

## 선박 대기오염 저감을 위한 벽면 캐비티 적용 습식 사이클론의 집진특성

여석준\* · 권준형<sup>1</sup>  
부경대학교 환경공학과

### Collection characteristics of wet-type cyclone with wall cavity for air pollutants removal of marine diesel engines

Seok-Jun YOA\*, Jun-Hyeong KWON<sup>1</sup>

*Departments of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea*

The main object of this study was to investigate the collection characteristics of wet-type cyclone with wall cavity. The experiment was executed to analyze the characteristics of pressure drop and collection efficiency for the present system with the experimental parameters such as water spray, water spray type, inlet velocity etc. In results, for the present system of wet-type, the pressure drop represented 35 mmH<sub>2</sub>O, while in dry-type 33 mmH<sub>2</sub>O showing lower 6% at  $v_{in}=21$  m/s. In case of  $v_{in}=21$  m/s and water spray 200 mL/min, the collection efficiency of the present system became significantly higher as 96.8% comparing to that of the conventional wet-type scrubber. Additionally, for 200 mL/min, SO<sub>2</sub> removal efficiencies decreased with the increment of inlet velocity representing 75.0, 62.5, 50.0%, at  $v_{in}=6, 9, 12$  m/s, respectively.

Keywords : Cyclone, Cavity, Pressure Drop, Collection Efficiency, Water Spray

#### 서 론

온실가스 감축의무가 현실화되면서, 선박엔진을 포함한 비도로 분야에서의 배기 정화 요구가 증대되고 있는 실정이다. 선박 디젤엔진으로부터 배출되는 유해한 배기배출물은 크게 입자상 및 가스상 오염물질로 나눌 수 있으며 이는 연료의 불완전 연소, 고온 고압에서 혼합물의 반응, 윤활유 및 첨가제의 연소 그리고 연료의 첨가제와 연료 중에 들어있는 유황 성분의 연소 등에 의해 생성된다. 디젤엔진에서 배출되는 입자상물질은 주요한 유해물질로서 국제해사기구 및 미국 유럽연합 등에서는 대기오염 배기배출물로 규정하여 그 배출량에 대한 규제를 시행하고 강화해 나가고 있다. 가스상 오염물질은 선박의 경우에 현재 국제해사기구는 Tier I, II

등을 통해 SO<sub>x</sub> 및 NO<sub>x</sub>를 규제하고 있고, 향후 점차 강화될 예정이다 (Oh et al, 2006; Lee and Doo, 2011; Kim et al, 2013). 선박의 경우 SO<sub>x</sub>농도 저감을 위해 현재 연료의 황 함유량으로 규제를 하고 있으나, 황 함유량 규제를 강화시킬 경우, 초저황유를 사용하거나, Global 및 ECA 지역별 엔진 연료를 변환하는 등의 방식으로 선박을 운전해야 하므로, 경제적으로 실현 불가능하다는 의견이 있다. 이와 같은 이유로 MEPC에서는 2009년 배기 가스 정화시스템의 가이드라인을 공개하여 SO<sub>x</sub> 후처리 장치를 설치하여 배기가스 조성으로 동등한 황함유량의 연료를 사용하는 것으로 간주할 수 있도록 하였다 (Kim et al, 2013). 위와 같은 배기규제 추세에 부합하기 위하여 선박용 배기배출물 처리 장치개발의 필요성이

\*Corresponding author: sjyoo@pknu.ac.kr, Tel: 82-51-629-6526, Fax: 82-51-629-6523

증대되고 있으며 이러한 입자상 및 가스상 오염물질을  
 동시에 제거하기 위해 세정집진기가 주로 사용된다. 세정  
 집진기는 분진을 수반하는 가스 등을 미세 액적에 의해  
 세정하여 제거하는 장치이다. 주요 세정집진기로는 벤  
 튠리 스크리버, 스프레이 챔버, 충전탑, 분무탑 등이 있  
 다. 이 중 벤튜리 스크리버는 세정 집진기 중 고효율  
 (90% 이상)의 장점을 지니지만, 압력손실 (300 mmH<sub>2</sub>O  
 이상)이 타 세정기에 비해 매우 높으며 세정액이 대량으  
 로 요구되어 운전비가 많이 소요된다는 단점을 가지고  
 있다. 더욱이 기존 세정집진기의 문제점은 오염물질 처  
 리 시 분사되는 미세 액적의 장치외부로의 배출 가능성  
 이 크며, 이를 해결하기 위해 장치 출구에 디미스터  
 (demister)를 설치하여 액적의 배출을 최소화 되도록 한  
 다 (Cho and Kim, 1990; Coker, 1993). 그러나 디미스터  
 설치 시 미세 액적과 함께 응집된 먼지 등에 의하여 디  
 미스터의 공극이 폐쇄되어 디미스터를 주기적으로 교  
 체해주어야 하는 문제점이 발생한다.

본 연구는 낮은 압력손실 및 고효율 (95% 이상)을 유  
 지할 수 있으며 소형 선박 및 어선에 적용 가능한 소형  
 의 콤팩트형 집진 시스템에 기존의 습식세정기의 문제  
 점인 디미스터의 설치 없이 미세 액적의 배출을 최소화  
 할 수 있는 습식 세정 집진장치를 연구·개발하는 것이  
 주요 목적이다. 따라서 본 연구에서는 물 분사 (water  
 spray) 시스템을 도입하여 입자상 오염물질 저감 성능  
 을 향상시키고 입자상 오염물질과 SO<sub>x</sub>의 동시저감이  
 가능하도록 하였다. 벽면 캐비티 (cavity)를 적용하여 캐

비티 내로 유입된 분진이 재비산 되지 않도록 하여 안  
 정적이고 높은 집진효율을 가질 수 있게 하였으며, 캐  
 비티 내로 유입된 미세액적 또한 캐비티 내에 머물게 함  
 으으로써 후단으로의 배출을 최소화할 수 있도록 하였다.  
 본 시스템의 집진특성을 해석하기 위해 유입유속, 물  
 분사량 및 분사방식 등의 변수에 따른 실험적 연구를 수  
 행하였다.

## 재료 및 방법

### 실험장치

본 연구에서 사용된 실험장치 구성을 살펴보면 분진  
 공급장치, 가스 주입장치, 물 분사 시스템, 캐비티를 적  
 용한 습식 사이클론 본체, 유입유속·압력손실 및 집진  
 효율 등을 측정할 수 있는 계측시스템으로 이루어져 있  
 으며, 유입유속과 압력손실, SO<sub>2</sub> 측정은 각각 열선풍속  
 계 (model 6162 Kanomax, accuracy ±3%), 압력측정장비  
 (midi LOGGER GL800 GRAPHTEC, accuracy ±0.25%),  
 SO<sub>2</sub>계측장비 (E8500, E Instruments, accuracy ±0.25%)를  
 사용하여 계측하였다. 시스템 유입유속은 원형 덕트 내  
 유속을 측정함으로써 산출되었으며, 유속 측정점은 대  
 기오염 공정시험법에 의해 덕트 단면의 14.6%와 85.4%  
 되는 지점을 선정하였다. 본 장치의 압력손실은 장치  
 입·출구의 정압차에 의해 측정되었으며, 사이클론의  
 이론적 압력손실을 나타내는 다음 식에 의해 평가·해  
 석될 수 있다 (Cho and Kim, 1990; Coker, 1993).

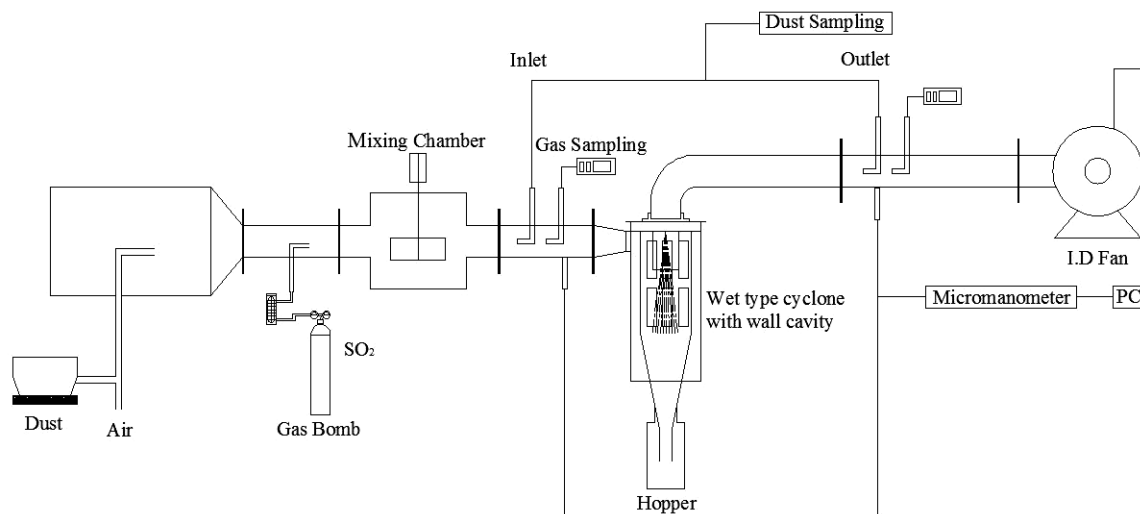


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

$$\Delta P = K \frac{\rho_a v_i^2}{2} \left( \frac{H_c B_c}{D_c^2} \right) \quad (1)$$

여기서,  $K$ 는 실험상수,  $\rho_a$ 는 가스의 밀도 ( $\text{g/cm}^3$ ),  $v_i$ 는 사이클론의 유입유속 ( $\text{m/s}$ ),  $H_c$ 는 유입구 높이,  $B_c$ 는 유입구의 너비,  $D_c$ 는 출구의 직경이다.

시스템 집진특성을 파악하기 위해 집진효율은 중량법 (gravity-metric method)에 의해 장치 입·출구의 중량농도를 측정하여 아래의 식에 의해 계산하였다 (Cho and Kim, 1990).

$$\eta_t = \left( 1 - \frac{m_{out}}{m_{in}} \right) \times 100 (\%) \quad (2)$$

여기서,  $\eta_t$ 는 총괄집진효율,  $m_{in}$ ,  $m_{out}$ 은 입·출구 중량농도 ( $\text{g/m}^3$ )이다.

Fig. 1은 본 집진장치의 전체 시스템에 관한 모식도이다.

Fig. 2는 실험장치 본체인 벽면 캐비티를 적용한 습식 사이클론의 구조를 나타내며 Table 1은 구체적 치수를 표현한 것이다. 기존의 사이클론의 형상과는 달리 벽면에 캐비티를 적용하여 포집된 입자가 블랙홀과 유사한

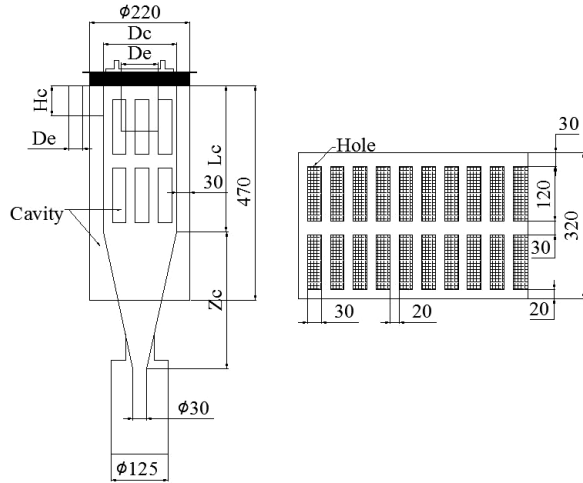


Fig. 2. Schematic diagram of wet type cyclone with wall cavity.

Table 1. Dimension of wet type cyclone with wall cavity.

	Dimension(mm)
Body diameter ( $D_c$ )	160
Inlet height ( $H_c$ )	65
Inlet width ( $B_c$ )	30
Body length ( $L_c$ )	320
Cone length ( $Z_c$ )	300
Exit diameter ( $D_c$ )	80

벽면 캐비티 내로 유입·포집되어 분진의 재비산에 의한 배출을 방지하고 액적의 배출을 최소화할 수 있도록 설계하였다 (Kim, 2013).

Fig. 3은 벽면 캐비티를 적용한 습식 사이클론에서 물 분사구의 위치를 표현한 것이다. 분사구는 분사각이 서로 겹치지 않게 하고 유출구로의 직접 배출의 가능성을 줄일 수 있도록 위치하였다.

Fig. 4는 입자를 포함한 기류가 벽면 캐비티를 적용한 습식사이클론으로 유입되었을 때의 기류패턴 및 입자 포집 메카니즘을 나타낸 것이다. 사이클론 본체에 접선으로 유입된 기류는 본체 내부에서 강한 선회류 (Vortex)를 형성하여, 선회류를 따라 이동하는 충분한 관성

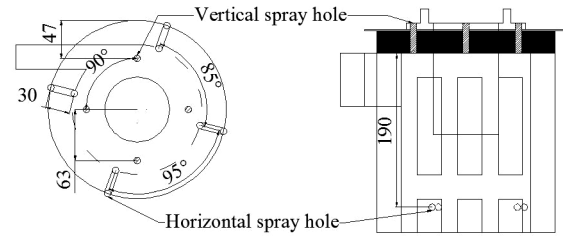


Fig. 3. Schematic diagram of water spray system.

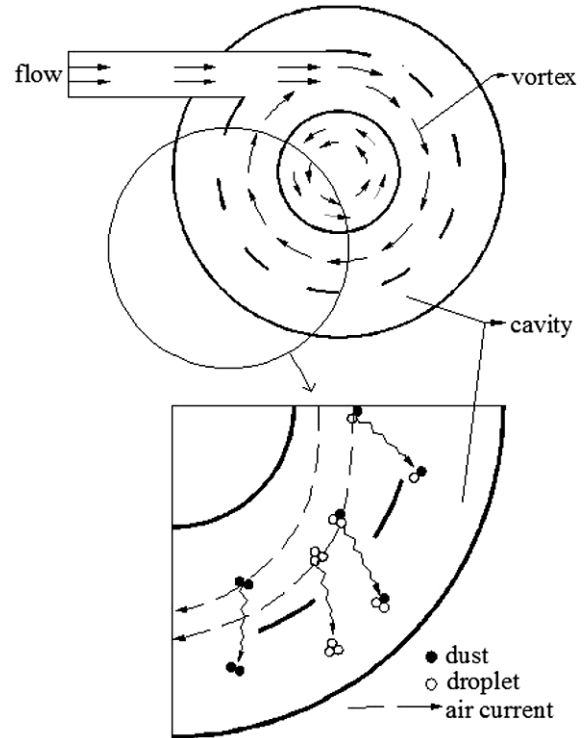


Fig. 4. Collection mechanism for present system.

**Table 2. Experimental conditions**

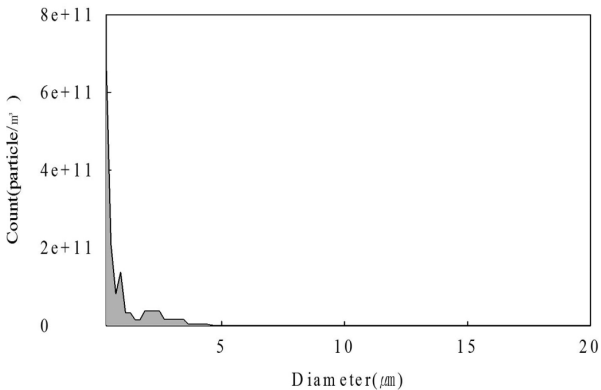
Description	Condition
Particle	fly ash
Dust inlet concentration (g/m <sup>3</sup> )	1, 3, 5
Dust operating hours (min)	4
Gas	SO <sub>2</sub>
Gas inlet concentration (ppm)	8
Liquid/gas ratio (L/m <sup>3</sup> )	0.041~0.285
Inlet velocity (m/s)	6, 9, 12, 15, 18, 21
Spray type	Vertical, Horizontal
Quantity of water spray (mL/min)	100, 200

력을 지닌 입자는 강한 원심력에 의해 선회류를 이탈하여 벽면 캐비티 내로 유입되어 중력에 의해 침강되면서 분진 누적함 (Hopper)에 포집 · 축적된다. 분사된 미세 액적은 서로간의 응집 현상에 의해 입경이 커지면서 충분한 관성력에 의해 위의 현상은 더욱 뚜렷이 나타난다. 따라서, 벽면 캐비티가 없는 기존 사이클론의 경우 분진 입자 및 분사 액적은 사이클론 내부 벽면에 포집되면서 다시 튕겨나오면서 재비산 되어 배출될 수 있지만 본 시스템의 경우 이와 같은 재비산에 의한 배출을 최소화 할 수 있다.

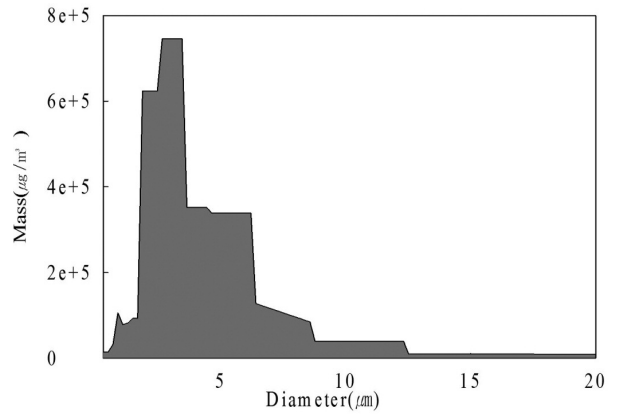
본 시스템의 집진특성을 해석하기 위해 입자상 (fly ash) 및 가스상 오염물 (SO<sub>2</sub>)로 구분하여 실험조건을 Table 2에 나타내었다.

**실험용 분진**

실험에 사용한 분진은 화력발전소에서 채취한 fly ash로 입경분석장비 (GRIMM Aerosol Dust Monitor & Counters)를 사용하여 분진의 입경별 분포를 알아보았다. 입경분석장비는 15개의 채널을 이용하여 분진의 수농도를 측정한다. 개수기준 평균입경은 0.69 μm이며, 중량



**Fig. 5. Particle number distribution.**



**Fig. 6. Particle mass distribution.**

기준 평균입경은 3.98 μm의 fly ash를 사용하였다.

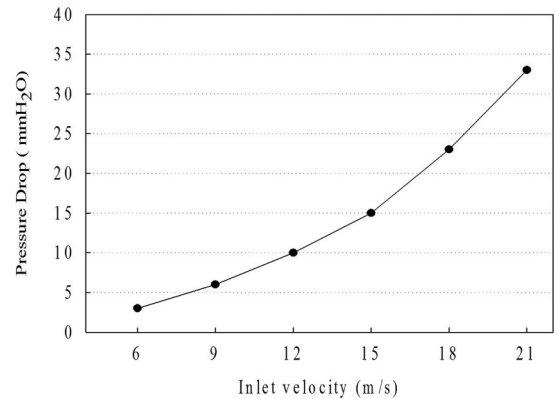
**결과 및 고찰**

**압력손실 특성**

본 시스템의 압력손실은 집진효율과 더불어 시스템 설계의 중요인자가 된다. 압력손실에 영향을 미치는 주요 실험변수로 시스템 유입유속, 물분사량 및 장치구조 등을 들 수 있다. 압력손실은 식 (1)에 의해 해석될 수 있으며, 이들 변수에 따라 압력손실 특성이 변화될 수 있다.

Fig. 7은 벽면 캐비티를 적용한 사이클론의 유입유속  $v_m=6, 9, 12, 15, 18, 21$  m/s에 따른 압력손실 변화를 나타낸다. 유입유속  $v_m=6, 9, 12, 15, 18, 21$  m/s에서 3, 6, 10, 15, 23, 33 mmH<sub>2</sub>O의 압력손실을 보인다. 입구유속이 증가할수록 압력손실이 높게 나타나는데 이는 식 (1)에 의해 압력손실은 유속의 제곱에 비례하여 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 8은 벽면 캐비티를 적용한 사이클론에 물 분사 시



**Fig. 7. Pressure drop with inlet velocity (dry type).**

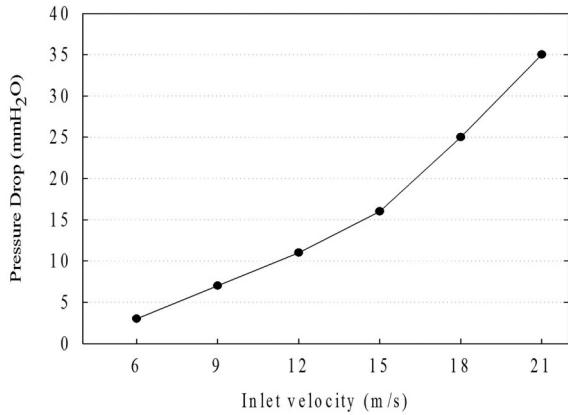


Fig. 8. Pressure drop with inlet velocity (wet type, water spray 200 mL/min, vertical spray type).

시스템을 부가하여 물 분사량 200 mL/min에서 유입유속 증가에 따른 압력손실의 변화를 나타낸다. 유입유속  $v_{in}$  = 6, 9, 12, 15, 18, 21 m/s 일 때 압력손실은 3, 7, 11, 16, 25, 35 mmH<sub>2</sub>O로 점차 증가함을 알 수 있다. Fig. 7의 건식 (dry type) 시스템의 경우에 비해 1~2 mmH<sub>2</sub>O정도 압력손실이 증가하였으며, 이는 물을 분사함으로써 분사 액적과 기류와의 충돌에 의한 저항증가에 따른 영향으로 판단된다.

입자상 오염물질의 집진 특성

본 연구의 집진효율에 영향을 미치는 중요 변수는 유입유속, 물 분사량 및 분사방식 등이며 주요 포집 메커니즘은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 임팩션 (impaction) 효과, 난류 확산, 분진과 미세 액적과의 상호작용 (확산, 차단, 충돌 등) 등이 될 수 있다.

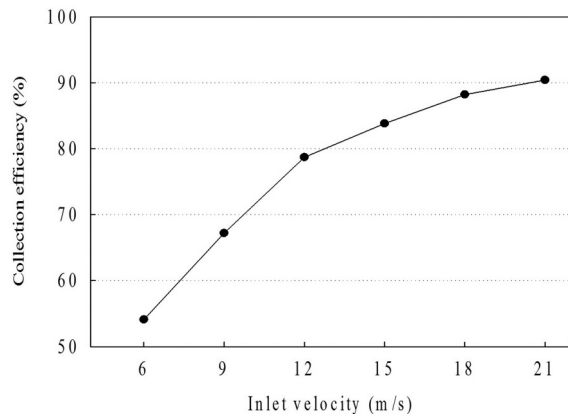


Fig. 9. Collection efficiency with inlet velocity (no water spray).

Fig. 9는 물 분사가 없는 건식 시스템에서, 유입농도 3 g/m<sup>3</sup>에서 유입유속에 따른 집진효율을 나타낸 것이다.

유입유속  $v_{in}$  = 6, 9, 12, 15, 18, 21 m/s에서 집진효율은 54.1, 67.2, 78.7, 83.8, 88.2, 90.4%로 유입유속이 증가함에 따라 집진효율이 증가함을 볼 수 있다.

사이클론의 이론적 입경별 효율식은 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Cooper and Alley, 1994).

$$\eta_d = \sqrt{\frac{\pi N_i v_i \rho_p d_p^2}{9 \mu B_c}} \quad (3)$$

여기서,  $\eta_d$ 는 입경별 효율,  $N_i$ 는 선회류수,  $\rho_p$ 는 입자 밀도 (g/cm<sup>3</sup>),  $d_p$ 는 입자 직경 ( $\mu$ m),  $\mu$ 는 가스의 점성계수 (g/cm-s)이다.

식 (3)으로부터 사이클론의 50% 효율의 절단입경은 식 (4)로 나타낼 수 있다 (Cooper and Alley, 1994).

$$d_{p,cut} = \sqrt{\frac{9 \mu B_c}{\rho_p v_i N_i 2 \pi}} \quad (4)$$

여기서,  $d_{p,cut}$ 는 절단입경 ( $\mu$ m)이다.

식 (4)에서 보는 바와 같이 유속 증가에 따라 절단입경이 감소되며, 즉 선회류에 의한 임팩션 효과의 증가에 의해 집진효율은 상승함을 알 수 있다.

Fig. 10은 습식 (wet type) 시스템에서 물분사량 (vertical spray type) 및 유입유속에 따른 효율을 비교하여 나타낸 것이다. 유입유속  $v_{in}$  = 6, 9, 12, 15, 18, 21 m/s에서 집진효율은 물분사량 100 mL/min인 경우 67.9, 79.1, 84.9, 90.3, 93.4, 96.1%이며 물분사량 200 mL/min인 경우 72.0, 83.2, 88.9, 92.4, 95.1, 96.8%로 높은 효율을 나타내

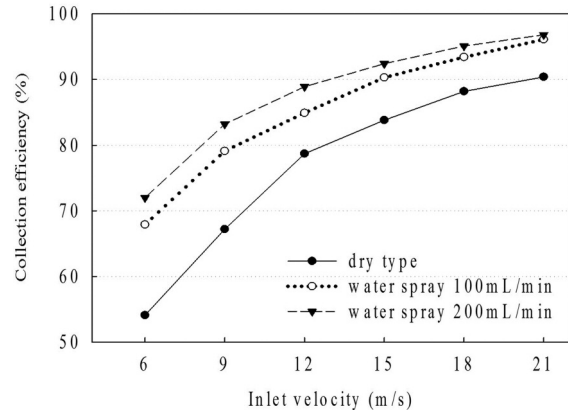


Fig. 10. Collection efficiency with inlet velocity (vertical spray type).



었다. 물 분사량이 증가하면서 집진효율은 증가하며, 물 분사량 200 mL/min에서 건식 시스템에 비해 유입유속에 따라 6.4~17.9%정도 집진효율이 높게 나타남을 알 수 있다. 이는 액적 분사에 의한 수백  $\mu\text{m}$ 입径의 미세 액적과 분진입자와의 관성충돌, 차단, 확산 등의 포집 메카니즘이 효과적으로 결합되어 나타난 결과이다. 관성충돌효과는 식 (5)에서 볼 수 있듯이 분진입자와 미세액적간의 상대속도가 증가될 때 높아지며, 즉 집진효율 증대를 의미한다. 단일 액적의 포집효율은 다음 식으로 표현된다 (Cooper and Alley, 1994).

$$\eta_d = \frac{kv_o v_t}{gd_d} \quad (5)$$

여기서,  $k$ 는 실험상수,  $v_o$ 는 액적에 대한 입자의 상대속도 (m/s),  $v_t$ 는 입자의 종말속도 (m/s),  $g$ 는 중력가속도 ( $9.8 \text{ m/s}^2$ ),  $d_d$ 는 액적 직경 ( $\mu\text{m}$ )이다.

또한 물 분사량의 증가는 즉, 단일 액적의 정량적 증가를 의미하며 식 (5)의 단일 액적의 효율이 직렬적으로 집진효율에 기여할 수 있다. 더욱이, 본 시스템은  $v_m = 21 \text{ m/s}$ , 물 분사량 200 mL/min에서 96.8%의 집진효율과 액·가스비 0.081 L/m<sup>3</sup>, 압력손실 35 mmH<sub>2</sub>O로 기존의 벤츄리 스크리버 (0.3~0.5 L/m<sup>3</sup>, 300 mmH<sub>2</sub>O 이상)에 비해 매우 낮은 압력손실로 동력소모를 현저히 줄일 수 있으며 상대적으로 낮은 액·가스비로 처리 후 폐수의 양을 줄일 수 있는 이점을 가질 수 있다.

Fig. 11은 습식 시스템에서 물 분사 방식에 따른 집진효율을 나타낸 것이다. 물분사량 200 mL/min, 유입유속  $v_m = 6, 9, 12, 15, 18, 21 \text{ m/s}$  일 때 사이클론 몸체 벽면에

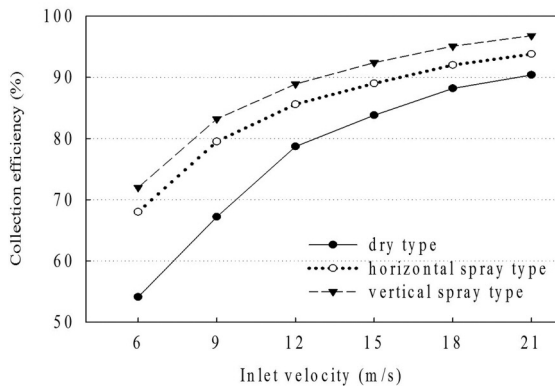


Fig. 11. Collection efficiency with inlet velocity and spray type (water spray 200 mL/min).

서 분사되는 수평분사방식 (horizontal spray type)의 경우 각 유입유속에서 68.0, 79.5, 85.6, 89.0, 92.0, 93.8%, 사이클론의 출구 부근 상측면에서 하측 중력 방향으로 분사되는 수직분사방식 (vertical spray type)은 72.0, 83.2, 88.9, 92.4, 95.1, 96.8%로 3~4% 정도의 집진 효율 차이를 나타내었다. 이는 수직 분사 방식에 비해 수평 분사 방식에 의한 분사 액적은 사이클론 접선 유입구를 통해 형성된 강한 선회류와 충돌하는 경향이 더욱 높아지면서 선회류 약화를 상대적으로 증대시키기 때문이며, 또한 식 (5)에 의해 수직 분사 방식의 경우 수평 방식에 비해 분진 입자와 액적간의 상대속도가 커지며, 이로 인해 효율 상승을 초래하는 것으로 판단된다.

### 가스상 오염물질의 처리 특성

액적분사에 의한 흡수 (absorption) 메카니즘은 가스상 오염물질의 주요 처리방법 중의 하나로 물질 이동 원리를 이용하여 분리·제거하는 방법이다. 물질이 용액 내로 이동할 때 물리·화학적 평형관계가 존재하며, 가스상 오염물질을 흡수액과 접촉시킬 때 물리적 평형관계 내에서 접촉 면적을 크게 하고 접촉시간을 충분히 유지시키는 것이 중요하다. 물리적 평형관계는 Henry의 법칙에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다 (Sawyer et al, 2008).

$$P_A = H X_A \quad (6)$$

여기서,  $P_A$ 는 기체분압,  $H$ 는 Henry 상수,  $X_A$ 는 액상 중의 가스농도이다.

본 시스템에서는 용해도가 비교적 높은, 즉 Henry 상수가 낮은 SO<sub>2</sub> 가스를 선택하여 실험을 수행하였다. Fig.

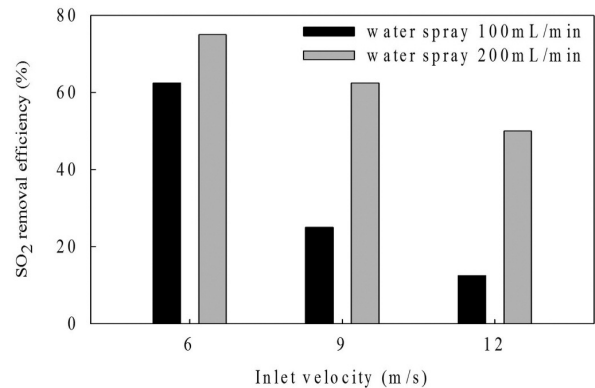


Fig. 12. SO<sub>2</sub> removal efficiency with inlet velocity and water spray (vertical spray type).

12는 물분사량 및 유입유속에 따른 SO<sub>2</sub> 제거 특성을 나타낸 것이다. 유입유속  $v_m=6, 9, 12$  m/s 에서 물분사량 100 mL/min일 때 제거효율은 62.5, 25.0, 12.5%, 물분사량 200 mL/min일 때 제거효율은 75.0, 62.5, 50%로 유입유속이 증가할수록 제거효율이 감소하며 물분사량이 증가할수록 제거효율이 증가함을 알 수 있다. 유입유속 증가는 유량증대에 의한 액·가스비의 감소와 시스템 내의 체류시간 즉, 가스-흡수액의 접촉시간을 감소시켜 제거효율의 저하를 초래하며 물 분사량 증가에 따라 액·가스비가 커지면서 흡수액과 가스의 접촉면적의 증가로 제거효율은 상승하였다.

### 결 론

선박디젤엔진에서 배출되는 대기오염 물질을 처리하기 위한 본 시스템은 기존의 사이클론에 물 분사 시스템과 분진입자 및 분사액적의 재비산을 최소화 하기 위해 벽면 캐비티를 적용하였다. 더욱이, 본 시스템은 소형 어선 및 선박에도 적용 가능한 소형 장치규모로 고효율(95%이상)과 낮은 압력손실(50 mmH<sub>2</sub>O이하)을 유지할 수 있는 콤팩트형 집진시스템이다. 본 집진시스템의 압력손실 및 집진특성을 해석하기 위해 유입유속, 물 분사량(액·가스비) 및 분사 방식 등의 다양한 실험변수에 따른 실험을 수행하여 시스템 최적설계를 위한 결과를 얻고자 하였다. 유입유속 증가에 따라 압력손실은 식(1)에 의해 유속 제곱에 비례해서 증대되며 최고 유속인  $v_m=21$  m/s에서도 압력 손실은 35 mmH<sub>2</sub>O로 기존 습식 세정기(200 mmH<sub>2</sub>O이상)에 비해 매우 낮게 나타남으로써(Yoo et al, 2003) 즉, 이는 낮은 동력소모로 장치를 구동시킬 수 있어 별도의 전력발생원 없이 선박엔진의 출력으로 충분히 장치 운전이 가능할 수 있음을 의미한다.

분진 입자 제거 특성은 유입유속이 높아 질 때 충분한 관성력에 의해 포집효율은 증가되며,  $v_m=21$  m/s 에서 건식인 경우 90.4%로 기존 사이클론 효율(60% 정도)에 비해 매우 높게 나타나며(Ko and Kim, 2013), 이는 본 시스템의 분진 재비산 방지를 위한 벽면 캐비티의 형성으로 분진의 장치 외부로의 배출을 최소화 할 수 있었기 때문이다. 물 분사량 200 mL/min(액·가스비 0.081 L/m<sup>3</sup>)일 때 96.8%의 높은 집진효율로 유입유속 및 액·가스비 증가에 따라 집진효율은 더욱 증대 될 수 있으며, 본 시스템은 벽면 캐비티 형성에 의해 기존 세정집진기의 미세액적 배출방지용인 디미스터를 필요로 하

지 않는 이점을 지니고 있다(Cho and Kim, 1990). 용해도가 비교적 높은 SO<sub>2</sub> 제거특성은 물 분사량 증가 및 유입유속감소에 따라 SO<sub>2</sub> 제거효율은 증가되며,  $v_m=6$  m/s, 물 분사량 200 mL/min일 때 75%의 비교적 높은 제거효율을 나타낸다. SO<sub>2</sub> 제거는 입자상 오염물질과는 상반적으로 낮은 유속에서 높은 처리효율을 나타내므로 동시 집진을 위해 적절한 유입유속의 선정과 그에 따른 액·가스비의 증가가 필요할 것으로 판단된다. 본 시스템의 액·가스비는 0.081~0.258 L/m<sup>3</sup>으로 기존의 고효율(90%이상) 습식 세정기인 벤투리 스크러버(Venturi-scrubber)의 액·가스비(0.3~0.5)에 비해 매우 낮아(Cho and Kim, 1990; Cooper and Alley, 1994) 적정 유입유속에서 액·가스비 증가에 의해 입자·가스상 오염물질을 동시에 효과적으로 처리할 수 있을 것으로 사료된다.

### 사 사

본 연구는 2014학년도 부경대학교 자율창의학술연구비(C-D-2014-0427) 지원에 의해 수행되었습니다.

### REFERENCES

- Cho BH and Kim JH. 1990. Air pollution prevention technology. Dong Hwa Technology, 23, 107 – 144, 260 – 286.
- Choi IS. 2003. Basic Study on an Aftertreatment System of Diesel Particulate Matters with Electrostatic Precipitator and Cyclone. Trans KOSAE, 9 (6), 8 – 15.
- Coker AK. 1993. Understand cyclone design. Chemical Engineering Progress. Dec. 51 – 55.
- Cooper CD and Alley FC 1994. Air pollution control : A design approach (second edition), 127 – 149, 217 – 247.
- Dietz PW. 1981. Collection efficiency of cyclone separators. AIChE Journal, 27 (6), 888 – 892.
- Kim CL, Kwon SA, Lee SJ and Ko CB. 2013. Experimental Study on Particle and Soluble Gas Removal Efficiency of Water-cyclone. J KOSAE 29 (2) 163 – 170. (doi : 10.5572/KOSAE.2013.29.2.163)
- Kim HJ, Han BW, Cho GB and Hwang SC. 2013. Performance test of a simultaneous PM and SO<sub>x</sub> removal system for marine diesel engines. Trans KSME\_B, 5, 104 – 105.
- Kim HJ, Han BW, Cho GB and Kim YJ. 2012. Particle removal performance of a dry electrostatic precipitator for marine diesel engines and boilers. Trans KSME\_B, 5, 250 – 251.
- Kim JY. 2013. Collection Characteristics of Multi-layer Multi-stage Porous Plate System with Water Spray, MS. Thesis, Pukyong

- National University, Korea, p. 62.
- Koo JH, Kim MC, Park SC, Park TS, Ahn BG, Oh SW, Lee GS and Lee SJ. 2006. Atmosphere Environmental Device Design II, Dong Hwa Technology, 226 – 233.
- Lee YC and Doo HW. 2011. A Study on the IMO Regulations regarding GHG Emission from Ships and its Implementation. J Nav Port Res, 35, 5, 371 – 380.
- Ha BK and Yoa SJ. 1995. Collection Efficiency Characteristics of Electroyclone for removal of B/C Soot Particulates. J Kor Soc Environ Eng, 17 (11) 1161 – 1169.
- Oh SH, Kim HK and Yoo BH. 2006. An Experimental Study on the Emission Charateristics of Diesel Particulate Matter. Proc Kor Soc Mar Eng Con, 93 – 94
- Park YO, Park HJ, and Kim YH. 2011. SO<sub>2</sub> Removal by Internal Circulation of de-SO<sub>x</sub> Absorbents. J KOSAE, 27, 6, 672 – 680. (doi : 10.5572/KOSAE.2011.27.6.672)
- Park SH, Kim IS. 2006. Recent Trends of Vessel-Source Pollution. J Kor Soc Mar Environ & Safty, 97 – 104.
- Yong JK, Kim CN and Jo YM. 2008. A Numerical Analysis on the Flow Characteristics and the Collection Efficiency for Fine Particles in a Cyclone. Int J Air-cond and Regri, 144 – 153.
- Yoo KH, Roh HH, Choi ES and Kim JK. 2003. An Experiment on the Particle Collection Characteristics in a Packed Wet Scrubber, Kor J Air-Cond and Refri Eng, 15 (4) 305 – 311
- Sawyer CN, McCarty and Perry L. 2008. Chemistry for Environmental Engineering and Science (5th Edition), McGraw-Hill, 25 – 27
- Ko HG and Kim HS, 2013, Theoretical Analysis and Experimental Evaluation of Small Cyclone Separator to Remove Fine Particulate Matter, Trans KSME\_A, 37 (1), 77 – 82. (doi:10.3795/KSME-A.2013.37.1.077)
- 
2014. 4. 8 Received  
2014. 5.16 Revised  
2014. 5. 20 Accept