

# 마그네슘합금의 온간 가공기술(현황)

정하국<sup>#</sup> · 최석우<sup>1</sup> · 나경환<sup>2</sup>

## Plastic Forming Technologies of Magnesium Alloys

H. G. Jeong, S. Choi, K. H. Na

### 1. 서론

마그네슘은 밀도가 약 1.7g/cm<sup>3</sup> 정도로 대표적인 경량금속인 알루미늄(밀도; 2.7g/cm<sup>3</sup>)의 2/3 정도이며 공업적으로 사용되고 있는 구조재료 중 가장 가벼운 재료이다. 마그네슘의 결정구조는 조밀육방격자구조(close packed hexagonal lattice structure; hcp)로 체심입방격자구조(body-centered cubic lattice structure; bcc)나 면심입방격자구조(face-centered cubic lattice structure; fcc)를 갖는 금속재료에 비하여 slip system 이 적기 때문에 일반적으로 상온에서의 소성가공성은 매우 나쁘다.

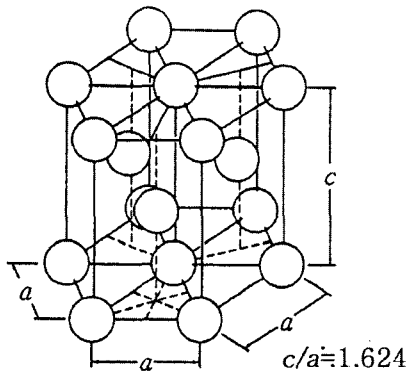


Fig. 1 Unit cell of close packed hexagonal lattice structure

Fig. 1은 마그네슘의 결정구조인 조밀육방격자구조를

Fig. 2는 조밀육방격자에서의 모든 slip system을 나타내고 있다. 조밀육방격자에서 원자가 가장 조밀하게 배열되어 있는 면은 Fig. 2(a)에서 사선으로 표시된 (0001)면이고, 이 같은 면이 조밀육방격자에는 한 종류밖에 없으며, 낮은 온도에서 마그네슘의 slip 변형은 주로 (0001) <11 $\bar{2}$ 0> 계에서 발생한다. 조밀육방격자에서 (0001)면을 basal plane이라 부르며, basal plane에 대한 임계전단응력(critical resolved shear stress: CRSS)값은 0.6~0.7MPa 정도로 매우 작다.

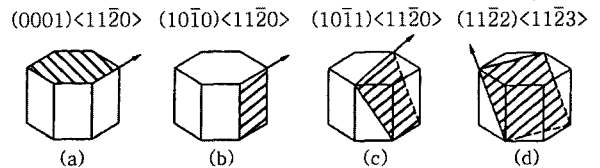


Fig. 2 Slip systems of magnesium

앞에서 말한 basal slip system(pair of basal plane and direction) 이외에는 Fig. 2(b), (c), (d)에서 나타낸 것과 같이 (10 $\bar{1}$ 0) <11 $\bar{2}$ 0>, (10 $\bar{1}$ 1) <11 $\bar{2}$ 0>, (11 $\bar{2}$ 2) <11 $\bar{2}$ 3> slip system 이 있으며, 이들을 앞의 basal plane 과 구분하여 non-basal slip system 이라 부른다. Non-basal plane slip 변형의 CRSS 값은 상온에서 40MPa 을 상회하는 높은 값을 나타내며, 따라서 상온에서는 CRSS 값이 작은 basal plane slip 만 활동하게 되어 마그네슘의 상온 가공성은 매우 나쁘나, non-basal plane slip 변형을 위한 CRSS 값이 온도에 따라 크게 낮아지는 강한 온도 의존특성을 보인다.

1. 한국생산기술연구원 생산기반기술본부

2. 한국생산기술연구원

# 교신저자 : 한국생산기술연구원 생산기반기술본부,

Email : hgjeong@kitech.re.kr

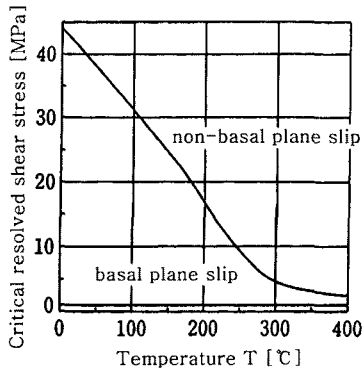


Fig. 3 Temperature dependency of critical resolved shear stress in slip systems of magnesium

Fig. 3 은 마그네슘의 basal plane, non-basal plane slip 변형에 대한 CRSS 값의 온도변화에 따른 거동을 보여주는 그래프이다[1~2]. Fig. 3 에서 알 수 있듯이 basal plane slip 변형의 CRSS 값은 온도와 관계없이 거의 일정한 값을 나타내지만 basal plane slip 변형에 대한 CRSS 값은 온도의 상승과 더불어 눈에 띄게 작아진다. 온도가 증가하면 basal plane slip 변형은 활성화되어 큰 소성변형특성을 나타내는 특징이 있고 따라서, 마그네슘은 non-basal plane slip system 이 활성화되는 250~300°C 근방의 온도에서 가공되고 있다.

## 2. 소성변형성과 합금원소의 영향

일반적으로 마그네슘합금의 기계적 특성에 영향을 미치는 대표적인 합금 첨가원소로는 I)첨가원소의 고용도와 강도 및 연성특성을 고려할 때는 알루미늄(Al), 아연(Zn), 은(Ag), 칼슘(Ca), 토륨(Th) 등을 들 수 있다. 그 중에서도 실용합금(AZ계)에서 대표적으로 사용되고 있는 Al, Zn는 미량(약 3% 내외)첨가량으로도 강도 및 연성이 극대치를 보이는 전형적인 첨가원소이다. Fig. 4는 마그네슘합금에서 Al, Zn의 첨가량에 따른 강도 및 연성변화를 보여주는 그래프이다[3~4]. 알루미늄 첨가량이 9%인 합금은 강도가 우수하여 구조용으로 사용되고, 3%인 합금은 연성이 우수하여 전신용으로 사용되며, 6%합금은 그 중간적인 특성이 요구되는 용도로 사용되고 있는 것은 잘 알려져 있다.

특히, 이들 합금 중에서 3%합금만이 압연 후 판재형상으로 가공되어 사용되고 있는 것은 이 합금조성 계에서만 응력 부식균열(stress corrosion

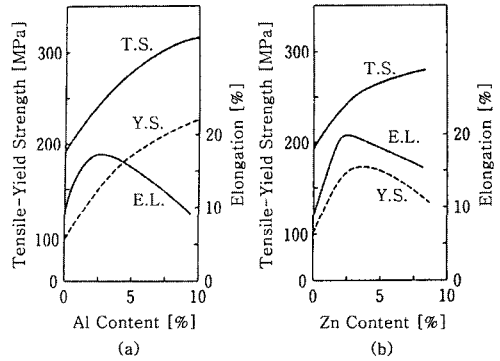


Fig. 4 The effects of alloying element on the tensile properties of AZ(Mg-Al-Zn) alloy system

cracking: SCC)이 발생하지 않기 때문이다. 따라서 6%, 9%첨가 합금을 압연 후 판재로 사용하는 경우는 먼저 압출 등의 1차 공정을 통하여 주조조직을 파괴하지 않으면 압연은 매우 곤란하다.

마그네슘합금은 II)결정립이 조대화되기 쉬운 단점이 있으며, 지르코늄(Zr)을 소량(약 1% 내외)첨가함에 따라 냉각속도에 무관하게 결정립이 조대화되는 현상을 억제할 수 있다. 그러나, 지르코늄을 첨가한 합금에는 추가로 결정립 미세화를 도와주는 첨가원소가 필요하며, 그 대표적인 원소가 아연(Zn)이며, 그 밖에도 세륨(Ce), 카드뮴(Cd), 칼슘(Ca) 등이 있다. 그와는 반대로 지르코늄과 반응하여 화합물을 만들어 지르코늄의 고용을 방해하여 용해도를 감소시키는 원소로는 알루미늄(Al), 실리콘(Si), 망간(Mn) 등이 있다[5]. 이들 원소로 구성된 상용 합금계로는 Zn 과 Zr 원소로 구성된 ZK 계가 있으며 그 함유량에 따라 ZK51, ZK61로 구분되고 있으며, 이들은 주로 구조용 및 압출가공용 합금으로 사용된다. 그 밖에도 Li와 같은 특정 원소를 첨가하여 상온 근방에서 나쁜 성형특성의 원인인 마그네슘의 조밀육방정구조를 체심입방정구조로 일부 치환하여 성형특성을 향상시킨 Mg-Li 합금계 등 다수의 합금조성이 연구되고 있으나 여러 가지 이유로 상용화까지는 아직 도달하지 못하고 있다.

## 3. 고온 변형 특성

마그네슘은 상온에서 가공성이 매우 낮으나 non-basal plane slip system 이 활성화되는 250°C 이상에서는 가공성이 크게 향상된다. 고온에서는 non-

basal plane slip 이 활발해짐과 동시에 결정립계 미끄러짐(grain boundary sliding)도 활성화되어 소성변형 특성 향상에 기여하게 된다. 그러나 고온에서도 slip system 이 많은 입방정구조(cubic structure)의 강이나 알루미늄 등에 비하면 가공성은 매우 낮은 편이다. 그 이유는 결정구조에 의하여 slip system 의 수가 제한되는 요인도 있지만 아래 정리한 내용과 같이 마그네슘 본질에 기인한 요인도 작용한다[4].

- 1) 마그네슘은 각 가공온도에 있어서 유동응력이 다른 금속보다 비교적 크다.
- 2) 적절한 가공온도가 330~380℃인데 그 범위가 비교적 좁다.
- 3) 마그네슘합금의 가공성은 합금조성, 주조 및 가공이력, 변형속도, 변형온도에 민감하다.

한 예로 일반적인 소성가공용으로 사용되는 마그네슘합금(AZ31, AZ61, ZK60)에서 변형저항에 미치는 가공속도의 영향에 관한 경우, 가공속도가 느릴 때 200~250℃부근에서 급격한 변형저항의 감소 현상이 관찰되고, 가공속도의 증가와 더불어 그러한 현상은 감소한다. 또한, 온도가 증가함에 따라 non-basal plane slip 등 속도 의존성이 큰 변형기구가 활성화되며, 그로 인하여 연성은 증가하고 변형속도 의존성도 커지는 특성이 있는 것으로 알려져 있다. 소성가공용 마그네슘합금은 열간 및 온간에서 가공되고 있지만, 가공 후 변형조직이 잔류하며, 열처리하여 재결정시키는 경우도 있고, 일부는 가공 중 재결정립(동적재결정)이 발생하는 경우도 있다. 앞에서 서술한 바와 같이 마그네슘에 있어서 성형성은 합금조성, 가공이력 등 1차 가공인자에 강하게 의존하므로 열간가공 중 혹은 가공후의 열처리 공정(일반적으로 소둔)은 매우 중요하다.

마그네슘의 동적재결정 기구는 수개의 모델이 제안되어 있고, 본 해설에서는 Fig. 5 에 나타난 Ion 등에 의해 제안된 150~330℃에서 발생하는 동적재결정 기구를 정리하여 설명한다. Fig. 5(a)는 변형 전에는 각 결정립의 basal plane 이 거의 압축축에 평행하게 배열해 있으며, 변형과 더불어 (b)쌍정(twin)의 발생에 의하여 basal plane 은 압축축에 거의 수직하게 정렬한다. 이때 (c)는 Schmid factor 는 작으나 쌍정내에서 basal plane slip 이 발생하면서 결정립계면 근방에서는 결정회전에 의해 시편의 압축변형이 진행함을 나타낸다.

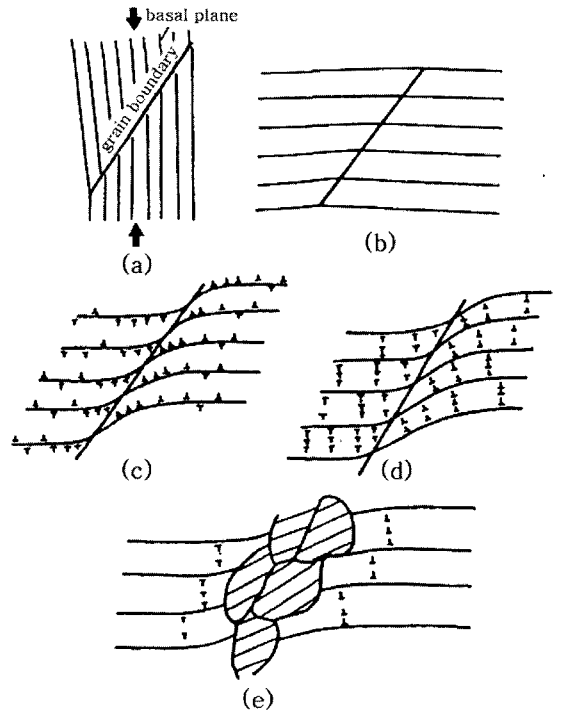


Fig. 5 Dynamic recrystallization model of magnesium (by Ion, etc.,[6])

이 모델에서는 basal slip 만이 관여한다고 가정하고 있으나 실제로는 non-basal plane slip 의 활동도 필요하다. (d)는 결정회전이 진행됨에 따라 동적회복과정에 의하여 기하학적으로 필요한 sub-grain 이 형성되며, (e)국부적으로 축적된 높은 변형 에너지를 구동력(driving force)으로 sub-boundary 의 이동이 발생하고 sub-grain 이 독립하거나 합체하여 고각결정립계가 형성된다. 즉, 방위변화가 작은 동적재결정립이 탄생한다. 위의 모델과 같이 마그네슘은 소성 변형 중 동적재결정이 발생하며, 이 과정은 조성, 집합조직, 변형온도 및 속도에 크게 의존하므로 마그네슘의 소성가공공정은 이들 인자들의 영향을 고려하여 설계되어야 한다.

#### 4. 소재제조 기술

마그네슘합금의 소성가공은 대부분 온간이나 열간에서 행하여지고 있으며, 대표적인 몇 가지 공정에 대하여 그 특징을 간단히 정리한다.

### 4.1 압연가공

마그네슘합금은 상온에서 극히 제한된 slip system 으로 인하여 압연 가능한계(압하율)가 약 10% 정도로 낮아서, 압연공정 중 균열 발생을 방지하기 위하여 반드시 온간 혹은 열간에서 수행되어지고 있다[7]. 마그네슘합금은 온도 상승과 더불어 압연율은 증가하지만 소재의 표면산화 및 합금계에 따른 고온취성, 결정립조대화 등 최종 압연판재의 특성이 악화되므로 매우 제한된 조건에서 제조된다. 압연 방식은 제품의 형태에 따라 크게 시트압연(sheet rolling)과 코일압연(coil rolling) 방식으로 구별하며, 한 장의 판재를 공급하여 한 장의 판재를 얻는 것을 시트압연, 코일형태의 소재를 압연기에 공급하여 코일형태의 제품을 얻는 것을 코일압연이라 한다. 시트압연은 박판을 간단히 제조할 때 적합한 공정이나 소재의 양 끝단을 구속하지 않으므로 상하롤의 국부적 마찰계수 차에 의하여 압연조건의 비대칭 및 압연판재가 울룩불룩하게 변하는 등 문제점이 발생하기 쉽다. 이에 반하여 코일압연은 압연 중 소재의 양 끝단을 고정하고 일정한 힘으로 장력을 가할 수 있어 평탄한 형상의 판재를 얻을 수 있어 공업적 생산 방식으로 널리 채택되고 있다. 그러나 압연 전 및 압연공정 중에 균일한 가열온도를 유지하기 위하여 필요한 가열설비가 시트압연과 비교하여 복잡하고 기술적으로도 매우 난해하다고 알려져 있다. 또한 롤의 가열방식에 따라 압연기술을 분류하면 크게 냉간 압연과 온간 압연으로 구분할 수 있다. 냉간 압연은 압연롤의 온도가 120℃이하에서 압연하는 것으로 롤의 온도가 낮아 소재가 압연 중에 소착하지 않는 특징이 있고 윤활제의 사용량도 최소화할 수 있어 표면이 미려한 얇은 판재의 제조에 제한적으로 사용되고 있다. 온간 압연은 압연롤을 300℃전후로 가열하여 압연하는 방식으로 압연 작업 시 소재의 온도 하강량이 적어 한번 가열로 많은 압하율을 얻는 조건에 적합하다. 그러나 롤 온도가 높아서 소재가 롤에 소착하기 쉽고, 대량의 윤활제를 필요로 하는 공정으로 표면결함이 발생하기 쉬운 단점을 가지고 있다. 압연이 끝난 소재는 표면의 윤활제나 결함을 제거하기 위하여 산으로 세척하거나 브러싱/밀링공정을 통하여 표면이 미려한 판재소재를 최종적으로 출하한다.

### 4.2 압출가공

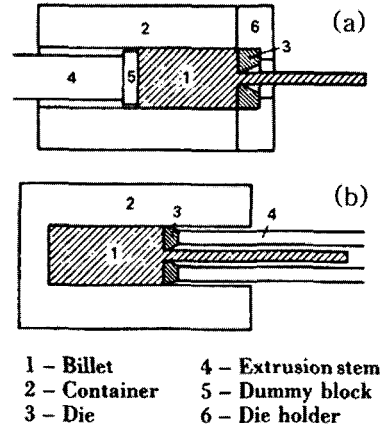


Fig. 6 Schematic of (a)direct and (b)indirect extrusion methods

마그네슘합금의 압출가공은 주로 복잡한 단면 형상을 갖는 사시나 판상의 형상재 제조에 적합하며, 금형비도 비교적 저렴하여 널리 이용되고 있는 제조공정이다. 압출방법은 크게 직접 압출법과 간접 압출법으로 구분되고 그 개념도를 Fig. 6에 나타내었다.

직접압출은 빌렛을 컨테이너에 장착하고 후방으로부터 피스톤을 전진시켜 일정한 형상을 갖는 금형을 통하여 형재를 얻는 공정으로 빌렛과 컨테이너벽면 사이의 마찰저항이 매우 크다. 또한, 직접압출공정은 빌렛전체가 소성변형 후 압출되므로 소성 가공열에 의하여 초기 설정 공정온도 이상으로 빌렛온도가 상승하여 국부적으로 빌렛이 용융하여 압출재에 균열이 발생하여 결함의 원인이 되기도 한다. 이것에 비하여 간접압출은 그림에서 알 수 있듯이 빌렛을 컨테이너에 장착한 후 중공 피스톤과 일체화된 금형을 컨테이너 방향으로 전진시켜 금형의 내부를 통하여 압출된 형재를 얻는 공정으로 빌렛과 컨테이너벽면 사이의 마찰저항이 매우 낮아서 적은 압력으로도 압출이 가능하다. 또한, 직접압출과는 달리 일정한 압력으로 압출이 가능하고, 압출공정 중 빌렛의 소성변형에 의한 온도상승 정도도 크지 않아 높은 압출압력을 필요로 하는 고강도 합금계도 표면에 결함이 없는 건전한 상태로 가공이 가능하다. 현재 상용화된 마그네슘합금의 기계적 성질은 다른 금속합금과는 다르게 결정립의 크기나 가공 정도에 크게 의존하므로 가공 시 부가되는 온도

나 가공도 설정은 매우 중요하다. 따라서 가능한 낮은 온도에서 가공하여 미세한 결정립을 얻어 기계적 성질을 개선하고 있다. 그러나 합금계나 압출형상에 따라 압출온도가 크게 다르고 가공을 쉽게 하기 위하여 높은 온도에서 압출할 경우, 소재의 표면산화나 석출물의 국부적인 용융에 의하여 균열이 발생하므로 일반적으로 최적의 압출 온도는 가능한 한 낮은 온도에서 표면결합(특히 균열)이 발생하지 않는 조건을 선택하고 있다. 특히, 마그네슘합금의 압출공정에서 주의할 점은 알루미늄합금의 압출공정과 달리, 압출 후 인장 등에 의한 방법으로 압출소재를 교정하는 것은 매우 어려워, 온도, 속도 등, 정확한 가공변수 설정을 통한 건전한 소재가공이 특히 중요하다.

### 4.3 인발가공

마그네슘합금의 인발가공은 상온에서 소성변형률이 작아 온간에서 행하여지며 단면적 감소율을 높이기 위해서는 고온이 필요하고 최적 온도는 합금의 조성에 따라 다르다. 일반적으로 붕이나 선재는 회전하는 드럼(볼블록 등)에 의해 인발되고, 판재는 draw bench 로 인발되며 1 공정에 의한 단면적 감소비는 온도에 따라 다르나, 붕이나 선재의 경우는 약 30%, 판재의 경우는 약 15%정도까지도 인발이 가능하다. 마그네슘합금 인발재의 기계적 특성은 인발 온도 및 단면적 감소율에 크게 의존하며, 단면 감소율에 따른 기계적 특성은 단면적 감소율이나 중간 공정회수에 따라 변화하지만, 최종 공정(최종 패스)에서의 공정조건(온도, 단면적 감소비 등)에 가장 크게 영향을 받는다. 특히, 인발 가공 후 가공재의 기계적 특성은 열처리 조건에 따른 미세조직 변화에 크게 영향을 받으므로 쌍정이나 재결정 정도 등 미세조직 인자 제어가 매우 중요하다. 마그네슘합금에서 인발 가공은 Mg-Al-Zn (AZ), Mg-Zn-Zr (ZK) 및 Mg-Al-Mn (AM)계에서 주로 행하여지고 있으며 온간 소성변형이 가능한 합금은 모두 가능하다.

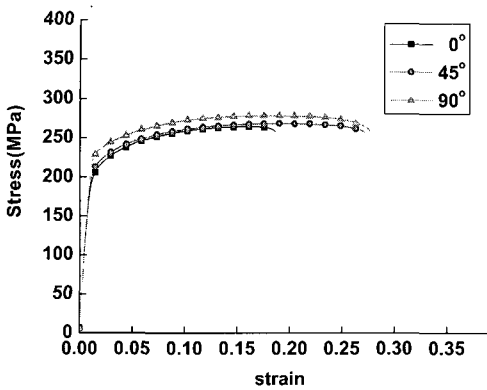
### 4.4 드로잉 가공

마그네슘합금의 드로잉가공은 마그네슘합금의 나쁜 상온 소성변형 특성 때문에 일반적으로 온간 혹은 열간에서 행하여지며, 판재의 가열은 히터를 내장한 다이와 블랭크 홀더의 판재에의 접촉으로 이루어진다. 특히, 드로잉 성형 중, 펀치의 냉각에 의하여 판재강도를 상승시켜 성형재 머리

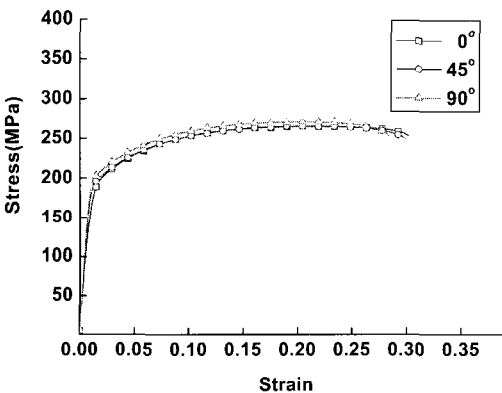
부(돌출부)의 파단을 저지하는 공정이 이용되며, 성형품의 형상 및 드로잉 비에 따라 국부가열 및 냉각 정도를 조절하는 차별냉각방식이 가공형상에 따라 부분적으로 채택되는 경우도 있다. 드로잉에 주로 사용되는 합금으로는 적당한 강도와 성형성을 겸비한 AZ31 이 가장 일반적이며, 표면형상이 미려한 압연이나 압출법으로 가공된 판재를 원소재로 사용한다. 드로잉에서 성형성에 영향을 미치는 중요한 공정인자를 정리하면 다음과 같다. 1) 판재의 성질, 2) 성형온도, 3) 성형속도, 4) 판재와 다이사이의 간격, 5) 펀치와 다이의 모서리 반지름(R), 6) 블랭크홀더의 지지력, 7) 윤활 등이다. 이들 공정인자가 드로잉 특성에 미치는 대표적 영향으로서 판재의 성질에 대한 영향은 마그네슘합금은 그 결정구조특성상 압연가공방향이 따라서 물성이 달라지는 강한 이방 특성을 보이며, 이들 이방성은 새로운 압연공정 적용에 의하여 개선될 수 있고 더불어 성형성도 향상된다고 알려져 있다. 아래 Fig. 7(a)에는 상하 롤의 회전속도가 같은 등속도 압연방식과 (b)상하 롤의 회전속도가 다른 이속도 압연방식으로 AZ31 판재를 각각 30% 압연한 후 압연방향에 대하여 0, 45, 90° 방향으로 상온에서 인장한 실험결과를 보여주는 응력-변형 곡선이다[8].

Fig. 7 에서 알 수 있듯이 등속도 압연 방식으로 제조된 판재보다 이속도 압연 방식으로 제조된 판재의 연신율이 모든 인장 방위에서 향상되었으며, 특히 인장 방향에 대하여 0° 방향으로 채취한 시편의 인장률을 비교할 때 현저하게 향상된 것을 알 수 있다. 성형온도에 대한 영향으로는 드로잉비가 크거나 R 이 작은 성형의 경우 반드시 판재를 가열하여야 하며, 일반적으로 온도 상승과 더불어 드로잉성(한계성형비)은 향상되나 어느 일정 온도를 넘어서면 성형품이 균열발생에 의하여 파손되는 등 최적의 성형온도가 존재한다.

특히, 최적의 성형온도는 윤활방식, 성형속도, 블랭크홀더지지력 등 다른 인자와 밀접하게 관련되기 때문에 성형품 형상, 두께 등을 고려한 온도 설정이 중요하다. 성형속도의 영향으로는 성형 대상 판재의 특성이나 성형온도, 성형률에 따라 크게 다르며, 실험적으로 200 에서 250℃에서 프레스 성형할 때, 낮은 성형속도 구간에서는 펀치의 냉각에 의하여 한계드로잉비(LDR)가 상승하지만 20mm/s 이상의 일반적인 공업적 가공속도 구간에서는 둔감해진다고 알려져 있다.



(a)



(b)

**Fig. 7 Tensile properties of (a) conventionally and (b) differentially speed rolled AZ31 sheets at room temperature**

일반적으로 마그네슘합금의 판재성형은 고온에서 행하여지고, 특히 마그네슘합금의 부식(산화)에 대한 취약성 때문에 윤활제 선정은 매우 중요하다. 윤활제를 특성에 따른 분류하면 광물성, 식물성, 동물성과 유성 및 수성계로 크게 분류할 수 있고, 사용 온도 및 성형품의 형상에 따라 구분하여 사용하고 있다. 비교적 높은 성형 온도 및 압력이 요구되는 공정에서는 카본계(graphite) 등 광물성 윤활제가 사용되고, 얇은 박판이나, 낮은 온도 및 낮은 성형압력이 요구되는 공정에서는 수

용성 등 식물성 윤활유가 주로 사용되고 있으나, 금형의 표면처리 등 작업환경에 따라 달라질 수 있어 각각의 부품 제조공정에 적합한 윤활제 선택 및 개발은 매우 중요하다.

#### 4.5 그 밖의 가공기술

마그네슘의 온간 가공방법으로는 앞에서 서술한 것과 같이 현장에서 주로 적용되고 있는 기술 이외에 단조가공, 스피닝가공, 굽힘가공, 초소성가공, 레이저성형가공 등이 있으며 기본적으로는 마그네슘합금의 온간 및 열간 특성을 고려하여 앞서 서술된 대표적인 가공기술과 동일하게 적용되고 있다.

### 5. 맺음말

마그네슘은 에너지, 환경 등 인류가 공통으로 직면해있는 중대한 문제를 해결하는데 있어 매우 중요한 key material의 하나로서 주목되고 있다. 그러나, 마그네슘은 압연, 압출, 단조 등과 같은 소성 가공기술에 의하여 제조되는 경우, 철강, 알루미늄등과 비교하여 상온 근방에서의 가공성이 매우 나쁜 이유로 널리 보급되지 못하고 있다. 최근에는 자동차, 가전 및 휴대용 전자부품 등 산업계의 마그네슘 소재 및 부품의 효율적 이용은 물론, 휴대용 전자기기에 대한 슬립/박육화, 특히 수송기기 경량화를 위한 대형부품적용 등에 대한 관심이 높아지고 있으며, 이와 더불어 이들 부품을 경제적으로 쉽게 가공할 수 있는 고도화된 가공기술개발이 가일층 요구되고 있다. 향후, 마그네슘 소재에 대한 이러한 시대적 요구에 대한 대응은 물론, 원활한 산업적 활용을 위해서도 마그네슘소재의 금속 및 가공학적 특징을 이해하고 이를 극복하려는 공동적인 노력은 매우 중요하다고 생각된다.

### 후 기

본 해설은 아래 참고문헌을 바탕으로 작성되었음을 밝히며, 협조에 감사 드립니다.

### 참 고 문 헌

[1] H. Yoshinaga, 1977, Metal Physics, Vol. 10, p. 91.

- [2] H. Yoshinaga, R. Horiuchi, 1963, Trans. JIM, Vol. 4, p.143.
- [3] J. C. McDonald, 1940, Trans. AIME, Vol.137, p. 430.
- [4] Handbook of Advanced Magnesium Technology, KALLOS PUBLISHING CO., LTD., 2000, p.155.
- [5] K. Abe, K. Saito, etc., 1966, KORITSU CO., LTD, p. 235.
- [6] S.E. Ion, F.J. Humphreys and S.H. White, 1982, Acta metall., Vol. 30, p. 1909.
- [7] Magnesium Processing Technology, CORONA PUBLISHING CO., LTD., 2004, p. 155.
- [8] 정하국, 2005, 한국생산기술연구원 첨단부품·인프라 구축사업, 『고강도 고성형성 마그네슘 합금부품개발을 위한 초소성 성형기술 개발 사업 보고서』.