

에멀전연료 충돌분무의 거동특성에 관한 연구[§]

염 정 국* · 김 학 민*[†]

* 동아대학교 기계공학과

Study of Behavior Characteristics of Impinging Spray of Emulsified Fuel

Jeong Kuk Yeom* and Hak Min Kim*[†]

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

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

Key Words: Emulsified Fuel(에멀전연료), Impinging Spray(충돌분무), Oil in Water(수중유형), Schlieren Method(슐리렌방법), Water in Oil(유중수형)

초록: 본 연구는 디젤-과산화수소 에멀전연료의 충돌분무를 대상으로 과산화수소의 혼합비가 증발분무 거동특성에 미치는 영향을 조사하였다. 에멀전연료의 증발을 위해 온도조절이 가능한 가열판을 사용하여 온도를 150℃, 200℃ 및 250℃로 각각 설정하였고, 연료 분사압력을 400bar, 600bar, 800bar 및 1000bar로 설정하여 분사압력이 에멀전연료의 증발특성에 미치는 영향을 확인하였다. 에멀전연료의 혼합을 위한 계면활성제로 span80과 tween80을 9:1의 비율로 혼합하여 에멀전연료 전체 체적의 3%로 고정하였고 과산화수소의 혼합비율을 EF(Emulsified Fuel)0, EF2, EF12 및 EF22로 설정하여 디젤연료와 혼합하였다. 또한 에멀전연료 증발 충돌분무의 가시화를 위해 슐리렌방법을 적용하였다. 본 연구의 결과로서 충돌하는 가열판의 온도와 분사압력이 높을수록 에멀전연료 증발 촉진으로 연료 기상의 확산이 활발해지는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과로부터 실제엔진에 에멀전연료를 사용할 경우 연료 내 과산화수소 증발에 의한 연소실 온도 저하효과와 함께 보다 신속한 혼합기 형성은 엔진배출물의 감소를 일으키는 것으로 기대된다.

Abstract: In this study, to investigate the effect of spray behavior characteristics, we induce the mixing ratio of emulsified fuel using impinging spray. We formulate the emulsified fuel by mixing diesel and hydrogen peroxide(H₂O₂). We set the temperature of the heating plate to 150℃, 200℃, and 250℃, and set the injection pressures to 400, 600, 800, and 1000bar. The surfactants for the emulsified fuel mixture, which were mixed span80 and tween80 was mixed as 9:1, were fixed to 3% of the total volume of the emulsified fuel. We set the mixing ratio of H₂O₂ in the emulsified fuel as emulsified fuel(EF)0, EF2, EF12, and EF22. Further, we visualize the evaporation impinging spray using the Schlieren method. Based on the results of this study, we found that a higher temperature and injection pressure of the heating plate impingement led to the active diffusion of the fuel vapor, which promoted emulsified fuel evaporation. When the emulsified fuel is utilized in an actual engine, because of the temperature-drop effect of the combustion chamber, which is due to the evaporation of H₂O₂ in fuel and faster mixture formation is expected to decrease the engine emissions.

- 기호설명 -

ASOI : 분사 후 경과시간, μs

T : 가열판의 온도, ℃
EF : 에멀전연료
S : 무차원 엔트로피
M : 전체 픽셀수
k : 볼츠만 상수
p : 분사압력, bar

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

[†] Corresponding Author, tkdvk2001@naver.com

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

하첨자

inj : 분사

t : 전체

1. 서론

환경문제에 대한 우려와 해결에 대한 필요성이 증가함에 따라 세계적으로 배기가스의 배출 규제가 강화되고, 그에 따라 내연기관으로부터 배출되는 유해배기가스를 저감시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 내연기관의 하나인 디젤엔진은 가솔린엔진에 비해 열효율이 높아 연비에 이점이 있고 대형화가 용이하여 여러 분야에서 광범위하게 사용되고 있지만 디젤엔진은 가솔린엔진에 비해 입자상물질(Particulate matter : PM)과 NO_x(질소산화물) 및 Soot등의 배출이 많아 이를 개선하기 위해 대체연료(Alternative fuel)의 연구 및 개발이 진행되고 있다. 대체연료의 하나인 에멀전연료(Emulsified fuel)는 물과 연료를 계면활성제를 이용하여 일정한 비율로 혼합시킨 연료이며, 에멀전연료의 형태로는 연료 속에 물이 미립자로 분산된 유중수형(Water in oil)과 물속에 연료가 미립자로 분산된 수중유형(Oil in water)이 있다. 에멀전연료에 포함된 물의 증발로 인한 효과를 기대하기 위해선 유중수형형태의 에멀전연료가 효과적이며 물의 증발잠열로 인한 연소실 온도 저하로 고온에서 생성되는 NO_x의 생성을 억제할 수 있고 미세폭발(Micro-explosion)의 효과로 Soot의 저감효과를 기대할 수 있다.^(1,2) 이러한 에멀전연료에 대한 연구로서 Seo 등⁽³⁾은 물과 디젤을 혼합한 에멀전연료를 사용하여 디젤과 배기가스배출량을 비교했을 때 물의 함량이 17%인 에멀전연료의 경우 디젤보다 NO_x의 배출량이 30%정도의 감소율을 나타내고 PM의 경우 40%정도의 감소율을 나타낸다고 발표하였다. 그 외에도 물과 바이오디젤을 혼합한 에멀전연료,^(4,5) 디젤과 에탄올 그리고 과산화수소(H₂O₂)를 혼합한 에멀전연료,⁽⁶⁾ 물과 저급디젤을 혼합한 에멀전연료⁽⁷⁾ 등 여러 종류의 에멀전연료 연구가 진행되고 있다. 이러한 연구에서 기존의 에멀전연료에 많이 사용되던 물 대신 물[H₂O, 증기압(30℃) : 32mmHg]과 분자의 구성성분이 비슷한 과산화수소[H₂O₂, 증기압(30℃) : 23mmHg]를 사용하게 되면 물을 사용한 경우와 마찬가지로 증발잠열로 인한 NO_x의 생성억제와 미세폭발 효과로 인한 Soot의 감소를 기대할 수 있을 뿐만 아니라 과산화수소가 만들어내는 활성산소로 인한 연소촉진효과를 기대할 수 있다.

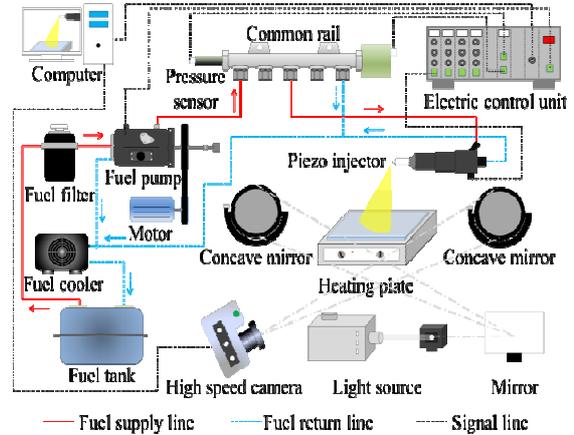


Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

따라서 본 연구에서는 상변화(Phase change)를 동반한 과산화수소와 디젤을 혼합한 에멀전연료의 증발분무를 대상으로 과산화수소의 혼합비 변화가 증발 증돌분무의 거동특성에 미치는 영향을 조사하였다. 증돌분무의 기상 이미지를 촬영하기 위하여 슈리렌방법(Schlieren Method)을 이용하였고, 에멀전연료는 과산화수소의 혼합비에 따라 EF0, EF2, EF12 및 EF22로 각각 설정하였다. 또한 본 연구에서 에멀전연료 혼합비, 연료분사압력 및 가열판의 온도를 실험변수로 선정하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

Fig. 1은 에멀전연료의 증돌분무 실험을 위해 구성한 실험장치의 개략도이다. 가열판은 대한과학사의 MSH-20A를 사용하여 증돌면의 온도를 조정하였고, 가열판에 증돌하는 분무의 촬영을 위해 슈리렌장치와 고속카메라(Micro-4C, Phantom Co., Ltd.)를 사용하였다. 분사실험 장치로 3세대 Bosch 피에조 인젝터, 커먼레일을 사용하였고 연료펌프는 Pride 2010년 모델의 U-engine 펌프 순정품을 사용하였다. ECU는 SamrTek Co.의 SCR-TDA8000을 사용하였다. SCR-TDA8000은 분사시간을 100μs에서 4000μs까지 변경이 가능하고 분사압력은 300bar에서 1600bar까지 변경이 가능하다.

2.2 실험방법

실험은 대기압 조건에서 실시하였으며 연료는 에멀전연료(Diesel+H₂O₂)를 제작하여 사용하였다. 계면활성제는 span80과 tween80을 9:1의 비율로 혼합하여 전체 체적의 3%로 고정하였고, 과산화수소의 혼합비에 따라 에멀전연료를 EF(Emulsified Fuel)0, EF2, EF12 및 EF22로 설정하였다. 에멀전연

Table 1 Experimental conditions

Injection nozzle	Type : 5 hole Bosch nozzle	
	Diameter of hole : 0.17 [mm]	
Injection duration [μs]	500	
Injection fuels	- Diesel only (EF0) - Diesel + H ₂ O ₂ by volume % (EF2, EF12, EF22)	
Heating plate temperature [°C]	150, 200, 250	
Injection pressure [bar]	400, 600, 800, 1000	
Surfactant	span80 : tween80 = 9 : 1	
H ₂ O ₂	Melting point [°C]	-33
	Boiling point [°C]	108
	Density	1.11

Table 2 Mixing ratio of emulsified fuel

Case	Mixture	Diesel	Hydrogen peroxide	Surfactant
				span : tween = 9 : 1
EF 0		100	0	0
EF 2		95	2	3
EF12		85	12	3
EF22		75	22	3

료 내 과산화수소의 증발을 위해 가열판의 온도를 150°C, 200°C 및 250°C로 설정하였고, 연료는 가열판에서 50mm 상부에 위치한 노즐을 통해 분사하였다. 본 실험에 사용한 노즐은 다공(5 holes)으로 인접한 분무의 간섭을 피하기 위하여 Fig. 2와 같이 노즐 홀 간의 거리가 상대적으로 최대인 5홀 노즐을 사용하였다. 또한 충돌분무 이미지를 촬영하기 전 산란광을 이용하여 노즐에서 분사된 연료 분무의 정면도를 촬영하고 타 홀 분무의 영향이 가장 적은 분무(①)를 선택하여 충돌분무 측면 촬영을 실시하였다. 그리고 각 설정온도에서 분사압력을 400bar, 600bar, 800bar 및 1000bar로 설정하였고, 분사시간은 500μs로 고정하여 에멀전연료의 충돌분무 발달과정을 500μs 간격으로 3000μs까지 측정하였다.

2.3 이미지 면적을 이용한 분무해석 방법

가열판과 노즐의 거리가 50mm인 것을 이용하여 실험을 통해 얻은 이미지에 실제거리를 대입해 가로 100mm 세로 75mm를 구하였고 길이를 이용하여 이미지전체의 면적 7500mm²을 구한 후 이미지의 픽셀수인 64512를 나누어 단위픽셀의 면적 0.116mm²를 구하였다. 가열판 위를 100mm × 30mm 크기로 잘라낸 이미지를 이미지처리프로그램(Photoshop CS6)을 이용하여 Fig. 3의 방식으로 픽셀수를 산출한 후 단위면적을 곱하여 충돌분무의 면적을 계산하였다.

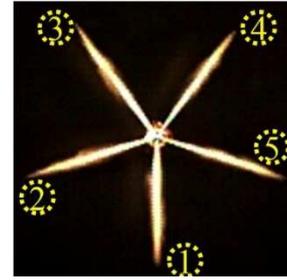


Fig. 2 Front view of spray with 5-holes nozzle

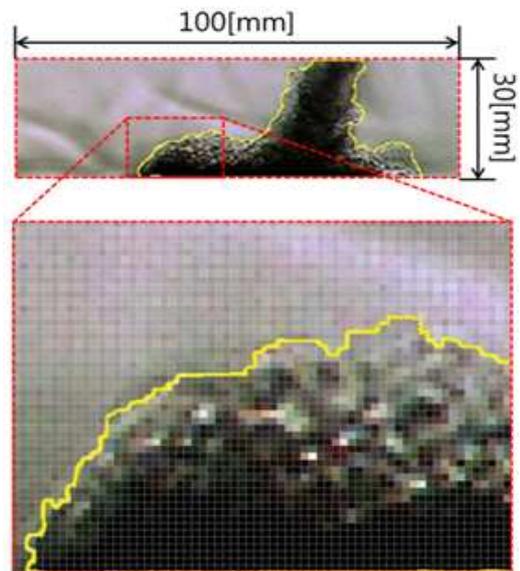


Fig. 3 Schematic of area analysis method for impinging spray image

2.4 통계열역학적 엔트로피를 이용한 분무해석 방법⁽⁸⁾

증발충돌분무의 확산정도를 나타내는 상태량으로 통계학에 기초한 엔트로피(Entropy)를 사용할 수 있다. 본 연구에 도입한 엔트로피의 개념은 공간을 M개의 메시(mesh)로 분할하고, 그 중에 N개의 입자 또는 분자가 분포하는 경우, 각 메시에 입자가 각각 N₁, N₂, ...로 존재하는 상태 {N₁, N₂, N₃, ..., N_M}에 상응하는 미시상태의 조합수 W는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{N!}{N_1! N_2! N_3! \dots N_M!} = \prod_i \frac{N!}{N_i!} \quad (1)$$

엔트로피는 W의 자연대수로서 표시되고, N>>1로 가정할 수 있다면 스탈링(Stirling)의 근사식을 적용할 수 있기 때문에 볼츠만상수(Boltzmann constant) k를 이용해 아래와 같이 나타낼 수 있다.

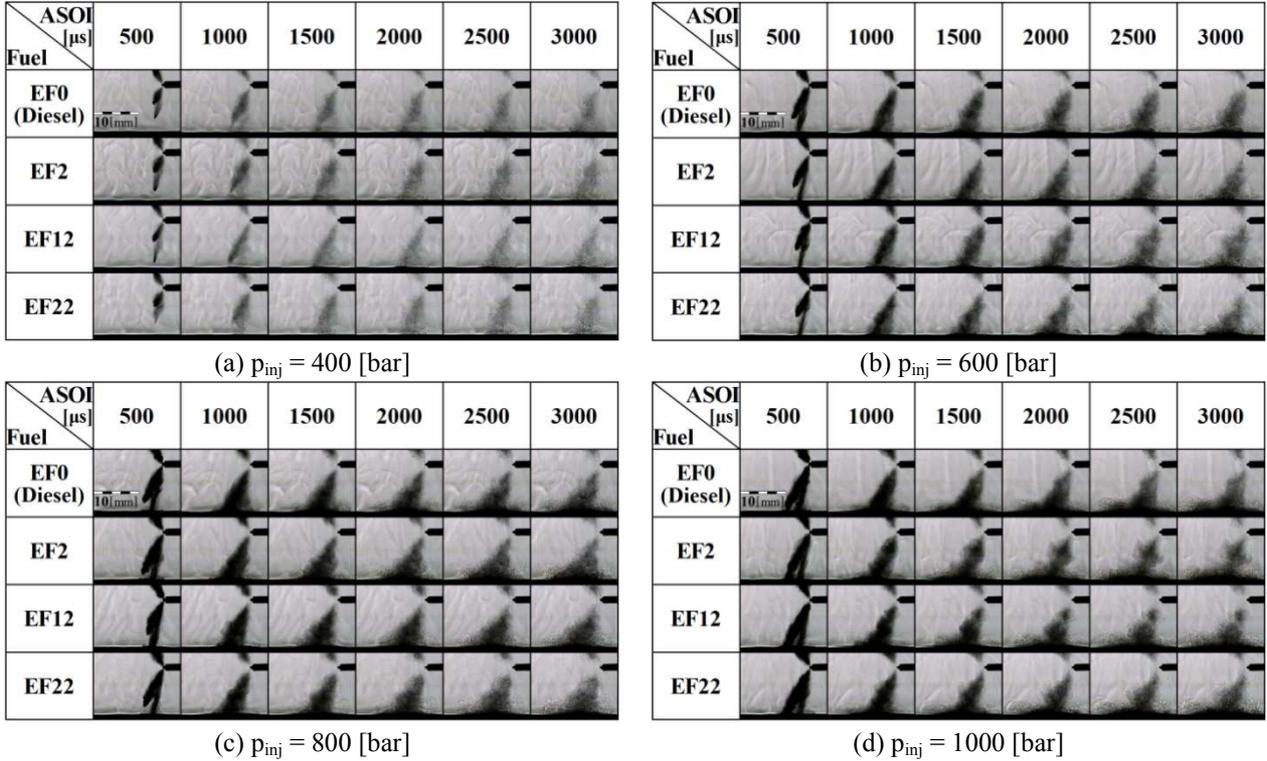


Fig. 4 Images of impinging spray according to fuel mixing ratio with Schlieren method (T = 150 [°C])

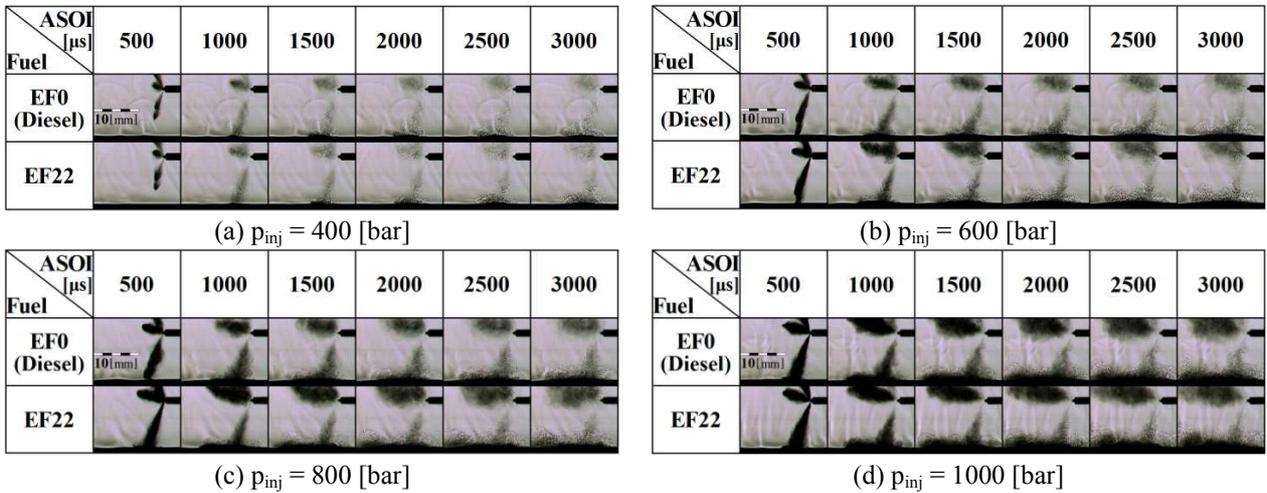


Fig. 5 Images of impinging spray according to fuel mixing ratio with Schlieren method (T = 200 [°C])

$$\begin{aligned}
 W(N_1, N_2, N_3, \dots, N_M) &= \frac{N!}{\prod_i N_i!} \quad \sum_i N_i = N \\
 \ln n! &\approx n \ln n - n \quad (n \gg 1) \\
 \ln W(N_1, N_2, N_3, \dots, N_M) &= \ln N! - \sum_i \ln N_i! \\
 &= N \ln N - N - \sum_i N_i \ln N_i + \sum_i N_i \\
 &= N \ln N - \sum_i N_i \ln N_i \\
 S &= k \ln(W) = k [N \ln(N) - \sum_i N_i \ln(N_i)] \quad (2)
 \end{aligned}$$

각 메시 내의 입자수 N_i 는 화상의 휘도 $I(i)$ 에 비례한다고 가정하면 다음과 같이 표시된다.

$$\begin{aligned}
 S &= \alpha \sum_i I(i) \ln \alpha \sum_i I(i) - \sum_i [\alpha I(i) \ln(\alpha I(i))] \\
 &= \alpha \sum_i I(i) \ln \sum_i I(i) - \alpha \sum_i [I(i) \ln(I(i))] \quad (3)
 \end{aligned}$$

여기서, α 는 볼츠만정수, 입자수 및 휘도와의 관련정수를 포함하는 정수이다. $I(i)$ 는 M개로 분할한 메시 내의 입자수에 대응하는 휘도값이고, 메시 내의 각 픽셀(pixel) 휘도값의 합이다. 입자가 화상 전체에 균일하게 분산한 상태를 고려한 경우의 평균휘도는 공간 분할 수(메시 수)를 M으로 하면

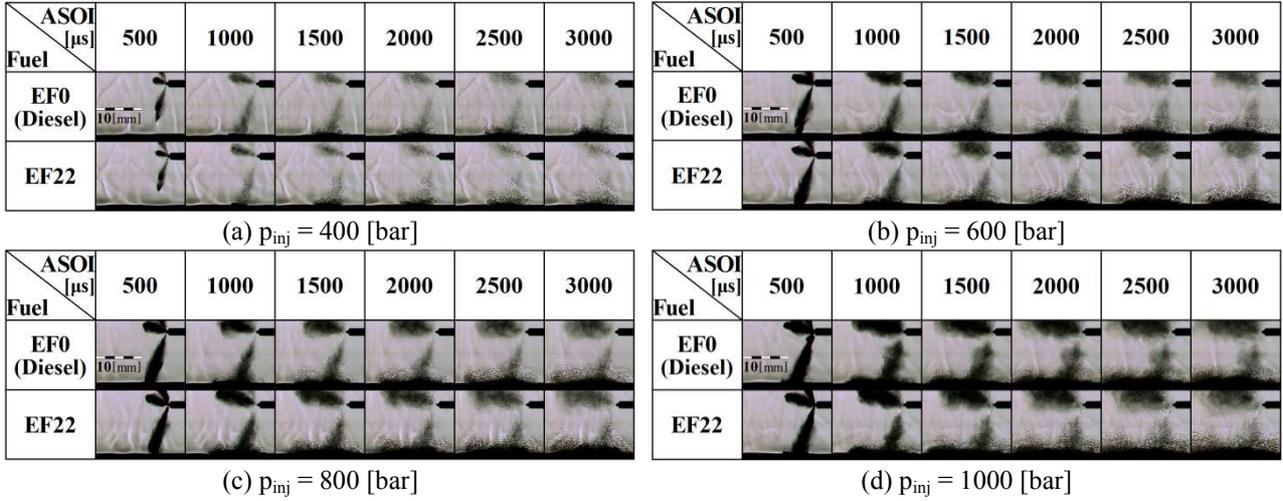


Fig. 6 Images of impinging spray according to fuel mixing ratio with Schlieren method (T = 250 [°C])

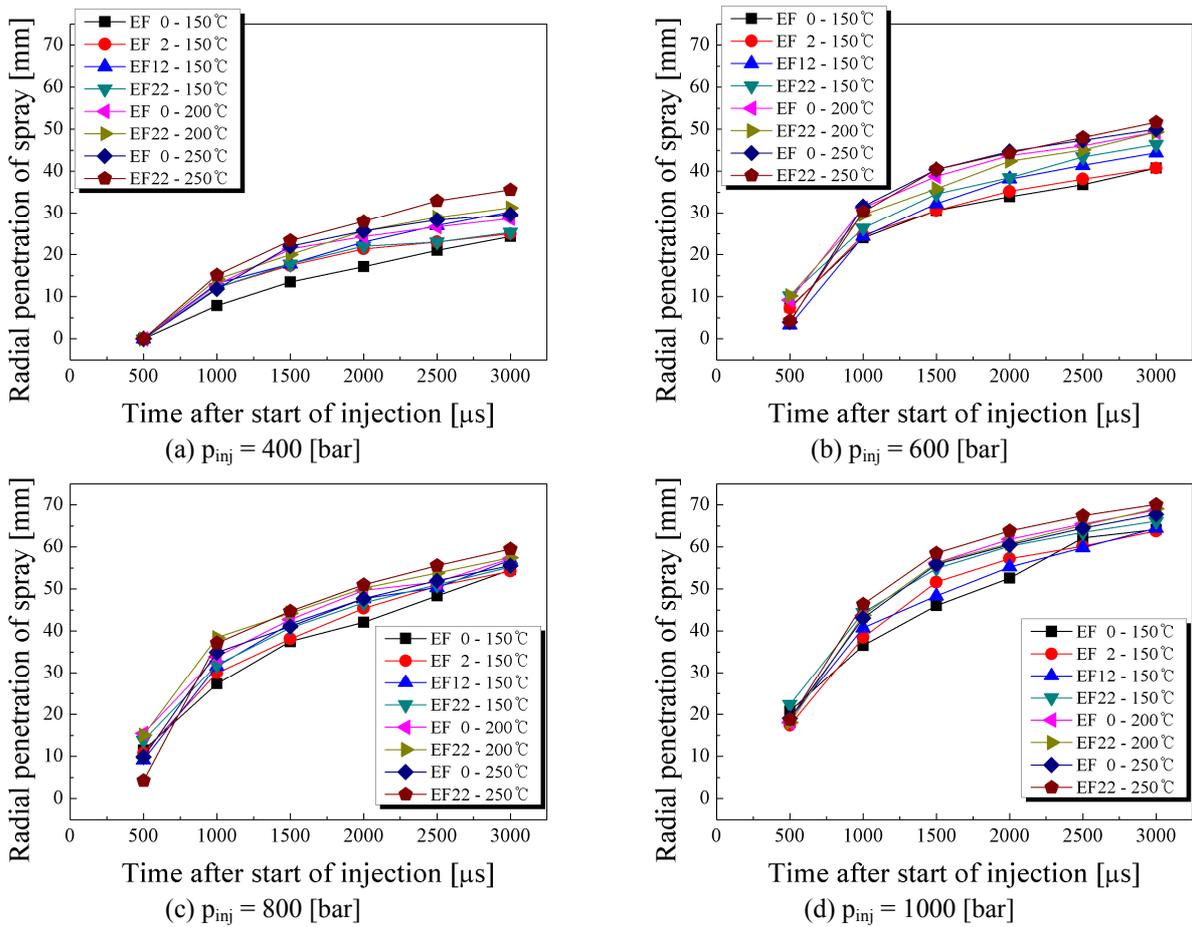


Fig. 7 Temporal change in radial penetration according to mixing ratio at T=150 [°C], 200 [°C], and 250 [°C]

다음과 같이 된다.

$$\overline{I(i)} = \frac{1}{M} \sum I(i) = \frac{I_t}{M} \quad (4)$$

여기서, I_t 는 공간전체 휘도의 합이다. 이 균일상

태의 엔트로피는 아래와 같이 된다.

$$S_1 = \alpha I_t \ln(M) \quad (5)$$

한편, 화상전체의 휘도값 합이 일정이고, 0과

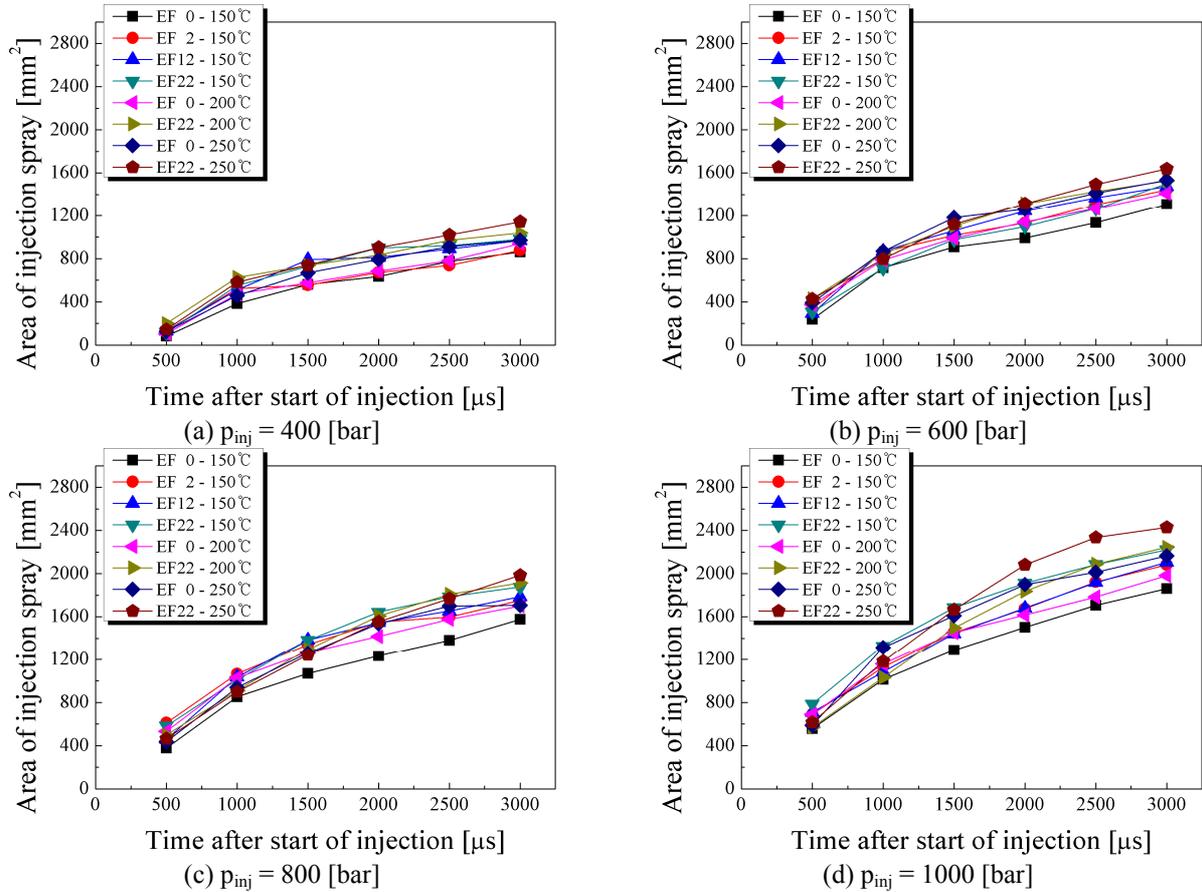


Fig. 8 Temporal change in impinging spray area according to mixing ratio at T=150 [°C], 200 [°C], and 250 [°C]

256인 두 개의 휘도값으로 분할한 상태, 즉 완전히 2개 값으로 분리한 경우의 엔트로피 S_0 는 P를 휘도값 256이 차지하는 메시 수라고 하면 다음 식과 같이 된다.

$$S_0 = \alpha [I_t \ln(I_t) - P256 \ln(256)] = \alpha [I_t \ln(I_t) - I_t \ln(256)] \quad (6)$$

S_1 과 S_0 를 이용해 엔트로피가 최대가 될 때를 1로, 최소가 될 때를 0으로 하여 정규화를 실시하면 다음과 같이 된다.

$$S = \frac{S - S_0}{S_1 - S_0} = \frac{I_t \ln(256) - \sum_i I(i) \ln(I(i))}{I_t \ln(M) - \ln(I_t) + \ln(256)} \quad (7)$$

정규화를 수행하기 전후 엔트로피에 동일한 기호 S를 사용하지만, 본 연구에서는 정규화한 것만을 사용한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 충돌분무의 이미지 해석

Figs. 4, 5, 6에 가열관의 온도 150°C, 200°C 및 250°C에 대한 각 분사압력의 충돌분무 이미지를

나타내었다. 가로축의 ASOI(After start of injection)은 분사후의 경과시간을 나타내고 세로축은 예멸전연료의 혼합비를 나타낸다. Fig. 4의 각 분사압력에 대한 이미지를 경과시간에 대해 비교하면 분사압력의 증가와 함께 분사되는 연료의 양이 증가함을 알 수 있고 충돌분무의 반경방향 분무선단도달거리가 증가함을 알 수 있다. 연료의 양은 분사시간을 500μs로 고정하였기 때문에 압력에 따라 차이가 발생을 하게 되고 반경방향 분무선단도달거리는 분사압력의 증가에 따라 분무의 충돌시간이 단축되기 때문이다. 또한 같은 분사압력에 대해 혼합비별로 비교하게 되면 과산화수소의 혼합비가 증가할수록 반경방향의 분무선단도달거리와 가열관으로부터의 충돌분무 높이가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. Fig. 4의 400bar를 보면 시간별, 혼합비별로 분무의 확산이 거의 차이가 없음을 알 수 있는데 이러한 경향은 낮은 분사압력에 의해 분사되는 연료량과 측정시간 내에 가열관에 도달하는 연료량이 적기 때문에 충돌하는 연료의 증발량이 미미하기 때문이다. 마찬가지로 Fig. 5와 Fig. 6의 400bar 역시 충돌하는 연료의 양이 적기 때문

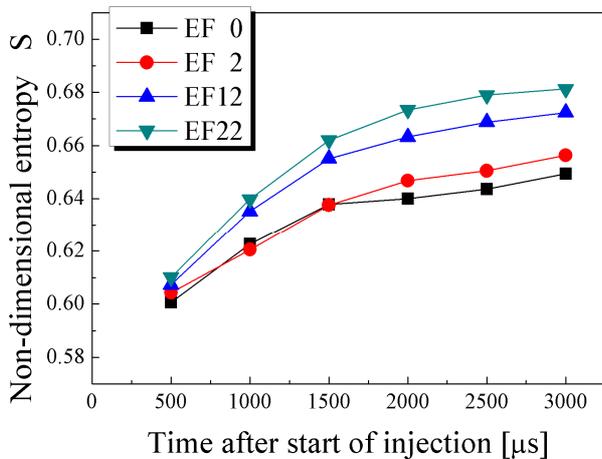


Fig. 9 Temporal change in non-dimensional entropy ($T = 150 [^{\circ}\text{C}]$, $p_{inj} = 1000 [\text{bar}]$)

에 과산화수소의 증발에 의한 충돌분무의 확산 현상이 활발하지 않은 것을 확인하였다.

3.2 충돌분무의 면적 해석

보다 정확한 충돌분무의 해석을 위해 이미지처리 프로그램(Photoshop CS6)을 이용하여 분무 반경 방향 선단도달거리를 구하여 Fig. 7에 나타내었고, 단위픽셀 당 면적을 구한 후 전술한 Fig. 3의 방식으로 충돌분무의 면적을 계산하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 7의 결과에서 분사압력과 충돌평판의 온도가 증가할수록 반경방향 분무선단도달거리가 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 8의 충돌분무 면적 변화도 Fig. 7의 결과와 동일하게 분사압력과 가열(충돌)판의 온도의 증가와 함께 분무면적도 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 각 분사압력에서 에멀전연료의 혼합비에 따른 분무면적은 다소 증가하는 것을 확인하였다. 분사압력이 상대적으로 낮은 조건 400bar와 600bar에서는 혼합비에 따른 면적의 차이가 거의 없지만 분사압력이 높은 조건인 800bar와 1000bar에서는 분사압력 증가에 따른 혼합비별 충돌분무의 면적증가를 명확히 알 수 있다. 이러한 결과는 분사압력이 높을수록 충돌에 의한 미립화가 활발히 일어나고, 그 결과 에멀전연료 내 과산화수소의 증발이 촉진되기 때문으로 판단된다. Fig. 8의 분사압력 400bar 에멀전연료가 디젤보다는 높은 면적을 가지는 것을 확인할 수 있지만 그 차이가 거의 없음을 알 수 있고, 이것은 400bar에서 분사되는 연료량이 적어 과산화수소의 증발이 미치는 영향이 적은 것으로 판단된다. 이러한 결과로부터 에멀전연료를 실제엔진에 적용 시, 600bar이상의 분사압력에서 단일 성분의 디젤연료보다 연료 내 과산화수소의 증발로

인한 빠른 연료증기 확산효과로 보다 신속한 균일 혼합기형성을 기대할 수 있다.

3.3 충돌분무의 엔트로피 해석

증발충돌분무의 해석을 보다 정량적인 방법으로 해석하기 위해 통계열역학에 기초한 무차원 엔트로피(Non-dimensional entropy) 개념을 도입하였다. 무차원 엔트로피 해석을 위해 측정된 이미지를 Image J 프로그램을 이용하여 이미지의 휘도 값을 텍스트 파일로 변환하여 C++ 프로그램을 이용해 이미지 전체에 낮은 농도의 기상이 균일하게 분산한 상태의 엔트로피를 1, 이미지에서 연료가 가장 응집한 상태의 엔트로피가 0이 되도록 정규화를 실시하였다. Fig. 9는 분사압력 1000bar로 150°C의 가열판에 에멀전연료를 분사한 실험 데이터로부터 구한 무차원 엔트로피 해석 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 각 혼합비별로 분사 후 경과 시간 500μs까지 엔트로피 변화가 거의 비슷한 경향을 보이는데 이것은 전술한 Fig. 4 1000bar의 경우 분사 후 경과시간 500μs가 거의 가열판에 충돌하는 시점이며 가열판으로부터의 열전달에 의한 연료증기 확산은 그 시간 이후에 활발히 발생하기 때문이라 판단된다. 그리고 시간의 경과와 함께 각 에멀전연료 혼합비별 엔트로피 변화는 연료 내 과산화수소의 혼합비가 높을수록 엔트로피가 증가하고 이것은 에멀전연료에 포함된 과산화수소의 급격한 증발로 충돌분무 연료증기 확산이 촉진되었기 때문이다.

4. 결론

본 논문은 디젤과 과산화수소를 혼합한 에멀전 연료를 디젤엔진에 적용하기 위한 기초연구로서 혼합비, 분사압력, 온도변화에 대한 에멀전연료 증발충돌분무의 거동특성을 해석하였다. 또한 증발충돌분무의 증기확산 정도를 보다 정량적으로 해석하기 위하여 이미지 면적해석과 통계열역학에 기초한 엔트로피 개념을 도입하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 가열판의 온도가 동일한 경우 분사압력이 증가할수록, 동일 분사압력조건에서 과산화수소의 혼합비가 증가할수록 충돌분무의 반경방향 선단도달거리가 증가하는 것을 알 수 있었다.

(2) 충돌분무의 이미지 면적해석을 실시하여 분사압력과 가열판의 온도가 높을수록 충돌분무의 면적이 증가함을 확인하였다. 또한 에멀전연료의 과산화수소 혼합비가 높을수록 과산화수소의 증발

에 의해 확산되는 면적이 증가함을 확인하였다.

(3) 통계열역학에 기초한 엔트로피 개념을 도입하여 충돌분무의 무차원 엔트로피 해석을 실시하였고, 그 결과 에멀전연료의 과산화수소 혼합비가 높을수록 연료증기의 확산이 증가하는 것을 확인하였다.

후 기

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

참고문헌

(References)

- (1) 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.
- (2) Lif, A. and Holmberg, K., 2006, "Water-in-Diesel Emulsions and Related Systems," *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 123-126, pp. 231~239.
- (3) Seo, H. J., Oh, S. M. and Huh, H. I., 2002, "Spray Characteristics and Exhaust Emission Tests for a Diesel Engine Using Emulsified Fuels," *Trans. of the KSAE*, Vol. 10, No. 4, pp. 60~68.
- (4) Koc, A. B. and Abdullah, M., 2013, "Performance and NO_x Emissions of a Diesel Engine Fueled with Biodiesel-Diesel-Water Nanoemulsions," *Fuel Processing Technology*, Vol. 109, pp. 70~77.
- (5) Raheman, H. and Kumari, S., 2014, "Combustion Characteristics and Emissions of a Compression Ignition Engine Using Emulsified Jatropa Biodiesel Blend," *Biosystems Engineering*, Vol. 123, pp. 29~39.
- (6) Ashok, M. P. and Saravanan, C. G., 2008, "Role of Hydrogen Peroxide in a Selected Emulsified Fuel Ratio and Comparing It to Diesel Fuel," *Energy & Fuels*, Vol. 22, No. 3, pp. 2099~2103.
- (7) Ithnin, A. M., Ahmad, M. A., Bakar, M. A. A., Rajoo, S. and Yahya, W. J., 2015, "Combustion Performance and Emission Analysis of Diesel Engine Fuelled with Water-in-Diesel Emulsion Fuel Made from Low-Grade Diesel Fuel," *Energy Conversion and Management*, Vol. 90, pp. 375~382.
- (8) Yeom, J. K., 2009, "Thermodynamic Approach to the Mixture Formation Process of Evaporative Diesel Spray," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 33, No. 3, pp. 201~206.