

공학적 기법을 응용한 카드뮴의 흡입독성 연구를 위한 초음파 네블라이저의 설계 그리고 광산란 광도계를 이용한 성능평가

정재열* · 도날드 밀턴¹ · 김태형² · 이종영³ · 정명수 · 고광재 · 김상덕 · 강성호 · 송용선 · 이기남

원광대학교 한의학전문대학원 제3의학과, 1: 하버드대학교 대학원 환경 및 산업보건학과,
2: 창원대학교 환경공학과, 3: 경북대학교 의과대학 예방의학교실

Design of Ultrasonic Nebulizer for Inhalation Toxicology Study of Cadmium with Application of Engineering Methodology and Performance Evaluation with Light-Scattering Photometer

Jae Yeal Jeung*, Donald K. Milton¹, Tae Hyeung Kim², Jong Young Lee³, 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 Environmental and Occupational Health Program, School of Public Health, Harvard University,

2: Department of Environmental Engineering, Changwon National University,

3: Department of Preventive Medicine, School of Medicine, Kyungpook National University

Author applied several engineering methodologies to classical ultrasonic nebulizer to cope with its demerits. After several trials and errors, we got the several meaningful results. To evaluate the modified ultrasonic nebulizer for inhalation toxicology of cadmium, author used light-scattering photometer. This paper is the one part of inhalation exposure systems for inhalation toxicology study of cadmium. According to the testing conditions, source temperature 50°C and inlet-duct band temperature 150°C, aerosol generation results for sodium chloride and cadmium chloride were as followings: Coefficients of variation(CV) of sodium chloride and cadmium chloride for repeated trials were 3.38 and 4.77 for 10g, 2.47 and 5.02 for 5g, and 4.70 and 2.98 for 2.5g. All the CVs were within 10% of acceptance variability. Count Per Minute(CPM) changes of NaCl and CdCl₂ for 5 repeated trials were similar. CPM ratios of CdCl₂/NaCl were 1.13 for 10g, 0.76 for 5g, and 1.06 for 2.5g. Relative aerosol generation of cadmium chloride to sodium chloride was the highest in 10g. Efficiency increases of 24.50% for 5g NaCl, 14.91% for 2.5g NaCl, and 16.48% for 2.5g CdCl₂ with respect to theoretical efficiency were observed but 0.04% efficiency decrease was observed in 5g CdCl₂.

According to the modifications of source temperature(20, 50, 70°C) and inlet-duct band temperature(20, 50, 100, 150, 200°C), aerosol generation results for NaCl and CdCl₂ were as followings: CPM trends for each quantity excepting 10g NaCl in inlet-duct band temperature 200°C were similar, and the highest CPM was observed in source temperature 70°C to each inlet-duct band temperature. The highest CPMs to 10, 5, and 2.5g NaCl were observed in source temperature 70°C and inlet-duct band temperature 20°C. Aerosol generation of cadmium chloride was increased with the higher source temperature, excepting inlet-duct band temperature 200°C. The highest CPMs for 10, 5, and 2.5g CdCl₂ were observed in source temperature 70°C and inlet-duct band temperature 20°C, and this trend was similar to NaCl aerosol generation. The highest CPMs for 10, 5, and 2.5g CdCl₂ were observed in source temperature 70°C and inlet-duct band temperature 20°C, and this result was similar to NaCl aerosol generation. Observed efficiencies of 5 and 2.5g NaCl were similar to its theoretical efficiency but -3.08% efficiency decrease of 5g CdCl₂, 17.47% efficiency increase of 2.5g CdCl₂ were observed. CPM ratio of CdCl₂/NaCl of 10g was different to 5 and 2.5g, and 2.5g ratio was higher than 5g ratio.

In conclusion, to get maximum aerosol generation for NaCl and CdCl₂ will be the conditions that set the appropriate inlet-duct band temperature for each materials and increase the source temperature. Sodium chloride can be used to evaluate the performance and predict the concentration for cadmium aerosol in aerosol generator and inhalation exposure system.

Key words : Inhalation toxicology, ultrasonic nebulizer, aerosol generation, coefficient of variation, light-scattering photometer, cadmium, inhalation exposure

서 론

카드뮴은 최근 납과 수은만큼이나 독물학적 관심을 끌고 있는 금속이고 자연 중에서는 아연, 납과 관련된 형태로 존재하고 있다. 이들 금속의 제련과정에서 카드뮴에 의한 환경의 오염이 발생한다¹⁾. 사람은 산업장에서 흡입 그리고 오염된 식품, 그리고 흡연을 통해 카드뮴에 폭로된다. 과량의 폭로는 카드뮴(그리고 아연, 아연 광석은 불순물로서 카드뮴을 흔히 포함하고 있기 때문에) 광산 그리고 제련, 카드뮴 색소의 생산 또는 이용, 합금(용접과 땀질을 포함한), 표면코팅, 안정제(PVC의), 알칼리 축전지 생산, 그리고 카드뮴을 함유하는 폐기물을 처리하고 재활용하는 곳에서 발생한다^{2,3)}. 현재 몇몇 나라에서 카드뮴의 이용은 제한되고 있다. 일반 환경에 관계되어서, 담배가 일반적으로 1개피당 1-2 μ g에 해당하는 카드뮴을 함유하고 있기 때문에, 흡연을 통해서 카드뮴에 상당히 심각한 폭로가 있다³⁾. 게다가, 음용수와 식품을 통한 경구적 폭로가 있다. 스웨덴에서, 식품을 통한 하루 섭취량은 약 10 μ g이다. 어떤 지역에서 그 폭로정도는 특별히 아연 광산에 의해 오염된 카드뮴-함유한 농업용수에 폭로된 쌀에서, 아주 높을 수 있다^{2,3)}. 흡입폭로에서, 흡수는 입자의 크기와 그들의 용해성에 의존한다. 흡입된 양의 0.1-35% 흡수 범위가 보고되고 있다. 일부의 입자는 호흡기계 그리고 삼킴(swallowed)에 의해서 제거된다 따라서, 위장관계에서의 흡수를 포함한, 전체 흡수의 범위는, 5-37%일 것이다. 흡연시 흡입된 카드뮴중, 약 10%는 흡수된다⁴⁾. 일반적으로 위장관계에서 카드뮴의 흡수는 약 5%이다⁴⁾. 그러나, 이러한 흡수정도는 상당히 변화된다. 그래서, 철 결핍이 있는 대상자는 20%까지 흡수할 수 있다. 피부를 통한 카드뮴의 흡수는 아주 낮다. 작업환경에서 개선된 분진제어의 결과로, 흡입된 분진의 만성건강영향에 대한 연구는 급성영향보다 훨씬 중요하게 되었다. 그러므로, 실험동물에 대한 흡입폭로실험에서 폭로챔버 내부에서 분진농도와 크기 분포는 장시간에 걸쳐 반드시 일정하게 유지되어야 한다³⁾. 또한, 입자가 덩어리가 되지 않고 고르게 분산되는 것이 바람직하다. 그러나 이러한 2가지 조건을 만족시키는 장치는 상용화된 제품에서도 제한되어있다. 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 연구 목적과 물질의 특성에 따라 적용의 제한점이 있다⁵⁻⁸⁾. 일반적으로 이용되는 대다수의 분진발생장치, 예를 들면 Wright 분진발생기를 이용하면 순간적인 공급비율은 변화할 수 있고 발생된 분진입자는 완전히 덩어리가 될 수 있다⁹⁾. 다른 형태의 분진 발생기는 Marple 등에 의해서 고안되었다¹⁰⁾. 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 시험오차를 거쳐 설정해 주어야 하며 흡입챔버의 용적, 흡입과 배출되

는 공기량, 발생장치에서 시험물질의 발생량(시간에 따른) 등을 고려해야 한다. 초음파 네블라이저는 대부분의 다른 방법으로 얻을 수 있는 농도 보다 높은 농도의 에어로졸을 얻을 수 있는 장점이 있고 입경은 5-10 μ m이고 기하표준편차는 1.5-1.7이다¹¹⁾.

본 연구는 실험동물에 대한 납의 흡입독성연구에 이용될 수 용성 물질인 염화카드뮴 그리고 표준물질로 이용되는 염화나트륨을 이용하여 고전적인 에어로졸 발생장치인 ultrasonic nebulizer에 새로운 몇 가지 공학적 기법을 응용하고 이에 따른 카드뮴 흡입독성 연구에 대한 이용가능성과 성능의 특성을 알아보고자 본 연구를 실시하였다.

재료 및 방법

1. 네블라이징 용액(Nebulizing Solution)

시험물질은 염화나트륨 그리고 염화카드뮴을 이용하였고 각각의 물질에 대해 10, 5, 2.5g을 3차 증류수 2ℓ에 완전히 용해시켜 nebulizing 용액을 만들었다(Na로 각각 1967, 983, 491ppm; Cd로 각각 3065, 1532, 766ppm; 이후 10, 5, 2.5g으로 표시). 10, 5, 2.5g은 예비시험을 거쳐 고려된 각 물질의 중량 농도이다.

2. 초음파 에어로졸 발생장치 및 시스템의 구성(Composition of Ultrasonic Aerosol Generator and System)

에어로졸 발생장치의 구성은 ultrasonic nebulizer, nebulizing 용액 히터와 덕트 입구 히터(Tubular Heater Type SS, Tempco) 그리고 온도 조절기(Thermostat TS-320S, Thermtrol), 블로어로 구성되어있고 발생된 에어로졸 시험장치의 유효용적은 0.100m³이었다. 장치는 설정된 폭로농도를 발생시키고자 여러 가지 유량에서 동력학적으로 작동 가능한 시스템이었다. 초음파 네블라이저의 구성은 초음파 평면 진동자, 발전회로, 파워 증폭기, 송풍기 모터와 필터로 구성되어 있다. 유입공기의 입자제거를 위한 입자상 필터가 장착된 컴파트먼트, ultrasonic nebulizer 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 장착되어있음, 4개의 팬으로 구성된 배합 컴파트먼트(유효용적 0.048m³), 배출되는 공기를 정화하기 위한 HEPA 필터가 장착된 컴파트먼트로 구성되어있으며 공기의 이동과 용량 조절은 HEPA 필터가 장착된 컴파트먼트에서 블로어와 댐퍼를 이용하였다. 덕트 내부의 유속 측정에는 6개의 횡단점(traverse point)을 설정하여 측정하였고¹²⁾ 그 결과 유속은 0.5%이었으며 유속의 측정에는 기류 측정기(VelociCalc Plus Air Velocity Meter Model 8385, TSI)를 이용하였다.

3. 발생된 에어로졸의 측정(Measurement of Aerosol Generated)

발생된 에어로졸의 측정에는 광산란 방식을 이용하는 광도계(Digital Dust Indicator, P5-L2, MDA Scientific)를 이용하였고 이 장비는 시간과 발생된 에어로졸의 변화에 따른 에어로졸의 전체 숫자 농도(total number concentration)의 변이를 알아보고

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

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

· 접수 : 2002/03/12 · 수정 : 2002/04/20 · 채택 : 2002/05/17

자 사용하였다. 측정의 결과는 분당 계수(Count Per Minute; CPM)으로 표시하였고 간단히 광산란 방식을 이용하는 광도계의 특성을 언급하면 소형의 팬은 장비내부로 광학적 통로를 통해 측정하고자 하는 공기를 분당 10ℓ 흡입하고 광학적 통로는 90°에서 산란된 광(scattered light)이 분진의 농도를 표시해 주고 전처리 장치(precut)에서 직경이 5 μ m인 입자는 모두 통과하고 10 μ m인 입자는 50% 통과하고 20 μ m인 입자는 100% 통과하지 못한다. 비임(beam)을 통과하는 입자의 광 펄스는 광전 배증관(光電 倍增管) 회로에서 계수되고 표시부에 나타나게 된다¹³⁾. 그러므로 CPM은 카드뮴의 흡입독성 연구에 부합하는 호흡성의 입자 부분만을 계수하는 것으로 고려할 수 있다.

4. 통계학적 분석(Statistical Analysis)

자료는 평균과 표준편차로 요약하였고 통계학적 분석 및 그래프의 작성은 윈도우용 SPSS/PC+8.0과 SigmaPlot 4.0을 이용하였다. 자료는 일원 분산분석을 이용하여 분석하였고 유의수준은 $\alpha = 0.05$ 로 설정하였다. 시간과 각각의 실험에 대한 입자수의 변이성은 변이계수(coefficient of variation; CV)를 이용하여 표시하였다¹⁴⁾.

결 과

발생원 온도 50℃, 입구와 덕트의 밴드 히터 온도 150℃ 조건에서 작동시간에 따른 2가지 시험물질의 CPM과 변화율은 표 1 및 2 그리고 변이계수와 CdCl₂/NaCl CPM의 비는 그림 1 및 2와 같다. 각각의 시험물질에 대한 CPM과 변화율은 염화나트륨 10g에서는 작동 4시간째 747.48CPM 그리고 작동 3시간째 -4.33%으로 가장 높은 수치를 보였다. 염화나트륨 5g에서는 작동 4시간째 545.038CPM 그리고 작동 2시간째 -2.35%으로 가장 높은 수치를 보였다. 염화나트륨 2.5g에서는 작동 5시간째 301.84CPM 그리고 작동 3시간째 -5.61%으로 가장 높은 수치를 보였다. 염화나트륨은 작동 2, 3시간째 CPM이 감소하는 경향이 있었으나 염화나트륨 10g에서는 3번째 시도에서 변이계수 2.43으로 가장 높았고 반복 시도에 대한 변이계수는 3.38이었으며 5g에서는 2번째 시도에서 변이계수 2.31으로 가장 높았고 반복시도에 대한 변이계수는 2.47이었다. 염화나트륨 2.5g에서는 2번째 시도에서 변이계수 2.30으로 가장 높았고 반복시도에 대한 변이계수는 4.70이었다. 이러한 실험결과는 단일시도에 대한 변이계수 20% 이내 그리고 반복시도에 대한 변이계수 10% 이내를 만족시키는 결과이었다.

염화카드뮴에 대한 CPM과 변화율은 10g에서는 작동 5시간째 854.81CPM 그리고 작동 2시간째 -6.63%으로 가장 높은 수치를 보였다. 염화카드뮴 5g에서는 작동 5시간째 432.24CPM 그리고 작동 5시간째 6.14%으로 가장 높은 수치를 보였다. 염화카드뮴 10g에서는 2번째 시도에서 변이계수 2.51으로 가장 높았고 반복 시도에 대한 변이계수는 4.77이었으며 5g에서는 2번째 시도에서 변이계수 2.41으로 가장 높았고 반복시도에 대한 변이계수는 5.02이었다. 염화카드뮴 2.5g에서는 4번째 시도에서 변이계수 2.35으로 가장 높았고 반복시도에 대한 변이계수는 2.98이었다. 이러한 실험결과는 단일시도에 대한 변이계수 20% 이내 그리고 반복시도에 대한 변이계수 10% 이내를 만족시키는 결과이었다.

CdCl₂/NaCl CPM의 비는 10g에서 1.13, 5g에서 0.76, 그리고 2.5g에서 1.06으로 제시되었고 10g에서 염화나트륨에 비해 염화카드뮴 에어로졸의 상대적인 발생량이 가장 높았다.

Table 1. Readings of Count Per Minute for 2 Testing Materials with Running Times

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
		Cadmium Chloride		
		10g	5g	2.5g
1	5	790.89±16.01	386.46±9.08	299.80±6.52
2	5	760.82±19.13	388.47±9.36	295.32±6.34
3	5	823.56±17.34	405.81±9.74	304.70±7.04
4	5	844.29±18.05	423.09±9.00	307.74±7.22
5	5	854.81*±16.52	432.24*±8.91	314.40*±6.30
Total	25	814.87±38.86	407.21±20.42	304.39±9.06

*p<0.05 by One-Way ANOVA.

Table 2. Fluctuation of Count Per Minute Readings for 2 Testing Materials with Operating Times

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
		Cadmium Chloride		
		10g	5g	2.5g
1	5	-2.94±1.96	-5.09±2.23	-1.50±2.14
2	5	-6.63*±2.34	-4.60±2.30	-2.98±2.08
3	5	1.06±2.12	-0.34±2.39	0.10±2.31
4	5	3.61±2.21	3.89±2.21	1.09±2.37
5	5	4.90±2.02	6.14*±2.18	3.28*±2.07
Total	25	0.00±4.76	0.00±5.01	0.00±2.97

*p<0.05 by One-Way ANOVA.

발생원 온도 50℃, 입구와 덕트의 밴드 히터 온도 150℃ 조건에서 작동시간에 따른 2가지 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. 염화카드뮴 5g에서는 평균 -50.02%이었고 작동 2시간째에서 -52.32%로 가장 높았으며 염화카드뮴 2.5g에서는 평균 -62.64%이었고 작동 2시간째에서 -63.75%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 염화카드뮴 2.5g에서 16.48%의 효율 증가가 있었으나 염화카드뮴에서는 5g에서 단지 0.04% 효율 증가만 있었

다. 시험물질로 염화나트륨을 이용할 때 5g이 적합하고 염화카드뮴의 경우에는 2.5g이 적합하다고 생각한다.

발생원 온도 50℃, 입구와 덕트의 밴드 히터 온도 150℃ 조건에서 작동시간에 따른 에어로졸 발생 시험의 표준물질인 염화나트륨과 흡입폭로시험에 이용될 물질인 염화카드뮴의 시간에 따른 CPM 변화율은 유사한 경향성을 나타내었다. 10g에 대한 감소율은 5g 염화나트륨과 염화카드뮴에서는 수치적인 차이가 컸으나 2.5g에서는 유사하였다. 시간에 따른 CPM 변화율 그리고 10g에 대한 감소율을 고려할 때 염화카드뮴을 이용한 흡입폭로에 대한 에어로졸 발생 및 흡입폭로 시스템의 설치시 2.5g의 염화나트륨이 표준물질로 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

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

Running 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
		Cadmium Chloride	
		5g	2.5g
1	5	-52.57±1.11	-63.20±0.80
2	5	-52.32±1.14	-63.75±0.77
3	5	-50.19±1.19	-62.60±0.86
4	5	-48.07±1.10	-62.23±0.88
5	5	-46.95±1.09	-61.41±0.77
Total	25	-50.02±2.50	-62.64±1.11

*p<0.05 by One-Way ANOVA.

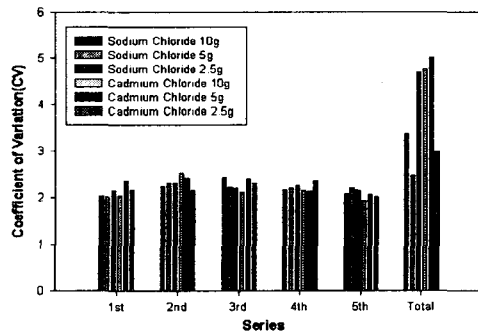


Fig. 1. Coefficient of Variation for 2 Testing Materials with Running Time.

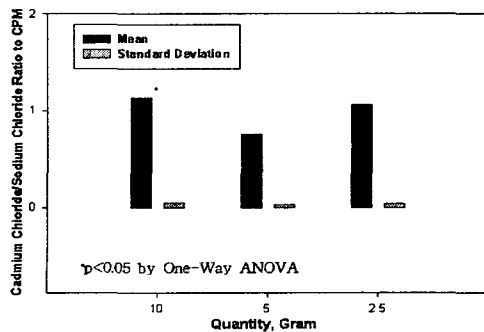


Fig. 2. CPM Ratio for Cadmium Chloride/Sodium Chloride.

발생원 온도(20, 50, 그리고 70℃) 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 온도(20, 50, 100, 150, 그리고 200℃)에 따른 2가지 시험물질의 Count Per Minute(CPM)은 표 4 그리고 5와 같다. 염화나트륨 10g일 때 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 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. 염화나트륨 5g일 때 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 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 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 흡입 챔버 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.

Table 4. Readings of Count Per Minute for Sodium Chloride with Operating Temperatures and Quantities

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.

염화카드뮴 10g일 때 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 온도 20, 50, 100, 150, 그리고 200℃에서는 각각 발생원 온도 70℃에서 527.83CPM, 발생원 온도 70℃에서 454.49CPM, 발생원 온도 70℃에서 348.37CPM, 발생원 온도 70℃에서 393.90CPM, 그리고 발생원 온도 50℃에서 405.02CPM으로 가장 높았다. 염화카드뮴 5g일 때 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 온도 20, 50, 100, 150, 그리고 200℃에서는 각각 발생원 온도 70℃에서 268.90CPM, 발생원 온도 70℃에서 248.80CPM, 발생원 온도 70℃에서 248.80CPM, 발생원 온도 70℃에서 248.80CPM, 발생원 온도 70℃에서 248.80CPM으로 가장 높았다.

0℃에서 172.70CPM, 발생원 온도 70℃에서 186.23CPM, 그리고 발생원 온도 50℃에서 221.19CPM으로 가장 높았다. 염화카드뮴 2.5g일 때 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 온도 20, 50, 100, 150, 그리고 200℃에서는 각각 발생원 온도 70℃에서 195.72CPM, 발생원 온도 70℃에서 182.51CPM, 발생원 온도 70℃에서 138.28CPM, 발생원 온도 70℃에서 154.89CPM, 그리고 발생원 온도 50℃에서 155.72CPM으로 가장 높았다. 염화카드뮴 10g, 5g, 그리고 2.5g 각각에 대해 입구와 덕트 밴드의 온도 200℃을 제외하면 각각의 입구와 덕트 밴드의 온도 조건에서 발생원의 온도가 높을 수록 염화카드뮴 에어로졸의 발생량이 증가하였고 이러한 조건은 흡입챔버 설계와 시험에서 최적 조건으로 생각된다. 염화카드뮴 10g, 5g, 2.5g에 대한 최대 CPM은 모두 발생원 온도 70℃ 그리고 입구와 덕트 밴드의 온도 200℃에서 제시되었고 이러한 경향성은 염화나트륨 에어로졸 발생과 유사한 양상을 나타냈다.

Table 5. Readings of Count Per Minute for Cadmium Chloride with Operating Temperatures and Quantities

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	201.06±17.08	236.17±0.69	224.97±3.77	257.04±7.32	268.94±6.07
50	3	261.75±5.46	291.92±4.58	329.98±1.22	350.95±2.75	405.02*±4.79
70	3	527.83*±7.32	454.49*±10.36	348.37*±1.58	393.90*±1.83	384.70±6.35
Total	9	330.21±150.83	327.53±98.39	301.11±57.69	333.96±60.74	352.89±63.77
Count Per Minute for 5g, CPM						
20	3	95.86±13.27	135.59±3.34	107.03±18.70	112.78±8.98	117.44±10.68
50	3	116.57±13.84	143.04±5.35	170.11±16.36	131.73±4.38	221.19*±35.14
70	3	268.90*±43.46	248.80*±19.51	172.70*±12.08	186.23*±24.31	179.18±15.34
Total	9	160.44±85.21	175.81±55.79	149.95±35.04	143.58±35.54	172.60±49.38
Count Per Minute for 2.5g, CPM						
20	3	79.54±9.71	88.56±8.64	82.81±10.65	98.48±11.74	98.52±4.47
50	3	96.11±5.31	103.02±4.95	135.40±15.69	127.20±0.00	155.72*±7.84
70	3	195.72*±20.03	182.51*±8.21	138.28*±3.36	154.89*±10.13	148.41±4.48
Total	9	123.79±55.62	124.70±44.27	118.83±28.70	126.86±25.62	134.22±27.42

*p<0.05 by One-Way ANOVA.

발생원 온도(20, 50, 그리고 70℃) 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 온도(20, 50, 100, 150, 그리고 2000℃)에 따른 2가지 시험 물질 10g에 대한 5g과 2.5g의 CPM 감소율은 표 6과 같다. 염화나트륨 5g일 때 평균 감소율은 -37.23%(이론상의 효율과 비교시 25.24% 효율증가)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). 염화나트륨 2.5g일 때 평균 감소율은 -57.51%(이론상의 효율과 비교시 23.32% 효율증가)이었고 감소율이 가장 낮은 입구와 덕트의 밴드 히터 온도는 100℃로 평균 -55.98%이었고 이 조건에서 가장 낮은 감소율은 보인 발생원 온도는 20℃이었으나 가장 낮은 감소율은 나타난 발생원 온도 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 온도는 20℃ 그리고 200℃로 -45.83%이었다(이론상의 효율과 비교시 38.89% 효율증가).

염화카드뮴 5g일 때 평균 감소율은 -51.54%(이론상의 효율과 비교시 -3.08% 효율감소)이었고 감소율이 가장 낮은 입구와 덕트의 밴드 히터 온도는 50℃로 평균 -46.28%이었고 이 조건에서 가장 낮은 감소율을 보인 발생원의 온도는 20℃이었다(이론상의 효율과 비교시 14.84% 효율증가). 염화카드뮴 2.5g일 때 평균 감소율은 -61.90%(이론상의 효율과 비교시 17.47% 효율증가)이었고 감소율이 가장 낮은 입구와 덕트의 밴드 히터 온도는 100℃로 평균 -60.82%이었고 이 조건에서 가장 낮은 감소율은 보인 발생원 온도는 50℃이었다(이론상의 효율과 비교시 21.39% 효율증가).

염화나트륨과 염화카드뮴 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 염화나트륨의 경우 5g과 2.5g은 이론상의 효율이 유사하였으나 염화카드뮴은 5g에서는 -3.08% 효율의 감소가 있었고 2.5g에서 17.47% 증가하였다. 염화카드뮴의 경우 2.5g을 사용하는 것이 더 좋을 것으로 생각된다.

Table 6. Decrease of Count Per Minute Readings to 10 g for 2 Testing Materials with Operating Temperatures and Quantities

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 Cadmium Chloride 5g, %						
20	3	-52.32±6.60	-42.58±1.41	-52.42±8.31	-56.12±3.49	-56.33±3.97
50	3	-55.46±5.28	-51.00*±1.83	-48.44±4.95	-62.46±1.25	-45.38±8.67
70	3	-49.05±8.23	-45.25±4.29	-50.42±3.47	-52.71±6.17	-53.42±3.98
Total	9	-52.28±6.52	-46.28±4.45	-50.43±5.42	-57.10±5.59	-51.71±7.13
Decrease for Cadmium Chloride 2.5g, %						
20	3	-60.43±4.83	-62.49±3.66	-63.18±4.73	-61.68±4.57	-63.36±1.66
50	3	-63.28±2.22	-64.70±1.69	-58.96±4.75	-63.75±0.00	-61.55±1.93
70	3	-62.91±3.79	-59.84±1.80	-60.30±0.96	-60.67±2.57	-61.42±1.16
Total	9	-62.21±3.53	-62.34±3.05	-60.82±3.87	-62.03±2.95	-62.11±1.69

*p<0.05 by One-Way ANOVA.

발생원 온도(20, 50, 그리고 70℃) 그리고 입구와 덕트의 밴드 히터 온도(20, 50, 100, 150, 그리고 2000℃)에 따른 2가지 시험 물질 10g에 대한 5g과 2.5g의 CdCl₂/NaCl CPM의 비는 표 7과 같다. CdCl₂/NaCl CPM의 비는 10g에서는 발생원, 입구와 덕트 밴드의 온도에 관련 없이 1.12 부근이었고 5g 그리고 발생원 온도 20℃에서는 입구와 덕트 밴드의 온도 50℃에서 1.04로 가장 높았고 발생원 온도 50℃에서는 입구와 덕트 밴드의 온도 200℃에서 1.22로 가장 높았으며 발생원 온도 70℃에서는 입구와 덕트 밴드의 온도 50℃에서 1.13으로 가장 높았다. 2.5g 그리고 발생원 온도 20℃에서는 입구와 덕트 밴드의 온도 50℃에서 0.95로 가장 높았고 발생원 온도 50℃에서는 입구와 덕트 밴드의 온도 200℃

에서 1.29로 가장 높았으며 발생원 온도 70℃에서는 입구와 덕트 밴드의 온도 50℃에서 1.19로 가장 높았다. 10g에 대한 CdCl₂/NaCl CPM의 비는 5g과 2.5g과 다른 양상을 나타내었고 5g보다는 2.5g에서 그 비가 높았다.

Table 7. CPM Ratio of Cadmium Chloride to Sodium Chloride with Operating Temperatures and Quantities.

Temperature, °C		Quantity, gram		
Source	Inlet and Duct Band	10	5	2.5
20	20	1.12±0.00	0.87±0.12	0.88±0.10
20	50	1.12±0.00	1.04±0.02	0.95±0.10
20	100	1.12±0.01	0.76±0.13	0.78±0.14
20	150	1.13±0.01	0.69±0.06	0.82±0.09
20	200	1.12±0.02	0.61±0.05	0.75±0.03
Total		1.12±0.01	0.79±0.08	0.83±0.09
50	20	1.12±0.01	0.83±0.09	0.99±0.12
50	50	1.12±0.01	0.95±0.03	1.14±0.05
50	100	1.13±0.00	1.06±0.10	1.27±0.19
50	150	1.13±0.00	0.76±0.00	1.06±0.00
50	200	1.12±0.01	1.22±0.19	1.29±0.06
Total		1.12±0.01	0.96±0.08	1.15±0.08
70	20	1.13±0.01	0.82±0.13	1.06±0.13
70	50	1.12±0.00	1.13±0.08	1.19±0.03
70	100	1.12±0.00	0.86±0.06	1.06±0.02
70	150	1.12±0.00	0.85±0.09	1.13±0.12
70	200	1.12±0.01	0.77±0.06	1.11±0.07
Total		1.12±0.01	0.89±0.08	1.11±0.07

고찰

초음파 네블라이저는 piezoelectric crystal의 높은주파수 진동을 이용해 에어로졸을 발생시키는데, 그 결과로 에어로졸 입자를 생성하게 되는 액체에서 진공현상에 의한 기포와 모세관 웨이브(capillary wave)를 발생시킨다. 여분의 에너지는 단백질과 같이, 영향을 받기 쉬운 물질을 불활성화시킬 수 있는 열로 전환되기 때문에¹⁵⁾ 발전회로의 설계시 여기 주파수(excitation frequency)에 대한 고려뿐만 아니라 이에 대한 고려가 필수적이나 상업적으로 시판되는 상품에서는 대부분의 흡입독성 연구자가 필요로 하는 에어로졸 발생기 제품은 찾아보기 어려운 실정이다. 따라서 흡입독성연구와 같은 특수한 목적을 위한 에어로졸 발생 연구를 위해서는 연구의 목적에 부합하는 발전회로와 권력 증폭기에 대한 설계와 제작이 필요하다. 초음파 네블라이저는 점성이 높은 액체를 에어로졸로 발생시킬 때는 효과가 없다¹⁶⁾. 초음파 네블라이저에 의한 에어로졸의 생성은 piezoelectric crystal의 진동에 의존하며 과거에는 이러한 원리를 이용하는 에어로졸 발생기에서 생성되는 입자의 크기가 젯 네블라이저(jet nebulizer)에서 생성된 입자의 크기보다 커서 광범위하게 이용되지 못하였다. 그러나, 최근에 개발된 초음파 네블라이저는 에어로졸이 통과하는 마이크론 크기의 구멍을 가진 미세한 그물에 piezoelectric transducer를 직접 연결하는 기술을 포함하는 조작 기술을 변형하여 이 문제를 해결하고자 시도하고 있다¹⁷⁻¹⁹⁾.

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 역할을 하고 물질이 흡습성이 있는 경우에 발생된 에어로졸 입자들은 물을 흡수하고 결과적으로 더 커지게 되지만 열화나트륨과 열화카드뮴을 이용한 본 연구에서는 덕트와 흡입챔버 내로 유입되는 공기를 실리카겔 층을 경유하게 하고 입구와 덕트 밴드 히터에서 증발과 응축에 의해 이러한 요인을 제어하였으며 입구와 덕트 밴드 히터를 경유한 공기 흐름에서는 에어로졸의 입경에 변화가 없었다^{20,21)}. 본 연구에서 카드뮴의 흡입독성연구를 위한 에어로졸 발생장치에서는 고전적으로 액체를 원자화 시켜 에어로졸을 발생시키는 nebulizer, 진동 오리피스 에어로졸 발생기의 원리 대신에 수조 하부에 장착한 초음파 진동자(piezoelectric crystal)로 원자화를 시키고 상향 기류를 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 하였다²²⁻²⁴⁾. 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 한다²⁴⁾.

발생원 온도 50℃, 입구와 덕트의 밴드 히터 온도 150℃ 조건에서 작동시간에 따른 에어로졸 발생 시험의 표준물질인 열화나트륨과 흡입폭로시험에 이용될 물질인 열화카드뮴의 시간에 따른 CPM 변화율은 유사한 경향성을 나타내었다. 10g에 대한 감소율은 5g 열화나트륨과 열화카드뮴에서는 수치적인 차이가 컸으나 2.5g에서는 유사하였다. 시간에 따른 CPM 변화율 그리고 10g에 대한 감소율을 고려할 때 열화카드뮴을 이용한 흡입폭로에 대한 에어로졸 발생 시험시 2.5g의 열화나트륨이 표준물질로 이용하는 것이 좋을 것으로 생각된다. 열화카드뮴 10g, 5g, 그리고 2.5g 각각에 대해 입구와 덕트 밴드의 온도 200℃를 제외하면 각각의 입구와 덕트 밴드의 온도 조건에서 발생원의 온도가 높을 수록 열화카드뮴 에어로졸의 발생량이 증가하였고 이러한 조건은 흡입챔버 설계와 시험에서 최적 조건으로 생각되며 열화카드뮴 10g, 5g, 2.5g에 대한 최대 CPM은 모두 발생원 온도 70℃ 그리고 입구와 덕트 밴드의 온도 20℃에서 제시되었고 이러한 경향성은 열화나트륨 에어로졸 발생과 유사한 양상을 나타냈다. 이러한 결과를 고려할 때 열화나트륨은 카드뮴의 흡입독성연구를 위한 에어로졸 발생장치의 설정 및 흡입챔버의 설계에 있어 표준물질로 이용될 수 있을 것으로 생각된다. 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 있다²⁵⁾. 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 자료가 될 것으로 생각한다. 염화나트륨 에어로졸 발생의 반복시도에 대한 변이계수는 10g에서 3.38, 5g에서 2.47, 그리고 2.5g에서 4.70이었다. 이러한 실험결과는 단일시도에 대한 변이계수 20% 이내 그리고 반복시도에 대한 변이계수 10% 이내를 만족시키는 결과이었다. 염화카드뮴 에어로졸 발생의 반복시도에 대한 변이계수는 10g에서 3.38, 5g에서 2.47, 그리고 2.5g에서 4.70이었다. 이러한 실험결과는 단일시도에 대한 변이계수 20% 이내 그리고 반복시도에 대한 변이계수 10% 이내를 만족시키는 결과이었다. 이러한 결과는 에어로졸 발생기의 구성이 유사한 정재열 등²⁰⁾에 의한 초산납을 이용한 에어로졸의 발생의 변이계수도 10%이내이었는데 이는 공학적 기법을 적용한 본 연구의 에어로졸 발생기가 흡입독성 연구를 위한 농도 변이의 기준에 부합하는 결과를 제시하고 있다고 할 수 있다. 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 한다고 한다^{14,26,27)}.

정재열 등²⁰⁾에 의한 초산납을 이용한 에어로졸의 발생의 경우 5g과 2.5g의 성적이 유사하였는데 이는 piezoelectric crystal에 초산납이 침전되기 때문이었고 초산납의 경우 용해도를 높이고 용액의 안정성을 위한 네블라이징 용액의 가온이 필요하고 용액을 교반해 줄 수 있는 배합 시스템의 필요성을 언급하였는데 염화카드뮴의 경우에는 이러한 문제가 발생하지 않았는데 이는 증류수에 용해된 염화카드뮴의 높은 용해성에 부분적인 원인이 있다.

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 흐름제어에 의한 방법이 있는데²⁵⁾, 본 연구는 염화나트륨과 염화카드뮴을 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 염화카드뮴의 효율을 연구하여 흡입폭로 시스템과 에어로졸 발생기의 조건을 설정하는데 유용한 자료를 제공하는 것으로 생각된다. 네블라이징이 진행되는 초음파가 발생하는 영역에서는 초음파에 의한 네블라이징이 진행되면서 에어로졸 그리고 용액의 온도가 감소하고²⁴⁾ 이로 인해 원자화되는 용액에 용해되어 있는 물질의 용해도에 영향을 주게 되고 초음파와 에너지는 감소하게 되며 결국 네블라이징 되는 양의 감소로 귀결되는데 염화나트륨과 염화카드뮴 모두에서 발생원의 온도가 낮을 수록 이러한 현상은 많이 발생했으나 네블라이징 되는 영역에 가온 시스템을 적용함으로써 이러한 문제점을 극복할 수 있었다. 정재열 등²⁰⁾에 의한 초산납을 이용한 에어로졸의 발생의 경우 문제점은 많이 향상되었다. 이러한 현상은 정재열 등²⁰⁾에 의한 의한 초산납을 이용한

에어로졸 발생실험에서 볼 수 있었던 현상이다. 고전적 에어로졸 네블라이저에 이러한 공학적 방법을 적용하면 카드뮴의 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. 발생원에 대한 가온 그리고 입구와 덕트 밴드의 가온에 따른 카드뮴의 에어로졸 발생에 부가하여 입자의 크기에 대한 세부적인 연구를 필요로 한다.

결 론

고전적인 에어로졸 발생장치의 단점을 보완하기 하고자 새로운 공학적 방법의 적용과 회로의 설계에 의한 초음파 네블라이저를 시험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

발생원 온도 50℃, 입구와 덕트의 밴드 히터 온도 150℃ 조건에서 작동시간에 따른 에어로졸 발생 시험에서, 염화나트륨 10g에서는 반복 시도에 대한 변이계수는 3.38이었으며 5g에서는 반복시도에 대한 변이계수는 2.47이었다. 염화나트륨 2.5g에서는 반복시도에 대한 변이계수는 4.70이었다. 염화카드뮴 10g에서는 반복 시도에 대한 변이계수는 4.77이었으며 5g에서는 반복시도에 대한 변이계수는 5.02이었다. 염화카드뮴 2.5g에서는 2.98이었다. 이러한 실험결과는 반복시도에 대한 변이계수 10% 이내를 만족시키는 결과이었다. 염화나트륨과 염화카드뮴의 시간에 따른 CPM 변화율은 유사한 경향성을 나타내었다. CdCl₂/NaCl CPM의 비는 10g에서 1.13, 5g에서 0.76, 그리고 2.5g에서 1.06으로 제시되었고 10g에서 염화나트륨에 비해 염화카드뮴 에어로졸의 상대적인 발생량이 가장 높았다. 이론상의 효율에 비해 염화나트륨에서는 5g에서 24.50%, 2.5g에서 14.91% 그리고 염화카드뮴 2.5g에서 16.48%의 효율 증가가 있었으나 염화카드뮴에서는 5g에서 단지 0.04% 효율 증가만 있었다. 발생원, 그리고 입구와 덕트 밴드의 온도조건에 따른 실험결과는 염화나트륨 10g의 입구와 덕트 밴드의 온도 200℃을 제외하면 발생원의 온도가 70℃에서 입구와 덕트 밴드의 온도 각각에 대해 최대의 CPM을 제시하였다. 염화나트륨 10g, 5g, 그리고 2.5g에 대한 최대 CPM은 발생원 온도 70℃와 입구와 덕트 밴드의 온도 20℃에서 제시되었다. 염화카드뮴 10g, 5g, 그리고 2.5g 각각에 대해 입구와 덕트 밴드의 온도 200℃을 제외하면 각각의 입구와 덕트 밴드의 온도 조건에서 발생원의 온도가 높을 수록 염화카드뮴 에어로졸의 발생량이 증가하였다. 염화카드뮴 10g, 5g, 2.5g에 대한 최대 CPM은 모두 발생원 온도 70℃ 그리고 입구와 덕트 밴드의 온도 20℃에서 제시되었고 이러한 경향성은 염화나트륨 에어로졸 발생과 유사한 양상을 나타냈다. 염화나트륨의 경우 5g과 2.5g은 이론상의 효율이 유사하였으나 염화카드뮴은 5g에서는 -3.08% 효율감소가 있었고 2.5g에서는 17.47% 효율증가가 있었다. 10g에 대한 CdCl₂/NaCl CPM의 비는 5g과 2.5g과 다른 양상을 나타내었고 5g보다는 2.5g에서 그 비가 높았다. 상기의 내용을 고려할 때, 염화나트륨은 카드뮴의 흡입독성연구를 위한 에어로졸 발생기 및 흡입폭로 시스템의 성능시험과 농도의 예측에 이용될 수 있을 것으로 생각한다.

감사의 글

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

참고문헌

- Gilman, A.G., Goodman, L.S., Rall, T.W. and Murad, F.: Goodman and Gilman's The Pharmacological Basis of Therapeutics. 7th Ed., pp.1664-1665, Macmillan Publishing Company, New York, 1985.
- Chang, L.W.: Toxicology of Metals. p.83, CRC Press Inc., New York, 1996.
- WHO : Cadmium, Environmental Health Criteria 134. Int. Prog., Chemical Safety, World Health Organization, Geneva, 1992.
- Nordberg, G.F. and Nordberg, M.: "Biological Monitoring of Cadmium", in Biological Monitoring of Toxic Metals. T.W. Clarkson, et al., Eds. pp.151-168, Plenum Press, New York, 1988.
- Corn, M., Esmen, N.A.: "Aerosol Generation", in Handbook on Aerosols, R. Dennis(Ed.), TID-26608, USERDA, 1976.
- Mercer, T.T.: Aerosol Technology in Hazard Evaluation. pp.125-130, Academic Press, New York, 1973.
- Liu, B.Y.H., Eds.: Fine Particles. pp.312-325, Academic Press, New York, 1976.
- Willeke, K. and Baron, P.A.: Aerosol Measurement. Van Nostrand Reinhold, New York, 1993.
- Wright, B.M.: A New Dust-Feed Mechanism. J. scient. Instrum., 27:12, 1950.
- Marple, V.A., Liu, B.H.Y., Rubow, K.L.: A Dust Generator for Laboratory Use. Am Ind. Hyg. Ass. J., 39:26, 1978.
- Willeke, K.: Generation of Aerosols and Facilities for Exposure Experiments. pp.21-23, Ann Arbor Science Publishers Inc., Michigan, 1980.
- ACGIH: Industrial Ventilation; A Manual of Recommended Practice. 18th Ed. pp. 99-103, Lansing, MI. American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 1984.
- Hering, S.V.: Air Sampling Instruments for Evaluation of Atmospheric Contaminants 7th Edition. pp.479-488, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, Ohio, 1989.
- Sipes, G., McQueen, C.A., Gandolfi, A.J.: Comprehensive Toxicology: Toxicological Testing and Evaluation, p.278, Pergamon, NY. 1997.
- Cipolla, D.C., Clark, A.R., Chan, H.K., Gonda, I., Shiir, S.J.: Assessment of aerosol delivery systems for recombinant human deoxyribonuclease. STP Pharma Sci. 4:50-62, 1994.
- McCallion, O.N.M, Taylor, K.M.G., Thomas, M. and Taylor, A. J.: Nebulization of fluids of different physicochemical properties with air-jet and ultrasonic nebulizers. Pharm. Res., 12:1682-1688, 1995.
- Mercer T.T: Production and characterization of aerosols. Arch Int. Med., 131:39-50, 1973.
- Mercer T.T.: Production of therapeutic aerosols; principles and techniques. Chest 80:818-820, 1971.
- Newman S.P.: "Therapeutic aerosols", in Aerosols and the lung: clinical and experimental aspects. Charke S, Demetri P, eds. pp.206-208, Butterworths, New York, 1984.
- 정재열, 김정만, 김태형, 정명수, 고광재, 김상덕, 강성호, 송용선, 이기남: 납의 흡입독성 연구를 위한 에어로졸 발생장치의 고안 및 실시간 모니터링을 이용한 성능평가. 동의생리병리학회지, 16(2):92-100. 2002.
- 강성호, 천병렬, 김상덕, 송용선, 이기남, 정재열 : 시엽 추출물이 카드뮴에 흡입폭로된 랫드의 독성에 미치는 영향. 동의생리병리학회지, 16(1):78-88, 2002.
- Chen, Y.L., Brock, J.R., Trachtenberg, I.: Appl. Phys. Lett., 51:2203, 1987.
- Chen, Y.L., Brock, J.R., Trachtenberg, I.: Aerosol Sci. and Technol., 12:842, 1990.
- Hinds, W.C.: Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. pp.392-394, John Wiley and Sons, New York. 1982.
- Niesink, R.J.M., Vries, J. de, Hollinger, M.A.: Toxicology Principles and Applications. pp.575-604, CRC Press Inc., New York. 1996.
- Phalen, R. F. : Inhalation Studies : Foundations and Techniques. pp.25-59, CRC Press, Boca Raton, FL, 1984.
- McClellan, R. O., Henderson, R. F.: Concepts in Inhalation Toxicology. p.123-137, Taylor&Francis, Washington D.C., 1995.