

등가음원법에서의 직육면체형 원거리음원 배치에 관한 연구

A Study on the Rectangular Distribution of far Field Sources in Equivalent Source Method

백 광 현*

(Kwang-Hyun Baek*)

*단국대학교 기계공학과

(접수일자: 2003년 9월 26일; 수정일자: 2003년 12월 12일; 채택일자: 2003년 12월 19일)

등가음원법은 일반적으로 실내에 위치한 음원에 의한 실내 음장을 모델링하기 위하여 원거리에 위치한 다수의 등가음원과 상대적으로 근방에 위치한 소수의 이미지음원들을 사용한다. 원거리음원은 일반적으로 실내 음장의 중심으로부터 적당히 먼 거리에 균일하게 위치시킨다. 이러한 원거리음원의 위치는 적절한 선택 여부에 따라, 계산 결과의 정확도와 이를 만족시키기 위해 필요한 음원의 수에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 등거리 상의 가상의 구형 표면에 위치시키는 기존의 방법 대신 모델링하는 실내 공간의 경계면과 닮은 꼴 형상으로 배치하여 그 영향을 조사하였다. 즉 가상의 직육면체 표면에 격자 형태로 균일하게 원거리음원들을 배치시키되, 음장의 중심으로부터의 거리를 변화시켜가며 각 경우에 대하여 최적화 기법을 이용하여 최적의 원거리음원 위치들을 찾아내어 비교, 분석하였다.

핵심용어: 등가음원법, 최적화, 최적 원거리음원 위치, 직육면체형 분포

투고분야: 건축음향 분야 (7.1)

The equivalent source method (ESM) uses two groups of equivalent source positions. One group includes the first order images of the sound source inside the enclosure. The positions of the other group are usually on a spherical surface some distance outside the enclosure. A proper selection of the positions for the far field sources could greatly improve the performance of the modeling accuracy and reduce the number of the sources to achieve the required accuracy. This study uses optimally distributed far field source positions on the surface of enlarged version of the rectangular enclosure instead of using typical spherical distribution. Simulations using various sizes of the box shaped distribution are executed and optimal positions are searched using an optimization technique from the larger number of candidate positions. The results of using these far field source positions are compared and analyzed.

Keywords: Equivalent source method (ESM), Optimization, Optimal far field source position, Rectangular distribution

ASK subject classification: Architectural acoustics (7.1)

I. 서론

음장을 산란시키는 물체가 존재하는 실내의 음향장 해석은 통상 유한요소법 (FEM)이나 경계면요소법 (BEM)을 이용하여 많이 이루어지며, 경우에 따라 두 가지 기법 모두를 적절히 조합시켜서 행해지기도 한다. 경계면요소법의 경우에는 자유음장에서의 방사 문제 등에 적용하기가 용이하지만 경계면에서의 특이점과 특정 파동수에

서 해의 존재가 유일하지 않다는 어려움이 있고, 유한요소법의 경우에는 무한한 개수의 요소를 포함할 수 없기 때문에 자유음장에서의 방사 문제에는 적용하기가 어려우며 주로 내부 음장 모델링에 많이 이용된다.

과도한 계산 시간의 소요 등을 포함한 기존 방법의 난점을 극복하기 위한 하나의 방법으로 Koopman 등은 등가음원법 (Equivalent Source or Superposition Method)을 제시하였다[1,2]. 이 방법의 특징 중 하나는 상대적으로 적은 양의 계산으로도 자유음장에서의 방사문제를 상당히 정확히 계산해 낼 수 있다는데 있다. 특히 음장 내에 존재하는 물체에 의한 산란을 해석할 수 있게 하며 임의

의 형상에 대한 모델링도 가능하게 한다. 등가음원법에서는 실내에 위치한 소음원에 의한 실내 음장을 실외의 원거리에 위치한 다수의 등가음원과 상대적으로 근방에 위치한 소수의 이미지음원들을 사용하여 모델링한다(그림 1 참조). 이 음원들은 실내외를 구분 짓는 경계를 나타내기 위하여, 경계면에 위치한 유한한 개수의 임의의 지점에서, 대개는 균일하게 분포되어, 경계면 조건을 만족하도록 강도와 위상이 정해진다.

결국 등가음원법을 효과적으로 이용하려면 등가음원들의 수와 경계면 조건 확인 위치의 수를 적절히 조절하여 너무 많지 않은 계산 시간을 소요하면서도 원하는 만큼의 정확도를 얻도록 하여야 한다. 정확도라는 것은 경계면 조건이 허용될 수 있을 만큼의 오차 범위 내에서 만족되는가에 상관되며, 이는 등가음원들의 개수 및 위치와 관계가 있다. 기존의 연구 결과에 따르면, 등가음원 중 2차 이상의 이미지음원(1차 이미지음원의 이미지) 사용은 별다른 이득을 보여 주지 못하며 오히려 그 수만큼의 원거리음원을 사용하는 것이 더 좋은 결과를 보여주는 것이 잘 알려져 있다[3].

따라서 등가음원 중에서 원거리음원의 위치와 수가 등가음원법의 실용성을 결정 짓는 중요한 요소로 결론지어진다. 일반적으로는 실내 공간의 중심으로부터 충분히 먼 등거리에 원거리음원들을 가능한 균일하게 배치시키기 위하여 가상의 구 표면에 분포시키는 방법을 이용한다. 본 연구에서는 이러한 단순한 배치 형태에서 벗어나 경계면과 닮은 형태로 배치할 경우 기하학적인 유사성이 얼마나 이득을 주는지, 또 음장의 중심부로부터 얼마나 멀리 떨어져서 원거리음원을 배치하는 것이 좋은지 여러 경우에 대하여 최적화 기법을 이용하여 알아보았다.

II. 등가음원법을 이용한 음장 모델링

일정한 공간 밖의 음원들에 의하여 그 공간 내에 형성된 음장은 그 공간을 구획 짓는 경계면에서의 법선 방향의 입자 속도와 압력에 의해 결정되어 질 수 있음은 Kirchhoff-Helmholtz식으로부터 잘 알려져 있다[4]. 이를 응용하면 실내 공간에 존재하는 음원에 의해 그 내부 공간에 형성되는 음장을 외부 음원들로 나타낼 수 있다. 즉 벽면과 같은 경계면의 바깥쪽에 존재하는 원거리음원들의 세기와 위상을 조절하여 물리적 경계면에서 요구하는 조건을 만족하도록 하게 하면 실제와 매우 유사한 음장을 형성할 수 있으며, 이 것이 등가음원법의 기본 원리

이다.

그림 1은 유한한 개수의 단극 음원(monopole source)을 이용한 등가음원법의 개념도이다. 실질적으로 경계면의 모든 지점에서 압력과 속도를 조사할 수 없으므로, 일반적으로는 충분히 많은 수의 지점을 정하여 그 곳에서 주어진 오차 범위 안에서 경계면 조건을 만족하는가를 검증하게 된다. 임의의 주파수에서 경계면조건 확인 지점에서의 압력은 다음과 같이 복소 벡터 p 로서 나타낼 수 있다[5].

$$p = p_{int} + p_{ext} = p_{int} + Z_e q_e \quad (1)$$

여기서 실내 공간 내부에 있는 내부 음원에 의한 경계면에서의 압력은 p_{int} , 외부 등가 음원에 의한 경계면에서의 압력은 p_{ext} , 등가음원과 오차확인지점간의 전달함수인 복소 임피던스 매트릭스는 Z_e , 그리고 등가음원 강도는 q_e 로 나타내었다. p_{int} 는 내부 음원의 위치와 강도만 주어지면 자유 음장에서의 그린함수(Green's function)를 이용하여 쉽게 구할 수 있는 값이다. 또한, m 번째 오차 확인 지점 x_{sm} 과 n 번째 등가음원 지점 x_{en} 간의 임피던스는 자유 음장에서의 그린함수를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$Z_{e,nn} = jkc\rho G(|x_{sm} - x_{en}|) \quad (2)$$

여기서 k, c, ρ 는 각각 파동수(wave number), 유체 내에서의 음속, 유체 밀도를 나타낸다.

경계면에서의 법선 방향의 입자 속도 u 도 앞서와 유사한 방법으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

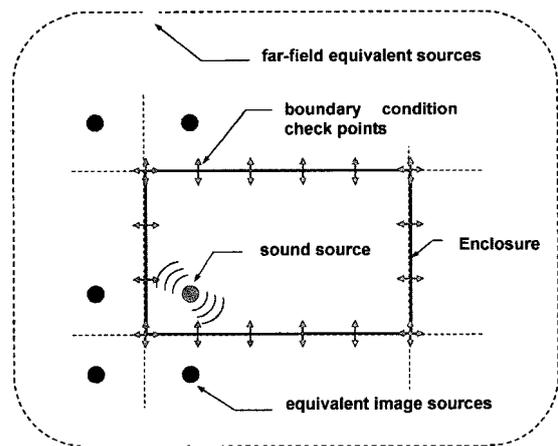


그림 1. 등가음원법의 개념도
Fig. 1. The conceptual sketch of equivalent source method.

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_{int} + \mathbf{u}_{ext} = \mathbf{u}_{int} + \mathbf{T}_e \mathbf{q}_e \quad (3)$$

여기서 실내 공간 내부에 있는 내부 소음원에 의한 경계면에서의 입자속도는 u_{int} , 외부 등가 음원에 의한 경계면에서의 입자속도는 u_{ext} 로 나타내었다. T_e 는 등가음원 강도와 경계면에서의 법선 방향 속도의 상관관계를 나타내는 매트릭스로서 자유음장에서의 그린함수를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{e_{mn}} = \frac{\partial G(\mathbf{x}_{sm} - \mathbf{x}_{en})}{\partial n_m} \quad (4)$$

한편, 경계면에서의 압력과 법선 방향 속도는 경계면을 특성 짓는 모빌리티 (또는 admittance) 매트릭스 Y_b 에 의하여 다음과 같은 관계를 갖는다고 볼 수 있다.

$$\mathbf{u} = Y_b \mathbf{p} \quad (5)$$

여기서 Y_b 는 경계면 각 지점에서의 상호간의 모빌리티 특성을 나타내며 외부 음장은 아무런 영향을 미치지 않는다고 가정한다.

식 (1), (3), (5)를 정리하면 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{u}_{int} + \mathbf{T}_e \mathbf{q}_e = Y_b [\mathbf{p}_{int} + \mathbf{Z}_e \mathbf{q}_e] \quad (6)$$

만약 경계면의 오차 확인 지점의 수와 동일한 수의 등가음원을 이용한다면 등가음원의 강도는 임의의 경계면 모빌리티 매트릭스 Y_b 에 대하여 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{q}_e = -[\mathbf{T}_e - Y_b \mathbf{Z}_e]^{-1} [\mathbf{u}_{int} - Y_b \mathbf{p}_{int}] \quad (7)$$

이 경우 경계면이 강체 표면 (hard surface)의 특성을 갖는다면 Y_b 는 0으로 수렴하게 되고 $\mathbf{u}=0$ 가 된다. 그러므로 식 (7)은

$$\mathbf{q}_e = -\mathbf{T}_e^{-1} \mathbf{u}_{int} \quad (8)$$

와 같은 간단한 형태가 된다. 그러나 이러한 fully determined system에서는 오차 확인 지점에서 경계면 조건을 정확히 만족시킬 수는 있지만 그 밖의 지점들, 예를 들어 경계면 조건 확인 지점과 지점 사이에서는 큰 오차를 유발할 가능성이 매우 크다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 많이 사용하는 방법은 오차 확인 지점의 수를 등가음원의 수보다 늘려 overdetermined system의 문제로 바꾸는 것이다. 이때 $[\mathbf{T}_e - Y_b \mathbf{Z}_e]$ 는 더 이상 정방형 (square) 매트릭스가 아니므로 경계면 조건 확인 지점에서 더 이상

정확히 오차를 0으로 만들 수 없다. 이 경우 등가음원은 경계면 조건 확인 지점에서의 오차를 최소화하는 방향으로 설정될 수 있다. 이때 오차의 정도는, 경계면 속도 오차값 (절대값의 제곱)을 등가음원이 존재하지 않을 때의 경계면 속도값 (절대값의 제곱)으로 나누어 무차원화한 다음과 같은 형태로 정의하였다.

$$E = \frac{\mathbf{u}^H \mathbf{u}}{\mathbf{u}_{int}^H \mathbf{u}_{int}} \quad (9)$$

식 (3)을 식 (9)에 넣어 정리하면 오차 E 는 등가음원 강도의 이차함수 (quadratic function)로 나타내어지며 최소값은 등가음원 강도의 값이 다음과 같을 때이다.[5]

$$\mathbf{q}_e = -[\mathbf{T}_e^H \mathbf{T}_e]^{-1} \mathbf{T}_e^H \mathbf{u}_{int} \quad (10)$$

여기서 H (Hermitian transpose)는 복소 요소를 갖는 행렬의 공액 복소 전치를 나타낸다. 만약 강체 표면이 아닌 유한한 값의 admittance를 갖는 경계면이라면 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$E = \frac{(\mathbf{u} - Y_b \mathbf{p})^H (\mathbf{u} - Y_b \mathbf{p})}{(\mathbf{u}_{int} - Y_b \mathbf{p}_{int})^H (\mathbf{u}_{int} - Y_b \mathbf{p}_{int})} \quad (11)$$

이 경우 역시 오차값은 등가음원 강도의 이차 함수로 표현되며 음원 강도가 다음과 같을 때 최소값을 가지게 된다.

$$\mathbf{q}_e = -[(\mathbf{T}_e - Y_b \mathbf{Z}_e)^H (\mathbf{T}_e - Y_b \mathbf{Z}_e)]^{-1} \times (\mathbf{T}_e - Y_b \mathbf{Z}_e)^H (\mathbf{u}_{int} - Y_b \mathbf{p}_{int}) \quad (12)$$

이와 같은 방식으로 등가음원법을 이용할 경우 아직도 남는 문제는, 이미 지정한 유한한 개수의 오차 확인 지점 이외의 경계면 지점에서도 오차 확인 지점에서 만큼의 정확도나 그 이상으로 경계면 조건을 만족하는가에 있다. 즉, 전체 가상 벽면에서 경계면 조건의 수렴성을 어떠한 방법으로 검증하느냐이다. 등가음원법의 경우에는 같은 개수의 등가음원을 이용하더라도 음원 위치의 배치 방법에 따라 무한히 많은 조합이 가능하기 때문에 경계면 조건의 만족성을 어느 특정한 위치로 국한하기가 거의 불가능하다. 이러한 수렴성을 확인하는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있겠으나, 본 연구에서는 음원 강도 계산에 이용되었던 경계면 오차 확인 지점보다 3배 많은 수의 지점에서 경계면 조건이 허용 한도 내로 수렴하는가를 평가하여 검증하였다.

실내 공간의 음장 모델링에 있어서 벽면의 댐핑 효과는

다음과 같이 자유음장에서의 그린함수에 복소 파동수 (complex wave number) k' 를 도입하여 처리하였다[5].

$$k' = k(1 - j\alpha) \tag{13}$$

한편 실내 음장에 대한 그린함수는 음향 모달 (Modal) 모델을 이용할 경우, α , k_n , φ_n 을 흡음률, n 번째 모드의 고유치 (eigenvalue)와 고유함수 (eigenfunction)라 할 때, 다음과 같이 주어진다[5].

$$G(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varphi_n(x)\varphi_n(y)}{V(k_n^2 - k'^2)} \tag{14}$$

식 (13)을 식 (14)에 넣어 정리하면 $\alpha \ll 1$ 인 경우에 다음과 같이 근사적으로 표현 할 수 있다[5].

$$G(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\varphi_n(x)\varphi_n(y)}{V[(k_n^2 - k^2) + 2j\alpha k^2]} \tag{15}$$

III. 최적화 기법과 계산결과

그림 2와 같은 공간 (2.12 m × 2.12 m × 6.06 m) 내에 존재하는 단극 음원에 의한 음장을 앞서 설명한 등가음원법을 이용하여 계산하였다. 원거리음원의 위치를 그림 2의 실내 공간 외벽을 그대로 확대한 형태로 배치한 경우와 등거리 (100 m)의 구 표면에 배치한 경우와 비교하였다. 두 경우 모두 이미지음원들은 같은 위치의 1차 이미지 음원들만을 사용하였다.

구 표면 형태의 원거리음원 배치의 경우 통상적인 균일한 배치[5]보다 더 좋은 결과를 보여주는, 그림 3과 같이 배치 표면을 미세하게 자른 많은 수의 후보 위치 중에서 찾은 최적의 결과를 이용하였다. 보다 의미 있는 비교를

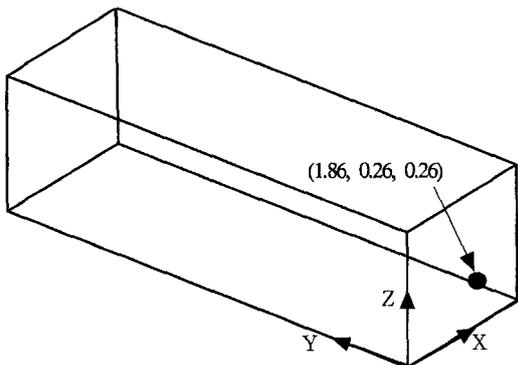


그림 2. 실내 공간 형상 및 내부 소음원의 위치
Fig. 2. The enclosure configuration and the positions of internal source and receiver.

위해 총 24개의 원거리음원 위치를, 100 m 크기의 구 표면에서 찾은 최적의 결과와 직육면체 표면에서 찾은 최적의 결과를 비교하였다. 구 표면의 경우 그림 3과 같이 경도와 위도 방향으로 각각 64등분하여 총 4096개의 후보 위치 중에서 찾아진 결과이다. 직육면체 분포의 경우는 X, Y, Z축 방향으로 각각 16, 50, 16등분하여 총 3714개의 후보 위치를 사용하였다 (구 형 배치와는 총 수가 다를 수 밖에 없으므로 가능한 한 유사한 수의 후보 위치를 갖도록 하였다).

직육면체 표면에서 원거리음원에 대한 최적의 24개의 위치를 찾는 경우 ${}_{4096}C_{24} \approx 7.49 \times 10^{62}$ 개라는 천문학적 인 조합이 가능하다. 이러한 조합적, 비선형적 최적화 문제에 유용하다는 유전자 알고리즘[6,7]과 같은 자연알고리즘이라도 탐색 공간의 크기가 너무 방대하여 24개의 최적 위치를 동시에 찾는 것은 거의 불가능하다. 따라서 현실적인 대안으로 총 3714개의 후보위치 중, 우선 최적의 2개를 자연알고리즘으로 찾아 이를 고정시키고 다음의 2개를 찾는 과정을 반복하여 24개의 위치를 찾았다. 즉, 자연알고리즘과 순차적 탐색 방법 (Greedy searching method)을 함께 사용하였다. 이 경우에도 탐색 공간의 크기가 매번 ${}_{3714}C_2 = 6895041$ 개이며 본 연구에서는 이러한 문제에 잘 적용될 수 있는 자연알고리즘 중에서 Simulated Annealing기법[7]을 이용하여 비교적 짧은 시간에 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

그림 4에서 그림 7까지는 이러한 최적화 기법을 적용하여 각기 다른 크기를 갖는 가상의 직육면체 표면에 원거리음원들을 배치할 때 찾아진 위치를 그림으로 나타낸 것이다. 원거리음원이 분포되는 직육면체의 위치는 그 중심이 그림 2에 보인 실내 공간의 중심과 일치하도록 하였다.

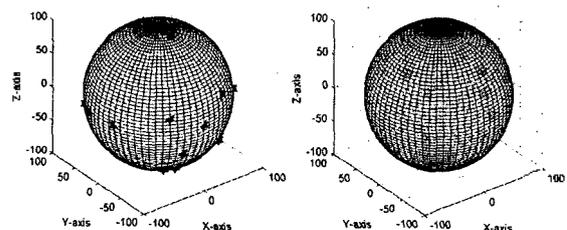


그림 3. 반경 100 m상의 구형 표면에 배치한 최적의 24개의 원거리음원의 위치 (우측 그림은 구의 후면에 있어 보이지 않는 부분을 표시함)

Fig. 3. The optimal 24 far field source locations when they are place on the spherical surface of 100 m radius. (The righthand side figure shows hidden side of the sphere).

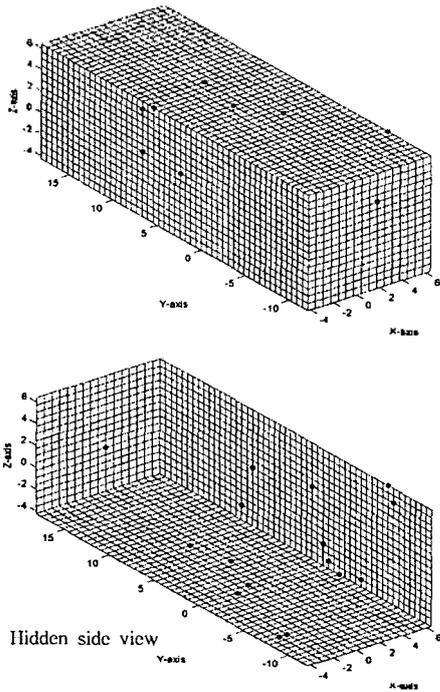


그림 4. 실내공간의 5배 크기의 직육면체 표면에 위치한 최적의 24개의 원거리음원 위치

Fig. 4. The optimal 24 far field source locations on the surface of 5 times larger rectangular shaped box than the enclosure.

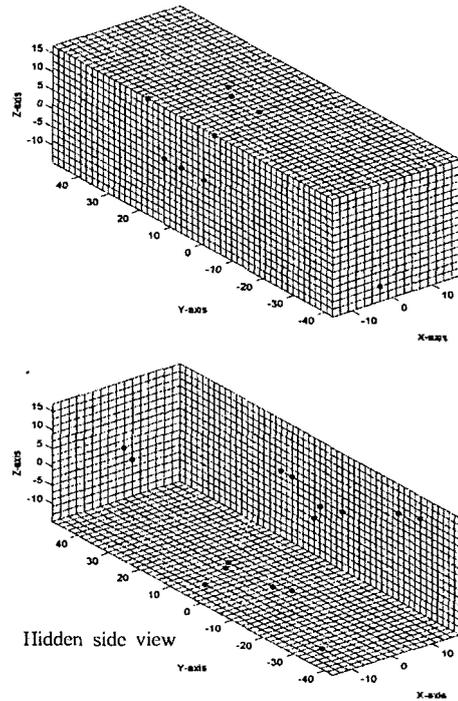


그림 5. 실내공간의 15배 크기의 직육면체 표면에 위치한 최적의 24개의 원거리음원 위치

Fig. 5. The optimal 24 far field source locations on the surface of 15 times larger rectangular shaped box than the enclosure.

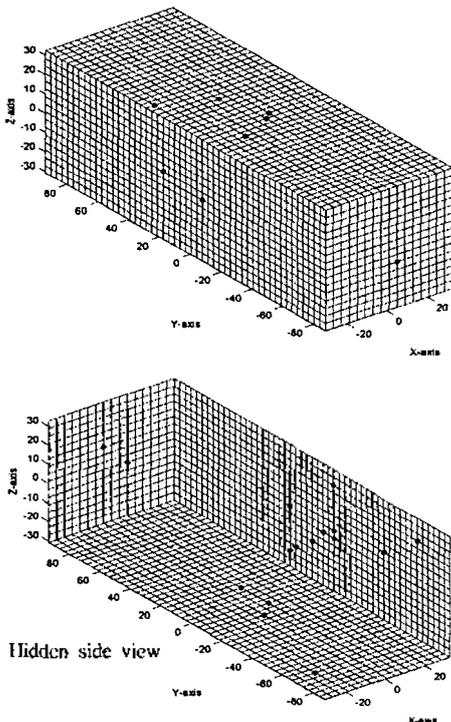


그림 6. 실내공간의 30배 크기의 직육면체 표면에 위치한 최적의 24개의 원거리음원 위치

Fig. 6. The optimal 24 far field source locations on the surface of 30 times larger rectangular shaped box than the enclosure.

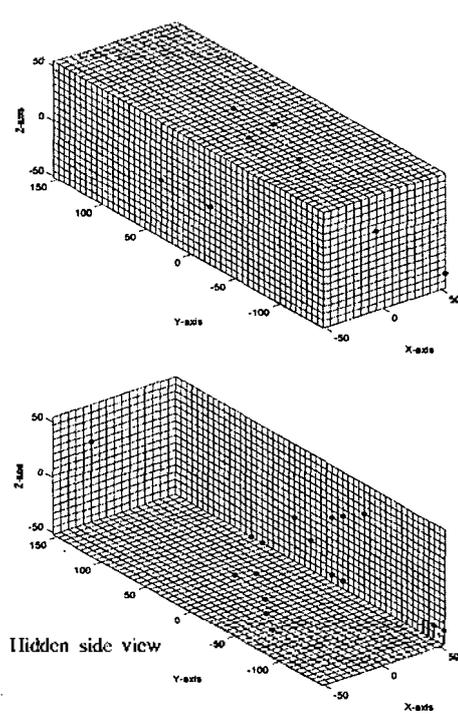


그림 7. 실내공간의 50배 크기의 직육면체 표면에 위치한 최적의 24개의 원거리음원 위치

Fig. 7. The optimal 24 far field source locations on the surface of 50 times larger rectangular shaped box than the enclosure.

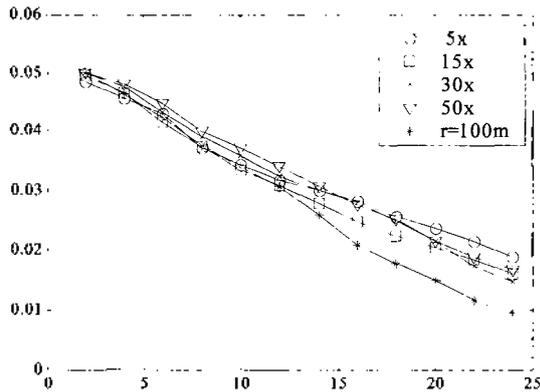


그림 8. 직육면체형 원거리음원 분포와 반경 100 m의 구형분포의 경계면 오차량의 비교

Fig. 8. Comparison of velocity squared errors of rectangular shape and spherical (100 m radius) distribution for far field sources.

그림 4-7에서 명백히 볼 수 있는 것은 최적 위치는 매 경우가 다 다르다는 것이다. 똑같은 형태 (담은 풀)의 배치 표면에 같은 수의 원거리 음원이 사용되어도, 직육면체 크기에 따라 최적위치의 대부분이 서로 다르다는 것을 쉽게 알 수 있다. 또 다른 한 가지 관찰할 수 있는 것은 가상 직육면체의 크기가 커질수록 비교적 원거리음원들의 분포가 서로 가까이 몰려 있다는 점이다. 그림 4의 경우를 보면 다른 경우들에 비해 조금 더 쉽게 확인할 수 있다. 이것은 아마도 원거리음원의 위치가 실내외를 구분 짓는 벽면 (경계면)에, 다른 경우에 비해, 상대적으로 너무 가깝기 때문에 다소 분산되는 형태의 위치 분포를 보이는 것으로 판단된다. 모든 경우에 있어 공통적으로 관찰되는 것은 XZ평면상에는 분포되는 음원의 수가 상대적으로 매우 작다는 것이다. 이러한 현상의 원인은 여러 가지가 있을 수 있으나 그 중 한 가지는 XZ평면이 다른 평면에 비해 경계면 오차 조건을 만족해야 하는 표면적이 적기 때문에 적은 수의 음원으로도 그 역할을 하는 것으로 추정된다. 전반적인 음원들의 위치는 Y축 방향으로서는 가운데 (Y=0)에 많이 몰려 있지만 X, Z축 방향으로서는 비교적 분산이 되어 있는 형태이다.

그림 8에서는 그림 4-7에서 보인 각각의 직육면체형 분포에 대하여, 식 (9)에서 정의된 경계면에서의 오차 값이 사용된 음원의 수와 직육면체의 크기에 따라 얼마나 영향을 받는지 보여주고 있다. 실내 공간 크기 대비 5배 큰 (가장 작은 직육면체형 분포) 경우를 제외하고는 전반적으로 비슷한 성능을 보여주고 있다. 전체적으로는 15배 크기의 분포에서 좋은 결과를 보여 주고 있으며 음원의 수가 22개 이상이 되면 30배 큰 표면에서의 분포가 가장

좋은 결과를 보여주고 있으나 그 차이는 그리 크지 않다. 그림 8에서는 반경 100 m인 구의 표면에 원거리음원들을 분포시킨 경우의 결과도 보여주고 있다. 마찬가지로 최적화 기법을 이용하여 최적의 24개 위치를 찾은 결과인데 음원의 수가 16개 이상에서는 오히려 직육면체형 분포보다 눈에 띄게 낮은 결과를 보여주고 있다.

IV. 결론

등가음원법을 이용하여 실내 음장을 모델링할 때 그 계산 결과의 정확도는 등가음원의 수와 위치에 따라 크게 영향을 받는다. 본 연구에서는 이러한 점에 초점을 맞추어 원거리음원들의 최적위치를 찾고자 하였다.

기존의 구형 배치에 대한 연구 결과를 바탕으로 좀 더 낮은 결과를 얻기 위하여, 실내와 실외의 음장을 구분 짓는 경계면과 담은풀의 형태로 원거리음원들을 분포시키고 최적위치들을 찾아보았다. 본 연구에서 의미하는 원거리 음원들의 최적 위치라는 것은, 같은 수의 원거리음원들을 사용하더라도 경계면 조건을 최대한 잘 만족시킬 수 있는 위치를 말하는 것이다. 본 연구에서는 직육면체형 분포로 그 형태를 제한하고, 직육면체의 크기를 변수로 삼아 각 경우에 대하여 최적의 위치를 찾아 그 결과를 비교하였다. 또한 그 결과는 대표적인 등거리 분포 형태인 구형 분포의 결과와도 비교되었다.

예상과 달리 직육면체형 분포의 경우에는 그 크기에 따른 성능의 차이는 그다지 크지 않았다. 오히려 구형분포에 비하여 비교적 큰 차이로 뒤떨어지는 결과를 보여주었다. 이러한 현상은 최적화 기법의 불완전성에 의한 오차가 기여했을 가능성도 있지만 가장 큰 이유는 기본적으로 등가음원법의 근본원리에 가장 근접한 음원분포는 먼 자점에 등거리 분포시키는 방법이기 때문인 것으로 추정된다.

감사의 글

본 연구는 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었음.

참고 문헌

1. G. H. Koopman, L. Song and J. B. Fahline, "A method for computing acoustic fields based on the principle of wave superposition", *Journal of Acoustical Society of America*, **86**, 2433-2438, 1989.
2. L. Song, G. H. Koopman and J. B. Fahline, "Numerical errors associated with the method of superposition for computing acoustic fields", *Journal of Acoustical Society of America*, **89**, 2625-2633, 1991.
3. 백광현, "등기소스법을 이용한 공간 내의 음장 모델링에서 경계면 조건 오차의 최소화에 관한 연구", 한국소음진동공학회 2000년도 춘계학술대회 논문집, 581-586, 2000.
4. A. D. Pierce, "Acoustics", *Acoustical Society of America - American Institute of Physics*, 180-183, 1991.
5. M. E. Johnson, S. J. Elliott, K.-H. Baek, and J. Garcia-Bonito, "An equivalent source technique for calculating the sound field inside an enclosure containing scattering objects", *Journal of Acoustical Society of America*, **104** (3), 1221-1231, 1998.
6. 문인섭, 김종교, "유전자 알고리즘을 이용한 화자인식 시스템 성능 향상", 한국음향학회지, **19** (8), 63-67, 2000.
7. K.-H. Baek and S. J. Elliott, "Natural algorithms for choosing source locations in active control system", *Journal of Sound and Vibration*, **186** (2), 245-267, 1995.

저자 약력

• 백 광 현 (Kwang-Hyun Baek)



1984년 2월: 서울대학교 조선공학과 (공학사)
1986년 2월: 서울대학교 조선공학과 (공학석사)
1992년 12월: ISVR, Southampton University (MSc)
1996년 6월: ISVR, Southampton University (Ph.D.)
1999년 3월 - 현재: 단국대학교 기계공학과 조교수