

의료용 압전 초음파 배열 변환기의 음향간섭 레벨에 관한 연구

김영신*, 노용래**

* 경북대학교 기계공학과

** 경북대학교 기계공학부

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

Young-Shin Kim*, Yongrae Roh**

*Department of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

**School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University

*straiper@usound.knu.ac.kr, **ryong@knu.ac.kr

요 약

초음파 진단용으로 널리 사용되는 1차원 배열 압전형 초음파 변환기는 변환기내의 인접한 소자들간의 간섭에 의해 그 특성에 많은 영향을 받는다. 특히 각 소자 사이에 위치한 커프 및 음향 벽의 형상은 변환기 내 음향 간섭에 매우 큰 영향을 미친다. 그러므로 본 연구에서는 일반적으로 복부진단용으로 사용되는 압전형 1차원 배열 의료용 초음파 변환기에서 커프 및 음향 벽의 형상에 따른 음향간섭 레벨의 변화 경향을 유한 요소 해석법을 이용하여 분석하였다. 해석 결과를 바탕으로 소자간 음향간섭을 일으키는 원인을 규명하고, 나아가 음향 간섭레벨을 최소화하기 위한 구조적 방안을 도출하였다. 이러한 연구 결과는 향후 진단용 초음파 변환기의 최적 설계를 위해 중요한 자료가 될 것이며, 의료 치료용, 비파괴 검사용, 그리고 수중 초음파 변환기에도 적용이 가능할 것이다.

1. 서 론

1차원 배열형 초음파 변환기는 다수의 독립소자를 치밀하게 배열하여 적절한 시간 간격을 두고 전자적 스위칭을 함으로써 초음파 영상을 획득한다. 이러한 배열형 초음파 변환기는 크게 선형 배열형 초음파 변환기, 위상 변조 배열형 초음파 변환기, 그리고 convex 배열형 초음파 변환기로 구분된다. 그중 convex 배열형 초음파 변환기는 탐촉자의 크기를 크게하지 않고 복잡한 시스템을 필요로 하지 않으면서 분해능이 좋은 화상 정보를 얻을 수 있는 장점으로 근래 인체 복부 장기, 태아 등의 진단에 널리 이용되고 있다[1].

이러한 convex 배열형 초음파 변환기는 일반적으로 그림 1과 같이 초음파 방사면에 적절한 곡률을 가지고 있으며 압전 소자를 중심으로 정합층과 후면층, 그리고

각 압전소자를 분리시키는 커프로 구성된다. 커프는 마이너 커프와 메이저 커프로 나뉘지며 독립소자 2개가 하나의 구동소자로서 구동이 된다. 변환기는 영상의 분해능 및 인체 적용성을 고려하여 1 ~ 10 MHz의 비교적 높은 작동 주파수를 가지고 각각의 독립소자는 매우 작은 치수(수백 μm)를 가지므로 그림 1에서와 같이 개개의 독립소자는 한 구조체로 묶여있는 것과 같이 작동한다. 이로 인해 구동되는 소자와 인접한 소자들 간에는 음향간섭(cross-talk)이 존재하게 되며 이 음향간섭은 전체 초음파 변환기의 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 특히 음향간섭은 초음파의 방사패턴을 변화시키며, 감도를 저하시키고 음향 감음을 증가시키는 등의 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다[2,3]. 따라서 음향간섭의 발생 구조를 해석하고 해결방안을 모색하기 위한 이론적인 해석[3]에 이어 광학 간섭계등을 이용하여 다양한 실험적인 접근을 시도하였다[4,5]. 그러나 1차원 배열 초음파 변환기에서 음향간섭을 발생시키는 탄성파의 전파 경로는 각 독립소자가 분리되어 있는 형태에 따라 매우 복잡하게 변화함으로 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 증대되어왔다. 최근 유한 요소법을 이용하여 인접한 초음파 소자들 간의 간섭구조에 관해 연구한 결과가 발표된 바 있다[6,7]. 본 연구에서는 이 연구 결과를 바탕으로 일반적으로 복부진단용으로 사용되는 convex 압전형 배열 초음파 변환기에서 음향 간섭레벨을 저하시키기 위한 구조적 방안을 분석하였다. 분석에는 상용 유한 요소 해석도구인 ANSYS를 이용하였고, 간섭효과를 억제하기 위한 구조물로서 통상 압전형 초음파 변환기에 많이 적용되는 커프 및 음향 벽의 형상변화에 따른 음향간섭 레벨의 변화 경향을 분석하였다. 나아가 그 결과로서

압전형 초음파 배열형 변환기내의 음향간섭현상을 줄이기 위한 방안을 모색하고자 하였다.

II. 유한요소 모델

일반적인 1차원 convex 배열형 초음파 변환기는 그림 1에서와 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 분리되며 이때 다이싱이 된 부분을 커프라고 한다. 본 연구에서는 이러한 1차원 convex 배열형 초음파 변환기의 기초적 구조를 바탕으로 하여 해석하고자 하는 유한 요소 모델을 그림 2와 같이 설정하였다. 모델은 음향렌즈 상단에서 40mm의 곡률반경을 가지며 변환기 구조의 대칭성을 반영하여 좌측면을 대칭면으로 전체의 절반만을 묘사하도록 했다. 압전 소자의 폭 대 두께 비는 진동 모드의 명확성과 전기-기계 결합 계수를 고려하여 모델에서 중형비를 0.45로 하고[7,8], 두 개의 압전 소자를 하나씩 구동 소자로 하였으며, 두 층의 음향 정합층은 DeSillets[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 0.41mm이고, 독립 소자가 32개 배열되어 있으며, 반대칭 축을 기준으로 대칭 조건을 부여하였다. 커프 폭은 구동 소자(압전 세라믹)의 가로 폭 대비 0.25이며, 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, 실제 귀와 같은 사양으로 제작된 5MHz convex 배열형 초음파 변환기에서의 주파수 특성과 방사패턴을 비교하였다. 구동은 그림 2의 모델의 왼쪽 끝 압전 소자 하나에 임펄스 전압을 인가하였으며, 이에 따라 모델로부터 6mm 떨어진 방사매질에서 펄스/에코(pulse/echo) 방식으로 음압의 주파수 특성과 방사패턴을 측정하였다. 그리고 이것을 실제 제작된 변환기에서의 측정값과 비교하여 그림 3에 나타내었다. 그림 2의 모델은 대칭구조의 오른쪽 절반만을 묘사한 것이므로 이러한 구동 상태는 실제로는 전체 변환기의 중심부에 위치한 압전소자 두개를 구동하는 것과 같다. 그림 3에서 모델의 중심주파수는 약 4.97MHz, -6dB 방사폭(beam width)은 약 30도이다. 중심 주파수에서 약 0.6%의 오차가 있으나 이것은 측정오차로 보이며 결과적으로 기본모델과 실제 변환기에서의 측정 결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 기본모델로 선정된 그림 2의 초음파 변환기와 실제 제작된 변환기에서의 측정결과가 유사함을 확인하여 모델의 타당성이 밝혀졌다고 볼 수 있다. 그리하여 이러한 기본모델을 바탕으로 커프의 폭 또는 깊이를 변화시키거나 음향벽의 형상에 따른 음향간섭 레벨의 변화 경향을 살펴보고자 한다.

III. 커프 폭 변화에 따른

음향간섭 레벨 변화

본 연구에서는 커프의 형상과 치수에 따른 음향간섭 레벨을 해석하기 위해 우선 그림 2의 기본 모델에서 커프 폭을 변화시킴에 따른 간섭레벨의 변화 경향을 해석하였다. 커프 충전재로는 일반적으로 사용되는 에폭시 수지 중 폴리우레탄을 적용하였다. 커프의 폭은 구동 소자의 가로 폭 대비 0.25, 0.29, 0.32, 0.36, 0.40 인 경우에 대하여 해석하였으며 각 경우에 대해서 소자간 간격과 마이너 커프의 폭은 일정하게 두고 메이저 커프 폭만 변화시켰다. 음향간섭 레벨은 앞절의 유한요소 모델에 의한 시간 영역에서의 과도 해석을 통해 구동소자의 바로 이웃하는 소자 상단에서의 전압(cross-talk#2)을 FFT(Fast Fourier Transform)하여 나타내었다. 그림 4에서 각 경우에 대한 주파수 스펙트럼상에서의 음향간섭 정도를 서로 비교하여 이에 대한 결과를 나타내었다. 그림에서 커프의 폭이 커짐에 따라 주파수 스펙트럼상에서의 저주파 성분의 음향간섭 레벨이 약간씩 감소한다. 이는 커프 폭이 커짐에 따라 인가된 전압으로 인하여 변환기내에서 구동소자의 측방향으로의 음향간섭이 감소됨을 나타낸다. 그러나 커프 폭이 증가할수록 5MHz부근에서의 주파수 성분이 상승함을 볼 수 있는데 이것은 커프 폭이 증가함에 따라 구동소자의 폭이 감소함으로써 방사매질에서의 방사패턴이 변하여 변환기의 표면으로부터 바로 이웃하는 소자에게 미치는 음향간섭 정도가 증가한 것이다. 이러한 결과로써 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. 또한 변환기 표면으로부터 발생하는 음향간섭을 제거하기 위한 음향벽의 설치에 따른 영향도 고려하여야 한다.

IV. 커프 깊이 변화에 따른

음향간섭 레벨 변화

다음으로 압전 소자 대비 커프 폭이 0.25인 경우에 대하여 그림 5와 같이 메이저 커프 깊이를 변화시켰을 때 음향간섭 레벨의 변화 경향을 살펴보았다. 그림 5의 각 경우는 1차원 배열 초음파 변환기의 제작성을 고려하여 선정한 것이며, 커프 충전재로는 3장파 같은 재료를 사용하였다. 그림 6에서 그림 5의 각 경우에 대한 해석 결과를 나타내었다. 여기서 case#5는 case#4의 모델에서 커프의 깊이가 후면층쪽으로 0.25mm 더 깊어진 형태를 나타낸다. 그림 6의 결과, 첫 번째 정합층에 커프가 위치할 때 음향간섭이 크게 감소하고 나머지 경우에는 작지만 음향간섭이 감소함을 알 수 있다. 그러므로 소자와 접한 정합층에서 음향간섭의 영향이 가장 큼을 알 수 있다. 또한 후면층에도 커프가 위치함에 따라 커프로부터 전파된 탄성파의 일부가 후면층에 흡수됨으로써 음향간섭을 감소시키는 영향이 있는 것으로 판단된다. 그러나, case#5에서는 약 5MHz부근에서 다시 음향간섭 레벨이 커진 것으로 보아 후면층의 절단깊이에는

임계값이 존재하는 것으로 보인다. 따라서 커프의 깊이는 두 개의 정합층과 후면층 상부 일부를 포함하는 값을 가질 때가 가장 바람직하고, 후면층으로 지나치게 깊어 커프를 설치하는 것은 효과가 없는 것으로 나타났다.

V. 음향벽의 형상에 따른

음향간섭 레벨 변화

마지막으로 그림 2의 기본모델에서 초음파 변환기의 음향렌즈 표면에 음향벽을 설치하고 그 형상을 변화시킴에 따라 인접소자에 미치는 음향간섭 레벨의 변화 경향을 분석하였다. 앞서 3절에서 언급하였듯이 구동된 소자로부터 방사된 음압이 변환기 표면에서 인접소자로의 음향간섭을 유도하므로 이러한 음향간섭을 차단시키기 위하여 음향벽을 설치하고, 또한 형상을 변화시킴에 따른 음향간섭의 변화 경향을 연구하였다. 그림 7에서는 음향벽의 형상을 변화시킨 모델을 나타낸다. 각부의 치수 및 물성은 기본모델과 동일하며 음향벽은 각 소자 사이의 패이저 커프 상단에 설치하였고 높이는 음향렌즈 상단에서 0.2mm이며 이는 근거리 음장내의 범위이다. 음향벽은 제작성을 고려하여 음향렌즈의 재료와 동일하며 음향벽의 하단부를 소자 폭의 1/2 만큼씩 증가시킴에 따른 음향간섭 레벨의 변화 경향을 확인하였다. 음향간섭 레벨은 구동 소자 렌즈 상단에서의 음압의 피크값을 기준으로 하여 바로 이웃하는 소자의 렌즈 상단(cross-talk#2)에서의 음압의 피크값을 서로 비교하여 데시벨(dB) 단위로 측정하여 나타내었다. 그림 8에서는 기본모델에서의 경우와 함께 음향벽의 형상에 따라서 인접소자의 음향렌즈 상단에서 미치는 음압의 정도를 나타내었다. 여기서 음향벽의 하단부의 폭이 넓어짐에 따라 인접소자의 렌즈 상단에 미치는 음압의 영향이 감소하다가 다시 증가하고 있다. 이는 음향간섭을 감소시키는 최적의 음향벽의 기울기가 존재함을 나타내며 그러한 음향벽은 인접소자에 미치는 음압을 굴절시켜 그 영향을 감소시키는 역할을 하는 것으로 보인다. 그러나 음향벽이 더욱 넓어지면 변환기 내에서 렌즈로부터의 음압 전파가 원활해져 바로 이웃하는 소자에서의 음향간섭이 상승함을 볼 수 있다. 결과적으로 음향간섭을 줄일 수 있는 최적의 형상을 가지는 음향벽이 있음을 알 수 있고 이는 변환기의 구조에 맞게 설계되어야 할 것이다.

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 주로 복부진단용으로 사용되는 convex 배열형 변화기에서 커프와 음향벽의 형상에 따른 음향간섭 레벨의 변화 경향을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 그 결과 커프의 폭은 가능한 한 넓을수록 그리고 깊이는 두 개의 정합층과 후면층의 상부 일부만을 포함할 때 음향간섭 레벨이 가장 낮은 것으로 나타났다. 또한 적절한 형상

의 음향벽을 설치함으로써 변환기 표면으로부터 발생하는 음향간섭을 차단할 수 있음을 확인하였다. 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.

감사의 글

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

참고 문헌

1. J. Ylitalo, "Synthetic aperture ultrasound imaging using convex array," *IEEE Ultrasonics symp.*, pp. 1337-1340, 1995.
2. 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.
3. G. S. Kino and R. Baer, "Theory for cross-coupling," *IEEE Ultras. Sym. Proc.*, pp. 1013-1019, 1983.
4. 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 Ultras. Sym. Proc.*, pp. 1053-1056, 1999.5
5. J. F. Guess, C. G. Oakley, S. J. Douglas, and R. D. Morgan, "Cross-talk paths in array transducers" *IEEE Ultras. Sym. Proc.*, pp. 1279-1282, 1995.
6. Y. R. Roh and B. T. Khiuri-Yakub, "Finite element modeling of capacitor micromachined ultrasonic transducers," *IEEE Ultras. Sym., Proc.*, pp. 905-908, 2000.
7. 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.
8. 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.
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.

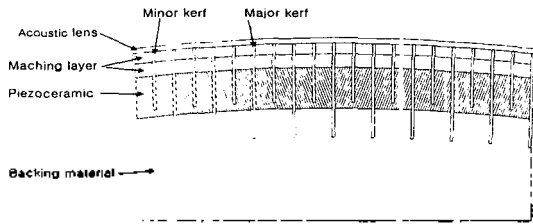


그림 1. convex 배열형 초음파 변환기의 일반적인 구조.

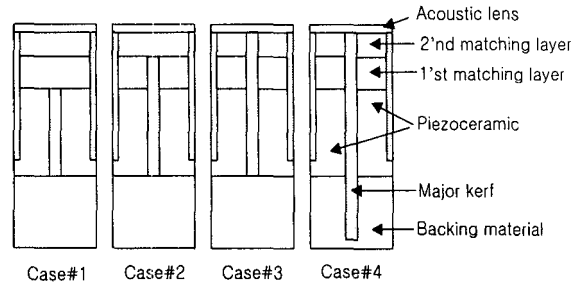


그림 5. 커프의 여러 가지 깊이 상태.

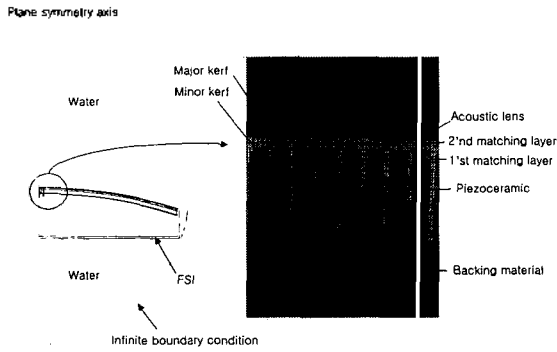


그림 2. convex 배열형 초음파 변환기의 유한 요소 기본 모델.

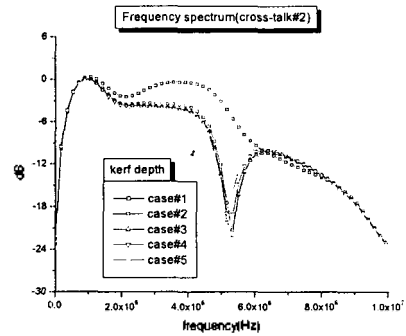


그림 6. 커프 깊이 변화에 따른 음향간섭 레벨 변화.

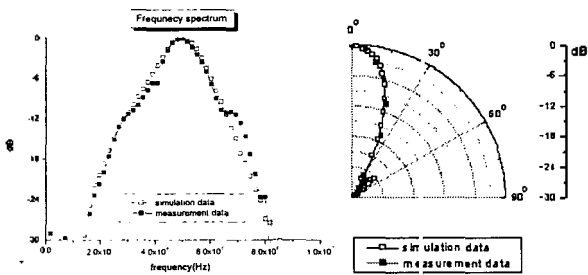


그림 3. 유한요소 기본모델과 실험측정 결과의 비교; (a) 주파수 스펙트럼 (b) 방사패턴.

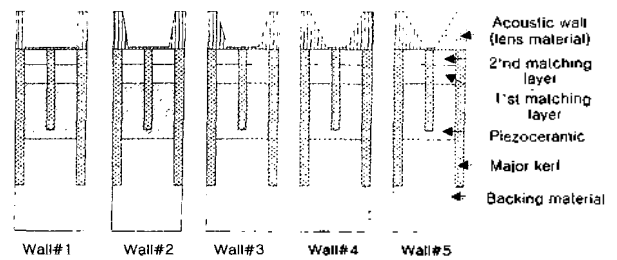


그림 7. 음향벽의 여러 가지 형상.

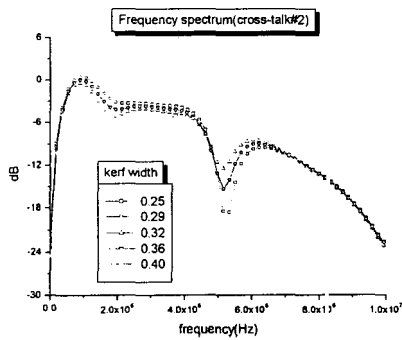


그림 4. 커프 폭 변화에 따른 음향간섭 레벨 변화.

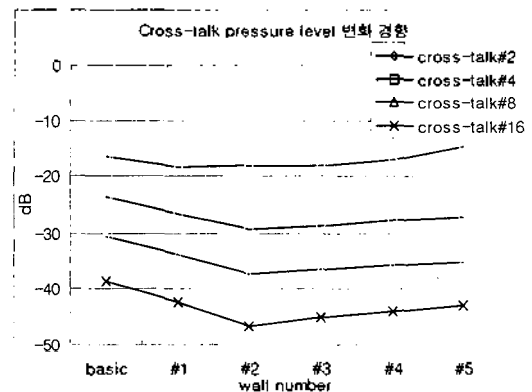


그림 8. 음향벽의 형상에 따른 음향간섭 레벨의 변화 경향.