

액적간격이 고정액적의 연소율상수에 미치는 영향에 관한 연구

한재섭* · 김선진** · 김 유***

Effect of droplet length on a burning constant rate of suspended droplet

Jae-seob Han* · Seon jin-Kim** · Yoo Kim***

ABSTRACT

This paper presents the results of an experimental investigation on the combustion of single droplets and 1-D droplet arrays of jet A-1 fuel droplets in atmospheric pressure. Experimental results indicate that burning rate constants(k_c) of jet A-1 fuel droplets were independent of initial droplet size as $0.915 \text{ mm}^2/\text{sec}$. It was acquired a general relationship expressing the variation of d^2 with time for droplet burning.

For 1-D droplet arrays($l/d_o=1.208\sim 2.922$), the burning rate constant k_c decreased with decreasing droplet spacing l/d_o and, The effect on combustion rate constant k_c was stronger to second fuel droplet than third fuel droplet with uniform droplet distance

초 록

본 연구에서는 대기압하에서의 탄화수소계 연료인 제트유 연료액적에 대한 연소시 나타나는 액적의 연소특성 및 1차원 액적배열구조를 갖는 액적연소시 액적간격이 연소율 상수에 미치는 영향을 실험적으로 고찰하였다. 실험결과, 탄화수소계 연료인 제트유(jet A-1)는 실험조건하에서 단일 연료액적의 연소에 대해 액적크기에 상관없이 일정한 연소율 상수 $k_c = 0.915 \text{ mm}^2/\text{sec}$ 를 유지하였으며 대기압하에서 액적직경의 제곱(d^2)은 시간에 대하여 선형함수를 얻을 수 있었다.

- 2001년 11월 26일 접수 ~ 2002년 3월 20일 심사완료
- * 학생회원, 충남대학교 기계공학과
주연락저자, E-mail : s_007hjs@cnu.ac.kr, 대전시 유성구 220번지
- ** 정회원, 독립청양대학 소방안전관리과
- *** 종신회원, 충남대학교 기계공학과

또한, 1차원 배열구조를 갖는 액적연소(액적간격 l/d_0 가 1.208~2.922사이)에 있어서 액적간격이 감소할수록 액적의 연소율 상수 k_c 는 감소하였으며, 일정 액적간격을 가지는 액적군 연소시 3번째 액적 보다 2번째 액적의 연소율상수 k_c 에 미치는 영향이 더 크게 나타났다.

Key Words : Droplet(액적), Droplet Length(액적간격), Bburning Constant rate(연소율상수)

1. 서 론

분무를 이루는 가장 기본적인 단위인 단일 액적에 대한 연구가 실제연소시스템의 분무연소기구의 기초정보를 얻기 위한 기본 연구로서 장시간동안 계속되어져 왔으나 그 해석결과를 실제 연소실에서 발생하는 액적들의 연소현상의 규명에 이용하는 것은 실제연소시스템에서의 연소현상의 불균일성 및 복잡함으로 인하여 자세한 해석에는 상당한 어려움이 야기되어왔다. 따라서, 분무연소를 이해하는 데는 실제연소시스템에서 발생할 수 있는 여러현상들에 대한 연구 및 액적 배열에 대한 해석 및 여러 인자들에 대한 실험이 필수적으로 필요하게 되었다.[1],[2],[3]

일반적으로 액적이 서로 근접하여 연소하면 액적사이의 대류를 더욱 강화시켜 산소를 화염에 공급한다. 이는 액적 화염으로부터 상호전달하는 복사열의 효과이다. 그러나, 액적사이의 간격이 더욱 근접하게 된다면 근접한 액적의 화염으로 인한 산소공급이 원활치 않을 수도 있다. 따라서, 액적의 연소에 도움을 줄 수 있는 액적간격이 임의의 점에서 존재할 수 있다. 단일 연료액적의 연소속도와 마찬가지로 액적군 연료의 연소에 있어서도 연소(증발)속도는 d^2-law 에 따르나, 액적 상호의 조건 등에 의하여 그들의 수치는 상이하다.

본 연구에서는 복합적인 분무연소의 특성들을 이해하기 위한 기초단계로서 간단한 액적 연소시험장치를 구성하여 액적의 간격이 연소율 상수 k_c 에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

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 1.55~1.90mm정도이었다.

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	비고
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 액적지지봉

액적은 실제의 연소기 내부에서는 지지대에 매달리지 않고 자유운동을 한다. 따라서, 고정 액적(Suspended droplet)에 대한 실험에는 액적을 매다는 지지대(suspender)와 액적 내부 온도측정을 위한 열전대가 액적연소시 자체의 열전달 효과에 의하여 액적에 미치는 영향을 고려하지 않을 수 없다. 본 실험에서는 비교적 열전달효과가 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.

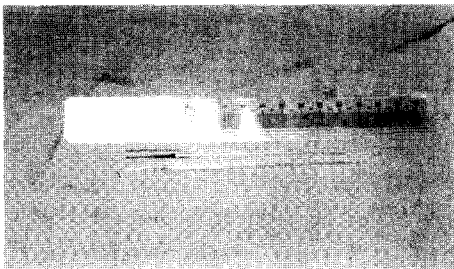


Photo 1 Photograph of quartz fiber filament for test

2.3 액적시험장치

단일액적 연소에서의 연소속도 상수와 액적을 일차원 배열시켜 연소할 때 액적간격이 연소속도 상수에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 본 연구에서는 Fig.1과 같이 실험장치를 구성하였다.

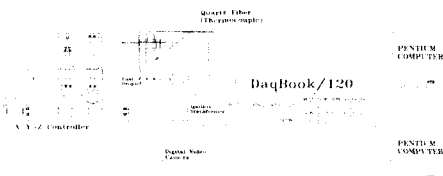


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus for single(array) effect

연소실험장치의 구성은 크게 액적발생기, 액적지지봉, 점화장치 및 측정장치로 구분할 수 있다. 액적발생기는 Photo 2와 같이 설계/제작하여 제어장치로서 위치 및 액적공급량을 조절하면서 사용하였으며 액적공급관은 외경 4mm의 의료용 고무관을 이용하였고 공급관 끝 부분에는 주사바늘을 노즐대신 부착하여 사용하였다.

단일액적 연소에서는 점화장치를 2차정격이 16.5KV, p24mA인 Ignition(HF) Transformer를 사용하였고 1-D 액적배열 연소실험시에서는 액적이 동시에 점화될 수 있도록 열선을 이용하여 실험을 수행하였다.

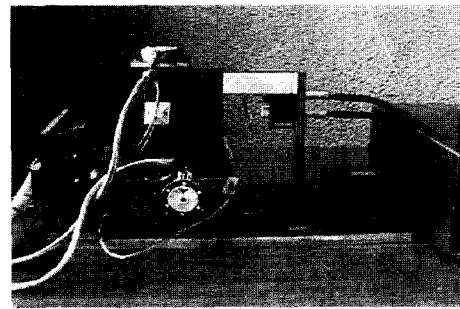


Photo 2 Photograph of fuel-supply part for droplet combustion test

액적의 시간에 따른 직경변화를 알기위해 디지털 비디오 카메라(GR-DVL300)를 이용하여 초당 30장의 속도로 연속 촬영하였으며, 획득한 디지털 신호는 전문 해석 소프트웨어(Photoshop 6.0)를 이용하여 가시화 처리하였다. 보충자료로 활용할 액적 내부온도 측정에는 직경이 250 μ m인 열전대를 액적지지봉으로 사용하였다. 열전대로 측정된 전위차는 iOtech사의 Daqbook/120(12-bit data aquisition system with Enhanced Parallel Port)를 통해 컴퓨터에 전달되어 DASYLab이라는 전문소프트웨어를 이용하여 온도로 환산하였다.

3.3 실험방법

일차원 액적배열을 가지는 액적군이 연소할 때 나타나는 연소특성을 고찰하기 하여 본 연구에서

는 Fig. 2(a),(b)와 같은 배열구조를 구성하였다.

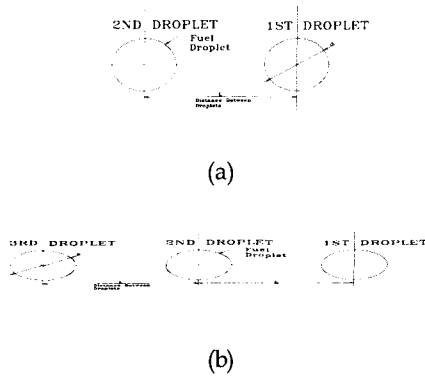


Fig. 2 Schematic diagram for the combustion of droplet arrangement

우선 액적지지봉을 실험조건에 맞게 Photo 2에 보여지는 액적발생기의 액적배열 지그(jig)위에 수평 일직선상으로 설치한 후 미세한 연료공급이 가능한 미소 주사기(micro-syringe)를 이용하여 액적지지봉에 연료액적이 공급되도록 하였다. 액적지지봉의 각 위치는 먼저 스텝모터로 작동되는 자동이송기를 이용하여 수동 확인한 후, 컴퓨터에 액적지지봉의 위치에 대한 자료를 입력하여 이후의 실험에서는 컴퓨터 명령에 의해 자동으로 연료가 각 액적지지봉으로 공급될 수 있도록 하였다. 특히, 액적의 크기는 액적상호간의 연소특성에 영향을 미칠 수 있는 가장 큰 인자라는 점을 고려하여 동일한 크기의 초기액적형성에 세심한 관심을 두었다.

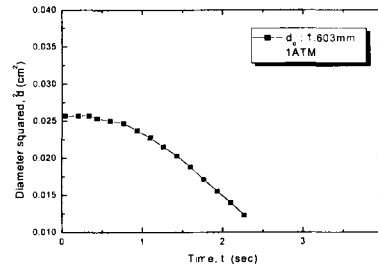
3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험결과의 처리방법

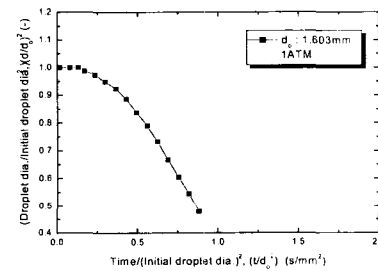
실험결과로 얻을 수 있는 데이터는 초기 액적 직경 및 액적내부 온도, 시간에 따른 액적의 연소특성에 대한 이미지 및 액적 내부의 온도의 천이 등이다.

디지털 캠코더에 의해 얻어진 연소상태에 대한 이미지는 액적의 직경, 화염대 직경, 화염형태 등인

데 이 기록들은 자료처리용 컴퓨터로 전환시켜 전문소프트웨어인 포토 샵(Photoshop 6.0)을 이용하여 가시화하고 연소시 액적의 직경을 수치로 나타내었다.



(a)



(b)

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

측정된 액적직경은 Fig. 3(a)에 보여지는 바와 같이 시간에 따른 액적직경의 제곱(d^2)의 변화로 나타내었다. 시간축에서 임의의 순간의 기울기는 순간의 증발(연소)을 상수이다. 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 하여보기 위해 Fig. 3 (b)와같이 액적의 순간직경의 제곱을 액적초기 직경의 제곱(d_0)으로 나누어 무차원화하

였고, 시간 (t)도 초기직경의 제곱(d_0^2)으로 나누어 데이터를 처리하였다.

3.2 단일액적

3.2.1 시간에 따른 액적의 직경 및 온도 변화

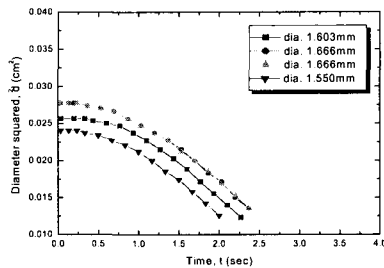


Fig. 4 Variations of droplet diameter a single burning droplet of pure jet A-1 in 1 ATM

Figure 4는 대기압 조건에서 다양한 크기의 제트유 연료액적에 대한 연소시 직경변화(d^2)의 시간에 따른 변화를 보여주는 그래프이다. 착화후 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 액적내부의 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.

3.2.2 액적의 초기직경이 연소율 상수에 미치는 영향

액적의 초기직경이 임의의 순간적인 시간에서 곡선의 경사도를 의미하는 연소율 상수에 미치는 영향을 고찰하는 것은 액적에 대한 연소특성을 고찰할 때 중요한 요소중 하나이다. 본 연구

에서도 액적의 크기가 연소율 상수에 미치는 영향을 고찰하였으며 결과는 Fig. 5과 같다.

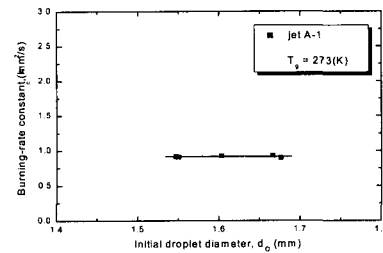


Fig. 5 Effect of initial droplet diameter on burning-rate constant(k_c) in atmospheric pressure

결과에 보이는 바와 같이 액적직경 1.55~1.90mm의 범위안에서는 연소율 상수 k_c 이 0.915 mm^2/sec 로서 일정하며 액적의 초기직경이 변화하여도 연소율 상수 k_c 에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 순수한 액체연료에 대한 연소율상수 k_c 는 액적의 지름에 무관함을 언급한 바 있는 Williams[5]의 연구결과와 일치함을 알 수 있었다.

3.3 일차원 액적배열 연소

3.3.1 화염형태

Photo. 3은 대기압에서 Fig. 2(b)와 같이 3개의 액적이 일정 간격을 가지고 일차원 배열이 이루어졌을 때 연료액적이 연소되는 화염형태를 보여주는 그림이다. 본 실험에서는 1차원 액적배열시 각 연료액적에 미치는 연소특성을 고찰하기 위하여 동시에 점화하는 방법을 사용하였다. 점화는 0.067초 시작되었으며 연소말기를 살펴볼 때 2번째 액적의 액적수명이 약간 연장됨을 알 수 있었다. 이러한 결과는 단일액적의 연소에 비하여 액적연소시 화염으로 인하여 산소공급이 감소되어 나타나는 결과로 사료된다.

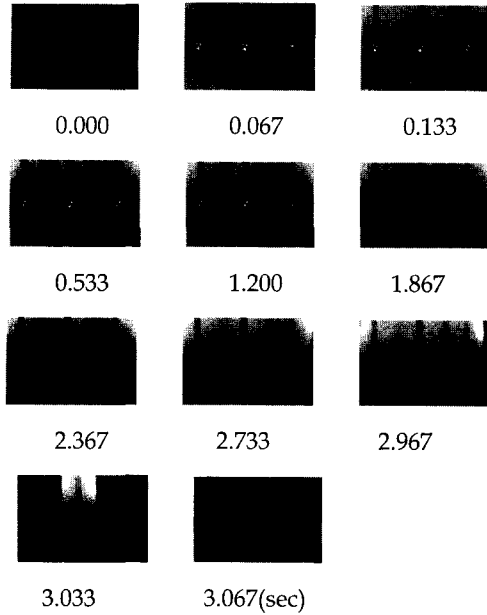


Photo 3 Sequence of burning tri droplet group of pure jet A-1 in 1 ATM

3.3.2 액적간격이 연소율상수에 미치는 영향
(2개의 1-D 액적배열)

본 연구에서는 액적이 일차원 액적배열을 가지고 연소할 때 액적간격이 연소율 상수 k_c 에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 2개의 일차원액적배열 및 3개의 일차원액적배열에 대한 액적 연소실험을 통하여 각각을 비교분석하였다.

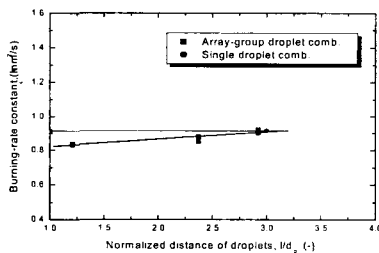


Fig. 6 Effect of distance of droplets L on burning-rate constant(k_c) for 2nd droplet at 2 array combustion having 1-D droplet arrangement ($l/d_0 = 1.2085 \sim 2.9224$)

Fig. 6는 2개의 액적이 Fig. 2 (a)와 같은 일차원 액적배열구조(액적간격 $l/d_0 = 1.2085 \sim 2.9224$)를 가지며 연소할 때 각 실험조건하의 연소율 상수(k_c)결과 값을 무차원화한 액적간격에 대하여 처리하여 액적간 거리가 연소율 상수(k_c)에 미치는 영향을 살펴보았다. 결과를 살펴보면, 액적의 간격이 임의의 값보다 작아지면 액적의 연소시간이 지연되었으며 이러한 연소지연은 연소율 상수값의 감소로 나타남을 알 수 있다. 액적간격 l/d_0 가 1.2085일 경우 연소율 상수, k_c 값은 단일액적이 연소할 때 갖는 연소율상수값 k_c (수평선으로 나타내어진 값)와 비교할 때 약 9%정도 작은 결과값을 보여주었으며 이후 액적간격이 커지면서 액적간격 l/d_0 이 2.9224에 이르면 연소율 상수 k_c 은 단일액적이 연소할 때의 연소율상수 값과 비슷하게 나타남을 보여주었다. 실험적 경향의 원인은 액적간격이 작아지면 근접한 액적의 화염으로 인하여 산소 공급이 줄어들어 원활한 액적의 연소에 영향을 미치기 때문으로 사료된다. 또한, 근접한 액적의 연소에 도움을 줄 수 있는 액적간격 l/d_0 도 > 2.9224 에서 존재함을 유추할 수 있다.

3.3.3 액적간격이 연소율 상수에 미치는 영향
(3개의 1-D 액적배열)

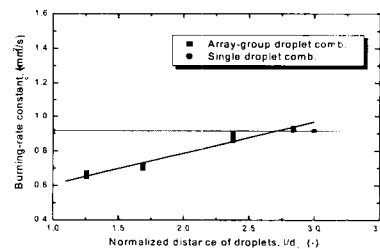


Fig. 7 Effect of distance of droplets L on burning-rate constant(k_c) for 2nd droplet at 3 array combustion having 1-D droplet arrangement ($l/d_0=1.257 \sim 2.841$)

Fig. 7는 3개의 액적이 Fig. 2(b)와 같은 일차원 액적배열 구조(액적간격 l/d_0 가 1.257~2.841)를 가지며 연소할 때 2번째 연료액적의 연소율 상수 k_c 에 미치는 액적간격 l/d_0 의 영향을 단일액적의 연소율상수 값과 비교하여 보여주는 그림이다. 결과는 액적간격 l/d_0 가 짧아져서 액적간격 l/d_0 가 1.257일 때 연소율 상수 k_c 는 단일액적 연소시의 그것과 비교할 때 약 27%정도 감소함을 보여주고 있다. 이러한 실험적 경향은 2번째 액적의 연소시 양쪽에 연소가 진행중인 액적의 화염으로 인하여 단일액적의 연소와 비교할때 연소에 필요한 충분한 산소공급이 이루어지지 않았기 때문으로 사료된다.

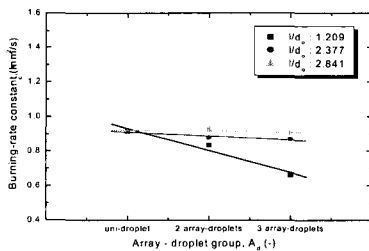


Fig. 8 Effect of distance of droplets L on burning-rate constant k_c for 2nd droplet at array-group combustion having 1-D droplet arrangement

Fig. 8는 액적간격 l/d_0 이 1.209~2.841일 때 Fig. 2 (a)의 첫 번째 액적과 같이 한쪽에 연소되는 액적이 존재할 때(2-array droplets, Fig. 2 (b)의 3번째 액적) 연소액적의 연소율상수값 k_c , Fig. 2 (b)의 2번째 액적과 같이 양쪽에 연소되는 액적이 존재할 때(3-array droplets)연소액적의 연소율상수값 k_c 을 단일액적이 연소할 때 가지는 연소율상수값 k_c 과 비교해 보여주고 있다. 결과를 살펴보면 단일액적이 연소할 때 가지는 연소율 상수 k_c 보다 한쪽에 연소되는 액적이 있을 때 연소

액적의 연소율 상수 k_c 값은 감소하였으며 양쪽에 연소되는 액적이 있을 때 연소액적의 연소율 상수 k_c 값은 더욱 감소함을 알 수 있다. 또한, 액적간격이 감소할수록 감소의 폭은 더욱 증가함을 알 수 있다.

이러한 실험적 결과로부터 판단할 때 1차원 배열구조를 갖는 액적연소에 있어서 액적간격 l/d_0 의 변화는 연소율 상수 k_c 에 많은 영향을 미치며, 실제 연소기의 연소특성을 고찰하기 위해서는 반드시 연구되어야 할 분야로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 실제 연소시스템에서 사용될 수 있는 탄화수소계 연료인 제트유를 적용하여 연소기내의 전반적인 연소현상을 해석하고자 할 때 반드시 필요한 액적의 연소특성을 알아내고자 하였다. 시간변화에 따른 액적의 크기 및 화염형태 변화 등을 측정하여 액적의 연소율 상수 k_c 에 미치는 영향을 고찰해 봄으로서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 탄화수소계 연료인 제트유(jet A-1)는 대기압하의 실험조건하에서 액적크기에 상관없이 일정한 연소율 상수 k_c 를 유지하였으며 액적직경의 제곱(d^2)은 시간에 대해 아래와 같은 선형함수를 얻었다.

$$d^2 = d_0^2 - 0.915 \times t$$

2. 1차원 배열구조를 갖는 액적연소에 있어서 액적간격 l/d_0 가 1.208~2.922사이에서는 액적간격 l/d_0 이 감소할수록 k_c 도 감소하였다.

3. 일정 액적간격을 가지는 1차원 액적배열구조(액적간격 l/d_0 가 1.208~2.922)를 갖는 액적연소시 3번째 액적보다 2번째 액적의 연소율상수 k_c 에

미치는 영향이 더 크게 나타남을 알 수 있다.

본 연구에서 고찰한 단일액적 및 일정한 액적간격을 갖는 일차원 액적배열구조의 액적들이 연소할 때 연소율상수에 미치는 영향에 대한 기초 결과들은 실제 연소시스템의 연소실의 연소특성 해석 및 향상된 추진시스템의 재설계에 중요한 기초 데이터로서 활용할 수 있을 것이다. 그러나, 실제 연소시스템의 연소과정은 더욱 더 복잡한 과정을 가지고 있으므로 이런 과정들을 포함한 부가적인 실험을 통하여 더욱 유용한 데이터를 획득할 수 있도록 추가적인 노력이 필요하다.

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. Spalding, D.B., Fourth Sym.(Int.) on Combustion, 1953
3. Jaques, M.T., Jordan, J.B., Williams, A., and Hadley-Coates, L., "The combustion of Water-in-oil Emulsions and the Asphaltene content", Sixteen Symp.(Int.) on Combustion, 1977
4. Tasi, J. S., Arthur M. Sterling, "The Combustion of Linear Droplet Arrays," 23th Symposium(Int.) on combustion, The Combustion Institute, pp. 1405-1411, 1990
5. Williams A., "Combustion of Liquid Fuel Sprays", Butterworths Pub, 1990
6. 국정진, 박승호, "연소실에 분사된 액적 간의 상호작용과 연소현상에 대한 수치적 연구," 한국연소학회지, Vol.4, pp. 17-26, 1999