

## 세라믹필터 역세정을 위한 노즐 사이즈 최적화

최 주홍, 김 진형, 지 화창, 우 량, 사공 경민, 김 영애

### The optimization of nozzle size for pulse cleaning of ceramic filter

Joohong Choi, Jinhyoung Kim, Huachang Chi, Lang Yu, Kyoungmin Sakong, Youngae Kim

**Key words** : Nozzle(노즐), pulse cleaning(역 세정), ceramic filter(세라믹필터)

**Abstract** : In the bench scale test unit consisting of four commercial filter elements, the traces of the transient pressure around the nozzle and overpressure in the filter cavity were measured to estimate the effect of nozzle on pulse cleaning. For the given pulse cleaning system, the convergent nozzle displayed better performance than the straight one. The optimum ratio of outlet to inside diameter of convergent nozzle was determined, which minimized the pulse gas consumption and maximized the entrainment effect. The angle and height of nozzle convergent part was also optimum operational condition, which is meaningful to the industrial applying.

### 1. 서 론

집진 시에 필터 표면에 쌓이는 분진은 분진층을 형성하고 시간에 따라 이에 의한 압력손실이 증가하기 때문에 주기적으로 이를 제거하여 주어야 한다. 이를 필터의 세척 또는 역세정 공정이라 부른다. 세라믹 필터의 경우 고압의 가스를 역으로 분사시키는 펄스제트식 역세정이 가장 효과적인 것으로 인식되고 있다. 역세정 시에 펄스가스에 의하여 형성되는 필터내부와 외부와의 차압 (over pressure)에 의한 역 모멘트가 분진 케이크의 결합력을 초월할 때 분진이 필터표면으로부터 유리되어 필터 세척이 이루어진다. 그러나 역세정 조건이 잘 형성되지 못할 경우 국부적으로 역세정 효과가 형성된다. 특히 필터의 목 부분의 세척이 어려운 것으로 지적되고 있다 [1-2]. 이는 역세정 가스가 펄스 노즐을 벗어날 때 강한 압력강하에 의하여 노즐 주위에서 주위의 압력보다 떨어지는 압력강하 현상이 일어나기 때문이다. 이 영향이 필터 내부까지 연장되는 조건에서 특히 필터의 상부 목 부분에 부압 (negative pressure)이 되는 경우 역세정 효과와는 반대로 흡인력이 형성되어 오히려 분진층의 형성을 촉진시킨다. 이와 같은 압력강하 현상은 노즐의 형상과 사이즈 그리고 운전조건에 따라 변화기 때문에 노즐과 역세정 운전조건의 최적화가 매우 중요하다.

한편 역세정 시에 형성되는 압력강화 현상은 주위의 더운 가스를 역세정 1차 가스가 동반할 수 있는 조건을 마련해 주기 때문에 찬 펄스가스에 의한 필터의 열충격을 감소시킬 수 있는

잇점도 있다. 즉 고온에서 운전되는 세라믹 필터 집진기에서 차가운 역세정 가스가 고온의 주위가스를 동반할 경우 가스 회석에 의하여 열충격이 완화될 뿐만 아니라 다량의 가스동반은 역세정 효과를 증진시킨다. 따라서 역세정 최적화 방안은 가스 동반효과를 최대화 하면서 필터 상부에 강한 역세압력이 형성될 수 있는 조건을 마련하는 것이다.

### 2. 실험

본 연구에서 BSU 장치를 위한 역세정 시스템을 구성하는 각 성분의 사양은 Table 1과 같다. 펄스 노즐은 내경이 18 mm인 튜브에 Fig. 1과 같이 연결되었다. 노즐의 길이는 70 mm이다. 노즐 내경은 16 mm이며 출구의 직경을 변화시켜서 여러 가지 노즐을 제조했다.

노즐 주위의 가스동반 효과를 측정하기 위하여 크린룸의 압력에 대한 노즐 주위의 차압을 측정하였다. 각 측정 지점을 나타내기 위하여 노즐 끝부분에서의 거리(Dsn), 노즐 센터에서의 거리(Dsc), 그리고 diffuser에서 수직거리(Dnd)를 각각 지정하였다.

상용 필터 네 개가 설치된 시스템에서 일정 시간 (pulse cycle) 동안 집진을 수행한 후에 순차적으로 각각의 필터를 세척하였다. 역세정 운전조건으로써, 여과속도, pulse

1) 생명화학공학과, 경상대학교  
E-mail : jhchoi@gnu.ac.kr

cycle, 펄스 밸브가 열리는 시간 (pulse duration; 0.3-1.0 s) 등의 변화로 수행되었다.

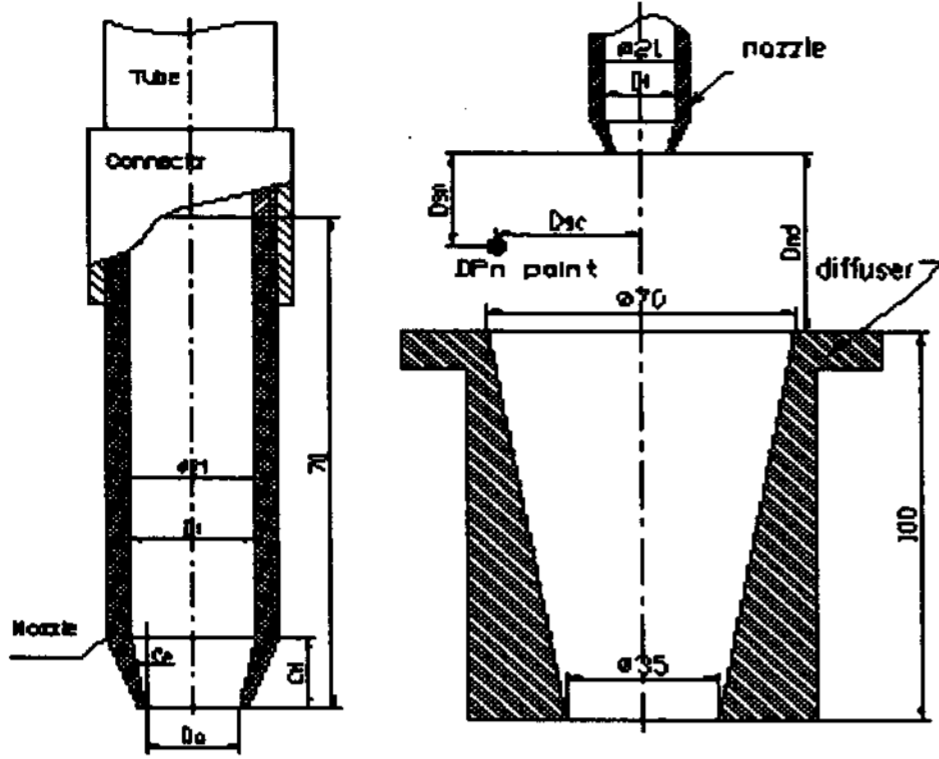


Fig. 1. Description of nozzle (left) and the measurement points around nozzle (right)

Table 1 The dimension of the nozzles

Outlet diameter (Do)/mm	Convergent height (CH)/mm	Convergent angle (CA)/°	Inside diameter (Di)/mm	Ratio of outlet to inside diameter (Do/Di)
8	10	21.8	16	0.5
10	10	16.7	16	0.625
12	10	11	16	0.75
14	10	5.7	16	0.875
16	-	-	16	1

### 3. 결과 및 검토

#### 3.1 노즐 주위의 가스동반 효과

역세정 시에 펄스 노즐 주위의 기체가 디퓨저를 통해 펄스가스에 의해 필터 내부로 동반되는 현상을 Fig. 2 에 보인 수치결과에서 잘 볼 수 있다. 그림에서 오른쪽 필터가 세척될 때 유량이 필터 외부로 향하고 반대로 바로 옆에 접한 필터의 유량은 내부로 향한다 [3-4]

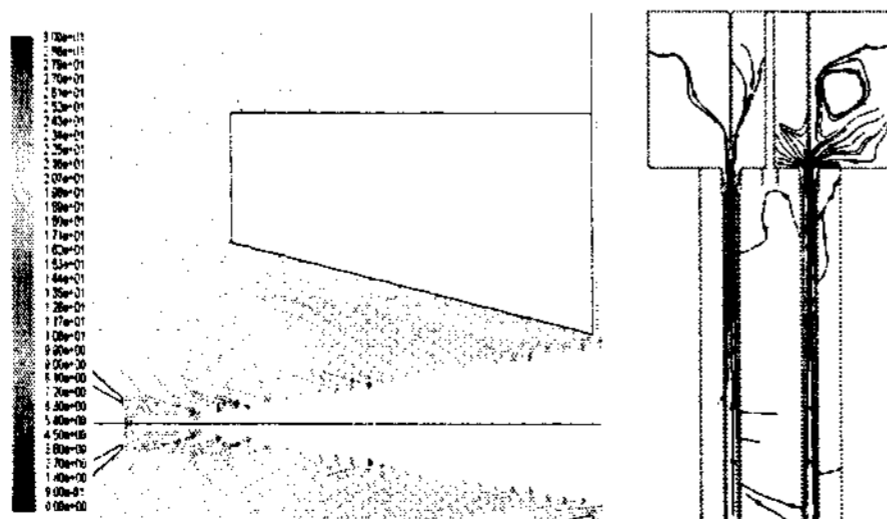


Fig. 2. 역 세정 시 노즐 주위와 필터에서 기체흐름 모사도.

Fig. 3 은 노즐 센터로부터의 위치에 따른 역세정 시에 부압이 형성되는 특성을 보기 위하여 Dsn와 Dnd가 각각 26과 28cm에 대하여 Dsc 변화에 따른노즐 주위의 차압 (DP1)의 변화를 측정한 것이다. 노즐의 중심선으로부터 벗어날수록 부압 형성특성이 감소하는 것을 볼 수 있다.

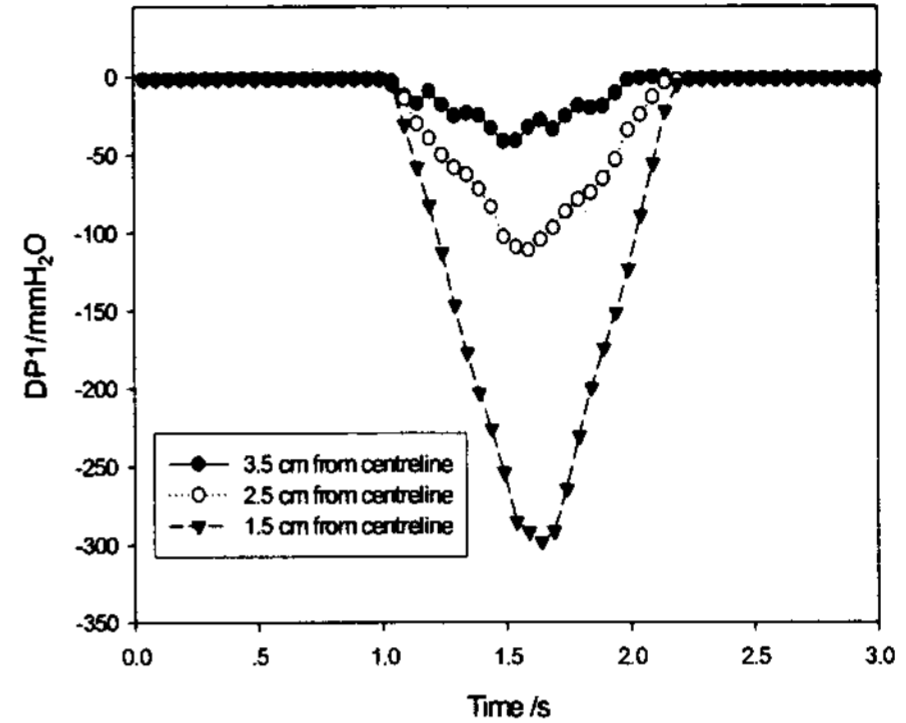


Fig. 3 Differential pressure around the nozzle: pulse pressure 7bar, Dsn 26 cm, Dnd 28 cm

#### 3.2 노즐 형상에 따른 역세정 효과

가스 흐름이 없는 상태에서 내경 16 mm의 직관형 노즐을 사용하여 펄스제트 시에 각 펄스압력에 대하여 필터 내부의 상부 (Pdt)와 하부 (Pdb)에 발생하는 차압 (over pressure)을 측정하였다. 솔레노이드 동작을 위한 pulse duration을 0.6초로 명령하였을 경우 압력에 대한 시그널이 2초 동안 지속되었다. 그리고 압력상승과 하강이 스텝 형을 보이지 않고 삼각형을 나타내었다. 이는 펄스 탱크와 펄스노즐 간의 거리가 멀고 (2 m) 그리고 배관에서 압력의 상당부분이 흡수되는 결과로 해석된다. 또한 압력 시그널을 이동시키는 배관이 측정점에서 센스까지 1/4 인치 튜브로 이어지는 데 이 배관에서의 압력손실이 복합적으로 작용된 것으로 보인다. 실험에서는 최고점을 기준으로 그 상대적인 효과를 판단할 수밖에 없었다. 펄스제트 시에 전반적으로 모든 펄스압력에 대하여 필터 상부보다는 하부에서 차압이 높게 나타났다. 이는 펄스가스의 흡입력이 필터 상부에 까지 영향을 미치지 않기 때문으로 해석된다.

역세정 시에 노즐 주위에 형성되는 부압은 Dsc와 Dsn이 각각 20과 15 mm 지점에서 측정되었다. 펄스 압력이 높을수록 필터 상부에 강한 부압이 형성되는 것을 Fig. 4 에서 볼 수 있다.

노즐 형상에 따른 역세정 효과를 보기 위하여 10 mm와 16 mm 직관 그리고 16에서 10 mm로 축소되는 수렴형 노즐에 대하여 펄스

압력에 따른 필터 내부의 차압 형성을 필터 하단에서 관찰하였다. 측정결과 동일한 노즐 출구 직경 10 mm를 비교할 때 수렴형 노즐이 직관형 노즐보다 높은 차압을 형성하였다. 그리고 펄스가스의 단위 질량당 차압 형성도 약간 높게 나타났다. 출구 직경 10 mm의 수렴형 노즐을 16 mm의 직관형 노즐과 비교할 경우 펄스압력이 작은 경우 수렴형 노즐의 차압형성이 높았으나 펄스압력이 큰 경우에는 직관형 노즐에서 더 높은 차압을 형성하였다. 그러나 펄스가스의 단위 질량에 대한 차압형성은 수렴형 노즐이 월등히 높았다. 따라서 동일한 차압을 형성하더라도 수렴형 노즐이 펄스가스를 덜 소모하는 것으로 해석된다.

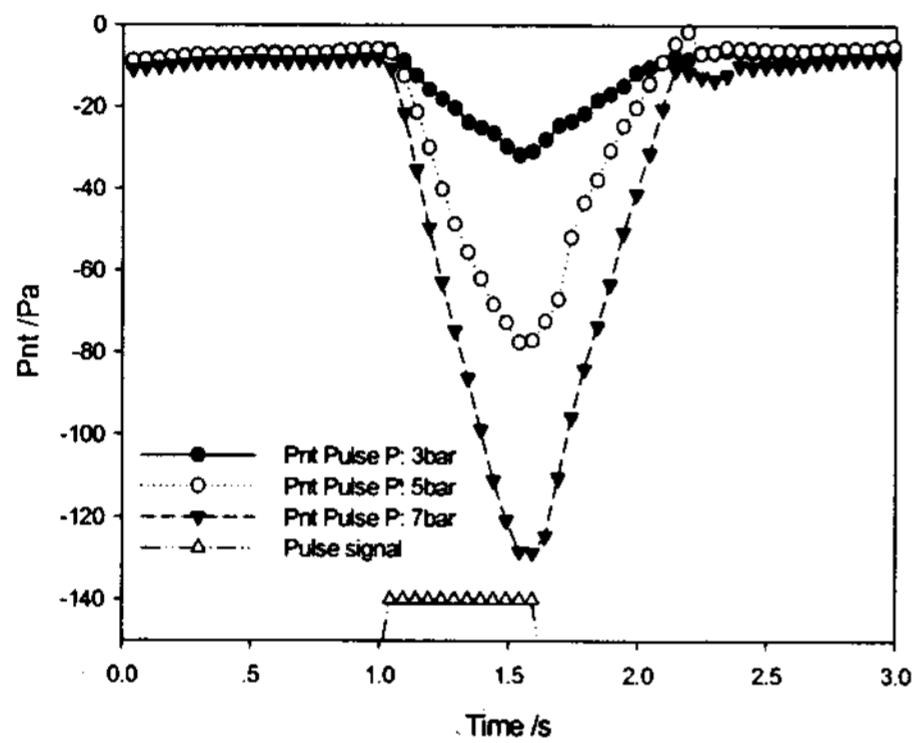


Fig. 4. Traces of the differential pressure around pulse nozzle (Dsc 20 mm, Dsn 15 mm) during the pulse cleaning for the straight nozzle 16mm: Dnd 3 cm, pulse duration 0.6s

### 3.3 노즐 사이즈 최적화

압축성 유체의 동역학적 노즐 출구의 가스 속도는 노즐의 수축비에 큰 영향을 받는다. 따라서 청정실에서 고온의 가스를 최대로 동반하고 필터 내부에 최대의 역세압력을 형성하는 노즐의 최적화가 역 세정에 매우 중요하다. 주어진 노즐 내경에 대하여 노즐 출구 직경은 두 가지 방법으로 변화시킬 수 있다. 첫째 수축부의 길이(CH)를 고정하고 수렴 각도를 조절하는 법, 둘째 수렴 각도를 고정하고 수축부의 길이를 조절하는 것이다. 본 실험에서는 이 두 가지 방법을 사용하여 노즐 출구 외경(Do), 수축 각도(CA), 그리고 수축부 높이(CH) 변화에 따른 실험을 수행하기 위하여 앞에서 보였던 Table 1 과 같이 여러 가지 노즐을 제작하였다.

먼저 노즐 수축부의 길이를 10 cm로 고정하고 수축 각도를 조정하여 제조된 노즐에서 펄스압력 변화에 따른 DPt 변화를 측정하였다. 노즐과 디퓨저 사이의 거리 (Dnd)는 3 cm이다. 펄스압력이 낮을 경우 16 mm

직관형 노즐에 비하여 수렴형 노즐이 필터 내부에 높은 차압을 형성함을 Fig. 5에서 보여주고 있다. 그러나 펄스 압력이 높은 경우 직관형 노즐보다 오히려 낮은 차압을 형성하며 이와 같은 경향은 노즐 직경이 작을수록 현저하였다. 이는 펄스압력이 높을수록 그리고 노즐 직경이 작을수록 노즐주위에 형성되는 부압이 증가되며 이 영향이 필터내부의 상부까지 연장되기 때문으로 해석된다. 대부분의 노즐에서 펄스압력이 6 bar 이상에서 DPt의 감소를 보이는 것이 특징적이다.

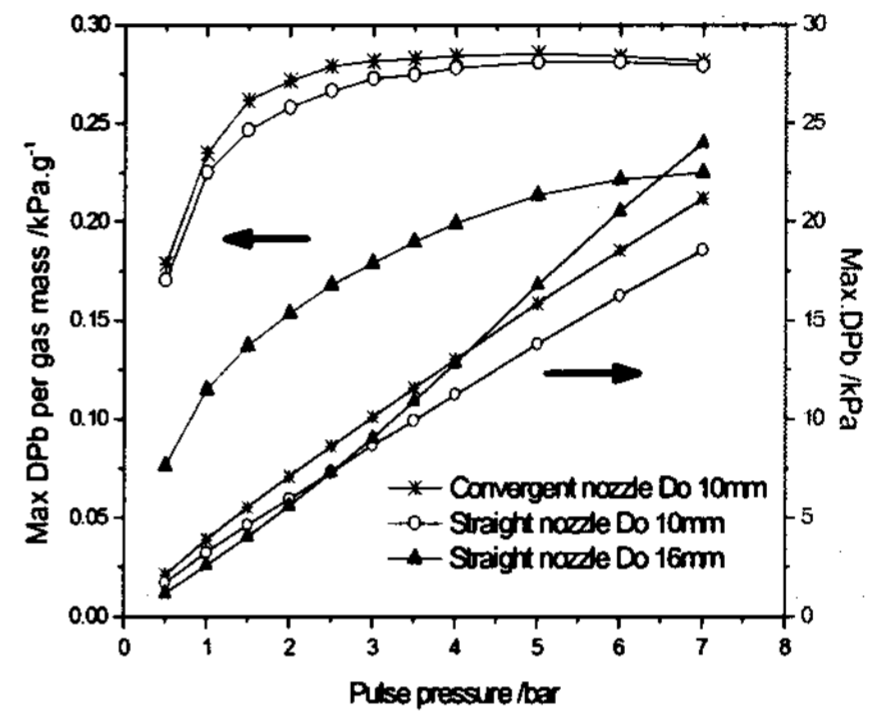


Fig. 5. Effect of nozzle shape on the formation of positive pressure in the top of the filter cavity

필터 바닥에서 의 차압(DPb)는 펄스압력에 대하여 거의 직선적으로 증가되며 전반적으로 노즐의 직경이 증가될수록 그 값이 증가되는 것을 보였다. 직관과 비교할 경우 노즐 출구직경이 8 mm를 제외하고 대부분 높은 값을 보였다. 이상에서 판단할 때 DPt와 DPb를 최대로 보이는 노즐출구 직경이 12 mm인 수렴노즐이 최적적으로 판단된다. 이 노즐은 DPn의 값도 최저를 나타내어 역세정시에 주위의 동반가스 량도 최대로 형성할 것으로 예상된다.

각 노즐에서 펄스압력에 따른 역세정 효과를 예상하기 위하여 Fig. 6에 펄스가스 단위 질량에 대한 최대 차압을 도시하였다. 그림은 노즐의 출구 사이즈가 작을수록 펄스가스의 단위 질량당 역세정 효과가 높고 그 최고점이 낮은 압력에서 도달하는 경향을 보인다. 이는 역세정 가스의 흡인력이 노즐출구가 작을수록 그리고 펄스압력이 높을수록 세며 그 영향이 긴 영역까지 연장되어 필터 내부까지 연속되기 때문에 필터의 턱 부분에 형성되는 차압이 높은 압력에서 감소되기 때문이다.

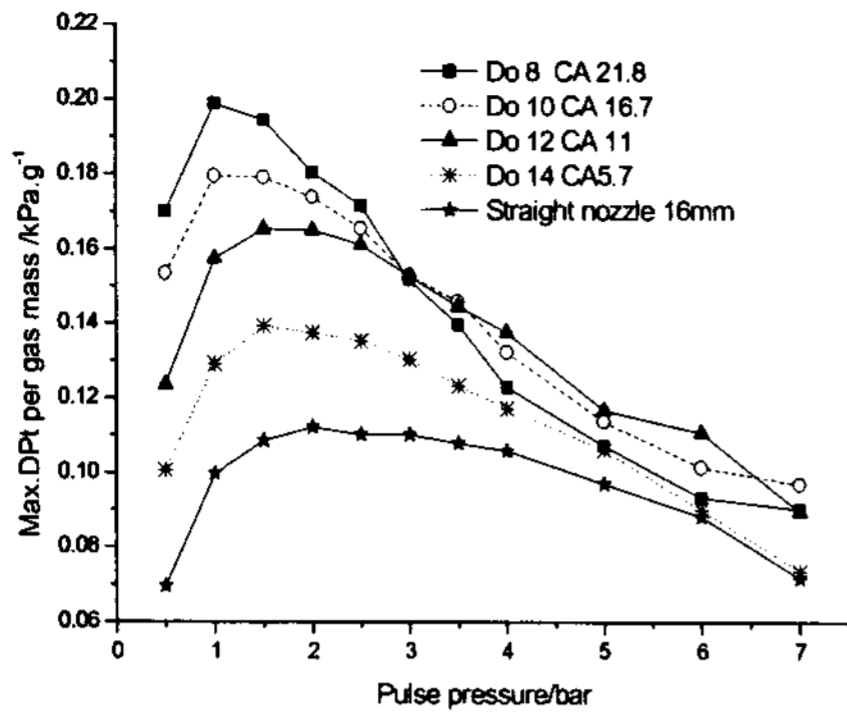


Fig. 6. Effect of nozzle size on the development of positive pressure in the filter cavity top

이와 같은 이유 때문에 필터 하부에 형성되는 차압을 역시 펄스가스 단위 질량에 대하여 환산하면 Fig. 7에 보인 바와 같이 일정압력 이상에서 더 이상 증가되지 않는 것을 볼 수 있다. 즉 각 노즐에서 펄스압력의 증가에 따라 가스 동반효과가 증가하지만 최대의 부압 형성 지점이 필터하단 부로 이동하기 때문에 동반가스 상승효과가 부압 상승효과에 의하여 상쇄되기 때문이다. 두 그림에서 직관형 노즐의 경우 펄스가스 단위질량당 필터 세척 압력이 현저히 낮은 것을 알 수 있다.

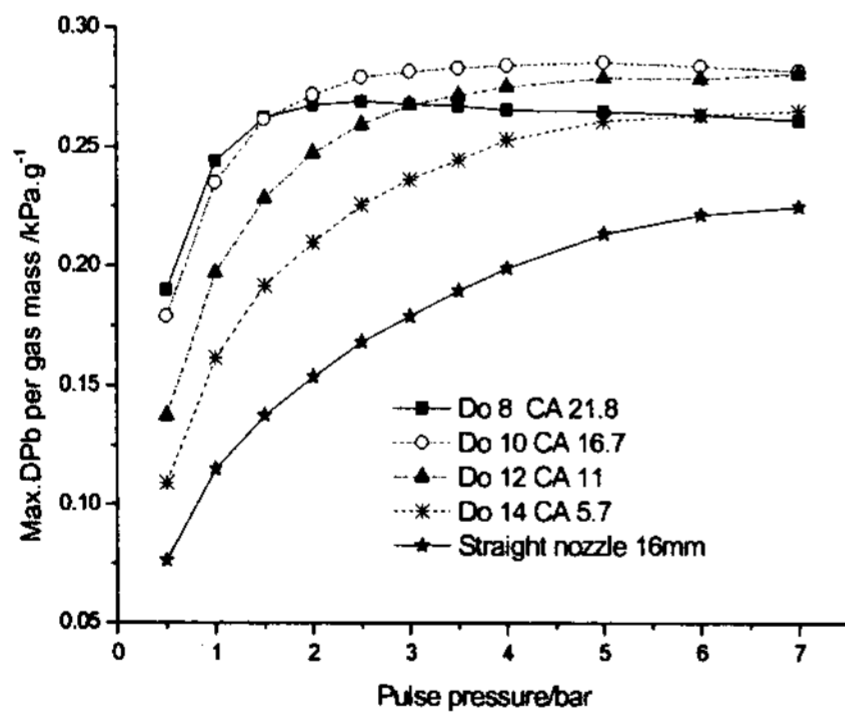


Fig. 7. The effect of nozzle size on the development of overpressure in the filter cavity bottom

#### 4. 결론

펄스가스가 노즐을 떠나서 필터 입구까지 이동하면서 주위의 압력보다 낮은 부압(negative pressure)가 형성되는 것이 실험적으로 관찰되었다. 이와 같은 부압은 펄스압력이 높을수록 그리

고 노즐 사이즈가 작을수록 크게 발생되었다. 노즐 주위의 부압 형성은 찬 역세 가스가 주위의 더운 가스를 동반하여 필터의 열충격을 줄이고 2차 가스를 동반하여 필터 내부의 충격압을 증가시키면서 일차 가스의 소비를 줄일 수 있는 면에서 매우 바람직스럽다. 그러나 부압이 너무 길게 형성되어 필터 내부까지 연장되면 실제로 필터의 상부에는 역세정 시에 흡인력을 일으키는 부압이 형성되기 때문에 심각한 역효과를 나타낼 수 있음이 확인되었다.

역세가스 주입 시에 노즐 주위에서 부압형성을 최대화 하고 동시에 필터 상부와 하부에는 양압(positive pressure)를 최대화 하는 조건을 최적치의 기준으로 삼았다. 직관형보다 수렴형 노즐이 높은 역세정 효과를 보였다. 또한 필터 설치 및 배열을 고려하여 최적으로 예상되는 노즐의 지름을 16 mm로 하여 노즐의 축소 직경을 12 mm로 할 때 제일 좋은 성능을 나타냈다.

#### 감사

본 연구는 2단계 BK21 사업과 에너지관리공단의 신·재생에너지개발 사업으로 수행되었으며, 신·재생에너지센터, 고등기술연구원과 석탄IGCC사업단에 감사드립니다.

#### References

- [1] Seville J P K, Chuah T G, Sibanda V, and Knight P. Gas cleaning at high temperatures using rigid ceramic filters. *Advanced Powder Technology*, 14 (6): (2003) 657-672.
- [2] Choi, J. H., Seo, Y. G., and Chung, J. W., Experimental Study on the Nozzle Effect of the Pulse Cleaning for the Ceramic Filter Candle. *Powder Technology*. 114: (2001) 129-135.
- [3] Ji Z, Meng X, Shi M, and Ding F. The interim process between pulse-backing cleaning and normal filtration processes of ceramic filter. *High Temperature Gas Cleaning*, Dittler A, Hemmer G, Kasper G., (2): (1999) 211-219.
- [4] Haixia Li, Zhongli Ji, Xiaolin Wu, Joo-Hong Choi, Numerical analysis of flow field in the hot gas filter vessel during the pulse cleaning process, *Powder Technology*, 173 (2007) 82.