

고온 고압하에서의 DME 연료 분무 및 증발 특성

김형준* · 서현규* · 이창식†

Spray and Evaporation Characteristics of DME fuel at the High pressure and temperature

Hyung Jun Kim, Hyun Kyu Suh and Chang Sik Lee

Key Words: Dimethyl Ether(DME), Spray tip penetration(분무도달거리), Spray cone angle(분무각), Evaporation(증발)

Abstract

The purpose of this study is to analyze spray and evaporation characteristics of DME fuel at the high pressure and temperature. For the numerical analysis of dimethyl ether(DME) fuel spray characteristics, hybrid breakup model was applied to the DME spray and its breakup process. In order to obtain experimental results for comparison with the predicted ones, the visualization of the spray evolution process was executed by using a Nd:YAG laser. Also, the numerical investigation was conducted by the two hybrid models for primary and secondary breakup of the DME spray. The primary breakup model used the Kelvin-Helmholtz(KH) breakup model. In the secondary breakup process, Rayleigh-Taylor(RT) and Drop Deformation Breakup(DDB) model was applied. The results of this study provide the macroscopic characteristics of the spray such as spray tip penetration and cone angle, and prediction accuracy of the two hybrid model.

기호설명

a : major semi-axis of deformed droplet
 r : droplet radius
 B : mass transfer number
 B_1 : breakup constant of KH model
 K : liquid to gas density ratio
 N : liquid to gas viscosity ratio
 Nu : Nusselt number
 Pr : Prantle number
 Re : Reynold number
 Sc : Schmidt number
 Sh : Sherwood number

We : Weber number
 Y : reference mass fraction
 Ω : maximum growth rate of wave
 Λ : wavelength
 τ : breakup time

서론

자동차 배기가스로 인한 환경오염이 심각한 사회 문제로 대두됨에 따라 최근 대체 연료의 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그 중 디젤 연료의 대체연료로 기대되는 연료인 DME(Dimethyl Ether)는 산소를 함유한 화합물이기 때문에 연소시 CO₂, soot등의 입자상 물질의 배출이 디젤연료에 비하여 현저하게 적고 유황분, 질소분 또는 벤젠 등의 방향족 성분을 포함하지 않기 때문에 매우 좋은 연료로 평가되고 있다. 또한, 대기 중에서 쉽게 분해되어 지구 온난화 효과나 오존층 파괴를 줄일

(2007년 6월 12일 접수 ~ 2007년 6월 28일 심사완료)

*한양대학교 대학원 기계공학과

†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : cslee@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-8963 FAX : (02)2281-5286

수 있는 특징이 있다.

또한, 디젤연료와 같이 자연 착화 특성이 매우 좋으며 세탄가도 높고 연료특성이 좋기 때문에 대체연료로서 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다.

그러나 DME는 상온에서 기체 상태이어서 액체상태로 저장하기 위해서는 가압하여야 하며, 낮은 점도로 인하여 윤활성이 좋지 않아 연료 분사 펌프 등의 연료계의 마멸을 발생시키는 등의 문제가 있다.

이러한 특성을 가진 DME 연료에 관하여 Teng등⁽¹⁻³⁾은 물리/화학적인 특성 및 온도에 따른 표면장력, 점도, 밀도, 증기압 등의 연료의 물성에 대하여 수치해석적 연구를 수행하였다.

Park등⁽⁴⁾은 커먼레일 방식의 DME분무 발달과정을 분석하여 디젤분무 특성과 비교하였으며, Suh등⁽⁵⁾은 디젤 연료와 DME 연료 분무발달과정과 미립화 특성을 실험적으로 비교하고 이들을 분석하였다. 그리고, Ryu등⁽⁶⁾은 DME분무의 거시적 특성인 분무도달거리 및 분무각 등을 디젤분무와 비교 분석하였다. 그러나 DME 분무의 미립화 및 분무 특성에 대하여는 더욱 체계적인 연구가 요망되고 있다. 따라서 본 연구에서는 온도 변화를 수반하는 고압 분위기 조건에서의 DME 분무발달과정을 가시화하고 KIVA코드를 이용하여 KH(Kelvin-Helmholtz) 모델을 1차 분열로 RT(Rayleigh-Taylor), DDB(Drop Deformation Breakup) 모델을 2차 분열로 적용한 두 개의 hybrid모델을 사용하여 분무도달거리 및 분무각 등의 거시적 특성을 수치해석하고 실험값과 비교분석 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

DME 연료의 분무 거동을 분석하기 위하여 Fig. 1과 같은 가시화 장치와 커먼레일 분사시스템을 구성하였다. 연료를 안정적으로 고압분사하기 위해 고압연료 펌프(Haskel, HSF-300) 두 개를 병렬로 연결하여 사용하였고 펌프로 유입되는 압축공기의 압력을 이용하여 커먼레일 내의 연료 압력을 조절하였다. 또한, 상온에서 기상인 DME연료를 질소가스로 가압하여 액상분사가 가능토록 하였으며, 분무발달을 가시화하기 위하여 Nd:YAG 레이저를 광원으로 사용하여 발생된 레이저 시트빔을 이용하여 인젝터에서 분사되는 분무단면을 가시화하였다. 그리고, ICCD카메라와 인젝터드라이버를 디지털 신호 발생기를 이용하여 동기화 하고 이미지 그래버를 사용

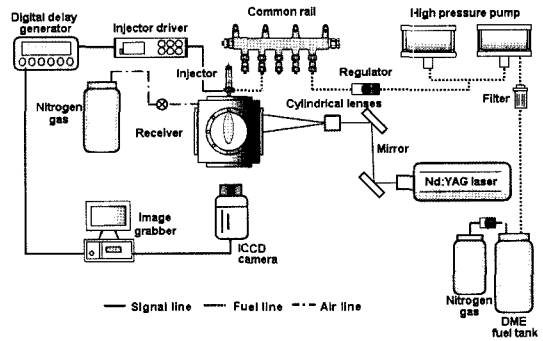


Fig. 1 Schematic diagrams of DME spray and visualization system

Table 1 Experimental conditions

Injection system	Common-rail
Fuel	DME
Hole diameter (mm)	0.3
Injection pressure (MPa)	40, 60
Injection duration (ms)	1.0
Ambient pressure (MPa)	1.0, 2.0

하여 분무이미지를 취득하였다.

2.2 실험방법

고압 및 고온의 분위기를 조성하기 위하여 5MPa까지 가압이 가능한 고압 챔버를 사용하였다. 연료의 분사 압력과 분위기압력의 조건에 따른 분무 형상, 분무도달거리와 분무각의 변화를 관찰하기 위하여 분사압력을 40, 60MPa로 분사하였으며 분위기압력은 1, 2MPa로 질소가스를 사용하여 가압하였다. 본 연구의 실험조건을 Table 1에 나타내었다. 분위기 압력과 온도(293, 393, 493K)에 따른 증발특성은 수치해석을 통하여 결과를 계산하였다.

3. 분열 및 증발 모델

3.1 1차분열모델

3.1.1 KH 모델

KH모델은 축대칭 원통분류의 표면에 생성되는 Kelvin-Helmholtz 파의 불안정성의 분석에 기초하여 Reitz⁽⁷⁾에 의해 제안된 모델이다. 이 모델의 분열특성은 최대 파장 성장율(Ω_{KH})과 이에 대응하는 파장(Λ_{KH})이 액적분열에 주된 요인이라고 하였다.

액적분열은 액적의 반경(r)이 분열시간(τ)동안 감소한다는 가정으로부터 아래와 같이 감소된 반지름(r_n)을 구할 수 있다. KH모델의 분열상수 B_1 값은 Reitz⁽⁷⁾이 제안한 20을 사용하였다.

$$r_c = 61\Lambda \quad (1)$$

$$\tau = \frac{3.726B_1r}{\Omega\Lambda} \quad (2)$$

$$\left(\frac{r-r_n}{dt}\right) = \left(\frac{r-r_c}{\tau}\right) \quad (3)$$

3.2 2차 분열 모델

3.2.1 RT 모델

Rayleigh-Taylor불안정성은 액체와 기체 사이의 경계면에 수직인 가속작용이 일어날 때 액체의 관성 때문에 일어난다고 하여 이를 기준으로 하여 Bellman등⁽⁸⁾이 제안하였다. 가장 빠르게 성장하는 주파수(Ω_{RT}), 파장(Λ_{RT}) 및 파동수(K_{RT})가 결정되고 아래와 같이 분열시간(τ_{RT})과 분열후 액적반경(r_c)가 결정된다.

$$\tau_{RT} = \frac{C_\tau}{\Omega_{RT}} \quad (4)$$

$$r_c = \frac{\pi C_{RT}}{K_{RT}} \quad (5)$$

여기서, 분열상수 C_τ 는 RT분열영역에서는 1.0으로 KH 분열영역에서는 9.0으로 설정하였고, 미립화 특성에 영향을 주는 분열상수 C_{RT} 는 0.5를 적용하였다.

3.2.2 DDB 모델

변형된 액적이 순수한 신장 유동에 의하여 변형된다고 가정하고 반액적에 관한 방정식에서 에너지 보존 법칙을 이용하여 비선형 효과를 고려하여 Ibrahim등⁽⁹⁾이 제안한 모델이다. 모델 방정식은 아래와 같이 주어진다.

$$K \frac{d^2y}{dt^2} + \frac{4N1dy}{Reydt} + \frac{27\pi^2}{16We}y[1-2(cy)^{-6}] = \frac{3}{8} \quad (6)$$

또한, 액적 분열이 일어나는 임계조건은 다음과 같다.

$$\frac{a}{r} = \frac{We}{6\pi} \quad (7)$$

3.3 증발모델

KIVA 코드에서는 Spalding 모델⁽¹⁰⁾을 기초로 증발모델을 포함하고 있으며 구형 입자와 유동 유체 사이의 대류상의 열과 질량전달에서 Nusselt수와 Sherwood수는 아래와 같이 계산된다.

$$Nu = 2 + 0.6\sqrt{Re}Pr^{0.33} \quad (8)$$

$$Sh = 2 + 0.6\sqrt{Re}Sc^{0.33} \quad (9)$$

액적의 증발률은 Ranz-Marshall 관계식⁽¹¹⁾에 의하여 계산되며 정지 상태하에서 액적기화율(\dot{m})과 Spalding 질량전달수(B)는 다음과 같다.

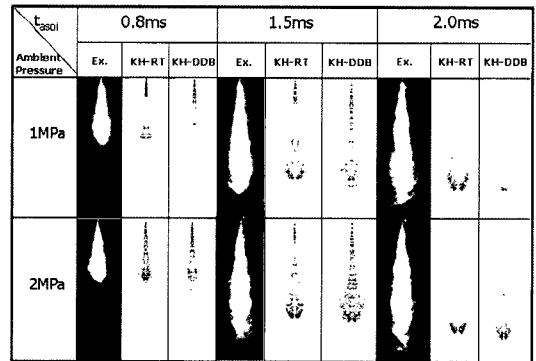
$$\dot{m} = 2\pi r(\rho D)_{air} B \times Sh \quad (10)$$

$$B = \frac{Y_s - Y_\infty}{1 - Y_s} \quad (11)$$

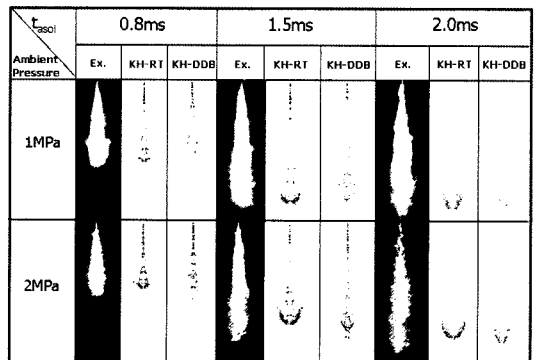
여기서, $(\rho D)_{air}$ 는 연료증기 확산계수를 사용하여 계산하며 Y 는 연료증기질량분률이고 첨자 's'는 액적표면, '∞'는 자유흐름 상태를 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

Figure 2는 40MPa과 60MPa의 분사 압력에서의 가시



(a) $P_{inj}=40MPa$



(b) $P_{inj}=60MPa$

Fig. 2 Comparison of hybrid models according to ambient pressure

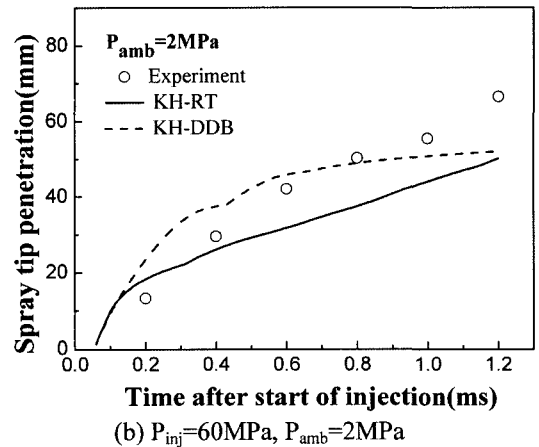
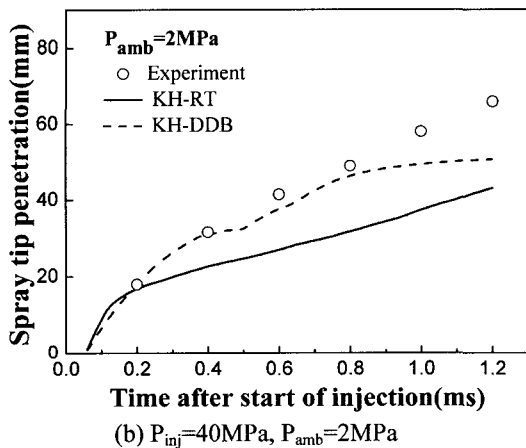
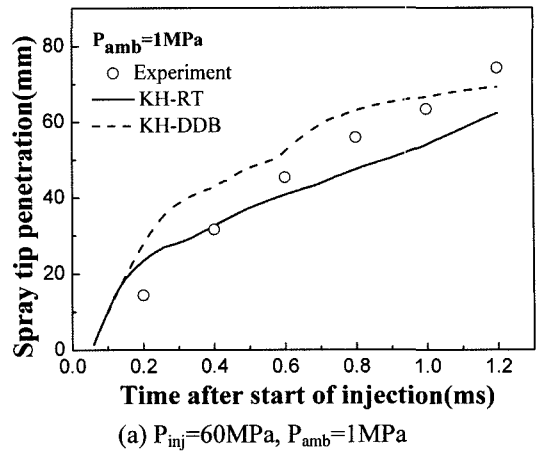
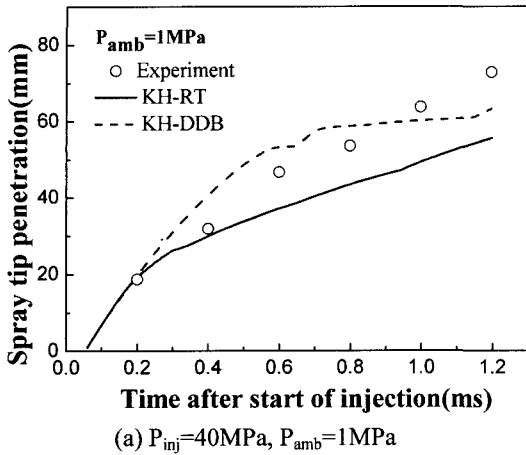


Fig. 3 Spray tip penetration according to hybrid model ($P_{inj}=40\text{MPa}$)

Fig. 4 Spray tip penetration according to hybrid model ($P_{inj}=60\text{MPa}$)

화 실험을 통해 취득한 영상과 Hybrid모형을 사용하여 계산된 결과를 비교한 것이다.

인젝터에서 분사된 연료 분무는 분무압력이 60MPa 인 경우가 40MPa일 때 보다 분무 도달거리가 더 길어지는 것을 알 수 있다. 또한, 분위기 압력이 높아 질수록 분무도달거리가 짧아지면서 분무각이 증가하는 것을 알 수 있다.

인젝터에서 분사된 연료 분무는 분무압력이 60MPa 인 경우가 40MPa일 때 보다 분무 도달거리가 더 길어지는 것을 알 수 있다. 또한, 분위기 압력이 높아 질수록 분무도달거리가 짧아지면서 분무각이 증가하는 것을 알 수 있다.

2차 분열 모델이 서로 상이하여 생성되는 와류현상의 모양도 다르고 KH-RT 모델의 경우에 좀더 뚜렷한 와류 현상을 볼 수 있다. 이는 RT모델에서는 액적의 가속도

와 파장이 액체의 표면장력 및 밀도에 의해 영향을 받는데 DME연료의 경우 그 값이 낮아 많은 분열을 야기시킨 것으로 판단된다. 그래서 KH-RT모델이 KH-DDB 모델보다 짧은 분무도달거리를 보이고 있다.

Figure 3은 분사압력 40MPa일 때의 분위기 압력 변화에 따른 분무도달거리를 실험값과 비교하여 나타낸 것이다.

분위기압력 1MPa과 2MPa의 모두 분사 초기에는 실험결과와 일치하였으나 KH-RT모델의 경우에는 2차 분열이 시작되는 0.1ms 이후부터는 점차 짧은 분무도달거리를 보여주고 있으며 분위기 압력이 높아짐에 따라 그 차이가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 KH모델의 파가 성장되고 2차 분열인 RT분열이 시작될 때 액적 반경이 결정되는 주요한 인자인 표면장력과 밀도가 작아 급속한 분열을 일으켜 분무도달거리가 짧아진 것으로 판단

된다.

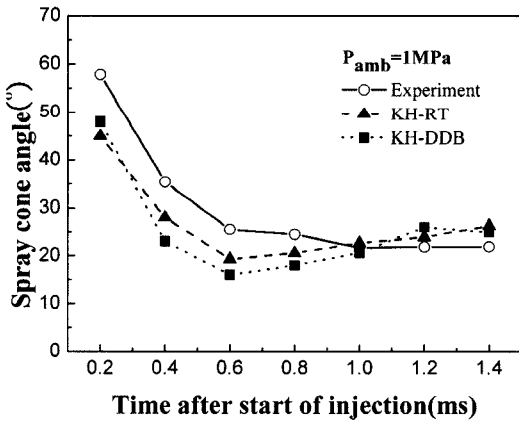
Figure 4는 분사압력 60MPa일 때의 분위기 압력에 따른 분무도달 거리를 나타낸 것이다. 두 그래프를 비교하여 보면 분사압력 60MPa의 경우가 40MPa보다 긴 분무도달거리를 나타내고 있으며 KH-DDB모델의 경우가 실험값에 좀 더 일치하는 결과를 보여주고 있다. 이는 KH-DDB모델의 경우에는 1차 분열과 2차 분열이 경쟁적으로 발생되어 분사 초기에도 DDB모델의 분열이 발생할 수 있으며 그러한 이유로 분무도달거리가 KH-RT보다 길어졌다고 판단된다. 그러나 DDB모델도 분열 임계조건이 Weber수의 영향을 받기 때문에 표면장력이 적은 DME연료의 경우 분사시간의 증가함에 따라 즉, 2차 분열이 진행됨에 따라 점차 분무도달거리가 짧아지는 것을 볼 수 있다.

Figure 5는 분사압력 40MPa일 때는 분위기 압력에 따

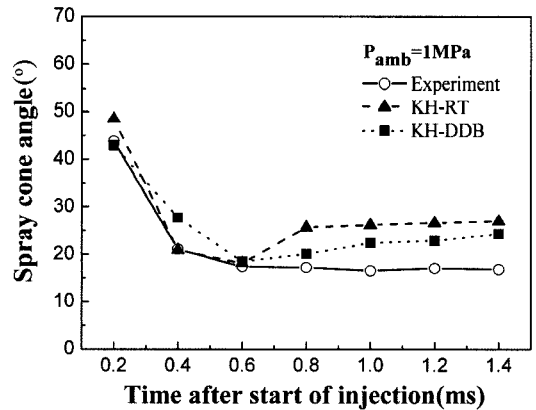
른 분무각을 나타내고 있다. 분사초기에는 실험값보다 작게 나타나다가 0.8 ms 이후에는 분무각이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 분사 후 2차 분열이 활발히 진행되면서 분무각에 영향을 준 것으로 판단된다.

Figure 6은 분사압력 60MPa일 때의 분위기 압력에 따른 분무각을 나타내고 있다. 분무각은 분사압력 40MPa일 때와 비슷한 경향을 보여주고 있으며 분위기 압력이 1MPa일 때 보다 분무하류에서 분무각이 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 분무도달거리가 실험결과에 비하여 짧게 나타나는 현상을 뒷받침해 주고 있다. 또한, 분사압력 40MPa일 때보다 증가 폭이 더 증가하는데 이는 분사압력이 상승함에 따라 분열 또한 활발히 진행된 것으로 판단된다.

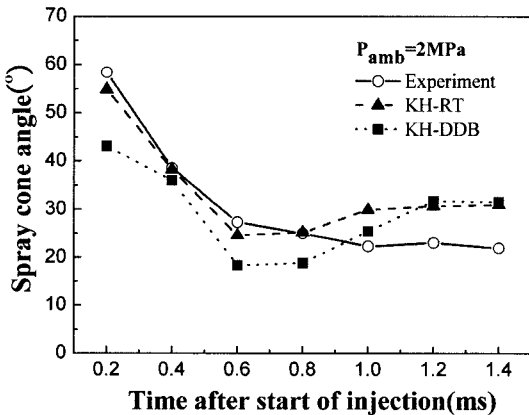
Figure 7은 분사압력 60MPa일 때의 분위기 온도와 압력의 변화에 따른 증발률을 나타낸 것이다. 계산결과



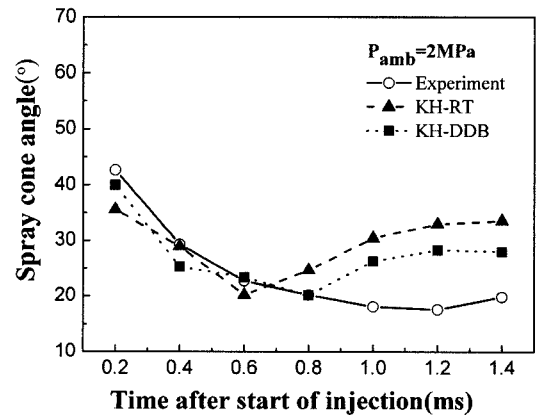
(a) $P_{inj}=40MPa, P_{amb}=1MPa$



(a) $P_{inj}=60MPa, P_{amb}=1MPa$



(b) $P_{inj}=40MPa, P_{amb}=2MPa$



(b) $P_{inj}=60MPa, P_{amb}=2MPa$

Fig. 5 Spray cone angle according to hybrid model ($P_{inj}=40MPa$)

Fig. 6 Spray cone angle according to hybrid model ($P_{inj}=60MPa$)

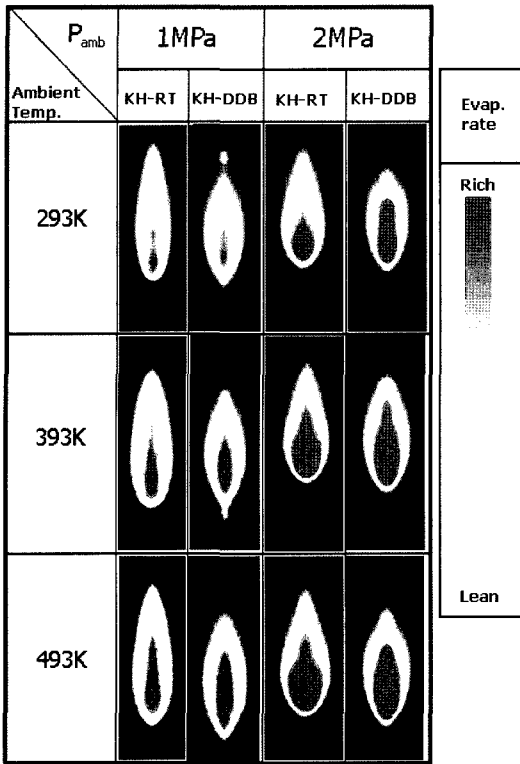


Fig. 7 Comparison of evaporation rate of DME spray according to ambient pressure and temperature ($t_{soi}=1.8ms$)

분무중심에서 증발이 가장 활발히 일어나는 것을 알 수 있으며 분위기 온도가 상승할수록 분무중심에서부터 증발이 활성화 되는 것이 확연히 드러남을 알 수 있다. 또한, 분위기 압력이 상승할수록 분무 폭이 커짐에 따라 증발률이 두드러지게 커지는 것으로 나타났다. 분무모델에 따라 형상이 다르게 보이는데 이는 2차 분열모델을 RT모델로 적용된 부분에서는 분열상수와 연료의 밀도에 의해 결정되는 분열 후 액적의 크기가 Weber수에 의해 분열조건이 결정되는 DDB모델보다 더 작게 나타나 분무중심에서의 증발이 더 뚜렷하게 나타나고 증발률도 더 큰 것으로 판단된다. 또한, 증발형상은 RT모델과 DDB모델의 다른 항력모델 즉, 공기유동의 변화에 의한 차이에 의한 것으로 판단된다.

5. 결 론

DME 분무 해석을 위하여 KH모델을 1차 분열로 RT, DDB모델을 2차 분열로 적용한 두 개의 hybrid모델을

사용하여 분위기 압력 및 온도 변화에 따른 분사 및 증발 특성을 해석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 분위기압력이 높을수록 분무도달거리가 짧아졌으며, KH-DDB모델의 경우가 실험결과와 비교적 잘 일치하는 결과를 얻었다.
- 2) 분무각의 경우에는 분사초기에는 계산결과가 실험 결과보다 작게 나타났으며 0.8 ms 이후에는 계산결과가 커지는 것으로 나타났다.
- 3) 증발률 계산결과에서 분무중심에서 증발이 가장 활발히 일어났으며 분위기 온도가 상승할수록 분무중심에서부터 증발이 활성화 되는 것이 확연히 드러났고, 분위기 압력이 높아지면 증발률이 증가하는 결과를 보였다.

후 기

본 연구는 교육 인적 자원부, 산업 자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수 실험실 지원 사업 및 환경부 ECO-STAR Project (무·저공해 자동차 사업단)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Schneyer, "Thermochemical characteristics of dimethyl ether-an alternative fuel for compression-ignition engine", SAE 2001-01-0154, 2001.
- (2) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Schneyer, "Compression ignition delay (physical+chemical) of dimethyl ether-an alternative fuel for compression-ignition engines", SAE 2003-01-0759, 2003.
- (3) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Schneyer, "Thermodynamic properties of dimethyl ether-an alternative fuel for compression-ignition engines", SAE 2004-01-0093, 2004.
- (4) J. H. Park, H. K. Suh, S. W. Park and C. S. Lee, "Spray development process of dimethyl ether (DME)", Transactions of the Korea society of automotive engineers, Vol. 1, pp.369-374,2005.
- (5) H. K. Suh, S. W. Park and C. S. Lee, "Atomization characteristics of dimethyl ether fuel as an alternative fuel injected through a common-rail injection system", Energy&Fuels, Vol. 20, No.4, pp 1471-1481, 2006.
- (6) B. W. Ryu, S. W. Bang, H. K. Suh and C. S. Lee,

- “Effects of injection parameters on the injection and spray characteristics of dimethyl ether compared to the diesel Fuel”, 2006 Fall Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division, 2006-1512, 2006.
- (7) R. D. Reitz, “Modeling atomization processes in high-pressure fuel sprays”, *Atomization and Spray Technology*, Vol.3, pp.309-337, 1987.
- (8) R. Bellman and R. H. Pennington, “Effects of surface tension and viscosity on Taylor instability”, *Quarterly of applied Mechanics*, Vol. 12, pp. 151-162, 1954.
- (9) E. A. Ibrahim, H. Q. Yang and A. J. Przekwas, “Modeling of spray droplets deformation and breakup”, *AAIA J. Propulsion and Power*, Vol. 9, No. 4, pp. 652-654, 1993.
- (10) D. B. Spalding, “The combustion of liquid fuels”, *Fourth Symposium (International) on Combustion*, 847, Williams &Wilkins, 1953.
- (11) W. E. Ranz and W. R. Marshall, “Evaporation from drops”, *Chem. Eng. Prog.*, 48, 141 (Part I) & 173 (Part II), 1952.