항공우주용 듀플렉스 스테인레스강의 초소성 특성 평가

Superplastic Characterization of Duplex Stainless Steel for Aerospace Application

*강석봉[1], 윤종훈[2], 이영무[3], 이석순[4]

*S. B. Kang[1](sbkang@doowonhi.com), J. H. Yoon[2] , Y.M.Yi[3] , S. S.Lee[4]

[1,4] 경상대학교 기계항공공학부, [2,3]한국항공우주연구원

Key words : Duplex stainless, Superplasticity, Flow stress, Stain rate sensitivity, Blow forming

1. 서론

변형률속도 민감지수(strain rate sensitivity, m)로 대표되는 재료의 초소성특성을 평가하는 방법에는 고온 단축인장시험, cone cup test, free bulging test의 3종류가 대표적이다. 그중 Free bulging test의 경우 압력프로파일을 적용하여 시험하는 방법으로서 압력 즉, 응력값과 변형률속도값이 동시에 변하는 조건이 된다. cone cup test에 비해 마찰 영향은 작지만 압력을 시간에 따라 연속적으로 변화시켜야 하기 때문에 시험에 다소 애로가 있을 수 있다. 본 연구에서는 Free bulging test를 이용한 duplex stainless steel의 초소성특성 평가를 하고자 하였으며 기존의 방식과는 달리 압력은 일정하게 유지하면서 dome의 정점 변위를 시간에 따라 계측하고 이를 응력-변형률속도 관계식으로 환산하여 재료상수 즉, 변형률속도 민감지수와 강도계수(strength coefficient, K)를 구하고자 하였다.

2. 이론적 배경

판재의 gas pressure forming 과정에서 소재의 각방향 응력성분을 수식으로 표현하여 내압용기 응력방정식과 Nadai주응과 변형율 관계식을 대입하여 산출된 유효변형율 속도는 다음과 같다

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\dot{s}}{s} = \frac{-2h\dot{h}}{R^2 + h^2} \qquad (1)$$

응력-변형률속도 관계식은 최종적으로 다음의 형태가 될 것이다.

$$\frac{p(R^2+h^2)^2}{4hR^2 s_0} = \Phi\left(\frac{-2h\dot{h}}{R^2+h^2}\right) \qquad (2)$$

위의 식에서 높이 h만이 단지 미지수이므로 이를 실험적으로 구한 다음 시간에 대해 미분을 하게 되면 응력과 변형률관계식을 도출할 수 있으며 변형률속도 민감지수의 계산도 가능하게 된다.

3. 시험결과-재료상수의결정

우선 본 시험에서 고려하는 대상소재는 UNS 31803으로서, 판재의 초기 두께는 실제품의 성형과정에서 두께감소를 고려하여 10.0mm (실측은 약 11mm)로 선정하였다. 판재의 초기 직경은 150mm이나 클램핑 되는 부분을 제외하면 약 103mm의 직경을 갖는다고 보면 된다. 본 연구에서 고려하는 시험조건은 온도 980℃에 대해서 두 가지 압력 즉, 3.5MPa, 5.5MPa이다. 시험방식은 최대 15sec 이내에 최대속도로 목표압력까지 승압, 이후 누적시간으로 1800sec까지 유지하였으며, 승압단계부터 시간에 따른 변위를 측정 하였다. 각 압력조건에 대해서 계측된 시간에 따른 변위는 아래에 나타낸 바와 같이 해석적 함수로 피팅하였다.

Table 1. Curve fitting results of experimental data obtained from the free bulging test

Experiment condition	*a*	*b*	*c*
3.5MPa	-2.33055	3.23543	0.28634
5.5MPa	3.43042	1.39388	0.42766
Reference	$y = a + bx^c$		

따라서 Table 1로 변환된 시험데이터를 이용하면 시간에 따른 높이 변화율을 해석적인 함수로 표현 할 수 있게 되고 결론적으로 식(2)로부터 유효응력 및 유효 변형율 속도 계산이 가능하게 된다. 한편, 여기서 만일 유동응력이 변형률속도만의 함수라면 즉, 다음과 같은 형태로 표현된다면

$$\bar{\sigma} = K\,\bar{\varepsilon}^{m} \qquad (3)$$

여기서 K는 강도계수(strength coefficient), m은 변형률속도 민감지수(strain rate sensitivity)이다.식 (3)의 양변에 로그를 취하면

$$\log\bar{\sigma} = \log K + m\log\bar{\varepsilon} \qquad (4)$$

따라서 Log scale에 표현된 응력과 변형률속도 plot을 직선으로 curve fitting한 다음 응력축 절편과 직선의 기울기를 구하면 이는 각각의 log K와 m값에 해당되므로 평가 하고자 하는 재료의 초소성 특성 및 유동 응력식을 구할 수 있게 된다. 아래의 그래프는 시험으로부터 얻은 데이터들을 해당 계산식을 이용하여 로그 스케일로 응력과 변형률속도를 나타낸 것이다.

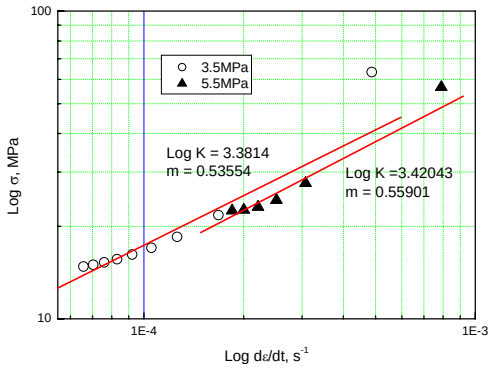


Fig 1. Plot of stress vs. strain rate

따라서 위 그래프에서 구한 재료 상수값과 이들의 산술평균값은 다음의 표에 정리하였다.

Table 2. Determined strain rate sensitivity and strength coefficient

Experiment condition	m	logK[MPa]	K[MPa]
3.5MPa	0.53554	3.3814	2406.58
5.5MPa	0.55901	3.4204	2632.87
Arithmetic mean	0.54728	-	2519.73
Reference Eq.	$\bar{\sigma} = K\,\bar{\varepsilon}^{m}$		

4. 검증결과-유한요소해석 및 비교

앞절에서 계산된 재료상수의 신뢰성 검증을 위해서 free bulging 시험과 동일한 조건 및 구해진 재료상수를 이용하여 유한요소해석을 한 다음 변위를 비교해 보았다. 해석에 사용된 유한요소해석 프로그램은 MSC MARC이며 강점소성 해석을 하였다. 단 해석에서는 마찰은 없는 것으로 가정하였다. 해석은 총 6가지의 경우로 수행되었으며 각 경우에 대한 조건은 아래의 표와 같다.

Table 3. Simulation cases

	p[MPa]	m	K[MPa]	Remark
Case 1	3.5	0.53554	2406.58	Value of 3.5MPa experiment
Case 2		0.55901	2632.87	Value of 5.5MPa experiment
Case 3		0.54728	2519.73	Arithmetic mean
Case 4	5.5	0.53554	2406.58	Value of 3.5MPa experiment
Case 5		0.55901	2632.87	Value of 5.5MPa experiment
Case 6		0.54728	2519.73	Arithmetic mean

각 조건에 대해서 해석을 수행한 다음 대칭축상에 있는 절점 중 제일 오른쪽 절점의 시간에 따른 변위를 추출하여 시험 결과와 비교해 보았다. 아래의 그림은 3.5MPa로 free bulging을 수행한 결과에 대한 시험과 해석을 비교한 것으로서 그래프에 나타난 각각의 곡선은 실험에서 얻은 돔 높이 변화와 case 1 ~ case 3의 해석결과를 비교한 것이다. 3.5MPa로 시험한 경우(case 1)는 약 1000sec까지는 시험결과와 유사하나 후반부로 갈 수록 오차가 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 강도계수가 실제보다 크게 평가 되었거나 변형률속도 민감지수가 실제보다 낮게 평가되었기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 5.5MPa 시험에서 구한 물성치를 이용하여 3.5MPa의 시험조건을 해석한 경우(case 2)는 시험데이터와 상당히 근접하는 결과를 보였으며 물성평가가 적절한 것으로 판단된다. 산술평균으로 구한 물성치(case 3)의 경우는 시험과 상당히 큰 오차를 나타내었다. 따라서 3.5MPa 시험에서 구한 물성치는 5.5MPa에서 구한 물성치보다 신뢰성이 상대적으로 낮은 것으로 판단된다.

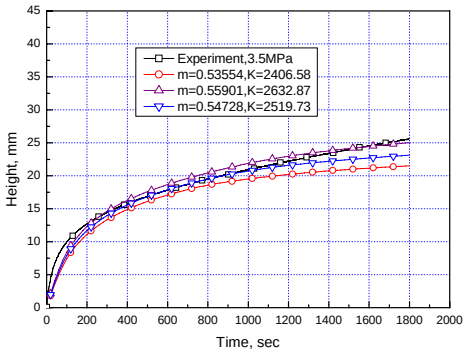
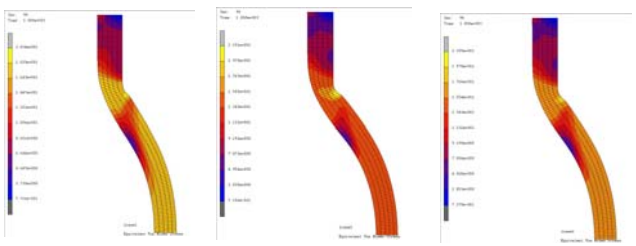


Fig 2. Comparison of dome height between experiment calculation results ; p=3.5MPa

아래의 그림은 각 해석조건에 대해 최종단계에서 판재내부의 응력분포를 살펴본 것으로서 세 경우 모두 클램핑 되는 부분과 금형의 곡률반경 부분에 접촉하는 지점은 두께방향의 응력분포를 가지나 정점(apex) 근처에서는 응력구배는 존재하지 않음을 알 수 있으며 시험과 가장 잘 일치하는 case 2의 경우 정점 근처의 응력은 약 20MPa정도 발생하였음을 알 수 있다.



(a) case 1 (b) case 2 (c) case 3

Fig 3. Equivalent stress distribution according to the analysis cases for the experiment with 3.5MPa

아래 그림은 5.5MPa로 free bulging을 수행한 결과에 대한 해석과 시험결과를 비교한 것으로서 3.5MPa 시험에서 얻은 물성치를 5.5MPa 시험조건으로 해석한 경우(case 4)는 시험결과보다 다소 낮은 것으로 나타났으며 5.5MPa 시험에서 얻은 물성치를 이용한 경우(case 5)는 재료의 특성이 보다 viscous한 것으로 예측되었다. 본 경우에 있어서는 산술평균값(case 6)이 시험결과와 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 앞 절의 결과를 고려해 보았을 때, 본 재료에 대한 강도계수와 변형률속도 민감지수는 2600MPa 및 0.55 정도가 적절한 물성값일 것으로 판단된다. 또한 각 해석조건에 대해 최종단계에서 판재내부의 응력분포를 살펴본 것으로서 세 경우 모두 3.5MPa의 경우와 유사한 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 하지만 두께방향의 응력구배가 정점 근처로 다소 확산되어 있음을 알 수 있다. 해석과 시험이 가장 잘 일치하는 case 6의 경우 정점 근처에서 최대 유효응력은 약 30MPa로 계산되었다.

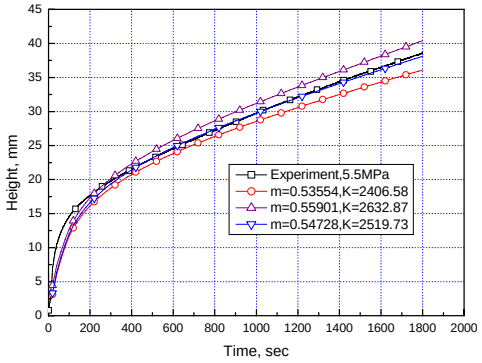
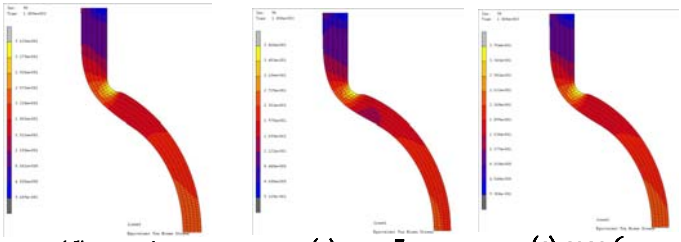


Fig 4. Comparison of dome height between experiment calculation results ; p=5.5MPa



(d) case 4 (e) case 5 (c) case 6

Fig 5. Equivalent stress distribution according to the analysis cases for the experiment with 5.5MPa

5. 결론

본 연구를 통해서 free bugling test를 이용한 duplex stainless steel의 초소성특성 평가를 수행하였으며 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 확보된 소재의 변형률속도 민감지수(m) 및 강도계수(K)는 각각 $K = 2600MPa$, $m = 0.55$이다.

(2) free bulging 시험을 통해서 구한 물성치를 이용한 유한요소 해석 결과는 시험결과와 양호한 일치를 보였으며 단축인장시험 결과보다 신뢰성이 높을 것으로 판단된다.

향후 강도 및 변형률속도 민감지수에 결정립 크기변화의 영향을 고려한다면 보다 정확한 물성평가가 될 것으로 예상되며 아울러 유한요소해석에 사용된 요소도 3차원 membrane 요소를 이용하여 해석해 볼 필요가 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Abhijit Dutta, Amiya K. Mukherjee, " Superplastic forming: an analytical approach", Material Science and Engineering A157, 1992, pp 9-13

2. G.C. Cornfield, R.H. Johnson, "The Forming of Superplastic Sheet Metal", International Journal of Mechanical Science, Vol. 12, 1970, pp 479-490

3. F. Jovane, "An Approxiamte Analysis of the Superplastic Forming of a Thin Circular Diaphragm: Thoery and Experiments", International Journal of Mechanical Science, Vol. 10, 1968, pp 403-427