

라디오시티법을 이용한 실내 음향장 해석 연구

김국현[†]
동명대학교 조선해양공학부

A Study on Room Acoustic Field Analysis using Radiosity Method

Kookhyun Kim[†]
School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Tongmyong University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Various numerical methods have been adopted for indoor noise assessments of ship plant. Acoustical radiosity method is one of the high frequency approaches for acoustic field analysis, which assumes diffuse reflections by boundaries so that it could be efficiently applied to the acoustically diffused indoor space noise analysis. In this study, an acoustic field analysis program has been developed based on radiosity method, which could apply for acoustically large enclosures such as ship's indoor space. For this purpose, the procedure of the acoustical radiosity method has been summarized and implemented to an acoustic field analysis program using MATLAB. Numerical example for a rectangular indoor space has investigated validity of the implemented program. Steady state sound pressure levels calculated for a continuous acoustic source signal have shown good agreement with those by other solutions such as an analytic solution and a ray tracing method. Instantaneous sound pressure levels calculated for an impulsive acoustic signal have provided the clues of direct/reflected acoustic field and reverberation time.

Keywords : Acoustic field(음향장), Diffuse reflecting surfaces(확산 반사면), Acoustic radiosity method(음향 라디오시티법), Form factor(형상인자), Sound pressure level(음압레벨), Reverberation time(잔향시간)

1. 서론

선박 거주공간의 소음특성은 승조원의 안락성 측면에서 매우 중요한 인자로 고려되고 있다. 이에 세계해사기구(International Maritime Organization: IMO)등에서는 선박에 대한 격실별 소음 기준치(limits)를 제시하고 있다 (IMO, 2014). 선박의 격실별 소음기준치 만족 여부를 판단하기 위해서는 설계단계에서부터 소음해석을 통한 정량평가가 이루어져야 한다.

소음해석에 적용되고 있는 음향이론으로는 경계요소법(Boundary Element Method: BEM), 유한요소법(Finite Element Method: FEM) 등의 파동모델(wave model) 기반의 음향해석이론과 음선추적법(Ray Tracing Method: RTM), 빔추적법(Beam Tracing Method: BTM), 가상음원법(Image Source Method: ISM), 음향 라디오시티법(Acoustic Radiosity Method: ARM) 등의 기하음향모델(Geometric Acoustic Model) 기반의 음향해석이론, 통계적 에너지해석(Statistical Energy Analysis: SEA), 에너지흐름해석(Energy Flow Analysis: EFA) 등의 에너지 기반의 음향해석이론 등이 있다 (Savioja & Svensson, 2015). 파동모델

기반의 음향해석이론은 파동방정식을 지배방정식으로 하여 정확한 해를 제공할 수 있는 장점이 있으나 주파수가 증가할수록, 대 상공간의 체적이 커질수록 연산 부담이 과도하게 증가해 선박 격 실과 같은 대형공간에 대한 음향장 해석에 적용하기에는 부적합 한 요소가 많다. 기하음향모델 기반의 음향해석이론은 광학이론, 에너지평형이론, 열전달이론 등의 물리이론을 차용하여 음파전달 현상의 근사해를 구하는 방법으로써, 파동모델 기반의 음향해석 이론 대비 연산 부담이 적어 대형 공간에 대한 중주파수 및 고주 파수 영역에서의 음향해석에 실용적으로 활용되고 있다. 이 중 에 서 음향 라디오시티법은 음향에너지의 전달현상과 열전달 문제 에서의 에너지 교환현상과의 유사성에 착안하여 제안되었으며, 특히, 음향공간을 구성하는 벽면을 이상적인 확산 반사면으로 가 정하므로 확산 음향장(diffused acoustic field) 형성이 용이한 고 주파수 영역의 음향 해석에 적합하다 (Kuttruff, 2009).

Miles (1984)는 음향라디오시티 기반의 적분방정식을 정식화 하고 직육면체 형상의 공간에 대한 수치해석을 위해 이산화 방법 을 제안하였다. Nosal and Hodgson (2002)은 음향 라디오시티 법을 이용한 음향장 해석결과를 검증하기 위해 스퀘어룸, 음향챔 버 등 직육면체 형상의 실내 공간에 대한 해석과 실험을 수행한

바 있다. Nosal et al. (2004)는 기존의 음향라디오시티법에 대한 알고리즘을 개선해 임의의 형상을 갖는 실내공간에 대한 음향장 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 기 정립된 음향 라디오시티법을 기반으로 선박 격실과 같은 대형 실내공간에 적용 가능한 확산 음향장 해석 프로그램을 개발하고자 한다. 이를 위한 기초연구로써, 본 논문에서는 음향 라디오시티법의 이론과 알고리즘을 정리하고 MATLAB을 이용해 수치해석 프로그램을 구현한다. 구현된 프로그램의 타당성을 검증하기 위해 직육면체 실내 공간에 대한 정상상태 음압 레벨을 해석하고 확산음장 이론에 및 음선이론에 의한 결과와 비교한다. 또한 순간 음압레벨 산정하여 음향장의 직접음성분과 반사성분의 영향 및 잔향시간을 검토한다.

2. 음향 라디오시티법

음향 라디오시티법에 기반한 음향장 해석은 음원에 의해 벽면에 유기되는 음향 라디오시티 산정, 벽면과 벽면 간의 음향 에너지 교환에 의해 유기되는 누적 음향라디오시티 산정, 최종적으로 벽면에 유기된 라디오시티를 이용한 수음점에서의 음향인텐시티 및 음압 계산) 등의 절차에 따라 수행된다. 또한 각 단계에서 사용되는 적분방정식은 다음과 같은 가정에 따라 유도되며 (Miles, 1984), 이 때, 사용된 기호체계는 Fig 1에 표시한 바와 같다.

- 1) 실내공간 내부 음향장은 음원으로부터 직접 수신되는 직접음 성분과 실내 공간의 경계면에 음원으로부터 직접 유기되고 이후 경계면 간 에너지 교환에 의해 형성되는 음향 라디오시티에 의한 간접음 성분의 합이다.
- 2) 실내 공간의 벽면은 확산 반사면(diffuse reflecting surface)으로 간주한다. 즉, 거울면반사(specular reflection) 특성은 무시한다.
- 3) 벽면에 대한 입사 및 반사 음향인텐시티는 경계면의 투영면적에 비례하며(Lambert's cosine law), 반사율은 입사각도에 대해 독립적이다.
- 4) 실내 음향장은 Schroeder 한계(Schroeder's limit)를 만족한다 (Skålevik, 2011). 즉, 실내공간 크기에 비해 파장이 매우 작아 음파의 위상차에 의한 영향은 무시할 수 있어 확산음향장을 형성한다.

2.1 음향 라디오시티 산정

실내 공간(enclosure)의 벽면을 유한개의 평면 다각형으로 이산화하면(Miles 1984), 공간 내부 점음원(point source)에 의해 i -번째 평면 S_i 에 유기되는 라디오시티 $B_i(t)$ (Watt/m²)는 식 (1)과 같은 시간의존 적분방정식으로부터 산정할 수 있다(Nosal et al., 2004). 이 식에서 첫 번째 항은 음원(source)으로부터 수음점(receiver)까지의 직접음 성분이며, 두 번째 항은 실내 공간 벽면을 거쳐 수음점까지 전달되는 간접음 성분이다.

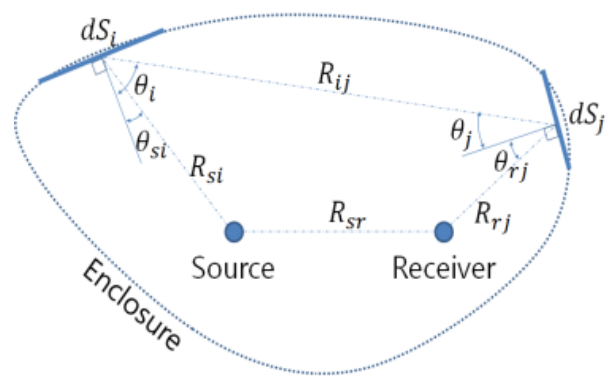


Fig. 1 Geometry of enclosure and symbol for integral equation

$$B_i(t) = \frac{\rho_i}{A_i} \int_{S_i} \frac{W(\bar{r}_s, t - R_{si}/c) \cos \theta_{si}}{4\pi R_{si}^2} e^{-\eta R_{si}} dS_i + \frac{\rho_i}{A_i} \int_{S_j=1}^N \int_{S_j} F_{ij} B_j(t - R_{ij}/c) e^{-\eta R_{ij}} dS_j dS_i \quad (1)$$

여기서, ρ_i 와 A_i 는 각각 i -번째 평면 다각형의 파워반사계수(power reflection coefficient)와 면적(m²)을 나타내며, N 은 평면 다각형 개수, $W(\bar{r}_s, t)$ 는 \bar{r}_s 에 위치한 음원의 음향파워(acoustic power, Watt), θ_{si} 는 음원과 i -번째 평면 다각형의 법선벡터가 이루는 각(rad), R_{si} 는 음원과 평면 다각형 상의 임의 위치 간 거리(m), R_{ij} 는 i -번째 평면 다각형과 j -번째 평면 다각형 상의 임의 위치 간 거리(m), η 는 공간 내부 매질에 의한 감쇠계수(damping coefficient), t 는 시간(s), c 는 음파 전달속도(m/s)이다. 한편, F_{ij} 는 i -번째 평면 다각형과 j -번째 평면 다각형 간의 형상인자(shape factor 또는 form factor)이며, 식 (2)과 같이 정의된다.

$$F_{ij} = \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{\cos \theta_i \cos \theta_j}{\pi R_{ij}^2} dS_j dS_i \quad (2)$$

여기서, θ_i (rad)와 θ_j (rad)은 i -번째 평면다각형과 j -번째 평면 다각형 상에 각각 위치한 임의의 점을 연결한 선과 i -번째 및 j -번째 평면 다각형 각각의 법선벡터가 이루는 각을 의미한다.

2.2 수음점 인텐시티 및 음압레벨

수음점 위치 \bar{r}_r 에서의 순간 음향인텐시티(instantaneous acoustic intensity) $I(\bar{r}_r, t)$ 는 식 (3)에 의거 산정한다. 이 식에서 첫 번째 항은 실내 공간 벽면에 유기된 라디오시티에 의한 영향 분이며, 두 번째 항은 음원으로부터 수음점까지의 직접음 성분이다.

$$I(\vec{r}_r, t) = \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^N \int_{S_i} \frac{B_i(t - R_{ri}/c) \cos \theta_{ri}}{R_{ri}^2} e^{-\eta R_{ri}} dS_i + \frac{W(\vec{r}_s, t - R_{sr}/c)}{4\pi R_{sr}^2} e^{-\eta R_{sr}} \quad (3)$$

여기서, R_{ri} 와 R_{sr} 은 수음점과 i -번째 평면 다각형 상의 임의 위치 사이의 거리(m)와 음원과 수음점 사이의 거리(m)를 각각 의미한다.

한편, 수음점에서의 순간 음압레벨(instantaneous sound pressure level) $L_p(\vec{r}_r, t)$ (dB re. 20 μ Pa)은 식 (4)로부터 산정하며, 연속 조화 음향신호(continuous harmonic source signal)를 음원으로 사용하면 정상상태 음압레벨(steady state sound pressure level) 산정도 가능하다.

$$L_p(\vec{r}_r, t) = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2(\vec{r}_r, t)}{p_o^2} \right) = 10 \log_{10} \left(\rho_o c \frac{I(\vec{r}_r, t)}{p_o^2} \right) \quad (4)$$

여기서, $p(\vec{r}_r, t)$ 는 수음점에서의 음압(Pa), p_o 는 기준음압(=20 μ Pa), ρ_o 는 매질 밀도(kg/m³)이다.

3. MATLAB 프로그램

앞서 정리한 음향 라디오시티법 이론을 기반으로 MATLAB 프로그램을 구현하였으며, 그 구성은 Fig. 2와 같이 입력부, 전처리부, 주처리부, 후처리부 등으로 되어 있다. 입력부에서는 수치해석 모델입력, 음원 및 수음점 정의, 벽면 및 매질의 음향특성, 시간 이산화 등 계산조건을 포함하며, 전처리부에서는 수치해석 모델을 구성하는 삼각형 평면의 면적, 면적중심 등의 기하정보와 삼각형 평면 요소간의 형상인자 등을 미리 산정해 준다. 주처리부에서는 삼각형 평면 요소별로 음원에 의해 생성되는 음향 라이오시티를 계산하며, 마지막으로 후처리부에서는 음압레벨 등을 산정한다.

4. 수치해석

구현된 MATLAB 프로그램의 타당성을 검토하기 위해 정육면체 모델에 대한 음향장 해석을 수행하고 그 결과를 음선추적법, 이론식 등에 의한 결과와 비교하였다. 음향장 해석결과는 대상 수치해석모델에 대한 정상상태 음압레벨과 순간 음압레벨로 구분하여 검토하였다.

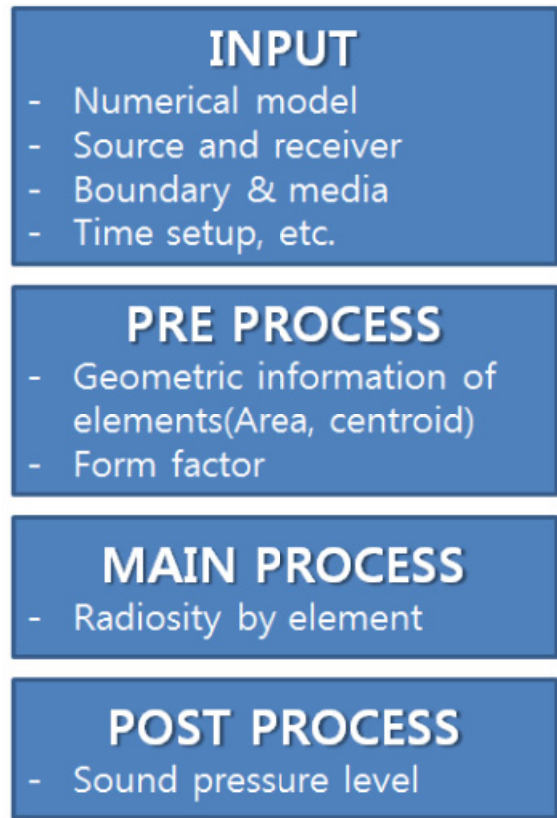


Fig. 2 MATLAB program based on the acoustic radiosity method

4.1 수치해석 모델 및 해석조건

수치해석모델은 Fig 3에 보인 바와 같으며, 그 세부 정보는 Table 1에 정리한 바와 같다. 수치해석 모델의 크기는 8 m x 8 m x 8 m이며, 벽면은 12,288 개의 삼각형 평면요소로 분할하였다. 음향장의 매질은 공기이다. 음원은 수치해석 모델의 정 중앙에 위치시키고 수음점은 바닥으로부터 2 m 높이에 길이방향 7 개, 폭방향 7 개로 균등 배열하였다.

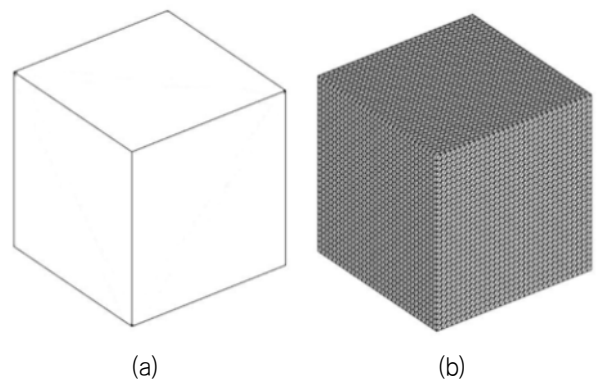


Fig. 3 Numerical model: (a) cubic acoustic field model (b) triangle facet element model(number of element: 12,228)

Table 1 Numerical analysis model and input parameter for verification of the program implemented with MATLAB

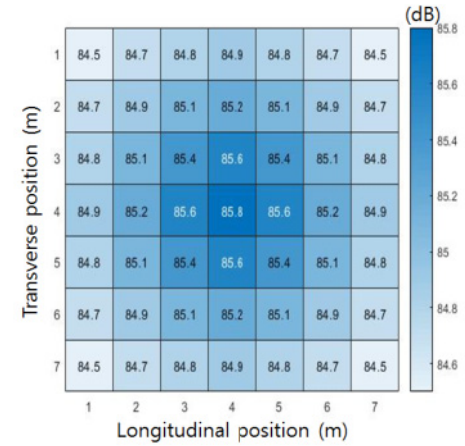
Item		Value
Dimension	Length (m)	8
	Width (m)	8
	Height (m)	8
Power reflection coefficient, ρ (-)		5/6
Source (point)	Directivity	omni-directional
	Type	steady state or impulsive
	Power, W (Watt)	0.005
	Position, \bar{r}_s (m)	[4,4,4]
Receiver position, \bar{r}_r	Longitudinal (m)	1.0 ~ 7.0 (1 m step)
	Transverse (m)	1.0 ~ 7.0 (1 m step)
	Vertical (m)	2.0
Medium (air)	Density, ρ_o (kg/m ³)	1.225
	Sound speed, c (m/s)	340
	Absorbtion, m (m ⁻¹)	0
Time, t	Range (s)	0~2.5
	Step(s)	1/24,000

4.2 정상상태 음압레벨

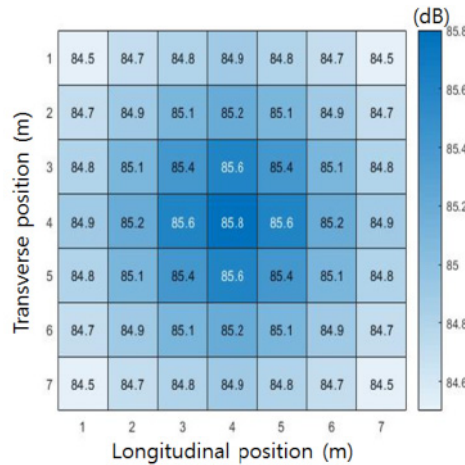
정상상태 음압레벨은 Table 1에 정의된 1개의 정상상태 음원에 대해, 총 49개 수음점 \bar{r}_r 에서의 음압레벨을 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 정확도 검토를 위해 음선추적법 및 확산음향장(diffuse acoustic field) 이론해에 의한 계산결과도 함께 나타내었다. 수치해석 결과는 정 중앙에 위치한 음원에 대해 대칭성을 잘 보여주고 있다. 음원과 가장 가까운 수음점 위치 (4 m, 4 m, 2 m)에서 가장 높은 음압레벨을 보이며, 거리가 멀어질수록 음압레벨이 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 음선추적법 및 이론해에 의한 해석결과에서도 동일하게 나타남을 알 수 있다. 참고로, 음선추적법 기반의 해석프로그램으로는 대표적인 고주파수 실내음향장 해석 S/W인 Virtual. Lab 13.5(일명 RAYNOISE)을 사용하였으며, 이 때, 음선의 개수는 20,000개이며, 최대 반사차수는 77회이다. 또한 확산음향장 이론해로는 식 (5)를 사용하였다 (Kuttruff, 2009).

$$L_{p,an} = 10 \log_{10} \left[\left(\frac{1}{4\pi R_{sr}^2} + \frac{4\rho}{S_t(1-\rho)} \right) \frac{W(\bar{r}, t)\rho_o c}{p_o^2} \right] \quad (5)$$

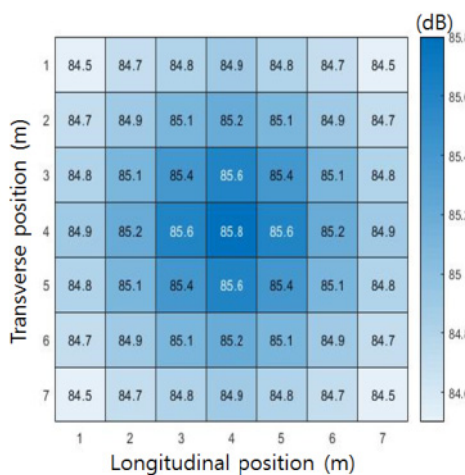
여기서, $L_{p,an}$ 는 확산음향장 이론식에 의한 음압레벨(dB re. 20 μ Pa)이며, S_t 는 내부공간을 구성하는 벽면의 총면적(m²)이다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Sound pressure level at receiver positions calculated by (a) acoustic radiosity method, (b) ray tracing method, and (c) analytic equation based on diffuse acoustic field theory

Fig. 5는 구현된 프로그램의 정확도 정량적으로 검토하기 위해 수치해석 결과와 음선추적법 및 이론해의 차이를 49개 수음점 위치별로 도시한 것이다. 음향 라디오시티법에 의한 수치해석 결과가 음선추적법 대비 0.1~0.3 dB, 이론해 대비 -0.1~0.1 dB로 매우 작은 차이를 보이고 있다.

한편, 벽면 분할 개수에 따른 해의 수렴성을 검토하기 위해, 삼각형 평면요소 수를 최초 48 개로부터 4 배수로 12,288 개까지 증가시키며 음압레벨을 계산하고 그 결과를 이론해의 결과와 함께 Fig. 6에 도시하였다. 이 때, 수음점의 위치는 (2 m, 2 m, 2 m)이다. 수치해석 결과는 삼각형 평면요소 개수가 48 개인 경우 0.4 dB 차이를 보이지만 이후 삼각형 평면요소 개수가 증가함에 따라 음압레벨 차이가 줄어들어 확산음향장 이론해에 잘 수렴함을 알 수 있다.

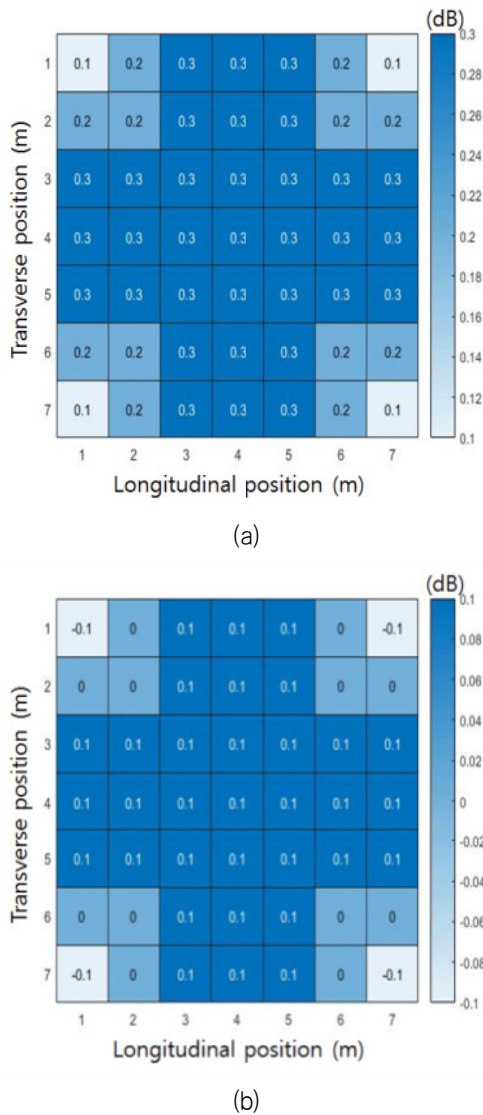


Fig. 5 Sound pressure level difference at receiver positions; (a) [acoustic radiosity method] -[ray tracing method] and (b) [acoustic radiosity method]-[analytic equation]

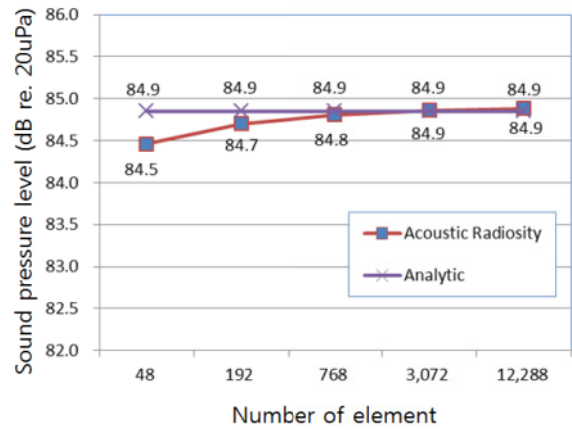


Fig. 6 Comparison of sound pressure level at the receiver position (2 m, 2 m, 2 m) using acoustic radiosity method (Acoustic Radiosity) and diffuse field theory(Analytic)

Fig. 7은 평면 다각형 개수에 따른 연산시간을 평면 다각형 개수를 48 개로 분할하였을 때 소요시간을 1로 간주하였을 때의 상대 비율(relative elapsed CPU time)로 환산하여 그래프로 나타낸 것이다. 12,288 개로 분할 시 소요시간은 4,269 배까지 기하급수적으로 증가한다.

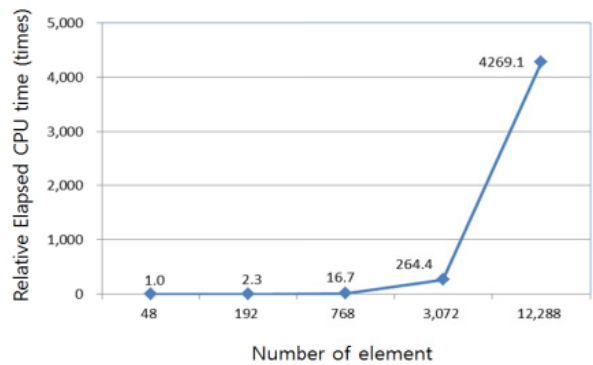


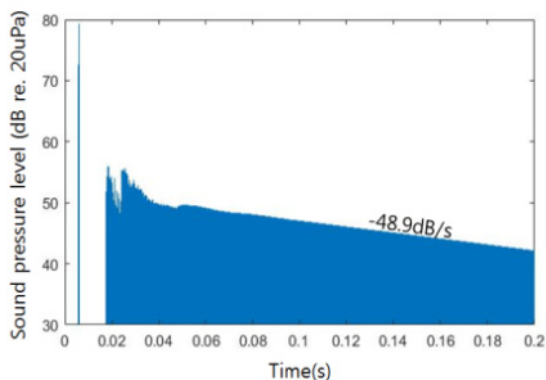
Fig. 7 Relative elapsed CPU time for acoustic field calculation by number of elements

이상의 결과로부터 음향 라디오시티법 기반의 MATLAB 프로그램이 성공적으로 구현되었음을 알 수 있다. 구현 프로그램을 이용해 정도 높은 음향장 해석을 위해서는 경계면의 분할개수를 증가시켜야 하지만, 그에 따른 연산량도 함께 증가하므로 연산 효율화에 대한 추가연구가 필요함도 알 수 있다.

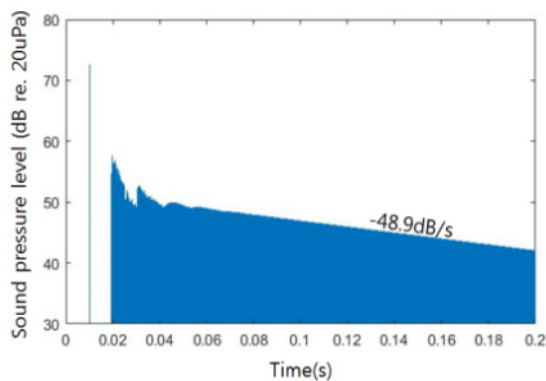
4.3 순간 음압레벨

대상 수치해석 모델에 대한 음향감쇠특성을 검토하기 위해 순간 음압레벨을 산정하였다. 0 초에서 0.005 Watt의 출력을 갖는 이상적인 충격음향신호(impulsive acoustic signal)를 음원으로 사용하여 순간 음압레벨을 산정하고 그 특성을 검토하였다.

Fig. 8은 수음점위치 \bar{r}_r , (4 m, 4 m, 2 m)과 (2 m, 2 m, 2 m)에서의 순간 음압레벨을 구분하여 도시한 것이다. 수음점 위치 각각에 대해 0.006 초와 0.010 초에서 발생한 강한 피크는 음원으로부터의 직접 영향 성분이며, 0.018 초와 0.025 초, 0.02 초와 0.03 초 근방에서 발생한 피크와 감쇠특성은 벽면에 의한 1차 반사 성분으로 파악되었다. 이후부터는 다중반사에 의한 영향으로 확산음장이 형성되고 있으며, 그 감쇠특성은 공히 -48.9 dB/s로 분석되었다. 이는 잔향시간(reverberation time: RT60)으로 환산했을 때 1.23 초에 해당한다. Table 2는 잔향시간 추정결과를 Nosal et al. (2004)의 연구결과 및 잔향시간 추정 이론식 (Beranek, 2006)에 의한 결과와 비교하여 정리한 것으로서, 본 연구와 동일한 해석이론을 적용한 Nosal et al의 결과와는 일치하는 값이며, Sabine 방정식에 의한 잔향시간 추정결과 1.29 초보다는 작고 Eyring 방정식에 의한 잔향시간 추정결과 1.18 초보다는 큰 값이다. 참고로, Sabine 방정식과 Eyring 방정식은 평균 흡음계수가 0.2보다 작은 경우와 큰 경우에 각각 유효한 것으로 알려져 있다. 대상 수치해석모델의 평균흡음계수가 약 0.167(≈ 1-5/6)이므로 Sabine 방정식이 유효한 경우에 해당하나 잔향시간이 이보다 작게 추정된 것은 체적과 흡음계수뿐 아니라 수치해석모델의 기하학적인 특성이 반영된 결과로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 8 Instantaneous sound pressure level at the receiver position (a) (4 m, 4 m, 2 m) (b) (2 m, 2 m, 2 m) by acoustic radiosity method

Table 2 Comparison of reverberation time calculation results

Present	Nosal et al.	Sabine equation	Eyring equation
1.23 s	1.23 s	1.29 s	1.18 s

5. 결론

확산 반사면을 갖는 실내공간의 음향장 해석을 위해 음향 라디오시티법을 도입하고 이를 기반으로 한 MATLAB 프로그램을 구현하였다. 정육면체 실내공간에 대한 수치해석을 수행하고 수음원 위치에 따른 음향장 분포를 산정하였으며, 이론해 및 음선 이론에 의한 해석결과와의 비교를 통해 라디오시티법 기반의 프로그램이 성공적으로 구현되었음을 보였다.

정상상태 음압레벨의 경우, 벽면의 분할 개수에 증가함에 따라 해의 정확도가 향상되지만 그에 따른 연산량도 기하급수적으로 증가하였다. 순간 음압레벨의 경우, 대상 수치해석모델 형상, 음원 및 수음점의 위치 등의 기하학적 특성에 의한 시간이력 변화를 관찰할 수 있었다.

향후, 선박 격실과 같은 대형 공간에 대한 음향해석에 실무적으로 적용할 수 있도록 계산 효율화를 통한 연산시간 단축 연구가 필요하며, 본 연구결과에 대한 실험적 검증연구와 확산음장이 형성되지 않는 음향장에 대한 해석기법의 보완연구도 필요하다.

후기

이 논문은 2017년도 동명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음(과제번호:2017A019).

References

Beranek, L.L., 2006. Analysis of sabine and eyring equations and their application to concert hall audience and chair absorption. *Journal of Acoustical Society of America*, 120(3), pp.1399-1410.

IMO, 2014. *Code on noise levels on board ships*. International Maritime Organization 2014 Edition.

Kuttruff, H., 2009. *Room acoustics*. 5th Ed. Spon Press: New York.

Miles, R.N., 1984. Sound field in a rectangular enclosure with diffusely reflecting boundaries. *Journal of Sound and Vibration*, 92(2), pp.203-226.

Nosal, E. & Hodgson, M., 2002. Preliminary experimental validation of the radiosity technique for

predicting room sound fields. *Forum Acustium*, Seville, Spain, September 2002.

Nosal, E., Hodgson, M., & Ashdown, I., 2004. Improved algorithms and methods for room sound-field prediction by acoustical radiosity in arbitrary polyhedral rooms. *Journal of Acoustical Society of America*, 116(2), pp.970-980.

SavioJa, L. & Svensson, U.P., 2015. Overview of geometrical room acoustic modeling techniques. *Journal of Acoustical Society of America*, 138(2), pp.708-730.

Skålevik, M., 2011. Schroeder frequency revisited. *Forum Acustium*, Aalborg, Denmark, 27 June 2011.



김국현