



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석사학위논문

ITO target 제조사업장의 접합공정 및
마감공정에서 근로자의 인덱스출수준 평가
및 측정의 정확도에 관한 연구



한성대학교 대학원

기계시스템공학과

산업위생공학전공

오 소 라

석 사 학 위 논 문

지도교수 박두용

ITO target 제조사업장의 접합공정 및
마감공정에서 근로자의 인듐노출수준 평가
및 측정의 정확도에 관한 연구

A Study on Workers' Exposure to Indium in Bonding and
Finishing Processes of an ITO Manufacturing Industry and
Accuracy of Measurement of Airborne and Blood Indium

2 0 1 5 년 6 월 일

한성대학교 대학원

기계시스템공학과

산업위생공학전공

오 소 라

석 사 학 위 논 문

지도교수 박두용

ITO target 제조사업장의 접합공정 및
마감공정에서 근로자의 인듐노출수준 평가
및 측정의 정확도에 관한 연구

A Study on Workers' Exposure to Indium in Bonding and
Finishing Processes of an ITO Manufacturing Industry and
Accuracy of Measurement of Airborne and Blood Indium

위 논문을 공학 석사학위 논문으로 제출함

2 0 1 5 년 6 월 일

한성대학교 대학원

기계시스템공학과

산업위생공학전공

오 소 라

국 문 초 록

ITO target 제조사업장의 접합공정 및 마감공정에서 근로자의 인듐노출수준 평가 및 측정의 정확도에 관한 연구

한성대학교 대학원
기계시스템공학과
산업위생공학전공
오 소 라

국내 모 ITO target 제조 사업장의 접합공정과 마감공정에서 근로자의 인듐노출과 작업장 공기 중 인듐농도를 측정하였다. 개인시료와 장소시료 모두 호흡성 먼지와 총먼지를 채취하여 인듐을 분석하였다. 인듐측정 및 분석의 정확도를 평가하기 위해 작업자에게서 동시에 2개 시료를 한 쌍으로 채취하거나, 동일지점에서 동시에 여러 개의 시료를 채취하였다. 여러 개의 동일한 시료는 두 실험실에서 나누어 분석하거나 한 실험실에서 모두 분석하여 공기 중 인듐의 시료채취 및 분석에 관한 정확도를 평가하였다. 이러한 실험적 연구로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

근로자의 호흡성 먼지 중 인듐 노출농도는 접합공정이 $1.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 마감공정은 $1.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 나타났다. 두 공정의 모두 일본 후생노동성에서 권고한 노출기준 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 0.1~0.2배 수준으로 노출기준을 초과할 가능성은 낮은 것으로 나타났다. 다만 기하표준편차가 접합공정은 3.071, 마감공정은 2.053으로 비교적 큰 것으로 나타나 일간변이를 관리할 필요성이 있는 것으로 나타났다. 작업장의 공기 중 호흡성 인듐농도는 접합공정이 $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 마감공

정이 $0.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 개인시료는 장소시료의 2.24배에서 9.8배까지 높았으며, 개인시료는 장소시료에 비해 일간변이는 더 큰 것으로 나타났다. 따라서 정확한 개인의 노출을 정확히 평가하기 위해서는 장소시료보다는 개인시료를 채취해야 하며, 개인시료는 여러 날에 걸쳐 반복하여 측정하는 것이 필요한 것으로 보였다. 공기 중 호흡성 먼지의 인듐은 총 먼지 중 인듐과 비교하여 16–20% 수준인 것으로 나타났다.

공기 중 동일한 지점에서 동일한 시간대에 반복하여 총인듐을 채취한 시료를 실험실에서 분석한 결과, 반복시료간 변이는 13~74%로 비교적 크게 나타나, 공기 중 인듐농도를 정확히 평가하기 위해서는 시료수를 늘려야 하는 것으로 나타났다. 공기 중 동일한 지점에서 동일한 시간대에 2개의 호흡성인듐 개인시료 쌍을 두 실험실에서 나누어 분석한 결과, 두 실험실 분석결과의 평균값을 참값으로 가정했을 때, 두 실험실간 오차는 0~100%까지 나타났다. 같은 방법으로 장소시료를 두 실험실에서 분석한 결과, 차이는 2.7~180%로 나타났다. 장소시료에서 오차가 더 크게 나타난 것은 시료 중 인듐량이 적었기 때문이다. 한편 소혈정으로 제조한 혈중인듐 시료를 분석한 결과, $0.02 \mu\text{g}/\text{L}$, $0.2 \mu\text{g}/\text{L}$ 및 $2 \mu\text{g}/\text{L}$ 에서 분석오차는 각각 -32%, 13% 및 24.4%로 나타났다.

【주요어】 인듐, ITO target, Indium Tin Oxide, 접합공정, 마감공정, 호흡성 인듐, 총인듐, 인듐 혈청시료, 분석, 정확도비교

목 차

I. 서 론	1
1. 연구배경	1
2. 연구목적	2
3. ITO target 제조공정	2
4. 인듐의 유해성 및 직업적 노출기준	3
1) 인듐의 유해성	3
2) 작업환경 중 공기 중 농도기준	3
3) 혈중 인듐 농도기준	3
II. 연구방법	4
1. 측정대상공정	4
2. 시료채취 및 제조	4
2.1. 공기 중 인듐 시료채취	4
2.1.1 시료채취기구 및 방법	4
2.1.2 개인시료 및 장소시료 채취방법	4
2.2. 혈청시료 제조	5
3. 인듐분석방법	5
4. 정확도 평가방법	7
4.1 실험실내 분석방법의 정확도	7
4.2 실험실간 분석방법의 정확도	7

Ⅲ. 연구결과	8
1. 공기 중 인덱스	8
1.1 공기 중 인덱스 농도	8
1.1.1 접합공정	8
가. 근로자의 호흡성 인덱스 노출 농도	8
나. 작업장소에서 호흡성 인덱스 노출 농도	11
다. 작업장에서의 총인덱스 농도	13
1.1.2 마감공정	14
가. 근로자의 개인의 호흡성 인덱스 노출농도	14
나. 마감공정 작업장소에서 공기 중 호흡성 인덱스농도	17
1.2 접합 및 마감 공정간 인덱스 농도의 비교	19
1.2.1. 근로자 개인시료(호흡성 인덱스)	19
1.2.2. 장소시료(호흡성 인덱스)	20
1.3 호흡성 인덱스와 총인덱스의 비교	22
1.4 개인시료와 장소시료의 비교(호흡성 인덱스)	23
1.5 인덱스 측정의 정확도 평가	25
1.5.1. 실험실내 분석의 정확도	26
1.5.2. 실험실간 분석의 정확도	28
가. 장소시료	28
나. 개인시료	32
2. 혈청시료	35
Ⅳ. 결 론	38
참 고 문 헌	40
ABSTRACT	43

표 목 차

<Table 1> Analytical Condition of ICP-MS	6
<Table 2> Workers' exposure to respirable indium in bonding process	9
<Table 3> Airborne respirable indium in bonding process (area sample)	12
<Table 4> Airborne total indium of area samples in bonding process by sampling date	14
<Table 5> Workers exposure to respirable indium dust in finishing process	15
<Table 6> Respirable indium concentration in finishing process area	18
<Table 7> Comparison of workers' exposure to respirable indium dust between bonding process and finishing process	20
<Table 8> Comparison of bonding process and finishing process for respirable indium of area air samples	21
<Table 9> Comparison of respirable and total indium in bonding process area	22
<Table 10> Comparison of personal and area samples in bonding process	24
<Table 11> Degree of variation of sampling and analysis for airborne total indium	27
<Table 12> Comparison of indium analysis results between Lab A and Lab B for two-paired respirable indium samples ..	29
<Table 13> Comparison of analytical results of respirable indium concentration from Lab A and Lab B	33
<Table 14> Results of spiked blood indium sample analysis	36

그 림 목 차

[Figure 1] Workers' exposure to respirable indium dust in bonding process	8
[Figure 2] Workers' exposure to respirable indium dust in bonding process	10
[Figure 3] Airborne total indium concentration by sampling position and date	13
[Figure 4] Distribution of workers' exposure to respirable indium in finishing processes	16
[Figure 5] Workers' exposure to respirable indium in finishing process	17
[Figure 6] indium concentrations in finishing process area	19
[Figure 7] Comparison of workers' exposure to respirable indium dust between bonding process and finishing process	20
[Figure 8] Comparison of bonding process and finishing process for respirable indium of area air samples	21
[Figure 9] Comparison of respirable and total indium in bonding process area	23
[Figure 10] Comparison of respirable indium dust between personal and area samples captured in bonding process	24
[Figure 11] Comparison of respirable indium dust between personal and area samples captured in finishing process	25
[Figure 12] Coefficient of variation of sampling and analysis for airborne total indium	27
[Figure 13] Comparison of Lab B result to Lab A for two-paired respirable sample (area sample)	31

[Figure 14] Comparison of Indium Analysis results of Lab A and B for two-paired respirable sample	31
[Figure 15] Comparison of analytical results of respirable indium concentration from Lab A and Lab B	34
[Figure 16] Error of spiked blood indium sample analysis by the concentration level	37



I. 서 론

1. 연구배경

인듐은 희귀금속으로 1980년 이전까지만 해도 산업적으로는 그다지 널리 사용되지 않았다(Cummings et al., 2012). 인듐이 대량으로 사용되기 시작한 것은 최근의 일로 LCD 패널이나 터치스크린 패드의 수요와 함께 인듐 사용량도 급증하였다. 인듐이 LCD 패널이나 터치스크린에 반드시 필요한 투명전선 소재인 Indium Tin Oxide(ITO)를 만드는 원료이기 때문이다. 인듐이 대량으로 사용된 이후 일본, 미국 및 중국에서 인듐 관련 사업장에서 일하던 근로자가 폐질환에 이환되거나 사망한 사례가 연이어 보고된 바 있다(Homma et al., 2003; Miyauchi et al., 2012). 우리나라에서도 근로자의 인듐노출농도는 물론 혈중 인듐농도에 대한 조사를 실시한 적이 있다(Yi, Lee & Shin, 2011). 그러나 아직 인듐 관련 사업장의 근로자 노출 및 작업장의 공기 중 인듐 농도에 관한 연구 및 보고는 우리나라뿐만 아니라 전 세계적으로 그다지 많지 않다. 인듐은 확실히 허파에 치명적인 손상을 가져오는 것으로 보고되고 있지만 아직도 상세한 건강장해 영향 및 그 기전(mechanism)은 밝혀지지 않는다. 인듐으로부터 근로자의 건강을 보호하기 위한 안전한 작업장 및 근로자 노출기준도 아직 확실하게 정해지지 않았다.

현재 인듐의 직업적 노출기준은 총먼지로 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정되어 있다. 하지만 이 기준은 최근 인듐에 의한 건강장해 사례가 보고되기 이전에 설정된 기준으로 이보다 낮은 수준에서 직업적 노출기준이 설정되어야 한다는 주장이 제기되고 있다. 또한 총먼지 보다는 호흡성 먼지를 기준으로 인듐의 노출기준을 설정해야 한다는 제안이 나와 있는 실정이다. 호흡성 먼지를 채취하면 시료 안의 인듐량은 상당히 적은 미량만 채취될 것이다. 따라서 어느 정도의 미량까지 실험실에서 정량적으로 분석이 가능한지 파악하는 것도 시급한 과제 중의 하나라고 볼 수 있다. 그 동안 인듐의 측정과 분석에 관한 연구도 거의 이루어진 바가 없다.

2. 연구목적

본 연구에서는 ITO target 제조 사업장의 일부 공정인 접합공정과 마감공정에서 공기 중 인듐농도 및 작업자의 인듐 노출 수준을 파악하고, 측정의 정확도에 관한 실험적 연구를 수행하였다. 구체적인 연구목적은 다음과 같다.

첫째, 모 ITO target 사업장의 접합공정과 마감공정에서 호흡성 먼지 중 인듐(이하 ‘호흡성 인듐’이라 함) 노출농도를 측정하여 그 특성을 파악한다.

둘째, 모 ITO target 사업장의 접합공정에서의 작업장 총먼지 중 인듐(이하 ‘총인듐’이라 함)농도를 측정하여 그 특성을 파악한다.

셋째, 호흡성 먼지 중 인듐농도와 총먼지 중의 인듐 농도를 비교분석한다.

넷째, 근로자 및 작업장에서 동시에 채취한 공기 중 인듐을 측정한 시료와 소혈청에 인듐을 주입한 혈청시료를 두 개의 실험실에서 따로 분석하여 실험실간 인듐분석의 정확도를 알아본다.

3. ITO target 제조공정

일반적으로 ITO target 제조는 산화인듐 분말을 제조하고, 이 분말을 산화주석 또는 산화아연 분말과 일정비율로 혼합하여 ITO target을 제조하기 위한 원료 분말을 제조한다. 이 분말을 성형공정에서는 판넬 모양의 형상을 만든 후, 소결공정에서 고온의 소결로로 소결(sintering)하여 ITO panel(target)을 제조한다. 소결된 ITO판넬(target)은 연마와 가공 공정을 거친 후 LCD또는 panel display 공정에 사용하기 위해 적절한 뒤판(back-plate)에 고정시킨다. 이 공정이 접합공정(bonding process)이다.

접합공정에서는 ITO target과 뒤판사이에 인듐금속을 넣고 약 200℃의 온도로 인듐금속을 용융시켜 ITO target과 뒤판을 접합시킨다. 뒤판과 접합된 ITO target은 마감공정에서 돌출부위나 매끄럽지 못한 부분을 제거하고 매끄럽게 처리한 후 LCD 및 패넬 디스플레이 제조업체로 납품한다(이광용, 2015).

본 연구대상인 이 사업장에서는 다른 사업장에서 이미 제조된 ITO target을 LCD 제조사업장 및 패넬 디스플레이 제조사업장 등에서 사용할 수 있도록 뒤판에 ITO target을 접합한 후 마감공정을 거쳐 ITO target 제품을 납품하고 있었다.

4. 인듐의 유해성 및 직업적 노출기준

1) 인듐의 유해성

Tanaka 등의 연구에 의하면 햄스터의 기관지에 ITO 입자를 반복적으로 노출시켜 흡입시키자 체중감소, 폐염증, 폐무게 증가 등의 폐 손상이 발생했다(Tanaka, et. al. 2010). 2003년에는 일본에서 인듐에 의한 첫 번째 사망사례가 보고되었다(Homma et al., 2003). 이후 2010년 5월까지 일본, 미국 그리고 중국 등에서 총 10건의 인듐에 의한 폐질환 사례가 보고되었다. 이런 직업병 사례와 실험적 연구를 통해 인듐은 치명적인 폐질환의 원인이 되는 것으로 밝혀졌다. 인듐이 일으키는 건강장해는 폐포단백증(Pulmonary alveolar proteinosis), Cholesterol ester crystals 와 콜레스테롤 육아종(Cholesterol granuloma), 폐섬유증, 폐기종 및 기흉 등 다양하다(Cummings et. al., 2012, O mae et. al., 2011, Chonan, et. al., 2007).

2) 작업환경 중 공기 중 농도기준

미국정부산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH), 미국 국립안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH)와 우리나라 고용노동부 화학물질 및 물리적 인자의 노출기준(고용노동부고시 제2013-38호)에 고시된 인듐 및 인듐화합물의 노출기준은 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다(NIOSH, 1992 & ACGIH 2015). 일본 후생노동성 가이드라인에서는 호흡성 인듐의 기준을 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 인듐 취급사업장의 작업환경관리 노출기준은 $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 제시하고 있다(MHLW, 2010).

3) 혈중 인듐 농도기준

아직까지 공식적인 혈중 인듐을 설정한 기관은 거의 없다. 일본 후생노동성에는 혈중 인듐 가이드라인으로 $3 \mu\text{g}/\text{L}$ 를 제시하였고, 이 기준을 초과하면 근무시간을 줄이거나, 작업방식을 바꾸거나 부서이동 또는 하던 일을 멈추고 치료를 하는 등의 조치를 취할 것을 권고하고 있다(MHLW, 2010).

II. 연구방법

1. 측정대상공정

본 연구에서 공기 중 인듐농도를 측정한 대상공정은 국내에 있는 모 ITO target 제조사업장의 접합공정(bonding process) 및 마감공정(finishing process)이었다.

2. 시료채취 및 제조

2.1. 공기 중 인듐 시료채취

2.1.1 시료채취기구 및 방법

1) 총먼지 중 인듐(Indium in total dust)

총먼지 중 인듐은 NIOSH Method 7303에 따라 실시하였다(National Institute for Occupational Safety and Health, 2005). 공기채취용 펌프(MSA ELF, MSA, USA)를 이용하여 시료를 채취하였으며 유량은 2.5 LPM이었다. 여과지는 MCE membrane filter(diameter: 37 mm, pore size: 0.8 μ m, Millipore, USA)를 사용하였다. 펌프 유량은 시료채취 전후에 비누거품 유량계(Gil Air, Gillian, USA)를 이용하여 보정하였다.

2) 호흡성 먼지 중 인듐(Indium in respirable dust)

호흡성 먼지 중 인듐 측정은 NIOSH Method 500에 따라 실시하였다(National Institute for Occupational Safety and Health, 2005). 시료채취 방법은 앞의 총먼지 중 인듐측정과 거의 같다. 다만 호흡성 먼지를 채취하기 위해 3단 카세트 앞에 알루미늄 사이클론(SKC, USA)을 장착하였다.

2.1.2 개인시료 및 장소시료 채취방법

본 연구에서는 근로자의 개인노출을 측정하기 위한 개인시료(personal sample)와 각 공정에서 장소시료(area sample)를 채취하였다.

개인시료를 채취하기 위한 시료채취기의 부착부위는 근로자의 어깨 앞 쪽의 가슴부위였다. 개인시료는 두 분석실간 분석의 정확도를 보기 위해 근로자 1인당 시료채취기를 2개씩 부착하여 동시에 측정하였다. 이 때 시료채취기는 한쪽에 2개를 부착하기 어려워, 하나는 왼쪽에, 다른 하나는 오른쪽에 부착하였다. 시료채취 후, 무작위로 하나는 실험실 A로, 다른 하나는 실험실 B로 보내 분석하였다.

장소시료는 작업이 이루어지는 5개실에서 작업에 방해가 되지 않는 지점을 선정하여 2개의 시료채취기를 동시에 설치하였다. 역시 무작위로 하나는 실험실 A로, 다른 하나는 실험실 B로 보내 분석하였다.

한편 실험실내의 분석변이를 파악하기 위한 장소시료로 접합공정에서 2개의 시료채취기를 설치한 지점 가까운 곳에 동시에 5개의 시료를 채취하였다. 이 시료는 실험실 A에서만 분석하였다.

2.2. 혈청시료 제조

혈청시료는 실험실 B에서 제조하였고 실험실 A에서 분석하였다. 혈청시료는 소혈청에 인듐을 첨가하여 제조하였다. 인듐농도는 $0.02 \mu\text{g/L}$, $0.2 \mu\text{g/L}$ 및 $2 \mu\text{g/L}$ 의 3가지 농도수준이었다.

실험실 A에서 분석한 혈청시료는 총 15개로 각 농도수준별로 5개씩이었다. 실험실 A에서 분석을 마치기 전까지 인듐의 농도수준은 알려주지 않았다.

3. 인듐분석방법

1) 공기시료의 시료전처리

인듐 및 인듐화합물을 포집한 MCE 여과지는 마이크로웨이브파 회화기(Mars, CEM Inc., USA)를 이용하여 회화시켰다. 용기(vessel)에 MCE 여과지를 넣은 후, 질산(Sigma-Aldrich, USA)을 1 ml 넣고, 고온고압의 마이크로웨이브파 회화기내부에서 여과지와 채취한 시료 등 유기물을 회화시킨 후, 20 ml의 용량플라스크에 넣고, 증류수를 보충하여 양을 20 ml로 맞추었다.

표준시료 조제와 연구대상 혈청을 전처리하기 위하여 희석용액을 조제하여

사용하였다. 희석용액을 일정량의 증류수가 담긴 1 L의 용량플라스크에 옮긴 후, Triton-X 100(Sigma-Aldrich, USA) 1 ml와 질산(Sigma-Aldrich, USA) 1 ml를 넣은 후, 증류수로 1L를 채웠다.

2) 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.

3) 분석기기

실험에 사용한 분석기기는 ICP 및 ICP-MS(Bruker, Thermo Science)를 이용하였다. ICP-MS의 분석조건은 <Table 1>에 나타났다.

<Table 1> Analytical Condition of ICP-MS

Parameter	Analytical Condition
Nebulizer	Micromist nebulizer(400 $\mu\text{l/min}$)
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

4. 정확도 평가방법

본 연구의 목적 중의 하나는 노출기준의 약 1/10수준인 저농도 작업환경에서의 공기 중 인듐과 그러한 수준에 노출될 경우의 혈액 중 인듐을 분석할 때 정확도를 평가하는 것이었다. 실제 작업장의 공기 중 인듐농도는 그 참값을 알 수 없다. 따라서 본 연구에서 정확도를 평가하는 방법으로는 작업현장에서 동시에 채취한 두 개의 시료를 각각 다른 2개의 실험실로 나누어 보내 분석을 하도록 한 다음, 그 결과를 비교하는 것이었다.

본 연구에 참가한 실험실은 2개로 하나는 한국에 있는 산업위생 전문실험실(이하 '실험실 A'라 함)로 20년 이상의 분석전문가가 분석을 실시하였다. 다른 하나는 사업장 소속의 실험실(이하 '실험실 B'라 함)로 일본에 있으며, 오랫동안 인듐을 분석해 온 전문가에 의해 ICP-MS를 이용하여 분석하였다. 분석방법은 실험실 A와 비슷하였다.

4.1 실험실내 분석방법의 정확도

실험실내 분석오차를 보기 위해 총인듐 측정시료기 5개씩 두 묶음을 동시에 설치하였다. 총인듐의 경우 인듐농도 수준이 다소 높아 분석하기에 충분한 양의 인듐을 채취할 수 있을 것으로 판단했기 때문이다. 또한 싸이클론을 장착한 시료채취기를 같은 지점에 5개를 동시에 설치하기는 어려웠다. 동일한 지점에서 5개 시료를 동시에 채취하기 위해서는 장소시료를 채취할 수밖에 없었다.

4.2 실험실간 분석방법의 정확도

실험실간의 분석오차를 보기 위해 모든 호흡성 인듐 측정시료는 두 개의 시료기를 하나의 쌍으로 설치하였다. 한 쌍에서 나온 양측 실험실의 평균값을 대푯값으로 가정하고 양측의 오차를 비교하였다.

Ⅲ. 연구결과

1. 공기 중 인듐

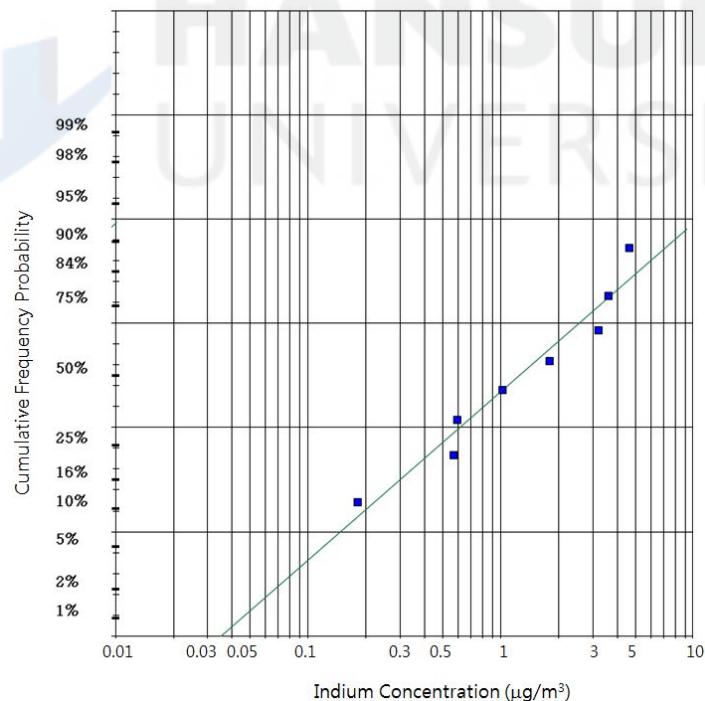
1.1 공기 중 인듐 농도

1.1.1 접합공정

가. 근로자의 호흡성 인듐 노출 농도

본 조사대상 사업장에는 ITO target 접합공정실이 2곳 있었다. 접합공정에서 근로자의 호흡성 인듐 노출 농도를 측정된 결과는 <Table 2> 및 [Figure 1]과 같다.

근로자마다 호흡성 먼지 채취기를 왼쪽과 오른쪽 어깨 아래 가슴부위에 각각 1개씩 2개를 부착하여 총 8개의 측정값을 얻었다. 8개 측정치의 기하평균은 $1.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 기하평균은 3.071이었다.



[Figure 1] Workers' exposure to respirable indium dust in bonding process.

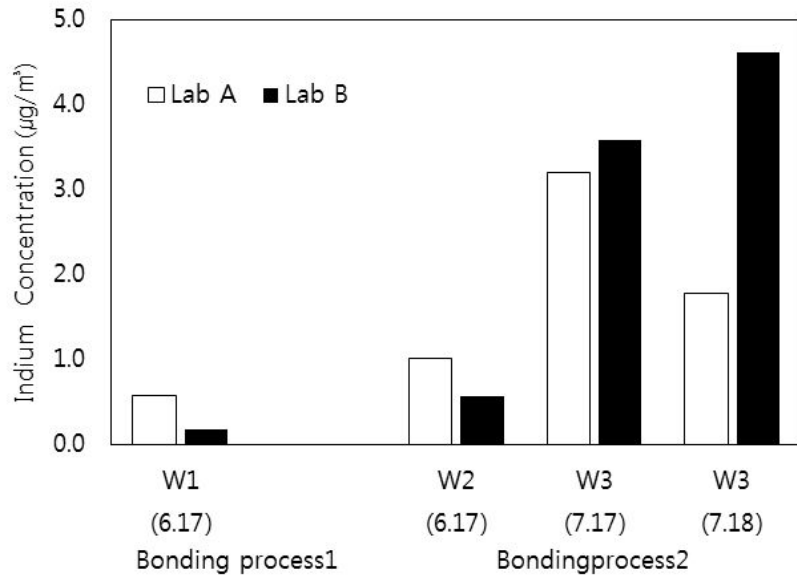
<Table 2> Workers' exposure to respirable indium in bonding process

Process	Worker	Sampling Date	Indium Concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
			Left side*	Right side*	Mean
Bonding 1	W1	6.17	0.59	0.18	0.38
	W2	6.17	1.02	0.57	0.80
	W3	7.17	3.21	3.59	3.40
Bonding 2	W3	7.18	1.78	4.62	3.20
	GM		1.80	2.12	2.06
	GSD		1.77	3.13	2.27
Total		N=8, GM = 1.25, GSD=3.071			

* Left side samples were analyzed by lab. A and right side samples by lab. B.

작업자 1명에게서 동시에 2개의 시료를 채취한 것은 실험실간 인듐분석의 정확도를 비교해 보기 위한 것이었다. 작업자의 동의를 구한 후, 2개의 호흡성 먼지 시료를 채취하기 위해 사이클론을 장착한 시료채취기와 공기채취펌프를 각각 2개씩을 부착하였다. 먼저 작업자는 X밴드를 착용시킨 후, 2개의 시료채취기를 각각 왼쪽과 오른쪽 어깨 앞쪽의 X밴드에 고정하였다. 시료채취 후 분석을 위해 2개의 시료는 무작위로 실험실 A(한국)와 실험실 B(일본)로 보냈다. 접합공정에서 채취된 시료는 우연히 왼쪽에서 채취된 시료는 실험실 A로 보내져 분석됐고, 오른쪽 시료는 실험실 B로 보내져 분석되었다.

[Figure 2]에서 보듯이 접합공정실간 차이보다는 일간차이가 큰 것으로 나타났다. 물론 접합공정 1에서는 6월 17일 하루만 측정했기 때문에 일간 변이를 파악하기는 어렵다. 그러나 6월 17일자의 접합공정 2와 비교해 볼 때 호흡성 인듐농도가 비슷하게 나타났으며, 접합공정 2에서 7월 18일 측정한 자료를 보면 두 지점의 농도가 비슷한 반면 6월 17일의 측정결과와는 큰 차이를 보이고 있기 때문에 공정간 차이보다는 일간 차이가 더 크게 나타나는 것으로 추정할 수 있을 것이다.



[Figure 2] Workers' exposure to respirable indium dust in bonding process.

접합공정에서는 ITO target과 지지대의 판 사이에 소량의 인듐을 넣고 약 200℃까지 가열하여 인듐을 용융시켜서 ITO target과 지지대를 접합시킨다. 이때 소량의 인듐금속은 용융상태가 되기 때문에 일부는 공기 중으로 기화된 후 급속히 응결되는 흠으로 발생되기 때문에 작업자는 공기 중 인듐에 노출될 가능성이 있다. 인듐의 녹는점은 약 156℃이며 끓는점은 약 2000℃이다. 접합공정에서 인듐을 녹이는 온도는 녹는점보다 약간 높은 200℃정도이므로 증기압은 크지 않으며(National Toxicology Program, 2009), 공기 중 흠으로 발생하는 양도 많지 않을 것이다. 접합공정에서 공기 중 인듐먼지가 발생될 또 다른 가능성은 ITO target에 오염되어 있던 ITO 입자이다. 가공·연마공정에서 충분히 세척되지 않은 ITO target에 붙어 있던 ITO 먼지가 접합공정에서 재비산될 수 있기 때문이다(이광용, 2015).

접합공정 1에서 채취한 시료는 하나는 0.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (실험실 A에서 분석)였으며, 다른 하나는 0.18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (실험실 B에서 분석)로 나타나 비교적 큰 차이(3.2배)가 나타났다. 이러한 차이는 시료채취과정이나 실험실 분석과정에서 발생할 것이다.

시료채취과정에서 차이가 발생할 가능성이 큰 것으로는 시료채취기의 위치이다. 시료채취기의 위치가 왼쪽이나 오른쪽이나에 따라 달라질 수 있기 때문

이다. 또한 실험실의 분석오차에서 기인한 것일 수도 있다.

한편 접합공정 2에서는 6월 17일과 7월 17-18일 등 총 3일간 측정할 수 있었다. 접합공정 2에서의 측정결과는 실험실 A와 B에서 각각 $1.02\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $0.57\mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $0.80\mu\text{g}/\text{m}^3$), $3.21\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $3.59\mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $3.40\mu\text{g}/\text{m}^3$) 그리고 $1.78\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $4.62\mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $3.20\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다. 두 시료간 차이는 뒤에서 별도로 논의하기로 하고, 여기에서는 접합공정의 호흡성 인듐 노출농도 수준으로 A와 B의 평균인 $0.80\mu\text{g}/\text{m}^3$, $3.40\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 $3.20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 세 작업자의 노출농도로 판단하였다.

접합공정 2의 기하평균은 $2.06\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 일본 후생노동성에서 가이드라인으로 제시한 호흡성 인듐의 노출기준인 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 약 1/5수준에 불과하였다. 또한 기하평균 $2.06\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 기하표준편차 2.27을 바탕으로 노출기준인 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과할 확률을 산출한 결과는 2.7%로 비교적 안전한 것으로 나타났다.

다만 최근 ITO 제조공정에서 인듐 노출에 의해 작업자가 심각한 폐손상을 입은 경우는 물론 사망자까지 발생한 적이 있으며, 아직까지 확실한 안전농도가 알려지지 않은 점을 고려할 때 보다 엄격한 관리가 필요하다고 할 수 있을 것이다. 미국의 산업안전보건청(Occupational Safety and Health Administration; OSHA)에서는 일반적으로 노출기준의 50% 수준을 조치기준(action limit, AL)으로 설정하고, 측정치가 AL를 초과하면 그 측정치가 2주 연속하여 AL미만에 이를 때까지 연속하여 작업환경을 측정하여 안전하게 관리하도록 하고 있으므로, 인듐관련 작업장에서도 관리나 조치기준으로는 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기준으로 하는 것이 보다 안전할 것으로 생각된다.

접합공정 2에서 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과할 확률을 산출한 결과는 13.9%로, 향후 주기적으로 작업환경 측정이나 근로자의 생물학적 노출측정과 같은 지속적인 관리가 필요할 것으로 판단되었다.

나. 작업장소에서 호흡성 인듐 노출 농도

접합공정 1과 접합공정 2의 작업장소에서 호흡성 인듐 노출 농도를 측정하였다. 장소시료는 두 개의 시료채취기를 한 쌍으로 묶어 같은 지점에서 동시

에 2개씩의 시료를 채취하였다. 측정지점은 작업에 방해되지 않는 장소로 비교적 작업자와 가까운 위치를 선정하였다. 2개의 시료는 무작위로 실험실 A와 실험실 B로 보내어 분석하도록 했다. 접합공정실에서 호흡성 인듐 노출 농도를 측정한 결과는 <Table 3>과 같다.

접합공정 1에서는 6월17일과 7월 17-18일 등 총 3일간 측정하였다. 측정 결과는 실험실 A와 B에서 각각 $0.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $0.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$), $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $0.35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $0.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 그리고 $0.02 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $0.08 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다. 근로자의 호흡성 인듐 노출 농도 수준은 실험실 A와 B에서 분석한 2개 시료의 평균값을 대푯값으로 볼 때, 기하평균은 $0.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 기하표준편차는 $2.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

접합공정 2에서는 실험실 A와 B에서 각각 $1.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $0.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $0.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$), $0.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $0.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $0.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 그리고 $0.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $0.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다. 3일간 측정치의 기하평균은 $0.60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 기하표준편차는 $1.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

<Table 3> Airborne respirable indium in bonding process (area sample)

Process	Sampling Date	Indium Concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
		Replication 1*	Replication 2*	Average
Bonding1	6.17	0.31	0.29	0.30
	7.17	0.30	0.35	0.33
	7.18	0.02	0.08	0.05
	GM	0.12	0.20	0.17
	GSD	4.82	2.23	2.89
Bonding2	6.17	1.00	0.34	0.67
	7.17	0.75	0.55	0.65
	7.18	0.52	0.45	0.49
	GM	0.73	0.44	0.60
	GSD	1.39	1.23	1.19
Total		N=12, GM=0.30, GSD=2.872		

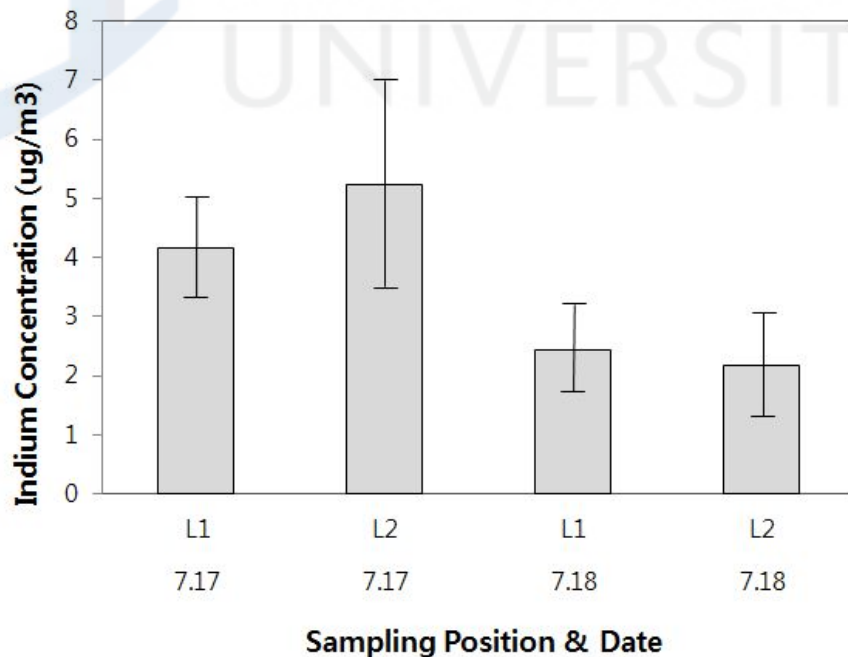
* Replication 1 samples were analyzed by lab. A and replication 2 samples by lab. B.

다. 작업장소에서의 총인듐 농도

접합공정 2에서는 두 지점에서 2일간 총먼지 중 인듐(총인듐)농도를 측정하였다. 시료를 채취한 두 지점은 접합공정 2의 작업장 안에서 서로 떨어져 있는 두 대의 작업대 위의 위치였다. 각 지점에서 한번 시료를 채취할 때 동시에 5개의 시료를 채취하였고, 이 시료는 모두 실험실 A에서 분석하였다. 이와 같이 한 지점에서 5개의 시료를 동시에 채취한 것은 실험실 내 분석오차를 보기 위한 것이었다.

접합공정 2의 장소에서 총인듐 농도를 측정한 결과는 <Table 4>와 같다. 이틀간 채취한 30개 시료의 기하평균은 $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 기하표준편차는 1.80이었다.

장소시료는 같은 지점에서 다른 날 측정한 결과(일간 변이)와 같은 날 다른 지점에서 측정한 결과(공간 변이)를 살펴보면 공간 변이보다 일간 변이가 큰 것을 알 수 있다([Figure 3]).



[Figure 3] Airborne total indium concentration by sampling position and date.

<Table 4> Airborne total indium of area samples in bonding process by sampling date

Date	Sampling Location	N	Samples taken simultaneously in a single position					Mean	SD
			1	2	3	4	5		
7.17	L1	5	3.36	4.60	5.60	3.66	3.54	4.15	0.94
	L2	5	5.47	5.18	6.12	4.23	5.09	5.22	1.79
	Subtotal	N=10, GM = 4.59, GSD=1.235							
7.18	L1	5	3.83	4.86	1.24	1.30	0.92	2.43	0.68
	L2	5	1.33	2.05	1.95	3.63	1.92	2.18	0.86
	Subtotal	N=10, GM = 2.00, GSD=1.738							
Total			N=20, GM = 3.03, GSD=1.804						

1.1.2 마감공정

가. 근로자의 개인의 호흡성 인듐 노출농도

본 조사 사업장에 있는 3개의 마감공정에서 근로자 개인의 호흡성 인듐 노출 농도를 측정한 결과는 <Table 4> 및 [Figure 4]와 같다.

마감공정에서는 ITO target의 표면이나 ITO target과 뒤판(back-plate)의 접합면 등을 가다듬고 제품을 깨끗하게 닦아낸다. 이때 ITO 먼지나 인듐 흡이 공기 중으로 비산될 가능성이 있다 (이광용, 2015).

마감공정 1에서는 3일(2014.6.17./7.17/7.18)간 1명의 작업자의 노출수준 측정이 가했다. 시료는 접합공정과 동일한 방법으로 채취하였다. 접합공정과 동일하게 본 공정에서도 작업자 1명에 대해 개인시료 2개를 동시에 채취하였다. 이후 무작위로 실험실 A와 실험실 B로 보내졌다.

실험실 A에서 분석한 최종 호흡성 인듐 노출 농도는 0.83–2.33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (기하

평균 $1.35\mu\text{g}/\text{m}^3$)였으며, 실험 B의 결과는 $0.64-1.79\mu\text{g}/\text{m}^3$ (기하평균 $1.08\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타나 실험실 A의 기하평균이 실험실 B의 기하평균값보다 1.3배 높게 나타났다. 이 오차에 대해서 역시 뒤에서 별도로 논하기로 한다.

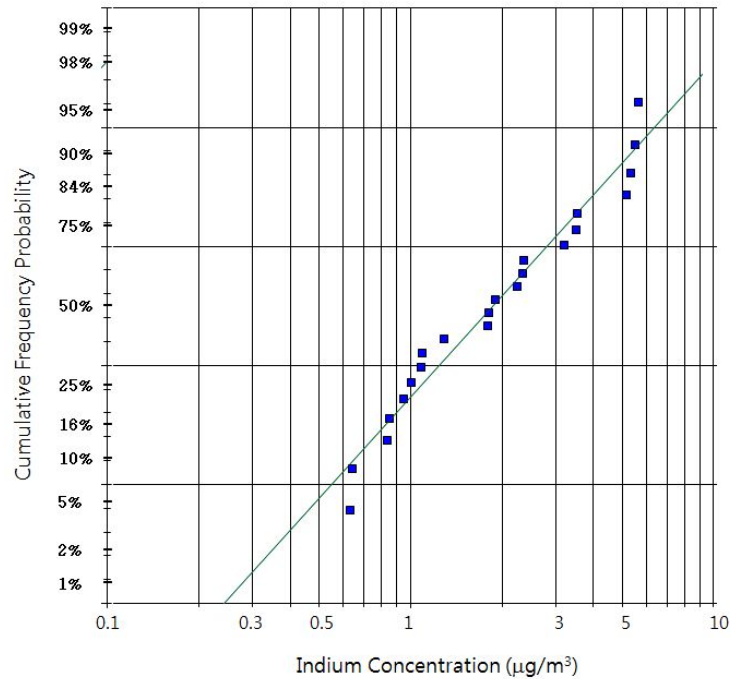
<Table 5> Workers exposure to respirable indium dust in finishing process

Process	Worker	Sampling Date	Personal Respirable Indium Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
			Side 1*		Side 2*		Mean
Finishing 1	W4	6.17	R**	0.83	L***	1.09	0.96
		7.17	R	2.33	L	1.79	2.06
		7.18	R	1.28	L	0.64	0.96
		GM		1.35		1.08	1.24
		GSD		1.68		1.68	1.55
Finishing 2	W5	6.17	R	1.08	L	1.90	1.49
	W6		R	2.23	L	0.94	1.58
	W7	7.17	L	3.18	R	1.80	2.49
	W2		R	5.11	L	5.31	5.21
	W2	7.18	R	1.00	L	3.52	2.26
	W7		L	0.85	R	0.63	0.74
		GM		1.79		1.83	1.93
		GSD		2.06		2.21	1.91
Finishing 3	W5	7.17	R	5.59	L	5.45	5.52
		7.18	R	3.49	L	2.34	2.92
		GM		4.42		3.58	4.01
		GSD		1.39		1.82	1.57
Total			N=22, GM = 1.87, GSD=2.053				

* Side 1 samples were analyzed by lab. A and Side 2 samples by lab. B.

** L: left side position of personal sample

*** R: right side position of personal sample.



[Figure 4] Distribution of workers' exposure to respirable indium in finishing processes

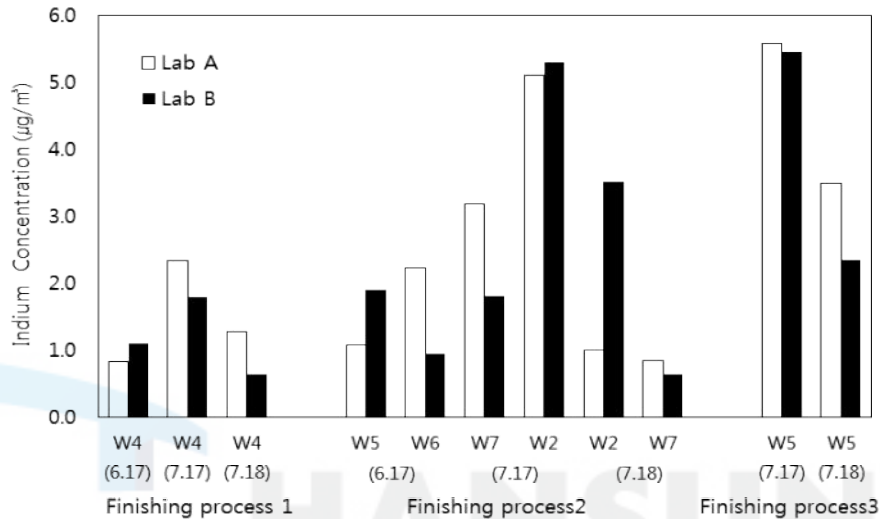
마감공정 1에서의 공기 중 호흡성 인듐 노출 농도는 두 실험실 결과의 평균값인 $0.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 $0.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보는 것이 가장 합리적일 것으로 판단된다.

한편 마감공정 2에서의 측정결과는 실험실 A와 B에서 각각 $0.85\text{--}5.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (기하평균 $1.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 $0.63\text{--}5.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $1.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 나타났다. 두 시료간 차이는 뒤에서 별도로 논의하기로 하고, 여기에서는 마감공정 2의 공기 중 호흡성 인듐 노출 농도 수준으로 A와 B의 평균인 $0.74\text{--}5.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 마감공정 2의 4명의 작업자의 노출농도로 판단하였다.

마감공정 3에서의 측정결과는 실험실 A에서는 $3.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $5.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (기하평균 $4.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$)였으며, 실험실 B에서는 $2.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $5.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $1.58 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 나타났다. 마감공정 3의 공기 중 호흡성 인듐 노출 수준으로 A와 B의 평균인 $5.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $2.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 마감공정 3 작업자의 노출농도로 판단하였다.

마감공정 1의 기하평균은 $1.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 일본 후생노동성에서 가이드라인

으로 제시한 호흡성 인듐의 노출기준인 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 약 1/10수준에 불과하였다. 또한 기하평균 과 기하표준편차 1.55를 바탕으로 노출기준인 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과할 확률은 0.0001%미만으로 나타났다. 앞서 접합공정과 마찬가지로 Action Limit $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기준으로 이를 초과할 확률을 산출한 결과는 0.1%로 안전한 것으로 나타났다.



[Figure 5] Workers' exposure to respirable indium in finishing process.

마감공정 2의 기하평균은 $1.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 노출기준 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 1/5 수준이었다. 또한 기하평균과 기하표준편차 1.91을 바탕으로 Action Limit인 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과할 확률은 7.1%이다.

마감공정 3의 기하평균은 $4.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 노출기준인 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 2/5배 이고, 기하표준편차 1.57을 바탕으로 Action Limit $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과할 확률은 32%로 지속적인 주의가 필요할 것으로 보인다.

나. 마감공정 작업장소에서 공기 중 호흡성 인듐농도

세 곳의 마감공정 작업장소에서 공기 중 호흡성 인듐을 측정한 결과는 <Table 6> 및 [Figure 6]에서 보는 바와 같이 총 18개 시료의 기하평균은 $0.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하표준편차는 2.553이었다.

마감공정 장소시료도 접합공정에서와 마찬가지로 한 지점에서 동시에 두

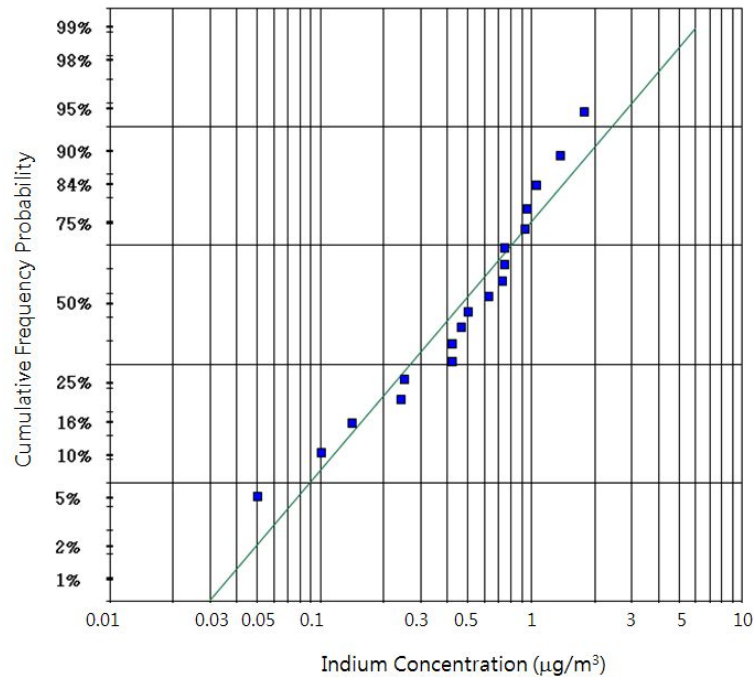
개의 시료를 채취하였다. 시료채취 장소는 작업에 방해되지 않는 범위에서 비교적 작업자와 가까운 위치를 선정하였다. 2개의 시료는 무작위로 실험실 A와 실험실 B로 보내 분석하도록 했다.

세 곳의 마감공정 1의 측정결과는 실험실 A와 B에서 각각 $0.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $0.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $0.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$), $0.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $0.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $0.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 그리고 $1.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $0.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $0.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다. 근로자의 인듐노출 농도와 마찬가지로 마감공정 1에서의 호흡성 인듐 노출 농도는 실험실 A와 B 시료의 평균값을 대푯값으로 판단하였다. 3일간의 평균측정치의 기하평균은 $0.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 기하표준편차는 $1.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

마감공정 2에서는 실험실 A와 B에서 각각 $0.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $0.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $0.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$), $1.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $0.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $1.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 그리고 $0.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $0.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났다. 3일간 측정치의 기하평균은 $0.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 기하표준편차는 $1.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

<Table 6> Respirable indium concentration in finishing process area

Process	Sampling Date	Indium Concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
		Lab A	Lab B	Average
Finishing1	6.17	0.25	0.24	0.24
	7.17	0.50	0.42	0.46
	7.18	1.78	0.10	0.94
	GM	0.61	0.22	0.47
	GSD	2.71	2.06	1.98
Finishing2	6.17	0.74	0.72	0.73
	7.17	1.36	0.93	1.14
	7.18	0.46	0.42	0.44
	GM	0.77	0.66	0.72
	GSD	1.72	1.50	1.61
Finishing3	6.17	0.05	0.14	0.10
	7.17	0.95	0.62	0.78
	7.18	1.05	0.74	0.90
	GM	0.37	0.40	0.41
	GSD	5.64	2.50	3.42
Total		N=18, GM = 0.46, GSD=2.553		



[Figure 6] indium concentrations in finishing process area.

1.2 접합 및 마감 공정간 인듐 농도의 비교

1.2.1. 근로자 개인시료(호흡성 인듐)

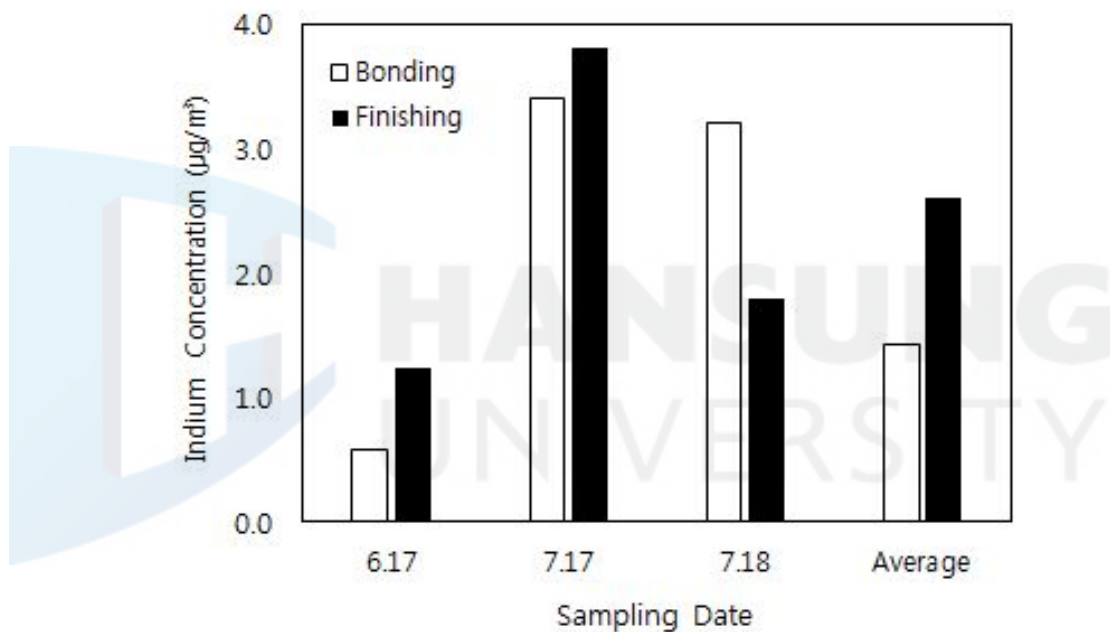
접합공정과 마감공정에서 근로자의 호흡성 인듐 노출농도를 비교한 결과는 <Table 7> 및 [Figure 7]과 같다. 각 공정의 근로자 호흡성 인듐 농도는 그 공정에서의 평균값이다.

근로자의 호흡성 인듐농도는 전반적으로 접합공정보다 마감공정이 약간 높은 것으로 나타났다. 접합공정은 마감공정의 47-179%로 나타나 변이가 큰 것으로 나타났다. 평균적으로는 마감공정이 접합공정의 약 54%였다. 그러나 그 변이가 매우 컸기 때문에 마감공정에서 일하는 근로자도 개별적으로는 높은 농도에 노출될 가능성도 있다는 것을 의미한다.

이는 국내 ITO, IZO target 제조업 6개 사업장을 대상으로 이광용(2015) 등이 연구한 결과와 비교했다. 이 등의 연구에서 접합공정의 기하평균은 $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 마감공정의 $6.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 약 46% 수준이었다.

<Table 7> Comparison of workers' exposure to respirable indium dust between bonding process and finishing process ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Process	Sampling Date			
	6.17	7.17	7.18	Average
Bonding	0.59 (47)	3.40 (89)	3.20 (179)	1.42 (54)
Finishing	1.25 (100)	3.81 (100)	1.79 (100)	2.61 (100)



[Figure 7] Comparison of workers' exposure to respirable indium dust between bonding process and finishing process.

1.2.2. 장소시료(호흡성 인듐)

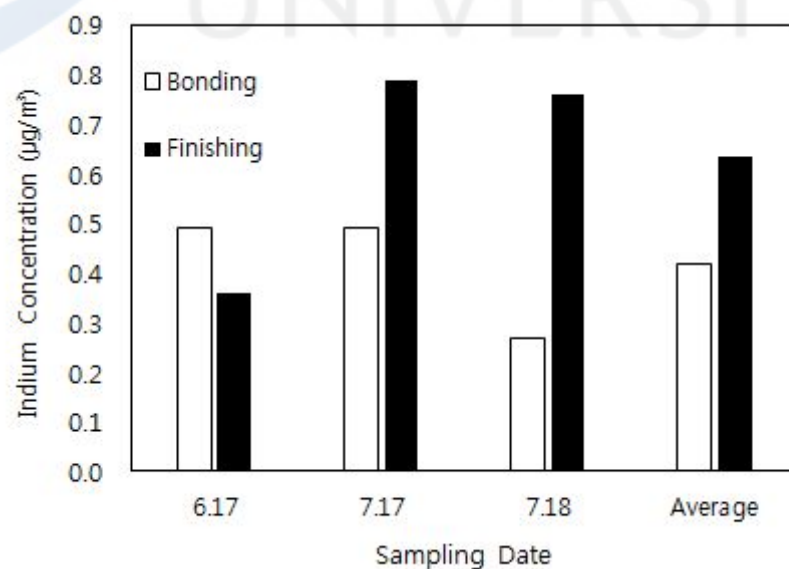
접합공정과 마감공정의 공정간 장소시료의 호흡성 인듐농도를 비교한 결과는 <Table 8> 및 [Figure 8]과 같다. 각 공정의 장소에서의 공기 중 호흡성 인듐 농도는 그 공정의 평균값이다.

장소시료의 인듐농도도 전반적으로 접합공정보다 마감공정이 높은 것으로

나타났다. 접합공정의 장소농도는 마감공정의 36-136%로 나타나 장소시료의 변이도 폭이 매우 큰 것으로 나타났다. 한편 장소시료와 개인시료간 공정별 차이는 날짜별로 일치하지 않았다. 6월 17일은 개인시료는 접합공정이 높았으나 장소시료는 마감공정이 더 높게 나타났고, 7월 18일은 반대로 개인시료는 접합공정이 마감공정보다 더 높았고, 장소시료는 접합공정보다 마감공정이 더 높게 나타났다. 이것은 장소시료가 개인의 노출농도를 정확하게 반영하지 못할 수도 있다는 점을 시사한다.

<Table 8> Comparison of bonding process and finishing process for respirable indium of area air samples ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Process	Sampling Date			
	6.17	7.17	7.18	Average
Bonding	0.49 (136)	0.49 (62)	0.27 (36)	0.42 (66)
Finishing	0.36 (100)	0.79 (100)	0.76 (100)	0.64 (100)



[Figure 8] Comparison of bonding process and finishing process for respirable indium of area air samples.

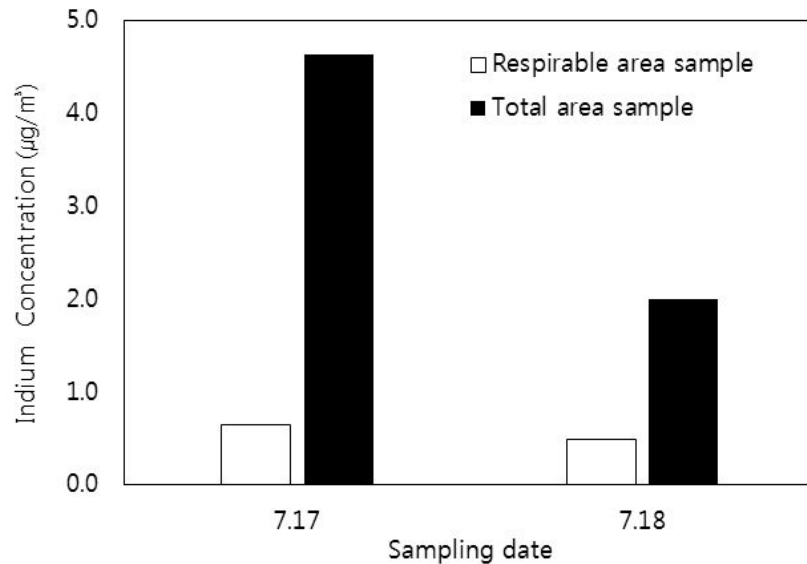
1.3 호흡성 인듐과 총인듐의 비교

호흡성인듐과 총인듐을 비교하기 위한 시료는 접합공정 작업장소 두 지점에서 2일간 시료를 채취하였다. 한 지점에 알루미늄 싸이클론을 장착하여 두개의 호흡성 먼지를 동시에 채취하였고 같은 지점에서 동시에 총 먼지를 5개를 채취하였다. 그 결과는 <Table 9> 및 [Figure 9]에서 보는 바와 같이 호흡성인듐은 총인듐의 16-20% 수준인 것으로 나타났다.

이러한 결과는 기존 연구와 일치하였다. 이광용 등(2015)이 국내 ITO, IZO target 제조업 6개 사업장을 대상으로 호흡성 인듐과 총인듐을 동시에 측정하여 비교분석한 결과, 평균적으로 호흡성 인듐은 총인듐의 약 17%수준이었다. 본 조사에서 마감공정에서는 총인듐을 측정하지 못하여 마감공정에서 총인듐에 대한 호흡성 인듐의 비는 파악할 수 없었으나 이광용 등의 연구에 따르면 마감공정에서의 호흡성 인듐도 총인듐의 16%수준이라고 하였다.(이광용 2015).

<Table 9> Comparison of respirable and total indium in bonding process area

Sampling position	Sampling Date	Indium Concentration(unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
		N	Respirable (Mean $\pm$ SD)	N	Total (Mean $\pm$ SD)
1	7.17	2	0.65 $\pm$ 0.14 (16%)	5	4.15 $\pm$ 0.94 (100%)
2	7.18	2	0.49 $\pm$ 0.05 (20%)	5	2.43 $\pm$ 1.79 (100%)



[Figure 9] Comparison of respirable and total indium in bonding process area.

1.4 개인시료와 장소시료의 비교(호흡성 인듐)

접합공정과 마감공정에서 측정한 개인시료와 장소시료의 차이를 비교한 결과는 <Table 10>과 [Figure 10] 및 [Figure 11]에서 보는 바와 같다.

개인노출농도, 즉 개인시료는 장소시료보다 보통 2배 이상 높은 것으로 나타났다으며, 심한 경우에는 10배 가까이 높은 것으로 나타났다. 이것은 장소시료의 경우 공기 중으로 발생한 인듐이 넓은 공간으로 확산되어 농도가 희석되기 때문에 일정한 수준을 보이지만 개인노출농도는 발생원 가까이에서 시료를 채취하기 때문에 작업량이 많거나 발생원 가까이에서 작업을 해야 하는 경우 높은 농도의 인듐에 노출되기 때문인 것으로 보인다.

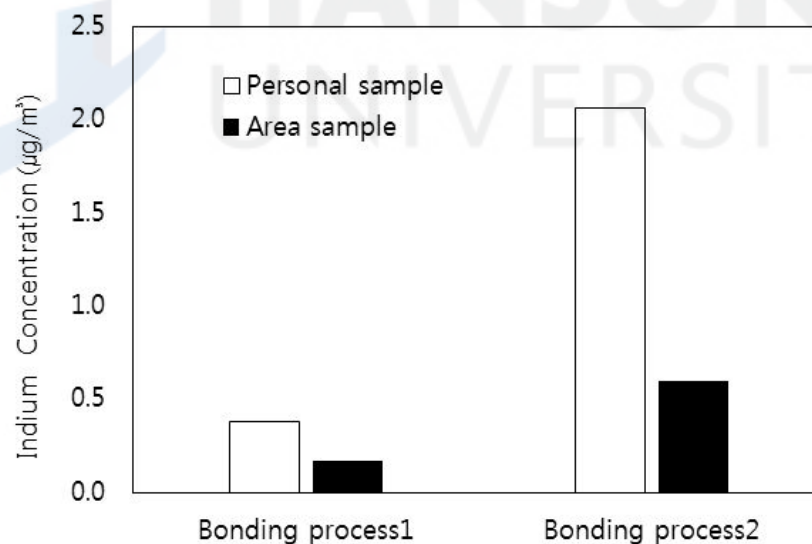
따라서 개인이 노출을 정확히 평가하기 위해서는 개인시료를 채취하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 그러나 개인시료는 일간 변이가 크기 때문에 여러 날에 걸쳐 충분한 시료수를 채취하지 않으면 과소평가하거나 과대평가할 가능성이 커지는 문제점이 있다. 향후 개인시료를 측정하도록 할 경우 이러한 점을 잘 감안해야 할 것이다.

한편 이 조사결과에서 장소시료는 개인노출농도를 잘 반영하지 못한다는

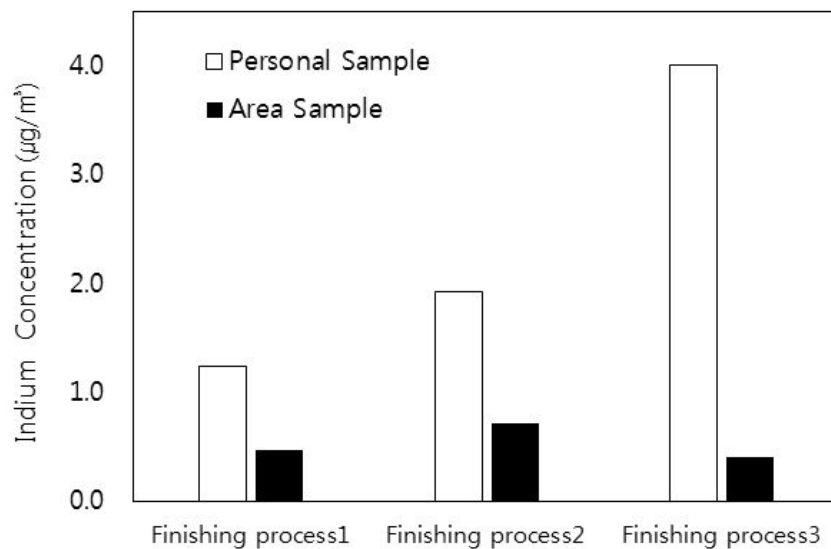
점이 드러났다. 장소시료를 측정하여 작업장을 관리하고자 할 때에는 이점을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

<Table 10> Comparison of personal and area samples in bonding process (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Process		Indium Conc. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
		Personal sample	Area sample
Bonding	1	0.38 (224%)	0.17 (100%)
	2	2.06 (343%)	0.60 (100%)
Finishing	1	1.24 (264%)	0.47 (100%)
	2	1.93 (268%)	0.72 (100%)
	3	4.01 (978%)	0.41 (100%)



[Figure 10] Comparison of respirable indium dust between personal and area samples captured in bonding process.



[Figure 11] Comparison of respirable indium dust between personal and area samples captured in finishing process.

1.5 인듐 측정의 정확도 평가

실험실에서 인듐을 분석하는 방법은 일반적인 금속분석과 크게 다르지 않다. 인듐분석이 특별히 어렵거나 까다롭다고 알려진 바도 아니다. 다만, 대부분의 인듐 노출은 주석과 산화물 형태, 즉 Indium-Tin-Oxide(ITO) 형태로 발생되기 때문에 전처리가 중요하며, 공기 중 또는 혈중 농도가 낮아 극미량을 분석해야 한다는 점에서 분석오차가 크게 발생할 가능성이 충분히 있다. 그 동안 인듐측정이나 분석이 많이 이루어지지 않은 점도 인듐분석의 정확도를 평가해 보아야 할 이유 중의 하나이기도 하다.

일본 후생노동성 가이드라인에 제시된 호흡성 인듐의 노출기준은 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 공기 중 호흡성 인듐농도가 $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상이면 작업환경을 개선하도록 권고하고 있다. 따라서 인듐 노출농도나 작업환경을 측정할 때에는 $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 수준까지는 측정을 해야 할 것으로 판단된다. 근로자 개인의 호흡성 먼지를 채취한다면 대체로 유량이 2.5 Lpm이므로 6시간 정도 시료를 채취한다면 공기량은 0.9 m^3 가 될 것이므로 실험실에서 최소한 인듐을 $0.1 \mu\text{g}$ 까지는 정량해

야 할 것이다. 본 연구에서는 실제 ITO 접합공정과 마감공정에서 채취한 시료를 가지고 실험실내와 실험실간 분석이 정확도를 평가해 보고자 하였다.

1.5.1. 실험실내 분석의 정확도

실험실내에서 인듐을 분석 정확도를 평가하기 위해 접합공정의 두 지점을 선정하여 각 지점에서 동시에 5개씩 이틀간 4개 군(set)의 20개 총 먼지 시료를 채취하였다.

실험실내 분석변이를 보기 위한 시료는 모두 장소시료였으며 개인시료는 채취하지 않았다. 한꺼번에 여러 개의 개인시료를 동시에 채취하기 어려웠기 때문이다. 또한 ITO target 제조공정에서는 근로자가 작업대에 밀착하여 매우 미세한 작업을 수행하므로 인듐발생원에 근접해 있기 때문에 근로자의 몸 오른쪽과 왼쪽간에도 인듐 농도에는 상당한 차이가 발생할 가능성이 높아 균질한 시료를 채취하기 어려웠기 때문이다. 분석변이를 파악하기 위해서는 개인시료보다 장소시료가 시료채취 측면이나 시료의 균질성 측면에서 더 낫다고 보았다.

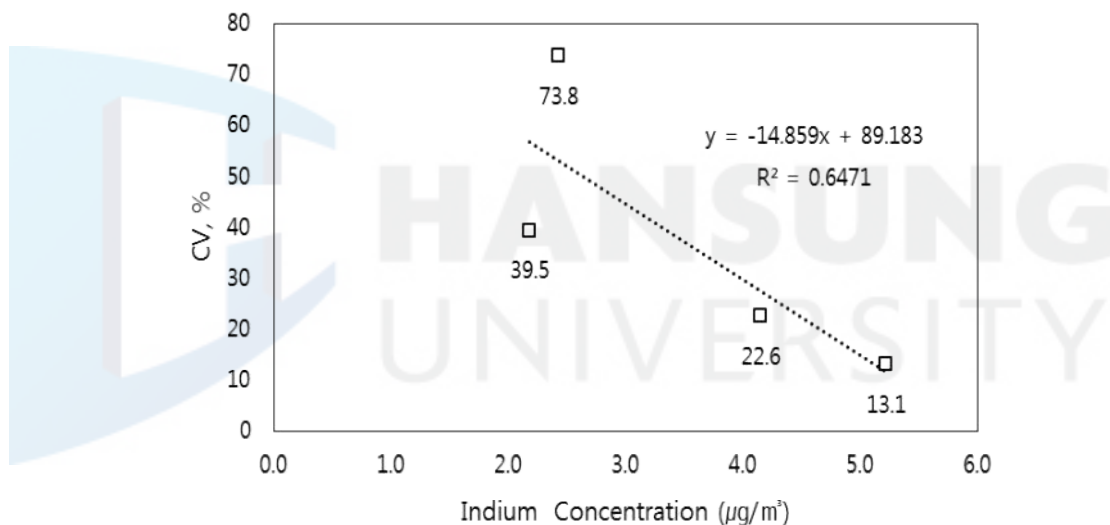
그럼에도 불구하고 같은 지점에서 채취한 장소시료가 모두 같은 양의 인듐을 채취한 것인지는 확인이 불가능하다. 비록 짧은 거리이기는 하지만 시료채취 위치나 방향에 따라 공기 중 농도차이가 있을 수 있다. 또한 시료채취과정에서 오차가 발생할 수도 있다. 이러한 점을 감안하더라도 현장에서 채취한 시료를 가지고 실험실에서 분석변이를 보기 위해서는 비교적 농도가 일정할 것으로 보이는 장소시료를 선정하여 동시에 여러 개의 시료를 채취하여 그 시료를 실험실에서 분석하는 방법이 최선일 것이다.

동일한 위치에서 5개의 시료를 채취한 4개 군의 시료는 모두 실험실 A에서 분석하였고 그 결과는 <Table 11>과 같다.

동일한 지점에서 동시에 채취한 5개 시료의 최종 농도간 변이는 변동계수로 13~74%로 비교적 높게 나타났다. 일반적으로 현장에서의 작업환경측정 오차, 즉 시료채취 및 분석오차의 허용범위는 $\pm 25\%$ 정도로 본다. 7월 17일 측정치는 대체로 이 범위이내인 것으로 나타났고, 7월 18일에는 40~74%로 이 범위를 벗어났다. 이러한 오차가 모두 시료채취 및 분석에서 발생한 오차만은 아니고 시료채취 지점별로 공기 중 농도차이에서 비롯된 것도 포함되어 있을 것이다.

L1의 측정치의 평균값은 $4.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 표준편차는 0.94로 22.6% 변동계수(CV)값을 보였다. L2 측정치의 평균값은 $5.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고 표준편차는 0.68로 변동계수값은 13.1%이다. 둘째날 L3의 평균값은 $2.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 첫날보다 낮았으나 표준편차값은 1.79이고 L4의 경우 평균값은 $2.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 표준편차값은 0.86으로 전날에 비하여 세 배가량 높은 변동계수값을 보였다.

변동계수가 비교적 낮았던 첫 번째 측정일의 L1과 L2의 농도수준은 $4\sim 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 반면 변이가 큰 둘째날의 농도수준은 $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 약 45%가량 낮아졌다. [Figure 12]에 전체적인 변동계수의 추세를 볼 때 평균농도가 가장 높은 $5.22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 일 때 변동계수가 13.1%로 오차가 가장 작았다. 농도가 낮아질수록 변동계수는 커지는 추세를 보였다.



[Figure 12] Coefficient of variation of sampling and analysis for airborne total indium.

<Table 11> Degree of variation of sampling and analysis for airborne total indium

Sampling Location	Sampling Date	Indium Conc.($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			CV
		N	Mean	SD	
L1	7.17	5	4.15	0.94	22.6
L2	7.17	5	5.22	0.68	13.1
L1	7.18	5	2.43	1.79	73.8
L2	7.18	5	2.18	0.86	39.5

1.5.2. 실험실간 분석의 정확도

가. 장소시료

같은 지점에서 2개를 동시에 채취한 시료를 두 실험실에서 나누어 분석한 결과는 <Table 11>과 같다.

쌍으로 된 시료를 채취하기 위해 각 공정실 내에 적절한 장소를 선정하였다. 한 지점마다 두 개의 시료채취기를 설치하여 동일한 시간동안 시료를 채취하였다. 싸이클론을 장착하여 호흡성 먼지를 채취하였고 유량은 시료채취 전에 2.5 Lpm으로 맞추었고 시료채취 후에 이 유량이 유지되는지 확인하였다. 시료는 각각 하나씩 실험실 A와 B로 보내 분석하도록 하였다. 그 결과 <Table 11>에서 보는 바와 같이 전반적으로 인듐량이 적으면 실험실간 오차가 커지고 인듐량이 많아질수록 실험실간 차이가 감소하는 것으로 나타났다.

실제 시료의 인듐량에 대한 참값이 얼마인지는 알 수가 없다. 또한 실험실 A와 B의 분석결과 중 어느 것이 정확한 값인지 또는 참값에 가까운지도 알 수가 없다. 따라서 본 연구에서는 먼저 A를 기준으로 B의 분석결과값이 A의 몇 %에 해당되는지를 비교해 보았다. 그리고 두 실험실간 분석량의 차이는 다음과 같이 두 실험실간 평균값을 참값으로 가정하고, 두 실험실간 차이가 이 참값의 몇 %가 되는지 계산하였다.

$$\frac{\frac{|A-B|}{(A+B)/2}}{\times 100 (\%)}$$

여기에서 A: A실험실의 분석값

B: B실험실의 분석값

<Table 12> Comparison of indium analysis results between Lab A and Lab B for two-paired respirable indium samples (area sample)

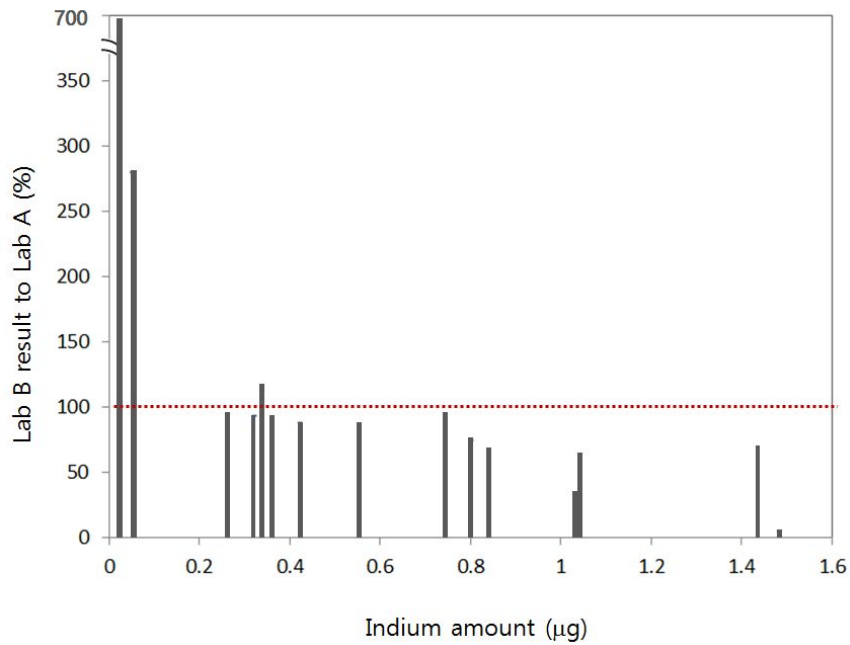
Range of Indium Amount	Indium amount, μg (%)		Difference (%)	
	Lab A	Lab B	$\frac{ A-B }{(A+B)/2} \times 100$	Average
<0.1 μg	0.01 (100)	0.07 (700)	150	122.5
	0.05 (100)	0.14 (280)	94.7	
0.1 ~1.0 μg	0.26 (100)	0.25 (96)	3.9	13.7
	0.32 (100)	0.30 (94)	6.5	
	0.34 (100)	0.39 (115)	13.7	
	0.36 (100)	0.34 (94)	5.7	
	0.42 (100)	0.37 (88)	12.7	
	0.55 (100)	0.47 (85)	15.7	
	0.74 (100)	0.72 (97)	2.7	
	0.80 (100)	0.60 (75)	28.6	
	0.84 (100)	0.60 (71)	33.3	
	1.03 (100)	0.34 (33)	101	
>1.0 μg	1.03 (100)	0.67 (65)	42.4	89.2
	1.43 (100)	1.00 (70)	35.4	
	1.48 (100)	0.08 (5)	180	

실험실 A의 분석결과를 기준으로 B의 분석결과가 A의 몇 %에 해당되는지를 비교해 본 결과, 인듐량이 $0.1 \mu\text{g}$ 미만의 낮은 범위에서는 B가 약 2.8배에서 7배까지 높게 나타나 차이가 매우 큰 것으로 나타났다. 이것을 위의 식과 같은 방법으로 오차를 계산하면 오차는 약 123%가 된다. 즉 참값이 두 실험실에서 분석한 인듐량의 평균이라고 한다면 A 실험실 분석결과는 -123% 로 과소평가한 것이며, B 실험실은 $+123\%$ 과대평가하고 있다는 것을 의미한다.

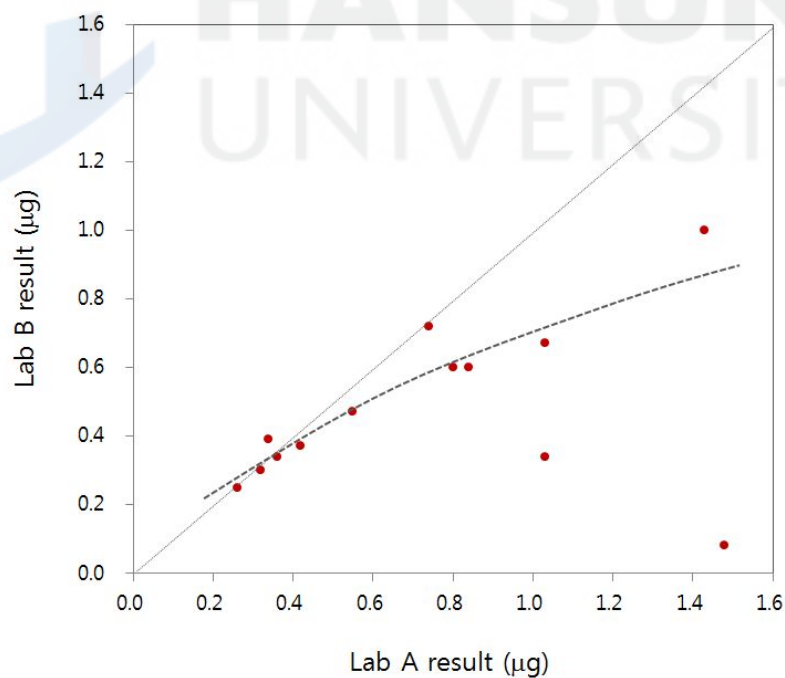
이러한 오차가 모두 분석과정에서만 발생한 오차인지는 확실하지 않다. 호흡성 먼지는 그 크기가 작아 많은 수의 입자가 채취되더라도 무게는 큰 입자에 비해 상대적으로 작다. 예를 들어 밀도가 같은 먼지라면 직경이 $10 \mu\text{m}$ 인 하나의 입자는 직경이 $0.1 \mu\text{m}$ 입자 100만개와 무게가 같다. 따라서 호흡성 먼지를 채취하는 과정에서 입자의 크기가 큰 먼지가 약간 과다하게 채취되거나 큰 입자에 의해 오염되면 상대적으로 인듐량이 크게 증가할 가능성이 있다. 이러한 영향은 공기 중 농도가 낮거나 시료에 채취된 인듐량이 낮으면 낮을수록 커진다. 일반적으로 분석대상의 시료량이 적으면 적을수록 오차는 점점 커지는 경향이 있다. 표준검량선을 이용한 기기분석의 경우, 시료량이 낮은 범위에서는 기기반응이 조금만 달라져도 분석량은 크게 달라지기 때문이다. 인듐량이 $0.1 \mu\text{g}$ 미만인 경우, 두 실험실간 차이가 크게 나타난 것은 위와 같은 두 가지가 모두 영향을 미쳤기 때문일 것으로 추정된다.

인듐량이 $0.1 \sim 1 \mu\text{g}$ 의 범위에서는 A를 기준으로 본 B의 분석결과는 71~115%로 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다. 오차율을 앞에서 나타낸 식과 같은 방법으로 계산하면 각 실험실의 오차는 약 14%가 된다. 즉 참값이 두 실험실에서 분석한 인듐량의 평균이라고 한다면 A 실험실 분석결과는 $+14\%$ 로 과대평가한 것이며, B 실험실은 -14% 과소평가하고 있다는 것을 의미한다. 인듐량이 증가하면서 그 차이가 크지는 않았지만 실험실 A가 B보다 더 높게 분석하는 경향이 나타났다.

인듐량이 $1 \mu\text{g}$ 이상인 범위에서는 이러한 경향이 두드러지게 나타났다. 실험실 B의 결과는 실험실 A의 5~70% 수준으로 낮게 분석하였다. 두 실험실간 차이는 다시 증가하여 오차가 89%인 것으로 나타났다.



[Figure 13] Comparison of Lab B result to Lab A for two-paired respirable sample (area sample).



[Figure 14] Comparison of Indium Analysis results of Lab A and B for two-paired respirable sample (dotted line represents a trend between A and B except for outliers).

일반적으로 인듐량이 증가하면 분석오차는 감소한다. 그러나 이 실험에서는 인듐량이 증가하자 분석오차가 커지는 것으로 나타났다. 인듐량이 적을 때는 A보다 B가 높게 나왔고 인듐량이 증가하면서 A와 B가 비슷해지다가, 인듐량이 더 많아지면서 A보다 B가 낮게 나왔다. 이러한 결과를 놓고 볼 때 분석에서의 계통적 오차(systematic error)가 발생한 것으로 추정된다. 가장 유력한 계통적 오차의 원인으로는 두 실험실 중 어딘가에서 검량선에 오류가 있었던 것으로 추정된다.

나. 개인시료

근로자 개인노출을 측정하기 위한 개인시료도 동시에 2개를 채취하였다. 시료채취기를 하나는 작업자의 왼쪽 어깨아래 가슴부위에, 다른 하나는 오른쪽 어깨아래 가슴부위에 부착하여 동일한 시간동안 측정하였다. 채취된 시료는 무작위로 하나는 실험실 A로, 다른 하나는 실험실 B로 나누어 보내 분석하였다.

각 작업자에게서 동시에 쌍으로 채취한 2개의 개인시료를 A와 B의 두 실험실에서 분석한 결과는 [Table 12]와 같다.

동시에 채취한 근로자의 개인시료를 두 실험실에 분석한 결과는 인듐량이 증가할수록 실험실간 분석의 일치도는 증가하는 것으로 나타났다. 두 실험실에서 분석한 결과의 평균을 참값을 가정할 때 각 실험실의 오차는 0%에서 13%까지인 것으로 나타났다. 인듐량이 $2.5 \mu\text{g}$ 이상인 경우에는 오차가 1~54%의 범위로 비교적 낮게 나타났다. 그러나 $1 \mu\text{g}$ 이하인 경우에도 두 실험실간 차이는 4개의 시료 중 하나는 0%, 또다른 하나는 30%로 절반이 30%이하의 오차범위를 보였다. 따라서 인듐량에 따른 오차의 크기 증감은 장소시료를 분석하였을 때처럼 인듐량에 따라 증감 추세가 뚜렷하지는 않았다.

개인시료의 경우 시료채취기의 위치가 근로자의 어깨 아래 가슴의 왼쪽과 오른쪽으로 약간 다르기 때문에 시료채취과정에서 인듐채취량 자체가 달라질 가능성이 크다. 따라서 이러한 오차가 실험실간 분석의 오차인지는 정확하게 알 수가 없다. 특히 작업자가 왼손을 주로 사용하는지, 오른손을 주로 사용하는지, 또는 작업자의 작업방향이 인듐 발생원의 오른쪽 방향인지에 따라 오른쪽과 왼쪽의 공기 중 농도가 달라질 가능성이 있고 이것이 인듐의 시료채취

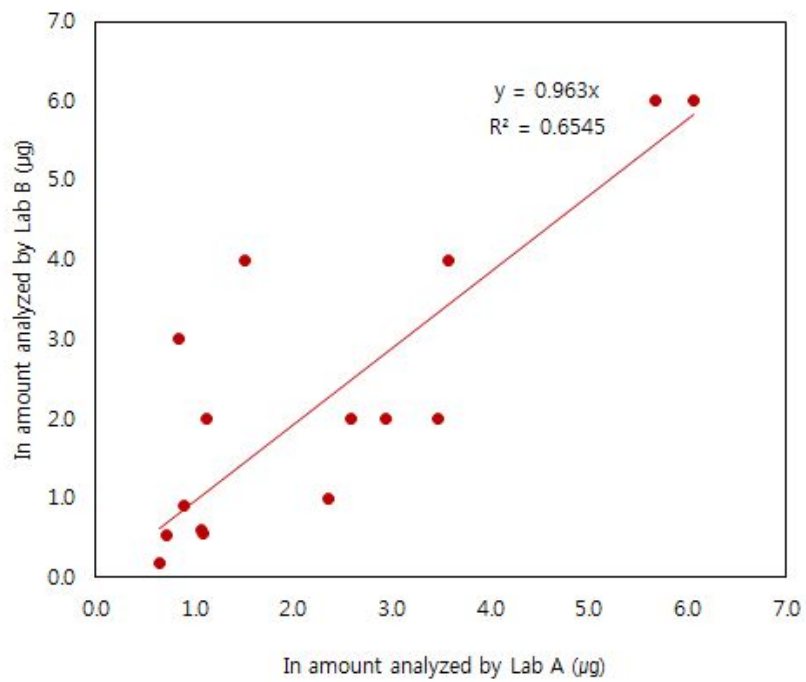
량에 영향을 미쳤을 수도 있다. 일반적으로 개인시료를 채취할 때 시료채취기를 왼쪽에 부착하는지, 오른쪽 부착하는지에 따라 농도가 달라지지 않는다고 가정하지만 발생원에 근접한 경우와 밀도가 큰 먼지의 경우 가까운 거리라도 하더라도 공기 중 농도는 달라질 가능성이 충분하다. 인덱스의 경우 향후 이에 대한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.

<Table 13> Comparison of analytical results of respirable indium concentration from Lab A and Lab B

No.	Lab A		Lab B		$\frac{ A-B }{(A+B)/2} \times 100\%$	Reference		
	Side*	Indium, μg	Side*	Indium, μg (%)**		Process	Worker	Date
1	L	0.64	R	0.19 (30)	108.4	Bonding1	W1	6.17
2	L	0.72	R	0.53 (74)	30.4	Finishing2	W7	7.18
3	R	0.84	L	3.00 (357)	112.5	Finishing2	W2	7.18
4	R	0.90	L	0.90 (100)	0.0	Finishing1	W4	6.17
5	L	1.08	R	0.60 (56)	57.1	Bonding2	W2	6.17
6	R	1.09	L	0.55 (50)	65.9	Finishing1	W4	7.18
7	R	1.13	L	2.00 (177)	55.6	Finishing2	W5	6.17
8	L	1.52	R	4.00 (263)	89.9	Bonding2	W3	7.18
9	R	2.36	L	1.00 (42)	81.0	Finishing2	W6	6.17
10	R	2.58	L	2.00 (78)	25.3	Finishing1	W4	7.17
11	R	2.94	L	2.00 (68)	38.1	Finishing3	W5	7.18
12	L	3.47	R	2.00 (58)	53.7	Finishing2	W7	7.17
13	L	3.57	R	4.00 (112)	11.4	Bonding2	W3	7.17
14	R	5.68	L	6.00 (106)	5.5	Finishing2	W2	7.17
15	R	6.06	L	6.00 (99)	1.0	Finishing3	W5	7.17

* Side : Personal sampling position. L and R indicate left and right side respectively.

** Lab B analysis result to Lab A $\left(\frac{B}{A} \times 100\%\right)$



[Figure 15] Comparison of analytical results of respirable indium concentration from Lab A and Lab B.

2. 혈청시료

본 연구에서는 작업자의 혈청인됨을 측정하거나 평가하지는 않았다. 다만 실험식에서는 공기 중 인됨을 채취한 시료뿐만 아니라 혈액 등 생체시료도 분석하므로, 실험실의 인됨분석의 정확도를 알아보기 위해 혈청시료도 포함하기로 했다. 혈액 중 인됨분석의 정확도를 파악하기 위한 실험은 실험실 B에서 소혈청에 인됨 일정량을 첨가하여 제조한 시료를 실험실 A에서 분석하는 방식으로 진행하였다. 동일한 시료를 실험실 B와 교차분석하여 실험실간 차이 등을 알아보고자 하였으나 실험실 B의 사정으로 실험실간 교차분석은 이루어지지 않았다.

실험실 B에서 제조한 시료의 혈 중 인됨 농도수준은 0.02 $\mu\text{g/L}$, 0.2 $\mu\text{g/L}$ 그리고 2 $\mu\text{g/L}$ 의 3단계 수준이었다. 참고로 일본 노동후생성에서는 혈 중 인됨 기준으로 3 $\mu\text{g/L}$ 이므로 이 기준의 약 0.007배, 0.07배 그리고 0.7배의 수준이었다. 가장 낮은 0.02 $\mu\text{g/L}$ 수준은 정량한계나 검출한계 수준인 것으로 추정된다. 분석을 실시한 A 실험실에 분석이 완료되기 전까지는 농도수준에 관한 정보는 알려주지 않았다. 각 농도별로 5개씩 총 15개의 시료를 분석하도록 하였다. 분석 결과는 <Table 14>와 같다.

가장 낮은 수준인 0.02 $\mu\text{g/L}$ 수준의 5개 시료를 분석결과는 평균 0.014 $\mu\text{g/L}$ 으로 약 32% 과소평가한 것으로 나타났다. 5개 시료 분석결과의 군내 변이는 14.3%로 비교적 일정하였고, 모든 시료가 20%에서 50%까지 과소평가하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 계통적 오차가 발생한 것으로 보인다. 중간 수준인 0.2 $\mu\text{g/L}$ 수준의 5개 시료를 분석결과는 평균 0.226 $\mu\text{g/L}$ 으로 약 13%정도 과대평가한 것으로 나타났다. 5개 시료 분석결과의 군내 변이는 3.5%로 비교적 일정하였다. 가장 높은 수준인 2 $\mu\text{g/L}$ 수준의 5개 시료를 분석결과는 평균 2.49 $\mu\text{g/L}$ 으로 약 24% 과대평가한 것으로 나타났다. 5개 시료 분석결과의 군내 변이 12.8%로 비교적 일정하였다. 대부분의 시료가 15%이상 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 이 역시 계통적 오차가 발생한 것으로 보인다.

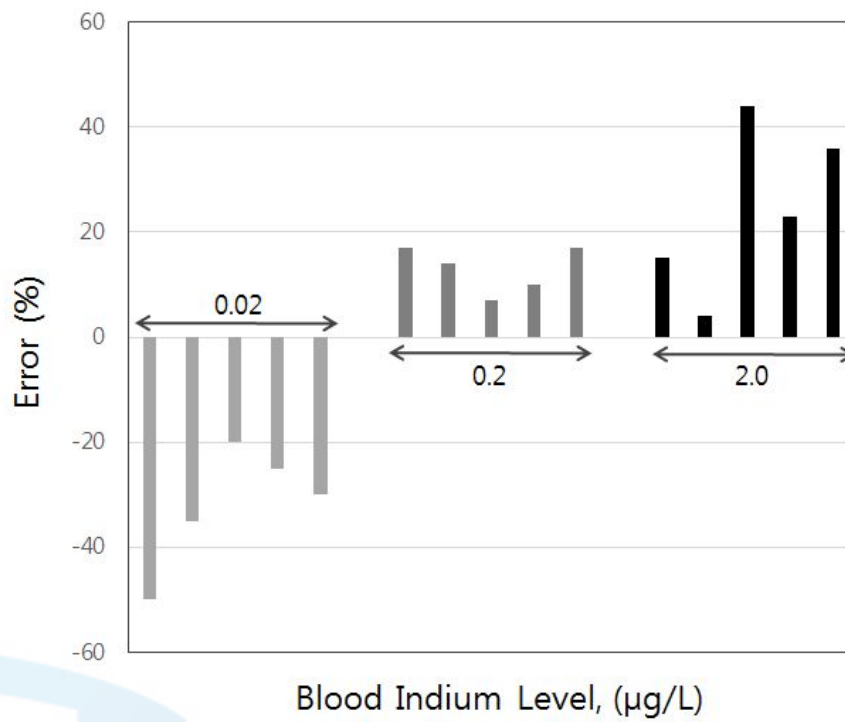
이상을 종합해 보면, [Figure]에서 보는 바와 같이 낮은 농도의

혈청시료는 과소평가하고 혈청 중 인듐량이 증가할수록 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과가 나타난 원인은 정확하게 파악할 수 없다. 분석에서의 계통적 오차발생 가능성을 검토한 결과는 다음과 같다. 실험실에서 분석시 작성한 검량선의 기울기가 참값보다 낮게 작성되었을 가능성이다. 실험실 A에서 검량선을 작성할 때 높은 농도의 표준용액을 희석하는 방법을 사용했기 때문에 만약 초기 표준용액 제조에서 참값보다 낮은 농도로 조제되었다면 검량선의 기울기가 낮아져 분석결과는 전반적으로 과대평가될 것이다. 그러나 낮은 농도에서는 오히려 과대평가되는 결과를 나온 점을 고려할 때 이 가능성은 낮은 편이다.

이러한 결과를 통해 향후 인듐에 대해서도 내부 및 외부 정도관리가 필요하다는 점을 확인할 수 있었다.

<Table 14> Results of spiked blood indium sample analysis

Injected amount($\mu\text{g/L}$)	Analysis result($\mu\text{g/L}$)	Error(%)
0.02	0.010	-50
	0.013	-35
	0.016	-20
	0.015	-25
	0.014	-30
AM $\pm$ SD (CV)	0.014+0.002 (14.3%)	-32.0
0.20	0.233	17
	0.227	14
	0.215	7
	0.220	10
	0.234	17
AM $\pm$ SD	0.226+0.008 (3.5%)	13.0
2.00	2.310	15
	2.085	4
	2.880	44
	2.459	23
	2.727	36
AM $\pm$ SD	2.491+0.319 (12.8%)	24.4



[Figure 16] Error of spiked blood indium sample analysis by the concentration level.

IV. 결 론

국내 모 ITO target 제조 사업장의 접합공정과 마감공정에서 근로자의 인
뿜노출과 작업장 공기 중 인뿜농도를 측정하고, 인뿜측정 및 분석의 정확도를
평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 근로자의 호흡성 먼지 중 인뿜 노출농도는 접합공정이 기하평균으로
 $1.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하표준편차는 3.071이었고, 마감공정은 기하평균이 $1.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$,
기하표준편차는 2.053이었다. 두 공정의 노출농도는 일본 후생노동성에서 권
고한 노출기준 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 0.1~0.2배 수준으로, 노출기준을 초과할 가능성은
매우 낮은 것으로 나타났다. 작업장의 공기 중 호흡성 인뿜농도는 접합공정에
서 기하평균이 $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하표준편차 1.19로 나타났다고, 마감공정은 기
하평균이 $0.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 기하표준편차가 2.553으로 나타났다. 전반적으로 접합
공정보다 마감공정에서의 호흡성 인뿜농도가 높은 것으로 나타났다.

둘째, 접합공정과 마감공정에서 공기 중 호흡성 먼지의 인뿜은 총 먼지 중
인뿜과 비교하여 16~20% 수준인 것으로 나타났다.

셋째, 개인시료와 장소시료를 비교한 결과 개인시료가 장소시료의 2.24배에
서 9.8배까지 높은 것으로 나타났다. 개인시료는 장소시료에 비해 일간변이는
더 큰 것으로 나타났다. 따라서 정확한 개인의 노출을 정확히 평가하기 위해
서는 장소시료보다는 개인시료를 채취해야 하며, 개인시료는 여러 날에 걸쳐
반복하여 측정하는 것이 바람직하다.

넷째, 공기 중 동일한 지점에서 동일한 시간대에 반복하여 총인뿜을 채취한
시료를 실험실에서 분석한 결과, 반복시료간 변이는 13~74%로 비교적 크게
나타나, 공기 중 인뿜농도를 정확히 평가하기 위해서는 시료수를 늘려야 하는
것으로 나타났다.

다섯째, 공기 중 동일한 지점에서 동일한 시간대에 2개의 호흡성인뿜 개인
시료 쌍을 두 실험실에서 나누어 분석한 결과, 두 실험실 분석결과의 평균값
을 참값으로 가정했을 때, 두 실험실간 오차는 0~100%까지 나타났다. 같은
방법으로 장소시료를 두 실험실에서 분석한 결과, 차이는 2.7~180%로 나타
났다. 장소시료에서 오차가 더 크게 나타난 것은 시료 중 인뿜량이 적었기 때

문이다.

6. 소혈청으로 제조한 혈중인듐 시료를 분석한 결과, $0.02\ \mu\text{g/L}$, $0.2\ \mu\text{g/L}$ 및 $2\ \mu\text{g/L}$ 에서 분석오차는 각각 -32%, 13% 및 24.4%로 나타났다.



참 고 문 헌

1. 국내문헌

고용노동부. (2013). 화학물질 및 물리적인자의 노출기준(노동부고시 제 2013-38호. 고용노동부.

이광용. (2015). 국내 인듐 산업 근로자의 노출실태 및 인듐분진 발생 특성에 관한 연구. 한성대학교.

이광용, 이나루, 신정아. (2011). 난용성 인듐 화합물의 노출실태 및 관리방안 연구 I. 한국산업안전보건공단, 산업안전보건연구원.



2. 국외문헌

Cummings, K J., Nakano M., et.al.(2012), Indium Lung Disease, *CHEST*, 141(6): 1512–1521.

Chonan, T., Taguchi O., and Omae K.(2007), Interstitial pulmonary disorders in indium–processing workers, *Eur Respir J* 2007; 29: 317–324

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.

Miyauchi, H et al.,(2012). Assessment of Workplace Air Concentrations of Indium Dust in an Indium–recycling Plant. *J. Occup. Health*, 54: 103–111.

Omae, K., Nakano M., Tanaka A., Hirata M., Hamaguchi T., Chonan T. (2011), Indium lung–case reports and epidemiology, *Int Arch Occup Environ Health*, 84:471–477.

Tanaka, A., Hirata, M., et. al. (2010), Review of pulmonary toxicity of indium compounds to animals and humans, *Thin Solid Films*, 518: 2934–2936.

American Conference of Governmental Industrial Hygienists(ACGIH), (2015). TLVs and BEIs Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices. ACGIH.

Japan Ministry of Health, Labour and Welfare(MHLW). (2011). The Technical Guideline for Preventing Health Impairment of Workers Engaged in the Indium Tin Oxide Handling Processes. MHLW, Japan.

National Toxicology Program(2009), Chemical Information Profile for Indium Tin Oxide [CAS No. 50926–11–9], National Toxicology

Program, National Institute of Environmental Health Sciences,
National Institutes of Health, U.S. Department of Health and
Human Services.

National Institute for Occupational Safety and Health (2015), NIOSH
Manual of Analytical Methods (NMAM), Method 500 and
Method 7303, NIOSH, Centers for Disease Control and
Prevention.

(<http://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/method-s.html>)



ABSTRACT

A Study on Workers' Exposure to Indium in Bonding and Finishing Processes of an ITO Manufacturing Industry and Accuracy of Measurement of Airborne and Blood Indium

Oh, So Rah

Major in Industrial Hygiene Engineering

Dept. of Mechanical Systems Engineering

The Graduate School

Hansung University

Personal and area samples were collected for both airborne respirable and total dust to evaluate indium exposure in bonding and finishing processes at an ITO manufacturing industry. During taking samples, a paired two personal respirable samples for each worker were simultaneously collected for evaluating interlaboratory analysis accuracy. Also, multiple area samples at each position were simultaneously for evaluating interlaboratory analysis variation.

Workers' exposures to respirable indium were $1.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $1.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at bonding and finishing processes respectively, which was believed to be much lower than $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a tentative guideline recommended by Japan Ministry of Labor and Welfare. Geometric standard deviation (GSD) were 3.071 and 2.053 at bonding and finishing processes. The high GSDs implies that there is a need to daily variation control.

Respirable indium concentration levels of area samples were $0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $0.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ at bonding and finishing processes respectively. Personal samples showed 2.24 to 9.8 times higher than area samples. Respirable indium was 16–20 % of total indium.

Intra-laboratory analysis variation for 5 multiple samples taken simultaneously for total indium at an area ranged from 13% to 74%.

Differences of results by two laboratories ranged from 0% to 100% for a paired respirable samples taken from each worker. Differences of the analysis results by two laboratories for multiple area samples were 2.7% to 180%. Since the indium amount is smaller in the area sample than personal sample, the difference of area samples showed bigger than personal samples

Analytical errors for spiked blood indium samples were -32%, 13% and 24.4% at $0.02 \mu\text{g}/\text{L}$, $0.2 \mu\text{g}/\text{L}$ and $2 \mu\text{g}/\text{L}$ level respectively.

【Keywords】 Indium, ITO target, Indium Tin Oxide, Bonding, Finishing