

박용디젤기관의 대기오염 저감을 위한 습식 다단 임팩션 시스템의 집진특성

여석준* · 권준형
부경대학교 환경공학과

Collection characteristics of wet-type multi-staged impaction system for air pollutants removal of marine diesel engines

Seok-Jun YO^A* and Jun-Hyeong KWON

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, Busan 48513, Korea

The main purpose of this paper was to analyze the removal characteristics of gas/particulate phase pollutants for the present system. Experimentally, we performed to estimate the pressure drop and air pollution removal efficiency with physical variables such as stage number, tube velocity, tube diameter, water spray (NH₄OH), and so on. It was concluded that the pressure drop was shown below 111 mmH₂O lower than that of the existing scrubber (centrifugal spray chamber, over 200 mmAq) at inlet velocity 3.46 m/s and 5 stage. The particular removal efficiency of this system was to be significantly higher at 99.8% in comparison with that of the existing scrubber for 5 stage, inlet velocity 3.46 m/s and NH₄OH (aq) 300 mL/min. It was estimated that the removal efficiencies of SO₂ and NO₂ were 80% and 70% at system inlet velocity 2.07 m/s and NH₄OH (aq) 300 mL/min respectively. Additionally, the present collection system was to be considered as an effective compact system for simultaneous removal of air pollutants (gas/particulate) due to much higher removal efficiency and appropriate pressure drop without a demister.

Keywords : Wet-type multi-staged impaction system, Removal efficiency, NH₄OH, Scrubber, Demister

서론

대기오염의 심각성으로 인해 대기오염물질 배출규제가 더욱 강화됨에 따라 대기오염방지시설의 교체 및 보안을 위한 저비용·고효율의 집진장치 개발이 절실히 요구된다.

선박 디젤 엔진에서 배출되는 대기오염물질은 입자상 및 황산화물, 질소산화물 등의 가스상 오염물질로 분류할 수 있다. 이는 연료의 불완전 연소, 연료 중에 함유되어 있는 유황성분의 연소 및 연료 내에 화학적으로 결합된 질소 성

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

분의 연소 과정에서 주로 생성된다. 박용 기관에서 발생하는 분진 등의 입자상 오염물질은 미국, 유럽연합 및 국제해사기구 등에서 대기오염 유해물질로 규정하여 배출규제를 시행하고 있으며, 황산화물 (SO_x), 질소산화물 (NO_x) 등의 가스상 오염물질의 경우 국제해사기구에서 Tier I, II 등을 통해 배출량 규제를 강화하고 있는 실정이다 (Jang et al., 2004; Lee and Doo, 2011; Kim et al., 2013a). 황산화물 배출농도 감소를 위해 연료의 황함유량 규제를 강화할 경우 초저황유 사용에 따른 연료 비용의 증가로 인한 경제적 부담이 현실적 문제로 대두된다. 따라서 Marine Environment Protection Committee (MEPC)에서는 배기가스정화 시스템의 표준 지표에 의해 SO_x 후처리 시스템을 구성하여 SO_x 배출농도 규제를 시행하도록 하였다 (Kim et al., 2013b). 일반 산업현장에서 SO_x 처리방법으로 석회법, 암모니아법 등을 사용하며 NO_x 처리방법으로 비선택적 촉매환원법 (SNCR), 선택적 촉매환원법 (SCR) 등을 사용하는데, 이는 입자상 오염물질을 처리하기 위한 집진 시스템과 더불어 별도의 부가적인 처리시스템이 요구되므로 제한된 공간에서 입자상 오염물질, SO_x 및 NO_x를 단일 시스템으로 동시에 처리할 수 있는 후처리 설비가 필요하다. 따라서 선박디젤기관에서 배출되는 입자 및 가스상 오염물질 (SO_x, NO_x)을 단일 시스템으로 동시처리하기 위해 세정 집진기가 도입될 수 있다.

세정 집진기는 가스 중 부유되어 있는 분진 등을 액적 분사에 의해 세정하여 처리하는 장치로 주요 세정 집진기로는 원심력 살수 집진기, 오리피스 세정 집진기, 분무탑 등이 있다. 이 중 원심력 살수 집진기는 세정 집진기 중 고효율 (90% 이상)의 이점을 지니지만, 압력손실 (250 mmH₂O 이상)이 타 세정 집진기에 비해 매우 높고 장치의 규모가 대형화 될 수 있으며 운전비가 많이 소요될 수 있는 단점을 가질 수 있다. 또한 기존 세정 집진기는 오염물질 처리 시 분사된 액적이 장치외부로 배출될 가능성이 크기 때문에 이를 해결하기 위해 장치 출구에 디미스터 (demister, 일종의 filter)를 사용하여야 한다 (Yoa and Jang, 2014). 그러나 디미스터 사용 시 분사된 액적과 함께 응집된 분진 등에 의하여 디미스터의 공극이 폐쇄되어 디미스터 교체주기가 단축되며, 이에 따른 운전의 연속성 및 유지비용에 대한 문제점이 발생된다.

따라서 본 연구에서는 적정 압력손실 (111 mmH₂O 이하) 및 고효율 (99% 이상)을 유지할 수 있으며, 입자 및 가스상 (SO₂, NO₂) 오염물질의 동시처리가 가능한 콤팩트형 집진 시스템으로 일반 세정 집진기의 문제점인 디미스터 사용 없이 장치외부로의 액적배출을 최소화할 수 있는 습식 다단 임팩션 시스템을 연구·개발하고자 한다.

재료 및 방법

실험장치 및 방법

본 연구의 실험장치는 먼지 공급장치, 액적 분사 시스템, 다공성 플레이트 시스템 본체, I.D. Fan, 튜브통과유속 (즉, 시스템 유입유속), 압력손실 및 처리 효율 등을 측정할 수 있는 계측시스템으로 구성되어 있다. 유입유속은 열선풍속계 (model 6162 Kanomax, accuracy ±3%), 압력손실은 압력계측장비 (midi LOGGER GL800 GRAPHTEC, accuracy ±0.25%), SO₂ 및 NO₂ 측정은 휴대용 연소가스 측정기 (E8500, E Instruments, accuracy ±4%)를 사용하여 측정하였다. 유입유속은 원형 덕트 내 유속을 측정함으로써 산출되었으며, 유속 측정지점은 대기오염 공정시험법에 의해 덕트 단면의 14.6%와 85.4%되는 지점을 선정하였다. 본 장치의 장치저항 (즉, 압력손실)은 시스템 입·출구의 정압 차에 의해 측정되었으며, 본 시스템의 이론적 압력손실은 아래의 식에 의해 해석될 수 있다 (Kim and Yoa, 2010).

$$\Delta P = P_n - P_{n-1} \propto f(\rho v_{in}^2, D_t, d_i, etc) \quad (1)$$

여기서 P_n 과 P_{n-1} 은 플레이트 전·후에서의 압력, v_{in} 은 시스템 유입유속, D_t 는 튜브내경, d_i 는 플레이트-튜브 간 거리이다.

본 장치의 집진특성을 분석하기 위해 분진 처리효율은 중량법 (gravi-metric method)에 의해 다음의 식으로 해석할 수 있다 (Willeke and Baron, 1993).

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

여기서 η_t 는 총괄집진효율, m_{in} , m_{out} 은 입·출구 중량농도 (g/m³)이다.

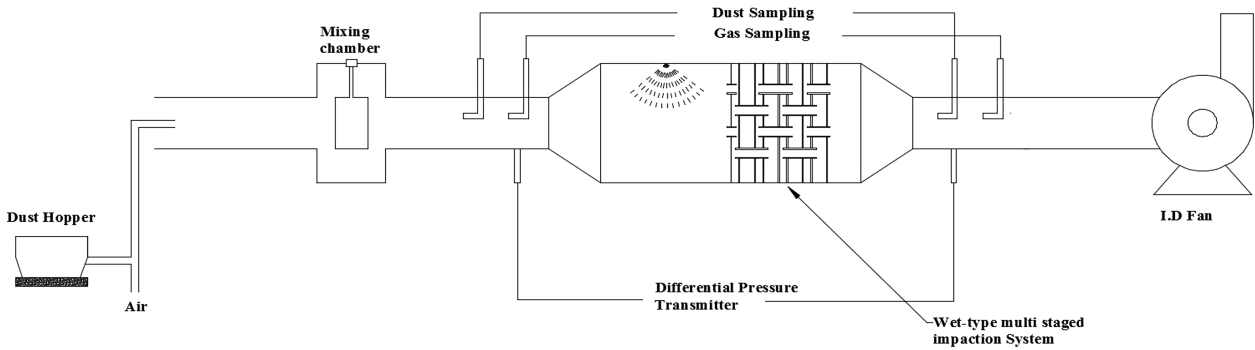


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

Fig. 1은 본 실험의 전체 시스템 구성에 대한 모식도이다. 유량조절을 위해 인버터 (inverter)를 사용하여 I.D. Fan의 회전수를 조절하며, 시스템 입구 쪽에 위치한 스크류 (screw)방식의 분진 공급 장치로부터 분진이 공급된다.

Fig. 2는 시스템 본체의 다단 (5 stage) 다공성 플레이트의 구성 및 배열을 나타내는 측면도이다. 본체 유입부에 액적 분사 시스템을 설치하고, 시스템 본체에 구성된 porous plate는 폭 250 mm, 높이 210 mm 및 홀 직경 12 mm tube를 사용하였다. 각 stage를 통과하는 튜브는 지그재그로 교차되며, 1 stage는 단층, 2~5 stage는 복층 구조로 블랙박스, 블랙홀로 구성되어 있고, 3~5 stage에는 블랙박스 내의 기류유출을 위한 사각형의 out flow hole과 물 칸막이가 설치되어 있으며, 블랙박스 내에 튜브가 일부 삽입되어 있는 형태로 분사액적의 배출을 최소화할 수 있도록 설계되어 있다. 1 stage에서 포집되지 않은 입자는 기류와 더불어 1 stage 튜브를 통해 가속화 되어 높은 관성력에 의해 기류를 이탈하여 블랙홀을 통해 블랙박스 내로 진입되면서 포집된다. 1 stage에서 플레이트에 포집된 입자는 기류에 의해 재비산의 가능성이 높지만, 2~5 stage의 경우 포집된 입자는

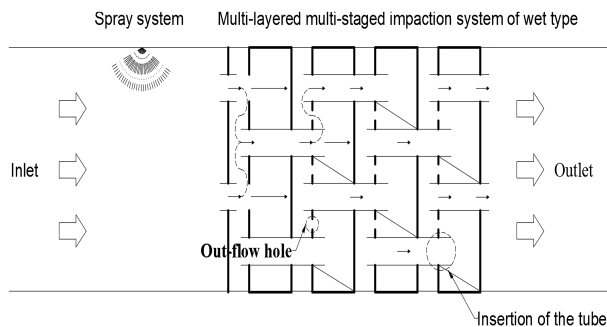


Fig. 2. Combined multi-layered multi-staged porous plate system.

블랙박스 내에 누적되면서 재비산을 방지할 수 있다. 본 시스템은 stage 수가 증가할 때 위의 물리적 과정을 반복하면서 집진효율이 증가되도록 설계되어 있다.

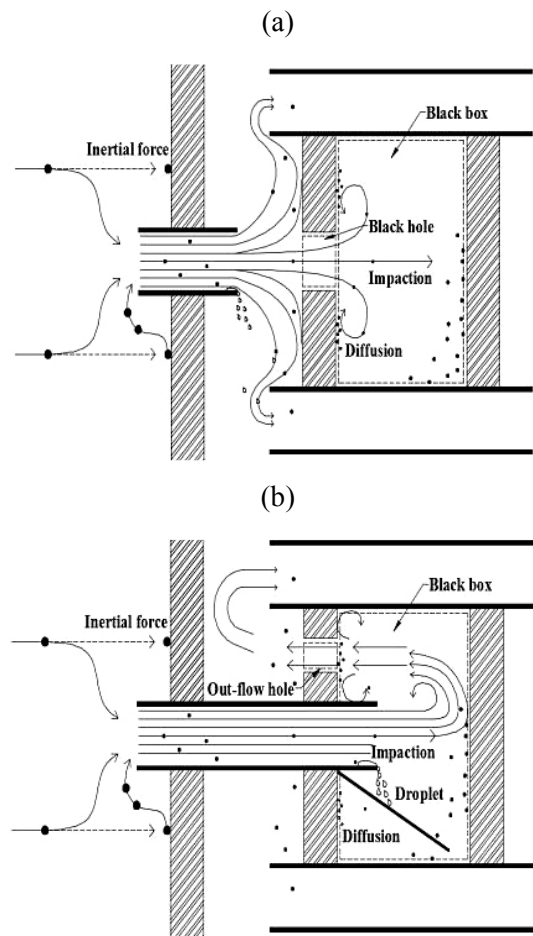


Fig. 3. Collection mechanism of the present system. (a) 1, 2 stage (b) 3, 4, 5 stage.

Fig. 3은 본 장치에서 각 stage의 단일 module을 통해 기류에 부유된 분진 입자 및 미세액적이 블랙박스 내에 포집되는 과정을 나타내는 그림이다. Fig. 3의 (a)는 1, 2 stage를 나타내는 그림으로, 이와 같은 형태는 액적 분사를 할 경우 기류에 부유되어 있는 먼지 입자와 액적은 기류와 더불어 tube를 통해 가속화 되며, 관성력이 높은 먼지 입자와 액적은 기류를 벗어나 블랙박스 내에 진입되어 재비산 없이 집진될 수 있다. 그러나 액적간의 응집현상으로 입경이 증가된 액적은 tube 하측 방향으로 중력에 의해 침강하여 하부 tube를 통해 다음 단으로 이동하면서 최종 stage (5 stage)를 통해 장치외부로 유출될 수 있다. 따라서 Fig. 3의 (b)와 같은 형태 (3, 4, 5 stage)로 전단의 tube가 다음 단의 블랙박스 내로 유입되고 tube 윗부분에 out-flow hole을 설치함으로써 기류가 다음 단으로 이동하도록 하고 튜브하단에 물 칸막이를 설치하여 위와 같은 액적의 유출을 최소화하였다.

본 시스템의 압력손실, 집진효율 특성을 알아보기 위해 유입유속, stage 수, 액적 분사량 등의 실험 변수로 실험을 수행하였으며, 이에 따른 실험조건을 Table 1에 나타냈다.

실험에 사용한 분진은 H 화력발전소에서 미분탄 연소 기관에 의해 발생된 비산회재 (fly ash) 입자로 입도분포 측정기 (Beckman Coulter LS 13 320)를 사용하여 분진

Table 1. Experimental conditions for analysis of collection characteristics

Description	Condition
Particle	fly ash
Inlet velocity (m/s)	2.07, 2.76, 3.46
Tube velocity (m/s)	9, 12, 15
Dust Inlet concentration (g/m ³)	1, 3, 5
Tube diameter (mm)	12
Stage number	1, 2, 3, 4, 5
Gas	SO ₂ , NO ₂
Gas inlet concentration (ppm)	30
Adsorption liquid	water, NH ₄ OH
Water spray (mL/min)	150, 300
Operating time (min)	4

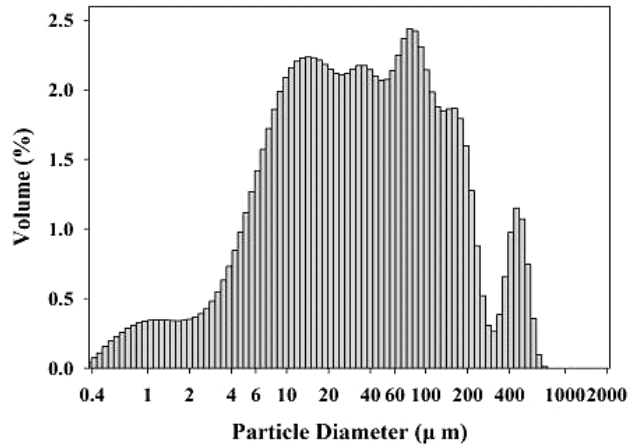


Fig. 4. Particle size distribution used for the present collection system.

의 입경분포를 측정하였다 (Fig. 4). 분진의 입경범위는 0.375~800 μm이며, 부피기준으로 79.6 μm의 평균입경을 나타냈다.

결과 및 고찰

압력손실 특성

본 시스템에서 각 stage에 걸쳐 발생하는 압력손실은 시스템 특성을 평가하기 위해 집진효율과 관련하여 본 장치 설계의 주요 변수가 된다. 장치에 걸리는 장치저항 즉, 압력손실특성은 식 (1)에서 보듯이 튜브통과유속, 단수, 튜브내경 및 플레이트-튜브 간의 거리 등의 물리적 변수에 직접적으로 의존된다. Fig. 5는 유입유속 $v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46$ m/s에서 stage 수 증대에 따른 압력손실 변화를 나타낸 그림이다. Stage 수가 1에서 5까지 변화함에 따라 $v_{in} = 2.07$ m/s에서 11, 18, 25, 38, 42 mmH₂O, $v_{in} = 3.46$ m/s에서 19, 40, 65, 85, 109 mmH₂O로 나타났다. Stage 수 증가에 따라 유속의 증가에 의한 압력손실의 증가치는 더욱 커지는데, 동일 stage에서 압력손실은 식 (1)에 의해 유속의 제곱에 비례해서 증가함을 알 수 있다. 본 시스템의 장치 저항 즉, 압력손실 (ΔP)은 장치 동력소모 ($Q \cdot \Delta P$)와 직접 연관되므로 동일 처리 유량 (Q)에서 동력소모를 최소화하기 위해 적절한 압력손실의 유지가 필요하다.

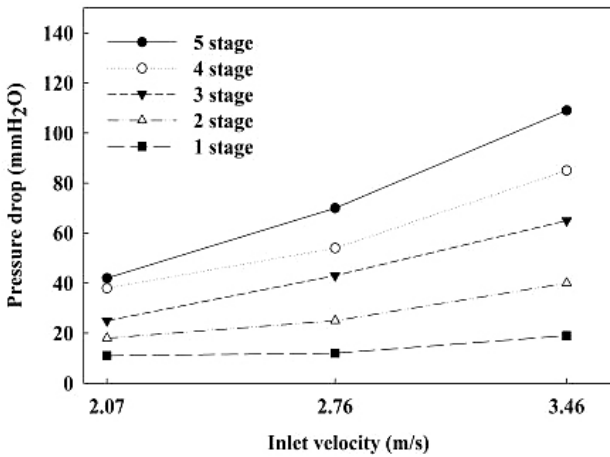


Fig. 5. Pressure drop with inlet velocity and stage number.

Fig. 6은 5 stage에서 액적 분사를 하지 않은 건식 (dry type)과 액적 분사량 (water spray) 300 mL/min 경우의 유입유속에 따른 압력손실을 비교한 그림이다. 건식의 경우 유입유속 $v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46$ m/s에서 42, 70, 109 mmH₂O, 액적 분사를 한 경우 43, 71, 111 mmH₂O의 압력손실을 나타냈으며, 건식의 경우보다 1~2 mmH₂O 정도 압력손실이 높아짐을 알 수 있다. 이는 분사 액적과 기류와의 충돌에 의한 저항증가에 따른 미소한 압력손실 차이로 액적 분사에 의한 영향은 거의 없는 것으로 판단된다.

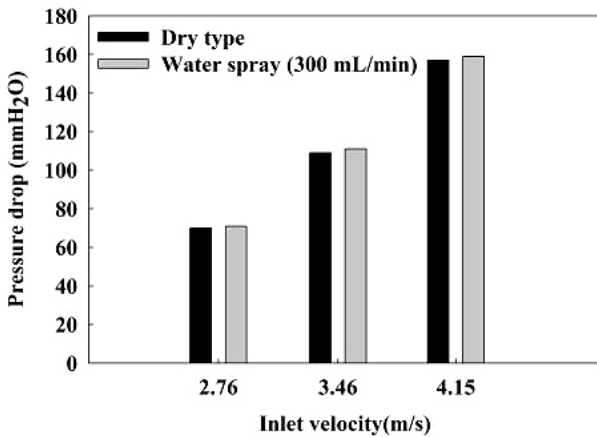


Fig. 6. Pressure drop with water spray and inlet velocity.

입자상 오염물질의 집진효율 특성

본 장치의 포집효율에 영향을 미치는 주요 물리적 변수는 시스템 유입 유속, 본체 stage 수, 액적 분사량 (액·기비) 등이며, 주요 집진 메카니즘은 임팩션, 확산, 먼지 입자와 분사 액적과의 상호작용 등이 될 수 있다 (Kim et al., 2002).

Fig. 7은 건식의 경우, 시스템 유입 유속 및 단 수 증가에 따른 본 시스템의 포집효율 특성을 나타낸 그림이다. 유입유속 $v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46$ m/s (튜브통과 유속 $v_t = 9, 12, 15$ m/s)에서 1 stage의 경우 76.0, 77.3, 78.1%, 5 stage의 경우 91.2, 92.5, 93.0%의 집진효율을 나타냈다. 유입유속이 증가하면서 임팩션 효과의 증대 및 난류강도에 의한 와류 확산효과가 부가되면서 집진효율은 상승한다 (Yoa, 2004). 임팩션 효과가 주요 메카니즘인 경우 집진효율 50%의 절단입경 (cut-off diameter)은 식 (3)으로 표현된다 (Ji et al., 2001).

$$d_{p,cut} = \sqrt{\frac{9\mu D_t Stk}{\rho_p C_c v_t}} \quad (3)$$

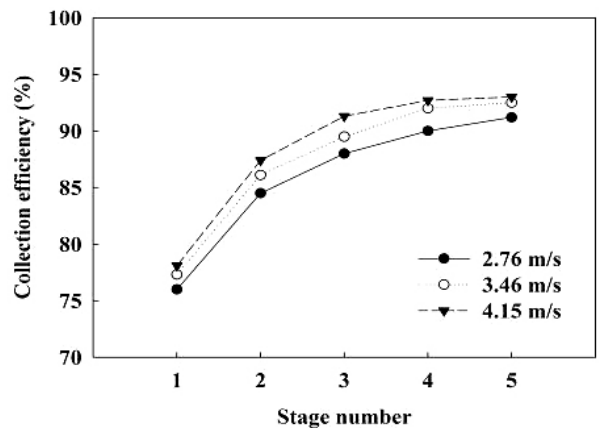


Fig. 7. Collection efficiency with inlet velocity and stage number (dry type).

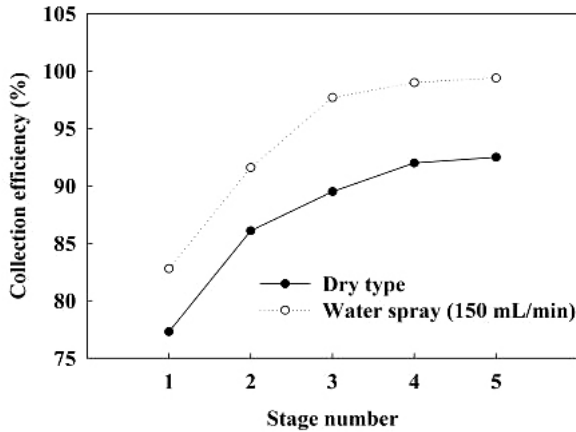


Fig. 8. Collection efficiency with stage number ($v_{in} = 2.76$ m/s, water spray = 150 mL/min).

여기서, $d_{p,cut}$ 는 절단입경, μ 는 가스의 점성계수, Stk 는 Stokes 수, ρ_p 는 입자밀도, C_c 는 커닝햄 보정계수, v_t 는 튜브통과유속이다.

식 (3)의 절단입경보다 큰 입자는 모두 포집된다고 가정되므로 식 (3)에서 보듯이 튜브통과유속이 높아짐에 따라 절단입경은 작아지며, 이에 따라 포집효율이 증가함을 알 수 있다. 더욱이 stage 수가 증가할 때 임팩션 메커니즘이 반복되면서 집진효율은 상승하지만 압력손실이 높아지기 때문에 효율과 더불어 최적의 시스템 설계가 요구된다.

Fig. 8은 습식(wet type) 시스템에서 유입유속 $v_{in} = 2.76$ m/s, 액적 분사량 150 mL/min의 경우 단 수 변화에 따른 포집효율 특성을 나타낸 그림이다. 습식 시스템의 경우 stage 수 변화 (1→5 stage)에 따라 포집효율은 82.8%에서 99.4%까지 증대되며, 건식의 경우에 비해 모든 stage 영역에서 5% 이상의 효율 증가를 나타냄을 알 수 있다. 이는 분사된 미세 액적 (직경 1 mm 내외)에 의한 임팩션, 직접 차단 및 확산 등의 포집효과가 집진효율 상승에 직접적으로 기여했기 때문이다.

Fig. 9는 습식 시스템에서 5 stage 경우 유입유속 및 액적 분사량에 따른 집진효율을 나타낸 그림이다. 액적 분사량 150 mL/min의 경우 유입유속 $v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46$ m/s에서 집진효율은 99.3, 99.4, 99.6%, 액적 분사량 300 mL/min의 경우 99.4, 99.6, 99.8%의 높은 집진효

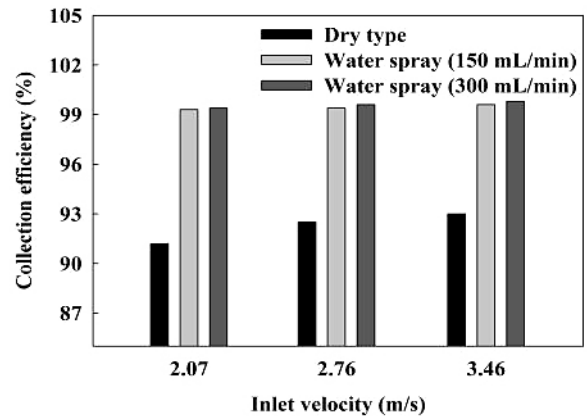


Fig. 9. Collection efficiency with inlet velocity and water spray (5 stage).

율을 보이며, 건식의 경우 91.2, 92.5, 93.0%를 나타낸다.

액적 분사량 300 mL/min, 유입유속 $v_{in} = 3.46$ m/s에서 최대 99.8%의 효율로 건식에 비해 7% 정도의 높은 고효율을 안정적으로 유지하며, 이는 Fig. 8에서 언급한 비와 같이 분사 액적에 의한 포집효율 상승효과에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 10은 5 stage, $v_{in} = 2.76$ m/s에서 유입농도 1, 3, 5 g/m³에 따른 집진효율을 비교한 그림이다. 건식 시스템 (dry type)의 경우, 유입농도가 증가함에 92, 92.5, 94.5%의 집진효율로 2.5%의 집진효율이 증가함에 반해 액적 분사량 300 mL/min의 경우 99.5, 99.6, 99.8%의 집진효율로 0.3%의 집진효율 증가를 보였다. 이는 건식의 경우, 먼지 농도가 높아지면서 먼지입자간의 충돌로 인

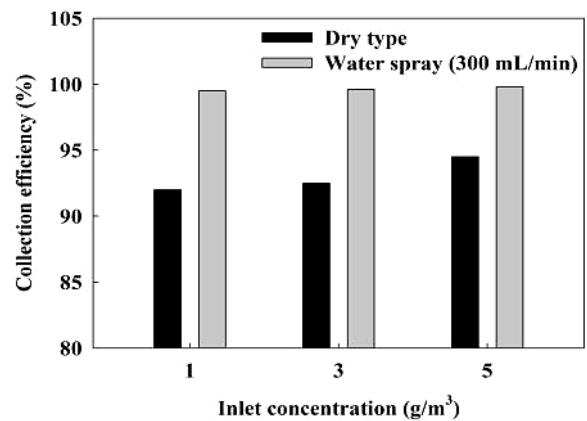


Fig. 10. Collection efficiency with inlet concentration ($v_{in} = 2.76$ m/s, water spray = 300 mL/min).

한 coagulation 효과가 증가되며, 이로 인해 입경증가에 따른 관성력이 증가하기 때문이다. 액적 분사량 300 mL/min 경우, 액적분사에 따른 높은 액·기비에 의한 분사 액적과 먼지 입자 간의 포집효과 증가에 비해 먼지 농도 증가에 따른 입자응집 효과가 상대적으로 약화되기 때문이다.

가스상 오염물질의 제거효율 특성

배출가스 중에서 오염성분을 제거하여 가스를 분리·정제하기 위해 물리적으로 흡수 (absorption), 흡착 (adsorption) 등의 방법이 사용된다. 분사 액적에 의한 흡수 메커니즘은 가스상 물질을 액체에 흡수시켜 물질 이동 원리를 이용하여 분리·처리하는 방법이다. 물질이 흡수액 (용매) 내로 이동·흡수될 때 물질이동의 한계 즉 평형한계 내에서 접촉 면적과 접촉 시간을 크게 유지시키는 것이 중요하다. 물질 이동의 평형관계는 Henry의 법칙에 의해 아래와 같이 표현될 수 있다 (Seader JD and Henley JE. 2006).

$$P_A = H X_A \tag{4}$$

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

본 시스템에서는 박용디젤기관의 연소 부산물인 SO₂, NO₂의 제거특성을 알아보기 위해 유입유속, 분사 액적 및 암모니아수 (NH₄OH) 사용 등의 변수에 따른 실험을 수행하였다. SO₂는 물에 대한 용해도가 비교적 높고 NO₂는 상대적으로 물에 대한 용해도가 낮으며 즉 SO₂의 Henry 상수가 NO₂보다 상대적으로 작은 값을 가진다.

Fig. 11은 5 stage, 유입유속 $v_{in} = 2.76$ m/s, SO₂ 및 NO₂의 유입농도 30 ppm에서 액적 분사량에 따른 제거 효율을 나타낸 것이다. 액적 분사량 150, 300 mL/min에서 SO₂는 50, 63.3%, NO₂는 33.3, 50.0%의 제거효율을 나타내며, 액적 분사량의 증가에 따라 액·가스비가 높아지면서 흡수액과 가스와의 접촉면적의 증대로 제거 효율은 높아진다.

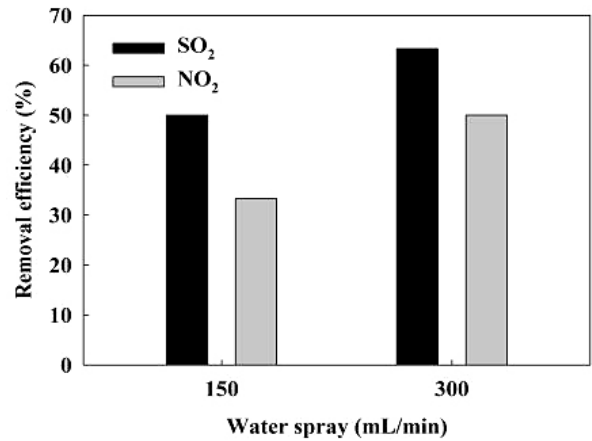


Fig. 11. SO₂, NO₂ removal efficiency with water spray (5 stage, $v_{in}=2.76$ m/s).

Fig. 12는 5 stage, 액적 분사량 300 mL/min, SO₂ 및 NO₂의 유입농도 30 ppm에서 유입유속 변화에 따른 제거 효율을 나타낸 것이다. 유입유속 $v_{in} = 2.07, 2.76, 3.46$ m/s에서 SO₂는 70, 63.3, 56.7%, NO₂는 56.7, 50.0, 40.0%의 제거효율을 나타내며, 유입유속이 증가함에 따라 제거효율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 유량증대에 의한 액·기비의 감소 (접촉면적의 감소)와 장치 내의 잔류시간 즉 가스·흡수액의 접촉시간을 낮추어 처리 효율의 감소를 초래하기 때문이다. Fig. 11, 12에서 SO₂에 비해 NO₂의 제거효율이 동일 액적 분사량에서 더 낮은 제거효율을 나타내는데, 이는 NO₂의 물에 대한 용해도가 SO₂에 비해 낮기 때문이다. 또한 Fig. 8에서 보는

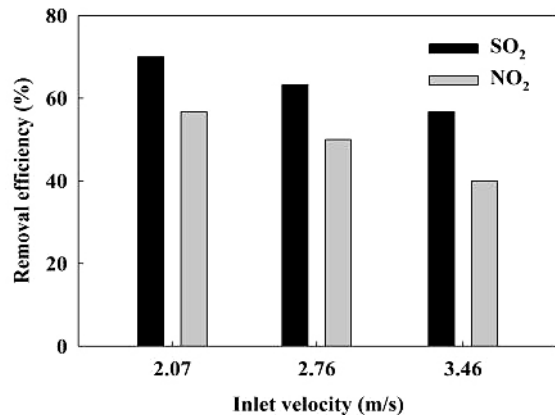


Fig. 12. SO₂, NO₂ removal efficiency with inlet velocity (5 stage, water spray = 300 mL/min).

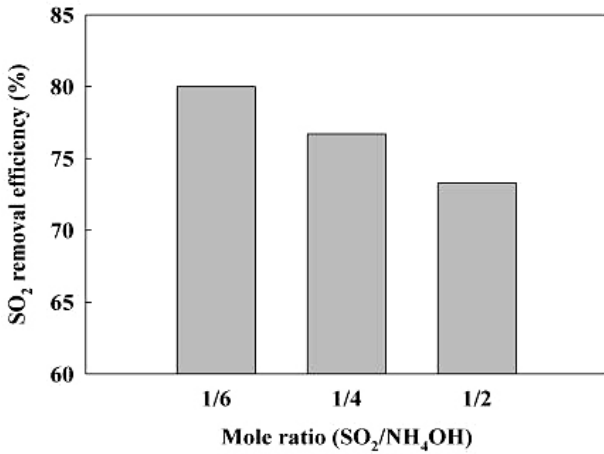


Fig. 13. SO₂ removal efficiency with SO₂/NH₄OH mole ratio (5 stage, NH₄OH(aq) spray = 300 mL/min, v_{in} =2.07 m/s).

바와 같이 입자상 오염물의 처리를 위해 임팩션 효과에 의한 높은 유입유속이 필요하므로, 가스상 물질과 동시 처리를 위해서는 상호보완적 최적 시스템의 설계가 필요하다고 판단된다.

Fig. 13은 SO₂와 NH₄OH의 몰 비에 따른 SO₂ 제거효율을 나타낸 것이다. 유입유속 $v_{in} = 2.07$ m/s, 암모니아 수용액 분사량 300 mL/min에서 NH₄OH의 농도에 따라 SO₂와의 몰 비를 조절하여 실험을 수행하였다. SO₂와 NH₄OH의 몰 비가 1:6, 1:4, 1:2 일 때 각각 80, 76.7, 73.7%의 제거효율을 나타냈다. 암모니아 수용액과 SO₂의 반응식은 다음과 같다 (Cho, 2008).

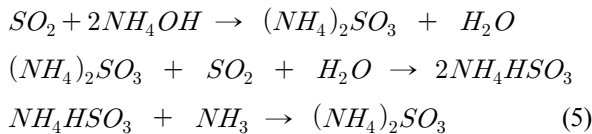


Fig. 14는 NO₂와 NH₄OH의 몰 비에 따른 NO₂ 제거율을 나타낸 것이다. 유입유속 v_{in} =2.07 m/s, 암모니아 수용액 분사량 300 mL/min에서 NH₄OH의 농도에 따라 NO₂와의 몰 비를 조절하여 실험을 수행하였다. NO₂와 NH₄OH의 몰 비가 1:4, 3:8, 3:4 일 때 각각 70.0, 66.7, 60.0%의 제거효율을 나타냈다. 암모니아 수용액과 NO₂의 반응식은 다음과 같다 (Seo et al., 2015).

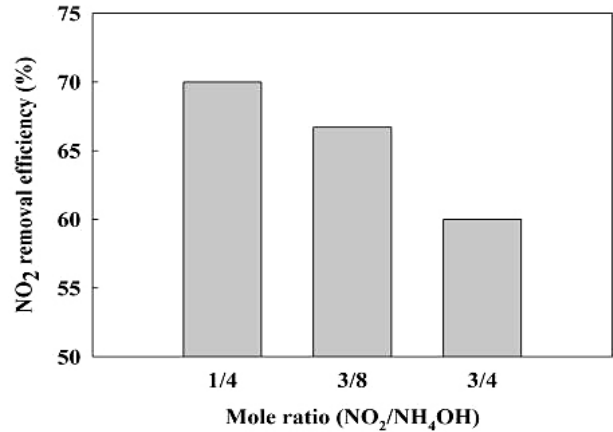
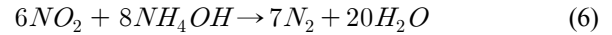


Fig. 14. NO₂ removal efficiency with NO₂/NH₄OH mole ratio (5 stage, v_{in} =2.07 m/s, NH₄OH(aq) spray = 300 mL/min).



식 (7), (8)에 따라 SO₂와 NH₄OH는 1:2, NO₂와 NH₄OH는 3:4의 몰 비로 반응하지만, 이론적 반응식에 따른 몰 비와 달리 실제 반응 시 SO₂와 NO₂는 NH₄OH와 정량적으로 반응할 수 없기 때문에 NH₄OH를 과량으로 투입할수록 SO₂ 및 NO₂의 제거효율이 증가함을 알 수 있다.

결론

본 연구에서는 박용 디젤기관의 대기오염물 처리를 위한 습식 다단 임팩션 시스템의 압력손실 및 집진특성을 평가하기 위해 튜브통과유속, 단 수, 액적 분사량, 유입농도 등의 물리적 변수들에 따른 실험을 수행하여 아래와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 유입유속 및 stage 수 증가에 따라 압력손실은 높아지며, 5 stage 및 유입유속 $v_{in} = 3.46$ m/s에서 최대 111 mmH₂O 이하로 기존 습식 세정기 (200 mmH₂O 이상)와 비교하여 매우 낮은 압력손실을 나타낸다 (Yoo et al., 2003).

(2) 입자상 오염물질의 집진특성은 5 stage, $v_{in} = 3.46$ m/s 및 액적 분사량 300 mL/min에서 99.8%의 높은 집진효율을 나타내며 유입유속이 높아질 때 충분한 관성력에 의해 포집효율이 증가된다. 가스상 오염물질의 제거 특성은 5 stage, $v_{in} = 2.07$ m/s 및 암모니아 수 (NH₄OH)

를 사용하는 조건에서 SO₂는 80%, NO₂는 70%의 제거 효율을 나타내며, 입자상 오염물질과 동시 처리를 위해서는 유입유속 및 액·기비 선정에 따른 최적설계가 필요할 것으로 판단된다.

(3) 본 시스템의 액·기비는 0.09~0.307 L/m³으로 기존 세정기의 액·기비 (1~2.7 L/m³)에 비해 매우 낮아 (Cooper and Alley, 1994) 분사수 사용 감소에 의한 폐수 처리 부담을 줄일 수 있다.

(4) 본 습식 다단 임팩션 시스템은 디미스터 (일종의 filter) 사용 없이 액적 배출을 최소화하며 적정 압력손실에서 99% 이상의 고효율로 입자·가스상 오염물질을 동시에 처리할 수 있는 콤팩트형 집진 시스템이 될 수 있을 것으로 고려된다.

사 사

본 연구는 2016학년도 부경대학교 자율창의학술연구비 (C-D-2016-0277) 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Cho GM. 2008. Air Pollution, Cheong Moon Gak, 360-383.
 Cooper CD and Alley FC 1994. Air pollution control : A design approach (second edition). 127-149, 217-247.
 Jang MS, Kim SH and Kang KJ. 2004. A review on the plan for the further reinforcement of the NO_x emission limit for marine diesel engine. J Kor Soc Mari Envi Engi 7(4), 174-179.
 Ji JH, Bae GN and Hwang JH. 2001. Design and Performance Evaluation of a Three Stage Impactor. J of the Korean Soc for Power Syst Eng 17(6), 441-450.
 Kim CL, Kwon SA, Lee SJ and Ko CB. 2013a. Experimental Study on Particle and Soluble Gas Removal Efficiency of Water-cyclone. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment 29(2), 163-170.
 (DOI:10.5572/KOSAE.2013.29.2.163)

Kim HJ, Han BW, Cho GB and Hwang SC. 2013b. Performance test of a simultaneous PM and SO_x removal system for marine diesel engines. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers_B, 5, 104-105.
 Kim IK and Yoa SJ. 2010. Collection characteristics of multi-layer multi-stage porous plate system. J of the Korean Soc for Power Syst Eng 14(5), 10-16.
 Kim KD, Cho YS and Yoa SJ. 2002. Collection Characteristics of Multi-stage Porous Plate System with Impaction Effect. J KSEE 24(5), 789-799.
 Lee YC and Doo HW. 2011. A Study on the IMO Regulations regarding GHG Emission from Ships and its Implementation. Journal of Navigation and Port Research 35(5), 371-380. (DOI:10.5394/KINPR.2011.35.5.371)
 Seader JD and Henley JE. 2006. Separation process principles (2nd edition). John Wiley & Sons, New York, U.S.A., 108.
 Seo GS, Kim MC, Kim SC, Kim TS, Son BS, Yoon YH, Jung JD and Choi SB. 2015. Air Pollution Control Technology. Goomi, Korea, 384-386, 404.
 Willeke K and Baron AP. 1993. Aerosol measurement. Van Nostrand Reinhold, New York, U.S.A., 119.
 Yoa SJ. 2004. Study on the Collection Characteristics of Multi-stage Porous Plate System. Ministry of Trade, Industry & Energy, 11-44.
 Yoa SJ and Jang CI. 2014. Collection characteristics of wet-type rotating porous disk system for air pollutants removal of marine diesel engines. J Korean Soc Fish Technol 50(3), 318-325. (DOI:10.3796/KSFT.2014.50.3.318)
 Yoo KH, Roh HH, Choi ES and Kim JK. 2003. An Experiment on the Particle Collection Characteristics in a Packed Wet Scrubber. Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, 15(4), 305-311.

2016. 06. 13 Received

2016. 07. 21 Revised

2016. 08. 09 Accepted