

비산업 연소 사업장 배출 가스상 미세먼지와 휘발성 유기 화합물 제거를 위한 가압수식 미세먼지 제거 장치 연구

윤재서¹, 김상민², 이예지³, 노성여^{4*}

¹부경대학교 기술경영전문대학원, ²디에프산업, ³부경대학교 기술경영전문대학원, ⁴동명대학교 항만물류시스템학과

A Study on the Fine Dust Removal Equipment of Pressurized Water type for the Removal of Exhaust Gas Fine Dust and Volatile Organic Compounds from the Non-industrial combustion plant

Jae-Seo Youn¹, Sang-Min Kim², Ye-Ji Lee³, Seong-Yeo Noh^{4*}

¹Graduate School of Management of Technology, Pukyong National University

²DF Industry

³Graduate School of Management of Technology, Pukyong National University

⁴Department of Port Logistics System, TongMyong University

요 약 가정과 요식업 사업장에서 발생하는 미세먼지는 전체 미세먼지 배출량의 약 4% 정도로 낮은 비율을 차지하고 있다. 하지만 요식업 사업장에서는 일시적 미세먼지 농도가 최대 60배 가까이 측정될 만큼 오염농도의 변화율이 매우 높다. 비산업 연소 사업장에서 발생하는 오염 물질은 입자상 미세먼지와 가스상 유기화합물로 구성되며, 이 오염물질을 제거하기 위해서 여러 집진원리 중 가스상 물질과 입자상 물질의 동시 제거에 효과적인 시스템인 세정집진을 적용하였다. 이는 이류체 분무 노즐을 이용한 가압수식 액체 분사 방법으로 브라운 운동의 확산 포집의 확률을 높인 방법이다. 제작된 미세먼지 제거 장치를 이용하여 노즐 분무 기압 조건과 각도 등에 따른 미세먼지 집진 시스템의 집진 효율성을 분석하였으며, 그 결과 미세먼지와 가스상 유기화합물 제거효율이 90% 이상을 만족하는 것을 확인하였다. 개발된 시스템은 기존 사업장 후드 시스템에 별도의 설치비용 없이 미세먼지 집진 제거가 가능하여 향후 높은 활용성이 기대된다.

Abstract The fine dust generated in the home and restaurant business occupies a low ratio of about 4% of the total fine dust emissions. However, at the foodservice business, the rate of change of the pollutant concentration is very high, so that the temporary fine dust concentration can be measured up to 60 times. The pollutants generated from non-industrial combustion plants consist of particulate fine dust and gaseous organic compounds. To remove these pollutants, cleaning dust collection system, which is an effective system for simultaneous removal of gaseous and particulate matter, is applied. This is a method of increasing the probability of diffusion capture of the Brownian motion by pressurized liquid injection method using the atomizing nozzle. The dust removal efficiency of the fine dust collecting system was analyzed by nozzle spraying air pressure condition and angle using the manufactured fine dust removing system. As a result, it was confirmed that the efficiency of removal of fine dust and gaseous organic compounds was more than 90%. The developed system is expected to be highly usable in the future because it can remove particulate dust from the existing plant hood system without any installation cost.

Keywords : Pressurized water nozzle, Brown movement, Diffusion, Fine dust removal equipment, Non-industry

본 논문은 중소기업부에서 지원하는 2017년도 산학협력력 기술개발사업(No.C531409)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

*Corresponding Author : Seong-Yeo Noh(TongMyong Univ.)

Tel: +82-10-8559-5336 email: nsy@tu.ac.kr

Received September 3, 2018

Revised (1st September 28, 2018, 2nd October 8, 2018)

Accepted November 2, 2018

Published November 30, 2018

1. 서론

최근 도심의 인구 증가와 함께 육류 및 어패류의 구이 음식 소비율이 높아짐에 따라 비산업 연소 사업장인 음식점에서 배출되는 미세먼지가 도심 내 전체 미세먼지의 주요 배출원인 중 하나로 대두 되고 있다[1]. 비산업 연소 사업장에서 발생하는 미세먼지는 유적 및 유기성 에어로졸, 미연탄소분 등, 유해 대기오염 물질과 함께 직접적으로 건강에 유해를 가 할 수 있는 톨루엔, 포름알데히드, 벤젠 등도 배출되고 있다[2].

하지만 대부분의 비산업 연소 구이 음식점에서는 경제성 등의 이유로 미세먼지 집진 제거장치를 설치하지 않고 후드를 이용하여 단순히 유해물질을 배출하는 실정으로 비산업 연소 사업장 주변 미세먼지로 인한 생활형 공해가 심각한 수준이다[3]. 때문에 일부 지자체에서는 조례 등을 제정하여 미세먼지에 대한 음식점 규제를 준비[4]하고 있지만 실제 필요한 것은 기존 사업장 후드 시스템에 별도의 시공 공사비용 추가 없이, 단순 설치만으로 미세먼지 집진 제거가 가능한 설비에 대한 연구가 우선되어야 한다. 이는 소규모 음식점에 설치된 후드 시스템에 배관 등의 교체 없이 후드에서 배출되는 미세먼지를 수집 처리할 장치가 없어 지자체 조례 제정 시 영세 사업자의 피해가 발생할 것을 우려하는 것이고, 현재 공장, 공장형 빌딩 등의 옥상에 설치된 대규모 전기 집진 미세먼지 처리 장치는 규모와 설치 금액이 커서 비산업 연소 사업장에 적용이 힘든 실정이다.

이에 본 연구에서는 비산업 연소 사업장에서 배출되는 가스상 미세먼지와 휘발성 유기화합물을 동시에 집진할 수 있는 액체의 브라운 확산 운동을 이용한 가압수식 미세먼지 제거 장치를 고안하였고, 장치의 유량 압력 및 구조에 따른 최적 미세먼지 제거에 관한 고찰을 하였다.

2. 본론

2.1 브라운 운동 및 확산

입자상의 미세먼지는 입자의 종류에 따라 중력침강, 대전입자 이동, 브라운 운동과 관성 부착, 플라즈마 소각 등 많은 수집 제거 방식이 있다. 하지만 비산업 연소 사업장에서 발생하는 유해 물질은 입자상의 성분인PM2.5, 금속 입자, 분진 황산염, 질산염, 유기탄소 등과 가스상

유기화합물인 포름알데히드, 벤젠, 톨루엔 등으로 구성 되어 있어 입자상 미세먼지만 제거하여 배출 할 시 사업장 주변의 유기화합물 가스 농도를 줄일 수 없다. 때문에 입자상과 가스상 유해물질 제거가 가능한 브라운 불규칙 운동과 액체의 확산 집진을 이용한 가압수식 미세먼지 제거 시스템이 비산업 연소 사업장에 적합한 것으로 판단된다.

기체 속에 부유하고 있는 미세 입자들은 각각 브라운 운동을 하게 되고 입자들의 이런 불규칙한 유동이 물체나 유체의 주위를 지나면, 유동은 Fig. 1와 같이 기존 유동 선에서 이탈하여 물체나 유체에 부착되게 된다.

이와 같은 브라운 불규칙 운동의 특성은 크기가 작은 입자일수록 활발하게 나타남으로 미세먼지와 같은 작은 입자의 제거에 적용이 용이하다. 그리고 비산업 연소 구이 사업장에서 발생하는 오염물질인 미세먼지 물질은 브라운 확산을 이용한 제거가 용이한 가스상 물질과 입자상 물질로 구성된다. 정상적인 상태 하에서 작은 입자는 일반적으로 유동선에 따라 이동하지 않고 계속해서 입자로 부터 확산하다가 입자가 유체 표면에 일단 도달되면, 표면에 남게 되는데, 그것은 반데르발스 힘(Van der Waal's force)에 의함으로, 표면에서 입자의 농도는 0으로 가정할 수 있고 농도구배(concentration gradient)는 입자의 확산을 지속시키는 힘으로 작용한다.

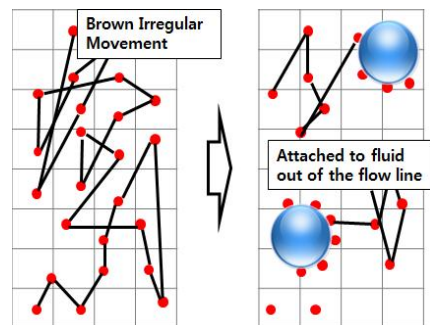


Fig. 1. Brown movement and diffusion capture

브라운 운동은 입자의 크기가 작을수록 증가하며, 이에 비례하여 확산에 의한 부착도 입자의 크기가 작을수록 증가하고, 이에 대한 현상은 Fig. 2와 같다[5].

확산에 의한 입자 포집은 무차원의 변수인 페클릿 수(Peclet number)로 정의가 가능하며 식(1)와 물질의 확산량은 농도의 기울기에 비례함을 정리한 식(2)를 통해 Fig. 2와 같이 0.1um 이하의 미세한 입자의 포집에 있어

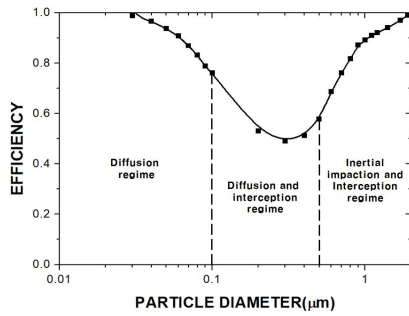


Fig. 2. Theory of Brown's motion

서는 브라운 확산 작용에 의한 부착이 지배적이며, 확산에 의한 입자의 부착속도는 입자의 확산계수에 비례하고, 이 계수는 입자경이 작을수록 커지며, 입자가 액체에 부착하는 양도 증가한다.

$$Pe = \frac{d_1 U}{D} \quad (1)$$

$$D = \frac{kTC_f}{3V_1^2 d_p} \quad (2)$$

Pe : 페클릿 수, d_1 : 포집 매체의 길이,
 U : 평균유속, D : 입자 확산 계수 값,
 k : 볼츠만 상수, T : 절대온도,
 C_f : 커닝햄 보정계수 V_1 : 공기 점도,
 d_p : 입자직경

그리고 이와 유사하게 포집 매체의 접촉 표면적과 길이가 증가 할수록, 점도와 유속은 낮을수록 미세 먼지의 부착 량은 많아지고, 집진 율은 높아지게 된다.

2.2 가압수식 분무 노즐의 원리

이상의 브라운 운동 특성을 구현하기 위하여 기체(공기)와 액체를 혼합하여 분사함으로써 기체의 압력이 분무입자의 미립화를 만들어 분무입경이 타 노즐에 비해 미세한 Fig 3와 같은 가압수식 이류체 분무 노즐이 특성 구현에 용이하다.

일반적인 수압식 노즐의 경우 분무압에 의한 분무량 조절에 따른 분무입자 크기가 변하므로 효율적인 집진효과를 얻기가 어렵고, 분무량은 유지 되며 분무 입자를 조절 가능하여 분무 범위내의 먼지에 효과적으로 세정 집진이 가능하기 위해서는 가압수식 분무 노즐의 적용이

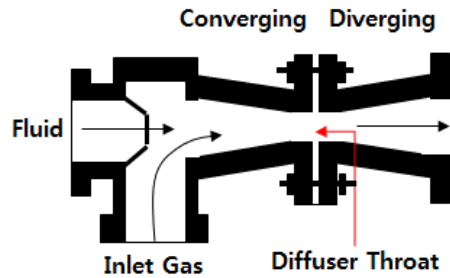


Fig. 3. Concept of pressurized injection nozzle

효과적이다. 가압수식 분무 노즐은 기체의 분무 압(Pa)과 액체의 분무압(Ps)의 다양한 조합을 통해 원하는 분무량과 분무 액체의 입경을 구현할 수 있어 미세먼지의 가스상과 입자상 제거가 가능한 집진 방법이다.

3. 연구방법

3.1 연구 장치의 구성

가압수식 분무노즐을 이용한 집진 방식의 효율을 확인하기 위하여 Fig. 4 (a),(b)와 같이 비산업 연소 구이 사업장에서 사용되는 후드와 같은 내경의 아크릴 관을 이용해 내부에 가압수식 분무노즐을 설치하였다.

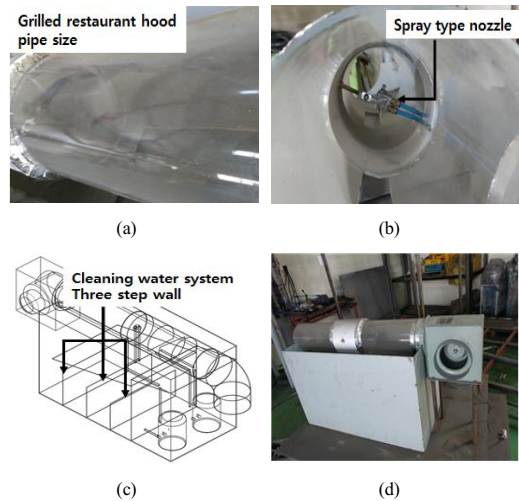


Fig. 4. Test equipment structure, (a) Pipe structure, (b) Nozzle installation structure, (c) Purification system structure, (d) Test equipment

미세먼지 포집을 위한 유속은 일반적인 구이 음식점 후드 유속 기준인, 표준 35 kW 급 모터를 적용하여 일정한 유속을 만들고 미스트 분사 방식의 이류체 분무노즐 적용을 통하여 브라운 운동의 확산에 중요한 인자인 공기의 유속을 저해하지 않는 범위에서 실험을 실시하였다. 즉 가압수식 분무 노즐에 의해 음식점 사업장 내부의 연기가 효과적으로 제거되지 못하면, 적용이 어렵기 때문에 내부 오염물의 흐름에 방해가 되지 않는 범위에서 효율을 판단하였다. 때문에 방재효과가 가장 우수하다는 가압수식 미세 분무 노즐에서 방출되는 물입자 중 99%의 누적 제적 분포가 400 μm 이하로 분무될 것을 정의한 에어 커튼 현상은 후드내 공기의 흐름을 방해하여, 에어 커튼이 발생하지 않기 위한 노즐인 미스트(Mist) 형태를 설치하였다.

액체를 사용하는 습식 집진 시스템은 물의 점성 유지와 배출 오염물의 관리가 필요하여 도금이나 습식표면처리 방식에서 사용하는 3단 물 정화 방식을 챔버 내에서 격벽의 사용으로 구성하였다[6]. 즉 미세먼지를 흡착한 액체를 정화 없이 사용할 경우 점도의 상승과 분무노즐 분사 홀에 문제를 야기할 수 있고, 사용하지 않고 배출하여도 오염물질을 그대로 배출할 경우 여러 가지 규제에 제약을 받을 수 있다. 때문에 Fig. 4(c)와 같이 각각 높이가 다른 3단 격벽을 이용하여 중력 침강을 이용한 수질을 관리하고 최소한의 물 사용으로 시스템을 구동하였다. 이상과 같은 설계를 주안으로 시스템을 Fig. 4(d)와 같이 구성하였다.

3.2 실험 방법

실험은 장치를 설치한 밀실 공간에서 후드를 사용하여 비산업 연소 사업장에서 배출되는 미세먼지와 유기 화합물을 제거 장치로 직접 분사한 후, 흡입구, 배출구에서의 오염물 변화 농도를 측정하였다. 각 오염물질의 시험 기준은 입자상 미세먼지 KS I ISO 12141-1 실내 공기 중 미세먼지(PM10) 측정방법(중량법), 휘발성 유기 화합물은 KS I ISO 16000-11 휘발성 유기화합물의 방출 측정법을 기준으로 하였다. 시험은 여과지를 이용한 중량 측정과 Mass flow meter를 이용한 이동 입자의 농도 분석을 함께 진행 하였고 실험에 사용된 측정 설비는 KEMIK / KMF-20 입자 유동 측정기와, AND / GF-400 정밀 전자저울, QUEST / QUESTEMP 15 디지털 농도 분석기, 그리고 여과지가 사용 되었다.

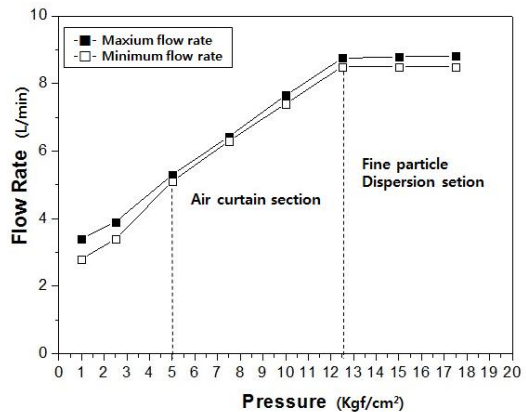


Fig. 5. Flow rate according to spray pressure

4. 결과 및 고찰

Fig. 5에 제작된 미세먼지 제거 시스템에서 가압수식 미스트 노즐의 분사 성능을 확인하기 위해서 미세먼지 배출구와 노즐의 각도를 90°로 고정된 후 노즐 가압 분사 압력을 조정하여 한계 유량의 측정 결과를 나타내었다.

Fig. 5의 결과로부터 가압수식 미스트 노즐은 2 kgf/cm² 이하의 압력에서는 미세 입자 분사가 어려우며, 압력 증가에 따른 유량 증가도 없음을 확인하였다. 그리고 12 kgf/cm² 이상의 압력에서도 유량의 증가 없이 미세 분무 입자의 분산만 커져 에어커튼의 형성이 용이하지 않아 미세먼지 제거에 적합하지 않음을 확인할 수 있다. 때문에 최적 미세먼지 제거 효율을 확인하기 위해서는 압력 증가에 따른 유량 증가와 분사 면적 증가가 일정한 2.5 kgf/cm² ~ 12.5 kgf/cm²까지의 압력에서 실험 진행이 필요함을 확인하였다.

가압수식 분무 노즐은 미립화된 입자크기에 따라 등급을 구분할 수 있으며, 파이프 배관 내의 영향을 고려할 때 미세먼지 제거 효율은 등급 1급, 입자크기 200 μm 내외인 경우 매연, 미스트, 스모그의 입자상을 제거하기 용이 하며, 입자크기가 400 μm 내외인 경우 분진, 에어로졸, 먼지 등의 입자상을 제거하기 용이한 것으로 판단 할 수 있다[7]. 이와 같이 선행 기술연구로 미스트 미세분무 노즐에서 분사된 액체의 미립화된 입자 크기에 따른 최대 분사 면적을 확인하였고 1개의 미스트 미세분무 노즐로 제거 가능 미세먼지 제거 농도는 Fig. 6과 Table 1.와 같다.

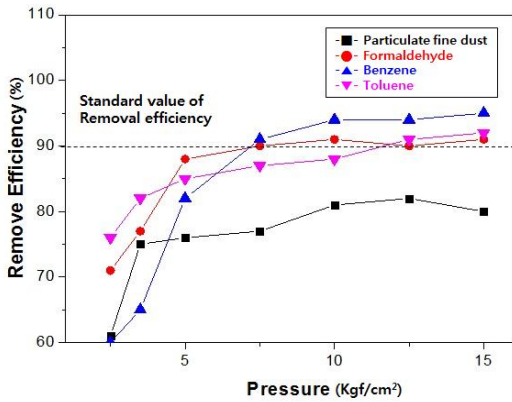


Fig. 6. Removal efficiency according to injection pressure by applying 1 mist nozzle

Table 1. Removal efficiency according to injection pressure by applying 1 mist nozzle

| 1 Nozzle pressure | Removal efficiency (%) | | | |
|-------------------------|------------------------|--------------|---------|---------|
| | fine dust | formaldehyde | benzene | toluene |
| 2.5kgf/cm ² | 61.3 | 70.2 | 60.5 | 76.1 |
| 3kgf/cm ² | 75.1 | 77.2 | 65.2 | 82.5 |
| 5kgf/cm ² | 75.2 | 88.6 | 82 | 85.1 |
| 7.5kgf/cm ² | 75.4 | 90.1 | 90.5 | 86.9 |
| 10kgf/cm ² | 80.2 | 90.9 | 94.4 | 88.1 |
| 12.5kgf/cm ² | 82 | 90.2 | 94 | 91.2 |
| 15kgf/cm ² | 80.6 | 91 | 95 | 92 |

Fig. 6의 결과로부터 입자상의 미세먼지 제거 효율은 최대 82%로, 가압수식 미스트 노즐 1개에 12.5 kgf/cm²의 압력을 가했을 때 입구 498 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 배출구 80.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 입자상 미세먼지가 감소했다. 하지만 입자상 미세먼지를 제거하는 일반적인 집진 설비의 효율이 90% 이상인 것을 감안할 때, 한 개의 가압수식 미스트 노즐을 적용한 집진 시스템은 성능에 미치지 못하였다[8].

반면 고기구가 시 발생하는 가스상 유해 물질인 포름알데히드, 벤젠, 톨루엔은 각각 제거 효율이 91%, 95%, 92%로 미스트형 노즐 한 개를 사용한 가압수식 미세먼지 제거 방법이 성능을 만족하였다. 각 유해물질의 제거량은 Fig. 7와 같다.

비산업 연소 사업장에서 발생하는 입자상 미세먼지에 대한 제거율을 상승시키기 위하여 제거장치 내의 가압수식 미스트 분무노즐을 추가하여 유해물질의 제거 효율을 측정할 결과를 Fig. 8과 Table 2.에 나타내었다.

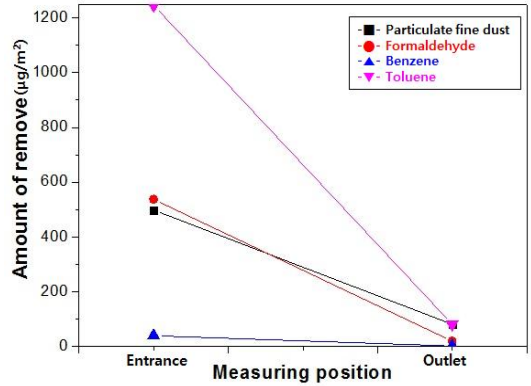


Fig. 7. Removal amount of fine dust and harmful gas

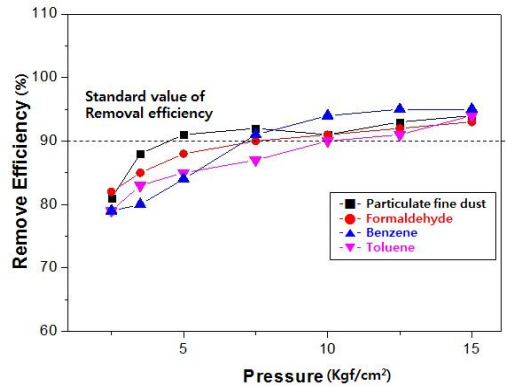


Fig. 8. Removal efficiency according to injection pressure by applying 2 mist nozzle

Table 2. Removal efficiency according to injection pressure by applying 2 mist nozzle

| 2 Nozzle pressure | Removal efficiency (%) | | | |
|-------------------------|------------------------|--------------|---------|---------|
| | fine dust | formaldehyde | benzene | toluene |
| 2.5kgf/cm ² | 81.1 | 83.1 | 78.2 | 78.4 |
| 3kgf/cm ² | 88.8 | 85.2 | 79.5 | 83.9 |
| 5kgf/cm ² | 91.2 | 88.7 | 84.4 | 85.2 |
| 7.5kgf/cm ² | 92.1 | 90.1 | 91.2 | 86.8 |
| 10kgf/cm ² | 91.2 | 90.9 | 94.1 | 89.9 |
| 12.5kgf/cm ² | 92.9 | 92 | 94.6 | 90.6 |
| 15kgf/cm ² | 94 | 93 | 94.5 | 94 |

Fig. 8의 결과로부터 미세먼지 제거 효율은 최대 94%까지 상승하였고 가압수식 노즐의 압력이 5 kgf/cm² 이상 영역에서는 제거 효율의 상승 없이 일정한 제거율이

유지되었다. 그리고 가스상 유해물질의 경우 노즐의 추
가로 인하여 낮은 압력에서의 제거 효율은 상승하였지만
높은 수압에서의 제거효율은 상승이 없는 것으로 확인되
었다.

Fig. 9는 한 개의 분무노즐을 사용하여 동일한 분사
압력에서 배출 유해물질과 노즐의 각도에 따른 미세먼지
제거 효율을 나타내었다.

Fig. 9의 결과는 배출 유해물질과 분사노즐의 각도에
따라 미세먼지의 통과 면적이 결정되며 Fig. 10와 같이
노즐의 분사 유체가 파이프의 단면을 막을 수 있는 범위
까지의 각도에서 미세먼지 제거 효율을 측정하였다. 실
험 가압수식 노즐의 각도는 노즐의 압력에 따라 효율의
변화가 달랐으며 높은 노즐 압력인 12.5 kgf/cm²에서는
노즐의 각도를 13~15도로 유지한 결과 가장 높은 미세
먼지 제거 효율을 보였고, 반면 낮은 압력인 2.5 kgf/cm²
에서는 노즐 각도 5도 까지 미세먼지 제거 효율이 증가
하다가 10도 이상 기울기에서 급격히 감소하였다.

실험의 결과로 가압수식 노즐의 각도와 압력에 미세
먼지 제거 효율 최적화가 가능하며, 노즐의 높은 압력과
15도 정도의 분사 기울기에서 제거 특성을 만족한다.

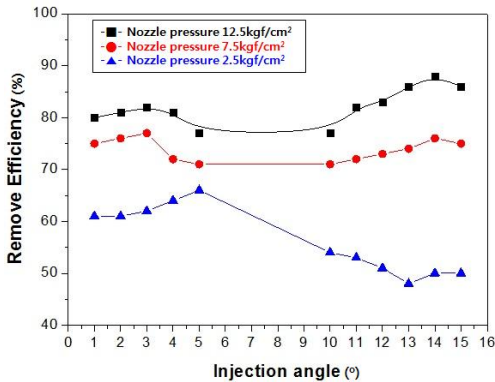


Fig. 9. Removal efficiency according to injection angle

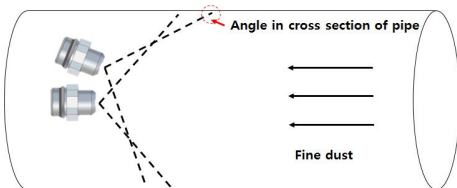


Fig. 10. Determination of injection angle

5. 결론

본 연구에서는 가압수식 분무 노즐을 이용하여, 비산
업 연소 사업장인 요식 사업장에서 발생하는 생활형 미
세먼지에 대한 효과적인 제거 방법을 연구하였다. 요식
사업장에서 발생하는 가스상과 입자상 오염물에 대한 제
거 방법으로 입자의 브라운 운동을 기반으로 가압 미세
회된 액체의 미세먼지 집진효율 실험을 통해 다음과 같
은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 미스트형 가압수식 분무노즐을 활용하여 실험
한 결과 분무량과 분무압의 조정에 따라 미세먼지 제거
시스템의 제거효율이 상승하였다. 즉 노즐의 분사 압력
에 따라 전반적으로 미세먼지 제거 효율이 증가 하였고,
분사 노즐의 개수도 제거효율에 영향을 미쳤다. 이는 브
라운 운동 원리 중, 입자의 미세화 정도와 입자의 개수가
증가할수록 브라운 비선형 운동 물체의 확산 집진이 높
아지기 때문이다. 이에 가압 액체가 이류체 분무 노즐에
의해 미립화되어 일정한 분무량에 미세먼지와와의 접촉 면
적을 최대로 할 수 있는 특성을 만족한다.

둘째, 파이프 단면적에 따른 분사 노즐의 각도는 미세
먼지의 통과 거리를 길게 하여 확산 접합이 잘 일어나는
환경을 구성한다. 하지만 일정 수압 이하에서 제거 효율
은 각도에 따라 오히려 감소하며 이는 낮은 압력에 의해
미립 정도가 부족한 상태에서 넓어진 단면적 범위에 에
어커튼을 만들 수 없는 조건에 의한 것이다. 이와 같은
압력에서 기인하는 문제를 해결하기 위해 가압수식 노즐
의 설치를 증가시켰을 때 입자상과 가스상 미세먼지를
제거하는 최대의 효율이 구현 가능했다.

이상의 연구를 통해 비산업 연소 사업장에서 발생하
는 입자상과 가스상의 미세먼지와 유해 물질을 기존 후
드 시스템에 장착하여 제거하기 위한 가압수식 미세먼지
제거 장치 대하여 고찰하였다. 그리고 제거효율 향상시
키기 위한 노즐의 조건과 브라운 비선형 운동과 확산 범
칙의 활용을 통해 가압수식 미세먼지 제거장치의 최적
성능도 구현할 수 있었다.

References

[1] S. K. Park, S. J. Choi, J. Y. Kim, U. H. Hwang
“Collection Characteristic of Particulate Matters from
Biomass Burning by control Device: Mainly Commercial
Meat Cooking,” Asian Journal of Atmospheric

Environment, Vol. 27, No. 6, pp 641-649, 2011.

- [2] C. K. Bong, S. J. Park, S. K. Park, J. H. Kim, Y. H. Hwang, "The Study on the Emission Characteristics of Particulate Matters from Meat Cooking", Journal of Korea Society Environmental Engineers, Vol. 33, No. 3, pp. 196-201, 2011.
- [3] J. B. Lee, H. J. Kim, K. Jung, S. D. Kim, "Emission Characteristics of Particulate Matters from Under-fired Charbroiling Cooking Process using the Hood Method", Journal of Environmental Health Sciences, Vol. 35, No. 4, pp. 315-321, 2009.
- [4] D. Y. Kim, B. M. Yoon, M. A. Choi, Proposal for Ordinance of Atmospheric Environment Management in Gyeonggi-Do, pp. 3-114, Gyeonggi Research Institute, 2017.
- [5] K. W. Lee, "Principles of Particle Filtration by Fibrous Filters", The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 26, No. 1, pp. 1-7 1997.
- [6] B. S. Han, H. K. Chang, "A Study on the Cleaning of AISI 304 Stainless Steel Surface for Gold Plating", Journal of the Korean Institute of Surface Engineering, Vol. 28, No. 1, pp. 23-33. 1995.
- [7] S. B. Oh, C. Kim, C. G. Yoon, Development of water mist nozzles for tunnel protection, pp. 1-199, GS HI-TEC Co.,LTD., 2014.
- [8] S. H. Woo, J. B. Kim, H. R. Jang, S. B. Kwon, S. J. Yook, G. N. Bae, "Performance Evaluation of a Hybrid Dust Collector for Removal of Airborne Dust in Urban Railway Tunnels", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 20, No. 4, pp. 433-439, 2017.

윤 재 서(Jae-Seo Youn)

[준회원]



- 2018년 2월 : 동명대학교 경영학과 (학사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 기술경영전문대학원 (석사과정)

<관심분야>

환경/에너지, 기술경영/공학

김 상 민(Sang-Min Kim)

[정회원]



- 2004년 2월 : 동서대학교 산업공학과 (학사)
- 2016년 9월 ~ 현재 : 부경대학교 금속공학과 (석사과정)

<관심분야>

환경, 금속/소재

이 예 지(Ye-Ji Lee)

[준회원]



- 2018년 2월 : 동명대학교 향만물류시스템학과 (학사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 부경대학교 기술경영전문대학원 (석사과정)

<관심분야>

환경/에너지, 기술경영/공학

노 성 여(Seong-Yeo Noh)

[중신회원]



- 2014년 1월 ~ 현재 : 동명대학교 향만물류시스템학과 교수

<관심분야>

환경/에너지, 기술경영/공학