

碩士學位論文

저유량 공기채취 펌프(0.2 l/min)를 이용한
먼지측정방법의 정확도에 관한 연구

2006年

漢城大學校 安全保健經營大學院
產業保健工學科
產業衛生工學專攻
金 景 惠

碩士學位論文

指導教授 朴杜用

저유량 공기채취 펌프(0.2 l/min)를 이용한
먼지측정방법의 정확도에 관한 연구

Study on a Validity Test for a Dust Sampling
Method with use of Low Volume Personal Air
Sampling Pumps

2005年 12月

漢城大學校 安全保健經營大學院

產業保健工學科

產業衛生工學專攻

金 景 惠

碩士學位論文

指導教授 朴杜用

저유량 공기채취 펌프(0.2 l/min)를 이용한

먼지측정방법의 정확도에 관한 연구

Study on a Validity Test for a Dust Sampling
Method with use of Low Volume Personal Air
Sampling Pumps

위 論文을 產業衛生工學 碩士學位論文으로 提出함

2005年 12月

漢城大學校 安全保健經營大學院

產業保健工學科

產業衛生工學專攻

金 景 惠

金 景 惠의 産業衛生工學碩士學位論文을 認准함

2005年 12月

심사위원장 (인)

심사위원 (인)

심사위원 (인)

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
I. 서 론	1
1. 연구배경 및 필요성	1
2. 연구목적	4
II. 측정 및 연구방법	5
1. 연구대상	5
2. 측정방법	5
2.1 NIOSH Method NO. 0500법	5
2.2 저유량채취(0.2 ℓ /min)법	5
2.3 시료 채취 수	6
3. 시료 분석	6
III. 연구결과 및 고찰	7
1. NIOSH Method NO. 0500법 과 저유량채취법의 농도 비교	7
2. 농도 수준별 차이	12
2.1 0.2 mg/m ³ 미만 수준에서 농도 차이	12
2.2 0.2~0.4 mg/m ³ 수준에서 농도차이	14
2.3 0.4~0.8 mg/m ³ 수준에서 농도차이	16
2.4 0.8 mg/m ³ 이상 수준에서 농도 차이	18
3. NIOSH 방법 내부 변이와 저유량채취법의 내부변이	20
4. 공시료 여과의 농도 비교	21
5. 시료채취 시간	24
5.1 200분 미만에서 농도 차이	24
5.2 200분 이상에서 농도 차이	26
6. 고찰	30
6.1 면속도 (Face Velocity)	30
6.2 분석감도 및 민감성 (Analytical Sensitivity)	33

IV. 결 론	36
참고문헌	38
Abstract	39

List of Tables

Table 1. NIOSH법 와 저유량채취법을 이용한 먼지 측정결과	8
Table 2. 0.2 mg/m ³ 미만 수준에서 농도 차이	12
Table 3. 0.2~0.4 mg/m ³ 수준에서 농도 차이	14
Table 4. 0.4~0.8 mg/m ³ 수준에서 농도 차이	16
Table 5. 0.8 mg/m ³ 이상 수준에서 농도 차이	18
Table 6. NIOSH법과 저유량채취법의 내부 변이 비교	21
Table 7. 공시료 필터의 농도 비교	22
Table 8. 농도 수준별 시료채취시간추정치	24
Table 9. 시료채취시간 200분 미만인 경우 두 방법 간 농도 차이	25
Table 10. 시료채취시간 200분 이상인 경우 두 방법 간 농도 차이	27
Table 11. 여과지 면속도 비교	32
Table 12. 공기 유입구 속도 비교	32
Table 13. 여과지 무게와 먼지의 무게 및 그 비율	34
Table 14. 여과지의 농도수준별 최소 시료채취 시간 비교	35

List of Figures

Figure 1. 외부 기류의 방해를 제거하고 균일한 농도상태를 유지하기 위한 시료채취 모식도	7
Figure 2. NIOSH법과 저유량채취법의 먼지측정결과 비교	11
Figure 3. NIOSH법과 저유량채취법 먼지 농도차이 비교	11
Figure 4. 0.2 mg/m ³ 미만 수준에서 먼지 측정결과 비교	13
Figure 5. 0.2 mg/m ³ 미만 수준에서 먼지 농도차이 비교	13
Figure 6. 0.2~0.4 mg/m ³ 수준에서 먼지 측정결과 비교	15
Figure 7. 0.2~0.4 mg/m ³ 수준에서 농도차이 비교	15
Figure 8. 0.4~0.8 mg/m ³ 수준에서 먼지 측정결과 비교	17
Figure 9. 0.4~0.8 mg/m ³ 수준에서 먼지 농도차이 비교	17
Figure 10. 0.8 mg/m ³ 이상 수준에서 먼지 측정결과 비교	19
Figure 11. 0.8 mg/m ³ 이상 수준에서 먼지 농도 차이 비교	19
Figure 12. 시료채취시간이 200분 미만인 경우 두 방법 간 농도차이 비교	26
Figure 13. 시료채취시간이 200분 이상인 경우 두 방법 간 농도차이 비교	30
Figure 14. 시료채취기구의 카셋트 유입구에서 기류속 및 여과지	

면속도에 대한 모식도 31

I. 서 론

1. 연구배경 및 필요성

쾌적한 작업환경을 유지하기 위해서 정확한 작업환경측정을 통한 실태 파악이 선행되어야 하는 점은 매우 중요하다(백남원 등, 1967; 황병문 등, 1970; 김성천 등, 1973; 김준연 등, 1978). 우리나라 전체 사업장에 대한 작업환경측정이나 작업환경실태를 파악하는 것은 인력, 기술, 예산 및 법적 근거 등의 미비로 충분히 이루어지고 있지 못하며, 특히 정확한 연구자료로 활용되기에는 현재의 작업환경측정결과가 미흡하다는 지적이 많다(Macmahon, et al., 1980; 노동부, 1984; 김정순, 1985). 한편, 우리나라 작업환경측정 결과를 분석해보면 유해 작업환경요인 가운데 화학적 요인으로는 먼지에 노출된 근로자가 가장 많다(백남원 등, 1967; 황병문 등, 1970; 김성천 등, 1973; 이상택 등, 1977; 김준연 등, 1978). 먼지는 진폐를 비롯하여 급성 폐렴, 만성 기관지염, 악성종양, 중독, 피부질환, 알러지 및 안질환등의 건강장애와 기계 및 제품의 손상, 재해 유발의 원인이 되기도 하므로 비단 먼지의 크기뿐만 아니라 그 성분에 대한 분석도 고려되어야 한다(Wark, et al., 1981; 조규상, 1985). 따라서 먼지에 노출실태를 정확히 파악하고 이를 근거로 작업환경관리를 실시하는 것은 산업보건분야, 특히 산업위생분야에서 오래된, 그렇지만 현재에도 매우 중요한 과제이다.

대기 중에 부유하고 있는 고체의 미립자를 먼지라 하며 먼지발생 공정을 산업별로 구분해 보면 광업전체, 석재 채취 및 가공업, 건설업에서 터널굴착, 발파, 굴삭, 도로나 건물 보수, 해체 등, 제조업에서 광물질을 사용하는 주물, 제철, 제련, 파쇄나 분쇄 또는 분체, 도자기, 요업 등과 용접을 수행하는 작업, 연마재 사용 작업 등이 있으며 운수 창고업에서 하역, 청소, 실내나 용기 내 수리나 청소 작업 등이 대표적으로

먼지가 많이 발생하는 산업이다(김광종 외 22, 2004).

먼지는 크기가 $1\mu\text{m}$ 미만부터 수백 μm 에 이른다. 산업보건학적으로 먼지는 건강에 영향을 미치는 영향에 따라 분류한다. 먼지의 분류기준에서 가장 일반적인 기준은 먼지의 크기이다. 왜냐하면 먼지의 크기에 따라 호흡기에 침착되는 부위, 즉 먼지가 도달하는 부위가 달라지며 그에 따라 건강장애가 달라지기 때문이다. 산업보건학적으로 가장 중요한 먼지는 주로 폐포까지 도달할 수 있는 크기의 호흡성 먼지이다. 따라서 산업위생분야에서 이론적으로는 호흡성 먼지를 측정하도록 권장하고 있다(Clayton, 1971; Schilling, 1981; 정광호등, 1983; 조규상, 1985). 선진국에서는 먼지의 입경에 따른 측정방법이나 분석방법에 대한 연구와 이러한 기기개발에 관련된 연구가 활발히 진행되어 왔으나 우리나라에서는 주로 과거에 일본의 먼지측정방법이나 노출기준을 준용하고 있으며, 상대적으로 먼지측정에 대한 연구는 부족한 실정이다(ACGIH, 1985; 이광묵, 1983). 일반적인 작업환경측정법에서는 총 분진을 측정하는 경우가 많으며 우리나라 작업환경 노출농도에 대한 기준도 총 분진으로 제시된 항목이 많다. 그 이유는 표준측정법인 중량법으로 먼지를 측정할 경우 호흡성 먼지를 시료채취량이 매우 적어 분석하기 매우 어렵기 때문이다.

작업환경측정에서 시료채취는 크게 먼지와 유기용제가 있는데 각각은 공기채취유량이 달라 별도의 공기채취펌프가 필요하며, 한 명의 근로자에게서 두 개를 동시에 측정하고자 하는 경우, 근로자는 두 개의 시료채취장치, 즉 먼지를 측정하기 위하여 여과지가 장착된 카셋트와 개인용 고유량 공기채취펌프(약 2 Lpm)를, 그리고 유기용제를 측정하기 위하여 활성탄관을 부착한 개인용 저유량 공기채취펌프(0.2 Lpm)를 착용하여야 한다. 이것은 근로자에게 과도한 부담을 주고 작업을 방해하게 되어 작업환경측정을 꺼려하거나 심지어는 작업환경측정을 거부하기도 한다. 또한 측정기관의 입장에서는 고 유량 공기채취펌프와 저

유량 공기채취펌프를 별도로 구입해야 하므로 비용부담이 높고, 각각의 유량을 별도로 보정해야 하고 유지관리도 별도로 해야 하는 등 부담이 된다. 또한 상호 호환성이 없어 먼지측정에는 저유량 공기채취펌프를 사용할 수 없고 유기용제 측정에는 고유량 공기채취펌프를 사용할 수 없어 비효율적이다.

먼지를 분석하는 방법은 청량법인데 일반적으로 측정한계가 0.01 mg 인 미량저울을 사용하였으나 최근에는 감도가 매우 뛰어나고 측정한계가 0.001 mg인 미량저울을 이용하는 경우가 점점 늘어나는 추세에 있다. 저울의 측정한계가 10배 향상되었다는 것은 산술적으로 유량이 1/10로 감소되어도 가능하다는 것을 의미한다. 즉 먼지측정의 유량은 2 Lpm에서 0.2 Lpm으로 감소시킬 수도 있음을 의미한다. 만약 0.2 Lpm 의 유량을 이용할 수 있다면 기존의 유기용제용 공기채취펌프로 먼지 시료를 채취하는 것이 가능함을 의미한다. 물론 먼지측정에서 있어서 정확도는 여과지의 무게, 여과지에 유입되는 공기속도 등 여러 가지 변수가 있다.

따라서 본 연구는 먼지를 측정하는 기존의 표준측정법으로 알려진 공기채취방법(NIOSH, Manual of analytical methods, fourth edition, No 0500, 1984, 이하 'NIOSH방법'이라 함)의 공기유량을 1/10로 낮춘 저유량 공기채취펌프으로 먼지를 측정할 수 있는지 여부에 대한 실험적 연구를 실시하였다. 본 연구는 저유량 공기채취펌프를 이용한 시료 채취법(이하 '저유량채취법'이라 함)과 NIOSH방법으로 시료를 채취하여 두 시료 채취 방법 간 결과를 비교 분석하므로써 저유량채취법의 타당성을 검증하고자 하였다.

2. 연구목적

본 연구의 목적은 개인용 저유량 공기채취펌프(0.2 Lpm)를 이용한 먼지시료의 채취방법의 타당성을 검증하고자 실시하였다. 본 연구의 구체적인 목적은 다음과 같다.

- (1) 먼지의 표준측정법인 NIOSH Method No. 0500법과 저유량 공기 채취펌프(0.2 ℥ /min)로 동시에 작업환경 중 먼지를 채취하여 농도를 측정한 결과를 비교한다.
- (2) 시판중인 저유량 공기채취펌프에 여과지를 장착하여 먼지시료 채취가능성을 검증한다.

II. 측정 및 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 2005년 9월말에서 12월초까지 제지업 화장지 생산 공정인 초지공정, 가공공정에서 NIOSH방법과 저유량채취법으로 동시에 먼지를 측정하였다. 2 Lpm의 고유량 공기채취방법(NIOSH Method No. 0500법)과 0.2 Lpm의 저유량 공기채취펌프(저유량채취법)를 같은 장소에 설치하여 먼지를 측정하였다. 시료채취시간은 작업공정 및 작업조건을 고려하여 3시간에서 6시간 정도로 하였다.

2. 측정방법

2. 1 NIOSH Method No. 0500법

총 먼지를 측정하기 위하여 NIOSH Method No. 0500법은 37 mm, 5 μm PVC여과지를 3단 카세트를 장착하여 2 ℓ/min 유량으로 먼지를 채취하였다. 측정 전·후에 공기채취펌프의 유량은 비누거품미터 (soap bubble meter)를 이용하여 보정하였다.

2. 2 저유량채취법

저유량채취법은 25 mm, 5 μm PVC여과지를 3단 카세트를 장착하여

0.2 ℓ/min 유량으로 시료를 채취하였다. 저유량채취법도 측정 전후에 NIOSH방법과 동일한 방법으로 유량을 보정하였다.

2.3 시료 채취 수

먼저 NIOSH방법과 저유량채취법을 비교하기 위하여 각각 4개의 시료채취법을 동일한 장소에서 놓고 먼지시료를 채취하여 먼지농도를 3회 측정하였고, 이후에는 NIOSH방법과 저유량 채취법을 1:1로 한 쌍씩 묶어서 73쌍을 측정하였다.

3. 시료 분석

포집된 먼지의 농도를 분석하기 위해 시료포집 전과 후로 나누어 각 PVC 여과지의 무게를 감도 0.001mg의 Microbalance(CAHN, C-33, USA)로 측정하였고, 칭량하기 전에는 PVC 여과지를 Desiccator에 12시간 이상 보관하여 온도, 습도 영향을 최소화하였고, 칭량 전의 PVC 여과지는 정전기 제거 작업을 한 후에 보관하였다.

여과지의 무게는 여과지를 저울에서 눈금 변화가 1분 이상 없을 때 그 값을 기록하였다. 여과지당 3회를 반복하여 측정하였고, 그 평균을 취하였다. 또한 시료를 채취하지 않은 공시료를 측정하여 보정하였다.

III. 연구결과 및 고찰

1. NIOSH Method No. 0500법과 저유량채취법의 비교

NIOSH법과 저유량채취법을 이용한 시료를 각각 1개씩 세트로 만들어서 서로 다른 장소에서 지역시료로 73쌍의 시료를 채취하였다. 측정 시에 외부 기류의 방해를 제거하고 균일한 농도 상태를 유지하기 위하여 PET병을 이용하여 균일한 농도가 채취되도록 보호막을 만들어 측정시 두 쌍의 시료채취기구(카셋트)는 넣어 측정하였다(Figure 1 참조).

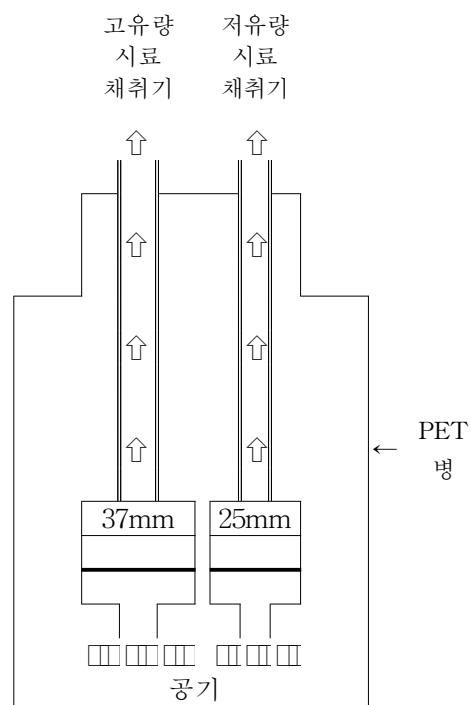


Figure 1. 외부 기류의 방해를 제거하고 균일한 농도상태를 유지하기 위한 시료채취 모식도.

NIOSH법과 저유량채취법의 농도를 분석하였으며 각 농도의 차이를 비교한 결과는 Table 1 및 Figure 2, 3과 같다. 두 측정법에 의한 농도 차이를 비교한 결과, 저유량채취법이 NIOSH법에 비하여 평균 -31.7%로 낮게 평가된 것으로 나타났다. 두 차이의 변이인 표준편차는 49.9%로 나타났다.

Table 1. NIOSH법 와 저유량채취법의 면지 측정결과 (mg/m³)

일련 번호	NIOSH법 (A)	저유량채취법 (B)	B-A/A*100 (%)
1	0.027	0.061	128.3
2	0.101	0.043	-57.7
3	0.107	0.103	-4.1
4	0.107	0.096	-10.1
5	0.120	0.237	98.0
6	0.150	0.132	-12.1
7	0.160	0.238	49.0
8	0.172	0.182	5.7
9	0.176	0.156	-11.5
10	0.195	0.254	30.1
11	0.207	0.201	-2.8
12	0.211	0.059	-72.2
13	0.216	0.188	-13.0
14	0.219	0.165	-24.8
15	0.225	0.111	-50.4
16	0.226	0.199	-11.7
17	0.226	0.177	-21.6
18	0.229	0.645	182.2
19	0.231	0.158	-31.6
20	0.254	0.088	-65.2
21	0.257	0.161	-37.4

Table 1. 계속(NIOSH법 와 저유량채취법의 먼지 측정결과 (mg/m³))

일련 번호	NIOSH법 (A)	저유량채취법 (B)	B-A/A*100 (%)
22	0.259	0.147	-43.0
23	0.263	0.122	-53.6
24	0.266	0.271	1.6
25	0.272	0.124	-54.4
26	0.284	0.235	-17.4
27	0.304	0.203	-33.3
28	0.308	0.144	-53.4
29	0.349	0.190	-45.6
30	0.353	0.121	-65.7
31	0.366	0.732	100.2
32	0.379	0.352	-7.1
33	0.381	0.307	-19.5
34	0.386	0.207	-46.4
35	0.401	0.182	-54.7
36	0.407	0.061	-84.9
37	0.429	0.379	-11.7
38	0.461	0.484	4.9
39	0.465	0.408	-12.2
40	0.481	0.304	-36.8
41	0.503	0.143	-71.5
42	0.510	0.775	52.0
43	0.511	0.223	-56.4
44	0.528	0.297	-43.8
45	0.536	0.112	-79.1
46	0.554	0.261	-52.9
47	0.587	0.207	-64.8
48	0.595	0.203	-65.8
49	0.599	0.256	-57.2
50	0.605	0.566	-6.5
51	0.611	0.332	-45.7
52	0.617	0.485	-21.3
53	0.626	0.148	-76.4

Table 1. 계속(NIOSH법 와 저유량채취법의 먼지 측정결과 (mg/m^3))

일련 번호	NIOSH (A)	저유량채취법 (B)	B-A/A*100 (%)
54	0.673	0.500	-25.6
55	0.741	0.425	-42.6
56	0.814	0.487	-40.1
57	0.835	0.244	-70.8
58	0.842	0.329	-61.0
59	0.849	0.265	-68.8
60	0.933	0.514	-44.9
61	1.000	0.269	-73.1
62	1.004	0.192	-80.8
63	1.021	0.227	-77.7
64	1.073	0.320	-70.2
65	1.147	0.318	-72.3
66	1.153	0.708	-38.6
67	1.160	0.388	-66.6
68	1.220	0.325	-73.4
69	1.419	0.195	-86.3
70	1.630	0.611	-62.5
71	1.705	0.968	-43.2
72	1.790	0.106	-94.1
73	2.514	0.832	-66.9
Mean	-	-	-31.7
S.D	-	-	49.9

※A: NIOSH No .0500 측정방법에 의한 농도

B: 저유량채취법(25mm 여과지, 0.2 ℓ/min)에 의한 농도

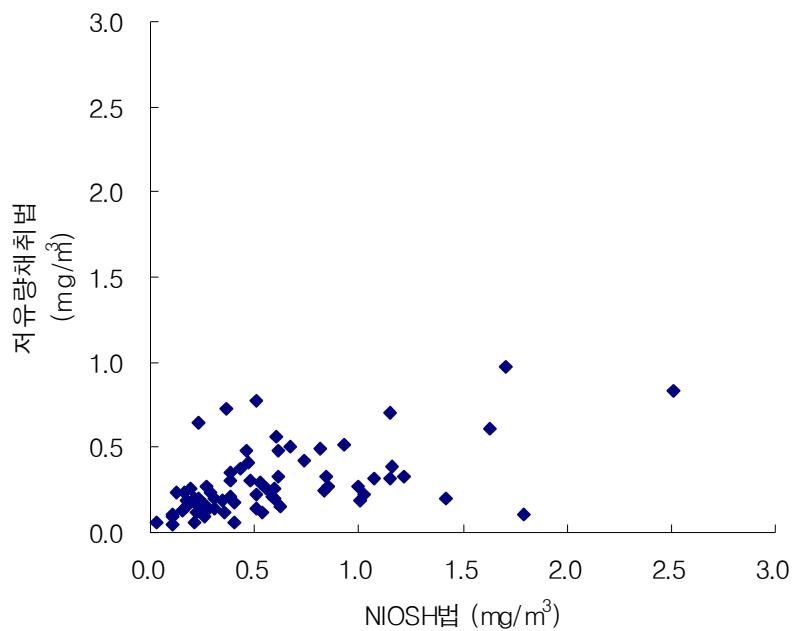


Figure 2. NIOSH법과 저유량채취법의 먼지측정결과 비교.

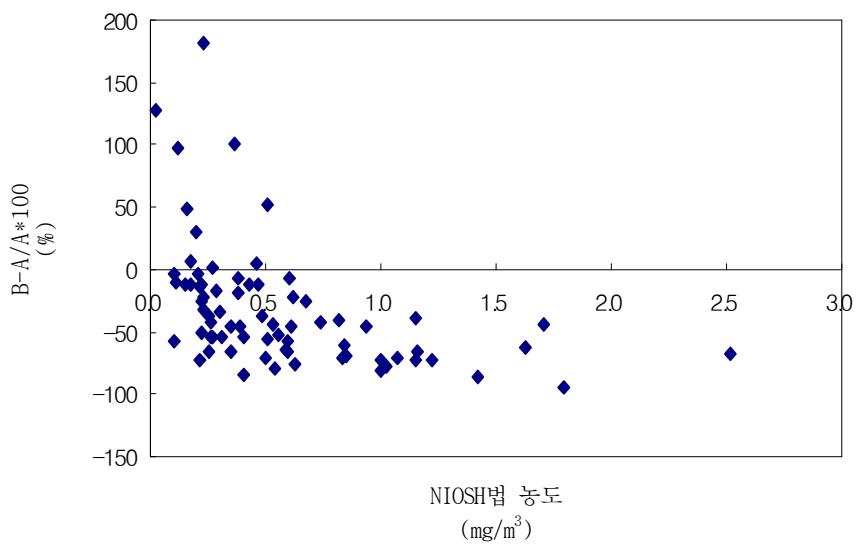


Figure 3. NIOSH법과 저유량채취법의 먼지 농도차이 비교.

2. 농도 수준별 차이

먼지의 시료 체취결과 NIOSH 시료 농도 수준을 0.2 mg/m^3 미만, $0.2\sim0.4 \text{ mg/m}^3$, $0.4\sim0.8 \text{ mg/m}^3$, 0.8 mg/m^3 이상 4단계로 나누어 농도를 비교하고 농도의 변화에 따른 각 측정법을 먼저 농도차이를 분석한 결과는 다음과 같다.

2.1 0.2 mg/m^3 미만 수준에서 농도 차이

0.2 mg/m^3 미만에서 농도 차이를 10쌍을 <Table 2> 및 <Figure 4, 5>와 같이 비교한 결과 평균 21.6%의 농도로 저유량채취법으로 측정한 농도가 더 높게 나타났으며 변이(표준편차 56.3%)도 큰 것으로 나타났다.

Table 2. 0.2 mg/m^3 미만수준에서 농도 차이 (mg/m^3)

일련 번호	NIOSH (A)	저유량채취법 (B)	B-A/A*100 (%)
1	0.027	0.061	128.3
2	0.101	0.043	-57.7
3	0.107	0.103	-4.1
4	0.107	0.096	-10.1
5	0.120	0.237	98.0
6	0.150	0.132	-12.1
7	0.160	0.238	49.0
8	0.172	0.182	5.7
9	0.176	0.156	-11.5
10	0.195	0.254	30.1
Mean	-	-	21.6
S.D	-	-	56.3

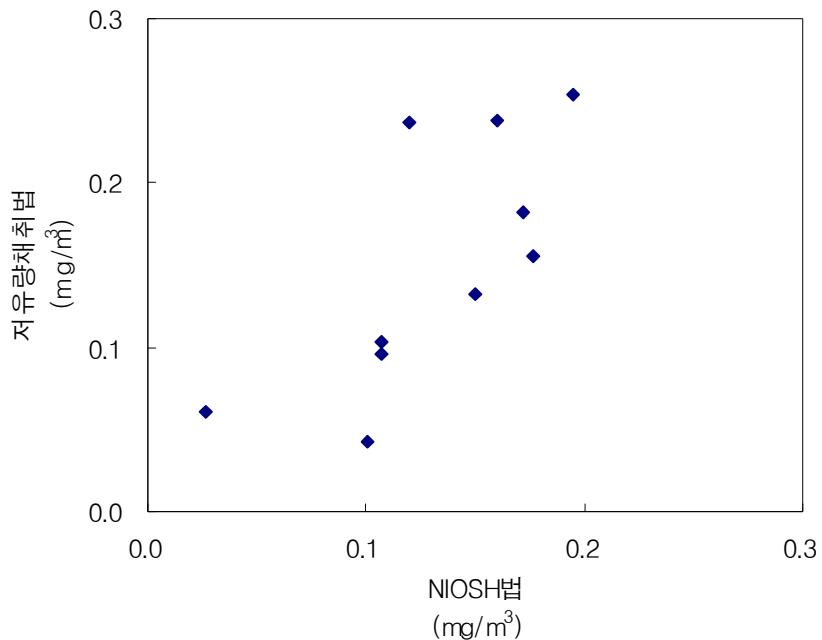


Figure 4. 0.2 mg/m³ 미만 수준에서 먼지 측정 결과 비교.

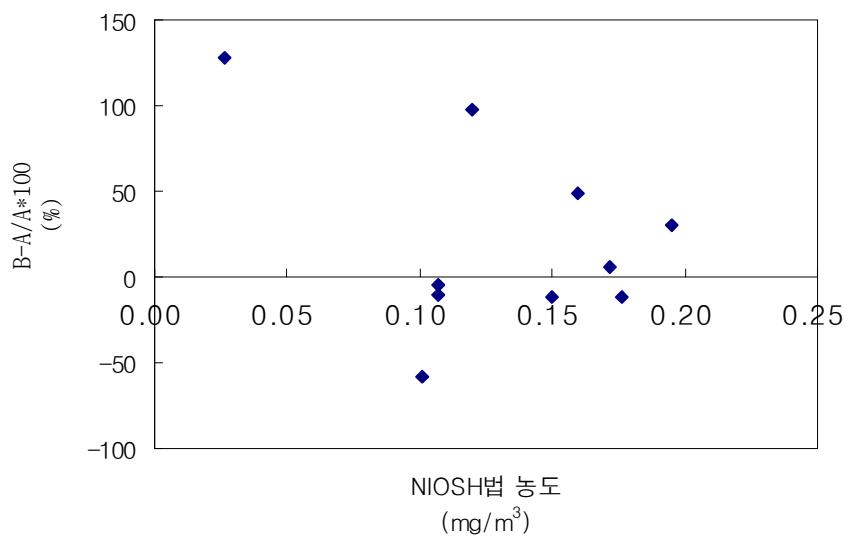


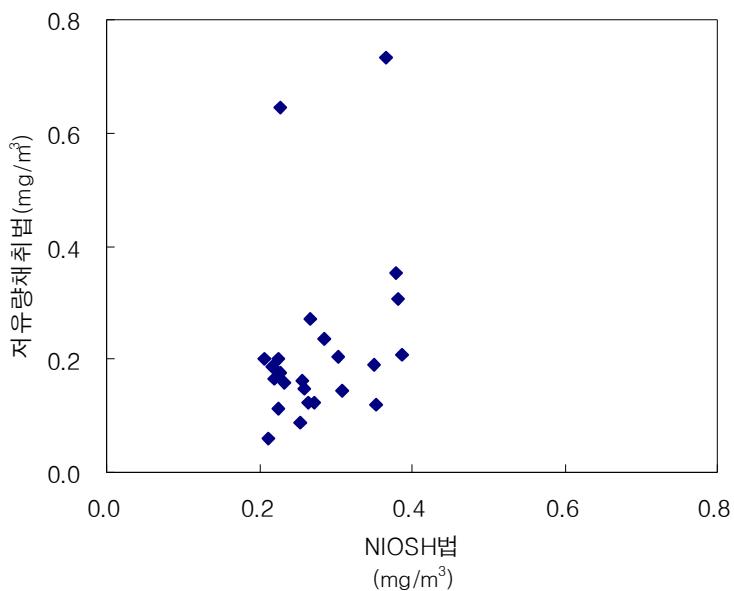
Figure 5. 0.2 mg/m³ 미만 수준에서 먼지 농도차이 비교.

2.2 0.2~0.4 mg/m³ 수준에서 농도차이

0.2~0.4 mg/m³ 수준에서 24쌍의 측정결과를 비교한 결과, <Table 3>과 <Figure 6, 7>에서 보는 바와 같이 평균 -24.3%로 37mm 여과지의 농도가 높게 나타나고 그 표준편차는 47.6%로 나타났다.

Table 3. 0.2~0.4 mg/m³ 수준에서 농도 차이 (mg/m³)

일련 번호	NIOSH법 (A)	저유량채취법 (B)	B-A/A*100 (%)
1	0.207	0.201	-2.8
2	0.211	0.059	-72.2
3	0.216	0.188	-13.0
4	0.219	0.165	-24.8
5	0.225	0.111	-50.4
6	0.226	0.199	-11.7
7	0.226	0.177	-21.6
8	0.229	0.645	182.2
9	0.231	0.158	-31.6
10	0.254	0.088	-65.2
11	0.257	0.161	-37.4
12	0.259	0.147	-43.0
13	0.263	0.122	-53.6
14	0.266	0.271	1.6
15	0.272	0.124	-54.4
16	0.284	0.235	-17.4
17	0.304	0.203	-33.3
18	0.308	0.144	-53.4
19	0.349	0.190	-45.6
20	0.353	0.121	-65.7
21	0.366	0.732	100.2
22	0.379	0.352	-7.1
23	0.381	0.307	-19.5
24	0.386	0.207	-46.4
Mean	-	-	-24.3
S.D	-	-	47.6



2.3 0.4~0.8 mg/m³ 수준에서 농도차이

0.4~0.8 mg/m³ 수준에서 21쌍의 측정결과를 비교한 결과 <Table 4>과 같이 평균 -45.9%로 NIOSH법에 비해 저유량채취법이 낮게 나타났으며 표준편차는 22.2%로 나타났다. <Figure 8, 9>에서 저유량 측정법을 이용한 시료가 대부분이 낮게 나타났다.

Table 4. 0.4~0.8 mg/m³ 수준에서 농도 차이 (mg/m³)

일련 번호	NIOSH법 (A)	저유량채취법 (B)	B-A/A*100 (%)
1	0.401	0.182	-54.7
2	0.407	0.061	-84.9
3	0.429	0.379	-11.7
4	0.461	0.484	4.9
5	0.465	0.408	-12.2
6	0.481	0.304	-36.8
7	0.503	0.143	-71.5
8	0.510	0.775	52.0
9	0.511	0.223	-56.4
10	0.528	0.297	-43.8
11	0.536	0.112	-79.1
12	0.554	0.261	-52.9
13	0.587	0.207	-64.8
14	0.595	0.203	-65.8
15	0.599	0.256	-57.2
16	0.605	0.566	-6.5
17	0.611	0.332	-45.7
18	0.617	0.485	-21.3
19	0.626	0.148	-76.4
20	0.673	0.500	-25.6
21	0.741	0.425	-42.6
Mean	0.621	0.338	-45.9
S.D	0.052	0.146	22.2

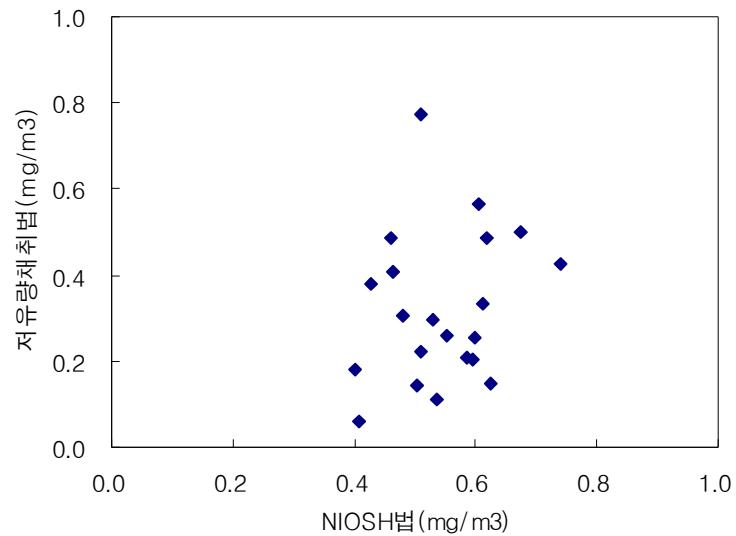


Figure 8. 0.4~0.8 mg/m³ 수준에서 먼지 측정결과 비교.

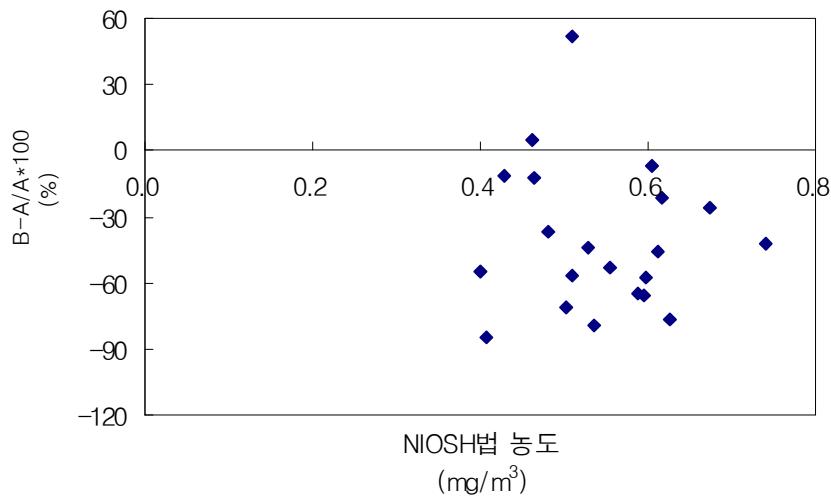


Figure 9. 0.4~0.8 mg/m³ 수준에서 먼지 농도차이 비교.

2.4 0.8 mg/m³ 이상 수준에서 농도 차이

0.8 mg/m³ 이상 수준에서 농도 차이를 18쌍을 비교한 결과도 저유량채취법이 평균 -67.4%정도 NIOSH법보다 낮게 나타났고, 표준편차는 16.9%로 나타났다 (Table 5 및 <Figure 11>참조).

Table 5. 0.8 mg/m³ 이상 수준에서 농도 차이 (mg/m³)

일련 번호	NIOSH법 (A)	저유량채취법 (B)	B-A/A*100 (%)
1	0.814	0.487	-40.1
2	0.835	0.244	-70.8
3	0.842	0.329	-61.0
4	0.849	0.265	-68.8
5	0.933	0.514	-44.9
6	1.000	0.269	-73.1
7	1.004	0.192	-80.8
8	1.021	0.227	-77.7
9	1.073	0.320	-70.2
10	1.147	0.318	-72.3
11	1.153	0.708	-38.6
12	1.160	0.388	-66.6
13	1.220	0.325	-73.4
14	1.419	0.195	-86.3
15	1.630	0.611	-62.5
16	1.705	0.968	-43.2
17	1.790	0.106	-94.1
18	2.514	0.832	-66.9
Mean	-	-	-67.4
S.D	-	-	16.9

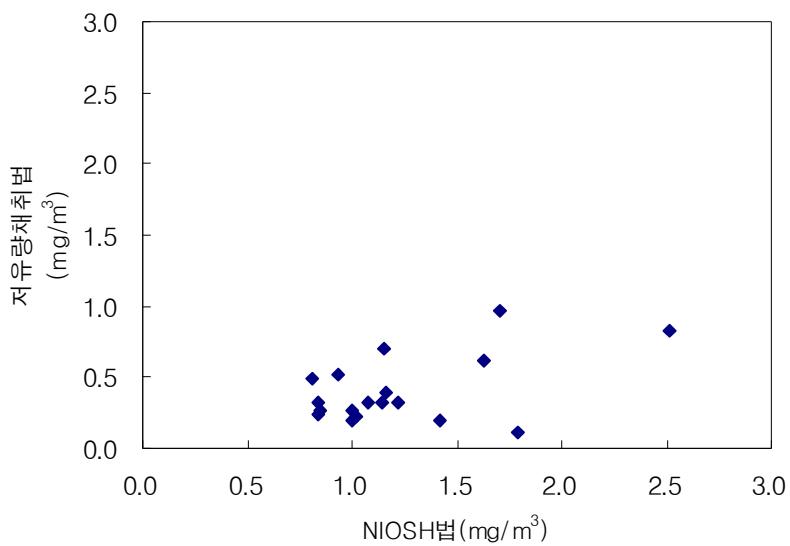


Figure 10. $0.8 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이상 수준에서 먼지 측정결과 비교.

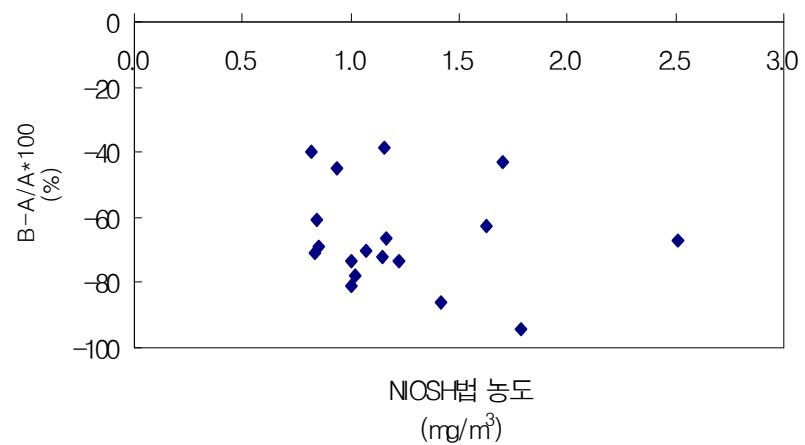


Figure 11. $0.8 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이상 수준에서 먼지 농도 차이 비교.

이와 같이 4단계로 분류하여 그 농도를 비교한 결과 $0.2 \text{ mg}/\text{m}^3$ 미만에서는 저유량채취법이 NIOSH방법보다 평균 21.6%로 높은 반면 $0.8 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이상에서는 평균 -67.4%로 낮게 나타났다. 농도의 표준편차를 비교해보면 $0.2 \text{ mg}/\text{m}^3$ 미만에서는 56.3%의 편차를 보이나 농도가 높아질수록 그 편차는 줄어들었다.

3. NIOSH방법의 내부변이와 저유량채취법의 내부변이

NIOSH방법의 내부변이와 저유량채취법의 내부변이를 살펴보기 위하여 동일한 장소에서 동시에 4개씩 면지를 측정한 결과를 분석하였다. 실험방법은 NIOSH법의 여과지 4개와 저유량채취법의 여과지 4개를 동일한 장소에서 동일한 시간동안 시료를 채취하였다. 이 실험은 3회 반복하였으며, 그 결과는 <Table 6>과 같다. 4개 시료의 평균과 표준 편차 및 변이계수를 비교한 결과, 변이계수는 NIOSH방법의 경우 각각 28.6%, 53.0%, 18.5%, 저유량채취법은 2.2%, 52.6%, 14.9%로 나타나 변이는 저유량채취법이 더 작은 것으로 나타났다.

두 측정법의 측정값을 t-test를 한 결과, 1회 실험 당시 두 그룹 간 차이를 검정한 t값은 -2.05였고 유의확률은 0.086였으며, 2회 실험 시 두 그룹 간 차이를 검정한 t값은 -1.50, 유의확률은 0.183이었으며, 3회 실험 시 t값은 -1.80, 유의확률은 0.122이었다. 따라서 3번의 실험결과 두 방법 간에는 통계적으로 유의한 차이가 없었다.

Table 6. NIOSH법과 저유량채취법의 내부 변이 비교

구분	No	NIOSH (mg/m ³)	저유량채취법 (mg/m ³)
A	1	1.18	1.11
	2	0.84	1.09
	3	0.66	1.07
	4	0.68	1.07
Mean		0.84	1.09
S.D		0.24	0.02
C.V(%)		28.6	2.2
B	1	1.30	2.22
	2	1.06	3.73
	3	0.46	0.95
	4	2.00	1.89
Mean		1.20	2.20
S.D		0.64	1.16
C.V(%)		53.0	52.6
C	1	1.63	0.99
	2	1.25	1.36
	3	1.22	1.28
	4	1.76	1.07
Mean		1.46	1.17
S.D		0.27	0.18
C.V(%)		18.5	14.9

4. 공시료 여과지의 농도 비교

NIOSH방법에서 사용한 여과지(37 mm)와 저유량채취법에서 사용한 여과지(25 mm)에 대한 공시료에 대한 분석결과는 Table 7과 같다. 37 mm여과지의 경우 공시료의 전후 무게차이는 0.027 mg으로 나타나 약간 증가하였으며, 25 mm 여과지는 0.006 mg으로 나타났다. 각각의 표준편차는 0.017 mg과 0.008 mg으로 나타나, 37 mm의 여과지

가 25 mm의 여과지보다 공시료에 대한 측정전후의 무게차이가 2.4배 더 큰 것으로 나타났다. 이것은 37 mm 여과지의 측정한계가 더 크거나 오차의 범위가 더 크게 나타날 가능성이 있다는 것을 의미한다.

Table 7. 공시료 여과지의 농도 비교.

No	NIOSH법 여과지 (mg)			저유량채취법 여과지 (mg)		
	Pre (A)	Post (B)	B-A	Pre (A)	Post (B)	B-A
1	13.296	13.363	0.067	7.512	7.520	0.008
2	16.611	16.629	0.018	7.179	7.185	0.006
3	15.668	15.690	0.022	6.154	6.187	0.033
4	18.032	18.057	0.025	5.448	5.457	0.008
5	14.939	14.962	0.023	5.883	5.883	0.000
6	15.212	15.224	0.012	5.479	5.482	0.003
7	16.187	16.185	- 0.002	5.701	5.700	-0.001
8	16.493	16.507	0.014	5.384	5.384	0.000
9	16.149	16.179	0.030	6.026	6.030	0.004
10	16.152	16.205	0.053	6.023	6.029	0.006
11	16.585	16.600	0.015	6.249	6.252	0.003
12	15.134	15.179	0.045	5.997	6.002	0.005
13	15.875	15.898	0.023	6.510	6.510	0.000
14	15.129	15.154	0.025	5.997	6.002	0.005
15	15.122	15.137	0.015	6.510	6.510	0.000
16	16.087	16.109	0.022	5.900	5.915	0.015
17	15.814	15.836	0.022	5.900	5.915	0.015
18	15.129	15.146	0.017	6.841	6.841	0.000
19	15.092	15.125	0.033	5.684	5.687	0.003
20	15.231	15.242	0.011	5.576	5.581	0.005
21	15.758	15.826	0.068	5.998	5.999	0.001
Mean	-	-	0.027	-	-	0.006
S.D	-	-	0.017	-	-	0.008

일반적으로 공시료의 검출한계(LOD)는 표준편차의 3배로 하여 계산하며 정량한계(LOQ)는 표준편차의 10배를 한 양이다.

$$LOD = 3 \times SD$$

$$LOQ = 10 \times SD$$

위의 식을 이용할 경우, 37mm 여과지의 경우, 검출한계(LOD)와 정량한계(LOQ)는 각각 다음과 같이 계산된다.

$$LOD = 3 \times 0.017 \text{ mg} = 0.051 \text{ mg}$$

$$LOQ = 10 \times 0.017 \text{ mg} = 0.17 \text{ mg}$$

이를 기준으로 각 농도별 시료채취에 필요한 시간을 구하면 <Table 8>과 같다.

$$T(\text{min}) = \frac{1000 \times LOQ}{\text{유량} \times 1 \text{m}^3 \text{공기중} \text{분진량}}$$

37mm 여과지를 사용하여 $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ 의 농도수준에서 시료를 채취할 경우 최소 시료채취 시간은 다음과 같다.

$$T(\text{min}) = \frac{1000 \times 0.17}{2 \times 1} = 85 \text{ min}$$

본 연구에서 실험한 조건은 노동수준이 대부분 $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이하였다. $1 \text{ mg}/\text{m}^3$ 의 수준이라면 측정시간은 NIOSH법의 경우 최소기준이상이었지만 저유량채취법은 최소시료채취시간보다 적어 시료채취시간이 충분하지 못한 것으로 나타났으며 이러한 결과가 시료의 과소평가 내지는 과대평가 등의 오차로 나타난 것이라고 추정된다.

Table 8. 농도 수준별 최소시료채취시간의 추정치

농도수준 (mg/m ³)	NIOSH법 (min)	저유량채취법 (min)
0.2	425	2000
0.4	213	1000
0.8	106	500
1	85	400
2	43	200
5	17	80

5. 시료채취 시간

본 실험결과를 시료채취시간에 따라 200분보다 적은 시간동안 시료를 채취한 그룹과 200분 이상 시료를 채취한 그룹에서 NIOSH법과 저유량채취법을 비교해 본 결과, 다음과 같았다.

5.1. 시료채취시간이 200분 미만인 경우

200분 미만동안 시료를 채취한 경우, NIOSH법과 저유량채취법의 결과를 비교한 결과 <Table 9>와 <Figure 12>에서 보는 바와 같이 평균 -14.0%, 표준편차 83.2%로 저유량채취법이 NIOSH법보다 낮게 나타났다.

Table 9. 시료채취시간이 200분 미만인 경우 두 방법 간 농도차이
(mg/m³)

일련 번호	시료채취시간 (min)	NIOSH방법 (A)	저유량채취법 (B)	B-A/A*100 (%)
1	177	1.705	0.968	-43.2
2	177	1.630	0.611	-62.5
3	177	2.514	0.832	-66.9
4	177	1.000	0.269	-73.1
5	179	0.842	0.329	-61.0
6	179	0.401	0.182	-54.7
7	179	0.510	0.775	52.0
8	187	0.503	0.143	-71.5
9	187	0.511	0.223	-56.4
10	187	0.933	0.514	-44.9
11	187	1.220	0.325	-73.4
12	191	0.160	0.238	49.0
13	191	0.229	0.645	182.2
14	191	0.027	0.061	128.3
Mean	-	-	-	-14.0
S.D	-	-	-	83.2

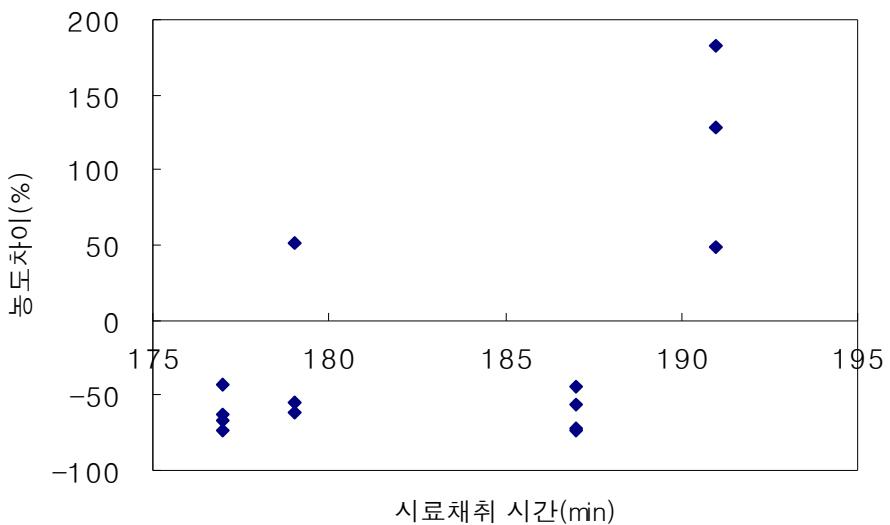


Figure 12. 시료채취시간이 200분 미만인 경우 두 방법 간 농도차이 비교.

5.2. 시료채취시간이 200분 이상인 경우

시료채취시간이 200분 이상에서의 NIOSH법과 저유량채취법을 비교한 결과, <Table 10>과 <Figure 13>에서 보는 바와 같이 평균 -14.0%, 표준편차 83.2%로 저유량채취법이 NIOSH법보다 과소평가되는 것으로 나타났다.

Table 10. 시료채취시간이 200분 이상인 경우 두 방법 간 농도

차이			(mg/m ³)
시간 (min)	NIOSH방법 (A)	저유량채취법 (B)	B-A/A*100 (%)
210	1.147	0.318	-72.3
210	0.465	0.408	-12.2
210	0.120	0.237	98.0
210	0.595	0.203	-65.8
214	0.429	0.379	-11.7
214	0.353	0.121	-65.7
214	0.407	0.061	-84.9
219	0.284	0.235	-17.4
219	0.272	0.124	-54.4
219	0.231	0.158	-31.6
235	0.107	0.096	-10.1
235	0.101	0.043	-57.7
235	0.259	0.147	-43.0
235	0.225	0.111	-50.4
236	0.176	0.156	-11.5
236	0.219	0.165	-24.8
236	0.172	0.182	5.7
237	1.177	1.115	-5.3
237	0.841	1.094	30.1
237	0.659	1.067	61.8
237	0.676	1.067	57.9
245	0.617	0.485	-21.3
245	0.366	0.732	100.2
245	1.419	0.195	-86.3

Table 10. 계속(시료채취시간이 200분 이상인 경우 두 방법 간
농도차이) (mg/m³)

시간 (min)	NIOSH방법 (A)	저유량채취법 (B)	B-A/A*100 (%)
248	1.153	0.708	-38.6
248	0.216	0.188	-13.0
248	0.226	0.177	-21.6
255	0.673	0.500	-25.6
255	0.587	0.207	-64.8
255	1.004	0.192	-80.8
260	1.021	0.227	-77.7
260	0.814	0.487	-40.1
260	1.073	0.320	-70.2
260	1.790	0.106	-94.1
263	0.308	0.144	-53.4
263	0.386	0.207	-46.4
263	0.528	0.297	-43.8
270	0.263	0.122	-53.6
270	0.254	0.088	-65.2
270	0.207	0.201	-2.8
271	0.150	0.132	-12.1
271	0.226	0.199	-11.7
271	0.107	0.103	-4.1
273	0.741	0.425	-42.6
273	0.605	0.566	-6.5
273	0.611	0.332	-45.7
273	0.481	0.304	-36.8

Table 10. 계속(시료채취시간이 200분 이상인 경우 두 방법 간

농도차이 (mg/m³)

시간 (min)	NIOSH방법 (A)	저유량채취법 (B)	B-A/A*100 (%)
280	0.211	0.059	-72.2
280	0.195	0.254	30.1
290	1.160	0.388	-66.6
290	0.626	0.148	-76.4
290	0.849	0.265	-68.8
291	1.251	0.987	-21.1
291	1.217	1.361	11.8
291	1.760	1.277	-27.5
291	0.266	0.271	1.6
291	0.379	0.352	-7.1
291	0.381	0.307	-19.5
291	0.257	0.161	-37.4
296	0.349	0.190	-45.6
296	0.536	0.112	-79.1
296	0.835	0.244	-70.8
296	0.599	0.256	-57.2
296	0.554	0.261	-52.9
296	0.461	0.484	4.9
296	0.304	0.203	-33.3
305	1.304	0.000	-100.0
305	1.059	2.222	109.7
305	0.456	3.730	717.1
305	2.000	0.947	-52.7
335	2.864	0.753	-73.7
335	3.004	0.773	-74.3
335	4.520	0.780	-82.7
Mean	-	-	-21.5
S.D	-	-	98.1

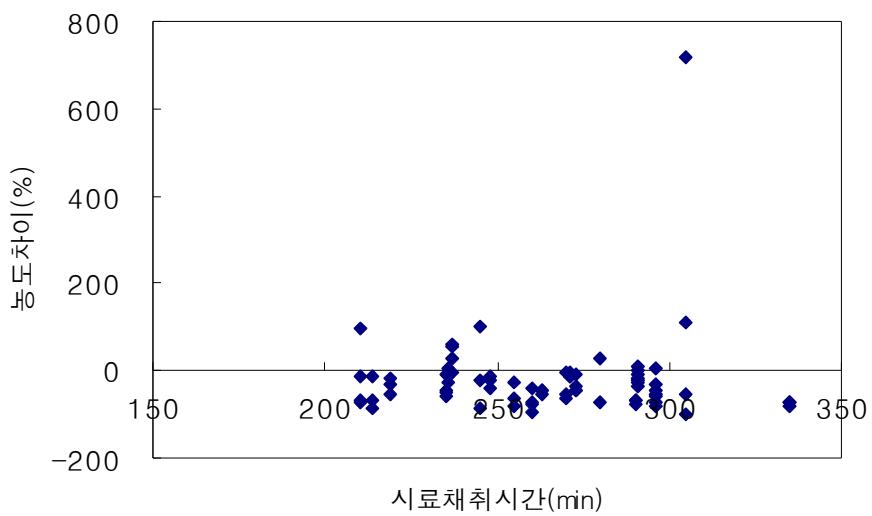
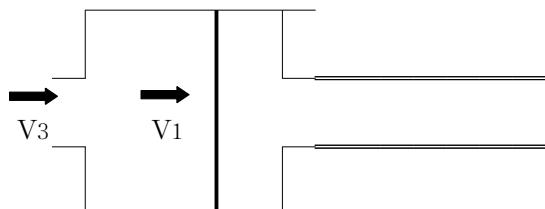


Figure 13. 시료채취시간이 200분 이상인 경우 두 방법 간 농도차이 비교.

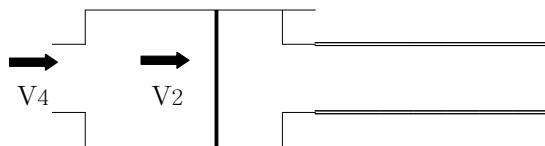
6. 고찰

6.1 면속도 (Face Velocity)

본 연구에서 시료 채취 시 여과지 크기와 유량의 차이만 비교하였으나 실제 유량의 변화에 따라 유속의 변화가 발생한다. 유속의 변화 중에서 면지채취에 영향을 미치는 부분은 <Figure 14>와 같이 카셋트의 공기유입구부분이다.



NIOSH법(37mm)



저유량채취법(25mm)

Figure 14. 시료채취기구의 카셋트 유입구에서 기류속 및 여과지 면속도에 대한 모식도.

NIOSH법에서는 유량이 2 l/min 이며 저유량채취법은 유량이 0.2 l/min 이다. 여과지의 유효직경은 NIOSH법이 35 mm 이고 저유량채취법은 23 mm 이다. 따라서 NIOSH법의 유속은 3.5 cm/sec 이며 저유량 채취법의 유속은 0.8 cm/sec 로 그 차이가 4.25배가 된다. 한편 유량을 달리할 경우 37 mm 여과지와 25 mm 여과지에 대한 여과지면에서의 면속도는 <Table 11>과 같다.

한편 NIOSH법과 저유량채취법은 모두 카셋트 공기유입구의 크기는 4mm 로 같다. NIOSH방법인 유량 2 l/min 과 저유량채취법인 0.2 l/min 에 대해 공기 유입구 유속은 각각 66.7 cm/sec , 6.7 cm/sec 로 그 차이가 10배가 된다. 유량을 달리하였을 경우 공기 유입구 유속은 <Table 12>와 같다.

Table 11. 여과지 면속도 비교 (cm/sec)

유량(ℓ/min)	NIOSH법 (V ₁)	저유량채취법 (V ₂)
2	3.5	-
1.5	2.6	-
1	1.7	4.0
0.5	0.9	2.0
0.2	-	0.8

Table 12. 공기 유입구 속도 비교 (cm/sec)

유량(ℓ/min)	NIOSH법 (V ₃)	저유량채취법 (V ₄)
2.0	66.7	-
1.5	50.0	-
1.0	33.3	33.3
0.5	16.7	16.7
0.2	-	6.7

본 실험에서 실험한 조건에서 NIOSH방법의 경우 여과지 면속도는 저유량채취법 보다 4.25배 커졌으며, 공기 유입구에서 유입속도는 약 10 배가 더 커졌다. 특히 공기 유입구 속도는 먼지의 포집속도에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 공기유입구의 속도가 낮은 저유량채취법이 먼지 채취량이 상대적으로 과소평가되었을 것으로 추측된다. 실제 저유량채취법에 의한 먼지농도가 과소평가된 것은 이러한 원인으로부터 기인된 것으로 보인다.

6.2 분석감도 및 민감성(Analytical Sensitivity)

먼지의 중량분석 과정에서는 분석의 민감도에 따라 최소한의 일정 공기량을 채취하여야 한다. 일반적으로 산업위생학 분야에서 측정방법은 노출수준의 1/10 농도수준까지 정량적인 측정이 가능하여야 한다. 그러므로 최소한 시료 채취시간은 다음과 같다.

$$\text{최소 채취 시간} = \frac{10 \times \text{분석의 민감성}}{\text{노출농도} \times \text{유량}}$$

분석시 민감도는 수분, 온도에 영향을 받는데 여과지는 건조시키거나 공시료 보정을 할 경우에는 그 여과지 무게의 0.1% 이상 먼지를 채취하는 것이 추천된다. 따라서 최소의 시료 채취시간은 다음 식과 같다.

$$\text{최소 채취 시간} = \frac{0.01 \times \text{필터무게}}{\text{노출 농도} \times \text{유량}}$$

번 실험결과를 농도 수준별로 여과지와 먼지의 무게를 분석해보면 <Table 13>과 같다. 여과지와 먼지무게의 비는 NIOSH방법은 각각 0.5%, 0.99%, 1.98%, 2.48%로 나타나며 저유량채취법에서는 0.13%, 0.27%, 0.54%, 0.67%로 나타나, NIOSH법의 경우 그 비율이 높게 나타난다. 시료채취시간은 NIOSH법의 경우 적합하나 저유량채취법의 시료채취시간이 위의 기준이하로 나타났다.

Table 13. 여과지의 무게와 면지의 무게 및 그 비율

농도 수준 (mg/m ³)	NIOSH법(400 ℥)			저유량채취법(40 ℥)		
	평균여과 지무게 (mg)	면지무게 (mg)	%	여과지무 게 (mg)	면지무게 (mg)	%
0.2	16.16	0.08	0.50	5.97	0.008	0.13
0.4	16.16	0.16	0.99	5.97	0.016	0.27
0.8	16.16	0.32	1.98	5.97	0.032	0.54
1	16.16	0.4	2.48	5.97	0.04	0.67

위의 식에 따라 본 실험에서 사용한 여과지의 무게를 기준으로 최소 시료채취시간을 구하면 <Table 14>와 같다. 농도수준이 1 mg/m³인 경우 NIOSH법의 최소시료채취시간이 81분이며, 저유량채취법을 사용할 경우 299분은 되어야 하는 것으로 나타나 저유량 시료채취 시 최소시료채취시간은 3.7배가 더 많게 나타났다. 그러나 저유량채취법의 최소 시료채취시간이 300분 정도로 6시간이상 TWA를 측정할 경우 작업환경측정은 가능한 것으로 나타났다.

한편 카셋트의 유입구에서 속도변화가 면지의 측정에 비치는 영향에 대해서는 보다 정밀한 연구가 뒤따라야 정확한 분석이 가능할 것으로 생각된다.

Table 14. 여과지의 농도수준별 최소 시료채취 시간 비교

농도 수준 (mg/m ³)	NIOSH법 (min)	저유량채취법 (min)
0.2	404	1493
0.4	202	746
0.8	101	373
1	81	299

IV. 결론

저유량채취 펌프를 사용하여 먼지의 측정가능성을 시험하기 위하여 0.2 Lpm의 저유량채취 펌프에 25 mm 여과지를 카셋트에 장착한 저유량채취법과 37 mm여과지와 2 Lpm의 공기채취펌프를 사용하는 기존의 표준측정법(NIOSH Method No. 0500)을 제지사업장의 공정에서 먼지를 직접 측정하여 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

첫째, 73쌍의 두 측정방법으로 농도를 측정한 결과 저유량채취법이 NIOSH방법보다 낮게 평가되었다. 그 차이는 그 평균 -31.7%로 나타났다.

둘째, 농도수준별로 두 방법 간 차이를 비교한 결과 $0.2 \text{ mg}/\text{m}^3$ 미만의 농도수분에서는 저유량채취법이 더 높게 나왔으나 $0.2 \text{ mg}/\text{m}^3$ 이상의 농도수준에서는 저유량채취법이 NIOSH방법보다 과소평가되는 것으로 나타났다.

셋째, NIOSH방법의 내부변이와 저유량채취법의 내부변이를 보기 위해 동일한 장소에서 각각 4개의 시료를 측정한 결과, 저유량채취법의 변이계수는 각각 2.15%, 52.6%, 14.9%로 나타났고, NIOSH법의 변이계수는 각각 28.6%, 53%, 및 18.5%로 나타났다.

넷째, 보정용으로 사용한 21개의 공시료를 분석한 결과, 37mm의 경우 측정전후의 무게차이에 대한 표준편차 0.017 mg, 25 mm여과지의 경우 측정전후 무게차이에 대한 표준편차 0.008 mg으로 나타나 37

mm의 여과지가 25 mm 여과지보다 2.4배로 높게 나타났다. 이와 같은 결과를 기준으로 공시료의 정량한계(LOQ)를 계산하여 최소시료채취시간을 계산한 결과, 1 mg/m^3 의 농도수준에서 약 400분이 되는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김병수, 김성천, 이채언, 전진호, 김진옥, 김준연: 제조업 산업장의 작업공정과 먼지 작업장내 먼지 농도에 관한 조사연구: 인제의학 제7권. 제1호. p61~62, 1986
2. 양원호, 김대원, 김진국, 윤충식, 허용, 이부용: 샘플유량과 기상조건에 따른 미세먼지 중량측정용 기구간의 농도비교: 한국환경과학회지 제14권. 제1호. p92, 2005
3. 임신섭 : 일부 작업환경측정기관의 먼지 농도분석의 정확도에 관한 연구
4. 이경주, 임영, 김현옥 : 목재먼지의 입경분포와 총 먼지로 측정 시 37mm Closed-face 카세트법과 IPM 측정법에 의한 농도비교; 서울대학교 보건대학원 산업보건학교실 10주년기념 학술 논문집, p126~127, 1995
5. 김광종 외 22: 산업위생, 신고아출판사 2004
6. 백남원, 박동욱, 윤충식: 작업환경측정 및 평가, 신광출판사 2001
7. NIOSH, Manual of analytical methods, fourth edition, No 0500, 1984
8. NIOSH, The Industrial Environment--its Evaluation & Control, NIOSH, 1977, p140~141,

Abstract

Study on a Validity Test for a Dust Sampling Method with use of Low Volume Personal Air Sampling Pumps

The sensitivity of micro-balances that are widely used recently in the IH laboratories has been increased to 0.001 mg. The NIOSH method for dust sampling was designed to use the micro-balance having a sensitivity of 0.01 mg. Thus, it may be possible to use of a low volume air sampling pump of 0.2 Lpm for airborne dust measurement. A validity test was conducted for a dust sampling method with use of low volume sampling pumps at 0.2 Lpm attached with 25 mm PVC filters. The results are as follows.

1. A dust concentrations were under-estimated by the low volume air sampling method(0.2 Lpm) compared to the standard air sampling method(2 Lpm). Average of differences for 73 paired samples between the standard and low flow sampling methods was -31.7%.
2. However, at the concentration levels below than 0.2 mg/m³, the results by the low sampling method showed high concentrations than those by the standard method.
3. Internal variations of the low flow method for 4 samples were 2.15%, 52.6% and 14.9%. Internal variations of the standard method for 4 samples showed 28.6%, 530%, and ± 18.5%.
4. Standard deviation of difference between post and pre-weights of 21 blank samples for 37 mm PVC filters was 0.017 mg and for 25

mm PVC filters was 0.008 mg. Based on these SDs, LOQs were calculated as 0.17 mg and 0.08 mg for the standard and the low flow sampling methods respectively.