

카트리지 필터 여과집진기 충격기류시스템의 최적탈진조건에 관한 실험적 연구

박승욱^{1*} · 하현철¹ · 김성준²

¹(주)벤티텍, ²(주)도널드슨

Experimental Study on Optimum Pulse Jet Cleaning Conditions of a Cartridge Filter System

Cheng Xu Piao^{*} · Hyun Chul Ha¹ · Sung Joon Kim²

¹Ventech Corp, ²Donaldson Corp

ABSTRACT

Objectives: Many types of dust collector are used for industrial ventilation, with the most common types being the cylinder bag filter system, rectangular bag filter system and cylinder type cartridge filter system. The cylinder type cartridge bag filter, which has more filtering area than other types of bag filter, can increase the pulse time and extend the useful life of the filter. This can save operational costs and installation area.

Materials: This study used cylinder type cartridge bag filter equipment and tested the impact of vibration level and filter pressure with different pulse jet cleaning conditions. The final, cleaning efficiency was calculated through input dust mass and cleaning dust mass.

Conclusions: Two optimum cleaning condition groups were found. The first condition group was 3 kgf/cm² pulse pressure, 15 cm pulse distance, 0.2 s pulse time with an H-10 type nozzle. The second condition group was 3 kgf/cm² pulse pressure, 15 cm pulse distance, 0.3 s pulse time with an H-10 type nozzle.

Key words: cartridge filter, pulse pressure, pulse distance, pulse time, nozzle type, vibration level

I. 서 론

입자상 오염물질의 처리방식은 매우 다양하며 중력 집진, 관성집진, 원심력집진, 여과집진, 세정집진, 전기집진 그리고 상술한 집진방식을 조합한 하이브리드 방식들이 있다. 그중에서 여과집진 방식은 입자상 오염물질의 포집성능이 안정적이고 사용시간이 길며 유지비용이 저렴한 등 특성을 보유하고 있어 현재 산업체에서 제일 많이 사용하고 있는 집진기 형태이다. 여과집진기의 성능복구를 위한 탈진방식은 진동식

(shaking), 역기류식(reverse air), 역류제트식(reverse jet), 충격기류식(Pulse air jet) 등이 있는데 그 중에서 제일 많이 사용하는 방식은 연속탈진이 가능하고 탈진효율이 우수한 충격기류 방식이다. 여과집진기의 형태 및 탈진방식을 선정할 때에는 제일먼저 대상오염원의 기본특성 즉 분진성상, 분진농도, 분진온습도 등에 관한 사전파악을 진행하여 적절한 집진기 형태 선정 및 탈진방식 선정을 진행하여야 한다.

본 연구대상인 카트리지 원통형 백필터는 다양한 여과집진기 형태중의 하나로서 주로 중,소형으로 제

*Corresponding author: Cheng Xu Piao Tel: 055-289-7587 E-mail: chengxu718@hanmail.net,
Ventech Corp 20, Changwondaehak-ro, Uichang-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 51140
Received: November 30, 2015, Revised: December 14, 2015, Accepted: December 15, 2015

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

작되어 사용되는 경우가 많은데 이는 카트리지 필터의 제작특성에서 비롯된 것으로 원통형 백필터와 사각형 백필터에 비해 절곡하여 케이스에 고정하는 등 비교적 복잡한 사전제작이 필요하기에 대형제작이 상대적으로 어렵기 때문이다. 하지만 카트리지 백필터는 동일한 크기의 전통 백필터에 비해 2~4배 정도의 여과면적을 확보할 수 있기 때문에 동일한 처리유량에 대비해 탈진주기를 2배 이상 증가시킬 수 있어 필터의 사용수명을 연장하고 운전비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 여과속도를 일반 백필터와 같게 할 경우 적용되는 필터의 수를 줄일 수 있어 집진장치가 차지하는 공간을 절약할 수 있다는 장점을 보유하고 있다(Park et al., 2002). 따라서 설치공간이 협소한 작업장에서 카트리지 집진기를 선호하는 경향이 있다.

일반적인 원통형 백필터는 표면이 상대적으로 평평하기 때문에 탈진용 제트기류에 의한 진동파와 제트기류의 역 통과로 분진이 필터표면에서 비교적 쉽게 이탈되어 탈진되지만 카트리지 필터인 경우 비록 같은 방식으로 제트기류가 역 통과됨과 동시에 진동파가 형성되지만 절곡으로 인한 진동파 흡수 및 압력분산으로 필터 주름 사이의 분진은 필터 표면에서 제대로 이탈되어 낙하하지 못하고 정체되어 있다가 재 부착되는 현상이 발생하면서 전체적인 시스템 차압 증가를 유발한다.

본 연구에서는 실험적인 방식으로 충격기류식 탈진방식을 적용한 카트리지 필터 집진기의 탈진성능을 파악하여 카트리지 필터 집진기의 탈진효율 향상을 위한 최적의 탈진방식을 도출하는 것을 목적으로 진행하였다.

충격기류식 탈진방식의 탈진원리를 살펴보면 충격기류식 여과집진기는 역방향으로 고압, 고속 분사되는 기류에 의한 충격파와 역기류의 순간적인 압력증가로 충격기류가 필터를 역 통과하면서 여과필터의 표면에 부착된 분진을 이탈시키는 방식으로서 비록 전통적이긴 하지만 여전히 제일 보편적으로 사용되는 여과집진기 탈진방식이다.

충격기류 탈진시스템에서 탈진효과에 영향을 주는 인자들은 매우 많은데 그 중에서 제일 큰 영향을 주는 인자들은 충격제트기류의 분사압력, 분사거리, 분사시간 그리고 분사노즐의 형태이다. 기타 인자들 즉

분진농도, 분사주기, 벤츄리 유무, 필터간격 등도 탈진효과의 영향인자 이긴 하지만 상술한 인자들은 이미 상당부분 연구와 검증이 이루어져 있기 때문에 본 연구에서는 제외되었다.

II. 연구방법

충격기류 탈진시스템에서의 탈진은 주로 충격기류에 의해 필터표면에서 발생하는 충격파와 압력변화에 의한 내부기류의 역 통과 방식으로 이루어진다. 따라서 충격기류 분사 시 발생하는 충격파가 클수록 필터표면의 진동세기 즉 진폭이 커지는데 그에 따른 탈진효과는 우수해 질 것이며 제트기류 분사전, 후의 압력변화가 클수록 내부기류의 역 통과량이 많아져 탈진효과가 우수해 질 것이다. 또한 필터위치별 진폭 및 압력변화가 균일할수록 필터표면의 탈진은 비교적 균일하게 이루어지게 되는데 궁극적으로 탈진효율의 향상과 필터의 사용수명의 연장을 보장할 수 있다.

본 연구는 두 가지 단계로 진행되는데 첫째는, 탈진원리를 활용한 이론적인 분석기법으로서 카트리지 필터의 선정하고 실험장치를 제작한 후 분사압력, 분사거리, 분사시간, 노즐형태 4가지 탈진효율 영향인자들의 서로 다른 조합에 따른 필터표면 위치별 진동세기와 압력변화를 측정하여 비교분석하는 방법으로 탈진효율이 우수할 것으로 추정되는 탈진영향 인자의 조합들을 찾아내는 것이다. 둘째는, 첫 번째 단계의 연구결과를 바탕으로 선정된 대표적인 영향인자 조합들의 탈진효율을 측정하는 실험적인 분석기법으로서 첫 번째 단계의 연구결과를 실험적인 방식으로 검증함과 동시에 연구결과를 종합분석하여 궁극적으로 최적의 탈진시스템을 구축하는 것이다.

III. 실험장치 및 방법

1. 실험용 분진

본 연구에 사용한 실험용 분진은 모 알루미늄 용해공장의 여과집진기에서 포집된 산화알루미늄 분말로서 사용 전에 체분리(#100)하여 불순물을 제거하였다. 분진의 입도분포는 레이저 입도분석장치(LS-13 320, USD, Malvern-mastersizer)를 이용하여 분석하였다.

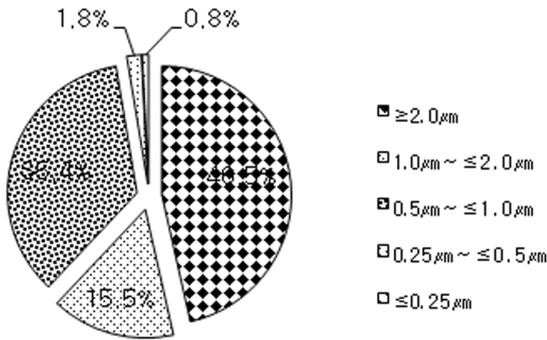


Figure 1. Particle size distribution of test dust

분진의 입경분포(Figure 1)는 대부분 0.5 μm 이상으로 전체분진의 97.4%이며 초 미세분진(0.5 μm 이하)은 전체분진의 2.6%에 달한다. 분진의 입경분포를 살펴보면 2 μm 이하의 분진이 50% 이상이고 비중이 비교적 낮은 알루미늄 산화물로 이루어 졌기 때문에 철 산화물 분진 등에 대비해 탈진이 상대적으로 어렵기에 본 실험에 비교적 적합하다고 판정되었다.

2. 실험용 필터

실험에 사용한 카트리지 필터는 국내 모 외국계 회사 D사의 외면 여과식 원통형표준필터(필터번호: Donaldson, USD, 1002 -246)로서 기본 물성을 Table 1에 표시한다. 카트리지 필터는 여재는 일정한 폭(절곡 깊이)으로 절곡한 후 원통형으로 만들고 양 끝단에 덮개를 씌워 에폭시 수지 등을 이용하여 접착시켜 제작된 것이다. 외부 지름은 162 mm이고 필터

Table 1. Properties of tested filter media

Items	Values
Filter material	Ultra-web FR
Weight unit(g/m ²)	130
Ventilation rate(m ³ /m ² .h)	460
Temperature of using(°C)	80

길이는 541 mm이며, 절곡 깊이는 38 mm이고 절곡 수는 113 이며 유효여과면적은 4.5 m²이다. 실험용 카트리지 필터의 형태와 사이즈는 Figure 2에 상세히 표시되어 있다.

3. 실험장치

본 연구에서는 현장테스트 용으로 실험장치(Figure 3)를 제작하였는데 블로워(①: 배기량 40 m³/min, 정압:330 kgf/cm²)를 가동한 후 메인덕트(②)에 설치된 댐퍼조절을 통하여 배기량은 30 m³/min 로 조절하여 필터의 여과속도를 0.11 m/s 로 설정하였다. 분사노즐(③), solenoid 밸브(⑤), 에어탱크(⑥), compressor (⑦)로 탈진시스템을 구성하고 실험장치 본체인 bag house(④)에 카트리지 필터(⑨)를 장착하였다. 분진탈진효과 실험을 진행할 때에는 분진 screw feeder(⑧)를 가동하여 일정한 량의 분진을 bag house에 투입하고 탈진된 분진은 dust hopper(⑩)에 받아 칭량하였다. Bag house 측방에 6개의 측정구(⑪)를 설치하여 실험조건 변화에 따른 필터 높이별 진폭과 압력의 변화를 측정하였다.

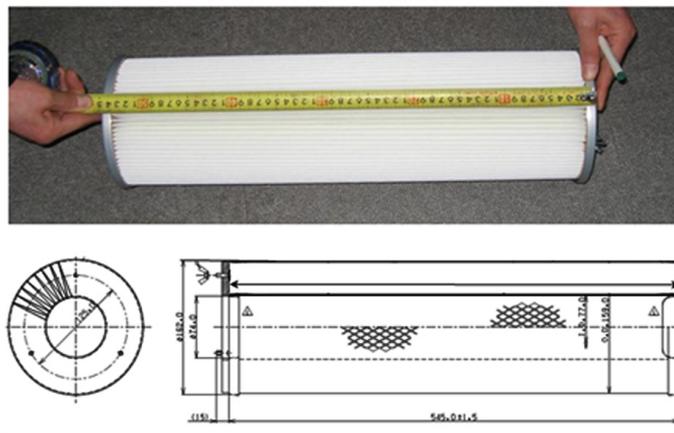


Figure 2. Environment cartridge filter size

Table 2. Experimental conditions

General conditions		Cleaning conditions	
Sample dust	Al ₂ O ₃	Pulse pressure	2, 3, 4 kgf/cm ²
Filter material	Ultra-web FR	Pulse distance	5, 10, 15cm
Pulse interval	10 min	Pulse time	0.1, 0.2, 0.3 sec
Face velocity	0.11 m/min	Nozzle type	T-6, H-6, H-10

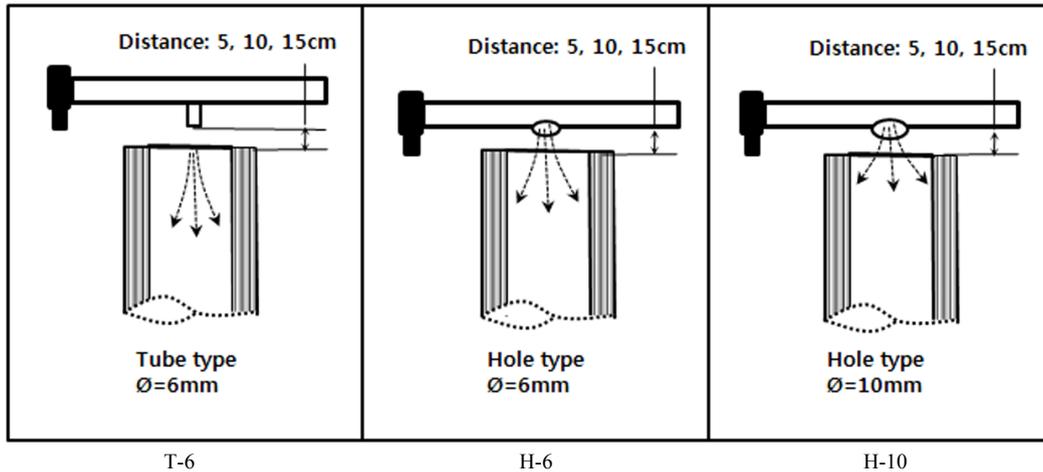


Figure 5. Schematic diagram of pulse nozzle types and distance

다. 두 번째 단계는 분진을 투입하여 진행되는 탈진 효율 측정을 통한 연구검증 방식으로서 압력측정결과와 진동세기 측정결과를 종합분석한 후 대표적인 조합들을 선정하여 일정한 량의(450 g)의 분진을 분진공급기(⑧: Sigmatech, Korea, Screw feeder)를 통하여 투입시켜 충분한 집진이 이루어진 다음 충격기류를 1차 분사하여 탈진시키고 시스템을 off하여 10분 동안 안정화 시켜 분진이 호퍼에 낙하하게 한 후 호퍼를 해체하여 호퍼에 낙하된 분진중량을 칭량하여 사전에 투입된 분진량과 비교하는 방식으로 탈진조건 변화에 따른 탈진효율을 측정한다. 1차 실험이 끝나면 동일한 형태의 필터를 교체하고 탈진조건을 변화시킨 후 위에서 서술한 측정방식을 반복한다. 탈진효율의 측정을 통하여 첫 번째 단계의 연구결과를 검증하고 최종적으로 최적의 탈진조건 혹은 탈진조합들을 찾아내는 방식을 채용하였다.

5. 실험조건

본 연구에서 설정한 실험조건(Table 2)은 두 가지로 분류되는데 첫째는 일반조건(general conditions)으로

서 이는 실험을 시작할 때 일단 선정되면 그 다음 진행되는 전체 실험과정에서 시종일관 변하지 않는다. 둘째는 탈진조건(cleaning conditions)로서 분사압력, 분사거리, 분사시간, 노즐형태 4개의 조건을 선정하였는데 각 조건은 또한 3개의 인자들로 구성되어 있다.

분사압력은 충격기류의 압력으로서 2 kgf/cm², 3 kgf/cm², 4 kgf/cm²로 설정하고 분사거리는 필터입구에서 분사노즐까지의 거리로서 각각 5 cm, 10 cm, 15 cm로 설정하였으며 분사시간은 타이머의 조절을 통하여 이루어지는데 0.1 s, 0.2 s, 0.3 s로 설정하고 노즐형태는 메인 파이프에 내경이 6 mm인 튜브를 용접하여 제작된 T-6형 노즐과 별도로 튜브를 연결하지 않고 메인 파이프에 6 mm 구멍(Hole)을 직선으로 뚫어 제작된 H-6 노즐 그리고 T-6과 비슷한 형태이지만 구멍의 크기가 10 mm로 확공한 H-10 형태의 노즐 3가지를 선정하여 실험을 진행하였다(Figure 5).

IV. 실험결과

카트리지 집진기의 최적의 탈진조건을 찾아내기

위한 수단으로 필터의 길이방향으로 균일하게 6개의 지점을 선정하여 탈진조건 변화에 따른 진동세기를 측정하여 진폭이 제일 크면서 진폭의 표준편차가 제일 작은 탈진조건 조합들을 찾아냈다. 또한 같은 방식으로 동일한 위치에서의 필터차압을 측정하여 압력변화가 제일 크고 압력의 표준편차가 제일 작은 조합들을 찾아냈다. 상술한 두 가지 실험을 통하여 찾아낸 최적의 조합들 중에서 서로 겹치는 조합들을 최적의 탈진조건 그룹으로 간주하고 다음 단계의 실험을 진행하였다.

상술한 두 가지 실험을 바탕으로 노즐형태의 변화에 따른 압력변화 실험을 진행하여 최적의 노즐형태를 선정하였고 최종적으로 특정된 조합들을 선정하여 일정한 량의 분진을 투입하여 탈진한 후 호퍼에 낙하

한 탈진분진의 량을 칭량하고 투입된 분진량과 비교하여 탈진효율을 평가하는 방식으로 위에서 세 가지 실험 즉 진동세기 측정결과, 필터내부 압력변화 그리고 노즐형태 변화에 따른 시험결과를 검증하였다.

1. 분사압력, 분사거리, 분사시간의 변화에 따른 진동세기 측정결과

분사압력, 분사거리, 분사시간의 변화에 따른 필터의 높이별 진동세기를 측정하여 각 높이별 진동폭 즉 진폭을 계산하여 평균진폭이 제일 크고 또한 진폭의 표준편차가 제일 작은 조건들로 구성된 조합을 찾아내는 목적으로 진동세기 측정실험을 진행하였다.

본 연구의 첫 번째 실험은 H-6노즐형태에서 분사압력 2 kgf/cm², 3 kgf/cm², 4 kgf/cm²와 분사거리 5 cm,

Table 3. Composite measurement result of the vibration amplitude(dB)

Experiment condition	H-6 Nozzle, Pulse time 0.1 s								
	Pulse distance 5 cm			Pulse distance 10 cm			Pulse distance 15 cm		
	2 kgf/cm ²	3 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²	2 kgf/cm ²	3 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²	2 kgf/cm ²	3 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²
Po.1	10.1	9.2	7.1	7.2	8.2	10.5	5.7	10.9	10.3
Po.2	7.7	11.4	12.1	10.7	11.9	16	9.1	14.7	14.6
Po.3	10.1	11.9	10.6	10.7	10.6	10.9	6.5	12.7	13
Po.4	13.2	12	12.5	7.8	9.3	8.7	7.7	12	12.7
Po.5	10.7	11.1	11.1	9.1	9.1	12	12.1	13.2	13.1
Po.6	9.7	8.1	11.2	10.9	8.6	16.5	12.2	12.6	14.2
AVERAGE	10.3	10.6	10.8	9.4	9.6	12.4	8.9	12.7	13.0
STDEV	1.78	1.60	1.93	1.62	1.38	3.15	2.78	1.26	1.51
Experiment condition	H-6 Nozzle, Pulse time 0.2 s								
	Pulse distance 5 cm			Pulse distance 10 cm			Pulse distance 15 cm		
	2 kgf/cm ²	3 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²	2 kgf/cm ²	3 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²	2 kgf/cm ²	3 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²
Po.1	7.7	8.3	9.1	10.9	9.3	9.2	7.5	11.5	10.6
Po.2	12.7	13.3	9.9	9.3	10.4	9.2	7	13.2	10.3
Po.3	12.8	13.1	13.8	10.3	10.7	11.7	8	9.7	16.9
Po.4	9.8	13.9	16.4	14.3	10.8	9.9	8.6	10.4	13.3
Po.5	13.4	10.9	11.7	12.4	10.1	12.9	13.9	13	13.9
Po.6	13.7	14.3	14.7	8.2	13.3	15.9	10.7	15	15.8
AVERAGE	11.7	12.3	12.6	10.9	10.8	11.5	9.3	12.1	13.5
STDEV	2.40	2.29	2.85	2.19	1.35	2.63	2.60	1.97	2.67
Experiment condition	H-6 Nozzle, Pulse time 0.3 s								
	Pulse distance 5 cm			Pulse distance 10 cm			Pulse distance 15 cm		
	2 kgf/cm ²	3 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²	2 kgf/cm ²	3 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²	2 kgf/cm ²	3 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²
Po.1	10.2	9.6	8.9	11.3	11.3	7.5	7.7	9.2	9.6
Po.2	7.6	9	9.7	13.1	11.5	16.6	7.5	13.1	14.9
Po.3	9.1	10	10.1	10.9	12.5	11.9	7.6	12.4	15.8
Po.4	9.8	10.6	12.5	10.4	11.9	12.1	8.3	12	10.3
Po.5	12.6	11.6	12.1	9.7	10.1	16	13.7	10.5	13.1
Po.6	12.5	13.9	14.7	8.2	8.3	18.8	11.8	14.9	14.2
AVERAGE	10.3	10.8	11.3	10.6	10.9	13.8	9.4	12.0	13.0
STDEV	1.96	1.77	2.16	1.64	1.51	4.10	2.65	1.99	2.52

Table 4. Candidate groups of optimum vibration conditions

No	Pulse pressure	Pulse distance	Pulse time	Nozzle type	AVERAGE/STDEV
1	3 kgf/cm ²	15 cm	0.1 s	H-6	10.08
2	3 kgf/cm ²	15 cm	0.2 s	H-6	6.14
3	3 kgf/cm ²	15 cm	0.3 s	H-6	6.03
4	4 kgf/cm ²	15 cm	0.1 s	H-6	8.61

10 cm, 15 cm 그리고 분사시간 0.1 s, 0.2 s, 0.3 s와 에 따른 필터의 높이별(6개 Point) 진동세기를 측정 한 후 포인트별 최고진동세기에서 최저진동세기를 덜어 내 대상 포인트의 진폭을 산정하였다. 산정결과를 종합하여(Table 3) 그 중에서 평균진폭이 제일 크면서 표준편차가 제일 작은 조합들을 선정하여(정방향 내) 최적의 탈진조건 후보군 조합으로 잠정한 후 다음 단계에서 진행되는 압력변화 실험결과와 종합하여 최적의 탈진조합을 찾아내는 방식을 채용하였다.

진동세기 측정결과를 통한 진폭산정 결과를 분석

하여 카트리지 필터의 최적의 진동효과 탈진조합 후 보그룹은(Table 4) 총 4개가 선정되었는데 각각 첫째: 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.1 s 둘째: 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.2 s 셋째: 분사압력 4 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.3 s 넷째: 분사압력 4 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.1 s이다. 이들 조합은 진폭이 상대적으로 크고 진폭의 표준편차가 상대적으로 작은 두 가지 조건을 동시에 만족시키는 조합들이기에 탈진에 필요한 진동을 제일 적절하게 발생시킬

Table 5. Measurement results of filter pressure in pulse distance 5 cm(mmH₂O)

Experiment conditions		H-6 Nozzle, Pulse distance 5 cm, Pulse time 0.1 s		
		2 kgf/cm ²	3 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²
Measure Point	Starting	After pulse	After pulse	After pulse
Po.1	-245	-125	-113	-184
Po.2	-116	-67	-48	-95
Po.3	-47	-29	0	9
Po.4	-26	-18	17	17
Po.5	-20	-11	29	24
Po.6	-16	-9	60	170
AVERAGE	-78.3	-43.2	-9.2	-9.8
STDEV	89.7	45.4	62.1	120.1
		H-6 Nozzle, Pulse distance 5 cm, Pulse time 0.2 s		
Po.1	-245	-118	-164	-160
Po.2	-116	-56	-36	-52
Po.3	-47	-26	0	-14
Po.4	-26	-16	20	14
Po.5	-20	-10	32	32
Po.6	-16	-8	98	73
AVERAGE	-78.3	-39.0	-8.3	-17.8
STDEV	89.7	42.5	88.1	81.4
		H-6 Nozzle, Pulse distance 5 cm, Pulse time 0.3 s		
Po.1	-245	-106	-133	-121
Po.2	-116	-48	-35	-25
Po.3	-47	-29	-4	7
Po.4	-26	-16	8	12
Po.5	-20	-9	23	22
Po.6	-16	-5	55	60
AVERAGE	-78.3	-35.5	-14.3	-7.5
STDEV	89.7	37.9	65.3	62.0

수 있을 것으로 판단된다.

2. 분사압력, 분사거리, 분사시간의 변화에 따른 필터차압 측정결과

진동세기 측정과 비슷한 방식으로 분사압력, 분사거리, 분사시간의 변화에 따른 필터의 높이별 필터차압 측정하였는데 충격기류를 분사하기 전에는 필터 내부의 차압이 Point 1부터 Point 6까지 -245 kgf/cm² 부터 -16 kgf/cm²로 다양한 압력을 나타내고 있었다. 충격기류를 분사한 후 필터내부의 위치별 차압 큰 변화를 보이고 있는데 차압변화가 크면 클수록 탈진 효과가 우수하고 또한 차압의 표준편차가 작을수록 탈진이 균일하게 이루어진다고 판단한다.

측정결과(Table 5, Table 6, Table 7)를 살펴보면 분사압력이 2 kgf/cm²일 때에는 전체 Point에서의 필터차압은 기타조건(분사거리, 분사시간)의 변화에 관계 없이 음압(-)을 나타내는데 이는 분사압력 2 kgf/cm²

조건에서는 탈진이 거의 이루어지지 않음을 의미한다. 분사압력 2 kgf/cm² 조건에서는 진동에 의하여 일부 탈진될 가능성도 존재하지만 전체적으로 탈진 효과가 상당히 낮을 것으로 판단되어 2 kgf/cm²의 압력조건은 최적의 탈진조건 선정에서 제외시킨다.

분사압력 2 kgf/cm²의 탈진조건은 제외시킨 나머지 3 kgf/cm² 압력조건과 4 kgf/cm²의 분사압력조건에서 필터의 평균차압이 높으면서 필터차압의 표준편차가 제일 낮은 조건을 동시에 만족시킬 수 있는 조합들을 찾아보면(표내 장방향) 세 가지 조합이 존재하는데 이들을 압력분포에 따른 최적의 탈진조합 후보그룹으로 선정하였다.

필터차압에 따른 최적의 탈진조합 후보그룹(Table 8)은 3개로 압축되는데 첫째: 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 10 cm, 분사시간 0.3 s, 둘째: 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.2 s 셋째: 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.3 s이다.

Table 6. Measurement results of filter pressure in pulse distance 10 cm (mmH₂O)

Experiment conditions		H-6 Nozzle, Pulse distance 10 cm, Pulse time 0.1 s		
		2 kgf/cm ²	3 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²
Measure Point	Starting	After pulse	After pulse	After pulse
Po.1	-245	-134	-147	-180
Po.2	-116	-68	-46	-87
Po.3	-47	-35	0	-4
Po.4	-26	-26	18	21
Po.5	-20	-14	21	30
Po.6	-16	-9	66	170
AVERAGE	-78.3	-47.7	-14.7	-8.3
STDEV	89.7	47.2	74.2	118.2
		H-6 Nozzle, Pulse distance 10 cm, Pulse time 0.2 s		
Po.1	-245	-127	-140	-121
Po.2	-116	-63	-50	-55
Po.3	-47	-28	-8	0
Po.4	-26	-17	14	10
Po.5	-20	-13	30	27
Po.6	-16	-11	96	147
AVERAGE	-78.3	-43.2	-9.7	1.3
STDEV	89.7	45.3	79.9	89.5
		H-6 Nozzle, Pulse distance 10 cm, Pulse time 0.3 s		
Po.1	-245	-126	-95	-108
Po.2	-116	-62	-28	-21
Po.3	-47	-29	0	0
Po.4	-26	-17	7	18
Po.5	-20	-13	29	45
Po.6	-16	-11	85	180
AVERAGE	-78.3	-43.0	-0.3	19.0
STDEV	89.7	44.8	59.9	94.5

Table 7. Measurement results of filter pressure in pulse distance 15 cm (mmH₂O)

Experiment conditions		H-6 Nozzle, Pulse distance 15 cm, Pulse time 0.1 s		
		2 kgf/cm ²	3 kgf/cm ²	4 kgf/cm ²
Measure Point	Starting	After pulse	After pulse	After pulse
Po.1	-245	-116	-68	-144
Po.2	-116	-66	-14	-47
Po.3	-47	-32	-9	-28
Po.4	-26	-21	6	-4
Po.5	-20	-11	0	30
Po.6	-16	-11	0	122
AVERAGE	-78.3	-42.8	-14.2	-11.8
STDEV	89.7	41.3	27.3	88.0
		H-6 Nozzle, Pulse distance 15 cm, Pulse time 0.2 s		
Measure Point	Starting	After pulse	After pulse	After pulse
Po.1	-245	-75	-60	-90
Po.2	-116	-48	-10	-75
Po.3	-47	-24	0	0
Po.4	-26	-16	12	10
Po.5	-20	-11	18	20
Po.6	-16	-8	24	80
AVERAGE	-78.3	-30.3	-2.7	-9.2
STDEV	89.7	26.2	30.7	63.4
		H-6 Nozzle, Pulse distance 15 cm, Pulse time 0.3 s		
Measure Point	Starting	After pulse	After pulse	After pulse
Po.1	-245	-83	-69	-133
Po.2	-116	-44	-20	-31
Po.3	-47	-22	0	-10
Po.4	-26	-16	10	17
Po.5	-20	-10	15	24
Po.6	-16	-8	27	185
AVERAGE	-78.3	-30.5	-6.2	8.7
STDEV	89.7	28.8	34.6	103.3

Table 8. Candidate groups of optimum filter pressure conditions

No	Pulse pressure	pulse distance	Pulse time	Nozzle type	AVERAGE/STDEV
1	3 kgf/cm ²	10 cm	0.3 s	H-6	-0.3/59.9
2	3 kgf/cm ²	15 cm	0.2 s	H-6	-2.7/30.7
3	3 kgf/cm ²	15 cm	0.3 s	H-6	-6.2/34.6

진동세기 측정결과에서 도출된 최적의 탈진조합 후보그룹과 필터차압 측정결과에서 도출된 최적의 탈진조합 후보그룹을 종합하여 비교하였을 때 상술한 두 후보그룹에서 서로 겹쳐지는 탈진조건 조합들을 모두 2개를 찾아낼 수 있는데 조합1: 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.2 s 조합2: 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.3 s이다. 위의 두 가지 이 조합들은 사실상 본 카트리지 필터의 탈진에 필요한 진동과 압력을 제일 적절하게 발생시킬 수 있는 최적의 조합이라고 판단된다.

3. 노즐형태의 변화에 따른 압력분포 측정결과

앞에서 진행된 분사압력, 분사거리, 분사시간에 따른 진동세기 실험결과와 압력분포 측정결과를 통하여 최적의 탈진조합 후보그룹은 두 가지인데 즉 조합1: 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.2 s 조합2: 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.3 s이다. 하지만 분사노즐 형태에 관한 실험연구는 진행되지 않았기에 본 실험은 위의 두 가지 조합에서 노즐형태 변화에 따른 압력분포를 추가 측정하여 최적의 노즐형태를 찾아보려고 한다.

Table 9. Measurement results of filter pressure with change of nozzle types (mmH₂O)

Experiment conditions	Pulse distance	15 cm					
	Pulse pressure	3 kgf/cm ²					
	Pulse time	0.2 s			0.3 s		
	Nozzle type	T-6	H-6	H-10	T-6	H-6	H-10
Measure Point	Starting	After pulse	After pulse	After pulse	After pulse	After pulse	After pulse
Po. 1	-245	-150	-60	-42	-150	-69	-47
Po. 2	-116	-76	-10	-10	-80	-20	-20
Po. 3	-47	-43	0	15	-50	0	14
Po. 4	-26	0	12	20	-10	10	14
Po. 5	-20	38	18	24	20	15	18
Po. 6	-16	145	24	37	160	27	45
AVERAGE	-78.3	-14.3	-2.7	7.3	-18.3	-6.2	4.0
STDEV	89.7	101.4	30.7	28.7	105.3	34.6	32.4

본 연구에서는 6 mm 튜브형(T-6), 6 mm 홀형(H-6), 10 mm 홀형(H-10) 세 가지 형태의 노즐을 연구대상으로 선정하여 압력분포 측정실험을 진행하였다. 노즐형태 변화에 따른 필터차압 측정결과(Table 9)를 살펴보면 분사시간 0.2 s와 0.3 s에서 모두 H-10형의 분사노즐의 평균압력이 기타 형태의 노즐을 사용했을 때보다 높고(7.3 kgf/cm²와 4.0 kgf/cm²) 또한 압력분포 표준편차도 기타 노즐을 사용했을 때에 비해 낮은데(28.7과 32.4) 이는 H-10형 노즐의 탈진효율이 기타형태보다 우수할 것으로 판단된다. 하지만 상술한 연구결과는 최종적으로 정량 분진투입 및 탈진량 측정을 통한 탈진효율 비교분석 검증과정을 거쳐야 한다.

4. 탈진효율 측정결과

분사압력, 분사거리, 분사시간에 따른 진동세기 측정결과와 필터차압 측정결과 그리고 노즐형태 변화에 따른 압력분포 측정결과를 종합하여 도출해낸 최적의 탈진조건 그룹들을 바탕으로 탈진효율 실험을 진행하였다. 또한 분사노즐의 형태가 탈진효율에 주는 영향을 파악하기 위하여 T-10분사노즐 뿐만 아니라 T-6분사노즐과 H-6분사노즐을 사용했을 때의 탈진효율을 측정하였고 분사압력이 탈진효율에 주는 영향을 파악하기 위하여 3 kgf/cm²의 분사압력조건 뿐만 아니라 4 kgf/cm²의 분사압력 조건도 활용하여 탈진효율을 측정하였다.

탈진효율 측정결과(Figure 6) H-10형 분사노즐의

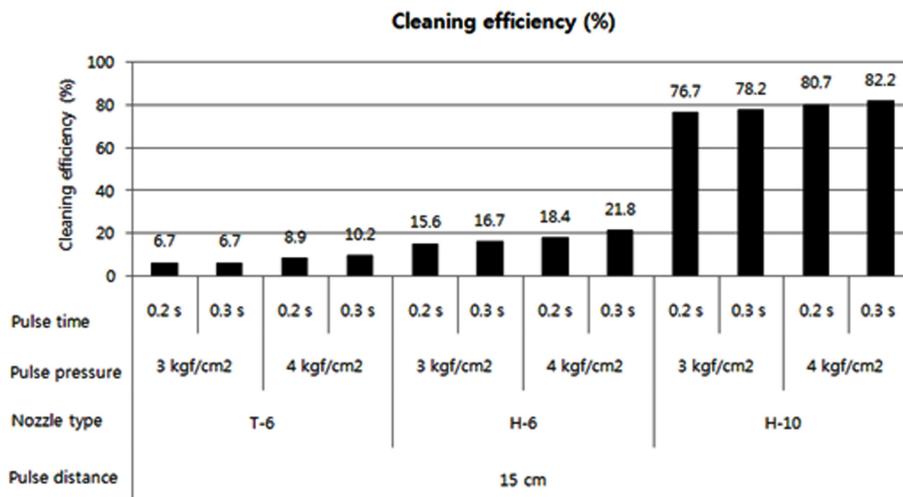


Figure 6. Cleaning efficiency in main cleaning conditions

Table 10. Optimum cleaning condition groups

No	Pulse pressure	Pulse distance	Pulse time	Nozzle type	Cleaning efficiency
1	3 kgf/cm ²	15 cm	0.2 s	H-10	76.7(%)
2	3 kgf/cm ²	15 cm	0.3 s	H-10	78.2(%)

탈진효율은 H-6형 분사노즐과 T-6형 분사노즐에 비해 탈진효율이 월등히 높는데 H-10형 노즐의 평균 탈진효율은 79.4%이고 H-6형 노즐의 평균 탈진효율은 18.1%이며 T-6형 노즐의 평균 탈진효율은 8.1%이다. 분사압력을 높이면 탈진효율은 조금 높아지지만 그 효과는 매우 제한적인 것을 알 수 있는데 대표적인 H-10형 노즐에서 분사압력을 3 kgf/cm²에서 4 kgf/cm²로 증가할 때 탈진효율은 평균 4%만 증가한다. 이는 분사압력이 3 kgf/cm²에서 4 kgf/cm²로 증가할 때 필터 끝부분의 탈진이 부분적으로 잘 이루어지지만 높은 압력으로 인한 필터 끝부분의 피로파괴를 가속화 할 수 있고 필터공극의 크기를 변화시켜 미세분진의 투과가능성을 높여주고 가능성이 존재한다. 또한 분사시간의 증가는 탈진효율에 큰 영향을 주지 않기에 최적의 분사시간은 0.2 s와 0.3 s 모두 가능하다고 판단된다.

5. 최적의 탈진조건 선정

상술한 진동세기, 압력분포, 노즐선정 및 탈진효율 측정결과를 종합하여 최적의 탈진조건 조합(Table 10)을 도출해 냈다. 즉 본 카트리지 필터에서는 2개 조합의 최적의 탈진조건이 있는데 첫째는 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.2 s, 노즐형태 H-10이고 둘째는 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.3 s, 노즐형태 H-10이다.

하지만 여기에서 유의할 점은 본 연구는 특정된 규격(길이: 541 mm, 외경: 162 mm)의 카트리지 필터에서 진행된 것이기 때문에 기타 규격 혹은 형태의 카트리지 필터에서는 본 연구결과를 그대로 적용할 수 없고 일정한 보정이 필요하다.

V. 고찰 및 결론

여과집진기 탈진시스템의 최적의 탈진시스템에 관한 연구는 대부분 탈진조건들의 변화에 따른 필터전, 후의 차압변화를 측정하여 분석하는 방식을 채용하

고 있는데 이러한 방식들은 필터의 각 부위의 탈진 효과를 비교 분석하지는 일정한 한계가 있다.

본 연구에서는 프랑스 Nancy-University의 Xavier et al.(2006)이 발표한 논문 Experimental study of pulse-jet cleaning of bag filters supported by rigid rings 에서 채용한 방법 즉 필터표면에 위치별 센서를 부착하여 제트기류 분사시의 차압변화와 속도변화 그리고 탈진량을 측정하여 비교분석한 연구방법을 참조하여 필터표면의 길이방향으로 6개의 점을 선정하여 제트기류 분사시의 진동세기와 압력변화를 측정하여 분석하고 최종적으로 탈진량을 측정하여 검증하는 방식을 채용하였다.

실험적인 연구를 통하여 분사압력, 분사거리 및 분사시간에 따른 필터의 높이별 진폭과 필터차압을 측정하여 필터 높이 위치별 진폭과 필터차압이 클 뿐만 아니라 표준편차가 작은 조합들을 찾아내어 최적의 분사압력, 분사거리 및 분사시간 탈진시스템 후보군을 선정하였다. 실험결과 필터의 진폭과 차압이 모두 위의 요구들을 만족하는 후보군은 첫째는 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.2 s이고 둘째는 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.3 s이다.

최적의 분사압력, 분사거리 및 분사시간 탈진시스템 후보군을 찾아낸 후 T-6형 분사노즐, H-6형 분사노즐 그리고 H-10형 분사노즐 3가지 형태의 노즐을 선정하여 필터차압을 측정하여 분석하는 방식으로 최적의 노즐형태를 찾아내는 실험연구를 진행하였다. 연구결과 최적의 분사노즐 형태는 H-10형 노즐 일 것으로 판명되었다.

앞에서 진행된 연구결과와의 검증을 위하여 특정된 탈진시스템 조합들을 선정하여 일정한 량의 분진을 투입하여 집진시킨 후 탈진하여 락하한 분진량을 측정하는 방식으로 탈진시스템 조합들의 변화에 따른 탈진효율을 측정하였다. 탈진효율 측정결과 두 가지 탈진조합에서의 탈진효율이 상대적으로 제일 높는데 첫째: 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 15 cm, 분사시간 0.2 s, 노

즐형태 H-10이고 둘째는 분사압력 3 kgf/cm², 분사거리 15cm, 분사시간 0.3s, 노즐형태 H-10이었다. 따라서 앞에서 서술한 두 가지 조합은 본 규격의 카트리지 필터 집진시스템의 최적의 탈진조합이라고 판단된다. 분사압력을 증가한다고 하여 탈진효율이 비례적으로 증가하는 것도 아니고 오히려 필터의 피로파괴를 유발할 수 있는 단점이 있고 또한 분사시간의 변화는 탈진효율에 큰 변화를 주지 않는다는 것을 실험적인 방식으로 검증하였다.

감사의 글

이 논문은 2014년 경남녹색환경센터의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Lee WH. Characteristics of Electrostatic Cyclone/Bag Filter with Upper Inlet. Department of Environmental Engineering Graduate School Pukyong National University. 2000
- Kim HB. Effects of Nozzle and Diffuser Shapes on Pulse Jet Cleaning of a Ceramic Filter. Major in Mechanical Engineering Graduate School of Engineering Yonsei University. 2000
- Park HS, Park SJ, Kim SD, Choi HK, Lim JH. Effects of Pleating Parameters on Characteristics of Cylindrical Cartridge Air Filters. The Korean Society of Mechanical Engineers, 2001.1, 154-159
- Park HS, Kim SD, Choi HK, Lim JH, Park SJ. Basic Filtration Properties of Cylindrical Cartridge Dust Filters. Proceeding of the 34th Meeting of KOSAE, 2002
- Lee KM, Park BH, Jo YM, Yoo JG. Reverse Pulse Cleaning of Bag-Filter Through Jet Nozzles. Korea Society of Waste Management Vol. 21, No. 1 27~34(2004)
- Suh JM, Choi KC, Park JH. Dept of Environmental Miryang National University. J.og the Environmental Sciences 13(3), 223~232, 2004
- Ji ZL, Shi MX, Ding FX. Transient flow analysis of Pulse-jet generating system in ceramic filter, Powder Technology 139(2004) 200-207
- Xavier Simon, Sandrine Chazelet, Dominique Thomas, Denis Bemer, Roland Regnier. Experimental study of pulse-jet cleaning of bag filters supported by rigid rings. doi:
- Lee DG. The influence on pressure drop of pulse pressure from pulse air jet type bag filter by using cake dust. Department of Bioenvironmental Energy The Graduate School Pusan National University. 2013