

특집

자동차 소음진동

배기 시스템에서의 소음 저감 및 소음 인자에 관한 고찰

서 경 석* · Laurent Malod
(포레시아 코리아)

1. 머리말

자동차산업의 기술은 지금까지는 몇몇 핵심 기술을 제외하고는 고도의 기술을 요하는 하이테크 기술로 분류되기보다는 생산기반기술의 종합화기술의 개념으로 정리되어 왔다. 그러나 미래의 21C 형 자동차는 저공해, 고안전도, 지능형 자동차를 지향하고 있고, 장시간 주행할 수 있는 초저연비 차량, 줄음운전예방, 인터넷, 무인운전 등이 가능한 지능형 자동차, 대기 오염이 전혀 없는 대형전기 자동차 등 고도의 기술을 요하는 내용을 포함하고 있어, 미국에서는 과학기술부, 국방성, NASA 등이 총 동원되어 범국가적으로 산학관연의 연구를 행해 나가고 있다. 국내에서도 자동차 산업의 급속한 발전과 더불어 심각한 대기 오염은 물론 주거지역 등의 소음 등으로 1990년대부터 대기오염 개선 등에 대한 꾸준한 연구를 진행해 오고 있으며 정부에서도 이에 대한 소음 및 배기가스에 대해 엄격한 규정을 두고 있다.

이러한 환경규제가 점차 엄격해지고 자동차를 사용하는 사용자들의 취향이 높아지면서 미래형 자동차의

배기 시스템에 있어서 소음개선은 가장 중요한 연구과제가 되었다. 그러나 배기시스템의 소음 개선을 위해서는 정확한 분석과 예측이 필요 하지만, 시스템 내에 발생하는 소음 즉, 공기 유동은 대부분 비선형적인 동적 거동을 하기 때문에 소음 예측 및 분석이 실질적으로 어려운 실정이다. 따라서 최근 포레시아(주)에서는 수년간 쌓아온 기술력을 바탕으로 Ameli(software) 프로그램을 개발하여 배기 시스템의 NVH를 해석하고 표준화된 머플러의 내부구조(tuning code)를 기준으로 최적화된 배기 시스템을 구현하고 있다. 이 연구는 자동차의 엔진소음으로부터 소음저감을 위한 배기시스템의 설계 방법과 배기시스템의 소음에 관여하는 인자들을 분석하고 정확한 측정 방법을 제안 하고자한다.

2. 배기시스템의 소음원과 측정

일반적으로 배기 시스템의 구성은 그림 1과 같이 매니폴드(mani-fold), 촉매장치(cat-converter), 벨로즈(bellows), CTR 머플러(center-muffler), main 머플러(main-

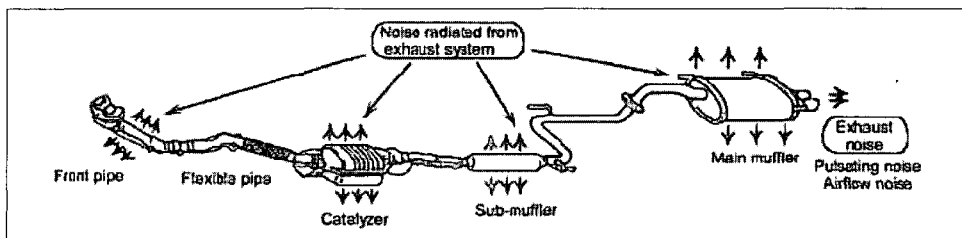


그림 1 배기 시스템의 소음 생성 과정 및 구성

* E-mail : kssea@shihwa.faurecia.com / Tel : (031) 4882-235

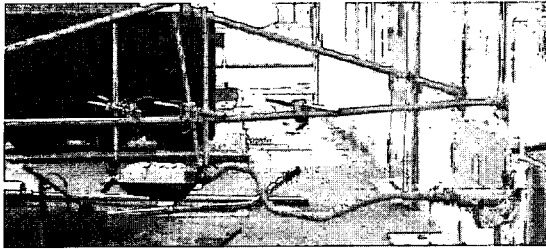


그림 2 Tail pipe 소음 측정 방법

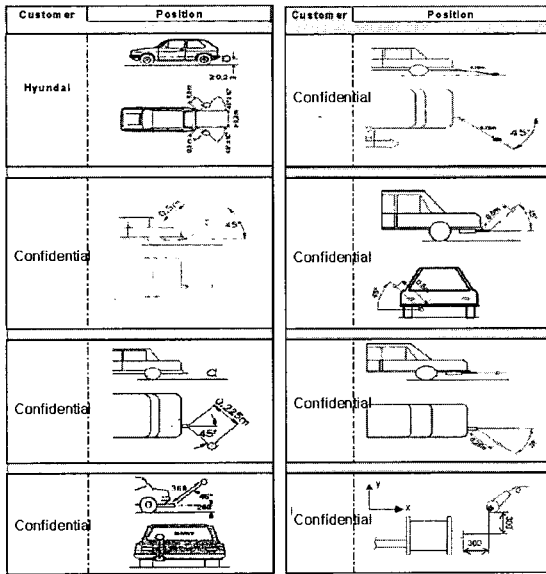


그림 3 Engine test bench에서 tail pipe 소음 측정 기준

muffler), 파이프(pipes) 등으로 구성 되어 있다.

엔진으로부터 발생된 배기가스는 매니폴드를 지나 촉매 장치(catalytic converter)에서 1차 화학 반응을 일으켜 유해 가스가 정제되고 일정한 파이프 관(벨로즈 포함)을 지나 2차 촉매 장치에 도달한다. 벨로즈는 엔진의 종, 또는 횡방향의 진동을 흡수함으로써 관외로 전파되는 방사 소음을 최소화 시킨다. 이러한 배기가스는 머플러(sub-muffler)를 통과하면서 머플러가 갖는 Se.(equivalent section : [cm²] : 유량이 흐를 수 있는 최소 단위 면적) 값에 의해 일정한 양 만큼 유량과 유속이 감소되고 동시에 소음 레벨도 저감된다. 그러나 지나치게 축소 형성된 파이프나 내부 흡음재는 관내 압력을 증가시켜 엔진 출력을 떨어뜨릴 수 있기 때문에, 국내 자동차 업계에서는 엔진 출력을 최대로 할 수 있는 관내 압력(back pressure)을 규정하여 배기 시스템을 하고 있다.

표 1 배기시스템의 소음 측정 원리와 문제점

Noise type	Principal measures	Related problems
Exhaust noise	Increased muffler capacity	More difficult to mount in vehicle; increased weight
	Addition of sub-muffler	Increased weight
	Improvement of muffler internal structure	Decreased output
	Improvement of muffler internal structure (dual-mode muffler)	Maintaining durability and reliability
Noise radiated from exhaust system	Tailpipe with multiple walls	Increased weight
	Muffler with multiple walls	
	Prevention of vibration of muffler outer wall	Maintaining durability and reliability
Use of flexible pipe to prevent transmission of vibration		

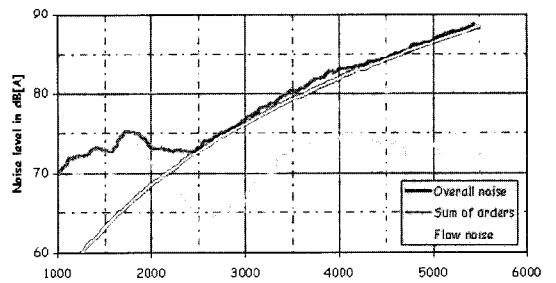


그림 4 Tail pipe 소음의 분해

배기시스템의 소음은 반무향실이나 완전무향실을 사용하여 측정할 수 있다. Tail pipe에서 발생하는 소음을 간단하게 측정하기 위해서 그림 2에서와 같이 암 소음을 무시할 수 있는 조용한 야외 공간에 배기시스템을 노출시켜 엔진벤치 조건에서 배기 소음을 측정할 수 있는 설비를 사용한다. 이때 바닥에서의 방사 소음을 차단할 수 있도록 흡음재를 바닥에 놓은 후 tail pipe 에서의 소음을 측정한다.

어떤 환경과 조건에서 소음을 측정하느냐에 따라 그 결과가 크게 차이가 나기 때문에 이러한 차이와 오류를 최소화하기 위하여 그림 3에서와 같이 자동차사(社) 별로 측정기준을 마련해 놓고 있으며 당사에서는 고객의 측정 기준을 따르고 있다.

표 1에서는 같이 배기 시스템의 주요 소음원인 배기소음과 시스템의 진동에 의한 방사 소음에 대한 시스템의 개선 요소들과 그에 따른 문제점들을 보여 주고 있다.

그림 4는 자동차의 tail pipe에서 측정된 배기가스의 전체 소음을 나타낸 그래프이며 기류소음(flow noise)과 harmonic noise로 분류하였다.

기류소음은 배기시스템의 tail pipe를 빠져 나올 때 발생하는 일종의 기류 음(音)으로서 고주파수 영역 (600

Hz 이상 : 3600 rpm)에서 주로 나타나며 엔진의 rpm이 상승하고 머플러의 tail pipe의 경이 작을수록 크게 나타난다. 반면에 harmonic noise는 엔진 실린더의 수와 용량에 따라 다르게 나타나는데 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$f_{exh} = \frac{N}{60} \times \frac{1}{2} = \frac{N}{60} \times 0.5 \quad (1)$$

배기 소음 레벨을 저감시키기 위하여 파이프의 내경을 작게 하거나 머플러 내부의 Se 값을 작게 하는 방법을 사용하지만 이러한 방법은 자칫 엔진 출력에 영향을 미칠 수 있으며, 배기 시스템을 실차량에 장착하여 측정하면 해석결과 보다 그 소음레벨이 높게 측정되기 때문에 배기계 소음 개선을 위해서는 정확한 측정뿐만 아니라 샘플 제작 또한 중요하다.

3. 머플러(Muffler)의 기본 구조와 공진

배기 시스템은 크게 두 부분으로 나뉘어 지는데 엔진으로부터 발생된 고열 고압의 가스가 매니폴드(manifold)를 지나 촉매장치(cat-converter)에서 정화되기까지의 과정을 hot-end part, 정화된 가스가 파이프 및 머플러를 통과하여 공기 중에 배출되기까지의 과정을 cold-end part라고 한다. 특히 cold-end part의 머플러(muffler)는 차량에 직접적인 영향을 주는 엔진의 소음과 진동을 최소화하기 위해 그림 5에서와 같이 baffle plate를 넣어 공간을 분할하고 그 사이에 일정한 크기의 파이프를 끼움으로서 머플러 내부로 유입된 공기의 유량과 유속의 변화에 의해 소음레벨이 감소하도록 설계된 장치이다.

일반적으로 배기 시스템을 도식화하면 그림 6과 같이 1 개의 파이프와 1 개의 머플러로 간단하게 표현할 수 있으며, 매질의 진동에 의해 발생한 음파가 관내를 유동하며 일정한 파장을 형성하고 고유한 진동수를 갖게 되는데 이를 식 (2)에 나타내었다. 여기서 C 는 음속, λ 는 파장, l 은 파이프의 길이를 나타낸다.

$$f_n = \frac{c}{\lambda} \times (2n + 1) = \frac{c}{4l} \times (2n + 1) \quad (2)$$

$n = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$

그림 7에서는 공명공간을 가진 두 머플러 사이에 파

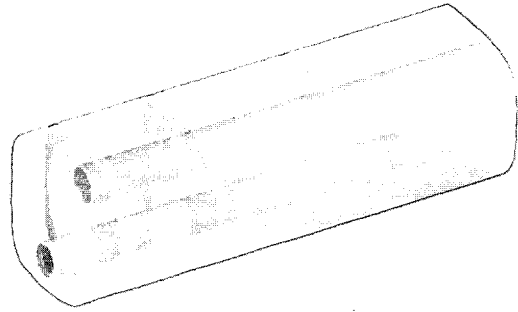


그림 5 머플러의 기본 모델링

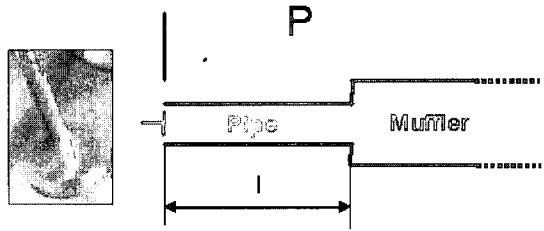


그림 6 밸브를 가진 파이프의 배기 공진

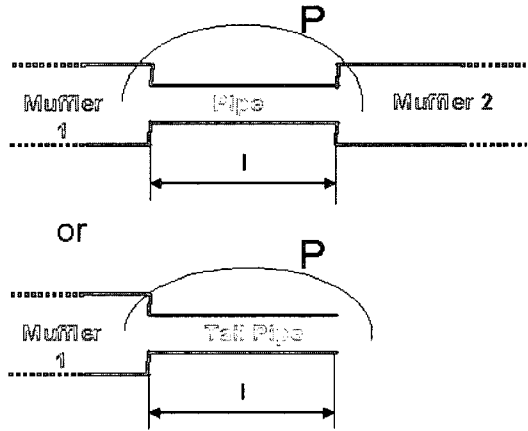


그림 7 기타 파이프와 연결된 경우의 배기공진

이프를 연결한 경우와 머플러 끝단에 파이프를 연결하고 파이프의 끝단은 자유단 상태를 유지한 두 경우를 비교 하였다. 식 (3)에서는 식 (2)와 달리 파장을 파이프 길이의 두 배로 정의하고 이를 음속에 나눈 값으로 공진 주파수를 구하였다.

$$f_n = \frac{c}{\lambda} \times (n + 1) = \frac{c}{2l} \times (n + 1) \quad (3)$$

$n = \{0, 1, 2, 3, \dots\}$

ORIGINAL MODEL

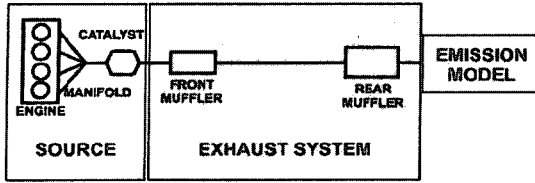


그림 8 AMELI 해석 프로그램의 기본 구조도

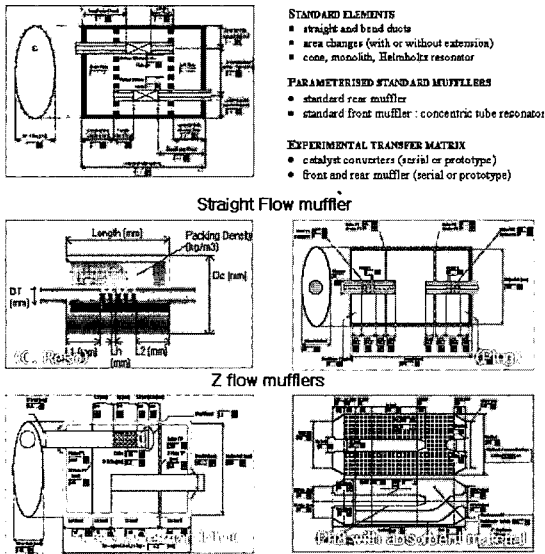


그림 9 AMLIE 프로그램의 다양한 머플러 디자인

예를 들어 파이프의 길이가 2.3 m이고 관내 온도가 400℃인 경우, 공기 주파수는 음속이 520 m/s이므로 $f=520/4.6=113$ Hz로 계산할 수 있다.

4. 배기 시스템의 디자인

시뮬레이션을 이용한 소음해석은 배기시스템을 제

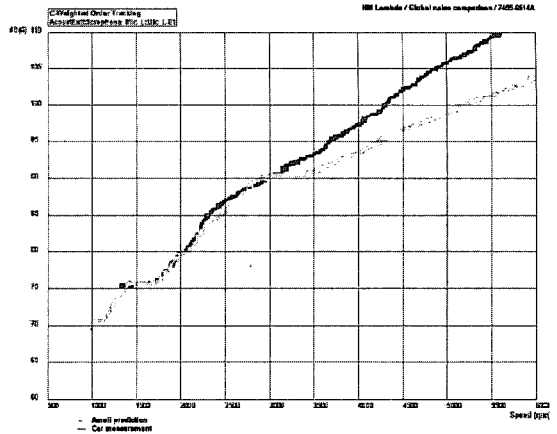


그림 10 Tail pipe에서 측정된 배기 소음의 실험 결과와 해석 결과 비교

작하기 전에 성능을 평가하여 최적 조건을 찾아내고 엔진에 적합한 설계를 할 뿐만 아니라 사전에 발생할 수 있는 문제점에 대한 수정 작업이 가능하기 때문에 소음 및 설계상 오차를 줄일 수 있다는 부분에서 큰 장점이 있다.

AMELI 프로그램은 포레시아 독자적으로 개발한 소프트웨어로 그림 8에서 보는 바와 같이 컨버터와 엔진 소스를 기준으로 끝단에 전면, 후면 머플러를 디자인하여 연결하고 방사음을 모델링하는 1차원 해석 프로그램이다. 프랑스 포레시아(Faurecia)의 오랜 기술력을 바탕으로 수많은 데이터베이스와 이론적인 계산식으로 설계된 이 프로그램은 사용자가 온도구배를 고려하여 표준화된 머플러를 선택할 수 있도록 개발되어 설계자는 손쉽게 시스템을 설계할 수 있다.

소음원 관련 엔진 데이터는 고객으로부터 주어지거나 자체 보유하고 있는 데이터베이스를 이용하여 12개

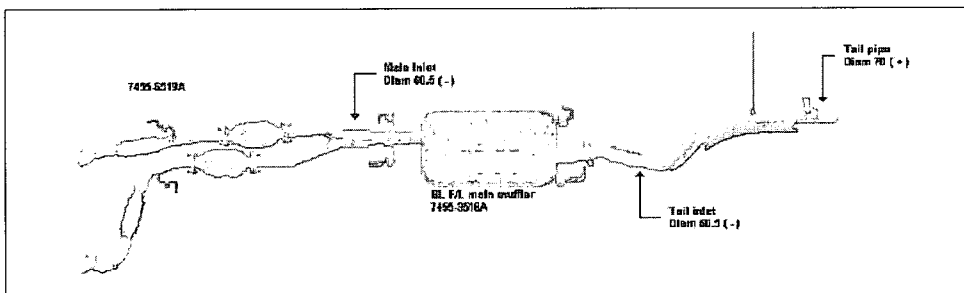


그림 11 배기 시스템 모델링

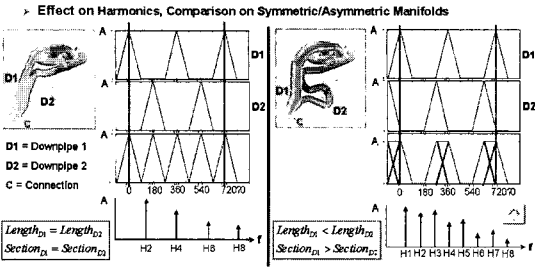


그림 12 매니폴드의 대칭인 경우와 비대칭인 경우의 harmonic noise 비교

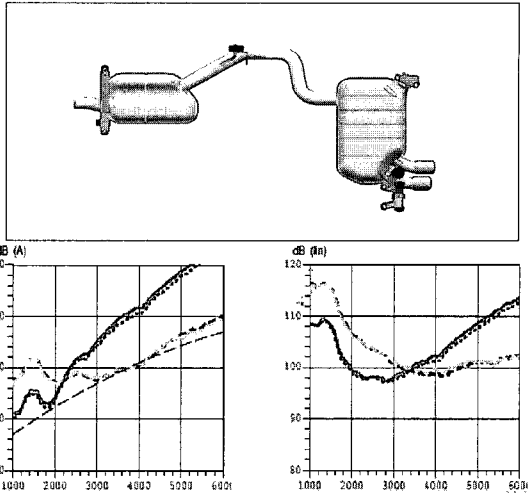


그림 14 밸브가 장착된 경우 배기소를 해석 방법 및 결과
 : 밸브가 항상 열려 있는 경우 - 녹색
 : 밸브가 항상 닫혀 있는 경우 - 빨강
 (3.2l 177 kW engine.)

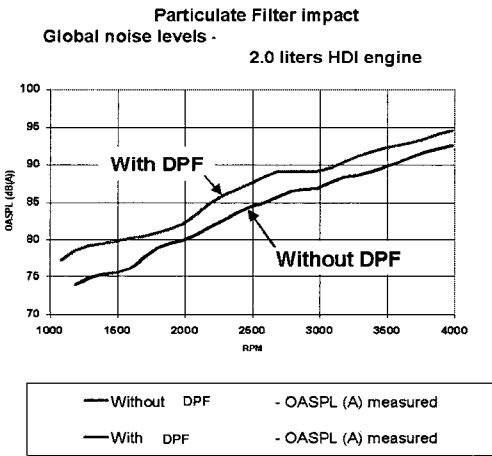


그림 13 DPF 유무에 따른 tail pipe의 배기 소음 비교

의 파라미터를 입력하여 모델링하고 실린더는 3~8개 까지 설계가 가능하다. 관(duct), 콘(cone), 촉매(catal-converter), 헬름홀츠 공명기(helmholtz resonator) 등은 표준화된 요소로 사용하고 머플러의 내부 구조는 그림 9에서와 같이 규격화된 머플러를 선택하여 파라미터를 결정하여 실험적 근거를 바탕으로 시스템의 방사모델(emission-model)을 만든다.

그림 10은 그림 11에서와 같이 제작된 배기 시스템을 실제 차량에 장착하여 tail pipe의 끝단에 마이크로폰을 장착하고 (Dis. : 50 cm/Ang. : 45°) 측정 한 소음레벨을 harmonic noise와 flow noise를 합한 over-all noise로 나타내었다.

5. 배기소음에 영향을 주는 파라미터

Tail pipe에서 측정된 소음에 영향을 미치는 인자들로

는 매니폴드의 형상(symmetric or asymmetric), 파이프의 크기 및 위치, 머플러의 구성, self-actuated valve, cat-converter 입자 밀도, 기타 유리섬유 및 pinched can 등이 있다.

먼저 그림 12에서와 같이 엔진에 연결된 매니폴드의 형상을 대칭인 경우와 비대칭인 경우에 대해 신호를 비교 하였다. 앞서 언급한 4실린더인 경우 매니폴드가 대칭일 때 180° 위상을 갖는 일정한 형태의 신호가 발생하며 2차, 4차, 6차 등 harmonic 성분이 나타난다. 반면에 실린더 수와 위상변화는 같지만 매니폴드가 비대칭인 경우, 매니폴드 끝단 "C-junction"에서 측정된 신호는 두 신호가 겹쳐져 다양한 형태의 harmonic 성분이 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 매니폴드의 형상은 자동차의 엔진 위치 및 구조에 따라 결정되기 때문에 대칭인 경우보다 비대칭인 경우가 많고 이러한 harmonic 성분의 노이즈를 제거하기 위해 내부 구조 개선에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

그림 13에서는 DPF (diesel particle filter)의 영향에 의한 tail pipe noise의 변화를 나타낸다. DPF는 디젤차량에 사용되는 converter의 일종으로 가솔린엔진에 사용되는 UCC 혹은 WCC 등과 다른 특성을 가지고 있다. UCC 등은 화학 반응 (산화 반응)후 응축수 H₂O가 생성되어 시스템의 배압 및 기타 성능에 큰 영향을 미치지 않는 반

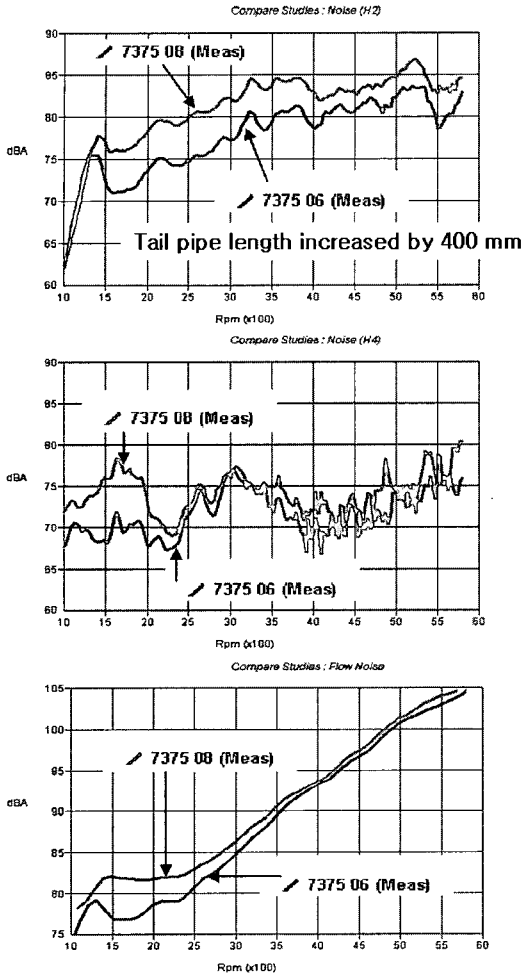
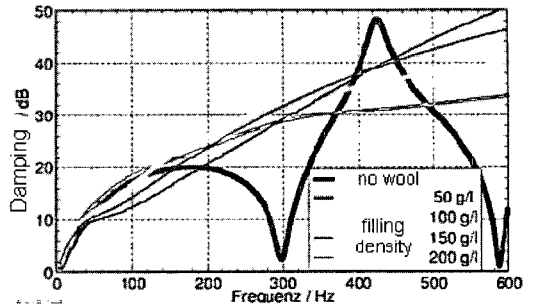
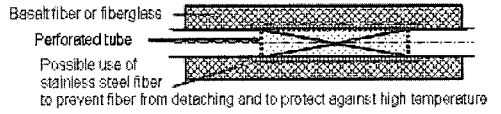


그림 15 Tail pipe의 길이 변화에 따른 harmonic noise (2.016V engine.)

면 디젤차량에 사용되는 DOC(diesel oxide converter)는 산화반응 후 미세 입자가 생성되어 벌집모양의 내부 구조를 막아 점차 배압이 높아지고 차량의 출력에 큰 영향을 미친다. 따라서 DPF는 이러한 문제점을 해결하기 위해 온도구배에 의해 미세입자를 태우는 방식을 채택했으며 이처럼 DOC와 DPF가 결합된 형태를 CPF라고 한다. DPF가 갖는 내부 구조가 미세한 벌집 구조와 같기 때문에 관내 흐르는 유체 유동 비 (mass flow rate)에 큰 영향을 미치며 이 값에 따라 harmonic noise (order noise)가 크게 감소될 수 있다.

배기소음에 영향을 미치는 또 다른 파라미터로 머플러 내 baffle plate에 적용된 밸브를 들 수 있는데 그림 14는 그 영향에 의한 tail pipe noise의 변화를 보여주는 것이



Fiber can also be used behind perforated baffles



Damping, "Sport-Sound" & Flow noise reduction

그림 16 머플러 내부에 흡음재(섬유)를 삽입한 경우의 고주파 변화

다. 배기 시스템에서의 밸브는 2000년대 초반 일본에서 처음 소개 되었는데 국내에서 최초로 차량에 적용 하였다. 이러한 밸브는 제한된 파이프의 길이와 harmonic 노이즈에 개선을 위해 적합하며 특정 주파수에 대한 소음 저감 효과가 있다. 그림 14는 3200 cc-177 kW 엔진에 장착된 배기 시스템의 tail pipe 노이즈를 밸브가 있는 경우와 없는 경우에 대해 각각 해석한 결과이다.

2300 rpm을 기준으로 각각 음압이 낮은 경우를 고려한다면 2300 rpm이하 영역에서는 밸브가 닫혀있는 경우, 2300 rpm이상 영역에서는 밸브가 열려 있는 경우 음압이 낮다고 할 수 있다. 이 결과로부터 밸브는 내부 압력이 증가함에 따라 일정한 rpm에서 개폐된다는 사실을 알 수 있으며 약 2300 rpm에서 개방이 되도록 설계해야 한다는 결론을 내릴 수 있다.

Tail pipe는 배기가스가 최종적으로 공기 중에 방사되는 부분으로 그 직경과 길이를 다르게 설계함으로써 배기소음에 대한 효과가 다르게 나타난다. 그림 15에서는 tail pipe의 길이를 길게 함으로서 harmonic noise(order noise)에 미치는 영향을 분석하였다.

배기 소음의 저감을 위한 기타 사항으로는 그림 16에서와 같이 머플러 내부에 섬유조직(wool)을 삽입하는

방법이 있다. 실험결과에 따르면 flow noise와 같은 high frequency의 소음 저감을 위해 일정한 공명공간에 섬유조직을 삽입하고 이때 파이프 표면의 홀(hole)로부터 나오는 고온 고압의 가스로부터 섬유조직을 보호하기 위하여 스텐레스 섬유(stainless fiber)등을 사용할 수 있다. 그래프에서는 섬유를 적용하지 않은 경우와 섬유의 조직 밀도를 증가 시키면서 변화하는 노이즈 레벨을 나타내었다.


머플러에 섬유조직을 삽입하는 경우 배압(back pressure)이 낮아지고 subjective noise가 개선되며 방사 소음이 적어지고 급격한 머플러 표면 온도 상승을 막을 수 있다. 반면에 무게와 가격 상승의 요인이 되고 유리 섬유의 경우는 녹는점이 약 550℃로 비교적 낮아 고열에 견디기 힘들며 응축수에 의한 부식과 저주파 영역에 대한 흡음효과가 낮은 단점이 있다.

6. 맺음말

이 글에서는 자동차의 엔진소음으로부터 소음저감을 위한 배기시스템의 설계 방법과 배기시스템의 소음에 관여하는 인자들을 분석하고 측정 방법을 제안 하였다.

- (1) Tail pipe에서 측정된 배기소음은 크게 기류소음(flow noise)과 harmonic noise로 분류할 수 있으며 측정 결과에 따라 배기시스템의 구조와 형상이 다르게 설계 되어야 한다.
- (2) AMELI 프로그램은 포레시아(Faurecia)의 오랜 기

술력을 바탕으로 수많은 데이터베이스와 이론적인 계산식으로 설계 되었으며 가상의 시스템을 디자인하고 방사음을 모델링하는 1차원 해석 프로그램이다.

- (3) Tail pipe에서 측정된 배기소음에 영향을 미치는 인자들로는 매니폴드의 형상, 파이프의 크기 및 위치, 머플러의 구성, self-actuated valve, cat-converter 입자 밀도, 기타 유리섬유 및 pinched can 등이 있다. 

참고문헌

- (1) Munjal, M. L., 1987, "Acoustic of Ducts and Mufflers", pp. 104-152, pp. 285-310.
- (2) David A. Bies and Colin H. Hansen, 1988, "Engineering Noise Control", pp. 92-121.
- (3) LAWRENCE E. KINSLER, 1982, "Fundamentals of Acoustics", pp. 225-242.
- (4) 부산 경남 자동차 테크노센터, 2000, "국의 자동차 부품 모듈화 동향", pp. 15-31.
- (5) Zintel, G., 2005, "Sound design of exhaust system", 3th styrian noise, vibration and Harshness congress, June 2-3, Graz, Austria.
- (6) Robert Fairbrother, "Acoustic simulation of after treatment devices using linear and nonlinear methods", Tenth International Congress on Sound and vibration, 7-10 July 2003 Stockholm, Sweden.