

# 연료분사시기와 압력이 합정용 디젤연료의 분무 및 연소특성에 미치는 영향

이형민<sup>†</sup>

(Received July 29, 2015 ; Revised September 21, 2015 ; Accepted September 21, 2015)

## Effect of fuel injection timing and pressure on the combustion and spray behavior characteristics of diesel fuel for naval vessel

Hyung-min Lee<sup>1</sup>

**요약:** 본 논문에서는 합정용 디젤연료를 단기통 커먼레일 디젤엔진에 적용하여 연료분사압력 변화에 따른 분사율 특성, 거시적 분무 특성 및 연료분사시기와 연료압력변화에 따른 연소 및 배기가스 배출특성을 분석하는데 초점을 두었다. 분사율 특성은 Bosch법을 적용한 분사율 측정 시험 장치를 이용하여 분석하였고, 거시적 분무 특성은 정적용기 및 초고속 카메라를 이용하여 분석하였다. 또한, 연료분사시기 및 연료압력 변화를 정밀하게 제어할 수 있는 단기통 엔진을 이용하여 연소 및 배기가스 배출특성을 분석하였다. 30MPa와 50MPa의 분사조건에서 초기 분사율은 50MPa의 분사조건에서 크게 나타났으며, 분무 발달(투과) 또한 동일시간대에서 큰 것으로 분석되었다. 연료분사시기가 지각될수록 실린더 내부 최대 압력과 최대 열발생량은 떨어지는 경향으로 나타났으며, 고압분사조건에서 실린더 내부 최대압력과 최대 열발생량은 다소 큰 것으로 분석되었다. 고압분사조건에서 도시평균유효압력은 낮은 것으로 분석되었고, 연료분사시기가 TDC 쪽으로 지각될수록 도시평균유효압력 및 토크는 증가하는 것으로 나타났다. 연료분사시기가 BTDC20°(30MPa)와 BTDC15°(50MPa)에서 질소산화물 발생수준이 가장 높았으며, 일산화탄소는 BTDC30°를 기준으로 지각될수록 저감되었다.

**주제어:** 분사율, 거시적 분무, 도시평균유효압력, 일산화탄소, 질소산화물

**Abstract:** The objective of this work focuses on the analysis of injection rate and macroscopic spray behavior characteristics with injection pressures as well as combustion and exhaust emission characteristics with injection timing and injection pressure by using a common rail single-cylinder diesel engine. The injection rate was measured by applying the Bosch method, and macroscopic spray behavior characteristics were analyzed with a constant-volume vessel and a high-speed camera. In addition, combustion and emission characteristics were analyzed in a common-rail single-cylinder diesel engine with precise control of fuel injection timing and pressure. For injection pressures of 30MPa and 50MPa, the injection rate was higher at 50 MPa, and the spray development (penetration) was also higher in the same elapsed time. The peak in-cylinder pressure and rate of heat release showed a tendency to decline as injection timing was delayed, and the peak in-cylinder pressure and rate of heat release were slightly higher for higher injection pressures. Higher injection pressures also reduced the mean effective pressure, while the indicated mean effective pressure and torque increased as injection timing was delayed to TDC. Nitrogen oxides had a peak level at injection timings of BTDC20°(30MPa) and BTDC15°(50MPa); carbon monoxide emissions were reduced by delaying injection timing from BTDC30°.

**Keywords:** Injection rate, Macroscopic spray, Indicated mean effect pressure, Carbon monoxide, Nitrogen oxides

### Nomenclature

CE	Combustion efficiency	NOx	Nitrogen oxides
CO	Carbon monoxide	P <sub>b</sub>	Back pressure
EOC	End of combustion	P <sub>inj</sub>	Injection pressure
HSD	High sulphur diesel	Q <sub>LEV</sub>	Chemical energy from fuel
m <sub>fuel</sub>	Fuel mass	ROHR	Rate of heat release
		SOC	Start of combustion

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1999-2604>): Department of Navigation and Ship Handling System, Republic of Korea Naval Academy, Jungwonro-1, Jinhaegu, Changwonsi, 51704, Korea, E-mail: [hmsj1226@korea.ac.kr](mailto:hmsj1226@korea.ac.kr), Tel: 055-549-1485

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

### 1. 서론

디젤엔진의 커먼레일 및 인젝터의 기술개발이 연료의 초 미립화, 투과거리 증가 등을 지속적으로 실현시킴으로써 연소 품질 개선, 연비 감소 및 엔진 성능 향상에 막대한 영향을 미치고 있다[1][2]. 디젤엔진에서 연료분사시기와 연료분사압력은 엔진의 성능과 연비를 결정짓는 중요한 요소로서 작용하고 있으며, Hong *et al.* [3]은 분사압력이 증가할수록 초기 분사속도가 빨라지기 때문에 분무도달거리는 동일시간대에 저압 분사 조건과 비교 시 증가한다고 보고하였으며, Lee [4]는 단기통 디젤엔진 실험에서 연료분사시기가 TDC 쪽으로 지각될수록 토크가 증가한다고 발표하였다. Park *et al.* [5]은 분사율 측정 실험 및 엔진실험에서 고압분사 시 분사지연 시간은 단축되며 초기 분사율이 크기 때문이 최대 분사율이 저압 분사 조건보다 높지만 동일한 연료량을 유지하기 위해서는 인젝터의 통전시간이 짧아져야 하며, 이는 연소최고 압력과 최고 열발생량에 영향을 미친다고 보고하였다. 또한, 연료분사시기가 지각될수록 일산화탄소 및 질소산화물은 저감된다고 발표하였다. 본 연구에서는 연료분사압력에 따른 함정용 디젤연료(HSD: 고유황 경유)의 분사량 특성 및 거시적 분무 특성을 분석하고, 단기통 디젤엔진에 적용시켜, 동일한 연료량으로 연료 분사시기와 연료분사압력 변화에 따른 연소 및 배기가스(일산화탄소, 질소산화물) 배출특성을 실험적으로 분석하였다.

### 2. 시험장치 및 방법

#### 2.1 분사율 측정 시험장치

Figure 1은 함정용 디젤연료의 분사율 특성 시험을 위한 개략도를 나타낸 것이다.

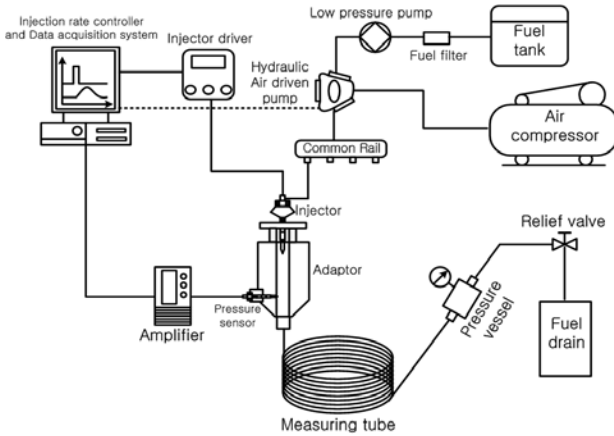


Figure 1: Schematic diagram of injection rate test system

분사율 측정 시험장치는 동일한 연료로 가득찬 관내부에 연료가 분사될 때 관내부의 압력변화를 측정하는 방법인 Bosch(장관법)법을 적용하여 구성하였다[5]. 분사율 시험장치는 연료공급라인과 신호공급라인으로 구분하였으며, 연료의 고압분사를 구현하기 위하여 공기를 가압하여 최대 1,600bar까지 연료의 압력을 상승시킬 수 있는 증압펌프를

장착하였다. 연료를 분사시키기 위한 인젝터의 전류 발생 신호는 프로그램화된 인젝터 드라이버(Zenobalti CO., ZB-5100)를 통해 제어되었다. 분사된 연료의 압력변화는 고압 센서(Kistler, 4067C2000) 및 신호증폭기(Kistler, 4618A)를 이용하여 측정하였고, 이를 Labview 프로그램을 통해 압력신호를 분사율로 나타내었다. 관내부의 압력( $P_b$ : Back pressure)은 연소 및 배기가스 특성 파악을 위한 시험엔진에서 TDC 부근에서 연료를 분사할 시 실린더 내부압력과 유사하게 설정하기 위하여 4.2MPa로 일정하게 유지시켰으며, 연료의 분사압력은 30MPa 및 50MPa이며, 연료의 1회 분사량은 13mg(1,000회 평균)이다. 또한, 시험의 정확도를 높이기 위해 10회에 걸쳐 획득한 데이터(data)를 평균화 하여 분사율 특성을 나타내었다. Table 1 본 시험에 사용된 함정용 디젤 연료의 물성치를 나타낸 것이다.

Table 1 : Properties of diesel fuel for naval vessel

Properties		Values
Carbon(wt%)		86.97
Hydrogen(wt%)		12.64
Sulfur(wt%)		0.025
Distillation Temperature(°C)	10%	227.5
	50%	296.4
	90%	352.8
Density(15°C, kg/m <sup>3</sup> )		849.4
Cetane number		52.8
Kinematic viscosity(40°C, mm <sup>2</sup> /s)		3.621
LHV(MJ/kg)		42.7
Flash point(°C)		81.0

#### 2.2 거시적 분무 가시화 측정 시험장치

Figure 2는 함정용 디젤연료의 거시적 분무 가시화 시험을 위한 개략도를 나타낸 것이다.

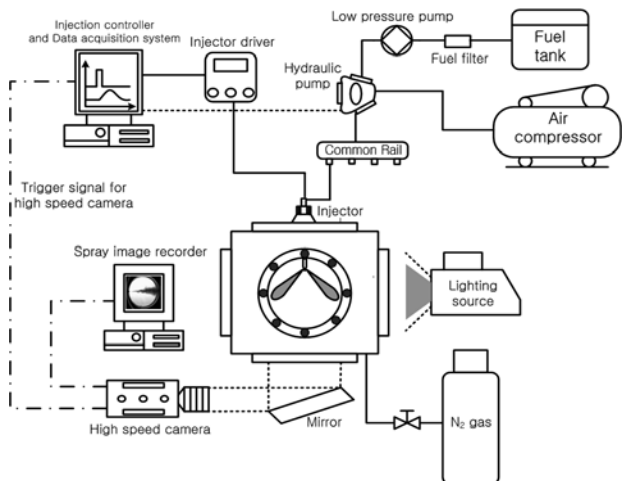


Figure 2: Schematic diagram of spray behavior test system

연료의 공급라인과 압력변화 시스템을 제외하고 신호라인은 분사율 시험장치와 동일하다. 함정용 연료의 분사 압력에 따른 정적용기내 거시적 분무 거동 형상을 분석하기 위해 초고속 카메라(Photron, Fastcam SA 3) 및 가시화용 램

프(Optical system, Xeon 1000, 1,000W)를 사용하였다. 정적 용기내의 압력은 자유분무 조건에서 촬영하기 위하여 대기압 상태로 유지시켰다. 연료의 분사압력과 분사량은 분사율 측정 시험 조건과 동일하며, 분무 거동 촬영 시 초고속 카메라의 프레임 속도는 16,000fps(0.0625ms/frame, resolution: 256×256)로 설정하였으며, 촬영시작점을 분사신호와 동기화 시켜 촬영하였다.

### 2.3 연소 및 배출가스 측정 시험장치

Figure 3은 연료의 분사시기와 압력변화에 따른 연소 및 배기가스 배출 특성 분석을 위한 시험장치의 개략도를 나타낸 것이다. 시험장치는 커먼레일 단기통 디젤엔진, 연료공급시스템, 시험엔진의 회전수를 정밀 제어하는 22kW급 전동기, 분사압력 및 분사시기를 제어하는 제어장치, 냉각시스템, 연소 특성분석(100cycle 평균화)을 위한 연소 해석 장치(Mobiltek MT-7002S), 배기가스 배출물 특성분석을 위한 배기가스 분석 장치(Testo 350K)등으로 구성되어 있으며, 시험엔진의 사양, 시험조건 주요 시험장치의 제원을 Table 2에 나타내었다.

## 3. 시험결과 및 고찰

### 3.1 연료 압력에 따른 분사율 특성

Figure 4는 연료분사 압력이 30MPa 및 50MPa인 조건에서 분사율 특성을 나타낸 결과이다. 연료분사 압력이 50MPa인 조건에서 초기 분사 지연이 짧아지면서 다량의 연료가 분사가 되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 연료분사 압력의 증가는 인젝터 초기 분사율을 급격히 증가시킨다는 것을 의미한다. 또한, 최대 분사율은 30MPa인 조건보다 약 40% 증가했음을 확인할 수 있다. 그러나 50MPa인 조건에서 동일한 연료량을 분사하기 위해서는 인젝터의 통전시간을 30MPa인 조건보다 짧게 설정해야 되기 때문에 최대 분사율 이후 분사율은 급격히 감소된다. Ikegami [6]는 일반적으로 연료의 초기 분사량의 증가는 연료분사시기가 특정한 부분에서 급격한 연소가 이루어지기 때문에 NOx 증가에 영향을 미친다고 발표했다.

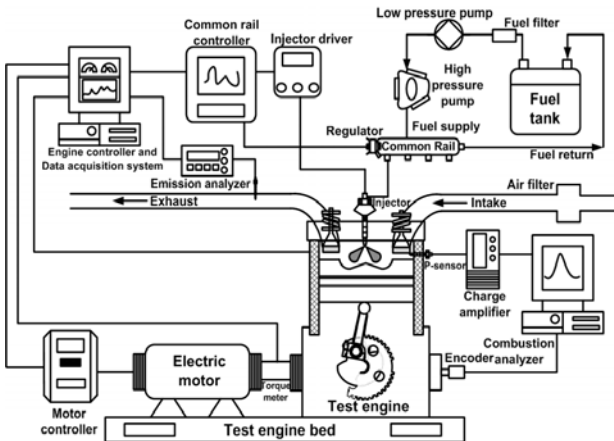


Figure 3: Schematic diagram of combustion and exhaust emission test system

Table 2 : Specifications of main experimental system

Items	Descriptions	
1. Test engine		
Displacement(cc)	498	
Valve Operation	SOHC	
Bore × Stroke (mm)	83 × 92	
Compression ratio	17.7 : 1	
Number of valve	2-Intake, 2-Exhaust	
Fuel injection system	Bosch common rail	
Valve timing	Intake open	BTDC7°
	Intake close	ABDC43°
	Exhaust open	BBDC52°
	Exhaust close	ATDC6°
2. Test Conditions		
Engine speed	800rpm	
Injection pressure( $P_{inj}$ )	30MPa, 50MPa	
Injection timing	BTDC30° ~ TDC(5° interval)	
Injection mass( $m_{fuel}$ )	13mg/stroke	
Coolant temperature	60 °C	
3. Combustion analyzer		
Maker & Model	Mobiltek MT-7002S	
Main ensemble data	P-θ, P-V, IMEP, dQ-dθ, dP-dθ	
4. Emission analyzer		
Maker & Model	Testo-350K	
Analysis range	NOx	0~4,000ppm
	CO	0~10,000ppm
5. Signal Amplifier		
Maker & Model	Kistler 5018	
Piezo Sensor	Kistler 6056A	

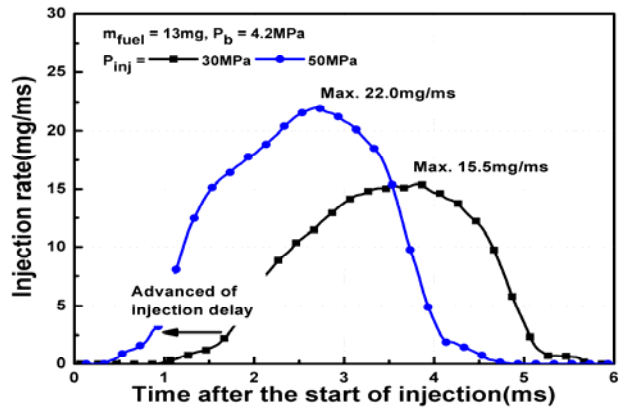


Figure 4: Injection rate characteristics with injection pressure

### 3.2 연료 압력에 따른 거시적 분무 특성

Figure 5는 초고속 카메라를 이용하여 연료분사 압력에 따른 분무특성을 대기압 조건에서 연료가 분사되는 시점부터 연료분사가 종료되는 시점까지 거시적으로 나타낸 결과이다.

30MPa과 50MPa의 연료분사압력조건에서 분무 특성 비교 시 연료분사압력이 높은 경우 연료분사 시작점이 빠르다는 것을 알 수 있으며, 이를 시간으로 변경 시 50MPa의 조건에서 약 0.93ms 빨리 분사된다는 것을 의미한다. 연료분사압력이 높은 경우 분무발달 거리는 분사 후 시간이 경과함에 따라 더욱 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 이때 분무 도달 거리는 촬영된 스케일(scale)에서 획득된 사진에서 인젝터 팁

으로부터 수직 방향으로 거리를 측정하였으며 최대 분무 발달거리 측정은 가시화창에 보이는 것으로 한정하였다.

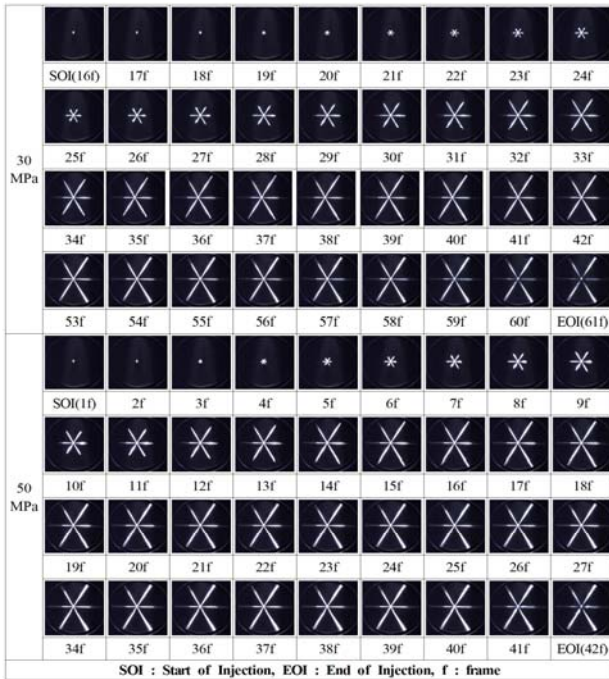


Figure 5: Macroscopic spray behavior characteristics with injection pressure

Figure 6은 연료분사압력에 따른 분무 도달거리를 촬영된 영상 사진으로부터 거리를 측정하여 나타낸 결과이다. 연료분사압력이 높은 조건에서 분사 시 분사개시 이후 분무 도달거리는 급격히 증가하는 경향을 확인할 수 있으며, 촬영된 사진으로부터 분사개시 이후 분무각도 커지는 경향을 확인할 수 있다. 이는 고압분사가 분사속도를 증가시키기 때문에 분무 발달이 커지게 되는 원인으로 작용하지만, 분사압력이 증가할수록 동일한 연료분사량을 유지하기 위해서는 통전시간은 짧아져야 된다는 것을 의미하는 것이다. 따라서, 고압분사 시 분무는 저압분사 조건보다 빨리 종료되어 모멘텀 손실을 초래한다[7].

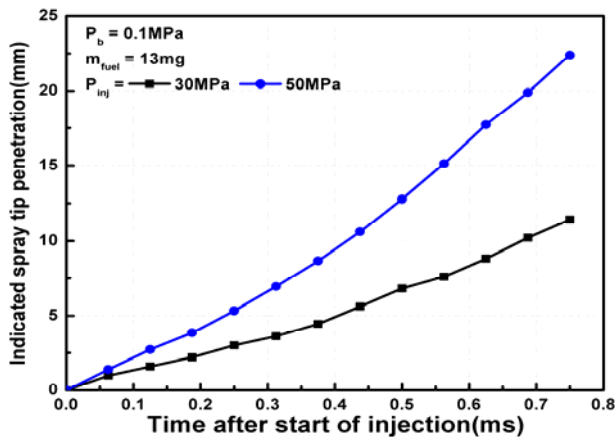


Figure 6: Indicated spray tip penetration with injection pressure from Figure 5

### 3.3 연료 분사시기 및 압력에 따른 연소 및 배출가스 특성

Figure 7은 단기통 디젤엔진에서 연료분사시기와 압력에 실린더 내부 압력 및 열발생량에 미치는 영향을 나타낸 결과이다. 단기통 엔진실험에서 주 분사 시 전 분사는 적용하지 않았다. 시험 결과로부터 연료분사시기가 TDC에서 전각될수록 실린더 최고 압력과 최고 열발생량은 높아지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 연료분사시기가 BTDC30°인 경우 실린더 최고 압력과 최고 열발생량은 낮아지는 결과로 나타났다. BTDC30°인 경우 실린더 내부 압력과 온도가 낮기 때문에 점화지연을 초래할 뿐만 아니라 실린더 내부 틈새로 연료가 들어가는 현상이 나타날 확률이 지각조건의 분사시기보다 높고, 긴 착화지연에 따른 미립화 및 화학적 반응의 불량, 산소와의 불충분한 혼합 등의 상태에서 연소 반응이 이루어지기 때문에 실린더 내부 최고 압력과 최고 열발생량은 떨어진다. 그러나 50MPa의 고압 분사 조건에서 모든 연료분사시기조건과 관계없이 점화시기가 빠른 경향을 보이고 있다. 이는 높은 연료분사압력과 짧은 통전시간이 연료의 미립화를 촉진시키기 때문이다. 또한 열발생량 비교 시 고압분사조건에서 열발생량이 짧아지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 짧은 통전시간이 연소기간을 짧게 하기 때문에 열발생량은 30MPa의 저압 분사 조건보다 짧아진다. 실린더 내부에서 고압분사에 의한 빠른 점화시기는 실린더 내부 최고압력에 영향을 미친다.

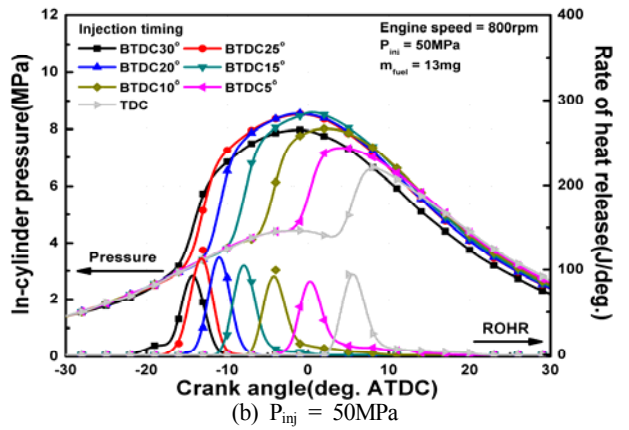
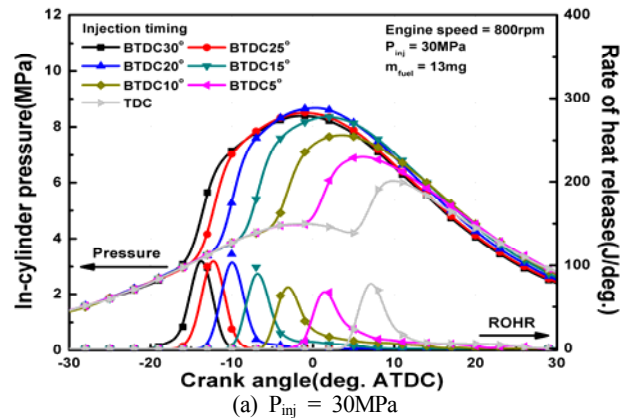
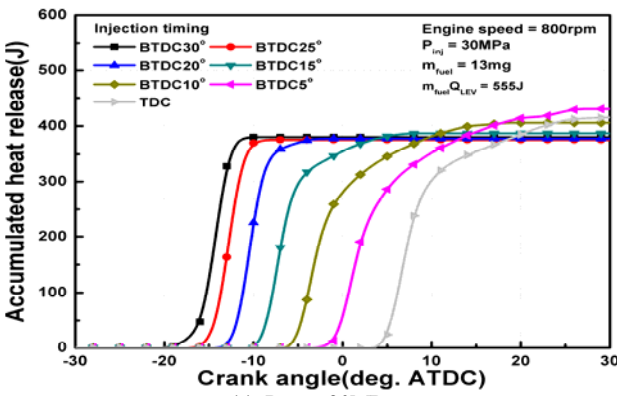


Figure 7: Effect of injection timing and pressure on the In-cylinder pressure and ROHR

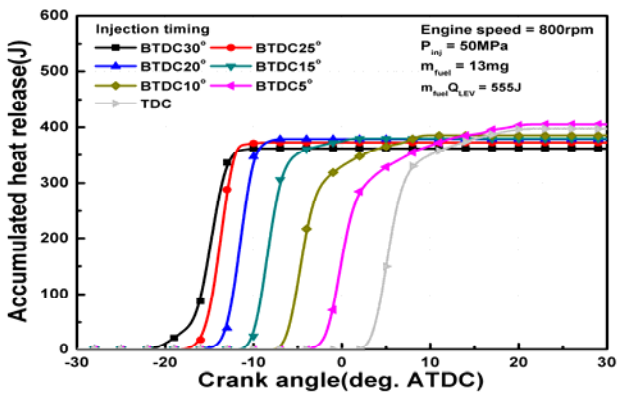
Figure 8은 연료분사시기와 분사압력에 따른 누적 열발생량을 나타낸 결과이다. 30MPa 및 50MPa 분사조건 비교 시 초기 연소되는 속도가 50MPa 조건에서 빠르다는 것을 확인할 수 있으며, 연료분사시기가 TDC쪽으로 지각될수록 누적 열발생량이 커지는 결과를 알 수 있다. 이는 연료분사시기가 TDC쪽으로 지각될수록 실린더 내부 압력과 온도는 높아지기 때문에 점화 지연 시간이 줄어들고 짧은 예혼합 연소에 이은 확산연소가 길게 나타나기 때문이라고 판단된다. 또한 최대 누적 열발생량의 값은 30MPa 분사조건에서 다소 크다는 결과를 확인할 수 있으며, 이는 연소효율이 50MPa 분사조건보다 증가했다는 결과를 말해주는 것이다. 연소효율은 아래와 같은 식 (1)으로 나타낼 수 있다[8].

$$CE = \frac{100}{m_f Q_{LEV}} \int_{SOC}^{EOC} ROHR(\theta) d\theta \quad (1)$$

연료로부터 발생되는 화학에너지( $m_f Q_{LEV}$ )와 최대 누적 열발생량의 값과의 차이는 실린더의 열전달, 크레비스 손실, 불완전 연소에 의한 손실 등을 포함하는 열손실로 대표할 수 있다. 위 연소효율 식으로 계산하면 30MPa 분사조건에서 연소효율이 증가하는 결과를 나타내지만, 그 차이는 크지 않다. 30MPa 분사조건에서 연소효율이 증가하는 가장 큰 이유는 인젝터의 통전시간이 50MPa 분사조건보다 길기 때문에 연소시간이 늘어났기 때문이라고 판단된다.



(a)  $P_{inj} = 30MPa$



(b)  $P_{inj} = 50MPa$

Figure 8: Effect of injection timing and pressure on the accumulated ROHR

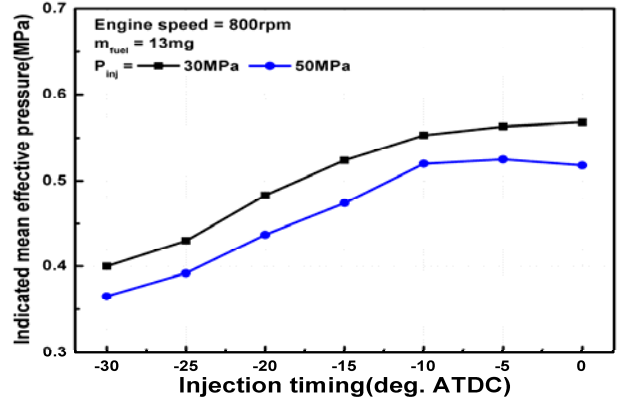


Figure 9: Effect of injection timing and pressure on the IMEP

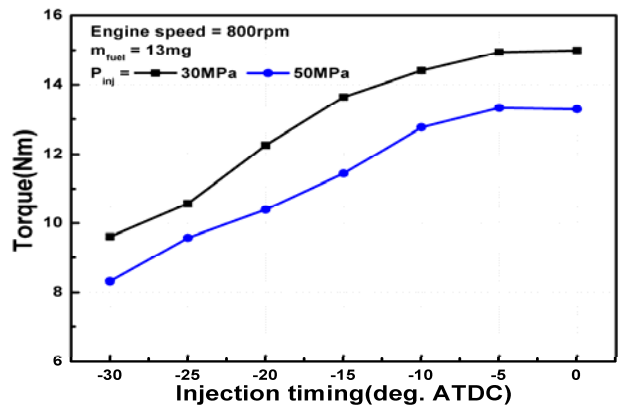


Figure 10: Effect of injection timing and pressure on the torque

Figure 11 과 12는 연료분사시기와 분사압력에 따른 일산화탄소 및 질소산화물 배출특성을 나타낸 결과이다. 일산화탄소의 경우 연료분사시기가 TDC 쪽으로 지각되면서 급격히 줄어드는 경향을 보이고 있다. BTDC30°의 조건을 제외하면 연료분사압력에 따른 차이는 크지 않다. BTDC30° 분사조건에서 일산화탄소가 크게 발생하는 이유는 낮은 실린더 내부 압력과 온도, 점화 지연, 실린더 벽면으로의 흡착 등의 이유로 불완전 연소가 발생하기 때문에 일산화탄소가 다량으로 배출되는 것으로 판단되며, 50MPa의 분사조건에서는 다량의 초기 분사량이 위 설명된 현상에 의해 불완전 연소를 더욱 촉진시키기 때문에 배출되는 수준이 큰 것으로 생각된다. 질소산화물은 30MPa 분사조건에서 BTDC20°를 기준으로, 50MPa 분사조건에서 BTDC15°를 기준으로 연료분사시기가 진각조건으로 이동할수록 저감되며, 지각조건으로 이동할수록 줄어드는 경향을 보이고 있다. 질소산화물은 실린더 내부 연소온도에 절대적 지배를 받으며, 일반적으로 실린더 내부 연소온도가 1,800K 정도에서 발생된다. 따라서, 최대값을 나타내는 연료분사시기에서 진각조건으로 이동할수록 실린더 내부의 낮은 압력과 온도로 질소산화물 배출 수준이 줄어들며, 지각조건으로 이동할수록 예혼합 연소에 의한 열발생량이 떨어지고, TDC 이후에 연소가 지속적으로 이루어지기 때문이 실린더 내부 연소온도

를 떨어뜨리는 원인으로 작용한다. 따라서, 연료분사시기가 최대값을 나타내는 조건에서 지각될수록 연소온도에 지배를 받는 질소산화물은 저감되게 된다.

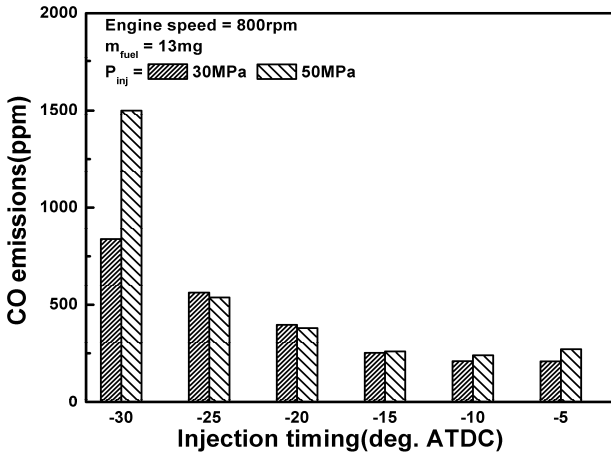


Figure 11: Effect of injection timing and pressure on the CO emissions

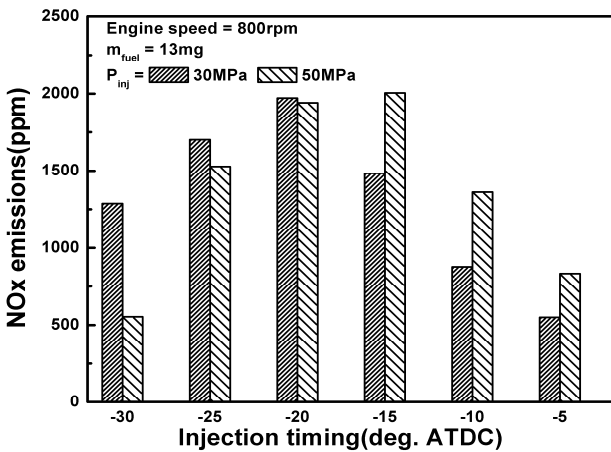


Figure 12: Effect of injection timing and pressure on the NOx emissions

#### 4. 결 론

본 논문의 목적은 연료분사시기와 연료분사압력에 따른 분사율 특성, 거시적 분무 특성 및 연소특성을 분석하는 것이다. Bosch법으로 제작된 분사율 측정 장치와 정적용기 및 초고속 카메라를 이용하여 분사율 특성 및 거시적 분무 특성 촬영하였고, 연료분사시기 제어가 가능한 단기통 엔진을 이용하여 연소 및 배기가스 배출특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연료분사압력이 높을수록 분사개시 시점이 저압 분사 조건보다 짧아졌으며, 초기 분사량이 급격히 증가하였다. 거시적 분무 특성을 분석한 결과 연료분사압력이 높은 경우 분무는 초기 분사속도가 저압 분사 조건보다 빠르기 때문에 급속히 발달한다. 또한, 동일한 연료

량을 유지하기 위해 인젝터 통전시간이 짧아져야 하며, 이는 분사종료가 빨리 이루어지는 결과를 초래하기 때문에 모멘텀 손실로 이어진다.

2. BTDC30°를 제외하고 연료분사시기가 BTDC25°부터 TDC 쪽으로 지각될수록 실린더 내부 최대압력 및 최대 열발생량은 떨어지고, 도시평균유효압력은 증가한다. 또한, 연료분사압력이 높은 경우 실린더 내부 최대압력과 최대 열발생량은 다소 증가하였으나, 인젝터 통전시간이 짧기 때문에 연소가 빨리 종료되는 결과로 나타났다. 이러한 영향은 고압분사조건에서 연소효율이 저압분사 조건의 연소효율보다 낮아지는 결과로 나타났다. 또한, 도시평균유효압력은 고압분사조건에서 줄어드는 경향으로 나타났다. 이는 저압 분사 조건보다 일찍 연소가 종료되기 때문에 음의 일의 효과가 가장 큰 원인이며, 이는 토크의 감소 작용으로 분석되었다.
3. 연료분사시기가 지각될수록 일산화탄소의 배출수준은 줄어드는 경향으로 나타났으나, BTDC30°를 제외하고 연료분사압력에 따른 배출수준은 크게 차이가 나지 않는다. 최대 진각조건 및 고압분사조건에서 연료 분사 초기 다량의 연료분사가 불완전 연소의 원인으로 크게 작용하기 때문에 일산화탄소의 배출수준은 높다. 질소산화물의 경우 연료분사시기가 BTDC20° ( $P_{inj} = 30MPa$ ) 및 BTDC15° ( $P_{inj} = 50MPa$ ) 기준으로 진각되었을 경우와 지각되었을 경우 저감되는 결과로 나타났다. 이는 BTDC20° ( $P_{inj} = 30MPa$ ) 및 BTDC15° ( $P_{inj} = 50MPa$ )에서 연소온도가 가장 높다는 것을 의미하며, 진각되었을 경우 실린더 내부의 낮은 압력과 온도, 지각되었을 경우 TDC 이후까지의 연소 작용이 실린더 내부 온도를 떨어뜨려 연소온도의 지배를 받는 질소산화물의 배출수준을 저감시켰다고 판단된다.

#### References

- [1] M. J. Bae, D. S. Han, Y. J. Chang, J.-H. Song, and C. H. Jeon, "A numerical study on effect of pilot injection on combustion and emission characteristics in a marine diesel engine," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 37-45, 2010 (in Korean).
- [2] J. D. Kim, G. Ainull, K. K. Song, J. Y. Jung, and H. G. Kim, "An experimental study on spray characteristics of diesel and biodiesel fuel," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, vol. 35, no. 1, pp. 53-59, 2011 (in Korean).
- [3] J. G. Hong, K. W. Ku, J. H. Kim, and C. W. Lee, "Spray characteristics of CRDi for injection and ambient pressure," *Spring academic conference proceeding of the Korean Society of Automotive Engineering*,

KSAE 12-G0011, 2012 (in Korean).

- [4] H. M. Lee, "Effect of fuel injection timing on the combustion and NOx emission characteristics in a single cylinder diesel engine applied with diesel fuel for naval vessel and biodiesel," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 38, No. 6 pp. 681-687, 2014 (in Korean).
- [5] C. Arcoumanis and M. S. Baniasad, "Analysis of consecutive fuel injection rate signals obtained by the Zeuch and Bosch methods," SAE technical paper, SAE 930921, 1993.
- [6] M. Ikegami, "Fuel injection rate shaping and its effect on exhaust emissions in a direct-injection diesel engine using a spool acceleration type injection," SAE technical paper, SAE 970347, 1997.
- [7] S. H. Park, S. H. Yoon, and C. S. Lee, "Effect of multiple-injection strategies on overall spray behavior, combustion, and emissions reduction characteristics of biodiesel," Applied Energy, vol. 88, pp. 88-98, 2011.
- [8] J. G. Ramírez-Hernández, Combustion Studies for High Speed Direct Injection Diesel Engines under Low Temperature Cold Start Conditions, Ph.d. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of Politecnica in Valencia, Spain, 2012.