

## 감압비등을 이용한 혼합연료의 분무제어에 관한 연구

명 광 재\* · 윤 준 규\*\*†

\* 조선이공대학 자동차과, \*\* 경원대학교 기계·자동차공학과

### Study on the Spray Control of Mixed Fuel Using Flash Boiling

Kwang Jae Myong\* and Jun Kyu Yoon\*\*†

\* Dept. of Automobile Engineering, Chosun College of Science & Technology,

\*\* Dept. of Mechanical & Automotive Engineering, Kyungwon Univ.

(Received July 7, 2010 ; Revised August 25, 2010 ; Accepted August 26, 2010)

**Key Words:** Spray Control(분무제어), Flash Boiling(감압비등), Mixed Fuel(혼합연료), Degree of Superheat(과열도), Constant Volume Vessel(정적용기)

**초록:** 본 연구는 HCCI 엔진의 운전조건을 고려한 혼합연료의 감압비등 분무제어방법을 평가하기 위하여 수행하였다. 2상영역이 존재하는 혼합연료는 고비점성분의 증발촉진과 함께 연료분무의 급격한 증발을 유도할 수 있는 감압비등분무를 이용함으로써 저온 및 저밀도장에서 혼합기형성과정의 제어가 가능하다. HCCI 엔진은 이러한 분위기조건에서 연료를 조기분사하기 때문에 착화성이 높은 경유와 휘발성이 높은 가솔린성분으로 함유한 혼합연료의 감압비등현상을 이용함으로써 액체연료의 분열, 미립화와 같은 물리적 제어 및 착화연소에 의한 화학적 제어를 실현할 수 있다. 본 연구는 혼합연료의 성분과 물분율을 주요변수로 설정하여 정적용기 내에 분사된 연료분무의 감압비등현상을 슐리렌 화상 및 Mie 산란광을 촬영한 후, 화상처리과정을 통하여 이루어졌다. 그 결과로 감압비등현상은 비교적 저온 및 저밀도장에서 분무구조가 크게 변화함을 알 수 있었으며, 조기 연료분사시기에서 감압비등분무를 이용한 혼합기형성을 제어함으로써 HCCI 연소에 적용이 가능할 것으로 분석하였다.

**Abstract:** This study was conducted to assess the spray control of flash boiling with mixed fuel in consideration of HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) engine condition. Mixed fuel existing in two phase regions can control the process of mixture formation under low temperature and density by using the spray resulting from flash boiling which is able to induce rapid evaporation of fuel spray as well as the evaporation of high boiling point component. Because HCCI engine injects the fuel early under ambient conditions, it can facilitate the chemical control of ignition combustion and physical control such as breakup and atomization of liquid fuel by flash boiling of mixed fuel which consists of highly ignitable light oil and highly volatile gasoline. This study was conducted by performing video processing after selected composition and molar fraction of the mixed fuel as major parameters and photographed Schlieren image and Mie scattered light corresponding to the flash boiling phenomenon of the fuel spray that was injected inside a constant volume vessel. It was found that flash boiling causes significant changes in the spray structure under relatively low temperature and density. Thus, we analyzed that the flash boiling spray can be used for HCCI combustion by controlling the mixture formation at the early fuel injection timing.

### 1. 서 론

최근 혼합기의 균일회박화를 도모하기 위하여 저온 및 저밀도의 분위기장에서 조기에 연료를 분사하는 예혼합압축착화(HCCI) 방식의 디젤기관 연구가 진행되고 있다. 기존 디젤기관에서 사용

되는 고비점성분(High Boiling Point Component)의 미증발연료가 고압분사기술로 실린더 벽면 또는 피스톤 상면에 다량으로 충돌함으로써 그 연료자체가 과농한 혼합기를 형성하여 유해성분의 배기가스를 배출하여 환경오염의 원인이 되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 또한 경유 등 고탄소수성분을 중심으로 구성되는 연료는 휘발성이 약한 반면에 착화성이 높으므로 착화촉진효과에 따른 연소제어법으로 미연성분 배출제어는 가능하다고 하지만 상당한

† Corresponding Author, jkyoon@kyungwon.ac.kr

기술이 필요하고 제어한계가 있다. Senda 등<sup>(4-7)</sup>은 이와 같은 고탄소수성분과 상반되는 물리적 및 화학적 특성을 갖는 저탄소수성분의 혼합연료를 이용한 연료설계방법(Fuel Design Method)을 제안하여 지속적인 연구를 진행해오고 있으며, 가솔린 혹은 가스계의 비점이 낮은 연료성분과 비점이 높고 착화성이 높은 연료성분을 혼합함으로써 기액(Vapor-Liquid) 2상영역(Two Phase Region)이 형성되어 증발과정의 제어가 가능하고 고착화성분에 의한 착화제어가 실현가능하다는 것을 보여주었다. 그리고 Nishimura 등<sup>(8)</sup>은 연료분사시 압력강하에 따른 혼합연료조건이 2상영역내에 도달하는 감압비등분무를 실험적으로 입증하였다. 감압비등은 연료분무의 급속증발을 유도하여 노즐 내부로부터 기포성장을 기인하는 분류의 붕괴로 액적을 미세화하고, 분무성상을 제어할 수 있다.

또한 감압비등분무의 특성은 연료의 과열도에 의존하기 때문에<sup>(9)</sup> HCCI 방식과 같은 저압의 분위조건인 조기의 연료분사시기에서 보다 유효하게 적용될 수 있다. 따라서 이 감압비등은 비점이 높고 착화성이 높은 연료성분과 비점이 낮고 착화성이 낮은 연료성분을 혼합하여 이용하면, 혼합기형성과정에서 최적화를 도모하여 각 연료의 장점을 살리는 방법을 모색하여 HCCI 방식의 연료제어가 가능하리라 생각한다. 본 연구에서는 실제기관과 유사한 압축분위기장을 고려한 조기의 연료분사시기를 설정하여 혼합연료의 포화증기압력을 고려하면서 연료의 과열도와 분위조건에서 분무화상을 관찰함으로써 감압비등분무의 제어방법을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 실험조건

본 실험에서는 Fig. 1과 같은 고온·고압 정적용기를 이용하여 분무의 광학적 계측을 하였다. 이용기의 재질은 SS41로서 최대사용압력은 3.0 MPa로 하였다. 분무는 정적용기의 한쪽방향 양측면과 직교하는 방향으로 3개의 석영제 관측창을 설치하여 관찰하도록 하였고, 분위기온도는 용기 내부에 장착된 cartridge heater에 의해 조절된다. 또한 슬리렌 화상(Schlieren image)과 Mie 산란광 화상을 동시에 촬영하기 위해 Fig. 2와 같이 실험장치를 구성하였다. 광원은 Ar<sup>+</sup>레이저를 이용하여 평행광으로 만든 후 용기 내에 조사하였고,

집광한 광은 다시 핀홀로 주광속을 cut한 후 105 mm 렌즈를 장착한 고속도 비디오카메라(노출시간 2  $\mu$ s, 촬영속도 20,000 f.p.s)로 촬영하였다

이때 평행광 측면으로부터 CCD카메라에 의해 산란광을 측정하였다. 촬영시간은 분사개시 후 2 ms로 하였고, 노출시간은 346  $\mu$ s로 하여 화상을 계측하였다. 여기서 노즐분공근방의 확대촬영(shadowgraph법)시, 현상의 동결을 방지하기 위해 광원은 Nd:YAG레이저의 제2고주파(532 nm)를 사용하였다. 슬리렌화상 촬영시에는 광학계로부터 카메라 앞에 설치된 핀 홀을 제거하여 300 mm 렌즈를 장착한 CCD카메라에 의해 19.6 mm/pixel 공간분해능으로 촬영하였다.

실험조건은 Table 1에 나타내었다. 본 실험에서는 실제기관의 압축행정 중에서 비교적 조기의 연료분사시기를 고려하기 위해 압축비 16.3의 실제기관의 분사시기 BTDC 100, 80, 60, 40 deg.에 상당하는 분위조건을 설정하였다. 여기서 분위

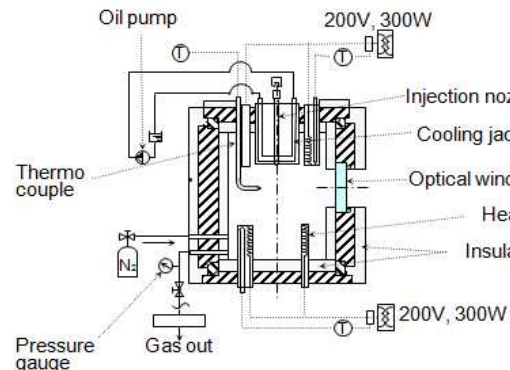


Fig. 1 Schematic cross section of constant volume vessel

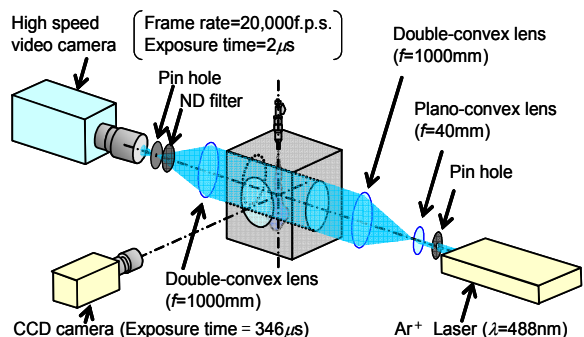


Fig. 2 Optical setup for simultaneous imaging of Schlieren and scattered light photography

기 가스는 질소를 이용하여 소정의 압력까지 용기 내를 가압하였고, 실험용 연료는 고비점성분인 n-트리데칸( $C_{13}H_{28}$ )와 저비점성분인 i-펜탄( $C_5H_{12}$ )의 혼합연료( $C_{13}/iC_5$ )을 사용하여 n-트리데칸에 대한 i-펜탄의 혼합몰분율( $X_{iC_5}$ )은 0.8로 정하였다. 혼합연료의 몰분율을 0.8로 선정한 이유는 저비점성분의 혼합비율이 높아질수록 2상영역의 임계점은 고압, 저온쪽으로 이동하며 2상영역의 면적이 커지기 때문에 HCCI 방식과 같은 조기분사(저압, 저온의 분위기조건)에서도 감압비등효과가 커지기 때문이다. 또한 비점이 n-트리데칸과 i-펜탄의 중간값을 갖는 n-헵탄( $C_7H_{16}$ )을 선정하여 혼합연료와 단일성분의 비교실험에도 사용하였다. Fig. 3은  $C_{13}/iC_5$  혼합연료의 압력-온도 특성 선도를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 다성분연료( $X_{iC_5}$ )의 포화증기압은 1개의 곡선으로 표현할 수 없으며, 포화액체곡선(고압측)과 포화기체곡선(저압측)으로 구성된 2상영역을 형성한다. 여기서 2상영역내는 임의의 압력과 온도에서 혼합연료의 각 성분이 기액 2상으로 혼재하기 때문에 연료조건이 포화액체곡선을 통과함으로써 기포생장이 개시되는 것을 생각할 수 있다. 이 때문에 연료온도와 각 분위기압력의 포화액체곡선 상과의 온도차를 과열도로 정의하였다.

본 실험에서는 초기연료온도를  $T_f=310, 345, 380, 410, 435$ , 380, 410, 435 K로 설정하여 과열도를 변경하였

Table 1 Experimental condition

Injection System	Common rail type (Denso ECD-U2)			
Nozzle hole diameter, [mm]	0.20			
Length of hole, [mm]	0.80			
Orifice pressure drop, [MPa]	50.0			
Injection quantity, [mg]	22.2			
Fuel temperature $T_f$ , [K]	310, 345, 380, 410, 435			
Compression ratio	16.3			
Ambient gas	$N_2$			
Injection timing, [deg.BTDC]	100	80	60	40
Ambient temperature, [K]	405	445	515	615
Ambient density $\rho_a$ , [ $kg/m^3$ ]	1.51	1.99	2.96	5.16
Ambient viscosity, [ $\mu Pa.s$ ]	21.8	23.3	25.6	29.1
Ambient pressure, [MPa]	0.18	0.26	0.44	0.93

다. 연료온도는 커먼레일 및 인젝터 사이의 고압관(길이 1,100 mm)을 가열하면서 조절하였고, 인젝터로부터 리턴되는 연료온도를 측정된 값으로 정하였다.

Table 2는 연료의 물성치를 나타낸 것으로 상단은 1.61 MPa, 293 K에서 각 단성분 연료의 물성치이고, 하단은  $C_{13}/iC_5$ 의 혼합몰분율  $X_{iC_5}=0.8$ 에서 연료온도를 변경했을 때 물성치를 나타낸 것이다. 연료의 포화증기압력과 물성치는 NIST mixture property database<sup>(10)</sup>에 의해 추산한 값으로  $T_f=435$  K의 포화액체선상에서 압력은 1.61 MPa로 계산되었다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 감압비등분무의 거동

Fig. 4는 분사시기 BTDC 80 deg.에서 연료온도

Table 2 Properties of tested fuel

Fuel	n- $C_{13}H_{28}$	i- $C_5H_{12}$	n- $C_7H_{16}$		
Boiling point, [K]	509	301	372		
Density $\rho_f$ , [ $kg/m^3$ ]	766	621	683		
Viscosity, [ $\mu Pa.s$ ]	1794	225	408		
Fuel	$X_{iC_5} = 0.8$				
Fuel temp. $T_f$ , [K]	310	345	380	410	435
Pre. on Sat. liquid line, [MPa]	0.11	0.28	0.63	1.09	1.61
Density $\rho_f$ , [ $kg/m^3$ ]	666	633	597	564	533
Viscosity, [ $\mu Pa.s$ ]	364	265	202	155	125

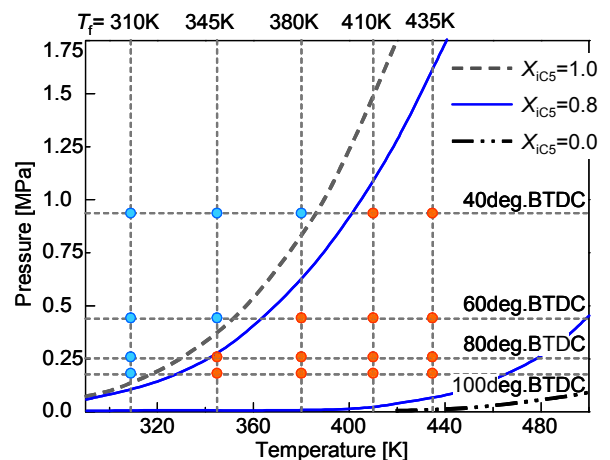


Fig. 3 Pressure-temperature diagram of pure fuel and mixed fuel

$T_f$ 에 따른 준정상상태에 도달한 분사개시 후 2 ms로 분공근방을 shadowgraph법으로 촬영한 결과를 나타내었다. 여기서 Fig. 4(a)는 연료의 혼합물 분율  $X_{iC_5} = 0.8$ 을 사용하여  $T_f$ 를 변경했을 때 촬영한 화상이고, Fig. 4(b)는 연료 온도  $T_f = 410$  K에서 n-트리데칸( $X_{iC_5} = 0$ ), 혼합물 분율  $X_{iC_5} = 0.8$ 인 연료 및 n-헵탄( $C_7$ )을 사용하여 촬영한 화상이다. 여기서 He와 Ar의 혼합가스를 용기내에 충전하여 BTDC 80 deg.에서 분위기의 압력과 밀도를 설정하여 주위기체로부터 열전달에 의한 증발의 영향을 무시하고 실온에서 실험을 하였다.

그 결과로 Fig. 4(a)의 경우는  $T_f = 345$  K 이상에서 분무가 노즐분공 바로 밑에서 반경방향으로 넓게 분산되며 그 확산은  $T_f$ 가 높을수록 크게 나타났으며, Fig. 4(b)의 경우에는 증발특성을 제외한 밀도, 점도 등의 물리적 특성이 비교적 유사한  $X_{iC_5} = 0$ 와  $C_7$ 의 경우는 분무형태가 거의 유사하지만  $X_{iC_5} = 0.8$ 의 경우는 현저한 차이를 나타내고 있다. 이 결과로부터 고비점성분을 함유한 혼합연료라 할지라도 감압비등을 이용할 경우, 비점이 낮은 단일성분과 비교하여 증발 및 분무의 확산이 유리하며 혼합연료의 성분 및 물 분율에 따라 분무의 물리적 제어(분열, 미립화, 확산)가 가능함을 알 수 있다.

Fig. 5는 분무원추각  $\theta_1$ 과 분무각  $\theta_2$ 의 개략도를 나타낸 것이다. 여기서 분무원추각  $\theta_1$ 은 분공출구에서 2 mm까지 분무면적에서 분공경분의 면

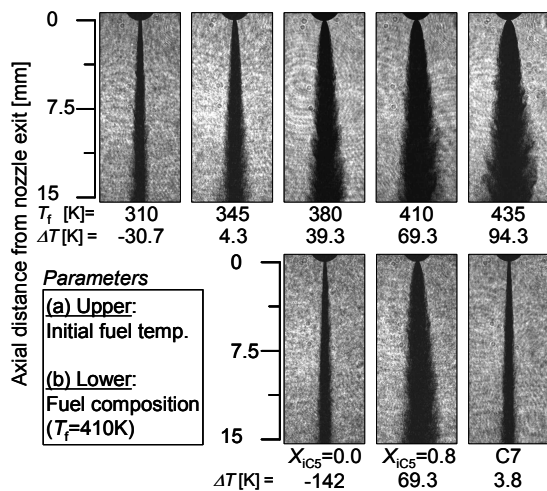


Fig. 4 Shadowgraph images taken in the region close to nozzle tip at BTDC 80 deg.

적을 뺀 그 양측의 분무면적( $A_1'$ ,  $A_1''$ )과 동일한 면적의 3각형으로 대체했을 때 이루어진 각으로 정의하고, 분무각  $\theta_2$ 는 감압비등에 의한 체적팽창이 없는 분공출구로부터 4 mm에서 15 mm까지 분무외연부의 경사각으로 정의하였다.<sup>(11)</sup>

Fig. 6은 과열도 및 분위기조건에 따른 분무원추각  $\theta_1$ 의 특성을 나타내었다. 그 결과로 분무원추각  $\theta_1$ 의 특성은 과열도가 (-)인 경우 분위기밀도의 영향으로 약간 증가하는 경향이 있으며, 반면에 과열도가 (+)인 경우에는 과열도의 증가에 따라  $\theta_1$ 이 지수함수적으로 증가됨을 알 수 있다. 또한 동일한 과열도에서  $T_f$ 가 높을 때 분무확산은 다소 감소하는데, 이것은 고온화에 의한 연료 점성의 저하를 원인으로 생각할 수 있다. 또한 감압비등은 상변화를 동반하는 현상으로 증발잠열에 의해 주위기체의 온도를 저하시키는데, 이

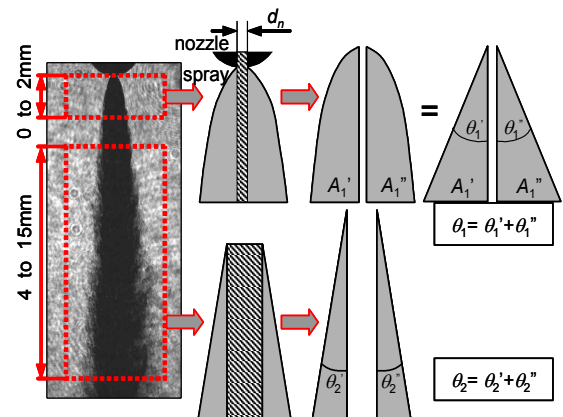


Fig. 5 Definition of spray cone angle  $\theta_1$  and spray angle  $\theta_2$

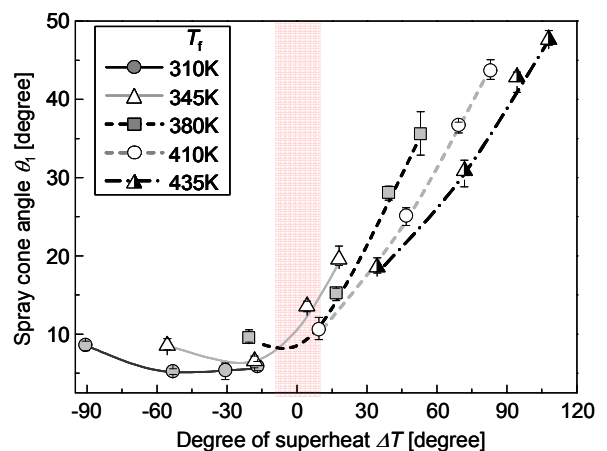


Fig. 6 spray cone angle  $\theta_1$  according to degree of superheat

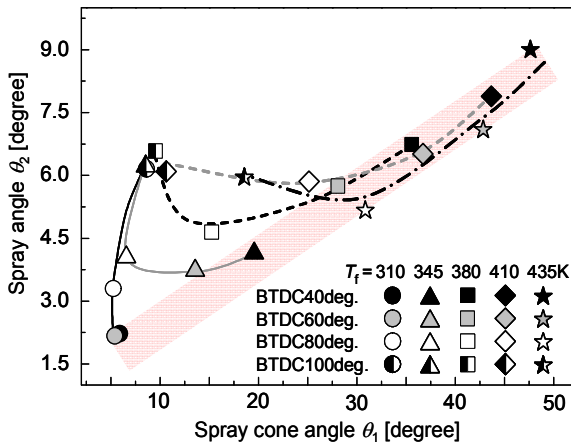


Fig. 7 Spray cone angle  $\theta_1$  versus spray angle  $\theta_2$

것이 분사율이 약간 감소하는 고온연료조건에 영향을 미쳤을 가능성도 존재한다.

Fig. 7은 연료온도와 분사시기에 따른 분무원추 각  $\theta_1$ 과 분무각  $\theta_2$ 의 관계를 나타내었다. 분사시기 BTDC 100 deg.와 80 deg.에서  $\theta_2$ 는  $\theta_1$ 의 증가에 따라 비슷한 증가 특성을 보인다. 이것은 감압비등시 분공내의 생성 및 성장한 기포가 분출된 후 분무에 반경방향으로 운동량이 있음을 알 수 있다. 한편 이보다 분사시기가 늦은 BTDC 60 deg.와 40 deg.에서는  $\theta_2$ 가  $\theta_1$  증가에 따라 선형적으로 증가하는 관계를 나타내는데 이는 분위기밀도가 상승하여 주위기체에 의한 작용이 크기 때문이고, 감압비등에 의해 반경방향으로 비산되어 관통력이 낮은 액적이 주위기체와 간섭이 되어 분무의 외연부로 움직이는 효과로 생각한다.

### 3.2. 분무특성

#### 3.2.1 분무선단도달거리에 미치는 영향

Fig. 8은 분사시기 BTDC 80 deg.에서 연료온도  $T_f = 310, 410$  K로 변경했을 때 촬영된 슐리렌 화상을 나타내었다.

그 결과로 분사초기 직후에 관통력이 아주 낮은 분무가 관찰되기 때문에 Naber 등<sup>(12)</sup>이 함수 fit처리한 자료를 참고로 분사개시후의 시간을 Fig. 9와 같이 보정하여 나타내었다. Fig. 8에서 과열도  $\Delta T = -30.7$  K인  $T_f = 310$  K의 분무는 저분위기 밀도장에서의 연료분사이기 때문에 반경방향으로 확산은 적고 축방향으로 강한 관통력을 유지하면서 성장한다. 한편 과열도  $\Delta T = 69.3$

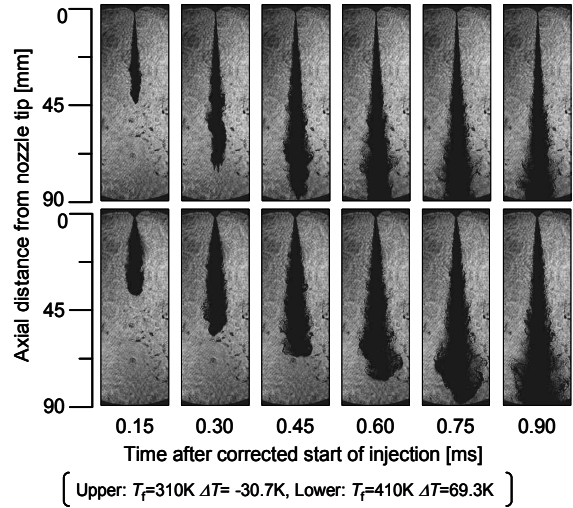


Fig. 8 Schlieren images for each initial fuel temperature under simulated condition

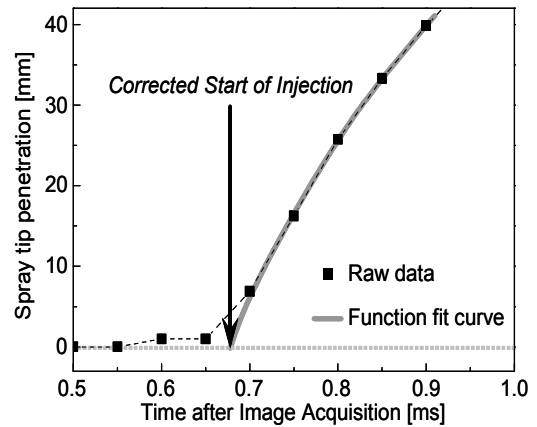


Fig. 9 Definition of corrected start of injection

K인  $T_f = 410$  K의 분무는 분사개시 직후부터  $T_f = 310$  K의 분무와 형상이 크게 다르고, 분공에서 분무선단에 걸쳐 반경방향으로 넓게 분산된다. 그리고  $T_f = 310$  K의 분무형상은 선단이 뾰족해져 보이는데 반해,  $T_f = 410$  K의 분무형상은 둥근 모양을 이루는데 이것은 분사개시 직후부터 이어지는 것으로 분공근방의 분산특성은 분무 전체영역에 걸쳐 영향을 주는 것으로 사료된다.

Fig. 10은 분사시기 BTDC 100 deg.와 60 deg.에서 슐리렌화상을 중간 필터링하여 취득한 분사개시후 시간에 따른 분무선단도달거리의 특성을 나타낸다. 그 결과로 Fig. 8의 슐리렌화상에서 나타난 바와 같이 과열도가 (+)인 경우가 분무선단도달거리는 단축됨을 알 수 있다. 이는 초기연료온도의 상승, 즉 과열도의 증가에 따라 그 경향은

현저하게 나타난다. 그리고 분사시기 BTDC 100 deg.에 비해 60 deg.인 경우가 과열도의 영향이 적은 이유는 주위기체가 분무에 미치는 영향이 크기 때문이라 사료된다. 여기서 분무선단도달거리가 시간에 대해 1승으로 비례하는 시간대와 1/2승으로 비례하는 시간대로 나눠 분무선단도달거리를 각각 시간의 거듭제곱으로 근사시켰다. 그 결과를 이용하여 연료온도에 따라 크랭크각에 따른 소요시간을 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11(a)은 분무선단도달거리가 분공으로부터 30 mm에 도달할 때까지의 소요시간이고, Fig. 11(b)은 분무선단도달거리가 55 mm에서 85 mm에 도달할 때까지 소요하는 시간이다.

Fig. 11(a)에서 소요시간은 과열도에 따라 약간의 차이를 보이나 모든 조건에 대해서 그 영향은 그다지 크지 않다. 이는 Reitz<sup>(13)</sup>의 연구결과와 유사하며, 감압비등시의 분류는 크게 확산되는 형상을 갖지만 내부 코어영역은 붕괴되지 않는 경우도 존재함을 나타낸다. 특히 본 실험과 같은 디젤분무는 연료가 노즐 내를 고속으로 통과하기 때문에 기포의 성장시간이 충분하지 않고, 분무 내부의 높은 수밀도 영역의 액적이 균일하여 광범위하게 확산되지 않을 가능성이 있다.

그러므로 분사초기에 있어서 감압비등분무는 반경방향으로 확산되지만 축방향에서는 높은 수밀도의 액적군이 어느 정도의 운동량을 유지하고

있는 것으로 사료된다. 단 Fig. 10에 나타난 바와 같이 과열도의 증대는 분무선단도달거리가 시간의 1승에 비례하는 선으로부터 벗어나는 시기를 조기화하고, 높은 수밀도영역의 분산을 촉진시키는 것을 알 수 있다.

한편 Fig. 11(b)에 관해서  $T_f=310$  K의 소요시간은 분위기조건이 압축상사점에 근접함에 따라 선형적인 증가를 보이나, 다른 연료온도에서는 다른 경향을 나타낸다. 예를 들면  $T_f=345$  K에서는 소요시간이 분사시기 BTDC 100 deg.인 경우가 BTDC 80 deg.인 경우보다 다소 길다. 이 연료온도의 경우에 BTDC 100 deg.에서 비교적 큰 과열도를 얻고, BTDC 80 deg.에서는 거의 0에 가깝다. 따라서 분위기조건에 기인하는 소요시간의 차이보다는 과열도의 대소에서 기인하는 차이가 크다. 이것은 고온의  $T_f$ 에서도 거의 비슷하며, 분위기조건과 과열도의 영향이 상쇄됨에 따라 분사시기 BTDC 100 deg.에서 60 deg.의 소요시간은 거의 유사한 경향을 보인다.

### 3.2.2 분무확산각에 미치는 영향

분무의 분산성을 평가하기 위해 분무확산각  $\theta_3$ 를 연료온도 및 분사시기조건에서 시간에 따른 변화를 Fig. 12에 나타내었다. 여기서  $\theta_3$ 는 Fig. 10과 동일한 방법으로 화상처리하여 분공과 분무

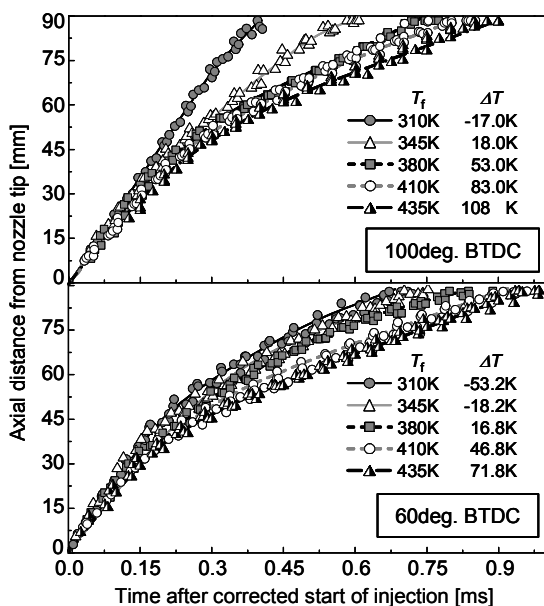


Fig. 10 Temporal change in spray tip penetration

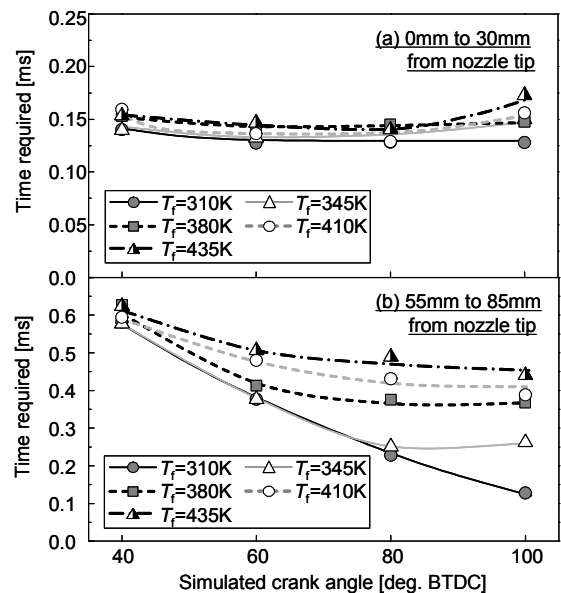


Fig. 11 Amount of time required so that spray tip penetrates in each distance

외연부를 연결하는 직선과 이루는 각도로 정의하였다.

그 결과로 분사시기 BTDC 100 deg.와 60 deg.에서 연료온도가 상승함에 따라 즉 과열도의 증가에 따라  $\theta_3$ 가 확대됨을 알 수 있었다. 또 분무선단도달거리의 결과와 마찬가지로  $\theta_3$ 도 저온 및 저밀도장일수록 연료온도의 영향을 크게 받는다. 여기서 분무확산각이 안정되는 분사개시 후 2~3 ms에서 평균분무각을 구하여 Fig. 13에 따른 결과를, Fig. 14는 연료밀도  $\rho_f$ 와 분위기밀도  $\rho_a$ 의 비에 따른 결과를 나타내었다.

Fig. 13의 결과로 분사시기 BTDC 100 deg.와

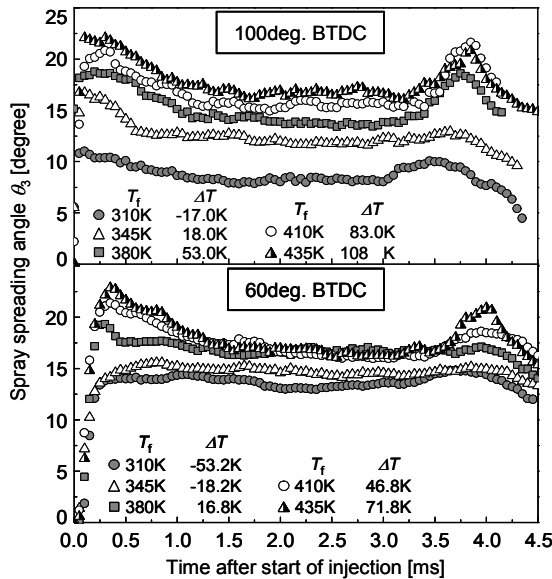


Fig. 12 Temporal change in spray spreading angle

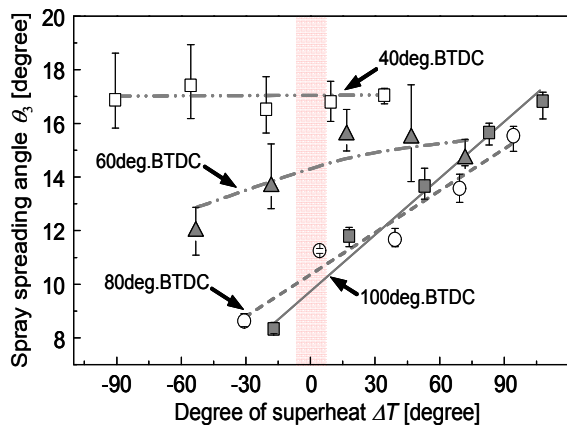


Fig. 13 Spray cone angle  $\theta_3$  according to degree of superheat

80 deg.에서는  $\theta_3$ 는 과열도에 의존하여 선형적으로 비례하는 경향을 나타내었다. 그러나 분사시기를 지각하면 그 구배는 완만하게 되고, 특히 BTDC 40 deg.에서는 과열도에 의존하지 않음을 알 수 있었다. 이것을 밀도비  $\rho_f/\rho_a$ 에 따른 분무확산각  $\theta_3$ 을 나타낸 Fig. 14에서 고찰해 보면, 모든 실험조건(BTDC 100, 80, 60, 40 deg.)이 2상영역의 포화액체곡선 밖에 존재하여 과열도가 부(-)가되어 감압비등이 발생할 수 없는  $T_f=310$  K의 경우에만  $\theta_3$ 가 밀도비의 감소에 따라 지수함수적으로 증가하는 특성을 나타내었고, 그 외의 연료온도조건에서는 감소하다가 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 감압비등에서 과열도 및 분위기밀도에 따라 분무확산각의 특성이 다름을 알 수 있다. 결국  $\theta_3$ 는 감압비등이 없는 분무의 경우에 분류가 유인한 분위기기체가 유동장에 미세액적을 분산하는 것으로 결정되지만, 감압비등이 있는 분무의 외연부는 분출직후의 분류가 갖는 분무반경방향의 운동량에 의해 결정된다.

이 때문에  $\theta_3$ 는 고밀도의 분위기장일수록 반경방향으로의 확산이 억제된다. 또 Fig. 13의 BTDC 60 deg.인 경우, 과열도가 가장 높은 조건과 비교하여 그 이하의  $\theta_3$ 가 커지는 것은 유인된 분위기 유체의 유동과 감압비등분무에 의한 확산이 상승적으로 작용한 때문이라 사료된다.

### 3.2.3 분무내의 농도분포

Fig. 15는 분사시기 BTDC 60 deg.에서 얻어진 산란광화상에 대하여 각 화상에서 얻어진 최대휘도  $I_{max}$ 를 무차원화한 등휘도( $I/I_{max}$ )의 조건에서 분공출구의 축방향거리에 따른 반경방향의 분무

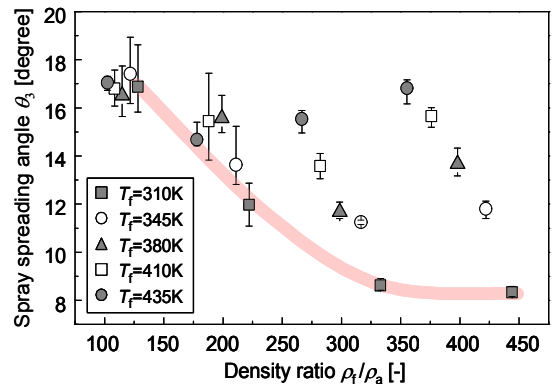


Fig. 14 Spray cone angle  $\theta_3$  according to density ratio  $\rho_f/\rho_a$

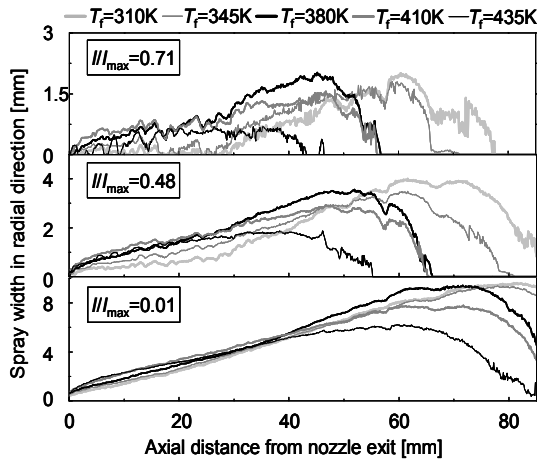


Fig. 15 Spatial distribution of iso-intensity line at BTDC 60 deg.

거리 확산을 나타내고 있다. 그 결과로 과열도(+)와 (-)의 연료온도에서 축방향하류의 고휘도영역이 크게 다르다. 이것은 감압비등에 의해 분무축상에 존재하는 높은 수밀도의 액적군이 조기에 붕괴하고 높은 과열도를 갖는 액적의 증발이 빠르기 때문이라 사료된다. 그리고 지금까지 외관상 큰 차이가 없었던 연료온도  $T_f=380, 410, 435$  K에서 축방향의 휘도영역은 각각 다르다. 특히  $I/I_{max}=0.71$ 에서 과열도가 가장 높은  $T_f=435$  K에서는 노즐근방 반경방향으로의 등휘도선의 확산이 낮다.  $T_f=310, 345$  K의 확산이 낮은 것은 반경방향으로의 분무 비산이 적은 것과  $I/I_{max}=0.71$ 의 휘도영역 외곽에 존재하는 액적군에 의한 입사광강도가 감소되는 것으로 생각되지만, 보다 고온의 연료조건에서 감소는 상대적으로 낮다. 또한 그것보다 휘도가 낮은  $I/I_{max}=0.48, 0.01$ 에서는  $T_f=380, 410, 435$  K의 경우, 모두 확산에 큰 차이는 없으며, 비슷한 경향을 나타낸다.

따라서  $T_f=435$  K에서는 축상에 높은 수밀도로 존재하는 액적의 대부분이 감압비등에 의해 반경방향으로 비산하고, 액적이 작고 과열도가 높은 비산액적이 신속하게 증발됨을 추측할 수 있다. 이상과 같이 감압비등은 고밀도 분위기장에 있어서도 분무성상을 제어할 수 있음을 보였다.

#### 4. 결 론

연료분사시기에 따른 과열도 및 분위기조건에서 고비점성분과 저비점성분으로 혼합한 연료의

의 감압비등 분무특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

(1) 저비점성분을 함유한 혼합연료에서는 쉽게 감압비등분무가 얻어지고, 노즐출구에서 분무확산은 과열도에 의해 좌우된다.

(2) 감압비등에 의한 분사직후의 분무 분산성은 분무하류의 확산에 보다 많은 영향을 미치고, 분무 관통력을 크게 저하시킬 수 있다.

(3) 감압비등분무의 외관은 과열도와 밀도비에 의해 결정된다.

(4) 고분위기 밀도장에서도 고과열도를 갖은 분무는 액적의 증발이 촉진되고, 내부의 고농도영역은 감소한다.

#### 후 기

이 연구는 2010년도 경원대학교 지원에 의한 결과임.

#### 참고문헌

- (1) Thring, R. H., 1989, "Homogeneous Charge Compression Ignition(HCCI) Engines," SAE Paper 892068.
- (2) Kitano, K., Nishiumi, R., Tsukasaki, Y., Tanaka, T. and Morinaga, M., 2003, "Effects of Fuel Properties on Premixed Charge Compression Ignition Combustion in a Direct Injection Diesel Engine," SAE paper 2003-01-1815.
- (3) Christensen, M., Hultqvist, A. and Johansson, B., 1999, "Demonstrating the Multi Fuel Capability of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Variable Compression Ratio," SAE paper 1999-01-3679.
- (4) Sensa, J., Ikeda, M., Yamamoto, M., Kawaguchi, B. and Fujimoto, H., 1999, "Low Emission Diesel Combustion System by Use of Design Concept," SAE paper 99011136.
- (5) Kawano, D., Senda, J., Kawakami, K., Shimada, A. and Fujimoto, H., 2002, "Fuel Design Concept for Low Emission in Engine 2nd Report : Analysis of Spray Characteristics for Mixed Fuels," SAE paper 2002-01-0202.
- (6) Kawano, D., Senda, J., Shimada, A. and Fujimoto, H., 2002, "Fuel Design Concept for Low Emission



- in Engine 3rd Report : Analysis of Spray Characteristics for Mixed Fuels," SAE paper 2002-01-0220.
- (7) Yoon, J. K., Myong, K. J., Senda, J., Fujimoto, H. and Cha, K. O., 2006, "A Study on Evaporative Characteristics of Multi-component Mixed Fuels Using Mie Scattered Light and Shadowgraph Images," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 30, No. 7, pp. 682~691.
- (8) Nishimura, H., Wada, Y., Yamaguchi, A., Yoon, J. K., Senda, J. and Fujimoto, H., 2006, "An Experimental Study on Flash Boiling Spray using Two-Component Fuel under the Condition of Advanced Injection HCCI," ICLASS 06-134.
- (9) Park, S. B. and Lee, Y.S., 1994, "An Experimental Investigation of the Flash Atomization Mechanism," *Atomization and Sprays*, Vol. 4, pp. 159~179.
- (10) Friend, J. F., 1992, "NIST Mixture Property Database Users" Guide.
- (11) Wada, Y., Yamaguchi, A., Nishimura, Y., Magara N., Yoon, J. K., Senda, J. and Fujimoto, H., 2007, "A Study on Possibility of Mixed Fuels to Control the Combustion Processes in Premixed Charge Compression Ignition Engine," *Trans. of the JSAE*, Vol. 38, No. 1, pp. 85~90.
- (12) Naber, D. J. and Siebers, L. D., 1996, "Effects of Gas Density and Vaporization on Penetration and Dispersion of Diesel Sprays," SAE paper 960034.
- (13) Reitz, D. R., 1990, "A Photographic Study of Flash Boiling Atomization," *Aerosol Science and Technology*, Vol. 12, pp. 561~569.