

마그네슘 판재성형을 위한 인장 및 압축실험을 통한 기계적 물성 평가

오세웅¹· 추동균¹· 이준희²· 강충길[#]

Evaluation of Mechanical Properties for Magnesium Sheet Forming by Tension and Compression Tests

S. W. Oh, D. K. Choo, J. H. Lee, C. G. Kang

(Received April 11, 2005)

Abstract

The crystal structure of magnesium was hexagonal close-packed (HCP), so its formability was poor at room temperature. But formability was improved in high temperature with increasing of the slip planes. Purpose of this paper was to know about the mechanical properties of magnesium alloy (AZ31B), before warm and hot forming process. The mechanical properties were defined by the tension and compression tests in various temperature and strain-rate. As the temperature was increased, yield-ultimate strength, K-value, work hardening exponent (n) and anisotropy factor (R) were decreased. But strain rate sensitivity (m) was increased. As strain-rate increased, yield-ultimate strength, K-value, and work hardening exponent (n) were increased. Also, microstructures of grains fined away at high strain-rate. These results would be used in simulations and manufacturing factor for warm and hot forming process.

Key Words : Magnesium Sheet, AZ31, Mechanical Properties, Strain Rate, Recrystallization

1. 서 론

마그네슘의 비중은 1.74로써 알루미늄의 2/3, 티타늄 합금의 1/3, 철의 1/4 수준으로 구조용 합금 중에서 가장 낮은 비중을 가진다. 또한 비강도, 비탄성계수, 전자파 차폐성, 전기·열전도도에 있어서 좋은 기계적 성질을 가지고 있다. 이러한 장점과 더불어 재생처리하여 높은 비율로 재활용 또한 가능하기 때문에 경량화 재료로 많은 관심을 받고 있다. 하지만 상온에서의 성형성이 좋지 않기 때문에 프레스 가공보다는 주조 제품에 한정되어 사용되고 있다[1].

마그네슘의 결정 구조는 소성변형이 어려운 조

밀 육방 구조를 가지고 있다[2]. 조밀 육방 구조의 소성 변형 기구는 슬립계에 의해 결정된다. 큐빅 구조는 슬립계가 12개인 반면 상온에서의 조밀 육방 구조의 슬립계는 3개이다. 이들 슬립계의 슬립 방향은 육방 격자축에 수직을 형성하며 그 방향이 판재의 면에 대해 평행하게 배열하는 강한 저면집합 조직을 형성하기 때문에 판의 두께감소를 수반하는 변형에 대해서는 강한 이방성을 나타내어서 일반적으로 상온에서 소성 성형이 어렵다. 그러나 고온 조건이 되면 부가적인 다른 슬립계의 활성화로 인하여 성형성이 향상된다[3~4].

지금까지 연구된 마그네슘 관련 내용은 주로 자동차의 무게 감소를 통한 연비 향상 및 환경 측면에서의 접근을 위한 다이캐스팅이 중심이었고, 최

1. 부산대학교 정밀기계공학과
2. 동아대학교 신소재공학과
교신저자 : 부산대학교 기계공학과
E-mail: cgkang@pusan.ac.kr

근 판재성형을 위한 연구가 유럽에서 활발히 진행되고 있다[5~6]. 이처럼 캐스팅 중심의 연구로 인하여 마그네슘 판재 성형에 필요한 기본 열물성치가 현저히 부족한 상태이다.

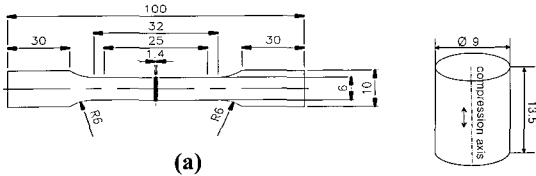


Fig. 1 (a) ASTM E80 subsize specimen for tensile test, (b) Specimen for compression test

Table 1 Chemical composition (wt %) of magnesium alloy AZ31

Al	Zn	Zr	Mn	Fe
2.5 ~3.5	0.6 ~1.4	-	0.20 ~1.0	Under 0.005
Si	Cu	Ni	Ca	Rare metal
Under 0.10	Under 0.05	Under 0.005	Under 0.04	Under 0.30

본 연구는 마그네슘 합금 AZ31의 온간·열간 성형을 위한 고온 조건에서의 기초 물성치 및 기계적 성질을 평가하는데 목적이 있다. 소재의 온도와 변형률 속도를 변화시켜 다양한 성형 조건에서의 열물성치 데이터베이스를 구축하여 마그네슘 판재 성형에 이용하도록 한다.

2. 실험

실험은 고온 조건에서의 인장과 압축 실험으로 구성 되고 소재 AZ31은 일본 Sankyo Aluminum Industry에서 제작되었다. Fig. 1와 Table 1은 각각의 실험에 사용된 소재의 규격과 AZ31의 조성 성분을 나타낸다.

2.1 인장 실험

인장 시험기는 MTS사의 동적 재료 시험기를 사용하였으며, 고온 챔버 역시 동회사의 기종을 사용하였다. 인장 시편은 표점거리 25mm, 폭 6mm인 ASTM subsize 시편을 사용하여 일축 인장 실험을 하였다. 시험 방법으로는 200, 250, 300, 350, 400℃ 다섯 종류의 온도 구간을 설정했고, 변형률

속도는 0.0025, 0.025, 0.06, 0.12, 0.25s⁻¹ 다섯 구간으로 정해 실험을 하였다. 또한 변형률 민감도를 구하기 위해 변형률 속도를 0.025s⁻¹에서 0.12s⁻¹로 변화시켜 각 온도 마다 실험하였다. 온도 제어는 고온 챔버 내부의 온도를 실험온도 까지 올리고 그 온도를 유지 시켰다. 시편의 온도가 챔버 내부의 온도와 같아져 정상상태를 이루도록 2시간을 유지시킨 후 실험을 실시하였다. 이때에 시편의 열팽창에 의한 굽힘 발생을 방지하기 위하여 시험기의 하중제어 방식으로 하중이 '0'으로 유지되도록 인장축을 제어하였다. 열팽창으로 인해 변위계의 측정 구간이 줄어들 것을 방지하여 최대한 많은 범위의 변형율을 측정하기 위해 챔버 내부가 목표 온도에 도달한 후 변위계를 장착하였다. 시편이 정상상태에 도달한 후 변형률 속도 조건에 따라 실험이 진행되었다.

인장실험을 통하여 기계적 특성을 나타내는 가공 경화지수(n), 변형률 민감도(m), 재료상수(K), 값을 구하였다. 그리고 판재 압연 방향의 0°, 45°, 90°방향으로 시편을 가공하여 변형율 15%까지 인장실험 해서 폭과 두께를 측정하는 방법으로 수직 이방성 계수(R)을 구하였다. 그리고 미세조직의 변화를 관찰하였다.

2.2 압축 실험

압축 시험기는 인장실험에 사용되었던 MTS사의 동적 재료 시험기를 사용하였으며, 고온 챔버는 동회사의 압축 시험용 기종을 사용하였다. 직경 9mm의 압출봉을 높이 13.5mm로 가공하여 높이 대 직경비가 1.5가 되는 시편으로 일축 압축 실험을 하였다.

실험 방법은 인장 실험과 동일한 조건의 온도와 변형률 속도를 각각 다섯 구간으로 정해 실험을 하였다. 온도 제어는 온도제어기를 조정하여 챔버 내부의 온도를 목표치까지 올리고 유지시켰다. 압축 시편의 중심부에 열전대를 장치하여 챔버 내부의 온도와 시편 중심부의 온도가 같아지는 시간을 미리 측정한 후 20분을 더 유지시켜 시편이 정상상태에 도달한 후 변형률 속도조건에 따라 실험이 진행되었다.

압축실험을 통하여 고온 조건에서의 항복응력과 진응력·변형률 선도를 구하고, 미세 조직의 변화를 관찰하였다.

2.3 미세 조직의 관찰

시편에 인장 및 압축력이 작용할 때에 재료의

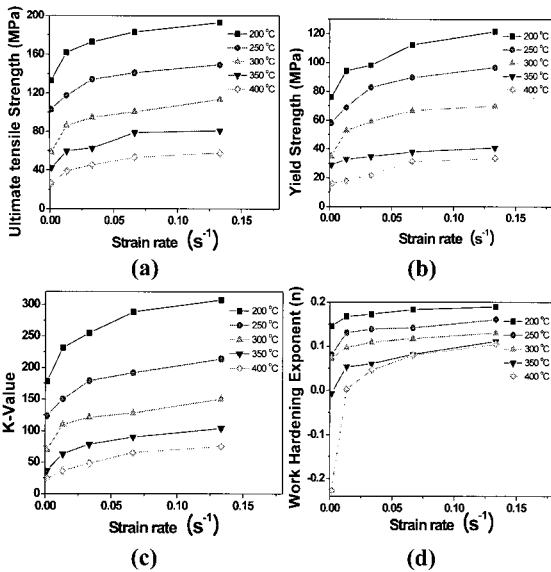


Fig. 2 Results of tensile test according to the various strain rate, (a) Yield Stress, (b) UTS, (c) K-Value, (d) Work hardening exponent (n)

미시적 거동을 관찰하기 위하여 미세조직을 관찰하였다. 마그네슘의 조직을 관찰하기 위해서는 에칭 과정이 필요하다. 에칭에는 에탄올 70ml, 물 10ml, 빙초산 10ml, 피크릭산 4.2g 의 혼합 용액이 사용 되었다[7].

3. 실험 결과

3.1 인장 실험

3.1.1 단순 인장 실험

인장 실험으로 정리된 결과를 알아보기 쉽게 Fig. 2에서 x 축에 변형률 속도, y 축에 각각 항복 강도, UTS, K-value, 가공 경화 지수(n) 값을 도시하였다.

항복 강도, UTS, K-value 모두 응력에 관한 변수라고 할 수 있다. Fig. 2(a), (b), (c) 세 변수 모두 온도가 상승하면 같은 변형률 속도에서 값이 낮아지는 것을 알 수 있고, 변형률 속도가 상승하면 기울기는 낮아지지만 점차 값이 상승하는 것을 볼 수 있다.

가공 경화 지수 (n) 값 역시 온도와 변형률 속도에 대해 비슷한 양상을 보이나 Fig. 2(d)와 같이 온도가 상승함에 따라 가공 경화 지수가 감소하는 경향이 완만함을 알 수 있다. 온도의 상승에 따라 가공경화지수가 감소하는 것은 동적 재결정

Table 2 Strain rate sensitivity (m) in changed strain rate from 0.0025 to 0.12

T(°C)	m
200	0.084
250	0.127
300	0.132
350	0.165
400	0.499

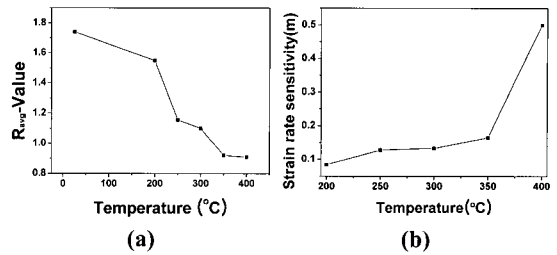


Fig. 3 Variations according to the temperature (a) Strain rate sensitivity (m) according to the temperature, (b) Anisotropic exponent (R)

에 의한 핵생성으로 조직이 미세화 되어 전위 밀도가 급격하게 감소되기 때문이며, 마그네슘의 동적 재결정 온도는 250°C로 이 온도 이상의 경우에 모든 실험 온도에서 동적 재결정이 발생하기 때문에 온도상승에 따른 가공경화 지수의 감소율은 크게 차이가 나지 않게 된다[8].

3.1.2 다단 인장 실험

각 온도 구간별로 변형률 속도를 $0.025s^{-1}$ 에서 $0.12s^{-1}$ 로 조정하여 식 (1)에 대입하여 얻은 변형률 속도 민감도지수(m) 값을 Table 2 에 정리하였다.

$$m = \frac{\Delta\sigma/\sigma}{\ln(\dot{\epsilon}_2/\dot{\epsilon}_1)} \quad (1)$$

변형률 속도 민감도 지수(m) 는 판재의 성형에서 백킹의 확산과 관련된 인자이다. Table 2 의 결과들을 Fig. 3(a)에 도시하였다.

변형률 속도 민감도는 온도의 상승에 따라 미미하게 증가하다가 400°C에서 급격히 증가한다. 소재의 용융온도는 630°C로 이 용융점의 65~70% 인 400°C의 실험 온도와 변형률 민감도 지수의 측정을 위한 변형률 속도의 초기 속도가 저속이라는 점을 통하여 초소성이 일어날 수 있다는 것을 보여 주고 있다[9].

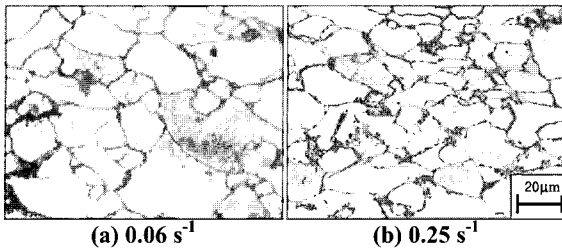


Fig. 4 Microstructures at the horizontal planes of AZ31 Mg Alloy according to the strain rate (a) 0.06 s^{-1} , (b) 0.25 s^{-1} ($T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 3(b) 는 각각의 온도에서의 수직 이방성 계수(R) 를 도시한 그래프로 온도의 상승에 따라 점차로 값이 작아 지다가 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 근방에서 $R=1$ 부근의 값을 가짐으로써 판재 생산 방향에 의한 이방성의 영향이 적어 지는 것을 볼 수 있다.

3.1.3 미세 조직 관찰

Fig. 5(b)와 Fig. 4(a), (b)를 순서 대로 놓고 보면 일정 온도에서 변형률 속도의 변화에 따른 미세 조직의 형상을 알아 볼 수 있다. 변형률 속도가 증가 할수록 조직이 미세해 지고 있음을 알 수 있다. 변형률 속도가 커지면 시간당 변형률의 증가로 재결정이 활발해 질 수 있는 높은 내부에너지가 축적되기 때문이다.

Fig. 5는 변형률 속도가 0.0025 s^{-1} 일 때 상온, $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 인장된 시편의 조직 사진을 나타낸 것이다. $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 까지는 조직이 조대해지고 있으며, 재결정 온도에서는 조직이 미세함을 알 수 있다. 재결정 온도 이상에서의 조직은 다시 결정이 성장되고 있음을 볼 수 있다.

3.2 압축 실험

3.2.1 일축 압축 실험

압축 실험으로 구한 진응력-변형률 선도는 Fig. 6에 나타난다. Fig. 6에서는 실험 온도 별로 구분하여 변형률 속도에 따라 응력의 변화 추이를 알 수 있다.

실험 온도가 높을수록 변형률 0.15 부근에서 나타나는 압축 항복강도가 점차로 낮아지고, $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일 때는 거의 보이지 않게 된다. 상온의 실험일 경우 압축 항복강도일 때의 변형률을 넘어서도 응력이 계속 하여 증가하지만, 본 실험은 $200\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서의 실험이기 때문에 압축실험이 진행되는 동안 전위의 회복, 재결정, 결정의 성장으로

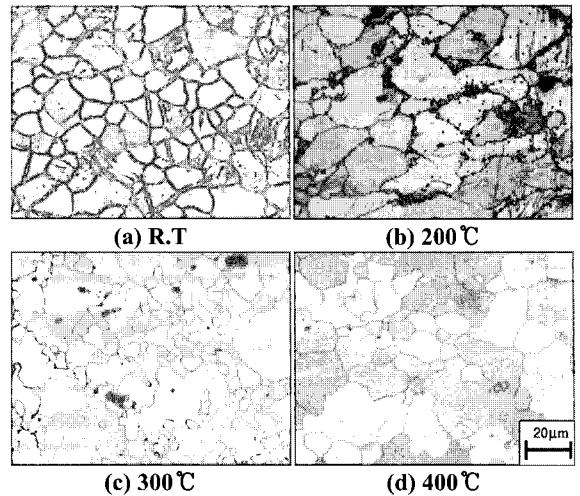


Fig. 5 Microstructures at the horizontal planes of AZ31 Mg Alloy according to the temperature (a) R.T, (b) $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, (c) $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, (d) $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\dot{\epsilon} = 0.0025\text{ s}^{-1}$)

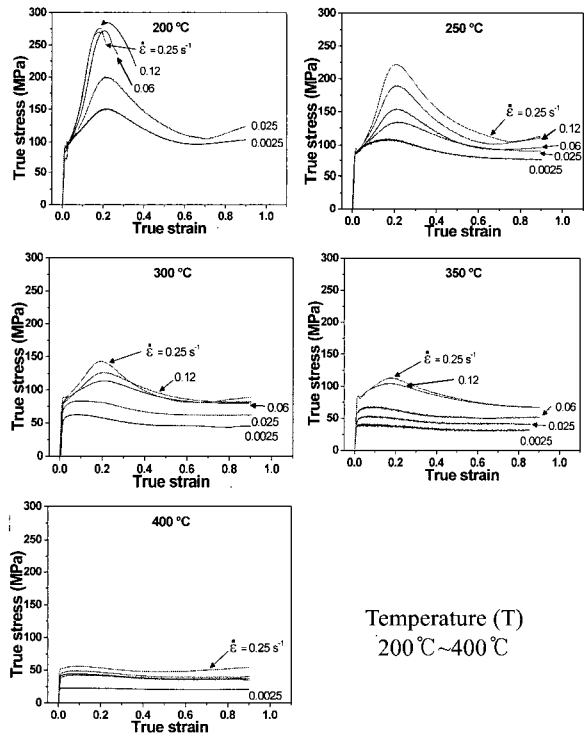


Fig. 6 True strain-stress curves according to the temperature

인하여 변형률의 증가에도 응력은 감소하는 경향을 보인다. 또 고온 일수록 속도에 따른 응력 차

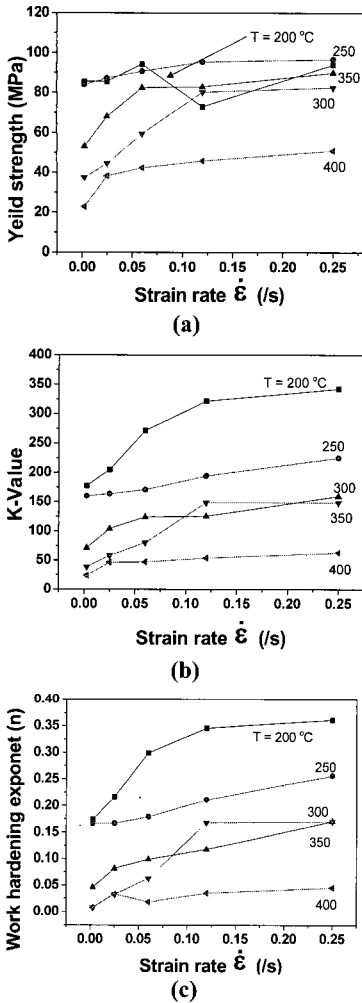


Fig. 7 Results of compression test according to the strain rate, (a) Yield Strength, (b) K-Value, (c) Work hardening exponent (n)

는 줄어 든다.

Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 200 °C의 경우에는 압축 항복강도를 지난 후 파단이 발생하는 데이터가 있다. 200 °C에서 변형률 속도 0.25s⁻¹, 0.12s⁻¹, 0.06s⁻¹인 경우는 마그네슘 합금이 상온에서 소성 가공이 어렵다는 것을 보여주고 있다.

또한 200 °C에서의 파단이 생기지 않은 나머지 변형률 속도는 실제 제품의 생산을 위한 가공 속도와 비교해 볼 때 적절한 속도가 아니라는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 실험 온도가 높을수록 항복강도, 강도 계수, 가공경화지수가 작아지고, 큰 변형률 속도에서 증가하는 것을 도시한 것이다. 압축실험의

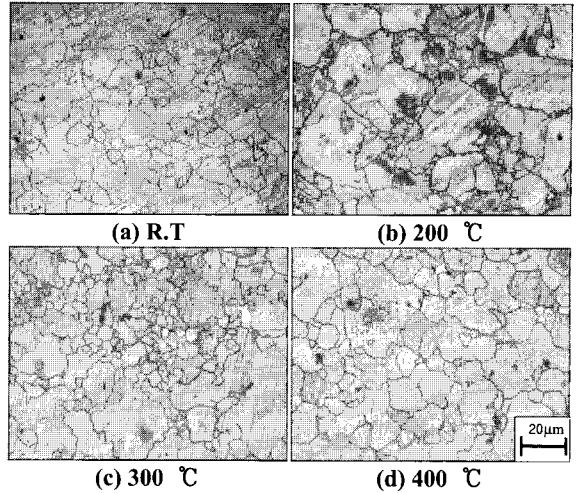


Fig. 8 Microstructures at the horizontal planes of AZ31 Mg Alloy according to the temperatures (a) R.T, (b) 200 °C, (c) 300 °C, (d) 400 °C ($\dot{\epsilon} = 0.0025s^{-1}$)

결과값들은 인장실험의 결과값들 처럼 매끄럽지 못한데, 이는 소재와 압축 지그(JIG) 사이의 마찰과 실험의 진행중에 발생하는 압축축의 비틀어짐에 의한 심한 노이즈의 발생 때문이다. 그리고 (c)의 가공경화지수는 고온일수록 값이 작아 질뿐 아니라 그 변형률 속도 증가에 따른 증가량이 작아지는 것도 알 수 있다. 그 이유는 인장실험에서와 마찬가지로 동적 재결정 온도 이상의 조건에서 실험이 진행되기 때문에 재결정 발생 이후 변형률 속도의 증가가 크게 영향을 미치지 않는다.

3.2.2 미세 조직 관찰

인장시험에서처럼 같은 조성의 에칭법으로 압축시험 소재의 내부 미세 조직을 관찰 하였다.

Fig. 8은 변형률 속도가 일정할 때 온도 변화에 따라서 압축 시편의 압축축과 수직된 단면의 미세조직 사진이다. 인장시험과 마찬가지로 200 °C 이상의 온도에서 동적 재결정에 의해 미세한 조직들이 보이고 400 °C에서는 재결정 입자들의 성장 현상이 관찰 되었다.

Fig. 9는 250 °C에서 변형률 속도의 변화에 따른 조직의 변화를 나타낸 것이다. 변형률 속도가 증가할수록 미세한 조직이 얻어진 것을 볼 수 있다. 인장 실험에서와 마찬가지로 큰 변형률 증분에 의한 동적 재결정의 활발한 발생에 기인한다.

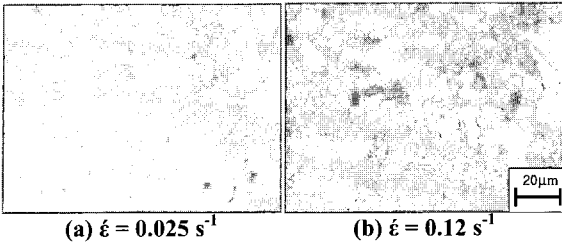


Fig. 9 Microstructures at the horizontal planes of AZ31 Mg Alloy according to the strain rate (a) $0.0025s^{-1}$, (b) $0.12s^{-1}$ ($T = 250^{\circ}C$)

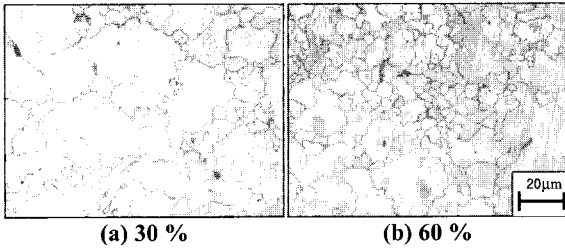


Fig.10 Microstructures at the horizontal planes of AZ31 Mg Alloy according to the compression rate (a) 30 %, (b) 60 %

Fig. 10은 압축률에 따른 조직의 차이로 30% (약 4mm) 일 때 보다 60% (약 8mm) 일 때의 조직이 미세하게 관찰되었다. 변형량이 증가할수록 전위 밀도가 높아져서 큰 내부에너지의 축적으로 핵생성 및 재결정 발생이 원활해지기 때문에 조직이 미세하게 된다[10].

4 인장 실험과 압축 실험의 비교

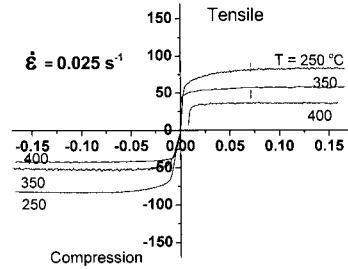
인장과 압축 실험의 결과를 종합적으로 비교 검토해 보면 Fig. 11로 도시된다.

인장 실험의 결과는 양의 값으로 두고, 압축 실험의 결과는 음의 값으로 설정하여 비교하여 보면 점대칭의 형상이 되지만 그 값에서는 차이가 나며, 그 이유는 시편과 지그 사이의 마찰력에 의한 배부름(bulge) 현상과 더불어 압축실험에서의 노이즈에 기인한다.

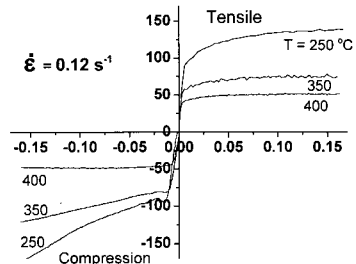
이상의 실험 결과는 마그네슘 합금 판재의 온간·열간 성형의 CAE 해석을 위한 정량적 데이터를 제공하게 된다.

4. 결론

본 실험은 AZ31 마그네슘 합금의 일반적인 소성 가공이 이루어지고 있는 200℃ 이상부터 초소



(a) $0.025s^{-1}$



(b) $0.12s^{-1}$

Fig.11 True strain-stress curves according to the temperature

성이 발생한다고 보고된 450℃ 미만의 온도 구간까지의 범위에서 변형률 속도를 달리하여 기계적 성질을 알아 보았다.

(1) YS, UTS, K-value, 가공경화지수(n) 값은 온도가 증가함에 따라 낮아지고 변형률 속도가 증가함에 따라 높아진다.

(2) 200℃ 이상이 되면 동적 재결정이 일어나고, 가공 경화지수가 낮아지고 변형률속도 민감도 지수가 상승하는 등 재료가 연화되는 것을 알 수 있다.

(3) 400℃부근에서 작은 변형률 속도에서는 재결정 조직이 성장하여 입계에서의 재결정 입자들이 줄어들고, 다시 커지는 것을 볼 수 있다.

(4) 200℃에서 $0.06s^{-1}$ 이상의 변형률 속도가 작용하면 소재의 크랙으로 인하여 가공이 불가능하다는 것을 알 수 있다.

(5) 압축실험에서는 실험조건에 따른 미세조직의 변화가 명확하게 관찰되고, 인장실험에서는 데이터의 축적이 용이하다.

(6) 동일한 소재이지만 압축/인장 실험의 항복응력에 차이가 나는데, 이는 배부름 효과에 의한 영향이라 여겨진다.

(7) 인장/압축실험의 차이점에 배부름 효과를 고려한 수치해석 기법이 필수적임을 알 수 있다.

향후의 과제는 본 실험을 통하여 측정된 물성치를 기본으로 딥드로잉 시뮬레이션과 실험이 진행될 예정이다.

후 기

본 연구는 동아대학교 신소재 가공 청정공정 개발 연구 센터의 무윤활 성형 공정에 의한 Mg 박판 부품 개발 사업의 연구 지원비에 의해 행해졌으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] T. Morishita, H. Takuda, T. Kinoshita, N. Shirakawa 2003, Flow stress of a magnesium alloy AZ31 Sheet at elevated temperatures, The Proceeding of the 54th Japanese joint Conference for the Technology of plasticity.
- [2] T. Obara, H. Yoshinaga, S. Morozumi, 1973, {1122} <1123> slip system in magnesium, Acta Metall., Vol.21, pp. 845~853.
- [3] E. Yukatake, J. Kaneko, M. Sugamata, 2003, Anisotropy and non-uniformity in plastic behavior of AZ31 magnesium alloy plates, Materials Transactions, Vol 44, No. 4, pp, 452~457.
- [4] 원성연, 오상균, K. Osakada, 박진기, 김영석, 2004, AZ31 마그네슘 합금 판재의 기계적 특성평가(1), 2004년도 한국소성가공학회 춘계 학술대회논문집, pp. 53~56.
- [5] 제 2 회 한·일마그네슘 신산업기술 공동워크샵, 2004, (사)한국마그네슘기술연구조합.
- [6] 이병호, 신광선, 이종수, 2004, AZ31 Mg 합금의 가공 조건에 따른 고온 성형성 연구, 2004년도 한국소성가공학회 춘계학술대회논문집, pp. 80~83.
- [7] ASM SPECIAL HANDBOOK, 1999, Magnesium and magnesium alloys.
- [8] 한형기, 유연철, 2001, SCM 440 강재의 동적 재결정 조직 변화에 관한 연구, 한국소성가공학회지, 제 10 권, 제 1 호, pp. 35~41.
- [9] 김영석, 2003, 소성역학, 시그마프레스.
- [10] Y. Xuyue, M. Hiromi, S. Taku, 2002, Dynamic evolution of fine grain structure during hot deformation of an AZ31 magnesium alloy, 輕金屬, 第 52 卷, 第 7 号, pp. 318~323.