

다성분 혼합연료를 이용한 디젤분무의 착화연소특성에 관한 연구

윤준규[†] · 임종한

경원대학교 기계·자동차공학과

(2007년 3월 21일 접수, 2007년 9월 18일 채택)

A Study on the Characteristics of Ignition and Combustion in a Diesel Spray Using Multi-Component Mixed Fuels

Jun-Kyu Yoon[†] and Jong-Han Lim

Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kyungwon University

(Received 7 March 2007, Accepted 28 September 2007)

요 약

본 연구의 목적은 디젤연소장의 분위기조건에 따라 다성분 혼합연료의 질량분율이 분무착화 및 연소특성에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하는데 있다. 착화 및 연소특성은 화학발광측법 및 직접촬영법을 이용하여 분석되었다. 실험은 광계측기를 사용하여 RCEM에서 이루어졌으며, 이소옥탄, 노말 도데칸, 노말 헥사데칸으로 혼합한 다성분연료는 커먼레일 인젝터의 전자제어에 의해 RCEM의 연소실 내로 분사된다. 실험조건은 분사압력 42, 72, 112 MPa과 분위기온도 700, 800, 900 K로 하였다. 그 결과로서 착화지연은 고세탄가성분에 의존하고, 분위기온도가 낮을 경우 저비점성분 혼합비율의 증가에 따라 휘도영역이 현저하게 낮아지며, 열발생률이 증가하면서 확산연소시간을 단축시킨다.

주요어 : 디젤분무, 화학발광, 급속압축팽창장치, 열발생률, 다성분 혼합연료

Abstract- The purpose of this study is experimentally to analyze that the fuel mass fractions of multi-component mixed fuels have an effect on the characteristics of spray ignition and combustion under the ambient conditions of diesel combustion fields. The characteristics of ignition and combustion were investigated by chemiluminescence images and direct photography. The experiments were conducted in the RCEM (rapid compression expansion machine) with optical access. Multi-component fuels mixed with i-octane, n-dodecane and n-hexadecane are injected in RCEM by the electronic control of common rail injector. Experimental conditions set up 42, 72 and 112 MPa in injection pressure, 700, 800 and 900 K in ambient gas temperature. The results show that the ignition delay was dependent on high cetane number. In case of low ambient temperature, the more low boiling point fuels were mixed, the lower luminance regime had a remarkable effect and also shortened diffusion combustion by increasing heat release rate.

Key words : Diesel spray, Chemiluminescence, RCEM(Rapid compression expansion machine), Heat release rate, Multi-component mixed fuels

[†]To whom correspondence should be addressed.
Department of Mechanical & Automotive Engineering,
Kyungwon University
Tel: 031-750-5651
E-mail: jkyoon@kyungwon.ac.kr

1. 서 론

디젤기관은 가솔린기관에 비해 열효율이 높고, 지구온난화의 원인이 되는 이산화탄소의 배출량이 적어 산업용의 동력원으로서 많이 사용되고 있으며, 또한 경제성이 우수하다. 그러나 유해물질인 질소산화물과 입자상물질이 동시에 배출되는 문제로 환경에 심각한 우려가 되고 있다. 따라서 이에 대한 대응방안으로 자동차기관의 성능뿐 만 아니라 배출가스의 저감 및 연비향상을 위해 연료를 개질화하여 디젤분부 및 연소특성을 고찰하는 연구가 이루어지고 있다. 일반적으로 디젤분부형성과정은 고압에서 액체연료가 과도적으로 분사되어 분열, 미립화, 주위기체의 혼입, 증발, 혼합기형성 등으로 복잡한 현상을 나타냄으로 짧은 시간에 이루어지는 비정상현상을 정확히 해명하기에는 어려움이 많다. 종래의 분부연소에 관한 연구에서는 분부연소현상을 간단히 보여주기 위해서 단성분연료를 사용해 왔다. 그러나 경유 또는 가솔린 등의 연료는 수십종 이상의 성분으로 혼합된 다성분연료임으로 함유되어 있는 성분의 물성치가 서로 달라 증발 및 연소되는 현상도 다르므로 단성분연료만으로 해석한다는 것은 충분하지 못하다. 일반적으로 다성분연료는 상변화과정에서 2상변화영역을 형성하므로 단성분연료의 증발 및 연소과정과 비교했을 때 상당한 차이를 보인다.

이에 따른 연구내용으로 Akihama 등^[1]은 혼합연료의 각 성분의 증발특성은 서로 다른 비점뿐 만 아니라 혼합연료 자체의 증류특성에 의존한다고 해석한 바가 있고, John과 Christoph^[2]는 연료조성 및 분위기조건에 따라 디젤연소의 화학반응에 생성되는 OH, CH, C₂ 등의 라디칼발광을 측정하여 착화지연, 분부휘염 등에 미치는 영향을 조사하였으며, Kawano 등^[3]은 노말 펜탄과 노말 트리데칸, 이소옥탄과 노말 트리데칸의 각각 2성분 혼합연료를 이용한 착화특성을 조사한 결과로, 저비점연료의 고옥탄가성분을 혼합해도 착화지연은 크게 변하지 않아 고비점연료의 고세탄가성분에 크게 의존함을 고찰하였다. 그 밖에 다성분 혼합연료의 증발 및 착화연소해석^[4,5]을 통하여 정성적인 연구의 가능성을 제시하고 있다.

본 연구에서는 물성치가 서로 다른 이소옥탄, 노말 도데칸, 노말 헥사데칸의 3성분연료를 적절히 혼합한 다성분연료를 이용하여 RCEM의 연소실 내로 분사·착화시켜 CH 라디칼 발광과 분부휘염을 동시에 직접 촬영하여 착화·연소과정에 미치는 다성분연료의 물리적, 화학적 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험연료의 증발특성

Fig. 1은 본 실험에서 사용한 다성분 혼합연료의 각

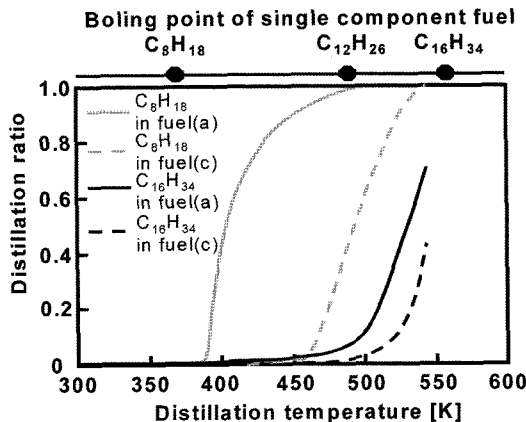


Fig. 1. Distillation curve of each component in multi-component fuels.

성분의 분류곡선을 수치계산^[6]에 의해 산출한 것이다. 이는 3성분 연료인 이소옥탄, 노말 도데칸, 노말 헥사데칸의 혼합연료의 질량분률에 따라 각 압력 및 온도에서 퓨개시티를 산출하여 기액평형을 추산하였다. 연료 a를 보면 저비점성분인 이소옥탄을 다량으로 함유한 것으로 증류개시가 저온측으로 이동하고 있음을 알 수 있으며, 반대로 연료 c에서는 각 성분의 증류개시가 고온측으로 이동한다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 연료분부중의 각 성분의 증발과정은 각각 물성치 및 함유량이 다르므로 증발특성도 변한다.

Table 1. Fuel Properties for single and multi-component fuels.

Properties	Fuel		
	C ₈ H ₁₈	C ₁₂ H ₂₆	C ₁₆ H ₃₄
Boiling point, [K]	372	489	560
Density (at 293 K), [kg/m ³]	692	759	795
Viscosity (at 293 K), [μPa · s]	508	1,543	3,399
Latent heat of vaporization (at 298 K), [kJ/kg]	305.4	360.0	358.3
Latent heat of vaporization (at B.P), [kJ/kg]	272.0	256.6	227.4
Properties	Fuel		
	Fuel(a)	Fuel(b)	Fuel(c)
Density (at 293 K), [kg/m ³]	722	748	773
Viscosity (at 293 K), [μPa · s]	825	1,265	2,061
Critical pressure, [MPa]	2.72	2.43	1.85
Critical temperature, [K]	604	654	690
Surface tension, σ [mN/m]	23.38	25.99	28.57

본 실험연료는 실제연료에 가깝도록 저·중·고비점의 3성분연료인 이소옥탄, 노말 도데칸 및 노말 헥사데칸을 질량분율을 6:3:1(연료 a), 1:1:1(연료 b), 1:3:6(연료 c)으로 조성된 다성분 혼합연료를 사용하였으며, 이들 연료의 물성치는 Table 1에 나타내었다.

3. 실험조건 및 실험방법

다성분 연료분무의 착화실험을 위한 실험조건과 본 실험에서 사용되는 RCEM의 제원은 각각 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 연료시스템은 일본 Denso제 커먼레일시스템(ECD-U2, $\phi 0.2$ 의 단공노즐)을 사용하였고, 분사량은 모든 조건에서 25 mg으로 일정하게 하여 분사시기를

Table 2. Experimental conditions for direct photography in RCEM.

Ambient temperature at injection start, [K]	700	800	900
Ambient gas, [vol.%]	N ₂ : 48.0	N ₂ : 76.0	N ₂ : 32.0
	O ₂ : 21.0	O ₂ : 21.0	O ₂ : 21.0
	Ar : 5.5	Ar : 3.0	Ar : 44.0
	CO ₂ : 25.5		He : 3.0
Specific heat ratio, κ	13.2	13.6	1.45
Compression ratio	11.0	12.5	11.0
Injection pressure, P _{inj} [MPa]	42, 72, 112		
Injection timing, [deg.CA.BTDC]	5.0±0.15		
Injection quantity, [mg]	25		
Initial cylinder pressure, P _i [MPa]	0.101		
Ambient density at injection start, ρ_a [kg/m ³]	12.8	12.8	12.9
Ambient pressure at injection start, P _a [MPa]	2.23	2.91	2.89

Table 3. Specification of RCEM.

Combustion chamber type	Flat disk type
Bore×Stroke	$\phi 100 \times 450$ [mm]
Top clearance	30~ [mm]
Injection location	slide injection
Compression ratio	6~161
Mean piston speed	~42 [m/s]
Equivalent crank speed	~280 [rpm]
Initial cylinder wall temperature	273~363 [K]

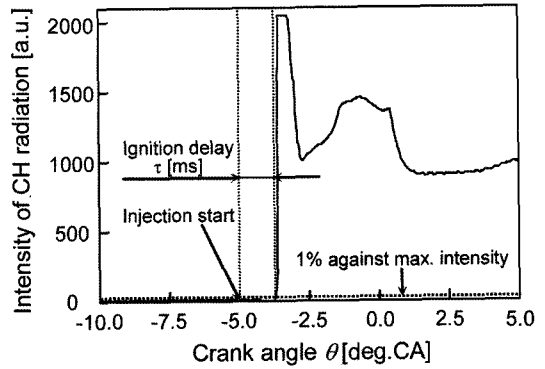


Fig. 2. Definition of ignition delay.

BTDC 5°CA로 설정하였다. 연료분사시의 분위기조건을 700, 800, 900 K로 설정하기 때문에 RCEM 연소실 내의 분위기는 N₂, O₂, Ar, CO₂, He의 혼합기를 사용하여 동시에 산소분율을 통상 공기와 같이 21[vol.%]가 되도록 충전분압을 설정하면서 연소현상에 지장이 없도록 각 분위기온도에서 혼합기밀도를 일정하게 하였다. 이 조작은 각 가스의 혼합비율 및 압축비를 변화시켜 조절한다.

착화시기의 결정은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 CH 라디칼강도가 최대치의 1%를 초월한 시점을 고려하여 착화지연기간으로 하였다.

보통 디젤화염에서 주로 탄화수소의 연소에 의해 발생하는 화학종의 발광은 단파장으로서 가시역 및 자외역에 가깝다. 탄화수소화염에서는 탄화수소의 초기분해 과정에서 C₂ 라디칼이 생성되고, 또 반응에 의해 CH 라디칼이 생기며, 다시 반응에 의해 OH 라디칼이 발생한다. 일반적으로 탄화수소의 분해과정에서 CH 라디칼 발광은 OH 라디칼 발광강도에 비해 높으므로^[1] 본 연구에서는 광전자증폭관을 이용한 CH 라디칼의 발광계측에 의해 다성분연료의 착화특성을 조사하였다.

Fig. 3은 CH 라디칼계측 및 분무취역계측 광학계의 개략도를 나타내었다. 먼저, 연소실 내를 진공펌프로 진공시키고, 예혼합기 생성용기로부터 RCEM의 연소실 내에 예혼합기를 대기압이상으로 충전하여 피스톤을 하사점으로 맞춘 후 배기구를 개방하여 연소실 내의 초기압력을 대기압으로 설정한다. 연소실 내의 모양은 실린더 헤드에 취부된 석영유리를 통과하여 반반사 거울에 의해 분광된다. 이 때 한 쪽은 대역통과필터(중심파장 430.9 nm, 반치폭 8 nm)를 통과하여 광전자증폭관에 의해 측정이 이루어지고, 또 다른 한 쪽은 동시에 고속도카메라에 의해 직접 촬영된다. 그 때 대역통과필터를 통과함으로써 CH 라디칼을 검출할 수 있고, 또 광차폐필터(Neutral density filter)를 카메라 렌즈 앞에 설치함으로써

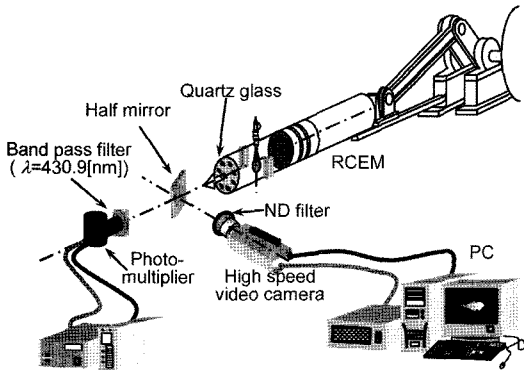


Fig. 3. Optical measurement system of direct photography in RCEM.

써 화염으로부터 휘광치의 포화를 막을 수 있다. 이 때 고속도카메라의 촬영속도는 9000 f.p.s.로 하였다. 또한 실린더헤드 측면부에는 피에조식 압력변환기를 설치하여 실린더 내의 압력을 검출하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4-1. 분무의 착화특성

일반적으로 착화성이 나쁜 성분을 혼합하면 그 혼합 연료의 착화성이 악화된다. 따라서 파라핀계의 단일성분과 이들 3성분 혼합연료의 착화특성을 비교하여 저·고비점혼합연료의 물리적, 화학적 특성이 착화에 미치는 영

향을 조사할 필요가 있다.

Fig. 4에는 분위기온도와 분사압력의 조건에서 단일분 연료와 다성분연료와의 착화지연특성을 나타내었다.

분위기온도가 낮은 700 K의 경우는, 다른 온도조건에 비해 분사압력에 따라 착화지연이 길어져 약 0.5 ms의 차이를 보인다. 이는 분위기온도를 낮추면 증발속도가 늦어지기 때문이다. 이 온도조건에서는 노말 헥사데칸, 연료 c 및 노말 도데칸의 착화지연의 영향은 거의 변함이 없다. 연료 b 및 연료 a에 있어서는 혼합연료중의 고비점성분의 혼합비율이 감소하고 저비점성분의 혼합비율이 증가하기 때문에 연료의 물리적 특성상 가연혼합기 형성이 쉬어지므로 착화지연은 길어진다. 이 경향은 저비점성분이 가장 많이 함유되는 연료 a에 있어서 현저하다. 이 결과는 Kobori 등의 실험결과^[11]와 거의 일치하였다.

또한, 분위기온도 800, 900 K의 경우에서, 분사압력의 상승에 따라 착화지연의 차이는 연료에 관계없이 대략 0.2 ms 정도로 나타나고 있으며, 이 온도조건에서는 분사압력이 연료의 자기착화에 미치는 영향은 그다지 크지 않는다. 이것은 분사압력 또는 분위기온도가 어느 일정치를 넘으면 가연혼합기의 형성시기는 거의 비슷하며, 다성분연료 a, b, c에는 어느 것도 고세탄가성분의 노말 헥사데칸을 함유하고 있기 때문에 착화시기에 큰 차이는 없다. 그러나 분위기온도 800 K와 900 K에서 착화지연에 미치는 분사압력의 영향은 작지만 연료의 물리적 특성에 따라 혼합기형성 및 연소과정에 큰 영향을 미칠 수 있다.

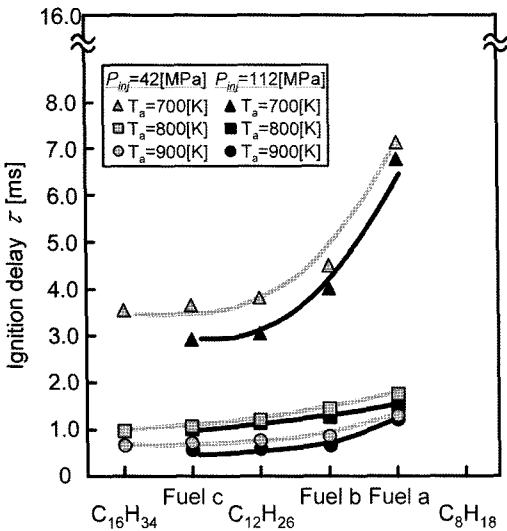


Fig. 4. Ignition delay of single and multi-component fuels.

4-2. 분무의 휘염분포특성

Fig. 5와 Fig. 6은 CH 라디칼계측 및 분무휘염계측 광학계를 이용하여 직접촬영한 휘염화상을 분사개시후 시간별 변화로 나타내었다. 이 때 실험조건은 분사압력이 42, 112 MPa이고, 분위기온도는 800, 900 K이다. Fig. 5와 Fig. 6에서 휘염분포의 경향을 보면, 연료 c, b, a 순으로 저비점성분을 더 많이 함유할수록 휘염휘도가 낮아지므로 흑연 생성량도 적어질 것으로 사료된다. 이것은 Fig. 4에서 연료별 착화지연의 특성을 고찰한 바와 같이 연료 c의 착화지연이 다른 연료에 비해 짧고, 확산연소의 개시점이 빠르기 때문이다. Fig. 5에서 분위기온도 800 K의 경우, 분사압력의 증가로 휘염의 전면적이 감소하고 휘염휘도는 균일한 분포를 보인다. 특히, 저비점성분이 많은 연료 a에서 이 현상은 가장 현저하게 나타나고, 분사압력 112 MPa에서는 휘염의 전면적이 현저하게 적다. 이 현상은 분사압력의 증가에 의한 미립화 및 증발촉진에 기인된다. Fig. 5(a)의 고회도영역은 자유분무영역과 벽면상의 분무영역의 경계부근에 나타난

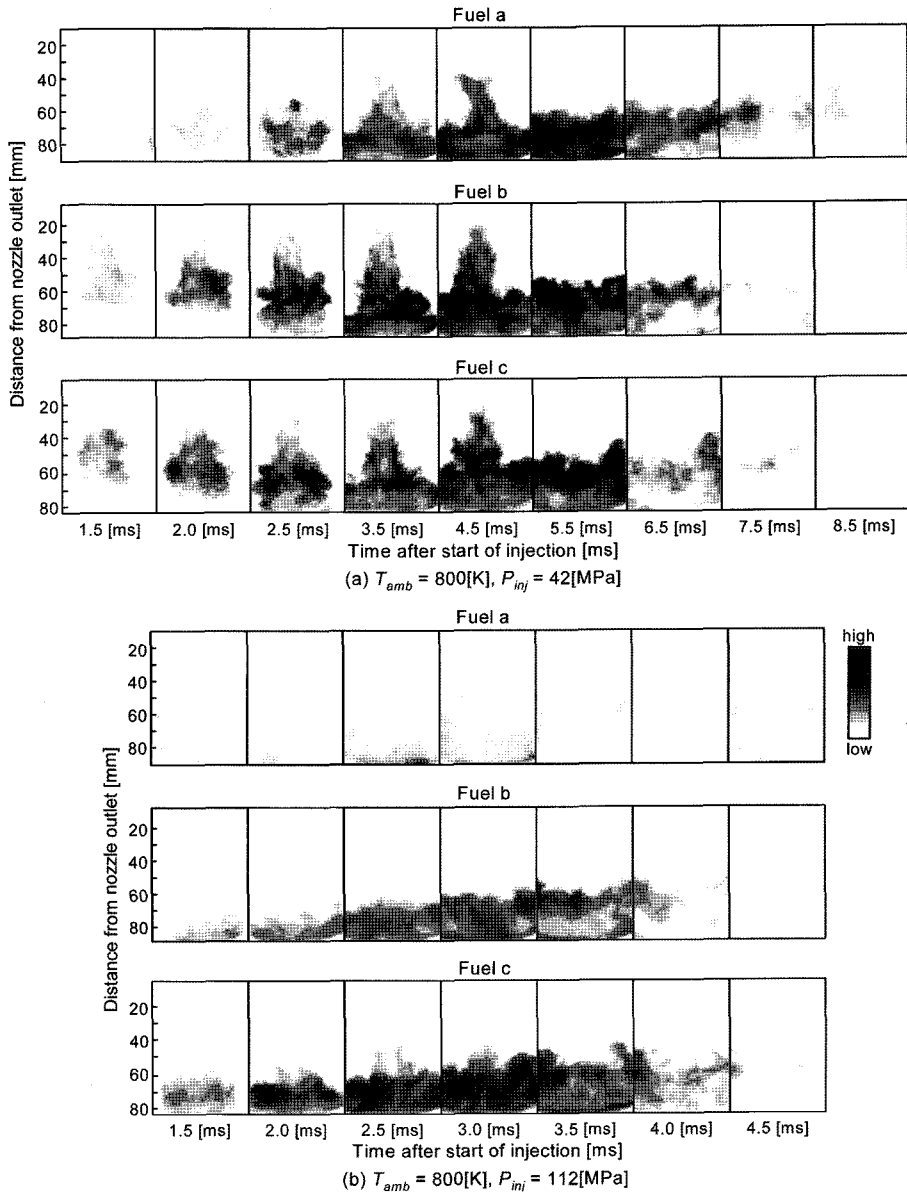


Fig. 5. Temporal flame images of multi-component fuels.

다. 이는 자유분무의 영역에서 주위기체의 분무로 흡인 속도가 감소되므로 확산진행정도가 적다는 것을 알 수 있다.

그러나 분사압력이 112 MPa로 될 때, 자유분무영역의 휘도는 거의 나타나지 않고 충돌영역만 나타난다. 저비점성분이 많은 연료 a에서는 저휘도영역만이 나타나고, 연료 b는 중휘도영역으로 대부분 형성한다. 그러나 고비점성분의 혼합비율이 가장 많은 연료 c에서는 고휘

도영역이 나타나지만, 그 면적은 분사압력 42 MPa의 혼합에 비해 상당히 좁다. 이 경향은 분사압력의 증가에 의해 미립화가 촉진되기 때문이라고 생각할 수 있다.

Fig. 6에서는 어떤 조건에서도 Fig. 5에 비해 자유분무영역에서 휘염형성이 뚜렷하게 나타난다. 고휘도영역은 주로 벽면충돌영역과 자유분무가 충돌하는 부분에서 더 현저하게 나타난다. 그리고 분사압력이 증가해도 그 경향은 비슷하지만, 고휘도영역의 면적은 감소하는 경향

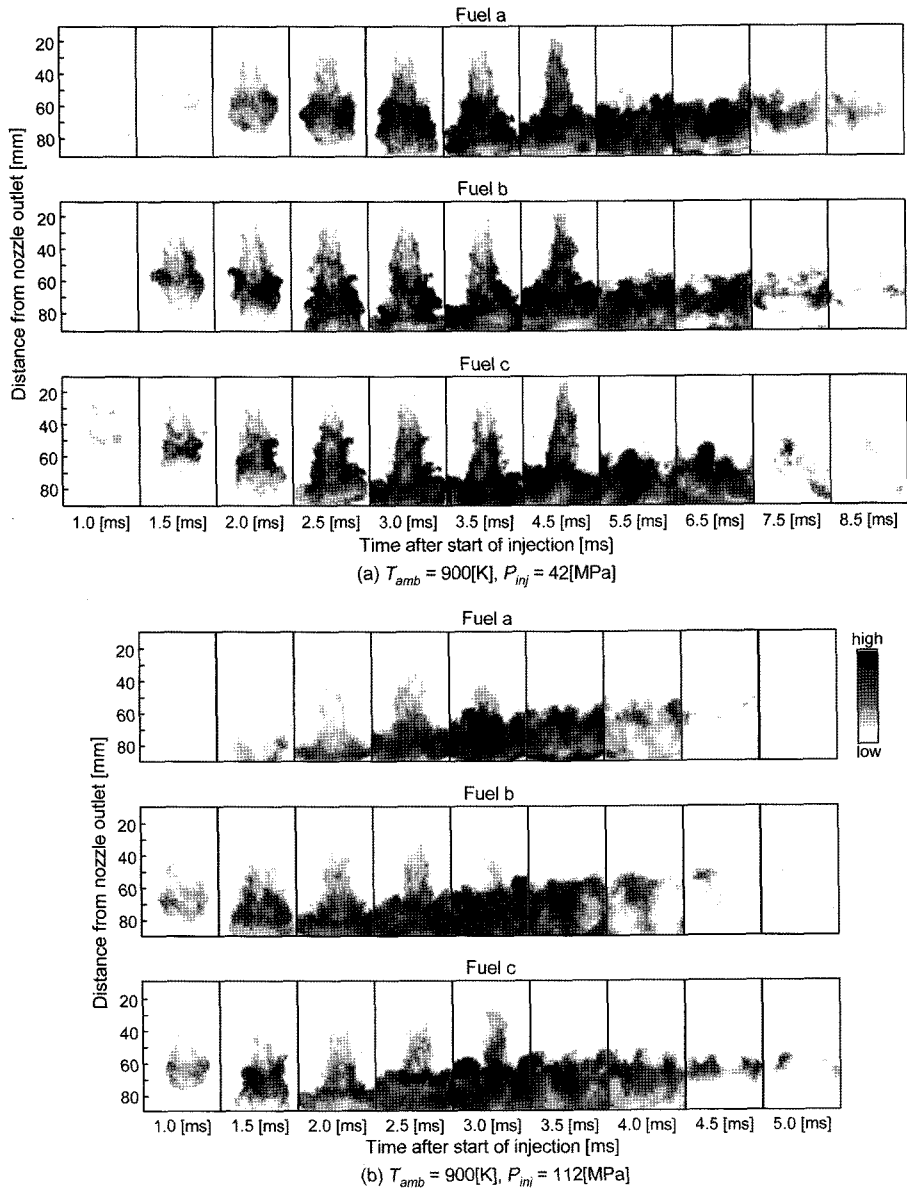


Fig. 6. Temporal flame images of multi-component fuels.

이 있다. 이것은 착화지연의 단축에 따른 확산연소가 현저하게 나타나기 때문이라 할 수 있다.

4.3. 분무의 연소특성

Fig. 7~Fig. 9에는 분사압력 42, 72, 112 MPa 조건에서 분위기온도를 800, 900 K로 변경했을 때 연소실 내의 압력 및 열발생률에 관한 결과를 나타내었다. Fig. 7에서 분사압 42 MPa, 분위기온도 800 K의 경우, 이소옥

탄의 혼합비율이 증가함에 따라 예혼합연소의 개시는 늦어지고, 그 열발생률은 증가하면서 후기연소가 빨라져 확산연소기간이 단축된다. 이는 저비점성분 혼합연료의 증가로 착화지연이 길어져 착화지연기간중에 형성되는 가연혼합기량이 증가함으로써 예혼합연소의 열발생률이 증가됨을 알 수 있다. 또한, 이소옥탄의 혼합비율이 적은 연료 c의 경우는 연소기간이 전체적으로 길어지는데, 이는 함유된 고비점성분의 노말 헥사데칸이 증발이 늦어

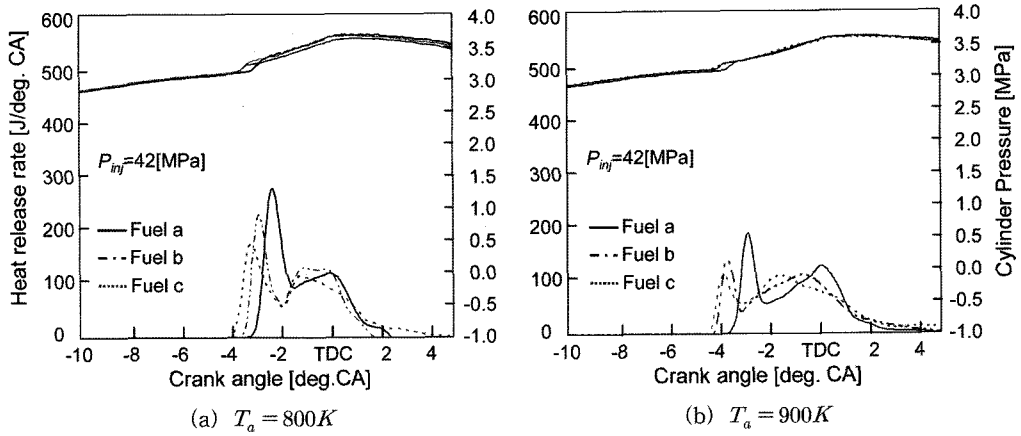


Fig. 7. Cylinder pressure and heat release rate for ambient pressure 42 MPa.

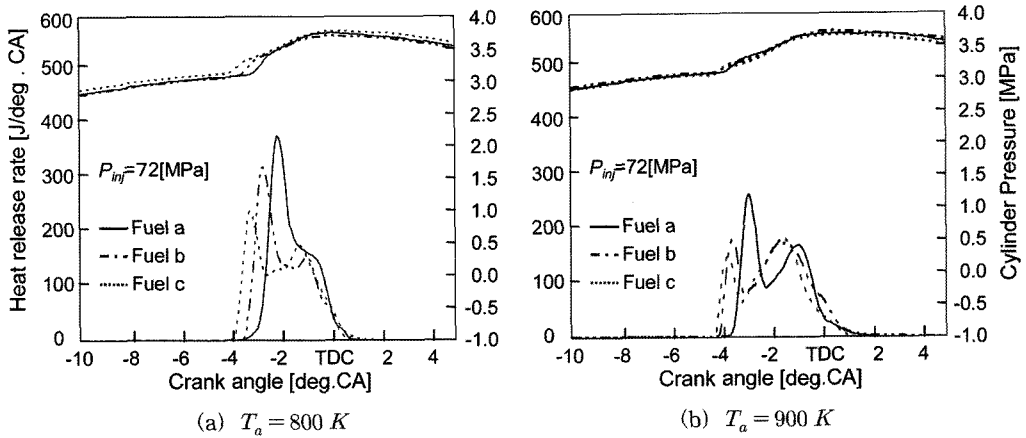


Fig. 8. Cylinder pressure and heat release rate for ambient pressure 72 MPa.

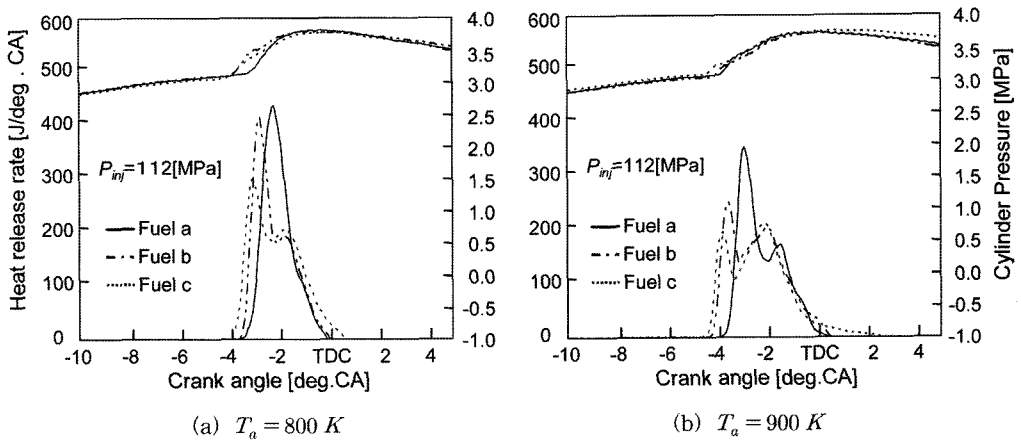


Fig. 9. Cylinder pressure and heat release rate for ambient pressure 112 MPa.

짐으로써 예혼합기형성도 적어져 확산연소기간중에 다량의 연료가 연소되기 때문이다. 이것에 대하여 분위기온도 900 K의 경우는, 온도증가에 따라 착화지연이 단축되어 열발생의 개시점도 빨라진다. 이 때문에 예혼합연소기간이 짧아지면서 열발생률이 감소되는 반면에, 확산연소기간은 증가한다. 그러나 연소종결점은 연료 a, b, c 모두가 비슷하게 끝난다.

Fig. 8은 분사압력 72 MPa의 경우, 연료 a, b, c 모두 예혼합연소특성이 현저하게 나타냄으로써 확산연소기간이 감소되어 전체의 연소기간을 단축하고 있다. 이는 분사압력의 증가로 인해 미립화가 촉진되어 증발과정이 빨라지는 결과라고 볼 수 있다. 동일한 분사압력 조건에서 분위기온도가 900 K로 되면, 분위기온도의 상승에 따른 예혼합연소가 800 K의 경우보다도 빨리 진행되며 현저하게 되고, 확산연소기간이 길어진다. 이것은 분위기온도의 상승에 의한 착화지연이 단축되는 효과를 알 수 있다.

Fig. 9는 분사압력이 최대인 112 MPa의 경우, 분위기온도 800 K 조건에서 예혼합연소가 현저하고, 저비점성분이 많은 연료 a에서는 확산연소가 거의 나타나지 않는다. 반면에 고비점성분의 혼합비율이 많은 연료 b 또는 c에서는 명확한 확산연소가 나타나며, 또한 최대치도 존재한다. 전체의 연소기간은 분사압력이 낮은 경우에 비해 가장 짧아진다. 그리고 분위기온도가 900 K가 되면 800 K의 경우에 비해 예혼합연소기간에 열발생률의 최대치는 낮아지고 확산연소기간에 열발생률이 높아지면서 전체의 연소기간은 길어진다. 이 경향은 분사압력 72 MPa의 경우와 다소 비슷한 경향을 보인다.

5. 결 론

본 연구에서 CH 라디칼 발광과 분무취역을 동시에 직접 촬영하여 착화·연소과정에 미치는 다성분 혼합연료의 물리적, 화학적 영향에 대하여 고찰한 결과는 다음과 같다.

(1) 분위기온도가 높은 800 K 및 900 K의 경우는 연료의 화학적 성질이 착화지연에 미치는 영향은 적으며, 고세탄가성분을 함유하는 혼합연료의 착화지연은 고세탄가성분에 의존한다.

(2) 분위기온도가 높은 900 K의 경우에서 저비점성분의 첨가 및 분사압력에 관계없이 비슷한 휘염특성을 보이나, 분위기온도가 낮은 800 K의 경우에서는 저비점성분이 많은 혼합연료일수록 분사압력을 높이면 휘염특성은 현저하게 낮아진다.

(3) 분사압력에 따라 착화지연은 큰 차이는 없으나, 연소과정에 주는 영향은 크게 나타난다.

(4) 저비점성분의 혼합비율이 증가함에 따라 예혼합연소에 의한 열발생률이 증가하여 확산연소기간을 단축시킨다.

참고문헌

1. Akihama, K.; Fujikawa, T.; Hattori, Y. "Simultaneous laser-induced fluorescence measurements of in-cylinder fuel behavior of different boiling point components", Proc. 15th Internal Combustion Symposium, Seoul, 1999, 577.
2. John E. Dec.; Christoph Espey. "Chemiluminescence imaging of auto-ignition in a DI diesel engine", SAE 982685, 1998.
3. Kawano, D.; Senda, J.; Kawakami, K.; Fujimoto, H. "Fuel design concept for low emission in engine systems 2nd report : Analysis of combustion characteristics for the mixed fuels", SAE 2002-01-0220, 2002.
4. Jin, J.D.; Borman, G.L. "A model for multi-component droplet vaporization at high ambient pressure", SAE 850264, 1985.
5. Ayoub, N.S.; Reitz, R.D. "Multidimensional computation of multi-component spray vaporization and combustion", SAE 950285, 1995.
6. Lippert, A.M.; Reitz, R.D. "Modeling of multi-component fuels using continuous distributions with application to droplet evaporation and sprays", SAE 972882, 1997.
7. Myong, K.J.; Arai, M.; Suzuki, H.; Senda, J.; Fujimoto, H. "Vaporization characteristics and liquid phase penetration for multi-component fuels", SAE 2004-01-0529, 2004.
8. Ciezki, H.K.; Adomeit, G. "Shock-tube investigation of self-ignition of n-heptane air mixtures under engine relevant conditions", Combustion & Flame, 1993, 93, 421.
9. Giulio, E.R.; *et al.* "Diesel spray combustion rate enhancement by increasing injection pressure", SAE 930926, 1993.
10. Ely, J.F.; Huber, M.L. "NIST thermo-physical properties of hydrocarbon mixture database(SURERTRAPP) version 1.0", National Institute of Standards and Technology, 1992.
11. Kobori, S.; Kamimoto, T. "Effects of surrounding gas condition, fuel injection condition and fuel properties on ignition delay in diesel engine", JSME(B), 1999, 65, 1152.