

배기계 디커플러의 음향 특성에 관한 연구

허 덕 재^{*1)} · 임 종 윤²⁾

고등기술연구원 제품기술연구센터¹⁾ · 아주대학교 대학원/한국 ESI²⁾

A Study on the Acoustical Characteristics of Exhaust Decoupler

Deogjae Hur^{*1)} · Jongyun Lim²⁾

¹⁾Product Design Tech. Center, Institute for Advanced Engineering, 633-2 Goan-ri, Baekam-myeon, Yongin-si, Gyeonggi 449-863, Korea

²⁾Department of Systems Engineering, Ajou University, Gyeonggi 443-749, Korea

(Received 27 January 2006 / Accepted 31 March 2006)

Abstract : Flexible couplers are widely used for exhaust transmitted vibration reduction in vehicles. This paper describes an investigation into the acoustical characteristics of exhaust flexible coupler by the simulation and testing. Computational acoustic simulation is carrying out to investigate resonance frequency and transmission loss of decoupler using the boundary element method and transfer matrix approach. To confirm the acoustical simulation results of exhaust decoupler, we compare with measured experimental results by the test of transmission loss measurement system. In the comparison with simulation results and tests results, there is correctly fit the resonance frequency and the trend of transmission loss. Also, we show that the acoustical structure of decoupler is analogous to the expended tube or side branch resonator. The characteristics of exhaust decoupler have a marked increase in the acoustic attenuation at the specified frequency bend. Therefore the decoupler is applied to develop the exhaust system not only for the vibration isolator but also for the noise attenuator.

Key words : Exhaust decoupler(배기 디커플러), Transmission loss(전달 손실), Extended tube(확장관), Transfer matrix(전달 행렬), Acoustic analysis(음향 해석)

Nomenclature

- TL : transmission loss
- BEM : boundary element method
- Wi : incident sound power
- Wt : transmitted sound power
- Wr : reflected sound power

1. 서론

자동차 및 기계 산업의 급속한 발전에 의한 시스

템 성능의 향상은 시스템을 이루는 요소부품에 대한 요구사항의 다양화 및 요구조건의 강화를 동반하고 있다. 이와 함께 시스템 모듈화 경향이 점점 대세를 이루어 감에 따라 신뢰성 있는 부품기술이 크게 요구되고 있다. 이러한 환경적 변화에서 차량 등의 동력시스템에 필수적 요소인 배기시스템은 동력원으로부터 전달되는 진동 및 열변형을 흡수하여 시스템을 보호하고, 차량 탑승자의 안락함을 위하여 벨로우즈(bellows)와 같은 부품을 사용한다. 진동의 절연은 차량 실내 소음을 저감하고 엔진 배기 매니폴드(exhaust manifolds)의 신뢰성을 유지 하는데

*Corresponding author, E-mail: djhur@iae.re.kr

매우 큰 역할을 한다.^{1,2)} 즉, 진동 절연에 의하여 차체의 진동으로 안락감을 저해하는 요인을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 구조 방사소음을 줄일 수 있다. 그러나 고효율 엔진 개발로 벨로우즈의 구조는 열적인 내구성능과 공간의 특성 때문에 새로운 절연 구조가 요구되어 디커플러(decoupler)를 개발, 적용하고 있다. 또한 벨로우즈는 주름관 형태를 띠고 있어 내부 표면의 형상과 유동에 의하여 2차 소음원으로 되는 경향이 있다. 그러므로 진동 절연뿐만 아니라 소음의 발생에 대한 연구가 병행되어야 한다. 디커플러의 경우에도 구조적으로 벨로우즈의 형상을 변형한 것으로 공간의 변화가 이루어지고 있어 소음에 대한 특성을 고찰하여야 한다. 배기계의 음향 특성은 주로 전달 손실에 의하여 평가한다. 전달 손실의 계산은 음파분리법 등과 4단 정수법(4-pole parameter method)을 사용하여 계산하는 것이 일반화 되어 있다. 또한 해석으로는 저주파수의 경우 유한요소 해석을 사용하고 중고주파수에서는 경계요소법과 통계적 에너지 방법을 사용하는데 통계적 에너지 방법으로는 협대역 해석을 할 수 없다는 단점이 있다.

본 연구에서는 개발된 디커플러의 소음에 대한 특성을 해석과 실험을 통하여 연구한 내용을 기술하였다. 먼저 디커플러의 구조를 분석하여 공명기 구조와의 유사성을 검토하였다. 해석은 음향해석의 대표적 기법인 경계요소법을 사용하여 음압 변화를 계산하고 4단정수법을 적용 음향전달 손실을 계산하였다. 실험은 4개의 마이크로폰을 이용한 음원 분리법을 사용하여 실험 장비를 구축하고 측정하였다. 그리고 디커플러의 음향 특성과 벨로우즈에 대한 음향특성을 비교하였다.

2. 전달 손실 측정 방법에 대한 고찰

2.1 전달 손실 계산 방법

음향 전달 손실은 소음제어요소의 상류측과 하류측에서의 음향 파워를 계산하거나 측정하여 그 비율에 상용로그를 취하여 10배를 해준 값이다. 측정은 통상적으로 상류 측에 두개의 마이크로폰을 설치하여 소음기에 입사되는 입사파와 음원쪽으로 반사되는 반사성분을 분리한 후 입사파의 파워를 측

정하고 하류측은 무반사 처리를 한 후 소음기를 투과한 투과파의 파워를 측정하는 방법이 사용된다.³⁾ 그 관계식은 Fig. 1과 식 (1)에 의하여 나타낼 수 있다. 이와 같은 전달 손실 계산 및 측정 방법은 많은 연구자들에 의하여 발표되었으며 그 대표적인 것은 무반사 음향법, 음파분리법(decomposition method), 2-음원 방법(two-source method), 2-부하 방법(two-load method) 등이 있다.^{4,5)} 본 연구에서는 음파 분리법과 무반사 음향법을 적용할 수 있도록 장비를 구성하여 실험을 수행하였다.

$$TL = 10 \log \left(\frac{W_i}{W_t} \right) \quad (1)$$

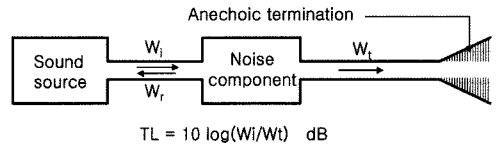


Fig. 1 Measurement of transmission loss

2.2 음파 분리

파이프 내에서 마이크로폰으로 측정된 음압에는 진행파와 반사파가 동시에 존재하므로 진행파만 추출하여 전달 손실 계산에 사용하여야 한다. 진행파와 반사파를 분리하는 방법은 Seybert가 제안한 방법을 사용하였다.⁶⁾

음파의 분리는 Fig. 2와 같은 파이프 내의 1과 2 지점에서 음압을 측정하여 진행파 및 반사파의 자기상관파워스펙트럼(auto-power spectrum, SAA, SBB)을 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$S_{AA} = \frac{S_{11} + S_{22} - 2C_{12}\cos k(x_1 - x_2) + 2Q_{12}\sin k(x_1 - x_2)}{4\sin^2 k(x_1 - x_2)} \quad (2)$$

$$S_{BB} = \frac{S_{11} + S_{22} - 2C_{12}\cos k(x_1 - x_2) - 2Q_{12}\sin k(x_1 - x_2)}{4\sin^2 k(x_1 - x_2)}$$

S_{11} : 1 지점에서의 자기상관스펙트럼

S_{22} : 2 지점에서의 자기상관스펙트럼

C_{12} : 1 지점에 대한 2 지점에서의 상호상관스펙트럼(cross-power spectrum)의 실수부

Q_{12} : 1 지점에 대한 2 지점에서의 상호상관스펙트럼의 허수부

k : 파동수(wave number)

$x_1 - x_2$: 마이크로폰 간격

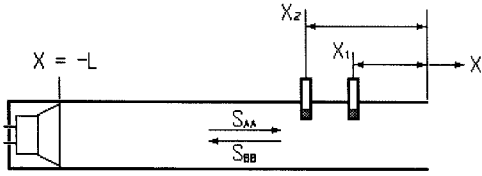


Fig. 2 Measurement system of sound power using two microphone method

3. 음향해석

3.1 디커플러와 공명기 특성

본 연구의 디커플러는 연장관(extended tube) 공명기와 확장관(expansion chamber)으로 이루어져 있다. 전달 손실은 연장관 공명기에 대한 전달 행렬과 확장관에 대한 전달 행렬의 곱으로 전달 손실을 계산할 수 있다. 그러나 Fig. 3에서 보듯이 디커플러는 입구관 및 출구관의 단면적이 거의 같으며, 확장관의 길이도 매우 짧아 연장관 공명기만을 고려하여 해석하여도 무방하다고 할 수 있다. 연장관의 원리는 연장관과 확장관 사이에 존재하는 공간이 하나의 측지 공명기(side branch resonator) 역할을 하여 소음원 파장이 그 길이의 1/4이 되는 경우에는 180 위상 반전에 의하여 소음 감소효과를 얻을 수 있다. 따라서 다음 식과 같이 공명 주파수와 전달 손실을 계산할 수 있다.³⁾

$$f_r = \frac{c}{4L} \quad (3)$$

$$TL = 10 \log \left[1 + \frac{1}{4} m^2 \tan^2 kL \right] \text{ (dB)}$$

f_r : 공진 주파수

c : 음속

L : 연장관의 길이

m : 입구관과 확장관의 단면적 비

식 (3)을 사용하여 Fig. 3의 디커플러에 대하여 공기 중의 음속을 대상으로 등가의 측지공명기의 공명 주파수와 전달 손실을 계산하면 공명 주파수는 1465 Hz로 나타나고, 전달 손실은 Fig. 4와 같이 나타난다. 따라서 1465 Hz 전후하여 소음저감이 이루어 질것으로 예상 할 수 있다.

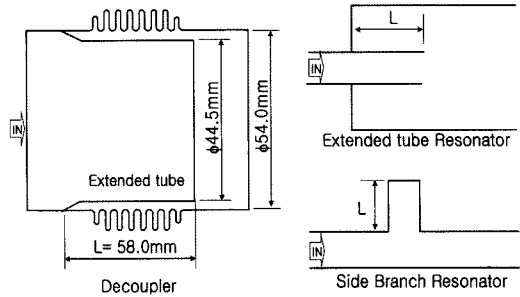


Fig. 3 Structure of decoupler and resonator

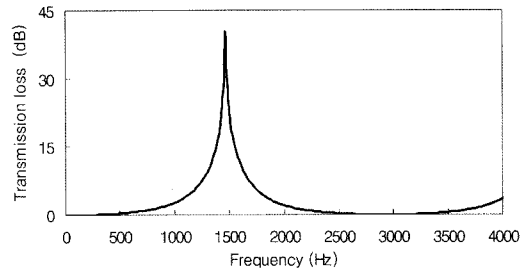


Fig. 4 TL of extended tube resonator

3.2 경계요소법에 의한 음향해석

3.2.1 모델링(Modeling)

- 본 연구에서 사용된 디커플러의 구조는 입구 지름이 54 mm 이고 연장관 지름 37.4 mm, 길이 58 mm 인 Fig. 3과 같은 구조로 되어있다. Fig. 5에서 보이는 것과 같이 디커플러의 구조는 매우 복잡하나 음향과 관련하는 부분은 덕트 내부의 연결된 공간만이 음향 특성의 성질을 좌우하게 된다. 따라서 음향 해석 모델은 다음과 같이 모델링 하였다.
- 디커플러 구성요소 중에서 공기 또는 배기가스가 지나가는 공간과 디커플러가 접하는 부분의 경계만을 경계요소로 모델링하였다.
 - 해석 음향 모델의 매질은 상온의 공기와 2000, 4000 rpm(4기통 엔진)에서의 배기가스를 대상으로 하였다.
 - 해석 주파수 대역이 약 10 kHz 까지 해석 할 수 있는 요소의 크기(mesh size)를 결정하였다.
 - 다중으로 연결된 부분에는 노드(node)를 중첩(duplication)함으로써 접합(junction)에 대한 구속(constraint)을 만족하게 하였다. 또한 연장관의 자유단의 음압은 자유롭도록 음압이 0이 되게 하였다.

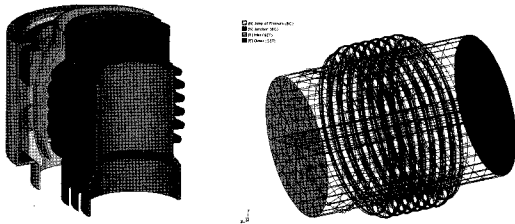


Fig. 5 CAD and BEM model of decoupler

3.2.2 경계 및 하중 조건

전달 손실을 계산하기 위해서 전달행렬의 4단 정수법을 사용하였다. 여기서 4단정수의 음향전달 행렬은 다음과 같이 구성된다.⁴⁾

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, p_1 : 입구의 음압

p_2 : 출구의 음압

v_1 : 입구의 매질의 입자속도

v_2 : 출구의 매질의 입자속도

T_{ij} : 전달행렬

식 (4)의 전달행렬로부터 TL은 다음과 같은 식으로 정의 된다.

$$TL = 20 \log_{10} \frac{1}{2} |T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}| \quad (5)$$

따라서 출구의 경계조건으로 매질의 입자속도가 0인 경우와 음압이 0인 경우에 대해 각각 해석하여야 한다. 입구와 출구를 제외한 모든 경계는 매질의 입자 속도가 0인 강진(rigid) 경계 조건을 부여하고, 디커플러 경계요소 모델의 입구에서는 매질의 입자 속도와 입력이 1인 평면파 음원으로 가졌다. 이 조건에서 출구에서의 매질의 입자 속도를 0으로 하면, 4단 정수, T_{11}, T_{21} 을 구할 수 있다. 또한 출구에서의 음압을 0으로 하면 나머지 4단 정수, T_{12}, T_{22} 를 계산할 수 있다.⁴⁾ 이러한 조건을 정리하여 Table 1에 나타내었다. 그리고 음향 전달손실은 식 (5)에 의하여 구할 수 있다.

3.2.3 해석 조건 및 방법

해석은 매질이 공기 중인 것과 2000 cc 급 차량의 2000 rpm, 4000 rpm에서의 운전 조건 등, 3가지 경우에 대하여 수행하였다(Table 2). 또한 해석에 소요되

Table 1 Boundary conditions for acoustic analysis

Boundary condition		4-pole parameter
Inlet	Outlet	
velocity $v=1$ pressure $p=1$	velocity $v=0$	T_{11}, T_{21}
velocity $v=1$ pressure $p=1$	pressure $p=0$	T_{12}, T_{22}

Table 2 Material properties of acoustic media

Media	Sound speed(m/s)	Density(kg/m ³)
Air	340	1.225
Exhaust gas(2000 rpm)	540	0.500
Exhaust gas(4000 rpm)	630	0.400

는 시간을 고려하여 주파수 범위와 간격을 조절하여 아래와 같이 해석하였다.

- 1단계에서는 5 kHz까지 100 Hz 간격으로 해석을 수행하였다.
- 연장관의 특성으로 인해 발생하는 전달손실의 첫 번째 피크 주파수에서 보다 상세한 정보를 알기 위해 그 주위를 20 Hz 간격으로 해석하였다.

3.3 전달 손실 해석 및 결과

전달 손실 계산은 경계요소법에 의하여 각각의 경계조건에 따라 계산된 음압을 4단 정수의 전달 함수로 치환하여 계산하였다. 디커플러의 소음 전달 손실에 대한 해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 조건에 따라 주파수 및 크기의 특성은 매우 다르게 나타나고 있으나 그 양상은 축지 공명기와 매우 유사한 경향을 보이고 있다. 즉, 공기 중에서는 1415 Hz, 2000 rpm의 배기가스에서는 2300 Hz, 4000 rpm의

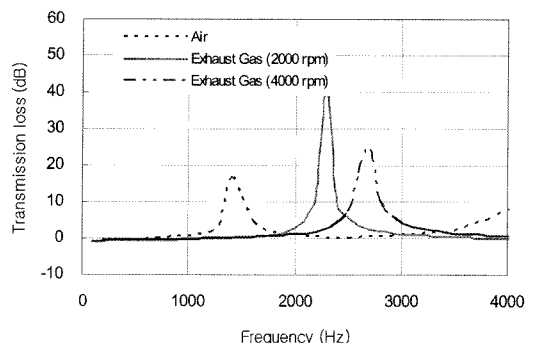


Fig. 6 TL analysis result of decoupler

배기가스에서는 2680 Hz에서 피크가 나타남을 볼 수 있다. 이는 차량의 rpm 증가에 따라 매질의 음속이 커지면서 첫 번째 전달 손실의 피크 주파수가 증가함을 알 수 있다. 또한 공기 중의 조건에서 약간의 차이는 있지만 연장관이나 측지 공명기와 유사한 공명 주파수를 갖고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 공명기에서의 전달 손실의 계산은 매질의 흡음율과 공명기의 임피던스에 관한 실수부를 적용하지 않기 때문에 관의 입구와 출구의 단면적 비에 의해 결정되며, 공명 주파수에서의 전달 손실 값은 매우 큰 값을 가지게 된다. 즉, 방사 저항, 점성 감쇠 등에 의한 감쇠 효과를 고려하지 않았기 때문이다. 이러한 감쇠 효과를 고려하여 해석하면 공명 주파수에서의 전달 손실의 값을 정량적으로 예측할 수 있다. 그러나 전달 손실의 값은 특정한 주파수에서의 값보다 공명 주파수 주위의 주파수 대역에서의 값의 변화 양상이 더 중요한 정보를 준다. 따라서 공명 주파수에서의 정확한 전달 손실값을 정량적으로 예측하는 것보다 전달 손실 대역의 손실값의 변화 양상을 예측하는 일이 중요하다.

4. 실험적 고찰

본 절에서는 디커플러의 음향 전달 특성을 실험적 측정 방법에 대하여 고찰하였다. 그리고 기존의 벨로우즈와의 비교하기 위하여 각각의 경우에 대하여 음향 전달 특성을 실험적으로 고찰하였다. 실험 방법은 2절에서 기술한 것과 같이 음파 분리법에 의한 입력부와 출력부의 음향 파워스펙트럼을 측정하여 전달 손실을 계산하였다.

4.1 실험장치의 구성

디커플러와 벨로우즈의 전달 손실을 측정하기 위해 Fig. 7과 같이 아크릴 파이프, 연결관, 소음을 발생시키는 장치, 음향 반사를 최소화 시켜줄 수 있는 나팔관 모양과 유로가 형성된 쪼기 모양의 흡음재를 장착하였다. 음압 측정은 Fig. 7과 같이 마이크로폰, 앰프, 주파수 분석기 등으로 구성하였다.

4.2 전달 손실 측정 및 결과

측정하고자 하는 디커플러의 직경이 54 mm이며

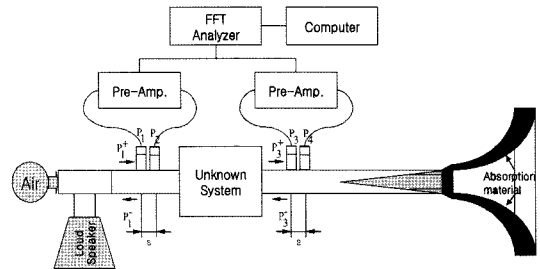


Fig. 7 Schematic diagram for TL measurement

로 평면파로 가정할 수 있는 주파수는 식 (6)에 의해 약 3.7 kHz까지이다.

$$f_c < \frac{c}{1.7D} \quad (6)$$

f_c : 상한주파수, c : 음속

D : 파이프 직경

신호발생기를 통해 이대역을 포함하는 6.4 kHz까지의 백색잡음(white noise)을 발생시켜 스피커를 통해 가진하였다. 그리고 디커플러의 입구와 출구에서 각각 약 50 mm 정도 떨어진 곳에 마이크로폰을 2개씩 설치하여 음압을 측정하였다. 마이크로폰 간격은 아크릴 파이프 길이방향으로 20 mm이다.

측정된 음압은 Seybert의 음파분리 이론을 통해 진행파를 추출하였고, 식 (7)을 이용하여 전달 손실을 계산하였다.

$$TL = 10 \log \frac{S_{AA}^i}{S_{AA}^o} \quad (dB) \quad (7)$$

S_{AA}^i : 입구 진행파의 음향 오토파워스펙트럼

S_{AA}^o : 출구 진행파의 음향 오토파워스펙트럼

또한 벨로우즈에 대해서도 디커플러와 동일한 과정으로 전달 손실을 측정하였다.

디커플러와 벨로우즈의 전달 손실 측정 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 디커플러와 벨로우즈에서 측정된 전달 손실의 결과를 보면 디커플러의 경우 약 1416 Hz에서 전달 손실이 가장 크게 나타나고 있으며, 확장관 공명기의 형태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 반면 벨로우즈에서는 소음저감효과가 거의 없는 것을 확인할 수 있으며 고주파에서 증폭되는 현상을 나타내고 있다.

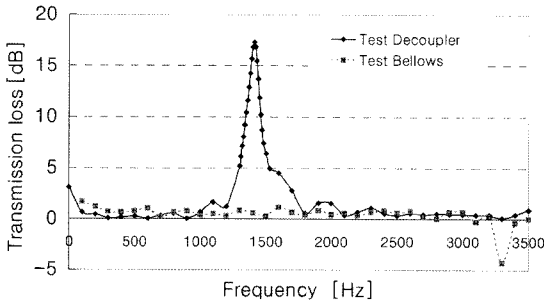


Fig. 8 Comparison of TL between decoupler and bellows

5. 해석 및 실험 결과의 비교 고찰

상온의 공기 상태에서 디커플러의 전달 손실 해석 결과와 실험 결과를 Fig. 9에 비교하여 나타냈다. 디커플러의 음향 전달 손실은 해석과 실험에서 1415 Hz 근처에서 전달 손실량이 가장 크게 나타나고 있다. 그리고 각각의 경우에 대하여 비교하여 Table 3에 나타냈다.

음향 전달 손실량의 크기는 약간의 오차를 보이고 있다. 이러한 오차 발생은 해석과 실험에서 발생

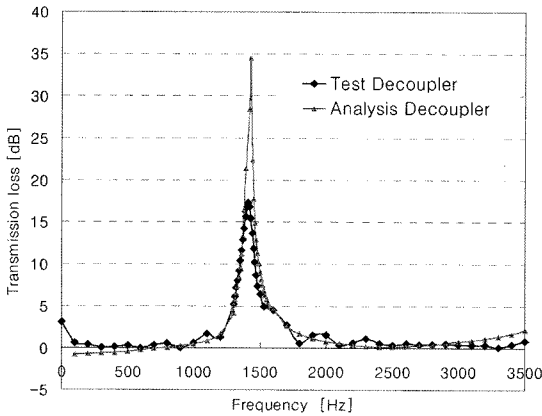


Fig. 9 Comparison of TL between analysis and test

Table 3 Comparison of results

Method	Frequency(Hz)			TL(dB)
	Air	2000 rpm	4000 rpm	
Analogy resonator	1465	2327	2716	-
BEM analysis	1415	2300	2680	34.40
Test measurement	1416	-	-	17.31

한 것으로 생각된다. 해석에서는 전체의 시스템으로 모델링을 하지 않고 디커플러의 음향 공간 부분만 해석하였고, 3.3절에서 설명한 바와 같이 방사 저항과 점성감쇠 등을 고려하지 않았다. 그리고 실험에서는 디커플러의 입출구의 직경과 스피커 및 무반사 장치의 연결부위의 직경이 변함에 따라 일직관(straight tube)과는 다른 임피던스의 변화가 발생하였다. 이러한 요인에서 의하여 실험치의 음향 전달 손실량은 약간의 물결 모양의 파동을 포함하고 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 요인에도 해석과 실험 결과는 매우 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 상온의 공기에서 디커플러 전달 손실의 해석 결과와 실험 결과가 잘 일치함을 보임에 따라 2000, 4000 rpm에서의 해석 결과도 신뢰할 만한 수준을 갖는다고 볼 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 디커플러의 소음 전달 손실 특성에 대하여 고찰하고, 해석적으로 예측 가능한 방법과 이를 검증하기 위한 측정에 대한 연구를 수행하였다. 해석과 실험의 비교는 실험하기 용이한 상온에서의 소음 전달손실을 측정하여 그 결과를 비교하였다. 또한 현재 많이 사용되는 벨로우즈에 대해서도 전달 손실을 측정하여 디커플러와 비교하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 디커플러의 음향 모델은 연장관이나 축지 공명기와 유사한 구조임을 알 수 있었고, 축지공명기나 연장관 공명기로 상사하여 특정 주파수의 저감을 피할 수 있음 알 수 있다.
- 2) 경계요소법에 의한 디커플러의 음향 전달해석 결과로 공명주파수는 실험결과와 매우 잘 일치하고 있으며, TL값의 경향 또한 매우 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.
- 3) 실차 상태의 여러 가지 매질에 대해서 해석한 결과, 1차 공진주파수는 1,400~3,000 Hz에 존재함을 알 수 있다.
- 4) 벨로우즈의 전달 손실 측정 결과는 소음저감이 매우 경미하며 디커플러에서 발생하지 않은 고주파수에서 소음을 증폭하는 것으로 나타났으며 소음 저감 능력 또한 매우 떨어지는 것으로 나타났다.

References

- 1) J. Baltes, D. Chang and J. Hodgson, "A New Generation of Flexible Coupling Elements with Integrated Metal Substrates," SAE 2000-01-0498, 2000.
- 2) B. G. Ko, W. I. Lee and G. J. Park, "Improvement of the Vibrational Characteristics According to Attachment of Bellows and Evaluation of Bellows Optimal Position in Automobile Exhaust System," Transactions of KASE, Vol.2, No.3, pp.21-32, 1994.
- 3) The Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Handbook of Noise and Vibration, pp.131-137, 1995.
- 4) Z. Tao and A. F. Seybert, "A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss," SAE 2003-01-1653, 2003.
- 5) J. Y. Chung and D. A. Blaser, "Transfer Function Method of Measuring In-Duct Acoustic Properties: I.Theory and II. Experiment," Journal of the Acoustical Society of America, Vol.80, No.2, pp.555-560, 1980.
- 6) A. F. Seybert and D. F. Ross, "Experimental Determination of Acoustic Properties Using a Two-microphone Random Excitation Technique," J. Acoust. Soc. Am., Vol.61, pp.1362-1370, 1977.