

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.12.1017>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

촉매삽입형 Urea-SCR 머플러 다공튜브 형상변화에 따른 NOx 저감 특성에 관한 연구[§]

문남수* · 이상규** · 고상철* · 이지근***
* 전북자동차기술원, ** 쌍용자동차, *** 전북대학교

Study on NOx Reduction with Multi-Perforated Tube Geometry in Integrated Urea-SCR Muffler

Namsu Moon*, Sangkyoo Lee**, Sangchul Ko* and Jeekeun Lee***†

* Jeonbuk Inst. of Automotive Technology, ** Ssangyong Motors

*** Division of Mechanical System Engineering, Chonbuk Nat'l Univ.

(Received May 12, 2014 ; Revised July 16, 2014 ; Accepted July 21, 2014)

Key Words: Perforated Tube(다공 튜브), Urea-SCR Muffler(Urea-SCR 머플러), Orifice Flow(오리피스 유동), Flow Distribution(유동 분배), Uniformity Index(균일도지수)

초록: Urea-SCR 머플러 시스템 입구와 촉매 전단에 설치된 다공튜브는 우레아 수용액 분무의 균일분포, SCR 촉매 활용도 증대 및 암모니아 슬립을 방지하기 위해 사용되고 있다. 다공튜브의 오리피스 면적비 변화가 머플러 챔버 내부유동 특성에 끼치는 영향이 상용 소프트웨어를 이용하여 해석적으로 조사되었다. 다공튜브 오리피스 면적비 변화는 촉매 전단에 설치된 챔버 내부의 벌크 선회유동 형성과 촉매 전단 속도분포의 균일도 지수에 큰 영향을 끼침을 보였다. 해석결과를 검증하기 위해 엔진실험이 ESC 및 ETC 모드에서 수행되었다. 엔진 실험결과 다공튜브 길이방향으로 보다 많은 유량이 흐르는 모델이 가장 높은 NOx 저감 효율을 나타냈으며, 이것은 높은 균일도지수 및 강한 선회유동을 나타내는 해석 결과와 일치됨을 알 수 있었다.

Abstract: A multi-perforated tube is generally installed between the muffler inlet and in front of selective catalytic reduction (SCR) catalysts in the integrated urea-SCR muffler system in order to disperse the urea-water solution spray uniformly and to make better use of the SCR catalyst, which would result in an increase nitrogen oxide (NO_x) reduction efficiency and a decrease in the ammonia slip. The effects of the multi-perforated tube orifice area ratios on the internal flow characteristics were investigated analytically by using a general-purpose commercial software package. From the results, it was clarified that the multi-perforated tube geometry sensitively affected the generation of the bulk swirling motion inside the plenum chamber set in front of the SCR catalyst and to the uniformity index of the velocity distribution produced at the inlet of the catalyst. To verify the analytical results, engine tests were carried out in the ESC and ETC modes. Results of these tests indicated that the larger flow model in the longitudinal direction showed the highest NO_x reduction efficiency, which was a good agreement with the analytical results.

1. 서 론

가솔린 엔진에 비해 대기오염의 주범으로 인식

되고 있는 대형 디젤엔진으로부터 배출되는 오염 물질을 저감시키기 위한 세계 각국의 법적 규제가 날로 엄격해 지고 있으며, 엔진 및 완성차 제조업체에서는 디젤엔진에서 배출되는 주요 오염 물질인 NOx와 PM을 저감하기 위한 연구가 활발히 진행되어지고 있다.

저공해 디젤엔진을 개발함에 있어 가장 어려운

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 유체공학부문 춘계학술대회(2014. 5. 15.-16., 부산 해운대 한화콘도) 발표논문임.

† Corresponding Author, leejk@chonbuk.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

점은 NO_x와 PM의 배출량이 상반관계(trade-off)로서 인해 동일한 기술 수준에서 NO_x 배출량 감소는 PM 배출량 증가를 수반하는 부분과 오염물질의 저감 노력은 연비의 악화를 초래하게 되므로 오염물질 배출량 사이의 상관관계와 성능 및 연비 측면에서 최적 설계기술이 필요하다.

최근에는 NO_x 저감을 위한 Lean NO_x 촉매, SCR(selective catalytic reduction)등과 같은 기술을 적용한 배기가스 후처리기술 개발이 활발히 이루어지고 있다. 특히 Urea를 환원제로 사용하는 SCR 시스템은 엔진 출력을 유지하면서 90% 이상의 NO_x 저감율을 달성할 수 있는 장점으로 많은 연구가 진행되어 오고 있다.^(1~4)

현재 유럽뿐만 아니라 전 세계적으로 SCR 시스템을 차량에 적용하기 위한 연구개발 및 양산이 진행되고 있으며, 현재 SCR 시스템은 배기규제, 즉 EU heavy-duty EURO VI(2013년) 또는 US 소형엔진(light-duty) Tier 3에서 요구되는 수준으로 디젤 NO_x의 배출을 감소시킬 수 있는 유일한 촉매기술로 평가되고 있다.

Urea-SCR 시스템은 요소수(urea-water solution)를 분사장치를 통해 배기관 내에 정밀하게 분사한다. 이렇게 분사된 요소수는 배기가스 열에 의해 분해되어 암모니아(NH₃)로 변환되며 생성된 암모니아는 후단에 장착된 SCR 촉매에서 질소산화물(NO_x)과 반응하여 인체에 무해한 물과 질소로 분해하는 원리를 갖고 있다.⁽⁵⁾

Urea-SCR 시스템의 촉매 활용도를 높이고 암모니아 슬립을 방지하기 위해서는 촉매 전단에서 암모니아의 공간분포가 균일해야 한다. 이러한 암모니아의 공간분포는 배기관 내로 분사된 요소수 분무와 배기가스의 혼합특성에 큰 영향을 받는다. 대부분의 Urea-SCR 시스템에서는 혼합을 촉진하기 위해 믹서(Mixer)를 사용하고 있으며^(6~9) 주로 촉매 전단의 균일도지수를 이용하여 혼합기 효과를 평가한다.^(10,11)

Urea-SCR 시스템은 분사장치 및 촉매 등이 머플러와 직렬형태(in-line type)로 배열될 경우 매우 긴 설치공간을 필요로 한다. 따라서 최근에는 경량화와 설치공간을 최소화하기 위해 촉매를 머플러 내부에 집적화한 촉매삽입형 SCR 머플러가 널리 사용되고 있다.^(12~14) 촉매삽입형 SCR 머플러는 좁은 공간에 촉매와 소음기가 설치되어 있어 소형화의 장점이 있지만 배기가스의 유동경로

가 매우 복잡하여 머플러 내부 유동 특성이 촉매의 NO_x 저감효율에 큰 영향을 끼친다.⁽¹⁵⁾

최근에 개발된 촉매삽입형 SCR 머플러는 머플러 입구와 촉매사이에 다공튜브를 설치하여 요소수 분무의 열분해에 의해 생성되는 암모니아의 촉매 전단 공간 균일도 향상을 도모함으로써 NO_x 저감 효율 향상 및 암모니아 슬립을 방지한다. 그러나 촉매 전단 유동분포는 다공튜브의 유동특성 및 챔버 내부에 형성되는 유동장에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다.^(16~19)

따라서 본 연구에서는 SCR 촉매와 소음기가 일체화된 머플러를 대상으로 머플러 입구와 촉매사이의 챔버 내부에 설치된 다공튜브의 형상변화가 내부유동에 끼치는 영향을 해석적으로 조사하여 챔버 내부 유동장을 가시화 하였으며, 다공튜브의 형상변화를 통한 설계해석 최적화를 실시한 결과를 반영하여 샘플을 동일 엔진에 장착, 시험을 통해서 NO_x 변화 추이를 분석하여 해석결과와의 비교를 통해 최적화 조건을 찾고자 하였다.

2. 해석 방법

2.1 해석 모델

해석에 사용된 SCR 머플러의 내부구조는 Fig. 1과 같다. 배기관과 연결된 다공튜브를 통해 배기가스와 요소수 분무가 유입되면 열분해 되어 생성된 암모니아와 배기가스가 플리넘 챔버를 거쳐 크기가 다른 2개의 SCR 촉매로 유입된다.

SCR 촉매에 직렬로 설치된 암모니아 슬립을 방지하기 위한 산화촉매를 거쳐 뒤쪽 챔버를 통해 머플러 소음기를 통과하여 대기 중으로 배출된다.

본 연구에서는 배기가스가 유입되는 다공튜브

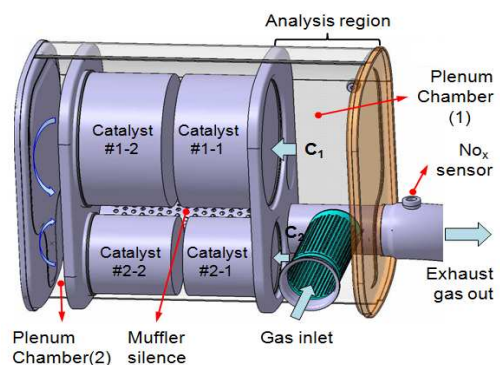


Fig. 1 Internal geometry of integrated SCR muffler system

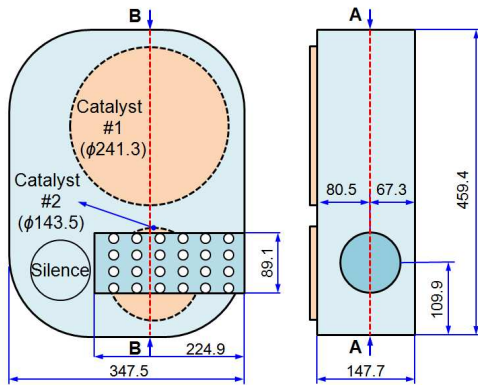


Fig. 2 Detailed sketch of plenum chamber and multi-perforated tube

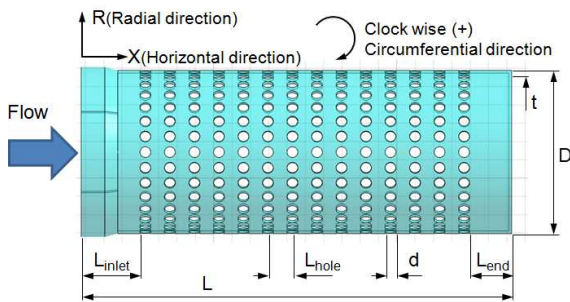


Fig. 3 Schematics of multi-perforated tube

입구부터 축매 입구 전단에 설치된 플리넘 챔버를 해석 대상으로 하였다.

Fig 2는 플리넘 챔버 내 다공튜브 및 축매의 위치를 나타낸 것이다. 챔버의 체적은 21.04 ℓ 이며 축매는 1번으로 정의된 큰 크기의 것과 2번으로 정의된 작은 크기의 축매로 구성되어 있다. 1번 축매와 2번 축매의 면적은 각각 0.042 m², 0.014m² 이며, 길이와 면적당 셀의 수는 동일하게 139.7mm, 300이다.

Fig 3은 배기관과 연결되어 챔버 내부에 설치된 다공튜브의 형상을 나타낸 것이다. 다공튜브는 배기가스의 맥동과 감소를 통한 진동소음 저감에 기여하며 SCR 시스템에서는 챔버 내부에 요구되는 유동장을 형성하는데 큰 영향을 끼친다. 다공튜브 전체 길이(L)은 234.98mm 이며 다공튜브 입구로부터 첫 번째 오리피스가 설치된 입구길이(L_{injet})는 24 mm이고 마지막 오리피스로부터 튜브 끝단까지 길이(L_{end})는 27mm 이다. 직경(d)은 8 mm 이며 오리피스 중심사이의 거리(L_{hole})는 15 mm 이다. 다공튜브의 입구내경(D)은 89.1 mm 이고 튜브의 두께는 1.5 mm 이다. 다공

Table 1 Hole area ratios and relating parameters

Area ratio (%)	d(mm)		Hole area	Distance between orifice (mm)	No. of orifice
	d ₁	d ₁₂			
+40	9.5	6.2	A ₁ =A _{8mm} ×1.4 A ₁₂ =A _{8mm} ×0.6	8.07	252
+20	8.8	7.2	A ₁ =A _{8mm} ×1.2 A ₁₂ =A _{8mm} ×0.8	8.02	
0	8		A _{8mm}	8.00	
-20	7.2	8.8	A ₁ =A _{8mm} ×0.8 A ₁₂ =A _{8mm} ×1.2	8.02	
-40	6.2	9.5	A ₁ =A _{8mm} ×0.6 A ₁₂ =A _{8mm} ×1.4	8.07	

튜브 길이방향 또는 유동방향을 수평방향(H), 길이방향에 수직한 방향을 수직방향(N)으로 정의하였다. 튜브에 설치된 오리피스의 개수는 길이방향으로 12개가 설치되어 있으며 원주방향으로 21개가 설치되어있어 전체 오리피스 개수는 252개 이다. 다공튜브 길이방향에 따른 오리피스 번호는 입구로부터 가장 가까운 지점에 있는 것을 1번으로 정의하고 길이방향에 따라 순차적으로 증가하여 마지막 오리피스를 12번으로 정의 하였다. 다공튜브 내부 유동면적을 기준으로 한 표면적과 오리피스 면적을 제외한 나머지 면적의 비로 정의되는 차단비(Blockage ratio, BR)는 20.3% 이다.

다공튜브의 형상이 챔버 내부유동에 끼치는 영향을 알아보기 위해 다공튜브 오리피스 면적을 변화시켰다. 다공튜브 길이방향에 따른 오리피스 면적은 +40, +20, -20, -40으로 변화되었다. +40은 Table 1에서 나타낸 것과 같이 직경(d) 8 mm의 면적(A_{8mm})을 기준으로 1번 오리피스의 면적(A₁)을 40% 증가시키고 12번 오리피스의 면적(A₁₂)을 40% 감소시킨 다음 두 면적의 차이를 11등분하여 다공튜브 입구길이(L_{injet})가 끝나는 지점부터 끝단이 시작되는 지점(L_{end}) 사이에 등간격으로 배치한 것을 나타낸다. (+)는 다공튜브 입구에 큰 직경의 오리피스가 설치되고 끝단으로 갈수록 점점 오리피스 직경이 작아지는 것을 의미하고, (-)는 반대로 다공튜브 끝단으로 갈수록 오

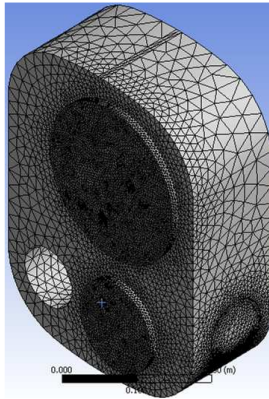


Fig. 4 Grid generation around plenum chamber and multi-perforated tube

리피스 직경이 점점 커지는 것을 의미한다.

면적변화에 따른 1번 및 12번 오리피스 직경(d_1 및 d_{12})과 변화된 직경에 따른 인접한 두 오리피스 사이의 간격을 Table 1에 나타내었다. 면적비 변화효과는 다공튜브 길이방향으로 일정한 직경($d=8$ mm)이 설치되어 면적비 변화가 없는 0(zero)으로 표시된 경우와 비교를 통하여 확인 하였다. 면적비 변화가 있는 경우(+40, +20, -20, -40)와 없는 경우(0) 모두 차단비는 20.3%로 동일하다.

2.2 지배방정식

다공튜브 형상변화에 따른 챔버 내부 유동특성을 해석하기 위하여 전산해석 상용프로그램 중 하나인 Fluent V6.3을 이용하였다. 챔버 내부 및 촉매 전후단 속도분포를 조사하기 위한 지배방정식은 기상인 공기의 연속상에 대한 오일러리언 연속방정식 및 운동량보존식으로 이루어져 있다. 열교환은 고려하지 않았으므로 에너지 방정식은 고려하지 않았으며 상세한 내용은 사용자 지침서를 참조하였다. 배기관 입구 유입속도와 입구 크기를 기준으로 한 레이놀즈수는 최소 5×10^4 이상이므로 난류모델을 사용하였으며 와점성계수 계산을 위한 난류모델은 표준 k- ϵ 모델을 사용하였다.

SCR 촉매 필터를 모사하기 위해 해석적으로 다공성모델을 사용하였다. 본 연구에 이용된 해석프로그램에서 다공성물질에 대한 운동량방정식에 대한 생성항인 촉매 셀을 통과하는 압력강하는 식 (1)과 같이 정의된다.⁽¹⁹⁾

$$\nabla p = \left(C_1 \frac{\rho u^2}{2} + D \mu u \right) \quad (1)$$

여기서 C_1 과 D 는 식 (2)로 표시되는 관성저항 및 점성저항을 나타낸다

$$C_1 = \frac{2\alpha}{\rho L}, D = \frac{\beta}{\mu L}$$

C_1 과 D 는 주어진 해석 조건의 속도에 대한 실험 데이터 또는 촉매 셀을 통과하는 유량에 대한 보존관계식을 이용하여 구할 수 있다. 해석대상인 셀의 체원과 입구속도를 이용하여 계산된 C_1 과 D 값은 각각 5.57, 143.5 이다. 해석모델은 CATIA V5를 이용하여 모델링하고 격자는 Gambit 2.3을 사용하였으며 구성된 격자 수는 대략 60만 개 전후 이다.

2.3 경계조건

해석에 사용된 SCR 머플러와 내부에 포함된 다공튜브를 해석하기 위하여, CATIA V5로 3차원 설계를 진행하고 설계된 파일은 GAMBIT 2.3에서 import 될 수 있는 파일형식으로 변경하여 형상을 불러오게 된다. 형상의 왜곡된 부분에 대해 수정을 하고 메쉬를 설정하였으며, 경계를 부여하여 solver에서 해석을 수행하였다.

Fig 4는 해석대상인 머플러 내부의 플리넘 챔버에 대한 메쉬 구성을 나타낸 것으로 왼쪽 유동의 입구부분과 2개의 촉매부분에 메쉬를 집중시켜 유동의 급격한 변화를 계산하였다.

대상엔진은 6ℓ 급 6기통 엔진을 대상으로 하였다. 직경 89.1 mm인 배기파이프의 체적유량은 $16.7 \text{ m}^3/\text{min}$ 이며 이에 따른 평균속도는 44.64 m/s 이고 머플러에 작용하는 배압은 0.20056 bar 이다. 해석에서 작동유체로 사용한 공기의 점도(μ)는 $8.9576 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 밀도(ρ)는 1.293 kg/m^3 이다. 배기관 직경을 기준으로 한 레이놀즈수는 57312.8 이며 정상상태에서 해석이 수행되었으며, 촉매전단에 배압을 적용하였다

3. 해석결과 및 고찰

3.1 다공튜브 형상변화에 따른 유량분포

Fig 5는 다공튜브 길이방향으로 설치된 오리피스로부터 방출되는 유량분포 특성이 챔버 내부 유동장에 미치는 영향을 조사하기 위해 오리피스 면적을 Table 1에 나타낸 것과 같이 변화시켰을 때 각 오리피스에 측정된 유량을 오리피스 번호에 대해 나타낸 것이다. 오리피스 면적변화가 없

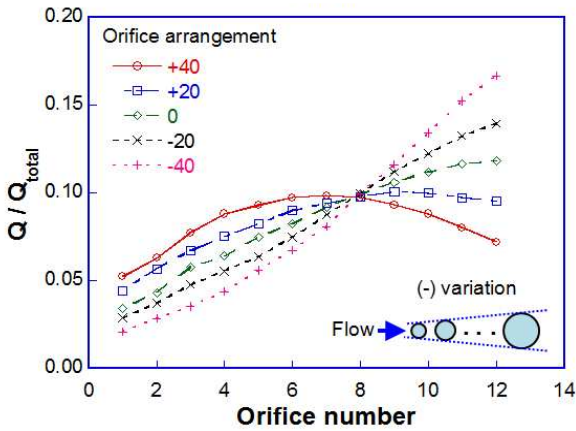


Fig. 5 Volume flow rate with the variation of orifice area ratio

이 직경 8 mm가 일정한 간격으로 설치된 0(zero) 조건 경우는 오리피스 유량분포가 다공튜브 길이방향에 따라 거의 선형적으로 증가하는 경향을 보인 반면, +40 조건의 경우는 8번 오리피스 이후의 감소경향이 두드러지게 나타나고 있으며, 1번 오리피스와 12번 오리피스 사이의 차이가 크게 감소한 것을 볼 수 있다. 반면 -40 조건의 경우 오리피스 면적변화가 없는 0의 경우보다 더 큰 오리피스 사이의 유량 차이를 보여주고 있다. 이러한 결과는 다공튜브에 설치된 오리피스 면적비 변화를 통해 오리피스 방출 유량을 조절할 수 있음을 의미하는 것이다.

Fig. 6은 다공튜브 형상변화의 +40 조건의 경우에 대한 축매 전단 유동의 등속도분포를 나타낸 것으로 우측의 범례 값은 축매전단에서 속도의 수직성분의 크기이다. 선행 연구결과⁽¹⁹⁾에 나타낸 것과 같이 약화된 벌크 선회유동의 결과 C₁ 축매 전단의 유동분포는 축매 중심부에서 비교적 낮은 속도분포를 나타내고 있으며 축매 외곽에서도 매우 낮은 속도 값을 보여주고 있다. C₂ 축매의 경우 유동분포가 개선되기는 했지만 축매 외곽에서 낮은 속도분포를 보여주고 있다.

Fig. 7은 다공튜브 형상변화 -40 조건의 경우에 대한 축매 전단 유동의 등속도분포를 나타낸 것이다. C₁ 축매 전단 유동장은 선회유동의 효과로 인해 중심부의 낮은 속도를 제외하고 비교적 향상된 유동분포를 나타내고 있다. C₂ 축매의 경우 다공튜브로부터 축매로 직접 향하는 유량이 증가하여 상당히 개선된 유동분포를 보여주고 있다.

3.2 다공튜브 형상변화에 따른 균일도 지수

Table 2는 다공튜브 오리피스 면적변화가 +40,

Table 2 Uniformity index and mass flow rate with orifice area change

Items	Uniformity Index		Mass flowrate (kg/s)		Back pressure (Pa)	
	Over 0.8		0.25	0.08		
Catalyst	C ₁	C ₂	C ₁	C ₂	-	
Cases	-40	0.7242	0.8545	0.1978	0.1356	3874.56
	0	0.7174	0.8065	0.1918	0.1415	3550.14
	+40	0.6255	0.8351	0.1939	0.1397	3830.10

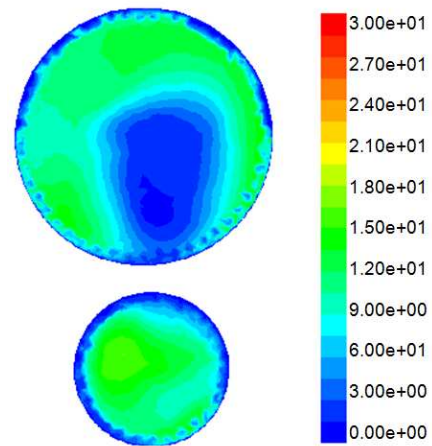


Fig. 6 Iso-velocity contours in front of SCR catalyst for +40 case

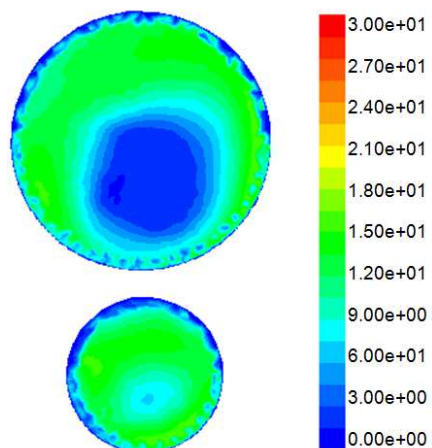


Fig. 7 Iso-velocity contours in front of SCR catalyst for -40 case

0, -40일 때 축매 후단에서 계산된 유동 균일도지수와 각 축매를 통과하는 질량유량을 챔버 내부에 작용하는 압력과 함께 나타낸 것이다. 목표치로 설정한 값은 연구대상 SCR 머플러 설계당시

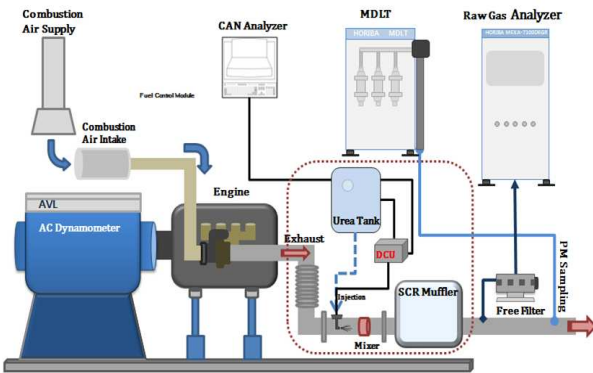


Fig 8 Testing device block diagram



Fig. 9 Photo of testing device

선정한 설계 목표값에 해당한다. 설계 목표값은 유동 균일도지수가 C₁ 및 C₂ 촉매에서 0.8 이상이고, 촉매의 면적비에 따라 계산된 유량 분배비가 C₁ 및 C₂ 촉매에 대해 각각 0.25 kg/s 및 0.08 kg/s이다. 다공튜브 오리피스 면적 변화에 대해 C₁ 및 C₂ 촉매 후단에서 계산된 유동 균일도지수를 살펴보면 C₁은 목표값을 상회하는 결과를 보여주는 경우는 없지만 그중에도 -40조건이 가장 높은 값을 나타내고 있다. 이것은 다공튜브 끝단으로 갈수록 보다 많은 유량을 방출하여 챔버 내부에 강력한 벌크 선회유동을 형성하는 것이 균일도 향상에 유리하게 작용함을 알 수 있다. 또한 C₂의 경우 인접한 다공튜브의 영향으로 세 경우 모두 목표값을 상회하지만 -40의 경우가 가장 높은 값을 나타내고 있다.

질량유량 분배 정도를 살펴보면 C₁의 경우 목표값을 초과하는 것은 없지만 -40의 경우가 가장 큰 값을 나타내고 있다. C₂ 촉매의 경우 -40의 경우가 가장 낮은 값을 보이는 하지만 세 경우 모두 목표값을 초과하고 있어 C₂로 향하는 유량을 감소시켜야 함을 알 수 있다. 한편 챔버 내부

에 작용하는 압력은 다공튜브 오리피스 면적 변화가 없는 0의 경우가 가장 낮게 나타났으며, -40의 경우에서 상대적으로 높은 압력을 보여주고 있다. 이와 같은 높은 배압은 배기가스 유동저항을 증가시켜 엔진의 효율을 떨어뜨릴 수 있는 가능성이 있으므로 신중히 고려되어야 한다.

이상의 결과를 종합해 보면 다공튜브 길이방향으로 보다 많은 유량이 방출되는 경우가 유동 균일도지수 및 유량분배 측면에서 효과적이지만 강한 챔버 내부 벌크 선회유동으로 인한 압력 손실이 약간 증가함을 알 수 있다. 따라서 압력증가가 허용되는 범위내에서 다공튜브 길이방향에 따라 더 많은 유량이 방출되도록 다공튜브의 형상을 설계하는 것이 촉매효율향상 및 암모니아슬립에 큰 도움이 된다는 것을 알 수 있다.

4. 엔진실험 결과 및 고찰

4.1 설계 최적화를 통한 엔진장착 실험

Fig. 8은 시험용 엔진의 기본성능 및 SCR 머플러 시스템의 성능을 분석하기 위한 시험장치로서 엔진동력계시스템, 배기분석계, 입상물질을 포집하는 MDLT로 구성하였다. Fig. 9는 실제로 구성된 시험장치의 사진이다.

시험에 사용한 엔진은 EURO-IV 규제를 만족하는 6L급 디젤엔진으로 터보차저와 인터쿨러가 장착되어 있으며, 연료분사시스템은 CRDI 방식으로 보쉬사 제품이며, 엔진의 최대 토크는 850Nm/1250~1950rpm이고 최대마력은 185KW/2700rpm이며, 최대엔진 speed는 3000rpm이다.

시험모드는 국내 및 유럽에서 사용하고 있는 배기인증 시험모드로써 정적 사이클의 ESC 모드와 transient의 ETC 시험모드를 수행하였다. ESC 모드는 유럽의 대형엔진 배기인증 사이클이며, steady-state모드로 국내에서는 ND-13 모드라고 하며, 대형 디젤 자동차의 배기인증 시험모드로 사용되고 있다. 사이클 구성은 아이들 모드와 최대출력을 기준으로 저속·중속·고속의 3가지 속도영역을 선정한 후 각 속도영역의 25, 50, 75, 100% 부하조건으로 구성된 정속 13모드와 NOx 측정을 위한 추가적인 3개의 모드로 구성, 고부하 및 높은 배출가스 온도영역의 운전조건을 만족도록 하였다.

또한 ETS 모드는 유럽 배기인증 사이클로 대형자동차의 도로주행 형태와 근접한 transient 사

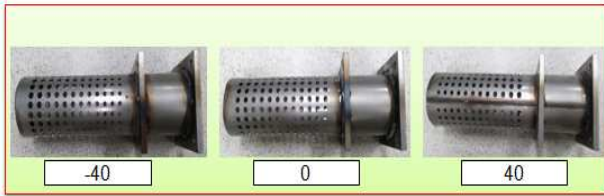


Fig. 10 Photo of perforated tube sample

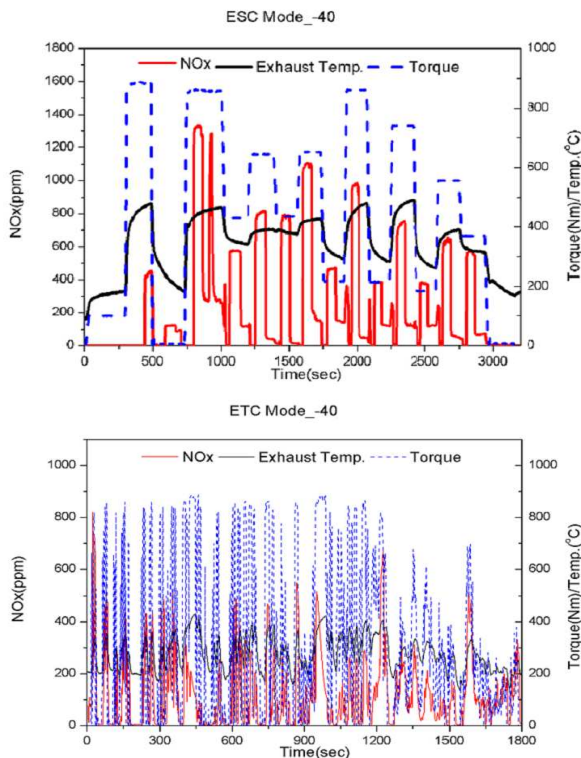


Fig. 11 ESC & ETC real-time result(NOx) at -40 condition

이클로 엔진의 성능영역을 최대한 수행할 수 있도록 구성되어 있으며, 현재 국내 대형자동차의 인증절차로 사용하고 있다. 사이클의 구성은 시간에 따른 엔진회전수(%) 및 엔진토크(%)로 구성되며, 사이클 주행모드는 3가지 모드로 구성되어 있다.

- ① 시내주행모드: 최고속도 50 km/h로 빈번한 출발과 정지 & 아이들링
- ② 교외주행모드: 시내주행모드 후 급격하게 가속하여 시작, 평균속도 72 km/h
- ③ 고속도로주행모드: 평균속도 88 km/h

시험에 사용한 다공튜브는 설계해석을 근거로 Table 1의 설계모델 중 면적비 +40, 0(zero), -40 조건인 샘플 3개를 제작하여 SCR 머플러 내부에 순차적으로 정착한 다음 엔진시험을 수행하였다.

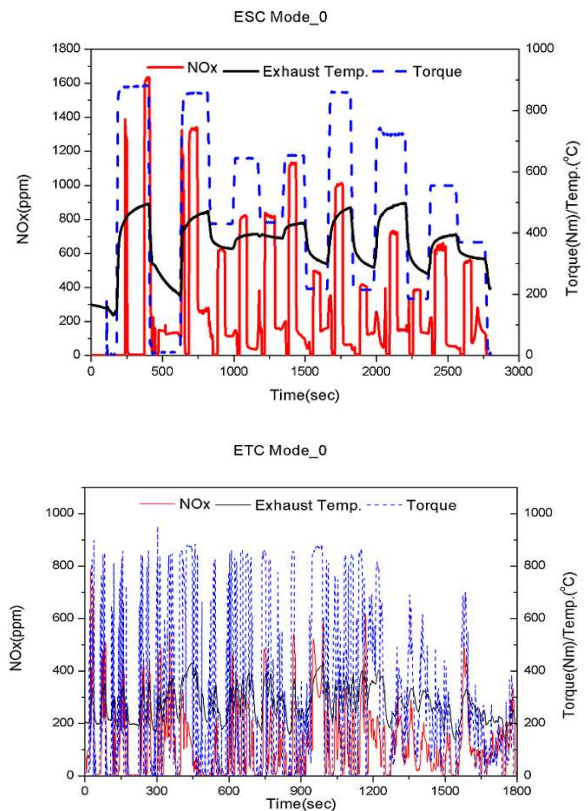


Fig. 12 ESC & ETC real-time result(NOx) at 0(zero) condition

Fig. 10은 시험에 사용된 다공튜브 샘플 사진을 나타내고 있다.

4.2 다공튜브 형상 변화에 따른 엔진시험결과
다공튜브 형상변경에 따른 면적비 +40, 0(zero), -40 조건에서의 동일한 SCR 머플러를 디젤엔진에 장착하고 시험장치를 활용하여 시험하였다.

본 연구 대상물인 SCR 머플러의 주요기능이 배출가스의 NOx를 저감하기 위하여 차량에 장착하는 장치임에 따라 시험 결과값 중 NOx 값에 대해서만 분석을 실시하였다. -40 조건에서 시험모드별 각 운전영역에서의 배출특성은 Fig. 11에서 보는 바와 같으며, 0(zero) 조건에서는 Fig. 12, +40 조건에서는 Fig. 13과 같다. 이 결과값은 체적당 농도단위(ppm)로써 시험장치의 자체 프로그램에 의해 환산 과정을 거쳐 출력당 중량단위(g/kWh)로 환산하여 산출한 결과는 Table 3과 같다.

시험결과를 분석해 보면 -40 조건에서 ESC 모드로 시험한 결과값이 1.064 g/kWh 값으로 0(zero) 조건에서의 결과값 1,242 g/kWh 대비하여 85.7% 수준으로 14.3% 저감효과를 나타내고 있으

Table 3 NOx test result at two test modes (g/kWh)

Test Mode	-40	0	+40
ESC	1.063	1.243	1.459
ETC	2.267	2.351	2.489

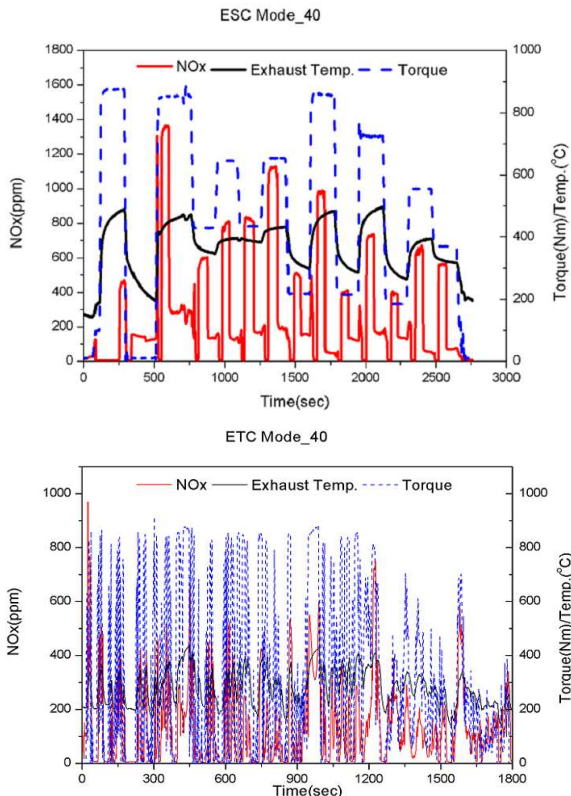


Fig. 13 ESC & ETC real-time result(NOx) at +40 condition

며 +40조건에서는 1.459 g/kWh 값으로 0(zero) 조건 대비하여 117.5% 수준으로 더 높아지는 것을 알 수 있다.

ETC 모드에서는 -40 조건에서 2.267 g/kWh 값으로 0(zero) 조건의 2.351 g/kWh 값 대비하여 96.4% 수준으로 3.6% 저감효과를 나타내고, +40 조건에서는 2.489 g/kWh 값으로 0(zero) 조건 대비 105.9% 수준으로 높아지는 것을 알 수 있다. Fig 14는 ESC 모드에서의 NOx 결과값을 비교한 것이고, Fig 15는 ETC 모드에서의 NOx 결과값 비교를 나타내고 있다.

이와 같은 시험결과는 해석결과 (-)조건에서 균일도지수 및 유량분배 특성이 유리하게 작용하는 결과와 동일한 결과로 -40 조건에서 NOx 저감 효과가 가장 좋은 것을 알 수 있다.

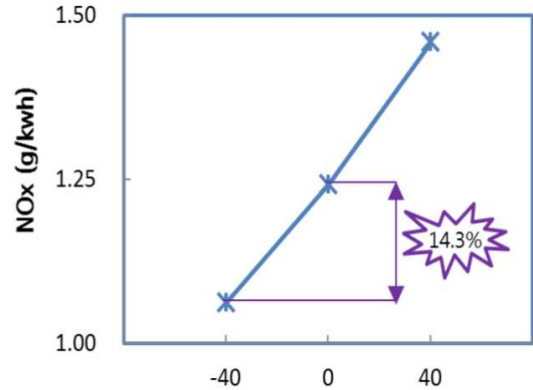


Fig. 14 NOx at the ESC testing mode

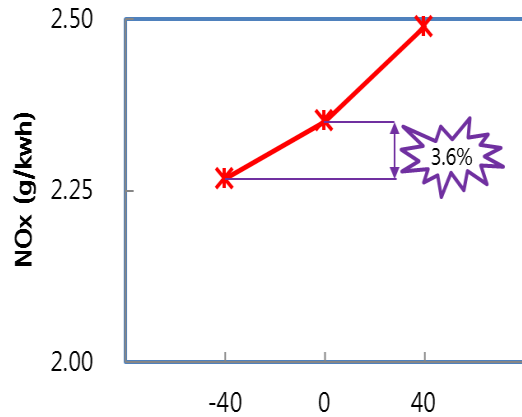


Fig. 15 NOx at the ETC testing mode

4. 결 론

입구 면적이 서로 다른 두 개의 촉매가 병렬로 설치된 촉매삽입형 SCR 머플러에서 플리넘 챔버 내에 설치된 다공튜브의 오리피스 면적비 변화가 챔버 내부유동 및 촉매 전후단 유동분포에 미치는 영향을 해석적으로 조사하고, 최적화 설계를 통한 다공튜브의 면적비를 변경한 +40, 0(zero), -40 조건으로 샘플을 제작하여 동일한 엔진 및 SCR 머플러에 장착하여 시험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 다공튜브 길이방향으로 오리피스 면적이 증가하여 오리피스 끝단부분으로 갈수록 유량이 많이 방출되는 경우 오리피스 방출유량 또한 길이 방향에 따라 증가하며 챔버 내부에 강력한 벌크 선회유동장이 형성되어 촉매 전후단 균일도지수 및 유량분배가 양호하게 나타나지만 상대적으로 챔버 내부압력이 증가함을 알 수 있었다.

(2) SCR 머플러 내부의 다공튜브 형상을 변경할 경우 디젤엔진의 배출가스 유해물질인 NOx를

저감할 수 있음을 확인하였다.

(3) 다공튜브 길이방향으로 오리피스 면적이 증가하여 오리피스 끝단으로 갈수록 유량이 많이 방출되는 경우 (-40조건)에서 NO_x 값이 ESC 모드의 경우에서 0(zero) 조건 대비 14.3% 저감되고, ETC 모드의 경우 3.6% 저감되어 NO_x 저감 효과가 가장 우수하게 나타남을 알 수 있었다.

(4) 축매삽입형 SCR 머플러의 해석결과인 (-)조건에서 균일도지수 및 유량분배 특성에 유리하게 작용하는 결과와 엔진시험을 실시한 결과값이 다공튜브 길이방향으로 오리피스 면적이 증가하여 오리피스 끝단으로 갈수록 유량이 많이 방출되는 경우 (-40조건)에서 NO_x 저감효과가 가장 우수하게 나타남에 따라, 해석결과와 엔진시험 결과가 일치함을 확인하였다.

참고문헌
(References)

(1) Zhang, X. and Romzek, M., 2007. "3-D Numerical Study of Flow Mixing in Front of SCR for Different Injection Systems," SAE Technical Paper 2007-01-1578.

(2) Girard, J., Snow, R., Cavataio, G. and Lambert, C., 2007. "The Influence of Ammonia to NO_x Ratio on SCR Performance," SAE Technical Paper 2007-01-1581.

(3) Narayanaswamy, K. and He, Y., 2008. "Modeling of Copper-Zeolite and Iron-Zeolite Selective Catalytic Reduction (SCR) Catalysts at Steady State and Transient Conditions," SAE Technical Paper 2008-01-0615.

(4) Thompson, J., De Beeck, J. O., Joubert, E. and Wilhelm, T., 2008. "Case Studies of Urea SCR Integration on Passenger Cars Monitoring of Urea Inside the Tank During Hot and Cold Environment Test Missions," SAE Technical Paper 2008-01-1181.

(5) Huang, Z., Zhu, Z., Liu, Z. and Liu, Q., 2003. "Formation and Reaction of Ammonium Sulfate Salts on V2O5/AC Catalyst During Selective Catalytic Reduction of Nitric Oxide by Ammonia at Low Temperatures," *Journal of Catalysis*, Vol. 214, pp. 213~219.

(6) Lee, J. S., Baik, D. S. and Lee, S. W., 2008. "Evaluation of SCR System in Heavy-Duty Diesel Engine," SAE Technical Paper 2008-01-1320.

(7) Rajadurai, S., 2008. "Improved NO_x Reduction Using Wiremesh Thermolysis Mixer in Urea SCR System," SAE Technical Paper 2008-01-2636.

(8) Kim, T. K., Sung, Y. M., Han, S. H., Ha, S. J., Choi, G. M. and Kim, D. J., 2012. "Effect of Mixer Structure on Turbulence and Mixing with Urea-water Solution in Marine SCR System," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 36, No. 6, pp. 814~822.

(9) Zhang, X., Romzek, M. and Morgan, C., 2006. "3-D Numerical Study of Mixing Characteristics of NH₃ in Front of SCR," SAE Technical Paper 2006-01-3444.

(10) Weltens, H., Bressler, H., Terres, F., Neumaier, H. and Rammoser, D., 1993. "Optimization of Catalytic Converter Gas Flow Distribution by CFD Prediction," SAE Technical paper 930780.

(11) Johansson, Å., Wallin, U., Karlsson, M., Isaksson, A. and Bush, P., 2008. "Investigation on Uniformity Indices Used for Diesel Exhaust Aftertreatment Systems," SAE Technical Paper 2008-01-0613.

(12) Oesterle, J. J., Calvo, S., Damson, B., Feyl, G., Neumann, F. and Rudelt, J., 2008. "Urea Systems in Focus - New Challenges and Solutions in the Development of Car and Commercial Vehicle Exhaust Systems," SAE Technical Paper 2008-01-1186.

(13) Oesterle, J. J., Calvo, S., Damson, B., Neumann, F. and Rudelt, J., 2008. "SCR Technology with Focus to Stringent Emissions Legislation," SAE Technical Paper 2008-01-2640.

(14) Karlsson, M., Wallin, U., Fredholm, S., Jansson, J., Wahlström, G., Schär, C. M., Onder, C. H. and Guzzella, L., 2006. "A Combined 3D/Lumped Modeling Approach to Ammonia SCR After-treatment Systems: Application to Mixer Designs," SAE Technical Paper 2006-01-0469.

(15) Lee, H. S., Ha, J. H., Pahn, L. O. and Lee, S. H., 2005. "An Internal Flow Analysis for Automobile Mufflers," *Proceedings of KSAE*, pp. 1804~1088.

(16) Han, K. T., 2005. "A Study on the Perforating

- Process of the Muffer Tube using FEM," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 29, No. 3, pp. 275~280.
- (17) Jeong, S. J., Kang, W., Lee, J. J. and Kim, T. H., 2009. "Exhaust System Design for the Integrated Automotive Muffler," *Transactions of KSAE*, Vol. 17, No. 4, pp. 24~31.
- (18) Lee, S. K., Moon, N. S. and Lee, J. K., 2012. "A Study on Exit Flow Characteristics according to the Orifice Configuration of Multi-perforated Tubes," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 9, pp. 2751~2758.
- (19) Lee, S. K., Moon, N. S. and Lee, J. K., 2013, "Analysis of an Internal Flow with Multi-perforated Tube Geometry in an Integrated Urea-SCR Muffler" *Journal of the Korea Society of Marine Engineering*, Vol. 37, No. 5, pp. 500~508
- (20) Fluent User Guide. 6.2, The RNG k-e Model, pp. 11~17.