

〈논 문〉

## 자유액적의 증발에 미치는 분위기 속도의 영향

정성식\* · 하종률\* · 이중순\*\* · 이상석\*\* · 川口 修\*\*\*

(1996년 1월 10일 접수)

### Effects of Environmental Flow Velocity on the Evaporation of Free Droplets

S. S. Chung, J. Y. Ha, J. S. Lee, S. S. Lee and O. Kawaguchi

**Key Words:** Free Droplet(자유액적), Evaporation(증발), Evaporation Rate Constant(증발속도정수), Relative Velocity(상대속도)

#### Abstract

An experimental study has been performed to obtain the effect of relative velocity between droplet and environmental gas on the evaporation of a n-heptane free droplet of 180  $\mu\text{m}$  in diameter flying in a hot and normal pressure air flow. Measurement of droplet diameter and velocity was conducted in a series of time by an electrically controlled optical system. From the experimental results, an empirical equation associated with the relation between evaporation rate constant and relative velocity was obtained.

#### 1. 서 론

분무의 연소기구를 해명하기 위한 기초정보의 취득을 목적으로, 분무를 구성하는 연료액적(燃料液滴)을 실험의 대상으로 하여, 분위기의 온도, 압력 등 액적주위의 물리량의 변화가 이의 증발에 미치는 영향에 대하여 많은 연구들이 진행되어 왔다.<sup>(1-3)</sup> 그 중에서 Ranz-Marshall<sup>(1)</sup>, Agoston<sup>(4)</sup> 등은 분위기와 액적간의 상대적인 속도의 차이가 액적의 증발에 미치는 영향에 관한 연구의 결과, 액적의 증발속도 정수는 액적직경을 포함하는 물리량을 매체로 한 레이놀즈수의 1/2승에 비례하는 것으로 보고하여, 이와 같은 부류의 연구에서 대표되는 식으로 평가받고 있다.

상술한 바와 같은 연구에서의 실험방법은 주로

단일액적(single droplet) 법과 자유액적(free droplet) 법으로 나뉘어진다. 단일액적법은 주로 열전대나 내열성의 현수선(懸垂線)에 부착시킨 액적을 실험에 이용한 것으로서, 이는 현상의 측정이 용이한 반면에 분무정도의 미소한 액적을 생성할 수가 없고, 또 현수선의 영향을 배제할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 분위기로부터 액적에 미치는 자연대류의 영향이 크고, 현수선은 액적에의 전열매체로 작용하게 되어 단일액적법에 의한 증발속도 정수는 비교적 큰 값을 나타내므로, 이로부터 얻어진 정보를 분무해석을 위한 기초정보로 인정하기에는 부적절한 점들이 많다. 이와 같은 관점에서 자유액적법은 단일액적법의 단점이 보완되며, 특히, 그의 증발 및 연소의 거동에서 분무를 형성하는 액적과 유사한 관계로, 분무의 연소기구를 해명하기 위한 신뢰성 높은 기초정보는 미소한 자유액적(free droplet)을 이용한 실험으로부터 취득할 필요가 있다.

그러나, 지금껏 자유액적법은 분무와 동정도의 미소액적을 생성하는 수법이 불확실하고, 또 고온

\*회원, 동아대학교 공과대학 기계공학과

\*\*회원, 동아대학교 대학원

\*\*\*慶應義塾大學 理工學部 機械工學科

의 분위기류 중에 투입되어 비행하는 액적의 시간 경과에 대한 직경의 변화 등에 관한 측정이 곤란하여, 자유액적의 증발에 미치는 분위기 속도의 영향을 정량적으로 측정하여 보고한 예는 없다.

본 연구에서는 원통형 전쇄소자를 이용한 액적 생성장치로써 생성한 직경 $180\ \mu\text{m}$  정도의 n-heptane 액적열을, 고온의 공기류 중에 연속적으로 투입하고, 시간경과에 따른 액적의 속도와 직경의 변화를 광학 측정시스템으로 측정하여, 액적의 증발속도정수에 미치는 분위기와 액적간의 상대적인 속도의 영향을 정량적으로 구하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 측정방법

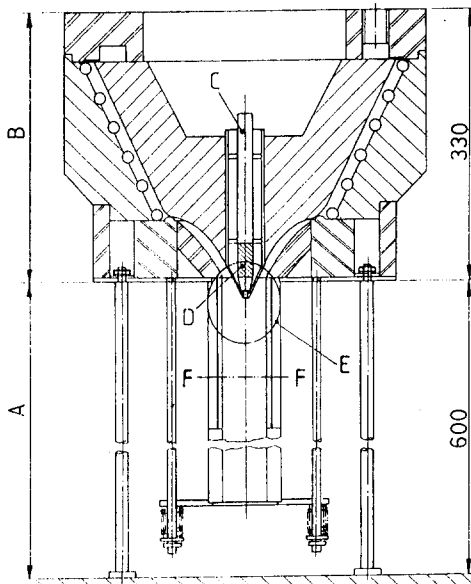
### 2.1 실험장치의 개략

실험장치의 개략을 Fig. 1에 나타낸다. 본 장치는 크게 나누어, 가열부와 측정부로 구성되어 있다. 가열부는 내열 시멘트로 성형하여, 액적의 분위기인 공기를 소정의 실험온도까지 가열하기 위한 전열선과, 중앙 부분에는 액적생성장치를 장착하고, 고온으로부터 보호하기 위한 냉각재킷이 설치되어 있다. 측정부는 Fig. 1의 확대도에 나타낸 바와 같이, 액적 생성장치로부터의 연료액적은 냉각

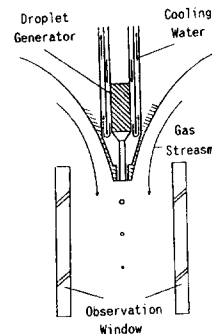
재킷의 통로를 거쳐 고온의 분위기류 중에 투입되는 데, 이로부터 액적의 속도 및 직경 변화에 관한 정보를 외부에서 광학적으로 측정하기 위한 부분이다. 이는 재질이 세라믹인 내경 50 mm, 외경 85 mm의 원통을 사용하여, Fig. 1의 F-F 단면도에 나타낸 것처럼 내경 7 mm인 12개의 길이 방향의 홈에는 분위기류의 보온을 위하여 전열선을 설치하였고, 유로 내부의 광학적인 측정이 가능하도록 이의 양쪽에 폭 10 mm, 길이 300 mm의 석영유리를 부착하였다.

본 장치에서 가열부의 전열선에 공급되는 전류는 액적의 출구인 냉각 재킷으로부터, 하방 50 mm 위치에서의 측정부 벽면 근처에 설치된 열전대의 신호로써 작동하는 온도조절장치를 이용하여 제어함으로써, 분위기 온도의 미세조정이 가능하게 하였다.

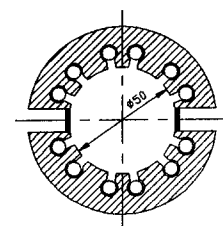
Fig. 2에 나타낸 액적생성장치는, 내경 1 mm, 외경 1.7 mm, 길이 12 mm인 원통형 전쇄소자를 이용한 것으로, 朴木<sup>(5)</sup> 등이 개발한 것을 본 연구에 맞게 개량하여 사용하였다. 이는 전쇄소자에 인가하는 전기신호의 파형과 전압을 조절함으로써 생성하는 액적의 직경과 속도의 제어가 어느 한도 내에서 가능하며 직경과 속도의 편차가 3% 이내인 특



A. Measuring section      C. Water jacket  
B. Heating section      D. Droplet generator

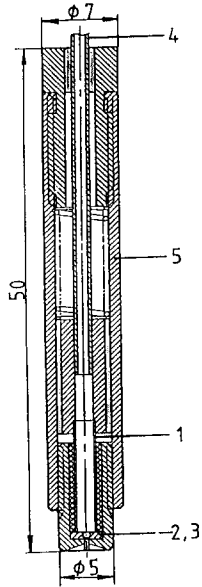


Enlarged view of part B of Fig. 1



F-F cross section of Fig. 1

Fig. 1 Experimental apparatus



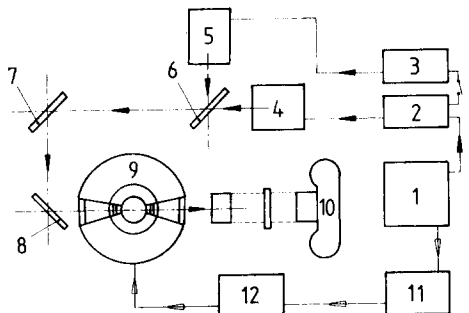
- 1. Piezoelectric transducer
- 2. Orifice holder
- 3. Ruby orifice
- 4. Sample liquid inlet
- 5. Droplet generator holder

Fig. 2 Droplet generator

정을 가지고 있다.

2.2 측정방법

Fig. 3에는 액적을 생성하고, 이의 직경과 속도를 측정하기 위한 광학시스템을 나타내었다. 광학



- 1. Pulse generator
- 2. Retarder 1
- 3. Retarder 2
- 4, 5. Microflash unit
- 6. Half mirror
- 7, 8. Mirror
- 9. Measuring section
- 10. Still camera
- 11. Pulse transformer
- 12. Amplifier

Fig. 3 Electrical network for measurement of droplet diameter and droplet velocity

시스템은 액적생성을 위한 피형발생기, 정형기, 증폭기와 생성된 액적의 직경과 속도의 측정을 위한 두 대의 지연회로, 순간광원, 카메라 등으로 구성되어 있다. 본 시스템을 이용하여 측정부에 연속적으로 투입되어 증발과정 중에 있는 연료액적의 직경과 속도는 각각 싱글 후레쉬법(single-flash method)과 더블 후레쉬법(double-flash method)으로, 감광 필름상에 약 6배로 확대촬영하고, 이를 필름의 판독기를 이용하여 초기 액적직경의 약 200배로 확대해서 측정된 값을 최종 데이터로 하였다.

3. 연료액적의 분위기 온도 및 속도

3.1 분위기의 온도분포

Fig. 4는 액적 생성장치로부터의 연료액적이 냉각재킷을 벗어나, 측정부에 투입되어 비행하는 측정부 중심선상의 온도분포를 흡인열전대로써 측정하여 나타낸 것이다. 온도 및 분위기의 속도는 액적의 출구인 냉각 재킷으로부터 하방 50 mm의 위치에서 623K으로 설정하고, 내경 50 mm인 측정부의 유로에서 아래 방향으로 1.5 m/s가 되도록 공기의 질량유량을 완전가스의 상태식으로 추산하여 공급한 경우이다. 여기서, 횡축의 Z는 액적 생성장치에 의한 연료액적이 냉각 재킷 내를 통과해서 측정부에 투입된 위치를 원점으로 하여, 그의 진행거리를 나타낸다.

Fig. 4의 측정부 입구영역에서 온도가 비교적 낮은 부분은 액적 생성장치를 보호하기 위한 냉각 재킷의 영향에 의한 것으로 생각되나, 이를 벗어나면 전체적으로 안정된 상태에서 완만히 상승하고 있다. 본 연구에서는 측정부 입구로부터 50 mm 위치에서의 온도 623 K을 대표온도로 하며, 임의의 위치 Z에서 액적이 경험하는 분위기의 온도는, Fig.

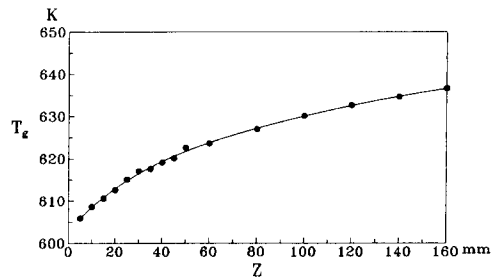


Fig. 4 Temperature distribution of environmental gas along the axis of measuring section

4에 나타낸 바와 같은 측정치를 최소자승법으로 표시한 실선의 값을 사용하였다.

3.2 분위기의 속도분포

본 연구에서는 측정부에 공급된 공기의 속도를 측정하는 방법으로, 기류 중에 놓인 물체에 작용하는 항력을 직접 측정함으로써, 속도를 추산하는 방법을 채택하였다. 즉, 세선(동선, 직경 약 100 μm)의 일단에 원추형의 불럭을 매달아, 액적이 비행하는 측정부의 중심선상에 두고, 타단을 실험장치 외부의 정밀천칭에 연결하면 측정부내에 분위기의 유동이 있을 경우, 불럭은 항력을 갖게 되고 이는 천칭으로 측정할 수 있다. 즉, 식 (1)로부터, 분위기의 속도를 추산할 수 있다.

$$V_g = (2 \cdot F / (C_d \cdot \rho_g \cdot A))^{1/2} \quad (1)$$

여기서

- $V_g$  : 유체의 속도(m/s)
- $F$  : 물체가 갖는 항력(N)
- $C_d$  : 항력계수(-)
- $\rho_g$  : 유체의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- $A$  : 물체의 단면적(m<sup>2</sup>)

측정용 불럭은 직경과 길이가 5 mm, 15 mm인 원추를 이용하였다. 불럭의 직경은, 200 μm 정도의 직경을 가진 액적이 비행하는 경로를 고려하면, 액적에 가까운 치수를 가진 것이 바람직한 것으로 생각되나, 분위기류의 온도와 속도를 623 K, 1.5 m/s로 설정한 경우에, 불럭이 나타내는 항력과 그의 단면적과는 비례하므로, 천칭의 능력(최저 측정단위 0.1 mg)을 고려하여 결정하였다.

다음에 불럭의 항력계수  $C_d$ 는  $Re$  수의 함수이며, 불럭의 길이/직경의 비율이 3인 경우,  $Re > 1000$ 에서는 정수 0.86으로 보고되어 있다.<sup>(6)</sup> 그러나 본 실험에 이용한 불럭의  $Re$  수는 분위기류의 온도와 속도가 623 K, 1.5 m/s에서는 133 정도로서, 이 범위에 맞는 항력계수에 관한 보고의 예는 보이지 않는다. 따라서 기지(既知)의 속도로 설정된 분위기 중에 불럭을 설치하여, 그의 항력과 속도와의 관계로부터 항력계수를 구하였다.

Fig. 5에는 일정한 유속을 가진 기류 중에 놓인 불럭이 나타내는 항력을 측정하고, 식 (1)을 이용하여 추산한 항력계수  $C_d$ 와 불럭의  $Re$  수와의 관계를 나타낸다. 기류속도는 외부로부터 일정 유량의 공기를 측정부에 공급하고, 정온도형 열선유속

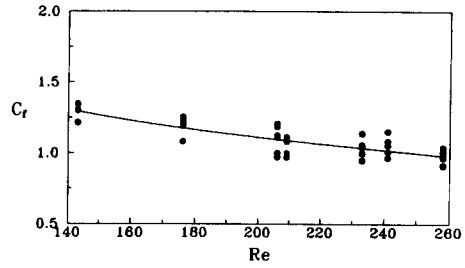


Fig. 5 Relation between drag coefficient and Reynolds number

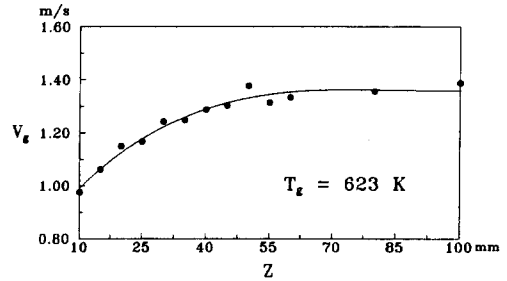


Fig. 6 Velocity distribution of environmental gas along the axis of measuring section

계로써 측정된 데이터를 이용하였고, 불럭은 액적의 출구로부터 50 mm의 하방에 위치시켜 상온에서 실험을 행하였다. Fig. 5로부터  $Re$  수의 감소에 따라 항력계수는 점점 크게 되며, 실험조건에 상당하는  $Re$  수에서의 항력계수를 구할 수가 있다.

Fig. 6은  $Z=50$  mm에서의 분위기 온도 623 K으로, 속도를 1.5 m/s가 되도록 설정하였을 경우, 상술의 방법으로 불럭의 항력을 측정하고, 식 (1)로써 분위기의 속도를 추산하여 측정부의 거리에 대하여 나타낸 것이다. 불럭의 항력계수  $C_d$ 는 초기 설정치를 고려하여  $Re$  수 133에서의 값을 Fig. 5의 실선의 식으로부터 구한 1.33을 이용하였고, 계산의 결과로부터 보정치의 반복계산은 고려하지 않았다. 또, 측정위치에 따른 세선의 길이 영향은 무시하였다.

Fig. 6에서 분위기 유속의 특징은 측정부 입구에서 속도의 상승률이 크며, 전체적으로 초기 설정치 1.5 m/s 보다 약간 작게 나타나 있다. 이의 원인은 각각, 냉각 재킷의 선단부와 측정부에 의해서 형성되는 유로 단면적의 변화에 의한 것과, 유로의 형상이 전열선을 내장한 복잡한 구조로 되어, 이의 단면적 추산 오차에 기인된 것으로 생각된다. 또,

분위기 유속은 하류로 진행함에 따라 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 실험에 사용된 세선의 길이 방향의 영향도 고려의 대상에 포함될 것이나, Fig. 4에 나타난 바와 같이 분위기의 진행방향에 따라 온도가 상승하므로 주로 기체의 열팽창에 많은 영향을 받은 것으로 생각된다. 본 연구에서는 초기 설정치 1.5 m/s를 분위기의 대표속도로 표시하며, 액적이 경험하는 분위기의 속도는 그림에 나타난 실선의 값을 이용하였다.

### 4. 실험결과

#### 4.1 액적의 직경과 속도의 변화

Fig. 7은 대표속도 및 온도로 설정된 고온의 공기 중에 n-heptane 액적을 투입하고, 투입 후로부터의 경과시간  $t$ 에 대하여 전술의 광학계로써 측정된 액적의 직경과 속도 변화의 일례를 나타낸다. Fig. 7에서  $D$ 와  $V$ 는 액적의 직경과 속도를 나타내며, 초기직경은 180  $\mu\text{m}$  정도이다. 본 실험에서는, 선행(先行)하는 액적으로부터 발생하는 연료증기 등의 영향을 고려하여, 액적의 생성주기를 20 Hz(매초 20개)로 함으로써 액적간의 간격을 충분히<sup>(7)</sup>(초기생성속도가 1.3 m/s의 경우 액적간의 간격 65 mm, 액적직경의 300배 이상) 유지하였다.

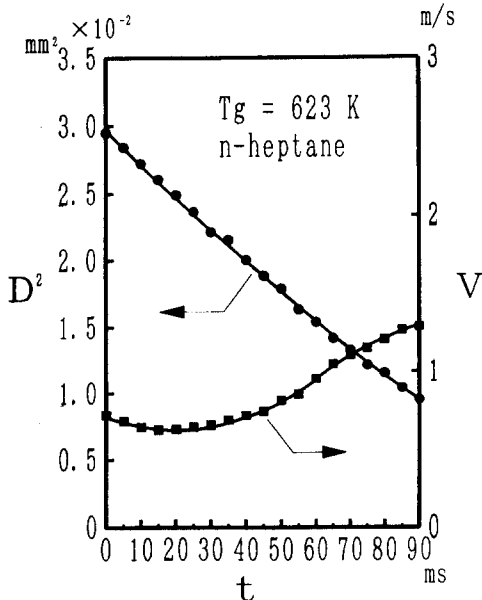


Fig. 7 Time history of squared droplet diameter and droplet velocity for n-heptane

Fig. 7의  $D^2-t$  관계에서, 액적의  $D^2$ 은 증발로 인하여 시간  $t$ 가 경과함에 따라 감소하며, 감소율도 점차로 적어지는 경향을 나타내고 있다. 액적의 속도이력은 측정부에 투입된 직후, 초기속도보다 일차 감소한 후, 하류로 비행함에 따라 점점 증가하고 있다. 액적의 출구인 냉각 재킷의 선단부는, 끝이 잘려진 역 원추형을 하고 있으므로, 가열부와 측정부가 연결되는 부분에서 유로의 단면적이 급증하기 때문에, 여기서는 분위기류의 재순환영역 또는 정체영역이 존재할 것으로 생각된다. 따라서 Fig. 7에서, 액적의 속도가 감소하는 것은 재순환 등에 의한 영향으로 생각되며, 이후 다시 증가하는 것은 액적이 기류의 속도에 추종되는 것으로 생각된다. 이와 같은 영역에서의 기류의 성질은, 얇은 수로에 부분적으로 유로를 가시화한 실험에 의해서 확인된 것으로, 이는 난류의 성질을 가지므로 이를 액적의 증발에 미치는 분위기 속도의 영향으로 정량화하기에는 곤란하여, 이 부분에서의 측정값은 최종 정리시에는 제외하였다.

Fig. 7에서,  $D^2-t$  면상의 실선은 직경자승의 변화를 2차 곡선으로 가정한 최소자승법에 의한 것이며,  $V-t$  면상에서의 실선은 속도 데이터의 4차 근사함수를 나타낸다. 본 연구에서, 측정부의 임의의 위치에서의 액적의 직경과 속도에 관한 데이터는 상술한 근사곡선의 식으로부터 구하였다.

#### 4.2 상대속도

액적 생성장치로써 생성한 미소한 연료액적을 일정한 속도성분을 가진 측정부의 기류 중에 투입하였을 경우, 이의 속도이력은 투입초기속도에 따라 결정된다. Fig. 7에 나타난 시간 경과에 대한 액적

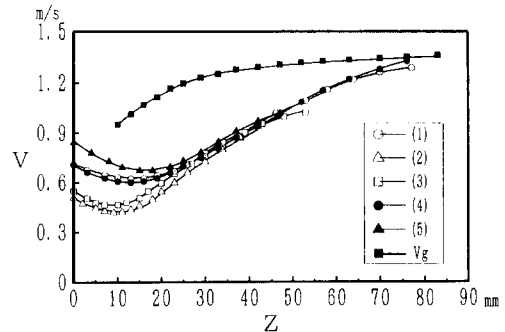


Fig. 8 Droplet velocity compared with velocity of environmental gas along the path

의 속도를, 측정부 위치에서의 속도로 환산하여 기류의 속도와 비교한 것을 Fig. 8에 나타낸다. Fig. 8에서, 범례 중의 Vg는 Fig. 6에 나타난 분위기의 속도이며, (1)부터 (5)는 각각 액적의 투입 속도를 달리하여 측정한 데이터의 번호를 나타낸다. Fig. 8에서, 액적의 속도이력은 액적의 투입 초기속도와는 관계 없이 전 조건에서 감소를 보이면서 진행하고, 일정위치를 지난 후에는 점점 증가하여 기류의 속도에 접근하는 경향을 나타내고 있다. 이와 같은 액적의 속도이력은, 액적이 가진 초기속도에 의한 관성력과 기류 중을 비행하는 액적에 작용하는 항력 등에 의해서 결정된다.

4.3 증발속도정수

고온의 분위기 중에서 증발하는 액적 직경자승의 시간에 대한 변화율을 식 (2)로 표시할 수 있으며, Ke를 증발속도정수로 정의하고 있다.

$$-(dD^2/dt) = Ke \tag{2}$$

여기서,

D : 액적직경 (mm)

t : 시간 (s)

정지 분위기 중에 놓인 연료액적의 증발속도정수 Ke는, 액적직경의 대소에 관계 없이 일정한 것으로 보고되어 있다.<sup>(3)</sup> 그러나 고온의 분위기기류 중에 투입되어, 기류와 상대속도를 가지면서 비행하는 액적의 경우, 그의 증발속도정수는 상대속도의 크기에 영향을 받게 된다. 이의 대표되는 예로서 액적의 증발속도정수에 미치는 상대속도의 영향에 대하여, 액적의 직경과 분위기기류의 물리량을 매체로 한 함수로 나타내면, 식 (3)과 같다.

$$Ke = Keo(1 + 0.3 Re^{1/2} Pr^{1/3}) \tag{3}$$

여기서,

Keo ; 극한증발률

Re ; 레이놀즈수 (-)

Pr ; 프란틀수 (-)

식 (3)은, 증발속도정수에 관한 Re수 및 Pr수의 영향을 나타낸 것으로서, Ranz-Marshall의 식으로 잘 알려져 있다. 여기서, 극한증발률 Keo는 액적과 분위기간의 상대속도가 0 m/s, 즉, Re=0에서의 증발속도정수를 나타낸다. 따라서, 식 (3)은 상대속도를 가진 액적의 증발속도정수를 기류와 액적간의 상대속도가 0 m/s일 때의 값을 기준으로

하여 나타낸 것이다. 식 (3)에서, 프란틀수 Pr을 일정한 값(Pr=0.71)으로 취한다면, 식 (3)은 식 (4)로 되어 액적의 증발속도정수 Ke는 극한증발률 Keo와 레이놀즈수 Re만의 영향을 받게 된다.

$$Ke = Keo(1 + 0.268 Re^{1/2}) \tag{4}$$

4.4 측정부 위치에서의 증발속도정수

Fig. 9는 Fig. 7에 나타난 D<sup>2</sup>-t의 관계로부터, 식 (2)의 정의에 따라 구한 증발속도정수 Ke를 측정부의 위치에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 9에서 액적이 하류방향 Z로 비행함에 따라 그의 증발속도정수 Ke가 점차 감소하고 있음을 알 수 있다. 이를 극한증발률 Keo를 일정한 값으로 가정하여 식 (4)로부터 생각하면, 증발속도정수 Ke는 레이놀즈수 Re만의 함수이며, 하류로 향함에 따라 Ke가 감소하는 것은 Re수의 감소를 의미하고 있다. 단, 액적이 투입되는 Z의 값 0 근방에서 Ke의 감소에 관해서는 상대속도보다는 난류의 성질이 고려되어야 할 것으로 생각되나, 이를 벗어난 지점부터는 액적의 직경이 감소하고 또한 기류와의 상대속도도 감소하여, 액적의 Re수는 계속 감소하므로, 식 (4)와는 정성적으로 일치하고 있다.

4.5 증발속도정수에 미치는 상대속도의 영향

Fig. 8, 9에 나타난 바와 같이, 액적의 속도는 분위기의 속도에 점점 접근하는 경향을 나타내며, 이와 같은 경우, 증발속도정수의 변화는 액적과 분위기간의 속도차인 상대속도의 영향을 받은 결과이다.

Fig. 10은 상대속도가 액적의 증발속도정수에 미치는 영향을 정량화하기 위하여, 상대속도의 크기

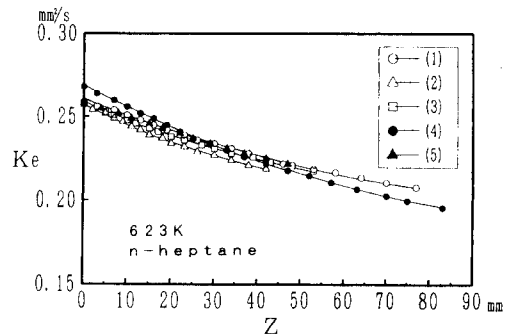


Fig. 9 Change of evaporation rate constant along the path

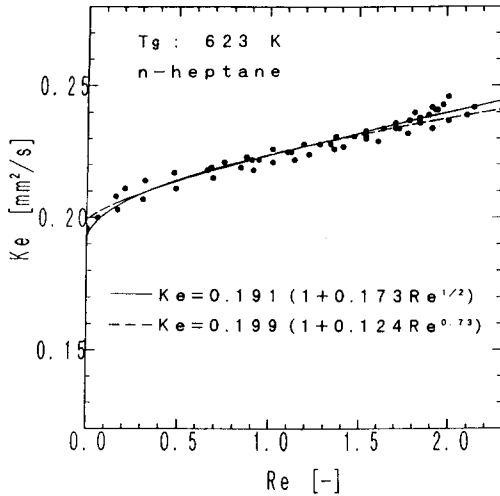


Fig. 10 Relation between evaporation rate constant and droplet Reynolds number

와 액적직경으로 계산되는 액적의  $Re$ 수와 증발속도정수  $Ke$ 와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 10에서, 액적의  $Re$ 수가 증가함에 따라, 증발속도정수가 점점 크게 되는 것을 알 수 있다. 본 실험에서의 증발속도정수는 액적이 재순환 영역을 벗어나, 속도가 증가하는 시점으로부터 취한 것으로서, 레이놀즈수  $Re$ 는 식 (5)로써 계산하였다.

$$Re = |V_d - V_g| \cdot D / \nu \quad (5)$$

여기서,

$V_d$  : 액적의 속도(m/s)

$V_g$  : 가스의 속도(m/s)

$\nu$  : n-heptane의 표준비점과 분위기 온도의 산술평균 온도에서의 공기의 동점성계수( $m^2/s$ )

Fig. 10의 결과로써 증발속도정수  $Ke$ 에 대한 극

한증발률  $Ke_0$ 와 레이놀즈수  $Re$ 의 영향을 식으로 표현하면, (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Ke = 0.199(1 + 0.124 Re^{0.73}) \quad (6)$$

식 (6)은, 증발속도정수  $Ke$ 에 관계하는 극한증발률  $Ke_0$ , 레이놀즈수  $Re$ 의 계수 및 그의 지수를 전부 변수로 한 경우, 자승평균치(RMS)를 최소화하는 식으로서, Fig. 10에 파선으로 나타낸 것이며, 그의 값은  $2.57 \times 10^{-3} mm^2/s$ 이다.

식 (6)에서, 극한증발률  $0.199 mm^2/s$ 는, n-heptane의, 상압, 623 K의 공기 중에서,  $Re=0$ 일 때의 증발속도정수이며, 전보<sup>(8)</sup>에서 보고한 동일 실험 조건에서의 극한증발률에 상당하는 증발속도정수,  $0.204 mm^2/s$ 과 비교하면, 그의 차는 약 2%로서, 본 실험치가 충분한 정도를 가진 것으로 생각된다. 상술의 증발속도정수는, 직경 1-2 mm 정도의 현수액적을 이용한 小林,<sup>(9)</sup> 角田<sup>(3)</sup> 등의 실험치에 비하면, 거의 절반 정도에 지나지 않으나, 이는 초기입경  $180 \mu m$  정도의 액적을 대상으로 한 것으로서, 미소한 자유액적의 증발속도정수가 액적 직경의 함수라는 李의 보고<sup>(10)</sup>와 정성적으로 일치하고 있다.

증발속도정수  $Ke$ 에 대한  $Re$ 수의 영향은, 대부분의 실험결과<sup>(11)</sup>에서  $Ke$ 가  $Re$  수의 1/2 승에 비례하는 것으로 보고되어 있다. Fig. 10에 나타낸 결과로부터, 증발속도정수  $Ke$ 가 레이놀즈수의 1/2 승에 비례한다면, 식 (7)처럼 나타낼 수 있다.

$$Ke = 0.191(1 + .173 Re^{1/2}) \quad (7)$$

식 (7)의 경우에는 RMS 치가  $2.88 \times 10^{-3} mm^2/s$ 이며, Fig. 10에 실선으로 표시한 것이다. Table 1에는 식 (6)과 (7)로부터 계산한 증발속도정수  $Ke$ 와 그들의 상호비율을 나타낸 것으로, 본 실험 범위에서 식 (6)과 (7)에 의한 증발속도정수는 실험

Table 1 Evaporation rate constant and the ratio calculated by Eqs. (6) and (7)

Re		0	0.5	1	1.5	2
Ke	Eq.(6)	0.199	0.214	0.224	0.232	0.240
	Eq.(7)	0.191	0.124	0.224	0.231	0.238
Eq.(6)/Eq.(7)		1.04	1.00	1.00	1.00	1.01

Eq. (6) :  $Ke = 0.199(1 + 0.124 Re^{0.73})$   
RMS =  $2.57 \times 10^{-3} [mm^2/s]$

Eq. (7) :  $Ke = 0.191(1 + 0.173 Re^{1/2})$   
RMS =  $2.88 \times 10^{-3} [mm^2/s]$

오차의 한계내에 속하는 것으로 생각된다. 따라서, 본 연구의 결과 미소한 자유액적의 증발에 미치는 분위기 속도의 영향을 식 (7)로 표시하는 것으로 한다.

이상으로부터 액적의 증발속도정수에 관한 극한 증발률  $Ke_0$  및 레이놀즈수  $Re$ 의 영향은, 분무에 가까운 초기입경  $180 \mu\text{m}$  정도의 자유액적의 경우라도, 식 (7)과 같이 종래부터 이와 같은 부류의 연구에서 참고로 되는 식과 동 형식으로 표시됨을 알 수 있다.

4.6 종래의 실험 결과와의 비교

연료액적이 고온의 분위기 중을 비행하면서 받는 단위 시간당의 열량은 식 (8)로 표시 할 수 있다.

$$Q_1 = hA_d(T_g - T_d) \tag{8}$$

여기서,

- $Q_1$  : 전열량(W)
- $h$  : 열전달계수(W/m<sup>2</sup>K)
- $A_d$  : 액적의 표면적(m<sup>2</sup>)
- $T_g$  : 분위기의 온도(K)
- $T_d$  : 액적의 표면온도(K)

액적의 증발에 필요한 열량을, 액적의 체적 변화율과의 관계로 나타내면, 식 (9)로 표시할 수 있다.

$$Q_2 = L_d \rho_d dv/dt \tag{9}$$

여기서,

- $Q_2$  : 증발열(W)
- $L_d$  : 증발잠열(kJ/kg)
- $\rho_d$  : 액적의 밀도(kg/m<sup>3</sup>)
- $dv/dt$  : 액적의 체적변화율(m<sup>3</sup>/s)

액적의 정상증발기간 중에,  $Q_1$ 이 증발열  $Q_2$ 로 소비된다면, Nusselt 수  $Nu=2$ 의 조건에서, 식 (8), (9)는 식 (10)으로 된다.

$$-dD^2/dt = 8\lambda_{mix}(T_g - T_d)/(L_d \cdot \rho_d) \tag{10}$$

여기서,

$\lambda_{mix}$  : 액적의 증기성분과 분위기가 혼합된 가스의 열전도율(W/mK)

식 (10)을 이용하여, 본 실험과 동일 분위기 조건에서 n-heptane의 극한증발률을 구하면, 0.324 mm<sup>2</sup>/s 정도이며, 이는, 액적의 온도  $T_d$ 를 표준비점인 371.6 K,<sup>(12)</sup> 그 외의 값은 물성정수 추산법<sup>(13)</sup>에 의한 값을 이용한 것이다.

액적이 증발할 때의 표면온도  $T_d$ 는, 통상 그의 표준비점보다 낮으며, 小林<sup>(14)</sup>에 의하면, 본 실험 조건(대기압, 623 K)에서 n-heptane의 경우는, 15 K 정도 낮은 357 K 정도로 보고하고 있다. 액적의 표면온도로서, 小林의 측정치를 이용하면, 식 (10)에서의 증발속도정수에는  $(T_g - T_d)$  항만이 아니라, 증발잠열  $L_d$ , 밀도  $\rho_d$  등도 변화하여 영향을 미치게 된다. 그러나, 식 (10)에 小林의 측정치 357 K 및 각각 상응하는 물성치를 이용하면, 극한 증발률은 0.323 mm<sup>2</sup>/s 정도로서, 표준비점을 이용한 경우와 거의 동등한 값을 나타내고 있다.

Table 2에는 n-heptane 액적의 623 K, 0.1 MPa에서의 이론 극한증발률의 추산에 사용한 물성치를 나타내며, case A는 표준비점에서의 물성치, case B는 액적의 온도가 표준비점보다 15 K 낮은 경우에서의 물성치이다.

이상에서 구한 n-heptane의 0.1 MPa, 623 K에서의 이론 극한증발률과 본 실험에서의 측정치, 0.191 mm<sup>2</sup>/s를 비교하면, 본 실험의 경우는 그의 60% 정도로서, 단순 모델에 의한 이론치와는 상당한 차가 있음을 알 수 있다. 이론 극한증발률 0.323mm<sup>2</sup>/s를 식 (4)의 Ranz-Marshall 식에 대입하면, 식 (11)로 된다.

$$Ke = 0.323(1 + 0.268 Re^{1/2}) \tag{11}$$

Fig. 11은 식 (7)과 (11)로부터 계산된 증발속도

**Table 2** Theoretical critical evaporation constant and the thermophysical properties used for the estimation of the value<sup>(12)(13)</sup>

CASE	$Ke_0$ mm <sup>2</sup> /s	$\lambda_{mix}$ mW/mK	$T_g$ K	$T_d$ K	L kJ/kg	$\rho_d$ kg/m <sup>3</sup>
A	0.324	34	623	372	337	620
B	0.323	33	623	357	340	634



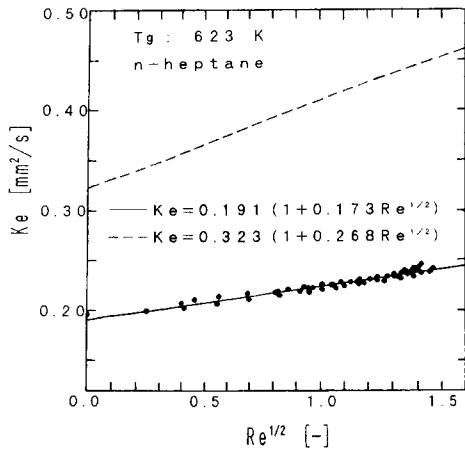


Fig. 11 Comparison of present data with previous data

정수율, 본 실험의 레이놀즈수 범위에 대응시킨 것이다. Fig. 11로부터, 종래의 실험식에 의한 증발 속도정수에 비교한 본 연구에서의 값은 50~60% 정도에 속하고, 분무 중의 액적처럼 미소액적의 증발에 미치는 상대속도의 영향이 비교적 큰 현수액적을 실험의 대상으로 하여 구한 결과식과 같이 크지 않음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는, 종래 규명되지 않은 자유연료액적의 증발에 미치는 분위기류와 액적간의 상대속도의 영향을 정량적으로 구한 연구이다. 즉, 전왜소자를 이용한 액적 생성장치로부터 생성된 직경 180  $\mu\text{m}$  정도의 n-heptane 액적을, 623 K의 공기류 중에 투입하고, 비행시간의 경과에 대한 액적의 직경과 속도의 변화를, 전기적으로 제어한 광학시스템으로 측정하고, 액적직경의 시간에 대한 변화율로부터 증발속도정수를 구함으로써, 액적의 속도와 분위기 속도의 상대적인 속도가 그의 증발속도정수에 미치는 영향을 조사한 것이다.

그 결과, 고온 기류 중에 투입된 미소한 연료액적의 비행속도가 분위기류의 속도에 접근하고, 상대속도가 감소함에 따라 증발속도정수가 적어지는 것이 실험적으로 측정되어, 그의 증발속도정수 및 액적의 직경과 액적과 분위기류간의 상대속도로서 표시한 레이놀즈수  $Re$ 와의 관계를 나타내는 다음의 실험식을 구하였다.

$$Ke = 0.191(1 + 0.173 Re^{1/2})$$

이상으로부터, 분무에 가까운 초기입경 180  $\mu\text{m}$  정도인 자유액적의 경우에도, 증발속도정수에 관계하는 레이놀즈수의 영향은, 강제대류 중의 열, 물질이동이 지배하는 형식으로 표시 가능함을 알았다.

## 후 기

본 연구는 1995년도 동아대학교의 학술연구조성비에 의하여 수행된 것으로 연구비 지원에 대하여 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Ranz, W. E. and Marshall, W. R. JR., 1952, "Evaporation from Drops, Part I," *Chemical Engineering Progress*, Vol. 48, No. 3, pp. 141~146
- (2) 荒木信幸, 1973, "高温空氣中を落下する噴霧液滴の蒸發," *日本機械學會論文集(第2部)*, 第39卷, 第317號, pp. 287~296
- (3) 角田敏一, 1976, "高温, 高壓の氣體中における燃料液滴の蒸發, 着火に関する研究," *廣島大學大學院 工學研究科 博士論文*
- (4) Agoston, G. A., Wise, H. and Rosser, W. A., 1956, "Dynamic Factors Affecting the Combustion of Liquid Spheres," *6th Symp. (International) on Combustion*, pp. 708~717
- (5) 朴木秀幸, 八木政幸, 徳岡直靜, 佐藤 豪, 1985, "電わい素子を用いた液滴生成 装置に関する研究," *日本機械學會論文集(B編)*, 第51卷, 第471號, pp. 3615~3622
- (6) 池森龜鶴, 1980, *水力學, 機械工學全書*, 第11卷, pp. 357~365, 東京, コロナ社
- (7) 小笠原光信, 藤本文隆, 高城敏美, 土佐陽三, 1973, "高温ふん圍氣中を自由落下する微小液滴の着火と燃焼," *日本機械學會論文集(第2部)*, 第39卷, 第320號, pp. 1308~1315
- (8) Chung, Sung Sik and Kawaguchi, O., 1995, "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

- (9) 小林清志, 1954, “液粒の蒸發および燃焼に関する研究(第3報),” 日本機械學會 論文集, 第20卷, 第100號, pp. 837~843
- (10) 李齊剛, 勝山泰彦, 徳岡直靜, 1992, “微小液滴の蒸發に及ぼす雰圍氣流の變動,” 日本液體微粒化學會 第1回微粒化シンポジウム講演論文集, pp. 217~222
- (11) 日本機械學會, 1975, 傳熱工學資料, p. 43
- (12) 日本機械學會, 1983, 流體の熱物性値集, pp. 22~23
- (13) 大江修造, 1985, 物性定數推算法, 日刊工業新聞社, 東京, pp. 27~55, 215~224, 57~189, 308~309
- (14) 小林清志, 1954, “液粒の蒸發および燃焼に関する研究(第1報),” 日本機械學會論文集, 第20卷, 第100號, pp. 823~831