

공회전 시 저소음화를 위한 자동차 배기계 위치 결정

Layout of Engine Exhaust System for Low-Noise Idling Condition

최충영*, 이정권†**, 김태균**, 장승호***, 김희전****, Antoine Delaigue****

Choong-Young Choi, Jeong-Guon Ih, Tae-Kyoon Kim, Seung-Ho Jang, Hoi-Jeon Kim and Antoine Delaigue

배기토출음은 공회전시 발생하는 소음에 큰 영향을 끼친다. 연비를 높이기 위하여 공회전시 RPM 을 낮추면 엔진 점화 주파수가 낮아지며, 이 경우 배기계 위치에 따른 음향학적 공명 주파수와 일치하면 배기 토출음의 크기가 증가한다. 따라서 본 연구에서는 공회전시 배기토출음을 줄이기 위해 소음기의 위치와 각 배기관들의 길이를 최적화하였다. 최적화 결과로써 3 가지 배기계 위치를 얻을 수 있었고, 실제 실험과의 비교를 통하여 최적화된 배기계 위치가 그렇지 않은 배기계 위치에 비하여 소음 저감량이 높은 것을 확인하였다.

1. 서론

차량의 배기토출음은 엔진 점화 주파수와 그 고조파 성분으로 구성되며, 소음기와 배기관의 위치에 의한 음향학적 공명 현상도 영향을 끼친다. 따라서 배기계 요소의 위치를 변경하여 공명 현상을 피하면, 배기토출음을 저감할 수 있다. 이를 위하여 새로운 변수인 가상 감쇠 계수가 Suyama 와 Hirata 에 의해 도입되었다 [1]. 이후, 음원의 특징과 방사 특성을 무시한 한계를 극복하기 위하여 Ih 등은 [2] 시스템삽입손실을 도입하였고 가상감쇠계수를 계산하는데 있어서 이상화된 음원 특성과 미관의 방사 임피던스 및 온도 구배를 고려하였으며, 본 연구에서는 가상감쇠계수와 시스템삽입손실의 정의 및 최적화 기법을 이용하여 배기계 위치 최적화를 수행하였다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 단순확장관을 포함하는 배기계를 도입하여, 최적화된 소음기의 위치와 각 배기관의 길이 및 배기토출음을 예측하였다. 실험을 통하여 주어진 배기계의 배기토출음을 측정하였으며, 비교 결과, 본 연구를 통해 제시된 최적화 기법에 의해 얻어진 배기계 위치가 저주파수 영역에서 엔진 공회전 소음 저감에 효과가 있음을 확인하였다.

2. 본론

2.1 시스템 삽입 손실

일반적인 삽입 손실에서 분자만을 취하여 시스템 삽입손실이라고 정의하며 [2], 다음과 표현한다:

† 이정권; KAIST
E-mail : J.G.Ih@kaist.ac.kr
Tel : (042) 350-3035, Fax : (042) 350-8220
* 삼성 중공업
** KAIST
*** 철도기술연구원
**** Faurecia Exhaust Systems Korea

$$IL_s = 20 \log_{10} |AZ_r + B + CZ_s Z_r + DZ_s|. \quad (1)$$

식 (1)에서 A-D 는 배기계의 전달 행렬 요소이며, 위첨자는 같은 길이의 직관의 전달 행렬 요소를, Z_r 과 Z_s 는 각각 미관의 방사 임피던스와 음원 임피던스를 나타낸다.

이때 배기토출음은 다음과 같이 표현할 수 있다 [3]:

$$L_p = 20 \log_{10} Q - 20 \log_{10} |AZ_r + B + CZ_r Z_s + DZ_s|. \quad (2)$$

식 (2)에서 $Q = \left(\frac{(1+M)^2 - (1-M)^2 |R|^2 |S_0|}{|1+R|^2 4\pi r^2} \right)^{1/2} |P_s|$ 이며, R 은

미관에서의 복소반사계수, r 은 미관으로부터 떨어진 거리, P_s 는 음원 강도이다. 이를 다시 표현하면 $IL_s = \alpha - L_p$ 이며, 이 때 α 는 상수이고 시스템삽입손실은 배기토출음과 비례관계이다.

2.2 가상감쇠계수의 선정

배기계 위치 최적화의 경우, 소음기의 위치가 바뀔 때 따라가서 빠르게 바뀐 위치의 특징을 평가할 수 있는 새로운 변수가 필요하다. Suyama 와 Hirata [1]가 제안한 가상감쇠계수는 목표로 설정한 소음 저감량을 얻기 위하여 추가적으로 필요한 소음기의 감쇠계수 크기를 뜻한다. 만약 소음기의 음향학적 공명 현상으로 인해 소음이 효과적으로 저감되지 않는다면 시스템삽입손실은 음의 값을 지닐 것이다. 이렇게 음의 값을 가지는 시스템삽입손실을 보상하기 위하여 임의로 소음기의 감쇠량을 조절하며, 이때 추가되는 감쇠량이 가상감쇠계수의 크기이다. 추가되는 가상감쇠계수가 작다면, 소음기에 추가적으로 필요한 감쇠량 또한 작은 값을 가진다. 가상감쇠계수 δ 는 다음과 같은 조건을 이용하여 결정할 수 있다:

$$all[IL_s(f)] \geq T^*. \quad (3)$$

식 (3)에서 T^* 는 목표로 하는 시스템삽입손실이며 $IL_s(f)$ 는 현재의 시스템삽입손실이다. 시스템삽입손실 간의 차이는 음향학적 공명 주파수에서 가장 크다. 그러므로 필요한 가상감쇠계수는 음향학적 공명 주파수의 시스템 삽입 손실 값으로부터 결정된다. 이

때, T^* 가 현실적이지 않을 경우, 가상감쇠계수를 계산할 수 없을 가능성도 있다. 따라서 목표 시스템삽입손실은 소음기의 위치 변화에 따른 시스템삽입손실 값들 가운데서 가장 작은 값들을 선별하고 이 값들 중 가장 큰 값을 목표 시스템삽입손실로 결정한다.

3. 적용 예제

그림 1의 소음기를 2개 가지는 검증 예제에 대하여 최적화 기법중의 하나인 금속냉각모사기법 (SA)을 이용하여 배기계 위치 최적화를 실행하였다. 이때, 관심주파수는 공회전 RPM (660 RPM)의 점화주파수(22 Hz) 및 저차 고조파 성분들(E2-E6)로 한정하였으며, E8 이상의 고조파 성분들은 집중매개변수법의 기준인 $l_e < \lambda/8$ 에 해당하는 범위를 초과하였기 때문에 관심주파수 범위에서 제외하였다. 배기계의 길이 정보는 표 1에 나타냈다. 표 2는 예측된 배기계 위치와 길이 정보이며, G는 최적화된 결과를, P는 중간 성능을 가질 것으로 예측되는 결과를, C는 가장 떨어지는 성능을 가질 것으로 예상되는 결과이다.

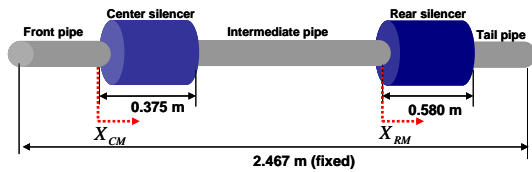


그림 1. 검증 예제.

Part name	Dimension	
	Length (m)	Diameter (m)
Front pipe	0.10	0.050
Center silencer	0.375	0.140
Intermediate pipe	1.36	0.050
Rear silencer	0.58	0.178
Tail pipe	0.10	0.050

표 1. 배기계 초기 위치 및 길이, 반지름 정보

Case	δ	Length of each pipe			Scheme of layout
		L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	
G	0.17	0.05	0.174	1.336	
P	1.1	0.10	1.10	0.360	
C	2.92	0.10	1.360	0.10	

표 2. 배기계 위치 계산 결과.

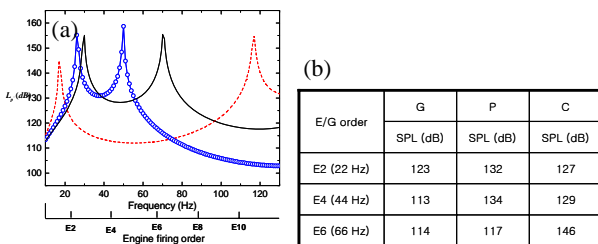


그림 2. (a) 표 2의 배기계 위치로부터 예측된 토출음 스펙트럼. (b) 점화 주파수에서의 음압 레벨: - - - - -, G; —○—, P; —○—, C.

그림 2는 각각의 배기계 배치에서 예측된 토출음 스펙트럼과 점화 주파수 및 그 고조파 성분에서의 음압이며, 제안된 위치에 따라서 점화 주파수 및 그 고조파 성분에서 약 10 dB 이상의 큰 차이가 생기는 것을 알 수 있다.

4. 실제 측정 결과

예측한 결과를 검증하기 위하여, 표 2의 배기계를 실제 제작하여 배기토출음을 반무향실에서 측정하였다. 표 3은 측정된 배기토출음이며, 최적화된 결과와 그렇지 않은 결과 사이에 약 9 dB의 차이가 존재함을 알 수 있고, 배기계 위치 G의 배기토출음 측정값이 배기계 위치 P나 C에 비해 낮음을 알 수 있다.

E/G order (Frequency)	G	P	C
	SPL (dB)	SPL (dB)	SPL (dB)
E2 (22 Hz)	89	97	98
E4 (44 Hz)	85	96	95
E6 (66 Hz)	75	85	86
Overall SPL (dB)	91	100	102

표 3. 측정된 점화 주파수에서의 음압.

5. 결론

본 연구에서는 공회전 시 저소음을 위한 배기계 위치 최적화 방법을 제안하였다. 소음기의 음향 성능을 평가하기 위하여 시스템삽입손실과 가상감쇠계수를 도입하였고, 최적화 기법으로는 SA를 사용하였다. 제시한 방법은 2개의 단순확장관을 가지는 실제 배기계에 대해 실험을 통하여 검증하였다. 그 결과, 토출음 차이가 10 dB 이상 존재하였다. 이를 통하여 제안된 방법으로 최적화된 배기계 위치를 찾는 것이 적합함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] E. Suyama and M. Hirata, "The best position of an expansion chamber type muffler and forecast of its silencing ability," *J. Acoust. Soc. Japan* **35**, 322-332 (1979).
- [2] J.-G. Ih and S.-H. Jang, and H.-J. Kim, "Development of the optimal positioning technique of exhaust muffler for reducing low frequency noise," Contract Research Report, KAIST, November 2000.
- [3] M. G. Prasad and M. J. Crocker, "A scheme to predict the sound pressure radiated from an automotive exhaust system," *J. Acoust. Soc. Am.* **70**, 1345-1352 (1981).

후 기

본 연구는 BK21 과 Faurecia Exhaust Systems Korea 로 부터 재정지원을 받았습니다.