

# Duplex 스테인레스강의 초소성 성형을 위한 유한요소 해석 및 실험에 관한 연구

## Superplastic Forming Analysis of Duplex stainless steel with Finite Element Method

\*박지원<sup>1</sup>, 탁승민<sup>1</sup>, #이석순<sup>2</sup>

\*J. W. Park<sup>1</sup>, S. M. TAK, #S. S. Lee(leess@gnu.ac.kr)<sup>3</sup>

<sup>1</sup>경상대학교 기계공학과, <sup>2</sup>경상대학교 기계항공공학부

Key words : Superplastic forming(초소성 성형), Duplex stainless steel(듀플렉스 스테인레스강)

### 1. 연구 목적 및 내용

초소성 성형(superplastic forming)은 항공우주산업에서 기존의 성형방법으로는 불가능하던 복잡한 형상의 부품을 제작 가능하게 하는 새로운 성형기술로 많은 관심을 모으고 있다. 초소성 재료는 보통 10 μm 이하의 미세한 입자구조를 가지며, 특정한 온도(보통 재료 용해온도의 중간이상)와 매우 느린 변형률속도(보통 10<sup>-3</sup> ~ 10<sup>-5</sup>/sec)에서 큰 인장 연신율을 나타내며, 이 영역에서 유동응력이 매우 낮아진다.<sup>1</sup>

본 연구에서는 Free bulging 시험을 이용한 duplex stainless steel의 초소성 특성 평가를 하고자 하였으며 압력은 일정하게 유지하면서 dome의 변위를 시간에 따라 유한요소해석을 수행 하고 이를 사용하여 재료의 두께변화를 구하고, 이론적인 식으로부터 재료의 두께를 구하여 그 결과를 비교하고자 한다.

### 2. 이론적 배경

#### 2.1 듀플렉스 스테인레스강

듀플렉스(Duplex) 스테인리스강은 고 Cr, 저 Ni 및 Mo을 첨가하고 α/γ 상 비율을 조정하여 얻어진 양호한 내식성을 갖는 강이다. 듀플렉스(Duplex) 스테인리스강은 강도가 높고 내공부식성, 내응력 부식균열성이 종래의 오스테나이트 강이나 페라이트 강에 비하여 뛰어나며, 오스테나이트계 스테인리스강에 비해 인성이 양호하고 용접성이 비교적 우수하여 점점 더 사용범위가 확대되고 있다.

#### 2.2 초소성(Superplasticity)

고온 인장 시 파괴가 일어나기 전까지 수백% 이상의 연신율이 나타나는 현상을 말하며, 1960년대 이후 개발 및 응용 연구가 확대, 최근 여러 분야에서 초소성을 이용한 제품들이 생산되어 지고 있다.

지금까지 알루미늄, 티타늄, 철, 니켈, 구리 등의 합금계에서 초소성현상이 발견되었다. 초소성의 주 변형기구는 입계 미끄러짐(grain boundary sliding)이며, 입계 미끄러짐에 의한 초소성은 0.5 Tm(Tm:녹는점)이상에서 가능하며 최적 변형률속도는 약 10<sup>-4</sup> ~ 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>, 변형률 속도 민감지수(strain-rate sensitivity) m은 0.5 정도로 갖는다.

#### 2.2 Free bulging test

다음 Fig. 1은 판재의 gas pressure forming 과정을 나타내는 그림으로서 판재는 끝단에서 둘레방향으로 충분히 구속되어 있어야 하며 아르곤과 같은 불활성 기체의 압력을 판재 표면에 가하여 시간에 따라 판재가 금형 캐비티 안으로 부풀리게 된다. 이때, 두께 방향으로의 응력을 무시할 수 있다면 각 방향 응력성분은 식(1) 같이 표현할 수 있다.

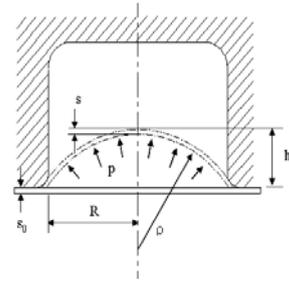


Fig. 1 Free bulging geometry of plate

$$\sigma_1 = \frac{p\rho}{2s} = \sigma_2, \quad \sigma_3 = 0 \quad (1)$$

여기서 ρ는 부풀려진 판재의 곡률반경이며 s는 변형된 판재의 두께, p는 압력이며, σ<sub>2</sub>는 자오선(meridian) 방향 응력, σ<sub>3</sub>는 두께방향 응력이다.

Von Mises 항복조건을 적용하면 유효응력은

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

따라서 식 (1)을 대입하면

$$\bar{\sigma} = \frac{p\rho}{2s} \quad (3)$$

한편, Nadai가 제안한 주응력과 변형률 관계식을 대입하면

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E_p} \left[ (\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2}) \right]^2 \quad (4)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{E_p} \left[ (\sigma_2 - \frac{\sigma_3 + \sigma_1}{2}) \right]^2 \quad (5)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E_p} \left[ (\sigma_3 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}) \right]^2 \quad (6)$$

여기서, E<sub>p</sub>는 소성계수(plastic modulus)이며, 식 (1)을 식 (4)~(6)에 대입하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = -\frac{1}{2}\epsilon_3 \quad (7)$$

따라서 유효변형률의 정의로부터 다음의 관계가 성립함을 알 수 있다.

$$\bar{\epsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2]^{\frac{1}{2}} = \epsilon_3 \quad (8)$$

한편, 두께방향 변형률은 다음과 같이 정의 되므로

$$\bar{\epsilon} = \ln \frac{S}{S_0} \quad (9)$$

유효변형률 속도는 식 (9)을 시간에 대해 미분한 것과 동일하다. 즉,

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{S}}{S} \quad (10)$$

한편 위의 그림에서 나타난 기하학적 관계로부터 피타고라스의 정리를 적용하면

$$\rho^2 = R^2 + (\rho - h)^2 \quad (11)$$

또는

$$\rho = \frac{R^2 + h^2}{2h} \quad (12)$$

변형된 판재의 표면적을 A 라 하면

$$A = 2\pi\rho h \quad (13)$$

만약 판재의 변형된 부분이 즉, 돔형상이 균일 두께를 계속 유지한다고 가정하면 체적일정 조건은

$$As = A_0s_0 = \pi R^2 \quad (14)$$

따라서 부풀어 오른 판재의 두께는 다음과 같다.

$$s = \frac{A_0s_0}{2\pi h} = \frac{R^2s_0}{R^2 + h^2} \quad (15)$$

### 3. 이론적 계산 결과

Table 1 Specimen thickness

	1	2	3	4	5	6
<b>h</b>	-5.08	-15.7	-24.9	-31.9	-36.5	-38.3
<b>R</b>	53	53	53	53	53	53
<b>S<sub>0</sub></b>	10	10	10	10	10	10
<b>S</b>	9.91	9.19	8.20	7.34	6.79	6.57

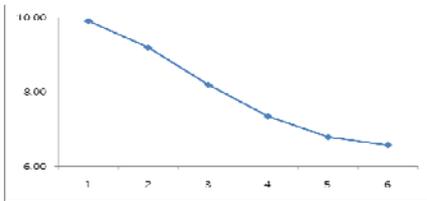


Fig. 2 Specimen thickness

식 (15)에서 높이 h 만이 단지 미지수이므로 이를 실험적으로 구한 다음 식에 적용하게 되면 재료의 두께도 계산이 가능하게 된다. Table 1 과 Fig. 2 는 계산한 결과를 나타낸 것이다.

### 4. 결과 검증

#### 4.1 유한요소해석 모델

앞 절에서 계산된 재료의 두께 신뢰성 검증을 위해서 Free bulging test 와 동일한 조건 및 계산된 재료상수를 이용하여 유한요소 해석을 한 다음 specimen 의 두께를 비교해 보았다. 해석에 사용된 유한요소해석 프로그램은 ABAQUS6.8 이며 Visco 해석을 수행하였다.

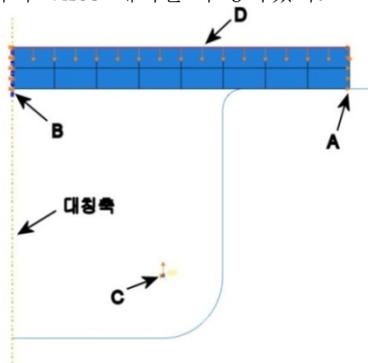


Fig. 3 Boundary conditions for whole model

다음 Fig. 3 은 유한요소 모델링과 모델링에 대한 구속조건을 나타낸다. Free bulging test 의 해석을 위한 금형과 초기 판재형상 셋업은 다음 Fig. 3 에 나타난 바와 같다.

#### 4.2 유한요소해석 결과

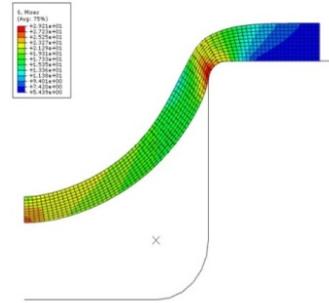


Fig. 4 Stress distribution for whole model

Fig. 5 는 유한요소 해석을 수행한 다음 대칭축 상에 있는 절점 들의 변위를 추출하여 두께를 계산한 다음 시험결과와 비교해 보았다. Specimen 이 고정되는 위치에서 차이가 있으나 전체적으로 유사한 결과를 얻었다.

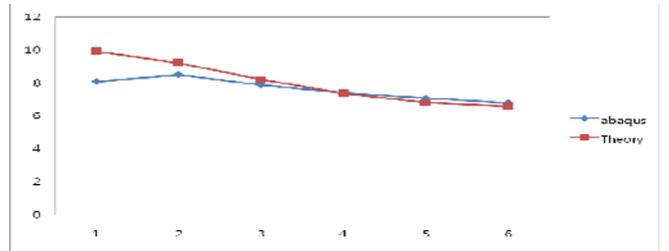


Fig. 5 Comparison of specimen thickness between FEM calculation result

### 5. 결론

본 연구를 통해서 Free bulging test 을 위한 두께 이론식을 이용하여 duplex stainless steel 의 초소성 특성 평가를 수행하였으며 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 이론적 계산을 통해서 구한 Specimen 의 두께는 유한요소해석결과와 양호한 일치율을 보였다.
- (2) 본 결과를 통해 Specimen 이 고정되는 부위에는 두께의 차이가 있었으나 전체적으로 이론적 계산과 유한요소해석 결과가 유사함을 보이고 있다.

### 6. 참고문헌

1. Sung Suk Hong, "Analysis of Superplastic Forming Processes Using Finite Element Method", Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 19, No. 6, 1995, pp. 1411-1421.
2. Kyung-Choong Hwang, "Creep Behaviours of Duplex Stainless Steel", Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineering, Vol. 14, No. 2, 2005, pp. 42-47.
3. V. S. Senthil Kumar, "Theoretical prediction and FEM analysis of superplastic forming of AA7475 aluminum alloy in a hemispherical die", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 173, No.3, 2006, pp.247-251.
4. ABAQUS, 2006, ABAQUS Example Problems Manual, pp.1.3.2-1~1.3.2-5.