

## 2성분 혼합연료를 이용한 감압비등 분무특성에 관한 연구

명광재\* · 윤준규†

(원고접수일 : 2009년 1월 31일, 원고수정일 : 2009년 4월 27일, 심사완료일 : 2009년 5월 8일)

### A Study on the Spray Characteristics of Flash Boiling Using Two Component Mixing Fuel

Kwang-Jae Myong\* and Jun-Kyu Yoon†

**Abstract :** This experimental study was conducted to investigate macroscopic characteristics of the flash boiling spray with tow component mixing fuel. Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) is a newer combustion method for internal combustion engines to reduce nitrogen oxide and particulate matter simultaneously. But it is difficult to put this combustion method to practical use in an engine because of such problems as instability of combustion in low load operating conditions and knocking in high load operating conditions. In HCCI, combustion characteristics and exhaust emissions depend on conditions of air/fuel mixture and chemical reactions of fuel molecules. The fuel design approach is achieved by mixing two components which differ in properties such as density, viscosity, volatility, ignitability and so on. We plan to apply the fuel design approach to HCCI combustion generated in a real engine, and examine the possibility of mixture formation control using the flash boiling spray. Spray characteristics of two component fuel with a flash boiling phenomenon was investigated using Shlieren and Mie scattering photography. Test fuel was injected into a constant volume vessel at ambient conditions imitated injection timing BTDC of a real engine. As a result, it was found that a flash boiling phenomenon greatly changed spray structure, especially in the conditions of lower temperature and density. Therefore, availability of mixture formation control using flash boiling spray was suggested.

**Key words :** Two component mixing fuel(2성분 혼합연료), Flash Boiling(감압비등), Homogeneous Charge Compression Ignition(예혼합 압축착화), Spray Characteristics(분무특성)

#### 1. 서 론

최근에 연구가 활발히 진행되고 있는 예혼합 압

축착화(HCCI)방식의 기관은 혼합기의 균일 희박 화에 의해 저온연소가 가능함으로써 NO<sub>x</sub>와 PM 을 동시에 저감시킬 수 있는 장점을 가지고 있다

† 교신저자(경원대학교 기계·자동차공학과, E-mail:jkyoon@kyungwon.ac.kr, Tel: 031-750-5651)

\* 조선이공대학 자동차과

[1]. 그러나 저부하영역에서 연소의 불안정성과 고부하영역에서 발생하는 노킹으로 인하여 운전부하 조건에 따라 제한을 받는 문제점이 있다. 이와 같은 연구로서 Christensen 등<sup>[2]</sup>은 예혼합 흡기를 형성하는 압축착화기관에서 저부하영역에서 HC배출량이 피스톤 Crevice 형상 내에 많이 형성하는 문제점을 강조하였고, Dec<sup>[3],[4]</sup>는 완전 균일장을 가정한 화학소반응 계산결과로부터 HC생성경향을 제시하여 저부하영역에서 화학반응속도가 느려서 연소기간 중에 화학반응이 이루어지기 전에 quenching되어 미연성분이 발생하는 문제점을 해결하기 위해 흡기온도를 올려 조기연소가 이루어지도록 HC, CO를 저감시키는 방법을 보여주었으며, 또한 소반응계산을 통하여 연소실내 최고온도가 1500 K이상에서 CO가 완전히 산화됨을 보여주었다. 따라서 이 방식에서의 연소 및 배기특성은 착화에 이르기까지의 혼합기상태 및 화학반응형태에 의해 크게 의존함을 알 수 있었다. 이와 유사한 연구로서 연료분사에 의한 혼합기 농도분포의 제어<sup>[5],[6]</sup> 또는 연료분자구조를 고려한 화학반응과정의 제어<sup>[7],[8]</sup> 등에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이와 같이 HCCI방식은 운전부하영역 확대와 더욱더 저공해화를 위하여 물리적 및 화학적 과정의 관계를 고려한 연소제어가 절대적으로 필요하다. 따라서 본 연구에서는 연소실내에서 여러 현상의 중요한 지배인자인 연료성상을 착안하여 연료측으로부터 분무, 착화 및 연소과정의 시공간적 제어를 목적으로 한 연료설계방법을 제안하고자 한다. 이 방법은 서로 물성이 다른 2성분을 혼합함으로써 연료의 밀도, 점성, 증발 등의 물리적 특성과 착화연소 등의 화학적 특성을 인위적으로 제어함을 목적으로 직접분사 HCCI 기관에 적용하는 것을 고려하여, 압축행정 중에서 비교적 이른 조기의 연료분사시기와 분위기조건을 설정하여 정적용기 내에서 감압비등분무에 대한 거시적 특성을 고찰하였다.

## 2. 감압비등분무의 혼합기 제어

### 2.1 감압비등분사

감압비등은 액체가 포화증기압 이하의 감압된 분

위기장에서 액체중의 기포핵으로부터 초기 발생하는 증기 캐비테이션의 급격한 성장으로 기인하여 액상에서 기상으로 상변화하여 미립화 및 증기화의 촉진이가 가능하다. 본 연구에서는 홀형 노즐을 이용한 디젤분무에서 감압비등을 용이하게 발생시키기 위해서 고비점연료에 저비점연료를 혼합하여 형성되는 2상영역을 이용하였다. Fig. 1은 비점이 서로 많이 차이나는 2종류의 연료를 혼합한 경우, 양 연료의 포화 증기압곡선은 서로 끌어당겨 기액이 혼재하는 2상영역으로 형성된다.

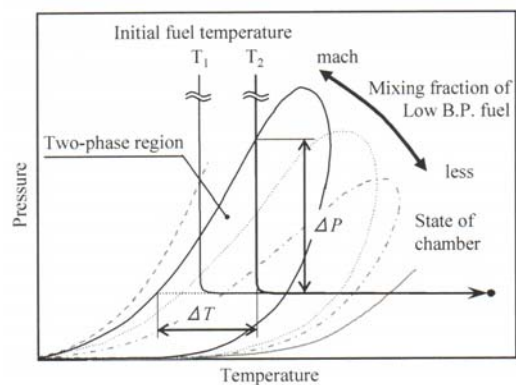


Fig. 1 The curve of two phase region

연료상태가 분사시의 감압에 의해 2상영역에 도달하는 경우, 액적내부에서 기포성장에 따라 급속하게 미립화되면서 증발된다. 감압비등현상에 있어서 캐비테이션 기포의 성장속도는 Fig. 1의 과열도  $\Delta T$  또는 감압도  $\Delta P$ (포화액선과 분위기압력과 차)에 따라 반응이 빨라진다. 따라서 과열도를 변경함으로써 감압비등분무의 제어는 가능하다. 그 방법으로는 연료분사전 연료온도제어, 연료 혼합비율에 의한 2상영역 제어, 분사시기에 의한 분위기조건의 변경 등으로 감압비등현상을 이용함으로써 직접분사 HCCI방식에 있어서 자유도가 높은 혼합기를 제어할 수 있다.

### 2.2 직접분사 HCCI방식 기관의 적용

감압비등분무를 직접분사 HCCI방식에 적용한 경우, 일반적으로 다음의 같은 효과를 기대할 수 있다.

① 직접분사 HCCI방식에서는 저온 및 저밀도장에 연료가 분사가 되기 때문에 연소실벽면에 연료가 부착되는 문제가 생긴다. 이것을 방지하기 위해서 분사압력을 낮춰서 분사관통력을 억제하면, 분사속도가 낮아짐으로서 공기와 전단작용에 의해 미립화가 불충분해진다. 따라서 감압비등현상을 이용하는 것으로 분사압력을 낮추지 않고도 분무의 낮은 관통력과 높은 미립화특성을 얻을 수 있다.

② 직접분사 HCCI방식에서 혼합기에 어느 정도 불균일성이 남아 있으므로 연소속도를 줄이는 방법으로서 제어가 가능하다는 점을 제시하는 연구가 있다<sup>[9]</sup>. 일반적으로 혼합기의 불균일성은 분사시기에 의해 제어가 가능하지만, 분사시기가 과도하게 빠른 경우에 연료가 실린더라이너 내에 부착하든가 피스톤 crevice부에 침입하는 문제를 야기시킨다. 그래서 감압비등분무를 이용하여 연료온도 또는 혼합비율에 의해 과열도를 변경하는 것으로 분사시기를 일정하게 했을 때, 균일한 혼합기의 제어가 가능하다.

### 3. 실험장치 및 방법

2성분 혼합연료를 이용한 감압비등분무의 거시적 특성을 파악하기 위해서 정적용기를 이용하여 광학적 계측을 하였다. Fig. 2는 분무전체상의 솔리렌 화상과 액상부의 Mie산란광 화상을 동시에 촬영하기 위한 광학시스템의 개략도를 나타내었다.

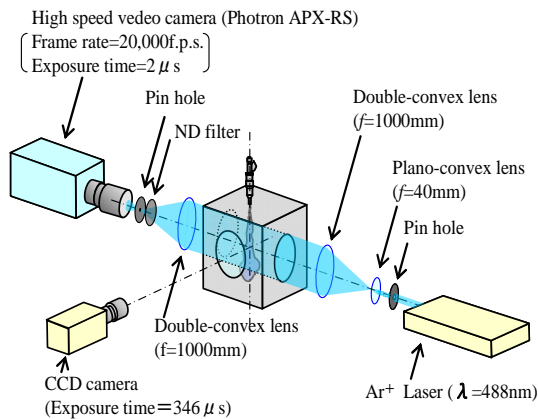


Fig. 2 Optical setup for Schlieren photography and scattering image

광원은 Ar<sup>+</sup>레이저(Spectra-Physics: 2017L-AR)를 이용하여 레이저광을 핀 홀에 의해 교축점 광원으로 편볼록렌즈(초점거리  $f=40$  mm)에서 집광확대하여, 양볼록렌즈(초점거리  $f=1000$  mm)를 통하여 직경 90mm의 평행광을 만든다. 이 평행광을 정적용기에 입사시켜 용기내의 분무현상을 포착한 후, 다시 양볼록렌즈(초점거리  $f=1000$  mm)을 통과시켜 집광하여 초점위치를 핀 홀에 맞춰 솔리렌효과를 가시화하여 고속도 카메라(Photron: Fastcam APX-RS, 촬영속도 20,000 f.p.s, 노광시간 2 μs)로 촬영하였다.

또, 분무 액상부로부터 Mie산란광을 레이저의 광로에 수직으로 설치한 CCD카메라(Yokohama photonic : C4742-95, 노광시간 346 μs)에 의해 촬영하였다. 여기서 액상부의 촬영시기는 분무가 정상상태로 되는 분사개시후 2 μs로 하였다.

본 실험에서 노즐 제원 및 실험조건은 Table 1에 나타내었다. 연료분사장치에는 커먼레일식 전자제어(DENSO ECD-U2)을 이용하여, 노즐분공경  $d_n=0.20$  mm( $L_n/d_n=4$ ,  $L_n$ : 분공길이), 분사차압 50.0 MPa, 분사기간 2.50 ms로 일정하게 하였다. 본 실험의 실험연료에 있어서 감압비등을 시키기 위해서 커먼레일, 고압관 및 인젝터홀더 각부에 리본 히터를 장착하여 인젝터홀더 외벽에 설치된 열전대에 의해 검출한 온도를 연료온도  $T_f$ 로 정하였다. 정적용기 내의 분위기조건은 압축비의

Table 1 Experimental conditions

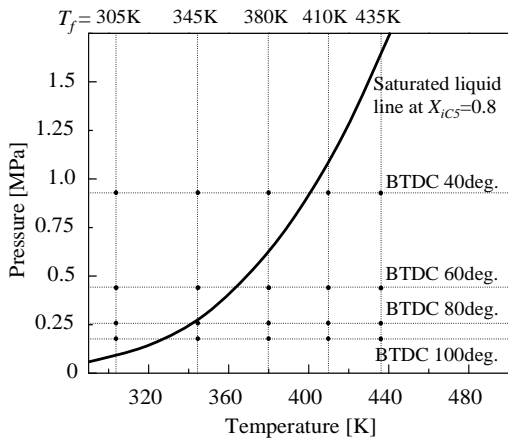
Injection equipment	Common rail type			
Nozzle hole diameter [mm]	0.20 ( $L_n/d_n = 4$ )			
Orifice pressure drop [MPa]	50.0			
Injection period [ms]	2.50			
Fuel temperature [K]	305, 345, 380, 410, 435			
Ambient gas	$N_2$			
BTDC crank angle in corresponding engine [deg]	100	80	60	40
Ambient temperature [K]	405	445	515	625
Ambient density [ $kg/m^3$ ]	1.51	1.99	2.96	5.16
Ambient pressure [MPa]	0.176	0.255	0.438	0.926

모터링시 크랭크각 상사점전 분위기의 압력, 온도 및 밀도와 일치시키기 위해 N<sub>2</sub>를 원하는 압력까지 충전시켜 내부에 취부된 히터에 의해 가열하였다.

**Table 2 Properties of test fuel(at 293 K, 0.101MPa)**

Test fuel	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosity × 10 <sup>6</sup> (N.m)	Surface tension × 10 <sup>6</sup> (N/m)
C <sub>13</sub> /iC <sub>5</sub> (X <sub>iC<sub>5</sub></sub> =0.8)	680	429	19.5

그리고 여기서 적용하는 실험연료는 고비점연료인 n-트리테칸(C<sub>13</sub>)에 저비점연료인 i-펜탄(iC<sub>5</sub>)을 혼합한 연료(C<sub>13</sub>/iC<sub>5</sub>)을 이용하여, 혼합비율은 iC<sub>5</sub>의 몰분율(X<sub>iC<sub>5</sub></sub>)을 0.8로 하였으며, 그 물성치는 Table 2와 같다. 또 Fig. 3에는 실험연료의 포화액선을 나타내고 있으며, 실험조건인 연료온도 및 분위기압력을 도시하였다.



**Fig. 3 Saturated liquid line of test fuel**

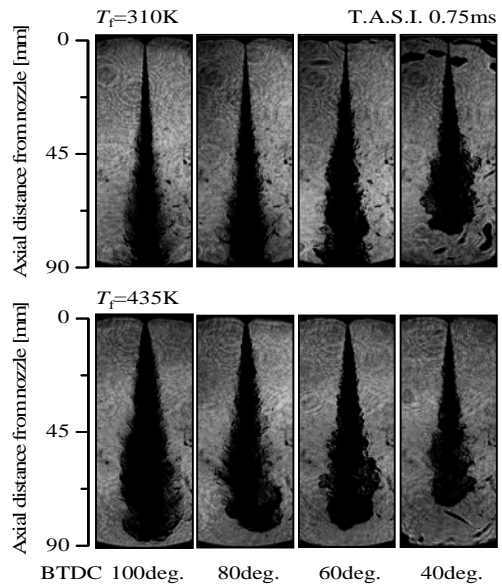
그 결과로서 포화액선 이하의 영역에서 과열도 또는 감압도가 큰 조건일수록 감압비등이 활발하게 일어나는 조건임을 확인할 수 있다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 분무선단도달거리에 미치는 영향

슬리렌촬영에 의해 얻어진 화상으로 연료온도

310 K와 435 K, 분사개시후 0.75 ms에서 대표 화상을 Fig.4에 나타내었다. 연료온도 435 K에서는 310 K에 비해 분무선단도달거리가 감소하고 반경방향으로 크게 분무가 퍼져가는 경향을 나타낸다. 보다 상세하게 비교하기 위해서 화상에 의해 분무선단도달거리를 측정된 결과를 각 분위기조건, 연료온도에 있어서 분무선단도달거리의 시간변화를 Fig. 5에 나타내었다. 그 결과로서 어느 조건에서도 분무선단도달거리는 분열길이에 도달할 때까지 등속으로 증가하다가 그 이후는 시간에 약 1/2승에 비례하여 성장하는 전형적인 분무의 도달거동을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 그리고 초기연료온도의 증가에 따라 분무의 발달은 좀 늦어지는 경향이 있으며, 분위기조건에 의해 저온 및 저밀도일수록 경향은 현저하게 나타난다. 이는 감압비등이 발생함으로써 미립화 및 증기화가 촉진되어 주위기체와 혼합에 의해 분무축방향으로 운동량을 잃기 쉽고, 과열도가 증가할수록 그 효과가 크다. 또 분사시기 BTDC 40 deg. 조건에서 연료온도의 영향이 그다지 없는 것은 분위기압력이 비교적 높기 때문에 Fig. 3과 같이 과열도가 그다지 높지 않은 영역에 감압비등이 생기지 않는 조건에서도 분위기 밀도의 증가에 따라 분무의 발달은 늦어진다.



**Fig. 4 Images of Schlieren photography**

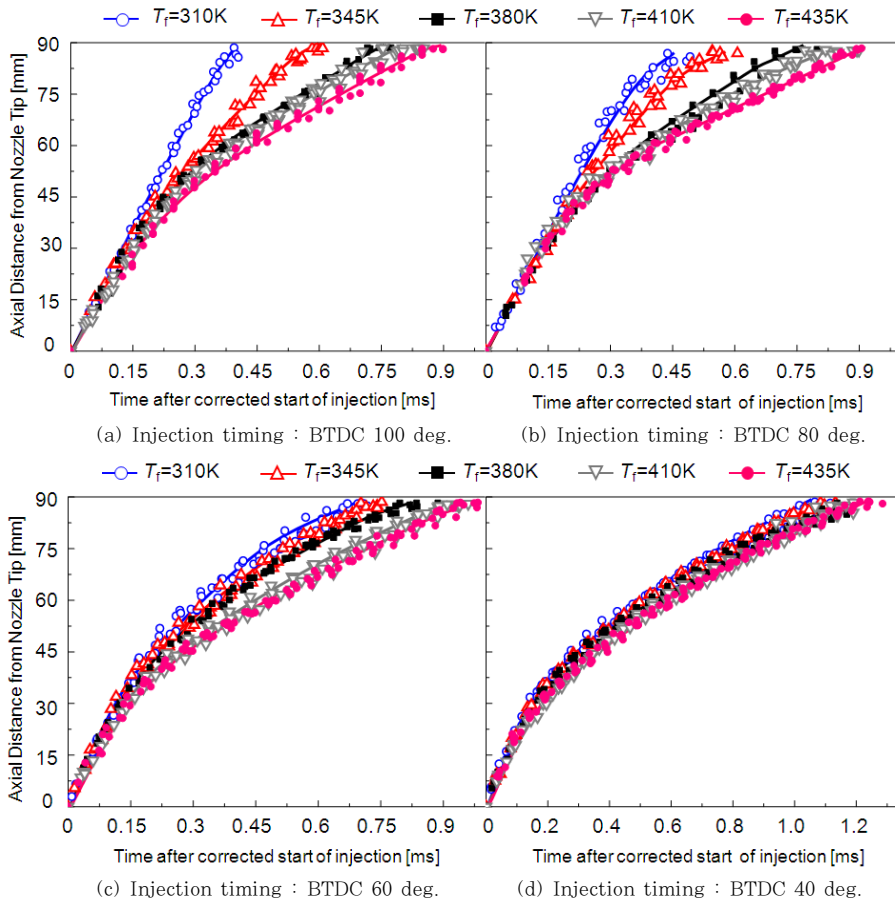


Fig. 5 Temporal change of spray tip penetration

이상과 같이 감압비등에 의한 분무의 관통력은 저온 및 저밀도장에서 유효하다는 점을 알 수 있다.

#### 4.2 분무각에 미치는 영향

분무의 분산성을 평가하기 위해서 분무각을 비교하였다. 여기서 분무각  $\theta$ 의 정의를 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$\theta = 2 \tan^{-1}(w/2l)$$

여기서  $l$  및  $w$ 는 슐리렌화상에 산출한 분무선단 도달거리 및 분무반경방향의 최대폭이다.

산출된 분무각  $\theta$ 을 각 연료온도 및 압력조건에서 시간에 따른 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 그 결

과로 분사시기 BTDC 40 deg.와 같은 비교적 고온 및 고밀도장에서는 연료온도와 관계없이 비슷한 분무특성을 보이고 있으며, 분사시기가 다른 조건에서는 연료온도가 상승함에 따라 즉 과열도의 증대에 따라 분무각이 확대됨을 알 수 있었다. 또 분무선단도달거리의 결과와 마찬가지로 분무각도 분위기조건이 보다 저온 및 저밀도일수록 연료온도의 영향을 크게 받는다. 여기서 분무각이 안정한 분무개시후 2~3 ms사이에서 평균분무각을 각 분위기조건에 따른 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 연료온도 310 K에서는 분위기밀도가 낮을수록 주위기체와 혼합이 이루어지기 어려워 분무각은 감소하는데 비해, 감압비등이 특히 활발한 연료온도 435 K 또는 410 K에서는 분위기밀도가 낮아도

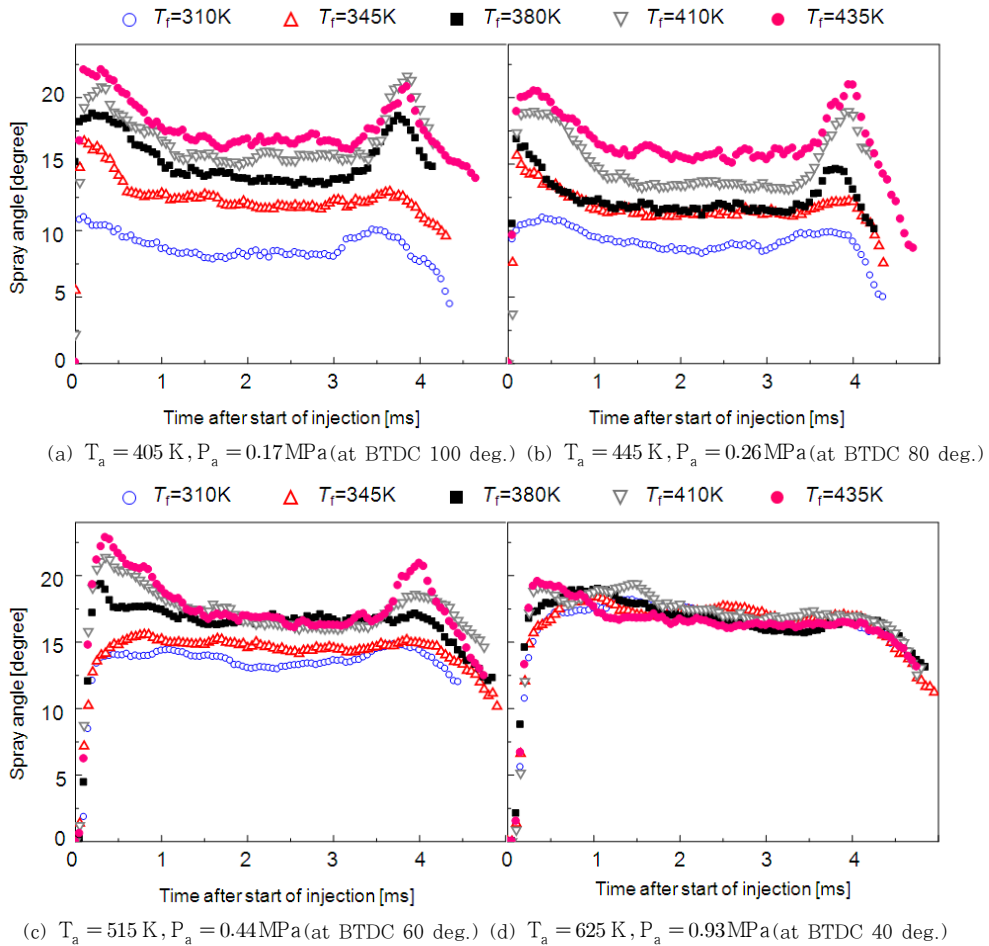


Fig. 6 Temporal change of spray angle

과열도의 증가에 따라 큰 분무각을 형성함을 알 수 있다. 따라서 감압비등에 의해 분무는 낮은 관통력 및 높은 분산성을 갖게 되며, 저온 및 저밀도장에서 그 효과가 현저하게 나타남을 알 수 있었다.

#### 4.3 분무구조에 미치는 영향

분무의 내부구조를 상세하게 파악하기 위해서 1024의 휘도 계조(階調)를 갖는 Mie산란광화상에서 120이하를 배경으로 하였고, 120~750 구간의 휘도를 5단계의 계조로 분할하였다. 각 계조에서 액상 가장자리쪽의 분무축방향을 Fig. 8에 나타내었다.

분사시기 BTDC 100 deg.의 조건에서는 연료 온도의 증가에 따라 액상의 고농도영역이 단축하여 저농도영역이 반경방향으로 크게 확대된다. 이 결과로부터 감압비등이 활발하여 주위기체와 혼합이 어려운 분무중심부에서도 미립화가 촉진되어 소입경의 액적이 넓게 분포됨을 알 수 있다. 그리고 분사시기 BTDC 40 deg.에서는 연료온도의 증가에 따라 액상전체가 분무축방향 및 반경방향으로 비례적으로 축소된다. 이 조건은 분위기온도도 충분히 높고, 감압비등에 의해 미립화된 후 주위기체로부터 가열됨에 따라 증기화가 진행되기 때문이라고 생각된다. 따라서 분사시기 BTDC 40 deg.의 조건에서는 분무선단도달거리 및 분무각에 관해서 연

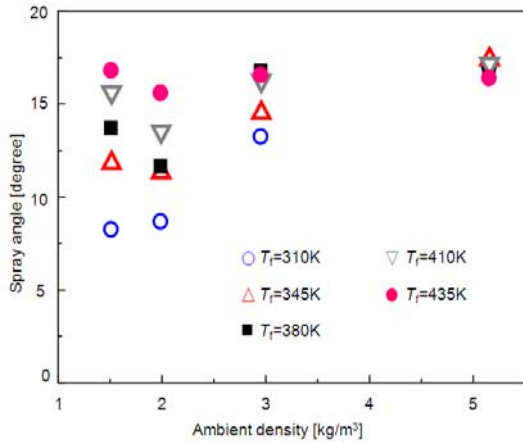
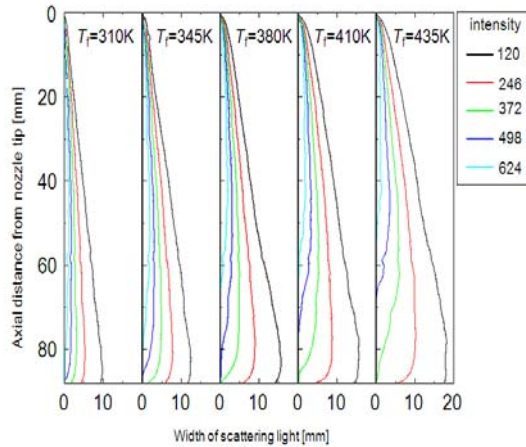
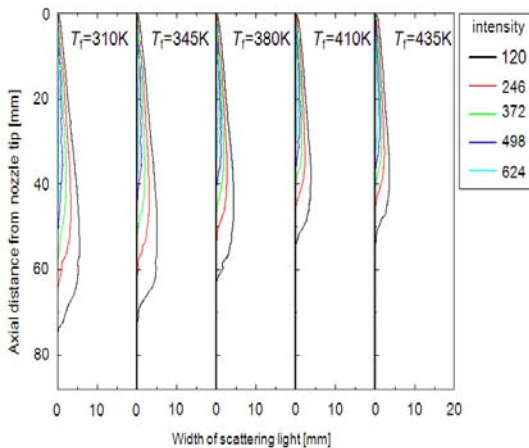


Fig. 7 Average spray angle during steady period



(a)  $T_a = 405 \text{ K}, P_a = 0.17 \text{ MPa}$  (at BTDC 100 deg.)



(a)  $T_a = 625 \text{ K}, P_a = 0.93 \text{ MPa}$  (at BTDC 40 deg.)

Fig. 8 Concentration distribution of liquid phase

료온도에 의한 영향이 큰 차이가 없었기 때문에 액상의 분무선단도달거리 및 확산정도에 관한 분무구조는 감압비등의 효과를 고려할 수 있다. 이상과 같이 감압비등을 하는 조건에서 과열도가 증가할수록 보다 균일한 혼합기를 형성할 수 있다고 여겨지며, 감압비등에 의한 혼합기의 제어는 가능할 것으로 사료된다.

### 5. 결 론

서로 물성이 다른 2성분 혼합연료를 이용하여 연료분사시기와 분위기조건에 따라 정적용기 내에서 감압비등분무에 대한 거시적 특성을 고찰한 결과는 다음과 같다.

- (1) 연료온도의 증가, 즉 과열도의 증가에 따라 분무선단도달거리는 단축되고, 분무각은 넓어진다. 또 그 효과는 분위기조건이 보다 낮은 온도 및 밀도의 분위기에서 현저하게 나타난다.
- (2) 분무선단도달거리 및 분무각에 미치는 연료온도의 영향이 나타나기 어려운 비교적 고온 및 고밀도의 분위기조건에서도 분무구조에 관해서는 연료온도의 증가, 즉 과열도의 증가에 의해 액상선단도달거리가 단축된다.
- (3) 비교적 낮은 온도 및 밀도의 분위기조건에서 감압비등에 따른 분무는 액상의 고밀도영역이 축소되며, 저밀도영역은 크게 분포된다.

### 참고문헌

- [1] R. H. Thring, "Homogeneous charge compression ignition(HCCI) engines", SAE Paper 892068, 1989.
- [2] M. Christensen, B. Johansson and A. Hultqvist, "The effect of piston top land geometry on emissions of unburned hydrocarbons from a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine", SAE Paper 2001-01-1893, 2001.
- [3] J. E. Dec, "A computational study of the effects of low fuel loading and EGR

on heat release rates and combustion limit in HCCI engine”, SAE Paper 2002-01-1309, 2002.

- [4] D. Jun and N. Iida, “A study of high combustion efficiency and Low CO emission in a natural gas HCCI engine”, SAE Paper 2004-01-1974, 2004.
- [5] 橋詰 剛ほか, “予混合壓縮着火機關における高負荷運轉の試み”, 機械學會講演論文集98-3(Ⅲ), pp. 65-66, 1998.
- [6] Magnus Sjoberg, et al, “GDI HCCI: effects of injection timing and air swirl on fuel stratification, combustion and emissions formation”, SAE paper 2002-01-0106, 2002.
- [7] 金子眞也ほか, “メタノール直接噴射による予混合壓縮着火機關の燃焼制御と運轉領域擴大”, 自動車技術會論文集, Vol. 69, No. 682, pp. 231-236, 2003.
- [8] 菅野秀昭ほか, “直噴ディーゼル機關の機關性能を向上させる燃料因子と燃料因子の組み合わせに関する研究”, 自動車技術會前刷集No.79-04, pp. 15-20, 2004
- [9] 熊野賢吾ほか, “予混合氣の均質性がHCCI燃焼に及ぼす影響”, 機械學會講演論文集03-1(Ⅲ), pp. 131-132, 2003.

## 저 자 소 개



### 명광재(明光재)

1968년생, 1998년 국민대학교 자동차공학과 졸업(학사), 2000년 전남대학교 기계공학과 졸업(석사), 2005년 일본 동지사대학 기계공학과 졸업(박사), 2005년 6월~2008년 2월 일본교통안전환경연구소 연구원, 2008년 3월~현재 조선이공대학 자동차과 전임강사



### 윤준규(尹俊圭)

1957년생, 1981년 조선대학교 기계공학과 졸업(학사), 1987년 경희대학교 기계공학과 졸업(석사), 2001년 명지 대학교 기계공학과 졸업(박사), 2005년 3월~2006년 2월 일본 동지사대학 기계공학과 객원연구원, 2007년 3월~현재 경원대학교 기계·자동차공학과 교수