

# 토출소음 저감을 위한 차량 흡기시스템 레이아웃 설계 Layout design of the vehicle intake system for reducing the radiated noise

김희전† · 이정권\*  
Hoi-Jeon Kim, Jeong-Guon Ih

**Key Words:** Intake system (흡기시스템), radiated sound (토출음), duct length (관로 길이)

### ABSTRACT

For the satisfaction of the high engine performance and the low radiated sound pressure simultaneously, the duct length in the vehicle intake/exhaust system should be tuned carefully in the design and development stage of a vehicle. This study was concerned about the effects of intake duct length in clean and dirty sides on the radiated sound emitted from an inlet. An index derived from the existing prediction model of radiated sound pressure was employed to determine which duct was more influential to the radiated sound. Comparing the experimental and predicted results, we found that the change of dirty-side duct length caused a larger change than that in the clean side in the radiated sound level from a tested intake system.

### 1. 서론

지금까지 진행된 자동차 머플러 배치와 관련된 많은 선행 연구들은 흡기계보다 일반적으로 더 높은 토출음을 발생시키는 배기계 레이아웃의 최적화에 대해서 집중되어 왔다<sup>1-3</sup>. 특히 저주파수 영역의 주요 배기소음 성분의 경우에는 소음기보다 길이가 긴 배기 파이프들에 의한 음향 공진 현상이 그 소음 저감 특성에 큰 영향을 주게 된다. 따라서 요구되는 배기 소음의 저감량을 얻기 위해서는 배기 파이프 길이를 조정하거나, 전방 및 후치 머플러의 위치를 변화시켜야 한다.

한편 과거의 소음기 장착 위치에 대한 결정은 대부분 선택적인 방법이나 시험으로 이루어져 왔으나, 최근에는 차량의 신속한 개발을 위해서 체계적인 최적화 프로그램의 필요성이 대두되고 있다<sup>1-3</sup>. Suyama 등<sup>2,3</sup>은 배기 시스템의 삽입손실 (Insertion loss)으로부터 감쇠계수 (attenuation coefficient)를 정의하고, 이를 통하여 배기 시스템을 최적화하였다. 하지만, 이 경우 음원 및 토출구를 음향학적으로 고려하지 못한다는 단점이 있다. Ih<sup>1</sup> 등은 상기의 단점들을 보완하기 위해서 시스템 삽입손실 (ILs: System Insertion Loss)으로부터 가상 감쇠 계수 (virtual attenuation coefficient)를 유도하고 이를 최소화시킴으로써 배기시스템을 최적화시키는 방법을 제안하고, 이를 시험을 통하여 검증하였다.

차량 소음원 중의 하나인 흡기계 토출음은 근

본적으로 엔진 폭발에 기인하여 발생된 소음으로써, 이의 저소음화를 위해서는 차량의 설계 및 개발 단계에서부터 흡기 덕트의 길이 및 흡기계에 장착된 헬름홀츠 공명기 (Helmholtz resonator)와 공기 여과기 상자 (air cleaner box)의 위치 등에 대한 최적화가 이루어져야 한다. 또한, 차량의 대형화 및 고성능 엔진의 개발영향으로 이제 흡기계 토출음은 무시될 수 없는 소음원이 되었다.

흡기계 시스템의 구성은 배기계의 그것에 비해서 단순한 형태를 가진다. 그림 1 과 같이 엔진에서 스로틀 바디 (throttle body) 까지를 음원으로 가정하면, 스로틀 밸브에서 토출구 (orifice) 방향으로 있는 모든 덕트 시스템은 토출음의 최적화가 수행되어야 할 음향 부하가 된다. 일반적으로 흡기 덕트 시스템은 1 개의 공기 여과기 상자, 여러 개의 헬름홀츠 공명기들, 흡입기가 유입되는 토출구, 그리고 이들을 연결하는 흡기 덕트들로 구성되어 있다.

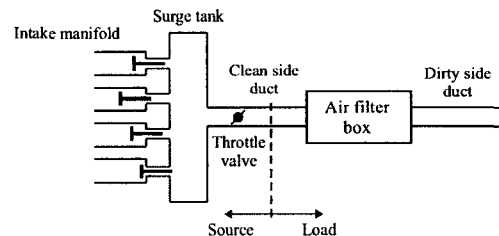


FIG 1. Conceptual layout of an intake duct system.

자동차 흡기계 시스템의 경우, 흡기 덕트가 공기 여과기 상자보다 상대적으로 길기 때문에 공기 여과기의 좌우에 장착된 덕트의 길이를 변화시킴으로써, 원하는 주파수 범위 내에서 전체 덕트 시스템의 공진 (resonance)을 피하여 토출음을 효과적으로 저감시킬 수 있다.

본 연구에서는 공기 여과기와 스로틀 밸브 사

† 한국과학기술원 기계기술연구소 박사후 연구원  
E-mail: hj.kim@kaist.ac.kr  
Tel: (042) 869-3075, Fax: (042) 869-8220

\* 한국과학기술원 기계공학과 교수  
E-mail: J.G.Ih@kaist.ac.kr

이에 삽입된 덕트 (클린 에어 덕트; clean-air duct) 와 공기 여과기와 토출구 사이에 삽입된 덕트 (더티 에어 덕트; dirty-air duct)의 길이 변화가 토출음에 끼치는 영향을 살펴보았다. 또한 이때, 시험을 통해 측정된 소음원 특성을 이용하여 보다 실제상황과 가까운 결과를 얻고자 하였다.

## 2. 이론

### 기존의 머플러 위치결정법

흡/배기계의 튜닝을 수행하기 위해서는 shock tube 이론과 같은 비선형 음향이론을 포함하는 해석법에 의하여만 가능하며, 이를 위해 특성곡선법 (method of characteristics), 유한차분법 (finite difference method) 등이 이용될 수 있다<sup>1</sup>. 하지만, 이러한 방법으로는 복잡한 구조를 가지는 소음기를 모델링하기 어렵다는 단점이 있다.

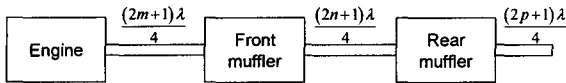


FIG. 2. The approximate way to determine the position of mufflers.

보다 쉽고 간단한 방법으로 기본 폭발 주파수의 파장의 정수 배를 이용하여 흡/배기계 관의 길이 선택을 하는 방법이 있으며, 아래에 주어진 식을 사용하여 덕트의 길이를 정하게 된다<sup>1</sup> (그림 2 참조).

$$l_f = \frac{(2m+1)\lambda}{4} \quad (\text{Front pipe}) \quad (1A)$$

$$l_c = \frac{(2n+1)\lambda}{4} \quad (\text{Center pipe}) \quad (1B)$$

$$l_r = \frac{(2p+1)\lambda}{4} \quad (\text{Tail pipe}) \quad (1C)$$

그러나 이상의 대략적인 계산은 엔진 회전수가 변하면 그 파장이 바뀌게 되므로 큰 의미가 있는 것은 아니다. 또한, 상기의 식은 각각의 머플러의 음향학적 특성을 고려할 수가 없다. Ih, et al.<sup>1</sup> 와 Suyama, et al.<sup>2,3</sup> 은 저주파수 영역의 파이프 음향 공진 현상에 대한 연구관점에서 각각의 소음기들을 단순 팽창형 소음기로 가정하고, 소음기의 장착위치를 최적화 하였다. 이들이 제안한 방법들은 차량 개발 초기 디자인에 유용하게 쓰일 수 있으나, 흡/배기 토출음에 보다 큰 영향을 미치는 덕트를 흡/배기계 레이아웃의 설계변수로 선정할 때에

는 유용한 정보를 제공할 수 없다는 단점이 있다.

### 흡기덕트 길이에 따른 토출음 변화

본 연구에서는 흡기 시스템의 공기 여과기 양쪽에 장착되어 있는 클린 에어 덕트와 더티 에어 덕트의 길이를 각각 변화시키면서 이들이 토출음에 어떤 영향을 끼치는지 살펴보았다. 또한 상기의 결과를 통해 어느 덕트의 길이가 보다 효율적인 디자인 변수로 선정될 수 있는지 역시 살펴보았다. 이 때 흡기 시스템은 해석의 편의상, 헬름홀쯔 공명기가 장착되어 있지 않는 단순한 형태로 가정하였다 (그림 3 참조).

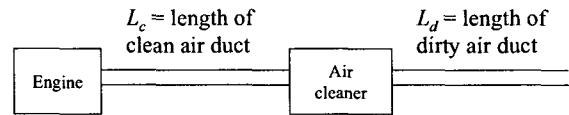


FIG. 3. Simplified vehicle intake layout.

토출구를 통해 방사되는 소음레벨은 아래와 같이 주어진다<sup>4</sup>:

$$L_p = 10 \log_{10} \left( \left( \frac{1 - |R|^2 S_0}{|1 + R|^2 4\pi r^2} \right) \cdot P_s^2 \cdot \left| \frac{Z_R}{T_{11}Z_R + T_{12} + T_{21}Z_s Z_R + T_{22}Z_s} \right|^2 \right) \quad (2)$$

여기서,  $R$  은 토출구에서의 반사계수,  $S_0$  는 미관의 면적,  $r$  은 측정점과 미관사이의 거리,  $Z_s$ ,  $Z_L$  는 각각 음원 임피던스와 음향 부하 임피던스, 그리고  $T_{ij}$  (where  $ij = 1,2$ )는 공기 청정기의 사단자 정수 (four-pole parameters)를 나타낸다. 식(2)에 나타난 토출음이 클린/더티 에어 덕트의 길이에 어떤 영향을 끼치는지 파악하기 위해 식(2)의 로그함수 인수의 세 번째 항을 아래와 같이  $P_{index}$  로 나타내었다:

$$P_{index} = \left| \frac{Z_R}{T_{11}Z_R + T_{12} + T_{21}Z_s Z_R + T_{22}Z_s} \right|^2 \quad (3)$$

또한, 클린/더티 에어 덕트의 길이 변화에 토출음이 얼마나 민감하지를 파악하기 위해서  $P_{index}$  를 각각의 길이로 미분하였다.

$$\text{Sensitivity} = \frac{\partial P_{index}}{\partial L_c \text{ or } \partial L_d} \quad (4)$$

식(4)를 통하여 클린/더티 에어 덕트 중 어느 덕트의 길이가 보다 효율적인 디자인 변수인지를 파악할 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 및 시험

#### 시험

반무향실 조건을 가진 샤시 다이내모미터 (chassis dynamometer)에서 엔진용량이 1000 cc 그리고 총 4 개의 실린더를 가진 소형차를 1200 rpm 에서 6000 rpm 까지 WOT (wide open throttle) 조건으로 엔진 런업 (run-up)하였다. 이 때, 엔진 및 타이어에서 발생하는 소음성분을 배제하기 위해, 그림 4 와 같이 공기 청정기에서 토출구 방향으로 20 cm 떨어진 곳의 덕트 내부 음압을 측정하였다.

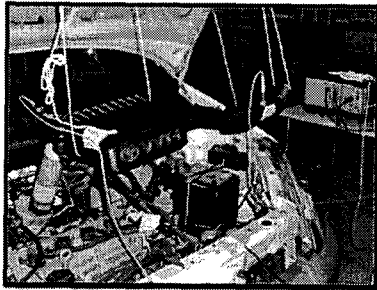


FIG. 4. The picture of the test when the clean-air duct is extended.

이때, 클린 에어 덕트 (원래 길이는 0.05 m)에 표 1 에 나타난 덕트들을 부가적으로 이어 장착하고, 장착 전/후에 발생한 방사음압 (C<sub>4</sub> 성분)의 차이를 나타냈다 (그림 5 참조).

TABLE 1. Additionally added duct on the clean-air duct.

No.	종류	길이 (mm)
1	PVC 파이프	160
2	직조관	200
3	PVC 파이프	97
4	직조관	100

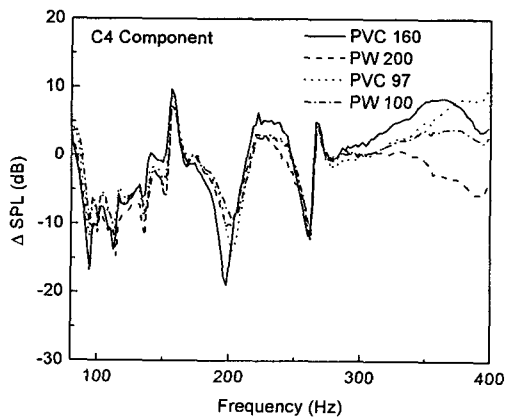


FIG. 5.  $\Delta$ SPL from the test with the extended clean-air duct.

그림 5 를 살펴보면, 클린 에어 덕트의 길이 및 재질이 바뀐다고 해도 토출음에는 거의 변화가 없는 것을 확인할 수 있다.

이번에는 클린 에어 덕트의 길이를 본래의 길이로 고정시켜놓고, 더티 에어 덕트 (원래 길이는 0.5 m)에 표 2 의 여러 종류의 덕트를 부가적으로 장착하고 나서, 앞의 경우와 마찬가지로 장착 전/후에 방사음압 (C<sub>4</sub> 성분)의 차이를 측정하였다 (그림 6 참조).

TABLE 2. Additionally added duct on the dirty-air duct.

No.	종류	길이 (mm)
1	PVC 파이프	300
2	직조관	400
3	PVC 파이프	150
4	직조관	200

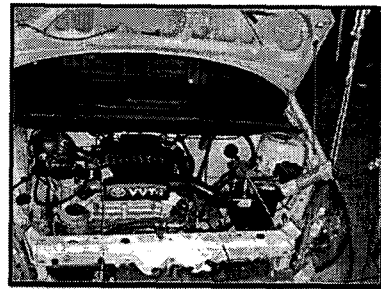


FIG. 6. The picture of the test when the dirty-air duct is extended.

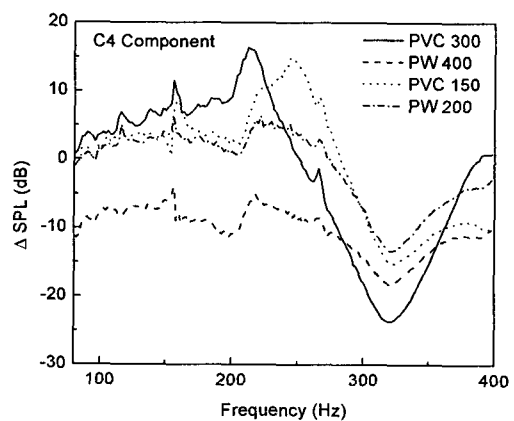


FIG. 7.  $\Delta$ SPL from the test with the extended dirty-air duct.

그림 7 에 의하면 클린 에어 덕트의 길이 및 재질이 바뀌었을 경우와 달리, 더티 에어 덕트의 길이 변화에 토출음이 민감하게 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 클린 에어 덕트의 길이 변화는 면적 변화비가 큰 공기 청정기에 가려져 토출음에

작은 영향을 끼치고, 더티 에어 덕트의 경우는 그렇지 않기 때문에 예상된다. 하지만, 여기에 대한 명확한 물리적 설명을 위해서는 향후에 연구가 더 수행되어야 할 것이다.

시뮬레이션

앞에서 보여졌던 시험결과가 2장에서 소개되었던  $P_{index}$  와 이의 미분값으로 예상되는지를 살펴보기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 8은 클린 에어 덕트의 길이를 시험 시와 동일하게 변화시킬 때의  $P_{index}$  을 나타낸다. 시험에서 나타났던 결과와 같이 덕트 길이에 따라 토출음의 변화가 미비한 것을 시뮬레이션을 통하여 예측할 수 있다.

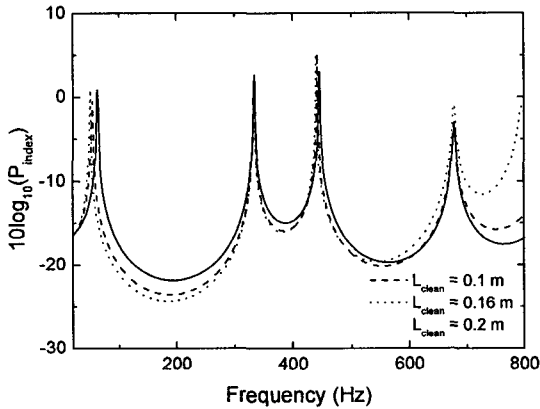


FIG. 8. Simulation results when the clean-air duct is extended.

그림 9는 앞의 경우와 마찬가지로 더티 에어 덕트의 길이 변화에 따른  $P_{index}$  을 나타낸다. 시험결과에서 측정되었던 바와 같이 덕트 길이가 변함에 따라 토출음이 많이 변하고 있다.

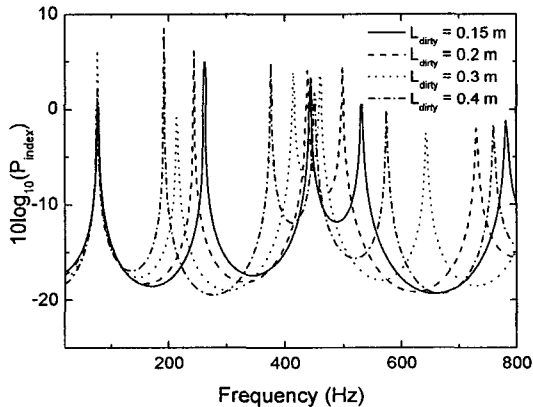


FIG. 9. Simulation results when the dirty-air duct is extended.

토출음에 클린/더티 에어 덕트가 얼마나 큰 영향을 끼치는지를 파악하기 위하여  $P_{index}$  의 미분값을 구하였고 이를 그래프로 나타낸 것이 그림 10이다. 100 Hz 부근을 제외하고는 더티 에어 덕트의 길이변화에 토출음이 더 많은 영향을 받는다는 것을 나타낸다. 상기의 제안된 식을 이용하면, 흡/배기 레이아웃의 설계과정에서 효과적인 디자인 변수의 선정이 가능할 것이다.

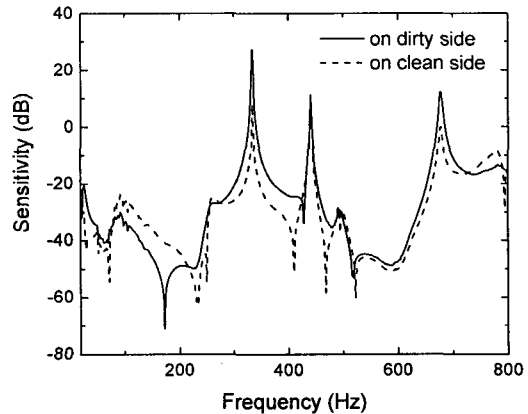


FIG. 10. Sensitivity analysis on  $P_{index}$ .

4. 결론

본 연구를 통하여 흡기 덕트의 길이 변화가 토출음에 어떤 영향을 끼치는지를 살펴보았다. 상기의 결과를 이용하면 흡기계 레이아웃 설계 시, 유용한 가이드 라인을 제시할 수 있을 것이다.

후기

본 연구는 BK21에서 일부 보조를 받았습니다. 일본 Sekiso Co.에서 받은 각종 도움에 감사를 표합니다.

참고문헌

- (1) J.-G. Ih, S.-H. Jang, and H.-J. Kim, "Development of the optimal positioning technique of exhaust muffler for reducing low frequency noise," Industrial report, Hyundai Motor Co., December 1999-November 2000.
- (2) E. Suyama and M. Hirata, "The best position of and expansion chamber type muffler and forecast of its silencing ability (Acoustic characteristic analysis of silencing systems based on assuming of plane wave propagation with frictional dissipation Part 3)," J. Acoust. Soc. Japan. 35, 322-332 (1979).
- (3) E. Suyama, T. Ishida, and Y. Nakamura "The optimum setting position of the silencer," SAE 900348.
- (4) 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).