

마그네슘합금 판재 정밀성형을 위한 판단조 공정 연구

송용현¹ · 김세종² · 이영선³ · 윤은유^{2, #}

Plate Forging Process for Near-net Shaping of Mg-alloy Sheet

Y. H. Song, S. J. Kim, Y. S. Lee, E. Y. Yoon

(Received November 10, 2020 / Revised January 27, 2021 / Accepted January 28, 2021)

Abstract

Magnesium alloys are used in electronic devices such as laptops due to their lightweight features as well as vibration absorption and electromagnetic shielding properties. However, the precision of electronics is limited by the large number of small and precise ribs, the cost-effective manufacture of which requires appropriate technology. Plate forging is an efficient manufacturing process that can address these challenges. In this study, plate forging of magnesium alloys was investigated specifically for the fabrication of laptop cover. The plate forging process with back-pressure was used for near-net shape formation. Finite element analysis was used to select appropriate variables for back-pressure formation to generate ribs of various sizes and shapes without defects. The reliability of the analysis was verified to manufacture the prototype. The effect of back-pressure can be verified via fabrication of prototypes as well as structure and forming analysis based on finite element method. The process design factor of back-pressure increases formability without defects of under-filling and flow-through. Moreover, the tensile strength was maintained even after high temperature plate forging at 370 °C, and the elongation was improved.

Keywords : Plate Forging, Press Forging, Mg Alloy, Finite Element Method, Hot forging, Back-Pressure, Near Net Shaping

1. 서 론

마그네슘 합금은 우수한 비강도(specific strength)와 100°C이하의 온도에서 장시간 노출되어도 부피의 변화가 거의 없는 치수안정성(dimension stability)으로 전자제품, 자동차, 항공 산업에 적용하기 위해 성형 기술 개발에 많은 연구가 진행중이며 대표적으로 벌크 소재(bulk material) 단조[1-2], 판재 디프 드로잉(deep drawing)[3], 이외에 판단조(plate forging & press forging)기술에 대한 연구가 진행되어 왔다[4-6].

판단조 공정은 휴대폰이나 노트북의 외장재(exterior parts)처럼 두께는 얇고 단면적이 넓은 제품에 적합한 소성가공기술이다. 하지만 외장재 부품에는 회로 기판(circuit board)을 고정시키고 제품 본체와 결속하기 위한 미세 돌기(rib)들이 많이 존재하기 때문에 리브를 포함한 정밀성형(near-net shaping, NNS)을 위해서는 높은 성형하중(forming load), 미충진(underfill) 결함 등 극복해야 할 난제가 존재한다. 본 연구에서는 성형하중을 저감하면서도 미충진 결함 과 같은 성형 결함이 발생하지 않도록 하는 성형공정을 제안하고자 하였다.

유한요소해석을 통해 제안된 배압(back-pressure)성형 기반의 판단조 공정은 실험을 통해 우수한 성형성과 특성이 입증됨으로써 전자제품 산업에 마그네슘 합금의 적용 가능성을 확인하였다.

1. 한국재료연구원 재료디지털플랫폼연구본부, 연구원
2. 한국재료연구원 재료디지털플랫폼연구본부, 선임연구원
3. 한국재료연구원 재료디지털플랫폼연구본부, 책임연구원

Corresponding Author : Korea Institute of Materials Science

E-mail: eyyoon@kims.re.kr

ORCID : 0000-0002-7863-2986

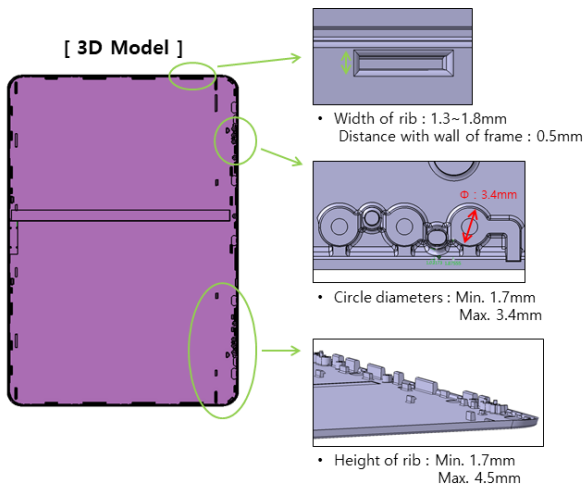


Fig. 1 Geometric example with embossment of inner surface of electronic component

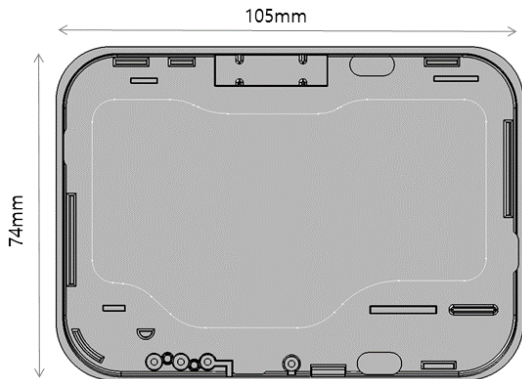


Fig. 2 Geometry of sub-size model of electronic component

한 이유로 적용이 어려울 뿐만 아니라 동종 금속선(wire)을 필요로 하는 미그 용접(Metal Inert Gas arc welding, MIG)만이 가능한 점을 고려하면 제조 비용과 기술적인 측면에서 절대적으로 효율이 떨어진다 [8-10]. 따라서 마그네슘 합금 판재의 정밀성형 판단조 기술은 돌기 형상이 포함된 박판 제품 제조에 효과적이며 이외에도 3C(Computer, Communication, Consumer Electronics) 제품과 같은 전자 부품을 제조하는데 필요한 요소기술이다.

본 연구에 사용된 실험 모델은 기존 제품(Fig. 1)의 외곽 치수 스케일을 1:3 으로 축소하고 많은 돌기들 중 주요 형상만을 선정하여 실제품 치수(actual-size)를 포함시킨 축소형(sub-size) 모델로 재설계된 형상은 Fig. 2 를 통해 확인할 수 있다. 축소형 모델의 최소 두께는 0.85mm 이며 돌기의 폭과 높이는 각각 1.3~1.8mm, 1.7~4.5mm 으로 실제품 모델과 동일하게 설계되었다.

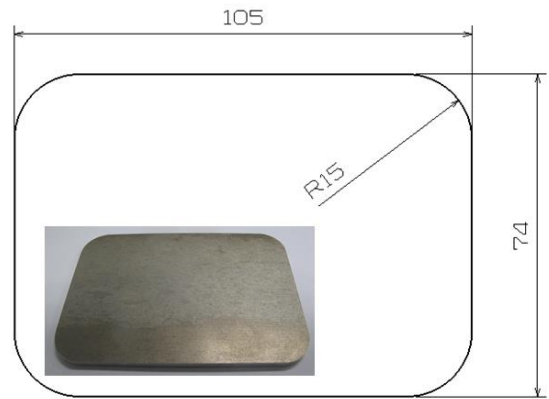


Fig. 3 Initial plate obtained through wire machining from 4.5mm AZ31B sheet

2. 마그네슘 합금 후판 판단조

2.1 연구대상 모델

본 연구대상은 휴대용 전자기기 가운데 하나인 노트북의 외장재 부품이며 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 내측 표면에 많은 미세 돌기들이 형성되어 있다. 이 같은 미세 돌기들은 플라스틱 복합재의 경우에는 가장 기본적인 에폭시 접합(epoxy bonding)[7]이나 사출(injection) 공정을 이용할 수 있고 철강 재료의 경우 용접 및 브레이징(brazing) 작업을 통해 제조할 수 있다. 하지만 마그네슘 합금에 적용 가능한 접합 기술(junction technology)들 중 마찰교반용접(friction stir welding)은 돌기의 크기가 미세하고 평면이 부족

2.2 일반 판 단조

쌍롤 박판주조공정(Twin Roll Strip Casting, TRSC)으로 제조된 마그네슘 합금 AZ31B 판재로부터 와이어 절삭(wire cutting) 과정을 통해 판단조 실험용 피가공재(workpiece)를 확보하였으며 Fig. 3에 나타내었다. 피가공재는 350°C로 가열하여 200°C로 예열된 금형에 안착 후 성형을 실시하였으며 실험에는 800톤 유압 프레스가 이용되었다. Fig. 4에는 두 케이스의 성형 결과물을 나타낸 것으로 Fig. 4(a)는 가압 하중이 380tonf일 때 하중이 부족한 이유로 미세 돌기는 물론 제품 중심부의 형상이 제대로 갖추어지지 않은 형상 결함의 결과를 보여준다. 다음으로 Fig.

4(b)는 690tonf의 하중이 부여된 성형품으로 돌기 형상은 갖추었으나 중심 평면 부위에서 휨 불량이 발생하여 목표로 하는 형상 결과물을 확보할 수 없었다. 전자제품과 같이 미세 돌기가 많이 존재하는 경우에는 이처럼 미충진이나 유동결함(flow-through)등의 결함들이 자주 발생하는 것은 이미 보고된 바 있다[2-3].

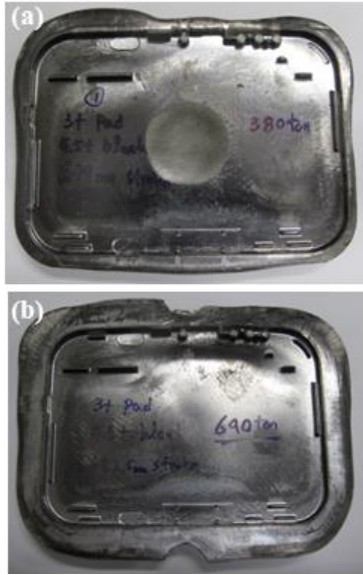


Fig. 4 Appearance of formed part on conventional plate forging; (a) applied load 380tonf, (b) applied load 690tonf

2.3 배압성형 적용 판단조 공정

Fig. 4에서 확인된 바와 같이 두께 3mm 이내의 얇은 판에서 미세한 돌기 형상들을 압력만으로 성형하기에는 성형 결함의 발생 및 높은 가압 하중을 필요로 하고 있는 것을 알 수 있다. 실험에 사용된 제품은 크기를 줄인 축소모델임에도 불구하고 최소 700tonf 이상의 하중이 필요함을 감안하면 실제 노트북의 규격에 맞춰 성형하기 위해서는 수천 톤의 하중이 필요할 뿐만 아니라 앞선 결과처럼 중앙의 휨 발생이 우려되고 있다. 따라서 본 연구에서는 결함 발생의 억제와 요구 하중을 저감하기 위해 새로운 방식의 금형 구조를 제안하였으며 Fig. 5에 다이셋의 개략도를 나타내고 있다. 제안된 다이셋은 하부 패드(pad)에 배압을 부여할 수 있으며 상/하부의 틈새로 불필요한 플래쉬의 유동을 제어하는 거터

(gutter) 형상을 고안함으로써 미충진 결함을 보완할 수 있도록 설계되었다.

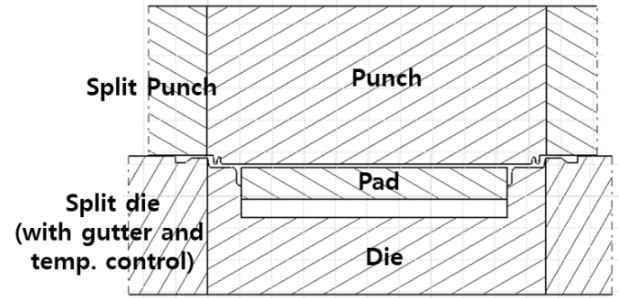


Fig. 5 Schematic of plate forging dieset with temperature cooling and gutter to suppressed slash

2.4 FEM해석을 이용한 공정 시뮬레이션

Fig. 6은 연구대상 노트북용 케이스 판단조 공정의 유한요소해석 모델을 나타내었다. 해석은 Forge NxT 상용프로그램을 이용하였으며, 피가공재에 해당하는 판재의 요소(element)는 사절점사면체(C3D4) 요소를 적용하였고 제품 돌기의 폭과 높이가 1.7~4.5mm인 점을 고려하여 0.8~1.8mm 범위의 미세 요소를 이용함으로써 총 33,356개의 요소가 해석에 이용되었다 [11-12].

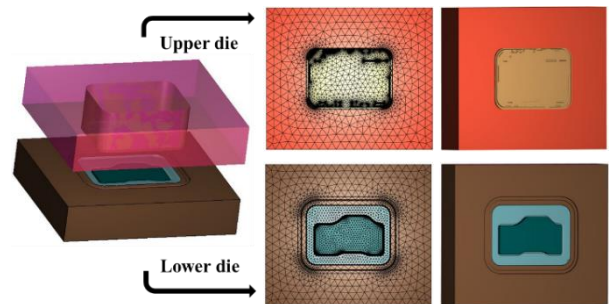


Fig. 6 FE-model of dieset assembly for plate forging of AZ31 thick sheet

피가공재의 물성은 AZ31B 판재의 인장시험을 통해 재료 상수를 분석하고 swift 경화 모델[13]로 재구성하여 입력하였으며 측정된 재료 상수는 식 (1) 에, 유동응력(flow stress)을 swift 모델로 표현하면 Fig. 7 과 같다.

$$\sigma_{swift} = K(\epsilon + \epsilon_0)^n \quad (1)$$

K : strength coefficient, (value : 43.19)

ϵ_0 : prestrain, (value : 0.00016)

n : hardening exponent, (value : 0.039)

판단조 공정해석에 사용된 조건은 Table 1에 나타내었으며 조건의 선정기준은 다음과 같다. 먼저 금형과 피가공재의 접촉 경계면에서 작용하는 마찰계수는 실험에 사용했던 흑연 분말과 기름을 혼합한 윤활 성능에 해당하는 전단마찰계수(shear friction coefficient, m) 0.3을 이용하였다[14-16]. 스크롤(scroll) 부품의 열간 배압 성형기술을 연구한 Lee[17]의 연구 결과에 따르면 배압의 크기에 따라 성형에 필요한 최대 하중 값이 결정되고 재료의 유동 방향과 속도가 결정되는 점을 고려하여 제품 바닥면의 변형이 먼저 발생하지 않는 조건에서 배압이 작용할 수 있도록 최초 50tonf의 배압 하중을 설정하였다.

Table 1 FE-simulation conditions of plate forging process with back-pressure

Analysis tool	Forge NxT 1.0
Material	AZ31B
Element size	0.8 ~ 1.8(mm)
Forming temperature	300°C
Velocity of punch	1 mm/sec
Lubricant (Friction coefficient)	Water+Graphite (m :0.3)
load of back-pressure	50tonf

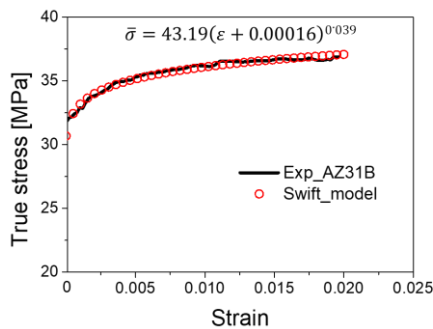


Fig. 7 Flow stress diagram of AZ31B for FE-simulation; Experiment result and Swift hardening model

해석 결과로는 Fig. 8와 같이 배압 성형을 이용한 판단조의 경우는 미세 돌기들의 건전한 성형과 중앙부 판의 평탄성이 잘 유지되는 반면에 Fig. 9에 나타난 바와 같이 배압이 없는 일반적인 판단조 공정에서는 중앙부의 휨과 결육(under filling) 결함이 발생하는 결과를 유한요소해석으로 확인할 수 있었다.

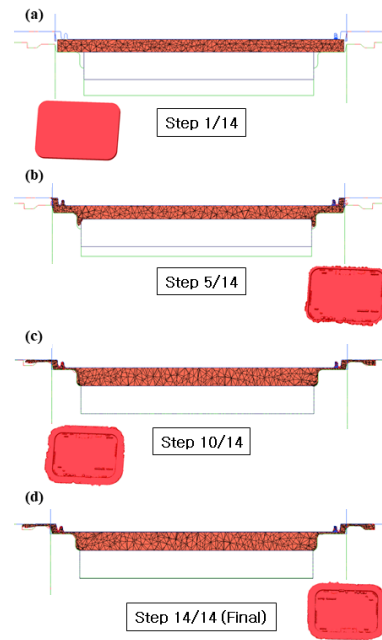


Fig. 8 Patterns of formed plate using back pressure; (a) stroke 0mm, (b) stroke 0.5mm, (c) stroke 1.1mm and (d) stroke 1.5mm

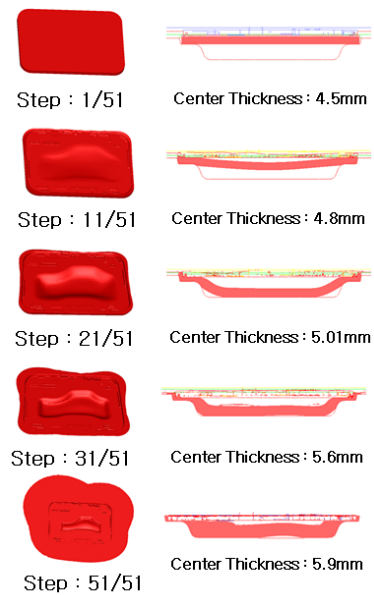


Fig. 9 Patterns of formed plate by conventional pressing without back pressure

3. 실험

3.1 sub-size 모델 실험 및 결과

수치해석 결과를 고려하여 실험용 금형셋(Fig. 10)을 설계/제조하여 제안된 판단조 공정의 검증을 수행하였으며 Table 2에 세부적인 실험 조건을 나타내고 있다. 소재는 AZ31B, AZ91, AM50 세 종류의 합금을 이용하였으며 단조 하중은 최대 700tonf까지 이용되었다. Fig 11은 각 소재의 단조 후 형상을 나타내는 사진으로 다양한 형상과 크기의 돌기들이 모두 정상적으로 성형된 결과를 확인할 수 있다. 대부분의 마그네슘 합금은 적정 성형조건(온도, 속도 등)에서 성형되지 못할 경우에 성형품의 미세조직 조대화 및 열화현상으로 물성이 저하되는 경우가 있어 [18-19] 성형품의 기계적 특성을 확인하였다.

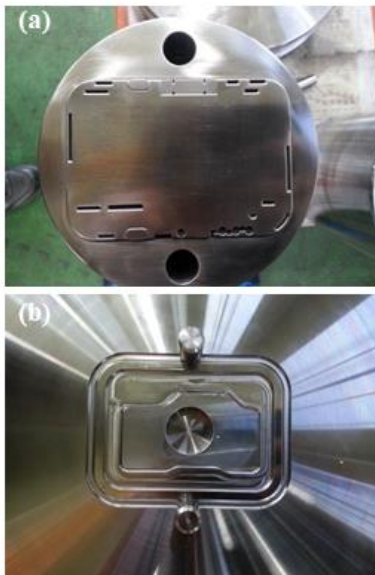


Fig. 10 Press forging toolset of sub-size model; (a) punch and (b) die

Table 2 Experimental conditions for plate forging process of sub-size model

Material	AZ31B, AM50, AZ91
Thickness of sheet	4.5mm
Forming temperature	Sheet: 300~320°C Tools: 180~250°C
Velocity of punch	1mm/sec
Lubricant	Water + Graphite

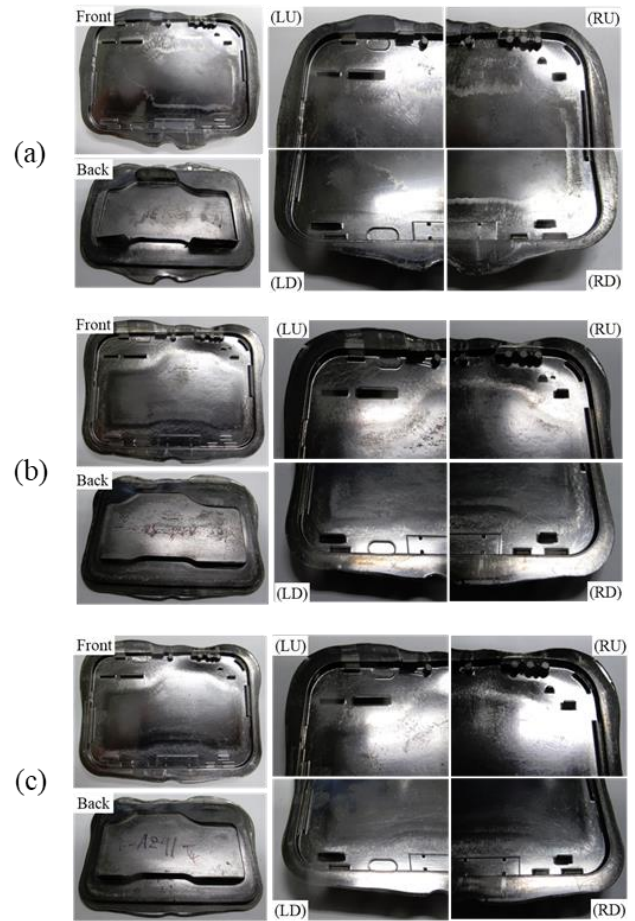


Fig. 11 Sub-size forged products of Mg alloys; (a) AZ31B, (b) AM50 and (c) AZ91

성형품의 기계적 특성을 확인하기 위해 Fig. 12와 같이 단조품의 중앙부위에서 20mm 표점거리(gauge length)의 sub-size 인장시편을 가공하여 변형률속도(strain rate) 0.1/sec의 속도로 상온 단축인장시험을 수행하였다.

Fig. 13(a)는 각 소재별(AZ31B, AM50, AZ91) 판단조 제품의 인장특성을 비교한 결과로 인장강도는 AZ91합금이 287MPa로 가장 우수하였으며 과단 연신율은 AZ31B합금이 24%로 우수한 결과를 나타내었다. 다음으로 Fig. 13(b)는 AZ31B합금의 판단조 전, 후의 인장 특성을 비교한 결과로 370°C의 온도에서 성형 후에도 초기시편의 강도 수준을 유지하며 연신율은 향상된 결과를 확인하였다. 초기 AZ31B합금과 판단조 후 AZ31B합금의 미세조직을 비교한 결과(Fig. 14) 결정립 크기는 5~30 μm (초기 조직)에서 5~25 μm (판단조 후 조직)으로 조직 균일화와 미세화가 이뤄졌으며, 이는 온간 판단조 공정 중 동적 재

결정에 의해 미세조직이 균일, 미세화된 것을 확인할 수 있었다[18-21]. 조직의 변화에 따라 항복강도는 147.5MPa에서 158.6MPa로 11MPa 가량 증가하였고 연신율은 16.3%에서 24.1%까지 8% 가량 증가되었다. 강도는 유사한 반면 연신율이 크게 증가한 원인으로서는 결정립 크기의 미세화도 발생되었으나 균일화 현상이 지배적이기 때문으로 판단된다.

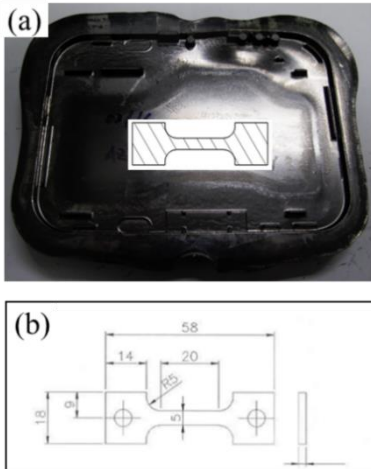


Fig. 12 Region and specimen of tensile test; (a) region of tensile test specimens from the forged product and (b) dimension of sub-size tensile specimen

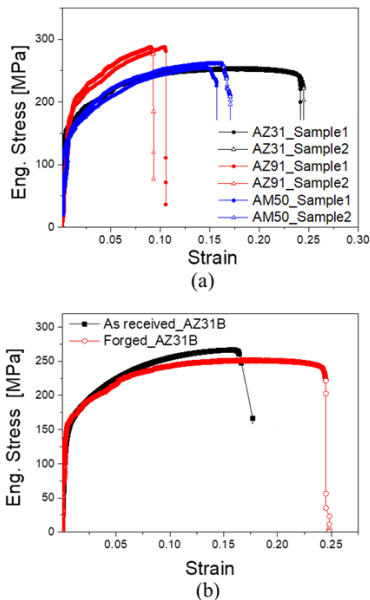


Fig. 13 Tensile stress-strain curves of (a) Mg alloys (AZ31B, AZ91, AM50) after forging process and (b) comparison tensile properties of as received and forged AZ31B

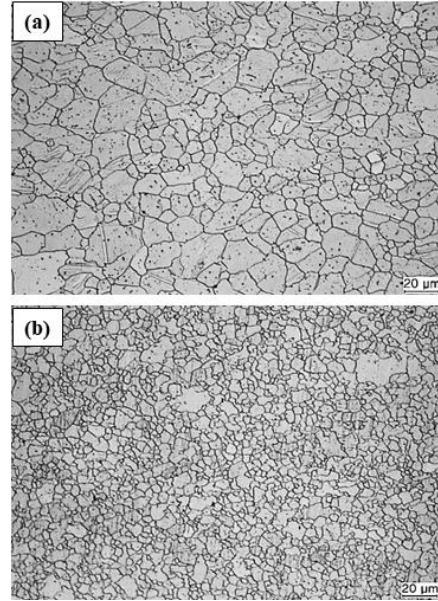


Fig. 14 Microstructure of (a) as received AZ31B sheet and (b) after forged AZ31B

4. 결론

금속소재 가운데 가장 높은 비강도를 갖고 있는 마그네슘 합금 판재의 경우 휴대용 기기로의 사용 비중이 증가되었고 향후에도 활용 가능성이 높은 만큼 휴대용 모바일 기기 제조에 적합한 성형기술 개발의 필요성은 높다. 그러나, 대부분의 휴대용 기기는 조립을 위해 제품 가장자리 부위에 미세하면서 다수의 돌기를 형성하고 있어 이를 효과적으로 성형할 수 있는 공정기술개발은 Mg합금의 적용 가능성을 확대시키기 위해 매우 적절한 요소기술이라 할 수 있으며 본 논문에서 고찰된 기술의 핵심만 정리하면 다음과 같다.

(1) Mg합금은 적절한 배압성형기술을 적용한 온간 판단조 기술을 이용하여 미세하면서도 다수의 돌기를 정형 제조할 수 있는 방법을 제시하였다.

(2) Mg합금(AZ31B, AM50, AZ91)을 이용하여 단조 후 성형품의 상온인장 시험을 통해 특성을 비교한 결과 AZ91합금이 287MPa로 가장 우수하였고, 연신율은 AZ31B합금이 24%로 가장 우수하였다.

(3) Mg합금(AZ31B)에 대한 상온인장 시험을 통해 원소재와 단조 후 성형품의 특성을 비교해본 결과 370℃의 온도에서 성형이 이루어졌으나, 단조 후에도 원소재와 유사한 강도를 가지며 연신율은 크게 향상된 결과를 확인할 수 있었다

후 기

본 연구는 한국재료연구원(구. 한국기계연구원 부설 재료연구소)의 주요사업(PNK7840)과 WPM 사업의 일환으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] P. Skubisz, J. Sińczak, S. Bednarek, 2006, Forgeability of Mg-Al-Zn magnesium alloys in hot and warm closed die forging, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 177, No. 1-3, pp. 210-213.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.04.091>
- [2] N. Ogawa, M. Shiomi, K. Osakada, 2002, Forming limit of magnesium alloy at elevated temperatures for precision forging, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 42, No. 5, pp. 607-614. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(01\)00149-3](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00149-3)
- [3] E. Doege, K. Dröder, 2001, Sheet metal forming of magnesium wrought alloys – formability and process technology, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 115, No. 1, pp. 14-19.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00760-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00760-9)
- [4] F. Chen, T. Huang and S. Wang, 2007, A study of flow-through phenomenon in the press forging of magnesium-alloy sheets, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 187-188, pp. 770-774.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.192>
- [5] F. Chen, T. Huang and S. Chen, 2007, Embossment formation in press forging of AZ31 magnesium-alloy sheet, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 32, No. 3-4, pp. 272-279. <https://doi.org/10.1007/s00170-005-0330-4>
- [6] S. Zhang, C. Sun and Z. Wang, 2008, Finite element simulation on press forging of magnesium alloy AZ31 sheets, *Trans. Nonferrous. Met. Soc. China.*, Vol. 18, pp. s269-s272.
[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(10\)60215-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(10)60215-4)
- [7] V. K. Stokes, 1989, Joining methods for plastics and plastic composites: An overview, *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 29, No. 19, pp. 1310-1324.
<https://doi.org/10.1002/pen.760291903>
- [8] C. G. Lee and S. J. Kim, 2003, Development and application of friction stir welding technology, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 12, No. 6, pp. 529-535.
<https://doi.org/10.5228/KSPP.2003.12.6.529>
- [9] K. Nakata, 2009, Friction stir welding of magnesium alloys, *Weld. Int.*, Vol. 23, No. 5, pp. 328-332.
<https://doi.org/10.1080/09507110802542668>
- [10] B. Rethmeier, B. Kleinpeter, H. Wohlfahrt, 2004, MIG welding of magnesium alloys metallographic aspects, *Weld. World*, Vol. 48, No. 3-4, pp. 28-33.
<https://doi.org/10.1007/BF03266424>
- [11] A. O. Cifuentes and A. Kalbag, 1992, A performance study of tetrahedral and hexahedral elements in 3-D finite element structural analysis, *Finite Elem. Anal. Des.*, Vol. 12, pp. 313-318.
[https://doi.org/10.1016/0168-874X\(92\)90040-J](https://doi.org/10.1016/0168-874X(92)90040-J)
- [12] S. E. Benzley, E. Peery, K. Merkley, B. Clark and G. Sjaardama, 1995, A comparison of all hexagonal and all tetrahedral finite element meshes for elastic and elastoplastic analysis, In proceedings, 4th international meshing roundtable, Vol. 17, pp. 179-191, Sandia National Laboratories Albuquerque, New Mexico.
- [13] H. W. Swift, 1952, Plastic instability under plane stress, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 1, No. 1, pp. 1-18.
[https://doi.org/10.1016/0022-5096\(52\)90002-1](https://doi.org/10.1016/0022-5096(52)90002-1)
- [14] A. R. Lasndown, 1994, High temperature lubrication, *Mech. Eng. Publications*, London, pp. 81-94
- [15] D. J. Kim, B. M. Kim and T. A. Dean, 2000, Study for frictional characteristics of graphite lubricants in hot•warm forging, *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 17, No. 4, pp. 29-37.
- [16] S. Hirawatari, H. Watari, S. Nishida, Y. Sato and M. Suzuki, 2017, Evaluation of friction properties of magnesium alloy during hot forging by ring compression test, In *Materials Science Forum*, Trans. Tech. Publications Ltd., Vol. 889, pp. 119-126.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.889.119>
- [17] Y. S. Lee, J. H. Lee, S. Y. Lee, Y. D. Park and W. S. Lee, 2000, Hot precision forging with a back-pressure of Al-Si alloy for scroll type compressor parts, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 9, No. 1, pp 52-58.
- [18] Y. Lee, J.-J. Kim, Y.-N. Kwon and E. Y. Yoon, 2014, Formability and grain size of AZ31 sheet in gas blow forming process, *Procedia Eng.*, Vol. 81, pp. 748-753.

- <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.071>
- [19] H. Y. Wu and F. Z. Lin, 2010, Mechanical properties and strain-hardening behavior of Mg ally AZ31B-H24 thin sheet, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 527, pp. 1194-1199. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.09.049>
- [20] H. Y. Wu, P. H. Sun and F. Z. Lin, 2011, Anisotropic and tensile flow behaviors of Mg alloy AZ31B thin sheet in H24 condition at elevated temperatures, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 527, pp. 2522-2531. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.11.082>
- [21] X. Liu, J. J. Jonas, B. W. Zhu, T. Wang and L. X. Li, 2016, Variant selection of primary extension twins in AZ31 magnesium deformed at 400°C, Mater. Sci. Eng. A, Vol. 649, pp. 461-467. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.10.020>