

가열냉각방법에 의한 마그네슘합금의 판재성형성 개선

강 대 민^{*1)} · K. Manabe²⁾

부경대학교 기계공학부¹⁾ · 동경도립대학교 기계공학부²⁾

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

Dae-Min Kang^{*1)} · Ken-ich Manabe²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Tokyo Metropolitan University, Japan

(Received 18 April 2005 / Accepted 26 July 2005)

Abstract : The purpose of this study is to confirm the improvement of formability of AZ31magnesium alloy sheet by using local heating and cooling technique. For this, the experiments of warm deep drawing were done under the temperatures of 100°C ~ 400°C , and the punch velocity of 10, 100mm/min. Also FE analysis under the temperatures of blankholder and die of 150°C, 225°C and 300°C for tools(holder and die) was executed with considering heat transfer. From the results, the formability of AZ31magnesium alloy, especially the temperatures of 225°C~250°C for tools(holder and die)improved remarkably. And the experiments and simulations showed that necking under room temperature for tools occured under the part of punch shoulder while at 300°C for tools, at the part of die shoulder.

Key words : Magnesium alloy(마그네슘 합금), Warm deep drawing(온간 디프드로잉), Heat transfer(열전 달), Finite element method(유한요소법), Formability(성형성)

Nomenclature

- λ : thermal conductivity
- T : temperature
- c : specific heat
- ρ : mass density
- q : heat regeneration rate
- t : time
- σ : flow stress
- K : strength coefficient
- ϵ : true strain
- n : work hardning coefficient
- m : strain rate sensitivity

1. 서론

마그네슘 합금은 1808년 H. Davy에 의해 발견된 은백색의 금속이고 밀도가 1.74 g/cm³으로 여러 가지 금속과 합금화할 경우 알루미늄 합금의 2/3, 티타늄 합금의 1/4, 철강 재료의 1/5정도의 밀도로 구조용재료를 쓸 수 있는 가장 가벼운 금속으로 최근 자동차산업과 전자산업 등과 같은 경량구조물에 크게 주목을 받고 있다.¹⁾ 이러한 마그네슘합금의 성형시 상온에서는 판의 두께의 감소를 수반하는 변형에 대해서는 강한 이방성을 나타내어 프레스성형이 어렵다. 그러나 고온이되면 비저면 슬립계가 활성화되어 슬립계의 수가 증가하면서 변형이 용이하게 되어 최근에는 펀치부분을 냉각시키고 다이 및 블

*To whom correspondence should be addressed.
dmkang@pknu.ac.kr

랭크홀더 부분을 히터로 가열하여 성형하는 가열냉각 온간성형법이 응용되고 있다.²⁾ 온간 성형법에 관련된 연구로는 E.Doege³⁾ 등은 다양한 마그네슘합금에 대해 온도 200°C~250°C 범위에서 다이프드로잉 실험을 통하여 판재성형성과 한계 드로잉비에 성형속도의 영향을 고찰하였고, P.J. Bolt⁴⁾ 등은 알루미늄합금을 사용하여 재료의 한계드로잉비와 성형성을 평가하였다. 또한 D.M Kang⁵⁻⁶⁾ 등은 온간 다이프드로잉시 AZ31 합금의 판재성형성에 관한 연구를 하였으나 아직 국내외적으로 마그네슘합금인 AZ31의 판재성형성에 대한 연구는 매우 불충분한 실정이다.

본 연구에서는 AZ31 마그네슘합금판을 이용, 상온에서 400°C까지 고온인장실험, 국부가열냉각 다이프드로잉실험 및 유한요소법을 통하여 AZ31 마그네슘합금판의 판재성형특성을 알아보고자 한다.

2. 국부가열냉각법의 다이프드로잉 성형해석

2.1 해석모델

본 해석에는 가열냉각 해석 모델을 위해 펀치, 다이, 블랭크홀더 그리고 블랭크 등으로 모델화하였고 성형해석을 위해 기하학적 성질로부터 2차원 축대칭모델을 이용했다. 해석을 위한 FE모델은 Fig. 1에 나타내었고 해석의 다이형상과 실험장치의 다이형상을 일치시켰다. 요소분할은 두께방향으로 2분할, 반경방향으로는 120분할했다. 전 요소수는 240, 최소요소크기는 세로 0.24, 가로 0.99mm로 했다. 펀치와 다이는 강체로 하고 온도조건에 대해 펀치온도는 20°C로 일정하게, 다이온도는 실온, 150°C, 225°C 및 300°C로 했다. 블랭크 홀더력은 5.9kN, 펀치속도는 10mm/min로 하였다. 성형시 펀치를 z방향으로하여 아래쪽으로 진행시키면 펀치부와 판재부에 접촉이 발생하여 접촉부에서 블랭크홀더와 다이부에서 히터를 통하여 가열된 판재를 냉각시킨다. 이 경우 열전달은 펀치부와 판재의 접촉부, 블랭크홀더와 다이부와 판재사이의 접촉부, 재료내부에서의 온도차이에 의한 열이동, 그리고 공기에 의한 열전달이 발생하나 공기에 의한 열전달은 무시하고 성형해석하였다.

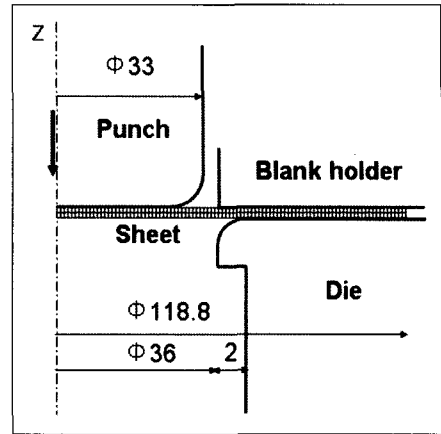


Fig. 1 FE model for simulation of warm deep drawing

2.2 열전달 해석

가열냉각법으로 판재성형하는 과정에 의존되는 열전도 지배 미분방정식은 다음과 같다.

$$\lambda \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} R \frac{\partial T}{\partial R} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + q = 0 \quad (1)$$

여기서 λ는 열전달, T는 온도, c는 비열, ρ는 밀도, q는 열재생률, 그리고 t는 시간을 나타낸다. 열전달에 대한 경계조건과 공구(다이, 블랭크홀더, 펀치 등)의 온도가 균일하다고 가정하면 식 (1)은 식 (2)로 표현된다.

$$\lambda \left(\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left(R \frac{\partial \{N\} \{T\}}{\partial R} \right) + \frac{\partial^2 \{N\} \{T\}}{\partial Z^2} - \rho c \frac{\partial \{N\} \{T\}}{\partial t} \right) + q = 0 \quad (2)$$

가열냉각 온간다이프드로잉 성형해석을 위해 사용된 해석기는 열전달 해석이 가능한 MARC/Mentat이다.

3. 실험

고온인장시험은 마그네슘 합금판(AZ31-O)의 JIS13호 시험편을 이용하여 실험을 행하였고 Table 1은 실험용 시험편에 사용된 마그네슘합금의 화학적 성분을 표시하였다.

Table 1 Chemical composition(%) of magnesium alloy sheet (AZ31-O)

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

가열냉각 다이프드로잉실험은 만능인장압축시험기(AUTO GRAPH, 최대하중 100KN)을 사용하여 다이프드로잉 치부를 부착하여 실험을 행하였다. 본 치구는 히터를 이용하여 플랜지와 다이부를 가열했고 펀치부는 물을 내부에 순환시켜 냉각시켰다. Fig. 2는 사용된 가열냉각다이프드로잉가공을 위한 실험장치이다. 다이와 블랭크홀더의 가열부의 실험온도조건은 온도가 성형성에 미치는 영향을 파악하기위해서 상온, 100°C, 150°C, 200°C, 225°C, 250°C, 300°C 및 400°C등의 조건에서 행하였고 변형속도가 성형성에 미치는 영향을 보기위하여 크로스헤드속도를 10mm/min, 100mm/min등으로 하였다. 또한 실험에 사용된 블랭크홀더력은 5.9kN이고 드로잉비 DR은 3.6으로 했다.

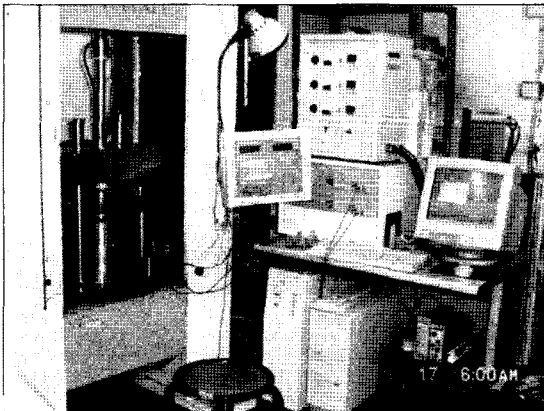


Fig. 2 The equipment for warm deep drawing with local heating and cooling system

4. 결과 및 고찰

4.1 실험결과

Fig. 3에서 펀치속도를 10, 100mm/min으로 했을 경우, 온도에 따른 최대성형높이를 나타낸 결과이다. 여기서보면 가열냉각다이프드로잉시 최대성형높이가 상온인경우의 최대성형높이보다 크게 증가되었다. 특히 펀치속도가 10mm/min이고 온도가 225°C조건에서의 최대성형높이가 24.29mm로서 상온치의 최대성형높이인 5.73보다 훨씬 크게 나타났고, 펀치속도를 100mm/min으로 했을 경우는 온도가 250°C에서 21.59로서 상온치의 6.51의 값보다 상

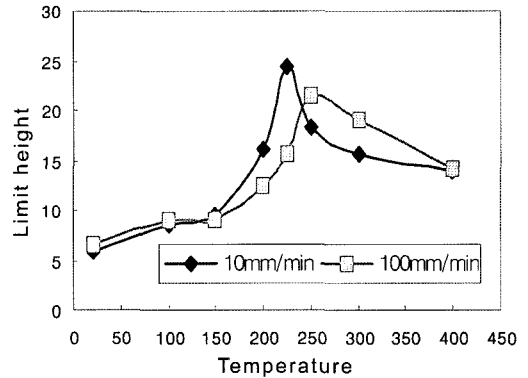


Fig. 3 Relation ship between temperature and limit height

당히 크게나타났다. 이것의 결과로서 펀치속도가 커질수록 한계성형 높이가 발생하는 온도가 차츰 증가하는 경향으로 나타났다.

Fig. 4는 AZ31마그네슘합금재료의 펀치속도가 10mm/min경우에 대해 상온인 경우의 실험 결과이고 Fig. 5는 펀치 속도가 10mm/min 경우에 대해 블랭크홀더와 다이의 온도는 300°C인 경우의 실험결과이다. 이 사진에서 상온에서의 파단위치는 펀치부에서 발생하고 블랭크홀더와 다이에서의 온도가 300°C인 경우는 다이벽부에서 파단이 발생함을 알 수 있다. 이것은 다이를 가열시킴으로서 소재연성을 증가시키고 다이형상반경부분과 벽부의 마찰을 감소함으로서 관재성형성을 증가시키는 효과를 얻는 동시에 성형공정에서 변형집중에 의한 파단의 대부분을 차지하는 펀치형상반경부분에 냉각을 가하여 인장강도를 증가시킴으로서 변형저항의 증대에 따른 국부적 네킹이 지연되기 때문이다.⁷⁾

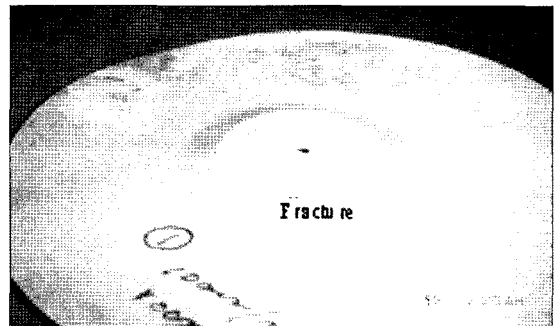


Fig. 4 The result of experiment under room temperature and punch velocity of 10mm/min

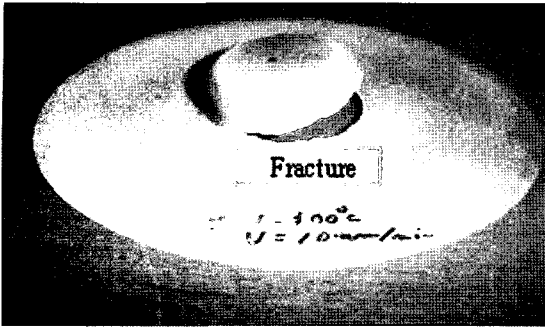


Fig. 5 The result of experiment under temperature of 300°C and punch velocity of 10mm/min

4.2 유한요소해석결과

온간 디프드로잉의 현상학적 모델은 다음과 같이 응력을 K, n 및 m항으로 나타내면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = K\varepsilon^n \dot{\varepsilon}^m \quad (3)$$

여기서 K는 강도계수, n는 가공경화지수, 그리고 m는 변형률속도 민감성을 나타낸다.

온도조건을 상온, 100°C, 200°C, 300°C, 그리고 400°C으로 하고 크로스헤드속도를 5, 50, 500mm/min으로 하여 고온인장시험을 통해 측정된 K, n 및 m값의 온도 의존성결과를 이용, 서브루틴을 활용하여 디프드로잉 변형시 블랭크내의 온도변화에 따른 변화된 K, n 및 m값을 식 (3)에 적용하면 발생하는 응력을 구할 수 있다.

Fig. 6은 블랭크홀더 및 다이의 온도를 150°C, 펀치내부에 물을 순환시켜 냉각한 조건에서 펀치행정이 각각 4.9mm에서의 재료내부의 온도분포를 나타낸 것이다. 오른쪽에 있는 결과는 진행된 펀치행정에서 펀치중심부에서부터 호길이에 따른 온도분포를 나타낸 것이다. 펀치접촉부와 다이접촉부사이의 전이영역의 온도분포는 낮은 행정에서는 거의 선형적으로 나타났다.

Fig. 7은 블랭크홀더 및 다이의 온도를 300°C로 한 경우와 상온으로 했을 경우의 시뮬레이션의 결과이다. 상온인 경우는 펀치어깨부에서 네킹이 발생하였으나 300°C인 경우는 다이어깨부에서 네킹이 발생하여 이것은 실험결과와 일치하였다.

Fig. 8은 블랭크홀더 및 다이온도를 225°C로 하고 5,20mm/min으로 했을 경우의 해석결과이고, 펀치

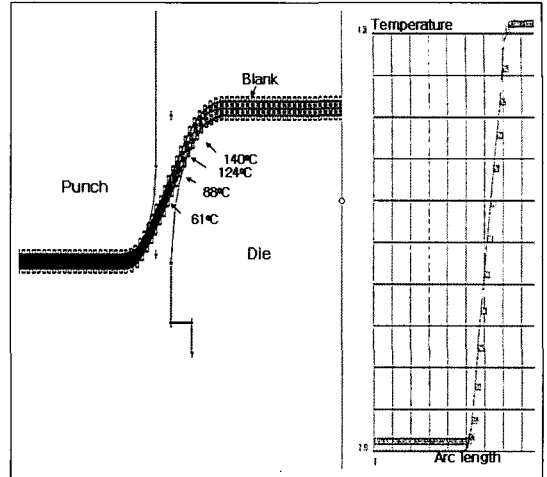


Fig. 6 Temperature distribution under punch stroke 4.9mm

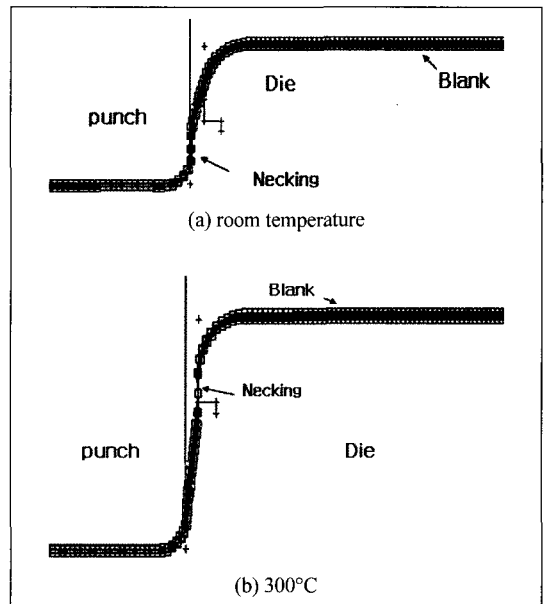


Fig. 7 The results of simulation for room temperature and temperature of 300°C

의 속도가 5mm/min인 경우는 성형된 높이가 20.2mm, 20mm/min일 때는 14.5mm 일 때 네킹이 발생하여 네킹발생시의 관재성형높이는 펀치속도가 낮을수록 크게 나타났다.

5. 결론

AZ31 마그네슘합금을 이용하여 블랭크홀더와 다이 온도를 국부가열시키고 펀치를 냉각시켜 행한

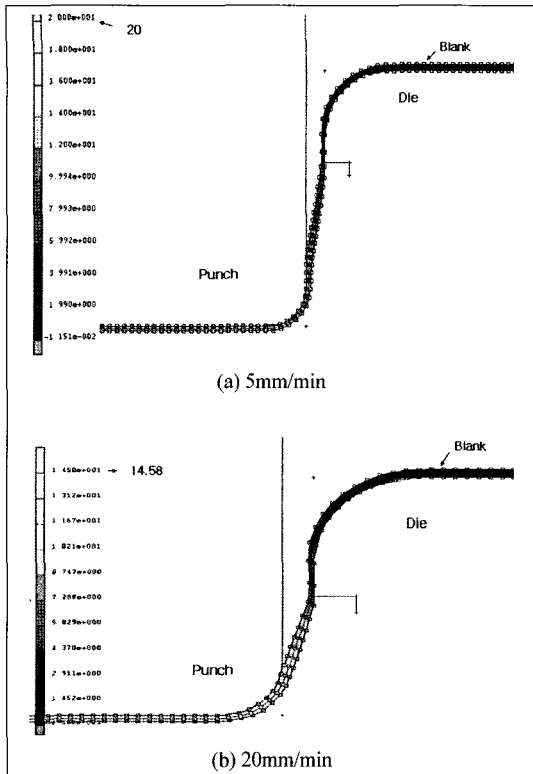


Fig. 8 The results of simulation for punch speed of 5,20mm/min and temperature of 225°C

온간 다이프드로잉 실험과 유한요소법으로 해석한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 펀치속도를 10,100mm/min 으로해서 국부가열냉각 다이프드로잉 실험한 결과, 펀치속도가 10mm/min에서 최대성형높이는 225°C에서 24.29mm로서 상온에서의 5.73mm의 결과보다 대단히 크게 나타났고, 펀치 속도가 100mm/min에서의 최대 성형높이는 250°C에서 21.59mm로서 상온에서의 6.51 mm보다 훨씬 크게 나타났다. 이것은 다이를 가열하므로써 소재연성을 증가시키고 펀치를 냉각시키므로써 인장강도를 증가시켜 결국 이것이 국부적 네킹을 지연시키기 때문으로 추측된다.
- 2) 가열냉각 온간다이프드로잉시 펀치속도가 10-100mm/min에서의 최대성형높이가 발생하는 온도는 225°C - 250°C인 것으로 추정된다.
- 3) 블랭크홀더 및 다이의 온도를 가열한 경우 펀치 접촉부와 다이접촉부의 재료내부의 온도분포는

거의 선형적인 관계가 나타났고, 펀치속도가 낮을수록 네킹이 발생하는 펀치행정은 증가하였다.

- 4) 실험과 유한요소해석결과, 다이의 온도가 상온인 경우의 네킹이 펀치어깨부에서 발생하였으나 블랭크홀더와 다이의 온도를 300°C로 했을 경우의 네킹이 발생하는 위치는 다이벽부에서 발생하였다.

후 기

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

References

- 1) D. M. Kim, H. S. Kim and S. I. Park, "Magnesium for Automotive Application," J. of KSAE, Vol.18, No.5, pp.53-67, 1996.
- 2) S. Yoshihara, H. Yamamoto, K. Manabe and H. Nishimura, "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, 2001.
- 3) E. Doege and K. Dröder, "Sheet Metal Forming of Magnesium wrought Alloy -Formability and Process Technology," J. of Materials Processing Technology 115, pp.11-19, 2001.
- 4) P. J. Bolt and R. P. Schaake, "Lubricant Reduction in Aluminin Deep Drawing by Means of Tool Coating or Lubricating Primers," Proceedings of Interinational Workshop on Environment Conscious Metal Proceeding (ICEM-99), pp.65-74, 1999.
- 5) D. M. Kang and J. K. Hwang, "The Simulations on the Formability of AZ31 Magnesium Alloy Sheet in Warm Deep Drawing," J. of KSMPE, Vol.3, No.1, pp.52-58, 2004.

- 6) D. M. Kang, J. K. Hwang, A. M. Al-Morsy and K. Manabe, "A Study on the Formability Alloy in Warm Temperature," J. of KSMPE, Vol.2, No.2, pp.84-90, 2003.
- 7) Y. K. Kang, "A Study on the Improvement of the Deep Drawability of Al-alloy by using Forming Process Control," Master Thesis, p.3, 2002.