

디스크형 압전변압기의 전극 면적비에 따른 구동 메카니즘에 관한 연구

(A Study on the Mechanism with the Electrode Ratio of Driving and Generating Part of a Disk-Type Piezoelectric Transformer)

이종필* · 채홍인 · 홍진웅

(Jong-Pil Lee · Hong-In Chae · Jin-Woong Hong)

요 약

본 연구에서는 직경이 50[mm], 두께가 4.5[mm]인 디스크형 압전 변압기의 구동부와 발전부의 전극 면적비를 각각 1.4:1, 2:1 및 3:1로 분할하여, 부하 저항을 변화(100[Ω]~70[kΩ])시키면서 전기적 특성을 측정하고, 이를 토대로 한 압전변압기의 승압비에 관한 메카니즘을 정량적 및 정성적으로 해석하였다.

Abstract

In this study, a disk-type piezoelectric transformer was fabricated. Its diameter was 50[mm] and thickness was 4.5[mm]. The driving and generating electrode with their gap of 1[mm] were fabricated on the top surface. But the common electrode was fabricated on the whole bottom surface. The electrode surface ratio of driving and generating part on the top surface was the range of 1.4:1 to 3:1. We investigated the electrical characteristics with the variation of its thickness and the electrode surface ratio of driving and generating part in the range of load resistance of 100[Ω]~70[kΩ]. From the experimental results, their influence on the set-up voltage ratio were investigated quantitatively and qualitatively.

Key Words : Piezoelectric Transformer, Piezoelectric Ceramic

1. 서 론

압전 변압기는 1956년 C. E. Rosen의 실용적인 연구[1]를 시작으로, H. W. Katz와 P. A. van Berkum 등에 의해 한층 발전된 구조를 갖게 되면서 주목을 받게 되었다. 그 후, 압전 재료의 발전 경과와 더불어 수

백배 이상의 승압비가 가능하게 됨으로써, TV 후라이 백용 고압 전원으로서의 시도와 집진기용 고압 발생 장치로 일부 실용화, 그 외에도 고전압 발생 장치로의 응용에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다[2]~[5].

로젠형 압전 변압기는 고효율성, 경박단소(輕薄短小), 단순 구조, EMI가 없음, 제작의 용이성, 난연성(難燃性), 승압비의 가변성 등의 장점이 있지만, 고효율화 하기에는 구조적 한계가 있다. 최근에는 적층을 한다든지 또는 2개 이상의 압전변압기를 병렬 구동시킨다든지 하는 방법의 연구가 진행되어 왔으며, 한편으로는 효율을 개선하기 위해 압전변압기의 형상과 전극

* 주저자 : 광운대학교 전기공학과 공학박사
Tel : 043-275-9462, Fax : 043-275-9463
E-mail : jp1212@hanmir.com
접수일자 : 2005년 6월 10일
1차심사 : 2005년 6월 16일, 2차심사 : 2005년 7월 13일
심사완료 : 2005년 7월 22일

패턴을 변화시키는 연구가 이루어지고 있다[6-8]. 또한 로젠형의 압전변압기는 출력 특성이 작기 때문에 입출력 관계를 명확히 하기가 어려워 점도 있다.

본 연구에서는 디스크형 압전 변압기의 구동부와 발전부의 전극 면적비를 각각 1.4:1, 2:1 및 3:1로 분할하여, 부하 저항을 변화시키면서 전기적 특성을 측정하고, 이를 토대로 하여 디스크형 압전변압기의 거동에 대한 정량적 및 정성적 해석을 하였다.

2. 실험

2.1 시편제조

압전 변압기용 세라믹은 전통적인 세라믹 제조 공정에 따라 제조하였으며, 표 1의 물성을 가진 조성으로 직경이 50[mm], 두께가 4.5[mm]인 디스크형 압전 변압기를 제작하여 그림 1과 같이 입출력 전극비가 그림 1과 같이 각각 1.4:1, 2:1 및 3:1로 분할하였으며, 분극 처리는 180[°C]의 온도 하에서 구동부와 발전부 모두 두께 방향으로 3[kV/mm]의 전계를 30분간 인가하였다.

표 1. 압전세라믹의 특성
Table 1. Properties of Piezoelectric ceramic

$\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$	$\tan \delta$	k_p	d_{33}	Q_m
1200	0.3%	0.55	320	1200

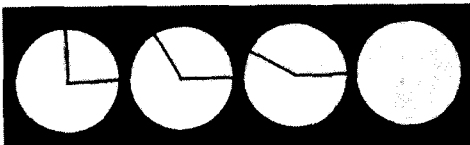
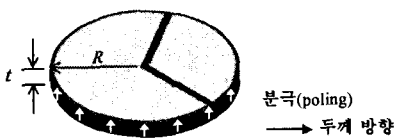


그림 1. 디스크형 압전 변압기의 전극패턴
Fig. 1. The electrode pattern of a disk-type piezoelectric transformer



$R = 25[\text{mm}]$, $t = 4.5[\text{mm}]$

그림 2. 디스크형 압전 변압기의 분극
Fig. 2. Poling of a disk-type piezotransformer

2.2 특성 측정

압전변압기의 전기적 출력 특성은 그림 3과 같이 회로를 구성하여 부하저항을 변화시키면서 측정하였다.

구동부 인가전원은 함수발생기(Agilent, 33120A)와 전력증폭기(NF, NF4015)를 사용하였으며, 구동부와 발전부의 전압 및 전류 측정은 오실로스코프(Tektronics, TDS 3032)로 측정하였다. 전력측정은 고주파 전력계(Yokogawa, WT1600)로 사용하였다.

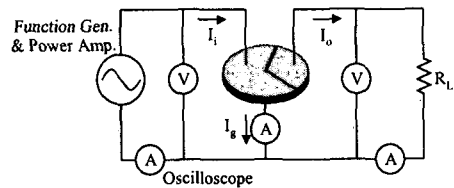


그림 3. 압전 변압기 특성 측정 회로
Fig. 3. The driving circuit of a disk-type piezoelectric transformer

3. 실험결과 및 고찰

입력 전압 3.60[V_{rms}]와 공진 주파수를 인가하면서 측정한 입·출력 전압과 입·출력 전류 및 각각의 위상차를 오실로스코프를 이용하여 측정하였으며, 이들 값으로부터 입·출력 전력을 계산하였다.

먼저, 입력 전압과 출력 전압 간의 위상차를 나타낸 것이 그림 4이다.

이 그림에서 보듯이 구동부 전극 면적이 감소함에 따라 또는 부하저항이 증가함에 따라 입·출력 전압 간 위상차는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 한편, 부하저항이 0[Ω](short)인 경우에 입·출력 전류 사이의 위상차를 측정한 결과 약 180[°]차이가 발생하였다. 이 같은 사항으로부터 디스크형 압전 변압기의 공진 모드와 특성에 대한 정보를 알 수 있는데, 즉 압전 변압기의 분극과 연관성이 있다고 볼 수 있다. 압전 변압기의 구동부 전극에 공진 주파수의 전압을 인가하면, 구동부에 기계적 변형이 발생되고 이것이 발전부 측으로 전달되어 다시 발전부에 기계적 변형을 일으키게 됨으로서 발전부에서는 전기적 출력으로 변환된다.

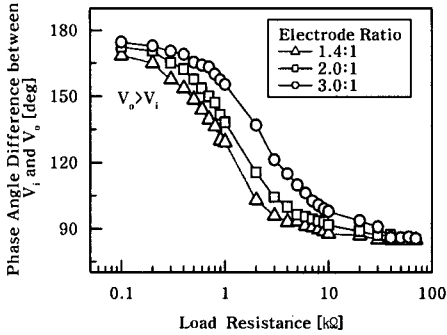


그림 4. 전극비열 부하저항에 대한 입·출력전압간 위상차
Fig. 4. Phase angle difference between input and output voltage as a function of load resistance with electrode ratio

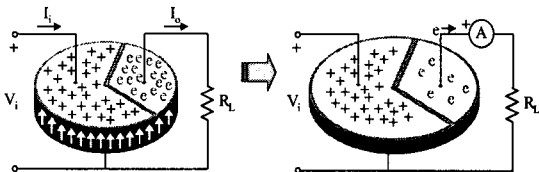


그림 5. 디스크형 압전변압기의 구동 메카니즘
Fig. 5. Mechanism of disk-type piezoelectric transformer

즉, 그림 5는 디스크형 압전 변압기의 정·역효과의 메카니즘을 도시한 것으로서, 디스크형 압전 변압기의 구동부 위 면에 양(+)의 반주기 전압이 인가되면 구동부는 분극의 방향을 고려할 때 반경 방향으로 신장될 것이며, 아울러 발전부 측도 구동부 측의 반경 방향으로 신장되는 형태가 될 것이다. 발전부가 신장되면 발전부의 분극의 크기가 줄어들게 됨으로써 발전부 전극에는 음전하가 유기됨을 의미한다.

한편, 그림 2의 디스크형 압전 변압기를 분극처리할 때, 그림 2와는 달리 구동부나 발전부 모두 분극의 방향을 반대로 분극시켜 입출력간 위상차를 측정할 결과도 위에서 언급한 바와 같다.

그림 6은 압전 변압기의 구동부에 입력 전압 3.60[V_{rms}], 부하저항별 각각의 공진 주파수를 인가하면서 오실로스코프로 측정된 승압비(=V_o/V_i)를 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 승압비는 구동부의 전극 면적이 커질수록 증가할 뿐만 아니라 부하저항이 커질수록 증가함을 알 수 있다.

그림 6에서 나타난 승압비의 경향을 입출력 전극

비열과 부하저항 변화를 나누어 생각해보자.

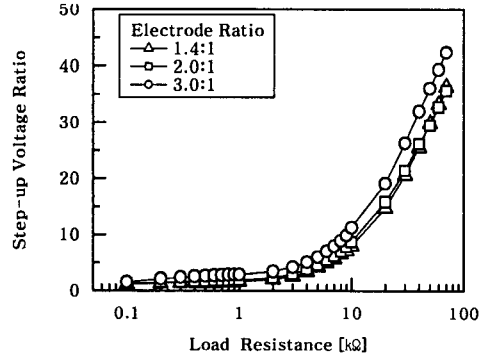


그림 6. 전극비열 부하저항 변화에 따른 승압비
Fig. 6. Step-up voltage ratio versus load resistance with electrode ratio

우선, 구동부의 전극 면적이 커짐에 따라 승압비가 증가하는 것은 다음과 같이 해석될 수 있다.

구동부의 전극 면적이 클수록 기계적 변형은 그만큼 크게 발생할 것이며, 따라서 발전부로 전달되는 기계적 변형이 크게 작용하여, 그림 5에서 보듯이 2차측의 단위시간당 생성 전하량이 증가하여 승압비가 증가하는 요인이 되는 것으로 볼 수 있다. 그리고 구동부의 전극 면적에 따른 고유의 공진 특성은 상이할 것이며, 압전특성상 구동부의 전극 면적이 클수록, 발전부의 전극 면적이 작을수록 양호해진 것으로 볼 수 있다. 이는 임피던스 분석기에 의해 구동부의 전극 면적을 변화시키면서 부하저항별 측정된 공진 저항을 보면(그림 7)알 수 있는데, 구동부의 전극 면적이 증가함에 따라 공진저항이 작아지는 즉, 공진의 첨예도가 좋아지게 됨으로써 공진 특성은 양호해진 것으로 해석된다. 또한 그림 8에서 보는 바와 같이, 임피던스 분석기로 측정된 부하저항별 구동부의 최대·최소 서셉턴스 주파수의 경향을 볼 때, 구동부의 면적이 증가하게 됨은 1차적으로 변위를 일으키는 구동부의 압전적 역할이 크게 됨을 확인할 수 있다. 따라서 구동부의 면적이 증가할수록 승압비는 증가하게 된 것으로 해석된다.

다음으로 부하저항별 승압비의 경향은 그림 6에서 보여준 바와 같이 부하저항이 증가함에 따라 승압비도 증가하는 경향을 보여주고 있다.

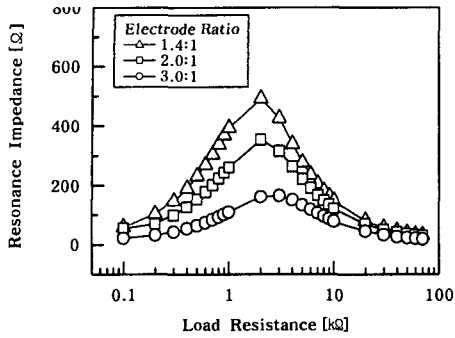


그림 7. 전극비별 부하저항에 따른 공진 임피던스
Fig. 7. Resonance impedance versus load resistance with electrode ratio

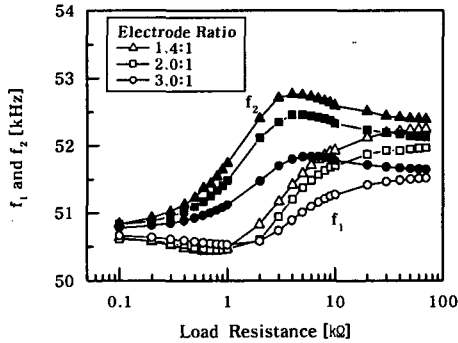


그림 8. 구동부의 최대 서셉턴스 주파수(f_1)와 최소 서셉턴스 주파수(f_2)
Fig. 8. f_1 and f_2 of driving part of piezoelectric transformer

그림 4에서 보았듯이, 부하저항이 증가함에 따라 위상차가 점점 감소하게 되는데, 이는 발전부를 일정한 크기의 전류원으로 보았을 때, 부하저항이 증가할수록 부하저항을 통해 흐르는 출력 전류의 크기가 감소할 것이며(그림 9 참조), 이에 따라 발전부 전극에 남아있는 전하의 양이 점점 증가함으로써 위상차가 점점 감소되는 것으로 보여지며, 또한 발전부의 잔류 전하가 많은 만큼 승압비는 증가하게 될 것이다. 이는 무부하에서 승압비가 가장 크게 나타나는 것과 동일한 현상으로, 그 만큼 구동부와 발전부의 한 몸체에 대한 공진 특성이 양호해진 것으로 볼 수 있다.

발전부에 남아있는 전하의 양이 부하저항의 크기에 비례한다는 사실은 임피던스 분석기를 통해 얻은

어드미턴스의 공진-반공진 특성 곡선에서 확인할 수 있었다. 부하저항이 3[kΩ] 이상일 때는 그림 10에서 보듯이 미소하지만 뚜렷한 hump가 관찰되었는데, 공진과 반공진 주파수 곡선 사이의 약 52[kHz] (전극비가 3.0 : 1인 경우) 부근에서 발생했으며, 공진 주파수로부터 반공진 주파수 사이의 범위는 유도성이므로 용량성 성분이 존재해야 hump가 발생할 수 있다. 부하저항이 커지면서 이 hump의 크기도 증가하였는데, 이는 발전부의 전하의 양이 점점 증가하여 구동부의 전극과 발전부의 전극 사이에 점점 용량성이 증가하였기 때문으로 볼 수 있다. 그리고 출력 전류와 출력 전압 사이의 위상차(그림 9 참조)도 부하저항이 3[kΩ] 이상부터 생겨 점점 커짐을 확인할 수 있었다.

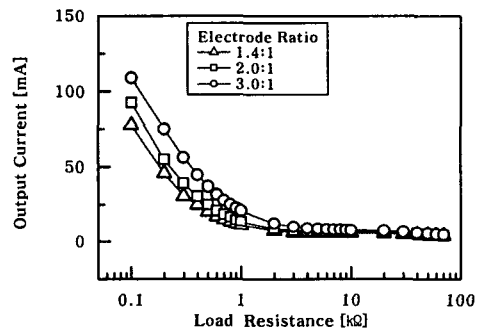


그림 9. 전극비별 부하저항에 따른 출력 전류
Fig. 9. Output current versus load resistance with electrode ratio

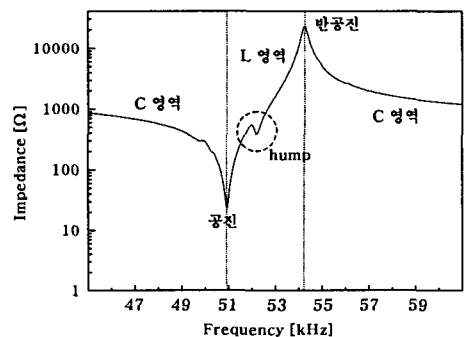


그림 10. 공진과 반공진 주파수 사이의 hump
Fig. 10. Hump between resonance and anti-resonance frequency

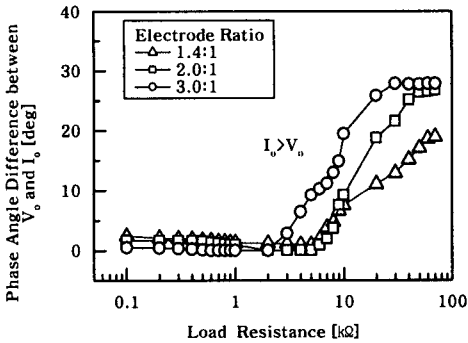


그림 11. 전극비별 부하저항에 대한 출력 전압과 출력 전류간 위상차
 Fig. 11. Phase angle difference between output voltage and current as a function of load resistance with electrode ratio

그림 12에서 그림 14까지는 오실로스코프로 측정 한 구동부의 입력 전류 I_i , 하면의 공통단자에 흐르는 전류 I_g 및 I_i 와 I_g 사이의 위상차 θ 를 나타낸 것이다.

부하저항이 100[Ω]~2[kΩ]인 범위에서의 입력 전류는 부하저항이 작을수록 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 구동부의 공진 특성에 미치는 발전부의 영향이라 보여지며, 즉 구동부는 공진 전압이 인가 되어 기계적 변형을 일으키는 역할을 담당하므로, 부하저항이 작을수록 발전부에서 생성된 전하가 쉽게 빠져 나가게 되어, 구동부와 발전부는 한 몸체와 같이 공진할 것이므로 공진 특성은 양호해지는 것으로 볼 수 있으며, 따라서 공진 저항의 감소에 의한 입력전류의 증가라 생각된다. 그러나 2[kΩ] 또는 3[kΩ] 이후의 부하저항부터는 입력 전류의 크기가 다시 증가하고 있는데, 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 부하저항이 클수록 부하저항에 흐르는 출력 전류의 크기가 감소하여 발전부 전극에 남아있는 전하량이 서서히 증가한 것에 기인된 것으로 보여진다. 발전부에 전하가 많이 남아 있을수록 구동부가 발전부를 공진시켜 전하를 생성하도록 하는 역할이 감소되어 구동부 자체만의 특성과 관련성이 있을 것이므로, 이 때도 공진 특성은 양호해질 것이다. 이는 앞에서 설명한 임피던스 분석기로 측정한 그림 7과 8의 경향과 일치하며, 그 결과 입력전류도 증가한 것으로 해석된다.

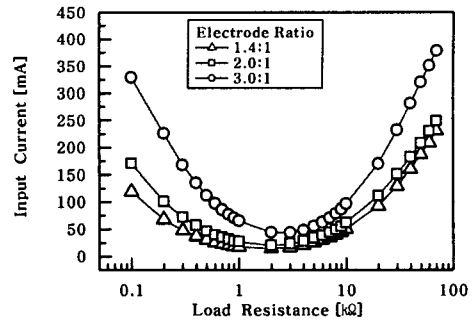


그림 12. 전극비별 부하저항에 따른 입력 전류
 Fig. 12. Input current versus load resistance with electrode ratio

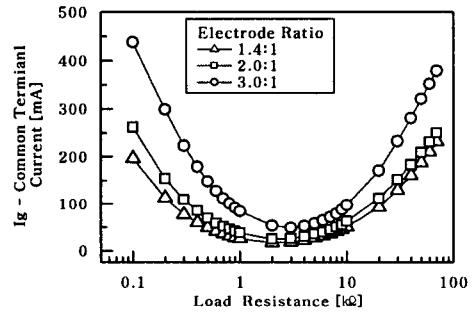


그림 13. 전극비별 부하저항에 따른 공통 단자 전류
 Fig. 13. Common terminal current versus load resistance with electrode ratio

한편, 공통 단자에 흐르는 전류 I_g 의 경향은 입력 전류의 경향과 유사함을 보였으며, 이들 전류 값들도 구동부의 전극 면적이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타내고 있다.

입력전류 I_i 와 출력전류 I_o 를 다음과 같이 놓으면,

$$I_i = I_{im} \sin \omega t \quad (1)$$

$$I_o = I_{om} \sin(\omega t - \alpha) \quad (2)$$

단, α 는 I_i 와 I_o 사이의 위상차

이 되고, 공통 단자에 흐르는 전류 I_g 는

$$\begin{aligned} I_g &= I_i - I_o \\ &= I_{im} \sin \omega t - I_{om} \sin(\omega t - \alpha) \\ &= \sqrt{(I_{im} - I_{om} \cos \alpha)^2 + (I_{om} \sin \alpha)^2} \sin(\omega t + \theta) \quad (3) \end{aligned}$$

$$\tan \theta = \frac{I_{om} \sin \alpha}{I_{im} - I_{om} \cos \alpha} \quad (4)$$

(θ : I_i 와 I_g 사이의 위상차)

과 같게 된다.

공통 단자 전류 I_g 는 입력 전류 값이 크고 출력 전류 값이 작으므로 입력 전류의 경향과 유사하게 나타나며, 측정된 I_i , I_o 및 I_i 와 I_o 사이의 위상차 α 를 식 (3) 및 식 (4)에 대입하여 계산한 I_g 의 값과 위상차 θ 값은 그림 13과 그림 14의 측정값과 거의 차이가 없음을 확인하였다.

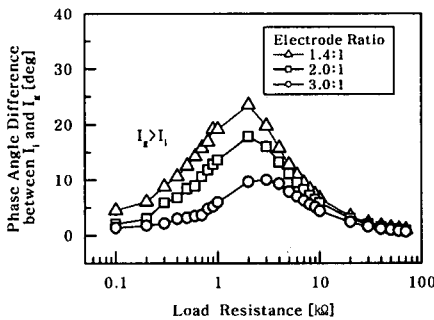


그림 14. 전극비별 부하저항에 따른 입력 전류와 공통 단자 전류간 위상차

Fig. 14. Phase angle difference between input and common terminal current as a function of load resistance with electrode ratio

4. 결 론

본 연구에서는 디스크형 압전 변압기의 구동부와 발전부의 전극 면적비별 부하 저항을 변화시키면서 전기적 특성을 측정하고, 이를 토대로 하여 디스크형 압전변압기의 거동에 대한 정량적 및 정성적 해석을 한 결과 다음과 같다.

구동부의 전극 면적이 커짐에 따라 승압비가 증가하였으며, 2차측의 단위시간당 생성 전하량이 증가하여 승압비가 증가하는 요인으로 해석되었다.

또한, 부하저항이 증가함에 따라 승압비도 증가하였다. 부하저항이 증가함에 따라 입출력 전압간의 위상차가 점점 감소하게 되는데, 이는 발전부를 일정한 크기의 전류원으로 보았을 때, 부하저항이 증가할수록 부하저항을 통해 흐르는 출력 전류의 크기가 감소하며, 이에 따라 발전부 전극에 남아있는 전

하의 양이 점점 증가함으로써 위상차가 점점 감소하며, 발전부의 잔류 전하가 많은 만큼 승압비는 증가하게 되는 것으로 해석된다. 무부하에서 승압비가 가장 크게 나타나는 것과 동일한 현상으로, 그 만큼 구동부와 발전부의 한 몸체에 대한 공진 특성이 양호해진 것으로 볼 수 있다.

References

- [1] C. A. Rosen, Electrical Conversion Apparatus, US Patent No. 2,975,354, 1961.
- [2] T. Kawada, Corona discharge apparatus for particle collection, US Patent No. 3,900,766, 1975.
- [3] Chong C Lim, Piezoelectric ultor voltage generator for a television receiver, US Patent No. 4,459,505, 1975.
- [4] 김희준, "압전 트랜스포머를 이용한 전력변환기 회로", Proceedings of KIEE, Vol. 45, No. 3, pp. 16-22, 1996.
- [5] H. Sasaki, "Development of high voltage DC power supply using piezoelectric transformer", NEC技術報告, Vol. 50, No. 10, pp. 80-83, 1997.
- [6] Inoue T, Yamamoto M, Kawashima S, and Hirose S, "Third Order Longitudinal Mode Piezoelectric Ceramic Transformer for High-Voltage Power Inverter", IBICE Transactions on Electronics, Vol. E81-C, No. 7, pp.1128-1135, 1998.
- [7] Tagami S, Kawai J and Fukuoka A, Piezoelectric transformer having improved electrode arrangement, US Patent No. 5,402,031, 1995.
- [8] Sato M, Wakatsuki N, Ueda M, Hasegawa H, Piezoelectric transformer showing a reduced input impedance and step-up/step-down operation for a wide range of load resistance, US Patent No. 5,424,602, 1995.

◇ 저자소개 ◇

이종필 (李鍾弼)

1962년 1월 21일생. 1990년 원광대학교 전기공학과 졸업. 1998년 광운대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 광운대학교 전기공학과 졸업(박사). 1994~2005년 현재 청주 한국전기학원 원장.

채홍인 (蔡洪仁)

1960년 12월 2일생. 1984년 충북대학교 전기공학과 졸업. 1986년 충북대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 충북대학교 전기공학과 졸업(박사). 1993~2005년 현재 주성대학 방사선과 교수.

홍진웅 (洪眞雄)

1955년 2월 23일생. 1982년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1984년 광운대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 광운대학교 전기공학과 졸업(박사). 1989~2005년 현재 광운대학교 전기공학과 교수.