

다조성 연료 액적의 연소특성에 관한 연구

김 봉 석

원주대학 동력기계과

A Study of Droplet Combustion Characteristics with Multicomponent Fuel

Bong-Seock Kim

Department of Mechanical Engineering for Power, Wonju National College

요 약

본 연구에서는 고온 분위기 온도 및 대기압 하에서 액적의 급속가열과 연소가 가능한 고온 연소로 장치와 고속도 비디오 카메라를 이용하여 다조성 단일 액적 연소에 대해 고찰하였다. 그 결과 저비점 성분을 혼합한 경유의 액적은 기본적으로 입경의 2승 법칙에 의해서 감소되었으며, 그 과정에서 입경이 일시적으로 급속히 감소하는 현상이 보여짐과 더불어 연소기간도 단축되었다. 즉, 저비점 성분을 혼합한 경유의 액적은 미세폭발 현상에 의해 기존 디젤 연료에 비해 더 빨리 증발되고 연소가 되었다. 또한, 순수 파라핀계 및 합산계 연료의 화염은 전체 연소기간동안 기존 경유의 화염에 비해 푸른색을 띠고 있어, 매연이 없는 연소를 입증해 주었다.

Abstract — The single droplet combustion of multicomponent fuel such as diesel-oxygenate and diesel-paraffin blends under high ambient temperature and atmospheric pressure was investigated in the study. The experiment was conducted by rapidly heating the droplets in an electric heated chamber. A high speed camera with 500fps was also used to take photographs. The results of the study may be concluded as follows : In the combustion of diesel fuel droplet with additive of oxygenate and paraffin, the dimensionless droplet size of $(D/D_0)^2$ was linearly decreased with time. A fuel droplet with low boiling temperature additives and in high boiling temperature diesel fuel evaporates and burns faster than usual diesel fuel. This rapid burning may result from so-called "micro-explosion" and its burning intensity varies with the types of additives. The results above may suggest that rapid evaporation of oxygenate additive in the middle stage of combustion can contribute much to combustion improvement of blended fuels. When compared to ordinary diesel fuel, neat oxygenate and paraffin fuels show blue flame during entire combustion which prove smokeless combustion.

1. 서 론

오늘날, 디젤기관은 전세계적으로 수송용 차량이나 산업용 차량의 주 원동기로서 널리 사용되고 있다. 그러나, 그의 특성상 입자상 물질(particulate matter), 매연, 질소산화물 등의 배기 배출물이 다량 배출되기 때문에 엄격한 환경규제를 충족시키기 위해서는 더욱 감소시켜야 한다. 특히, 질소산화물과 입자상 물질은 대도시 지역에서 심각한 사회문제를 유발하고 있기 때문에, 각국에서는 디젤기관의 배출물 규제를 더욱 강화시켜 시행하고 있지만, 질소산화물과 입자상 물질은 일반적으로 트

레이드 오프(trade-off) 관계가 있어, 이들을 동시에 저감시키기는 매우 어렵다.

지금까지 시도되고 있는 디젤차량의 배출가스 저감 기술로는 크게 기관본체 개량, 연료분사계 개선, 흡·배기 계통 구조변경, 연료개선 및 후처리장치 사용 등으로 나눌 수 있다¹⁾. 기관본체의 개량에는 연소실 형상 개조, 배기량 증대, 압축비 증대, EGR, 오일소비량 저감 등이, 연료분사계 개선에는 연료분사시기 지연, 연료펌프의 고압화, 가버너와 타이머의 전자제어화, 가변분사율 제어 등이, 흡·배기 계통의 구조변경에는 과급화 및 과급기 성능향상, 가변노즐 터보, 인터쿨러화, 흡·배기

포트 개량, 가변 스윙 기구 등이, 연료개선에는 세탄가 향상제, 방향족 성분 저감, 유탄연료, 합산소연료(oxygenated fuel) 등이, 후처리장치에는 DPF(diesel particulate filter), 산화촉매, DeNOx 촉매 등이 디젤차량의 배출가스 저감 대책 기술로 연구되어 왔다. 그러나, 2002년 이후 우리나라의 배출가스 규제가 미국, EU와 같은 선진국 수준으로 더 엄격하게 강화된다는 점을 감안할 때, 기관본체 개량이나 연료분사계 개선 및 후처리 장치 사용만으로는 배출가스 규제를 만족시키기에는 한계가 있다.

이러한 점을 고려할 때, 현재로서 NOx와 PM을 동시에 저감시키고 에너지의 효율적 이용이라는 측면에서 합산소화합물과 디젤연료 혼합에 의한 연료개선 기술이 가장 효과적인 방법이라 할 수 있다. 즉, 최근에 디젤연소와 배출물의 향상을 위해 알콜을 제외한 카보네이트, 에테르, 아세테이트, 케톤 화합물 등과 같은 합산소연료들이 크게 주목받고 있다. 연료로서 기존 경유에 합산소화합물을 혼합하거나 순수 합산소화합물을 사용하면 배출물을 더 효과적으로 저감시킬 수 있고 열효율과 소음도 향상시킬 수 있을 것으로 보고되고 있다^{24,25}. 이러한 합산소화합물의 사용은 아주 유망한 기술로 그 필요성이 강조되고 있으나, 아직 국내의 연구활동은 극히 미미한 수준이다.

따라서, 본 연구에서는 액적의 급속가열과 연소가 가능한 고온 연소로 장치와 고속도 비디오 카메라를 이용하여 다조성, 즉 각종 혼합연료 및 순수 합산소연료의 단일 액적 연소를 행하여 연소거동의 해명을 시도함으로써, 추후 합산소연료 사용 디젤기관의 기본 자료로 사용할 수 있도록 하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1에 다조성 연료 액적의 연소거동을 해명하기 위하여 사용한 고온 연소로 장치의 개략도를 나타냈다. 실험은 마이크로 실린지에 의해 연료 액적을 열전대 끝에 동일량 떨어뜨려 부착시키고, 그 연료 액적 주위에 전

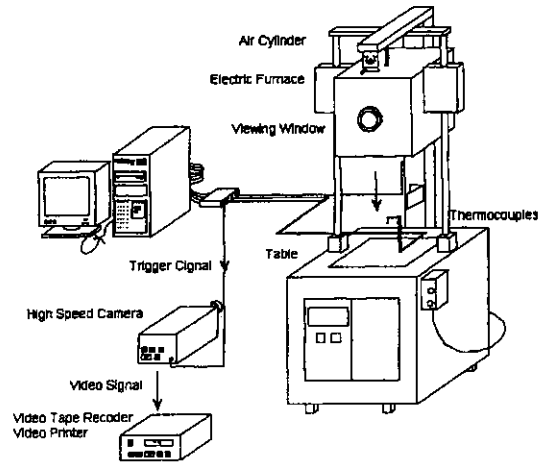


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

기(용적 약 6300 cm³)를 낙하시켜, 주변 고온분위기로 부터의 급속 가열에 의해 자 착화를 행함과 동시에, 그 연소거동을 고속도 디지털 비디오 카메라(NAC MemrecamC)로 촬영, 해석했다. 또한, 이때의 액적 내부 온도와 노내온도는 A/D converter를 통해 컴퓨터로 입력시켜 해석하였다. 사용된 열전대는 직경이 100 μm로 2개를 사용, 액적 내부 온도 측정용 열전대는 연료 액적이 수직 방향으로 부착될 수 있게 Fig. 1에서와 같이 구부러져 있으며, 노내 온도 측정용 열전대는 액적 온도 측정용 열전대의 지지대에 설치하였다.

노내 온도는 칸델선 히터에 의해 최고 1000°C까지 설정·가능 하였지만, 본 실험에서는 800°C로 세팅하였다. 또한, 노의 강하의 쇼크를 흡수하기 위하여 오일 실린더에 의한 쇼크 업서버를 이용했다.

연료는 Table 1에 나타난 바와 같이, 단일조성의 탄화 수소 및 합산소물질을 JIS 2호 경유에 체적비율로 혼합하여 사용하였으며, 일부 순수 단일연료도 함께 사용했다. 이들 연료는 산소함유량이 서로 다른 합산소계와 비점이 서로 다른 파라핀계를 기준으로 하여 각각 선정하였다.

Table 1. Properties of tested fuels.

Fuels	Oxygen content (wt.%)	Density (g/cm ³)	Boiling point (°C)
JIS #2 Diesel fuel (DF)	0	0.832	306@90%*
Dimethyl succinate (DES)	36.8	1.047	218
Ethylene glycol mono-n-butyl ether (ENB)	27.1	0.905	171
Methyl-t-butyl ether (MTBE)	18.2	0.746	55
n-hexane	0	0.659	71
n-nonane	0	0.717	150.8
n-decane	0	0.731	174

*90% Distillation temperature.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 연료 액적의 측정 및 해석방법

액적의 연소추이를 정량적으로 정리하기 위해서는 1개의 초기 액적 직경 D_0 를 구할 필요가 있다. 그러나, 점화 전의 연료 액적은 열전대에 부착되어 중력의 영향을 받아 전체적으로 타원형으로 되어 있기 때문에 종 방향의 길이 측정은 곤란하다.

따라서, 본 실험에서는 횡 방향의 직경을 측정하고 그 값을 연료 액적 직경으로 했다. 그러나, 체적이 작아 보이는 결과로 되어 특히 액적이 작을 수록 중형비가 크게 되기 때문에 그 오차가 크게 된다. 또한, 열전대의 체적을 무시하고 있기 때문에 역으로 액적의 체적이 크다고 생각하면, 이것도 연료 액적이 작게 됨에 따라 크게 된다. 전자의 오차는 수 퍼센트 정도이고 후자의 오차는 1~10% 정도이지만, 양자의 부호가 반대이기 때문에 구(球)라고 가정하면 측정오차는 이보다 작다^[1].

일반적으로 액적의 증발, 연소 과정은

$$D^2 = D_0^2 - kt \tag{1}$$

으로 생각할 수 있다. 여기서, t 는 경과시간, k 는 연소율 또는 연소속도정수이다.

따라서, 그 액적이 타 없어지기까지의 연소시간을 T 라 하면

$$\frac{T}{D_0^2} = K \tag{2}$$

이라 하는 관계가 성립한다. 여기서, K 는 연료의 종류 및 주변의 조건에 따른 증발을 또는 증발속도정수이다.

경과시간 t 와 그때의 액적 입경 D 를 구하고, 액적의 연소율에 관한 종래의 D^2 법칙에 의해

$$\frac{dD^2}{dt} = \text{const} = k \tag{3}$$

으로 되는 관계가 얻어진다.

식 (3)의 경과시간 t 는 점화 후 화염이 연료의 액적 주위의 혼합기 층을 전파하여, 그것을 둘러싸서 정상상태로 되기까지의 시간 및 연료 액적의 온도가 정상으로 되기까지의 시간을 포함하고 있으나 후자가 대부분을 점유하고 있다. 연료 액적의 온도가 정상으로 되면 D^2 은 t 에 대해서 직선적으로 감소하고 연료 액적이 작아짐에 따라 열전대선 굵기의 영향이 강하게 나타나기까지 이 관계는 변화하지 않는다^[2].

따라서, 식(3)은 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$\frac{dD}{dt} = \frac{k}{2D} \tag{4}$$

다음에 연료 액적의 온도가 정상으로 되기까지의 시간을 t_1 , 그 후 연소가 끝나기까지의 시간을 t_2 라 한다면

$$T = t_1 + t_2 = t_1 + \frac{D_0^2}{k} \tag{5}$$

으로 나타낼 수 있다.

연료 액적의 온도가 비점에 이르기까지의 시간은 액적 중에 대류가 없기 때문에 항상 액적 표면적에 정비례한다는 것^[3]에 의해

$$t_1 = \frac{D_0^2}{\alpha} \tag{6}$$

로 나타낼 수 있다. 여기서, α 는 임의의 비례정수이다.

따라서, 식(5)는

$$\frac{T}{D_0^2} = \frac{1}{\alpha} + \frac{1}{k} \tag{7}$$

으로 쓸 수 있다.

비정상기간이 무시될 경우에 식(7)은

$$\frac{T}{D_0^2} = \frac{1}{k} \tag{8}$$

로 된다.

따라서, 식(2)와 식(8)의 관계로부터

$$K = \frac{1}{k} \tag{9}$$

으로 된다.

그러나, 직접 측정한 K 의 값과 식(9)에 k 의 측정값을 이용하여 계산한 K 값과의 사이에는 약간의 차이가 있어, 비정상 기간은 무시할 수 없는 크기를 가지고 있다.

액적 연료의 연소법칙은 식(2) 외에 식 (3)-식(5)로 표현할 수 있으며, 연료의 종류 또는 주변 조건에 따른 연소율의 대소는 K 또는 k 의 값에 의해 규정할 수 있다.

비정상기간에 증발계수가 0으로부터 차례로 증가하여 점차로 일정한 값으로 되어 정상기간으로 이동하여 가는 경우에는 이와 같은 관계가 얻어지지만, 이와 같은 결과가 얻어지지 않은 경우도 있다.

그러한 예로써, 증유의 액적에 점화하면 증유는 열분해를 시작하여 내부로부터 입자를 비등시키면서 연소를 계속하여 결국에는 종 모양의 단상의 고풍물을 남긴다. 이때, 외견상 직경의 변화를 D^2 -의 관계로써 나타내면, 전술한 직선적 관계와는 현저히 떨어진 것으로 된다. 마찬가지로, 경유도 주변 온도가 750°C로 되면, D^2 -의 관계는 꽤 직선으로부터 떨어진 것으로 된다.

그러나, 그보다 가벼운 탄화수소, 알콜류 등에서는 꽤

높은 온도까지 이러한 현상은 없기 때문에 정상상태에 있어서 D^2-t 의 직선관계가 성립된다¹⁶⁾.

따라서, 최종적으로 식(1)은 입경의 2승 법칙

$$D_0^2 - D^2 = kt \tag{10}$$

로 된다.

한편, 본 연구에서는 초기 입경 크기의 영향을 제거하기 위하여 양변을 D_0 로 나누어 무차원화한

$$\frac{D^2}{D_0^2} = 1 - \frac{k}{D_0^2}t \tag{11}$$

를 이용하여 정리했다.

3-2. 연료 액적의 연소과정

Fig. 2에 노내 온도 800°C에 있어서 n-decane-경유 혼합연료의 연소과정 예를 나타냈다. 종축은 착화 후의 연료입경 D 와 액적 및 분위기 온도의 추이를, 횡축은 전기로의 하강개시부터의 시간 t 를 초기입경 D_0 로 보정한 시간 t/D_0^2 를 나타냈다. 입경은 D_0 에 의해 무차원화하고 착화로부터 연소 종료까지의 값을 나타냈다. 저비점 물질 혼합이 25 vol.%로 작은 경우의 입경 감소 추이는 그 값이 거의 일정속도로 변화하고 있다. 분위기 온도는 서서히 증가하여 착화시에는 400°C 정도, 연소 종료시에는 750°C 정도에 달하고 있다. 한편, 액적 내부의 온도는 분위기 온도보다 상승이 완만하고 착화 직후에 일단 온도상승이 정지하지만, 액적이 소멸하기까지 서서히 증가하는 특성을 보이고 있다. 연소가 종료하면 열전도가 분위기 온도에 직접 노출되기 때문에 액적 소멸의 전후부터 그 온도는 급격히 상승하고 있다. 이상의 연소특

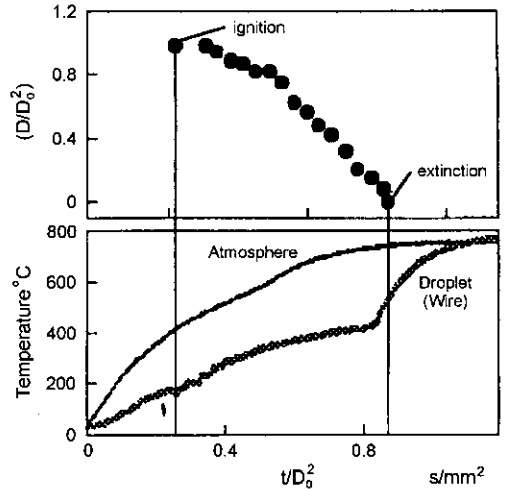


Fig. 2. Changes in droplet diameter and temperature of diesel fuel with n-decane (25%).

성은 정상적으로 시험 연료 전체에 걸쳐서 공통적으로 확인되었다.

3-3. 저비점 탄화수소 혼합 경유의 액적 연소과정

Fig. 3은 경유 액적을 Fig. 4는 n-nonane 혼합 경유 액적에 있어서 자 착화후의 연소화염의 형상 및 시간추이를 나타낸다. 이들 그림에 의하면, n-nonane 혼합 경유 액적과 순수 n-nonane의 화염은 검은색을 띠고 있는 경유 액적의 화염에 비해 밝은 푸른색을 띠고 있어, 실제 디젤엔진에 사용시 매연농도가 적게 배출될 수 있음을 암시하고 있다.

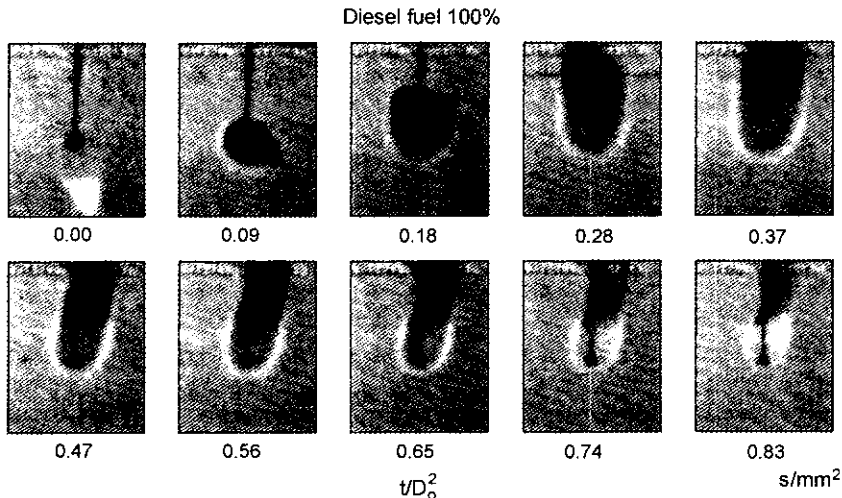


Fig. 3. Burning behavior of diesel fuel droplet (500t/s, f/22).

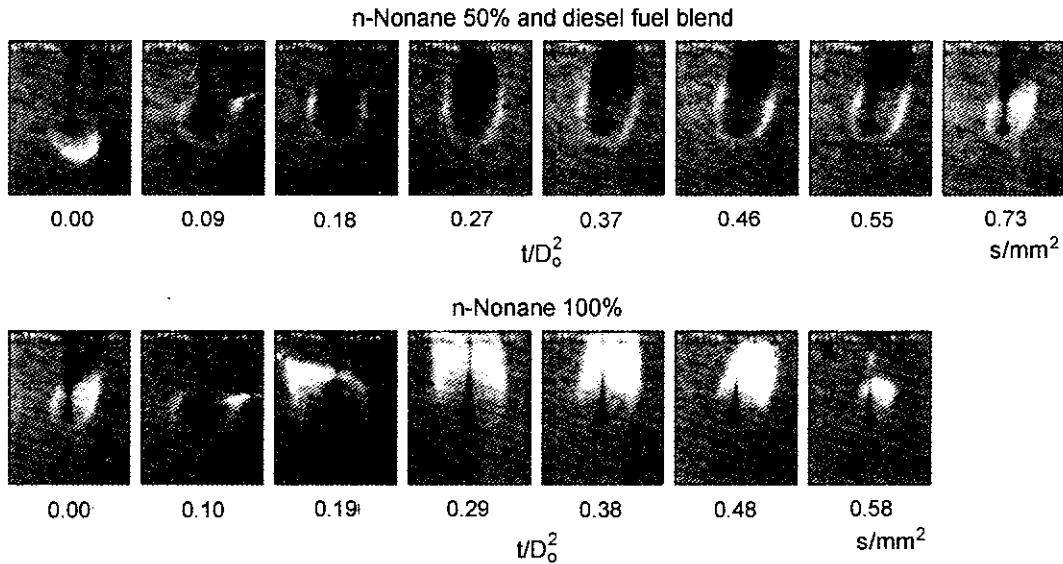


Fig. 4. Burning behavior of n-nonane droplet (500f/s, f/22).

그림으로부터 알 수 있듯이, 경과시간 t 를 초기 입경 D_0 로 보정한 시간 t/D_0^2 의 값을 비교해볼 때 n-nonane 저비점 성분을 혼합함으로써 연소기간이 경유에 비해 단축되고, 그 경향은 기본적으로 입경의 2승 법칙에 의해서 감소하는 연소가 진행되고 있다. 또한, 순수 경유에 비해 혼합한 경유의 액적은 $t/D_0^2 = 0.19 \text{ s/mm}^2$ 이후 급속히 감소하는 현상이 보여지고 있다(Fig. 6(a) 참조). 이는 저비점 탄화수소가 미세폭발(micro-explosion)현상에 의해 일차적으로 급속히 연소한 후 디젤 연료가 연소되기 때문인 것으로 사료된다. 이러한 연소현상은 저비점 탄화수소를 첨가한 시험 연료 전체에 걸쳐서 전부 확인되었다. 한편, Fig. 3에서 $t/D_0^2 = 0.09 \text{ s/mm}^2$ 이후에 발생되는 검은색 화염은 연료 액적 표면에서 열분해가 먼저 일어나 탄소가 석출되기 때문인 것으로 사료된다.

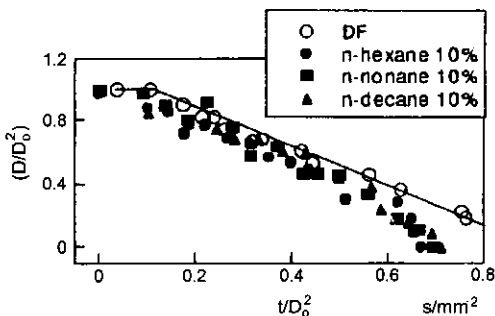


Fig. 5. Changes in droplet diameters of diesel fuel with different n-paraffine hydrocarbons.

Fig. 5에 각종 파라핀계의 저비점 탄화수소를 경유에 10 vol.% 혼합한 액적에 있어서 연소 중의 입경 D 의 추이를 나타냈으며, 시간은 착화 후의 경과시간 t 이다. 그림으로 볼 수 있는 바와 같이, 혼합비율이 10% 정도로 적어도 비점이 100°C 이하로 낮은 물질의 혼합시(n-hexane)에는 착화 직후에, 비점이 150°C~174°C 정도로 비교적 높은 물질의 혼합시에는(n-nonane, n-decane)는 연소 후반에, 입경 감소 속도가 크게 되고 있어 저비점 탄화수소의 혼합에 의한 증발·연소촉진 효과가 있음을 알았다.

Fig. 6의 (a)와 (b)는 노내 온도 800°C에 있어서, n-nonane 및 n-decane의 경유에 대한 혼합비율을 25, 50, 100%로 변화시켰을 때의 연소 중의 입경 D 와 액적 온도를 각각 나타낸 것이다. n-nonane 및 n-decane 모두 착화 후의 액적 소멸기간은 혼합비율이 25 vol.%와 50 vol.% 모두 기본적으로 입경의 2승 법칙에 의해 감소하며, 특히 100 vol.%일 때는 $t/D_0^2 = 0.2 \text{ s/mm}^2$ 부근부터 입경 감소의 경향이 현저히 크게 되고 그 기간 또한 단축되고 있다. 한편, n-decane의 경우는 비점이 n-nonane에 비해 20°C 정도 높지만 그 혼합비율이 증가함과 더불어서 $t/D_0^2 = 0.2 \text{ s/mm}^2$ 이후에 있어서 입경 감소 속도가 n-nonane에 비해 오히려 약간 더 크게 되는 경향을 확인하였다.

3-4. 함산소물질 혼합 경유 액적의 연소과정

Fig. 7은 함산소물질 중 산소 함유량이 36.8 wt.%로 가장 높은 DES 혼합 경유 액적에 있어서 자 착화후의 화염 형상과 시간추이를 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있

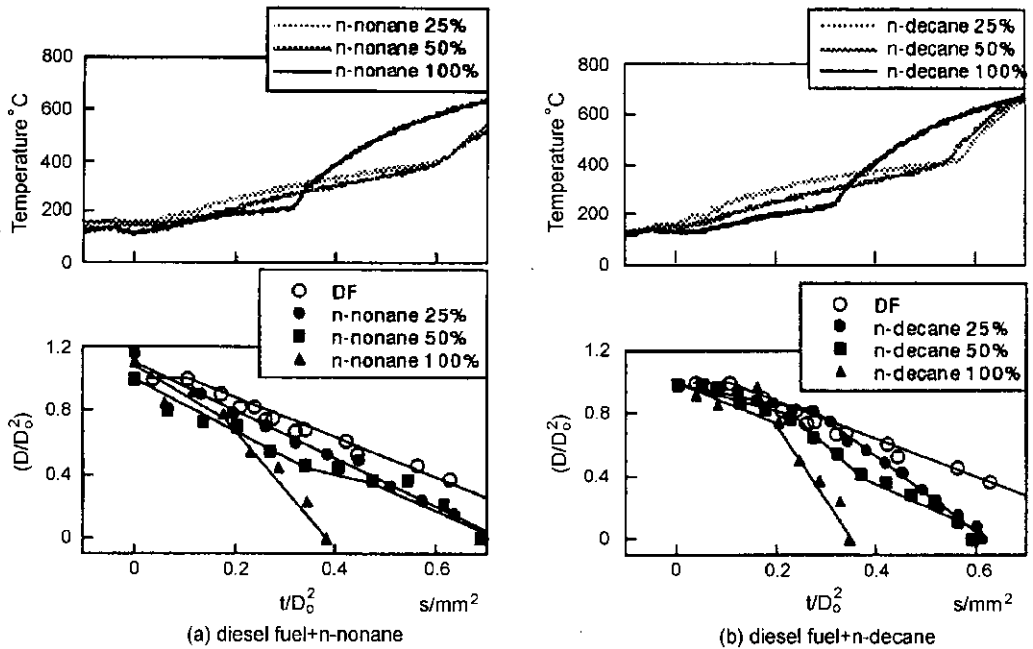


Fig. 6. Influence of n-paraffin content in diesel fuel on changes in droplet diameters.

는 바와 같이, 순수 DES의 화염색은 50 vol.% DES 혼합 경유의 화염이나 순수 경유의 화염색보다 훨씬 더 밝고 푸른색을 띠고 있으며 연소시간도 짧아지고 있어, 경유에 합산소물질을 혼합함으로써 실제 디젤기관 적용시에는 매연을 저감시키고 연소시간을 단축시킬 수 있을

것으로 사료된다. 이러한 사실은 연소가 종료된 후 열전대 끝을 살펴보면 합산소물질의 액적은 고형물이 전혀 남지 않는 반면(Fig. 7 참조), 경유 액적은 검은색의 고형물을 남기고 있는 것(Fig. 3 참조)으로부터도 명백히 알 수 있었다.

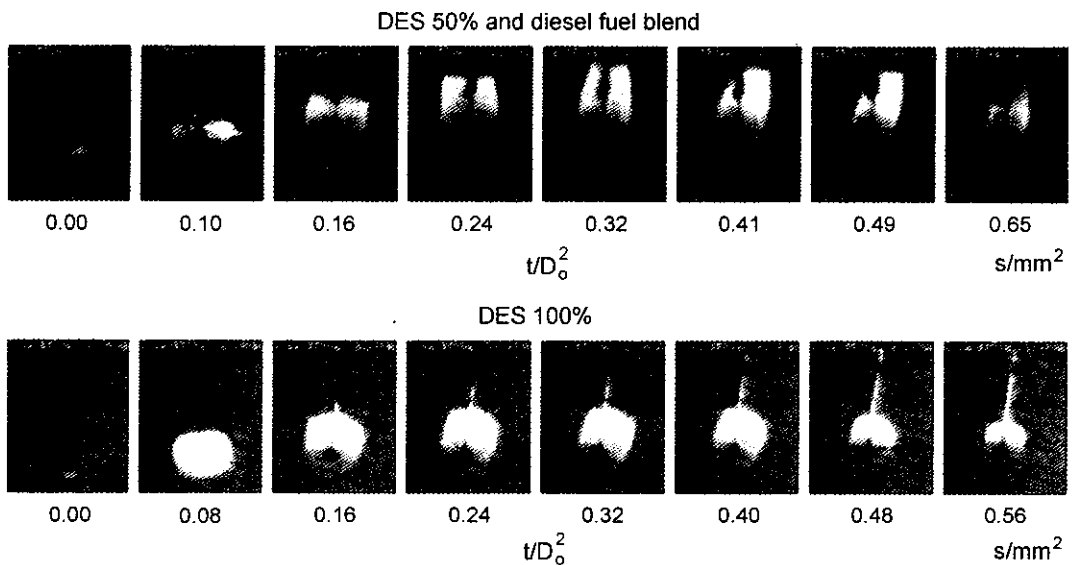


Fig. 7. Burning behavior of DES droplet (500f/s, DES 50 vol.% : f/22, DES 100 vol.% f/4).

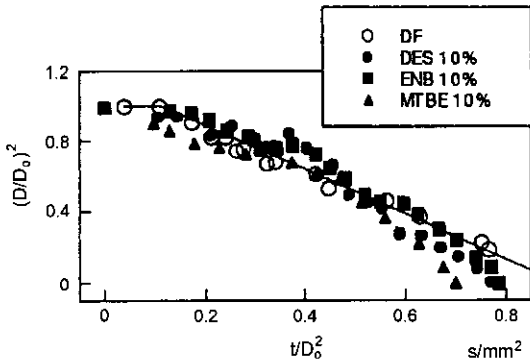


Fig. 8. Changes in droplet diameters of diesel fuel with different oxygenates.

Fig. 8에 합산소물질 DES, ENB 및 MTBE를 경우에 10 vol.% 혼합한 액적의 입경추이를 나타냈다. 그림으로부터 알 수 있는 바와 같이, 이들 합산소물질 중 산소 함유율은 18.28%로 가장 적지만 비점이 낮은 MTBE의 연소기간이 가장 짧게 나타나고 있으며, 이보다 산소 함유율이 많은 DES와 ENB의 연소기간은 약간 더 길고 비슷한 경향을 나타내고 있다.

따라서, 합산소물질의 첨가율이 낮을 경우 연소시간은 산소함유율 보다 비점에 더 의존하고 있음을 알 수 있다. 이때의 경향을 비점이 71°C인 탄화수소계 n-hexane

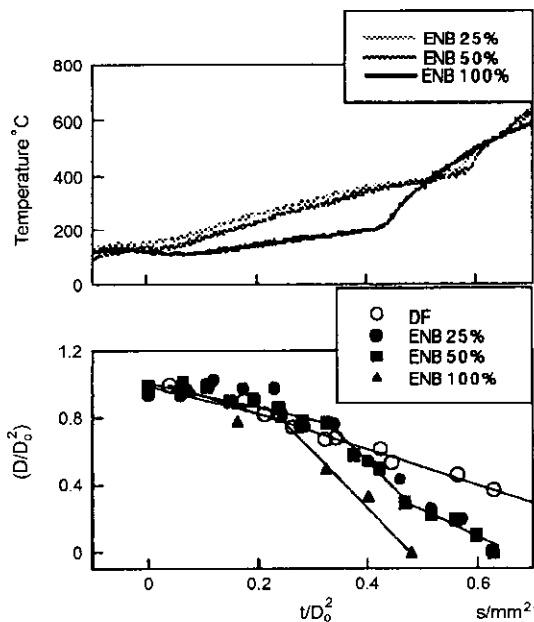


Fig. 9. Influence of oxygenate content in diesel fuel on changes in droplet diameters.

10 vol.%와 비교해 보아도 연소종료시간은 거의 비슷하게 나타나고 있다.

Fig. 9는 시험 연료 중 비점이 171°C인 ENB의 경우에 대한 혼합비율을 25, 50 및 100%로 변화시켰을 때의 입경과 액적 온도를 나타낸 것이다. 파라핀계 연료와 똑같이 ENB의 경우에도 액적 소멸기간은 혼합비율이 25 vol.%와 50 vol.% 모두 크게 변하지 않고 있지만, 순수 ENB 일 때는 $t/D_0^2 = 0.2 \text{ s/mm}^2$ 부근으로부터 입경 감소의 경향이 크게 되고, 기간도 단축되고 있다. 또한, 이 경우에도 전술한 바와 같이 혼합비율이 증가할 수록 $t/D_0^2 = 0.2 \text{ s/mm}^2$ 이후로부터의 입경 감소 속도가 크게 되는 경향이 확인되었으며, 일시적이고 급격한 입경 감소 시에는 화염형상도 급격히 변동하였다. 즉, 합산소재 저비점 성분 혼합 경우 액적의 연소에서는 증발속도의 일시적인 증가현상이 보여지는 연소 주기에서 저비점 성분의 증발이 활발하고, 그 외의 영역에서는 통상의 경우와 똑같은 증발이 진행하였다. 이는 저비점 성분의 미세폭발(micro-explosion) 현상에 의한 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온 분위기 온도 및 대기압 하에서 액적의 급속가열과 연소가 가능한 고온 연소로 장치와 고속도 비디오 카메라를 이용하여 다조성 단일 액적 연소에 대해 고찰하였다. 연구의 결과로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고온장에서의 저비점 성분 혼합 경우 액적은, 기본적으로 입경의 2층 법칙에 의해서 감소하는 연소가 진행되고 있지만, 그 과정에서 입경이 일시적으로 급속히 감소하는 현상이 보여짐과 더불어, 연소기간이 단축된다.
2. 파라핀계 저비점 성분 혼합 경우 액적 연소에서, 비점이 100°C 이하로 낮은 물질의 혼합시에는 착화 직후에, 또한 비점이 150°C~174°C 정도로 비교적 높은 물질의 혼합시에는 연소의 후반에, 저비점 성분의 증발이 활발하고 그 외의 영역에서는 통상의 경우 주체의 증발이 진행된다.
3. 합산소재 저비점 성분 혼합 경우 액적 연소에서, 일시적이고 급격한 입경 감소시에는 화염형상도 급격히 변동하는데 이는 저비점 성분의 미세폭발(micro-explosion) 현상에 의한 것으로 사료된다. 또한, 합산소물질의 연소 시간은 첨가율이 낮을 경우 산소함유율보다 비점에 더 의존했다.
4. 파라핀계 및 합산소재 성분 혼합 경우의 화염은 경우의 화염에 비해 밝은 푸른색을 띠고 있어, 이들 혼합 연료를 실제 디젤기관에 적용시에는 매연을 저감시킬 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Miyamoto, N. *et al.*: "Ultra Low Emissions and High Performance Diesel Combustion with a Combustion of High EGR, Three-way Catalyst, and a Highly Oxygenated Fuel, Dimethoxy Methane (DMM)", SAE Paper 2000-01-1819 (2000).
2. 宮本 登 外3名: "含酸素燃料によるディーゼル燃焼の低エミッション・高効率化とその特性", 日本機械學會論文集(B編), 64-620, pp. 306-312 (1998).
3. Miyamoto, N. *et al.*: "Smokeless, Low NOx, High Thermal Efficiency, and Low Noise Diesel Combustion with Oxygenated Agents as Main Fuel", SAE Paper 980506 (1998).
4. Spencer, C. *et al.*: "Dimethyl Ether in Diesel Fuel Injection Systems", SAE Paper 981159 (1998).
5. 赤坂行男: "含酸素化合物がディーゼルエンジンからの大気汚染物質に及ぼす影響", 日本機械學會論文集(B編), 63-609, pp. 345-351 (1997).
6. 福田昌准: "含酸素燃料による直接噴射式ディーゼル機關の排氣淨化", 日本機械學會論文集 (B編), 63-607, pp. 340-344 (1997).
7. 宮本 登・外 3名: "燃料への含酸素物質混合がディーゼル燃焼・排氣に及ぼす影響", 日本機械學會論文集(B編), 62-601, pp. 282-288 (1996).
8. Miyamoto, N. *et al.*: "Improvement of Diesel Combustion and Emissions with Addition of Various Oxygenated Agents to Diesel Fuels", SAE Paper 962115 (1996).
9. Kumagai, S.: "Combustion Engineering", Iwatani Shobo Co. (1976).