

## 배플이 없는 사각형 음향센서의 자기방사 임피던스

# Self-Radiation Impedance of Rectangular Acoustic Sensor without Baffle

이 종 길\*, 서 인 창\*  
(Jongkil Lee\* and Inchang Seo\*)

### 요 약

배플이 없는 폴리우레탄 유한 윈도우를 장착한 사각형 음향 센서의 수중 음향방사로 인한 자기방사 임피던스 (self-radiation impedance)의 컨덕턴스(conductance)와 서셉턴스(susceptance)를 실험으로 측정 하여 이를 전기적 동가회로를 이용하여 수중방사 임피던스 양을 계산하였다. 또한 무한배플(rigid infinite baffle)의 사각형 피스톤을 모델로 선정한 Levine 식을 이용하여 음향방사로 인한 자기방사 임피던스를 적분식으로 표시하고 이것을 방사 저항과 방사 리액턴스로 분리하여 수치해석하였다. 실험의 경계조건과 비교적 유사한 이론해석 결과를 실험치와 비교하였다.

### ABSTRACT

Conductance and susceptance of the self-radiation impedance in a rectangular acoustic sensor without baffle are measured experimentally. Finite polyurethane window is mounted at the end of the acoustic sensor. The sensor radiation impedance is calculated using the equivalent electric circuit. Using the Levine's integral equations of a rectangular piston mounted to the rigid infinite baffle, radiation resistance and reactance were simulated numerically. Numerical and experimental results are compared to each other.

### I. 서 론

수중에서 송수신 음향에너지를 이용하여 여러가지 관측 및 통신에 응용이 되는 소나 시스템은 내부에 음향 센서가 장착되어 있으며 이것의 배열에 따라 선 배열형, 원통 배열형 및 평면 배열형 등으로 구분된다. 능동소나에 사용되는 평면 배열형 음향 센서는

고출력 음향 방사를 위해 다양한 형상의 센서를 장착하고 있다. 현재까지 널리 알려진 음향센서로는 원형 및 사각형 등이 있다. 따라서 이러한 고효율 고출력 소나를 설계하기 위해 음향 방사 임피던스의 고려가 주요한 설계인자로 인식되고 있다. 또한 방사 임피던스의 상호간섭으로 인하여 일부 센서는 다른 센서들의 출력을 상쇄시켜 센서 효율을 감소시킨다.

무한배플(infinite baffle)에서 원형 피스톤(piston)의 방사 임피던스는 비교적 많은 연구가 이루어져 있으나 사각형 피스톤의 방사 임피던스는 복잡한

\* 국방과학연구소 음향센서연구실  
접수일자: 1995년 5월 17일

수식의 전개 때문에 관심에서 벗어나 있다. Lowenthal(1963) 등은 폭이 일정하고 길이가 무한인 배플로 가정한 경계조건을 이용한 사각형 진동체의 자기방사 임피던스를 구하였다. Arase(1964)는 무한 강성배플에서의 사각형 피스톤의 상호방사 임피던스를 적분식으로 유도하여 상호 거리에 따른 방사 임피던스의 변화를 보였다. Burnett(1969) 등은 무한 배플의 사각형 피스톤의 방사 임피던스 함수를 표로 제시하였다. Stepanishen(1970)은 무한 배플에서 사각형 피스톤의 방사 임피던스를 충격응답함수(impulse response function)를 이용하여 수치해석하였다. 또한 Stepanishen(1977)은 무한 배플에서 사각형 피스톤의 방사 임피던스를 푸리에(Fourier) 변환을 이용하여 방사 저항(resistance) 및 방사 리액턴스(reactance)를 유도하여 수치해석하였다. Levine(1983)은 무한 배플에서 사각형 피스톤에서의 자기방사 임피던스를 임피던스 함수로서 공식화 한 적분식을 제시하였으며, 단순점근(simple asymptotic) 접근법을 이용하여 제시한 식의 해를 근사적으로 구하였다.

실험을 통한 사각형 음향센서의 방사 임피던스 연구는 아직까지 발표된 논문이 거의 없는 실정이다. 다만 Flad(1964) 등은 원형 음향센서의 상호방사 임피던스를 무한 배플과 배플이 없는 상태에서 측정하여 이를 이론식과 비교하였으나 상세한 실험결과는 발표하지 않았다. Johnson(1962) 등은 대형 배열에 사용되는 소나 트랜스듀서 요소들의 음향 상호간섭으로 인한 방사 임피던스 변화량을 계측하여 유사한 형태의 이론식과 비교하였으나 역시 실험결과는 발표되지 않았다. Kim(1994)등은 유한배플 원통형 진동체의 수중방사 임피던스를 실험으로 계측하고 이를 이론식의 결과와 비교하였으며 실험에서의 계측 결과 배플의 크기가 클수록 이론치에 근접함을 보였다.

실험을 통한 음향 방사 임피던스의 계측결과는 이론으로 유도된 수식과 비교 검토하여 검증하는데 유용하게 활용될 수 있으나 이론식의 유도에서 사용된 경계조건(boundary conditions)들의 변화 때문에 실험의 결과와 비교하는데 어려움이 있다. 따라서 이러한 음향 방사 임피던스의 영향을 먼저 실험과 비슷한 경계조건의 이론식으로 수치해석을 하고 이것을 실험의 계측결과와 비교하여 음향방사량을 분석하는 것이 본 연구의 목적이다. 본 연구에서는 평면배열형 소나에 이용되는 배플이 없는 정사각형 음향센서를

모델로 선정하였다.

## II. 이론식의 검토

이론해석을 위하여 강성이 강한 무한배플(rigid infinite baffle)의 사각형 피스톤을 모델로 선정한다. Levine(1983)의 식을 이용하여 음향방사로 인한 자기방사 임피던스를 적분식으로 표시하고 이것을 방사 저항과 방사 리액턴스로 분리하여 수치해석으로 검토하였다. Levine은 무한 배플의 사각 피스톤에서 반공간(half-space) 자기방사 임피던스를 다음과 같이 제안하였다. 즉, 방사 임피던스,  $Z$ 는

$$\begin{aligned} \frac{Z}{\rho c A} = & 1 - \frac{2i}{\pi a b k^2} \{ k(a+b) - i \\ & + \int_0^{\tan^{-1}(b/a)} (ka \sin \theta - kb \cos \theta + 2i \sin \theta \cos \theta) e^{ika \sec \theta} d\theta \\ & + \int_{\tan^{-1}(b/a)}^{\pi/2} (-ka \sin \theta + kb \cos \theta + 2i \sin \theta \cos \theta) \\ & e^{ikb \cos \theta} d\theta \} \end{aligned} \quad (1)$$

로 표시됨을 보였다. 여기서  $\rho c$ 는 특성 임피던스(characteristic impedance),  $k$ 는 파수(wave number),  $A$ 는 음향센서 진동체의 단면적,  $a$  및  $b$ 는 사각형의 변의 길이이다. 만약 식 (1)에서  $b \rightarrow \infty$ 이면 방사 임피던스  $\tilde{Z}$ 는

$$\begin{aligned} \tilde{Z} \left\{ \frac{Z}{\rho c A} \right\}_{b \rightarrow \infty} = & 1 - \frac{2i}{\pi k a} + \frac{2i}{\pi k a} \int_0^{\pi/2} \\ & \cos \theta e^{ika \sec \theta} d\theta \end{aligned} \quad (2)$$

로 표시된다. 즉 식 (2)는 음향센서가 장착되는 배플이 한쪽은 유한이며 다른 한쪽은 무한인 경계조건으로 가정할 수 있다. 이것은 실험의 조건과 조금 근접한 경계조건으로 볼 수 있다. 식 (2)를 방사 저항,  $R$  및 방사 리액턴스,  $X$ 로 표시하여  $\tilde{Z} = R - jX$ 로 정의하면 실수부  $R$ 은

$$R = \text{Re}\{\tilde{Z}\} = 1 - \frac{2}{\pi k a} \int_0^{\pi/2} \cos \theta \sin(ka \sec \theta) d\theta \quad (3)$$

이며 허수부  $X$ 는

$$X = \text{Im}\{\bar{Z}\} = \frac{2}{\pi ka} \left\{ 1 - \int_0^{\pi/2} \cos \theta \cdot \cos(ka \sec \theta) d\theta \right\} \quad (4)$$

로 표시된다. 식 (3) 및 (4)를 이용하여  $ka$ 의 값에 따라 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 그림 1은 반 무한 배플에서의 사각형 피스톤의 자기 방사 저항 및 자기 방사 리액턴스를 무차원화 하여 보인 것이다. 즉 고주파로 방사되는 음향센서의 경우 방사되는 저항은 1로 수렴이 되며 리액턴스는 0으로 수렴함을 알 수 있다. 이것은 또한 방사 임피던스가 고주파에서는 1로 수렴이 됨을 보이고 있다.

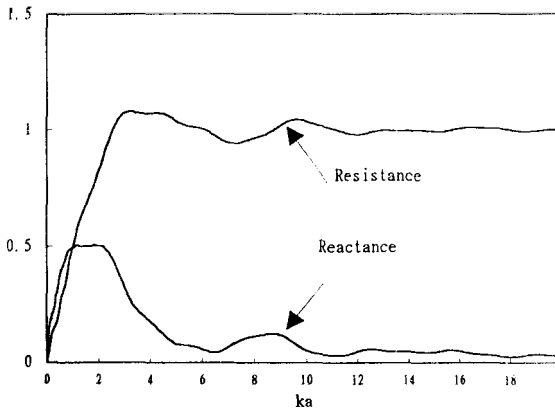


그림 1. 무한배플 사각형 피스톤의 방사저항 및 방사 임피던스

### III. 계측 및 결과

본 실험에 사용된 압전 진동체는 실제 수중 음향센서로 널리 이용이 되는 PZT-4 세라믹 링으로 전기기계 변환계수  $n$ 은 0.315이다. 그림 2에 보인 바와 같

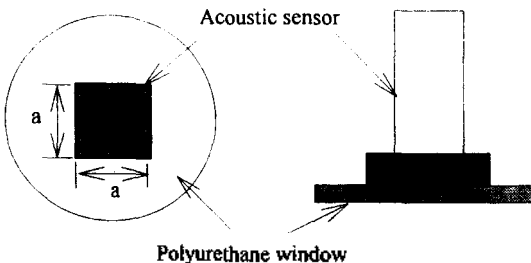


그림 2. 폴리우레탄 윈도우에 장착된 배플이 없는 음향센서

이 변의 길이가  $a$ 이고 배플이 없는 정사각형 음향센서 진동체의 끝단에 몰과 특성 임피던스가 유사한 두께가 5mm이고 직경이 43mm인 폴리우레탄(polyurethane) 윈도우(window)를 부착하였다. 수중에서의 실험을 고려하여 센서 상부까지 원통형 폴리우레탄으로 수밀처리 하였다.

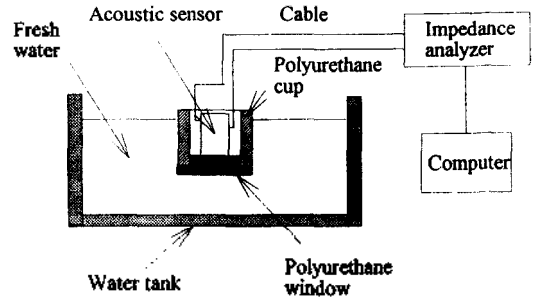


그림 3. 방사 임피던스 계측을 위한 실험 장치의 구성

방사 임피던스의 계측을 위하여 그림 3과 같이 실험장치를 구성하였다. 음향수조(acoustic water tank)는 길이 18m, 폭 및 깊이가 10m로서 정재파(standing wave)를 제거하기 위해 약간 변형된 직육면체 구조이며 청수(fresh water)가 채워져 있다. 계측 방법은 공기중과 수중으로 분리하여 계측하였다. 그림 3에 보인 바와 같이 음향센서의 진동체의 전기단자에서 입력 어드미턴스(admittance)를 임피던스 분석기(impedance analyzer, HP4194A)를 이용하여 계측하고 전산기로 데이터 처리를 하였다. 압전진동체에 가해지는 전기적 입력 신호는 임피던스 분석기에서 전압 및 전류로 인가 되었다. 그림 4 및 5는 배플이 없는 음향센서의 전기단자에서 컨덕턴스(conductance)와 서셉턴스(susceptance)를 공기중과 수중에서 계측한 결과를 보인 것이다. 공기중에서의 음향센서의 공진 주파수는  $ka=0.75$  근처이며 수중에서와 약간의 차이를 보였다. 이것은 센서 진동체의 경계조건이 공기중과 수중에서 서로 다르기 때문에 발생하는 것으로 해석된다. 또한 수중에서의 어드미턴스는 방사 임피던스에 의해 공기중에서의 값에 비해 크게 감소 하였다. 또한 그림 6은 공기중 및 수중에서의 어드미턴스를 보인 것으로 고유진동수가  $ka=0.75$  근처임을 알 수 있다.

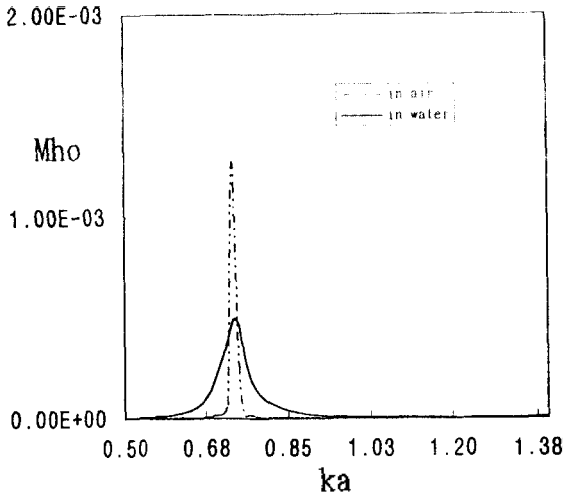


그림 4. 공기중 및 수중에서의 컨덕턴스

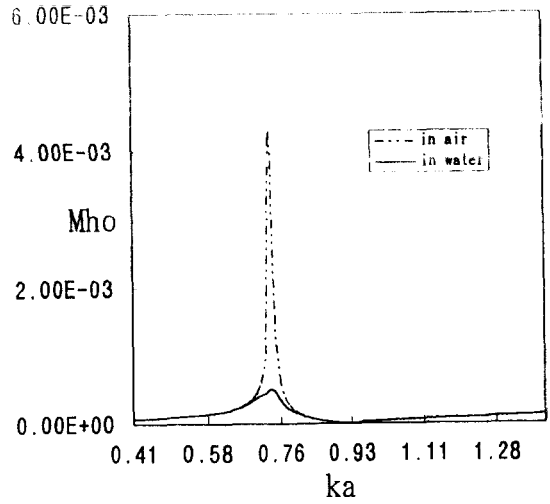


그림 6. 공기중 및 수중에서의 어드미턴스

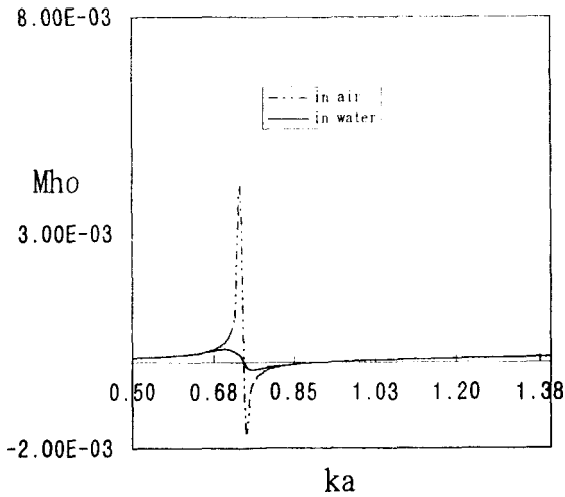


그림 5. 공기중 및 수중에서의 서셉턴스

실제 음향센서는 유한배풀의 상태로 구성되며 배풀길이에 대한 영향은 이론해석에서 보듯이 고주파일수록 그 영향이 적어지나 음향센서의 사용 주파수 대역을 벗어나 정확도가 크게 감소하는 단점이 있다. 또한 저주파에서는 계측 시스템의 잡음영향으로 특성해석에 어려움이 있어 본 연구에서는 센서 공진주파수를 포함한  $ka$ 를 0.5~1.4까지를 분석 주파수 영역으로 설정하여 수행하였다.

#### IV. 자기 방사 임피던스의 계산

수중에서의 방사 임피던스를 계산하기 위하여 전기적 등가회로 기법을 도입하였다. 그림 7은 케이블 효과( $C_c$ )를 고려한 음향센서의 전기적 등가회로를 보인 것이다. 음향센서의 공기중에서의 임피던스와 수중에서의 임피던스 데이터로부터 실제 방사 임피던스를 등가 회로기법을 이용하여 유도된 수식으로 전산기를 이용하여 데이터 처리를 하였다.

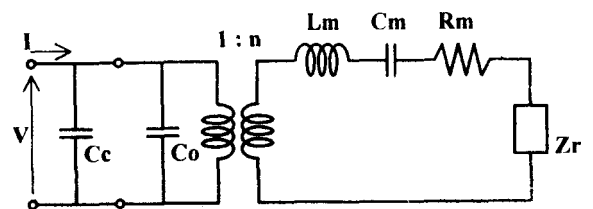


그림 7. 사각형 음향센서의 전기 등가회로

등가회로에서 음향계가 물인 경우 동임피던스(motional impedance)에 직렬로 방사 임피던스  $Z_r$ 이 추가되므로 수중에서의 입력 어드미턴스  $Y_w$  및 방사 임피던스  $Z_r$ 는

$$Y_w = Y_b + \frac{n^2}{Z_m + Z_r}, \quad Z_r = n^2 \left\{ \frac{1}{Y_w - Y_b} - \frac{1}{Y_m} \right\} \quad (5)$$

로 표시된다. 여기서,

$Y_b = j\omega C_0$ : 제지 어드미턴스(blocked admittance)

$Z_m = R_m + j\left(\omega L_m - \frac{C_m}{\omega}\right)$ : 동임피던스(motional impedance)

$Z_r = R_r + jX_r$ : 방사 임피던스

를 나타낸다. 또한 수중 방사 임피던스에 비해 공기 중의 방사 임피던스는 무시할 수 있으므로 진공중의 어드미턴스를 공기중의 어드미턴스 특성으로 가정하여 계산하였다. 따라서 공기중에서의 입력 어드미턴스  $Y_a$ 의 계측으로부터 동어드미턴스  $Y_m$ 과 제지 어드미턴스  $Y_b$ 를 구하고 수중에서의 입력 어드미턴스  $Y_w$ 를 계측하면 음향센서에 대한 자기 방사 임피던스 특성을 구할 수 있다.

이러한 개념을 알고리즘화 하여 그림 4~6의 계측 결과를 입력 데이터로 하여 전산기로 방사임피던스 양을 계산한 결과가 그림 8이다. 그림 8은 배플이 없는 음향센서의 주파수에 따른 방사 임피던스, 방사저항 및 방사 리액턴스이다. 그림 9 및 10은 방사 저항과 방사 리액턴스를 무한배플의 이론치와 비교한 것

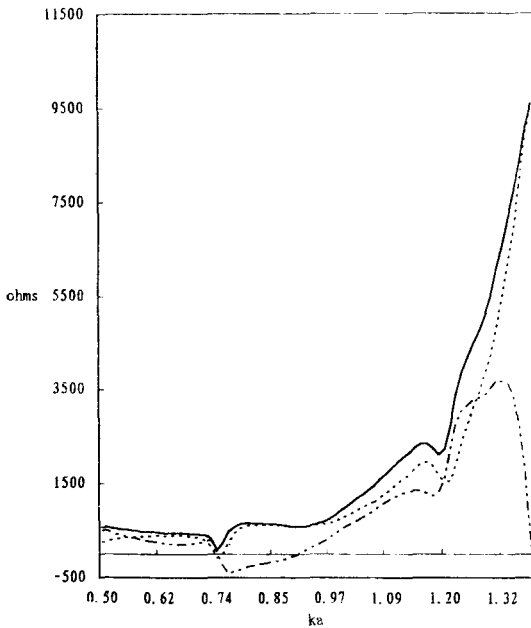


그림 8. 배플이 없는 음향센서의 ka에 따른 방사임피던스, 방사저항 및 방사 리액턴스(점선: 방사저항, 이점쇄선: 방사리액턴스, 실선: 방사 임피던스)

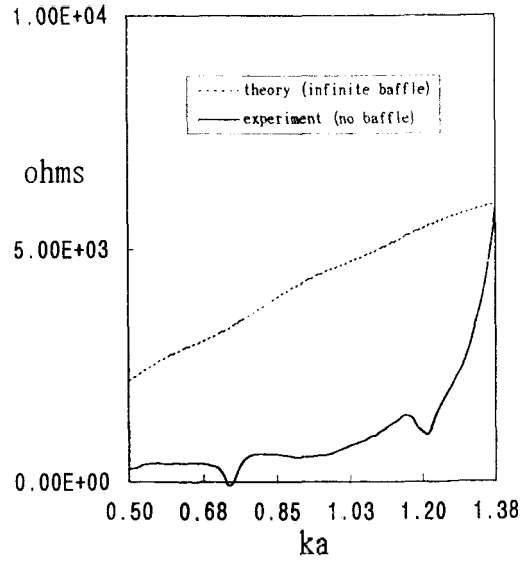


그림 9. 사각형 음향 센서의 방사저항

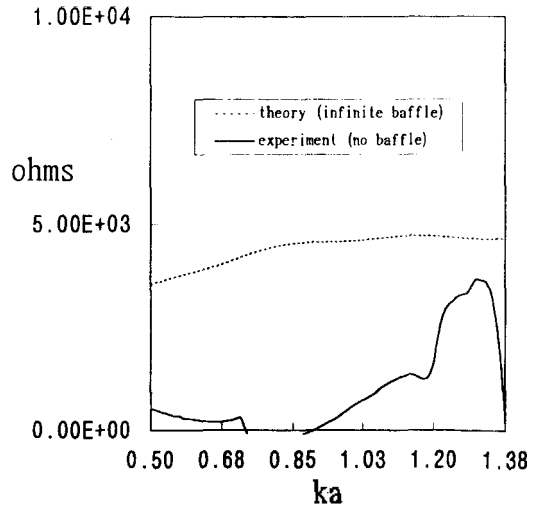


그림 10. 사각형 음향 센서의 방사 리액턴스

이다. 즉 ka의 값이 증가할수록 방사저항은 증가하며 방사 리액턴스는 ka의 값이 1.3근처에서 감소하였다. 이는 그림 1의 리액턴스가 ka의 값이 2의 근처에서 감소하는 경향과 비교하여 볼 수 있다. 그러나 이론식의 결과는 무한배플이므로 배플이 없는 상태의 실험 결과와 정확히 비교할 수는 없으나 배플 유무에 따른 이론 및 실험의 결과 비교는 주파수에 따른 방사 저항 및 방사 리액턴스의 경향을 파악 하는데 그 의미가 있다고 본다.

## V. 결 론

방사 임피던스의 계측결과는 수학적으로 유도된 수식과 비교검토하여 검증하는데 유용하게 활용될 수 있으며 센서배열의 분체를 풀기 위한 실제정보를 제공할 수 있다. 따라서 이러한 방사 임피던스의 영향을 실험으로 먼저 계측하고 그 결과들을 분석하여 고효율 음향센서 설계에 활용할 수 있도록 센서 설계 정보(특정 주파수 대역에서의 자기 방사 임피던스)를 제공하는 것이 본 연구의 목적이다.

본 연구에서는 배플이 없는 사각형 음향센서를 풀과 특성치가 비슷한 폴리우레탄 원도우에 장착하여 공기중 및 수중에서 계측한 후 방사 임피던스를 전기 등가회로를 이용하여 계산하였다. 계측장비의 잡음 및 센서특성을 고려하여  $ka$ 의 값을 0.5~1.4 범위에서 계측하였다. 계산된 결과에 근거하여  $ka$ 의 값이 증가할수록 방사저항은 증가하나 방사 리액턴스는  $ka$ 의 값이 1.3근처에서 감소하였다. 그러나 이론식의 결과는 무한배플이므로 배플이 없는 상태의 실험 결과와 정확히 비교할 수는 없으나 배플 유무에 따른 이론 및 실험의 결과 비교는 주파수에 따른 방사 저항 및 방사 리액턴스의 경향을 파악 하는데 그 의미가 있다고 본다.

실제적으로 소나에 이용되는 음향센서는 유한배플이며 단순히 이론치와 비교하기 위하여 무한배플을 음향센서에 직접 장착하는 것은 센서 설계자의 입장에서는 현실성이 없기 때문에 이것이 본 연구의 실험적 한계라고도 할 수 있으며 실험의 조건에 맞는 이론해석이 매우 어렵고 또한 해석된 이론 결과들이 아직까지 발표 된 것이 없다. 그러나 배플이 없는 음향센서의 경우 방사 임피던스의 이론식의 유도는 계속 연구 되어져야 할 과제임에는 틀림없다.

## 참 고 문 헌

1. Arase, F. M., "Mutual Radiation Impedance of Square and Rectangular Pistons in a Rigid Infinite Baffle," *The Journal of the Acoustical Society of America* 36(8), pp. 1521-1525, 1964.
2. Bank, G. and Wright, J. R., "Radiation Impedance Calculations for a Rectangular Piston," *Journal of Audio Engineering Society*, Vol. 38, No. 5, pp. 350-354, 1990.
3. Burnett, D. S. and Soroka, W. W., "Tables of Rectangular Piston Radiation Impedance Functions, with Application to Sound Transmission Loss through Deep Apertures," *The Journal of the Acoustical Society of America* 51(5), pp. 1618-1623, 1972.
4. Flad, F. R., Kuzneski, J. A., and Packard, W. B., "Experimental Determination of Mutual Radiation Impedance between Coplanar Circular Pistons," *The Journal of the Acoustical Society of America* 36, pp. 2005 (Abstract), 1964.
5. Johnson, H. M., "Effects of Radiation Impedance Variation on Sonar-Transducer Performance in a Large Array," *The Journal of the Acoustical Society of America* 34, pp. 716 (Abstract), 1962.
6. 김원호, 윤종락, "유한배플 원통 진동체의 수중 방사 임피던스에 대한 실험적 연구," *한국음향학회지*, 제13권 제2호, pp. 23-29, 1994.
7. Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., and Sanders, J. V., *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, New York, 1982.
8. Levine, H., "On the Radiation Impedance of a Rectangular Piston," *Journal of Sound and Vibration* 89 (4), pp. 447-455, 1983.
9. Lowenthal, S. and Tournois, P., "Radiation Impedance of Membranes and Plates: Their Acoustic Coupling with the Propagating Medium," *The Journal of the Acoustical Society of America* 35(9), pp. 1423-1428, 1963.
10. Stepanishen, P. R., "The Time-Dependent Force and Radiation Impedance on a Piston in a Rigid Infinite Planar Baffle," *The Journal of the Acoustical Society of America* 49(3), pp. 841-849, 1970.
11. Stepanishen, P. R., "The Radiation Impedance of a Rectangular Piston," *Journal of Sound and Vibration* 55(2), pp. 275-288, 1977.

▲李 鍾 吉(Jongkil Lee) 1962년 2월 23일생



1984년: 부산대학교 기계설계학  
과(B.S.)

1990년: Univ. of Utah, Me-  
chanical Engineering  
(M.S.)

1993년: Univ. of Utah, Me-  
chanical Engineering  
(Ph.D.)

1984년~1989년: 국방과학연구소 연구원

1994년: 현대중공업(주) 전동소음연구실

1995년: 소음진동기술사(P.E.)

1995년~현재: 국방과학연구소 음향센서연구실 선임  
연구원

▲徐 寅 彰(Inchang Seo) 1966년 3월 6일생



1988년: 한양대학교 물리학과  
(학사)

1990년: 한양대학원 물리학과  
(석사)

1990년~현재: 국방과학연구소  
음향센서연구실  
연구원