

점화안전장치용 격벽 착화모듈 설계 및 신뢰도 분석

장승교* · 차홍석*

Design and Reliability Analysis of the Through Bulkhead Initiation Module for Arm-Fire-Device(AFD)

Seunggyo Jang* · Hongseok Cha*

ABSTRACT

A Through Bulkhead Initiation Module(TBIM) has been designed which guarantees the seal property without using O-ring. The TBIM works as the shock wave generated by a donor charge transmits to the acceptor charge. The structural safety of TBIM housing has been calculated via modeling analysis, and the ignition performance has been proved by 10 cc closed bomb test. The reliability analysis has been made using Probit method on the base of performance test results. According to the reliability analysis the bulkhead thickness of TBIM which is the most important design parameter has been determined.

초 록

오링을 사용하지 않고 기밀을 유지할 수 있는 점화안전장치용 격벽 착화모듈을 설계하였다. 격벽 착화모듈은 도우너 화약에 의해 발생한 충격파가 격벽을 통해 억셉터 화약에 전달되었을 때 동작한다. 격벽 착화모듈의 구조적 안전성을 구조해석을 통해 확인하였고 점화 성능은 10cc 밀폐용기 시험을 통하여 검증하였다. 동작시험 결과를 토대로 통계적 처리방법인 Probit Method를 이용하여 신뢰도 분석을 하였다. 신뢰도 분석 결과를 통하여 격벽 착화모듈의 중요한 설계변수인 격벽두께를 결정하였다.

Key Words: Arm-Fire Device(점화안전장치), Through Bulkhead Initiation Module(격벽착화모듈), Probit Method, Reliability(신뢰도)

1. 서 론

점화안전장치(Arm-Fire Device)는 고체추진기관의 우발 점화를 방지하고 원하는 시점에 추진기관을 점화시키는 장치이다. 점화안전장치는 일

반적으로 동작 상태에 따라 안전모드와 장전모드로 구분할 수 있다. 안전모드에서는 정전기나 EMI와 같은 외부의 위협으로부터 추진기관이 작동하지 않도록 점화장치를 보호해 주고, 장전모드는 추진기관을 점화시키기 위한 모든 준비가 완료된 상태를 의미한다. 일반적으로 안전모드에서 장전모드로 전환시키기 위하여 로타리 솔레노이드를 사용하고 장전된 상태에서 착화기

* 국방과학연구소 1본부-6부-2그룹
연락처, E-mail: jsg4580@add.re.kr

또는 전기식 기폭관을 발화시켜 점화기에 점화 에너지를 공급한다[1].

기존의 점화방식은 점화안전장치에 착화기를 내장시키고 착화기에 전류를 공급하면 착화기에서 분출되는 고온 고압의 가스에 의하여 안전장치의 기구적 메커니즘이 작동하고 이어서 점화 안전장치 외부로 점화에너지가 분출된다[1].

이러한 점화안전장치는 작동 후 추진기관의 연소 압력에 노출되므로 내부적으로 기밀 구조를 채택하여야 한다. 그러므로 기밀 구조에 적합하도록 착화기에는 유리-금속 밀봉 기술이 적용되고 착화기의 외곽과 기구적 메커니즘에는 오링이 적용된다. 오링을 이용한 기밀 방식은 구조적으로 단순하여 많은 기밀 구조에 사용하고 있으나 내열특성과 노화특성을 고려해야하고 조립 공정관리에 세심한 주의를 요한다.

이러한 단점을 극복하기 위하여 새롭게 고안된 방식이 격벽 착화(Through Bulkhead Initiation)방식이다. 격벽 착화방식은 기존의 착화방식과 달리 금속 격벽을 이용하여 전달된 충격파가 화약결합체를 작동시켜 점화에너지를 발생하는 방식으로 격벽 구조물 자체가 기밀 구조를 유지하므로 오링이 불필요하다.

본 연구에서는 격벽 착화방식의 중요한 설계 변수인 격벽 두께를 결정하기 위한 구조 해석 및 화약결합체 작동 시험 결과와 그 결과를 토대로 적용 가능한 격벽 두께의 동작 신뢰도를 계산하였다.

2. 격벽 설계 및 구조해석 결과

2.1 격벽 및 화약결합체 설계

격벽을 중심으로 충격을 발생시키는 부분은 도우너(donor)라고 하고 충격을 흡수하여 기폭되는 부분을 억셉터(acceptor)라고 부른다. 도우너와 억셉터는 일반적으로 같은 양의 동일한 화약을 이용한다. 도우너를 작동시키기 위하여 전기식 기폭관(dettonator)을 설치하고 도우너에 의해 동작되는 화약결합체(explosive assembly)를 도우너 앞에 설치하여 착화에너지를 발생하도록

하였다. 또한 점화안전장치의 작동 신뢰도를 높이기 위하여 동일한 격벽 구조와 화약 결합체를 Fig. 1과 같이 병렬 배치하였다.

Figure 1에는 도우너를 작동시키는 전기식 기폭관은 표현하지 않았다. 일반적으로 도우너와 억셉터는 PETN이나 RDX를 사용하고 화약결합체에는 ZPP(Zirconium Potassium Perchlorate)나 B/KNO₃을 적정 비율로 충전하여 사용한다.

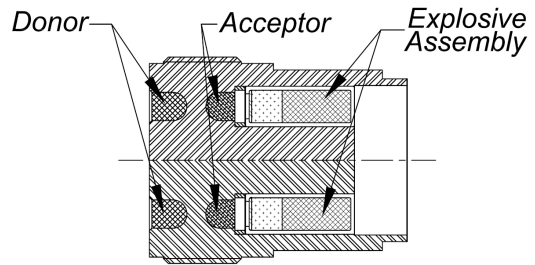


Fig. 1 Through Bulkhead Initiation Module

2.2 격벽 착화모듈의 구조해석

격벽 착화모듈의 장점은 앞에서 언급한 바와 같이 별도의 오링을 사용하지 않고 모듈 구조물 자체가 기밀 구조물로 사용된다는 것이다. 격벽 착화모듈이 정상적으로 동작하면 도우너와 억셉터 및 화약 결합체는 모두 기폭되어 사라지고 구조물만 남게 된다. 이 때 구조물은 점화기 및 추진기관의 연소압력에 노출되므로 구조물 특히, 가장 구조적으로 취약한 격벽부분의 구조적 안전성을 검증해 보아야 한다.

해석을 위하여 격벽이 노출되는 압력을 임의로 3,000psi로 가정하였고 격벽의 두께는 0.1mm에서 0.5mm로 변화할 경우 최대 응력과 변형량을 매개변수로 적용하였다. 모듈 구조물의 재질은 AISI 304L stainless steel을 사용하였고 정적 구조해석만을 수행하였다. Fig. 2는 격벽의 두께가 0.1mm일 경우에 발생하는 등가 압력분포와 최대 응력이 발생하는 부위의 상세 응력 분포를 나타냈다. 최대 응력은 격벽의 두께가 가장 얇은 부분에서 발생하며 그 값은 123.1MPa 정도이다. 이 값은 재료의 항복강도인 210MPa에 비하여 상당히 작으므로 재료는 탄성을 그대로 유지하

여 구조적으로 안전하다고 평가할 수 있다. 그러므로 격벽이 Fig. 1과 같은 형상일 경우 격벽의 최소 두께가 0.1mm 이상만 되면 구조물은 내압 기밀 구조물로서 안전함을 확인하였다.

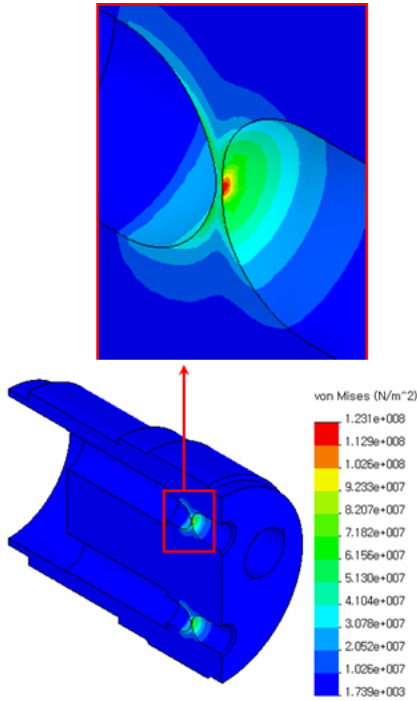


Fig. 2 Equivalent Stress Distribution

3. 격벽 착화 모듈의 성능시험 및 신뢰도 분석

3.1 개요

위의 구조해석 결과에 의하면 격벽의 최소 두께가 0.1mm 이상만 되면 구조적 측면에서는 사용가능한 것으로 해석되었다. 그러나 격벽의 두께가 얇을 경우 도우너 화약의 기폭압력에 의해 격벽이 파괴 될 수 있으므로 격벽은 사용되는 화약량에 비례하여 증가시켜야 한다.

3.2 격벽 착화 모듈 성능시험

임의의 화약량에 대하여 격벽의 적정 두께를 결정하기 위하여 일련의 작동시험을 실시하였다. 격벽 착화모듈을 10cc 체적을 갖는 밀폐용기에

조립하고 전기식 기폭관을 이용하여 도우너 화약을 기폭시키면 격벽을 통하여 전달된 충격파가 액셀러 화약을 기폭시키고 이어서 화약결합체가 기폭되어 밀폐용기에 압력을 형성하게 된다. 이 압력을 측정함으로써 격벽 착화모듈의 작동 성능을 확인하였다. Fig. 3에는 격벽 착화모듈이 정상적으로 동작하였을 때 측정된 압력을 나타내었다.

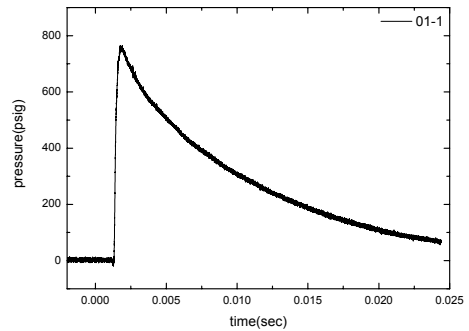


Fig. 3 10cc Closed Bomb Test Result

서로 다른 격벽 두께를 갖는 시료를 제작하여 성능시험을 한 결과 Table 1과 같이 두께가 두꺼워 질수록 예상대로 동작율이 낮아짐을 확인하였다.

Table 1. TBI Module Test Result

Bulkhead Thickness (x)(mm)	Test Number (n)	Pass	Fail	Pass Ratio
3.10	20	3	17	15.0%
2.90	20	9	11	45.0%
2.80	24	13	11	54.2%
2.70	48	41	7	85.4%
2.40	34	34	0	100.0%
Total	146			

3.3 격벽 착화모듈 신뢰도 분석

위의 시험 결과로부터 설계하고자 하는 두께를 갖는 격벽 착화모듈의 신뢰도는 시료의 수량이 적어 일반적인 통계 방법을 적용할 수 없다. 이러한 경우에 유용하게 적용할 수 있는 통계처

리 방법이 Bruceton이나 Probit 방법이다. 이 두 방법에서는 두 변수, 즉 평균값과 표준편차(σ)를 이용하여 시험 매개변수의 여러 값에 대하여 획득된 시험데이터의 분포 특성을 알 수 있다. Bruceton시험은 평균(50% 동작) 예측에 우수하고 표준편차에는 대략적인 예측이 가능하여 민감도(비점화/점화 한계 값) 분석에 특히 적합하며, 이에 반하여 Probit방법은 양호한 표준편차를 제시하나 평균 예측에서는 미흡한 편이다.

Table 1에 나타난 시험 결과를 Probit 방법에 적용하였다. 동작율은 NAVORD Report 2101[2]에 제시된 자료에 근거하여 경험적 Probits로 변환되고, Excel 프로그램 추세 분석의 선형회기에 의한 예측을 통하여 Provisional Probit의 직선의 식을 구하고 함수의 인자를 결정하였다.

또한, 가중 계수와 시험 수량을 곱한 nW, 동작율 및 Provisional Probit에 의거하여 Working Probit를 산출한다.

이렇게 구한 데이터를 이용하여 Calculated Probit line의 식을 아래와 같이 구하였다[3].

$$\therefore Y = 16.9 - 4.1x$$

최종적으로 계산된 여러 Probit 선도는 아래의 Fig. 4와 같이 표시된다.

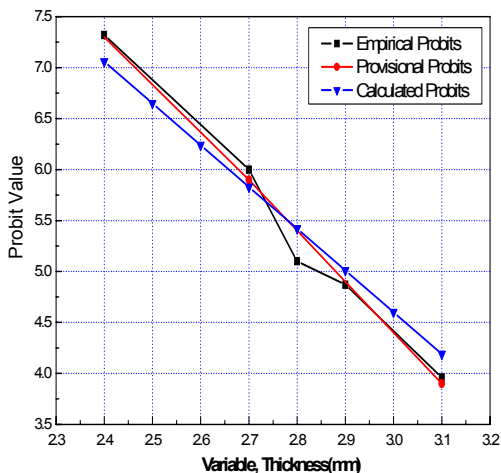


Fig. 4 Curves of various Probits line

이 계산결과에 대한 신뢰성을 확인하기 위하여 Fig. 4의 그래프에서 Calculated Probit(Y) 값

이 5.0일 경우에 계산된 평균 $\bar{x}=2.899$ 및 표준편차 $\sigma=0.244$ 값을 다음 식에 적용하여 신뢰도의 안전성을 비교하게 된다.

$$\therefore D_s = \frac{\phi n - \bar{x}}{\sigma}$$

여기서 $\phi n =$ rated value of variable.

또한, 평균 및 표준편차에 대한 오차 검토와 지정 신뢰수준에서의 한계성을 검토한 뒤 최종적으로 신뢰도 계산을 위한 s값을 다음과 같이 계산한다[4].

$$\therefore s = \left| \frac{\phi n - \bar{x}_{\min}}{\sigma_{\max}} \right|$$

여기에서 구한 s값을 이용하여 정규 분포 표에서 신뢰도를 산출하였으며, 본 격벽 착화 모듈의 경우 신뢰수준 90%에서 99.64%의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

4. 결 론

새로운 기밀 구조를 갖는 점화안전장치용 격벽 착화모듈을 개발하여 성능시험을 실시하였고 시험결과를 토대로 Probit 통계 기법을 적용하여 우수한 신뢰도를 갖고 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 장승교, "고체추진기관 점화안전장치 개발," 한국추진공학회 2005년도 추계학술대회, 2005.
2. Curling, H. P., "Statistical methods appropriate for evaluation of fuse explosive train safety and reliability", NAVORD Report 2101, 1953.
3. Tarriau, Ch., "Evaluation of a pyrotechnic actuator concept by means of the Probit statistical method", N82-17403, 1981.
4. 차홍석, "파이로밸브 개발(II)- Probit방법에 의한 신뢰도 분석", MADC-S416-03140, 2003.