

# 커먼레일 디젤 엔진용 피에조 인젝터 제어에 관한 연구

## A Study on the Piezo Injector Control Algorithm for CRDI Diesel Engines

오병걸<sup>1</sup>, 오승석<sup>1</sup>, 박영섭<sup>1</sup>, 이강윤<sup>2</sup>, ✉선우명호<sup>2</sup>  
Byounggul Oh<sup>1</sup>, Seungsuk Oh<sup>1</sup>, Yeongseop Park<sup>1</sup>, Kangyoon Lee<sup>2</sup> and ✉Myoungho Sunwoo<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 한양대학교 자동차공학과 (Department of Automotive Engineering, Hanyang Univ.)

<sup>2</sup> 한양대학교 (Hanyang Univ.)

✉ Corresponding author: msunwoo@hanyang.ac.kr, Tel: 02-2220-0453

Manuscript received: 2008.2.11 / Revised: 2008.12.14 / Accepted: 2008.12.16

*The purpose of this study is to develop a piezo injector driver for common-rail direct injection diesel engines. In this research, we analyzed the electrical and mechanical characteristics of the piezo actuator through experiments. Current flow and charging voltage of the piezo injector are controlled by the PWM signal of variable duty ratio in order to realize both fast response and low peak current. The optimal switching duty ratio was designed by modeling and analyzing of the piezo driver circuit. In order to avoid resonance and unacceptably long settling time, appropriate frequency range of the PWM signal was derived based on the driver circuit model. The developed injector driver was validated by experiments under various fuel rail pressure, injection duration, and charging voltage.*

Key Words: CRDI (커먼레일직접분사), Current Control (전류 제어), Fuel Injection System (연료 분사 장치), Injector Driver (인젝터 드라이버), Piezo Injector (피에조 인젝터)

### 기호설명

$S_3$  : strain

$d_{33}$  : linear electromechanical coupling coefficient [m/V]

$Y_{33}$  : elastic modulus of the piezo actuator [N/m<sup>2</sup>]

$T_3$  : stress [N/m<sup>2</sup>]

$E_{33}$  : electric field [V/m]

$Q$  : electric charge [C]

$D$  : duty ratio

$U$  : applied voltage [V]

$L$  : inductance [H]

$R$  : resistance [ $\Omega$ ]

$\Delta L$  : displacement of the actuator [m]

$C$  : mechanical capacitance [F]

FR : fast response

MV : maximum voltage

MC : maximum current

### 1. 서론

디젤엔진은 높은 열효율로 인하여 자동차용 엔진으로 많이 사용되고 있다. 그러나 전 세계적으로 대기환경에 대한 관심이 증가되면서 디젤엔진의 유해 배기 배출물에 대한 규제가 날로 강화되고 있다. 미국, 유럽 등 선진국에서는 대기의 질을 개선하기 위하여 Tier, EURO emission standard 와 같이 단계별로 엄격한 배기규정을 제정하여 적용을 추진하고 있다. 이에 따라 자동차업체에서는 점차 강화되는 디젤엔진의 배기규제를 만족시키며, 연비를 개선시키고 엔진의 성능을 향상시킬 수 있는

디젤엔진을 개발 중에 있다.

기술 개발의 대표적인 예로써 Common rail direct injection (CRDI) 시스템을 들 수 있다. CRDI 시스템은 유해 배기가스 저감 문제와 낮은 연료 소비에 대한 요구를 동시에 극복하기 위하여 개발되었다. CRDI 시스템은 기존의 연료 분사 시스템과 달리 연료 분사 압력이 엔진 회전수 및 부하 조건에 독립적이기 때문에 분사율과 분사시기 제어에 자유도가 높은 특징이 있다. 따라서 이를 이용한 정확한 연료량과 연소 시기의 제어는 최적의 연소 조건을 조성하여 엔진의 출력과 연비를 향상시킬 수 있다. 또한 CRDI 시스템은 한 사이클 내 다중 연료 분사가 가능함대 이는 연소 소음을 줄이고 NOx, PM 등을 줄이는 효과가 있다.<sup>1,2</sup>

기존의 CRDI 시스템은 솔레노이드 방식 Common rail (CR) 인젝터를 사용하였다. 솔레노이드 방식 인젝터는 솔레노이드 코일에서 발생하는 자기력으로 밸브를 동작시켜 연료를 분사한다.<sup>3,14</sup> 그러나 솔레노이드 코일의 자기력은 솔레노이드와 아마추어간의 거리에 많은 영향을 받으므로 인젝터의 응답시간에 제한이 있는 단점이 있다.

피에조 인젝터는 이러한 솔레노이드 인젝터의 단점을 보완하기 위하여 사용되기 시작하였다. 피에조 소자는 가해지는 전압에 비례하여 변위가 발생하는 일종의 커패시터이며, 소자 고유의 특징 중 하나인 빠른 반응성으로 인하여 많은 분야에서 액추에이터로 사용되고 있다.<sup>6</sup> 위와 같은 특징으로 인하여 피에조 소자를 이용한 피에조 방식 인젝터는 솔레노이드 인젝터에 비하여 짧은 응답시간을 갖는다.<sup>13</sup> 그러나 짧은 응답시간을 얻기 위하여 소자의 한계치를 벗어나는 고전압, 고전류로 피에조 소자를 충전 하게 되면 피에조 소자의 파손을 초래하므로 주의하여야 한다.

이 논문에서는 피에조 인젝터용 액추에이터의 기계적 특성과 전기적 특성을 분석하였으며, 가변 듀티비 Pulse width modulation (PWM)으로 피에조에 흐르는 전류를 제어하여 낮은 피크 전류와 빠른 응답을 얻기 위한 제어 전략을 수립하였다. 또한 피에조 구동회로 모델을 이용하여 최적 스위칭 파형을 도출하였다.

## 2. 이론적 배경

피에조 방식 커먼레일 인젝터는 기존의 솔레노이드 커먼레일 인젝터의 액추에이터인 솔레노이드

를 대신하여 피에조 소자를 이용한다. 피에조 인젝터는 솔레노이드 인젝터와 유사한 유압 시스템에 의하여 작동하며 그 원리는 다음과 같다. 구동 회로에 의하여 피에조 스택이 충전되면 피에조 스택은 푸시로드를 밀어내고 컨트롤 밸브에 의하여 poppet 이 움직이게 된다.

컨트롤 챔버안에 있던 연료는 리턴 라인으로 배출되어 컨트롤 챔버의 압력을 떨어뜨리고 이 때 발생하는 컨트롤 챔버와 어큐뮬레이터 챔버 사이의 압력차이로 인해 니들 밸브가 열리면 연료가 분사된다. Fig. 1 은 피에조 인젝터의 작동원리를 간단히 나타내고 있다.

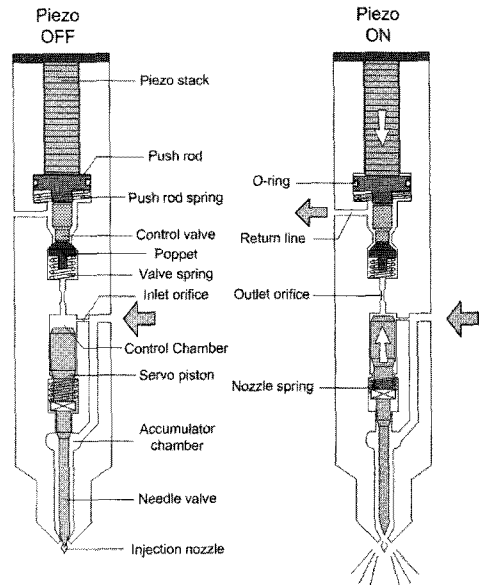


Fig. 1 Piezo injector operations

## 2.1 피에조 액추에이터의 특성

### 2.1.1 기계적 특성

피에조 소자는 외력에 의한 변위 발생 시 소자 양단에 전위차가 발생한다. 이것은 피에조 압전 효과라고 하며 이 효과는 압력센서 등에 적용되고 있다. 이와 반대로 피에조 소자에 전하가 충전되면 변위가 발생하는데, 이를 역압전효과라고 부르고 이 효과를 이용하여 많은 분야에서 피에조 소자를 액추에이터로 사용한다.<sup>4,7</sup> Fig. 2 는 역압전효과에 의하여 동작하는 피에조 소자를 보여주고 있다. 선형 피에조 액추에이터는 메탈릭 일렉트로드에 의하여 나뉜 얇은 세라믹 디스크가 Fig. 3 과

같이 적층되어 이루어져 있다.

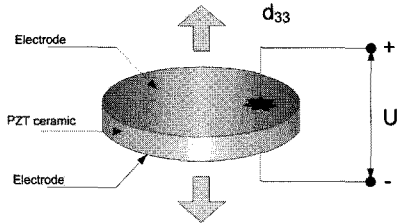


Fig. 2 Schematic of a single layer piezoelectric element

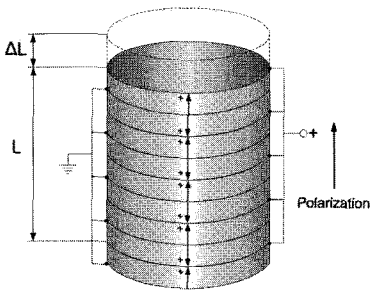


Fig. 3 Linear piezoelectric actuator

피에조 소자는 전하가 충전되면 전압에 비례하여 750 - 1200 μm/m 의 변위가 발생한다.<sup>5,11</sup> 피에조 소자의 1-D 선형 전기기계적 구성은 식 (1)에서 보는 바와 같이 변형, 응력 그리고 전기장의 관계로 표시 할 수 있다.<sup>5,10</sup>

$$S_3 = d_{33}E_{33} + \frac{1}{Y_{33}}T_3 \quad (1)$$

이 식에서  $d_{33}$  은 linear electromechanical coupling coefficient 이고  $Y_{33}$  은 피에조 액추에이터의 탄성계수를 나타낸다.

2.1.2 전기적 특성

피에조 스택은 다층 커패시터의 한 종류이다. 커패시터의 커패시턴스(C)는 엘리먼트의 수, 두께, 층의 접합면적 등에 의하여 결정된다. 커패시터에 충전된 전하량(Q)은 식 (2)에 표현된 것과 같이 커패시터에 충전된 전압(U)에 비례한다.

$$Q = U \cdot C \quad (2)$$

일반적인 커패시터의 커패시턴스는 상수 값이지만 피에조 액추에이터의 커패시턴스는 전압, 압

축력(stress), 온도 등에 의하여 그 값이 결정된다. 속도와 가속도 등의 kinetic parameters 는 액추에이터 스택의 전하로 표현할 수 있다. Kinetic parameters 와 전하와의 관계를 Table 1 에 표현하였고 Table 1 과 식 (2)로부터 피에조에 가해진 전압과 변위와의 관계를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

Table 1 Characteristics of the piezo element

Description	Electrical charge
Position	Electrical charge content Q
Change in position	dQ: Change in electrical charge
Speed	dQ/dt: Current i
Acceleration	d <sup>2</sup> Q/dt <sup>2</sup> = di/dt: Current variation/current slew rate

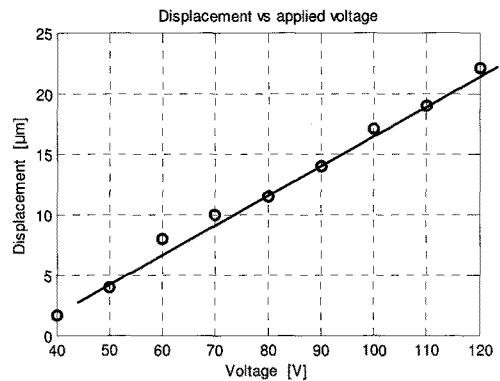


Fig. 4 Piezo stack displacement

$$\Delta L \propto U \quad (3)$$

여기서 ΔL 은 액추에이터의 변위이고 U 는 피에조 액추에이터에 충전된 전압을 나타낸다. Fig. 4 는 인젝터에 사용되는 피에조 스택의 전압과 변위 사이의 관계를 나타내고 있다. 그림에서와 같이 피에조 스택의 변위는 인가 전압에 비례함을 알 수 있다.

3. 피에조 액추에이터 특성 분석

피에조 인젝터의 전기적인 특성을 파악하기 위하여 Fig. 5 와 같이 구동회로를 구성 하였다. 구동회로 내에서 피에조 소자와 직렬로 연결된 인덕터

는 피에조 충전 시 소자에 흐르는 전류의 급격한 상승을 방지하여, 액추에이터가 파손되지 않도록 하는 역할을 담당한다. 인덕터의 인덕턴스는 피에조 액추에이터에 흐르는 전류의 변화량 및 분사율에 많은 영향을 미치기 때문에 인덕턴스 변화에 따른 전압, 전류 특성을 분석하였다.

Fig. 6 과 7 은 구동회로에 413 $\mu$ H 의 인덕터를 사용했을 경우, 피에조 소자 충전 시 인가된 전압이 피에조 소자에 흐르는 전류와 피에조 충전 전압에 미치는 영향을 보여준다. 실험 결과 인가 전압이 높을수록 최대 전류 값과 전압 overshoot 이 커짐을 알 수 있다.

Fig. 8 과 9 는 구동회로에 사용되는 인덕터의 인덕턴스가 피에조 액추에이터의 전류와 전압에 미치는 영향을 보여준다. 인덕턴스는 각각 106 $\mu$ H, 212 $\mu$ H, 413 $\mu$ H 로 변경하여 실험하였으며, 이때 피에조 액추에이터는 120V 로 충전하였다. 실험 결과 Fig. 8 에서 보는 바와 같이 큰 인덕턴스는 큰 전류 유도효과에 의하여 낮은 피크 전류결과를 보여주며 Fig. 9 의 전압 응답에서는 큰 인덕턴스에 의하여 충전전압의 settling time 이 길어지는 것을 볼 수 있다. 따라서 구동회로 내 인덕터의 용량 선정 시 액추에이터의 특성에 따라 최대 전류 및 인덕터의 반응속도 사이에 최적의 인덕턴스를 결정하여야 한다.

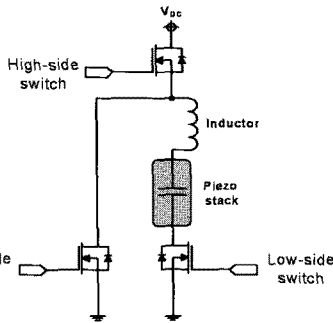


Fig. 5 Schematic of the piezo injector driver circuit

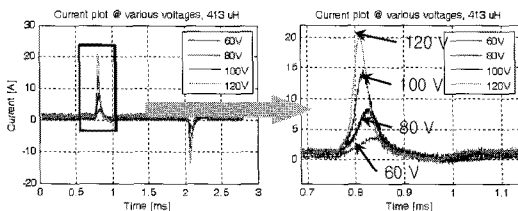


Fig. 6 Current plots at various charging voltage

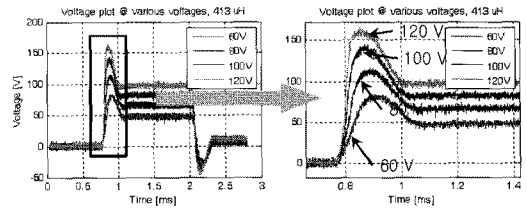


Fig. 7 Voltage plots at various charging voltage

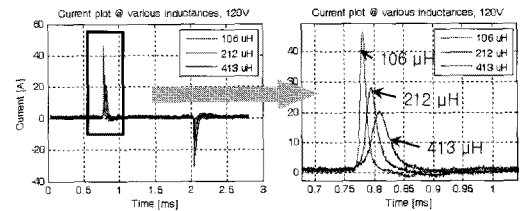


Fig. 8 Current plots at various inductances

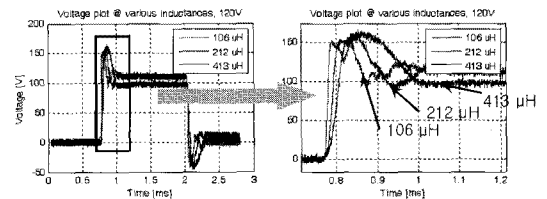


Fig. 9 Voltage plots at various inductances

#### 4. 구동 회로

피에조 인젝터의 구동회로는 부스트 컨버터와 스위칭 회로로 나뉜다. 피에조 액추에이터의 충전 시 100~300V 사이의 고전압을 사용하는데, 이때 사용하는 고전압을 생성하기 위하여 Fig. 10 과 같은 부스트 컨버터를 사용한다. 부스트 컨버터는 12V 의 배터리( $V_{BATT}$ ) 공급전압을 고전압( $V_{DC}$ )으로 승압한다.

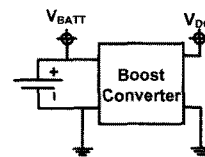


Fig. 10 Boost converter

피에조 액추에이터의 충전 또는 방전은 구동회로의 스위치 동작에 의하여 2 가지 상태로 나눌 수 있다.<sup>9</sup> 충전 시에는 Fig. 11 과 같이 스위치 A 가

스위칭 되고 스위치 B 는 열린 상태를 유지한다. 스위치 C 는 드라이버가 동작하는 동안 닫혀있다. 이 상태에서는 피에조 스택이 고전압으로 충전된다. 이와 반대로 방전 시에는 Fig. 12 와 같이 스위치 A 는 열림, 스위치 B 는 스위칭 된다. 스위치 C 는 충전 시와 마찬가지로 닫혀 있다. 이때 피에조 액추에이터에 충전되어 있던 전하가 방전되며 인젝터의 니들이 닫힌다.

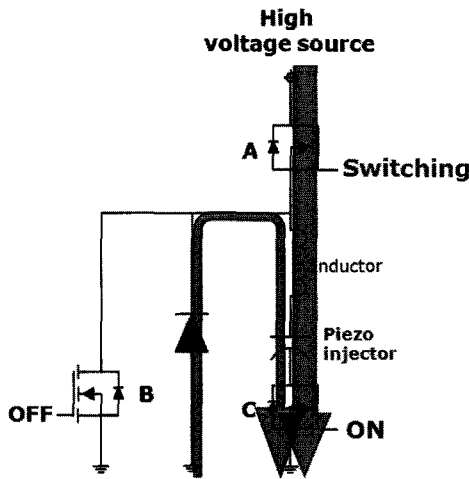


Fig. 11 Charging operation

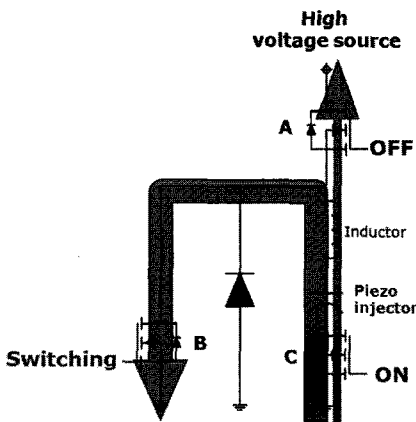


Fig. 12 Discharging operation

## 5. 구동 드라이버 시뮬레이션

### 5.1 드라이버 모델

인젝터 구동 시스템의 구현에 앞서 회로 시뮬레이션을 통하여 피에조 구동 특성을 알아보았다. 시뮬레이션은 구동 회로에서 충전 파형에 따른 피

에조 스택의 전압, 전류 경향을 분석하기 위해 수행하였으며, 시뮬레이션 결과를 이용하여 최적의 스위칭 파형을 도출하였다.

Fig. 13 은 인젝터 드라이버의 시뮬레이션 블록 다이어그램을 나타내고 있다. 구동 회로는 DC 전압원, 부스트 컨버터, 스위칭 회로, 피에조 액추에이터, 전류량 측정을 위한 션트 저항으로 구성되어 있다. 이 연구에서는 단일 커패시터 모델을 이용하여 피에조 액추에이터를 표현 하였다.

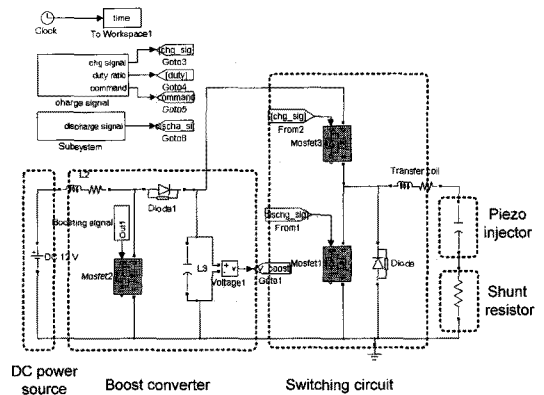


Fig. 13 Driver circuit block diagram

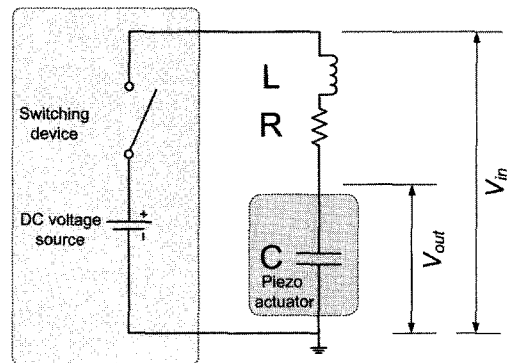


Fig. 14 Second-order driver circuit model

### 5.2 스위칭 주파수

피에조 액추에이터 충전 시 전류를 효과적으로 제어하기 위하여 PWM 스위칭 방식을 적용하였다. 또한 공진을 피함과 동시에 최적의 충전 전류 PWM 주파수를 찾기 위하여 Fig. 14 와 같이 RLC 회로로 구성된 2 차 시스템을 분석하고 스위칭 주파수를 결정하였다.

식 (4)는 피에조 구동 드라이버를 Laplace transform 을 이용하여 전달함수 G(s)로 표현한 것

이다. 시스템의 입력은 PWM 형태의 120 V 직류전압이고 출력은 피에조 스택 양단의 전압이다. 전달함수를 이용하여 피에조 드라이버의 공진 주파수를 계산하면 식 (4)의  $\omega_n$ 과 같다.

100 $\mu$ H의 인덕턴스와 피에조 소자의 커패시턴스 3  $\mu$ F로 구성된 회로는 11.2 kHz의 공진 주파수를 갖는다. 이 연구에서는 액추에이터의 공진 현상을 방지하기 위하여 충·방전 시 공진 주파수보다 충분히 큰 주파수를 사용하였다.

$$G(s) = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}}$$

$$\omega_n = 2\pi f = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (4)$$

Fig. 15와 16은 스위칭 주파수에 따른 피에조 충전 전압의 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 스위칭 주파수가 높을수록 피에조 전압의 rising time과 settling time이 증가함을 볼 수 있다. 반면, 낮은 스위칭 주파수에서는 입력전압의 1.5 배 이상의 전압 overshoot이 발생한다.

일부 구간에서 실험과 시뮬레이션 결과간에 전압 차이를 볼 수 있는데, 이러한 오차의 주요 원인은 피에조 소자를 단일 capacitor로 표현하여 인젝터 내부 연료압력이 피에조 전압에 미치는 영향을 고려하지 않았기 때문이다.

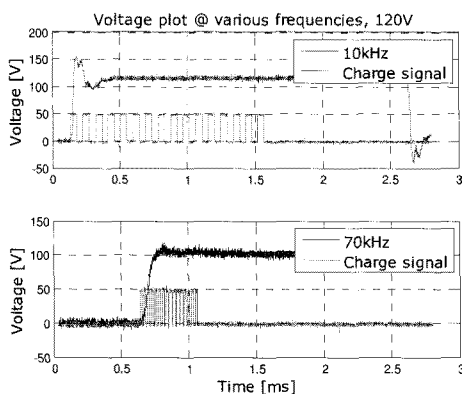


Fig. 15 Effects of switching frequency on piezo voltage (Experiment)

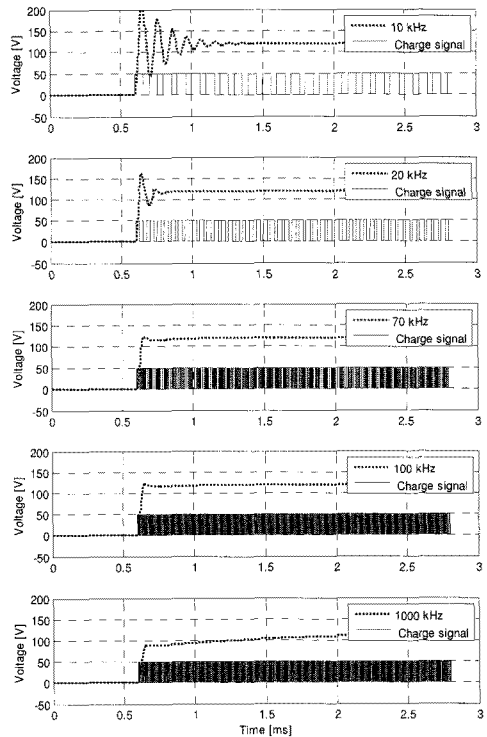


Fig. 16 Effect of the switching frequency on piezo voltage (Simulation)

스위칭 주파수가 공진 주파수에 가까운 경우 입력 전압의 약 1.5 배 이상의 해당하는 전압 overshoot이 발생하였다. 전압 overshoot은 높은 피크 전류를 발생시켜 피에조 액추에이터의 파손 원인이 된다. 충전 시 빠른 스위칭 주파수는 전압 overshoot을 줄일 수 있지만 1MHz 이상의 주파수에서는 피에조 충전전압의 settling time이 분사명보다 길기 때문에 두 가지 조건을 모두 만족하는 범위 안의 스위칭 주파수를 결정하였다.

## 6. 전류 제어

앞서 언급한 바와 같이 피에조 인젝터는 빠른 응답 시간을 갖는다. 그러나 빠른 응답을 얻기 위해서는 높은 전류로 피에조 액추에이터를 충전해야 하는데, 이때 피에조 액추에이터에 과전류가 흐르게 되면 액추에이터가 견딜 수 있는 한계치 이상의 속도와 인장응력이 발생하여 피에조 스택의 파괴를 초래한다.<sup>12</sup> 피에조 액추에이터의 고장 원인 중 30%가 이러한 기계적 파손에 의한 것이

다.<sup>8</sup> 그러므로 인젝터 드라이버는 피크 전류를 액추에이터의 한계 전류 범위 내에서 제어 해야 한다.

기존의 피에조 인젝터 드라이버는 일정한 스위칭 파형으로 피에조 소자를 충전하거나, duty ratio 가 단순 증가하는 방향으로 충전하였다. 이 연구에서는 피에조 인젝터의 빠른 반응속도를 달성함과 동시에 피크 전류를 제한하기 위하여 피에조 소자의 전류 특성을 고려한 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 제어 알고리즘은 인젝터의 휴지 상태에서 피에조 소자가 100% 충전되기 까지 아래와 같이 총 세 개의 구간으로 나누어 제어를 수행한다.

### 6.1 빠른 응답 제어

초기 충전 시 100%의 듀티비 DFR(duty ratio for fast response control)로 피에조 액추에이터를 충전한다. 이 단계에서는 액추에이터의 충전 초기에 보다 빠른 응답을 얻을 수 있다.

### 6.2 피크 전류 제어

100 %의 듀티비로 충전 중 액추에이터에 흐르는 전류가 일정 전류 이상일 때 PWM 듀티비를 DMC(duty ratio for maximum current control)로 낮추어 제어한다. 이 단계에서는 피에조 액추에이터에 흐르는 전류가 threshold 값 이상으로 넘지 않도록 유지한다.

### 6.3 피크 전압 제어

피에조 액추에이터가 기준 전압 이상으로 충전이 되면 피에조 액추에이터에 흐르는 전류는 낮아진다. 이 때 PWM 듀티비를 DMC 보다 큰 듀티비인 DMV(duty ratio for maximum voltage control)로 변경하여 피에조 액추에이터의 충전 전압값이 최종 전압 값에 도달하도록 한다. 피에조 액추에이터 충전전시 PWM 듀티비를 변경하여 충전함으로써 액추에이터의 빠른 응답과 동시에 낮은 피크 전류 응답을 얻을 수 있었다. Fig. 17 에 각 단계의 PWM 듀티비와 전류, 전압 값을 표시하였다.

## 7. 실험장치 구성 및 결과 고찰

### 7.1 실험장치 구성

개발한 인젝터 구동 알고리즘 검증용 목적으로 테스트 벤치를 이용하여 실험하였다. Fig. 18 은 테

스트 벤치, 인젝터 드라이버, 분사율계와 데이터 수집 시스템으로 이루어져 있는 실험 환경이다. 인젝터 테스트 벤치는 연료 압력을 1500bar 까지 가압할 수 있으며, 분사율을 측정하기 위하여 Ono-Sokki FJ400 분사율계를 이용하였다. 피에조 스택의 전압과 전류는 Table 2 에 표시한 장비를 이용하여 측정하였다.

### 7.2 실험 결과

연료압력 1500bar 와 1ms 의 분사명령 조건 하에서 연료분사 실험한 결과 Fig. 19 와 같이 10A 이하의 피크전류와 60 $\mu$ s 의 rising time 을 나타내었다. 이는 시뮬레이션을 통하여 얻은 결과와 유사하며, 기존 피에조 액추에이터 구동회로의 rising time 인 100 $\mu$ s 과 비교하여 40 $\mu$ s 빠른 rising time 을 보여주었다.

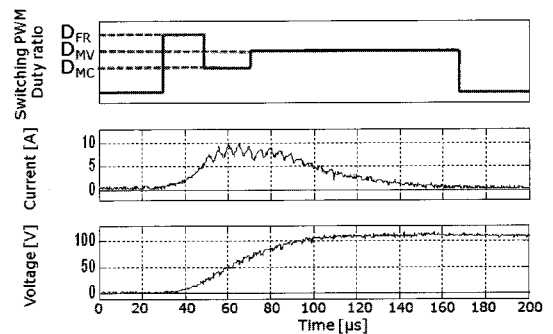


Fig. 17 Switching signal

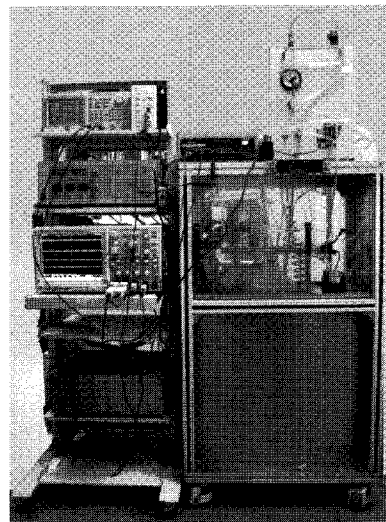


Fig. 18 Experimental setup

Table 2 Equipments of Injection rate experiment

Description	Equipment
Voltage	DPO 4034 Tektronix digital phosphor oscilloscope
	P5205 Tektronix differential probe
Current	TCPA 300 Tektronix amplifier
	TCP 303 Tektronix current probe
Injection rate	FJ400 Ono-sokki injection rate meter

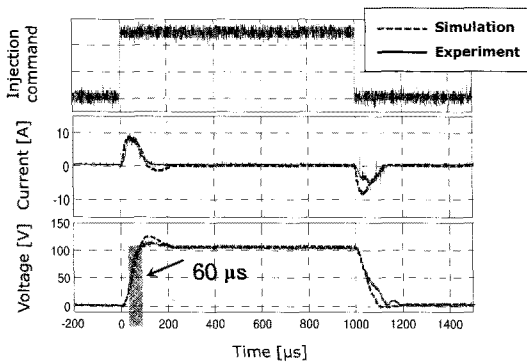


Fig. 19 Comparison for the voltage and current of the piezo actuator

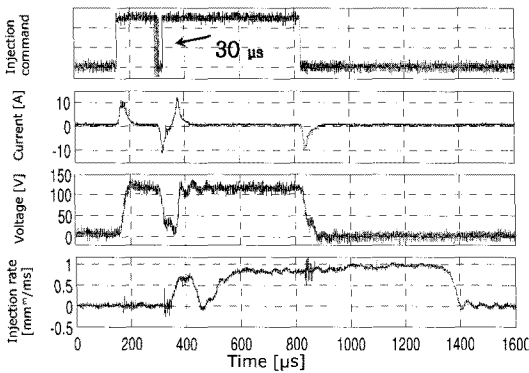


Fig. 20 Minimum dwell time between two consecutive injections

한 사이클 내에 5 회 이상의 다중 분사를 위해서는 분사 명령간의 간격인 dwell time 이 짧을수록 좋다. 만약 dwell time 이 최소 지연시간보다 작으면 두 번 또는 다수의 분사명령에도 불구하고 한번의 연료분사만 이루어진다. 이 실험에서는 dwell time 을 변경하며 분사율을 측정함으로 최소 분사 지연 시간을 측정하였다. 실험 결과 30 $\mu$ s 이상의

dwell time 에서 인젝터는 각 분사명령에 따라 분사를 하였고 Fig. 20 에 결과를 표시하였다.

제안된 알고리즘의 구동성능을 검증하기 위하여 기존의 피에조 연료분사 시스템과 비교 검증시험을 수행하였다. Fig. 21 에서 Driver-A 는 이 연구에서 제안한 구동 시스템을 이용하여 분사율을 측정 한 결과이며, Driver-B 는 자동차에 많이 사용되고 있는 B 사의 피에조 구동 시스템의 분사율 특성을 보여주고 있다. 같은 조건에서 구동성능을 비교하기 위하여 두 실험 모두 B 사의 피에조 인젝터를 사용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 이 연구에서 제안한 과도구간 제어 방법을 이용한 결과, 기존의 피에조 연료분사 시스템보다 분사 지연시간이 짧아졌음을 확인할 수 있으며, 또한 분사종료 시 지연 또한 짧아 짐을 알 수 있다. 이러한 분사 지연시간의 단축은 엔진에서 정밀한 연료 제어가 가능하게 함으로써 엔진의 배기배출물 저감 및 연비 향상에 도움을 줄 수 있다.

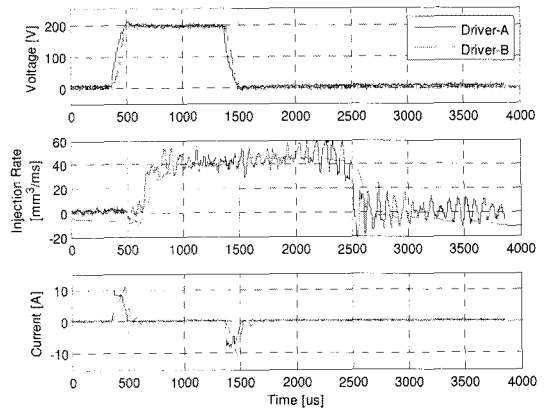


Fig. 21 Injection rate comparison

### 8. 결론

이 연구에서는 커먼레일 디젤엔진용 피에조 인젝터 구동을 위한 제어로직을 제안하였으며, 이를 적용한 드라이버를 개발하였다. 이 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 개발된 피에조 인젝터 드라이버는 액추에이터의 충·방전시 급격한 전류 상승으로 인한 피에조 소자의 파손을 방지하기 위하여 인덕터를 사용하였다. 인덕터는 피에조 소자에 흐르는 피크 전류의 시간과 크기에 영향을 미친다.



2) 드라이버 회로의 스위칭 주파수는 2 차 시스템의 분석을 통하여 결정되었다. 피에조 소자의 충전과 방전을 위하여 충전 전압과 전류 상환 따른 다양한 듀티비의 PWM 신호를 사용하였다.

3) 개발한 인젝터 드라이버를 이용하여 연료 분사 실험을 수행한 결과, 기존의 피에조 방식 연료 분사 시스템과 비교하여 짧은 전압 rising time 과 짧은 dwell time 을 보여주었다. 이는 높은 엔진 회전 수에서도 한 사이클 내 다중 연료 분사를 통한 보다 정밀한 연소제어를 가능하게 할 것으로 사료된다.

## 후 기

이 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

## 참고문헌

- Schommers, J., Duvinage, F., Stotz, M., Peters, A., Ellwanger, S., Koyanagi, K. and Gildein, H., "Potential of Common Rail Injection System for Passenger Car DI Diesel Engines," SAE paper, No. 2000-01-0944, 2000.
- Guerrassi, N. and Dupraz, P., "A Common Rail Injection System For High Speed Direct Injection Diesel Engines," SAE paper, No. 980803, 1998.
- Lee, K. Y., Oh, B. G. and Sunwoo, M. H., "Development of a Programmable Driver for Solenoid-type 2-way-valve Common-rail Injectors," International Pacific Conference on Automotive Engineering - IPC-13, pp. 349-354, 2005.
- Phillips, J. R., "Piezoelectric Technology Primer," CTS Wireless Components, 2000.
- Jalili, N., Wagner, J. and Dadfarnia, M., "A piezoelectric driven ratchet actuator mechanism with application to automotive engine valves," MECHATRONICS, Vol. 13, Issues 8-9, pp. 933-956, 2003.
- Iked, T., "Fundamentals of piezoelectricity," Oxford University Press, 1990.
- Kasuga, C., Nakagawa, Y., Harashima, F., Nishimura, T. and Ban, M., "Characteristic Analysis of Multi-Layer Piezo-Ceramic Actuator (Part II)," Proceedings of the IEEE IECON 93, Vol. 3, pp. 1573-1576, 1993.
- Bindig, R. and Helke, G., "Application of Piezo ceramic Multilayer Actuators," Experiences and Solutions, 7th International Conference on New Actuators, pp. 53-57, 2000.
- Cordes, S., Hoika, J., Leteinturier, P. and Preuschoff, C., "Semiconductor Solutions for Piezo Injector System," SAE Paper, No. 2003-01-0710, 2003.
- An American National Standard, "IEEE Standard on Piezoelectricity, ANSI/IEEE Standard 176," pp. 4-11, 1987.
- Newcomb, C. V. and Flinn, I., "Improving the Linearity of Piezoelectric Ceramic Actuators," Electronic Letters, Vol. 18, pp. 442-444, 1982.
- Chun, D. P., Lim, J. S., Ahn, S. Y., Kim, H. S., Shin, S. J. and Yoo, W. J., "Piezo Injector Driving Circuit in Diesel Common Rail System," KSAE Fall Conference Proceedings, Vol. 1, pp. 391-396, 2003.
- Dörlemann, C., Muß, P., Schugt, M. and Uhlenbrock R., "New High Speed Current Controlled Amplifier for PZT Multilayer Stack Actuators," 8th International Conference on New Actuators, 2002.
- Sa, J. S., Chung, N. H. and Sunwoo, M. H., "A study on the injection rate observer of the piezo-actuated and solenoid-operated injectors for CRDI diesel engines," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 9, pp. 52-59, 2007.