광학특성을 이용한 고체추진제 점화특성 연구

유지창* · 김인철* · 정정용* · 이경주** · 고승원*

The study of ignition characteristics of solid propellant using Arc Image Furnace

Jichang Yoo* · Inchul Kim* · Jungyong Jung* · Kyungjoo Lee** · Seungwon Ko*

ABSTRACT

The objective of the present work is to characterize design parameters of solid propellant ignitor for composite, double base, and nitramine propellants using arc image furnace. Arc image furnace and fiber optics surface reflectometer were used to measure ignition delay time and reflected optical energy of several compositions of composite, double base and nitramine base rocket propellant at different pressure levels each other. The order of ignitability was double base > composite > nitramine propellants at initial pressure of over 75 psia. The highest ignition energy was needed to ignite nitramine propellant, however, the ignition delay time decreased abruptly as the pressure increased up to the range of 75~400 psia. The absorbtion of radiation energy could be increased by the addition of small amount of opacifiers as carbon black, ZrC, WC and burning catalyst.

초 록

본 연구에서는 로켓 모타의 추진제 점화 특성을 살펴보기 위하여 혼합형, 복기 및 니트라민 추진제를 대상으로 압력 변화에 따른 점화지연시간을 아크 이미지를 이용하여 측정하였다. 추진제 표면의 반사에너지를 측정하기 위하여 광섬유 표면반사계를 사용하였다. 추진제 점화성은 복기 추진제 > 혼합형 추진제 > 니트라민 추진제 순으로 나타났으며, 니트라민 추진제 점화에 가장 큰 점화 에너지가 필요했으나 압력이 75~400 psia 범위로 상승함에 따라 니트라민 추진제의 점화 지연 시간은 급격히 감소하였다. 카본 블랙, ZrC 및 WC 등의 소량의 오페시화이어를 첨가함으로써 추진제 표면의 흡수도를 증가시킬 수 있었다.

Key Words: Arc Image(아크이미지), Fiber Optics Surface Reflectometer(광섬유 표면 반사계), Radiation Energt(복사에너지), Propellant(추진제)

† 2007년 10월 8일 접수 ~ 2007년 12월 5일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 1본부 6부

** 정회원, 국방과학연구소 영상정보체계개발단

연락저자, E-mail: yoojic@hanmail.net

1. 서 론

간단한 실험을 통해 고체 추진제의 점화 특성을 이해하고, 실제 로켓 모터의 점화 특성을 예측하기 위한 대표적인 방법으로 아크 이미지(arc image furnace)와 CO_2 레이저가 많이 사용되고 있다. 이 두 방법은 모두 복사 에너지원을 이용하지만, 아크 이미지에 의해서는 추진제의 성분 변화에 따른 점화 특성 데이터를 비교적 손쉽고 정확하게 얻을 수가 있으며, 가스 압력과 열 속(heat flux) 변화를 통해 점화 기구를 이해할 수 있는 장점이 있다[1]. 그러나 사용되는 에너지원인 제논(Xenon) 램프는 파장 범위가 0.3~1.1μm로 넓고, 열 속은 최대 120 cal/cm^{2}s로 낮은 편이며, 광학 오목 거울에 의해서 복사 에너지를 고밀도의 초점으로 집약하여 이용하므로 부분 점화를 일으키는 단점이 있다. CO_2 레이저는 파장 범위가 10.6 μm로 일정하며 열 속을 높게 제어할 수 있고 복사 에너지를 추진제 표면에 연속적인 띠로 공급하므로 부분 점화를 일으키지 않는 장점이 있으나, 운용이 복잡하고 안정성이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 두 방법상의 차이 때문에 추진제 점화 특성 결과가 약간 다르게 나타날 수 있다.

본 연구에서는 고체상에서의 열전도 현상을 이용하는 점화현상 설명이 가능한 아크 이미지를 사용하여 추진제 조성 변화에 따른 점화 특성을 비교하였다. 또한, 추진제 표면에서의 복사 에너지 반사량을 광섬유 표면 반사계(fiber optics surface reflectometer)를 이용하여 측정하고, 그 결과를 아크 이미지에 의한 추진제 점화 에너지 측정 결과의 보정에 이용하여 보다 정확한 시험 결과를 얻고자 하였다. 그리고 보정된 복사 에너지를 이용하여, 압력과 복사 에너지 양의 변화에 따라 혼합형, 복기 및 니트라민 추진제의 점화 에너지와 점화 특성을 살펴보고자 하였다.

일반적으로 고체 추진제의 점화현상은 Fig. 1에서 나타낸 바와 같은 많은 물리화학 과정을 포함하는 복잡한 현상이다. 로켓 모터 내에서의 점화는 주로 추진제 표면에 고온의 입자를 분사시키는 열전도 방식, 또는 고온의 가스에 의해 가열된 대류가 추진제의 표면 온도를 상승시켜 점화시키는 방식 등에 의해 이루어진다[2].

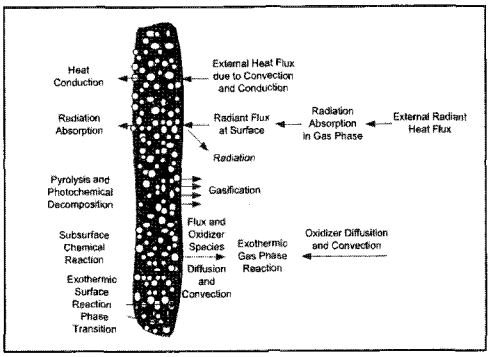

Fig. 1 Physical Process of Solid Propellant Ignition

복사에 의한 효과는 상대적으로 크지 않다고 알려져 있다. 점화의 초기 단계는 에너지 자극을 시작으로 고체상의 내부가 가열되고, 이어 분해 현상이 발생하게 된다. 대부분의 반응은 추진제 표면에서 시작되어 추진제 성분에 따라 표면에 용해 층이 형성되며, 열전도, 복사, 표면 화학반응 및 열분해 등에 의해 용해 층의 기화가 일어나거나 고체 층의 승화가 일어난다[2,3].

2. 이론적 배경

추진제의 점화는 추진제 표면에 외부로 부터 가해진 에너지에 의해 화학 발열 반응이 일어나는 현상으로, 이때 발생된 열이 추진제 표면으로부터 내부로 전달된다는 가정에 근거하고 있다. 고체상 열 이론(Solid Phase Thermal Theory)에 의하면 반무한 고체 추진제의 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$\rho_c c_c(\partial T/\partial t) = k_c(\partial^2 T/\partial x^2) + \rho_c c_c r(\partial T/\partial t) + \beta\dot{q}\exp(-\beta x) + z_c Q_c C_i^a f^a \exp(-E/RT) \quad (1)$$

$$\partial f/\partial t = -Z_c C_i^{a-1} f^a \exp(-E_c/RT) \quad (2)$$

$$\dot{q}_n + \dot{Q}_s = -k_c(\partial T/\partial x) \quad at\ x=0 \tag{3}$$

$$T = T_i \quad at\ t=0 \tag{4}$$

$$T = T_\infty \equiv T_i \ at\ x=\infty \tag{5}$$

$$f = 1\ at\ t=0 \tag{6}$$

ρ_c는 응축상의 밀도, c_c는 응축상의 비열, k_c는 응축상의 열전도도, r은 선형 연소속도, β는 소화 상수, z_c는 예비 지수인자, Q_c는 응축상의 열방출, C_i는 i성분의 농도, E는 활성화 에너지, R은 기체상수를 나타낸다. 왼쪽 첫 번째 항은 열축적을 나타내고, 오른 쪽 첫 번째 항은 고체상에서의 열전도에 의한 에너지, 두 번째 항은 표면 움직임에 의한 대류 에너지, 세 번째 항은 고체상의 광학적 투명도에 따른 에너지 흡수, 네 번째 항은 a차 반응의 화학적 열 발생량을 나타낸다.

식 (1)의 비선형 방정식은 조건에 따라서 식 (1)의 왼쪽의 열 축적 항과 오른쪽 첫 번째 항의 열전도 에너지를 무시하거나, 왼쪽 두 번째와 세 번째 항을 무시하고 경계 조건에 따라 여러 가지 해가 구해 질 수 있다.

열 흐름이 1차원적일 때에 대류 에너지와 에너지 흡수 및 화학 반응에 의한 영향을 무시할 경우, 다음과 같은 비정상 상태에서의 열전도 방정식을 얻을 수 있다.

$$\rho_c C_c \frac{\partial T}{\partial t} = k_c \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \tag{7}$$

식 (7)을 경계 조건에 대해서 풀면 다음 식 (8)를 유도할 수 있으며, α는 열확산 계수로서 $k_c/\rho_c c_c$로 나타낼 수 있으며 π는 무차원 상수이다.

$$T - T_0 = \frac{q}{k_s}\left(\frac{\alpha t}{\pi}\right)^{1/2} \tag{8}$$

T_0는 초기 온도, q는 열 속을 나타낸다. 식 (8)에서 추진제의 자연 발화 온도가 일정하다고 가정하면, 추진제 점화 지연 시간은 식 (9)과 같이 나타낼 수 있으며 Fishman은 대기압 이상에서 임계 열 유속까지 log t_{ig}와 log q의 기울기가 (-2)인 직선 관계가 성립한다고 주장하였고, Pantoflicek는 임계 열속 이상에서는 기울기가 더 커져서 log t_{ig}와 log q의 기울기가 (-1)의 관계가 성립한다고 하였다[2,5].

$$t_{ig} = C/q^2 \tag{9}$$

화학 반응열을 고려할 경우에는 1차원적 비정상 상태 열전달 방정식을 식 (10) 같이 나타날 수 있으며, 이때 반응 속도 상수 파라메타인 B값과 활성화 에너지 E 등을 결정해야 한다.

$$\rho_c c_c \frac{\partial T}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Be^{-E/RT} \tag{10}$$

그 밖에 에너지의 대류 및 흡수에 의한 영향 등을 고려함으로써 보다 근접한 점화 지연 시간을 얻을 수 있다. 그러나 실제 추진제에 전달된 복사 에너지와 점화 지연 시간은 주위 가스의 특성과 화학 반응으로 생긴 열의 영향을 받기 때문에 $\ln t_{ig}$과 $\ln q$의 기울기가 -2보다 작은 값을 나타내며, 작은 열 속과 낮은 압력 조건을 제외하고는 실험 데이터와 잘 일치하지 않는다[2]. 현재까지 소개된 추진제의 점화 이론은 기상 점화 이론, 불균일성 점화 이론 및 고상 점화 이론으로 나눌 수 있다. 기상 점화 이론에서의 점화 과정은 추진제 내의 바인더가 분해되고, 뜨거운 산화제 가스 속으로 확산되어, 점차적으로 격렬한 발열 반응이 진행되어 추진제가 기화되고, 경계표면 근처에서 기체상에 의한 점화가 발생한다는 것이다. 기상 점화 이론은 대부분 일차원적이며, 고상이나 불 균일 모델보다 복잡하다. 그 이유는 기상 가스의 성분과 에너지 방정식이 이 수식에 포함되어야 하기 때문이다. 기상 점화 이론의 주된 장점은 산화제 농도, 압력 등 외부

조건으로부터 점화 시간을 예측할 수 있다는 것이다. 불 균일 점화 이론은 추진제 표면과 주위 가스, 추진제 성분, 특정 성분의 분해 생성물 사이의 반응을 주요 반응 기구로 설명한다. 또한 확장된 개념으로는 고체 산화제의 분해 생성물과 바인더 연료의 분해 생성물 사이에 자발적 불 균일 반응이 주요 반응으로 설명된다[2,5].

3. 실험장치 및 방법

아크 이미지 시스템을 Fig. 2에 나타내었다. 이 장치는 주요 에너지원인 복사에너지를 변화시키면서, 일정온도에서 연소실 내의 초기압력 변화에 따라 고체추진제의 점화 에너지를 측정한다. 주요장치는 1차 및 2차 반사경(알루미늄 코팅 오목거울), 제논 아크 램프(4200 W, Christie Electric Co.), 고속 셔터 시스템, 시편 연소실, 제어부로 구성되어 있다. Fig. 2에 설명되지 않은 제어부는 전원공급기(HP-6469C), 제논 램프의 열량 제어부, 고속 셔터의 개방 시간을 조절하는 시간 조절부 및 압력 조절부로 구성되어 있다.

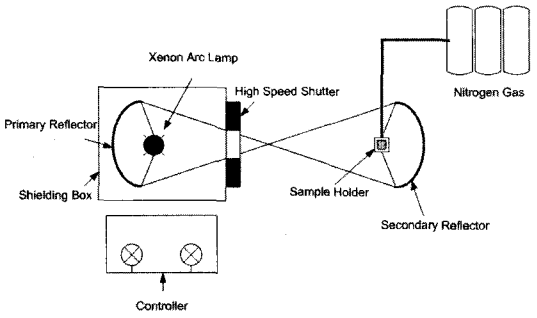

Fig. 2 Schematic Diagram of Arc Image Ignition System

고체 추진제 표면에서 복사 에너지의 반사량을 측정하기 위하여 광섬유 표면 반사계를 사용하였으며 장치도를 Fig. 3에 나타내었다. 주요 구성품은 전원 공급 부위, 점화기, 시편 홀더, 광섬유 케이블과 측정 부위로 구성되어 있다. 복사 에너지원으로는 아크 이미지에서 사용한 것과 동일한 파장 범위를 가지며 에너지는 상당히 작은 제논 아크 램프(150 W)를 사용하였다. 에너지는 전원의 전류 변화와 셔터를 열어주는 시간에 의해 조절 가능하였다. 난반사 표준물질인 $BaSO_4$ 펠릿을 제논 아크 램프의 주요 파장 영역인 0.8 μm와 0.9 μm에서 분광 광도계로 반사량을 측정한 결과, 99.7%와 99.0%를 각각 얻었다. 실제 추진제를 이용한 측정에서는 복사 에너지 반사량을 측정하기 위하여, 같은 조건의 광섬유 표면 반사계에서 표준시료 값($BaSO_4$ 펠릿)을 100% 반사량으로 가정하였다.

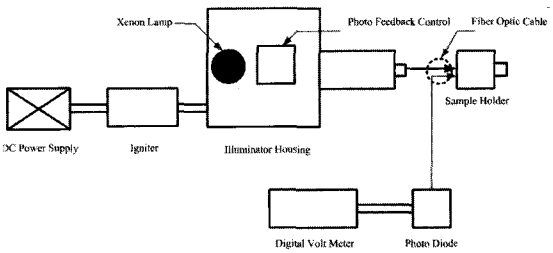

Fig. 3 Schematic Diagram of Fiber Optics Surface Reflectometer

3. 실험결과 및 고찰

시험 대상 추진제의 주조성과 복사 에너지 반사량을 측정한 결과를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Formulation and Absorptivity of Propellants

Propell-ant	Formulation					Absorptivity
	AP	RDX	Al	Binder	Additives	
A	83	-	2	15	-	81.3
B	85	-	1.5	13	0.5 (Graphite)	94.1
C	10	75	-	15	-	60.0
D	20	55	-	14.9	0.1 (Carbon Black)	92.8
	NC		NG		Etc.	
N-5	50		34.9		15.1	54.7
AA-2	51		38.6		10.4	60.3

Table 1에서, 혼합형 추진제 A와 B는 각각 18.7%, 5.9%의 복사 에너지 반사량을 나타냈으며, RDX가 함유된 C와 D 추진제는 40%, 7.2%

의 복사 에너지 반사량을 보였다. A와 C 추진제의 색은 회색과 흰색인 반면, 후자인 B와 D 추진제의 색은 흑연과 카본 블랙이 각각 0.5%와 0.1% 함유된 검정색으로 복사 에너지 반사량에 크게 영향을 준 것으로 판단된다. NC와 NG가 주조성인 복기 추진제인 N-5와 AA-2의 반사량은 각각 45.3%와 39.7%로 비교적 큰 값을 나타내었다.

추진제 표면에서의 복사 에너지 반사량은 추진제 구성원인 AP, RDX, Al, 바인더 및 첨가제 등의 광학적 특성에 주로 영향을 받는다. 즉, 각 원료의 함량 변화에 따른 영향은 적은 반면, 첨가제인 연소 촉매와 카본 블랙에 의한 추진제 색의 변화에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 이는 오페시화이어(opacifier)인 카본 블랙 첨가로 추진제 표면에서의 복사 에너지 흡수량이 크게 변한다는 것을 보여주고 있다. 카본 블랙의 영향은 현재까지 정량적으로 규명되지는 않았지만, 복사 에너지에 의한 높은 확산 흡수도의 증가와 역 분산을 감소시키는 역할을 하는 것으로 설명되고 있다[4]. 혼합형 추진제 A와 B에 대하여, 아크 이미지를 이용하여 -40℃의 일정 온도에서 초기 압력을 15, 75, 400 psia로 변화시키면서 광섬유 표면 반사계의 보정된 복사 에너지와 점화 지연시간과의 관계를 각각 Fig. 4와 Fig. 5에 그래프로 나타내었다.

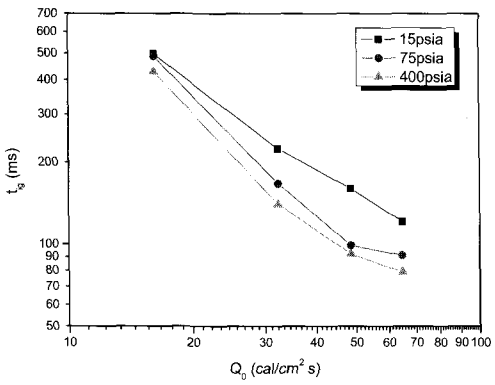

Fig. 4 Ignition Delay Time vs Heat Flux of A Propellant at each Pressure

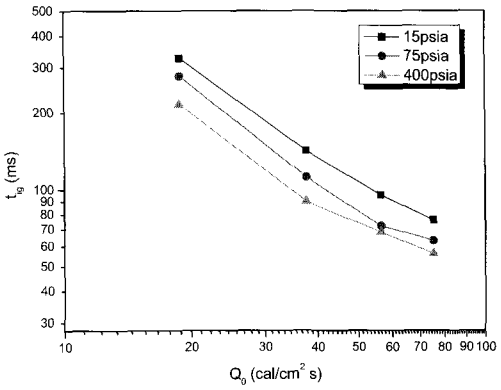

Fig. 5 Ignition Delay Time vs Heat Flux of B Propellant at each Pressure

산화제로 RDX를 사용하는 니트라민 추진제 D에 대하여 아크 이미지를 이용하여 초기압력을 15, 75, 400 psia로 변화시키면서, 광섬유 표면 반사계에 의하여 보정된 복사 에너지의 변화에 따라 측정된 점화지연시간의 결과를 Fig. 6의 그래프에 나타내었다.

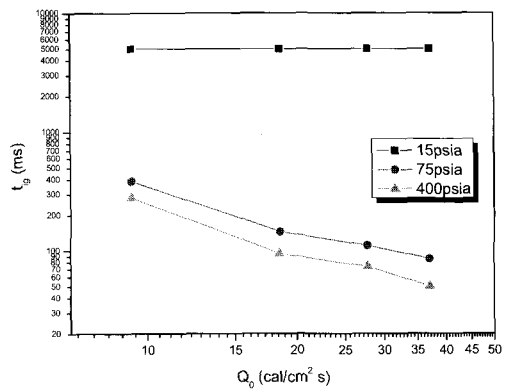

Fig. 6 Ignition Delay Time vs Heat Flux of D Propellant at each Pressure

초기 압력이 15 psia로 낮은 경우에는 복사 에너지의 증가와 관계없이 거의 점화가 일어나지 않았으며, 초기 압력이 75 psia와 400 psia로 증가하면서 복사 에너지의 증가에 따라 점화도 용이하고 점화지연시간도 크게 감소함을 보였다.

아크 이미지를 이용하여 복기추진제인 N-5와 AA-2에 대하여 보정된 복사 에너지와 점화지연시간과의 관계를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 복사 에너지 흡수도는 각각 54.7%와 60.3%로 작은 값을 나타내었다.

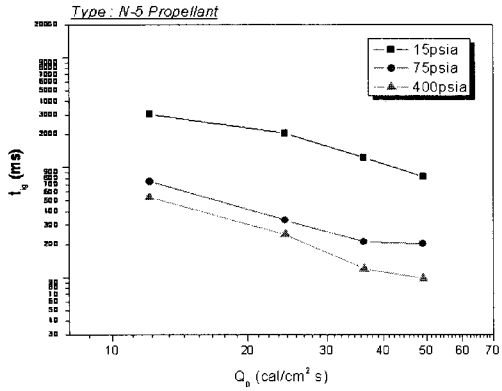

Fig. 7 Ignition Delay Time vs Heat Flux of N-5 Propellant at each Pressure

N-5와 AA-2 추진제는 초기 압력이 15 psia로 낮은 경우에는 복사 에너지의 증가와 관계없이 점화지연시간이 크게 나타났고, 니트라민 추진제의 점화 특성과 거의 유사한 경향을 보였다. 압력이 75 psia에서는 복사 에너지량 증가에 따라 점화 지연시간이 급격히 감소하고 점화성도 좋은 것으로 나타났으며, 압력이 400 psia로 높은 경우에서는 압력이 75 psia일 때와 비교해서 점화 지연시간이 약간 더 감소하는 경향을 보였다. 복사 에너지에 의한 복기 추진제의 점화 특성은 카본 블랙과 연소 촉매 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 납 화합물과 같은 연소 촉매를 더 많이 함유하고 연소 속도가 더 빠른 AA-2 추진제가 N-5 추진제에 비해 점화 지연시간이 더 짧게 나타났다. 복기 추진제는 75 psia 이상의 압력에서는 압력의 영향이 적고 복사 에너지의 영향이 더 큰 것으로 나타났으며, 대체적으로 점화성은 양호한 것으로 나타났다.

복기 추진제의 자연발화온도가 154~160℃로 혼합형 추진제에 비해 낮은 것이 점화성을 향상시킬 수 있는 주요 요인으로 작용한 것으로 판단된다.

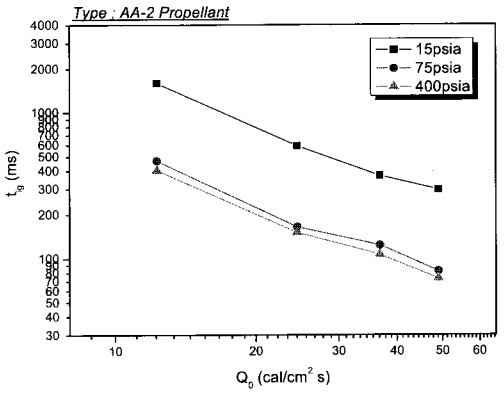

Fig. 8 Ignition Delay Time vs Heat Flux of AA-2 Propellant at each Pressure

75 psia와 400 psia의 일정 압력 조건에서 혼합형추진제, 니트라민 추진제 및 복기 추진제의 복사 에너지 변화에 따른 점화 지연시간 측정 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 9에서 볼 수 있듯이 초기 압력이 75 psia일 때에는 추진제 종류에 따른 점화 지연시간은 니트라민 추진제 > 혼합형 추진제 ≥ 복기 추진제 순으로 니트라민 추진제의 점화 지연시간이 가장 크게 나타났으며, 혼합형 추진제는 복기 추진제와 점화 지연시간이 비슷하였다.

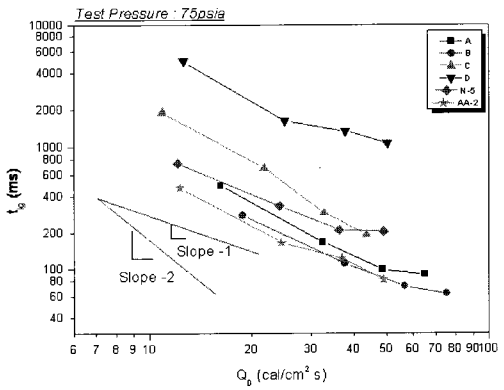

Fig. 9 Comparison of Ignition Delay Time vs Heat Flux of Propellants at 75 psia

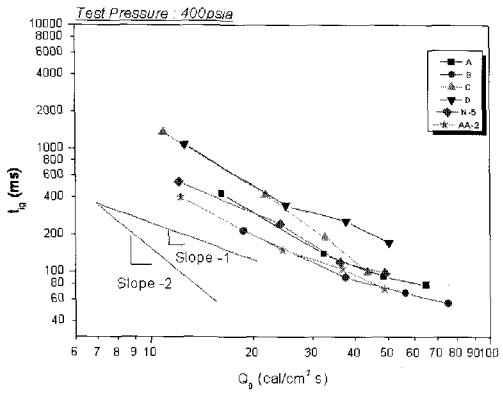

Fig. 10 Comparison of Ignition Delay Time vs Heat Flux of Propellants at 400 psia

Figure 10에서 볼 수 있는 바와 같이, 초기 압력이 400 psia로 높은 경우의 점화지연시간은 75 psia일 때와 마찬가지로 니트라민 추진제 > 혼합형 추진제 > 복기 추진제 순으로 나타났으나 상대적으로 점화 시간의 차이는 75 psia일 때와 비해 크지 않았다. 이와 같이 점화지연시간이 추진제 종류별로 차이가 나는 이유는 각 추진제들의 분해온도가 복기추진제 < 니트라민추진제 < 혼합형 추진제의 순으로 차이가 나며, 복기 추진제와 니트라민 추진제의 경우 혼합형 추진제에는 없는 dark 영역이 존재하는 불꽃 특성 차이로 인한 것으로 판단된다.

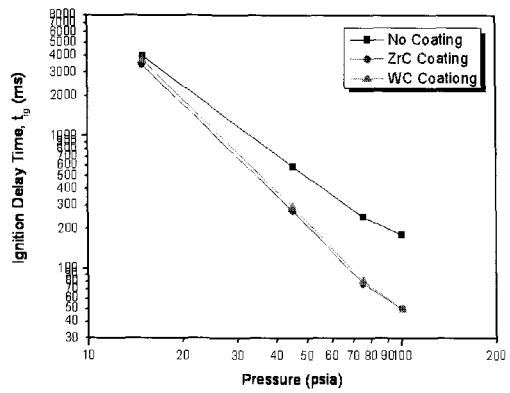

Fig. 11 Comparison of Ignition Delay Time vs Pressure according to Opacifiers

니트라민 추진제 표면에 ZrC와 WC를 각각 코팅한 후, 압력별 점화지연시간 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 압력 증가에 따라 추진제 표면에 오페시화이어 물질을 코팅하지 않은 시료에 비해 ZrC와 WC를 코팅한 추진제가 점화 지연시간이 현저히 감소함을 나타냈다. 또한, 같은 오페시화이어 물질에서도 ZrC가 WC보다 점화 지연시간이 감소 경향이 현저함을 보여주고 있다. 추진제의 점화 특성에 가장 중요한 요소인 점화지연시간을 감소시키기 위해서는 오페시화이어인 카본블랙, ZrC, WC와 연소 촉매 등의 첨가로 복사에너지 흡수도를 증가시키고, 적합한 점화 이론의 적용과 압력 영향에 따른 점화 특성을 고려하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

4. 결 론

1. 혼합형 추진제 2종과 RDX함량이 55% 이상인 니트라민 추진제 2종 및 복기형 추진제 2종의 점화성을 아크이미지를 이용하여 평가한 결과, 75 psia 이상에서는 복기형과 혼합형 추진제의 점화성은 유사하고, 니트라민 추진제의 점화성이 제일 떨어졌으며, 이들 추진제의 log t_{ig}와 log q의 기울기는 (-1)과 (-2)사이로 나타났다.

2. 광섬유 표면 반사계를 이용하여 추진제의 복사에너지 흡수도를 측정한 결과, 카본 블랙 및 ZrC 등의 오페시화이어가 함유된 추진제의 흡수도가 92% 이상으로 크게 나타났다.

3. ZrC와 WC 등의 오페시화이어를 추진제 표면에 코팅함으로 점화성을 크게 증가시킬 수가 있었으며, ZrC가 WC보다 더 우수하였다.

참 고 문 헌

1. Committee on Standardization of Arc Image Propellant Ignition Measurement, "Arc

Image Ignition Brochure", CPIA Pub. No. 238, 1973

2. Kuo K.K. and Summerfield M., "Fundamentals of Solid Propellant Combustion", Vol. 90, 1984
3. Duterque J. and Leugelle G., "Combustion Mechanisms of Nitramine Propellants with Additives," AIAA-88-3253, 1988
4. Fleming R.W., and Derr R.L., "An Investigation of Nonreactive Surface coatings for use in Solid Propellant Arc Image Ignition Studias", AD-A019402, 1975
5. Ohlemiller T.J., Caveny L.H., DeLuca L., and Summerfield M., "Dynamic Effects on Ignitability Limits of Solid Propellants Subjected to Radiotive Heating", 14th Symposium(International) on combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1973, pp. 1297-1307