

상용차용 SCR 머플러의 방사소음 개선에 관한 연구

A Study on the Improvement of Radiated Noise in SCR Muffler of Commercial Vehicle

이 동 원* · 김 완 수* · 배 철 용† · 김 찬 중* · 권 성 진* · 이 봉 현*
Dong-Won Lee, Wan-Su Kim, Chul-Yong Bae, Chan-Jung Kim,
Sung-Jin Kwon and Bong-Hyun Lee

(2008년 2월 5일 접수 ; 2008년 7월 21일 심사완료)

Key Words : Exhaust System(배기계), SCR(selective catalytic reduction, 선택적촉매저감), SDM(structural dynamic modification; 동적구조변경), Radiated Noise(방사소음), Stringer(세로 보)

ABSTRACT

This study presents the design modification for SCR muffler of a commercial vehicle. Its main objective is the reduction of radiated noise at SCR muffler. For this study, the research of five steps were achieved by experimental and CAE analysis. First step is the measurement of radiated noise using impact-acoustic test. Second step is the source identification using experimental modal analysis. The cause of radiated noise source is confirmed by the resonance of end plates at SCR muffler. Third step confirms the possibility of resonance avoidance using SDM analysis applied the mass control. Fourth step is the suggestion of design modification which is the change of mode shape by CAE analysis. Last step is the verification of design modification using SYSNOISE analysis. Finally, the prototype product applied the countermeasure of resonance evasion was manufactured and the reduction of radiated noise at SCR muffler was confirmed by pass-by noise test.

1. 서 론

일반적으로 자동차 엔진 등의 내연기관에서 발생되는 배기소음의 주파수 특성은 엔진 회전수와 밀접한 관련을 갖고 있으며, 이외에 기타 광대역 주파수 성분을 갖는 소음특성을 가지고 있다⁽¹⁾. 특히, 자동차용 내연기관에서 방출되는 소음은 배기 매니폴드에서 매우 큰 소음레벨을 발생시키기 때문에 소음기의 사용은 필수적으로 인식되어지고 있다. 이러한 배기계 소음은 크게 토출소음과 배기계 겉 표면에서 방사되어지는 소음으로 구분할 수 있으며, 자동차의

소음원 중 가장 큰 영향을 미치는 소음원으로 작용하게 된다⁽²⁾. 이에 따라 배기계 소음 저감을 위해 머플러 내부 유동소음에 대한 많은 연구들이 수행되어지고 있다⁽³⁾. 특히, 환경소음의 규제가 국내/외적으로 강화되어지는 추세이기 때문에 이러한 배기계의 소음 저감에 대한 노력은 엔진구동에 따른 유해가스 처리기술과 더불어 중요한 연구분야로 자리 잡고 있는 상황이다. 또한 근래의 소음규제는 일반 승용차뿐만 아니라 상용차에 대한 규제도 강화되어지고 있는 상황이기 때문에 대형 트럭 등에 장착되어지고 있는 배기계의 소음저감에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다.

자동차의 소음규제 허용은 크게 가속주행 소음과 배기소음으로 나누어 규제되어지며, 각기 다른 표준화된 시험규격을 통하여 소음측정 결과를 도출하게

† 교신저자 : 정희원 자동차부품연구원 에너지시스템연구센터
E-mail : cybae@katech.re.kr

Tel : (041)559-3339, Fax : (041)559-3070

* 정희원, 자동차부품연구원 에너지시스템연구센터

된다. 하지만, 배기계에서 발생하는 소음이 자동차 주행 중 상당히 큰 소음원으로 작용하기 때문에 배기계에 대한 소음저감은 배기계 단일의 소음규제 뿐만 아니라 가속주행에 따른 소음레벨의 저감에도 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 가속주행 소음은 엔진/구동계 뿐만 아니라 배기계에 대한 소음저감이 동시에 이루어져야 허용 규제치를 원활하게 만족시킬 수 있게 된다.

이에 이 연구에서는 400마력 이상의 대형 트럭에 장착되는 SCR 머플러에 대하여 가속주행 소음을 측정하고, 허용규제 이상의 소음레벨을 획득한 머플러 시스템에 대하여 실험적 방법 및 해석적 방법을 통하여 머플러에서 방사되어지는 소음 저감에 대한 연구를 수행하고 이 결과를 제품 설계변경에 적용시켜 국내 가속주행 소음규제 허용치를 만족시키는 제품 양산화에 대한 연구를 수행하였다.

2. 시제품 Pass-by Noise 시험

2.1 시험 대상품

이 연구에 적용되어진 SCR 머플러는 국내 D社에서 개발 중인 제품으로 440마력급의 대형 트럭에 장착 예정인 제품이다. Fig. 1은 시험품의 외관을 보여주는 그림이며 무게는 약 80kg이고 양 끝단면 플레이트의 직경은 약 50.6cm이다.

Fig. 1에서 입구를 통해 들어오는 연소공기는 SCR 촉매를 통과하고 주 공기는 공명기를 거쳐 외부로 배출이 되며 잉여공기는 다공판을 거쳐 순환되는 구조를 가지고 있다⁽⁴⁾. 따라서 SCR 머플러 내부에는 공기 유동에 따른 소음의 영향으로 차량에 공기

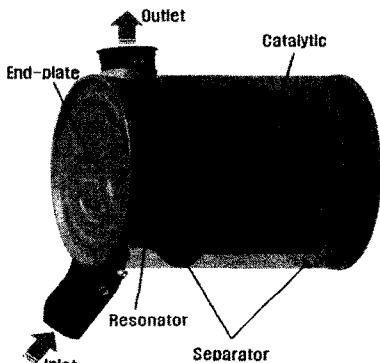


Fig. 1 Structure of SCR muffler

기인 및 구조기인 소음과 진동을 유발시키게 된다.

2.2 시험품 Pass-by Noise 시험

머플러를 개발하여 차량에 적용할 때에 발생하는 방사소음은 일반적으로 각 업체에서 KS R 1020 (ISO 362) 차량가속 시 차의 소음시험방법을 통하여 측정하게 되며, 측정된 음압을 통하여 개발되어진 제품의 방사소음 특성의 적합성 여부를 판단하게 된다. 국내 환경부에서 법령으로 고지되어 있는 pass-by noise의 제한 규제치는 Table 1과 같다. 이 연구에 적용되어진 SCR 머플러의 경우, 440마력급의 대형 트럭에 적용되어지기 때문에 80 dB(A) 이하의 규제치를 적용받게 된다.

이 연구에 적용되어진 SCR 머플러 1차 시험품에 대하여 KS R 1020 시험규격에 의하여 6단 기어비부터 10단 기어비까지 pass-by noise 시험을 수행한 결과 85.9 dB(A)의 소음레벨을 획득하여, 이에 대한 소음개선 대응책이 요구되어지고 있는 상황이다.

2.3 SCR 머플러 소음특성 분석

SCR 머플러에서 방사되어지는 소음의 동특성 분석을 수행하기 위하여, 이 연구에서는 충격-음향

Table 1 Regulation of commercial vehicles

Vehicle type		Noise level (dB(A))	
Commercial vehicles	Small size	77 or under	
	Midium size	78 or under	
	Big size	97.5 HP or under	77 or under
		97.5 < HP ≤ 195	78 or under
	195 HP over	80 or under	

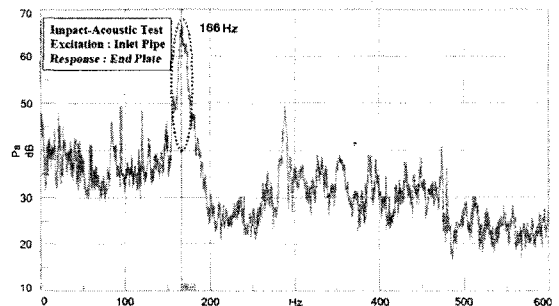


Fig. 2 Frequency response of impact-acoustic test

측정 시험을 우선적으로 수행하였다. 충격-음향측정 시험은 자유경계 조건하에서 머플러의 입구 파이프 부분을 가진 후, 머플러의 양 끝단 플레이트에 마이크로폰을 설치하여 이에 대한 소음을 측정하는 방식으로 구성되어진다. 이러한 시험은 구조기인에 의해 전달되어지는 소음특성의 분석에 유용하게 사용되어지는 방법이다.

Fig. 2는 충격-음향측정 시험결과를 주파수 분석하여 도시한 것이다. 주파수 분석 결과 약 166 Hz 근방에서 주요한 지배적 소음인자가 발생하고 있음을 확인할 수 있으며, 차량 주행 시에도 이러한 머플러 내부에서 공기 유동에 의한 머플러 구조물 가진을 통하여 동일한 주파수 대역의 소음인자가 발생할 수 있음을 예측할 수 있다. 따라서 166 Hz 근방에 해당하는 소음레벨을 저감시킨다면 전체적인 SCR 머플러의 방사소음의 레벨을 저감시킬 수 있게 된다.

3. SCR 머플러 방사소음 개선

3.1 SCR 머플러 실험적 모달해석

SCR 머플러의 구조적 동특성 분석을 위하여 이 연구에서는 실험적 모달해석을 수행하였다. Fig. 3은 실험적 모달해석 수행을 위한 모달 모델을 나타낸 것이다. 또한 SCR 머플러의 모드형상을 왜곡되지 않은 상태로 분석하기 위하여 110개의 노드로 구성된 후, 가진기를 이용하여 모달시험을 수행하였다.

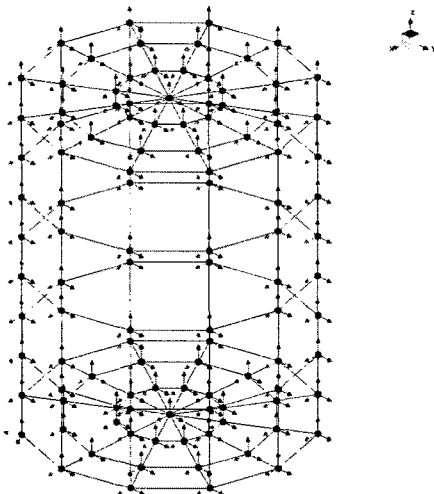


Fig. 3 Modal model for SCR muffler

Table 2는 실험적 모달해석의 결과를 4차 공진대역까지 나타낸 것이다. 특히, 3차 공진주파수는 166 Hz에서 발생하고 있으며, 앞서 수행되어진 충격-음향측정 시험에서 분석되어진 주요한 주파수 인자와 동일한 주파수 대역을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 SCR 머플러의 주요한 소음원은 구조적 공진에 의해 발생되어지는 공진음이란 것을 알 수 있다. 또한 3차 공진 주파수에 대하여 모드형상을 분석해 본 결과, 양단 플레이트(end plate)만이 Fig. 4와 같은 일반적인 플레이트 진동(plate vibration)의 1차 모드형태로 모드형상이 발생하고 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 SCR 머플러 SDM 분석

앞서 수행되어진 실험적 모달해석을 통하여 166 Hz 대역의 주파수 성분으로 양단 플레이트가 1차 플레이트 진동모드로 발생되어지는 공진음이 주요한 SCR 머플러의 소음원임을 알 수 있었다. 이에 이 절에서는 상단 플레이트의 동적 구조변경(structural dynamic modification) 분석을 통하여 설계개선가능성을 확인해 보고자 한다.

SDM 분석은 측정된 모달 모델에서 각 노드별 질량 혹은 노드와 노드 사이의 강성 및 감쇠비 조절을 통하여 시스템 변경을 수행하게 된다. 이 연구에서

Table 2 Result of modal analysis

Mode	Frequency (Hz)	Damping (%)
1	11.5	5.19
2	51.5	3.47
3	166	0.58
4	256.8	4.64

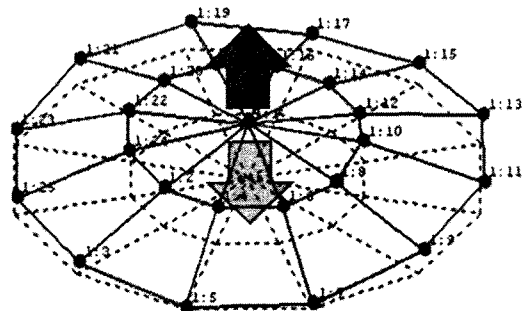


Fig. 4 Mode shape of 3rd modal frequency

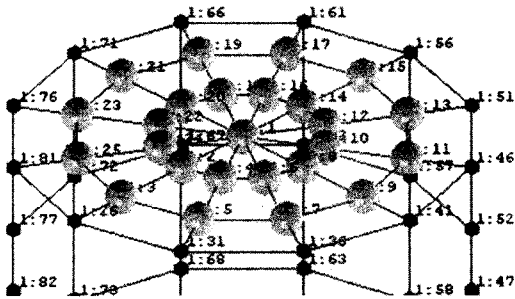
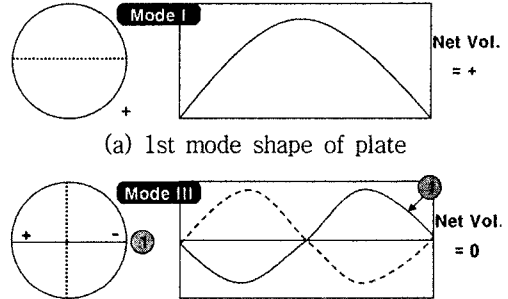


Fig. 5 Added mass for SDM analysis



(a) 1st mode shape of plate
(b) 3rd mode shape of plate
Fig. 7 Plate mode shapes

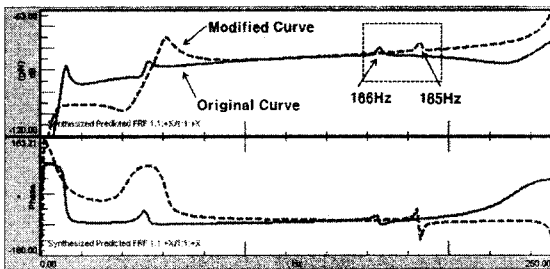


Fig. 6 Result of SDM analysis

는 세 가지 물성치 변화 중, 질량부가를 통한 SDM 분석을 수행하였다. Fig. 5는 공진을 발생에 영향을 미치는 양단 플레이트부에 질량부가를 통하여 시스템 구조변경을 수행한 모습을 나타낸다. 질량은 18 kg을 부가하였으며, 이를 통하여 예측되어진 SCR 머플러의 공진주파수 및 위상의 변화는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6에서 166 Hz 대역에 존재하던 공진주파수 영역이 185 Hz 대역으로 이동되어져 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서 SDM 분석을 통한 질량부가에 의한 양단 플레이트의 구조변경이 이루어진다면 166 Hz 대역에서 발생하는 공진현상을 회피시킬 수 있음을 알 수 있다. 하지만 실제 양산형 제품에 질량을 부가하는 것은 전체적인 차량중량 저감의 설계 방향에 부합되지 않기 때문에 실제 양산에 적용이 가능한 양단 플레이트부의 새로운 개선안 도출이 요구되어진다.

3.3 Plate 진동의 모드형상 분석

앞서 수행되어진 SDM 분석을 통해 양단 플레이트의 질량부가에 따른 구조변경이 공진현상을 회피시킬 수 있음을 알 수 있었다. 하지만 실제 양산을 고려할 때 질량 증가는 한계가 있으므로 이러한 개선방안은 효율적인 대응책으로 적용할 수 없으므로

이 절에서는 플레이트의 진동모드 분석을 통한 보다 효율적인 공진회피안에 대한 연구를 수행하였다.

Fig. 7은 일반적인 플레이트에서의 1차 및 3차 진동모드를 나타낸 그림이다.






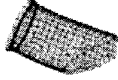
이 연구에 적용되어진 SCR 머플러의 진동형태는 1차 플레이트의 진동형태로 발생하고 있다. 1차 플레이트 진동모드는 플레이트 전체가 거동함으로써 상/하 한 방향으로 공기대역을 가진하여 방사소음을 유발시킬 수 있게 된다. 하지만 3차 진동모드의 경우 중심점을 기준으로 양단이 상호 +와 -방향으로 공기대역을 가진시킴으로써 상호 가진을 상쇄시키는 효과를 얻을 수 있게 된다. 이는 SCR 머플러 내의 체적비로 확인할 수 있게 되는데, 1차 진동모드의 경우 진동발생 시, 항상 + 혹은 -의 체적비를 갖게 되지만, 3차 진동모드의 경우 항상 '0'의 체적비를 갖게 된다. 따라서 일반적인 플레이트의 1차 진동모드 형태를 갖는 SCR 머플러 양단 플레이트의 3차 진동모드를 Fig. 7(b)에 나타낸 진동모드로 유도한다면, 발생하는 공진음의 영향을 감소시킬 수 있음을 유추할 수 있다.

3.4 SCR 머플러 공진회피안 분석

SCR 머플러의 공진음 저감을 위하여 전절에서 실험적 방법과 모드형상 분석을 통해 공진회피 가능성을 확인하였다. 이에 이 절에서는 설계 조건을 감안한 상태에서 SCR 머플러에 이를 적용하여 공진을 회피할 수 있는 설계 변경안에 대한 연구를 수행하였다.

Fig. 8은 이 연구에 적용되어진 SCR 머플러의 유한요소 모델을 나타낸 그림이며, Table 3과 같이 총 6가지의 요소부품으로 나누어 모델링을 수행하였다.

Table 3 Information of CAE model

Item	Model	Node	Element
Cover		4,088	4,096
Inlet		1,434	1,411
Separator		1,784	1,553
Catalyst		7,701	7,200
Cylinder		6,050	5,949
Outlet		473	446

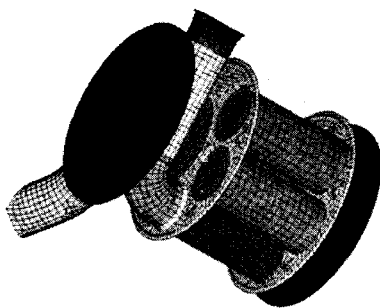


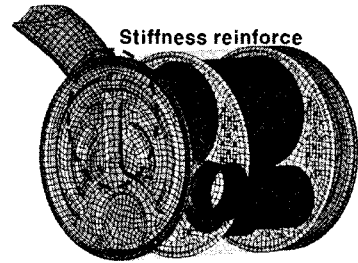
Fig. 8 CAE model for SCR muffler

Table 4는 주요 공진영역에 해당하는 3차 및 4차 공진영역에 대한 실험과 이론적 모달해석의 결과를 나타낸 것이다. 특히, 3차 공진모드의 경우 오차율이 0.18%로 문제영역에 대한 해석모델의 신뢰성을 확보한 상태이며, 이 주파수 영역을 고주파 혹은 저주파 대역으로 회피시킴으로써 SCR 머플러에서 발생하는 공진음을 저감시킬 수 있게 된다.

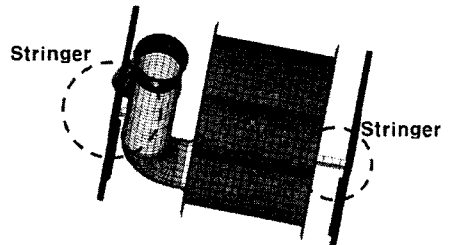
Fig. 9는 양단 플레이트부의 공진회피를 위한 구조적 변경안을 나타낸 그림으로, 첫 번째 모델은 플레이트부의 리브형상을 6mm 높이로 변경을 하여 강성을 보강한 형태이며, 두 번째는 얇은 세로 보

Table 4 Result of normal mode analysis

Mode	Experiment	CAE	Error ratio
3	166 Hz	165.7 Hz	0.18 %
4	256.8 Hz	250 Hz	2.6 %



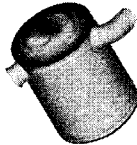


(a) Model for stiffness reinforce



(b) Model attached stringer

Fig. 9 Modified model for resonance avoidance

Table 5 Result of normal mode analysis on modified SCR muffler model at 3rd mode

Original model	Stiffness reinforce model	Stringer model
		
165.7 Hz	182.6 Hz	200.0 Hz

(stringer)를 이용하여 플레이트의 중심점을 지지함으로써 공진모드의 변형을 유도한 형태이다.

Table 5는 Fig. 9에 나타낸 SCR 머플러의 두 가지 공진회피안에 대한 165.7 Hz 대역의 이론적 모달 해석 결과를 나타낸 것이다. 양단 플레이트에 대한 강성보강 모델의 경우 초기 공진대역 대비 약 10%의 주파수 이동률을 나타내고 있으며, 세로 보 적용 모델은 약 20%의 주파수 이동률을 나타내고 있다. 또한 세로 보 적용모델의 모드형상을 분석해 본 결

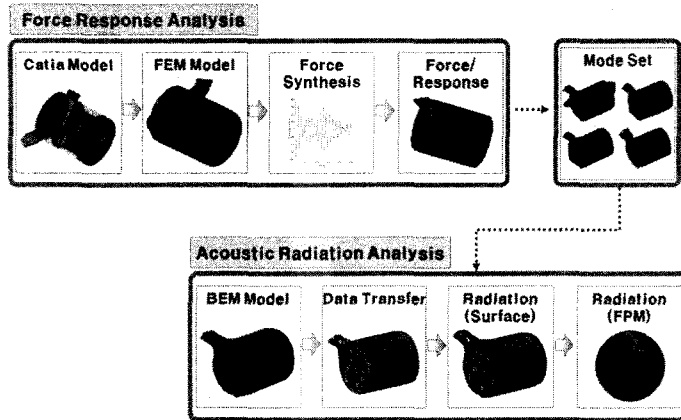


Fig. 10 Process for radiated noise analysis

과 3차 플레이트 진동모드의 형태로 진동모드가 변화되어 있음을 알 수 있었다. 모드형상 분석을 통해 3차 진동모드가 공진음을 저감시키는 효율적인 방법임을 알 수 있었으므로, 이 연구에서는 양산에 대한 적용성 및 공진회피의 신뢰성을 고려하여 새로 보 적용모델로 공진회피안을 선정하였다.

3.5 공진회피 개선안의 방사소음 해석

머플러 소음은 유동해석을 통한 소음분석이 일반적으로 수행되어진다. 하지만 이 연구에 적용되어진 SCR 머플러의 경우 구조적 방사소음문제이므로, SYSNOISE를 이용한 방사소음 해석을 통해 기존 사양과 설계 변경사양에 대한 방사소음을 상대비교하고자한다.

Fig. 10은 SCR 머플러에 적용되어진 방사소음 해석의 프로세스를 나타낸 것이다. Fig. 10의 프로세스에 따라 SCR 머플러의 원통면에 4개의 단일 하중 적용위치를 선정하여 하중을 가한 후, SCR 머플러에서 발생하는 가속도 응답 데이터를 획득하였다. 이후 SCR 머플러에 대한 BEM 모델작업을 수행한 후, 소음모델 표면을 구성하여 방사소음 해석을 수행하였다.

Fig. 11은 SCR 머플러로부터 반경 1m를 갖는 소음장 구성모델을 나타낸 그림이며, Fig. 12는 구성되어진 소음장 구성모델을 통한 기존사양과 설계변경 사양에 대한 방사소음해석 결과를 나타낸 그림이다. 방사소음 해석결과 기존모델은 165.7 Hz 대역에서 93.9 dB의 음압을 나타내고 있는데 반해, 새로 보 적용모델은 77.6 dB의 음압을 방사시키고 있음을 확

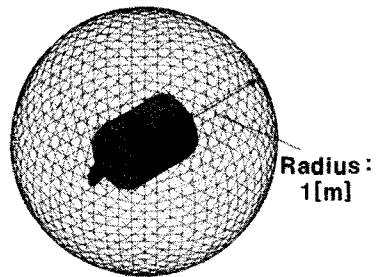


Fig. 11 Noise field point mesh for SCR muffler

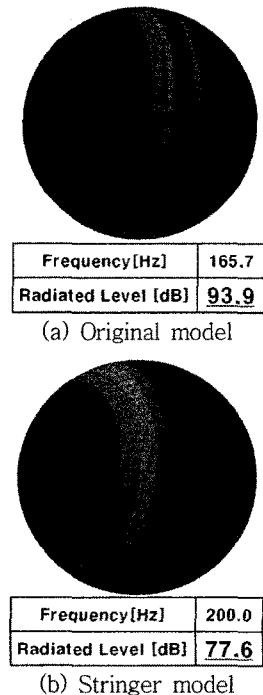


Fig. 12 Result of radiated noise analysis

인할 수 있다. 이는 약 16 dB의 방사 소음저감 효과를 보여주는 결과로, 세로 보가 적용되어진 공진회피 모델이 시제품 개발 적용에 가능한 설계 개선모델임을 확인할 수 있었다. 또한 세로 보가 적용되어진 설계개선 모델을 통하여 새로운 시제품을 제작한 후, 유관업체의 pass-by noise 시험에서 국내 허용기준치 이하의 소음 측정결과를 얻게 되어, 이 연구결과가 실제 양산에 적용이 이루어질 예정이다.

4. 결 론

이 연구에서는 상용차용 SCR 머플러에서 방사되어지는 소음저감에 대한 연구를 통하여 이를 제품설계 변경에 적용하여 소음규제치를 만족시키는 양산형 제품개발에 관한 연구를 수행하였다.

실험적 방법을 통하여 방사되어지는 소음의 주요한 소음인자가 SCR 머플러의 구조기인에 의한 공진현상임을 확인하고, 시스템 변경을 통한 공진회피가능성을 확인하였다. 또한 해석적 방법을 통하여 방사소음의 주요한 주파수 영역에서의 모드형상을 강제변형 시키는 개선안을 도출 시킨 후, 이에 대한 방사소음 해석을 통하여 공진에 의한 소음저감가능성을 확인하였다. 마지막으로 이 연구를 통하여 도출되어진 SCR 머플러 설계 변경안을 시험품에 적용

하여 실제 가속주행 소음측정 시험을 통하여 소음규제치를 만족 시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) Lee, J. M., Kim, K. M., Sohn, D. G., Lee, J. H. and Hwang, Y. H., 2001, "A Research on Characteristics of Semi-active Muffler Using Difference of Transmission Paths", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 11, No. 3, pp. 401~409.
- (2) Lee, J. K., 1994, "Acoustic Analysis and Design of Exhaust Mufflers", KSAE Auto Journal, Vol. 16, No. 4, pp. 37~50.
- (3) Oh, S. K., Mo, J. Y. and Huh, M. S., 1996, "A Study on the Analysis and Improvement of the Acoustic Characteristics of the Muffler with Complex Geometry", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 6, No. 6, pp. 755~762.
- (4) Jeong, S. K., Jung, H. S., Yi, K. W., Cho, Y. G., Kim, K. H. and Kim, H. S., 2006, "Design Evaluation of SCR Type CEM for the NOx Reduction", KSAE 06-F0066, pp. 429~433.