

음파가 고정액적의 증발/연소에 미치는 영향에 관한 연구

한재섭* · 김선진** · 김 유*

Effect of acoustic wave on the evaporation/combustion of suspended droplet

Jae-Seob Han* · Seon-Jin Kim** · Yoo Kim*

ABSTRACT

This paper presents the results of the experimental investigation on the effect of acoustic wave on the combustion of suspended A-1 jet fuel droplets in atmospheric pressure. Experimental results indicate that A-1 jet fuel droplet burning rate constants k_c were independent of initial droplet size and the relative evaporation/burning-rate constant K_e, K_c (ratio of the acoustically disturbed evaporation/burning-rate constant to the undisturbed evaporation/burning-rate constant) increased remarkably 1.2~1.51times, 1.04~1.42times, for frequency below 100Hz, and sound pressure level above 80dB.

초 록

본 연구에서는 대기압하에서 외부교란이 고정 연료액적(jet A-1)의 증발/연소에 미치는 영향에 대한 실험연구 결과이다. 연구결과, 탄화수소계 연료인 제트유(jet A-1)액적은 크기에 상관없이 일정한 증발률 상수 k_e , 연소율 상수 k_c 를 유지하였다. 또한, 액적의 증발률 및 연소율 상수 K_e, K_c 를 증가시키기 위해서는 적절한 음파의 주파수 및 진폭영역이 존재하였으며, $80\text{Hz} \leq f \leq 100\text{Hz}$, $80 \leq \text{SPL} \leq 110$ 에서 각각 외부교란이 없을 때보다 1.2~1.51배, 1.04~1.42배 만큼 증가하였다.

Key words : Droplet(액적), burning rate constant(연소율상수), evaporation rate constant(증발율상수)

1. 서론

분무를 이루는 가장 기본적인 단위인 단일

액적에 대한 연구가 실제연소시스템의 분무연소 기구의 기초정보를 얻기위한 기본연구로서 장시간동안 계속되어져 왔으나 그 해석결과를 실제

* 정회원: 충남대학교 기계공학과
주연락자 E-mail=007hjs@hanmail.net 대전유성구 궁동 220
** : 청양대학 소방안전관리과

연소실에서 발생하는 액적들의 연소현상의 규명에 이용하는 것은 실제 연소 시스템에서의 연소현상의 불균일성 및 복잡함으로 인하여 자세한 해석에는 상당한 어려움이 야기된다.^[1]

액체연료를 사용하는 고성능엔진은 연소실 압력이 점점 높아져 연료의 임계압력에 가까워지거나 또는 넘어서 운전되고 있기 때문에 저압상태에서의 증발 및 연소과정에 비해 현저하게 다른 특성을 가지는 고압상태에서의 증발 및 연소과정을 잘 모사하는 것은 고압에서의 분무연소과정, 연소불안정 현상 그리고, 공해가스 배출 특성의 예측을 위한 선결과제라 할 수 있다. 이러한 이유로 고온고압 연소장에서의 액적이 가지는 연소특성 연구도 필수적으로 필요하게 되었다. 또한, 연소장내의 연소 및 폭발에 의한 진동 등의 요동요소에 의한 연소에 미치는 영향을 간과해서는 안 된다. 이러한 요동요소들은 어떤 경우에 있어서 화염면의 진동이나 연소율의 증가 등으로 나타나거나, 혹은 시간이 지나면서 연료입자의 섭동(mass flux fluctuation, or velocity slip) 및 열방출량의 섭동(heat release fluctuation) 등을 증가시켜 연소불안정성을 일으킬 수도 있기 때문이다.^[3]

음파가 액적의 증발 및 연소에 미치는 영향에 대한 실험적·이론적연구는 Masahiro Saito^[4], Masayuki Sato^[5], 김^[6], 박진성^[7] 등 많은 국내외 연구자들에 의해 연구되어졌다. 특히, Masahiro Saito^[4], Masayuki Sato^[5] 등은 실험장치내에 정상파를 만들어 음파가 액적의 증발 및 연소에 미치는 영향을 고찰하여 loop에서의 가진주파수가 node에서보다 더욱 큰 영향을 끼침을 실험적으로 보였다.

본 연구에서는 대기압상태에서 단일액적 연소, 음파로 모사되는 외부교란 및 고온고압의 주변 분위기에서의 증발 및 연소 등 실제 연소기에서 일어날 수 있는 여러 유사한 상황을 가정하여 음파가 증발률 상수 k_e 와 연소율 상수 k_c 에 미치는 영향을 고찰해 보고자 하였다. 이러한 실험적

결과는 추후 실제 연소시스템의 연소실에서 발생할 수 있는 복잡한 연소현상을 이해하고 추후 더욱 향상된 연소실 및 액체로켓 등의 추진시스템의 재설계시 중요한 입력 데이터로 활용할 수 있을 것이다. 실험에 사용된 연료는 탄화수소계 연료인 Jet A-1을 사용하였다.

2. 실험

2.1 액적(Droplet)

액적의 연소특성을 고찰하기 위한 본 실험장치 중에서 가장 중요한 부분 중 하나는 적절한 액적의 형성이다. 실험에 사용되는 액적은 작은 양이라도 수분이 함유되어 있으면 미세폭발이나 액적내부의 순환 등 연소에 많은 영향을 주게 되는 원인을 제공하게되므로 수분의 완전한 제거가 필요하다. 또한, 액적지지봉의 크기 및 비이드(beed) 형상에 따라 액적 초기직경의 형상 및 직경 감소율이 달라지기도 한다. 액적의 초기직경이 너무 크면 착화시나 연소시에 액적지지봉으로부터 떨어지는 수가 있으며, 지나치게 작으면 액적이 비정상형상이 될 수 있으며 또한, 액적 지지봉의 비이드(beed)로의 열전달에 의한 비정상(非正常, unsteady)효과가 커지기도 한다. 여러차례의 시행착오 끝에 실험에 사용한 초기액적 직경은 약 1.55~1.90mm 정도이었다.

본 실험에서는 실험연료(제트유, Jet A-1)의 물성치의 검증을 위해 국내 유수의 정유업체 ((주) SK)로부터 ASTM에 의한 품질검증을 받았다. 검증결과는 다음과 같았다.

Table 1 Liquid fuel properties

Property	Jet A-1
Specific Gravity (15/4 °C)	797
Appearance	Bright & Clear
Flashed Point (°C)	Min. 38
Distillation temperature (°C)	156.7~259.7
Net heat of combustion (kcal/kg)	10,350

2.2 실험장치 및 방법

2.2.1 액적지지봉

액적은 실제의 연소기 내부에서는 지지대에 매달리지 않고 자유운동을 한다. 따라서, 고정액적(Suspended droplet)에 대한 실험에는 액적을 매다는 지지대(suspender)와 액적 내부 온도 측정을 위한 열전대가 액적연소시 자체의 열전달 효과에 의하여 액적에 미치는 영향을 고려하지 않을 수 없다. 본 실험에서는 비교적 열전달 효과가 적다고 생각되는 석영관(quartz)을 가공하여 사용하였으며 석영관 끝에 구형 비이드를 만들어 연료액적을 매다는 방법을 사용하였다. 제작된 석영관 연료지지봉의 지름은 0.4~0.56mm이었고 지지봉의 형태는 Photo 1과 같다.

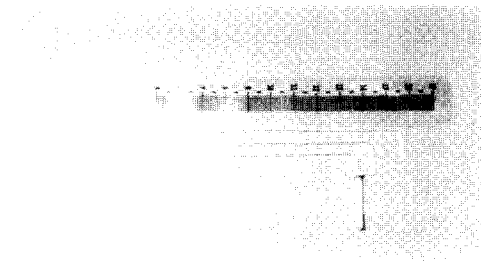


Photo 1 Photograph of quartz fiber filament for test

2.2.2 실험장치 및 방법

화염면의 음파에 의한 진동이 액적의 증발 및 연소에 어떠한 영향을 미치는가를 고찰하기 위해 Fig. 1과 같은 실험장치를 구성하였다.

실험장치는 액적이 연소되는 연소장으로 사용되는 Pyrex glass 튜브, 음파 발생장치로 사용되는 함수발생기(Function generator) 및 스피커, 액적의 운송, 음파의 출력량 및 온도를 조절하는 제어장치, 점화장치 및 측정장치로 구성하였다.

사용된 Pyrex glass 튜브는 내부직경이 100mm, 길이는 1000mm였으며, 튜브의 중간지점에는 자동이송장치로서 Photo 1과 같은 액적지지봉에 매달려있는 연료액적을 Pyrex glass 튜브내 연소장으로 이송할 수 있도록 지름 5mm 정도의

조그만 구멍을 만들었다. 실제 연소기에서 나타날 수 있는 연소기내 폭발, 진동 등의 요동성분을 표현 가능한 음파의 형성은 저음용 스피커(40W8012F, 4Ω 30W)를 사용하였으며 함수발생기 및 제어장치를 이용하여 음파의 주파수 및 진폭을 조절하였다. Heating system을 부착하여 연소기에 열원을 공급하였고 PID방식을 가진 온도제어장치로서 실험액적의 주변온도를 조절하여 액적이 증발 및 연소할 때 주변온도의 영향을 고찰하였다. 점화장치로는 2차 정격이 16.6KV, P24mA인 Ignition(HF) Transformer를 사용하여 액적을 착화할 수 있도록 하였다.

실험은 측정위치의 주변공기 온도를 열원장치를 이용하여 상승시킨 후 이동장치시스템을 이용하여 액적지지봉에 매달린 액적을 연소장으로 사용한 Pyrex glass 튜브속으로 이송하여 수행하였다. 열원으로는 열선을 이용한 전기히터를 사용하여 열량을 공급하였으며 이를 이용한 연소기 내부의 공기온도는 278~523K 범위의 안정된 온도를 유지하였다. 연소기의 온도는 K형 열전대(probe type)를 이용하여 측정하였다.

연소기의 증발환경은 고온의 공기로부터 액적으로 전달되는 열과 히터로부터 오는 열전달로 구성되는 데 열전대로 측정한 온도는 이 두 가지 형태의 열을 모두 포함하였다.

본 실험에서는 순수한 탄화수소계 단일 연료액적에 대하여 대기압 및 고온고압의 주변분위기가 존재하는 압력장에서 증발 및 연소실험을 수행함으로써 액적의 증발 및 연소에 어떠한 영향을 끼치는지를 고찰하였으며 액적이 존재하는 연소장에 70~1000Hz의 음파를 사용함으로써 연소장내 요동성분이 액적의 증발 및 연소에 미치는 영향을 고찰하였다. 특히, 연소장내의 요동성분으로 사용되는 음향장은 실제 가스터빈 및 엔진에서 발생하는 진동의 주파수 조건과 유사하게 연소분위기를 설정함으로써 연소액적에 미치는 영향을 구체적으로 고찰하였다.

함수발생기 및 제어장치에 의해 발생된 음파의

from simplified analysis

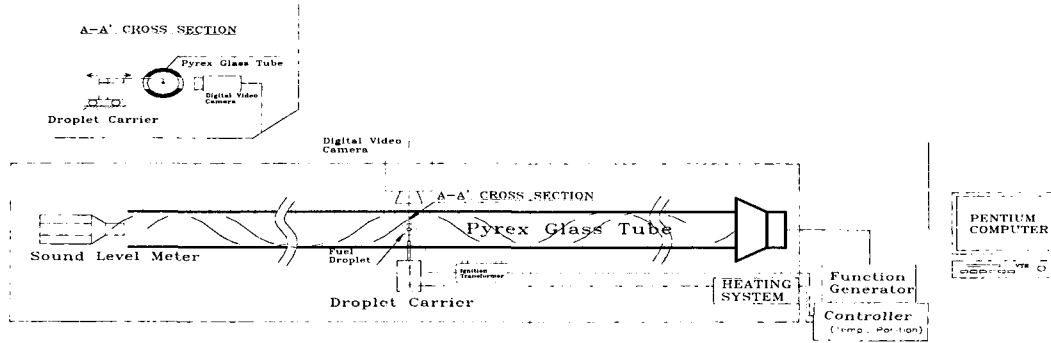


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus for wave effect

주파수 및 진폭은 소음측정기(IEC 651 TYPE II)를 사용하여 튜브출구의 끝단에서 측정하였다 시간에 따라 증발 감소되는 액적의 거동은 디지털 비디오 카메라(GR-DVL300)를 이용하여 초당 30장의 속도로 연속 촬영되었다

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험결과의 처리방법

액적의 증발에 대한 단순해석 결과^[8]에서 서술한 바와 같이 Fig.2와 같이 D^2 는 시간에 대해서 선형적으로 감소하는 데 기울기가 $[-8k_g/\rho_l c_{pg}]\ln(B_q + 1)$ 인 것을 알 수있다. 이 기울기를 증발/연소상수 K라고 정의한다. 시간축에서 임의의 순간의 기울기는 순간의 증발(연소)율 상수이다.

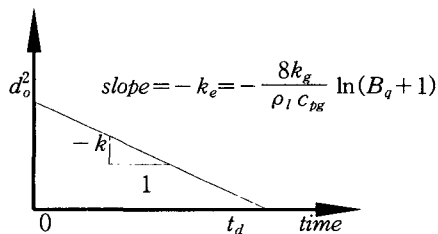


Fig. 2 D^2 law for droplet evaporation resulting

실험결과로 얻을 수 있는 데이터는 초기 액적 직경 및 액적내부 온도, 시간에 따른 액적의 연소특성에 대한 이미지 및 액적 내부의 온도의 천이 등이다. 디지털 컴퓨터에 의해 얻어진 연소상태에 대한 이미지는 액적의 직경, 화염대 직경, 화염형태 등인데 이 기록들은 자료처리용 컴퓨터로 전환시켜 전문소프트웨어인 포토 샵(Photoshop 6.0)을 이용하여 가시화하고 연소시 액적의 직경을 수치로 나타내었다. 측정된 액적 직경은 Fig. 2에 보여지는 바와 같이 시간에 따른 액적직경의 제곱(d^2)의 변화로 나타내었다. Fig. 3 (a)는 본 실험액적의 결과를 시간에 따른 액적직경의 제곱(d^2)의 변화로 나타낸 그림이다.

연소율 상수 계산시 섭동이 배제된 정상연소상태에서 의미가 있으므로 본 연구에서는 액적이 착화후 액적직경의 변화가 거의 없는 어느 정도 시간(약 0.8sec)동안의 측정 데이터는 천이과정으로 고려하여 분석대상에서 제외하고 나머지의 데이터를 유효데이터로 처리하여 분석하였다. 또한, 각 조건들에 대한 상대적인 비교를 하여 보기 위해 Fig. 3(b)와같이 액적의 순간직경의 제곱을 액적초기 직경의 제곱(d_o)으로 나누어 무차원화하였고, 시간(t)도 초기직경의 제곱

(d_0^2)으로 나누어 데이터를 처리하였다.^{[2],[3]}

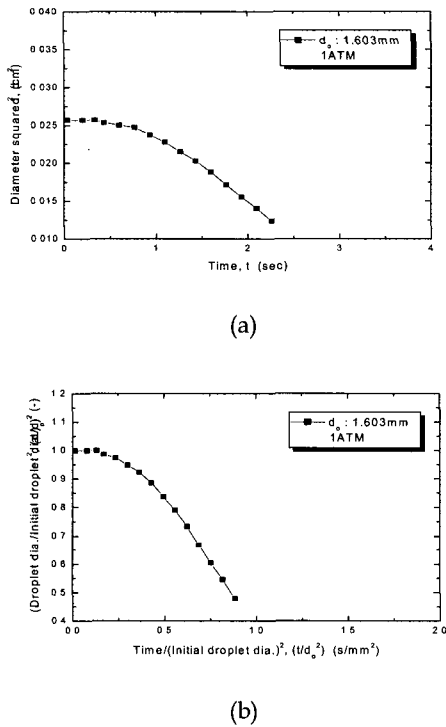


Fig. 3 Variation of droplet diameter for a single burning droplet of pure jet A-1 at 1 ATM

3.2 시간에 따른 액적의 직경변화

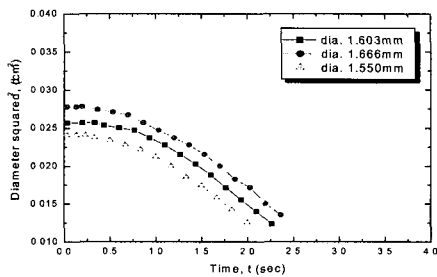


Fig. 4 Variations of droplet diameter a single burning droplet of pure jet A-1 at 1 ATM

Fig. 4는 대기압 조건에서 다양한 크기의 제트유 연료액적에 대한 연소시 직경변화(d^2)의 시

간에 따른 변화를 보여주는 그래프이다^[3]. 착화 후 액적직경은 어느정도 시간동안은 거의 변화가 없으며 연소 중·후반부에 감소하는 것을 보여주고 있다. 이처럼 초기에 액적직경이 거의 감소하지 않는 것은 액적 내부온도의 상승에 의한 밀도의 감소로 인하여 액적의 팽창효과가 나타나는 동시에 연소 중·후반부에 비하여 화염대로부터 액적으로 전달된 열량이 대부분 액적 내부의 온도증가에 사용되어 증발에 필요한 잠열의 공급이 작아 액적으로부터의 증발량이 상대적으로 작기 때문으로 생각할 수 있다. 액적의 내부온도가 거의 비등점에 가까워지면 내부온도의 증가에 쓰이는 열량이 거의 없이 전달 열량은 거의 모두 잠열이 되어 증발량이 급격히 증가하는 것으로 사료된다.

3.3 액적의 초기직경이 연소율상수에 미치는 영향

액적의 초기직경이 연소율 상수에 미치는 영향을 고찰하는 것은 액적에 대한 연소특성을 고찰할 때 중요한 요소중 하나이다.

Fig. 5와 Fig. 6는 대기압상태에서 탄화수소계 연료인 제트유가 증발 및 연소가 이루어질 때 초기 액적직경이 증발률 및 연소율 상수, k_{ev} , k_c 에 미치는 영향을 보여주고 있다.

결과에 보이는 바와 같이 액적직경 1.55~1.90mm의 범위안에서는 액적의 초기직경이 k_{ev} , k_c 값에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

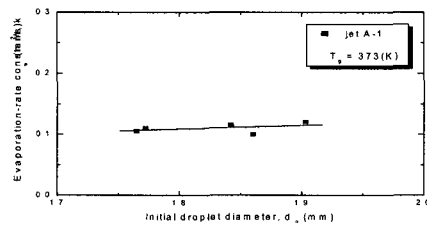


Fig. 5 Effect of initial droplet diameter on evaporation-rate constant (k_e)

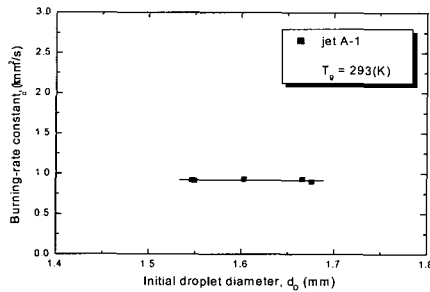


Fig. 6 Effect of initial droplet diameter on burning-rate constant(k_c) in atmospheric pressure

이러한 결과는 순수한 액체연료에 대한 연소율 상수 k_c 는 액적의 지름에 무관함을 언급한 바 있는 Williams⁹⁾의 연구결과와 일치함을 알 수 있었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 음파가 액적에 영향을 미칠 때 액적의 초기직경이 증발률 및 연소율 상수, k_e , k_c 에 미치는 영향을 보여주는 것으로서 액적직경 1.55~1.90mm의 범위안에서는 k_e , k_c 값에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 그러나, 가진주파수가 액적에 영향을 미칠 때의 k_e , k_c 값은 가진되지 않은 액적의 연소에서의 증발률 및 연소율 상수 값과 비교할 때 약간 높음을 보여주었다. 이러한 결과로 가진된 주파수는 액적의 증발 및 연소 특성에 영향을 주어 증발률 및 연소율 상수를 증가시켰음을 알 수 있다.

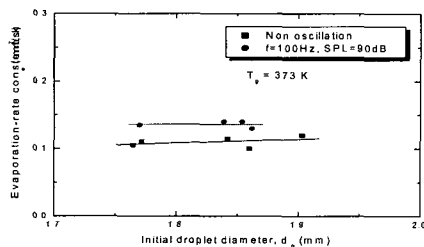


Fig. 7 Effect of initial droplet diameter on evaporation-rate constant(k_e) in acoustic field

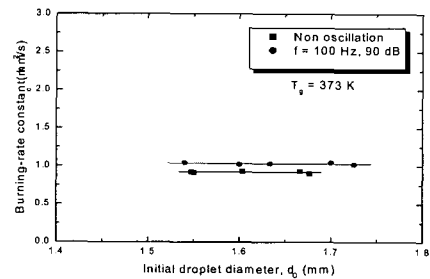


Fig. 8 Effect of initial droplet diameter on burning-rate constant(k_c) in acoustic field

3.4 주변온도가 증발률 및 연소율 상수에 미치는 영향

실제 연소기에 있어서 연소장에 분사된 연료액적은 고온고압의 분위기속에서 연소하게 되며 특히, 주변온도는 연료액적의 증발이나 연소에 크게 영향을 미친다.

Fig. 9과 Fig. 10은 액적 주변의 온도가 증발률 상수(k_e) 및 연소율 상수(k_c)에 미치는 영향을 보여주고 있다. 액적의 증발과 연소 두 경우 모두 주변온도가 증가함에 따라 k_e , k_c 값은 주변온도가 상승함에 따라 점차적으로 증가하였다. 또한, 음파가 액적에 영향을 미치는 경우는 그렇지 않은 경우보다 액적의 증발률 및 연소율 상수의 증가율이 더 커지는 것으로 나타났다.

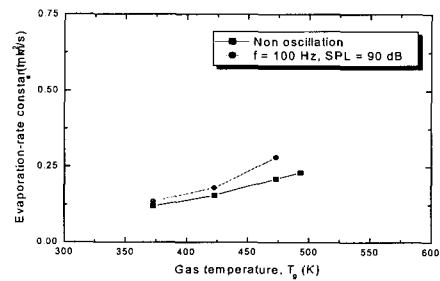


Fig. 9 Effect of surrounding gas temperature on evaporation rate constant(k_e)

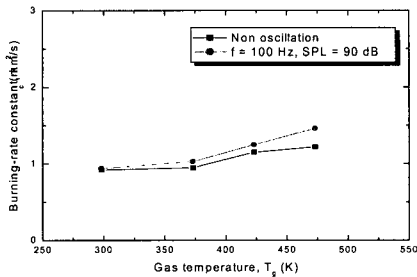


Fig. 10 Effect of surrounding gas temperature on burning-rate constant(k_c)

3.5 음파의 진폭이 상대적인 증발률상수(K_e) 및 연소율상수(K_c)에 미치는 영향

본 연구에서는 70~1000Hz사이의 주파수 범위를 가지는 음파를 사용함으로써 단일 연료액적의 증발률 및 연소율에 음향장이 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. Fig. 11과 12는 주파수(f) 조건 100Hz에서 가진 음파가 액적에 영향을 미칠 때에 음파의 진폭(sound pressure level, SPL)의 영향의 정도를 보여주는 그림으로서 음파의 진폭이 액적에 미치는 경우와 그렇지 않은 경우의 원활한 고찰을 위하여 결과 그래프에는 $K_e = k_e / K_{e,0}$, $K_c = k_c / K_{c,0}$ 를 사용하여 상대적인 증발률 및 연소율 상수인 K_e , K_c 로 환산한 값으로 표시하였다

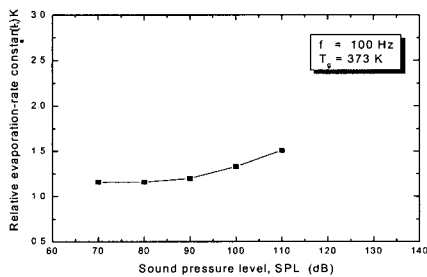


Fig. 11 Effect of sound pressure level on relative evaporation-rate constant(K_e) in acoustic field

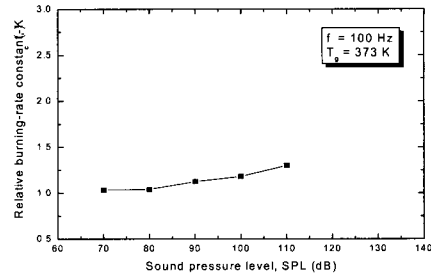


Fig. 12 Effect of sound pressure level on relative burning-rate constant(K_c) in acoustic field

K_e 와 K_c 값은 음파의 진폭이 <80dB일 때 음파의 진폭에는 거의 영향을 받지 않았으나, 진폭이 >80dB이 되면 K_e 와 K_c 값은 빠르게 증가하고 있음을 보여준다. 즉, 진폭이 >80dB이 되면 진폭의 증가에 따라 주변공기와의 상호작용 증가로 인해 열전달 및 질량전달률을 증가시켜 액적의 증발 및 연소에 영향을 주는 것으로 생각된다. 결과적으로 일정수준이상에서 진폭의 증가는 액적의 증발 및 연소율 상수를 증가를 가져온다고 할 수 있다.

3.6 음파의 주파수(frequency)가 증발률상수(K_e) 및 연소율상수(K_c)에 미치는 영향

Fig. 13과 14는 제트유 액적에 대한 상대적인 증발률 및 연소율 상수에 주파수가 미치는 영향을 나타내었다.

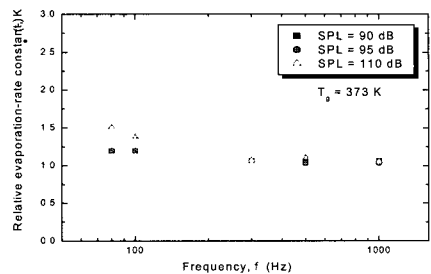


Fig. 13 Effect of frequency on relative evaporation-rate constant(K_e) in acoustic field

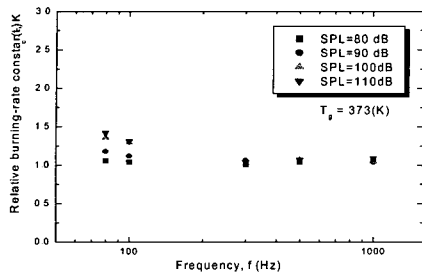


Fig. 14 Effect of frequency on relative burning rate constant (K_r) in acoustic field

보여지는 결과에서 살펴보면 주파수 $f > 100\text{Hz}$ 이고 $\text{SPL} < 80$ 에서는 상대적인 증발률 및 연소율 상수 K_e , K_c 에 미치는 영향이 나타나지 않았으나, 반면에, 주파수 $f < 100\text{Hz}$ 이고 $\text{SPL} \geq 90$ 에서는 현저하게 증가하는 현상이 보였다. 음파의 진폭의 세기가 액적의 증발률 및 연소율 상수 (K_e , K_c)에 미치는 영향을 보여주는 Fig. 11~14로부터 음파의 진폭이 액적의 증발 및 연소에 영향을 미칠 때의 증발률 및 연소율 상수 값이 그렇지 않은 경우보다 각각 $80\text{Hz} \leq f \leq 100\text{Hz}$, $80 \leq \text{SPL} \leq 110$ 에서 각각 1.2~1.51배, 1.04~1.42배 만큼 증가시키는 데 영향을 끼쳤음을 알 수 있었다. 이러한 실험결과로부터 액적의 증발률 및 연소율을 증가시키기 위해서는 적절한 가진 주파수가 존재함을 예측할 수 있다. 즉, 음파가 100Hz 이하의 저주파수, 80이상의 진폭을 가질 때 액적의 증발 및 연소에 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 실제 연소에서 연소불안정성을 야기시킬 수도 있는 외부교란이 액적의 연소에 미치는 영향에 관한 연구를 수행해 봄으로써 연소기내의 전반적인 연소현상을 해석하고자 할 때 기초자료가 될 연소특성을 알아내고자 하였다.

연구결과, 기존의 연구결과^{[4],[5]}와 직접적인 상호 비교는 할 수 없었으나 나타나는 일반적인 경향은 기존의 연구결과^{[4],[5]}와 마찬가지로 액적크기에 상관없이 일정한 증발률 상수 k_e , 연소율 상수 k_c 를 유지함을 알 수 있었다. 또한, 액적의 증발률 및 연소율 상수를 증가시키기 위해서는 적절한 음파의 주파수 및 진폭영역이 존재하였으며 $80\text{Hz} \leq f \leq 100\text{Hz}$, $80 \leq \text{SPL} \leq 110$ 에서 각각의 부교란이 없을 때보다 1.2~1.51배, 1.04~1.42배 만큼 증가하였음을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

1. GODSAVE, G.A.E, "Studies of the combustion of drops in a fuel spray-the burning of single droplets of fuel", fourth Symposium(Int.) on combustion, 1953
2. 한재섭의 3인, "대기압하에서의 에틸알코올과 케로신 연료액적의 연소에 관한 연구", 한국 추진공학회지, 제5권, 제3호, 2001.9, pp 71 ~78
3. 한재섭의 2인 "액적간격이 고정액적의 연소율상수에 미치는 영향에 관한 연구", 한국 추진공학회지, 제6권, 제1호, 2002.3, pp 47 ~54
4. Masahiro Saito의 2인, "Evaporation and combustion of a single fuel droplet in acoustic fields", Linacr House, Jordan Hill 1994 Vol. 73, No.3
5. Masayuki sato의 2인, "Enhancement of evaporation /combustion rate coefficient of a single fuel droplet by acoustic oscillation" Fuel Vol. 75, No.6, pp 669-674, 1996
6. 김성룡의 2인, "구형연소기 내부의 음향 간섭에 의한 연소 불안정의 선형해석," 한국항공우주학회지, 제25권, 5호, 1995
7. 박진성, "음향장내 액적연소의 상호작용에 대한 수치적 연구", 고려대학교, 2001
8. Stephen R. Turns, " An Introduction to combustion", McGraw-Hill, Inc. 1996
9. Williams A., "Combustion of Liquid Fuel Sprays", Butterworths Pub, 1990