

적응 삼각형 빔 방법에 의한 실내음장 해석

A Study on the Indoor Sound-field Analysis by Adaptive Triangular Beam Method

조대승† · 성상경* · 김진형* · 최재호** · 박일권***

D. S. Cho, S. K. Sung, J. H. Kim, J. H. Choi and I. K. Park

(2003년 1월 2일 접수 : 2003년 2월 18일 심사완료)

Key Words : Indoor Sound-field Analysis(실내음장해석), Adaptive Triangular Beam Method(적응 삼각형 빔 방법), Automatic Beam Subdivision(빔의 자동 재분할), Reflection(반사), Diffraction(회절)

ABSTRACT

In this study, the adaptive triangular beam method(ATBM) considering different sound reflection coefficients and angles of a triangular beam on two or more planes as well as diffraction effect is suggested. The ATBM, subdividing a tracing triangular beam into multiple triangular beams on reflection planes, gives reliable and convergent sound-field analysis results without the dependency on the number of initial triangular beam segmentation to search sound propagation paths from source to receiver. The validity of the method is verified by the comparison of numerical and experimental results for energy decay curve and steady-state sound pressure level of rooms having direct, reflective and diffractive sound paths.

1. 서 론

대형 공연장, 공장 및 선박의 기관실 등과 같이 복잡한 3차원 형상을 갖는 실내 공간의 음향 특성 해석 또는 방음설계에 실용적이면서도 정밀한 기하음향학 방법이 널리 적용되고 있다.^(1~3) 기하음향학에 적용되고 있는 알고리즘으로는 음선추적방법(ray tracing method; RTM)과 거울영상음원방법(mirror image source method; MISM) 및 상기 두 알고리즘의 장점을 결합한 복합 방법인 콘형 빔 방법(conical beam method; CBM)과 삼각형 빔 방법(triangular beam method; TBM) 등이 있다.

상기 방법 중 Lewers⁽⁴⁾가 제시한 삼각형 빔 방법은 빔의 중첩 또는 누락 현상이 없는 삼각형 빔으로 음원을 분할하므로 원리적으로는 직접 및 반사에 의해 수음점에 전달되는 음 에너지를 가장 정확하게 산정할 수 있다고 평가되고 있다. 그러나, 삼각형 빔 방법의 실제 적용에 있어서 삼각형 빔이 실내의 모서리 부 등 동일 면상에 위치하지 않는 복수 경계면에 입사되어 빔의 세부 영역별 반사각도가 달라지거나, 동일 면상에 위치한 반사면이라도 흡음율이 서로 다를 경우 반사되는 음 에너지가 달라지는 현상이 발생한다. 이에 기존의 연구들은 음원으로부터 수음점까지의 음 전달 경로를 찾기 위한 삼각형 빔을 세분화하고 각각의 삼각형 빔 추적시 반사 특성이 다른 경우에 대해서는 이를 무시하거나 근사적인 처리 방법을 적용하고 있다. 이로 인해 삼각형 빔 방법을 적용할 경우에도 음선추적방법과 마찬가지로 빔의 분할 개수를 변경하면서 음장 해석 결과의 수렴성을 확인해야 하는 단점이 있다.

† 책임저자, 정회원, 부산대학교 조선해양공학과

E-mail : daecho@pusan.ac.kr

Tel : (051) 510-2482, Fax : (051) 512-8836

* 정회원, 부산대학교 대학원 조선해양공학과

** 선보 공업 부설연구소

*** 국방과학 연구소 책임연구원

이에 본 연구에서는 초기 삼각형 빔 분할 개수에 상관없이 음장해석 결과의 수렴성이 보장되는 방법을 마련하고자 최소한의 삼각형 빔으로 음원을 포함하는 단위 구를 분할하되 각각의 삼각형 빔 추적 시 경계면에서의 반사각 또는 반사율이 서로 다른 경우 복수개의 삼각형 빔으로 재분할한 후 각각의 분할된 삼각형 빔을 추적하는 적응 삼각형 빔 방법(adaptive triangular beam method; ATBM)을 제시하였다. 또한, 상기 방법과 회절 경로로 전달되는 음 에너지를 고려할 수 있는 음장해석 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램의 타당성과 유용성은 직육면체 격실에 대한 에너지 감소 특성에 대한 수치해석 결과와 이론식과의 비교·검토 및 직접, 반사 및 회절 경로가 모두 구현되는 2개의 격실로 구성된 실내 공간에 대한 정상상태 음압레벨의 수치해석 및 실험 결과를 비교·검토하여 확인하였다.

2. 적응 삼각형 빔 방법

2.1 적응 삼각형 빔 방법에서의 초기 빔 모델링

삼각형 빔 방법은 소음원을 중심으로 하는 구면을 세 음선으로 이루어지는 삼각형 빔으로 분할하고, 각각의 삼각형 빔의 직접 및 반사경로를 추적하여 수음점에 전달되는 음 에너지를 계산한다. 적응 삼각형 빔 방법은 기존 삼각형 빔 방법과 비교하여 삼각형

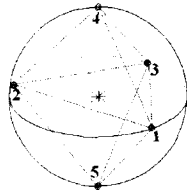


Fig. 1 Nodes to define the hexahedron on the surface of unit sphere

Table 1 Coordinates to define a hexahedron subdividing unit sphere

| Node number | Coordinate | | |
|-------------|---------------|------|----|
| | x | y | z |
| 1 | $\sqrt{3}/2$ | -1/2 | 0 |
| 2 | $-\sqrt{3}/2$ | -1/2 | 0 |
| 3 | 0 | 1 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 1 |
| 5 | 0 | 0 | -1 |

빔이 음향 반사 특성이 다른 복수 경계면에 입사될 경우 삼각형 빔을 자동 재분할하는 방법이다. 따라서, 기존 삼각형 빔 방법과는 달리 초기 삼각형 빔의 형태 및 개수에 상관없이 수렴성이 보장되는 음장해석이 가능하다. 이에 본 연구에서는 Fig. 1과 Table 1에 나타난 바와 같이 음원을 둘러싸는 단위 구면을 6개의 삼각형 면으로 분할토록 하여 초기 삼각형 빔의 개수를 최소화하고 삼각형 빔 방법을 적용하였다.

2.2 반사점 결정

공간상의 임의 평면은 삼각형 혹은 사각형 평면의 조합으로 근사 모델링할 수 있으며, 이때 임의 i -번째 평면의 방정식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$A_i \cdot x + B_i \cdot y + C_i \cdot z + D_i = 0$$

또는,

$$\vec{N}_i \cdot \vec{X} + D_i = 0 \quad (1)$$

여기서,

$\vec{N}_i = (A_i, B_i, C_i)$: i -번째 평면의 단위 법선 벡터

D_i : 좌표축의 원점으로부터 i -번째 평면까지의 거리

한편, 삼각형 빔을 구성하는 세 음선을 정의하는 벡터 방정식 \vec{R} 은 음원 또는 가상음원의 위치벡터 \vec{R}_0 와 음선의 단위 방향 벡터 \vec{R}_d 및 음선의 이동거리 d 를 이용하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\vec{R} = \vec{R}_0 + \vec{R}_d \times d, \quad d > 0 \quad (2)$$

상기의 경계면 방정식과 음선의 방정식을 이용하여 경계면에서 삼각형 빔을 구성하는 각 음선의 반사점은 다음과 같은 과정을 거쳐 결정할 수 있다.

① 경계면을 정의하는 평면을 음선이 통과하는 지를 조사한다. 이때, 평면의 법선 벡터 \vec{N}_i 가 음원 방향이라고 가정하면 음선의 방향벡터 \vec{R}_d 가

$$\vec{R}_d \cdot \vec{N} < 0 \quad (3)$$

인 조건을 만족하는 평면만이 반사면이 될 수 있다.

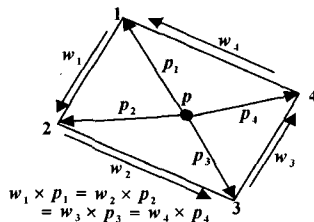
② 음선이 통과할 경우 그 통과점이 대상 경계면의 영역 내부에 위치하는지를 판단한다. 이는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 반사점으로부터 경계면 정의 질점

방향을 정의하는 단위벡터 p_i 와 인접한 절점간의 단위 방향벡터 w_i 의 외적이 모두 같다는 조건 또는 반사점과 경계면 정의 절점으로 분할되는 삼각형의 면적의 합이 실제 경계면의 면적과 같아야 된다는 조건을 이용해서 판별할 수 있다.

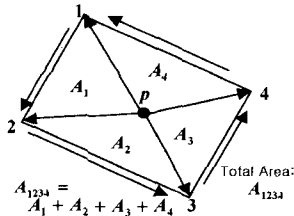
③ 복수 개의 경계면이 상기 조건을 만족할 경우 음선의 이동거리 d 가 최소 값인 경계면이 실제 반사점이 있는 경계면에 해당한다.

2.3 경계면에서의 반사 및 가상 음원의 위치

삼각형 빔이 경계면에서 반사될 경우 반사 후의 삼



(a) Method using the cross products of vector



(b) Method using the triangle areas

Fig. 2 Methods to check the ray incidence within a plane

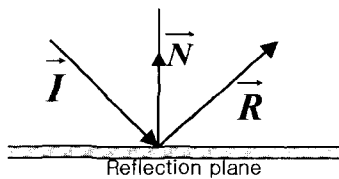


Fig. 3 Reflection at a wall

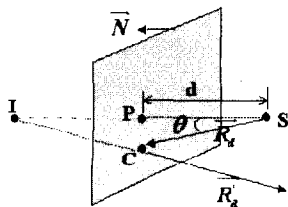


Fig. 4 Location of image sources in the propagation of triangular beam

각형빔을 구성하는 세 음선의 방향벡터 \vec{R} 은 Snell법칙에 의거하여 Fig. 3에 보인 바와 같이 입사음선 \vec{I} 와 반사면의 법선벡터 \vec{N} 를 이용하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$\vec{R} = \vec{I} - 2(\vec{I} \cdot \vec{N})\vec{N} \quad (4)$$

한편, 반사 후 삼각형 빔의 가상 음원의 위치벡터 \vec{I} 는 Fig. 4에 보인 바와 같이 삼각형 빔을 구성하는 세 개의 음선의 반사점으로 구성되는 평면에 대하여 음원과 대칭인 지점에 있으므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{I} = \vec{P} + d\vec{N} = \vec{S} + 2d\vec{N} \quad (5)$$

여기서,

\vec{I} : 가상음원의 위치 벡터

\vec{P} : 반사면에 대한 음원의 수직 투영점의 위치벡터

\vec{S} : 음원의 위치벡터

\vec{N} : 반사면의 단위 법선벡터

$$d = \frac{\vec{SC} \cos \theta}{|\vec{N}|} = \frac{\vec{N} \cdot \vec{SC}}{|\vec{N}|} : \text{음원으로부터}$$

반사면까지의 수직거리

C : 반사점

θ : \vec{SC} 와 \vec{N} 의 사이각

한편, 빔의 반사 후 진행경로는 Fig. 5에 보인 바와 같이 반사 후의 세 음선의 방향벡터에 의해 결정된다.

2.4 음향 반사특성이 다른 복수 경계면에서의 삼각형 빔 분할

적용 삼각형 빔 방법에서는 삼각형 빔을 구성하는 세 개의 음선이 모두 음향 반사특성이 같은 평면에서 반사되는 경우에는 기존의 삼각형 빔 방법과 동일한

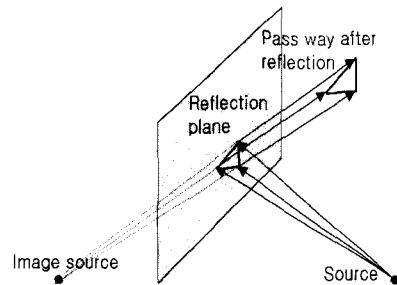


Fig. 5 Pass way of a triangular beam after reflection

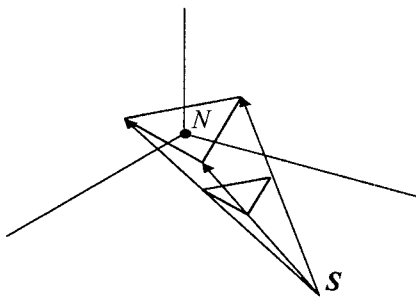
방법으로 빔을 추적하며, 음향 반사특성이 서로 다른 2개 이상의 경계면에서 반사될 경우에는 입사된 삼각형 빔을 음향 반사특성이 동일한 복수 개의 삼각형 빔으로 자동 재분할한 후 각각의 분할된 삼각형 빔을 독립적으로 추적한다. 또한, 삼각형 빔의 자동 재분할을 위해서는 삼각형 빔을 구성하는 세 음선의 반사점, 투영 삼각형 빔 내부에 위치한 경계면을 정의하는 절점 및 투영 삼각형 빔의 경계선과 반사면의 경계선과의 교점을 파악하여야 한다. 상기 점들은 다음과 같은 방법에 의해 구할 수 있다.

① 삼각형 빔을 구성하는 세 개 음선의 반사점을 찾고, 사전에 지정된 각 경계면의 고유번호를 이용해서 세 개의 음선이 복수 경계면에서 반사되는 지를 판별한다.

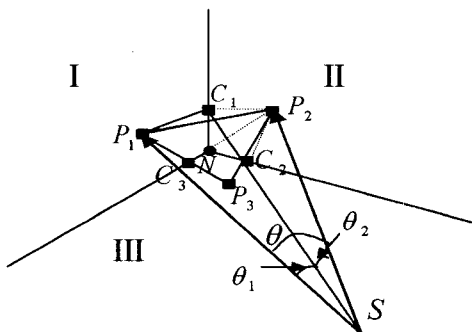
② 복수 경계면에서 빔이 반사되는 경우 삼각형 빔을 재분할하기 위한 점들은 다음의 방법으로 찾는다.

단계 1

Fig. 6(a)에 보인 바와 같이 경계면을 구성하는 노드점과 음원을 연결한 직선이 입사되는 삼각형 빔 내부에 위치하는 지를 Fig. 2에 나타난 방법으로 찾는다.



(a) Node point located in the projected beam



(b) Cross points at boundaries of the projected beam and reflection planes

Fig. 6 Points to generate adaptive triangular beams on multiple reflection planes

단계 2

Fig. 6(b)에 보인 바와 같이 삼각형 빔을 구성하는 경계선과 각 평면의 경계선이 만나는 교점을 찾는다. 이때, 교점은 Fig. 6(b)에 정의된 θ_1 과 θ_2 가 θ 보다 작고, 교점과 음원, 반사점을 이용하여 구한 $\overrightarrow{SP_1} \times \overrightarrow{SC_1}$ 와 $\overrightarrow{SP_1} \times \overrightarrow{SP_2}$ 의 방향 벡터가 서로 일치한다는 조건을 만족한다.

③ Fig. 7에 보인 바와 같이 ②에서 찾은 교점이 회절평면의 경계선상에 존재할 경우 음원과 교점을 잇는 직선 벡터를 이용해서 회절평면을 기준으로 음원 반대편에 위치한 반사점을 추가로 찾는다.

④ 동일한 반사특성을 가지는 평면상에 위치한 교점, 반사점 및 경계면 정의 절점들을 분류한다. 이때, 반사면의 경계선상에 위치한 교점들과 경계면 정의 절점은 이를 공유하는 모든 평면상에 위치한 점으로 간주한다.

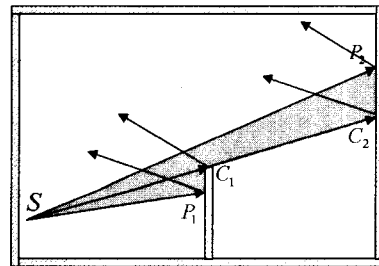
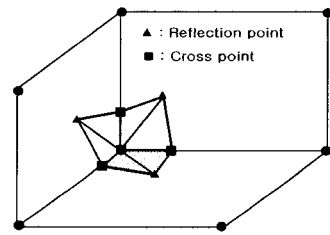
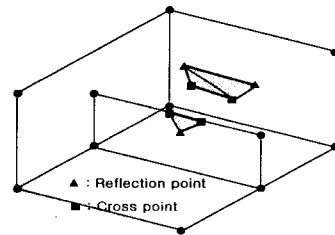


Fig. 7 An example of subdivision of a triangular beam at discontinuous reflection planes



(a) Subdivision on planes with common boundaries



(b) Subdivision on discontinuous planes

Fig. 8 Examples of subdivision of a triangular beam in adaptive triangular beam method

⑤ 동일한 평면상에 위치한 점들을 이용해서 Delaunay 방법⁽⁵⁾ 등을 이용해서 복수 개의 삼각형 빔으로 분할한다.

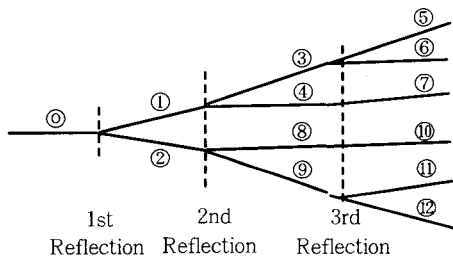
Fig. 6과 Fig. 7에 나타난 경우에 대해서 상기 과정을 통해 삼각형 빔을 재분할 한 결과를 Fig. 8에 예시하였다.

2.5 적응 삼각형 빔 방법에서의 빔 추적 순서

적응 삼각형 빔 방법에서는 삼각형 빔이 음향 반사 특성이 다른 경계면에서 자동 분할될 경우 분할된 각각의 빔을 추적해야만 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 분할된 각각의 빔들은 계층(tree) 구조로 관리 하되 효율적인 컴퓨터 메모리 사용을 위해서 분할된 빔의 계층 정보를 동적 메모리로 관리하고 기 추적된 빔에 연관된 정보는 계산 완료와 동시에 삭제하는 방법을 적용하였다. 삼각형 빔들의 분할 순서와 분할된 빔들의 추적 및 정보 저장 및 삭제 순서는 Fig. 9에 예시하였다.

2.6 직접 및 반사음 에너지 산정

삼각형 빔 방법은 음향 에너지가 유한한 면적을 갖는 빔을 통하여 전달되므로 수음영역은 점으로 정의



| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|---|---|---|---|
| Calculation stage | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | | | | |
| Beam segmentation & storage | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | ⑨ | ⑩ | ⑪ | ⑫ | | | | | | |
| Tracing beam | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | ⑨ | ⑩ | ⑪ | ⑫ | | | | | | |
| Erasing beam information | | | | | | ⑥ | ⑤ | | ⑦ | ④ | ③ | | ⑩ | ⑫ | ⑪ | ⑧ | ② | ① |

Fig. 9 An example of beam segmentation, tracing and information management order in adaptive triangular beam tracing method

되며, 수음점과 가상음원을 연결한 직선이 빔을 정의하는 삼각형의 내부 영역을 통과하면 음에너지가 전달되는 경우에 해당한다.

삼각형 빔 방법은 전파거리에 따른 음향 에너지의 구형발산효과(spherical divergence)가 빔의 면적 확산에 의해 반영된다. 따라서, 반사회수가 q 번째인 삼각형 빔이 수음점을 통과할 때 수음점에 전달되는 에너지 E 는 반사된 경계면에서의 흡음률 α_i 와 음원으로 부터 수음점까지의 총 전달거리 L 을 이용하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$E = E_0 \frac{\exp(-mL)}{4\pi L^2} \prod_{i=1}^q (1 - \alpha_i) \quad (6)$$

여기서,

E_0 : 음원 에너지

α_i : i 번째 반사면의 흡음률(absorption coefficient)

m : 단위 길이당 공기의 에너지 감쇠계수 (attenuation coefficient)로써 ISO 9613-1⁽⁶⁾ 방법 적용

q : 반사회수

한편, 빔의 이동거리 L 을 이용하여 빔의 이동시간 t_i 를 구할 수 있으며, 일정한 잔향시간 또는 에너지의 감소 한도 내에서의 음에너지의 시간 감쇠를 나타내는 충격응답과 전체 에너지를 합산한 정상상태 응답을 구할 수 있다.

2.7 회절음 효과 산정

삼각형 빔 방법은 기하 음향학에 근거한 타 방법과 마찬가지로 음파의 회절 경로에 의한 음에너지 전달 기여분을 별도로 고려하여야만 정밀한 음장해석이 가능하다. 이에 본 연구에서는 회절 경로로 수음점에 전달되는 음압 L_{diff} 를 Kurze 식⁽⁷⁾을 이용하여 다음과 같이 산정하였다.

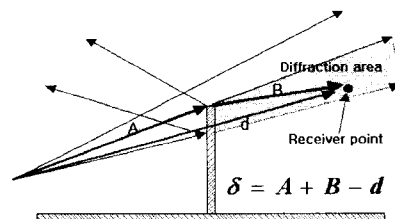


Fig. 10 Pathlength difference between direct and diffraction paths

$$L_{diff} = L_{dir} - 20 \log \left(\frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \right) - 5 \quad (7)$$

여기서, L_{dir} 은 회절 유발 구조물이 없는 경우의 직접 전달음압레벨이고, N 은 Fresnel 수로서 Fig. 10에 나타난 직접 전달음과 회절음의 경로차 δ 과 음파의 파장 λ 에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \quad (8)$$

3. 수치해석 및 고찰

3.1 에너지 감쇠곡선

본 연구에서 제시한 적응 삼각형 빔 방법을 이용한 음장해석 기법의 타당성과 정확도를 검증하기 위하여 Fig. 11에 보인 바와 같이 가로, 세로, 높이가 10×10×5 m인 직육면체 격실의 중심 위치에 점 소음원이 위치한 경우에 음원으로부터 4.272 m 떨어진 수음점에서 충격응답으로 나타나는 에너지 감쇠특성 해석을 수행하였다. 소음해석에 있어서 경계면 흡음률은 모두 0.5로 설정하였으며, 공기흡음효과 산정에 필요한 온도와 상대습도는 20°C와 60 %로 각각 설정하였다.

Fig. 12에는 초기 삼각형 빔 개수를 6개, 20개 및 180개로 한 경우에 적응 삼각형 빔 방법으로 산정한 에너지 감쇠특성을 Eyring의 격실 전체에 대한 에너지 감쇠 평가식⁽⁸⁾

$$\beta_E(t) = 10 \log \left[\frac{E(t)}{E_0} \right] = 10 \left[\frac{cS}{4V} t \ln(1 - \bar{\alpha}) \right] \log e \quad (9)$$

여기서,

- E_0 : 소음원의 음향에너지(Watt)
- $E(t)$: 시간 t 에서의 격실의 음향에너지(Watt)
- c : 음속(m/s)
- S : 격실 내부 표면적(m²)
- V : 격실의 체적(m³)
- $\bar{\alpha}$: 격실의 평균흡음률(= $\frac{\sum a_i S_i}{\sum S_i}$)
- a_i, S_i : 각각 경계면 요소의 흡음률과 면적(m²)

에 의한 결과와 함께 나타내었다. 이로부터 적응 삼각형 빔 방법에 의한 해석 결과는 초기 삼각형 빔의 분할 개수에 상관없이 시간에 따른 에너지 감쇠가 일

정하고, Eyring의 격실 전체에 대한 에너지 감쇠 평가 결과와도 부합성이 매우 양호함을 확인할 수 있다. 한편, 초기 빔의 개수가 6개인 경우의 해석 결과가 타 경우와 비교해서 약간의 차이를 나타내는 것은 연산상의 수치 오차 등에 의해 발생한 것으로 판단한다.

3.2 정상상태 음압레벨

적용 삼각형 빔 방법 적용시 재료 흡음률, 연속 및 불연속 경계면에서의 빔의 분할 현상과 함께 회절 효과가 모두 발생하는 격실을 대상으로 정상상태 음압레벨 해석의 유용성과 타당성을 확인하고자 Fig. 13에 보인 바와 같이 전체 체적 V 가 47.29 m³이고, 실내 표면적 S 가 100.57 m²이며, 1.63 m×1.43 m의 개구부를 갖는 중간 벽으로 분할된 격실에 4 m²의 흡음재를 설치하여 음장해석 및 실험을 수행하였다. 한편, 해석에 있어서 수음영역 및 음원의 위치와 해석 결과의 정확도 검증을 위한 계측지점은 Fig. 14에 보인 바와 같이 설정하였다.

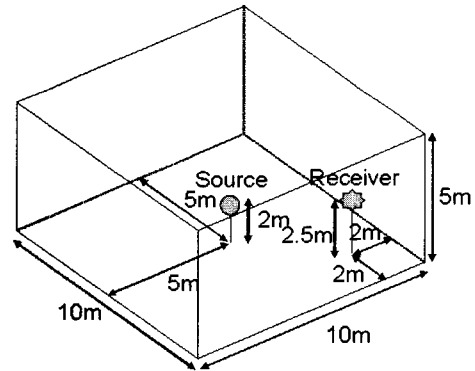


Fig. 11 Parallelepiped room adopted in numerical analysis

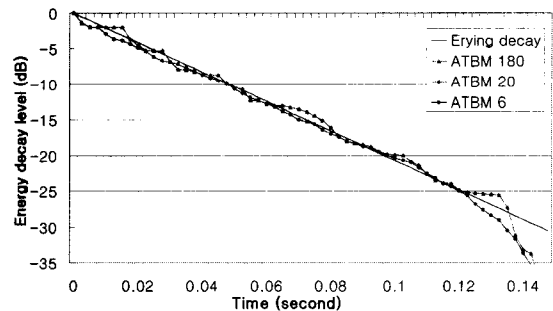


Fig. 12 Energy decay curves in the parallelepiped room

수치해석에 있어서 공기 흡음 효과를 산정하기 위한 공기 온도와 습도는 실험 당시의 온도 18.5°C, 습도 35 %로 설정하였으며, 실험 당시 이용한 무지향성 음원의 음향과위레벨 L_w 와 흡음재 및 경계면의 흡음률은 Table 2에 나타내었다.

초기 삼각형 빔의 개수를 6개로 한 적용 삼각형 빔 방법을 이용한 해석 결과는 계측 결과와 함께 Fig. 15에 나타내었다. 또한, Table 3에는 각각의 수음점에

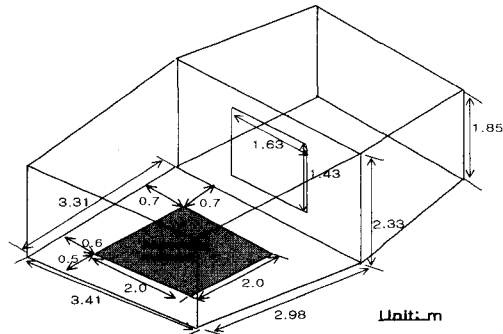


Fig. 13 Room geometry

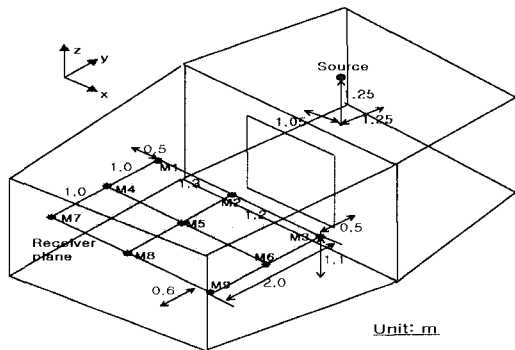
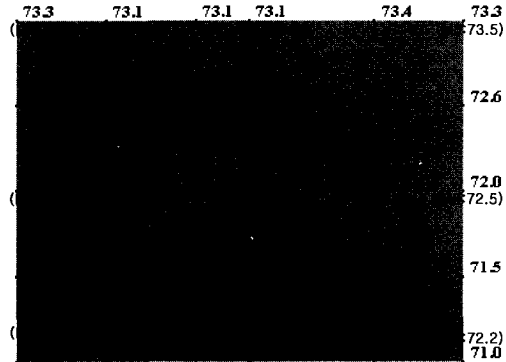


Fig. 14 Positions of sound source, receiver plane and measurement locations of sound pressure levels

Table 2 Sound power level and absorption coefficient α of absorbing material and wall

| Octave band center freq. (Hz) | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Source PWL (dB) | 54.3 | 65.8 | 66.8 | 65.8 | 70.8 | 69.5 | 71.5 |
| α Absorbing material | 0.23 | 0.57 | 0.93 | 0.89 | 0.78 | 0.50 | 0.50 |
| Wall | 0.0093 | 0.0101 | 0.0121 | 0.0149 | 0.0186 | 0.0195 | 0.0200 |

있어서 해석 및 계측 결과를 1-옥타브밴드별로 나타내었으며, Table 4에는 상기 9개 지점에서의 해석 및



* M : Measured SPL

Fig. 15 Overall sound pressure levels obtained by ATBM and measurement at the receiver plane

Table 3 Measured and predicted sound pressure level in dB at receivers

| Position | | Octave band center frequency(Hz) | | | | | | | |
|----------|---|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|---------|
| | | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | Overall |
| M1 | M | 58.5 | 66.7 | 65.7 | 63.8 | 67.8 | 65.0 | 62.5 | 73.5 |
| | P | 58.6 | 67.6 | 66.4 | 64.6 | 68.3 | 65.8 | 63.5 | 74.3 |
| M2 | M | 59.6 | 67.4 | 66.8 | 63.8 | 67.5 | 64.6 | 63.3 | 73.8 |
| | P | 58.7 | 67.7 | 66.4 | 64.5 | 68.1 | 65.7 | 63.0 | 74.2 |
| M3 | M | 56.4 | 66.5 | 66.6 | 63.7 | 67.4 | 65.1 | 62.2 | 73.5 |
| | P | 58.7 | 67.7 | 66.5 | 64.7 | 68.3 | 65.9 | 63.3 | 74.3 |
| M4 | M | 57.3 | 66.8 | 64.4 | 62.5 | 66.3 | 63.4 | 59.8 | 72.4 |
| | P | 57.8 | 66.6 | 65.0 | 63.1 | 66.7 | 64.2 | 60.6 | 72.8 |
| M5 | M | 56.8 | 66.2 | 64.8 | 62.2 | 67.0 | 63.6 | 61.1 | 72.5 |
| | P | 58.2 | 66.9 | 65.4 | 63.5 | 67.1 | 64.6 | 61.3 | 73.2 |
| M6 | M | 55.5 | 66.6 | 65.0 | 62.5 | 66.2 | 63.7 | 61.6 | 72.5 |
| | P | 58.0 | 66.8 | 65.4 | 63.5 | 67.1 | 64.6 | 61.2 | 73.1 |
| M7 | M | 58.5 | 66.2 | 63.9 | 62.7 | 65.5 | 62.5 | 59.4 | 71.9 |
| | P | 57.2 | 65.8 | 64.2 | 62.3 | 65.9 | 63.4 | 59.6 | 72.0 |
| M8 | M | 56.5 | 66.3 | 63.5 | 62.1 | 65.9 | 62.9 | 60.3 | 71.9 |
| | P | 57.5 | 66.2 | 64.6 | 62.6 | 66.2 | 63.8 | 60.1 | 72.3 |
| M9 | M | 57.0 | 65.5 | 64.2 | 62.7 | 66.5 | 63.0 | 61.0 | 72.2 |
| | P | 57.3 | 66.0 | 64.4 | 62.5 | 66.1 | 63.6 | 59.8 | 72.2 |

Table 4 Mean difference ΔL and standard deviation σ between predicted and measured sound pressure level in dB

| Position | Octave band center frequency(Hz) | | | | | | | Overall |
|------------|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|---------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 | 8000 | |
| ΔL | 0.65 | 0.34 | 0.38 | 0.59 | 0.42 | 0.87 | 0.13 | 0.45 |
| σ | 1.21 | 0.52 | 0.41 | 0.51 | 0.39 | 0.15 | 0.71 | 0.26 |

계측 결과 차이값의 평균치와 표준편차를 나타내었다.

상기 결과로부터 적응 삼각형 빔 방법에 의한 해석 결과와 계측결과의 평균 차이값과 표준편차는 125 Hz 옥타브밴드를 제외한 주파수 영역에서 0.9 dB 이내로서 계측치와의 부합성이 매우 양호하였다. 따라서, 본 연구에서 제시한 적응 삼각형 빔 방법은 직접, 반사 및 회절 경로가 모두 존재하는 복잡한 음장에 있어서 초기 빔의 분할 개수와 상관없이 정밀한 음장 해석이 가능하다고 판단한다.

한편, 125 Hz 주파수 대역에서 해석 결과가 계측 결과와 최대 2.5 dB의 차이를 나타내어 상대적으로 정확도가 떨어지는 것은 상기 주파수에서의 파장이 격실의 가장 짧은 변의 길이와 거의 같은 약 2.72 m로서 음파의 간섭효과가 컸기 때문인 것으로 판단한다. 아울러, 8 kHz 대역에서 상대적으로 차이가 큰 것은 흡음재의 흡음률 자료가 정확하지 못하였기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 음향 반사특성이 다른 복수 경계면에서 반사되는 삼각형 빔을 자동 재분할하는 적응 삼각형 빔 방법을 제시하였다. 제시된 적응 삼각형 빔 방법과 회절 경로로 전달되는 음 에너지 기여분을 고려할 수 있는 음장해석 프로그램을 개발하여 일련의 수치해석 및 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 음향 반사 특성이 다른 복합 경계면에서의 반사 특성을 삼각형 빔의 자동 재분할로 정밀 반영하는 적응 삼각형 빔 방법은 초기 삼각형 빔의 분할 개수와 상관없이 음장해석 결과의 수렴성이 보장된다.

(2) 적응 삼각형 빔 방법은 음장 해석 중에 분할되는 삼각형 빔의 개수가 기하급수적으로 늘어나므로 분할된 빔 정보의 효율적 관리가 중요하다.

(3) 회절효과를 고려한 적응 삼각형 빔 방법을 이용한 음장해석 결과는 기존의 이론식 또는 실험 결과와 매우 양호한 부합성을 나타내었다. 따라서, 본 연구에서 개발한 적응 삼각형 빔 방법을 이용한 음장해

석 프로그램은 반사음이 지배적인 소음원실의 경제적인 방음 대책 수립은 물론 극장이나 콘서트 홀과 같이 소리의 음영지대를 최소화하기 위한 음장 해석에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 첨단조선공학연구원 터와 부산대학교 학술연구조성비(4년과제)의 지원으로 이루어졌음.

참 고 문 헌

- (1) Crocker, M. J., 1998, Handbook of Acoustics, John Wiley & Sons.
- (2) Cremer, L. and Mueller, H. A., 1982, Principles and Applications of Room Acoustics, Vol. 1, Applied Science Publishers Ltd..
- (3) 김관주, 박진규, 2002, "기하음향기법을 적용한 한국형 고속철도 실내소음 저감방안," 한국소음진동공학회논문집, 제12권 제6호, pp. 431~436.
- (4) Lewers, T., 1993, "A Combined Beam Tracing and Radiant Exchange Computer Model of Room Acoustics," Applied Acoustics, Vol. 38, pp. 161~178.
- (5) Lee, D.T. and Schachter, B., 1980, "Two Algorithms for Constructing Delaunay Triangulation", International J. of Computers and Information Science, Vol. 9, No. 3, pp. 219~242.
- (6) ISO 9613-1, 1993, "Acoustics - Attenuation of Sound During Propagation Outdoors - Part 1: Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere," International Standard Organization, Geneva.
- (7) Kurze, U. J., 1974, "Noise Reduction by Barriers," J. of Acoustic Soc. Am., V. 55.
- (8) Kuttruff, H., 1991, Room Acoustics, Elsevier Science Publishers.