

## 공진형 인버터를 사용한 적층액츄에이터형 초음파 노즐 구동시스템의 전기적 특성

### Electrical Properties of Multilayer Actuator Structured-ultrasonic Nozzle Driving System using a Resonant Inverter

황락훈<sup>1</sup>, 김화수<sup>1</sup>, 김국진<sup>1</sup>, 류주현<sup>1,a</sup>

(Lark-Hoon Hwang<sup>1</sup>, Hwa-Soo Kim<sup>1</sup>, Kook-Jin Kim<sup>1</sup>, and Ju-Hyun Yoo<sup>1,a</sup>)

#### Abstract

In this paper, multilayer actuator structured-ultrasonic nozzle and resonant inverter driving circuit were manufactured, respectively. Its electrical properties were investigated. Multilayer actuator structured-ultrasonic nozzle was fabricated using PMN-PNN-PZT ceramics showing excellent piezoelectric characteristics. In order to drive ultrasonic nozzle, resonant PWM inverter was used. The purpose of this study is to find the optimal driving condition of ultrasonic nozzle. Accordingly, electrical and temperature characteristic of multilayer ultrasonic driving system were investigated by experiments as a function of the series resonance inductance. The driving current of ultrasonic nozzle showed the maximum current of 27 mA. Also, the surface temperature of ceramic vibrator showed 44 °C at driving time for 20 min. The ultrasonic nozzle was stably operated in the case of driving for more than 20 min.

**Key Words** : Ultrasonic nozzle, Resonant inverter, Series resonance inductance

#### 1. 서론

현재 액체 연료의 분사에는 고압펌프를 이용하여 tip부분의 가는 구멍으로 액체 연료를 압출 분사 방법을 많이 사용하고 있다. 이 방식은 분사되는 연료의 입자들의 표면적이 불균일하며, 유입되는 연료의 양도 일정하지 않은 단점을 지니고 있어 분사된 입자의 불균일성에 의해 불안전 연소에 의한 공해발생과 에너지 효율 저하의 문제점을 가지고 있다. 그러나 초음파를 이용하여 액체연료를 분사하면 균일한 입경과 미립화가 용이하여 에너지 절약과 공해방지등을 할 수 있으며, 유속과 유량에 관계없이 이용할 수 있어 반도체 분야의 반

도체 웨이퍼와 평판 표시기상에 사진 식판용 화학 물질의 균일도포, 컴퓨터 하드디스크의 광택제 도포등에 사용할 수 있다. 이처럼 초저의 유출 용량을 요구하는 모든 공정 및 액체연료의 분사가 요구되는 모든 산업에 적용할 수 있다[1-3].

공진형 인버터를 사용하여 초음파 노즐을 구동하는 경우 공진 인덕턴스의 직렬 삽입만으로 노즐의 구동 전압을 공진에 의하여 쉽게 얻어질 수 있는 장점과 구동 스위치에 가해지는 전압의 크기가 상대적으로 작게되므로 인버터 구동에 저전압 MOSFET를 사용함으로써 도통손실의 저감 및 구동회로의 저압화 등에 유리한 이점이 있다[4-8].

본 연구에서는 기존의 고전압 입력을 필요로 하는 단판형 압전세라믹을 대체할 저전압 고효율의 초음파노즐을 개발하기 위해 적층형 압전세라믹을 이용한 초음파 노즐을 개발하여 구동회로를 설계하고 직렬 공진 인덕턴스의 변화에 따른 초음파 노즐의 전기적 특성을 조사하였다.

1. 세명대학교 전기공학과

(충북 제천시 신월동 579)

a. Corresponding Author : juhyun57@semyung.ac.kr

접수일자 : 2007. 9. 4

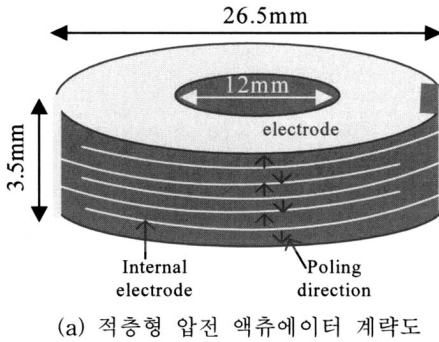
1차 심사 : 2007. 10. 12

심사완료 : 2007. 10. 16

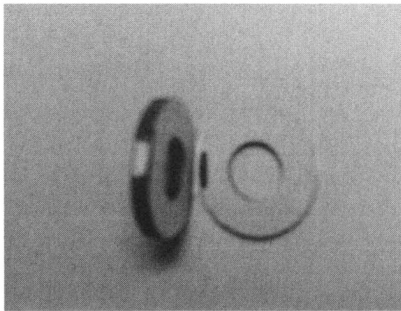
표 1. 시편의 압전 및 유전특성.

Table 1. Piezoelectric and dielectric properties of specimens.

Sintering temp[°C]	Dielectric constant	$k_p$	$Q_m$	$T_c$ [°C]
940	1423	0.59	1384	334



(a) 적층형 압전 액츄에이터 계략도



(b) 제작된 적층형 압전 액츄에이터

그림 1. Ring형 적층 압전 액츄에이터.

Fig. 1. Ring-type multilayer piezoelectric actuator.

## 2. 실험

### 2.1 진동자 제조 및 특성

초음파 노즐의 구동시 기계적인 진동을 이용하므로 많은 열을 발생시켜 노즐의 온도가 상승하여 세라믹 진동자에도 그 영향을 미치게 되어 열적 열화 현상이 일어날 수 있기에 높은 큐리온도를 가지는 세라믹 진동자가 필요하다. 본 실험에서는 PMN-PNN-PZT 조성을 사용하여 적층형 압전 세라믹 액츄에이터를 제작하였으며 압전 및 유전 특성을 표 1에 나타내었다. 본 실험에서 제작한 조성 세라믹스는 940 °C의 저온에서 액상 소결하였으며, 그 온도에서 전기기계결합계수  $k_p$ 가 0.59, 기계적 품질계수  $Q_m$ 은 1384, 큐리온도가 334 °C 매우 높아

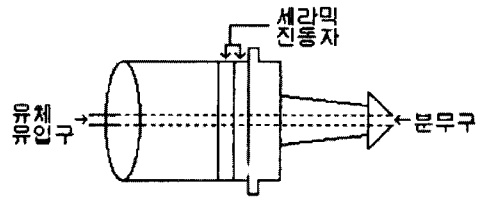


그림 2. 초음파 노즐의 모양.

Fig. 2. Form of ultrasonic nozzle.

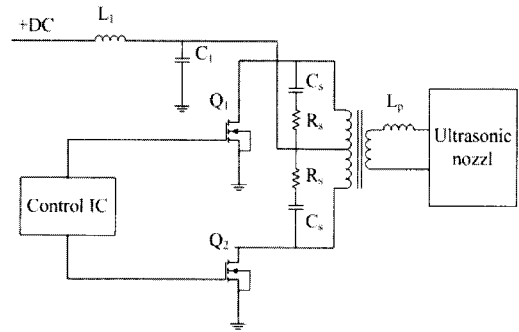


그림 3. 초음파 노즐 구동회로의 블록도.

Fig. 3. Block diagram of ultrasonic nozzle.

초음파 노즐용 진동자로 적용하기에 우수한 특성을 나타내었다.

여기서, 제작된 적층 압전 액츄에이터는 테일 캐스팅 방법을 사용하였으며, 그림 1과 같이 압전 진동자는 외경 26 mm, 내경 12 mm 그리고 두께는 한층 당 0.58 mm로 6층의 총 두께는 3.5 mm로 ring형으로 제작하였다. 전기기계 결합계수 및 기계적 품질계수등과 같은 특성을 조사하기 위하여 Impedance Analyzer (Agilent 4294A)로 공진 및 반공진 주파수를 측정하였다.

### 2.2 초음파 노즐의 제작

제조된 초음파 진동자를 사용하여 그림 2와 같은 초음파 노즐을 제작하였다. 노즐의 설계시 세라믹 진동자에 최대 진동이 전달될 수 있도록 하였으며, tip부분은 분무 시 분무 범위를 넓게 하기 위하여 45°의 각을 주고 처리 하였다.

### 2.3 구동회로의 설계 및 회로해석

#### 2.3.1 Push-Pull 인버터

초음파 노즐의 구동을 위한 구동회로의 블록도를 그림 3에 나타내었다. 초음파 노즐의 구동회로는 그림 3과 같이 Push-Pull방식을 사용하였으며, Push-Pull 방식의 기본파형을 그림 4에 나타내었다.

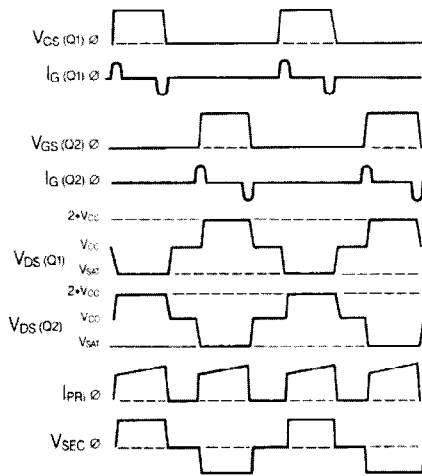


그림 4. Push-Pull 방식의 기본 파형.  
Fig. 4. Basic Push-Pull waveforms.

제안된 회로의 Push-Pull방식은 권선형변압기 1차측 권선에는 센터 탭이 있어 권선의 양단에 출력되는 MOSFET(Q1, Q2)의 Gate에 입력을 받아 스위칭 되어 권선형변압기 양 1차 권선에 전력을 교번 주입하는 방식을 채택하였다. 단지 이 회로에서는 2차측에는 교류파형을 얻기 위해 센터 탭 정류회로를 사용하지 않았다. PWM Control을 사용하여 타러식 발진방식으로 Q1, Q2의 Gate신호를 교번 스위칭 시켰으며, 그림의 L1, C1은 스위칭 및 부하측에서 전원측으로 침입하는 노이즈 성분을 방지하기 위하여 설치하였다. RC 직렬회로를 MOSFET에 직렬 연결하여 MOSFET의 Tun on, Tun off 과정에서 발생하는 서지 전압을 콘덴서 Cs에서 흡수하여 저항 Rs를 통하여 서서히 방전시킴으로서 스위칭 소자의 보호를 위해 스너버 회로를 추가하였다. 스너버 회로의 시정수  $\tau = R_s C_s$ 의 값은 식(1)로 유도되며 Rs의 값은 방전전류  $I_{TD}$ 로 구할 수 있다.

$$\frac{d_v}{dt} = \frac{0.632 V_s}{\tau} = \frac{0.632 V_s}{R_s C_s} \quad (1)$$

$$R_s = \frac{V_s}{I_{TD}} \quad (2)$$

### 2.3.2 공진주파수와 데드타임

구동회로의 공진 주파수는 PWM Controller KA3525A를 사용하여 공진주파수를 약 200 Hz의

가변폭을 가질 수 있도록 설계하였으며 (3)식으로 유도될 수 있다.

구동회로의 출력전압을 제어하기 위하여 데드타임을 조절할 수 있도록 설계하여 약 20~44 % Duty cycle을 조절할 수 있다.

$$f = \frac{1}{C_T(0.7R_T + 0.3R_D)} \quad (3)$$

### 2.3.3 공진 인덕턴스

초음파 노즐과 구동회로의 공진을 일으켜 초음파 노즐 입력단 전압이 정현파가 되도록 하기 위하여 공진 인덕턴스  $L_p$ 를 삽입한다.  $L_p$ 와 초음파 노즐 진동자의 블로킹 캐패시턴스  $C_d$ 만을 고려하여 초음파 노즐의 공진주파수를 (4)식으로 표현되면  $L_p$ 와  $C_d$ 의 공진주파수가 일치 하도록  $L_p$ 를 선정한다. LCR meter (ANDO AG-4304)를 사용하여 측정된  $C_d$ 의 값은 120 nF이다.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C_d}} \quad (4)$$

초음파 노즐의 구동주파수 영역이 35~36 kHz 정도이고 초음파 노즐의 고유 공진주파수가 약 35 kHz 부근임을 감안할 때 초음파 노즐의 구동주파수 전 영역에서 초음파노즐측의 임피던스가 균등하게 최소로 되기 위한 공진 인덕턴스는 약 170  $\mu$ H 정도이다. 공진 인덕턴스 변화에 의한 초음파 노즐의 구동특성을 조사하기 위하여 150~200  $\mu$ H까지 10  $\mu$ H 단위로 단계별로 인덕턴스를 제작하여 실험을 하였다.

## 3. 결과 및 고찰

초음파 노즐의 구동시에 나타나는 진동자의 온도 변화에 따른 공진주파수의 온도 의존성을 알아 알아보고 초음파 노즐의 임피던스 매칭을 위해 공진 인덕턴스를 단계별로 제작 삽입하여 동일한 유량과 유속 조건하에 직렬 공진 인덕턴스의 변화에 따른 초음파 노즐을 30분씩 구동 하였을 때의 전기적 특성을 조사하였다. 표 2는 제안된 회로의 구성요소의 값들은 나타낸다. 측정된 구동 주파수는 35~36 kHz 부근이지만 공진 인덕턴스의 영향으로 구동 주파수의 변화를 감안하여 33 kHz에서 37 kHz로 설정 할 수 있도록 설계하였다.

표 2. 초음파 노즐 구동회로의 구성 요소.

Table 2. Components of ultrasonic nozzle driving circuit.

입력전압	12 V		
공진주파수	$R_t$	6.5 k $\Omega$	
	$C_t$	3.3 nF	33~37 kHz
	$R_{tver}$	500 $\Omega$	
듀티 사이클	R	10 k $\Omega$	
	C	100 nF	20~44 %
	$R_{ver}$	1 k $\Omega$	
보호회로	$C_s$	1 nF	
	$R_s$	100 $\Omega$ /2 W	
Controller	KA3525A		
MOSFET	IRF840		

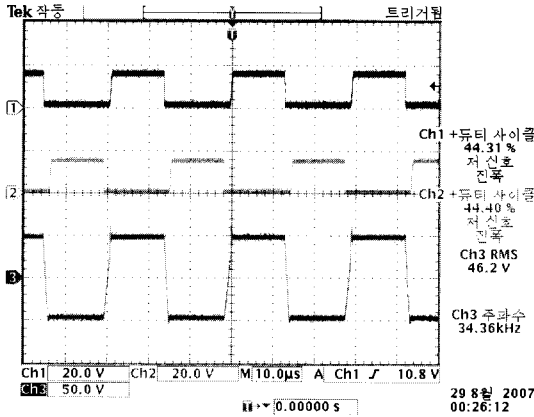


그림 5. 구동회로 FET단의 입력신호와 출력 파형.  
Fig. 5. Input signal and output wave of FET driving circuit.

그림 5는 FET를 스위칭하는 파형과 트랜스포머의 2차단에 출력되는 파형을 나타낸 것으로 Q1의 출력과 Q2의 출력에는 약간의 데드타임을 두었다. 구동 주파수는 식(4)에서  $L_p$ 가 증가됨에 따라 감소된다. 그림 6은 공진 인덕턴스 변화에 따른 구동 주파수를 측정하는 것으로 공진 인덕턴스가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

그림 7은 구동회로의 입력 전류 변화량이다. 구동 5분 후부터는 안정된 값을 나타내었으며, 공진 인덕턴스의 값의 변화에도 0.7 A 정도의 낮은 값을 나타내었다. 그림 8, 9에 구동시간에 따른 전압값과 전류값을 나타낸 것으로 초음파 노즐의 임피던스가 최소로 되기 위한 공진 인덕턴스의 값은 최소의 전압과 전류값을 가지는 180, 190 uH으로 사료된다.

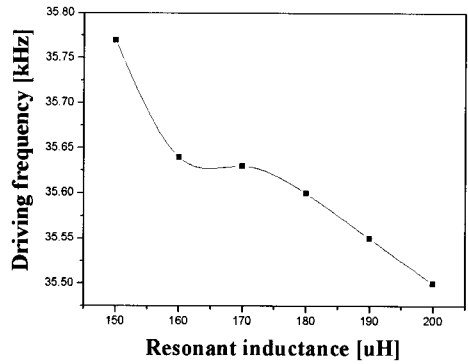


그림 6. 공진 인덕턴스 변화에 따른 구동주파수.  
Fig. 6. Driving frequency of ultrasonic nozzle with the varying resonant inductances.

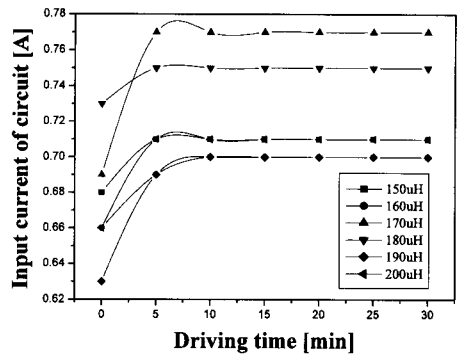


그림 7. 구동시간에 따른 구동회로의 입력 전류.  
Fig. 7. Input current of driving circuit with driving time.

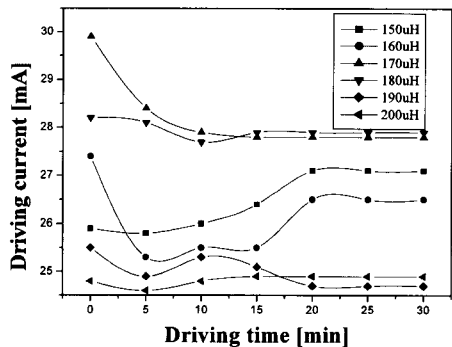


그림 8. 구동시간에 따른 구동 전류.  
Fig. 8. Driving current with driving time.

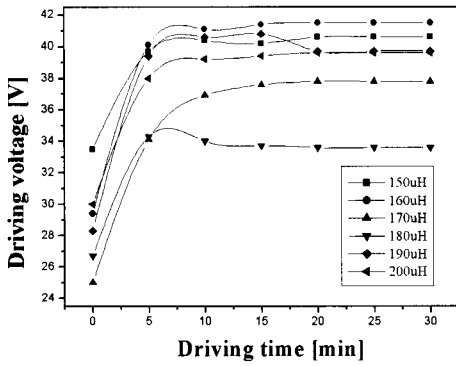


그림 9. 구동시간에 따른 구동 전압.  
Fig. 9. Driving voltage with driving time.

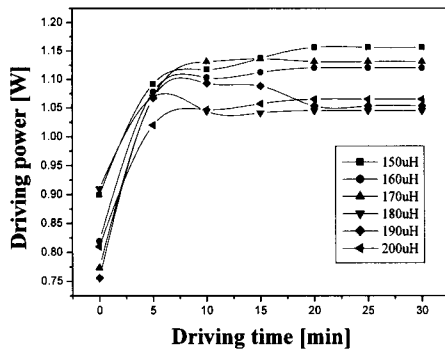


그림 10. 구동시간에 따른 구동 전력.  
Fig. 10. Driving power with driving time.

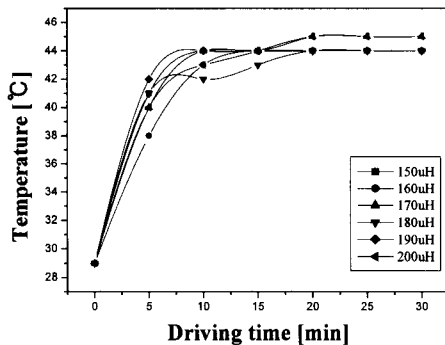
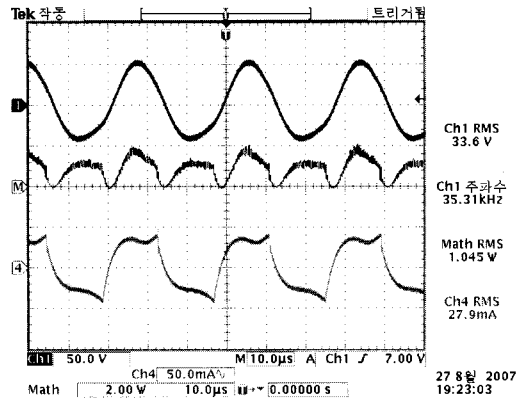
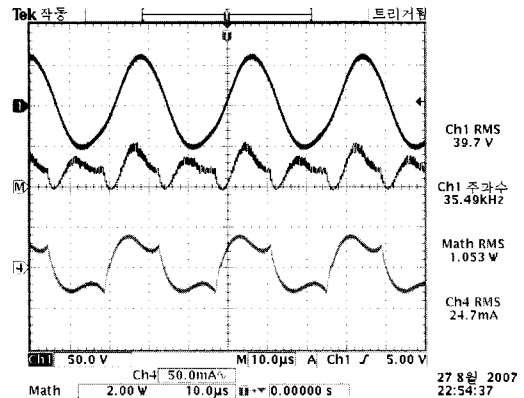


그림 11. 구동시간에 따른 진동자의 표면 온도.  
Fig. 11. Surface temperature of vibrator with driving time.



(a)



(b)

그림 12. 초음파 노즐의 입력 파형 (a) 180  $\mu$ H, (b) 190  $\mu$ H.  
Fig. 12. Input wave of ultrasonic nozzle (a) 180  $\mu$ H, (b) 190  $\mu$ H.

그림 10은 구동시간에 따른 소비 전력의 변화를 측정 한 것으로 공진 인덕턴스의 변화에도 모두 20분 이후부터는 약 1 W 정도로 안정됨을 알 수 있으며 이는 구동 시간에 따른 진동자의 표면 온도의 변화가 20분 이후부터는 포화 현상이 나타남으로 온도 변화에 따른 진동자의 임피던스의 변화가 작아지면서 나타나는 것으로 사료된다. 그림 11에서 보여지는 것처럼 초음파 노즐 진동자의 온도는 구동 20분 후부터는 모두 약 44 °C의 안정된 값을 나타내었다. 진동자의 초기온도가 약 29 °C임을 감안하면 온도상승은 약 15 °C를 나타내어 소자의 무리가 거의 없었다.

그림 12은 공진 인덕턴스의 값이 180, 190  $\mu$ H일 때 초음파 노즐의 입력 파형이며, 가장 낮은 소비 전력을 보였다. 그림 13은 제작된 적층형 초음파노즐의 구동 모습이다.

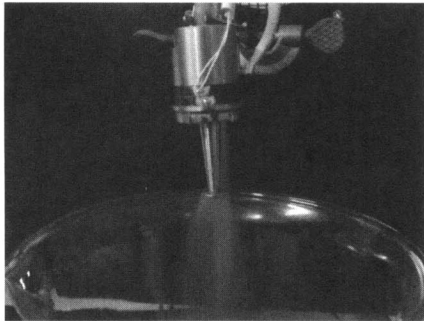


그림 13. 초음파 노즐 분무.

Fig. 13. Aerosol of ultrasonic nozzle.

#### 4. 결 론

본 실험은 저전압 고효율 적층액추에이터형 초음파노즐의 제작과 구동회로를 설계하여 직렬 공진 인덕턴스를 단계별로 제작 삽입하여 진동자측의 임피던스를 매칭 시켜 구동시간에 따른 전기특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 직렬 공진 인덕턴스 삽입으로 인한 진동자의 임피던스 매칭으로 공진을 발생시켜 필요한 정현파 전압을 발생시켰다.
2. 구동회로를 제작하여 소자에 맞는 공진 주파수를 발견시켜 초음파 노즐의 분무에 안정성을 가져왔다.
3. 초음파 노즐을 구동시킬 때 진동자의 표면 온도가 20분 이후부터는 약 44 ℃로 포화되어 온도에 안정성을 기대 할 수 있었다.
4. 초음파 노즐 구동시 구동회로의 입력 전류가 0.7 A로 낮을 값을 요구되기에 발열에 의한 문제점들을 감소 시킬수 있었다.
5. 초음파 노즐의 구동시에 직렬 공진 인덕턴스가 180 uH일 때 입력전압이 33.6 V 소비전류 및 전력이 약 27.8 mA, 1.045 W로 낮아 저전력 구동이 가능하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 2006년도 과학재단에서 시행하는 특정기초 사업(과제번호: R01-2006-000-10120-0)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고 문헌

- [1] 이수호, 민석규, 윤광희, 류주현, 사공건, “초음파 액추에이터 응용을 위한 압전 세라믹의 유전 및 전기적 특성”, 한국전기전자재료학회 2000 추계학술대회논문집, p. 200, 2000.
- [2] 이수호, 민석규, 윤광희, 류주현, 사공건, “구동회로에 따른 초음파 노즐의 분무 특성”, 한국전기전자재료학회 2001추계학술대회논문집, p. 1005, 2001.
- [3] 김선우, 정남훈, 선우명호, “피에조 인젝터의 모델링 및 분사율의 추정”, 한국자동차공학회논문집, 13권, 2호, p. 93, 2005.
- [4] S. H. Lee, J. H. Yoo, K. H. Yoon, J. Y. Sug, G. H. Rue, K. H. Sin, J. G. Kim, and J. I. Hong, “The dielectric and electric characteristics of piezoelectric ceramics for ultrasonic oscillator application”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 41, No. 11B, p. 7099, 2002.
- [5] M. J. Ruan and William E., “A new ZVS LCL-re-sonant push-pull DC-DC converter topology”, IEEE Trans Industry Applications, Vol. 34, p. 1164, 1998.
- [6] Data sheet & User’s Gwde Note, Multi-Topology Piezoelectric Transformer Controller, Texas Instrument, 2002.
- [7] B. K. Bose, “Evaluation of modern power semiconductor devices and future trends of converters”, IEEE Trans on Ind. App., Vol. 28, p. 403, 1992.
- [8] T. A. Lipo, “High frequency series resonant dc link power conversion”, IEEE Trans on Ind. App., Vol. 28, No. 6, p. 1277, 1992.