

격벽착화기 화약의 충격파와 민감도 분석

장승교^a · 황정민^a · 백성현^{a,*}

Analysis on Shock Wave and Sensitivity of Explosives in Through-Bulkhead Initiator

Seung-gyo Jang^a · Jung-min Hwang^a · Sung-Hyun Baek^{a,*}

^aAgency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: shbaek@add.re.kr

ABSTRACT

We studied attenuation characteristics of shock waves induced by a donor charge and the sensitivity of an acceptor for optimal design of a TBI (Through-bulkhead initiator). The attenuation behavior of shock waves was studied by measuring free surface velocity using a VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector), and the sensitivity of the acceptor explosives was analyzed via SSGT (Small Scale Gap Test). It was found that the acceptor sensitivity obtained by the SSGT may be inappropriate for the design of the small-scale explosive devices such as TBI due to the different shock duration time.

초 록

격벽착화기의 최적 설계를 위하여 여폭약에 의해 생성되는 충격파의 감쇄 특성과 수폭약의 민감도에 관하여 연구하였다. 충격파의 감쇄 특성은 레이저 광간섭계인 VISAR를 이용하여 측정된 격벽의 자유 표면 속도로부터 유도하였고 수폭약의 민감도는 SSGT (Small Scale Gap Test) 결과로부터 구하였다. 격벽착화기의 기폭시험을 통하여 SSGT로부터 구한 화약의 민감도가 격벽착화기와 같이 소량의 화약을 사용하는 시스템에는 충격파 지속 시간이 상이하여 적합하지 않다는 것을 밝혀내었다.

Key Words: Through Bulkhead Initiator(격벽착화기), Shock Wave(충격파), Velocity Interferometer System for Any Reflector(VISAR, 바이저), Donor Explosive(여폭약), Acceptor Explosive(수폭약)

Received 26 December 2016 / Revised 25 May 2017 / Accepted 31 May 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

[이 논문은 한국추진공학회 2016년도 추계학술대회(2016. 12. 21-23, 강원랜드 컨벤션호텔) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

격벽착화기는 로켓 추진기관의 점화장치 또는 점화안전장치의 주요부품으로 사용되고 부분 절

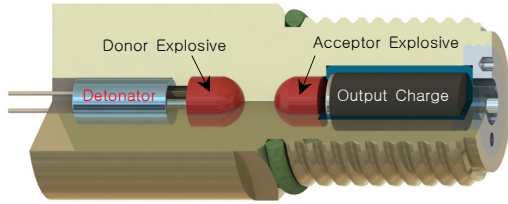


Fig. 1 Through-bulkhead initiator.

개 형상은 Fig. 1과 같다. 전기식 기폭관(detonator)에 전원을 인가하면 기폭관이 폭발하여 인접한 여폭약(donor explosive)이 폭발되고 이 때 발생하는 충격파는 여폭약과 수폭약(acceptor explosive) 사이에 있는 금속 격벽(bulkhead)을 통과하여 수폭약에 전달된다. 이어서 수폭약이 폭발하면서 발생하는 폭발과 열에너지는 출력 화약(output charge)을 점화시키고 출력 화약이 연소되면서 발생하는 고온 고압의 가스에 의해 추진기관을 점화시킬 수 있다. 기폭 후에도 격벽(bulkhead)의 구조적 건전성이 보존되고 이를 통하여 로켓 추진기관이 연소되는 동안 기밀을 유지할 수 있다는 장점 때문에 우주발사체나 대륙간 탄도미사일과 같이 장시간 연소 모터를 사용하는 시스템에 주로 적용되었다.

격벽착화기의 특성에 관한 본격적인 연구는 1980년대 이전으로 거슬러 올라가는데 미국의 Sandia Lab.에서는 처음으로 격벽착화기에 적용할 수 있는 수폭약과 여폭약 및 격벽 재질 등에 관한 연구 결과를 제시하였고[1] VISAR (Velocity Interferometer System for Any Reflector)를 활용하여 격벽 두께에 따른 입자 속도(particle velocity) 계산을 시도하였다[2]. 비슷한 시기에 프랑스의 항공우주국에서도 우주 발사체나 탄도 미사일에 적용 가능한 격벽착화기를 개발하였고 점화기나 파이프 장치에 적용할 수 있도록 출력 화약을 적용한 시험 결과를 발표하였다[3,4]. 국내에서는 국방과학연구소에 의해 처음으로 개발되어 특허 출원이 되었고[5], 실험에 기반한 신뢰도 예측에 관한 연구가 진행되었으며[6,7] 최근에는 하이드로 다이내믹 해석을 이용한 격벽 착화기의 성능 모델링 등의 연구가 활발하게 진

행되고 있다[8].

격벽착화기와 같은 One-shot 디바이스는 기폭 후 재사용이 불가능하고 사전에 성능 확인이 어렵기 때문에 높은 신뢰도가 요구된다[9]. 그리고 시험을 통하여 요구된 신뢰도를 보장하기 위해서는 많은 수량의 시험과 비용이 필요하기에 적은 시료를 이용한 통계적 시험 방법이 제한되기도 하였다[10,11]. 그러나 기존의 통계적인 방법은 설계가 바뀔 때마다 매번 다시 시험을 해야 하고 또 생산 로트가 바뀔 때마다 신뢰도 계산 결과가 다르기에 최근에는 성능 모델링에 기반한 시뮬레이션을 통하여 신뢰도를 계산하는 방법이 제안되었다[12].

격벽착화기의 성능 모델링에 있어서 가장 중요한 값은 적용된 여폭약에 의해 발생하는 폭발과 격벽을 통과하면서 감쇄되는 충격파의 특성 값 및 격벽과 수폭약 사이의 경계면에서 전달되는 폭발 등이다. 이를 통하여 격벽의 적정 두께를 설계할 수 있기 때문이다. 이 외에도 전기식 기폭관과 여폭약 또는 수폭약과 출력 화약 사이의 에너지 전달 특성도 중요하지만 대부분의 경우 1 mm 내외의 거리로 이격시켜 놓아 직결되어 있고 충분한 양의 화약이 적용되므로 신뢰도 계산을 위한 성능 모델링에는 크게 중요한 요소로 작용하지 않는다.

본 논문에서는 기존의 RDX를 대신하여 이를 둔감화시킨 CH-6를 여폭약과 수폭약으로 사용하는 격벽착화기 개발하면서 성능 모델링을 검증하고 보정하기 위한 기초 실험결과를 제시하고 분석하는 것을 목적으로 하였다. 이를 위하여 여폭약에 의한 충격파의 특성은 VISAR를 이용하여 분석하였고 수폭약의 폭발 민감도는 SSGT (Small Scale Gap Test)를 이용하여 측정하였다. 두 시험 결과를 종합하여 적용 가능한 격벽 두께를 예측하고 기폭시험 결과와 비교하였다.

2. 실험(시험) 방법

2.1 VISAR를 이용한 격벽착화기 충격파 속도 측정

격벽착화기의 여폭약에 의해 발생하는 충격파

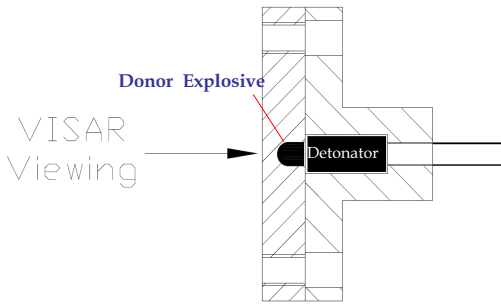


Fig. 2 TBI for VISAR experiment.

Table 1. CH-6 composition.

Composition	Weight Percent (%)
Research Department Formular X (RDX)	97.5
Calcium Stearate	1.5
Polyisobutylene	0.5
Graphite	0.5

의 특성을 알아보기 위하여 Fig. 2와 같이 수폭약 충전면을 평평하게 만든 시제를 제작하였다.

수폭약은 본래 여폭약과 마찬가지로 곡률 반경을 갖는 구멍에 충전되지만 여폭약과 가장 가까운 부분(점)이 충격파에 의해 반응하므로 실험의 편의를 위하여 그 점을 기준으로 한 평면에서 여폭약에 의한 충격파를 측정하였다.

실제 격벽착화기에 적용하고 있는 전기식 기폭관과 여폭약 CH-6를 사용하였고 기폭관과 여폭약 사이는 약 1 mm의 간격을 두었다. 전기식 기폭관에는 LA (Lead Azide)와 RDX를 수십 mg 충전하여 적용하였고 여폭약인 CH-6의 조성은 Table 1과 같다. 종래 연구와 달리 CH-6를 사용한 이유는 로켓의 점화장치에 관한 미국 국방부 안전규정에서 허용된 둔감화약이기 때문이다[13]. 여폭약이 충전되는 VISAR 시험 치구는 실제 격벽착화기 하우징의 재질을 동일하게 적용하였다. 여폭약이 충전되는 반대면에서 VISAR 프로브를 설치하여 여폭약에 의해 발생하는 충격파의 형태를 Fig. 3과 같은 간섭계를 구성하여 관찰하였다[6]. VISAR는 레이저 빔과 광간섭계

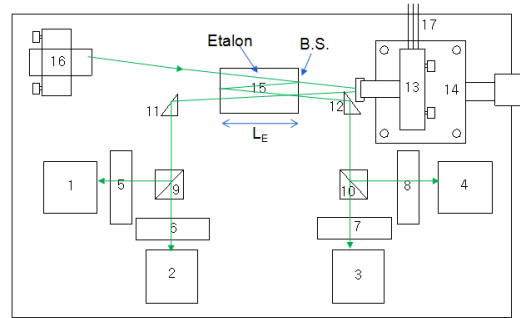


Fig. 3 VISAR configuration (1~4. Photodiode, 5~8. X-Y Translation lens mount, 9, 10. Polarizing beam splitter, 11, 12. Right angle prism, 13. PZT mount, 14. Translation stage, 15. Etalon, 16. Collimator, 17. PZT cables)[6].

를 결합한 장치로 충격파가 전달되는 매질의 경계면에서 자유 표면 속도를 측정하는데 유용하게 사용된다. 특히 속도의 범위가 수십 km/s인 경우까지 측정이 가능하므로 화약에 의해 발생하는 충격파의 분석에 많이 활용된다. 여폭약이 폭발하면서 발생하는 충격파는 수폭약 충전면의 움직임을 발생시키고 이 면으로부터 반사된 레이저 빔의 주파수 ν 는 자유표면 속도 v 에 따라 Eq. 1과 같이 도플러 이동한다. 여기에서 ν_0 는 반사되기 전의 레이저빔의 주파수, c 는 빛의 속도이다.

$$\nu = \nu_0 \left(1 + \frac{2v}{c} \right) \quad (1)$$

이와 같이 도플러 이동된 빛이 Fig. 3과 같이 collimator에 의해 VISAR 간섭계에 입사되면 빔가리개 (beam splitter)에 의해 입사빔은 각각의 경로를 지나 간섭된 신호를 만들어 낸다. 이러한 간섭 신호를 이용하면 수폭약 충전면에서의 자유표면속도를 산출해 낼 수 있다. 속도 산출 방식에 관한 내용은 이전 연구 결과에 상세히 기술하였다[6].

본 연구에 사용된 레이저는 Coherent사의 Verdi-5 모델로 최대출력은 5 W이고 파장은 532 nm이다. 광섬유와 렌즈를 이용한 프로브로 레이저 빛을 집속시키고 반사된 빛을 다시 광섬유를

통하여 간섭계에 입사시켰다.

격벽의 두께를 0.5 t에서 4.0 t까지 변화시키면서 자유표면 속도를 관찰하였고 동일한 조건에서 속도 편차를 알아보기 위하여 동일한 두께의 시편을 최소 네 개를 준비하여 반복실험을 수행하였다.

2.2 SSGT를 이용한 수폭약 민감도 시험

수폭약의 충격 민감도를 알아보기 위하여 관련 미 군사규격[14]에 따라 SSGT를 수행하였다. SSGT 시험 치구는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 격벽착화기와 유사한 구성을 가지고 있다. SSGT는 표준화된 충격을 인가하여 시험 대상 화약의 반폭점 폭압을 알아내는 시험 방법이다. 표준화된 충격은 RDX donor charge에 의해 만들어지는데 RDX (Type II, Class 1) 화약 165 mg 씩 7회 충전하였고 이 때 충전 밀도는 약 1.56 g/cm^3 이다. 기폭관(detonator)은 Teledyne사의 RP-87 EBW (Exploding Bridge Wire)를 사용하였다. 표준화된 충격은 Fig. 4의 PMMA 감쇄기(attenuator)의 두께에 따라 감쇄되어 대상 시료(test explosives)에 전달된다. 규격 시험에서 PMMA 두께(X)에 따라 시험 화약에 전달되는 충격 강도(Y)는 Eq. 2와 같이 구해진다.

$$Y(dBg) = 30 - 10\log X(mil) \quad (2)$$

그리고 충격 강도 Y에 따른 폭압 P는 Eq. 3을 통해 구할 수 있다[14].

$$\log P(kbar) = 0.14 Y(dBg) + 0.5232 \quad (3)$$

시험 대상 화약은 약 161 mg 씩 8회로 나누어 충전하여 약 1.28 g을 사용하였고 이때 충전 밀도는 약 1.64 g/cm^3 이다.

반폭점을 찾기 위하여 우선 PMMA 감쇄기를 사용하지 않고 RDX Donor 화약을 시험 대상 화약(CH-6)과 직결하여 기폭시킨 후 steel witness block의 dent 깊이를 측정하였다. 이 dent 깊이를 시험 대상 화약이 완전하게 기폭(detonation)되었을 때 형성되는 충격을 반영한

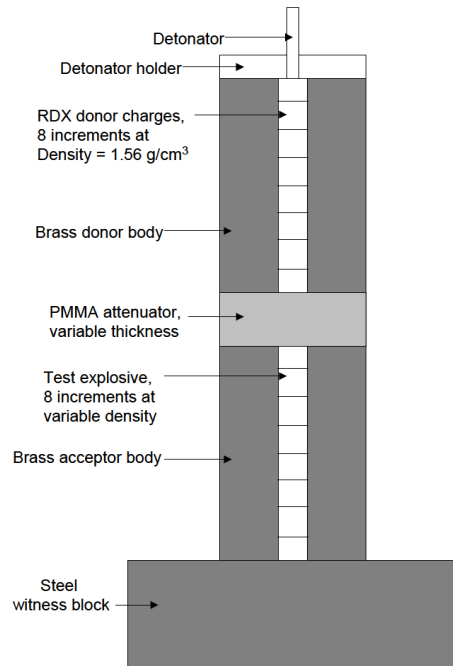


Fig. 4 Small scale gap test assembly[14].

다고 가정하고, PMMA 감쇄기의 두께를 변화시켜 가면서 기폭 시험을 수행하고 이 때 steel witness block의 dent 깊이를 측정하였다. Dent 깊이가 완전 기폭 되었을 때 깊이의 반이 되는 PMMA 두께를 산정하고 이를 통하여 시험 대상 화약의 민감도 즉, 반폭압을 구할 수 있다.

반폭점을 구하기 위하여 Bruceton test 방식으로 PMMA의 두께를 변화시키면서 15회의 시험을 실시하였다.

3. 실험(시험) 결과

3.1 VISAR를 이용한 격벽착화기 충격과 속도 측정 결과

격벽 두께에 따른 VISAR 시험 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에는 각 두께별 대표적인 결과만 나타내었다. 격벽의 두께가 증가할수록 자유 표면 속도는 비례적으로 감소하는 경향을 보였다. 대부분의 경우 초기에 속도의 최고 값을 나타낸 후에 시간이 경과됨에 따라 속도가 완만하게 감소하는 양태를 보였다. 이는 여폭약이 발생시킨

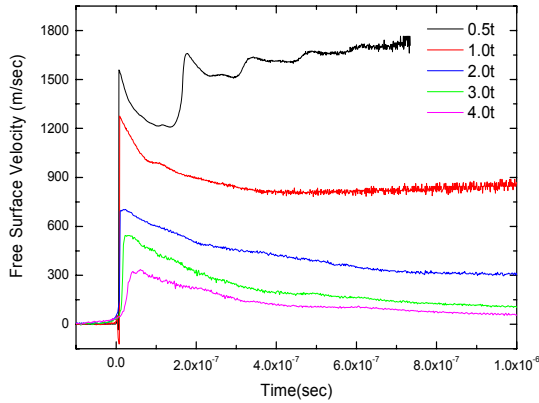


Fig. 5 Free surface velocity vs. time for different bulkhead thickness.

충격파에 의해 자유 표면이 급격하게 움직인 후에 서서히 멈추는 과정이 반영된 결과로 판단된다. 격벽 두께가 0.5 mm인 시료의 경우는 시간이 경과할수록 속도가 서서히 증가하는 양상을 보였다. 이는 자유 표면이 충격파에 의해 계속해서 변형되는 경우에 해당된다고 볼 수 있다. 이 경우에 시료는 격벽이 파열되어 관통되었다. 또한 시간이 경과하면서 속도 값의 피크가 두세 개 더 나타나는데 이는 얇은 격벽 두께로 인하여 격벽 내에서 반사되는 반사파가 영향을 미친 것으로 판단된다. 이를 확인하기 위하여 첫 번째 피크와 두 번째 피크 시간 차(t)를 계산하면 Eq. 4와 같고 그 값은 약 171 nsec로 실험치 169 nsec와 유사하다. Eq. 4에서 C 와 S 는 격벽의 재질인 STS 304의 Hugoniot 상수로 각각 4570 m/sec와 1.49이다. 여기에서 U_p 는 입사속도이다.

$$t(\text{sec}) = \frac{\text{path}}{\text{shock velocity}} = \frac{2 \times \text{thickness}}{C + SU_p} \quad (4)$$

Fig. 5의 실험결과에서 속도의 최댓값 또는 첫 번째 피크 값을 나타낼 때 발생하는 폭압에 의해 수폭약이 폭발되므로 이 때 폭압(P)은 Eq. 5[15]와 같이 계산할 수 있고 이를 그래프로 나타내면 Fig. 6와 같다. 여기에서 U_s 는 충격파 속도이고 ρ_0 는 격벽의 초기 밀도를 나타낸다. 여폭약에 의해 발생하는 폭압이 격벽두께가 1 mm

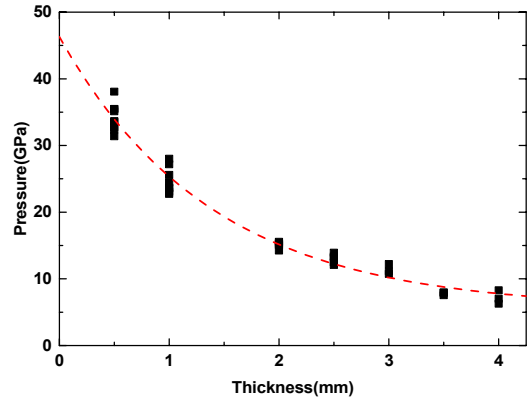


Fig. 6 Shock pressure vs. bulkhead thickness.

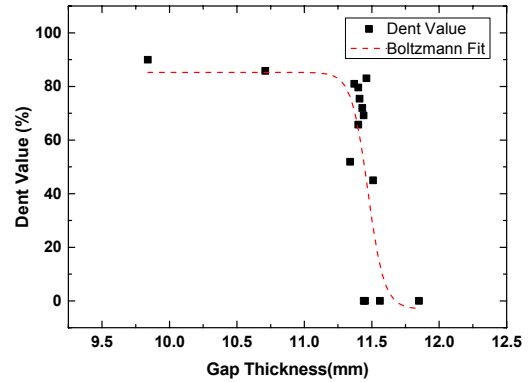


Fig. 7 CH-6 dent value vs. gap thickness.

이하인 경우에는 실험에 따라 다소 큰 편차를 보였다. 그러나 데이터의 회귀분석 결과(Fig. 6의 점선)는 일반적인 지수함수적 감소 형태를 나타냈고[16] 이 때 R^2 값은 0.977로 매우 우수하였다.

$$P = \rho_0 U_s U_p = \rho_0 (CU_p + SU_p^2) \quad (5)$$

3.2 SSGT를 이용한 격벽착화기 화약 민감도 실험 결과

PMMA 감쇄기 두께(x)를 바꾸어 가면서 측정 한 dent 깊이와 감쇄기를 넣지 않고 시험한 결과를 비교하여 백분율로 표시하면 Fig. 7과 같다. 수폭약의 민감도를 계산하기 위하여 50% dent 깊이를 나타내는 감쇄기의 두께를 알아야 한다. 이를 위하여 dent 데이터에 대하여 비선형 회귀분석을 수행하였고 그 결과는 Fig. 7에 적색

점선으로 나타내었다. 이 때 적용된 식은 볼츠만 분포를 사용하였고 R^2 는 0.36297로 좋지 않으나 반폭점을 구하는 데는 큰 무리가 없을 것으로 판단되었다.

회귀분석 결과를 이용하여 반폭점에 해당하는 PMMA 두께를 구하면 11.45 mm이다. Eq. 3에 대입하여 반폭점 폭압을 구하면 1.02 GPa을 얻었다.

4. 분석

4.1 격벽착화기 수폭약에 전달되는 압력

여폭약에 의해 발생되는 충격파는 격벽을 통과하여 감쇄되면서 수폭약에 전달된다. 이 때 수폭약에 전달되는 폭압을 추정하기 위하여 수폭약 충전면에서 자유표면 속도를 측정하고 이를 통하여 폭압을 계산하였다. 그러나 실제로 수폭약이 충전되어있을 때 전달되는 폭압과 자유 표면 속도로부터 추정한 값과는 다른 양상을 보인다. 운동량 보존 법칙에 따라 같은 양의 폭압이 격벽과 수폭약의 경계면에 가해지므로 수폭약에 전달되는 폭압은 격벽의 Hugoniot 곡선의 거울상(mirror image)이 수폭약 CH-6의 Hugoniot 곡선과 만나는 점에 의해 결정된다[15]. 이를 임피던스 정합(impedance matching)기법이라고 하는데 그림으로 나타내면 Fig. 8과 같다. 이 때 적용된 수폭약과 격벽의 Hugoniot 상수는 Table 2와 같다. Fig. 8에서 입자 속도가 500 m/s인 경우 자유 표면 속도로부터 구한 격벽에서의 폭압은 약 21 GPa인데 이 때 수폭약에 전달되는 폭압은 약 5.8 GPa로 감쇄됨을 점선과 실선과의 교차점에서 확인할 수 있다. 이와 같은 방식으로 Fig. 6의 회귀분석 값에 대하여 이 계산 과정을 수행하면 격벽 두께에 따라 수폭약에 전달되는 폭압을 알 수 있고 이는 Fig. 9에 나타내었다. 고려된 전 영역에서 압력은 점선으로 표시된 임계 압력 값(1.02 GPa)보다 크므로 수폭약은 모두 기폭되는 것으로 예상되었다.

4.2 검증

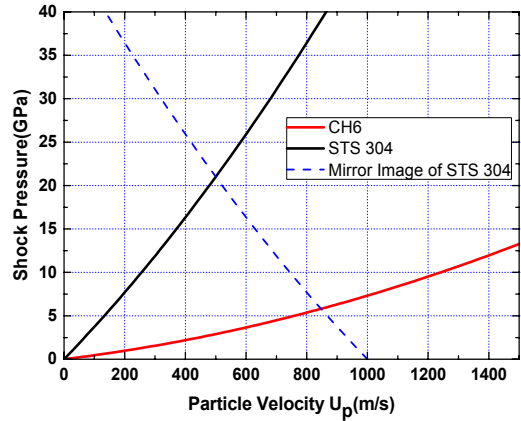


Fig. 8 Hugoniot P-U_p diagram of TBI.

Table 2. Hugoniot parameters.

Item	ρ_0 (g/cm ³)	C (m/sec)	S
STS 304	7.9	4570	1.49
CH-6	1.64	2600	1.86

Fig. 9의 예측 결과를 보면 격벽 두께가 5 mm 이상일 경우 격벽착화기의 반폭점이 나타날 것으로 예상된다. 이를 검증하기 위하여 실제 격벽착화기를 이용하여 기폭시험을 수행하였다. 시험 결과는 Table 3과 같다. 예상과 달리 실제 시험 결과 격벽착화기의 반폭점은 격벽 두께가 약 2.5 mm인 영역에서 나타나는 것으로 확인되었다. Fig. 9에 실제 기폭시험 결과를 반영하여 격벽착화기 수폭약의 반폭점에서의 임계압력을 구하면 약 3.2 GPa이 된다.

4.3 분석

일반적으로 화약의 임계 폭압은 시험의 방법과 관계없이 일정한 것으로 여긴다. 이러한 이유로 인하여 많은 경우에 화약을 적게 사용하는 SSGT가 LSGT (Large Scale Gap Test)를 대체한다. 그러나 격벽착화기와 같이 매우 적은 화약을 사용하는 경우에는 화약의 임계 폭압은 일반적인 시험 방법으로 구한 값과 크게 차이가 난다. Gap test와 같이 여폭약 칼럼이 충분히 길 경우

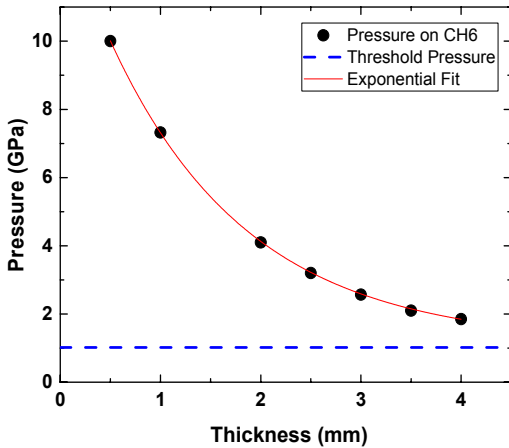


Fig. 9 Shock pressure transferred on CH-6.

Table 3. TBI firing test results.

Thickness (mm)	1.8	2.5	2.7	3.0
Fire No.	18	11	6	0
No Fire No.	0	13	18	12
Fire Rate	1	0.46	0.25	0

폭압이 일정시간 유지되고 온전한 폭발(detonation)을 유도할 수 있지만 격벽착화기와 같이 적은 양의 여폭약을 사용할 경우에는 폭발 형상이 다소 불안정적이고 충격파도 매우 짧은 시간에 급격하게 감쇄된다. 이 경우에 임계 폭압이 달라질 수 있다.

화약의 민감도는 단순히 폭압(P)에만 의존하지 않고 Eq. 6과 같이 폭압이 인가된 시간(τ)과도 밀접한 관계를 가지고 있다[17]. 여기에서 E_{cr} 은 화약이 폭발되기 위한 임계 에너지를 의미한다.

$$E_{cr} = PU_p\tau \quad (6)$$

일반적인 gap test에서 여폭약에 의해 발생하는 충격파의 지속 시간은 격벽착화기 여폭약에 의한 그것보다 충분히 크다. SSGT의 경우 압력 인가 시간이 1 μ s 이상인 반면에 격벽착화기에서는 Fig. 5로부터 추정할 수 있는 바와 같이 0.1

μ s 내외이다. 이와 같이 폭압의 지속시간이 짧을 경우에 폭압에 반응하는 임계압력은 시간에 반비례하여 증가한다[18]. 따라서 격벽착화기와 같이 매우 작은 시스템에서는 일반적인 gap test를 통해 구한 화약의 민감도가 적용되지 않고 적용된 화약의 양과 형상에 따라 서로 다른 민감도를 나타낼 개연성이 충분히 있다.

5. 결 론

화약의 민감도는 격벽착화기의 설계에 매우 중요한 요소로 작용한다. 여폭약에 의한 충격파의 감쇄 특성을 정밀하게 측정하여 격벽 두께에 따른 폭압의 변화를 알고 있더라도 수폭약의 민감도를 정확하게 알지 못하면 설계 오류를 범할 수 있다. 많은 경우 화약의 민감도를 문헌 값을 사용하거나 기존의 일반적인 민감도 시험을 통해 구하지만 격벽착화기와 같은 수십 mg 내외의 화약을 사용하는 작은 시스템에서는 이러한 값들이 더 이상 유효하지 않는다. 본 연구를 통하여 격벽착화기의 여폭약에 의한 충격파의 감쇄 특성을 알아보았고 일반적인 방법으로 구한 수폭약의 민감도를 적용할 경우 반폭점이 실제 시험 결과와 상이함을 제시하였다. 실제 기폭시험 결과와 충격파 분석 결과를 종합하여 격벽착화기 수폭약의 민감도를 예측할 수 있었다. 본 연구를 통해 구해진 격벽착화기의 충격파 감쇄 특성과 여폭약의 민감도는 이론적 성능 모델의 검증 및 보정에 긴요하게 사용될 것이다.

References

1. Schwart, A.C., "Feasibility of a Fail-Safe Through Bulkhead Initiator," SAND78-1696, Mar. 1980.
2. Begeal, D.R., "Through Bulkhead Initiator Studies," SAND97-0582, Mar. 1997.
3. Mas, C., Vaillantdeguelis, H., Guy, L. R. and Thivet, R., "Perfectioning of Through

- Bulkhead Initiators Mise au Point d'Initiateurs Fonctionnant ar Onde de Choc," N83-32966; SNIAS-831-422-105, Societe Nationale Industrielle Aerospatiale, Paris France, 1982.
4. Thivet, R. and Mas, C., "Combustion of Redox Mixes in the Through Bulkhead Initiator(TBI) Configuration," N84-31332; SNIAS-841-422-115, Societe Nationale Industrielle Aerospatiale, Paris, France, 1984.
 5. Lee, H.N., Jang, S.T. and Gil, H.Y., "Isolation Wall Lighter," *Republic of Korea Patent*, 10-0279050-0000, 2000.
 6. Jang, S. and Baek, S.H., "Studies on Through-Bulkhead Initiator Module using VISAR," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 14, No. 4, pp. 16-24, 2010.
 7. Jang, S., Kim, Z. and Ryu, B.T., "Reliability Analysis of A Through Bulkhead Initiator," *Proceeding of the 2013 KSPE Fall Conference*, Gyeongju, Rep. of Korea, pp. 181-184, Dec. 2013.
 8. Kim, B., Kang, W., Jang, S. and Yoh, J., "Hydrodynamic Analysis on Shock-induced Detonation in Pyrotechnic Initiator," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 20, No. 5, pp. 19-30, 2016.
 9. "Criteria for Explosive Systems and Devices on Space and Launch Vehicle," *AIAA S-113-2005 Standard*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA, Reston, V.A., pp. 18, 2005.
 10. Dixon, W.J. and Mood, A.M., "A Method for Obtaining and Analyzing sensitivity data," *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 43, No. 241, pp. 109-126, 1948.
 11. Neyer, B.T., "A D-Optimal-Based Sensitivity Test," *Technometrics*, Vol. 36, No. 1, pp. 61-70, 1994.
 12. Lee, H.N. and Jang, S., "Reliability Evaluation of a Pin Puller via Monte Carlo Simulation," *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 16, No. 4, pp. 537-547, 2015.
 13. "Munition Rocket and Missile Motor Ignition System Design, Safety Criteria for," *MIL-STD-1901A*, Department of Defense Design Criteria Standard, pp. 15, 2002.
 14. "Safety and Performance Tests for the Qualification of Explosives(High Explosives, Propellants, and Pyrotechnics)," *MIL-STD-1751A Method 1042*, Department of Defense Test Method Standard, 2001.
 15. Forbes, W.J., "Shock Wave Compression of Condensed Matter," *Springer*, New York, N.Y., U.S.A., pp. 16-21, 2012.
 16. Sanchidrian, J.A., "Analytical and Numerical Study of the Shock Pressures in the Gap Test," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 18, pp. 325-331, 1993.
 17. Cooper, P. W., *Explosive Engineering*, Wiley-VCH, New York, N.Y., U.S.A., pp. 310-312, 1996.
 18. Souers, P.C. and Vitello, P., "Initiation Pressure Thresholds from Three Sources," *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, Vol. 32, No. 4, pp. 288-295, 2007.