

지하철 공기청정을 위한 2유체노즐형 자동세정 공기청정 시스템 개발에 관한 연구

Performance Evaluation of Automatic Self-Cleaning Filter System using Twin-Fluid Nozzles for Air Cleaning in the Subway Stations

안영철*, 이재근**
Y. C. Ahn*, J. K. Lee**

ABSTRACT

The removal of the dusts in the subway stations, tunnels, factories and buildings becomes issue for comfortable indoor and outdoor conditions. There has been used an automatic self-cleaning filter system to collect the dusts. In general, the collected particles are removed by water spray nozzles. The new design for improving the cleaning efficiency of collected dusts and reducing the supplied water is the concept of the plane array of demister filters and the twin-fluid nozzle for mixing compressed air and water in the automatic self-cleaning filter system. Results show that the cleaning efficiency of twin-nozzle filter systems is 99.1%, compared to 47% in the conventional filter system. Therefore the automatic self-cleaning filter system using twin-fluid nozzle filter systems reduces water supplied in the filter system, and increases cleaning efficiency and drying efficiency.

주요기술용어: Twin fluid nozzle(2유체 노즐), Automatic self cleaning(자동세정), Resuspension(재비산), Air conditioning(공기조화), Pressure drop(압력손실)

1. 서론

지하생활공간은 지상생활공간에 비해 외부 공기와의 순환이 어렵고 또한 밀폐되어 있다는 환경적 제약 때문에 공기오염에 대해 한층 더 심각한 문제점을 지니고 있다. 그렇기 때문에 지상공간에 비하여 훨씬 엄격한 조건 하에서의 실내공기질 관리가 요구되고 있다. 하지만 지하공간은 한정된 공간에서 장시간 생활하는 재실자를 비롯하여 고객, 보행자등 불특정 다수가 이용하며, 용도가 다양하기 때문

에 실내의 환경을 효과적으로 관리하는 것은 그다지 간단한 일은 아니다. 특히 대부분의 지하공간용 환기를 위한 덕트시설이 도심지의 도로와 접하게 설치되어 있으므로 자동차 매연이나 먼지 등에 쉽게 노출되어 있다. 그래서 지하철이나 지하상가 등의 공조용 환기시설에는 이러한 먼지들을 포집하여 깨끗한 공기만을 공급하기 위한 필터 설비들이 장착되어 있으며, 이러한 필터 설비들은 분진의 포집과 세정에 의한 재생공정이 자동으로 주기적으로 반복되도록 설계되어 있다.

그러나 기존에 설치되어 사용되고 있는 "자동 세정재생형 공기청정장치"는 액체용 분무노즐을 설치하여 세정 재생을 수행하기 때문에

* 부산대학교 기계기술연구소

** 부산대학교 기계공학부

필터에 대한 투과력이 낮아 세정효과가 크지 않으며 잔류 액적들이 장시간 필터 미디어 내부에 체류하기 때문에 겨울철 동결현상으로 인한 여과효율 저하와 압력손실의 증가는 물론 심할 경우 필터의 파손까지 초래하고 있다. 그 결과로 지하공간의 오염 및 재실자의 건강에 대한 위협 등의 문제들이 야기되므로 이에 대한 대책이 시급한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 2유체 노즐을 이용한 필터의 자동 세정재성장치를 개발하여 필터의 세정효율을 증대시키고 잔류액적의 체류를 최소화하여 동결에 의한 문제를 방지함은 물론 분진 포집효율의 증대를 통한 지하공기질의 향상 방안에 대한 연구를 수행하였다

2. 실험장치 및 실험방법

2.1 2유체 노즐

Fig. 1은 본 연구에서 사용한 2유체 노즐의 구조를 나타낸 것으로 몸체(Body)와 머리(Head)부로 구성되어 있다. 2유체 노즐은 압축공기와 물이 노즐에 유입되면 몸체부에서 혼합되어 머리부의 팁(Tip)을 통해 대기중으로 분무되면서 작동한다. 2유체 노즐은 압축공기와 물의 사용압력과 유량에 따라 분무형상과 분무입자의 크기가 결정되며 특히, 머리부의 팁 형상에 따라 원형, 타원형, 고리형 등의 분포 형상을 나타낸다.^(1,2,3)

본 실험에서는 노즐에서의 분무 형상에 대한 분석과 분무 유량의 균일성에 대한 분석을 수행하여 필터의 세정에 가장 적합한 운전조건을 도출하였다. 노즐에서의 분무 형상은 사진 촬영을 통하여 분사 각도 및 형상에 대해 분석하였으며 분무 유량분포의 측정은 Fig. 2와 같은 아크릴 챔버를 제작하여 각각의 구간에 포집되는 분무 유량을 측정하여 분석하였다. 일정 조건 하에서 노즐에 의해 분사되는 물의 양을 측정하기 위하여 25 × 720 × 300 mm의 크기를 가지는 썰을 나란히 설치하였으며, 각 썰에 포집되는 물의 높이를 측정함으로써 노즐 팁의 중심으로부터 분사되는 형태에 대한 분석과 단위 시간당 분사량을 분석하였다.

2.2 2유체 노즐을 이용한 자동세정 공기청정 장치

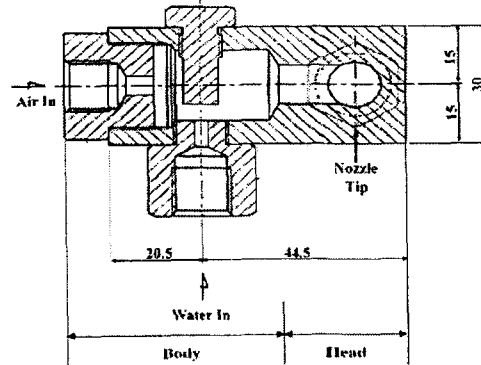


Fig. 1 Drawing of the twin-fluid nozzle.

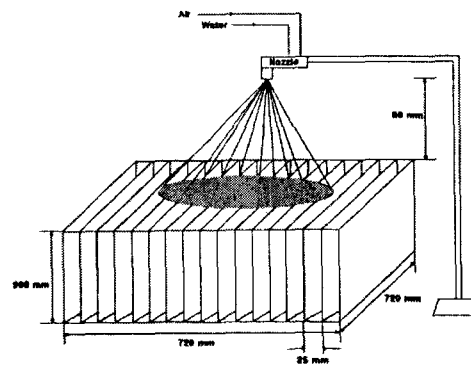


Fig. 2 Schematic diagram for measuring water distribution sprayed in the twin-fluid nozzle.

Fig. 3에는 본 연구에서 사용된 2유체 노즐을 이용한 자동세정 공기청정 장치의 개략도를 나타내었다. 공기 유입부와 유출부는 610 mm × 610 mm로 제작되어 일반 공조용 덕트에 적용이 가능하도록 제작되었으며 500 mm × 500 mm의 스테인레스 재질의 필터가 수평방향으로 2개 장착되어 있다. 필터의 하류부분에는 2유체 노즐이 설치되어있으며, 좌우로 이동하면서 물과 압축공기를 이용하여 필터를 세정하고, 세정후 필터 내부에 잔류하는 액적을 제거하기 위해 압축공기를 분사하여 수분을 제거하는 건조공정을 거치게 된다.

본 연구에서는 ASHRAE 52.1⁽⁴⁾에 의해 제작된 풍동에 상기의 실험장치를 설치하여 실험을 수행하였다. 필터의 포집 효율 및 세정, 건조 특성을 파악하기 위해 ASHRAE 표준분진을 사용하였으며, 특히 지하철에 적용할 경

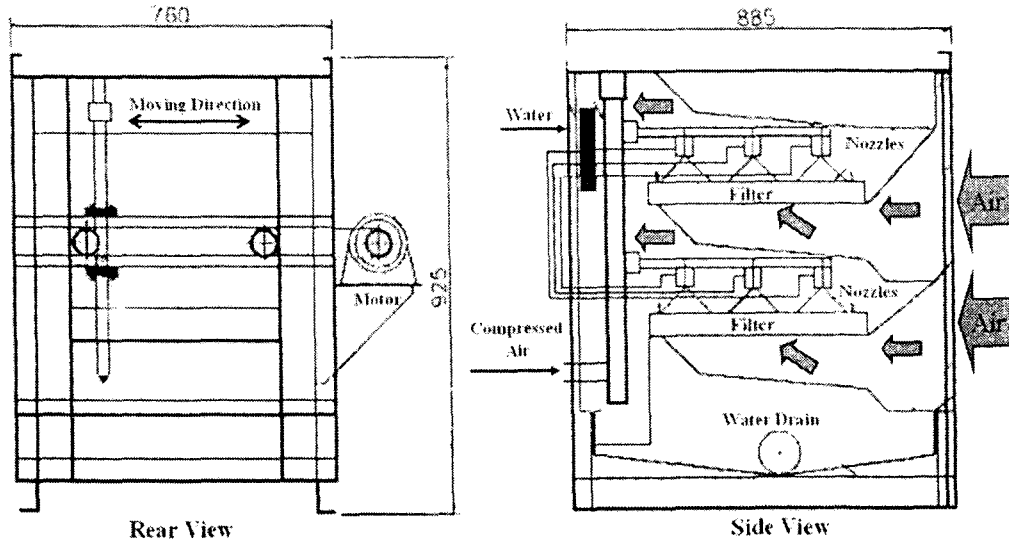


Fig. 3 Schematic diagram of the automatic self-cleaning filter system using twin-fluid nozzles.

우에는 전철의 통과시 환기구를 통해 역류가 발생하므로 필터에 포집된 분진의 재비산에 대한 우려가 있으므로 역류 재비산에 대한 특성도 함께 분석하였다. 필터에 분진을 포집시킨 뒤 세정과 건조를 반복하면서 장치의 특성을 분석하였으며 최적의 노즐 운전조건을 도출하였다. 그 결과를 바탕으로 장치의 최적화 설계를 수행하여 부산의 지하철 역사 한 곳에 적용, 실공간 성능에 대한 평가를 수행하였으며 기존에 설치되어 사용되고 있는 장치의 성능과 비교 평가를 수행하였다.

각각의 특성 평가를 위한 지표는 아래와 같이 정의한다.

(1) 분진포집효율 (%)

$$= \frac{\text{필터에 포집된 분진의 무게}(g)}{\text{총 공급된 분진의 무게}(g)} \times 100$$

(2) 세정효율 (%)

$$= \left\{ 1 - \frac{\text{필터 세정후 잔류 분진의 무게}(g)}{\text{필터에 포집된 분진의 무게}(g)} \right\} \times 100$$

(3) 건조효율 (%)

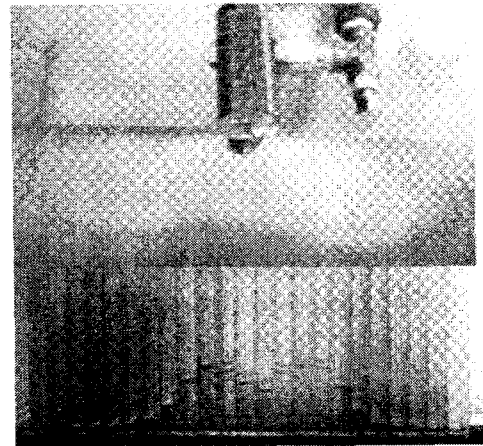


Fig. 4 Photograph of the water distribution sprayed in the twin-fluid nozzle.

$$= \left\{ 1 - \frac{\text{필터 건조후 잔류 액적의 무게}(g)}{\text{필터 세정후 잔류 액적의 무게}(g)} \right\} \times 100$$

(4) 역류 재비산율 (%)

$$= \left\{ 1 - \frac{\text{역류 통과후 필터에 잔류하는 분진의 무게}(g)}{\text{필터에 포집된 분진의 무게}(g)} \right\} \times 100$$

Table 1 Experimental results of twin-fluid nozzle filter systems in the laboratory test

Parameters	Results
Initial Pressure Drop (mmAq)	2.3
Resuspension by Reverse Flow (%)	0.3
Cleaning Efficiency (%)	99.1
Drying Efficiency (%)	95.5
Dust Collection Efficiency (%)	92.5

3. 실험결과 및 분석

3.1 2유체 노즐 특성 분석

2유체 노즐의 분무특성을 파악하기 위해 물의 압력은 1 ~ 4 kgf/cm²의 범위에서, 압축공기는 2 ~ 3 kgf/cm²의 범위에서 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 유량 분포 측정은 2유체 노즐에서 물과 공기를 30초 동안 분사하여 노즐 아래에 위치한 Fig. 2의 유량분포 측정 장치에 담겨져 있는 물의 양을 측정하여 분포를 구하였다. Fig. 4에는 노즐에서 분사되는 액적의 모습과 분포상태의 사진을 나타내었으며 Fig. 5에는 2유체 노즐에서 압축공기와 물의 여러 가지 조건에 따른 분무 특성을 나타내었다. 최적 분무특성의 선정은 최소한의 물을 사용해서 최대한 균일한 액적의 분포가 나타나는 조건을 택하였으며 본 연구에 사용된 노즐에서는 (a)조건과 같이 압축공기의 유량이 14 Nm³/hr, 압력이 2 kgf/cm²이고 물의 유량이 5 l/min, 압력이 1.2 kgf/cm²일 때 가장 적합한 특성을 나타내었다.

3.2 2유체 노즐을 이용한 자동세정 공기청정장치 특성분석

2유체 노즐을 이용한 자동세정 공기청정장치의 성능평가를 위해 실험실에서 최적 조건

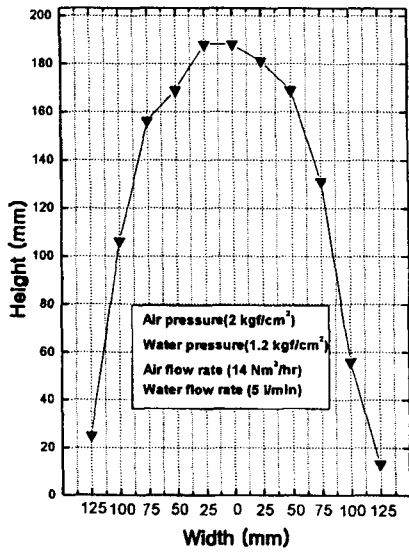
Table 2. Experimental results of twin-fluid nozzle filter systems installed in Busan subway station

Parameters	Automatic Self-Cleaning Filter System using Twin-Fluid Nozzles	Conventional Automatic Self-Cleaning Filter System in Single-Fluid Nozzles
Initial Pressure Drop (mmAq)	2.2	3.8
Resuspension by Reverse Flow (%)	0.3	0.8
Cleaning Efficiency (%)	97	47
Drying Efficiency (%)	93	-
Dust Collection Efficiency (%) (PM10)	85.8	57.4

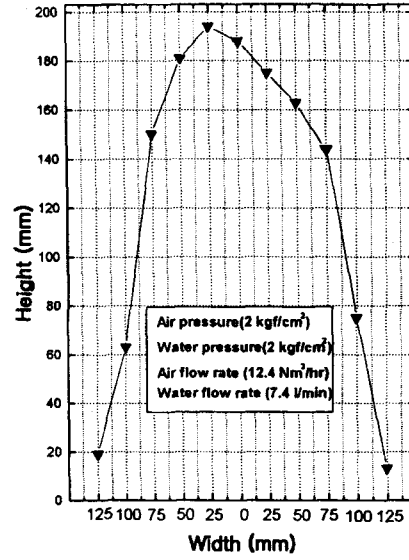
을 도출한 후 부산의 지하철 역사 한 곳에서 실공간 적용실험을 수행하였다.

Table 1에는 실험실에서 수행된 2유체 노즐을 이용한 자동세정 공기청정장치의 특성 분석 결과를 요약하여 나타내었다. 필터를 지나 는 여과속도를 1.25 m/s로 고정하였을 경우, 이 때의 초기 압력손실을 측정된 결과 2.3 mmAq로 측정되었으며, 분진 포집효율은 92.5%를 나타내었다. 세정효율은 세정 노즐이 필터를 3회 이동하면서 필터를 세정한 후 필터에 잔류하는 분진의 무게를 측정하여 분석하였으며, 99.1%로 매우 높게 측정되었다. 필터의 세정후 잔류 액적에 대한 건조 효율도 노즐이 3회 이동하며 건조한 뒤의 결과를 측정하였으며, 95.5%의 효율을 나타내었다.

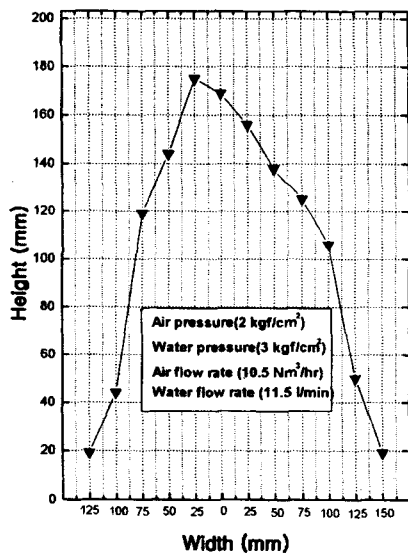
Table 2에는 2유체 노즐을 이용한 자동세정 공기청정장치의 실공간 평가 결과를 나타내었다. 기존의 자동세정 공기청정장치는 물만을 사용하는 1유체 노즐을 이용한 세정방식이며, 하루에 1회의 주기로 세정공정이 반복된다. 본 연구에서는 실공간에 설치되어 사용되고 있는 동일 사양의 필터를 이용하여 성능평가를 수행하였으며, 기존 장치의 여과속도가 1



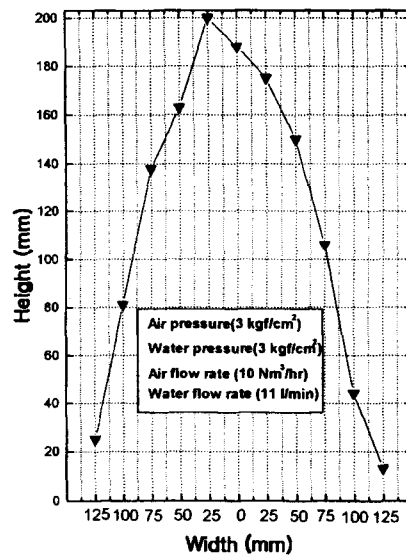
(a) Air pressure : 2 kgf/cm²
Water pressure : 1.2 kgf/cm²



(b) Air pressure : 2 kgf/cm²
Water pressure : 2 kgf/cm²

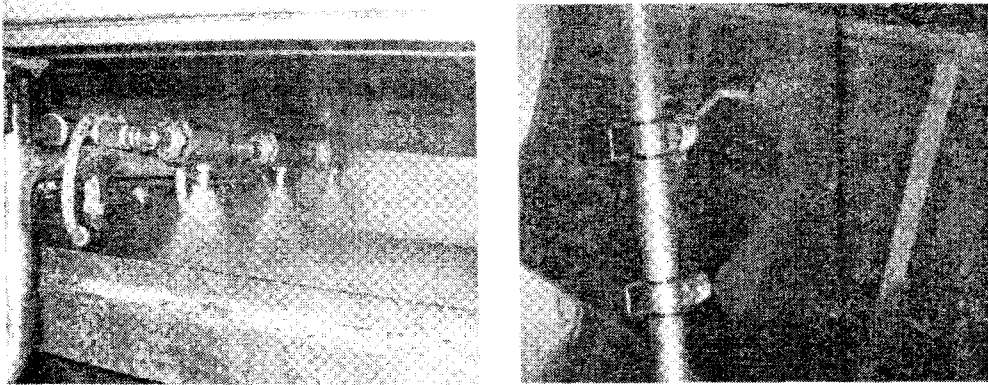


(c) Air pressure : 2 kgf/cm²
Water pressure : 3 kgf/cm²



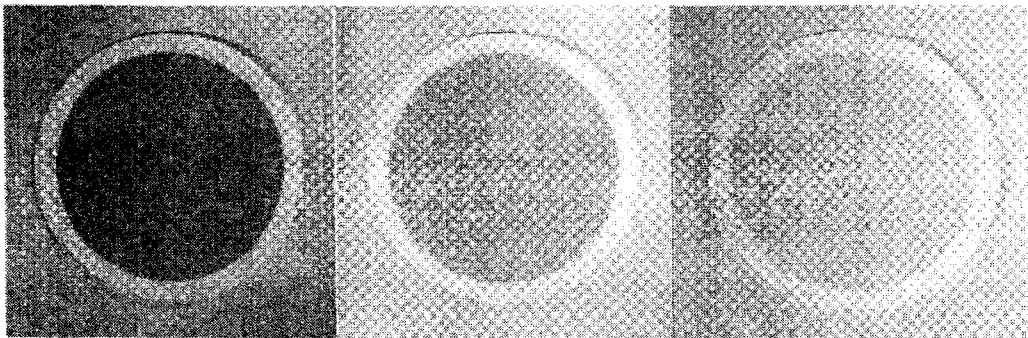
(d) Air pressure : 3 kgf/cm²
Water pressure : 3 kgf/cm²

Fig. 5 Water distributions sprayed in the twin-fluid nozzle.



(a) Automatic Self-Cleaning Filter System using Twin-Fluid Nozzles (b) Conventional Automatic Self-Cleaning Filter System in Single-Fluid Nozzles

Fig. 6 Photographs for the comparison of water spraying characteristics between the twin and the single fluid nozzles.



(a) Upstream Air (b) Downstream of Conventional Filter System (c) Downstream of Twin-Fluid Nozzle Filter System

Fig. 7 Photographs of dusts collected the PM10 sampling filters.

m/s로 설정되어 있기 때문에 실공간 성능평가는 동일한 유속 하에서 실험을 수행하였다. 전체적인 실험결과는 2유체 노즐을 이용한 시스템이 기존의 시스템에 비하여 분진 포집능력 및 세정효율 면에서 매우 우수한 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. Fig. 6에는 2유체 노즐을 이용한 필터의 세정 모습과 기존의 장치에서 1유체 노즐을 이용하여 세정하는 모습을 비교하여 나타내었는데 2유체 노즐에서 분사되는 액적이 훨씬 미세하게 분사되며 압축공기와 함께 강력하게 필터를 관통하여 훨씬 효과적으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 그러나 세정효율과 건조효율은 실험실에서

수행된 결과에 비해 다소 낮게 측정되었는데, 이는 실공간에서의 실험이기 때문에 지하철역사내의 환기를 위해 지속적으로 공기가 유입되는 상황이어서 강한 바람에 의해 계측기가 안정된 값을 나타내지 못했기 때문에 다소 낮게 나타났다. 실공간 평가에서의 분진 포집효율은 지하공기질 공정 시험방법(환경부 고시 제2000-139호)을 기준으로 측정하였는데, 이 방법에서는 TSP(Total Suspended Particle)의 개념으로 효율을 평가하지 않고 10 μ m 이하의 입자상 물질(Particulate Matter)에 대한 포집효율을 나타내는 PM10을 기준으로 나타내고 있기 때문에 TSP를 기준으로 하여 측정된 실

협실에서의 분진 포집효율에 비해 다소 낮게 나타났다.

Fig. 7에는 지하공간에서의 PM10 포집 필터의 사진과 기존의 자동세정 공기청정장치 후단에서의 PM10 포집상태, 그리고 2유체 노즐을 이용한 자동세정 공기청정장치 후단에서의 PM10 포집상태를 각각 나타내었다. Table 2의 분진 포집효율 결과에서 알 수 있듯이 2유체 노즐을 이용한 자동세정 공기청정장치의 분진 포집효율이 우수하여 필터 후단에서의 분진 농도가 낮아 기존의 장치에 비하여 비교적 깨끗한 상태를 유지하고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존에 지하공간의 공기청정을 위해 설치되어 있는 자동세정 공기청정장치의 단점을 보완하고자 2유체 노즐을 이용한 자동세정 공기청정장치를 개발하였으며 실제 지하공간에 적용하여 성능평가를 수행함으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 기존의 자동세정 공기청정장치에서는 물분사 노즐만을 사용하여 필터를 세정 재생하기 때문에 세정효율이 47%로 매우 낮게 측정되었으며, 이로 인해 필터의 눈막힘 현상을 초래하여 분진 포집효율이 57.4%로 매우 낮게 측정되었다.

(2) 2유체 노즐을 이용한 자동세정 공기청정장치의 성능평가 결과 압축공기가 수분과 함께 필터 미디어를 관통하면서 부착된 분진을 효과적으로 제거함으로써 99.1%의 높은 세정효율을 나타내었으며, 압축공기의 분사를 통한 잔류액적의 제거율을 나타내는 건조효율도 95.5%로 나타나 겨울철 동결문제에 효과적으로 대처할 수 있을 것으로 판단된다.

(3) 2유체 노즐을 이용한 자동세정 공기청정장치에 대한 실제 지하공간에서의 현장적용평가 결과 97%의 세정효율과 93%의 건조효율

을 나타냄으로써 기존 시설에 비해 월등히 우수한 성능을 나타냄을 확인하였다.

후기

이 논문은 중소기업청 기술연구회 사업과 2004년 부산대학교 Post-Doc. 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. A. H. Lefebvre, *Atomization and Sprays*, Taylor & Francis, Inc., 1989
2. E. J. Crosby, "Atomization Considerations in Spray Processing," Proc. 1st International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLA-78), pp. 265-272, 1978
3. J. D. Jung, "An Analysis Results of Agricultural Ultrasonic Twin-fluid Nozzle", *Journal of ILASS-Korea* Vol. 8, No. 3, 2003, pp. 1-9
4. ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 52.1-1992, *Gravimetric and Dust-Spot Procedures for Testing Air-Cleaning Devices Used in General Ventilation for Removing Particulate Matter*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc, 1992