

탄소성해석을 이용한 파열판의 파열예측

한혁섭* · 이원복* · 구송회** · 이방엽**

Rupture Prediction of the Rupture Disc Tests using Elastic-Plastic Analysis

Houkseop Han* · Wonbok Lee* · Song-Hoe Koo** · Bang-Eop Lee**

ABSTRACT

This paper provides a comparison between finite element analysis results and test data of rupture disc. Rupture disc is safety device of high pressure equipment. Rupture disc of solid rocket motor is a device to control rupture pressure. Rupture discs were made of AISI 316L. By the elastic-plastic analysis, the stress limit of rupture discs were compared to the test results. The results can be used to control the rupture pressure by the change of the disc size.

초 록

본 논문은 파열판 시험결과와 유한요소해석 결과를 비교하기 위한 것이다. 파열판은 고압장치에서 안전장치로 사용하고 있으며, 추진기관에서는 파열을 임의로 제어하기 위한 장치로서 사용한다. 탄소성 물성치를 이용하여 재해석을 수행한 이유는 탄소성 해석을 사용하여 압력용기 파열판의 한계하중 계산결과를 검증하고 임의의 형상에 대한 파열판의 한계하중을 계산하기 위한 것이다. 본 논문에서는 내식성이 우수한 고연성 소재인 AISI 316L을 이용하여 제작한 파열판의 파열시험을 수행하였다. 결과를 통하여 파열판의 크기에 대한 파열압력의 변화를 확인하고 유한요소해석 결과를 비교하여 탄소성 물성의 수정을 통해 정확성을 향상시켰으며, 임의의 형상에 대한 파열판 해석을 수행함으로써 계산 결과를 검증하였다.

Key Words: Rupture Disc(파열판), Elastic-Plastic Analysis(탄소성해석), Pulse Separation Device(펄스 분리장치), Dual Pulse Rocket Motor(이중 펄스 로켓 추진기관)

1. 서 론

이중 펄스 로켓 추진기관은 하나의 연소관 안

에 특성이 다른 2개의 추진제가 격벽(Bulkhead) 또는 격막(Diaphragm)에 의해 분리되어 있는 고체 추진기관이다[1].

이중 펄스 로켓 추진기관은 발사단계(Boost Phase)에서는 1단 추진기관이 연소하여 많은 에너지를 분출하고, 순항(Mid-Course Phase) 및 종

* (주)한화 대전사업장

** 국방과학연구소 1기 6부

* 교신저자, E-mail: strand7@hanwha.co.kr

말(Terminal Phase) 단계에서는 2단 추진기관이 연소하여 필요한 에너지를 공급한다. 순항 및 종말 단계의 추력을 얻기 위해서는 2단 추진기관의 연소 시 발생하는 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. 적합한 파열판을 설계하기 위해서는 다양한 형상에 대한 유한요소해석을 수행하여 1단과 2단 추진기관의 요구사항에 적합한 파열판을 설계하여야 한다.

D. P. Jones는 304 SS, ABS-C, A-533-B에 대한 ASME Code의 한계압력과 탄성, 탄소성해석 결과를 비교하였다. 해석 결과 대변형률 대변형 탄소성해석(Large Strain Large Deflection)이 파열압력 계산에 가장 근접한 결과를 보였으며, 304 SS는 11% 크게 나타났으며, ABS-C는 11% 작게 나타났고, A-533-B는 7% 작게 나타났다[2]. 이 논문에 의하면 오차가 큰 이유는 소재의 응력-변형률 선도를 균일 변형률에 의해 가정된 이중 선형 응력 변형률 선도(Bi-linear Stress Strain Curve)로 고려되었기 때문으로 나타났다.

파열판은 안전과 관련된 중요한 부품이므로 약 10%의 오차는 허용할 수 없는 오차이며, 오차를 최소화시키는 것이 필요하다.

본 논문에서는 파열판 소재 중의 하나인 AISI 316L 소재에 대하여 L.A. Norstrom의 시험 결과를 이용하여 해석을 수행하였다[3]. 소성 물성치의 변경을 통해 파열압력 계산 결과를 향상시키고 파열판에 사용되는 임의의 형상에 대한 시험결과와 비교하였다.

2. 파열시험

2.1 실험장치 및 방법

파열판 덤플의 파열압력 측정을 위한 시험장치는 Fig. 1과 같다. 시험장비는 20톤급의 프레스

스와 유압시험장치를 사용하였으며, 시험체는 두께가 0.635 mm인 AISI 316L 판을 사용하였다.

성형시험을 하기 위해 JIG 1에 판형 소재를 장착하고 임의의 형상이 적용된 JIG 2와 시험체를 고정하기 위한 JIG 3를 장착한다. 프레스를 하강하여 시험체를 고정하고 유압펌프를 이용하여 시험체에 압력을 가하고 JIG 2와 동일한 모양으로 덤플을 형성하였다.

소재 물성을 검증하기 위한 시험체의 형상은 Fig. 2와 같다. 파열판은 8개의 덤플을 가지며, 슬릿으로 나누어져 원주방향으로 동일한 형상을 가지고 있다. 파열판 제작 시와 동일한 성형과정을 고려하기 위해 1개의 파트를 시험체로 고려하였다. JIG 2는 원형으로 제작하여 직경 35 mm ~ 45 mm까지 2 mm 간격으로 증가시키면서 시험을 진행하였다.

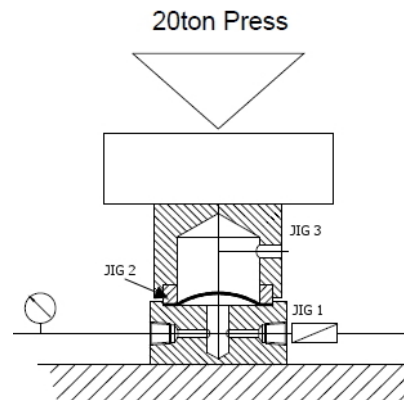


Fig. 1 Schematic Diagram of Dimple Forming Test Set-up

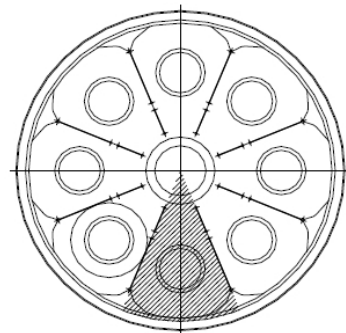


Fig. 2 Test Specimen of Dimple Forming Test

2.2 실험 결과 및 고찰

딴플의 파열압력을 측정하기 위하여 최대 41.37 MPa(6000 psi)까지 압력을 작용하였다. 실험 결과 Table 1과 같이 딴플의 직경이 커질수록 파열압력은 감소하였다. 딴플의 직경이 37 ~ 41 mm인 경우 Fig. 4와 같이 딴플의 중심에서 파열이 발생하였으며, 딴플의 직경이 43 ~ 45 mm인 경우 딴플의 모서리에서 파열이 발생하였다. D.P. Jones에 의하면 직경이 152 mm인 파열판의 해석 결과 연성이 작은 합금강(A-533-B)의 경우 모서리에서 파열이 발생하였으며, 연성이 큰 스테인리스강(304 SS)의 경우 파열판의 중심에서 파열이 발생하는 현상이 나타났다. 본 실험에서는 파열 위치가 재료에 의한 영향뿐만 아니라 파열판의 직경에 의해서도 영향이 있는 것으로 나타났다.

Table 1. Rupture Test Results

Dimple Diameter(mm)	Rupture Pressure(MPa)	Rupture Pressure(psi)
35	No Rupture	No Rupture
37	39.51	5,730
39	37.32	5,412
41	35.61	5,164
43	32.44	4,704
45	32.35	4,692



Fig. 3 Specimen before Dimple Forming



Fig. 4 Ruptured Specimen(D: 39 mm)

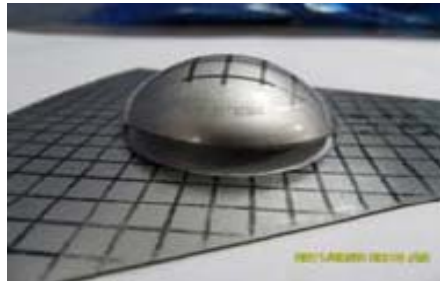


Fig. 5 Ruptured Specimen(D: 43 mm)

3. 유한요소해석

3.1 유한요소모델

유한요소모델은 Fig. 6과 같이 2차원 축대칭 해석을 수행하였다. 파열판은 직사각형 형태로 모델링하였으며, JIG는 강체로 모델링하였다. 딴플의 직경을 모사하기 위하여 강체를 이동하였다. 해석에 사용한 요소는 파열판은 CAX4R(4-node bilinear axisymmetric quadrilateral, reduced integration)요소이며, 지그는 RAX2(2-node linear axisymmetric rigid link) 요소이다. 전체 모델의 절점 수는 5,433개이며, 파열판 요소 수는 4,800개, Zig 요소 수는 68개이다.

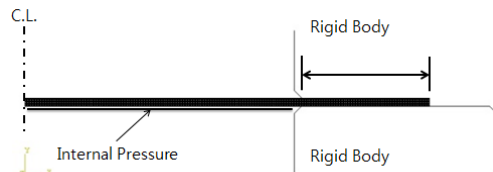


Fig. 6 Finite Element Model

3.2 경계조건

파열판은 Zig의 압력에 의해 고정된다. 파열판과 하부 강체는 마찰계수 0.3을 적용한 접촉조건을 사용하였으며, 상부 강체와 접촉하는 부분은 파열판의 변형 시 Under constraint를 방지하기 위하여 반경방향을 구속하였다. 변형 시 상부 강체와 파열판이 접촉하게 되므로 마찰계수 0.3을 적용한 접촉조건을 적용하였다.

압력은 파열판의 노출된 면에 작용하였다. 파열되는 시점을 알기 위하여 10 MPa씩 단계적으로 작용하였다.

3.3 재료 물성치

파열판은 고연성 재료인 AISI 316L로 제작되었으며, 대변형을 필요로 하는 파열판 재료로써 적합하다. 파열판의 제작에 사용한 AISI 316L의 탄성계수는 193 GPa이며, 푸아송비는 0.295이다.

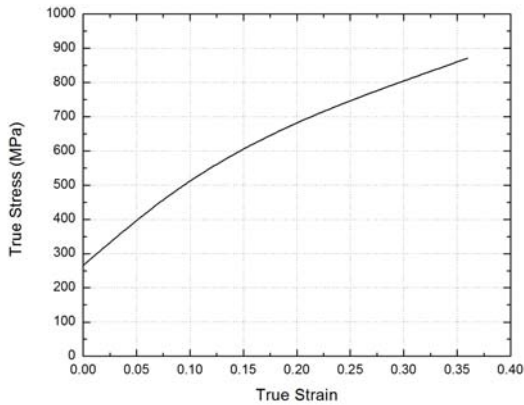


Fig. 7 True Stress-Strain Curve of AISI 316L

4. 해석결과분석

해석을 수행한 결과 Fig. 8과 같이 구형의 변형이 발생하였으며, 변형률이 한계점에 도달하였을 때 해석이 중지되었다. Table 2와 같이 딴플의 직경이 커질수록 파열압력은 감소하였다. 실험결과와 파열압력을 비교한 결과 직경 43 mm의 파열판은 8.4 %의 오차가 발생하였으며, 이외

의 모든 파열판은 12.1 ~ 12.5 %의 오차가 나타났다. 직경 43 mm는 실험적 요인에 의해 발생한 오차이며, 이외의 파열판에서 발생한 오차는 재료 물성치의 차이에 의해 발생하는 오차로 판단되었다. 동일한 오차가 발생한다는 것은 물성의 차이가 동일하다는 것으로 판단되어 Fig. 10과 같이 해석에 사용한 진응력-변형률 선도를 대수적으로 증가시킨 후 해석을 수행하였으며, 실험을 수행하지 않은 딴플의 직경은 선형 피팅을 사용하여 파열압력을 계산하였다.

해석을 수행한 결과 Table 3과 같은 결과가 나타났다. 실험 결과와 비교하면 -2.9 ~ -3.3 %의 오차가 나타났으며, 소성 물성치의 수정 전 결과에 비해 파열판의 파열압력 예측에 사용할 수 있도록 오차 5 %이내의 정확한 결과가 나타났다. Fig. 12 ~ 15와 같이 딴플의 변위와 등가응력은 소성 물성치의 수정 전에 비해 수정 후 증가하였다.

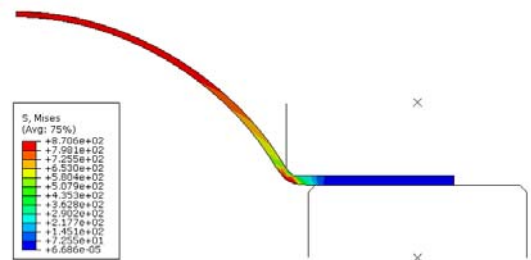


Fig. 8 Von Mises Stress of Rupture Disc(D: 37 mm)

Table 2. Rupture Analysis Results

Dimple Diameter(mm)	Rupture Pressure(MPa)	Rupture Pressure(psi)
35	36.6	5,308
37	34.6	5,018
39	32.8	4,757
41	31.2	4,525
43	29.7	4,308
45	28.3	4,105

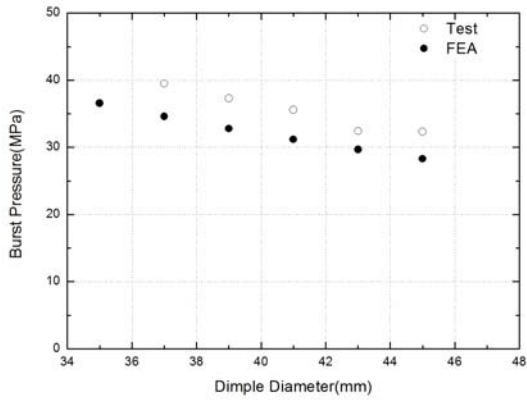


Fig. 9 Difference between Test and FEA Results

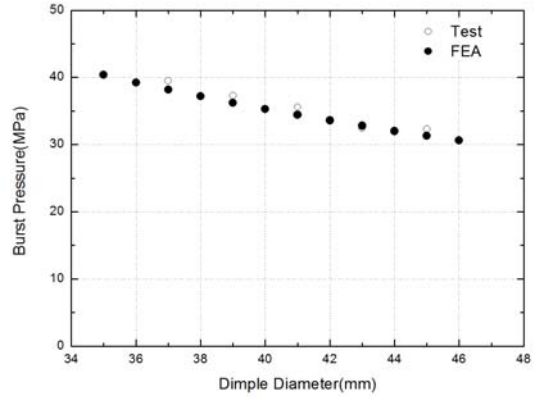


Fig. 11 Difference between Test and FEA Results using Modified Material Property

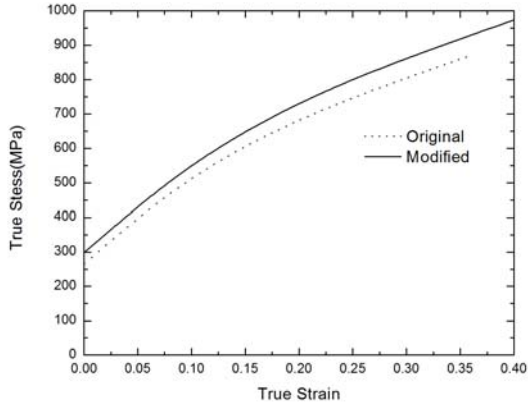


Fig. 10 Modified Plastic Property

Table 3. Rupture Analysis Results using Modified material property

Dimple Diameter(mm)	Rupture Pressure(MPa)	Rupture Pressure(psi)
35	40.4	5,859
37	38.2	5,440
39	36.2	5,250
41	34.4	4,989
43	32.8	4,757
45	31.3	4,540

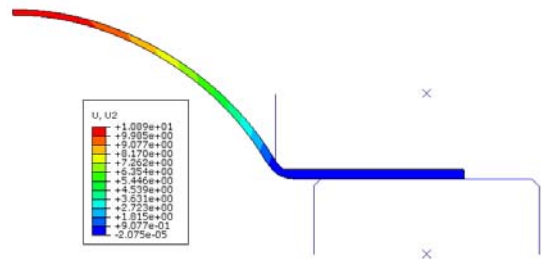


Fig. 12 Displacement(mm) of FEA using Original Material Property (D: 35 mm)

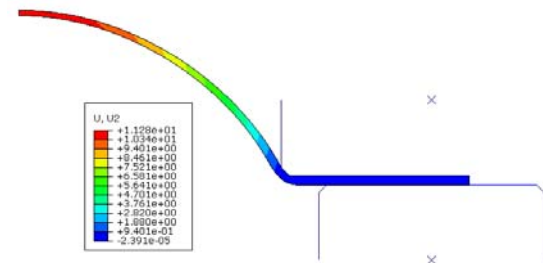
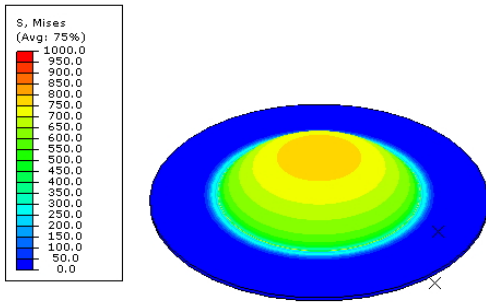
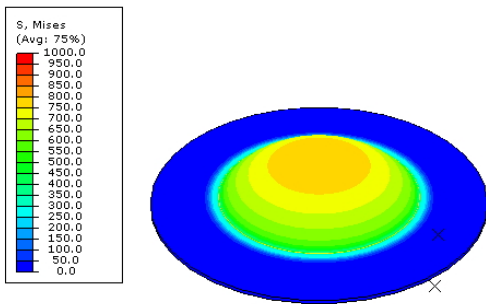


Fig. 13 Displacement(mm) of FEA using Modified Material Property (D: 35 mm)



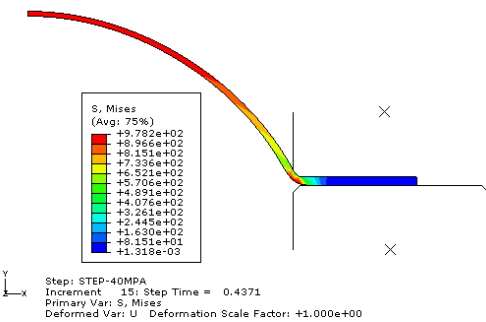
Step: STEP-30MPA
Increment: 28; Step Time = 1.000
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.0e+00

Fig. 14 Von Mises Stress(MPa) of FEA using Original Material Property (D: 35 mm)



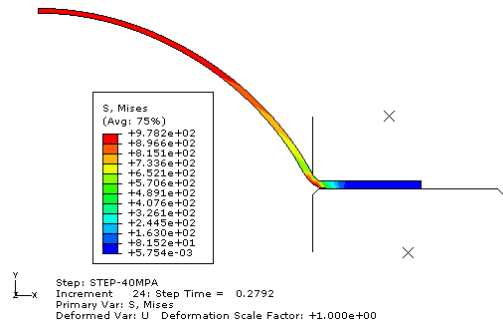
Step: STEP-30MPA
Increment: 22; Step Time = 1.000
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.0e+00

Fig. 15 Von Mises Stress(MPa) of FEA using Modified Material Property (D: 35 mm)



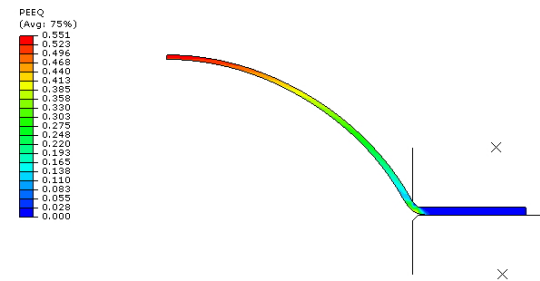
Step: STEP-40MPA
Increment: 15; Step Time = 0.4371
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Fig. 16 Von Mises Stress of Dimple(D: 41 mm)



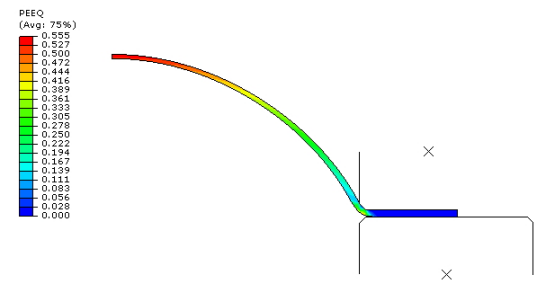
Step: STEP-40MPA
Increment: 24; Step Time = 0.2792
Primary Var: S, Mises
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Fig. 17 Von Mises Stress of Dimple(D: 43 mm)



Step: STEP-40MPA
Increment: 15; Step Time = 0.4371
Primary Var: PEEQ
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Fig. 18 PEEQ of Dimple(D: 41 mm)



Step: STEP-40MPA
Increment: 24; Step Time = 0.2792
Primary Var: PEEQ
Deformed Var: U Deformation Scale Factor: +1.000e+00

Fig. 19 PEEQ of Dimple(D: 43 mm)

실험에서 딤플의 직경 35 ~ 41 mm인 경우 딤플의 돔에서 파열이 발생하였으나, 43 ~ 45 mm인 경우 돔의 하단 에지에서 파열이 발생하였다. D. P. Jones는 소재 간의 파열위치 변화에 대하여 연구하였으며, 파열 위치는 해석적으로 등가 소성변형률을 통해 판단하였다. 딤플의 직경에

의해 발생하는 파열 위치의 변화는 Fig. 16, 17과 같이 에지 부분에서도 돔의 정점과 유사한 응력을 가지는 것을 확인할 수 있었으며, Fig. 18, 19와 같이 등가소성변형률은 이종 소재의 변화와 같이 큰 차이는 나타나지 않았다.

5. 결론

본 연구에서는 이전 연구의 소재 탄소성 물성치를 이용하여 압력용기 파열판의 한계하중 계산 결과를 검증하여 임의의 형상에 대한 파열판의 한계하중을 계산하도록 하였다. 해석 수행을 통해 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

1. 실험 결과 돔플의 직경이 커질수록 파열압력은 감소하였다.
2. 돔플의 직경이 37 ~ 41 mm인 경우 돔플의 중심에서 파열이 발생하였으며, 돔플의 직경이 43 ~ 45 mm인 경우 돔플의 모서리에서 파열이 발생하였다.
3. 돔플의 파열 위치는 재료에 의한 영향뿐만 아니라 파열판의 직경에 의해서도 영향이 있는 것으로 나타났다.

4. 해석을 수행한 결과 실험과 동일하게 돔플의 직경이 커질수록 파열압력은 감소하였다.

5. Norstron의 탄소성 물성을 사용하여 해석한 결과 12.1 ~ 12.5 %의 오차가 나타났다.

6. 진응력-변형률 선도를 대수적으로 증가시킨 후 해석을 수행한 결과 -2.9 ~ -3.3 %의 오차가 나타났으며, 파열판의 파열압력 예측에 사용할 수 있도록 오차 5 %이내의 정확한 결과가 나타났다.

7. D. P. Jones는 소재 간의 파열위치 변화에 대하여 연구 결과와 같이 돔플의 직경에 의해 발생하는 파열 위치의 변화는 유한요소해석을 통해 발견할 수 없었다.

참 고 문 헌

1. Sutton, G. P., Rocket Propulsion Elements, 6th ed., John Wiley & Sons Inc., 1992
2. Jones, D. P. and Holliday, J. E., "Elastic-Plastic Analysis of the PVRC Burst Disk Tests with Comparison to the ASME Code Primary Stress Limits," ASME, Vol. 122, May, 2000
3. Norstrom, L.A., Scand. J. Metal., Vol.6, No. 4, 1977, P.145