

# 단순확장관 내부 파티션 위치에 따른 음향투과손실 계산식의 개발

## Development of a Formula for Acoustic Transmission Loss According to Partition Positions in a Simple Expansion Chamber

박 정 필\* · 배 경 원\* · 정 의 봉† · 안 세 진\*\*

Jeong-Pil Park, Kyeong-Won Bae, Weui-Bong Jeong and Se-Jin Ahn

(Received December 12, 2014 ; Revised January 21, 2015 ; Accepted January 27, 2015)

**Key Words** : Simple Expansion Chamber(단순확장관), Silencer(소음기), Transmission Loss(투과손실), Internal Partition(내부 파티션), Least Square Estimation(최소자승법)

### ABSTRACT

This paper proposed a new formula for predicting acoustic power transmission loss of simple expansion chamber with two internal partitions. Seventeen cases of computational results were performed and the database was constructed for the TL according to the various positions of internal partitions. Using this database, firstly, the formula for the peak values of TL at certain frequencies was developed using the least square estimation. Secondly, the formula for the TL curve could be obtained automatically with the input data of the positions of two internal partitions. The formula of TL developed in this paper showed good agreement with computational results. This formula will be helpful for the positioning of internal partitions to improve TL at target frequencies.

### 1. 서 론

자동차, 증장비 및 건설 기계 등에서 발생하는 배기소음을 줄이기 위해서, 배기계에 소음기(silencer)를 설치한다.

소음기의 성능을 평가하는 방법은 대표적으로 삽입손실(insertion loss)과 투과손실(transmission loss)이 있다<sup>(1)</sup>. 삽입손실은 음원과 소음기의 특성을 동시에 고려한 평가 방법이고, 투과손실은 소음기만의 고유한 특성을 평가하는 방법이다. 소음기의 투과손실 성능에 관한 연구로 Kim<sup>(2)</sup>이 소음기의 입·출구

위치와 단면의 크기가 투과손실에 미치는 영향을 조사하였으며, Park<sup>(3)</sup>이 내부 파티션의 위치와 개수가 투과손실에 미치는 영향을 조사하였다. 그리고 Kwon<sup>(4)</sup>은 유동속도가 투과손실에 미치는 영향을 조사하였다. 그러나 3차원 음향전산해석을 통한 머플러의 투과손실 예측은 모델마다 새로운 메시(mesh)를 생성하여 해석을 해야 하기 때문에 많은 시간이 필요하므로 간편한 계산식에 의한 효율적이고 빠른 투과손실 예측법이 필요하다.

이 연구에서는 소음기의 특성으로 투과손실을 사용하여 소음기의 성능을 평가하고자 한다. Lee<sup>(5)</sup>가 연구한 건설장비용 머플러를 이 논문의 머플러 모델

† Corresponding Author ; Member, School of Mechanical Engineering, Pusan National University

E-mail : wbjeong@pusan.ac.kr  
Tel : +82-51-510-2337, Fax : +82-51-517-3805

\* Graduate School of Mechanical Engineering, Pusan National University

\*\* Member, School of Mechanical&Electrical Engineering, Uiduk University

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2014 Annual Autumn Conference

‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

외형 크기로 정하였으며, 소음기의 전체 길이와 단면적은 일정하게 유지하는 것으로 가정한다. 머플러의 내부는 단순확장관(simple expansion chamber)으로 단순화하고 2개의 내부 파티션이 삽입되어 있다. 그리고 내부 파티션 위치에 따른 투과손실 해석결과들을 데이터베이스화시켜 내부 파티션 위치에 따른 투과손실을 빠르고 효율적으로 추정할 수 있는 계산식을 도출하는 것이 목적이다.

## 2. 소음기 성능 평가

### 2.1 음향파워 투과손실

소음기의 성능을 측정하기 위한 구성도는 Fig. 1 과 같다. 입구에  $x_{12}$ 의 간격으로 2개의 마이크로폰을 설치하고 출구에는 1개의 마이크로폰을 설치한다. 소음기의 출구에 무반사단을 연결한다.

3개의 지점에 설치된 마이크로폰에서 측정된 음압의 파워스펙트럼을  $S_{11}$ ,  $S_{22}$ ,  $S_{33}$  이라 하고, 1번과 2번 위치에서 측정된 음압의 상호스펙트럼을  $S_{12} = C_{12} + jD_{12}$  라 한다. 이 값들을 이용해 진행파의 파워스펙트럼  $S_{AA}$ 와 반사파의 파워스펙트럼  $S_{BB}$ 을 다음 식으로 나타낼 수 있다<sup>(6,7)</sup>.

$$S_{AA} = \frac{S_{11} + S_{22} - 2C_{12}\cos kx_{12} + 2Q_{12}\sin kx_{12}}{4\sin^2 kx_{12}} \tag{1}$$

$$S_{BB} = \frac{S_{11} + S_{22} - 2C_{12}\cos kx_{12} - 2Q_{12}\sin kx_{12}}{4\sin^2 kx_{12}} \tag{2}$$

출구단에 무반사단을 연결하였으므로 3번 마이크로폰에서 측정한 음압의 파워스펙트럼  $S_{33}$ 은 투과음의 파워스펙트럼이다.

입사파의 음향파워  $W_i$ 와 투과파의 음향파워  $W_t$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$W_i = \frac{|p_i|^2}{2\rho c} A_i, \quad W_t = \frac{|p_t|^2}{2\rho c} A_o \tag{3}$$

여기서  $p_i$ 는 입사파음압,  $p_t$ 는 투과파음압이고,  $A_i$ 와  $A_o$ 는 입출구 단면적이며  $\rho c$ 는 공기의 임피던스이다.

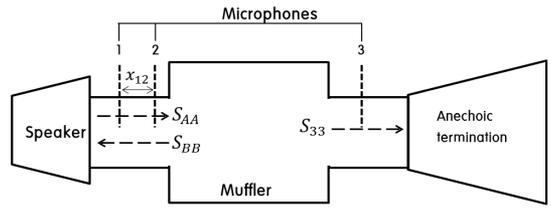


Fig. 1 Model concept

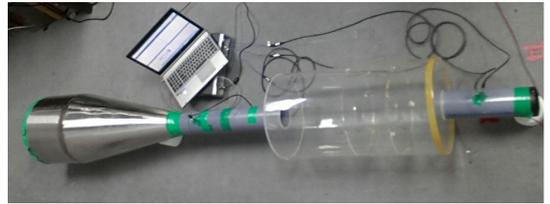


Fig. 2 Experimental setup for the measurement of TL

음향파워 투과손실(TL)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

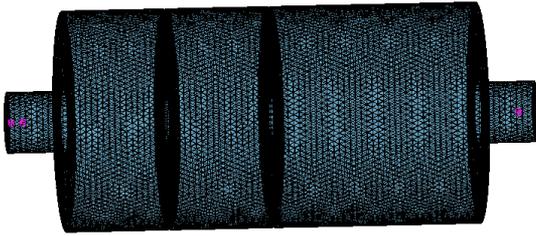
$$TL = 10\log_{10} \frac{W_i}{W_t} = 10\log_{10} \left| \frac{S_{AA}}{S_{33}} \right| + 10\log_{10} \frac{A_i}{A_o} \quad [\text{dB}] \tag{4}$$

### 2.2 실험과 해석의 검증

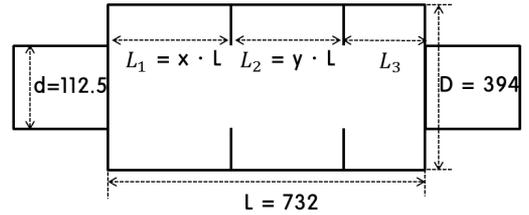
이 논문에서 실험 및 해석을 위한 모델의 제원은 다음과 같다. 단순확장관의 길이  $L=732$  mm, 확장관 지름  $D=394$  mm, 입·출구단의 지름  $d=112.5$  mm. 내부에 삽입된 2개의 파티션의 구멍의 지름은 입·출구의 지름과 동일한 112.5 mm이다. Fig. 1과 동일하게 입구에는 0.2 m의 간격을 가지는 2개의 마이크로폰을 설치하고 출구에는 1개의 마이크로폰을 설치한다. 입구단에 설치된 스피커에서는 백색잡음을 생성하고 출구단에는 무반사단을 적용하였다. Fig. 2는 머플러의 투과손실 성능을 측정하는 실험 사진이다.

전산해석은 실험과 동일한 조건으로 진행하였다. 음향해석 소프트웨어인 LMS. Sysnoise를 사용하여 전산 해석을 진행하였으며, Fig. 3은 model 2:2:4의 모델링을 나타낸다. 모델의 mesh 개수는 약 18만개이다.

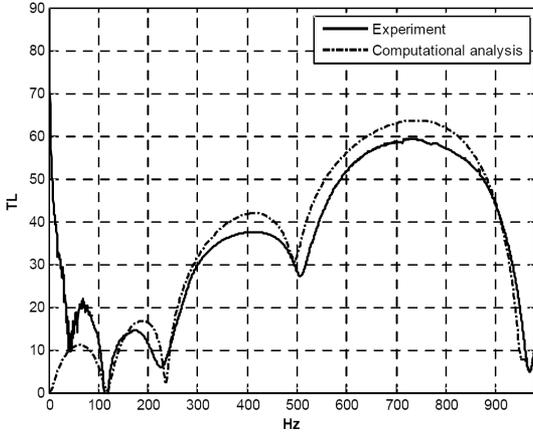
신뢰성을 검증하기 위해 실험과 전산해석을 비교



**Fig. 3** Modeling of the model 2:2:4 for computer analysis



**Fig. 5** Model geometry



**Fig. 4** TL comparison with experiment and computer analysis(model 2:2:4)

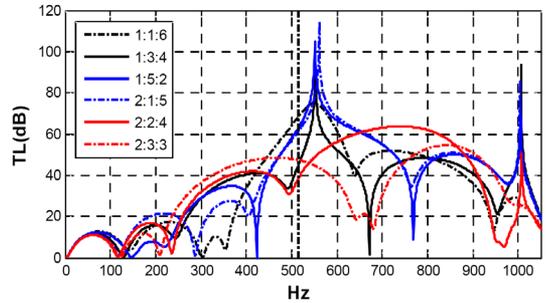
한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 전산해석을 통한 투과손실 결과가 실험의 경향을 잘 표현하고 있으므로 이 논문에서는 해석한 투과손실 결과로 진행하였다.

### 3. 투과손실 예상 곡선 제작 원리

#### 3.1 해석 모델

건설장비용 머플러를 Fig. 5와 같이 단순화하였다. 모델의 길이 및 지름은 2.2절의 모델과 동일하며, 단순화장관의 입구단 공간의 길이  $L_1 = x \cdot L$ 과 가운데 공간의 길이  $L_2 = y \cdot L$ 와 출구단 공간의 길이  $L_3 = (1-x-y) \cdot L$ 는 길이 L과의 길이비로 정의한다. 그리고 파티션 길이  $L_1, L_2$ 에 따른 투과손실 특성을 분석하였다.

이 논문에서는 길이비율  $L_1 : L_2 : L_3$ 로 모델을 구별하였다. 해석 결과를 비교한 결과, 길이  $L_1$ 과  $L_3$



**Fig. 6** Numerical results of TL according to partition position

이 바뀐 모델의 투과손실 성능이 같다는 것을 확인하였다. 예를 들면 3:3:2 모델과 2:3:3의 모델의 투과손실 성능은 같다. 투과손실 데이터베이스를 구성하기 위해서 17가지의 모델(1:1:6, 1:2:5, 1:3:4, 1:4:3, 1:5:2, 1:6:1, 2:1:5, 2:2:4, 2:3:3, 2:4:2, 3:1:4, 3:2:3, 3:3:2, 3:4:1, 4:1:3, 4:2:2, 4:3:1)에 대하여 전산 해석을 수행하였다.

#### 3.2 투과손실 해석

파티션 위치 변경에 따른 17가지 모델 중 몇 개의 모델에 대한 투과손실 해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 여기서 평면파가 성립하는 차단주파수,  $f_c$ 를 구하면 다음과 같다.

$$f_c = \frac{c}{1.7D} = 507.6 \text{ Hz} \quad (5)$$

Fig. 6에서 차단주파수 이내의 주파수 범위에서 TL특성 형태가 일관성이 있음을 알 수 있다. 따라서 이 논문에서는 2번째 최대 TL값을 포함하는 300 Hz까지를 해석주파수 범위로 설정하였다.

$L_1 : L_2 : L_3 = 1:2:5$ 인 모델에 대한 투과손실 해석 예를 Fig. 7에 나타낸다. Fig. 7에서 투과손실의 최대

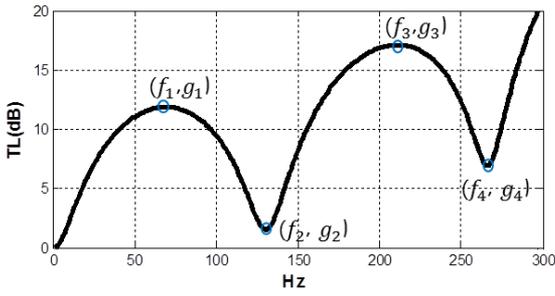


Fig. 7 Symbols representing max and min points in TL curve

값을 가지는 점을  $(f_1, g_1)$ 와  $(f_3, g_3)$ 라 한다. 또한, 최소값의 투과손실을 가지는 점을  $(f_2, g_2)$ ,  $(f_4, g_4)$ 라 한다. 파티션 위치를 다양하게 변화시킨 17종류의 모델에 대한 투과손실값  $g_{ij} = g_i(x_j, y_j)$ ,  $j = 1 \sim 17$ 을 Table 1에 나타냈으며, 대응하는 주파수  $f_{ij} = f_i(x_j, y_j)$ 를 Table 2에 나타냈다. 여기서  $i$ 는 Fig. 7에 나타난 점의 위치,  $j$ 는 17종류의 모델번호를 나타낸다.

3.3 내부 파티션과 투과손실의 관계

단순확장관의 전체 길이(L)와 단면적은 변하지 않는다고 가정하였으며, 투과손실은 앞부분 공간의 길이의 비(x)와 가운데 공간의 길이의 비(y)의 함수로 가정한다.

내부 파티션의 위치와 투과손실의 관계를 파악하기 위해, 여러 개의 모델 중 j번째 모델의 길이 비인 변수(x, y)에 의해 투과손실  $g_i(x, y)$ 과 주파수  $f_i(x, y)$ 가 변하는 특징을 함수화시켜 다음 식으로 표현했다.

$$g_i(x, y) = c_{1i} + c_{2i}x + c_{3i}y + c_{4i}x^2 + c_{5i}xy + c_{6i}y^2 + c_{7i}x^3 + c_{8i}x^2y + c_{9i}xy^2 + c_{10i}y^3 \quad (6)$$

$i = 1 \sim 4$

$$f_i(x, y) = d_{1i} + d_{2i}x + d_{3i}y + d_{4i}x^2 + d_{5i}xy + d_{6i}y^2 + d_{7i}x^3 + d_{8i}x^2y + d_{9i}xy^2 + d_{10i}y^3 \quad (7)$$

$i = 1 \sim 4$

Table 1과 Table 2에서 제시한 17종류의 모델의 길이 비  $(x_j, y_j)$ 와  $g_i(x_j, y_j)$ ,  $f_i(x_j, y_j)$ ,  $j = 1 \sim 17$ 를 이용하여 식 (6), (7)을 행렬식으로 표현하면 다음 식 (8)과 같다.

Table 1 Value of  $TL_{max}$  and  $TL_{min}$  according to the partition locations

Model	j	$x_j$	$y_j$	$g_{1j}$	$g_{2j}$	$g_{3j}$	$g_{4j}$
1:1:6	1	1/8	1/8	12.59	3.44	17.29	0.19
1:2:5	2	1/8	2/8	11.89	1.56	17.15	6.98
1:3:4	3	1/8	3/8	11.72	0.32	15.77	9.5
1:4:3	4	1/8	4/8	11.85	0	12.94	8.77
1:5:2	5	1/8	5/8	12.33	0.32	7.83	5.12
1:6:1	6	1/8	6/8	13.35	0	1.53	0
2:1:5	7	2/8	1/8	11.36	1.48	21.51	0.28
2:2:4	8	2/8	2/8	11.07	0.5	16.79	1.88
2:3:3	9	2/8	3/8	11.13	0.06	11.84	1.24
2:4:2	10	2/8	4/8	11.55	0	7	0.01
3:1:4	11	3/8	1/8	10.92	0.17	23.54	0.12
3:2:3	12	3/8	2/8	10.78	0.01	17.08	0.03
3:3:2	13	3/8	3/8	11.13	0.06	11.84	1.24
3:4:1	14	3/8	4/8	11.85	0	12.94	8.77
4:1:3	15	4/8	1/8	10.92	0.17	23.54	0.12
4:2:2	16	4/8	2/8	11.07	0.5	16.79	1.88
4:3:1	17	4/8	3/8	11.72	0.32	15.77	9.5

Table 2 Frequencies at which  $TL_{max}$  or  $TL_{min}$  occur according to the partition locations

Model	j	$x_j$	$y_j$	$f_{1j}$	$f_{2j}$	$f_{3j}$	$f_{4j}$
1:1:6	1	1/8	1/8	75	142	229	302
1:2:5	2	1/8	2/8	69	130	211	266
1:3:4	3	1/8	3/8	68	128	200	244
1:4:3	4	1/8	4/8	69	133	193	229
1:5:2	5	1/8	5/8	74	147	192	220
1:6:1	6	1/8	6/8	84	180	205	227
2:1:5	7	2/8	1/8	64	119	220	288
2:2:4	8	2/8	2/8	62	117	189	236
2:3:3	9	2/8	3/8	63	121	174	209
2:4:2	10	2/8	4/8	67	133	171	200
3:1:4	11	3/8	1/8	61	111	219	286
3:2:3	12	3/8	2/8	60	112	184	229
3:3:2	13	3/8	3/8	63	121	174	209
3:4:1	14	3/8	4/8	69	133	193	229
4:1:3	15	4/8	1/8	61	111	219	286
4:2:2	16	4/8	2/8	62	117	189	236
4:3:1	17	4/8	3/8	68	128	200	244

$$[T]\{C_i\} = \{G_i\}, [T]\{D_i\} = \{F_i\} \quad i = 1 \sim 4 \quad (8)$$

단,

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & x_1^3 & x_1^2 y_1 & x_1 y_1^2 & y_1^3 \\ & & & & & \vdots & & & & \\ 1 & x_{17} & y_{17} & x_{17}^2 & x_{17} y_{17} & y_{17}^2 & x_{17}^3 & x_{17}^2 y_{17} & x_{17} y_{17}^2 & y_{17}^3 \end{bmatrix}$$

$$\{C_i\}^T = [c_{1i} \ c_{2i} \ \dots \ c_{10i}], \quad \{D_i\}^T = [d_{1i} \ d_{2i} \ \dots \ d_{10i}]$$

$$\{G_i\}^T = [g_{i1} \ g_{i2} \ \dots \ g_{i17}], \quad \{F_i\}^T = [f_{i1} \ f_{i2} \ \dots \ f_{i17}] \quad (9)$$

여기서 17개의 모델에 대한 파티션 위치 행렬  $[T]$ 는  $[17 \times 10]$ , 미지수 벡터  $\{C_i\}$ 와  $\{D_i\}$ 는  $[10 \times 1]$ , 벡터  $\{G_i\}$ 와  $\{F_i\}$ 는  $g_{ij} = g_i(x_j, y_j)$ 와  $f_{ij} = f_i(x_j, y_j)$ 를 나타내는  $[17 \times 1]$  벡터이다.

예측 오차의 제곱식은 다음과 같다.

$$e_i^2 = \sum_{j=1}^{17} \left( \sum_{k=1}^{10} (T_{jk} c_{ki} - g_{ki}) \right)^2 \quad i = 1 \sim 4 \quad (10)$$

식(10)의 오차제곱을 최소화하는 계수  $\{C_i\}$ 와  $\{D_i\}$ 는 다음과 같다.

$$\{C_i\} = ([T]^T [T])^{-1} [T]^T \{G_i\}$$

$$\{D_i\} = ([T]^T [T])^{-1} [T]^T \{F_i\} \quad (11)$$

최소제곱법을 적용하여 구한 식(11)의 미지수 벡터  $\{C_i\}$ 와  $\{D_i\}$ 는 Table 3과 Table 4와 같다. 미지수 벡터  $\{C_i\}, \{D_i\}$ ,  $i=1\sim 4$ 를 구하였으므로, 변수( $x, y$ )와  $g_i, f_i$ 의 관계를 함수화하여 특징을 파악하고자 고 볼 수 있다.

임의의 길이 비  $x=L_1/L, y=L_2/L$ 값과 Table 3과 Table 4에서 구한 계수를 이용하여 식(6)과 식(7)에 대입하면, 길이 비 ( $x, y$ )에 따른 투과손실의 최대 및 최소값과 그 때의 주파수 ( $g_i(x, y), f_i(x, y), i=1\sim 4$ )를 예측할 수 있다.

### 3.4 투과손실 곡선 계산과정

앞의 과정을 통해 전체길이( $L$ )에 대한 파티션의 길이 비율인  $x$ 와  $y$ 값을 결정하면 투과손실 곡선의 최대 및 최소값과 그 때의 주파수를 예측할 수 있다. 투과손실 성능 예상 곡선을 4개의 구간으로 나누어 다음 식(12)와 같이 가정하였다. 구간에 대한

**Table 3** Coefficients of polynomials for determining value of TL given in Table 1

Coefficient	$g_1$	$g_2$	$g_3$	$g_4$
Scale	1.0	1.0	$1.0 \times 10^2$	$1.0 \times 10^2$
$c_{1i}$	15.68	11.76	-0.01	-0.26
$c_{2i}$	-27.78	-56.84	1.72	1.44
$c_{3i}$	-15.61	-71.56	1.95	3.77
$c_{4i}$	48.17	52.56	0	-0.12
$c_{5i}$	32.5	274.82	-18.17	-23.19
$c_{6i}$	19.97	137.29	-3.45	-7.06
$c_{7i}$	-16.67	43.64	-5.29	-4.29
$c_{8i}$	-6.54	-228.83	22.28	30.12
$c_{9i}$	10.04	-285.03	18.78	26.34
$c_{10i}$	3.19	-84.33	0.8	2.98

**Table 4** Coefficients of polynomials for determining frequencies given in Table 2

Coefficient	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$
scale	$1.0 \times 10^2$	$1.0 \times 10^2$	$1.0 \times 10^2$	$1.0 \times 10^3$
$d_{1i}$	1.03	2	2.26	0.32
$d_{2i}$	-2.65	-5.46	1.71	0.18
$d_{3i}$	-1.34	-3.23	3.15	0.15
$d_{4i}$	5.22	6.87	4.28	0.63
$d_{5i}$	3.57	17.15	-60.31	-7.8
$d_{6i}$	1.54	2.09	-8.31	-0.51
$d_{7i}$	-2.7	2.63	-13.33	-1.73
$d_{8i}$	-1.96	-17.4	76.06	9.84
$d_{9i}$	0.19	-8.68	76.25	10
$d_{10i}$	0.68	5.13	5.79	0.18

**Table 5** Information of value in frequency range in Eq. (12)

Frequency range	$f_p$	$g_p$	$f_q$	$g_q$
$0 \sim f_1$	$f_1$	$g_1$	0	0
$f_1 \sim f_2$	$f_1$	$g_1$	$f_2$	$g_2$
$f_2 \sim f_3$	$f_3$	$g_3$	$f_2$	$g_2$
$f_3 \sim f_4$	$f_3$	$g_3$	$f_4$	$g_4$

정보는 Table 5에 나타내었다.

$$TL(f_i) = a|f_i - f_p|^n + g_p \quad (12)$$

단,

$$a = \frac{g_q - g_p}{|f_q - f_p|^n}$$

여기서 주파수  $f = f_p$  에서 TL은 최대값  $g_p$  를 가지며, 주파수  $f = f_q$  에서 TL은 최소값  $g_q$  를 갖는다. 식 (12)에서 좌변과 우변 오차의 log스케일을 주파수  $f_i$  마다 나타내면 다음과 같다.

$$\left[ \log\left(\frac{|f_i - f_p|}{|f_q - f_p|}\right) \right] n = \left[ \log\left(\frac{g_p - TL(f_i)}{g_p - g_q}\right) \right] \quad (13)$$

또는 간단히 표현하면 다음과 같다.

$$[A]n = [B] \quad (14)$$

예측 오차의 제곱을 최소화하도록 최소제곱법을 적용하면 식 (12)의 차수  $n$  은 다음과 같이 구해진다.

$$\{n_i\} = ([A]^T[A])^{-1}[A]^T[B] \quad (15)$$

이러한 방법으로 17개에 모델의 구간마다의 차수를 구하였으며, Table 6에 나타내었다. 여기서  $\{n_{ij}\}$  는 주파수  $i$  구간에서  $j$  번째 모델에 대한 차수를 의미한다.

내부 파티션의 위치( $x, y$ )에 따른 차수  $n$  을 계산할 수 있는 보간식은 다음과 같이 표현하였다.

$$n_i(x, y) = N_{1i} + N_{2i}x + N_{3i}y + N_{4i}x^2 + N_{5i}xy + N_{6i}y^2 + N_{7i}x^3 + N_{8i}x^2y + N_{9i}xy^2 + N_{10i}y^3 \quad (16)$$

$i = 1 \sim 4$

17종류의 모델에 대하여 식 (16)을 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$[T]\{N_i\} = \{n_i\}, \quad i = 1 \sim 4 \quad (17)$$

단,

$$\{N_i\}^T = [N_{1i} \ N_{2i} \ \dots \ N_{10i}]$$

$$\{n_i\}^T = [n_{i1} \ n_{i2} \ \dots \ n_{i17}]$$

$$[T] = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1y_1 & y_1^2 & x_1^3 & x_1^2y_1 & x_1y_1^2 & y_1^3 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_{17} & y_{17} & x_{17}^2 & x_{17}y_{17} & y_{17}^2 & x_{17}^3 & x_{17}^2y_{17} & x_{17}y_{17}^2 & y_{17}^3 \end{bmatrix}$$

**Table 6** Value of the order according to the partition locations

Model	$j$	$x_j$	$y_j$	$n_{1j}$	$n_{2j}$	$n_{3j}$	$n_{4j}$
1:1:6	1	1/8	1/8	2.0244	2.1372	1.8824	2.303
1:2:5	2	1/8	2/8	2.0266	2.1276	1.9207	2.1463
1:3:4	3	1/8	3/8	2.1344	2.0733	1.9026	2.006
1:4:3	4	1/8	4/8	2.0538	2.1203	1.7843	2.1441
1:5:2	5	1/8	5/8	2.1987	2.004	1.7081	1.7273
1:6:1	6	1/8	6/8	2.158	1.9679	1.4093	1.6704
2:1:5	7	2/8	1/8	1.958	2.2381	2.0492	2.425
2:2:4	8	2/8	2/8	1.9658	2.1959	1.8705	2.426
2:3:3	9	2/8	3/8	2.0117	2.1189	1.8077	2.1602
2:4:2	10	2/8	4/8	2.0825	2.0286	1.5667	2.1094
3:1:4	11	3/8	1/8	2.0922	2.0933	2.0155	2.6269
3:2:3	12	3/8	2/8	2.0023	2.1359	1.9186	2.4163
3:3:2	13	3/8	3/8	2.0117	2.1189	1.8077	2.1602
3:4:1	14	3/8	4/8	2.0538	2.1203	1.7843	2.1441
4:1:3	15	4/8	1/8	2.0922	2.0933	2.0155	2.6269
4:2:2	16	4/8	2/8	1.9658	2.1959	1.8705	2.426
4:3:1	17	4/8	3/8	2.1344	2.0733	1.9026	2.006

**Table 7** Coefficients of polynomials for determining value of order given in Eq. (16)

Coefficient	$N_1$	$N_2$	$N_3$	$N_4$
$N_{1i}$	2.0226	1.9193	1.3886	2.2678
$N_{2i}$	-0.8059	3.9257	4.8606	0.3337
$N_{3i}$	1.1412	0.1644	5.0499	-1.1601
$N_{4i}$	9.5934	-17.2188	0.3519	11.6806
$N_{5i}$	-18.3146	-1.7014	-51.797	2.4783
$N_{6i}$	1.431	-0.755	-5.5913	0.1
$N_{7i}$	-15.0677	19.7189	-20.3369	-18.4078
$N_{8i}$	20.0653	11.7853	78.1936	-32.4943
$N_{9i}$	20.8558	-5.4453	40.4435	10.7023
$N_{10i}$	-4.0052	0.8245	-2.2569	-2.4091

예측 오차의 제곱을 최소화하도록 최소제곱법을 적용하면 계수벡터  $\{N_i\}$  는 다음과 같이 표현된다.

$$\{N_i\} = ([T]^T[T])^{-1}[T]^T\{n_i\} \quad (18)$$

식 (18)에서 구한 미지수 벡터  $\{N_i\}$  을 Table 7에

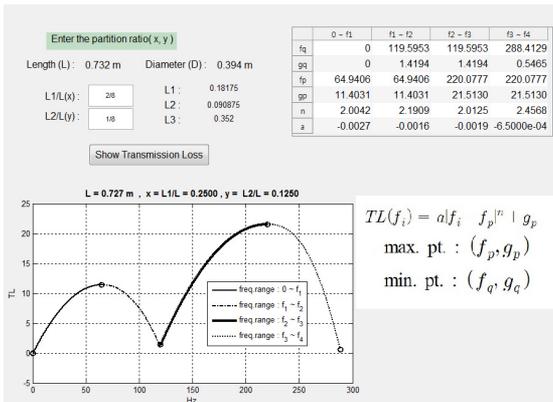


Fig. 8 GUI for the estimation of TL curve(2:1:5 model)

### 4. 결과 및 비교

#### 4.1 GUI 개발

내부에 두 개의 파티션이 있는 단순확장관의 모델들을 해석하여 얻은 결과를 바탕으로 내부 파티션 길이의 비만을 이용하여 투과손실의 최대 및 최소점  $(f_1, g_1)$ ,  $(f_2, g_2)$ ,  $(f_3, g_3)$ ,  $(f_4, g_4)$ 을 예상하는 계산식을 개발하였다. 그리고 원점, 최대 및 최소점 중 이웃한 2점을 잇는 곡선의 방정식도 개발하였다. 이로써 컴퓨터 해석을 하지 않고 내부 파티션 길이 비를 이용하여 투과손실 성능을 예측할 수 있는 계산식을 개발하였다. 이 논문에서 개발한 계산식을 바탕으로 만든 GUI를 이용해 내부 파티션의 길이 비  $x = 2/8$ ,  $y = 1/8$ 인 모델 2:1:5의 투과손실을 예측한 결과를 Fig. 8에 제시하였다.

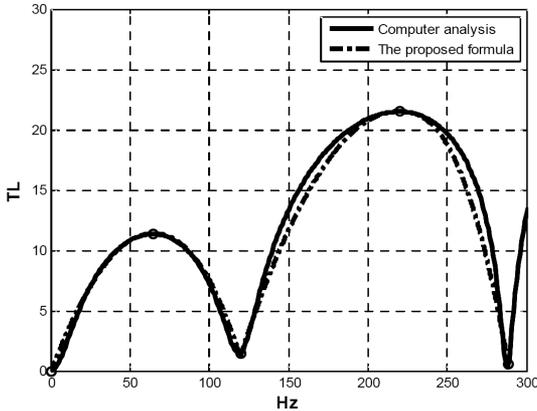


Fig. 9 Comparison of a typical TL curve used for the database(model 2:1:5)

#### 4.2 투과손실 해석과 계산식의 비교

모델 2:1:5를 컴퓨터 해석으로 구한 투과손실과 내부 파티션 길이 비를 이용해 계산식으로부터 구한 투과손실을 Fig. 9에 비교하여 나타내었다. 모델 2:1:5는 계산식을 개발할 때 기초자료로 사용되었던 모델이다.

계산식을 개발할 때 사용하지 않은 모델 1:1:1에 대해서, 컴퓨터 해석으로 구한 투과손실과 내부 파티션 길이 비를 이용하여 계산식으로부터 구한 투과손실의 비교를 Fig. 10에 나타내었다.

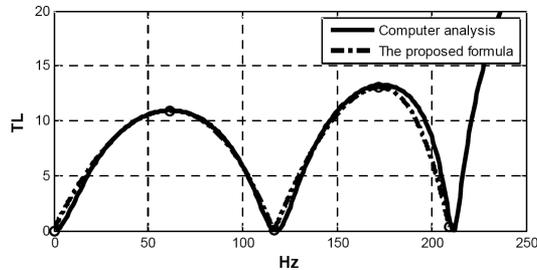


Fig. 10 Validation of TL curve by the proposed formula for arbitrary position of partition(model 1:1:1)

Fig. 9와 Fig. 10의 결과를 비교하면 특징을 잘 따라가며 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 해석을 하지 않고 모델의 내부 파티션의 위치에 따른 길이 비만을 이용해 투과손실 성능을 추정할 수 있는 새로운 계산식이 개발되었음을 확인할 수 있다.

### 5. 결론

이 논문에서는 전산해석에 의한 17가지 경우에 대한 투과손실특성을 기초로 최소제곱 추정법을 이용하여, 단순확장관 내부에 있는 2개의 파티션 위치 변화에 따른 투과손실 측정곡선을 자동으로 예측할 수 있는 계산식을 개발하였다. 개발된 계산식을 이용하면 전산해석을 수행하지 않아도 투과손실을 정

나타내었다. 이상과 같이 파티션 위치변수  $(x, y)$ 가 주어지면 식 (12)에서 TL곡선을 자동으로 예측할 수 있게 되었다.

확히 예측할 수 있음을 확인하였으며, 향후 머플러 설계에 필요한 시간과 비용을 줄이는데 도움이 될 것으로 기대된다.

## References

- (1) Munjal, M. L., 1987, *Acoustics of Ducts and Mufflers*, Wiley-Interscience, New York.
- (2) Kim, B. J., Jeong, W. B. and Hwang, S. M., 1999, Acoustic Analysis of Circular Simple Expansion Chamber with Arbitrary Location and Cross-section Area of Inlet/Outlet, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 9, No. 5, pp. 914~921.
- (3) Park, J. P., Bae, K. W., Jeong, W. B. and Ahn, S. J., 2014, Analysis of Transmission Loss according to Internal Space Partition of Simple Expansion Chamber, *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 520~521.
- (4) Kwon, J., Jeong, W. B. and Hong, J. S., 2012, Effects of Fluid Velocity on Acoustic Transmission Loss of Simple Expansion Chamber, *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 22, No. 10, pp. 994~1002.
- (5) Lee, S. B., Lee, W. T. and Nam, K. H., 2009, Development of a Muffler for the Super Heavymachinery in the 70 Ton Class, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 10, No. 10, pp. 2557~2564.
- (6) Tao, Z. and Seybert, A. F., 2003, A Review of Current Techniques for Measuring Muffler Transmission Loss, *SAE Technical Paper*, No. 01-1653.
- (7) Seybert, A. F., 1988, Two-sensor Methods for the Measurement of Sound Intensity and Acoustic Properties in Ducts, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 83, No. 6, pp. 2233~2239.



**JeongPil Park** received B.S. degrees from in Pusan National University in 2014 and he is currently majoring in noise and vibration in Pusan National University. He especially is interested in Coil Spring.



**KyeongWon Bae** received B.S. degrees from in Pusan National University in 2014 and he is currently majoring in noise and vibration in Pusan National University. He especially is interested in Modal Expansion Method.



**Weuibong Jeong** received B.S. and M.S. degrees from Seoul National University in 1978 and from KAIST in 1980, respectively. He then received his Ph.D. degree from Tokyo Institute of Technology in 1990. Dr. Jeong is currently a professor at the department of mechanical engineering at Pusan National University in Busan, Korea. His research interests are in the area of the measurement and signal processing, finite/boundary element analysis of noise and vibration, fluid-structure interactions and acoustic-structure interactions.



**SeJin Ahn** is received B.S., M.S. and Ph.D. degrees from Pusan National University in 1994, 1996, and 2003, respectively. Dr. Ahn is currently a professor at the department of energy & electricity in Uiduk University. His research interest is in human vibration.