

유한요소법과 하이브리드형 무한요소법의 결합에 의한
축대칭 변환기의 음향 특성해석(Ⅱ) ; 광대역 배열
변환기의 설계 및 그 음향특성

Acoustic Characteristics Analysis of the Axi-symmetric
Transducer by the combined Finite Element Method and
Hybrid Type Infinite Element Method, Part Ⅱ ; Wideband
Array Transducer Design and its Acoustic Characteristics

김 천 덕*, 김 원 호**, 김 대 환**, 윤 종 락***

(Chun-Duck Kim*, Won-Ho Kim**, Dae-Whan Kim**, Jong-Rak Yoon***)

요 약

본 논문은 두 편으로 연결된 논문의 둘째편으로 광대역 배열변환기의 설계방법과 설계된 변환기의 음향특성을 제시한다. 아울러 유한요소법과 하이브리드형 무한요소법의 결합기법에 의한 설계된 변환기의 음향특성 결과가 등가회로 해석 기법에 의한 결과보다 양호함을 확인하였다. 따라서 제시된 변환기 해석기법이 광대역 배열 변환기의 설계 및 음향특성 해석에 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

ABSTRACT

This is the second of two companion papers which describes the wideband array transducer design procedure and the designed transducer acoustic characteristics. In addition, the result of the designed transducer acoustic characteristics by the combined Finite Element Method and Hybrid Type Infinite Element Method, is found to be better than that by the equivalent circuit model method. Therefore, the technique presented in this paper could be applied in the design and the acoustic characteristics analysis of the wideband array transducer.

I. 서 론

수중에서 사용되는 송신용 변환기의 주파수 대역은 변환기의 사용목적에 따라 결정된다. 능동소나와 같은 단일 주파수 시스템인 경우는 협대역, 고출력 특성을 갖는 단일 공진형 변환기가 요구되지만 다양

한 주파수가 음향 환경에 따라 선택되는 경우에는 광대역, 고출력 특성을 갖는 변환기가 요구된다.^[1]

단일 공진형 변환기의 경우 주파수 대역을 규정하는 Q값과 음향출력은 사용압 전자의 손실계수, 절연 및 보호를 목적으로 압전자에 부가되는 음향원도우의 기계적 손실계수 및 두께, 음향방사계의 방사임피던스 등에 의해 결정된다. 그러나 변환기의 설계 단계에서 조정 가능한 요소는 음향원도우의 기계적 손실계수와 원도우 두께만으로 협대역, 고출력을 얻기

*부산수산대학교 전기공학과

**국방과학연구소

***부산수학교 정보통신공학과

접수일: 1993년 11월 22일

위해서는 일반적으로 음향원도우의 기계적 손실계수가 작고 원도우의 두께만 중심주파수에 대한 파장의 $n/4$ (n : 양의 정수)배가 되도록 설계한다. 음향원도우의 기계적 손실계수를 크게 하면 Q 값은 낮아져 대역폭은 증가하지만 음향출력은 상대적으로 작아진다, 즉 Q 값과 음향출력은 상호 상반관계가 있으므로 단일공진형 변환기를 사용하여 광대역, 고출력 변환기를 제작하는 것은 기술적으로 제한점을 갖게 된다. 이러한 제한점을 해결하기 위해 Flexensional 변환기와 같이 변환기의 기계적 구조를 특별히 설계하는 경우도 있으나 Q 값이 5이하인 광대역, 고출력 변환기를 제작하는 것은 어렵다고 알려져 있다.^[1,5]

따라서 본 연구에서는 공진주파수가 서로 다른 3개의 원통형 압전자를 배열하여, 각 압전자의 대역특성 및 출력특성이 합성되게 설계하여 광대역, 고출력 변환기를 얻고자 한다. 설계의 기준 및 설계된 배열 변환기의 음향특성 해석은 본 논문의 선행연구^[6]에서 제안한 기법을 적용하였다.

또한 변환기 설계는 등가회로 해석모델^[7]이 적용 가능하도록 하여 두 기법에 의한 음향특성 결과를 상호 비교하였고 임피던스 분석기를 사용한 측정 결과를 양결과와의 비교기준 자료로 하였다.

II. 광대역 배열 변환기의 설계 및 등가회로 해석 모델

II.1 광대역 배열 변환기의 설계

그림 1은 세계의 원통형 압전자를 배열한 변환기 설계단면도로 세계의 압전자는 외경, 두께, 높이가 각각 (50.8mm, 5.2mm, 25.4mm), (38.1mm, 3.15mm, 25.4mm) 및 (25.4mm, 3.15mm, 12.7mm)의 특성을 갖고 경방향 분극으로 제작된 것이다.

설계의 기본적인 요구 특성 및 설계기준은 - (1) 서로 다른 크기 즉 공진주파수가 다른 압전자를 배열하여 광대역 특성을 얻는다. (2) 압전자의 분극방향은 경방향으로 주용력은 원주방향이다. 즉 제작된 배열 변환기에 사용된 각 압전자 음향축은 경방향이다. (3) 전체 시스템의 음향적 특성은 각 압전자의 음향특성의 산술적 합성으로 되도록 한다. 즉 전기적 등가회로 모델의 적용이 가능하도록하여 본 연구에서 제시한 기법으로 구한 결과와 등가회로 모델에 의한 결과가 비교 가능하도록 설계한다. (4) 배열을 둘러싼 4mm두께의 폴리우레탄 음향원도우는 전기적으로

절연 및 변환기 보호를 목적으로 한 필수적인 기계부재로 그 자체의 기계적 손실계수에 의해 주파수 대역폭을 증가시키는 역할을 한다. 그러나 각 압전자를 결합시키는 역할을 하므로 (3)의 조건을 만족시키기 위해서는 압전자간의 결합력이 무시될 정도로 압전자간의 상대적 거리가 크게 되도록 해야 한다. (5) 그림 1에서 알루미늄 구조는 압전자 배열을 지지하는 기계 구조물로서만 작용하고 압전자의 음향특성에 영향을 주지 않아야 한다. 이는 알루미늄의 부가 질량에 의한 공진주파수 전이효과를 무시하기 위한 것과 음향특성 해석의 단순화를 위한 것으로 설계된 모델에 등가회로 해석 모델을 적용하기 위한 조건이다. - 등으로 선행 논문^[6]의 결과를 적용하여, 압전자간의 수직거리를 20.5mm로 하여 (4)의 조건이 만족되도록 설계하였다. 또한 그림 1에서 폴리우레탄에 의해 압전자의 용력이 알루미늄으로 전달되지만 알루미늄은 코프렌에 의해 압전자와는 차단되도록 하여 (5)의 조건이 만족되도록 하였다. 마찬가지로 압전자의 축방향 용력은 코프렌에 의해 차단되도록 하여 (5)의 조건이 충족되도록 하였다.

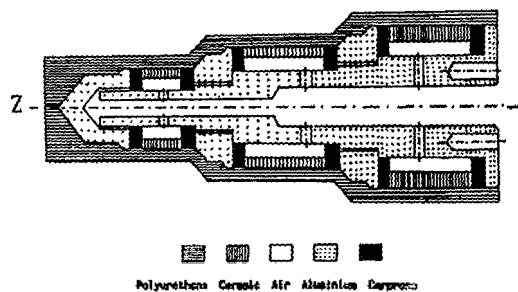


그림 1. 배열 변환기의 설계단면도

II.2 광대역 배열 변환기의 전기적 등가회로 해석 모델

Mason^[7]에 의해 발표된 압전자의 전기적 등가회로 해석 모델은 변환기를 전기적 등가회로로 모델화하여 변환기의 음향특성을 해석하는 기법이다. 그림 2는 그림 1에 대한 등가회로 모델로 그림 2-(a) 및 (b)는 단일 압전자 및 배열 압전자에 대한 등가회로 모델 구성도이고 그림 2-(c)는 단일 압전자 등가회로 모델에 대해 전기, 기계, 음향적 구성요소를 전기적 회로 상수로 변환하여 표시한 것이다.

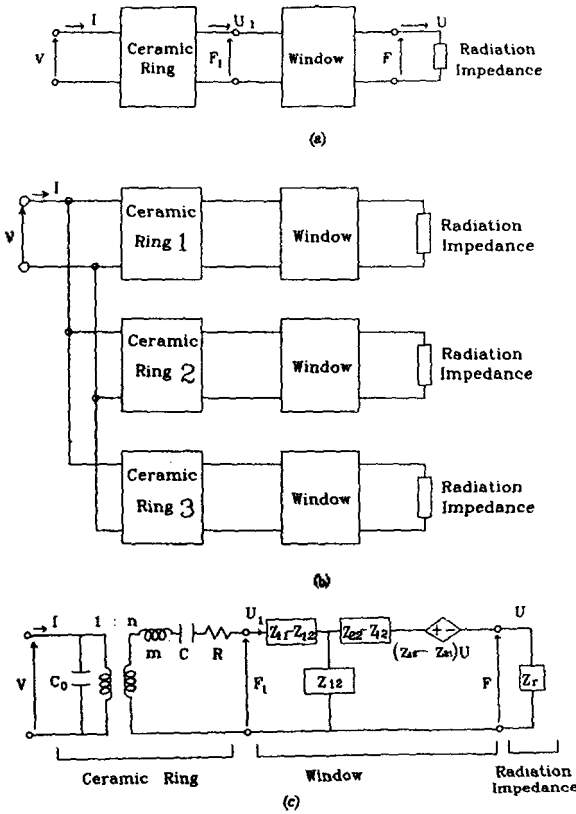


그림 2 배열변환기의 동가회로 모델
 (a) 단일 압전자 동가모델 (b) 배열 압전자 동가모델
 (c) 단일 압전자 동가모델의 전기적 동가회로

그림은 전기계 매개변수(V: 전압, I: 전류)와 기계계 매개변수(F₁, F: 진동력; u₁, u: 진동속도)는 상호 결합된 형태로 해석되어야 함을 보인다.

따라서 그림 2-(c)를 4단자망의 전송파라미터로 표시하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ u \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}$

$\begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix}$: 압전자 전송파라미터,

$\begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix}$: 윈도우 전송파라미터

$$\begin{cases} A_1: 1/n \\ B_1: Z_m/n \\ C_1: j\omega C_0/n \\ D_1: n + (j\omega C_0 Z_m/n) \end{cases} \quad \begin{cases} A_2: Z_{11} - Z_{21} \\ B_2: -Z_{12} + Z_{11} Z_{22}/Z_{21} \\ C_2: 1/Z_{21} \\ D_2: +Z_{22}/Z_{21} \end{cases}$$

n : 압전자의 transformation factor

C₀ : 압전자의 정전용량

Z_m : 압전자 기계 임피던스(=R + j(ωm - 1/ωC))

Z_{ij} : 윈도우의 임피던스 파라미터⁽¹⁾

또한 식(1)을 2단자대망의 임피던스 파라미터로 표시하여 입력임피던스 Z_i를 구하면 다음 식으로 주어진다.

$$Z_{i_n} = AZ_r + B/CZ_r + D \quad (2)$$

식(2)에서 방사임피던스 Z_r를 제외한 임피던스 성분은 압전자 및 윈도우의 전기·기계적 구성요소 특성에 의해 산출된다. Z_r는 방사면의 경계조건에 의해 결정되는 값으로 그림1에서 보는 바와 같이 실제 모델은 유한강벽조건 이지만 본 연구에서는 무한강벽에 구속된 유한 원통형 진동자가 일정한 속도로 진동한다고 가정하여 유도한 Nimura의 결과식^[8]을 적용하여 Z_r를 구하였다. 이러한 가정은 선행연구^[6]에서 지적한 바와 같이 압전자간의 거리가 20mm 이상으로 폴리우레탄에 의한 결합효과가 없고 폴리우레탄이 무한 강벽 조건을 만족시켜야 타당하다. 따라서 폴리우레탄은 유한길이이므로 Z_r은 오차를 포함하게 될 것이다.

설계된 배열 변환기의 각 배열요소는 II.1절에서 논한 바와 같이 코프렌과 음향윈도우의 기계적 손실에 의해 상호 독립되어 있다. 따라서 그림 2-(b)와 같이 병렬연결로 되어 있으므로 전체 특성은 각 배열요소의 전기적 어드미턴스 특성의 산술적 합으로 계산된다.

III. 실험결과 및 고찰

선행 논문에서 제안한 해석기법을 적용하여 그림 1의 설계된 배열 변환기의 음향특성을 해석하였다. 아울러 비교검증을 위해 II.2절에서 소개한 동가회로 해석기법과 임피던스 분석기(HP 4194A)를 이용한 결

과도 제시하였다. 설명의 편의를 위해 외경 50.8mm 압전자를 “대”, 외경 38.1mm 압전자를 “중”, 외경 25.4mm 압전자를 “소”로 표기하였다. 또한 분석주파수 ka (a : “대” 압전자의 반경)가 약 1.0~4.0되는 주파수범위로 하였다.

그림 3은 공기중 어드미턴스 특성으로 컨덕턴스 값이 극치를 보이는 각 압전자의 공진주파수는 측정치를 기준으로 수치계산 결과는 높게, 등가회로 기법에 의한 결과는 낮게 나타나고 공진주파수 근처의 어드미턴스는 수치계산 결과 등가회로 결과에 비해 상대적으로 큰 오차를 보인다. 이러한 오차특성은 수치계산시 적용한 압전자의 손실계수가 부적당하게 선택된 이유로 판단된다. 그러나 전체적인 특성은 상호 잘 일치하며 또한 II-1절에서 논한 압전자간의 결합 효과는 공기중에서는 관측되지 않는다.

그림 4~7은 배열의 수중어드미턴스 특성으로 그림 4는 “대” 압전자, 그림 5는 “중” 압전자, 그림 6은 “소” 압전자에만 구동전압을 인가한 경우이고 그림 7은 세 압전자에 동시에 전압을 인가한 결과이다. 그

림 4~6의 공통된 특징은 컨덕턴스는 수치계산쪽이 등가회로 결과에 비해 측정치에 아주 잘 일치하고 서셉턴스는 반대로 등가회로 결과가 보다 잘 일치한다. 수치계산에 의한 서셉턴스가 등가회로 결과보다 나쁜 이유는 수치계산시 알루미늄과 폴리우레탄의 경계면을 자유경계면으로 하여 실제의 경계조건을 위배한 결과로 판단된다. 알루미늄을 포함시킨 실제 경계조건에서는 계산량의 증대로 보유하고 있는 계산기로 처리가 불가하였다. 또한 그림 4 및 5의 컨덕턴스 특성은 공기중의 특성과는 달리 $ka=2\sim3$ 범위에서 압전자간의 결합효과를 보이는 극치가 관측되고 측정치에서도 이러한 특성이 관측된다. 그러나 등가회로 기법에 의한 결과에서는 이 현상은 관측되지 않는다. 등가회로 결과에서 결합효과가 관측되지 않는 이유는 등가회로 모델은 1차원 모델로 폴리우레탄에 의한 축방향 응력 전달현상이 계산과정에서 무시되고 방사임피던스 Z_r 이 실제값과 다르기 때문으로 해석된다.

“소” 압전자에 전압을 인가한 그림 6의 경우는 결합

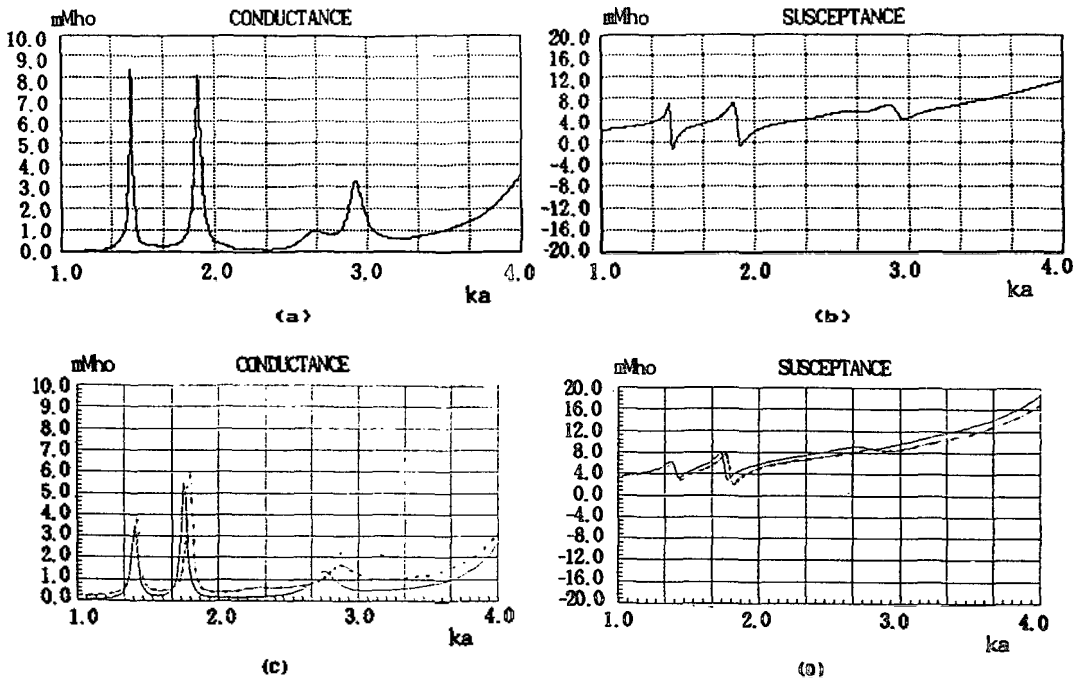


그림 3. 배열 변환기의 공기중 어드미턴스 특성
 (a), (b) : 어드미턴스 수치계산 결과
 (c), (d) : 어드미턴스 측정 및 등가회로 결과
 (··· : 측정, — : 등가회로)

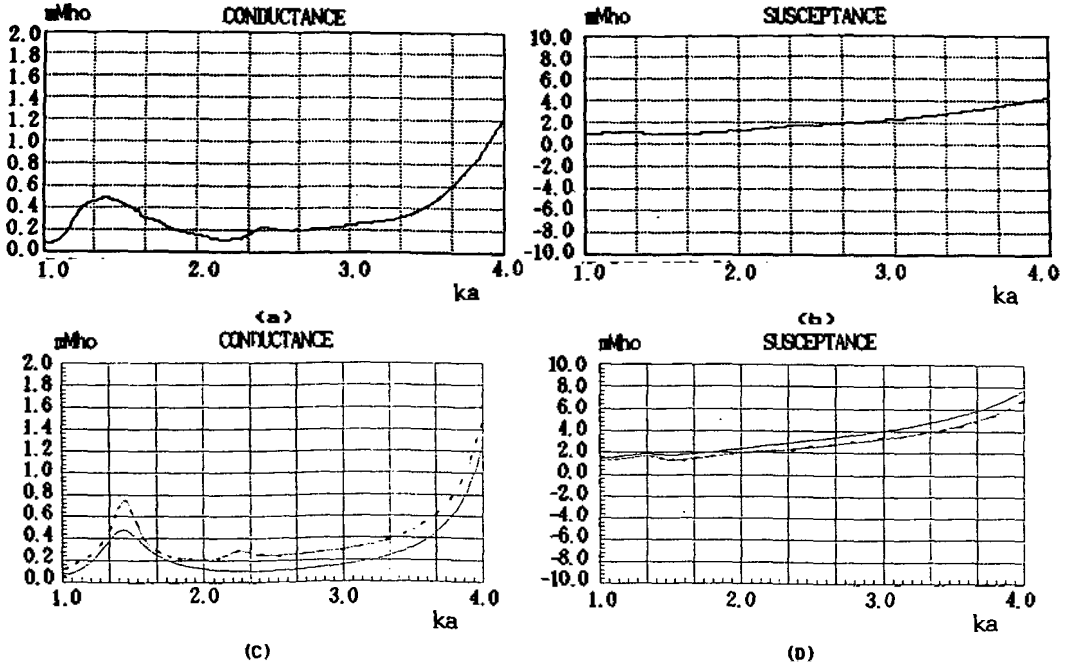


그림 4. 배열 변환기의 수중 어드미턴스 특성("대"압전자에 1V전압인가)
 (a), (b): 어드미턴스 수치계산 결과
 (c), (d): 어드미턴스 측정 및 동가회로 결과 (...: 측정, -: 동가회로)

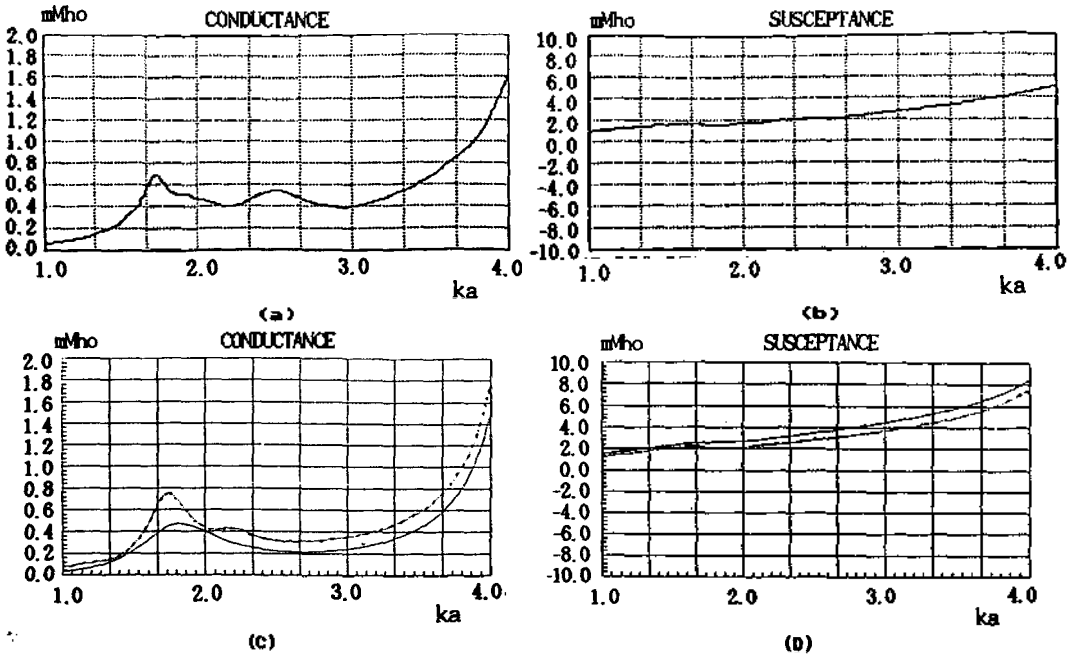


그림 5. 배열 변환기의 수중 어드미턴스 특성("중"압전자에 1V전압인가)
 (a), (b): 어드미턴스 수치계산 결과
 (c), (d): 어드미턴스 측정 및 동가회로 결과 (...: 측정, -: 동가회로)

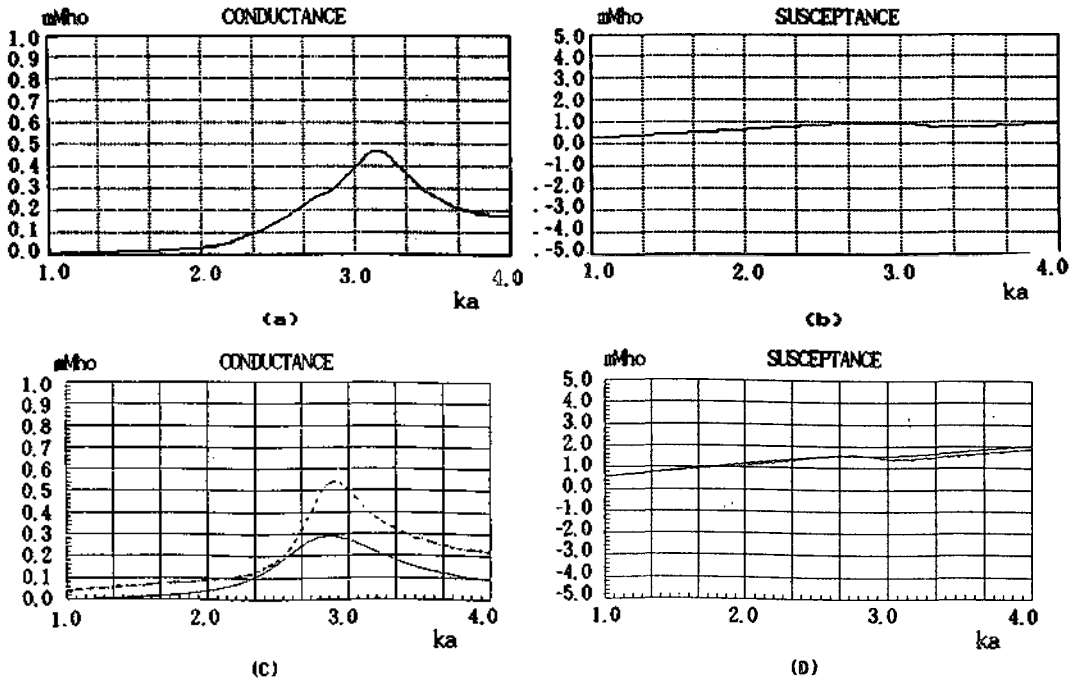


그림 6. 배열 변환기의 수중 어드미턴스 특성("소"압전자에 1V전압인가)

(a), (b) : 어드미턴스 수치계산 결과

(c), (d) : 어드미턴스 측정 및 동가회로 결과 (... : 측정, - : 동가회로)

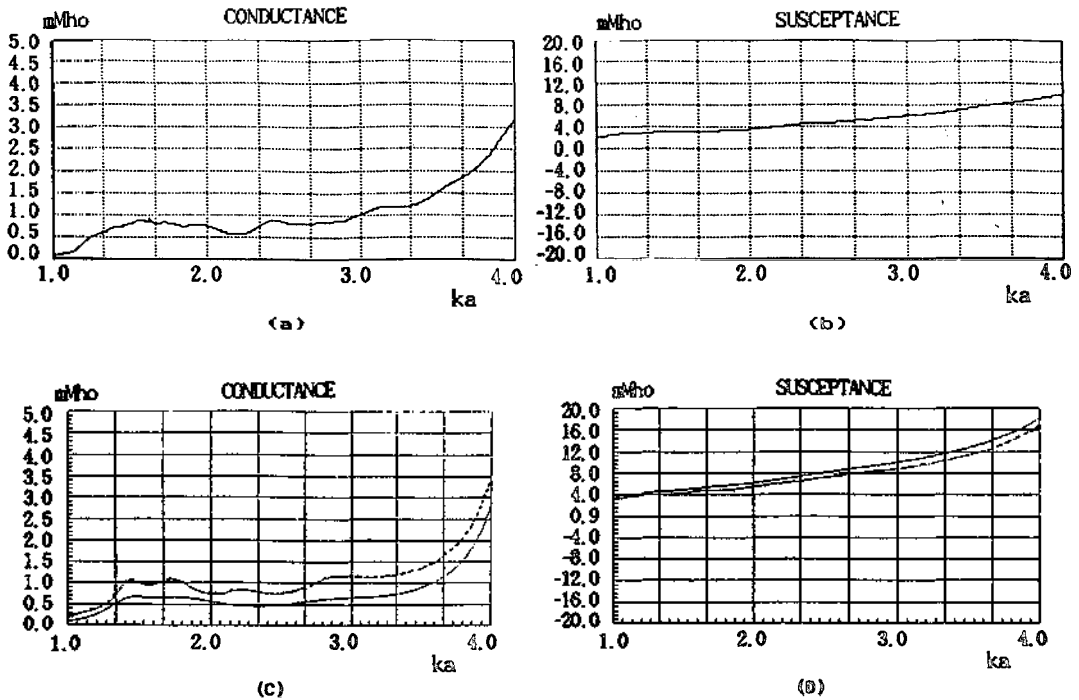


그림 7. 배열 변환기의 수중 어드미턴스 특성(새 압전자에 1V전압 동시 인가)

(a), (b) : 어드미턴스 수치계산 결과

(c), (d) : 어드미턴스 측정 및 동가회로 결과 (... : 측정, - : 동가회로)

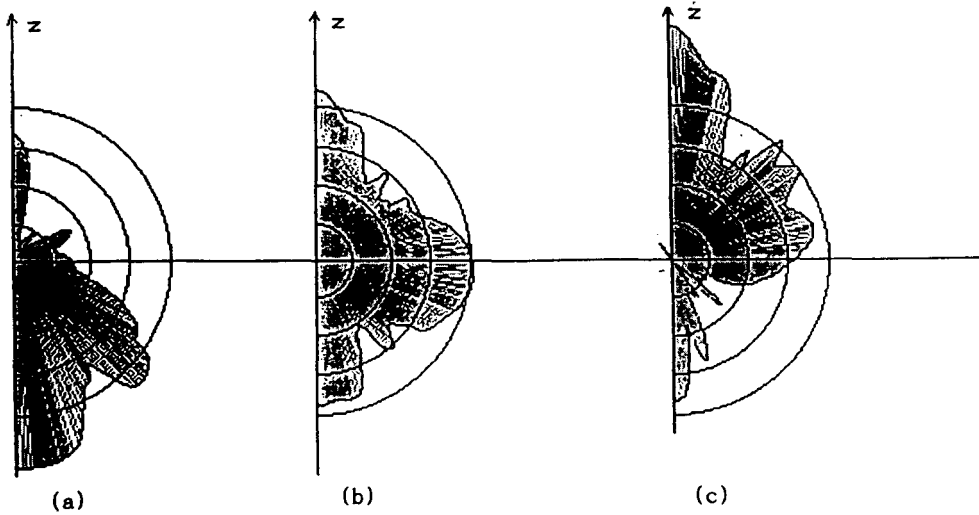


그림 8. 배열 변환기의 주파수별 지향특성(5dB/div.)
 (a) "대"압전자공진주파수
 (b) "중"압전자공진주파수
 (c) "소"압전자공진주파수

효과가 관측되지 않는다. 이는 첫 논문에서 고찰한 바와 같이 소압전자는 기계적 물리량이 작으므로 인접압전자에 전달되는 진동력이 작기 때문이다.

그림 7의 결과 역시 컨덕턴스의 특성은 등가회로 결과에 비해 결합효과에 의한 국소변화 특성이 측정치와 비슷하게 잘 일치한다.

그림 8은 가상경계역에서 계산된 주파수별 지향특성으로 각 압전자의 공진주파수에 대한것이다. 지향성은 등가회로 해석 기법으로는 예측할 수 없는 결과로 사용압전자는 경방향 분극으로 경방향 지향성을 가질 것으로 예측되나 수치해석 결과는 축방향 지향성도 아울러 보인다. 이러한 특성은 첫째 논문에서 고찰한 바와 같이 경방향 진동에너지는 폴리우레탄에 의해 축방향으로 전달되어 배열변환기는 multipole 음원으로 작용하는 이유이다. 또한 배열의 중간에 위치한 "중"압전자의 음향축은 경방향으로 관측되나 "대" 및 "소"압전자의 음향축은 첫째 논문에서 고찰된 바와 같이 폴리우레탄 음향원도우로 전달된 진동력에 의해 축방향으로 관측되어 실제 응용단계에서 특히 고려할 사항이다.

IV. 결 론

본 연구의 목적은 유한요소법과 무한요소법을 결합한 변환기 음향특성 해석 기법을 적용하여 광대역 배열변환기를 설계하고 설계된 변환기의 음향특성을 제시하는 것이다. 배열변환기를 세개의 원통형 압전자와 폴리우레탄 원도우, 코프렌 및 알루미늄의 기계요소로 구성하고 폴리우레탄에 의한 인접 압전자간의 결합효과를 무시하기 위해 압전자간의 거리를 5mm로 하였고 또한 코프렌을 삽입하여 압전자간의 용력전달이 차단되도록 하였다.

본 연구에서 제시한 음향특성 해석기법에 의해 예측된 설계된 변환기의 어드미턴스와 지향특성으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 설계된 변환기의 어드미턴스 특성은 전체적으로 측정치와 잘 일치하고 등가회로 해석 기법이 예측하지 못하는 압전자간의 결합효과를 잘 예측한다.
- (2) 등가회로 해석 기법으로는 해석할 수 없는 지향특성을 얻을 수 있었고 예측된 지향성은 압전자 고유의 경방향 지향성 뿐만아니라 축방향 지향성을 보였다.

결론적으로, 동가화로 해석 기법은 코프렌과 같은 응력차단제를 부가하여 변환기를 1차원모델로 가정할 수 있는 경우에만 적용시킬 수 있는 반면 본 연구에서 제시한 기법은 2차원 변환기의 모델인 축대칭 변환기의 어드미턴스 및 저항특성을 잘 예측할 뿐만 아니라 기계부재의 물리적 특성만 주어지면 기계부재의 형상, 압전자간 결합특성 등에 좌우되지 않고 응용될 수 있으므로 기존 변환기 모델의 음향 특성해석 및 신모델 개발에 유용하게 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

※본 연구 결과의 일부는 1992년도 한국음향학회 학술발표논문집과 1993년도 일본 시울레이션학회 (제14회 계산전기·전자공학 심포지움)에서 발표된 바 있다.

참 고 문 헌

1. S. C. Butler, and A. L. Butler, and J. L. Butler, "Directional Flexensional Transducer," JASA, vol 92, 2977, 1992.
2. M. G. Gazale, "Dummy Load Backing of Ultrasonic Transducers for Bandwidth Enhancement," JASA, vol 83, 1180, 1988.
3. J. H. Goll, "The Design of Broadband Fluid-Loaded Ultrasonic Transducer," IEEE Trans. Sonics Ultrasonic, vol 26, 385, 1979.
4. D. F. McCammon, "The Design of Tonpiltz Piezoelectric Transducers using Nonlinear Goal Programming," JASA, vol 68, 345, 1980.
5. M. V. Crombrugge and W. Thompson, Jr., "Optimization of the Transmitting characteristics of a Tonpiltz-type Trasducer by Proper choice of Impedance Matching Layers," JASA, Vol. 77 No.2, 747, 1985.
6. 윤종락, 윤형규, 김대환, 김천덕, "유한요소법과 하이브리드형 무한요소법의 결합에 의한 축대칭 변환기의 음향특성 해석(Ⅰ) : 방사임피던스, 저항성 및 압전자간의 결합효과." 한국음향학회지, vol 13(2), 1994.
7. W. P. Mason, "Physical Acoustics," voi I-part A, Academic Press, pp220-242, 1964.
8. T. Nimura and Y. Watanabe, "Sound Radiation from Zonal Radiators," Sci. Rep. Ritu, B-(Elect.Comm.) Vol.5 No.3, 153, 1953.

▲김 천 덕 1946년 5월 23일생
현재: 부산수산대학교 전자공학과 교수(1992년 제11권 6호 참조)

▲김 원 호 1959년 5월 14일생
현재: 국방과학연구소 선임연구원(1988년 제7권 6호 참조)

▲김 대 환 1954년 3월 31일생
현재: 국방과학연구소 수중음향센서 연구실장(1992년 제11권 6호 참조)

▲윤 종 락 1954년 6월 17일생
현재: 부산수산대학교 정보통신공학과 조교수(1992년 제11권 6호 참조)