# 2차원 배열 수중청음기를 이용한 생체조직에서의 초음파 음장 전파특성 측정

Measurement of Ultrasonic Field Propagation Characteristics in Biological Tissues Using a Two-dimensional Array Hydrophone

하 강 열\*, 김 무 준', 현 병 국<sup>™</sup>, 채 민 구<sup>™</sup>, Xiu-Fen Gong<sup>™</sup> (Kang-Lyeol Ha<sup>™</sup>, Moo-Joon Kim<sup>™</sup>, Byung-Gook Hyun<sup>™</sup>, Min-Gu Chae<sup>™</sup>, Xiu-Fen Gong<sup>™</sup>)

\*부경대학교 물리학과, \*부경대학교 대학원 음향진동공학협동과정,

<sup>##</sup> State Key Laboratory of Mordern Acoustics, Institute of Acoustics, Nanjing University, China (접수일자: 2001년 5월 23일; 채택열자: 2001년 6월 13일)

음향특성이 균일하지 않는 생체조직은 특정의 형태 유지가 어렵기 때문에 종래의 극소형 수중청음기의 스캐닝 방법에 의한 초음파 음장 전파특성 측정이 곤란하다. 본 연구에서는 PVDF (Polyvinylidene fluoride) 압전막을 사용하여 2차원 배열 수중청음기를 제작하고, 그것에 의한 음장 측정 시스템을 구축한 후, 생체조직에 적용하였 다. 중심주파수 2.25 Mb여고 직경이 13mm인 원형평면 트랜스듀서에 의한 실험 결과, 구축한 시스템에 의해 비교적 정밀한 음장 측정이 가능한 것을 알았으며, 그 주파수에 대해 소와 돼지의 간에서는 각각 0.7~1.3 dB/cm (평균; 1.0 dB/cm), 1.0~1.8 dB/cm (평균; 1.6 dB/cm), 근육에서는 각각 0.9~2.9 dB/cm (평균; 2.1 dB/cm), 1.7~3.3 dB/cm (평균; 2.5 dB/cm)의 값을 갖는 감쇠계수의 공간적 분포를 측정할 수 있었다. 핵심용어: 초음파 음장, 생체조직, PVDF 압전막, 배열 수중청음기, 트랜스듀서, 감쇠 투고분야: 초음파 및 탄성파 분야 (4.4)

Because the biological tissue with inhomogeneous acoustic properties does not keep a particular shape, the measurement of propagation characteristics of ultrasonic fields by the conventional scanning method with a miniature hydrophone is difficult. In this study, a two-dimensional array hydrophone was fabricated using the PVDF (Polyvinylidene fluoride) piezo-electric film, and a ultrasonic field measurement system with it was established. For the acoustic field produced by a circular plan transducer with center frequency of 2.25 MHz and 13mm in diameter, it was possible to make a fairly accurate field measurement using the hydrophone system. The attenuation coefficients at 2.25 MHz for biological tissues were  $0.7 \sim 1.3$  dB/cm (average; 1.0 dB/cm) in bovine liver,  $1.0 \sim 1.8$  dB/cm (average; 1.6 dB/cm) in pig liver,  $0.9 \sim 2.9$  dB/cm (average; 2.1 dB/cm) in bovine muscles,  $1.7 \sim 3.3$  dB/cm (average; 2.5 dB/cm) in pig muscles.

Keywords: Ultrasonic field, Biological tissue, PVDF piezo-electric film, Array hydrophone, Transducer, Attenuation

ASK subject classification: Ultrasonic and elastic waves (4,4)

#### I. 서 론

초음파 트랜스듀서가 매질 중에 만드는 음장의 측정 및 해석은 그 트랜스듀서 자체의 특성평가는 물론, 그 트 랜스듀서에 의해 얻은 정보의 분석을 위해서 필수적인 것이다. 즉, 음장의 분석을 통하여 각종 초음파 장치의 효율적인 사용 및 성능이 우수한 초음파장치의 개발이 가능하게 된다. 또한, 매질 중을 전파하면서 변하는 음장 의 특성을 측정 및 해석함으로써 그 매질의 물성 파악이 가능하다. 따라서, 초음파 음장 측정 및 해석에 관한 연구 는 초음파 분야에서는 기초적이며 중요한 과제 중의 하나 로서, 오래 전부터 많은 연구가 수행되어져 왔다[1-4]. 그러나, 기 보고되어 있는 음장 연구결과는 대부분 물과 같은 균질 매질 또는 균질한 것으로 가정한 매질을 대상 으로 하는 것이어서 공간적인 음향 특성의 변화가 있는 비균질 매질에 적용하기 어렵다. 생체조직의 경우 음향 특성의 공간적인 변화가 크며, 그 원인이 복잡하기 때문 에 음장 전파 현상의 이론적인 해석이 어려울 뿐만 아니 라. 서료를 판 모양의 일정한 형상으로 유지시키기 어렵 기 때문에 종래의 극소형 수중청음기의 스캐닝 방법[5.6] 등에 의한 음장 분포의 직접적인 측정 또한 쉽지 않다. 따라서, 그 동안 다양한 생체조직에 대한 음향특성 측정 이 이루어졌음[7,8]에도 불구하고 조직 내에서의 그 특성 의 분포에 대한 정량적인 값의 보고는 찾기가 어렵다.

본 연구에서는 최근 초음파 음장 측정에의 적용 가능성 이 보고되고 있는 2차원 배열 PVDF (Polyoinylidence fluoride) 수중청음기[9]를 제작하고, 그것을 사용한 음장 측정 시스템을 구축, 그 측정정도를 파악한 후, 비균질 매질인 생체 조직에 적용하여 음향특성 중 하나인 감쇠의 조직 내에서의 분포 측정을 시도하였다. 생체조직으로서 는 소와 돼지의 간 및 근육을 대상으로 하였으며, 각 조직 을 통과한 중심주파수 2.25 毗인 원형 평면 트랜스듀서가 만드는 음장을 균질 매질인 물에서의 음장파 비교함으로 써 감쇠의 분포 측정이 이루어졌다.

#### II. 각스펙트럼법에 의한 음장해석 이론

그림 1과 같이 균절의 주변 매질 I내에 음향특성이 다 른 매질 II가 판 모양으로 놓여 있는 경우를 생각한다. z=0 인 단면상에 평면 음원이 있고, 그 2차원 음장 분포가 u<sub>0</sub>(x<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>;0)일 때, z=z<sub>1</sub> 인 단면의 음장





Fig. 1. Coordinate system of the ultrasonic field analysis.

u<sub>1</sub>(x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>; z<sub>1</sub>)은 각스펙트럼법에 의해 다음과 같이 주 어진다[10,11].

$$u_1(x_1, y_1; z_1) = F^{-1}[U_0(k_x, k_y; 0) H_1(k_x, k_y; \Delta z_{01})]$$
(1)

여기서,  $k_x$ 와  $k_y = x$ , y 방향의 파수성분,  $F^{-1}[] =$ 푸리에 역변환을 나타내며,  $U_0(k_x, k_y; 0) = u_0(x_0, y_0; 0)$ 를 2차원 푸리에 변환한 각스펙트럼, 즉,

$$U_{0}(k_{x}, k_{y}; 0) = \int \int_{\infty}^{\infty} u_{0}(x_{0}, y_{0}; 0) e^{-j(k_{x}x + k_{y}y)} dx dy$$
(2)

$$h_1(x, y; \triangle z_{01}) = -\frac{j\omega\rho_1}{2\pi} \frac{e^{jk_1r_{01}}}{r_{01}}$$
(3)

를 푸리에 변환한 각스펙트럼,

Ó

$$H_{1}(k_{x}, k_{y}; \Delta z_{01})$$

$$= \int \int_{\infty}^{\infty} h_{1}(x, y; \Delta z_{01}) e^{-j(k_{x}x + k_{y}y)} dx dy \qquad (4)$$

이다. 여기서, ρ<sub>1</sub> 및 k<sub>1</sub>는 매질 I의 밀도 및 전파방향에 대한 파수를 각각 나타내며, k<sub>1</sub>=√ $k_x^2 + k_y^2 + k_z^2$ , r<sub>01</sub> =√ $(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 + \triangle z_{01}^2$ , △ $z_{01} = z_1 - z_0$ 인 관계에 있다.

매질 Ⅱ를 통과한 음장  $u_2(x_2, y_2; z_2)$  는,

$$u_{2}(x_{2}, y_{2}; z_{2}) = F^{-1} [U_{0}(k_{x}, k_{y}; 0) H_{1}(k_{x}, k_{y}; \Delta z_{0})$$

$$T_{1}(k_{x}, k_{y}; z_{1}) H_{2}(k_{x}, k_{y}; \Delta z_{12}) T_{2}(k_{x}, k_{y}; z_{2})]$$
(5)

#### 78 한국음형학회지 제20권 제5호 (2001)



그림 2. 2차원 배열 PVDF 수중청음기의 구조와 실물 사진 Fig. 2. Geometry and photograph of the 2-D array PVDF hydrophone.

로 주어진다. 여기서,  $H_2(k_x, k_y; \Delta z_{12})$ 는 매질 II내에 서의 식 (3)과 동일한 형태로 표시되는 전달함수의 각스펙 트럼이며,  $T_1(k_x, k_y; z_1)$ 과  $T_2(k_x, k_y; z_2)$ 는 각각 매 질 I에서 II 및 매질 II에서 I로의 투과계수로서,

$$T_{i}(k_{x}, k_{y}; z_{i}) = \frac{2}{1 + \frac{(\rho_{i}c_{i})\sqrt{k_{i}^{2} - (c_{i+1}/c_{i})^{2}k_{x}^{2} - (c_{i+1}/c_{i})^{2}k_{y}^{2}}}{\rho_{i+1}c_{i+1}\sqrt{k_{i}^{2} - k_{x}^{2} - k_{y}^{2}}}$$
(6)

로 나타내어진다[11].

# III. 2차원 배열 PVDF 수중청음기와 음장 측정 시스템

2차원 배열 수중청음기는 생체조직을 그 위에 올려둠 으로써 일정 두께의 판 모양으로 형상을 유지시킬 수 있 어, 여기서는 그것을 제작하여 음장 측정을 수행하였다. 그림 2은 본 연구에서 제작한 2차원 배열 PVDF 수중청음 기의 구조와 실물 사진을 나타낸다. 압전체 소자는 그림 에서처럼 반경 r=1.0 m 인 원형의 8×8 배열 PVDF 고 분자 압전막이며, 소자간의 간격은 I=2.0 m 이다. 따 라서 압전체 소자가 있는 전체 영역은 약 30×30 m 이다. 동이 코팅된 두께 15 m 의 베크라이트를 배면체로 사용 하여 한쪽 단면에 예칭에 의해 그림 2(a)의 전극 패턴을 형성하고, 각 중심에 반경 0.2 m 의 구멍을 뚫어 리드선 을 삽입, 도전성 접착제에 의해 전극과 결합한 후, 에폭시 를 얇게 도포하여 한쪽 면만 전극이 형성되어 있는 두께 52 /m 의 PVDF 압전막의 전극이 없는 단면을 압착하면서 접착시켜 제작하였다. 접합층의 두꼐를 무시하였을 경 우, 제작한 수중청음기의 Mason 등가회로 해석에 의한 수신주파수 특성은 그림 3과 같이 중심주파수가 약 21 Wb 이며, 대역폭이 30 Wb 로 매우 넓게 나타난다.

본 연구에서의 주된 실험은 판 모양의 시료에 대하여, 그 시료의 통과에 따른 음압 분포의 차이를 구하는 것인 데, 그림 4는 이 실험을 위해 구축한 음장 측정 시스템의 구성을 나타낸다. 송신용 트랜스듀서는 3차원 스캐너에 장착되어 있는데, 그 스캐너는 최초의 Alignment 이후, x,y 방향으로는 각 요소사이에서의 음장의 미세 변화를 측정하기 위하여 압전 요소간의 간격인 4mm 이내에서 이 동시키고, z 방향으로는 시료를 원거리에 해당하는 적 절한 위치에 이동시키는데 사용하기 위한 것이다.

2차원 배열 수중청음기의 구동을 위해 제작한 64입력



그림 3. 베크리이트 배면체 PVDF 수중청음기의 수신 주피수 특성 Fig. 3. Receiving frequency response of a PVDF hydrophone with Bakelite backing.





1출력의 멀티프렉스는 컴퓨터에 의한 번지 제어에 따라 특정 요소의 출력을 수신용 증폭기로 내보내는데, 여기 서는 MC14067B IC 5개를 사용하여 구성하였고, 컴퓨터 와는 8255AP-5 PPI (Programable Peripheral Interface) IC를 사용하여 연결하였는데, 그 구성은 그림 5와 같다.

## IV. 측정 방법 및 정도 고찰

음장 측정에 앞서 64개의 소자 각각에 대하여 상대적인 수신 감도의 차이를 조사해 두어야한다. 본 연구에서는 균질의 수중에서 각 소자를 송신 트랜스듀서로부터 동일 한 지점에 위치시켰을 때 수신되는 신호의 상대적인 크기 를 구하여 각 소자간의 차이를 교정하였다. 제작한 수중



그림 5. 컴퓨터 인터페이스와 멀티플렉스의 회로도 Fig. 5. Circuit-diagram of the computer interface and multiplex.

청음기의 소자간에는 2.25 ₩ 에 대해 그림 6과 같이 최대 ±5 dB의 수신 감도 차이를 나타내었다.

음장 측정에 있어서는 먼저 송신용 트랜스듀서를 2차 원 배열 수중청음기의 중앙에 오도록 배치하여 각 요소로 부터 수신신호를 얻은 다음, 얻고자 하는 데이터의 공간 샘플링 간격과 소자 중심간의 간격 *d*를 고려하여 어동 회수 *N*을 결정하고, *△d = d/N를* 스탭 간격으로 하여 송신 트랜스듀서를 *x* 및 *y* 방향으로 *N* 스탭 이동시키 면서 압전소자가 있는 전체 영역 *D*에서 등간격으로 수 신신호를 얻을 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 *N*=5 로 하였는데, 이에 따른 공간 샘프링 간격은 0.8 m 이다. 그림 7은 본 측정에 사용한 송신 트랜스듀서가 균질

매질인 수중에서 원거리의 최소거리로 생각할 수 있는  $z=a^2/\lambda$  (*a*는 송신 트랜스듀서의 반경, *λ*=파장) 지점



그림 6. 압전 요소간의 수산 감도 차이 Fig. 6. Differences of receiving sensitivity among piezoelectric elements.



그림 7. 수중의  $z=a^2/\lambda$ 인 지점의 2차원 음장 Fig. 7. Two-dimensional acoustic fields on  $z=a^2/\lambda$  in water.



그림 8. 수중의  $z=a^2/\lambda$ 인 지점의 중심축상 음장 Fig. 8. Lateral acoustic fields on  $z=a^2/\lambda$  in water.

에 형성하는 D=4a 영역의 2차원 음장을 각스펙트럼법 을 이용하여 구한 것이다. 여기서 트랜스듀서는 베플된 원형 피스톤 음원으로 가정되었다. 이 음장은 미소크기 의 수중청음기를 미소간격으로 이동하면서 측정할 경우 에 얻어지는 수중청음기의 출력전압에 대한 크기변화로 볼 수 있다. 그러나 실제의 수중청음기는 유한 크기를 가 지므로 z=z1 인 단면에서 직경 2r인 수중청음기를 사 용하여 이동하면서 측정하는 경우, 임의 지점에서의 출 력 전압은 그 수중청음기 영역 내에 있는 음장의 적분에 비례한다고 볼 수 있다. 따라서, 그 출력 전압은

$$V_{o}(x, y) = C \int \int_{A} u_{2}(x_{2}, y_{2}; z_{2}) dA$$
(7)

로 나타내어진다. 여기서 *C*는 수신감도 및 증폭기의 중 폭도에 의해 정해지는 비례상수이며, *A*는 수중청음기의 면적음 나타낸다. 수중청음기가 원형인 경우 식 (7)은

$$V_{o}(x, y) = C \int_{0}^{2\pi} \int_{-r}^{r} u_{2}(x_{2}, y_{2}; z_{2}) \rho d\rho d\theta$$
(8)

이 되며, ρ=√x²+y² 인관계에 있다. 여기에서는 식 (8) 을 수치 적분에 의한 방법으로 계산하였는데 u₂(x₂, y₂; z₂) 를 충분히 작은 간격 (여기서는, 0.1 m 이하)으로 산출한 후, 각 소자의 영역에 해당하는 신호를 합하는 방법을 사 용하였다. 음장은 소자간에 생기는 출력전압의 상대적인 크기 차이에 해당하는 것으로 N=5일 때, 제작한 직경 2.0 m 인 수중청음기에 의해 측정되어져야할 중심축상 음장의 계산치를 그림 7의 각스뙉트럼에 의한 음장 (ASM) 및 실제 측정치와 비교하여 그림 8에 나타내었다. 그림 8로부터 제작한 수중청음기에 의해 비교적 정밀하게 음 장을 측정할 수 있음을 알 수 있다.

### V. 생체조직에서의 초음파 감쇠의 분포

원거리와 근거리 영역을 구분하는 거리인 *z=a<sup>2</sup>/λ* 부 근의 음장은 파면이 구면확산하기 직전에 해당하며, 음장 의 변화가 완만하게 생기는 영역이다. 생체조직 내에서의 초음파 감쇄의 분포를 얻기 위한 생채실험은 *z*=a<sup>2</sup>/λ인 지점에 수중청음기를 설치하고, 먼저 균질의 물에 대하 여 음장을 측정한 후, 그 위에 두꼐 △z=1 cm 인 생체사 료를 올려놓고 측정함으로써 이루어졌다. 따라서, 생체 시료는 근거리 영역 한계 내에 있어, 음파의 확산에 의한 손실은 적을 것으로 생각된다. 생체시료는 죽은지 12시간 이내의 신선한 것으로 냉장실에 보관하면서 사용하였는 데, 측정 시에는 가로, 세로, 높이가 4 cm × 4 cm × 1 cm 인 테두리 케이스에 맞도록 절단하여 케이스와 함께 2차원 수중청음기 위에 설치하였다. 여기서 사용한 근육은 대 퇴부에서 채취한 불소이근 (不隨意筋; smooth muscles) 이며, 절단시의 섬유질 (fiber)의 방향은 고려하지 않았 다. 측정 시의 온도는 22℃이었다. 일반적으로 20℃ 물



그림 9. 물/생체조직 경계에서의 투과손실 Fig. 9. Transmission loss on the boundary of water/biological tissues.

<b>표 1</b> .	물 및 생체/	시료의 음향 피	따라메터(2	3℃ 기준)""		
Table	1. Acoustic	parameters	of water	and biologica	al tissues (	(23°C) <sup>[13]</sup> .

Material	Velocity(m/s)	Density(kg/m³)	Acoustic Impedance(rayl)
Water*	1509	996	1.50×106
Bovine Liver*	1588	1050	1.67×106
Bovine Muscle**	1590	1080	1.72×106
Pig Liver***	1553	1064	1.65×106
Pig Muscle*	1593	1070	1.70×106

\* From reference [13]

\*\* Velocity from reference [13] and density from reference [14]

\*\*\* From reference [5]

에서의 음파의 감쇠는 25.0×10<sup>-15</sup>/f<sup>2</sup> Np·s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> (여 기서, f 는 주파수)로 주어지므로[12], 2.25 th 의 경우 약 0.1 dB/cm로 적다. 따라서 시료가 있을 때와 없을 때 측정한 음장의 차이는 주로 시료 표면 및 저면에서의 투 과에 따른 손실과 시료내부에서의 감쇠에 의한 것으로 볼 수 있다. 그 투과손실을 표 1과 식 (6)에 의하여 계산하 면 측정 영역에 해당하는 공간주파수에 대해서 그림 9와 같이 나타난다.

감쇠계수는 물과 생체시료를 통과한 음장의 차이로부 터 그림 9의 투과에 따른 손실을 보정하여 산출하였는데, 사용한 생체조직 내에서의 그 분포는 그림 10과 같이 측정 되었다. 이로부터 사용한 시료에 있어서 주파수 2.25 배 의 초음파는, 소와 돼지의 간에서 각각 0.7~1.3 dB/cm (평균; 1.0 dB/cm), 1.0~1.8 dB/cm (평균; 1.6 dB/cm), 근육에서는 각각 0.9~2.9 dB/cm (평균; 2.1 dB/cm), 1.7~ 3.3 dB/cm (평균; 2.5 dB/cm)의 범위에서 공간적 분포를 가지는 감쇠가 측정되었다.

생체 조직에 대한 감쇠는 시료 및 측정 조건에 따라 문헌 별로 상당한 차이가 있는데, Goss 등[7]이 종합한 자료에 따르면 여기서의 실험과 유사한 주파수인 2.1~2.3 心에 서 측정된 소의 간에서의 감쇠는 1.0±0.1 dB/cm, 2 w 에서 측정된 돼지의 간에서는 1.5 dB/cm이고, 2.1 w 에 서 측정된 소의 근육에서는 2.2~3.5 dB/cm로 나타나 있 어, 근육에서의 감쇠가 간에서 보다 다소 높다. 그림 10으 로 부터 그러한 경향과 함께 각각의 평균치가 문헌치와 유사함을 알 수 있다.

### Ⅵ. 결론

본 연구에서는 먼저, 2차원 배열 PVDF 수중청음기를 제작하여, 그에 의한 초음파 음장 측정시스템을 구축하 고, 균질 수중에서의 측정 정도를 검토하였다. 그 결과, 제작한 수중청음기에 의해 비교적 정밀한 초음파 음장 측정이 가능함을 알았다. 그것을 근거로 음향특성여 공 간적으로 균일하지 않는 생체조직인 소와 돼지의 간 및 근육을 대상으로 초음파 음장 전파 특성을 측정하였다. 그 결과, 2.25 毗 의 초음파에 대해 소와 돼지의 간에서는



그림 10. 생체조직에서의 감쇠계수 분포

Fig. 10. Distribution of attenuation coefficients in biological tissues.

각각 0.7~1.3 dB/cm (평균; 1.0 dB/cm), 1.0~1.8 dB/cm (평균; 1.6 dB/cm), 근육에서는 각각 0.9~2.9 dB/cm (평균; 2.1 dB/cm), 1.7~3.3 dB/cm (평균; 2.5 dB/cm)의 값을 갖는 감석의 공간적 분포를 측정할 수 있 었으며, 그 평균치는 문헌치와 유사함을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

이 논문은 1998년 한국학술진흥재단의 학술연구비에 의하여 지원되었음. (KRF 1998-001-E00632)

#### 참 고 문 헌

- W.L. Beaver, "Sonic Nearfields of a Pulsed Piston Radiator", J. Acous. Soc. Am., Vol. 56, pp. 1043-1048, 1974.
- 2. 鳥飼安生, "超音波音場と Lommel 關數", 東京大學 生 産技術研究報告, UDC 534 · 231-141, pp, 107-121, 1975.
- 3. E.G. Williams, "Numerical Evaluation of the Radiation from Unbaffled, Finite Ulates using FFT", J. Acous. Soc. Am., Vol. 74, pp. 343-347, 1983.
- 4, J.A. Jensen and N.B. Svendsen, "Calculation of Pressure Fields from Arbitrarily Shaped, Apodized, and Excited Ultrasound Transducers", *IEEE Trans. on UFFC*, Vol. 39, pp. 262-267, 1992.
- R.C. Wagg, J.A. Campbell, J. Ridder and P.R. Mesdag, "Cross-Sectional Measurements and Extrapolations of Ultrasonic Fields", *IEEE Trans. on Son. and Ultrason.*, Vol. Su-32, pp. 26-35, 1985.
- K. L. Ha, M. J. Kim and B. G. Hyun, "Estimation and Measurement of Forward Propagated Ultrasonic Fields in Layered Fluid Media", J. Acous. Soc. Kor., Vol. 19(2E), pp. 14-19, 2000.
- S.A. Goss, R.L. Johnston and F. Dunn, "Comprehensive Compilation of Empirical Ultrasonic Properties of Mammalian Tissues", J. Acous. Soc. Am., Vol. 64, pp. 423-457, 1978.
- S.A. Goss, R.L. Johnston and F. Dunn, "Compilation of Empirical Ultrasonic Properties of Mammalian Tissues. II", J. Acous. Soc. Am., Vol. 68, pp. 93-108, 1980.
- A. Hurrell and F. Duck, "A Two-Dimensional Hydrophone Array Using Piezo-Electric PVDF", *IEEE Trans. on UFFC*, Vol. 47, pp. 1345-1353, 2000.

- M.E. Schafer and P.A. Lewin, "Transducer Characterization using the Angular Spectrum Method", J. Acous. Soc. Am., Vol. 85, pp. 2202-2214, 1989.
- P.T. Christopher and K.J. Parker, "New Approaches to the Linear Propagation of Acoustic Fields", J. Acous. Soc. Am., Vol. 90, pp. 507-521, 1991.
- L.E. Kinsler, A.R. Frey, A.B. Coppens and J.V. Sanders, Fundamentals of Acoustics, 4th Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 2000,
- W.K. Law, L.A. Frizzell and F. Dunn, "Determination of the Nonlinerity Parameter B/A of Biological Media", Ultrasound in Med. & Biol., Vol. 11, pp. 307-318, 1985.
- E.L. Madsen, H.J. Sathoff and J.A. Zagzebski, "Ultrasonic Shear Wave Properties of Soft Tissues and Tissuelike materials", J. Acous. Soc. Am., Vol. 74, pp. 1346-1355, 1983.

#### 저자 약력

하 강 열 (Kang-Lyeol Ha)
 1978년: 부산수산대학 어업물리전공 졸업,
 1982년: 부산수산대학 대학원 수산물리전공 졸업,
 1990년: 일본 도오후쿠 (東北)대학 대학원 공학연구과 수료 (공학박사),
 1991년~ 현재: 부경대학교 물리학과 전임강사, 조교수, 부교수
 \* 주관심분야: 초음파 트랜수듀서의 제작 및 용용, 초음파 움장 측정 및 해석

김 무 준 (Moo-Joon Kim)
 1985년: 부산수산대학 응용물리학과 졸업 (이학사),
 1990년: 부산수산대학 대학원 응용물리학과 졸업 (이학석사),
 1994년: 일본 도오후쿠(東北)대학 대학원 공학연구과 수료 (공학박사),
 1994년~현재: 부경대학교 물리학과 전임강사, 조교수, 부교수
 ※ 주관상분야: 압전 진동자의 특성해석 및 초음파 트랜스듀서의 설계·제작

• 현 당 국 (Byung-Gook Hyun)
 1999년: 부경대학교 물리학과 졸업 (학시),
 1999년 ~ 현재: 동 대학원 음향진동공학과 석시과정
 ※ 주관심분야: 극소형 수중청음기 제작 및 초음파 음장 측정 및 해석

• 계 민 구 (Min-Gu Chae) 2001년: 부경대학교 물리학과 졸업 (학사), 2001년 ~ 현재: 동 대학원 음향진동공학과 석사과정 ※ 주관심분야: 초음파 음장 측정 및 측정시스템 인티페이스 구축 등

Xiu-Fen Gong

2001年現在:中國南京大學近代聲學國家重點實驗室 聲學研究所 教授 ※ 主關心分野:非線型音響 parameters 測定 및 應用 等