

디젤기관의 연료분사시기가 배기배출물 특성에 미치는 영향

임재근* · 최순열*

Effects of Fuel Injection Timing on Exhaust Emissions Characteristics in Diesel Engine

J. K. Lim · S. Y. Choi

Key words : Fuel Injection Timing (연료분사시기), Specific Fuel Consumption(SFC)(연료소비율), International Maritime Organization(IMO)(국제해사기구), NO_x Emission (질소산화물 배출물), Soot Emission (매연 배출물), HC Emission (미연탄화수소 배출물), CO Emission (일산화탄소 배출물)

Abstract

A study on the exhaust emissions of diesel engine with various fuel injection timing is performed experimentally.

In this paper, fuel injection timing is changed from BTDC 14° to 20° by 2° intervals, the experiments are performed at engine speed 1800rpm and from load 25% to 100% by 25% intervals, and main measured parameters are fuel consumption rate, Soot, NO_x, HC and CO emissions etc.

The obtained conclusions are as follows

- (1) Specific fuel consumption is indicated the least value at BTDC 18° of fuel injection timing and it is increased in case of leading the injection timing.
- (2) Soot emission is decreased in case of leading fuel injection timing and it is increased in the form of convex downwards with increasing the load.
- (3) NO_x emission is increased in case of leading fuel injection timing and it is increased in the form of straight line nearly with increasing the load.
- (4) HC and CO emissions are decreased in case of leading fuel injection timing and they are changed in the form of convex downwards with increasing the load.

* 군산대학교 기관공학과

1. 서론

최근에 환경오염, 산성비, 오존층파괴 및 지구온난화 등 환경보호에 대한 문제가 매우 중요한 과제로 부각됨에 따라, 대기오염에 대해서도 증대한 관심을 갖게 되었다.

대기오염의 주요 인자는 연소기관에서 배출되는 유해성분 물질인데, 그 중에서 육상용 디젤기관의 배기 규제가 매우 강화되고 있으며,^(1,2) 국제해사기구(IMO)^(3,4)에서는 선박기관에 대해서도 배출되는 배기 유해가스를 규제하기로 이미 합의했고, 우리나라에서도 몇년안에 적용될 예정이며, 그에 대한 규제가 더욱 강화되고 있다.

지금까지 많은 노력을 기울여 연구한 결과 내연기관에서 배출되는 배기 오염물질의 저감대책에 많은 진전이 있었지만^(5,6), 현재 디젤기관의 유해오염물질의 배출정도는 동일 출력의 가솔린기관에 비하여 상당히 높다.

그런데 선박기관의 주종을 이루는 디젤기관은 많은 출력을 낼 수 있고, 열효율이 높으며, 값이 싼 연료를 사용할 수 있어서, 다른 기관에 비하여 경제성이 높고, 신뢰성과 내구성도 좋다.

그러나 디젤기관에서는 매연(Soot), 질소산화물(NO_x), 미연탄화수소(HC), 일산화탄소(CO) 및 황산화물(SO_x)의 대기오염물질이 많이 배출되고 있으므로 환경보존을 위하여 이들의 저감대책이 절실히 요구되고 있다.

이들 중에서 HC 및 CO의 저감대책은 연료의 완전연소와 관련되어 실용적인 여러가지 대처방법이 개발되고 있으며,⁽⁷⁻⁹⁾ SO_x의 생성은 연료유로부터 유황성분을 제거하여 억제시키고 있고, Soot는 완전연소와 여과장치를 이용하여 저감시킬 수 있으며, NO_x는 연소계의 개선, 배기재순환, 물첨가 연료 및 물 분사 등⁽¹⁰⁾을 이용하여 저감시킬 수 있으나, 더욱 실용적이고 효율적인 방법의 개발이 필요하다.

그런데 연소와 배기배출물에 미치는 인자로는 연료의 분사시기, 분사율, 연료분무의 무화성, 관통성, 공기과잉율, 실린더내의 온도와 압력 및 연료의

세탄가 등이 있으며, 이러한 인자들은 매우 유기적인 관계를 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 우선 연료의 분사시기가 연료소비율, Soot, NO_x, HC 및 CO 등의 배기배출물에 미치는 영향을 실험적으로 분석·고찰하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 실험에 사용된 장치는 Fig.1과 같고, 기관은 선박용 기관으로 주요 제원은 Table 1과 같다.

기관의 출력은 와류형 전기동력계를 사용하여 측정하였고, 연소실의 압력측정을 위하여 첫 번째 실린더에 압전식(Piezo-electric type) 압력변환기를 설치하였다. 연료소비율은 용적식유량계를 사용하여 연료의 소비되는 시간을 계측하여 계산하였고, 흡입공기량의 계측은 오리피스에 의한 아날로그식 공기 유량계를 사용하였다. 또한 배기배출물은 배기가스분석기(Signal EMIRAK RAG4873)와 보쉬(Bosch)형 매연측정기를 사용하여 측정하였다.

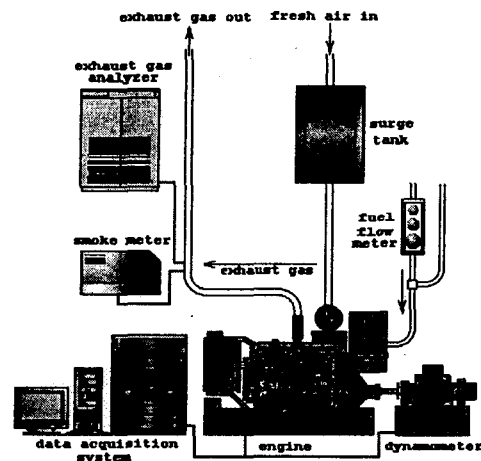


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

Item	Specification
Cylinder number	4
Cooling type	Water-cooled
Cycle	4
Injection type	Direct injection
Bore × Stroke (mm)	102 × 100
Piston displacement (cc)	3,268
Max. output	43 PS / 1800 rpm (31.63 kW / 1800 rpm)
Compression ratio	17 : 1
Fuel injection timing	BTDC 18°
Fire order	1 - 3 - 4 - 2

Table 1 Specification of test engine

Item	Value	
Carbon residue	0.08 wt%	
Calorific value	42.8 MJ/kg	
Stoichiometric ratio	14.44 kg/kg	
Cetane number	54	
Cloud point	-1 °C	
Pour point	-275 °C	
Sulfur	400 ppm	
Flash point	49 °C	
Distillation	0 %	136 °C
	10 %	182 °C
	50 %	260 °C
	90 %	333 °C
	Endpoint	365 °C
Viscosity	2.67 cSt @ 40°C	
Water & sediment	0.00 %	
Specific gravity	0.8342 @ 4°C	

Table 2 Compositions and properties of diesel oil

2.2 실험방법

실험에 사용된 연료유의 화학적 성분과 물리적 성질은 Table 2와 같고, 기관회전속도를 1800rpm으로 고정하여 놓고 부하를 25%에서 100%까지 25%간격으로 변화시키면서 측정하였으며, 분사시기는 BTDC 14°에서 20°까지 2°간격으로 실험을 하였다.

실험을 하는 동안 수냉식 열교환기를 사용하여 기관의 냉각수와 윤활유 온도를 일정하게 유지하였고, 기관의 연소상태를 파악하기 위하여 지압선도 및 열발생율 선도 등을 발취하였으며, 각 부위(흡입공기, 배기가스, 윤활유, 냉각수 입·출구)의 온도를 측정하였다.

또 배기가스 분석기와 매연측정기를 "0"점 조정과 표준가스(측정범위의 80%인 보정용 가스)농도와 일치하도록 보정을 한 후에 각종 배기배출물을 측정하였고, 동력계는 표준중량(5 kg)의 추를 사용하여 압축·인장에 대한 보정을 하여 정확한 토오크값을 확인한 후 동력을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연료소비율

Fig. 2는 기관회전수 1800rpm에서 부하의 변화와 분사시기의 변화에 따른 연료소비율을 나타낸 것이다.

연료소비율은 부하가 증가함에 따라 점점 감소하는 경향이고, 그 값은 거의 비슷하나 연료분사시기가, BTDC 18°인 경우에 가장 적게 나타났다.

분사시기가 18°보다 더욱 지연되면 상사점을 훨씬 지나서 실린더내의 연소최고 압력이 형성되고, 이로 인한 후 연소기간의 증가로 열효율을 저하에 따라 평균유효압력이 감소되었기 때문에 연료소비율이 증가되며, 또한 18°보다 앞 당겨지면 연소시작이 빨라서 연소 최고 압력이 적정위치보다 앞당겨지므로 평균유효압력이 감소되어 연료소비율이 증

가 되었다.

즉, 1800rpm 전부하일때, 연료분사시기가 BTDC 18°를 기준으로 하여 16°와 14°로 늦추어지고, 20°로 앞당겨짐에 따라 연료소비율은 214g/kWh에서 222g/kWh, 226g/kWh 및 216g/kWh로 증가되었다.

그러므로 본 실험기관의 경우에 경제적인 운전을 하기 위한 최적 연료분사시기는 BTDC 18°이다

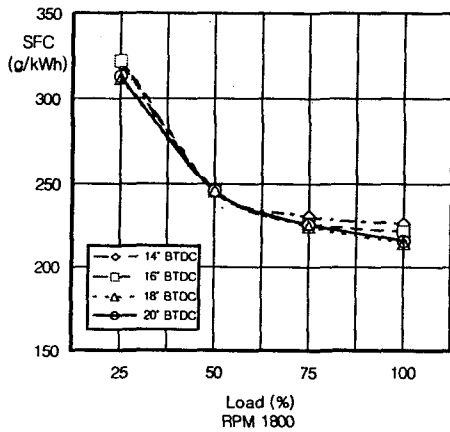


Fig. 2 Comparison of specific fuel consumption on fuel injection timing.

3.2 Soot 배출물

Fig. 3은 Soot 배출물을 나타낸 그림으로, 부하가 증가할수록 아래로 볼록한 형태로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 연료 분사시기가 앞 당겨질수록 적게 나타났다.

이것은 Needham, J. R.등⁽⁶⁾이 주장한 직접분사식 디젤기관에서 연료분사시기를 앞당기면 매연의 배출이 감소한다는 내용과 일치한다. 즉, 1800rpm 전 부하일때, 연료분사시기가 BTDC 14°에서 16°, 18° 및 20°로 앞당겨짐에 따라 매연 생성량은 Bosch No. 2.8에서 2.4, 2.1 및 1.9로 감소되었다.

그 이유는 점화지연기간 동안 분사된 연료의 증발이 지속되어 연료증기의 양이 많아지게 되고 급격한 연소로 실린더 내의 온도가 증가하여 매연입자가 산화될 수 있는 기간이 증가하기 때문이다.

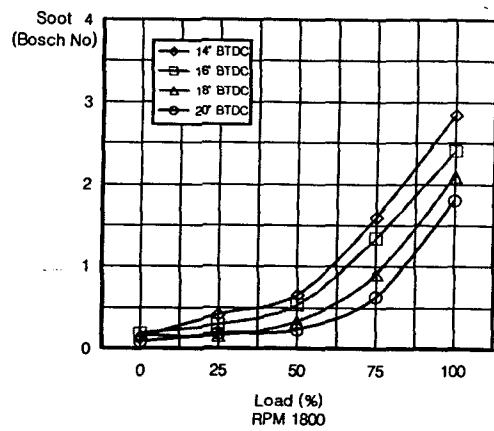


Fig. 3 Comparison of soot emission on fuel injection timing

3.3 NO_x 배출물

NO_x의 생성을 지배하는 것은 온도, 산소의 국부농도 및 연소의 지속시간이며, NO_x는 확산연소단계 동안 반응영역의 최박한 쪽에서 많이 생성된다.

그리고 연료분사시기를 앞당기면 착화지연이 점점 증가하며, 착화지연이 증가할수록 연소실 온도는 증가한다⁽¹⁰⁾.

Fig. 4는 NO_x 배출물을 나타낸 그림으로, 부하가 증가할수록 거의 직선적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, 연료분사시기가 앞당겨질수록 더욱 많이 발생되었다.

즉, 1800rpm 전부하일때, 연료분사시기가 BTDC 14°에서 16°, 18° 및 20°로 앞당겨짐에 따라 NO_x 생성량은 856ppm에서 953ppm, 1117ppm 및 1429ppm으로 증가되었다.

그 이유는 연료 분사시기가 앞 당겨짐으로써 착화지연이 증가하여 실린더내의 압력이 상승하므로 연소실 온도가 증가되어 NO_x 생성량이 많아진 것이다.

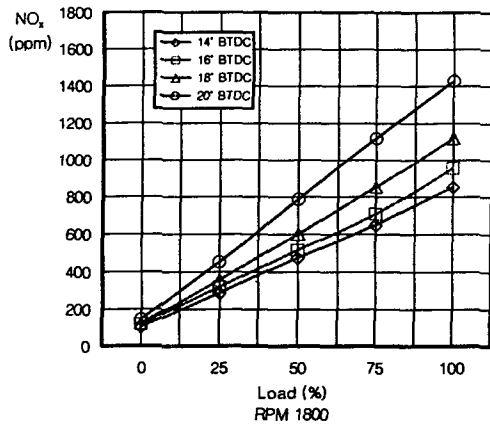


Fig. 4 Comparison of NO_x emission on fuel injection timing

3.4 HC 배출물

Fig. 5는 HC 배출물을 나타낸 그림으로, 부하가 증가할수록 아래로 볼록한 형태로 감소-증가하는 경향을 보이고 있으며, 연료 분사시기가 앞 당겨질수록 적게 나타났다.

HC 배출물은 실화(失火), 소염(消炎), 불량분사 및 불균일분사 등으로 인해 연료가 완전 연소되지 않고 배출되는 물질로써, 실린더내가 저온인 저부하시에 많이 발생한다⁽¹¹⁾.

또 산소 농도가 낮아지면 국부적인 산소결핍 영역이 증가하여, 불완전연소로 인한 미연(未燃) HC 연료분자가 많이 남는다.

본 실험결과 1800rpm 전부하일때, 연료분사시기가 BTDC 14°에서 16°, 18° 및 20°로 앞당겨 짐에 따라 HC 생성량은 602ppm에서 572ppm, 534ppm 및 506ppm으로 감소되었다.

그 이유는 연료분사시기를 앞당기면 에혼합연

소를 활성화하고, 연소온도와 압력을 높이며, 연소 효율을 향상시키므로 HC 배출량이 감소된다.

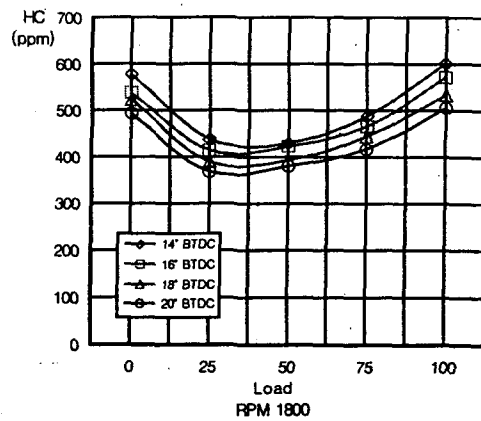


Fig. 5 Comparison of HC emission on fuel injection timing

3.5 CO 배출물

Fig. 6은 CO 배출물을 나타낸 그림으로, 부하가 증가할수록 아래로 볼록한 형태로 감소-증가하는 경향을 보이고 있으며, 연료 분사시기가 앞 당겨질수록 적게 나타났다.

CO는 연소되어야할 연료에 대하여 산소가 부족한 상태에서 발생하는데, 일반적으로 디젤기관에서는 전부하시 CO농도가 급증하지만, 부분부하에서도 CO농도가 증가하는 경우가 있는데, 이것은 디젤기관의 연소가 전체적으로는 산소 과잉상태일지라도, 국부적으로는 분무확산연소로 인하여 혼합이 좋지 않기 때문에 산소가 부족하여 CO가 발생하고, 발생한 CO가 완전한 연소를 하지 못한 상태에서 연소가스온도가 낮아져서 그 상태로 배출된다.

Plee 등⁽¹²⁾은 산소농도 및 연소가스온도의 감소가 CO농도의 증가 원인이 된다고 했다.

본 실험결과 1800rpm 전부하일때, 연료분사시기가 BTDC 14°에서 16°, 18° 및 20°로 앞당겨 짐

에 따라 CO생성량은 419ppm에서 405ppm, 376 ppm 및 360ppm으로 감소되었다.

그 이유는 분사시기를 앞당기면 예혼합연소가 활성화되고 연소온도가 증가되어 CO의 배출량이 감소되기 때문이다.

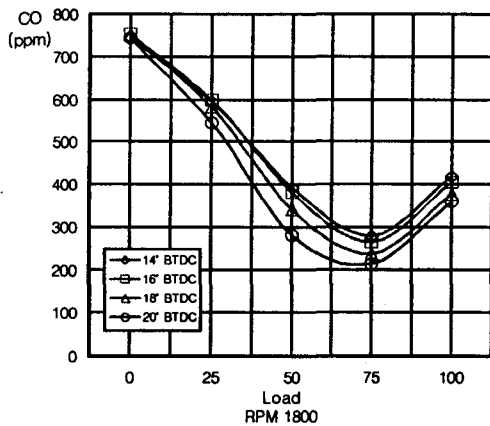


Fig. 6 Comparison of CO emission on fuel injection timing

4. 결론

디젤기관에 있어서 연료 분사시기가 연료소비율, 매연, 질소산화물, 미연탄화수소 및 일산화탄소 등의 배출에 미치는 영향을 분석·고찰하기 위하여 기관회전속도를 1800rpm으로 고정하고, 부하를 25%에서 100%까지 25%간격으로, 분사시기를 BTDC 14°에서 20°까지 2°간격으로 실험한 결과는 다음과 같다.

1. 연료소비율은 분사시기가 BTDC 18°일 경우에 가장 적으며, 그 보다 앞당기면 증가한다.
2. 매연배출물은 연료 분사시기를 앞당길수록 감소하며, 부하가 증가할수록 아래로 볼록한 형태로 증가한다.

3. NO_x 배출물은 연료 분사시기를 앞당길수록 증가하며, 부하가 증가할수록 거의 직선적으로 증가한다.

4. HC배출물 및 CO배출물은 분사시기를 앞당길수록 감소하며, 부하가 증가할수록 아래로 볼록한 형태로 감소-증가한다.

참고 문헌

1. Stumpp, G., Polach, W., Muller, N. and Warga, J., "Fuel Injection Equipment for Heavy-duty Diesel Engines for U.S. 1991/1994 Emission Limits," SAE 890851
2. USA-Environmental Protection Agency, "Emissions Standards for Vehicles," USA-Code : Title 40, Part 86, 1987
3. International Maritime Organization, "Technical code on control of emission of nitrogen oxides from marine diesel engine," 1997.
4. 전효중, "선박용디젤기관의 환경문제." 한국박용기관학회지, 제20권 제3호, pp.187-205, 1996.
5. Stumpp, G. "Reduction of Exhaust Emissions of Diesel Engines by means of the Injection Equipment," CIMAC'73, pp. 441-456.
6. Needham, J.R., et. al., " Injection Timing and Rate Control a Solution for Low Emissions," SAE 900854
7. Ahmad, T., Plee, S. L., and Myers, J. P., "Effects of Intake-Air Composition on Gas-Phase and Particulate-Bound HC Emissions from Diesel Engines," SAE 811196
8. Alkidas, A. C. and Cole, R. M., "The Effects of Coolant Temperature on the Performance and Emissions of a Single-Cylinder Divided-Chamber Diesel Engine," SAE 841053
9. Yu, R. C., Wong, V. W. and Shahed, S. M., "Sources of Hydrocarbon Emissions from

- Direct Injection Diesel Engines," SAE 800048
10. 内田 登, 외 3명, "ディーゼル機関におけるEGR過給の組み合わせによる排出特性の改善." 自動車技術會論文集, 제24권, 제4호, pp.41-46, 1993.
 11. Gumbleton, J. J., Bolton, R. A. and Lang, H. W. "Optimizing Engine Parameters with Exhaust Gas Recirculation," SAE 740104
 12. Plee, S. L., Ahamed, T. and Myers, J. P. "Flame Temperature Corelation for the Effects of EGR on Diesel Particulate and NOx Emissions," SAE 811195
 13. John B. Heywood, " Internal Combustion Engine Fundamentals", pp.863-867, 1988.
 14. Soon-Ik Kwon, et. al., " Effects of cylinder Temperature and pressure on Ignition Delay in Direct Injection Diesel Engine", Bulletin of the M.E.S.J., Vol.18, No.1, pp.3-16, 1990.