

밀폐공간의 최적설계에 관한 기초적 연구

오재웅, 김용집, 지동하
현양대학교 정밀기계공학과

Basic study on the optimal design of enclosed space.

Jae-Eung Oh, Hong-Jib Kim, Dong-Ha Chi
Department of Precision Mechanical Eng., Hanyang University

요 지

현대사회의 복잡한 생활환경과 더불어 주위의 밀폐공간에서 발생한 소음은 인접한 환경에 커다란 영향을 미치고 있다. 그러므로, 본 연구에서는 밀폐공간의 음향특성을 연구하고, 또한 밀폐 공간에서 발생된 소음원이 주위의 생활환경에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 밀폐공간의 크기를 연구하였다. 연구한 결과, 길이를 반화시킴으로써 우리가 주목해야할 주파수의 모우드 분포를 고려하여 최적한 크기를 결정할 수 있었다.

1. 서 론

현대 사회의 구조가 복잡해짐에 따라 우리들이 생활하고 있는 생활환경 또한 복잡해져 가고 있다. 이러한 복잡한 생활환경과 더불어 주위에는 밀폐된 공간이 생기게 되었으며, 밀폐된 공간에서 발생된 소음이 주위 환경에 커다란 영향을 미치고 있다. 이러한 현상은 대형건물의 엘리베이터 hoistway와 지하 주차장, 그리고, 지하도 및 지하차도 등에서 발생한 소음이 인접한 생활환경에 영향을 미치는 것에서 쉽게 느낄 수 있다.

본 연구에서는 주위의 생활환경에 커다란 영향을 미치고 있는 밀폐공간에서의 음향특성을 연구하고 또한 밀폐공간에서 발생되어지는 소음원이 주위의 생활환경에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 밀폐공간의 크기를 연구한다.

따라서, 본 연구의 목적을 크게 3가지로 나누면 첫째, 밀폐공간의 음향특성에 대한 소프트웨어를 개발하고

둘째, 개발된 소프트웨어를 통하여 이론에서 제시한 식으로 부터의 결과와 계산으로 부터 얻은 결과를 비교하며,

셋째, 개발된 소프트웨어를 밀폐공간에 적용하여 적합한 크기의 공간을 제시하는 것이다.

2. 이론적 고찰

강체로 된 벽면으로 이루어지고, 크기가 l_x, l_y, l_z 인 실내의 한 모퉁이에 점음원이 놓여있다고 가정하자. 이러한 실내에서 형성되는 정상 모우드의 주파수는 파동 방정식을 풀어 경계조건을 대입함으로써 구할 수 있다. 일반적인 파동 방정식으로 부터 음압 P 에 대한 3차원 파동 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] P = \frac{\partial^2 P}{c^2 \partial t^2} \dots (1)$$

만약 실내의 모든 벽면이 완전한 강체로 이루어져 있다면 벽면에서 입자의 속도는 영이 된다. 이러한 경계 조건은 정상 모우드의 주파수에 제한을 주기 때문에 실내에 형성되는 정상 모우드의 가능한 주파수는 식(1)로 부터 구할 수 있으며, 다음 식으로 주어진다

$$f_n = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{N_x}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{N_y}{l_y} \right)^2 + \left(\frac{N_z}{l_z} \right)^2 \right]^{1/2} \dots (2)$$

여기서, $N_x, N_y, N_z = 0, 1, 2, 3, \dots, \infty$ 이며 l_x, l_y, l_z 는 실을 형성하는 변의 길이 c 는 음파의 속도이다.

한편, 입자속도의 실내 분포는 장제파로서 다음과 같이 표시된다.

$$\sin \left[\frac{N_x \cdot \pi \cdot x}{l_x} \right] \sin \left[\frac{N_y \cdot \pi \cdot y}{l_y} \right] \sin \left[\frac{N_z \cdot \pi \cdot z}{l_z} \right] \dots (3)$$

또한 음압의 장제파는 다음과 같다.

$$\cos \left[\frac{N_x \cdot \pi \cdot x}{l_x} \right] \cos \left[\frac{N_y \cdot \pi \cdot y}{l_y} \right] \cos \left[\frac{N_z \cdot \pi \cdot z}{l_z} \right] \dots (4)$$

한편 일정한 주파수 이하의 값을 갖는 모우드의 수는 1차원 모우드, 2차원 모우드, 3차원 모우드의 합으로 나타낼 수 있다.

그러므로 일정한 주파수 이하의 값을 갖는 모우드의 수는

$$N = \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot V}{3C^3} \right] f^3 + \left[\frac{\pi \cdot A}{4C^2} \right] f^2 + \left[\frac{L}{8C} \right] f \dots (5)$$

이다.

또한 일정한 주파수 대역폭 Δf 내에 들어있는 모우드의 수 ΔN 에 대한 근사적 수치를 계산하는 식은 식(5)를 주파수 f 에 대하여 미분함으로써 주어진다.

$$\Delta N = \left[\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot V}{C^3} \right) f^2 + \left(\frac{\pi \cdot A}{2C^2} \right) f + \left(\frac{L}{8C} \right) \right] \Delta f \dots \dots (6)$$

한편, l_x, l_y, l_z 인 실내에서 N_x, N_y, N_z 를 바꾸어 가며 f_n 을 계산해 보면 N_x, N_y, N_z 가 각각 다른 값을 갖는대도 불구하고 동일한 모우드 주파수를 갖는 모우드가 있다. 이러한 모우드를 축퇴 모우드(degenerate mode) 라고 한다.

3. 연구의 방법

3.1 연구의 흐름도 및 연구 방법

기존의 hoistway의 크기인 2.25 x 2.85 x 118 (m)을 기준으로 하여 다음과 같은 방법으로 연구를 행한다.

- (a) X 방향 길이만 10 cm씩 증가시킨다.
- (b) Y 방향 길이만 10 cm씩 증가시킨다.
- (c) Z 방향 길이만 16 m씩 감소시킨다.
- (d) 체적을 일정하게 유지시키면서 X 방향의 길이를 10 cm씩 증가시킨다.
- (e) X, Y, Z 방향 총길이는 일정하게 유지시키면서 X 방향 길이를 10 cm 씩 변화시킨다.

이상과 같은 5가지 방법으로 연구를 행한 다음 엘리베이터 hoistway의 소음특성을 파악하여 특성에 가장 적합한 hoistway의 크기를 결정한다. Fig. 1은 엘리베이터 hoistway의 크기, 형태 방향을 나타낸 그림이며, Fig. 2는 최적설계를 위한 연구의 흐름도이다.

3.2 엘리베이터 hoistway의 소음특성

Hoistway는 엘리베이터가 운행되는 공간이기 때문에 엘리베이터 운행시에 생기는 소음이 hoistway를 통하여 hoistway주변의 사무실 및 엘리베이터의 cage내에 그대로 전달 된다.

한편, 엘리베이터가 운행할때 생기는 소음의 주요원인은 sheave와 rope의 마찰음, guide rail과 roller의 마찰음등을 들 수 있다. 이러한 소음원 중에서 가장 주된 소음원은 sheave와 rope의 마찰음이다.

Fig. 3은 sheave와 rope의 주파수 특성으로 335 Hz, 355 Hz, 425 Hz에서 특성이 나타나고 있다.

Fig. 4는 측정 및 분석 계통도이다.

3.3 주파수와 N_x, N_y, N_z 의 결정

본 연구에서는 모우드 분포를 500Hz 까지 연구 하였으며, 그 이유는 엘리베이터의 sheave와 rope의 마찰음의 특성이 335 Hz, 355 Hz, 425 Hz 이므로 그 이상의 주파수는 연구에 커다란 영

향을 미치지 않기 때문이다.

또한, N_x, N_y, N_z 의 결정은 상한 주파수인 500 Hz 가 결정 되었기 때문에 식 (2)로 부터

$$N_z = 347.06, \quad N_x = 7.79, \quad N_y = 9.55$$

그러므로, 본 연구에서는

$$N_x = 0, 1, 2, 3, \dots, 10$$

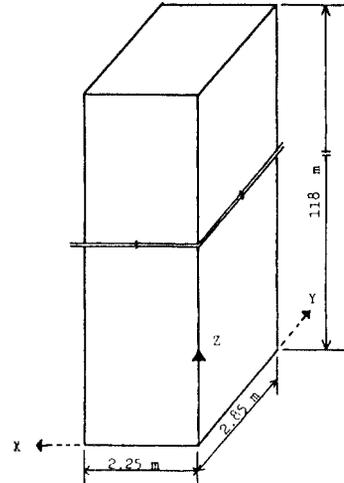


Fig. 1 Elevator hoistway

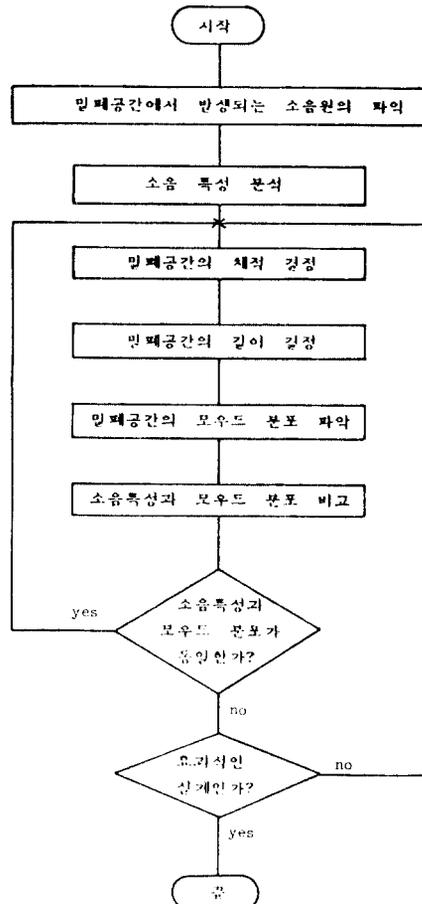


Fig. 2 Flow chart of the study

$N_y = 0, 1, 2, 3, \dots, 15$

$N_z = 0, 1, 2, 3, \dots, 350$

으로 하여 연구를 행하였다.

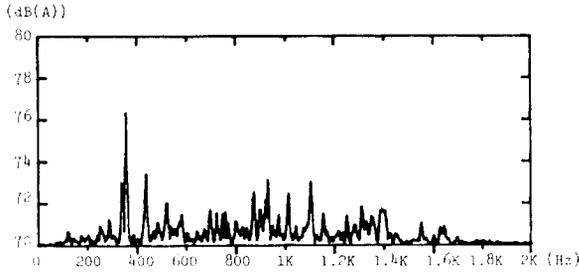


Fig. 3 Characteristics of friction sound

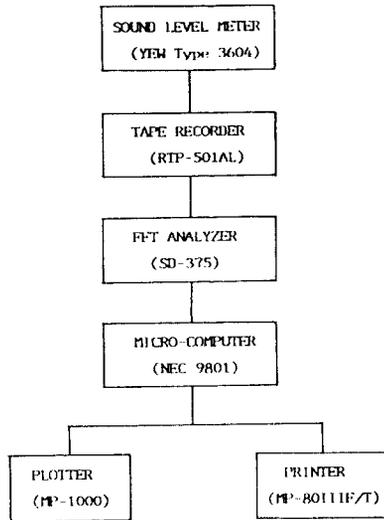


Fig. 4 Schematic diagram of measuring and analysis system

4. 경과 및 고찰

4.1 X 방향 길이 변화에 따른 모우드의 변화

Hoistway의 크기중 Y 방향 길이는 2.85 m, Z 방향 길이는 118 m로 고정하고 X 방향 길이를 2.35 m, 2.45 m, 2.55 m, 2.65 m로 변화시키면서 연구한 결과 다음과 같다.

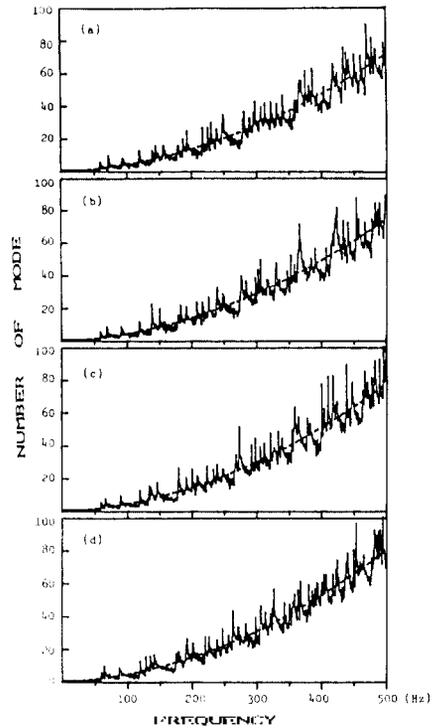
Fig. 5는 X 방향의 길이만을 변화시키면서 500 Hz 까지 나타낸 모우드의 분포이며, Fig. 6은 10 Hz 간격으로 나타낸 모우드의 분포이다. 그림에서 알 수 있듯이, (a)의 경우는 최대 모우드수가 470 Hz에서 나타났고, (b)의 경우는 499 Hz, (c)의 경우는 500 Hz, (d)의 경우는 495 Hz에서 나타나고 있다. 이러한 결과로 보아 X 방향 길이를 변화시킴에 따라 모우드의 분포가 크게 변화하는 것을 알 수 있다.

4.2 Z 방향 길이의 변화에 따른 모우드의 변화

Hoistway의 크기중 X 방향 길이는 2.25 m, Y 방향 길이는 2.85 m로 고정하고, Z 방향 길이를 118 m, 102 m, 86 m, 70 m로 변화시키면서

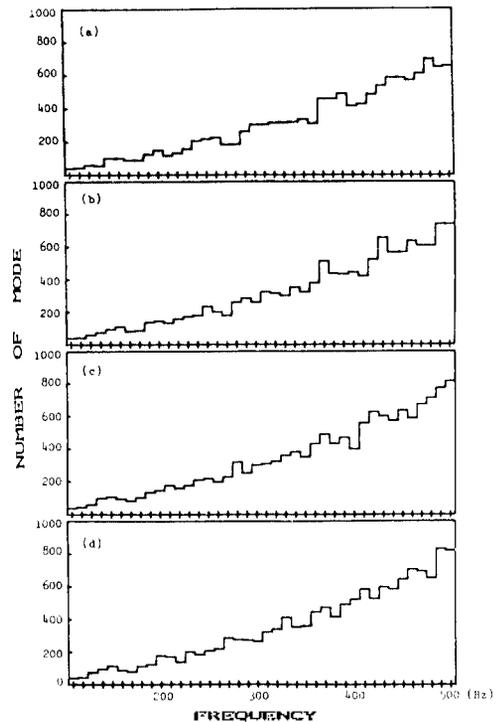
연구한 결과 다음과 같다.

Fig. 7은 Z 방향 길이를 변화시키면서 500 Hz까지 나타낸 모우드의 분포이다. 그림에서 알 수



(a) 2.35 x 2.85 x 118 (m) (b) 2.45 x 2.85 x 118 (m)
(c) 2.55 x 2.85 x 118 (m) (d) 2.65 x 2.85 x 118 (m)

Fig. 5 Distribution of mode according to the change of length (X)



(a) 2.35 x 2.85 x 118 (m) (b) 2.45 x 2.85 x 118 (m)
(c) 2.55 x 2.85 x 118 (m) (d) 2.65 x 2.85 x 118 (m)

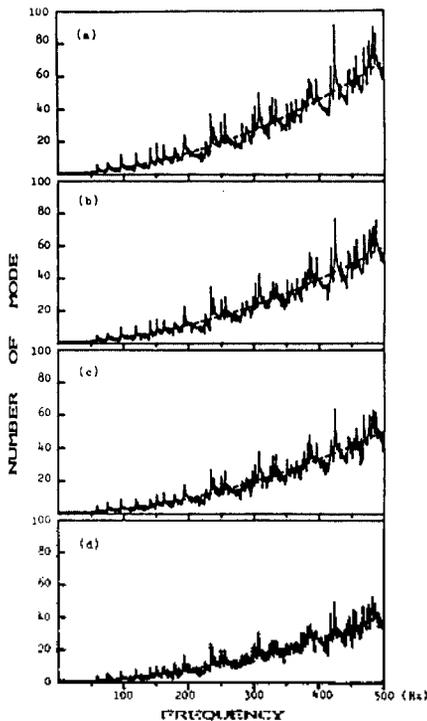
Fig. 6 Distribution of mode according to the change of length (X)

있듯이, (a),(b),(c)의 경우는 425 Hz에서 최대 모드 수가 나타나고 있으며, (d)의 경우는 484 Hz에서 최대 모드 수가 나타나고 있다. 그러나, 전체적인 모드 분포는 Z 방향 길이의 변화에 관계없이 같게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 그러므로, 이 hoistway의 음향특성은 425 Hz의 주파수 특성을 갖는 공간으로 생각할 수 있다. 만일, hoistway의 소음을 저감하려면, 425 Hz에서 높은 흡음율을 갖는 흡음체를 사용하면 효과적인 대책을 수립할 수 있다.

또한, hoistway처럼 세방향 (X,Y,Z) 길이 중에서 두 방향의 길이보다 나머지 한 방향의 길이가 현저하게 긴 경우는, 짧은 길이를 갖는 방향의 길이를 변화시킴으로써 모드의 분포를 변화시킬 수 있다.

4.3 전체 길이의 변화에 따른 모드의 변화
 Hoistway의 체적을 일정하게 유지시키기 위하여 Z 방향의 길이는 118 m로 고정하고, X 방향의 길이를 10 cm씩 증가시키면서, 그에 따른 Y 방향의 길이를 결정하여, 연구한 결과 다음과 같다.

Fig. 8은 X,Y 방향의 길이변화에 따른 500 Hz까지의 모드 분포를 나타내고 있다. (a)의 경우는 425 Hz, (b)의 경우는 440 Hz, (c)의 경우는 491 Hz, (d)의 경우는 486 Hz에서 최대 모드 수가 나타나고 있다. 이러한 결과에서 모



(a) $2.25 \times 2.85 \times 118$ (m) (b) $2.25 \times 2.85 \times 102$ (m)
 (c) $2.25 \times 2.85 \times 70$ (m) (d) $2.25 \times 2.85 \times 70$ (m)
 Fig. 7 Distribution of mode according to the change of length (Z)

드분포는 체적이 일정하더라도 길이의 변화에 따라 다양하게 변화하는 것을 알 수 있다.

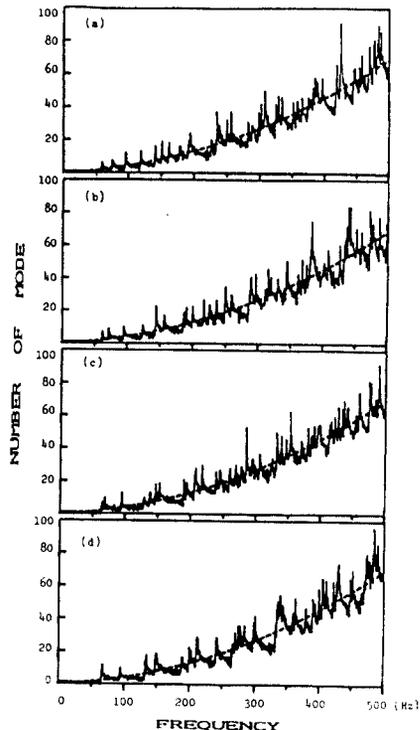
4.4 체적의 변화에 따른 모드의 변화

Hoistway의 X,Y,Z 방향의 길이의 합을 일정하게 유지시키기 위하여 Z 방향의 길이는 118 m로 고정하고, X 방향의 길이를 10 cm씩 변화시키면서 그에 따른 Y 방향의 길이를 결정하여 연구한 결과 다음과 같다.

Fig. 9는 X,Y 방향의 길이 변화에 따른 500 Hz까지의 모드 분포를 나타내고 있다. (a)의 경우는 490 Hz, (b)의 경우는 439 Hz, (c)의 경우는 490 Hz, (d)의 경우는 486 Hz에서 최대 모드 수가 나타나고 있다. 이러한 결과에서, X,Y,Z 방향 길이의 합이 같더라도 체적이 변화하므로 모드의 분포가 다양하게 변화하는 것을 알 수 있다. 즉, 모드의 분포는 체적과 길이에 따라서 다양하게 변화한다.

4.5 모드 분포에 따른 최적한 밀폐 공간의 설계

Hoistway에서 운행되는 엘리베이터의 소음의 특성이 335 Hz, 355 Hz, 425 Hz이므로 이런 주파수 특성을 갖는 공간은 피해야한다. Hoistway의 특징상 Z 방향(높이)은 변할 수 없으므로 X,Y 방향의 길이를 변화시켜야 할 것이다. 여기서는 체적이 일정해야 한다는 가정하에서 밀폐 공간의 최적한 크기를 연구 하였다



(a) $2.25 \times 2.85 \times 118$ (m) (b) $2.35 \times 2.73 \times 118$ (m)
 (c) $2.45 \times 2.62 \times 118$ (m) (d) $2.55 \times 2.51 \times 118$ (m)
 Fig. 8 Distribution of mode according to the change of total length

Fig. 10 은 (a)-(f) 경우의 301~500 Hz 의모우드 분포를 10 Hz간격으로 나타낸 것이다. 우리가 주목해야할 주파수인 331~340 Hz 에서는 (f) 의 경우가 가장 적게 나타나고 있으며, 351~360 Hz 에서는 (b) 와 (f), 421~430 Hz에서는 (b) 의 경우가 가장 적게 나타나고 있다. Table 1과 2에서도 (b)와 (f)의 경우가 전체적으로 모우드수가 적게 나타나고 있다. 그러므로, hoistway의 적합한 크기는 $2.33 \times 2.75 \times 118$ (m)임을 알 수 있다.

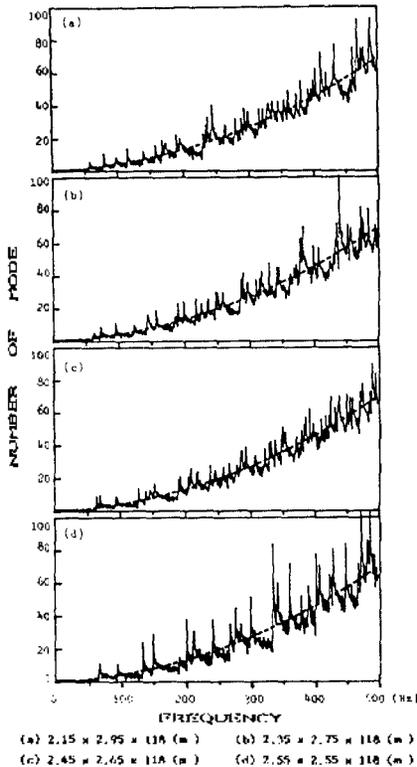


Fig. 9 Distribution of mode according to the change of volume

Table 1 Number of mode according to the change of total length.

(a) $2.25 \times 2.85 \times 118$ (m)	(b) $2.35 \times 2.73 \times 118$ (m)
(c) $2.45 \times 2.62 \times 118$ (m)	(d) $2.55 \times 2.51 \times 118$ (m)
(e) $2.65 \times 2.42 \times 118$ (m)	(f) $2.75 \times 2.33 \times 118$ (m)
(g) $2.95 \times 2.17 \times 118$ (m)	(h) $3.05 \times 2.10 \times 118$ (m)

(Hz)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
335	46	32	37	30	33	29	40	47
355	31	33	48	34	39	32	47	30
425	91	37	49	51	46	41	45	58

Table 2 Number of mode according to the change of total length.

(Hz)	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)
331 - 335	176	173	185	172	177	171	194	194
351 - 355	176	163	217	174	226	162	173	171
421 - 425	291	194	260	247	239	200	231	282

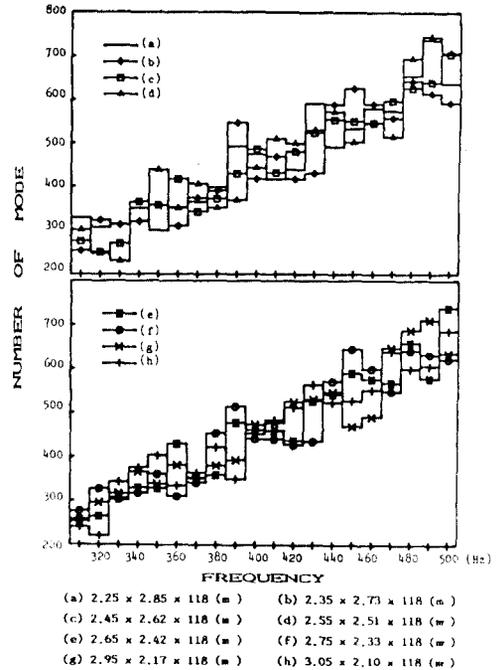


Fig. 10 Distribution of mode according to the change of total length

5. 결 론

밀폐 공간에서의 음향 특성에 관하여 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션을 하고, 측정된 결과에 따른 적합한 밀폐 공간의 크기에 관하여 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모우드의 분포는 체적과 길이의 변화에 따라 다양하게 변화한다
- (2) 세 방향의 길이 중에서 두 방향의 길이보다 나머지 한 방향의 길이가 현저하게 긴 경우는 짧은 길이를 갖는 방향의 길이를 변형시킴으로써 모우드의 분포를 변화시킬 수 있다.
- (3) 밀폐 공간의 음향 특성을 알 수 있으므로 그에 따른 효과적인 소음 방지 대책을 수립할 수 있다.
- (4) 본 연구의 대상인 hoistway의 소음특성 335 Hz, 355 Hz, 425 Hz를 고려하면 밀폐공간의 최적인 크기는 $2.33 \times 2.75 \times 118$ (m)이다.
- (5) 길이를 변형시킴으로써 우리가 주목해야할 주파수의 모우드 분포를 고려하여 최적한 크기를 결정할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Leo L. Beranek, "Noise and Vibration Control", McGraw-hill
- (2) Heinrich Kuttruff, "Room Acoustics", second edition, applied science publishers
- (3) Douglas D. Reynolds, "Engineering Principle of Acoustics", Ailyn and Bacon