

AZ31 합금 판재의 온간 점진 성형에 관한 연구

김상우[#] · 이영선¹ · 권용남¹ · 이정환¹

A Study on Warm Incremental Forming of AZ31 Alloy Sheet

S. W. Kim, Y. S. Lee, Y. N. Kwon, J. H. Lee

(Received July 7, 2008)

Abstract

A fundamental study on warm incremental forming of a magnesium alloy sheet has been carried out. In order to enhance the incremental formability of the magnesium alloy sheet, a local heating device was newly designed and manufactured. Through the incremental forming tests of AZ31 under various forming conditions, the effects of process parameters such as the temperature, feeding depth per cycle, and inclination angle on the incremental formability of AZ31 were investigated. In addition, conventional FLDs at elevated temperatures were constructed experimentally and applied to predict the forming failure.

Key Words : Incremental Forming, Magnesium, Warm Forming, FLD, FEM, Formability

1. 서론

최근 다품종 소량생산 제품에 대한 산업적 수요가 증가하면서 점진 판재 성형기술에 대한 관심이 높아지고 있다. 점진 판재 성형기술은 별도의 상·하 금형 없이 하나의 공구가 계산된 경로에 따라 이동하면서 삼차원 형상을 점진적으로 성형해 나가는 방법으로 자동차 및 항공기 부품의 시제품 개발, 맞춤형 의료기기 등에 적용함으로써 초기 제품개발기간 축소, 제조비용 절감 등의 이점이 있다. 그 동안 많은 선행연구자들에 의해 점진 판재 성형기술에 대한 연구가 진행되어 왔는데 점진 판재 성형에서의 변형해석[1~2], 성형성[3~5], 공구경로생성 기법[6]에 관한 연구가 주류를 이루었다. 이들 연구는 주로 연강, 알루미늄과 같이 상온 성형성이 비교적 양호한 소재에 국한되어 진행되어 왔다.

자동차, 항공기 등 수송기류의 경량화 추세에

힘입어 최근 마그네슘과 같은 경량소재에 대한 관심이 높아지고 있다. 마그네슘은 경량성, 우수한 절삭성, 전자파 차폐성 등 다양한 이점으로 인해 산업적 수요가 늘어가고 있으나, 욱방정계 결정구조로 인해 상온 성형성이 열악함에 따라 온간 성형에 대한 연구가 집중적으로 이루어지고 있다.

본 연구에서는 앞서 말한 점진 판재 성형공정 및 마그네슘 합금의 장점을 활용하여 산업적 적용범위를 확대하기 위한 초기단계로 온간 점진 판재 성형에 관한 기초연구를 수행하였다. 마그네슘 합금 판재의 성형성을 향상하기 위한 방안으로 점진 판재 성형장비에 독자적으로 제작된 국부 가열장치를 장착하여 성형온도, 1회 성형깊이, 기울임 각 등 다양한 성형조건에서의 실험을 통하여 이들 공정변수가 AZ31 마그네슘 합금 판재의 점진 성형성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한, 유한요소법과 AZ31 소재의 성형한계선도(FLD)를

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소
교신저자: 한국기계연구원 부설 재료연구소,
E-mail: kimsu@kims.re.kr

이용하여 성형한계를 예측함으로써 기존의 성형 한계선도를 이용한 네킹 및 파단 발생 판단 가능 여부를 검토하였다.

2. AZ31 합금 판재의 기계적 물성

두께 0.8mm인 AZ31 마그네슘 합금 판재의 고온에서의 기계적 물성을 측정하기 위하여 100, 200, 300, 400℃의 네 가지 온도 및 변형률 속도 0.01, 0.1, 1/s에서의 인장시험을 수행하였다. 실험은 압연방향에 대하여 0°, 45°, 90°의 세 방향으로 시편을 절단하여 방향별로 수행하였으며, 식(1)의 평균유동응력으로 근사하여 분석한 결과를 Fig. 1, 2에 나타내었다.

$$\bar{\sigma} = (\sigma_0 + 2\sigma_{45} + \sigma_{90}) / 4 \quad (1)$$

전 응력은 온도가 증가함에 따라 감소하는 반면 변형률 속도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 전 연신률은 온도가 증가함에 따라 증가하는 반면 변형률 속도가 증가함에 따라 감소하는 경향으로 보였다. 특히, 400℃에서 변형률 속도 0.01/s의 경우 급격한 연신률 증가를 보였다.

3. 온간 점진 판재 성형용 가열장치

상온에서의 성형성이 열악한 마그네슘 합금의 성형성을 향상시키고, 점진 성형 공정에 적용하기 위하여 점진 성형용 국부 가열장치를 설계하였다. 가열장치의 설계에 있어서 다음의 세가지 설계인자가 고려되었다. 첫째, 3차원으로 이동하는 공구의 이동경로를 방해하지 않을 것. 둘째, 가열로 인한 공정시간 증대를 최소화하기 위해 급속가열이 가능할 것. 셋째, 변형영역내의 온도 제어가 가능할 것. 상기의 세 가지 설계인자를 고려하여, Fig. 3과 같이 할로겐 램프를 이용한 국부가열 장치의 설계 및 제작을 완료하였다. 가열장치는 공구에 장착되어 공구와 함께 이동함으로써 이동경로에 방해받지 않으며, 여섯 개의 'U'자형 할로겐램프를 사용하여 급속가열을 가능하게 하였다. 또한, 변형영역내의 온도제어를 위해 열전대가 소재에 접촉할 수 있도록 설치하고, 이를 통해 온도를 제어할 수 있도록 시스템을 구현하였다.

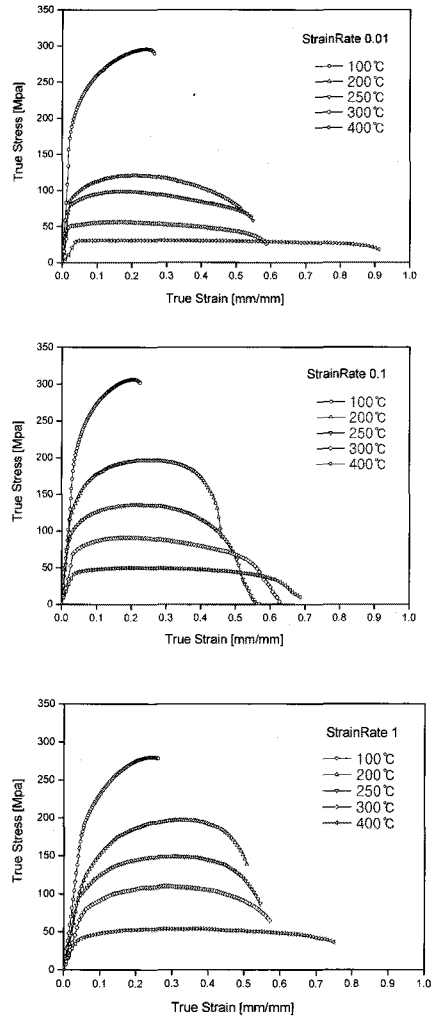


Fig. 1 Flow stresses at various temperatures and strain rates

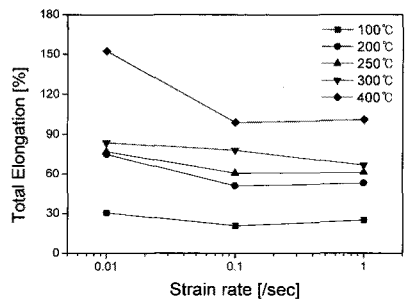


Fig. 2 Total elongations at various strain rates and temperatures

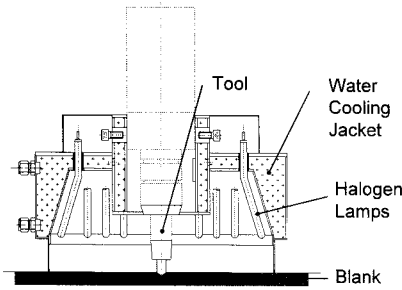


Fig. 3 Schematic of heating device

4. 공정변수의 영향

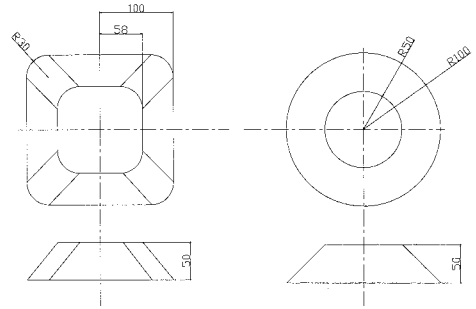
마그네슘합금의 온간 점진 성형에서의 공정변수들의 영향을 살펴보기 위해 두 가지 기본형상의 모델을 Fig. 4와 같이 선정하여, 국부 가열장치를 이용한 온간 점진 성형실험을 수행하였다. 실험모델은 직경(가로변) 100mm, 높이 50mm의 높이에 따라 단면이 줄어드는 사각기둥 및 원기둥 형상의 두 개 모델을 선정하였다. 성형공구는 직경 10mm의 반구형을 사용하였으며, 자연발화점이 400℃인 합성오일을 윤활제로 사용하였다. 공구의 속도는 초기 예비가열을 위해 10mm/s로 수 회 성형한 후, 100mm/s까지 점진적으로 속도를 증가시킴으로써 일정온도가 유지될 수 있도록 하였다. 실험은 1회 전 당 성형깊이, 성형온도, 모델의 기울임 각을 달리하여, 다양한 공정변수에 대한 영향을 검토할 수 있도록 하였다. Fig. 5는 국부 가열장치를 장착한 점진 성형 공정 장비를 보여주고 있다.

4.1 1회 성형깊이에 대한 영향

우선, 1회 성형깊이에 따른 성형성을 조사하기 위하여 성형온도 250℃, 기울임 각 45°인 조건하에서 1회 성형깊이를 0.2mm, 3mm로 달리하여 실험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 6에서 보이는 것과 같이 두 가지 모델 모두 1회 성형깊이가 작을수록 성형가능 높이가 커지는 것으로 나타났으며, 원형 모델의 경우 파단까지의 성형깊이가 사각형 모델보다 큰 것으로 나타났다. 이는 사각형 모델의 평행부에서의 평면변형에 의한 성형한계의 감소로 판단된다.

4.2 성형온도의 영향

둘째로, 성형온도의 영향을 살펴보기 위하여 100,



(a) Model A (b) Model B
Fig. 4 Two types of test model

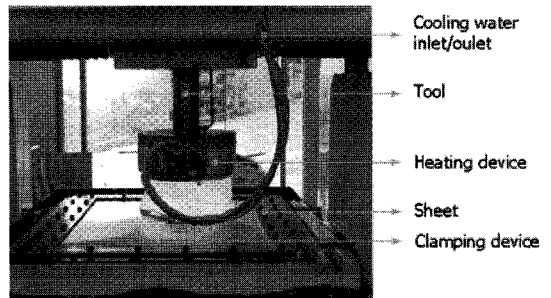


Fig. 5 Incremental forming at elevated temperatures

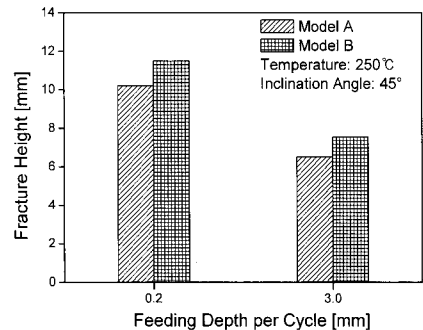


Fig. 6 Effect of process parameters: Feeding depth

200, 250, 300℃의 온도에서 1회 성형깊이를 0.2mm, 기울임 각 45°의 동일한 조건에서 실험을 수행한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 성형온도가 증가함에 따라 파단높이도 증가하는 경향을 보였으며, 200℃ 이상에서는 급격한 성형성 증가를 나타내었다. 또한, 원형모델이 사각형모델에 비해 성형이 잘 되는 것으로 나타났다.

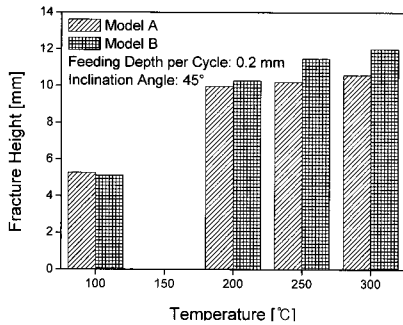


Fig. 7 Effect of process parameters: Forming temperature

4.3 기울임 각에 대한 영향

판재의 점진 성형 공정은 국부적인 변형을 유도하여 전체적인 형상을 점진적으로 성형하는 공정으로 Table 1의 좌측 그림과 같이 변형영역내부의 소재 체적은 일정하므로 기울임 각이 클수록 두께가 얇아지게 된다. 따라서, 기울임 각은 점진 성형의 성패를 좌우하는 주요한 설계변수로 작용한다. 본 연구에서는 기울임 각이 성형성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 30°, 35°, 40° 45°의 네 가지 경우에 대한 실험을 수행하였다. 성형온도 및 1회 성형깊이는 앞서 수행된 실험에서 가장 성형결과가 좋았던 250°C, 0.2mm로 고정하고, 두 가지 모델에 대한 실험을 수행하였다. 실험결과, Table 1에서와 같이 온도 및 1회 성형깊이가 동일한 조건하에서 기울임 각이 35°이상일 경우, 두 모델 모두 높이 50mm가 도달하기 전 파단이 발생하였다. 따라서, 상기 조건하에서의 마그네슘 합금의 점진 성형을 위한 최소 기울임 각은 30° 부근인 것으로 판단된다. Fig. 8, 9는 실험결과 파단이 발생한 경우와 성공적으로 성형이 이루어진 경우를 보여주고 있다.

5. 성형한계선도 구축

온간 점진 성형 공정에서의 성형한계를 예측하기 위하여 성형한계선도(FLD)가 고려되었다. Fig. 10과 같이 $\Phi 100$ 반구형 금형에 카트리지 히터를 삽입하여 가열하였으며, 변형경로를 다양하게 하기 위해 각각 폭이 다른 시편을 제작하여 100, 200, 250, 300°C의 네 가지 온도조건에서 실험을 수행하였다. 본 연구에서는 점진 판재 성형에서의 주 변형모드인 평면변형 및 2축 인장 모드에서의

Table 1 Effect of inclination angle on formability

Inclination angle θ	Model A	Model B
0°	Model A	Model B
45°	Fracture	Fracture
40°	Fracture	Fracture
35°	Fracture	Fracture
30°	Success	Success

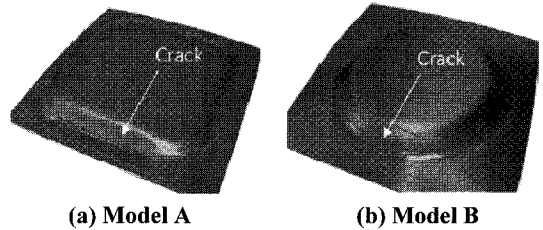


Fig. 8 Experimental results: crack occurrence (T=250°C, Inclination angle=45°)

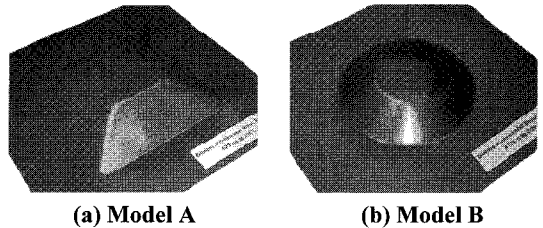


Fig. 9 Experimental results: successful forming (T = 250°C, Inclination angle = 30°)

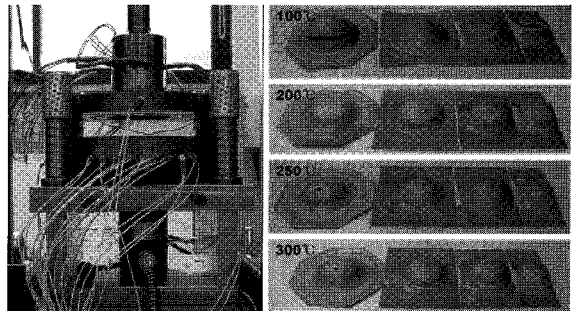


Fig.10 Tool set and specimens for FLD test

성형한계선도만 고려되었으며, 그 결과는 Fig. 11과 같이 온도가 증가함에 따라 한계변형을 역시 증가하는 경향을 보였다.

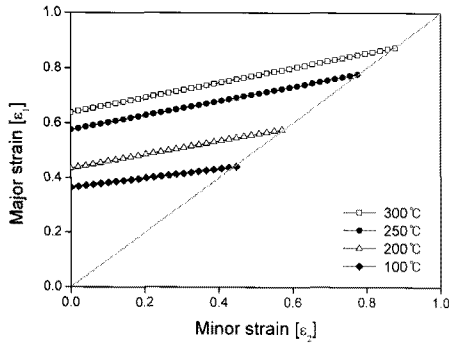


Fig.11 FLCs at various temperatures

6. 유한요소 성형해석

온간 점진 성형 공정에서의 소성변형해석 및 성형한계선도를 이용한 성형한계예측을 위하여 상용 유한요소해석 코드인 ABAQUS-Explicit 을 이용한 공정해석을 수행하였다. Fig. 12와 같이 공구, 상하 홀더, 베이스 몰드는 강체로 가정되었으며, 소재는 변형률 속도를 고려한 탄소성체로 가정하였다. 공정 중에는 변형영역내의 균일한 가열이 이루어졌다는 가정하에 250℃의 등온공정으로 해석하였다.

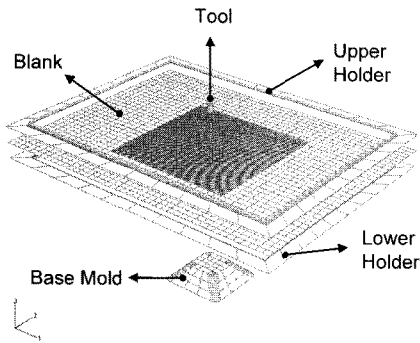
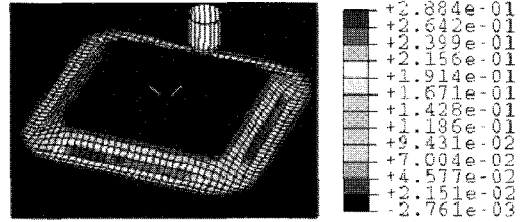


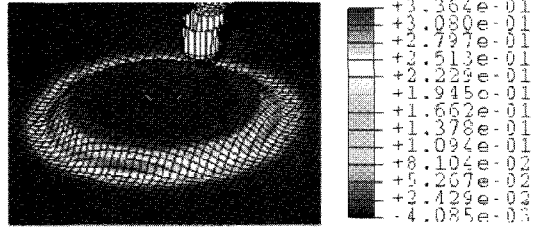
Fig. 12 Finite Element Model

6.1 변형률 분포

앞서 수행된 실험에서 파단이 발생하였던 성형 온도 250℃, 기울임 각 45°인 경우와 파단이 발생하지 않고 높이 50mm까지 성형된 경우의 각각의 모델에 대한 유한요소해석이 수행되었다. Fig. 13은 파단이 발생한 경우의 해석결과 최대 변형률 분포를 보여주고 있는데 두 가지 모델 모두 평면변

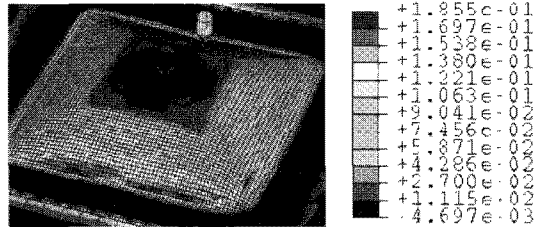


(a) Model A

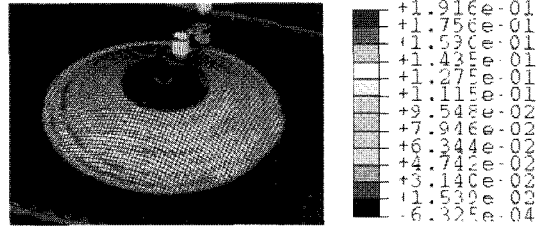


(b) Model B

Fig.13 FE analysis: crack occurrence (T=250℃, Feeding depth per cycle=0.2mm, Inclination angle=45°)



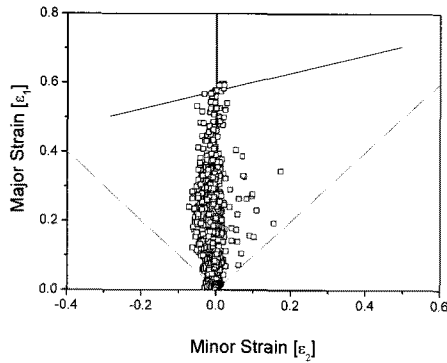
(a) Model A



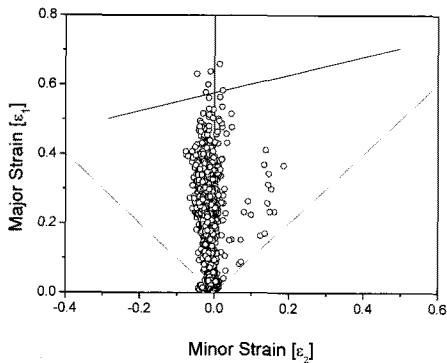
(b) Model B

Fig.14 FE analysis: no crack (T=250℃, Feeding depth per cycle=0.2mm, Inclination angle=30°)

형이 작용하는 평행부에서 최대 인장 변형률이 발생하였다. Fig. 14는 높이 50mm까지 성형이 완료된 경우의 해석결과로 사각형 모델의 경우 최대 인장 변형률이 0.186으로 파단이 된 경우의 0.288에 비해 35%가량 작게 나타났으며, 원형 모델의 경우 0.192로 파단된 경우의 0.336에 비해 43%가량 작게 나타났다.

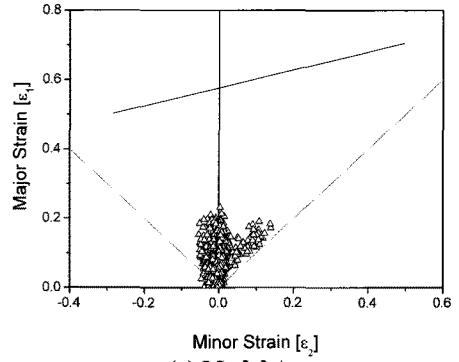


(a) Model A

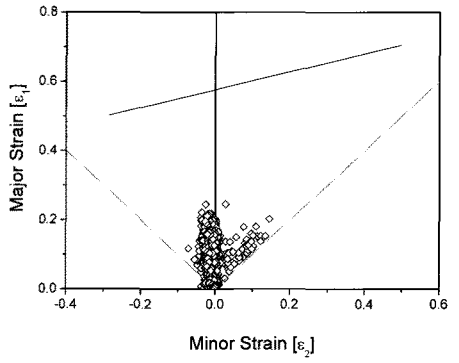


(b) Model B

Fig.15 Failure prediction: no crack(T=250 ℃, Feeding depth per cycle=0.2mm, Inclination angle=30°)



(a) Model A



(b) Model B

Fig.16 Failure prediction: crack occurrence(T=250 ℃, Feeding depth per cycle=0.2mm, Inclination angle=45°)

6.2 성형한계선도를 이용한 파단에측

실험을 통해 도출된 성형한계선도와 해석결과를 이용하여 마그네슘 합금의 온간 판재 점진 성형공정에서의 파단을 예측해 보았다. 그 결과, Fig. 15에서와 같이 파단이 된 경우에는 두 모델 모두 주변형률이 평면 변형상태에서 한계변형률을 초과함으로써 실험과 동일하게 파단을 예측하였으며, Fig. 16의 파단이 되지 않은 경우에는 각 요소의 변형률이 한계변형률 아래에 분포됨으로써 파단없이 성형이 완료될 수 있음을 예측하였다.

7. 결론

본 연구에서는 마그네슘 합금 판재의 온간 점진 성형을 위하여 국부 가열장치를 이용하여 기초실험을 수행함으로써 공정변수의 영향을 분석하였으며, 파단을 예측하기 위하여 고온에서의 성형한계선도를 도입하였다. 이상의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 국부가열장치를 도입함으로써 공구경로가 복잡한 점진 성형 공정에서 효율적으로 소재를 가열할 수 있도록 함으로써 마그네슘 합금의 점진 성형이 가능하도록 하였다.

(2) 성형온도, 1회 성형깊이, 기울임 각의 세 가지 공정변수에 대한 영향을 분석한 결과 기울임 각이 성형의 성공여부를 결정하는 가장 주요한 인자인 것으로 나타났다.

(3) 변형률 기반의 고온 성형한계도를 이용하여 성형성을 예측한 결과, 실험과 잘 일치하는 경향을 보임으로써, 점진 성형 공정에서의 파단기준으로 적용할 수 있음을 보였다.

참고 문헌

[1] H. Iseki, T. Naganawa, 2002, Vertical wall surface forming of rectangular shell using multistage incremental forming with spherical and cylindrical

- rollers, J. Mater. Process. Technol., Vol.130~131, pp. 675~679.
- [2] G. Amrogio, I. Costantino, L. De Napoli, L. Filice, L. Fratini, M. Muzzupappa, 2004, Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental investigation, J. Mater. Process. Technol., Vol.153~154, pp. 501~507.
- [3] H. Iseki, 2001, An approximate deformation analysis and FEM analysis for the incremental bulging of sheet metal using a spherical roller, J. Mater. Process. Technol., Vol. 111, pp. 150~154.
- [4] M. S. Shim, J. J. Park, 2001, The formability of aluminium sheet in incremental forming, J. Mater. Process. Technol., Vol. 113, pp. 654~658.
- [5] S. Shima, H. Kotera, K. Kamitani, T. Bando, Development of Incremental Deep Drawing Process, Metals and Materials, Vol.4, No.3, pp. 404~407.
- [6] K. Dai, Z. R. Wang, Y. Fang, 2000, CNC incremental sheet forming of an axially symmetric specimen and the locus of optimization”, J. Mater. Process. Tech., Vol.102, pp. 164~167.