

Mg 온간성형을 위한 십자형상 금형의 가열/냉각 채널 설계

최선철¹ · 고동선¹ · 김현영^{1#} · 김형종¹ · 홍석무² · 유수열² · 신용승²

Heating and Cooling Channel Design of Cross-Shaped Die for Warm Forming of Magnesium Alloy Sheet

S. C. Choi, D. S. Ko, H. Y. Kim, H. J. Kim, S. M. Hong, S. Y. Ryu, Y. S. Shin

Abstract

It is known that the temperatures of die, punch, holder and punch pad need to be kept different to get better formability in Mg sheet forming processes. Heating and cooling channels are usually equipped in each tool to assign different temperature. This study focused on the optimal design of the heating and cooling channels for a cross-shaped deep drawing die set. While the die and blankholder were heated to and kept at 250°C by using heat cartridges, the punch and punch pad were kept at much lower temperature than that of the die and blankholder by water circulating through cooling channels. All the approaches were done by numerical analyses, aiming to maximize the cup height and to minimize the punch corner radius without any failure.

Key Words : Magnesium Alloy Sheet(마그네슘 합금 판재), Cross-Shaped Die(십자형상 금형), Heating and Cooling Channel(가열 및 냉각 채널), Finite Element Analysis(유한요소해석)

1. 서론

1808년 H. Davy에 의해 발견된 은백색의 금속인 마그네슘은 밀도가 1.74g/cm³ 로 알루미늄의 2/3, 철의 1/4 수준이다. 그리고 다른 금속과 합금할 경우 열전도율은 아연의 1.2 배, 철의 2 배가 되며 플라스틱 등과 비교해도 방열성이 우수하다. 또한 전자파 차폐성, 진동흡수성, 부식저항성 등이 뛰어나 경량화가 요구되는 자동차 부품과 전자제품 등의 기계구조용 재료로 각광받고 있다.

그러나 마그네슘 합금의 결정은 조밀육방구조(HCP)를 가지고 있어 상온에서는 낮은 성형성을 나타낸다. 이로 인해 프레스 가공보다는 기계가공을 통한 부품제조와 다이캐스팅 제품에 한정되어 사용되어 왔다. 마그네슘 합금의 낮은 성형성을 극복하기 위하여 국내·외에서 다양한 연구가 진행되고 있다. 더욱이 마그네슘 합금이 고온(200°C 이상)에서 높은 성형성을 보이는 것이 알려지면서

고온에서의 인장시험, 온·열간 성형시험 및 성형한계도 작성 등의 온·열간 성형을 통한 성형성 향상을 위한 연구가 진행되었다.

E. Doege 등[1]은 여러 종류의 마그네슘 합금에 대해 200°C~250°C 범위에서의 디프드로잉 실험으로 성형성을 연구하였고, 김민철 등[2]은 AZ31 마그네슘 합금의 온간성형에 대한 실험적인 연구와 유한요소법을 이용한 성형성을 예측하였다. 김현영 등[3]은 마그네슘 합금의 온간 성형한계도 및 스프링백 실험을 통한 연구를 실시하였으며, 이명환[4] 등도 마그네슘 합금의 유한요소해석의 타당성을 알아보고 고온 성형해석을 수행할 때 열전달 계수의 중요성을 알렸다.

국내·외적으로 온·열간 실험을 통한 성형성 평가 연구는 다양하지만 원형 및 사각형 형상의 디프드로잉이 대부분이다. 본 연구에서는 다소 복잡한 형태의 십자(十) 형상 금형을 이용한 마그네슘 합금판재 온간성형 시 파단이 일어나지 않는

1. 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부

2. ㈜ 삼성전자 생산 기술 연구소

E-mail: khy@kangwon.ac.kr

범위에서의 최대 성형높이와 최소 모서리반지름을 얻기 위한 가열/냉각 라인의 설계를 유한요소 해석으로 실시하였고, 이를 실제 금형 제작에 적용하여 향후 공정설계 및 금형설계의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 십자형 금형

상온에서 낮은 성형성을 보이는 마그네슘 합금은 열을 가해 온도를 상승시키면 비저면 슬립계가 활성화되고 슬립계 수가 증가되어 항복강도의 감소와 플랜지 부분의 변형저항의 감소 등으로 변형이 용이하게 된다. 마그네슘 합금의 이러한 성질을 이용하여 판재성형 시 다이와 블랭크홀더를 가열시켜 소재에 간접적으로 열을 가하게 함으로써 소성변형을 촉진시킨다. 한편, 펀치를 금형보다 낮은 온도로 냉각시키면 펀치 어깨부에서의 과단저항을 높여 소재의 성형성을 더욱 향상시킬 수 있다는 연구결과도 발표된 바 있다[5]. 이러한 방법을 이용하여 본 연구에서는 국부가열냉각[6]을 적용하여 십자형 금형을 설계하였다. 다이와 블랭크홀더는 카트리지를 이용한 직접가열방식으로 가열하고, 펀치는 냉각라인을 설치하고 물을 순환시켜 냉각하였다. 금형의 형상 및 주요치수는 성형해석을 통해 Fig. 1 과 같이 결정하였다. 펀치에 설계한 초기 냉각 라인은 지름이 9mm 이며 표면으로부터 5mm 떨어져 있다. 다이 및 블랭크홀더용으로 설계한 초기 히트 카트리지는 지름과 길이가 각각 10 mm, 50 mm 이며, 8 개를 대칭적으로 배치하였다.

3. 가열/냉각 최적설계를 위한 유한요소해석

가열 및 냉각 라인의 최적설계를 위해 각 채널 라인의 개수와 위치, 채널의 지름과 라인과 라인 사이의 간격 등을 설계 변수로 두었다. 각 설계 변수들은 초기에 Fig. 1 과 같이 배치하고, 각 변수들을 조정하여 채널라인의 최적화를 실시하였다. 다이 및 펀치는 상용 소프트웨어인 ABAQUS 의 DC3D4 사면체 요소를 사용하여 Fig. 2 와 같이 1/4로 모델링하였다. ‘열전달(heat transfer)’ 모듈을 이용하여 해석하였으며, 해석 시 공기에 의한 열대류는 무시하였다. 금형의 가열 및 냉각 라인은 소재와 접촉하는 부분의 금형 온도와 면내 균일도를 목적함수로 설정하여 설계 최적화를 하였다.

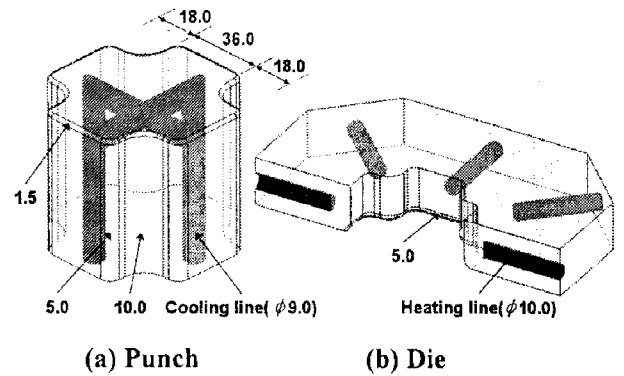


Fig. 1 Dimensions of the cross-shaped die and punch

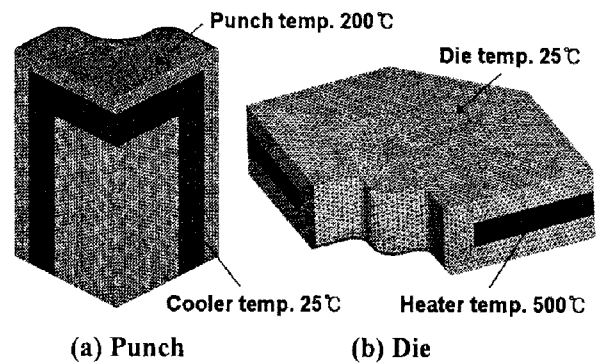


Fig. 2 Finite element models

실제 성형 시 펀치의 온도는 250°C로 가열된 다이 및 블랭크홀더에 의해 약 200°C까지 상승하는 점을 고려하여 냉각 해석 시 초기 펀치온도는 200°C로 설정하였고, 냉각수는 유속이 일정하며 25°C를 유지한다고 가정하였다. 또한, 냉각라인과 펀치의 열전달계수는 정확한 측정이 불가능하여 금형과 소재와의 열전달 계수와 비슷하다고 가정하였다. 금형의 소재는 SKD61 종을 사용하였으며, 해석에 사용된 주요 물성치는 Table 1 에 나타내었다. 가열 해석의 경우 다이와 블랭크홀더는 형상이 비슷하므로 다이의 경우에만 진행하였고, 초기 다이의 온도는 25°C로 하였으며, 카트리지는 최대 발열 온도인 500°C로 설정하였다.

4. 해석 결과 및 고찰

4.1 펀치 냉각 해석

펀치 냉각 라인의 지름과 수는 치수를 고려하여 6mm - 1 줄, 6mm - 2 줄, 6mm - 3 줄, 9mm - 1 줄 및 9mm - 2 줄 등 5 가지 조합으로 설정하였다. Fig. 3 은 동일한 시각에서 이 5 가지 경우에 대한 펀치 표면온도 분포를 비교한 그림이다. 지름 9mm

라인이 2 줄인 경우(e)가 펀치 표면의 온도 분포가 가장 균일한 결과를 보이므로 라인 수는 2 줄로 결정하였다. 한편, 냉각 라인의 지름, 위치 및 간격 등을 최적화하기 위해 $L_8(2^3)$ 직교배열표를 이용하였으며, 각 설계 변수는 2 수준으로 Table 2 와 같이 설정하였다. 펀치 모서리부의 온도결과에 대한 분산분석 결과를 Table 3 에 나타내었고, 각 경우의 온도 분포는 Fig. 4 에 표시하였다. 분산분석 결과 온도 분포는 펀치 표면에서 냉각 라인까지의 높이(H)가 가장 큰 영향을 미쳤으며, 그 다음으로 라인의 지름(D), 라인 사이의 간격(G)순이었고, 2 인자 교호작용은 상대적으로 낮은 영향을 보였다. 따라서 라인의 지름, 높이, 간격이 각각 9, 5, 8mm 인 Fig. 4(f)의 결과가 가장 좋은 것으로 나타났다.

4.2 다이 가열 해석

가열의 경우 실제 실험에서는 장시간 가열한 상태를 유지하기 때문에 금형 전체의 온도 편차는 크지 않다. 따라서 초기에 동일한 시간 동안 가열할 경우 소재와 접촉할 부분에서의 온도가

Table 1 Thermal properties

Material	SKD61	Cooling Water
Thermal conductivity (W/m °C)	27.2	6
Specific heat (J/kg °C)	548	418
Interface heat transfer coeff. (N/s mm °C)	4.5	

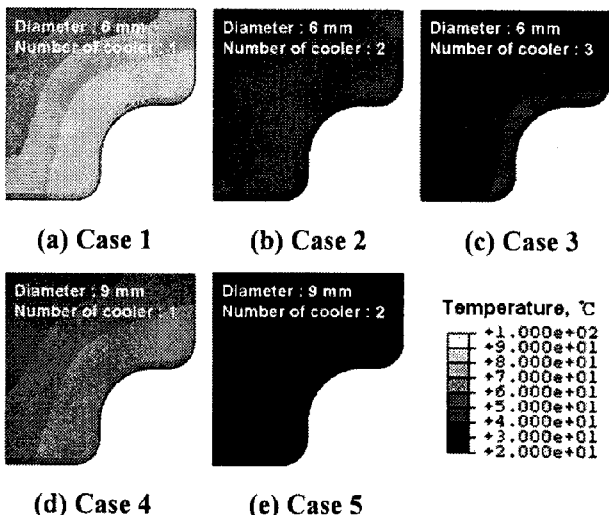


Fig. 3 Influence of the diameter and number of cooling lines on the punch temperature

Table 2 Level of design variables

Variables(unit)	Level 0	Level 1
Diameter of cooling line, D (mm)	6	9
Height of cooling line from the surface, H (mm)	5	10
Gap of cooling lines, G (mm)	5	8

Table 3 ANOVA table for the corner temperature

Section	SS	DOF	MS	F-test
D	56.711	1	56.711	2835.55
H	91.801	1	91.801	4590.05
G	7.762	1	7.762	388.1
D-H	4.118	1	4.118	205.9
D-G	4.205	1	4.205	210.25
H-G	0.231	1	0.231	11.55
Error	0.02	1	0.02	
Total	164.848	7		

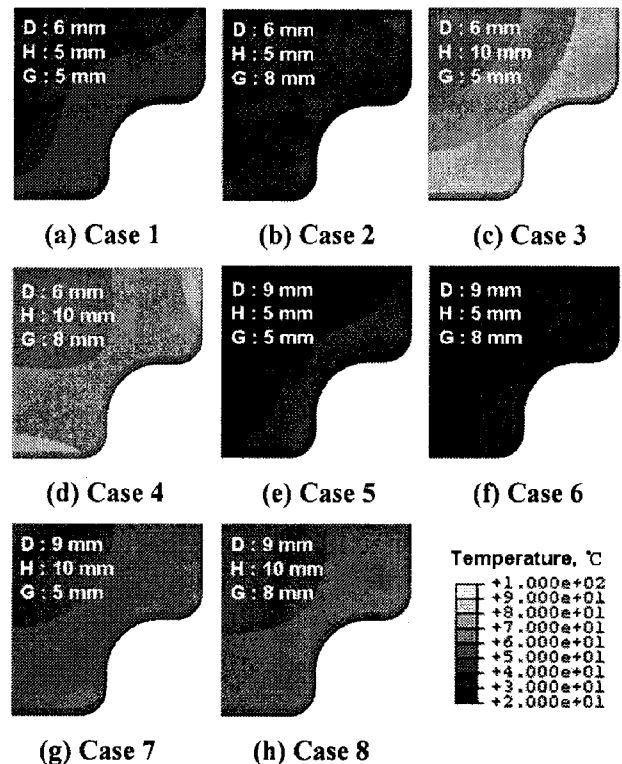
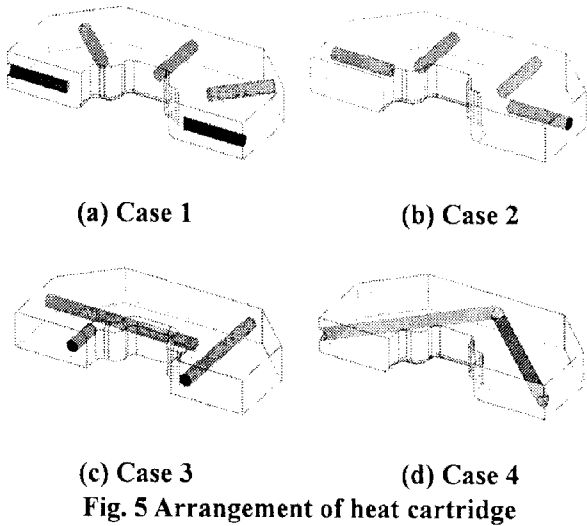
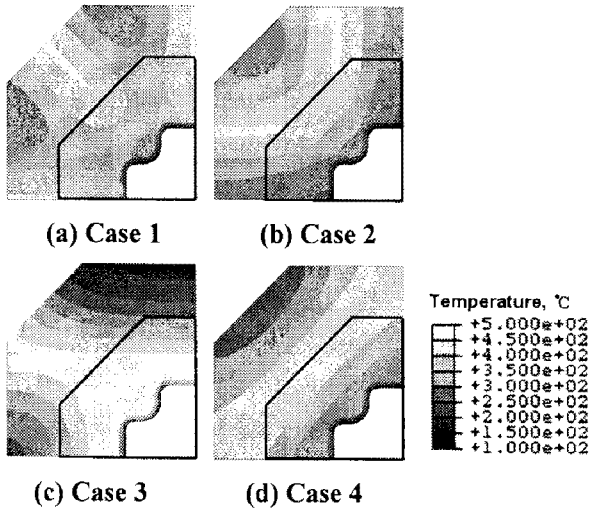


Fig. 4 Distribution of temperature of the punch

균일한 정도를 판단기준으로 설정하였다. 동일한 용량의 히트 카트리지를 50, 100mm 로 길이를 바꾸며, 대칭되게 배치하였을 경우 총 용량이 같아 지도록 Fig. 5 와 같이 길이가 50mm 인 경우 8 개씩, 100mm 인 경우 4 개씩 배치하였다. 4 가지 경우의 해석 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 소재가 위치



(a) Case 1 (b) Case 2
(c) Case 3 (d) Case 4
Fig. 5 Arrangement of heat cartridge



(a) Case 1 (b) Case 2
(c) Case 3 (d) Case 4
Fig. 6 Distribution of temperature of the die

하는 검은색 실선 부분 내에서 Case 3의 결과가 가장 온도분포가 균일한 것으로 판단하여 실제 금형설계에 사용하기로 하였다.

5. 결론

본 연구에서는 십자형상 금형을 이용한 마그네슘 합금판재의 온간성형 시 성형높이의 최대화와 펀치 모서리반지름의 최소화를 위해 금형의 가열 및 냉각 채널의 최적설계를 실시하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 냉각 채널 설계 시 실험계획법을 이용하여 유한요소해석으로 최적화를 하였으며, 최저 온도 및 균일도 면에서는 냉각과 펀치 표면과의 거리가 가장 중요한 인자임을 확인하였다.

(2) 가열 채널의 경우 히트 카트리지의 수가 많을수록 금형 전체의 온도가 균일해짐을 알 수 있으나, 국부적인 균일도면에서는 히트 카트리지의 길이가 더 길고, 소재 위치에 더 가까운 Fig. 5(c)가 더 좋을 것으로 판단된다.

(3) 냉각 채널은 지름 9mm, 라인 2줄, 표면과의 높이 5mm, 간격 8mm로 설치 하였을 경우 가장 좋은 결과를 보였으며, 가열 채널은 길이 100mm의 히트 카트리지를 Fig. 5(c)와 같이 4개를 대칭적으로 배치하였을 때 가장 좋을 것으로 나타났다.

참고 문헌

- [1] E. Doege, K. Dröder, 2001, sheet metal forming of magnesium wrought alloy formability and process technology, J. of Mat. Proc. Tech., 115, pp. 11~19.
- [2] 김민철, 이영선, 권용남, 이정환, 2004, AZ31 합금의 온간 디프드로잉에 관한 연구, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 175~179.
- [3] 김현영, 최선철, 이한수, 김형종, 이경택, 2007, AZ31B 마그네슘 합금판재의 온간 성형한계도 및 스프링백 특성 실험, 한국소성가공학회지, 제16권 제15호, pp. 364~369.
- [4] 이명환, 김현영, 김형종, 김홍규, 오수익, 2007, 마그네슘 합금판재의 온간 디프드로잉 공정의 성형해석, 한국소성가공학회지, 제16권 제5호, pp. 401~405.
- [5] 강대민, 2003, 국부가열냉각법을 이용한 AZ31 마그네슘합금판의 온간 디프드로잉 성형성에 관한 연구, 한국소성가공학회 추계학술대회 논문집, pp. 288~292.
- [6] S. Yoshihara, B.J. MacDonald, H. Nishimura, H. Yamamoto, K. Manabe, 2004, Optimisation of magnesium alloy stamping with local heating and cooling using the finite element method, J. of Mat. Proc. Tech., 153~154, pp. 319~322.