

연성 파괴이론에 의한 마그네슘 합금 EL-cover 부품 온간 성형 공정 설계

김상우[#], 이영선¹

Design for Warm Forming of a Mg El-cover Part Using a Ductile Fracture Criterion

S. W. Kim, Y. S. Lee

(Received March 25, 2014 / Revised April 9, 2014 / Accepted April 16, 2014)

Abstract

Recently, magnesium alloys have been widely used in the automotive, aerospace and electronics industries with the advantages of high specific strength, excellent machinability, high electrical conductivity, and high thermal conductivity. Deep drawn magnesium alloys not only meet the demands environmentally and the need for lighter products, but also can lead to remarkably improved productivity and more rapid qualification of the product. The current study reports on a failure prediction procedure using finite element modeling (FEM) and a ductile fracture criterion and applies this procedure to the design of a deep drawing process. Critical damage values were determined from a series of uniaxial tensile tests and FEM simulations. They were then expressed as a function of strain rate and temperature. Based on the plastic deformation histories obtained from the FEM analyses of the warm drawing process and the critical damage value curves, the initiation time and location of fracture were predicted. The proposed method was applied to the process design for fabrication of a Mg automotive compressor case and verified with experimental results. The final results indicate that a Mg case part 39% lighter than an Al die casting part can be produced without any defects.

Key Words : Electronic Compressor, Magnesium, AZ31, FEM, Ductile Fracture, Deep Drawing

1. 서 론

최근 화석연료 사용으로 인한 지구온난화 규제에 대응하고, 연비향상을 위해 EV/PHEV/HEV/FCV 등 친환경 자동차에 대한 기술개발이 활발하게 이루어지고 있다. 이와 함께 기존의 내연기관 자동차에 적용되어 왔던 엔진 냉각수의 잠열을 이용한 난방시스템 및 구동엔진의 회전력을 활용한 벨트구동방식의 난방시스템은 독립적인 전기에너지에 의해 구동되는 방식으로 패러다임이 전환되고 있다. 공조시스

템을 위한 추가적인 전기에너지의 사용은 연비효율을 저하시킴으로써, 친환경 에너지원을 이용하는 자동차의 연비를 저해하는 주된 요인이다. 따라서, 공조시스템의 고효율화와 구성부품의 경량화는 전기소모량의 최소화를 통해 그린 수송시스템의 연비향상과 상용화 시기를 앞당길 수 있는 핵심기술이다.

한편, 마그네슘은 경량성, 우수한 절삭성, 전자파 차폐성 등 다양한 이점으로 인해 산업적 수요가 증가하고 있는 금속소재로 내부결합에 취약한 주조공정에 의한 제품생산기술에서 한발 나아가 판재성형,

1. 한국기계연구원 부설 재료연구소
Corresponding Author : Materials Deformation Division, Korea
Institute of Materials Science, E-mail: kimsw@kims.re.kr

단조, 압출 등 소성가공기술을 통해 고품질의 부품을 연속생산하기 위한 기술개발이 활발히 진행 중이다[1~3]. 현재 자동차, 항공기 등 수송시스템의 경량화를 위한 내·외장재 및 전자제품의 외장부품에 마그네슘 합금을 적용 하기 위한 연구개발이 국내·외에서 활발하게 진행되고 있으나, 자동차용 공조시스템의 경량화를 위한 부품 개발 사례는 전무하다.

본 연구에서는 현재 알루미늄 합금의 주조공정으로 제조되고 있는 전동식 스크롤 압축기의 케이스 부품인 EL-cover 부품을 마그네슘 합금 판재성형기술로 대체함으로써 경량화 및 생산성을 향상시키고자 하였다. 현 주조품과 동등이상의 특성을 가지면서, 기존 시스템에 대체 적용이 가능할 수 있도록 주조품 형상을 수정하여 판재 성형이 가능하도록 재설계 하였다. 또한, 2차원 변형률 공간 내에서 표현 되어지는 기존의 성형한계도의 적용이 제한적인 3mm두께의 AZ31B합금 판재의 딥 드로잉 공정에서의 연성파괴현상을 예측하고, 공정설계에 반영하기 위해 연성파괴이론과 연계한 유한요소해석을 수행하였으며, 동일한 조건하에서의 성형 실험을 통해 결과를 비교함으로써 공정설계를 위한 파단예측방법의 적용 가능성을 검토하였다.

2. 전동 압축기용 케이스 설계

자동차용 HVAC(Heating, Ventilation, and Air Conditioning) 시스템은 Fig. 1과 같이 컨덴서, 라디에이터와 같은 열교환기와 압축기 및 제어시스템으로 구성되어 있다. EL-cover 부품은 압축기 구동을 제어하는 전자 회로판을 보호하기 위한 케이스 부품으로 현재 ADC12 알루미늄 합금의 주조공정으로 제작되고 있다. 본 연구에서는 제품의 경량화 및 생산성 향상을 목적으로 마그네슘 합금 판재성형기술로 대체하기 위하여 Fig. 2와 같이 판재 드로잉용 제품으로 설계 변경하였다. 주조품의 평균 두께를 고려하여 드로잉 제품의 두께는 3mm 이내로 설계하였으며, 플랜지(flange)를 형성시켜 본체와의 볼트조립이 가능하도록 설계하였다. 제품의 형상을 고려하여 드로잉 공정은 Fig. 2와 같이 세 단계로 분할하였다. 1 공정에서는 하부 모서리에서의 국부연신에 의한 파단을 방지하기 위하여 모서리 반경을 실제품 보다 크게 설계하여 35mm 깊이까지 드로잉을 수행하고, 2 공정에서는 제품의 치수와 동일한 모서리 반경을

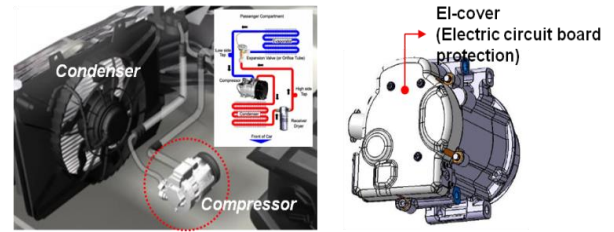


Fig. 1 Automotive HVAC system and electronic compressor case

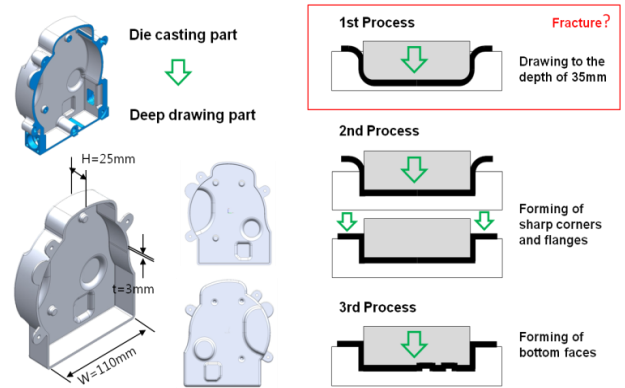


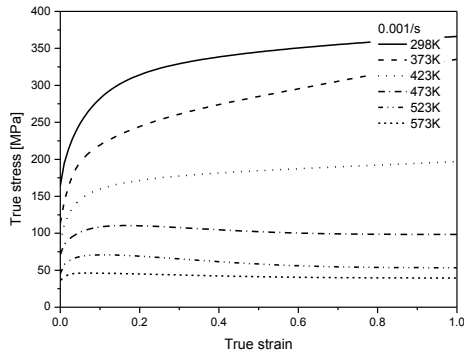
Fig. 2 Design of automotive compressor case for deep drawing

생성함과 동시에 홀더를 가압하여 직각 플랜지를 생성한다. 마지막 3공정에서는 바닥면의 돌출부 형상을 최종 성형한다. 상기 2, 3공정에 비해 1공정에서 소재의 과도한 연신에 의한 파단발생 가능성이 클 것으로 판단됨에 따라, 유한요소법과 연성파괴이론에 의한 파단예측방법을 제시하고 EL-cover부품 제조를 위한 상세 공정설계에 적용하였다.

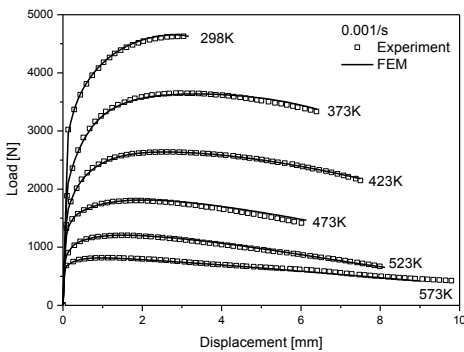
3. 파단예측 기준

3.1 AZ31합금 판재의 유동응력 측정

판재성형용 EL-cover부품에 요구되는 소재의 연신율, 강도, 두께 및 성형성을 고려하여 3mm 두께의 AZ31B(Mg-3 wt.% Al-1 wt.% Zn)합금 판재를 선정하였다. 유한요소해석의 입력 물성으로 활용하기 위한 소성유동응력을 측정하기 위하여 압연방향으로 폭 6mm, 표점거리 15mm인 고온 인장시편을 절취하고 298, 373, 423, 473, 523, 573K의 네 가지 온도범위와 0.001, 0.01, 0.1/s의 변형률 속도에서의 인장시편을 실시하였다. 일반적으로 인장시편을 통해 진응력-변형률 곡선을 측정함에 있어서 균일연신 이후에 발생



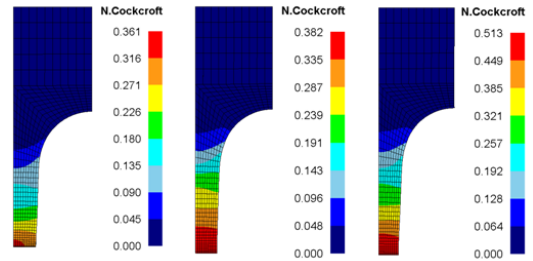
(a) True stress-strain curves



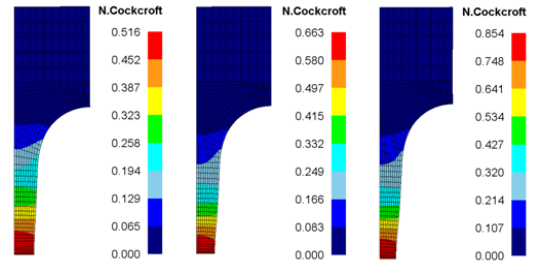
(b) Comparison of load-displacement between FEM and experiment

Fig. 3 Determination of flow stress at various temperatures by inverse correction method (0.001/s)

하는 표점거리 내에서 불균일한 변형으로 인해 균일 연신 구간에서 얻은 경화곡선을 외삽함으로써 해석에 필요한 충분한 변형구간 동안의 진응력-변형률 곡선 얻는다. 그러나, 마그네슘 합금 판재와 같이 균일연신 이후의 구간이 상대적으로 크고, 동적재결정에 의한 연화효과가 발생하는 경우, 실제 진응력-변형률 곡선과 외삽으로 구한 곡선의 오차가 심화되어 정확한 해석을 저해하는 요인이 된다. 따라서, 본 연구에서는 균일 연신 구간내에서의 진응력-변형률 곡선을 초기치로 가정하고, 인장시험을 모사한 유한요소해석을 수행한 후 실험에서 측정된 하중-변위 곡선과 해석결과가 일치할 때까지 진응력-변형률 곡선을 보정하는 방법을 이용하여 다양한 온도 및 변형률 속도에서의 진응력-변형률 곡선을 도출하였다[4]. Fig. 3는 역보정 방법을 통해 얻어진 변형률 속도 0.001/s에서의 진응력-변형률 곡선과 이를 이용하여 단축인장시험 모사해석을 통해 얻어진 하중-변



(a) 298K (b) 373K (c) 423K



(d) 473K (e) 523K (f) 573K

Fig. 4 Comparison of damage distribution at various temperatures in tensile test simulations(0.001/s)

위 곡선 및 인장실험을 비교한 결과로 해석과 실험과 잘 일치하는 경향을 보임에 따라 해석시 소재의 소성 변형거동을 잘 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 연성파괴이론 및 임계손상값 결정

소성가공과정 중 파단발생을 예측하기 위한 다양한 이론적, 실험적 근거에 의한 연성파괴기준이 제시되어 있으나, 본 연구에서는 동일한 AZ31B 판재의 등온 에릭슨 실험에서의 파단예측에 적용[5]되어 검증된 바 있는 Cockcroft-Latham[6]의 연성파괴모델이 고려되었다. Cockcroft-Latham의 연성파괴모델은 최대 인장변형 에너지밀도에 근거한 모델로 식(1)과 같이 표현된다.

$$CDV = \int \bar{\epsilon}_f \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (1)$$

여기서, $\bar{\epsilon}_f$ 는 파단시 유효변형률, σ_{max} 는 최대인장응력, $\bar{\sigma}$ 유효응력, CDV 는 임계손상값(critical damage value)이다.

식(1)의 임계손상값을 측정하기 위하여 인장시험을 모사한 유한요소해석을 수행하였다. 해석은 상용 해석코드인 Deform-3D를 사용하였으며, 사용자 부프로그래를 이용하여 식(1)의 우측 적분항을 매 시간

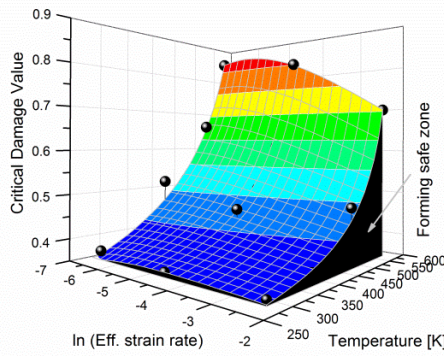


Fig. 5 Surface-fitted CDVs vs. temperature and effective strain rate

Table 1 Parameters of surface-fitted CDVs with respect to effective strain rate and temperature

A_0	A_1 [s]	B_1 [K ⁻¹]	B_2 [K ⁻²]	C_2 [s·K ⁻²]
5.27E-01	6.76E-02	1.60E-03	-3.24E-06	-2.86E-04
a_1 [s]	a_2 [s ²]	b_1 [K ⁻¹]	b_2 [K ⁻²]	c_2 [s·K ⁻²]
3.78E-02	7.48E-03	8.22E-03	-1.50E-05	-8.13E-05

를 속도에서의 최대 손상값을 임계손상값으로 가정하고, 식(2)의 Taylor rational function으로 근사하여 Fig. 5와 같이 변형률 속도 및 온도의 함수로 표현하였으며, 함수의 파라미터들은 Table 1에 나타내었다. 임계손상값은 온도가 증가함에 따라 증가하고, 변형률 속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 이는 식(1)의 임계손상값이 단축 인장변형에서는 파단 변형률과 동일하고, 균일연신 이후 3차원 응력상태로 변함에 따라 차이를 나타내게 되나, 전체적인 경향은 일반적인 금속소재에서 나타나는 파단 변형률의 온도 및 변형률 속도에 따른 특성과 유사하게 나타나는 것으로 판단된다.

$$CDV(\dot{\epsilon}, T) = \frac{A_0 + A_1(\dot{\epsilon}) + B_1(T) + B_2(T)^2 + C_2(\dot{\epsilon} \cdot T)}{1 + a_1(\dot{\epsilon}) + b_1(T) + a_2(\dot{\epsilon})^2 + b_2(T)^2 + c_2(\dot{\epsilon} \cdot T)} \quad (2)$$

4. 유한요소해석

공정조건을 설계하기 위하여 상용유한요소해석 코드인 Deform-3D 를 이용하여 온간 드로잉 공정의 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 2의 3 단계 성형공정중 파단발생가능성이 가장 큰 1 공정에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소 모델은 편치, 다이, 홀더로 구성하였다. 두께 3mm의 블랭크는 200,000 개의 4 절점 사면체요소로 모델링하고, 강소성체로 가정하였으며, 공정 중 공기와 접촉면에서의 열전달을 고려한 열-변형해석을 수행하였다. 또한, 금형은 가열장치에 의해 일정온도가 유지된다는 가정하에 온도변화가 없는 강체로 가정하였다. Fig. 6에서와 같이 해석이 진행되는 동안 매 시간증분마다 사용자 부프로그램에 의해 모든 요소에 대해 식(1)의 우측 적분항이 계산되고, 각 요소에서의 변형률 속도 및 온도에 따라 식(2)의 임계손상값이 결정되어 식(3)에 의해 I 값이 결정된다. 이때, I = 1.0 을 만족할 경우, 파단이 발생할 것으로 예측된다.

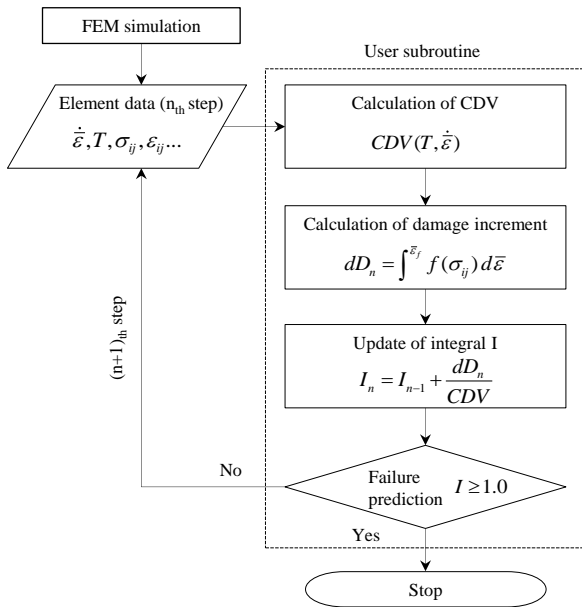


Fig. 6 Numerical procedure for failure prediction

증분마다 계산하였다. 인장실험시 측정된 상부 그림의 파단변위까지 인장해석을 수행하였으며, 그 결과 Fig. 4에서와 같이 시편중앙부의 네킹 발생 지점에서 최대 손상값이 나타남으로써 파단발생 가능성을 예측하였다.

유한요소법에 의해 계산되어진 각 온도 및 변형

$$I = \frac{1}{CDV(\dot{\epsilon}, T)} \int_{\bar{\epsilon}_j} \frac{\sigma_{max}}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} \quad (3)$$

마그네슘은 조밀육방격자(HCP, hexagonal closed packed) 구조로 상온에서는 소성변형이 일어나는 슬립면이 제한되어 있어 열악한 성형성을 보이는 반면 473K 이상의 온도에서는 저면 슬립외에 비저면

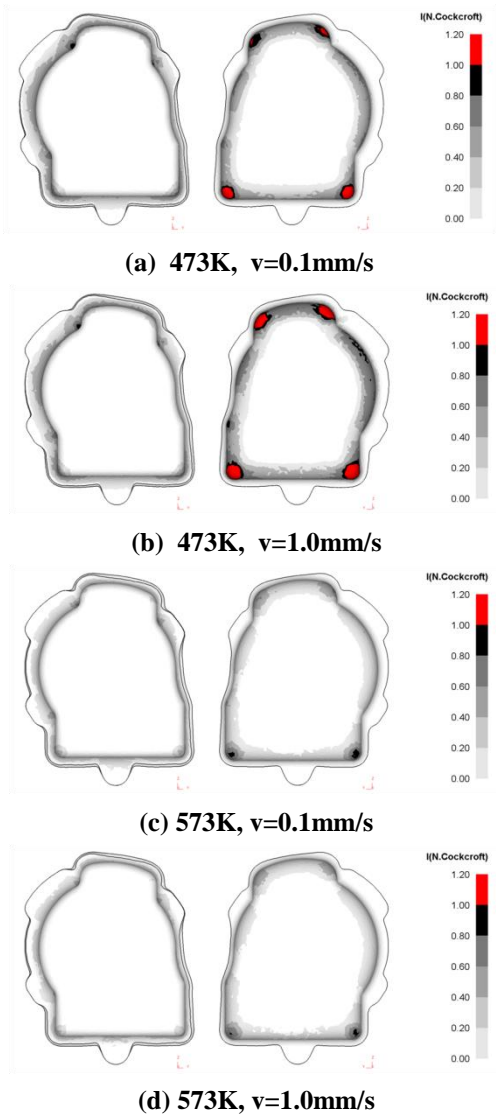


Fig. 7 Distributions of *I*-value

슬립이 활성화되어 성형성이 개선되므로, 본 연구에서는 473, 573K 두 온도범위와 0.1, 1.0mm/s의 펀치속도에 대한 해석을 수행하였다. 해석결과, Fig. 7에서와 같이 473K에서는 상·하측 모서리에서 *I*값이 1.0을 초과하는 부분이 발생함으로써 펀치속도에 관계없이 파단이 발생할 것으로 예측되었으며, 573K에서는 모든 부분에서 *I* 값이 1.0미만으로 나타남으로써 파단 발생이 없을 것으로 예측되었다.

5. 드로잉 실험

상기의 파단예측을 위한 접근방법의 타당성을 검증하기 위하여 해석과 동일한 조건에서의 드로잉

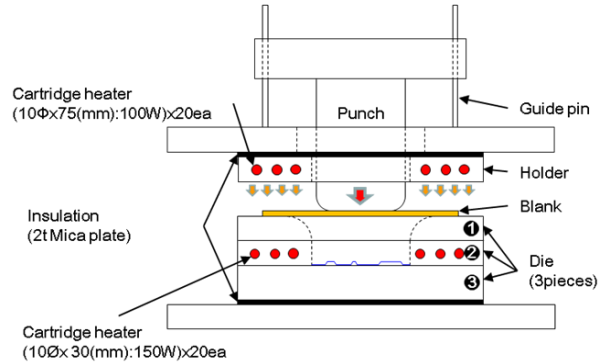


Fig. 8 Schematic illustration of deep drawing die set

실험을 수행하였다. 실험은 각각 독립적으로 제어 가능한 두 개의 100ton 용량의 유압실린더로 구성된 수직형 프레스를 이용하여, 펀치 및 블랭크 홀더의 개별제어가 가능하도록 하였으며, 드로잉용 금형의 개략적 구조는 Fig. 8에 도시하였다. 홀더와 다이는 각각 카트리지히터(cartridge heater) 및 제어장치를 이용하여 성형공정 동안 일정온도를 유지할 수 있도록 직접 가열하였으며, 펀치는 다이와 접촉한 상태에서 금속간의 열전달에 의해 간접적으로 가열될 수 있도록 하였다. 이후, 홀더는 소재와 0.1mm의 간격을 유지하도록 제어하고, 펀치는 일정속도로 소재와의 접촉지점으로부터 35mm까지 하강하였다. 실험은 해석과 동일하게 473, 573K의 두 온도범위와 0.1, 1.0mm/s의 펀치속도에 대해 수행하였다. 실험결과 Fig. 9에서와 같이 473K, 0.1mm/s에서는 외측면 상·하 모서리부에서 표면 크랙이 발생하였으며, 473K, 1.0mm/s에서는 상·하 모서리부에서 내·외측을 관통하는 크랙이 발생하였다. 반면, 573K에서는 성형속도와 무관하게 크랙 발생없이 성공적으로 드로잉 되었다. 이상의 실험결과는 앞서 수행된 유한요소해석결과와 잘 일치하는 경향을 보이고 있으나, 473K, 1.0mm/s에서 실험에서는 관통 크랙이 발생한 반면, 해석에서는 외측 코너부 크랙만 예측함으로써 실험과 상이한 결과를 보였다. 이는 본 연구에서 제시한 파단예측기법이 크랙 발생을 예측할 뿐 크랙의 진전을 고려하지 못함에 기인하는 것으로 판단된다. 상기 1공정의 해석 및 실험결과로부터 본 연구에서 제시한 변형률 속도 및 온도효과를 고려한 파단 예측방법이 AZ31B 판재의 온간 성형시 공정설계를 위한 가이드라인으로 적용하기에 매우 유용한 것으로 판단되었다. 이상의 결과를 바탕으로 2, 3공정을 수행하여 Fig. 10과 같이 마그네슘 합금 EL-cover 부

6. 결론

본 연구에서는 전동식 압축기용 마그네슘 합금 EL-cover 부품 제조를 위한 기초 연구로 유한요소법과 연계한 연성과괴이론에 의해 3mm 두께의 AZ31 마그네슘 합금 판재의 온간 드로잉 성형시 발생하는 파단현상을 예측하였다. 변형률 속도 및 온도 의존성 임계파단상수를 이용한 해석결과, 동일한 조건에서의 실험결과와 잘 일치하는 경향을 보임에 따라 마그네슘 합금의 파단발생예측을 위한 유용한 수단으로 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한, 3단계 드로잉 공정을 통해 제조된 마그네슘 합금 EL-cover 부품은 기존 ADC12 다이캐스팅 제품 대비 동등이상의 인장강도 및 연신율을 가지면서도 39% 경량화되었다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부/산업기술연구회 융합연구사업의 지원으로 수행되었음. (과제번호 B551179-11-02-0).

REFERENCES

- [1] S. W. Kim, Y. S. Lee., Y. N. Kwon, J. H. Lee, 2008, Study on Warm Incremental Formability of AZ31 Alloy Sheet, Steel Res. Int., Vol. 79, pp. 691~698.
- [2] S. Lee, Y. H. Chen, J. Y. Wang, 2002, Isothermal Sheet Formability of Magnesium Alloy AZ31 and AZ61, J. Mater. Process. Technol., Vol. 124, No. 1, pp. 19~24.
- [3] S. Yoshihara, K. I. Manabe, H. Nishimura, 2005, Effect of Blank Holder Force Control in Deep-drawing Process of Magnesium Alloy Sheet, J. Mater. Process. Technol. Vol. 170, No. 3, pp. 579~585.
- [4] J. H. Park, D. Kim, D. Y. Seok, T. Park, S. W. Kim, J. H. Kim, Y. S. Lee, K. Chung, 2012, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Korea, pp. 51~52.
- [5] S. W. Kim, Y. S. Lee, 2012, Failure Prediction of AZ31 Alloy Sheet in Warm Drawing Process by the FEM Combined with Ductile Fracture Driteria, Trans. Mater. Process., Vol.21, No.4, pp. 258~264.
- [6] M. G. Cockcroft, D. J. Latham, 1968, Ductility and The Workability of Metals, J. Inst. Metals, Vol. 96, pp. 33~39.

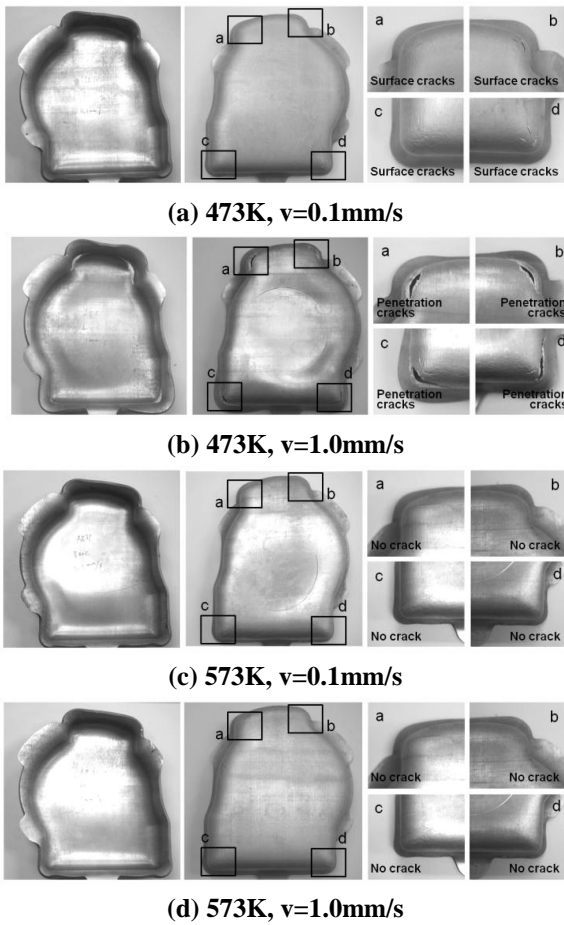


Fig. 9 Deep drawing test results

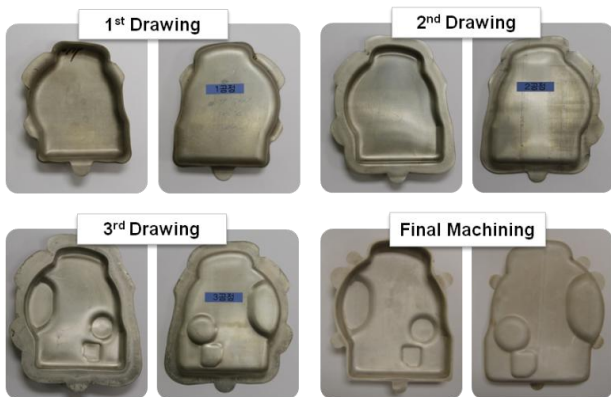


Fig.10 AZ31B EL-cover parts fabricated by warm deep drawing process

품을 성공적으로 제조하였다. 최종 기계가공을 거친 마그네슘 합금 판재성형 EL-cover 부품은 기존 AD C12 다이캐스팅 제품 대비 동등이상의 인장강도 및 연신율을 가지면서도 39% 경량화되었다.