

대형 디젤 엔진에서 JP-8 과 디젤 적용 시의 배기 배출물 특성에 대한 이해[§]

이진우* · 배충식*[†]

* 한국과학기술원 기계공학부

Understanding Pollutant Emission in a Heavy-Duty Diesel Engine with JP-8 and Diesel

Jinwoo Lee* and Choongsik Bae*[†]

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

(Received May 16, 2011; Revised August 22, 2011; Accepted August 22, 2011)

Key Words : Diesel(디젤), JP-8(Jet Propellant 8), Combustion(연소), Direct Imaging(직접 가시화), 2-Color Thermometry(이색법)

초록: 커먼레일 분사 시스템이 장착된 대형 단기통 가시화 엔진에서 디젤과 JP-8 의 연소 및 배기 특성을 분석하였다. 두 연료 적용 시, 배기 배출 경향을 분석하기 위해 직접 화염가시화와 이색법을 적용하였다. 연소 과정은 직접 화염 가시화로부터 화염 강도 분석을 통해 이루어 졌다. 이색법 결과는 화염 온도 및 KL 값을 도출하여 분석을 하였다. 직접 화염 가시화 결과, JP-8 연소 시, 점화 지연 시간이 길며, 디젤 연소에 비해 화염이 빠르게 소멸되는 것을 확인하였다. 화염 강도 분석을 통해 디젤 연소의 경우, 연소 전 기간에 걸쳐 높은 화염 강도 수준을 유지하며 화염 지속 시간이 긴 것을 알 수 있었다. 이색법 결과를 통해, JP-8 연소의 경우, 국부적으로 고온의 화염 면이 더 많이 분포하는 것을 확인하였으며, 이는 NO_x 가 더 많이 배출된 경향을 설명해준다. 또한 KL 치 분석 결과, JP-8 연소 시 낮은 수준의 KL 값이 더 고르게 분포하는 것을 알 수 있었으며, 이는 JP-8 연소 시 스모크 가 덜 배출된 결과를 뒷받침 해준다.

Abstract: Combustion processes in an optically-accessible single-cylinder heavy-duty diesel engine equipped with a high-pressure common-rail injection system were investigated for JP-8 and diesel. Direct imaging and two-color thermometry were employed to verify the emission trend for both fuels. The combustion process was characterized by image analysis with focus on luminosity. The results of two-color thermometry were analyzed on the basis of the flame temperature and KL factor distribution. Analysis of the combustion process by direct imaging showed that the ignition delay was longer for JP-8 than for diesel, while the flame was extinguished rapidly. Analysis of the flame luminosity showed that the combustion intensity was higher for diesel and that the flame lasted for a longer duration in this case. Two-color thermometry results showed that the high-temperature region extended over a large area during JP-8 combustion, implying the formation of a large amount of NO_x. In addition, the KL factor showed low level over a large area and relatively homogeneous in the case of JP-8 combustion, which implied that less smoke was produced when using this fuel.

- 기호설명 -

K : 흡수계수(1/cm)
L : 화염 가시 길이(cm)

T : 진 슈트 입자 온도(K)

약어

ATDC : 상사점(after top dead center)
CAD : 크랭크 각도(crank angle degree)
FSN : 스모크 값(filtered smoke number)
JP-8 : 항공유(jet-propellant type 8)
HC : 탄화수소(hydrocarbon)
HFR : 유압 유량(hydraulic flow rate(cc/30s))

§ 이 논문은 2011 년도 대한기계학회 열공학부문 춘계 학술대회(2011. 5. 12.-13., 롯데부여리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, csbae@kaist.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

NATO : 나토(North Atlantic Treaty Organization)
 NOx : 질소산화물(nitrogen oxide)
 SFC : 단일 연료 개념(Single Fuel Concept)

1. 서론

북대서양 조약 기구(NATO; North Atlantic Treaty Organization)는 지상에 기반을 둔 모든 군용 비행기, 차량 및 기타 장비에 단일 연료를 사용하기로 결정하였다.⁽¹⁾ 이런 개념은 단일 연료 개념(SFC; single fuel concept)이라 통칭되어 있다. SFC를 충족시킬 수 있는 연료로서 항공기에 주로 사용되어 오던 JP-8(jet-propellant type 8) 연료가 선택되었다.⁽¹⁾ 하지만 JP-8 연료는 디젤과 물성치가 다르기 때문에 기존 디젤을 연료로 사용되어온 기관에 JP-8을 적용하였을 경우에 발생할 수 있는 현상에 대한 이해가 요구된다. 하지만 기존 연구는 주로 성능시험을 통한 배기 특성 및 분사기 계통에 미치는 영향에 대한 평가에 주안점을 두어왔다.⁽²⁻⁴⁾ 또한 배기 저감에 효과적인 것으로 알려진 신 연소 기술의 단점으로 알려진 적용 엔진 부하 범위의 한계를 극복하기 위해 증발특성 및 세탄가가 다른 연료에 대한 연구가 진행이 되고 있다.^(5,6)

본 연구는 두 연료의 서로 다른 물성치가 기본적인 분무 특성에 미치는 영향을 파악하고, 이들과 엔진 성능 및 배기특성 결과의 관계를 도출해 내고자 하였다. 또한 직접 화염가시화 및 이색법 적용을 통해 얻어진 이미지들을 분석하여 배기 배출 특성에 대한 이해를 구하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 조건

2.1 실험 장치

본 실험에 사용된 실험장치의 개략도 및 제원을 Fig. 1 과 Table 1 에 나타내었다. 엔진은 배기량 1818 cc, 압축비 17:1 인 단기통 직접분사식 디젤 엔진을 사용하였다. 분사시스템은 분사압력을 최대 160 MPa 범위에서 조절할 수 있는 커먼레일 분사시스템(Zenobalti Co., IDU 5000B)을 사용하였으며, 8 공, 분사각 146° 인 분사기를 사용하였다. 단기통 엔진을 구동하기 위해 동력계(DC dynamometer, 90 kW)를 크랭크 축에 연결하여 회전수를 제어하였다. 엔진의 캠 축에 장착되어있는 엔코더(Autonics, 3600 pulses/revolution)의 신호를 통해 분사시기를 제어하였으며, 분사량을 제어하기 위해 분사기 구동 장치(TDA 3200, TEMS Ltd)를 사

용하였다. 압력센서(KISTLER, 6043Asp)를 장착하여 총 100 사이클 동안 매 0.2 CAD 마다 연소실 내부 압력을 취득한 값을 평균하여 열방출율을 계산하였다. 배기가스 분석장치(HORIBA MEXA 1500D)를 사용하여 NOx, HC 배기가스를 분석하였다. 스모크 측정을 위해 AVL Smoke Meter(415S G02)를 이용하였다.

Fig. 1(a)를 통해 확인할 수 있듯이 엔진 내부 가시화를 위해 확장피스톤을 45° 미러와 함께 피스톤 퀴즈 윈도우 아래 장착하였다. 연소를 통한 자연 발광 화염을 고속 카메라(Vision Research Inc., Phantom V.7.0)를 이용하여 취득하였다. 해상도는 512 x 384 였으며, 초당 10,000 프레임의 이미지를 취득하였다. 이는 엔진 회전수 1200 rpm 조건에서 매 0.72 CAD 마다 이미지가 획득 가능한 것을 의미한다.

Table 1 Engine specification

Engine	Single-cylinder, direct injection, four valves, compression-ignition engine
Bore x Stroke	128 x 142 mm
Displacement	1818 cc
Compression ratio	17:1
Fuel Injection type	Common rail injection system
Injector	8 hole, HFR 860 cc/30s, injection angle 146°

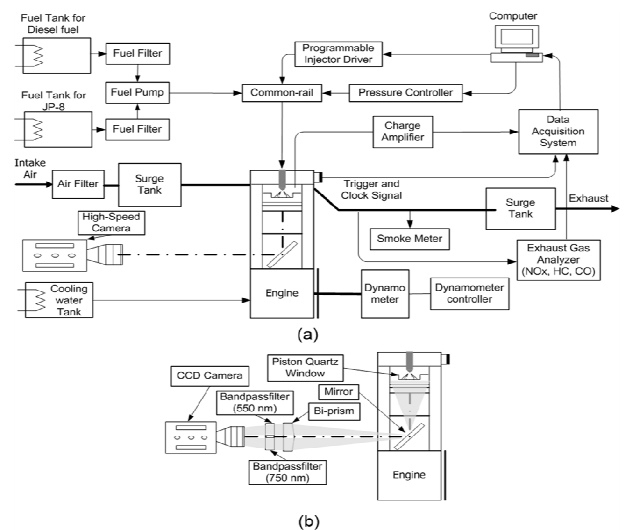


Fig. 1 Schematic diagram for(a) engine performance and direct imaging and(b) two-color thermometry

Fig. 1(b)는 이색법 적용을 위한 장치도를 보여 준다. 이색법은 화염의 실제온도 T 및 화염 중의 매연 입자 농도에 거의 비례하는 K 값과 화염의 축 방향 두께 L 에 관한 KL 값을 구한다.⁽⁷⁾ 연소로 발생된 발광 화염은 바이-프리즘(bi-prism)을 통과하면서 2 개의 빔(beam)으로 분리된다.

각각의 빔은 550 nm 와 750 nm 의 파장을 가지는 두 개의 대역 필터(band-pass filter)를 지나게 되며 CCD 카메라(PCO CCD Imaging, Sencicam)에 두 개의 이미지를 취득하여 분석하였다. 이색법 결과 해석의 수학적 해결과정은 다수의 기존 논문에서 자세히 소개되어 있기에 본 연구에서는 생략한다.^(8,9)

2.2 실험 조건

본 실험에 사용된 JP-8 과 디젤의 물성치를 Table 2 에 나타내었다. JP-8 은 디젤에 비해 세탄가, 밀도, 점도, 증발점이 낮으며, 저위발열량은 높은 것을 알 수 있다. Table 3 은 JP-8 과 디젤의 분무

Table 2 Properties of JP-8 and diesel

Properties	JP-8	Diesel
Cetane number	39	47
Liquid density [kg/m ³]	800	840
Lower heating value [MJ/kg]	43.3	42.5
Kinetic viscosity @ 40 °C	1.2	2.6
Distillation, °C		
10%	162	210
20%	170	230
50%	189	282
90%	234	330

Table 3 Experimental conditions for engine operating

For macroscopic imaging	
Injection pressure [MPa]	30
Ambient pressure [MPa]	0.1
Injection quantity [mg/stroke]	60 for diesel, 58.8 for JP-8
For engine operating	
Engine speed [rpm]	1200
Injection timing [CAD ATDC]	-24, 20, 16, -12, -8, -4, 0, 4

및 연소 실험 조건을 보여준다. 분사 압은 두 실험 모두에서 30 MPa 을 적용하였다. 또한 분사량의 경우, 디젤은 본 실험에 사용된 엔진의 중부하 조건에 해당하는 60 mg/stroke 를 분사하였으며, JP-8 의 경우, 58.8 mg/stroke 를 분사하였다. 이는 두 연료의 저위 발열량이 각각 42.5 과 43.3 MJ/kg 로 JP-8 이 다소 높기 때문에 총 발열량을 고정하기 위함이다. 분무 실험의 경우, 주변 기체 밀도는 대기압 상태로 고정하였다. 엔진 실험의 경우, 엔진 회전 속도는 1,200 rpm 으로 고정하였다. 엔진 냉각수 온도는 모든 실험 조건에서 353 K 로 설정하였다. 분사 시기는 -24 ~ 4 CAD ATDC 로 변화시키면서 연소압력 및 배기가스를 측정하였다.

3. 본 론

Fig. 2 는 분사압 30 MPa, 분위기 압력은 대기압 조건에서 JP-8 과 디젤의 거시적 분무 발달 과정을 보여준다. 전체적으로 JP-8 의 경우 디젤에 비해, 분무 도달 거리는 짧고, 분무각은 넓은 것을 알 수 있다. 이는 이미지를 보다 정량적으로 분석한 Fig. 3 을 통해 동일 시점에서 JP-8 의 경우, 분무 도달 거리는 짧고, 분무각은 넓은 특성을 확인할 수 있다. 분무도달거리의 경우, JP-8 은 최대 약 16% 짧은 결과를 보였으며, 15.9° 더 넓은 분무각을 보였다. 분무 도달거리와 분무각의 차이는 밀도, 증발특성, 점도와 같은 두 연료 간 물성치의 차이로부터 설명이 가능하다. JP-8 은 Table 2 에 나타낸 바와 같이 디젤에 비해 밀도, 증발특성, 점도 특성이 낮은 것을 알 수 있다. 이와 같은 연료 특성 차이로 인해 분무 외곽과 주변 공기 사이의 표면 장력이 감소하게 되며, 이로 인해 분사기 노즐 근처에서의 불안정성(instability)이 발생하게 된다. 이 불안정성에 의해 야기된 와류(vortex)는 주변 공이 유입률을 향상시키는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁰⁾ 이런 특성으로 인해 JP-8 의 경우, 공기와의 혼합 특성이 향상될 것으로 기대할 수 있으며, 결국 미립화 특성이 디젤에 비해 우수할 것으로 판단할 수 있다. 이런 결과로 JP-8 이 디젤보다 분무 도달거리가 짧고 분무각이 넓은 현상이 나타난 것이라 할 수 있다. 또한 JP-8 의 낮은 증발 온도 특성으로 인해 디젤보다 기화 특성이 역시 우수할 것이라 판단할 수 있다.⁽¹¹⁾

위의 두 연료간 분무 특성이 연소에 미치는 영향을 파악하기 위해 얻어진 연소압력과 이를 통해 계산한 열방출율을 Fig. 4 에 나타내었다. 동일 시점에서 연료를 분사하였음에도 불구하고 디젤 연소의 경우, JP-8 연소에 비해 점화 지연 시간이 짧은

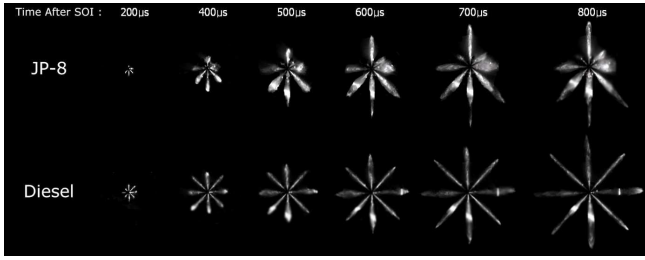


Fig. 2 Comparison of spray development process for JP-8 and diesel

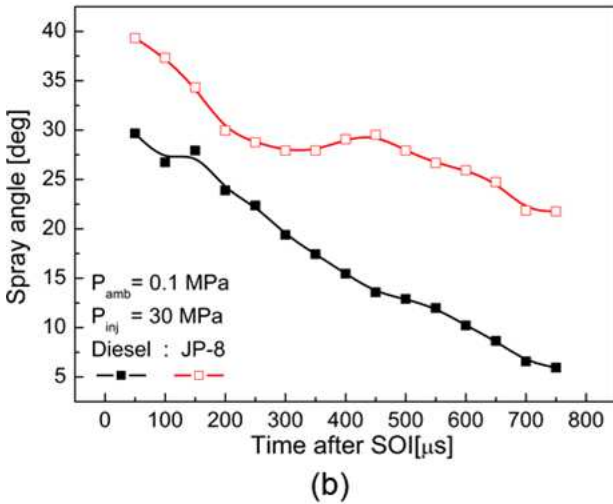
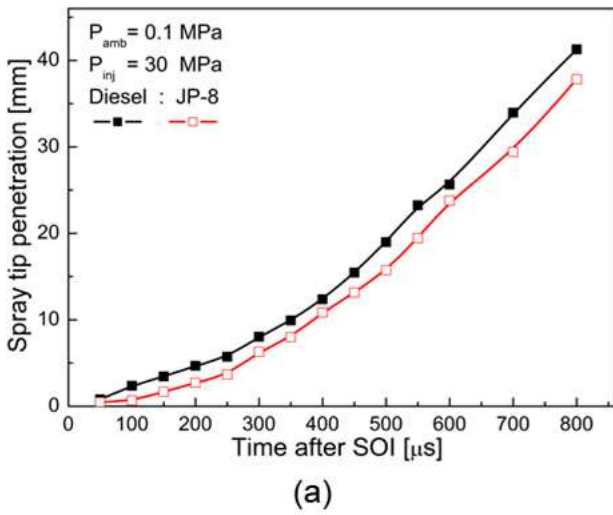


Fig. 3 Spray penetration and spray angle for JP-8 and diesel

것을 알 수 있다. JP-8 이 디젤에 비해 증발특성은 우수하나, 낮은 세탄가 특성으로 인해 점화 지연 시간이 길게 발생한 것으로 판단된다. 또한 JP-8 연소 시 최고 열방출을 값이 디젤에 비해 크며, 예혼합 연소 구간 동안 방출된 열량이 높은 것을 확인할 수 있다. 이런 현상은 명백히 JP-8 의 우수

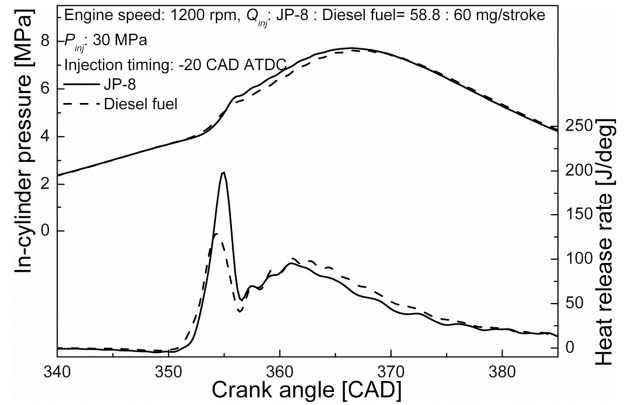


Fig. 4 Comparison of in-cylinder pressure and heat release rate

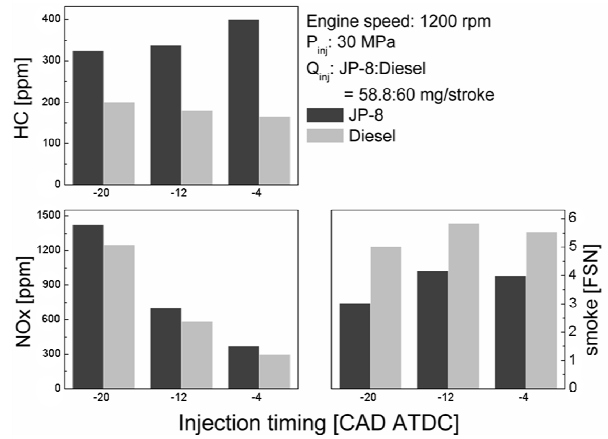


Fig. 5 Comparison of emission characteristics

한 기화특성과 긴 점화지연 기간으로부터 야기된 것이라 할 수 있다. 이런 특성으로 연료와 공기의 혼합특성을 향상시키며, 결과적으로 예혼합 구간 동안 더 많은 연료와 공기가 상대적으로 균일하게 분포하게 되기 때문이다. 또한 이 결과는 JP-8 의 디젤에 비해 상대적으로 낮은 세탄가가 점화지연 기간을 연장시켜줌으로써 혼합 특성을 향상시키는데 유리한 역할을 하는 것을 확인시켜준다. 반면 이러한 JP-8 의 연소 특성은 디젤 연소에 비해 상대적으로 연소 소음이 상승하는 단점을 야기시키는 바, 파일럿 분사 등을 함께 적용해야 할 것으로 판단된다. Fig. 5 는 연소 실험 결과 취득한 HC, NOx 와 스모크 배출 특성을 보여준다. JP-8 연소 시 분사 시기에 관계없이 NOx 와 HC 는 더 많이 발생하지만, 스모크는 저감되는 것을 알 수 있다. JP-8 의 더 높은 증발율과 긴 점화 지연 기간으로 인해 이론 공연비에 가까운 예혼합기가 형성될 수 있는 가능성이 더 많아지게 된다. 이로 인해 예혼합 연소가 더 활발히 진행되어, 연소 온도가 증가

하게 된다. NO_x 는 국부적인 화염 온도에 비례하여 생성되는 것으로 알려져 있기에 JP-8 의 연소 결과 NO_x 배출이 증가한 것이라 판단할 수 있다. 또한, JP-8 의 향상된 혼합특성으로 인해 상대적으로 농후한 혼합기 분포 영역이 감소하게 되어 결과적으로 스모크배출이 저감된 것이라 판단된다. 반대로, JP-8 의 높은 기화율과 긴 점화지연 기간은 국부적으로 희박한 혼합기의 형성 여지를 높여준다. 이로 인해 연소실 내 일부 부분에서 불완전 연소가 나타나 HC 가 더 많이 배출 된 것이라 판단된다. 또한 상대적으로 우수한 JP-8 의 기화특성으로 인해 점화지연 기간 동안 연료의 기화 과정에서 증발 잠열로 인한 주변 공기의 온도 저하가 더 크게 발생한 것이 HC 가 많이 생성된 원인이라 판단할 수 있다.

Fig. 6 은 고속 카메라를 이용하여 취득한 JP-8 과 디젤의 연소 화염 가시화 이미지를 나타낸 것이다. 디젤 연소의 경우, 화염이 더 이른 시기에 감지되는 것을 알 수 있으며, 이는 디젤연소의 점화지연 기간이 상대적으로 짧은 것을 확인시켜준다고 할 수 있다. 4.5 CAD ATDC 시점에서 디젤 연소의 경우, 연소실 전체에 걸쳐 매우 강한 강도를 가진 확산 화염이 분포하는 것을 알 수 있다. 이 시점 이후, 화염 강도는 감소하기 시작하며, 화염이 실린더 벽면 쪽으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 23.9 CAD ATDC 이후 분사기 근처에서의 화염 강도가 큰 폭으로 감소하기 시작하며 30.4 CAD ATDC 지점에서는 거의 사라지는 것을 알 수 있다. 이 현상은 연료가 가지는 운동량에 의해 단순 분사 종료 이후 화염이 이동한 것이 아니라, 분사기 노즐 근처에서의 급속한 공기유입의 증가로 인해 화염의 소멸 과정이 활발하게 발생하여 발생한 결과라는 연구가 최근 소개된 바 있다.⁽¹²⁾ 반면, JP-8 연소 가시화를 통해 연소 기간 전반에 걸쳐 디젤에 비해 낮은 수준의 화염 강도를 유지하고 있으며, 화염 발달이 약한 것을 확인할 수 있다. 이는 JP-8 연소가 디젤 연소에 비해 확산 연소 구간이 덜 지배적이었음을 의미한다. 이미 8.8 CAD ATDC 지점에서 약한 화염 강도를 가지는 화염이 연소실 약 절반 정도의 영역만을 차지하고 있는 것을 알 수 있다. 디젤 연소에 비해 매우 이른 시점인 17.4 CAD ATDC 에서 분사기 노즐 근처의 화염은 이미 소산된 것을 알 수 있으며 이는 JP-8 의 경우, 연소 후반부에 더 활발한 화염 소멸 과정이 일어나고 있음을 보여준다. 이는 JP-8 의 더 빠른 기화 특성으로 인해 연소과정이 가속화

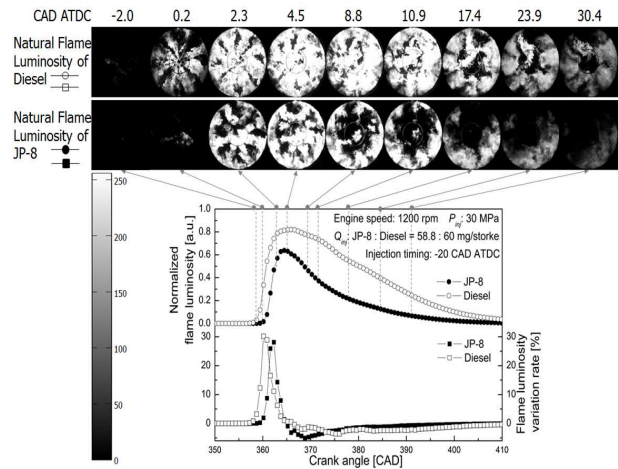


Fig. 6 Normalized flame luminosity & flame luminosity variation rate and natural luminosity of diesel and JP-8

되었음을 의미한다. Fig. 6 에 표기된 그래프의 상단에 위치한 화염 강도 분석을 통해 JP-8 의 연소 시, 화염 강도가 연소 기간 전반에 걸쳐 약하게 유지되는 것을 알 수 있으며 가시 화염 지속 기간이 짧은 것을 알 수 있다. 아래쪽 그래프에 나타난 화염 강도 변화율 그래프를 통해, 디젤 연소 시 화염 강도 상승을 최고 값이 더 큰 것을 알 수 있으며, 이는 확산 연소가 활발하게 진행되었음을 보여준다. 하지만 JP-8 연소의 경우, 최대 화염 강도 발생 지점이 더 이른 시기로 이동하며, 화염 강도 감소율이 디젤에 비해 더 큰 것을 확인할 수 있다. 전자는 JP-8 의 경우, 연소는 더 늦게 시작했음에도 불구하고 더 빠르게 연소가 진행되었음을 의미하며, 후자는 연소 후반기에 화염의 소산이 더 빠르고 강하게 발생하였음을 보여준다. 이는 곧, JP-8 이 디젤에 비해 연소 후반기 화염의 소멸이 더 강하게 발생하였음을 의미하며 앞선 배기 결과에서 스모크가 적게 배출된 원인이라 할 수 있다.

배기 결과에 대한 보다 정량적인 분석을 위해 이색법 적용을 통해 화염온도와 KL 치를 분석하여 Fig. 7 에 도시하였다. 일반적으로 이색법을 통해 얻은 화염온도와 KL 치는 각각 NO_x 와 스모크 생성과 비례하는 것으로 알려져 있다.⁽¹³⁾ Fig. 7 의 왼쪽과 오른쪽에 있는 컬러바는 이미지 각 픽셀의 온도와 KL 치 값과 일치하는 값이다. 예혼합 연소 기간 동안에는 연소로 인한 신호는 거의 탐지되지 않았다. 이는 예혼합 연소 구간 동안에는 스모크가 거의 생성되지 않았다는 것을 의미한다. 디젤 연소에 의한 화염 온도는 JP-8 의 경우에 비해 상대적으로 고르게 분포하고 있음을 확인할 수 있다.

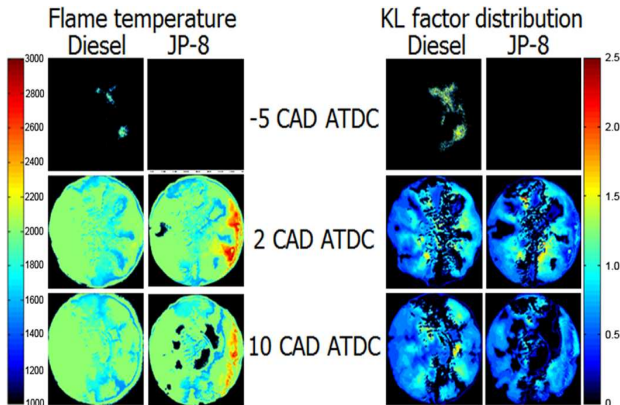


Fig. 7 Flame temperature and KL factor distribution

반면 JP-8 연소의 경우, 연소실 오른 편에서 매우 높은 온도 영역이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 JP-8 연소의 디젤에 비해 높았던 예혼합 연소 구간 영역 뿐 아니라, 확산 연소 구간에서의 국부적인 고온 영역의 존재가 JP-8의 연소 결과 디젤 연소의 경우 보다 다량의 NOx가 배출된 결과를 설명해 준다고 할 수 있다. KL치를 보여주는 Fig. 7의 오른쪽 그림을 살펴보면, 디젤 연소의 경우, JP-8 연소에 비해 2 CAD ATDC 조건에서 상대적으로 높은 KL치를 가지고 있으며, 더 고른 KL치 분포를 보여주는 것을 알 수 있다. 또한 10 CAD ATDC 지점에서 JP-8 연소의 경우, KL치가 분사기 노즐 근처에서 2 CAD ATDC에 비해 매우 급격하게 감소하는 것을 알 수 있는 반면, 디젤의 경우 2 CAD ATDC의 KL치 분포와 거의 유사하게 유지되고 있음을 확인할 수 있다.

이런 이색법 결과를 통해서도 JP-8 연소의 경우, 연소 후반부에 디젤에 비해 상대적으로 빠른 스모크 산화과정을 겪으며, 이로 인해 최종 스모크 측정값이 낮게 되는 것을 다시 한번 확인할 수 있다.

4. 결론

대형 디젤 엔진에서 JP-8과 디젤의 분무 및 연소특성을 비교하였다. 배기 결과 해석의 신뢰도를 높이기 위해 직접 화염가시화와 이색법을 적용하였다. 본 연구를 통한 주요 결과는 아래와 같다.

(1) JP-8은 낮은 증발 온도 특성으로 인한 기화 및 미립화 향상으로 인해 분무 도달 거리가 짧고 분무각은 더 넓은 결과를 보였다.

(2) 향상된 혼합기 형성에도 불구하고 낮은 세탄가 특성으로 인해 JP-8의 점화지연 기간은 디젤에 비해 더 긴 특성을 보였다.

(3) JP-8 연소 시 긴 점화지연 기간과 우수한 증

발 특성으로 인해 예혼합 연소가 더 지배적으로 나타났다.

(4) 결과적으로 디젤 연소에 비해 높은 연소 온도 특성으로 인해 NOx는 더 배출되며, 농후 영역의 감소로 스모크는 저감되는 결과를 확인하였다.

(5) 직접 화염 가시화 결과 해석을 통해, JP-8 연소 시 화염의 소산이 더 빠르게 그리고 더 일찍 발생하는 것을 알 수 있었다. 이는 연소 후반기 JP-8의 상대적으로 우수한 기화 특성으로 인해 연소가 더욱 가속화되었으며 이로 인해 화염 소멸 과정이 촉진되어 최종 스모크 배출이 저감된 것을 의미한다.

(6) 이색법을 통해 얻은 화염 온도 분석 결과, JP-8 연소 시 국부적으로 고온 영역이 분포하는 것을 확인하였으며, 이는 JP-8 연소시의 NOx 배출이 증가된 현상을 설명해준다. 또한 JP-8의 KL치 분포가 더 균일하며 전반적으로 낮은 값을 보이는 것을 확인하였으며, 이를 통해 낮은 스모크배출 결과를 다시 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 두산인프라코어와 지식경제부의 산업원천 기술 개발 과제 지원에 의해 수행된 결과로서, 이에 감사의 뜻을 표합니다. 또한 제노발티사의 박정서 박사의 기술 지원에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Belvoir, 1991, "JP-8 Single Fuel Forward Report," *U. S. Army R-D & E Centre.*, Vol. 20, No. 5, pp. 449~464.
- (2) Owen, E. C., LePera, M. E. and Letstz., 1989, "Use of Aviation Turbine Fuel JP-8 as the Single Fuel on the Battlefiled," *SAE Technical Paper* 892071.
- (3) Papagiannakis, R. G., Ktsiopoulos, P. N., Hountalas, D. T. and Yfantis, E., 2006, "Single Fuel Research Program Comparative Results of the Use of JP-8 Aviation Fuel versus Diesel Fuel on a Direct Injection and Indirect Diesel Engine," *SAE Technical Paper* 2006-01-1673.
- (4) Kouremenos, D. A., Rakopoulos, C. D. and Hountalas, D. T., 1997, "Experimental Investigation of the Performance and Exhaust Emissions of a Swirl Chamber Diesel Engine Using JP-8 Aviation Fuel," *International Journal of Engine Research*, Vol. 21, No. 12, pp. 1173~1185.
- (5) Li, T., Kakizaki, R., Ogawa, H., Murase, M. and Suzuki, M., 2010, "Fuel Property Effect in Premixed Low Temperature Diesel Combustion," *Conference on*

- Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines(THIESEL).*
- (6) Kalghatgi, G., Hildingsson, L., Harrison, A. and Johansson, B., 2010, "Low-NOx, Low-Smoke Operation of a Diesel Engine Using "Premixed Enough" Compression Ignition – Effects of Fuel Autoignition Quality, Volatility and Aromati content," *Conference on Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines(THIESEL).*
- (7) Bang, J. and Choi, I., 2003, "An Estimation of the Temperature Distribution and the Soot Density in Diesel Flame with the Two-color Method using Image Analysis System," *Transactions of KSAE*, Vol. 11, No. 5, pp. 60~69.
- (8) Zhao, H. and Ladommatos, N., 1998, "Optical Diagnostics for Soot and Temperature Measurement in Diesel Engines," *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 24, No. 3, pp. 221~255.
- (9) Musculus, M. P. B., 2005, "Measurements of the Influence of Soot Radiation on In-Cylinder Temperature and Exhaust NOx in a Heavy-Duty Diesel Engine," *SAE Transactions Journal of Engines*, Vol. 114, No. 3, pp. 845~866.
- (10) Myong, K. J., Suzuki, H., Senda, J. and Fujimoto, H., 2007, "Spray Inner Structure of Evaporating Multi-Component Fuel," *FUEL*, Vol. 87, No. 2, pp. 202~210.
- (11) Pickett, L. M. and Hoogterp, L., 2008, "Fundamental Spray and Combustion Measurements of JP-8 at Diesel Condition," *SAE Transactions Journal of Commercial Vehicles*, Vol. 2, No. 1, pp. 108~118.
- (12) Musculus, M. P. B. and Kattke, K., 2009, "Entrainment Wave," *SAE International Journal of Engines*, Vol. 2, No. 1, pp. 1170~1193.
- (13) Nikolic, D. and Iida, N., 2007, "Effects of Intake CO₂ Concentration of Fuel Spray Flame Temperatures and Soot Formation," *Journal of Automobile Engineering*, Vol. 221, No. D12, pp. 1567~1573.