

고압 분사 인젝터의 분사 시기에 따른 DME 분무특성에 관한 실험 및 해석적 연구

김형준* · 박수한* · 이창식†

Experimental and Numerical Investigation on DME Spray Characteristics as a Function of Injection Timing in a High Pressure Diesel Injector

Hyung Jun Kim, Su Han Park and Chang Sik Lee

Key Words: Injection timing(분사 시기), Diesel injector(디젤 인젝터), Dimethyl ether(DME), High pressure injection(고압 분사), Spray characteristics(분무 특성)

Abstract

The purpose of this study is the experimental and numerical investigation on the DME spray characteristics in the combustion chamber according to the injection timing in a common-rail injection system. The visualization system consisted of the high speed camera with metal halide lamp was used for analyzing the spray characteristics such as spray development processes and the spray tip penetration in the free and in-cylinder spray under various ambient pressure. In order to observe the spray characteristics as a function of injection timing, the piston head shape of re-entrant type was created and the fuel injected into the chamber according to various distance between nozzle tip and piston wall in consideration of injection timing. Also, the spray and evaporation characteristics in the cylinder was calculated by using KIVA-3V code for simulating spray development process and spray tip penetration under real engine conditions. It was revealed that the high ambient pressure of 3 MPa was led to delay the spray development and evaporation of DME spray. In addition, injected sprays after BTDC 20 degrees entered the bowl region and the spray at the BTDC 30 degrees was divided into two regions. In the calculated results, the liquefied spray tip penetration and fuel evaporation were shorter and more increased as the injection timing was retarded, respectively.

기호설명

BTDC : before top dead center
 P_{amb} : ambient pressure
 SOE : start of energizing
 TDC : top dead center
 t_{asoe} : time after the start of the energizing

1. 서 론

자동차 기관 내에서 연료의 연소 생성물로 발생하는 배기 배출물은 대기오염의 주원인으로 인식되고 있다. 이 때문에 자동차에서 배출되는 유해 배출물의 규제는 점차 강화되고 있는 실정이다. 또한, 전 세계적인 에너지 소비의 증가로 인한 에너지 수급의 불균형과 강화되는 환경규제를 만족시키기 위해서 대체에너지의 개발 및 연구는 반드시 필요하다. 현재까지 액화석유가스(LPG), 압축천연가스(CNG), 바이오디젤(biodiesel), 바이오에탄올(bioethanol), 디메틸에테르(dimethyl ether, DME) 등의 다양한 대체에너지들이 활발히 연구되고 있다. 이

(2009년 8월 26일 접수 ~ 2009년 9월 14일 심사완료)

*한양대학교 대학원 기계공학부

†책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학부

E-mail : cslee@hanyang.ac.kr

TEL : (02)2220-0427 FAX : (02)2281-5286

런 다양한 대체에너지들 중 DME는 환경친화적이며 디젤연료를 대체할 수 있는 대표적인 연료로 인식되고 있다. DME는 연료 자체에 질량비로 약 35%의 산소를 포함하고 있으며 분자구조가 간단한 에테르이다. 또한, 액화석유가스와 유사한 특성을 가지고 있으며, 높은 세탄가로 인해 디젤 연료보다 좋은 자발화 특성을 가지고 있어 압축착화기관에 적합하다. 또한, 분자구조에서도 알 수 있는 것처럼 탄소와 탄소 간의 직접 결합이 없어 산화반응 시 낮은 soot 배출물을 기대할 수 있다. DME는 천연가스, 석탄, 바이오매스(biomass)등의 다양한 원료로부터 생산이 가능하다. 그러나 낮은 발열량 때문에 동일한 열량을 얻기 위해서는 디젤연료를 사용할 때보다 많은 양의 연료가 필요하며 연료가 가지는 높은 증발압 때문에 연료 저장 및 공급 시스템의 변경이 필요하다.⁽¹⁾ 따라서, DME연료를 압축착화기관에 적용하였을 때 배기가스 저감과 높은 연소효율에 대한 기대 때문에 이에 관한 연구들이 지속적으로 진행되고 있다.

Kim 등⁽²⁻⁴⁾은 고압분사시스템에서 디젤과 DME를 포함한 다양한 연료들의 분무특성을 실험 및 해석적으로 연구하였다. 디젤연료에 비해 DME의 분무는 짧은 도달거리를 가지며 미립화 성능이 우수하다고 하였다. 또한, 고압조건의 실린더내의 증발특성은 DME가 디젤보다 넓은 분포와 빠른 증발특성을 가진다고 보고하였다. Sidu 등⁽⁵⁾과 Li 등⁽⁶⁾은 정적챔버내에서 다양한 분위기 조건에 따른 DME 분무와 증발특성에 관한 실험적 연

구를 수행하였다. 그들은 챔버내의 압력이 증가할수록 분무도달거리는 감소하고 분무각은 증가한다고 하였으며 고온의 분위기 조건에서는 디젤보다 DME분무가 빠른 증발을 보인다고 하였다. 또한, 커먼레일 분사시스템에서의 DME의 분무 도달거리는 분사압력보다는 분위기 압력에 더 많은 영향을 받는다고 He 등⁽⁷⁾의 연구에서 보고 되었다. DME 연료의 연소특성에 관해서는 Kim등⁽⁸⁾이 커먼레일 분사시스템을 가진 단기통 디젤엔진에서의 DME 연료의 연소 및 배기특성을 연구하였다. 그들은 동일한 운전조건에서 질소산화물(NO_x)은 디젤에 비해 다소 높은 배출량을 보이나 일산화탄소(CO)와 미연탄화수소(HC)는 저감된다고 하였다. Gui 등⁽⁹⁾은 DME 연료의 연소 및 배기특성에 관한 수치해석적 연구를 수행하였으며 빠른 점화시기와 낮은 최대연소압력을 보인다고 하였다.

그러나 다양한 분사시기에 따른 DME연료의 분무특성에 관한 연구결과는 아직 불분명해서 체계적인 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 커먼레일 고압 분사시스템을 이용하여 고압 챔버에서의 분사 및 분위기 조건에 따른 분무 특성을 비교하였다. 또한, 연소실 내의 분위기 조건에서 분사시기에 따른 분무 특성도 분석하였다. 수치해석적 연구로는 KIVA-3V를 사용하여 실제 연소실 조건에서의 분사시기에 따른 분무 및 증발 특성을 해석적으로 연구하였다.

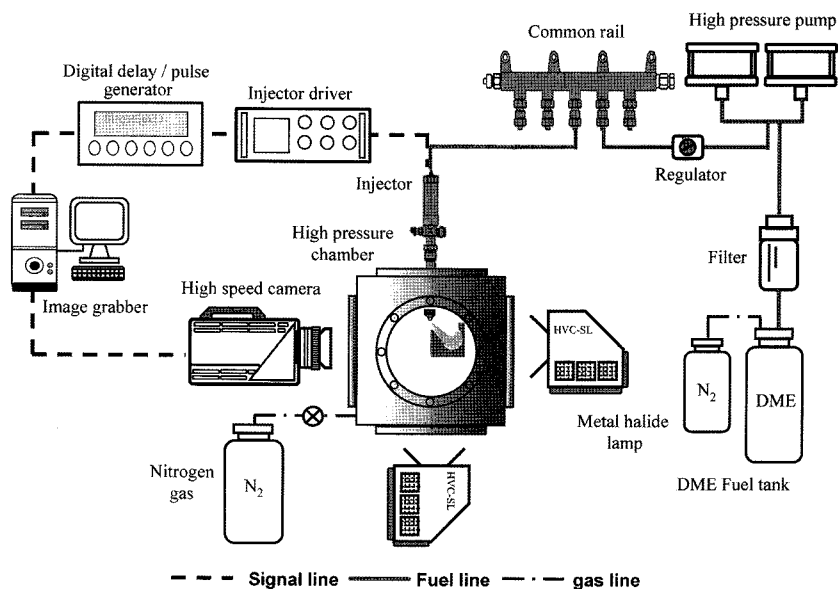


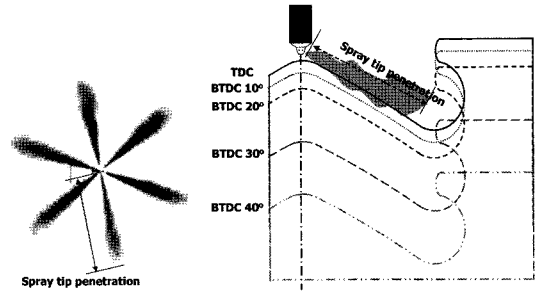
Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 연소실 내에서의 DME 분무 거동을 분석하기 위해 Fig. 1과 같은 고속카메라와 광원들로 구성되는 DME 분무 가시화 장치를 구성하였다.

DME 연료는 상온, 상압에서 기체상태이기 때문에 질소가스로 약 0.5 MPa 이상 가압하여 액화시켜 고압펌프로 공급하였다. 연료 필터를 이용하여 액상 DME 연료 내의 이물질 제거하였으며, 고압의 연료를 안정적으로 공급하기 위해 병렬로 연결된 고압펌프와 커먼레일 분사 장치를 이용하였다. DME의 연료는 분공크기 0.128 mm인 슬레노이드형 6공 인젝터를 이용하여 분사하였으며, 인젝터 드라이버(TEMS, TDA 3200H)를 통해 통전기간 등을 제어하였다. 분사된 DME 연료는 고속카메라(Photron, Fastcam-APX RS)를 이용하여 자유분무 시에는 아래에서 측정하였고 연소실 내에서의 분무 거동은 측면에서 가시화 되었으며, 광원으로는 150W의 출력을 갖는 메탈-할라이드 램프(Photron, HVC-SL) 2개를 사용하였다. 고속카메라와 인젝터는 디지털 신호 발생기(Berkeley Nucleonics Corp, Model 555)를 이용하여 동기화하였다. 고압 채임버는 자유분무 시에는 대기압과 질소가스를 이용하여 3.0 MPa로 가압하였으며 연소실 내의 분사 시에는 3.5 MPa로 가압하였다. 자유분무와 연소실 내 분무에 관한 자세한 실험조건은 Table 1에 나타내었다.

Figure 2는 자유분무와 연소실 내의 분무 시 분무도달 거리의 정의를 나타낸 그림이다. 연소실 내의 분무를 모사하기 위하여 Fig. 2(b)와 같은 re-entrant 형 피스톤 형



(a) Free spray

(b) In-cylinder spray

Fig. 2 Definition of spray tip penetration and locations of piston head according to the injection timing

상을 아크릴 재질을 사용하여 가공하였으며 분사시기에 따른 노즐팁과 피스톤헤드 간의 거리(1500 rpm 기준)는 Table 1에 나타나 있는 대로 조절하여 실험하였다. 또한, 분무도달거리의 정의는 노즐 팁에서부터 분무의 끝 단까지의 최대 거리로 정의하였다.

3. 분무 및 증발 해석 모델

본 연구에서는 엔진 연소실 내에서의 분사시기에 따른 분무 및 증발 특성을 분석하기 위하여 KIVA-3V release 2 code⁽¹⁰⁾를 사용하여 수치해석을 수행하였다. 코드 내에 기본 연료 라이브러리에는 기체상태의 DME의 물성치만 있어 액상 DME 연료의 물성치들을 Teng등⁽¹¹⁻¹⁵⁾에 의해 제안된 온도에 따른 식을 기반으로 하여 연료 라이브러리를 생성하였다. Re-entrant 타입의 연소실 형상은 격자생성 프로그램을 사용하여 6공 인젝터를 고려하여 60도의 부채꼴 모양으로 생성하였다. 고압으로 분사되는 분무의 분열과 미립화 현상을 예측하기 위하여 Kelvin-Helmholtz & Rayleigh-Taylor 복합 액적 분열 모델⁽¹⁶⁾을 사용하여 해석하였다. 또한, 연소실 내의 난류 유동 및 흐름을 해석하기 위하여 RNG k-ε 모델⁽¹⁷⁾을 사용하였다. 분무의 벽면 충돌 후 과정은 spray-wall interaction 모델⁽¹⁸⁾을 사용하여 예측하였으며 단일 액적의 내부 및 외부간의 열전달을 고려한 증발모델⁽¹⁹⁾을 사용하여 해석하였다. 실제 엔진 연소의 분위기 조건을 모사하기 위하여 압축비 17.8의 실린더에서 흡기밸브가 닫히는 시점인 BTDC 128°의 분위기 압력과 온도의 초기조건은 0.1 MPa와 320K으로 설정하였다.

Table 1 Experimental conditions

	Free spray	In-cylinder spray
Injection system	Common-rail	
Fuel	DME (CH ₃ OCH ₃)	
Hole diameter	0.128 mm	
Number of holes	6	
Injection pressure	60 MPa	
Energizing duration	1.0 ms	
Nozzle position	-	0mm (TDC) 0.72mm (BTDC 10°) 2.85mm (BTDC 20°) 6.30mm (BTDC 30°) 10.1mm (BTDC 40°)
Ambient pressure	0.1MPa, 3.0MPa	3.5MPa

4. 실험결과 및 고찰

4.1 분위기압력에 따른 자유분무의 분무발달

가시화 장치를 통하여 취득한 분무영상의 시간에 따른 분무발달을 비교 분석하였다.

Figure 3은 분사압력 60 MPa에서 통전 후 0.5 ms부터 2.0 ms까지 분위기 압력에 따른 분무 발달 과정을 비교한 것이다. 분사가 시작된 후 노즐입구의 높은 압력에 의하여 분무가 빠르게 성장하는 것을 볼 수 있다. 대기압($P_{amb}=0.1$ MPa)의 분위기 압력조건에서는 분위기 압력이 3 MPa일 때 보다 훨씬 빠른 분무의 성장을 보이는 것을 알 수 있으며 분무 형태는 좁고 긴 형태가 나타났다. 또한, 분무 끝과 외곽에서는 흐린 이미지를 나타내고 있는데 이는 분무 끝과 외곽에서는 많은 분열에 의한 액적의 증발 때문인 것으로 판단된다. 통전 후 2.0 ms에서는 분무이미지가 매우 흐린 것을 볼 수 있는데 이는 DME 연료의 높은 증발압력으로 인하여 연료가 거의 증발하였기 때문인 것으로 판단된다. 분위기 압력 3 MPa에서는 체임버 내의 높은 분위기 압력으로 인한 밀도의 증가가 분무 발달을 지연시키는 것을 알 수 있다. 이로 인하여 분무 폭이 넓어지며 분위기 압력이 연료의 증발압보다 높아 통전후 2.0 ms에서도 증발이 지연되는 것을 볼 수 있다. 분위기 압력의 증가는 분무성장을 둔화시키며 분사후의 시간의 경과에 분무도달 거리는 현저하게 지연되는 경향을 나타내었다.

Figure 4는 분위기 압력에 따른 6개의 인젝터 분공에서 분무 도달 거리와 평균 분무 도달 거리를 나타낸 그림이다. 분사 신호 입력 후 약 0.3 ms까지 분무 지연 시간이 나타난 후 분사가 시작되는 것을 알 수 있다. 또한, 6개의 분공에서 분사되는 분무의 도달 거리들은 분위기 압력이 대기압의 경우가 3 MPa의 분위기 압력의 경우

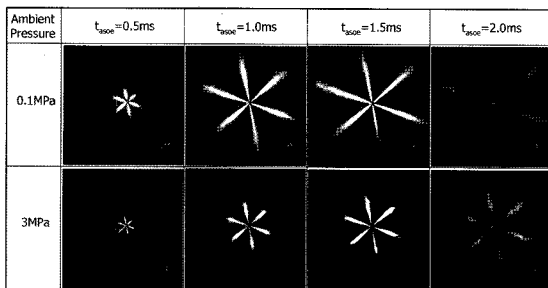


Fig. 3 Effect of the ambient pressure on the spray development process according to time after the start of the energizing

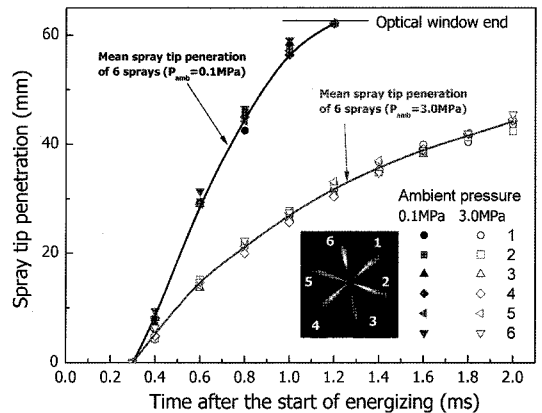


Fig. 4 Effect of the ambient pressure on the spray tip penetration of six sprays and mean value according to time after the start of the energizing

보다 약간 더 큰 분공별 차이를 보이고 있는데 이는 대기압의 경우에 분무들의 끝단에서의 증발이 불규칙하게 많이 일어난 것으로 판단된다. 분위기 압력이 대기압 조건인 경우에 분무 도달 거리는 급격히 증가하는 것을 볼 수 있으며 그 차이는 시간이 지남에 따라 커진다. 분위기 압력이 3 MPa의 경우에는 분무 도달 거리의 증가율이 통전후 1.0 ms이후 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 분사가 끝난 이후 액적이 가진 모멘텀이 분위기 압력에 의해 급격히 감소하면서 분무 도달 거리의 증가가 지연되는 것으로 판단된다.

4.3 분사 시기에 따른 연소실 내의 분무발달

분사시기에 따른 연소실 내의 분무 발달 과정을 보기 위하여 각각의 분사시기에서의 노즐 팁과 실린더 헤드까지의 거리는 엔진 회전 속도 1500 rpm을 기준으로 설정하여 분사하였다.

Figure 5는 분사압력 60 MPa과 분위기 압력 3.5 MPa의 통전후 1.0 ms와 2.0 ms에서의 분사시기에 따른 분무 발달 과정을 나타낸 그림이다. 분사시기에 따라 분무의 충돌 위치가 다른 것을 볼 수 있다. DME연료가 BTDC 20° 이후에 분사되면 실린더 보울(bowl)내로 분무가 모두 유입되는 것을 알 수 있다. TDC에서의 분사는 보울 벽면 충돌 후 분무가 보울 면을 따라 상승하며 BTDC 20°의 경우에는 충돌 후 아래 벽면을 따라 진행되는 것을 알 수 있다. BTDC 30°에서의 분무는 피스톤 헤드의 스퀴시(squish) 영역과 보울 내로 나누어 분무가 유입되는 것을 볼 수 있다. 또한, 충돌 후 분무는 각 영역으로 벽면을 따라 진행되는 것을 알 수 있다. 따라서,

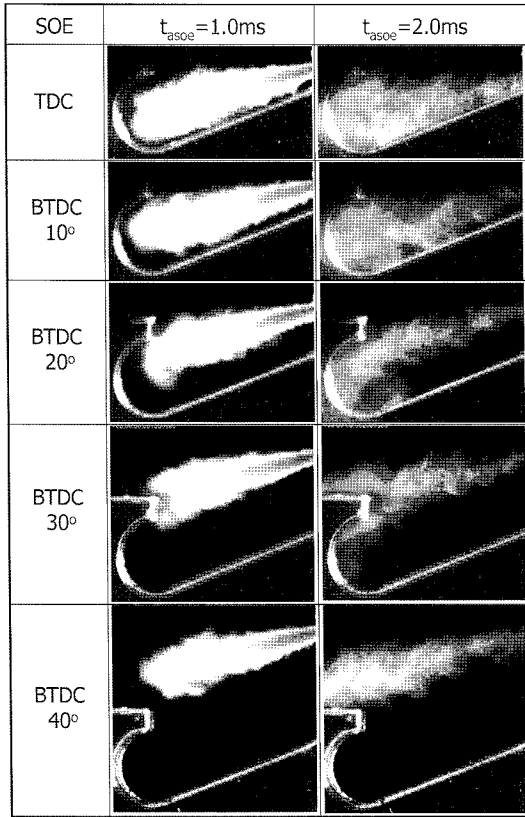


Fig. 5 Effect of the injection timing on the spray development process at the 60 MPa of injection pressure according to time after the start of the energizing ($P_{amb}=3.5$ MPa)

연소시 두 공간에서의 연소가 가능할 것으로 판단된다. BTDC 40°에서의 분무는 피스톤 헤드의 스퀴시 영역으로만 진행되는 것을 볼 수 있는데 이렇게 진행된 분무는 피스톤 벽면과 실린더 사이의 크레비스(crevice) 영역으로 연료가 유입될 것으로 판단된다.

분사시기에 따른 벽면 충돌 전과 후의 분무 도달 거리는 Fig. 6에 나타내었다. 벽면 충돌 전의 분무 도달 거리는 분사시기에 관계없이 0.8 ms까지 증가하다가 분무가 끝나는 시점인 1.0 ms 이후 증가율이 둔화되는 것을 볼 수 있다. 또한, 충돌 전의 분무 도달 거리는 동일한 분위기 압력 때문에 거의 비슷한 것으로 나타났다. BTDC 20°에서의 분무는 실린더 보울의 상단에 충돌 후 보울의 벽면을 따라 충돌 후 분무 도달 거리가 지속적으로 증가하는 것을 알 수 있다. BTDC 30°에서의 분무는 두 영역으로 나뉘어 진행된 후 보울 내로 유입된 분무 길이는 보울 벽면을 따라 서서히 증가하는 것으로

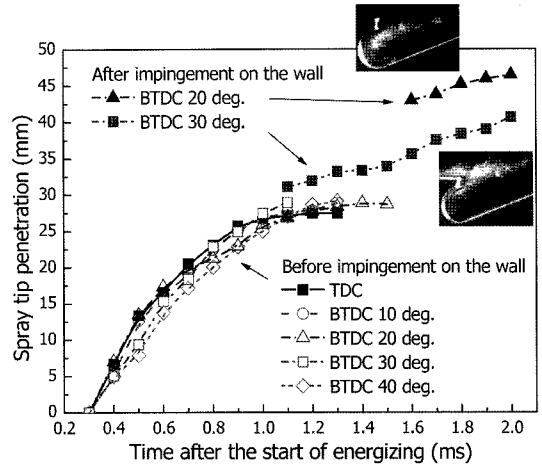


Fig. 6 Effect of the injection timing on the spray tip penetration before and after impingement on the wall according to time after the start of the energizing

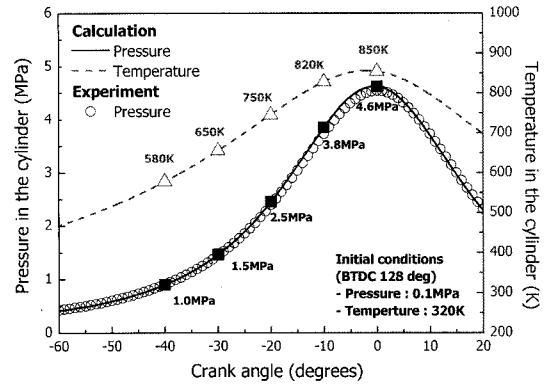


Fig. 7 The calculated ambient pressure and temperature in the cylinder according to the crank angle

나타났다.

4.3 연소실 내의 분무 및 증발 특성 해석

Figure 7은 크랭크 각도에 따른 연소실 내의 분위기 온도와 압력의 계산치를 나타낸 것이다. BTDC 128°에서의 초기조건으로부터 연소실은 압축되기 시작하여 분위기 온도는 선형적으로 분위기 압력은 포물선 형태로 증가하는 것을 알 수 있다. BTDC 40°에서 TDC까지 분위기 온도는 580K부터 850K, 분위기 압력은 1.0 MPa부터 4.6 MPa의 범위를 가지는 것으로 나타났다. 따라서, 분사시기가 지각될수록 연소실 내의 압력과 온도는 높아지며 이 조건에서 분사가 진행되는 것을 알 수 있으며 이런 분위기 조건은 분무특성에 영향을 줄 것으로

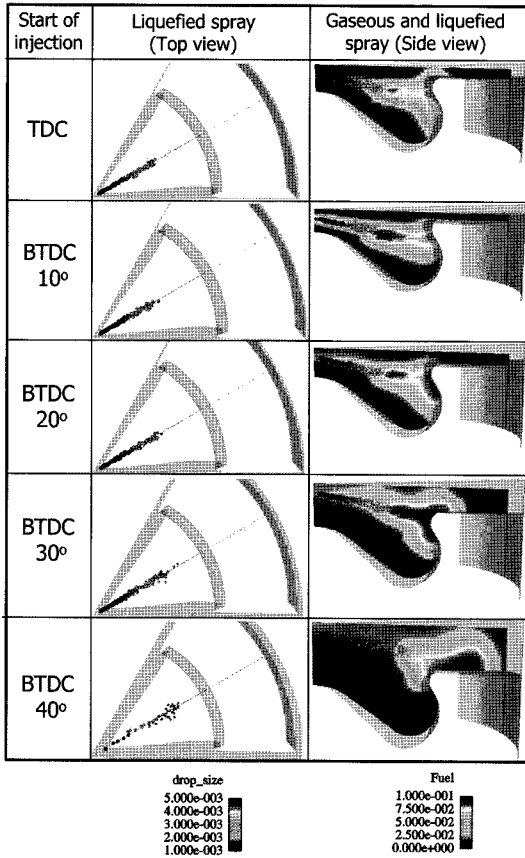


Fig. 8 Effect of the injection timing on the calculated gaseous and liquefied spray distribution according to time after the start of the injection

판단된다.

분사시기에 따른 분사 후 10° 후 윗면과 측면 각도에서 계산된 기상과 액상의 분무 분포는 Fig. 8에 나타내었다. 액상 분무의 분포에서 분무가 인젝터로부터 멀어질수록 액적의 크기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 분무의 끝단에서의 주변기체의 영향으로 인한 분열 및 증발에 따른 것으로 볼 수 있다. 또한, 분사시기가 지각될수록 액상 분무의 길이가 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 분사시기가 지각될수록 분위기 압력이 증가되어 분무 발달을 방해하기 때문인 것으로 판단된다. 우측의 기상 및 액상의 분무 분포에서 Fig. 5에서의 실험결과와 유사한 경향을 보여주는 것을 알 수 있다. 또한, 기상분포에서 알 수 있듯이 분무 끝단에서 증발이 가장 활발히 일어나는 것도 볼 수 있다. 또한, 분무가 벽면에 충돌 시 벽면의 높은 온도(약 450~500K) 인하여 높은 레벨의 증기 분포도를 보이는 것으로 나타났다.

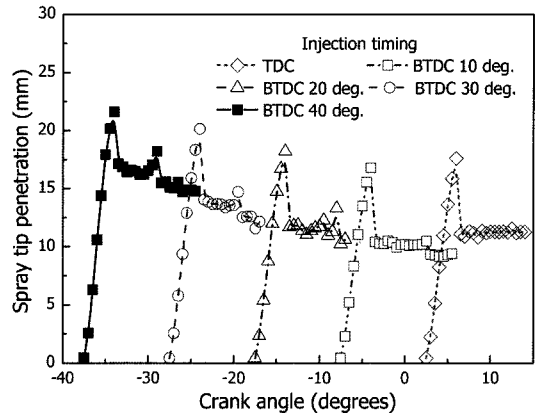


Fig. 9 Effect of the injection timing on the calculated spray tip penetration in the cylinder according to the crank angle

Figure 9는 분사시기에 따른 계산된 분무 도달 거리를 나타낸 그림이다. 분무 도달 거리는 분사시작시점부터 노즐 입구의 높은 압력에 의하여 급격히 증가한다. 분사시기가 진각될수록 분무 도달 거리의 최대 길이가 길어지는 것을 볼 수 있는데 이는 분사시점에서의 분위기 압력과 온도가 분사시기가 진각되면 낮아지기 때문이다. 또한, 분무 도달 거리가 갑자기 떨어지는 구간은 DME 연료의 증발 특성과 분위기 조건에 의해 빠른 증발이 일어나기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 고압 분사시스템과 고압 체임버를 이용하여 분위기 조건에서의 자유 분무 특성과 연소실 형상에서 분사시기에 따른 분무 특성들을 분석하였다. 또한, KIVA-3V를 사용하여 실제 연소실 조건에서 분사시기에 따른 분무 및 증발 특성을 해석적으로 연구하였으며 다음과 같은 결론은 얻었다.

1. 분위기 압력의 증가는 분무성장을 둔화시키며 분사후의 시간의 경과에 분무도달 거리는 현저하게 지연되는 경향을 나타내었다.
2. 분사시기가 BTDC 20° 이후에 분사되면 실린더 보울 내로 분무가 모두 유입되며 BTDC 20°의 경우에는 충돌 후 아래 벽면을 따라 진행되며 BTDC 30°에서의 분무는 피스톤 헤드의 스퀴시 영역과 보울 내로 나누어 분무가 유입되어 충돌 후 분무는 각 영역으로 벽면을 따라 진행되었다. BTDC 40°에서의 분무는 피스톤 헤드

의 스퀴시 영역으로만 진행되었다.

3. 엔진 운전 조건하의 계산결과에서 분무가 인젝터로부터 떨어질수록 액적의 크기가 감소하였으며, 분사 시기가 지각될수록 분위기 압력의 증가로 액상 분무의 길이가 짧아지는 것으로 나타났다. 또한, 계산결과와 기상 및 액상의 분포는 실험결과와 유사한 경향을 보여주었다.

후 기

본 과제는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업 및 환경부 ECO-STAR Project(무·저공해 자동차 사업단)의 지원으로 수행되었습니다. 또한, 2009년도 2단계 두뇌한국21 사업의 지원으로 진행되었으며, 연구를 지원하여 주신 기관에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) S. C. Sorenson, M. Glensvig, and D. L. Abata, "Dimethyl ether in diesel fuel injection system", SAE tech. paper series, 1998, 981159.
- (2) H. J. Kim, H. K. Suh, S. H. Park and C. S. Lee, "An experimental and numerical investigation of atomization characteristics of biodiesel, dimethyl ether, and biodiesel-ethanol blended fuel", Energy&Fuels, Vol. 22, No. 3, 2008, pp. 2091~2098.
- (3) H. J. Kim, H. K. Suh and C. S. Lee, "Numerical and experimental study on the comparison between diesel and dimethyl Ether (DME) spray behaviors according to combustion chamber shape", Energy&Fuels, Vol. 22, No. 4, 2008, pp. 2851~2860.
- (4) H. J. Kim, H. K. Suh, S. H. Park and C. S. Lee, "Atomization and evaporation characteristics of biodiesel and dimethyl ether compared to diesel fuel in a high-pressure injection system", Energy&Fuels, Vol. 23, 2009, pp. 1734~1742.
- (5) X. Sidu, Y. Mingfa and X. Junfeng, "An Experimental Investigation on the Spray Characteristics of Dimethyl Ether(DME)", SAE tech. paper series, 2001, 2001-01-0142.
- (6) J. Li, S. Yoshio and N. Akira, "An Experimental Study on DME Spray Characteristics and Evaporation Processes in a High Pressure", SAE tech. paper series, 2001, 2001-01-3635.
- (7) C. He, Y. Ge, J. Tan and X. Han, "Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of biodiesel and diesel", International Journal of Energy Research, Vol. 32, 2008, pp. 1329~1338.
- (8) M. Y. Kim, S. H. Bang and C. S. Lee, "Experimental investigation of spray and combustion characteristics of dimethyl ether in a common-rail diesel engine", Energy&Fuels, Vol. 21, No. 2, 2007, pp. 793~800.
- (9) B. Gui, T. L. Chan, C. W. Leung, J. Xiao, H. Wang and L. Zhao, "Modeling study on the combustion and emissions characteristics of a light-duty DI diesel engine fueled with dimethyl ether (DME) using a detailed chemical kinetic mechanism", SAE tech. paper series, 2004, 2004-01-1839.
- (10) A. A. Amsden, "KIVA-3V release 2. Improvement to KIVA-3V", Los Alamos National Laboratory, 1999, LA-UR-99-915.
- (11) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Schneyer, "Thermochemical characteristics of dimethyl ether-An alternative fuel for compression-ignition engines", SAE tech. paper series, 2001, 2001-01-0154.
- (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 tech. paper series, 2002, 2002-01-0862.
- (13) 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 tech. paper series, 2003, 2003-01-0759.
- (14) H. Teng, J. C. McCandless and J. B. Schneyer, "Thermodynamic properties of dimethyl ether-An alternative fuel for compression-ignition engines", SAE tech. paper series, 2004, 2004-01-0093.
- (15) H. Teng and J. C. McCandless, "Comparative study of characteristics of diesel-fuel and dimethyl-ether sprays in the engine", SAE tech. paper series, 2005, 2005-01-1723.
- (16) J. C. Beale and R. D. Reitz, "Modeling spray atomization Kelvin-Helmholtz-Rayleigh-Taylor hybrid model", Atomization and Sprays, Vol. 9, 1999, pp. 623~650.
- (17) Z. Han and R. D. Reitz, "Turbulence modeling of internal combustion engines using RNG k-e models", Combustion Science and Technology, Vol. 106, 1995,

pp. 267~295.

- (18) P. J. O'Rourke and A. A. Amsden, "A spray/wall interaction submodel for the KIVA-3 wall film model", SAE tech. paper series, 2000, 2000-01-0271.

- (19) D. B. Spalding, "The combustion of liquid fuels", Fourth Symposium (International) on Combustion, 847, Williams & Wilkins, 1953.