

〈論 文〉

고온 고압기류중을 비행하는 파라핀계 연료액적의 증발에 관한 연구

정성식* · 川口 修**

(1991년 6월 19일 접수)

An Experimental Study on the Evaporation of Paraffin Family Fuel Droplet Under High Temperature and High Pressure

S.S. Chung and O. Kawaguchi

Key Words : Droplet(액적), Evaporation Rate Constant(증발속도정수), Critical Evaporation Constant(극한증발률)

Abstract

Evaporation rate constant, obtained by in this experimental study, of freely falling liquid fuel droplet on the condition of hot and pressurized environment are converted to critical evaporation constant according to Eq. of Ranz and Marshall. Critical evaporation constant, on constant environment pressure, actively increase almost linearly with environment temperature increasing, but, on constant temperature, increases more or less with pressure increasing. Multicomponent droplet mixed with the fine fuel having a different of boiling point evaporate in order to boiling point, and each evaporation rate constant of mixed fuel equal to each fuel.

1. 서 론

분무연소기구의 해명을 위한 기초정보를 얻기 위하여 액적을 대상으로 한 연구가 장기간에 걸쳐서 진행되고 있다. 분무의 연소기구를 액적을 대상으로 한 연구결과를 적용하여 직접 해명하기는 곤란하지만 액적은 분무를 구성하는 기본단위이기 때문에 전자의 지식없이 후자의 해명은 있을 수 없다고 생각된다.

이와 같은 관점에서 角田⁽¹⁾는 내열사에 현수한 단일액적의 증발에 관한 연구를 행하고, 분위기의 온도와 압력이 증발에 미치는 영향에 관한 결과를 보고하고 있다. 같은 방법에 의한 연구로서는 小

林⁽²⁾, Nishiwaki⁽³⁾ 등의 연구가 있으나, 이에 의하면 현상의 측정이 비교적 쉬운 반면, 대상으로 하는 액적이 분무를 형성하는 액적에 비하여 직경이 크므로 액적에 미치는 자연대류의 영향이 크고, 내열사가 액적에의 전열매체가 되는 등의 불합리한 점이 많기 때문에 측정 데이터의 유용성에 의문을 남기고 있다. 한편, 실제 연소기에 있어서 분무의 연소방식은 그의 연소율을 높이기 위하여 일반적으로 고압연소방식을 채택하고, 연소장내에 분사된 연료액적은 고온 고압의 분위기중을 비행하면서 증발하고 착화, 연소하여 그의 수명을 마친다. 이러한 이유로 실기내의 액적의 거동과 근사도가 높은 자유액적을 대상으로한 연구가 시도되고 있으며, 荒木⁽⁴⁾, Kawaguchi⁽⁵⁾, Wang⁽⁶⁾ 등의 연구를 예로 들 수 있으나, 단일액적 연구에 비하여 실험상의 난점으로 인하여 그 수는 그다지 많지 않다. 더욱

*정회원, 동아대학교 기계공학과

**日本 慶應義塾大學 機械工學科

기, 분위기의 압력은 액적의 증발이나 연소과정에 크게 영향을 미치는데 반하여, 이에 관한 체계적인 연구는 거의 전무한 실정에 있다.

전보⁽⁷⁾에서는 고온 고압중에 있어서 자유연료액적의 증발, 착화, 연소에 관한 연구를 수행하기 위하여 실험장치와 측정 시스템을 개발하고 일련의 체계적인 실험을 통하여, 장치의 유용성을 보고한 바 있다. 본보에서는 고온고압의 기류중에 투입된 미소연료액적의 증발에 관한 정보를 구하여 분무연소기구의 해명을 위한 기초데이터를 제공하려 시도한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 측정방법

Fig. 1에 실험장치의 본체를 나타낸다. 장치 외통의 재료는 탄소강을 이용하였고, 이를 크게 구분하면 가열부, 측정부, 열교환부로 구성되어 있다. 분위기인 기류는 열교환기와 가열부를 거치면서 실험온도로 가열되고 측정부, 열교환기를 통하여 대기에 방출되는 구조로 되어 있다.

가열부의 상부는 필요에 따라 개폐 될 수 있도록 하였고, 내부는 내열 시멘트로 성형하였으며 기류를 소정의 온도까지 전기적으로 가열하기 위한 전열선과 그의 중앙부에는 액적생성장치를 장착하기 위한 냉각자켓이 설치되어 있다.

액적생성장치로부터 생성된 연료액적은 냉각자켓

을 벗어나 고온기류중을 비행하는데 그의 증발, 착화, 연소과정을 외부로부터 광학적으로 관측하기 위한 부분이 측정부이다. 측정부의 중앙에는 기류의 보온을 위하여 전열선을 내장한 내경 50mm의 유로로 구성되어 그의 측면에 설치된 홈에는 외부로부터 유로내부가 관측 가능하도록 폭 10mm 길이 300mm의 석영유리를 부착하였다. 또 장치표면의 양측면에는 석영유리와 마주보는 폭 35mm 길이 350mm의 파이렉스(pyrex) 유리로 된 관측창이 설치되어 있다.

열교환부는 측정부의 하단에 설치되어 측정부를 통하여 대기에 방출되는 분위기가 가진 열에너지의 50%정도를 회수한다.

전왜소자법(piezoelectric transducer method)을 이용한 액적생성장치는 외부 제어장치로써 생성하는 액적의 직경과 속도의 조절이 가능하고, 본 실험에서 대상으로 한 액적은 생성초기속도를 약 1.5 m/s, 평균입경 약 180 μ m의 액적을 20Hz의 주기로 하였다. 액적생성장치로부터 측정부에 투입된 비행액적의 시간경과에 따른 직경변화의 측정법은 싱글 후래쉬(single flash)법을, 이의 속도 측정은 더블 후래쉬(double flash)법을 이용하였다.

2.2 분위기 조건과 시료의 선정

연료액적이 냉각자켓을 벗어나 측정부에 투입되면 설정한 분위기의 속도에 따라 액적과 분위기와는 상대속도를 갖게된다. 상대속도는 실험결과와

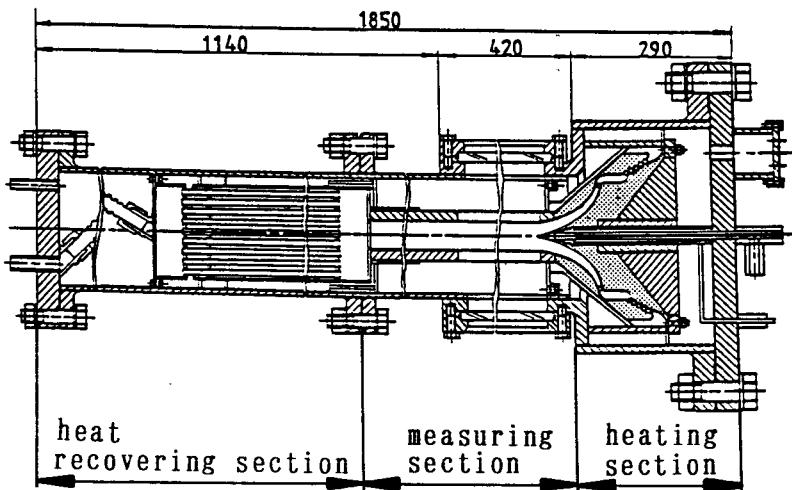


Fig. 1 Experimental apparatus

정량화를 위하여 가능한한 단순한 것이 바람직스럽다. 그리고 시료로서 화석연료를 사용하는 경우, 이는 산지에 따라 조성이 다르며, 다성분 액체이기 때문에 증발현상이 복잡할 뿐더러 또 반드시 일정한 조성을 가진 시료가 얻어질 수 없다. 따라서 화석연료를 직접 시료로 사용하여 실험결과의 일반성을 논한다는 것은 쉬운 일이 아니다.

본보에서, 분위기의 속도는 액적과 분위기와와의 상대속도의 영향을 적게 하기 위하여, 액적의 초기 생성속도에 가까운 값으로서 1.5m/s로 설정하였다. 분위기는 공기로 하고 온도와 압력범위는 623~1023K, 0.1~0.5MPa까지로 하였다. 시료로서는 화석연료를 구성하는 탄화수소화합물 중에서 그의 비점에 주목하고, n-heptane, i-octane, n-undecane으로 하였다. n-heptane과 i-octane은 대기압에 있어서 비점이 각각 371.577K, 372.2K으로 거의 동일하고, n-undecane은 이들과 약 100k 정도의 차이를 가진 469.04K이다.

3. 실험결과

3.1 액적의 증발곡선

본 실험에 사용된 액적생성장치는 朴木⁽⁸⁾ 등이 개발한 것을 개량한 것으로서 생성된 액적의 직경과 속도의 상대표준편차는 3%이내의 특성을 가지고 있다. 따라서 동일 측정점에서 액적의 직경은 4~8회, 액적속도는 3회의 측정으로 충분한 정도의 데이터를 얻을 수 있다고 생각한다. 액적직경과 그의 속도는 필름면상에 4배로 확대 촬영하고, 필름의 판독기에서 약80배로 확대하여 측정한 값을 데이터로 하였다. 액적생성장치와 연료공급탱크(tank) 간의 수두차는 0mm Aq에서 액적의 생성이 가능하여 대기압보다 고압 상태에서의 실험은 꽤 세심한 주의를 필요로 한다. 본 실험에서는 액적의 증발양상을 평균 5회 측정하고, 주로 액적의 생성 미스(miss)로 인한 데이터는 최종값에서 배제하였다.

고온분위기중에 투하된 n-heptane과 i-octane 액적의 직경변화를 Fig. 2에 나타내었고, 그의 횡축에는 액적이 측정부에 투하된 후의 시간을, 종축

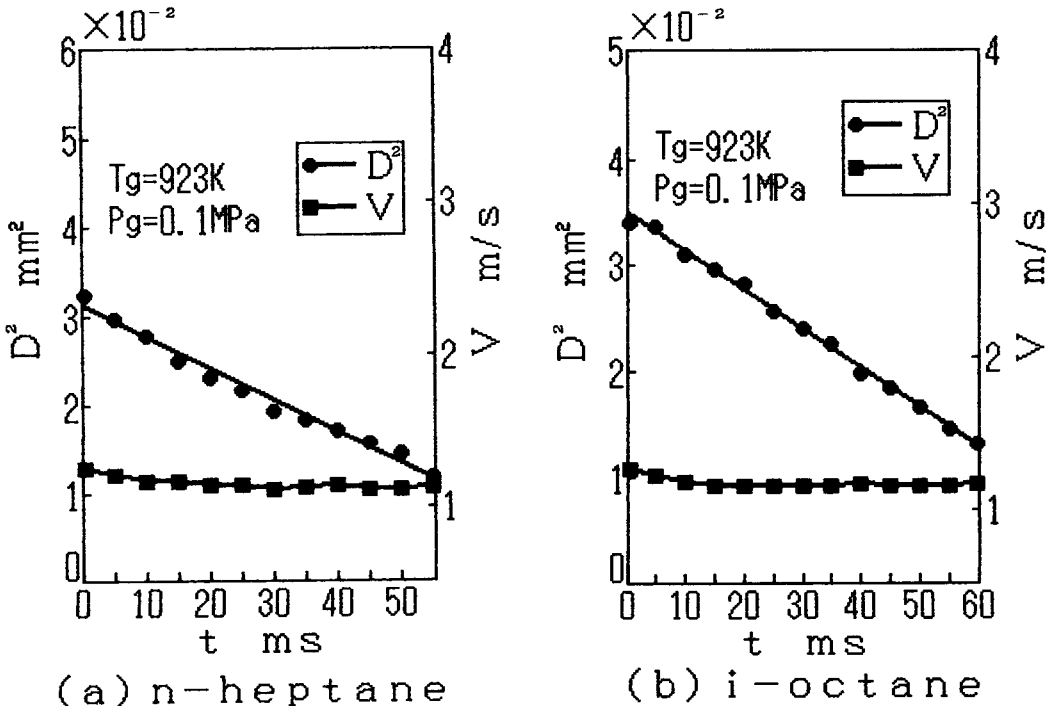


Fig. 2 Change of squared droplet diameter and velocity with time

에는 액적직경의 2승의 값과 그의 비행속도를 나타내고 있다. Fig. 2에서 액적직경의 2승은 그의 비행시간이 경과함에 따라 직선적으로 감소하고 있으며, 동종의 연구^(1~4,9)와 마찬가지로 자유액적의 증발은 입경의 2승칙이 성립하고 있다. 순수물질의 증발속도정수는 그림에서 나타난 직선부분의 구배에 의해서 정의한다.

3.2 순수연료의 증발

각각의 분위기 온도, 분위기 압력에 있어서 n-heptane, i-octane의 D^2-t 곡선으로부터 증발속도정수를 구하여, 그의 분위기온도, 압력의 변화에 대한 일례를 나타낸 것이 Fig. 3,4이다. Fig. 3,4에서, 증발속도정수는 분위기의 압력이 일정할 때, 온도의 상승에 따라 거의 직선적으로 증가하고, 분위기의 온도가 일정할 때, 압력의 상승에 따라서도 거의 같은 경향을 나타내고 있다.

Fig. 3,4에서 n-heptane, i-octane 액적의 증발속도정수는 양 시료의 비점과 비열, 증발잠열등의 열물성치가 거의 같음에도 불구하고 동일한 분위기 조건에서 후자 쪽이 약간 큰 결과를 나타내고 있다. 액적의 증발속도정수는 액적과 분위기와의 온도차, 경계영역에서의 열전달 조건 및 확산등의 외부조건과 액적의 물성치및 내부의 온도분포, 유동상태등의 내부상태에 의해 정해진다. 본 연구에서 Fig. 3,4의 결과는 소림⁽²⁾의 현수적에 의해서도 확

인된 바있으나, 연료증기와 분위기로 된 혼합가스의 열전도률등에 의한 전열과정이 i-octane 액적의 증발에 크게 영향을 미치기 때문이라고 생각된다.

3.3 극한증발률에 미치는 분위기온도와 압력의 영향

증발속도정수의 Re 수와 Sc 수와의 관계는 Ranz-Marshall에 의해서 다음과 같이 나타나고 있다.

$$K_e = K_{eo}(1 + 0.3 Re^{1/2} \times Sc^{1/3})$$

K_e : 증발속도정수, K_{eo} : 극한증발률

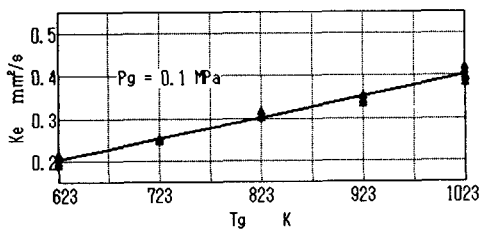
$$Re = |(V_1 - V_a)| \times D / \nu_a$$

V_1 : 액적속도, V_a : 분위기속도, D : D^2-t 곡선상의 평균액전경, ν_a ^(4,10~12): 액적의 비점과 분위기온도의 산술평균온도에 있어서 분위기의 동점성계수.

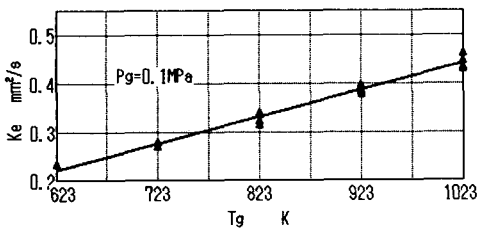
$$Sc = \nu_a / D_{1a}$$

D_{1a} ^(4,10): 액적의 비점과 분위기온도의 산술평균온도에 있어서 연료증기의 공기중에서의 확산계수.

본 연구에서 구한 증발속도정수를 상기식을 이용하여 극한증발률로 환산하였다. 이때 액적과 분위기와와의 상대속도는 Fig. 2에 나타난 액적의 비행속도로 부터 추정하였다. Fig. 5의 (a), (b)에 n-heptane, i-octane의 분위기온도와 극한증발률과의 관계를 나타내고, Fig. 6(a), (b)에는 이들의 분

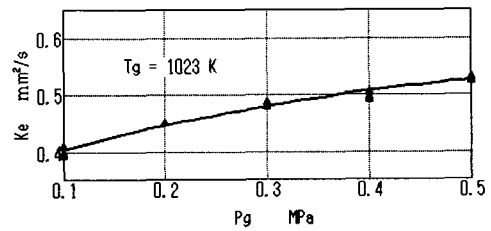


(a) n-heptane

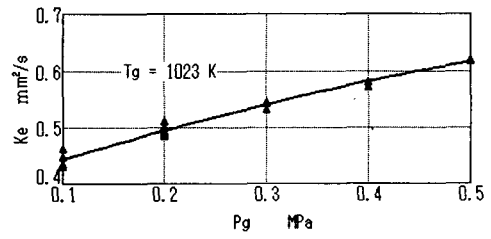


(b) i-octane

Fig. 3 Evaporation rate constant vs. environment temperature

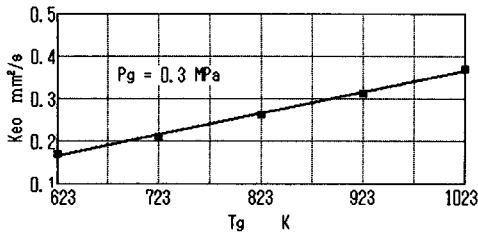


(a) n-heptane

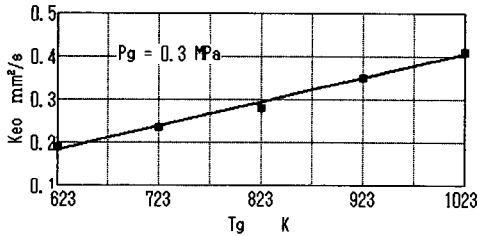


(b) i-octane

Fig. 4 Evaporation rate constant vs. environment pressure



(a) n-heptane

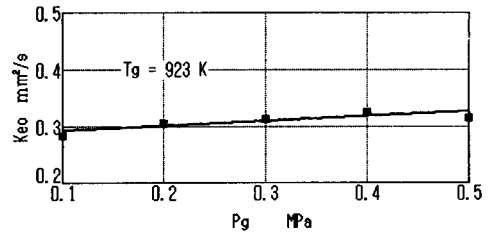


(b) i-octane

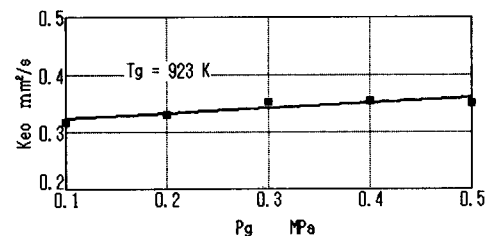
Fig. 5 Critical evaporation constant vs. environment temperature

위기 압력과 극한증발률과의 관계를 나타내었다. 극한증발률은 분위기 온도의 상승에 따라 거의 직선적으로 증가하지만 분위기 압력에 의한 증가는 그다지 크지 않음을 나타내고 있다. 액적의 극한증발률은 상기식에 나타난 바와같이 증발속도정수, Re 수, 그리고 Sc 수의 함수이다. 따라서 액적과 분위기의 온도차, 액적의 증발잠열, 밀도등의 영향과 액적주위에 형성되는 혼합기의 열전도율과 그의 분위기에의 확산계수 동점성계수등의 영향을 받는다. Fig. 5의 결과는 분위기의 압력이 일정할 때, 분위기의 온도가 상승함에 따라 액적의 극한증발률에 반비례하는 인자가 거의 고정치를 가지는 반면 분위기온도의 상승에 의한 의존성이 크기 때문이라고 생각된다. 일정 분위기온도에서, 분위기의 압력이 상승함에 따라 액적의 포화온도가 상승하고 이로 인하여 분위기와 액적과의 온도차는 점점 적어진다. Fig. 6의 결과는 극한증발률에 미치는 증가 인자와 감소 인자와의 차이가 본 실험의 범위내에서는 그다지 크지 않음을 나타내고 있다.

지금까지 고온과 고압의 분위기 중에서 자유액적을 대상으로 한 증발에 관한 실험적 연구는 전례를 보기 어렵고, 대개는 현수적(suspended droplet)이 주류를 이루어 왔다. Fig. 7에 실험대상으로 하는 액적의 크기에 따른 차이를 비교하기 위하여 角田⁽¹⁾, 小林⁽²⁾의 정지분위기중에서 평균입경 1.5mm의 현수적의 실험치와, 塚本⁽¹³⁾등의 초기입경 0.5mm



(a) n-heptane



(b) i-octane

Fig. 6 Critical evaporation constant vs. environment pressure

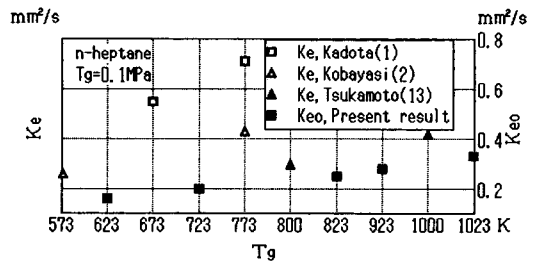


Fig. 7 Comparison of result between three methods

액적의 이론치, 그리고 본 연구의 결과를 나타낸다. 이는 n-heptane 액적의 증발속도정수와 극한증발률과의 비교이기는 하지만, 액적주위의 강제대류의 영향을 배제했다는 점에서는 그다지 차이가 없다. Fig. 7에서 현수액적은 본 연구결과 보다 약 2~3배, 그리고 비교적 작은 액적을 취급한 塚本은 약 1.3배의 큰 값으로 추정된다. 이들 결과로부터 연료액적은 입경의 크기에 따라 증발의 속도가 다르다는 것을 알 수 있다. 실제 연소기에서 분무의 입경분포는 20~200 μ m의 범위에 속하고, 본 연구에서는 평균입경이 180 μ m정도인 액적을 대상으로 하였기 때문에 실제연소기의 증발을 고려할 때, 그의 기초자료로 이용되어 정도높은 결과를 얻을 것으로 생각된다.

3.4 혼합연료의 증발

증발하고 있는 액체연료에 공급되는 열은 그의

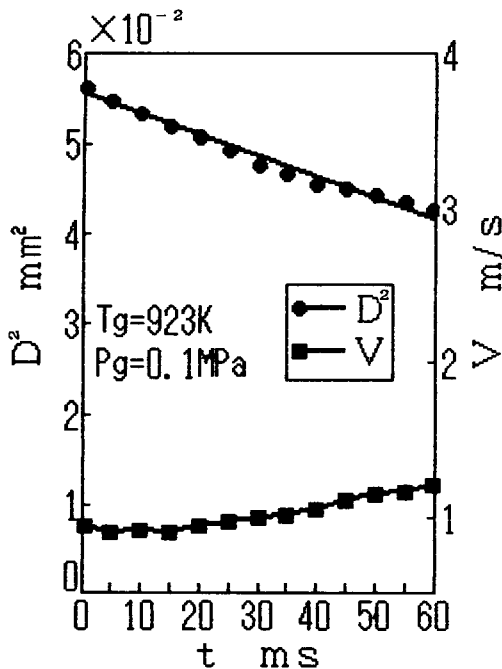


Fig. 8 Change of squared droplet diameter and velocity with time for an n-undecane droplet

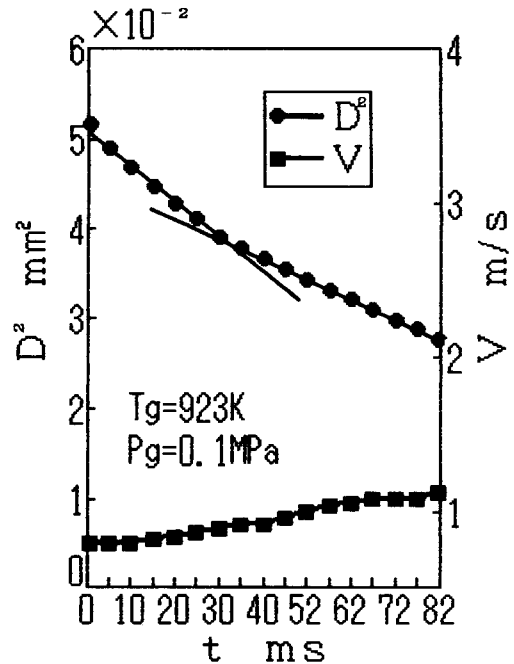


Fig. 9 Change of squared droplet diameter and velocity with time for n-hep./n-und. droplets

증발잠열에 소비되고, 그의 온도는 증발이 끝날 때까지 포화온도를 유지한다. 그러므로 비점의 차이가 있는 순수연료를 복수로 혼합한 혼합액적은 비점이 낮은 연료부터 순차적으로 증발하고, 입경의 2승과 시간과의 관계는 액적을 구성하는 물질마다 각각의 구배를 가질 것으로 예상된다.

Fig. 8에 대기압하에서 비점이 469K인 n-undecane의 증발곡선을 나타내었다. Fig. 9는 n-heptane과 n-undecane을 체적비 1:1로 혼합한 경우의 증발곡선으로 이는 40ms 부근에서 증발의 양상이 굴절하고 있으며, 입경으로부터 추산한 굴절점 전후의 증발량은 거의 초기량의 반에 상당한다. Fig. 9의 증발곡선에서 굴절점 전후의 증발속도정수와 Fig. 2의 (a)와 Fig. 8의 증발속도정수를 각각 구하면 Fig. 2의 (a)는 Fig. 9의 전반과, Fig. 8은 Fig. 9의 후반에 거의 일치한다. 그러므로 Fig. 9의 전반은 n-heptane의 증발기간이며, 후반은 n-undecane의 증발기간 이라고 생각된다.

이러한 결과로부터, 혼합액적의 증발과정은 다음과 같이 생각할 수 있다. 즉, 분위기로부터 액적에의 전열로 인하여 액적의 온도는 최저 비점을 가진 연료의 비점에 도달하게 되고, 액적은 이 온도

를 유지한 채 이 연료만이 증발을 시작한다. 이윽고 이것이 증발을 마치면, 액적의 증발잠열로 쓰여 지던 분위기로 부터의 열은 다시 그의 현열에 충당되고 액적의 온도를 상승시키므로서 다음의 비점을 가진 연료의 포화온도에 도달하여 이의 증발이 시작된다. 혼합액적의 증발과정은 이러한 과정을 계단식으로 반복하므로서 전체적으로 각 연료마다 고유의 증발속도정수를 나타낼 것으로 생각된다.

4. 결론

전소자를 이용한 액생성장치를 이용하여 액적경 180 μ m 정도의 순수연료의 자유액적열을 고온고압기류중에 투입하여 그의 증발속도정수를 구했다. 그리고 그 결과를 이용하여 액적과 분위기와와의 상대속도의 영향을 배제한 극한증발률로 환산하였다. 또, 비점이 다른 2종류의 연료를 혼합한 액적을 이용하여 증발에 관한 실험을 행하고, 이들의 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일정압력하에서는 분위기온도가 상승하면 극한증발률은 거의 직선적으로 증가한다.

(2) 일정온도하에서는 분위기압력의 상승으로 극

한 증발률은 직선적으로 증가하나 그 증가률은 적다.

(3) 비점이 다른 연료를 혼합한 액적에서는 비점이 낮은 연료가 전부 증발한 후 비점이 높은 연료가 증발한다. 이 때의 증발속도정수는 단독의 경우와 동일하다.

참고문헌

- (1) 角田敏一, 1976, “高温, 高压の気体中における燃料液滴の蒸発, 着火に関する研究”, 日本広島大学博士学位論文.
- (2) 小林清志, 1954, “液粒の蒸発および燃焼に関する研究(第2報蒸発速度)”, 日本機械学会論文集(B 偏), 第20卷, 第100号, pp.831~837.
- (3) Nishiwaki, N., 1955, “Kinetics of Liquid Combustion Processes: Evaporation and Ignition Lag of Fuel Droplets,” 5th Symp.(International) on Combustion, pp148~158.
- (4) 荒木信幸, 1973, “高温空气中を落下する噴霧液滴の蒸発(蒸発速度の測定)”, 日本機械学会論文集(B 偏), 第39卷, 第317号, pp.287~296.
- (5) Kawaguchi, O. and Kikuchi.K., Kanno.Y., 1985, “Ignition and Combustion of Free Liquid Fuel Droplet in an Hot Gas Stream,” Pro. of Int. Symp. on Refined Flow Modeling and Turbulence Measurements,” Vol. 1. No. C-22, pp.1~9.
- (6) Wang, C.H., Liu,X.Q. and Law, C.K., 1984, “Combustion and Microexplosion of Freely Falling Multycomponent Droplets,” Combustion and Flams 56, pp.175~197.
- (7) Chung Sung Sik and Kawaguchi, O., 1990, “An Experimental Sudy on the Evaporation of Freely Falling Droplet Under High Temperature and High Pressure gas Stream,” KSME Journal, Vol. 4, No.2, pp.172~177.
- (8) 朴文秀行, 1985, “電わい素子を用いた液滴生成装置に関する研究”, 日本機械学会論文集(B 偏), 第51卷, 第471号, pp.3615~3622.
- (9) 態谷清一郎, 磯田 浩, 1952, “燃料液滴の蒸発と燃焼”, 機械の研究, 第4卷, 第6号, pp.337~342.
- (10) 大江修造, 1985, 設計者のための物性定数推算法, 日刊工業新聞社, 東京, pp.225~248, pp.291.
- (11) 化学工学協会編, 1964, 物性定数, 2集, 丸善株式会社, 東京, pp.206.
- (12) Thermodynamics Tables Hydrocarbons, The texas A&M University System Collage Station Texax.
- (13) 塚本, 1990, 第28回 燃焼SYMPOSIUM, 日本燃焼研究会, 東京, pp.173~175.