

< 학술논문 >

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.9.917>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 에멀전연료 증발특성에 관한 기초 연구<sup>§</sup>

염정국\* · 윤정환\*<sup>†</sup>

\* 동아대학교 기계공학과

### Basic Study of Evaporative Characteristics of Emulsified Fuels

Jeong Kuk Yeom\* and Jeong Hwan Yoon\*<sup>†</sup>

\* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

(Received February 23, 2015 ; Revised May 20, 2015 ; Accepted June 16, 2015)

**Key Words:** Diesel Engine(디젤엔진), Emulsified Fuel(에멀전연료), Mixing Ratio(혼합비), Oil in Water(수중유형), Water in Oil(유중수형)

**초록:** 본 연구는 대체혼합연료의 디젤엔진 적용 적합성 검토를 목적으로 수행되었다. 실험연료로서 디젤과 과산화수소의 혼합연료인 에멀전연료를 사용하였고, 실험과 수치해석의 주요변수로서 경유와 과산화수소 혼합비를 선택하였다. 에멀전연료의 증발거동 특성은 슈리렌 방법을 이용한 실험과 실험에서 구한 결과를 바탕으로 상용 프로그램(ANSYS CFX)을 이용한 수치해석을 실시하였다. 본 연구의 주요결과로서 과산화수소의 혼합비가 증가할수록 에멀전연료의 증발특성인 미세폭발 현상이 활발해짐을 확인하였고, 또한 수치해석으로 디젤연료 계산영역 내부 디젤의 체적분율 계산을 통하여 에멀전연료의 증발현상을 정량적으로 모사 가능하였다.

**Abstract:** The goal of this study is to consider the application of alternative blended fuel to diesel engine. In this study, as the test fuels, we use a blended fuel mix of diesel and hydrogen peroxide. As the primary variable, we vary the mixing ratio of diesel and hydrogen peroxide in the experimental and numerical analysis. We perform an evaporative behavior characteristics analysis of the emulsified fuel using the Schlieren method. The numerical analysis was carried out based on results obtained from the experimental analysis using the commercial code(ANSYS CFX). Consequently, we found that the micro-explosion depends on the fraction of hydrogen peroxide, and we propose a numerical method for the quantitative evaporation analysis of emulsified fuel droplets using the calculation of the volume fraction in the oil domain.

- 기호설명 -

EF : 에멀전연료  
T : 온도  
V : 부피

하첨자

h : 가열판  
s : 교반

a : 주위  
d : 액적

## 1. 서론

기존의 디젤엔진에 적용 가능한 대체연료는 바이오디젤과 에멀전연료가 대표적이며 고유가 시대를 맞아 기존의 디젤엔진에 대체연료의 적용에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 바이오디젤<sup>(1)</sup>은 디젤기관에 사용되는 연료로 팜유, 폐식용유, 대두유 등으로 에스테르화반응<sup>(2)</sup>과 같은 화학반응을 통해 얻어지는 수송용 대체 에너지이다. 그리고 에멀전연료는 원유가 상승 및 배기가스 규제 정책

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계학술대회(2015. 2. 25-27., 제주대) 발표논문임.

† Corresponding Author, jeonghwan789@naver.com

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

에 의해 주목 받는 연료이다. 다양한 종류의 에멀전연료가 존재하지만 흔히 수성과 유성을 혼합하여 사용하며 연료와 산소의 접촉면의 증가를 통해 완전연소를 유도하여 연비향상 및 질소산화물을 억제하는 연료이다.<sup>(3)</sup> 에멀전연료는 연료혼합 방법에 따라 유중수형(Water in oil)과 수중유형(Oil in water) 두 가지 형태가 존재하며 디젤엔진에 적용 가능한 에멀전연료는 유중수형을 의미한다. Atlas Powder Co.의 W.C. Griffin은 유화제의 친수기-친유기의 균형(Hydrophilic lipophilic balance) 혹은 HLB를 제안하여 1~40사이의 숫자로 나타내었고 일반적으로 계면활성제를 유화제로 사용 시 HLB가 2~20 사이의 것을 사용하며 유중수형 유화제는 4~6, 수중유형 유화제는 8~14이 적당하다고 알려져 있다.<sup>(4)</sup> 한편, 실제 엔진에 있어 바람직한 완전연소를 위해서는 실린더 내 연료의 고압분사 및 연료특성을 이용한 분사연료의 미립화개선이 중요하다. 에멀전연료의 증발특성인 미세폭발 현상은 혼합연료의 비점 차를 이용하여 기존의 디젤에 비해 표면적을 보다 확장시키는 현상으로 연소가 완전연소에 접근하도록 하는 방법이다. Watanabe 등<sup>(5)</sup>은 물과 디젤을 혼합한 에멀전연료와 기존의 디젤을 고온 정적용기 내부에 분무실험을 통하여 미세폭발 현상 관측 및 입자거동에 대하여 연구하였다. Kim 등<sup>(6)</sup>은 에멀전연료 제조 시 가장 문제가 되는 상 분리 현상에 대하여 하이브리드형 물혼합장치를 부착한 버너의 성능실험을 실시하였고 배기 특성 및 연료특성에 대한 연구를 하였다.

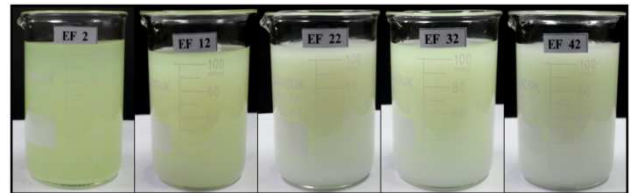
따라서 본 연구에서는 에멀전연료의 기초 거동 특성을 파악하기 위하여 액적을 대상으로 에멀전연료 증발특성을 슈리렌(Schlieren) 가시화 방법을 이용한 실험연구와 상용프로그램인 ANSYS CFX를 이용해 수치해석 연구를 동시에 실시하였다. 또한 실험해석 및 수치해석의 주요 연구 변수는 에멀전연료에 사용된 과산화수소의 혼합비로 설정하였다. 이러한 실험과 수치해석 연구결과들은 차후 에멀전연료를 실제 엔진에 적용할 시 연소설계 등에 필요한 기초 데이터로서 활용 가능하다고 판단된다.

## 2. 실험장치 및 방법

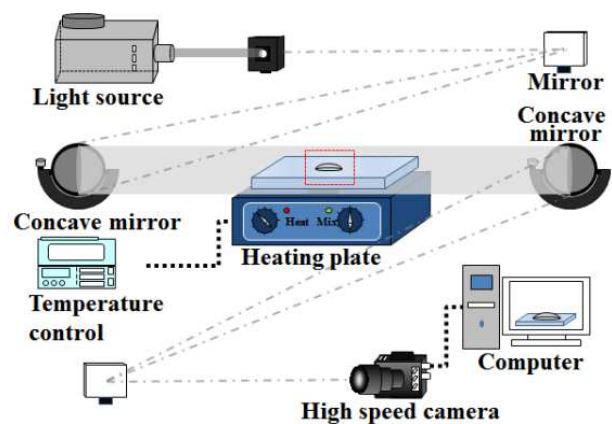
본 연구에서는 디젤과 과산화수소( $H_2O_2$ )를 체적비로 혼합하여 EF(Emulsified fuel)2, EF12, EF22, EF32 및 EF42의 에멀전연료를 제작하여 사용하였다. 유성과 수성의 혼합액인 에멀전연료는 혼합을 위한 유화제가 필요하며 디젤과 과산화수소의 혼

**Table 1** Experimental conditions for emulsified fuel droplet

Hotplate temperature ( $T_h$ )	473 K
Stirring rpm	1,500 rpm
Stirring time ( $t_s$ )	20 min
Ambient gas	Air
Ambient temperature ( $T_a$ )	298 K
Ambient pressure ( $p_a$ )	1.01 bar
Mixing ratios of emulsified fuel(EF)	EF2, EF12, EF22, EF32, EF42 (Diesel + $H_2O_2$ by volume %)



**Fig. 1** Emulsified fuels according to mixing ratio

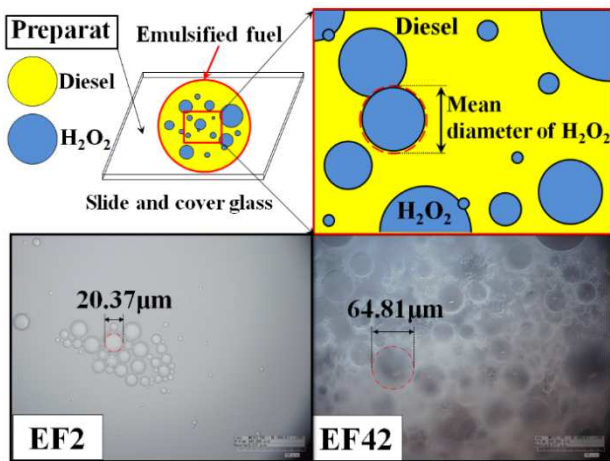


**Fig. 2** Schematic diagram of experimental apparatus

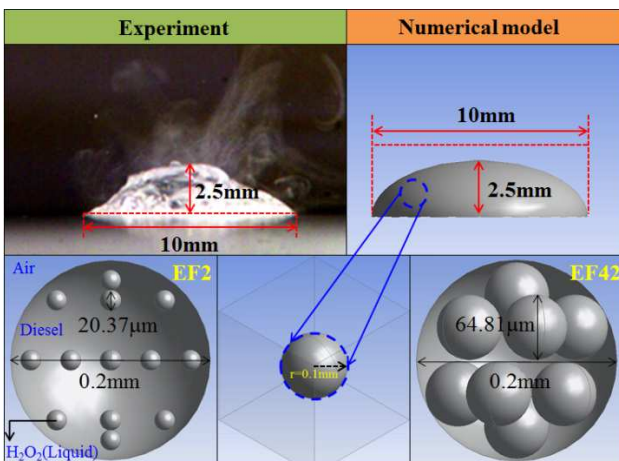
합을 위해서 span 80과 tween 80을 9:1의 혼합비로 제작 후 총 체적의 3%로 첨가하였고 rpm과 교반시간이 제어 가능한 대한과학사의 WKDH-WOS1015를 이용하여 혼합연료를 교반하였다. Fig. 1은 본 연구에서 교반기를 사용하여 제작한 에멀전연료의 이미지이다. 혼합한 에멀전 연료의 증발 특성인 미세폭발 현상은 에멀전연료 제작에 사용된 용액의 비점 차로 인해 발생하는 현상으로 본 연구에서는 혼합비에 따른 에멀전연료의 미세폭발 현상을 관측하기 위해 대한과학사의 MSH-20A 열관자력교반기를 사용하여 가열판의 온도를 473K로 설정 후 스포이트를 이용해 각 혼합비에 따른 에멀전연료 액적의 증발특성을 관측하였다.

**Table 2** Droplet information of emulsified fuel for numerical analysis

Sort	EF2	EF42
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> diameter [ $\mu\text{m}$ ]	20.37	64.81
$V_d(r=0.1[\text{mm}])$ [ $\text{mm}^3$ ]	2.62	55.02
Droplet numbers of H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> in total volume of droplet of emulsified fuel( $V_t=131[\text{mm}^3]$ )	592,011	386,008
Droplet numbers of H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> in total volume of droplet of emulsified fuel( $r=0.1[\text{mm}]$ )	19	12



**Fig. 3** Expanded images of emulsified fuel droplet



**Fig. 4** Models of EF2 and EF42 for numerical analysis based on the experiment

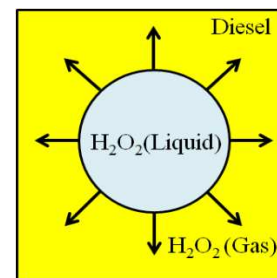
Fig. 2는 에멀전연료의 연료특성관측을 위한 실험 장치 개략도이다. 자세한 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

**Table 3** Calculation of mass flow for one droplet

No.	EF2[g]	EF42[g]
1	0.0208	0.0249
2	0.0266	0.0259
3	0.0215	0.0266
4	0.0212	0.0265
5	0.0248	0.0286
6	0.0265	0.0238
7	0.0208	0.0242
8	0.0244	0.0249
9	0.0266	0.0259
10	0.0212	0.0274
Average	0.0234	0.0259
EF mass Ave. [kg]	2.344e-5	2.587e-5
EF Vol. Ave. [ $\text{mm}^3$ ]	27.803	27.161
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Vol. Ave. [ $\text{mm}^3$ ]	6.281e-7	1.129e-5
Evaporation time [s]	0.701	1.069
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> mass flow [kg/s]	8.964e-7	1.206e-5

**Table 4** Properties of each emulsified fuel

Sort	EF2	EF12	EF22	EF32	EF42
Density [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	843.1	870.3	899.5	952.5	1129.5
Surface tension [mN/m]	31.6	31.9	32.2	32.6	33.1



**Fig. 5** Schematic diagram for boundary condition of emulsified particle

### 3. 수치해석 방법

#### 3.1 수치해석적용 모델의 선정

에멀전연료에 대한 수치해석은 과산화수소 혼합비에 따른 증발특성(미세폭발 현상)의 비교를 목적으로 하였기 때문에 대표적으로 혼합비 EF2와 EF42, 두 가지 경우에 대하여 진행하였다. Fig. 3은



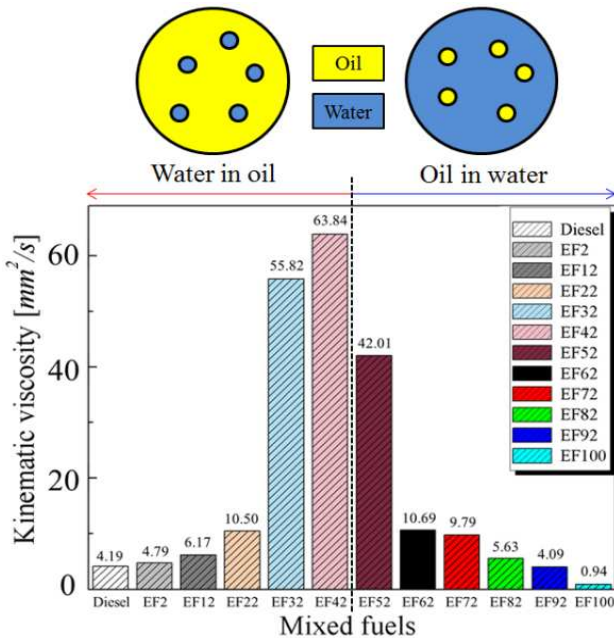


Fig. 6 Kinematic viscosities according to mixing ratio of emulsified fuel

HIROX사의 KH-7700으로 700배 확대하여 관측한 에멀전연료 EF2와 EF42 측정 이미지이며, Fig. 4는 EF2 액적실험과 EF2와 EF42에 대한 수치해석 모델 결과이다. 실험과 동일한 부피로 수치해석을 진행할 경우 EF2와 EF42 내부의 과산화수소 입자의 수는 592,011개와 386,008개로 계산되었기 때문에 전체의 일부분인 반지름 0.1mm 구에 대하여 해석을 진행하였고 내부의 과산화수소 입자 수는 Table 2에 의해 EF2와 EF42의 경우 19개와 12개로 각각 계산되었다.

3.2 수치해석 경계조건 설정

Fig. 5는 에멀전연료의 증발특성인 미세폭발현상을 측정하기 위해 적용한 경계조건 개략도이다. 본 수치해석에서는 Air, Oil 및  $H_2O_2$ , 3가지 Domain으로 나누었고  $H_2O_2$  부분을 벽으로 설정 후 벽면에서 과산화수소가 발생하는 조건으로 설정하였다. Table 3은 1개의 과산화수소 입자에서 발생하는 질량유량을 계산한 표이다. 질량유량을 계산하기 위

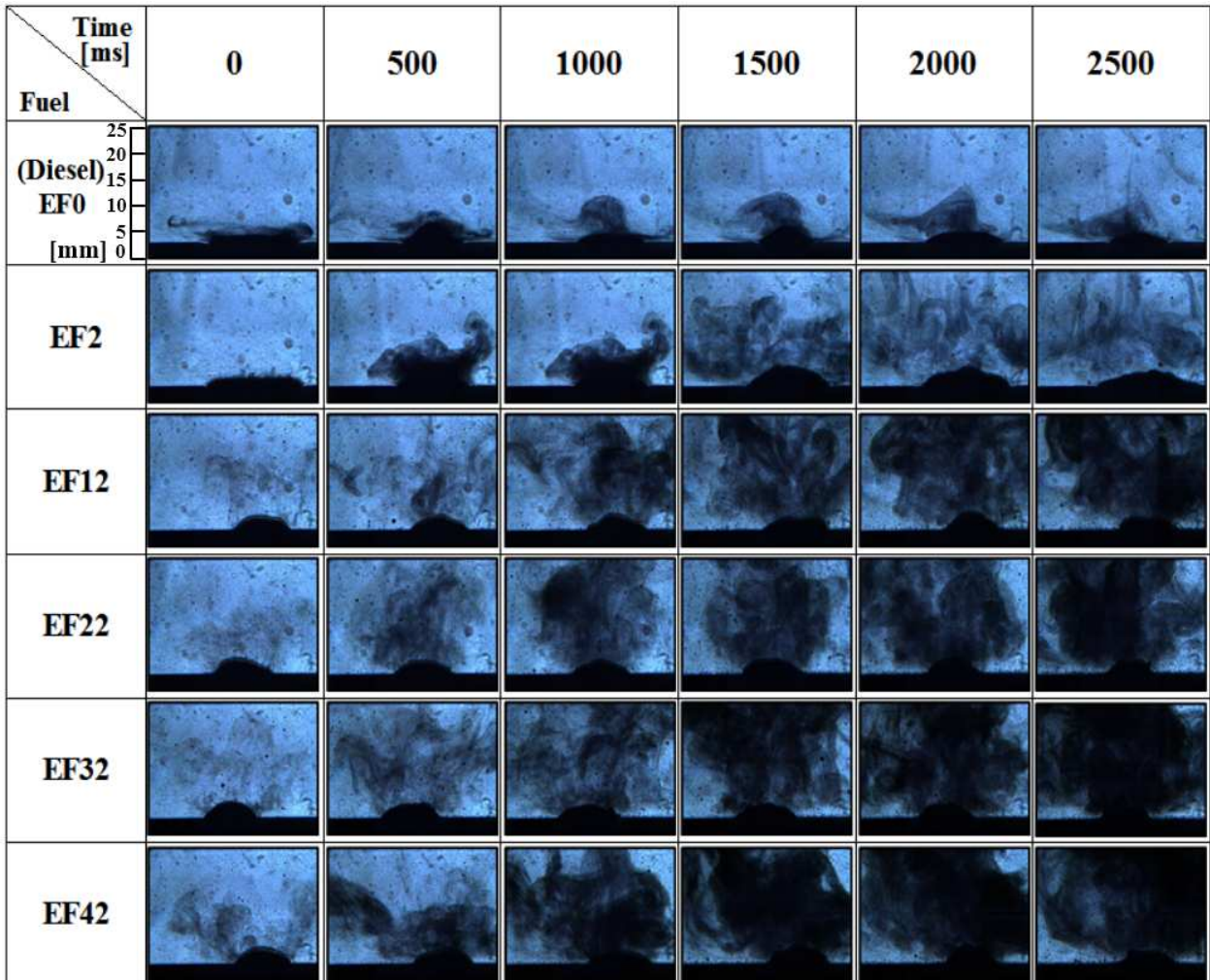


Fig. 7 Evaporative images of emulsified fuel droplets using Schlieren method with fuel mixing ratio<sup>(7)</sup>

하여 스포이트로 자유낙하 시킨 1방울에 대한 질량을 각 연료 별 10번 측정하여 평균 질량을 구하였고 고속카메라로 에멀전연료의 증발 종료시간을 측정하였다. 계산을 위해 사용된 각 연료의 물성은 Table 4에 나타내었다.

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 에멀전연료 액적 증발특성 실험해석

Fig. 6은 에멀전연료의 동점도 측정값이다. 에멀전연료의 동점도는 에멀전연료 혼합비가 42%와 52%를 기점으로 변화한다. 이는 에멀전연료의 형태가 유증수형에서 수증유형으로 변화되는 분기점이며 이러한 연료물성특성에 기초하여 내연기관의 연료로서 적합한 에멀전연료의 과산화수소 최대 혼합비는 42%라고 판단하였다. Fig. 7은 솔리덴 장비를 이용하여 에멀전연료의 증발특성인 미세폭발 현상을 고속카메라로 촬영한 실험이미지이다. 미세폭발 현상은 에멀전연료 제작에 사용된 디젤과 과산화수소의 비점차이로 발생하는 증발특성으로 본 연구에서는 가열판을 이용하여 디젤의 비점(523~623K)에 비해 낮고, 과산화수소의 비점(381K)보다 높은 473K 온도로 가열함으로써 미세폭발 현상을 관측하였다. 과산화수소 농도가 증가함에 따라 증발이 활발함을 알 수 있었으며 이를 통해 디젤과 과산화수소의 에멀전연료를 실제 디젤엔진에 적용 시 연료내의 과산화수소 증발로 인한 신속한 혼합기 형성이 가능하다고 판단하였다.

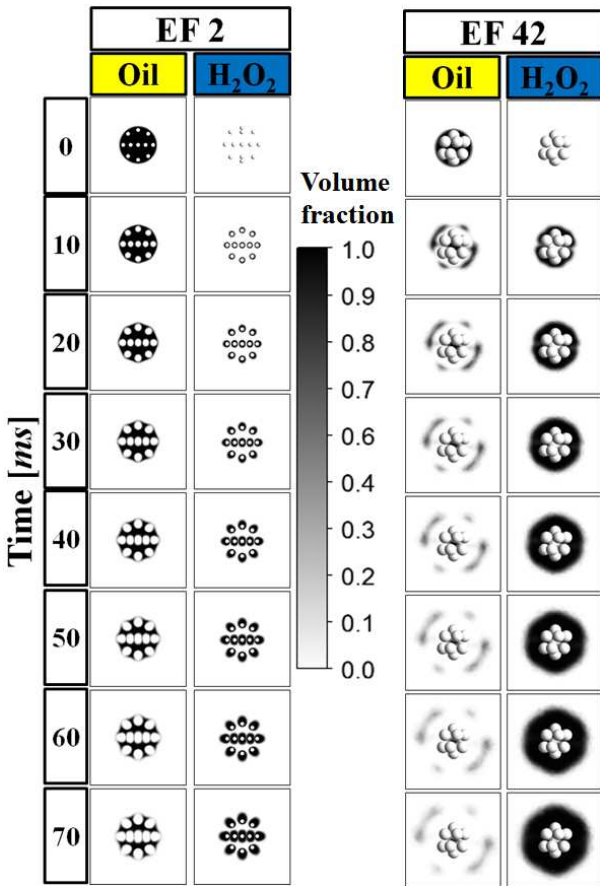


Fig. 8 Numerical results of EF2 and EF42 for micro-explosion

##### 4.2 에멀전연료 액적 증발특성 수치해석

Fig. 8은 에멀전연료 EF2와 EF42의 수치해석 결과이다. 그림 중에 각 혼합비 조건에 있어서 왼쪽은 Oil(디젤), 오른쪽은 과산화수소(H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)의 계산결과이다. 계산은 전술한 것과 같이 에멀전연료 내 반지름 0.1mm의 구내에 혼합비 조건에 따라 과산화수소만으로 구성된 가상의 구가 EF2의 경우에는 19개, EF 42의 경우에는 12개가 각각 들어있다. 계산은 반지름 0.1mm의 구내에 대해서만 실시하였고, 각 과산화수소 구내에서 과산화수소의 증발 현상은 과산화수소가 표면을 통해서 나오는 기체의 질량유량으로 계산되어졌고, 이것에 따라 반지름 0.1mm내의 디젤은 경계를 유지하면서 풍선처럼 바깥쪽으로 밀려 이동하게 된다. 이때 디젤의 양은 불변이고 과산화수소 기체가 계산영역 내로 유입됨에 따라 디젤(연료)농도가 낮아 지면서 계속 외부로 팽창하게 되는 개념이다. 그림에서 알 수 있듯이 EF42의 경우가 EF2의 경우와 비교하여 과산화수소의 증발이 동일한 계산시간 범위에 있어서 월등히 빠르며, 에멀전연료 액적 계산영역 내에는 과산화수소의 농도가 지배적으로 된다. 이러한 현상은 액적 내에 과산화수소 혼합비가 높을수록 연료 액적의 증발이 활발해지고, 그 결과 본

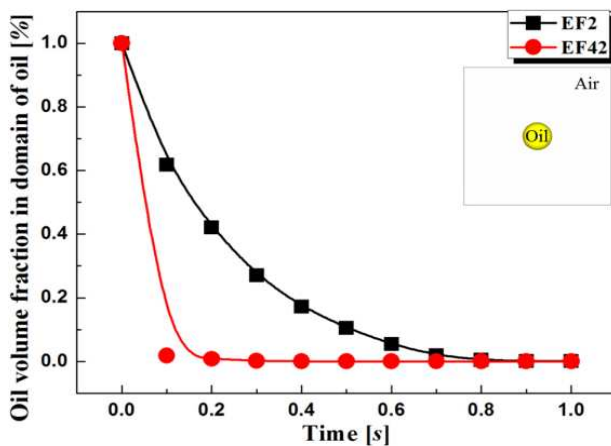


Fig. 9 Oil volume fractions of EF2 and EF42 in domain of oil

계산결과를 통하여 에멀전연료 증발현상의 특징인 연료의 미세폭발 현상 등을 예측할 수 있다. Fig. 9는 에멀전연료 혼합비가 EF2와 EF42의 경우에 대해서 반지름 0.1mm의 에멀전연료 입자 내부에 Oil(디젤)의 체적분율이 0으로 되는데 필요한 시간을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 EF2의 경우가 0.8s인 반면에 EF42의 경우는 0.1s로 상대적으로 신속한 증발을 예측할 수 있다. 따라서 본 연구에서 상용 프로그램을 이용해 에멀전연료 액적의 거동특성을 모사할 수 있었고, 보다 상세한 에멀전연료의 증발 현상을 모사하기 위해서는 각 혼합연료의 물성에 따른 증발특성을 고려한 프로그램의 수정작업이 필요하다.

## 5. 결 론

본 연구는 대체혼합연료의 디젤엔진 적용에 관한 기초연구로 디젤 내 과산화수소가 혼합된 에멀전연료를 사용하여 에멀전연료 내의 과산화수소 증발특성을 혼합비에 따라 실험을 실시하였고, 그 결과를 상용 프로그램을 사용한 수치해석 결과와 비교·분석하였다. 그 결과들은 다음과 같다.

(1) 본 연구에서 동점도 측정 실험을 통하여 연료의 성상이 유증수형으로 유지되는 최대 연료혼합비 EF42를 확인하였고, 또한 솔리렌 방법을 이용하여 에멀전연료 액적의 증발특성을 조사하였다. 그 결과 에멀전연료 내 과산화수소의 혼합비가 증가할수록 신속한 액적증발이 관측되어졌으며 이러한 결과로부터 에멀전연료의 실제엔진 적용 시 보다 신속하고 균일한 혼합기형성을 기대할 수 있다.

(2) 에멀전연료의 최소와 최대 혼합비인 EF2와 EF42의 두 경우에 대해서 수치해석을 실시하였으며, 그 결과 실험결과와 동일하게 혼합비가 높은 EF42의 경우가 과산화수소의 증발이 활발하여 동일시간에 있어서 연료증기의 생성이 증가하였다. 또한 설정한 Oil domain 내부 디젤의 체적분율을 계산함으로써 액적 표면의 팽창 등 에멀전연료의

미세 거동특성의 모사가 가능함을 확인할 수 있었다.

## 후 기

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

## 참고문헌

(References)

- (1) Yeom, J. K., 2011, "Basic Experimental Study on the Application of Biofuel to a Diesel Engine," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 35, No. 11, pp. 1163~1168.
- (2) No, S. Y., 2009, Bioenergy Engineering, ABCNURI, Chungbuk National University, pp. 47~60.
- (3) Park, J. K., Oh, J. M., Kim, H. I., Lee, C. 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) 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.
- (5) Watanabe, H. and Okazaki, K., 2013, "Visualization of Secondary Atomization in Emulsified-fuel Spray Flow by Shadow Imaging," *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 34, pp. 1651~1658.
- (6) Kim, C. J., Kim, D. K. and Park, K. H., 2013, "Burner Combustion Characteristics of Hybrid Type Water Mixing Emulsion Fuel," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 37, No. 4, pp. 308~315.
- (7) Yeom, J. K. and Yoon, J. H., 2015, "Study of Behavior Characteristics of Emulsified Fuels with Evaporative Field," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 39, No. 3, pp. 237~243.