

파이로 테크닉 점화기의 노화 성능 평가

장 승 교* · 류 병 태*

Evaluation of the Aging Effects on the Performance of the Pyrotechnic Igniter

Seung-Gyo Jang* and Byung-Tae Ryu*

ABSTRACT

In order to evaluate the effects of aging on the ignition performance, pyrotechnic igniters were separated from twelve-year-old, fifteen-year-old, and sixteen-year-old live rocket motors. The characteristic values of the ignition material were measured, and the firing tests of the igniters were performed. The moisture content, the outer dimension, the crush strength, the thermal decomposition characteristics, and the heat of formation the B/KNO₃ ignition pellet were measured. The crush strength was increased and the heat of formation was reduced as aged, but no change was detected for other characteristic values. The burning test results of the igniter pellet in the closed bomb and the inert motor showed that the burning rate of the ignition pellet was increased by 10%, and the integration of pressure P_t of the p-t curve was reduced by 15% for aged samples. It was inferred that the burning rate was increased as the crack was appeared in the pellet and P_t could be proportionally decreased with the heat of explosion.

초 록

점화기의 성능에 미치는 노화의 영향을 알아보기 위하여 12년, 15년, 16년 경과된 활성 모타로부터 점화기를 분해하여 점화제의 특성 값을 측정하고 점화기의 연소 시험을 하였다. 점화제인 B/KNO₃ 펠렛의 수분 함량, 외형 치수, 분쇄 강도, 열 분해 특성, 발열량 등을 측정한 결과, 노화 기간에 비례하여 분쇄 강도는 다소 증가하였고 발열량은 감소하였으나 그 외의 특성 값들은 변화가 없었다. 밀폐 용기 시험과 비활성 모타 연소 시험 결과, 노화된 점화제의 연소 속도는 약 10% 증가하였고, p-t 곡선의 압력을 적분한 값 P_t 는 약 15% 감소하였다. 연소 속도는 점화제에 균열이 발생할 경우 증가하고 P_t 는 폭발 열량에 비례하여 감소함을 추론할 수 있었다.

* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)

1. 서 론

일반적으로 추진제는 오랜 기간이 경과함에 따라 구성 물질의 분해, 상호 반응 등의 원인에 의해 내탄도 성능 및 기계적 물성에 많은 변화가 있기 때문에 다양한 연구를 통하여 수명이 예측되고 있으나,¹⁾ 추진 기관의 점화에 상당한 영향을 미칠 것으로 예상되는 점화기의 노화 현상에 대한 연구는 미미한 실정이다.

고체 추진제용 점화제는 연소가 빠르고, 외부로부터 별도의 산화제 공급 없이 자발적인 반응을 수행하며, 많은 열 에너지를 방출한다. 점화제는 화학적 조성, 물리적 형태 및 기계적 물성뿐만 아니라 내탄도 성능 등의 기능적인 면도 중요하게 고려하여 설계된다. 고체 추진제용 점화제의 종류는 매우 다양하다. 가장 오래된 점화제는 흑색 화약으로 최근까지도 내탄도 성능이 중요하지 않은 단순한 추진기관에 적용되고 있으나 에너지 발생량이 적고, 흡습성이 높으며, 높은 고도에서 연소가 중단되는 문제가 있어 사용이 점차 줄어드는 추세이다. 그리고 열에 다소 둔감하고, 가스 발생량이 적으며, 고온의 입자를 생성하는 Al/CuO와 비교적 무연인 Zr/BaCrO₄, 흡습성이 낮고 높은 고도에서도 점화가 용이한 Zr/Ni/KClO₄/Ba(NO₃)₂, 에너지 함유량, 환경 저항성, 제작성, 안전성 등이 우수하여 추진기관 및 가스발생기의 점화제로 사용되는 MTV(Magnesium Teflon Viton) 등이 있다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 점화제인 B/KNO₃는 내탄도 성능이 다른 점화제에 비하여 상당히 우수하고 높은 고도의 진공 상태에서도 점화성이 우수한 것으로 알려져 있다.²⁾

소형 추진기관에 적용되는 파이프 테크닉 점화기는 점화제의 화학적 조성, 양, 밀도, 형태 등에 의해서 에너지 방출률이 결정된다.³⁾ 일반적으로 사용하는 bi-convex 형태의 점화 펠렛은 분말 및 입상 점화제에 비해 에너지 공급 시간이 길고 연소 시간의 조절이 용이하고 내탄도 성능의 재현성이 있으며 진동에 의한 미세 분말의 생성량도 적다.

본 연구의 대상인 K21 점화기⁴⁾는 bi-convex 형태의 B/KNO₃를 점화제로 사용하고 있는 전형적인 파이프 테크닉 점화기로서 다연장 로켓 외에

도 다른 많은 미사일 체계에 유사한 형태로 적용되고있는 모델이다. 본 논문에서는 점화기의 노화 성능 평가를 위하여 12년 이상 경과된 K21 점화기를 활성 모터로부터 분리하여 수행한 일련의 시험 내용과 그 결과에 관하여 논하였다.

2. 시 험

시험에 사용된 점화 펠렛은 다음과 같은 비교적 간단한 공정을 거쳐 제작된 것이다. 1) 입자의 직경이 15 μm 미만인 KNO₃(MIL-P-156, Class II)를 45 \pm 5 $^{\circ}\text{C}$ 에서 건조한다. 2) 결합제인 polyester resin(Laminac 4116, American Cyanamid Co, MIL-R-7575)을 아세톤으로 잘 용해한 다음 촉매(Lupersol DDM, Wallace Inc., MIL-P-81351)를 넣는다. 3) 순도가 90~92 %인 1.5 μm 미만의 보론 분말(MIL-B-51092)과 결합제 용액을 혼합한

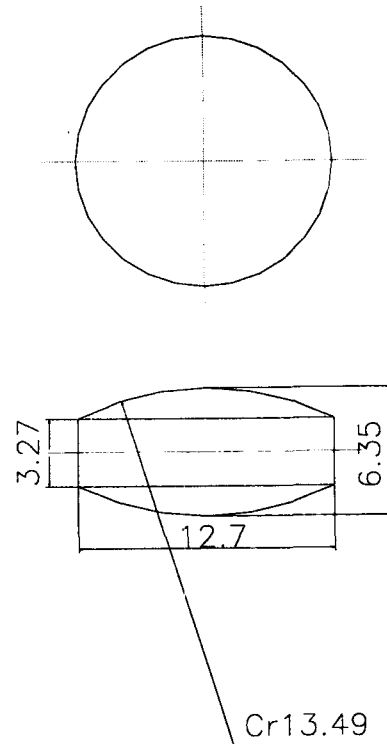


Fig. 1 Bi-convex type igniter pellet

다음, KNO_3 를 넣고 다시 혼화한다. 이때 보론 : KNO_3 : 결합제의 중량비는 23.7 : 70.7 : 5.6이다. 4) 혼화물에서 아세톤을 완전히 건조한 후 사분하고, 다시 건조한다. 5) 건조된 분말을 사용하여 그림 1과 같은 bi-convex 형태로 성형한다.

점화제의 기초적 물성을 확인하기 위하여 수분 함량, 외형 치수, 분쇄 강도, 열분해 특성, 발열량 등을 측정하였다.

일반적으로 점화제에 수분이 필요이상 존재하면 점화성 및 에너지 방출량이 저하되고 수명이 짧아진다. B/ KNO_3 점화제는 대기에 노출되었을 경우 KNO_3 의 조해성으로 인해 수분이 증가되는 경향이 있는데 이를 방지하기 위하여 점화기 바스켓은 PVC 필름으로 감고 착화기와와의 연결 부위는 에폭시를 이용하여 밀봉한다. 수분 함량을 알아보기 위하여 약 2 gram의 점화 펠렛을 대기압에서 100 ± 2 °C로 조절된 오븐에 2시간 동안 넣은 후 무게의 변화를 측정하였다.

동일한 조성의 점화 펠렛일 경우도 밀도, 모서리 효과, web 두께 등에 의하여 질량 연소 속도에 변화가 생기므로 시간 경과에 따른 형상의 변화는 노화 경향 파악에 중요한 분석 인자이다. 펠렛의 형상 변화는 제작시 받은 응력의 완화, 펠렛 상호간의 마찰 및 진동 등에 의하여 발생된다. 형상 변화를 알아보기 위하여 마이크로미터를 사용하여 높이와 외경을 측정하였다.

펠렛의 분쇄 강도는 충격 및 마찰에 대한 저항을 나타내는 값으로 결합제의 물성 및 함량과 성형 강도에 따라 결정된다. 분쇄 강도는 Instron (series IX, automated materials testing system)을 사용하여 측정하였다.

점화제의 열분해 특성은 DSC(Stanton Redcroft Co., STA 1500)를 이용하여 알아보았다. 시료의 양은 약 10 mg을 사용하였고, 승온 속도는 10 °C/min로 유지하였다. 자동 점화 온도는 DSC thermogram의 기준선과 발열 곡선 접점과의 교점인 onset 온도로 측정하였다.

점화제는 추진제 표면에 열을 전달하는 능력으로 성능을 측정하기 때문에 폭발 열량도 점화제의 중요한 특성 값 중 하나이다. 발열량은 약 1 gram의 시료를 단열 열량계(Parr, 1241)에 넣고, 아르곤 가스로 내부 압력을 25 기압으로 유지한 후, 연소에 따른 온도 상승 값을 측정하였다. 열량은 표준 시료인 benzoic acid 펠렛으로 교정한 값에 실험 값을 대입하여 계산하였다.

점화제의 연소 속도를 측정하기 위하여 일정한 체적의 밀폐 용기 내에서 연소되었을 때 형성되는 압력을 측정하는 밀폐 용기 시험(closed bomb test)을 하였다. 밀폐 용기의 외벽에는 일정한 온도를 유지시켜 주기 위하여 water jacket이 설치되어있고 압력은 piezoelectric 방식의 센서를 이용하여 측정하였다. 밀폐 용기 시험 장치의 개략

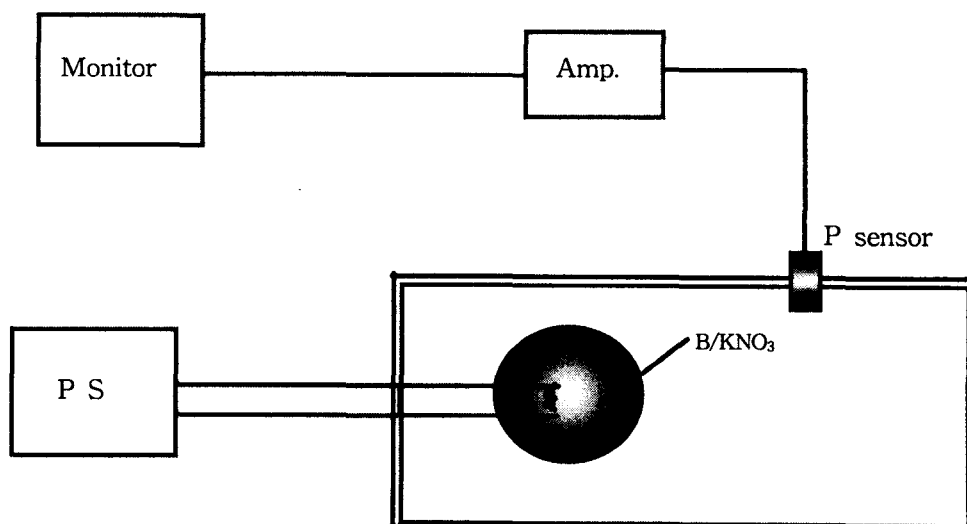


Fig. 2 Schematic diagram of the closed bomb test set

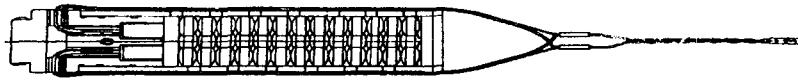


Fig. 3 Cross section of the K21 pyrotechnic igniter

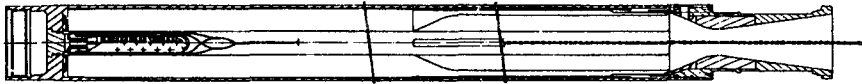


Fig. 4 Cross section of the Inert motor

도는 그림 2와 같다. 시료는 10 gram의 점화 펠렛을 사용하였고 용기의 체적은 210 cc이다. 펠렛이 동시에 전표면 연소되도록 소량의 보론 분말을 넣은 후 형겼으로 포장하여 니크롬선 주위에 고정시켜 시험하였다. 첨가된 보론 분말에 의한 압력 증가치는 보정하였다.

초기 자유 체적과 노즐목 면적이 활성 모터와 동일하고 연소관 내부는 그레인 형상을 모사한 라이너로 채워져 있는 비활성 모터에서 점화기를 연소시켰을 때 연소관 내부에 형성되는 압력과 점화 지연 시간 등을 측정하였다. 시험에 사용된 점화기 및 비활성 모터의 형상은 각각 그림 3, 그림 4에 나타나있다. 비활성 모터의 자유 체적은 약 4.92 ℓ이고 노즐목 면적은 77.4 cm²이다. FRP를 사용한 점화기 바스켓은 4 mm 직경의 구멍이 73개 뚫려있고 66개의 펠렛을 담고 있다. 착화기는 Zr/KClO₄ 분말을 기폭약으로, B/KNO₃ 분말을 주장약으로 사용하며, 1 Ω의 값을 갖는 발열선이 기폭약과 접촉되어 있다.

3. 결 과

16년 경과된 시료의 수분 함유량을 측정한 결과 기준값(수분 함량 0.75 % 미만)에 근접한 양호한 상태인 것으로 나타났고 외형 치수는 15년, 16년 경과된 시료 모두 제작 기준치(높이 : 6.22~6.48 mm, 외경 : 12.62~12.78 mm)에 해당하였다.

분쇄 강도는 16년 경과된 시료의 경우 34.63 kg/cm², 15년 경과된 시료의 경우 26.64 kg/cm²

로 기준값(6.5 kg/cm² 이상)에 해당되나 점화 펠렛 제작시 최고 강도가 20 kg/cm² 이하인 점을 감안하면 노화됨으로써 강도가 증가되는 것으로 볼 수 있다. 펠렛 분쇄 강도 증가의 주원인은 결합제인 Laminac의 경화에 기인한 것으로 판단되는데, 펠렛이 지나치게 경화되면 착화기 또는 점화기의 연소때 발생하는 충격으로 점화제가 파괴되어 요구되는 성능을 얻을 수 없다. 또한, 경화가 계속 진행되면 결국 결합력을 잃고 분해되어 분말이 형성되어 연소시 점화 충격파를 발생시키기 때문에 바람직하지 않다.

DSC 결과 130 °C 부근에서 KNO₃의 결정이 orthorhombic에서 trigonal로 변화함에 따라 흡열 반응이 나타나고, 330 °C 부근에서 고체에서 액체로 상변화 함에 따른 흡열 반응이 나타나며 500 °C~600 °C 영역에서는 KNO₃의 분해, 가스화 반응 및 보론과의 연소에 따른 발열 반응이 나타난다. KNO₃의 결정 변화 온도는 15년, 16년 경과된 시료 모두 약 10 °C 정도 증가되어 나타났으나 상변화 온도 330 °C는 큰 변화가 없었다. 그러나, 자동 점화 온도는 두 시료 모두 510 °C 정도로 신규 제작 분에 비하여 다소 감소하는 경향을 나타냈다.

발열량 측정 결과, 16년 경과된 시료의 경우 1516 cal/g, 15년 경과된 시료의 경우 1545 cal/g로 기준 값인 1500 cal/g 이상에 해당하나 신규 시료의 경우 제작 당시 약 1560 cal/g 이상이 측정되므로 본 시료들의 경우 노화 기간에 비례하여 발열량이 점차로 감소하였다.

그림 5에 16년 경과한 시료에 관한 CBT 압력

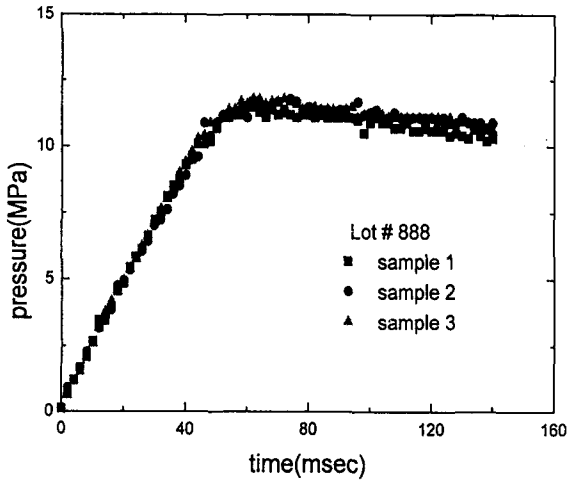


Fig. 5 CBT results of the sixteen-year-old igniter pellet(1981)

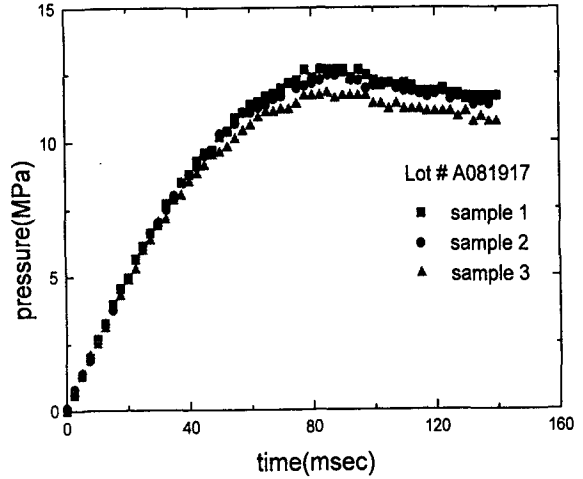


Fig. 7 CBT results of the half-year-old igniter pellet(1997)

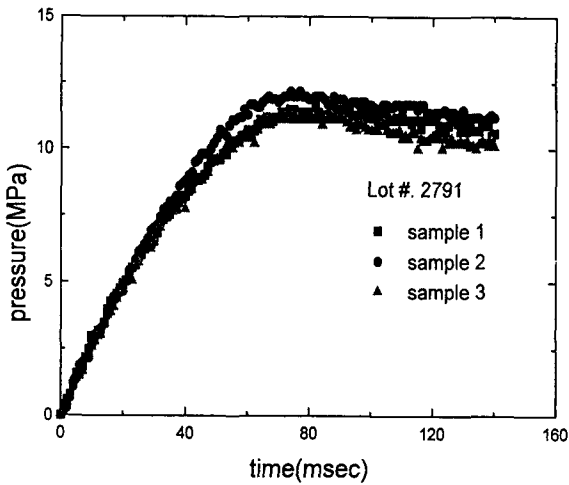


Fig. 6 CBT results of the fifteen-year-old igniter pellet(1982)

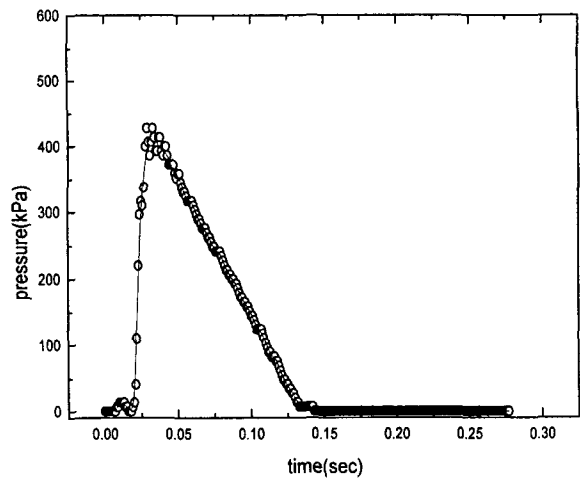


Fig. 8. Inert motor test result for sixteen-year-old igniter(1981). The solid line is the guide to the eyes.

측정 결과를 나타냈다. 일정시간(약 50 msec)까지 압력이 급격하게 증가하고 압력이 최고 값에 달하면 낮은 비율로 감소하기 시작한다. 그림 6에 15년 경과된 시료에 관한 압력 측정 결과를 나타냈다. 두 번째 시료의 경우 다른 두 시료에 비하여 측정된 최고 압력 값은 다소 높다. 그림 7에는 신규로 제작한 시료에 대한 CBT 압력 측정 결과를 나타냈다.

그림 8부터 그림 10에 각각 16년, 15년, 12년 경과된 점화기의 비활성 모터 시험 결과를 나타냈다. 16년 저장된 점화기의 경우 비활성 모터에 형성된 압력의 최고치는 약 414 kPa이다. 초기에 최고 압력 값의 5%에 도달하는데 걸리는 시간을 점화 지연 시간으로 정의하고 이로부터 연소 말기에 최고 압력 값의 5%에 해당하는 압력이 되었

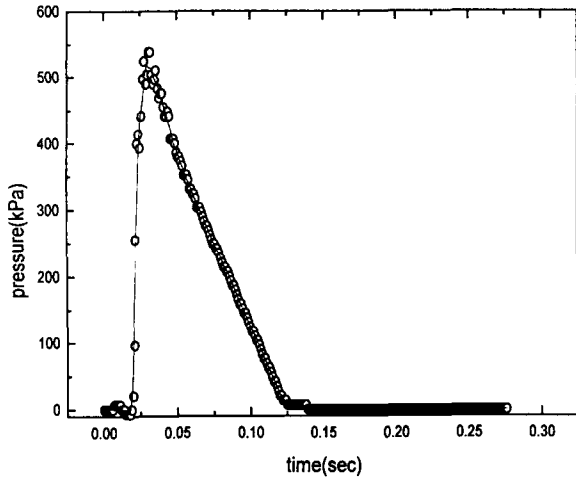


Fig. 9 Inert motor test result for fifteen-year-old igniter(1982). The solid line is the guide to the eyes.

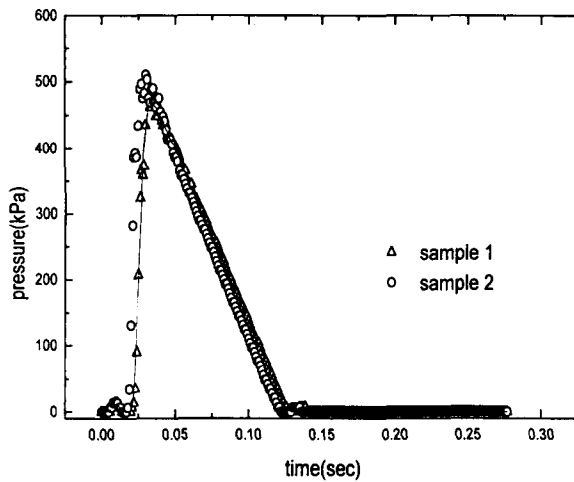


Fig. 10 Inert motor test results for twelve-year-old igniters(1985). The solid line is the guide to the eyes.

을 때까지의 시간을 총 연소 시간으로 정의하면, 약 20 msec 정도 점화가 지연되었고, 총 연소 시간은 약 110 msec이다. 시간의 변화에 대하여 압력 값을 적분한 값 P_t 는 25.6 kPa-sec이다. 15년 저장된 점화기의 경우 그림 9에서 볼 수 있듯이 최고 압력 값은 약 517 kPa이고 점화 지연 시간은 약 20 msec로 위의 16년 저장된 점화기의

Table 1. K21 Igniter design criteria

Max. Pressure	Min. Pressure	Max. Pressure Time	Total Burn Time
827 kPa	345 kPa	less than 40 msec	over 80 msec

경우와 동일하였으나, 총 연소 시간은 약 104 msec로 다소 짧아졌다. P_t 는 27 kPa-sec로 16년 경과한 점화기의 값보다 다소 크다. 12년 저장된 점화기의 경우는 그림 10에서와 같이 시료 1과 시료 2에 대하여 최고 압력 값은 각각 469 kPa, 496 kPa이고 점화 지연 시간은 각각 23 msec, 19 msec이며 총 연소 시간은 두 시료 모두 약 100 msec이다. P_t 는 각각 26 kPa-sec, 26.2 kPa-sec이다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 모든 시료가 표 1의 점화기 설계 기준 값을 만족하였다.

4. 고 찰

4.1. 이론적 접근

본 CBT 시험의 목적은 노화된 점화 펠렛과 신규로 제작된 점화 펠렛의 최고 압력, 최고 압력 도달 시간 등의 특성 값을 비교하는데 있다. 그러나 위의 시험 결과에서 알 수 있듯이 압력 값은 증가하면서 진동하고 있기 때문에 특성 값을 정확하게 결정하기가 어려웠다. 따라서 이상 기체 방정식을 적용한 이론 식에서 총 연소 시간, 연소 가스 온도 등의 변수를 실험 값에 부합하도록 곡선 맞춤(curve fitting)하여 구한 후 위의 특성 값들을 비교하였다.

열 손실이 없다고 가정하면 이상 기체 방정식으로부터 밀폐 용기 내부의 압력 P_c 와 점화 펠렛의 연소에 따른 가스 생성률 \dot{m}_g 는 다음의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_f}{RT} \frac{dP_c}{dt} = \frac{\dot{m}_g}{w} \quad (1)$$

여기서, V_f 는 밀폐용기의 체적으로 210 ml이고, R

은 기체상수로 8.3143 J/mole · K이며, T는 연소 가스의 온도이다. 또한 w는 연소 생성물 중 가스만의 분자량이다.

기체상수 R을 분자량 w로 나눈 값을 R'이라 하면 (1)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$-K_1 \dot{m}_g dt + dP_c = 0 \quad (2)$$

단, $K_1 = R' T / V_f$ 이다.

가스의 질량 생성률은 다음의 두 가지 경우로 가정할 수 있다. 먼저 연소 초기에 시료의 전표면 연소가 이루어진다고 가정하면 연소가 진행됨에 따라 시료의 연소 면적이 점차적으로 감소하기 때문에 연소 가스 생성률도 줄어든다. 즉,

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{gm} \left(1 - \frac{t}{t_b} \right) \quad (3)$$

여기서 t_b 는 총 연소 시간이다.

반면에, 연소 초기에 부분 연소가 되면, 전표면 연소가 될 때까지는 연소 면적이 증가되고, 임의의 시간 t_0 가 지나면 전표면 연소가 되어 그 이후로는 연소 면적이 감소하므로 가스 생성률도 이에 따라 변화한다. 즉,

$$\dot{m}_g = \frac{\dot{m}_{gm}}{t_0} t, \quad t \leq t_0 \quad (4)$$

$$\dot{m}_g = -\frac{\dot{m}_{gm}}{t_b - t_0} (t - t_b), \quad t \geq t_0 \quad (5)$$

그림 11에 위의 두 경우(식 (3) 및 식 (4),(5))를 비교하였다.

초기 전표면 연소의 경우에 밀폐 용기 내부의 압력 P_c 를 계산하면 다음과 같다.

$$P_c = K_1 \dot{m}_{gm} \left(t - \frac{t^2}{2t_b} \right) \quad (6)$$

반면에 전표면 연소가 t_0 후에 이루어진 경우에 P_c 는, $t \leq t_0$ 일 때

$$P_{c1} = \frac{K_1 \dot{m}_{gm}}{2t_0} t^2 \quad (7)$$

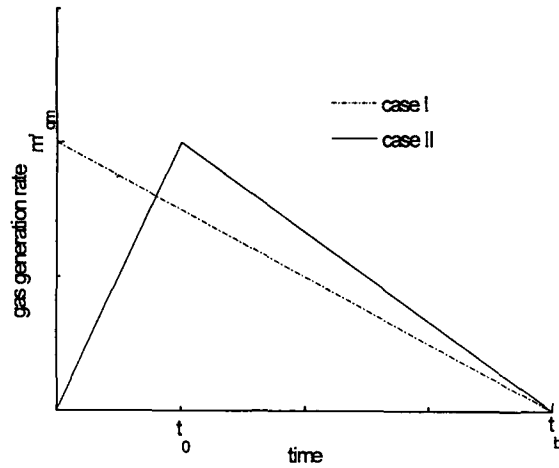


Fig. 11 Comparison of the different mass generation rates

이고, $t \geq t_0$ 일 때

$$P_{c2} = -\frac{K_1 \dot{m}_{gm}}{t_b - t_0} \left[\frac{1}{2} (t - t_0)^2 - t_b (t - t_0) \right] + \frac{1}{2} K_1 \dot{m}_{gm} t_0 \quad (9)$$

이다.

비활성 모타의 경우 이상 기체 방정식으로부터 모타 내부의 압력 P_c 와 점화기의 연소에 따른 기체 생성률 \dot{m}_g 는 다음의 관계식을 만족한다.

$$\frac{V_f}{RT} \frac{dP_c}{dt} = \frac{\dot{m}_g - \dot{m}_e}{w} \quad (9)$$

여기서 V_f 는 모타의 자유 체적으로 4.92 ℓ, T는 2589 K, \dot{m}_e 는 노즐 출구에서의 기체 질량 방출률이고 w는 48.98 g/mol이다. 연소 가스의 온도, 분자량 등은 NASA 프로그램인 Chemical Equilibrium Code(CEC)⁵⁾로부터 345 kPa일 때의 값을 기준으로 사용하였다. 연소 가스 질량 방출률 \dot{m}_e 는

$$\dot{m}_e = C_D A_t P_c \quad (10)$$

이다. A_t 는 노즐 목 면적 77.4 cm²이고, C_D 는 가스 방전 계수(gas diffusion coefficient)로 다음과 같

이 나타낼 수 있다⁶⁾.

$$C_D = \sqrt{\frac{\gamma}{R'T} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (11)$$

여기서 γ 는 비열 비이다. B/KNO₃의 경우 γ 는 1.064이고 C_D 는 약 9×10^{-4} sec/m이다. 따라서 (9)식은 다음과 같다.

$$(K_1 K_2 P_c - K_1 \dot{m}_g) dt + dP_c = 0 \quad (12)$$

단, $K_2 = C_D A_t$ 이다. 결국 연소관 내부의 압력 P_c 는 다음과 같다.

$$P_c = e^{-K_1 K_2 t} \left(\int e^{K_1 K_2 t} K_1 \dot{m}_g dt + const. \right) \quad (13)$$

CBT의 경우와 같이 서로 다른 형태의 기체 생성물을 가정하여 (13)식을 전개할 수 있다. 연소 초기에 전표면 연소가 된다고 가정한 경우에 연소실의 압력은 다음과 같다.

$$P_c = \frac{\dot{m}_{gm}}{K_2} \left[(1 - e^{-K_1 K_2 t}) - \frac{1}{t_b} \left(t - \frac{1}{K_1 K_2} \right) - \frac{e^{-K_1 K_2 t}}{K_1 K_2 t_b} \right] \quad (14)$$

반면에 점화 펠렛 중에서 착화기에 가장 근접한 펠렛이 먼저 점화되고 이어서 임의의 시간 t_0 가 지난 후 모든 점화 펠렛이 전표면 연소된다고 가정할 경우, 점화 펠렛이 연소됨으로써 생성되는 연소 가스는 점화된 표면적과 비례하므로 기체 발생률은 t_0 까지 증가하여 최고 값을 갖게 된다.

먼저 $t \leq t_0$ 일 경우 연소실 내부의 압력 P_{c1} 은

$$P_{c1} = \left(\frac{\dot{m}_{gm}}{t_0} \right) \left[\frac{1}{K_2} \left(t - \frac{1}{K_1 K_2} \right) + \frac{e^{-K_1 K_2 t}}{K_1 K_2^2} \right] \quad (15)$$

이고 $t \geq t_0$ 인 경우 압력 P_{c2} 는

$$P_{c2} = \frac{\dot{m}_{gm}}{K_2} \left[(1 - e^{-K_1 K_2 (t-t_0)}) - \frac{1}{t_b} \left(t - t_0 - \frac{1}{K_1 K_2} \right) - \frac{e^{-K_1 K_2 (t-t_0)}}{K_1 K_2 t_b} \right] + P_{c1}(t_0) e^{-K_1 K_2 (t-t_0)} \quad (16)$$

이다.

4.2. 분석

식(7)과 식(8)을 CBT 결과와 비교해 보기 위하여 이론 식에 사용된 연소 가스의 분자량, 온도, 생성물 등의 변수를 계산하여야 한다. 그러나 CBT와 같이 압력과 온도가 급격히 변하는 환경에서의 변수 값에 대하여 알려진바 없으므로 CEC를 이용하여 근사적으로 구하였다. 그 결과 3.45 MPa의 단일 조건에서 연소 가스의 온도는 2818 K, 비열비는 1.068, 가스의 분자량은 51.27 g/mol, 연소 생성물 중 기체가 차지하는 비율은 전체 생성물 무게의 81 %, 물 비율의 59.7 %이다. 위 변수들은 모두 압력의 함수이나 13 MPa 이하에서는 큰 변화가 없으므로 위 값들을 대표값으로 사용하였다. 그러나 밀폐 용기의 열 손실을 고려하면 연소 가스의 온도는 CEC의 결과와 차이가 있을 것이기 때문에 식(7)과 식(8)을 온도의 함수로 두고 실험 값과 곡선 맞춤하여 결정하였다.

그림 12에서 15년 경과된 시료 3에 대한 CBT 결과와 이론 값을 비교하였고 이론 식에 사용된 변수 값들도 함께 나타냈다. 동일한 방법으로 다

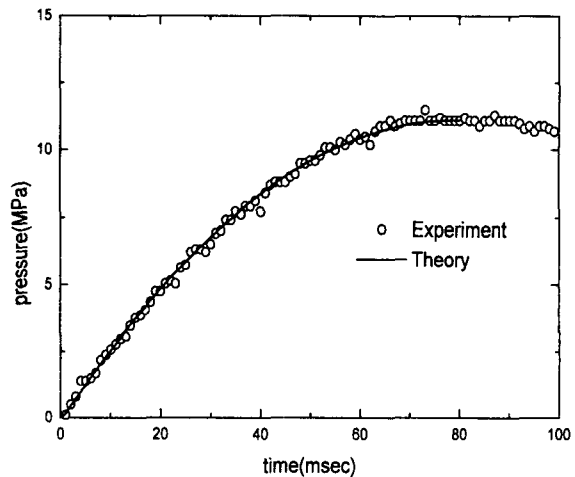


Fig. 12 CBT result and theoretical prediction for fifteen-year-old igniter pellet (prediction variables: $t_0=0.001$ sec, $t_b=0.078$ sec, $\dot{m}_{gm}=207.25$ g/sec, $T=1789$ K)

Table 2. Major CBT variables (calculated from the linear fit of the theoretical prediction)

Shelf Year	Maximum Pressure (MPa)	Max. Pressure Time (msec)	Rising Time (msec)*	Increasing Rate (kPa/ms)**	Burning Rate (cm/sec)
15	11.53	78.7	29	234	3.56
1/2	12.18	86.7	31	232	3.23

* the time to reach 60% value of the maximum pressure

** 60% value of the maximum pressure/rising time

른 시료에 대하여 이론 값 p-t 곡선을 구한 후 특성 값을 평균하여 표 2에서 비교하였다.

표 2에 나타낸 바와 같이 15년 경과된 점화제의 경우 연소 속도가 다소 증가하였다. 연소 속도의 증가는 점화제의 화학적 성분 변화가 없을 경우 연소 면적의 증가가 원인이라고 볼 수 있다. 점화제의 연소 면적은 점화 펠렛에 균열이 생기거나 분말이 형성될 때 증가되는데, 본 점화제의 경우 시험 전에 확인한 바로는 외관상으로 어떤 균열이나 분말도 발견되지 않았다. 그러므로 연소 면적의 증가는 다른 원인에 의하여 연소 초기에 2차적으로 생긴 것으로 판단된다.

위의 분쇄 강도 분석 결과에 의하면 점화 펠렛의 강도가 제작 초기보다 다소 증가한 것으로 나타났다. 결합제의 경화에 의해 강도가 증가된 점화제는 외부 충격이나 진동에 의해서 균열이 발생할 가능성이 높다. 그러므로 강도가 증가된 노화 시료의 경우 초기 연소 충격에 의하여 펠렛에 균열이 생기고 따라서 연소 면적이 증가하였다고 추론할 수 있다.

밀폐 용기 시험의 p-t 곡선에서 압력 값을 시간에 대하여 적분한 값 P_t 는 연소 가스의 온도와 양에 비례하는데, 동일한 양의 점화제를 연소시켰을 경우 연소 가스의 온도가 일정하다면 연소 속도에 무관하게 P_t 값은 같아야 한다. 그러나 그림 13에서 볼 수 있듯이 15년 경과된 점화제의 P_t 값과 1/2년 경과된 점화제의 P_t 값은 차이를 나타내는데, 계산 결과 각각 600 kPa-sec와 692 kPa-sec이다. 여러 가지 시험 오차를 고려하더라도 위 경우와 같은 P_t 값의 차이는 설명할 수 없다.

B/ KNO_3 의 경우 CEC의 결과에 의하면 표 3과

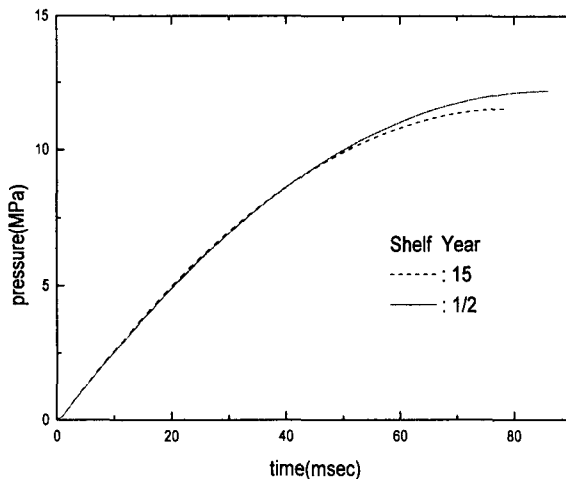


Fig. 13 Comparison of the theoretical predictions (each line is the average value for three samples)

같이 시료 무게의 약 81 %만이 가스 상으로 되고 나머지는 액체 상이나 고체 상으로 남는다. 밀폐 용기의 압력은 연소 생성물 중 기체 상에 의해 형성되는데 이론적으로 시료의 화학적 조성에 변화가 없는 한 일정 압력에서 연소되었을 경우 연소 가스의 조성 및 양은 동일하다. 본 시료는 수분 함량 분석 결과, 보관 및 밀봉 상태가 양호하였고, DSC 분석 결과 화학적 조성에는 큰 변화가 없는 것으로 나타나 연소되었을 경우 동일한 양의 연소 가스를 발생시킨다고 볼 수 있다.

그러므로 노화 기간에 비례하여 감소하는 P_t 값은 연소 가스의 온도가 노화된 점화제의 경우 상대적으로 낮기 때문이라고 볼 수 있다. 위의 발열량 측정 결과를 보면 노화된 시료일수록 발열량이 적어지므로, 이 경우 연소 가스의 온도는 낮고 P_t

Table 10. The molecular weight, the mole fraction, and the weight of the combustion products of B/KNO₃ at 3.4 MPa

Products	Molecular Weight (g/mol)	Mole Fraction	Weight (g)
BO	26.811	0.01857	0.50
B ₂ O ₂	53.622	0.04795	2.57
B ₂ O ₃	69.622	0.01242	0.86
CO	28	0.13228	3.70
HBO	27.811	0.04220	1.17
H ₂	2	0.04269	0.08
K	39.102	0.01787	0.70
KBO ₂	81.913	0.24777	20.30
N ₂	28	0.02857	0.80
B (Liquid)	10.811	0.19429	2.10
BN (Solid)	24.817	0.20854	5.18
Sum		0.99315	37.96

값도 비례하여 작아지게 된다.

노화 시간의 경과에 따른 연소 속도의 증가 (총 연소 시간의 감소) 또는 P_i의 감소는 16년 경과된 시료의 CBT 결과를 보면 더욱 뚜렷해진다. 그림 14에서는 연도별 시험 데이터의 평균값 p-t 곡선을 비교하였다. 16년 경과된 점화제의 총 연소 시간은 15년 경과된 점화제의 총 연소 시간보다 더욱 짧아졌고 P_i 값도 감소하였다.

비활성 모타 시험에 대한 이론 식인 식(15), (16)에는 점화 지연에 관한 항이 포함되어 있지 않아 임의로 15 msec를 설정하여 그림 15에 나타내었다. 이때 t₀는 0.1 msec이고 t_b는 100 msec이다. 이론 값과 실험 값과의 비교 결과는 만족할 만 하였다. 비활성 모타는 CBT와 달리 연소실의 라이너에 의해 열 손실이 차단됨으로 이론 식의 연소 가스 온도는 CEC의 계산 값을 사용하였다.

그림 16에는 이론 값과 노화 기간이 서로 다른

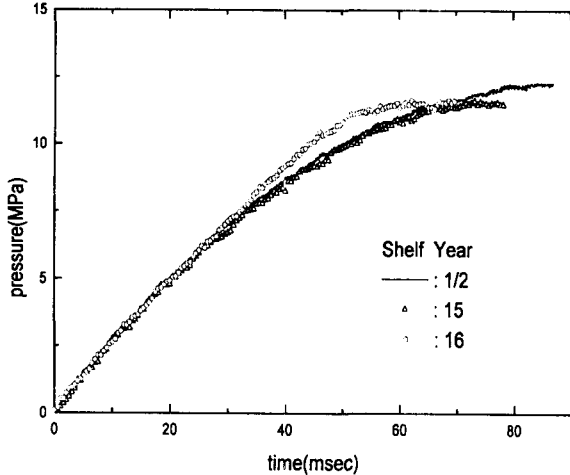


Fig. 14 Comparison of average value curves

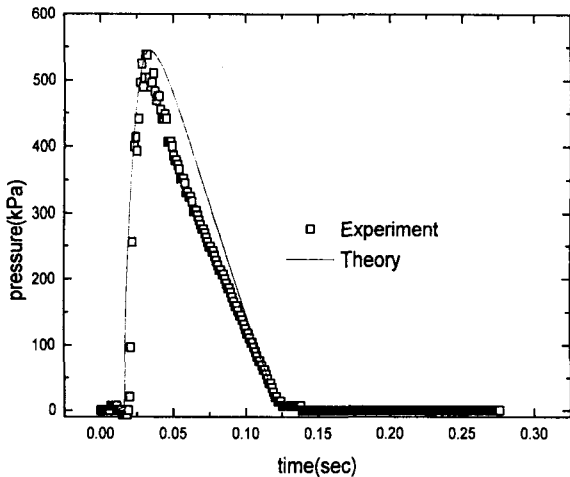


Fig. 15 Inert motor test result for fifteen-year-old igniter(1982) and theoretical prediction (solid line)

경우의 시험 데이터를 비교하였다. 최고 압력 값은 410 kPa와 550 kPa 사이의 값을 나타내고 있는데 노화 정도에 따른 어떠한 상관 관계는 발견되지 않았다. 총 연소 시간은 노화 기간에 비례하여 조금씩 길게 측정되었는데, 이 결과는 동일 생산 시료에 대한 연소 시간의 시험 오차 범위를 벗어나지 않으므로 노화에 따른 변화로 단정할 수 없다.

비활성 모타 시험의 경우 CBT 결과와 같이 노

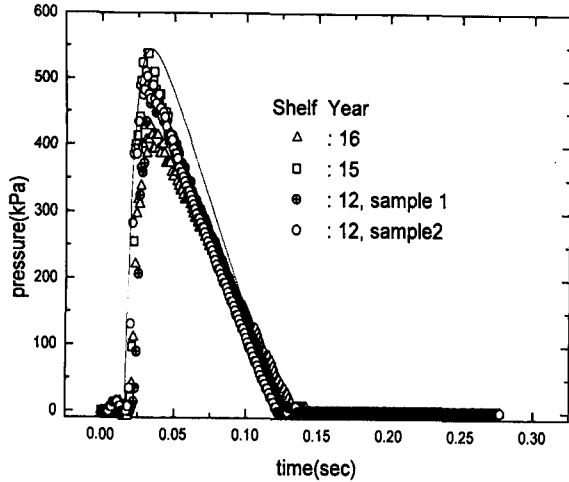


Fig. 16 Inert motor test result for igniters which are aged for different periods and theoretical prediction (solid line)

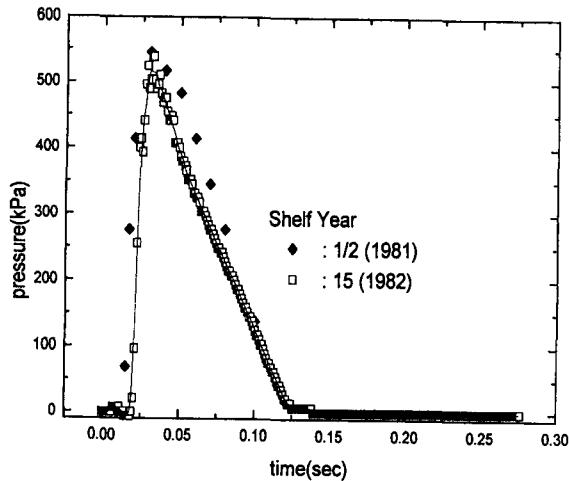


Fig. 17 Comparison of the inert motor test result for igniters which are aged for different periods. The solid line is the guide to the eyes.

화 기간이 길어질수록 P_t 값이 감소하는 경향은 나타나지 않았지만, 12년 이상 경과된 점화기의 P_t 값은 노화되지 않은 점화기의 시험에서 얻은 값⁴⁾ 보다 감소된 것을 그림 16, 17을 통하여 확인할 수 있다.

5. 결 론

점화제는 고온의 화염을 발생시키면서 압력을 형성하여 추진제에 열을 공급함으로써 추진 기관을 점화시킨다. 점화제의 양이 적어지거나 점화기의 노화에 의하여 추진제에 공급하는 열량이 충분하지 못할 경우 점화 지연이 일어날 수 있고 점화에 실패할 수도 있다. 본 연구의 목적은 노화된 점화기의 성능을 분석하여 사용 여부를 판단하고 시간 경과에 따른 성능 변화의 경향을 분석하여 점화기의 수명을 판단하는데 있다. 그러나, 16년이 경과된 점화기의 성능도 신규로 제작하여 시험한 결과와 크게 차이 나지 않아 정확한 수명은 알 수 없었다.

12년 이상 경과된 점화제를 이용하여 물성 시험을 한 결과 몇몇 시험에서 노화 특성을 나타내었는데, 노화 기간에 비례하여 분쇄 강도는 증가하였고 발열량은 감소하였으며 그 외의 수분 함량, 외형 치수, 열 변환 특성 등은 제작 당시의 값들과 유사하였다. 노화된 시료와 신규 제작된 시료의 CBT 결과를 비교함으로써 점화제는 15년 노화되었을 경우 연소 속도가 약 10% 빨라지고 P_t 가 약 15% 감소함을 알아내었고, 비활성 모타 시험에서도 유사한 결과를 얻을 수 있었다. CEC의 이론적 계산과 DSC 결과를 통하여 P_t 의 감소는 연소 가스 발생 양의 감소 때문이 아니라 발열량의 감소에 기인함을 추론하였다.

Reference

1. F. N. Kelley, "Solid Propellant Mechanical Properties Testing, Failure Criteria, and Aging", Advances in Chemistry Series 88, 1969, pp.231-240
2. W. E. Robertson, "Igniter Material Consideration and Application", AIAA Paper 72-1195, Nov. -Dec. 1972
3. Donald H. Barrett, "NASA Space Vehicle Design Criteria (Chemical Propulsion) Solid Rocket Motor Igniters", NASA SP-8051,

- 1971
4. 김광수, 최용규, 윤영대, "구룡포 기술보고서(제 10권 추진기관)", ADD보고서 MRL TR 81-10, 1981, pp.68~86
 5. S. Gordon and B. J. McBride, "Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonations", NASA SP-273, 1971
 6. George P. Sutton, "Rocket Propulsion Elements", 6th Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1992, pp.43~62