

# 납의 흡입독성 연구를 위한 에어로졸 발생장치의 고안 및 실시간 모니터링을 이용한 성능평가

정재열\* · 김정만<sup>1</sup> · 김태형<sup>2</sup> · 정명수 · 고광재 · 김상덕 · 강성호 · 송용선 · 이기남

원광대학교 한의학전문대학원 제3의학과, 1: 동아대학교 의과대학 예방의학교실, 2: 창원대학교 환경공학과

## Design of Aerosol Generator for Inhalation Toxicology Study of Lead and Evaluation with Real Time Monitoring

Jae Yeal Jeung\*, Jung Man Kim<sup>1</sup>, Tae Hyeung Kim<sup>2</sup>, Myoung Soo Chong,  
Kwang Jae Ko, Sang Duck Kim, Sung Ho Kang, Young Sun Song, Ki Nam Lee

*The Third Medicine, Professional Graduate School of Oriental Medicine, Wonkwang University,*

*1: Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Dong-A University,*

*2: Department of Environmental Engineering, Changwon National University*

This paper was the design of aerosol generator for inhalation toxicology study of lead and evaluation with real time monitoring, and applied several engineering methodology to classical aerosol generator to cope with its disadvantages. According to the testing conditions, source temperature 50°C and inlet-duct band heater temperature 150°C, aerosol generation results for sodium chloride and lead acetate were as followings: CPM(Count Per Minute) for Sodium chloride that used for the testing material in aerosol generation and inhalation system was decreased in the 2nd and the 3rd hour's serial trials, but CVs(coefficiency of variation) were maintained within 10%. CPMs for 5 and 2.5 gram of lead acetate that used for aerosol generation and inhalation exposure of lead showed similar results because of the sedimentation of lead acetate on piezoelectric crystal with time. For that reason, heating and mixing of nebulizing solution will be needed to generate lead aerosol with stable profile and maximum generation efficiency. Fluctuations of 10 and 5 gram lead acetate were low but 2.5gram was high. However, CVs for 10, 5, and 2.5gram lead acetate were within 10%. Considering the theoretical efficiencies for sodium chloride and lead acetate, 5gram sodium chloride and 2.5gram lead acetate were appropriate choice. Aerosol generation characteristics for two materials with 1 hour interval were different with respect to the fluctuation of CPM and the decrease to 10gram in its material. For that reason, sodium chloride can not be used to estimate the aerosol generation and its related parts for lead acetate. According to the testing conditions, source temperature 20, 50, 70°C, and inlet-duct band heater temperature 20, 50, 100, 150, 200°C, aerosol generation results for sodium chloride and lead acetate were as followings: Excluding inlet-duct band temperature 200°C, maximum CPM for sodium chloride was manifested in source temperature 70°C with each inlet-duct band temperature conditions. We suggest that this condition was the optimum in the design of aerosol generator, inhalation system, and the testing. Maximum CPMs for 10, 5, and 2.5gram sodium chloride were from source temperature 70°C and inlet-duct band temperature 20°C. Excluding inlet-duct band temperature 50, 200°C, maximum CPMs for lead acetate were indicated in source temperature 50°C with each inlet-duct band temperature conditions. We suggest that this condition was the optimum in the design of aerosol generator, inhalation system, and the testing for lead inhalation study. Source and inlet-duct band temperatures for 10, 5, 2.5gram lead acetate were 50 and 100°C, 50 and 100°C, 50 and 150°C, respectively. In conclusion, considering above 2 paragraphs of results for aerosol generation, 5gram efficiencies for sodium chloride, lead acetate were higher than 2.5gram's. If inlet-duct band temperature was same, aerosol generation was increased with increase of source temperature. To get maximum aerosol generation will be the conditions that set the appropriate inlet-duct band temperature for each materials and increase the source temperature.

Key words : Inhalation Toxicology, Aerosol Generator, Real Time Monitoring, Lead, Inhalation Exposure.

### 서론

사람은 환경 속에서 항상 중금속에 노출되어왔다. 최초의 중독은 아마도 고농도의 중금속에 오염된 지역에서 음식이나 물에

혼입된 금속에 의해 발생되었을 것이다. 그중 납은 자연계에 존재하며 산업적인 용도로 인해 환경에 널리 산재해 있다. 채광되는 납의 약 10%는 "antiknock"이라 하는 휘발유 첨가물(휘발유 1ℓ 당 약 1mℓ)로서 사용되는 알킬 납 화합물의 생산에 있다. 지난 10년 동안 휘발유에 납을 적게 사용함으로써 사람에게 있어 혈중 납의 농도를 현저하게 줄여왔다<sup>1)</sup>. 전체적으로 납에 대한 인체의 노출은 주로 음식에서 기인한다. 미국에서 성인의 납의 평균

\* 교신저자 : 정재열, 익산시 신용동 344-2 원광대학교 한의학전문대학원

E-mail : jaeyeal@wonkwang.ac.kr, Tel : 063-850-6941

· 접수 : 2001/01/23 · 수정 : 2002/02/28 · 채택 : 2002/03/27

1일 섭취량은 0.1~2mg 정도이다. 그러나, 납중독의 대부분은 환경이나 공해에 의해 일어나며<sup>2)</sup>. 산업환경 즉 다시 말하면 작업환경에서 노동에 종사하는 작업자의 납에 대한 노출은 중요성이 크다. 작업환경에서 개선된 분진제어의 결과로, 흡입된 분진의 만성건강영향에 대한 연구는 급성영향보다 훨씬 중요하게 되었다. 그러므로, 실험동물에 대한 흡입폭로실험에서 폭로챔버에서 분진농도와 크기 분포는 장시간에 걸쳐 반드시 일정하게 유지되어야 한다<sup>3)</sup>. 또한, 입자가 덩어리가 되지 않고 고르게 분산되는 것이 바람직하다. 그러나 이러한 2가지 조건을 만족시키는 장치는 상용화된 제품에서도 제한되어있다. 다수의 일반적으로 이용되는 분진발생장치, 예를 들면 Wright 분진발생기를 이용하면 순간적인 공급비율은 변화할 수 있고 발생된 분진입자는 완전히 덩어리가 될 수 있다<sup>4)</sup>. 다른 형태의 분진 발생기는 Marple 등에 의해서 고안되었다<sup>5)</sup>. 그러나 상용화된 제품은 고가이고 언급된 분진 발생기는 분진의 발생시 많은 시료량이 필요하고 시료의 손실이 많아 여전히 개선이 필요한 실정이다. 상용화된 제품에서도 시험물질에 따라 분진 발생시 설정변수를 시행오차를 거쳐 설정해 주어야 하며 흡입챔버의 용적, 흡입과 배출되는 공기량, 발생장치에서 시험물질의 발생량(시간에 따른) 등을 고려해야 한다. 에어로졸을 발생시키는 방법은 크게 4가지, 액체의 원자화(atomization of liquids), 부유 액체의 원자화(atomization of liquid suspensions), 분말의 분산(dispersion of powders), 그리고 응축(condensation)이고 연구목적과 물질의 특성에 따라 적용의 제한점이 있다<sup>6-9)</sup>.

본 연구는 실험동물에 대한 납의 흡입독성연구에 이용될 수 있는 물질인 초산납 그리고 표준물질로 이용되는 염화나트륨을 이용하여 고전적인 에어로졸 발생장치인 ultrasonic nebulizer에 새로운 몇 가지 공학적 기법을 응용하고 이에 따른 성능의 특성을 알아보려고 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 에어로졸 발생장치

에어로졸 발생장치의 구성은 ultrasonic nebulizer, nebulizing 용액, 히터(Tubular Heater Type SS, Tempco)와 온도 조절기(Thermostat TS-320S, Thermtrol), 블로어로 구성되어있고 발생된 에어로졸 시험장치의 유효용적은 0.100m<sup>3</sup>이었다. 장치는 설정된 폭로농도를 발생시키고자 여러 가지 유량에서 동력학적으로 작동 가능한 시스템이었다. 유입공기의 입자제거를 위한 입자상 필터가 장착된 챔버, ultrasonic nebulizer 원리를 이용하는 에어로졸 발생기, 발생된 에어로졸을 주 덕트에 유입시키는 밴드 히트(Mi-Plus MPP55101, Tempco)와 온도조절기가 장착된 유입관, 배합챔버 전·후의 덕트(전반부 유효용적 0.017m<sup>3</sup>, 후반부 유효용적 0.035m<sup>3</sup>)- 전반부에는 밴드 히트(Mi-Plus MPP00247, Tempco)와 온도조절기가 장착되어있음, 4개의 팬으로 구성된 배합챔버(유효용적 0.048m<sup>3</sup>), 배출되는 공기를 정화하기 위한 HEPA 필터가 장착된 챔버로 구성되어있으며 공기의 이동과 용량 조절은 HEPA 필터가 장착된 챔버에서 블로어와 댐퍼를 이용하여 수행되었다.

### 2. Nebulizing 용액

시험물질은 염화나트륨 그리고 초산납을 이용하였고 각각의 물질에 대해 10, 5, 2.5g을 3차 증류수 2ℓ에 완전히 용해시켜 nebulizing 용액을 만들었다(Na로 각각 1967, 983, 491ppm; Pb로 각각 3184, 1592, 796ppm; 이후 10, 5, 2.5g으로 표시). 10, 5, 2.5g은 예비시험을 거쳐 고려된 각 물질의 중량 농도이다.

### 3. 에어로졸의 측정

실시간 모니터링에는 디지털 분진 표시기(Digital Dust Indicator, P5-L2, MDA Scientific)를 이용하였고 이 장비는 시간의 변화에 따른 에어로졸의 전체 숫자 농도(total number concentration)의 변화를 알아보고자 이용되었고 결과는 분당 계수(Count Per Minute; CPM)으로 표시하였다. Digital Dust Indicator의 특성을 간단히 언급하면 90 °에서 산란된 광(light)이 분진의 농도를 표시해 주고 전처리 장치(precutter)에서 직경이 5 μm인 입자는 모두 통과하고 10μm인 입자는 50% 통과하고 20μm인 입자는 100% 통과하지 못한다. 그러므로 분당계수는 납의 흡입 독성 연구에 부합하는 호흡성의 입자부분을 계수하는 것으로 고려할 수 있다.

### 4. 통계학적 분석

자료는 평균과 표준편차로 요약하였고 통계학적 분석은 윈도우용 SPSS/PC+ 8.0을 이용하였다. 자료는 일원 분산분석을 이용하여 분석하였고  $\alpha = 0.05$ 이었다. 시간에 따른 입자수의 변이성은 변이계수(coefficient of variation; CV)를 이용하여 표시하였다.

## 결 과

발생원 온도 50℃, 입구와 덕트의 밴드 히터 가열기 온도 150℃ 조건에서 작동시간에 따른 2가지 시험물질의 CPM과 변화율은 표 1 및 2와 같다. 각각의 시험물질에 대한 CPM과 변화율은 염화 나트륨 10g에서는 작동 4시간째 747.48CPM 그리고 작동 3시간째 -4.33%로 가장 높은 수치를 보였다. 염화 나트륨 5g에서는 작동 4시간째 545.038CPM 그리고 작동 2시간째 -2.35%로 가장 높은 수치를 보였다. 염화 나트륨 2.5g에서는 작동 5시간째 301.84CPM 그리고 작동 3시간째 -5.61%로 가장 높은 수치를 보였다. 염화 나트륨은 작동 2, 3시간째 CPM이 감소하는 경향이 있었으나 변이계수는 10%안에서 유지되었다.

초산납에 대한 CPM과 변화율은 10g에서는 작동 4시간째 747.48CPM 그리고 작동 5시간째 -7.66%로 가장 높은 수치를 보였다. 초산납 5g에서는 작동 4시간째 747.48CPM 그리고 작동 1시간째 -3.48%로 가장 높은 수치를 보였다. 초산납 2.5g에서는 작동 4시간째 747.48CPM 그리고 작동 1시간째 -6.08%로 가장 높은 수치를 보였다. 초산납의 경우 5g과 2.5g의 성적이 유사하였는데 이는 piezoelectric crystal에 초산납이 침전되기 때문이다. 초산납 10, 5g의 변화율은 낮았고 2.5g에서는 높았으나 변이계수는 10%안에서 유지되었다.

Table 1. Count Per Minute for 3 Testing Materials with Running Time

Running Time, Hour	N	Count Per Minute, CPM		
		Sodium Chloride		
		10g*	5g	2.5g*
1	5	725.18±14.76	541.19±10.91	298.45±6.37
2	5	712.30±15.86	523.89±12.11	271.20±6.23
3	5	688.91±16.71	531.74±11.81	276.49±6.09
4	5	747.48*±16.19	545.03*±11.97	288.73±6.50
5	5	726.89±15.06	540.68±11.87	301.84*±6.46
Total	25	720.15±24.34	536.51±13.27	287.34±13.49
CV	25	3.38	2.47	4.70
		Lead Acetate		
		10g*	5g*	2.5g*
1	5	397.49±7.84	138.57±2.95	104.27±2.39
2	5	404.20*±7.94	147.45*±3.09	107.00±2.46
3	5	379.80±8.39	147.45*±3.10	112.79±2.49
4	5	353.97±8.45	142.53±3.22	113.65±2.37
5	5	347.79±8.17	141.84±2.92	117.42*±2.42
Total	25	376.65±24.22	143.57±4.48	111.03±5.33
CV	25	6.43	3.12	4.80

\*p<0.05 by One-Way ANOVA.

Table 2. Fluctuation of Count Per Minute for 3 Testing Materials with Operating Time

Running Time, Hour	N	Fluctuation, %		
		Sodium Chloride		
		10g	5g	2.5g
1	5	0.69±2.04	0.87±2.03	3.86±2.21
2	5	-1.09±2.20	-2.35*±2.25	-5.61*±2.16
3	5	-4.33*±2.32	-0.88±2.20	-3.77±2.12
4	5	3.79±2.24	1.58±2.23	0.48±2.26
5	5	0.93±2.09	0.77±2.21	5.04±2.25
Total	25	0.00±3.38	0.00±2.47	0.00±4.69
		Lead Acetate		
		10g	5g	2.5g
1	5	5.53±2.08	-3.48*±2.05	-6.08*±2.16
2	5	7.31±2.10	2.70±2.15	-3.62±2.21
3	5	0.83±2.22	2.70±2.16	1.58±2.24
4	5	-6.02±2.24	-0.72±2.24	2.36±2.13
5	5	-7.66*±2.16	-1.20±2.03	5.76±2.18
Total	25	0.00±6.43	0.00±3.12	0.00±4.80

\*p<0.05 by One-Way ANOVA.

발생원 온도 50℃, 입구와 덕트의 밴드 히터 가열기 온도 150℃ 조건에서 작동시간에 따른 3가지 시험물질의 10g에 대한 5g과 2.5g의 CPM 감소율은 표 3과 같다. 각각의 시험물질에 대한 감소율은 염화나트륨 5g에서는 평균 -25.50%이었고 작동 2시간째에서 -27.25%로 가장 높았으며 염화나트륨 2.5g에서는 평균 -60.09%이었고 작동 2시간째에서 -62.34%로 가장 높았다. 초산납 5g에서는 평균 -61.88%이었고 작동 1시간째에서 -63.20%로 가장 높았으며 초산납 2.5g에서는 평균 -70.52%이었고 작동 1시간째에서 -72.31%로 가장 높았다. 각각의 물질에 대해 10g에 대한 5, 2.5g의 CPM 감소율은 이론적으로 각각 -50%, -75%이어야 한다. 이론상의 효율에 비해 염화나트륨에서는 5g에서 24.50%, 2.5g에서 14.91% 그리고 초산납 2.5g에서 4.48%의 효율 증가가 있었으나 초산납에서는 5g에서 -11.88% 효율 감소가 있었다. 시험물질로 염화나트륨을 이용할 때 5g이 적합하여 초산납의 경우에는 2.5g이 적합하다. 발생원 온도 50℃, 입구와 덕트의 밴드 히터 가열기 온도 150℃ 조건에서 작동시간에 따른 에어로졸 발생 시험

의 표준물질인 염화 나트륨과 흡입폭로시험에 이용될 물질인 초산납의 시간에 따른 CPM 변화율, 10g에 대한 감소율은 다른 양상을 보였다.

Table 3. Decrease of Count Per Minute to 10 g for 2 Testing Materials with Running Time

Operating Time, Hour	N	Decrease, %	
		Sodium Chloride	
		5g	2.5g
1	5	-24.85±1.51	-58.55±0.88
2	5	-27.25*±1.68	-62.34*±0.86
3	5	-26.16±1.64	-61.60±0.84
4	5	-24.31±1.66	-59.90±0.90
5	5	-24.92±1.64	-58.08±0.89
Total	25	-25.50±1.84	-60.09±1.87
		Lead Acetate	
		5g	2.5g
1	5	-63.20*±0.78	-72.31*±0.63
2	5	-60.85±0.82	-71.58±0.65
3	5	-60.85±0.82	-70.05±0.66
4	5	-62.15±0.85	-69.82±0.62
5	5	-62.34±0.77	-68.82±0.64
Total	25	-61.88±1.19	-70.52±1.41

\*p<0.05 by One-Way ANOVA.

발생원 온도(20, 50, 그리고 70℃) 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 가열기 온도(20, 50, 100, 150, 그리고 200℃)에 따른 3가지 시험물질의 Count Per Minute(CPM)은 표 4, 5, 그리고 6과 같다. 염화 나트륨 10g일 때 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 가열기 온도 20, 50, 100, 150, 그리고 200℃에서는 각각 발생원 온도 70℃에서 466.66CPM, 발생원 온도 70℃에서 403.33CPM, 발생원 온도 70℃에서 310.00CPM, 발생원 온도 70℃에서 350.00CPM, 그리고 발생원 온도 50℃에서 360.00CPM으로 가장 높았다. 염화 나트륨 5g일 때 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 가열기 온도 20, 50, 100, 150, 그리고 200℃에서는 각각 발생원 온도 70℃에서 326.66CPM, 발생원 온도 70℃에서 220.00CPM, 발생원 온도 70℃에서 200.00CPM, 발생원 온도 70℃에서 216.66CPM, 그리고 발생원 온도 50℃에서 230.00CPM으로 가장 높았다. 염화나트륨 2.5g일 때 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 가열기 온도 20, 50, 100, 150, 그리고 200℃에서는 각각 발생원 온도 70℃에서 183.33CPM, 발생원 온도 70℃에서 403.33CPM, 발생원 온도 70℃에서 310.00CPM, 발생원 온도 70℃에서 350.00CPM, 그리고 발생원 온도 50℃에서 360.00CPM으로 가장 높았다. 염화나트륨 10g의 입구와 덕트 밴드의 온도 200℃을 제외하면 발생원의 온도가 70℃에서 입구와 덕트 밴드의 온도 각각에 대해 최대의 CPM을 제시하였고 흡입챔버 설계와 시험에서 최적 조건으로 생각된다. 염화나트륨 10g, 5g, 그리고 2.5g에 대한 최대 CPM은 발생원 온도 70℃와 입구와 덕트 밴드의 온도 20℃에서 제시되었다.

초산납 10g일 때 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 가열기 온도 20, 50, 100, 150, 그리고 200℃에서는 각각 발생원 온도 50℃에서 280.00CPM, 발생원 온도 20℃에서 236.66CPM, 발생원 온도 50℃에서 300.00CPM, 발생원 온도 50℃에서 210.00CPM, 그리고 발생원 온도 50℃에서 200.00CPM으로 가장 높았다. 초산납

5g일 때 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 가열기 온도 20, 50, 100, 150, 그리고 200℃에서는 각각 발생원 온도 50℃에서 170.00CPM, 발생원 온도 50℃에서 160.00CPM, 발생원 온도 50℃에서 180.00CPM, 발생원 온도 50℃에서 143.33CPM, 그리고 발생원 온도 20℃에서 136.66CPM으로 가장 높았다. 초산납 2.5g 일 때 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 가열기 온도 20, 50, 100, 150, 그리고 200℃에서는 각각 발생원 온도 50℃에서 113.33CPM, 발생원 온도 50℃에서 100.00CPM, 발생원 온도 50℃에서 90.00CPM, 발생원 온도 50℃에서 126.66CPM, 그리고 발생원 온도 50℃에서 90.00CPM으로 가장 높았다. 초산납 10g, 5g의 입구와 덕트 밴드의 온도 각각 50℃, 200℃을 제외하면 발생원의 온도가 50℃에서 입구와 덕트 밴드의 온도 각각에 대해 최대의 CPM을 제시하였고 흡입챔버 설계와 시험에서 최적 조건으로 생각된다. 초산납 10g, 5g, 2.5g에 대한 최대 CPM은 각각 발생원 온도 50℃ 그리고 입구와 덕트 밴드의 온도 100℃, 발생원 온도 50℃ 그리고 입구와 덕트 밴드의 온도 100℃, 발생원 온도 50℃ 그리고 입구와 덕트 밴드의 온도 150℃에서 제시되었다.

Table 4. Count Per Minute for Sodium Chloride with Operating Temperature and Quantity

Temperature of Source, °C	N	Operating Temperature of Inlet and Duct's Band Heater, °C				
		20	50	100	150	200
Count Per Minute for 10g, CPM						
20	3	178.66±15.04	210.00±0.00	200.00±0.00	226.66±5.77	240.00±0.00
50	3	233.33±5.77	260.00±0.00	290.00±0.00	310.00±0.00	360.00±0.00
70	3	466.66*±5.77	403.33*±5.77	310.00*±0.00	350.00*±0.00	343.33±5.77
Total	9	292.88±132.74	291.11±86.95	266.66±50.74	295.55±54.56	314.44±56.37
Count Per Minute for 5g, CPM						
20	3	110.00±0.00	130.00±0.00	140.00±0.00	163.33±5.77	190.00±0.00
50	3	140.00±0.00	150.00±0.00	160.00±0.00	173.33±5.77	180.00±0.00
70	3	326.66*±5.77	220.00*±0.00	200.00*±0.00	216.66*±5.77	230.00*±0.00
Total	9	192.22±101.70	166.66±40.92	166.66±26.45	184.44±25.05	200.00±22.91
Count Per Minute for 2.5g, CPM						
20	3	90.00±0.00	93.33±5.77	106.66±5.77	120.00±0.00	130.00±0.00
50	3	96.66±5.77	90.00±0.00	106.66±5.77	120.00±0.00	120.00±0.00
70	3	183.33*±5.77	153.33*±5.77	130.00*±0.00	136.66*±5.77	133.33*±5.77
Total	9	123.33±45.27	112.22±31.13	114.44±12.36	125.55±8.81	127.77±6.66

\*p<0.05 by One-Way ANOVA.

Table 5. Count Per Minute for Lead Acetate with Operating Temperature and Quantity

Temperature of Source, °C	N	Operating Temperature of Inlet and Duct's Band Heater, °C				
		20	50	100	150	200
Count Per Minute for 10g, CPM						
20	3	180.00±0.00	236.66*±5.77	226.66±5.77	166.66±5.77	166.66±5.77
50	3	280.00*±0.00	200.00±0.00	300.00*±0.00	210.00*±0.00	200.00*±0.00
70	3	270.00±0.00	183.33±5.77	180.00±0.00	130.00±0.00	120.00±0.00
Total	9	243.33±47.69	206.66±23.97	235.55±52.46	168.88±34.80	162.22±34.92
Count Per Minute for 5g, CPM						
20	3	83.33±5.77	93.33±5.77	90.00±0.00	120.00±0.00	136.66*±5.77
50	3	170.00*±0.00	160.00*±0.00	180.00*±0.00	143.33*±5.77	130.00±0.00
70	3	120.00±0.00	120.00±0.00	90.00±0.00	80.00±0.00	70.00±0.00
Total	9	124.44±37.78	124.44±29.20	120.00±45.00	114.44±27.88	112.22±31.92
Count Per Minute for 2.5g, CPM						
20	3	66.66±5.77	76.66±5.77	70.00±0.00	60.00±0.00	70.00±0.00
50	3	113.33*±5.77	100.00*±0.00	90.00*±0.00	126.66*±5.77	90.00*±0.00
70	3	90.00±0.00	73.33±5.77	50.00±0.00	50.00±0.00	40.00±0.00
Total	9	90.00±20.61	83.33±13.22	70.00±17.32	78.88±36.20	66.66±21.79

\*p<0.05 by One-Way ANOVA.

발생원 온도(20, 50, 그리고 70℃) 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 가열기 온도(20, 50, 100, 150, 그리고 200℃)에 따른 3가지 시험물질 10g에 대한 5g과 2.5g의 CPM 감소율은 표 7과 같다. 염화 나트륨 5g일 때 평균 감소율은 -37.23%이었고 감소율이 가장 낮은 입구와 덕트의 밴드 히터 온도는 200℃로 평균 -34.61%이었고 이 조건에서 가장 낮은 감소율을 보인 발생원의 온도는 20℃이었다(이론상의 효율과 비교시 58.34% 효율증가). 염화 나트륨 2.5g일 때 평균 감소율은 -57.51%이었고 감소율이 가장 낮은 입구와 덕트의 밴드 히터 온도는 100℃로 평균 -55.98%이었고 이 조건에서 가장 낮은 감소율을 보인 발생원 온도는 20℃이었으나 가장 낮은 감소율은 나타낸 발생원 온도 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 온도는 20℃ 그리고 200℃로 -45.83%이었다(이론상의 효율과 비교시 38.89% 효율증가).

초산납 5g일 때 평균 감소율은 -40.44%이었고 감소율이 가장 낮은 입구와 덕트의 밴드 히터 온도는 200℃로 평균 -31.55%이었고 이 조건에서 가장 낮은 감소율을 보인 발생원의 온도는 20℃이었다(이론상의 효율과 비교시 64.00% 효율증가). 초산납 2.5g일 때 평균 감소율은 -61.52%이었고 감소율이 가장 낮은 입구와 덕트의 밴드 히터 온도는 150℃로 평균 -55.07%이었고 이 조건에서 가장 낮은 감소율을 보인 발생원 온도는 50℃이었다(이론상의 효율과 비교시 47.09% 효율증가).

염화 나트륨과 초산납 5g과 2.5g에 대한 흡입챔버의 성능 시험시 최대의 시험물질 발생량을 얻기 위해서는 상기에 언급된 발생원 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 온도 사용하는 것이 좋을 것으로 생각된다. 상기의 결과를 고려할 때 염화 나트륨과 초산납 모두 2.5g에서 보다는 5g에서 이론적인 결과 보다 효율이 높았고 입구와 덕트 밴드 히터의 온도가 같을 때는 발생원의 온도가 높을 수록 에어로졸의 발생량이 증가하는 경향이 있었다.

Table 7. Decrease of Count Per Minute to 10 g for 3 Testing Materials with Operating Temperature and Quantity

Temperature of Source, °C	N	Operating Temperature of Inlet and Duct's Band Heater, °C				
		20	50	100	150	200
Decrease for Sodium Chloride 5g, %						
20	3	-38.43±0.00	-38.09±0.00	-30.00±0.00	-27.94±2.54	-20.83±0.00
50	3	-40.00*±0.00	-42.30±0.00	-44.82*±0.00	-44.08*±1.86	-50.00*±0.00
70	3	-30.00±1.23	-45.45*±0.00	-35.48±0.00	-38.09±1.64	-33.00±0.00
Total	9	-36.14±4.69	-41.95±3.19	-36.77±6.49	-36.70±7.28	-34.61±12.68
Decrease for Sodium Chloride 2.5g, %						
20	3	-49.62±0.00	-55.55±2.74	-46.66±2.88	-47.05±0.00	-45.83±0.00
50	3	-58.57±2.47	-65.38*±0.00	-63.21*±1.99	-61.29*±0.00	-66.66*±0.00
70	3	-60.71*±1.23	-61.98±1.43	-58.06±0.00	-60.95±1.64	-61.16±1.68
Total	9	-56.30±5.27	-60.97±4.59	-55.98±7.54	-56.43±7.08	-57.88±9.38
Decrease for Lead Acetate 5g, %						
20	3	-53.70±3.20	-60.56*±2.43	-60.29*±0.00	-28.00±0.00	-18.00±3.46
50	3	-39.28±0.00	-20.00±0.00	-40.00±0.00	-31.74±2.74	-35.00±0.00
70	3	-55.55*±0.00	-34.54±0.00	-50.00±0.00	-38.46*±0.00	-41.66*±0.00
Total	9	-49.51±7.87	-38.36±17.83	-50.09±8.78	-32.73±4.79	-31.55±10.70
Decrease for Lead Acetate 2.5g, %						
20	3	-62.96±3.20	-67.60*±2.43	-69.11±0.00	-64.00*±0.00	-58.00±0.00
50	3	-59.52±2.06	-50.00±0.00	-70.00±0.00	-39.68±2.74	-55.00±0.00
70	3	-66.66*±0.00	-60.00±3.14	-72.22*±0.00	-61.53±0.00	-66.66*±0.00
Total	9	-63.05±3.63	-59.20±7.90	-70.44±1.38	-55.07±11.67	-59.88±5.24

\*p<0.05 by One-Way ANOVA.

## 고찰

흡입챔버는 사전에 설정된 상태에서 동물 또는 인간 대상자를 시험공기에 폭로될 수 있게 해 준다. 그러므로 흡입챔버는 동물 또는 인체가 이전에 설정된 환경 하에 폭로될 수 있는 air-tight room으로 실제적으로 정의 될 수 있다. 시험공기는 액체 또는 고형물질인 에어로졸을 함유할 수 있다. 가스 또는 증기, 또는 가스 그리고/또는 증기 그리고/또는 에어로졸의 조합도 가능하다. 시험공기의 형태는 흡입챔버의 설계에 있어 반드시 고려되어야 한다. 이러한 설계에 대한 자료는 거의 없어서, 다수의 연구자는 그들 자신의 것을 개발한다. 그러나, 지난 수년간에 걸쳐, 다수의 회사는 다양한 종류의 챔버를 제작하고자 위험을 무릅썼다. 실제적 공간을 필요로 하는 흡입챔버는 구입 또는 제작하기에 비용이 많이 들고, 다수의 하부 시설 그리고 주변장비를 필요로 하기 때문에 흡입폭로 실험은 일부의 연구자들에 의해 제한적으로 수행되고 있다<sup>10)</sup>. 본 연구에서는 이러한 현실을 감안하여 흡입폭로 시스템의 설계에 도움을 주고 에어로졸의 발생에 관한 기초자료를 제공하고자 다수의 시행착오를 거쳐 흡입폭로 시스템을 위한 에어로졸 발생장치를 설정하는데 성공하였으며 이러한 기초자료는 흡입폭로 실험을 수행하고자 하는 다른 연구자에게도 유용한 자료로 제공될 것으로 생각한다. 에어로졸을 발생시키는 것은 가스 또는 증기 시험공기를 발생시키는 것보다 훨씬 더 어렵다. 고형물질의 경우에, 입자크기, 덩어리 형성의 정도, 정전기 그리고 주입자의 입자크기 분포가 중요한 역할을 하지만 액체로 이용되는 경우에 물질의 점도 그리고 표면장력은 중요한 역할하고 물질이 흡습성이 있는 경우에 발생된 에어로졸 입자들은 물을 흡수하고 결과적으로 더 커지게 되지만 염화나트륨과 초산납을 이용한 본 연구에서는 덩트와 흡입챔버 내로 유입되는 공기를 실리카겔 층을 경유하게 하고 입구와 덕트 밴드 히터에서 증발과 응축에 의해 이러한 요인을 제어하였으며 입구와 덕트 밴드 히터를 경유한 공기흐름에서는 에어로졸의 입경에 변화가 없었다. 본 연구에서 납의 흡입독성연구를 위한 에어로졸 발생장치에서는 고전적으로 액체를 원자화 시켜 에어로졸을 발생시키는 nebulizer, 진동 오리피스 에어로졸 발생기의 원리 대신에 수조 하부에 잠착한 초음파 진동자로 원자화를 시키고 상향기류를 인위적으로 유입시켜 에어로졸을 발생시키는 장치를 도입하였으며 에어로졸의 발생 후에는 고밀도 집적회로(VLSI) 제조시 이용되는 증발응축법을 응용하여 높은 농도의 전하를 띄지 않는 에어로졸을 발생시킬 수 있게 하였다<sup>11-13)</sup>. 증발-응축방법의 장점은 입자의 크기를 어느 정도까지는 조절 가능하다는데 있다. 그 방법은 원자화된 에어로졸의 농도를 조절하면 가능하다고 하는데 이는 본 연구의 범위를 벗어난 것이며 에어로졸의 입자크기가 중요시되는 흡입독성 연구에서는 중요한 부분이므로 추가의 연구를 필요로 한다<sup>13)</sup>. 에어로졸 발생은 본질적으로 가스 또는 증기 발생 보다 더 변이성이 있기 때문에, 수용 가능한 변이성은 이러한 물질보다 더 높을 수밖에 없다. 농도의 변이는 변이계수가 단일 폭로인 경우 20% 이내 그리고 반복 폭로인 경우 10% 이내에서 제어되어야 한다<sup>14-16)</sup>. 본 연구에서 염화 나트륨은 작동 2, 3시간째 CPM이 감소하는 경향이 있었으나 변이계수는

10%안에서 유지되었다. 초산납에 대한 CPM과 변화율은 10g에서는 작동 4시간째 747.48CPM 그리고 작동 5시간째 -7.66%으로 가장 높은 수치를 보였다. 초산납 5g에서는 작동 4시간째 747.48CPM 그리고 작동 1시간째 -3.48%으로 가장 높은 수치를 보였다. 초산납 2.5g에서는 작동 4시간째 747.48CPM 그리고 작동 1시간째 -6.08%으로 가장 높은 수치를 보였다. 초산납의 경우 5g과 2.5g의 성적이 유사하였는데 이는 piezoelectric crystal에 초산납이 침전되기 때문이다. 초산납 10, 5g의 변화율은 낮았고 2.5g에서는 높았으나 변이계수는 10%안에서 유지되었다. 그러나 초산납의 경우 용해도를 높이고 용액의 안정성을 위한 네블라이징 용액의 가온이 필요하고 용액을 교반해 줄 수 있는 배합 시스템을 적용하면 더 안정적으로 작동할 것으로 생각된다.

흡입폭로 시험에서 증기, 액체 또는 고형물질에서 시험공기를 발생시키는 방법은 공급되는 공기 중으로 휘발성이 높은 액체를 직접 주입시키는 방법, 공기 중으로 액체의 원자화 그리고 이후에 에어로졸을 순식간에 증발시키는 방법, 가열장치에서 물질을 증발시키는 방법, 온도가 제어되는 상태 하에서 액체 또는 고형물질의 공급을 통하여 또는 맞은편에 공기 또는 질소 흐름 제어에 의한 방법이 있는데<sup>10)</sup>, 본 연구는 염화나트륨과 초산납을 액체상태로 흡입챔버로 들어가는 청정공기에 직접 원자화시키고 이 원자화된 에어로졸을 증발과 응축시키는 방법을 이용한 것으로 물질에 따라 증발과 응축에 많은 효율 차이가 있을 수 있는데 본 연구는 표준물질인 염화나트륨과 흡입폭로 실험에 이용될 물질인 초산납의 효율을 연구하여 흡입폭로 시스템과 에어로졸 발생기의 조건을 설정하는데 유용한 자료를 제공하는 것으로 생각된다(용액에서의 물질의 농도, 발생원의 온도, 그리고 입구와 덕트 밴드의 온도의 관점에서-시험공기의 양은 일정한 상태 하에서 수행되었음). 인체가 폭로되는 대부분의 에어로졸은 다분산이고 대부분의 흡입독성 연구에서 다분산 에어로졸을 이용하는 이유는 인체가 폭로되는 대부분의 에어로졸은 다분산 에어로졸이기 때문이다. 본 연구에서도 자료상으로 결과에 제시되지는 않았지만 분석한 입경을 보면 염화나트륨과 초산납의 에어로졸이 다분산 에어로졸로 흡입폭로 연구에 적합함을 알 수 있었고 본 연구에서 도입한 네블라이징 영역에서의 가온 그리고 증발-응축 시스템은 납의 흡입독성 연구를 위한 에어로졸 발생에 아주 유용하다고 생각한다. 흡입시험에 대한 EPA의 질량중위수공기역학 직경(mass median aerodynamic diameter; MMAD)은 4 $\mu$ m까지이고<sup>17)</sup>, OECD와 EU는 MMAD 3 $\mu$ m 또는 그 이하이다<sup>18)</sup>. 결과로 제시되지는 않았지만 본 연구의 MMAD는 3.5 $\mu$ m로 EPA에 의한 흡입독성 시험의 조건에 적합하였다. Hinds<sup>19)</sup>에 의하면 초음파 네블라이저에서 생성될 수 있는 에어로졸 입자의 범위는 MMD 5-10 $\mu$ m인데 본 연구의 입경이 이 범위 보다 낮은 이유는 발생원의 온도를 증가시켜 초음파 에어로졸의 발생시 야기되는 초음파 에너지의 열 손실을 감소시켰고 증발-응축기법의 도입에 기인한 것으로 생각된다. 다른 연구에서 시도되지 않았고 본 연구에서 응용된 네블라이징 영역에서 용액을 가온 시키는 방법과 증발-응축 방법은 납의 흡입독성 연구시 EPA의 기준에 부합하는 에어로졸을 발생시키는데 아주 적합한 것으로 생각된다. 네블라이징이 진행되는 초음파가 발생하는 영역에서는 초음파에 의한 네

블라이징이 진행되면서 에어로졸 그리고 용액의 온도가 감소하고<sup>13)</sup> 이로 인해 원자화되는 용액에 용해되어 있는 물질의 용해도에 영향을 주게 되고 초음파 에너지는 감소하게 되며 결국 네블라이징 되는 양의 감소로 귀결되는데 열화 나트륨과 초산납 모두에서 발생원의 온도가 낮을 수록 이러한 현상은 많이 발생했으나 네블라이징 되는 영역에 가온 시스템을 도입함으로써 이러한 문제점은 많이 향상되었다. 고전적 에어로졸 네블라이저에 이러한 공학적 방법을 적용하면 납의 흡입독성 연구를 위한 에어로졸의 발생에 성공적인 결과를 얻을 수 있으며 흡입독성 연구를 위한 에어로졸의 발생 및 흡입 폭로 시스템의 설계에도 많은 도움을 줄 수 있다고 생각한다.

## 결 론

고전적인 에어로졸 발생장치의 단점을 보완하기 하고자 새로운 공학적 방법(발생원의 가온 그리고 입구-덕트 밴드의 가온)을 응용하여 설계한 초음파 네블라이저를 시험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

발생원 온도 50℃ 그리고 입구-덕트 밴드 온도 150℃ 조건에서 시험물질인 열화 나트륨은 작동 2, 3시간째 CPM이 감소하는 경향이 있었으나 변이계수는 10%안에서 유지되었다. 흡입폭로에 이용될 초산납의 경우 5g과 2.5g의 성적이 유사하였는데 이는 시간의 경과에 따라 piezoelectric crystal에 초산납이 침전되기 때문이고 네블라이징 용액의 가온 및 교반이 필요하다고 생각한다. 초산납 10, 5g의 변화율은 낮았고 2.5g에서는 높았으나 변이계수는 10%안에서 유지되었다. 각각의 물질에 대한 이론상의 효율을 고려할 때 시험물질로 열화나트륨을 이용할 때 5g이 적합하여 초산납의 경우에는 2.5g이 적합하다. 발생원 온도 50℃, 입구와 덕트의 밴드 히터 가열기 온도 150℃ 조건에서 작동시간에 따른 에어로졸 발생 시험의 표준물질인 열화 나트륨과 흡입폭로시험에 이용될 물질인 초산납의 시간에 따른 CPM 변화율, 10g에 대한 감소율은 다른 양상을 보였고 열화 나트륨이 초산납에 대한 에어로졸 발생의 예측에 부적합하다는 결론을 얻었다. 열화나트륨 10g의 입구와 덕트 밴드의 온도 200℃을 제외하면 발생원의 온도가 70℃에서 입구와 덕트 밴드의 온도 각각에 대해 최대의 CPM을 제시하였고 에어로졸 발생장치와 흡입챔버 설계 그리고 시험에서 최적 조건으로 생각된다. 열화나트륨 10g, 5g, 그리고 2.5g에 대한 최대 CPM은 발생원 온도 70℃와 입구와 덕트 밴드의 온도 20℃에서 제시되었다. 초산납 10g, 5g의 입구와 덕트 밴드의 온도 각각 50℃, 200℃을 제외하면 발생원의 온도가 50℃에서 입구와 덕트 밴드의 온도 각각에 대해 최대의 CPM을 제시하였고 에어로졸 발생장치와 흡입챔버 설계 그리고 시험에서 최적 조건으로 생각된다. 초산납 10g, 5g, 2.5g에 대한 최대 CPM은 각각 발생원 온도 50℃ 그리고 입구와 덕트 밴드의 온도 100℃, 발생원 온도 50℃ 그리고 입구와 덕트 밴드의 온도 100℃, 발생원 온도 50℃ 그리고 입구와 덕트 밴드의 온도 150℃에서 제시되었다. 열화 나트륨과 초산납 5g과 2.5g에 대한 에어로졸 발생장치와 흡입챔버의 성능시험시 최대의 시험물질 발생량을 얻기 위해서는 상기에 언급된 발생원 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 온도 사용하는

것이 좋을 것으로 생각된다. 상기의 결과를 고려할 때 열화 나트륨과 초산납 모두 2.5g에서 보다는 5g에서 이론적인 결과 보다 효율이 높았고 입구와 덕트 밴드 히터의 온도가 같을 때는 발생원의 온도가 높을 수록 에어로졸의 발생량이 증가하는 경향이 있었다. 에어로졸의 발생량을 최대로 하기 위해서는 각각의 물질에 적합한 입구와 덕트 밴드 히터의 온도를 설정하고 발생원의 온도를 가능한 높이는 것이 좋을 것으로 생각된다.

## 감사의 글

이 논문은 두뇌한국(Brain Korea; BK) 21 사업의 지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사한다.

## 참고문헌

1. Annett, J.L., Pirkle, J.L., Makuc, D., Neese, J.W., Bayse, D.D., and Kovar, M.G.: Chronological Trend in Blood Lead Levels between 1976 and 1980. *N. Engl. J. Med.*, 308, pp.1373-1377, 1983.
2. Gilman, A. G., Goodman, L. S., Rall, T. W., Murad, F.: Goodman and Gilman's The Pharmacological Basis of Therapeutics. Seventh Edition. Macmillan Publishing Company. New York. pp.1652-1654, 1985.
3. Tanaka, I. and Akiyama, T.: Dust generation from a Batch Fluidized Bed. *J. Soc. Powder Technol., Japan* 18, 903, 1981.
4. Wright, B.M.: A New Dust-Feed Mechanism. *J. scient. Instrum.*, 27, p.12, 1950.
5. Marple, V.A., Liu, B.H.Y., Rubow, K.L.: A Dust Generator for Laboratory Use. *Am Ind. Hyg. Ass. J.*, 39, 26, 1978.
6. Corn, M. and Esmen, N. A. : "Aerosol Generation", in *Handbook on Aerosols*, R. Dennis(Ed.), TID-26608, USERDA, 1976.
7. Mercer, T.T.: *Aerosol Technology in Hazard Evaluation*. Academic Press, New York, 1973.
8. Liu, B.Y.H., Eds.: *Fine Particles*. Academic Press, New York, 1976.
9. Willeke, K. and Baron, P.A., Eds.: *Aerosol Measurement*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
10. Niesink, R.J.M., Vries, J. de, Hollinger, M.A. : *Toxicology Principles and Applications*. CRC Press, Inc, New York. pp.575-604, 1996.
11. Chen, Y.L., Brock, J.R., and Trachtenberg, I., *Appl. Phys. Lett.*, 51, 2203, 1987.
12. Chen, Y.L., Brock, J.R. and Trachtenberg, I., *Aerosol Sci. and Technol.*, 12, 842, 1990.
13. Hinds, W.C.: *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. John Wiley and Sons, New York. pp.392-394, 1982.
14. Sipes, G., McQueen, C.A., Gandolfi, A.J.: *Comprehensive*

- Toxicology : Toxicological Testing and Evaluation, Pergamon, NY. p.278, 1997.
15. Phalen, R. F. : Inhalation Studies : Foundations and Techniques, CRC Press, Boca Raton, FL, 1984.
  16. McClellan, R.O. and Henderson, R.F., Eds.: Concepts in Inhalation Toxicology. Taylor and Francis, Washington, D.C., 1995.
  17. Whalan, J.E. and J.C. Redden: "Interim Policy for Particle Size and Limit Concentration Issues in Inhalation Toxicity Studies". OPP0039, Institution, Washington DC, 1994.
  18. OECD : "Draft Guideline for the Testing of Chemicals", 1994.