

# 고전압 펄스 발생기를 위한 강유전체의 전압 출력 특성

## The Characteristics of the Output Voltage Ferroelectrics for High Voltages Pulse Generators

장 동 관\* · 최 순 호\*\* · 황 선 목\*\*\* · 허 창 수†

(Dong-Gwan Jang · Sun-Ho Choi · Sunl-Mook Hwang · Chang-Su Huh)

**Abstract** - High power pulse generating technology is to accumulate the energy for relatively long and then to create a strong force by emitting the energy very fast. High power pulse generating technology has recently been using in various fields like environments, industry, research, military and so on. Numerous studies about high power pulse generators have already been performed and commercialized in various conditions. However, in aspect of their size and weight, it is hard to carry the generators which currently have been developed. For these reasons, in nations like America or Russia, the researches have been performed for Ferroelectric Generators(FEG), which have relatively simple structure and are economical. To realize the ferroelectric generator, in this study, we selected the PZTs which have different physical properties respectively, and then shocked them using explosives. The PZT samples with volumes of  $0.31 \sim 0.94\text{cm}^3$  were depolarized by shocked and produced the waveform that have peak voltages of  $4.28 \sim 15\text{kV}$ . The lowest relative permittivity sample generated much higher peak voltage. And sudden voltage drops which seem to be caused by dielectric breakdown were observed in some experiments using low young's modulus samples. Also, increase in thickness led to increase in peak voltage, but the ratio of the voltage rise did not reach the ration of the thickness increase.

**Key Words** : Ferroelectrics, Pulse Generators, PZT

### 1. 서 론

고출력 펄스 발생기술은 환경, 산업, 연구, 군사 분야 등에서 다양하게 사용되고 있다. 특히 군사 분야에서는 적들의 장비를 무력화 시키거나 아군 장비들의 EMP에 대한 내성을 시험하는데 고출력 펄스 발생기가 사용된다. 고출력 펄스 발생기에 대해서는 이미 많은 연구가 이뤄져있고, 다양한 형태로 상용화 되어 있다. 그러나 현재 개발 되어 있는 펄스 발생기들은 크기가 크고 무거워 휴대가 어렵다. 또한 외부로부터 별도의 전원 공급을 필요로 한다. 특히나 군사적 목적으로 사용할 경우, 이와 같은 특징들이 큰 장애 요인으로 작용할 수 있다. 강유전체를 사용한 고출력 펄스 발생기는 상대적으로 구조가 간단하고 부피가 작다. 게다가 외부로부터의 전원 공급을 필요로 하지 않는다. 때문에 강유전체를 이용한 기술은 고출력 펄스 발생기의 휴대성을 극대화 할 수 있을 것이다. 강유전체를 사용한 고출력 펄스 발생기를 구현하기 위해서는 강유전체의 에너지변환 특성에 대한 연구가 선행되어야 한다. 이러한 연구들은 수십 년 전 미국의 Sandia National Laboratory에서 시작되어, 지금까지

이어져오고 있다. 여러 종류의 강유전성 세라믹들 중 PZT(lead zirconate titanate)와 티탄산바륨(barium titanate)이 기계적 충격을 받았을 때, 펄스 전압과 펄스 전류가 발생했다는 내용이 1957년에 처음으로 보고되었다[1]. 이후, 1960년에서 1980년 사이에 강유전성 물질들이 충격을 받았을 때의 물리적 또는 전기적 특성들을 알아보기 위한 연구들이 진행되었다. 이 당시에는 압축가스 또는 화약을 이용하여 탄체를 가속시켜 이 탄체가 강유전성 물질을 타격하는 방식이 주로 사용되었다[2-12].

본 연구에서는 내부 조성을 달리 제작하여 전기적, 기계적 특성이 각기 다른 PZT 샘플 4종류와 조성과 직경은 같고 두께가 다른 샘플 4종류를 사용하여 일정한 압력을 주었을 때 변화되는 고전압 펄스를 비교·분석하였다. 결과적으로 고전압 펄스 발생기에 사용되는 PZT 선택에 있어 안정적인 고출력 발생을 위한 조건을 알아보았다.

### 2. 본 론

#### 2.1 실험재료

PZT는 지르콘산염( $\text{PbZrO}_3$ )과 티탄산염( $\text{PbTiO}_3$ )의 고용체로써 화학식의 머리 글자를 따서 PZT라 한다. 실험은 국내에서 생산된 제품을 사용하였고 표 1와 같이 PZT 직경이 10mm이고 조성비율이 다른 4종류와 각각 샘플의 두께(2배 ~ 3배)를 달리하여 실험을 진행하였다. PZT 제조업체에서는 자체적으로 제작하는 PZT의 조성비율이나 도핑물질을 공개하지 않기 때문에 전기적·기계적 특성만을 표 2와 같이 정

\* General Motors Korea

\*\* Dept. of Electrical Engineering, INHA University

\*\*\* Hanwha Corporation

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering  
INHA University, Korea

E-mail : cshuh@inha.ac.kr

Received : December 30, 2011; Accepted : August 27, 2013

리하였고 이름을 Model A, Model B, Model C, Model D라고 명명하였다.

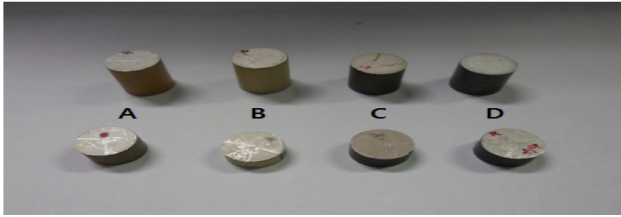


그림 1 실험에 사용된 PZT 샘플  
Fig. 1 The PZT Samples used in these experiments

표 1 PZT 샘플의 두께  
Table 1 The Thickness of the PZT Samples

Diameter : 10mm				
	PZT model No.			
	A	B	C	D
Thin (mm)	5	4.5	4	6
Thick (mm)	10	10	12	12

표 2 실험에 사용된 PZT의 물리적 특성  
Table 2 The physical properties of the PZTs used in this experiment

	PZT model No.			
	A	B	C	D
$\epsilon_r^{T_{33}}$	1350	1150	3400	1700
$k_p$	0.58	0.54	0.60	0.60
$d_{33}$ ( $\times 10^{-12}$ C/N)	315	250	620	374
$g_{33}$ ( $\times 10^{-3}$ Vm/N)	26.4	24.6	21.9	24.8
$T_C$ (°C)	320	300	200	374
$Y$ (GPa)	60	74	53	46

여기에서,  
 $\epsilon_{r,33}$  : 비유전율,  $Y$  : 영률,  $T_C$  : 큐리온도,

$k_p$  (진기기계결합계수) :

$$\sqrt{\frac{\text{저장된 기계 에너지}}{\text{공급된 전기 에너지}}} \quad \text{또는} \quad \sqrt{\frac{\text{저장된 전기 에너지}}{\text{공급된 기계 에너지}}}$$

$d_{33}$  (압전상수) :  $\frac{\text{단락 회로 전하밀도}}{\text{가해진 압력}} [C/N]$

$g_{33}$  (압전상수) :  $\frac{\text{개방 회로 전계}}{\text{가해진 압력}} [V/N]$  이다.

실험에 사용된 PZT는 전극면과 수직인 방향으로 분극 되었다. 여기에서 주의할 점은 PZT는 물체의 물리적 성질이 방향에 따라 달라지는 이방성(anisotropy)을 가지고 있기 때문에 압력을 가하는 방향에 따라 실험값이 달라질 수 있다.

이런 이유로 각각의 축들을 식별할 방법이 필요한데 축의 번호를 부여하여 이 문제를 해결한다. 아래첨자를 이루는 두자리 숫자 중 앞에 있는 숫자는 전계가 형성되는 방향을 말하고, 뒤에 있는 숫자가 기계적 압력이 가해지는 방향을 말한다.

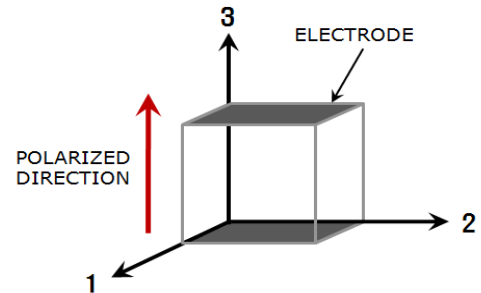


그림 2 PZT의 축방향 정의  
Fig. 2 Defined in the axial direction of the PZT

### 2.2 PZT 충격 장치와 모듈장치

PZT에 충격을 가하기 위해서는 다양한 방법이 사용되지만 일반적으로 순간적인 큰 힘을 PZT에 가하기 위해서는 무거운 물체의 자유낙하나 화약, 압축공기(대형 에어건)등을 사용한다. 본 실험에서는 재현성이 좋고 소규모로 연구를 진행할 수 있으며, 산업용으로 널리 사용되어 구매가 용이한 저급화약류를 사용하였다. 고급화약류(다이너마이트, TNT 등)는 높은 파괴작용을 가지고 있지만, 저급화약류(코르다이트)는 점화가 용이하고 발사력이 강한 특징으로 가지고 있다. 일정한 화약을 사용하고 압력을 가하기 위해 네일건(H사 DX460) 발사부와 실험 지그를 제작하였고 실험 1회당 0.2g의 코르다이트 화약을 사용하였다. 네일건을 작동하면 파이프 모양을 한 폭발 챔버의 한쪽 끝에서 화약이 폭발하면서 화약과 맞닿아있던 강철피스톤이 가속되고 그 피스톤이 PZT 모듈의 윗부분을 가격하게 된다. 강철피스톤이 가격되는 압력은 가스압을 조절하여 3Mpa의 압력이 발생하도록 하였다. 모듈 제작에 있어 가공성과 전기 절연특성이 좋은 MC 나일론 환봉으로 모듈 케이스를 가공하였고 중간에 PZT를 배치하였다. 또한 PZT의 발생 파형을 추출하기 위한 전극은 구리소재를 사용하여 PZT의 직경과 같은 크기인 직경 10mm, 두께 0.3 mm로 고압케이블과 연결을 위해 주걱 모양으로 제작하여 PZT의 상부와 하부에 위치하였다. 발사체의 힘을 PZT에 기계적 에너지를 인가하기 위해서는 중간체가 필요하다. 중간재로는 강도가 높아 충격장치로부터 받은 기계적에너지를 손실없이 전달하고, 1mm당 절연내력이 17kV를 갖는 산화알루미늄(Al2O3)을 사용하였고 제작한 크기는 직경 10mm, 두께 10mm의 크기로 제작하여 사용하였다. 실험용도에 맞게 MC나일론 파이프를 가공하고 PZT 모듈을 구성하는 모든 내부 부자재들이 일직선상에 놓이도록 고정하여 제작을 마친 실험 모듈은 그림 3과 같다. 실험에 사용된 PZT 모듈과 네일건을 고정하고 제작한 하단부 지그는 압력과 무게를 버티기 위해 강도가 높은 스테인레스 재질을 사용하였다. 또한 하단부 지그와 PZT 사이에 산화알루미늄이 위치함으로써 전기적 절연을 확보하였다. 하단 지그는

네일건과 PZT 모듈이 일직선을 유지하는 역할을 수행하며 PZT 모듈을 일정하게 가압할 수 있으므로 연속 실험 진행 시 재현성이 가능하며 제작한 모듈 PZT 샘플에 작용하는 같은 압력조건을 확보하였다.

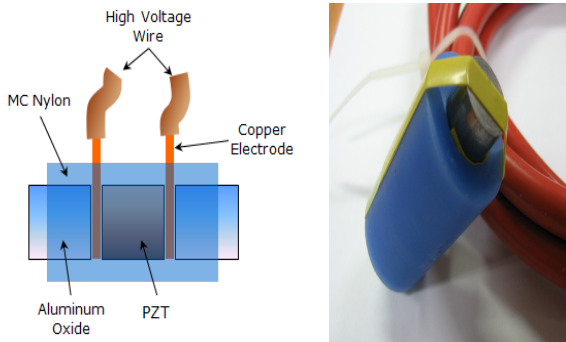


그림 3 PZT 모듈 구조와 실물 사진  
 Fig. 3 An outline of the PZT module structure and the actual picture

PZT에서 발생하는 전압 파형 측정에 사용한 프로브는 고전압프로브(Tektronix P6015A)를 사용하여 오실로스코프(500MHz, 5GS/s)로 측정하였다. 실험 구성의 개략도는 그림 4과 같고 측정 회로에서는 PZT 모듈 이외에는 어떠한 부하도 사용하지 않았으며 개방회로 전압만으로 측정하였다. 실험장치를 통해 산화알루미늄을 가압한 후 기계적 힘이 PZT에 가해진 후에 모듈의 모습은 그림 5와 같고 PZT에 큰 힘이 가해진 것을 확인 할 수 있다.

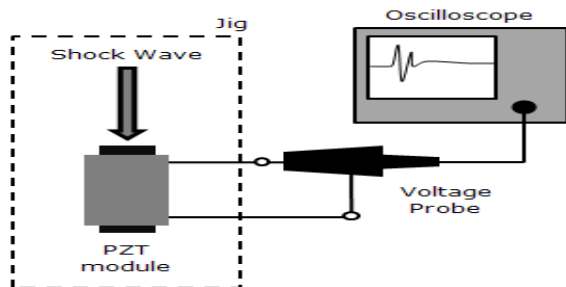


그림 4 실험 구성 개략도  
 Fig. 4 A schematic of the experimental setup



그림 5 충격을 받은 PZT 모듈의 내부  
 Fig. 5 Inside of the shocked PZT module

### 3. 실험 결과

PZT 모듈에 압력을 가해서 생성된 출력 전압파형은 그림 6 ~ 9와 같다. 결과 분석 전 사용한 PZT 샘플의 전기적·기계적 특성은 표 2를 통해 서로 다르다는 것을 확인 할 수 있다. 또한 압전상수(g33)의 수치를 비교하였을 때, 가해진 압력이 일정하다고 가정하였을 때 압전상수가 비슷한 값을 가지므로, 개방회로 전계도 비슷한 수치라는 것을 물리적 특성 표만으로 유추할 수 있다. 하지만 그래프 값을 비교한다면 전압파형이 샘플의 전기적·기계적 특성에 따라 달라진다. PZT 샘플 두께 변화에 따른 발생하는 전압특성을 알아보기 위해 샘플의 조성, 압력의 조건을 같게 하고 두께(2~3 배)를 일정비율로 달리하였을 때 그에 따른 전압특성이 두께의 비율에 맞춰 변화되지 않는다. 펄스폭과 상승시간을 고려하지 않고, 최대 전압변동을 분석하였을 때, Model A가 두께가 2배 증가 시 전압 1.94배로 거의 근사하였고 그 외 Model B ~ D는 이를 충족하지 못하였다. 표 3의 값처럼 Model C와 D는 두께를 증가시키면 전압파형의 펄스폭과 상승시간이 급격하게 증가하고 경향성 없는 최대전압을 관찰할 수 있다. 그림 8, 9에서 두꺼운 Sample C, D의 발생 전압 파형을 관찰하면 Model C는 파형의 상부가 상당히 일그러져 있으며, Model D는 대조적으로 피크전압이라고 말할 수 있는 부분인 1.1μs에서 전압파형이 급격하게 하락되는 것이 관찰 되는데 이 결과는 PZT의 절연파괴로 인한 결과로 보인다. PZT는 세라믹 재료 중의 하나로써 취성이 강하여 쉽게 변형되고 깨지게 된다. 표 2와 같이 Sample C, D는 Sample A, B에 비해 상대적으로 낮은 영률을 가지고 있어 같은 압력조건일 경우에 내부변형이 상대적으로 커져 온전한 전자 방출 과정을 수행하지 못하고 PZT가 깨짐으로써 내부 관통 절연파괴가 발생한 것이다.

얇은 PZT 샘플과 두꺼운 PZT 샘플을 사용한 실험 모두에서 Model B가 월등히 높은 피크전압을 출력하였다. 이것은 Model B의 낮은 비유전율로 인하여 전하방출이 용이하기 때문인 것으로 예상할 수 있다. 예로 커패시터의 경우에

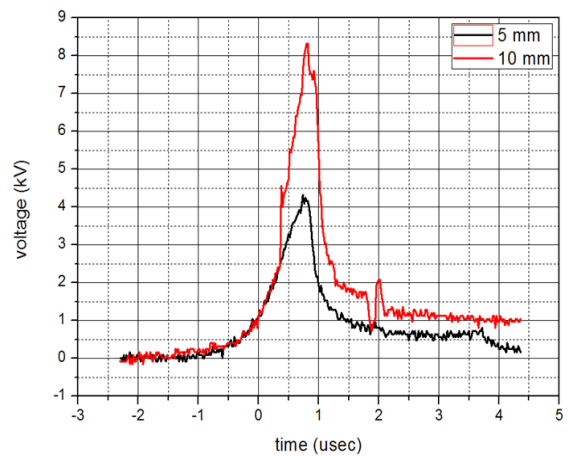


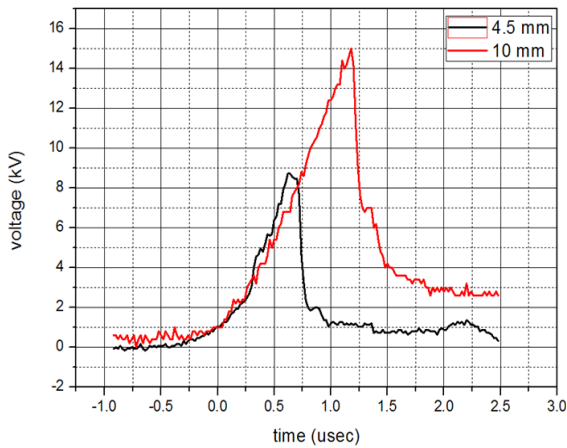
그림 6 5 mm 두께(흑색)와 10 mm 두께(적색)를 갖는 Model A에 의한 전압 파형  
 Fig. 6 The waveforms for the Model A samples with thickness of 5 mm (black) and thickness of 10 mm (red)

**표 3** PZT 모델에 따른 결과의 변화

**Table 3** The change of results according to PZT models.

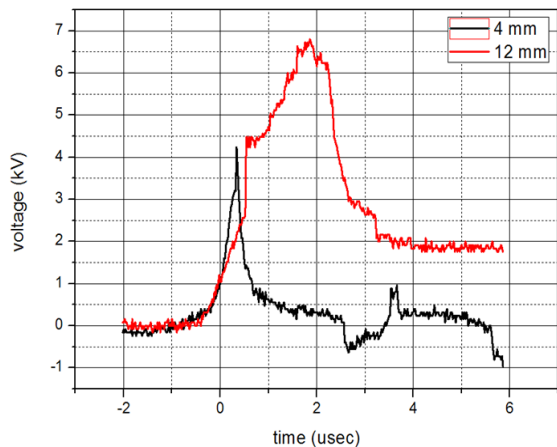
	PZT model No.							
	A (thickness × 2)		B (thickness × 2.2)		C (thickness × 3)		D (thickness × 2)	
Peak Voltage(kV)	4.32		8.72		4.28		5.52	
	8.36	× 1.94	15.0	× 1.72	6.8	× 1.59	4.4	× 0.80
Pulse Width (μs)	0.7		0.4		0.3		0.46	
	0.6	- 0.1	0.6	+ 0.2	2.0	+ 1.7	-	-
Rising Time (μs)	1.2		0.62		0.5		1.1	
	0.9	- 0.3	1.0	+ 0.38	1.68	+ 1.18	-	-

는 고유전율 재료를 사용하는 것이 더 많은 전하를 축적하는데 유리한데, 그와 같은 원리로 고전압 펄스 발생기에서는 고유전율 재료가 전하의 방출을 방해한다는 것이다.



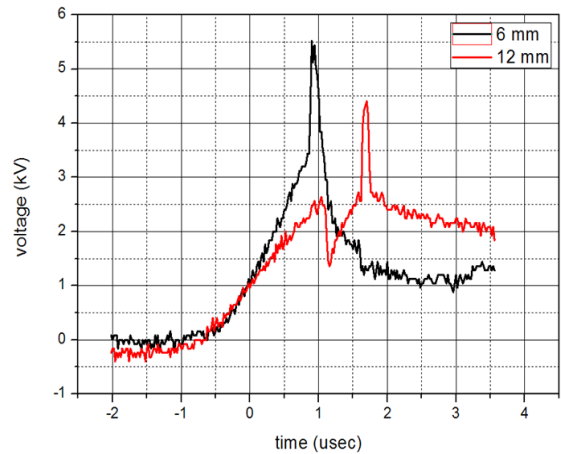
**그림 7** 4.5 mm 두께(흑색)와 10 mm 두께(적색)를 갖는 Model B에 의한 전압 파형

**Fig. 7** The waveforms for the Model B samples with thickness of 4.5 mm (black) and thickness of 10 mm (red)



**그림 8** 4 mm 두께(흑색)와 12 mm 두께(적색)를 갖는 Model C에 의한 전압 파형

**Fig. 8** The waveforms for the Model C samples with thickness of 4 mm (black) and thickness of 12 mm (red)



**그림 9** 6 mm 두께(흑색)와 12 mm 두께(적색)를 갖는 Model D에 의한 전압 파형

**Fig. 9** The waveforms for the Model D samples with thickness of 6 mm (black) and thickness of 12 mm (red)

**4. 결 론**

본 논문에서는 실험을 통해 강유전체의 일정한 축 방향으로 충격을 가했을 때 발생하는 전압의 출력특성을 연구하였고, 그 결과로 0.31 ~ 0.94 cm<sup>2</sup>의 크기의 PZT가 기계적 에너지를 통해 최고 15kV 고전압 펄스를 발생시킴을 확인하였다.

1. 실험결과를 통해 PZT의 전압 출력특성은 같은 축방향을 기준으로 하였을 때 유전율이 영향을 미친다. 커패시터의 경우에는 고유전율 재료를 쓰는 것이 더 많은 에너지를 저장하는데 유리하지만 반대로, 고출력 펄스 발생기에서는 고유전율 재료로부터 많은 전하를 방출시키기 위해서는 더 많은 기계적 에너지를 필요로 하게 된다. PZT에 같은 힘이 주어졌을 때 낮은 유전율일 경우 최대전압 발생을 예상할 수 있다.

2. PZT는 세라믹 중 한 종류로써 취성이 강하여 약간의 충격이 가해졌을 때, 변형이 거의 없어서 쉽게 깨진다. PZT에 일정한 압력을 가했을 경우 낮은 영률을 가진 소자는 전자 방출이 완전히 끝나기 전에 충격에 의해 깨짐으로써 내

부 관통 절연과파가 발생하는 것을 확인하였다. 내부 PZT 큰 변형이 일어날 경우 그 결과를 예측할 수 없다.

3. PZT를 고전압 펄스 발생기에 적용할 경우에 출력을 극대화하기 위해서는 PZT 소자의 유전율이 낮고 영률이 높은 소자를 사용하여야 최대발생전압이 높고 두께변화에 따른 결과 예측이 가능하다.

**감사의 글**

"This research was supported by the MSIP (Ministry of Science, ICT&Future Planning), Korea, under the ITRC(Information Technology Research Center) support program(NIPA-2013-H0301-13-1010) supervised by the NIPA(National IT Industry Promotion Agency)"

**References**

[1] F. W. Neilson, "Effect of strong shock in ferroelectric materials", Bull. Amer. Phys. Soc., vol. 2, no. 2, p. 302, 1957.

[2] C. E. Reynolds and G. E. Seay, "Multiple shock wave structures in polycrystalline ferroelectrics", J. Appl. Phys., vol. 32, no. 7, pp. 1401-1402, Jul. 1961.

[3] C. E. Reynolds and G. E. Seay, "Two-wave shock structures in the ferroelectric ceramics barium titanate and lead zirconate titanate", J. Appl. Phys., vol. 33, no. 7, pp. 2234 - 2241, Jul. 1962.

[4] W. J. Halpin, "Currents from a shock-loaded short-circuited ferroelectric ceramic disk", J. Appl. Phys., vol. 37, no. 1, pp. 153 - 163, Jan. 1966.

[5] J. T. Cutchen, "Polarity effects and charge liberation in lead zirconate titanate ceramics under high dynamic stress", J. Appl. Phys., vol. 37, no. 13, pp. 4745 - 4750, Dec. 1966.

[6] W. J. Halpin, "Resistivity estimates for some shocked ferroelectrics", J. Appl. Phys., vol. 39, no. 8, pp. 3821 - 3826, Jul. 1968.

[7] P. C. Lysne, "Dielectric breakdown of shock-loaded PZT 65/35", J. Appl. Phys., vol. 44, no. 2, pp. 577 - 582, Feb. 1973.

[8] F. Bauer and K. Vollrath, "Behaviour of non-linear ferroelectric ceramics under shock waves", Ferroelectrics, vol. 12, no. 1 - 4, pp. 153 - 156, 1976.

[9] F. Bauer and K. Vollrath, "New aspects in ferroelectric energy sources for impact fuses," Propellants, Explosives, Pyrotechnics, vol. 1, no. 3, pp. 55 - 59, 1976.

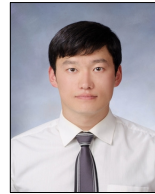
[10] V. N. Mineev and A. G. Ivanov, "Electromotive force produced by shock compression of a substance", Sov. Phys.-Usp., vol. 19, no. 5, pp. 400

- 419, May 1976.

[11] G. E. Duvall and R. A. Graham, "Phase transitions under shock-wave loading", Rev. Mod. Phys., vol. 49, no. 3, pp. 523 - 579, Sep. 1977.

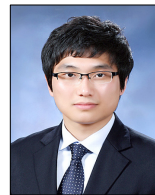
[12] E. Z. Novitskii, V. D. Sadunov, and G. Y. Karpenko, "Behavior of ferroelectrics in shock waves", Combustion, Explosion, Shock Waves, vol. 14, no. 4, pp. 505 - 516, Jul. 1978.

**저 자 소 개**



**장 동 관 (張 東 官)**

1984년 12월 1일생. 2010년 인하대학교 전기공학과 학사 졸업, 2010 ~ 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2012년 ~ 현재 (주) 한국 GM  
Tel : 032-860-7408  
E-mail : eleckarisma@nate.com



**최 순 호 (崔 淳 豪)**

1984년 10월 12일생. 2010년 인하대학교 전기공학과 학사 졸업, 2010 ~ 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2012년 현재 동 대학교 전기공학과 박사과정  
Tel : 032-860-7408  
E-mail : whitelily37@hanmail.net



**황 선 묵 (黃 先 默)**

1976년 5월 2일생. 2003년 원광대학교 전기공학과 학사 졸업, 2005년 인하대학교 석사 졸업, 2010년 인하대학교 박사 졸업, 2010년 ~ 현재 (주) 한화



**허 창 수 (許 昌 洙)**

1955년 1월 27일생. 1981년 인하대학교 전기공학과 학사 졸업, 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1983 ~ 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1983년~1993년 한국전기연구원기능재료 연구실장, 현 인하대학교 전기공학과 교수  
E-mail : cshuh@inha.ac.kr