3차원 음장 분석법을 이용한 진단용 초음파 프로브의 정량적 성능평가

노시철 · 김주영 · 박재현* · 김진수 · 강정훈 · 최흥호†

Quantitative evaluating method for diagnostic ultrasound probe using 3-dimensional acoustic field analysis

Si-Cheol Noh, Ju-Young Kim, Jae-Hyun Park*, Jin-Su Kim, Jung-Hoon Kang, and Heung-Ho Choi†

Abstract

In this study, in order to overcome the weakness of acoustic field analysis which is generally used for ultrasonic probe performance evaluation, automatic acoustic field measurement system and evaluation parameters were proposed. The comparisons between acoustic field simulation and measured acoustic distribution data of normal and abnormal channels were conducted to evaluate the availability of proposed system and evaluation parameters. First, the impulse response characteristic of sample probe was investigated to classify the normal elements and abnormal elements. And then, normal channels and abnormal channels with abnormal element were chosen. The suggested 12 evaluation parameters were calculated using the acoustic fields of these channels. The availability of proposed automatic acoustic field measurement system and evaluation parameters was confirmed. And the performance evaluation of ultrasonic probe using acoustic field analysis could be easier and faster.

Key Words : ultrasound probe, performance evaluation, 3 dimensional acoustic field analysis

1. 서 론

초음파 프로브는 초음파를 발생시키는 다수의 진동자 엘리먼트와 kurt 물질, 흡음층, 정합층, 동조코일 등의 조합으로 구성된 복합적 모듈이다. 이러한 프로브의 성능은 초음파 진단에 있어 영상의 질을 결정하는 매우 중요한 요소이다^[1,2]. 초음파 프로브의 성능은 제작 물질의 개발, 제조공정의 개선, 새로운 진동자 배열방법의 시도 등으로 지속적으로 개선되어 왔지만^[3], 제작 단계에서의 불량 및 오랜 사용으로 인한 마모성 불량, 엘리먼트의 열화 등은 여전히 영상의 질을 저하시키고 오진의 원인이 되어 효율적인 진단을 방해하는 결정적인 변수로 작용하고 있다^[4]. 이에 한국표준협회는 KS P 1216 규격을 제안하여 초음파 진단장치에 대하여 안

전에 관한 시험, 종합감도, 분해능, 주파수 특성, 초음파 출력 등의 성능시험을 권고하고 있으며, 임상에서도 정기적인 프로브의 평가 및 관리가 이루어지고 있다.

진단용 프로브의 성능평가 방법으로는 프로브 성능 변수를 분석하는 방법, 진단 장비를 이용하여 획득한 영상의 질을 평가하는 방법과 음장분석 방법이 주로 사용되고 있다. 프로브의 성능변수 분석법은 각 엘리먼트들이 가지는 방사 전력, 공진주파수, 임피던스 대역폭, 전기기계결합계수 등을 측정하여 설계 시 수행된 시뮬레이션 결과와 비교하는 방법으로, 프로브 제조 회사에서 주로 사용하고 있으며, 출고 전 수행하는 평가이다. 진단영상 평가법은 AIUM 팬텀 또는 인체로부터 초음파 영상을 획득하고 이를 통하여 분해능, 영상의 밝기, 음속 등을 평가하는 방법으로, 평가절차 및 분석이 간단하며, 소요시간이 짧아 현재 임상에서 가장 널리 사용되고 있다. 음압분포를 측정하는 음장분석 방법은 프로브가 생성하는 공간적 음장특성, 임펄스 응답특성을 평가하는 방법으로, 정밀한 측정이 가능하여 진단용 프로브의 감도 보정에 주로 사용되고 있다. 이러한 방법은 측정 후 생성되는 음장 영상을 통하여 직관적

인제대학교 의생명공학과(Department of Biomedical Engineering, Inje University)

*김해 의생명센터(Gimhae Biomedical Center)

†Corresponding author : hhchoi@inje.ac.kr

(Received : October 5, 2010, Revised : November 23, 2010)

Accepted : November 24, 2010)

으로 평가 할 수 있다는 장점을 갖고 있다^[5,6]. 또한, 엘리먼트 정렬 불량, 간격 이상, 감도 이상 등과 같이 비정상 엘리먼트에 의해서 발생하는 프로브의 성능 저하는 성능 변수 분석이나 진단 영상 평가방법으로는 확인 되지 않는 경우가 많다. 이러한 불량변수는 음압분포 분석을 통하여 확인이 가능하다.

하지만, 음장 분석법은 음장이 형성되는 공간의 각 부분에서의 음압을 측정해야 하므로 제어가 번거롭고 정확성이 요구되며, 측정시간이 많이 소요된다는 단점을 갖고 있다. 또한, 음압 분포 영상을 통한 분석이 정량적이지 못하고 주관적 조건이 성능평가에 적용된다는 단점을 갖고 있다. 이에 본 연구에서는 자동화된 음장 측정시스템을 제작하여 측정이 용이하고 소요시간을 단축시킬 수 있는 방법을 제시하였으며, 단면의 음압분포 영상이 아닌 3차원 입체영상의 측정이 가능하도록 하였다. 또한, 정량적 평가를 위하여 음장 분석에 유용할 것으로 판단되는 평가 변수들을 제안하고 시뮬레이션 음압 분포와, 정상 음압분포, 비정상 음압 분포를 비교 분석하여 유효성을 평가하였다. 이를 통하여 정량적이고 보다 체계적인 음장 분석법의 기초가 마련될 것으로 판단된다.

2. 관련 이론

진단용 초음파 프로브는 일반적으로 다수의 엘리먼트들이 일정한 간격으로 배열을 이루고 있으며, 전기적 에너지를 여기신호에 따라 기계적 진동 에너지로 변형시켜 초음파를 발생하거나, 반대로 수신된 신호를 전기적 신호로 제공하게 된다. 이러한 엘리먼트들의 정렬상태, 감도, 연결상태 등은 프로브의 성능에 직접적인 영향을 주는데, 반복적인 사용이나 외부적인 충격 등의 원인으로 파괴되거나, 배열의 정렬상태가 달라질 수 있다. 이렇게 손상된 엘리먼트는 영상의 질을 저하시키고, 왜곡된 영상을 제공하여 오진의 원인이 되는 등 효율적인 진단을 방해하게 된다.

엘리먼트 불량의 형태로는 엘리먼트 자체의 파괴 및 케이블 단선으로 인한 송/수신 신호의 감소, 엘리먼트 간의 거리가 달라져 음파중첩의 왜곡이 발생하는 피치 불균형, 엘리먼트의 방향이 틀어져 초음파 송/수신 방향이 달라지는 정렬 불량 등이 대표적이다. 이러한 불량변수는 일반적으로 프로브 제작과정 단계에서 발생하지만, 장비의 사용에 따라 관리적 문제 또는 소모적인 사용에 의해서도 발생하기 때문에 지속적인 성능평가가 필요하다. Fig. 1은 초음파 프로브의 성능에 영향을 미치는 엘리먼트의 불량형태를 보여주고 있다.

Fig. 1. Typical defects of elements affecting the performance of probe.

Fig. 2. Shape and inner structure of sample probe Linear 5-9, Digital-Echo Inc., Korea).

3. 실험 재료 및 방법

본 연구에서는 프로브 성능에 영향을 미치는 엘리먼트의 불량에 따른 음장 및 특성의 변화를 관찰하는 것을 목표로 하고 있다. 이에, 개발단계에서 불량관정을 받은 상용의 프로브를 이용하여 특성을 측정하고 분석하였다. 평가에 사용된 프로브는 경동맥과 같이 비교적 근거리 측정용으로 개발된 프로브(리니어 5-9 프로브, digital-echo (주), 한국)를 사용하였다. 사용된 프로브의 중심 주파수는 7.5 MHz였으며, 총 128개의 엘리먼트로 구성되었다. 1개의 엘리먼트는 3개의 보조 엘리먼트로 구성되었으며, 엘리먼트의 폭과 엘리먼트 중심간의 거리는 각각 0.39 mm, 길이는 4 mm였다. 커넥터는 128 핀 초음파 영상용 커넥터(medison 사, 한국, Zi = 50 Ω)을 이용하였다. Fig. 2는 사용된 초음파 프로브의 외형과 구조, 커넥터를 보여주고 있다.

Fig. 3. Block diagram of experimental setup.

Fig. 4. Experimental setup.

사용된 초음파 프로브의 엘리먼트별 임펄스 응답특성과 형성되는 음장을 측정하기 위하여 3축 음장측정 시스템을 제작하였다. 제작된 음장 측정 시스템은 국가 표준원이 정한 기준인 KS-C-IEC 61102의 5.2항에 부합하도록 구성하였으며^[7,8], 수중청음기 및 프로브의 고정에 관한 표준인 KS-C-IEC 61102-7 항목의 내용에 따라 시스템을 제어하였다. 제작된 측정 장치는 수조, 초음파 프로브 고정 장치, 음장 측정을 위한 하이드로폰, 측정 위치제어를 위한 3축 제어 시스템, 초음파 구동 시스템, 디지털오실로스코프로 구성되었다. 하이드로폰으로부터 수신된 음압신호는 디지털오실로스코프를 이용하여 저장되고, GPIB 통신을 이용하여 PC로 전송되도록 구성하였으며, 개발된 제어 프로그램을 이용하여 측정 및 데이터 저장, 분석이 자동으로 이루어질 수 있도록 하였다. Fig. 3은 본 연구에서 사용된 실험 장치의 블록 다이어그램을 보여주고 있다.

초음파 음장 측정을 위한 수조는 무정전 아크릴을 이용하여 600 mm×600 mm×600 mm 규격으로 제작하였으며, 초음파 구동 시스템은 여기펄스가 150 Vp-p 부펄스, 펄스 지속시간이 1 us를 가지도록 제작하였다. 각 위치에서의 음향 신호는 0.5 MHz~15 MHz 대역특성을 가지는 PVDF 하이드로폰(generex 사, 미국, $\phi=1$ mm)을 이용하여 수신하였으며, 디지털오실로스코프(wave runner 6100, Lecroy 사, 미국)를 이용하여 저장 후, GPIB-USB-HS 모듈(NI 사, 미국)의 GPIB 모듈을 이용하여 PC로 전송하였다. 위치제어 시스템은 스텝모터(103-718-0841, sanyo denki 사, 일본)와 스텝모터 드라이버(2D24M, prime driver 사, 한국)를 사용하여 구성하였으며, 제작된 시스템의 위치제어 분해능은 3축 모두 0.01 mm/pulse로 설정하였다. LabVIEW 7.0(NI 사, 미국) 프로그램을 이용하여 제어 프로그램을 구현하였으며, DAQ 패드(6016, NI 사, 미국)를 이용하여 모터를 제어하였다. Fig. 4는 실험 장치의 셋업을

보여주고 있다.

제작된 제어 프로그램을 이용하여 프로브 및 하이드로폰의 정렬을 할 수 있도록 하였으며, 임펄스 응답특성 평가 및 3차원 음장 측정이 자동으로 수행되도록 하였다. 임펄스 응답특성 측정의 경우, 엘리먼트 간의 피치 간격과 엘리먼트의 수를 입력하면 프로브의 각 엘리먼트를 각각 독립적으로 여기시킨 후 발생하는 음압의 특성을 저장, 분석할 수 있도록 구성되었다. 3차원 음장 측정의 경우, 축방향 및 측방향, 수직방향의 측정 거리와 측정 분해능을 설정하면, 선택된 엘리먼트들을 여기시켜 음장을 형성하고, 형성되는 각 지점에서의 음압을 하이드로폰으로 수신한 후, 신호처리 과정을 거쳐 영상으로 결과를 출력하도록 설계하였다.

본 연구에서는 3축 위치제어 시스템에 측정할 초음파 프로브를 위치시키고 수조의 바닥에 하이드로폰을 고정시킨 후, 측정될 프로브의 각 엘리먼트를 1번부터 128번까지 차례대로 구동시켜 각 엘리먼트의 임펄스 응답 특성을 측정하고 그래프로 나타내었다. 측정된 임펄스 응답 특성의 결과를 이용하여 비정상 엘리먼트를 결정하고, 8개의 엘리먼트를 하나의 채널로 설정하여 정상 채널 3개와 비정상 채널 3개를 결정하였다. 결정된 정상과 비정상의 채널에 대하여 각각 측방향으로 0.13 mm 간격 3.25 mm 범위, 상하 방향으로 1 mm 간격 5 mm 범위, 측방향으로 2.5 mm 간격 60 mm 범위의 음압을 측정하였다. 한 채널에 대하여 총 3,125 (25×5×25)개의 데이터를 획득하였다.

획득된 데이터는 각 지점에서의 최고 음압으로 표현되었으며, 평준화(normalizing)와 보간 과정을 거쳐 3차원 음압분포 영상으로 구성되었다. 데이터 보간은 바일리니어 보간법을 이용하였으며, 보간 계수는 2로 하였다. 음압분포 영상은 전체적인 음압분포를 관찰할 수 있는 영상과 최대음압의 0.707 배 이상의 데이터만을 이용하여 -3 dB 음압분포 영상을 표시하였다. 본 연구

에서는 전자를 ‘normal mode’ 영상, 후자를 ‘-3dB mode’ 영상으로 명명하였다. 마지막으로, 최종 처리된 데이터를 이용하여 초음파 빔의 진행방향을 기준으로 정면(frontal section) 영상과 측면(longitudinal section) 영상, 상측면(cross section) 영상을 표시하였다. 또한, 최대 음압 값 기준으로 -3 dB 이상 음장영역의 부피, 상하 및 좌우의 부피 및 거리 대칭성, 최대 음압, 빔 폭 및 발산각 등의 음장 분석 변수들을 계산하였다. 데이터 분석 및 변수 계산은 MATLAB R2006a(mathworks 사, 미국) 프로그램을 사용하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 각 엘리먼트의 임펄스 응답 특성의 결과를 보여주고 있다. 측정 결과 전체적으로 16 mV의 응답특성을 가졌으며, 5개 엘리먼트에서 최대 응답특성 대비 80 % 이상, 122개 엘리먼트에서 90 % 이상의 특성을 보였다. 67번 엘리먼트에서는 응답 신호가 나오지 않는 결함이 발견되었다. 이에 본 연구에서는 67번 엘리먼트를 포함하는 채널을 비정상 채널로 설정하였으며, 비교적 특성 변화가 적은 채널을 정상 채널로 설정하여 음압 분포 데이터를 측정하였다. 비정상 채널은 67번 엘리먼트를 포함하는 61-68번, 65-72번, 67-74번으로 설정하였으며, 정상 채널은 9-16번, 31-38번, 91-98번으로 결정하였다. Fig. 6은 정상 채널(91-98번)과 비정상 채널(65-72번)에서 측정된 음압 분포의 ‘normal mode’ 영상과 ‘-3dB mode’ 영상을 보여주고 있다.

정상 채널의 음압 분포를 이용하여 본 연구에서는 최고 음압, -3 dB 이상의 음장 영역 부피, 초점영역에서의 빔폭, 발산각, 최대 음압점을 기준으로 양측의 -3 dB 영역까지의 거리 및 부피 대칭성 등의 기하학적 특성 12 가지를 추출하여 음압 분포 분석을 위한 변수로 설정하였다. -3 dB 이상의 음장 영역 부피(-3dB volume)는

Fig. 5. Impulse response characteristics of each element.

(a)

(b)

Fig. 6. Acoustic pressure distribution (a) normal channel (91~98th element) (b) abnormal channel(65~72th element).

전체의 부피에서 -3 dB 음장이 차지하는 비율을 백분율로 나타낸 것이며, 빔폭은 최고 음압값을 기준으로 -3 dB 이상 영역에 대하여 좌우 빔폭(lateral beam width 이하 *LBW*) 및 상하 빔폭(elevation beam width 이하 *EBW*)을 mm 단위로 표현한 것이다. 각도는 초음파 빔의 발산각과 유사하게 중심축과 최고점이 이루는 각도를 각각의 평면에서 나타낸 것으로써, 측방향 음압 분포에서 형성되는 *XZ-plane angle*(이하 *XZPA*)와 측방향 음압분포 영상에서 형성되는 *YZ-plane angle*(이하 *YZPA*)로 구분하였다. *Rotate angle*(이하 *RA*)은 -3 dB 영역에서 지름이 가장 긴 직선과 수평축이 형성하는 각도로 규정하였으며, 정면 음압분포 영상에서 관찰하였다.

거리 및 부피 대칭성은 -3 dB 이상의 영역에서 최고 점을 기준으로 좌우(측방향), 상하(입면방향), 전후(측방향) 대칭성을 비교한 것으로, 측방향 대칭성(lateral distance symmetry 이하 *LDS*), 측방향 대칭성(axial distance symmetry 이하 *ADS*), 입면 대칭성(elevation distance symmetry 이하 *EDS*), 측방향 부피 대칭성(lateral volume symmetry 이하 *LVS*), 입면 부피 대칭성(elevation volume symmetry 이하 *EVS*)로 구분하였다. 본 연구에서는 정상 및 비정상 채널에서의 음압 분포

Fig. 7. Proposed angle relevant parameter.

뿐만 아니라, 동일한 조건에 대하여 시뮬레이션 된 음압 분포 결과를 이용하여 분석 기준으로 설정하였다. Fig. 7은 제안된 변수 중 각도 관련 변수를 보여주고 있으며, 식 1은 각 지점의 음압 데이터를 이용하여 거리 및 부피 대칭성을 계산하기 위한 식을 보여주고 있다.

$$\left[\sum_{x=1}^{end} \cdot \sum_{a=1}^{\frac{y-1}{2}} \cdot \sum_{z=1}^{end} \frac{\left(p_{\left(x, \frac{y+1}{2}+a, z\right)} - p_{\left(x, \frac{y+1}{2}-a, z\right)} \right)^2}{n} \right] \times 100 \quad (1)$$

Fig. 8은 시뮬레이션 된 음압 분포 영상과 정상채널에서 획득된 음압 분포 영상(91-98번), 비정상채널에서 획득된 음압 분포 영상(65-72)을 보여주고 있으며, Table 1은 계산된 변수의 측정값을 보여주고 있다.

본 연구에서 제시한 변수 12가지 중에서 -3dB vol-

(a)

(b)

(c)

Fig. 8. Acoustic pressure distribution ; (a) simulation (b) normal channel (c) abnormal channel.

Table 1. Calculated results of suggested evaluation parameters.

Parameter	Simulation (Standard)	Normal Channels				Abnormal Channels			
		9-16	31-38	91-98	average error	61-68	65-72	67-74	average error
-3 dB volume(%)	3.456	2.592	3.584	3.424	0.341	4.032	4.456	5.344	1.155
LBW(mm)	1.833	1.351	1.962	1.769	0.225	2.509	1.48	1.254	0.536
EBW(mm)	1.177	0.941	0.941	0.941	0.236	0.706	0.706	0.941	0.393
XZPA(degree)	0	-2.382	1.787	0.745	1.638	3.571	1.192	-0.745	1.836
YZPA(degree)	0	0	0	0	0	-0.764	0	0	0.255
RA(degree)	0	0.83	0.551	0.645	0.675	0.267	0.6	0.726	0.531
LDS	1	0.952	1.4	1.455	0.301	2.5	1.5	0.81	0.73
ADS	2.091	1.5	1.546	0.737	0.83	1.429	1.133	0.692	1.006
EDS	1	2	2	2	1	1	1	2	0.333
LVS	1	0.956	1.452	1.809	0.435	5.253	2.232	0.86	1.875
EVS	1	5.171	2.137	1.175	1.828	0.953	1.305	15.74	5.031
Maximum pressure	100	107.92	94.47	97.6	5.283	76.11	75.36	62.97	28.52

ume, LBW, LDS, LVS, EVS, Maximum pressure 총 6개의 변수에서는 정상과 비정상 채널의 차이가 확연하게 나타남을 확인할 수 있었다. 하지만, XZPA, YZPA, RA, EDS 총 4개의 변수에서는 유효한 차이점이 확인되지 않았다. 한편, EBW, ADS 변수에서는 비정상 채널의 결과값이 시뮬레이션의 값과 차이가 커 유효하다고 판단은 되었지만, 정상 채널에서의 오차 때문에 추가적인 평가가 필요할 것으로 판단되었다. 엘리먼트의 정렬 불량에 따라 발생할 것으로 판단되었던 각도 관련 변수(XZPA, YZPA, RA)의 측정 결과는 측정값이 매우 작은 값이고, 반복측정의 오차가 커 본 연구에서는 상관관계가 적다고 판단되었으나, 이는 본 연구에서 사용된 프로브에 정렬 불량이 없었고 음장 측정 시 하이드로폰과 변환기, 이동 시스템의 정렬상태가 정확하지 않아 발생한 현상으로 판단되었다. 이는 실험 시스템의 보완과 추가적인 평가를 통하여 재검증 되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

음장 분석법은 음장이 형성되는 공간의 각 부분에서의 음압을 측정해야 하므로 제어가 번거롭고 정확성이 요구되며, 측정시간이 많이 소요된다는 단점을 갖고 있다. 또한, 음압 분포 영상을 통한 분석이 정량적이지 못하고 주관적 소견이 성능평가에 적용된다는 단점을 갖고 있다. 이에, 본 연구에서는 초음파 프로브의 성능평가에 사용되는 음장 분석법의 단점을 보완하고 보다 정량적인 평가 방법을 제시하기 위하여 자동화된 3차원 음압 분포 측정시스템과 음장 분석에 유용할 것으로 판단되는 평가 변수들을 제안하였다. 제안된 시스템과 평가 변수의 유효성을 평가하기 위하여, 시뮬레이션 음압 분포와, 정상 음압분포, 비정상 음압 분포를 비교 분석하였다. 제작공정에서 불량으로 평가된 샘플 프로브를 이용하여 평가를 수행하였으며, 각 엘리먼트의 임펄스 응답특성을 측정하여 정상과 비정상 채널을 설정하고, 정상과 비정상 채널 각 3개씩의 음장을 측정하여 제안된 평가 변수를 계산하였다.

본 연구에서는 프로브 성능 평가 변수로 형성된 음장에서 초음파 빔폭 관련 2개 항목, 대칭성 관련 5개 항목, 각도 관련 3개 항목, 최대 음압, -3 dB 이상의 부피 총 12가지를 제시하였다. 제시된 변수에 대하여 음압 분포 시뮬레이션 결과와 정상채널의 음압 분포, 비정상 채널에서의 음압분포 결과를 이용하여 비교 분석하였다. 비교 결과 제시된 변수 중 6개의 변수는 프로브의 성능평가 변수로서 유용할 것으로 판단되었으며,

2개의 변수는 적용가능하나 추가적인 평가가 필요할 것으로 판단되었다. 한편, 엘리먼트의 정렬 불량에 따라 발생할 것으로 판단되었던 각도 관련 변수(XZPA, YZPA, RA)와 엘리먼트 가공 오차로 발생할 것으로 판단되었던 EDS 총 4개의 변수에서는 유효한 차이점이 확인되지 않았는데, 이는 본 연구에서 사용된 프로브에 정렬 불량이 없었고 음장 측정 시 하이드로폰과 변환기, 이동 시스템의 정렬상태가 정확하지 않아 발생한 현상으로 판단되었다. 이는 실험 시스템의 보완과 추가적인 평가를 통하여 재검증 되어야 할 것으로 판단되었다.

본 연구를 통하여 3차원 음장 측정 시스템과 프로브 성능 평가 변수를 이용한 초음파 프로브의 성능평가 방법이 보다 쉽고 객관성을 가질 수 있을 것으로 판단되었으며, 현재 수행되고 있는 초음파 프로브의 평가에서 발생할 수 있는 오차를 줄여 평가의 신뢰성을 향상시킬 수 있을 것으로 사료되었다. 차후 제안된 변수의 지속적인 관찰을 통하여 보다 정확한 변수의 설정이 가능할 것으로 판단되며, 초음파 프로브의 정량적인 평가 결과를 제시하는 기준으로 활용되어 보다 체계적인 음장 분석법의 기초가 마련될 것으로 판단된다.

감사의 글

This work was supported by the Korea Science and Engineering Foundation(KOSEF) grant funded by the Korea government(MEST) (No. R01-2004-000-10325-0), and this work was supported by grant from Inje University, 2009

참고 문헌

- [1] Beate Weigang and G. Wayne Moore, et al., "The Methods and effects of transducer degradation on image quality and the clinical efficacy of diagnostic sonography", *Journal of Diagnostic Medical Sonography*, Vol. 19, no. 1, pp. 3-13, 2003.
- [2] K. K. Shung and M. Zipparo, "Ultrasonic transducer and arrays", *IEEE in medicine and biology* November/December, 1996.
- [3] J. Gessert and G. W. Moore, et al., "Development of a novel hand-held ultrasonic probe test device", *IEEE Ultrasonics Symposium*, pp. 1622-1624, 2006.
- [4] 한국 표준협회, KS B 0535, "초음파 탐촉자의 성능 측정 방법", 2005.
- [5] Kay Raum and William D. O'Brien, "Pulse-Echo

field distribution measurement technique for high-frequency ultrasound sources”, *IEEE Transactions on Ultrasound, Ferroelectric and Frequency Control*, Vol. 44, no. 4, 1997.

- [6] J. Jaros and J. Rozman, “Three-dimensional measured ultrasound field”, *Measurement Science Review*, Vol. 4, section 3, 2004.
- [7] 한국표준협회, KS P IEC 61102, “0.5 MHz~15 MHz

주파수 영역에서 수증 청음기를 사용한 초음파 음장 측정 및 특성화”, 2004.

- [8] S. D. Sagong, M. J. Jo, and B. Y. Choi, “Design of the calibration system for determining the sensitivity of ultrasonic transducer”, *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 5, no. 2, pp. 200-207, 1999.

노 시 철

- 2002년 인제대학교 의용공학과 졸업 (공학사)
- 2004년 인제대학교 대학원 의용공학과 졸업(공학석사)
- 현재 인제대학교 의용공학과 박사과정
- 주관심분야: 치료 초음파, 초음파 QA, cavitation 모니터링

김 주 영

- 2000년 인제대학교 의용공학과 졸업 (공학사)
- 2002년 인제대학교 대학원 의용공학과 졸업(공학석사)
- 현재 인제대학교 의용공학과 연구원
- 주관심분야: cavitation 모니터링, 초음파 조직유사 팬텀, 초음파 영상 처리

박 재 현

- 2007년 인제대학교 의용공학과 졸업 (공학사)
- 2010년 인제대학교 대학원 의용공학과 졸업(공학석사)
- 현재 김해 의생명센터 연구원
- 주관심분야: 진단 초음파, 이미지 프로세싱

김 진 수

- 2010년 인제대학교 의용공학과 졸업 (공학사)
- 현재 인제대학교 대학원 의용공학과 석사과정
- 주관심분야: 진단 초음파, 초음파 조직유사 팬텀, 초음파 가열특성 평가

강 정 훈

- 2010년 인제대학교 의용공학과 졸업 (공학사)
- 현재 인제대학교 대학원 의용공학과 석사과정
- 주관심분야: 초음파 신호영상 처리, 고강도 집속 초음파 시스템, 휴대형 초음파 진단장치

최 흥 호

- 1984년 인하대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
- 1986년 인하대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)
- 1991년 인하대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사)
- 현재 인제대학교 의용공학과 교수
- 주관심분야: 진단 초음파, 조직 특성화, 치료 초음파, cavitation