

# Rupture Disc의 성형압력 및 파열압력 해석

강영규\*

## Analysis of Forming Pressure and Burst Pressure of Rupture Disc

Young Kyu Kang\*

### ABSTRACT

Forming pressure of the rupture disc has been analyzed theoretically and verified by experiments. Final shape of the rupture disc after forming process is assumed to be hemi-ellipsoid for small height of the rupture disc. The predicted forming pressures are in good agreement with those by experiment. A new simple model has been proposed to predict the burst pressure of the rupture disc. Experimental results show that the proposed model of burst pressure describes the bursting characteristics of the rupture disc very well.

**Key Words :** Rupture Disc(파열 디스크), Forming Pressure(성형압력), Burst Pressure(파열압력), safety relief valve(안전밸브)

### 기호설명

E = Young's modulus

h = height

K = plastic coefficient

n = strain-hardening exponent

$P_b$  = burst pressure

$P_f$  = forming pressure

r = inner radius

t = final thickness

$t_0$  = initial thickness

$\epsilon$  = true strain

대표적인 예이다. 특히 저장탱크의 내용물의 온도가 민감하게 변하는 경우에 많이 사용되며, 비교적 단순한 형태의 구조로 구성되어 있으므로 유지보수의 측면에서 효과적이다. 대형 저장탱크의 안전을 위해서 꼭 설치되어야 하는 중요 항목이지만 국내 수요의 대부분은 수입에 의존하고 있는 실정이다. Fig. 1 은 실제로 산업현장에서 Rupture Disc가 응용되는 예를 보여준다. 저장탱크의 내압이 기준치 이상으로 올라가면 Rupture Disc의 파열을 통하여 저장탱크를 보호하며, 주 안전장치(primary relief device) 또는 보조 안전장치(secondary relief device)로 사용된다.

### 1. 서론

Rupture Disc는 산업 시설물에서 광범위하게 사용되고 있는 안전 밸브(safety relief valve)의

Rupture Disc의 성형압력 및 파열압력을 해석하기 위해서는 먼저 설계변수들을 규명해야 한다. Rupture Disc 제작용 소재의 초기 두께, Rupture Disc의 내직경(inner diameter), Rupture

2000년 11월 10일 접수

\* 인하대 기계공학과

Disc의 높이(height) 등의 설계 변수들이 Rupture Disc의 성형압력 및 파열압력에 영향을 미친다는 것을 산업현장의 종사자들이 경험적으로는 알고 있으나 정량적인 거동은 충분히 파악하지 못하고 있는 실정이다.

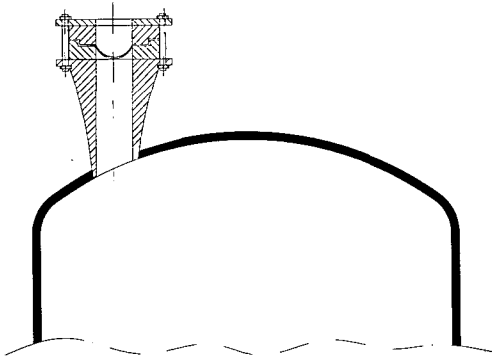


Fig. 1 Application of Rupture Disc

제작과정을 고려하면 Rupture Disc의 설계시에 고려해야 할 요소에는 소재의 초기 두께, 내직경(inner diameter), 높이(height), 성형을 위한 유압의 온도, 성형압력(forming pressure), 파열압력(burst pressure), 체결시 압력누수 방지를 위한 누수방지턱(anti-leak sill)의 높이 및 폭, 파열시험시의 공기의 유속 및 압력의 증분크기(step size of pressure increment) 등이 있음을 알 수 있었다. 다양한 설계변수들 중에서 지배적인 영향을 미치는 것들을 실험 데이터를 분석하여 파악하였으며, 이것을 성형압력 및 파열압력을 예측하는 이론식에서 반영하였다. 본 논문에서는 실제로 Rupture Disc 제작에 가장 많이 사용되는 SUS316 재료를 이용하여 실험을 수행하여 성형압력 및 파열압력 예측모델의 타당성을 확인하였으며, 본 논문의 예측모델은 산업현장의 기술자들이 쉽게 적용할 수 있으므로 기존의 경험적인 방법에 의한 시행착오를 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. 이론

공학적 모델링 및 설계를 위한 해석을 수행하였다. 먼저 박판 형태의 소재를 이용하여 반타원체(hemi-ellipsoid)의 형상을 가진 Rupture Disc의 성형압력을 계산하기 위해서 먼저 소재가 변형된 후의 기하학적 형상에 대한 해석을 수행하였다. 내직경이  $D_1$ , 초기 두께가  $t_0$ 인 소재가 성형압력에 의해서 소성변형을 통해서 높이  $h$ 인 Rupture Disc로 제작된 경우 최종 변형된 형상에 대하여 다음과 같은 가정을 하였다. 첫째로, 성형된 Rupture Disc의 형상은 반타원체(hemi-ellipsoid)로 가정하였다. 이는 높이가 내반경(inner radius)에 비해서 작은 경우에 타당하며, 현장에 설치되는 대부분의 Rupture Disc 형상과 유사하다. 둘째로, 성형과정에서 박판의 소재는 성형압력에 의해서 대칭적인 변형을 일으킨다. 셋째로, 성형을 위한 유압의 온도변화에 따른 성형압력의 변화는 무시할 수 있을 정도로 유압의 온도는 일정한 것으로 하였다. Rupture Disc의 성형된 형상을 Fig. 2에 나타내었다. 내반경이  $D_1$ 인 소재를 이용하여 높이  $h$ 의 형태로 성형된 Rupture Disc의 진변형률(true strain)은 다음과 같이 표현된다.

$$\varepsilon = \ln\left(2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{h^2}{r^2}\right) \sin^2 t} dt\right) \quad (1)$$

식(1)에서  $r$ 은 Rupture Disc의 내반경(inner radius)으로  $D_1/2$ 로 표현된다. 성형후의 변화된 Rupture Disc의 최종두께는 다음과 같이 표현된다.

$$t = t_0 e^{-\bar{\varepsilon}} = t_0 e^{-2\varepsilon} \quad (2)$$

여기서  $\bar{\varepsilon}$ 는 소성변형시의 주진변형률(principal true strain)이다. 식(2)에서 보면 소성변형후의 박판의 두께는 변형률에 지수함수적으로 감소함을 알 수 있다.

구형의 압력용기(spherical pressure vessel)<sup>(1)</sup>에 작용하는 내압(internal pressure)과 응력의 관계와 소성변형시의 응력-변형률의 관계식을 이용하면 Rupture Disc의 성형압력(forming pressure)은 다음의

식으로 표현된다.

$$P_f = \frac{2t}{r} K \bar{\epsilon}^n \quad (3)$$

여기서  $K$ 는 소성변형계수(plastic coefficient)이며,  $n$ 은 가공경화지수(strain-hardening exponent)로 실험을 통해서 구한다. 식(2)의 두께에 관한 식을 식(3)에 대입하면 성형압력은 다음과 같이 초기 두께, 내반경 및 높이의 함수로 표현된다.

$$P_f = \frac{2t_0 e^{-2\epsilon}}{r} K \bar{\epsilon}^n \quad (4)$$

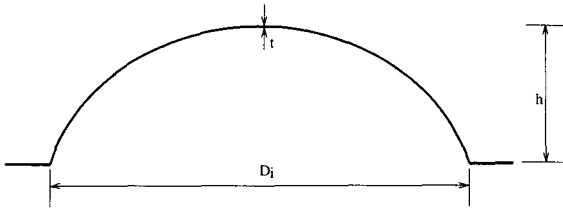


Fig. 2 Formed Shape of Rupture Disc

성형압력에 의해 완성된 Rupture Disc는 산업현장에 설치되면 외압을 받는다. Fig. 3 은 외압에 의해서 Rupture Disc가 파열된 형상을 보여준다. Fig. 3 에서 A가 Rupture Disc이며, B는 좌굴에 의해 disc가 변형된 후에 2 차적으로 안전한 압력강하를 위하여 설치한 절단기구이다.

파열압력(burst pressure)에 관한 이론적 정식화를 위하여 문헌조사를 수행하였다. 반구(hemi-sphere)형태나 원뿔(cone) 형태의 압력용기가 외압을 받을 때의 좌굴 임계압력에 관한 식들은 몇몇 사람들이 제안하였다.<sup>(2,6)</sup>

이론식 뿐만 아니라 유한요소법과 같은 수치모사법을 사용하기도 하였으나 실험치와 잘 일치하지 않는 경우가 많으며, 주로 경험적 및 실험적인 방법으로 구하여 사용해 왔다. 또한 산업 현장의 기술자가 바로 적용하기에는

여러가지 어려움이 있다. 두께  $t$ , 반경  $r$ , 포아송의 비가  $\nu$ 인 얇은 구형(thin-walled sphere)이 균일한 외압을 받는 경우에 대하여 von Karman & Hsue-Shen<sup>(2)</sup>은 임계좌굴압력이 이론적으로 다음의 식으로 표현된다고 하였다.

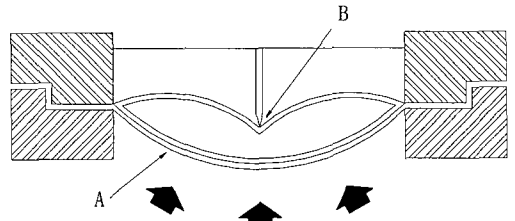


Fig. 3 Rupture Disc after Bursting

$$P_{cr} = \frac{2E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{t}{r}\right)^2 \quad (5)$$

하지만 식(5)를 이용한 압력예측은 실험치보다 크게 나온다고 알려져 있으며, 실험적으로 구한 보정계수를 사용하기도 한다. 이에 본 논문에서는 von Karman & Hsue-Shen의 임계좌굴압력 이론을 변형하여 타원체 형태의 Rupture Disc 파열압력을 다음과 같은 형태의 식으로 제안하였다.

$$P_b = C_b E \left(\frac{t}{r}\right)^2 \left(\frac{h}{r}\right)^2 \quad (6)$$

식(6)에서  $E$ 는 소재의 영의 계수(Young's modulus),  $t$ 는 소성변형 후의 Rupture Disc의 최종 두께이며,  $r$ 은 내반경(inner radius)을 나타낸다. 이 식에서  $h/r$ 을 보통 세장비(aspect ratio)라고 부르며, 식(6)에서 파열압력이 세장비의 함수로 표현되어 있으므로 다양한 형상에 대한 수치모사를 수행하여 최적의 설계조건을 구할 수 있다.  $C_b$ 는 파열압력 계산을 위한 보정상수이며, 실험적인 결과를 종합해 보면 내직경이 32mm이하이면서

Rupture Disc의 형상이 반구의 형상에 가까운 경우  $C_b$ 의 값은 1.21 이며, 이는 von Karman & Hsue-Shen의 임계좌굴압력과 일치한다. 하지만 타원체 형상을 가지는 대부분의 Rupture Disc의 경우에는  $C_b$ 의 값은 2 이다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 4 는 SUS316 재료로 내직경이 46mm이고 초기 두께가 0.1mm인 Rupture Disc의 높이에 따른 성형압력을 이론적 예측치와 실험치를 보여준다. 실험을 위하여 박판의 소재를 내직경의 크기에 누수방지턱(anti-leak sill) 폭의 2 배를 더한 외직경의 크기로 절단한 후에 내직경과 외직경 사이의 폭을 원주방향으로 고정하였다. 다음에는 내직경의 단면적 방향으로 압력을 가하여 원하는 형상에 도달하도록 성형을 하였다. Fig. 4 에서 보면 대체적으로 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

이용한 파열압력의 예측은 기존의 유한요소법을 이용한 방법에 비해서 매우 편리하며, 실험치와 잘 일치하므로 식(6)의 형태로 Rupture Disc의 파열압력을 표현한 것은 타당하다.

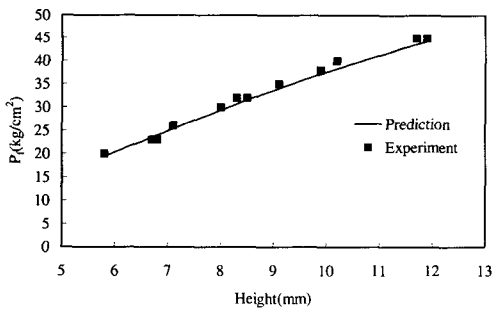


Fig. 4 Forming Pressure vs. Height

다양한 내직경과 초기두께 및 높이에 대해서 변형률과 비례성형압력(scaled forming pressure,  $P_f/(2\epsilon r)$ )의 관계를 SUS316 재료에 대해서 Fig. 5 에 나타내었다. 이론적 예측치와 실험치가 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 6 은 SUS316 재료로 내직경이 46mm이고 초기 두께가 0.1mm인 Rupture Disc의 높이(height)에 따른 파열압력을 이론적 예측치와 실험치를 보여준다. Fig. 6 에서 보면 대체적으로 서로 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 식(6)을

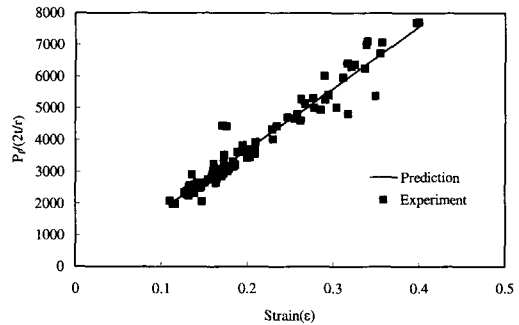


Fig. 5 Scaled Forming Pressure vs Strain (SUS 316)

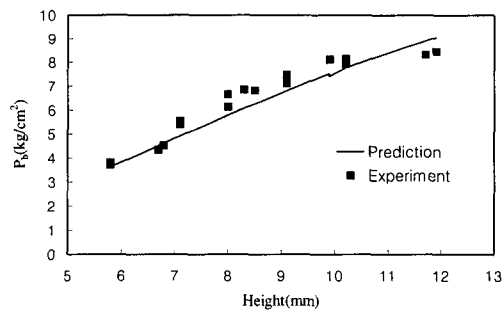


Fig. 6 Burst Pressure vs. Height(SUS316)

Table 1 Comparison of burst pressure(kg/cm<sup>2</sup>)

$t_0$ (mm)	h(mm)	$D_i$ (mm)	Prediction	Experiment
0.05	10.3	45	2.10	2.08
0.2	8.25	64	7.75	7.66
0.2	11.6	85	4.80	5.27
0.3	18.3	105	10.02	10.12
0.3	37.8	265	1.19	1.29

다양한 세장비에 대한 본 논문의 예측값과

실험값을 Table 1 에 나타내었다. Table 1 의 결과를 보면 식(6)을 이용한 파열압력 예측이 타당함을 알 수 있다.

stability studies of thin-walled domes under uniform pressure," J. Strain Analysis, 18, pp. 167-72, 1983.

#### 4. 결론

Rupture Disc의 성형압력 및 파열압력을 해석하기 위한 모델을 제시하였으며, 실험적으로 해석기법의 타당성을 확인하였다. 본 논문의 결론을 요약하면 다음과 같다.

첫째로 Rupture Disc의 성형압력에 지배적인 영향을 미치는 설계변수로는 초기 소재의 두께, Rupture Disc의 내반경 및 높이임을 알 수 있었다. 실험적으로 측정된 성형압력과 이론적 예측치는 매우 잘 일치하였다.

Rupture Disc의 파열압력을 예측하기 위해서 본 논문에서 제안한 모델은 Rupture Disc의 다양한 세장비(aspect ratio)에 대해서 잘 일치하였다. 따라서 기존의 경험적인 식만을 이용한 예측식과는 달리 유사한 압력용기의 파열 및 좌굴하중 해석에 응용이 가능할 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. Henry H. Bedner, "Pressure Vessel Design Handbook," Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, pp. 55-62, 1986.
2. Von Karman, Th. and Hsue-Shen Tsien, "The Buckling of Spherical Shells by External Pressure, in Pressure Vessel Piping Design," ASME Collected Papers, 1927-1959.
3. Roark, R. J. and Young, W. C., Formulas for Stress and Strain, McGraw-Hill/Kogakusha, 1975.
4. Galletly, G. D., Blachut, J. and Kruzelecki, J., Plastic buckling of imperfect Hemispherical Shells Subjected to External Pressure, Proc. I.Mech.E., 201, pp. 153-70, 1987.
5. Ross, C. T. F and Johns, T., "Dynamic buckling of thin-walled domes under external water pressure," Res. Mechanica, pp. 28, 113-137, 1989.
6. Ross, C. T. F and Mackney, M. D., "Deformation and