

2색법에 의한 에멀존 연료의 화염온도 및 soot 분포 측정에 관한 실험적 연구

박 재 완(포항공과대학교 기계공학과)

박 권 하(한국해양대학교 기계공학과), 허 강 열(포항공과대학교 기계공학과)

Abstract

This experiment is performed to investigate the effects of the emulsion on the flame temperature and soot formation in a diesel engine. The two-color method is used to measure the flame temperature for combustion of emulsified diesel in the Rapid Compression and Expansion Machine(RCEM). The concentration of soot is estimated via calculation of the KL factor. The solenoid valve, electronic controller and needle lift sensor are used to control the exact injection timing and duration under various operating conditions. According to the results the soot concentration is reduced with the increasing W/O while the temperature reduced. The pressure data and the flame images captured by a high speed camera show that the ignition delay of emulsified diesel increase the duration of premixed combustion. The sizes of water drops are measured to be about $10\mu\text{m}$ by a microscope.

1.서론

최근 선박 및 자동차에서 배출되는 오염물질이 지구 환경에 심각한 영향을 미치고 있음이 알려지면서 각국의 배기가스에 대한 규제가 점차로 강화됨에 따라 이를 감소시키기 위한 대책이 시급한 과제로 떠오르고 있다. 이를 위해 후처리 기법의 일종인 접촉 환원법(SCR)이나 스크라바를 이용하는 방법 등이 제안되었으나 비용과 효율 면에서 많은 단점을 안고 있는 형편이다. 이에 배기 되는 NOx의 90%이상을 차지하는 thermal NOx를 억제하기 위한 방안으로 흡기관내에 물을 분사하는 방법, 물과 연료를 동시에 분사하는 방법 그리고 에멀존 연료를 사용하는 방법 등이 새롭게 제안되었다. 이중 배기가스의 정화도가 높고 적용이 비교적 용이한 것은 emulsion 연료를 이용한 것이다. 디젤 기관에 유화연료를 사용할 경우 경유만을 사용할 때에 비하여 NOx 및 soot 농도가 저감되고 CO는 분사시기에 따라 증감하는 것으로 알려져 있다. 이러한 현상은 대체로 다음과 같은 효과에 의한 연소 개선 및 연료 소비율저감이라는 해석이 지배적이다.

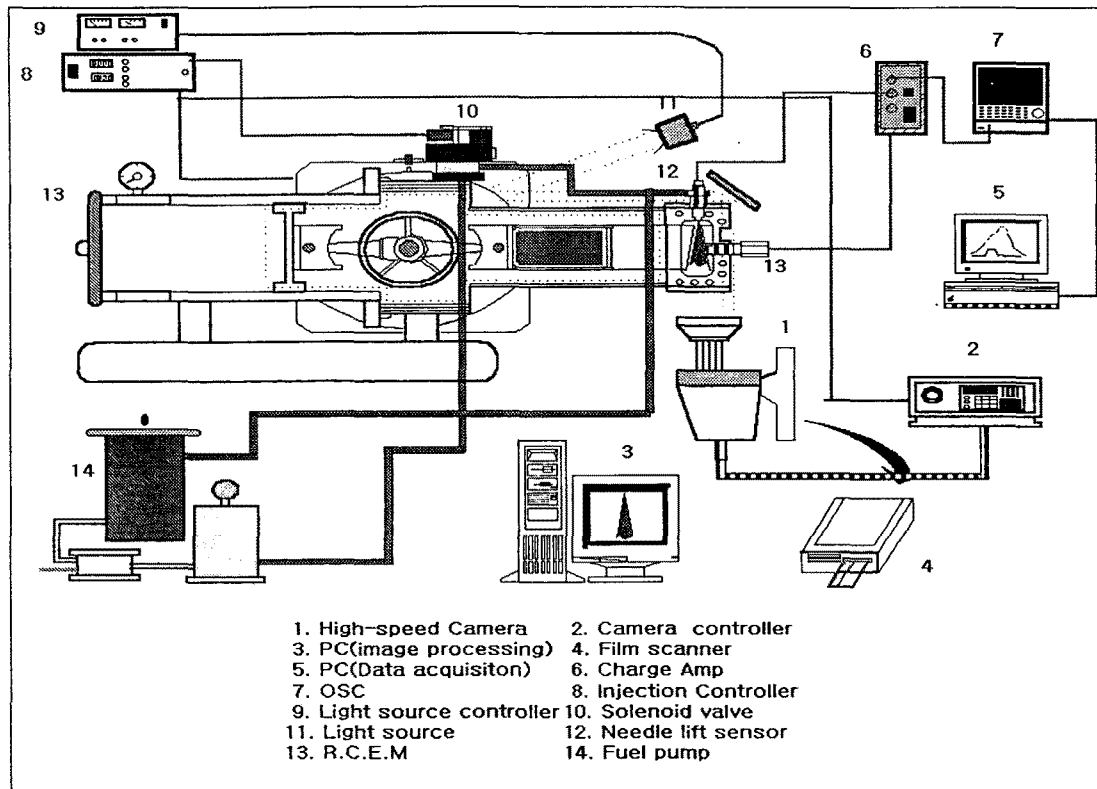
- (1) 유화 연료중의 물 입자의 급속한 체적팽창 즉, micro explosion 현상에 의한 분무의 2차 미립화.
- (2) 분무의 운동량 증가에 의한 분무내의 공기의 swirl 효과.
- (3) 물의 함유에 의한 분무의 국소 공기 과잉을 증대.
- (4) 착화 지연 증대에 의한 예혼합 연소량 증가.
- (5) 연소 온도 저하 및 휘염 감소에 의한 냉각 손실 저감.
- (6) 연소 온도 저하에 의한 열해리 경향 억제.
- (7) 연소 가스 몰 수 증가.

(1)~(4) 효과에 의해 연소실내에서 분무된 연료와 공기와의 혼합이 촉진되어 연소기간이 단축되며 그 결과 열효율이 개선되는 현상이 발생하고, (5)~(7)의 이유가 함께 가해져 냉각 손실의 감소에 의해 연료 소비율이 저감되는 것이라고 생각되고 있다. 본 연구에서는 에멀존 연료의 압축착화 현상을 가시화하고 연소압력데이터를 분석하여 (4)의 현상을 확인하였고, 2색법을 이용하여 온도와 Soot분포를 측정함으로써 (5)현상을 확인하였다. 또한 연소중 물 입자의 폭발현상을 휘염의 거동을 통하여 간접적으로 추정할 수 있었다.

2. 실험 장치 및 방법.

본 실험에 사용된 실험장치에 대한 전체적인 개략도는 그림[1]과 같다. 실험장치는 크게 보아 R.C.E.M, 공압펌프, 솔레노이드 밸브, 인젝션 콘트롤러, High-speed camera 등으로 나눌 수 있다. R.C.E.M의 공압피스톤에 4bar의 압축공기를 채우고 브레이크를 풀면 이 힘으로 크랭크축이 회전하여 연소실내에 평균 38bar 정도의 motoring peak 압력이 발생한다. 공압펌프를 이용하여 약 225bar로 가압된 연료는 개폐압 170bar의 핀틀형 노즐을 통해 연소실 안으로 분사되었다. 에멀존에 의한 점화지연을 논하기 위해서는 먼저 여러 가지 시험조건에 대해 연료의 분사시기와 기간을 정확히 제어해야 하므로 이를 위해 엔코더 신호로부터 각도를 세어 원하는 기간동안 분사할 수 있도록 신호를 발생시키는 콘트롤러를 직접 설계 제작하였다. 화염은 인젝션이 시작되는 순간부터 착화될 수 있고, 고속으로 회전하고 있는 드럼 카메라의 촬영시간이 8 ms 정도로 짧으므로 착화시점을 포함한 연소의 전 과정을 필름에 담기 위해서는 솔레노이드 밸브와 카메라의 작동 지연을 각각 정확히 측정하여 그만큼 빨리 신호를 보내주어야 한다. 또한 R.C.E.M의 크랭크 앵글을 촬영하기 위한 광원도 동시에 제어되어야 한다. 모든 신호는 R.C.E.M의 크랭크축에 부착된 엔코더의 Z-pulse를 기준으로 각 장비의 기계적인 지연을 감안하여 신호를 발생시켜 비로소 완전한 화염사진을 얻을 수 있었다. 동시에 압력데이터와 인젝터의 needle lift 신호 그리고 크랭크앵글을 1도 간격으로 함께 얻어 정확한 분사시기와 회전속도를 바탕으로 압력데이터를 분석할 수 있었다. 디젤 연소시 가시화창과 연소실을 오염시키는 soot입자를 매찰영시 헤드를 열고 닦아주어 최적의 실험조건을 유지하였으며 열선과 air heater를 이용하여 연소실벽의 온도를 80~85로 제어하였다. 2색법을 적용하기 위한 표준광은 1500도에서 2000도까지 100도 간격으로 촬영되었으며 하나의 필름에 300도 간격의 2가지 경우를 한번에 촬영하여 온도에 따른 필름의 감광도를 검증하였다.

실험은 분사시기 BTDC10, 15, 20과 에멀존율(W/O) 0, 20, 40의 총 9가지 경우에 대해 수행되었고, 물과 디젤의 상분리 현상을 막기 위하여 일본 세끼구치사의 emulsion surfactant 세키에말 SA를 물에 부피 비로 0.2퍼센트 섞어서 스위스 HDC사의 믹서로 15분간 섞은 뒤 펌



[Fig.1] Schematic Diagram of the experiment

프에 공급하였다.

3. 이론

빛의 강도에 따라 필름의 감광정도가 1차함수의 형태로 증가하는 성질을 이용하는 이색법은 화염사진으로부터 서로 다른 두 파장의 복사강도를 검출하고, soot의 방사율을 소거하는 방법으로 화염온도를 구한다. 단파장 흑체 방사율 $I(\lambda, T)$ 는 3000K이하의 온도에서 Wien의 식에 의해 식(1)과 같이 주어진다.

$$I(\lambda, T) = \epsilon_{\lambda} C_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda T}\right) \quad (1)$$

λ 는 파장이고 T 는 절대온도이며, C_1 은 $3.743 \times 108 W \mu m^4 / m^2$ 이고, C_2 는 $1.4387 \times 104 \mu m K$ 이다.

여기서 ϵ_{λ} 는 Lambert Beer's의 법칙으로부터

$$\epsilon_{\lambda} = 1 - \exp(-K_{\lambda}L) \quad (2)$$

식에서 K_{λ} 는 soot의 크기가 작으므로 산란율은 무시되고 흡수율로 간주된 계수이며 L 은 빛의 optical path에 해당하는 길이 즉 화염의 기하학적 두께이다. Hottel과

Broughton의 실험식을 디젤화염내의 soot입자의 단파장 방사율에 적용하면,

$$a_\lambda = \frac{K}{\lambda^a} = K_\lambda \quad (3)$$

여기에서 K 는 soot입자의 밀도와 관계된 값을 나타내는 흡수계수이다. 가시역의 이색법에서 온도에 미치는 a 의 영향은 상대적으로 작고 1.38의 상수를 유지함이 알려져 있다. 이 값은 Hottel의 정상화염에서 얻어진 1.39와 거의 비슷하다. 식(3)과 식(4)에서

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \exp\left(-\frac{KL}{\lambda^a}\right) \quad (4)$$

KL 이 근사적인 입자수 밀도와 화염 두께를 나타내고, λ^a 는 파장의 영향을 근사적으로 나타내기 때문에 지수 a 는 입자 직경의 함수이고, soot의 굴절 지수라 할 수 있다. 식(1)과 (4)에서 soot밀도의 지표인 KL 값은 다음 식으로 표시된다.

$$KL = -\lambda^a \ln\left[1 - \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda}\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T}\right)\right)\right] \quad (5)$$

위의 식에서 T_a 는 λ 에서의 색온도이다. (5) 식을 이색법을 적용하는 두 파장의 식으로 나누어 쓰면 식(6)과 (7)과 같다.

$$KL = -\lambda_1^a \ln\left[1 - \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_1}\left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T}\right)\right)\right] \quad (6)$$

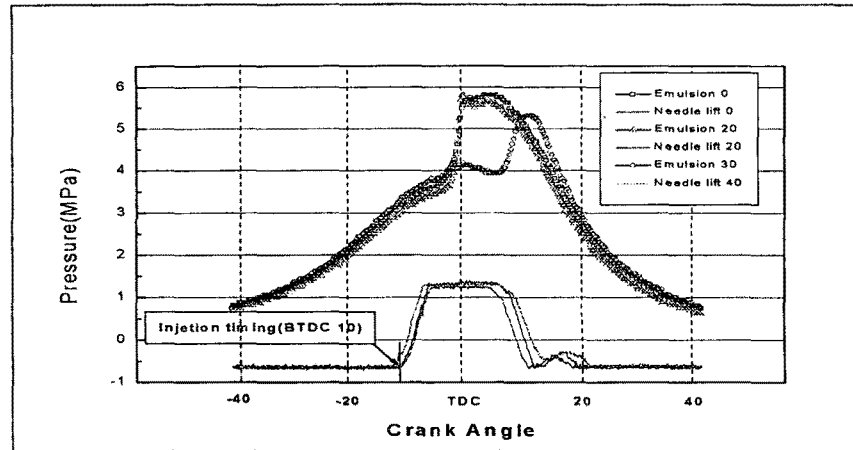
$$KL = -\lambda_2^a \ln\left[1 - \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_2}\left(\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T}\right)\right)\right] \quad (7)$$

식(6)과 (7)에서 KL 을 소거하면

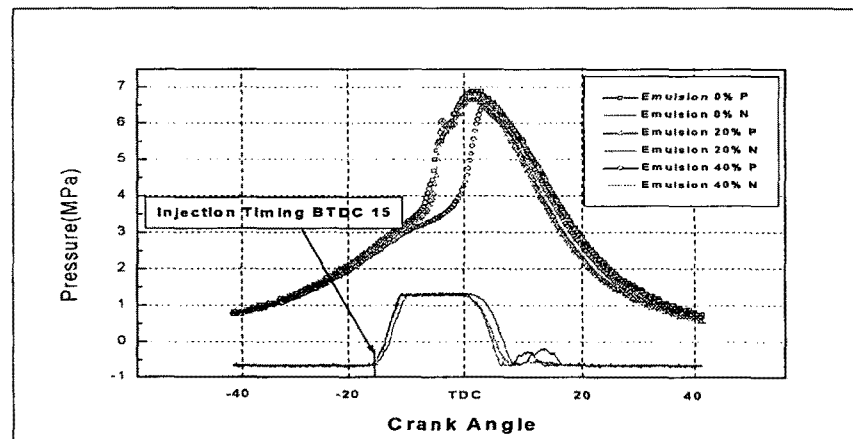
$$\begin{aligned} \lambda_1^a \ln\left[1 - \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_1}\left(\frac{1}{T_{a1}} - \frac{1}{T}\right)\right)\right] \\ = \lambda_2^a \ln\left[1 - \exp\left(-\frac{C_2}{\lambda_2}\left(\frac{1}{T_{a2}} - \frac{1}{T}\right)\right)\right] \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 이색법에 적용하는 두 파장 λ_1, λ_2 그리고 표준광의 calibration curve와 필름의 감광도 즉 화염사진을 스캐닝하여 얻은 8-bit의 R, G값으로부터 계산된 화염의 색온도 T_{a1}, T_{a2} 를 대입하면 진온도 T 를 구할 수 있고, 이 값을 다시 식 (7)에 대입하면 KL 도 구할 수 있다.

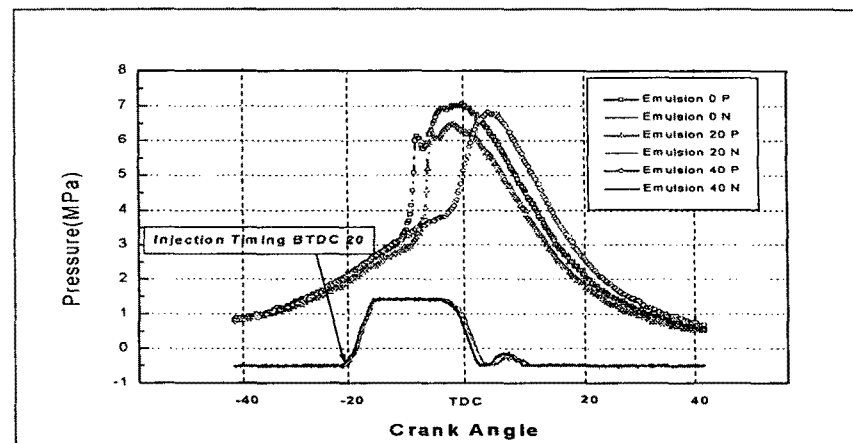
4. 실험 결과



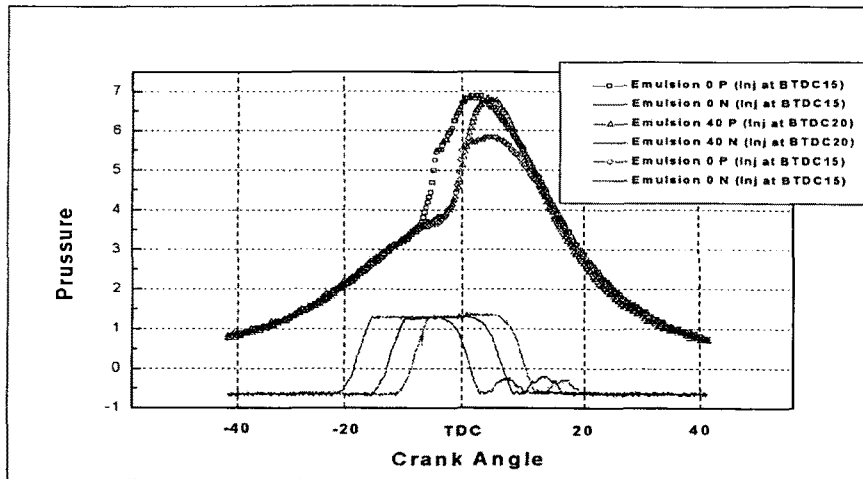
[Fig.2] Pressure and Needle data (injected at BTDC 10)



[Fig.3] Pressure and Needle data (injected at BTDC 15)



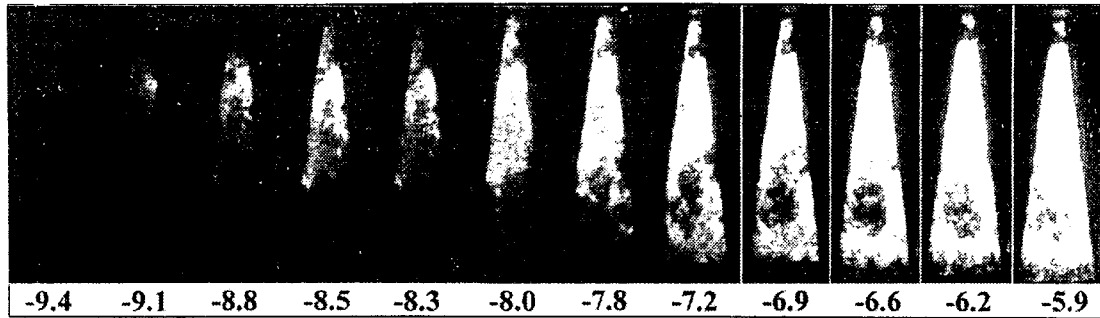
[Fig.4] Pressure and Needle data (injected at BTDC 20)



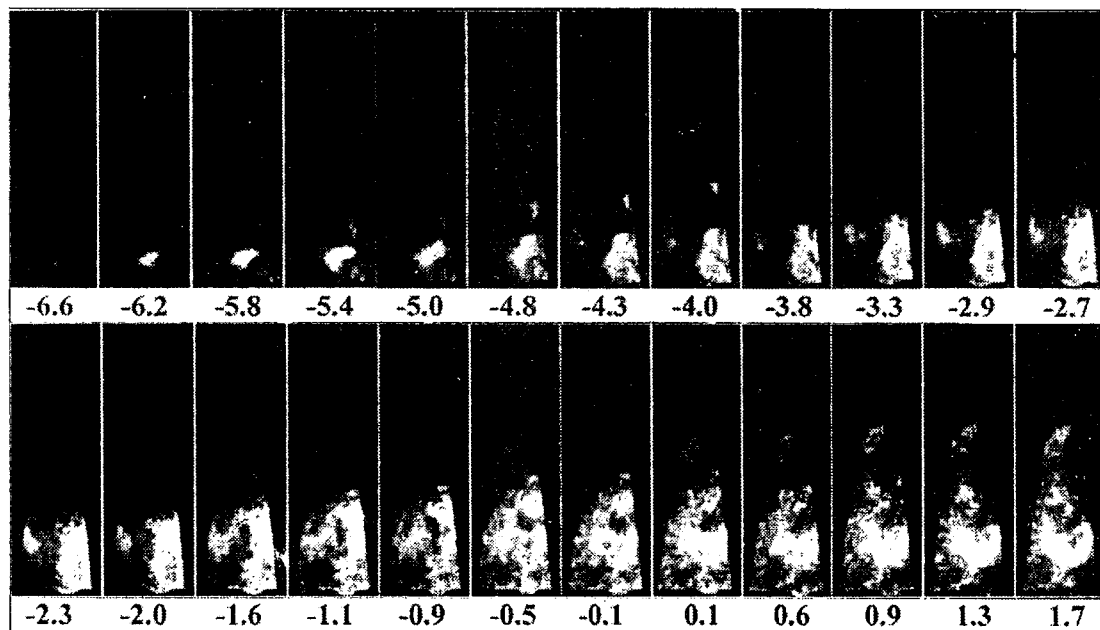
[Fig.5] Pressure and Needle data
(Diesel inj at BTDC 10, 15 Emulsion inj at BTDC 20)

[Fig.2], [Fig.3], [Fig.4]는 각각 BTDC 10, 15, 20도에서 Emulsion을 0, 20, 40의 연료를 분사하여 연소 시켰을 경우의 압력곡선과 인젝터 니들의 거동을 나타낸 것이다. 분사시기는 ± 1 도 미만의 오차로 제어되었으며 전체적인 분사기간도 거의 같음을 알 수 있다. 10도와 15도 분사인 경우는 0%와 20%의 분사지연이 큰 차이를 보이지 않았고 두 가지 모두에 대해 40%의 경우는 점화지연이 매우 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 현상은 20도 분사에서도 같은 경향으로 나타나며 고부하 고회전에서의 경우와는 달리 저부하 저회전수의 경우에는 특정 에멀존율에서 점화지연이 매우 큰 폭으로 증가함을 확인 할 수 있었다. 10도 분사에서는 에멀존율 40의 연소가 매우 불안한 경향을 보였다. 이에 비하여 15도와 20도 연소에서는 비교적 안정된 연소를 보였으며 두 경우의 점화시기가 비슷한 경향을 보였으나 20도 분사의 경우가 조금 더 활발한 연소를 보이고 있다. 모든 경우의 분사량이 같으므로 이와같은 현상은 에혼합연소 구간의 길이가 길어짐에 따른 연소효율의 증대효과라 할 수 있다. [Fig.6], [Fig.7]은 각각 BTDC 20도 분사에 대한 디젤과 40% 에멀존 연료의 착화현상을 가시화한 것이다. BTDC 20도에서 분사한 에멀존 연료의 경우 크랭크 앵글과 니들 데이터로부터 에멀존 연료의 착화시점이 분사말기임을 알 수 있다. 디젤이 분무 직후 연소실의 상단으로부터 연소가 시작되어 크랭크 앵글 2도(약 500 μ s)정도의 시간만에 화염이 급격히 전파되고 있는 반면, 에멀존 연료는 연소실 하단으로부터 착화되어 느린 속도로 상단으로 전파하고 있다. 연소실 하단에는 분사 초기의 에멀존 연료가 공기와 섞여 에혼합 상태를 이루고 있으며 디젤의 경우와는 달리 분사된 연료가 곧바로 연소하지 못하고 중단에 와서야 연소되고 있다. 전체적인 휘염의 양도 상당히 감소 하였음을 알 수 있다.

[Fig.5]는 BTDC 10도와 15도에 분사된 디젤과 20도에 분사된 에멀존 40% 연료의 연소 압력을 비교한 것이다. 15도에 분사된 디젤의 압력 곡선이 전체적으로 더 높고 넓은 폭의 압력곡선을 나타내고 있으나 내연기관에 있어 TDC 이전의 연소는 펌핑웍을 늘이는 결과이므로 디젤에서는 더 이상 분사시기를 앞당기는 것이 무의미



[Fig.6] Photographs of diesel ignition(injected at BTDC 15)



[Fig.7] Photographs of emulsion fuel ignition(injected at BTDC 15)

하다. 따라서 이 경우 최적의 연소가 10도와 15도 사이에서 일어난다고 해도 에멀존 40%인 경우와 비교해 보면 에멀존 연료가 디젤의 함량이 약 71% 정도이나 오히려 최고 압력이 더 높고 전체 일의 양도 소폭으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와같은 현상은 실제 엔진에서 에멀존 연료를 사용하여 분사시기를 알맞게 조절할 경우 연료 소비율을 감소 시킬 수 있는 사실의 근거라 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 RCEM을 이용하여 디젤과 에멀존 화염을 분사시기별로 가시화하여 온도와 soot분포를 계산하고 압력데이터를 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 에멀존 연료의 착화지연과 그 특성을 확인할 수 있었다. 디젤의 경우 일단 착화가 일어나면 분무되는 디젤이 곧바로 연소하였으나 에멀존 연료의 경우는 연소

중 분사되는 연료도 계속적으로 점화지연이 발생하였다.

2. 착화지연에 의한 예혼합연소량의 증가를 확인할 수 있었고 이를 바탕으로 에멀존에 의한 연료소비율 감소 현상을 설명할 수 있었다. 이는 최근 여러 연구에서 보고되고 있는 바로 에멀존이 배기가스 정화측면 뿐만이 아니라 분사제어를 통하여 연비절감도 실현할 수 있음을 보여준 예이다.

3. 에멀존 연료를 실제 디젤엔진에 적용할 경우 점화지연을 감안한 분사시기의 조절이 반드시 선행되어야함을 알 수 있었다. 다양한 운전조건에 대한 분사계의 전자제어가 절실히 요구된다.

4. 2색법을 통한 온도와 soot분포 해석을 통하여 엘멀존에 의한 soot저감 현상을 관찰할 수 있었다.

6. 참고문헌

- [1] Yukio Matsui, Takeyuki Kamimoto, and Shin Matsuoka. "A Study on the Time and Space Resolved Measurement of Flame Temperature and Soot Concentration in a D. I. Diesel Engine by the Two-Color Method", SAE Paper-790491.
- [2] Hoang Xuan Quoc, Jean-Marc Vignon, and Maurice Brun. "A New Approach of the Two-Color Method for Determining Local Instantaneous Soot Concentration and Temperature in a D.I. Diesel Combustion Chamber" SAE Paper-910736.
- [3] Gregory J. Hampson and Rolf D. Reitz. "Two-Color Imaging of In-Cylinder Soot Concentration and Temperature in a Heavy-Duty DI Diesel Engine with Comparison to Multidimensional Modeling for Single and Split and Split injections." SAE Paper-980524.
- [4] "연료 유화에 의한 배기 정화에 관한 조사 연구", 사단 법인 일본 박용 기관 학회. 1997.7
- [5] Kiyoshi Enoki, "Fluidity, Spray and Injection Rate Characteristics of Unstable Water/Gas-Oil Emulsion Fuel(W/O)" SAE Paper-900839
- [6] G.E. Andrews. K.D. Bartle, S.W.Pang, A.M. Nurein, and P.T. Williams. "The Reduction in Diesel Particulate Emissions Using Emulsified Fuels" SAE Paper-880348