

# 열과 유동을 고려한 음장해석을 통한 머플러의 설계

## Muffler Design Using Transmission Loss Prediction Considering Heat and Flow

김 현 수\* · 강 상 규\* · 임 윤 수\*  
Hyunsu Kim, Sang-kyu Kang and Yun-soo Lim

(Received May 7, 2014 ; Revised July 16, 2014 ; Accepted July 16, 2014)

**Key Words** : Muffler(머플러), Transmission Loss(전달손실계수), Flow(유동), Back Pressure(배압), Orifice(오리피스)

### ABSTRACT

Two mufflers for a large-size sedan are suggested aiming (1) sporty-sound and (2) quiet-sound as well as both satisfying low back-pressure and low manufacturing cost. Transmission loss prediction considering heat and flow may increase the accuracy and reduce the development cost in muffler design; thus, GT-power prediction considering heat, flow, and acoustics is utilized. By understanding the fundamentals of flow-acoustic theory in small orifice(hole), an effective muffler design concept is proposed. Vehicle tests show the consistence with predictions for sound; also a back-pressure test bench confirms the advantage in pressure drop for both suggested mufflers. Those suggested mufflers also have advantages in manufacturing cost due to simplicity of the design.

### 1. 서 론

머플러에서 소음을 저감하는 방식에는 크게 반응형(reactive) 방식과 에너지 소실형(dissipative) 방식이 있다. 반응형 방식은 소리가 경계 면에서 반향되는 특성 때문에 생기는 위상 차이를 이용하여 특정한 주파수대역을 저감하는 방식으로, 대표적으로 헬름홀츠 공명기, 1/4파장 공명기, 단순확장형 공명기와 이것들의 변형된 형태들이 많이 있다. 소실형 방식은 소리에너지의 소멸(dissipation) 효과를 이용한다. 이 방식에는 흡음재를 사용하여 소리 에너지를 흡수하는 방법과 소리가 파이프 혹은 격막(baffle)에 타공되어 있는 다공홀(perforation)을 통과할 때 생기는 소리 에너지의 손실을 이용하는 방법이 있다. 후

자의 방법은 소음저감 뿐 아니라, 배기가스가 통과할 때 같은 원리로 생기는 유압손실(hydraulic loss) 때문에 배압(pressure drop)이 많이 발생할 수 있다<sup>(1)</sup>.

유체가 작은 홀(orifice)을 통과할 때 생기는 유압 에너지의 소멸효과 원리는 Fig. 1에 묘사되어 있다<sup>(2)</sup>. 유체가 Fig. 1(a)와 같이 작은 홀을 통과할 때, 난류(turbulence)가 발생한다. Fig. 1(b)로부터 이 현상을 모델링 하면 다음과 같은 지배방정식으로 표현이 된다.

$$\underbrace{p_i - p_o}_{\text{pressure}} = \underbrace{\rho_0 l_{eq} \frac{du_r}{dt}}_{\text{inertia}} + \underbrace{C_M \rho_0 u_r |u_r|}_{\text{convection}} + \underbrace{C_\tau u_r}_{\text{shear}} \quad (1)$$

여기서  $p_i$ ,  $p_o$ 는 입력, 출력부의 압력이고,  $l_{eq}$ 는 유체모델의 길이,  $C_M$ 은 대류계수,  $C_\tau$ 는 전단계수,  $\rho_0$ 은 유체밀도이고,  $u_r$ 은 유속을 나타낸다. 난류에 의

\* Corresponding Author ; Member, Hyundai-Kia Motor Company, R&D Division  
Email : hkim@hyundai.com  
Tel : +82-31-8036-1938, Fax : +82-31-368-6095  
\* Hyundai-Kia Motor Company, R&D Division

# A part of this paper was presented and selected as one of best papers KSNVE 2014 Annual Spring Conference  
# Recommended by Editor Don Chool Lee  
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

한 에너지 소산은 대류(convection)향으로 모델링이 되며, 전단손실은 식 (1)의 마지막항으로 표현이 될 수 있다. 식 (1)에서 유속( $u_r$ )의 증가에 따라 대류향의 크기는 유속의 제곱에 비례해서 커지게 된다. 대류향과 전단손실항을 하나의 식으로 표현하며 식 (1)을 재정리하면

$$p_i - p_o = \rho_0 l_{eq} \frac{du_r}{dt} + Ru_r \tag{2}$$

이 되고 이 식에서 에너지손실을 의미하는 감쇠항  $R$ 이 대류향을 포함하고, 유속의 증가에  $R$ 이 증가됨을 보인다. 이는 홀을 통과하는 유체의 동적에너지의 감소를 의미하고, 바로(감쇠에 의한) 소음저감 원리가 된다.

많은 머플러에서 반응형 방식과 에너지 소실형 방식을 혼합하여 사용하지만, 일반적으로 차량용 머플러에서는 후자의 경우인 에너지 소실형이 주로 쓰인다. 그 이유는 유체의 흐름이 다수의 홀을 통과할 때 생기는 에너지 손실이 유체 속도에 비례하여 증가하기 때문이다. 이는 실제 적용에 있어 엔진의 속도에 따라 유속이 증가되기 때문에, 소음 저감 측면에서 효과적인 머플러 설계 전략이라고 볼 수 있다. 따라서, 이와 비슷한 형태의 머플러 등이 많이 고안되었다<sup>(3-5)</sup>. 특히, 이러한 유체 에너지 손실에 의한 소음저감효과를 잘 보여주는 것은 Fig. 2에 보인

플러그 머플러(plugged muffler)이다. Fig. 2(a)는 배인파이프의 가운데가 플러그(plug)로 막혀 있고 모든 소음성분과 배기가스가 파이프에 있는 다수의 홀을 통해서만 흘러가는 것을 보여준다. Fig. 2(b)는 유속의 증가함(mach number 0 → 0.05)에 따른 전달손실계수(transmission loss)가 크게 증가하는 것을 보여주고 있다. 앞서 설명한 것과 같이 유속이 증가함에 따라 소음저감능력이 거의 모든 주파수 대역에서 증가되고 있음을 볼 수 있다.

하지만, 이런 플러그 머플러의 구조는 그 머플러가 갖는 소음저감성능에 비해, 배기가스가 작은 홀들만을 통과하도록 되어 있고 파이프 가운데 플러그가 있음으로 인해, 배압이 많이 발생한다. 따라서, 많은 머플러의 구조들이 배압을 낮추기 위해 다수의 작은 홀들이 있는 파이프와 격막(baffle)을 여러 개 사용한다<sup>(6-8)</sup>. 하지만, 이는 그 구조를 복잡하게 하여 중량을 증가시키는 단점이 있고, 배기가스가 직경이 아주 작은 홀 만을 통해 흘러가는 그 구조상, 배압이 쉽게 낮아지지 않는다.

머플러를 설계함에 있어 유체의 흐름은 매우 중요한 인자이며, 그 특성을 반드시 고려해야 한다. 그러나, 유동 자체가 발생시키는 기류 소음<sup>(9)</sup>에 대한 것 외에 유동이 머플러의 성능에 직접적으로 끼

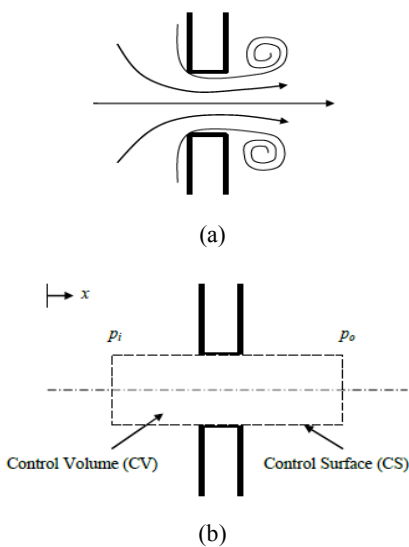


Fig. 1 Orifice model with flow<sup>(2)</sup>

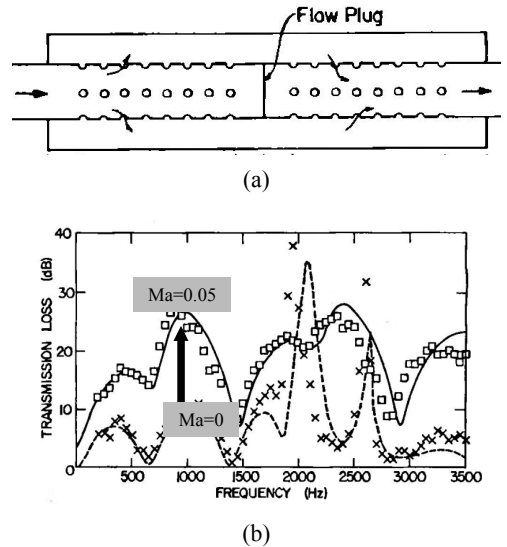


Fig. 2 Effect of flow in a plugged muffler<sup>(3)</sup> (a) a schematic (b) effect of flow in TL(lines: computation analysis, symbols: experimental results)

치는 영향에 대한 연구는 많이 진행되고 있지 않다. 따라서, 이 연구는 실제 머플러가 쓰일 때 발생하는 열과 유동의 영향을 고려한 전달손실계수 (transmission loss)를 구하고, 유체의 흐름이 끼치는 영향을 고려하여 기존 머플러보다 단순한 형태의 머플러를 설계하였다. 유체의 흐름을 크게 방해하지 않으며(배압 저감), 유동이 홀을 통과할 때 생기는 소음 저감 원리를 활용한 (a) 정숙형(quiet-sound)머플러와 헬름홀츠(Helmholtz) 공명기<sup>(10)</sup>를 활용한 (b) 스포티 사운드형(sporty-sound) 머플러를 제안하고자 한다.

## 2. 본 론

이 논문에서는 배압이 유리하고, 형상이 비교적 간단하며, (a) 정숙형 사운드(quiet-sound)와 (b) 스포티 사운드(sporty-sound)를 내는 두 개의 머플러를 제안하였다. 머플러를 설계하고, 그 성능을 예측하기 위해 GT-power<sup>(11)</sup>(엔진 및 흡배기 시스템 해석에 사용되는 Gamma Technologies사의 상용 소프트웨어)를 사용하였고, 해석방법을 검증하기 위해 간단한 확장형 챔버(expansion chamber)에 대한 전달손실계수 이론값과 GT-power 해석값을 비교하였다. 해석 방법 검증 후, 최적의 해석값을 선택하기 위해 기존 양산 차량의 머플러의 전달손실계수를 해석하였고, 그 머플러의 전달손실계수와 배압을 타겟으로 하여 여러 가지 해석 모델 중 두 가지 안을 선택하였다. 해석을 통해 선정된 두 머플러를 제작하여, 실차에서 평가하였으며, 머플러 토출 소음, 실내 유입 소음을 비교하였고 전달손실계수 해석과 일치함을 검증하였다. 마지막으로, 간단한 배압 측정 장치를 통해 배압을 비교하였다.

### 2.1 해석방법의 사전 검증

GT-power의 전달손실계수를 수치적으로 구하는 방법을 검증하기 위해, Fig. 3과 같은 간단한 확장형 챔버에 대해 전달손실계수를 구하였다. 이러한 확장형 챔버의 전달손실계수의 이론값은 다음과 같다.

$$TL = 10 \log_{10} \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left( m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kl_c \right\} \quad (3)$$

여기서  $m$ 은 확장형 챔버와 메인 파이프의 단면적비(ratio)이고,  $k = \omega / c$  (wavenumber, 주파수/음속)이며,  $l_c$ 는 확장형 챔버의 길이 이다. 온도( $T$ )의 영향은 쉽게 검증할 수 있는데, 식 (3)에서 온도가 영향을 주는 부분은 wave number  $k$ 에 포함되어 있는 음속(speed of sound)이다. 음속에 관한 식은

$$c \approx 20.1\sqrt{T + 273.15} \quad (4)$$

으로 간단히 나타낼 수 있다. 이러한 부분을 고려하여 산출한 이론값과 GT-power를 이용하여 구한 전달손실계수값을 구하면 Fig. 3(b)가 된다. 이론값과 해석값이 실온(21℃)과 고온(500℃)에서 잘 일치함을 보여 주고 있다.

### 2.2 머플러의 모델링과 해석 결과

GT-power를 이용하여 여러 개의 머플러의 형상을 해석하여, 그 중 가장 좋은 전달손실계수와 배압을 보여주는 두 개의 머플러 (7D, 4B)가 선정되었고, Fig. 4에 대략적인 형상이 나타나 있다. 여러 개의 머플러를 해석하였지만 다음과 같이 두 가지 디

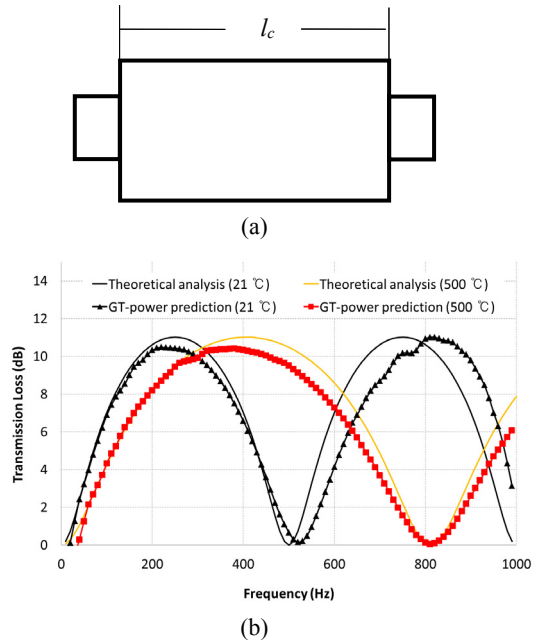


Fig. 3 Effect of high temperature in an expansion chamber; (a) schematic of an expansion chamber, (b) transmission loss predictions with two different temperature

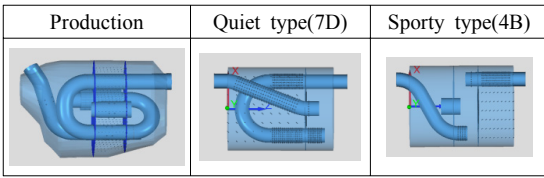


Fig. 4 Comparison of three muffler design

자인이 선정되었다.

(1) 정속형(7D) 사운드를 구현하는 머플러(오리피스 소음저감능력을 활용하여, 유동이 증가할 때 전달손실계수도 증가하는 형태의 컨셉),

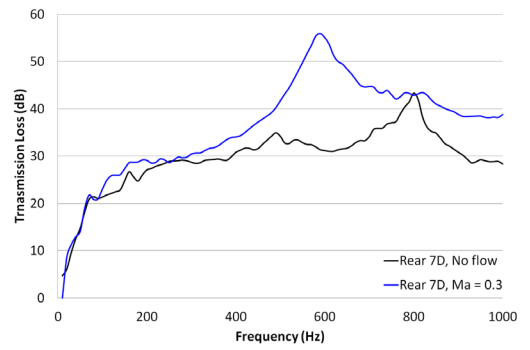
(2) 스포티(4B) 사운드 머플러(헬름홀츠 공명기와 흡음효과를 사용하는 하이브리드 머플러<sup>(10)</sup>)의 컨셉.

특히, 정속형 머플러의 입구 쪽 메인 덕트 끝 단에는 지름이 20 mm인 오리피스가 장착이 되어있다. 그림에서 보이는 것처럼, 제안된 머플러는 양산형보다 구조가 간단하여, 제작비용 및 원가 절감이 기대된다.

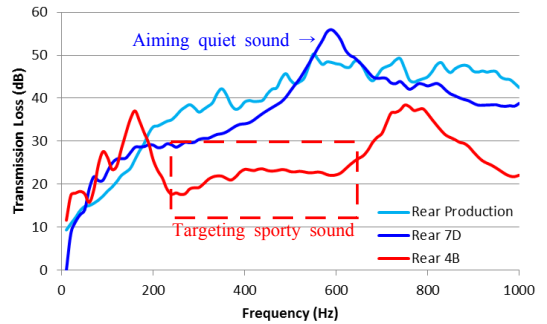
정속형(7D)머플러에 대해 유동이 없고 상온인 경우(no flow)와 유동이 있고 고온인 경우( $Ma=0.3$  in main duct)에 대한 전달손실계수는 Fig. 5(a)에 나타나 있다. 유동이 있는 경우, 전달손실계수는 400 Hz 이상에서 증가됨을 볼 수 있다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 오리피스를 통과할 때 생기는 에너지의 손실로 인해, 소음저감이 증대되는 현상을 보여 준다. 따라서, 실제 머플러의 적용에 있어 유동을 고려하지 않으면 그 해석이 정확하지 않을 수 있다. 유동을 고려한 경우 위의 세 가지 머플러의 전달손실계수는 Fig. 5(b)에 나타나 있다. 양산과 정속형의 전달손실계수는 동등 수준이며, 스포티 머플러는 200~600 Hz 사이의 사운드가 더 풍부해 질 것으로 보인다. 각 머플러의 배압 결과는 뒤에서 다루도록 하겠다.

2.2 차량 평가 및 배압 측정 결과

Fig. 6는 차량(V6엔진, 배기량 3300 cc)에 각 머플러를 장착하고, 머플러 끝단에서의 측정된 토출소음(tailpipe noise)과 차량 실내소음(Cabin noise)을 시간-주파수(time-frequency) 영역에서 칼라맵(colormap)으로 나타낸 그림이다. 정속형과 양산은 토출소음이 나 실내소음에 큰 변화는 없지만, 스포티 사양은 토출소음에서 3차 오더 성분이 크게 증대 되어 있음을



(a)



(b)

Fig. 5 Comparison of transmission loss; (a) 7D with vs. without considering heat and flow, (b) production vs. 7D vs. 4B(with considering heat and flow)

볼 수 있다. 이러한 현상은 오더성분만을 따로 추출해 놓은 Fig. 7에도 잘 나타나 있다.

Fig. 7에서 보면, 실내소음의 전체음압레벨(overall SPL, in dB)은 세 머플러 모두 동등 수준이다. 하지만, 실내소음의 3차 성분을 비교하면, 정속형(7D)과 양산은 비슷하고, 스포티(4B)는 다소 높다. 또한, 스포티 머플러는 3차 오더 성분의 크기의 변화가 적어, 감성적으로 스포티한 느낌이 난다<sup>(12)</sup>. 배기토출에서는 양산과 정속형(7D)는 동등 수준이고, 스포티 사양은 전체음압레벨과 3차 오더성분이 높게 나온다. 따라서, 실내소음 3차 오더 성분의 차이는 배기토출의 3차 오더 성분의 차이에 기인한다고 볼 수 있다.

Fig. 8은 3가지 머플러를 각각 장착한 후, 실내소음을 1/3rd옥타브 밴드로 나타낸 그림이다. 앞선 Fig. 5(b)의 전달손실계수에서 보여진 대로 스포티(4B)는 저주파수(250~500 Hz) 대역에서 더 높은 음압레벨을 보여 주고 있고, 이는 스포티한 느낌을 주는 효과가

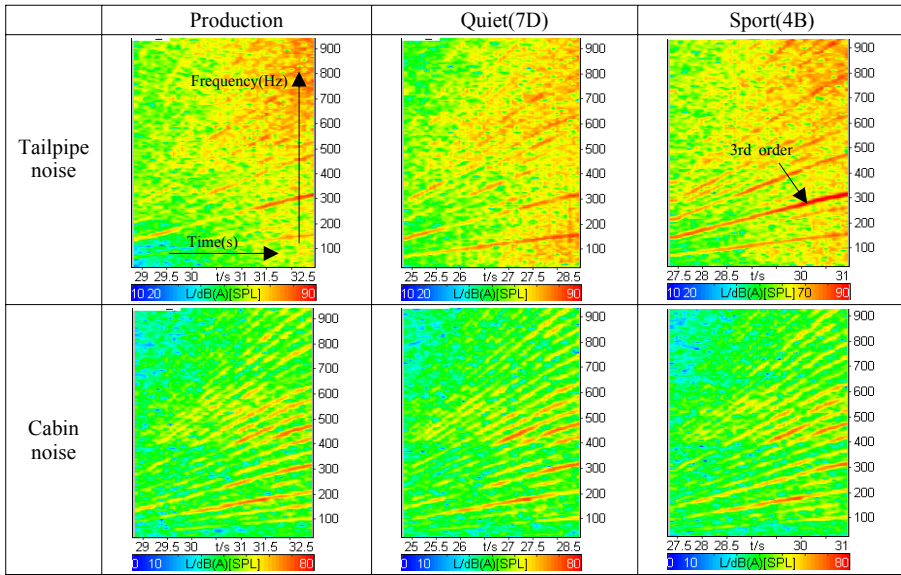


Fig. 6 Comparison of tailpipe and cabin noise

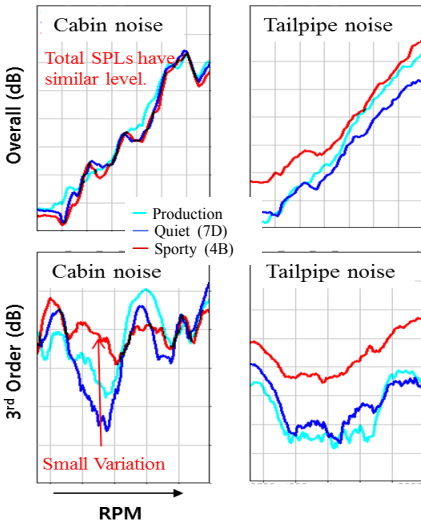


Fig. 7 Comparison of overall SPL and 3rd order level at cabin and tail pipe

있다<sup>(12)</sup>. 정속형(7D)은 양산과 비슷한 레벨을 보여주며, 이 또한 전달손실계수에서 나타난 것과 동일하다. 이는 열과 유동을 고려한 전달손실계 수를 이용하면, 쉽고 정확하게 머플러의 성능을 예측할 수 있다는 것을 보여준다.

위 세 가지 머플러에 대한 배압은 Fig. 9와 같은 간단한 배압 측정장치 - 머플러를 장착 한 후, 압축 공기를 불어 넣고, 머플러의 상단에서 압력을 측정

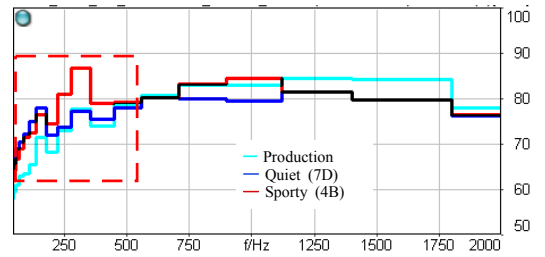


Fig. 8 1/3rd octave band analysis for the cabin noise



Fig. 9 Picture of test setup for back-pressure measurement, provided by Pico Corp.

Table 1 Measured pressure at the upstream side of muffler

	Production	Quiet(7D)	Sporty(4B)
Pressure	27.8 kPa	22 kPa	16.3 kPa



하여 대기압과의 차이를 계산 - 를 이용하였다. 측정된 배압은 Table 1에 표시되어 있다. 제안된 머플러(7D, 4B) 모두 양산 머플러보다 배압이 낮게 측정 되었으며, 이 머플러를 장착할 경우 연비 향상이 기대된다.

### 3. 결 론

전달손실계수(transmission loss)는 머플러의 소음 저감 특성(characteristics)을 나타내는 값이다. 하지만, 그 측정 방법 상 열과 유동을 고려하는 것은 그리 쉽지 않다. 이 연구에서의 결론은 다음과 같다.

(1) 해석적으로 열과 유동을 고려한 전달손실계수를 구하였고, 이 방법을 통해 머플러의 성능을 예측하였다.

(2) 유동(flow)이 있는 경우에 머플러의 성능이 변화하는 특성을 이해하고, 그 성질을 이용하여 구조가 간단하고, 배압이 낮은 고성능 머플러를 제안하였다. 현재 양산 중인 머플러는 배압이 많이 걸리는 구조이며, 이를 개선하는 방안에 대해 추가적인 연구가 필요하다.

(3) 스포티한 사운드를 내는 머플러의 경우, 헬름홀츠 공명기와 흡음재를 이용하여 구현할 수 있음을 보였다.

(4) 해석과 차량시험의 비교를 통해 검증하였다. 이러한 검증을 통해, 머플러를 해석하는데 있어 전달손실계수는 매우 유용한 정보이며 열과 유동을 고려하는 것이 매우 중요한 것을 알 수 있다.

(5) 현재까지는 열과 유동을 고려한 전달손실계수 측정 시험결과들이 많이 알려진 바가 없으므로 실험을 통해 머플러의 전달손실계수 특성이 열과 유동에 따라 변하는 것을 알아내는 것은 앞으로 해야 할 일 중 하나이다.

### References

(1) Choi, D. W. and Lee, J. W., 2013, Optimal Design of a Muffler with Perforated Plates Considering Pressure Drop, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, No. 4, pp. 372~378.

(2) Kim, H., 2011, Transmission Loss of Silencers

with Flow from a Flow-impedance Tube using Burst Signals, Ph.D. Dissertation, The Ohio State University.

(3) Sullivan, J. W., 1979, A Method for Modeling Perforated Tube Muffler Component. II Applications, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 66, No. 3, pp. 779~788.

(4) Wagner, D., Plug Muffler for Aircraft and Method of Construction Thereof, US patent 5,496,975.

(5) Thawani, P., Plug-type Muffler Section, US Patent 4,595,073.

(6) Jeon, J., Han, H., Muffler for Vehicle Exhaust Aystem, Korean Patent Pending 1020100092652.

(7) Cho, K., Seo, H. and Choi, D., Attenuator for Noise of Vehicle Exhaust Gas System, Korean Patent Pending 1019990020764.

(8) Robert, P. and Chung, S., High Performance Automotive Muffler, US Patent 4,673,058.

(9) Kim, H.-T., Joo, W.-H. and Bae, J.-G., 2008, Development of the Low Noise Design Program for Construction Equipment's Muffler under the High Velocity Flow, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 483~488.

(10) Champney, L., Huff, N. T., Lee, I. J. and Selamet, A., 2007, Mufflers with Enhanced Acoustic Performance at Low and Moderate Frequencies, US Patent 7,281,605 B2.

(11) GT-Power, <https://www.gtisoft.com/>

(12) Chang, K.-J., Kwag, B. C., Kim, D. Y., Ahn, H. G. and Jung, W. M., 2011, Sound Quality Development of a High-powered Sports Coupe, KSAE 2011 Annual Conference and Exhibition, pp. 822~827.



**Hyunsu Kim, Ph.D.** received his doctor degree at the Ohio State University in 2011 after achieving B.S. from Kookmin University in 2001 and M.S. from University of Cincinnati in 2006. His research area is acoustics of intake/exhaust

system especially focusing on nonlinear characteristics in silencers in the presence of flow. Since 2011, he works at Hyundai-Kia Motor Company as a senior researcher in the power-train NVH team as currently expanding his area of interest to (hybrid) electrical vehicle motor noise.