분위기 압력변화에 따른 DME 커먼레일 연료 분사 시스템의 분무 특성에 관한 연구

이 세 준¹⁾ · 오 세 두²⁾ · 정 수 진²⁾ · 임 옥 택³⁾

울산대학교 대학원 기계자동차공학과¹⁾ · 자동차부품연구원 그린동력시스템센터²⁾ · 울산대학교 기계자동차공학부³⁾

An Investigation on the Spray Characteristics of DME Common Rail Fuel Injection System with Variation of Ambient Pressure

Sejun Lee¹⁾ · Sedoo Oh²⁾ · Soojin Jeong²⁾ · Ocktaeck Lim³⁾

¹⁾Graduate School of Mechanical and Automotive Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

²⁾Center of Green Powertrain, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

³⁾Department of Mechanical and Automotive Engineering, Ulsan University, Ulsan 680-749, Korea

(Received 14 March 2011 / Revised 10 August 2011 / Accepted 23 August 2011)

Abstract : It is investigated of the DME spray characteristics about varied ambient pressure and fuel injection pressure using the common rail fuel injection system when the nozzle holes diameter is varied. The common rail fuel injection system and fuel cooling system is used since DME has compressibility and vaporization in atmospheric temperature. The fuel injection quantity and spray characteristics were measured. The spray was analyzed of spray shape, penetration length, and spray angle at the six nozzle holes. The 2 types injector were used, the one was 0.166 mm diameter the other one was 0.250 mm diameter. The ambient pressure which is based on gage pressure was 0 MPa, 2.5 MPa, and 5 MPa. The fuel injection pressure was varied by 5 MPa from 35 MPa to 70 MPa. When using the converted injector, compared to using the common injector, the DME injection quantity was increased 127 % but it didn't have the same heat release. Both of the common and converted injector had symmetric spray shapes. In case of converted injector, there were asymmetrical spray shapes until 1.2 ms, but after 1.2 ms the spray shape was symmetrical. Compared with the common and converted injector, the converted injector had shorter penetration length and wider spray angle than the common injector.

Key words : DME(Di-Methly Ether, 디메틸에테르), Spray angle(분무각), Spray penetration length(분무관통길이), Ambient pressure(분위기 압력), Fuel injection pressure(연료 분사 압력)

1. 서 론

디젤의 대체연료로 각광받고 있는 DME에 관한 연구는 환경문제와 이로 인한 대체연료의 필요성에 의해 현재 연구가 진행 중이다. 이러한 연구들을 통해서 DME의 많은 장점을 찾아볼 수 있다. 오용일

외¹⁾는 DME버스에 대한 배출가스특성과 연료효율에 관한 연구를 실시하였고, 그 결과 디젤 엔진에서 DME와 디젤의 동적 특성이 유사하다는 것을 알게 되었다. 또한, 후처리 장치가 없는 상태에서 배출가스특성이 개선되었다. Seto 외²⁾는 DME를 사용한 경우에 CO₂의 발생량이 감소하였다는 것을 발견하였다. 하지만, 이러한 DME에도 몇몇 단점이 존재한

*Corresponding author, E-mail: otlim@ulsan.ac.kr

다. Ishicawa 외³⁾의 논문에서는, DME가 탄성중합체에 피해를 주기 때문에 DME연료공급시스템이 필요하다고 되어있다. 게다가, Ion 외⁴⁾의 논문에서는 DME의 낮은 윤활성에 인해 연료공급시스템에서의 누유 및 마모가 발생한다고 되어있다. Yoshino 외⁵⁾에 의한 DME 분사시스템이 적용된 디젤 엔진의 성능 연구에 따르면, 디젤과 동일한 발열량을 확보하기 위해서는 DME의 분사량이 증가되어야 한다고 되어있다. 이것은 DME의 발열량이 디젤에 비해 낮다는 것은 뜻한다. 이러한 문제로 인하여, 디젤과 동일한 출력을 가지기 위해서 디젤보다 더 많은 DME 분사량이 요구된다. DME의 낮은 발열량 문제를 해결하기 위한 방법들 중 3가지는 다음과 같다. 첫번째는 노즐 홀 직경의 증대이고, 두번째는 연료 분사압을 증가시키는 것이며, 세번째는 인젝터 내부의 니들 팁을 개조하는 것이다. 이 방법들 중 세번째인 니들 팁 개조는 가공의 어려움이 존재하기 때문에 DME의 낮은 발열량 문제해결에 접근하기 힘든 방법이다. 이에 비해, 노즐 홀 직경 증가와 연료 분사압 증가는 상대적으로 간단한 방법이다. 그러므로, 본 논문에서는 노즐 홀 직경 증대 및 연료 분사압의 증가를 통해 DME의 낮은 발열량문제를 개선하기 위한 연구결과를 보이도록 하겠다.

2. 실험장치

2.1 분무 가시화 및 DME 분사 장치

Fig. 1⁶⁾은 전체 실험장치의 개략도이다. Fig. 1의

우측은 분무 가시화 시스템이고 좌측은 DME 연료 분사 시스템을 나타내고 있다. Fig. 1의 우측에 위치한 고압챔버는 질소에 의해 내부가 가압된다. 인젝터는 인젝터 컨트롤러(TDA-3300)를 사용하여 연료 분사시간 및 분사횟수를 제어한다. 광원으로 사용되는 스트로브 라이트는 펄스발생기(DG535)에서 생성되는 신호에 의해 작동된다. 고압챔버 내부의 압력은 챔버 내부에 설치되어 있는 압력센서(Kistler 6056A)에 의해 측정된다. 여기서 측정된 압력신호는 신호증폭기(Kistler 5015)에 의해 증폭된 신호를 읽는다. 스프레이 형상을 촬영할 때 사용되는 카메라(Nikon D90)는 컴퓨터와 연결되어 작동하고 분무가 촬영되면 컴퓨터에 저장된다. Fig. 1의 좌측은 DME 연료분사 시스템이다. 사용되는 DME의 물성치는 Table 1에서 볼 수 있다. 본 실험장치에서는 연료를 일정한 고압으로 분사하기 위해 커먼레일 시스템을 사용하였다. DME는 낮은 점성이나 낮은 윤활성 때문에 연료개통 시스템의 누유 및 마모를 일으킨다.⁷⁻¹³⁾ 이를 위해, 연료 가압 시 공기 압축기를 사용하였고 1% 바이오디젤을 DME에 추가하여 연료의 윤활성을 개선하였다. DME는 낮은 증발점에 의해 대기압에서 가스상태로 존재하기 때문에 DME를 액화시키기 위해서 0.5MPa로 가압할 필요가 있다. 0.5~0.8MPa 일 때 액화상태로 존재하는 DME는 연료탱크에서 저압펌프를 거친 다음 어큐물레이터로 공급된다. 액화상태의 DME는 어큐물레이터의 벽면온도에 의해 가스상태로 저장되는 문제가 발생

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

Table 1 Delphi multec injector

Property [Unit]	DME	Diesel
Boiling point at 1 atm [K]	248.1	450 ~ 643
Enthalpy of vaporization [kJ/kg]	467.13	300
Lower heating value [MJ/kg]	27.6	42.5
Gaseous specific heat capacity [kJ/kg K]	2.99	1.7
Ignition limits [vol% in air]	3.4/18.6	0.6/6.5
Modulus of elasticity [N/m ²]	6.37E+08	14.86E+08
Kinematic viscosity of liquid [cSt]	<0.1	3
Surface tension at 298K [N/m]	0.012	0.027
Vapor pressure at 298K [kPa]	530	<<10

할 수 있다. 이를 방지하기 위해, 소형 냉각장치를 어큐뮬레이터에 설치하여 벽면온도를 차갑기 유지시켜서 어큐뮬레이터 내부의 DME가 계속 액체상태가 되도록 한다. 액화된 DME는 압축공기로 가동되는 공기 압축기를 통과하면서 약 35MPa 로 가압된 후 커먼레일 전에 설치된 어큐뮬레이터에 저장된다. DME는 PCV(Pressure Control Valve) 드라이브에 의해 연료 압력이 조절되는 커먼레일로 공급되어 일정한 압력으로 DME가 분사되도록 한다. 인젝터는 인젝터 드라이버에 의해 분사시간과 분사횟수가 제어된다. 인젝터에서 커먼레일로 순환된 연료는 다시 저압펌프로 이동하여 다시 연료공급시스템을 순환하게 된다.

2.2 DME 분사량 측정장치

Fig. 1의 우측하단에는 DME 연료량 측정장치에 대한 개략도가 포함되어있다. 측정장치의 전면부는 액화 DME의 양을 확인할 수 있도록 눈금이 새겨진 쿼츠로 되어있다. DME 분사량을 측정 한 후에는 장치의 하단부에 있는 배출밸브를 개방하여 측정장치 내부의 액화 DME를 배출한다. 측정장치 내부의 DME의 상태는 Fig. 2에 표시되어있는데, DME는 질소에 의해 5.5MPa 로 가압되기 때문에 액화상태유지가 가능하다.

Fig. 2 Vapor pressure curve of DME

2.3 신호동기화

Fig. 3은 분무가시화 시스템에서의 신호동기화를 보여준다. 먼저, 카메라 셔터를 1,000ms동안 열어두고, 인젝터 컨트롤러를 통해 트리거 신호가 입력되면 DME가 1ms동안 고압챔버 내부로 분사된다. 인젝터 드라이버에서의 트리거 신호는 펄스발생기를 통과하고, 연료가 분사되는 기간 동안 트리거 신호 타이밍보다 지연된 특정 시간에서 스트로브 라이트가 발광한다. 스트로브 라이트가 발광하는 시간은 약 8~20μs이고 이때 분무형상이 카메라에 잡히게 된다.

Fig. 3 Timing diagram for synchronization

2.4 인젝터

상용인젝터와 DME의 분무량을 증대시키기 위해 노즐 홀 직경을 증대시킨 개조인젝터가 사용되었다. Table 2는 각각의 인젝터의 사양에 대하여 보여주고 있다. 상용인젝터의 직경은 0.166mm이고 개조인젝터의 경우는 0.250mm이다. 개조인젝터의 경우 상용인젝터로 디젤을 분사하였을 때 얻을 수 있는 발열량확보를 위한 계산의 결과에 의해 개조되었다.

Table 2 Delphi multec injector

Property	Delphi multec	
	Common	Converted
Nozzle type	VCO	VCO
The number of nozzle holes	6	6
Diameter of nozzle holes [mm]	0.166	0.250
Spray angle [deg]	140	140

3. 실험방법

3.1 분사량 측정

본 연구에서는, 연료분사압력이 5MPa 간격으로 35MPa부터 70MPa까지의 범위에서 상용 및 개조인젝터를 사용하여 DME의 분사량이 측정되었다. 모든 실험 조건에서, 분사시간은 1ms이고 분사시간은 1,000번으로 수행되었다. 실제 엔진 작동 시의 내부 압력조건을 만들면서 동시에 대기온도에서 DME를 액화시키기 위해 질소를 사용하여 고압챔버 내부를 5.5MPa로 가압하였다.

3.2 분무 가시화

DME는 연료분사압력이 35MPa, 70MPa 일 때 고압챔버 분위기 조건이 상온 0MPa, 2.5MPa, 그리고 5MPa에서 분사된다. 이러한 실험조건을 통해, Fig. 3 [14]에서와 같이 DME는 액체상태로 존재한다. 모든 조건에서 연료분사시간이 1ms인 상태에서 상용 및 개조인젝터가 사용되었다. 본 실험에서의 주요 측정사항은 분무관통길이와 분무각이고, Fig. 4와 같이 정의되며 Adobe Photoshop CS3를 사용하여 측정하였다.

Fig. 4 Schematic of spray visualization system

4. 실험결과

4.1 분사량 측정

Fig. 5와 6은 분무과정에 따른 연료 분사량을 보

Fig. 5 Injection quantity of DME and diesel [ml/cycle]

Fig. 6 Injection quantity of DME and diesel [KJ/cycle]

여주고 있다. 모든 실험결과는 측정된 분사량을 1,000으로 나눠서 1회 분사량으로 표시되어있다. 개조인젝터를 통해서 DME 분사량을 측정한 결과, 상용인젝터를 사용했을 때보다 많은 양의 DME가 분사됨을 Fig. 5를 통해 알 수 있다. 하지만 Fig. 6에서와 같이, 개조인젝터로 DME의 분사량을 늘렸음에도 불구하고, 열발생량은 디젤에 비해 낮게 나온다. 왜냐하면 개조인젝터를 통한 DME의 연료분사량이 상용인젝터를 사용하여 디젤을 분사한 양보다 1.27 배밖에 되지 않아서 열 발생량이 디젤에 비해 0.66 배 정도로만 계산되었기 때문이다. 비록 DME와 디젤의 동일한 발열량을 확보하기 위해 인젝터 노즐 홀의 직경을 증대시켰으나, 디젤과 같은 발열량을 내기에는 DME분사량이 적었다. 개조인젝터의 경우 오직 노즐 홀 직경의 증대만 있었고 이에 따른 다른 부품의 개조는 이뤄지지 않았기 때문에 원하는 양만큼의 DME가 분사되지 않았다. 즉, 인젝터의 노즐 홀의 증대만으로는 DME의 낮은 발열량 문제를 해결하기에 한계가 있다는 것을 알 수 있다.

4.2 분무 가시화

Fig. 7과 8은 연료분사압 70MPa, 분위기압력 5MPa일 때의 분무형상을 보인다. Fig. 7은 상용인젝터를, Fig. 8은 개조인젝터를 사용한 경우이다. 모든 사진은 연료가 분사된 시점부터 완전발달할 때까지의 분무발달과정을 보이고 있다. Fig. 7에서 분무가

Fig. 7 Sequential images of DME spray (Injector : Common, Injection Pressure : 70 MPa, Ambient Pressure : 5 MPa)

Fig. 8 Sequential images of DME spray (Injector : Converted, Injection Pressure : 70 MPa, Ambient Pressure : 5 MPa)

완전발달하는데 걸리는 시간은 0.4ms부터 3.4ms까지이고 이 과정동안 6개의 노즐 홀에서 나오는 분무형상이 대칭적이라는 것을 보여준다. Fig. 8에서는, DME가 분사되어 완전발달하는 시간이 0.4ms부터 3.4ms이고 Fig. 7의 경우에 비해 분무각이 더 크게 형성되는 것을 보여준다. 이러한 결과의 원인은 동일한 압력 조건에서 노즐 홀의 증가에 의한 것으로 볼 수 있다. 이를 통해, 실린더 내부에서의 공기 이용률이 증가하여 연소 특성이 개선될 것으로 판단된다. Fig. 8에서, 연료분사가 진행되는 1.2ms까지는 DME분무형상이 비대칭적인 것을 볼 수 있다. 인젝터 내부에 들어있는 니들을 고정시키는 것이 싱글 가이드이고 단지 6개의 노즐 홀이 개조된 상태이기 때문에, 연료가 분사되는 초기 시간대에 니들이 진동할 수 있기 때문에 이와 같은 결과를 가진다고 판단된다. 하지만 1.4ms이후부터는 DME분무가 완전 발달 할 때까지 분무형상이 대칭적으로 발달하는 것을 확인할 수 있다.

4.3 분무관통길이

분무관통 길이 분석에서는 짧은 시간 내에 관통 길이가 얼마나 길게 발달하였는지가 중요하다. 즉 분무발달속도가 분무의 완전발달 시의 관통길이보다 더 중요한 해석요소가 된다.

Fig. 9는 분위기압력이 5MPa 인 경우 다양한 연료 분사압력에 따른 DME와 디젤의 분무관통길이를 보여준다. Fig. 9 이후부터 모든 그래프는 6개의 노즐 홀에서 분사되는 분무관통길이의 평균값을 나타내고 있다. DME의 분무관통길이는 Fig. 9의 좌측에서 보여지고, 우측에는 디젤분무관통길이가 나타나 있다. DME의 경우, 실험데이터를 연료분사압력 35MPa와 70MPa로 나눠서 해석할 수 있다. 먼저 35MPa일 때, 연료분사 이후 3.5ms 까지 상용 인젝터에 의한 분무관통길이는 개조인젝터를 사용한 경우보다 길다는 것을 알 수 있다. 연료분사압력이 70MPa 인 경우에는 2.5ms까지의 분무거동이 앞서서와 동일하다는 것을 볼 수 있다. 왜냐하면 개조인젝터의 경우 노즐 홀의 직경이 증대되었기 때문에 동일한 연료에 운동량의 전달이 지연된다. 따라서, 개조인젝터를 사용하면 상용인젝터의 경우보다 분

Fig. 9 Spray penetration length of DME (left) and diesel (right) at P_{amb} : 5MPa

Fig. 10 Spray penetration length of DME (left) and diesel (right) at P_{inj} : 70MPa

무관통속도가 작아진다. Fig. 9에서 DME와 디젤을 비교하면, 일반적으로 디젤의 분무관통속도는 DME에 비해 빠르다. 연료가 분사되는 동안 DME는 디젤에 비해 증발이 잘 일어나므로 DME 분무 입자는 더 쉽게 운동량을 잃는다. 그래서 동일한 시간 동안 DME의 분무관통길이가 디젤에 비해 짧은 것이다. Fig. 10은 연료분사압력이 70MPa일 때 DME와 디젤의 분무관통길이를 보여준다. Fig. 10의 좌측은 DME를 사용한 경우이고 우측은 디젤의 경우를 나타내고 있다. Fig. 9와 유사하게, 1ms, 2ms, 그리고 2.5ms일 때 상용인젝터를 사용한 경우의 분무관통거리는 개조인젝터에 비해 더 길다는 것을 알 수 있다. 이것은 개조인젝터를 사용하면 분무관통속도가 느려진다는 것을 의미한다. 게다가, 연료분무의 완전발달에 걸리는 시간이 분위기 압력의 증가에 따

라 길어진다는 의미도 가지고 있다. 이러한 결과의 이유는 분위기 압력이 증가할수록, 분위기가스입자의 농도 또한 증가하는 것에 있다. 이것은 연료분무의 발달이 분위기가스입자에 의해 방해 받는다는 것을 의미하며, 결국 분위기압력의 증가로 인해 분무관통길이가 줄어든다는 것을 뜻한다. DME와 디젤을 비교해보면, 디젤분무의 완전발달 시의 관통거리는 DME 분무에 비해 더 길다. 이러한 실험결과 이유는 Fig. 9에서와 비슷한 원인 때문이다.

4.4 분무각

Fig. 11과 12에서 좌측은 DME를, 우측은 디젤을 분사했을 때의 분무각을 보여준다. Fig. 8과 같이, 분무는 1.1ms 이전까지는 불안정한 발달을 보이고 있기 때문에 1.1ms 이후부터의 분무각 데이터를 해석

Fig. 11 Spray angle of DME (left) and diesel (right) at $P_{amb} : 5 \text{ MPa}$ Fig. 12 Spray angle of DME (left) and diesel (right) at $P_{inj} : 70 \text{ MPa}$

하였다. Fig. 11과 같이, 일반적으로 DME와 디젤을 개조인젝터를 사용하여 분사했을 때 상용인젝터의 경우에 비해 더 큰 분무각을 형성하였다. Fig. 11의 좌측에서, 상용인젝터를 통한 DME의 평균 분무각이 24.7 deg으로, 개조인젝터를 사용한 경우는 33.5 deg로 측정되었다. 디젤의 경우에 개조인젝터를 사용하면 평균 분무각이 30.4 deg으로, 상용인젝터의 경우에는 27.3 deg로 측정되었다. 두 경우 모두 상용인젝터에 비해 개조인젝터를 사용했을 때 더 큰 분무각이 형성된다는 것을 보여준다.

Fig. 12는 일정한 분위기 압력에서 다양한 분사압력으로 실험했을 때의 분무각을 보여준다. Fig. 11에서의 결과와 같이, 개조인젝터를 사용할 때 평균 분무각이 커진다. Fig. 11과 12에서와 같은 결과가 나타나는 이유는 공기와 연료분무가 접하는 표면적이

증가함에 따라 공기유입이 활성화되기 때문이다. 따라서 개조인젝터를 사용하면 큰 분사각이 잘 형성되고 공기 이용률이 증가하여 연소특성이 개선될 수 있다.

Fig. 11과 12에서는 1.1ms 전까지 분무각이 증가하다가 이후 감소하는 것을 보인다. 또한 상용인젝터로 디젤을 분사한 경우, 0.7ms부터 1ms 사이에 분무각이 급격히 감소되는 것을 볼 수 있다. 전자의 경우 불안정한 분무패턴이 그 이유가 되고, 후자의 경우 분무발달에 있어서 주된 영향을 미치는 운동량효과가 공기유입효과보다 더 크게 작용하기 때문이다. 그리고 개조인젝터로 연료를 분사하는 경우보다 분무표면과 공기가 닿는 표면적이 작아 공기유입 활성화가 덜 일어나는 이유도 있다.

5. 결 론

본 연구에서는, 상용 및 개조인젝터를 사용하여 커먼레일 시스템에서 다양한 분위기압력 조건에 대한 DME분무특성을 알아보았다. DME 실험결과는 디젤 분무특성과 비교분석 되었고 다음과 같은 결론을 내리게 되었다.

- 1) 노즐 홀 직경을 0.166mm에서 0.250mm로 증대시킨 개조인젝터를 사용한 경우, 상용인젝터의 경우보다 더 많은 연료 분사량을 확보할 수 있었다. 하지만 DME의 증가된 열발생량은 디젤의 경우보다 적었다. 따라서 노즐 홀 직경의 증가만으로는 DME의 낮은 발열량 문제를 해결하기 어렵다. DME 연료 분사량을 효과적으로 증가시키기 위해서는 인젝터의 전체적인 부품 개조가 이뤄져야 할 것으로 판단된다. 왜냐하면 노즐 홀 직경의 증가만으로는 원하는 연료분사량을 확보하기 힘들기 때문이다.
- 2) DME 분사 시에 개조인젝터를 사용하면, 분무관 통길이 발달속도는 상용인젝터를 사용한 경우보다 느린 것에 비해 더 넓은 분사각이 형성된다. 이로 인하여 엔진 실린더 내부에서의 공기 이용률이 증가하여 연소특성이 개선될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 지식경제부 기술혁신사업인 ‘클린 신 연료 동력시스템 개발’에서 수행된 연구입니다. 관계자들의 지원에 깊이 감사드립니다.

References

- 1) Y. Oh and O. Lim, “The Experimental Study of Emission Characteristics and Fuel Efficiency for the Heavy-duty DME Bus,” Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.361-362, 2011.
- 2) T. Seto, T. Tokumaru and S. Takase, “Improvement of Performance and Emission Gas Level of Dimethyl-ether-fueled Diesel Engine,” JSAE Annual Congress, 05A0535900, 2005.
- 3) Y. Sato, S. Nozaki and T. Noda, “The Performance of a Diesel Engine for Light Duty Truck Using a Jerk Type, In-line DME Injection System,” SAE 2004-01-1862, 2004.
- 4) I. M. Sivebaek, S. C. Sorenson and J. Jakobsen, “Dimethyl Ether (DME) - Assessment of Viscosity using the New Volatile Fuel Viscometer (VFVM),” SAE 2001-01-2013, 2001.
- 5) T. Noda, T. Ishikawa, D. Ushiyama, S. Nozaki and Y. Sato, “Development of the Fuel System for a Jerk-type, In-line DME Injection System,” JSAE Annual Congress, 04A0427959, 2004.
- 6) M. Konno, K. Chiba and T. Okamoto, “Experimental and Numerical Analysis of High Pressure DME Spray,” SAE 2010-01-0880, 2010.
- 7) S. Kajitani, M. Oguma and T. Mori, “Fundamental Research of DME Diesel Engine Operated with a Common Rail Injection System,” 14th ISAF, 2002-VT-13, 2002.
- 8) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Sohneyer, “Compression Ignition Delay (Physical + Chemical) of Dimethyl Ether,” SAE 2003-01-0759, 2003.
- 9) S. C. Sorensen and S.-E. Mikkelsen, “Performance and Emission of a 0.273 Liter Direct Injection Diesel Engine Fuelled with Neat Dimethyl Ether,” SAE 950064, 1995.
- 10) S. Kajitani, M. Oguma and T. Mori, “DME Fuel Blends for Low-emission Direct -injection Diesel Engines,” SAE 2000-01-2004, 2000.
- 11) Z. Lonbao, W. Hewu, J. Deming and H. Zuohua, “Study of Performance and Combustion Characteristics of a DME-fuelled Light-duty Direct-injection Diesel Engine,” SAE 1999-01-3669, 1999.
- 12) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Schneyer, “Viscosity and Lubricity of (Liquid) Dimethyl Ether an Alternative Fuel for Compression -ignition Engines,” SAE 2002-01-0862, 2002.
- 13) J. Yu, J. Lee and C. Bae, “Macroscopic Characteristics of Evaporating Dimethyl Ether(DME) Spray,” Transactions of KSAE, Vol.11, No.3, pp.58-64, 2003.
- 14) S. Tamura and T. Tsuji, DME Data Book, KHK, Tokyo, 2006.