공 학 석 사 학 위 논 문

음장해석과 가시화를 통한 의료용 초음파프로브의 결함요소 검출



부경대학교대학원

음향진동공학협동과정

최 광 윤

공 학 석 사 학 위 논 문

음장해석과 가시화를 통한 의료용 초음파프로브의 결함요소 검출



부경대학교대학원

음향진동공학협동과정

최 광 윤

최광윤의 공학석사 학위논문을 인준함.

2010년 2월 25일



목 차

----- viii

Abstract

제	1 장 서론	1
제	2 장 의료용 초음파프로브의 구조와 동작특성	3
	2-1. 의료용 초음파프로브의 구조	3
	2-2. 의료용 초음파프로브의 종류 및 동작특성	6
제	3 장 초음파음장해석 이론 및 가시화 원리	8
	3-1. 초음파음장해석 이론	8
	3-2. 가시화 원리 및 장치1	0
제	4 장 요소결함에 따른 초음파음장변화	3
	4-1. 시뮬레이션	5
	4-2. 가시화 음장 ~~~~~3	4
제	5 장 요소결함이 초음파 영상에 미치는 영향4	0
	5-1. 요소결함에 따른 과도음장 해석4	:0
	5-2. 요소결함에 따른 초음파 B-모드 영상 시뮬레이션4	:7
제	6 장 결론	6

참고문헌	58
------	----

표 목차

······22	특성	구격 및	루품의 T	}학계 퉈	상치 된	슈리렌정	3-1.	표
		•••••	동조건	튁및 구	비 규기	프로브의	5-1.	표
·향 분해능55	및 축방히	측방향	영상의	점표적	지점	20 mm	5-2.	표



그림 목차

그림	2 - 1.	의료용 초음파프로브의 구조3
그림	2 - 2.	의료용 초음파프로브의 구동 형태
그림	3 - 1.	음장계산을 위한 초음파프로브의 도식화9
그림	3 - 2.	초음파에 의한 광선의 굴절
그림	3 - 3.	초음파에 의한 광빔의 회절
그림	3 - 4.	초음파에 의해 회절된 광빔의 파면
그림	3 - 5.	초음파에 의한 회절광
그림	3 - 6.	전체 시스템의 구성도18
그림	3 - 7.	슈리렌장치 광학계의 구성도
그림	3 - 8.	슈리렌장치 광학계의 실물사진
그림	3 - 9.	실험에 사용한 스토퍼19
그림	3 -10.	750 kHz 원통형 트랜스듀서의 정상파음장(프레넬영상) 20
그림	3 -11.	8 MHz 직선집속형 트랜스듀서 진행파음장(슈리렌영상) 21
그림	4 - 1.	실험에 사용된 프로브의 규격
그림	4 - 2.	정상인 프로브의 음장 시뮬레이션 결과($\theta_s = 0^\circ$) 27
그림	4 - 3.	정상인 프로브의 음장 시뮬레이션 결과($\theta_s = 30^\circ$) 28
그림	4 - 4.	임의의 압전요소 고장시의 초음파음장 시뮬레이션 결과
		(θ _s =0°, n은 고장요소번호) ~~~~~29
그림	4 - 5.	임의의 압전요소 고장시의 초음파음장 시뮬레이션 결과
		$(\theta_s = 30^\circ, n$ 은 고장요소번호)

CH OT V

Detection of defective elements in a medical ultrasound probe through acoustic field analysis and visualization

Kwang-Yoon, Choi

Interdisciplinary Program of Acoustic and Vibration Engineering, Graduate School. Pukyong National University

Abstract

G

Ultrasound probes for medical application have many piezoelectric elements arrayed in a line or on a two-dimensional surface. Some or all of the elements are employed for electronic beamforming to get an image line, and a frame of image is obtained by electronic scanning or steering of the formed beam. If a few elements among them are electromechanically defective due to cracks, disconnecting of electric lines and so on, the image obtained by the probe might be degraded.

In this study, the feasibility of detection of defective elements in a medical ultrasound probe was basically investigated by using the acoustic fields for a 3 MHz linear phased array transducer which has sixteen piezoelectric elements. The fields were simulated theoretically and measured experimentally using a visualization system based on the Schlieren method. The simulation results for steering angles of 0° and 30° show that the side-lobe patterns of the transducer including a defective element are quite different from those of the transducer with all normal elements, and those patterns are in good agreement with the results of visualization. It is shown that the defective elements in a linear array

transducer can be detected by comparison of the simulated side-lobe patterns and the visualized ones in two dimensional acoustic fields.

In addition, the influences of a few defective elements on imaging were analyzed by simulation for a commercial 7.5 MHz 1D linear array probe with 192 elements. The qualitative difference in images and the quantitative variation of lateral and axial resolutions according to the number of defective elements were analyzed.



제 1 장 서론

의료용 초음파프로브는 수십~수백 개의 작은 압전요소가 선형 또는 2D로 배열되어져 있다. 영상라인(image line)은 그 중 일부의 압전요소 를 동시에 사용하여 전기적인 신호가 각 요소 간에 특정의 위상차를 가 지도록 하여 빔포밍(beam forming)한 후에 특정방향으로 초음파 빔을 방사함으로써 획득되고, 영상프레임(image frame)은 그 빔을 전자주사 (electronic scanning) 또는 조향(steering)함으로써 얻어진다. 초음파 빔 은 각 압전요소로부터 방사된 음파들의 중첩에 의해 형성되는데 만약, 각 압전요소에 연결된 케이블이 단선되거나 외부적인 요인으로 인하여 압전요소가 파손되면 그 프로브로부터의 초음파음장 패턴은 변하고 초 음파 영상에 영향을 미치게 된다.

초음파음장을 측정하기 위한 종래의 방법으로는 국소형 수중청음기를 기계적으로 주사하며 측정하는 것이다. 그러한 방법은 절대음압 분포를 얻을 수는 있으나 측정에 많은 시간이 소요되며 고가의 정밀 스캐너시 스템이 필요한 단점이 있다. 초음파음장을 측정하는 다른 방법으로는 슈리렌(Schlieren)장치 등 광학적 수단을 이용한 음장가시화 방법이 있 다.^[1-5] 그러한 음장가시화 방법은 절대음압을 직접적으로 측정할 수는 없으나 단시간에 전체 음압분포의 파악이 가능한 장점이 있다.

이에 본 연구에서는 중심주파수 3 *MHz*인 압전요소 16개가 선형배열 되어진 프로브를 대상으로 모든 압전요소가 정상일 때와 임의의 압전요 소 하나가 결함일 때, 이 프로브가 수중에서 형성시키는 근거리 및 원 거리의 전체 음장을 시뮬레이션하여 이론적으로 해석하고 광학적 방법 중 슈리렌법으로서 자체 구축한 초음파음장 가시화장치로써 측정하였 다. 그리고 그에 따라 얻어진 2차원 음장의 이론치와 측정치로부터의 부엽패턴(side-lobe pattern)변화 비교에 의해 프로브의 내부 결함요소 존재 여부 평가 및 프로브 내에서의 결함요소 위치추정 가능성을 보였 다.

나아가, 본 연구에서는 중심주파수 7.5 *MHz*인 압전요소가 192개 선 형 배열된 상용의 의료용 프로브를 대상으로 결함요소수 증가에 따른 과도음장과 초음파 B-모드 영상의 변화를 시뮬레이션 함으로써 결함요 소가 초음파 영상에 미치는 영향을 규명하였다.



제 2 장 의료용 초음파프로브의 구조와 동작특성

2. 1. 의료용 초음파프로브의 구조

그림 2-1은 의료용 초음파프로브의 내부 구조를 보인다. 초음파프로 브 내부에는 전기적인 신호를 음향에너지로 변환하거나 그 역으로서 음 향에너지를 전기적인 신호로 변환하는 압전체가 있다. 이 압전체의 전 면부에는 압전체와 인체와의 음향임피던스의 차이를 줄여 초음파의 투 과계수를 높이는 음향정합층이 있고 배면부에는 압전체로부터 짧은 펄 스를 방사함으로써 축방향의 분해능을 높이는 흡음층이 있다. 그리고 프로브의 전면에는 초음파 영상의 해상도를 높이고 이물질로부터 프로 브를 보호하는 음향렌즈가 부착되어있다.



그림 2-1. 의료용 초음파프로브의 구조

(가) 압전체(piezoelectric material)

압전체는 프로브의 핵심적인 구성품으로서 전기적 신호를 음향에너지 로 변환하거나 그 역도 성립하는 물질이다. 압전물질에는 LiNbO₃, SiO₂ 와 같은 압전단결정, PZT(Pb[Zr·Ti]O₃), PbTiO₃와 같은 압전세라믹, PVDF, P(VDF-TrFe)와 같은 고분자 압전막이 있다. 그 중에서 압전세 라믹 PZT는 성분인 Zr과 Ti의 조성비에 따라 그 특성이 달라지나, Curie온도가 약 300°C 이며 압전 d상수가 다른 물질에 비해 상당히 크 고 온도변화가 적은 안정된 물질이기 때문에 의료용 초음파프로브에 널 리 이용되고 있다. 최근에는 압전특성이 보다 우수한 PZN-PT 또는 PMN-PT와 같은 압전단결정을 이용하려는 시도가 있다. 그 압전단결 정은 전기-기계 결합계수가 크고 d₃₃, g₃₃와 같은 압전상수가 높기 때문 에 고감도, 광대역 특성을 가지나 재질이 연하여 쉽게 깨지기 때문에 가공이 어려운 단점을 가진다.

(나) 음향정합층(matching layer)

앞에서 언급한 바와 같이 오늘날 의료용 초음파프로브의 압전체로서 가장 많이 이용되는 압전세라믹 PZT의 고유음향임피던스는 30 *Mrayls* 이상이다. 하지만 인체내부의 고유음향임피던스는 1.5 *Mrayls*정도로 상 당히 큰 차이를 가진다. 이 때문에 대부분의 초음파 에너지는 인체내부 로 투과를 하지 못하고 경계면에서 대부분 반사되어 버린다. 이를 해결 하기 위해서 두 매질 사이에 두께가 λ/4이면서 식 (2-1)에 주어진 고유 음향임피던스 Z_m을 가진 음향정합층을 둠으로써 투과계수를 높인다.

 $Z_m = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2} \tag{2-1}$

여기서 Z₁은 압전체의 고유음향임피던스이며 Z₂는 인체내부의 고유 음 향임피던스이다.

(다) 흡음층(backing layer)

압전체로부터의 초음파는 전면뿐만 아니라 후면으로도 방사되는데 후 면부의 매질이 일정한 두께를 가지고 있으면 그 경계면에서 반사되어 전면으로 되돌아온다. 따라서 전면부에서 방사된 초음파와 결합되어 초 음파 펄스의 길이를 길게 만든다. 초음파 영상에 있어 축방향의 분해능 은 펄스의 길이에 기인하는바 길어진 펄스는 축방향의 분해능을 떨어뜨 린다. 이것의 해결을 위해서는 후면부로 전파된 파가 되돌아오지 않도 록 감쇠가 심한 재료로 만들어진 흡음층을 둔다. 현재 텅스텐 또는 알 루미나(Al₂O₃) 분말 등이 포함된 폴리머재료가 매질로서 주로 사용되고 있다.

(다) 음향렌즈(Acoustic lens)

음향렌즈는 그림 2-1에 나타낸 elevation방향에 대하여 기계적으로 초음파를 집속시킴으로써 영상의 분해능을 개선하고 초음파프로브를 이 물질로부터 보호하는 역할을 한다. 음향렌즈는 재질의 음속에 따라 외 부 집속형, 내부 집속형, 그리고 내부변형 집속형으로 나뉜다. 외부 집 속형의 경우 인체 내의 음속보다 상대적으로 느린 음속을 갖는 실리콘 을 사용하며 내부 집속형은 상대적으로 빠른 음속을 갖는 에폭시를 주 로 사용한다. 2. 2 의료용 초음파프로브의 종류 및 동작특성

초음파프로브는 형태와 주사방식에 따라 선형 배열형(linear array) 프로브와 곡면 배열형(curved array) 프로브, 그리고 위상차 배열형 (phased array) 프로브로 나뉜다.

선형 배열형 프로브는 압전요소가 일정한 간격으로 평면에 일렬로 배 열되어져 있다. 초음파 영상의 획득 시에는 공간 분해능을 높이기 위해 그림 2-2(a)와 같이 일부의 압전요소에 전자적으로 시간지연을 준 신호 를 인가하여 빔을 집속시키고, 압전요소를 순차적으로 이동시킴으로써 사각형의 영상을 얻을 수 있다. 이 프로브는 주로 혈관이나 근골격계 진단용으로 사용된다.

곡면 배열형 프로브는 선형 배열형 프로브의 원리와 동일하며 압전소
자가 곡면 위에 배열되어져 있어 영상은 부채꼴 형태이며 선형 배열형
프로브의 영상 보다 넓은 면적의 영상을 얻을 수 있다. 주로 산부인과
와 같이 복부진단용으로 사용된다.

위상차 배열형 프로브는 그림 2-2(b)와 같이 전체의 압전요소에 동시 에 구동신호를 인가하고 각 압전요소 간에 전자적으로 일정한 시간지연 을 줌으로써 초음파 빔을 특정 방향으로 조향시켜가며 영상을 획득한 다. 프로브의 크기가 작기 때문에 심장진단용으로 주로 사용된다.



(b) 위상차 배열형 프로브

그림 2-2. 의료용 초음파프로브의 구동 형태

제 3 장 초음파음장해석 이론 및 가시화 원리

3. 1. 초음파음장해석 이론

근거리 및 원거리를 모두 포함하는 전체 영역에 대한 선형 배열형 프 로브가 만드는 음장은 각 압전요소를 미소 점음원의 집합으로 생각하여 호이겐스의 중첩원리를 적용시킴으로써 수치 해석적으로 구할 수 있다. 그림 3-1과 같이 길이 L이 폭 W에 비해 충분히 큰 직사각형의 압전요 소가 일정간격 d로 N개 나열되어 있는 프로브가 강체 베플인 배면체에 부착되어 z방향으로 음파를 방사하는 경우를 생각한다. 모든 압전요소 가 정상적으로 동작할 경우 프로브의 중심인 $\frac{N}{2}$ 번째와 $\frac{N}{2}$ +1번째 요 소의 중간으로부터 θ방향으로 임의 거리 r 떨어져 있는 yz 평면상의 한 점 P의 음압은 각 압전요소를 원통파를 방사하는 M개의 단순음원 의 집합으로 생각하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.^[67]

$$p(r,\theta,t) = \sum_{n=1}^{N} \sum_{m=1}^{M} \left(\frac{p_0}{r_{nm}}\right)^{\frac{1}{2}} \exp[j(\omega t_{nm} - kr_{nm})]$$
(3-1)

여기서 p_0 는 음원에서의 음압, ω 는 각주파수, k는 파수이며 n번째 요소 의 m번째 단순음원으로부터 p점까지의 거리 r_{nm} 과 그 음원요소가 가지 게 되는 시간지연 t_{nm} 은 다음의 식 (3-2) 및 식 (3-3)과 같이 주어진다.

$$r_{nm}^{2} = r^{2} + \left\{ (n-1)d + (m-1)\frac{W}{M-1} - \frac{(N-1)d + W}{2} \right\}^{2}$$

$$-2r\left\{ (n-1)d + (m-1)\frac{W}{M-1} - \frac{(N-1)d + W}{2} \right\} \sin\theta$$
(3-2)

$$t_{nm} = \Delta t_n = -(n-1)\frac{d}{c}\sin\theta_s \tag{3-3}$$

여기서, c는 매질에서의 음속, θ_s는 형성되는 초음파 빔의 조향각이다. 식 (3-3)은 n번째 요소 내의 모든 음원요소에는 동일한 시간지연이 가 해지며, 각 요소간의 지연시간은 일정하고, 그 지연시간 및 요소간의 간 격과 매질의 음속에 따라 조향각이 정해짐을 나타낸다.

한편, 임의의 n' 번째 요소가 결함으로 인해 동작하지 않을 경우의 음장은 위의 식 (3-1)에서 그 결함요소에 해당하는 n=n'만을 제외한 나머지 요소에 대해 계산해야하므로 그 결함요소에 대해 $p_0=0$ 로 두면 간단히 구해진다.



그림 3-1. 음장계산을 위한 초음파프로브의 도식화

3. 2. 가시화 원리 및 장치

(가) 가시화 원리

액체 중의 초음파는 소밀파이기 때문에 파가 전파하면서 광학적으로 는 굴절률의 변동이 진행되고 있다. 즉, 음파의 전파방향으로는 굴절률 의 기울기가 있기 때문에 음파장보다 충분히 좁은 광선이 그 전파방향 과 수직으로 입사하면 연속적인 굴절률 변화를 겪게 되어 스넬(snell)의 법칙에 따라 그림 3-2에서 초음파의 음압이 1번 선과 같이 분포하면 광선은 위로 휘고, 음파가 진행하여 음압이 2번 선과 같이 분포하게 되 면 아래로 휘게 된다. 따라서 음파가 한 파장 진행한 경우를 생각하면 광선은 음파의 파장과 관련한 빔 폭을 갖는 띠 모양으로 퍼져 보인다.

이때 최대의 편각을 공기 중에서 측정하여 그것을 *θ*라고 하면 정현 파 음파에서는

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\pi L}{\Lambda} \left(\frac{d\eta}{dp} \right) P_0$$
 (3-4)
가 된다. 여기서, Λ 는 초음파의 파장이며, L 은 초음파의 폭, η 은 액체의
굴절률, P_0 는 음압의 최대치이다. 20°C 물에 있어서 $\frac{d\eta}{dp}$ 의 값은 실험
적으로

$$\frac{d\eta}{dp} = 1.47 \times 10^{-10} Pa^{-1} = 1.49 \times 10^{-5} atm^{-1}$$
(3-5)

인 것이 알려져 있다.^[5] 광원으로서 He-Ne 레이저를 이용하면 가는 빔 이 쉽게 얻어지며, 식 (3-4)을 이용하면 굴절각 θ의 측정으로부터 음압 최대치 *P*₀를 구할 수 있다. 이 방법은 가는 광선을 초음파의 파면에 평행하게 입사시키는데 따르 는 어려움 등으로 인해 높은 정밀도는 기대할 수는 없지만 액체 중의 음파의 파장이 그다지 짧지 않은 1 *MHz*이하의 주파수를 갖는 비교적 큰 진폭의 초음파에 있어서는 상당히 유효하다. 이러한 초음파에 의한 빛의 굴절의 효과는 음파가 광파에 작용하여 그 위상을 변조시키는 현 상으로 볼 수 있으며, 그러한 현상을 통칭하여 음향광학(Acousticoptics)작용이라고 부르는데, 이 음향광학 작용이 음장가시화의 기초적 물리현상이다.

레이저나 할로겐램프 등과 같이 어느 정도 폭을 갖는 광 빔이 초음파 의 파면에 평행으로 입사하여 초음파 빔을 통과하게 되면 빛은 굴절하 여 그림 3-3에서 나타낸 것처럼 회절 영역이 존재하게 되고, 그 영역에 서의 파면은 그림 3-4에서 나타낸 것처럼 곡면이 된다. 이것은 초음파 에 의해 형성된 매질입자의 소밀에 있어서 밀(密) 부분의 광속이 소(疎) 부분보다 늦어 파면이 뒤처지기 때문이다. 광선의 굴절이 그다지 크지 않다면 초음파 영역을 통과한 빛의 세기는 변화가 없고 위상만 변조되 는데, 이 경우 초음파는 빛에 대해 위상격자로서 작용한다고 볼 수 있 다. 이때 위상 변화의 진폭 ν는

$$\nu = \frac{2\pi\delta_n L}{\lambda} \text{[rad]} \tag{3-6}$$

가 된다. 여기서, δ_n은 굴절률변화의 진폭이며, *L*은 초음파 빔의 폭, λ 는 공기 중의 빛의 파장이다. (3-6)식의 ν를 Raman-Nath 파라메타라 고 한다.

정현파 모양의 파면을 갖는 광파는 공간 푸리에변환에 의해 그림 3-5에 나타낸 것처럼 특정방향으로 전파하는 평면파 성분의 합으로 나 타낼 수 있으며, 각 성분의 입사방향에 대한 회절각 θ_m은 다음과 같이 주어진다.

$$\sin\theta_m = m\frac{\lambda}{\Lambda} \tag{3-7}$$

여기서, m은 회절파의 차수를 나타내는 자연수이며, 0차파는 회절 없이 직진하는 파를 나타낸다. m차 회절광의 세기 I_m 은 입사광의 세기를 1 로 하였을 때,

$$I_m = J_m^2(\nu) \tag{3-8}$$

이 된다. 여기서 J_m 은 m차 Bessel 함수이다. 슈리렌장치와 같이 스토퍼 (stopper)를 이용하여 0차파를 제거한 경우 회절된 슈리렌 광의 세기 I_s 는,

$$I_s = 1 - I_0 = 1 - J_0^2(\nu) \tag{3-9}$$

이다.

한편, 그림 3-5에서 y-z면의 위치별 최대음압과 Raman-Nath 파라 메터 ν와는 다음의 관계를 성립한다.

$$\nu(y,z) = A\sin\left(\omega_a t + k_a z\right) f_p(y) \tag{3-10}$$

여기서 A는 상수, ω_a 는 초음파의 각주파수, k_a 는 파수이며, $f_p(y)$ 는 음 압의 전파경로에 대한 적분으로서,

$$f_p(y) = \int p(x,y)dx \tag{3-11}$$

가 된다.



그림 3-3. 초음파에 의한 광빔의 회절



그림 3-5. 초음파에 의한 회절광

(나) 가시화 장치

본 연구에서 구축한 초음파음장가시화 장치의 전체 구성은 그림 3-6 에 나타낸 바와 같이 초음파 송신부와 수조, 광학계, 그리고 CCD 및 PC로 된 영상기록 장치로 구성된다. 초음파 송신부에서는 그림에서 알 수 있는 바와 같이 함수발생기(Agilent 33250A)에서 나온 펄스는 자체 제작한 16채널의 시간지연 및 미분기능이 부가된 전력증폭회로를 거쳐 프로브에 입력된다. 조향각 θ_s=30°를 위한 지연시간 Δt=100ns를 얻 기 위한 시간지연회로 소자로서는 10-Tap Si delay line(DS1010) 을 사 용하였으며, 전력증폭을 위해서는 FET(IRF 830)을 사용하였는데, 그 FET의 구동을 위해 최대 120V가 출력되는 적류전원 (Agilent E3649A) 을 이용하였다.

그리고 수조는 가로 260 mm x 세로 145 mm x 높이 300 mm의 직 육면체 형상으로서 파이렉스유리로 제작하였으며, 물에서 산란을 줄이 기 위해 증류수를 사용하였다. 또한 진행파 음장의 측정 시에 사용한 바닥면의 흡음판은 두께 약 2 cm의 표면이 거친 실리콘 고무판으로 제 작하였다.

이 장치의 핵심 부분인 광학계는 그림 3-7에서 나타낸 것처럼 광원 인 He-Ne레이저, 빔 확대용 렌즈(Expander), 평행광선을 만들기 위한 렌즈(Collimating lens: Lens 1), 집속렌즈(Focusing lens: Lens 2), 스토 퍼, 스크린 및 CCD 카메라에 의해 구성된다. 레이저 광원에서의 빛이 오목렌즈인 Expander에 도달하면 그 가상초점에서 나온 것처럼 확산되 어 전방에 설치된 렌즈 1에 입사한다. 렌즈 1의 곡률중심을 Expander의 가상초점에 맞추면, 초음파가 없을 경우 렌즈 1을 통과한 빛은 평행광 이 되며, 그 평행광은 렌즈 2를 통하여 초점에 집속되어진다. 이때 렌즈 2의 초점위치에 스토퍼를 설치하면 0차파 성분에 해당하는 평행광은 모 두 차단된다. 그러나 초음파가 있을 경우에는 회절 때문에 생기는 1차 파 이상의 고차 성분이 초점을 지나 스크린에 도달하게 된다.

본 연구에서는 [표3-1]에 나타낸 장치를 이용하여 광학계를 구성하였 으며, 그 실물사진은 그림 3-8과 같다. 스토퍼로서는 투명한 유리판에 흑점을 부착한 점스토퍼(그림 3-9(a))와 문구용 칼날을 사용한 나이프 에지(knife-edge) 스토퍼(그림 3-9(b))의 두 종류가 일반적으로 사용되 나, 여기서의 실험 결과, 나이프에지형 스토퍼가 보다 우수한 것으로 나 타났다. 따라서 본 실험에서는 나이프에지형 스토퍼를 사용하였는데, 그 림 3-9(b)에는 그 스토퍼에 의해 0차파가 차단된 모습을 보여준다.

이상과 같이 구축한 광학계는 슈리렌장치에 해당하며, 이 때 얻어진 영상은 슈리렌 영상이다. 이 장치구성 중에 렌즈 2 및 스토퍼가 없는 경우에도 초음파음장의 세기가 충분히 크면 회절된 빛은 스크린에 위상 변화의 시간평균에 해당하는 영상을 형성하는데, 이것을 프레넬 (Fresnel) 회절영상법이라고 한다. 이 방법에 의하면, 진행파의 경우 위 상변화의 평균이 0이 되어 측정이 곤란하나 정상파의 경우는 정지된 파 면으로서의 음장 가시화가 가능하다.

그림 3-10은 중심주파수가 750 kHz인 원통형 트랜스듀서가 수중에서 형성시키는 정상파 음장을 프레넬 회절영상법으로써 촬영한 영상으로 밝은 부분이 배이며 어두운 부분이 마디이다.

그림 3-11은 두께 52 µm의 PVDF로 직접 제작한 중심주파수 8 MHz이고 곡률반경(ROC)이 20 mm인 직선집속형 트랜스듀서가 수중에 형성 시키는 음장의 시뮬레이션과 그림 3-8의 슈리렌장치로써 측정한 영상이다. 트랜스듀서로부터 20 mm 지점에 초점이 형성되어 그 지점 에서 음압이 가장 높기 때문에 밝은 것을 알 수 있다.





그림 3-7. 슈리렌장치 광학계의 구성도



(a) 점 스토퍼

(b) 나이프-에지 스토퍼

그림 3-9. 실험에 사용한 스토퍼



(b) 실제 측정된 정상파 음장

그림 3-10. 750 kHz 원통형 트랜스듀서의 정상파 음장 (프레넬 영상)



(c) 슈리렌 영상

(b) 시뮬레이션

그림 3-11. 8 MHz 직선집속형 트랜스듀서 진행파 음장 (슈리렌 영상)

[표3-1] 슈리렌장치 광학계 부품의 규격 및 특성

Parts	Characteristics		
Laser	 He-Ne Laser(Metrologic Ltd.) Wavelength = 632 nm, Power = 1.5 m W 		
Expanding Lens	 NT55-582(Edmund Ltd.) Rear accessory attachment type Expansion power : 20 times 		
Collimating Lens	 Diameter : 900 mm, focal length : 600 mm Plane-Convex type 		
Focusing Lens	 Diameter : 900 mm, focal length : 300 mm Plane-Convex type 		
Beam Stopper	- Knife-edge type		
Screen	- White-board made of fomex		
CCD Camera	 - KP-120(Hitachi Ltd.) - 124M Pixel, Shutter speed : 1/50000 sec 		

제 4 장 요소결함에 따른 초음파음장변화

본 연구에서 사용된 초음파프로브의 내부 구조는 그림 4-1에 보인다. 이 프로브는 중심주파수 3 *MHz*인 PZT의 압전요소 16개가 선형배열되 어진 것이다. 그 압전요소의 크기는 0.25*mm(W)*×14*mm(H)*이며, 압전 요소 간의 간극(kerf)는 50 µm이다. 프로브의 방사면에는 음향정합층이 있고 그 표면은 절연 및 방수를 위한 고분자막이 코팅되어 있다. 프로 브의 후면은 알루미나(Al₂O₃) 분말을 혼합하여 있든 음향임피던스 $Z_b = 3.75 Mrayls$ 인 흡음층이 있다. 16개의 모든 압전요소에 대한 개별 적 임피던스분석에 의해 얻어진 -3dB 기준 공진주파수는 3 *MHz*를 중심으로 ± 20 *kHz* 범위 내에서 일정하였다. 그리고 전기기계결합계수 는 54.8±0.4%이었다.

이 프로브를 대상으로 모든 요소가 정상일 때의 음장과 임의의 요소 하나가 결함일 때의 음장을 식(3-1)~식(3-3)을 이용하여 시뮬레이션하 고 슈리렌장치를 통하여 실험적으로 측정하였다.



4. 1. 시뮬레이션

조향각 θ_s=0°및 30°인 상태에서 16개의 압전요소가 모두 정상적 으로 동작하고 있을 때의 초음파음장 시뮬레이션 결과를 그림 4-2 및 그림 4-3에 그레이스케일(gray-scale)과 등고선(contour)으로서 각각 나 타내었다. 시뮬레이션에 있어서는 방사면에 부착된 음향정합층과 전극 및 코팅막의 영향은 무시하였고, L≫ W 이므로 x방향에 대해서는 무한 하다는 가정 하에 yz평면의 음장을 구하였다. 이 결과로부터 θ_s=0°의 경우, 모든 압전요소가 정상적으로 동작할 때는 부엽(side-lobe)이 규칙 성 있게 대칭적으로 형성되는 것을 알 수 있으며, θ_s=30°일 때의 좌 엽이 우엽에 비해 그 수가 많으며 형태가 복잡해짐을 알 수 있다.

그림 4-4(a)는 $\theta_s = 0^\circ$ 에서 16개의 압전요소 중 임의의 1개가 고장으 로 인해 동작하지 아니할 경우의 음장에 대한 등고선도이다. 그림에서 첫 번째 소자가 동작하지 않는 n = 1의 경우는 15개의 정상적인 압전요 소를 갖는 프로브가 형성하는 음장에 해당하는바, 그림 4-2에 나타낸 음장과 유사한 좌우대칭의 부엽패턴을 가지는 것을 알 수 있다. 이러한 부엽패턴은 n = 16의 경우에도 동일하다. 그러나 고장 요소가 제일 바 깥쪽 소자가 아닐 때는 그림 4-4(b)~(h)에서 나타낸 바와 같이 비대칭 적이며, 복잡하면서 특이한 형태를 나타내어, 고장요소가 없을 때와 분 명히 식별되어진다. 총 16개의 요소를 갖는 이 프로브는 8번과 9번 소 자 사이에 중심축이 있으므로 그 축을 중심으로 대칭적 위치에 있는 소 자가 고장일 경우 음장 또한 대칭되게 나타나는바, $n = 9 \sim 16$ 에 대한 고장은 $n = 8 \sim 1$ 에 대한 결과의 좌우대칭이다. 그림 4-5은 조향각 θ_s=30°일 때 고장 요소를 갖는 프로브가 만드는 음장에 대한 시뮬레이션 결과이다. 이 경우에도 첫 번째 소자 (n=1)가 동작하지 않을 때는 그림 4-3에 나타낸 정상음장과 유사한 부엽패턴을 가지는 것을 알 수 있다. 그러한 음장분포는 n=16의 경우와 일치한다. 제일 바깥쪽 소자 이외의 다른 소자가 고장인 경우에는 그림에 나타낸 바와 같은 고장요소가 없는 정상 프로브와 분명히 식별이 가능한 특이 한 음장을 형성함을 알 수 있다. θ_s=30°의 경우에는 θ_s=0°와는 달 리 중심축을 중심으로 대칭적 위치에 있는 소자가 고장일 경우에도 음 장이 완전한 대칭이 되지 않는다.





그림 4-2. 정상인 프로브의 음장 시뮬레이션 결과($heta_s$ = 0 $^\circ$)



그림 4-3. 정상인 프로브의 음장 시뮬레이션 결과($\theta_s = 30^\circ$)



그림 4-4. 임의의 압전요소 고장시의 초음파음장 시뮬레이션 결과 $(\theta_s=0^\circ, n$ 은 고장요소번호)



그림 4-4(계속). 임의의 압전요소 고장시의 초음파음장 시뮬레이션 결과(θ_s=0°, n은 고장요소번호)



그림 4-5(계속). 임의의 압전요소 고장시의 초음파음장 시뮬레이션 결과($heta_s$ = 30°, n은 고장요소번호)



그림 4-5(계속). 임의의 압전요소 고장시의 초음파음장 시뮬레이션 결과($heta_s$ = 30°, n은 고장요소번호)



그림 4-5(계속). 임의의 압전요소 고장시의 초음파음장 시뮬레이션 결과($heta_s$ = 30°, n은 고장요소번호)



그림 4-5(계속). 임의의 압전요소 고장시의 초음파음장 시뮬레이션 결과($heta_s$ = 30°, n은 고장요소번호)

4. 2. 가시화 음장

그림 4-6과 그림 4-7는 본 논문의 제 3-2절에서 설명한 가시화장치 에 의해 음장을 가시화여 측정한 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 이들 그림으로부터 가시화에 의한 측정 결과는 시뮬레 이션 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있는데, 그림 4-6(a)에 나타낸 $\theta_s = 0^\circ$ 에 있어서 n = 1일 때의 음장은 그림 4-2(a)에 나타낸 정상적인 프로브의 음장과 패턴이 비슷하여 고장여부의 판단이 쉽지 않다. 전술 한 바와 같이 그것은 n = 16일 때도 동일하다. 그러나 그 외의 경우는 음장의 형태가 비대칭으로 특이하므로 측정된 음장으로부터 결함요소 존재여부의 판단은 대단히 쉽다. 특히, 그림 4-7에 나타낸 바와 같이 $\theta_s = 30^\circ$ 에 있어서는 더욱 분명히 알 수 있다. 그리고 그림에서 알 수 있는 바와 같이 가시화 장치에 의해 측정된 결과를 시뮬레이션 결과와 비교하면 프로브 내에서의 결함 요소의 위치추정이 가능하다.

A S H S M



(b) n=4

그림 4-6. 임의의 압전요소 고장시 초음파음장 시뮬레이션 결과와 측정치의 비교($\theta_s=0^\circ, n$ 은 고장요소번호)



(d) n=7

그림 4-6(계속). 임의의 압전요소 고장시 초음파음장 시뮬레이션 결과와 측정치의 비교(θ_s=0°, n은 고장요소번호)



(b) n=4

그림 4-7. 임의의 압전요소 고장시 초음파음장 시뮬레이션 결과와 측정치의 비교(θ_s =30°, n은 고장요소번호)



(d) n=12

그림 4-7(계속). 임의의 압전요소 고장시 초음파음장 시뮬레이션 결과와 측정치의 비교(θ_s=30°, n은 고장요소번호)

제 5 장 요소결함이 초음파 영상에 미치는 영향

제4장에서는 시뮬레이션과 음장가시화를 통하여 프로브의 요소결함에 따르는 부엽패턴 변화로부터 프로브의 결함요소 존재여부 및 결함위치 를 파악하였다. 본 장에서는 요소결함으로 인한 음장패턴의 변화가 실 제적으로 초음파 영상에 미치는 영향을 조사하기 위하여 초음파음장계 산 소프트웨어인 Field II를 이용하여 중심주파수 7.5 *MHz*이고 길이가 0.2 *mm*인 192개의 압전요소가 25 *µm*의 간극(kerf)으로 선형 배열된 프로브를 대상으로 결함요소수가 증가함에 따른 과도음장과 초음파 B-모드 영상을 시뮬레이션하였다.^[8-11]

5-1. 요소결함에 따른 과도음장 해석

[표5-1]는 프로브의 구동조건을 보인다. 초음파를 송수신할 때 192개 의 압전요소 중 64개를 이용하여 순차적으로 주사함으로 128개의 영상 라인을 얻었다. 프로브의 elevation방향에 대해서는 음향렌즈에 의한 기 계적인 집속을 20 mm에 시켰고 각 라인을 얻기 위해서 구동하는 압전 요소들에 대해서 azimuth방향으로 10~40 mm 범위에 10 mm의 간격 으로 다중 집속(dynamic transmit focusing)을 시켰다. 인가신호에는 부 엽의 영향을 줄이기 위해 식(5-1)로써 구해지는 Hanning 창의 진폭가 중치를 주었다.

 $A(x) = 0.54 + 0.46\cos(2\pi x/L) \tag{5-1}$

여기서, L은 구동되는 64개의 압전요소가 만드는 개구의 폭이며 x는 개구 내에서의 위치이다. 매질 내의 음속은 1540 m/s으로 하였다.

[표5-1] 프로브의 규격 및 구동 조건

Number of PZT elements	192	
Number of active elements	64	
Mechanical focus[mm]	20	
Dynamic transmit focusing[mm]	10, 20, 30, 40	
Apodization	Hanning window	
Speed of sound in medium [m/s]	1540	

결함요소 수에 따른 과도음장의 변화를 해석하기위해서 그림 5-1과 같이 프로브의 azimuth방향의 중심으로 결함 요소가 4개 이내인 것으 로 가정하여 N=1~4 로 설정하고, 압전요소 22~86번, 65~128번, 108~ 172번을 각각 구동하였을 경우 의 음장을 순차적으로 겹쳐서 그림 5-2 와 같이 나타내었다. 주사함에 따라 결함 요소수를 1개 포함할 때는 그 림 5-2(a) 중 2번째의 음장과 같이 변화가 미소하지만 결함 요소수가 2 개 이상을 포함할 때의 음장에서는 부엽이 넓게 형성됨을 알 수 있다. 그림 5-3은 부엽의 변화를 쉽게 관찰하고자 프로브의 중심에서 기계적 인 집속점인 20 mm에서의 음장을 -30~0 dB 범위에 5 dB 간격으로 등고선으로 표시하였는데, 이 결과들로부터 결함이 생김에 따라 부엽 형성 범위가 넓어지는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 특히, 주엽에 가장 근 접한 부엽의 음압이 결함요소수가 증가할수록 상승됨을 알 수 있다.



그림 5-1. 결함요소 위치(N은 결함요소수)



그림 5-2. 결함요소수 증가에 따른 과도음장변화



16



그림 5-3. 결함요소수 증가에 따른 20 mm 지점 음장 등고선

음장의 음압변화를 정량적으로 해석하기 위해서 음축 20 mm에서 측 방향의 음압분포를 그림 5-4에서 나타내었다. 5-4(a)는 결함요소가 없 을 때의 음압분포를 나타내는데 -3 *dB*에서 주엽의 폭은 0.39 mm이고, 주엽과 가장 근접한 부엽의 음압은 -14.9 *dB*를 가졌으나 그 외의 부엽 은 최대 -26 *dB* 이하였다. 결함 요소수가 증가함에 따라 음장 변화의 변화가 나타나는데, 먼저 주엽의 음압은 미소하게 감소하여 그립 5-5(e) 처럼 4개의 압전요소에 결함이 있을 때에는 1.4 *dB*의 차이를 가졌고 -3 *dB*에서 주엽의 폭은 0.39 mm에서 0.23 mm로 0.16 mm만큼 좁아 졌다. 그리고 부엽에 있어서는 결함요소가 1개일 때에는 음압의 변화는 미소하나 결함요소가 2개 이상을 가질 때에는 근접한 부엽의 음압이 -12.2 *dB*까지 상승하였고 그 외의 부엽은 넓은 범위에서 -30 *dB* 이상 의 음압을 가졌다.

ot u



(a)
$$N=0$$



그림 5-4. 결함요소수에 따른 20mm 지점 축방향 음압분포

5-2. 요소결함에 따른 초음파 B-모드 영상 시뮬레이션

초음파 영상은 음속이 1540 m/s이고 50mm×10mm×50mm인 직 육면체의 팬텀 내에 10mm~40mm의 범위에서 10mm의 간격으로 위 치된 4개의 점표적로부터 반사된 신호를 수신하여 B-모드 영상으로 그 림 5-5에 나타내었다. 결함 요소수가 증가함에 따라 10 mm, 20 mm, 30 mm 지점에 위치한 점표적 영상은 그 주위에 허위 표적이 뚜렷하게 생김을 알 수 있다. 이것은 결함 요소수의 증가에 따라 상승된 부엽의 음압이 결함 요소를 포함한 영상라인에 영향을 미쳤기 때문이다. 40 mm에서는 깊이가 갚어질수록 음압의 감쇠현상으로 부엽의 음압은 상 승하나 영상에는 영향을 미치지는 않았다.

그림 5-6은 스펙클(speckle)이 포함된 영상이다. 결함 요소수가 증가 함에 따라 결함요소를 포함한 영상라인에 대해서 어두워지는 것을 확인 할 수 있다. 그리고 그림 5-5의 결과와 같이 점표적 영상 부근에 허위 표적이 생성되며 점표적 영상의 폭이 좁아지는 것을 알 수 있다.

초음파 영상의 축방향 및 측방향 분해능은 식(5-2)로부터 구할 수 있 다.^[12]

$$R = \frac{FHWM}{\sqrt{\ln 2}} \sqrt{\ln\left(\frac{A}{A - JND}\right)} - D \tag{5-2}$$

여기서, FHWM(Full Width Half Maximum)과 A(amplitude of PSF)는 스펙클(speckle)이 포함된 20mm 지점에 위치한 점표적 영상의 축 및 측 방향의 픽셀 프로파일 변화를 보이는 그림 5-7을 그림 5-8에 나타 낸 가우시안 PSF(Point Spread Function)와 피팅함으로써 얻어지는 값 이다. JND(Just Noticeable difference)는 32로 설정하였으며 D는 점표 적의 직경으로서 무한히 작다고 가정하여 0으로 두었다.

식 (5-2)로부터 구한 음축 20 mm 지점의 점표적 영상에 대한 측방향 및 축방향 분해능의 결함요소수에 따른 변화를 [표5-2]에 나타내었다. 그 결과로부터 축방향의 분해능은 결함요소수 증가에 따라 0.001 mm 의 미소한 변화를 보이나 측방향 분해능의 변화는 상당히 크며, 결함요 소가 4개일 때의 값은 정상일 때보다 차이가 0.111 mm로서 분해능이 현저하게 떨어짐을 알 수 있다.





그림 5-5. 스펙클이 포함되지 않은 초음파 B-모드영상 시뮬레이션



그림 5-5(계속). 스펙클이 포함되지 않은 초음파 B-모드영상 시뮬레이션



그림 5-6. 스펙클이 포함된 초음파 B-모드영상 시뮬레이션



그림 5-6(계속). 스펙클이 포함된 초음파 B-모드영상 시뮬레이션



(b) 측방향

그림 5-7. 20 mm 지점 점표적 영상의 축방향 및 측 방향 픽셀 프로파일 변화



[표 5-2] 20 mm 지점 점표적 영상의 측방향 및 축방향 분해능

Number of c	lefective	Axial	Lateral
element	6	R [mm]	R [mm]
0	6	0.313	0.633
1	X	0.313	0.608
2	X	0.312	0.583
3	12	0.312	0.556
4	V A	0.312	0.522
	1 miles	र मित्र म	

제 6 장 결론

본 연구에서는 중심주파수 3*MHz*인 압전요소 16개가 선형배열되어진 의료용 초음파프로브에 대하여 모든 압전요소가 정상일 때와 임의의 하 나의 압전요소가 결함으로 인해 작동하지 않을 때의 음장을 조향각 0° 와 30°에 대해서 이론적으로 시뮬레이션을 하고, 슈리렌법에 따라 구 축한 음장가시화장치를 이용하여 실험적으로 측정하였다. 그 결과, 임의 의 압전요소가 결함으로 인해 동작하지 않을 때의 음장은 모든 요소가 정상적으로 동작할 때의 음장에 비해 부엽패턴이 크게 다르게 나타나 며, 그 형태는 가시화에 의한 측정결과와 잘 일치하였다. 따라서 가시화 장치에 의해 측정된 음장에서의 부엽패턴의 특징을 시뮬레이션 결과와 비교 분석함으로써 의료용 초음파프로브에서의 결함요소 존재여부는 물 론, 그 결함요소의 위치 추정이 가능함을 알았다.

또, 실제적으로 프로브의 결함요소가 초음파 영상에 미치는 영향을 조사하기 위하여 7.5 *MHz*의 192개의 압전요소를 가진 선형배열 프로브 를 대상으로 결함 요소수가 증가함에 따른 과도음장 및 초음파 영상을 시뮬레이션을 통하여 이론적으로 분석하였다. 그 결과 결함요소가 증가 함에 따라 20 *mm*에서 과도음장의 -3 *dB* 주엽폭은 점점 감소하여 결 함요소가 4개 일 때에 0.23 *mm*로서 결함이 없을 때보다 0.16 *mm*의 차이를 보였으며 음압은 1.4 *dB*의 차이를 보였다. 부엽에 있어서는 -30 *dB* 이상의 값을 가진 부엽이 넓게 형성되었으며 특히, 주엽과 근접한 부엽의 음압이 -12.2 *dB*까지 상승하였다. 이와 같은 과도음장으로부터 팬텀 내의 10~40 *mm*지점에 10 *mm* 간격으로 위치된 점표적의 초음 파 B-모드 영상을 시뮬레이션한 결과 결함요소가 증가함에 따라 점표 적 영상의 크기가 작아지고 점표적 영상의 부근에 허위 영상이 형성됨 으로 인해 측방향 분해능이 크게 저하됨을 알 수 있었다.



참고문헌

- [1] T. Neumann and H. Ermert, "A new designed Schlieren system for the visualization of ultrasonic pulsed wave fields with high spatial resoulution and temporal resolution", 2006, IEEE Ultrason. Symposium Proceedings, vol. 1, pp. 244–247, 2006.
- [2] B. Schneider and K. K. Shung, "Quantitative analysis of pulsed ultrasonic beam patterns usings a Schlieren system", IEEE Trans. on UFFC, vol. 43, pp. 1181–1186, 1996.
- [3] N. Kudo, H. Miyashita, K. Yamamoto and H. Sekimizu, "A simple Schlieren system for visualization of a sound field of pulsed ultrasound", Journal of physics: Conference Series 1, pp. 146–149, 2004.
- [4] 江連 朝寬, "光學的手法による二次元投影像から取得する音場分布計 測に關する研究", 筑波大學博士學位論文, 2004.
- [5] 根岸 勝雄、高木 堅志郎, "超音波技術", 東京大學出版會, pp. 76-107, 1984.
- [6] S.C. Woo, Yijun Shi, "A simulation study of the beam steering characteristics for linear phased arrays", Journal of Nondestructive Evaluation, Vol.18, No.2, pp.39–57, 1999.
- [7] S.C. Woo, Yijun Shi, "Optium beam steering of linear phased arrays", Wave motion, Vol.29, pp.245–265, 1999.
- [8] N. Denisenko, M. Pappalardo, E. D'Ottavi, and M. Matteucci,

"An approximated closed form of the transient acoustic pressure distribution generated by a linear source", J. Acoust. Soc. Am., 75, pp.1896–1899, 1984.

- [9] D. H. Turnbull and F. S. Foster, "Beam steering with pulsed two-dimensional transducer arrays", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelect. Freq. Contr., 38 (4), pp.320–333, 1991.
- [10] 조영환, "초음파 영상 진단기용 변환기의 설계 및 과도음장 해석", 박사학위 논문, 서울대학교, 1995.
- [11] 박은주, 송행용, 하강렬, 김무준, 김동현, 이수성, "과도음장 해석을 통한 초음파 진단 탐촉자의 성능 개선", 한국음향학회지, 제21권 제 8호, pp.744-756, 2002.
- [12] 양정화, 이경성, 강관석, 팽동국, 최민주, "초음파프로브의 결함이
 B-모드 영상의 공간 분해능에 미치는 영향", 한국음향학회 학술발
 표대회 논문집, 제28권, 제1(s)호, pp. 176-179, 2009.

W a CH OL IN

감사의 글

어버이의 마음으로 학문뿐만이 아닌 그 외의 너무 많은 것들을 가르 쳐 주신 하강렬 교수님께 진심으로 존경과 감사를 드립니다.

또한 늦은 밤까지 연구하시는 모습으로부터 저로 하여금 학문의 열정 을 가지도록 만들어주신 김무준 교수님, 그리고 수중음향이라는 흥미로 운 학문을 가르쳐주시고 미흡한 저를 좋게 평가해주신 윤종락 교수님께 도 감사드립니다.

배민건 박사님, 김정순 박사님, 김동현 선배님, 양정원 선배님, 배종우 선배님께도 학문과 인생의 조언자가 되어주신 것에 대하여 감사드립니 다.

마지막으로 지금까지 저를 위해 회생만을 하신 어머니와 형님을 향한 감사와 사랑을 평생 지워지지 않는 가슴 깊은 곳에 새깁니다.

ता वा ग