

유한요소해석을 이용한 Mg 합금 판재 성형 공정 변수 분석

이영선*, 권용남, 이정환(한국기계연구원)

FEM analysis for process variables in sheet metal forming for Mg alloy

Y. S. Lee*, Y. N. Kwon, J. H. Lee (KIMM)

ABSTRACT

Since the sheet forming of Mg alloy has many difficulties due to the low formability, many forming conditions need to be selected properly. Especially, the process variables should be investigated to increase the formability, such as, forming temperature. In this paper, the effects of forming process variables has been investigated using the bending and deep drawing process. A simple U-bending designed for mobile part could be formed in room temperature and springback amounts are surveyed. On the other hand, square cup part couldn't be formed in room temperature due to the low formability. Therefore, the effects of forming temperature are investigated in deep drawing process for square cup part. As a experimental and FEM results, the optimum forming temperature is presence and formability in a higher temperature is less than that of lower temperature. Above experimental results are compared with the FEM analysis and well coincided with the experimental results. Therefore, more detail investigations could be progressed to select more appropriate process conditions by the FEA.

Key Words : Mg alloy(마그네슘 합금), Forming condition(성형 조건), Formability(성형성), Springback(탄성회복), Bending(굽힘), Deep drawing(딥 드로잉)

1. 서론

한정된 에너지의 효율적인 이용측면에서 재활용이 가능하여 친환경적이며 경량화에 적합한 이유 때문에 전자 산업 및 자동차 산업에서 재 평가를 받고 있는 마그네슘 합금은 그만큼 대량생산의 요구가 증대되고 있다. 그러나, 낮은 성형성 때문에 대량생산에 적합한 공정인 소성 가공 공정을 이용하는데 많은 어려움이 존재하며 그 핵심은 성형성에 있다.

마그네슘 합금은 HCP 결정 구조로 인해 성형성이 떨어지며, 다양한 형상으로 소성 변형을 유도하기가 곤란한 단점이 있다. 따라서, 성형성 향상을 위한 연구[1], 온도에 따른 기계적 특성 변화[2], 다양한 온도에서의 성형성 연구[3-5] 등이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 마그네슘 합금 가운데 대표적인 합금인 AZ31 소재를 이용하여 다양한 온도에서의 성형 연구를 통해 공정 변수를 분석하고 향후 계속 될 연구에 사용될 유한요소해석의 신뢰도를 분석하

였다.

상온에서의 성형 기술은 휴대용 전자부품에 많이 사용되는 형상인 U-굽힘 형상에 대한 자체 설계 모델을 이용하여 실험과 해석을 수행하였으며, 승온 상태에 대해서는 직사각 컵 형상의 딥 드로잉(Deep Drawing) 공정을 이용하여 연구를 수행하였다.

냉간 성형에 대해서는 성형 후 탄성회복에 대한 해석을 수행하여 제품 정밀도 확보를 위해 필요한 탄성 회복량 보정에 대한 기초 데이터를 정립하고자 하였다. 반면, 고온 성형에서는 각 온도에서의 딥 드로잉 실험을 통해 성형에 적합한 온도를 선정하고자 하였으며, 온도별 인장 특성은 제품 결함 발생 원인 분석과 유한요소해석을 이용한 성형 해석에 물성치로 이용되었다. 또한, 마그네슘 합금의 고온 변형에서 발생하는 가공 연화 현상을 유한요소해석에서 어떻게 고려해야 할지에 대한 기초 분석을 수행하였다.

2. U-굽힘 모델을 이용한 냉간 성형

2.1 U-굽힘 성형 실험

마그네슘 합금의 냉간 판재 성형 기술을 연구하기 위해 사용된 모델은 Fig.1 과 같은 형상으로 AZ31 소재로 제조된 시제품을 보여주고 있다. 연구 대상으로 설계한 모델은 휴대용 전자기기의 대표적인 형상으로 굽힘 형상이면서 한쪽은 폐쇄되어 있어 단순 굽힘 뿐만 아니라 드로잉 성형 모드도 존재하도록 함으로써, Mg 합금의 냉간 성형성을 분석하는데 이용하였다

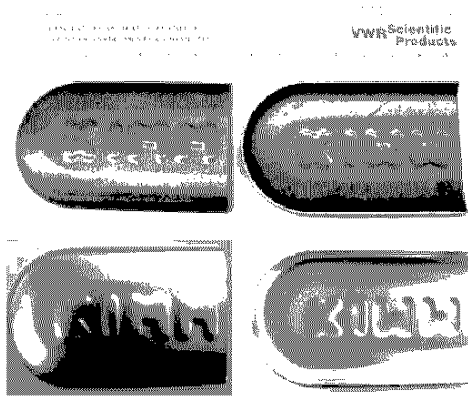


Fig. 1 Model designed inherently and prototype formed in room temperature

성형을 위해 사용된 소재의 초기 조직은 냉간 압연된 상태로서 원소재 조직과 성형 결합이 발생된 성형품의 사진을 Fig. 2 에 나타내었다. Fig. 2 에서 알 수 있듯이 조직은 10 μ m 이하로 미세한 수준이지만, 그 크기가 매우 불균일한 상태이다.

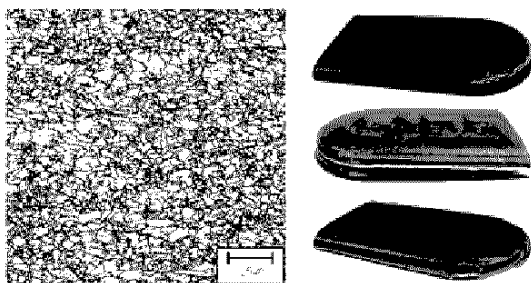
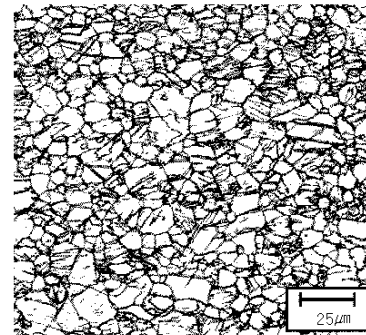
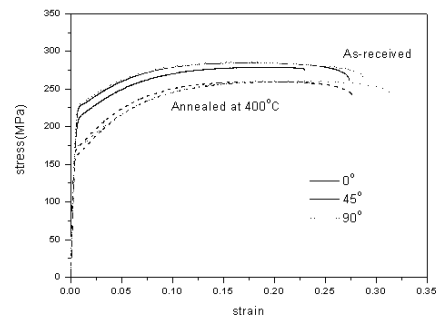


Fig. 2 Microstructure and fracture of formed part using the AZ31 alloy sheet (as received)

조직의 균일성과 성형성을 향상시키기 위해 소둔 열처리를 거쳐 조직을 균일화하고 성형성을 향상시키고자 400 $^{\circ}$ C에서 10 분 동안 유지한 후는 Fig. 3 과 같은 조직으로 일부 조대화되었으나 균일성은 향상되었으며, 유동응력 곡선을 살펴보면 성형성 향상이 이루어진 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 3 Microstructure and tensile curves after annealing (400 $^{\circ}$ C, 10 min.)

Fig.3 과 같이 소둔 공정(400 $^{\circ}$ C에서 10 분)에 의해 항복응력은 50Mpa 정도 낮아지며, 가공경화 지수는 0.25 에서 0.30 으로 증가되고 있다. 결국 소둔 공정에 의해 결정립은 미소하게 성장하였지만 소성 변형에는 유리하도록 변화되고 있음을 알 수 있다.

2.2 FEM 을 이용한 U-굽힘 성형 공정 해석

탄성 회복량의 예측을 위한 유한요소해석은 상용 프로그램인 LS-Dyna 를 이용하였으며, 성형공정은 내연적방법(Implicit Method)을 이용하여 성형 공정에 대해 해석을 수행하여 두께 분포, 성형 결합 등을 예측하였으며 탄성회복량을 예측하기 위한 연구를 위해 내연적방법(Implicit Method)을 이용하여 탄성 회복 공정에 대한 분석 또한 수행하였다. 해석에 사용된 모델은 Fig.4 와 같으며 성형품의 변형율과 응력 분포는 Fig.5 와 같이 나타났다.

탄성회복량의 정량적 분석을 위해 3 차원 측정기를 이용하여 성형품의 치수를 측정하였다. 유한요소해석 결과와의 치수 비교 결과는 Fig.6 에 나타내었는데, 해석에 의해 예측된 치수는 최대 0.5mm 까지 실험값과 차이를 나타내고 있는데 이는 실험시에 발생하는 높이 방향 성형 공차 때문으로 예측된다.

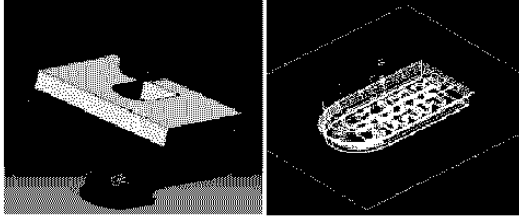


Fig. 4 FE-Model for U-bending process

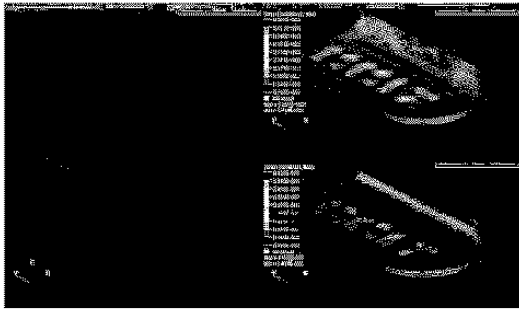


Fig. 5 Strain and stress distribution (von-Mises)

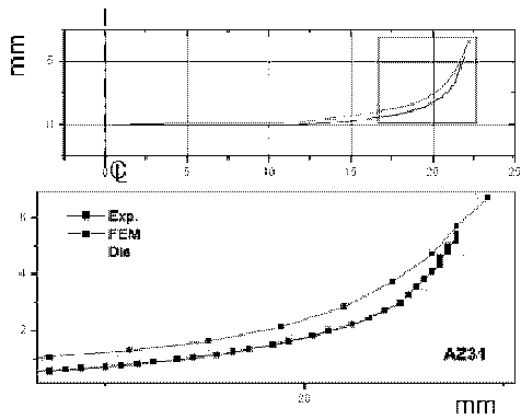
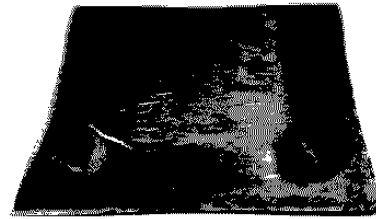


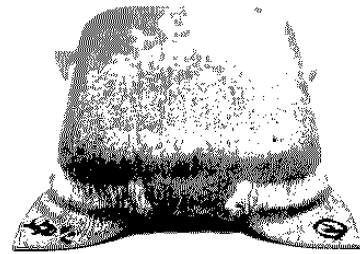
Fig.6 Dimensional comparison of formed part between experimental and FEA

3.1 사각컵 디프 드로잉 성형 실험

U-굽힘과는 달리 디프 드로잉 공정은 다이 어깨 부를 통과하는 동안 소재에 인장과 압축응력의 전환이 발생되기 때문에 성형성 부족시 파단이 발생할 가능성이 높다. 따라서, 고온에서 성형을 하는 것이 유리한 것으로 알려져 있다. [5-7] 디프 드로잉 공정을 위해 사용된 모델은 직 사각컵 (가로 60, 세로 40, 높이 15mm)형태로서 다양한 성형 온도에 대한 실험을 수행함으로써 성형성에 대해 분석하였다. Fig. 7은 각 온도별 성형품 외관으로 250°C에서는 파단 없이 성형이 된 반면에 상온과 400°C에서는 코너부위에서 파단이 발생되었다.



(a)



(b)



(c)

Fig.7 Square cup drawn part at three temperatures (a) room temperature, (b) 250°C, (b) 400°C

온도에 따라서 파단 유무가 변화되는 것은 성형성이 온도에 따라 많은 변화를 나타내기 때문에 판단되며 원인 분석을 위해 온도별 인장 곡선을 비교하여 보면 Fig. 8과 같다.

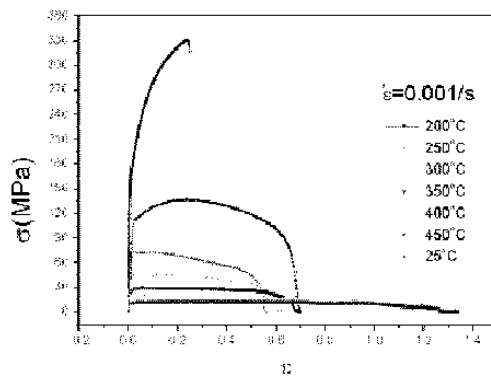


Fig.8 Flow stress of AZ31 sheet at various temperature

연신율은 상온에서는 0.2 정도의 낮은 값을 나타내는 반면에 200°C에서 350°C까지 0.7의 유사한 경향을 나타내고 있다. 그러므로, 상온에서의 파단은 연신율 부족이 그 원인으로 예측되나 250°C에서 보다 높은 연신율을 갖는 400°C에서의 파단은 연신율과는 다른 영향 인자가 작용되는 것으로 판단된다.

각 온도별 물성치를 정리하면 Table 1과 같이 온도가 상승됨에 따라 강도는 감소하는 반면에 가공 경화지수는 250°C일 때가 가장 큰 값을 나타내고 있다. 이와 같은 데이터를 근거로 파단 원인을 분석하면 가공 경화 지수가 큰 영향을 미침을 이해할 수 있다. 다른 소재와는 달리 Mg합금의 인장곡선상의 특징은 소성 불안정 조건에 도달되기 전에 파단이 발생되고 있어 연신율 보다는 오히려 소성 불안정 조건에 도달하기까지의 연신율이 성형성에 더 지배적인 영향을 미치는 것으로 예측되며 보다 정밀한 분석을 수행 중에 있다.

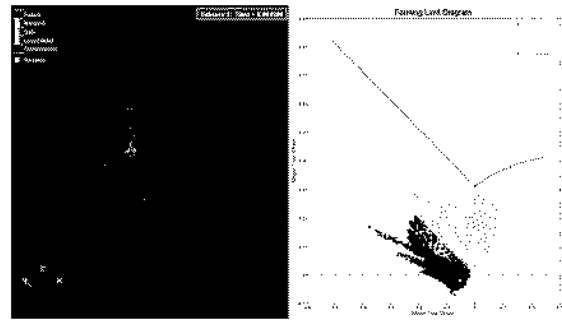
Table 1 Mechanical properties

Temperature(°C)	Y.S. (MPa)	T.S. (MPa)	K	n
Room Temp.	183	268	503	0.243
250°C	129	157	288	0.258
400°C	34	38	42	0.206

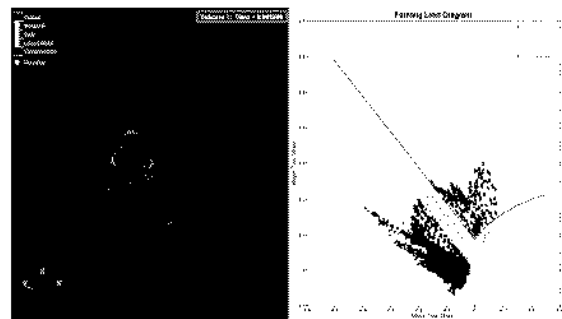
3.2 사각컵 디프 드로잉 공정의 FEM 해석

디프 드로잉의 성형 공정 해석에 사용된 물성치는 Table 1과 같으며, 온도에 따른 탄성 계수를 달리 적용하여 LS-dyna960을 이용하여 해석하였다. 정량적인 성형 공정 해석을 위하여 적분점 개수는 4개, 요소크기 2mm, 요소 형태는 4-node-shell 요소로, Hourglass 효과를 고려하였고, 해석 시간은 약 4시간이 소요되었다.

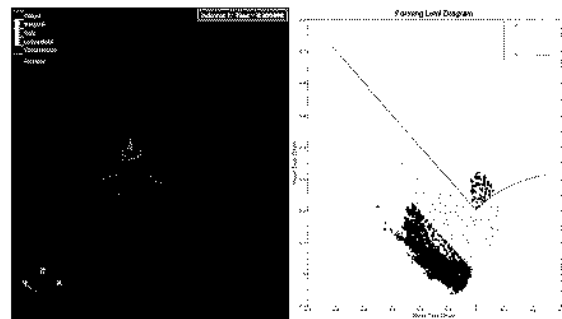
실험에서 사용된 AZ31 마그네슘 판재는 상온에서의 실험에서는 약 6mm 성형 시 파단이 발생되었다. 그리고 250°C온도에서는 15mm의 디프 드로잉에서도 파단 없이 성형되었고, 400°C온도에서의 성형에서는 파단이 발생되었다. 결국, 250°C의 성형 온도를 제외하고는 코너 부위에서 성형 한계를 넘고 있다고 예측할 수 있으며 Fig. 9에서 분석된 결과에서도 실험과 동일한 조건하에서 파단이 발생되고 있음을 예측하고 있다. Fig. 9는 각각의 온도에 대한 유한 요소 해석 결과를 Keeler와 Goodwin의 이론을 이용하여 계산된 FLD곡선상에 나타낸 결과이다. (a)에서는 상온에서의 성형 한계도를 나타내었는데 성형 초기에서부터의 파단 형성부를 나타내고 있다.



(a) Formability of AZ31 sheet by room temperature



(b) Formability of AZ31 sheet by 250°C temperature



(c) Formability of AZ31 sheet by 400°C temperature

Fig. 9 Fracture of square cup deep drawn part predicted in FLD curve

(b)의 250°C에서의 성형에서는 FLD곡선이 성형이 끝날 때까지 안정적인 모습을 보여주고 (c)의 400°C의 최종 성형 단계에서 파단이 됨을 보여주고 있다. 400°C 성형할 경우 파단이 발생되고 있는 코너 부위에서의 변형률 분포(von Mises)와 두께 분포는 Fig. 10과 같다. 변형률은 파단 부위에서 최대 값을 나타내고 있으며 두께 또한 파단 발생 부위에서 그 값이 최대임을 확인할 수 있다.

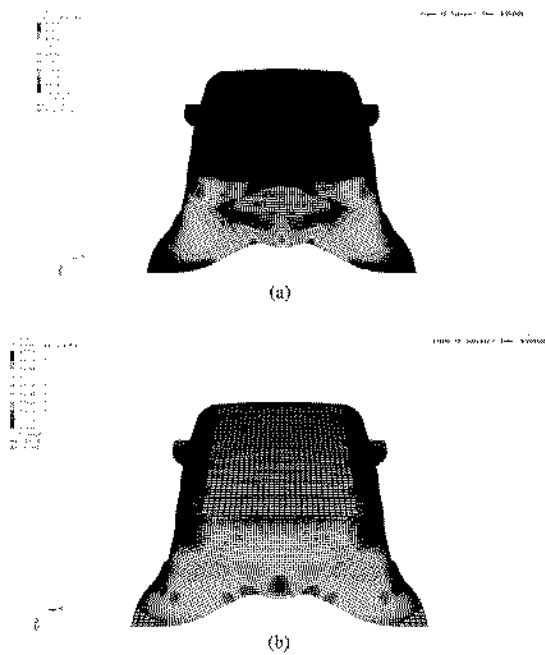


Fig. 10 Strain and thickness distribution of deep drawn part (a) von-Mises strain, (b) thickness

4. 결론

낮은 성형성으로 인해 판재 성형시 파단등 결함 발생이 쉬운 Mg 합금 가운데 하나인 AZ31 소재를 이용하여 성형 공정 변수에 따른 영향을 분석한 결과 성형성이 향상되는 최적 온도 범위가 존재함을 알 수 있었다. 또한, 유동응력이 소성 불안정 영역이나 가공 연화등에서 다른 소재와 많은 차이를 갖는 Mg 합금의 경우에 대한 분석이 가능함을 알 수 있었으며 제품 정밀도 향상을 위해 스프링 백과 같은 정밀 분석이 계속될 예정이다.

제품 형상과 소재 조건에 따라서는 상온에서의 성형 또한 가능한 만큼 향후에는 성형성이 향상되는 소성 가공용 Mg 합금의 개발과 소성 가공 공정 개발을 동시에 연구 개발할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 프론티어사업과 기본연구 사업으로 진행된 결과로서 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. H. Takuda, T.Yoshii, N.Hatta, 1999, "Finite-element analysis of the formability of a magnesium-based alloy AZ31 sheet." *Journal of Materials Processing Technology* Vol.89-90, pp. 135~140, 1999
2. Tien-Chan Chang, Jian-Yi Wang, Chia-Ming O, Shyong Lee, "Grain refining of magnesium alloy AZ31 by rolling," *Journal of Materials Processing Technology* Vol.140, pp. 588~591, 2003
3. Shyong Lee, Yung-Hung Chen, Jian-Yi Wang, "Isothermal sheet formability of a magnesium alloy AZ31 and AZ61." *Journal of Materials Processing Technology* Vol.124, pp. 19~24, 2002
4. 이용길, 김종호, 이종섭, "마그네슘 합금판재의 온간 디프드로잉성에 관한 연구." *한국소성가공학회지, 추계학술대회* pp. 117~120, 2003
5. K. Iwanaga, H. Tashiro, H. Okamoto, K. Shimizu, "Improvement of formability from room temperature to warm temperature in AZ-31 magnesium alloy." *Journal of Materials Processing Technology*, 2004
6. Fuh-Kuo Chen, Tyng-Bin Huang, "Formability of stamping magnesium-alloy AZ31 sheets." *Journal of Materials Processing Technology* Vol.142, pp. 643~647, 2003
7. Fuh-Kuo Chen, Tyng-Bin Huang, Chih-Kun Chang, "Deep drawing of square cups with magnesium alloy AZ31 sheet." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 43, pp. 1553~1559, 2003
8. 김순호, "Mg-9Al-1Zn 합금 자동차 에어백 케이스의 다이캐스팅에 관한 연구", *한국정밀공학회지*, Vol.19, N.10, pp77-83, 2002