

n-Dodecane 연료의 고온면 점화특성 Ignition Characteristics of n-Dodecane Fuel Droplet on a Hot Surface

김성찬

Sung-Chan Kim

경일대학교 소방방재학부
(2010. 1. 8. 접수/2010. 2. 12. 채택)

요 약

n-dodecane 연료 액적의 고온면 점화특성을 파악하기 위해 본 연구에서는 공기의 공급과 제어가 가능한 실험실 규모의 실험 장치를 제작하였다. 표면온도는 적외선 측정법에 의해 측정되었으며 적외선 측정법에 의해 측정된 온도는 k-type 열전대에 의해 측정된 온도와 비교하여 10°C 이내의 오차를 보였다. 각 공기 공급유량에 대하여 약 400회의 점화실험이 수행되었으며 점화실험결과로부터 점화확률 분포와 최소 점화 온도에 관한 결과를 얻었다. 공기 공급유량이 3.0lpm인 경우를 제외하고 냉염과 열염 점화특성을 보였으며 공기 공급유량에 따라 냉염점화가 일어나는 온도범위가 큰 차이를 보였다. 실험결과 n-dodecane 연료의 최소고온면점화온도(MHSIT)는 공기공급 유량이 0.5lpm인 경우에 대하여 약 300°C를 나타냈다. 본 연구에서는 외기조건에 따른 점화특성을 파악함으로써 초기 발화 메커니즘을 이해하고 조기화재 진압을 위한 시스템 설계의 기초적 자료로 활용된다.

ABSTRACT

The present study has been performed to investigate the ignition characteristics of a n-dodecane fuel droplet on the hot surface. Simplified bench scale test setup was built to examine the effect of air flow on the ignition temperature of fuel droplet. IR pyrometric sensor was used to measure the surface temperature, the measured temperature using IR pyrometer was directly compared with k-type thermocouple. The ignition of n-dodecane fuel droplet was divided into two stage - cool flame and hot flame - with the air flow rate except the case of air flow rate 3.0 lpm. The ignition temperature and probability was greatly affected by the air flow rate and the MHSIT of the present study was about 300°C for air flow rate of 0.5 lpm.

Key words : Ignition, Hot surface, Combustible liquid, Fire initiation, Liquid fire, MHSIT

1. 서 론

가연성 액체나 연료의 고온면(hot surface) 점화 현상은 항공기의 낫셀(nacelle)이나 선박, 자동차의 엔진실과 같은 기계 설비뿐만 아니라 변압기나 절연설비등과 같은 전기설비의 초기 화재발생의 중요한 원인이 된다. 즉, 설비의 과부하 혹은 이상으로 인해 시스템의 일부가 비정상적으로 가열될 수 있고 이러한 상황에서 고체 표면에 연료의 누출이나 가연성 액체의 접촉이 이루어질 경우 가연물에 충분한 에너지가 공급되고 자연 점화(auto ignition)에 의해 대형 화재사고로 발전할 우

려가 크다. 이러한 액체연료의 고온면 점화는 액체연료 자체가 단위질량당 높은 에너지 방출량을 가지고 있을 뿐만 아니라 발화원(ignition source)인 고온 표면과 연료의 누출이 지속적으로 유지되기 때문에 일반 화재에 비해 화재성장이 매우 빠르고 발열량도 높아 인명이나 시스템의 안전에 큰 피해를 야기하게 된다.^{1,3)}

가연성 물질의 반응율은 온도와 매우 밀접한 관계를 가지기 때문에 액체연료의 고온면 점화에 대한 연구는 점화가 가능한 최저 표면온도를 파악하기 위한 연구를 중심으로 진행되었다. ASTM E659⁴⁾와 같이 단일 액적의 자연점화온도(auto-ignition temperature)에 관한 시험은 외기 유동조건이 없는 반밀폐용기에서 측정된 값으로써 액체 연료의 고온면 점화에 대한 기준 값으로

간주된다.^{5,6)} 그러나 유동장과 기하학적 복잡성이 존재하는 조건하에서의 최소고온면 점화온도(minimum hot surface ignition temperature, MHSIT)는 자연점화 온도에 비해 일반적으로 높은 값을 나타내고 실제로 MHSIT에 영향을 미치는 조건에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다.

대표적인 액체연료의 고온면 점화에 관한 연구로써 Myronuk⁷⁾은 단순화된 실험실 규모의 엔진 낫셀 화재 실험을 통해 JP-5, JP-5, MIL-H- 83282, MIL-H-5606 등과 같은 액체연료에 대하여 표면 재질, 유동속도, 유체온도, 연료의 분사모드, 장애물과 같은 다양한 조건 변화에 따른 최소고온면점화온도(MHSIT)를 측정하였다. 실험결과 연료의 MHSIT는 유체의 물성보다 국부적인 동적 조건에 의해 결정되는 것으로 단순히 자연 점화온도(AIT)에 의해 유추될 수 있는 것이 아니라는 사실을 파악하였고 대부분의 실험에서 MHSIT는 500°C 이상을 보였으나 저속유동, 티타늄 표면, 탄화수소계 연료의 경우 400°C 정도에서도 점화가 가능하다는 사실을 파악하였다.

Johnson 등⁸⁾은 AENFTS(Aircraft Engine Nacelle Fire Test Simulator)를 이용하여 크게 두 가지의 기하학적 형상(simple duct, high realism test)에 대하여 MHSIT를 측정하는 실험을 수행하였다. 특히 대기압력, 대기 온도, 연료의 분사모드, 유체속도등의 변화가 고온면 점화온도에 미치는 영향을 파악하여 고온면의 가열방식과 배치형태에 따라서 점화온도가 크게 변화함을 파악하였다. 실험결과 대부분의 조건에 대하여 500°C 이상의 MHSIT를 가지는 것으로 나타났지만 고온면을 통

과하는 유체의 온도가 증가함에 따라 MHSIT는 감소하며 탄화수소계 연료의 경우 약 400°C 정도에서도 점화가 이루어지는 것을 파악하였다.

Table 1은 액체연료의 고온면 점화에 영향을 미치는 인자들의 경향을 나타낸다. 대부분의 이전 연구에서 액체 연료의 MHSIT는 500°C 이상의 고온에서 점화가 이루어지는 것으로 보고되고 있으나 고온면이나 연료 및 외기 조건에 따라 낮은 온도에서도 점화가 이루어질 수 있다.⁹⁾ 이러한 저온점화는 상대적으로 낮은 외부 에너지 공급에도 점화가 발생할 확률이 높기 때문에 시스템의 안전을 확보함에 있어서 매우 중요한 문제로 인식되어지고 있다. 그러나 액체연료의 고온면 점화에 대한 대부분의 실제 연구는 실험조건이 복잡하고 한번 실험에 많은 시간과 비용이 소모될 뿐만 아니라 결과의 재연성이나 신뢰도가 낮아 점화 메커니즘의 물리적 현상을 파악하는데 어려움이 있었다. 특히 급기 조건은 고온면의 기하학적 형상과 함께 실제 시스템에서의 MHSIT에 영향을 미치는 중요한 인자임에도 불구하고 정량적인 연구가 상대적으로 부족하였다.

본 연구에서는 단순화된 기하학적 형상의 고온 표면에 대하여 급기조건에 따른 점화실험을 수행하여 가연성 액체연료의 고온면 점화특성에 대한 이해를 도모하고 관련분야 연구에 기초적인 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치

Figure 1은 가연성 액체의 고온면 점화온도를 측정

Table 1. Influence Parameters for Minimum Hot Surface Ignition Temperature (MHSIT)

Parameters	High MHSIT	Low MHSIT
Fuel Volatility	High Volatile Fuel	Low Volatile Fuel
Air Velocity	High Air Velocity	Low Air Velocity
Air Temperature	Low Air Temperature	High Air Temperature
Surface Configuration	Vertical Test Section	Horizontal Test Section
Geometry	Simple Duct Test	High Realism Test
Initial Fuel Temperature	Low Initial Fluid Temperature	High Initial Fluid Temperature
Test Rig Confinement	Open Duct	Closed Duct
Surface Materials	Low Conductivity	High Conductivity

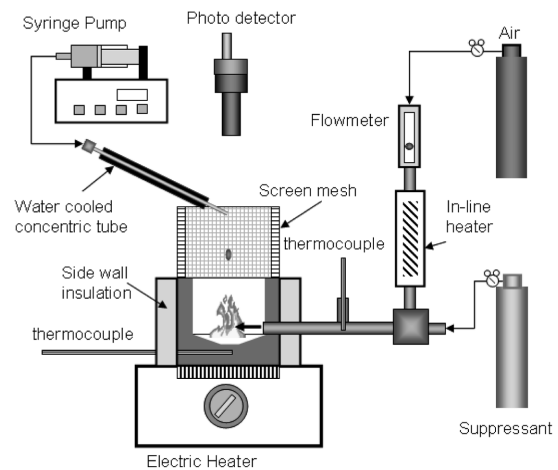


Figure 1. Schematic of the experimental setup to measure hot surface ignition temperature of combustible liquids.

하기 위한 장치의 개략도를 나타낸다. 점화실험 용기는 외경이 6.35cm인 스테인리스스틸(SUS316)로 제작되었으며 점화가 이루어지는 내부는 직경은 2.5cm, 깊이가 2.5cm이다. 용기의 측면두께는 1.9cm, 바닥면 두께는 2.5cm로써 바닥면의 하부에 설치된 가변형 전기히터를 이용하여 가열된다. 실험에 사용된 가연성 연료는 순도 99% 이상의 n-dodecane($C_{12}H_{26}$)이며 시린지펌프(syringe pump)를 이용하여 직경이 약 1.6mm인 미세관을 통해 고온면 중앙으로 공급되고 자유낙하하는 액적의 직경은 4~5mm 정도이다. 고온의 용기표면으로부터 연료공급관으로의 열전달을 차단하기 위해 미세관 외부를 둘러싸고 있는 동심관에 물을 순환시켜 가연성 액체의 온도를 일정하게 유지하였다. 점화 실험 중 외부유동의 영향을 최소화하기 위해 격자간격이 75 μ m인 원통형 격자 그물망을 실험용기 위에 설치하였다. 실험중 점화여부는 육안과 함께 점화된 화염에서 발생하는 빛을 감지하여 판단하였으며 화염에서 발생된 빛은 Photo-detector에 의해 감지되어 실시간으로 기록되었다.

공기의 공급은 용기 측면에 설치된 외경 6.35mm, 내경이 4.57mm인 SUS-304관을 통해 압축공기의 공기(산소 20%, 질소 80%)가 용기 내부로 공급된다. 용기로 공급되는 공기의 유량과 온도를 측정하기 위해 k-type 열전대와 유량계가 설치되었다.

용기의 고온 바닥면의 온도는 적외선 온도측정법에 의해 측정되었고 바닥면에서 2mm 아래 용기내부에 k-type 열전대를 설치하여 고온면과 가까운 용기 내부에서의 온도를 측정하였다.

2.2 표면온도측정

액체 가연물의 점화온도를 측정하기 위해서는 표면에서의 신뢰성 높은 온도 측정이 매우 중요하다. 고온의 표면에 열전대를 직접 설치할 경우 열전대의 존재에 의해 액막(liquid film)의 형성이나 점화에 직접적인 영향을 줄 수 있기 때문에 점화실험이 진행되는 동안 표면에 열전대를 설치할 수 없다. 본 연구에서는 비접촉식 적외선 온도측정(non-contact IR temperature measurement)을 통해 표면의 온도를 측정하였으며 실험에 사용된 적외선 온도측정센서(IR pyrometric sensor)는 오메가(Omega)사의 OS550 시리즈로써 반응 파장대는 8~14 μ m, 측정온도범위는 -18~870°C, 측정정확도는 외기온도 25°C 상태에서 $\pm 1\%$ 정도의 오차를 가진다. 적외선 센서는 표면에서 약 23cm 떨어진 수직 방향으로 설치되었으며 질소(N_2)가스를 센서에 분사하여 냉각을 유도하였다. 센서의 시야각(field of view)은 약

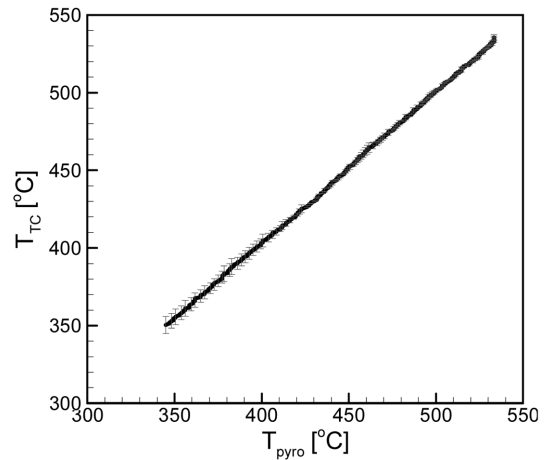


Figure 2. Comparison of the measured temperature using IR pyrometer and k-type thermocouple on the hot surface.

1°이며 표면으로부터 23cm 떨어진 위치에 센서를 설치할 경우 측정점의 직경은 약 1cm이다.

적외선 온도측정법의 타당성을 평가하기 위하여 점화실험을 수행하기 이전에 가열표면에 설치된 열전대에 의해 측정된 온도와 적외선 온도센서에 의해 측정된 온도를 비교하여 적외선 온도 측정법의 신뢰성을 파악하였다. Figure 2는 표면에 직접 용접된 k-type 열전대에 의해 측정된 온도(T_{TC})와 적외선 센서에 의해 측정된 온도(T_{pyro})사이의 관계를 나타낸다. 그림에서의 오차막대는 적외선 온도측정법과 열전대에 의해 측정된 온도의 차이를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 두 가지 측정 방법에 의해 측정된 온도는 선형적인 관계를 보이고 있으며 두 측정법 사이의 차이는 10이내를 보이고 있다. 따라서 비접촉식 적외선 온도측정법을 이용하여 표면온도를 측정하고 점화실험을 수행하는데 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

3. 결 과

Figure 3은 공기공급 유량이 1.5lpm인 경우 온도에 따른 n-dodecane 연료의 점화실험 결과를 나타낸다. 시간에 따른 온도변화율은 약 0.5°C/min 정도이며 약 400회 정도의 점화실험결과를 나타낸다. 그림에서 보는 것처럼 약 340°C 이하에서는 점화가 이루어지지 않고 340°C에서 400°C 사이에서는 연료의 점화가 확률적인 분포를 나타내었다. 표면온도가 420°C 이상에서 620°C 구간에서는 점화가 이루어지지 않다가 620°C 이상 660°C 이하 구간에서 다시 확률적인 점화특성을 보였

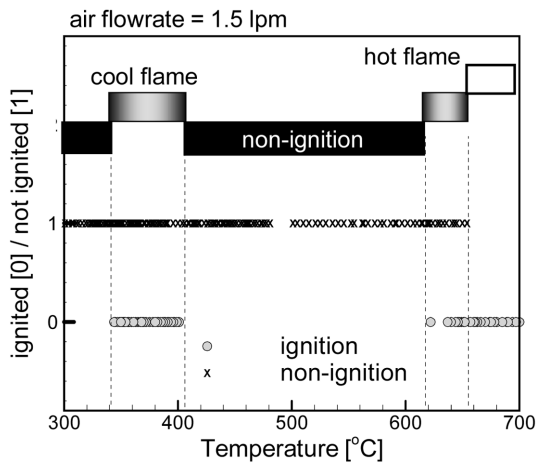


Figure 3. The result of ignition tests for the air flow rate of 1.5 lpm.

으며 약 660°C 이상에서는 항상 점화가 이루어지는 전형적인 2단계 점화형태를 보였다.^{10,11)} 이러한 2단계 점화형태에 의해 형성된 화염은 상대적으로 저온에서 형성되는 냉염(cool flame)과 상대적으로 높은 온도에서 형성되는 열염(hot flame)으로 구분된다. 냉염 점화에서는 화염은 청색을 띠고 점화지연시간(ignition delay time)이 1~3초 정도로 상대적으로 길었지만 열염 점화 상태에서 화염은 밝은 주황색의 빛을 발하며 1초 이내의 짧은 점화지연시간을 보였다.

Figure 4는 유입공기유량이 1.5lpm인 경우와 3.0lpm인 경우에 대하여 표면 온도구간에 따른 냉염과 열염 구간에 대한 점화확률분포를 각각 나타낸다. 각 온도 구간에 대한 점화확률(ignition probability)은 다음과 같이 계산된다.

$$P_{ig}(\Delta T) = \frac{N_{ig}}{N_{test}} \quad (1)$$

여기서 $P_{ig}(T)$ 는 ΔT 온도구간의 점화확률을 나타내고 이는 ΔT 구간에 이루어진 총 점화실험횟수(N_{test})에 대한 ΔT 구간에서 점화가 이루어진 실험의 횟수(N_{ig})로 정의된다. 그림에서 보는것 처럼 공기 공급 유량이 1.5lpm인 경우 냉염점화가 340°C 온도 구간에서 시작되어 약 370°C 정도에서 최대 점화확률을 보였으며 이후 표면온도가 증가함에 따라 점화확률은 오히려 감소하는 경향을 보였다. 앞서 언급한 바와 같이 420°C 이상 620°C 사이에서는 점화확률은 0으로 나타났다.

표면온도가 620°C 이상에서는 열염 점화가 시작되었으며 온도가 증가함에 따라 점화확률은 증가하였고

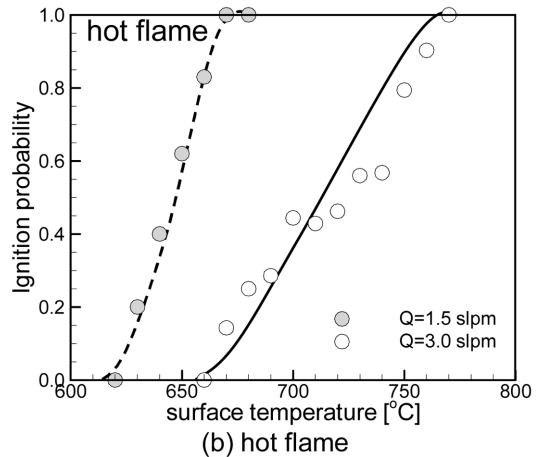
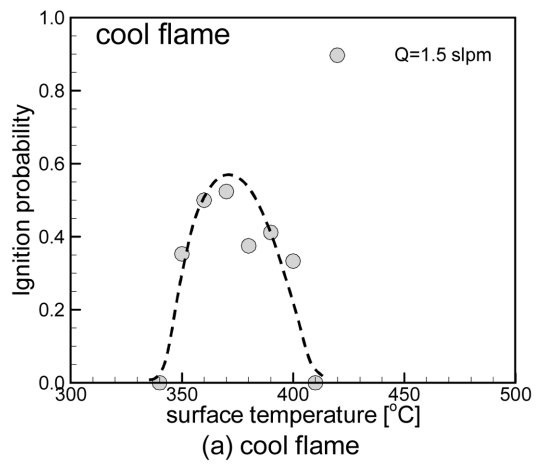


Figure 4. Ignition probability of ignition test with the air flow rate of 1.5 lpm and 3.0 lpm.

점화지연시간은 짧아지는 경향을 보였다. 이후 표면온도가 660°C 이상에서는 항상 점화가 일어났다. 반면에 공기 공급유량이 3.0lpm인 경우 표면 온도가 상대적으로 낮은 구간에서 냉염 점화는 이루어 지지 않았고 650°C 이상에서 열염 점화가 이루어지기 시작했다. 이후 표면의 온도가 증가함에 따라 점화확률은 증가하였으며 750°C 이상에서 점화확률이 1에 도달하여 지속적인 점화가 이루어졌다.

Figure 5는 공기 공급 유량에 따른 실험결과의 점화 범위를 나타낸다. 냉염점화의 경우 공기 공급 유량이 증가함에 점화온도는 증가하였고 냉염 점화가 확률적 분포($0 < P < 1$)를 보이는 온도 범위가 증가하는 경향을 보이고 있다. 열염점화의 경우 확률적 점화가 이루어지는 점화온도가 공기 공급 유량이 증가함에 따라 감

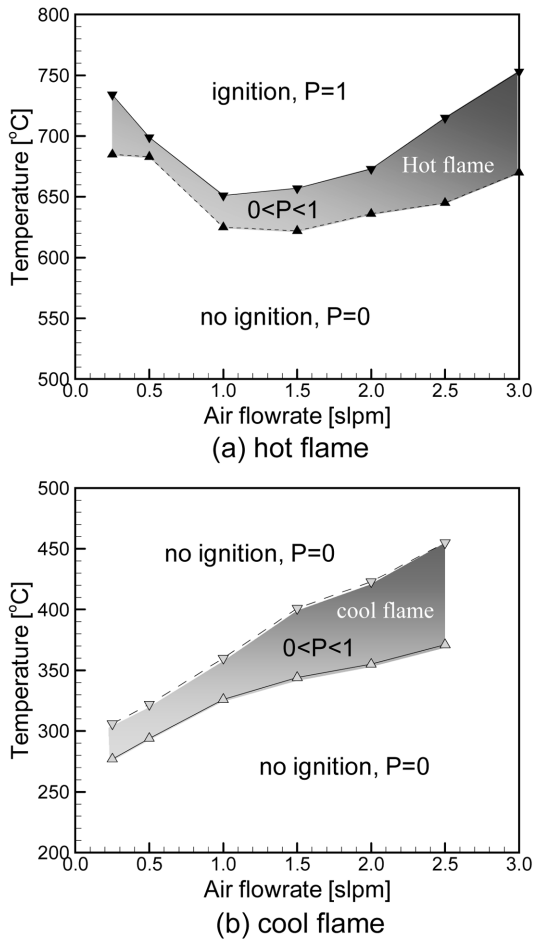


Figure 5. Two stage ignition regimes with various air flow rate.

Table 2. Summary of Ignition Tests

Air Flow Rate [slpm]	No. of Tests	T _{ig} (P = 1) [°C]	T _{ig} (0 < P < 1) [°C]	
			Cool Flame	Hot Flame
0.5	430	699	294-322	683-699
1.0	406	653	326-360	625-653
1.5	387	657	345-401	622-654
2.0	380	673	355-423	636-673
2.5	331	711	371-455	695-711
3.0	354	751	-	675-751

소하는 경향을 보였으며 공기 공급유량이 1.0~1.5lpm 정도에서 확률적 점화분포가 시작되는 온도가 가장 낮

게 나타났다. 이후 공기 공급유량이 증가함에 따라 열염점화가 시작되는 온도가 증가하는 경향을 보였다. 점화확률이 1이 되는 온도도 이와 유사한 경향을 보였다. 전반적으로 공기 공급유량이 증가함에 따라 확률적 점화가 일어나는 온도구간이 증가하는 경향을 보였다. 본 연구의 경우 최소 고온면 점화온도(MHSIT)는 공기 공급유량이 0.5lpm인 경우에 대하여 약 300°C에서 점화가 시작될 수 있는 것으로 나타났다. 또한 공기 공급유량이 1.0lpm이고 표면온도가 약 650°C인 경우 점화가 항상 일어날 수 있는 최소온도조건으로 나타났다. 따라서 n-dodecane 연료의 고온면 점화특성은 표면온도뿐만 아니라 공기 공급유량에 따라 크게 영향을 받으며 특히 냉염점화를 일으키는데 공기공급 조건이 중요한 영향을 미친다는 사실을 파악하였다.

Table 1은 공기공급 조건에 따른 점화실험결과를 요약하여 나타낸다.

4. 결 론

본 연구는 단순화된 기하학적 형상의 고온 표면에 대하여 온도측정법을 정량화하고 공기 공급 조건에 따른 n-dodecane 연료의 고온면 점화특성을 실험적으로 파악하고자 하였다. 실험을 통해 얻어진 결론은 다음과 같이 요약된다.

1. 표면온도의 정확한 측정을 위하여 비접촉식 적외선 측정법을 이용하였으며 표면에 설치된 k-type 열전대와 비교하여 10°C 이내의 오차범위를 보였다. 이러한 오차는 측정기법 자체뿐만 아니라 측정점의 크기 주변환경의 영향등 다양한 요인에 의해 발생되며 적외선 온도측정방식이 고온면의 점화온도를 측정하는 유용한 방식이 될 수 있음을 보인다.

2. n-dodecane 점화실험 결과 공기 공급유량에 따라 냉염점화와 열염점화의 2단계 점화형태를 보였으며 상대적으로 저온에서 형성되는 냉염(cool flame)은 청색을 띄고 점화지연시간이 약 1~3초 정도로 상대적으로 길었지만 열염점화상태에서의 화염은 밝은 주황색의 빛을 발하며 1초 이내의 짧은 점화지연시간을 보였다. 또한 공기공급 유량이 3.0lpm 이상에서는 냉염점화가 일어나지 않았는데 이는 공기공급 증가로 인한 혼합기 농도감소, 혼합기의 고온면 잔류시간 감소등 복합적인 요인에 의한 것으로 판단된다.

3. 본 실험에서 n-dodecane 연료의 고온면 최소점화온도는 공기공급유량이 0.5lpm인 경우에 대해 약 300°C로 나타났으며 냉염화염의 점화온도는 공기 공급유량이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

공기공급조건에 따른 n-dodecane 연료의 고온면 점화에 관한 점화실험을 통해 외기조건에 따른 고온면 점화특성을 이해함으로써 시스템의 비정상적인 과부하로 발생된 고온면에 액체연료 누출시 발화 특성을 파악하고 화재를 조기에 차단하기 위한 시스템 구축의 기초 자료로 활용될 수 있다.

후 기

이 논문은 2009년도 경일대학교 교내 학술연구비 지원에 의하여 수행된 것임.

참고문헌

1. B.P. Mullins, "Spontaneous Ignition of Liquid Fuels", Butterworths Publication Ltd.(1955).
2. W.E. Scull, "Relation between Inflammables and Ignition Sources in Aircraft Environments", NACA Report No. 1019, Lewis Flight Propulsion Laboratory, Cleveland, Ohio(1951).
3. J.M. Bennett, "Ignition of Combustible Fluids by Heated Surfaces", Ph. D. Thesis, Univ. of Dayton (2003).
4. ASTM E659, Standard Test Method for Autoignition Temperature of Liquid Chemicals(2005).
5. 최재욱, 목연수, 최일곤, 전세호, 임우섭, 민철웅, "Gasoliner과 연료첨가제(Cenox)의 자연발화에 관한 연구", 한국화재소방학회 논문지, Vol.20, No.1, pp. 1-5(2006).
6. 하동명, 이성진, "Ethylbenzene + n-hexanol계와 ethylbenzene + n-propionic acid 계의 최소자연발화온도의 측정", 한국화재소방학회 논문지, Vol.21, No.3, pp.33-40(2007).
7. D.J. Myronuk, "Dynamic, Hot Surface Ignition of Aircraft Fuels and Hydraulic Fluids", Technical Report AFAPL-TR-79-2095(1980).
8. A.M. Johnson, A.J. Roth, and N.A. Moussa, "Hot Surface Ignition Tests of Aircraft Fluids", AFWAL-TR-88-2101(1988).
9. J. Santrock and D.W. Kononen, "Flammability Properties of Engine Compartment Fluid other than Gasoline - Autoignition Characteristics of Non-Gasoline Motor Vehicle Fluids on Heated Surface", GM Report(2002).
10. T. Karasawa and S. Shiga, "Ignition Phenomenon of a Fuel-Droplet Impinging upon a Hot Surface", Bulletin of JSME, Vol.29, No.247, pp.143-148 (1986).
11. A.A. Pekalski, J.F. Zevenbergen, H.J. Pasman, S.M. Lemkowitz, A.E. Dahoe, and B. Scarlett, "The Relation of Cool Flames and Auto-ignition Phenomena to Process Safety at Elevated Pressure and Temperature", Journal of Hazardous Materials, Vol.93, pp.93-105(2002).