



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

AZ31 마그네슘 합금의 기계적 특성에 미치는
변형속도 및 PB 처리의 영향

The Effect of Strain Rate and PB Treatment on
Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy



지도교수 최 일 동

2014년 2월

한국해양대학교 대학원

재료공학과

정 승 훈

본 논문을 정승훈의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 이 성 열 (인)

위 원 최 일 동 (인)

위 원 이 병 우 (인)

2013년 12월

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii
1. 서 론	1
2. 이론적 배경	
2.1 마그네슘 합금 판재	4
2.1.1 이방성 재료	4
2.1.2 슬립계에 대한 이해	7
2.2 고속인장시험의 필요성	8
2.3 PB처리	9
2.4 피로특성	9
3. 실험방법	
3.1 시험편 제조	10
3.1.1 인장시험편	12
3.1.2 피로시험편	13
3.2 미세조직 관찰과 EBSD (Electron BackScattered Diffraction) 분석	14
3.3 PB처리(Prestrain & Baking treatment)	14
3.4 인장시험	15
3.4 피로시험	15

4. 결과 및 고찰	
4.1 미세조직 관찰	16
4.2 EBSD를 통한 방향성 분석	18
4.3 NPB 인장시험	20
4.3.1 변형속도와 시편 두께가 인장 특성에 미치는 영향	23
4.3.2 시편의 가공 방향이 인장 특성에 미치는 영향	26
4.3.3 변형속도 민감도	29
4.3.4 흡수에너지	31
4.3.5 자동차용 재료와 10% 흡수에너지 비교	34
4.4 PB 인장시험	36
4.4.1 변형속도와 PB처리가 인장특성에 미치는 영향 비교 ...	38
4.5 피로시험	41
5. 결론	44
감사의 글	46
참고문헌	47

List of Tables

Table 1 Compositions (wt%) of AZ31B Mg sheet studied

Table 2 Symbols of AZ31 Mg sheet studied



List of Figures

Fig. 1 Comparisons between cast alloys and wrought alloys in Mg

Fig. 2 Orientation change of Mg alloy after rolling

Fig. 3 Twin and slip deformation mechanism of Mg alloy on stress direction

Fig. 4 Monotonic deformation behavior of the ND and RD specimens on tensile stress-strain curves

Fig. 5 Slip system of magnesium

Fig. 6 A schematic diagram showing the specimens with different directions

Fig. 7 Specimen dimension of tensile test (a)for low strain rate, and (b)for high strain rate

Fig. 8 Specimen dimension of fatigue test

Fig. 9 Microstructure of AZ31 Mg alloy with 0° direction: (a)1mm, (b)1.5mm, (c)2mm, and (d)3mm

Fig. 10 Pole figure of AZ31 Mg alloys with 0° direction: (a)1mm, (b)1.5mm, (c)2mm, and (d)3mm

Fig. 11 Stress-strain curve according to (a)specimen thickness in 90° direction at 10^{-4} s^{-1} , (b)machining direction with a specimen thickness of 1.5mm at 10^{-4} s^{-1} , (c)strain rate in 45° direction and 3mm thickness, and (d)plastic region of high strain rate to show serration

Fig. 12 The effect of specimen thickness on the UTS of AZ31: (a) 0° , (b) 45° , and (c) 90°

Fig. 13 The effect of specimen thickness on the elongation of AZ31: (a) 0° , (b) 45° , and (c) 90°

Fig. 14 The effect of specimen direction on the UTS of AZ31: (a)1mm, (b)1.5mm, (c)2mm, and (d)3mm

Fig. 15 The effect of specimen direction on the elongation of AZ31: (a)1mm (b)1.5mm, (c)2mm, and (d)3mm

Fig. 16 Strain rate sensitivity of AZ31 Mg alloy: (a)specimen direction, and (b)specimen thickness

Fig. 17 The effect of specimen thickness on the absorbed energy of AZ31: (a)0°, (b)45°, and (c)90°

Fig. 18 The effect of specimen direction on the absorbed energy of AZ31: (a)1mm, (b)1.5mm, (c)2mm, and (d)3mm

Fig. 19 The comparison of normalized absorbed energy of the automotive materials

Fig. 20 Stress-strain curve according to (a)PB treatment in 90° direction at 10^{-4} s^{-1} , (b)machining direction with a specimen thickness of 1.5mm at 10^{-4} s^{-1} , (c)strain rate in 45° direction and 3mm thickness

Fig. 21 The effect of PB treatment on the UTS of AZ31: (a)1.5mm, and (b)3mm

Fig. 22 The effect of PB treatment on the elongation of AZ31: (a)1.5mm, and (b)3mm

Fig. 23 S-N curve of NPB AZ31 Mg Alloy with 0° direction: (a)1mm, (b)1.5mm, (c)2mm, and (d)3mm

Fig. 24 S-N curve of PB AZ31 Mg Alloy with 0° direction: (a)1.5mm, and (b)3mm

Fig. 25 FE-SEM image of fractured AZ31 Mg alloy according to fatigue test

Fig. 26 Crack initiation point of AZ31 Mg alloy: (a)NPB 1.5mm, (b)NPB 3mm, (c)PB 1.5mm, and (d)PB 3mm

The Effect of Strain Rate and PB Treatment on Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy

Jeong, Seung Hun

Department of Materials Engineering

Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

Recently, the world is focused in saving energy and preserving environment. Accordingly, there are also being studied about high strength and light weight material in automobile industry. Magnesium is very effective for weight reduction because its density (1.74 g/cm^3) is lower than Al (2.73 g/cm^3) and steel (7.85 g/cm^3). Therefore, it will be an important part of automobile industry for weight reduction.

The demand for automotive materials with excellent high rate tensile properties is continually increasing in the automobile industry in conjunction with efforts to achieve weight reduction and passenger protection. Until now, researchers have tried to get smooth stress-strain curves and had reproducible mechanical properties such as yield and tensile strength, strain

hardening and uniform elongation at high strain rates. Car collision characteristics are evaluated by absorbed energy obtained from the area under stress-strain curves.

In the case of Mg sheet, research mainly focused on the effect of strain rate and temperature on formability, but it is hard to find research for high rate tensile properties. In the present study, the behavior of Mg sheet with strain rates will be observed and the effect of microstructure, texture and PB treatment on high rate tensile properties will be carefully evaluated. The absorbed energy will also be calculated and compared with Al to find out which alloy is better for automotive materials. Strain rate sensitivity calculated from high speed tensile results will be compared with steel and other nonferrous alloys to analyze high rate behavior theoretically, So that the research results offer the basic data to evaluate the applicability of Mg sheet for automotive materials. I also studied fatigue properties with thickness and heat treatment which was called PB treatment.

KEY WORDS: AZ31 Mg alloy; High strain rate; Mechanical property; Fatigue test; PB treatment.

제 1 장 서 론

현재 환경 보호 및 에너지 절약이 강조되고 있으며 이 흐름에 발 맞춰 자동차 산업에서도 경량화에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한 추세를 반영하듯이 기계공학적, 재료공학적으로 여러 방면에서 연구가 진행되어 오고 있다. 기계공학적으로는 엔진 설계 최적화에 의한 효율 향상, 차체 디자인의 최적화된 설계로 공기 저항을 최소화 등에 관한 연구가 있으며, 재료공학적으로는 기존에 사용되고 있는 철강재료의 고강도화에 의한 방법과 알루미늄, 마그네슘 합금 등과 같은 밀도가 낮은 비철재료를 도입함으로써 경량화를 시도하는 방법이 있다. 비철재료 중 하나인 마그네슘은 밀도가 철의 $2/9$ (7.85 g/cm^3), 알루미늄의 $2/3$ (2.73 g/cm^3) 수준으로 낮고, 비강도, 비강성이 높으며, 전자파 차폐성, 진동흡수능이 뛰어나 자동차 산업과 전자부품산업에서 주목 받고 있으며 활발한 연구가 진행 중인 재료이다[1,2]. 하지만 마그네슘 합금은 슬립계가 적은 HCP 결정구조를 가지고 있어 성형성이 좋지 않다. 그래서 현재까지는 가공재보다는 주조재를 주로 사용하였으나, 그림 1과 같이 가공재는 주조재에 비해 강

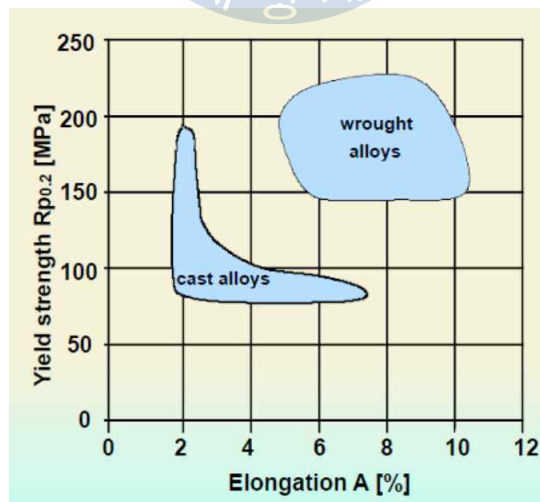


Fig. 1 Comparison between cast alloys and wrought alloys in Mg

도, 연신율과 같은 기계적 성질이 우수하므로 가공재에 대한 관심이 다시 높아지고 있다[3,4]. 단결정 실험에 비추어 고안된 Von Mises 조건에서 균일한 변형을 이루기 위해서는 최소한 다섯 개의 독립된 변형기구가 필요하다고 언급하였듯이[5], 부족한 슬립계를 가진 마그네슘 합금의 경우, 슬립 변형 시에 짧은 연신율과 더불어 불균일한 변형이 발생할 우려가 높다. 실제로 압축시험 시에 시편 표면에 orange peel 현상이 발생했다는 보고가 있다[6]. 이러한 현상은 쌍정 변형을 통해 보완이 가능하나[6], 상대적으로 항복강도가 낮아지므로 변형기구 선택에 있어 좀 더 심도 깊은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

우수한 기계적 특성을 가진 마그네슘 합금의 가공재를 자동차용으로 사용하기 위해서는 승객의 안전성을 평가하기 위한 고속인장특성에 대한 평가가 필요하다. 자동차용 소재의 기계적 특성에 대한 연구가 이루어져 오고 있지만 이들 대부분은 10 s^{-1} 이하의 저속변형조건에 국한되었다. 일반적으로 금속재료의 동적거동은 정적 또는 준정적인 하중상태에서의 거동과 큰 차이를 보인다[7-12]. 이러한 동적재료 거동은 운송수단의 고속화에 따라 관심이 집중되고 있는데 특히 자동차, 항공기 등과 같은 승객의 안전성이 매우 중요한 운송 수단의 경우는 소재가 충돌 시 발생하는 고속변형거동을 정확히 파악해야 할 필요가 있다.

또한 마그네슘은 HCP 결정구조를 가진 이방성 재료이므로 이에 대한 연구가 필요하다. 일반 자동차용 판재는 방향에 상관없이 동일한 기계적 특성을 나타내지만, 마그네슘 판재는 방향에 따라 기계적 성질이 다르게 나타나므로 정확한 특성 평가가 이루어져야 한다. 따라서 마그네슘 판재의 압연 방향을 기준으로 방향과 두께를 달리하여 저속 및 고속 인장 특성 시험을 실시하여 인장 특성을 평가하고 피로시험을 통해 피로특성 또한 평가하고자 한다. 더불어 마그네슘 판재가 자동차용 판재로의 적용 가능성을 면밀히 평가하기 위해서 실제 자동차 생산 공정과 유사한 예비변형과 도장열처리 (PB 처리)를 적용한 시편을 제작하여 앞선 시험법과 동일하게 저속 및 고속 인장 특성과 피로특성을 평가함으로써 PB 처리 유무에 따른 기계적 성질 변화를 살펴보기로 한다.

따라서 본 연구는 AZ31 마그네슘 판재의 PB 처리 유무에 따라 저속 및 고속에서의 인장 특성과 고주기 피로 특성 평가를 목적으로 하였다. 인장 특성 평가를 위한 시험은 변형속도가 1 s^{-1} 이하인 저속의 경우, 일반 유압인장시험기로

측정하였고, 변형속도가 1 s^{-1} 이상인 고속의 경우, Instron 에서 제작한 고속유압인장시험기를 사용하였다. 고속에서의 시험 결과는 실험값(raw data)로부터 얻어진 응력-변형률 곡선을 소프트웨어를 이용하여 평활화(smoothing)하고 실험값과 비교하여 연신율을 보정하는 작업을 실시하였다. 이러한 과정을 통해 최대인장강도(UTS)와 연신율을 측정하였고, 이를 바탕으로 변형속도에 따라 그래프를 그려 변형속도민감도, 변형속도에 따른 강도, 연신율의 변화를 관찰하였다. 또한 얻어진 응력-변형률 곡선으로부터 적분하여 흡수에너지를 구함으로써 충돌에 따른 안전성을 평가하였다. 고주기 피로 시험은 유압 서보식 피로시험기를 사용하여 측정하였고, 조직관찰결과를 바탕으로 미세한 결정립과 조대한 결정립을 가진 대표 시편을 선정하여 열처리의 유무에 따른 마그네슘의 피로 거동을 평가하였다.



제 2 장 이론적 배경

2.1 마그네슘 합금 판재

2.1.1 이방성 재료

마그네슘은 HCP결정구조를 가진 대표적인 이방성 재료로써 마그네슘 가공재를 자동차용으로 사용하기 위해서는 우선 마그네슘의 방향성에 대한 이해가 필요하다. 일반적으로 슬래브(slab) 상태에서는 결정립의 방향성이 다양하게 존재하지만 압연을 실시하면 그림 2와 같이 압연방향과 기저면이 평행하게 배열된다[13]. 이러한 경향은 압하량과 패스수가 많아질수록 더욱 뚜렷해지고 강도 또한 증가하는 것으로 알려져 있다[14]. 반면에 압하량이 증가하면 (0002)극점도의 강도가 감소하고 동시에 TD방향으로 약간 기울어지면서 기저면 슬립(basal slip)이 활성화한다는 보고도 있어[15] 신중한 검토가 요구될 것으로 판단된다.

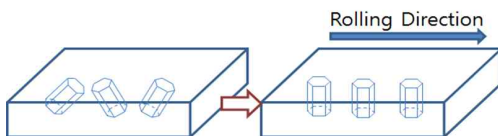


Fig. 2 Orientation change of Mg alloy after rolling

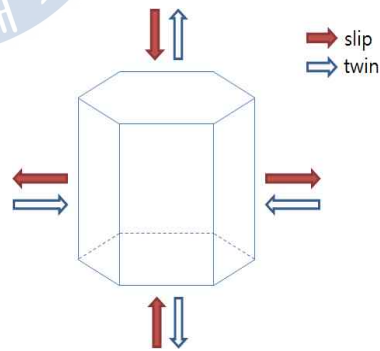


Fig. 3 Twin and slip deformation mechanism of Mg alloy on stress direction

마그네슘 합금의 기계적 거동은 방향에 따라 그림 3과 같이 슬립(slip)과 쌍정(twin)으로 달라진다. HCP구조는 크게 a와 c축으로 구분되는데, a축은 기저면을 이루는 변을 말하며, c축은 HCP구조의 옆면을 구성하는 긴 변을 말한다. c축을 기준으로 인장응력이 작용하거나 기저면을 기준으로 압축응력이 작용하면 쌍정 변형기구가 활성화되고, c축을 기준으로 압축응력이 작용하거나 기저면을 기준으로 인장응력이 작용하면 슬립변형기구가 활성화된다. 작용하는 힘과 결정구조의 방향에 따라 달라지는 변형기구는 응력-변형률 곡선 형태에도 영향을 미친다. 그림 4를 보면, 쌍정이 활성화되면 항복강도가 낮아지고 가공경화지수가 높은 아래로 볼록한 형태의 응력-변형률 곡선이 그려지고, 슬립이 활성화되면 항복강도는 쌍정에 비해 높아지고 가공경화지수가 낮은 위로 볼록한 형태의 응력-변형률 곡선이 그려짐을 볼 수 있다[16]. 이러한 변형 이방성은 마그네슘 합금 가공재에 나타나는 전형적인 특성으로, 마그네슘 합금과 같이 c/a ratio가 1.732보다 작은 재료의 경우 (c/a ratio=1.632) HCP재료에서 가장 활발하게 나타나는 $\{10\bar{1}2\}$ 주쌍정계(twin primary system)가 기저면에서 대하여 가지는 각도관계(43.2°)로 인하여 쌍정이 형성되었을 경우 기저면이 수축하는 현상을 보인다[6,17]. 이러한 $\{10\bar{1}2\}$ 쌍정은 마그네슘 합금에서는 c-extension twin이라고 불리는데, 주쌍정(primary twin)면과 기저면의 각도 관계에 의해 기저면이 수축되는

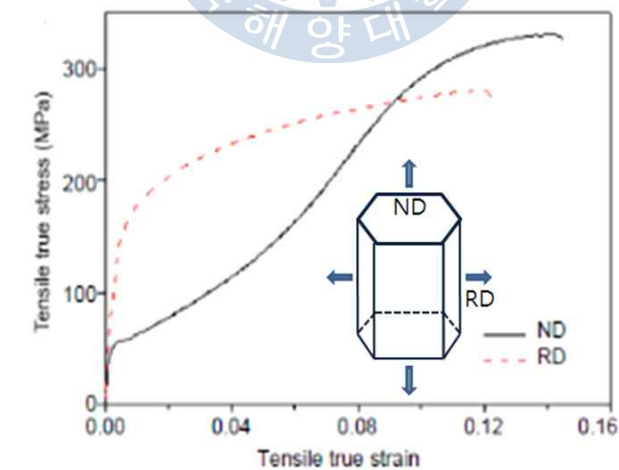


Fig. 4 Monotonic deformation behavior of the ND and RD specimens on tensile stress-strain curves

방향의 응력을 받을 경우 주쌍정이 형성되기 때문에 나타나는 현상이다[6,17]. 또한 인장변형 후기에 응력이 증가하게 되면 c축 압축 모드를 가지는 $\{10\bar{1}1\}$ 쌍정과 $\{10\bar{1}1\}$ 쌍정 내에 $\{10\bar{1}2\}$ 쌍정이 형성되는 $\{10\bar{1}1\}-\{10\bar{1}2\}$ 쌍정이 형성되고, 이러한 쌍정들에 전위가 집적되어 크랙이 발생하고 이로 인해 재료가 파단되는 것으로 알려져 있다[18]. 슬립과 동일하게 쌍정 또한 결정립이 증가함에 따라 임계전단응력이 감소할 뿐만 아니라 슬립보다 더 민감하게 변하므로 결정립 크기에 따라 연신율에 영향을 주는 $\{10\bar{1}1\}$, $\{10\bar{1}1\}-\{10\bar{1}2\}$ 쌍정의 활성화 또한 크게 변할 것으로 예측할 수 있으며, 이에 따라 연신율 또한 달라질 것으로 예상된다.



2.1.2 슬립계에 대한 이해

마그네슘은 상온에서 제한된 슬립계로 인해 성형성이 좋지 못한 단점이 있다. 다른 합금에 비해 마그네슘 합금이 가지고 있는 슬립계는 매우 적은 편이며, 이는 HCP 결정구조가 기인한다. 이러한 마그네슘 결정구조의 슬립계는 3가지가 있는데 그림 5에 나타났다. (0001)의 기저면에서 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 방향으로 발생하는 슬립계 이외에도 비기저면 슬립계인 $\{10\bar{1}0\}\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 프리즘(prismatic)면과 $\{10\bar{1}1\}\langle \bar{1}2\bar{1}0 \rangle$ 피라미달(pyramidal)면의 슬립계가 있으며[2], 기저면은 비기저면 슬립계에 비해 CRSS (Critical Resolved Shear Stress)값이 매우 작아, 상온에서는 기저면 슬립이 주로 작용하게 된다. 하지만 온도가 증가하면 비기저면 슬립계의 CRSS값이 기저면과 유사한 수준까지 낮아져 기저면, 프리즘면 그리고 피라미달면의 슬립계가 작용하여 성형에 용이하게 된다[6].

그래서 일반적으로 가공재는 200°C 이상의 고온에서 슬립계를 활성화 시킨 후에 가공을 실시한다. 또한 앞서 언급한 쌍정을 이용하여 변형을 시키기도 한다. 이외에도 마그네슘 합금을 저온에서 가공 및 성형성을 향상시키는 방법들이 있는데, Ca, Ce, Li, Si, Sr, Y, Zr 등의 원소를 첨가하여 결정립 미세화와 집합조직을 제어하는 것이다[1]. 이렇게 제조된 미세한 결정립을 가진 마그네슘은 상온에서 연신율이 증가하고, 고온에서 초소성을 갖는 장점이 있다[1].

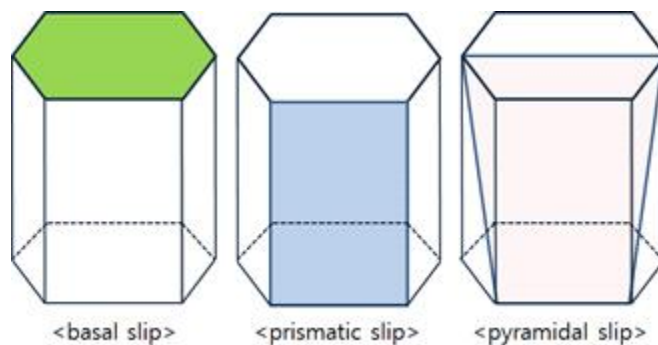


Fig. 5 Slip system of magnesium

2.2 고속인장시험의 필요성

현재까지 자동차용 소재에 대한 기계적 특성에 대한 많은 연구가 이루어져 오고 있지만 이들 대부분은 10 s^{-1} 이하의 저속변형조건에 국한되었다. 일반적으로 금속재료의 동적거동은 정적 또는 준정적인 하중상태에서의 거동과 큰 차이를 보이므로 점차 고속화되는 운송수단의 안정성을 위해 소재의 고속변형거동 평가가 실시되어야 한다. 일반적으로 자동차 충돌 시 얻어지는 재료의 변형속도는 대략 $10 \sim 300\text{ s}^{-1}$ 정도이다. 만약 시속 60km의 속도로 달리는 자동차의 250mm 부품을 고려하면 요구되는 실험실적 변형속도는 67 s^{-1} 이 되고, 시속 100km의 속도로 달리면 요구되는 변형속도는 111 s^{-1} 이 된다. 따라서 ULSAB-AVC에서는 충돌해석에 사용하기 위해서는 $10 \sim 300\text{ s}^{-1}$ 의 변형속도에서 측정된 데이터가 필요하다고 기술하고 있다[19]. 따라서, 이 부근의 속도범위에서 재료거동을 정확히 파악하기 위해서는 $10 \sim 1000\text{ s}^{-1}$ 정도 높은 변형 속도에서의 시험결과를 확보하여야 한다.

현재까지 박육화에 따른 소재의 충돌특성에 관한 연구는 사각형 부재를 이용한 충돌에너지 흡수성, 인장형 흡킨스 바를 이용한 높은 변형속도범위에서의 충격특성분석, 동적항복강도와 정적항복강도의 비를 비교하여 충격특성을 조사한 연구결과가 발표되었으나[20,21], 자동차충돌특성을 파악하기 위한 $10 \sim 1000\text{ s}^{-1}$ 의 변형속도범위에서는 정확한 데이터를 얻을 수 없다는 단점이 있다[22]. 따라서 최근에 와서 일반 인장시험편을 이용하여 고속유압인장시험기로 $10 \sim 1000\text{ s}^{-1}$ 의 변형속도범위에서의 고속인장성질을 측정하여 데이터를 축적하고 있다[23,24]. 컴퓨터를 이용한 자동차의 충돌해석에 이용될 수 있는 동적 기계적 특성은 load path와 충돌 시 소성불안정을 보다 더 잘 예측할 수 있으므로 해석식에서 인공적인 보정상수의 필요성을 없앨 수 있다.

국내에서는 POSCO, HYSCO, 재료연구소에서 고속유압인장시험기를 도입하여 신뢰성 있는 실험결과를 얻으려고 노력하고 있다. 동적시험은 아직 표준화가 이루어지지 않고 시험자체도 간단히 할 수 있는 것이 아니므로 동적 시험 결과를 이용해 자동차의 충돌성능분석을 한 결과는 그렇게 많지 않고 최근 여러 연구자에 의해 시도되고 있다[25-28].

2.3 PB처리

자동차 제조공정은 강판 절단(blanking) - 성형(press forming) - 도장 - 굽기(baking) - 조립 순으로 이루어지는데, 절단 된 강판은 약 2%의 소성변형이 발생한다. 그 후, 목적에 따라 성형이 이루어지게 되고 도장처리를 하게 되는데, 성형은 목적에 따라 변형률이 다르므로 제외하였다. 도장처리 후 오븐에서 160 ~ 200℃ 범위에서 약 20분간 가열하여 건조시킨 뒤에 다음 공정으로 넘어간다[29]. 도장 후의 굽기처리를 하면, 고용 탄소(C)의 확산으로 성형가공으로 도입된 변형 전위에 고착되는 Cottrell 분위기가 형성됨으로써 항복강도가 증가하게 된다[29,30]. 이러한 강을 소부경화강이라고 하는데, 내텐트성이 우수한 특징이 있다.

본 연구에서는 BH공정에서 절단 공정을 추가함으로써 Prestrain(2%)과 Baking(170℃, 20분) 처리를 실시하였고, 이를 PB처리라 명명하였다.

2.3 피로 특성

산업 전반에 걸쳐 발생하는 파괴에서 피로파괴는 상당부분을 차지하고 있다. 따라서 재료의 인장 특성뿐만 아니라 피로 특성 평가 또한 반드시 필요하다. 일반적으로 철계 금속에서 피로강도는 인장강도의 약 50% 값을 가진다는 보고가 있으나[31], 마그네슘은 비철금속이기도 하며, 인장과 피로는 각각 다른 요인에 의해 파단이 발생하므로 좀 더 연구가 필요하다. 인장강도는 재료의 슬립과 같은 변형기구에 의해 파단이 발생하지만 피로는 재료의 미소 균열이나 표면부의 단차와 같은 결함에 의해 파단이 발생한다[32]. 그래서 재료의 두께 역시 피로 특성에 영향을 줄 수 있다. 본 실험에서 4가지 두께의 시험편을 준비하여 실험을 실시함으로써 재료의 두께별 피로특성에 대해 평가하였다.

제 3 장 실험 방법

3.1 시험편 제조

대상 시험재는 상용화된 열연 AZ31 마그네슘 판재로써 1, 1.5, 2, 3mm 로 4 가지 두께의 판재를 압연방향에 대하여 그림 6 과 같이, 0°, 45°, 90° 방향으로 인장시험편을 채취하여 실험하였다.

표 1 에는 본 실험에 사용한 열연 AZ31 마그네슘 판재의 화학 성분을 나타내었고, 시험편두께, 방향 및 PB 처리에 관한 시험 구분은 심볼로 표현하여 표 2 에 나타내었다.

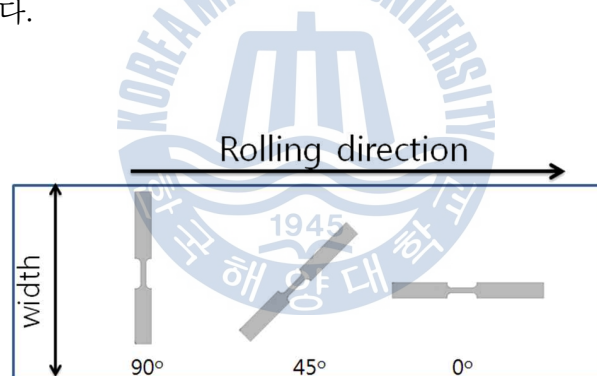


Fig. 6 A schematic diagram showing the specimens with different directions

Table 1 Chemical compositions (wt.%) of AZ31B Mg sheet studied

	Al	Zn	Mn	Mg
AZ31	3.0	1.0	0.5	BAL.

Table 2 Symbols of AZ31 Mg sheet studied

Thickness (mm)	Heat treatment	0°	45°	90°
1	NPB	■	□	⊠
1.5	NPB	●	○	⊗
	PB	◐	⊕	◑
2	NPB	▲	△	⊠
3	NPB	◆	◇	⊠
	PB	◈	⊞	◈



3.1.1 인장 시편

시편은 1, 1.5, 2, 3mm 로 4 가지 두께의 판재를 그림 7 과 같은 크기로 압연방향에 대하여 0°, 45°, 90° 방향으로 인장시편을 채취하였다.

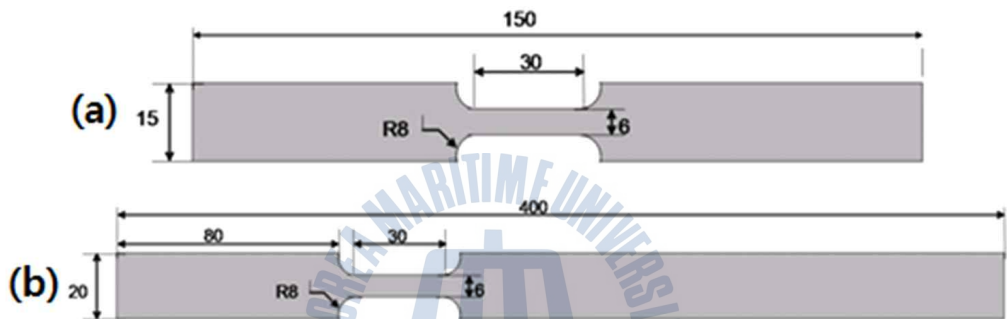


Fig. 7 Specimen dimension of tensile test (a)for low strain rate, and (b)for high strain rate

3.1.2 피로시험편

NPB시험편은 0°방향으로 1, 1.5, 2, 3mm의 4가지 두께에 대하여 그림 8과 같이 피로시험편을 채취하였고, PB시험편은 1.5와 3mm로 2가지 두께에 대하여 NPB와 동일한 규격으로 채취하여 피로시험을 실시하였다. 이는 미세조직 관찰을 통해 얻어진 데이터를 통해 1과 1.5mm의 결정립 크기가 유사하고, 2와 3mm의 결정립 크기가 유사함이 확인되었다. 따라서 미세한 결정립을 가진 대표시험편을 1.5mm로 정하고, 조대한 결정립을 가진 대표시험편을 3mm로 정하게 되었다. 피로시험은 표면 상태에 민감하므로, 시험 전에 NPB시험편의 평면 인장부는 3 μ m 다이아몬드입자 연마를 실시하였고, PB시험편은 PB처리 후에 3 μ m 다이아몬드입자 연마를 실시하여 최대한 표면을 매끄럽게 하였다. 측면은 기계가공을 실시하여 추가 연마 작업은 실시하지 않았다.

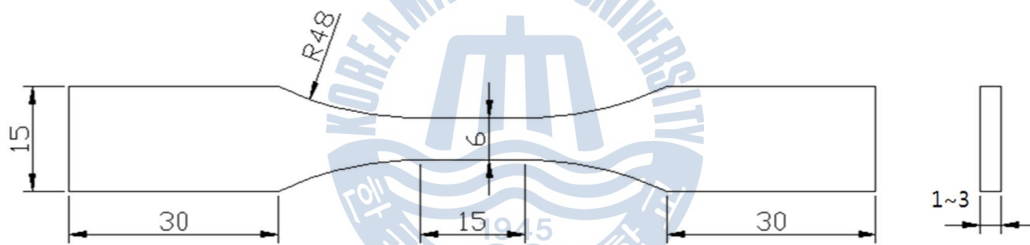


Fig. 8 Specimen dimension of fatigue test

3.2 미세조직 관찰과 EBSD (Electron BackScattered Diffraction) 분석

미세조직 관찰을 위해 변형 전, 4 가지 두께에서의 대표조직을 채취하고 에칭액(Ethanol 70mL + Water 10mL + Acetic acid 10mL + Picric acid 4.2g)을 이용하여 조직을 관찰하였다. 그리고 EBSD 를 이용하여 마그네슘 합금 판재의 결정학적 방위 관계에 대해 분석하였다.

3.3 PB처리(Prestrain & Baking treatment)

자동차 판재로써 마그네슘 합금의 적용가능성에 대해 좀 더 면밀히 살펴보기 위해 자동차 제조 공정과 유사한 처리를 한 시편을 준비하였다. 자동차 판재는 절단, 프레스, 도장 공정 등을 거치게 되는데, 이때 판재 절단 시, 약 2% 변형이 발생하고, 도장 후 건조과정에서 170℃에 20 분간 노출된다. 프레스 공정은 형상에 따라 다양한 변형이 발생하므로 제외하였다. 그러나 제한된 시설과 공간으로 절단과 굽기 공정을 실시할 수 없으므로 인장시험기로 2% 변형(Prestrain)을 주고, 170℃ Si 욕에 20 분간 담근 후(Baking) 공냉 시킴으로써 유사한 조건을 시편에 적용시켰다. 이러한 처리과정을 PB 처리라고 명하였다.

3.4 인장시험

인장시험은 PB 처리한(이하 PB) 시편과 PB 처리하지 않은(이하 NPB) 시편으로 나누어 실시하였다. 그림 7(a)시편은 Instron(4469)를 이용하여 $10^{-4} \text{ s}^{-1} \sim 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ 변형속도 범위에서 4 개 변형속도를 선택하여 각 3 회 실시하였고, 그림 7(b) 시편은 Instron(VHS-8800)을 이용하여 $1 \text{ s}^{-1} \sim 3 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$ 변형속도 범위에서 5 개 변형속도를 선택하여 2 ~ 3 회 실시하였다. (변형속도는 인장부의 변형속도를 측정하여 기재해야 하지만 준비과정과 시간이 요구되어 지그의 속도로 대신하였다.) 시험한 데이터를 이용해 시편의 두께 및 방향, 그리고 변형속도에 따른 최대인장강도, 연신율, 변형속도민감도 그리고 흡수에너지를 분석하였다.

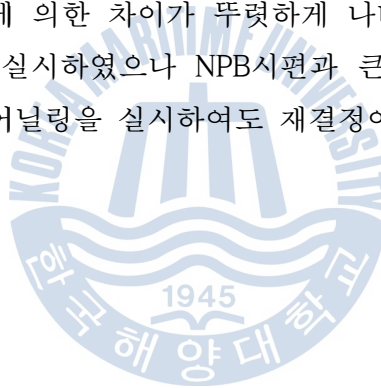
3.5 피로시험

피로시험은 KDMT-320-5(유압 서보식 피로시험기)를 이용하였다. 응력비 (Stress ratio) $R = 0.1$, 진동 주파수 20Hz 조건에서 ASTM E466 규격에 따라 그림 8과 같이 시험편을 제작하여 실험하였다. 피로한도는 2×10^6 cycles로 설정하였으며, 파단이 일어나지 않으면 동일 조건에서 추가적으로 2번 반복 실험을 실시하였다. 결과적으로 3회 반복실험 후에도 파단이 발생하지 않으면 피로한도로 결정하였다.

제 4 장 결과 및 고찰

4.1 미세조직 관찰

각 시편의 변형 전 미세조직을 촬영한 그림을 9에 나타내었다. 결정립 측정은 직경법을 이용하였고, 압연방향을 기준으로 평행한 방향과 수직인 방향으로 측정하여 이를 합하여 평균을 구하였다. 판재 두께에 의한 결정립 크기의 차이는 뚜렷하게 볼 수 있었으며, 결정립의 크기는 1.5, 1, 2, 3mm 순으로 11, 12, 17, 18 μ m로 판재의 두께에 의한 차이가 뚜렷하게 나타났다. 변형 전 PB시험편도 결정립 크기 측정을 실시하였으나 NPB시험편과 큰 차이가 없었다. 이는 20 0℃ 이하의 온도에서는 어닐링을 실시하여도 재결정이 발생하지 않는다는 보고 [33]와 일치한다.



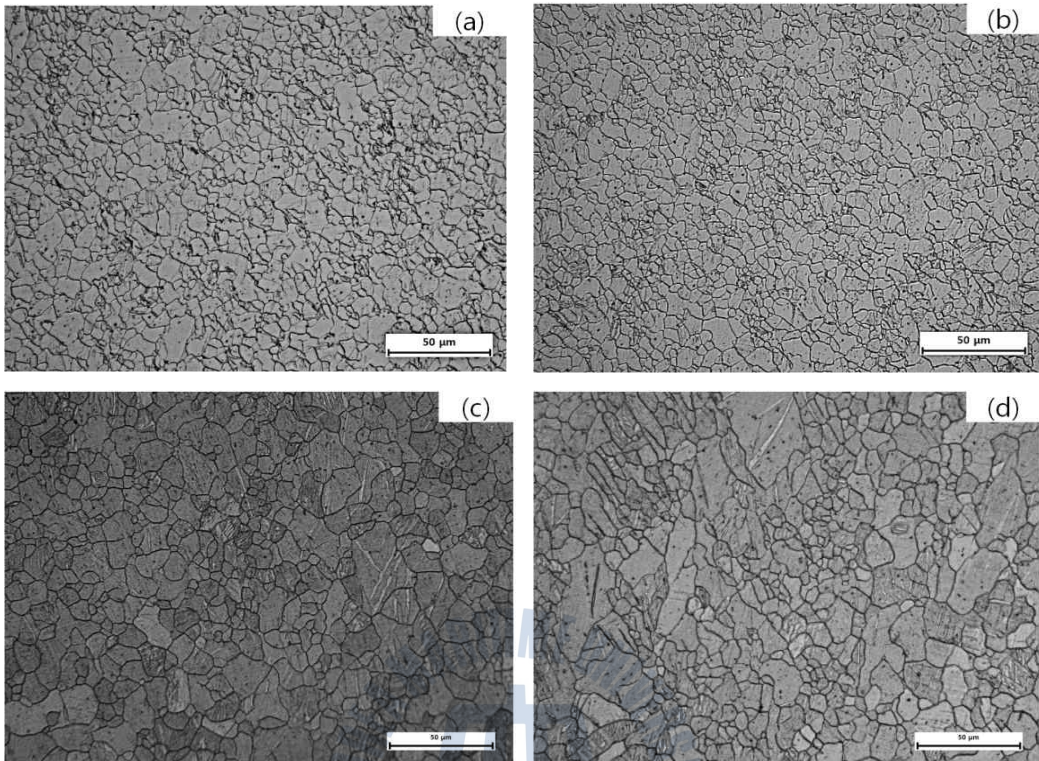


Fig. 9 Microstructure of AZ31 Mg alloy with 0° direction: (a)1mm, (b)1.5mm, (c)2mm, and (d)3mm

4.2 EBSD에 의한 방향성 분석

각 시편의 초기 집합구조를 분석하기 위해 EBSD를 이용하여 (0001) 면과 $(10\bar{1}0)$ 면의 극점도를 촬영하여 그림 9에 나타내었다. 1, 1.5, 2mm 판재는 (0001) 면에 집중되어 있는 것으로 보아, 압연면과 평행한 기저 집합조직이 강하게 배열되어 있음을 알 수 있다. 3mm의 경우에는 다른 두께에 비해 다소 기저 집합조직의 강도가 낮게 나타났다. 프리즘면인 $(10\bar{1}0)$ 의 극점도를 보면, 특정한 방향성을 나타내지 않으므로 HCP 구조의 a 축이 무작위(random)로 배열되어 있음을 알 수 있다. 이와 같이 기저면과 압연면이 평행하게 배열되어 있는 상태에서 압축응력이 작용하면, c 축 인장 모드를 가지는 $\{10\bar{1}2\}$ 쌍정이 활성화되어 낮은 응력에서 항복현상이 발생하게 되고, 가공경화지수가 높아지는 아래로 볼록한 형태의 응력-변형률 곡선이 그려지게 된다. 그러나 본 연구에서는 인장응력이 작용하므로, c 축이 압축 모드가 가지게 되고 슬립이 주변형기구로 작용하게 됨을 예측할 수 있다.



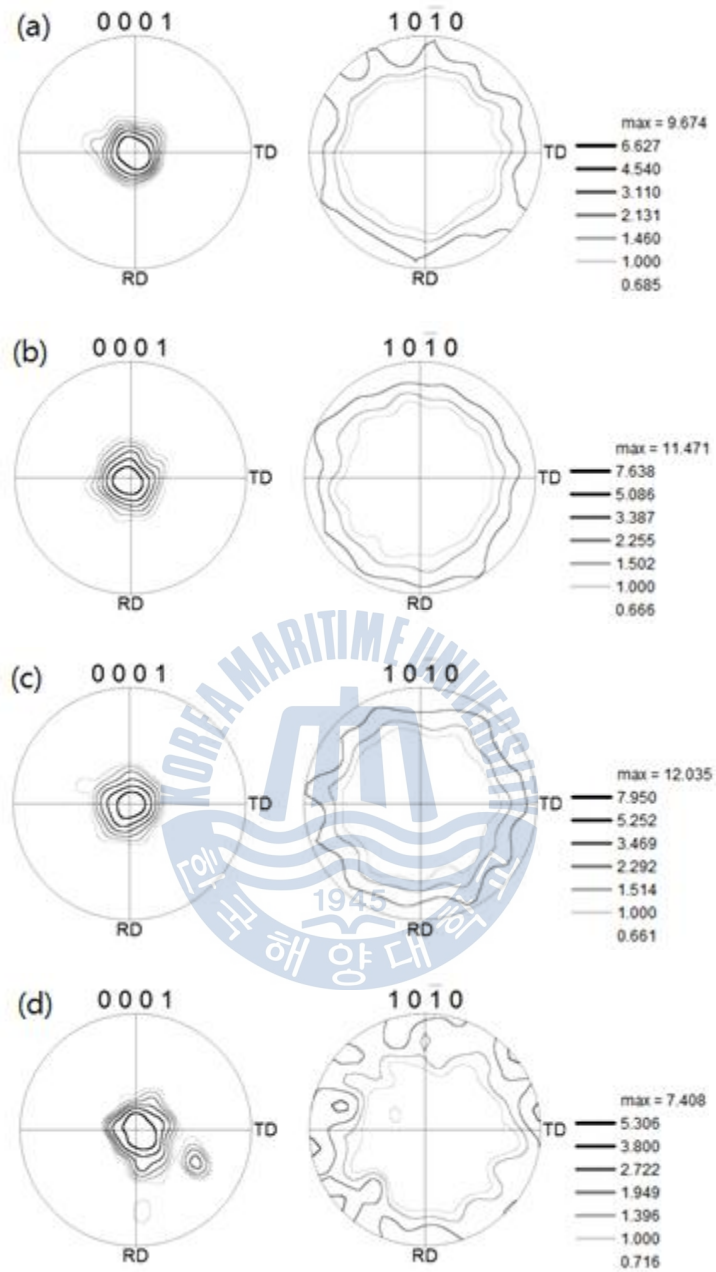


Fig. 10 Pole figure of AZ31 Mg alloys with 0° direction: (a)1mm, (b)1.5mm, (c)2mm, and (d)3mm

4.3 NPB 인장시험

시험을 통해 얻어진 각각의 데이터를 이용하여 응력-변형률 곡선을 그림 11과 12에 나타내었다. 이를 이용하여 최대인장강도, 연신율, 변형속도민감도, 흡수에너지를 평가하였다. 그림 11(a)를 보면, 결정립의 크기에 따라 최대인장강도와 항복강도가 감소하는 것을 볼 수 있고, 특히 3mm가 최대인장강도, 항복점이 다른 두께에 비해 낮음을 알 수 있다. 그림 11(b)를 보면, 가공방향에 따른 최대인장강도의 차이는 크지 않으나 연신율은 45° 가 높고, 90° 가 가장 낮게 나타났다. 그림 11(c)는 모든 변형속도에서의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로서, 10 s^{-1} 이상의 고속에서는 파동이 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 11(c)의 고속 부분은 평활화 처리한 것으로 다른 곡선들과 함께 있어 이러한 파동이 확실히 구분되지 않는다. 그래서 그림 11(d)에 항복강도 이후의 곡선을 평활화 처리하지 않고 나타내었다. 변형속도가 증가함에 따라 파동의 진폭이 증가하는 것이 명확히 보이고 있다.



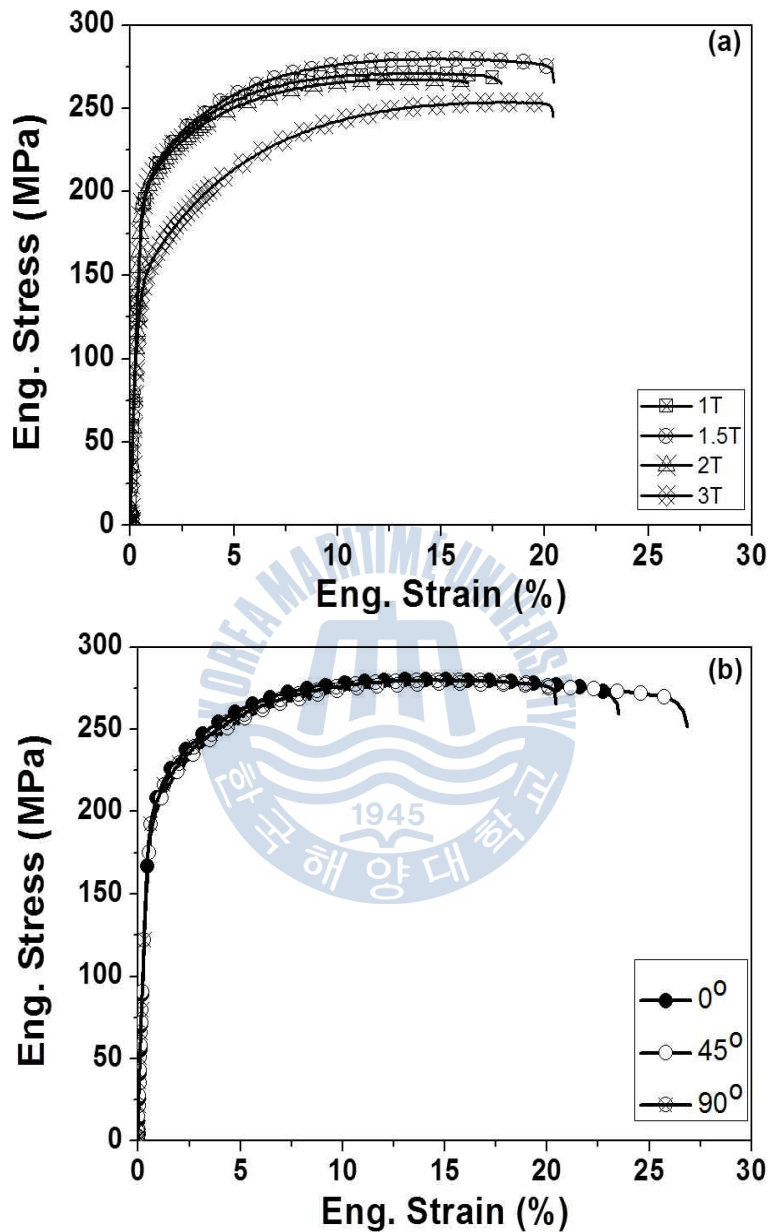


Fig. 11 Stress-strain curve according to (a)specimen thickness in 90° direction at 10^{-4} s^{-1} , (b)machining direction with a specimen thickness of 1.5mm at 10^{-4} s^{-1}

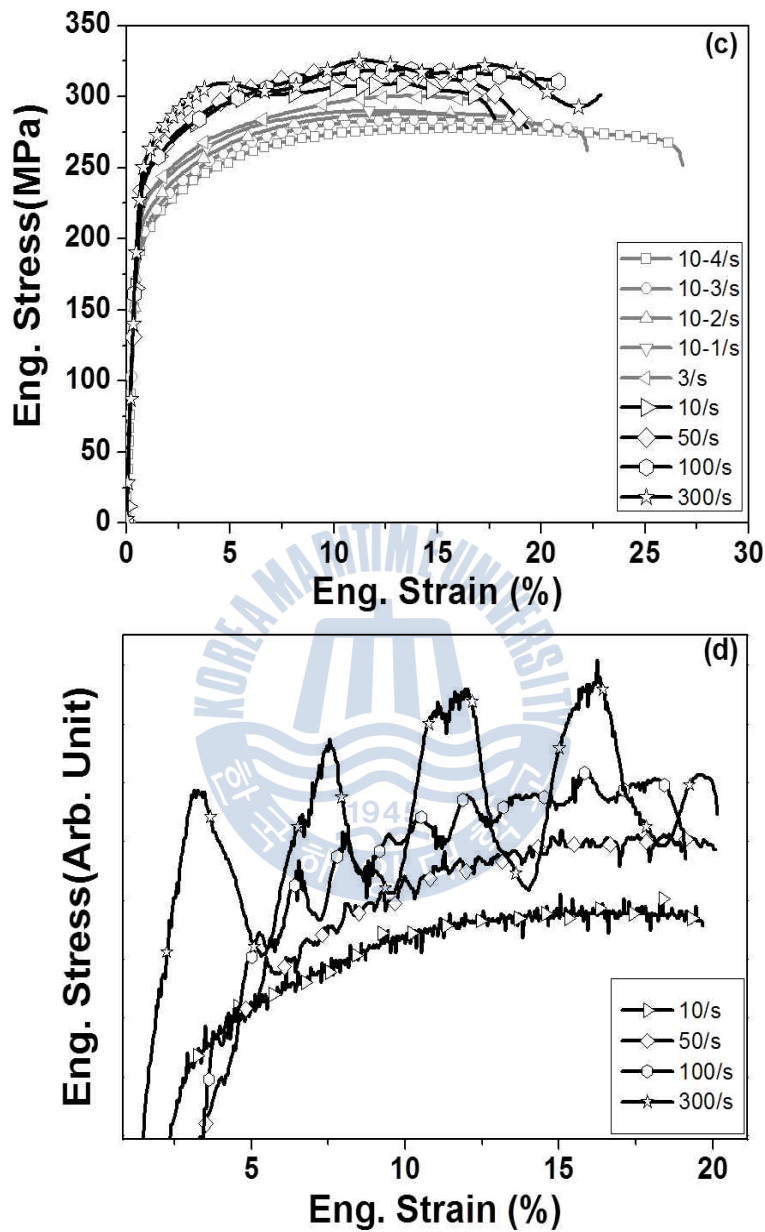


Fig. 11 Stress-strain curve according to (c) strain rate in 45° direction and 3mm thickness, and (d) plastic region of high strain rate to show serration

4.3.1 변형속도와 시편 두께가 인장 특성에 미치는 영향

그림 12 와 13 은 0° , 45° , 90° 방향에서 각 시편의 두께별로 변형속도에 따른 최대인장강도와 연신율의 변화를 나타내었다. 모든 조건에서 변형속도가 증가할수록 인장강도가 증가하는 양의 변형속도 민감도(positive strain rate sensitivity)를 나타내었다. 이는 자동차 판재로 이용되는 TRIP 강, DP 강, 일반강 등과 비슷한 경향을 보이며, 고속에서 급격한 강도 증가가 발생함에 따라 충돌 시 특성이 향상될 것으로 판단된다.

모든 시편 방향에서 그림 12 에 나타난 최대인장강도는 1.5mm 에서 가장 높고 3mm 에서 가장 낮게 나타났다. 1mm 보다 1.5mm 에서 최대인장강도가 높게 나온 것은 1mm 보다 1.5mm 가 미세한 결정립이 많이 섞여 있어 결정립의 영향에 의한 것으로 판단되고, 2 와 3mm 의 경우에는 결정입도가 불균일하며 조대 결정립의 존재하여 강도가 낮게 나타난 것으로 판단된다. 특히 3mm 판재의 결정립이 가장 조대한 것으로 관찰되어 가장 낮은 최대인장강도를 나타낸 것으로 판단된다.

그림 13 은 방향별로 시편의 두께와 변형속도에 따른 연신율의 변화를 평균값과 표준편차로 나타내었다. 이 때, 표준편차는 각 변형속도에서의 연신율 범위를 표현하고자 이용되었으며, 평가기준은 평균값으로 하였다. (특정 변형속도에 4 가지 두께 시편이 표기되어 오차 범위가 겹쳐져 판단에 어려움을 주기 때문에 약간씩 간격을 띄워 표기하였고, 실제 변형속도는 동일하다.) 전체적으로 1.5mm 가 높은 연신율을 나타내고, 2mm 가 낮은 연신율을 보였다. 이는 강도가 증가할수록 연신율이 감소하는 일반적인 경향과는 다른 결과로, 압연공정 시 불충분한 압하량에 의해 균일한 결정립의 크기를 얻지 못하고 미세결정립과 조대 결정립이 혼재함으로써 평균 결정립의 크기가 커지게 되고, 이로 인한 낮은 강도와 조대결정립에서 $\{10\bar{1}1\}$, $\{10\bar{1}1\}-\{10\bar{1}2\}$ 의 이중 쌍정(double twin) 활성화되어 낮은 연신율을 갖게 되는 것으로 판단된다. 결국은 낮은 강도와 연신율은 낮은 흡수에너지를 나타내므로 자동차 충돌 특성에 좋지 않을 것으로 예측할 수 있다.

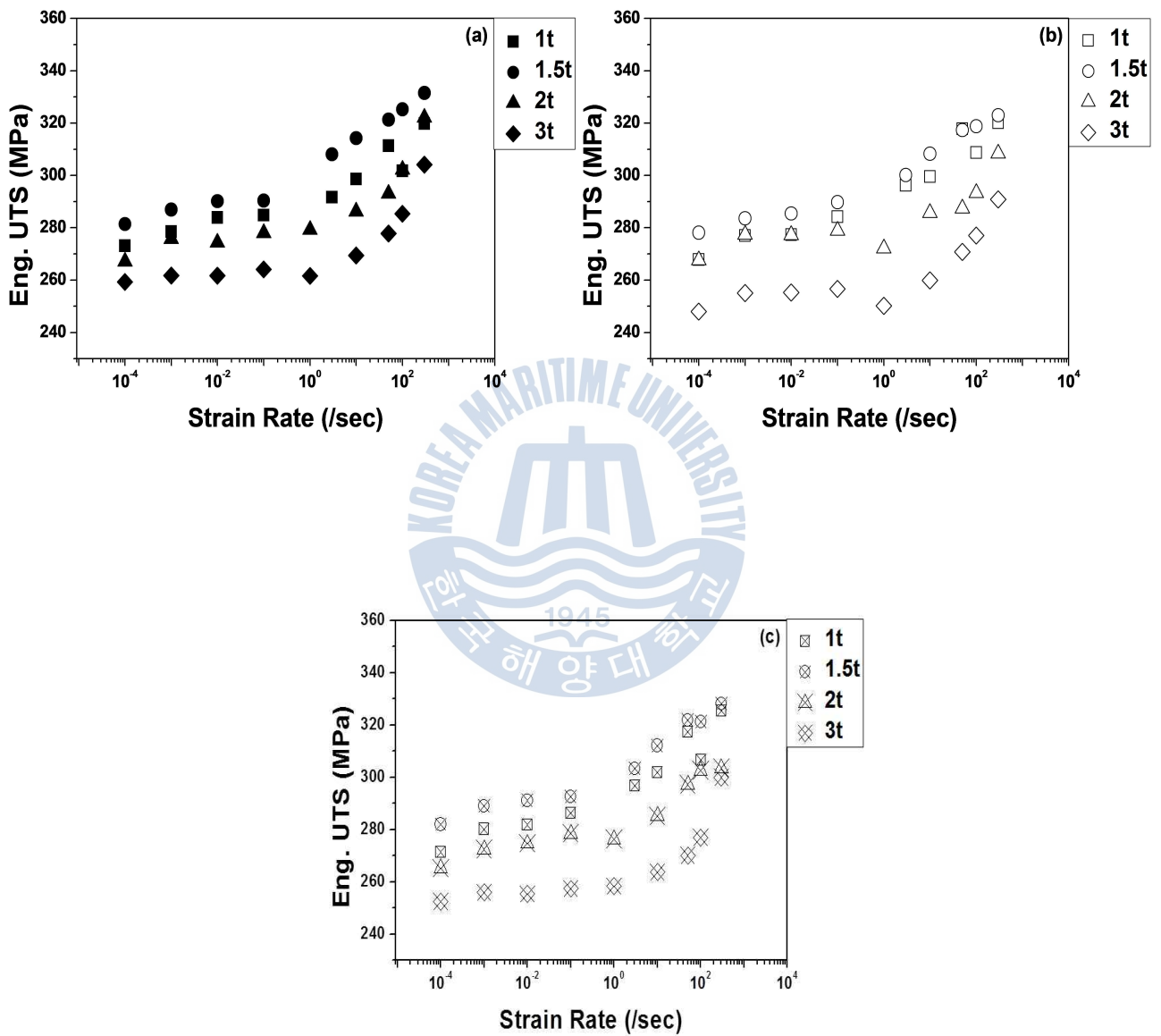


Fig. 12 The effect of specimen thickness on the UTS of AZ31: (a) 0° , (b) 45° , and (c) 90°

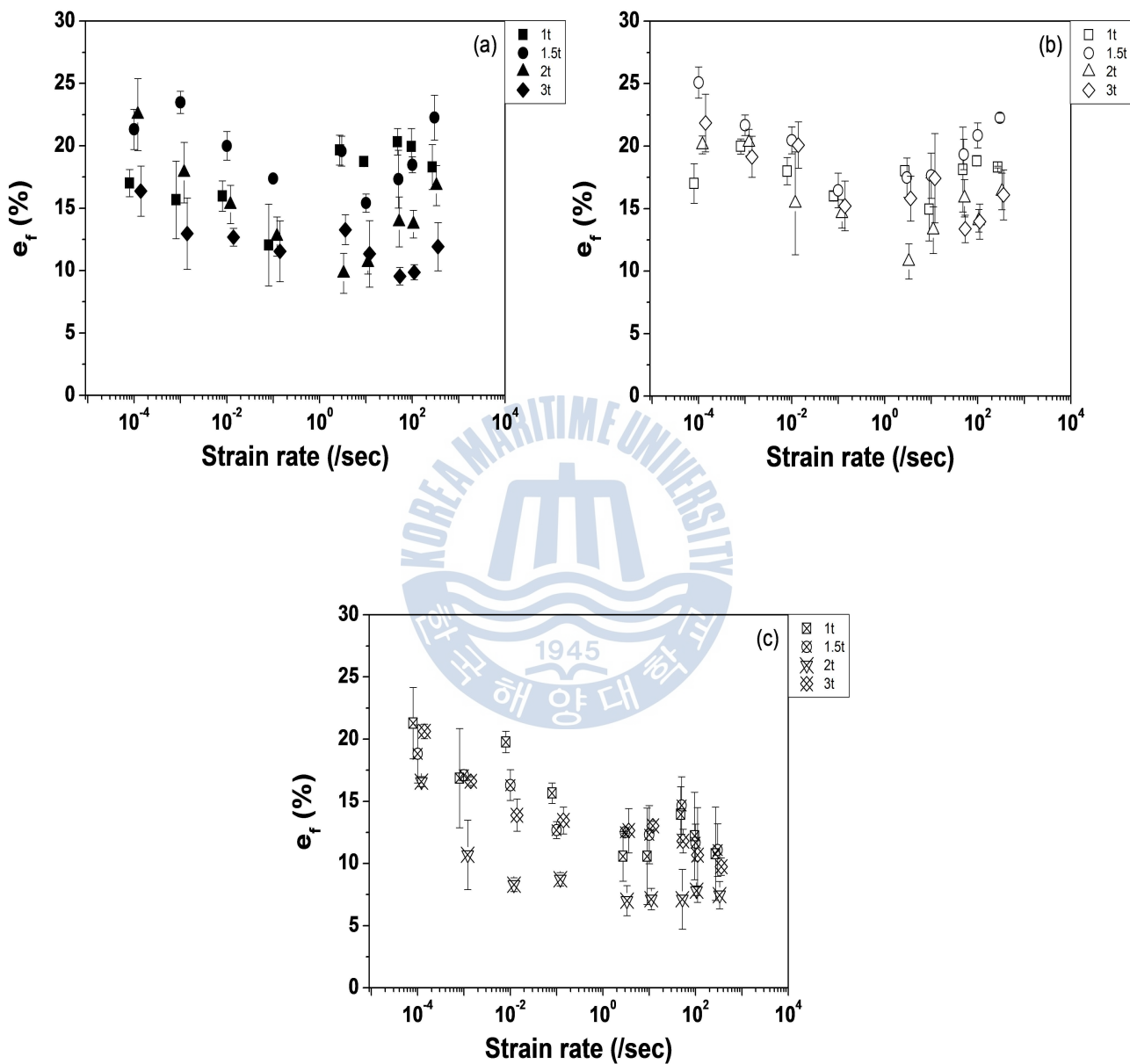


Fig. 13 The effect of specimen thickness on the elongation of AZ31: (a) 0° , (b) 45° , and (c) 90°

4.3.2 시편의 가공 방향이 인장 특성에 미치는 영향

그림 14 과 15 는 두께가 1, 1.5, 2, 3mm 로 4 가지 시편에서 시편 가공 방향과 변형속도에 따른 최대인장강도와 연신율의 변화를 나타내었다. 그림 14(a)와 (b) 는 1 과 1.5mm 시편의 최대인장강도 평균값만은 나타내었고, 그림 14(c)와 (d)는 2 와 3mm 두께시편 최대인장강도의 평균값과 표준편차를 나타내었는데 고속에서도 표준편차가 크지 않으므로 높은 신뢰도를 보여준다. 45° 에서 다소 낮은 최대인장강도를 보이나 모든 두께의 시편에서 유사한 최대인장강도 값을 가지고 있으며, 이러한 압연면 상에서의 강도 등방성은 그림 9 와 같이 등축조직과 그림 10 과 같이 c 축이 압연면에 수직하게 배열된 강한 집합조직을 통해 확인할 수 있다.

그림 15 는 시편의 방향과 방향속도에 따른 연신율의 변화를 나타내었는데 전체적으로 90° 가 가장 연신율이 낮게 나타났고 0° 와 45° 가 높게 나타나나 시편 두께에 따라 약간씩 차이를 보이고 있다. Ulacia[36]는 1mm 의 경우, 저속에서는 0° (압연방향)가 90° (수직방향)보다 연신율이 높고 고속에서는 큰 차이가 나타나지 않는다고 했으나 본 연구 결과에서는 동일한 두께인 1mm 의 경우, 90° 가 0° 보다 높은 변형속도 구간이 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 2mm 이하 얇은 판재의 경우에는 1mm 의 일부 변형속도를 제외하고 모든 변형속도에서 0° 가 90° 보다 높은 연신율을 나타내고 3mm 두께 시편에서는 반대로 90° 가 0° 보다 연신율이 높게 나타났다. 또한, 변형속도 변화에 따른 연신율의 변화가 유사한 두 가공방향과는 달리 90° 의 경우에는 변형속도 증가에 따라 지속적으로 연신율이 감소하는 경향을 나타내고 있어 흡수에너지에 나쁜 영향을 줄 것으로 예상할 수 있다.

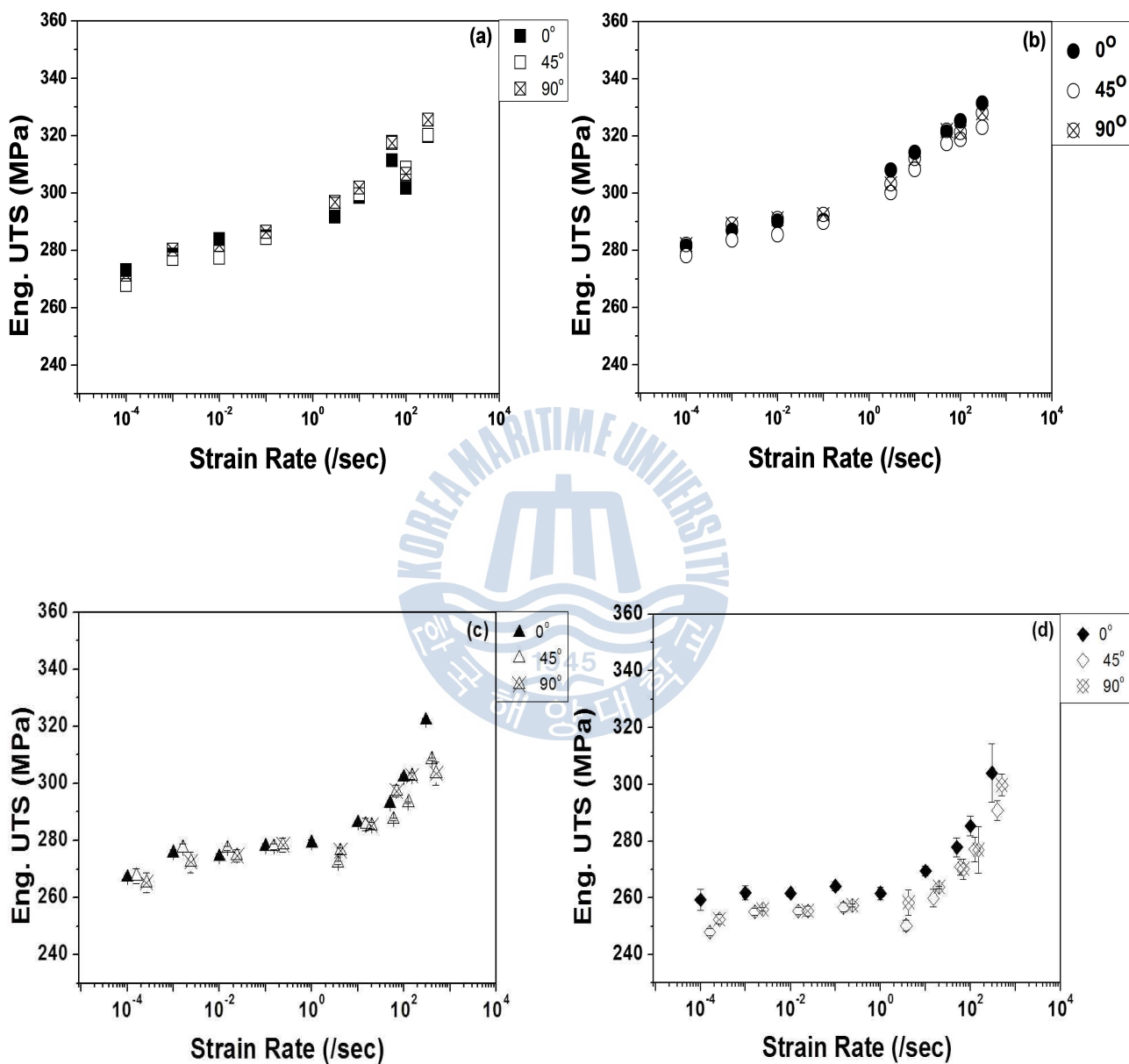


Fig. 14 The effect of specimen direction on the UTS of AZ31: (a)1mm, (b)1.5mm, (c)2mm, and (d)3mm

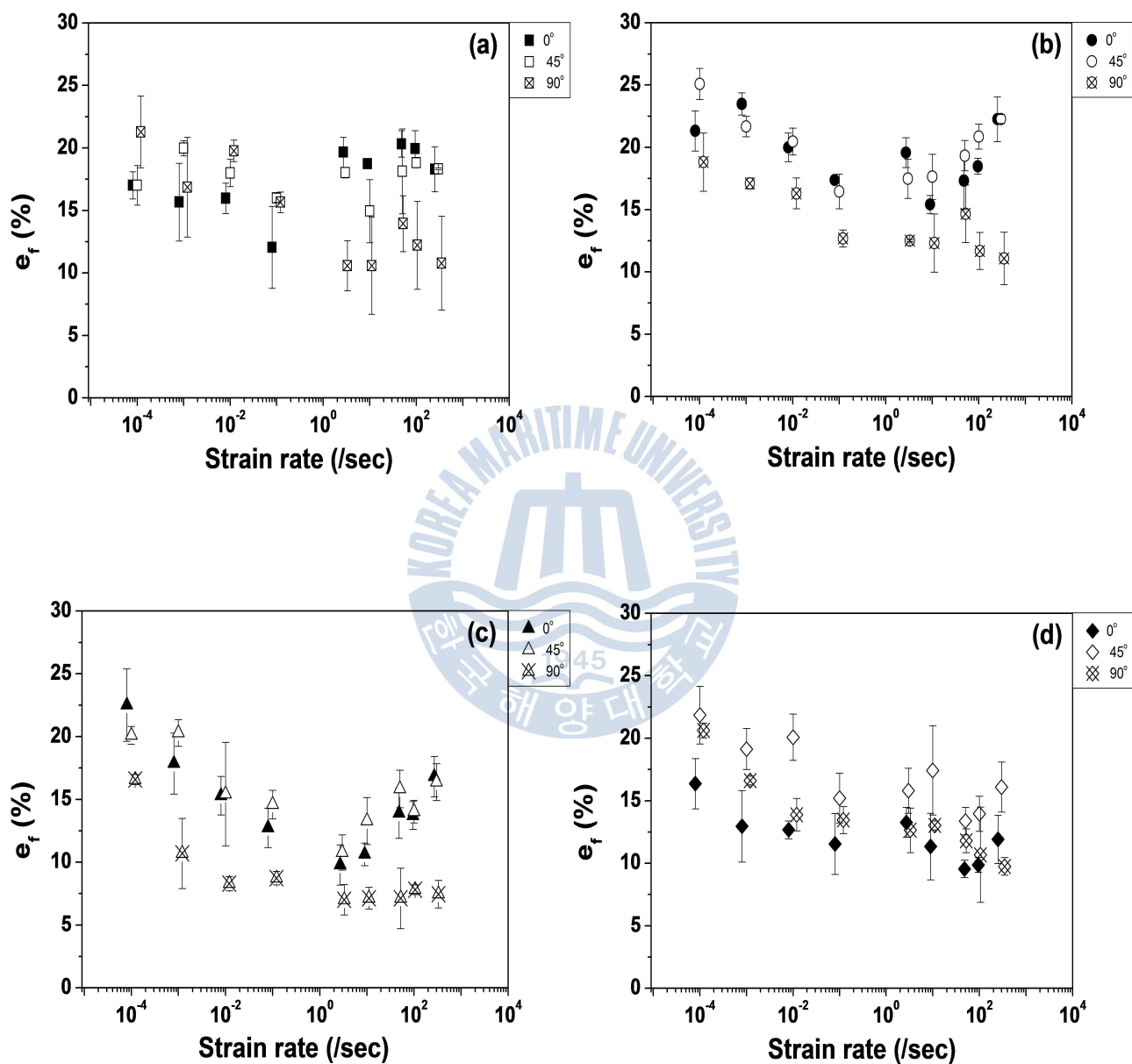


Fig. 15 The effect of specimen direction on the elongation of AZ31: (a)1mm, (b)1.5mm, (c)2mm, and (d)3mm

4.3.3 변형속도 민감도

앞선 그림 12 과 14 에서 변형속도 증가에 따라 최대인장강도가 지속적으로 증가함을 확인하였다. 이를 정량적으로 나타내기 위해 1 s^{-1} 를 기준으로 저속, 고속구간으로 나누어, 변형속도민감도(m)를 다음 식 (1)로 구하여 그 결과를 그림 16 에 나타내었다.

$$m = (\Delta \log \sigma) / (\Delta \log \dot{\epsilon}) \quad (1)$$

$$\sigma = S(1 + e) \quad (2)$$

식(1)에 적용된 진응력은 식(2)를 이용하여 공칭응력을 진응력으로 변환하였으며, 진변형률속도는 측정하지 않았으므로 공칭변형률속도로 대체하여 구하였다. 변형속도 민감도는 모든 방향에서 비슷한 거동을 보여 각 방향에 따라 모든 두께의 평균값으로 나타내었다. 마그네슘의 변형속도민감도 값은 최대가 0.025 수준으로 철강재에서의 재료에 따른 변형속도민감도 최대값 0.03 ~ 0.08[37]보다는 조금 낮은 수준이었다. 마그네슘의 변형속도 민감도는 모두 고속구간에서 저속구간보다 3 ~ 4 배 높은 값을 가져 빠른 변형속도에서 높은 강도를 가지는 것으로 나타나 자동차 충돌 시 흡수에너지 측면에서 유리할 것으로 예측되었다.

일반적으로는 장범위마찰 응력이 유동응력을 조절하는 낮은 변형속도에서는 응력의 변화가 별로 없고 높은 변형속도에서는 전위반응과 같은 단범위 장벽이 유동응력을 조절하여 변형속도에 따른 응력의 변화가 크다고 알려져 있다[37]. 그리고 변형속도민감도는 결정구조에 따라 달라지는데 BCC 결정구조가 높은 변형속도민감도를 가진다고 알려져 있는데[38] 마그네슘의 경우 HCP 구조임에도 불구하고 본 연구에서는 상당히 높은 변형속도민감도를 나타내어 좀 더 심도있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

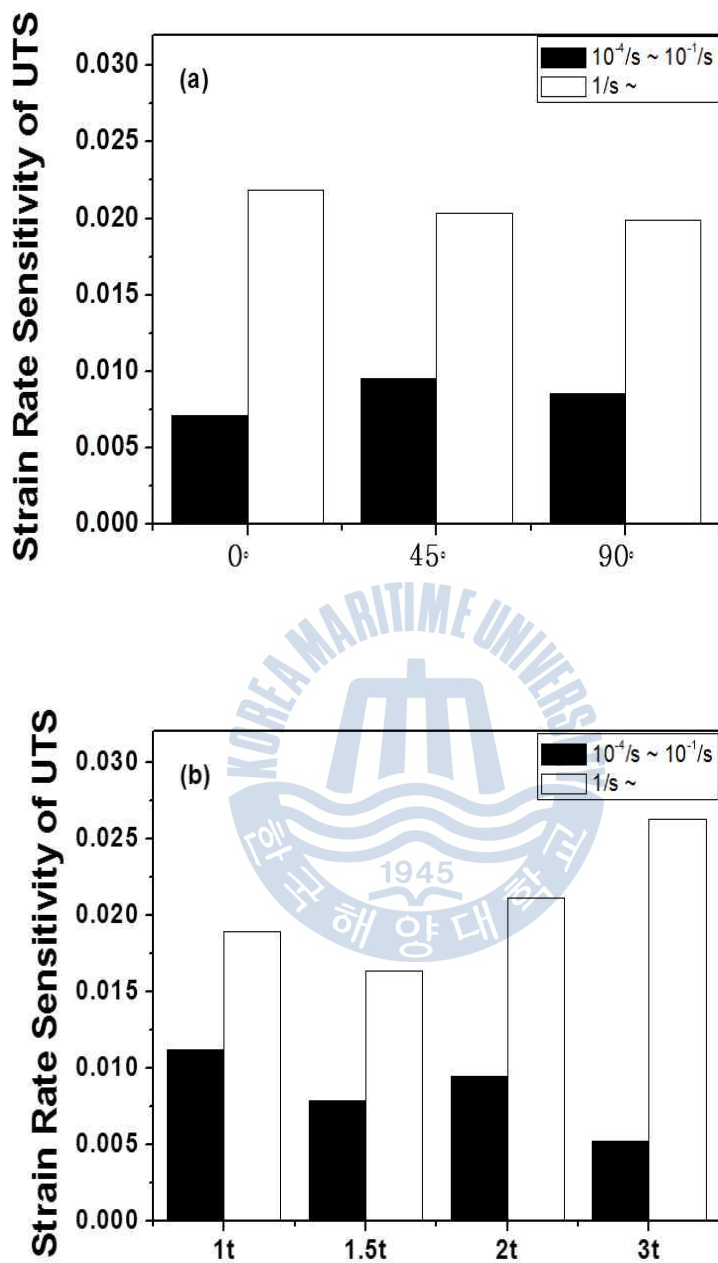


Fig. 16 Strain rate sensitivity of AZ31 Mg alloy: (a)specimen direction, and (b)specimen thickness

4.3.4 흡수에너지

그림 17 과 18 에 시편 두께와 가공방향에 따른 총흡수에너지를 나타내었다. 총흡수에너지는 응력-변형률 곡선 아래 면적을 적분하여 구하였으므로 강도와 연신율의 변화 추이로부터 흡수에너지를 예측할 수 있다. 자동차 충돌의 경우, 변형률 10%까지의 흡수에너지가 중요하나 동일 재료의 경우 변형률은 같고 강도만 달라 큰 차이를 볼 수 없다. 따라서 동일 재료에서는 총흡수에너지를 비교하고 다음 절에서 다른 재료와 흡수에너지를 비교할 때는 10% 변형률 흡수에너지를 비교하였다. 그림 12 와 13 에서 시편 두께에 따라서는 1.5mm 의 강도와 연신율이 제일 높았고 강도는 3mm 가, 연신율은 2mm 가 가장 낮았으므로 흡수에너지도 이와 유사한 경향을 보일 것으로 예상할 수 있다. 그림 17 에서 1.5mm 시편의 흡수에너지가 가장 높고 2 와 3mm 시편이 낮게 나타남으로써 이를 확인 할 수 있다. 조직이 균일하고 미세한 1 과 1.5mm 판재는 불균일하고 조대결정립이 존재하는 2 와 3mm 에 비해 강도 및 연신율이 높으며, 이로 인해 흡수에너지 또한 높게 된다. 따라서 마그네슘 판재의 충돌특성을 향상시키기 위해서는 미세하고 균일한 조직 형성이 요구되며, 이에 따라 압연 중 압하량과 같은 공정변수와 더불어 합금 원소에 따른 압연 중 재결정 거동 및 후기 열처리를 통한 조직제어 등이 중요한 인자로 작용할 것으로 판단된다.

그림 15 에서 변형속도에 따른 연신율의 변화는 시편 두께에 관계없이 가공방향 0° , 45° 의 경우에는 1 s^{-1} 경계로 저속에서는 변형속도 증가에 따라 연신율이 감소하고 고속 구간에서는 변형속도 증가에 따라 증가하는 경향을 나타내고 90° 의 경우에는 변형속도 증가에 따라 지속적으로 연신율이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그림 18 에서 흡수에너지도 유사한 경향을 나타내어 가공방향이 90° 일 경우 흡수에너지가 가장 낮게 평가되었고 0° 와 45° 의 경우에는 가공방향이 90° 일 경우보다 높은 흡수에너지를 나타내고 고속구간에서 흡수에너지가 증가하여 자동차 충돌 특성에 유리하게 작용할 것으로 판단된다. 따라서 마그네슘을 자동차용 소재로 적용할 때 흡수에너지를 고려하여 두께와 가공방향을 적절히 선택할 필요가 있다고 판단된다.

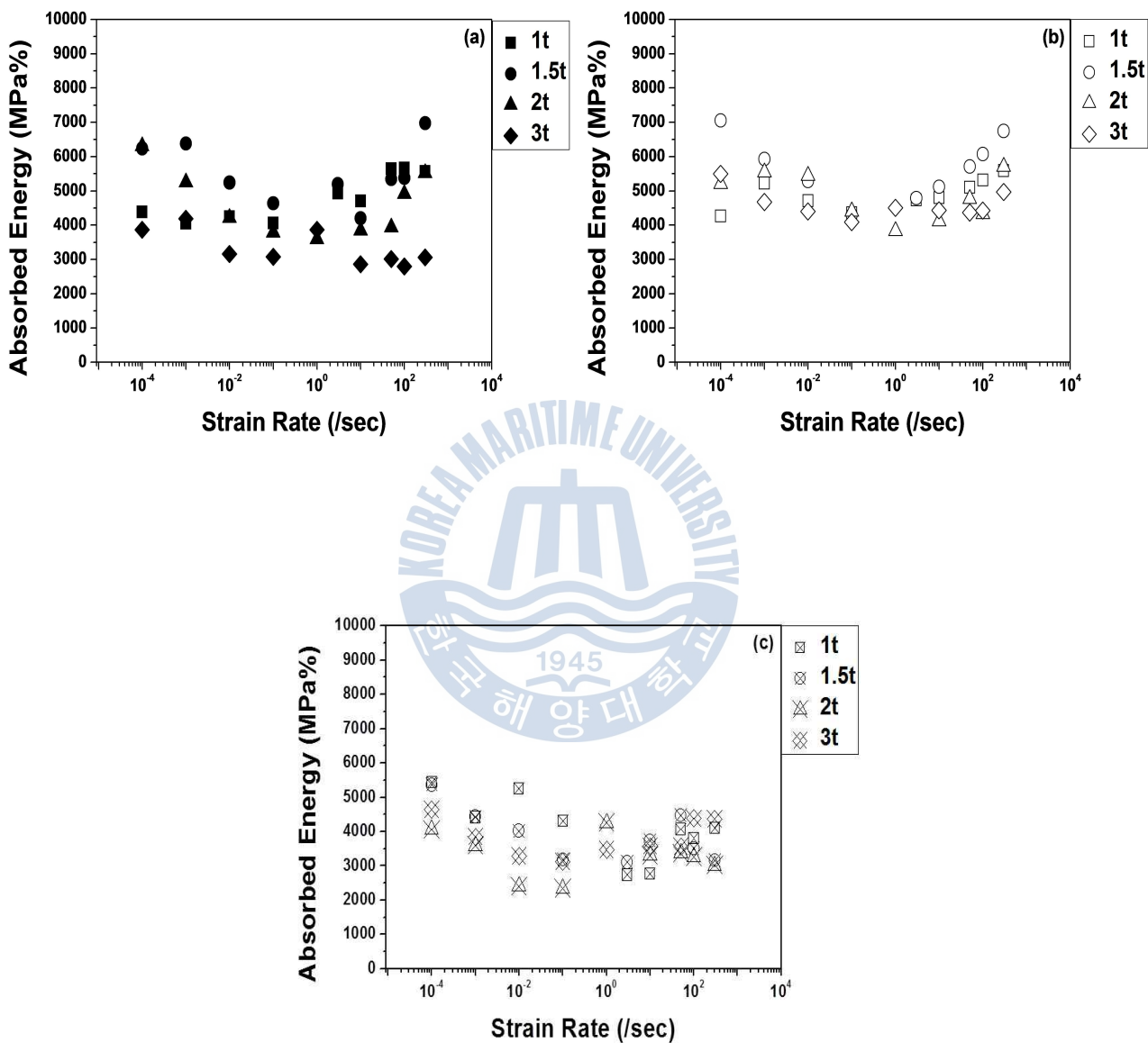


Fig. 17 The effect of specimen thickness on the absorbed energy of AZ31: (a) 0° , (b) 45° , and (c) 90°

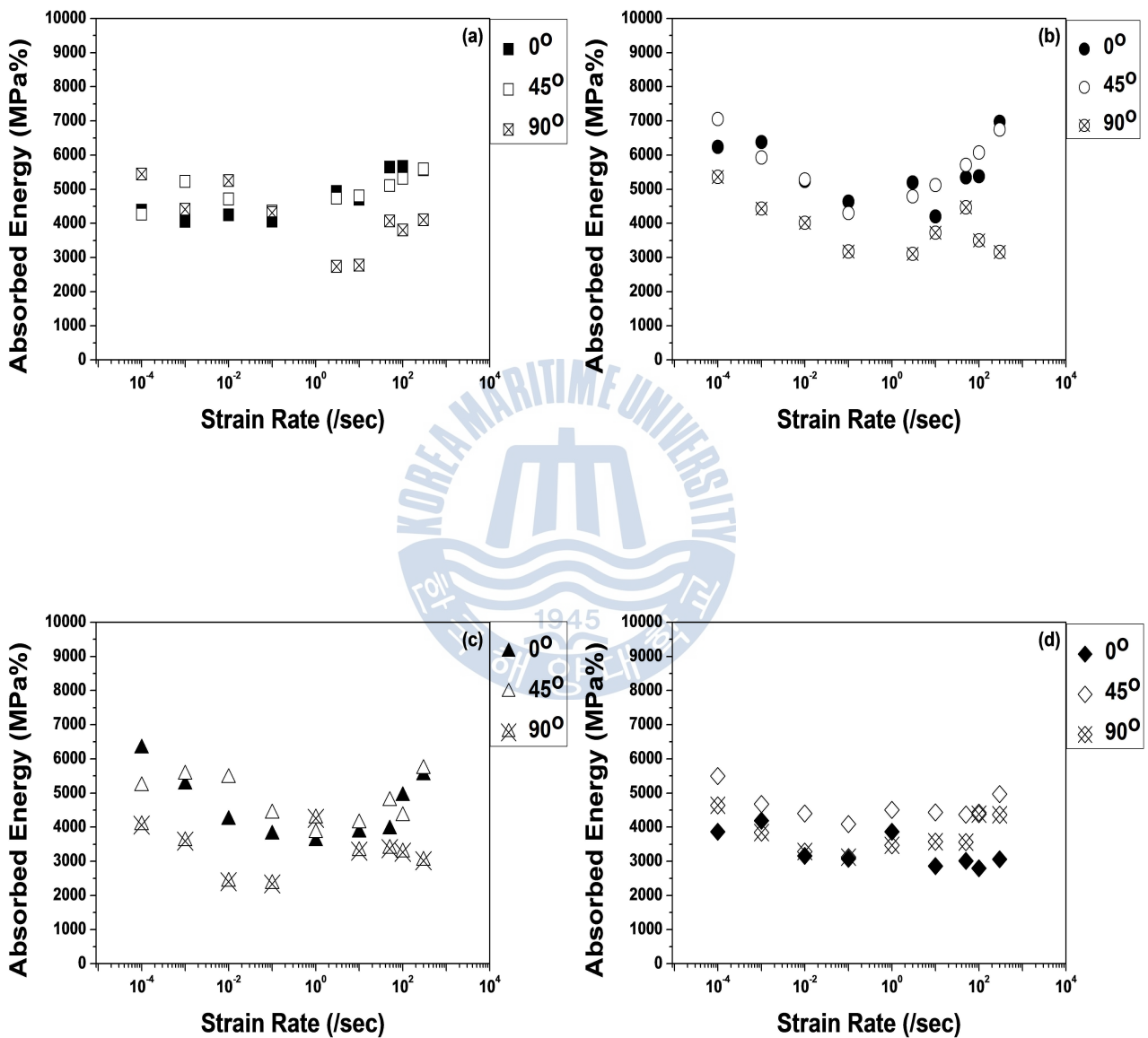


Fig. 18 The effect of specimen direction on the absorbed energy of AZ31: (a)1mm, (b)1.5mm, (c)2mm, and (d)3mm

4.3.5 자동차용 재료와 10% 흡수에너지 비교

AZ31 마그네슘 합금과 다른 자동차용 재료의 흡수에너지를 정량적으로 비교하기 위해 식(3)을 이용하여 계산하였고, 그 결과를 그림 19에 나타내었다.

$$(\text{Normalized Absorbed Energy}) = (10\% \text{ 흡수에너지}) / (\text{각 재료의 밀도}) \quad (3)$$

식(3)에 의한 흡수에너지는 동일 무게에서의 흡수에너지를 비교한 것으로 AZ31 마그네슘 합금의 흡수에너지는 앞서 측정한 모든 방향과 두께의 평균값이다. AA5754의 경우, 준정적 변형속도구간에서 속도에 명기되어 있지 않았으므로 대표적으로 10^{-4} s^{-1} , 10^{-2} s^{-1} 로 도시하였다. 고속에서는 속도에 관계없이 비슷한 흡수에너지를 나타내었다.

저속에서 마그네슘의 10% 흡수에너지는 다른 재료들의 비해 높은 것을 알 수 있다. 그러나 고속의 경우에 18Mn TWIP, AA5754 보다는 높고 12Mn TWIP, DP 강 보다는 낮은 값을 가지므로 전체적으로 다른 재료들과 유사한 값을 가지고 있다고 할 수 있다. 하지만 고속에서 다른 재료들에 비해 변형속도가 증가할수록 높은 구배를 보여주고 있어 고속충돌특성이 좋을 것으로 판단된다. 이러한 흡수에너지능은 자동차 판재로 사용하는데 큰 문제는 없는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 AZ31의 10% 흡수에너지는 모든 방향과 두께의 평균값을 나타낸 값이므로 불균일하고 조대결정립이 존재하여 흡수에너지가 낮은 2와 3mm의 값이 포함되어있다. 따라서 조직제어를 통해 1.5mm 판재와 같이 미세하고 균일한 조직을 형성시키면 우수한 흡수에너지능을 가지는 자동차 강판용 마그네슘 판재를 개발 및 적용이 가능할 것으로 판단된다.

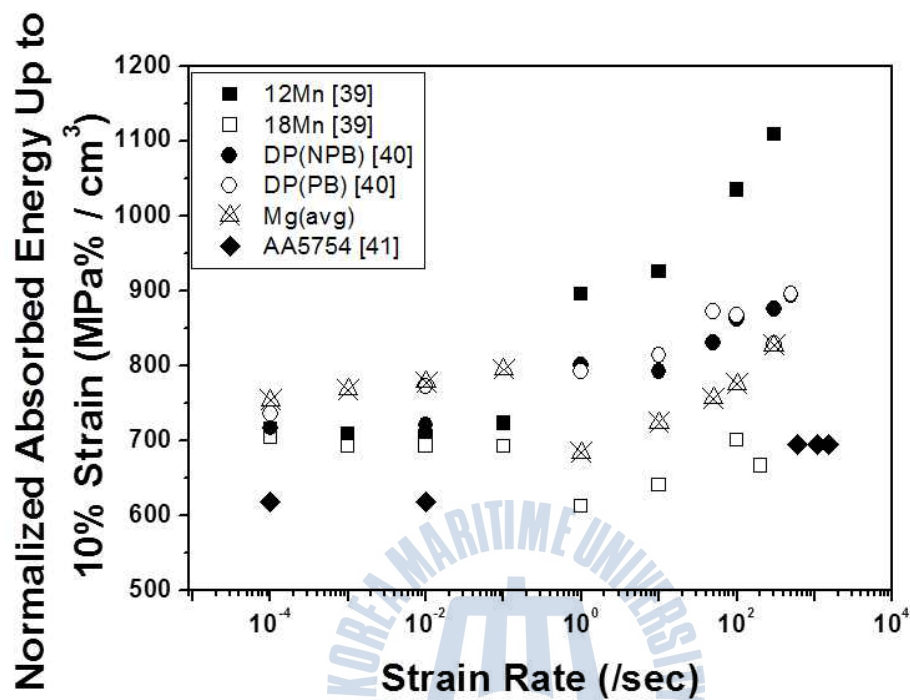


Fig. 19 The comparison of normalized absorbed energy of the automotive materials

4.4 PB 인장시험

변형 및 열처리를 고려한 PB 처리를 도입하여 시험한 결과를 이용하여 응력-변형률 곡선으로 나타내었고, 그림 20에 나타내었다. 이 데이터를 바탕으로 최대인장강도와 연신율을 평가하였다. 그림 20(a)를 보면, 결정립이 미세한 1.5mm 시편이 3mm 시편에 비해 높은 인장강도를 나타내고 있어, PB 처리 후에도 결정립 크기에 따른 강도차이는 여전히 존재하였다. 그러나 1.5mm는 감소하고 3mm는 강도가 증가하여 차이의 크기는 감소하였다. 그림 20(b)를 보면, NPB와 마찬가지로 방향에 따른 연신율의 차이는 크지 않으나, 0° 가 가장 높고, 45° 가 가장 낮은 연신율이 나타내었다. 방향에 따른 기계적 거동은 NPB와 전반적으로 유사하여 이 후의 결과는 평균값으로 나타내어 평가를 실시하였다. 그림 20(c)는 특정 두께와 방향에서 모든 변형속도를 나타낸 것으로, 변형속도가 빠를수록 강도는 증가하고 연신율은 감소하는 것을 확인할 수 있다.

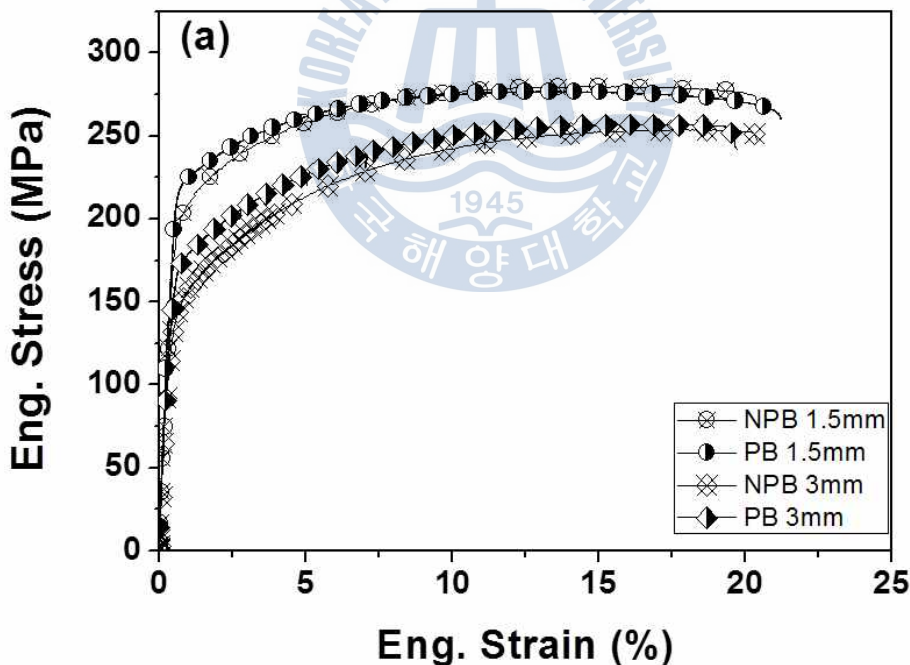


Fig. 20 Stress-strain curve according to (a)PB treatment in 90° direction at 10^{-4} s^{-1}

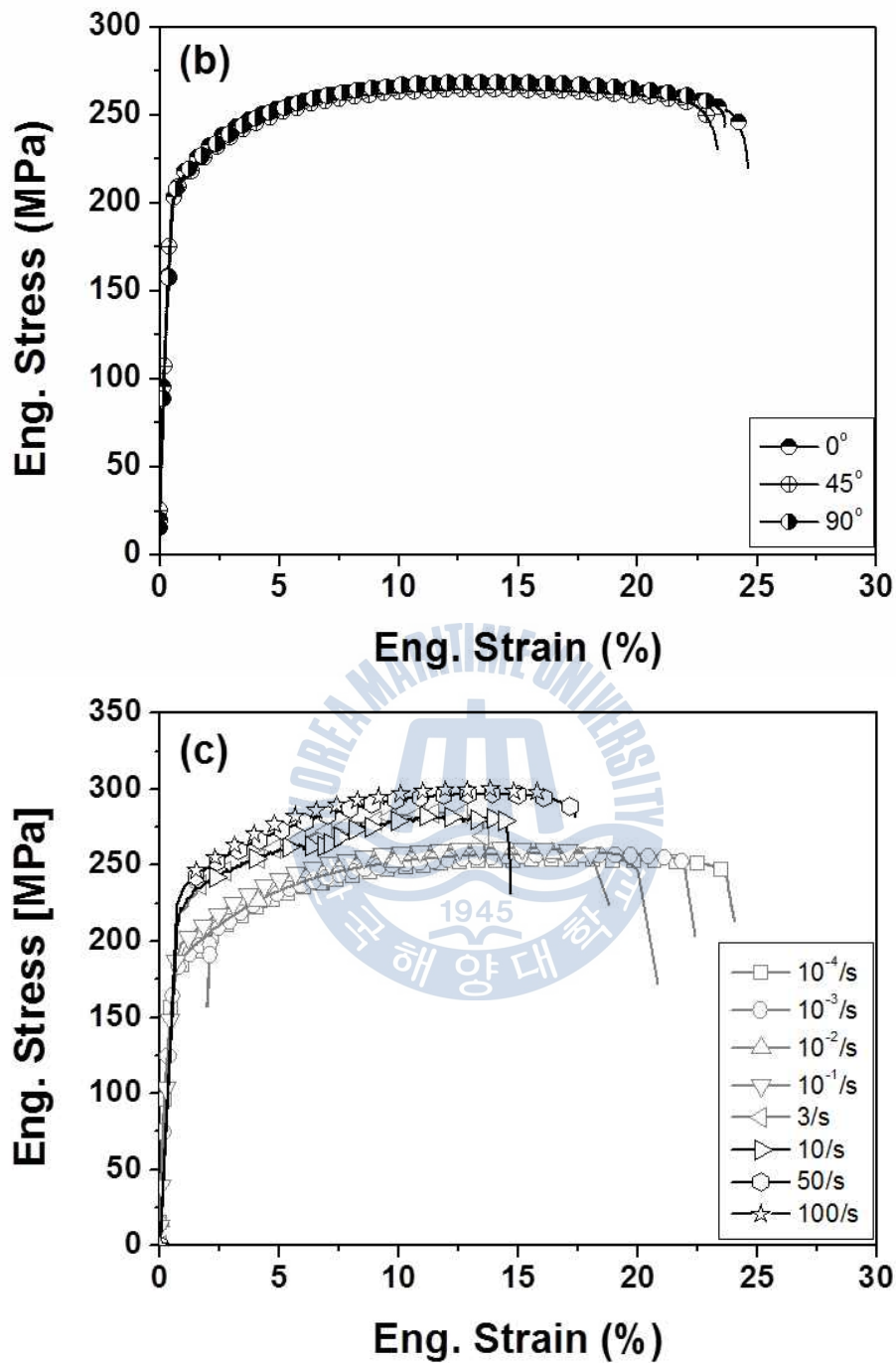


Fig. 20 Stress-strain curve according to (b) machining direction with a specimen thickness of 1.5mm at 10^{-4} s^{-1} , (c) strain rate in 45° direction and 3mm thickness

4.4.1 변형속도와 PB 처리가 인장 특성에 미치는 영향 비교

그림 21과 22는 1.5와 3mm의 시편이 변형속도와 PB처리에 따라 최대인장강도와 연신율의 변화를 모든 방향의 평균값으로 나타내었다. NPB와 마찬가지로 BP처리 후에도 변형속도가 증가할수록 인장강도가 증가하는 양의 변형속도민감도를 나타내었다. 저속구간에서는 1.5와 3mm의 거동이 차이가 나타났는데, 1.5mm는 PB가 NPB보다 낮은 인장강도를 보인 반면, 3mm는 NPB보다 PB가 높은 인장강도를 나타내었다. 그러나 고속에서는 1.5와 3mm 모두 NPB보다 높은 강도를 보였다. 이는 앞서 NPB가 급격한 강도 증가로 인해 충돌 특성이 향상될 것이라 언급한바 있다. 또한, PB처리한 1.5와 3mm 시편도 고속에서 급격한 강도 증가가 발생하여 NPB보다 더 좋은 충돌 특성을 가질 것으로 판단된다. 특히 3mm의 경우, 고속에서 NPB보다 급격한 강도 증가를 나타내므로 이러한 특성은 더욱 클 것으로 예상된다.

그림 22는 1.5와 3mm 시편의 변형속도 증가에 따라 연신율의 변화를 나타내었다. 저속에서의 연신율은 두께에 상관없이 NPB와 PB 모두 큰 차이가 유사한 연신율을 나타내었다. 그러나 고속에서는 전체적으로 NPB에 비해 연신율이 약간 상승하였음을 알 수 있다.

PB처리의 유무는 저속에서는 그 특성이 다양하게 나오나, 고속에서는 모든 두께에서 최대인장강도와 연신율이 NPB보다 우수한 성질을 나타내었다. 이는 자동차 공정을 통해 마그네슘 합금 판재가 유리한 기계적 성질을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

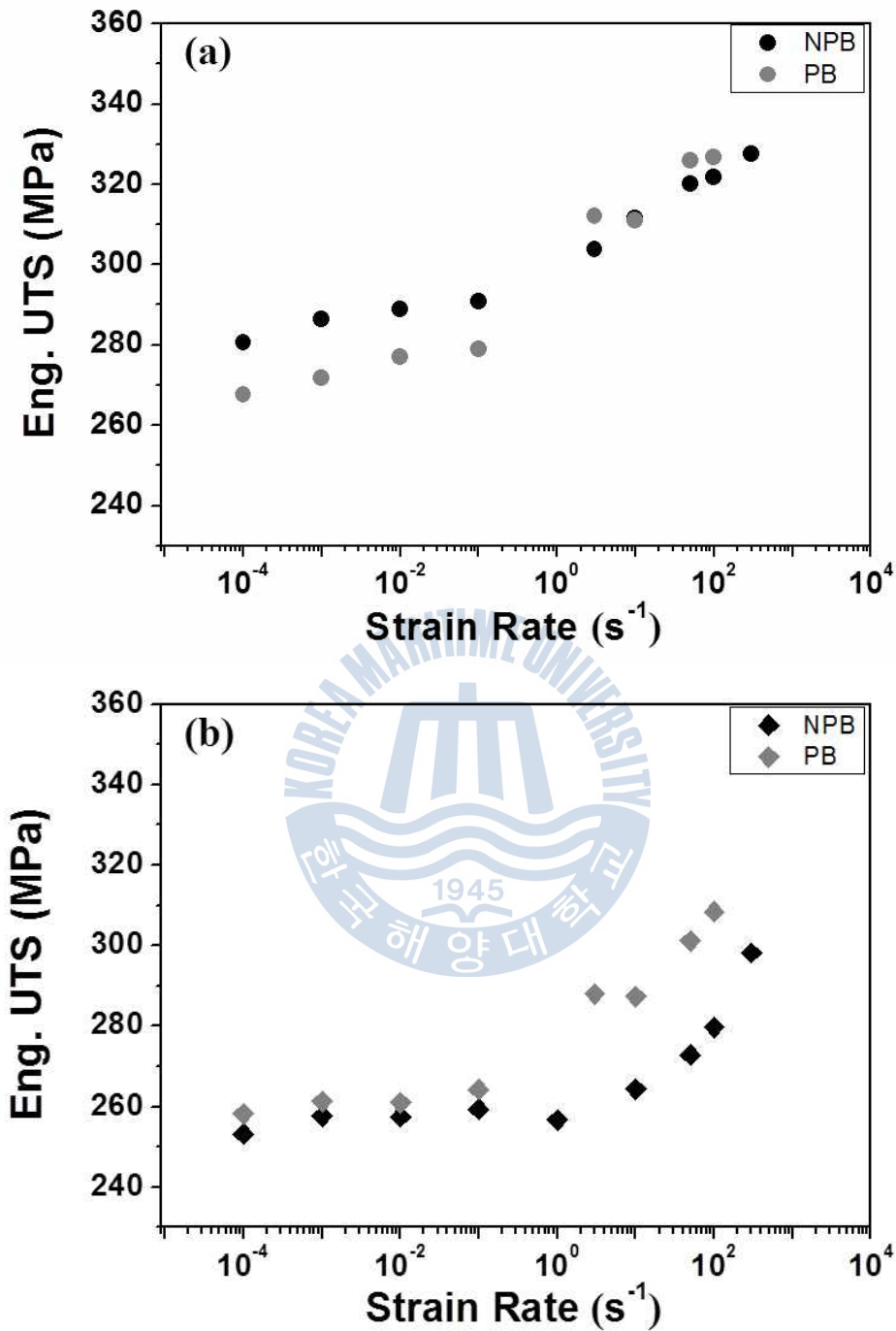


Fig. 21 The effect of PB treatment on the UTS of AZ31: (a)1.5mm, and (b)3mm

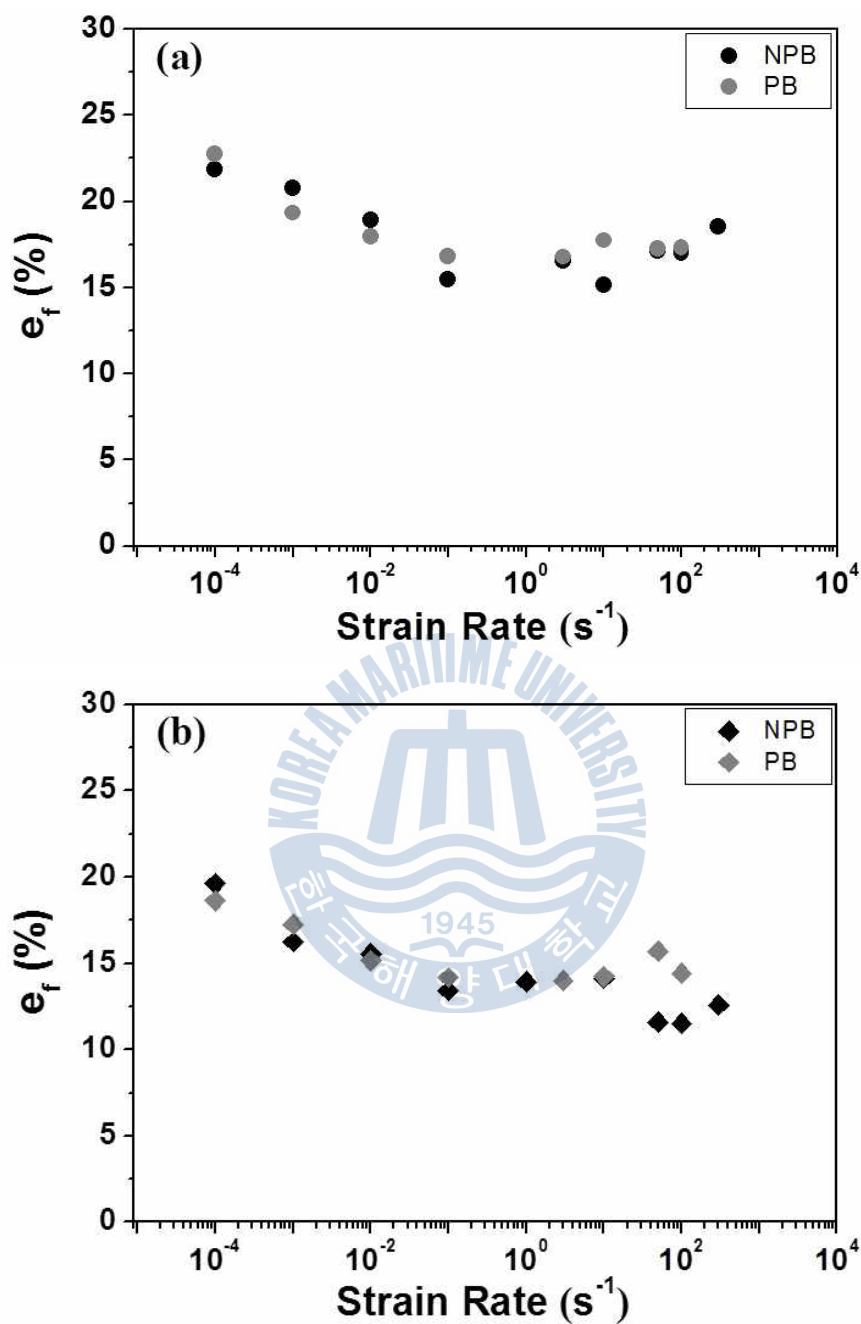


Fig. 22 The effect of PB treatment on the elongation of AZ31: (a)1.5mm, and (b)3mm

4.5 피로시험

$R=0.1$ 과 진동주파수 20Hz의 조건으로 NPB와 PB처리로 구분하여 피로시험한 결과를 그림 23과 24에 나타냈다. 피로결과는 □로 표시하였고, 피로한도는 ■로 구분하여 나타내었다. 이러한 결과를 바탕으로 피로한도선을 판단하였다. NPB 시편은 1.5mm 시편이 135 MPa로 가장 높은 피로한도를 나타내었고, 1mm 시편이 110 MPa로 가장 낮은 피로한도를 나타내었다. PB시편은 미세한 결정립과 조대한 결정립을 가진 대표 시편으로 1.5mm와 3mm의 시편을 선택하여 시험하였는데, 1.5mm는 피로한도가 120 MPa로 NPB보다 15 MPa 낮았고, 3mm는 125 MPa로 NPB와 동일하게 나타나, PB처리 전, 후의 인장강도 경향과 유사함을 알 수 있다. 이러한 경향을 분석하고자 FE-SEM을 이용하여 파면을 관찰하였고 이를 그림 25와 26에 나타내었다. 그림 25를 보면, 왼쪽과 오른쪽의 파면이 다를 수 있으나, 초기 균열에 의해 진행되는 방향을 파악할 수 있는 비치마크(beach mark)나 조개 껍질 모양(clam shell mark)이 나타나지 않아 일반적인 피로파괴거동을 확인할 수 없었다. 하지만 그림 25의 오른쪽 파면형태에서 균열 개시점으로 판단되는 부분이 발견되어 그림 26에 화살표로 나타내었다.

피로는 표면 거칠기에 민감하므로 상대적으로 단면적이 넓을수록 피로한도에 약한 특성을 나타낼 것으로 판단되나, 본 연구의 결과는 단면적이 좁은 1.5mm가 3mm보다 낮은 피로한도를 나타내고 있다. 뿐만 아니라, 인장 특성도 이러한 경향을 나타내고 있어 이에 대한 심도 깊은 연구가 필요할 필요가 있다.

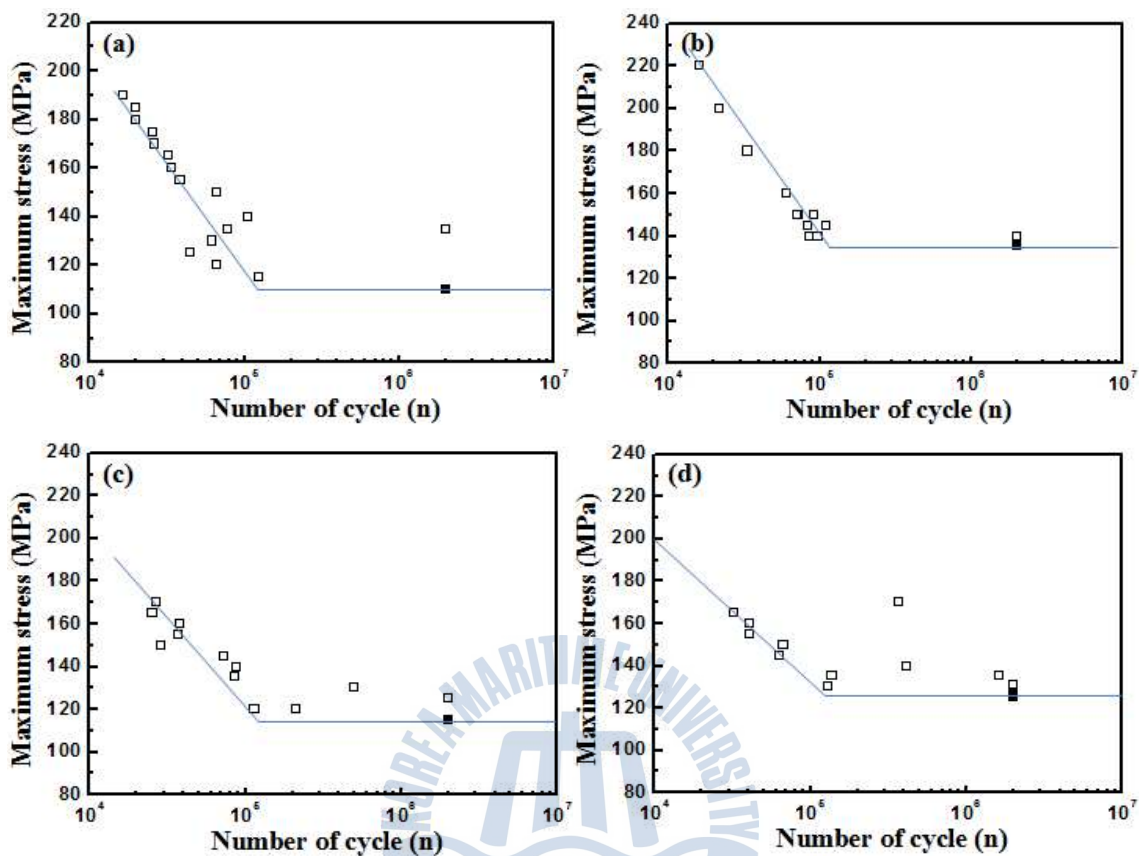


Fig. 23 S-N curve of NPB AZ31 Mg Alloy with 0° direction: (a)1mm, (b)1.5mm, (c)2mm, and (d)3mm

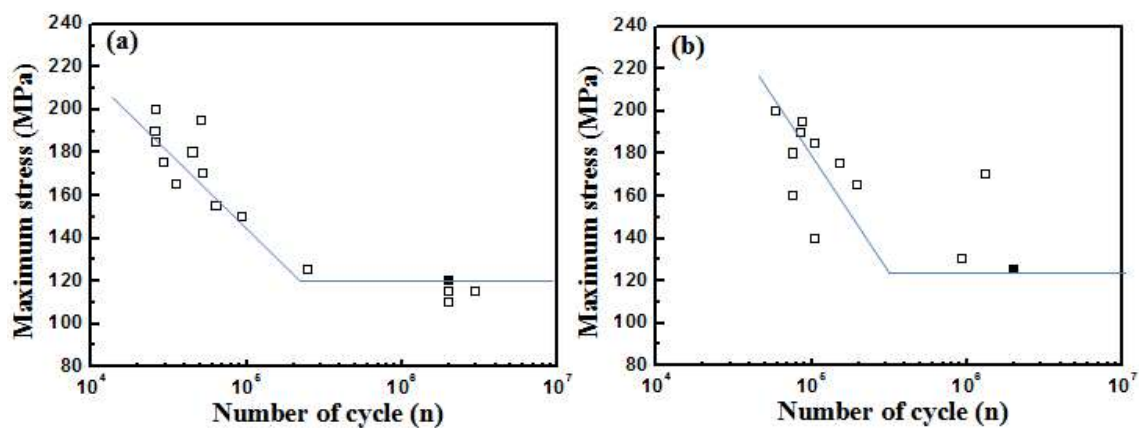


Fig. 24 S-N curve of PB AZ31 Mg Alloy with 0° direction: (a)1.5mm, and (b)3mm

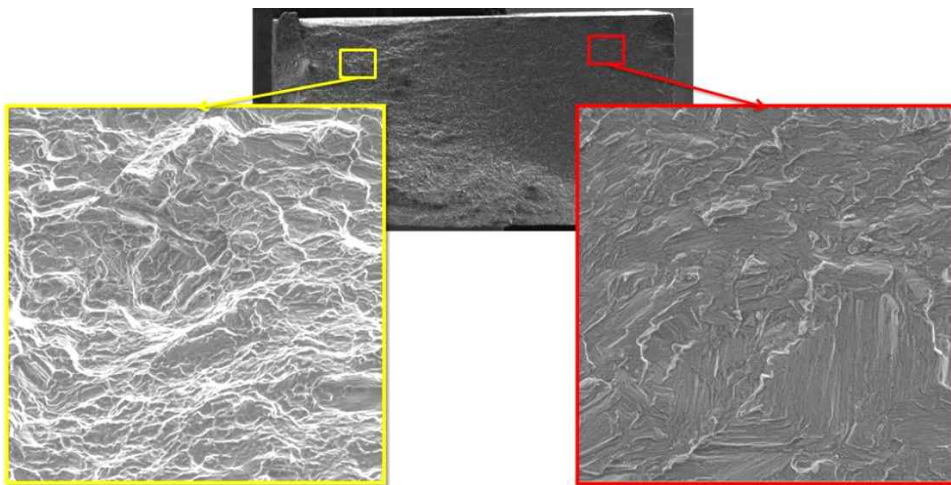


Fig. 25 FE-SEM image of fractured AZ31 Mg alloy according to fatigue test

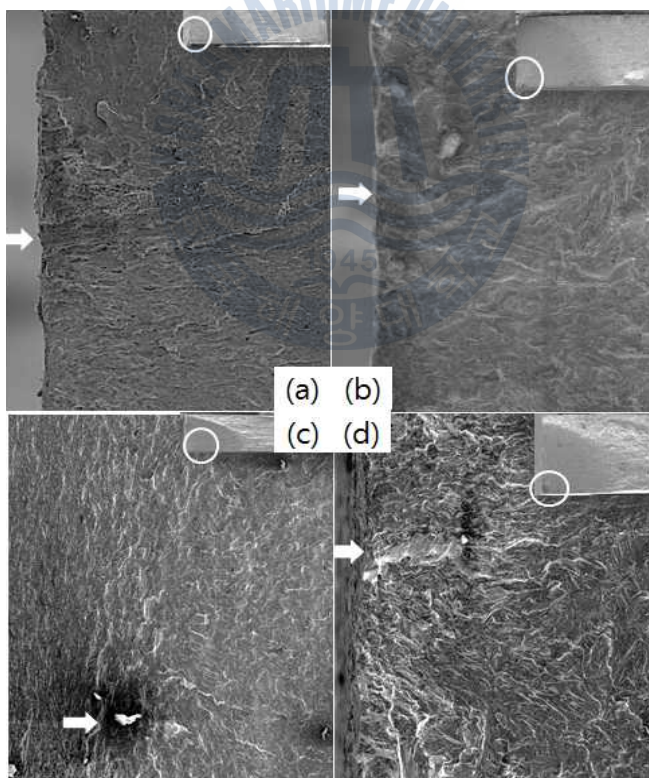


Fig. 26 Crack initiation point of AZ31 Mg alloy: (a)NPB 1.5mm, (b)NPB 3mm, (c)PB 1.5mm, and (d)PB 3mm

제 5 장 결 론

1) 판재의 두께 차이에 의한 미세조직의 차이는 뚜렷하였고, 평균 결정립의 크기는 1.5, 1, 2, 3mm의 순서로 증가하였다. 1과 1.5mm 두께의 판재에서는 비교적 균일한 결정입도를 나타내었는데 2와 3mm 두께의 판재는 조대한 결정립과 미세한 결정립이 혼합된 미세조직을 관찰할 수 있었다.

2) 마그네슘 판재의 인장 특성이 두께에 따른 미세조직의 차이에 의해 달라지는 것으로 평가되었다. 다른 판재에 비해 1.5mm 두께 판재가 강도, 연신율, 흡수에너지 등 여러 측면에서 우수한 기계적 특성을 나타내므로 실제 적용을 위한 생산에서는 결정입도 조절이 원활히 이루어져야 할 것으로 판단된다.

3) 모든 시편에서 변형속도가 증가함에 따라 강도가 증가하는 양의 변형속도민감도를 나타내어 TRIP, DP, 일반강 등 자동차 판재와 비슷한 경향을 나타내었고 고속영역에서 급격한 강도의 증가를 나타냄으로 충돌 시 특성이 향상될 것으로 판단된다.

4) 변형속도민감도는 모두 고속구간에서 저속구간보다 3 ~ 4 배 높은 값을 가져 빠른 변형속도에서 높은 강도를 가지는 것으로 나타나 마그네슘 판재의 경우에도 자동차 충돌 시 흡수에너지 측면에서 유리할 것으로 예측되었다.

5) 가공방향이 0° 와 45° 의 경우에는 90° 일 경우보다 높은 흡수에너지를 나타내고 고속구간에서 흡수에너지가 증가하여 자동차 충돌 특성에 유리하게 작용할 것으로 판단된다. 따라서 자동차용으로 적용할 때 흡수에너지를 고려하면 두께와 가공방향을 적절히 선택할 필요가 있다고 판단된다.

6) PB 처리 후, 1.5mm 시편의 경우에는 저속에서 NPB 보다 낮아졌으며, 고속에서는 NPB 보다 높아진 값을 나타내었다. 3mm 시편의 경우에는 저속과 고속구간 모두가 NPB 보다 높은 강도를 나타내었다. 연신율은 1.5와 3mm 시편이 NPB 와 비슷한 연신율을 나타내었고, 고속에서는 NPB 보다 약간 증가한 것을 확인하였다.

7) 1.5mm 시편의 경우, PB 처리 후의 피로한도가 감소하였고, 3mm 시편의 경우에는 PB 처리 후에도 NPB 와 동일한 피로한도를 나타내어 저속인장특성과 유사한 거동을 보였다. 비금속 계재물, 표면 조도 등에 의한 영향이 있을 수 있으나, 아직 확실한 데이터가 없어 좀 더 심도 있는 연구가 필요할 것으로 판단한다.

감사의 글

한국해양대학교 석사과정을 마칠 수 있도록 이끌어 주신 최일동 교수님께 감사드리며, 저의 전공을 탄탄하게 만들어주신 문경만 교수님, 이성열 교수님, 김윤해 교수님, 이병우 교수님, 김준영 교수님께 깊이 감사드립니다.

앞서 졸업한 재료강도실험실 선배님들께도 감사드리고, 저와 함께 실험실을 생활을 한 장지현, 임성상, 오훈택, 박지연, 김경원에게 고맙단 말을 전하고 싶습니다. 이번에 같이 졸업하는 지현이랑 경원이는 좋은 곳에 취업해서 서로 웃으며 졸업하길 기도합니다.

언제나 믿고 응원해주시는 우리 부모님과 우리 형들, 그리고 형수님들께도 감사의 말씀을 전하고, 삼촌이 용돈도 안 주는데 잘 따라주는 5살, 3살짜리 우리 조카님들도 고마워요.

마지막으로 이 논문을 읽으신 모든 분께 도움이 되었으면 좋겠고, 감사하다는 말씀 드리겠습니다.

참고문헌

1. N. J. Park, J. H. Hwang and J. S. Roh, 「AZ31 마그네슘 합금의 집합조직에 따른 인장특성」, J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol. 47, No. 1, pp. 1~6, KOREA(2009)
2. S. Y. Won, S. K. Oh, L. O. Osakada, J. K. Park and Y. S. Kim, 「AZ31 마그네슘 합금판재의 기계적 특성 평가(1)」, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 53~56, KOREA(2004)
3. M. G. Lee and H. J. Kim, 「AZ31B 마그네슘 합금판재의 성형특성 평가를 위한 실험적·해석적 연구」, 한국소성가공학회, Vol. 20, No. 2, KOREA(2011)
4. Y. S. Lee, M. C. Kim, Y. N. Kwon and J. H. Lee, 「Mg합금 판재 냉간 성형품의 탄성회복량 예측」, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 43~46, KOREA(2004)
5. M.R. Barnett, 「Twinning and the ductility of magnesium alloys Part 1: “Tension” twins」, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 464, No. 1~2, pp. 1~7 (2007)
6. B. H. Lee, Y. W. Kim, S. H. Park and C. S. Lee, 「AZ31 Mg 합금의 쌍정 형성에 미치는 초기 집합조직의 영향」, 한국소성가공학회지, Vol. 16, No. 6, KOREA(2007)
7. Y. Sakuma, D. K. Matlock and G. Krauss, 「Intercritically annealed and isothermally transformed 0.15 Pct C steels containing 1.2 Pct Si-1.5 Pct Mn and 4 Pct Ni: Part I. Transformation, Microstructure, and room-temperature mechanical properties」, Metall. Trans. A, Vol. 23A, p. 1221, USA(1992)

8. Y. Sakuma, D. K. Matlock and G. Krauss, 「Intercritically Annealed and Isothermally Transformed 0.15 Pct C Steels Containing 1.2 Pct Si-1.5 Pct Mn and 4 Pct Ni Part II. Effect of Testing Temperature on Stress-Strain Behavior and Deformation-Induced Austenite Transformation」, Metall. Trans. A, Vol. 23A, p. 1233, USA(1992)
9. W. C. Jeong, D. K. Matlock and G. Krauss, 「Observation of deformation and transformation behavior of retained austenite in a 0.14C-1.2Si-1.5Mn steel with ferrite-bainite-austenite structure」, Mater. Sci. & Eng., Vol. 165, p. 1, USA(1993)
10. W. C. Jeong, D. K. Matlock and G. Krauss, 「Effects of tensile-testing temperature on deformation and transformation behavior of retained austenite in a 0.14C-1.2Si-1.5Mn steel with ferrite-bainite-austenite structure」, Mater. Sci. & Eng., Vol. 165, p. 9, USA(1993)
11. N. C. Goel, J. P. Chakravarty and K. Tangri, 「The influence of starting microstructure on the retention and mechanical stability of austenite in an intercritically annealed-low alloy dual-phase steel」, Metall. Trans. A, Vol. 18A, p. 5, USA(1987)
12. I. D. Choi, D. M. Bruce, S. J. Kim, C. G. Lee, S. H. Park, D. K. Matlock and J. G. Speer, 「Deformation Behavior of Low Carbon TRIP Sheet Steels at High Strain Rates」, ISIJ Int., Vol. 42, No. 12, p.1483, JAPAN(2002)
13. 박성혁(2011:28)-금속의 집합조직 분석 방법(XRD, EBSD)
14. S. H. Kim, C. D. Yim, B. S. You, Y. M. Seo and I. S. Chung, 「열간 압연한 AZ31 마그네슘합금 판재의 미세조직 발달에 관한 연구」, 한국소성가공학회 압연심포지엄, pp. 63~71, KOREA(2004)
15. T. K. Ha, H. T. Jeong, H. J. Sung and W. J. Park, 「압연조건에 따른 AZ31 마그네슘합금판재의 변형거동 및 미세조직 변화」, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 63~66, KOREA(2006)

16. S. H. Park, S. G. Hong, W. K. Bang and C. S. Lee, 「effect of anisotropy on the low-cycle fatigue behavior of rolled AZ31 magnesium alloy」, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 527, No. 3, pp. 417~423 (2010)
17. S. H. Park, S. G. Hong, C. S. Lee and H. S. Kim, 「집합조직과 {10-12} 쌍정인 AZ31 마그네슘 합금 압연재의 저주기 피로특성에 미치는 영향」, Korean J. Met. Mater., Vol. 51, No. 5, pp. 325~332, KOREA(2013)
18. M. R. Barnett, 「Twinning and the ductility of magnesium alloys Part II. “Contraction” Twins」, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 464, No. 1~2, pp. 8~16 (2007)
19. ULSAB-AVC, Technical Transfer Dispatch #6, Appendix III, 3 (2001)
20. W. J. Kang, S. S. Cho, H. Huh and D. T. Jung, 「새로운 Tension Split Hopkinson Bar를 이용한 박판의 고속 인장시험」, 대한기계학회논문집 A, Vol. 21, No. 12, pp. 2209~2219, KOREA(1997)
21. W. J. Kang, S. S. Cho and H. Huh, 「Tension Split Hopkinson bar를 이용한 자동차 성형용 금속 박판의 고속인장 시험」, KSAE Spring Conference Proceedings, No. 2, p. 565, KOREA(1997)
22. J. H. Lim, S. B. Kim, J. S. Kim, H. Huh, J. D. Lim and S. H. Park, 「중변형을 속도에서의 차체용 강판의 고속 인장실험」, Transactions of KSAE, Vol. 13, No. 2, pp. 127~134, KOREA(2005)
23. S. H. Jeong, H. Huh, G. W. Bahng, C. G. Kim and K. S. Chae, 「자동차용 강판 동적인장물성 측정에서의 표준불확도평가」, KSAE Conference Proceedings, pp. 2496~2505, KOREA(2011).
24. J. C. Park, 「동 하중에 대한 연강 재질의 변형을 속도 민감도 특성 연구」, 대한기계학회 추계학술대회 논문집, pp. 377~382, KOREA(2004).

25. S. W. Seo, G. H. Kim and J. Y. Song, 「승용차 충돌특성 및 변형양상에 관한 실험적 연구」, KSAE Conference Proceedings, pp. 1232~1239, KOREA(2009)
26. S. K. Kang, 「트립갑의 충돌특성에 대한 충돌시험과 컴퓨터 전산모사 결과의 비교 연구」, Master Thesis, pp. 24~45, Korea Maritime University, Busan (2011)
27. J. H. Song, B. C. Hong, G. H. Kim, J. H. Song and S. W. Seo, 「대형승용차 충돌특성 및 변형양상에 관한 실험적 연구」, KSAE Conference Proceedings, No. 3, pp. 1159~1164, KOREA(2008)
28. J. S. An, G. H. Kim, H. J. Jang and B. C. Hong, 「소형승용차 충돌특성 및 변형양상에 관한 실험적 연구」, KSAE Conference Proceedings, No. 3, pp. 1307~1312, KOREA(2007)
29. H. S. Ko, M. B. Moon, C. S. Shin and H. W. Oh, 「자동차 외판용 BH강판에서 성형성과 소부경화성에 미치는 조질압연의 영향」, 한국소성가공학회 제 5회 압연심포지엄, pp. 37~44, KOREA(2004)
30. S. G. Kang, J. Y. Kim, I. D. Choi, S. B. Lee and M. H. Hong, 「자동차용 소부경화형(BH)강의 고주기 피로 특성에 미치는 미세 황화물의 영향」, Kor. J. Met. Mater., Vol. 49, No. 3, pp. 203~210, KOREA(2010)
31. Y. H. Lee, 《피로수명 평가 방법(1)》, 월간 기계기술, (주)기술정보, pp. 150~158 (2004)
32. J. H. Lee and W. J. Yang, 「자동차용 금형강의 열피로특성」, 대한재료금속학회 재료마당, Vol. 25, No. 5, KOREA(2012)
33. S. S. Yoon, M. H. Cho, W. S. Jo, J. W. Kang and W. Y. Jang, 「Mg-3%Al-1%Zn 합금의 가공열처리에 따른 미세조직 및 기계적 성질 변화」, J. of Advanced Engineering and Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 63~70, KOREA(2008)

34. P. Peura and J. Talonen, 29th FISITA World Automotive Congress, p. F02P093, Helsinki, Finland(2002)
35. I. D. Choi, D. M. Bruce, D. K. Matlock and J. G. Speer, 「The High-Speed Deformation Behavior of TRIP Steels」, Met. & Mater. Int., Vol. 14, p. 139 (2008) J. Talonen
36. I. Ulacia, C. P. Salisbury, I. Hurtado and M. J. Worswick, 「Tensile characterization and constitutive modeling of AZ31B magnesium alloy sheet over wide range of strain rates and temperatures」, JMPT, Vo. 211, p. 830 (2011)
37. I. D. Choi, D. M. Kim, D. M. Bruce, D. K. Matlock, J. G. Speer and S. H. Park, 「자동차용강의 고속변형거동에 대한 예비변형과 소부경화의 영향」, J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol. 43, p. 263 (2005)
38. J. Harding, Materials at High Strain Rates, pp. 133-146, Elsevier Applied Science, New York, USA (1987)
39. J. Y. Kim, 「저망간 트립강의 트윈형성 결정립 분율이 기계적 특성에 미치는 영향」, Master Thesis, p. 48, Korea Maritime University, Busan (2011)
40. H. J. Bang, I. D. Choi, S. K. Kang and M. B. Moon, 「복합조직강의 고속인장 결과를 이용한 컴퓨터 전산모사와 실제 충돌시험 결과와의 비교 연구」, J. Kor. Inst. Met. & Mater., Vol. 50, p. 873 (2012).
41. R. Smerd, S. Winkler, C. Salisbury, M. Worswick, D. Lioyd and M. Finn, 「High Strain Rate Tensile Testing of Automotive Aluminum Alloy Sheet」, IJIE, Vol. 32, No. 1, pp. 541~560 (2005)