

STS 격벽착화기의 충격파 감쇠 특성 해석

김보훈* · 장승교** · 여재익*†

Analysis on Shock Attenuation of STS Bulkhead Initiator

Bohoon Kim* · Seung-gyo Jang** · Jai-ick Yoh*†

ABSTRACT

Two-dimensional hydrodynamic analysis was performed to analyze the attenuating characteristics of shock waves generated by the detonation of the bulkhead initiator. Through the interlocking analysis between HNS and HMX stacking initiator and STS bulkhead, we have precisely simulated detonation growth and pressure wave attenuation phenomena. The free surface velocity at the surface of the bulkhead was measured for quantitative comparison with the test data by VISAR. As a result, it was confirmed that the pressure attenuating pattern of the shock wave exponentially decreased according to the bulkhead thickness. The observed inflection point at the particle velocity measured over time is due to the subsequent propagation of the shock wave due to the rapid spallation of the interface between the detonator and the bulkhead.

초 록

격벽착화기의 기폭으로 인하여 발생하는 충격파가 격벽을 통과할 때의 감쇠 특성을 해석하기 위하여 2차원 하이드로다이나믹 해석을 수행하였다. HNS와 HMX가 적층되어 있는 기폭제와 STS 격벽간의 연동해석을 통해 폭압 생성 및 압력과 감쇠 현상을 정밀하게 모사하였다. VISAR로 측정된 시험 데이터와의 정량적인 비교를 위하여 격벽 끝단에서의 자유표면 속도를 계측하였다. 해석결과, 격벽 두께에 따른 충격파의 압력 감쇠 패턴이 지수적으로 감소하는 것을 확인하였으며, 시간에 따라 측정된 입자속도에서 관찰된 변곡 패턴은 기폭부와 격벽 사이의 충진면의 급격한 파쇄(spallation)에 의한 충격파의 잇따른 전파에 의한 것임을 규명하였다.

Key Words: Shock Attenuation(충격감쇠), Bulkhead Initiator(격벽착화기), Spallation(파쇄 현상), VISAR(Velocity Interferometer System for Any Reflector)

1. 서 론

* 서울대학교 기계항공공학부

** 국방과학연구소 4본부 1부

† 교신저자, E-mail: jjyoh@snu.ac.kr

격벽착화기(bulkhead initiator)[1,2]는 기폭관에 충전된 고폭약에서 발생하는 충격파의 전달을 이

용한 파이로테크닉(pyrotechnic) 시스템으로써 로켓 추진기관의 점화장치나 단 분리 등에 사용된다. 격벽 내에서의 충격파의 압력 감쇠가 지속적으로 이루어지므로 격벽의 두께를 엄밀히 결정하여 수폭약 및 파이로 추진제의 점화를 유도한다.

한편, VISAR(Velocity Interferometer System for Any Reflector)[3]는 레이저 빔과 공간섭계를 결합한 장치로 충격파가 전달되는 매질의 경계면에서 자유표면 속도(free surface velocity)를 측정하는데 사용된다. 자유표면에서의 임피던스 매칭에 의해 입자속도(particle velocity)는 자유표면 속도의 1/2에 해당하며, shock-Hugoniot 관계에 의한 충격파속 및 폭압은 다음의 식과 같다.

$$u_f = 2u_p \quad (1)$$

$$u_s = c_0 + su_p \quad (2)$$

$$p = \rho_0 (cu_p + su_p^2) \quad (3)$$

즉, VISAR를 사용하여 격벽 끝단에서의 자유표면 속도를 측정하는 것은 입자속도와 충격파속을 도출하는 정보를 획득하는 것이고, 이는 입자속도와 폭압간의 관계를 도출할 수 있음을 의미한다.

본 연구에서는 격벽착화기의 기폭으로 인하여 발생하는 충격파가 격벽을 통과할 때의 감쇠 특성을 해석하기 위하여 오일러리안 기반의 하이브리드 레벨셋 기법이 적용된 2차원 하이드로다이 나믹 코드[4]를 사용하여 FSI(Fluid-Structure Interaction) 해석을 수행하였다.

HNS(hexanitrostilbene, $C_{14}H_6N_6O_{12}$, R.E 계수 1.05)와 HMX(cyclotetramethylene-tetranitramine, $C_4H_8N_8O_8$, R.E 계수 1.70)가 적층되어 있는 기폭제와 STS(stainless steel 304, 함량 : C-0.08%, Cr-18%, Ni-8%) 격벽간의 연동해석을 통해 폭압 생성 및 압력과 감쇠 현상을 정밀하게 모사하였다. VISAR로 측정한 시험 데이터와의 정량적인 비교를 위하여 격벽 끝단에서의 입자속도를 계측하였다. 자유표면 속도와 폭압 감쇠 패턴을 실험 값과 정량적으로 비교하고, STS 경계면 변형과 관련하여 기폭부와 격벽 사이의 2차 충격파 생성에 관하여 분석하고자 하였다.

2. 본 문

2.1 자유표면 속도

격벽착화기는 HNS를 점화시켜 발생한 폭굉파의 전파를 통해 순차적으로 HMX를 기폭시키고 고압의 충격파가 비반응 물질인 STS 격벽에 투과되는 구조를 갖는다. 격벽 두께에 따른 자유표면 속도를 측정하기 위해서 Fig. 1과 같이 1.0 mm, 2.0 mm, 3.0 mm, 3.5 mm, 4.0 mm 두께의 STS 격벽착화장치를 고려하였다. VISAR는 충격파가 전파되는 방향을 마주봄으로써 격벽의 끝단의 경계면의 표면속도를 측정할 수 있다. 광섬유와 렌즈를 이용한 프로브로 시편에 레이저 빛을 집속시키고 반사된 빛을 VISAR 간섭계에 입사시키는 방식으로 계측이 이루어진다. 사용된 레이저 파장은 532 nm이다.

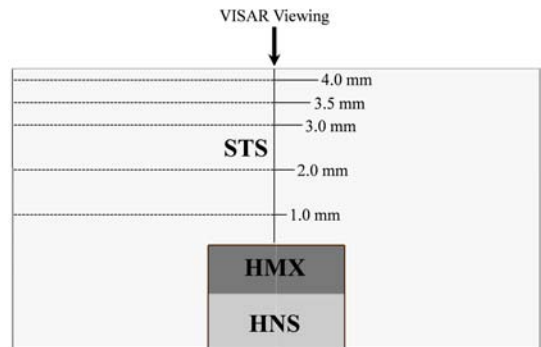


Fig. 1 Schematic of Bulkhead Initiator for VISAR

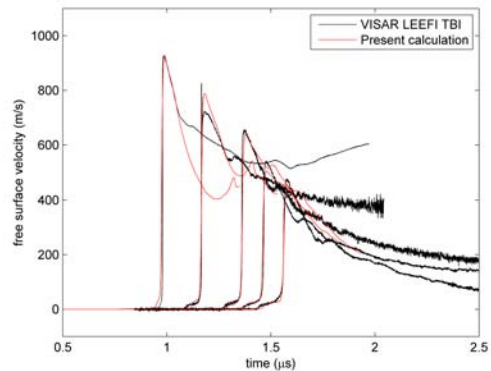
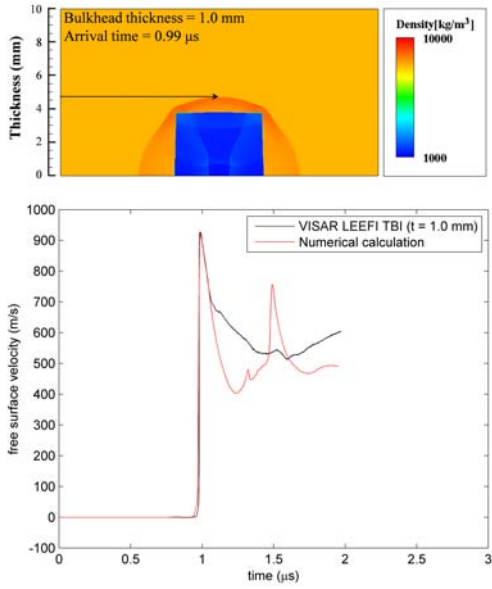
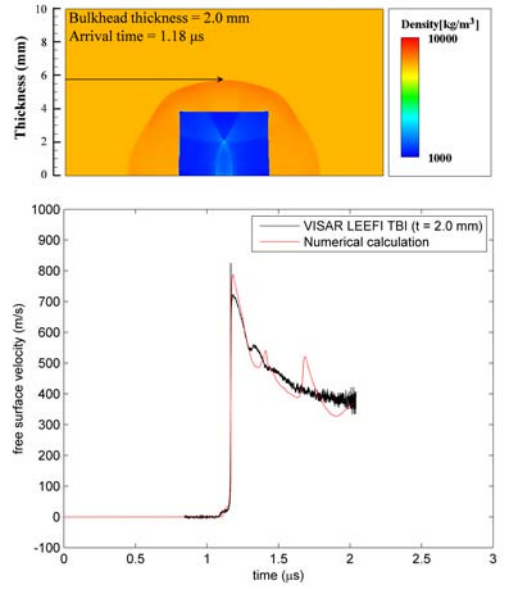


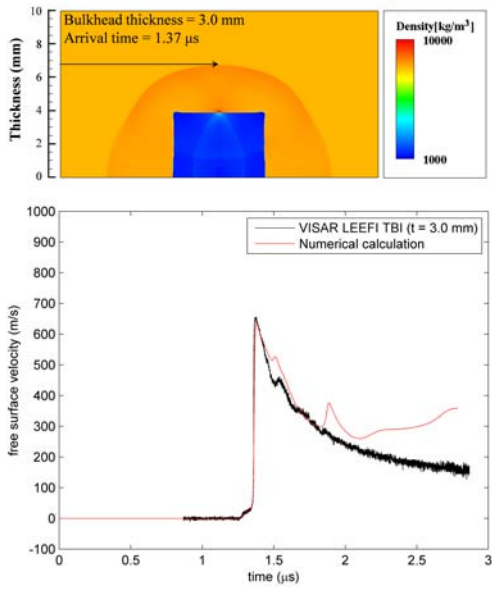
Fig. 2 Free Surface Velocity Profiles



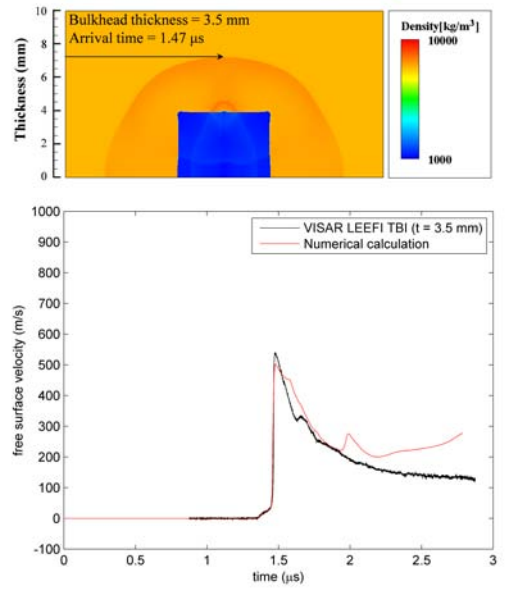
(a) Bulkhead thickness = 1.0 mm



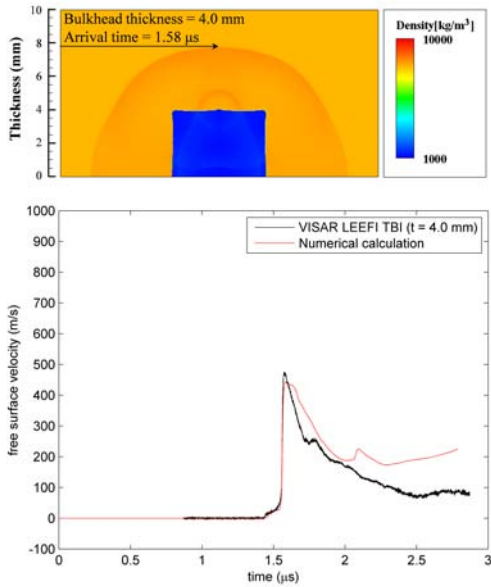
(b) Bulkhead thickness = 2.0 mm



(c) Bulkhead thickness = 3.0 mm



(d) Bulkhead thickness = 3.5 mm



(e) Bulkhead thickness = 4.0 mm

Fig. 3 Timed Images of Calculated Density Contour and Free Surface Velocity Profiles at (a) 1.0 mm, (b) 2.0 mm, (c) 3.0 mm, (d) 3.5 mm, (e) 4.0 mm Bulkhead Thicknesses of the Initiator

격벽 두께에 따른 VISAR 시험 데이터 및 하이드로다이나믹 수치해석으로 도출된 자유표면 속도는 Fig. 2와 같다. 격벽의 두께가 두꺼워질수록 자유표면 속도의 최대값이 점차 감소하게 되며 이는 충격파가 비반응 물질 내부를 통과하면서 발생하는 압력의 감쇠에 기인한다.

고려된 격벽 두께 각각에 대한 전산해석 밀도장과 시간에 따른 자유표면 속도의 그래프를 Fig. 3에 나타내었다. (c)의 3.0 mm의 경우를 살펴보면, 약 1.3 μs 에서 충격파가 도달하였음을 첫 번째 peak을 통해 알 수 있고, 이후 시간이 지남에 따라 점차 감소하던 자유표면 속도는 약 1.5 μs 에서 두 번째 peak을 만들면서 뛰고 약 2.0 μs 부근에서 세 번째 peak을 만들면서 점차 감소하거나 수렴하는 패턴을 보인다. 첫 번째와 두 번째 peak은 실험과 수치해석에서 동시에 관찰되는 현상으로 그 원인은 연속적으로 유입된 충격파의 전달에 의한 것으로 생각된다. HNS와 HMX로 구성된 기폭부의 연속된 두 차례의 폭발이 파가 도달하는 초기 시점에서 관측이 되고, 세 번째 peak은 기폭부의 급격한 파쇄 또는 변형에 의한 밀도파 전파에 따른 것으로 보인다.

(d) 3.5 mm와 (e) 4.0 mm를 살펴보면, 기폭부와 STS간 인터페이스의 가운데 지점에서 국부적인 변형이 발생하는 것을 볼 수 있다. HNS와 HMX의 기폭으로 고압의 연소유동이 STS의 표면을 강하게 압축시키면서 동시에 상하좌우로 퍼져나갔던 압력파가 가운데 지점에 중첩되면서 약간의 돌출부를 형성하는 과정을 나타낸다. 이러한 현상은 전체적인 변형이 진행되는 (a) 1.0 mm와 (b) 2.0 mm에서 관찰되지 않았다. 다만, 변형이 전반적으로 이루어지고 있는 와중에 강한 압축이 국부적으로 발생하는 지점에서의 형상 변화가 또 다른 압축파의 전파를 생성하였고 몇 차례의 peak 시그널을 관측할 수 있었다. 실제 시험에서는 VISAR 장비의 민감성과 폭발 후 진동 및 빔 얼라이먼트 문제로 인해 계측에 어려움이 증대되었으나, 복잡한 형태로 전파되는 연속된 충격파로 인한 파쇄 현상이 격벽착화기 내부에서 발생하고 있음을 확인할 수 있었다.

2.2 압력감쇠

VISAR로 측정된 자유표면 속도를 Eq. (1)-(3)을 통해 압력 데이터로 변환할 수 있다. 격벽 두께별 압력 데이터와 수치해석으로 도출된 시간에 따른 압력의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. 제작 편차 및 계측오차 등을 감안하여 각 두께별로 4~5조에 해당하는 시료를 사용하여 시험하였음에도 불구하고 그림에서 나타난 것과 같이 각 두께에서 큰 오차 없이 밀집된 데이터를 획득할 수 있었다.

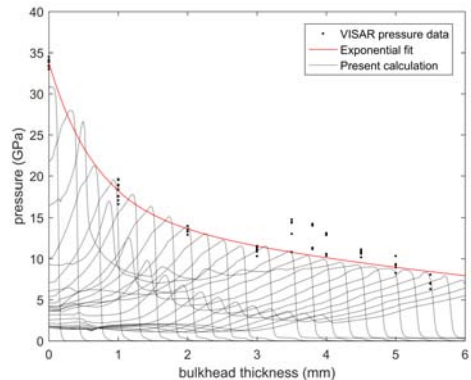


Fig. 4 Time Trace of Attenuating Pressure along the STS Thickness in Bulkhead Initiator

$$p_{fit} = a \exp(bt) + c \exp(dt) \quad (4)$$

초기에 입력되는 압력은 약 35 GPa로 HMX의 폭발압에 해당한다. STS 두께가 증가함에 따라 감쇠가 나타나고 이를 지수함수로 fitting하면 Eq. (4)와 같다. 여기서 $a = 17.52$, $b = -1.527$, $c = 16.27$, $d = -0.1196$ 의 값을 갖는다.

3. 결 론

격벽착화기의 구조에 해당하는 HNS+HMX - STS 도메인에서 VISAR를 이용하여 측정된 자유표면 속도를 2차원 하이드로다이나믹 수치해석으로 도출한 데이터와 비교 분석하였다. 자유표면 속도의 시간에 따른 분포에서 관찰된 변곡점이 물리적으로 의미하는 바를 전산해석 결과를 통해 규명하고자 시도한 결과, 이는 연속적으로 STS 내부로 유입되는 충격파에 의한 것으로 중첩 고폭약의 시퀀스 반응과 고압 압축으로 인한 STS 격벽의 급격한 파쇄에 기인한 현상으로 사료된다. 고폭약의 시퀀스 반응은 반응 초기에만 구분되고 이후로는 중첩되면서 진행하므로 나타나지 않는다. 반면, STS 변형으로 인한 압축파 전파는 국부적 변형이 발생하는 시점에서 생성되므로 시간적으로 각 현상들이 구분될 수 있도록 엄밀하게 살펴볼 필요가 있다고 생각된다.

후 기

본 연구는 '유도탄용 고성능 PMD 기술' 사업의 일환으로 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Kim, B., Kim, M. and Yoh, J. J., "Shock to detonation transition analysis using experiments and models," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 36, 2017, pp.2699-2707
2. 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, 2016, pp.19-30
3. Jang, S., Hwang J., Baek S., Kim, B. and Yoh, J., "Analysis of Shock Wave generated by Small Amount of Explosives," KSAS 2017 Spring Conference, 2017
4. Kim, B., Park, J. and Yoh, J.J., "Analysis on shock attenuation in gap test configuration for characterizing energetic materials," Journal of Applied Physics, Vol. 119, 145902, 2016.