

마그네슘 합금 AZ31의 온간성형과 재료특성변화에 관한 연구[§]

서창민^{*†} · 허광호^{**} · 김효민^{**} · 서민수^{***}

* 경북대학교 기계공학부, ** 경북하이브리드연구원, *** 한국에너지기술연구원

Variation of Material Characteristics of a Hot-formed AZ31 Magnesium Alloy

Chang-min Suh^{*†}, Kwang-ho Hor^{**}, Hyo-min Kim^{**} and Min-soo Suh^{***}

* School of Mechanical Engineering, Kyungpook Nat'l Univ.,

** Gyeongbuk Hybrid Technology Institute,

*** Korea Institute of Energy Research

(Received December 10, 2012 ; Revised March 31, 2013 ; Accepted April 8, 2013)

Key Words: Magnesium Alloy(마그네슘 합금), Hot-Forming(온간성형), Finite Element Analysis(유한요소해석), Fatigue Test(피로시험), Battery Pack Case(배터리 팩 케이스)

초록: 본 연구에서는 마그네슘 합금 AZ31을 적용한 배터리 팩 케이스를 개발하여 자체 진동 및 외부 충격으로부터 배터리를 보호하도록 하며, 기존 스틸 소재 대비 50% 이상 경량화하여 친환경 기술개발을 목적으로 한다. 또한, 제품의 복잡한 형상 및 마그네슘 소재의 특성으로 제품을 성형하기에는 힘든 측면이 많으므로 이를 해결하기 위해 마그네슘 합금소재의 온도별 최적성형조건을 제시하고자 한다. 즉 AZ31의 성형방법에 따라 상온, 230°C, 250°C 및 270°C의 4가지 조건하의 시험편으로 인장시험, 경도시험, 부식시험 및 피로시험 등을 실시하여 기계적 특성을 정량적으로 분석하였고, 또 FEM해석을 통하여 자동차 부품 배터리 팩 케이스 개발에 적용토록 하였다.

Abstract: Magnesium alloys are known to be hard-forming materials at room temperature owing to their material structure. This study analyzes the optimal temperature conditions of warm-forming and the forming process by using a high-pressure laminating test and FM analysis, respectively. The effect of temperature on the fatigue limit was examined from the collected specimens by analyzing the material properties after the fatigue test. The material formed at a temperature of 230°C shows occasional defects, but the best forming quality was obtained at 270°C. The optimal temperature for the forming process was found to be 250°C considering the material quality and thermal efficiency. The overall fatigue life of specimens decreases with an increase in the processing temperature. The fatigue limit of AZ31 formed at 250°C was approximately 100 MPa after 10⁶ cycles.

1. 서론

마그네슘은 실용되고 있는 구조용 금속재료 중 에서 비강도 (단위중량 강도)가 가장 크기 때문에 경량화를 목적으로 하는 구조설계용에는 적합한 재료이다.

따라서 자동차 부품에서도 CO₂ 배출 저감과

연비절감 차원에서 마그네슘의 경량성을 활용하는 용도가 증가되고 있다. 또 최근 자동차, 컴퓨터, 정보통신기기 등의 부품소재로서 그 수요가 크게 증가하고 있다.⁽¹⁻⁵⁾

본 연구에서는 마그네슘 합금을 적용한 배터리 팩 케이스를 개발하여, 배터리의 과열을 방지하고, 진동흡수력이 강한 특성을 갖도록 한다. 즉 자체 진동 및 외부 충격으로부터 배터리를 보호하도록 하며, 기존 스틸 소재 대비 50% 이상 경량화하여 친환경 기술개발을 목적으로 한다. 또한, 제품의 복잡한 형상 및 마그네슘 소재의

§ 이 논문은 대한기계학회 2012년도 추계학술대회(2012. 11. 7.-9., CECO) 발표논문임

† Corresponding Author, cmsuh@knu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

특성으로 제품을 성형하기에는 힘든 측면이 많으므로 이를 해결하기 위해 마그네슘 합금소재의 온도별 성형조건을 제시하고자 한다. 최적온도 조건으로 온간금형을 제작하여 제품 생산 후의 재료특성과 피로시험을 수행하고 가공시 성형 온도가 미치는 영향을 연구하고자 한다.

2. 마그네슘 합금의 특성

마그네슘은 비중 1.74로 알루미늄 합금의 2/3, 티타늄 합금의 1/3, 철의 1/4에 해당하며 상용 금속재료 중에서 가장 가벼운 재료이다. 따라서 제품적용시 에너지를 절감할 수 있고 진동 감쇠 능력이 뛰어나다. 금속의 소성변형능력은 결정구조가 지배적인데 순수한 마그네슘의 결정구조는 조밀육방격자(HCP, Hexagonal Close Packed)로 소성변형이 일어나는 슬립면이 한정되어 실온에서는 연성이 낮아 프레스 가공이나 압출에 의한 상온가공이 매우 어렵고,⁽¹⁻³⁾ 가공이 잘되는 Al, Cu, Fe 등은 입방정(cubic)이다. 그러나 약 200~300°C에서 온간성형하면, 저면 슬립 외에 비저면 슬립이 활성화되어 5개 이상의 슬립계가 작동할 수 있기 때문에 상온보다 고온에서 성형이 개선되는 것으로 보고되고 있다.⁽⁴⁾

마그네슘은 입방정 구조와 다른 기구로 소성변형을 일으킨다. 마그네슘의 HCP구조는 상온에서 소성변형을 시키기는 매우 어렵다. 이러한 냉간가공의 어려움 때문에 공업적으로 이용되는 마그네슘은 대부분 주물형태 또는 온간성형으로 이용된다.

알루미늄과 플라스틱의 철강에 대한 EBS(equal bending stiffness)를 계산하면 각각 0.50 및 0.65가

된다.⁽⁶⁾ 즉 Table 1과 같이 마그네슘 합금의 탄성률, 밀도는 알루미늄 합금이나 철강과 유사하지만, 부품 설계시 사용되는 지수인 EBS를 계산해보면, 알루미늄 합금이나 플라스틱에 비해 중량감소 효과가 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.⁽⁷⁾

3. 실험방법

본 연구에 사용된 실험재료는 실제 프레스 설비에 온간금형을 장착하여 제작된 배터리 팩 케이스제품에서 채취한 시편으로 온간에서 제작된 마그네슘 합금(AZ31) 제품의 성질특성 변화에 대하여 연구하였다. 즉, AZ31재의 기계적 및 화학적 특성을 얻기 위해 인장시험, 경도시험, 조직관찰, 염수분무시험, 피로시험 등을 행하여 각 온도에서 제작된 시편의 특성을 비교 검토하였다.

3.1 마그네슘 합금 온간성형 방법

본 연구에 사용된 AZ31 소재의 적용부품 개발시 최적의 성형조건을 찾기 위한 온도별 성형시험에 Fig. 1과 같은 박판성형시험기(USTM-150T, 영진기계)를 사용하였다. 이때 230 °C, 250°C 및 270°C의 3가지 온도조건에서 각 케이스별 8종의 돔 장출시편⁽⁸⁾에 대한 성형시험(Fig. 3 참조)을 수행하였으며 온도는 장비 내부 제어판에 부착된 센서를 통하여 측정하였다. 별도 열처리하는 하지 않은 상태에서, 두께 1 mm인 시편을 시험 후 FLD(Forming limit diagram, 성형 한계곡선) 도출을 위해 표면에 그리드(2.0×2.0 mm) 에칭하였다.

성형시험기는 온간시험용 금형의 펀치(Punch) 내부에 가열을 위한 가열봉(Heating core)을 내장하고 있는 형태로서 성형시험편으로의 충분한 열전도를 위해 상, 하형 금형이 닫힌 상태에서 20 초 이상 유지하였으며 최대 500°C까지 가열 가능하다. 이때 블랭크 홀더력(Blank holder force)는 100 kN으로 설정하였으며 펀치를 10 mm/min으로 돔 장출시험(Dome stretching test)을 실시하였다.

3.2 온간금형 제작 방법

온간 프레스 성형공정은 크게 소재의 가열, 프레스 성형, 성형물 밀어내기의 3단계로 나눌 수 있다. 이때 성형 중의 소재 열손실과 공정의 연속성을 고려하면 금형내에서 소재를 가열하고 바로 성형을 수행하는 것이 효과적이다. 이러한 이

Table 1 Comparison of material properties⁽⁷⁾

Materials	Alloy/grade	Density (g/cm ³)	Stiffness		Equal Bending Stiffness to Steel	
			Modulus (GPa)	Modulus/Density	Thickness Ratio	Weight Ratio (%)
Mg	AZ91/die-cast	1.81	45	24.9	1.67	0.39 (61)
	AZ80/extrusion	1.80	45	25.0	1.67	0.38 (62)
Al	A.380.0/die-cast	2.68	71	26.4	1.43	0.49 (51)
	6061-T6/extrusion	2.70	69	25.5	1.45	0.50 (50)
Fe	Steel/galvanized	7.80	210	26.9	1.00	1.00 (0)
Plastics	PC/ABS Dow 2000	1.13	2.3	2.04	0.65	0.65 (35)

유로 Fig. 1과 같이 금형내에 가열장치가 내장된 온간금형을 설계, 제작하였다. 온간금형을 서보프레스에 장착하여 온간 딥드로잉(Deep drawing)을 수행하였다. 서보프레스를 사용함으로써 소재

의 가열과 성형공정을 하나의 프레스 모션 사이클 내에서 연속적으로 수행할 수 있었다.

3.3 시험편 실험종류

3.3.1 온도별 시편 제작 방법

시험편은 배터리 팩 케이스의 평탄구간을 와이어 절단기를 이용하여 채취하였으며 피로시험편은 Fig. 2와 같은 형상으로 두께 이외에는 ASTM E647-05에 제시되어 있는 규격에 만족하도록 제작하였다. 시험편은 230°C, 250°C 및 270°C 각 온도별 온간성형으로 제작된 배터리 팩 케이스에서 각각 시편을 채취하였다. 그 화학조성은 Table 2와 같이 Al 3.29%, Zn 0.95%인 AZ31 마그네슘 합금이다. Table 3은 온간성형 전 AZ31 시험편의 기계적 성질을 시편의 압연방향(RD)에 대한 3가지 방향(0°, 45°, 90°)에 따른 결과를 정리하였다.

3.3.2 인장 및 경도시험

상온 및 고온인장시험은 ASTM A370-09a 규격에 만족하도록 실시하였다. 유압식 재료시험기(MTS 100ton, Model: LC200RB)를 이용하여 5 mm/min 부하속도로 230°C, 250 °C 및 270°C 시험편에 대하여 상온 및 고온(230°C, 250°C 및 270°C)에서 압연 각도별 0°, 45° 및 90°에 대하여 각각 3회 실시하여 그 값을 평균하였다.

경도시험은 각 시험편에 대하여 표면에서 중심으로 0.1 mm의 일정한 간격으로 각 깊이에 대해서 상온에서 3번의 경도를 측정하여 평균값을 구하였다. 이때 Micro Vickers hardness tester (Future-tech, FM 700)를 이용하였으며 압입하중 100g, 부하시간은 8초로 하였다.

3.3.3 조직관찰 및 부식시험

각 시편은 연마지로 경면연마한 후 애칭용액(알콜 70ml + 증류수 10ml + acetic acid 10ml + picric acid 4.2g)으로 부식하여 조직을 관찰하였다. 이때 깊이방향의 조직관찰은 광학현미경(LEICA, DM4000M)으로 촬영하고 평균결정입계의 크기를 측정, 분석하였다.

부식시험은 4가지 종류(상온, 230°C, 250°C 및 270°C)의 제품에서 시편을 KS D 9502 규격(70mm×150mm)으로 채취하여 상온에서 염수 5%에서 실시하였다. 이때 염수분무시험기(UAGs, SQ-1000-CA)를 사용하여 시간에 따른 시편 중량

Table 2 Chemical composition(unit; %)

Al	Zn	Si	Mn	Cu	Fe	Mg
3.29	0.95	0.04	0.31	0.003	0.01	Remain

Table 3 Mechanical properties

Temperature (°C)	Specimen	Yield strength	Tensile strength	Elongation
		MPa	MPa	%
23	0°	172.0	259.0	16
	45°	187.0	262.0	16
	90°	204.0	264.0	13
230	0°	62.5	69.6	56
	45°	61.5	68.7	52
	90°	62.4	70.8	41
250	0°	50.5	59.7	61
	45°	52.4	58.7	56
	90°	55.3	60.6	47
270	0°	42.3	44.8	56
	45°	42.4	46.1	52
	90°	42.8	46.0	54



Fig. 1 Warm molding device (back view, open state)

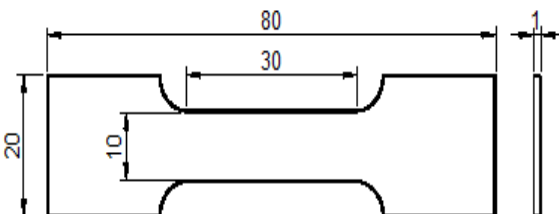


Fig. 2 Configuration of fatigue test specimen(unit : mm)

의 감소량을 측정하였다.

3.3.4 피로시험

유압식피로시험기(MTS100ton, Model:LC200RB)를 사용하여 주파수 10Hz의 하중제어피로시험을 실시하였으며, 응력파형은 정현파를 사용하였다. 4가지 종류의 시험편의 인장시험 결과에서 항복강도 기준의 95%에서 5%씩 감소시켜 상온에서 부하하였고, 각 응력레벨에서 시험이 파단 될 때의 수명을 측정하였다. 피로수명이 1×10^6 이상이 되면 파단하지 않는 무한수명으로 가정하여 피로시험을 종료하였고, 각 응력레벨에서 2회씩 실시하였으며. 하중은 편진교번하중(응력비 R=0)을 부가하였다. 1, 2차 피로시험에 대한 실험결과를 이용하여 기울기를 도출하고 피로한도를 이용하여 최종 S-N 곡선을 작성하였다.

4. 연구결과 및 고찰

4.1 온간성형시험을 이용한 평가

230°C에서 온간성형 결과, 펀치 높이가 약 32mm 부근에서 시험이 파단되었지만, 주름이 발생하거나 성형이 곤란한 경우는 없었다. Fig. 3은 일예로 250°C의 온도조건에서 각 케이스별 8종의 돔 장출시험편⁽⁸⁾에 대한 온간성형시험 결과, 펀치 높이가 약 36mm 부근에서 파단이 일어났으며, 성형높이는 230°C보다는 좀 더 높은 성형성을 나타내었다.

270°C의 온간성형 결과, 펀치 높이가 약 38mm 부근에서 파단이 일어났으며, 돔 장출 성형성

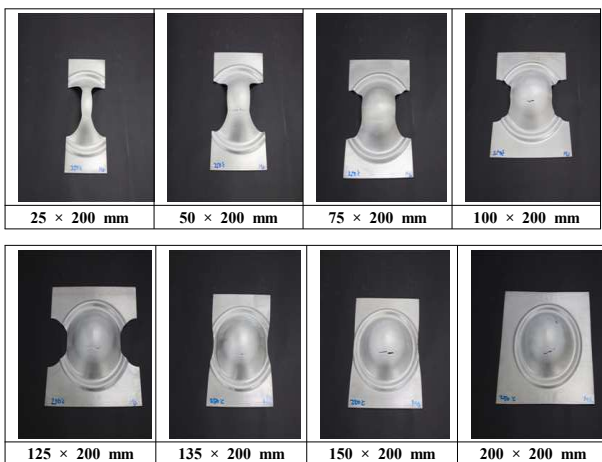


Fig. 3 Dome stretching sheet test of Mg AZ31 at 250°C

은 270°C에서 가장 좋았다. 이러한 각각 온간성형시험을 수행한 시편에서 그리드(grid) 형상분석기를 활용하여 시험 후 시험편 표면의 에칭격자의 변화를 분석하여 250°C 온도레벨에서 성형한 결과를 Fig. 4에 예시하여 나타내었다. Fig. 5는 이와같은 방법으로 3가지 온도(230°C, 250°C, 270°C)에서의 성형한계를 서로 비교 정리한 것으로 최소 스트레인(Minor strain)과 최대 스트레인(Major strain)의 안전영역이 높은 온도에서 성형할수록 점점 높아진다는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 인장특성

AZ31재의 상온인장시험에서의 하중-변형 (P- δ)선도에서 압연각도 0°의 인장강도(TS)는 259MPa, 45°는 262MPa, 90°는 264MPa로 0°보다 90°는 1.9% 증가하였으며 90°에서 인장강도가 가장 높았다.

230°C, 250°C 및 270°C에서 실시한 고온인장시험 결과는 다음과 같다. 230°C에서 0°일 때 69.6MPa에서 90°일 때 70.8 MPa 로 약 1.7% 증가하였으며, 250°C에서는 0°일 때 59.7MPa에서 90°일 때 60.6MPa 로 약 1.5% 증가하였다. 또 270°C에서의 인장강도는 0°일 때 44.8MPa에서 90°일 때 46.0MPa도 90°에서

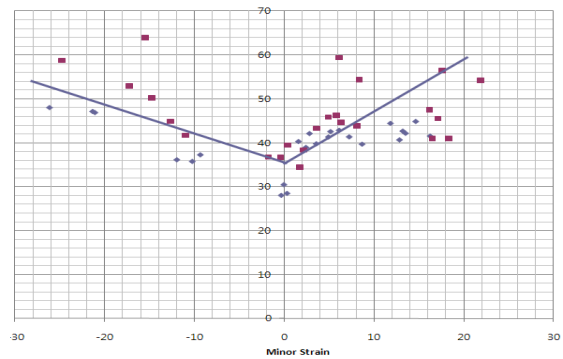


Fig. 4 Forming limit diagram of Mg AZ31 at 250°C

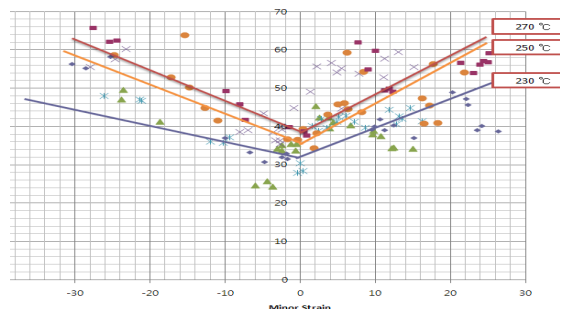


Fig. 5 Summarized forming limit diagram of Mg AZ31 at 230°C, 250°C and 270°C

로 약 2.5% 증가하여 모든 시험편에서 시편각에서 약 2% 가량 증가하여 가장 높은 것으로 나타났다.

이상과 같은 인장시험의 결과를 정리하면 상온에서 230°C로 온도가 올라감에 따라 항복강도(YS)와 인장강도(TS)는 감소하는 경향이다. 특히 270°C에서 90°의 TS는 0°에 대하여 약 82%가량 줄어들었다. 그러나 연신율(EI)은 230°C에서 상온보다 3.5배가량 증가하였으며, 연신율은 판재 압연방향 0°에서 가장 높았다.

4.3 유한요소해석을 이용한 평가

Fig. 6(a)와 Fig. 6(b)는 4.1절의 박관성형시험 결과를 토대로 한 FEM 해석결과로서 성형이 완료된 후의 유효변형률 분포를 각각 전면부와 후면부로 예시한 것이다. 이때 LS-DYNA 970/971 MPP를 사용하였으며 예로서 Fig.6은 온도 250°C에서 펀치변위는 36 mm, 1초에서 메시 크기 2 mm로 해석하였다.

Fig. 6(a)에서 최대 유효변형률은 배터리 팩의 중심부에서 가장 크게 나타났다. 이 이유는 배터리 팩의 형상 특성상 중심부분을 기준으로 양쪽 방향으로 곡률이 있기 때문에 중심을 기준으로 소재의 유동이 주로 발생한 것으로 판단된다. 또한 성형한계도에서 나타난 것으로 배터리 팩 케이스 덮개부 성형해석결과 전반적으로 형상성형에 따른 주름 발생영역이 과다하나 성형성이 무난한 편이었다 또 Fig. 6(b)의 배터리 팩 케이스 후판부 성형해석결과와 같이 모서리에서 국부적인 연신으로 인한 Neck이 발생하였다. 그 원인은 금형의 'R'이 매우 작은 것으로 추정되며 금형 T/O 과정에서 설계변경으로 해소 될 것으로 판단된다.

4.4 배터리 팩 케이스 제작

이상과 같이 AZ31재의 온도별 성형시험 및 해석 시뮬레이션의 특성 분석 후 배터리 팩 케이스를 가공하기 위해 온간 프레스성형을 실시하였다. Fig. 7(a)는 세 단계의 온도조건(230°C, 250°C 및 270°C)을 설정하여 제품을 가공하였으며 온도 230°C에서 배터리 팩 케이스의 성형은 이루어졌지만 코너부에서 열전달이 미흡하여 크랙이 발생하는 경우도 발생하였다. 250°C일 때도 성형이 이루어졌고 불량률이 거의 발생하지 않았으며, 270°C

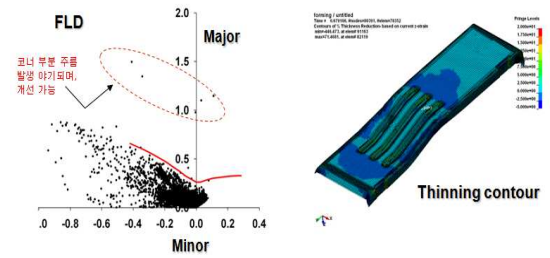


Fig. 6(a) FEM forming analysis of battery pack case (Front)

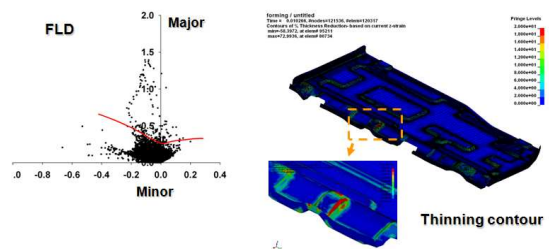


Fig. 6(b) FEM forming analysis of battery pack case (Rear)



Fig. 7(a) Parts of battery pack case Fig. 7(b) Assembly of battery pack case

일 때 성형성이 가장 좋은 것이 확인되었다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)의 배터리 팩 케이스의 각 부품의 조립품이며 조립시 형상변형 및 치수변형이 거의 나타나지 않은 예를 나타내고 있다.

4.5 결정립 크기 변화

AZ31의 온간성형 전후에 대한 결정립 크기(GS, grain size)변화를 측정 분석하였다. Fig. 8은 결정립 크기를 50 μm의 원을 현미경 사진에 그려서 측정 한 예를 나타내었으며 상온에서 GS는 10.9μm로 나타났으며 230°C, 11.2μm, 250°C, 11.5μm, 270°C, 12.1μm로 되었다. 즉 온도가 상승할수록 결정립 크기가 점차 증가함을 알 수 있었다.

4.6 경도 특성

Fig. 9는 온간성형 전후의 표면에서 깊이방향으로의 경도변화를 상온에서 측정한 결과를 나타낸 것으로 표면경도 67.6Hv에서 중심부는 58.6Hv로 약 6% 감소하였다. 230°C의 시료의 경우 표면경도 63.2Hv에서 중심부는 56.3Hv, 250°C의 경우 63.4Hv에서 56.4Hv, 270°C는 60.3Hv에서 55.4Hv로 점차 감소하였다.

이와같이 표면보다 중심부의 경도가 13.3%가량 감소하였으며 온간성형된 시험편은 상온성형 보다 약 10.8% 가량 경도가 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 경도감소는 다른 연구보고와 유사하였다.⁽⁷⁾

4.7 부식성 특성

염수 5%의 분무시험은 96, 192, 288, 384, 480

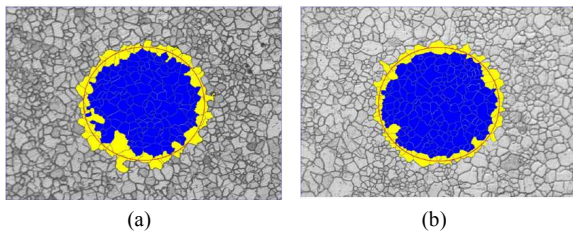


Fig. 8 Examples of the grain size measurement; (a) 10.9 μm (RT) (b) 11.5 μm (250°C)

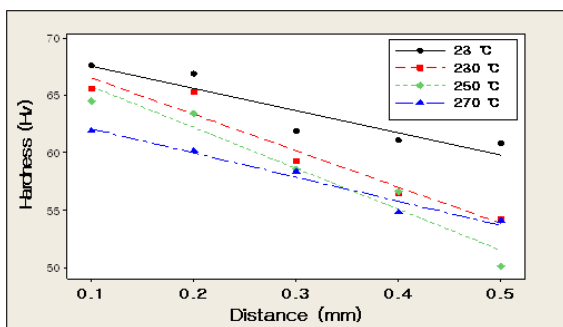


Fig. 9 Vicker's hardness decreased from surface to depth direction

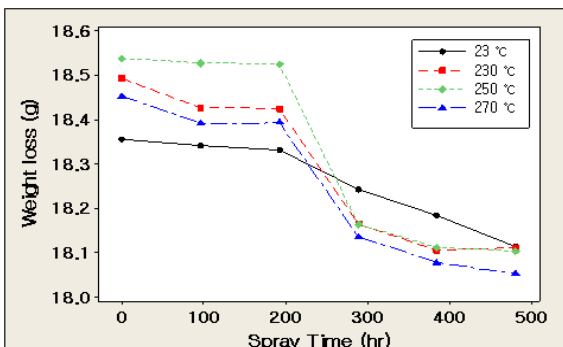


Fig. 10 Weight loss under the salt spray test

hr 간격으로 상온에서 무게 감량을 체크하였다. Fig. 11(a)의 상온에서 성형하지 않고 절단한 시편은 표면이 깨끗하였지만, 초기 18.355g (1)에서 480시간 후 18.063g로 약 1.6% 감량되면서 Fig. 11(b)의 ①과 같게 되었다. 230°C에서 성형한 시



Fig. 11(a) Test specimen before the salt spray test; (1) before forming, (2) 230°C(hot-forming, HF), (3) 250°C(HF), (4) 270°C(HF)

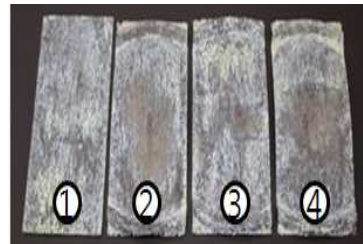


Fig. 11(b) Test specimen after 480hr at a salt spray test of Fig. 11(a)

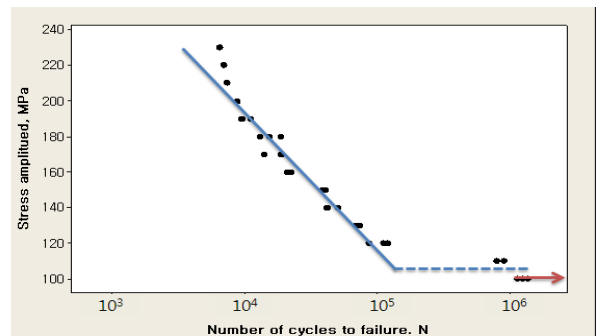


Fig. 12(a) S-N curve of hot formed specimen at 250 °C

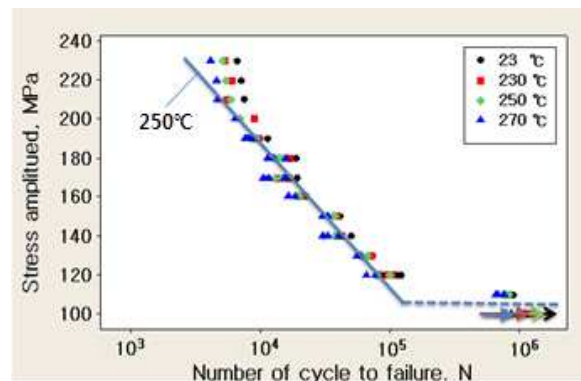


Fig. 12(b) Summarized S-N curves of AZ31 forming specimen at 23°C, 230°C, 250°C and 270 °C

편은 초기 18.492g (2)에서 18.112g ②으로 약 2.1% 감량되었다. 250°C에서 성형 제작된 시편은 초기 18.538g (3)에서 18.103g ③으로 약 2.3% 감량되었다. 또 270°C에서 제작된 성형시편은 초기 18.452g (4)에서 18.052g ④으로 약 2.2% 감량되었다. 이러한 염수 분무시험 결과(Fig. 10과 Fig. 11)에서 높은 온도에서 성형한 시편일수록 감량비가 증가하는 경향을 나타내었으며 다른 연구결과 유사하였다.⁽⁶⁾

4.8 S-N 곡선

Fig. 12는 4가지 피로시험편(상온, 230°C, 250°C 및 270°C)으로 상온에서 실시된 피로시험 결과를 정리 한 것이다. Fig. 12(a)는 250°C에서 프레스 성형한 제품에서 채취한 피로시험편은 240MPa 응력레벨에서 1,923 사이클에서 파단이 일어났으며, 본 연구에서는 10⁶ 사이클까지 파단되지 않는 경우는 피로시험을 종료하였다.

Fig. 12(b)는 본 연구에서 실시된 4가지 조건 즉 상온, 230°C, 250°C 및 270°C의 온도별 프레스 성형 제품의 피로시험결과를 동시에 나타낸 S-N곡선이다. 이 S-N곡선에서 높은 온도에서 제작된 시편일수록 피로수명이 조금씩 저하되는 것을 확인할 수 있었다. 특히 250°C에서 제작된 피로시편은 상온의 경우에 비해 140MPa 응력레벨에서 약 10%정도 피로수명이 저하되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 마그네슘 합금 AZ31의 성형방법에 따라 상온, 230°C, 250°C 및 270°C의 4가지 조건하의 시험편으로 인장시험, 경도시험, 부식시험 및 피로시험을 실시하여 기계적 특성을 정량적으로 분석하였고, 또 FEM해석을 통하여 자동차 부품 배터리 팩 케이스 개발에 적용토록 하였고, 다음 결과를 얻었다.

(1) 온간성형시 230°C에서 성형이 이루어졌고 250°C에서 가공불량이 거의 발생하지 않았으며 270°C에서 성형이 가장 좋았다. 따라서 배터리 팩 케이스 개발을 위한 최적온도는 열효율과 성형성을 고려하여 250°C가 가장 적합하다.

(2) 일반시편의 염수 부식시험결과 480시간 경과 후 약 1.6% 무게 감량되었으며, 250°C에서 제작된 배터리 팩 케이스의 채취된 시편은 약 2.3% 감량되었다.

(3) 피로시험 결과 높은 온도에서 제작된 시편일수록 피로수명이 조금씩 저하되는 경향을 나타내었다. 특히 250°C에서 제작된 피로시편은 상온의 일반

시편에 비해 10⁶ 사이클 기준수명에서 약 10% 정도 피로수명이 저하되었다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(R1A1B6001483).

참고문헌

- (1) Tokaji, K., Kamakura, M., Ishiizumi, Y. and Hasegawa, N., 2004, "Fatigue Behaviour and Fracture Mechanism of a Rolled AZ31 Magnesium Alloy," *International Journal of Fatigue*, Vol. 26, pp. 1217~1224.
- (2) Mordike, B.L. and Ebert, T., 2001, "Magnesium Properties-Application-Potential" *Materials Science & Engineering*, Vol. 302, pp. 37~45
- (3) Yin, S.M., Yang, H.J., Li, S.X., Wu, S.D. and Yang, F., 2008, "Cyclic Deformation Behavior of as-Extrude Mg-3%Al-1%Zn," *Script Material*, Vol. 58, pp. 751~754.
- (4) Choi, S.S., 2009, "Estimation of Probability Distribution Fit for Fatigue Crack Propagation Life of AZ31 Magnesium Alloy," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 33. No. 8, pp. 707~719.
- (5) Park, C.W. and Kim, H.Y., 2012, "Analysis of Tube Extrusion Process Conditions Using Mg Alloy for Automotive Parts," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 36. No. 12, pp. 1675~1682.
- (6) Chung, C.S., Chun, D.K. and Kim, H.K., 2005, "Fatigue Properties of Fine Grained Magnesium Alloys After Sever Plastic Deformation," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 19. No. 7, pp. 1441~1448.
- (7) Ishihara, S., McEvily, A. J., Sato, M., Shibath, H., Goshima, T. and Shimizu, M., 2008, "Fatigue Lives and Crack Propagation Behavior of the Extruded Magnesium Alloy Processed Under Various Extrusion Conditions," *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Vol. 2, No. 4, pp. 487~495.
- (8) Ishihara, S., Nan, Z. and Goshima, T., 2007, "Effect of Microstructure on Fatigue Behavior of AZ31 Magnesium Alloy," *Materials Science & Engineering*, Vol. 468-470, pp. 214~222.