

흡입독성 연구를 위한 2730ppm 납 네블라이징 용액에서 발생된 에어로졸의 입경분석

정재열* · 강성호 · 김삼태 · 이은경 · 송용선 · 이기남

원광대학교 한의학전문대학원 제3의학과

Particle Size Analysis of Lead Aerosol with the use of 2730ppm Lead Nebulizing Solution for Inhalation Toxicology Study

Jae Yeal Jeung*, Sung Ho Kang, Sam Tae Kim, Eun Kyoung Lee, Young Sun Song, Ki Nam Lee

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

Ultrasonic nebulizer with the application of new engineering methodology and the design of electronic circuit was made for lead inhalation toxicology study and 2730ppm lead nebulizing solution was used to generate lead aerosol. After modification of source and inlet temperatures, the results of particle size analysis for lead aerosol were as following. The highest particle counting for source temperature 20°C was 39933.66 in inlet temperature 100°C and particle diameter 0.75 μ m. The highest particle counting for source temperature 50°C was 39992.71 in inlet temperature 250°C and particle diameter 0.75 μ m. The highest particle counting for source temperature 70°C was 37569.55 in inlet temperature 50°C and particle diameter 0.75 μ m. The ranges of geometric mean diameter(GMD) were 0.754-0.784 μ m for source temperature 20°C, 0.758-0.852 μ m for source temperature 50°C, and 0.869-1.060 μ m for source temperature 70°C. The smallest GMD was 0.754 μ m in source temperature 20°C and inlet temperature 20°C, and the largest GMD was 1.060 μ m in source temperature 70°C and inlet temperature 250°C. The ranges of geometric standard deviation(GSD) were 1.730-1.782 for source temperature 20°C, 1.734-1.894 for source temperature 50°C, and 1.921-2.148 for source temperature 70°C. The lowest GSD was 1.730 in source temperature 20°C and inlet temperature 20°C, and the highest GSD was 2.148 in source temperature 70°C and inlet temperature 250°C. Lead aerosol generated in this study was polydisperse. The ranges of mass median diameter(MMD) were 1.856-2.133 μ m for source temperature 20°C, 1.877-2.894 μ m for source temperature 50°C, and 3.120-6.109 μ m for source temperature 70°C. The smallest MMD was 1.856 μ m in source temperature 20°C and inlet temperature 20°C, and the largest MMD was 6.109 μ m in source temperature 70°C and inlet temperature 250°C. Slight increases for GMD, GSD, and MMD values were observed with same source temperature and increase of inlet temperature. MMD for inhalation toxicology testing in EPA guidance is less than 4 μ m. In this study, source temperature 20°C and 50°C with inlet temperature from 20°C to 250°C were conformed to the EPA guidance, but inlet temperature 20°C and 50°C for source temperature 70°C were conformed EPA guidance. MMD for inhalation toxicology testing in OECD and EU is less than 3 μ m. In this study, source temperature 20°C and 50°C with inlet temperature from 20°C to 250°C were conformed to the EPA guidance, but none for source temperature 70°C.

Key words : Inhalation, ultrasonic nebulizer, nebulizing solution, lead aerosol, particle size, particle counting, geometric mean diameter, geometric standard deviation, mass median diameter, polydisperse aerosol

서론

납은 구리, 주석과 더불어 오래 전부터 유용하게 이용되어 온

금속으로, 이미 기원전 3000년경에 이집트에서 사용 되었다는 증거가 있다. 산업혁명과 더불어 그 사용량도 증가하였고 그 결과 인류가 거주하는 환경에 약 400만톤 이상의 납이 방출되어 인류가 모두 오염된 납에 폭로되게 되었다^{1,2)}.

현대사회에 사는 정상 성인은 직업적 또는 특수한 납 폭로가 없는 사람이라도 음식물이나 물로부터 경구적으로 1일 약

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

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

· 접수 : 2003/02/13 · 수정 : 2003/03/06 · 채택 : 2003/04/10

300 μg , 대기로부터 흡입으로부터 약 30 μg , 합계 330 μg 의 납을 섭취하고 있다고 계산된다. 대도시에 거주하는 사람의 조사에서는 성인이 매년 공기 중으로 15mg, 음료수로부터 5mg, 음식물로부터 100mg의 납을 섭취하고 있다고 한다. 이중 호흡에 의해 흡입된 납의 약 29%가 흡수되어 약 8%가 기관에 침착 된다고 한다. 흡수율은 납 입자의 크기와 관계가 있으며 정상상태에서는 입자의 직경이 1 μm 인 입자의 침착률이 가장 높다³⁾.

흡입독성과 관련된 시험물질의 잠재적 건강영향의 평가를 위해서 가장 중요한 부분 중 하나는 시험하고자 하는 물질의 공기중 입자크기의 측정이다. 공기 중에 부유되어 있는 입자크기 분포에 관한 정보는 흡입폭로(inhaled exposure)와 조직 투여량(tissue dose)에 대한 가능성 있는 적절한 평가에 필수적이다. 입자가 호흡기계로 흡입되고 최후로 침착될 가능성은 공기역학 직경과 가장 밀접하게 관련되어 있는데, 그 이유는 폐내에서 침착된 입자의 분포이기 때문이다. 또한 입자크기는 입자로 침착된 독성물질의 양과 명백히 관련되어 있다. 에어로졸의 입자크기 분포는 명백히 유해성의 중요한 결정요인이다³⁾.

네블라이징이 진행되는 초음파가 발생하는 영역에서는 초음파에 의한 네블라이징이 진행되면서 에어로졸 그리고 용액의 온도가 감소하고⁴⁾ 이로 인해 원자화되는 용액에 용해되어 있는 물질의 용해도에 영향을 주게 되고 초음파 에너지는 감소하게 되며 결국 네블라이징 되는 양의 감소로 귀결되는데 흡입독성을 위한 카드뮴 에어로졸의 발생에서 네블라이징 되는 영역에 가온 시스템을 적용함으로써 이러한 문제점을 극복할 수 있었다⁵⁾. 선행한 정재열 등의 연구에서⁶⁾ 발생원에 대한 가온 그리고 입구와 덕트 밴드의 가온에 따른 납 에어로졸 발생에 부가하여 입자의 크기에 대한 세부적인 연구의 필요성을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 흡입독성에서 주 관심사인 입자의 크기인 0.3-5 μm 의 입자 크기를 중심으로 기존의 초음파 에어로졸 발생장치에서 연구자의 기술과 경험에 의해 설계·변형된 에어로졸 발생장치인 초음파 네블라이저에서 생성된 납 에어로졸의 입자크기를 입자 카운터(particle counter)를 이용하여 분석·측정하고 변형된 방법의 적용에 따른 납의 흡입독성 연구에의 적용 가능성을 알아보고 발생원과 입구온도의 변화에 따른 입자의 크기 변화를 알아보고자 본 연구를 실시하였다.

재료 및 방법

1. 납 에어로졸 발생 시스템의 구성(Constitution of Lead Aerosol Generation System)

시스템의 덕트의 직경은 150mm이었고 내부의 유속 측정은 6개의 횡단점(traverse point)을 설정하여 측정하였다⁷⁾. 측정결과 유속은 0.5%이었고 유속의 측정에는 열선 기류 측정기(VelociCalc Plus Air Velocity Meter Model 8385, TSI)를 이용하였다. 납의 흡입독성 연구를 위한 에어로졸 발생장치와 폭로 시스템의 구성은 그림 1과 같고 초음파 네블라이저, 네블라이징 용액을 가열하기 위한 히터와 덕트 입구를 가열하기 위한 히터(Tubular Heater Type SS, Tempco) 그리고 각각에 대한 온도 조

절기(Thermostat TS-320S, Thermtrol), 그리고 송풍기로 구성되어 있다. 발생된 에어로졸 시험장치의 유효용적은 0.100m³이었다. 시스템은 사전에 설정된 에어로졸 농도를 발생시키고자 다양한 유량에서 동력학적으로 작동 가능하였다.

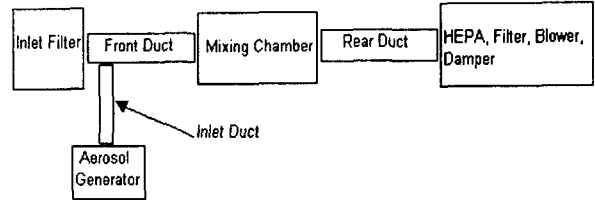


Fig. 1. Constitution of Aerosol Generation System.

에어로졸 발생을 위한 초음파 네블라이저의 구성은 초음파 평면 진동자, 발진회로, 파워 증폭기, 송풍기 모터와 필터로 구성되어 있다. 유입공기의 입자제거를 위한 입자상 필터가 장착된 컴파트먼트, 초음파 네블라이저 원리를 이용하는 에어로졸 발생기, 발생된 에어로졸을 주 덕트에 유입시키는 밴드 히트(Mi-Plus MPP55101, Tempco)와 온도조절기가 장착된 유입관, 배합 컴파트먼트 전·후의 덕트(전반부 유효용적 0.017m³, 후반부 유효용적 0.035m³)- 전반부에는 밴드 히트(Mi-Plus MPP00247, Tempco)와 온도조절기가 장착되어있다. 4개의 팬으로 구성된 배합 컴파트먼트(유효용적 0.048m³), 배출되는 공기를 정화하기 위한 HEPA 필터(900×900×300)가 장착된 컴파트먼트로 구성되어있으며 덕트내부를 흐르는 공기용량의 조절은 HEPA 필터가 장착된 컴파트먼트의 출구에 부착된 송풍기와 입구에 부착된 뱀피를 이용하였다.

2. 납 에어로졸 발생을 위한 네블라이징 용액(Nebulizing Solution for Lead Aerosol Generation)

시험물질은 증류수에 용해성이 있는 초산납(L3396, Sigma)을 이용하였고 10g을 3차 증류수 2ℓ에 완전히 용해시켜 네블라이징 용액을 만들었다(납으로 2730ppm). 이 네블라이징 용액을 납 에어로졸의 발생시험에 이용하였다.

3. 기하평균입경, 기하표준편차, 그리고 질량중위수입경의 계산(Calculation of Geometric Mean Diameter, Geometric Standard Deviation, and Mass Median Diameter)

측정된 각 입경별 계수는 Hinds가 제시하는 아래의 공식을 이용하여⁵⁾ 기하평균입경, 기하표준편차, 그리고 질량중위수입경을 계산하였다.

$$\log d_g = \frac{\sum n_i \log d_i}{\sum n_i}$$

dg: 기하평균입경, μm
ni: 입자계수
di: 대표경, μm

$$\log \sigma_g = \left[\frac{\sum n_i (\log d_g - \log d_i)^2}{\sum n_i - 1} \right]^{1/2}$$

σg: 기하표준편차
dg: 기하평균입경, μm
ni: 입자계수
di: 대표경, μm

$$\log d_{mmd} = \log d_g + 6.9 \log^2 \sigma_g$$

d_{mmd}: 질량중위수입경, μm
dg: 기하평균입경, μm
σg: 기하표준편차

4. 발생된 납 에어로졸의 입경별 계수와 측정(Counting and Measurement of Lead Aerosol with Particle Diameter)

입자의 직경에 따른 계수는 5 채널 입자 카운터(Particle Counter KC-01C, Rion)를 이용하였다. 각각의 입자 직경에 대한 계수는 수동모드에서 5초 동안 동시에 공기용적 0.042 l (42ml)에 대해 수행하였으며 10회 반복측정하여 분석자료로 이용하였다. 발생원 온도와 입구온도를 변경하였을 때는 최소한 30분 동안의 시스템 안정화 후에 예비측정을 실시하여 시스템의 안정을 확인한 후 분석을 위한 자료를 얻기 위한 본 측정을 실시하였다.

5. 통계학적 분석(Statistical Analysis)

자료는 평균과 표준편차로 요약하였고 통계학적 분석은 윈도우용 SPSS/PC+8.0을 이용하였다. 자료는 일원 분산분석(One-Way Analysis of Variance)을 이용하여 분석하였고 유의수준은 $\alpha = 0.05$ 이었다.

결 과

에어로졸의 발생원 온도 20℃에서 입구온도의 변화에 따른 에어로졸 입경별 계수는 표 1과 같다. 입자 직경 0.4μm에서는 입구온도 200℃에서 33389.52로 가장 낮았고 20℃에서 34761.68로 가장 높았다. 입자 직경 0.75μm에서는 입구온도 200℃에서 38325.91로 가장 낮았고 100℃에서 39933.66으로 가장 높았다. 입자 직경 1.5μm에서는 입구온도 20℃에서 28634.58로 가장 낮았고 100℃에서 29943.70으로 가장 높았다. 입자 직경 3.5μm에서는 입구온도 20℃에서 1647.28로 가장 낮았고 200℃에서 3234.27로 가장 높았다. 입자 직경 7.5μm에서는 입구온도 100℃와 3.16으로 가장 낮았고 150℃에서 4.14로 가장 높았다.

Table 1. Particle Countings with Particle Diameter by Source Temperature 20℃ and Inlet Temperatures

Inlet Temp., °C	N	Midsize of Lead Aerosol, μm				
		0.4	0.75	1.5	3.5	7.5
Particle Counting						
20	10	34761.68 ± 617.54	39484.08 ± 296.14	28634.58 ± 274.54	1647.28 ± 33.44	3.54 ± 1.04
50	10	34442.02 ± 425.74	39323.03 ± 497.18	28994.49 ± 358.88	2226.20 ± 39.02	3.97 ± 0.19
100	10	34999.04 ± 589.13	39933.66 ± 535.02*	29943.70 ± 972.47*	2569.53 ± 232.92	3.16 ± 0.94
150	10	34447.19 ± 313.59	38920.00 ± 611.86	29789.22 ± 1022.73	2763.78 ± 690.33	4.14 ± 0.31*
200	10	33389.52 ± 495.18	38325.91 ± 344.36	29705.27 ± 99.07	3234.27 ± 232.49*	3.94 ± 0.50
250	10	34059.67 ± 725.93	38631.49 ± 1229.79	29758.11 ± 685.55	3075.89 ± 107.56	4.04 ± 0.38
Total	60	34349.85 ± 738.49	39103.03 ± 834.34	29470.90 ± 802.20	2586.16 ± 616.44	3.80 ± 0.71

*p<0.05 by One-Way ANOVA.

에어로졸의 발생원 온도 50℃에서 입구온도의 변화에 따른 에어로졸 입경별 계수는 Table 2와 같다. 입자 직경 0.4μm에서는 입구온도 20℃에서 32634.36으로 가장 낮았고 250℃에서 34457.78로 가장 높았다. 입자 직경 0.75μm에서는 입구온도 20℃에서 37350.73으로 가장 낮았고 250℃에서 39992.71로 가

장 높았다. 입자 직경 1.5μm에서는 입구온도 20℃에서 27341.72로 가장 낮았고 250℃에서 33976.12로 가장 높았다. 입자 직경 3.5μm에서는 입구온도 20℃에서 1655.08로 가장 낮았고 250℃에서 8238.10으로 가장 높았다. 입자 직경 7.5μm에서는 입구온도 250℃에서 3.12로 가장 낮았고 150℃에서 4.10으로 가장 높았다.

Table 2. Particle Countings with Particle Diameter by Source Temperature 50℃ and Inlet Temperatures

Inlet Temp., °C	N	Midsize of Lead Aerosol, μm				
		0.4	0.75	1.5	3.5	7.5
Particle Counting						
20	10	32634.36 ± 298.56	37350.73 ± 402.75	27341.72 ± 91.99	1655.08 ± 42.02	3.72 ± 0.38
50	10	33851.47 ± 715.95	38425.14 ± 1062.06	27915.39 ± 430.44	2073.66 ± 275.42	4.01 ± 0.36
100	10	32948.90 ± 181.45	37875.51 ± 240.65	28931.37 ± 409.32	3029.06 ± 300.76	3.80 ± 0.26
150	10	33065.27 ± 418.97	38178.18 ± 357.75	29607.23 ± 677.79	3160.67 ± 283.46	4.10 ± 0.47*
200	10	33360.28 ± 233.86	38649.42 ± 278.38	31715.84 ± 592.31	5658.24 ± 468.90	4.01 ± 0.43
250	10	34457.78 ± 336.43*	39992.71 ± 281.96*	33976.12 ± 199.03*	8238.10 ± 243.60*	3.12 ± 0.71
Total	60	33386.34 ± 725.46	38411.95 ± 964.96	29914.61 ± 2347.31	3969.13 ± 2330.24	3.79 ± 0.55

*p<0.05 by One-Way ANOVA.

에어로졸의 발생원 온도 70℃에서 입구온도의 변화에 따른 에어로졸 입경별 계수는 표 3과 같다. 입자 직경 0.4μm에서는 입구온도 250℃에서 29289.60으로 가장 낮았고 50℃에서 31481.52로 가장 높았다. 입자 직경 0.75μm에서는 입구온도 250℃에서 34469.33으로 가장 낮았고 50℃에서 37569.55로 가장 높았다. 입자 직경 1.5μm에서는 입구온도 20℃에서 31324.18로 가장 낮았고 150℃에서 34710.52로 가장 높았다. 입자 직경 3.5μm에서는 입구온도 20℃에서 8577.15로 가장 낮았고 200℃에서 24306.04로 가장 높았다. 입자 직경 7.5μm에서는 입구온도 20℃에서 1.39로 가장 낮았고 250℃에서 122.77로 가장 높았다.

Table 3. Particle Countings with Particle Diameter by Source Temperature 70℃ and Inlet Temperatures

Inlet Temp., °C	N	Midsize of Lead Aerosol, μm				
		0.4	0.75	1.5	3.5	7.5
Particle Counting						
20	10	30676.26 ± 1387.16	35479.58 ± 1619.77	31324.18 ± 1187.95	8577.15 ± 644.76	4.06 ± 0.46
50	10	31481.52 ± 529.82*	37569.55 ± 847.07*	32795.95 ± 434.71	10099.40 ± 129.25	3.44 ± 0.87
100	10	30698.04 ± 843.38	35491.06 ± 969.63	33019.94 ± 842.88	15599.38 ± 3200.72	1.39 ± 0.79
150	10	30896.29 ± 205.27	36359.85 ± 308.98	34710.52 ± 619.40*	23234.12 ± 195.20	44.78 ± 2.86
200	10	30452.30 ± 539.78	35368.37 ± 512.82	34027.32 ± 637.28	24306.04 ± 583.87*	103.67 ± 6.73
250	10	29289.60 ± 569.60	34469.33 ± 633.03	33077.96 ± 483.82	24056.48 ± 529.14	122.77 ± 26.20*
Total	60	30582.33 ± 994.40	35789.62 ± 1310.69	33159.31 ± 1281.32	17645.43 ± 6768.12	46.68 ± 51.17

*p<0.05 by One-Way ANOVA.

에어로졸의 발생원 온도와 입구온도의 변화에 따른 에어

로졸 입경별 계수는 Table 4 및 5와 같다. 입자 직경 0.4 μm 그리고 입구온도 20, 50, 100, 150, 200, 그리고 250 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 각각 발생원 온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 34761.68, 발생원 온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 34442.02, 발생원 온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 34999.04, 발생원 온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 34447.19, 발생원 온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 33389.52, 그리고 발생원 온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 34059.67로 가장 높았다. 입자 직경 0.75 μm 그리고 입구온도 20, 50, 100, 150, 200, 그리고 250 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 각각 발생원 온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 39484.08, 발생원 온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 39323.03, 발생원 온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 39933.66, 발생원 온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 38920.00, 발생원 온도 50 $^{\circ}\text{C}$ 에서 38649.42, 그리고 발생원 온도 50 $^{\circ}\text{C}$ 에서 39992.71로 가장 높았다. 입자 직경 1.5 μm 그리고 입구온도 20, 50, 100, 150, 200, 그리고 250 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 각각 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 31324.18, 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 32795.95, 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 33019.94, 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 34710.52, 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 34027.32, 그리고 발생원 온도 50 $^{\circ}\text{C}$ 에서 33976.12로 가장 높았다.

Table 4. Particle Countings for Particle Diameter 0.4, 0.75, and 1.5 μm by Source and Inlet Temperatures

Inlet Temp., $^{\circ}\text{C}$	Source Temp., $^{\circ}\text{C}$								
	20			50			70		
	Midszie of Lead Aerosol, μm								
	0.4			0.75			1.5		
20	34761.68	32634.36	30676.26	39484.08	37350.73	35479.58	28634.58	27341.72	31324.18
	± 617.54	± 298.56	± 1387.16	$\pm 296.14^*$	± 402.75	± 1619.77	± 274.54	± 91.99	$\pm 1187.95^*$
50	34442.02	33851.47	31481.52	39323.03	38425.14	37569.55	28994.49	27915.39	32795.95
	$\pm 425.74^*$	± 715.95	± 529.82	$\pm 497.18^*$	± 1062.06	± 847.07	± 358.88	± 430.44	$\pm 434.71^*$
100	34999.04	32948.90	30698.04	39933.66	37875.51	35491.06	29943.70	28931.37	33019.94
	$\pm 589.13^*$	± 181.45	± 843.38	$\pm 535.02^*$	± 240.65	± 969.63	± 972.47	± 409.32	$\pm 842.88^*$
150	34447.19	33065.27	30896.29	38920.00	38178.18	36359.85	29789.22	29607.23	34710.52
	$\pm 313.59^*$	± 418.97	± 205.27	$\pm 611.86^*$	± 357.75	± 308.98	± 1022.73	± 677.79	$\pm 619.40^*$
200	33389.52	33360.28	30452.30	38325.91	38649.42	35368.37	29705.27	31715.84	34027.32
	$\pm 495.18^*$	± 233.86	± 539.78	± 344.36	$\pm 278.38^*$	± 512.82	± 99.07	± 592.31	$\pm 637.28^*$
250	34059.67	34457.78	29289.60	38631.49	39992.71	34469.33	29758.11	33976.12	33077.96
	$\pm 725.93^*$	± 336.43	± 569.60	± 1229.79	$\pm 281.96^*$	± 633.03	± 685.55	$\pm 199.03^*$	± 483.82

*p<0.05 by One-Way ANOVA

입자 직경 3.5 μm 그리고 입구온도 20, 50, 100, 150, 200, 그리고 250 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 각각 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 8577.15, 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 10099.40, 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 15599.38, 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 23234.12, 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 24306.04, 그리고 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 24056.485로 가장 높았다. 입자 직경 7.5 μm 그리고 입구온도 100, 150, 200, 그리고 250 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 각각 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 4.06, 발생원 온도 50 $^{\circ}\text{C}$ 에서 4.01, 발생원 온도 50 $^{\circ}\text{C}$ 에서 3.80, 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 44.78, 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 103.67, 그리고 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서 122.77로 가장 높았다.

Table 5. Particle Countings for Particle Diameter 3.5 and 7.5 μm by Source and Inlet Temperatures

Inlet Temp., $^{\circ}\text{C}$	Source Temp., $^{\circ}\text{C}$					
	20		50		70	
	Midszie of Lead Aerosol, μm					
	3.5		7.5			
20	1647.28	1655.08	8577.15	3.54	3.72	4.06
	± 33.44	± 42.02	$\pm 644.76^{***}$	± 1.04	± 0.38	± 0.46
50	2226.20	2073.66	10099.40	3.97	4.01	3.44
	± 39.02	± 275.42	$\pm 129.25^*$	± 0.19	± 0.36	± 0.87
100	2569.53	3029.06	15599.38	3.16	3.80	1.39
	± 232.92	± 300.76	$\pm 3200.72^*$	± 0.94	$\pm 0.26^*$	± 0.79
150	2763.78	3160.67	23234.12	4.14	4.10	44.78
	± 690.33	± 283.46	$\pm 195.20^*$	± 0.31	± 0.47	$\pm 2.86^*$
200	3234.27	5658.24	24306.04	3.94	4.01	103.67
	± 232.49	± 468.90	$\pm 583.87^*$	± 0.50	± 0.43	$\pm 6.73^*$
250	3075.89	8238.10	24056.48	4.04	3.12	122.77
	± 107.56	± 243.60	$\pm 529.14^*$	± 0.38	± 0.71	$\pm 26.20^*$

*p<0.05 by One-Way ANOVA

발생원과 입구 온도의 변화에 따른 에어로졸의 기하평균입경은 표 6과 같다. 발생원 온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 입구온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 0.754 μm 으로 가장 작았고 200 $^{\circ}\text{C}$ 에서 0.784 μm 으로 가장 컸다. 발생원 온도 50 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 입구온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 0.758 μm 으로 가장 작았고 250 $^{\circ}\text{C}$ 에서 0.852 μm 으로 가장 컸다. 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 입구온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 0.869 μm 으로 가장 작았고 250 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1.060 μm 으로 가장 컸다. 발생원과 입구온도 온도 증가에 따라 기하평균입경이 증가하는 경향이 있었다.

Table 6. Geometric Mean Diameters(GMD) by Source and Inlet Temperatures

Inlet Temp., $^{\circ}\text{C}$	N	Source Temp., $^{\circ}\text{C}$		
		20	50	70
		Geometric Mean Diameter, μm		
20	10	0.754 \pm 0.002	0.758 \pm 0.002	0.869 \pm 0.012
50	10	0.764 \pm 0.002	0.759 \pm 0.005	0.885 \pm 0.005
100	10	0.769 \pm 0.006	0.780 \pm 0.004	0.954 \pm 0.035
150	10	0.773 \pm 0.007	0.777 \pm 0.004	1.037 \pm 0.003
200	10	0.784 \pm 0.004*	0.820 \pm 0.005	1.053 \pm 0.007
250	10	0.779 \pm 0.005	0.852 \pm 0.006*	1.060 \pm 0.006*
Total	60	0.770 \pm 0.011	0.791 \pm 0.035	0.976 \pm 0.080

*p<0.05 by One-Way ANOVA

발생원과 입구 온도의 변화에 따른 기하표준편차는 표 7과 같다. 발생원 온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 입구온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1.730으로 가장 작았고 200 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1.782로 가장 컸다. 발생원 온도 50 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 입구온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1.734로 가장 작았고 250 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1.894로 가장 컸다. 발생원 온도 70 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 입구온도 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1.921로 가장 작았고 250 $^{\circ}\text{C}$ 에서 2.148로 가장 컸다.

Table 7. Geometric Standard Deviations(GSD) by Source and Inlet Temperatures

Inlet Temp., °C	N	Source Temp., °C		
		20	50	70
		Geometric Standard Diameter		
20	10	1.730±0.002	1.734±0.003	1.921±0.010
50	10	1.749±0.003	1.745±0.008	1.939±0.007
100	10	1.759±0.007	1.777±0.009	2.037±0.053
150	10	1.768±0.021	1.783±0.009	2.125±0.004
200	10	1.782±0.007*	1.845±0.010	2.145±0.005
250	10	1.778±0.006	1.894±0.003*	2.148±0.009*
Total	60	1.761±0.020	1.796±0.057	2.053±0.097

*p<0.05 by One-Way ANOVA

발생원과 입구 온도의 변화에 따른 질량중위수입경은 표 8과 같다. 발생원 온도 20°C에서는 입구온도 20°C에서 1.856µm로 가장 작았고 200°C에서 2.133µm로 가장 컸다. 발생원 온도 50°C에서는 입구온도 20°C에서 1.877µm로 가장 작았고 250°C에서 2.894µm로 가장 컸다. 발생원 온도 70°C에서는 입구온도 20°C에서 3.120µm로 가장 작았고 250°C에서 6.109µm로 가장 컸다.

Table 8. Mass Median Diameters(MMD) by Source and Inlet Temperatures

Inlet Temp., °C	N	Source Temp., °C		
		20	50	70
		Geometric Mean Diameter, µm		
20	10	1.856	1.877	3.120
		±0.007	±0.011	±0.092
50	10	1.948	1.923	3.296
		±0.011	±0.039	±0.044
100	10	2.000	2.100	4.391
		±0.037	±0.044	±0.616
150	10	2.048	2.116	5.687
		±0.101	±0.044	±0.050
200	10	2.133	2.521	6.023
		±0.036*	±0.062	±0.101
250	10	2.100	2.894	6.109
		±0.037	±0.033*	±0.144*
Total	60	2.014	2.239	4.771
		±0.105	±0.364	±1.277

*p<0.05 by One-Way ANOVA

고찰

흡입독성연구에서 연구하고자 하는 입자를 에어로졸로 발생시킨 다음에 연구자가 알아야 할 가장 중요한 변수는 발생된 에어로졸 입자의 크기이다. 이러한 입자의 크기를 측정하는 방법에는 Anderson Cascade Impactor, 광학·전자 현미경을 이용하는 방법 등 여러 가지가 있으나 측정과정이 번거롭고 시간과 경비가 많이 소요된다. 흡입독성연구에서는 입자의 크기가 5µm(일반적), 4µm(EPA), 3µm(OECD와 EU) 이상 그리고 0.3µm 이하의 입자에 대해서는 그 중요성이 상대적으로 작다^{8,9)}. Hinds에 의하면⁵⁾ 초음파 네블라이저에서 생성될 수 있는 에어로졸 입자의 범위는 질량중위수입경 5-10µm인데 본 연구에서 생성된 카드뮴 에어로졸의 입경이 일부 조건을 제외하면 이 범위 보다 낮은 이유는 piezoelectric crystal의 특성, 공기흐름의 양의 차이도 있지만 발

생원의 온도를 증가시켜 초음파 에어로졸의 발생시 야기되는 초음파 에너지의 열 손실을 감소시켰고 주 덕트로 유입되기 전에 가온 시스템을 적용시킨 증발-응축기법의 도입에 기인한 것으로 생각된다. 이러한 방법은 다른 연구에서 시도되지 않았고 본 연구에서 응용된 네블라이징 영역에서 용액을 가온시키는 방법과 입구와 덕트의 가온은 납에 대한 흡입독성 연구시 EPA와 OECD의 기준에^{8,9)} 부합하는 입경의 납 에어로졸을 발생시키는데 적합하며 공기량과 piezoelectric crystal의 변화 이외에도 발생원과 입구의 온도를 변화시켜 연구자가 이용할 수 있는 입경을 얻는데 아주 유용한 방법이라고 생각한다^{5,10,11)}.

증발-응축방법의 장점은 입자의 크기를 어느 정도까지는 조절 가능하다는데 있다. 이 방법은 원자화된 에어로졸의 농도를 조절하면 입자의 크기를 조절하는 것이 가능하다고 하는데^{10,11)} 본 연구에서는 2730ppm 납 네블라이징 용액을 이용하였고 에어로졸이 발생하는 발생원과 에어로졸이 본관으로 유입되는 덕트 입구의 온도를 조절하여 납 에어로졸의 입자크기를 변화시키는 방법을 적용하였다. 입자직경에 따른 입자계수의 관점에서 보면 발생원 온도 20°C에서는 입자 직경 3.5µm을 제외하면 입구온도의 증가에 따른 입자계수 증가의 경향성은 작았다. 발생원 온도 50°C에서는 0.4, 0.75, 1.5, 3.5, 그리고 7.5µm 모든 입자 직경에서 입구온도 증가에 따라 입자계수의 증가 경향성이 뚜렷하였다. 발생원 온도 70°C에서는 3.5와 7.5µm 입자직경에서 입구온도의 증가에 따라 입자계수 증가의 경향성이 있었다. 에어로졸의 발생원 온도와 입구온도의 변화에 따른 에어로졸 입경별 계수는 입자직경 0.4µm의 경우 발생원 온도 20°C와 모든 입구온도에서 가장 높았고 입자 직경 0.75µm의 경우 발생원 온도 20°C와 입구온도 20, 50, 100, 그리고 150°C에서 가장 높았으며 입자직경 1.5µm의 경우 발생원 온도 70°C와 입구온도 20, 50, 100, 150, 그리고 200°C에서 가장 높았다. 입자직경 3.5µm의 경우 발생원 온도 70°C와 모든 입구온도에서 가장 높았고 입자직경 7.5µm의 경우 발생원 온도 70°C와 입구온도 20, 150, 200, 그리고 250°C 가장 높았다.

이러한 실험 결과는 발생원 온도가 동일할 때 입구 온도 증가에 따라 기하평균입경(GMD), 기하표준편차(GSD), 그리고 질량중위수입경(MMD)이 커지는 결과로 귀결되었다. 발생원 온도에 따른 최소 기하평균입경은 발생원 온도 20°C과 입구온도 20°C에서 0.754µm이었고 최대 기하평균입경은 발생원 온도 70°C과 입구온도 250°C에서 1.060µm이었다. Sinclair와 LaMer에 의한 핵 입자(nuclei particles)상에 유기증기를 제어응축하는 방법으로 얻은 기하평균입경 또는 계수중위수입경의 범위와 기하표준편차는 각각 0.2-2.0µm와 1.1 이하이었다¹²⁾. 계수중위수입경의 하한은 본 연구결과 보다 낮았으나 상한은 본 연구결과 보다 높았다. 발생원 온도에 따른 최소 기하표준편차는 발생원 온도 20°C과 입구온도 20°C에서 1.730이었고 최대 기하표준편차는 발생원 온도 20°C과 입구온도 250°C에서 2.148이었으며 기하표준편차는 Sinclair와 LaMer가 보고한¹³⁾ 1.1보다 높았다. 단분산 에어로졸은 거의 균일한 크기의 입자를 함유한 알려지지 증위수 직경 그리고 1.2 이하의 기하표준편차를 가진 크기분포를 나타낸다¹³⁾. 본 연구에서는 발생원과 입구온도가 낮을수록 단분산 에어로졸

(monodisperse aerosol)의 크기분포에 근접하였으나 본 연구에서 생성된 납 에어로졸은 다분산 에어로졸(polydisperse aerosol) 분포를 가진다고 할 수 있다. Phalen에 의한¹³⁾ 압축공기 네블라이저에서 생성된 입자의 기하표준편차는 1.6-2.3이었는데 이는 본 연구결과와 기하표준편차의 범위 1.730-2.148과 유사하였다. 발생원 온도에 따른 최소 질량중위수입경은 발생원 온도 20℃과 입구온도 20℃에서 1.856 μm 이었고 최대 질량중위수입경은 발생원 온도 70℃과 입구온도 250℃에서 6.109 μm 이었다. Phalen에 의한¹³⁾ 압축공기 네블라이저에서 생성된 입자의 질량중위수입경 범위는 3-Jet Collision에서는 1.65-2.0 μm , DeVilbiss No. 40에서는 2.8-4.2 μm , 그리고 Lovelace에서는 2.6-6.9 μm 이었는데 본 연구에서 발생시켰던 납 에어로졸의 질량중위수입경의 범위가 이들이 보고한 범위보다 더 넓었고 응용 가능성이 다양하다고 할 수 있다. 흡입독성실험을 위한 입자의 질량중위수입경은 EPA의 경우 4 μm 이하인데⁸⁾ 본 연구의 결과 발생원 온도 20℃와 50℃에서는 모든 입구온도에서 이러한 기준에 부합하였고 발생원 온도 70℃에서는 입구온도 20℃와 50℃에서 이러한 기준에 부합하였다. OECD와 EU의 경우 흡입독성실험을 위한 질량중위수입경은 3 μm 이하인데⁹⁾ 본 연구의 결과 발생원 온도 20℃과 50℃에서는 모든 입구온도에서 이러한 기준에 부합하는 납 에어로졸을 성공적으로 발생시킬 수 있었으나 발생원 온도 70℃에서는 이러한 기준에 부합하는 납 에어로졸을 발생시킬 수 없었다.

에어로졸의 농도를 조절하여 입자크기를 제어하는 방법은 에어로졸의 입자크기가 중요시되는 흡입독성 연구에서는 중요한 부분이므로 추후에 납 네블라이징 용액의 농도별 입자크기에 대한 추가의 연구가 필요하다고 생각한다. 정재열 등의 연구결과와⁶⁾ 더불어 본 연구의 새로운 공학적 기법이 응용된 에어로졸 발생장치인 초음파 네블라이저에서 발생된 납 에어로졸 입자의 크기 분석에 대한 기초자료는 납에 대한 흡입폭로 실험을 수행하고자 하는 다른 연구자에게도 유용한 자료로 이용될 수 있다고 생각한다.

결 론

납의 흡입독성 연구를 위해 새로운 공학적 방법의 응용과 회로의 설계에 의한 에어로졸 발생장치인 초음파 네블라이저를 제작하였다. 납 2730 ppm 네블라이징 용액을 이용하여 발생원, 입구와 덕트의 온도를 변화시켜 납 에어로졸을 발생시킨 후 얻은 입경분석 결과는 다음과 같다.

발생원 온도 20℃에서 최고 계수는 입경 0.75 μm , 입구온도 100℃에서 39933.66이었고 발생원 온도 50℃에서 최고 계수는 입경 0.75 μm , 입구온도 250℃에서 39992.71이었다. 발생원 온도 70℃에서 최고 계수는 입경 0.75 μm , 입구온도 50℃에서 37569.55이었다. 발생원 온도에 따른 기하평균입경(GMD)의 범위는 발생원 온도 20℃에서는 0.754-0.784 μm , 발생원 온도 50℃에서는 0.758-0.852 μm , 그리고 발생원 온도 70℃에서는 0.869-1.060 μm 이었다.

최소 기하평균입경은 발생원 온도 20℃과 입구온도 20℃에서 0.754 μm 이었고 최대 기하평균입경은 발생원 온도 70℃과 입구온

도 250℃에서 1.060 μm 이었다. 발생원 온도에 따른 기하표준편차(GSD)의 범위는 발생원 온도 20℃에서는 1.730-1.782, 발생원 온도 50℃에서는 1.734-1.894, 그리고 발생원 온도 70℃에서는 1.921-2.148이었다. 최소 기하표준편차는 발생원 온도 20℃과 입구온도 20℃에서 1.730이었고 최대 기하표준편차는 발생원 온도 70℃과 입구온도 250℃에서 2.148이었다. 본 연구에서 얻어진 기하표준편차를 고려하면 납의 흡입독성연구를 위해 생성된 에어로졸은 다분산 에어로졸이었다. 발생원 온도에 따른 질량중위수입경(MMD)의 범위는 발생원 온도 20℃에서는 1.856-2.133 μm , 발생원 온도 50℃에서는 1.877-2.894 μm , 그리고 발생원 온도 70℃에서는 3.120-6.109 μm 이었다. 최소 질량중위수입경은 발생원 온도 20℃과 입구온도 20℃에서 1.856 μm 이었고 최대 질량중위수입경은 발생원 온도 20℃과 입구온도 250℃에서 6.109 μm 이었다. 발생원 온도가 동일할 때 입구 온도 증가에 따라 기하평균입경, 기하표준편차, 그리고 질량중위수입경이 커지는 경향이 명확하였다.

EPA의 경우 흡입독성실험을 위한 질량중위수입경은 4 μm 이하인데 본 연구의 결과 발생원 온도 20℃과 50℃에서는 모든 입구온도에서, 발생원 온도 70℃에서는 20℃와 50℃에서 이러한 기준에 부합하였다. OECD와 EU의 경우 흡입독성실험을 위한 질량중위수입경은 3 μm 이하인데 본 연구결과 발생원 온도 20℃, 50℃에서는 모든 입구온도에서 이러한 기준에 부합하였으나 발생원 온도 70℃에서는 이러한 기준에 부합하지 않았다.

감사의 글

이 논문은 두뇌한국(Brain Korea; BK) 21 사업과 2002년도 원광대학교 교비의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사한다.

참고문헌

1. Heple P.: Lead in the Environment. Institute of Petroleum. pp.4-10, Applied Science Pub., 1972.
2. Patterson, C. C. : Lead in the Environment. Connecticut Med., 35, 347, 1971.
3. Wada, O.: Recent Progress in the Study of Lead Poisoning. Environ. Rev., 1, 77, 1972.
4. Lodge, J. P. and Chan, T.L.: Cascade Impactor Sampling and Data Analysis. pp.2-3, AIHA, OH, 1986.
5. Hinds, W. C. : Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. pp.392-394, John Wiley and Sons, New York, 1982.
6. 정재열, 김정만, 김태형, 정명수, 고광재, 김상덕, 강성호, 송용선, 이기남 : 납의 흡입독성 연구를 위한 에어로졸 발생장치의 고안 및 실시간 모니터링을 이용한 성능평가. 동의생리병리학회지 16(2):373-379, 2002.
7. ACGIH : Industrial Ventilation; A Manual of Recommended Practice. 18th Ed. pp.99-103, Lansing, MI. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1984.

8. Whalna, J.E. and Redden, J.C.: "Interim Policy for Particle Size and Limit Concentration Issues in Inhalation Toxicity Studies". OPP0039, Institution, Washington DC, 1994.
9. OECD:Draft Guideline for the Testing of Chemicals, 1994.
10. Chen, Y.L., Brock, J.R., Trachtenberg, I.:Appl. Phys. Lett., 51:2003, 1987.
11. Chen Y. L., Brock, J. R., Trachtenberg, I.: Aerosol Sci. and Technol., 12:842, 1990.
12. Sinclair, D. and LaMer, V.K.: Light Scattering as a Measure of Particle Size in Aerosols, Chem. Rev., 44, 245, 1949.
13. Phalen, R.F.:Inhalation Studies:Foundations and Techniques. pp.25-59, CRC Press, Boca Raton, FL, 1984.