

마그네슘 합금 판재 (AZ31)의 온도별 성형 특성 분석

이한규¹ · 라원빈¹ · 홍소담¹ · 이창환[†]
서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과^{1,†}

A study on forming characteristics of magnesium alloy (AZ31) on various temperatures

Han-Gyu LEE¹ · Won-Bin La¹ · So-Dam Hong¹ · Chang-Whan LEE[†]

Dept. of Mechanical System Design and Engineering, Seoul National University of Science and Technology^{1,†}
(Received October 17, 2018 / Revised November 22, 2018 / Accepted December 01, 2018)

Abstract: Recently, in the surge of global environmental issues, there has been a great attention to lightweight materials in purpose of saving energy. Magnesium alloys not only have low specific gravity, and superb specific stiffness, but are also excellent in blocking vibrations and electromagnetic waves. So demand for this material is getting bigger rapidly throughout the industry. In this study, we examined the improvement of formability of magnesium alloy AZ31 material in warm working. Drawing, bending and shearing process were carried out by varying the forming temperature and the forming speed, and the influence of the variables on each process was studied. In the experiments, the high forming temperature and low forming speed results in high formability in the drawing process and the bending process. In the shearing process, as the forming temperature increases, the length of the fracture decreases.

Key Words: Formability, Magnesium alloy, Punch speed, Temperature

1. 서 론

최근 세계적으로 환경 문제가 대두되면서 에너지 절약을 위한 방안으로 제품 경량화가 주목받고 있다. 대표적인 경량 소재인 마그네슘 합금은 알루미늄 합금, 철 합금에 비해 작은 비중과 우수한 비강도를 가지고 있으며 진동 및 전자파 차단에 뛰어난 성능을 보여 차량 구조재, 전자 제품 케이스 프레임 등 산업분야 전반에서 점차 그 수요가 급증하고 있다.

현재 마그네슘 합금 제품의 주된 생산 공정은 높은 불량률과 낮은 생산성 등의 문제로 인해 다이캐스팅에서 박판성형으로 넘어가는 추세이다. 프레스 성형 방식을 이용하면 표면 결함이 줄어들고 금형 수명을 연장시킬 수 있어 보다 효율적이다¹⁾.

그러나 마그네슘의 결정구조는 HCP (조밀육방격자, hexagonal close-packed lattice)구조로 결정회전(reorientation)이나 재결정(recrystallization)으로 인해 왜곡된 경화 거동을 야기 시킨다. 또한 바우싱거 효과(Bauschinger effect)로 인해 하중에 따른 결과를 예측하기 힘들어 마그네슘 합금의 판재 성형을 더 어렵게 만든다²⁾. 최근 연구에 따르면, 이러한 마그네슘 합금의 특징들은 온도 상승에 따라 쌍정(twinning)과 재쌍정(untwinning)거동이 거의 활성화되지 않아 점차 완화되거나 소멸하는 것으로 나타났다³⁾.

따라서 본 논문에서는 상온에서 성형성이 좋지 못한 마그네슘 합금의 성형성을 향상시킬 수 있는 공정 조건을 분석 하였다. 다양한 변수 중, 가장 영향이 큰 성형 온도와 성형 속도에 대하여 드로잉, 굽힘, 전단 성형을 수행하였다. 그리고 각 공정에서 변수가 어떤 영향을 미치는지 연구하였다.

1. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
† 교신저자: 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과
E-mail: cwlee@seoultech.ac.kr

2. 실험

2.1. 실험재료

실험에 사용된 소재는 두께 1mm의 마그네슘 합금 AZ31 소재이며, 화학 조성은 Al 3.0%, Zn 1.0%, Mn 0.5%이다. 소재의 인장특성을 알아보기 위하여 표집거리 (gauge length) 20 mm, 단면적 8.8 mm²의 판형인장시험편으로 고온인장시험을 행하였다. 인장시험 소재 온도(T)는 상온, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C이며 속도는 2 mm/min, 스트로크는 4 mm이다. Fig. 1은 인장시험 결과로 얻어진 소성영역에서의 응력-변형률 곡선이다. 항복응력은 T=RT(20 °C)에서 130 MPa, T=100 °C에서 103 MPa, T=150 °C에서 76 MPa, T=200 °C에서 67 MPa, T=250 °C에서 54 MPa로 측정되었다. 온도가 높아질수록 유동응력과 항복강도가 낮아짐을 그래프를 통하여 확인하였다. 동일한 스트로크 (4 mm)만큼 인장하였으나 온도가 높아질수록 변형률이 커져 T=250 °C일 때 다소 높은 연신율을 보였다.

드로잉 실험의 원형 블랭크 직경은 $\varnothing 30$ mm, 굽힘 실험의 직사각형 블랭크 크기는 가로 200 mm, 세로 30 mm이다.

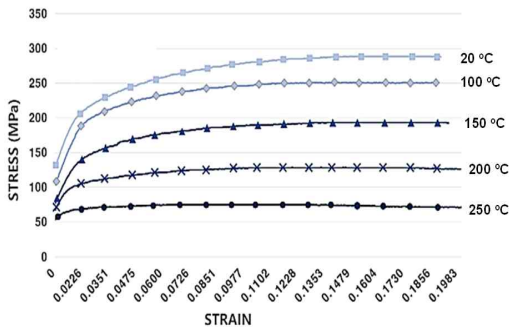


Fig. 1 Stress-strain curve by temperature of AZ31

2.2. 실험방법

온간 드로잉 실험 및 온간 굽힘 실험 장치는 각각 Fig. 2 (a), (b)와 같이 용량 10 ton 인 재료시험기에 카트리지 히터와 열전쌍을 삽입할 수 있도록 구멍을 낸 금형을 연결하고 필요 온도까지 다이 및 블랭크 홀더를 가열하여 소재에 열이 전도되는 방식을 사용하였다. 다른 금형 부품으로 열이 전달되는

것을 방지하기 위하여 다이에 운모판을 추가하였다. 금형 조립도는 Fig. 3에 나타내었다. 드로잉 금형의 펀치 코너반경과 다이 코너반경은 4 mm, 펀치 직경은 17 mm이며 펀치와 다이의 틈새는 1.2 mm이다. 굽힘 금형의 펀치 코너반경은 2 mm이다.

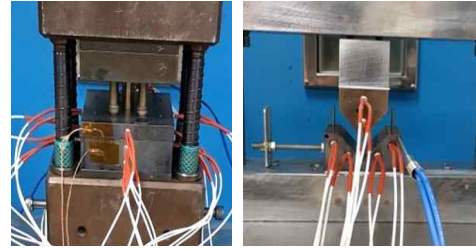


Fig. 2 Equipment for experiments

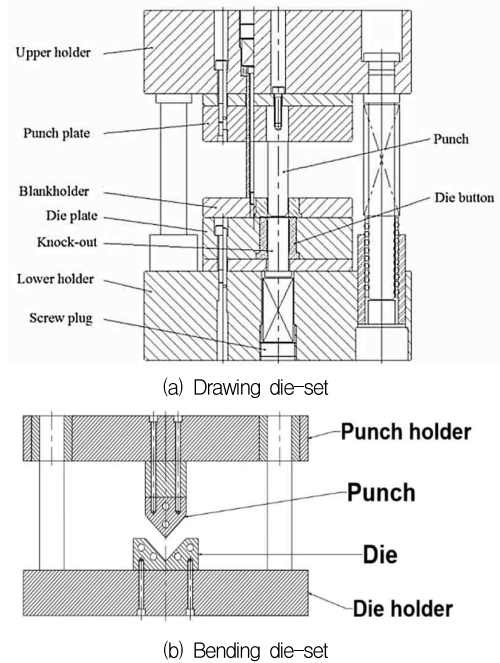


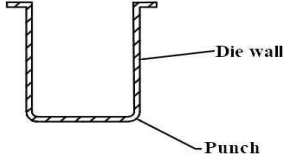
Fig. 3 Cross-sectional drawing of die-set for drawing and bending

드로잉 실험의 온도는 상온, 100 °C, 200 °C, 250 °C로, 성형 속도는 2 mm/min, 20 mm/min, 200 mm/min로 제어하였다. 파단이 나타날 때 까지 펀치 행정을 점차 증가 시켜가며 드로잉한 후, 스트로크 하중 그래프를 비교하고 시편을 커팅하여 단면 두께를 측정하여 분석하였다.

Table 1 Experimental conditions and results for warm drawing

| Temp. (°C) | Punch velocity (mm/min) | Punch stroke at fracture (mm) | Fracture (part) |
|------------|-------------------------|-------------------------------|-----------------|
| 20 | 2 | 4.12 | Punch |
| | 20 | 3.79 | Punch |
| | 200 | 3.38 | Separation |
| 100 | 2 | 7.47 | Punch |
| | 20 | 6.47 | Punch |
| | 200 | 5.33 | Separation |
| 200 | 2 | 9.80 | Die wall |
| | 20 | 8.89 | Die wall |
| | 200 | 7.76 | Die wall |
| 250 | 2 | 10.85 | No necking |
| | 20 | 9.92 | Die wall |
| | 200 | 8.50 | Die wall |

Remark



굽힘 실험의 온도는 상온, 100 °C, 150 °C, 200 °C, 250 °C이며, 성형 속도는 50 mm/min, 150 mm/min, 300 mm/min 로 제어하였다. 펀치 행정 5.5mm 만큼 굽힘을 진행한 뒤, 온도 및 속도 변수에 따른 파단 상태를 비교하여 소재의 성형성을 분석하였다.

전단 실험은 소재를 근적외선 램프로 직접 가열한 뒤, 정격하중 10 ton, 펀치 직경 $\varnothing 40$ mm, 펀치와 다이 틈새 0.1 mm 인 프레스로 전단하였다. 온도는 상온, 100 °C, 250 °C이며 성형 속도는 200 mm/min 로 제어하였다. 블랭크 전단면을 배율 50 배로 확대 관찰하여 온도에 따른 유효전단면을 비교하였다.

3. 실험 결과

3.1. 온간 드로잉 실험 결과

Table 1에 온간 드로잉 실험의 조건별 결과를 나타내었다. Fig. 4 (a)-(c)는 왼쪽부터 온도(T)가 20 °C, 100 °C, 200 °C, 250 °C일 때 성형된 시편의 사진이다. 상온, 100 °C의 경우 성형 속도(v)와 관계 없이 펀치 코너부에서 파단이 발생하였으며 특히 성형 속도가 200 mm/min 일 경우 시편이 완전히 분리되었다. T=200 °C, 250 °C 일 때 다이 벽부에서 파단이 관찰되었으나 T=250°C, v=2mm/min 조건에서는 네킹이 발생하지 않고 매끄럽게 성형되었다. 온도가

높아질수록, 속도가 낮아질수록 파단 시 펀치 행정이 커지는 경향을 보였다.

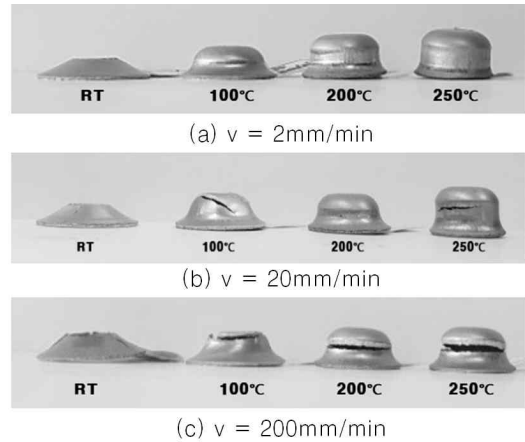


Fig. 4 Experimental results of warm drawing

T=250 °C, v=2 mm/min 조건에서 펀치 행정 10.85 mm로 제일 깊이 성형되었다. 동일한 온도 및 높은 속도 조건(T=250 °C, v=200 mm/min)의 펀치 행정(8.50 mm)과 비교했을 때 24.8% 깊은 반면, 동일한 속도 및 낮은 온도 조건(T=20 °C, v=2 mm/min)의 펀치 행정(4.12 mm)과 비교했을 경우 61.5 % 깊이 성형되어 온도 변수가 속도 변수보다 성형성에 크게 영향을 미치는 것으로 추측된다.

Fig. 5 (a)-(c)는 각각 성형 속도 v=2 mm/min, 20 mm/min, 200 mm/min에서의 온도별 드로잉 하중-변위 그래프이다. (a), (b), (c) 모두 온도가 높을수록 기울기가 낮아 동일 하중에 대해 더 많은 변형을 하는 것을 확인할 수 있으며, (a)에서 온도별 기울기 차이가 가장 커 속도가 낮을 때 온도 변수의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 온도 T=250°C일 때의 속도별 드로잉 하중-변위 그래프이다. 속도가 낮을수록 기울기가 낮아 동일 하중일 때 더 많은 변형을 하며, 최종 스트로크가 큰 것을 확인할 수 있다. Table 1의 결과와 비교하여 온도가 높을수록, 속도가 낮을수록 소재의 성형에 적합하다고 추측 된다. 이것은 마그네슘 합금이 200 °C 이상의 온도에서 변형이 충분히 일어나기 위해 필요한 비저면 슬립이 활성화 되어 연성이 증가한다는 연구와 일치 한다⁴⁾. 연성에 대한 변형률 속도의 영향은 잘 알려져 있지 않으나, 변형률 속도경화가 네킹시 발생하는 하중을 분산시켜 네킹

을 지연시킴으로써 연신율이 증가한다는 연구결과가 있다⁵⁾.

와 비교했을 때 바닥부는 6.5%, 측벽부는 28.8% 두께가 더 얇아져 소재가 가장 크게 연신되었다.

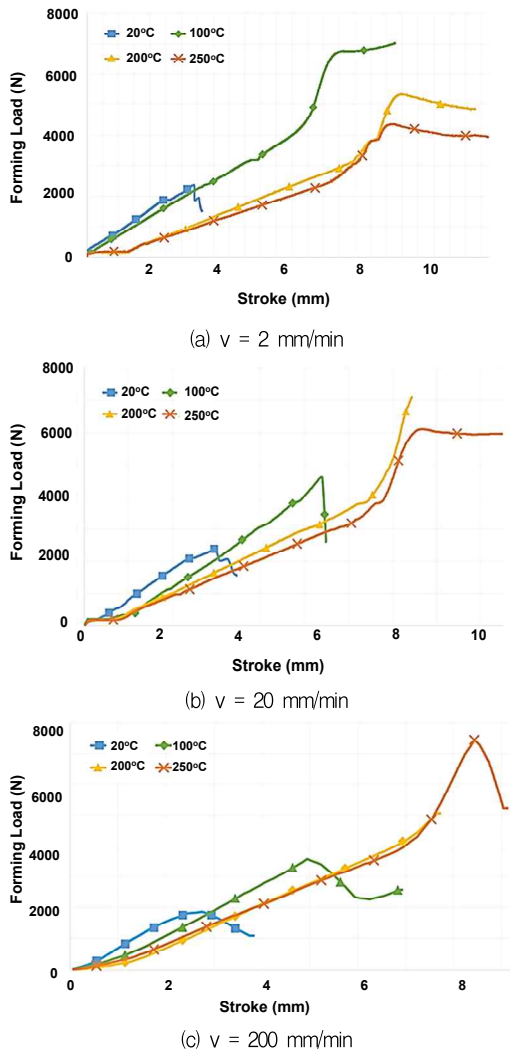


Fig. 5 Load-displacement curves with temperature in warm drawing

Table 2는 시편을 커팅하여 파단되지 않은 단면의 두께를 측정된 결과이다. 상온에서는 시편의 파단이 심하여 코너부와 바닥부의 측정이 불가능하였다. 100°C부터 측벽부의 두께가 바닥부 및 코너부의 두께보다 얇은 것으로 측벽부에서 최대인장응력이 작용하였음을 알 수 있다. 특히 $T=250^\circ\text{C}$, $v=2\text{mm/min}$ 일 때 바닥부와 측벽부의 두께는 각각 0.848mm, 0.615mm로 $T=250^\circ\text{C}$, $v=200\text{mm/min}$ 결과

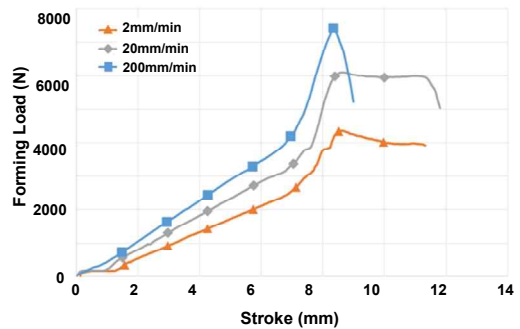
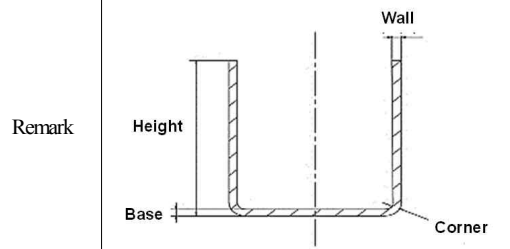


Fig. 6 Load-displacement curves with velocity in warm drawing at 250°C

Table 2 Thickness measurement value of specimens

| (mm) | | 20°C | 100°C | 200°C | 250°C |
|------------|--------|-------|-------|--------|--------|
| 2 mm/min | Height | 5.091 | 8.411 | 10.674 | 11.733 |
| | Base | 0.954 | 0.922 | 0.877 | 0.848 |
| | Corner | - | 0.820 | 0.838 | 0.822 |
| | Wall | - | 0.821 | 0.653 | 0.615 |
| 20 mm/min | Height | 4.745 | 7.417 | 9.805 | 10.815 |
| | Base | 0.957 | 0.939 | 0.883 | 0.872 |
| | Corner | - | 0.866 | 0.867 | 0.839 |
| | Wall | - | 0.851 | 0.779 | 0.656 |
| 200 mm/min | Height | 4.332 | 6.271 | 8.704 | 9.402 |
| | Base | 0.961 | 0.943 | 0.915 | 0.907 |
| | Corner | - | 0.923 | 0.884 | 0.888 |
| | Wall | - | 0.902 | 0.867 | 0.864 |









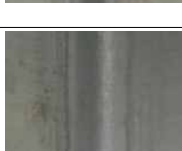



3.2. 굽힘 실험 결과

Table 3은 성형속도 $v=150 \text{ mm/min}$, 펀치 행정 5.27 mm 일 때의 온도별 성형된 시편의 사진이다. 굽힘 외측의 인장력에 의하여 상온, 100 °C에서 중심 표

면에서 파단이 발생하였으며 150 °C, 200 °C일 때 파단선이 생성되었다. 반면, 25 °C일 때 파단 없이 성형되는 것으로 온도가 높을수록 연성이 증가해 성형성이 향상되는 것을 확인 할 수 있다.

Table 3 Comparison of specimens for bending test

| Temp. | Experimental results | |
|--------|---|---|
| 20 °C |  |  |
| 100 °C |  |  |
| 150 °C |  |  |
| 200 °C |  |  |
| 250 °C |  |  |

성형온도 T=20 °C, 150 °C, 250 °C에서 각각 성형 속도 v=50 mm/min, 300 mm/min에서 굽힘 후 비교해본 결과 온도 RT, 150 °C에서는 모두 파단선이 생성 되어 성형성 차이를 볼 수 없었다. 낮은 온도에서는 속도의 영향이 나타나지 않는 것으로 성형성이 속도보다 온도의 영향을 더 크게 받는 것으로 사료된다. 반면 Fig. 7는 T=250 °C일 때 v=50 mm/min, 300 mm/min 에서의 시편을 비교한 사진이다. 온도 250 °C일 때 v=50 mm/min, 150 mm/min에서 성형되

었으며 v=300 mm/min에서 굽힘부에 약한 파단선이 관찰되어 속도가 낮을수록 성형성이 좋으나 영향이 크지 않은 것을 확인하였다.

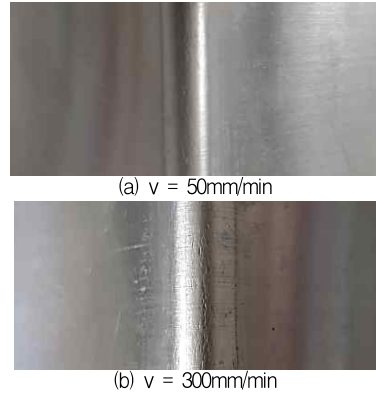


Fig. 7 Specimens of warm bending at 250 °C

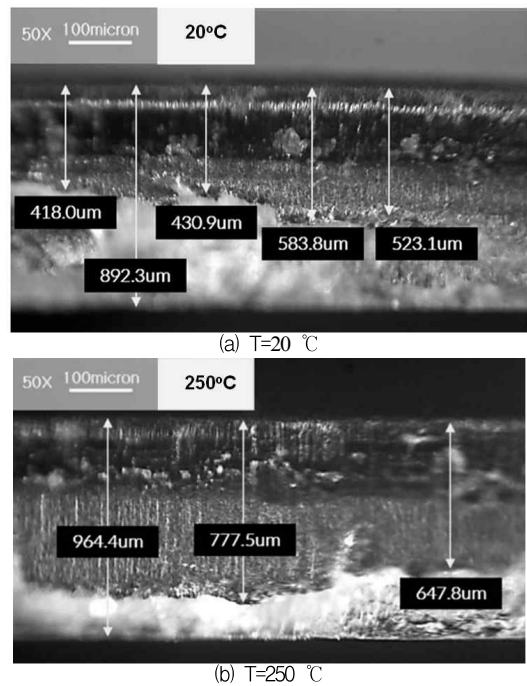


Fig. 8 Roll-over, burnish and fracture in blanking test

3.3. 전단 실험 결과

Fig. 8 (a),(b)는 각각 소재 온도 상온과 250 °C에서 실험한 시편의 전단면을 50 배율 확대하여 전체 길이 및 유효전단면(눌림면과 전단면의 합)과 침입률(전체 두께에 대한 유효전단면의 백분위 비율)을 측정 한 것이다. 상온에서 시편의 최소 유효전단면은

418.0 um (침입률 46.84%), 최대 유효 전단면은 583.8 um (침입률 65.45%) 인 반면, 250 °C에서 최소 유효 전단면은 647.8 um (침입률 67.17%), 최대 유효전단면은 777.5 um (침입률 80.42%)으로 측정되었다.

상온의 파단면이 큰 반면 250 °C의 파단면은 상대적으로 작는데, 이는 응력-변형을 선도에서 온도가 올라감에 따라 파단강도(fracture strength)가 점차 뒤로 밀려나는 것으로 해석할 수 있다. 파단면은 전단변형이 진행되면서 펀치 날 끝과 다이 날 끝 주위의 소재 저항이 파단강도를 초과하며 발생하는데, 소재 온도가 올라가면서 파단전까지의 변형량이 증가하여 전단면은 늘어나고 상대적으로 파단면이 줄어든 것으로 추측된다.

4. 결론

본 논문은 마그네슘 합금 AZ31의 온간 프레스 성형 초기 조건을 제시하기 위하여 드로잉, 전단, 굽힘 실험을 통해 온도와 속도 변수의 영향을 분석하고 성형성 개선을 확인하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 온도를 상온에서 250 °C까지 단계별로 가열하고 성형 속도 2 mm/min, 20 mm/min, 200 mm/min에서 드로잉 하였을 때, 상온과 150 °C에서는 펀치코너 부에서 파단이 발생하였으며 특히 속도가 200mm/min일 때 완전히 분리되었다. 200 °C와 250 °C에서는 대체로 측벽부에서 파단이 발생하였고 온도 250 °C, 속도2 mm/min 조건에서 파단이 발생하지 않았다.

2) 온도를 상온에서 250 °C까지 단계별로 가열하고 성형 속도2 mm/min, 20 mm/min, 200 mm/min에서 파단이 발생할 때까지 드로잉 했을 때 T=20 °C, v=200 mm/min 조건에서 최저 높이 4.332 mm를 갖은 반면, 온도 250 °C 속도2 mm/min 조건에서 최대 높이 11.733 mm로 성형되었다.

3) 온도를 상온에서 250 °C까지 단계별로 가열하고 성형 속도를 150 mm/min에서 펀치 행정 5.5 mm 만큼 굽힘 실험한 결과 상온일 때 시편이 완전히 분리되었으며 100 °C, 150 °C, 200 °C에서 파단선이 관찰된 반면, 250 °C에서는 매끄럽게 성형되었다.

4) 온도를 상온, 150 °C, 250 °C로 가열하고 성형 속도를 50 mm/min, 300 mm/min으로 굽힘 실험한 결과 상온, 150 °C에서 속도와 관계 없이 파단선이 관찰 되었으며, 온도 250 °C 속도 300 mm/min에서 파단선이 생성된 반면 속도 50 mm/min일 때 파단선 없이 성형되었다.

5) 소재 온도를 직접 상온, 100 °C, 250 °C로 가열하고 성형 속도 200 mm/min 에서 전단한 뒤 절단면을 50배 확대하여 측정한 결과 250 °C일 때 최대 유효전단면 777.5 um (80.42 %)를 갖는 것을 확인하였다.

후기

본 연구는 정부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행 되었습니다. (과제 번호: NRF-2017R1C1B5017648)

참고문헌

- 1) Y. G. LEE, "A Study on the Warm Deep Drawability of Mg-Alloy Sheet Metal", Seoul National University of Science and Technology, Master Thesis, pp. 9-10, 2004.
- 2) J. H. Park, "A development of temperature dependent constitutive equation for Magnesium alloy sheet regarding twinning behavior", Korea Polytechnic University, Ph. D Thesis, pp. 28-30, 2016.
- 3) B. K. Raghunath, K. Raghukandan, R. Karthikeyan, K. Palanikumar, U. T. S. Pillai, & R. Ashok Gandhi, "Flow stress modeling of AZ91 magnesium alloy at elevated temperature.", Journal of Alloys and Compounds. 509. pp. 4992-4998, 2011.
- 4) T. Obara, H. Yoshinga, & S. Morozumi, "Slip system in magnesium", Acta Metallurgica, 21., pp. 845-858, 1973.
- 5) I. D. Choi, D. M. Kim, D. M. Bruce, D. K. Matlock, & J. G. Speer, "Effect of Prestrain and Bake Hardening Treatment on the High Speed Deformation Behavior of Automotive Steels", Korean Journal of Metals and Materials, 43(4), 139, 2005.