

유한배플의 영향을 고려한 정방형 진동면의 방사임피던스계산

Calculation of Radiation Impedance for Rectangular Piston Vibrators with Finite Baffle

김 무 준*, 김 천 덕**, 하 강 열*

(Moo-Joon Kim*, Chun-Duck Kim**, Kang-Lyeol Ha*)

*부경대학교 물리학과, **부경대학교 전기공학과

(접수일자: 2000년 7월 25일; 채택일자: 2000년 8월 31일)

일반적으로 보고되어있는 방사임피던스는 무한강체 배플에 진동면을 두고있는 경우에 대하여 계산되어져 있어, 실제 유한한 크기의 배플을 갖는 트랜스듀서의 설계에는 적용하기 어려운 경우가 많다. 본 연구에서는 피스톤의 진동면을 작은 점음원의 모임으로 가정하고, 각 점음원의 음원강도와 배플의 크기를 관련지어 유한배플을 갖는 진동면에 대한 방사임피던스의 새로운 계산법을 제안하였다. 그에 대한 예로서 정방형의 피스톤 진동면에 대하여 배플의 크기에 따른 자기방사임피던스의 변화를 계산함으로써 제안한 방법의 유효성을 확인하였다.

핵심용어: 방사임피던스, 배플, 정방형 진동면, 트랜스듀서

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

Because the generally reported radiation impedance has been calculated for vibrating surface with infinite baffle, the results have difficulties to apply for design of the real transducers with finite baffle. In this paper, with assuming a vibrating surface as a set of small point sources, a new calculation method for the vibrating surface with finite baffle is suggested by considering the effect of finite baffle on the source strength of each point source. As an example, the variation of self-radiation impedance for rectangular vibrating surface is calculated according to the size of baffle. The results show that the suggested method is useful.

Key words: Radiation impedance, Baffle, Rectangular vibrating surface, Transducer

Subject classification: Underwater acoustics (5.6)

I. 서 론

수중 소나 시스템이나 스피커 등 음파를 방사하는 진동면을 이용한 음향 트랜스듀서에 있어서 음향매질에 대한 방사임피던스의 계산은 그 특성해석이나 설계상의 매우 중요한 작업이다¹⁾. 방사임피던스에 대한 연구결과는 무한 강체 배플상에 존재하는 진동면에 대하여는 이미 많이 보고되어있으나²⁻⁵⁾, 유한한 크기의 배플상에 존재하는 진동면에 대하여는 그 수학적인 취급이 쉽지않아 충분한 연구가 수행되어 있지 못하다. 그러나 실제 사용하고 있는 음향 트랜스듀서는 무한한 크기의 강체 배플을 사용할 수 없을 뿐만 아니라 오히려 설계상의 문제로 작은 배플의 면적이 요구되고 있다.

유한 배플상에 위치한 원형 진동면에 대한 방사임피던스의 계산은 Niumura⁶⁾등에 의해 보고된 바 있다. 이는 회

전타원체 면상에 위치한 원형 진동면을 고려하여 그 회전 타원체의 두께를 극단적으로 작게 하는 방법으로 유한 원형 배플위에 존재하는 원형 진동면의 방사임피던스를 계산하였다. 그러나 이것은 기하학적 대칭성이 좋은 원형의 진동면에 대하여도 매우 복잡한 여러종류의 무한 급수를 사용하여야만 계산이 가능하므로 진동면의 형상이 원형이 아닌 경우에는 계산이 불가능하다는 제한이 있다.

한편 필자 등이 최근 발표한 정방형 진동면에 대한 계산법에서는 진동면을 점음원의 집합으로 가정하고, 각 점음원간의 상호작용을 고려하는데 있어서 같은 물리량이 나오는 횟수를 수열의 일반항 형태로 나타냄으로써 계산량을 현저히 줄이고 계산의 정도를 높였다^{7,8)}. 또한 강체 배플 위에 놓여진 점음원에 대하여는 영상음원에 의한 해석법이 알려져있다⁹⁾. 본 연구에서는 배플이 존재하지 않는 영역에 대한 영향을 영상음원에 의한 부(負)음원으로 등가하여 정방형 진동면에 대한 계산에 있어서 점음원의 음원강도를 배플의 크기의 함수로 나타냄으로써 유한 배플에 대한 방사임피던스 계산식을 유도하였다. 그 식을

책임저자: 김무준 (kimmj@pknu.ac.kr)

608-737 부산광역시 남구 대연동 599-1 부경대학교 물리학과

(전화: 051-620-6349; 팩스: 051-611-6357)

이용하여 유한배플을 갖는 정방향 진동면의 방사임피던스를 계산하고, 그 결과를 문헌치와 비교 분석함으로써 그 방법의 유효성을 확인하였다.

II. 이론

그림 1은 유한배플을 가진 진동면의 방사임피던스를 계산하는데 있어서 점음원에 대한 유한 배플의 영향을 고찰하기 위한 모식도이다. 그림 1(a)는 무한 강체 배플면에 위치한 음원강도(Source Strength) Q_0 의 점음원이 등가적으로 $2Q_0$ 의 음원강도를 갖는 공간상의 점음원으로 나타낼 수 있다는 것을 보이고 있다. 그러나, 그림 1(b)에 나타낸 것과 같이 같은 점음원이 유한한 넓이의 배플면 위에 있을 경우 배플면을 벗어난 영역에 대해서는 점음원으로 부터의 회절음압이 반사되지 못하고 음원의 뒷방향으로 진행하게 되어 더 이상 등가적으로 2배의 음원강도를 갖지 못하게 된다. 이것을 배플의 평균 반경 d 의 함수인 가상적인 부음원의 음원강도 $-q$ 로 표현하면 무한배플일때의 음원강도 $2Q_0$ 와 유한 배플에 의한 영향을 고려한 부음원의 음원강도 $-q$ 를 합한 Q' 의 음원강도를 갖는 공간상의 점음원으로 등가할 수 있다.

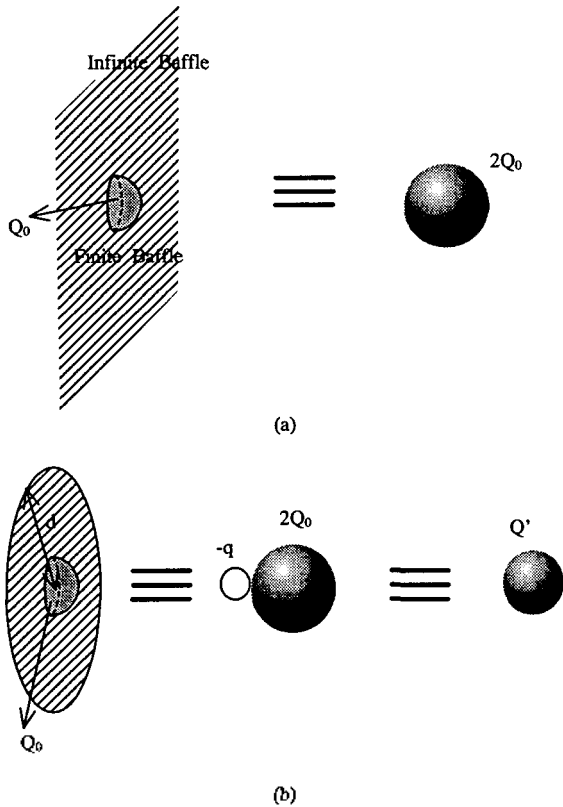


그림 1. 유한 배플을 갖는 점음원의 등가 음원강도
Fig. 1. Equivalent source strength of a point source with finite baffle.

본 연구에서는 그림 2에 나타낸 것과 같이 유한 배플을

갖고있는 정방향의 진동면에 대한 방사임피던스를 계산하기 위하여 진동면을 $n \times n$ 개의 점음원의 모임으로 가정하고, 이 각 점음원의 음원강도를 상술한 Q' 로 하여 계산을 수행한다. 이때 진동면의 중심으로부터 배플의 한 변까지의 거리를 평균 배플반경 d 로 고려하였다. 한편, 무한 강체 배플에 놓여있는 정방향의 진동면을 $n \times n$ 개의 점음원의 모임으로 가정하여 그 점음원 상호간의 영향을 합하는 방법을 택하면 규격화된 자기 방사임피던스는 다음과 같이 주어진다^[7]. 이때 규격화를 위하여 한 변의 길이 a 는 1로 두었다.

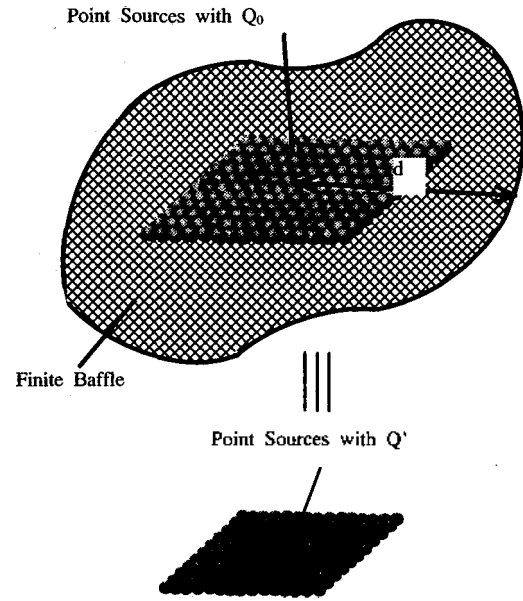


그림 2. 유한 배플을 갖는 정방향의 진동면에 대한 등가 음원강도
Fig. 2. Equivalent source strength of rectangular vibrating surface with finite baffle.

$$\frac{Z_j}{\rho c S} = \frac{jk}{2\pi} \left(\frac{1}{n}\right)^4 \left[\sum_{n=1}^{n-1} s_1(n) f_1 + \sum_{n=1}^{n-1} s_2(n) f_2 + \sum_{n=2}^{n-1} \sum_{m=1}^{n-1} s_3(n) f_3 \right] \tag{1}$$

여기서, ρ 는 음향매질의 밀도, c 는 음속, k 는 파수이며 $s_1(n)$, $s_2(n)$, $s_3(n)$ 및 f_1 , f_2 , f_3 는 각각 다음과 같다.

$$s_1(n) = \begin{cases} 4(n-x)^2 & (1 \leq x \leq n-1), \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{2}$$

$$s_2(n) = \begin{cases} 4(n-x)n & (1 \leq x \leq n-1), \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{3}$$

$$s_3(n) = \begin{cases} 8(n-x)(n-y) & (1 \leq x \leq n-1, 2 \leq y \leq n-1) \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{4}$$

$$f_1 = \frac{\exp\left(-jk \frac{x\sqrt{2}}{n}\right)}{\frac{x\sqrt{2}}{n}} \quad (5)$$

$$f_2 = \frac{\exp\left(-jk \frac{x}{n}\right)}{\frac{x}{n}} \quad (6)$$

$$f_3 = \frac{\exp\left(-jk \frac{\sqrt{x^2+y^2}}{n}\right)}{\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{n}} \quad (7)$$

그림 2에 나타난 것과 같이 임의의 유한 배플을 갖는 정방형 진동면에 있어서 각 점음원으로부터 배플의 가장자리까지의 거리에 대한 평균치를 평균 반경으로 정의하면, 평균반경 d 인 배플의 경우, 점음원의 음원강도 변화를 고려한 방사임피던스는 다음과 같이 구해진다.

$$\frac{Z_b}{\rho c S} = \frac{jk}{2\pi} \left(\frac{1}{n}\right)^4 \left[\sum_{x=1}^{n-1} s_1(n)(f_1 - f_{1b}) + \sum_{x=1}^{n-1} s_2(n)(f_2 - f_{2b}) + \sum_{y=2}^{n-1} \sum_{x=1}^{n-1} s_3(n)(f_3 - f_{3b}) \right] \quad (8)$$

단,

$$f_{1b} = \frac{\exp\left\{-jk \frac{(x+d)\sqrt{2}}{n}\right\}}{\frac{(x+d)\sqrt{2}}{n}} \quad (9)$$

$$f_{2b} = \frac{\exp\left(-jk \frac{x+d}{n}\right)}{\frac{x+d}{n}} \quad (10)$$

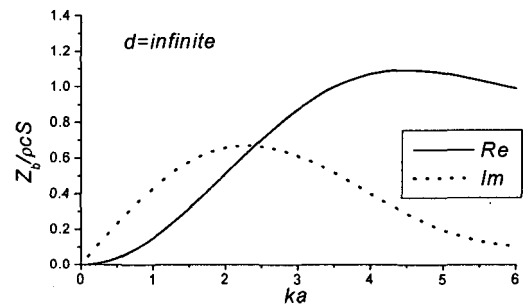
$$f_{3b} = \frac{\exp\left(-jk \frac{\sqrt{x^2+y^2+d}}{n}\right)}{\frac{\sqrt{x^2+y^2+d}}{n}} \quad (11)$$

로 주어진다.

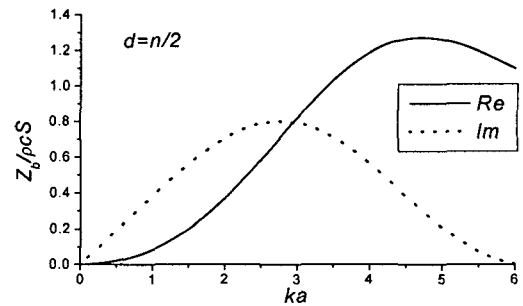
III. 결 과

배플의 크기에 따른 정방형 진동면에 대한 방사임피던스의 변화를 알아보기 위하여 그림 2에 나타난 정방형 배플의 크기를 나타내는 길이 d 를 변화시켜가며 계산한 결과를 그림 3에 나타내었다. 이때 진동면의 한 변의 분할 수 n 은 200으로 하여 계산했다. 그림 3(a)에 무한배플의 경우에 대한 방사임피던스의 결과를 나타내었다. 이에 대해 그림 3(b)의 결과는 배플의 크기와 진동면의 크기가 동일한 경우 즉, 배플이 없는 경우의 방사임피던스를 나타내고 있다. 이 결과를 보면 $ka=3.3$ 보다 작은 영역은, 진동면으로부터 방사되는 음파의 파장이 진동면의 한 변의 길이 a 에 비해 2배 이상 큰 경우로, 실수부의 경우

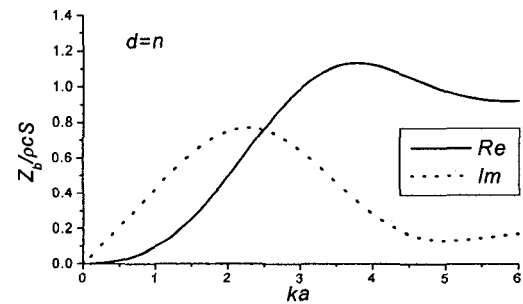
무한배플의 경우에 비해 작은 값을 나타내고 있다. 이것은 진동면의 앞면에 생성되는 음향매질의 소밀상태가 진동면의 측면에 있는 음향매질에 의해 쉽게 상쇄됨을 나타내고 있다. 그러나 $ka>3.3$ 인 영역에 있어서는 오히려 무한배플의 경우보다 더욱 큰 피크값을 나타내고 있어 진동판의 진동수에 따라 변하는 음향매질의 소밀상태의 변화와 측면 매질에 의한 상쇄와의 관계에 의해 복잡한 변화를 보이고 있음을 나타낸다. 그러나 진동판으로부터 방사되는 음파의 파장이 진동판 한 변의 길이 a 에 비해 매우 작은 경우 즉, ka 의 값이 매우 큰 경우에는 무한 배플에서의 결과에 수렴해 감을 확인할 수 있다. 허수부의 경우도 실수부와 비슷한 경향을 보이고 있으나 최대치를 나타내는 피크의 위치가 무한 배플의 경우에 비해 늦게 나타남을 보이고 있다. 이상의 결과는 동일한 대상에 대한 연구결과를 찾을 수 없어 비교하기가 어려우나, Nimura¹⁰⁾등에 의해 계산되어진 원형진동판에 대한 계산결과와 동일한 경향을 나타내고 있어 여기서의 계산방법이 타당한 것으로 사료된다.



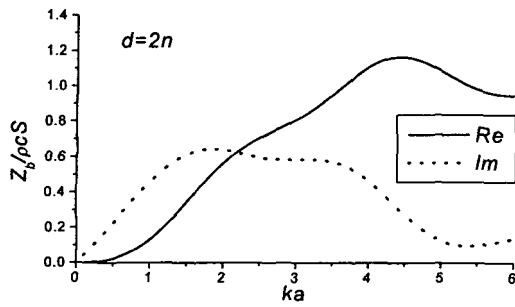
(a)



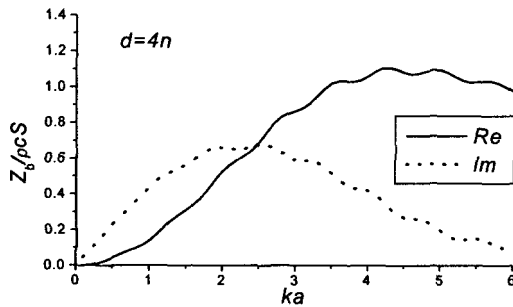
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 3. 배플의 크기에 따른 정방향 진동면에 대한 방사임피던스의 변화

- (a) 무한배플의 경우 (b) 배플이 없는 경우
 (c) 배플면적/진동면적 = 4 (d) 배플면적/진동면적 = 16
 (e) 배플면적/진동면적 = 64

Fig. 3. Variation of radiation impedance for rectangular vibrating surface according to the size of baffle,
 (a) infinite baffle, (b) no baffle,
 (c) baffle area/vibrating area=4,
 (d) baffle area/vibrating area=16,
 (e) baffle area/vibrating area=64.

배플의 크기를 변화시켜가며 계산한 방사임피던스의 결과를 그림 3(c)~그림 3(e)에 보였다. 배플의 크기가 커져감에 따라 무한 배플의 경우에 접근해 감을 알 수 있으며, 배플의 크기와 진동면에서 방사되는 음파의 파장과 관계에 따라 복잡한 변화를 보이고 있어 $d < 4\lambda_0$ 인 유한 배플의 경우, ka 가 10이하의 영역에 대하여는 무한 배플의 경우로 근사하기가 곤란함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 연구에서는 유한 배플상에 위치한 정방향의 진동면에 대하여 진동면을 구성하고 있는 점음원의 음원강도를 배플의 크기의 함수로 나타내어 배플의 크기에 따른 방사임피던스의 변화를 계산하였다. 그 결과, 배플이 없는 경우의 방사임피던스는 무한배플의 경우에 비해 ka 가 비교적 작은 영역에서는 실수부 및 허수부의 값이 작은 값을 가지나 최대치를 나타내는 피크는 오히려 배플이 없는 경우가 더 큰 값을 나타내었다. 이 결과는 원형진동판에 대한 결과와 동일한 경향을 나타내고 있어 본 연구에

서 제안한 계산법의 타당성을 확인할 수 있었다. 또한 배플의 크기를 변화시켜가며 계산한 방사임피던스의 변화는 배플의 크기가 진동면의 면적에 비해 64배 이하인 경우에는 ka 의 값이 10이하의 영역에 대해 매우 많은 변화를 보여 트랜스듀서의 특성해석 및 설계시 정확한 고려가 필요함을 확인했다.

감사의 글

본 연구는 수중음향특화센터(UARC)의 지원으로 수행되었습니다(UA-31).

참 고 문 헌

1. 조치영, 서희선, 이정민, "방사임피던스를 고려한 평면배열 수중 음향 트랜스듀서의 최적 빔 설계," 한국음향학회지, 15, 1, pp. 40-45, 1996.
2. H. A. Schneck, "Improve Integral Formulation for Acoustic Radiation Problems," J. Acoust. Soc. Amer., 44, 1, pp. 41-58, 1968.
3. P. Stepanishen, "The Time-Dependent Force and Radiation Impedance on a Piston in a Rigid Infinite Planar Baffle," J. Acoust. Soc. Amer., 49, 3, pp. 841-849, 1971.
4. 이종길, 서인창, "배플이 없는 사각형 음향센서의 자기방사 임피던스" 한국음향학회지, 14, 4, pp. 82-88, 1995.
5. 이종길, 서인창, "적분식을 이용한 무한배플 사각형 진동체의 자기방사 임피던스 연구," 한국음향학회지, 14, 5, pp. 58-62, 1995.
6. T. Nimura, Y. Watanabe, "Effect of a Finite Circular Baffle Board on Acoustic Radiation," J. Acoust. Soc. Amer., 25, pp. 76, 1953.
7. Moo-Joon Kim, Chun-Duck Kim and Kang-Lyeol Ha, "A New Calculation Method for the Radiation Impedance of Transducer with Regular Square Vibrating Surface," J. Acoust. Soc. Korea, 18, 1E, pp. 20-26, 1999.
8. Moo-Joon Kim, Chun-Duck Kim and Kang-Lyeol Ha, "A New Calculation Method of Radiation Impedance for Vibrating Surfaces with Arbitrary Shape," JIAP, Part 1, 39, 5B, pp. 3174-3179, 2000.
9. 早坂、吉川、音響振動論、丸善、pp. 569-571、1974、東京.

- ▲ 김 무 준(Moo-Joon Kim)
 한국 음향학회지 17권 2호 참조
 ▲ 김 천 덕(Chun-Duck Kim)
 한국 음향학회지 15권 3호 참조
 ▲ 하 강 열(Kang-Lyeol Ha)
 한국 음향학회지 17권 2호 참조.