

가스압력을 이용한 자유벌징에서 성형양 최대화를 위한 두께 분포 최적화[§]

유준태^{*†} · 윤종훈^{*} · 이호성^{*} · 윤성기^{**}

* 한국항공우주연구원 재료구조연구팀, ** 한국과학기술원 기계공학과

Study of Blank Thickness Optimization in Free Bulging for Maximizing Bulged Height

Joon-Tae Yoo^{*†}, Jong-Hoon Yoon^{*}, Ho-Sung Lee^{*} and Sung-Kie Youn^{**}

* Korea Aerospace Research Institute,

** Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute Science and Technology

(Received April 15, 2014 ; Revised May 27, 2014 ; Accepted May 27, 2014)

Key Words: Blow Forming(블롭 성형), Free Bulging(자유벌징), Hot Forming(고온성형), Equivalent Static Load(등가정하중), Optimization(최적화)

초록: 자유벌징에 있어서 성형 높이를 최대화하기 위하여 블랭크의 두께 분포를 최적화 하였으며, 등가정하중을 이용한 구조최적화법을 사용하였다. 두께형상은 부드러운 곡선으로 나타내기 위하여 베지어곡선을 사용하였고 제어점의 위치가 설계변수이며, 최대 변형률을 일정 값으로 제한하였다. 사용된 소재는 인코넬 718 이며 최적화된 두께분포로 가공된 블랭크를 이용한 자유벌징 시험을 수행하여 평판형 블랭크를 사용한 결과보다 22% 더 높은 성형 높이를 얻었다. 최적화결과에서 예측된 변형형상, 정점에서의 변형 경향, 두께분포가 실험에서 얻은 결과와 유사하여 최적화 과정의 유효성을 입증하였고, 최적화 결과가 실제 구현될 수 있음을 검증하였다

Abstract: Thickness profiled blank is designed using optimization techniques for maximizing the bulged heights during the free bulging of Inconel 718. The thickness of the blank was described by the Bezier curve and the locations of the control points were used as the design variables for optimization. The maximization of the bulged heights within the limited strain range served as the objective function and constraints for optimization. The equivalent static loads method for non-linear static response structural optimization (ESLSO) was used and the result of the optimization revealed 22 increased bulged heights. A free bulging test using a blank with an optimized profile was conducted to verify the optimization process. The results were compared with those of numerical analysis in terms of bulged height and deformed shape.

1. 서 론

고온성형 방법 중 하나인 블로우성형은 최대 성형성을 이끌어 낼 수 있는 온도와 유동조건을 만족하도록 고온에서 가스압력을 이용하여 성형하는 기법이다. 초소성 특성이 있는 재료를 이용한 블

로우성형 방법인 초소성 성형은 재료의 낮은 유동응력과 특정 변형률 속도에서의 높은 변형률을 이용하여 원하는 형상을 성형하므로 다양한 형상의 박판 성형이 가능하여 복잡한 형상의 경량구조 제작에 적합하다. 또한 복잡한 형상에 대한 가공시 수반되는 원소재의 낭비, 접합부의 존재시 추가 접합공정 적용과 접합부의 강도 문제등이 검토되어야 하지만 초소성 성형을 이용한다면 이러한 작업 없이 한번에 성형할 수 있으므로 비용 및 무게 절감에 있어서 효과적이다. 하지만 초소성 특성을 가지는 금속재료는 티타늄 합금, 알루미늄 합금,

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2014. 4. 24.-25., 라마다프라자호텔) 발표논문임

† Corresponding Author, jtyoo@kari.re.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

마그네슘 합금등으로 제한되어 있으며, 인코넬 718의 경우는 초소성 특징을 가지는 초소성급 판재(SPF grade plate)가 별도로 존재하지만 상대적으로 고가이며, 구하기도 힘들다는 어려움이 있다. 이러한 이유로 초소성 성형을 적용할 수 있는 재료는 제한되거나 추가 비용이 발생한다.

이러한 블로우성형 과정 중에는 일반적으로 재료에 2축 인장응력이 작용하므로 공정 중 두께 감소가 발생하게 되며, 최대 변형이 발생하는 부분의 두께는 상대적으로 더 얇아지는 문제가 발생한다. 이러한 현상이 심화될 경우 성형 중 파손이 발생하기도 하므로 이를 방지하고 성형성을 높이기 위하여 유한요소 해석을 이용한 공정해석을 하였으며, 이 과정에서 최적 성형압력에 대한 연구도 수행되어 제품 성형에 적용되었다.^(1~3) 초소성 특성이 없는 재료를 사용할 경우에는 이러한 두께의 불균일성이 더 심하며 낮은 변형률 구간에서 파손이 발생하므로 적용할 수 있는 형상에 한계가 있다. 그러므로 블립성형시 최대 변형률을 감소시키며 원하는 형상까지 성형할 수 있도록 초기 블랭크의 두께 최적 설계가 이루어 진다면 성형품의 기계적인 특성 향상뿐만 아니라, 초소성 특성이 없는 재질을 이용하더라도 파손 없이 대변형 블립성형이 가능할 것이다. 만약 초소성 재질을 이용한 성형공정에 두께 최적화가 적용된다면 더 많은 변형을 가지는 제품 성형이 가능하다.

본 연구에서는 블립성형 중 가장 단순한 형태인 자유벌징에 있어서 성형 높이를 최대화하기 위한 블랭크의 두께 분포 최적화를 수행하였다. 시험에 사용된 재질은 인코넬 718이며 성형온도는 980℃이다. 최적설계 결과로 두께 가공된 블랭크를 이용하여 벌징 시험을 수행하여 해석결과와 비교하여 결과를 검증하였다.

2. 자유벌징시험 및 고온유동특성

2.1 자유벌징시험

고온에서의 성형특성을 파악하기 위해서는 성형 온도에서의 유동특성파악이 필수적이다. 이를 위하여 2.1mm의 두께를 가지는 인코넬 718을 이용한 자유벌징시험을 3.6MPa와 5.0MPa의 두 가지 압력조건으로 수행하였고, 성형온도는 980℃이다. 시험 장비의 구성은 Fig. 1과 같이 원형의 금형 내부로 피성형물을 가스의 압력으로 성형을 하였다. 압력은 가압 후 15초 동안 승압되어 이후로는 압력이 유지가 되었고 파손이 발생할 때까지 계속 가압을 하였다. 시험 중에는 정점에서의 변

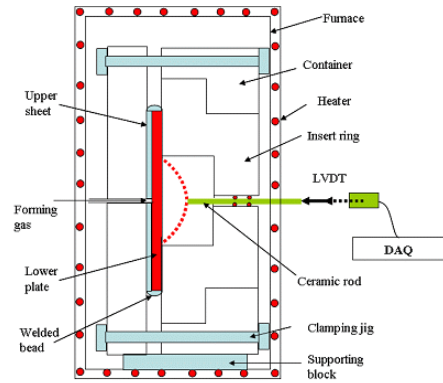


Fig. 1 Experimental setup for free bulging test

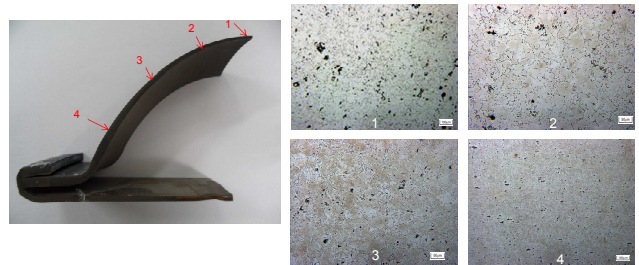


Fig. 2 Microstructure observation after bulging test

형량을 변위계를 이용하여 계속 측정하여 유동특성을 파악하였다. 재료의 파손은 3.6MPa 조건에서는 52.9mm, 5.0MPa 조건에서는 54.5mm일 때 발생하였으며, 모두 정점에서 파손되었다.

2.2 유동특성

고온에서의 유동응력($\bar{\sigma}$)은 식 (1)과 같이 유효 변형률($\bar{\epsilon}$)과 유효변형률속도($\dot{\bar{\epsilon}}$), 변형률속도민감지수(m), 가공경화지수(n), 강성계수(K_0)로 나타낼 수 있으며 미세조직내의 캐비티를 고려한 경우는 캐비티 비율(f)을 강성계수에 포함하여 유효변형률의 함수로 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

$$\bar{\sigma} = K_0(1 - f(\bar{\epsilon}))\dot{\bar{\epsilon}}^m \bar{\epsilon}^n \quad (1)$$

여기서 m 은 성형압력과 일정높이에 도달하는 시간의 관계로 결정되며, n 과 K_0 는 유한요소 해석을 이용하여 실험과 해석의 차이를 최소화 하는 값으로 결정된다.⁽⁵⁾ 캐비티 비율(f)은 고변형률 구간에서의 정확도를 높이기 위하여 추가하였으며, 일반적으로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.^(6,7)

$$f = f_0 \exp(\bar{\epsilon}) \quad (2)$$

시험 후 벌징된 시편의 여러 군데에서 두께 감소율과 미세조직을 관찰하여 캐비티 비율을 계산하여 보간한 후 유동응력에 포함하였다.⁽⁴⁾ Fig. 2는

Table 1 Material Parameters for flow stress of Inconel 718 at 980°C

m	0.221
n	0.072
K_0	548.17 MPa
f	$f(\epsilon)=0$ when $\epsilon \leq \epsilon_c$ $f(\epsilon)=f_0+A\exp(\eta\epsilon)$ when $\epsilon > \epsilon_c$ $f_0=-5.23Q, A=3.887, \eta=0.714, \epsilon_c=0.416$

벌징된 시험편과 표시된 부분의 단면 미세조직을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 정점에 가까워 질수록 두께 감소현상이 심해지며, 이에 따라 캐비티의 비율도 같이 증가함을 확인할 수 있다. 식 (2)의 캐비티 비율은 단면에서 관찰된 캐비티의 비율을 사용하였다. 이를 바탕으로 결정된 유동응력식에 사용되는 변수는 Table 1 과 같다.

2.3 유한요소해석

결정된 유동응력식을 반영한 유한요소 해석을 수행하여 시험결과와 비교하였다. Fig. 3 은 유한요소해석 모델로서 총 1440 개의 4 절점 축대칭 요소가 사용되었으며, 해석에 사용된 코드는 ABAQUS/Standard 이다.

성형후 금형과의 원활한 분리를 위해서 금형 내부에는 이형재가 도포되며 이러한 영향을 고려한 기존의 연구결과⁽⁴⁾를 바탕으로 금형과의 마찰계수는 0.15 를 적용하였고, 벌징 시험의 끝부분은 완전고정조건을 부여하였다. Fig. 4는 시험과 해석에서 얻어진 정점부분의 변형량 비교로서 Fig. 4(a)는 3.6MPa 압력조건, Fig. 4(b)는 5.0MPa 압력조건에서의 벌징 시험과 해석 결과 비교이다. 정점에서의 변형 경향은 파손 직전을 제외하고는 대부분 일치함을 알 수 있다. 즉, 본 해석에서 사용된 유동응력식은 파손 직전구간을 제외하고는 실제 유동을 잘 표현 함을 알 수 있다. 해석에서 정점의 변위가 실험상 파손된 시점에 도달하였을 때 변형률은 5.0MPa 압력조건에서 159.4%로서 이 값은 최대 변형률로 예상될 수 있다.

3. 블랭크 두께분포 최적화

3.1 최적설계 방법 및 설계 영역

블랭크의 두께분포는 매끄러운 곡선으로 나타내기 위해 베지어 곡선(Bezier curve)으로 나타내었다. 베지어 곡선은 여러 개의 제어점(control point)을 사용하여 나타내는 곡선으로 양 끝에 위치한 제어점만 통과하는 특징을 가지고 있으며, 이를 나타

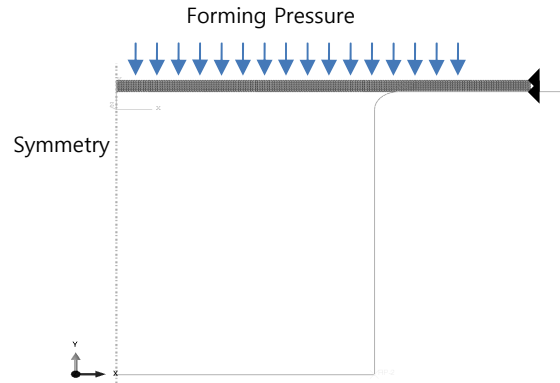


Fig. 3 Finite element model and boundary conditions

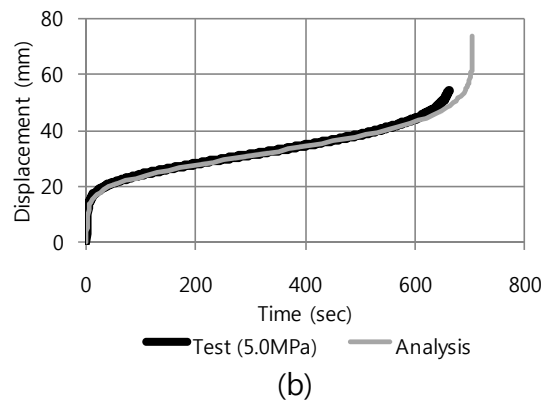
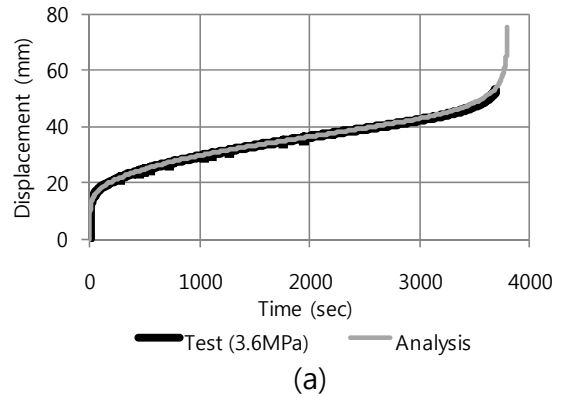


Fig. 4 Comparison of displacement between analysis and test - (a): 3.6MPa, (b):5.0MPa

내기 위한 연속함수는 $N+1$ 개의 제어점이 있는 경우 일반적으로 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B(t) = \sum_{i=0}^N \frac{N!}{i!(N-i)!} (1-t)^{N-i} t^i P_i, t \in [0,1] \quad (3)$$

여기서, $B(t)$ 는 곡선을 나타내기 위한 연속함수이고, P_i 는 제어점을 나타낸다. 본 연구에서 사용된 제어점의 개수는 6 개로, Fig. 5에 제어점과 곡선을 같이 나타내었다. 블랭크의 중심($R=0$)에 위

치한 제어점(t_0)은 이 부분에서의 급격한 두께변화를 방지하고자 바로 옆의 제어점(t_1)과 동일한 두께방향 위치를 가지고, 반경 65mm 지점에 위치한 제어점(t_m)은 원소재의 두께인 2.1mm 에 위치한다. 즉, 두께 분포를 표현하기 위해서는 총 4 개의 제어점 위치가 사용되며, 각 제어점의 두께방향 위치(t_{yn})와 원주방향 위치(t_{Rn})를 최적화의 설계변수로 설정하였다. 이러한 두께분포를 반영한 유한요소 모델은 Fig. 6 과 같다. 해석을 위하여 사용된 모델 및 경계조건은 앞장에서 소개된 모델과 동일하다. 두께분포를 최적화 하기 위하여 사용된 설계 정식화는 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find } \mathbf{t}_{yn} \ (n = 1,2,3,4), \ \mathbf{t}_{Rn} \ (n = 1,2,3,4) \\
 &\text{To maximize } h \\
 &\text{Subject to } \bar{\epsilon}_{\max} < 0.45 \\
 &\quad 1.3 \leq t \leq 2.1
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 h 는 벌징된 높이이며, 최대 유효변형률은 0.45 로 제한하였으며, 블랭크의 두께(t)범위는 원소재 두께인 2.1mm 를 최대값으로, 가공성을 고려하여 최소값을 1.3mm로 설정하였다.

최적화 과정 중에는 많은 횟수의 비선형 해석이 필요하여 많은 시간이 소요되므로, 최적화의 효율적인 진행을 위하여 등가정하중을 이용한 구조최

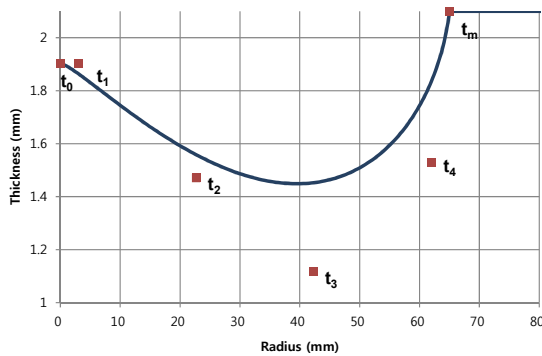


Fig. 5 Control points location for Bezier curve to describe thickness profile

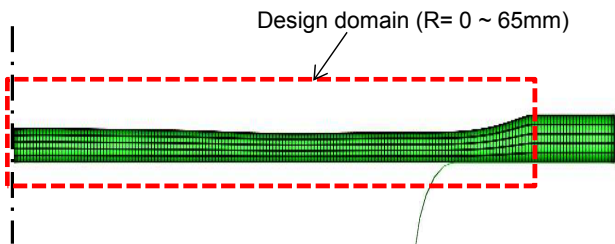


Fig. 6 Design domain and blank shape which has profiled thickness

적화법을 이용하였다.⁽⁸⁻¹¹⁾ 이 방법은 설계변수의 변화가 적다면 선형 응답과 비선형 응답이 유사하다는 가정하에 비선형 해석과 동일한 응답을 보이는 선형모델을 사용하여 최적화 하는 방법으로서 해석하는데 시간이 오래 걸리는 비선형 문제에 대한 최적 설계 시 상당히 유용한 방법이다. 하지만, 선형 응답과 비선형응답이 유사한 범위에서 설계영역을 설정하여야 하므로 설계영역이 좁아 질 수 있다.

3.2 최적설계결과

최적화 결과 얻어진 블랭크의 두께 분포는 Fig. 7 과 같으며, 제어점의 위치는 Table 2 와 같다. 최적화 결과, 성형 중 금형의 라운드 부분과 접촉하는 부분 근처(반경 50mm 부분)에서 가장 얇은 두께를 보이고 중앙으로 갈수록 점차 두께가 증가하는 경향을 얻었다. 성형 초기에는 두께가 얇은 부분에서 주로 성형이 이루어지다가 금형과 접촉하게 된 후에는 마찰의 영향으로 성형 속도가 상대적으로 감소하게 되어 중앙부분에서 성형되는 양이 많아지게 된다.

평판형 블랭크를 이용한 경우에는 최대 변형률이 0.45 로 제한되어 성형 높이가 31.45mm 이었으나, 최적화 후에는 38.65mm 로 약 22% 상승하였으며, 성형후의 반경에 따른 변형률 분포는 Fig. 8 과 같다. 그림과 같이 평판형 블랭크를 이용한 벌징의 경우는 중앙부분에서 최대 변형률을 보이며 외곽으로 갈수록 점차 변형률이 감소되는 경향을 보이지만, 최적화 후에는 대부분의 영역에서 최대 변형률에 가까운 분포를 보이며 성형량이 증가하였음을 알 수 있다. 최적 형상으로 가공된 블랭크를 이용하여 벌징시험을 수행하였으며, 그 결과 변형 형상이 Fig. 9 와 같이 해석과 매우 유사함을 확인 할 수 있다. 반경별로 두께를 측정하여 시험결과와 해석결과를 비교하면 Table 3 과 같으며, 모두 상대오차 10%이내로 비교적 정확한 결과를 얻었다. Fig. 10 은 시험과 해석에서 얻어진 정점에서의 변위를 비교한 그림이다. 블랭크 가공시에는 두께의 감소로 인한 예상치 못한 파손을 방지하기 위하여 가공 공차를 두께가 증가하는 방향으로

Table 2 Locations of control points after optimization (mm)

Control point	t_1	t_2	t_3	t_4
Thickness location (mm)	1.717	1.851	0.936	1.013
Radial location (mm)	2.928	26.124	47.374	63.390

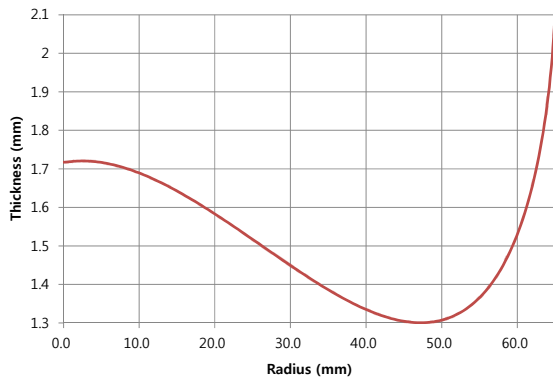


Fig. 7 Optimized thickness profile for free bulging

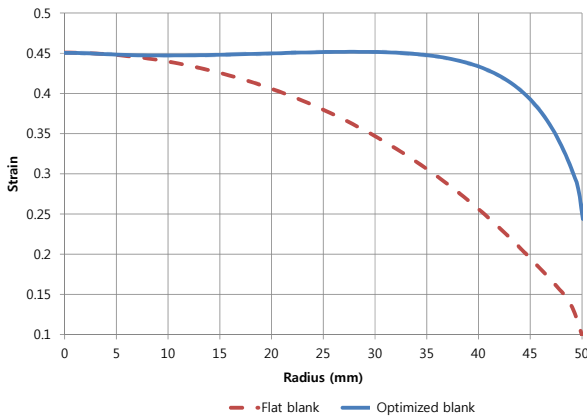


Fig. 8 Strain distribution after forming

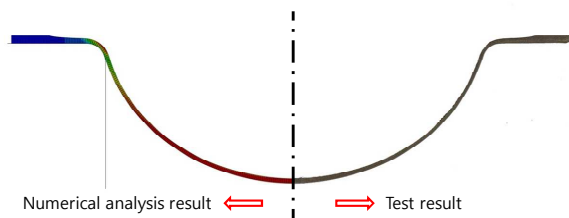


Fig. 9 Comparison of deformed shape between analysis and test

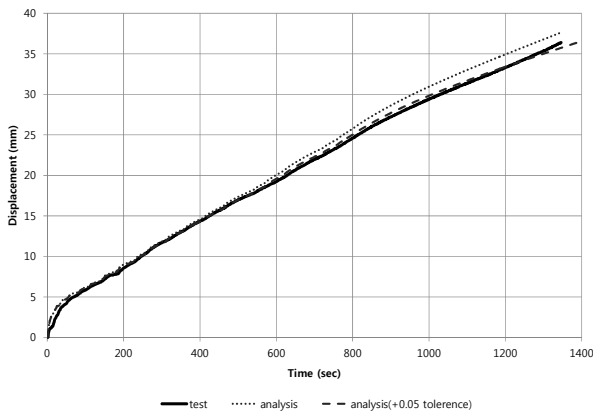


Fig. 10 Comparison of displacement change at pole during free bulging

Table 3 Thickness comparison of bulged part

Radius (mm)	0	10	20	30	40	50
Analysis (mm)	1.142	1.156	1.117	1.045	0.981	1.093
Measurement (mm)	1.26	1.27	1.18	1.12	0.97	1.08
Relative error (%)	9.37	8.98	5.34	6.70	1.13	1.20

0.05mm 를 적용하였다. 그림에는 블랭크의 모든 영역에서 최적화 설계보다 0.05mm 더 두껍다는 가정하에 해석한 결과가 같이 표시되어 있다. 그림과 같이 공차범위내에서 유사한 거동을 보임을 확인하였다.

5. 결론

인코넬 718 의 자유벌징 시험을 통해 획득한 고온 유동응력식을 결정하였고, 벌징 높이를 최대화하기 위한 두께분포 최적화 연구를 수행하였다. 그 결과 평판형 블랭크를 이용한 벌징시험 보다 약 22% 증가된 성형높이를 얻었다. 설계된 블랭크를 제작하여 시험함으로써 최적화 과정에 대하여 검증하고 실제로 구현될 수 있음을 입증하였다. 본 연구에서 적용된 방법을 다양한 형상의 고온 성형에 적용한다면, 기존의 성형 결과보다 더 우수한 결과를 얻을 수 있을 것이고, 또한 성형의 한계로 인하여 고온 성형이 불가능한 경우에도 두께분포 최적화를 통해 구현할 수 있을 것이다.

참고문헌 (References)

- (1) Kim, Y. H., Hong, S. S., Lee, J. S. and R. Wagoner, H., 1996, "Analysis of Superplastic Forming Processes Using a Finite-Element Method," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 62, pp. 90~99.
- (2) Hwang, Y. M., Liew, J. M., Chen, T. R. and Huang, J. C., 1996, "Analysis of Superplastic Blow-Forming in a Circular Closed-Die," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 57, pp. 360~372.
- (3) Jarrar, F. S., Hector, L. G., Jr., Khraisheh, M. K. and Bower, A. F., 2010, "New Approach to Gas Pressure Profile Prediction for High Temperature AA5083 Sheet Forming," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 82~834.
- (4) Yoo, J.-T., Yoon, J.-H. and Lee, H.-S., 2011, "Material Characterization of Inconel 718 from Free Bulging Test at High Temperature," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 7, pp. 2101~2105.

- (5) Giuliano, G. and Franchitti, S., 2008, "The Determination of Material Parameters from Superplastic Free Bulging Tests at Constant Pressure," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, pp. 1519~1522.
- (6) Takigawa, Y., Velazquez Aguirre, J., Taleff, E. M. and Higashi, K., 2008, "Cavitation During Grain-Boundary-Sliding Deformation in an AZ61 Magnesium Alloy," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 497, pp. 139~146.
- (7) Semiatin, S. L., Seetharamna, V., Ghosh, A. K., Shell, E. B., Simon, M. P. and Fagin, P. N., 1998, "Cavitation During Hot Tension Testing of Ti-6Al-4V," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 256, pp. 92~110.
- (8) Shin, M.-K., Park, K.-J. and Park, G.-J., 2007, "Optimization of Structures with Nonlinear Behavior Using Equivalent Loads," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 196, pp. 1154~1167.
- (9) Lee, J.-J. and Park, G.-J., 2011, "Shape Optimization of the Initial Blank in the Sheet Metal Forming Process Using Equivalent Static Loads," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 85, pp. 247~268.
- (10) Lee, H.-A., Zeshan, A. and Park, G.-J., 2010, "Preliminary Study on Nonlinear Static Response Topology Optimization Using Equivalent Load," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 12, pp. 1811~1820.
- (11) Jung, U.-J., Lee, J.-J. and Park, G.-J., 2011, "A Preliminary Study on the Optimal Shape Design of the Axisymmetric Forging Component Using Equivalent Static Loads," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 35, No. 1, pp. 1~10.