

액적의 증발에 미치는 수증기 농도의 영향

Effects of Water Vapor Concentration on a Droplet Evaporation

김용우*, 이명준*, 하종률**, 정성식**

Y. W. Kim*, M. J. Lee*, J. Y. Ha**, S. S. Chung**

ABSTRACT

An experimental study has been conducted to clarify the effect of vapor on droplet evaporation. Droplets of water, ethanol, n-hexadecane and n-heptane were exposed in air stream. Temperature, pressure, and flow velocity in the ambient air are 470K, 1 atm, and 2m/s, respectively. Measurements are carried out for the wide range of water vapor concentration(0%~40%). To obtain the time histories of droplet diameter, suspended droplet in hot and humid air stream was synchronized with a back flash light, and enlarged droplet images were taken on a CCD camera. With the vapor concentration increasing, the evaporation rate constant of water droplet decrease slightly and the droplet of ethanol and n-heptane increase actively. The evaporation rate constant of n-hexadecane which has higher boiling point than water increases within around 30% of the concentration.

주요기술용어 : Droplet evaporation(액적증발), Micro-explosion(미소폭발)

1. 서론

디젤엔진이나 가스터빈의 분무연소에 관한 기초자료를 얻기 위하여 연료액적의 증발에 관한 연구가 오래전부터 지속적으로 이루어지고 있다.^{(1)~(3)} 이와 같은 실험의 결과로서 액적의 증발에 미칠 수 있는 분위기의 온도, 압력, 속도 등을 비롯한 각종의 인자들의 영향에 관하여 상세한 정보들이 보고되어 있다.^{(4)~(6)} 이들 이외에도, 액적의 증발에 영향을 미치는 요소로서 연소 분위기 중에 포함된 수증기를 생각해 볼 수 있다. 즉, NO_x 저감 대책의 일환으로 가스터빈기관에서는 처음부터 수증기를 첨가하여 운영하는 경우가 있고, 유상액의 연소에서는 수증기가 연료액적의 증발에 미치는 영향이 적지 않을 것으

로 생각된다. 실로, 유상연료를 사용한 디젤기관에서 연비가 개선된다는 결과를 얻고서도 수증기가 액적의 증발이나 연소과정에 미치는 영향에 대해서는 구체적인 언급이 없다.

본 연구에서는 연소분위기 중에 포함된 수증기가 시료액적의 증발에 미치는 영향을 정량적으로 측정하고자 한다. 실험에서는 수증기를 포함하는 고온의 기류 중에 물, 에탄올, n-hexadecane, n-heptane으로 생성한 액적의 시간에 따른 직경변화를 화상처리를 통해 취득하였다. 얻어진 결과로써 액적의 증발속도 정수에 미치는 수증기농도의 영향을 친수성연료, 소수성연료, 또한 시료액적의 비등점에 유의하여 고찰하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1 증발속도정수

상온의 액적이 고온의 분위기 중에 노출되면

* 동아대학교 대학원

** 정희원, 동아대학교 기계공학과

액적은 가열되면서 그의 표면에서는 증발이 일어난다. 이 사이에 증발에 의한 액적의 체적감소율보다 가열에 의한 체적증가율이 상회하면 액적의 직경은 커진다. 시간이 경과함에 따라 액적의 온도가 상승하고, 이와 더불어 액적의 표면상에서 액적 증기의 분압이 상승함으로써 증발이 활발하게 일어난 결과, 액적의 직경은 감소를 시작한다. 이 증발기간 동안 순수시료 액적의 직경자승의 변화율 경과시간에 대하여 나타내면 직선적으로 변화하며, 이 경우 액적의 증발속도정수는 다음과 같은 식들로 정의된다.

$$dD^2/dt = -Ke \quad (1)$$

$$D_0^2 - D_1^2 = Ke (t_1 - t_0) \quad (2)$$

여기서, D: 액적직경(mm), t : 시간(s), Ke : 증발속도정수(mm²/s), D₀ : 시간 t₀에서의 액적직경(mm), D₁ : 시간 t₁에서의 액적직경(mm)

2.2 실험장치

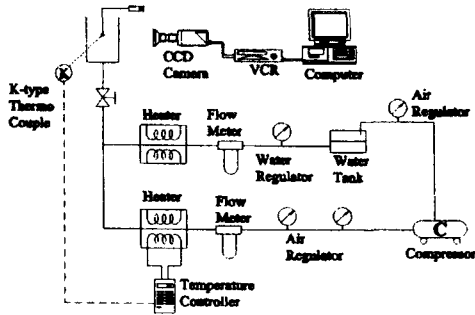


Fig.1 The schematic diagram of the experimental apparatus

액적의 주위분위기를 소정의 실험조건으로 설정하기 위하여 공기압축기, 유량계, 가열기 등을 사용하였다. 액적분위기에 수증기를 첨가하기 위하여 공기압축기로부터의 공기압을 압력조절기로 제어하고 물탱크에 공급함으로써 물을 가압하고, 가압된 물은 유량계를 통과하여 히터를 거쳐 기화되어 공기공급관에 합류됨으로써 고온·고습의 실험분위기로 설정된다.

액적 분위기의 온도는 히터에 공급되는 전력

을 액적부근에 설치된 열전대의 신호에 의해 작동하는 온도조절기로써 제어하여 일정온도를 유지하였다.

액적은 석영을 직경 약 0.1~0.2mm의 석영사로 세공하여 이의 끝단에 연료를 현수하여 생성하였다. 고온 분위기에 노출된 액적의 시간경과에 따른 직경변화의 측정을 위한 계측부는 광원, CCD 카메라, 화상캡처 및 분석을 위한 컴퓨터 등으로 구성된다. 이중 CCD 카메라에 접사렌즈를 사용하여 약 0.5~2mm의 액적을 약 10배 정도 확대 촬영하였다.

액적중심의 온도변화를 측정하기 위하여 소선이 약 50μm인 백금열전대의 접점을 석영사 끝단에 부착하여 액적의 중심에 상당하는 온도를 측정하고, 이의 결과는 주로 수증기의 액적에의 유입 유무를 판단하는데 이용하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 실험연료

본 실험에서 사용된 액적의 시료는 물, 그리고, 물보다 비등점이 낮으며 친수성인 에탄올 및 소수성인 n-heptane, 물보다 비등점이 높은 소수성 n-hexadecane을 사용하였다. Table 1에 시료의 주요 물성치를 나타낸다.

Table 1. The kind of tested fuels and the main properties at atmospheric pressure

Tested Fuels	Boiling Point(K)	Latent Heat(kJ/kg)
Distilled Water	373.15	2676.0
Ethanol	351.7	854.8
n-heptane	371.6	320.1
n-hexadecane	560.0	284.6

2.3.2 분위기의 온도, 유속 및 수증기농도

액적주위의 분위기는 473K으로 일정하게 유지하고, 이의 속도를 액적이 위치하는 관의 직경과 공기 및 수증기의 공급량과의 관계로써 2m/s로 설정하였다. Table 2는 분위기유속을 일정하게 유지하기 위한 공기와 물의 공급량이다. 고온의 공기중에 포함된 수증기는 그의 체적을

0%부터 10%씩 증가시켜 40%까지 변화시켰다.

Table 2. Supplied amount of water and air

Vapor mol(%)	Temp. [300K]		Temp. [473K]
	Q_w [cc/min]	Q_a [l/min]	V_{wa} [m/s]
0	0	107.3	2
10	8	96.6	2
20	16	85.9	2
30	23	75.1	2
40	31	64.4	2

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 수증기가 수액적의 증발에 미치는 영향

Fig.2는 분위기온도를 473K, 수증기의 체적농도를 0%~40%로 변화시킨 경우에, 수액적의 직경자승의 시간변화를 나타낸 것이다. 그림에서 수액적의 D^2-t 의 관계는 거의 직선상에서 변화하며, 분위기의 수증기농도가 변하여도 직선적인 변화는 유지되고 있다.

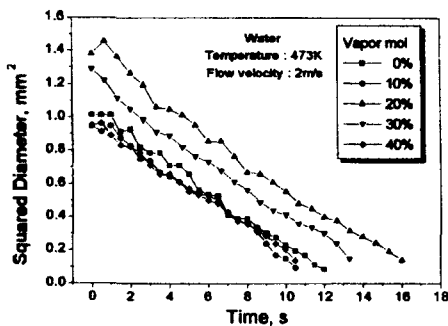


Fig.2 Time histories of squared diameter of water droplets

Fig.3은 Fig.2의 결과를 이용하여 산출한 수액적의 증발속도정수의 변화를 수증기농도에 따라 나타낸 것이며, 이는 전체를 직선적으로 변화하는 것으로 생각하고 최소자승법으로써 구한 것이다. 본 그림에서 수증기 농도에 따른 액적의 증발속도정수는 전체적으로 약간 감소하는 경향을 보이며, 상온에 가까운 분위기 조건에서는 dD^2/dt 의 절대치가 수증기농도의 증가에 따라 감소한다는 결과⁽⁶⁾와는 거의 경향이 일치하고 있다.

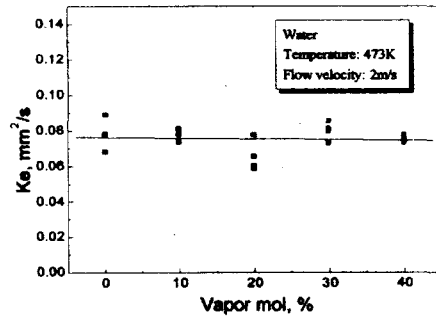


Fig.3 The evaporation rate of water droplet in each vapor mol

이는 액적이 증발하는 분위기 중에 액적과 동종의 증기가 존재하면, 액적으로부터 발생한 증기의 확산속도가 저하하는 것과, 다음과 같은 물리적인 요인들이 복합적으로 작용하여 증발속도가 감소된 것으로 생각된다. 즉, 공기에 수증기가 포함된 경우에 액적에 관한 대류열전달률을 물성정수추산법⁽⁷⁾에 따라 추산하면, 수증기농도가 증가함에 따라 감소하며, 농도 40%에서는 약 10%정도 감소된다. 또한, 분위기중의 수증기농도가 증가하면 수액적 표면에서 증발된 수증기의 확산속도가 감소하게 된다. 따라서, 액적은 분위기에서 받은 열량에 상당하는 증기의 확산에 필요한 확산속도를 갖기 위한 수증기농도를 액적표면의 포화농도로써 갖기 위한 온도까지 액적표면온도가 상승되게 된다. 그러므로, 분위기와 액적표면온도와 온도구배가 감소하므로, 수증기농도가 증가할수록 액적의 증발은 더딜 것으로 생각된다.

반면, 증발하는 액적의 표면온도가 분위기중의 수증기농도의 포화온도 이하라면, 수증기는 액적의 표면에서 응축되고, 응축된 수분은 액적과 혼합된 결과, 이의 응축열은 액적의 증발에 사용될 것으로 생각된다. 그러나, 유입된 수분은 재차 증발잠열에 상당하는 열량을 분위기로부터 얻어 증발되므로 전체의 증발에는 영향을 미치지 못할 것으로 생각된다.

3.2 수증기가 에탄올액적의 증발에 미치는 영향

Fig.4는 친수성연료인 에탄올 액적을 고온·고

습의 기류 중에 노출시키고, 시간경과에 따른 직경자승의 변화를 측정 한 것이다.

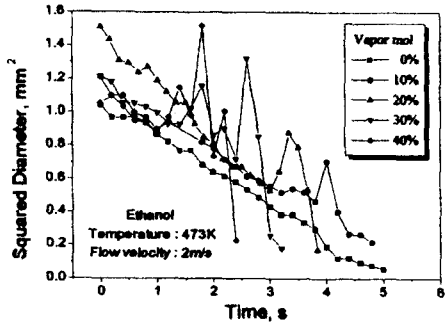


Fig.4 Time histories of squared diameter for ethanol droplets

본 그림에서 에탄올액적의 증발경향은 수증기과는 확연히 다른 현상을 보이고 있다. 즉, 초기의 증발과정에는 증기농도가 그다지 관계치 않으며, 수증기농도 0%에서의 D^2-t 의 구배는 일정한 감소율 나타내지만, 수증기가 첨가된 분위기의 액적은 부분적으로 액적직경자승의 급격한 팽창과 감소가 관찰된다.



Fig. 5 Explosion of Ethanol(Vapor mol 40%)

Fig.5는 수증기농도 40%의 경우에, 임의의 시각에서 액적의 급격한 팽창과 감소부분만을 실상으로 나타낸 것이다. Fig.5에서, 액적은 급속한 팽창을 보이며 급기야는 미소폭발과 유사한 현상을 나타낸 후에 직경이 급감하고 있다. 이는 에탄올 액적의 표면에 분위기중의 수증기가 응축되어 유입되고, 이의 응축열 및 현열로 인하여, 액적내부에서 포화상태 가까이에 이른 에탄올성분이 급격히 기화되는 과정들이 60Hz로 측정하는 CCD 카메라에 포착된 것으로 생각된다.

상술한 수증기의 유입에 관한 사실은 에탄올과 물을 혼합한 액체의 기액평형선도 및 에탄올액적의 내부온도계측으로써 재차 설명될 수 있다.

Fig.6은 에탄올과 물을 혼합한 경우, 에탄올

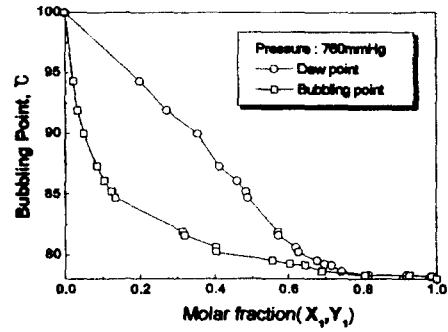


Fig.6 The water-ethanol state diagram

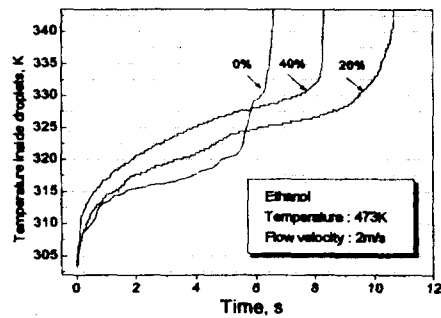


Fig.7 The inside temperature of ethanol droplet

의 물분율(X_1)의 변화에 대하여 bubbling point와 기상에서의 에탄올의 조성(Y_1)과의 관계를 나타낸다.⁽⁶⁾ 그림에서 아래편 곡선이 bubbling point를 나타내며, 윗편이 노점곡선이다. 그림에서 알 수 있듯이 표준비등점이 78°C인 순수 에탄올에 물의 혼합분율이 증가함에 따라 bubbling point가 점점 물의 비등점에 가까워짐을 나타낸다. 또한 임의의 혼합비 X_1 에서, bubbling point와 같은 위상에 있는 노점곡선을 보면, 혼합비에 비하여 상대적으로 에탄올의 양이 많은 것을 알 수 있다. 즉, Fig.6은 물이 유입된 에탄올 액적이 증발함에 따라 이의 온도는 점점 물의 비등점에 가까워지고, 증발성분은 에탄올이 물에 비하여 상대적으로 많음을 의미하고 있다.

Fig.7은 수증기농도 0%, 20%, 40%인 분위기 중에 노출된 에탄올액적의 내부온도변화를 백급

열전대로써 측정하여 나타낸 것이다. 그림에서 수증기가 첨가되지 않은 0%인 경우보다 20%, 40%인 경우에서 증발말기의 액적온도가 높은 것을 알 수 있다. 이는 친수성 연료인 에탄올 액적으로 응축하고 용해되는 물에 의해, 순수에탄올로 시작한 액적이 점차 물이 첨가된 혼합연료의 특성을 가지게 되고, 분위기의 수증기농도가 증가함에 따라 에탄올의 물분율이 상대적으로 낮아져, 기액 평형선도에서 설명한 것처럼 액적의 최종온도가 상승되는 것으로 생각된다. 이러한, 액적내부의 온도이력으로서 에탄올액적에 물이 유입되는 것이 설명가능하다.

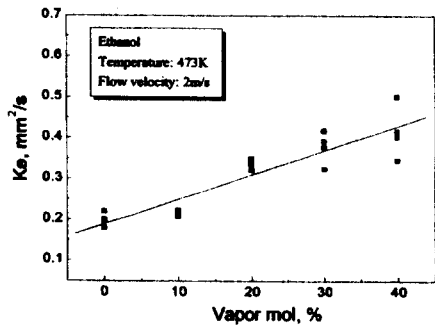


Fig.8 The evaporation rate of ethanol droplet in each vapor mol

Fig.8은 Fig.4에 나타낸 바의 실험을 수 차례 행하고 각각의 증발속도정수로 산출한 결과를 평균하여 나타낸 것이다. 여기서 증발속도정수를 산출할 때, 과도하게 팽창된 경우의 직경은 제외하였다. 거의 동일한 분위기 조건에서 실험한 廣光⁽⁶⁾에 의하면 에탄올 액적에 유입되는 수증기의 양은, 수증기농도 40%의 경우라도 직경의 자승으로 약 0.1mm²에 불과한 것으로 보고하고 있다. 따라서, Fig.8의 값은 거의 에탄올만의 증발속도정수를 나타내는 것으로 보아도 무방하다. Fig.8에서 분위기중의 수증기농도가 증가함에 따라 증발속도정수는 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타내며, 0%에 비하여 40%의 경우는 거의 2배에 가까운 증가를 나타낸다. 이와 같은 현상은 상술한 바와 같이 분위기중의 수증기가 에탄올 액적의 표면에서 응축하여 액적에 유입됨으로써 응축열이 거의 에탄올의 증발에 이용된 결과로 생각된다. 그리고, 고온분위기에

서 포화상태에 있는 에탄올 액적이 수증기의 응축열로 인하여 급격히 기화된 결과, 미소폭발을 일으킴으로써 증발속도정수의 증가가 가중되는 것으로 생각된다. 또한 액적의 급속한 팽창시기가 수증기농도에 따라 앞당겨지는 경향을 Fig.4에서 볼 수 있는데, 이 역시 에탄올 액적의 증발속진을 가속시키는 요인으로도 볼 수 있다.

3.3 수증기가 n-hexadecane액적의 증발에 미치는 영향

소수성연료인 n-hexadecane액적이 증발할 경우에도 에탄올 액적처럼, 분위기에 포함된 수증기가 액적의 표면에서 응축되어 내부로 유입될 것으로 생각된다. 그러나, n-hexadecane의 표준비등점은 물보다 한층 높은 560K이므로, 에탄올과는 증발양상이 다를 것으로 예상된다.

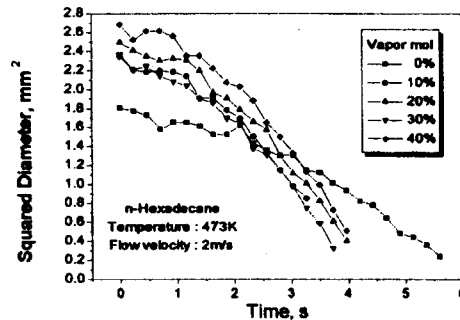


Fig.9 Time histories of squared diameter for n-hexadecane droplets

Fig.9는 n-hexadecane액적의 증발에 관하여 측정된 결과의 일례를 나타낸 것이다. 그림에서 수증기농도 0%의 경우는 D^2-t 의 관계가 위로 약간 볼록한 형상을 보이나, 실험의 오차를 고려하면 단일시료 액적의 증발로 볼 수 있다. 그러나, 수증기농도 20%이상의 조건에서는 위로 볼록한 정도가 심하며, 특히, 투입후 1초 정도를 전후하여 그의 양상이 달라, 수증기가 어떠한 형태이든 n-hexadecane액적의 증발에 영향을 미친 것으로 생각된다.

투입하여 1초 이전의 과정에서는 액적의 표면에 응축된 수증기는 농도0%에 비하여 액적의 온도를 급상승시킨 결과, 액적온도에 평형한

n-hexadecane 및 수분이 증발하여 물의 유입에도 불구하고 액적의 직경은 감소하고 있는 것으로 생각된다. 이 기간동안, n-hexadecane만으로 시작한 액적은 물과의 혼합액적으로 점차 변하며, 수증기가 용축되는 기간은 액적의 표면온도가 수증기의 노점에 이를 때까지로서, 노점온도는 수증기농도 20%, 30%, 40%에서 각각, 60℃, 70℃, 75℃ 정도이다.

이 이후에는 혼합액적의 온도가 상승하면서 물과 n-hexadecane 이 동시에 증발하며, 물과 n-hexadecane의 비등점의 차이를 고려하면, 최후에 증발하는 성분은 n-hexadecane 일 것으로 생각된다.



Fig.10 Progress of evaporation of n-hexadecane (Vapor mol 40%)

수증기의 유입을 볼 수 있는 그림을 Fig.10에 나타내었다. 이는 수증기농도 40%에서의 것으로서, 특히, 1~3초 사이의 액적에서 기포가 발생되고 있는 것을 볼 수 있으며, 이의 정도는 에탄올액적보다는 약한 편이다. 이 기포들은 단일성분의 액적이 증발하는 경우에는 볼 수 없는 현상으로서, n-hexadecane 액적의 온도가 비교적 낮았던 초기에 내부로 유입된 물이 증발되면서 만들어 낸 것으로 볼 수 있고, 액적내부에서는 유상연료에서의 수분과 같이 극히 작은 피로서 분포했던 것으로 생각된다.

Fig.11은 Fig.9와 같은 실험으로 산출된 n-hexadecane의 수증기농도에 따른 증발속도정수를 나타낸 것이다. 그림에서 n-hexadecane 액적의 증발속도정수는 수증기농도에 따라 점차 증가해 가지만, 30%이후에서는 감소하고 있다. 본 실험에서 수증기의 유입과 유출에 따른 열량이 같은 값으로 생각되므로, 분위기중의 수증기는 대류열전달률을 감소시켜, 오히려 액적의 증발속도를 저하시키는 방향으로 작용한다. 그러나, 증발속도를 증가시키는 요인들로서는 수증기의 용축 및 유입으로, 액적표면적의 확대에 따른 수열면적의 확대, 수분과 함께 n-hexadecane의

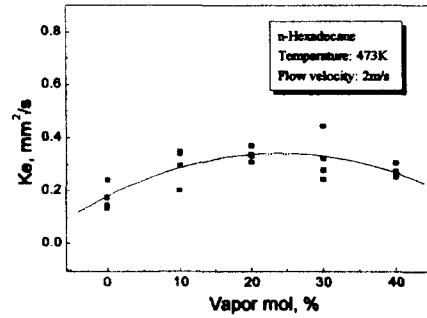


Fig.11 The evaporation rate for n-hexadecane droplet in each vapor mol

동반유출을 생각할 수 있으며, 30% 이후에서의 감소는 수증기농도증가에 따른 수분의 확산속도 저하에 기인한 것으로 생각된다.

3.4 수증기가 n-heptane액적의 증발에 미치는 영향

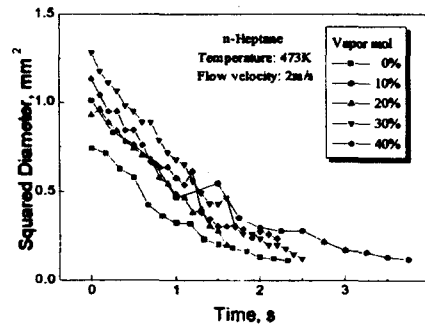


Fig.12 Time histories of squared diameter for n-heptane droplets

Fig.12에는 수증기농도에 따른 소수성 연료인 n-heptane액적의 직경자승의 시간변화를 나타내고 있다. 그림에서 수증기농도가 10%이상인 경우의 액적은 초기의 D^2-t 구배의 절대치가 농도 0%에 비해 커지는 것을 알 수 있으며, 증발의 말단에서는 구배가 점차 완만해짐을 보인다. 이는 저온의 액적표면에 수증기가 용축되어 유입됨으로써 액적의 온도상승 및 증발을 촉진하고, n-heptane보다 증발잠열이 훨씬 큰 물도 시간경

과와 더불어 일부 증발함으로써 생기는 현상으로 생각된다. n-heptane의 증발이 끝나는 지점은 두 성분의 표준비등점이 비슷하여 Fig.12로는 명확히 구분할 수 없으나, 상술한 바의 완만한 구배를 보이는 지점을 약1.5초 정도로 보면, 이 시간 이전에 대부분의 n-heptane이 증발하고, 이후에는 거의 물만이 증발해 갈 것으로 생각된다.

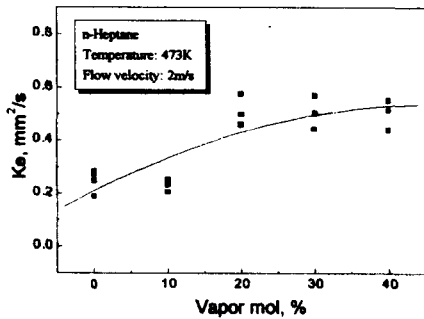


Fig.13 The evaporation rate of n-heptane droplet in each vapor mol

Fig.13은 Fig.12와 같은 결과들을 이용하여 n-heptane의 증발속도정수와 수증기농도와 관계로써 나타낸 것이다. 그림에서 수증기 농도가 증가함에 따라 증발속도정수가 증가하고 있는 것을 알 수 있으며, 이는 분위기 중의 수증기 농도가 증가함에 따라 수증기의 액적으로의 용착량이 증가하여 열전달을 촉진한 결과로 생각된다.

4. 결론

- (1) 물액적의 증발속도정수는 분위기중에 수증기 농도가 증가하면, 약간 감소하는 경향을 보인다.
- (2) 친수성인 에탄올 액적에는 분위기중의 수증기가 유입되어 액적의 증발을 촉진시키며, 간혹 미소폭발현상이 발생하여 증발속도를 더욱 크게 한다. 미소폭발현상은 표준비등점이 물보다 낮은 액적일수록 심할 것으로 생각된다.
- (3) 비등점이 물보다 높은 소수성인 n-hexa-

decane 액적의 경우는, 수증기의 농도가 낮은 범위에선 증발이 촉진되지만 수증기의 농도가 높은 범위에서는 감소하는 경향을 나타내었다.

- (4) 소수성 연료인 n-heptane 액적의 증발속도정수는 수증기농도가 증가함에 따라 수증기의 용착열의 증가로 인하여 증발이 촉진되는 경향을 보인다.

후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME-97-F-05)에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. 小林清志, "液粒の蒸發および燃焼に関する研究" 日本機械學會 論文集, pp.20~100, 1954
2. G.A.Agoston, H.Wise, W.a.rossoer "Dynamic Factors Affecting the combustion of Liquid Sphere", 6th Symp.(International) on Combustion, 1956
3. 熊谷清一郎, 田, "燃料液滴の蒸發と燃焼", 機械の研究, pp.4~6, 1952
4. 정성식, 하종률, 이중순, 이상석, 川口 修. "자유액적의 증발에 미치는 분위기속도의 영향" 대한기계학회논문집(B), 제20권 제6호 pp.2036~2045, 1996
5. Sung Sik Chung, O. Kawaguchi, "Evaporation Rate of Free Paraffin Hydrocarbon Droplet in a High Temperature and High Pressure Gas Stream", JSME International Journal, Vol. 38-1, B, pp.121~128, 1995
6. 廣光水兆. "氣流中の液滴の蒸發過程に對する氣流亂れと蒸氣濃度の影響", 廣應義塾大學, 工學研究科 博士論文, 1997
7. 大江修造, 物性定數推算法, 1985, 日刊工業新聞社
8. BOOM.C.H.,et al. : CND.ENG. CHEM, VOL. 53, p.829, 1961