

고온벽면에서의 액적연료의 증발 및 착화에 관한 연구

송 규 근*

A Study on the Evaporation and Ignition of Single Fuel Droplet on the Hot Surface

K-K Song *

Key words : Droplet(액적), Evaporation Time(증발시간), Hot Surface(고온벽면), Highest evaporation rate(최대증발율), Leidenfrost point(라이덴프rost점), Ignition Delay time(착화지연)

Abstract

Recently, impinging spray is used for atomization of diesel engine, but it bring on adhesion of fuel. Therefore, we studied about droplet behavior on high temperature plate changing the size of droplet, surface temperatures, and surface roughness of plate .

In this study, We studied to confirm experimentally about mechanism of evaporation and ignition process of single fuel droplet. We observed evaporation time, evaporation appearance and ignition delay time by the photographs of 8mm video camera.

Experimental results are summerized as follows:

1. The boiling point of fuel affect a evaporation and ignition process.
2. The surface roughness affect a evaporation time.
3. The ignition delay time relate to evaporation characteristic.

1. 서 론

현재 디젤엔진, 터빈 및 연소로 등의 연소장치들에서 에너지원으로 사용되어지고 있는 대부분의 액체연료들은 분무확산연소방식으로 연소되고 있다. 이 분무확산연소방식은 액체 연료를 연소실내에 분사하고 이를 연소시키는 방법으로써 분사노즐을 통하여 연소실내로 분사된 연료는 약 $10\mu\text{m}$

$\sim 30\mu\text{m}$ 의 액적으로 미립화되고 공기와 혼합된 뒤 주위의 열을 받아 증발이 일어나고, 이후 연료증기와 공기의 혼합기는 화학반응을 하면서 착화가 이루어진다.

디젤엔진에서는 충돌분무가 이루어 지면서 연소가 진행하는데, 이것은 연료의 유착을 일으킨다. 또한 이러한 과정은 다양한 성분의 화학적 반응과 상 변화를 포함하는 등 매우 복잡하기 때문에 이를

* 전북대학교, 자동차신기술연구소

Table 1. The property of fuel

Parameter	n-Heptane	n-Hexadecane	Ethylalcohol
Molecular formula	$CH_3(CH_2)_6CH_3$	$CH_3(CH_2)_{14}CH_3$	C_2H_5OH
Molecular weight	100.2	226	46.1
Specific gravity(at 20°C)	0.6838	0.7739	0.79
Boiling point(°C)	98.4	287.5	78.3
Critical temperature(K)	267.0	451.0	243.1
Critical pressure(atm)	223	205	64.75
Heating value (kcal/kg)	10643	10497	6405

있는데, 이 경우는 데이터에서 제외하였다.

주사침은 항상 냉각되도록 유지하였으며, 액적의 초기 온도의 변화나 벽면에 접하기까지의 액적의 증발량은 무시하였다.

액적 직경의 변화는 주사침의 직경을 달리하여 얻었으며, 증발시간 측정은 8mm 비디오 카메라 (SONY, CCD-TR3000 NTSC)를 이용하였다. 이때의 촬영속도는 초당 30프레임이며 촬영된 영상을 PC로 불러들여 크기변화, 증발형태 변화 및 기타 특성을 해석하였다.

증발 및 착화 현상을 촬영한 사진을 Fig. 2에 보인다. 벽면 평균표면거칠기는 $Ra=0.15\mu m$, $2.84\mu m$ 로 하였다.

또한 사용 연료로서는 구하기 쉽고, 연소특성들의 비교를 위해 n-헵탄, n-헥사데칸, 에틸알콜을 사용하였으며, 이들 연료에 대한 기본적인 물성치를 Table 1에 보인다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 증발에 미치는 연료특성의 영향

본 연구에서는 n-헵탄, n-헥사데칸, 에틸알콜 연료를 사용하여 각 종 연료의 증발 특성을 파악하고자 하였다. Fig. 3에 이 결과를 보인다.

Fig. 3은 벽면온도의 변화에 대한 각 종 연료의

증발시간을 나타낸 결과이다.

실험에 있어 벽면의 표면 거칠기는 $Ra = 0.15\mu m$ 이고, 액적 직경은 2.8mm이다.

전반적인 증발곡선 형태를 보면 벽면온도에 따른 증발시간 곡선은 모든 연료에 있어 거의 같은 경향을 보이고 있다. 즉 벽면온도가 낮은 상태에서 벽면온도가 증가함에 따라 증발시간이 감소하며, 증발시간 최저치 즉 최대 증발율점을 지나면 다시 증발시간이 증가하다가 최고치 즉, Leiden Frost

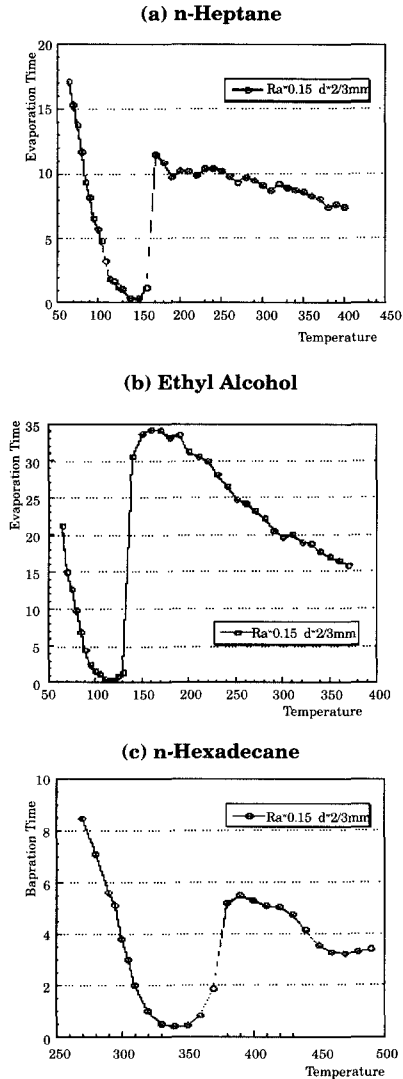


Fig. 3 Evaporation curves of each fuel

점을 지나서 점차 다시 감소하는 경향을 보인다.

최대 증발율점에서는 액적에 미세한 기포가 발생하고 격하게 비등하면서 증발하는 형태를 보이고 있다. 하지만 이 부분을 지나면 갑자기 증발시간이 증가하고 있다. 이것은 액적이 벽면에 닿을 때 벽면의 높은 온도에 의해서 액적의 온도가 액체의 비등점에 도달하게 되어 액적은 뜨거운 벽면으로부터 강한 열전도와 복사 때문에 액적 하부와 벽면사이에 얇은 증기막이 형성되어 벽면으로부터의 열전도가 작아지기 때문이다. 그리고 증발시간이 최고치에 달한 이후에는 복사열이 증가하여 증발시간이 점차 감소하다가 마지막 부분에서 액적은 거의 구형 형태로 수직방향으로 운동하면서 증발을 완료한다.

연료 종류에 따른 연료증발특성은 최대증발율점은 모든 연료에서 각 연료의 비점보다 약 50℃ 높은 온도에서 나타났으며, 또한 최대증발율점은 비점온도순인 에틸알콜, n-헵탄, n-헥사데칸 순의 온도(약 120℃, 150℃, 340℃)에서 나타났다. 즉 증발특성은 비점온도와 밀접한 관계를 가지고 있다.

3.2 벽면 거칠기의 영향

본 연구에서는 벽면거칠기가 증발특성에 미치는 영향에 대해 해석하였다. 본 실험에서 사용되어진 벽면의 거칠기는 $Ra = 0.15\mu m, 2.84\mu m$ 이고, 액적 직경은 2.8mm이다.

Fig. 4는 n-헵탄에 있어 벽면의 거칠기가 증발시간에 미치는 영향을 측정된 결과이며, 다른 연료에 있어서도 비슷한 결과를 보였다.

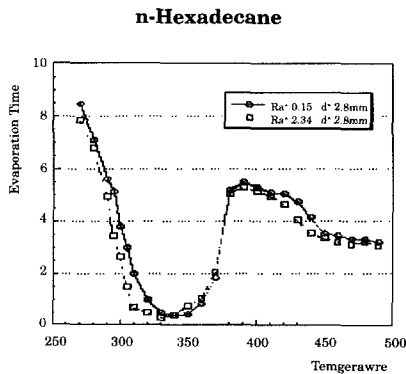


Fig. 4 Effect of surface roughness

그림에서 보는 것과 같이 전반적인 벽면온도에 따른 증발시간은 N자곡선형태를 보이고 있다. 표면 거칠기에 대한 증발 특성은 표면이 거칠수록 증발시간은 감소하며, 표면 거칠기가 큰 쪽이 최대증발율점은 벽면 온도가 낮은쪽으로 이동하고 있다.

또한 표면 거칠기가 큰 경우($Ra = 2.84\mu m$)가 벽면 거칠기가 작은 경우($Ra = 0.15\mu m$)보다 동일한 벽면온도에 있어서 증발시간이 감소하고 있다. 이것은 액적의 대부분이 벽면에 접촉하여 증발하기 때문에 벽면이 거칠수록 전열면이 증가하여 벽면으로부터의 전열량에 의한 영향때문이다.

이 결과는 Temple-Pediani의 석유에 대한 표면 거칠기의 연구결과와 비슷한 경향이며, 액적이 벽면에 접촉하여 증발하는 경우에는 표면거칠기가 증발특성에 중요 인자임을 알수 있었다.

3.3 초기 액적 직경의 영향

미립화는 연료의 증발 및 연소현상을 지배하는 중요한 인자이다. 본 연구에서는 초기 액적 직경이 증발특성에 미치는 영향을 해석하였다.

Fig.5는 n-헥사데칸 연료의 직경이 2.2, 2.8, 3.2mm일 때 증발시간을 측정된 결과이다

그림에서 처럼 최대증발율점 이전에는 초기액적 직경이 클수록 증발시간이 길어지고 있다.. 그러나 Leiden Frost점 이후에는 초기 액적 직경이 감소할수록 증발시간이 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 최대증발율점 이전에는 액적이 벽면에 부착하여 열전달량이 많은 상태에서 증발이 일어나고, Leiden Frost점 이후에서는 액적과 벽면

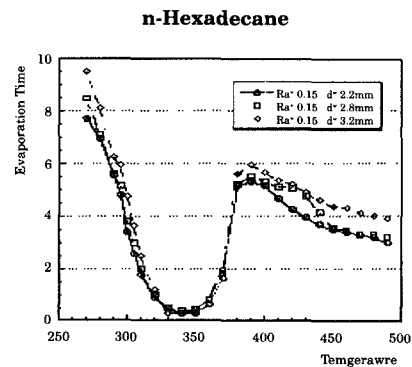


Fig. 5 Effect of initial droplet size

사이에 증기막이 형성되어 증발이 진행되기 때문에 증발시간의 차가 크게 나타난다고 판단된다.

3.4 증발 형상의 고찰

본 연구에서는 증발 형태를 자세히 검토하기 위해 벽면 거칠기가 $Ra = 0.15/\mu m$ 인 벽면 위에서 관측한 증발 형상을 8mm 비디오 카메라로 저장하여, 그 결과 증발 형태를 모형적으로 Fig. 6에 나타냈다.

증발곡선은 크게 a~g로 특징지어 6개의 온도범위로 나누어 형상을 분석하였다.

a-b의 온도범위에 있어서 액적은 평철 렌즈 모양으로 액막증발을 계속하고 이 증발 형태로 증발을 완료한다.

c-d의 온도범위에 있어서는 b-c의 온도범위의 경우보다 더욱 미세한 기포가 발생하고 심하게 비등하면서 증발하며, 증발시간은 최소치를 갖는다.

d-e의 온도범위는 상당히 협소하고, 이 온도범위에서는 증발시간이 급격하게 증가하고, 증발시간

내에 있어서 증발형태는 시간적으로 변화를 나타내는 천이영역을 이룬다. 이 구간에서는 벽면온도가 e점에 가까울수록 증발형태Ⅳ를 유지하는 시간은 짧고 증발형태Ⅴ를 유지하는 시간이 길어진다.

e-f의 온도범위에서는 d-e의 온도범위의 증발형태와 같지만 증발형태Ⅳ를 나타내는 시간은 극히 짧고 증발시간의 대부분은 증발형태Ⅴ를 나타내며, f점에 있어서는 증발형태Ⅳ가 나타나지 않는다. 또한 증발시간은 e-f의 온도범위에 있어서 최대치를 갖는다.

f-g의 온도범위에서의 액적은 벽면온도가 높기 때문에 벽면에 접촉한 직후 구상이 되어 벽면위에 떠올라 증발하며, 이 온도범위에서는 벽면온도의 상승과 함께 증발시간은 단조롭게 감소한다.

이와 같이 연료 액적의 증발형태는 온도에 따라 크게 변하고 있음을 알 수 있다.

3.5 증발시간과 착화지연

단일액적 연료의 착화과정은 액적 증발로 인한 증기와 공기 혼합기의 반응이다. 본 연구에서는 증발특성과 착화특성과의 관계를 해석하였다. 착화지연시간을 구함에 있어서는 30회 정도의 실험 데이터를 산술 평균하여 구하였다. Fig. 7에 증발시간과 착화지연시간의 측정 결과를 같이 나타냈다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 착화지연시간의 극소치 및 극대치점은 증발곡선에서와 같은 형태의 경향을 보이나, 착화지연의 극소치 및 극대치점이 높은 가열벽면온도 쪽으로 이동하고 있다. 착화지연곡선은 증발곡선과 유사한 극소치 및 극대

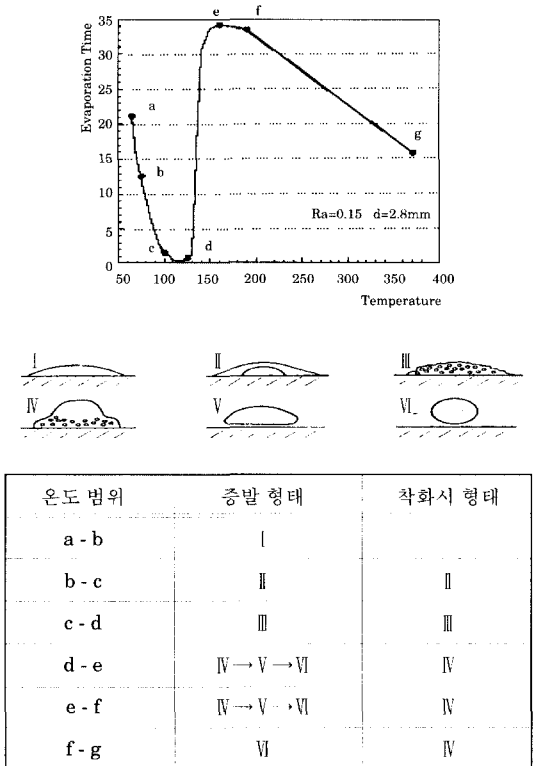


Fig. 6 Evaporation appearance

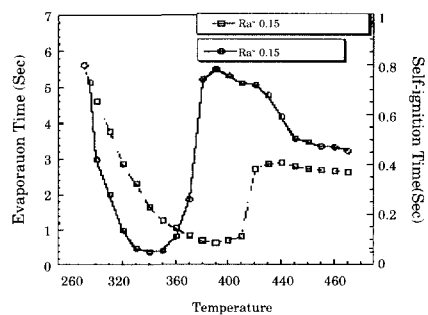


Fig. 7 Relation between Evaporation curve and Self-Ignition curve (d = 2.8mm)

치를 갖는 N자형 곡선 형태를 갖고 있으며, 이것은 가열 벽면에서 연료 액적의 착화현상이 증발과 정과 밀접한 관계를 갖고 있음을 의미한다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온 벽면위에서의 n-Heptane, n-Hexadecane, Ethyl Alcohol의 단일 연료 액적을 벽면거칠기와 초기 액적 직경의 변화에 따른 증발 및 착화 과정에 대한 실험에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 연료특성 특히 연료비등점은 증발 및 착화 특성에 크게 영향을 미친다. 비등점이 낮은 연료일수록 최대증발율점이 발생하는 온도는 낮으며, 각 연료에 대해서 최대증발율점은 비등점보다 약 50℃ 정도 높은 온도에서 나타난다.

(2) 고온 벽면에서 연료 액적 증발시간은 벽면 거칠기의 영향을 받는다. 벽면거칠기가 증가하면 증발시간은 감소하고, 최대증발율점이 벽면온도가 낮은 쪽으로 이동한다.

(3) 액적의 크기가 증가할수록 증발시간은 약간 증가하나, 액적의 크기와 상관없이 최대증발율점과 라이덴프루스트점은 동일 지점에서 발생한다.

(4) 벽면온도에 의해 액적의 증발형태는 액막증발형태, 비등증발형태, 천이형태, 구상증발형태와 같은 여러 모양으로 변화한다.

(5) 착화지연시간은 액적 증발시간과 밀접한 관계를 가지고 있다.

5. 참 고 문 헌

[1] Gottfried, B. S, and Lee, C. J., "Theory of non-steady state droplet combustion" Int. J. Heat Mass Transfer 9, pp1167~1187, 1966

[2] 角田敏一, 廣安博之, "高温, 高壓の氣體中における單一液滴の蒸發" 日本機械學會論文集 39卷328號, pp3779~3787, 1973

[3] Baumeister, K. J., and Simon, F. F., "The ignition of hydrocarbon fuel droplet in air", ASME C-95, pp166-173, 1973

[4] 송규근, 류호성, "단일액적의 증발 및 착화특성에 관한 연구", 박용기관학회지, 22권 4호, pp133-141, 1998

[5] 송규근, 류호성, "고온분위기에서의 디젤분무의 거동에 관한 연구", 박용기관학회논문집 24권4호, pp454-459, 2000

[6] Yang, W. J., Inst. Space and Aeron. Sci., Univ. of Tokyo, Report No. 535, pp.423~455, 1975

[7] Faeth, G. M., and Olson, D. R., "Current status of droplet and liquid combustion", SAE Paper No.680465, 1968.

[8] N.Shaygan and S.Prakash, "Droplet ignition and combustion including liquid -phase heating", Combustion and Flame, vol102, pp1~10, 1995

[9] C.K.Law, "Evaporation and ignition of a fuel droplet on a hot surface", Combustion and Flame, vol51, pp95~104, 1983

[10] A.H.Lefebvre, "Atomization and spray", Hemisphere publishing, 1989

[11] P.Samuel and G.A.Karim, "Analysis of droplets ignition and combustion within homogeneous mixture of fuel and air", SAE 940914, pp257~267, 1994

저 자 소 개



송규근(宋圭根)

1954년 12월 26일생. 1981년 전북대학교 기계공학과 졸업. 1983년 전북대학교 기계공학 석사. 1987년 일본 북해도대학교 기계공학 교수. 1990. 3~현재 전북대학교 교수.