

논문 2002-11-3-02

 $LiTaO_3$ 단결정을 사용한 압전변압기의 개발

황성필*, 김무준**, 하강열**, 강갑중**

**Development of Piezoelectric Transformer Using
The Single Crystal of $LiTaO_3$**

Sung-Phil Hwang*, Moo-Joon Kim**,

Kang-Lyeol Ha**, Gab-Joong Kang**

요 약

본 연구에서는 온도에 따른 압전특성이 매우 안정적인 $LiTaO_3$ ($x-112^\circ y$) 단결정을 이용하여 압전변압기를 제작하고 그 특성을 분석하였다. 제작시 $LiTaO_3$ 단결정의 변환효율이 낮은 단점을 보완하기 위해 Lamé'-mode를 이용하여 길이와 폭의 비가 2:1인 압전변압기를 제작하고 PSpice를 이용하여 진동 모드 해석, 입력전압에 따른 출력전압특성 및 진동속도특성을 분석하였다. 제작한 압전변압기는 길이방향의 제 2차 고조파 주파수와 폭방향의 기본공진주파수가 결합된 290.83[kHz]에서 입력전압에 대한 최대출력전압이 나타났으며, 약 10배 정도의 승압비를 얻을 수 있었다.

Abstract

The single crystal of $LiTaO_3$ ($x-112^\circ y$) has very stable thermal characteristics in a piezoelectric transformer. In this paper, a piezoelectric transformer made of the crystal is newly designed and its operating characteristics are analyzed. The length of the transformer is determined as twice as its width for Lamé'-mode because the single crystal of $LiTaO_3$ has low electro-acoustic efficiency. The electric and vibrational characteristics of the transformer is simulated by the PSpice program, and its results are compared to experimental ones. As the results, the ratio of output voltage to input shows large than 10 at 290.83[kHz], which is the frequency coupled the 2nd harmonic for length and the fundamental for width of the Lamé'-mode transformer.

1. 서 론

최근 전자·정보통신기기는 소형화 및 경량화의 추세가 강하게 요구되어지고 있으며, 이로 인해 전자·정보통신기기의 전력공급원 역시 소형

화 및 경량화의 필요성을 동반하게 되었다. 그러나 기존의 권선형 변압기는 자심(magnetic core)에 의해 소형화 및 경량화에 제약을 받는다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 압전변압기가 주목받고 있다.

압전변압기는 1957년 미국의 C.E. 사의 C.A. Rosen에 의해 제안된 이래로 그 실용가능성에 대하여 꾸준한 연구가 진행되고 있으며, 주재료로 압전세라믹을 사용하고 있다. 이러한 압전세라믹 변압기는 TV, 집진기, 전자복사기, 노트북 PC 및 PDA 등의 제품에 사용되고 있으며, 그 이용범위가 점차 확대되고 있다. 압전세

* 부경대학교 대학원 음향진동공학과(Dept. of Acous. & Vib. Eng. in Pukyong National University)

** 부경대학교 물리학과(Dept. of Phys. in Pukyong National University)

<접수일자 : 2002년 1월 31일>

라믹 변압기는 권선형 변압기에 비해 구조가 단순하고, 소형화 및 경량화가 가능할 뿐만 아니라 고전압, 고효율의 출력특성을 가진다. 하지만 장시간 사용시 압전세라믹의 열화에 의해 진동특성이 변하여 출력전압의 감소 및 발열에 의한 수명 단축 등의 문제가 야기되고 있다.^[1] 따라서 본 연구에서는 온도변화에 따른 공진주파수의 변화율을 나타내는 온도계수(temperature coefficient)가 압전세라믹보다 훨씬 우수한 것으로 알려진, 즉 $-18[\text{ppm}/^\circ\text{C}]$ 의 낮은 온도계수^[2]를 가지는 $\text{LiTaO}_3(x-112^\circ y)$ 단결정을 이용하여 압전변압기를 제작하였다. 제작시 낮은 변환효율을 개선하기 위해 기존의 Rosen형 또는 Rosen 적층형과는 다른 Lamé'-mode를 이용하여 압전변압기를 제작하고 그 특성을 해석하므로써 실용가능성을 확인하였다.^[3,4]

2. 압전변압기의 제작

판상의 압전체에 있어 길이방향과 폭방향이 결합되어 진동하는 Lamé'-mode를 이용하여 압전변압기를 제작할 경우, 결합의 효율을 높이기 위해서는 변압기의 길이와 폭에 대한 컴플라이언스의 값이 일치해야 하므로, 다음의 방정식을 이용하여 그림 1에서와 같이 각 θ 의 회전에 따른 변화된 좌표축에 대한 컴플라이언스의 값을 계산하였다.^[5] 식 (1)은 동일한 원점을 가지는 단결정의 고정축 (x, y, z)과 시료의 결정축 (x', y', z')사이의 좌표변환 관계식을 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} x' &= l_1x + m_1y + n_1z \\ y' &= l_2x + m_2y + n_2z \\ z' &= l_3x + m_3y + n_3z \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, (l_1, l_2, \dots, n_3)의 값은 단결정의 고정축과 결정축 사이의 방향여현 성분을 나타내고 있으며, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{\partial x'}{\partial x} = \frac{\partial x_1'}{\partial x_1} \\ l_2 &= \frac{\partial y'}{\partial x} = \frac{\partial x_2'}{\partial x_1} \\ &\vdots \\ n_3 &= \frac{\partial z'}{\partial z} = \frac{\partial x_3'}{\partial x_3} \end{aligned} \quad (2)$$

따라서, 고정축과 결정축간의 텐서(tensor) 변환방정식은 식 (3)과 같이 주어지며, 식 (1), (2), (3)을 이용하면 좌표변환에 대한 컴플라이언스의 값을 유도할 수 있다.

$$s'_{IJ} = s'_{ijkl} = \frac{\partial x'_i}{\partial x_m} \frac{\partial x'_j}{\partial x_n} \frac{\partial x'_k}{\partial x_o} \frac{\partial x'_l}{\partial x_p} s_{mnop} \quad (3)$$

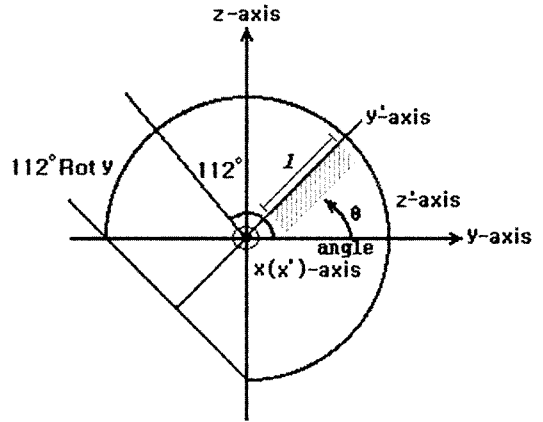


그림 1. $\text{LiTaO}_3(x-112^\circ y)$ 단결정.

Fig. 1. $\text{LiTaO}_3(x-112^\circ y)$ single crystal.

표 1. LiTaO_3 단결정의 컴플라이언스.

Table 1. Compliance values of LiTaO_3 single crystal.

	Compliance [m^2/N]
s_{11}^E	4.87×10^{-12}
s_{33}^E	4.36×10^{-12}
s_{12}^E	-0.58×10^{-12}
s_{13}^E	-1.25×10^{-12}
s_{44}^E	10.8×10^{-12}
s_{14}^E	0.64×10^{-12}
s_{66}^E	—

표 1은 LiTaO_3 단결정에 대한 컴플라이언스의 각 요소의 값을 나타내고 있다. 앞서 사용한 식들을 이용하여 LiTaO_3 단결정의 각 θ 의 회전에 따른 변화된 좌표축에 대한 컴플라이언스 s'_{11}^E 과 s'_{22}^E 는 그림 2에서 보는 바와 같이 각 θ

가 21.6° 또는 111.6° 에서 그 값이 일치하였으며, 계산결과로부터 압전변압기의 길이와 폭에 대한 음속이 동일함을 알 수 있다.

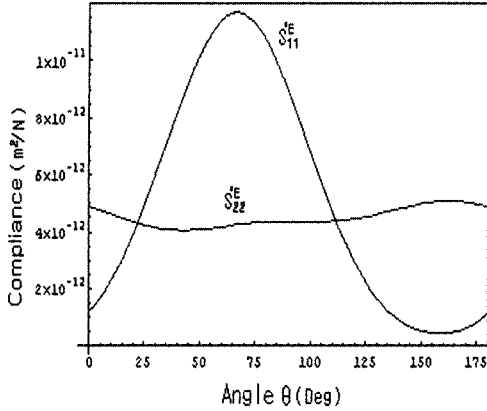


그림 2. 각 θ 의 회전에 따른 s'_{11}^E 와 s'_{22}^E 의 변화.
 Fig. 2. Change of s'_{11}^E and s'_{22}^E by rotated according to the angle θ .

그림 2의 계산을 토대로 각 θ 가 111.6° 인 지점에서 LiTaO₃ 단결정을 잘라 길이 l 과 폭 b 의 비가 2:1인 압전변압기를 그림 3과 같이 제작하였으며, 변압기의 전극면은 금으로 코팅한 후 길이 방향에 대하여 $l/2$ 되는 지점에서 전극을 분할하였다. 표 2는 제작된 LiTaO₃ 압전변압기의 물질 상수값을 나타내고 있다.

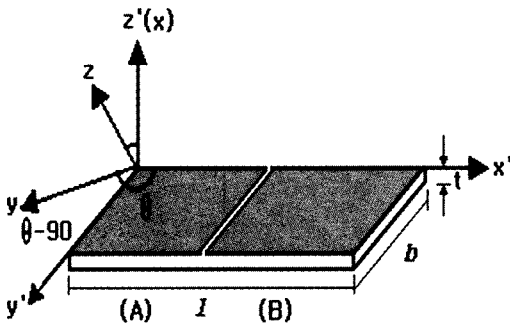


그림 3. LiTaO₃ 단결정을 이용한 압전변압기의 구조.
 Fig. 3. Construction of piezoelectric transformer made of LiTaO₃ single crystal.

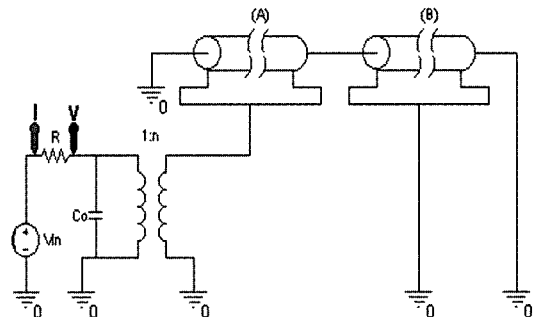
표 2. LiTaO₃ 단결정을 이용한 압전변압기의 물질 상수 값.

Table 2. Material constants of the piezoelectric transformer made of LiTaO₃.

Items	Values
Density $\times 10^3$ [kg/m^3]	$\rho = 7.46$
Length [mm]	$l = 20$
Width [mm]	$b = 10$
Thickness [mm]	$t = 0.4$

3. 시뮬레이션 및 실험

그림 3과 같이 제작된 압전변압기의 진동모드를 해석하기 위해 그림 4와 같이 PSpice 모델을 이용하였다.^[6] 그림 4 (a)는 x' 방향에 대한 진동모드를 해석하기 위한 PSpice 모델로서, 저항 R 은 계측기의 내부저항을 나타낸 것이며, 손실이 없는 전송선로 (A)와 (B)는 각각 전극분할된 압전변압기를 나타내고 있다. 시뮬레이션시 전송선로 (A)는 구동전압에 의해 구동되는 반면에, 전송선로 (B)는 단락 되기 때문에, 전송선로 (B)는 전기단이 없이 기계단으로만 나타내었다. 시뮬레이션 방법은 진폭 $1[V_p]$ 의 교류전원을 구동전압으로 인가하고 주파수를 100-350[kHz] 까지 변화시키면서 저항 R 에 걸리는 전류와 전압의 비를 계산하였다. 그림 4 (b)는 y' 방향에 대한 진동모드를 해석하기 위한 PSpice 모델로서 시뮬레이션 방법은 동일하다.



(a)

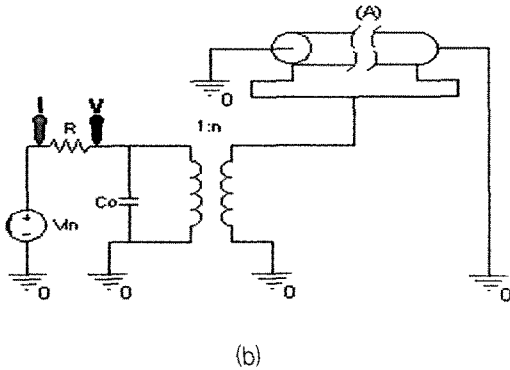


그림 4. 압전변압기의 PSpice 모델.

(a) x' 방향 (b) y' 방향

Fig. 4. Pspice model of the piezoelectric transformer.

(a) x' axis (b) y' axis

그림 5는 압전변압기의 전기적 특성을 측정하기 위한 장치도로서 우선 출력단을 단락 시킨 상태에서 네트워크 분석기(R3754A Network Analyzer)로 어드미턴스를 측정하였다. 그리고 입력단에 연결된 전원장치(AGF 301 Function Generator)에서 진폭 $1[V_r]$ 의 교류전원을 구동전압으로 인가하고 주파수를 100-350[kHz]까지 변화시키면서 출력단에 연결된 디지털 오실로스코프(VC-6275 Digital Oscilloscope)로 입력전압에 대한 최대출력전압과 그때의 주파수를 측정하였다.

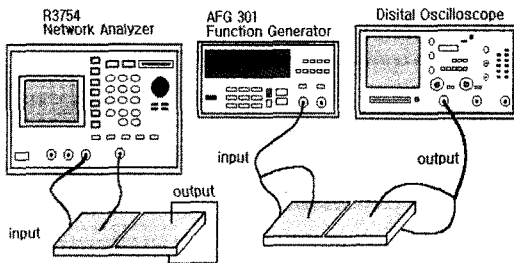


그림 5. 압전변압기의 전기적특성 측정 장치도.

Fig. 5. Experimental setup for measurement of electrical characteristics.

그림 6은 압전변압기의 진동속도를 측정하기 위한 장치도로서 단락 시킨 압전변압기의 출력단 단면의 중앙지점에서의 입력전압에 대한 진동속도를 Laser Vibrometer(AT 3500)로 측정하였다.

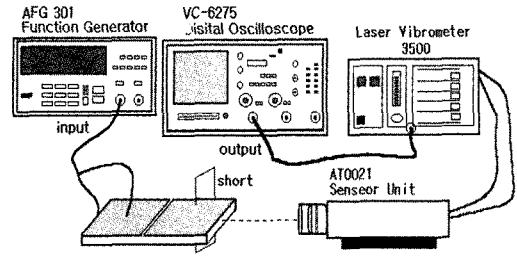
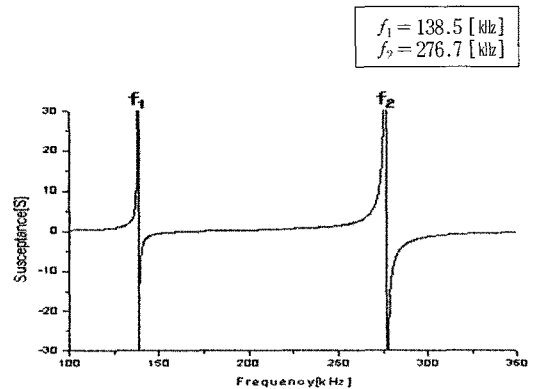


그림 6. 압전변압기의 진동속도 측정 장치도.

Fig. 6. Experimental setup for measurement of vibrational velocity.

4. 실험결과 및 고찰

압전변압기의 진동모드의 시뮬레이션 결과는 그림 7과 같다. 시뮬레이션 결과 y' 방향에 대한 횡진동의 기본공진주파수와 x' 방향에 대한 횡진동의 제 2차 고조파 성분, 즉 기본공진주파수의 배수의 주파수가 276.7[kHz]에서 일치하였다. 그림 8은 압전변압기의 어드미턴스를 측정한 결과로서 압전변압기의 기본공진주파수의 배수의 주파수가 290.83[kHz]에서 나타났다. 그림 7과 그림 8의 시뮬레이션 및 실험결과로부터 압전변압기의 기본공진주파수의 배수의 주파수 290.83[kHz]가 x' 방향의 횡진동의 제 2차 고조파 주파수와 y' 방향의 횡진동의 기본공진주파수가 결합된 모드임을 알 수 있다. 그리고 전극을 분할하고 있는 무전극 영역 때문에, 길이방향에 있어서 구동전극면과 비구동 전극면 사이의 크기의 차이가 생기는데, 그로 인한 것으로 사료되는 공진모드가 310[kHz]에서 나타나고 있다.



(a)

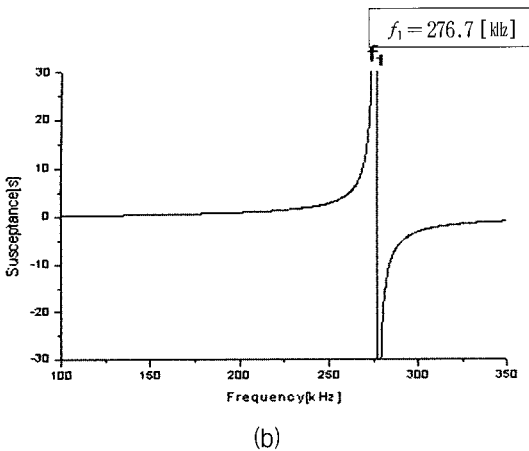


그림 7. Pspice 시뮬레이션 결과.
(a) x' 방향 (b) y' 방향

Fig. 7. Simulation results of PSpice.
(a) x' axis (b) y' axis

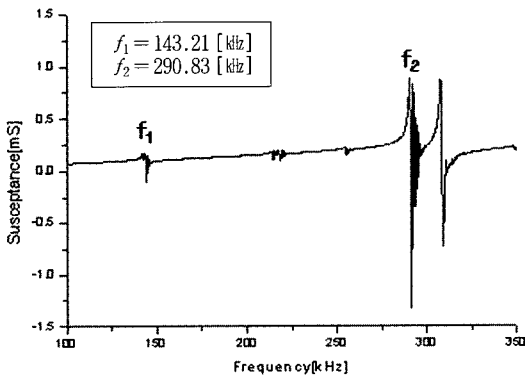


그림 8. 압전변압기의 어드미턴스 측정 결과.

Fig. 8. Measurement result of admittance characteristics.

압전변압기 자체의 기본공진주파수 143.21(kHz)와 그 배수의 주파수 290.83(kHz)에서 측정된 입력전압에 따른 출력전압은 그림 9와 같다. 실험결과 기본공진주파수에서는 입력전압이 1[V_p]일때, 출력전압의 비가 약 3.4배이고, 입력전압이 증가함에 따라 출력전압의 비는 증가되지 않고 포화되었다. 반면에, 기본공진주파수의 배수의 주파수에서는 입력전압이 증가함에 따라 출력전압의 비는 포화되지 않고 일정하게 증가하였으며, 입력전압에 대한 출력전압의 비는 약 10배로 나타났다.

그림 10은 압전변압기의 입력전압에 따른 출력측의 진동속도를 측정된 결과로서 입력전압이

증가함에 따라 진동속도는 일정하게 증가하였다. 즉, 압전변압기의 입력과위에 대한 출력과위는 주어진 입력전압범위에서 포화되지 않고 일정하게 증가함을 알 수 있다.

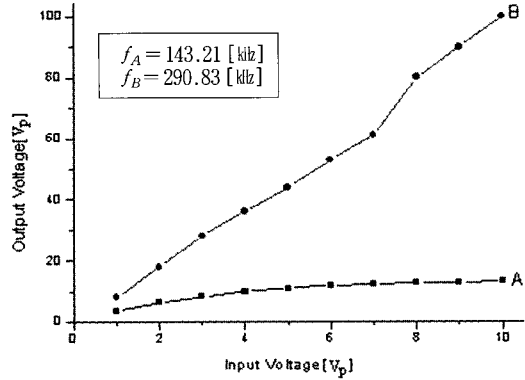


그림 9. 입력전압 변화에 대한 출력전압.

Fig. 9. Output voltages for changing input voltages.

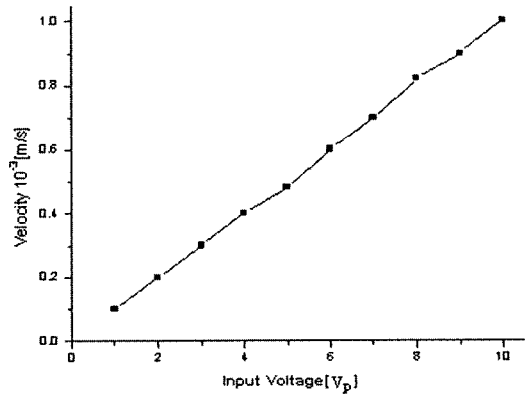


그림 10. 입력전압 변화에 대한 진동속도.

Fig. 10. Vibrational velocities versus input voltages.

5. 결 론

낮은 온도계수를 가지는 LiTaO₃(x-112° y) 단결정의 각 θ의 회전에 따른 컴플라이언스 s'₁₁^E과 s'₂₂^E의 값을 시뮬레이션 하여, 그 값이 일치하는 각 111.6° 인 지점에서 단결정을 잘라 길이와 폭의 비가 2:1인 압전변압기를 제작하였다. 시뮬레이션과 실험결과를 통한 압전변압기의 특성을 해석한 결과, LiTaO₃ 단결정을 이용한

압전변압기는 x' 방향에 대한 횡진동의 제 2차 고조파와 y' 방향에 대한 횡진동의 기본공진주파수가 결합된 290.83[kHz]에서 입력전압에 대한 최대출력전압이 나타났으며 승압비는 약 10배 정도로 나타났다. 또한 주어진 입력전압의 범위에서 진동속도는 포화되지 않고 일정하게 증가하므로, 입력파위에 대한 출력파위가 포화되지 않고 일정하게 증가함을 알 수 있었다.

이상의 시뮬레이션과 실험결과로부터 낮은 온도계수를 가지는 $LiTaO_3$ 단결정을 이용한 압전변압기의 가능성을 확인할 수 있었다.

이 논문은 2001년도 부경대학교 발전기금 학술연구비의 지원에 의하여 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

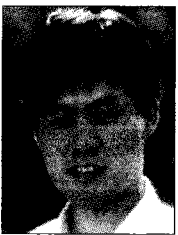
[1] 남성이, 이수호, 홍재일, 류주현, "두계방향 진동형 압전트랜스포머의 특성에 관한연구.", 한국전기전자재료학회 추계학술대회

논문집, pp.177-181, 1997.
 [2] 超音波便覽, 超音波便覽編集委員會 編, 丸善株式會社, pp.600-637.
 [3] C. A. Rosen, "Ceramic Transformer and Filters.", Proc., Electronic Symposium. pp.205-211, 1957.
 [4] K. Nakamura and T. Tsujimoto, "Lame'-mode Piezoelectric Resonators Using $LiNbO_3$ Crystals.", Trans. IEICE(C-I), J78-C-I, No.11, pp.494-499, 1995.
 [5] WARREN P. MASON, "Piezoelectric Crystal and Their Application to Ultrasonic.", D. Van Nostrand Company, Inc., New York, 1950.
 [6] W. M. Leach, "Controlled-source Analogous Circuits and SPICE Models for Piezoelectric Transducers.", Ultrason., Ferroelect., Freq., Contr., Vol. 41, pp.60-66, 1994.

著 者 紹 介

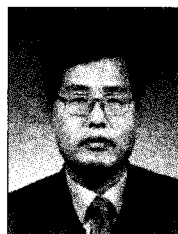


황 성 필
 2001년 부경대학교 물리학과 졸업(이학사)
 2001년~현재 동 대학원 음향진동공학과 석사과정
 주관심 분야 : 초음파 트랜스듀서들의 특성제어 및 성능개선.



김 무 준
 1985년 부경대학교(구 부산수산대학) 응용물리학과 졸업(이학사)
 1990년 부경대학교 대학원 응용물리학과 졸업(이학석사)
 1994년 일본 도오후쿠(東北)대학 대학원 공학연구과 수료(공학박사)

1994년~현재 부경대학교 물리학과 전임강사, 조교수, 부교수
 주관심 분야 : 압전 진동자의 특성해석 및 초음파 트랜스듀서들의 설계·제작



하 강 열
 1978년 부경대학교(구 부산수산대학) 어업학과 졸업(수산학사)
 1982년 부경대학교 대학원 수산물리학과 졸업(수산학석사)
 1990년 일본 도오후쿠(東北)대학 대학원 공학연구과 수료(공학박사)

1991년~현재 부경대학교 물리학과 전임강사, 조교수, 부교수, 교수
 주관심 분야 : 초음파 트랜스듀서들의 제작 및 응용, 초음파 음장 측정 및 해석

강 갑 중

1963년 경북대학교 사범대학 물리학과 졸업(이학사)
 1982년 부산대학교 대학원 물리학과(이학석사)
 1989년 영남대학교 대학원 물리학과(이학박사)
 현재 부경대학교 물리학과 교수
 주관심 분야 : MOS소자의 방사선에 의한 퇴화 원인 규명 및 방사선 영향 저감기법 연구