

유한요소법에 의한 Duplex 스테인레스 강의 초소성 해석

Superplastic Forming Analysis of Duplex Stainless Steel with Finite Element Method

박지원¹, 강석봉², 황영진³, 이석순^{4,✉}
Ji Won Park¹, Seok Bong Kang², Yeong Jin Hwang³ and Seok Soon Lee^{4,✉}

1 경상대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Gyeongsang National Univ.)

2 두원중공업 (Doowon Heavy Industrial Co.)

3 경남 테크노 파크 (Gyeongnam Technopark)

4 경상대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Gyeongsang National Univ.)

✉ Corresponding author : leess@gnu.ac.kr, Tel: 055-751-5314

Manuscript received: 2009.2.12 / Accepted: 2009.7.6

In recent years, there has been a considerable interest in the application of superplastic forming in the aircraft and automotive industries. This requires a detailed design of the technological process in order to exploit its peculiar potentialities better. Nowadays, the finite element method is used to plan the sheet metal forming processes whose simulation requires determination of material constants for superplastic materials. The present work is aimed to show a simple method to characterize superplastic materials duplex stainless steel which was formed by a constant gas-pressure to hemispheres with and without back pressure. The forming operation was performed using an in-house designed and built biaxial forming apparatus. The temporal change of dome heights of hemispheres were measured for applying the pressures. The flow stresses and strain rates developed at the top of the dome during the forming step were shown to follow closely the flow stress - strain rate relationship obtained from the strain rate change tests performed at the same temperature.

Key Words : Superplastic Forming (초소성 성형), Duplex Stainless Steel (듀플렉스 스테인레스강), Strength Coefficient (강도계수), Strain Rate Sensitivity (변형률속도 민감지수), FEM (유한요소법)

기호설명

K = Strength coefficient

m = Strain rate sensitivity

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 보

통 10 μm 이하의 미세한 입자구조를 가지며, 특정한 온도(보통 재료 용해온도의 중간이상)와 매우 느린 변형률속도(보통 $10^{-3}\sim 10^{-5}/\text{sec}$)에서 큰 인장연신률을 나타내며, 이 영역에서 유동응력이 매우 낮아진다.¹

이러한 초소성 재료는 보통 낮은 유동응력에 매우 큰 변형률속도 민감도를 보여주며, 특정한 변형률 속도 영역에 제한되어 나타난다. 또한 초소성 성형은 잠재력이 매우 다양하며, 중요한 형상이나 정밀한 치수를 요하는 부품을 하나의 공정으로 성형할 수 있으며, 성형과 접합이 동시에 수

행되는 초소성 성형/확산접합공정으로 복잡한 형상의 구조물을 쉽게 성형할 수 있는 특징이 있다.

재료의 초소성 성질을 유지하고 성형시간을 최소화하기 위하여 재료의 초소성 특성이 나타나는 영역 내에서 가능한 높은 변형률속도를 유지하는 것이 필요하며, 그 값은 최적의 변형률속도 값을 초과하지 말아야 한다.

변형률속도 민감지수(strain rate sensitivity, m)로 대표되는 재료의 초소성 특성을 평가하는 방법에는 고온 단축인장시험, cone cup 시험, free bulging 시험의 3 종류가 대표적이다. 고온 단축인장시험의 경우 변형률속도 일정조건하에서 시험하는 것으로서 물성평가가 비교적 용이하다는 장점은 있으나 실제 공정에서 야기되는 다축 응력상태가 아닌 단축 응력상태에서 물성평가를 하기 때문에 실제 성형 공정 시에는 시험조건이 단순화되어 정확한 평가가 안 될 수도 있다는 단점이 있다.

단축인장시험의 단점을 보완하기 위해 제안된 것이 cone cup 시험과 free bulging 시험인데 cone cup 시험의 경우 압력을 일정하게 유지 즉, 응력일정 조건하에서 성형가스 압력으로 판재를 불림성형하면서 cone 정점(apex)의 높이를 시간에 따라 측정하는 다음 이를 응력-변형률속도 관계식으로 산출해 내는 방법이다. 이는 일정 압력만을 부여하면 되기 때문에 시험의 정확도가 높고 판재가 다축상태가 되므로 실제 성형공정 조건과 유사한 조건으로 물성평가를 할 수 있다는 장점이 있다. 하지만 성형된 cone 벽면과 금형 간의 접촉 시 윤활 조건에 따른 마찰상태가 시험결과에 다소 영향을 미칠 수 있다.

Free bulging 시험의 경우 압력프로파일을 적용하여 시험하는 방법으로서 압력 즉, 응력 값과 변형률 속도 값이 동시에 변하는 조건이 된다. cone cup 시험에 비해 마찰 영향은 작지만 압력을 시간에 따라 연속적으로 변화시켜야 하기 때문에 시험에 다소 문제가 있을 수 있다.

본 연구에서는 Free bulging 시험을 이용한 duplex stainless steel의 초소성 특성 평가를 하고자 하였으며 기존의 방식과는 달리 압력을 일정하게 유지하면서 dome의 정점 변위를 시간에 따라 측정한다. 이를 응력-변형률속도 관계식으로 환산하여 재료상수 즉, 변형률속도 민감지수와 강도계수(strength coefficient, K)를 구하고, 이 값들을 이용하여 유한요소해석을 수행하여 그 결과를 비교하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 듀플렉스 스테인레스강

스테인리스강의 사용처로는 원자력 발전설비를 비롯하여 내구성이 크게 요구되는 소비재, 화학공업 및 자동차 배기가스 정화장치 등의 환경보전 분야와 내해수 관련장치의 수요분야 등이다. 특히 최근 우주항공 분야에서도 그 활용도가 높아지고 있다.

스테인리스강의 종류로는 페라이트계(α), 마르텐사이트계(β) 및 오스테나이트계(γ) 등으로 대별할 수 있다. 페라이트계 스테인리스강은 응력에 대한 저항성은 우수하나 내식성, 연성 및 인성 등의 기계적 성질과 가공성 및 용접성이 오스테나이트계의 스테인리스강에 비해 떨어진다. 듀플렉스(Duplex)($\alpha + \gamma$) 스테인리스강은 오스테나이트상과 페라이트상이 동시에 존재함으로써 오스테나이트계 스테인리스강이 가지는 우수한 연성과 내식성을 갖고, 높은 항복강도를 갖는다. 더불어 응력저항성이 큰 균열진전 특성과 열팽창계수가 작은 특징도 갖고 있다. 또한 페라이트계 스테인리스강이 가지는 우수한 강도를 동시에 가지는 강으로서 내식성과 강도가 동시에 요구되는 구조물 및 원자력 발전설비들의 소재로서 많이 활용되고 있다.⁴

듀플렉스(Duplex) 스테인리스강은 고 Cr, 저 Ni 및 Mo 을 첨가하고 α/γ 상 비율을 조정하여 얻어진 양호한 내식성을 갖는 강이다. 듀플렉스(Duplex) 스테인리스강은 강도가 높고 내공부식성, 내응력 부식균형성이 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 생산되어지고 있다.

지금까지 알루미늄, 티타늄, 철, 니켈, 구리 등의 합금 계에서 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 $10^{-4} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$, 변형률 속도 민감지수(strain-rate sensitivity) m 은 0.5 정도로 갖는다.

10 μm 이하의 미세한 결정립을 갖도록 하는 결정립 미세화(grain refinement)가 중요한 관건으로 지속적인 입계 미끄러짐이 일어나기 위하여 고온에서 결정립 성장을 억제할 수 있는 제 2 상의 존재가 필요한데 제 2 상은 기지와 상대적 강도가 달라 초소성 변형 동안 공동(cavity)가 발생한다.

기지와 단단한 입자, 기지와 제 2 상의 계면에서는 응력집중으로 불균일한 변형이 쉽게 일어나므로 공동(cavity)이 잘 발생한다. 따라서 제 2 상은 기지상과 강도가 거의 비슷해야 한다.

인접한 결정립 사이에 방위차가 커야 전단응력에 의해서 입계 미끄러짐이 용이해지므로 결정립의 모양은 등방성을 가져야 한다. 그러나 빠른 변형률 속도 초소성(High strain-rate superplasticity)은 일반적인 초소성과 달리 몇 가지 다른 요구조건과 특징을 갖는다. 먼저 2 μm 이하의 미세한 결정립 크기가 요구되고, $10^{-2} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ 의 아주 빠른 변형률 속도에서 나타나는데, 이는 일반적인 초소성에 비해 100~10000 이상 빠른 가공속도로 일반적인 단조 가공속도와 비슷하다. 이러한 변형속도는 가공 시간을 줄일 수 있게 되어 상업적 활용 면에서 상당한 장점이 되고 있다. 빠른 변형률 속도 초소성은 Ts(Ts:고상온도)온도 부근에서 얻어진다. 이러한 빠른 변형률 속도 초소성은 현재까지 금속복합재료, 기계적 합금재료, 일반적인 금속 합금재료에서 관찰되고 있다.³

2.3 Free bulging test

Fig. 1은 판재의 gas pressure forming 과정을 나타내는 그림으로이다. 판재는 끝단에서 둘레방향으로 충분히 구속되어 있어야 하며 아르곤과 같은

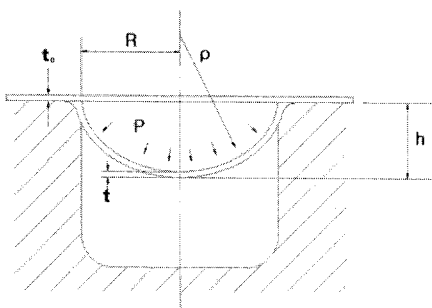


Fig. 1 Free bulging geometry of plate

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.

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

여기서 ρ 는 부풀려진 판재의 곡률반경이며 s 는 변형된 판재의 두께, p 는 압력이며, σ_1, σ_2 는 자오선(meridian) 방향 응력, σ_3 는 두께방향 응력이다.

Von Mises 항복조건을 적용하면 유효응력은 다음과 같이 표현된다.

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

따라서 식 (1)을 대입하면

$$\bar{\sigma} = \frac{p\rho}{2s} \tag{3}$$

한편, Henkey's deformation 이론에 의하면 응력과 변형률 관계식은 다음과 같이 주어진다.⁷

$$\epsilon_1 = \frac{d\bar{\epsilon}}{d\bar{\sigma}} \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right) \tag{4}$$

$$\epsilon_2 = \frac{d\bar{\epsilon}}{d\bar{\sigma}} \left(\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \right) \tag{5}$$

$$\epsilon_3 = \frac{d\bar{\epsilon}}{d\bar{\sigma}} \left(\sigma_3 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \right) \tag{6}$$

여기서, $\epsilon_i, \sigma_i, i=1,3$ 는 변형률과 응력이고, $\bar{\epsilon}, \bar{\sigma}$ 은 von Mises 이론에 의한 유효변형률과 유효응력이다. 식(1)을 식(4)~(6)에 대입하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = -\frac{1}{2} \epsilon_3 \tag{7}$$

von Mises 이론에 따른 유효 변형률 $\bar{\epsilon}$ 에 식 (7)을 대입하면 다음과 같은 식으로 유효변형률이 표현된다.

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

두께방향 변형률은 판재의 초기 두께 t_0 와 변형 후 판재 두께 t 로 다음과 같이 정의 된다.

$$\bar{\epsilon} = \ln \frac{t}{t_0} \quad (9)$$

유효변형률 속도는 식 (9)을 시간에 대해 미분한 값으로 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

Fig. 1 에서 판재의 곡률 ρ 와 금형반경 R 및 판재의 변형 높이 h 에 피타고라스 정리를 적용하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

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

식(11)은 곡률반경 값으로 다음과 같이 정리된다.

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

변형된 판재의 표면적을 A 는 다음과 같이 표현된다.

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

만약 판재의 변형된 부분이 즉, 돛형상이 균일 두께를 계속 유지한다고 가정하면 체적일정 조건은 다음과 같이 표현된다.

$$At = A_0 t_0 = 2\pi R t_0 \quad (14)$$

따라서 부풀어 오른 판재의 두께는 식(13)과 식(14)로부터 다음과 같다.

$$t = \frac{A_0 t_0}{2\pi h} = \frac{R^2 t_0}{R^2 + h^2} \quad (15)$$

식(10)과 식(15)로부터 유효변형률속도는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{\dot{t}}{t} = \frac{-2h\dot{h}}{R^2 + h^2} \quad (16)$$

초소성 해석에서 재료는 유효응력이 변형률 속도의 함수로 가정을 하여 다음과 같이 표현한다.^{1,2}

$$\bar{\sigma} = K \dot{\bar{\epsilon}}^m \quad (17)$$

여기서 K 는 강도계수(strength coefficient), m 은 변형률속도 민감지수(strain rate sensitivity)이다.

식(16)과 식(17)으로부터 유효응력은 다음과 같이 변형 높이 h 만의 함수로 표현할 수 있다.

$$\bar{\sigma} = K \left(\frac{-2h\dot{h}}{R^2 + h^2} \right)^m \quad (18)$$

위의 식에서 변형높이 h 만이 미지수이므로 이를 실험적으로 구한 다음 시간에 대해 미분을 하게 되면 응력과 변형률 관계식을 도출할 수 있으며 변형률 속도 민감지수의 계산도 가능하게 된다.

3. 실험

3.1 실험조건

1) 대상소재

본 시험에서 사용한 소재는 UNS 31803 으로서 국내의 소재공급업체(스틸라인)를 통해서 열연판재 형태로 수급하였으며, 판재의 초기 두께는 연소기 챔버 성형과정에서 두께감소를 고려하여 10.0mm (실측은 약 11mm)로 선정하였다.

2) 시험장치

Free bulging test 를 위한 금형과 초기 판재형상 셋업은 Hong¹ 이 사용한 장치를 참고하여 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 설치하였다. 시험장치 제작은 비교적 내열강인 STS630 소재를 사용하였으며 변위측정은 Linear gage 를 이용하였다. 가압 가스는 아르곤 가스를 사용하였다.

3) 시험조건

본 연구에서 고려하는 시험조건은 압력의 변화만 고려하기로 하며 구체적으로는 다음과 같다.

(1) 온도 : 980℃

(2) 압력 : 3.5MPa, 5.5MPa

(3) 시험방식 : 15sec 이내에 최대속도로 목표압력까지 승압, 이후 누적시간으로 1800sec 까지 유지, 승압 단계부터 시간에 따른 변위측정

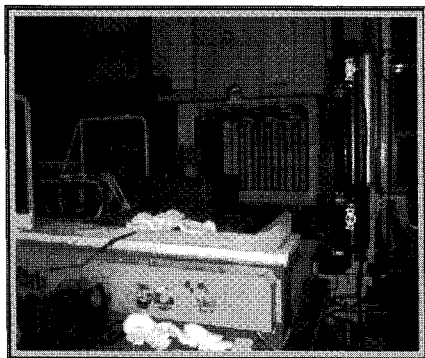
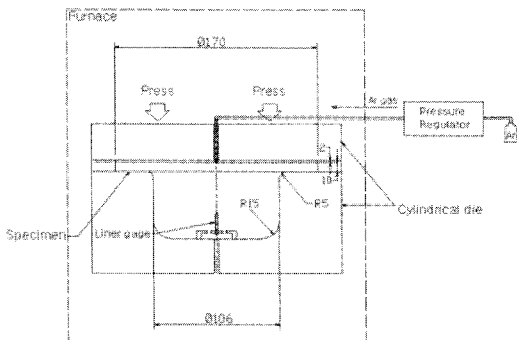


Fig. 2 Scheme of bulge forming equipment

3.2 실험결과

앞 절에서 설명한 바와 같이 압력조건 3.5MPa 과 5.5MPa 에 대해서 각각 시험을 수행하였으며 측정된 변위는 아래의 그림과 같다. 여기서 측정된 각 변위 데이터는 $y = a + bx^c$ 형태의 함수로

curve fitting 하여 사용하였다(그림에서 가는 실선에 해당).

각 시험조건에 해당하는 a, b 및 c 값은 Table 1 에 나타낸 바와 같다. 따라서 Table 1 로 변환된 시험데이터를 이용하면 식 (18)에 나타낸 높이와 높이 변화율을 함수로 표현할 수 있게 된다. 이 함수와 식(17)을 이용하여 유효응력 및 유효변형률속도 계산이 가능하게 된다.

계산된 응력과 변형률속도 간의 각 값들에 상용로그를 취한 결과는 Fig. 4 에 나타낸 바와 같다.

Table 1 Curve result of experimental data obtained from the free bulging test

Pressure	A	b	C
3.5 [MPa]	-2.33055	3.23543	0.28634
5.5 [MPa]	3.43042	1.39388	0.42766
Reference	$y = a + bx^c$		

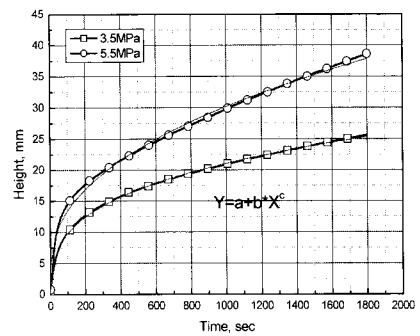


Fig. 3 Height-time curve obtained from the free bulging test

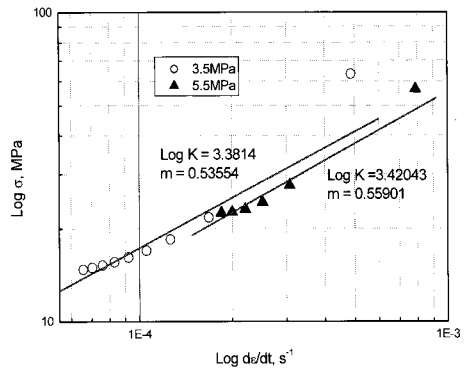


Fig. 4 Plot of stress vs. strain rate

식 (17)의 양변에 로그를 취하면 다음과 같이 표현된다.

$$\log \bar{\sigma} = \log K + m \log \dot{\epsilon} \quad (19)$$

Log scale 에 표현된 응력과 변형률속도 plot 을 직선으로 curve fitting 한 다음 응력축 절편과 직선의 기울기를 구하면 이는 각각의 log K 와 m 값에 해당되므로 평가하고자 하는 재료의 초소성 특성 및 유동응력 식을 구할 수 있게 된다. 계산된 각 시험조건에 대한 재료상수 값과 이들의 산술평균 값은 다음의 Table 2 에 정리하였다.

Table 2 Determined strain rate sensitivity and strength coefficient

Pressure	m	log K [MPa]	K [MPa]
3.5 [MPa]	0.53554	3.3814	2406.58
5.5 [MPa]	0.55901	3.4204	2632.87
Reference		$\bar{\sigma} = K \dot{\epsilon}^m$	

4. 결과 검증

4.1 유한요소해석 모델

앞 절에서 계산된 재료상수의 신뢰성 검증을 위해서 Free bulging test 와 동일한 조건 및 계산된 재료상수를 이용하여 유한요소 해석을 한 다음 변위를 비교해 보았다. 해석에 사용된 유한요소해석 프로그램은 ABAQUS6.8 이며 Visco 해석을 수행하였다.⁶

Free bulging test 의 해석을 위한 금형과 초기 판재형상 셋업은 Fig. 5 나타낸 바와 같이 A 로 표시된 부분은 초기 판재를 나타내고, B 로 표시된 부분은 해석에 사용된 금형을 간략화하여 나타냈다.

구조해석을 위해 유한요소는 초기 판재에 최대칭요소를 사용하였으며, 금형은 형상변화가 일어나지 않은 강제요소(Rigid element)를 사용하였다. 초기 판재에 사용된 유한요소의 종류는 접촉(Contact) 해석에 적합한 2 차원 4 절점, First order 인 CAX4R 을 사용하였다. Fig. 6 는 유한요소 모델링을 보여주고 있고, 유한요소(Finite Element)의 개수는 961 개이고, 절점(Node)의 개수는 1,212 개이다.

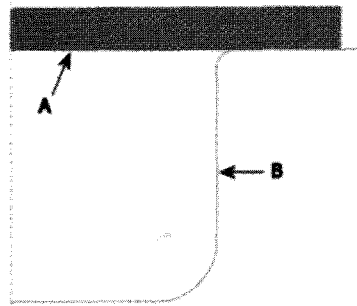


Fig. 5 Whole model of the Free bulging test

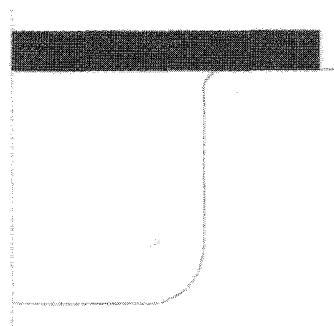


Fig. 6 FE modeling for whole model

Fig. 7 은 모델링에 대한 구속조건을 나타내었다. A 는 판재의 끝 부분으로 U1 방향을 구속하였고, B 부분에 Y 축 Axi-symmetry 으로 구속하였다. C 는 금형을 고정하기 위한 구속조건을 부여하였다. 그리고 D 는 재료에 가해지는 Pressure 을 나타낸다.

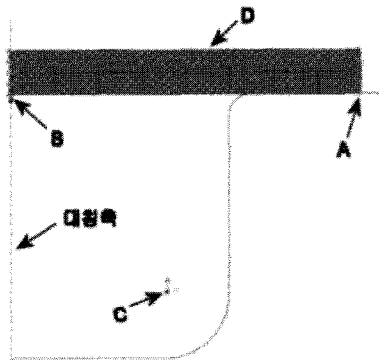


Fig. 7 Boundary conditions for whole model

4.2 유한요소해석 결과

해석은 총 2 가지의 경우로 수행되었으며 각 경우에 대한 조건은 Table 3 과 같다.

Table 3 Simulation cases

	P [MPa]	m	K [MPa]
Case 1	3.5	0.53554	2406.58
Case 2	5.5	0.55901	2632.87

각 조건에 대해서 해석을 수행한 다음 대칭축 상에 있는 절점 중 제일 왼쪽 하단 절점의 시간에 따른 변위를 추출하여 시험 결과와 비교하였다.

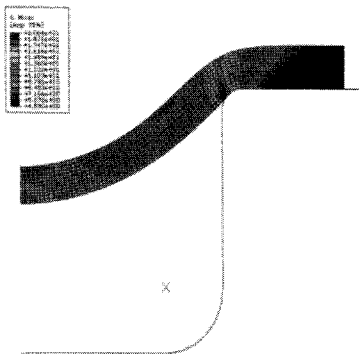


Fig. 8 Equivalent stress distribution in the case 1

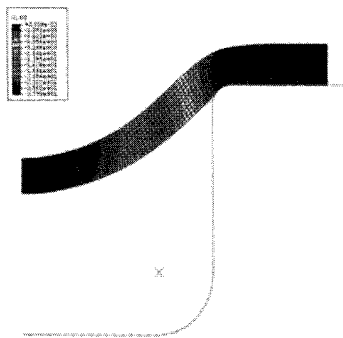


Fig. 9 Displacement U2 distribution in the case 1

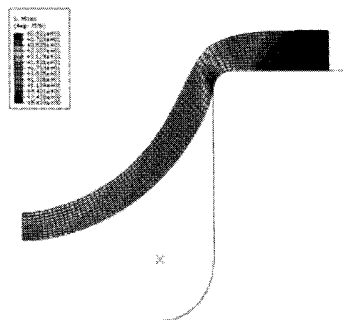


Fig. 10 Equivalent stress distribution in the case 2

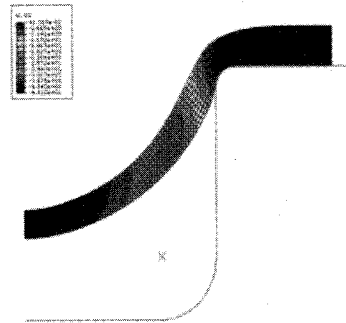


Fig. 11 Displacement U2 distribution in the case 2

Fig. 8 ~ Fig. 11 는 Case 1, Case 2 에 대한 각각의 Stress 와 Displacement 분포값을 나타낸다. 각 해석 조건에 대해 최종단계에서 판재내부의 응력분포를 살펴본 것으로서 세 경우 모두 클램핑되는 부분과 금형의 곡률반경 부분에 접촉하는 지점은 두께방향의 응력분포를 가지고 또한 정점(apex) 근처에서도 응력구배는 존재함을 알 수 있었다.

Fig. 12 ~ Fig. 13 은 Case1, Case2 에 대한 각각의 Displacement 시험 값을 U2 의 해석결과와 비교한 것으로서 그래프에 나타난 각각의 곡선은 실험에서 얻은 뒀 높이가 변화와 Case1 ~ Case2 의 해석결과를 비교한 것이다. 모든 Case 에 초기 값의 차이는 해석 시 마찰이 없다고 가정하여 실제의 실험데이터와 차이를 보이는 것을 제외하고 실험값과 해석값이 비슷한 경향을 보이는 것을 볼 수 있다.

3.5MPa 시험에서 구한 물성치를 이용한 해석결과(Case 1)는 시험데이터와 비교적 근접하는 결과로 보였으나 초기 변형에서 곡선의 기울기에서 차이를 보였다. 이는 강도계수가 실제보다 큰 값이 적용되었거나 변형률 민감지수가 실제보다 적은 값이 적용되었기 때문으로 판단되고, 이에 대한 추가 연구가 필요하다.

5.5MPa 로 free bulging 을 수행한 결과에 대한 해석과 시험결과를 비교한 것으로서 5.5MPa 시험에서 얻은 물성치를 이용한 경우(Case 2)는 재료의 특성이 보다 viscous 한 것으로 예측되었다.

본 결과 통해 Free bulging 시험을 이용하여 구한 변형률속도 민감지수 m 과 강도계수(strength coefficient, K)는 유효하다는 것을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구를 통해서 free bulging test 를 이용한

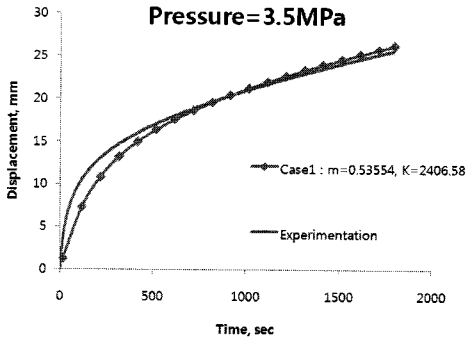


Fig. 12 Comparison of dome height between experimentation and calculation results: P=3.5MPa

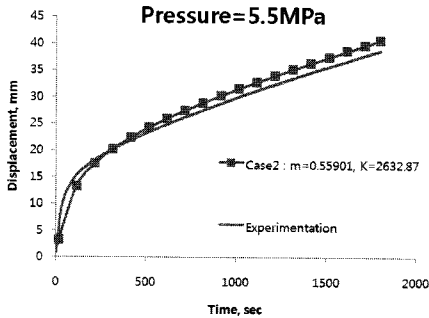


Fig. 13 Comparison of dome height between experimentation and calculation results: P=5.5MPa

duplex stainless steel 의 초소성 특성 평가를 수행하였으며 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) free bulging 시험을 통해서 구한 물성치를 이용한 유한요소해석 결과는 시험결과와 양호한 일치를 보였다.

(2) 본 해석 결과를 통해 3.5MPa 의 경우 초기 변형에서 기울기차이가 있고 5.5MPa 의 경우 t=1000 이상에서 일정한 변위차이가 있었으나 전체적으로 실험결과와 유사한 결과를 보이고 있다.

(3) 향후 강도 및 변형률속도 민감지수에 결정립 크기변화의 영향을 고려한다면 보다 정확한 물성평가가 될 것으로 예측된다.

후 기

본 연구는 2 단계 지역대학 육성 사업(BK21)과 첨단기계사업단(NURI)의 지원에 의해서 연구되었다. 모든 지원에 대해서 감사드린다.

참고문헌

1. Hong, S. S., Kim, M. H. and Kim, Y. H., "Analysis of Superplastic Forming Processes Using Finite Element Method," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 19, No. 6, pp. 1411-1421, 1995.
2. Huh, H., Lee, K. S. and Choi, Y. J., "Finite Element Analysis of Punch Forming of Superplastic Materials," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers(B), Vol. 20, No. 2, pp. 440-449, 1996.
3. Lee, S.-H., Hong, S.-S. and Lee, J.-S., "Superplasticity and Superplastic Forming," J. of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 33, No. 7, pp. 628-635, 1993.
4. Hwang, K.-C., Kwon, J.-W. and Yoon, J.-H., "Creep Behaviours of Duplex Stainless Steel," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineering, Vol. 14, No. 2, pp. 42-47, 2005.
5. Senthil Kumar, V. S., Viswanathan, D. and Natarajan, S., "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, pp. 247-251, 2006.
6. ABAQUS, "ABAQUS Example Problems Manual," ABAQUS, 2006.
7. Budiansky, B., "A reassessment of deformation theories of plasticity," J. Appl. Mech., Vol. 26, No. 2, pp. 259-264, 1959.