Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 39, No. 3 pp. 217~222, 2015
J. Korean Soc. of Marine Engineering (JKOSME)
http://dx.doi.org/10.5916/jkosme.2015.39.3.217

ISSN 2234-7925 (Print)
ISSN 2234-8352 (Online)
Original Paper

습식 스크러버의 분무유량, 형상비 및 충진율 변화가 스모크 저감에 미치는 영향

손권[1] · 이주열[2] · 박권하†

(Received January 15, 2015 ; Revised February 4, 2015 ; Accepted February 12, 2015)

The Effect of Spray Flow Rate, Aspect Ratio, and Filling Rate of Wet Scrubber on Smoke Reduction

Kwun Son[1] · Ju-Yeol Lee[2] · Kweon-Ha Park†

요약: 산업혁명과 함께 급격히 증가한 화석연료의 사용은 기존에 없었던 다양한 대기오염의 원인이 되었다. 특히 NOx와 SOx의 경우 산성비, 광화학 스모그의 원인이 되어 지속적인 규제와 그에 따르는 저감 노력이 이루어지고 있는데, 가장 대표적인 방법이 습식 스크러버 시스템이다. 본 연구에서는 3298cc 상용 디젤기관에 습식 스크러버 시스템을 적용하여 스크러버 형상비, 내부 충진율, 세정수 분무유량, 엔진 부하 조건을 달리하며 스크러버 전후의 스모크 저감률을 측정하였고, 이를 이용하여 스크러버의 최적 형상 및 충진율을 확인하였다. 실험결과 충진재 투입에 의한 큰 스모크 저감률 향상을 확인하였고, 형상비 및 세정수 분무유량 또한 스모크 저감률 향상에 영향을 미치는 인자임을 확인하였다.
주제어: 습식 스크러버, 분무유량, 형상비, 충진율

Abstract: There has been increased amount of atmospheric pollutants including NOx and SOx which cause acid rain and photo-chemical smog as a result of increased use of fossil fuels. In order to reduce the amount of pollutants produced by fossil fuel, wet scrubber system is introduced in this experiment. Wet scrubber system is applied to a diesel engine (3,298 cc) and the amount of smoke is measured before and after the application in terms of aspect ratio, filling rate, and flow rate. The result showed a lot of smoke reduction when wet scrubber system was applied, and also the aspect ratios and water spray flow rate were the important factors to improve smoke reduction.
Keywords: Wet scrubber, Flow rate, Aspect ratio, Filling ratio

1. 서 론

산업혁명과 함께 급격히 증가한 화석연료의 사용은 기존에 없었던 다양한 대기오염의 원인이 되었다**[1]**. 특히 NOx와 SOx의 경우 토양 및 수질오염의 원인이 되는 산성비, 인체에 유해한 광화학 스모그의 원인이 되어 지속적인 규제가 이루어지고 있다**[2][3]**. 하지만 급격한 산업발전에 의한 에너지 부족현상에 의해 석탄, 벙커유와 같은 다량의 분진 및 유해 배기배출물을 발생시키는 저질연료의 사용은 점차 증가할 전망이다**[4][5]**. 또한 유해성 화학물질을 사용하는 반도체 공정의 경우 불산과 같은 유해 화학물질들이 지속적으로 생성-배출되고 있는 실정이다. 따라서 후처리에 의한 배기배출물 저감에 대한 연구의 필요성이 대두되었고, 가장 대표적인 방법으로서 습식 스크러버가 다양한 분야에서 연구되고 있다. **[6][7]**에서는 연도가스에서 첨가제를 이용하여 NOx, SOx를 동시 저감하고자 하였고, 이와 같은 시스템을 SCR 전단에 설치하여 SOx 저감율을 높이고자 하였다. **[8]**에서는 충진재의 종류 및 유속을 달리하며 가스상 물질의 제거율 및 스크러버 전후의 차압을 측정하여 최적의 운전조건을 제시하고자 하였고, **[9][10]**에서는 분사노즐 구조 및 분무형태 변화에 따른 최적의 세정수 분무특성 및 스크러버 운전조건을 CFD를 이용하여 연구하였다. **[11]**에서는 스크러버 시스템에서 $NaClO_2$를 산화제로 이용하여 세정수의 pH조절을 통해 배기가스 내부의 NO를 대부분 산화시킬 수 있음을 발표하였다. 이러한 다양한 연구에도 스크러버 시스템의 가장 큰 문제인 넓은 공간이 필요한 문제**[12]**를 해결하기 위해 반드시 연구되어야 하는 스크러버의 형상비에 대한 연구는 아직 미비한 실정이다.

본 연구에서는, 다양한 형상비로 제작된 스크러버를

† Corresponding Author (ORCID: http://orcid.org/0000-0001-9460-8399): Division of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: khpark@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4367
1 Department of Mechanical Engineering, Korea Marine and Ocean University, E-mail:realsonkwun@naver.com, Tel: 051-410-4953
2 Anytech, Co, E-mail:tom93@hanmail.net, Tel: 031-695-6210

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.

Copyright ⓒ The Korean Society of Marine Engineering

3,298cc 상용 디젤엔진의 배기라인에 설치하여 엔진 부하, 스크러버 내부 충진율, 세정수 분무유량을 변화시키며 스크러버 전후에서 스모크를 측정하였고, 스모크가 스크러버를 통과함에 따르는 스모크 저감률을 바탕으로 최적의 스크러버 형상비 및 최적 형상비에서의 충진율, 분무유량을 확인하고자 한다.

2. 실험장치 구성 및 방법

2.1 실험장치 구성

Figure 1은 최적의 스크러버 형상비 평가를 위한 다양한 형상비, 분무유량, 내부 충진율에서의 스모크 저감률 측정을 위해 구성한 실험장치의 개략도이다. 수동력계에 의해 부하가 조절되는 **Table 1**의 성능을 가진 상용 디젤엔진의 배기라인에 가로-세로의 형상비가 1:2, 1:3, 1:4로 제작된 스크러버를 설치하였다. 스크러버 내부에 충진재가 채워진 정도를 나타내는 충진률을 산출하기 위한 스크러버 내부 총 체적은, 하단의 물 순환 및 분무된 세정수의 고른 분포를 위한 공간을 제외한 16l이며, 이를 본 연구에 사용된 스크러버의 충진률 100% 조건으로 선정하였다. 또한 엔진 부하조건 변화에 의한 스크러버 입구의 배기가스 온도조건 변화폭을 줄여 충분한 스크러버 효율을 이끌어내기 위한 열교환기를 스크러버 전단에 설치하였다.

Figure 2는 실험에 사용된 충진재(Metal Saddle, 규격 : 0.625 × 0.625 × 0.5 inch)와 스크러버로서, 부식과 높은 작동온도 조건을 감안하여 스테인레스 재질로 제작되었다.

Table 1: Specifications of a test engine

No. of cy1. & Arrangement	4-IN line
Combustion Chamber Type	Direct Injection
Total Piston Displacement	3,298cc
Compression Ratio	16:1
Rated Output	80/2400 (ps/RPM)

Figure 2: Photos of packing and wet scrubbers

2.2 실험조건 및 방법

실험은 **Table 2**의 조건으로 수행되었다. 엔진 회전속도는 800rpm으로 고정하고, Idle, 25, 50, 75, 100%로 점차 부하를 증가시키며 각각의 부하 조건에서의 충진율, 분무유량을 각각 0, 50, 75, 100%, 2.15, 4.4, 9.68 l/min로 증가시키면서, 그에 따른 배기온도, 배기압력, 스모크의 변화를 OMEGA사의 K-Type 열전대 , SENSYS사의 압력센서, IYASAKA사의 광투과식 스모크 테스터(DS-4000Q)를 이용하여 측정하였다. 위와 같은 실험과정을 형상비 2, 3, 4로 제작된 스크러버 조건에서 반복 수행하였다.

배기가스 온도는 배기 매니폴드 직후(개략도의 P1), 스크러버 전(P2),후(P3)에서 측정되어 부하 증가에 따른 배기가스 온도상승에 의한 스크러버 입구온도 조건의 변화를 측정하였고, 배기 압력은 배기 매니폴드 직후(P1)에서 측정되어 충진재 첨가 전후의 배기압력 변화를 측정하였다. 또한 스크러버 전(P2), 후(P3)에서 스모크를 측정함으로써 분무유량, 충진률의 변화에 따른 충분한 기액 접촉면적의 확보, 즉 스모크 저감량을 확인하였다.

Table 2: Test conditions

Engine speed (rpm)	800
Aspect ratio	2, 3, 4
Engine load (%) (kg.m)	idle, 25, 50, 75, 100 (4.6, 7.6, 10.6, 13.6, 16.6)
Filling rate(%)	0, 50, 75, 100
Flow rate(l/min)	2.15, 4.4, 9.68

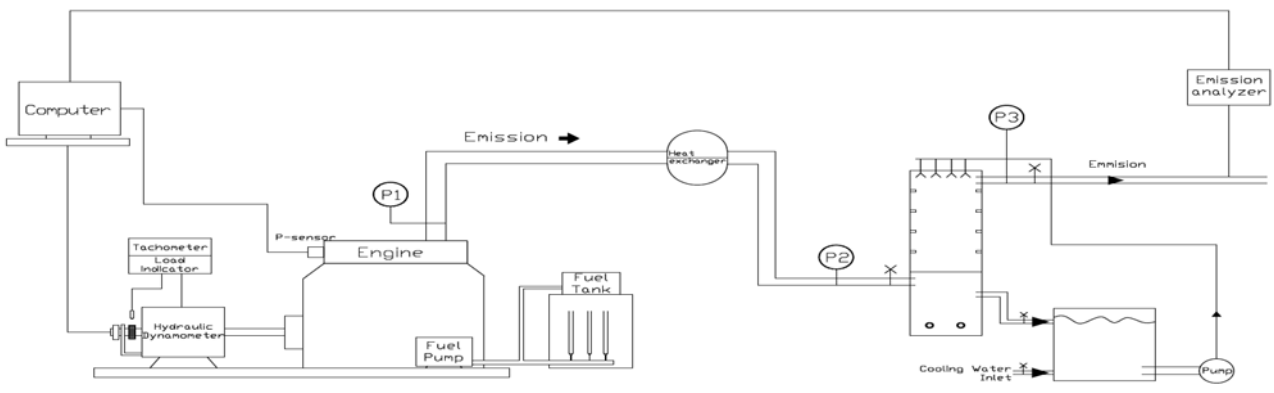
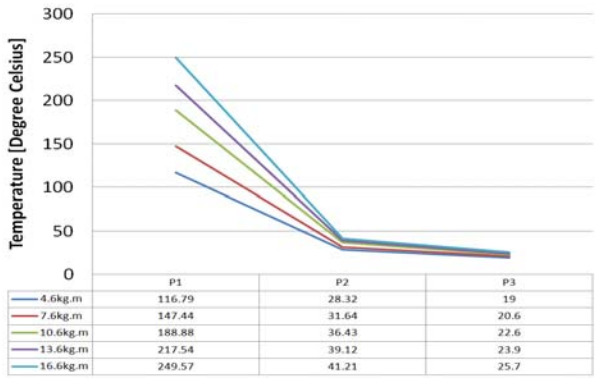


Figure 1: Schematic of a experimental system

3. 실험결과 및 고찰

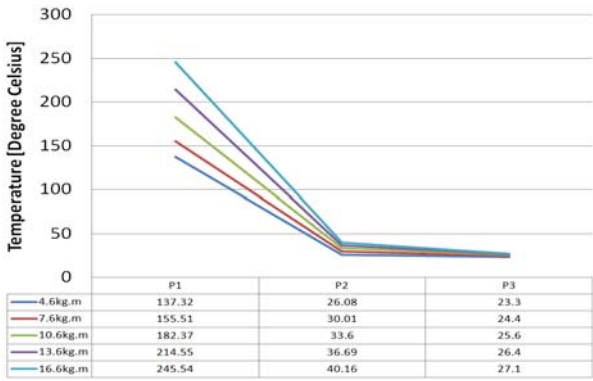
3.1 배기온도

Figure 3은 스크러버 형상비가 2이고 분무유량이 2.15l/min인 조건에서, 충진율이 0, 100%일 때 부하 증가에 따른 배기 매니폴드 직후(P1), 스크러버 전(P2), 후(P3)에서의 배기가스 온도변화를 나타낸다. 무부하 조건의 경우 충진율이 증가함에 따라 매니폴드 직후에서 약 17.6% 배기온도가 상승하였지만, 스크러버 전후에서는 열교환기를 거쳐 거의 유사한 온도를 나타냈다. 25%부하 조건에서도 마찬가지로 매니폴드 직후에 약 5.5% 온도가 상승하였지만 마찬가지로 스크러버 전후에서는 유사한 온도를 나타냄을 확인할 수 있었다. 50% 이상의 부하 조건에서는 모든 측정구간에서 매우 유사한 온도분포를 보여, 충진율이 100%로 증가함에 따른 배기가스 온도의 변화를 확인할 수 없었다. 또한 스크러버 입구온도의 경우, 모든 실험조건에서 25~45℃ 사이의 온도를 나타내어, 본 실험장치에서는 부하 증가에 의한 큰 배기가스 온도 상승에도 입구온도 조건은 큰 변화가 없음을 확인하였다.



	P1	P2	P3
4.6kg.m	116.79	28.32	19
7.6kg.m	147.44	31.64	20.6
10.6kg.m	188.88	36.43	22.6
13.6kg.m	217.54	39.12	23.9
16.6kg.m	249.57	41.21	25.7

(a) Aspect ratio 2, filling rate 0%



	P1	P2	P3
4.6kg.m	137.32	26.08	23.3
7.6kg.m	155.51	30.01	24.4
10.6kg.m	182.37	33.6	25.6
13.6kg.m	214.55	36.69	26.4
16.6kg.m	245.54	40.16	27.1

(b) Aspect ratio 2, filling rate 100%

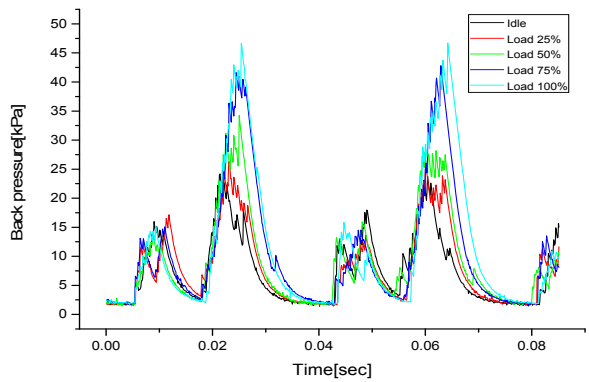
Figure 3: Exhaust gas temperature on engine load and filling rate variations

3.2 배기압력

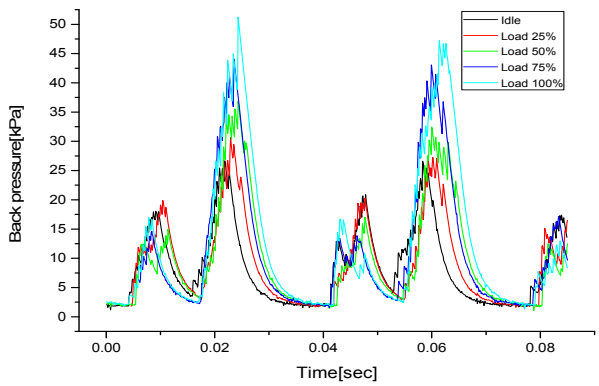
Figure 4는 스크러버 형상비가 2이고 분무유량이 2.15l/min인 조건에서, 충진율이 0, 100%일 때 부하 증가에 따른 배기 매니폴드 직후(P1)에서의 배기가스 압력을 나타낸다.

엔진 부하 증가에 따라 배기압력이 증가하는 경향을 확인하였고, 최대압력의 증가폭은 형상비 2이고 충진율 0%인 조건에서 Idle조건에서의 최대압력 대비 각각 8.2, 32.1, 83.3, 105.3%, 형상비 2이고 충진율 100%인 조건에서 각각 10.6, 38.3, 65.1, 92.3% 증가하였다. 비교적 낮은 부하조건인 25, 50% 부하 조건에서는 100% 충진율 조건에서 큰 최대 배기압력 상승률을 보였지만, 75, 100% 부하 조건에서는 충진율 0%의 조건에서 100% 조건보다 각각 18.2, 13% 더 큰 배기압력 상승률을 보였다.

충진율을 0%에서 100%로 변화시켰을 때의 최대 배기압력은 Idle, 25, 50, 75, 100% 부하조건에서 각각 17.3, 19.9, 22.8, 5.7, 9.9% 상승하여 평균 15.1%의 최대 배기압력 상승률을 확인하였다. 형상비 3, 4의 스크러버에 적용한 결과 또한 거의 유사하였으므로, 이를 종합하면 본 연구를 수행하기 위한 실험장치를 구성함에 따른 최대 배기압력 상승률은 약 15%이다.



(a) Aspect ratio 2, filling rate 0%



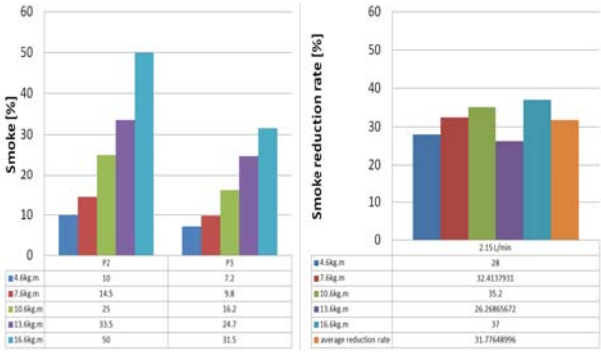
(b) Aspect ratio 2, filling rate 100%

Figure 4: Back pressure according to engine load

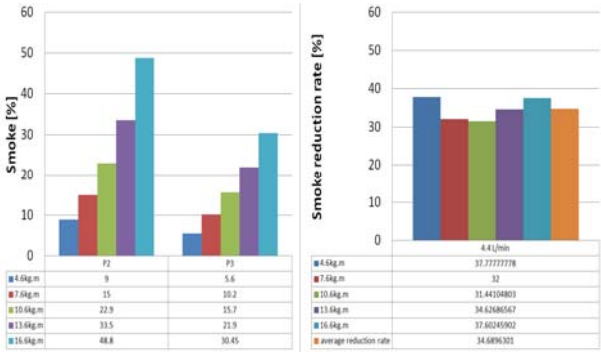
3.3 스모크

Figure 5는 스크러버 형상비가 4, 충진율 0%, 분무유량이 2.15, 4.4, 9.68l/min인 조건에서, 스크러버 전(P2), 후(P3)에서의 스모크와 스크러버 통과 전의 스모크 대비 통과 후의 스모크 저감률을 나타낸다. Idle에서 100%로 부하가 상승함에 따라 스모크는 7.2~50%까지 증가하였는데, 모든 부하 조건에서 분무유량이 증가함에 따른 스크러버 통과 후의 스모크 저

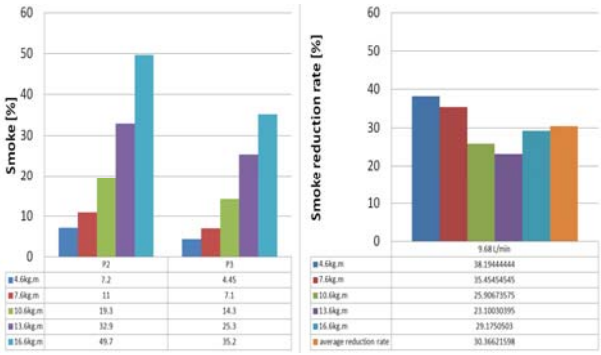
감률을 평균한 분무유량 조건별 평균 스모크 저감율은 각각 31.7, 34.7, 30.4%로 세정수의 분무 만으로도 30~35%의 스모크가 저감됨을 확인하였다. 각각의 분무유량 조건에서, 부하변화에 따른 스모크 저감률은 뚜렷한 경향성 없이 평균 스모크 저감율을 전후한 값을 나타냈다.



(a) Aspect ratio 4, filling rate 0%, flow rate 2.15l/min



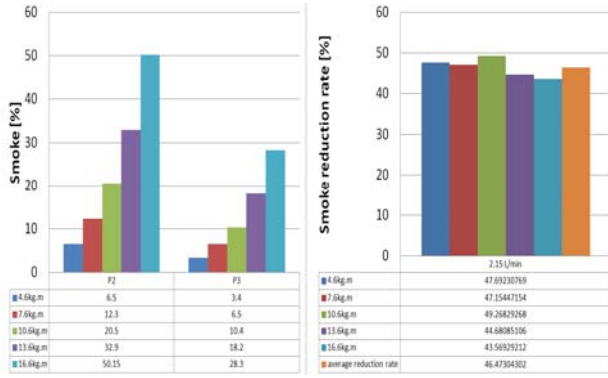
(b) Aspect ratio 4, filling rate 0%, flow rate 4.4l/min



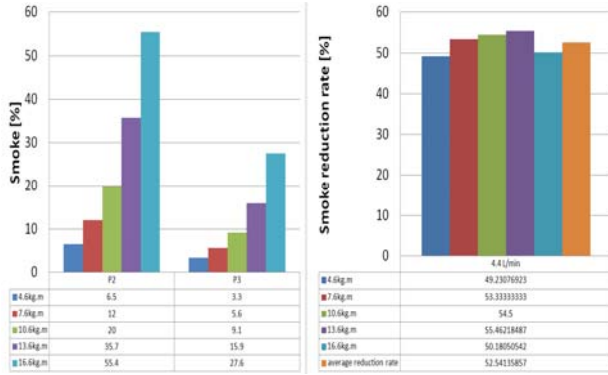
(c) Aspect ratio 4, filling rate 0%, flow rate 9.68l/min

Figure 5: Smoke and smoke reduction rate at filling rate 0%

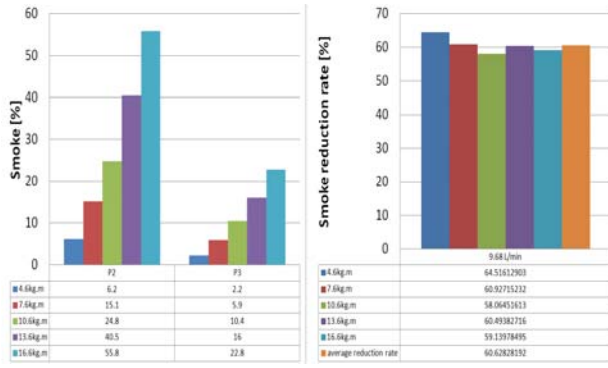
Figure 6은 동일 조건에서 충진율이 50%로 증가하였을 때의 스모크 저감률을 나타낸다. 분무유량 조건별 평균 스모크 저감률은 각각 46.5, 52.5, 60.6%로 충진율 0%조건의 저감률에 비해 크게 향상되었는데, 이는 충진재 첨가에 의한 충분한 기액접촉면 확보의 결과로 사료되며, 또한 분무유량의 증가에 따라 스모크 저감률이 점차 증가하는 경향을 보였다. 각각의 분무유량 조건에서, 부하변화에 따른 스모크 저감률은 충진율 0% 조건과 마찬가지로 평균 스모크 저감률을 전후한 값을 나타냈지만, 평균값과 큰 차이를 보이지 않는 범위 내에서 각각의 부하조건에서의 스모크 저감률이 존재함을 확인하였다.



(a) Aspect ratio 4, filling rate 50%, flow rate 2.15l/min



(b) Aspect ratio 4, filling rate 50%, flow rate 4.4l/min

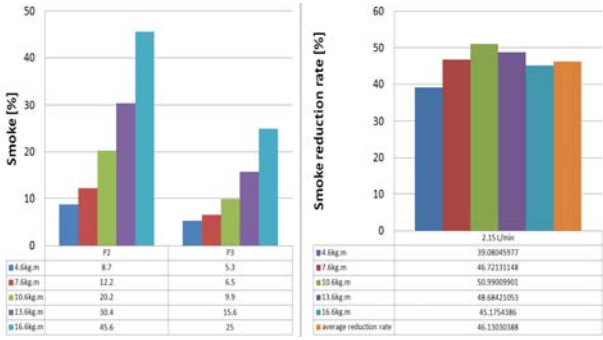


(c) Aspect ratio 4, filling rate 50%, flow rate 9.68l/min

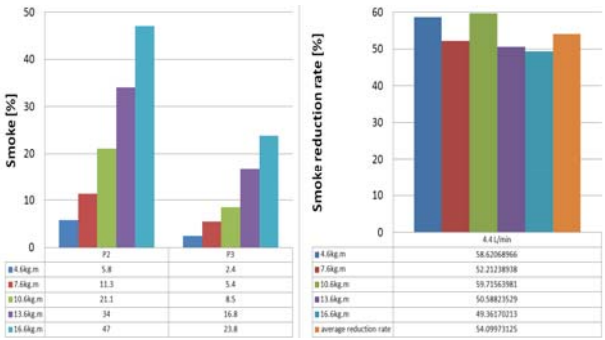
Figure 6: Smoke and smoke reduction rate at filling rate 50%

Figure 7은 동일 조건에서 충진율이 75%로 증가하였을 때의 스모크 저감률을 나타낸다. 분무유량 조건별 평균 스모크 저감률은 각각 46.1, 54.1, 62.2%로 충진율 50%조건에 비해 저감률이 상승하였으나 그 폭은 충진재 투입 직후의 폭과 비교할 만큼 크지 않았다. 각각의 분무유량 조건에서, 부하변화에 따른 스모크 저감률은 비교적 적은 분무유량 조건인 2.15 l/min 조건에서 Idle의 경우 39.1% 스모크가 저감되었고, 25, 50, 75, 100% 조건으로 부하가 증가함에 따라 45~50%의 스모크 저감률을 보여 부하증가에 따른 스모크 저감율 향상 경향을 확인할 수 있었다. 하지만 4.4, 9.68l/min 조건에서는 충진율 50%조건의 경향과 유사한 평균값과 큰 차이를 보이지 않

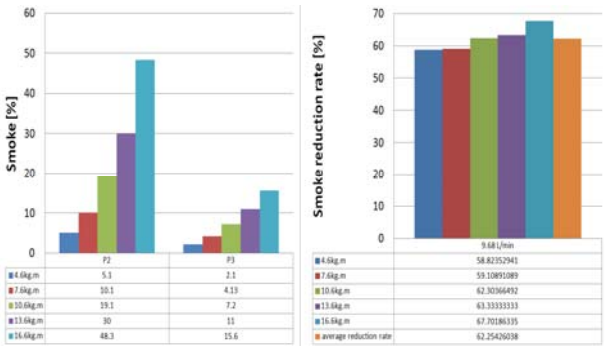
는 범위 내에서의 고른 스모크 저감율을 나타냈다.



(a) Aspect ratio 4, filling rate 75%, flow rate 2.15l/min



(b) Aspect ratio 4, filling rate 75%, flow rate 4.4l/min



(c) Aspect ratio 4, filling rate 75%, flow rate 9.68l/min

Figure 7: Smoke and smoke reduction rate at filling rate 75%

Figure 8은 형상비 2, 3, 4로 제작 된 스크러버의 충진율 0, 50, 75%에서의 분무유량 조건별 평균 스모크 저감률을 나타낸다. 형상비 2, 3으로 제작된 스크러버의 스모크 저감률은 위와 같은 방법으로 측정-분석되었으며, 충진율 100% 조건의 데이터는 과도한 충진으로 인한 스크러버 내부의 세정수 분무방해의 결과로 사료되는 불규칙적인 스모크 저감 감소 경향의 이유로 분석에서 제외하였다.

충진율 0%의 경우 형상비 2, 3 조건에서 형상비 4의 조건보다 높은 스모크 저감률을 보였는데, 특히 9.68l/min 조건에서큰 스모크 저감율을 보였다. 충진율 50%의 경우, 2.15l/min 조건에서는 여전히 형상비 3 조건에서 가장 높은 스모크 저감률을 나타냈지만, 분무유량이 증가함에 따라 형상비 2 조건에서의 스모크 저감률은 감소하다 큰 폭의 증가 경향을, 형상비 3 조건에서는 소폭의 증가, 감소 경향을 보인 반면, 형상비 4 조건에서는 선형에 가까운 뚜렷한 스모크 저감률 향상의 경향을 보였다.

충진율 75% 조건 또한 앞선 경향과 유사한 경향으로서, 형상비 2 조건에서는 분무유량이 증가함에 따라 스모크 저감률이 소폭 증가하는 경향을, 형상비 3 조건에서는 분무유량이 증가하여도 스모크 저감률은 유사하거나 소폭 감소하는 경향을 보인 반면, 형상비 4 조건에서는 뚜렷한 스모크 저감률 향상의 경향을 확인하였다.

Figure 9는 분무유량별 스모크 저감률을 평균한 형상비 2, 3, 4, 조건에서 충진율 증가에 따른 스모크 저감률을 나타낸다. 위에서 확인한 경향성을 뚜렷이 확인할 수 있었는데, 충진율 50, 75% 조건에서 가장 낮은 스모크 저감률을 보인 형상비 2 조건 대비 형상비 3 조건에서의 스모크 저감률 향상율은 각각 14.8, 18.2%, 형상비 4 조건에서 각각 22.8, 29.6% 향상되었다.

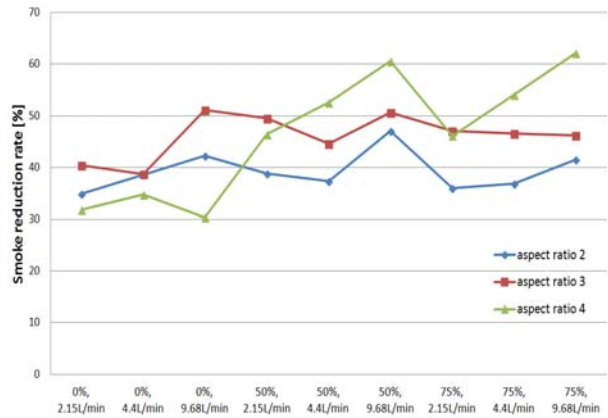


Figure 8: smoke reduction rate at aspect ratio 2, 3, 4, filling rate 0, 50, 75%, flow rate 2.15, 4.4, 9.68 l/min

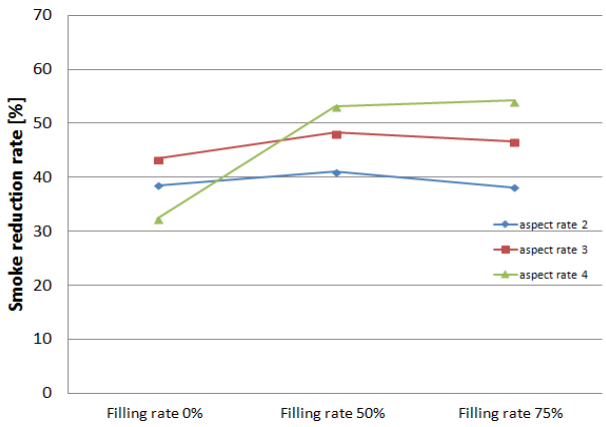


Figure 9: Averaged smoke reduction rate with filling rate

4. 결 론

본 연구에서는, 최적의 스크러버 기액 접촉면적 평가를 위

해 다양한 형상비, 분무유량, 충진율, 부하 조건에서의 스모크 저감률을 측정하였고 그 결과는 다음과 같다.

1) 스크러버 입구에서의 적절한 배기가스 온도조건을 위해 열교환기를 설치하였고, 25~45℃의 입구온도 조건을 확보하였다.

2) 실험장치 구성에 따른 배기압력 상승을 확인하였고, 각각의 부하조건에서 최대압력 상승률의 평균은 15%였다.

3) 모든 형상비의 스크러버에서 충진재 투입 직후 큰 스모크 저감률 향상 경향을 보였으며, 동시에 세정수 분무유량의 증가에 비례하였다. 특히 형상비 4 조건에서 두드러졌다.

4) 가장 큰 스모크 저감률을 보인 형상비 4의 경우는, 충진율 50, 75% 조건에서 형상비 2 조건 대비 각각 22.8, 29.6% 향상되었다.

5) 종합적으로 판단할 때 형상비 4이고 충진율 75%, 분무유량 9.68*l*/min 조건이 3000cc급 디젤엔진에 최적이라고 판단된다.

후 기

이 논문은 산업통상자원부 청정생산기반 전문기술개발사업의 연구비 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: 10044510)

References

[1] S. S. Kim, J. H. Choi, H. D. Lee, J. K. Kim, and S. C. Hong, “A study on fuel NOx emission characteristics in coal combustion,” Journal of Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry, vol. 20, no. 6, pp. 675-680, 2009.

[2] J. N. Armor, “Catalytic reduction of nitrogen oxides with methane in the presence of excess oxygen : A review,” Catalysis Today, vol. 26, pp. 147-158, 1995.

[3] K. A. Bethke, M. C. Kung, B. Yang, M. Shah, D. Alt, C. Li, and H. H. Kung, “Metal oxide catalysts for lean NOX reduction,” Catalysis Today, vol. 26, pp. 169-183, 1995.

[4] K. J. Bae, “Outlook of coal-fired power market,” Korea Institute of Science and Technology Information Market Report, vol. 3, no. 6, 2011.

[5] J. W. Miller and R. Smith, The Wall Street Journal, http://www.wsj.com/news/articles/SB10001424052702303332904579228160256043626?mod=trending_now_3, Accessed January 7, 2014.

[6] H. K. Lee, H. D. Cho, and S. H. Kim, “Performance test of additives for simultaneous removal of SOx/NOx from flue gas,” Journal of the Korean Institute of Chemical Engineers, vol. 32, no. 3, pp. 273-280, 1994.

[7] W. K. Choi, H. D. Cho, H. K. Lee, K. H. Lee, and D. H. Jang, “Study on the removal of SOx and the partial oxidation of NO in an experimental duct injection process,” Proceedings of the 50th Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment Fall Conference, pp. 608-609, 2010 (in Korea).

[8] B. W. Han, H. J. Kim, Y. J. Kim, and K. S. Han, “Removal characteristics of gaseous contaminants by a wet scrubber with different packing materials,” Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, vol. 23, no. 6, pp. 744-751, 2007.

[9] I. C. Kim, K. W. Lee, and Y. H. Lee, “Study of spray characteristics according to the variation of swirl vane geometry for fuel oil scrubber nozzles,” Proceedings of the KOSME spring conference, pp. 203, 2012 (in Korea).

[10] K. Brown, W. Kalata, and R. Schick, “Optimization of SO2 scrubber using CFD modeling,” Procedia Engineering, vol. 83, pp. 170-180, 2014.

[11] Y. J. Cha, J. Y. Lee, T. Y. Ha, and B. H. Park, “Simultaneous removal of SOx and NOx by wet scrubber at small and medium craft,” Journal of Korean Oil Chemists' Society, vol. 31, no. 1, pp. 159~166, 2014.

[12] B. W. Han, H. J. Kim, Y. J. Kim, and K. S. Han, “Characterization of ammonia gas removal performance of wet scrubber in relation with its packing and operation condition,” Proceedings of the 45th Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment, pp. 345-346, 2007 (in Korea).