

# 등가음원법에서의 원거리음원의 위치와 개수의 최적화 연구

## Optimization of the Number and Position of Far Field Sources in Using the Equivalent Source Method

백 광 현†

Kwang-Hyun Baek

(2003년 3월 27일 접수 ; 2003년 9월 22일 심사완료)

**Key Words** : Equivalent Source(등가음원), Far Field Source(원거리음원), Position Optimization(위치 최적화)

### ABSTRACT

The equivalent source method(ESM) is used for the calculation of the internal pressure field for an enclosure which can have arbitrary boundary conditions and may include internal objects which scatter the sound field. The advantage of using ESM is that it requires relatively low computing cost and is easy to model the internal diffracting objects. Typical ESM modeling uses two groups of equivalent source positions. One group includes the first order images of the source inside the enclosure. The positions of the other group are usually on a spherical surface some distance outside the enclosure. The normal velocity on the surfaces of the enclosure walls is evaluated at a larger number of positions than there are equivalent sources. The sum of the squared difference between this velocity and the expected is minimized by adjusting the strength of the equivalent sources. This study is on the optimal far field sources positions when using the equivalent source method. In general, the far field sources are evenly distributed on a surface of a virtual sphere which is centered at the enclosure with a sufficiently large radius. In this study, optimal far field source locations are searched using simulated annealing method for various radii of spheres where far field sources are located. Simulation results showed that optimally located sources with adequate distance away from the enclosure center gave better result than sources with even distribution even with a smaller number of far field sources.

### 1. 서 론

음향적 산란 물체 등이 존재하면서 벽면 등으로 둘러싸인 실내 공간과 같이 복잡한 형태의 음향장의 모델링은 통상 유한요소법(FEM)이나 경계면요소법(BEM) 등이 많이 이용되고 있다. 경계면요소법의 경우에는 자유음장에서의 방사 문제에 적용하기가 용이하지만 경계면에서의 특이점과 특정 파동수에서 해의 존재가 유일하지 않다는 문제점이 있는 반면 유한요

소법의 경우에는 무한한 개수의 요소를 포함할 수 없기 때문에 자유 음장에서의 방사 문제에는 적용하기가 어려우며 주로 내부 음장 모델링에 많이 이용된다.

이러한 관점에서 Koopman<sup>(1)</sup> 등은 경계면요소법에 대한 대응책으로 등가음원법(equivalent source or superposition method)을 제시하였다. 이 방법의 특징 중 하나는 상대적으로 적은 양의 계산으로도 자유 음장에서의 방사문제를 상당히 정확히 계산해 낼 수 있다는데 있다. 특히 음장 내에 존재하는 물체에 의한 산란을 해석할 수 있게 하며 임의의 형상에 대한 모델링도 가능하게 한다.<sup>(2,3)</sup> 이러한 등가음원법은 능동 소음제어 시스템의 이론적인 음장 해석에도 응용되었다.<sup>(4)</sup> 등가음원법은 일반적으로 실내에 위치한 음원

† 책임저자, 정회원, 단국대학교 기계공학과  
E-mail : khbaek@dankook.ac.kr  
Tel : (02) 709-2563, Fax : (02) 709-2569

에 의한 실내 음장을 모델링하기 위하여 원방에 위치한 다수의 등가음원과 상대적으로 근방에 위치한 소수의 허상음원들을 사용한다. 이 음원들은 실내외를 구분 짓는 벽을 모델링하기 위하여, 경계면에 위치한 유한한 개수의 지점에서, 대개는 균일하게 분포되어, 경계면 조건을 만족하도록 강도와 위상이 정해진다.

결국 등가음원법의 효과적 응용은 음원들의 개수와 경계면 조건 확인 위치의 개수를 적절히 조절하여 너무 많지 않은 계산 시간을 소요하면서도 원하는 만큼의 정확도를 유지 할 수 있는 가에 있다. 정확도라는 것은 경계면 조건이 허용될 수 있을 만큼의 오차 범위 내에서 만족되는 가에 상관되며, 이는 등가음원들의 개수 및 위치와 관계가 있다. 특히 본 연구에서는, 기존의 등가음원법의 모델링에서 관심을 두지 않았던 원거리음원의 위치 최적화에 초점을 두었다. 기존의 연구 결과에 따르면, 등가음원 중 2차 이상의 허상음원사용은 별다른 이득을 보여 주지 못하며 오히려 그 수만큼의 원거리음원을 사용하는 것이 더 좋은 결과를 보여주는 것이 잘 알려져 있다.<sup>(5)</sup> 반면에 원거리음원의 경우에는 그 위치나 개수에 관한 심도 있는 연구가 없었다. 본 연구에서는 일반적으로 큰 반경을 가지는 구 형태의 표면에 균일하게 원거리음원들을 배치시키는 기존의 방법을 좀 더 체계적으로 연구하기 위하여, 여러 가지 배치 반경의 크기와 그에 따른 최적 위치들을 찾아내어 비교, 분석하였다.

2. 등가음원법을 이용한 음장 모델링

일반적으로, 특정 공간 밖의 음원들에 의하여 그 공간 내에 형성된 음장은 경계면에서의 법선 방향의 입자 속도와 압력에 의해 결정되어 질 수 있음은 Kirchhoff-Helmholtz식으로부터 잘 알려져 있다.<sup>(6)</sup> 이를 응용하면, 실내 공간과 같이 물리적으로 존재하는 경계면에 의해 공간 내외로 특정 지어지는 음장은, 경계면의 다른 한 쪽에 존재하는 음원들을 물리적 경계면에서 요구하는 조건(속도)을 만족하도록 잘 조정하면 물리적 공간에 의해 생성된 것과 매우 유사한 음장을 형성할 수 있다는 것이 등가음원법의 기본 원리이다.

Fig.1은 유한한 개수의 단극 소스(monopole source)를 이용한 등가음원법의 개념도이다. 실질적으로 경계면의 모든 지점에서 압력과 속도를 조사할 수 없

므로, 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.<sup>(7)</sup>

$$p = p_{int} + p_{ext} = p_{int} + Z_e q_e \tag{1}$$

여기서 실내 공간 내부에 있는 내부 음원 소스에 의한 경계면에서의 압력은  $p_{int}$ , 외부 등가음원에 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 음장에서 그린함수(Green's function)를 이용하여 쉽게 구할 수 있는 값이다. 또한, 경계면 상의  $m$ 번째 오차 확인지점  $x_{sm}$ 과 경계면 외부에 위치하는  $n$ 번째 등가음원 지점  $x_{en}$ 간의 임피던스는 자유 음장에서 그린함수를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$Z_{emn} = jkc \rho G(|x_{sm} - x_{en}|) \tag{2}$$

여기서  $k, c, \rho$ 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.

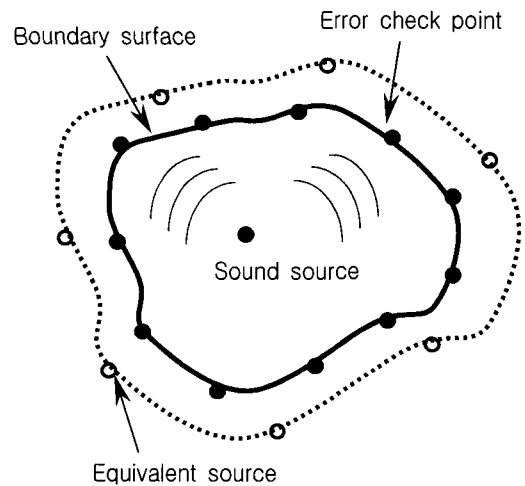


Fig. 1 The conceptual sketch of equivalent source method : Equivalent source positions and boundary condition check points

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

여기서 실내 공간 내부에 있는 내부 음원 소스에 의한 경계면에서의 입자속도는  $\mathbf{u}_{int}$ , 외부 등가음원에 의한 경계면에서의 입자속도는  $\mathbf{u}_{ext}$ 로 나타내었다.  $\mathbf{T}_e$ 는 등가음원 강도와 경계면에서의 법선 방향 속도의 상관관계를 나타내는 매트릭스로서 자유 음장에서 그린함수를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

한편, 경계면에서의 압력과 법선 방향 속도는 경계면을 특성 짓는 모빌리티(또는 admittance) 매트릭스  $\mathbf{Y}_b$ 에 의하여 다음과 같은 관계를 갖는다고 볼 수 있다.

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

여기서  $\mathbf{Y}_b$ 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.

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

만약 경계면의 오차 확인 지점의 수와 동일한 수의 등가음원을 이용한다면 등가음원의 강도는 임의의 경계면 모빌리티 매트릭스  $\mathbf{Y}_b$ 에 대하여 다음과 같이 구해진다.

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

이 경우 경계면이 강체 표면(hard surface)의 특성을 갖는다면  $\mathbf{Y}_b$ 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 사이

에서는 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  $[\mathbf{T}_e - \mathbf{Y}_b \mathbf{Z}_e]$ 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 있으며, 다음과 같이 등가음원이 존재하지 않을 때의 경계면 속도 값을 이용하여 무차원화한 형태로 나타낼 수 있다.<sup>(7)</sup>

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

식 (3)을 식 (9)에 넣어 정리하면 오차  $E$ 는 등가음원 강도의 이차함수(quadratic function)로 나타내어지며 최소 값은 등가음원 강도의 값이 다음과 같을 때이다.

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

여기서  $H$ 는 Hermitian transpose를 나타낸다. 만약 강체 표면이 아닌 유한한 값의 admittance를 갖는 경계면이라면 다음과 같이 정의 될 수 있다.

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

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

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

이와 같은 방식으로 등가음원법을 이용할 경우 아직도 남은 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 이용하

더라도 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 오차확인 지점보다 훨씬 많은 수의 지점에서 경계면 조건을 만족하는 가를 평가하여 수렴성을 검증하는 방법<sup>(5)</sup>을 이용하였다. 예를 들자면, 100개의 지점에서 경계면 조건을 만족(오차를 최소화)하도록 식 (10) 또는 (12)에서 계산된 음원 강도가 100개의 지점 이외의 몇 배 이상 되는 많은 지점에서 얼마만큼의 오차를 가지고 경계면 조건을 만족하는가를 식 (9)나 (11)의 형태로 계산하여 확인하였다.

실내 공간의 음장 모델링에 있어서 벽면의 댐핑 효과는 다음과 같이 자유 음장에서와 같은 그린함수에 복소 파동수(complex wave number)  $k'$ 를 도입하여 처리하였다.<sup>(7)</sup>

$$k' = k(1 - j\alpha) \quad (13)$$

음향 모달(Modal) 모델을 이용한 실내 음장에 대한 그린함수는  $k_n, \varphi_n, V$ 를 각각  $n$  번째 모드의 고유치(eigenvalue), 고유함수(eigenfunction), 실내 공간의 부피라 할 때 다음과 같이 주어진다.<sup>(7)</sup>

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

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

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

음향 모달 모델에서 사용되는 모달감쇠비  $\zeta$ 는, 감쇠의 양이 적은 경우 공진주파수 근처에서 만이 감쇠가 중요한 역할을 하므로, 이 경우는  $\zeta = \alpha k_n / k$ 의 관계를 가지는 것으로 가정할 수 있다.<sup>(8)</sup>

### 3. 최적화 기법과 계산결과

Fig. 2에 보이는 것과 같은 공간(2.12 m × 2.12 m × 6.06 m) 내에 존재하는 단극 소스에 의한 음장을 등가음원법을 이용하여 계산하였다. 등가음원들을 이용

한 가상 벽면의 형성을 위하여 벽면(경계면)의 외부에 Fig. 3에 보이는 것과 같이 음원들을 배치하였다. 음원들은 Fig. 3과 같이 1차 허상음원들과 등거리 원방에 위치한 구의 표면에 위치하는 음원들로 구성되어 있다. 허상음원들을 이용한 이유는, 순수히 원방에 위치한 음원들만으로 경계면 조건을 정밀하게 만족시키기 위해서는 상당히 많은 수의 음원들이 필요로 하게 되어 이러한 비효율성을 극복하기 위해서이다.

일반적인 원거리음원의 배치 방법은 적절히 먼 거리에 위치한 가상의 구 표면에 가능한 한 균일하게 배치하는 것이다. 그러나 구 표면에 임의의 수의 음원을 완벽하게 균일하게 배치하는 것은 기하학적으로 불가능하므로 원거리음원이 위치 할 가상구면을 위도와 경도 방향으로 균등 분할하여 배치하는 것이 일반적이다. 본 연구에서도 같은 배치 방법을 사용하였다.

원거리음원들을 가상 구면에 위치시키되 위도와 경도 방향으로 각각  $2^6 = 64$  균할 등분하여 구 표면에 총  $2^6 \times 2^6 = 4096$  개의 후보위치를 정하였다. 그 모든 위치에 음원을 배치하는 것은 계산상으로는 효율성면에서나 불가능하므로, 그 중 24개의 최적 위치를 찾는 비교적 간단한 경우의 해를 찾는 것을 본 연구의 목표로 하였다. 즉, 이것은 조합의 최적화 문제인 것이다. 그러나 이 경우에도  ${}_{4096}C_{24} \approx 7.49 \times 10^{62}$  개라는 천문학적인 조합이 가능하여, 이러한 종류의 최적화 문제에 유용하다는 유전자 알고리즘<sup>(9)</sup> 등의 자연알고리즘을 바로 적용하는 것은 불가능하다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 동류의 알고리즘인 simulated annealing<sup>(10)</sup> 기법을 적용하되 알고리즘의 순수성은 다소 희생이 되더라도 현실적인 계산 측면에서 가능한 하이브리드 형태의 최적화 기법을 적용하였다. 즉, 총

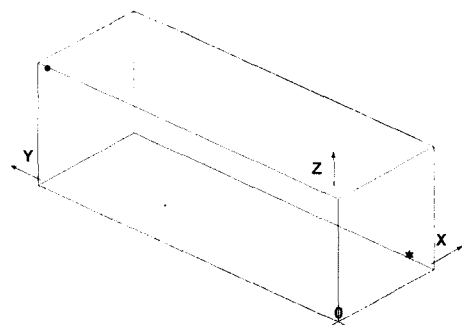


Fig. 2 The enclosure configuration and the positions of internal source and receiver

4096개의 후보 위치 중 최적의 24개를 동시에 찾는 것이 아니고, 우선 최적인 두 개의 위치를 simulated annealing 기법을 이용하여 구하고, 이를 고정시킨 뒤 다시 또 다른 2개를 구하는 순차적 탐색기법(greedy searching method)을 함께 이용하였다. 이 경우에도 탐색 공간의 크기가 매번  ${}_{4096}C_2 = 8386560$  개이므로, 통상적인 최적화 기법으로는 전역 최적치를 구하는 것이 거의 불가능하다. 본 연구에서는 이러한 문제에 잘 적용될 수 있는 자연알고리즘 중에서 simulated annealing 기법을 이용하여 좋은 결과를 얻을 수 있었다.

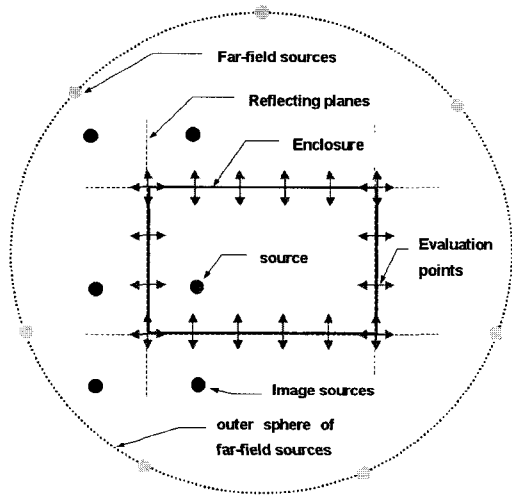
시뮬레이션에서 허상음원들의 경우 2차 이상의 허상음원들의 포함은 계산속도 향상이나 경계면 오차의 감소에 별다른 영향을 주지 못하여 허상음원들의 수

는 1차로 제한하였다. 3차원 공간에서는 1차 허상음원들의 수는 총 26개가 된다. 이렇게 허상음원들의 수를 고정시키고 원방에 위치한 음원들의 수를 변화시켜가면서 사용된 원거리음원의 개수에 따른 시뮬레이션 결과가 Table 1과 Fig. 4에 요약 정리되어 있다. Table 1은 일반적 균등 분포와 실내 공간의 중심으로부터 반경 100 m인 구 표면의 4096개의 위치 중 최적화 기법으로 찾은 음원 위치가 얼마만큼의 경계면 조건의 오차( $\mathbf{u}^H \mathbf{u}$ )를 보이는지 보여주고 있다. 24개의 원거리음원이 사용된 경우 최적 위치에 있는 음원들은 균등 분포된 경우에 비하여 1/4 정도의 오차밖에 보이고 있지 않다.

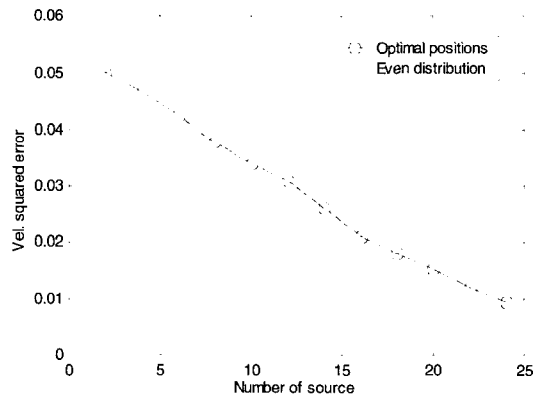
Table 1에서는 원거리음원 세기(파워)의 합  $\mathbf{q}_e^H \mathbf{q}_e$ 의 값도 보여 주고 있는데, 24개의 최적 원거

**Table 1** Comparison of velocity squared errors at the wall boundary and sum of the source power according to the source locations

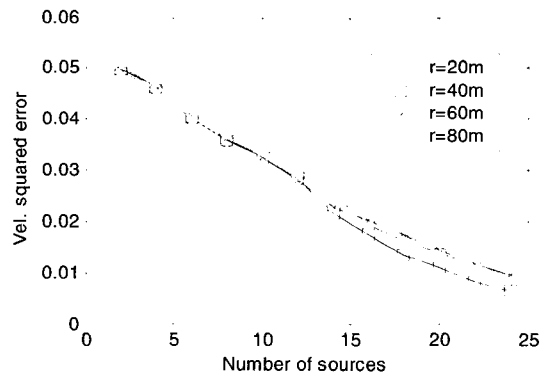
Number of sources	Optimal positions		Even distribution	
	$\mathbf{u}^H \mathbf{u}$	$\mathbf{q}_e^H \mathbf{q}_e$	$\mathbf{u}^H \mathbf{u}$	$\mathbf{q}_e^H \mathbf{q}_e$
2	0.0500	3.42e+07	0.0511	6.91e+08
8	0.0377	1.39e+09	0.0509	5.17e+06
14	0.0260	3.99e+09	0.0430	2.66e+09
20	0.0151	1.00e+10	-	-
24	0.0093	1.71e+10	0.0360	8.56e+08
38	-	-	0.0136	3.83e+10



**Fig. 3** The equivalent source positions used to calculate the response of a rectangular enclosure with a single monopole source



**Fig. 4** Comparison of velocity squared errors at the wall boundary according to the far field source locations



**Fig. 5** Comparison of velocity squared errors for various radii of virtual sphere for far field sources

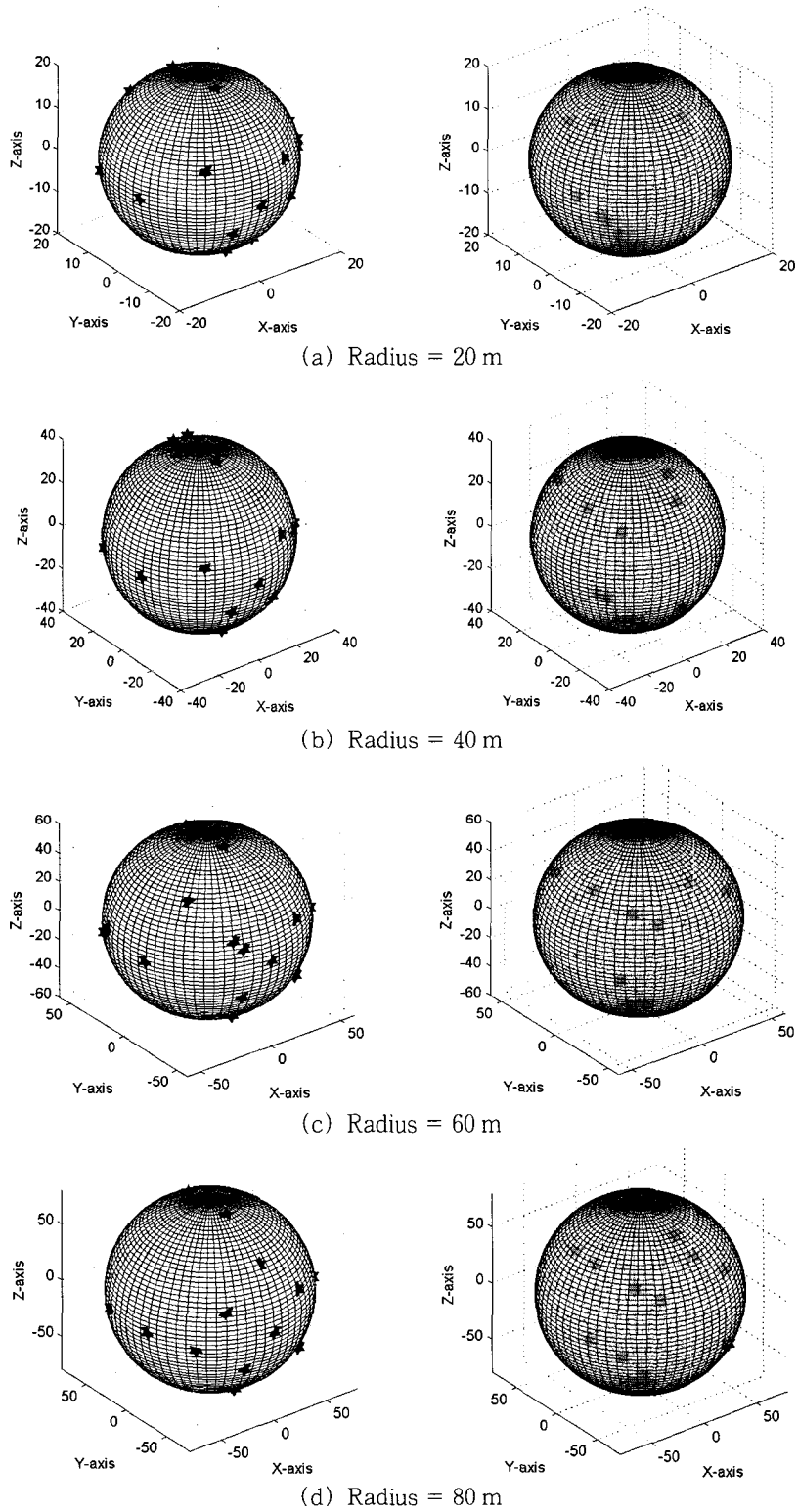


Fig. 6 Optimal far field source positions for virtual sphere radius of (a) 20 m, (b) 40 m, (c) 60 m, (d) 80 m

리음원이 사용된 경우 보다 균등 분포의 경우가 훨씬 작은 파워를 필요로 하는 것으로 나타나 있다. 이 경우에는, 결국 균등 분포 된 음원 위치가 부적절하여 제 기능을 다하지 못하고 있는 것으로 해석 된다. 한편 38개의 음원이 사용된 균등분포의 계산 결과와 20개의 최적 위치 계산 결과를 비교해 보면, 비슷한 정도 오더의 경계면 오차 값을 보이게 됨을 알 수 있다. 즉, 최적화 기법을 이용함으로써 음원의 수를 절반 정도로 줄일 수 있음을 알 수 있다. 또한 이 경우 파워의 값을 비교해 보면 최적 위치의 음원들이 1/4 정도 밖에 필요로 하고 있지 않는데, 이것은 최적 위치의 음원들이 파워를 매우 경제적으로 사용하고 있음을 의미한다.

Fig. 4는 Table 1의 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 음원의 수가 증가함에 따라 거의 선형적으로 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 이 것은 어느 정도 이상의 음원의 수에 대해서는 0에 거의 수렴하면서 더 이상 줄지 못 할 것이며 이는 이 그래프가 지수적 감소의 초기 부분을 보여주는 것이라고 판단된다. 균등 분포의 경우에는 음원의 수가 증가해도 경계면 오차 값이 비효율적으로 감소 될 것임을 짐작할 수 있다.

Fig. 5는 원거리음원이 배치되는 가상 구의 여러 가지 반경에 대하여 하이브리드 된 최적화 기법을 적용한 결과를 나타낸 것이다. 반경 40m인 구 표면에 음원을 분포한 경우가 가장 좋은 결과를 보이고 있으며 반경이 20m, 60m, 80m인 나머지 경우는 큰 차이를 보이지 않았다. 24개의 음원을 모두 사용하게 되는 경우 반경 40m의 구에 분포 시킬 경우 다른 경우 보다 약 30%이상의 경계면 조건 오차가 감소되었으며, 이는 최적화 기법이 적용할 만한 가치가 있다는 것을 보여주는 결과로 판단된다. 그림에 나타 내지는 않았으나 반경 100m, 200m인 경우의 결과도 나머지 경우와 비슷하거나 더 나쁜 결과를 보여주었다. 전체적으로는 반경 40m 경우를 전후로 더 차이가 날수록 경계면 오차가 조금씩 커지는 경향을 보였다. 물론 이러한 결과는 40m 반경 크기의 구가 모든 경우에 항상 최적이라는 것을 의미하지는 않는다. 다만 원거리음원의 배치 표면이 무조건 멀리 있을수록 좋은 것이 아니라는 점과 원거리음원의 적정한 위치와 반경의 선택이 그렇게 과도한 계산 시간을 필요로 하지 않는다는 것이다.

Fig. 6은 앞서 4가지 반경에 대하여 찾아진 최적의 24개의 원거리음원의 위치를 그림으로 나타낸 것이다. Fig. 6의 좌표축은 Fig. 2의 좌표축과 일치하며, 구의 내부 중심에 직육면체 실내공간의 중심이 위치한다. Fig. 6의 왼쪽 그림들은 현재의 시야각에서 보이는 음원위치들, 오른쪽 그림들은 구의 뒷면에 위치한 음원들만을 구를 투명하게 하여 나타낸 것이다. 그림에서 음원 위치에 대한 뚜렷한 경향이나 특정한 패턴을 발견하기는 어려웠으나 전반적으로 구의 극 지역 부위나 적도 부근 위치에 주로 분포하였으며, 이는 실내 공간의 음원의 벽면에 대한 이미지 음원들의 방향과 유사하며 어느 정도 의미 있는 결과라 생각된다. 4가지 반경의 경우 모두에서 항상 공통적으로 대응되는 위치가 구의 앞면에서만 10여 곳 정도 되며 그것들은 주로 허상음원 배치 방향과 일치한다. 그러나 나머지 위치들은 비교적 불규칙적인 배치 경향을 보여, 최적 위치가 구의 중심으로부터 그어진 방사 방향으로 일정하게 분포하지 않음을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 사용한 등가음원법은 실내 공간에 위치한 소음원과 음향학적 산란 물체에 의한 공간내부의 음장을 허상음원들과 원방에서의 음원들을 사용하여 나타냈다. 이 때 등가음원법의 모델링이 효과적이게 하기 위하여 등가음원들의 위치는 어떤 위치가 좋은지, 특히 원거리음원들을 어떠한 위치에 배치하는 것이 유리한지, 자연 알고리즘과 순차적 탐색 기법을 혼용한 하이브리드 형태의 최적화 기법을 사용하여 알아보았다.

등가음원법에서의 원거리음원의 최적 위치 선정은 경계면 오차를 최소화 하면서, 동시에 얼마나 적은 수의 음원들로 가능한가를 알아보는 것으로 검증하였다. 또한 원거리음원이 배치되는 가상 구면의 반경을 여러가지로 변화시켜가면서 최적 위치를 탐색하였다. 최적 위치의 선정은, 먼저 후보 위치인 가상 구면을 격자 형태로 세밀하게 나누고, 그 중에서 최적 위치를 찾아내었다. 이때의 위치 선정은 조합적 최적화 문제로서 이러한 형태의 문제에 적합한 최적화 기법 중 자연알고리즘의 하나인 simulated annealing 기법을 이용하였다. 그 자체만으로도 매우 강력한 탐색방

법이기는 하나 본 연구의 경우 그 탐색공간의 크기가 너무 방대하여 순차적 탐색기법과 혼합한 하이브리드 방식을 이용하였다.

최적화된 원거리음원의 위치는, 가상 구면에 균일한 격자 형태로 단순 분포시키는 경우에 비하여 같은 정도의 경계면 오차를 가져오는데 필요한 원거리음원의 수를 절반 정도로 줄일 수 있음을 보여주었다. 또한 똑같은 하이브리드 방식의 최적화 기법을 적용하더라도 원거리음원이 분포되는 가상 구면의 크기가 다르면 최적 위치도 달라지며, 단순히 매우 먼 거리에 배치하는 것이 항상 좋은 것이 아니라는 것도 밝혀냈다. 그러나 반경 변화에 따른 어떤 특징적인 원거리음원의 배치 패턴을 알아내기는 힘들었다. 그럼에도 불구하고 이러한 최적화 기법의 적용은 계산 수행시간 등 여러 가지를 고려했을 때 매우 유용하게 사용될 수 있는 것으로 사료된다.

## 후 기

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구 되었습니다.(KRF-2001-003-E00354)

## 참 고 문 헌

- (1) Koopman, G. H., Song, L. and Fahline, J. B., 1989, "A Method for Computing Acoustic Fields Based on the Principle of Wave Superposition," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 86, pp. 2433~2438.
- (2) Song, L., Koopman, G. H. and Fahline, J. B., 1991, "Numerical Errors Associated with the Method of Superposition for Computing Acoustic Fields," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 89, pp. 2625~2633.
- (3) Fahline, J. B. and Koopman, G. H., 1991, "A Numerical Solution for the General Radiation Problem Based on the Combined Methods of Superposition and Singular-value Decomposition," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 90, pp. 2808~2819.
- (4) Song, L., Koopman, G. H. and Fahline, J. B., 1991, "Active Control of the Acoustic Radiation of a Vibrating Structure Using a Superposition Formulation," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 89, pp. 2786~2792.
- (5) 백광현, 2000, "등가소스법을 이용한 공간 내의 음장 모델링에서 경계면 조건 오차의 최소화에 관한 연구", 한국소음진동공학회 춘계학술대회논문집, pp. 581~586.
- (6) Pierce, A. D., 1991, *Acoustics*, Acoustical Society of America-American Institute of Physics.
- (7) Johnson, M. E., Elliott, S. J., Baek, K.-H. and Garcia-Bonito, J., 1998, "An Equivalent Source Technique for Calculating the Sound Field Inside an Enclosure Containing Scattering Objects," *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 104, No. 3, pp. 1221~1231.
- (8) Nelson, P. A. and Elliott, S. J., 1992, *Active Control of Sound*, Academic press, London.
- (9) 김영찬, 최성필, 양보석, 2002, "조합 유전 알고리즘을 이용한 증기 터빈 회전체-베어링 시스템의 최적 설계", 한국소음진동공학회논문집 제 12 권, 제 5 호, pp. 380~388.
- (10) Van Laarhoven, P. J. M. and Aarts, E. H., 1988, *Simulated Annealing: Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers.