

압전형 초음파 배열 변환기의 음향간섭 레벨에 관한 연구

A Study on the Cross Talk Level in a Piezoelectric Ultrasonic Array Transducer

이 수 성*, 김 영 신**, 노 용 래**
(Susung Lee*, Youngshin Kim**, Yongrae Roh**)

*경북대학교 센서공학과, **경북대학교 기계공학과

(접수일자: 2001년 8월 28일; 수정일자: 2001년 12월 18일; 채택일자: 2002년 1월 2일)

초음파 진단용으로 널리 사용되는 1차원 배열 압전형 초음파 변환기는 변환기내의 인접한 소자들간의 간섭에 의해 그 특성에 많은 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 유한 요소 해석법을 이용하여 압전형 1차원 배열 의료용 초음파 변환기에서 커프의 충전재와 형상의 변화에 의한 음향간섭 레벨의 경향을 분석하였다. 분석결과 는 향후 진단용 초음파 변환기의 최적 설계를 위해 중요한 자료가 될 것이며, 더 나아가 치료용, 비파괴 검사용, 그리고 수중 초음파 변환기에도 적용이 가능할 것이다.

핵심용어: 간섭 레벨, 커프, 배열, 변환기

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.1)

In piezoelectric ultrasonic linear array transducers widely used for diagnosis, the cross talk caused by the structural cross-coupling between adjacent elements inside the transducer affects the probe performance in a significant manner. In this study, we constructed a finite element model of a piezoelectric ultrasonic transducer, and analyzed its cross talk level with respect to the shape of and materials inside the kerf. The results of this work can be utilized in optimal design of the transducers for medical diagnosis and treatment as well as NDT applications.

Keywords: Crosstalk, Kerf, Array, Transducer

ASK subject classification: Ultrasonic and elastic waves (4.1)

I. 서론

지난 수십년간 초음파를 이용한 진단 장비는 인체에 무해하다는 장점으로 인하여 여러 분야에서 사용되어 왔다. 현대 초음파 영상 장비는 실시간 화상을 임상학자 나 의사에게 제공할 수 있으며, 이와 같은 대중적 보급은 전자적 스캔이 가능한 1차원 배열 초음파 변환기 (linear array)의 등장에 의해 가능해졌다. 1차원 배열 초음파 변환기는 다수의 독립소자를 치밀하게 배열하여 적절한 시간 간격을 두고 전자적 스위칭을 함으로써 초음파 영 상을 획득하며 근래의 초음파 영상 진단 장비의 주된 변

환기로 사용되고 있다. 배열형 초음파 변환기는 일반적으로 영상의 분해능 및 인체 적용성을 고려하여 1 ~ 10 MHz의 비교적 높은 작동 주파수를 가진다. 그 구조는 일반적으로 그림 1과 같이 압전 (piezoelectric) 소자를 중심으로 정합층 (matching layers)과 후면층 (backing material), 그리고 각 압전소자를 분리시키는 커프 (kerf) 로 구성된다. 변환기의 작동주파수가 높음으로 인해 각 각의 독립소자는 매우 작은 치수 (수백 μm)를 가지므로 그림 1에서와 같이 개개의 독립소자는 한 구조체로 묶여 있는 것과 같이 작동한다. 이로 인해 구동되는 소자와 인접한 소자들 간에는 음향간섭 (cross talk)이 존재하며 이 음향간섭은 전체 초음파 변환기의 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 특히 음향간섭은 초음파의 방사패턴을 변 화시키며, 감도를 저하시키고 음향 잡음을 증가시키는

등의 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다[1,2]. 따라서 음향간섭의 발생 구조를 해석하고 해결방안을 모색하기 위한 이론적인 해석[3]에 이어 광학 간섭계 등을 이용한 실험적인 접근이 있었다[4]. 그러나 1차원 배열 초음파 변환기에서 음향간섭을 발생시키는 탄성파의 전파 경로는 각 독립소자가 분리되어 있는 형태에 따라 매우 복잡하게 변화하므로 위와 같은 접근방법에는 한계가 있었으며, 해석을 위한 명료한 수학적 모델을 도출하기도 어려웠다. 그리하여 보다 정확한 음향간섭 구조 및 효과를 분석하기 위해서는 유한 요소법과 같은 다차원 수치해석법이 이용되어야 할 필요가 증대되어 왔다. 최근 유한 요소법을 이용하여 인접한 초음파 소자들 간의 간섭구조에 관한 연구한 결과가 발표된 바 있다[5]. 본 연구에서는 이 연구 결과를 바탕으로 압전형 배열 초음파 변환기에서 음향 간섭레벨을 저하시키기 위한 구조적 방안을 분석하였다. 분석에는 상용 유한 요소 해석도구인 ANSYS를 이용하였으며, 간섭효과를 억제하기 위한 구조물로서 통상 압전형 초음파 변환기에 많이 적용되는 커프의 불성과 형상의 변화에 따른 음향간섭 레벨의 변화 경향을 분석하였다. 나아가 그 결과로서 압전형 초음파 배열형 변환기내의 음향간섭 현상을 줄이기 위한 방안을 모색하고자 하였다.

II. 유한 요소 모델

일반적인 압전형 1차원 배열 초음파 변환기는 그림 1에

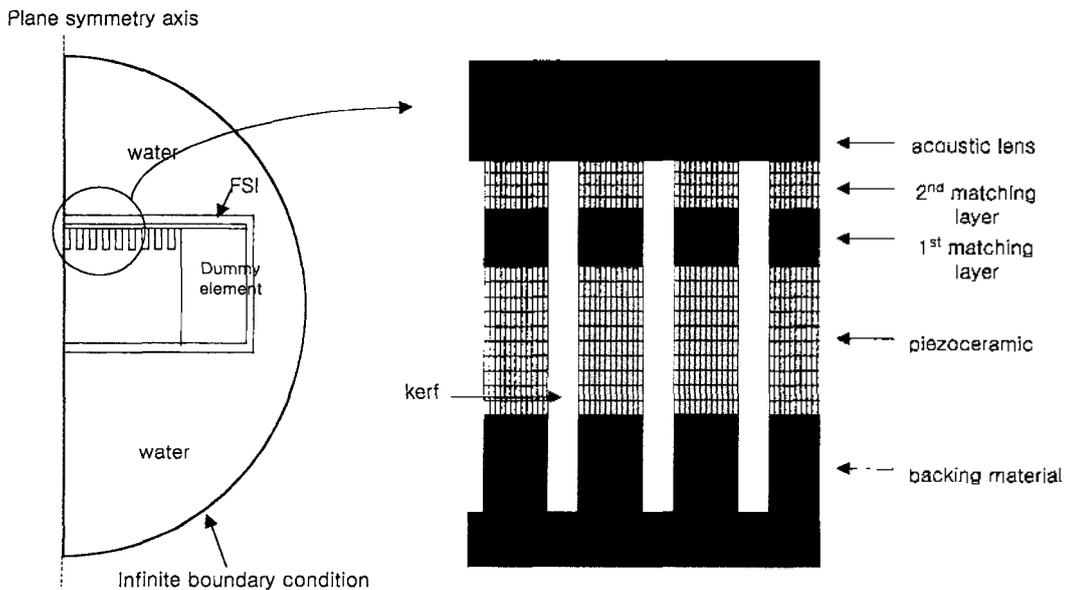


그림 2. 압전형 변환기의 유한 요소 기본 모델
Fig. 2. Basic FE model of the piezoelectric transducer.

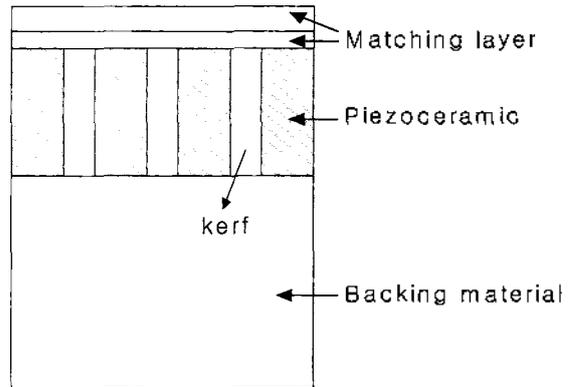


그림 1. 1차원 배열 초음파 변환기의 일반적인 구조
Fig. 1. General structure of an ultrasonic linear array transducer.

서와 같이 초음파를 발생하고 다시 반사된 초음파 신호를 전기 신호로 변환하는 압전 소자를 기준으로 초음파의 방사 전면으로 음향 정합층이 존재하며, 독립 소자가 배열된 방향에 수직한 방향으로 음향 집속을 위한 렌즈가 위치한다. 또한 압전 소자의 뒤쪽으로는 음향 감쇄층(후면층)을 두어 전면으로 전파되는 초음파 펄스가 압전 소자 후면에서 반사된 파에 의해 왜곡되지 않도록 한다. 그리고, 이런 층 구조의 독립 소자는 다시 다이싱 기법에 의해 서로 분리된다. 이때 다이싱이 된 부분을 커프라고 한다. 본 연구에서는 이러한 1차원 배열 초음파 변환기의 기초적 구조를 바탕으로 한 유한 요소 모델을 그림 2와 같이 설정하였다. 모델은 변환기 구조의 대칭성을 반영하여 좌측면을 대칭면으로 전체의 절반만을 묘사하도록 했다. 압전 소자의 폭 대 두께비는 진동 모드의 명확성과

전기-기계 결합 계수를 고려하여 모델에서 0.5로 설정하였으며[6-8], 두 층의 음향 정합층은 DeSilets[9]의 연구에 의한 물성을 도입하였고 각각 $\lambda/4$ 의 두께를 가진다. 여기서 λ 는 방사매질 (물)에서의 파장이다. 근거리 음장의 경계는 소자의 폭을 고려하여 변환기로부터 약 0.56 mm이고, 독립 소자가 8개 배열되어 있으며, 면대칭 축을 기준으로 대칭 조건을 부여하였다. 또한 모델의 오른쪽 끝에는 배열에 의한 수평방향의 공진모드로 인하여 생기는 영향을 배제하기 위하여 가상 요소 (dummy element) 들을 설치하였다. 커프 폭은 구동 소자 (압전 세라믹)의 가로 폭 대비 0.50이며, 음향 렌즈와 방사매질의 접합 부분은 FSI (fluid structure interface)층을 두었으며, 마지막으로 방사매질의 최외곽에는 무한 경계 조건을 부여하였다.

우선, 본 연구에서 해석의 기본 모델로 삼은 그림 2의 모델의 타당성을 검증하기 위해, 커프 충전재를 에폭시 수지, 알루미늄, 진공으로 채웠을 때의 각 경우에 대하여 구동신호가 인가되었을 때 구동 소자와 인접소자들에 발생한 변위의 비교를 통하여 음향간섭 정도를 해석하였다. 또한 음향간섭은 구동소자의 초음파 방사면을 왜곡시켜 방사패턴을 변화시키는 것으로 알려져 있으므로[1-2], 이에 따른 해석도 병행하였다. 표 1에 커프 충전재로 사용

된 에폭시 수지와 알루미늄의 물성을 나타내었다. 구동은 그림 2의 모델의 왼쪽 끝 압전 소자 하나에 임펄스 전압을 인가하였으며, 이에 따라 구동 소자와 바로 인접한 소자에서의 시간에 따른 변위 변화와 구동소자에 의한 방사 패턴을 그림 3에 나타내었다. 그림 2의 모델은 대칭 구조의 오른쪽 절반만을 묘사한 것이므로 이러한 구동 상태는 실제로는 전체 변환기의 중심부에 위치한 압전 소자 두개를 구동하는 것과 같다. 그림 3에서 변위는 커프 충전재가 알루미늄, 에폭시 수지, 진공의 순으로 나타나서 진공일때의 음향간섭 레벨이 가장 적음을 확인할 수 있었고, 이는 커프 충전재의 탄성계수가 클수록 인접소자의 변위가 크다는 선행 연구 결과와 잘 일치한다[11]. 또한 구동소자 상단에 위치한 음향 렌즈로부터 7 mm 떨어진 원주상의 지점에서 측정한 방사패턴이 이론적으로 무지향성을 가져야 함에도 불구하고 알루미늄, 에폭시 수지, 진공의 순으로 왜곡이 큼을 알 수 있으며, 이 또한 커프 충전재의 강성이 클수록 방사패턴이 많이 왜곡된다는 선행 연구 결과와 잘 일치한다[11]. 따라서, 본 연구에서 기본 모델로 제시한 그림 2의 초음파 변환기는 기존 연구사례와 경향성이 일치하는 결과를 보임으로서 그 타당성이 밝혀졌다고 볼 수 있다.

표 1. 커프 충전재의 물성

Table 1. Properties of the kerf filler.

Material	Density (kg/m ³)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
epoxy	2180	3.8	0.30
aluminum (a-2024)	2770	7.3	0.23
RDEG/PDA	1270	7.2	0.36

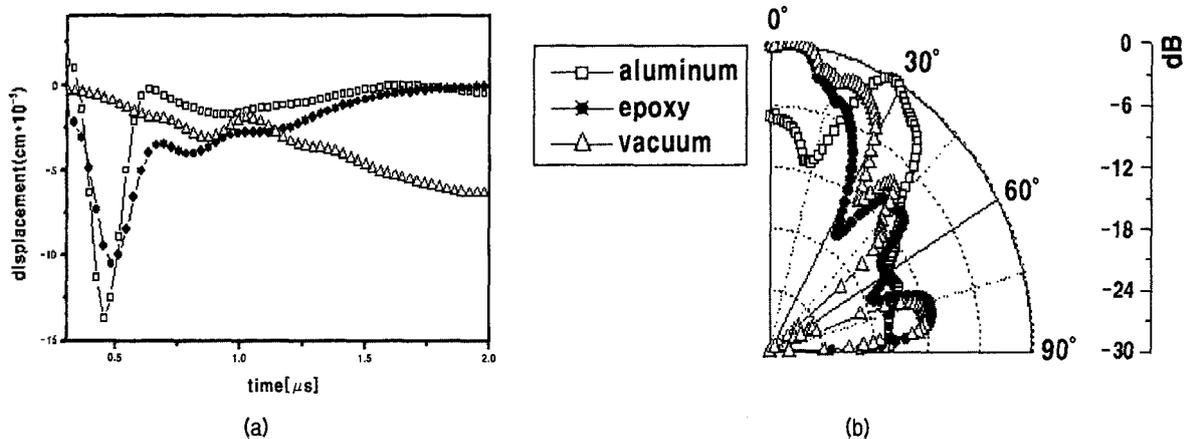


그림 3. 유한요소 기본 모델에 의한 결과: 인접소자에서의 시간에 따른 (a) 변위 변화 (b) 변환기의 방사패턴

Fig. 3. Results with the basic FE model: (a) displacement vs. time at the first neighboring element (b) radiation pattern of the transducer.

III. 커프 충전재의 물성 변화에 따른 간섭효과 레벨 변화

2장의 결과와 같이 커프의 존재는 1차원 배열 초음파 변환기의 성능에 지대한 영향을 미치며 본 절에서는 커프를 채우는 충전재의 물성에 따른 영향을 분석한다. 일반적으로 커프 내에 어떠한 충전재도 삽입하지 않는 경우, 즉 커프 내부가 진공인 경우 가장 효과적으로 음향간섭 레벨을 저하시킬 수 있다. 그러나 통상의 압전 초음파 변환기의 제작시, 커프를 비워두면 제작성도 떨어질 뿐만 아니라 배열된 구조가 외부 압력에 의해 쉽게 무너질 수 있으므로 일반적으로 커프를 에폭시 수지로 충전한다. 본 연구에서는 그림 2의 기본 모델에 에폭시 재료의 음향 임피던스를 변화시켜 커프에 대입하여 음향간섭 레벨의 변화 경향에 대하여 해석하였다. 음향간섭 레벨은 앞절의 유한요소 모델에 의한 시간 영역에서의 과도 해석을 통해 구동 소자 렌즈 상단 (LP1)에서의 변위 피크값을 기준으로 하여 바로 이웃하는 소자의 렌즈 상단 (LP2)에서의 변위 피크값을 서로 비교하여 데시벨 (dB) 단위로 측정함으로써 구하였다. LP2에서의 음향간섭 레벨은 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$\text{cross talk displacement level} = 20 \log_{10} \left| \frac{\text{peak displacement at LP2}}{\text{peak displacement at LP1}} \right| \quad (1)$$

또한 음향 임피던스는 충전재의 밀도와 음속에 의해 결정되므로, 계산에서는 커프 충전재의 음속이 2000 m/s로 일정한 경우와 밀도가 1500 kg/m³으로 일정한 경우에 대하여 음향 임피던스를 1.5 Mrayl에서 4 Mrayl까지 0.5 Mrayl 간격으로 증가시키며 해석하였으며, 그에 따른 충전재 물성을 표 2에 나타내었다. 실제로는 음속이 일정하

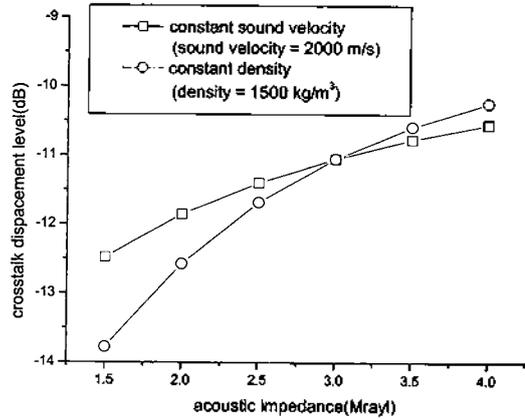


그림 4. 커프 충전재의 음향임피던스에 따른 음향간섭 레벨
Fig. 4. Crosstalk level with respect to acoustic impedance of the kerf filler.

고 밀도만 변화하는 재료나, 밀도는 일정한데 음속만 변화할 수 있는 재료는 없으나, 본 연구에서는 음향 임피던스를 구성하는 밀도의 개별적인 영향도를 파악하기 위해 표 2와 같은 값들을 적용하여 그에 따른 음향간섭 레벨의 변화를 관찰하였다. 그림 4에 나타난 해석 결과에 따르면 커프 충전재의 음향 임피던스가 증가함에 따라 음향간섭 레벨이 커짐을 알 수 있는데, 이는 압전 소자와 커프 충전재의 음향 임피던스 차이가 감소함에 따라 횡방향으로의 탄성파 전파가 보다 용이하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 같은 음향 임피던스를 가진다 하더라도 음속이 큰 경우에 음향간섭 레벨이 큼을 알 수 있다. 음속을 이루는 독립변수는 영률 (Young's modulus)이므로, 이는 곧 높은 영률을 가지는 재료는 충전재로 부족함을 나타낸다. 따라서 커프의 충전재로는 낮은 음향 임피던스를 가지며, 동일한 임피던스의 경우 낮은 밀도를 가지는 재료가 더 바람직하다고 할 수 있다.

표 2. 음향 임피던스에 따른 커프 충전재의 물성
Table 2. Properties of kerf filler with respect to the acoustic impedance.

Acoustic impedance (Mrayl)	I. Constant sound velocity (sound velocity = 2000 m/s)		II. Constant density (density = 1500 kg/m ³)	
	Density (kg/m ³)	Young's Modulus (GPa)	Sound velocity (m/s)	Young's Modulus (GPa)
1.5	750	3.00	1000	1.50
2.0	1000	4.00	1330	2.67
2.5	1250	5.00	1670	4.17
3.0	1500	6.00	2000	6.00
3.5	1750	7.00	2330	8.17
4.0	2000	8.00	2670	10.67

IV. 커프 폭 변화에 따른 간섭효과 레벨 변화

커프의 형상과 치수에 따른 음향간섭 레벨을 해석하기 위해 우선 커프 폭의 변화에 따른 압전 초음파 변환기의 음향간섭 레벨의 변화를 분석하였다. 커프 폭은 구동 소자의 가로 폭 대비 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25인 경우에 대하여 해석하였으며, 커프 충전재로는 일반적으로 사용되는 에폭시 수지 중 표 1에 나타난 같은 물성을 가지는 RDEG/PDA를 적용하였다. 그림 5에 이에 대한 음향간섭 레벨의 변화 계산 결과를 그래프로 나타내었다. 그림에서 LP2-LP8은 구동소자 (LP1)에 인접한 각 압전소자의 음향렌즈 상단 지점을 나타내는데, LP2는 구동소자와 바로 이웃한 소자, LP8은 가장 멀리 떨어진 소자의 렌즈 상단을 뜻한다. 그림에서 음향간섭 레벨은 커프 폭이 증가할수록 감소하는 경향을 나타내며, 구동소자와 멀어질수록 역시 감소한다. 그러나 그림 5의 결과에서, LP8의 음향간섭 레벨이 LP7에 비하여 증가한 것은 유한요소 모델에서 변환기의 수평 끝단에 가상 요소를 설치했음에도 불구하고 압전 세라믹과 가상 요소의 경계면에서 파동의 반사현상이 나타남에 따른 오차에 의한 것이다. 이와 같이 커프 폭의 증가는 음향간섭 현상을 감소시키는 것으로 나타나므로, 초음파 변환기의 개발시 커프는 다른 성능지수들의 저하를 초래하거나 제작상 제한을 벗어나지 않는 범위에서 가능한 한 넓게 설치하여야 한다.

V. 커프 깊이 변화에 따른 간섭효과 레벨 변화

다음으로 압전 소자 대비 커프 폭이 0.50인 경우에 대

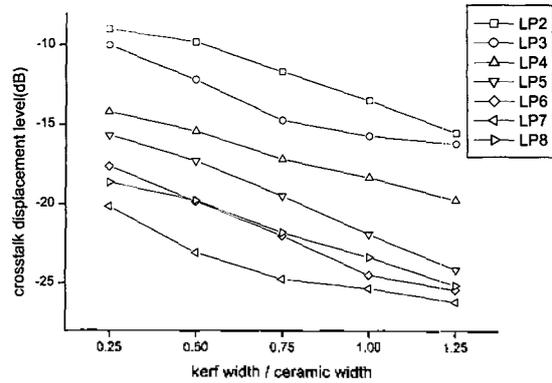


그림 5. 커프 폭 변화에 따른 음향간섭 레벨 (커프 충전재: RDEG/PDA)

Fig. 5. Crosstalk level with respect to kerf width (kerf material: RDEG/PDA).

하여 그림 6과 같이 커프변화 깊이를 변화시켰을 때 음향간섭 레벨의 변화 경향을 살펴보았다. 그림 6의 각 경우는 1차원 배열 초음파 변환기의 제작성을 고려하여 선정한 것으로서, 커프 충전재료는 표 2의 RDEG/PDA를 사용하였다. 그림 7에 그림 6의 각 경우에 대한 해석 결과를 나타내었다. 여기서 case 5-8은 case 4의 모델에서 커프의 깊이가 후면층쪽으로 0.5 mm 간격으로 각각 깊어진 형태를 나타낸다. 그림 7의 결과, case 4와 같이 정합층 모두와 후면층 안쪽으로 어느 정도 깊이 만큼만 커프가 위치할 때 음향간섭 레벨이 가장 낮은 값을 가지는 것으로 나타났다. 이는 후면층이 절단되어 있지 않은 경우에 비하여 절단하였을 때, 커프를 전파하던 탄성파의 일부가 감소가 큰 후면층으로 전파하여 음향간섭 레벨을 감소시키는 것으로 판단된다. 그러나 case 5-8에서 다시 음향간섭 레벨이 커진 것으로 보아 그 절단의 깊이에는 임계값이 존재하는 것으로 보인다. 따라서 커프의 깊이는 두 개의 정합층과 후면층 상부 일부를 포함하는 값을 가질 때가

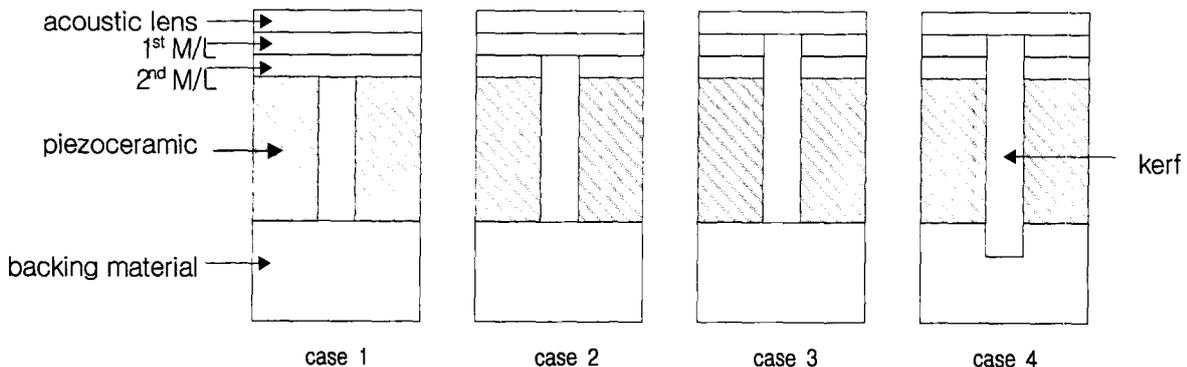


그림 6. 커프의 여러 가지 깊이 상태
Fig. 6. Configuration of various kerf depth.

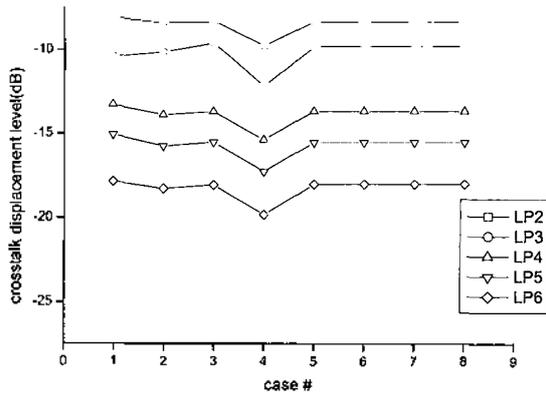


그림 7. 커프 깊이에 따른 음향간섭 레벨 - 커프 충전재: RDEG/PDA
 Fig. 7. Crosstalk level with respect to the kerf shape and depth - kerf material: RDEG/PDA.

가장 바람직하고, 후면층으로 지나치게 깊이 커프를 설치하는 것은 효과가 없는 것으로 나타났다.

VI. 결론

초음파 진단용으로 널리 이용되는 압전형 1차원 배열 변환기는 자체가 가지는 구조적인 특성으로 인한 내부의 음향간섭에 의해 그 성능에 큰 영향을 받는다. 이러한 음향간섭은 변환기 특성에 악영향을 미치고, 이에 따라 영상의 질을 저하시키게 된다. 본 연구에서는 배열형 변환기의 구조상 존재할 수밖에 없는 커프의 치수 및 충전재 물성에 따른 음향간섭 레벨의 변화 경향을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 그 결과 커프의 충전재는 가능한 한 음향 임피던스가 작아야 하며, 동일한 임피던스일 경우 밀도가 작을수록 음향간섭 레벨이 낮은 것으로 나타났다. 또한 커프의 규격으로는 폭은 가능한 한 넓을수록 그리고 깊이는 두 개의 정합층과 후면층의 상부 일부만을 포함할 때 음향간섭 레벨이 가장 낮은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 향후 진단용 1차원 배열 초음파 변환기의 최적 설계를 위한 자료로 활용될 것이며, 더 나아가 치료용, 비파괴 검사용, 수중 초음파 변환기의 설계 자료로도 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

향후 연구과제로는 본 연구에서 구한 해석 결과들에 대해 동일한 상황들을 실제 변환기로 구현하여 실험적 측정 및 비교 연구를 수행하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2001-041-E00072).

참고 문헌

1. S. W. Smith, O. T. von Ramm, M. E. Haran and R. L. Thurstone, "Angular response of piezoelectric elements in linear phased array ultrasound scanners," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, vol. 26, pp. 185-191, 1979.
2. N. Felix, D. Certon, E. Lacaze, M. Lethiecq and F. Patat, "Experimental investigation of cross-coupling and its influence on the elementary radiation pattern in 1D ultrasound arrays," *IEEE Ultrason. Symp. Proc.*, pp. 1053-1056, 1999.
3. G. S. Kino and R. Baer, "Theory for cross-coupling," *IEEE Ultrason. Symp. Proc.*, pp. 1013-1019, 1983.
4. J. Larson, "Non-ideal radiations in phased array transducers," *IEEE Ultrason. Symp. Proc.*, pp. 673-684, 1984.
5. Y. R. Roh and B. T. Khuri-Yakub, "Finite element modeling of capacitor micromachined ultrasonic transducers," *IEEE Ultrason. Symp. Proc.*, pp. 905-908, 2000.
6. J. Sato, M. Kawabuchi and A. Fukumoto, "Dependence of the electromechanical coupling coefficient on the width-to-thickness ratio of plank-shaped piezoelectric transducers used for electronically scanned ultrasound diagnostic systems," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 66, pp. 1609-1611, 1979.
7. J. Sato, H. Fukukita, M. Kawabuchi and A. Fukumoto, "Farfield angular radiation pattern generated from arrayed piezoelectric transducers," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 67, pp. 333-335, 1980.
8. R. Lerch, "Simulation of piezoelectric devices by two- and three-dimensional finite elements," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Contr.*, vol. 37, pp. 253-247, 1990.
9. C. S. DeSilets, H. D. Fraser and G. S. Kino, "The design efficient broad-band piezoelectric transducers," *IEEE Trans. Son. Ultrason.*, vol. 25, pp. 115-125, 1978.
10. J. Assaad and C. Bruneel, "Radiation from finite phased and focused linear array including interaction," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 101, pp. 1859-1866, 1997.
11. W. Qi and W. Cao, "Finite element and experimental study of composite and 1-D array transducers," *Proc. SPIE*, vol. 3341, pp. 119-130, 1998.

저자 약력

● 이 수 성 (Susung Lee)

1999년 2월: 인제대학교 의용공학과 (공학사)
 2001년 2월: 경북대학교 센서공학과 (공학 석사)
 2001년 3월 - 현재: 경북대학교 센서공학과 박사과정
 ※ 주관심분야: 초음파 트랜스듀서, 의료용 초음파

● 김 영 신 (Youngshin Kim)

2001년 2월: 경일대학교 기계설계학과 (공학사)
 2001년 3월 - 현재: 경북대학교 기계공학과 석사과정
 ※ 주관심분야: 초음파 트랜스듀서, 의료용 초음파

● 노 용 래 (Yongrae Roh)

한국음향학회지 제20권 제4호 참조