

증발장에서 에멀전연료의 거동특성에 관한 연구

염정국* · 윤정환**
* 동아대학교 기계공학과

Study of Behavior Characteristics of Emulsified Fuels with Evaporative Field

Jeong Kuk Yeom* and Jeong Hwan Yoon**
* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

(Received September 13, 2014 ; Revised November 25, 2014 ; Accepted December 18, 2014)

Key Words: Diesel Engine(디젤엔진), Emulsified Fuel(에멀전연료), Oil in Water(수중유형), Spray(분무), Water in Oil(유중수형)

초록: 본 논문은 에멀전연료(Diesel/H₂O₂)에 있어 과산화수소의 혼합비가 혼합연료 액적증발 및 분무거동 특성에 미치는 영향을 연구하였다. 연료혼합을 위한 계면활성제는 span 80, tween 80을 9:1로 혼합하여 에멀전연료 총 부피의 3%로 고정 혼합하였다. 또한 과산화수소의 혼합비율은 계면활성제의 혼합비를 고려하여 EF (Emulsified Fuel)0, EF2, EF12, EF22, EF32 및 EF42로 설정하였다. 에멀전연료 액적의 증발 특성을 관찰하기 위해 가열판에 액적 방울을 투하시켜 액적이 증발하는 현상을 산란광 및 쉐리렌기법을 통하여 촬영하였다. 또한 혼합비 변화에 따른 혼합연료의 분무거동특성을 해석하기 위하여 혼합연료 EF0~EF22를 선택하여 150℃로 유지된 정적용기에서 증발자유분무 거동해석 실험을 실시하였다. 그 결과 과산화수소의 혼합비율이 EF0보다 높은 EF22 에멀전연료의 자유분무성장이 연료 속에 혼합된 과산화수소의 증발촉진으로 인하여 보다 신속하였다.

Abstract: In this study, the effects of the mixing ratio of emulsified fuel on the droplet evaporation and spray behavior characteristics were analyzed. A surfactant comprising span 80 and tween 80 mixed at a 9:1 ratio was used for the emulsified fuel. The fuel and surfactant were mixed at a ratio of 3:1 for the emulsified fuel. In addition, considering the mixing ratio of the surfactant, the mixing ratio of H₂O₂ in the emulsified fuel was set as EF (emulsified fuel)0, EF2, EF12, EF22, EF32, and EF42. To observe the evaporation characteristics, droplets of the emulsified fuel were dropped on a heating plate and observed using scattered light and a Schlieren system. In addition, to analyze the effect of the H₂O₂ mixing ratio, the behavior characteristics of the evaporative free spray were investigated in the mixing ratio range of EF0 to EF22 using a constant volume chamber with heaters. Consequentially, it was found that in the case of EF22, the free spray development of the emulsified fuel was faster than that of EF0 (diesel only) because of the promotion of the evaporation due to the phase change in the peroxide contained in the emulsion fuel.

- 기호설명 -

1. 서론

EF : (Emulsified Fuel) 에멀전연료

하첨자

inj : 분사

연료의 효율측면에서 디젤엔진은 가솔린엔진과 비교하여 엔진 효율이 높고 이산화탄소(CO₂)와 일산화탄소(CO) 및 탄화수소(Hydrocarbon :HC)배출이 적지만, 질소산화물(Nitrogen oxide :NOx)과 입자상물질(Particulate matter: PM)은 가솔린 엔진 보다 배출량이 많아 이를 개선시키기 위한 연구

† Corresponding Author, jeonghwan789@naver.com

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

가 많이 진행되고 있다. 또한 화석연료의 고갈과 화석연료 중 특히 석유에 있어 고유가 문제, 자동차 배기가스 배출문제를 해결하기 위해 자동차용 대체연료(Alternative fuels)의 연구 및 개발이 중요시되고 있다. 그 대표적인 대체연료로서 식물성기름 및 동물성기름을 사용하는 바이오디젤^(1,2)이 있으나, 식용으로 인한 윤리적인 문제가 제기되고 있는 실정이다. 이러한 문제를 극복하기 위한 연구의 일환으로 화석연료와 물 등을 혼합한 에멀전연료의 사용을 생각할 수 있고, 이 에멀전연료는 연료특성으로 인하여 엔진 유해배기가스 배출이 적은 등의 이점이 있다. 이러한 에멀전연료에 대한 연구로서 Park 등⁽³⁾은 물을 혼합한 에멀전연료를 사용하여 선박디젤유와 배기가스배출량을 비교했을 때 물의 함수율이 20%인 에멀전연료의 경우 선박디젤유를 사용할 경우보다 NOx의 배출량은 약 20%, Soot의 배출량은 약 71.2% 적게 나타났다고 발표하였다. 그리고 Lim 등⁽⁴⁾은 에멀전연료 혼합비 25%에서 부하조건 75% 및 100%에서 각각 32%, 30%의 NOx감소 및 84%, 59%의 Soot 배출이 감소한다고 발표하였다.

한편 에멀전연료는 기존의 경유에 물과 계면활성제를 첨가하여 혼합한 연료를 말하며, 에멀전연료의 형태로는 유중수형(Water in oil) 및 수중유형(Oil in water)이 있다. 에멀전연료 내의 물의 증발로 인한 미립화 촉진 및 증발 잠열의 효과를 기대하기 위해선 유중수형형태의 에멀전연료가 효과적이며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾ 또한 에멀전연료의 장점으로는 물의 증발잠열로 인한 연소실 온도의 저하로 고온에서 생성되는 NOx의 생성을 억제할 수 있으며, 물의 증발로 인한 미립화 촉진으로 Soot의 저감효과를 기대할 수 있다.⁽⁸⁾ 그리고 물과 원자의 구성이 비슷한 과산화수소(H₂O₂)를 경유에 첨가하는 경우, 전술한 물을 혼합한 경우의 같은 효과뿐만이 아니고 연소 반응 시 활성화산소 생성으로 인한 보다 적극적인 연소 촉진효과를 기대할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 경유와 과산화수소가 혼합된 에멀전연료의 증발특성해석연구를 위한 액적증발실험과 에멀전연료의 혼합기형성과정의 특성해석을 위한 분무실험을 동시에 실시하였다. 그리고 분무실험을 위하여 에멀전연료의 증발특성고찰이 가능한 고온의 정적용기를 이용하여 가시화를 실시하였으며, 획득한 이미지를 프로그램

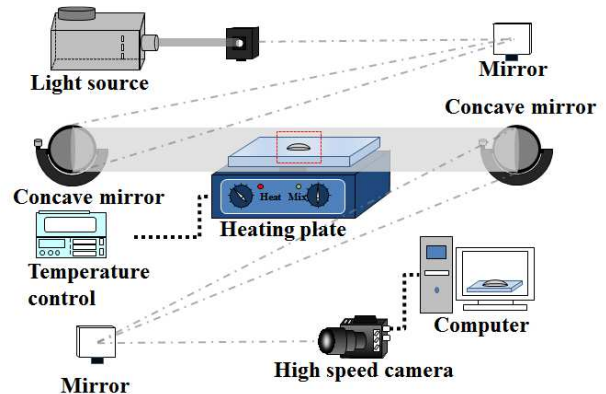


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus for the droplet evaporation of emulsified fuel

처리를 통하여 혼합연료 자유분무의 증발 거동특성을 정량적으로 해석하였다. 또한 실험가시화방법으로 고속카메라를 이용하여 산란광 직접측정과 쉐리렌기법을 적용하였고, 경유에 대한 과산화수소 혼합비율을 실험변수로서 하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험에 사용할 연료로서 디젤연료에 과산화수소를 혼합한 에멀전연료를 사용하였다. 에멀전연료(Emulsified Fuel, EF)의 혼합비 설정을 경유에 과산화수소 혼합 %(체적)에 해당하는 조건을 이용하여 EF0(Diesel only), EF2, EF12, EF22, EF32 및 EF42로 각각 설정하였다. Fig. 1의 개략도와 같이 가열판(MSH-20A)에 연료액적을 떨어뜨려 증발되는 현상을 쉐리렌장치 및 고속카메라(Micro-4C, Phantom Co., Ltd.)를 사용하여 촬영하였다. 실험에 앞서 에멀전연료로서 의미를 가지는 유중수형을 확인하기 위해 항온수조를 온도 25℃로 유지하여 Ostwald viscometer를 이용해 점성을 측정하였다.⁽⁹⁾ 액적 실험을 바탕으로 디젤엔진에 사용되는 3세대 Bosch. 피에조 인젝터, 커먼레일시스템을 이용하여 분사실험을 하였다. 정적용기 안의 온도를 150℃로 고정하여 에멀전연료 EF0, EF2, EF12 및 EF22를 분사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 에멀전연료 액적 증발특성 해석

경유에 과산화수소의 혼합이 혼합연료 분무거동에 미치는 영향을 알아보기 위한 선행 기초실험으로서 에멀전연료의 액적증발특성 실험을 실

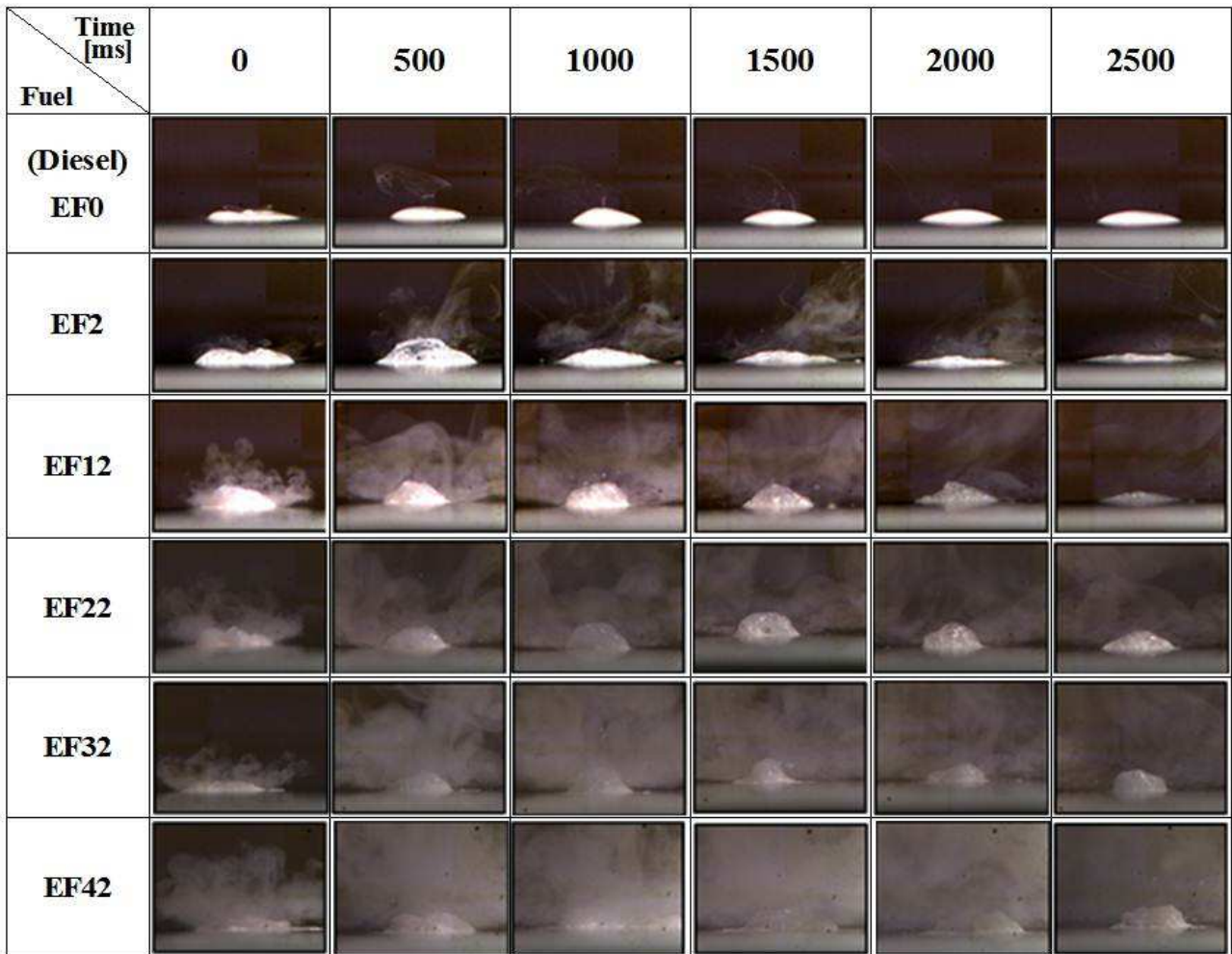


Fig. 2 Evaporative images of emulsified fuel droplets using scattering light with fuel mixing ratio⁽⁹⁾

시하였다. 에멀전연료 내 혼합된 과산화수소의 물성특성으로 인한 액적증발특성을 산란광 및 쉘리렌기법을 이용하여 촬영하고 그 결과를 비교·분석하였다. 실험에 사용된 가열관의 온도를 200℃로 설정하여 경유의 끓는점(250℃~350℃)을 피하였고, 과산화수소 끓는점(108℃)을 만족시켜 에멀전연료 내의 과산화수소 혼합비가 액적증발 특성에 미치는 영향을 관찰하였다. 혼합조건은 EF0~42 5가지로 선택하여 유중수형 에멀전연료의 액적증발실험을 실시하였다. Fig. 2는 산란광을 직접 촬영한 에멀전연료의 액적증발실험 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 경유에서는 액적증발이 이루어지지 않아 증발된 과산화수소의 기체 및 표면의 변화가 관찰되지 않지만 과산화수소가 혼합된 에멀전연료의 경우는 혼합비가 증가될수록 증기의 발생량이 많아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 EF0~EF42까지는 유중수형으로 존

재하기 때문에 경유 내의 과산화수소가 증발하면서 액적의 외부표면을 왜곡시키는 현상도 관찰할 수 있다. 이는 가열관으로부터의 열교환에 의한 에멀전연료내의 과산화수소가 증발하여 나타난 현상이라 판단된다. Fig. 3은 에멀전연료내의 과산화수소 증발현상을 보다 세밀하게 관찰하기 위해 쉘리렌기법을 사용하여 촬영한 이미지결과이다. 산란광으로 촬영한 이미지와 동일하게 과산화수소의 혼합비가 증가될수록 에멀전연료 내 과산화수소의 증발로 인한 증기의 발생량이 촉진됨을 알 수 있다. 특히 액적표면 영역에 있어서 액적증발 촉진현상을 산란광의 이미지와 비교해 확연하게 관찰할 수 있었다. 에멀전연료에 포함된 과산화수소의 미세폭발에 의한 액적증발 현상을 보다 정확하게 관찰하기 위하여 에멀전연료 혼합조건 중 EF22의 결과를 확대하여 Fig. 4에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 시간이 경과

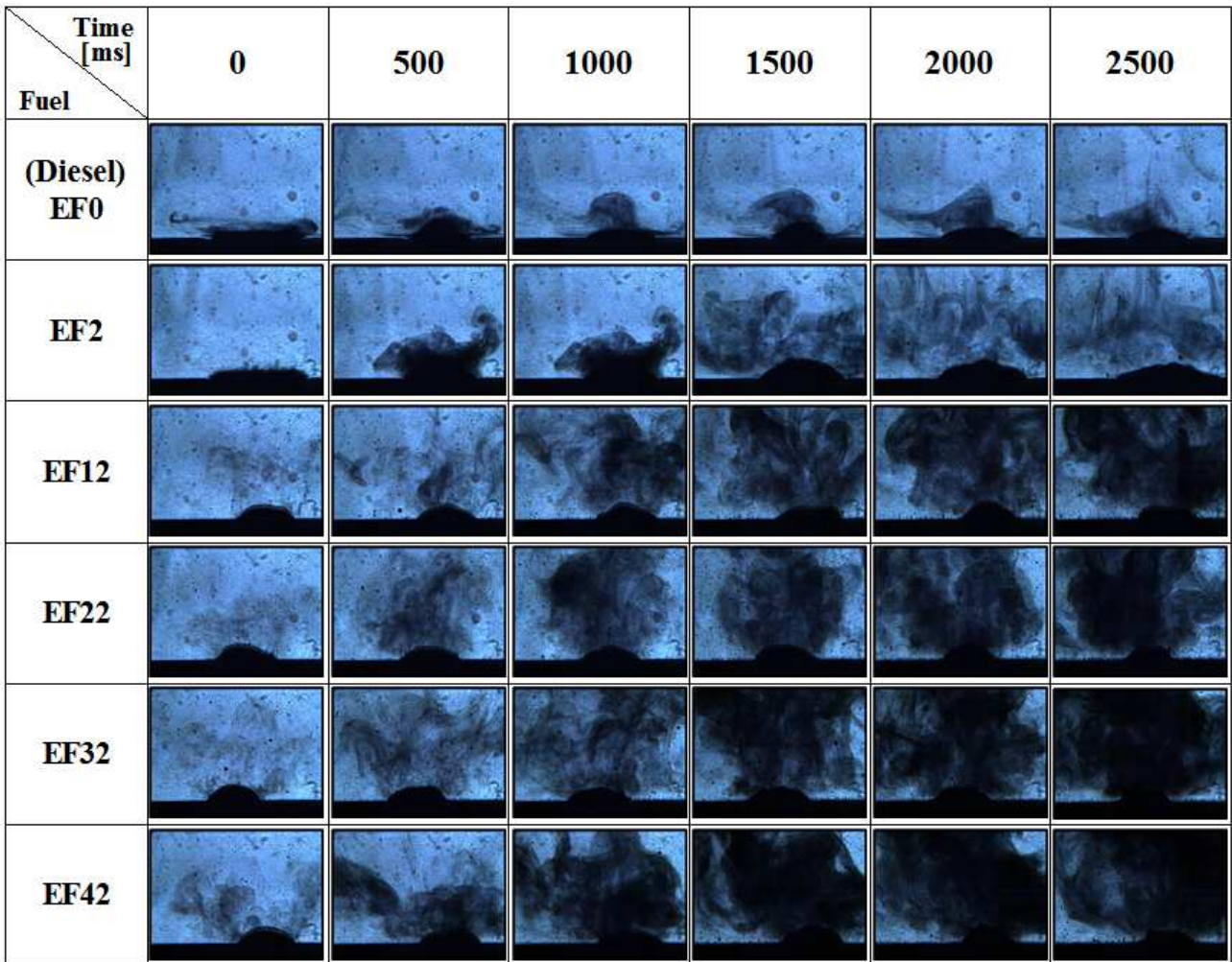


Fig. 3 Evaporative images of emulsified fuel droplets using Schlieren method with fuel mixing ratio

함에 따라 가열판으로부터 액적으로의 열전달에 의해 에멀전연료의 증발은 점차 급속히 일어나고 있다. 연료 내의 과산화수소의 미세폭발(Microexplosion)에 의한 액적들의 비산(Scattering)을 관찰할 수 있다. 이러한 결과로 에멀전연료 분사 시, 혼합연료 내 과산화수소의 증발효과로 인한 미립화 촉진과 증발잠열로 인한 NO_x 감소를 기대할 수 있다.

3.2 에멀전연료 분무 거동특성 해석

전술한 액적 증발특성이 에멀전연료 분무 거동특성에 미치는 영향을 알아보기 위해 분사 조건을 1000bar로 설정하였고, 에멀전연료의 혼합비는 EF0(Only diesel), EF2, EF12, EF22로 각각 설정하여 실험하였다. 산란광을 이용해 대기압 및 실온에서 실험하였고 이 결과를 증발분무와 비교하기 위하여 Fig. 5와 같이 분무내의 과산화수소의 증

발이 발생하는 온도 150℃로 유지되는 정적용기를 제작하여 1000bar조건에서 실험을 실시하였다. 제작한 정적용기내의 온도를 열전대를 이용하여 정적용기 내 3개의 지점에서 측정하였다. 그 결과를 근거로 정적용기 내의 온도가 전체적으로 150℃로 유지된다고 판단하여 쉘리렌기법을 이용하여 증발분무 가시화실험을 실시하였고, 이러한 증발특성의 비교 대상으로 상온 및 대기압 조건에서 산란광으로 측정한 이미지를 함께 나타내었다. 그 실험결과들을 Fig. 6에 나타내었고, 이미지내의 S.L.은 산란광인 scattering light을, S.M.은 쉘리렌방법인 Schlieren method를 각각 뜻한다. 결과에서 알 수 있듯이 에멀전연료내의 과산화수소의 증발효과로 인해 표면의 일그러짐 현상이 발생하고 연료의 확산현상이 촉진되는 현상을 볼 수 있다. 이는 전술한 혼합연료 액적실험의 결과와 동일하며 연료내의 과산화수소가 분무 시에도 신속

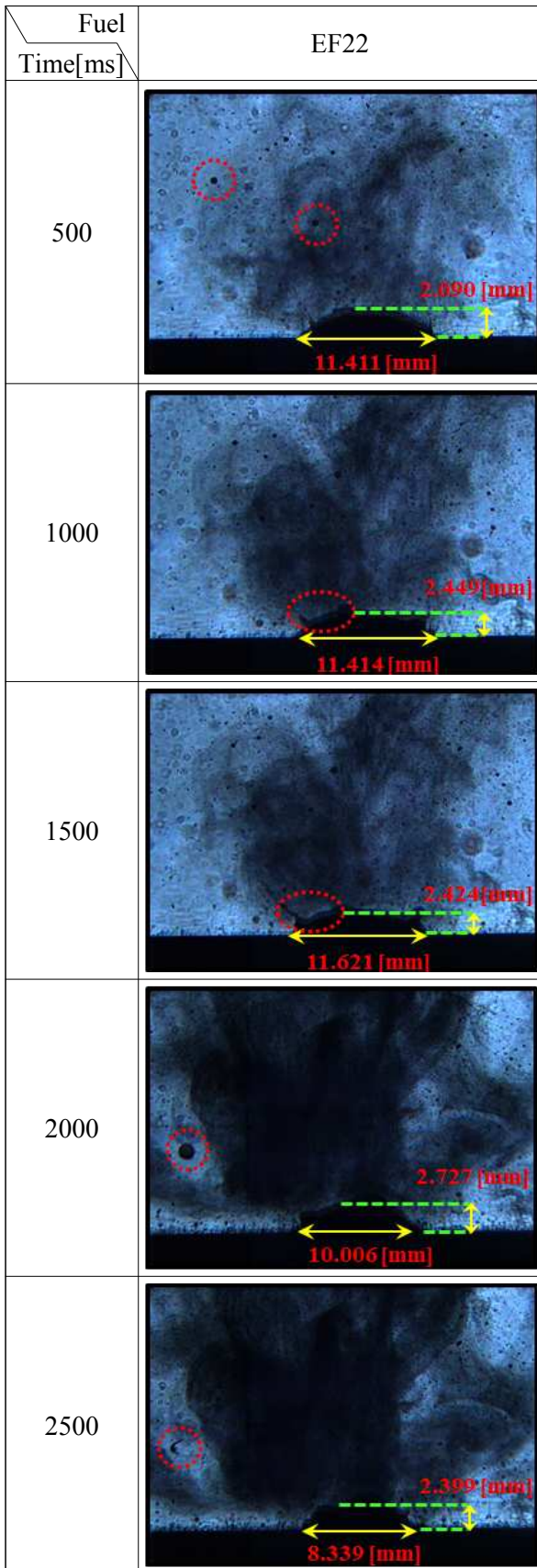


Fig. 4 Evaporative images of case of EF22

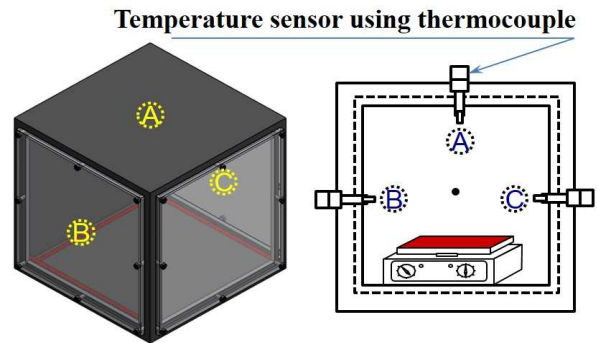


Fig. 5 Schematic of constant volume chamber with thermocouples

히 증발하여 분무거동특성에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이러한 에멀전연료의 기상확산 면적 분석을 통하여 실제 엔진 연소실내 에멀전연료 분사 시 연료액적의 미립화와 증발축진으로 보다 신속하고 균일한 혼합기형성을 기대할 수 있다. Fig. 7은 연료확산 이미지 산출방법에 대한 이미지이다. 촬영한 이미지를 이미지처리프로그램 (Photoshop CS6)을 이용하여 65536개의 픽셀로 분할하였다. 그리고 노즐의 실제사이즈를 이미지에 대입시켜 촬영한 이미지의 가로, 세로의 크기를 각각 38.3mm, 155.8mm로 구하였다. 단위픽셀에 대응하는 면적을 그림과 같이 0.091mm²로 구하였고 연료의 확산면적에 해당하는 픽셀을 각 조건에 맞게 그림과 같이 지정하여 단위픽셀에 해당하는 면적을 곱함으로써 분무 확산면적을 구하였다. 분사압력 1000bar에 대해 분무 확산면적을 구한 결과는 Fig. 8과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 과산화수가 혼합된 에멀전연료의 연료확산면적이 경유와 비교했을 때 더 넓으며, 과산화수소의 혼합비가 증가될수록 분무 연료의 확산면적이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 본 연구조건인 경우, 고온의 정적용기내의 연료 분사 시 열전달에 필요한 시간은 분사 후 400 μ s~600 μ s 정도 경과하여야 하며, 보다 높은 온도에서는 더 빠른 시간에 그러한 현상이 발생할 것이라 예측된다. 따라서 차후 실제엔진 연소실 내를 재현할 수 있는 보다 고온·고압의 실험 조건에서의 추가 연구가 필요하다고 판단된다. 그리고 혼합비가 증가 할수록 혼합연료 증기의 확산면적 크기는 커지고, 혼합비가 증가할수록 확산면적이 넓은 지는 것은 과산화수소가 확산면적에 영향을 미치는 것을 의미한다.

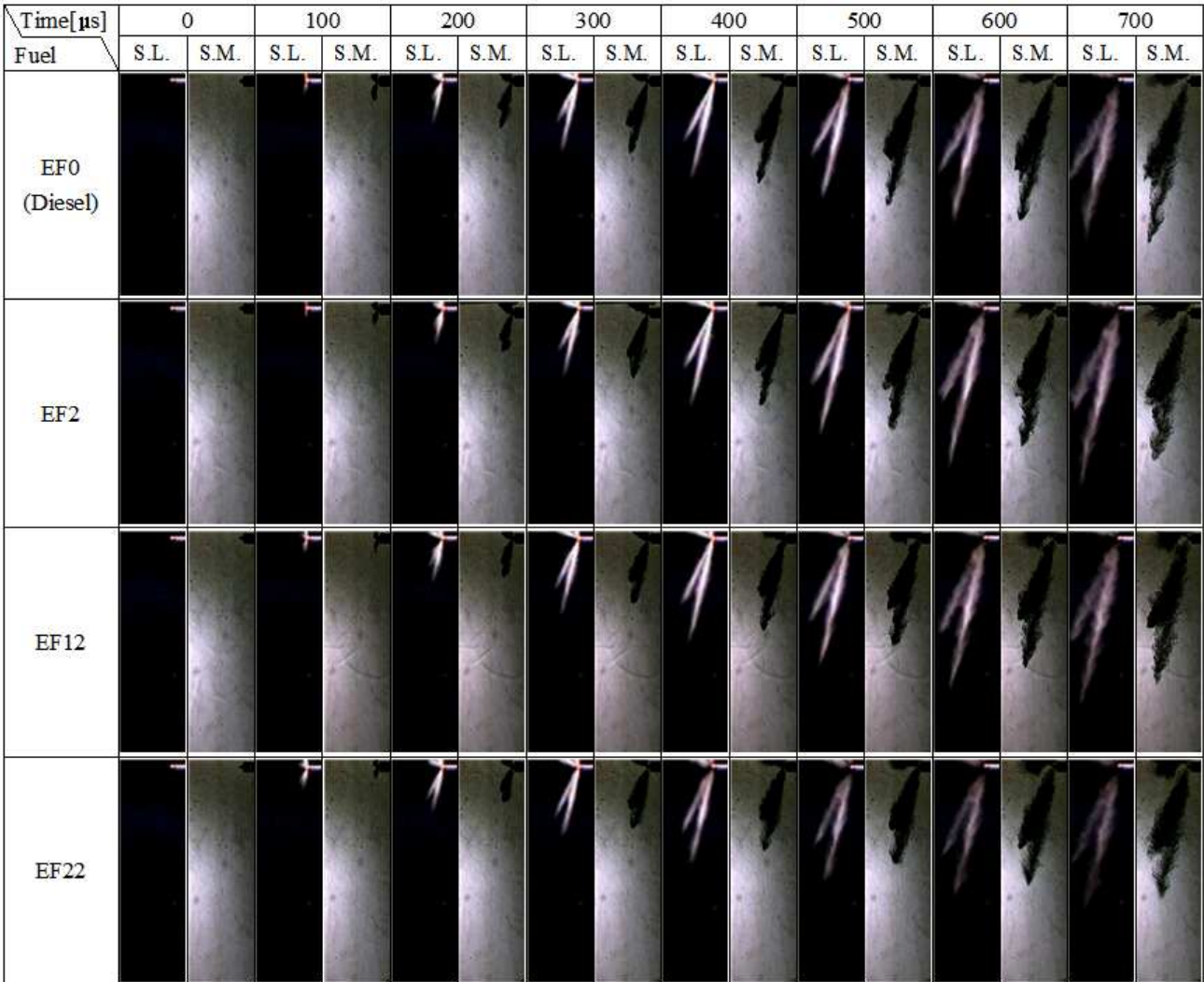


Fig. 6 Images of free spray according to fuel mixing ratio with scattering light and Schlieren method

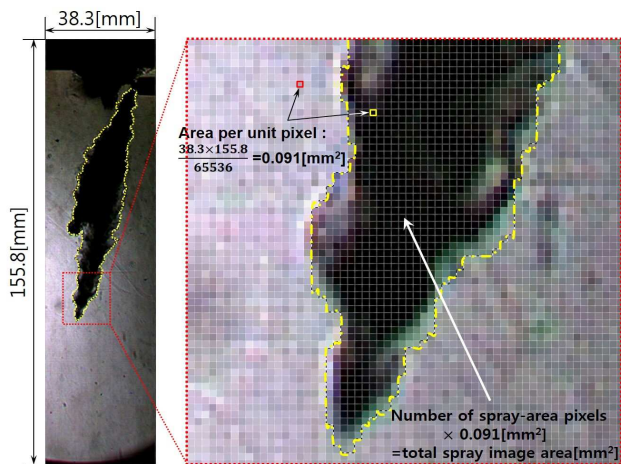


Fig. 7 Schematic of analysis of spray image using area per unit pixel for dispersion calculation

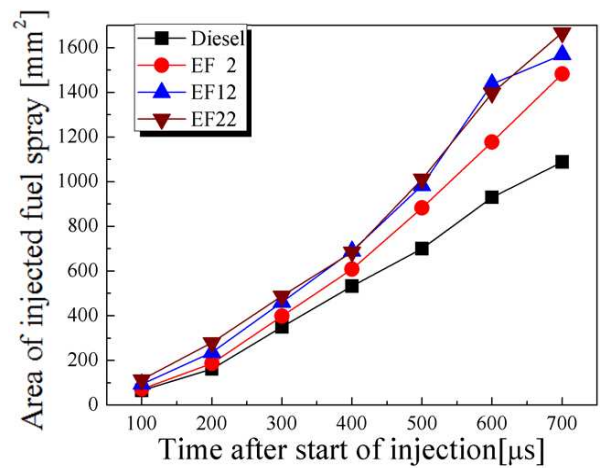


Fig. 8 Temporal change in spray dispersion area according to mixing ratio

4. 결 론

본 연구는 과산화수소가 혼합된 에멀전연료에 관한 기초실험연구로서 에멀전연료내의 과산화수소 증발특성이 혼합연료 분무거동특성에 미치는 영향을 조사하였고, 그 결과는 다음과 같다.

(1) 경유와 혼합연료 EF2, EF12, EF22, EF32 및 EF42 5가지의 조건에 대해 가열관을 이용하여 에멀전연료 액적의 증발특성을 관찰하였다. 그 결과 경유의 경우 증발이 일어나지 않았으며, 과산화수소가 혼합된 에멀전연료의 경우 혼합비가 증가할수록 액적증기의 양이 증가되는 것을 이미지 해석을 통해서 알 수 있었다. 또한 이와 동일한 결과를 혼합연료의 자유분무 거동실험해석에서도 알 수 있었고, 이러한 결과로 실제 엔진 연소실 내 에멀전연료 분사 시 연료액적의 미립화와 증발촉진으로 보다 신속하고 균일한 혼합기형성을 기대할 수 있다.

(2) 에멀전연료 분사 시 과산화수소의 증발이 분무거동에 미치는 영향을 보다 자세히 관찰하기 위해 이미지처리프로그램을 이용하여 전체 이미지 면적을 이미지 픽셀수로 나눠 단위픽셀당의 면적을 구하였고, 그 단위픽셀당 면적에 쉘리렌으로 촬영한 분무해당 이미지 픽셀을 곱하여 분무 확산면적의 크기를 분석하였다. 그 결과 경유만의 경우보다 에멀전연료내 과산화수소의 혼합비가 높을수록 연료내의 과산화수소에 의한 증발촉진으로 이미지 내 확산되는 연료의 면적이 증가함을 확인하였다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2013R1A1A2011842).

참고문헌 (References)

(1) Yeom, J. K. and Ha, H. S., 2012, "Basic Study on Spray Behavior for Application of Biofuel to Diesel Engines(Palm Oil-Considering Viscosity),"

Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, Vol. 36, No. 7, pp. 745~752.

(2) Lee, D. G., Roh, H. G., Choi, S. C. and Lee, C. S., 2011, "Combustion and Emission Characteristics of 4 Cylinder Common-Rail DI Diesel Engine with Biodiesel Blended Fuel," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 2, pp. 137~143.

(3) Park, J. K., Oh, J. M., Kim, H. I., Lee, Ch. H. and Lee, K. H., 2012, "Combustion Characteristics of MDO and MDO Emulsion in Automotive Diesel Engine," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 36, No. 9, pp. 954~951.

(4) Lim, J. K., Cho, S. G., Hwang, S. J. and Yoo, D. H., 2007, "Effect on Characteristics of Exhaust Emissions by Using Emulsified Fuel in Diesel Engine," *Journal of KOSME*, Vol. 31, No. 1, pp. 44~50.

(5) Kim, M. C. and Lee, C. S., 2008, "It's Effects for Engine Emission of Water/Oil Emulsified Fuel," *Journal of Korean Society of Analytical Science*, Vol. 21, No. 3, pp. 159~166.

(6) Fahd, M. A., Wenmig, Y., Lee, P. S., Chou, S. K. and Yap, C., 2013, "Experimental Investigation of the Performance and Emission Characteristics of Direct Injection Diesel Engine by Water Emulsion Diesel under Varying Engine Load Condition," *Applied Energy*, Vol. 102, pp. 1042~1049.

(7) Yang, W. M., An, H., Chou, S. K., Vedharaji, S., Vallinagam, R., Balaji, M., Mohammad, F. E. A. and Chua, K. J. E., 2013, "Emulsion Fuel with Novel Nano-organic Additives for Diesel Engine Application," *Fuel*, Vol. 104, pp. 726~731.

(8) Alahmer, A., 2013 "Influence of Using Emulsified Diesel Fuel on the Performance and Pollutants Emitted from Diesel Engine," *Energy Conversion and Management*, Vol. 73, pp. 361~369.

(9) Yeom, J. K. and Yoon, J. H., 2014, "A Basic Study of Spray-Behavior Characteristics of Emulsified Fuel," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 38, No. 9, pp. 763~771.