

技術論文

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2011.39.12.1166>

전기-기계식 점화안전장치 설계 및 출력 특성 해석

장승교*, 이효남*, 오종윤*, 오석진*

Design and Output Characteristic Analysis of Electro-Mechanical Ignition Safety Device

Seung-gyo Jang*, Hyo-nam Lee*, Jong-yun Oh* and Seok-jin Oh*

ABSTRACT

Electro-Mechanical Ignition Safety Device(EMISD) for solid rocket motor is designed and manufactured. The EMISD utilizes a true rotary solenoid for arming mechanism and an electric squib(initiator) for generating ignition energy. In order to prove the ignition capability of the EMISD, 10-cc Closed Bomb Test(CBT) is performed, which measures the pressure built by high temperature and high pressure gas generated by operating EMISD. The pressure built in the free volume of 10-cc closed bomb and the opening time of the ignition gas outlet are calculated using one dimensional gas dynamic model which is composed of the ideal gas equation and mass-energy conservation equation. Comparing the test result with model prediction, it is realized that the pressure built in the free volume of closed bomb due to the firing of EMISD, has the efficiency ratio of about 34%.

초 록

고체 로켓 추진기관에 적용 가능한 전기-기계식 점화안전장치를 설계하고 제작하였다. 본 전기-기계식 점화안전장치는 로터리 솔레노이드를 이용하여 장전되고 내장된 전기식 착화기를 발화하여 점화 에너지를 발생시킨다. 점화안전장치의 점화 성능을 검증하기 위한 방법으로 10-cc 밀폐용기 시험(Closed Bomb Test)을 실시하였고 점화안전장치 작동시 발생하는 고온, 고압의 가스로 인하여 밀폐용기 내부에 형성되는 압력을 계측하였다. 10-cc 밀폐용기 내부에 형성되는 압력과 점화가스 유로가 열리는 시간 등을 이상기체 방정식과 질량 및 에너지 보존 법칙을 적용한 1차원 가스 동력학 모델을 통하여 계산하였다. 모델링 예측과 CBT 시험 데이터를 비교한 결과 점화안전장치에서 발생하는 가스에 의해 밀폐용기에 형성되는 압력은 약 34%의 효율을 갖는 것으로 나타났다.

Key Words : Electro-Mechanical Ignition Safety Device(전기-기계식 점화안전장치), Closed Bomb Test(밀폐용기 시험), Solid Rocket Motor(고체 로켓 추진기관)

1. 서 론

† 2011년 9월 23일 접수 ~ 2011년 11월 16일 심사완료

* 정회원, 국방과학연구소 1본부 6부

교신저자, E-mail : jsg4580@add.re.kr,

대전시 유성구 유성우체국 사서함 35-16

고체 로켓 추진기관은 액체 로켓 추진기관에 비하여 저장성이 뛰어나고 발사를 위한 준비시간이 짧기 때문에 전술 유도무기의 추진력을 제공하는 로켓 모터로 많이 사용된다. 이러한 유도무

기용 고체 로켓 추진기관은 그 목적상 유사시 빠른 시간에 점화되어 추진력을 발생시켜야 하므로 로켓 모터에 장착 되어있는 점화장치는 점화명령이 인가되면 최대한 짧은 시간에 추진기관을 점화시킬 수 있어야한다.

고체 추진체를 사용하는 로켓 모터에 점화장치가 내장되어 있고 점화장치에 적정량의 전기에너지가 인가되면 즉시 점화되어 추력을 발생시킬 수 있는 장점은 때로는 유도무기가 운용자의 의지와 관계없는 우발적 발사로 큰 재앙을 초래할 수 있다는 개연성을 내포하기도 한다. 즉, 전기에너지를 이용하여 동작하는 점화장치는 유도무기가 운용되는 전장 환경에서 발생하는 전자기파 간섭이나 유도탄 전원에 존재할 수 있는 표류전압 또는 정전기 등에 의해 우발적으로 동작할 수 있는 위험성을 갖게 된다.

이러한 위험성을 방지하면서 점화장치의 동작을 정밀하게 제어하기 위한 장치가 필요한데 이를 일반적으로 점화안전장치(Ignition Safety Device)라고 부른다[1, 2]. 점화안전장치는 점화기와 함께 점화장치로 분류된다. 고체 로켓 추진기관에 사용하는 점화기는 적절한 점화에너지를 공급하기 위하여 압력 용기 내에 소량의 화약을 작은 알약(pellet)이나 과립(granule)형태로 만들어 담아 놓기도 하고, 그 규모가 큰 경우에는 화약과 함께 추진체를 사용하기도 한다[3]. 반면에 점화안전장치는 점화기를 연소시키기 위하여 다소 민감한 화약을 담고 있는 착화기를 포함한다[4].

점화안전장치에 장착된 착화기에서 발생되는 열에너지의 손실이 클 경우 한계치에 도달하면 연결된 점화기가 정상적으로 연소되지 못하는 경우도 발생할 수도 있다. 따라서 점화안전장치를 설계할 때 착화기에 사용되는 화약량과 점화가스 유로의 형상 등을 고려하여 손실에 대한 보상 설계 방안을 강구하여야 한다.

본 논문에서는 로터리 솔레노이드를 이용하여 장전되는 일반적인 전기-기계식 점화안전장치의 설계 내용을 간략하게 기술하고, 점화안전장치를 통하여 발생하는 착화기 발화에너지를 밀폐 용기 시험(Closed Bomb Test)에서 측정되는 압력을 통하여 간접적으로 측정하고 그 결과를 1차원 가스 동력학 모델을 통하여 분석해 보았다.

II. 전기-기계식 점화안전장치 설계

2.1 장전 메커니즘 설계

본 연구에 사용된 점화안전장치는 로터리 솔

레노이드를 이용하여 장전되는 전기-기계식 점화 안전장치이다. 로터리 솔레노이드는 전원을 제거 할 경우 자동적으로 다시 본래의 원위치로 역회전 할 수 있도록 회전축에 복귀 스프링을 설치하였다. 복귀 스프링은 Fig. 1과 같이 솔레노이드 축 상단에 조립된다[5].

솔레노이드 회전축 하단에는 축중앙에 클러치가 나사 체결되어있고 클러치는 다시 3개의 스위치 접점들이 고정된 판을 솔레노이드 축에 고정하여 축과 함께 회전할 수 있도록 조립되어 있다. 이와 같이 설계함으로써 솔레노이드 축 회전시 클러치와 스위치 접점 고정판이 함께 45도 회전하게 된다.

솔레노이드 하단 중앙에 위치한 클러치는 4개소의 돌출부위와 4개소의 함몰부위가 교차하도록 설계되어 있어, 솔레노이드 축이 45도 회전할 경우 돌출부가 위치했던 곳은 함몰부로 바뀌고 함몰부가 위치했던 곳은 돌출부가 위치하게 된다.

솔레노이드 축과 함께 회전하는 스위치 접점 고정판에는 3개의 스위치 접점이 90도 간격으로 고정되어 있고 각 접점은 각각 4개소의 contact point를 가지고 있다. 이 접점들은 주로 점화안전장치에 조립된 착화기의 전기적 도통을 제어하고 솔레노이드의 회전각 위치를 모니터링하는 용도로 사용된다.

점화안전장치 내에 조립되었을 때 접점과 접점이 접촉하고 있는 PCB(Printed Circuit Board) 도체 패턴 사이의 상대위치는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서는 이해를 돕기 위하여 접점 고정판과 클러치 등 기타 부품들은 표시하지 않았다.

솔레노이드 축이 45도 회전하여 장전되었을 때 스위치 접점들과 PCB 도체 패턴 사이의 상대위치는 Fig. 3과 같다. 이와 같이 제어함으로써

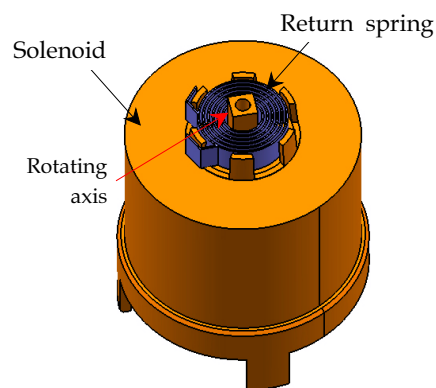


Fig. 1. Solenoid assembly with return spring(Top view)

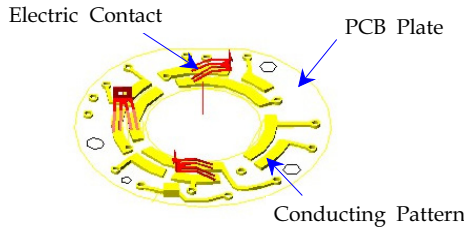


Fig. 2. Switch contacts configuration (safe status)

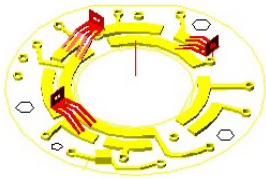


Fig. 3. Switch contacts configuration (arm status)

작은 동심원 상에 있는 도체 패턴과 큰 동심원 상에 있는 도체 패턴 사이에 스위칭 조건을 만들 수 있게 된다.

2.2 착화기 설계

점화안전장치에 사용되는 착화기는 전원이 인가되었을 때 열에너지를 발생시키는 발열선(hot bridge wire)과 그 위에 접촉되어 있는 기폭화약이 주요 구성품이다. 발열선의 양쪽 끝은 착화기 외부에서 전원을 공급할 수 있는 전원 단자(contact pin)에 용접되어 있고 기폭 화약은 분말 형태로 만든 후에 높은 압력으로 발열선 위에 압착하여 고정시킨다. 기폭화약과 발열선은 일반적으로 단열성이 좋은 BN(Boron Nitride) 구조물(spacer) 속에 설치한다.

착화기 설계시 가장 중요한 것은 발열선과 기폭화약에 관한 열전이(thermal transient) 특성이다. 즉, 착화기를 설계함에 있어서 발열선에서 발생하는 열이 단위 시간에 얼마만큼 기폭화약에 전달되어 자연발화 온도까지 올라가도록 할 것인가를 결정해야 한다. 본 점화안전장치에 적용되는 착화기는 All-Fire Level이 3A 이상이 되도록 설계하였다. 이와 같은 조건을 만족하는 착화기 열전이 특성을 설계하기 위하여 일반적으로 Fitted Wire Model이 많이 사용된다[6, 7].

2.3 점화가스 유로 설계

점화안전장치 내부에 장착되는 착화기가 발화

될 때 발생하는 고온, 고압의 가스는 점화가스 유로를 통하여 점화기로 전달된다. 점화안전장치의 솔레노이드는 이 유로를 제어하는 용도로 설계되어야 한다. 점화안전장치 설계 개념이 진화됨에 따라 도입된 방식은 점화유로를 간접적으로 제어하는 방식이다. 이 방식은 착화기가 동작할 때 발생하는 고압의 가스를 이용하여 유로를 자발적으로 열고 분출될 수 있도록 관련 구조물을 제어하는 방식이다.

점화유로와 관련된 구조물의 설계 형상은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 착화기(initiator)는 연결관(tube)과 나사 체결되어 있고 또 클러치(clutch-2)는 연결관에 용접되어 있다. 따라서 착화기와 연결관과 클러치-2는 일체를 이루게 된다. 클러치-2는 Fig. 4에서 알 수 있는 바와 같이 한 쪽 끝에 4개의 돌기가 90도 간격으로 배치되어 있다. 클러치-1은 앞에서 언급한 솔레노이드 축에 고정되어 있고 솔레노이드에 전원이 인가되면 45도 회전하게 된다. 연결관의 한 쪽 끝에는 두 개의 크고 작은 오링이 체결되어 있는 막음편(closure)이 끼워져 있다. 막음편의 한쪽 끝은 착화기 쪽을 향하고 있고 다른 쪽 끝은 점화안전장치 하우징에 고정된다.

이와 같은 상태에서 착화기가 발화되어 고온, 고압의 가스가 발생되면 착화기 끝단과 막음편 사이의 공간에 순간적으로 높은 압력이 형성되고 이 압력은 막음편과 착화기 사이에 서로 밀어내려는 힘을 발생시킨다. 막음편을 점화안전장치 구조물에 고정시켜 움직이지 못하도록 하면 이 때 발생하는 힘에 의해 연결관을 포함한 연결관 결합체는 클러치-1 방향으로 움직일 수 있는 구동력을 얻게 된다.

장전 상태에서는 클러치-1이 축을 중심으로 45도 회전하여 클러치-2의 돌기 부분이 클러치-1의 함몰부분과 정렬이 된다. 이 때 착화기가 동작하여 연결관 내부에 압력이 형성되면 클러치-2를 포함한 연결관 결합체는 클러치-1 방향으로

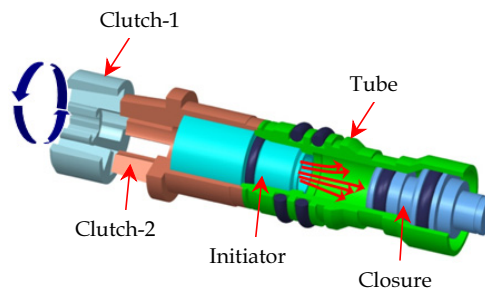


Fig. 4. Safe mode configuration

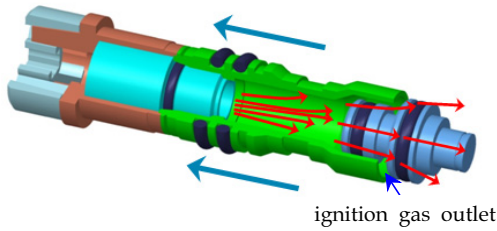


Fig. 5. Arm&Fire mode configuration



Fig. 6. Electro-Mechanical Ignition Safety Device

이동하여 Fig. 5와 같이 점화가스 유로(ignition gas outlet)를 만들어 줄 수 있게 된다.

솔레노이드 조립체 및 점화가스 유로 설계를 종합하여 최종적으로 설계되어 제작된 점화안전장치의 형상은 Fig. 6과 같다.

III. 출력 성능 시험 및 분석

3.1 출력 성능 시험 및 결과

점화안전장치는 정상적인 조건에서 장전 신호와 점화 신호가 순차적으로 공급되면 점화기를 착화시킬 수 있는 에너지를 제공하여야 한다. 점화안전장치 또는 착화기의 점화 성능을 간접적으로 검증하는 방법 중에 일반적으로 많이 사용되는 방법이 밀폐용기 시험(Closed Bomb Test)이다[4]. 이 시험을 통하여 착화기나 점화안전장치 동작시 분출되는 고온, 고압의 가스가 밀폐용기에서 형성하는 압력을 계측함으로써 점화기를 착화시킬 수 있는 적정 에너지가 발생하는가를 검증할 수 있게 된다. 경험에 의하면 일반적으로 점화기를 안정적으로 착화시키기 위해서는 10-cc의 자유체적을 갖는 밀폐용기 시험시 300psi 이상의 최고 압력이 발생하여야 한다. 따라서 새로운 착화기나 점화안전장치를 개발하여 그 성능을 보증하기 위한 방법으로 주로 10-cc 밀폐용기 시험을 이용한다. 참고로 본 점화안전장치에 적용된 착화기를 점화안전장치에 내장하지 않고 개별

적으로 10-cc 밀폐용기 시험에 적용하면 약 1000psi 내외의 압력을 형성하여 직접 점화기에 적용하는 데는 아무런 문제가 없다. 그러나 이 착화기를 점화안전장치 내부에 장착하여 발화시키고 그 가스가 점화 가스 유로를 통하여 10-cc 용기로 방출될 때는 유로에 의한 열손실과 압력 손실이 발생하게 되므로 반드시 밀폐용기 시험을 통하여 그 적합성을 사전에 검증해 볼 필요가 있다.

점화안전장치의 출력 성능을 검증해 보기 위하여 Fig. 7과 같이 최종적으로 설계된 점화안전장치를 10-cc 자유체적을 갖는 밀폐용기에 장착하여 동작 시험을 수행하였다. 안전장치를 동작시키기 위하여 커넥터를 통하여 28VDC의 장전 전원을 공급한 후에 곧바로 10A의 점화전류를 공급하였다.

밀폐용기 내부의 압력은 PCB사의 압력센서(ICP Dynamic Pressure Sensor)인 101A02를 PCB사에서 제작한 signal conditioner인 Model 484B series에 연결하여 계측하였다. 계측된 압력은 Agilent사의 Digital Oscilloscope인 Infinium 54831B을 이용하여 얻어지고 저장되는데 이 때 sampling rate는 250kSa/s로 하였고 계측 시간은 50ms로 한정하였다. 실제 소모되는 점화 전류 공급 시간은 점화안전장치내의 착화기 발열선이 가열되어 착화기가 기폭되는 시간까지인데 대부분의 경우 1~2ms 내외이다. 착화기가 기폭되면 점화회로가 open circuit이 되어 점화 전류는 더 이상 흐르지 않는다. 그리고 착화기가 기폭되면 일순간에 점화안전장치 출구 쪽으로 고온 고압의 가스가 유출되어 10-cc 체적의 밀폐용기 내부부를 가득 채우게 된다. 시험은 상온과 고온(+65℃) 및 저온(-40℃)으로 나누어 실시하였고 시험 온도에 따른 밀폐용기 내부의 압력 값을 계측하고 비교하였다. 저온과 고온시험의 경우 10-cc 밀폐

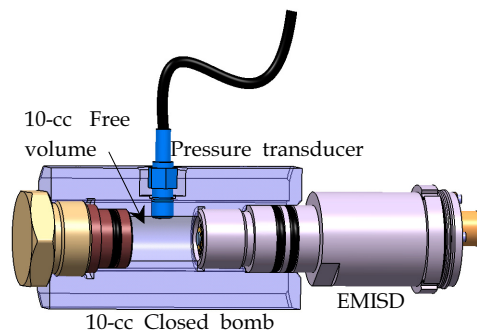


Fig. 7. Cross-section view of closed bomb in 10-cc Closed bomb test setup

용기 내부에 형성된 압력은 Fig. 8과 같다.

밀폐용기 내부의 압력은 점화 전원이 공급된 후 약 2~3ms 후에 일 순간적으로 감소했다가 급격하게 증가하여 약 500psi 정도의 최고 압력 값을 형성 한 후에 서서히 감소하는 양상을 나타내었다. 고온 시험에서 계측된 압력 값이 감소되는 기울기가 저온 시험의 경우보다 다소 완만한 것으로 계측되었다. 밀폐용기 내부의 압력이 급격하게 증가하기 전에 일순간 감소하는 이유는 밀폐용기 내부에 실제로 진공 상태가 만들어 지는 것이 아니고 점화안전장치 내부의 열결관 결합체가 클러치-2 쪽으로 이동한 후 멈출 때 발생하는 진동이 밀폐용기를 통하여 압력센서에 전달되었기 때문이다.

그리고 압력 값이 2ms 내지 3ms 지연되어서 발생하는 이유는 점화전원에 의해 가열되는 착화기의 발열선이 기폭 화약의 자동점화 온도까지 도달하는데 일정한 시간이 필요하기 때문이다. 일단 발열선에 근접한 기폭화약이 자동 점화 온도에 도달하면 인접한 기폭 화약과 주장약이 일순간에 발화되어 착화기로부터 고온, 고압의 가스를 형성하면서 분출되고 이 가스는 점화안전장치의 열결관을 이동시키면서 점화 가스 유로를 통하여 점화안전장치 외부로 분출되고 발화 후 1ms 이내에 연결된 10-cc의 밀폐용기를 가득 채우며 압력을 형성하게 된다. 밀폐용기를 채운 고압의 가스는 용기 내면과 용기와 결합된 점화안전장치 하우징 단면을 통한 열손실로 인하여 서서히 온도가 내려가게 되고 비례적으로 압력이 감소하게 된다. 저온 시험의 경우 저온에 4시간 이상 보관한 점화안전장치를 용기에 결합함으로써 용기의 온도가 다소 감소하게 되고 이로 인하여 용기 내부로의 열손실이 상대적으로 커지게 되므로 용기 내부의 압력은 고온 시험보다 조금 더 큰 기울기를 가지고 감소된다고 사료된다.

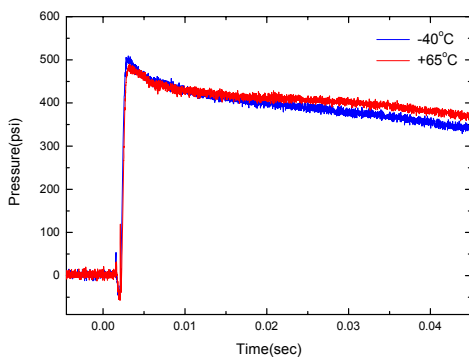


Fig. 8. EMISD CBT results

3.2 점화안전장치 출력 해석

점화안전장치의 성능을 검증하기 위한 밀폐용기 시험시 10-cc 용기 내에서 계측되는 압력을 1차원 가스 동역학 모델을 이용하여 분석하였다. 모델을 단순화하기 위하여 Fig. 9와 같이 착화기가 발화될 때 점화안전장치 내에서 압력이 형성되는 공간(space 1)과 10-cc의 공간(space 2)이 노즐을 통하여 연결되어 있고 노즐의 크기는 점화안전장치의 점화가스 유로의 크기로 설정하였다.

또한 실제 상황에서는 발열선에 인접한 기폭 화약인 Zr/KClO₄(Zirconium Potassium Perchlorate, ZPP)가 먼저 발화되고 이어서 주장약인 B/KNO₃가 발화되며 기폭 화약과 주장약은 착화기 공간 내에서 모두 연소되지 않고 일부는 연소되지 않은 상태로 착화기 밖으로 분출되어 점화안전장치의 열결관 내에서 또는 10-cc 밀폐 공간 내에서 연소되지만 모델 계산을 단순화하기 위하여 다음과 같은 가정을 사용하였다. 가정 1) 기폭화약과 주장약은 동시에 연소된다. 가정 2) 화약연소시 응축상(condensed phase)은 생기지 않는다. 가정 3) ZPP와 B/KNO₃ 각각의 연소가스는 이상기체이고 이상적으로 혼합된다. 따라서 별도로 언급되지 않으면 가스란 이들이 혼합된 상태를 의미한다.

공간 1에서 질량 및 에너지 보존식과 기체 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d(\rho_1 V_1)}{dt} = \dot{m}_{gen} - \dot{m}_{out} \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho_1 V_1 C_v T_1)}{dt} &= (\dot{m}_{gen} C_p T_f)_{ZPP} \\ &+ (\dot{m}_{gen} C_p T_f)_{BKNO_3} - \dot{m}_{out} C_p T_1 - \dot{Q}_{loss1} \end{aligned} \tag{2}$$

$$P_1 = \rho_1 \left(\frac{\tilde{R}}{M_w} \right) T_1 \tag{3}$$

여기에서 ρ_1 , P_1 , T_1 , V_1 은 각각 공간 1에서 가스의 밀도, 압력, 온도와 체적이고 \dot{m}_{gen} 과 \dot{m}_{out} 은 각각 공간 1에서 가스 질량 생성율과 방출율이다. 또한 C_v 와 C_p 는 각각 가스의 일정 부피와 일정 압력에서의 비열이며 M_w 와 \tilde{R} 그리고 \dot{Q}_{loss1} 은

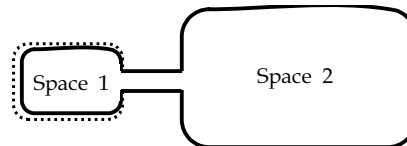


Fig. 9. Inner volume related to CBT

각각 분자량, 가스 상수, 그리고 열손실율을 의미한다. 또한 공간 2에서도 식 (1) ~ (3)과 유사하게 질량 및 에너지 보존식과 기체 방정식을 나타낼 수 있다.

식 (1)에서 질량 생성률 \dot{m}_{gen} 은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\dot{m}_{gen} = (\rho_p A_b r_b)_{ZPP} + (\rho_p A_b r_b)_{BKNO3} \quad (4)$$

여기에서 ρ_p , A_b 그리고 r_b 는 각각 화약의 밀도, 연소 면적 그리고 연소속도이다. 연소면적 A_b 는 화약의 연소 길이(l)의 함수로 화약이 착화기에 충전된 형상에 따라 달라진다. 본 연구에서는 모델을 단순화하기 위하여 기폭화약과 주장약은 직경이 r 인 N 개의 작은 구형 알갱이들로 구성된 것으로 가정하였다.

공간 1에서의 빈공간은 시간에 따라 증가하는데 화약이 연소되면서 그것이 차지하고 있던 공간이 새롭게 생기게 되고, 연결관 내부에 형성된 압력에 의해 연결관과 막음핀 사이가 벌어지면서 추가로 공간이 늘어나게 된다. 늘어난 공간은 Fig. 9에 점선으로 표현하였다. 이 때 빈공간의 시간에 따른 증가분은 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기에서 A_{mip} 는 압력(P_1)이 막음핀 쪽에 가해지는 면적을 의미하고, v_{mip} 는 연결관 결합체의 이동 속도이다.

$$\frac{dV_1}{dt} = (A_b r_b)_{ZPP} + (A_b r_b)_{BKNO3} + A_{mip} v_{mip} \quad (5)$$

식 (1)에서 \dot{m}_{out} 은 점화안전장치 출구 즉, 점화 가스 유로가 오리피스 역할을 하여 분출되는 가스의 변화량을 의미한다. 점화가스 유로는 연결관을 고정하고 있는 전단핀이 끊어진 후에 연결관 결합체가 이동하면 열리는 것으로 설정하였다. 또한 \dot{m}_{out} 은 P_1 과 P_2 값의 함수로 나타나는데

P_2/P_1 의 비가 임계압력($P_{critical}$)인 $(2/(\gamma+1))^{1/\gamma}$ 보다 작을 경우에만 chocking 현상이 발생한다.

공간 1과 공간 2에서 형성되는 압력과 연결관 결합체의 운동을 기술하기 위하여 다음과 같은 상미분방정식을 만들었고 이를 4차 Runge-Kutta 시간적분법을 이용해서 계산하였다.

$$\frac{d\rho_1}{dt} = \frac{\dot{m}_{gen} - \dot{m}_{out} - \rho_1(dV_1/dt)}{V_1} \quad (6)$$

$$\frac{dP_1}{dt} = \left(\frac{1}{\rho_1 V_1 C_v} \right) [(\dot{m}_{gen} C_p T_f)_{ZPP} + (\dot{m}_{gen} C_p T_f)_{BKNO3} - T_1(\dot{m}_{gen} C_{v1})_{mixture} - T_1 \dot{m}_{out} (C_p - C_v)_{mixture} - \dot{Q}_{loss1}] \quad (7)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{\dot{m}_{out} T_1 (\gamma \tilde{R} / M_w)_{mixture} - \dot{Q}_{loss2}}{V_2} \quad (8)$$

계산을 통하여 구한 공간 1에서의 압력 P_1 , 공간 2에서의 압력 P_2 , 연결관 결합체의 이동거리 및 속도는 각각 Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 이 결과들은 점화안전장치 하우징 및 밀폐용기로의 열손실이 없다고 가정한 것이다. 실제의 경우 열손실은 응축상에서 연소가스로, 응축상과 연소가스로부터 주변 부품으로 열이 이동하면서 생기게 된다[8].

공간 1에서의 압력은 화약이 연소되면서 그 연소 가스가 공간 2쪽으로 분출되기 때문에 약 120 μ s만에 약 4000psi 이상 압력이 급격하게 증가하다가 감소하는 것으로 나타났다. 압력이 감소될 때 압력 값의 기울기가 일순간 급격하게 변하는 변곡점(Fig. 10의 화살표)이 발생하는데 이때 연결관 결합체의 이동이 멈추고 일정한 비율로 증가하던 공간 1의 자유체적이 더 이상 증가하지 않고 일정하게 유지되기 때문이다. 변이 곡선과 속도 그래프를 통해서 알 수 있는 바와 같

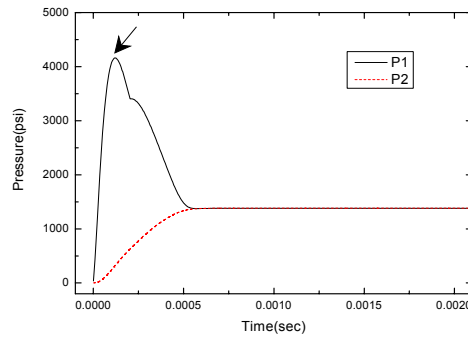


Fig. 10. Pressure vs. time curves in space 1 and space 2

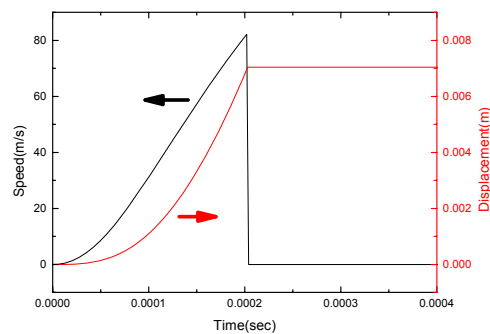


Fig. 11. Speed and displacement vs. time curve of tube

이 약 200 μ s의 시간에 연결관 결합체는 이동을 멈추었다.

공간 2에서의 압력은 공간 1에서 뽑어져 나오는 연소 가스로 채워지면서 증가하게 되고 일정 시간 후에는 공간 1에서 생성되는 가스가 없으므로 P1과 P2는 평형을 이루게 된다. 이 때 점화안전장치 하우징과 밀폐용기를 통하여 일정량의 열손실이 발생한다고 가정할 경우 P2 곡선은 Fig. 12와 같다.

Fig. 12와 실제 시험 데이터인 Fig. 8을 비교해보면 최고 압력 값이 큰 차이를 나타낼 수 있다. 이는 모델 계산에서 사용한 가정 때문인 것으로 판단된다. 즉, 사용된 화약이 연소할 때 생기는 응축상을 무시하고 모두 연소가스로 바뀐다고 가정했고 또한 모든 연소반응이 이상기체처럼 작용한다고 가정했기 때문이다. 실제로 착화기에서 나오는 많은 양의 화약은 동시에 연소되지 않고 발열선에 가까운 화약이 먼저 발화되고 일부는 착화기로부터 분출되고 나서 또는 점화안전장치 밖으로 분출된 후에 연소되기도 한다. 또한 본 점화안전장치와 같이 공간 1과 공간 2 사이에 노즐이 있을 경우 노즐에 의한 에너지 손실도 발생하게 된다. 그러므로 이상기체 방정식을 이용한 식으로 실제 현상을 정확하게 모사할 수는 없다. 그러나 여러 가지 가정에 의한 이론값과 실제 실험값을 비교해서 효율을 알아낼 수 있다면 그 결과를 토대로 유사한 장치를 설계할 때 많은 설계요소를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

시험 값과 근사한 값을 갖도록 하기 위하여 이론식에서 화약에 의한 가스 생성율을 34%로 조정하고 열손실을 $\dot{Q}_{loss1} = \dot{Q}_{loss2} = 200 \text{ J/kg} \cdot \text{s}$ 로 가정하여 결과를 비교하면 다음 Fig. 13과 같다. 이 경우에 노즐에서의 마찰 손실은 고려하지

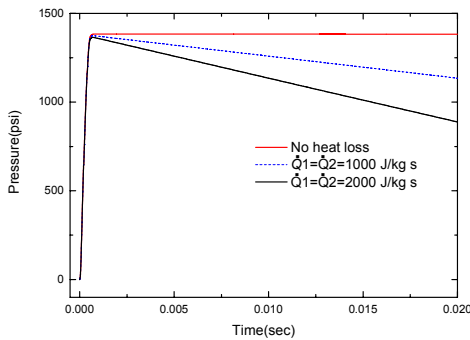


Fig. 12. Pressure(P2) vs. time curves with and without heat loss

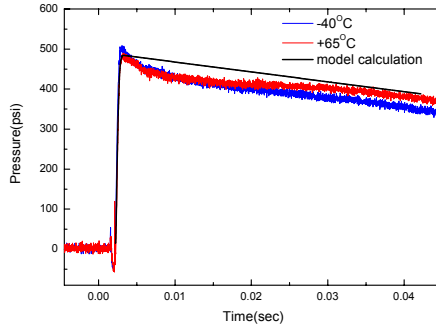


Fig. 13. Comparison between Bomb and model pressure vs. time

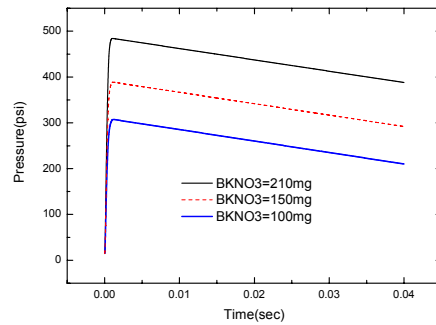


Fig. 14. Pressure vs. time estimations with different amounts of explosive in CBT

않았다.

위에서 구한 가스 생성율과 열손실율을 근거로 점화장치로서 사용하기 위한 조건, 즉 10-cc 밀폐용기 시험시 최대 압력이 300psi 이상이 되어야 하는 조건을 만족하기 위하여 점화안전장치 내에 장착된 착화기의 화약량을 예측해 볼 수 있다. Fig. 14에서 보는 바와 같이 ZPP는 70 mg이고 B/KNO₃는 100mg 이상 일 때 P2 압력의 최고값이 약 300psi를 초과하므로 점화장치로서 사용이 가능할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

로켓 모터에 관한 미 안전규정인 MIL-STD-1901A[9]에서는 안전상태에서 점화안전장치에 내장된 ZPP와 같은 화약은 점화기와 기구적 장벽에 의해 분리되도록 권장하고 있다. 본 전기-기계식 점화안전장치는 로터리 솔레노이드를 구동하여 장전시키고 전기식 착화기를 이용하여 점화시키는 장치로 위의 규정을 만족한다. 솔레노이드

는 내부에 코일과 자성체를 가지고 있어 전원이 인가될 때 45도 회전할 수 있도록 설계되었고 전원을 제거하면 다시 본래의 위치에 돌아올 수 있도록 스프링이 회전축에 연결되어 있다.

점화안전장치의 점화성능을 검증하기 위하여 CBT를 통하여 계측되는 예상압력을 이상기체 방정식과 질량 및 에너지 보존 법칙을 이용한 1차원 방정식을 이용하여 모델링하였다. 4차 Runge-Kutta 시간적분법을 이용하여 해를 구한 결과 착화기에서 발생하는 가스의 효율이 약 34%가 되는 것으로 나타났고, 열손실율은 약 200 J/kg·s로 계산되었다. 계산식을 근거로 했을 때 점화안전장치에 적용 가능한 착화기 주장약량의 최소 요구량은 약 100mg인 것으로 조사되었다.

이와 같은 간단한 모델은 착화기에 사용되는 화약량과 점화가스 유로의 형상 변화와 같은 설계 변수에 따라 밀폐용기에 형성되는 압력을 예측함으로써 점화안전장치 설계 변경시 많은 시험을 거치지 않고 설계 내용을 검증할 수 있는 도구로 활용할 수 있고, 설계된 점화안전장치의 작동 신뢰도를 예측하기 위한 기본 모델로도 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) "NASA Space Vehicle Design Criteria, Solid Rocket Motor Igniters", National Technical Information Service, Springfield, Virginia, NASA SP-8051, Mar. 1971, p. 51
- 2) Sipes, W. J., "Reliable Safe and Arm Devices", AIAA 34th Joint Propulsion Conference, AIAA98-3627, July 1988
- 4) 장승교, 정진석, 김인석, "고체 추진기관 점화안전장치 개발", 한국추진공학회 2005년 추계 학술대회, Nov. 2005
- 5) 장승교, "추진기관 점화안전장치", ADD Report, MADC-S416-05243, 2005
- 6) W. C. Prinse and M. W. Leeuw, "Analysis of the Functioning of Bridgewire Igniters based on the Fitted Wire Model", Propellants, Explosives, Pyrotechnics Vol. 13, Aug. 1988, pp. 120~125
- 7) 윤기은, 류병태, 최창선, "STS 304 발열선 착화기의 열전이 특성", 한국추진공학회지, 제 10 권 제 4호, Dec. 2006, pp. 19~25
- 8) K. A. Gonthier, and J. M. Powers, "Formulation, Predictions, and Sensitivity analysis of a Pyrotechnically Actuated Pin Puller Model", Journal of Propulsion and Power, Vol. 10, No. 4, 1994, pp. 501~507
- 9) U. S. Army, TACOM-ARDEC, "Munition Rocket and Missile Motor Ignition System Design, Safety Criteria for", MIL-STD-1901A, June, 2002