

# 원주방향 슬릿을 가진 파열판의 매개변수 연구

한혁섭\* · 조원만\* · 이원복\* · 구송회\*\* · 이방업\*\*

## A Parametric Study on Rupture Disc with Radial Slit of Pulse Separation Device

Houkseop Han\* · Won-Man Cho\* · Wonbok Lee\* · Song-Hoe Koo\*\* · Bang-Eop Lee\*\*

### ABSTRACT

Dual Pulse Rocket Motor is a solid rocket motor with two grains separated by a bulkhead and rupture disc. The elasto-plastic explicit dynamic analysis of rupture disc was conducted by the finite element method. The effect of the slit geometry of rupture disc with radial slit was parametrically analyzed in terms of rupture time and shape. The results can be used to control the rupture pressure by changing the slit geometry of rupture disc.

### 초 록

이중 펄스 로켓 추진기관은 하나의 연소관 안에 특성이 다른 2개의 추진제가 격벽에 의해 2개의 공간에 분리되어 있는 고체 추진기관이다. 유한요소법을 이용한 탄소성 동적거동해석에 의하여 펄스 분리장치 파열판의 파열해석을 수행하였다. 원주방향 슬릿을 가진 파열판의 슬릿 크기를 변경한 해석을 수행하여 파열형상, 파열시점을 해석함으로써 슬릿의 설계 변수가 파열판에 미치는 영향을 검토하였다. 해석 결과는 펄스분리장치 파열판 슬릿 크기의 변경을 통한 파열압력의 조절에 사용할 수 있다.

Key Words: Dual Pulse(이중 펄스), Solid Rocket Motor(고체 추진기관), Bulkhead(격벽), Rupture Disk(파열판), Pulse Separation Device(펄스분리장치)

### 1. 서 론

다중 펄스 로켓 추진기관은 하나의 연소관 안에 특성이 다른 2개 또는 3개의 추진제가 격벽

(Bulkhead) 또는 격막(Diaphragm)에 의해 분리되어 있는 고체 추진기관이다[1]. 이중 펄스 로켓 추진기관의 구성품은 1단 추진기관, 2단 추진기관, 펄스분리장치, 1단 및 2단 점화기, 노즐 등으로 구성된다.

이중 펄스 로켓 추진기관은 발사단계에서는 1단 추진기관이 연소하여 많은 에너지를 분출하고, 순항 및 종말 단계에서는 2단 추진기관이 연

\* (주)한화 대전사업장 개발부

\*\* 국방과학연구소, 1본부 6부

연락처, E-mail: strand7@hanwha.co.kr

소하여 필요한 에너지를 공급한다. 순항 및 종말 단계의 추력을 얻기 위해 2단 추진기관의 연소 압력에 의해 펄스분리장치의 격벽에 부착된 파열판(Rupture Disc)이 파열한 후 연소가스가 펄스분리장치의 가스 유동 구멍을 통과하여 노즐로 분출된다. 따라서 펄스분리장치의 파열판은 1단 추진기관 연소 시 연소가스의 온도와 압력을 견뎌야 하며, 2단 추진기관의 연소 시 시스템이 요구하는 압력 범위 내에서 파열되어야 한다.

본 연구에서는 범용 유한요소 소프트웨어인 ABAQUS/Explicit V6.9를 이용하여 파열압력 조건을 충족시키기 위한 원주방향 슬릿을 가진 파열판의 파열해석을 수행하였다. 파열판의 파열형상과 파열시점은 파열판의 슬릿에 의해 결정되기 때문에 슬릿의 크기를 변경하여 해석을 수행하였으며, 이 결과를 이용하여 파열형상과 파열시점을 예측함으로써 슬릿의 설계 변수가 파열판에 미치는 영향을 분석하였다.

## 2. 유한요소모델

### 2.1 파열판의 유한요소모델

펄스 추진기관을 구현하기 위한 펄스분리장치는 격벽, 파열판, 내열재(Thermal liner)로 구성된다. 격벽은 1단과 2단 추진기관의 연소 시 발생하는 압력을 모두 견디기 위한 구조와 재료로 설계되었다. 파열판은 1단 추진기관의 연소 시 발생하는 압력은 견디고, 2단 추진기관의 연소 시 시스템 요구 압력 범위 내에서 파열되는 구조와 재료로 설계되었다.

파열판은 규칙적인 파열형상을 구현하기 위해 6개의 이중 슬릿으로 설계하였다. 이 슬릿의 끝은 키홀(Keyhole)을 형성하여 응력집중을 완화하도록 설계하였다.

원주방향 슬릿을 가진 파열판은 Fig. 1, 2와 같이 T자형의 내부 슬릿 사이에 1개의 연결점을 가진 형태이다. 연결점의 간격을 15°, 20°, 25°, 30°, 35°로 설계하였다.

파열판은 슬릿을 기준으로 60° 순환 형상이므로 Fig. 3과 같이 60°의 유한요소모델을 사용하

였다. 해석에 사용한 요소는 C3D8(8-node linear brick)요소이며, D-1 모델의 절점 수는 20,454개이며, 요소 수는 12,962개이다. 모델마다 절점, 요소의 개수가 다르지만 동일한 요소망 형성방법을 사용하였다.

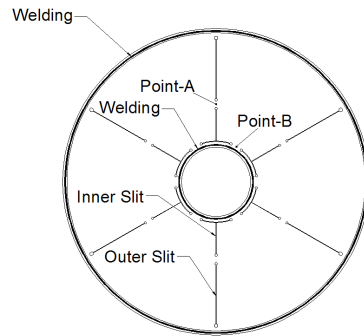


Fig. 1 D-타입 파열판

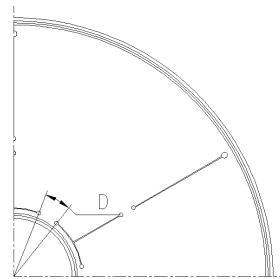


Fig. 2 D-타입 파열판의 매개변수

### 2.2 경계조건

파열판은 Fig. 1과 같이 격벽과 용접에 의해 결합되어 있다. 용접부를 모사하기 위하여 2 mm의 폭을 가진 면에 고정경계조건을 원주방향으로 적용하였다. 파열판의 대칭면은 Fig. 3과 같이 원통형 좌표계를 이용하여 대칭면의  $\theta$ -방향 자유도를 구속하였다.

파열판에 작용한 압력은 파열판의 안쪽 면에 모두 작용하도록 하였다. 동일한 압력 분포에서 각 모델의 변형 형상을 비교하기 위하여 실험 결과를 바탕으로 Fig. 4와 같이 총 0.030 sec의 시간 동안 0.010 sec에 689476 Pa(100psi)의 비율로 압력이 증가하도록 적용하였다.

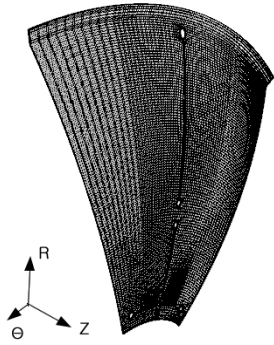


Fig. 3 파열판의 유한요소모델

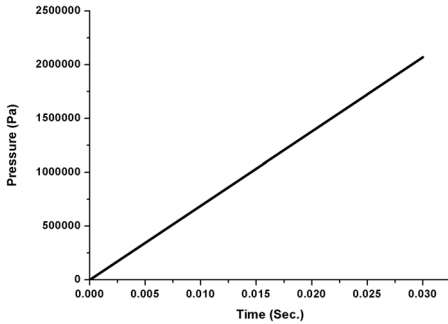


Fig. 4 압력 하중 조건

### 2.3 재료물성치

파열판은 고연성 재료인 AISI 316L로 제작되었으며, 대변형을 필요로 하는 파열판 재료로써 적합하다. 파열판의 제작에 사용한 AISI 316L의 기계적 물성치는 Table 1과 같다.

파열판의 탄소성해석을 위하여 Johnson-Cook 구성방정식을 사용하였다[3].

Johnson-Cook 구성 모델에서 AISI 316L의 재료 상수는 Table 2와 같이 Chandrasekaran이 제시한 값을 사용하였다[4]. 재료의 파손 거동을 해석하기 위하여 Ductile Failure Model을 사용하였다[4].

Table 1. AISI 316L의 물성치[3]

Material	$E(GPa)$	$\nu$	$\rho(kg/m^3)$	$T_m(^\circ C)$
AISI 316L	193	0.28	7750	1400

Table 2. AISI 316L의 J-C 모델 상수[3]

$A(MPa)$	$B(MPa)$	$C$	$n$	$m$	$\dot{\epsilon}_0$
305	1161	0.01	0.61	0.517	1

### 3. 해석결과분석

#### 3.1 D-1의 파열 형상 분석

Figure 5는 연결점의 간격이 15°인 경우 등가 응력 분포와 변형형상이다. 파열판은 압력이 작용하면서 0.017 sec에 Point-B에서 먼저 파손이 발생한 후 0.018 sec에 Point-A에서 파손이 발생하였다. 0.021 sec 후에 파열판이 완전 개방하였다.

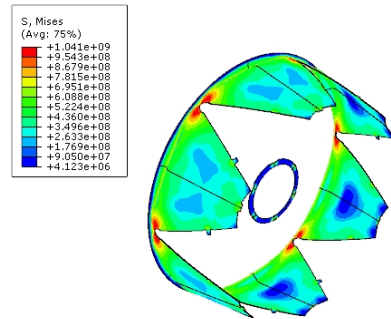


Fig. 5 0.021 sec에서의 변형형상과 등가응력

#### 3.2 매개변수의 영향 분석

파열형상을 분석한 결과 모두 Point-B에서 먼저 파손이 발생한 후 Point-A에서 파손이 발생하였다. Point-B에서의 등가응력의 변화는 Fig. 6과 같다. 시간이 경과함에 따라 등가응력이 증가하다가 파손이 발생하면 등가 응력이 급격히 감소하였다. 파손하기 전 등가응력은 연결점 사이의 각도가 가장 작은 D-1이 가장 크게 나타났으며, 연결점 사이의 각도가 커질수록 작게 나타났다. 슬릿에서의 변형이 커지면서 응력이 이완되는 현상은 모두 나타났다. D-5의 경우 파손이 발생하는 시간이 0.027 sec로써 D-1~4의 경우 0.020 sec 이전에 파손이 발생하는 것에 비해 늦게 발생하였다. Fig. 7과 같이 Point-B에서의 파

손 발생시간도 D-1~4에 비해 늦게 나타났다. D-1의 경우 0.021 sec에서 완전 개방되었으며, 연결점의 각도가 커질수록 완전 개방 시간이 크게 나타나므로 연결점의 거리에 의존적인 것으로 나타났다.

Point-A와 B가 모두 파손되는 시점을 기준으로 파열압력을 계산한 결과 Fig. 8과 같다. 연결점 사이의 각도가 커질수록 파열압력은 기하급수적으로 증가하였다.

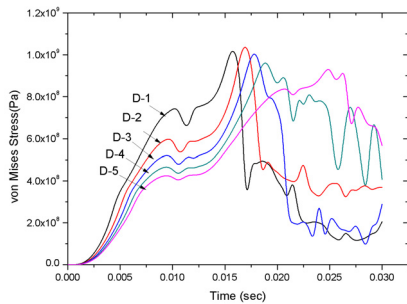


Fig. 6 Point-B에서의 등가응력 변화

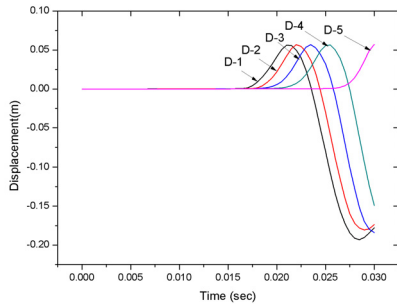


Fig. 7 Point-B의 원주방향 변위 변화

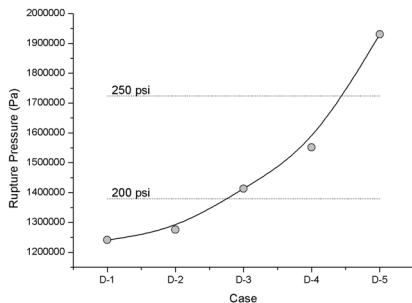


Fig. 8 파열압력의 변화

#### 4. 결 론

본 연구에서는 펄스분리장치 파열판의 파열 해석을 수행하여 파열판의 슬릿이 파열형상, 파열 시점, 파열압력에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

1. 원주방향 슬릿을 가진 파열판 모델에서는 원주방향 슬릿(Point-B)에서 파열이 시작되었다.
2. 연결점 사이의 각도가 커질수록 파열압력은 기하급수적으로 증가하였으므로 각도가 큰 경우 원하는 압력보다 큰 압력에서 파열되는 것을 주의하여야 한다.
3. 높은 파열압력이 필요한 경우 연결점의 사이의 각도를 이용하여 제어할 수 있을 것으로 판단되었다.

#### 참 고 문 헌

1. Sutton, G. P., Rocket Propulsion Elements, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992
2. Johnson, G.R., Cook, W.H., A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high, Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, 1983
3. Chandrasekaran, H., R. M'Saoubi, and H. Chazal, Modelling of Material Flow Stress in Chip Formation Process from Orthogonal Milling and Split Hopkinson Bar Tests. Machining Science and Technology, 2005
4. Hooputra, H., H. Gese, H. Dell, and H. Werner, A Comprehensive Failure Model for Crashworthiness Simulation of Aluminium Extrusions, International Journal of Crashworthiness,, 2004.
5. Kolmogorov, W. L. Spannungen Deformationen Bruch, Metallurgija, 1970.
6. Blandford, R. K, Morton, D. K., Rahl, T. E., Snow, S. D., Impact Testing of Stainless Steel Materials, American Society of Mechanical Engineers Pressure Vessels and Piping Conference, 2005.