

자동차 흡기계의 방사소음 예측에 대한 연구 Prediction of the Radiated Noise from the Vehicle Intake System

김 회 전†*· 이 정 권**· 이 성 현*· K.Shinoda***· S.Kitahara***
Hoi-Jeon Kim, Jeong-Guon Ih, Seong-Hyun Lee, K. Shinoda, and S. Kitahara

Key Words: Intake Noise (흡기 소음), Insertion loss (삽입손실), Source Characteristics (음원특성)

ABSTRACT

The radiated noise from the automotive intake system should be predicted at the design stage. To this end, the precise measurement of in-duct acoustic source parameters of the intake system, i.e., the source strength and source impedance, is essential. Most of previous works on the measurement of acoustic source parameters were performed under a fixed engine speed condition. However, the requirement of vehicle manufacturer is the noise radiation pattern as a function of engine speed. In this study, the direct method was employed to measure the source parameters of engine intake system under a fixed engine speed and engine run-up condition. It was noted that the frequency spectra of source impedance hardly changes with varying the engine speed. Thus, it is reasonable to calculate the source strength under the engine run-up condition by assuming that source impedance is invariant with engine speed. Measured and conventional source models, i.e., constant pressure source, constant velocity source, and non-reflective source, were utilized to predict insertion loss and radiated sound pressure level. A reasonable prediction accuracy of radiated sound pressure level spectra from the intake system was given in the test vehicle when using the measured source characteristics which were acquired under the operating condition.

1. 서론

자동차 흡기계 시스템의 설계과정에서 엔진 성능의 향상과 흡기 방사소음 저감을 동시에 이루기는 쉽지 않으며, 적합한 디자인 조건을 찾기 위해서는 많은 시간과 노력이 필요하다. 특히 요즘과 같이 모델 개발에서 출시시간이 짧아지는 지금, 디자인 및 개발 과정에서 흡기계에서 발생하는 방사소음과 삽입손실(insertion loss)을 예측한다는 것은 매우 중요하다.

앞에서 설명된 두 지표, i.e., 방사소음과 삽입손실, 을 예측하기 위해서는 엔진 음원의 특성을 알아야 한다. 엔진 음원의 특성은 음원의 소음강도를 나타내는 음원 강도(source strength)와 외부로 방출되는 음향 파워를 결정하는 음원 임피던스(source impedance)로 정의된다. 삽입손실은 음원 임피던스와 전체 흡기계 시스템의 사단자 정수(four-pole parameters)를 알면 구해지고, 방사소음은 음원 특성값 두 개, 상기의 사단자 정수, 그리고 방사 임피던스를 알면 구해진다.

음원 특성을 모델링하는 방법은 소음발생기작(sound generating mechanism)과 지배방정식에 의해서 선형적 접근과 비선형적 접근으로 나누어

진다. 또한 선형모델은 시간 시불변모델과 시간 시변 모델로 나누어진다. 내연기관 및 압축기와 같은 유체기계에서는 150~160 dB 가 넘는 소음이 방사되고 있으므로, 완전한 소음 해석을 위해서는 시간영역에서의 비선형 모델[1]이 채택되어야 한다. 하지만 비선형 모델을 여러 유체 기계에 적용하기에는 계산시간이 많이 걸리고, 3 차원 해석을 위해서는 많은 메모리가 필요하게 된다.

보다 짧은 시간에 원하는 결과를 얻기 위해 선형 시불변 모델이 실제 적용에 많이 쓰이고 있다. 이는 무엇보다 수식전개에서의 수고를 줄이고 계산량을 향상시킬 수 있는데다가 많은 현장상황에서 원하는 정도의 정확성을 가지면서 원하는 값을 예측할 수 있기 때문이다. 보통 많이 쓰이고 있는 방법에서는 음원은 선형적으로 시불변이라는 가정 아래, 음원발생에 대한 구체적인 모델이 필요 없는 black box 접근을 사용한다. 이 경우 빠른 시간내에 원하는 삽입손실과 방사소음[2,3]을 예측할 수 있다는 장점이 있으나, 비선형적이고 시변적인 특성이 다 고려될 수 없어서 가끔은 물리적으로 설명되지 않는 현상이 발생하기도 한다. 하지만 이런 현상에도 불구하고, 일반적으로 원하는 오차 안에서 방사소음을 예측할 수 있다.

선형 시불변 음원 모델은 음원 특성을 측정할 때, 외부 음원을 사용하는 직접법과 외부 음원을 필요로 하지 않고 단지 여러 개의 부하를 사용하는 간접법으로 나누어질 수 있다.

직접법[4]은 내연기관 배기계의 음원 특성을 측정하기 위해서 사용되었다. 직접법을 적용할 때

* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정
E-mail : hj.kim@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3075, Fax : (042) 869-8220

** 한국과학기술원 기계공학과 정교수

*** Sekisoo Corporation, R&D, Japan

주의해야 할 사항은 외부음원에서 발생하는 음향 파워가 측정 음원에서 발생하는 음향 파워보다 커야 한다는 것이다. 이를 위해서 전기-공압 소스 [4](electro-pneumatic driver)가 사용되고 있으나, 내연기관의 경우, 관심 주파수 대역이 낮은 곳에 위치하고 있기 때문에 폭발주파수 (firing frequency) 에서 충분한 정도로 음원을 가진 할 수 없었다. 그것이 후에 삽입손실 및 방사 소음을 예측하는 데 오차를 야기하였다.

간접법은 음원 발생과 관련된 신호의 필요 유무에 따라서 2-부하법과 4-부하법으로 나누어진다. 2-부하법은 음원 발생관련 신호가 필요하기 때문에 내연기관에 적용하기에는 많은 어려움이 따른다. 4-부하법은 외부 음원 및 음원 발생과 관련된 신호가 필요없다는 점에서 적용하기는 매우 용이하나, 측정오차에 결과가 민감하다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해서 Jang 과 Ih [5]등은 개선된 4-부하법을 제시하였다.

최근에는 보다 강력한 출력을 위해 엔진용량이 커지는 경향이 있어서, 전체 발생 소음에서 흡기 소음이 차지하는 경향이 커지고 있다. 하지만 배기 소음에 비해 방출 소음의 크기는 작으며, 외부 음원을 장착하기 용이하다는 장점이 있어서 본 연구에서는 직접법을 적용하였다. 이 때, 저주파 영역의 가진을 위해서 우퍼, 고주파 영역의 가진을 위해서는 컴프레션 드라이버(compression driver)가 사용되었다. 측정된 음향 특성 값을 가지고, 삽입 손실 및 방사 소음 특성을 측정하였다.

2. 직접법 이론

2.1 음원 임피던스와 음원 강도

엔진 흡기계 시스템을 그림 1 과 같이 간략하게 표시된다. dirty side duct 쪽의 입구를 통하여 흡입기가 유입되고, 유입된 흡입기는 에어 클리너 박스 내부의 여과재를 거치면서 불필요한 먼지 성분들이 제거된다. 이후, 스로틀 밸브를 지나고 써지탱크 (surge tank) 및 인매니(intake manifolds)를 거쳐서 각 실린더로 공급된다.

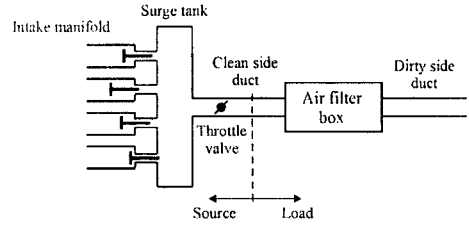


Fig. 1. Conceptual layout of intake duct system.

본 연구에서는 스로틀 밸브 앞을 음원면으로 정하여서 엔진쪽은 음원으로 그 반대쪽은 부하로 정하였다. 이를 전기적 유사성을 이용하여 회로도로 나타내면 그림 2 와 같다.

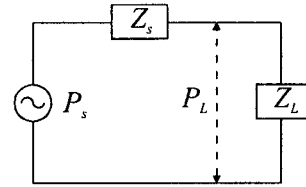


Fig. 2. Analogous electrical circuit.

이때 음원면의 음압, P_L 과 음향파워, W 는 아래와 같이 표시된다.

$$P_L = P_s \frac{Z_L}{Z_s + Z_L}, \quad (1)$$

$$W = |P_s|^2 \frac{\text{Re}(Z_L)}{|Z_s + Z_L|^2}. \quad (2)$$

여기서, P_s 는 음원강도, Z_s 는 음원 임피던스, 그리고 Z_L 는 부하 임피던스를 나타낸다.

2.2 직접법

직접법을 적용할 때는 측정음원을 수동 종단 (passive termination)으로 가정하고, 이를 외부 음원으로 가진하여 음압 반사계수, $R(f)$ 를 구하게 된다. 이 때 측정된 음압 반사계수와 음원 임피던스와의 아래와 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{Z_s(f)}{\rho_0 c_0} = \frac{1 + R(f)}{1 - R(f)}. \quad (3)$$

측정 시, 다중 마이크로폰 방법[6]을 사용하여서, 외부 오차의 영향을 최소화하고자 하였다.

3. 음향 특성 측정

엔진용량이 1000 cc 그리고 총 4 개의 실린더를 가진 소형차에 대해서 연구를 수행하였다. 내경 45 mm 의 알루미늄 덕트를 스로틀 밸브앞에 장착하였고 3 개의 1/4-인치 마이크로폰 (B&K 4939 A11)을 덕트면에 수직으로 장착하여 음파분리를 수행하였다. 우퍼 및 컴프레션 드라이버, 총 2 개의 외부음원을 사용하여 가진 주파수 대역을 넓히 고자 하였다. 장착된 알루미늄 덕트의 반대쪽에는 반사에 의한 악영향을 제거하고자 무반사 종단을 그림 3 (a)과 같이 장착하였다.

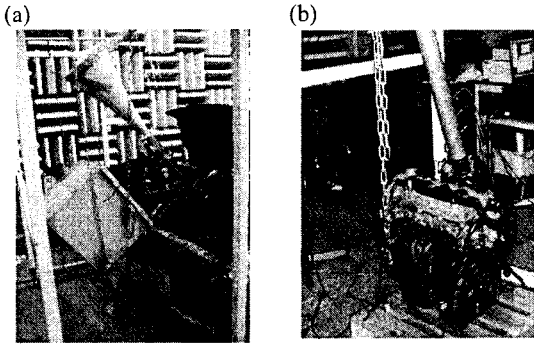


Fig. 3. Photo of experiment setup for measuring source impedance by the direct method.

엔진 가동상태의 임피던스를 1200~4200 rpm 까지 300 rpm 간격으로 측정하였다. 또한 엔진이 정지된 상태의 임피던스 [4]를 그림 3 (b)와 같이 측정하였다. 엔진 가동상태의 임피던스를 엔진 속도에 따라 그린 것이 그림 4 이다. 엔진 속도에 따라서 음원 임피던스가 거의 변화가 없는 것을 볼 수 있다. 각 커브마다 피크가 존재하는 것을 볼 수 있는데, 이는 폭발 주파수에서 외부음원의 음압레벨이 엔진 흡기 소음보다 작기 때문이다. 음원 임피던스가 엔진속도보다 엔진의 흡기계의 기하학적인 모양에 의존한다는 사실에 기초하여, 각 엔진 속도에서 얻어진 음원 임피던스들을 평균하여서 얻어진 하나의 음원 임피던스가 그림 5 에 나타나 있다. 평균을 할 때, 각 엔진 속도에 해당하는 폭발주파수 영역에서의 값을 제거하여 보다 정확한 음원 임피던스 값을 얻었다.

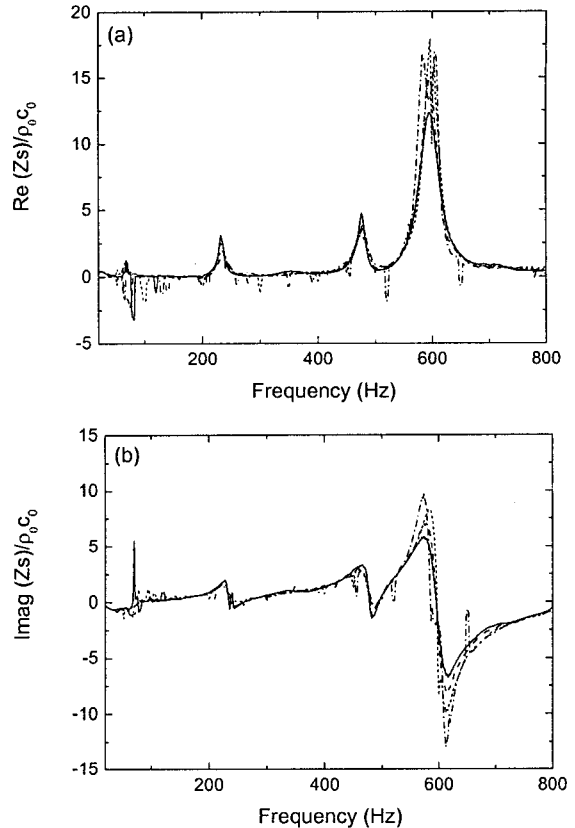


Fig. 4. The measured source impedance: —, at 1200 rpm; — —, at 2100 rpm; - - - -, at 3000 rpm; — · —, at 3900 rpm. (a) Resistance, (b) reactance.

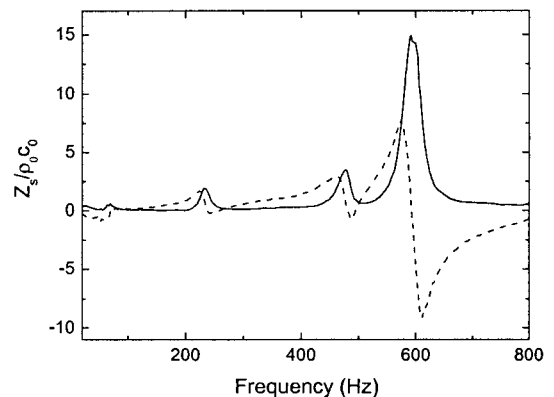


Fig. 5. The selected source impedance: —, resistance; — —, reactance.

4. 삽입손실 및 방사소음 예측

4.1 삽입손실

본 방법의 타당성을 검증하기 위해서, 예측 및 측정된 삽입손실을 나타낸 것이 그림 6이다.

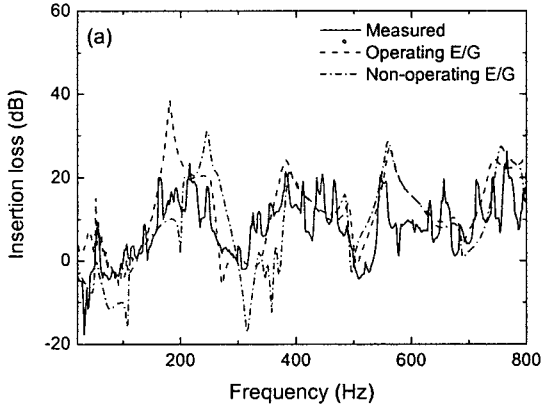


Fig. 6. Comparison of insertion losses by changing the source characteristics of the intake system at 3300 rpm.

예측치와 계측치가 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 계측치에 생기는 여러 오차들은 본 시험이 반무향실, 샤시 다이어나노미터에서 수행되었기 때문으로 추정된다.

4.2 방사소음 예측

측정된 음원 특성 및 기존의 여러 음원 모델을 통하여 각 엔진 속도에 따라서 예측 및 측정된 전체 방사 소음은 그림 7과 같다. 측정된 음원 특성 사용시, 오차가 2~3 dB 안으로 들어올 정도로 매우 정확하게 예측하였다.

5. 결론

본 연구에서는 흡기계의 음향특성을 직접적으로 측정하였고, 음향 임피던스가 엔진속도와 무관함을 밝혔다. 이를 통하여 삽입손실 및 방사소음을 엔진 속도에 따라서 예측하여 타당한 결과를 얻었다. 또한 기존의 음원 모델과도 비교하여 본 연구 방법의 우월성을 확인하였다.

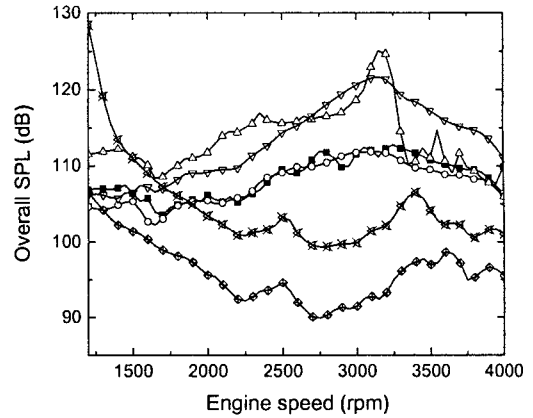


Fig. 7. A comparison of radiated overall SPL by changing the source property of the intake system: —■—, measured; —○—, predicted by using measured source impedance from the operating condition; —△—, predicted by using measured source impedance from the non-operating condition; —▽—, predicted by using constant pressure source; —◇—, predicted by using constant velocity source; —×—, predicted by using non-reflective source.

후 기

본 연구는 BK21에서 일부 보조를 받았습니다. 일본 Sekiso Corporation에서 받은 많은 도움에 감사사를 표합니다.

참고문헌

- (1) S.-H. Jang and J.-G. Ih, "Numerical Investigation and Electro-Acoustic Modeling of Measurement Methods for the In-duct Acoustical Source Parameters," J. Acoust. Soc. Am. 113, 726-734 (2003)
- (2) M. G. Prasad and M. J. Crocker, "Insertion Loss Studies on Models of Automotive Exhaust Systems," J. Acoust. Soc. Am. 70, 1339-1344 (1981).
- (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).
- (4) M. G. Prasad and M. J. Crocker, "Acoustical Source Characterization Studies on a Multi-cylinder Engine Exhaust System," J. Sound Vib. 90, 479-490 (1983).
- (5) S.-H. Jang and J.-G. Ih, "Refined Multiloading Method for Measuring Acoustical Source Characteristics of an Intake or Exhaust System," J. Acoust. Soc. Am. 107, 3217-3225 (2000).
- (6) S.-H. Jang and J.-G. Ih, "On the Multiple Microphone Method for Measuring In-duct Acoustic Properties in the Presence of Mean Flow," J. Acoust. Soc. Am. 103, 1520-1526 (1998).