

# 부정형 잔향실의 체적 산출과 체적 불확도 평가

## Calculation and Uncertainty Estimation of the Volume of Reverberation Chamber with Indeterminate Form

서 재 갑\*, 서 상 준\*\*

(Jae-Gap Suh\*, Sang-Joon Suh\*\*)

\*한국표준과학연구원, \*\*유동/음향그룹

(접수일자: 2007년 8월 27일; 수정일자: 2007년 10월 19일; 채택일자: 2007년 11월 8일)

잔향실은 사용 목적과 주어진 공간에 따라 적절한 크기와 형태를 갖도록 설계, 시공된다. 그러나 일반 공작물과는 달리 정확한 설계도에 따른 시공이 어렵기 때문에 완공후에는 실제 치수를 측정하여 체적과 표면적 등을 확인하는 것이 중요하다. 이러한 값들은 잔향실을 이용하여 측정하는 건축재료의 음향특성 계산에 직접 사용될 뿐만 아니라 체적 불확도는 음향특성의 불확도 산출에도 중요한 요소이기 때문에 정확하게 계산하여야 한다.

본 논문에서는 잔향실 완공 후, Total Station으로 각 꼭지점의 좌표를 측정하여 이로부터 잔향실의 체적과 불확도를 산출하는 방법을 제시하였다. 잔향실의 체적을 계산한 결과 설계값과 약 5%의 차이가 나는 것을 확인할 수 있었으며, 잔향실 체적의 확장불확도를 평가한 결과 전체 체적의 약 2% 정도인 것을 확인하였다.

핵심용어: 체적 불확도, 잔향실 체적

투고분야: 건축음향 분야 (7)

A reverberation chamber should be designed and constructed so as to satisfy its purposes and available space. However, it is somewhat difficult to meet the intended design requirements due to various errors from construction process. So, the post-construction measurement of its volume and surface areas is very essential to check the actual volume and volume uncertainty of a reverberation chamber. These values should be carefully calculated and accurately estimated since they are used not only to evaluate the acoustic characteristics of building materials but also to calculate uncertainties for other acoustic characteristics. In this work, the method for the calculation and uncertainty estimation of the volume of a reverberation chamber is presented. To this end, the coordinates of all corners was measured with Total Station after construction. The results showed that the calculated volume of the measured reverberation chamber differs by 5% from the design specification. The expanded volume uncertainty was also estimated to be about 2% of the total calculated volume.

Key words: Source localization, Waveguide invariant parameter, Interference pattern matching, Circle of apollonius, Hyperbola equation

ASK subject classification: Architectural Acoustics (7)

### I. 서론

잔향실은 건축자재의 흡음률과 투과손실을 측정하는 데 사용된다. 이때 흡음률과 투과손실을 계산하는 공식에서 중요한 것 중의 하나가 잔향실의 체적이다.

책임저자: 서 재 갑 (sjg@kriss.re.kr)  
305-600 대전시 유성구 도룡동 1번지 한국표준과학연구원  
(전화: 042-868-5303; 팩스: 042-868-5643)

잔향실의 내부 음장을 확산음장으로 만들어주기 위해 일반적으로 잔향실은 마주보는 두 면이 평행이 되지 않도록 구성한다. 일반적인 잔향실의 형태는 직육면체가 아니라 바닥과 천정이 오각형이며 일부 벽면도 수직이 아니라 경사를 갖고 있는 부정형의 형태를 갖는다. 따라서 부정형으로 된 잔향실의 체적을 구하는 것은 쉽지는 않다.

또한 ISO/IEC 17025:2005 [1]에 따라 잔향실을 이용한 건축자재의 음향특성 시험성적서를 발급할 때에는 측

정 결과의 불확도를 명기하여야 한다. 잔향실을 이용하여 측정된 음향특성 결과의 불확도를 산출하기 위해서는 여러 가지 불확도 요인을 고려하여야 하지만, 그 중에서도 잔향실 체적 불확도는 중요한 요인 중의 하나로서 이의 영향을 무시할 수 없다.

실제로 최근 수행된 잔향실을 이용하여 측정된 건축자재의 흡음률 불확도 평가에서 잔향실 체적 불확도가 전체 불확도에서 차지하는 비율이 주파수에 따라 다소 차이는 있지만 약 50 % 정도가 되는 것을 확인할 수 있었다 [2].

여기서는 바닥과 천장이 5각형으로 이루어져 있고 마주 보는 벽면이 평행하지 않은 부정형으로 이루어진 7면체의 체적을 기하학의 공식을 이용하여 구하는 방법과 체적 불확도를 산출하는 방법에 대해 기술한다.

### II. 잔향실의 구조

바닥과 천장이 5각형으로 이루어져 있고 마주 보는 벽면이 평행하지 않은 부정형 잔향실은 그림 1에서 보는 것과 같다. 이러한 잔향실이라도 일반적으로 출입문 또는 시료 설치 등을 고려하여 한 개 또는 두 개의 벽면은 수직을 이루고 있으나 나머지 벽면은 기울어져 있는 것이 일반적인 형태이며 정재파 형성을 배제하기 위해 바닥과 천장도 평행하지 않게 설계, 시공된다.

이와 같은 잔향실은 총 10개의 꼭지점을 갖는데, 편의상 바닥의 전면 좌측 꼭지점을  $P_0$ 라하고 시계바늘 반대 방향의 꼭지점을 각각  $P_1, P_2, P_3, P_4$ 라 하자. 마찬가지로 천장의 꼭지점도 같은 방법으로  $P_5$ 부터  $P_9$ 까지 번호를 매길 수 있으며, 각 꼭지점  $P_i$ 의 좌표를  $(x_i, y_i, z_i)$ 라고 하자.

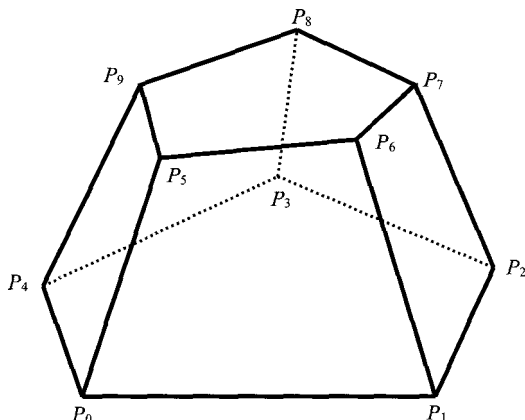


그림 1. 잔향실의 형태 및 각 꼭지점의 좌표  
Fig. 1. Shape of reverberation chamber and coordinates of each corner point.

### III. 사면체의 체적

그림 2와 같이 평면상에 놓이지 않은 4 점  $P_1, P_2, P_3, P_4$ 가 이루는 사면체의 체적  $V_{1234}$ 는 다음 식과 같이 주어진다 [3].

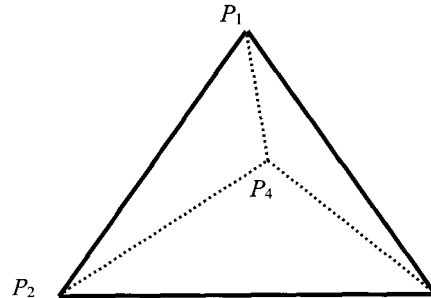


그림 2. 사면체의 꼭지점  
Fig. 2. corner point of tetrahedral.

$$V_{1234} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \\ x_4 & y_4 & z_4 & 1 \end{vmatrix} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 & 0 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 & 0 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 & 0 \end{vmatrix} \quad (1)$$

$$= \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \end{vmatrix}$$

$$= \frac{1}{6} [(x_2 - x_1)(y_3 - y_1)(z_4 - z_1) + (x_3 - x_1)(y_4 - y_1)(z_2 - z_1) + (x_4 - x_1)(y_2 - y_1)(z_3 - z_1) - (x_2 - x_1)(y_4 - y_1)(z_3 - z_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)(z_4 - z_1) - (x_4 - x_1)(y_3 - y_1)(z_2 - z_1)]$$

한편 그림 3과 같이 밑면이 사각형이고 하나의 정점을 갖는 오면체의 체적은 사각형인 밑면을 두 개의 삼각형으로 분할하여 형성된 두 개의 사면체 체적을 더하면 된다.

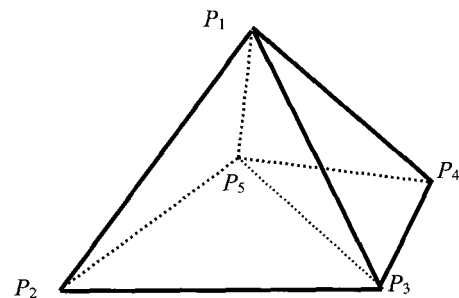


그림 3. 오면체의 꼭지점  
Fig. 3. corner point of a body with 5 surfaces.

$$V_{12345} = V_{1235} + V_{1345}$$

$$= \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \end{vmatrix} + \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \\ x_5 - x_1 & y_5 - y_1 & z_5 - z_1 \end{vmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_5 - x_1 & y_5 - y_1 & z_5 - z_1 \end{vmatrix} - \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_4 - x_1 & y_4 - y_1 & z_4 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_5 - x_1 & y_5 - y_1 & z_5 - z_1 \end{vmatrix} \\
 & = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_2 - x_4 & y_2 - y_4 & z_2 - z_4 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \\ x_5 - x_1 & y_5 - y_1 & z_5 - z_1 \end{vmatrix}
 \end{aligned}$$

#### IV. 잔향실의 체적

위에 주어진 수식을 이용하여 잔향실의 체적을 계산하기 위하여 잔향실의 각 벽면 ( $R_1P_2P_3P_6$ ,  $P_2P_3P_8P_1$ ,  $P_3P_4P_9P_8$ )과 천장 ( $P_5P_6P_4P_8$ 과  $R_5P_8P_9$ )으로 분리)을 바닥으로 하고 점  $R_5$ 를 꼭지점으로 하여 형성되는 5면체와 4면체로 분할하자. 그러면 전체 체적  $V_{Total}$ 은 식 (1)과 식 (2)를 이용할 경우, 다음과 같이 5개 체적의 합으로 주어진다.

$$V_{Total} = V_{01276} + V_{02387} + V_{03498} + V_{05678} + V_{0589} \quad (3)$$

여기서 오면체 또는 사면체의 각 체적은 다음과 같이 표현된다.

$$V_{01276} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_1 - x_7 & y_1 - y_7 & z_1 - z_4 \\ x_2 - x_0 & y_2 - y_0 & z_2 - z_0 \\ x_6 - x_0 & y_6 - y_0 & z_6 - z_0 \end{vmatrix} \quad (4)$$

$$V_{02387} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_2 - x_8 & y_2 - y_8 & z_2 - z_8 \\ x_3 - x_0 & y_3 - y_0 & z_3 - z_0 \\ x_7 - x_0 & y_7 - y_0 & z_7 - z_0 \end{vmatrix} \quad (5)$$

$$V_{03498} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_3 - x_9 & y_3 - y_9 & z_3 - z_9 \\ x_4 - x_0 & y_4 - y_0 & z_4 - z_0 \\ x_8 - x_0 & y_8 - y_0 & z_8 - z_0 \end{vmatrix} \quad (6)$$

$$V_{05678} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_5 - x_7 & y_5 - y_7 & z_5 - z_7 \\ x_6 - x_0 & y_6 - y_0 & z_6 - z_0 \\ x_8 - x_0 & y_8 - y_0 & z_8 - z_0 \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$V_{0589} = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_5 - x_0 & y_5 - y_0 & z_5 - z_0 \\ x_8 - x_0 & y_8 - y_0 & z_8 - z_0 \\ x_9 - x_0 & y_9 - y_0 & z_9 - z_0 \end{vmatrix} \quad (8)$$

#### V. 잔향실 체적의 불확도

잔향실의 전체 체적  $V_{Total}$ 은 각 꼭지점 좌표의 함수로 주어진다.

$$V_{Total} = V_{Total}(x_0, x_1, x_2, \dots, x_9, y_0, y_1, y_2, \dots, y_9, z_0, z_1, z_2, \dots, z_9) \quad (9)$$

원점을 제외한 잔향실 각 꼭지점  $P_i$ 의 좌표 ( $x_i, y_i, z_i$ )가 갖는 불확도를  $\{u(x_i), u(y_i), u(z_i)\}$ 라고 하면 전체 체적의 불확도  $u(V_{Total})$ 은 다음 식과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 u(V_{Total}) &= \left[ \sum_{i=1}^9 \left\{ \left( \frac{\partial V_{Total}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \left( \frac{\partial V_{Total}}{\partial y_i} \right)^2 u^2(y_i) + \left( \frac{\partial V_{Total}}{\partial z_i} \right)^2 u^2(z_i) \right\} \right]^{1/2} \\
 &= \left[ \sum_{i=1}^9 \left\{ \left( \frac{\partial V_{01276}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \left( \frac{\partial V_{01276}}{\partial y_i} \right)^2 u^2(y_i) + \left( \frac{\partial V_{01276}}{\partial z_i} \right)^2 u^2(z_i) \right\} \right. \\
 &\quad + \sum_{i=1}^9 \left\{ \left( \frac{\partial V_{02387}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \left( \frac{\partial V_{02387}}{\partial y_i} \right)^2 u^2(y_i) + \left( \frac{\partial V_{02387}}{\partial z_i} \right)^2 u^2(z_i) \right\} \quad (10) \\
 &\quad + \sum_{i=1}^9 \left\{ \left( \frac{\partial V_{05498}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \left( \frac{\partial V_{05498}}{\partial y_i} \right)^2 u^2(y_i) + \left( \frac{\partial V_{05498}}{\partial z_i} \right)^2 u^2(z_i) \right\} \\
 &\quad + \sum_{i=1}^9 \left\{ \left( \frac{\partial V_{05678}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \left( \frac{\partial V_{05678}}{\partial y_i} \right)^2 u^2(y_i) + \left( \frac{\partial V_{05678}}{\partial z_i} \right)^2 u^2(z_i) \right\} \\
 &\quad \left. + \sum_{i=1}^9 \left\{ \left( \frac{\partial V_{0589}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \left( \frac{\partial V_{0589}}{\partial y_i} \right)^2 u^2(y_i) + \left( \frac{\partial V_{0589}}{\partial z_i} \right)^2 u^2(z_i) \right\} \right]^{1/2}
 \end{aligned}$$

행렬식  $A = |a_{ij}|$ 의 판미분은 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{\partial A}{\partial x} = \sum_{i,j=1}^n A_{ij} \frac{\partial a_{ij}}{\partial x} \quad (11)$$

여기서  $A_{ij}$ 는  $a_{ij}$ 의 cofactor이다.

#### VI. 잔향실 각 꼭지점의 좌표 측정 및 좌표 불확도

##### 6.1. 좌표 측정

한국표준과학연구원에서 보유하고 있는 잔향실의 경우,  $R_0P_1P_8P_9$ 와  $R_0P_8P_9P_4$ 로 이루어진 벽면은 수직 벽이며 서로 직각을 이루고 있다. 따라서 잔향실 내의 공간 임의의 위치에 Total Station (Topcon, GPT-7000i)을 설치하고 벽면  $R_0P_8P_9P_4$ 에 평행하고 벽면  $R_0P_1P_8P_9$ 에 수직인 선을 기준선으로 하여 각 꼭지점에 레이저 빔을 조사하여 각 꼭지점의 방위각과 양각 및 거리를 측정하여 좌표를 계산한다. 표 1은 잔향실 각 꼭지점의 좌표를 보여준다. 이 표에는 참고로 줄자를 이용하여 수작업으로 측정한 측정값과 설계도면에 주어진 설계값도 주어졌다. 좌표 원점은 두 수직벽과 바닥이 만나는 점으로 하였다.

표 1. 제 1 잔향실 각 꼭지점의 좌표(단위: m)  
Table 1. Coordinates of each corner point of reverberation chamber.(unit: m)

	Total Station			측정값			실계값		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
P <sub>0</sub>	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
P <sub>1</sub>	7.386	0.066	0.017	7.381	0.000	0.000	7.374	0.000	0.000
P <sub>2</sub>	9.438	4.626	-0.024	9.453	4.622	0.000	9.285	4.611	0.000
P <sub>3</sub>	6.516	7.819	-0.008	6.566	7.770	0.000	6.496	7.934	0.000
P <sub>4</sub>	-0.027	5.178	-0.006	0.000	5.178	0.000	0.000	5.190	0.000
P <sub>5</sub>	0.024	0.007	5.508	0.000	0.000	5.506	0.000	0.000	5.417
P <sub>6</sub>	6.235	0.068	5.491	6.243	0.000	5.486	6.234	0.000	5.417
P <sub>7</sub>	8.419	4.802	6.246	8.450	4.724	6.264	7.902	4.399	6.149
P <sub>8</sub>	6.528	6.685	6.629	6.476	6.658	6.650	6.125	6.414	6.486
P <sub>9</sub>	-0.010	3.951	6.139	0.000	3.940	6.150	0.000	3.813	6.069

6.2. 좌표 불확도

가. 교정성적서

잔향실 꼭지점 좌표 측정에 사용된 Total Station의 교정 결과가 표 2에 주어져 있다.

표 2. Total Station의 교정 결과  
Table 2. Calibration result of the Total Station.

1. 수평각도 측정오차 : 2"				
* 측정불확도 : 3" (k=2, 신뢰수준 95 %)				
2. 수직각도 측정오차 : 5"				
* 측정불확도 : 3" (k=2, 신뢰수준 95 %)				
3. 고저오차 : 2"				
* 측정불확도 : 3" (k=2, 신뢰수준 95 %)				
4. Line of Sight (단위: mm)				
* 측정불확도: 0.05 mm (k=2, 신뢰수준 95 %)				
	3 m	5 m	10 m	∞
X 축	0.00	0.00	0.00	0.00
Y 축	0.00	+0.01	0.00	0.00

표 2에서 보듯이 수평각도와 수직각도 측정오차는 각각 3" 와 5" 이며 측정불확도는 3" (k=2, 신뢰수준 95 %)이다. 한편 X와 Y 축에 대한 거리측정 오차는 3, 5, 10 m와 ∞에 대해 교정한 결과, Y 축 5 m 측정 시 +0.01 mm이며 나머지는 0.00 mm였으며 측정불확도는 0.05 mm (k=2, 신뢰수준 95 %)이다.

각도측정 오차에 의한 거리 오차는 무시할 수 있을 정도로 작다. 따라서 거리측정 오차만 고려하되 최악의 조건을 고려한다면 측정장비의 오차는 다음과 같이 계산된다.

$$u_{Calibration} = \sqrt{0.01^2 + 0.025^2} = 0.027 \text{ mm}$$

나. 벽면의 평탄도:

잔향실 벽면 P<sub>1</sub>P<sub>2</sub>P<sub>3</sub> 상의 임의의 5 점에 대한 수직거리를 측정하여 계산한 Y 좌표가 표 3에 주어져 있다.

표 3. 한 벽면의 임의의 5 점에 대한 수직 거리(단위: m)  
Table 3. Vertical distance of 5 arbitrary points.(unit: m)

	X	Y	Z
1	-	0.032	-
2	-	0.044	-
3	-	0.073	-
4	-	0.052	-
5	-	0.018	-
평균	-	0.044	-
표준편차	-	0.021	-
불확도	-	0.010	-

표 3에서 보듯이 한 벽면의 임의의 5 점에 대한 좌표 측정 결과의 불확도는 10 mm이다. 벽면의 평탄도 역시 체적 불확도의 요인으로 작용하며 각 꼭지점의 위치에도 영향을 미치기 때문에 꼭지점 좌표 불확도 요인으로 간주할 수 있다.

$$u_{Flatness} = 10 \text{ mm}$$

다. 반복 측정에 의한 오차

한 꼭지점에 대해 6회 반복 측정된 값이 표 4에 주어져 있다.

표 4. 한 꼭지점에 대한 반복 측정 결과  
Table 4. Results of repeated measurement of corner point.

	X	Y	Z
1	7.387	0.066	0.015
2	7.385	0.067	0.017
3	7.385	0.066	0.018
4	7.385	0.065	0.017
5	7.386	0.065	0.018
6	7.385	0.065	0.017
평균	7.386	0.066	0.017
표준편차(mm)	0.84	0.82	1.10
불확도(mm)	0.37	0.37	0.49

마찬가지로 최악의 조건을 고려한다면 반복 측정에 의한 불확도는 0.49 mm로 간주할 수 있다.

$$u_{Measurement} = 0.49 \text{ mm}$$

라. 좌표 불확도 총괄표

이상의 요인들을 고려한 꼭지점 좌표 불확도 총괄표는 표 5에 주어져 있다. 이 표에서 합성표준불확도는 불확도 요인들 사이에 상관관계가 없는 것으로 간주하여 계산하였다. 또한 확장불확도는 포함인자 k=2, 신뢰수준 95 %로 하였다.

표 5. 좌표 불확도 총괄표(단위: mm)  
Table 5. Uncertainty budget for coordinate.(unit: m)

불확도 요인	기호	불확도	Type	자유도
교정성적서	$U_{Calibration}$	0.027	B	$\infty$
벽면 평탄도	$U_{Flatness}$	10	A	4
반복 측정	$U_{Measurement}$	0.49	A	5
합성표준불확도	$U_C$	10	-	-
확장불확도	$U$	20	-	-

표 5에서 보듯이 잔향실 체적의 확장불확도는 20 mm 이다.

### VII. 잔향실의 체적 및 체적 불확도

잔향실의 전체 체적은 위에서 계산한 것 외에 출입문과 시료 설치를 위한 개구부로 인한 벽감 (벽에 오목하게 파 놓은 부분)에 해당하는 부분을 추가하여야 한다.

잔향실 개구부에 의한 벽감의 치수를 결정하기 위해 몇 지점에 대한 측정 결과가 표 6에 주어져 있다.

표 6. 벽감의 치수(단위: m)  
Table 6. Dimensions of space for sample installation.(unit: m)

	가로	세로	깊이
1	2.992	3.532	0.325
2	2.996	3.525	0.310
3	2.984	3.521	0.319
평균	2.991	3.526	0.317
표준편차	0.006	0.006	0.007

표 6에 주어진 평균값을 이용하여 계산한 벽감의 체적은 3.3 m<sup>3</sup>이다.

표 1에 주어진 좌표들 이용하여 계산한 체적에 벽감의 체적을 더한 전체 잔향실의 체적이 표 7에 주어져 있다. 이 표에는 체적의 확장불확도 ( $k=2$ , 신뢰수준: 95 %)도 주어져 있다. [4]

표 7. 잔향실의 체적 및 불확도  
Table 7. Volume and uncertainty of Reverberation Chamber.

	체적(m <sup>3</sup> )
Total Station	291.3
측정값	292.6
설계값	277.9
확장불확도	5.7

### VIII. 결론

잔향실을 이용한 건축자재의 음향특성을 측정하여 계산할 때, 잔향실의 체적이 중요한 변수로 사용된다. 그러나 잔향실은 실내 음장 조건을 확산음장으로 만들기 위해 부정형의 형태를 취하기 때문에 체적 계산이 쉽지 않다. 그러나 잔향실의 각 꼭지점의 좌표를 알면 사면체의 체적 계산 방법을 이용하여 잔향실의 체적을 계산할 수 있다.

본 논문에서는 완공된 잔향실의 각 꼭지점 좌표를 Total station으로 측정하여 이로부터 체적을 계산하였다. 그 결과 설계값과 약 5 %의 차이를 보이고 있는 것을 확인하였다. 이러한 체적 차이는 잔향실을 이용하여 측정된 여러 가지 건축자재의 음향특성에도 직접적인 영향을 미치게 되어 측정 결과의 신뢰도를 저하시킬 수 있다.

또한 실제 잔향실의 치수를 측정하는 과정을 통해 체적 불확도를 계산하기 위한 불확도 요인들의 자료를 수집하여 평가한 체적의 확장불확도는 전체 체적의 약 2 % (약 5.7 m<sup>3</sup>)가 되는 것을 알 수 있었다.

#### 부록: 체적 불확도 계산식 유도

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^9 \left\{ \left( \frac{\partial V_{01276}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \left( \frac{\partial V_{01276}}{\partial y_i} \right)^2 u^2(y_i) + \left( \frac{\partial V_{01276}}{\partial z_i} \right)^2 u^2(z_i) \right\} \\ &= \left( \frac{1-x_1}{6} \left| \begin{matrix} y_2 & z_2 \\ y_6 & z_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_1) + \left( -\frac{1-y_1}{6} \left| \begin{matrix} x_2 & z_2 \\ x_6 & z_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_1) + \left( \frac{1-z_1}{6} \left| \begin{matrix} x_2 & y_2 \\ x_6 & y_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_1) \\ &+ \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} y_1 & z_1 \\ y_6 & z_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_2) + \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_1 & z_1 \\ x_6 & z_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_2) + \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_1 & y_1 \\ x_6 & y_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_2) \\ &+ \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} y_1 & z_1 \\ y_2 & z_2 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_6) + \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_1 & z_1 \\ x_2 & z_2 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_6) + \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_6) \\ &+ \left( \frac{x_1-1}{6} \left| \begin{matrix} y_2 & z_2 \\ y_6 & z_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_7) + \left( -\frac{y_1-1}{6} \left| \begin{matrix} x_2 & z_2 \\ x_6 & z_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_7) + \left( \frac{z_1-1}{6} \left| \begin{matrix} x_2 & y_2 \\ x_6 & y_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_7) \\ & \sum_{i=1}^9 \left\{ \left( \frac{\partial V_{02387}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \left( \frac{\partial V_{02387}}{\partial y_i} \right)^2 u^2(y_i) + \left( \frac{\partial V_{02387}}{\partial z_i} \right)^2 u^2(z_i) \right\} \\ &= \left( \frac{1-x_8}{6} \left| \begin{matrix} y_3 & z_3 \\ y_7 & z_7 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_8) + \left( -\frac{1-y_8}{6} \left| \begin{matrix} x_3 & z_3 \\ x_7 & z_7 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_8) + \left( \frac{1-z_8}{6} \left| \begin{matrix} x_3 & y_3 \\ x_7 & y_7 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_8) \\ &+ \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} y_2 & z_2 \\ y_7 & z_7 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_3) + \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_2 & z_2 \\ x_7 & z_7 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_3) + \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_2 & y_2 \\ x_7 & y_7 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_3) \\ &+ \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} y_2 & z_2 \\ y_3 & z_3 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_7) + \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_2 & z_2 \\ x_3 & z_3 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_7) + \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_7) \\ &+ \left( \frac{x_1-1}{6} \left| \begin{matrix} y_1 & z_1 \\ y_6 & z_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_4) + \left( -\frac{y_1-1}{6} \left| \begin{matrix} x_1 & z_1 \\ x_6 & z_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_4) + \left( \frac{z_1-1}{6} \left| \begin{matrix} x_1 & y_1 \\ x_6 & y_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \sum_{i=1}^9 \left\{ \left( \frac{\partial V_{03498}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \left( \frac{\partial V_{03498}}{\partial y_i} \right)^2 u^2(y_i) + \left( \frac{\partial V_{03498}}{\partial z_i} \right)^2 u^2(z_i) \right\} \\
&= \left( \frac{1-x_9}{6} \left| \begin{matrix} y_4 & z_4 \\ y_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_9) + \left( -\frac{1-y_9}{6} \left| \begin{matrix} x_4 & z_4 \\ y_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_9) + \left( \frac{1-z_9}{6} \left| \begin{matrix} x_4 & y_4 \\ x_8 & y_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_9) \\
&+ \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} y_3 & z_3 \\ y_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_4) + \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_3 & z_3 \\ x_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_4) + \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_3 & y_3 \\ x_8 & y_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_4) \\
&+ \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} y_4 & z_3 \\ y_4 & z_4 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_8) + \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_3 & z_3 \\ x_4 & z_4 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_8) + \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_3 & y_3 \\ x_4 & y_4 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_8) \\
&+ \left( \frac{x_3-1}{6} \left| \begin{matrix} y_4 & z_4 \\ y_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_9) + \left( -\frac{y_3-1}{6} \left| \begin{matrix} x_4 & z_4 \\ x_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_9) + \left( \frac{z_3-1}{6} \left| \begin{matrix} x_4 & y_4 \\ x_8 & y_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_9) \\
& \sum_{i=1}^9 \left\{ \left( \frac{\partial V_{05678}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \left( \frac{\partial V_{05678}}{\partial y_i} \right)^2 u^2(y_i) + \left( \frac{\partial V_{05678}}{\partial z_i} \right)^2 u^2(z_i) \right\} \\
&= \left( \frac{1-x_2}{6} \left| \begin{matrix} y_6 & z_6 \\ y_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_5) + \left( -\frac{1-y_2}{6} \left| \begin{matrix} x_6 & z_6 \\ y_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_5) + \left( \frac{1-z_2}{6} \left| \begin{matrix} x_6 & y_6 \\ x_8 & y_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_5) \\
&+ \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} y_5 & z_5 \\ y_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_6) + \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_5 & z_5 \\ x_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_6) + \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_5 & y_5 \\ x_8 & y_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_6) \\
&+ \left( \frac{x_5-1}{6} \left| \begin{matrix} y_6 & z_6 \\ y_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_7) + \left( -\frac{y_5-1}{6} \left| \begin{matrix} x_6 & z_6 \\ x_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_7) + \left( \frac{z_5-1}{6} \left| \begin{matrix} x_6 & y_6 \\ x_8 & y_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_7) \\
&+ \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} y_5 & z_5 \\ y_6 & z_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_8) + \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_5 & z_5 \\ x_6 & z_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_8) + \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_5 & y_5 \\ x_6 & y_6 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_8) \\
& \sum_{i=1}^9 \left\{ \left( \frac{\partial V_{0589}}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + \left( \frac{\partial V_{0589}}{\partial y_i} \right)^2 u^2(y_i) + \left( \frac{\partial V_{0589}}{\partial z_i} \right)^2 u^2(z_i) \right\} \\
&= \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} y_8 & z_8 \\ y_9 & z_9 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_3) + \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_8 & z_8 \\ y_9 & z_9 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_3) + \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_8 & y_8 \\ x_9 & y_9 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_3) \\
&+ \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} y_5 & z_5 \\ y_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_8) + \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_5 & z_5 \\ x_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_8) + \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_5 & y_5 \\ x_8 & y_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_8) \\
&+ \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} y_5 & z_5 \\ y_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(x_9) + \left( -\frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_5 & z_5 \\ x_8 & z_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(y_9) + \left( \frac{1}{6} \left| \begin{matrix} x_5 & y_5 \\ x_8 & y_8 \end{matrix} \right| \right)^2 u^2(z_9)
\end{aligned}$$

## 참고 문헌

1. ISO/IEC 17025:2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
2. 한국표준과학연구원, "산업측정 신뢰도제고 사업(3차년도)," KRISS/IR 2006 043, 2006
3. W. H. Beyer, *CRC Standard Mathematical Tables*, (25<sup>th</sup> CRC Press, Inc., 1979, Boca Raton), pp. 295.
4. *KRISS Guide to the expression of uncertainty in measurement*, (KRIS 98 096 SP, 1998)

## 저자 약력

### • 서재갑 (Jae-Gap Suh)

한국음향학회지 제22권 6호 참조

### • 서상준 (Sang-Joon Suh)

한국음향학회지 제22권 6호 참조