

박 사 학 위 논 문

국내 인뿔 산업 근로자의 노출실태 및
인뿔분진 발생 특성에 관한 연구

2 0 1 5 년

한성대학교 대학원

기계시스템공학과

산업위생공학전공

이 광 용

박 사 학 위 논 문
지도교수 박두용

국내 인듐 산업 근로자의 노출실태 및 인듐분진 발생 특성에 관한 연구

A Study on the Workers' Exposure to Indium in ITO
targets and LCD panel manufacturing and Indium recycling
industries in Korea

2 0 1 4 년 12 월 일

한성대학교 대학원
기계시스템공학과
산업위생공학전공
이 광 용

박 사 학 위 논 문
지도교수 박두용

국내 인듐 산업 근로자의 노출실태 및 인듐분진 발생 특성에 관한 연구

A Study on the Workers' Exposure to Indium in ITO
targets and LCD panel manufacturing and Indium recycling
industries in Korea

위 논문을 공학 박사학위 논문으로 제출함

2 0 1 4 년 12 월 일

한성대학교 대학원

기계시스템공학과

산업위생공학전공

이 광 용

국 문 초 록

국내 인듐 산업 근로자의 노출실태 및 인듐분진 발생특성에 관한 연구

한성대학교 대학원
기계시스템공학과
산업위생공학전공
이 광 용

인듐은 인류 역사상 그다지 많이 사용되지 않은 희귀금속으로 산업보건학적으로 크게 문제가 되지 않았던 금속이다. 그러나 지난 20여 년간 평판 디스플레이의 투명전선의 주원료로 사용되기 시작하면서 사용량이 급격히 증가하였다. 인듐이 대량으로 사용되기 시작한 이후 인듐에 의한 건강장해가 보고되기 시작했고, 인듐장해로 인한 사망자까지 발생했다. 최근 인듐분진에 노출되면 폐포단백증(Pulmonary alveolar proteinosis, PAP)과 간질성 폐렴(Interstitial pneumonia) 등의 호흡기에 여러 가지 장해를 일으키는 것으로 알려졌다. 우리나라는 디스플레이 및 스마트폰 등의 전자산업이 크게 발달하면서 지난 20여 년간 인듐 사용량이 크게 증가했다. 특히 평판 디스플레이 산업은 그 생산량이 세계 1위에 이를 만큼 대량 생산시스템을 갖추고 있어 인듐관련 제품사용량이 많다. 그럼에도 불구하고 인듐에 대한 위험성, 유통현황, 근로자의 노출특성 및 인듐산업의 현황 등은 정확하게 파악되지 않고 있다. 인듐은 산업안전보건법상 관리대상물질에 포함되어 있지 않기 때문에 법적인 작업환경측정과 특수건강검진 대상도 아니다. 인듐에 의한 작업환경

실태나 근로자의 노출실태 및 건강장해에 대해서도 조사나 연구가 이루어진 적도 거의 없다.

본 연구는 우리나라 최초로 인듐 취급실태를 파악하고 인듐을 취급하는 사업장 및 공정을 대상으로 인듐분진 노출실태 및 인듐분진의 크기 특성 등을 파악하며, 근로자의 혈청에서 인듐수준을 평가하고자 수행되었다. 인듐관련 산업은 크게 인듐 제련업, ITO, IZO 타겟 제조업, 평판 디스플레이 제조업 그리고 인듐 재생업이 있다. 우리나라에서는 위와 같은 인듐과 관련된 모든 산업이 있다. 그 중에서도 특히 대규모 또는 다수의 사업장이 관련된 산업은 ITO, IZO 타겟 제조업, 평판 디스플레이 제조업 그리고 인듐 재생업이다. 본 연구에서는 ITO, IZO 타겟 제조업, 평판 디스플레이 제조업 그리고 인듐 재생업의 3개 업종의 전체 공정을 대상으로 그곳에서 일하는 근로자에 대한 인듐노출 및 인듐분진의 특성을 측정하고 분석하였다. 근로자의 인듐노출은 공기 중 총분진과 호흡성분진 시료를 채취하여 인듐을 분석하였고, 인듐분진의 특성을 파악하기 위해서 공기 역학적 입경별로 인듐농도를 분석하였다.

연구결과는 다음과 같다.

1. 국내 인듐의 생산량은 2013년 현재 매월 약 12톤씩 연간 140톤 정도가 생산되는 것으로 추정된다. 국내 ITO, IZO 타겟 소비량은 약 1,000톤 정도로 추정되며, 국내에서 700톤이 생산되고 있고 일본으로부터 약 300톤이 수입되고 있다. 디스플레이 산업에 공급되는 ITO, IZO 타겟은 패널 디스플레이 제조 중 약 30%정도가 소모되고, 70%정도가 남아 있을 때 디스플레이 패널 품질을 유지하기 위해 교체된다. 교체된 ITO, IZO 타겟은 재생업체에서 다시 인듐을 추출하여 ITO, IZO 타겟 제조업에 공급한다. 즉 연간 약 1,000톤의 ITO, IZO 타겟이 공급되어 300톤이 패널 디스플레이 등에 증착되어 소모되고 약 700톤은 재생 사이클을 거쳐 다시 ITO, IZO 타겟으로 만들어지고 있다. 재생은 국내에서 약 500톤, 해외에서 약 200톤 정도가 이루어지는 것으로 파악되었다.

2. ITO, IZO 타겟 제조업 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐의 노출수준은

0.9~609.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 매우 넓게 나타났다. 기하평균(GM)은 33.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하표준편차(GSD)는 3.8로 나타났고, 산술평균은 73.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차는 99.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 기하평균 및 산술평균은 우리나라 고용노동부, 미국정부산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists; ACGIH) 및 미국국립산업안전보건연구소(National Institute for Occupational Safety and Health; NIOSH)에서 제시하는 공기 중 인듐의 노출기준인 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다는 낮았다. 그러나 상당수의 근로자는 상당히 높은 수준의 인듐에 노출되고 있었으며, 182명 중 42명(23.1%)이 노출기준을 초과하고 있는 것으로 나타났다.

호흡성 인듐은 노출수준이 0.02~448.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지의 분포를 보였다. 기하평균은 5.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하표준편차는 4.1로 나타났고, 산술평균은 14.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차는 36.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 분포가 매우 넓고 기하분포를 하는 것으로 나타났다. 기하평균은 일본에서 권고하고 있는 기준(10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 미만이었으나 산술평균은 14.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 이 기준을 초과하였다. 인듐 취급근로자 194명 중 64명(33.0%)이 권고기준을 초과하고 있는 것으로 나타났다.

ITO, IZO 타겟 제조에는 7개 공정이 있다. 공정별로 호흡성 인듐 농도는 기하평균으로 혼합공정 58.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (GSD: 3.3), 가공·연마공정 56.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (GSD: 3.7), 성형공정 45.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (GSD: 5.8), 마무리공정 43.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (GSD: 3.9), 분말공정 32.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (GSD: 3.2), 소결공정 12.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (GSD: 2.4), 접합공정 18.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (GSD: 2.8)의 순이었다.

호흡성 인듐의 노출권고기준을 초과하는 비율은 혼합공정 50.0%, 마무리공정 45.9%, 가공·연마공정 40.7%, 분말공정 39.1%, 성형공정 27.8%, 소결공정 17.3%, 접합공정 13.9%의 순이었다.

3. 평판 디스플레이 제조업 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 0.2~2782.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 기하평균(11.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균(85.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준 미만이었으나 인듐 취급근로자 119명 중 14명이 노출기준을 초과하여 공기 중 인듐 노출기준 초과비율은 11.7%이었다. 호흡성 인듐의 노출수준은 0.01~419.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 기하평균은 2.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준

미만이었으나, 산술평균은 $13.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 인듐 취급근로자 121명 중 29명이 호흡성인듐 노출기준을 초과하여 초과비율은 23.9%이었다.

평판 디스플레이 산업 3개 공정의 공기 중 인듐 노출기준 초과비율은 타겟 교환공정 1.8%, sputter 부품세척 공정 26.1%, 타겟 세척공정 6.3%이었으며, 호흡성 인듐은 타겟 교환공정 13.6%, sputter 부품세척 공정 36.9% 그리고 타겟 세척공정 25.0%이었다.

4. 인듐 재생업 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $0.5 \sim 2089.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 기하평균은 $54.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으나 산술평균 $225.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 인듐 취급근로자 68명 중 26명이 노출기준을 초과하여 공기 중 인듐 노출기준 초과비율은 38.3%이었다. 호흡성 인듐의 노출수준은 $15.4 \sim 436.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 기하평균($15.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($63.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준을 초과하였다. 인듐 취급근로자 69명 중 36명이 호흡성인듐 노출기준을 초과하여 초과비율은 52.1%이었다.

5. 인듐 취급산업에서 채취된 공기 중 인듐과 호흡성 인듐 간의 상관관계를 평가한 결과 ITO, IZO 타겟 제조업, 평판 디스플레이 제조업 그리고 인듐 재생업 순으로 상관관계가 높았으며, 공기 중 인듐과 호흡성 인듐의 회귀식은 ITO, IZO 타겟 제조업은 $y=0.07252x + 0.43197(r^2=0.798)$, 평판 디스플레이 제조업은 $y=0.120195x + 3.75255(r^2=0.514)$ 그리고 인듐 재생업은 $y=0.16340x + 47.66525(r^2=0.302)$ 이었다.

6. ITO, IZO 타겟 제조업 근로자 176명 중 99명이 혈청에서 인듐이 검출되었으며, 혈청인듐 노출수준은 $\text{ND} \sim 49.8 \mu\text{g}/\text{L}(n=176)$ 이었다. 혈청에서 인듐이 검출된 99명 근로자의 기하평균은 $1.9 \mu\text{g}/\text{L}$ 로 생물학적 노출기준 ($3.0 \mu\text{g}/\text{L}$) 미만이었으나 산술평균은 $4.6 \mu\text{g}/\text{L}$ 로 노출기준을 초과하였다. ITO, IZO 타겟 제조업 근로자의 혈청인듐 초과비율은 22.7%($n=176$)이다.

평판 디스플레이 제조업 인듐 취급근로자 196명의 혈청인듐 노출수준은 $\text{ND} \sim 16.2 \mu\text{g}/\text{L}(n=196)$ 이었으며, 혈청인듐이 검출된 중 31명 근로자의 기하평균($1.0 \mu\text{g}/\text{L}$)과 산술평균($2.2 \mu\text{g}/\text{L}$)은 노출기준 미만이었다. 평판

디스플레이 제조업 인뿔 취급근로자의 3.1%가 생물학적 노출기준을 초과하였다.

인뿔 재생업 근로자 66명의 혈청인뿔 농도는 ND~125.8 $\mu\text{g/L}$ (n=66)이었으며, 66명 중 37명 근로자에게서 혈청인뿔이 검출되었다. 혈청인뿔이 검출된 37명의 기하평균(5.0 $\mu\text{g/L}$)과 산술평균(23.8 $\mu\text{g/L}$)은 노출기준을 초과하였다. 인뿔 재생업 근로자의 노출기준 초과비율은 30.3%이었다.

7. 인뿔 산업의 공기역학적 질량중위직경은 ITO, IZO 타겟 제조업 3.47~15.21 μm 으로 평가되었으며, 국내 타겟 제조업체인 A 사업장과 B 사업장은 3.47~10.13 μm 와 4.42~9.47 μm 이었으며, 일본계 C 사업장은 10.41~15.21 μm 이었다. 평판 디스플레이 제조업은 5.60~34.53 μm 그리고 인뿔 재생업의 공기역학적 질량중위직경은 0.09~7.30 μm 이었다.

8. ITO, IZO 타겟 제조업 6개 공정에서 평가한 질량 입경분포는 9.8 μm 이상의 크기의 분진 발생비율이 15.5~53.90%로 평가되었으며, 입자수 입경분포에서는 9.8 μm 이하의 분진이 99.94% 이상 분포하는 것으로 평가되었다. 평판 디스플레이 제조업과 인뿔 재생업의 9.8 μm 이상의 분진 질량 입경분포 비율은 12.06~74.14%와 0.46~25.70%이었고, 입자수로는 대부분 9.8 μm 이하의 분진인 것으로 나타났다.

주요어 : 인뿔, ITO, IZO 타겟, 평판 디스플레이, 인뿔재생, 공기 중 인뿔, 호흡성 인뿔, 공기역학적 질량중위직경, 입경분포, 혈청인뿔

목 차

I. 서 론	1
1. 연구배경	1
1.1. 직업적 노출기준(Occupational Exposure Limits, OELs)	3
1.2. 인듐 산업의 구조	5
1.3. 인듐의 유통	6
1.4. 인듐관련 직업병 사례	8
1.4.1. 최초의 사례	8
1.4.2. 일본에서의 6건의 추가사례	8
1.4.3. 미국에서 2건의 사례	10
1.4.4. 중국에서 1건의 사례	10
1.4.5. 그밖에 의심사례	11
1.5. 측정·분석방법(Methods)	11
1.5.1. 인듐 및 인듐화합물(Indium and compounds)	11
1.5.2. 호흡성 인듐(Respirable indium)	11
1.5.3. 인듐 분진의 입경분포 및 공기역학적 질량중위직경(MMAD)	12
1.5.4. 시료 전처리	14
1.5.5. 공기 중 인듐 분석	14
1.6. 혈청 인듐(In-S)의 측정·분석방법	15
1.6.1. 시료채취	15
1.6.2. 희석용액	16
1.6.3. 인듐 표준시료(Standard solution)	16
1.6.4. 혈청 인듐 분석	16
1.6.5. 혈청인듐 분석을 위한 자체 정도관리	16
2. 연구목적	17
3. 연구가설	18

II. 인듐산업 현황 및 연구대상 19

1. 인듐의 생산 및 수입	19
2. ITO, IZO 타겟 생산 및 수입	19
2.1. ITO, IZO 타겟 제조공정	20
2.2. ITO, IZO 타겟의 생산 규모	21
3. 평판 디스플레이 제조업	21
3.1. 박막증착(Sputtering) 공정	21
3.2. ITO, IZO 타겟 세척	23
3.3. Sputter 부품(shield, mask, carrier 등) 세척	24
3.4. 평판 디스플레이 제조 산업의 인듐 사용규모	24
4. 인듐 회수 및 재생업	25
4.1. 인듐 회수 및 재생 처리공정	25
4.2. 인듐 회수 및 재생 규모	25
5. 연구대상	26
6. 노출평가	28

III. 연구결과 29

1. ITO, IZO 타겟 제조업	29
1.1. 공기 중 인듐(Airborne Indium) 노출평가	29
1.2. 호흡성 인듐(Respirable Indium) 노출평가	35
1.3. 인듐의 크기별 비교	45
1.4. 인듐 입경분포 및 공기역학적 질량중위직경(MMAD)	47
1.4.1. 인듐의 공기역학적 질량중위직경	47
1.4.2. 인듐의 입경분포	48
1.5. 혈청인듐 평가	58
2. 평판 디스플레이(Panel display) 제조업	61
2.1. 공기 중 인듐 노출평가	61

2.2. 호흡성 인덱스 노출평가	65
2.3. 인덱스의 크기별 비교	72
2.4. 인덱스 입경분포 및 공기역학적 질량중위직경(MMAD)	74
2.4.1. 인덱스의 공기역학적 질량중위직경	74
2.4.2. 인덱스의 입경분포	75
2.5. 혈청인덱스 평가	84
3. 인덱스 재생업	87
3.1. 공기 중 인덱스 노출평가	87
3.2. 호흡성 인덱스 노출평가	90
3.3. 인덱스의 크기별 비교	97
3.4. 인덱스 입경분포 및 공기역학적 질량중위직경(MMAD)	99
3.4.1. 인덱스의 공기역학적 질량중위직경	99
3.4.2. 인덱스의 입경분포	100
3.5. 혈청인덱스 평가	107
 IV. 결론	 109
 참 고 문 헌	 113
 ABSTRACT	 118

표 목 차

<표 1> Selection of Respiratory Protective Equipments Suitable for Handling Indium	4
<표 2> Cut-Point Diameter of Marpel Personal Cascade Impactor at 2LPM	13
<표 3> Analytical Condition of ICP-MS	15
<표 4> Type of Industries and Number of Companies for Measure of Indium	27
<표 5> Airborne Indium Concentration of the ITO, IZO Target Industry	33
<표 6> Table 6. Probability of Airborne Indium Concentration Exceeding OEL in ITO, IZO Target Industry	34
<표 7> Respirable Indium Concentration of the ITO, IZO Target Industry	38
<표 8> Probability of Respirable Indium Concentration Exceeding OEL in ITO, IZO Target Industry	39
<표 9> Concentration for the Comparative Evaluation of Airborne Indium and Respirable Indium in the ITO, IZO Target Industry	45
<표 10> Mass Median Aerodynamic Diameter of the ITO, IZO Target Process	48
<표 11> Particle Size Distribution of the ITO, IZO Target Industry	51
<표 12> Serum Indium Concentration of ITO, IZO Target Companies	59
<표 13> Airborne Indium Concentration of the Display Industry ..	63
<표 14> Probability of Airborne Indium Concentration Exceeding OEL in Display Industry	64
<표 15> Respirable Indium Concentration of the Display Industry	67
<표 16> Probability of Respirable Indium Concentration Exceeding OEL in Display Industry	68

<표 17> Concentration for the Comparative Evaluation of Airborne Indium and Respirable Indium in the Display Industry	72
<표 18> Mass Median Aerodynamic Diameter of the Display Process	75
<표 19> Particle Size Distribution of the Panel Display Industry ·	77
<표 20> Serum Indium Concentration of the Display Companies ..	85
<표 21> Airborne Indium Concentration of the Indium Recycling Industry	89
<표 22> Probability of Airborne Indium Concentration Exceeding OEL in Indium Recycling Industry	89
<표 23> Respirable Indium Concentration of the Indium Recycling Industry	92
<표 24> Probability of Respirable Indium Concentration Exceeding OEL in Indium Recycling Industry	92
<표 25> Concentration for the Comparative Evaluation of Airborne Indium and Respirable Indium in the Indium Recycling Industry	97
<표 26> Mass Median Aerodynamic Diameter of the Indium Recycling Process	99
<표 27> Particle Size Distribution of the Indium Recycling Industry	101
<표 28> Serum Indium Concentration of the Indium Recycling Companies	107

그 립 목 차

<그림 1 > Required actions based on the measurement results in Japan	4
<그림 2 > Structure of the indium and indium compounds industry	5
<그림 3 > ITO, IZO and indium compounds handling work	6
<그림 4 > Status of the distribution of indium-related products ...	7
<그림 5 > ITO, IZO target process	20
<그림 6 > Sputtering target for transparent conductive thin films	23
<그림 7 > ITO, IZO target cleaning process	23
<그림 8 > Sputter parts cleaning process	24
<그림 9 > Refining process of indium recycling industry	25
<그림 10> Cumulative probability of indium concentration in the powder process	41
<그림 11> Cumulative probability of indium concentration in the mixing process	41
<그림 12> Cumulative probability of indium concentration in the molding process	42
<그림 13> Cumulative probability of indium concentration in the sintering process	42
<그림 14> Cumulative probability of indium concentration in the polishing process	43
<그림 15> Cumulative probability of indium concentration in the bonding process	43
<그림 16> Cumulative probability of indium concentration in the finishing process	44
<그림 17> Cumulative probability of indium concentration in the ITO, IZO target companies	44
<그림 18> Correlation between airborne indium and respirable indium in the ITO, IZO target industry	46

<그림 19> Mass percent per stage width	
at each particle diameters of the Powder Process	52
<그림 20> Particle size distribution of the powder process	52
<그림 21> Mass percent per stage width	
at each particle diameters of the mixing process	53
<그림 22> Particle size distribution of the mixing process	53
<그림 23> Mass percent per stage width	
at each particle diameters of the molding process	54
<그림 24> Particle size distribution of the molding process	54
<그림 25> Mass percent per stage width	
at each particle diameters of the sintering process	55
<그림 26> Particle size distribution of the sntering process	55
<그림 27> Mass percent per stage width	
at each particle diameters of the polishing process	56
<그림 28> Particle size distribution of the polishing process	56
<그림 29> Mass percent per stage width	
at each particle diameters of the bonding process	57
<그림 30> Particle size distribution of the bonding process	57
<그림 31> Cumulative probability of serum indium	
in the ITO, IZO target companies	60
<그림 32> Cumulative probability of indium concentration	
in the target exchange process	69
<그림 33> Cumulative probability of indium concentration	
in the shield, mask & carrier cleaning process	70
<그림 34> Cumulative probability of indium concentration	
in the target cleaning process	70
<그림 35> Cumulative probability of indium concentration	
in the display companies	71

<그림 36> Correlation between airborne indium and respirable indium in the display industry	73
<그림 37> Mass percent per stage width at each particle diameters of the exchange targets process	78
<그림 38> Particle size distribution of the exchange targets process ...	78
<그림 39> Mass percent per stage width at each particle diameters of the target cleaning process	79
<그림 40> Particle size distribution of the target cleaning process	79
<그림 41> Mass percent per stage width at each particle diameters of the disassembly process	80
<그림 42> Particle size distribution of the disassembly process ..	80
<그림 43> Mass percent per stage width at each particle diameters of the carrier bar cleaning process	81
<그림 44> Particle size distribution of the carrier bar cleaning process	81
<그림 45> Mass percent per stage width at each particle diameters of the blasting process	82
<그림 46> Particle size distribution of the blasting process	82
<그림 47> Mass percent per stage width at each particle diameters of the acid washing process	83
<그림 48> Particle size distribution of the acid washing process	83
<그림 49> Cumulative probability of serum indium in the display companies	86
<그림 50> Cumulative probability of indium concentration in the pulverization process	93
<그림 51> Cumulative probability of indium concentration in the dissolution process	94
<그림 52> Cumulative probability of indium concentration in the substitution process	94

<그림 53> Cumulative probability of indium concentration in the electrolysis process	95
<그림 54> Cumulative probability of indium concentration in the casting process	95
<그림 55> Cumulative probability of indium concentration in the indium recycle companies	96
<그림 56> Correlation between airborne indium and respirable indium in the indium recycling industry	98
<그림 57> Mass percent per stage width at each particle diameters of the pulverization process	102
<그림 58> Particle size distribution of the pulverization process	102
<그림 59> Mass percent per stage width at each particle diameters of the dissolution process	103
<그림 60> Particle size distribution of the dissolution process	103
<그림 61> Mass percent per stage width at each particle diameters of the substitution process	104
<그림 62> Particle size distribution of the substitution process	104
<그림 63> Mass percent per stage width at each particle diameters of the electrolysis process	105
<그림 64> Particle size distribution of the electrolysis process	105
<그림 65> Mass percent per stage width at each particle diameters of the casting process	106
<그림 66> Particle size distribution of the casting process	106
<그림 67> Cumulative probability of serum Indium in the indium recycling companies	108

I. 서 론

1. 연구배경

인듐은 2차 세계대전 중 항공기 엔진 베어링의 경도를 높이기 위해 코팅 재료로 사용해 왔으며, 그 외에도 전기, 합금, 원자로의 제어봉 및 뎀납 등 다양한 분야로 사용범위가 조금씩 확대되어 왔다. 1990년대 초기까지만 해도 전 세계적으로 인듐 사용량은 그다지 많지 않았다(Omae et al. 2011). 그러나 1990년도 중반 이후부터 반도체산업과 평판 TV, 컴퓨터, 휴대폰 등의 패널 디스플레이(Panel display) 산업이 급속하게 발전하며 인듐 소비량은 매우 빠르게 증가하였다. 특히 인듐주석산화물(Indium tin oxide, $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$, ITO), 인듐아연산화물((Indium zinc oxide, $\text{In}_2\text{O}_3\text{-ZnO}$, IZO)이 전기전도성도 좋고 가시광선의 투과성도 좋아 투명전도성 산화막(Transparent conductive oxide, TCO)의 대표적인 소재로 부각되면서 인듐 관련 산업은 급격히 팽창하였다. 더구나 최근 스마트폰과 같이 터치스크린(Touch screen)이나 터치 패널(Touch panel)이 필수적인 전자기기의 수요가 폭발적으로 늘어나면서 터치스크린과 터치 패널에 필수적으로 사용되는 투명전도성 산화막의 수요도 급증하였고, 그에 따른 인듐 관련 산업도 큰 폭으로 증가하였다(KIGMR, 2007).

2007년 현재 전체 인듐 수요 중 약 87%가 ITO, IZO 타겟 등의 생산에 사용되고 있으며, 그 외에 합금, compound 및 반도체 등에 사용되고 있다고 한다. 우리나라에서 평판 디스플레이 산업 비중과 태양광 산업의 발전 가능성을 고려할 때 인듐 수요량은 지속적으로 증가할 것으로 전망된다(바 있다(KIGMR, 2007)). 실제로 2011년 7월 지식경제부(현 산업통상자원부)는 해외자원개발사업법시행령을 개정하여 인듐의 안정적 확보에 나선 바 있다(MOTIE, 2012).

인듐은 아연광석(섬아연석(Sphalerite, ZnS)) 등에 일부 불순물로 함유(약 100ppm)되어 있어 특별한 목적을 가지고 별도 생산을 하지 않는 한 그 생산량이 극히 적은 희귀금속의 일종이다(Yi et al., 2011 & Hines et al.,

2013). 과거에는 인듐의 수요가 그다지 많지 않아 생산량이 극히 적었으며, 인류가 그다지 많이 사용하지 않은 금속이다. 따라서 인듐으로 인한 건강장애는 거의 알려지지 않았다. 그러나 최근 일본, 미국 및 중국에서 인듐 관련 사업장에서 일하던 근로자가 사망하는 사례와 폐질환에 이환된 사례가 연이어 보고되면서 인듐에 의한 건강장애가 새롭게 주목을 받고 있다 (Omae et al., 2011 & Miyauchi et al., 2012). 호흡기를 통해 폐에 침착한 인듐 및 인듐화합물은 장기간 폐에 존재하며 체외로 배설되는 비율은 매우 낮고 급성 독성보다는 만성 독성에 의한 영향이 크며, 혈액, 혈청 중 인듐 농도는 인듐화합물의 용해성에 따라 달라지는 것으로 보고되고 있다 (MHLW, 2009)

우리나라는 LCD, LED, OLED 등을 이용한 패널 TV, 터치스크린이나 터치패널이 들어가는 컴퓨터나 태블릿 컴퓨터 그리고 스마트폰의 생산량이 질적, 양적 확대로 세계 1위의 시장점유율을 유지하고 있으며, 박막태양전지 산업은 신규 산업으로 역량을 넓혀가고 있다(하나금융경제연구소, 2010). 이러한 산업에는 예외 없이 투명 전도성 산화막 소재를 사용하고 있다. 따라서 투명 전도성 산화막 소재의 제조 및 재활용 등과 관련된 사업장도 증가하고 있다. 투명 전도성 산화막 소재를 제조하거나 재활용하는 산업은 물론, 이러한 소재를 사용하는 각종 디스플레이 산업에 종사하는 근로자들은 직·간접적으로 인듐에 노출될 가능성이 있다. 그러나 인듐관련 사업장이나 공정은 최근 새롭게 생겼기 때문에 사업장 현황은 물론 공정 자체도 잘 알려지지 않았다(YI et al., 2011).

우리나라는 디스플레이 산업의 지속적인 발전으로 인듐 및 인듐화합물의 사용량 및 취급사업장이 증가하고 있어 인듐에 의한 직업성 폐질환 발생이 우려됨에도 불구하고 법적인 관리대상 물질이 아니기 때문에 인듐 및 인듐화합물 취급사업장에 대한 객관적인 정보, 근로자 노출평가 자료 및 검진 자료(혈청인듐 등)가 없는 실정이다(고용노동부, 2012). 따라서 본 연구에서는 인듐 취급사업장에 대한 정보와, 작업장 노출평가 및 근로자의 혈청인듐 평가 등을 통해 근로자 건강 위험을 정확히 파악하고 관리방안을 마련하기 위해 본 연구를 실시하였다.

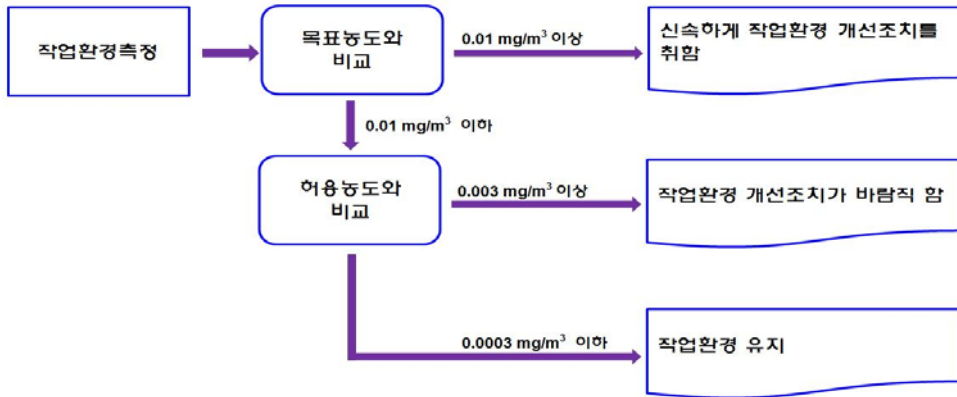
1.1. 직업적 노출기준(Occupational Exposure Limits, OELs)

인듐 및 인듐화합물의 직업적 노출기준을 보면 미국 국립안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)의 REL(Recommended Exposure Limits, 미국정부산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)의 TLV(Threshold Limit Value) 그리고 우리나라 고용노동부에서의 노출기준은 인듐 및 인듐화합물 0.1 mg/m^3 으로 제정되어 있다(NIOSH, 1992 & ACGIH 2014). ACGIH TLV는 동물에서 관찰된 폐질환을 근거로 제정되었다(ACGIH 2001). 미국산업안전보건청(U.S. Occupational Safety and Health Administration)의 PEL(Permissible Exposure Limit)에서는 인듐에 대한 노출기준이 설정되지 않았으며(Hines et al., 2013), 미국과 한국 이외의 대부분 나라에서는 인듐의 직업적 노출기준이 0.1 mg/m^3 으로 제정되어 있다(BGIA, 2013).

인듐 취급으로 인한 폐질환이 최초로 보고된 일본은 2010년 제정된 후생노동성 가이드라인에 따라 호흡성 인듐의 노출기준을 0.01 mg/m^3 으로 제시하고 있다(MHLW, 2010). 사업주는 공기 중의 인듐 및 인듐화합물을 제 1 평가방법¹⁾ 또는 제 2 평가방법²⁾에 따라 평가하여 얻은 노출평가 결과가 어느 쪽이라도 목표농도(0.01 mg/m^3)를 초과할 경우 사업주는 신속하게 작업 환경 개선을 위해 필요한 조치를 강구하여 목표 농도 이하가 되도록 노력하고 있다(그림 1). 또한, 제 1 평가방법 또는 제 2 평가방법으로 얻은 노출평가 결과가 노출이 허용되는 농도(0.003 mg/m^3)를 초과한 경우에는 표 1의 순서에 따라 적절한 호흡용 보호구를 선택하여 착용시키도록 권고하고 있으며, 인듐 취급 사업장의 작업환경 관리는 호흡성 인듐 농도를 0.0003 mg/m^3 으로 하고 있다(MHLW, 2010).

1) 제 1 평가방법 : 측정점은 단위 작업장소의 바닥에 6 미터 이하의 간격으로 가로와 세로선을 그어 그 교점에 바닥으로부터 50 센티미터 이상 150 센티미터 이하의 위치에서 측정하고, 측정점의 수는 단위 작업장소에서 5곳 이상으로 할 것. 또한, 측정은 ITO 등 취급 작업이 정상적으로 진행되고 있는 시간에 실시할 것(이하 'A 측정에 준한 측정'이라 함).

2) 제 2 평가방법 : ITO 등 분진의 발생원에 접근하는 경우에 대해서는, 1에 의한 측정 외에, 공기 중 ITO 등 농도가 가장 높을 것으로 예상되는 시간에 해당 작업이 진행되는 위치에서 측정을 실시할 것(이하 'B 측정에 준한 측정'이라 함).



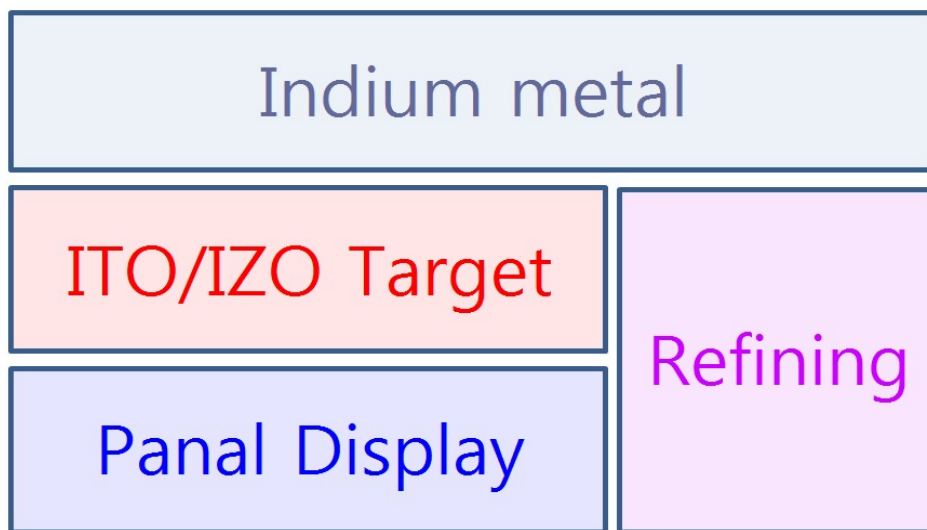
<그림 1> Required actions based on the measurement results in Japan

<표 1> Selection of Respiratory Protective Equipments Suitable for Handling Indium – Reference table in case of the allowable exposure concentration of 0.0003 mg/m³

작업환경측정 미 실시 또는 0.03 mg/m³ 이상 【지정 보호계수 100 – 1,000레벨 또는 그 이상의 방호 성능을 기대할 수 있는 것】 – 전동팬이 부착된 전면형 호흡보호구(입자포집 효율 99.9 % 이상) – 전면형 또는 공기공급식 에어라인 마스크 – 압력 요구형 에어라인 마스크
0.003 mg/m³ 이상 【지정 보호계수 50 – 100 레벨 또는 그 이상의 방호 성능을 기대할 수 있는 것】 – 전동팬이 부착된 반면형 호흡보호구(입자포집 효율 99.9 % 이상) – 필터 교환형 전면형 방진 마스크(국가검정 합격품 : 입자포집 효율 99.9 % 이상) (보호구 사용자가 이들 호흡용 보호구를 착용하고, 정기적으로 마스크 누설율을 측정에서 2% 미만(방호 계수 50 이상)임을 확인할 필요가 있음)
0.0003 mg/m³ 이상 【지정 보호계수 10 레벨 또는 그 이상의 방호 성능을 기대할 수 있는 것】 – 필터 교환형 반면형 방진 마스크(입자 포집 효율 99.9% 이상)
0.0003 mg/m³ 이상 호흡용 보호구의 사용이 요망됨

1.2. 인듐 산업의 구조

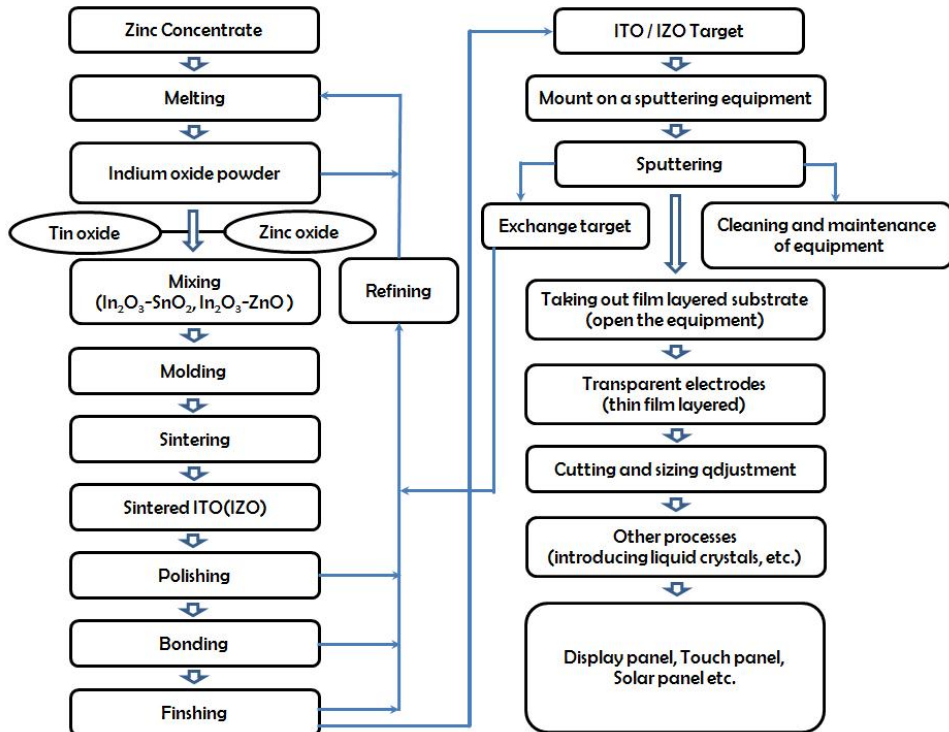
인듐관련 산업은 그림 2와 같이 1) 인듐 제련업, 2) ITO, IZO 타겟 제조업, 3) LCD 및 OLED 디스플레이 또는 모바일기기의 디스플레이 등 전자제품 제조업 그리고 4) 사용 후 인듐제품 및 디스플레이 등으로부터 인듐을 회수하는 재생업 등으로 구분할 수 있다(Yi et al., 2011). 인듐금속이 ITO 또는 IZO 타겟 제조과정을 거쳐 최종 패널 디스플레이(LCD, OLED, PDP, 박막 태양전지 등)로 생산되는 과정은 그림 3과 같다. 이러한 인듐 및 인듐화합물의 산업구조는 일본 후생노동성에서 2010년 발간한 “인듐·주석산화물 취급 작업 근로자의 건강장해 예방을 위한 기술지침”에 기술되어 있는 ITO 등의 취급작업 작업공정과 크게 다르지 않다(MHLW, 2010).



<그림 2> Structure of the indium and indium compounds industry

인듐산업 구조의 흐름은 아연광석에 불순물로 함유되어 있는 인듐을 제련하고 고순도의 인듐금속으로 정련하여 ITO, IZO 타겟 등을 생산하는 산업에 공급한다. 인듐금속은 국내 인듐 제련업체와 중국, 일본 등에서 수입하여 공급되고 있으며, 타겟 제조업체에 공급된 인듐금속은 산화인듐으로 만들

어져 산화주석 또는 산화아연과 혼합하여 금속세라믹 제품인 ITO, IZO 타겟을 생산된다. 타겟은 디스플레이 제조 산업에 공급되어 투명전도성 산화막 제품을 생산하는데 사용된다. 디스플레이 산업에서 사용하는 ITO, IZO 타겟 등은 타겟은 제조사로 회수되어 슬러지 등과 함께 회수하여 인듐재생업체에서 인듐금속으로 재생된다(Yi et al., 2012).



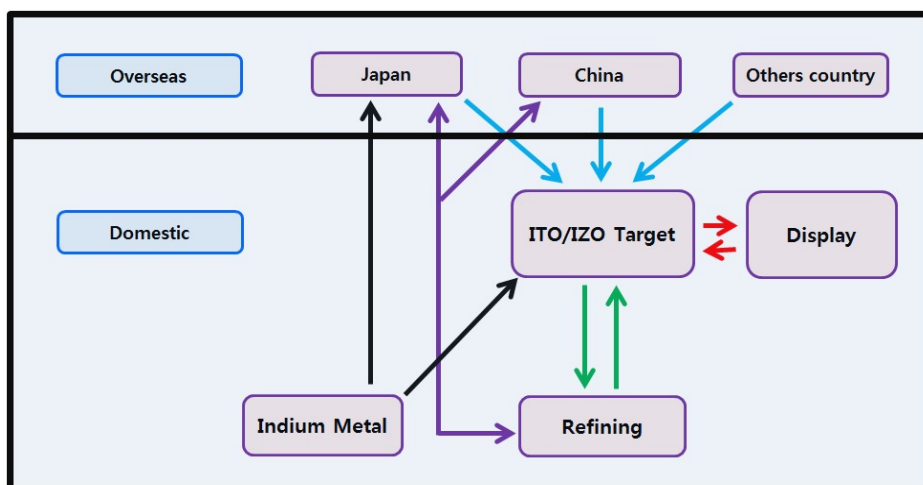
<그림 3> ITO, IZO and indium compounds handling work

1.3. 인듐의 유통

국내 인듐의 수요량을 한국무역협회의 수출입 자료를 통해 정확하게 확인이 불가능하기 때문에 인듐 생산·취급업체를 방문 조사하여 인듐의 유통흐름을 조사하였다. 우리나라의 인듐 체련업, ITO, IZO 타겟 제조업, 디스플레이 제조업, 인듐 재생업은 제품의 사용목적은 다르나 각 산업 간에 매우 유기적으로 연결된 구조를 가지고 있다. 국내에서 생산된 인듐금속(Virgin metal)은

생산량의 대부분을 일본으로 수출하며 일부 제품만이 국내 ITO, IZO 타겟 제조업체에 판매하고 있다. 국내 타겟 제조업체 및 소규모의 수입업자들은 국내 공급분이 매우 부족하기 때문에 일본, 중국 등으로부터 인듐을 수입하여 사용하고 있다. 수입된 대부분의 인듐은 타겟 생산에 사용되어지며, 타겟 생산 공정에 투입된 인듐은 각 공정을 거치면서 투입량의 약 10%는 스크랩(슬러지 형태)으로 발생한다. 인듐은 타겟 형태의 금속 세라믹으로 제조되어 LCD, OLED, PDP 등의 디스플레이 업체에 공급한다. 디스플레이 제조업체는 ITO, IZO 타겟을 약 30%를 사용하며 사용하고 남은 타겟은 제조업체에서 회수하여 제조과정에서 발생된 스크랩과 함께 재생업체에서 인듐금속으로 재생된다. 일본계 타겟 제조업체는 본국(일본)으로부터 ITO, IZO 타겟을 수입하여 가공한 후 디스플레이 제조업체에 공급하고 있으며, 사용하고 회수된 타겟은 일본으로 보내어 인듐을 회수하고 있다.

2007년 교육과학기술부 자료에 의하면 타겟 제조는 국내 제조업체에서 국내 수요의 약 40%를 공급하고 있으며, 60%는 일본 업체에서 타겟을 일본과 대만 등에서 수입하여 국내 디스플레이 제조업체에 공급하고 있는 것으로 보고되고 있다(MEKE, 2011). 그러나 국내 타겟 제조업체가 질적 양적 성장을 이루어 연구가 진행된 2011년에는 국내 인듐제품 제조업체가 약 70% 이상을 공급하는 것으로 조사되었다(Yi et al., 2011).



<그림 4> Status of the distribution of indium-related products

1.4. 인듐관련 직업병 사례

1.4.1. 최초의 사례

인듐관련 최초의 직업병 사례가 보고된 것은 일본에서 2001년 간질성 폐렴(Interstitial pneumonia)으로 인한 양측성 기흉(Bilateral pneumothorax)으로 사망한 사례로 그 원인이 인듐인 것으로 추정되었다(Homma et al. 2003). 이 환자는 이 근로자는 1994년부터 1997년까지 ITO 타겟 제조업체의 연마공정에서 일했고, 흡연량은 1일 10개피 정도였다. 1997년(당시 27살) 마른기침과 숨이 차는 증상을 호소했다(Omae et al. 2011). 흉부방사선과 흉부 CT 검사결과, 흉막하 벌집모양의 폐(Subpleural honeycomb)와 폐의 전영역에 간유리 음영(Ground glass appearance, GGA)이 나타났고, 청진기상으로 Fine crackle음과 High-pitched squeaks가 나타났고, 곤봉지(Clubbed finger)가 있었다. 비디오흉강경생검(Video-assisted thoracoscopic lung biopsy, VATS)에서 미세입자 함유의 확장된 세포질과 함께 적혈구, 피브린, 콜레스테롤 cleft, 대식세포 등으로 채워진 폐포가 발견되었다. 림포구(Lymphocytes)와 형질세포(Plasma cell)는 세포간극(Interstitial spaces)에 스며들어 있었고, 수많은 미세입자들이 발견되었다. 입자 크기는 대개 1 μm 이하였고, 성분분석에서 인듐과 주석이 검출되었다. 이 환자는 ITO 분진 노출로 인한 간질성 폐렴으로 진단되었다. 사망 1년 전의 혈청인듐(In-S)은 290 ng/ml이었다. 대조군의 혈청인듐(In-S)은 평균 0.1 ng/ml라고 한다.

1.4.2. 일본에서의 6건의 추가사례

두 번째 사례도 첫 번째와 같은 공장에서 일했던 30살의 남자로 1994년부터 1998년까지 ITO에 노출되었으며, 1997년 마른기침과 운동 중 호흡장애(Exertional dyspnea)가 나타났다(Homma et al. 2005). 흡연경력은 3년간 하루 10개피 이었다. 흉부 X선과 CT 검사결과, 간유리 음영(GGA) 등 폐에 몇 가지 증상이 나타났다. VATS검사결과, 세기관지에 섬유화 및 폐포내 대식세포가 축적되는 확산성 폐포렴과 함께 수많은 콜레스테롤 cleft와

이물질형의 거대세포가 발견되었다. 거대세포와 대식세포에서 갈색 미립자가 발견되었는데 성분은 인듐과 주석으로 밝혀졌다. 혈청인듐(In-S)은 51 ng/ml(정상치는 <3 ng/ml)이었다. KL-6(간질성 폐질환의 지표)는 799 U/ml였다(정상치는 <500 U/ml). 이 환자는 다른 부서로 재배치된 후 폐질환 진행이 멈췄다.

위의 공장에서는 2002년 공장 산업보건위가 검진을 실시하였고, 그 결과 3건의 인듐에 의한 폐질환이 발견됨으로써 3번째, 4번째 및 5번째의 사례가 보고되었다(Taguchi and Chonan 2006). 이들 3명은 이 공장에서 각각 12년, 12년 그리고 8년 동안 근무해 왔다. 3번째 환자와 5번째 환자는 비흡연자였고 5번째 환자는 1년에 18갑 정도의 담배를 피우는 흡연자였다. 인듐에 의한 폐질환으로 판정을 받았을 때 혈중 인듐을 나타내는 혈청인듐(In-S)는 각각 40, 127 및 90 ng/ml이었고, KL-6은 1,930, 3,570 및 1,190 U/ml이었다.

6번째 사례는 같은 공장에서 2005년 2월 인듐관련 건강검진 결과로 드러났다(Nakano et al. 2007). 이 환자는 44세의 비흡연자로 2000년부터 인듐작업을 해 왔으며, 2002년에 기침과 가래 증상을 느끼기 시작했고, 2004년 근처 병원에서 만성기관지염 진단을 받았다. 이후 기침이 지속되었고 운동 시 호흡곤란 증세가 나타났다. 정밀진단결과 폐쇄성호흡기질환으로 나타났고, 세포간극사이에 약한 섬유화비대증 등의 증상이 나타났으며, 혈청인듐(In-S)은 64.7 ng/ml, KL-6는 3,450 U/ml, 그리고 폐계면활성제 단백질 D(Lung surfactant protein D; SP-D)는 346 ng/ml로 나타났다.

7번째 사례는 2006년 20년간 ITO 타겟 작업에 종사한 47세 남자로 41세에 기침증세가 시작되었다(Takeuchi 2008). 이 근로자는 약 20년 동안 박막 제조 공정에 사용되는 ITO 타겟을 제조하는 공정에서 일해 오면서 주로 산화인듐(indium oxide)에 노출된 것으로 추정되었다. 흉부 X선과 CT 촬영결과 여러 가지 폐장애가 발견되었고, 폐안에서 수많은 갈색 미립자가 발견되었고 이 먼지에서 인듐이 검출되었다. 혈청인듐(In-S)은 92 ng/ml, KL-6는 6,395 U/ml로 나타났다.

1.4.3. 미국에서 2건의 사례

8번째 사례는 2010년 미국에서 보고되었다(Cummings et al., 2010). 8번째 인듐 직업병 사례는 49세의 비흡연 남성에게서 발생된 건으로 1999년부터 수소로(水素爐; Hydrogen furnace)작업을 시작한지 9개월 만에 운동 시 호흡곤란 증세가 나타났다. 고해상도 흉부 전산화 단층 촬영(HRCT; high resolution CT) 결과, 여러 가지 폐질환 증상이 나타났고, 특히 폐포단백증(Pulmonary alveolar proteinosis, PAP)이 발견되었다. 2005년 초, 이 작업자가 근무하던 작업장의 인듐분쇄공정에서 측정된 지역시료의 공기 중 인듐농도는 NIOSH의 권고기준인 0.1 mg/m³를 초과하였다. 이 환자는 2006년 10월 PAP로 인한 호흡곤란으로 사망하였다.

9번째 사례는 ITO공정에서 2004년 1월부터 일하기 시작한 39세 흡연자로 HRCT 검사결과, 양측 폐포와 간질의 이상이 발견되었고, 폐기능검사서 제한성 폐질환증상이 나타났다(Cummings et al., 2010). 이 작업자가 ITO를 연마하는 작업장의 공기 중 인듐농도는 NIOSH 기준, 0.1 mg/m³를 초과하였다. 환자의 혈중 인듐농도는 검출한계 미만이었고, 혈중 호흡기질환 생체지표검사는 이루어지지 않았다. 6~9개월이 지나면서 간헐적으로 마른 기침, 흉부압박, 숨이 가쁨 등의 증상이 나타났다. 비디오흉강경검사서 폐포단백증(PAP)과 일치하는 병리학적 소견이 발견되었다.

1.4.4. 중국에서 1건의 사례

10번째 인듐관련 직업병 사례는 중국에서 핸드폰 제조공장의 LCD 표면의 ITO 스프레이 및 샌드블라스팅 작업에 근무해 왔던 29세의 남성 근로자에게서 나타난 폐포단백증(PAP)이다(Xiao et al. 2010). 이 작업에 근무한지 22개월 후, 흉부압박, 운동 시 호흡곤란, 간헐적인 기침과 가래가 나타났으며, 폐기능 검사결과 제한성 호흡기질환 유형이 나타났다. HRCT 검사결과 역시 간유리 음영(GGA) 등 여러 가지 폐장에 소견이 나타났다. 최종적으로 그는 2차 폐포단백증으로 진단되었다. 한편, 이 작업자가 작업하던 공정의 샌드블라스팅 물질에 대한 EDX 분석결과, 인듐이 2.72%, 인듐산화물이 2.84%

함유된 것으로 나타났고, 인듐산화물의 입자크기는 0.1-6 μm 인 것으로 나타났다. 혈청인듐(In-S) 검사결과는 151.8 $\mu\text{g/L}$ 이었다.

1.4.5. 그밖에 의심사례

일본에서 산화인듐(In_2O_3)제조와 ITO sputter 타겟 연마에 종사하는 근로자 3명에게서 인듐 폐(Indium lung)가 의심된다는 보고가 있었다(MHLW, 2009)

1.5. 측정·분석방법(Methods)

1.5.1. 인듐 및 인듐화합물(Indium and compounds)

공기 중 인듐은 NIOSH Method 7303을 사용하여 시료를 채취하였다(NIOSH, 1994 & OSHA, 2002). 인듐 및 인듐화합물 취급 공정에서 발생하는 인듐분진 채취에 사용된 여과지는 mixed cellulose ester membrane filter(MCE filter, diameter: 37 mm, pore size: 0.8 μm , Millipore, USA)를 사용하였으며, 여과지를 3단 카세트에 패드와 함께 장착한 후 공기채취용 펌프(MSA ELF, MSA, USA)를 이용하여 시료를 채취하였으며, 펌프의 유량은 2.0 ± 0.1 LPM으로 하였다. 공기채취용 펌프는 비누거품 유량계(GIL Air, Gillian, USA)를 이용하여 시료채취 전·후의 유량을 측정하였다.

1.5.2. 호흡성 인듐(Respirable indium)

공기 중 호흡성 인듐 채취는 NIOSH Method 500을 사용하였으며(NIOSH, 1994), 여과지는 MCE 여과지를 사용하였다. 시료를 채취하기 위해 3단 카세트에 패드와 함께 여과지를 넣고 알루미늄 사이클론(SKC, USA)을 장착하였다. 공기채취용 펌프(MSA ELF, MSA, USA)의 유량은 2.5 LPM으로 하였으며, 비누거품 유량계를 이용하여 시료채취 전·후의 유량을 측정하였다. NIOSH Method 500에서는 분진의 무게를 전자저울로 측정하기

위해 PVC(polyvinyl carbonate filter) 여과지를 사용하고 있으나, 전처리용 산(질산)으로 유기물 분해가 용이한 MCE 여과지를 사용하였다.

1.5.3. 인듐 분진의 입경분포 및 공기역학적 질량중위직경(MMAD)

인듐분진 입경분포와 공기역학적 질량중위직경을 평가하기 위하여 marple personal cascade impactor(Model 298, Anderson Sampler. Inc., USA)를 이용하여 인듐 및 인듐화합물 취급 산업, 공정 그리고 작업방법에 따라 인듐 분진을 측정하였다. Marple personal cascade impactor Model 298은 9단(stage)으로 구성되어 있으며, 1에서 8 단에는 MCE 여과지(Pore size: 0.8 μm , Diameter: 34 mm, TISCH, USA)를 장착하여 인듐분진을 측정하였고, 마지막 9계에서는 back filter로 PVC filter(Pore size: 5 μm , Diameter: 34 mm, Anderson Sampler. Inc., USA)를 사용하여 인듐을 측정하였다. 각 단계에서 구분되어 채취되는 인듐입자의 유효한계직경은 (effective cut-point diameter, ECD)은 표 2와 같다. 시료채취를 위한 공기채취용 펌프의 유량은 2.0 LPM으로 시료를 채취하였으며, 비누거품 유량계를 이용하여 시료채취 전·후의 유량을 측정하였다. 채취된 시료는 마이크로 웨이브파 회화기를 이용하여 시료를 전처리 한 후, 유도결합플라즈마 분광광도계(Inductively coupled plasma(ICP), Varian, Australia) 및 유도결합플라즈마-질량분석기(Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), Bruker, Australia)를 이용하여 각 단의 인듐을 분석하였다.

연구대상 산업 및 공정에서 인듐분진 특성을 평가하기 위하여 marple personal cascade impactor의 각 단의 인듐비율(%)에 표 2의 보정계수(stage effect)로 보정하여 인듐분진의 입경분포와 공기역학적 질량중위직경(MMAD, mass median aerodynamic diameter)을 계산하였다.

**<표 2> Cut-Point Diameter of Marple Personal Cascade Impactor
at 2LPM**

Impactor Stage No.	Cut-Point Diameter (microns)	Stage Effect
1	> 21.3	0.52
2	14.8	0.61
3	9.8	0.78
4	6.0	0.89
5	3.5	0.95
6	1.55	0.96
7	0.93	0.97
8	0.52	0.99
Back filter	0.25	1.00

질량 입경분포와 함께 입자수(particle) 입경분포를 평가하기 위하여 marple personal cascade impactor의 각 단계에 포집된 분진 수를 이론적으로 계산하여 인듐분진의 발생 특성을 평가하였다. Marple personal cascade impactor의 각 단계의 분진 개수는 ICP 또는 ICP-MS로 분석한 인듐의 농도 (μg)와 유효한계직경을 이용하여 아래의 식 1로 계산하여 impactor 각 단계의 분포비율(%)을 평가하였다.

$$Number\ of\ Particles = \frac{Mass}{\frac{3}{4}\pi r^3} \dots\dots\dots (식\ 1)$$

$$Mass = Indium\ Concentration, \mu g$$

$$r^3 = \left(\frac{d}{2}\right)^3$$

$$d = Cut\ Point\ Diameter, \mu m$$

1.5.4. 시료 전처리

인듐 및 인듐화합물을 포집한 MCE 여과지의 전처리는 마이크로웨이브과 회화기(Mars, CEM Inc., USA)와 질산(Sigma-Aldrich, USA)을 사용하였다. 마이크로웨이브과 회화기의 베셀(vessel)에 질산 1 mL를 넣어 고온·고압에서 MCE 여과지의 유기물을 파괴한 후 20 mL의 용량플라스크에 증류수와 함께 넣어 보정하였다.

1.5.5. 공기 중 인듐 분석

공기 중 인듐 및 호흡성 인듐 분석은 ICP 및 ICP-MS를 이용하여 분석하였다. ICP를 이용하여 연구대상 시료를 1차 분석한 후, 인듐 농도수준이 0.2 ppm 이하의 낮은 농도의 시료는 ICP-MS를 이용하여 2차 분석을 하였다. 검량선 작성을 위한 표준시료는 시판되고 있는 인듐 표준용액(Inorganic ventures, USA) 100 $\mu\text{g/ml}$, 1,000 $\mu\text{g/ml}$ 으로 만들어 사용하였다. 연구진행 중 표준용액의 오염을 예방하고 신뢰성 확보를 위해 2개의 표준용액으로 표준시료를 만들어 사용하였으며, ICP의 표준시료 농도범위는 0 - 8 $\mu\text{g/ml}$ 범위에서 ICP-MS는 0~300 ng/ml의 범위에서 분석하였다. 저농도의 시료는 분석과정에서 고농도 표준시료의 영향을 받기 때문에 저농도의 시료와 고농도의 시료를 분리하여 분석하였다. 또한 Alfa Aesar(USA)사 분말형태의 표준시료인 ITO(Vacuum deposition grade, 99.99%(Metal basis))를 구입하여 염산에 일정량을 희석하여 표준시료로 표정한 후 표준용액으로 사용하였다. 최종 용액의 인듐 농도는 1,050 $\mu\text{g/ml}$ 이었다.

<표 3> Analytical Condition of ICP-MS

Parameter	Analytical Condition
Nebulizer	Micromist nebulizer (400 $\mu\text{l}/\text{min}$)
Spray chamber	Double passed scott spray chamber
RF Generator	Frequency : 27.12MHz Power output : 600W – 1600W
Ar Flow rate	Plasma gas : 18.0 mL/min Auxiliary gas : 1.5 mL/min Nebulizer gas : 1.00 mL/min
Sampler cone	Pt 1.0 mm
Skimmer cone	Pt 0.5 mm
Vacuum	Interface < 4 torr, Quadrupole < 3×10^{-6} torr
Data acquisition	Peak hopping, 10ms scan time, 30 scan rate, 3 replicate
Analysis mass	In115
Measurement mode	Quantification mode

1.6. 혈청 인듐(In-S)의 측정·분석방법

1.6.1. 시료채취

연구대상 사업장의 인듐 노출 근로자 및 대조군을 대상으로 정맥혈 채취 및 연구목적으로 사용에 대한 충분한 설명을 한 후에 동의한 근로자를 대상으로 정맥혈을 채취하였으며, 채취 시간을 특별히 정하지는 않았다. 정맥혈은 응고촉진제가 포함된 8.5 ml 진공채혈관을 이용해 채혈한 후 30분간 응고시키고 원심분리기(Thermo Scientific, Germany)를 이용하여 1000 x g 에서 10분간 원심 분리하여 혈청을 분리하였다. 채취된 혈청은 소분하여 냉장보관 상태로 운반하여 분석 전까지 -80°C 에 보관하였다.

1.6.2. 희석용액

표준시료 조제와 연구대상 혈청을 전처리 하기위하여 희석용액을 조제하여 사용하였다. 희석용액은 1 L의 용량플라스크에 일정량의 증류수를 넣고 Triton-X 100(Sigma-Aldrich, USA) 1 mL와 질산(Sigma-Aldrich, USA) 1 mL를 넣은 후 증류수로 보정하여 사용하였다. 인듐 노출 근로자 및 대조군의 혈청은 희석용액 9.5 mL에 혈청 0.5 mL를 넣어 20배 희석하여 분석하였다.

1.6.3. 인듐 표준시료(Standard solution)

혈청 인듐 분석을 위한 표준시료는 시판되고 있는 인듐 표준용액(Inorganic ventures, USA) 100 $\mu\text{g/mL}$, 1,000 $\mu\text{g/mL}$ 로 만들어 사용하였다. 분석에 사용한 표준시료의 농도범위는 0.05 - 1.6 $\mu\text{g/L}$ 이며 표준시료의 범위를 초과한 경우에는 희석하여 분석하였다.

1.6.4. 혈청 인듐 분석

혈청 인듐 분석은 ICP-MS를 사용하였다. ICP-MS의 분석조건은 공기 중 인듐분석과 동일한 분석조건에서 분석하였다.

1.6.5. 혈청인듐 분석을 위한 자체 정도관리

자체 정도관리는 일본의 교토대학교에서 소의 혈청에 인듐을 넣어 조제한 시료를 이용하여 진행하였다. 혈청 인듐 정도관리용 시료는 3개 농도수준이며, 각 농도 수준별로 5개의 시료로 구성되어 있다. 정도관리는 본 연구에서 사용한 분석방법과 동일한 방법으로 희석하여 ICP-MS로 분석하여 결과를 평가하였다. 일본 혈청인듐 자료는 이론적 주입량으로 통계적 처리에 의한 기준값 및 적합범위 등이 제기되지 않아 직접적인 비교가 어려웠다.

2. 연구목적

인듐 및 인듐화합물을 취급산업에서 인듐에 의한 건강장애 예방을 위한 인듐 노출평가와 관련한 연구결과는 매우 제한적으로 보고되고 있다(Yi et al., 2011) 이처럼 국내에서 뿐만 아니라 국외에서도 연구가 진행되지 못한 것은 인듐 취급산업이 최근에 급속도로 발달한 산업이란 특징과 디스플레이 제조업 등 인듐관련 산업이 매우 폐쇄적이기 때문으로 판단된다. ITO, IZO 타겟 제조업, 패널 디스플레이 제조업 및 인듐 재생업 등 인듐 관련업을 대상으로 진행하는 최초의 연구이다. 본 연구에서는 인듐 및 인듐 화합물의 국내 유통현황 조사, 산업별 공기 중 인듐 노출평가 및 근로자의 혈청인듐 등을 평가하여 직업성질환 예방을 위한 자료를 제공하고 인듐 및 인듐화합물의 노출기준을 제시하고자한다. 본 연구의 구체적인 목적은 다음과 같다.

첫째, 우리나라 인듐 취급산업의 산업구조 및 유통 실태조사를 실시한다.

둘째, 국내 인듐 취급산업별 공정을 파악하고, 각 산업별 공기 중 인듐, 호흡성 인듐의 노출평가를 통해 인듐 관리방안을 제시한다.

셋째, 산업별 공기 중 인듐과 호흡성 인듐의 관계모델을 제시한다.

넷째, 인듐의 입경분포와 공기역학적 질량중위직경(MMAD)을 평가하여 인듐 취급산업에서의 노출평가 방법을 제시한다.

3. 연구가설

이 연구의 가설은 다음과 같다.

“인듐 및 인듐화합물을 취급산업에는 발생하는 분진은 호흡성 인듐 크기의 분진이 발생하며, 국내 인듐 취급근로자는 고농도의 인듐에 노출되고 있을 것이다.”

II. 인듐산업 현황 및 연구대상

1. 인듐의 생산 및 수입

인듐은 아연, 납, 구리, 철 황화물에 함유되어 있고, 특히 아연광석(Sphalerite, ZnS)에 함유량이 높다. 인듐은 주로 아연의 제련과정에서 금, 은 등의 금속과 함께 부산물로 추출된다. 국내에서 인듐 금속을 생산하는 사업장은 2개소이며, 생산된 제품의 上堂부분이 일본에 수출되고 있으며 일부는 국내 ITO, IZO 타겟 제조업체에 공급되고 있다(Yi et al., 2011, Yi et al., 2012)

한편 최근 국내의 인듐 수요가 급증하여 타겟 제조업체 및 소규모 수입업자에 의해 일본, 중국 등으로부터 인듐 금속이 수입되고 있으며, 수입된 인듐의 대부분은 ITO 또는 IZO 타겟을 생산하는데 사용된다. 인듐의 수출·입 관련 상품 품목별 분류코드인 HS Code(The Harmonized Commodity Description and Coding System)는 2002년부터 인듐, 갈륨 등 타 관련 품목들과 혼합된 5개의 HS Code로 분류되어 사용되고 있기 때문에 인듐 수입량을 별도로 파악하는 것도 불가능하다(KIGMR, 2007).

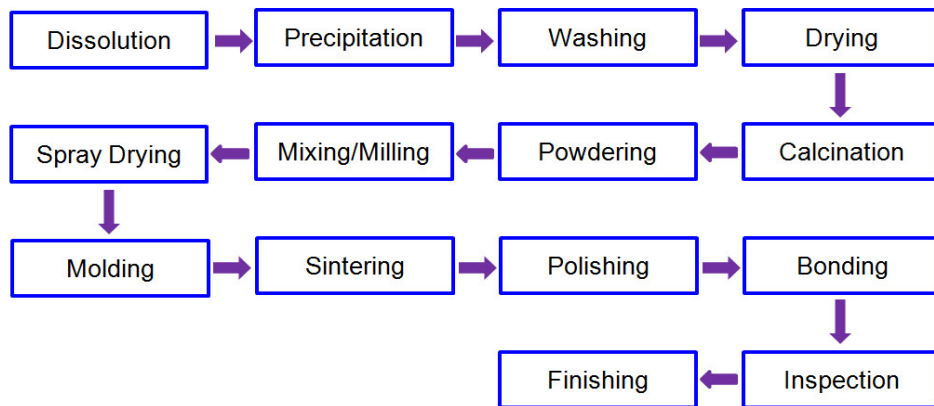
국내 인듐의 생산량은 HS Code 분류체계의 문제점으로 보고된 자료는 없으나 인듐금속 생산과 관련하여 제조업체의 담당자와 면담을 통해 조사한 생산량은 매월 약 12톤씩 연간 140톤이 생산되고 있다(Yi et al., 2011).

2. ITO, IZO 타겟 생산 및 수입

인듐은 그 용도가 LCD, PDP, OLED 등의 평판 디스플레이의 전면 유리 안쪽에 투명한 전선 회로도를 만들기 위해 코팅하는 투명전도성 산화막의 원료, 태양전지용 투명전도막의 소재, CIGS 박막 태양전지 흡수층의 투명전도막 소재, 그리고 스마트폰 유리용 투명전도막 소재 등으로 평판 디스플레이 산업, 태양전지, 스마트 유리용 투명전도성 산화막의 핵심 원천소재이다.

2.1. ITO, IZO 타겟 제조공정

평판 디스플레이에 투명전도성 산화막을 코팅하는 방법은 진공 챔버 안에 한쪽에는 평판 디스플레이용 유리를 놓고 맞은편에 ITO, IZO 타겟을 장착한 다음, 플라즈마 상태에서 아르곤(Ar)가스를 주입하여 이온화된 아르곤을 ITO, IZO 타겟과 충돌시킨다. ITO, IZO 타겟에서 튕겨져 나온 이온 입자는 평판 디스플레이용 유리에 코팅된다. 이러한 코팅 기술을 박막증착(Sputtering)이라고 하며, 이러한 기기를 sputter라고 한다. 이러한 ITO, IZO 타겟 제조업의 생산 공정도는 그림 5와 같다.



<그림 5> ITO, IZO target process

ITO, IZO 타겟을 제조하기 위한 첫 번째 공정이 분말공정(산화인듐 제조)이다. 산화인듐 분말을 만들기 위해서 인듐금속(99.99% 이상)을 질산에 용해시킨 후(dissolution), 초순수와 암모니아를 이용하여 질산용액에 녹아 있는 질산인듐($\text{In}(\text{NO}_3)_3$)을 수산화인듐($\text{In}(\text{OH})_3$)으로 만들어 침전시킨다(precipitation). 침전된 수산화인듐은 세정(washing), 건조(drying), 하소공정(calcination)을 거쳐 산화인듐 분말(Powder)로 만들어진다.

혼합공정(mixing)에서는 산화인듐 분말과 산화주석 또는 산화아연 분말을 일정비율(약 9:1)로 혼합한 후, 물과 기타 첨가제를 넣어 제품생산에 맞는 일정한 크기로 혼합된 분말을 분쇄한다(milling). 분쇄된 분말을 고온의

스프레이 건조기에서 건조하게 되면 산화인듐과 산화주석(또는 산화아연)이 혼합된 나노입자 크기의 분말이 만들어진다(spray drying). 이후 성형공정(molding)에서 두 금속이 혼합된 분말을 프레스로 생산 제품의 특성에 맞게 1차 성형한 후, 진공 포장하여 수압(water pressure)을 이용하여 2차 성형을 한다. 성형을 마친 제품은 고온(약 1,500-1,600℃)의 소결로에서 약 1주일 동안 액화산소를 공급하며 금속분말을 결합시키는 소결공정(sintering)을 거치게 된다.

소결된 금속 세라믹제품(ITO, IZO 타겟)은 연마·가공공정(polishing)을 거쳐 제품의 특성에 맞게 가공·연마한 후, 접합공정(bonding)에서는 약 200℃ 온도에서 인듐금속을 용융시켜 backing plate와 접합하게 된다. Backing plate에 접합된 타겟은 검사공정(inspection)에서 접지상태 등을 검사하고 제품 마무리(finishing) 처리 후 패널 디스플레이 업체로 공급된다.

2.2. ITO, IZO 타겟의 생산 규모

국내 ITO, IZO 타겟을 생산하는 제조업체는 3개소가 있으며, 외국으로부터 타겟을 수입한 후 가공하여 판매하는 제조업체는 2개소인 것으로 파악되었다(Yi et al., 2011). 이중 국내 ITO, IZO 타겟 제조업체의 생산량은 연간 약 700톤 정도로 추정되고 있다. 타겟 수입업체의 수입량은 약 300톤으로 추정된다. 그러나 그 규모나 정확한 양은 파악되지 않고 있다.

3. 평판 디스플레이 제조업

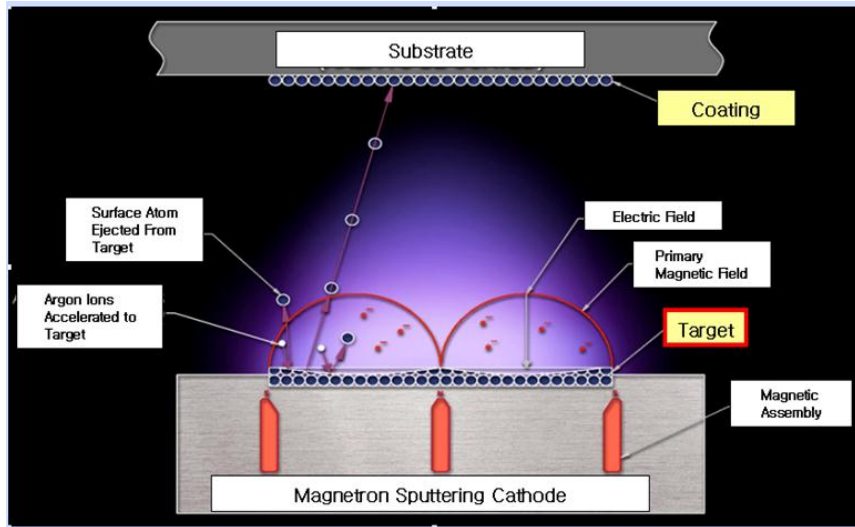
3.1. 박막증착(Sputtering) 공정

평판 디스플레이 제조업은 앞에서 언급한 바와 같이 LCD 및 PDP TV 및 모니터를 제조하는 산업이나 OLED 등의 평판 디스플레이나 필름을 사용하는 모바일 전자기기를 제조하는 산업을 말한다. 이들 산업에서는 유리 또는 PET 필름 등에 투명전도성 산화막을 입히기 위해 sputter에서 아르곤(Ar)이온을 ITO, IZO 타겟에 충돌시켜 ITO, IZO 입자를 방출시킨다. 방출된

입자는 타겟 뒷면에 설치되어 있는 자석(Magnetic assembly)에 의해 유리면 또는 PET 필름의 표면으로 날아가 유리면 또는 PET 필름의 표면에 증착된다(그림 6). 이때 방출된 입자가 유리면 등에 증착되지 못하고 타겟으로 되돌아와(Back scattering) 타겟 또는 shield, mask 등 sputter 주변 부품을 오염시키면 평판 디스플레이 표면 증착이 균일하게 이루어지지 않아 제품 불량을 초래할 수 있다. 제품불량을 예방하기 위해 주기적으로 sputter를 열고 ITO, IZO 타겟을 교환하거나 세척 및 청소를 해주어야 한다.

유리에 투명전도성 산화막을 증착하는 박막증착 공정은 TFT 화소전극(pixel electrode) 공정(이하 TFT 공정)과 Color filter(CF 공정)의 sputter에서 이루어진다. 디스플레이 제조업체에 따라 TFT 공정에서는 ITO, IZO 타겟을 사용하며 CF 공정에서는 ITO 타겟을 사용한다. CF 공정은 유리가 이동하며 투명전도성 산화막을 증착시키기 때문에 sputter의 양쪽 전면에 여러 개의 타겟을 설치하도록 설계되어 있으며, sputter는 작업자가 직접 손으로 개방하여 ITO 타겟을 교환하거나 수리하고 있다. TFT 공정의 sputter에 유리를 넣고 고정된 상태에서 투명전도성 산화막을 증착시키기 때문에 ITO, IZO 타겟은 sputter의 한쪽 면에 장착 되어 있다. Sputter는 기계적인 방법으로 개방하여 ITO, IZO 타겟 교환과 수리한다. TFT sputter와 CF sputter 모두 진공청소기를 이용하여 ITO 또는 IZO 분진을 제거한 후 타겟을 교환하며, 타겟에 묻어 있는 ITO, IZO 분진은 천에 IPA(isopropyl alcohol) 또는 에탄올로 제거한 후 외부 협력업체로 보내어 재사용이 가능하도록 세척한다. 일부 사업장에서는 ITO, IZO 타겟이 sputter에 장착된 상태에서 사포 등을 이용하여 자체적으로 세척하여 재사용한다(Yi et al., 2011).

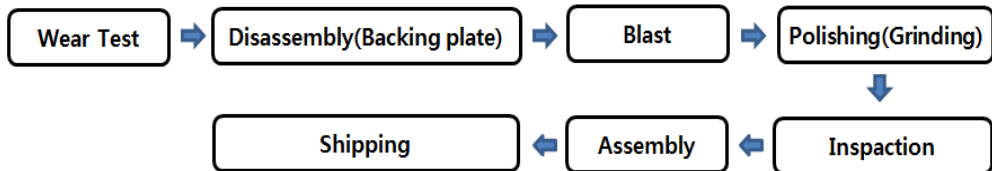
Sputter 및 ITO, IZO 타겟을 보호하기 위해 sputter 주변에 설치되어 있는 shield, mask 등과 CF 공정에서 유리를 이송하여 사용하는 carrier 등에 부착되어 있는 불순물(ITO, IZO 분진 등)은 외부 협력업체에 보내어 주기적으로 세척해야한다.



<그림 6> Sputtering target for transparent conductive thin films

3.2. ITO, IZO 타겟 세척

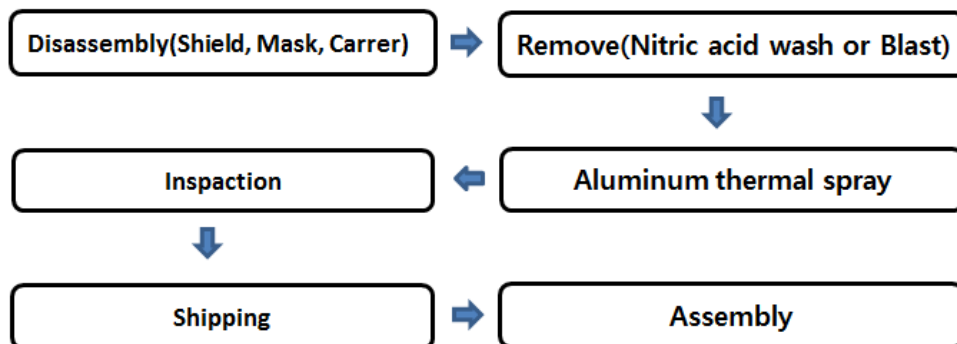
디스플레이 제조업체로부터 ITO, IZO 타겟이 입고되면 타겟 수량, 파손, 얼룩 및 오염 등을 육안으로 확인하고 운반용 케이스에서 backing plate를 분해한다. 블라스팅 공정에서는 타겟 표면을 산화알루미늄을 분사하여 타겟의 오염물을 1차로 제거한 후, 표면연마 공정에서 그라인더를 이용하여 최종적으로 오염물, 얼룩, 성막 등을 제거한다. 1, 2차 세척이 끝난 타겟 표면의 분진은 알코올로 제거하고 backing plate 재배열을 위한 타겟 두께측정 등의 검사를 한다. 검사가 끝난 타겟은 클린룸에서 포장하여 디스플레이 업체에 납품한다. ITO, IZO 타겟 세척작업의 공정도는 그림 7과 같다.



<그림 7> ITO, IZO target cleaning process

3.3. Sputter 부품(shield, mask, carrier 등) 세척

디스플레이 제조업체로부터 sputter를 보호하는데 사용하는 부품인 shield, mask, carrier 등이 입고되면 각 부품을 분해한다. CF 공정에 사용하는 carrier bar의 표면에 오염된 ITO를 수작업으로 제거하고, 이외의 sputter 부품은 특성에 따라 산화알루미늄 블라스팅 공정 또는 질산 세척 공정에서 sputter 부품 표면의 ITO 또는 IZO를 제거한다. 일반적으로 대부분의 제품이 질산 세척공정에서 처리되나 부식성이 강한 부품은 블라스팅 공정에서 오염물을 제거한다. 세척을 끝낸 각 부품은 알루미늄 용사공정(thermal spray)에서 표면에 알루미늄 피막을 형성한 후 조립하여 디스플레이 업체에 납품한다. Sputter 부품 세척작업의 공정도는 그림 8과 같다.



<그림 8> Sputter parts cleaning process

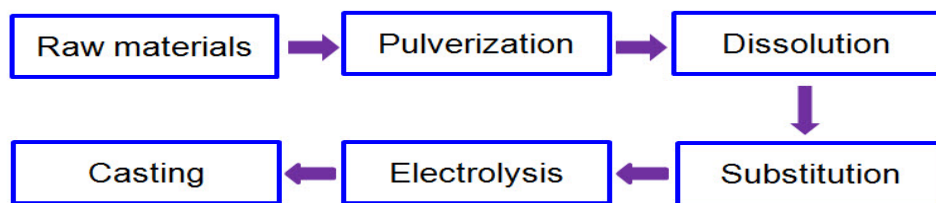
3.4. 평판 디스플레이 제조 산업의 인듐 사용규모

평판 디스플레이 생산 등에 사용되고 있는 ITO, IZO 타겟은 연간 약 1,000톤 정도로 추정된다. 이 중 실제 작업 중 소요되는 타겟의 양은 전체 중량의 약 30%정도이므로 ITO의 소비량은 약 300톤 내외로 추정되고, 나머지 70%(700톤)은 재생을 위해 타겟 제조회사 등에서 회수하고 있다(Yi et al., 2011).

4. 인듐 회수 및 재생업

4.1. 인듐 회수 및 재생 처리과정

인듐 재생업은 ITO, IZO 타겟 제조업체로부터 사용하고 남은 타겟, 슬러지 등의 원료를 공급받아 인듐 금속을 회수하여 순도를 높인 후, 타겟 제조업체 등에 납품하고 있다. 인듐 회수의 첫 단계는 사용하고 남은 타겟 또는 ITO, IZO 타겟 제조공정에서 발생한 스크랩을 분쇄기로 분쇄(pulverization)한 후 염산, 황산 또는 질산 등으로 용해하는 공정(dissolution)을 거친다. 폐수에서 인듐을 회수하는 경우에는 인듐 함유량이 미량이기 때문에 가성소다를 이용하여 케이크 형태로 만들어 건조한 후 용해시킨 후 여과한다. 인듐이 용해된 용액은 아연 또는 알루미늄 치환 반응(substitution)을 통해 인듐을 회수한다. 치환반응을 통해 회수된 스펀지 형태의 인듐은 주조공정을 통해 금속 인듐(순도 99% 이하)으로 만들어진다. 이후 전기분해 공정(electrolysis)을 거쳐 순도를 높인 인듐은 다시 주조공정(casting)을 거쳐 인듐금속괴(Ingot)로 만들어진다. 전기분해 공정은 건식과 습식이 있는데, 우리나라는 대부분 습식방법을 사용하고 있으며, 일부에서는 건식방법으로 사용하고 있다(그림 9)(Yi et al., 2011).



<그림 9> Refining process of indium recycling industry

4.2. 인듐 회수 및 재생 규모

국내에서는 ITO, IZO 타겟 및 산화인듐, 그리고 타겟 생산과정에서 발생되는 폐수 및 슬러지 등을 합하여 약 500톤 정도의 원료로부터 인듐금속을

재생하고 있는 것으로 추정되고 있다. 인듐 재생업체는 약 10여개 정도로 파악되고 있으며 이들 업체는 소규모인데다가 업종이 제조업 또는 환경재생업 등으로 혼재되어 있고, 생산하는 금속이 인듐뿐만 아니라 여러 가지 귀금속 또는 희귀금속을 회수하고 있다. 이러한 귀금속 등 재생사업장은 제품 수요나 가격에 따라 재생하는 금속의 종류가 수시로 바뀔 수도 있기 때문에 인듐 재생 전문업체를 제외하고는 인듐재생 규모를 정확하기 어려운 실정이다 (Yi et al., 2011).

5. 연구대상

연구대상 사업장 중 투명전도성 산화막 증착에 사용되는 ITO, IZO 타겟 제조와 관련된 사업장은 6개 사업장이다. 이중 2개 사업장은 타겟 제조와 관련된 분말공정 등 모든 공정을 보유하고 있으며, 4개 사업장은 가공·연마 등의 후처리 공정을 보유한 사업장으로 모든 공정에서 인듐 분진에 근로자들이 노출되고 있다. 일본이 본사인 2개 사업장 중 1개소는 본사에서 제품을 수입하여 가공, 연마, 접합 및 마무리 공정을 통해 제품을 생산하고 있으며, 또 다른 1개 사업장은 접합공정과 마무리 공정을 통해 ITO 타겟을 만들어 국내 패널 디스플레이 사업장에서 공급하고 있다.

패널 디스플레이 제조업체 4개소를 대상으로 TFT array와 Color filter 제조공정 중에서 투명전도성 산화막을 증착시키는 sputter의 유지·보수 작업과 타겟 교체작업 근로자를 대상으로 인듐의 노출실태를 평가하였다. 패널 디스플레이 증착공정의 sputter에 사용되는 타겟은 일정시간 사용을 하면 타겟이 오염되어 제품의 불량을 유발할 수 있기 때문에 타겟 세정이 필요하다. 디스플레이 제조업체 4개소 중 3개소는 ITO, IZO 타겟을 세정하여 재사용하고 있었으며, 1개 사업장은 ITO타겟 세정을 하지 않고 타겟 제조업체에 반납하였다. 패널 디스플레이 제조업체 중 2개소는 sputter를 개방한 상태에서 타겟을 세정하였으며, 1개 사업장은 sputter에서 ITO, IZO 타겟을 분리하여 외부 협력업체에서 세척하고 있었다. ITO, IZO 타겟을 세정하는 협력업체 1개소와 디스플레이 제조업체 3개소의 sputter shield, mask, carrier

등의 각 부품을 세정하는 협력업체 2개소를 연구대상으로 평가하였다.

인듐 재생업은 5개소의 인듐 재생업체를 연구대상으로 선정하여 평가하였다. 연구대상 인듐 재생업체 4개소는 사용 후 반납된 ITO, IZO 타겟과 슬러지 등에 함유되어 있는 인듐을 재생하는 업체이다. 연구대상 4개소 중 3개소는 습식공정으로 인듐을 회수하는 사업장이며, 1개 업체는 건식 방법으로 인듐을 회수하는 재생업체이다. 연구대상 인듐 재생업체 중 폐수를 정제하여 인듐을 회수하는 곳은 1개소이며, 인듐 재생업에서는 동일한 공법으로 인듐을 재생하더라도 각 사업장의 공법과 사용물질(산, 치환 물질)이 달랐다. 또한 연구대상 재생업체 2개소는 순도가 낮은(약 95% 이하) 인듐을 재생하여 고순도의 인듐을 생산하기 위한 전기분해 공정을 보유한 재생업체에 납품하는 곳이었다.

혈청인듐 시료는 인듐취급 작업이 교대제로 운영되고 있는 일부 ITO, IZO 타겟 제조업체 및 디스플레이 제조업체를 제외하고는 공기 중 시료와 동일한 근로자를 대상으로 연구를 진행하였다. 타겟 제조업체로부터 하청을 받아 운영하는 2개 사업장은 작업이 없어 혈청인듐만을 측정하였다.

<표 4> Type of Industries and Number of Companies for Measure of Indium

Industry	No of Companies	
	Air Sample	Serum Indium
ITO, IZO Target	6	8
Panel display	8	8
Indium recycling	5	5

6. 노출평가

인듐 및 인듐화합물 관련 4개 산업 중 인듐 제련업을 제외한 ITO, IZO 타겟 제조업, 디스플레이 제조업 및 인듐 재생업에서 인듐을 취급하는 근로자를 대상으로 연구를 실시하였다. 노출평가는 공기 중 인듐과 호흡성 인듐을 근로자의 호흡기 위치에서 측정하여 평가하였으며, 인듐의 노출수준 구분은 ACGIH에서 권고하고 있는 방법에 준하여 평가하였다. 평가기준은 공기 중 인듐과 호흡성 인듐의 노출기준을 기준으로 ① 노출기준의 10% 미만, ② 노출기준의 10-50%, ③ 노출기준의 50-100%, ④ 노출기준의 1-2배, ⑤ 노출기준의 2배 이상으로 구분하여 각각 평가하였다. 노출기준 2배 이상의 항목은 ACGIH 평가항목에는 제시되어 있지 않으나 고용노동부 산업안전보건법에서는 노출기준의 2배를 초과할 경우, 기존 작업환경측정 주기인 6개월에 1회를 3개월에 1회로 적용하고 있기 때문에 평가항목으로 구분하여 평가하였다(고용노동부, 2012). 공기 중 인듐은 고용노동부, ACGIH 그리고 NIOSH의 노출기준인 0.1 mg/m^3 을 호흡성 인듐은 일본 후생노동성 노출기준인 0.01 mg/m^3 을 적용하였다(MHLW, 2009).

III. 연구결과

1. ITO, IZO 타겟 제조업

ITO, IZO 타겟 제조업 6개 사업장의 7개 공정에서 공기 중 인듐을 평가하였다. 국내 타겟 제조업체 2개소는 7개 공정(분말공정, 혼합공정, 성형공정, 소결공정, 가공·연마공정, 접합공정, 마무리공정)에서 평가하였으며, 일본계 타겟 제조업체 2개소는 3개 공정(가공·연마공정, 접합공정, 마무리공정) 그리고 국내 타겟 제조업체의 협력업체 2개소는 가공·연마공정과 접합공정을 대상으로 평가하였다.

1.1. 공기 중 인듐(Airborne Indium) 노출평가

ITO, IZO 타겟 제조업 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출평가 결과는 표 5, 6과 같다. ITO, IZO 타겟 제조업 공기 중 인듐의 노출수준은 $0.9 \sim 609.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=182$)으로 폭 넓은 노출특성을 보여주고 있으며, 인듐 취급근로자의 23.1%(42명)이 ACGIH 노출기준 $100.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 노출평가 자료의 기하평균($33.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($73.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준 미만으로 평가되었다. ITO, IZO 타겟 제조업의 기하평균은 연구대상 7개 공정이 모두 노출기준 미만으로 혼합공정이 $58.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높았고, 소결공정이 $12.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮게 평가되었다. 산술평균은 혼합공정($113.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 성형공정($107.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 그리고 가공·연마공정($107.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 노출기준을 초과하였으며, 혼합공정이 가장 높았고 소결공정이 $19.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮게 평가되었다.

ITO, IZO 타겟 제조업 분말공정은 인듐금속을 사용하여 산화인듐 분말을 생산하는 공정으로 근로자는 수산화인듐과 산화인듐에 노출되고 있다. 분말 공정 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $2.7 \sim 366.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=20$)이었으며, 인듐 취급 근로자의 15.0%(3명)이 노출기준을 초과하였다. 분말공정 노출평가 자료의 기하평균($32.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($61.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은

노출기준 미만이었으며, 근로자의 최고 노출농도는 $366.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 3.7배를 초과하였다. 공기 중 인듐 노출수준이 $50.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 평가된 B 사업장($2.7 \sim 22.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 공정개선을 실시하여 자동화 시설로 개선한 상태이며, 개선이 이루어지지 않은 A 사업장은 인듐 취급근로자의 약 25%(3명)이 노출기준을 초과하였다.

혼합공정에서는 산화인듐과 산화주석 또는 산화아연을 일정한 비율(9:1)로 혼합하여 분쇄한 후 나노입자 크기의 분말로 제조하는 공정으로 근로자는 산화인듐과 산화주석 또는 산화아연에 노출되고 있다. 혼합공정 공기 중 인듐 노출수준은 $13.1 \sim 502.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=13$)이었으며, 인듐 취급 근로자의 30.8%(4명)이 노출기준을 초과하였다. 노출평가 자료의 기하평균은 $58.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으나 산술평균은 $113.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 혼합공정 근로자의 최고 노출농도는 $502.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 5.0배를 초과하였다. B 사업장은 혼합공정($13.1 \sim 66.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 설비를 자동화 시설로 운영하고 있어 노출기준 미만이었으나 A 사업장($19.4 \sim 502.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=8$))은 수작업으로 혼합하기 때문에 근로자의 50.0%(4명)이 노출기준을 초과하였다.

성형공정은 혼합공정에서 만들어진 분말을 프레스를 이용하여 ITO, IZO 타겟 제품의 특성(사이즈 및 두께 등)에 맞게 형태를 만드는 공정으로 산화인듐과 산화주석 또는 산화아연에 노출되고 있다. 성형공정 공기 중 인듐 노출수준은 $1.4 \sim 376.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=15$)이었으며, 인듐 취급근로자의 약 40%(6명)이 노출기준을 초과하였다. 노출평가 자료의 기하평균은 $45.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으며, 산술평균은 $107.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 성형공정 근로자의 최고 노출농도는 $376.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 3.7배를 초과하였다. A 사업장 성형공정의 노출수준은 $2.6 \sim 280.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=7$)로 근로자의 약 40.0%(3명)이 노출기준을 초과하였으며 B 사업장의 노출수준은 $1.4 \sim 376.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=8$)로 근로자의 약 37.5%($n=3$ 명)이 노출기준을 초과하였다.

소결공정은 고온의 소결로에 액체산소를 공급하며 성형된 제품을 금속 세라믹(ITO, IZO 타겟)으로 만드는 작업을 하며, 작업 중 인듐에 직접적인

노출보다는 주변 공정의 영향으로 인듐에 노출되고 있다. 소결공정 근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $4.5 \sim 92.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=21$)로 노출기준을 초과하는 인듐 취급근로자는 없었다. 소결공정 근로자의 최고 노출농도는 $92.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었다.

가공·연마공정은 소결된 금속세라믹 제품(ITO, IZO 타겟)을 제품의 규격에 맞게 절단하고 표면을 연마하는 공정이다. 가공·연마공정의 분진발생은 물리적인 요인으로 발생하며, 근로자는 ITO, IZO 분진에 노출되고 있다. 가공·연마공정 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $3.1 \sim 609.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=45$)으로 폭넓은 노출분포를 보여주고 있으며, 근로자의 약 37.8%(17명)이 노출기준을 초과하였다. 노출평가 자료의 기하평균은 $56.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으나 산술평균은 $107.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 가공·연마공정 근로자의 최고 노출농도는 $609.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 6.1배를 초과하였다. A 사업장 가공·연마공정의 공기 중 인듐 노출수준은 $27.4 \sim 609.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=20$)로 근로자의 55.0%(11명)이 노출기준을 초과하였고, B 사업장의 노출수준은 $26.5 \sim 173.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=14$)로 근로자의 7.3%(2명)이 노출기준을 초과하였다. D 사업장은 B 사업장의 협력업체로 공기 중 인듐 노출수준은 $154.6 \sim 329.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=4$)로 모든 근로자(100%)가 노출기준을 초과하였으나, 일본계 타겟 제조업체인 C 사업장의 공기 중 인듐의 노출수준이 $3.1 \sim 19.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=7$)로 일본 후생노동성의 ITO 관리지침에 따라 사업장을 관리하고 있어 노출기준 미만이었다.

접합공정은 타겟과 backing plate를 접합시키는 공정으로 접합재로는 인듐 금속을 사용한다. 인듐금속을 200°C 의 온도에서 용융시켜 접합하기 때문에 이론적으로는 인듐에 노출될 가능성이 매우 적다. 그러나 가공·연마공정에서 ITO, IZO 타겟을 완벽하게 세척하지 못한 경우에는 인듐분진에 의해 노출될 수 있으며, 인듐금속을 용융시킬 때 노출될 수 있다. 접합공정 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $0.9 \sim 239.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=39$)로 인듐 취급근로자의 약 2.6%(1명)이 노출기준을 초과하였다. 접합공정 노출평가 자료의 기하평균($18.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($31.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준 미만

이었으며, 근로자의 최고 노출농도는 $239.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 2.4배를 초과하였다. 접합공정에서 노출기준을 초과한 A 사업장 근로자는 작업 중 타 공정(마무리 공정)에서 일정시간 동안 작업을 수행한 것으로 확인되었다.

ITO, IZO 타겟 제조업의 마무리공정은 제품을 디스플레이 업체로 출하하기 전에 타겟의 표면, 타겟과 backing plate의 접합면 등을 수정하는 작업으로 ITO, IZO 분진 및 인듐금속 분진에 근로자들이 노출되고 있다. 마무리공정 공기 중 인듐의 노출수준은 $4.0 \sim 438.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=29$)이었으며, 근로자의 약 37.9%(11명)이 노출기준을 초과하였다. 노출평가 자료의 기하평균($43.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($87.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준 미만이었으며, 근로자의 최고 노출농도는 $438.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 4.4배를 초과하였다. A 사업장 마무리공정의 공기 중 인듐 노출수준은 $10.0 \sim 438.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=12$)로 근로자의 41.7%(5명)이 노출기준을 초과하였으며, B 사업장의 공기 중 인듐 노출수준은 $67.5 \sim 250.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=11$)로 근로자의 54.6%(6명)이 노출기준을 초과하였다. 일본 후생노동성의 ITO 관리기준에 따라 사업장을 관리하고 있는 C 사업장과 E 사업장은 노출기준 미만이었다. B 사업장의 마무리공정은 협력업체가 운영하면서 공정관리가 이루어지지 않아 근로자의 노출기준 초과비율이 높았다.

미국 ACGIH의 공기 중 인듐 노출기준인 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 0.5배에 해당하는 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 공기 중 인듐에 노출되고 있는 근로자는 분말공정 40.0%, 혼합공정 46.2%, 성형공정 66.7%, 소결공정 4.8%, 가공·연마공정 50.0%, 접합공정 5.2% 그리고 마무리공정 62.0%이었다.

<표 5> Airborne Indium Concentration of the ITO, IZO Target Industry

Process	n	Airborne Indium Concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$						
		AM	SD	GM	GSD	Med.	Min.	Max.
Powder								
Company A	12	93.2	97.1	66.8	2.2	53.8	27.0	366.9
Company B	8	13.0	7.4	10.9	2.0	11.8	2.7	22.3
Total	20	61.1	84.3	32.3	3.2	31.6	2.7	366.9
Mixing								
Company A	8	164.0	166.0	97.8	3.2	109.0	19.4	502.1
Company B	5	32.1	23.7	25.8	2.1	17.9	13.1	66.4
Total	13	113.0	144.0	58.6	3.3	47.3	13.1	502.1
Molding								
Company A	7	117.0	107.0	61.0	4.9	60.2	2.6	280.2
Company B(1st press)	6	131.0	125.0	95.6	2.3	93.9	30.6	376.0
Company B(2nd press)	2	1.9	1.8	1.8	1.5	1.9	1.4	2.5
Total	15	107.0	111.0	45.8	5.8	60.4	1.4	376.0
Sintering								
Company A	11	29.9	24.9	21.8	2.4	23.4	5.1	92.4
Company B	10	7.9	3.8	7.2	1.6	5.7	4.5	15.7
Total	21	19.4	21.0	12.9	2.4	11.5	4.5	92.4
Polishing								
Company A	20	154.0	142.0	109.0	2.4	105.0	27.4	609.3
Company B	14	55.7	48.5	44.9	1.8	37.0	26.5	173.9
Company C	7	8.0	6.6	6.0	2.2	3.4	3.1	19.5
Company D	4	228.0	84.6	216.2	1.5	213.0	154.6	329.7
Total	45	107.0	121.0	56.0	3.7	49.7	3.1	609.3
Bonding								
Company A	17	49.9	64.3	25.7	3.6	23.6	0.9	239.4
Company B	13	24.8	11.1	22.9	1.5	20.4	13.9	46.9
Company C	4	6.9	4.9	6.0	1.8	4.8	3.8	14.2
Company E	1	6.6	-	-	-	-	-	-
Company F	4	10.4	4.7	9.4	1.8	11.2	4.2	15.2
Total	39	31.9	45.6	18.5	2.8	18.1	0.9	239.4
Finishing								
Company A	12	101.0	136.0	50.1	3.4	36.3	10.0	438.2
Company B	11	117.0	57.0	107.0	1.6	103.0	67.5	250.5
Company C	5	8.4	7.5	6.7	2.0	5.8	4.0	21.8
Company E	1	4.3	-	-	-	-	-	-
Total	29	87.9	101.0	43.3	3.9	67.5	4.0	438.2
Total	182	73.3	99.7	33.3	3.8	35.2	0.9	609.3

<표 6> Table 6. Probability of Airborne Indium Concentration Exceeding OEL in ITO, IZO Target Industry

Process	n	Occupational Exposure Limit, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
		< 10%	10~50%	50~100%	1~2 excess	> 2 excess
Powder						
Company A	12	0(0%)	4(33.3%)	5(41.7%)	2(16.7%)	1(8.3%)
Company B	8	4(50.0%)	4(50.0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Total	20	4(20.0%)	8(40.0%)	5(25.0%)	2(10.0%)	1(5.0%)
Mixing						
Company A	8	0(0%)	3(37.5%)	1(12.5%)	1(12.5%)	3(37.5%)
Company B	5	0(0%)	4(80.0%)	1(20.0%)	0(0%)	0(0%)
Total	13	0(0%)	7(53.8%)	2(15.4%)	1(7.7%)	3(23.1%)
Molding						
Company A	7	1(14.3%)	1(14.3%)	2(28.6%)	1(14.3%)	2(28.6%)
Company B(1st press)	6	0(0%)	1(16.7%)	2(33.3%)	2(33.3%)	1(16.7%)
Company B(2nd press)	2	2(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Total	15	3(20.0%)	2(13.3%)	4(26.7%)	3(20.0%)	3(20.0%)
Sintering						
Company A	11	2(18.2%)	8(72.7%)	1(9.1%)	0(0%)	0(0%)
Company B	10	7(70.0%)	3(30.0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Total	21	9(42.9%)	11(52.4%)	1(4.8%)	0(0%)	0(0%)
Polishing						
Company A	20	0(0%)	5(25.0%)	4(20.0%)	6(30.0%)	5(25.0%)
Company B	14	0(0%)	11(78.6%)	1(7.1%)	2(7.3%)	0(0%)
Company C	7	5(71.4%)	2(28.6%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Company D	4	0(0%)	0(0%)	0(0%)	2(50.0%)	2(50.0%)
Total	45	5(11.1%)	18(40.0%)	5(11.1%)	10(22.2%)	7(15.6%)
Bonding						
Company A	17	3(17.6%)	12(70.6%)	1(5.3%)	1(5.3%)	0(0%)
Company B	13	0(0%)	13(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Company C	4	3(75.0%)	1(25.0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Company E	1	1(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Company F	4	2(50.0%)	2(50.0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Total	39	9(23.1%)	28(71.8%)	1(2.6%)	1(2.6%)	0(0%)
Finishing						
Company A	12	0(0%)	5(41.7%)	2(16.7%)	2(16.7%)	3(25.0%)
Company B	11	0(0%)	0(0%)	5(45.5%)	5(45.5%)	1(9.1%)
Company C	5	4(80.0%)	1(20.0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Company E	1	1(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Total	29	5(17.2%)	6(20.7%)	7(24.1%)	7(24.1%)	4(13.8%)
Total	182	35(19.2%)	80(47.0%)	25(13.7%)	24(13.2%)	18(9.9%)

1.2. 호흡성 인듐(Respirable Indium) 노출평가

ITO, IZO 타겟 제조업 인듐 취급근로자의 호흡성 인듐 노출평가 결과는 표 7, 8과 같다. ITO, IZO 타겟 제조업 호흡성 인듐의 노출수준은 $0.02 \sim 448.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=194$)으로 폭 넓은 노출특성을 보여주고 있으며, 근로자의 33.0%(64명)이 일본 후생노동성 노출기준인 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 노출평가 자료의 기하평균은 $5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으나 산술평균은 $14.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. ITO, IZO 타겟 제조업 호흡성 인듐의 기하평균은 혼합공정이 $10.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고 소결공정이 $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮게 평가되었으며, 혼합공정에서 노출기준을 초과하였다. 산술평균은 혼합공정이 $44.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았고 접합공정이 $7.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮게 평가되었으며, 분말공정($18.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 혼합공정, 성형공정($10.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 가공·연마공정($11.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 그리고 마무리공정($16.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 노출기준을 초과하였다.

분말공정 인듐 취급근로자의 호흡성 인듐 노출수준은 $0.02 \sim 98.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=23$)이었으며, 인듐 취급 근로자의 39.1%(9명)이 노출기준을 초과하였다. 분말공정 호흡성 인듐 노출평가 자료의 기하평균은 $7.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으나 산술평균은 $18.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 분말공정 근로자의 최고 노출농도는 $98.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 9.8배를 초과하였다. A 사업장 분말공정의 호흡성 인듐 노출수준은 $3.3 \sim 98.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=15$)로 근로자의 60.0%(9명)이 노출기준을 초과하였으며, B 사업장의 노출수준은 $0.02 \sim 7.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=8$)로 노출기준을 초과한 근로자는 없다

혼합공정 인듐 취급근로자의 호흡성 인듐 노출수준은 $1.1 \sim 448.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=16$)이었으며, 인듐 취급근로자의 50.0%(8명)이 일본의 노출기준을 초과하였다. 혼합공정 노출평가 자료의 기하평균($10.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($44.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준을 초과하였으며, 근로자의 최고 노출농도는 $448.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 44.9배를 초과하였다. A 사업장 혼합공정의 호흡성 인듐 노출수준은 $3.9 \sim 448.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=11$)로 근로자의 72.7%(8명)이 노출기준을 초과하였고, B 사업장의 노출수준은 $1.1 \sim 4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출

기준을 초과한 근로자는 없다.

성형공정 인뿔 취급근로자의 호흡성 인뿔 노출수준은 $1.0 \sim 74.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=19$)이었으며, 인뿔 취급근로자의 약 27.8%(5명)이 노출기준을 초과하였다. 성형공정 노출평가 자료의 기하평균은 $5.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으며, 산술평균은 $10.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 일본의 노출기준을 초과하였다. 성형공정 근로자의 최고 노출농도는 $74.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 7.5배를 초과하였다. A 사업장 성형공정의 노출농도 수준은 $1.6 \sim 74.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=11$)로 근로자의 약 45.5%(5명)가 노출기준을 초과하였으나 B 사업장의 노출수준은 $1.0 \sim 9.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=7$)로 노출기준을 초과한 근로자는 없었다.

소결공정 인뿔 취급근로자의 호흡성 인뿔 노출수준은 $0.5 \sim 58.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=23$)이었으며, 인뿔 취급근로자의 약 17.3%(4명)이 노출기준 초과하였다. 소결공정 노출평가 자료의 기하평균($3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($8.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준을 미만이었으며, 근로자의 최고 노출농도는 $58.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 5.8배를 초과하였다. A 사업장 소결공정의 노출수준은 $0.8 \sim 58.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=13$)로 근로자의 약 23.4%(3명)가 노출기준을 초과하였으며, B 사업장의 노출수준은 $0.5 \sim 26.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=10$)로 근로자의 약 10.0%(1명)이 노출기준을 초과하였다.

가공·연마공정 인뿔 취급근로자의 호흡성 인뿔 노출수준은 $0.2 \sim 61.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=54$)이었으며, 근로자의 약 40.7%(22명)이 노출기준을 초과하였다. 가공·연마공정 노출평가 자료의 기하평균은 $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으나 산술평균은 $11.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 가공·연마공정 근로자의 최고 노출농도는 $61.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 6.1배를 초과하였다. A 사업장 가공·연마공정의 공기 중 인뿔 노출수준은 $1.8 \sim 61.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=22$)로 근로자의 77.3%(17명)이 노출기준을 초과하였으나 B 사업장의 노출수준은 $0.5 \sim 9.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=14$)로 노출기준을 초과한 근로자는 없었다. C 사업장의 노출수준이 $0.2 \sim 11.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=14$)로 근로자의 7.1%(1명)이 노출기준을 초과하였으며, D 사업장의 호흡성 인뿔 노출수준은 $11.5 \sim 29.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=4$)로 모든 근로자(100%)가 노출기준을 초과하였다.

접합공정 인뿔 취급근로자의 호흡성 인뿔 노출수준은 $0.8 \sim 118.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$

(n=36)이었으며, 인듐 취급근로자의 13.9%(5명)가 노출기준을 초과하였다. 접합공정 노출평가 자료의 기하평균($3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($7.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준 미만이었으며, 근로자의 최고 노출농도는 $118.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 11.9배를 초과하였다. 접합공정에서 노출기준을 초과한 사업장은 A 사업장과 E 사업장이다. A 사업장 접합공정의 공기 중 인듐 노출수준은 $1.3 \sim 118.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=17)로 근로자의 28.5%(4명)이 노출기준을 초과하였고, E 사업장 공기 중 인듐 노출수준은 $0.6 \sim 10.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=4)로 근로자의 25.0%(1명)이 노출기준을 초과하였다. B 사업장의 노출수준은 $2.0 \sim 9.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=7), C 사업장의 노출수준은 $0.8 \sim 1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=4) 그리고 F 사업장의 노출수준은 $0.8 \sim 5.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=4)로 노출기준 미만이였다.

마무리공정 인듐 취급근로자의 인듐 노출수준은 $0.2 \sim 68.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=24)이었으며, 인듐 취급근로자의 약 45.9%(11명)가 노출기준을 초과하였다. 노출평가 자료의 기하평균은 $6.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이였으나 산술평균은 $16.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 마무리공정 근로자의 최고 노출농도는 $68.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 6.8배를 초과하였다. A 사업장 마무리공정의 호흡성 인듐 노출수준은 $1.8 \sim 68.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=8)로 근로자의 62.5%(5명)이 노출기준을 초과하였으며, B 사업장의 노출수준은 $18.2 \sim 57.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=5)로 모든 근로자(100%)가 노출기준을 초과하였다. 일본계 E 사업장의 호흡성 인듐 노출수준은 $1.1 \sim 19.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=7)로 근로자의 16.7%(1명)이 노출기준을 초과하였으나 C 사업장의 호흡성 인듐 노출수준은 $0.2 \sim 3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=4)로 노출기준 미만이였다.

일본 후생노동성의 호흡성 인듐 노출기준인 $10.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 0.5배에 해당하는 $5.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 호흡성 인듐에 노출되고 있는 근로자는 분말공정 60.9%, 혼합공정 62.5%, 성형공정 55.6%, 소결공정 26.0%, 가공·연마공정 53.7%, 접합공정 33.3 그리고 마무리공정 54.2%이였다.

<표 7> Respirable Indium Concentration of the ITO, IZO Target Industry

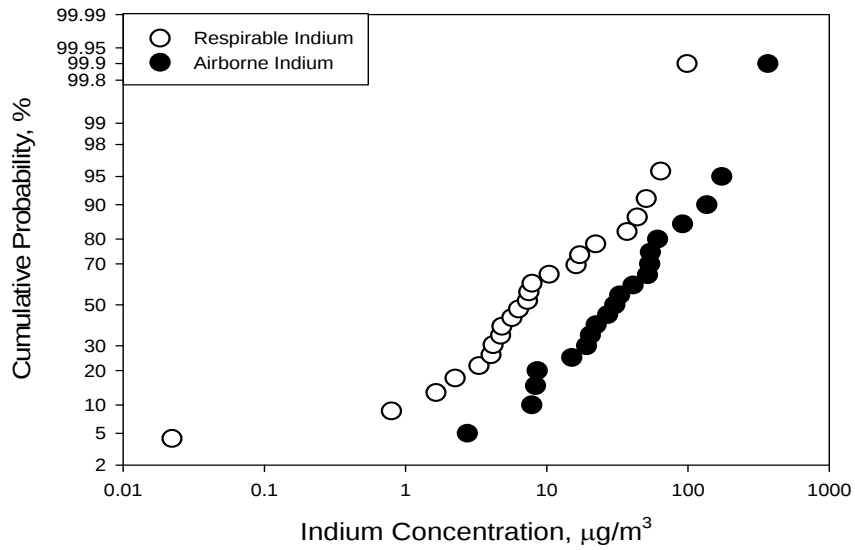
Process	n	Respirable Indium Concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$						
		AM	SD	GM	GSD	Med.	Min.	Max.
Powder								
Company A	15	26.2	27.6	15.5	3.0	16.1	3.3	98.2
Company B	8	3.4	2.7	1.7	6.6	3.1	0.02	7.8
Total	23	18.2	24.7	7.1	5.8	7.3	0.02	98.2
Mixing								
Company A	11	63.5	134	18.8	4.0	14.1	3.9	448.6
Company B	5	3.0	1.2	2.7	1.7	3.0	1.1	4.3
Total	16	44.6	43.0	10.2	4.5	8.6	1.1	448.6
Molding								
Company A	11	14.5	20.9	8.0	3.0	7.6	1.6	74.9
Company B(1st press)	6	5.1	2.8	4.5	1.7	4.6	2.4	9.9
Company B(2nd press)	1	1.0	-	-	-	-	-	-
Total	19	10.6	16.9	5.9	2.8	5.5	1.0	74.9
Sintering								
Company A	13	11.3	17.7	5.0	3.5	4.1	0.8	58.3
Company B	10	4.3	8.2	1.6	3.6	0.9	0.5	26.2
Total	23	8.3	14.5	3.0	3.9	3.2	0.5	58.3
Polishing								
Company A	22	19.5	13.7	14.7	2.4	18.4	1.8	61.1
Company B	14	4.8	2.4	4.1	2.1	4.7	0.5	9.8
Company C	14	2.2	2.9	1.2	3.2	1.4	0.2	11.6
Company D	4	18.2	7.6	17.1	1.5	16.1	11.5	29.1
Total	54	11.1	12.1	5.5	4.0	6.0	0.2	61.1
Bonding								
Company A	17	12.5	27.9	5.2	3.1	3.8	1.3	118.9
Company B	7	4.8	3.4	4.0	2.0	3.3	2.0	9.5
Company C	4	1.1	0.2	1.0	1.2	1.1	0.8	1.2
Company E	4	3.2	4.7	1.5	3.7	0.9	0.6	10.3
Company F	4	2.1	2.3	1.5	2.5	1.0	0.8	5.6
Total	36	7.7	19.6	3.2	3.1	3.1	0.8	118.9
Finishing								
Company A	8	20.4	21.4	12.1	3.3	18.6	1.8	68.6
Company B	5	37.8	14.6	35.4	1.5	35.4	18.2	57.9
Company C	4	1.7	1.2	1.2	3.4	1.9	0.2	3.0
Company E	7	5.5	6.6	3.3	2.6	2.3	1.1	19.7
Total	24	16.4	19.2	6.9	4.6	5.5	0.2	68.6
Total	194	14.3	36.9	5.2	4.1	4.8	0.02	448.6

**<표 8> Probability of Respirable Indium Concentration Exceeding
OEL in ITO, IZO Target Industry**

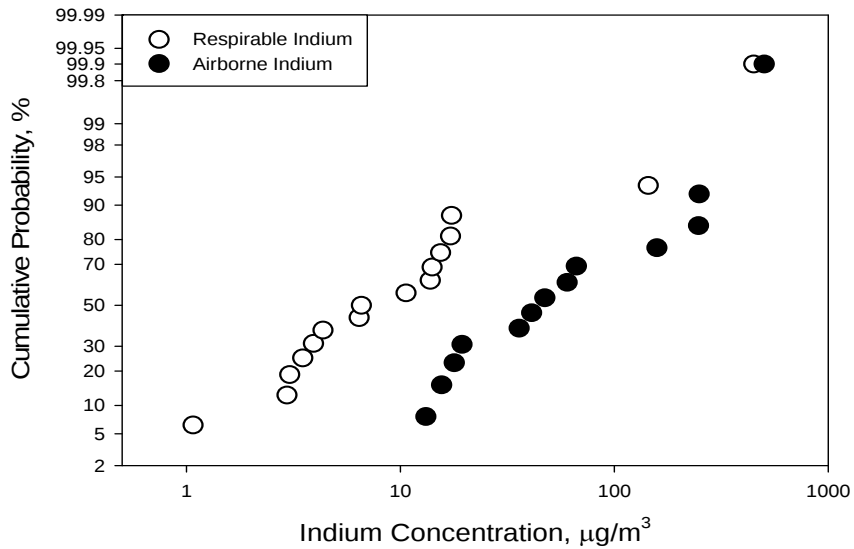
Process		n	Occupational Exposure Limit, 10 µg/m³				
			< 10%	10~50%	50~100%	1~2 excess	> 2 excess
Powder							
	Company A	15	0(0%)	3(20.0%)	3(20.0%)	3(20.0%)	6(40.0%)
	Company B	8	2(25.0%)	4(50.0%)	2(25.0%)	0(0%)	0(0%)
	Total	23	2(8.7%)	7(30.4%)	5(21.7%)	3(13.0%)	6(26.1%)
Mixing							
	Company A	11	0(0%)	1(9.1%)	2(18.2%)	6(54.5%)	2(18.2%)
	Company B	5	0(0%)	5(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
	Total	16	0(0%)	6(37.5%)	2(12.5%)	6(37.5%)	2(12.5%)
Molding							
	Company A	11	0(0%)	4(36.4%)	2(18.2%)	4(36.4%)	1(9.1%)
	Company B(1st press)	6	0(0%)	3(50.0%)	3(50.0%)	0(0%)	0(0%)
	Company B(2nd press)	1	0(0%)	1(50.0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
	Total	19	0(0%)	8(44.4%)	5(27.8%)	4(22.2%)	1(5.6%)
Sintering							
	Company A	13	1(7.7%)	8(61.5%)	1(7.7%)	1(7.7%)	2(15.4%)
	Company B	10	5(50.0%)	3(30.0%)	1(10.0%)	0(0%)	1(10.0%)
	Total	23	6(26.1%)	11(47.8%)	2(8.7%)	1(4.3%)	3(13.0%)
Polishing							
	Company A	22	0(0%)	3(13.6%)	2(9.1%)	8(36.4%)	9(40.9%)
	Company B	14	1(7.1%)	8(57.1%)	5(35.7%)	0(0%)	0(0%)
	Company C	14	6(42.9%)	7(50.0%)	0(0%)	1(7.1%)	0(0%)
	Company D	4	0(0%)	0(0%)	0(0%)	3(75.0%)	1(25.0%)
	Total	54	7(13.0%)	18(33.3%)	7(13.0%)	12(22.2%)	10(18.5%)
Bonding							
	Company A	17	0(0%)	10(71.4%)	3(21.4%)	3(21.4%)	1(7.1%)
	Company B	7	0(0%)	4(57.1%)	3(42.9%)	0(0%)	0(0%)
	Company C	4	1(25.0%)	3(75.0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
	Company E	4	2(50.0%)	1(25.0%)	0(0%)	1(25.0%)	0(0%)
	Company F	4	2(50.0%)	1(25.0%)	1(25.0%)	0(0%)	0(0%)
	Total	36	5(13.9%)	19(52.8%)	7(19.4%)	4(11.1%)	1(2.8%)
Finishing							
	Company A	8	0(0%)	2(25.0%)	1(12.5%)	2(25.0%)	3(37.5%)
	Company B	5	0(0%)	0(0%)	0(0%)	1(20.0%)	4(80.0%)
	Company C	4	1(25.0%)	3(75.0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
	Company E	7	0(0%)	5(71.4%)	1(14.3%)	1(14.3%)	0(0%)
	Total	24	1(4.2%)	10(41.7%)	2(8.3%)	4(16.7%)	7(29.2%)
Total		194	21(10.8%)	79(40.7%)	30(15.5%)	34(17.5%)	30(15.5%)

그림 10~16은 ITO, IZO 타겟 제조업 각 공정에서 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐과 호흡성 인듐의 누적도수분포표를 나타낸 그림이다. 분말 공정(그림 10)과 혼합공정(그림 11)은 산화인듐을 생산하고 산화인듐과 산화주석을 혼합한다. 근로자가 직접 수작업을 하는 A 사업장에서는 고농도의 인듐에 근로자가 노출되고 있으며, 자동화 설비로 작업을 하는 B 사업장은 상대적으로 낮은 농도 수준의 인듐에 근로자가 노출되었다. 성형공정(그림 12)은 A, B 사업장 모두 수작업으로 혼합된 산화인듐과 산화주석 분말을 프레스의 넣는 작업자가 높은 노출량을 보여주고 있다. 소결공정(그림 13)은 작업의 특성상 성형공정과 가공·연마공정을 근로자가 출입하기 때문에 일부 근로자는 고농도 수준의 인듐에 노출되고 있다. 가공·연마공정(그림 14)은 사업장의 작업 특성에 따라 농도분포에 많은 차이를 보여주고 있다. 인듐의 노출관리가 매우 양호한 일본계 사업장은 인듐이 매우 낮게 평가되었으나 작업관리가 부족한 A사업장과 D 사업장은 매우 높게 평가되어 공기 중 인듐과 호흡성 인듐 평가결과 매우 넓은 분포를 보여주고 있다. 특히 A와 D 사업장은 작업장에 떨어진 ITO 타겟 분진이 비산으로 인한 2차 오염의 영향도 배제할 수 없다. 접합공정(그림 15)에서 고농도의 인듐이 노출되는 것으로 평가된 A 사업장에서는 일부 근로자가 접합공정과 마무리 공정을 함께 수행하고 있어 매우 높은 농도의 인듐에 근로자가 노출되고 있으며, B 사업장은 마무리공정의 영향을 받고 있었다. 그러나 일본계 사업장과 접합전문업체에서는 마무리공정의 영향을 받지 않기 때문에 일정한 노출특성을 보여주고 있다. 마무리공정(그림 16)은 인듐분진의 관리에 따라 두 개의 농도분포를 보여주고 있다. A 사업장과 B 사업장에서는 인듐 분진의 관리가 이루어지지 않아 매우 높은 노출수준을 보여주고 있다.

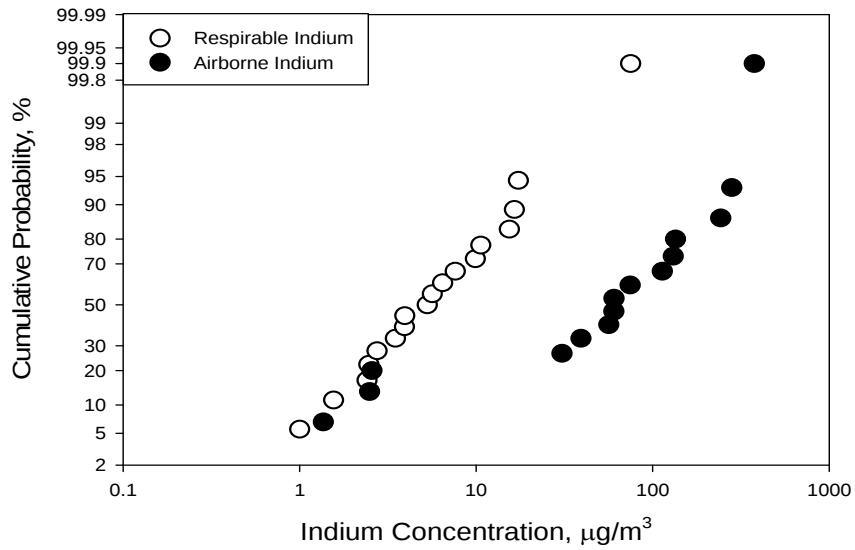
그림 17은 ITO, IZO 타겟 제조업 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐과 호흡성 인듐의 노출수준을 나타내는 누적도수분포표이다. ITO, IZO 타겟 제조업의 공기 중 인듐 및 호흡성 인듐의 노출평가 자료는 대수정규분포하고 있으며, 대수변환 된 자료의 공기 중 인듐의 기울기 값(r^2)은 0.988($n=182$)이며 호흡성 인듐의 기울기 값(r^2)은 0.988($n=194$)이다.



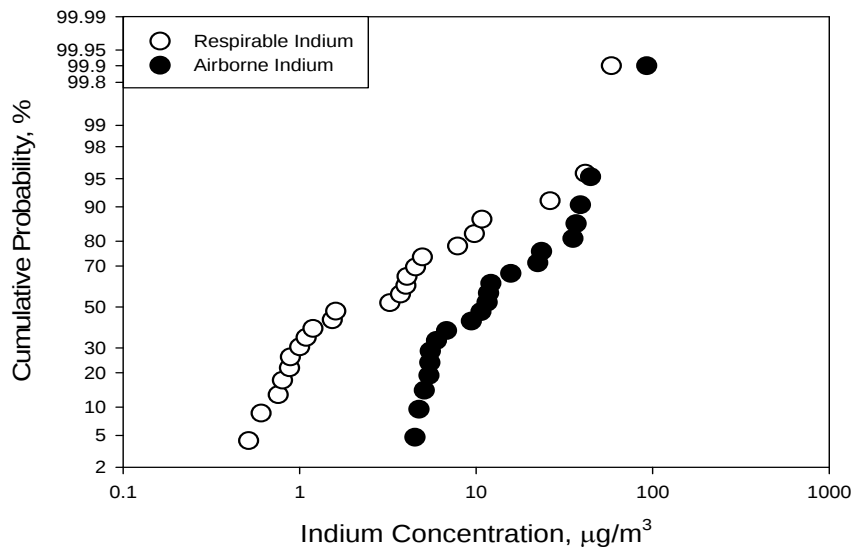
<그림 10> Cumulative probability of indium concentration in the powder process



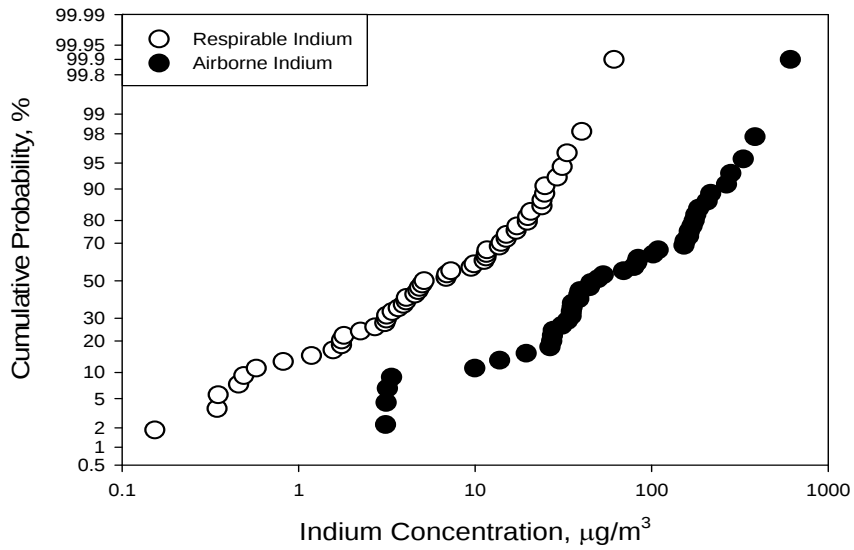
<그림 11> Cumulative probability of indium concentration in the mixing process



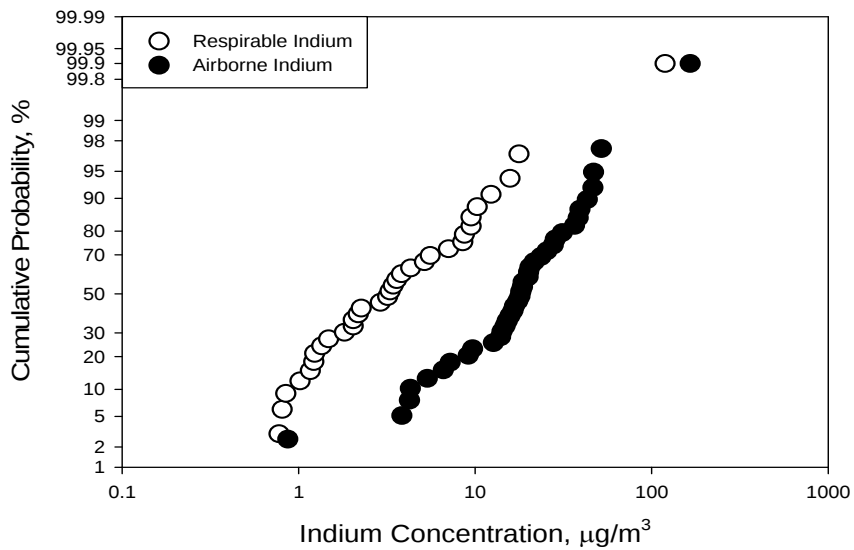
<그림 12> Cumulative probability of indium concentration in the molding process



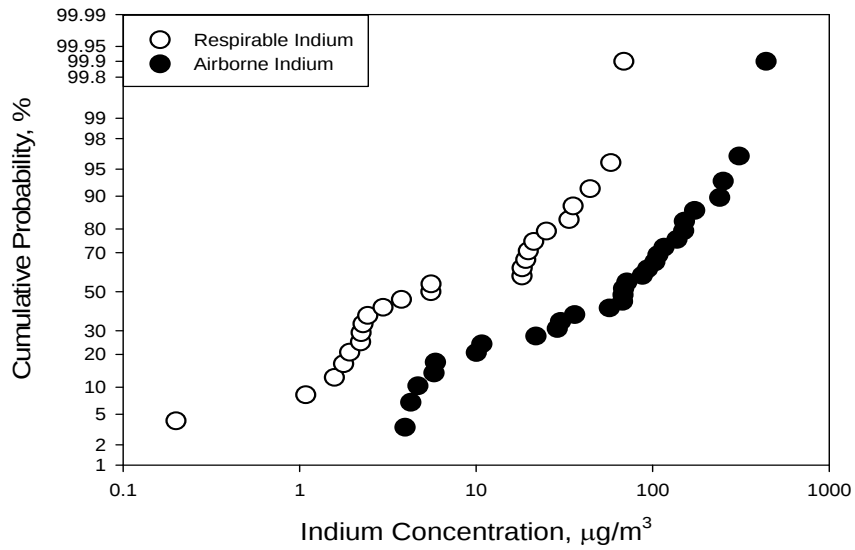
<그림 13> Cumulative probability of indium concentration in the sintering process



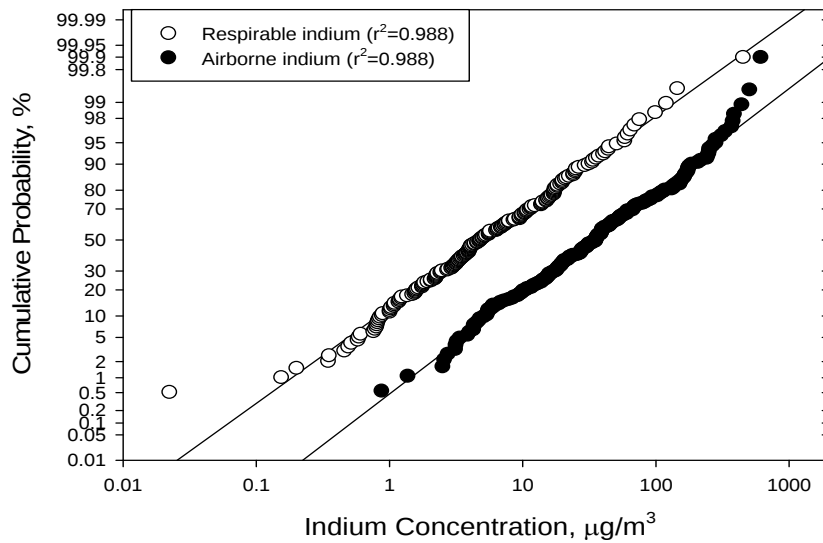
<그림 14> Cumulative probability of indium concentration in the polishing process



<그림 15> Cumulative probability of indium concentration in the bonding process



<그림 16> Cumulative probability of indium concentration in the finishing process



<그림 17> Cumulative probability of indium concentration in the ITO, IZO target companies

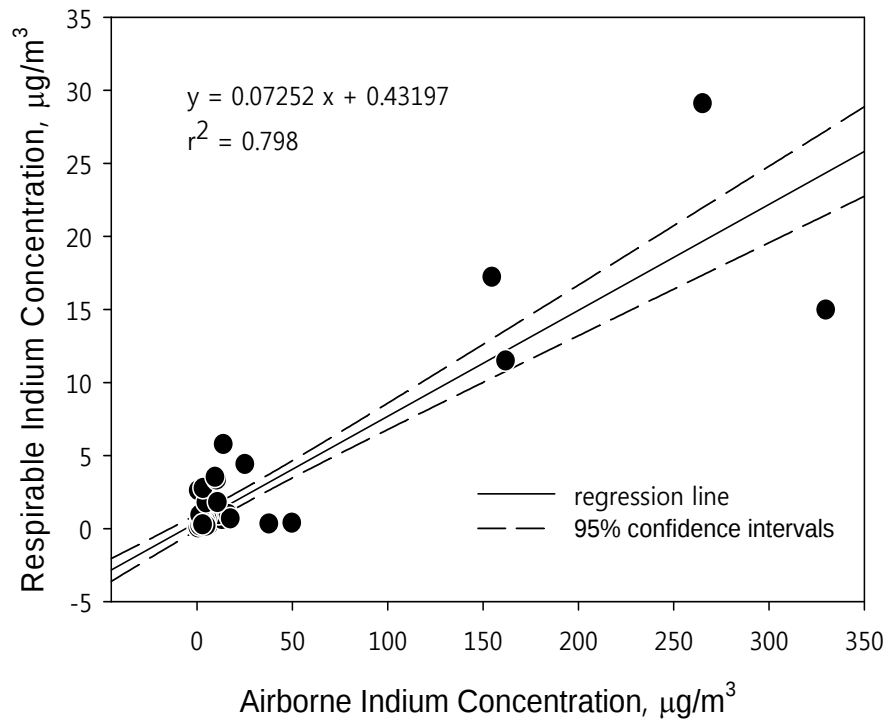
1.3. 인듐의 크기별 비교

ITO, IZO 타겟 제조업 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐과 호흡성 인듐 노출평가 자료의 상관관계를 비교하기 위하여 일부 사업장(또는 공정) 인듐 취급근로자의 호흡기 위치에서 공기 중 인듐과 호흡성 인듐 시료를 동시에 채취하여 표 9, 그림 18과 같은 결과를 얻었다. ITO, IZO 타겟 제조업의 공기 중 인듐 노출수준은 $0.14 \sim 329.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (기하평균 $3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 산술평균 $18.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 호흡성 인듐의 노출수준은 $0.05 \sim 29.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (기하평균 $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 산술평균 $1.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이었다. 타겟 제조업의 공기 중 인듐과 호흡성 인듐의 노출평가 자료는 모두 대수정규분포를 하였다.

ITO, IZO 타겟 제조업 모든 공정에서 채취된 공기 중 인듐과 호흡성 인듐간의 상관관계 식은 $y=0.07252x + 0.43197$, $r^2=0.798$ 로 두 자료간의 상관성이 높았다.

<표 9> Concentration for the Comparative Evaluation of Airborne Indium and Respirable Indium in the ITO, IZO Target Industry

Sample type	No. of Sample	Indium Concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
		AM	SD	GM	GSD	Range
Airborne Indium	69	18.1	56.0	3.1	5.0	0.14-329.7
Respirable Indium	69	1.7	4.5	0.4	2.3	0.05- 29.1



<그림 18> Correlation between airborne indium and respirable indium in the ITO, IZO target industry

1.4. 인뿔 입경분포 및 공기역학적 질량중위직경(MMAD)

인뿔분진의 입경분포와 공기역학적 질량중위직경을 평가하기 위해 국내 타겟 제조업체 2개소와 일본계 타겟 제조업체 1개소를 대상으로 분진 크기별 분포를 평가하였다. 대상 공정은 분말공정, 혼합공정, 성형공정, 소결공정, 가공·연마공정, 접합공정의 6개 공정이며, 국내 타겟 제조업체에서는 6개 공정 모두 평가하였으며 일본계 타겟 제조업체는 가공·연마공정과 접합공정을 대상으로 평가하였다.

1.4.1. 인뿔의 공기역학적 질량중위직경

ITO, IZO 타겟 제조업체의 공정에서 발생하는 인뿔분진의 공기역학적 질량중위직경을 분석한 결과는 표 10과 같다. A 사업장에서 발생하는 인뿔분진의 공기역학적 질량중위직경은 3.47~10.13 μm 이었다. 혼합공정의 공기역학적 질량중위직경이 10.13 μm 로 가장 큰 크기의 분진이 발생하였고, 성형공정(7.54 μm), 가공·연마공정(7.24 μm), 접합공정(6.00 μm), 분말공정(5.40 μm) 그리고 소결공정(3.47 μm)에서 가장 작은 분진이 발생하였다. 혼합공정의 공기역학적 질량중위직경이 10 μm 이상으로 평가된 것은 산화인뿔 분말을 산화주석과 혼합하면서 수작업으로 작업을 진행하였기 때문에 많은 양의 분진이 비산하였기 때문이다

B 사업장에서 발생하는 인뿔분진의 공기역학적 질량 중위직경은 4.42~9.47 μm 이었다. 접합공정에서 발생하는 분진의 공기역학적 질량 중위직경이 9.74 μm 로 가장 큰 분진이었으며, 소결공정(8.93 μm), 가공·연마공정(6.70 μm), 분말공정(6.28 μm), 혼합공정(5.08 μm) 그리고 성형공정(4.42 μm)에서 가장 작은 분진이 발생하였다.

일본계 C 사업장에서 발생하는 인뿔분진의 공기역학적 질량 중위직경은 가공·연마공정 10.41 μm , 접합공정 15.21 μm 로 국내업체보다 큰 분진이 발생하는 것으로 평가되었다. C 사업장은 일본 후생노동성의 ITO 관리기준에 따라 사업장을 관리하고 있어 실제 사업장의 인뿔 노출농도가 국내 사업장보다 매우 낮게 평가되었다. 이처럼 낮은 농도수준에서 큰 입자의 인뿔분진이

포집되었을 가능성이 있기 때문에 공기역학적 질량중위직경이 10 μm 이상으로 평가되었을 가능성이 크다.

<표 10> Mass Median Aerodynamic Diameter of the ITO, IZO Target Process

Process		Company A	Company B	Company C
Powder	MMAD	5.40	6.28	-
	GSD	3.12	3.94	-
Mixing	MMAD	10.13	5.08	-
	GSD	3.69	5.13	-
Molding	MMAD	7.54	4.42	-
	GSD	6.29	5.76	-
Sintering	MMAD	3.47	8.93	-
	GSD	8.56	6.00	-
Polishing	MMAD	7.24	6.70	10.41
	GSD	3.25	3.05	3.10
Bonding	MMAD	6.00	9.47	15.21
	GSD	5.40	4.52	2.80

1.4.2. 인듐의 입경분포

ITO, IZO 타겟 제조업 6개 공정에서 발생하는 인듐분진의 입경분포를 평가는 marple personal cascade impactor를 이용하여 평가하였다. 각 공정에서 채취된 시료는 1) impactor 각 단의 입경 크기별 함유량 비율(%)을 구하고, 2) 각 단의 인듐 함유량(%)에 보정계수로 보정하여 각 공정의 질량(mass) 입경분포(%) 계산하였다. 3) impactor 각 단의 인듐을 분석하여 정확한 질량(μg)을 구한 후, 계산식을 이용하여 입자수(Particles) 입경분포(%)를 계산하였다. 각 공정별 인듐의 입경분포를 평가하기 위해 3.5 μm 이하(5 stage~back filter), 9.8 μm 이하(3 stage~back filter) 그리고

10 μm 이상(1~2 stage)의 분진으로 구분하여 인듐 재생업의 공정별 평가를 한 결과 표 11과 같다.

A 사업장의 6개 공정에서 발생하는 인듐분진의 질량 입경분포를 보면 3.5 μm 이하의 인듐분진 분포비율(%)이 가장 큰 공정은 소결공정(44.0%), 접합공정(40.6%), 분말공정(37.5%), 성형공정(34.6%), 가공·연마공정(31.2%) 그리고 혼합공정(20.8%)의 순이었다. 9.8 μm 이하 인듐분진의 분포비율은 분말공정(84.4%), 가공·연마공정(74.8%), 소결공정(72.9%), 접합공정(68.1%), 성형공정(64.4%) 그리고 혼합공정(62.4%)의 순이었다. 혼합공정, 성형공정 그리고 접합공정은 9.8 μm 이상 인듐분진의 분포비율은 30% 이상 분포하고 있어 분진의 크기가 큰 인듐분진이 발생하고 있다.

입자수 입경분포를 보면 A 사업장 6개 공정에서 발생하는 인듐분진 입자의 크기는 3.5 μm 이하의 작은 분진이 99.95% 이상 발생하는 것을 알 수 있다. 표 11의 질량 입경분포를 보면 9.8 μm 이상 크기의 인듐분진이 모든 공정(15.55~37.62%)에서 발생하는 것을 알 수 있다. A 사업장의 연구대상 공정에서 적은 수로 발생한 인듐분진의 크기가 크기 때문에 9.8 μm 이하의 분진보다 고농도로 평가되어 공기역학적 질량중위직경과 질량 입경분포에 영향을 미친 것으로 판단된다.

B 사업장의 6개 공정에서 발생하는 인듐분진의 질량 입경분포를 보면 3.5 μm 이하의 인듐분진 분포비율(%)이 가장 큰 공정은 혼합공정(45.1%), 분말공정(42.1%), 성형공정(38.9%), 가공·연마공정(34.7%), 소결공정(33.3%) 그리고 접합공정(20.8%)의 순이었다. 9.8 μm 이하 인듐분진의 분포비율은 가공·연마공정(84.4%), 혼합공정(74.8%), 분말공정(72.9%), 소결공정(68.1%), 접합공정(64.4%) 그리고 성형공정(62.4%)의 순이었다. 성형공정, 접합공정 그리고 소결공정은 9.8 μm 이상 인듐분진의 분포비율은 30% 이상 분포하고 있어 분진의 크기가 큰 인듐분진이 발생하고 있다.

입자수 입경분포를 보면 3.5 μm 이하의 작은 분진이 99.95% 이상 발생하는 것을 알 수 있다. 표 11의 질량 입경분포를 보면 9.8 μm 이상 크기의 인듐분진이 모든 공정(21.90~36.82%)에서 발생하는 것을 알 수 있다. B

사업장의 연구대상 공정에서 적은 수로 발생한 인듐분진의 크기가 크기 때문에 9.8 μm 이하의 분진보다 고농도로 평가되어 공기역학적 질량중위 직경과 질량 입경분포에 영향을 미친 것으로 판단된다.

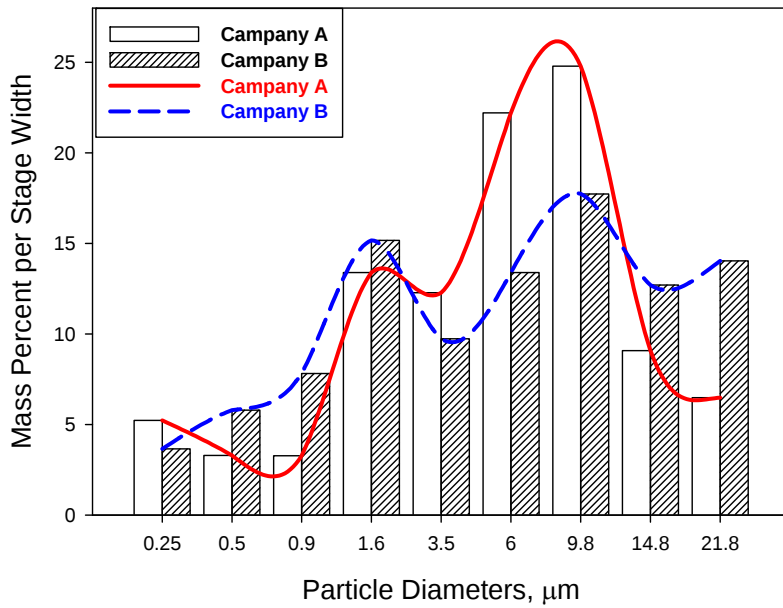
일본계 C 사업장의 2개 공정에서 발생하는 인듐분진의 질량 입경분포를 보면 3.5 μm 이하의 인듐분진 분포비율(%)은 가공·연마공정이 27.4%, 접합공정이 16.8%이었으며, 9.8 μm 이하 인듐분진의 분포비율은 가공·연마공정이 62.2%, 접합공정이 46.1%이었다. C 사업장의 9.8 μm 이상 인듐분진의 분포비율은 가공·연마공정이 37.8%, 접합공정이 53.9%로 분진의 크기가 큰 인듐분진이 발생하고 있다.

입자수 입경분포를 보면 3.5 μm 이하의 작은 분진이 99.9% 이상 발생하는 것을 알 수 있다. 표 11의 질량 입경분포를 보면 9.8 μm 이상 크기의 인듐분진이 0.01~0.06%가 발생하는 것으로 평가되었다. 연구대상 공정에서 적은 수로 발생한 인듐분진의 크기가 크기 때문에 9.8 μm 이하의 분진보다 고농도로 평가되어 공기역학적 질량중위직경과 질량 입경분포에 영향을 미친 것으로 판단된다.

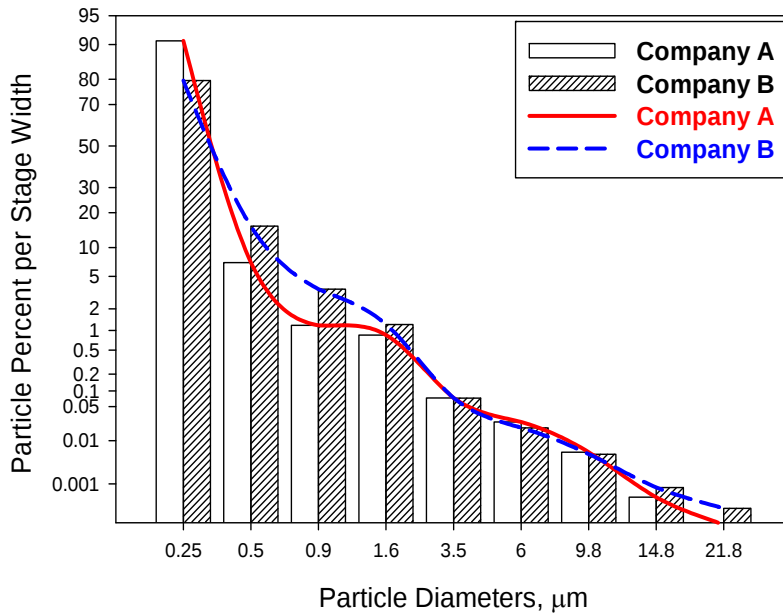
ITO, IZO 타겟 제조업의 공기역학적 질량중위직경과 입경분포(질량 및 입자수)를 볼 때, 대부분의 공정의 인듐 취급근로자가 호흡성 인듐에 노출되고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 사업장 분진 관리는 호흡성 인듐을 관리하는 것이 타당하다.

<表 11> Particle Size Distribution of the ITO, IZO Target
Industry

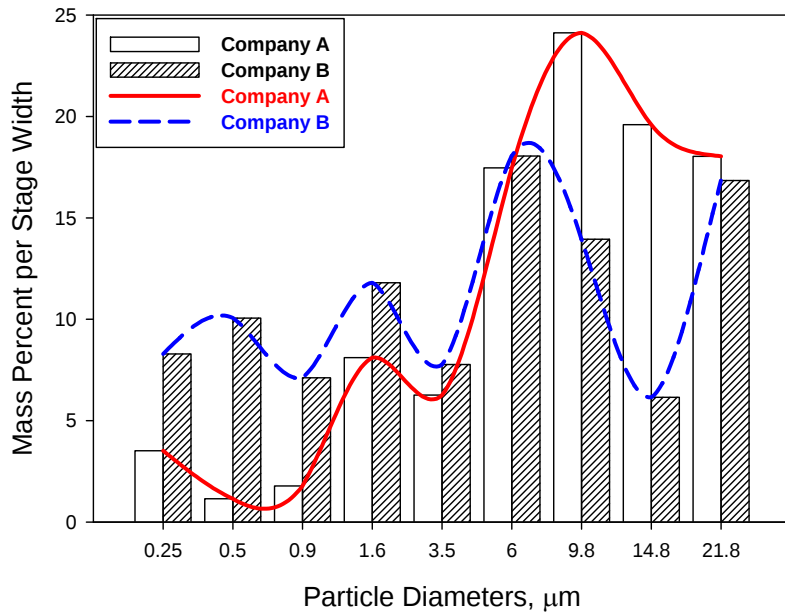
	Mass, %			Particles, %		
	<3.5	<9.8	>9.8	<3.5	<9.8	>9.8
A Company						
Powder	37.45	84.45	15.55	99.97	100.00	0.00
Mixing	20.79	62.38	37.62	99.99	100.00	0.00
Molding	34.58	64.44	35.56	100.00	100.00	0.00
Sintering	43.99	72.92	27.08	99.99	100.00	0.00
Polishing	31.27	74.58	25.42	99.95	100.00	0.00
Bonding	40.59	68.12	31.88	99.96	100.00	0.00
B Company						
Powder	42.15	73.27	26.73	99.98	100.00	0.00
Mixing	45.01	77.01	22.99	99.99	100.00	0.00
Molding	38.86	63.18	36.82	100.00	100.00	0.00
Sintering	33.27	64.32	35.68	99.99	100.00	0.00
Polishing	37.41	78.10	21.90	99.93	100.00	0.00
Bonding	28.13	63.86	36.14	99.97	100.00	0.00
C Company						
Polishing	27.44	62.23	37.77	99.89	99.99	0.01
Bonding	16.79	46.10	53.90	99.24	99.94	0.06



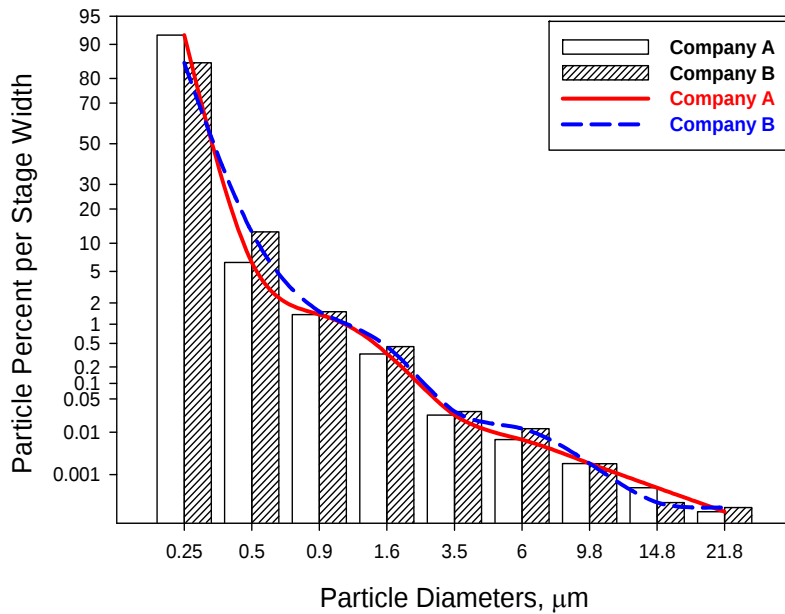
<그림 19> Mass percent per stage width at each particle diameters of the Powder Process



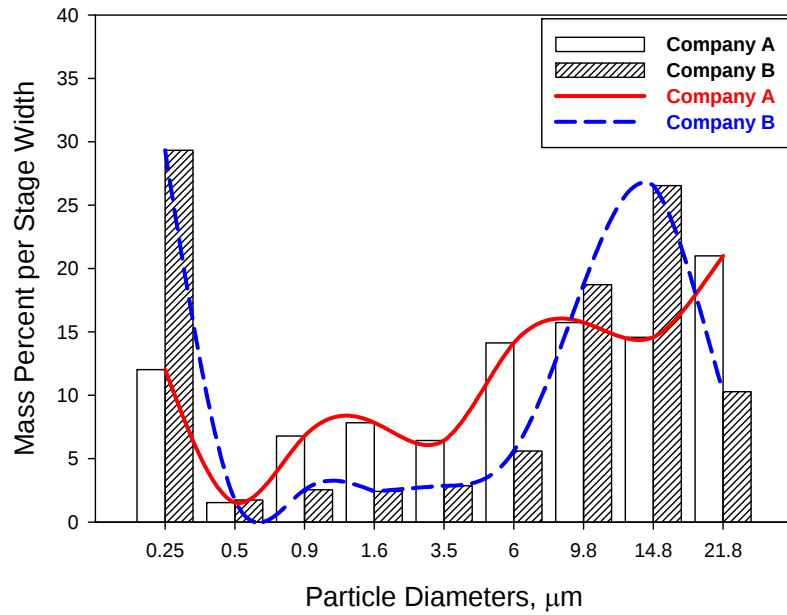
<그림 20> Particle size distribution of the powder process



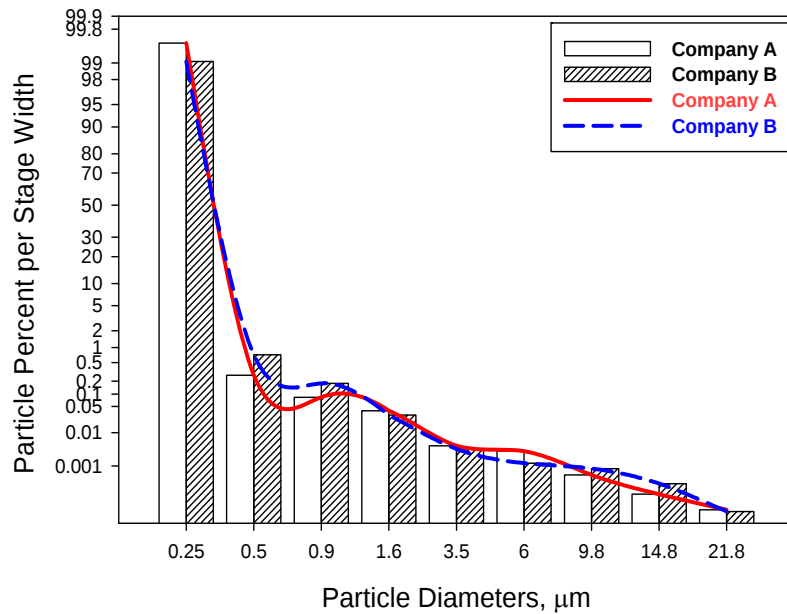
<그림 21> Mass percent per stage width at each particle diameters of the mixing process



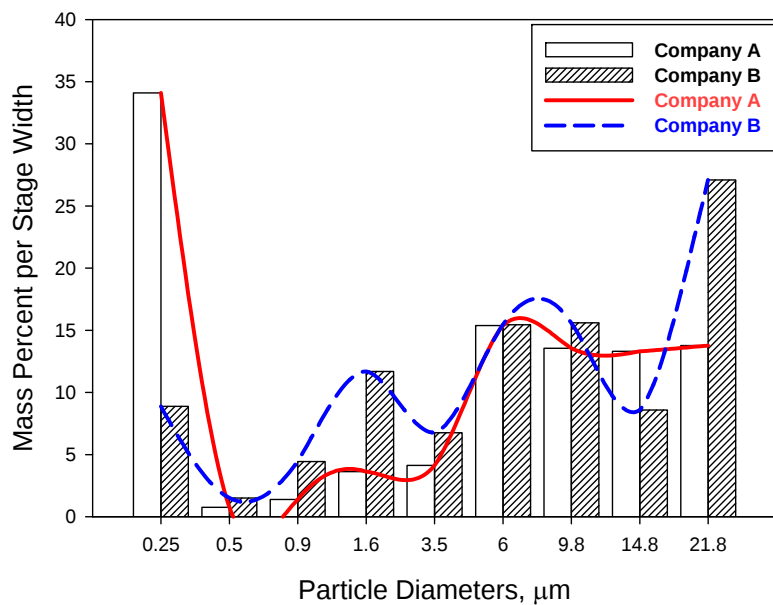
<그림 22> Particle size distribution of the mixing process



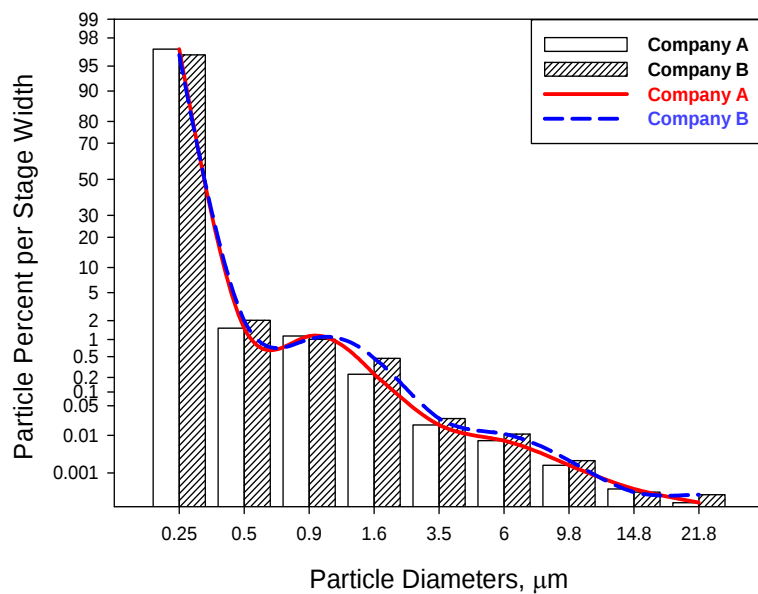
<그림 23> Mass percent per stage width at each particle diameters of the molding process



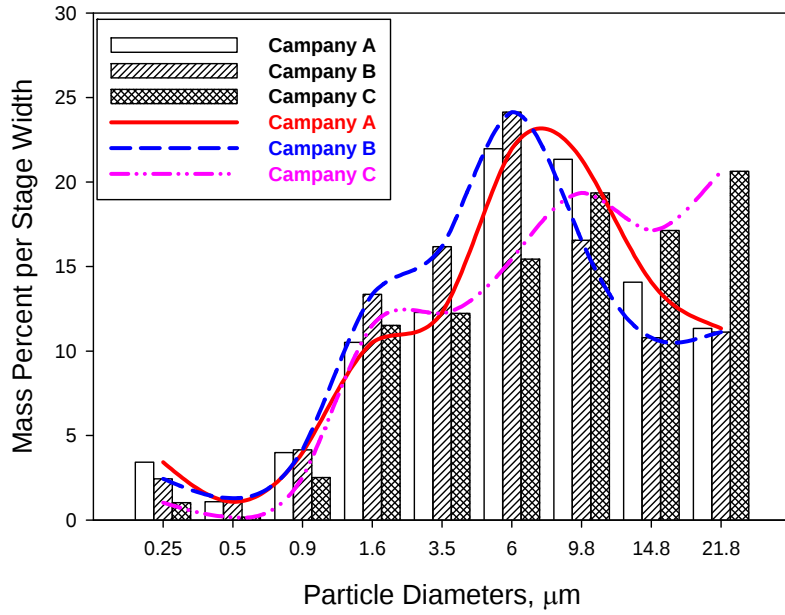
<그림 24> Particle size distribution of the molding process



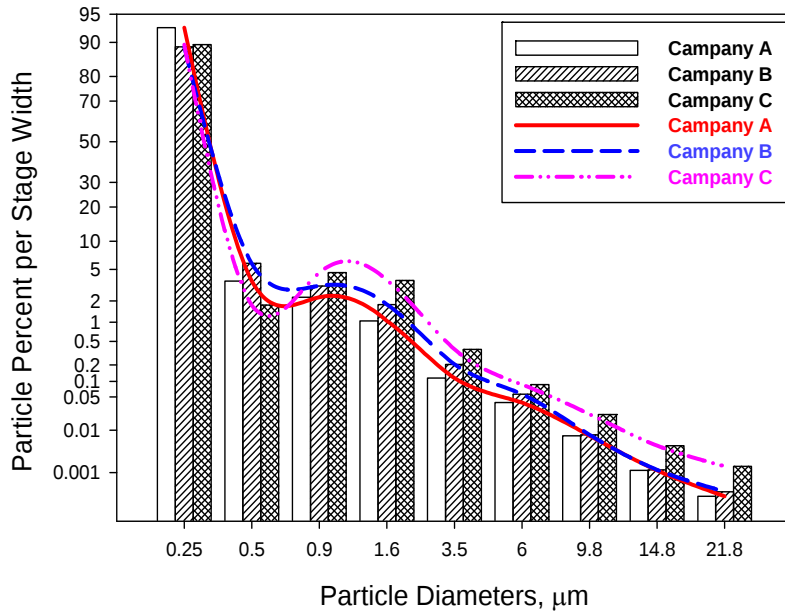
<그림 25> Mass percent per stage width at each particle diameters of the sintering process



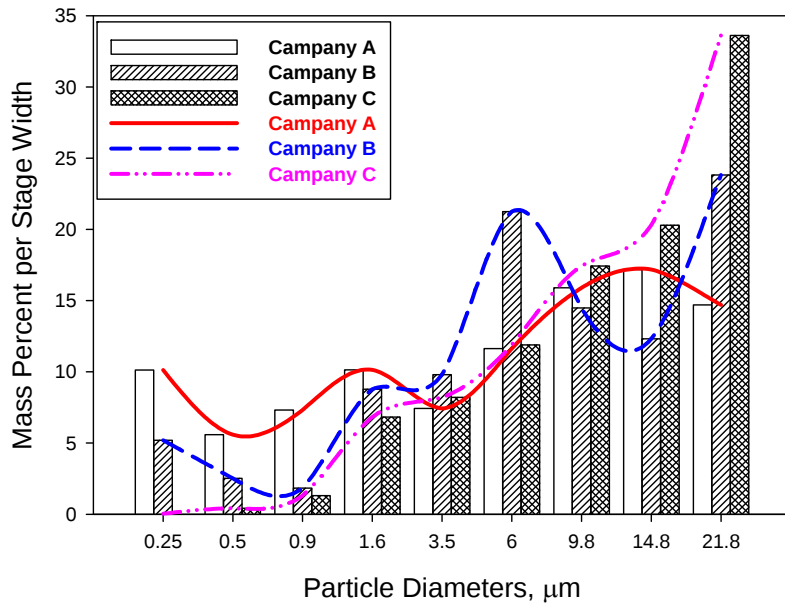
<그림 26> Particle size distribution of the sintering process



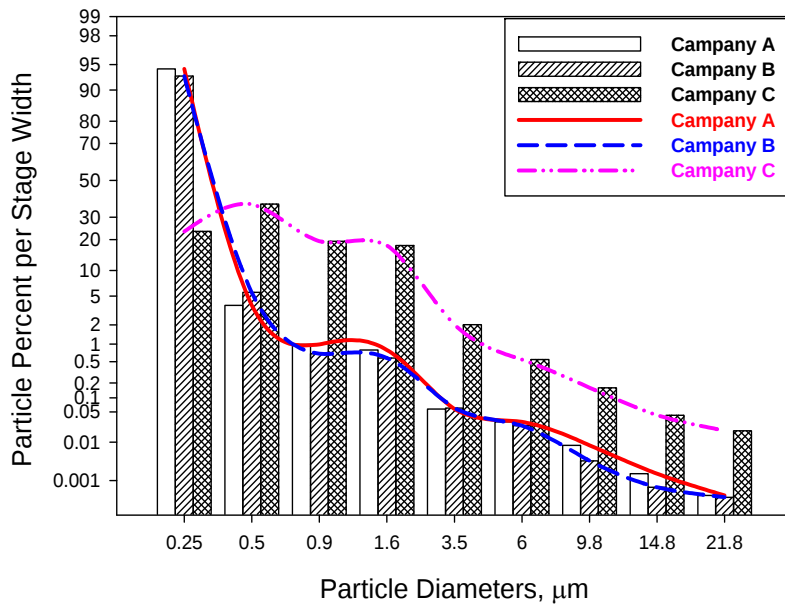
<그림 27> Mass percent per stage width at each particle diameters of the polishing process



<그림 28> Particle size distribution of the polishing process



<그림 29> Mass percent per stage width at each particle diameters of the bonding process



<그림 30> Particle size distribution of the bonding process

1.5. 혈청인듐 평가

ITO, IZO 타겟 제조업은 1) 국내 타겟 제조업체, 2) 일본계 타겟 제조업체 그리고 3) 국내업체의 협력업체로 나누어진다. 국내업체는 A와 B 사업장이며, 일본계 업체는 C와 D 사업장 그리고 국내업체의 협력업체는 E, F, G, H 사업장이다. 인듐 취급근로자 및 관리자 176명을 대상으로 혈청인듐을 평가한 결과는 표 12와 그림 31과 같다. 연구대상 176명 중 99명의 근로자가 혈청인듐에 검출되었으며, 혈청인듐의 노출수준은 ND~49.8 $\mu\text{g/L}$ ($n=176$)이었다. 혈청인듐이 검출된 99명의 혈청인듐 농도수준은 0.02~49.8 $\mu\text{g/L}$ ($n=99$)이었으며, 기하평균은 1.9 $\mu\text{g/L}$ 로 일본 후생노동성의 생물학적 노출기준 3.0 $\mu\text{g/L}$ 미만이었으나 산술평균은 4.6 $\mu\text{g/L}$ 로 노출기준을 초과하였다. ITO, IZO 타겟 제조업 인듐 취급근로자의 혈청인듐 노출기준 초과비율은 22.7%(20명)이었다.

국내 타겟 제조업체 A 사업장 39명의 인듐 취급근로자 중 33명에게서 혈청인듐이 검출되었다. 전체 근로자의 혈청인듐 노출수준은 ND~49.8 $\mu\text{g/L}$ ($n=39$)이었다. 혈청인듐이 검출된 근로자의 노출수준은 0.18~49.8 $\mu\text{g/L}$ ($n=33$)이었으며, 기하평균(5 $\mu\text{g/L}$)과 산술평균(8.0 $\mu\text{g/L}$)은 생물학적 노출기준을 초과하였다. A 사업장의 혈청인듐 노출기준 초과비율은 69.2%(27명)이었다. B 사업장 53명의 인듐 취급근로자 중 41명에게서 혈청인듐이 검출되었다. 전체 근로자의 혈청인듐 노출수준은 ND~17.0 $\mu\text{g/L}$ 이었다. 혈청인듐이 검출된 근로자의 노출수준은 0.02~17.0 $\mu\text{g/L}$ ($n=41$)이었으며, 기하평균은 2 $\mu\text{g/L}$ 로 노출기준 미만이었으며, 산술평균은 4.1 $\mu\text{g/L}$ 로 노출기준을 초과하였다. B 사업장의 혈청인듐 노출기준 초과비율은 34.0%(18명)이었다.

타겟 제조업체로부터 일부공정의 대행하는 협력업체 인듐 취급근로자의 혈청인듐 검출비율을 보면 E 사업장 42.9%, F 사업장 100%, G 사업장 83.3% 그리고 H 사업장이 100%이었다. 그러나 4개 사업장의 최고 혈청인듐 농도는 생물학적 노출기준 미만으로 평가되었다.

일본계 C 사업장 인듐 취급근로자(38명)와 D 사업장 인듐 취급근로자

(13명)는 혈청인듐이 검출되지 않았다. 일본계 사업장에서 혈청인듐이 검출되지 않은 것은 일본 후생노동성의 ITO 관리지침에 따라 사업장을 관리하고 있기 때문이다.

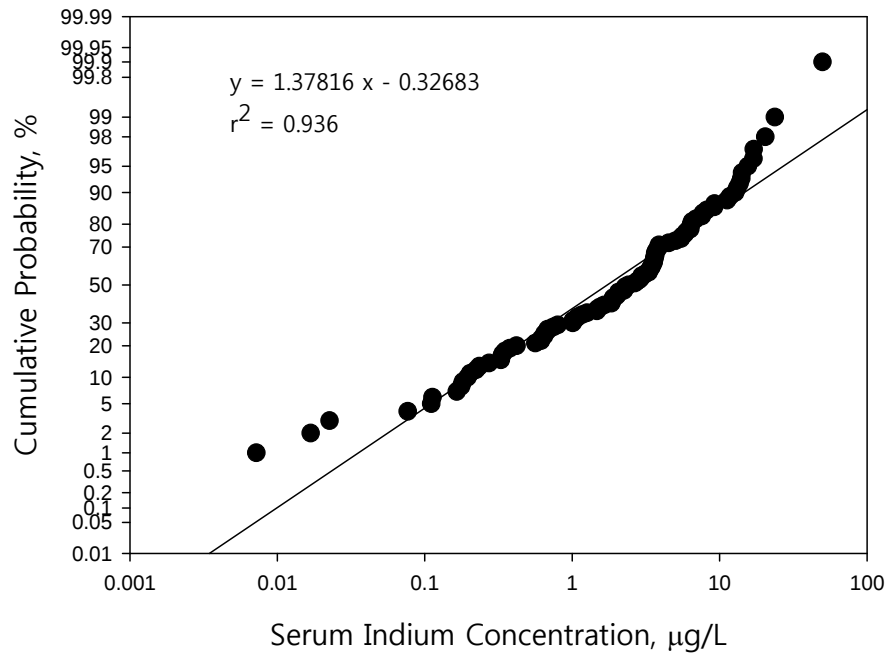
A 사업장에서는 인듐취급 근로자 전체를 대상으로 혈청인듐을 평가하였으나, B 사업장은 인듐취급 근로자의 약 30%만을 대상으로 혈청인듐을 평가한 자료이기 때문에 전체 근로자를 대상으로 평가한다면 생물학적 노출기준 초과비율이 증가할 가능성이 있다.

연구대상 근로자 176명 중 혈청인듐이 검출된 99명 근로자의 자료는 대수정규분포를 하고 있으며, 누적도수분포표에 따른 관계식은 $y=1.37816x - 0.32683$, $r^2= 0.936$ 이었다.

<표 12> Serum Indium Concentration of ITO, IZO Target Companies

Company	n	Serum Indium Concentration, $\mu\text{g/L}$						
		AM	SD	GM	GSD	Med.	Min.	Max.
Company A	34(39)	8.0	9.2	5.0	2.9	5.7	ND*	49.8
Company B	41(53)	4.1	4.6	2.0	4.2	2.9	ND	17.0
Company C	0(38)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Company D	0(13)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Company E	6(14)	1.3	0.6	1.1	1.6	1.2	ND	2.3
Company F	8(8)	0.5	0.3	0.3	3.3	0.6	0.02	0.8
Company G	5(6)	0.2	0.1	0.2	1.8	0.1	ND	0.3
Company H	5(5)	0.9	0.9	0.5	3.2	0.3	0.2	2.3
Total	99(176)	4.6	6.7	1.9	4.7	2.7	ND	49.8

*ND = 0.01 $\mu\text{g/L}$



<그림 31> Cumulative probability of serum indium in the ITO,
IZO target companies

2. 평판 디스플레이(Panel display) 제조업

2.1. 공기 중 인듐 노출평가

디스플레이 제조업의 인듐노출은 크게 3개의 작업공정으로 구분할 수 있다. 1) TFT sputter와 CF sputter의 타겟 교환공정, 2) Sputter 부품(shield, mask, carrier) 세척공정 그리고 3) 타겟 세척공정이다. 각 작업공정은 좀 더 세부적인 공정으로 나누어 운영하고 있다. 타겟 교환공정은 디스플레이 제조업체에서 작업이 이루어지며, sputter 부품(shield, mask, carrier) 세척과 타겟 세척은 외부 협력업체의 공장에서 작업이 이루어진다.

디스플레이 제조업 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출평가 결과는 표 13, 14와 같다. 공기 중 인듐의 노출수준은 $0.2 \sim 2782.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=119$)이었으며, 인듐 취급근로자의 11.7%(14명)가 ACGIH 노출기준 $100.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 디스플레이 제조업 노출평가 자료의 기하평균($11.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($85.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준 미만으로 평가되었다. 디스플레이 제조업의 근로자의 기하평균과 산술평균은 sputter 부품 세척공정(기하평균; $47.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 산술평균; $195.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 가장 높게 노출되고 있으며, 타겟 교환공정(기하평균; $4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 산술평균; $13.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 가장 낮게 노출되는 것으로 평가되었다.

타겟 교환공정의 근로자는 ITO 또는 IZO 분진에 노출되고 있다. 공기 중 인듐의 노출수준은 $0.2 \sim 206.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=57$)이었으며, 근로자의 1.8%(1명)이 노출기준을 초과하였다. 타겟 교환공정 공기 중 인듐 노출평가 자료의 기하평균($4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($13.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준을 미만이며, 근로자의 최고 노출농도는 $206.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 2배를 초과하였다. 노출기준을 초과한 A-2 사업장의 근로자는 TFT sputter에 ITO 타겟이 장착되어 있는 상태에서 타겟의 표면을 사포 등을 사용하여 수작업으로 세척함으로써 인해 고농도의 ITO 분진에 근로자가 노출되고 있었다.

Sputter 부품(shield, mask, carrier) 세척공정은 산에 의한 부품의 부식 등의 특성에 따라 분류하여 질산세척과 산화알루미늄 블라스팅을 하고 있다. 공기 중 인듐 노출수준은 $3.5 \sim 2782.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=46$)로 매우 폭넓은 노출

분포 하고 있으며, 인듐 취급근로자의 26.1%(12명)이 노출기준을 초과하였다. Sputter 부품 세척공정 공기 중 인듐 노출평가 자료의 기하평균은 $47.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으나 산술평균은 $195.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 노출기준을 초과하였다. Sputter 부품 세척공정 근로자의 최고 노출농도는 $2782.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 27.8배를 초과하였다. F 사업장의 공기 중 인듐 노출수준은 $4.4 \sim 2782.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=28)이며, 근로자의 35.7%(10명)이 노출기준을 초과하였다. F 사업장 노출평가 자료의 기하평균은 블라스팅 공정($403.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 노출기준을 초과하였으며, 산술평균은 블라스팅 공정($935.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 분해공정($125.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 노출기준을 초과하였다. 질산세척공정의 기하평균($30.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($81.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준 미만이었다. G 사업장의 공기 중 인듐 노출수준은 $3.5 \sim 1992.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=18)이며, 근로자의 5.6%(2명)이 노출기준을 초과하였다. G 사업장 노출평가 자료의 기하평균은 블라스팅 공정과 분해공정에서 노출기준 미만이었으나, 질산세척공정($104.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준을 초과하였다. G 사업장의 질산세척공정이 높게 평가된 것은 두 가지 원인으로 판단된다. 첫째, 질산으로 sputter 부품에 묻은 ITO 등을 용해한 후, 물을 분사하여 세척하기 때문에 많은 입자상 물질이 근로자에 노출되는 원인과 세척작업 후 회수되는 ITO 슬러지를 처리하는 과정에서 근로자가 노출되기 때문이다.

타겟 세척공정은 산화알루미늄 블라스팅 공정에서 타겟 표면의 불순물을 제거하고 표면연마 공정에서 그라인더를 사용하여 IZO 타겟의 표면을 연마한다. 타겟 세척공정 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $0.2 \sim 235.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=16)으며, 인듐 취급근로자의 6.3%(1명)이 노출기준을 초과하였다. 타겟 세척공정 공기 중 인듐 노출평가 자료의 기하평균($6.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($29.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준 미만이었으며, 근로자 최고 노출농도는 $235.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 2.3배를 초과하였다. 타겟 세척공정에서 노출기준을 초과한 H 사업장의 근로자는 환기설비가 전혀 없는 작업장에서 핸드 그라인더로 타겟 표면을 연마하는 작업을 하고 있었다. IZO 타겟의 표면연마 근로자 이외의 인듐 취급근로자는 노출기준 미만으로 평가되었다.

미국 ACGIH의 공기 중 인듐 노출기준인 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 0.5배에 해당하는

50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 공기 중 인듐에 노출되고 있는 근로자는 타겟 교환공정 5.3%, sputter 부품(shield, mask, carrier) 세척공정 43.5% 그리고 타겟 세척공정 6.3%이었다.

<표 13> Airborne Indium Concentration of the Display Industry

Process	n	Airborne Indium Concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$							
		AM	SD	GM	GSD	Med	Min.	Max.	
Target Exchange									
Company A-1	4	13.5	15.3	4.1	8.7	11.0	0.4	31.5	
Company A-2*	4	71.3	95.2	24.3	6.6	36.9	4.5	206.8	
Company B	7	6.5	9.0	2.4	6.2	2.2	0.2	25.2	
Company C	38	8.2	12.8	3.9	3.3	3.2	0.6	72.5	
Company D	4	12.9	10.3	10.5	2.1	9.5	4.9	28.0	
Total	57	13.1	29.7	4.4	4.3	3.9	0.2	206.8	
Shield, Mask & Carrier Cleaning									
Company F(Disassembly)	15	125.1	118.5	83.3	2.7	85.9	15.8	468.0	
Company G(Disassembly)	7	17.5	12.8	13.8	2.2	13.5	3.5	43.3	
Company F(Washing)	9	81.3	157	30.8	3.8	19.4	4.4	496.5	
Company G(Washing)	4	592.0	946.6	104.1	12.4	183.4	9.2	1992.0	
Company F(Blasting)	4	935.2	1250.0	403.0	5.1	450.5	57	2782.0	
Company G(Blasting)	7	19.7	15.3	15.7	2.0	12.8	6.2	49.8	
Total	46	195.0	500.0	47.3	4.7	39.5	3.5	2782.0	
Target Cleaning									
Company H(Manager etc.)	2	20.3	9.9	19.3	1.6	20.3	13.9	26.7	
Company H(Grinding&blast)	3	97.7	120	50.7	4.4	46.1	12.0	235.0	
Company E(Cleaning etc.)	3	19.9	14.4	15.4	2.6	20.3	5.3	34.0	
Company H(Cleaning etc.)	2	22.5	7.9	21.8	1.4	22.5	16.9	28.1	
Company H(Finishing)	6	4.7	10.4	0.8	6.0	0.4	0.2	25.9	
Total	16	29.1	56.7	6.7	8.7	15.4	0.2	235.0	
Total	119	85.6	322.3	11.7	7.0	13.5	0.2	2782.0	

* ITO Target Exchange & Cleaning

**<표 14> Probability of Airborne Indium Concentration Exceeding OEL
in Display Industry**

Process	n	Occupational Exposure Limit, 10 μg/m³				
		< 10%	10~50%	50~100%	1~2 excess	> 2 excess
Target Exchange						
Company A-1	4	2(50.0%)	2(50.0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Company A-2*	4	2(50.0%)	0(0%)	1(25.0%)	0(0%)	1(25.0%)
Company B	7	6(85.7%)	1(14.3%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Company C	38	28(73.7%)	9(23.7%)	1(2.6%)	0(0%)	0(0%)
Company D	4	2(50.0%)	2(50.0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Total	57	40(70.2%)	14(24.6%)	2(3.5%)	0(0%)	1(1.8%)
Shield, Mask & Carrier Cleaning						
Company F(Disassembly)	15	0(0%)	4(26.7%)	5(33.3%)	3(20.0%)	3(20.0%)
Company G(Disassembly)	7	1(14.3%)	6(85.7%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Company F(Washing)	9	1(11.1%)	5(55.6%)	2(22.2%)	0(0%)	1(11.1%)
Company G(Washing)	4	1(25.0%)	1(25.0%)	0(0%)	0(0%)	2(50.0%)
Company F(Blasting)	4	0(0%)	0(0%)	1(25.0%)	0(0%)	3(75.0%)
Company G(Blasting)	7	2(28.6%)	5(71.4%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Total	46	5(10.9%)	21(45.7%)	8(17.4%)	3(6.5%)	9(19.6%)
Target Cleaning						
Company H(Manager etc.)	2	0(0%)	2(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Company H(Grinding&blast)	3	0(0%)	2(66.7%)	0(0%)	0(0%)	1(33.3%)
Company E(Cleaning etc.)	3	1(33.3%)	2(66.7%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Company H(Cleaning etc.)	2	0(0%)	2(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Company H(Finishing)	6	5(83.3%)	1(16.7%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
Total	16	6(37.5%)	9(56.3%)	0(0%)	0(0%)	1(6.3%)
Total	119	51(42.9%)	44(37.0%)	10(8.4%)	3(2.5%)	11(9.2%)

* ITO Target Exchange & Cleaning

2.2. 호흡성 인듐 노출평가

디스플레이 제조업 인듐 취급근로자의 호흡성 인듐 노출평가 결과는 표 15, 16과 같다. 호흡성 인듐의 노출농도 수준은 $0.01 \sim 419.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=121$)로 폭넓은 노출 특성을 보여주고 있으며, 인듐 취급근로자의 23.9%(29명)가 노출기준을 초과하였다. 디스플레이 제조업 노출평가 자료의 기하평균은 $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 일본 후생노동성의 노출기준 미만이었으나, 산술평균은 $13.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 디스플레이 제조업의 sputter 부품(shield, mask, carrier) 세척공정의 근로자가 호흡성 인듐의 기하평균이 $8.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게 노출되고 있으며, 타겟 교환공정 근로자가 $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮게 노출되는 것으로 평가되었다. 디스플레이 제조업 인듐 취급 근로자의 기하평균 결과는 3개 공정 모두 노출기준을 미만이었으나 산술평균은 sputter 부품(shield, mask, carrier) 세척공정($23.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 타겟 세척공정($12.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 일본 후생노동성의 노출기준 $10.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다.

타겟 교환공정 인듐 취급근로자의 호흡성 인듐의 노출수준은 $0.01 \sim 34.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=59$)이며, 인듐 취급근로자의 약 13.6%(8명)이 일본 후생노동성의 노출기준을 초과하였다. 타겟 교환공정 호흡성 인듐 노출평가 자료의 기하평균($1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준을 미만이며, 근로자의 최고 노출농도는 $34.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 3.4배를 초과하였다. 연구대상 사업장 중 A-2, B, C 사업장 근로자의 일부 호흡성 인듐은 노출기준을 초과하였다. A-2 사업장 인듐 취급근로자의 호흡성 인듐 노출수준은 $2.1 \sim 30.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=4$)로 근로자의 25.0%(1명)이 노출기준을 초과하였다. B 사업장의 노출수준은 $0.3 \sim 18.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=8$)로 근로자의 14.3%(1명)이 노출기준을 초과하였으며, C 사업장의 노출수준은 $0.01 \sim 18.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (39)로 근로자의 15.8%(6명)이 호흡성 인듐 노출기준을 초과하였다. C 사업장은 협력업체를 통해 sputter를 관리함으로서 빠른 시간 내에 sputter를 수리하거나 타겟을 교체해야 하기 때문에 ITO 또는 IZO 분진관리가 소홀하였기 때문에 호흡성 인듐에 가장 높게 노출되는 것으로 판단된다.

타겟 부품(shield, mask, carrier) 세척작업 인듐 취급근로자의 호흡성

인듐 노출수준은 $1.1 \sim 419.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=46$)이었으며, 인듐 취급근로자의 36.9%(17명)가 노출기준을 초과하였다. 노출평가 자료의 기하평균은 $8.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으나 산술평균은 $23.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였으며, 근로자의 최고 노출농도는 $419.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 41.9배를 초과하였다. F 사업장의 호흡성 인듐 노출수준은 $1.9 \sim 24.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=28$)로 인듐 취급근로자의 46.4%(13명)가 노출기준을 초과하였다. F 사업장의 기하평균 결과 노출기준을 초과한 공정은 분해공정($14.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 블라스팅 공정($14.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이며, 질산세척공정($5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준 미만이었다. G 사업장의 호흡성 인듐 노출수준은 $1.1 \sim 419.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=18$)이며, 근로자의 22.2%(4명)가 노출기준을 초과하였다. 질산세척공정은 기하평균($15.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($30.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 모두 노출기준을 초과하였으며, 분해 공정에서는 산술평균($62.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 노출기준을 초과하였다. 그러나 블라스팅 공정은 노출기준 미만이었다.

타겟 세척작업 인듐 취급근로자의 호흡성 인듐의 노출수준은 $0.1 \sim 113.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 근로자의 25.0%(4명)가 노출기준을 초과하였다. 타겟 세척작업 호흡성 인듐 노출평가 자료의 기하평균은 $2.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으나 산술평균은 $12.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 타겟 세척작업 근로자의 최고 노출농도는 $113.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 11.3배를 초과하였다. 타겟 세척작업에서 일본 후생노동성의 노출기준을 초과한 공정은 H 사업장의 표면연마 및 블라스팅 공정 그리고 마무리공정이다. 타겟 표면연마공정 근로자의 호흡성 인듐 노출수준은 $4.0 \sim 113.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=3$)이며, 근로자의 66.7%(2명)이 노출기준을 초과하였다. 노출평가 자료의 기하평균($17.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($42.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 결과는 노출기준을 초과하였다. 타겟 세척작업 마무리공정의 기하평균($1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($6.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준 미만이었으나 연구 대상 근로자의 25%(2명)는 노출기준을 초과하였다. 마무리공정은 클린룸에서 작업이 이루어지기 때문에 작업 중 ITO, IZO 분진에 노출되기는 매우 어렵다. 따라서 노출기준을 초과한 2명 근로자의 노출농도($12.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $26.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 노출기준 미만의 4명 근로자의 노출농도($0.06 \sim 0.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 비교해 보면 외부의 영향으로 노출기준을 초과한 것을 알 수 있다.

일본 후생노동성의 호흡성 인듐 노출기준인 $10.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 0.5배에 해당하는 $5.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 호흡성 인듐에 노출되고 있는 근로자는 타겟 교환 공정 22.0%, sputter 부품(shield, mask, carrier) 세척공정 65.2% 그리고 타겟 세척공정 37.5%이었다.

<표 15> Respirable Indium Concentration of the Display Industry

Process	n	Airborne Indium Concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$							
		AM	SD	GM	GSD	Med.	Min.	Max.	
Target Exchange									
Company A-1	4	1.6	0.9	1.3	2.5	2.0	0.3	2.2	
Company A-2*	4	10.3	13.5	5.8	3.3	4.4	2.1	30.5	
Company B	8	3.2	6.1	1.2	3.7	1.0	0.3	18.1	
Company C	38	4.8	8.6	0.7	21.0	1.1	0.01	34.2	
Company D	5	4.1	2.8	3.4	2.1	3.3	1.5	7.8	
Total	59	4.7	8.1	1.2	7.9	1.6	0.01	34.2	
Shield, Mask & Carrier Cleaning									
Company F(Disassembly)	16	18.8	14.1	14.9	2.0	14.4	5.3	55.5	
Company G(Disassembly)	7	62.0	158.0	4.4	8.0	1.9	1.1	419.4	
Company F(Washing)	9	7.0	7.0	5.1	2.2	4.7	1.9	24.3	
Company G(Washing)	4	30.3	43.4	15.5	3.4	9.6	6.7	95.2	
Company F(Blasting)	3	43.2	65.3	14.2	6.7	8.1	3.0	118.5	
Company G(Blasting)	7	6.0	3.5	5.2	1.9	5.0	2.0	12.1	
Total	46	23.7	63.8	8.6	3.4	7.8	1.1	419.4	
Target Cleaning									
Company H(Manager etc.)	2	5.6	1.5	5.5	1.3	5.6	4.6	6.7	
Company H(Grinding&blast)	3	42.9	61.4	17.1	5.6	11.0	4.0	113.8	
Company E(Cleaning etc.)	3	3.0	1.6	2.6	2.1	3.9	1.1	4.0	
Company H(Cleaning etc.)	2	5.3	1.5	5.2	1.3	5.3	4.2	6.4	
Company H(Finishing)	6	6.8	10.9	1.1	10.1	0.5	0.1	26.7	
Total	16	12.5	27.8	2.3	6.2	4.1	0.1	113.8	
Total	121	13.6	41.6	2.9	7.1	3.9	0.01	419.4	

* ITO Target Exchange & Cleaning

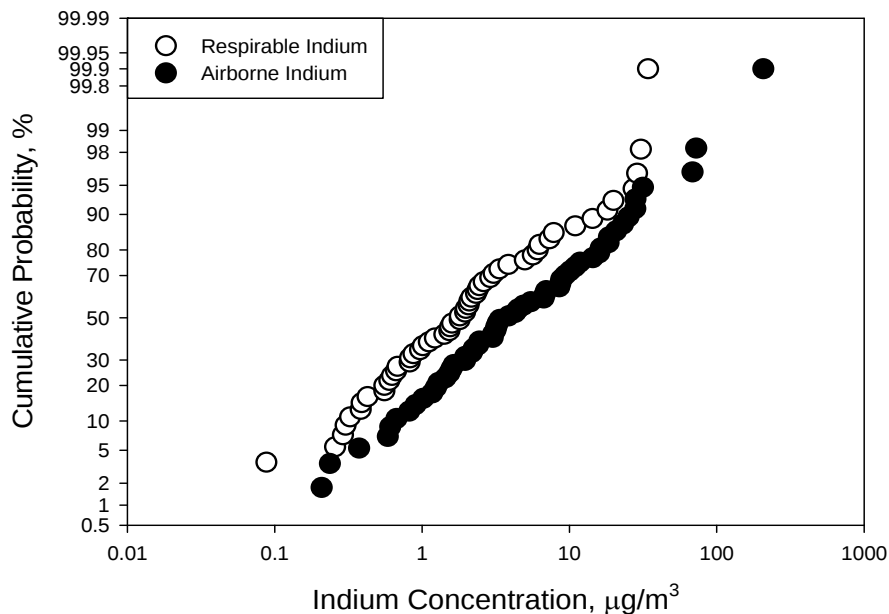
**<표 16> Probability of Respirable Indium Concentration Exceeding
OEL in Display Industry**

Process	n	Occupational Exposure Limit, 10 µg/m³					
		< 10%	10~50%	50~100%	1~2 excess	> 2 excess	
Target Exchange							
Company A-1	4	1(25.0%)	3(75.0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	
Company A-2*	4	0(0%)	2(50.0%)	1(25.0%)	0(0%)	1(25.0%)	
Company B	8	4(57.1%)	3(42.9%)	0(0%)	1(14.3%)	0(0%)	
Company C	38	18(47.4%)	12(31.6%)	2(5.3%)	3(7.9%)	3(7.9%)	
Company D	5	3(60.0%)	2(40.0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	
Total	59	26(44.1%)	22(37.3%)	3(5.1%)	4(6.8%)	4(6.8%)	
Shield, Mask & Carrier Cleaning							
Company F(Disassembly)	16	0(0%)	0(0%)	6(35.5%)	4(25.0%)	6(37.5%)	
Company G(Disassembly)	7	0(0%)	6(85.1%)	0(0%)	0(0%)	1(14.3%)	
Company F(Washing)	9	0(0%)	6(66.7%)	1(11.1%)	1(11.1%)	1(11.1%)	
Company G(Washing)	4	0(0%)	0(0%)	2(50.0%)	1(25.0%)	1(25.0%)	
Company F(Blasting)	3	0(0%)	1(33.3%)	1(33.3%)	0(0%)	1(33.3%)	
Company G(Blasting)	7	0(0%)	3(42.9%)	3(42.9%)	1(14.3%)	0(0%)	
Total	46	0(0%)	16(34.8%)	13(28.0%)	7(15.2%)	10(21.7%)	
Target Cleaning							
Company H(Manager etc.)	2	0(0%)	1(50.0%)	1(50.0%)	0(0%)	0(0%)	
Company H(Grinding&blast)	3	0(0%)	1(33.3%)	0(0%)	1(33.3%)	1(33.3%)	
Company E(Cleaning etc.)	3	0(0%)	3(100%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)	
Company H(Cleaning etc.)	2	0(0%)	1(50.0%)	1(50.0%)	0(0%)	0(0%)	
Company H(Finishing)	6	4(66.7%)	0(0%)	0(0%)	1(16.7%)	1(16.7%)	
Total	16	4(18.8%)	6(37.5%)	2(12.5%)	2(12.5%)	2(12.5%)	
Total	121	30(24.8%)	44(36.4%)	18(14.9%)	13(10.7%)	16(13.2%)	

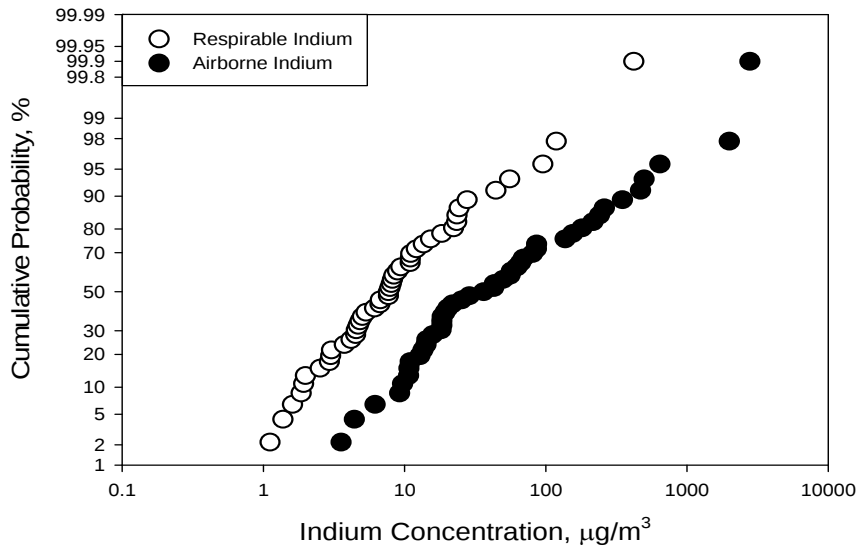
* ITO Target Exchange & Cleaning

그림 32~34는 디스플레이 제조업의 작업특성에 따른 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐과 호흡성 인듐의 누적도수분포표이다. 타겟 교환과정(그림 32)에서 타겟 또는 sputter 부품에 부착되어 있는 오염물질을 제거하는 과정에서 일부 근로자가 고농도의 인듐에 노출되고 있으며, sputter 부품 세척과정(그림 33)은 블라스팅 작업에서 고농도의 되고 있었다. 타겟 세정 공정(그림 34)은 IZO 타겟의 오염물을 제거하는 블라스팅 작업과 그리인딩 작업 근로자가 고농도의 인듐에 노출되며, 이외의 작업에서는 낮은 농도의 인듐에 노출되고 있어 동일한 작업에서 두 개의 노출 특성으로 구분할 수 있다.

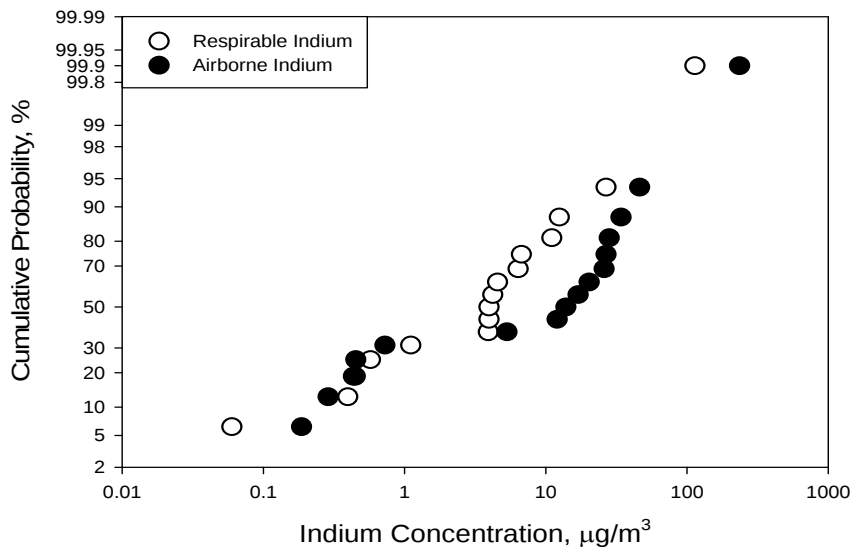
그림 35는 디스플레이 제조업 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐과 호흡성 인듐 농도를 나타내는 누적도수분포표이다. 디스플레이 제조업의 공기 중 인듐과 호흡성 인듐의 노출평가 자료는 대수정규분포 하였으며, 대수변환 된 자료의 공기 중 인듐 기울기 값(r^2)은 0.921($n=119$)이며 호흡성 인듐 기울기 값(r^2)은 0.993($n=121$)이다.



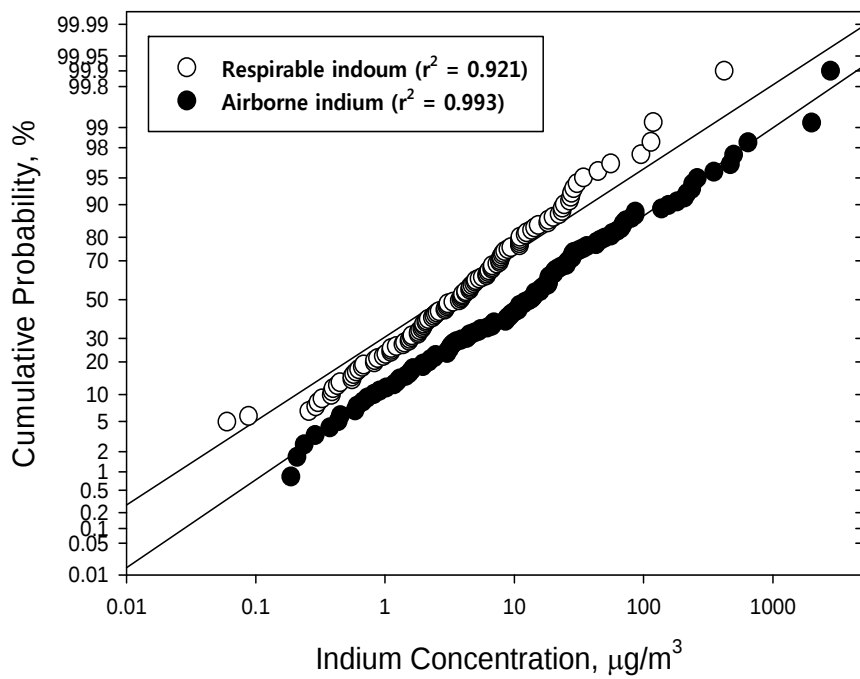
<그림 32> Cumulative probability of indium concentration in the target exchange process



<그림 33> Cumulative probability of indium concentration in the shield, mask & carrier cleaning process



<그림 34> Cumulative probability of indium concentration in the target cleaning process



<그림 35> Cumulative probability of indium concentration in the display companies

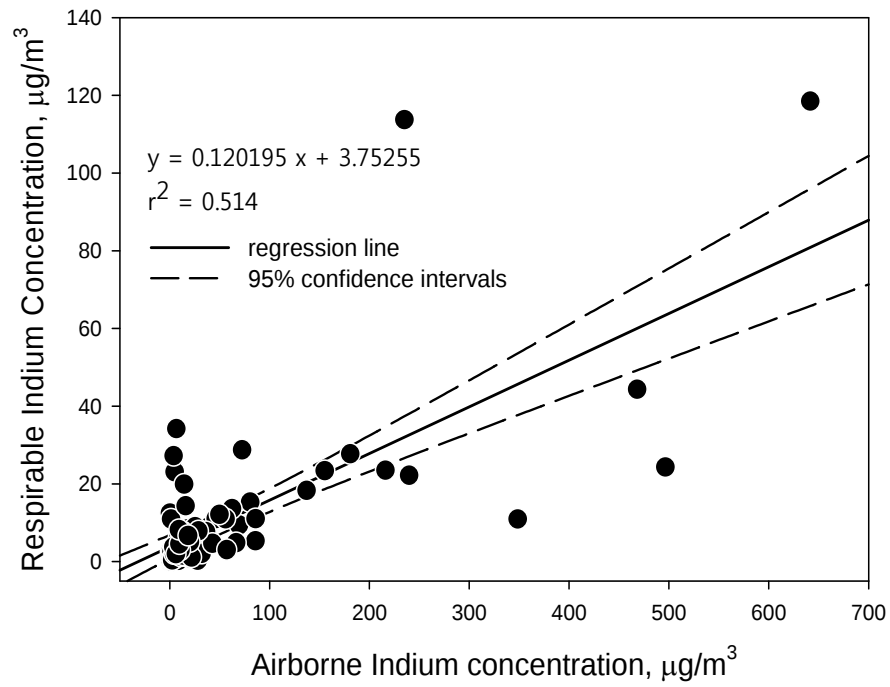
2.3. 인듐의 크기별 비교

본 연구에서는 시료채취 과정에서 공기 중 인듐과 호흡성 인듐 간의 상관관계를 비교하기 위하여 일부 사업장(또는 공정)의 근로자의 호흡기 위치에서 공기 중 인듐과 호흡성 인듐 시료를 동시에 채취하여 표 17, 그림 36과 같은 결과를 얻었다. 공기 중 인듐과 호흡성 인듐 시료간의 상관관계 비교하기 위한 공기 중 인듐 시료의 노출수준은 0.19~641.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (기하평균 12.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 산술평균 52.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 호흡성 인듐 노출수준은 0.06~118.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (기하평균 3.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 산술평균 9.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었다.

디스플레이 제조업 모든 공정에서 채취된 공기 중 인듐과 호흡성 인듐 간의 상관관계식은 $y=0.120195x + 3.75255$, $r^2=0.514$ 이었다

<표 17> Concentration for the Comparative Evaluation of Airborne Indium and Respirable Indium in the Display Industry

Sample type	No. of Sample	Indium Concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
		AM	SD	GM	GSD	Range
Airborne Indium	87	52.8	110.8	12.6	6.2	0.19-641.5
Respirable Indium	87	9.5	18.2	3.9	4.5	0.06-118.5



<그림 36> Correlation between airborne indium and respirable indium in the display industry

2.4. 인듐 입경분포 및 공기역학적 질량중위직경(MMAD)

인듐분진의 입경분포와 공기역학적 질량중위직경을 평가하기 위해 디스플레이 제조업체 2개소와 sputter 부품(shield, mask, carrier) 세척업체 2개소를 대상으로 분진 크기별 분포를 평가하였다. 대상 공정은 타겟 교환, 타겟 세척, sputter 부품 분해, carrier bar 세척, 블리스팅, 질산세척 등 6개 공정에서 평가하였다.

2.4.1. 인듐의 공기역학적 질량중위직경

연구대상 사업장 및 공정에서 발생하는 인듐분진의 공기역학적 질량중위직경을 분석한 결과는 표 18과 같다. 디스플레이 제조업 인듐 취급공정 중에서 분진의 크기가 가장 큰 공정은 타겟 교환공정으로 공기역학적 질량중위직경은 $34.53\ \mu\text{m}$ 이었으며, sputter 부품(shield, mask, carrier) 세척공정과 타겟 세척공정에서는 $10\ \mu\text{m}$ 이하의 호흡성 인듐에 근로자가 노출되고 있는 것으로 평가되었다. 디스플레이 제조업의 인듐분진 관리의 호흡성 인듐으로 관리하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

Sputter에서 발생한 ITO 또는 IZO 이온이 유리면에 증착하지 못하고 되돌아오며(back scattering) 이온 입자들이 서로 뭉쳐지며 큰 입자로 만들어진다. 이렇게 만들어진 오염물을 제거하기 위해 TFT sputter와 CF sputter 개방하여 물리적인 힘을 가해 오염물을 제거하기 때문에 타겟 교환공정에서는 타 공정에 비해 큰 분진이 발생하고 있다.

<표 18> Mass Median Aerodynamic Diameter of the Display Process

Process	MMAD	GSD
Target Exchange	34.53	5.85
Target Cleaning	8.08	3.45
Disassembly (Shield, Mask & Carrier Cleaning)	8.44	3.07
Carrier bar cleaning (Shield, Mask & Carrier Cleaning)	6.30	2.84
Blasting (Shield, Mask & Carrier Cleaning)	5.60	1.97
Acid washing (Shield, Mask & Carrier Cleaning)	11.02	2.40

2.4.2. 인듐의 입경분포

디스플레이 제조업 6개 공정에서 발생하는 인듐분진의 입경분포를 평가는 marple personal cascade impactor를 이용하여 평가하였다. 각 공정에서 채취된 시료는 1) impactor 각 단의 입경 크기별 함유량 비율(%)을 구하고, 2) 각 단의 인듐 함유량(%)에 보정계수로 보정하여 각 공정의 질량(mass) 입경분포(%) 계산하였다. 3) impactor 각 단의 인듐을 분석하여 정확한 질량(μg)을 구한 후, 계산식을 이용하여 입자수(Particles) 입경분포(%) 계산하였다. 각 공정별 인듐의 입경분포를 평가하기 위해 $3.5 \mu\text{m}$ 이하(5 stage~back filter), $9.8 \mu\text{m}$ 이하(3 stage~back filter) 그리고 $10 \mu\text{m}$ 이상(1~2 stage)의 분진으로 구분하여 인듐 재생업의 공정별 평가를 한 결과 표 19와 같다.

디스플레이 제조업의 질량 입경분포를 보면 $3.5 \mu\text{m}$ 이하의 인듐분진 분포비율이 가장 큰 공정은 carrier bar 세척공정(46.3%), sputter 부품 해체공정(40.1%), 블라스팅 공정(29.1%), 타겟 세척공정(20.4%), 타겟 교환공정(8.8%) 그리고 질산세척공정(0.75%)의 순이었다. $9.8 \mu\text{m}$ 이하 인듐분진의 분포비율은 블라스팅 공정(87.9%), 질산세척공정(82.0%), carrier bar 세척

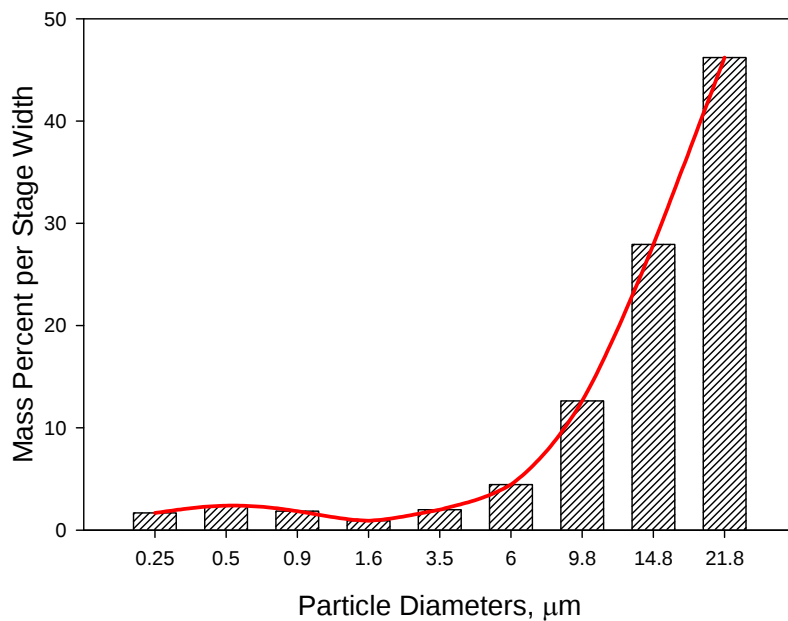
공정(80.1%), 타겟 세척공정, sputter 부품 해체공정(70.6%) 그리고 타겟 교환공정(25.9%)의 순이었다. 타겟 교환공정은 9.8 μm 이상 인듐분진의 분포비율은 74.1%로 매우 큰 인듐분진의 분포비율이 높게 평가되었다. 입경분포 비율이 큰 원인은 ITO, IZO 이온이 유리면에 증착하지 못하고 back scattering에 의해 타겟을 오염시키거나 shield, mask 등에 증착하여 이를 제거하는 과정에서 물리적인 힘으로 인위적인 작업하기 때문이다.

입자수 입경분포를 보면 디스플레이 제조업 6개 공정에서 발생하는 인듐 분진 입자의 크기는 3.5 μm 이하의 작은 분진이 99.9% 이상 발생하는 것을 알 수 있다. 9.8 μm 이상 크기의 인듐분진이 타겟 교환공정(0.01%)과 질산 세척공정(0.02%)에서 디스플레이 제조업 타 공정에 비해 상대적으로 많이 발생하고 있다. 표 19의 질량 입경분포를 보면 9.8 μm 이상 크기의 인듐 분진이 모든 공정(12.06~74.14%)에서 발생하는 것을 알 수 있으며, 입자수 입경분포 결과에서 타겟 교환공정과 질산세척공정의 공기역학적 질량중위 직경은 34.53 μm 와 11.02 μm 의 큰 인듐입자가 발생하는 것으로 평가되었다. 타겟 교환공정과 질산세척공정 뿐만이 아니라 디스플레이 제조업 모든 공정에서 발생하는 큰 크기의 분진이 공기역학적 질량중위직경과 질량 입경분포에 영향을 미친 것으로 판단된다.

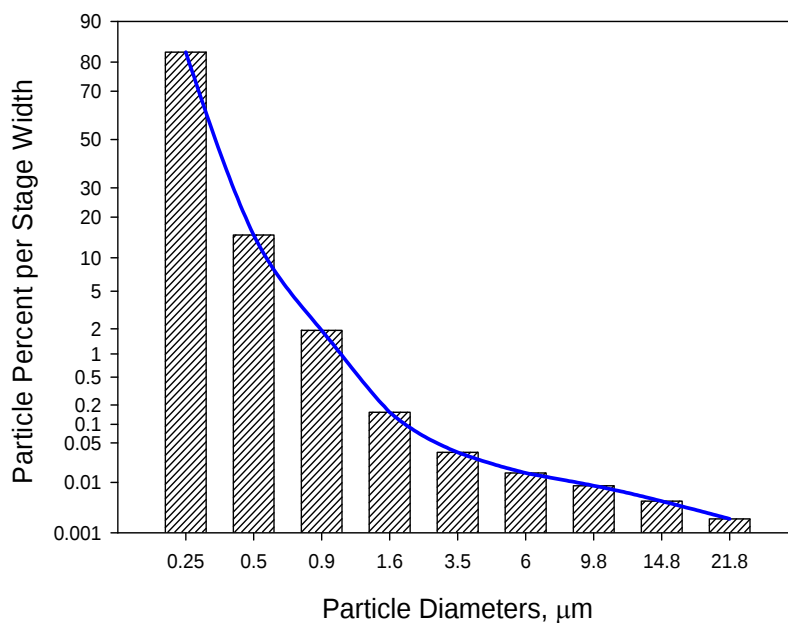
디스플레이 제조업에서 발생하는 인듐분진의 공기역학적 질량중위직경과 입경분포(질량 및 입자수)를 볼 때, 모든 공정의 인듐 취급근로자는 호흡성 인듐에 노출되고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 인듐 재생업의 사업장 분진 관리에 호흡성 인듐을 관리하는 것이 타당하다.

<表 19> Particle Size Distribution of the Panel Display Industry

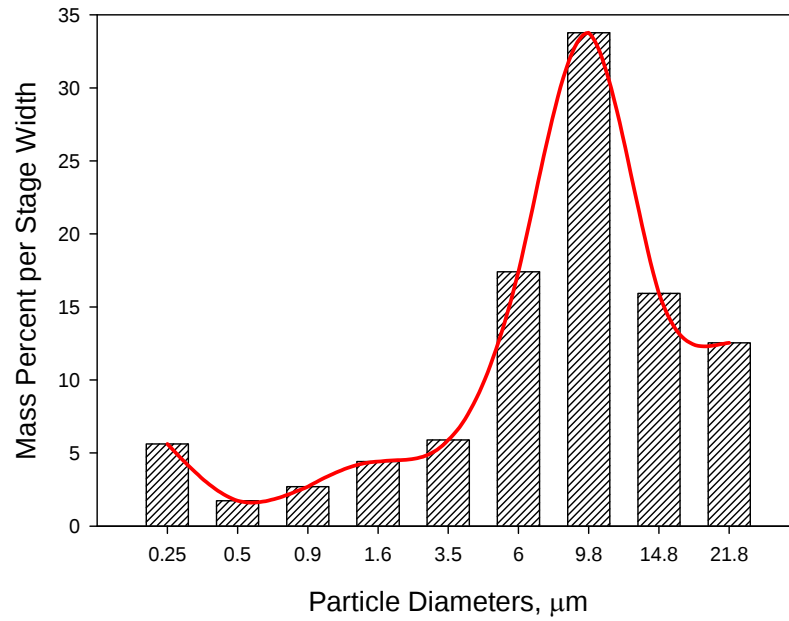
	Mass, %			Particles, %		
	<3.5	<9.8	>9.8	<3.5	<9.8	>9.8
Target Exchange	8.79	25.86	74.14	99.97	99.99	0.01
Target Cleaning	20.35	71.53	28.47	99.97	100.00	0.00
Disassembly	33.13	70.63	29.37	99.91	100.00	0.00
Carrier bar cleaning	40.35	80.69	19.31	99.92	100.00	0.00
Blasting	29.13	87.94	12.06	99.90	100.00	0.00
Acid washing	0.75	81.99	18.01	98.19	99.98	0.02



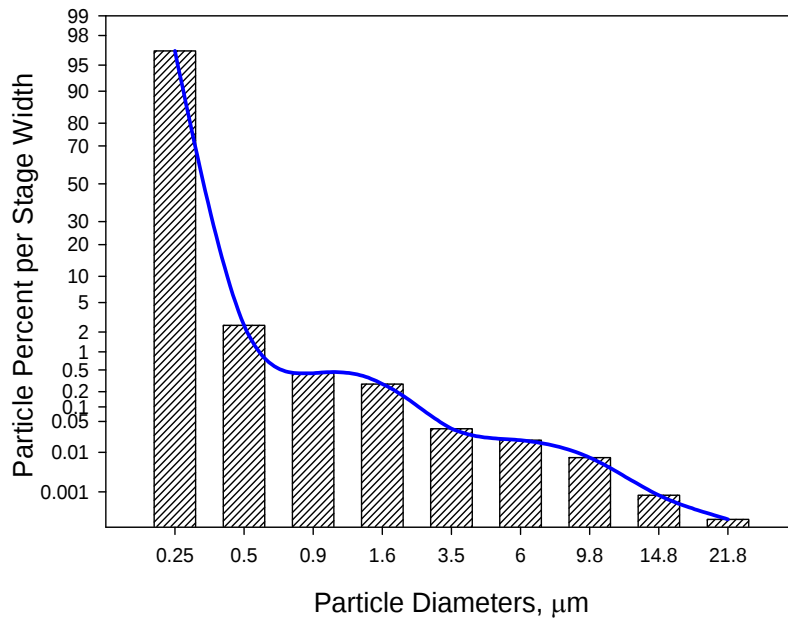
<그림 37> Mass percent per stage width at each particle diameters of the exchange targets process



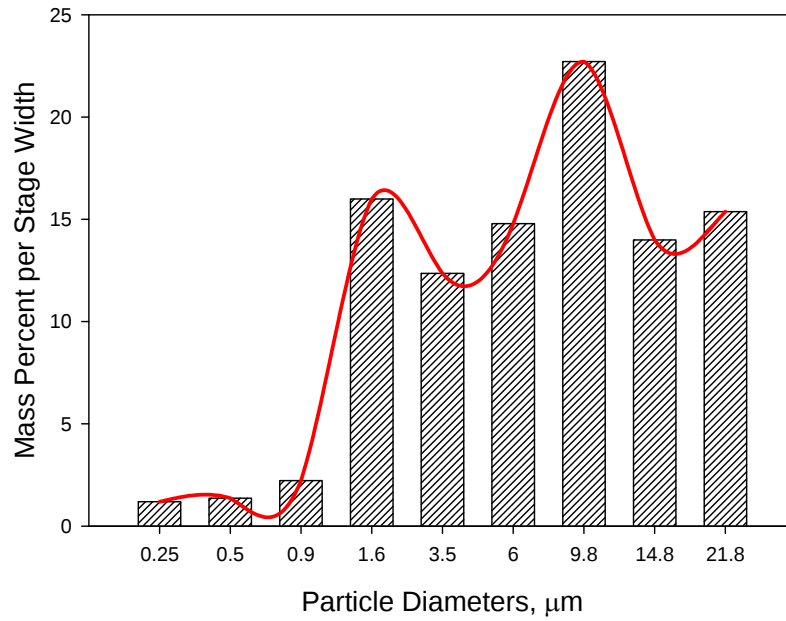
<그림 38> Particle size distribution of the exchange targets process



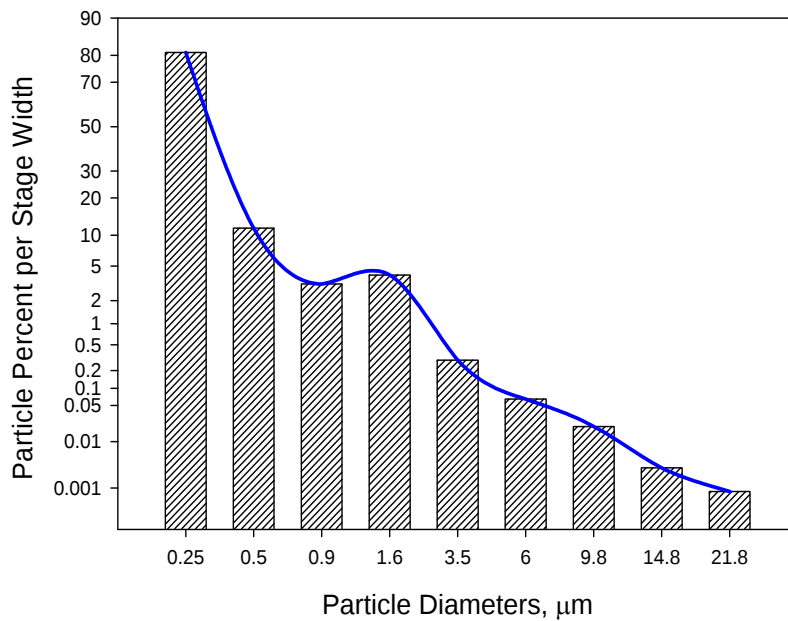
<그림 39> Mass percent per stage width at each particle diameters of the target cleaning process



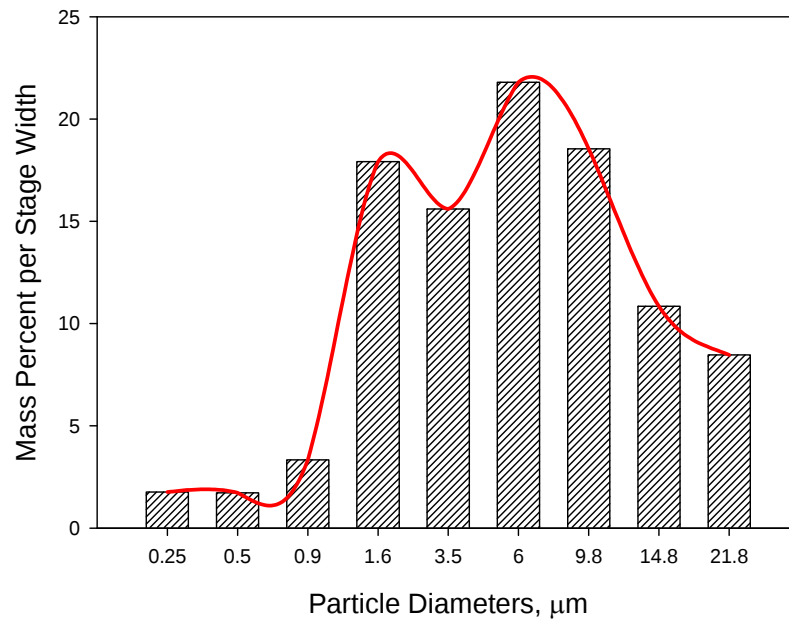
<그림 40> Particle size distribution of the target cleaning process



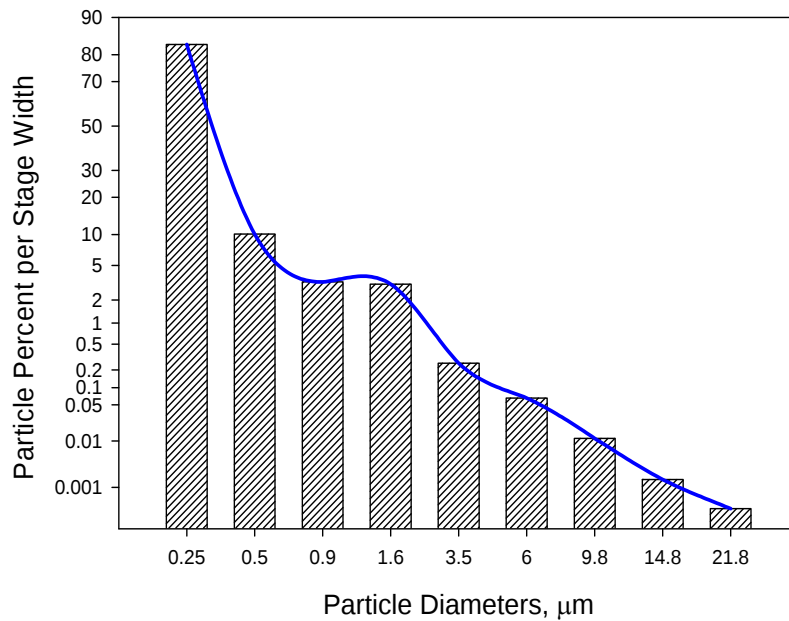
<그림 41> Mass percent per stage width at each particle diameters of the disassembly process



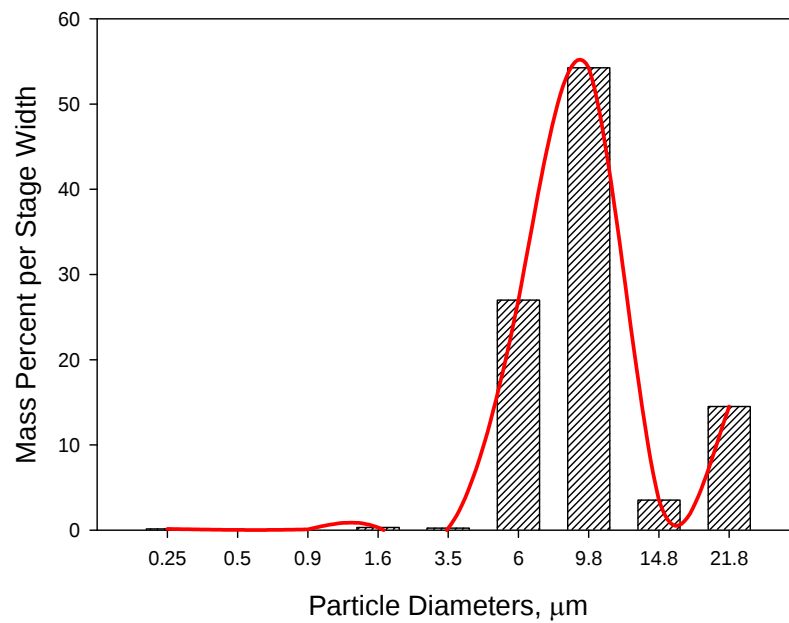
<그림 42> Particle size distribution of the disassembly process



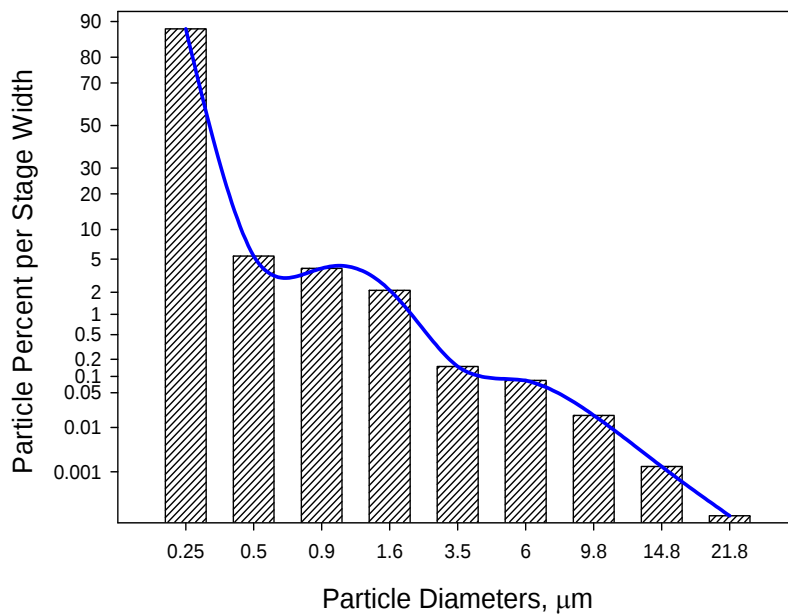
<그림 43> Mass percent per stage width at each particle diameters of the carrier bar cleaning process



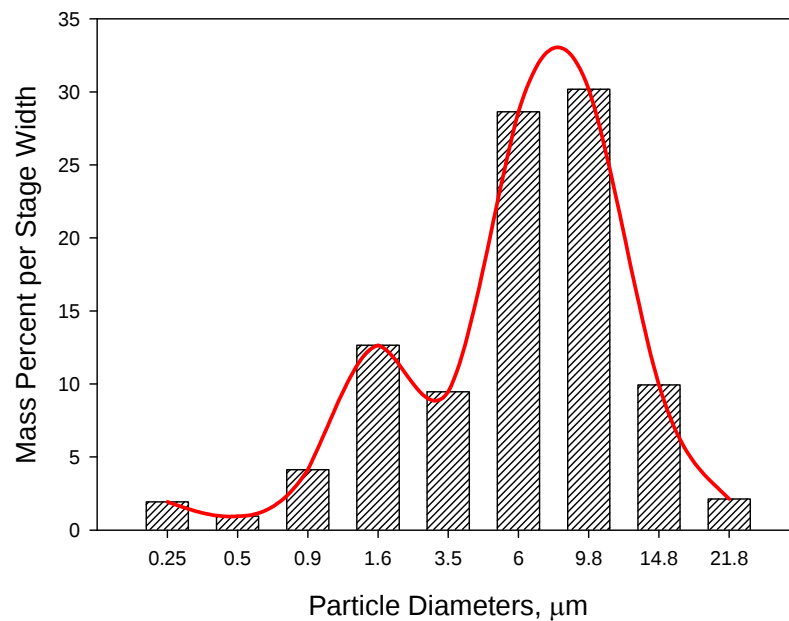
<그림 44> Particle size distribution of the carrier bar cleaning process



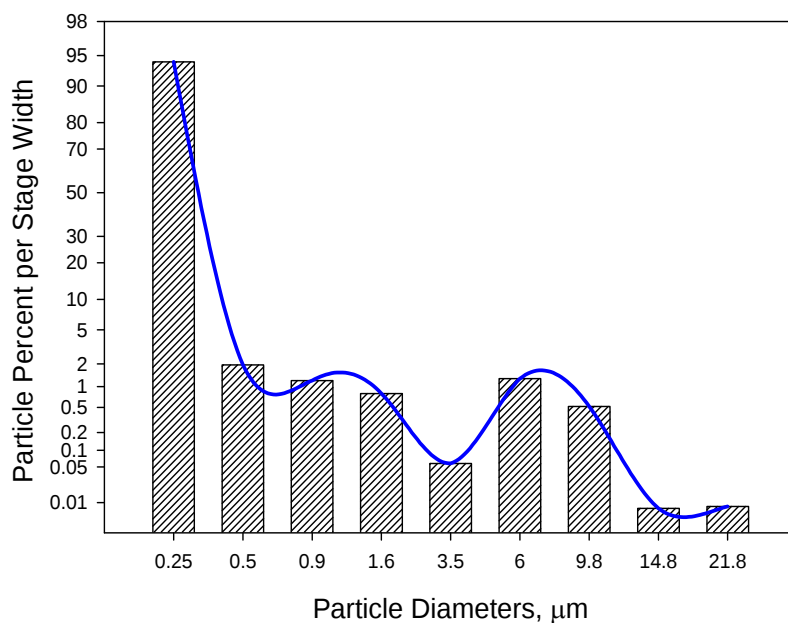
<그림 45> Mass percent per stage width at each particle diameters of the blasting process



<그림 46> Particle size distribution of the blasting process



<그림 47> Mass percent per stage width at each particle diameters of the acid washing process



<그림 48> Particle size distribution of the acid washing process

2.5. 혈청인듐 평가

디스플레이 제조업 근로자 및 관리자 196명을 대상으로 혈청인듐을 평가한 결과는 표 20과 그림 49와 같다. 디스플레이 제조업 근로자 196명 중 31명의 근로자가 혈청 중에 인듐이 검출되었으며, 혈청인듐 노출수준은 ND~16.2 $\mu\text{g/L}$ (n=196)이었다. 혈청인듐이 검출된 31명 근로자의 혈청인듐 노출수준은 0.06~16.2 $\mu\text{g/L}$ (n=31)이었으며, 기하평균(1.0 $\mu\text{g/L}$)과 산술 평균(2.2 $\mu\text{g/L}$)은 일본 후생노동성의 생물학적 노출기준인 3.0 $\mu\text{g/L}$ 미만으로 평가되었다. 디스플레이 제조업 근로자 3.1%(6명)은 혈청인듐의 생물학적 노출기준을 초과하였다.

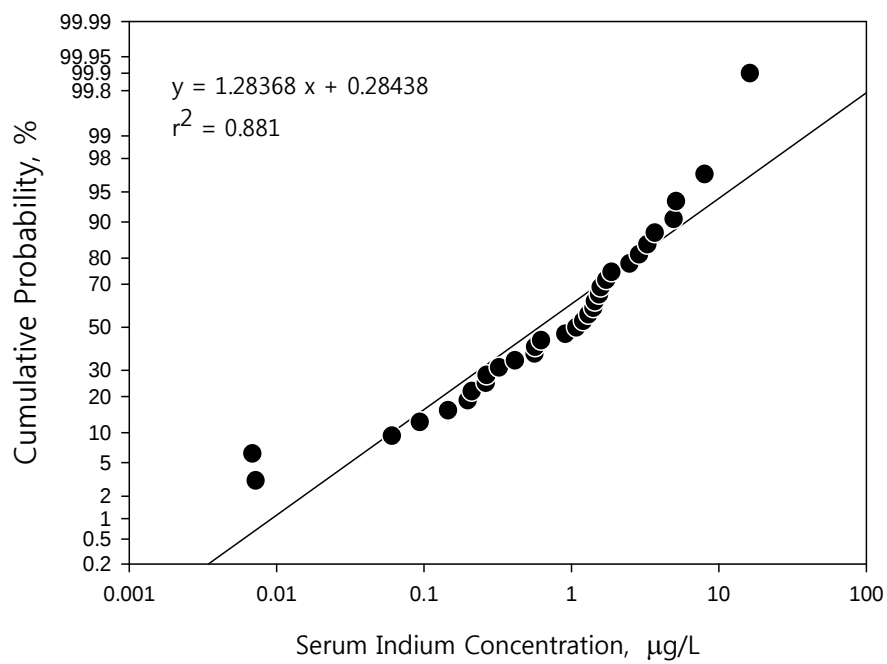
디스플레이 제조업체 A, B, C 그리고 D 사업장 근로자에게서는 혈청인듐에 검출되지 않았으며, sputter 부품을 세척하는 F 사업장 근로자의 63.0%(17명)이 혈청인듐이 검출되었으나 생물학적 노출기준 이하였다. 그러나 G 사업장은 근로자 34명 중 13명(38.2%)에게서 혈청인듐이 검출되었으며, 혈청인듐이 검출된 근로자 중 6명(17.6%)의 근로자가 생물학적 노출기준을 초과하였다.

디스플레이 제조업 근로자 및 관리자 196명 중 혈청인듐이 검출된 31명 근로자의 혈청인듐 자료는 대수정규분포를 하며, 누적도수분포표에 따른 관계식은 $y=1.28368x - 0.28438$, $r^2=0.881$ 이었다.

<표 20> Serum Indium Concentration of the Display Companies

Company	n	Serum Indium Concentration, $\mu\text{g/L}$						
		AM	SD	GM	GSD	Med.	Min.	Max.
Company A	0(30)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Company B	0(30)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Company C	0(30)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Company D	0(30)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Company E	1(15)	0.2	ND	ND	ND	ND	ND	0.2
Company F	17(27)	1.1	0.7	0.8	2.6	1.2	ND	2.9
Company G	13(34)	3.7	4.5	1.4	5.5	2.9	ND	16.2
Total	31(196)	2.2	3.2	1.0	3.8	1.3	ND	16.2

*ND = 0.01 $\mu\text{g/L}$



<그림 49> Cumulative probability of serum indium in the
 display companies

3. 인듐 재생업

3.1. 공기 중 인듐 노출평가

인듐 재생업은 5개의 작업공정으로 분류하여 평가하였으며, 각 연구대상 사업장의 인듐 회수공법 및 특성에 따라 작업공정이 조금씩 다르게 운영되고 있다. 인듐 재생업 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출평가 결과는 표 21, 22와 같다. 인듐 재생업 근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $0.5 \sim 2089.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=68$)로 매우 폭 넓은 노출 특성을 보여주고 있으며, 인듐 취급근로자의 38.3%(26명)이 ACGIH 노출기준인 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 노출평가 자료의 기하평균은 $54.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으나 산술평균은 $225.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 인듐 재생업 5개 공정 중 기하평균이 노출기준을 초과한 공정은 분쇄공정($583.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 용해공정($105.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이며, 분쇄공정의 공기 중 인듐 농도가 가장 높았고, 주조공정($28.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 가장 낮게 평가되었다. 산술평균이 노출기준을 초과한 공정은 분쇄공정($901.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 용해공정($153.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 그리고 전기분해공정($124.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이며, 분쇄공정의 공기 중 인듐 농도가 가장 높았고, 주조공정($59.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 가장 낮게 평가되었다.

ITO, IZO 타겟, 슬러지 등의 원료를 분말형태로 만드는 분쇄공정 근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $81.0 \sim 2089.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=11$)로 인듐 취급 근로자의 90.9%(10명)이 노출기준을 초과하였다. 분쇄공정 노출평가 자료의 기하평균($583.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($776.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준을 초과하였으며, 분말공정 근로자의 최고 노출농도는 $2089.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 20배를 초과하였다.

용해공정 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $19.7 \sim 308.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=4$)이었으며, 근로자의 75.0%(3명)이 노출기준을 초과하였다. 용해공정 노출평가 자료의 기하평균($105.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($153.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준을 초과하였으며, 근로자의 최고 노출농도는 $308.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 3배를 초과하였다. 용융해공정의 근로자가 고농도의 인듐에 노출되고 있는 원인은 분쇄공정에서 원료(ITO 분말, 슬러지 등)를 계량, 운반 및 용해탱크에 원료를 투입하는 과정에서 고농도의 인듐에 노출되고 있다.

치환공정 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $5.9 \sim 1003.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$

(n=24)로 근로자의 25.0%(6명)이 노출기준을 초과하였다. 치환공정 노출평가 자료의 기하평균($34.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($94.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준 미만으로 평가되었다. 근로자의 최고 노출농도는 $1003.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 10배를 초과하였으며, 근로자가 고농도의 인듐에 원인은 근로자는 짧은 시간이지만 파쇄작업을 병행하고 있어 높게 평가 되었다. 치환공정은 완전한 습식공정으로 아연과 인듐이 치환하는 과정에서 인듐이 함유된 미스트가 발생하여 근로자들이 인듐에 노출된다.

전기분해공정 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $0.5 \sim 643.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=13)로 근로자의 30.8%(5명)이 노출기준을 초과하였다. 전기분해 공정 노출평가 자료의 기하평균은 $32.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으나 산술평균은 $124.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 근로자의 최고 노출농도는 $643.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 6.4배를 초과하였다. 건식 전기분해 공정의 인듐 취급근로자의 노출수준 $0.5 \sim 643.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=9)로 5명의 근로자가 노출기준을 초과하였으며, 습식 전기분해공정 인듐 취급근로자의 노출수준 $1.7 \sim 44.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=4)로 노출기준 미만으로 평가되었다.

주조공정 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $5.6 \sim 343.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=16)이었으며, 근로자의 12.5%(2명)이 노출기준을 초과하였다. 주조공정 노출평가 자료의 기하평균($28.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($59.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준 미만으로 평가되었으며, 근로자의 최고 노출농도는 $343.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 3.4배를 초과하였다.

미국 ACGIH의 공기 중 인듐 노출기준인 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 0.5배에 해당하는 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 공기 중 인듐에 노출되고 있는 근로자는 분쇄공정 100%, 용해공정 75.0%, 치환공정 25.0%, 전기분해공정 46.2% 그리고 주조공정 18.8%이었다.

<표 21> Airborne Indium Concentration of the Indium Recycling Industry

Process	n	Airborne Indium Concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$						
		AM	SD	GM	GSD	Med.	Min.	Max.
Pulverization	11	901.5	776.1	583.6	2.9	641.3	81.0	2089.9
Dissolution	4	153.8	118.6	105.7	3.3	143.7	19.7	308.2
Substitution	24	94.0	205.4	34.0	3.6	29.8	5.9	1003.5
Electrolysis	13	124.6	187.3	32.4	8.1	44.5	0.5	643.4
Casting	16	59.3	97.4	28.4	3.1	23.0	5.6	343.9
Total	68	225.8	451.1	54.7	5.7	38.2	0.5	2089.9

<표 22> Probability of Airborne Indium Concentration Exceeding OEL in Indium Recycling Industry

Process	n	Occupational Exposure limit, $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$				
		< 10%	10~50%	50~100%	1~2 excess	> 2 excess
Pulverization	11	0(0%)	0(0%)	1(9.1%)	1(9.1%)	9(81.8%)
Dissolution	4	0(0%)	1(25.0%)	0(0%)	2(50.0%)	1(25.0%)
Substitution	24	2(8.3%)	16(66.7%)	0(0%)	3(12.5%)	3(12.5%)
Electrolysis	13	3(15.4%)	5(38.5%)	1(7.7%)	2(15.4%)	3(15.4%)
Casting	16	2(12.5%)	11(68.8%)	1(6.3%)	0(0%)	2(12.5%)
Total	68	7(10.3%)	33(48.5%)	3(4.4%)	8(11.8%)	18(26.5%)

3.2. 호흡성 인듐 노출평가

인듐 재생업 인듐 취급근로자의 호흡성 인듐 노출평가 결과는 표 23, 24와 같다. 호흡성 인듐의 노출수준은 $0.5 \sim 436.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=69$)으로 매우 폭넓은 노출 특성을 보여주고 있으며, 근로자의 52.1%(36명)이 일본 후생노동성의 노출기준 $10.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 인듐 재생업 노출평가 자료의 기하평균($15.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($63.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준을 초과하였다. 인듐 재생업 5개 공정 중 기하평균이 노출기준을 초과한 공정은 분쇄공정($70.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 용해공정($145.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 그리고 전기분해공정($22.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이며, 분쇄공정의 호흡성 인듐 농도가 가장 높았고, 주조공정($5.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 가장 낮게 평가되었다. 산술평균이 노출기준을 초과한 공정은 분쇄공정($113.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 치환공정($101.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 그리고 전기분해공정($1064.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이며, 분쇄공정의 공기 중 인듐 농도가 가장 높았고, 주조공정($19.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)이 가장 낮게 평가되었다.

인듐 재생업 분쇄공정 인듐 취급근로자의 호흡성 인듐 노출수준은 $0.5 \sim 253.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=14$)로 근로자의 85.7%(12명)이 노출기준을 초과하였다. 분쇄공정 노출평가 자료의 기하평균($70.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($113.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 호흡성 인듐의 노출기준을 초과하였으며, 근로자의 최고 노출농도는 $253.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 25.3배를 초과하였다.

용해공정 인듐 취급근로자의 호흡성 인듐 노출수준은 $15.4 \sim 264.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=3$)이었으며, 근로자의 100%(3명)이 호흡성 인듐 노출기준을 초과하였다. 용해공정 노출평가 자료의 기하평균은 $45.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 산술평균 $101.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 근로자의 최고 노출농도는 $264.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 26.4배를 초과하였다. 용해공정의 근로자가 고농도의 호흡성 인듐에 노출되고 있는 원인은 분쇄공정에서 원료(ITO 분말, 슬러지 등)를 계량, 운반 및 용해탱크에 원료를 투입하는 과정에서 고농도의 호흡성 인듐에 노출되고 있다.

치환공정 인듐 취급근로자의 호흡성 인듐 노출수준은 $1.8 \sim 317.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=24$)이었으며, 근로자의 41.7%(10명)이 노출기준을 초과하였다. 치환

공장 노출평가 자료의 기하평균은 $8.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으나 산술평균은 $26.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 치환공장 근로자의 최고 노출농도는 $317.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 32배를 초과하였다.

전기분해공장 인뿔 취급근로자의 호흡성 인뿔 노출수준은 $1.9 \sim 436.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=13$)이었으며, 인뿔 취급근로자의 53.9%(7명)이 노출기준을 초과하였다. 전기분해공장 노출평가 자료의 기하평균($22.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($106.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 호흡성 인뿔의 노출기준을 초과하였으며, 근로자의 최고 노출농도는 $436.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 43.6배를 초과하였다. 건식 전기분해공정의 인뿔 취급근로자의 노출수준 $4.1 \sim 436.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=8$)로 7명의 근로자가 노출기준을 초과하였으며, 습식 전기분해공장 인뿔 취급근로자의 노출수준 $1.9 \sim 8.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=5$)로 노출기준 미만으로 평가되었다.

주조공장 인뿔 취급근로자의 호흡성 인뿔 노출수준은 $1.3 \sim 128.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($n=15$)이었으며, 근로자의 53.9%(7명)이 노출기준을 초과하였다. 주조공장 노출평가 자료의 기하평균은 $5.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었고, 산술평균은 $19.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 주조공장 근로자의 최고 노출농도는 $128.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준의 약 12.9배를 초과하였다.

일본 후생노동성의 호흡성 인뿔 노출기준인 $10.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 0.5배에 해당하는 $5.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 호흡성 인뿔에 노출되고 있는 근로자는 분쇄과정 85.7%, 용해과정 100%, 치환과정 58.3%, 전기분해과정 69.2% 그리고 주조과정 26.7%이었다.

<표 23> Respirable Indium Concentration of the Indium Recycling Industry

Process	n	Respirable Indium Concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$						
		AM	SD	GM	GSD	Med.	Min.	Max.
Pulverization	14	113.4	63.8	70.1	5.3	118.5	0.5	253.7
Dissolution	3	101.1	141.3	45.9	4.6	23.8	15.4	264.2
Substitution	24	26.3	65.3	8.4	3.7	6.2	1.8	317.9
Electrolysis	13	106.1	155.5	22.4	7.8	11.1	1.9	436.3
Casting	15	19.3	38.6	5.9	3.9	4.2	1.3	128.8
Total	69	63.8	103.1	15.4	6.0	11.2	15.4	436.3

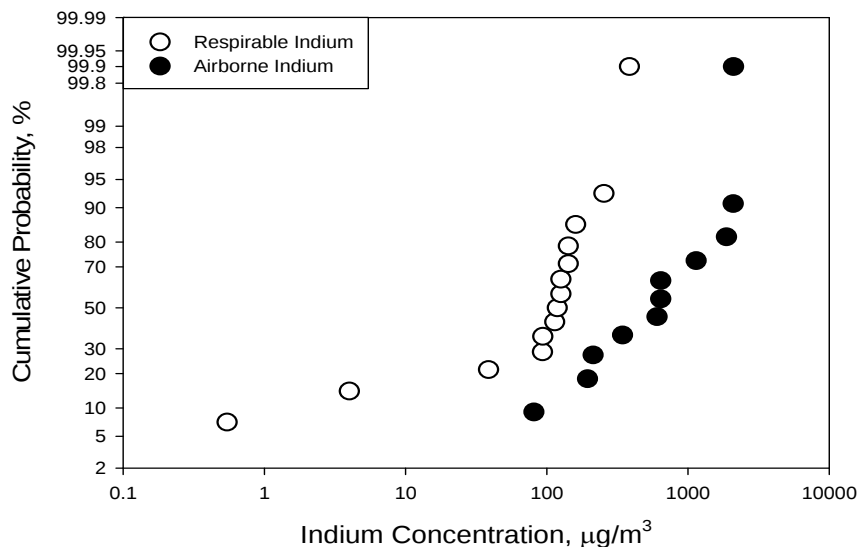
<표 24> Probability of Respirable Indium Concentration Exceeding OEL in Indium Recycling Industry

Process	n	Occupational Exposure limit, 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
		< 10%	10~50%	50~100%	1~2 excess	> 2 excess
Pulverization	14	1(7.1%)	1(7.1%)	0(0%)	0(0%)	12(85.7%)
Dissolution	3	0(0%)	0(0%)	0(0%)	1(33.3%)	2(66.7%)
Substitution	24	0(0%)	10(41.7%)	4(16.7%)	6(25.0%)	4(16.7%)
Electrolysis	13	0(0%)	4(30.8%)	2(15.4%)	2(15.4%)	5(38.5%)
Casting	15	0(0%)	11(73.3%)	0(0%)	2(13.3%)	2(13.3%)
Total	69	1(1.4%)	26(37.7%)	6(8.7%)	11(15.9%)	25(36.2%)

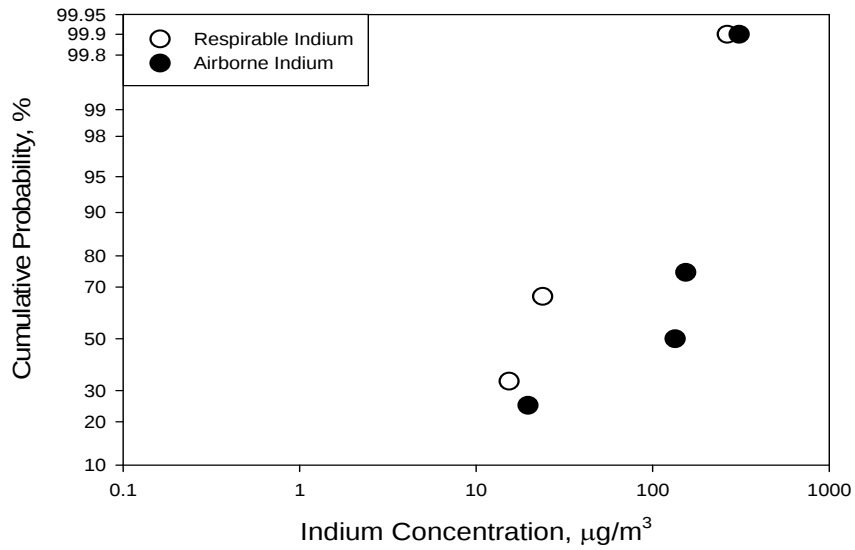
그림 50~54는 인듐 재생업 작업특성에 따른 공정별 공기 중 인듐과 호흡성 인듐의 누적도수분포표이다. 분쇄공정(그림 50)에서 낮게 평가된 호흡성 인듐 시료는 미량의 인듐이 함유되어 폐수를 고형물의 형태(cake)로 만들어 수분을 제거하고 분쇄하는 작업자를 평가한 결과이다. Cake 내에 들어있는 인듐의 함량 매우 적어 근로자는 인듐 노출량이 낮게 평가되고 있었다. 용해공정(그림 51)은 시료수가 적고 용해작업을 독립적으로 수행하는 근로자가 없어 객관적인 평가가 불가능하다. 치환공정(그림 52)은

일부 작업자가 분쇄공정에서 분쇄된 제품을 용해공정으로 운반하는 과정에서 일부 시료가 높게 평가되었다. 치환공정 작업자는 용해공정을 병행하여 작업하는 경우가 대부분이었다. 전기분해공정(그림 53)은 습식공정과 건식공정에 따라 노출되는 인듐의 특성이 다르게 평가되었다. 물속에서 전기분해를 통해 인듐의 순도를 높이는 습식공정과 달리 전기분해설비에 인듐을 넣고 고온으로 순도를 높이는 건식공정은 직접 인듐에 근로자가 노출되고 있었다. 주조공정(그림 54)에서 고농도의 인듐에 노출되는 것으로 평가된 근로자는 대부분 분쇄공정에서 일정시간 일을 하거나 분말제품 운반작업을 도와주고 있었기 때문에 고농도의 인듐에 노출되었다.

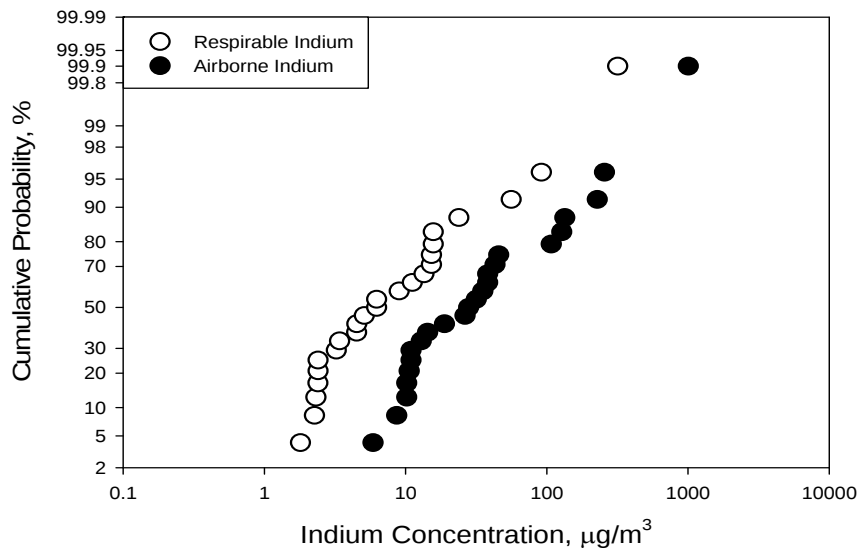
그림 55는 인듐 재생업 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐과 호흡성 인듐 농도는 나타내는 누적도수분포표이다. 인듐 재생업의 공기 중 인듐과 호흡성 인듐 노출평가 자료는 대수정규분포를 하고 있으며, 대수변환 된 자료의 공기 중 인듐 기울기 값(r^2)은 0.918($n=68$)이며 호흡성 인듐 기울기 값(r^2)은 0.955($n=69$)이다.



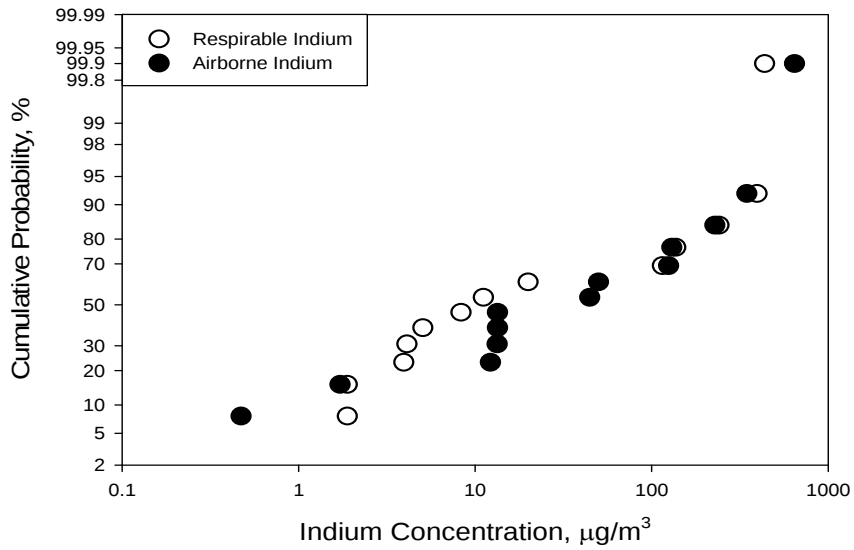
<그림 50> Cumulative probability of indium concentration in the pulverization process



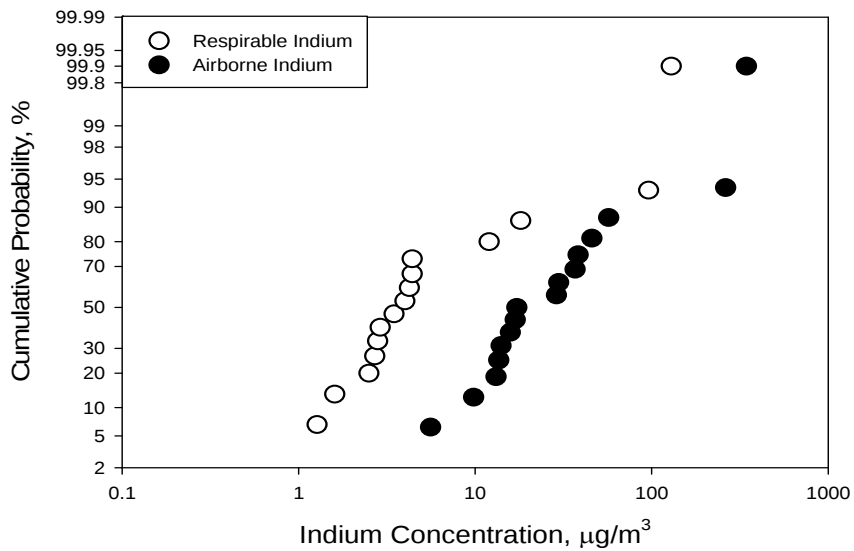
<그림 51> Cumulative probability of indium concentration in the dissolution process



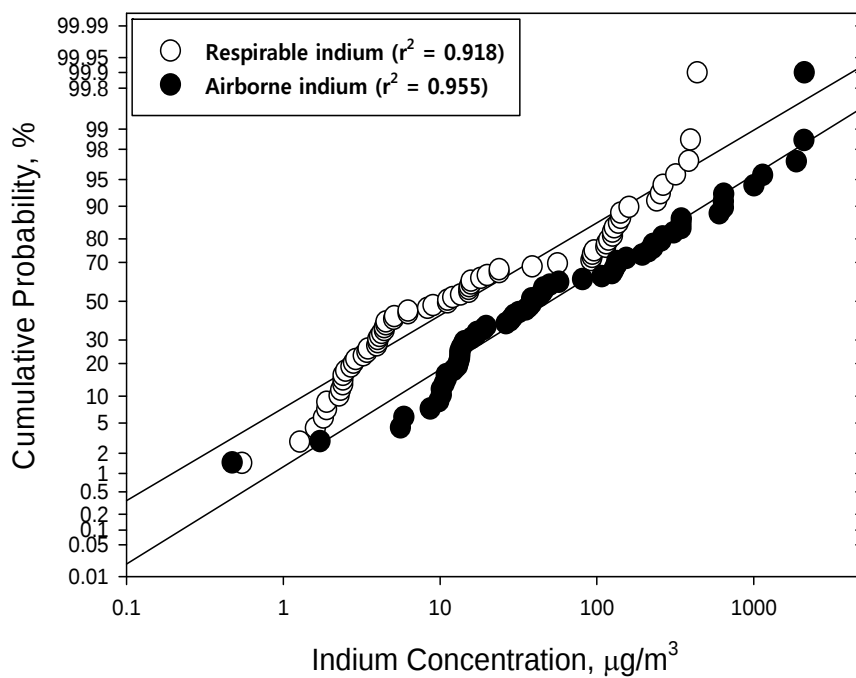
<그림 52> Cumulative probability of indium concentration in the substitution process



<그림 53> Cumulative probability of indium concentration in the electrolysis process



<그림 54> Cumulative probability of indium concentration in the casting process



<그림 55> Cumulative probability of indium concentration in the indium recycle companies

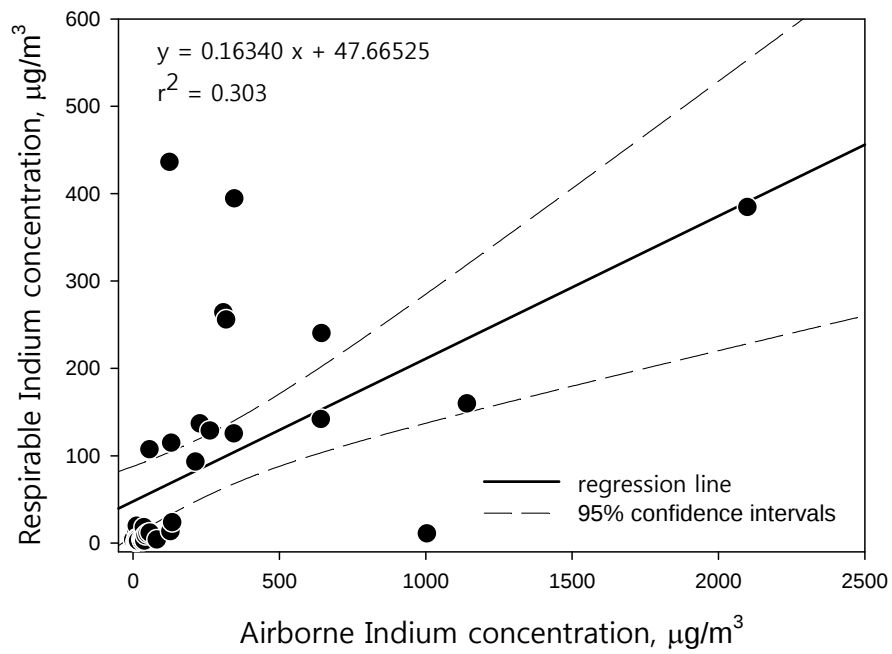
3.3. 인듐의 크기별 비교

인듐 재생업 근로자에게 공기 중 인듐과 호흡성 인듐 시료를 동시에 채취하여 표 25, 그림 56과 같은 결과를 얻었다. 공기 중 인듐과 호흡성 인듐의 상관관계를 비교하기 위한 공기 중 인듐의 노출수준은 0.45~2098.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (기하평균 69.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 산술평균 234.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었으며 호흡성 인듐의 노출수준은 1.60~436.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (기하평균 22.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 산술평균 86.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이었다. 인듐 재생업 공기 중 인듐과 호흡성 인듐 노출평가 자료는 모두 대수정규분포를 하였다.

인듐 재생업 모든 공정에서 채취된 공기 중 인듐과 호흡성 인듐간의 상관관계는 $y=0.16340x + 0.47.66525$, $r^2=0.302$ 이었다. 인듐 재생업은 타겟 제조업($r^2=0.798$)과 디스플레이 제조업($r^2=0.514$)에 비해 상관관계가 낮았다.

<표 25> Concentration for the Comparative Evaluation of Airborne Indium and Respirable Indium in the Indium Recycling Industry

Sample type	No. of Samples	Indium Concentration, $\mu\text{g}/\text{m}^3$				
		AM	SD	GM	GSD	Range
Airborne Indium	37	234.4	415.0	69.1	5.65	0.45-2098.8
Respirable Indium	37	86.0	123.2	22.6	6.17	1.60- 436.3



<그림 56> Correlation between airborne indium and respirable indium in the indium recycling industry

3.4. 인듐 입경분포 및 공기역학적 질량중위직경(MMAD)

인듐분진의 입경분포와 공기역학적 질량중위직경을 평가하기 위해 분쇄 공정, 용해공정, 치환공정, 전기분해공정, 주조공정의 5개 공정에서 평가하였다.

3.4.1. 인듐의 공기역학적 질량중위직경

연구대상 5개 공정의 공기역학적 질량중위직경을 분석한 결과는 표 26과 같다. 인듐 재생업 인듐 취급공정 중에서 분진의 크기가 가장 큰 공정은 분쇄공정으로 공기역학적 질량중위직경은 $7.30\ \mu\text{m}$ 이었으며, 전기분해공정의 공기역학적 질량중위직경이 $0.09\ \mu\text{m}$ 로 가장 작은 분진이 발생하였다. 인듐 재생업의 공기역학적 질량중위직경을 평가한 결과 모든 공정에서 $10\ \mu\text{m}$ 이하의 분진이 발생하는 것으로 평가되었다. 따라서 인듐 재생업 근로자들은 호흡성 인듐에 노출되고 있는 것을 알 수 있다.

<표 26> Mass Median Aerodynamic Diameter of the Indium Recycling Process

Process	MMAD	GSD
Pulverization	7.30	2.93
Dissolution	1.81	7.44
Substitution	0.69	4.91
Electrolysis	0.09	5.76
Casting	1.01	5.17

3.4.2. 인뿔의 입경분포

인뿔 재생업 5개 공정에서 발생하는 인뿔분진의 입경분포를 평가는 marple personal cascade impactor를 이용하여 평가하였다. 각 공정에서 채취된 시료는 1) impactor 각 단의 입경 크기별 함유량 비율(%)을 구하고, 2) 각 단의 인뿔 함유량(%)에 보정계수로 보정하여 각 공정의 질량(mass) 입경분포(%) 계산하였다. 3) impactor 각 단의 인뿔을 분석하여 정확한 질량(μg)을 구한 후, 계산식을 이용하여 입자수(Particles) 입경분포(%) 계산하였다. 각 공정별 인뿔의 입경분포를 평가하기 위해 $3.5\ \mu\text{m}$ 이하(5 stage~back filter), $9.8\ \mu\text{m}$ 이하(3 stage~back filter) 그리고 $10\ \mu\text{m}$ 이상(1~2 stage)의 분진으로 구분하여 인뿔 재생업의 공정별 평가를 한 결과 표 27과 같다.

인뿔 재생업 5개의 공정의 질량 입경분포를 보면 $3.5\ \mu\text{m}$ 이하의 인뿔분진 분포비율이 가장 큰 공정은 전기분해공정(99.1%), 치환공정(91.2%), 주조공정(85.6%), 용해공정(70.0%) 그리고 분쇄공정(33.3%)의 순이었다. $9.8\ \mu\text{m}$ 이하 인뿔분진 분포비율(%)이 가장 큰 공정은 전기분해공정(99.5%), 치환공정(95.7%), 주조공정(91.6%), 용해공정(78.9%) 그리고 분쇄공정(74.3%)의 순이었다. 분쇄공정과 용해공정에서 $9.8\ \mu\text{m}$ 이상의 인뿔비율이 25.7%와 21.1%로 다른 공정에 비해 큰 비율로 평가되었다. 분쇄공정은 타겟과 슬러지 등을 분쇄기로 물리적으로 분쇄하기 때문에 큰 입자의 인뿔이 발생하며, 용해공정은 분쇄된 원료 계량, 운반 및 용해탱크에 수작업으로 투입하는 과정에서 큰 입자의 인뿔에 노출되고 있다.

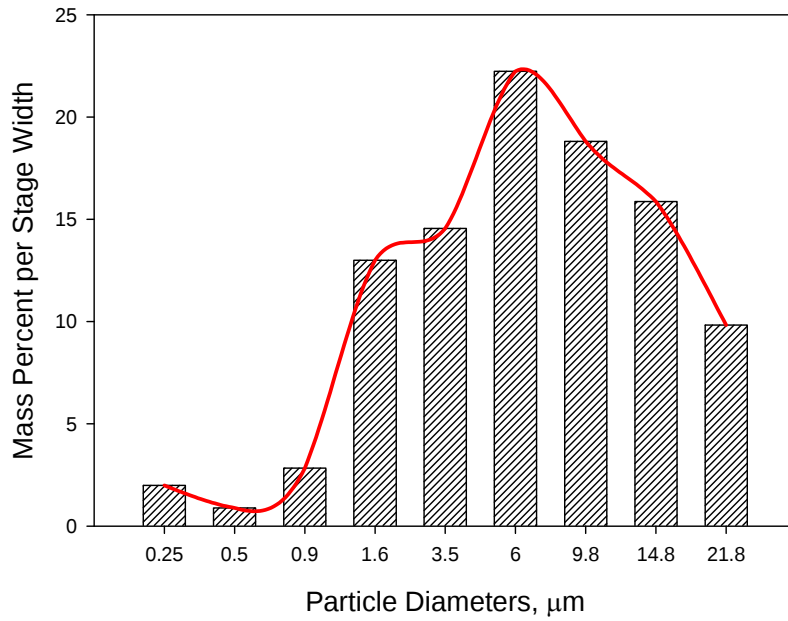
입자수 입경분포를 보면 인뿔 재생업 5개 공정에서 발생하는 인뿔분진 입자의 크기는 $3.5\ \mu\text{m}$ 이하의 작은 분진이 다량 발생한 것을 알 수 있다. $3.5\ \mu\text{m}$ 이상의 분진은 매우 적은 수가 발생하고 있으나 분쇄공정이나 용해공정에서 적은 수로 발생한 인뿔분진의 크기가 크기 때문에 $9.8\ \mu\text{m}$ 이하의 분진보다 고농도로 평가되어 공기역학적 질량중위직경과 질량 입경분포에 영향을 미친 것으로 판단된다.

인뿔 재생업에서 발생하는 인뿔분진의 공기역학적 질량중위직경과 입경

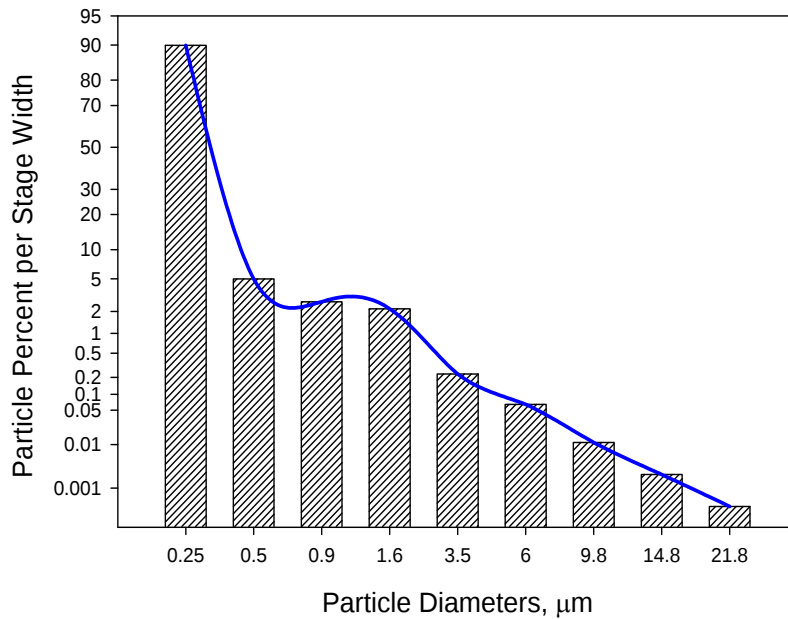
분포(질량 및 입자수)를 볼 때, 모든 공정의 인듐 취급근로자는 호흡성 인듐에 노출되고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 인듐 재생업의 사업장 분진 관리는 호흡성 인듐을 관리하는 것이 타당하다.

<표 27> Particle Size Distribution of the Indium Recycling Industry

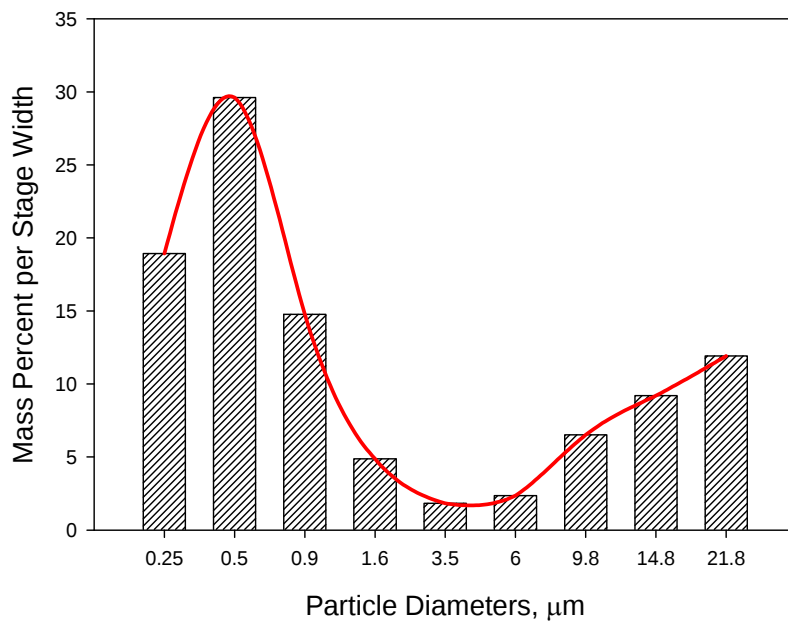
	Mass, %			Particles, %		
	<3.5	<9.8	>9.8	<3.5	<9.8	>9.8
Pulverization	33.25	74.30	25.70	99.92	100.00	0.00
Dissolution	70.02	78.88	21.12	100.00	100.00	0.00
Substitution	91.21	95.68	4.32	100.00	100.00	0.00
Electrolysis	99.12	99.54	0.46	100.00	100.00	0.00
Casting	85.60	91.64	8.36	100.00	100.00	0.00



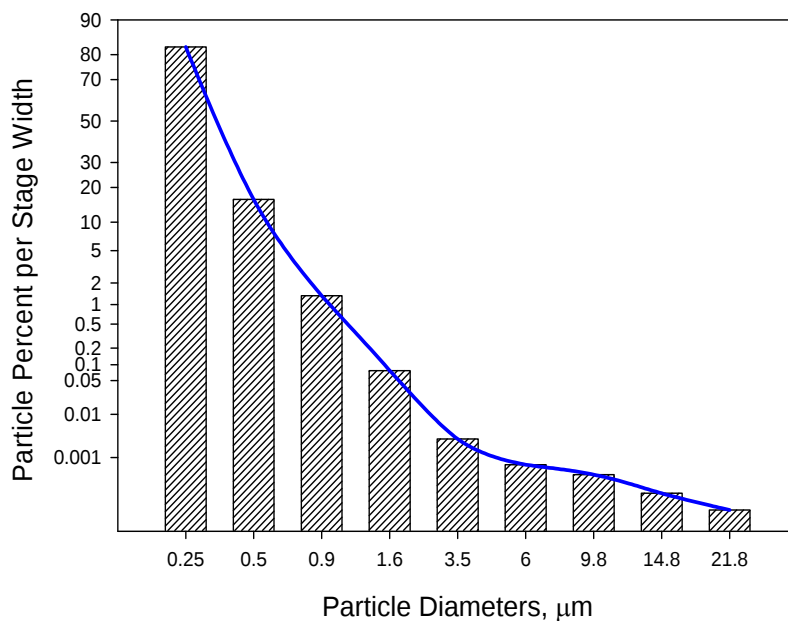
<그림 57> Mass percent per stage width at each particle diameters of the pulverization process



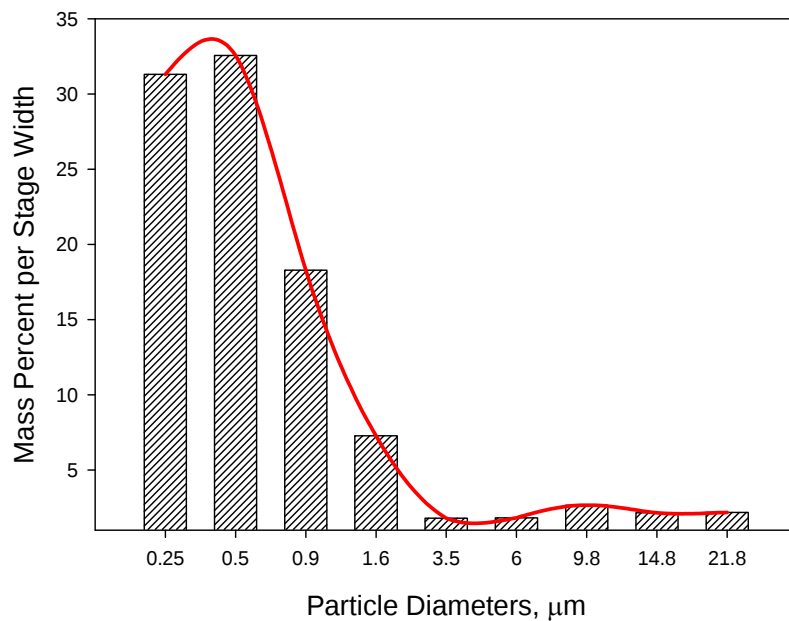
<그림 58> Particle size distribution of the pulverization process



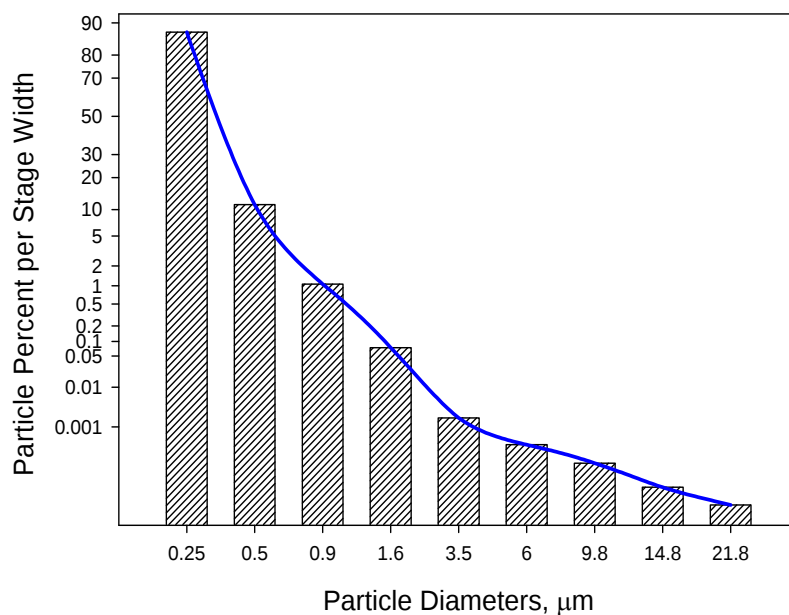
<그림 59> Mass percent per stage width at each particle diameters of the dissolution process



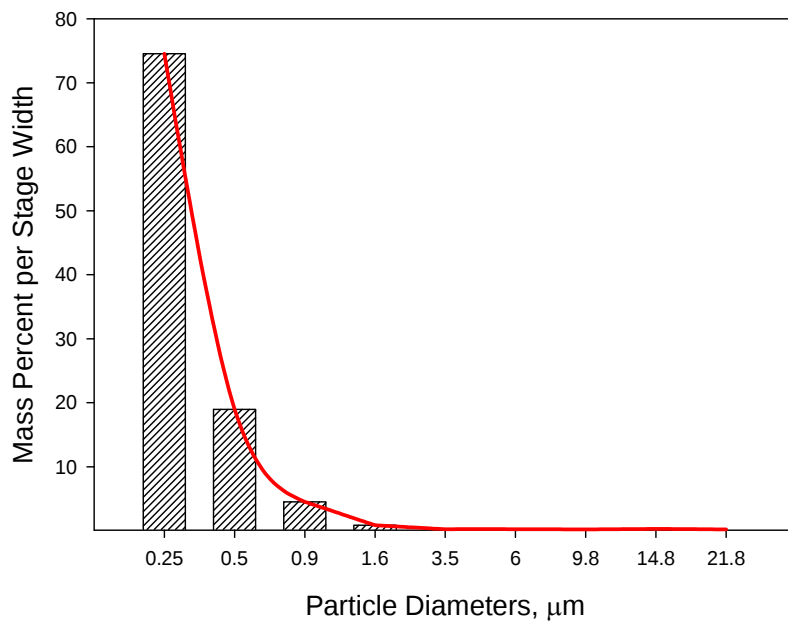
<그림 60> Particle size distribution of the dissolution process



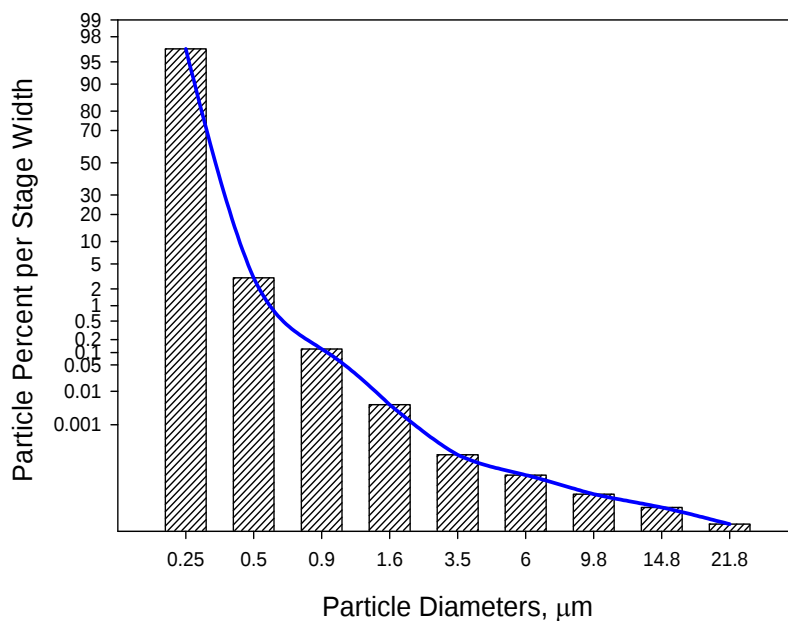
<그림 61> Mass percent per stage width at each particle diameters of the substitution process



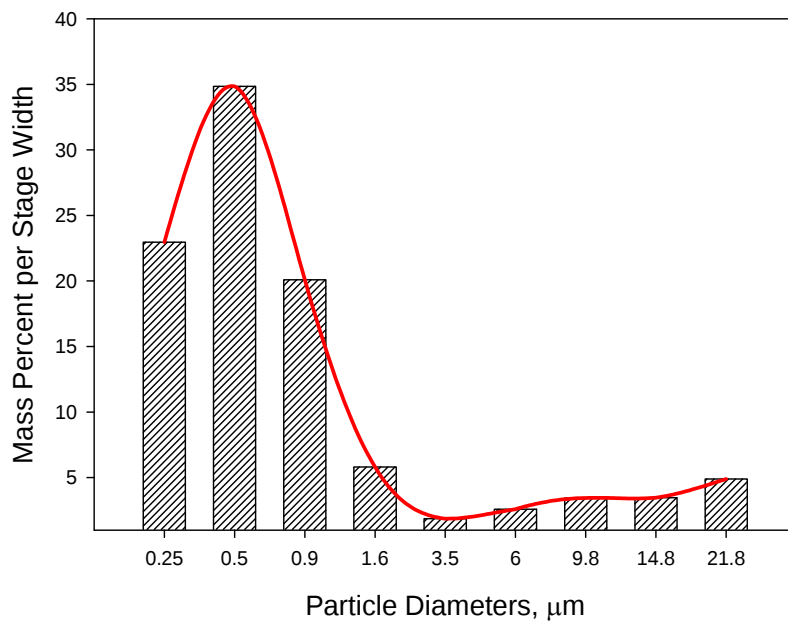
<그림 62> Particle size distribution of the substitution process



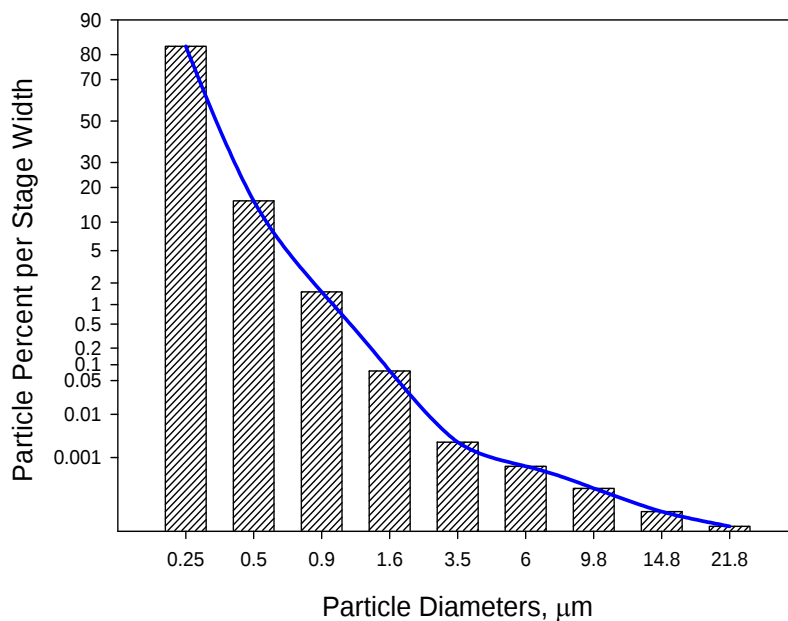
<그림 63> Mass percent per stage width at each particle diameters of the electrolysis process



<그림 64> Particle size distribution of the electrolysis process



<그림 65> Mass percent per stage width at each particle diameters of the casting process



<그림 66> Particle size distribution of the casting process

3.5. 혈청인듐 평가

인듐 재생업 근로자 66명을 대상으로 혈청인듐을 평가한 결과는 표 28과 그림 67과 같다. 인듐 재생업 근로자 66명 중 37명의 근로자가 혈청 중에 인듐이 검출되었으며, 혈청인듐 농도는 ND~125.8 $\mu\text{g/L}$ (n=66)이었다. 인듐 재생업 근로자 중 혈청에서 인듐이 검출된 37명의 혈청인듐 농도는 0.01~125.8 $\mu\text{g/L}$ (n=37)이었으며, 기하평균(5.0 $\mu\text{g/L}$)과 산술평균(23.8 $\mu\text{g/L}$)은 일본 후생노동성의 생물학적 노출기준 3.0 $\mu\text{g/L}$ 을 초과하였다. 인듐 재생업 연구대상 근로자의 30.3%(20명)은 생물학적 노출기준을 초과하였다.

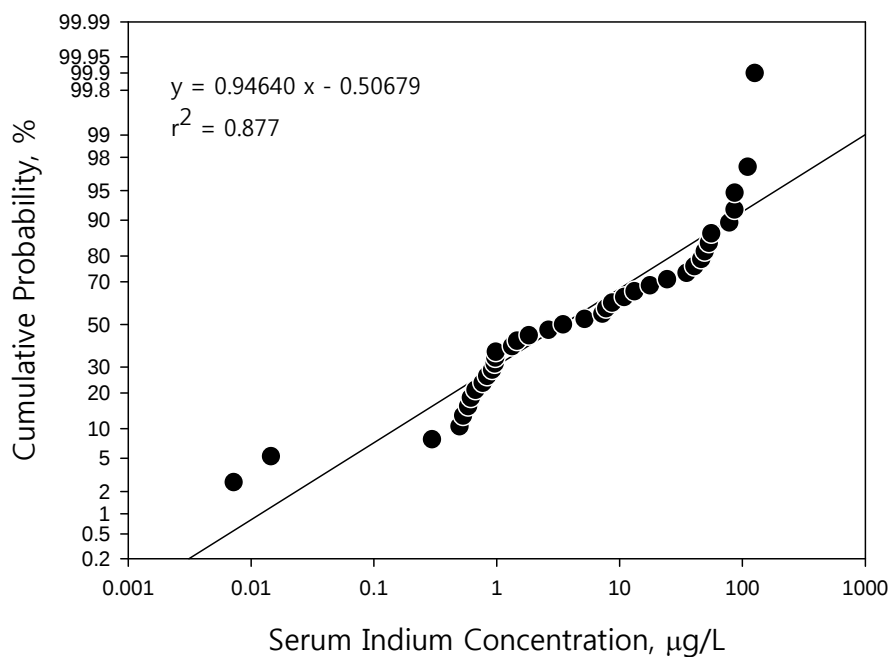
C 사업장은 건식 전기분해공법으로 인듐을 재생하는 사업장으로 인듐 취급근로자의 혈청인듐 농도수준은 24.4~125.8 $\mu\text{g/L}$ (n=11)이었으며, 혈청인듐 평가 근로자의 100%(11명)이 생물학적 노출기준을 초과하였다. A 사업장 인듐 취급근로자 37.5%(3명), B 사업장 근로자의 9.4%(3명) 그리고 D 사업장 근로자의 42.9%(3명)의 근로자가 생물학적 노출기준을 초과하였다. E 사업장은 폐수에 들어있는 미량의 인듐을 회수하는 업체로 혈청인듐을 평가한 결과, 생물학적 노출기준 미만이었다. 인듐 재생업 근로자 중 혈청인듐이 검출된 37명 근로자의 자료는 대수정규분포를 하였다.

혈청인듐의 누적도수분포표에 따른 관계식은 $y=0.94640x - 0.50670$, $r^2= 0.877$ 이었다.

<표 28> Serum Indium Concentration of the Indium Recycling Companies

Company	n	Serum Indium Concentration, $\mu\text{g/L}$						
		AM	SD	GM	GSD	Med.	Min.	Max.
Company A	7(8)	4.2	4.7	2.3	3.5	2.6	ND	12.7
Company B	12(32)	6.1	15.0	1.1	7.2	0.9	ND	53.3
Company C	11(11)	67.0	32.5	59.8	1.7	55.7	24.4	125.8
Company D	5(7)	7.8	7.2	4.0	4.6	8.7	ND	17.6
Company E	2(8)	1.1	0.3	1.1	1.3	1.1	ND	1.3
Total	37(66)	23.8	34.5	5.0	8.7	5.2	ND	125.8

*ND = 0.01 $\mu\text{g/L}$



<그림 67> Cumulative probability of serum Indium in the indium recycling companies

IV. 결 론

본 연구에서는 ITO, IZO 타겟 제조업, 평판 디스플레이 제조업 그리고 인듐 재생업의 3개 업종을 근로자를 대상으로 공기 중 인듐과 호흡성 인듐의 노출평가, 혈청인듐 평가 그리고 인듐분진의 발생특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 국내 인듐의 생산량은 2013년 현재 매월 약 12톤씩 연간 140톤 정도가 생산되는 것으로 추정된다. 국내 ITO, IZO 타겟 소비량은 약 1,000톤 정도로 추정되며, 국내에서 700톤이 생산되고 있고 일본으로부터 약 300톤이 수입되고 있다. 디스플레이 산업에 공급되는 ITO, IZO 타겟은 패널 디스플레이 제조 중 약 30%정도가 소모되고, 70%정도가 남아 있을 때 디스플레이 패널 품질을 유지하기 위해 교체된다. 교체된 ITO, IZO 타겟은 재생업체에서 다시 인듐을 추출하여 ITO, IZO 타겟 제조업에 공급한다. 즉 연간 약 1,000톤의 ITO, IZO 타겟이 공급되어 300톤이 패널 디스플레이 등에 증착되어 소모되고 약 700톤은 재생 사이클을 거쳐 다시 ITO, IZO 타겟으로 만들어지고 있다. 재생은 국내에서 약 500톤, 해외에서 약 200톤 정도가 이루어지는 것으로 파악되었다.

2. ITO, IZO 타겟 제조업 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $0.9 \sim 609.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 기하평균($33.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($73.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준 미만이었으며, 인듐 취급근로자 182명 중 42명이 노출기준을 초과하여 노출기준 초과비율은 23.1%이었다. 호흡성 인듐의 노출수준은 $0.02 \sim 448.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 기하평균은 $5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 일본의 노출기준($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 미만이었으나 산술평균은 $14.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 인듐 취급근로자 194명 중 64명이 일본의 노출기준을 초과하여 초과비율은 33.0%이었다.

ITO, IZO 타겟 제조업 산업 7개 공정의 공기 중 인듐 노출기준 초과비율(%)은 분말공정 15.0%, 혼합공정 30.8%, 성형공정 40.0%, 소결공정 0%, 가공·연마공정 37.8%, 접합공정 2.6%, 마무리공정 37.9%이었으며, 호흡성

인듐은 분말공정 39.1%, 혼합공정 50.0%, 성형공정 27.8%, 소결공정 17.3%, 가공·연마공정 40.7%, 접합공정 13.9% 그리고 마무리공정 45.9% 이었다.

3. 평판 디스플레이 제조업 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $0.2 \sim 2782.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 기하평균($11.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($85.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출 기준 미만이었으나 인듐 취급근로자 119명 중 14명이 노출기준을 초과하여 공기 중 인듐 노출기준 초과비율은 11.7%이었다. 호흡성 인듐의 노출수준은 $0.01 \sim 419.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 기하평균은 $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으나, 산술평균은 $13.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 인듐 취급근로자 121명 중 29명이 호흡성인듐 노출기준을 초과하여 초과비율은 23.9%이었다.

평판 디스플레이 산업 3개 공정의 공기 중 인듐 노출기준 초과비율(%)은 타겟 교환공정 1.8%, sputter 부품세척 공정 26.1%, 타겟 세척공정 6.3%이었으며, 호흡성 인듐은 타겟 교환공정 13.6%, sputter 부품세척 공정 36.9% 그리고 타겟 세척공정 25.0%이었다.

4. 인듐 재생업 인듐 취급근로자의 공기 중 인듐 노출수준은 $0.5 \sim 2089.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 기하평균은 $54.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 미만이었으나 산술평균 $225.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준을 초과하였다. 인듐 취급근로자 68명 중 26명이 노출기준을 초과하여 공기 중 인듐 노출기준 초과비율은 38.3%이었다. 호흡성 인듐의 노출수준은 $15.4 \sim 436.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 기하평균($15.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 산술평균($63.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 노출기준을 초과하였다. 인듐 취급근로자 69명 중 36명이 호흡성인듐 노출기준을 초과하여 초과비율은 52.1%이었다.

5. 인듐 취급산업에서 채취된 공기 중 인듐과 호흡성 인듐 간의 상관관계를 평가한 결과 ITO, IZO 타겟 제조업, 평판 디스플레이 제조업 그리고 인듐 재생업 순으로 상관관계가 높았으며, 공기 중 인듐과 호흡성 인듐의 관계식은 ITO, IZO 타겟 제조업은 $y=0.07252x + 0.43197(r^2=0.798)$, 평판 디스플레이 제조업은 $y=0.120195x + 3.75255 (r^2=0.514)$ 그리고 인듐 재생업은

$y=0.16340x + 47.66525(r^2=0.302)$ 이었다.

6. ITO, IZO 타겟 제조업 근로자 176명 중 99명이 혈청에서 인듐이 검출되었으며, 혈청인듐 노출수준은 ND~49.8 $\mu\text{g/L}$ (n=176)이었다. 혈청에서 인듐이 검출된 99명 근로자의 기하평균은 1.9 $\mu\text{g/L}$ 로 생물학적 노출기준 미만이었으나 산술평균은 4.6 $\mu\text{g/L}$ 로 노출기준을 초과하였다. ITO, IZO 타겟 제조업 근로자의 혈청인듐 초과비율은 22.7%(n=176)이다.

평판 디스플레이 제조업 인듐 취급근로자 196명의 혈청인듐 노출수준은 ND~16.2 $\mu\text{g/L}$ (n=196)이었으며, 혈청인듐이 검출된 중 31명 근로자의 기하평균(1.0 $\mu\text{g/L}$)과 산술평균(2.2 $\mu\text{g/L}$)은 노출기준 미만이었다. 평판 디스플레이 제조업 인듐 취급근로자의 3.1%가 생물학적 노출기준을 초과하였다.

인듐 재생업 근로자 66명의 혈청인듐 농도는 ND~125.8 $\mu\text{g/L}$ (n=66)이었으며, 66명 중 37명 근로자에게서 혈청인듐이 검출되었다. 혈청인듐이 검출된 37명의 기하평균(5.0 $\mu\text{g/L}$)과 산술평균(23.8 $\mu\text{g/L}$)은 노출기준을 초과하였다. 인듐 재생업 근로자의 노출기준 초과비율은 30.3%이었다.

7. 인듐 산업의 공기역학적 질량중위직경은 ITO, IZO 타겟 제조업 3.47~15.21 μm 으로 평가되었으며, 국내 타겟 제조업체인 A 사업장과 B 사업장은 3.47~10.13 μm 와 4.42~9.47 μm 이었으며, 일본계 C 사업장은 10.41~15.21 μm 이었다. 평판 디스플레이 제조업은 5.60~34.53 μm 그리고 인듐 재생업의 공기역학적 질량중위직경은 0.09~7.30 μm 이었다.

8. ITO, IZO 타겟 제조업 6개 공정에서 평가한 질량 입경분포는 9.8 μm 이상의 크기의 분진 발생비율이 15.5~53.90%로 평가되었으며, 입자수 입경분포에서는 9.8 μm 이하의 분진이 99.94% 이상 분포하는 것으로 평가되었다. 평판 디스플레이 제조업과 인듐 재생업의 9.8 μm 이상의 분진 질량 입경분포 비율은 12.06~74.14%와 0.46~25.70%이었고, 입자수 입경분포는 9.8 μm 이하의 분진이 99.98%, 100%로 평가되었다.

9. 인뚱 취급산업에서 발생하는 인뚱분진의 공기역학적 질량중위직경과 입경분포(질량 및 입자수)를 볼 때 인뚱 취급근로자는 호흡성 인뚱에 노출되는 것을 알 수 있다. 따라서 인뚱 취급산업의 사업장 환경관리와 근로자 노출평가는 호흡성 인뚱으로 관리하는 것이 타당할 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 국내문헌

고용노동부. (2012). 화학물질 및 물리적인자의 노출기준(노동부고시 제 2012-31호). 고용노동부.

하나금융경제연구소. (2010). 산업연구시리즈 - 국내·외 태양광발전 시장 전망. 하나금융그룹. <http://www.hanaif.re.kr>

이광용, 박두용. (2013). 인듐 관련 직업병 사례 및 국내 사업장 현황. 한국산업위생학회지. 23(3), 299-306.

Yi GY, Lee NR and Shin JA. (2011). Research on exposure and management of insoluble indium compound. Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA.

Yi GY, Lee NR and You KH. (2012) Exposure and management of insoluble indium compound II, Occupational Safety & Health Research Institute, KOSHA.

2. 국외문헌

Omae K, Nakano M, Tanaka A, Hirata M, Hamaguchi T et al.. (2011). Indium Lung-case reports and epidemiology. *Int Arch Occup Environ Health*. 84, 471-477.

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources(KIGMR). (2007). Positioning and Globalization of Geo-Information and Geo-Technology. Ministry of Education, Science and Technology.

Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE). (2012). Enforcement Decree of the Overseas Resources Development Business Act. Ministry of Trade, Industry & Energy.

Miyauchi H, Minozoe A, Tanaka S, Tanaka A, Hirata M et al.. (2012). Assessment of Workplace Air Concentrations of Indium Dust in an Indium-recycling Plant. *J Occup Health*. 54, 103-111.

Japan Ministry of Health, Labour and Welfare(MHLW). (2009). The 3rd workshop to exchange of information effect of indium to health. Ministry of Health, Labour and Welfare.

National Institute of Occupational Safety and Health(NIOSH). (1992). NIOSH Recommendations for Occupational Safety and Health(DHHS(NIOSH) Pub. No. 92-100). Cincinnati, Ohio; NIOSH.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH), (2014) TLVs and BELs Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices. Cincinnati Ohio, ACGIH.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH). (2001). Documentations of the Threshold Limit Values & Biological Exposure Indices. 7th ed. Cincinnati Ohio, AIHA.

Cynthia J. Hines, J.L. Roberts, R.N. Andrews, M.V. Jackson, J.A. Deddens. (2013). Use of and Occupational Exposure to Indium in the

United States, Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 10, 723–733.

Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (BGIA) (2013) "GESTIS Hazardous Substances atabase, International Limit Values for Chemical Agents." Available at www.dguv.de/ifa/en/gestis/limit-values/index.jsp (accessed May 10, 2013).

Japan Ministry of Health, Labour and Welfare(MHLW). (2010). The Technical Guideline for Preventing Health Impairment of Workers Engaged in the Indium Tin Oxide Handling Processes. Ministry of Health, Labour and Welfare.

Homma T, Ueno T, Sekizawa K, Tanaka A, Hirata M. (2003). Interstitial pneumonia developed in a worker dealing with particles containing indium–tin oxide. J Occup Health 45, 137–139

Homma S, Miyamoto A, Sakamoto S, Kishi K, Motoi N et al.. (2005). Pulmonary fibrosis in an individual occupationally exposed to inhaled indium–tin oxide. Eur Respir J. 25, 200–204.

Taguchi O, Chonan T. (2006). Three cases of indium lung. J Jpn Respir Soc. 44, 532–535.

Nakano M, Kamata H, Saito F, Tanaka A, Hirata M et al.. (2007). A case of indium lung disclosed in health check–up. Occup Health J. 30, 25–29.

Takeuchi K. (2008). Pulmonary toxicity of indium. Kokyuu. 27(6), 599–603.

Cummings KJ, Walter E, Donat WE, Ettensohn DB, Roggli VL et al.. (2010) Pulmonary alveolar proteinosis in workers at an indium processing facility. Am J Respir Crit Care Med. 181, 458–464.

Cummings KJ, Nakano M, Omae, K, Takeuchi K, Chonan T et al.. (2012). Indium Lung Disease. Occup Env Lung Dis. 141, 1512–1521.

Ministry of Knowledge Economy(MEKE). (2011). Rare metal indium,

iridium authentic promote overseas development(Press release). Ministry of Knowledge Economy. Available from: URL:<http://www.mke.go.kr>.

Xiao YL, Cai HR, Wang YH, Meng FQ, Zhang DP. (2010). Pulmonary alveolar proteinosis in an indium-processing worker. Chin Med J. 123, 1347–1350.

National Institute of Occupational Safety and Health(NIOSH). (1994). NIOSH Manual of Analytical Method. 4th ed. NIOSH. <http://www.cdc.gov/niosh>.

National Institute of Occupational Safety and Health(NIOSH). (2009). Chemical information profile for Indium tin oxide. NIOSH. <http://ntp.niehs.nih.gov/>

Occupational Safety and Health Administration(OHSA). (2002). Sampling & Analytical Methods. OSHA. <http://www.osha.gov>

National Toxicology Program(NTP), (2009) Chemical information profile for indium tin oxide. Nation Institute of Environmental Health Sciences. <http://ntp.niehs.nih.gov>

ABSTRACT

A Study on the Workers' Exposure to Indium in ITO targets
and LCD panel manufacturing and Indium recycling
industries in Korea

Yi, Gwang Yong

Major in Industrial Hygiene Engineering

Dept. of Mechanical Systems Engineering

The Graduate School

Hansung University

Indium has been rarely used until it started to be used as a raw materials for the transparent wire in the flat panel display manufacturing and related industries. For last decades, the use of indium has been sharply increased as the high-tech display industry such as touch panels advanced. Recently the toxic properties of indium have been reported such as pulmonary alveolar proteinosis(PAP) and interstitial pneumonia, and it has been known that occupational exposure to indium causes lung diseases (collectively known as 'indium lung') and it may be fatal.

There has been increased consumption of indium and there are a number of indium related industries in Korea since the Korea is one of the major production country for the electronic display products.

However, survey and research has been conducted neither for the workers' exposure to indium nor for the workers' health effects in Korea. Even for the status of indium imports and productions of indium have not surveyed.

This study was conducted to survey the indium related industry status and workers' exposure to indium in indium related industries in Korea. Airborne indium in the total and respirable dusts were measured and size distribution were analyzed for each process for ITO target manufacturing, display manufacturing, and recycling industries. Blood indium concentrations of some workers were also measured. Results of this study were as follows

Total amount of annual consumption of ITO and IZO target is estimated around 1,000 tons. Roughly 700 tons were produced domestically and 300 tons were imported from Japan. In the display panel manufacturing industry, after 30% of indium ITO target were sputtered into display panel, the ITO targets were removed and sent to recycling industry where they were recycled to indium metal. Therefore around 700 tons of ITO targets were sent to recycle industry. Around 500 tons were recycled in Korea and 200 tons were exported to foreign countries for recycling.

Airborne total indium exposure levels of the ITO and IZO target manufacturing workers showed the range of $0.9 \sim 609.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Arithmetic mean($73.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and geometric mean($33.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) were below the current Korean occupational exposure limit of $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. However, 42 workers among 182 were exposed to indium above than the exposure limit. Respirable indium exposure levels were $0.02 \sim 448.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Geometric mean($5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) was below Japan's recommended exposure limit($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) but arithmetic mean($14.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) was exceeded this limit. Sixty four workers(33.0%) among 194 were exposed to indium above than this

limit.

In the ITO and IZO target manufacturing industries, the probability of excessive exposure of indium for the total dusts by the process were as follows; 15.0% in powdering process, 30.8% in mixing process, 40.0% in molding process, 0% in sintering process, 37.8% in grinding process, 2.6% in bonding process and 37.9% in finishing process. For the respirable indium exposure, the excess probability were 39.1% in powdering process, 50.0% in mixing process, 27.8% in molding process, 17.3% in sintering process, 40.7% in grinding process, 13.9% in bonding process and 45.9% in finishing process.

Airborne total indium exposure levels of the flat panel display manufacturing workers showed the range of $0.2 \sim 2782.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Arithmetic mean($85.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and geometric mean($11.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) were below the Korean occupational exposure limit of $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Fourteen workers(11.7%) among 119 were exposed to above the exposure limit. Respirable indium exposure level were $0.01 \sim 419.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Geometric mean($2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) was below Japan's recommended exposure limit($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$) but arithmetic mean($13.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) exceeded the exposure limit. Twenty nine workers(23.9%) among 121 were exposed to the above the Japan's exposure guideline. The probability of excessive exposure of indium for the total dusts by the process were as follows; 1.8% in target exchange process, 26.1% in sputter element cleaning process and 6.3% in target cleaning process. For the respirable indium exposure, the excess probability were 13.6% in target exchange process and 25.0% in target cleaning process.

Airborne total indium exposure levels of the recovery industry workers showed the range of $0.5 \sim 2089.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Geometric mean($54.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) was below the Korean occupational exposure limit but arithmetic mean($225.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) exceeded. Twenty six workers(38.3%) among 68 were exposed to

indium above than this limit. Respirable indium exposure level were 15.4 ~463.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Geometric mean(15.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) and arithmetic mean(63.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) exceeded the exposure limit. Thirty six workers(52.1%) among 69 were exposed to indium above than the exposure limit.

Good correlation between total airborne indium concentration and respirable indium concentration was shown in ITO and IZO target manufacturing industry. The regression analysis shows $y=0.07252x + 0.43197$ ($r^2=0.798$). In the flat panel display manufacturing, it was $y=0.120195x + 3.75255$ ($r^2=0.514$) and in the indium recovery industry, $y=0.16340x + 47.66525$ ($r^2=0.302$).

Blood indium levels in ITO and IZO target manufacturing industries were ND~49.8 $\mu\text{g}/\text{L}$ ($n=176$). Geometric mean (1.9 $\mu\text{g}/\text{L}$) was lower than the biological exposure limit of 3.0 $\mu\text{g}/\text{L}$ but arithmetic mean(4.3 $\mu\text{g}/\text{L}$) was exceeded. Forty workers(22.7%) showed their blood indium levels above the limit of 3.0 $\mu\text{g}/\text{L}$. In flat panel display manufacturing, blood indium levels of 196 workers showed the range of ND~16.2 $\mu\text{g}/\text{L}$. Six workers(3.1%) showed their blood indium above the limit. In recovery industry, blood indium levels were ND~125.8 $\mu\text{g}/\text{L}$ ($n=66$). Blood indium was detected for 37 workers. Their geometric mean was 5.0 $\mu\text{g}/\text{L}$ and arithmetic mean 23.80 $\mu\text{g}/\text{L}$. Twenty workers(30.3%) showed their blood indium level above the biological exposure limit.

Mass median aerodynamic diameters(MMAD) of dusts in ITO and IZO target manufacturing ranged from 3.47 to 15.21 μm . MMAD in flat display manufacturing industry was 5.60~34.53 μm and in indium recovery industry was 0.09~7.30 μm .

Size distribution analysis showed that mass over 10 μm occupied 15.5~53.90% in ITO and IZO target manufacturing. However, in terms of particle number, it was found that 99.94% was distributed under 10 μm . In flat panel display manufacturing and indium recovery industry, mass

over 10 μm occupied 12.06~74.14% and 0.46~25.70% respectively. However, in terms of particle numbers, most of them were distributed under 10 μm .

【keywords】 Indium, ITO, IZO, flat panel display, indium recovery, indium exposure. Size distribution. indium in blood serum