

## 승용 디젤 엔진에서 분사 전략이 배출 가스 및 엔진 성능에 미치는 영향에 관한 연구

노 현 구<sup>1)</sup> · 이 두 진<sup>2)</sup> · 이 창 식<sup>\*3)</sup>

인덕대학 기계자동차과<sup>1)</sup> · 한양대학교 대학원 기계공학과<sup>2)</sup> · 한양대학교 기계공학부<sup>3)</sup>

### Effect of Injection Strategy on the Exhaust Emission and Performance Characteristics of a Light-duty Diesel Engine

Hyun Gu Roh<sup>1)</sup> · Doo Jin Lee<sup>2)</sup> · Chang Sik Lee<sup>\*3)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Mechanical and Automotive Engineering, Induk University, Seoul 139-749, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

<sup>3)</sup>Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 5 July 2010 / Accepted 24 November 2010)

**Abstract** : This paper described the effect of the multiple injections on the emission characteristics and combustion stability in a common rail diesel engine. In order to investigate the influence of multiple injections in a passenger car diesel engine, the injection strategy was varied with pilot injection, post injection and one main injection at various conditions. Based on the experimental results, the combustion and emissions characteristics were analyzed for the various injection strategies such as main, pilot-main, double-pilot-main, double-pilot-main-post injection strategy. It is revealed that the NO<sub>x</sub>, HC and CO emissions are reduced by double pilot and post injection at medium load, however, soot emission is increased. Also, in the case of multiple injection, the combustion pressure is increased smoothly near the TDC and the coefficient of variation and fuel consumptions are decreased.

**Key words** : Injection strategy(분사 전략), Multiple injection(다단 분사), Pilot injection(과일릿 분사), Post injection(후 분사), Combustion characteristics(연소 특성), Emission characteristics(배기 배출물 특성)

### 1. 서 론

최근 고유가 및 자동차 배출가스에 의한 대기오염과 화석 연료 고갈에 대비하기 위하여 자동차의 고 효율화와 저공해 자동차의 개발의 관점에서 꽤 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>1-4)</sup> 특히 지구 온난화의 주된 인자로 알려져 있는 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 배출 저감 정책에 따라 자동차 연비 향상을 위한 연구 개발이 본격화되고 있다. 이러한 지구 온난화에 대한 대책과 엔진의 연비 및 효율 증대를 위한 여러 가지

대책으로 클린 디젤, 천연가스, 하이브리드, 연료전지 그리고 전기 자동차 등이 개발되고 있다.

또한 디젤 엔진에서 분사 방법의 개선 기술들이 널리 보급되면서 매년 또한 많은 감소를 가져왔으며 고출력, 저 연비 실현을 위하여 더욱 많은 연구가 이루어지고 있다. 과일릿 분사는 주 분사에 의한 급격한 연소를 방지하는 기술로 과일릿 분사의 횟수, 분사시기, 분사량의 최적화에 의하여 배출가스저감과 연소성능 개선에도 크게 이바지하게 되었으며 이러한 연구 또한 여러 연구자에 의하여 보고되고 있다.<sup>5-7)</sup> 그러나 과일릿 분사와 주 분사의 상호 관계

\*Corresponding author, E-mail: cslee@hanyang.ac.kr

가 잘 조화되지 않으면 과일릿 분사에 의한 부조화에 의하여 배출가스 또한 증가한다고 알려져 있다.<sup>8-10)</sup>

디젤의 경우 HC, CO는 가솔린 대비 적게 배출되지만 NO<sub>x</sub>와 Soot의 경우는 가솔린 대비 많이 배출되는 단점을 지니고 있다. 특히 매연의 경우에는 배출시 매연도 중요하지만 배출되는 입자상 물질의 수와 크기에 따른 인체 유해성이 크게 거론되고 있으며 이 부분에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.<sup>11-13)</sup> 또한 WHO에서는 청정 공기는 인간의 건강과 복지의 기본 사항으로 대기오염이 건강을 위협하는 주된 요인의 하나라고 보고하였다. 특히 WHO에서는 대기오염 때문에 질병이 증가하여 인체의 건강을 해치고 심지어는 조기 사망의 원인이라고 보고하고 있다. 이에 대기 공기에 대한 품질 지침을 1987년에 제정하고 10년에 한번씩 갱신하며 2005년 공기 품질 지침을 수정하여 2006년에 보고하는 등<sup>14)</sup>에 대기 공기 품질에 많은 관심을 가지고 있다.

배출가스의 유해물질저감을 위해서는 합산소연료 즉, DME(Dimethyl Ether), 바이오 디젤, 바이오 에탄올혼합 연료 등을 이용한 엔진의 개발에 박차를 가하고 있다. 그러나 이러한 신 연료 적용 연구와 아울러 분사 전략에 따른 배기가스의 특성이 분석된다면 신 연료를 적용함에 있어 고성능 저공해를 실현할 수 있을 것으로 사료된다.

따라서 본 연구는 커먼레일 디젤 엔진에서 분사 전략이 배기가스 및 엔진 성능에 미치는 영향을 비교 분석하고자 한다. 이를 위해 과일릿 분사의 유무와 횟수 그리고 후 분사까지 적용했을 경우 이에 대한 효과를 실험적으로 분석하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 연구에 적용한 엔진은 직분식 디젤 엔진으로 최고 분사압력이 165MPa이며 배기량은 1.6ℓ, 4기통 CRDI 디젤 엔진을 이용하여 실험을 수행하였다.

실험 장치는 EC 동력계(AG150), 연료 압력 및 연료 분사 제어 장치(ETAS INCA V5.4, Bosch EDC16 ETK ECU), 연소 및 배기 분석 장치(Horiba MEXA-

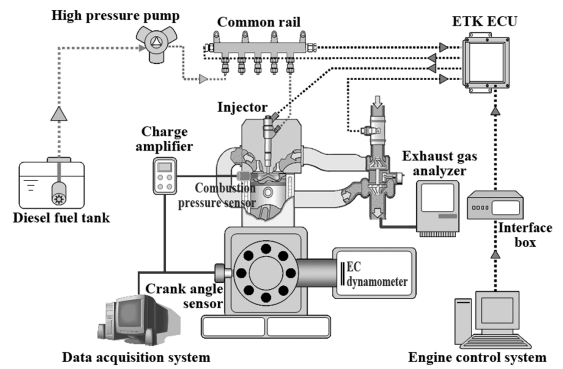


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Specifications of test engine

Engine type	VGT DI diesel
Number of cylinder	4
Displacement volume(L)	1.6
Compression ratio	17.3
Fuel injection system	Bosch common rail
Max. power (kW/rpm)	86/4,000
Max. torque (Nm/rpm)	260/2,000

554JKNO<sub>x</sub>, AVL Smokemeter 407)를 구성하였으며 실험 장치의 개략도는 Fig. 1과 같다. 연소시 압력을 측정하기 위해 예열 플러그식 압전소자 압력 센서(Kistler, 6057ASP)를 장착하였다. 또한 크랭크축에는 엔진 회전속도 검출 및 엔진 회전각을 검출하기 위한 크랭크 위치 센서(Crankshaft position sensor)를 장착하였으며 실린더 헤드에는 실린더의 압축 상사점을 계측하기 위해 캠축 위치 센서(Camshaft position sensor)를 장착하였다. 본 실험에 사용된 엔진의 제원은 Table 1과 같으며 엔진의 성능을 분석하기 위한 DAQ보드(NI, PCI 6251 & SC2345)와 소프트웨어(NI, Labview 8.2)를 사용하여 실시간으로 데이터를 취득하였다.

### 2.2 실험 방법

본 실험에서 분사 전략에 따른 엔진 성능 및 배기 특성을 분석하기 위해서 엔진 ECU를 직접 제어하여 단 분사, 1회 과일릿 분사+ 주 분사, 2회 과일릿 분사+ 주 분사, 2회 과일릿 분사+ 주 분사+ 후 분사인 4가지 조건으로 실시하였다. 또한 연소 및 배기가스에 미칠 수 있는 냉각수 온도, 흡기 온도, 연료

Table 2 Test and operating condition

Test speed	1,000 rpm					
Test load	0~80%					
Injection pressure	40 MPa					
Water temperature	80 ± 3°C					
Intake air temperature	40 ± 3°C					
<b>CASE 1 (Single injection)</b>						
	single injection quantity(mg)					
	0%	20%	40%	60%	80%	
	3.84	6.53	9.90	13.75	17.71	
	<b>CASE 2 (One pilot + main injection)</b>					
		One pilot quantity				
		1.5 mg				
Main injection quantity						
Variable						
<b>CASE 3 (Double pilot + main injection)</b>						
	1st + 2nd pilot quantity					
	1.5 mg + 1.5 mg					
	Main injection quantity					
	Variable					
<b>CASE 4 (Double pilot + main + post injection)</b>						
	1st + 2nd pilot quantity					
	1.5 mg + 1.5 mg					
	Post injection quantity					
	1.5 mg					

온도 등의 보정 제어 부분을 엔진 ECU 로직에서 보정 값을 모두 제거한 제어용 INCA 프로그램을 사용하였다.

엔진 부하에 있어서는 1,000rpm에서의 최대 부하를 기준으로 무 부하부터 80%의 부하까지 20%씩 증가하며 5가지의 부하조건에서 실험을 실시하였다. 또한 연료 분사 압력은 40MPa로 고정하여 실시하였으며 실험 조건 및 엔진의 작동 상태는 Table 2와 같다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 분사 전략 및 엔진 부하에 따른 배출물 특성

Fig. 2는 1,000rpm에서 분사 전략 및 부하에 따른 NO<sub>x</sub>와 Soot의 배기 특성을 나타낸 그래프이다. 단 분사 조건인 CASE 1을 살펴보면 엔진 부하에 따라 급격하게 NO<sub>x</sub>가 증가하는 것을 볼 수 있으나 Soot의

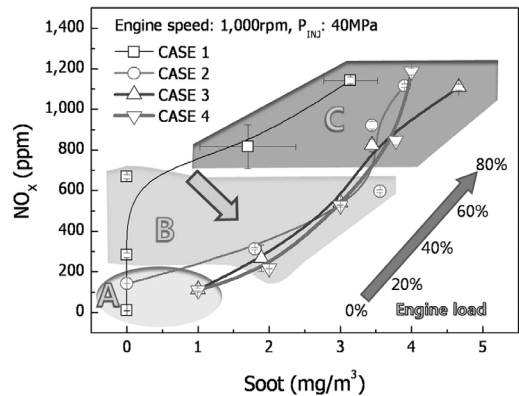


Fig. 2 Effect of injection strategy on Soot and NO<sub>x</sub> emissions

경우 60%부터는 발생하는 것을 볼 수 있다. 그리고 다단 분사인 CASE 2,3,4의 경우 “A” 영역인 저부하에서는 NO<sub>x</sub>와 Soot 모두 증가하였으나 “B” 영역(중부하영역)에서는 NO<sub>x</sub>만 감소하고 Soot는 증가한 것을 볼 수 있다. 그러나 고부하 영역인 “C” 영역에서는 NO<sub>x</sub>는 비슷하게 배출되나 Soot는 증가한 것을 볼 수 있다. 즉 다단 분사는 고부하 영역에서는 큰 효과를 볼 수 없으나 중부하 영역인 CASE 4에서는 NO<sub>x</sub>의 감소효과가 더 두드러지게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 팽창 구간에서의 연료 분사에 따른 증발 잠열로 인하여 연소 압력이 낮아져 감소한 것으로 사료된다.

Fig. 3은 HC와 CO를 나타낸 그래프로 단 분사에 대한 다단 분사에서의 감소가 두드러지게 나타난다. 특히 분사 횟수가 증감함에 따라 중부하 영역 이하에서는 감소하는 양이 더 많아지는 것을 볼 수 있다. 이는 단 분사의 경우 1회 연소만 이루어지는 반면에 다단 분사의 경우 분사횟수에 따라 연소가 지속되는 기간이 증가하여 HC와 CO가 동시에 감소한 것으로 판단된다. 특히 후 분사를 실시한 경우 중부하 영역인 “A” 영역에서 감소폭이 두드러지게 나타나는 것을 볼 수 있다. 고부하 영역인 80%에서는 후 분사조건(B)이 2회 파일럿 분사를 한 경우 보다 HC가 높게 배출되는 것을 볼 수 있다. 이는 고부하에서의 주 분사량이 증가함에 따라 소량의 후 분사는 연소되지 못해 배출되어 증가한 것으로 판단된다. 따라서 후 분사는 중부하 영역에서 그 효과를 볼 수 있는 것으로 판단된다.

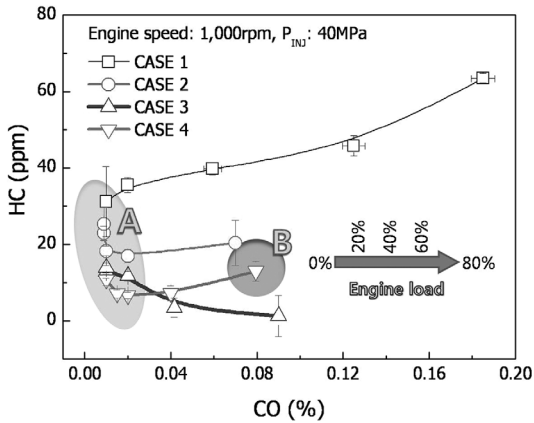


Fig. 3 Effect of injection strategy on HC and CO emissions

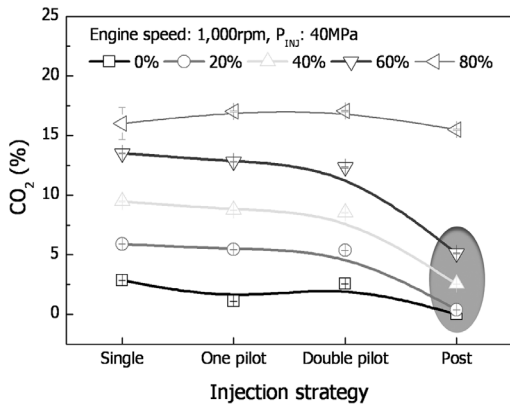


Fig. 4 Effect of injection strategy on CO<sub>2</sub> emissions

Fig. 4는 분사 전략에 따른 CO<sub>2</sub>를 나타낸 그래프로 엔진 부하가 증가함에 따라 CO<sub>2</sub> 배출량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 파일럿 분사를 실시한 경우 단분사의 경우와 큰 차이는 없으나 후분사의 경우 엔진 부하 60%의 이하에서는 많은 감소를 보이고 있다.

### 3.2 분사 전략과 엔진 성능 특성

Fig. 5는 분사 전략에 따른 IMEP와 사이클 변동률을 나타낸 그래프이다. IMEP의 경우 부하에 따라 증가하고 분사 전략에 따른 차이가 발생하지 않는다. 그리고 사이클 변동률을 살펴보면 부하가 증가함에 따라 분사 횟수에 큰 영향을 받지 않으나 무부하 조건인 경우 분사 횟수가 증가함에 따라 감소하는 것을 볼 수 있으며 특히 후 분사를 한 CASE 4의 경우

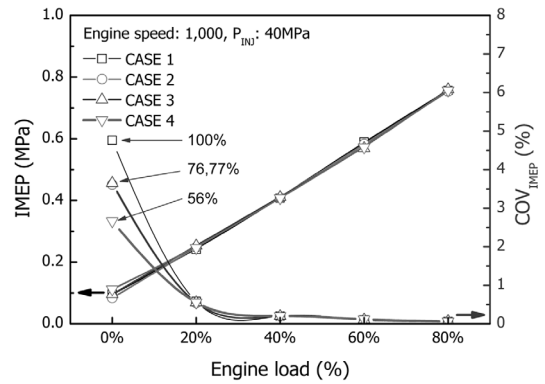


Fig. 5 Effect of injection strategy on the IMEP and cycle-to-cycle variation

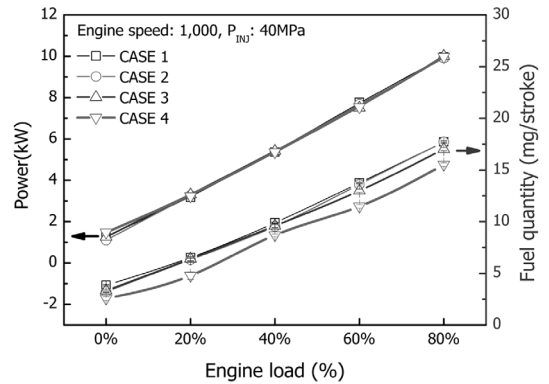


Fig. 6 Comparisons of injection strategy of power and total injection quantity

감소폭이 커짐을 볼 수 있다. 이는 무부하 조건인 경우 단분사에 따라 연소 안정성이 좋아지는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 출력에 따른 사이클당 연료 분사량을 나타낸 그래프이다. 출력은 엔진의 부하를 일정하게 유지함에 따라 연료 분사 전략별 차이는 나지 않으나 한 사이클당 총 연료 분사량을 살펴보면 CASE 4 조건인 2회 파일럿 분사 + 주분사 + 후분사를 한 경우에 총 연료 분사량이 낮은 것을 볼 수 있다.

Fig. 7은 연료 소비율과 열효율에 대해서 분사 전략에 따른 그래프로 출력당 연료 소비율의 경우 분사 횟수 및 부하의 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 열효율의 경우도 엔진의 부하 및 분사 횟수에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다.

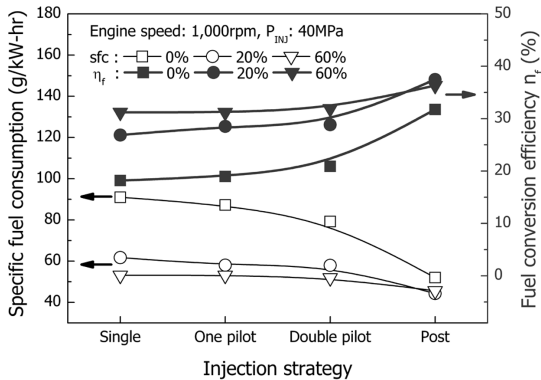


Fig. 7 Comparisons of injection strategy of fuel consumption and efficiency

### 3.3 분사 전략과 엔진 연소 특성

Fig. 8은 연료 분사 조건 및 엔진 부하에 따른 배기 가스 온도에 대한 그래프이다. 배기 온도를 측정하기 위하여 온도 센서를 배기 매니폴드에 장착하였다. 배기가스의 온도는 엔진 부하에 따라 선형적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 엔진의 부하증가에 따라 연료 분사량이 증가함에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 또한 저부하 조건인 20% 이하에서는 연료 분사 횟수가 증가함에 따라 배기 온도도 증가하고 있다. 이는 저부하에서의 후 분사로 인하여 팽창 행정 구간에서의 추가 분사로 인한 연소 온도가 증가하여 배기가스 온도가 증가한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 엔진 부하 20%, 연료 분사압력 40MPa의 조건에서의 연료 분사 조건별 연소 압력과 열 발생

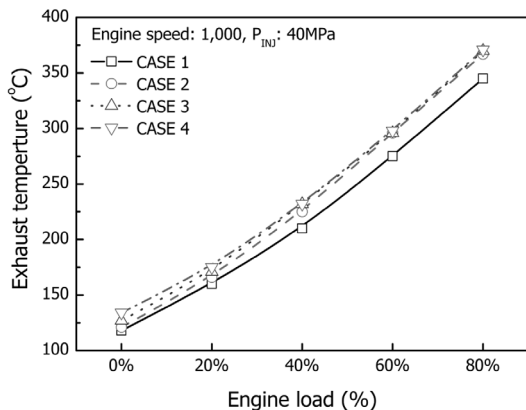


Fig. 8 Comparisons of injection strategy of exhaust gas temperature

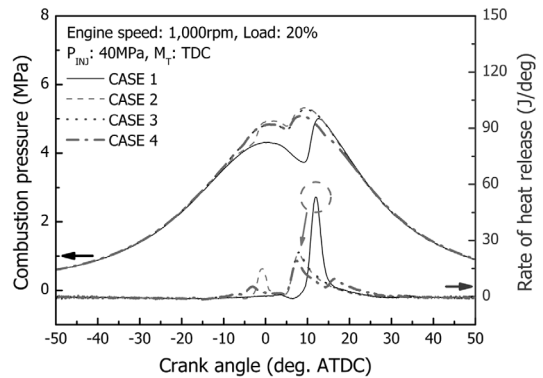


Fig. 9 Effect of injection strategy on the combustion pressure and rate of heat release

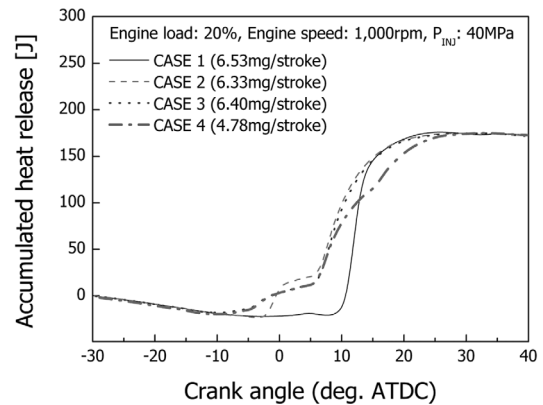


Fig. 10 Effect of injection strategy on the accumulated heat release

률에 대한 그래프이다. TDC 부근의 연소 압력의 경우 분사횟수가 증가함에 따라 연소 압력이 완만하게 형성되는 것을 볼 수 있다. 특히 CASE 4인 후 분사의 경우에는 아주 완만한 연소 압력이 형성되는 것을 볼 수 있다. 열 발생율의 경우 CASE 1은 주 분사 열 발생이 ATDC 12°에서 최고로 발생하였으나 다단 분사의 경우 주 분사 열 발생이 ATDC 7~8° 사이에서 낮게 발생되며 주 분사 열 발생 시점이 또한 약 4° 전각되어 빠르게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 소량의 파일럿 분사에 의한 주 분사시 예혼합 연소가 아닌 확산연소로 인한 열 발생율이 감소한 것으로 판단된다. 그리고 후 분사의 경우 ATDC 15° 부근에서 발생하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 10은 분사 전략에 따른 누적 열 발생 그래프이다. 실험 조건은 1,000rpm에서 연료 분사압력

40MPa, 엔진 부하 20%인 조건에서 파일럿 분사 유무와 추가로 후 분사를 실시한 경우를 비교하였다. 단 분사 조건인 CASE 1의 경우 누적 열발생율이 ATDC 10° 부근에서 급격하게 상승하는 것을 볼 수 있다. 그러나 파일럿 분사 횟수(CASE 3)가 증가함에 따라 열 발생 또한 진각 됨을 알 수 있다. 그리고 후 분사가 추가된 CASE 4의 경우 ATDC 10° 부근의 누적 열 발생율의 기울기가 낮아지는 것으로 나타내었다.

#### 4. 결론

파일럿 분사 유무, 횟수 그리고 후 분사 등에 따른 커먼레일 디젤 엔진의 배출물, 성능 및 연소 특성을 실험한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 단 분사인 경우 부하에 따라 급격하게 NO<sub>x</sub>가 증가되었으며 다단 분사의 경우 고부하에서는 큰 효과를 볼 수 없었으나 중부하에서는 NO<sub>x</sub>의 감소효과가 두드러지게 나타나는 것이 확인되었다.
- 2) 다단 분사의 경우 분사횟수의 증가에 따라 연소가 지속되는 기간이 증가하여 중 부하영역이 하에서는 HC와 CO는 단 분사에 비하여 다단 분사에서의 감소가 두드러지게 나타나는 것이 확인되었다. 또한 CO<sub>2</sub>의 후 분사의 경우 엔진 부하 60% 이하에서는 많은 감소가 확인 되었다.
- 3) 사이클 변동에서는 엔진 부하 및 분사 횟수에 따라 효과는 미비하나 무부하 조건의 경우 분사 횟수가 증가함에 따라 연소 안정성의 많은 효과를 볼 수 있었다. 또한 분사 횟수의 증가에 따른 연료 소비율은 감소함을 확인하였으며 열효율은 증가됨을 확인되었다.
- 4) 저부하 조건인 20% 이하에서는 연료 분사 횟수가 증가함에 따라 배기 온도도 증가함을 확인되었으며 TDC 부근의 연소 압력의 경우 후 분사의 경우에는 아주 완만한 연소 압력이 형성되는 것을 확인되었다.

#### 후 기

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project(무·저공해

자동차 사업단) 및 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지인력양성사업의 연구결과이며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사드립니다.

#### References

- 1) R. R. Maly, V. Schaefer, H. Hass, G. F. Cahil, P. Rouveirrolles, A. R/agoj, R. Wegener, X. Montagne, A. Di Pancrazio and J. Kashdan, "Optimum Diesel Fuel for Future Clean Diesel Engines," SAE 2007-01-0035, 2007.
- 2) P. Machiele, Low Sulfur Diesel Fuel an Enabling Technology for Future Low Emitting Diesel Engines, Presentation by the U.S. EPA at the Explore Future Diesel Engine Lube Oils, February 1st, Scottsdale, Arizona, 2000.
- 3) G. L. Grant and J. J. Ronning, "Global Hybrid Electric Vehicle Markets and Missions," SAE 1999-01-2946, 1999.
- 4) A. F. Burke, "Hybrid / Electric Vehicle Design Options and Evaluations," SAE 920447, 1992.
- 5) T. Tanaka, A. Ando and K. Ishizaka, "Study on Pilot Injection of DI Diesel Engine Using Common-rail Injection System," JSAE Review Vol. 23, pp.297-302, 2002.
- 6) M. Y. Kim, D. J. Lee, H. G. Roh, J. H. Lee and C. S. Lee, "Effect of Injection Parameters on Combustion and Exhaust Emission Characteristics in a Small Common-rail Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.12, No.6, pp.9-15, 2004.
- 7) H. G. Roh and C. S. Lee, "The Effect of Multiple Injections on the Stability of Combustion and Emissions Characteristic in a Passenger Car Diesel Engine," Transactions of KSAE, Vol.15, No.4, pp.76-82, 2007.
- 8) A. Trueba, B. Barbeau, O. Pajot and K. Mokaddem, "Pilot Injection Timing Effect on the Main Injection Development and Combustion in a DI Diesel Engine," SAE 2002-01-0501, 2002.
- 9) D. A. Nehmer and R. D. Reitz, "Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and NO<sub>x</sub> Emissions," SAE 940668, 1994.

- 10) A. Carlucci, A. Ficarella and D. Laforgia, "Effect of Pilot Injection Parameters on Combustion for Common Rail Diesel Engines," SAE 2003-01-0700, 2003.
- 11) Y. W. Lim, Y. J. Lee, Y. J. Yeon and D. C. Shin, "Risk Reduction Analysis upon Replacement of Diesel Bus with CNG Bus," Fall Conference Proceedings, KSAE, pp.788-797, 2005.
- 12) C. A. Pope III, R. D. Brook, R. T. Burnett and D. W. Dockery, "How is Cardiovascular Disease Mortality Risk affected by Duration and Intensity of Fine Particulate Matter Exposure? An Integration of the Epidemiologic Evidence," Air Qual Atmos Health, s11869-010-0082-7, 2010.
- 13) C. A. Pope III and D. W. Dockery, Epidemiology of Particle Effects, In: Air Pollution and Health, Academic Press, San Diego CA, USA, 1999.
- 14) WHO(World Health Organization), Summary of Risk Assessment; Air Quality Guidelines for Particulate Matter, Ozone, Nitrogen Dioxide and Sulfur Dioxide, Global Update, 2005.