

가열냉각법에 의한 마그네슘 합금의 판재 성형성 개선

Improvement on the Formability of Magnesium Alloy Sheet by Heating and Cooling Method

강대민 · K. Manabe
D. M. Kang and K. Manabe

Key Words : Magnesium Alloy(마그네슘 합금), Warm Deep Drawing(온간 디프드로잉), Heat Transfer(열전달), Finite Element Method(유한요소법)

Abstract : Structural components for aerospace, electronics and automobile industry are the main applications for magnesium alloys due to their lightweight and high specific strength. The adoption of magnesium alloys in sheet forming processes is still limited, due to their low formability at room temperature caused by the hexagonal crystal structure. In this paper, the authors aim to improve the formability of AZ31 magnesium alloy. For this, experiment and finite element analysis on used warm deep drawing process with a local heating and cooling technique were done. Both die and blank holder were heated at various warm temperature while the punch was kept at room temperature by cooling water.

1. 서 론

마그네슘 합금은 밀도가 1.74 g/cm^3 으로 여러 가지 금속과 합금화할 경우 알루미늄 합금의 2/3, 티타늄 합금의 1/4, 철강 재료의 1/5 정도의 밀도를 가지게 되어 최근 자동차산업과 전자산업 등과 같은 경량구조물에 크게 주목을 받고 있고 특히 마그네슘 합금을 자동차부품에 적용할 경우 차량중량의 감소에 효과가 크고 또한 충격 흡수능력이 우수하여 진동과 충격방지에 효과적이기 때문에 승차감향상에 크게 기여할 수 있다.¹⁾

한편 디프드로잉은 판재성형에 있어서의 중요한 제조공정 중의 하나로 주로 강재나 알루미늄에 대해 행하여져왔다. 마그네슘 합금의 디프드로잉에 관한 연구로는 그 동안 몇몇 연구자들에 의해 상온에서 연구되어왔으나 상온에서는 슬립계에서 발생하는 모든 슬립방향이 판재의 면에 대해 평행하게 배열하는 강한 저면 집합조직을 형성하기 때문에 판의 두께의 감소를 수반하는 변형에 대해서는 강한 이방성을 나타내어 프레스성형이 어렵다. 그러나 고

온이 되면 비저면 슬립계가 활동하게 되어 슬립계의 수가 증가하면서 변형이 용이하게 되어 최근에는 편치부분에는 냉각시키고 다이 및 블랭크홀더 부분에서 히터로 가열하여 성형하는 가열냉각 온간 성형법이 응용되고 있다.²⁾

온간 성형법에 관련된 연구로는 E. Doege³⁾ 등에 의해 여러 가지 마그네슘 합금에 대해 온도 473 K~523K 범위에서 디프드로잉 실험을 통하여 판재성형성과 한계 드로잉비에 성형속도의 영향을 고려하였고, D. M. Kang^{4,5)} 등에 의해 온간 디프드로잉시 AZ31 합금의 판재성형성에 관한 연구를 하였으나 아직 국내외적으로 마그네슘 합금인 AZ31의 판재성형성에 대한 연구는 매우 불충분한 실정이다.

본 연구에서는 AZ31 마그네슘 합금의 디프드로잉 성형성향상을 위한 국부 가열냉각효과에 대해 유한요소해석과 실험 등을 이용하여 검토하였다.

2. 가열냉각 해석모델

본 해석에는 가열냉각 해석모델을 위해 편치, 다이, 블랭크홀더 그리고 블랭크 등으로 모델화하였고, 모델에 사용된 각 공구와 블랭크치수는 Table 1에 표시했다.

접수일 : 2005년 2월 28일
강대민(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : dmkgang@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1614
K. Manabe : 동경도립대학교 기계공학부

Table 1 Dimensions of punch and die used in the FE simulation

| | |
|--------------------------|------|
| Punch diameter/mm | 32 |
| Punch shoulder radius/mm | 5 |
| Die diameter/mm | 35.5 |
| Die shoulder radius/mm | 8 |

디프드로잉 성형해석을 위해 기하학적 성질로부터 2차원 축대칭모델을 이용했다. 사용된 블랭크재의 절점수는 603개이고 축대칭 유한요소수의 수는 400개이다. 펀치와 다이는 강체이고 블랭크홀더는 축대칭 솔리드 모델로 된 강체로 변형이 발생하지 않는 모델을 이용하였다.

Fig. 1의 그림은 국부 가열냉각을 적요한 온간 디프드로잉 성형법의 개략도이다. 이 그림에서 다이와 블랭크홀더 내부에 설치되어있는 히터를 이용하여 가열시키고 펀치 내부에는 물이 순환하여 냉각한다. 그리고 펀치와 블랭크의 접촉부에서는 상온으로 유지하고 다이와 블랭크홀더와 블랭크와의 접촉부에서는 고온상태가 되어 판재성형시 판재 내부에서 열전달효과가 금속조직을 변화시켜 성형성을 향상시키게 된다. 발생하는 열전달은 펀치와 접촉하는 판재부분, 공기로의 대류, 그리고 재료 내의 heat flux에 의한 열전달로 고려할 수 있다.

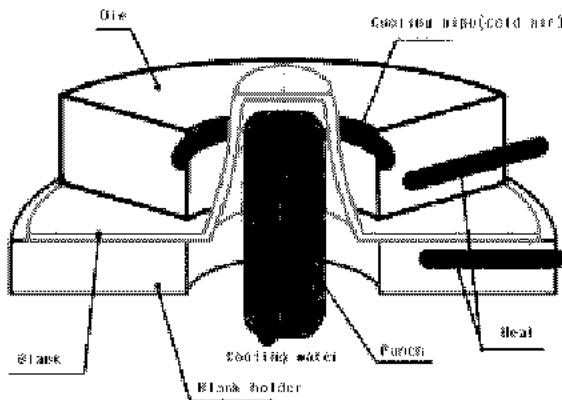


Fig. 1 Schematics for warm deep drawing

여기서 공기와의 대류에 의한 열전달은 무시하고 재료 내의 열전달과 판재와 공구(펀치, 블랭크홀더, 그리고 다이)부분의 접촉에 의한 열전달을 고려하여 해석하였다. 블랭크의 플랜지부분은 573K, 펀치 접촉부분과 용기벽부는 293K의 일정온도로서 정상상태로 유지하면 고온영역과 저온영역 경계에서는

판재의 재료특성에 따라 온도분포가 발생하는 전이영역이 설정된다. 이러한 전이영역 내에서의 판재의 재료 특성치 K 값, m 값 및 n 값의 계산은 고온인장 실험결과로부터 구할 수 있다. 가열냉각 성형해석을 위해 사용된 해석기는 열전달 해석이 가능한 MARC/Mentat이고 본 열전달해석에 사용된 마그네슘 합금의 열적계수는 Table 2와 같다.

Table 2 Thermal coefficients used in the simulation

| | |
|--|------|
| Thermal conductivity/ $W.m^{-1}.K^{-1}$ | 154 |
| Specific heat/ $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ | 1050 |
| Mass density/ $g.cm^{-3}$ | 1740 |
| Contact heat transfer coefficient / $W.m^2.K^{-1}$ | 5000 |

3. 실험

고온인장시험은 마그네슘 합금판(AZ31-O)의 JIS13호 시험편을 이용하여 실험을 행하였고 Table 3은 실험용 시험편에 사용된 마그네슘 합금의 화학적 성분을 표시하였다.

Table 3 Chemical composition(%) of magnesium alloy sheet(AZ31-O)

| Al | Zn | Mn | Zr | Fe | Si | Cu | Ni | Ca |
|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|------|----|
| 1.9 | 1.1 | 4.7 | - | - | 1.0 | 0.1 | 0.03 | - |



Fig. 2 The equipment for warm deep drawing with heating and cooling system

가열냉각 디프드로잉실험은 만능인장압축시험기(AUTO GRAPH, 최대하중 100KN)을 사용하여 드

로잉 치구를 부착하여 실험을 행하였다. 본 치구는 플랜지를 가열, 편치부는 물을 내부에 순환시켜 냉각시켰다. Fig. 2는 사용된 가열냉각 디프드로잉가공을 위한 실험장치이다. 다이와 블랭크홀더의 가열부의 실험 온도조건은 온도가 성형성에 미치는 영향을 파악하기 위해서 상온, 373K, 423K, 473K, 498K, 523K, 573K 및 673K 등의 조건에서 행하였고 변형속도가 성형성에 미치는 영향을 보기 위하여 크로스헤드 속도를 10 mm/min, 100 mm/min 등으로 하였다. 또한 블랭크홀더력은 5.9 kN이고 DR은 3.6으로 했다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과

4.1.1 고온인장시험결과

고온인장시험에 사용된 온도조건은 373K, 473K, 573K 그리고 673K이고 크로스헤드 속도는 5, 50, 500mm/min 등이다. 온간 디프드로잉의 현상학적인 모델은 다음과 같이 응력은 가공경화지수 n 과 변형률속도 민감성 m 에 의존된다고 하면,

$$\sigma = K\epsilon^n \dot{\epsilon}^m \quad (1)$$

여기서 σ 는 흐름응력, K 는 강도계수, ϵ 는 변형률, n 는 가공경화지수, $\dot{\epsilon}$ 는 변형률속도, 그리고 m 는 변형률속도 민감성을 나타낸다.

진응력 σ 는 인장시험을 통해 하중-변위선도로 기록된 하중을 체적 일정법칙으로부터 산출된 시험편의 단면적을 나누어서 구한다. 진응력 σ 를 기초로 재료 특성치 m , K , 및 n 값을 아래 식 (2), (3)의 재료 구성식을 이용하여 구한다.

$$\sigma = K\dot{\epsilon}^m \quad (2)$$

$$\sigma = F\epsilon^n \quad (3)$$

식 (2)에서 공칭변형률 10%의 경우의 진응력과 초기 변형률속도와의 관계를 대수 그래프 상에 표시된 직선관계식으로부터 m 값을 구하고 K 값은 변형률속도가 1인 경우의 진응력의 값이 된다. 초기 변형률 속도는 식 (4)과 같이 크로스헤드 속도 V 를 표점거리 l 을 50mm로 나눈 값이 된다.

$$\dot{\epsilon} = V/60K(s^{-1}) \quad (4)$$

식 (3)에서 n 값은 진응력과 진변형률과의 관계를 대수 그래프 상에 직선관계식으로 변환하여 식 (5)에서 구한다.

$$n = d \ln \sigma / d \ln \epsilon \quad (5)$$

변형률속도 민감성 m 값은 식 (2)에서 진응력과 진변형률속도와의 관계를 대수 그래프 상에 변환하여 식 (6)에 의하여 구할 수 있다.

$$m = d \ln \sigma / d \ln \dot{\epsilon} \quad (6)$$

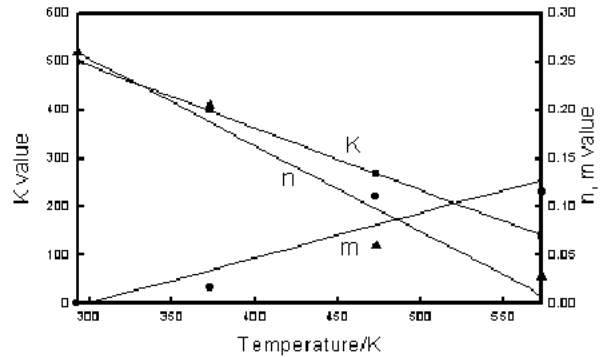


Fig. 3 Results of uniaxial tension test at high temperature

Fig. 3은 고온인장시험을 통하여 K 값, m 값 그리고 n 값의 온도의존성을 나타낸 결과로서 K 값과 n 값은 온도가 증가할수록 급격히 감소하고, m 값은 온도가 증가할수록 현저히 증가함을 알 수 있다.

4.1.2 가열냉각 디프드로잉 실험결과

Fig. 4에서 크로스헤드 속도를 10, 100 mm/min으로 했을 경우 온도에 따른 최대 성형높이를 나타낸 결과이다. 여기서 보면, 가열냉각 디프드로잉시 최대 성형높이가 상온인 경우의 최대 성형높이보다 크게 증가되었다. 특히 크로스헤드 속도가 10 mm/min이고 온도가 498K 조건에서의 최대 성형높이가 24.29mm로서 상온치의 5.73mm의 값보다 4배 이상 크게 나타났고 크로스헤드 속도를 100 mm/min으로 했을 경우는 온도가 523K에서 21.59mm로서 상온치의 6.51mm의 값보다 3배 이상 크게 나타났다. 이것의 결과로서 크로스헤드 속도가 커질수록 한계 성형높이가 발생하는 온도가 차츰 증가하는 경향으로 나타났다. 그리고 크로스헤드 속도가 10~100 mm/min에서의 최대 성형높이가 발생하는 온도는 498K~523K로 추측되고, 결국 가

열 냉각방법은 AZ31 마그네슘 합금의 디프드로잉 성형성을 크게 향상시키는 것으로 생각된다.

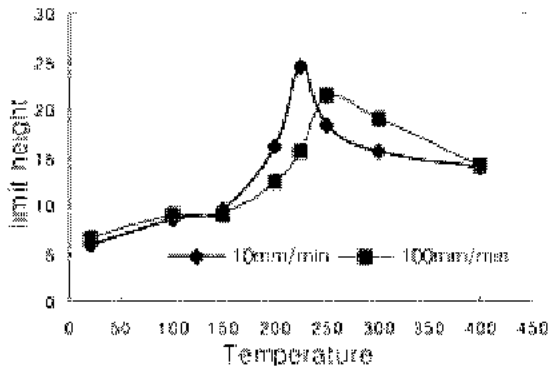


Fig. 4 Relation ship between temperature and limit height

Fig. 5는 AZ31 마그네슘 합금재료의 크로스헤드 속도가 10 mm/min 경우에 대해 실험결과로서 사진의 왼쪽부터 블랭크홀더와 다이의 온도는 상온, 498K인 경우의 실험결과이고, Fig. 6은 크로스헤드 속도가 100 mm/min 경우에 대해 블랭크홀더와 다이의 온도는 상온, 523K인 경우의 실험결과이다. 이 사진에서 상온에서의 파단위치는 펀치부에서 발생하고 최대 성형높이가 발생하는 온도에서는 벽부에서 파단이 발생함을 알 수 있다.

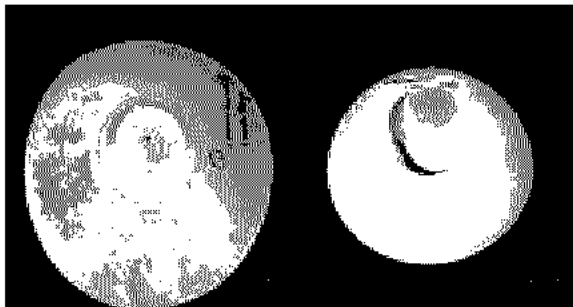


Fig. 5 The result of experiment under cross head velocity of 10mm/min

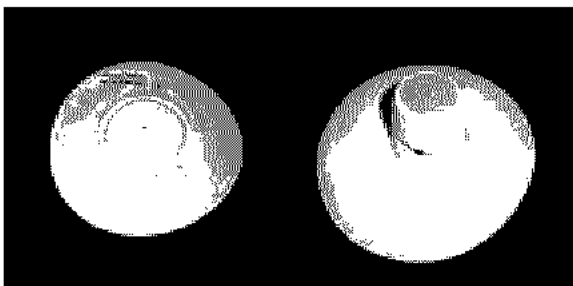


Fig. 6 The result of experiment under cross head velocity of 100mm/min

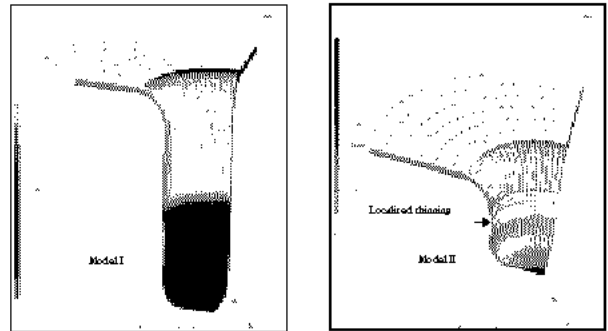


Fig. 7 Graphical output of FEM simulation of warm deep drawing process

4.2 유한요소 해석결과

Fig. 7의 모델 1은 펀치와 블랭크, 블랭크홀더 및 다이와 블랭크 사이에 열전달을 고려하여 해석한 온간 디프드로잉의 성형결과를 나타낸 것이고, 모델 2는 열전달을 고려하지 않고 해석된 해석결과를 나타낸 그래프이다. 이 그래프를 보면 열전달을 고려하지 않는 모델 2에서의 성형 해석결과는 성형이 별로 되지 않는 상태에서 국부적인 네킹이 발생하였고, 이에 대비하여 열전달을 고려한 모델 1에서의 성형결과는 국부적인 네킹이 없이 현저히 성형성이 뛰어나게 해석되어 열전달 효과가 성형성에 대단히 큰 효과를 가진다는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 열전달 효과를 고려한 모델 1과 열전달 효과를 고려하지 않은 모델 2의 등가 변형률분포의 해석결과를 비교한 그래프이다. 이 결과에서 보면 열전달을 고려하지 않은 모델 2에서의 해석결과는 국부적인 네킹이 발생하는 부분에 현저히 큰 최대 등가 변형률 분포가 발견되었으나, 열전달을 고려한 모델 1에서는 등가 변형률분포가 거의 일정함을 알 수 있다.

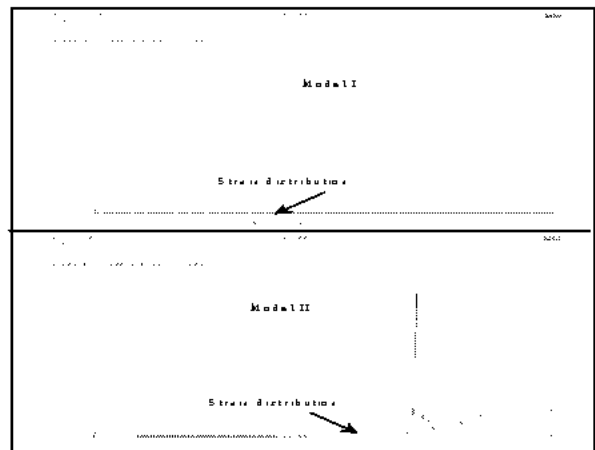


Fig. 8 Effect of heat transfer on the equivalent plastic strain distribution along deformed part

5. 결 론

후 기

AZ31 마그네슘 합금의 가열냉각 디프드로잉을 위해 블랭크홀더와 다이 온도를 다양하게 하여 실험과 시뮬레이션 해석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 고온인장시험결과 강도계수 K 값과, 가공경화지수 n 값은 온도가 증가할수록 급격히 감소하였고 변형률속도 민감성 m 값은 온도가 증가할수록 현저히 증가하였다.
2. 크로스헤드 속도를 10, 100 mm/min 으로 해서 편차를 생각시키고 블랭크홀더와 다이 온도를 점차 온도를 증가시킨 조건에서 가열냉각 디프드로잉 실험한 결과, 크로스헤드 속도가 10 mm/min 에서 최대 성형높이는 498K에서 24.49mm로서 상온에서의 5.73mm의 결과보다 대단히 크게 나타났고, 크로스헤드 속도가 100 mm/min 에서의 최대 성형높이는 523K에서 21.59mm로서 상온에서의 6.514mm보다 크게 나타났다.
3. 열전달 효과가 온간 디프드로잉성형에 미치는 영향을 고려하기 위해 블랭크홀더가 상온, 열전달 효과를 고려한 경우와 그렇지 않는 경우를 비교한 결과, 국부적인 네킹없이 열전달 효과를 고려하지 않는 경우보다 훨씬 뛰어난 성형효과가 나타났다.
4. 가열냉각 온간 디프드로잉시 크로스헤드 속도가 10~100 mm/min 에서의 최대 성형높이가 발생하는 온도는 498K에서 523K인 것으로 추정되고 가열냉각성형에서 필수적으로 발생하는 열전달 효과가 디프드로잉성을 향상시키는데 매우 크게 작용된다고 생각된다.

이 논문은 2003년 한국과학재단 지역대학 우수과학자지원연구과제(계속과제, 번호 : R05-2003-000-10410-0)의 지원으로 수행하였으며, 이에 감사의 뜻을 표하고 아울러 실험을 행하는데 많은 도움을 준 동경도립대학교의 Mr. Simomura님께 감사를 표합니다.

참고 문헌

1. 상공자원부, 1994, "자동차 경량화를 위한 신금속 기술 개발전략", 연구기획사업 보고서, pp. 25.
2. S. Yoshihara, H. Yamamoto, K. Manabe, and H. Nishimura, 2001, "Formability Enhancement in Magnesium alloy Deep Drawing by local heating and cooling technique", Proceedings of the International Conference on Advanced Materials Processing Technologies (AMPT01) Sep, pp. 18~21.
3. E. Doege and K. DrÖder, 2001, "Sheet Metal Forming of Magnesium wrought alloy - Formability and Process Technology", J. of Materials Processing Technology 115, pp. 11~19.
4. 강대민, 외 1인, 2004, "AZ31 마그네슘 합금판의 온간 디프드로잉 성형성 해석", 한국기계가공학회지, 제 3권, 제 1호, pp. 52~58.
5. 강대민, 외 3인, 2003, "고온상태에서 마그네슘 합금의 디프드로잉 성형성에 관한 연구", 한국기계가공학회지, 제 2권, 제 2호, pp. 84~90.