

분사율 변화에 따른 Dimethyl Ether (DME)와 디젤의 분무도달거리

최 욱·이 주 광·배 총 식*

한국과학기술원 기계공학과

Spray Penetrations of Dimethyl Ether (DME) and Diesel for the Variation of Injection Rate

Wook Choi · Jukwang Lee · Choongsik Bae*

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea
(Received 4 May 2004 / Accepted 23 August 2004)

Abstract : Dimethyl Ether (DME) has been considered as one of the most attractive alternative fuels for a compression ignition engine. The major advantage of DME-fuelled engine is a great potential for soot-free combustion without sacrificing an inherent high thermal efficiency of diesel engine, despite a necessity for modification of the conventional fuel injection system. An experimental study on DME and conventional diesel sprays was conducted by employing a common-rail type fuel injection system with a 5-holes sac type nozzle, including a constant volume vessel pressurized with nitrogen gas. The injection rates of DME and diesel fuel were recorded with the Bosch type injection rate meter. The injection delay of DME was shorter than that of diesel fuel. The measured injection rates of DME and diesel fuel were correlated with spray penetrations. The prediction method of spray penetration was established using the injection rates, which was verified with the Dent's penetration model and found to agree well for DME case.

Key words : Dimethyl ether(DME), Diesel(디젤), Common-rail(커먼레일), High-current holding time(고전류 유지시간), Injection rate(분사율), Spray penetration(분무도달거리)

Nomenclature

- ΔP : pressure drop across the nozzle, Pa
- ρ_g : gas density, kg/m^3
- T_g : gas temperature, K
- d_o : nozzle hole diameter, mm
- t, τ : time elapsed, s
- S : spray tip penetration, mm
- c : sonic velocity, m/s

1. 서론

현재까지 개발된 많은 대체연료 중, 에테르 계통의 저탄소 함산소연료인 DME(Dimethyl Ether)는 CO₂ 배출량이 기존 디젤연료보다 적고, 검댕(soot)을 비롯한 입자상물질의 배출을 현저하게 줄일 수 있는 것으로 평가되고 있어, DME 자체를 디젤과 대체하려는 연구가 활발하게 진행되고 있다.¹⁻³⁾ 그러나, DME는 압축성이 디젤보다 높고, 증기압이 높아 상온에서 기상으로 존재하며 점도가 디젤에 비해 낮기 때문에 기존 분사장치를 사용할 경우 발생하는 분무의 특징을 정량적으로 연구할

*To whom correspondence should be addressed.
csbae@kaist.ac.kr

필요가 있다.²⁾ 현재까지 DME에 관한 연구는 DME를 연료로 사용하는 엔진의 성능이나 공해배출물 저감에 초점이 맞추어지고 있어, 기초적인 분사 특성에 관한 연구는 상대적으로 미미한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 커먼레일형 분사시스템을 이용하여 DME와 디젤연료의 물성치에 따른 분사율의 변화와 분무 특성을 파악한다.

한편, 지금까지는 Dent,⁴⁾ Hiroyasu와 Arai,⁵⁾ Naber와 Siebers⁶⁾ 등이 발표한 비증발 디젤분무의 분무선단 도달거리에 관한 관계식들이 빈번히 인용되고 있으나, 이들 식들은 상온에서 분사 후 충분한 시간이 지났을 때, 즉 분사율이 일정하게 유지되는 조건에서, 분사각이 일정하게 유지되며 분무내의 밀도는 주변기체의 밀도와 동일하다는 가정에서 얻어진다. 여러 모델 중에서, 특히 Dent의 모델(식 (1))은 주변의 온도의 영향을 고려한 항이 포함되어 있으며, 가스제트 혼합모델에 기초를 두고 있다.

$$S = 3.07 \left(\frac{\Delta P}{\rho_g} \right)^{0.25} (d_o t)^{0.5} \left(\frac{295}{T_g} \right)^{0.25} \quad (1)$$

여기서, ΔP 는 직경이 d_o 인 노즐 분공의 압력차를, 그리고 주변기체의 밀도와 온도는 각각 ρ_g 와 T_g 로 나타낸다.

본 논문에서는 위의 모델을 활용하여 분사율의 비정상 발달과정을 고려한 분무도달거리 예측법에 관해 검토한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 연료분사장차와 가시화 장치

Fig. 1은 실험장치의 개략도이다. 본 연구에 사용된 연료공급장치는 상용커먼레일 연료공급장치를 모사할 수 있도록 구성되어 있다. 압력조절부에는 연료펌프(MS188, 69 MPa, Haskel Ltd), 축압기(69 MPa), 배압 조절기(back pressure regulator; 69 MPa, Tescom Ltd.)를 사용하고, 연료공급라인에서 유히향상제(Infineum R655)를 500 ppm 첨가한 DME를 액상으로 유지시키기 위하여 1.5 MPa의 질소가스로 DME를 가압하였으며, 최종적으로 연료공급펌프 및 축압기를 통해 DME를 공급하였다. 분사압력은 배압 조절기를 이용하여 수동으로 조절하였다.

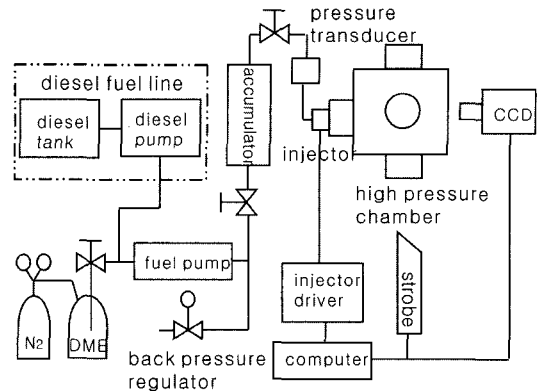


Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

본 연구에서 사용한 분사기는 상용 커먼레일용 sac 타입 분사기(5 holes, 직경 0.168 mm/hole)이며, 전용 구동장치(TDA 3000H, TEMS Ltd)를 사용하여 연료를 2.5 Hz로 분사시켰다. 각기 다른 연료를 분사하는 경우, 압력관은 혼용되지 않도록 개별적인 설비를 구축하였다. 분무의 특성을 파악하기 위하여 CCD 카메라(PCO Sensicam)를 분사기의 노즐 전면 방향으로 향하도록 하고 스트로보라이트(strobe light)를 분무의 측면에서 조사하는 Mie 산란법으로 분무 영상을 취득하였다.

2.2 분사율 측정장치

Fig. 2는 BOSCH tube법의 원리⁷⁾로 제작된 분사율계와 실험 장비를 나타낸다. 분사기와 축압기

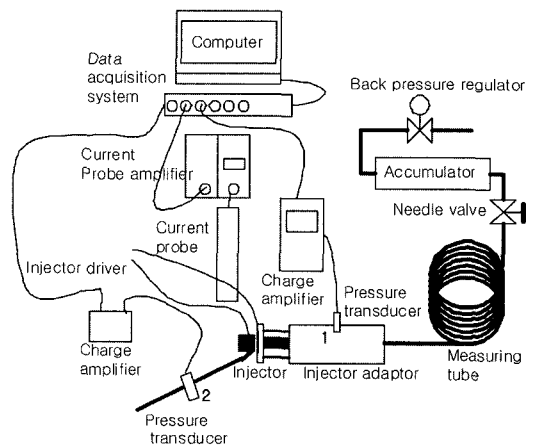


Fig. 2 Schematic diagram of injection rate meter

사이의 연료공급라인에는 압력센서(4067A 2000, piezo-eletric type, Kistler Ltd)를 설치하였다. 분사기 구동장치의 전류를 측정하기 위하여 전류측정장치(A6303 Current probe, Tektronix Ltd)를 사용하였으며, 측정값은 데이터취득장치(data acquisition system)를 이용해 300 kHz의 주기로 PC에 저장하였다.

2.3 분사율계와 연료 공급 라인에서의 음속

분사율은 hydraulic pulse의 원리가 적용된 분사율계를 통해 측정된 압력과로써 계속된다. 측정된 압력과 유속의 관계는 식 (2)와 같다.

$$dp = \rho du^2 \tag{2}$$

여기서 c는 음속, ρ는 밀도를 의미한다.

측정관 내의 음속은 측정관내에서 반사파가 이동한 거리를 측정된 압력과와 반사파 사이의 시간으로 나누어서 계산하였고, 연료공급라인에서 음속은 분사기와 연료공급라인에 있는 압력센서와의 거리를 달리하여 측정하였다.

$$c = \sqrt{E/\rho} \tag{3}$$

식 (3)은 체적탄성계수(modulus of elasticity, E)와 밀도(ρ)와 음속(c)의 관계를 보여준다. Table 1은 식 (3)으로 계산한 값과 실험적으로 얻은 값을 나타낸다. Point 1과 Point 2 (at Fig. 2)에서 디젤의 음속은 변화가 거의 없는 반면, DME의 경우 높은 압축성으로 인한 음속의 변화가 상당하다. 분사율계에서 압력센서는 노즐 팁에서 50 mm 떨어진 지점에 위치하여 압력파를 감지한다. 연료 공급라인에서 관찰되는 압력파는 두 곳에서 발생하는데, 이는 분사기에서 연료가 밸브 컨트롤 챔버(valve control chamber)와 노즐 챔버 볼륨(nozzle chamber volume)으로 공급되

Table 1 Acoustic velocity in the measuring tube and the fuel delivery line

	DME	Diesel
Bulk modulus (E) [10 ⁸ N/m ²]	6.37 ⁸⁾	14.9 ⁸⁾
Density [kg/m ³] (@20℃)	668 ⁸⁾	829.3 ⁸⁾
Calculated acoustic velocity [m/s]	977	1340
Measured acoustic velocity at point 1 in Fig. 2 [m/s]	990	1430
Measured acoustic velocity at point 2 in Fig. 2 [m/s]	1200	1430

Table 2 Delay of the pressure pulses between the two pressure transducers

	DME	Diesel
Delay between the nozzle tip and the point 1 in Fig. 2 [μs]	50.5	35.0
Delay between the nozzle chamber volume and the point 2 in Fig. 2 [μs]	266	223.8
Delay between the valve control chamber and the point 2 in Fig. 2 [μs]	133	111.9

기 때문이다. 연료 공급 라인에 있는 압력센서부터 밸브 컨트롤 챔버와 노즐 챔버 볼륨 사이의 거리는 각각 약 160 mm와 약 320 mm이다. 따라서, 식 (2), (3)을 통해 측정위치에 따른 압력과 발생 후 지연시간을 계산할 수 있으며, 이를 Table 2에 나타낸다.

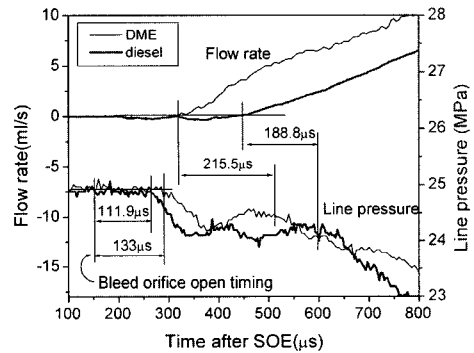


Fig. 3 Delays between the measured pressure pulses

Fig. 3은 분사기에 전압을 가한 시점(start of energizing, SOE)을 기준으로 하여 분사압이 25 MPa인 DME와 디젤 연료를 분사하여 측정된 분사율과 연료 공급라인부터 측정된 압력사이에서 발생하는 시간차를 보여주고 있다. Fig. 3에서 알 수 있듯이 분사기와 공급라인의 압력은 DME와 디젤 연료 각각 215.5 μs와 188.8 μs의 시차로 관측된다. 반사된 압력파는 무시하더라도 연료 공급라인에서 측정된 압력은 두 신호가 중첩되어 나타나므로 신호의 명확한 구분은 어려우나, 한쪽이 정상상태인 경우에는 독립적인 압력 변화를 측정할 수 있다. 분사가 시작되기 전에 블리드 오리피스(bleed orifice)에서 발생하는 압력파에서 밸브 컨트롤 챔버와 연료공급라인의 시차를 고려하면 연료에 관계없이 약 150 μs에 블리드 오리피스가 열리기 시작했음을 예측할 수 있다.

3. 실험 결과 및 토의

연료와 분사압력에 관계없이 정상적인 분사가 되었을 때 분사 유량을 5.7 mg/stroke로, 그리고 분사울계의 배압은 0.3 MPa로 일정하게 유지하였다.

3.1 분사 압력에 따른 분사율과 연료 공급라인의 압력의 변화

Fig. 4는 DME와 디젤연료의 분사압력에 따른 분사율과 연료라인의 압력변화를 나타낸다. 분사기의 솔레노이드 밸브에 전류가 인가되고 블리드 오리피스 가 열리면서 압력강하가 분사 압력이나 연료에 따라 큰 변화 없이 약 1~1.3 MPa 정도 나타난다. 이어서 분사가 시작되면서 추가적인 압력 강하가 약 1.5~4 MPa 정도 발생한다. 이 때 정량적인 크기는 분

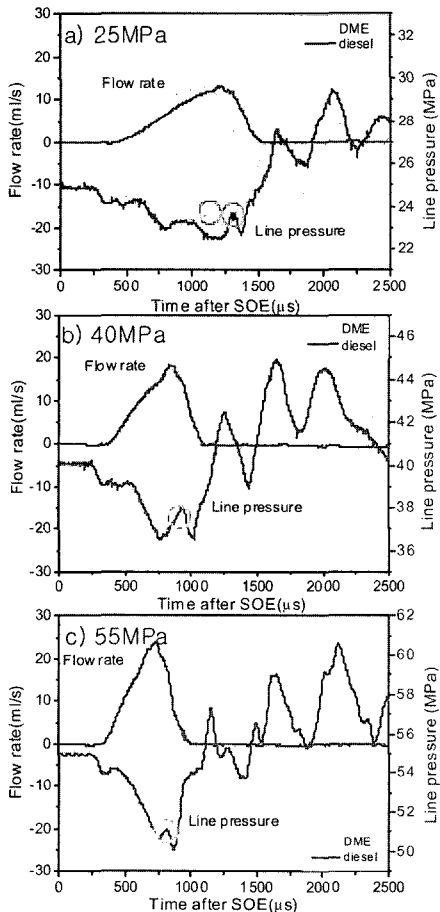


Fig. 4 Effect of injection pressure on injection rate and fuel line pressure a) 25 MPa b) 40 MPa c) 55 MPa

사압력에 따라 변하지만, 연료에 따른 차이는 없었다. 같은 질량을 분사하였으나 밀도의 차이로 DME가 디젤 연료에 비해 분사 체적이 약 1.26배 큰 것을 알 수 있다. Fig. 4에 원으로 표시된 부분은 솔레노이드에 인가된 전류가 중단되어 나타나는, 즉 블리드 오리피스가 닫히면서 발생하는 압력파로 예상된다. 압력관 내의 분사지연(분사개시 신호 이후의 관내 압력강하)은 압축성, 그리고 낮은 음속에 따른 압력과 전달의 지연으로 인해 DME의 경우가 디젤보다 설정압력에 따라 0.1~0.2 ms 더 길게 나타남을 알 수 있다. 그러나, 높은 체적팽창계수 및 낮은 연료 밀도(낮은 초기소요 운동량)를 반영하듯, 최초 연료 분출시점은 오히려 보다 이르며, 빠른 분사율의 증가는 압력관 내의 지연현상을 보상하고 있다. 그러나, 연료의 물성에 따른 분사지연의 차이는 분사압력이 증가할수록 감소한다.

3.2 고전류 유지시간에 따른 분사율의 변화

Fig. 5, 6은 DME와 디젤연료의 고전류 유지시간 (high-current holding time)에 따른 분사율의 변화를 나타낸다. 분사시간은 그대로 유지하고, 분사기 구동장치의 고전류 유지시간의 최소값인 100 μs에서 정상적인 분무가 확인된 400 μs까지 고전류 유지시간을 변화시켰다. 이전의 연구⁹⁾에서 DME의 고전류 유지시간이 200 μs일 경우 ‘분무 중단 후 재분무’되는 현상이 관찰되었는데, Fig. 5에서도 마찬가지로 DME의 경우 고전류 유지시간 200 μs를 전후로 분사 중단 현상이 나타났으며, 이는 분사압력에 관계없이 관찰되었다. 고전류 유지시간이 100 μs인 경우는 분사압력에 관계없이 솔레노이드에 충분한 자기장이 생성되기까지 더 많은 시간이 소요되므로 분사지연은 약 20~30 μs 정도 증가한다. 또한 Fig. 5(c)에서 확인할 수 있듯이, 분사시간과 고전류 유지시간이 거의 같을 경우 전류 공급이 중단되어도 솔레노이드에 자기장이 소멸되지 않아서 분사율의 증가경향이 유지됨을 확인할 수 있다. 디젤 연료의 경우 고전류 유지시간이 변하여도 분무가 중단되는 현상은 발생하지 않는다(Fig. 6). 하지만 DME와 같이 고전류 유지시간이 너무 짧은 경우에는 분사지연이 길어지고 분사압력이 25 MPa일 경우에 가장 크다.

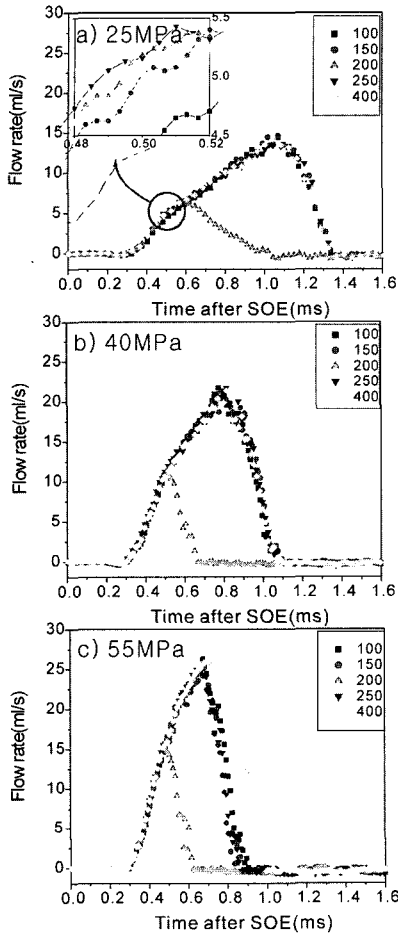


Fig. 5 Effect of high-current holding time on injection rate of DME (a) 25 MPa (b) 40 MPa (c) 55 MPa

현재는 DME 분무가 특정 고전류 유지시간에 중단되는 현상의 원인을 명료하게 설명하기 어렵다. 따라서 현상의 해명을 위해서는 분사기 내의 유동 및 기구학적 특성 등을 모두 고려한 추가적인 상세 연구가 필요하다.

3.3 분사율을 이용한 분무도달거리 예측

분무가 완전히 발달되지 않은 영역에서 분무 선단거리를 나타내는 식을 적용할 때의 가장 큰 문제는 압력차(ΔP)를 쉽게 구할 없다는 점이다. 일반적으로 분사설정압력과 분위기 압력의 차이를 ΔP 로 생각하기 쉬우나, 실제 분사기 내부에서는 압력변화가 급격하게 일어날 뿐만 아니라, 설정분사압력에 도달하기까지 비정상적(unsteady) 단계를 거치므

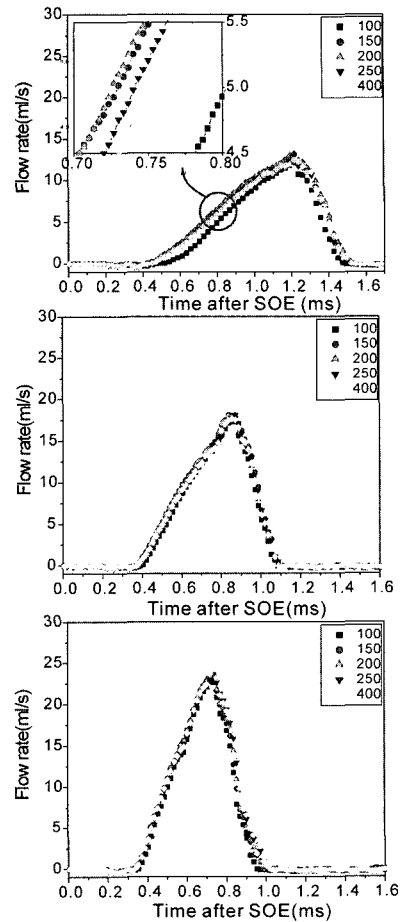


Fig. 6 Effect of high-current holding time on injection rate of diesel fuel (a) 25 MPa (b) 40 MPa (c) 55 MPa

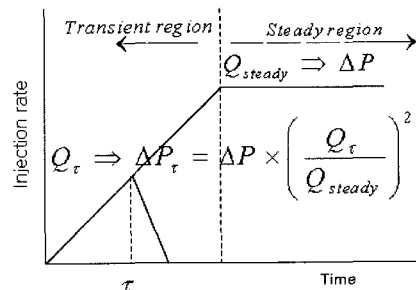


Fig. 7 Developing process of injection rate to steady regime

로 압력 발달과정을 무시해서는 안 된다. 따라서 본 연구에서는 분사율을 이용하여 간접적으로 비정상과정을 고려한 ΔP 를 구하고, 이를 식 (1)에 적용하였다.

분사개시 후(start of injection, SOI)이후 시간 t에서의 분무도달거리는 다음과 같은 가정과 절차에 의해서 구해진다.

- 1) 분사초기의 분무 도달거리를 준정상상태의 분사 조건에서 얻는다.
- 2) 분사 개시 후 시간 $\tau(0 < \tau \leq t)$ 에서 분사된 연료들은 상호작용 없이 독립적으로 진행한다.
- 3) 분사율이 일정해지는 시기의 커먼레일의 압력과 분위기 압력의 차이가 ΔP 이다.
- 4) 분사개시 후 시간 τ 에서의 압력비 ($\Delta P\tau/\Delta P$)는 시간 τ 에서의 분사율(Q_τ)과 균일 분사율 (Q_{steady})의 비의 제곱에 비례한다.

$$\frac{\Delta P_\tau}{\Delta P} = \left(\frac{Q_\tau}{Q_{steady}} \right)^2 \quad (4)$$

- 5) 분사개시후 시간 $\tau(0 < \tau \leq t)$ 에서 분무 도달거리(S_τ)는 식 (5)로부터 구한다.

$$S_\tau = 3.07 \left(\frac{\Delta P}{\rho_g} \right)^{0.25} (d_o(t-\tau))^{0.5} \left(\frac{295}{T_g} \right)^{0.25} \quad (5)$$

- 6) 시간 t에서의 분무 도달거리(S)는 분사개시 후 시간 $\tau(0 < \tau \leq t)$ 에서 구한 S_τ 중 최대값이다(식 (6)).

$$S = \text{MAX}_{0 < \tau \leq t} S_\tau \quad (6)$$

분사율이 일정하게 되도록 분사 시간을 길게 하였고, 균일 분사율은 최고 분사율의 90 % 되는 지점으로 정의하였다. Table 3은 압력에 따른 DME와 디젤의 분사율이 일정하게 되는데 걸리는 시간을 나타낸다. 분사압력이 25 MPa일 경우에는 DME와 디젤의 차이가 다소 크나, 분사압력이 증가할수록 거의 같아지고 분사율이 일정하게 되는 시간도 줄어든다.

Fig. 8, 9는 각각 DME와 디젤연료를 분위기 압력 3 MPa에서 분사하여 얻은 이미지에서 구한 실험값과, 분사율을 이용하여 Dent의 식에 적용한 예측값

Table 3 Time to reach the steady state in the injection rate

Injection pressure(MPa)	DME (time after SOI, μ s)	Diesel (time after SOI, μ s)
25	1105	1393
40	800	817
55	630	633

을 비교한 결과이다. Fig. 8에서 확인할 수 있듯이, DME의 경우 계산값의 변화경향은 실험값과 유사하지만, 정량적으로 약 10 % 정도 낮은 수준을 나타낸다. 반면, Fig. 9의 디젤의 경우에는 전반적으로 약 25 %의 비교적 큰 차이를 보이는데, 이는 나중에 분사된 연료들이 이전에 분사된 연료액적들을 추월하면서 미치는 간섭 때문으로 생각된다. 따라서 이는 식 (2)의 기반이 되는 자유분무, 혹은 가스제트 혼합 모델의 가정으로부터 벗어나는 원인이 된다. 결과적으로 쉽게 기화되는 DME의 물성자체의 영향으로, 분사율이 정상상태에 도달하기까지의 초기분사 거동을 고려하여 적용한 예측식은 디젤의 경우에 비해 실험결과와 잘 일치하였다.

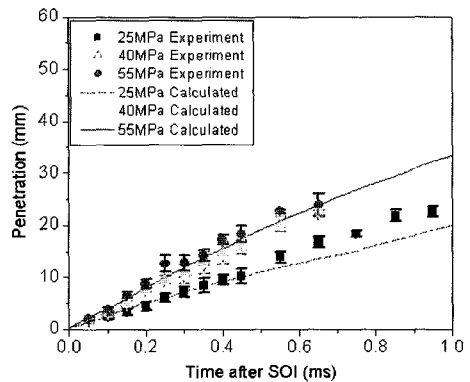


Fig. 8 Comparison of spray penetrations between the measured and the calculated values for DME at chamber pressure of 3 MPa

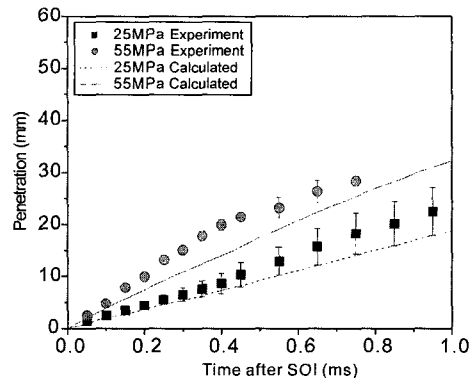


Fig. 9 Comparison of spray penetrations between the measured and the calculated values for diesel fuel at chamber pressure of 3 MPa

4. 결론

커먼레일형 분사장치와 BOSCH 형의 분사울계를 사용하여 DME와 디젤 연료의 분사울을 측정된 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) DME의 음속은 디젤보다 느리며, 분사울은 높은 압축성의 영향을 받는다.
- 2) 분사울과 연료공급라인의 압력에서 발생하는 압력파를 측정하여 분사장치의 작동 상태를 간접적으로 예측할 수 있었다.
- 3) 압력관 내의 분사지연은 DME가 디젤연료 보다 길지만, 초기 분출시점 이후의 빠른 분사울 증가를 통해 지연현상을 보상하며, 분사압력이 증가할수록 분사지연의 차이는 감소한다.
- 4) 분사압력에 관계없이 DME의 경우, 고전류 유지 시간이 200 μ s 전후일 때 분사울이 분사 도중에 급격히 감소하는 현상이 나타났다.
- 5) 분사울을 이용한 분무도달거리를 예측법을 Dent 모델에 적용하여 계산한 결과, DME의 경우가 디젤연료보다 실험결과와 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 KAIST 연소기술연구센터(CERC)의 연구비 지원에 의해 수행된 결과입니다. 또한 DME 유통 철가제 Infineum R655를 기증해주신 Infineum Korea Ltd에 감사드립니다.

References

- 1) R. Verbeek and J. Van der Weide, "Global

Assessment of Dimethyl Ether Comparison with Other Fuels," SAE 971607, 1997.

- 2) S. Kajitani, "Fundamental Research of DME Diesel Engine Operated with a Common Rail Injection System," 14th ISAF, 2002-VT-13, 2002.
- 3) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Schneyer, "Compression Ignition Delay(Physical+Chemical) of Dimethyl Ether," SAE 2003-01-0759, 2003.
- 4) J. C. Dent, "A Basic for the Comparison of Various Experimental Methods for Studying Spray Penetration," SAE 710571, 1971.
- 5) H. Hiroyasu. and M. Arai, "Structure of Fuel Sprays in Diesel Engines," SAE 900475, 1990.
- 6) J. D. Naber and D. Siebers, "Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays," SAE 960034, 1996.
- 7) W. Bosch, "The Fuel Rate indicator: A New Measuring Instrument For Display of the Characteristics of Individual Injection," SAE 660749, 1966.
- 8) P. Kapus and H. Ofner, "Development of Fuel Injection Equipment and Combustion System for DI Diesels Operated on Dimethyl Ether," SAE 950062, 1995.
- 9) J. Yu, J. Lee and C. Bae, "Dimethyl Ether (DME) Spray Characteristics Compared to Diesel in a Common-rail Fuel Injection System," SAE 2002-01-2898, 2002.