

다구찌 방법을 이용한 무반사 종단 덕트 설계

Design of semi-anechoic termination using Taguchi's method

김 회 전*·이 상 훈†·전 승 경*·한 상 명*

Hoi-Jeon Kim, Sang-Hoon Lee, Seung-Kyoung Jeon, Sang-Myoung Han

Key Words: semi-anechoic termination (무반사 종단), Taguchi's method (다구찌 방법)

ABSTRACT

A semi-anechoic termination is necessary in the muffler transmission loss test rig in order to suppress the sound reflection effects in the downstream. The reflected sound can distort the measured transmission loss curves. However, there exists only general guide about how to manufacture a semi-anechoic termination. In this study, Taguchi's method was used to design a semi-anechoic termination more efficiently.

1. 서 론

자동차 배기 시스템 부품 및 소음기 단품의 음향 성능을 나타내는 대표적인 지수에는 소음 저감량 (Noise reduction; NR), 삽입손실 (Insertion loss; IL), 그리고 전달손실 (Transmission loss; TL) 등이 있다.

소음 저감량 (NR)은 소음기 상단 및 하단에서의 음압레벨의 차이로 정의된다. 측정하기 비교적 쉽다는 장점이 있지만, 소음기 설계에 많은 도움이 되지 않는다. 삽입손실 (IL)은 배기 시스템 미관 끝부분에서 일정한 거리만큼 떨어진 곳에서 소음기 장착 전과 후의 음압레벨을 측정하고, 그 차이를 dB 로 표시한 것이다. 현장에서 사용하기에 가장 유용하게 쓰일 수 있다는 장점이 있지만, 삽입손실을 계산하기 위해서는 소음원 및 미관에서의 음향 임피던스를 미리 알아야 한다는 단점이 있다. 전달손실 (TL)은 소음기로 입사 및 투과되는 음향 에너지의 차이를 dB 로 표시한 값이며, 소음기에 관한 이론 해석들은 주로 이 전달손실을 예측한다. 앞에서의 다른 두 값과 달리 전달손실은 소음기만의 음향성능을 나타내기 때문에 소음기 설계에 유용하게 사용될 수 있다. 하지만, 음원 특성 및 출구 임피던스를 고려할 수 없기 때문에 미관에서의 방사음압을 예측할 때에는 효용성이 떨어진다는 단점이 있다.

전달손실을 측정하는 방법에는 다음과 같이 음파 분리법 (decomposition method)¹⁻², 두 개의 음원을 이용하는 방법 (two source method)³, 그리고 두 개의 음향 부하를 이용하는 방법 (two load method)⁴ 등 세 가지가 있다.

음파 분리법을 이용하기 위해서는 그림 1 과 같이 소음기의 상단 및 하단에서 2 개 이상의 마이크로폰을 사용하여 입사파 및 반사파를 서로 분리해야 하며, 외부 오차에 의한 영향을 줄이기 위해서 다수의 마이크로폰을 사용하는 것이 선호된다⁵. 덕트 내부에 유동이 존재하지 않을 때는 그림 1(a)와 같은 무반사 종단을 장착하여 덕트 하단부 내의 반사파를 상당량 줄일 수 있다. 그러나, 일반적으로 소음기는 유동이 있는 경우에 작동하기 때문에 그림 1(b)에 나타났듯이 내부에 흡음재가 장착된 원뿔이나 혼 모양의 무반사 종단을 장착하는 경우가 대부분이다. 그러나 100 Hz 미만의 저주파수 대역의 반사파까지 완전히 차단하는 무반사 종단을 만드는 것은 현실적으로 어렵기 때문에, 저주파수 및 특정 주파수 대역에서 측정된 전달 손실이 왜곡될 수 있다.

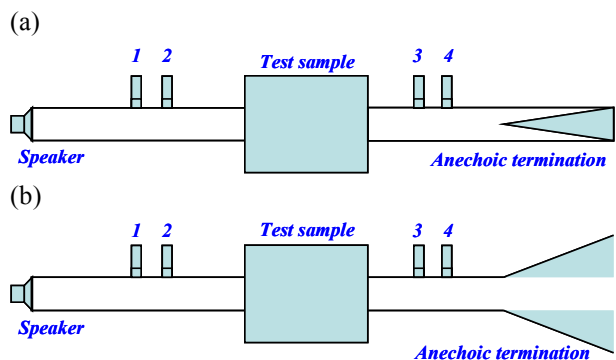


FIG. 1. Decomposition method for measuring the transmission loss. (a) Without flow, (b) with flow.

두 개의 음원을 이용하는 방법⁴은 소음기의 2×2 전달 행렬⁶을 기초로 하고 있다. 4 개의 미지수를 구하기 위해서, 그림 2 에서 나타났듯이 소음기를 정방향 및 역방향으로 위치시키고 각각 측정한다. 이 경우 무반사 종단을 사용할 필요가 없다는 장

† 포레시아 배기시스템 코리아(주) 기술연구소
E-mail: shlee@shihwa.faurecia.com
Tel: (031) 4882-242, Fax: (031) 434-6306

* 대기 포레시아 (주)

점이 있으나, 머플러 2번 장착해야 한다는 단점이 있다.

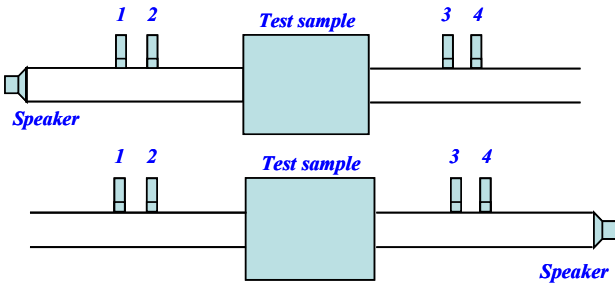


FIG. 2. Two source method for measuring the transmission loss.

두 개의 음향 부하를 사용하는 방법⁵은 그림 3과 같다. 두 개의 음원을 사용하는 방법⁴에 비해서 머플러를 2번 장착하는 수고를 덜 수 있다는 장점이 있다. 하지만, 두 개의 음향 부하의 종류가 측정 결과의 정확도에 많은 영향을 주기 때문에 이를 잘 선택해야 하는 난점이 있다. 일반적으로 두 개의 음향 부하 임피던스 차이가 클수록 더 좋은 결과를 얻을 수 있다.

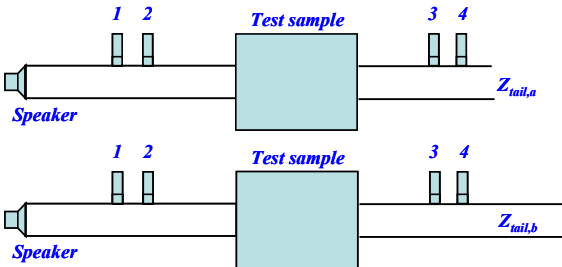


FIG. 3. Two load method for measuring the transmission loss.

음파 분리법 및 두 개의 음원을 이용하는 방법에서는 하단부의 반사파를 제거하여 보다 오차에 덜 민감한 결과를 얻기 위해서, 그리고 두 개의 음향 부하를 사용하는 경우에 두 개의 음향 부하 임피던스 값 사이에 큰 차이를 주고자 무반사 종단이 많이 사용된다.

본 연구에서는 다구찌 방법을 이용하여 보다 손쉽게 우수한 음향 성능을 가진 무반사 종단을 설계하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 이론

원뿔 모양의 무반사 종단 설계

ISO 7235 (Acoustics-Measurement procedures for ducted silencers-Insertion loss, flow noise, and total pressure loss) 규격에서 제시한 몇 가지 무반사 종단의 예제들은 음향 반사를 억제하기 위해서, 길이 방향으로의 단면이 지수함수 (exponential) 혹은 현수선 (catenoidal) 형상을 지니고 있으며, 일반적으로 현수선 형태의 혼이 가장 뛰어난 성능을 가지고 있다고 알려져 있다.

상기의 두 가지 형태의 혼을 현장에서 제작하기에는 많은 비용과 노력이 필요하므로, 원뿔 (conical) 형태의 혼으로 이를 대체하는 경우가 많으며 이 때는 원뿔 혼의 길이와 직경의 선택을 보다 신중하게 해야 한다.

본 연구에서 채택한 원뿔 형태의 혼은 그림 4와 같으며, 이의 음향 전달 행렬은 식(1)의 혼 방정식 (Horn equation)⁶을 이용하면 식(2)와 같이 유도될 수 있다.

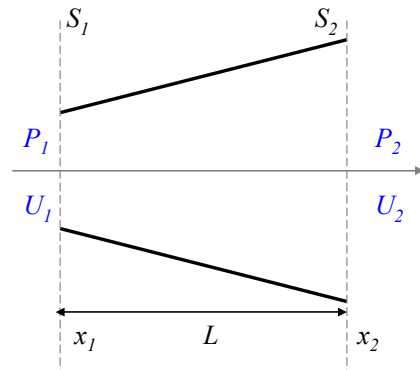


FIG. 4. Longitudinal cross-section of conical duct.

$$\frac{d^2 p(x)}{dx^2} + \frac{1}{S(x)} \frac{dS(x)}{dx} \frac{dp(x)}{dx} + k^2 p(x) = 0. \quad (1)$$

여기서, S 는 덕트 내 단면적, p 는 음압, k 는 파수, 그리고 x 는 길이방향 좌표를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서, 전달 행렬의 각 요소는 다음과 같이 구해진다:

$$T_{11} = m \cos kL - \frac{m-1}{kL} \sin kL, \quad (3.1)$$

$$T_{12} = \frac{j\rho c}{S_2} m \sin kL, \quad (3.2)$$

$$T_{21} = \frac{jS_1}{\rho c} \left\{ \left(m + \left(\frac{m-1}{kL} \right)^2 \right) \sin kL - \frac{(m-1)^2}{kL} \cos kL \right\}. \quad (3.3)$$

$$T_{22} = \frac{1}{m} \left(\frac{m-1}{kL} \sin kL + \cos kL \right). \quad (3.4)$$

단, m 은 면적비, $\sqrt{S_2/S_1}$ 을 나타낸다. 오른쪽 면을 끝단으로 가정하였고, 방사 임피던스는 Levine and Schwinger 의 근사식⁷을 사용하였다.

3. 다구찌 방법의 적용

그림 4 에 나타난 원뿔 형태의 무반사 종단 입구 (내부 지름 46.2 mm)에서의 20~1 kHz 대역 내의 주파수 평균화된 반사계수 값을 출력으로 정했다. 반사계수의 크기가 작을수록 좋은 성능의 무반사 종단이므로, 다구찌 방법 중 망소특성을 사용하였다. 다구찌 방법의 모든 계산은 MINITAB ver.14 을 이용하여 이루어졌다.

제어인자는 입/출구의 면적비 (A) 및 덕트의 길이 (B), 그리고 잡음 인자는 온도로 정하였으며 각각의 인자 수준은 표 1 에 나타냈다. 2 단계의 덕트 내부 온도 (18 °C 및 300 °C)가 잡음인자로 설정되었다.

TABLE 1. Factor levels in Taguchi method.

No.	A: area ratio	B: length (m)
1	3	0.50
2	6	0.75
3	9	1.00
4	12	1.25
5	15	1.50

본 연구에서 사용된 직교 배열표, $L_{25}(5^2)$ 는 표 2 와 같다.

TABLE 2. Table of orthogonal arrays.

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	A	B			SNRA1	STDE1	평균1
1	1	1	0.822361	0.890840	1.33760	0.0484214	0.856600
2	1	2	0.823491	0.891539	1.32834	0.0481171	0.857515
3	1	3	0.823837	0.891825	1.32515	0.0480748	0.857831
4	1	4	0.824035	0.891949	1.32354	0.0480222	0.857992
5	1	5	0.824135	0.892032	1.32262	0.0480103	0.858084
6	2	1	0.670123	0.735055	3.05671	0.0459136	0.702589
7	2	2	0.672876	0.737936	3.02199	0.0460044	0.705406
8	2	3	0.673684	0.738791	3.01177	0.0460372	0.706237
9	2	4	0.674191	0.739354	3.00519	0.0460776	0.706773
10	2	5	0.674458	0.739619	3.00193	0.0460759	0.707038
11	3	1	0.647586	0.662022	3.67725	0.0102081	0.654804
12	3	2	0.648681	0.663945	3.65786	0.0107229	0.656263
13	3	3	0.649267	0.664434	3.64936	0.0107111	0.656361
14	3	4	0.649736	0.665147	3.64226	0.0108976	0.657441
15	3	5	0.650004	0.665413	3.63874	0.0108963	0.657708
16	4	1	0.672165	0.653475	3.57122	0.0132156	0.662820
17	4	2	0.668579	0.649238	3.62256	0.0136766	0.658909
18	4	3	0.668387	0.648698	3.62736	0.0139222	0.658542
19	4	4	0.668540	0.649127	3.62354	0.0137298	0.658634
20	4	5	0.668683	0.649228	3.62193	0.0137568	0.658695
21	5	1	0.710383	0.649228	3.34353	0.0432434	0.679806
22	5	2	0.698856	0.661474	3.34443	0.0264330	0.680165
23	5	3	0.697284	0.658925	3.37060	0.0271238	0.678104
24	5	4	0.696918	0.658644	3.37475	0.0270639	0.677781
25	5	5	0.696815	0.658418	3.37684	0.0271507	0.677616

다구찌 방법을 적용하면, 신호대 잡음 비의 주효과도 및 평균의 주효과도가 다음과 같이 구해진다:

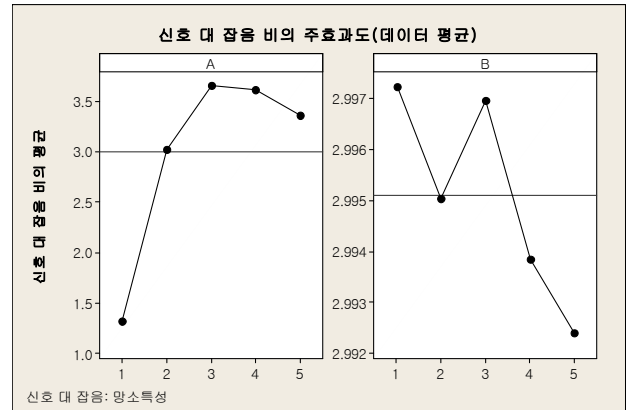


FIG. 5. Main effects plot for S/N ratios.

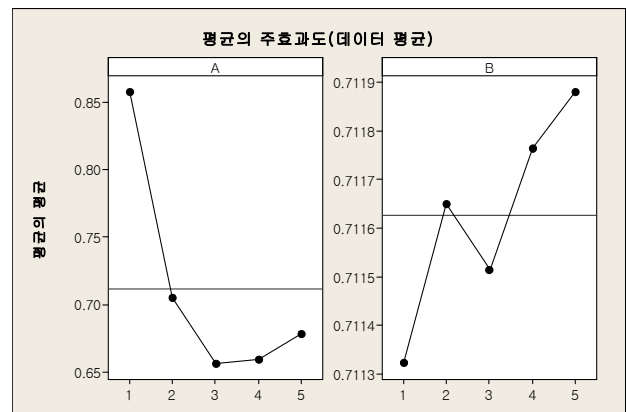


FIG. 6. Main effects plot for Means.

그림 5 를 보면, 온도가 잡음인자로 작용할 때, A1 (면적비 = 3)이 가장 잡음에 강건한 결과를 주고 있다. 하지만, 그림 6 을 보면, 주파수 평균화된 반사계수의 값이 A1 일 때, 0.85 를 넘는 매우 큰 값을 나타내고 있으며, A3 (면적비 = 9)일 때, 가장 작은 값을 나타내고 있다. 상기의 결과가 의미하는 바는 전달 손실의 측정이 온도가 일정하게 유지되는 실험실 환경에서 이루어진다면, 무반사 종단은 면적비가 9 (A3)일 때, 가장 좋은 성능을 나타낸다는 것과 실제 차량 배기 시스템과 소음기가 함께 장착된 상태 (온도가 안정되게 유지되지 못하는 경우) 에서 전달 손실을 측정할 때에는 면적비가 3 (A1)인 경우를 선택하는 편이 보다 잡음에 강건한 결과를 얻는다는 것이다. 특히, 후자는 엔진 실제 작동온도에서 소음기의 전달 손실과 전달 행렬을 동시에 구하는 시험을 수행할 때 유용할

것이다.

그림 5와 6에 따르면, 무반사 종단의 길이는 잡음에 대한 영향이나 평균값에 큰 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 하지만, 이는 무반사 종단 내부에 흡음재를 채우지 않았을 때 얻어진 결과이다. 일반적으로 흡음재의 절대량이 많으면 많을수록 중고주파수 대역 흡음에 유리하므로, 무반사 종단의 길이를 최대한 길게 하여 흡음재 장착량을 많이 하는 것이 보다 좋은 성능을 지닌 무반사 종단을 제작하는 방법 일 것이다. 아래 그림은 그림 5와 6의 결과에 따라 가장 우수한 결과 (A3,B5)와 가장 열등한 결과 (A1, B5)을 비교한 결과이다.

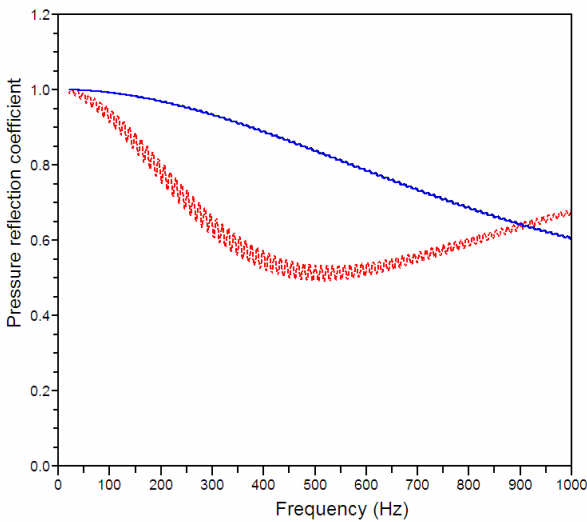


FIG. 7. Pressure reflection coefficient at the inlet of semi-anechoic termination: solid line; (A1, B5) and dotted line; (A3, B5).

4. 결론

본 연구의 목적은 원뿔 모양의 무반사 종단을 다구찌 방법을 사용하여 보다 효과적으로 설계하는 방법을 제시하는 것이다. 상기의 해석을 통하여 무반사 종단의 주파수 평균화된 반사계수는 면적비에 대하여 부분 극소값을 가짐을 보였다. 본 연구에서는 끝단에서의 방사 임피던스로 Levine 과 Schiwinger 이 제시한 저주파 근사식을 사용하였는데, 향후에는 넓은 주파수 대역에서 유효한 방사 임피던스를 이용함으로써 고주파수 영역에서도 보다 유용한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) J. Y. Chung and D. A. Blaser, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties, 1: Theory," J. Acoust. Soc. Am, 68, 907-913 (1980).
- (2) A. F. Seybert, "Two-sensor methods for the measurement of sound intensity and acoustic properties in ducts," J. Acoust. Soc. Am, 83, 2233-2239 (1988).
- (3) M. L. Munjal and A. G. Doige, "Theory of a two source-location method for direct experimental evaluation of the four-pole parameters of an aeroacoustic element," J. Sound. Vib. 141, 323-333 (1990).
- (4) T. Y. Lung and A. G. Doige, "A time-averaging transient testing method for acoustic properties of piping systems and mufflers," J. Acoust. Soc. Am. 73, 867-876 (1983).
- (5) 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).
- (6) M. L. Munjal, *Acoustics of ducts and mufflers*, New York: Wiley-Interscience (1987).
- (7) M. Levine and J. Schwinger, "On the radiation of sound from an unflanged circular pipe," Phys. Rev., 73 383-406 (1948).