

## 솔레노이드 타입 디젤 커먼레일 인젝터 구동을 위한 전류 파형 변화에 따른 분사 연료 압력과 특성

김길태\* · 이충훈†

### A Study on Characteristics of Injected Fuel Pressure Waves of a Solenoid Type Diesel Common Rail Injector with Controlling Current Wave for Driving the Injector

Kil Tae Kim and Choong Hoon Lee

**Key Words:** Injected fuel pressure wave(분사 연료 압력파), Current profile(전류 파형), Pulse width modulation (PWM), Duty ratio(듀티비), Peak and hold(픽앤홀드)

#### Abstract

Injected fuel pressure waves of a common rail injector with various current profiles supplied to the injector were measured using Bosch method. In order to drive the common rail injector, the current in the solenoid should be controlled using what is known as a peak and hold pattern, which consists of a high current level with a short time duration (peak) in the first step and a low current level with a long time duration (hold) in the subsequent step. The current profile can be shaped by switching an injector driving power source with the peak and hold waves. The capture, compare and PWM (CCP) pin in the microprocessor was used to generate the combined peak and hold waves. The PWM square wave generated from the CCP pin has a duty ratio of 100% for the peak current and 10% or 30% for the hold pattern. Five patterns of the current profile were generated by combining the peak and hold wave. The common rail pressure is controlled at 75, 100, and 130 MPa. As the fuel rail pressure increases, the variations of the measured fuel injection pressure wave according to the current profiles decrease.

#### 1. 서 론

디젤 엔진에서 연료 분사율 및 분사 패턴은 엔진의 토크, 배출가스, 연비 등의 성능에 큰 영향을 미치는 인자이다<sup>(1-3)</sup>. 현재 생산되고 있는 상용 차량의 대부분이 커먼레일 디젤 엔진을 장착하고 있다. 커먼레일과 전자

제어로 구동되는 인젝터를 도입하면서 연료 분사 타이밍과 분사율 패턴의 제약이 거의 없어졌다<sup>(4-6)</sup>.

일반적으로 디젤 엔진은 운전 조건에 따라 최적의 분사 타이밍이 다른데 전자제어가 도입이 되면서 최적의 제어가 가능하게 되었다. 또한 연료 분사율 제어와 관련하여서는 엔진 운전 조건에 따라 최적의 성능이 나올 수 있도록 파일럿 분사(pilot injection), 주분사(mian injection), 후분사(post injection) 등과 같은 다중 분사(multiple injection) 패턴의 구현이 가능하게 되었다<sup>(7-9)</sup>. 정확한 분사량과 타이밍 제어는 분무의 혼합 및 연소 과정에 중요한 영향을 미치며 특히 직분식 디젤 엔진에서는 질소산화물(NO<sub>x</sub>) 생성, 매연, 연소 소음 등에서 다

(Received: 8 Aug 2016, Received in revised form: 5 Sep 2016, Accepted: 6 Sep 2016)

\*서울과학기술대학교 산업대학원 자동차공학과  
†교신저자, 회원, 서울과학기술대학교 기계자동차공학과  
E-mail : chlee5@seoultech.ac.kr  
FAX : (02)979-7032

중 분사 패턴 제어가 중요하다. 파일럿 분사는 메인 연료 분사 후의 착화 지연 시간을 줄여 예혼합기 생성량을 줄여 NO<sub>x</sub> 생성과 연소 소음 저감을 가능하게 하며 후분사는 매연 생성에 영향을 미친다<sup>(10,11)</sup>.

대부분의 커먼레일 인젝터는 연료 분사량 및 분사 타이밍 제어를 위해 인젝터에 공급되는 전류를 제어한다. 다중 분사시 분사량 제어를 하기 위해서는 인젝터에 공급되는 전류 파형의 제어가 필요하다. 일반적으로 커먼레일 인젝터 구동은 소위 픽앤홀드(peak and hold) 방식으로 한다. 인젝터 구동 초기에 니들(needle)을 누르고 있는 스프링 힘을 빠르게 극복하여 니들이 들리(lift) 연료가 분사되기 위해서는 인젝터 내의 유압 통로를 개폐하는 솔레노이드 밸브의 빠른 응답 특성이 필요한데 이를 위해 높은 전류를 공급하여야 한다. 일단 니들이 들리면 그 상태를 유지하는 데에는 큰 전류가 필요하지 않기 때문에 낮은 전류를 유지하는 방식(hold)을 사용한다. 커먼레일 인젝터에 공급되는 픽앤홀드 전류 제어는 마이크로프로세서로 생성된 PWM(pulse width modulation) 파형으로 인젝터 구동용 80V 전원을 스위칭하여 구현할 수 있다. 스위칭 수단은 고전류용 트랜지스터 또는 FET를 사용한다. 커먼레일 인젝터 제어기에 의한 연료 분사율 제어와 관련하여 Postrisoti<sup>(10)</sup>는 다양한 다중 분사 조건에서 Zeuch 방식<sup>(12)</sup>에 의한 연료 분사율 및 니들리프트 등을 측정하였고, Cho<sup>(13)</sup>는 마이크로프로세서를 사용하여 커먼레일 인젝터 드라이버를 개발하였고, Roh 등<sup>(14)</sup>은 커먼레일 인젝터 구동용 전용 장치를 개발하였다. Graham 등<sup>(15)</sup>은 상용 커먼레일 인젝터 다중 분사 제어 조건에서 분사율을 측정하였고, Chiatti 등<sup>(16)</sup>은 니들 움직임에 따른 분사율 특성을 수치적으로 분석하

였다. 그러나, 이들의 연구는 인젝터에 공급되는 다양한 전류 파형 변화에 따른 분사율 및 분사 타이밍 측정과 관련된 연구는 충분히 보여 주지 못하였다.

본 연구에서는 커먼레일 인젝터에 공급하는 전류 파형을 픽 조건과 홀드 조건을 조합하여 5가지로 생성하였다. 픽앤홀드 신호는 총 1000 ms 분사 기간 중 초반 일부는 듀티비 100% 파형, 나머지 일부는 듀티비를 크게 낮춘 파형으로 구성하였으며 듀티비는 10%와 30%를 사용하였다. 인젝터를 구동하였을 때의 연료 분사압력과 측정은 Bosch 방법<sup>(17)</sup>을 사용하였다.

## 2. 실험 장치 및 방법

Figure 1은 커먼레일 인젝터에 공급되는 전류 파형 변화에 따른 연료 분사 압력과 및 분사 타이밍 측정을 위해 구성된 실험 장치 개략도를 나타낸 것이다. 연료 가압 장치는 연료 탱크와 연료를 고압 펌프에 공급하기 위한 저압 연료 펌프, AC 모터로 구동되는 고압 연료 펌프, 커먼레일, 커먼레일 인젝터, 연료 온도를 일정하게 유지하기 위한 열교환기 등으로 구성되어 있다. 측정 시스템은 압저항형 압력 측정 시스템, 전류 프로브, 디지털 오실로스코프, Bosch 분사율 측정 장치 등으로 구성되어 있다. 사용된 인젝터는 Bosch사에서 제조한 솔레노이드 타입 커먼레일 인젝터로 분공경은 0.16 mm, 분공수는 6개이다.

레일압 제어를 위해서는 우선 인버터 노브를 조절하여 AC 모터의 회전 속도를 일정한 속도로 제어하여 고압 펌프를 구동한다. 이 때 인젝터로 공급되는 연료 라

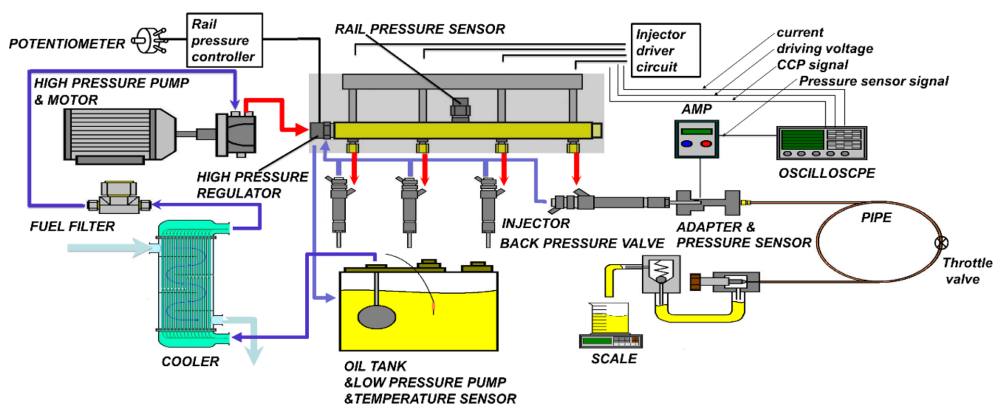


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

인의 압력을 목표 값으로 일정하게 제어하기 위해 커먼 레일압 제어기에 공급되는 PWM 펄스의 듀티비를 제어 하였다. 제어에 필요한 PWM 펄스는 마이크로프로세서 PIC16F917과 고전류용 트랜지스터 2N3055를 사용하였다. 커먼레일 압력은 레일에 부착된 레일압 센서로 모니터링 하였다. 커먼 레일의 압력이 목표 압력에 도달하여 일정하게 유지되는 조건이 되면 연료 분사를 위해 인젝터를 구동하였다. 인젝터 구동은 픽앤홀드 방식에 의한 전류 제어 방식을 사용하였다. 인젝터 구동 장치는 80V 파워서플라이, 고전류 제어용 트랜지스터 MJ11016, 픽앤홀드 제어 신호 생성용 마이크로프로세서 PIC16F917 등으로 구성하였다. 커먼레일압 제어기 회로와 인젝터 드라이버 회로는 Kim<sup>(18)</sup>이 사용한 것과 동일한 것을 사용하였다.

픽앤홀드 신호는 총 1000 ms 분사 기간 중 픽구간은 100 ms 또는 500 ms 으로 하였고 듀티비는 100%, 나머지 홀드 구간 900 ms 또는 500 ms 동안 듀티비 10% 또는 30%를 사용하였다. Fig. 2에는 마이크로프로세서 CCP 핀에서 생성된 픽앤홀드 신호를 디지털 오실로스코프로 측정한 예를 보여 주고 있으며 픽 구간, 홀드 구간 각각 100 ms, 900 ms 이며 홀드 파형의 듀티비는 10%로 설정되어 있다.

Table 1에는 커먼레일 인젝터에 공급되는 다양한 전류 파형을 생성하기 위해 마이크로프로세서에 설정된 PWM 파형의 5가지 조건을 나타내었다. 각각의 케이스에 대해 커먼레일 압력을 75, 100, 130 MPa로 변화시키면서 측정하였다.

Bosch 방법에 의한 연료 분사율 측정은 연료 분사 과정에서 발생하는 압력파를 기록함으로써 가능하다. 연료 분사시 발생하는 반사파의 영향을 제거하기 위해 부

Table 1 Summary of peak and hold wave set condition

Case	Rail Pressure (MPa)	Peak/Hold (μs/μs)	Hold wave duty ratio (%)
1	75/100/130	1000/0	-
2	75/100/130	100/900	10
3	75/100/130	100/900	30
4	75/100/130	500/500	10
5	75/100/130	500/500	30

착된 동관(brass tube)내의 연료를 가득 채우고 압력 조절 밸브로 배압(back pressure)을 조절한다. 커먼레일 인젝터로부터 연료를 분사하면 이 때 발생하는 압력파를 압력센서로 감지하여 디지털 오실로스코프에 기록한다.

### 3. 결과 및 검토

Figure 3은 Table 1에 나타낸 실험 조건 중 case 2의 조건으로 연료를 분사하였을 때의 측정 예를 나타낸 것이다. 측정시 커먼 레일압은 130 MPa을 유지하였다. 연료 분사 기간 1000 ms 중 픽파형 듀티비 100%로 100 ms, 홀드 구간은 듀티비 10%로 900 ms 로 구성된 PWM 파형을 마이크로프로세서 CCP단자로부터 생성된 파형(Fig. 3(a))을 MJ11016 NPN 트랜지스터의 베이스 단자에 입력하여 커먼레일 인젝터 80V구동 전원을 스위칭 하였을 때의 전압 파형(Fig. 3(b)), 인젝터에 흐르는 전류(Fig. 3(c)), 그리고 Bosch 분사율 측정 장치에서의 발생되는 연료 분사 압력파(Fig. 3(d))를 동시에 측

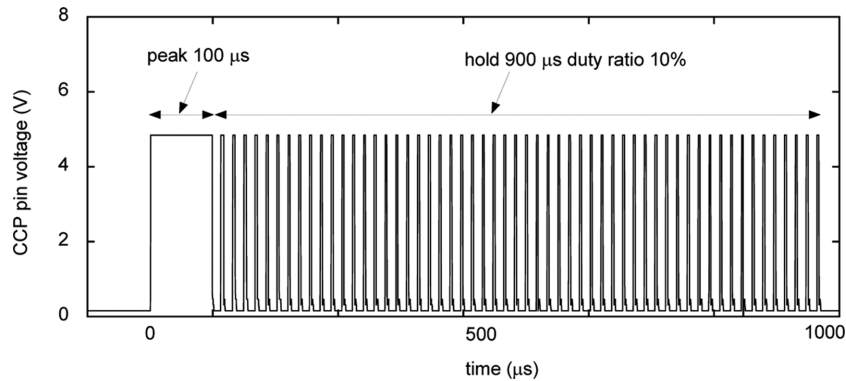


Fig. 2 A typical peak and hold wave measured with digital oscilloscope

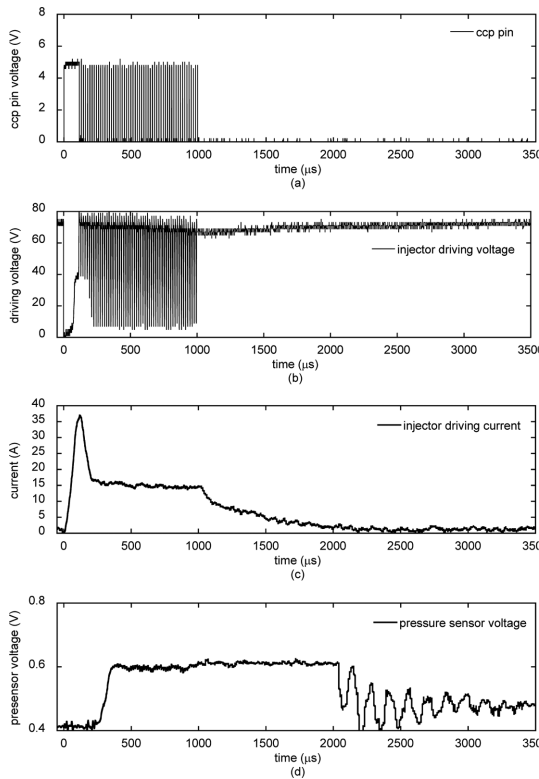


Fig. 3 A typical measured result at the case 2 (a) CCP pin voltage (b) Injector driving voltage (c) Injector driving current (d) Pressure sensor voltage of Bosch method

정한 결과이다. 트랜지스터 베이스에 입력된 마이크로 프로세서 파형과 잘 동기화된 인젝터 구동 전압이 커먼 레일 인젝터에 공급되고 있음을 알 수 있다. 마이크로 프로세서의 픽신호가 상승하는 에지(rising edge)에서 인젝터 구동 전압 공급과 전류 상승이 동기 되었으나 Bosch 분사를 측정하기 위한 압력 센서 신호는 일정시간 지연되어 상승하였다. 이는 실제 연료 분사가 인젝터 구동 시작 신호 타이밍보다 약간 지연되어 이루어짐을 의미하며 솔레노이드 밸브 움직임에 의해 유발된 커먼레일 인젝터 내의 유압 작용으로 니들이 리프트되기까지는 일정 시간이 필요하기 때문이다. Fig. 3(c)의 전류 파형을 보면 픽구간에서는 전류가 최대 35A까지 상승하였다가 홀드 구간에서는 15A를 유지함을 알 수 있다. 또한 구동 전압 파형이 종료된 후 (1000 ms)에도, 약 2000 ms 까지 서서히 전류가 0으로 떨어지고 있으며 연료 분사도 2000 ms 이후까지도 지속됨을 알 수 있다.

Figure 4는 Table 1에 나타난 5가지 조건으로 픽앤홀

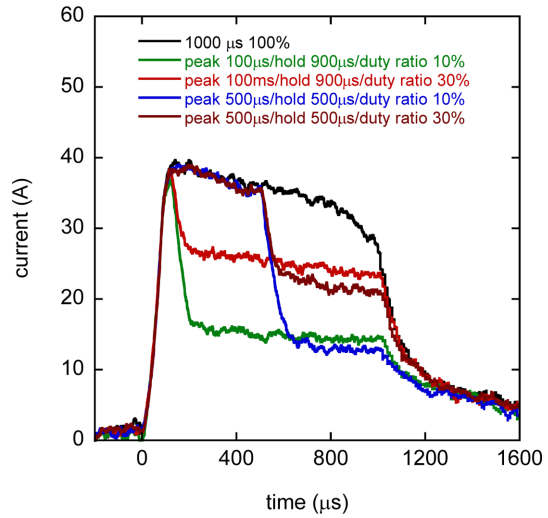


Fig. 4 Measured injector driving current with 5 case peak and hold conditions

드 파형을 마이크로프로세서의 CCP핀으로 출력하여 커먼레일 인젝터로 공급되는 구동 전원을 스위칭하였을 때 인젝터에 흐르는 전류를 측정 한 결과이다. 픽구간에서 전류가 급격하게 상승 하는 곡선은 5가지 조건 모두 거의 일치하고 있다. 픽 이후 홀드 구간에서는 홀드 시간과 홀드 파형의 듀티비값에 의해 결정됨을 알 수 있다. Case 1의 경우 1000 ms 픽앤홀드 파형 전체가 듀티비가 100% 로 픽앤홀드 구간에서 전류가 38~28A 수준이며, 나머지 case의 경우 홀드 구간 듀티비가 10%, 30% 인 조건에서는 각각 15A, 25A 수준이다.

Figure 5(a), Fig. 5(b), Fig. 5(c)는 커먼레일 압력을 130, 100, 75 MPa로 각각 일정하게 유지한 조건에서 Table 1에 나타난 5가지 case의 픽앤홀드 신호 조건으로 3번씩 반복 측정하여 총15회의 Bosch 분사를 측정 장치 압력 센서 신호를 하나의 그래프로 나타낸 것이다. 커먼레일압이 130 MPa, 100 MPa인 경우 픽앤홀드 기간 동안 15회 측정 한 압력 센서 신호들의 변동이 작게 났다. 반면에 레일압 75 MPa의 경우에는 압력 센서 신호의 변동이 상대적으로 크게 나타났음을 알 수 있으며 이는 커먼레일 인젝터 내의 니들이 리프트 되는 메커니즘과 관련이 있다. 즉, 연료가 분사되려면 인젝터 내의 니들을 누르고 있는 스프링 힘을 이기고 니들이 리프트 되어야 하는데 이 힘의 원천이 레일압의 작용과 관련이 있으며 레일압 작용을 제어하는 것은 인젝터 내의 솔레노이드밸브의 개폐이다. 레일압이 130, 100 MPa과 같이

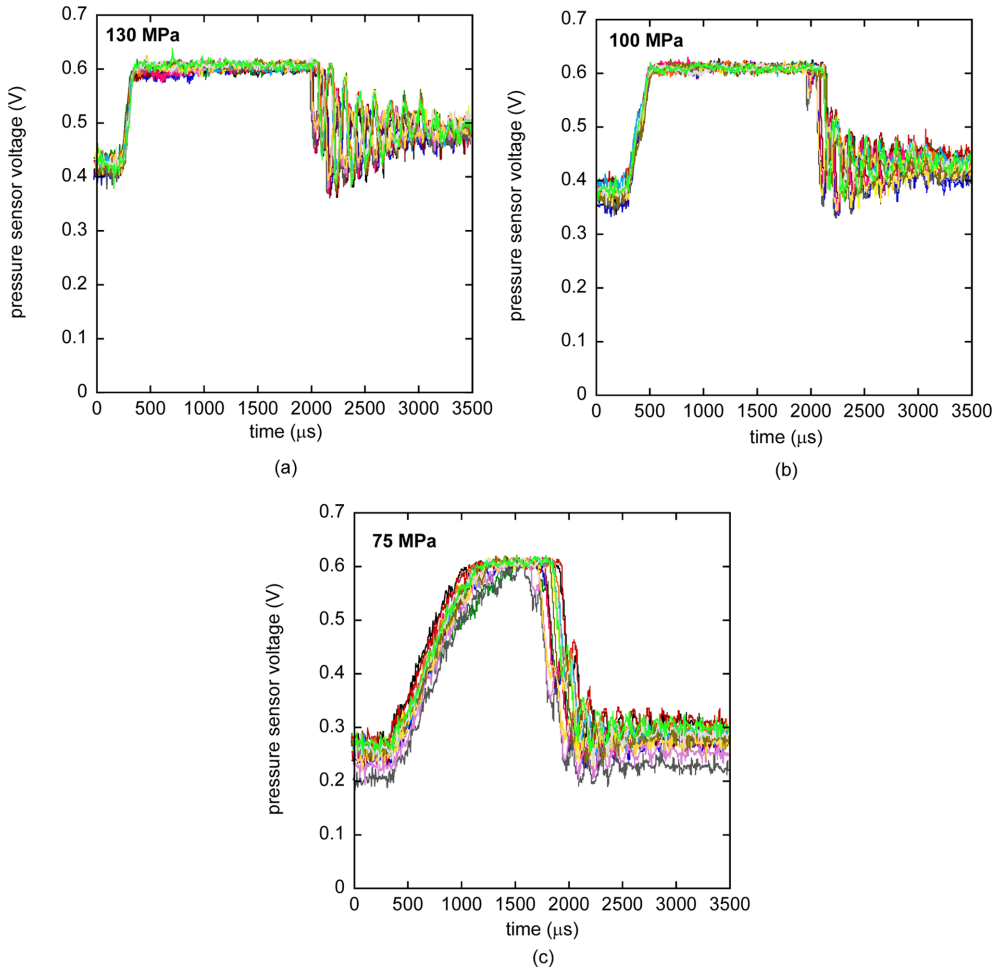


Fig. 5 Pressure sensor voltage of Bosch injection rate method at various common rail pressure: (a) 130 MPa, (b) 100 MPa, (c) 75 MPa

높은 경우에는 니들에 작용하는 힘의 전달이 신속하게 이루어져서 연료 분사압력과의 변동이 작으나, 레일압이 상대적으로 낮은 75 MPa에서는 니들에 작용하는 힘의 변동이 커서 분사압력과의 변동이 크게 나타난 것으로 사료된다. Fig. 4에 나타난 것과 같이 픽과정에서의 전류 상승 곡선에서의 변동은 크지 않기 때문에 솔레노이드 밸브 개폐의 신속성의 영향이 크지 않은 것으로 판단된다. 또한 레일압이 높을수록 픽구간에서 연료 분사 압력과 신호의 기울기가 높게 나타났음을 알 수 있다.

레일압 75 MPa에서 Table 1의 픽앤홀드 5가지 분사 조건 중 case 1, case 2, case 3 대해 Bosch 분사를 측정용 압력 센서의 신호의 변동 특성을 Fig. 6(a), Fig. 6(b),

Fig. 6(c)에 각각 나타내었다. case 1, case 3, case 2의 순서로 연료 분사압력과의 신호의 폭이 넓게 나타났으며, 이 순서는 1000 ms 전체 분사 기간에 걸쳐서 인젝터에 흐르는 전류 적분값이 값이 큰 순서이다. Case 1은 전체 파형이 100% 듀티비를 유지하기 때문에 전류 적분값이 가장 크고, case 2와 case 3는 픽 구간 전류는 일치하지만, 홀드 구간에서 듀티비 차이가 나서 전체 전류 적분값은 case 3가 상대적으로 크다. 이는 커먼 레일압이 작게 유지되는 경우(75 MPa) 연료 분사 압력파가 전류 파형의 영향이 연료 분사 압력파에 미치지 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. case 4, case 5 조건에서의 연료 분사 압력파의 신호도 전술한 case 2, case 3의 결과와 유사하였다.

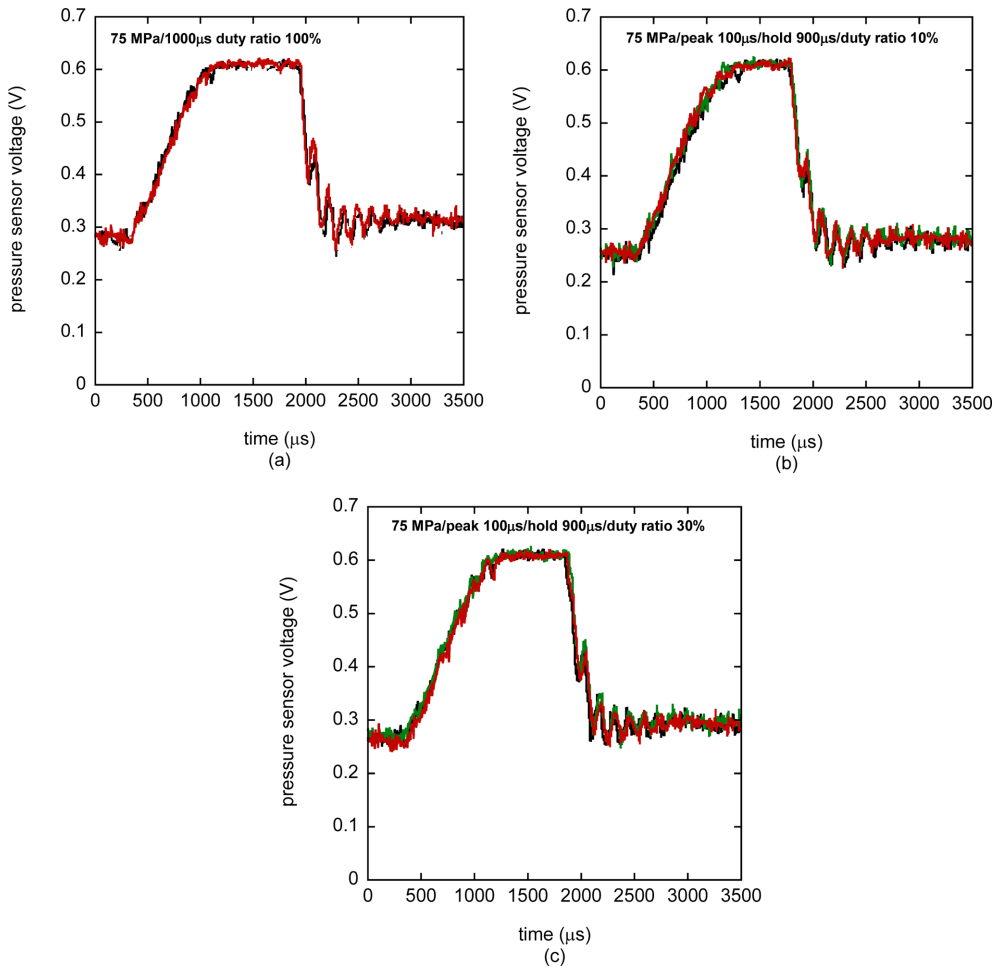


Fig. 6 Pressure sensor voltage of Bosch injection rate method at various peak and hold conditions with rail pressure 75 MPa (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3.

#### 4. 결 론

일정한 압력으로 제어되는 디젤 커먼레일 시스템에서 커먼레일 인젝터에 공급되는 다양한 전류 파형을 공급하는 조건에서 인젝터의 연료 분사 압력과 신호를 Bosch 방식으로 측정하였다. 인젝터에 공급되는 전류 파형의 생성은 마이크로프로세서의 PWM 파형 제어로 구현하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

디젤 커먼레일압이 높은 경우 (100, 130 MPa) 픽앤홀드에 의한 다양한 전류 파형을 인젝터 공급하여도 연료 분사 압력과 파형은 크게 변하지 않았다.

디젤 커먼레일압이 낮은 경우 (75 MPa) 픽앤홀드에

의한 전류파형의 변화가 연료분사 압력과의 변동이 크게 나타났다.

디젤 커먼레일압이 낮은 경우 (75 MPa) 전류파형의 펄스폭이 동일할 경우 홀드구간의 전류값이 크게 유지되는 경우 홀드 구간에서의 연료 분사 압력과의 전압값 적분값이 상대적으로 크게 나타났다.

#### 후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다

## 참고문헌

- (1) M. S. Graham, S. Crossley, T. Harcombe, N. Keeler and T. Williams, Beyond Euro VI - Development of A Next Generation Fuel Injector for Commercial Vehicles, SAE paper 2014-01-1435, 2014.
- (2) S. Matsumoto, C. Klose, J. Schneider, N. Nakane, D. Ueda and S. Kondo, 4th Generation Diesel Common Rail System: Realizing Ideal Structure Function for Diesel Engine, SAE paper 2013-01-1590, 2013.
- (3) V. Macian, R. Payri, S. Ruiz, M. Bardi and A. H. Plasas, Experimental study of the relationship between injection rate shape and Diesel ignition using a novel piezo-actuated direct-acting injector, Applied Energy, Vol. 118, pp. 100-113, 2014.
- (4) J. Schommers, F. Duvinage, M. Stotz, A. Peters, S. Ellwanger, K. Koyanagi and H. Gildein, Potential of common rail injection system for passenger car DI diesel engines. SAE paper, 2000-01-0944, 2000.
- (5) A. Vanegas, H. Won, C. Felsch, M. Gauding and N. Peters, Experimental investigation of the effect of multiple injections on pollutant formation in a common-rail DI diesel engine. SAE paper, 2008-01-1191, 2008.
- (6) R. Matsui, K. Shimoyama, S. Nonaka, I. Chiba and S. Hidaka, Development of high-performance diesel engine compliant with Euro-V. SAE paper, 2008-01-1198, 2008.
- (7) Y. Hotta, M. Inayoshi, K. Nakakita, K. Fujiwara and I. Sakata, Achieving Lower Exhaust Emissions and Better Performance in an HSDI Diesel Engine with Multiple Injection. SAE paper No. 2005-01-0928, 2005.
- (8) M. Badami, F. Mallamo, F. Millo and E. E. Rossi, Influence of Multiple Injection Strategies on Emissions, Combustion Noise and BSFC of a DI Common Rail Diesel Engine. SAE Paper No. 2002-01-0503, 2002.
- (9) A. Kato, K. Matsuura, T. Hakozaki, O. Suzuki, S. Hara-guchi, Y. Yoshimi, T. Katano and T. Hashimoto, Influence of a Fast Injection Rate Common Rail Injector for the Spray and Combustion Characteristics of Diesel Engine, SAE paper No. 2011-01-0687, 2011.
- (10) L. Postrioti, G. Buitoni, F. C. Pesce and C. Ciaravino, Zeuch method-based injection rate analysis of a common-rail system operated with advanced injection strategies, FUEL, Vol. 128, pp. 188-198, 2014.
- (11) C. Poetsch, Crank-Angle Resolved Modeling of Fuel Injection and Mixing Controlled Combustion for Real-Time Application In Steady-State and Transient Operation, SAE Paper No. 2014-01-1095, 2014.
- (12) W. Zeuch, Neue Verfahren zur Messung des Einspritzgesetzes und Einspritz-Regelmässigkeit von Diesel-Einspritz-pumpen, MZT, Jahr. 22 Heft 9, 1961.
- (13) Y. Roh and K. Cho, Development of multi-channel common rail diesel injector driver, KSAE fall conference, pp. 274-279, 2004.
- (14) K. R. Cho, Korea Institute of Electronic Communication Science Journal, Development of Injector Controller, Vol. 8, No. 2, pp. 279-284, 2013.
- (15) M. S. Graham, S. Crossley, T. Harcombe, N. Keeler and T. Williams, Beyond Euro VI - Development of A Next Generation Fuel Injector for Commercial Vehicles, SAE paper 2014-01-1435, 2014.
- (16) G. Chiatti, O. Chiavola, M. Palazzoni and F. Palmieri, Diesel Spray Modeling Under Off-Axis Needle Displacement, 2015-01-922, 2015.
- (17) W. Bosch, The Fuel Rate Indicator: A New Measuring Instrument for Display of the Characteristics of Individual Injection, SAE Paper 660749, 1966.
- (18) J. G. Kim, Driver for Diesel common rail pressure control and injector using a micro-controller, MS Thesis, Seoul National University of Science and Technology, 2016.