

마그네슘합금 가공 및 성형 기술

김수현, 임창동, 유봉선 | 한국기계연구원

1. 서론

마그네슘은 다른 금속에 비하여 매우 가벼우면서도 높은 비강도를 가지며, 생각만큼 그렇게 희귀한 금속이 아니지만, 지금까지 우리의 일상생활에서는 그 존재를 크게 인식하지 못해 왔다. 아직까지는 마그네슘 또는 마그네슘 합금의 사용량이 철이나 알루미늄에 비해서 크게 못 미치지만 당분간 수송기구나 휴대용 전자제품의 경량화를 위한 마그네슘 합금 부품의 사용량은 계속 증가할 것 같다. 또한, 특정 제품군에 사용되는 마그네슘 합금은 경량화나 여러 가지 기능적인 측면 외에 일반인에게 전달하는 홍보효과 때문에 더 매력적인 소재로 느껴진다. 실례로 노트북 케이스나 디지털 카메라 케이스로 플라스틱을 사용한 것보다 마그네슘 재료를 사용한 제품이 더 고급이라는 우리의 인식은 마그네슘의 부가가치를 높이기에 충분하다.

현재 가장 일반적인 마그네슘 합금 부품 제조법은 다이캐스팅법이다. 대표적인 액상성형법인 다이캐스팅법은 복잡한 형상의 제품을 대량으로 제조할 수 있다. 하지만 이러한 다이캐스팅법으로도 제조하기 어려운 제품 형상이 있는데, 그것은 두께가 얇은 넓은 면적의 판재이다. 아직까지 우리 주변에서 볼 수 있는 마그네슘 합금 노트북 케이스는 거의 대부분 다이캐스팅법으로 제조하고 있지만, 지금보다 두께가 더 얇아져야 한다면, 더 이상 다이캐스팅법으로 제조할 수 없을 수도 있다. 이미 이러한 전자제품의 외장재에서는 박판 성형법을 필요로 하고 있고 특정 제품에서는 이미 사용되고 있는 실정이며 (그림 2), 이러한 판재 성형의 적용 분야는 앞으로 계속 확대될 것이다. 또한, 자동차용 부품에 있어서는 스티어링 휠, 에어백 하우징, 동력전달장치 (powertrain) 등에 쓰이는 다이캐스팅 부품 뿐 아니라, 외판에도 마그네슘 합금 판재를 성형하여 사용할 수 있으리라는 가능성이 조심스럽게 제기되고 있다 (그림 3). 사실, 판재 형태의 마그네슘은 이미 2차 세계대전 이후부터 수송기기 재료로서 사용되어 왔지만^[1], 지금까지는 극히 제한적인 범위 내에서 적용되어 왔다. 다이캐스팅체에 비하여 향상된 연신율은 자동차용 판재로 사용하기에 더 적합하다. 물론 자동차 외판용 마그네슘 재료는 기존의 강판이나 알루미늄 합금과 비교해 볼 때 기술적인 측면이나 가격경쟁력에서 앞으로의 갈 길이 멀어 보이긴 하다^[2].

최근 독일을 대표로 하는 기술 선진국에서는 판재 성형에 관한 지식을 가진 연구자들이 가공용 마그네슘 합금의 성형 기술에 대한 관심을 다시 가지게 되었다. 즉, 압출이나 압연 공정 등 소성 가공을 통하여 두께가 얇은 마그네슘 합금 판재를 제조하여 이를 원하는 모양으로 성형하는 공정을 도입하여 전

자 제품이나 자동차에 사용하려고 하고 있으며, 이러한 연구동향은 국내에서도 이미 중요한 연구 테마로 자리 잡았다.

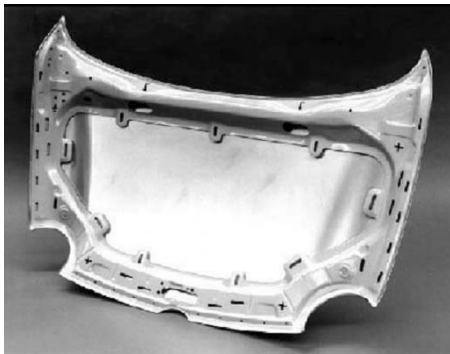
본 고에서는 이러한 가공용 마그네슘 합금의 판재 형태로의 소성 가공 및 제조한 판재를 원하는 형태로 성형하는 기술에 대하여 논하고자 한다.



그림 1. 마그네슘 판재의 자동차 적용 사례는 이미 오래전에 있었다^[3]



그림 2. IMA 2003 최우수상 수상의 영예를 안겨 준 CASIO 디지털 카메라 케이스^[4]
(Hitachi 금속에서 마그네슘 판재 프레스 성형법으로 제조)



본넷



도어내부 패널

그림 3. 마그네슘 판재 성형 적용 사례 (폭스바겐사)^[5]

2. 마그네슘 합금의 가공 및 성형 기술

2.1 마그네슘 합금의 가공 기술

마그네슘 합금의 가공은 기존의 강판이나 알루미늄 합금 판재 제조나 가공과는 다른 점이 있다. 그것은 마그네슘이 상온에서 연신율이 낮다는 점이다. HCP 구조를 가지고 있는 마그네슘은 상온에서 자유롭게 변형되기 위한 충분한 슬립계 (slip system)를 가지지 못한다. 마그네슘은 상온에서 비저면 (non-basal) 슬립의 임계분해전단응력 (critical resolved shear stress, CRSS)이 저면 (basal) 슬립에 비하여 매우 커서, 작동하기가 쉽지 않다. 따라서 임의의 (arbitrary) 변형을 하기 위해서는 von Mises 조건에 의하여 5개

의 독립적인 슬립계가 작동해야 하는데, 상온에서는 이것이 어렵게 된다. 하지만, 비저면 슬립을 활성화(activate)하는 방법은 간단하다. 변형 온도를 올리면 된다. 비교적 낮은 온도 -약 200°C 이상 온도- 에서 변형하면, 저면 슬립 외에 비저면 슬립이 활성화되어 5개 이상의 슬립계가 작동할 수 있다. 이미 많은 문헌을 통하여 보고된 바에 의하면, 변형 온도를 증가시킬 때 연신율이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다(그림 4)^[5]. 많은 연구자들이 이와 같이 변형이 가능한 200~250°C 구간에서의 가공 또는 성형을 온간(warm) 가공, 온간 성형이라고 부르고 있다. 이외는 달리 더 높은 온도, 약 400°C의 온도 부근에서 가공하는 것을 열간(hot) 가공이라고 부를 수 있다. 열간이라는 말에서도 알 수 있듯이, 이 온도 영역에서는 재료가 동적재결정(dynamic recrystallization, DRX)을 일으켜서 미세한 결정립 구조로 변할 수 있다. 최근의 연구 결과들을 보면, 충분히 높은 온도, 가령 250°C 이상, 400°C 이하의 온도에서 열간 압연에 의한 판재 제조가 가능하며, 압연 중 동적재결정에 의하여 마이크론(micron) 크기의 미세한 결정립을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다^[6]. 미세한 결정립을 얻는 것은 상온에서의 연신율 증가나, 고온에서의 초소성(super-plasticity) 성질 등, 다양한 장점들을 가질 수 있는데, 이에 대해서는 아래에서 다시 논하기로 한다. 이와 같은 온간 또는 열간 가공 공정은 이미 마그네슘 외에 다른 금속 재료에서 흔하게 사용하고 있는 공정으로서 마그네슘 역시 적절한 공정 조건 하에서 소성 가공하여 원하는 형태의 판재를 제조하는 것은 그렇게 어려운 공정이 아니라고도 할 수 있다. 또한, 변형 온도를 증가시켰을 때 마그네슘의 충분한 소성변형이 가능하다는 것은 이미 1940년대부터 알려진 사실이며^[7], 전혀 새로운 것이 아니다. 오히려 중요한 점은 생산성 향상을 위한 최적의 가공 공정을 도출하는 것이다.

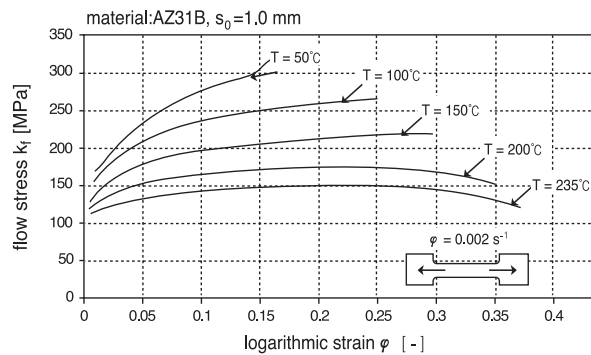


그림 4. 변형 온도가 증가하면 연신율은 상당히 증가한다^[5]

이와 같이 마그네슘 합금의 소성 가공에 관하여서는 비교적 오래전부터 연구가 되어 왔지만, 여전히 해결하지 못한 것은 불량한 상온 변형 특성이라고 할 수 있다. 물론 이것은 마그네슘 소재 자체의 근본적인 한계일 수도 있다. 어쨌거나 이러한 마그네슘 재료의 단점은 냉간 압연을 이용하여 박판을 제조하려 할 때 문제가 될 수 있으며, 가공 온도를 낮추는 것은 공정 단순화에도 직접적인 관계가 있다. 최근에는 상온에서의 연신율을 증가시키기 위하여 미세조직을 제어하는 기술을 적용한 사례가 보고되고 있는데, 열간 가공에 의한 동적재결정, 강소성 가공(severe plastic deformation, SPD)에 의한 결정립 미세화 등, 기존의 철강이나 알루미늄 합금에서 시도하였던 기술이 마그네슘 합금에서도 시도되고 있다. 이러한

연구의 배경에는 충분히 작은 결정립을 가질 때 상온에서 연신율이 향상된다는 보고에서 기초한다고 할 수 있다. 아직까지 충분한 검증이 이루어지지지는 않았지만, 이것은 변형 과정 중 결정립계에서의 응력집중에 의하여 비저면 슬립을 촉진한다는 전제하에, 결정립이 작아지면 상온에서도 충분히 많은 슬립계가 작동할 수 있을 것이라는 기대에서 출발한다^[6]. 아래에서 다시 논하겠지만, 몇몇 연구자들에 의하여 미세한 결정립을 가질 때 상온 연신율이 향상된다는 보고는 고무적인 결과라고 할 수 있다.

22 마그네슘 합금의 성형 기술

마그네슘 판재의 제조가 가능하다면, 그 다음의 문제는 성형이다. 압출, 압연 등의 가공 공정을 통해 제조한 마그네슘 합금 판재를 원하는 형태로 만들기 위해서는 프레스 가공, 디프드로잉 (deep drawing) 등의 성형 공정을 거쳐야 한다. 성형 공정에서도 중요한 인자는 성형 온도이다. 실제로 상온에서 판재 성형을 하게 되면, 불과 수 %이내의 변형을 감당하지 못하고 파괴가 일어난다. 그러나 약간만 성형 온도를 증가시키면 판재 성형은 충분히 가능하다. 이미 1940년대에 판재 성형의 최적 온도는 200~225°C라는 보고^[7]가 있었다는 것을 보면 마그네슘 성형도 그리 새로운 연구 분야가 아니다. 최근에 보고되고 있는 문헌들을 살펴보면, 200~250°C의 온도 영역에서 비교적 쉽게 성형이 가능하다는 것이 다시 한번 확인되었다^[8]. 이것은 이 온도 영역에서 비저면 슬립이 활성화되기 때문인 것으로 해석할 수 있다. 따라서 이러한 온간 성형 기술을 적용한다면, 마그네슘의 성형도 충분히 가능하다. 물론, 성공적인 성형을 위해서는 펀치나 다이 설계 등의 기술도 매우 중요하다.

최근에는 국부 가열 및 냉각 기술을 이용하여 마그네슘 판재의 성형성을 향상시킨 사례가 있으며, 적절한 공정조건에서 한계드로잉비를 5.0까지 증가시킬 수 있다고 보고하였다^[9].

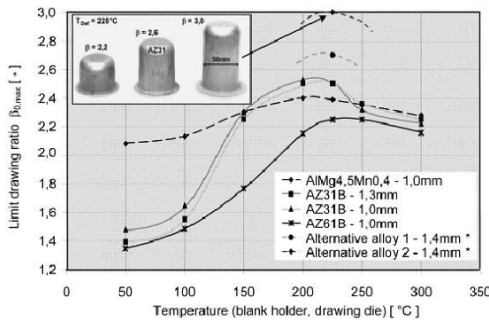


그림 5. 성형온도가 증가하면 한계드로잉비는 급격히 증가한다^[3]

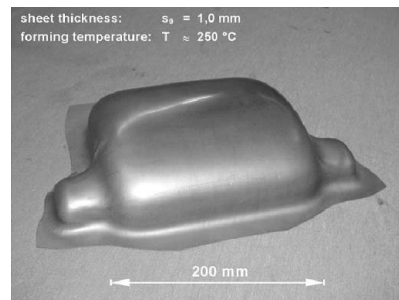


그림 6. AZ31B 소재를 이용하여 250°C에서 디프드로잉한 형상^[5]

최근에는 좀더 높은 온도, 즉, 400°C 이상의 온도에서 마그네슘 합금에서도 초소성의 성질을 가질 수 있음이 보고되었다^[10]. 이러한 초소성은 충분히 작은 결정립을 가질 때 가능하며, 미국 General Motors 사에서는 이러한 초소성의 성질을 이용하면 복잡한 형상의 판재 성형도 가능하다는 보고를 내놓은 바 있다^[11]. 이와 같은 결과는 마그네슘 합금 판재 성형을 이용하여 자동차 도어 내부와 같은 복잡한 형상의 부품도 생산이 가능함을 시사한다.

3. 미세조직 및 집합조직 제어를 위한 가공 기술

지금까지 살펴본 바로는 마그네슘 합금의 가공 및 성형은 그 공정 온도를 증가시키면 해결할 수 있다. 그러나, 공정 비용이나 생산성을 고려한다면 고온 성형 공정은 큰 부담이 아닐 수 없다. 다이캐스팅과의 가격 경쟁력을 생각해볼 때, 공정 단가 감소는 필수적인 사항이다. 또한, 자동차 외판으로 마그네슘 합금 판재를 사용하려고 한다면, 공정 단순화의 필요성은 좀더 절실하다. 실제로 이와 같은 점들을 인식하고 있는 연구자들은 마그네슘의 저온 가공 및 성형성 향상을 위한 다양한 새로운 시도들을 하고 있다. 이 때 고려해야 할 핵심적인 재료 물성은 결정립 크기와 집합조직 (texture)이다. 앞서도 논했듯이 마그네슘이 충분히 작은 결정립을 가지면, 상온에서 연신율이 증가하고 고온에서 초소성의 성질을 갖는 등, 여러 가지 장점을 가질 수 있다. 이러한 의미에서 결정립을 미세화하는 것은 마그네슘 합금에서는 매우 중요하다.

집합조직은 성형성과 직접적인 관련을 가진다. 강판이나 알루미늄 합금 판재에 있어서 집합조직은 성형성을 평가하는 매우 중요한 재료 인자이다. 판재의 성형성을 판단하는 기준인 소성변형비 (plastic strain ratio)와 이방성 (anisotropy)이 집합조직에 의해 지배된다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 그러나 일반적인 공정으로 제조한 마그네슘 판재는 강한 저면 집합조직이 발달하는 것으로 알려져 있으며, 이 성분은 가공이나 성형에 이롭지 못하다. 결정립의 (0002) 면이 판재의 압연면과 나란하게 놓여 있으면, 판재의 압연면과 나란한 방향으로 인장 응력을 받을 때 Schmid 인자가 0인 저면 슬립이 일어날 수 없게 된다. 마그네슘 판재는 이방성도 큰 것으로 알려져 있는데 (그림 7)^[12-14] 이러한 현상은 (0002) 성분이 압연면에 수직인 방향에서 압연 방향으로 약간 회전한 방향으로 발달하기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 이러한 이방성은 변형온도가 증가할수록 감소하게 된다.

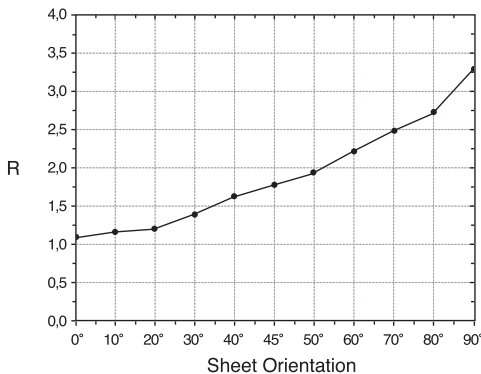


그림 7. 심한 이방성을 보여주는 AZ31 판재의 소성변형비^[12]

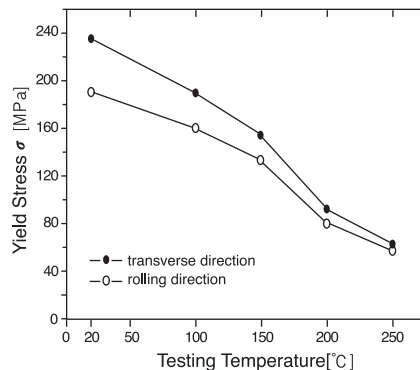


그림 8. 항복강도 이방성을 보여주는 AZ31 판재^[12]

이와 같은 점들을 고려해 볼 때 결정립을 미세화시키고, (0002) 저면 집합조직을 약화시키는 것이 마그네슘의 가공 및 성형성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대할 수 있다 (어떤 집합조직이 성형성 개선에 최적인지는 아직 여러 이견이 있을 수 있다). 여기서는 이러한 관점에서 다음과 같은 미세조직과 집합조직을 제어할 수 있는 여러 가지 공정을 제안하고자 한다.

3.1 열간 압연

마그네슘 합금 판재의 가장 일반적인 제조 공정으로서, 무엇보다도 공정 변수의 최적화가 중요하다. 이것은 공정 단순화 뿐 아니라 재료의 미세조직과 집합조직 발달에도 큰 영향을 미친다. 공정 변수는 크게, 압연 온도, 총 압하량, 패스당 압하량, 윤활 조건 등이다. 높은 압연 온도는 건전한 가공성을 확보할 수 있으나, 너무 높은 압연 온도는 결정립 성장을 일으킬 수 있을 뿐 아니라 공정 비용을 증가시킬 수 있다. 반대로 너무 낮은 압연 온도 조건에서는 동적재결정이 일어나지 않아 미세한 결정립을 얻을 수 없다. 집합조직의 발달은 압연 온도에 큰 영향을 받지 않는다. 총 압하량은 균질한 미세조직을 얻는데 중요한 인자이다. 작은 변형에서는 큰 결정립 주위에 작은 동적재결정립이 분포하는 불균질한 미세조직을 가지다가, 변형량이 증가하면서 전 영역에 고르게 미세한 결정립이 분포하게 된다. 따라서, 최종 판재까지의 총 압하량을 고려하여 초기 빌렛 또는 압출재의 두께를 결정할 필요가 있다. 집합조직은 압하량이 증가할수록 강한 (0002) 저면 집합조직이 발달하게 된다. 패스당 압하량은 공정 단순화를 위해서는 증가시킬 필요가 있는데, 너무 크게 증가시키면 불균질한 미세조직을 얻을 수 있으므로 주의해야 한다^[15]. 윤활조건도 중요한데, 무윤활 조건에서 표면부에 추가적인 전단변형이 가해져서 집합조직이나 미세조직을 변화시킬 수 있다. 이미 알루미늄 합금 판재에서는 이러한 무윤활 압연을 통하여 표면부의 전단변형 집합조직을 발달시킬 수 있음이 보고되었다^[16].

3.2 ECAP (Equal Channel Angular Pressing)

ECAP은 이미 잘 알려진 바와 같이 재료의 형상 변화 없이 전단변형을 가할 수 있는 방법이다. 반복적인 ECAP을 통하여 재료에 전단변형을 계속 가할 수 있으며, 이러한 강소성 가공을 통하여 많은 금속 재료의 결정립을 미세화할 수 있고 전단변형 집합조직을 발달시킬 수 있다는 것이 수많은 논문을 통하여 보고된 바 있다. 유사한 결과로서 마그네슘 합금 역시 ECAP을 통하여 결정립을 미세화시킬 수 있고, 강한 (0002) 집합조직 성분을 다른 방위로 바꿀 수 있음이 보고되었다^[17]. 또한, 이를 통하여 상온 연신율을 증가시킬 수 있음도 보여주었다 (그림 9)^[17]. ECAP이 실제 산업화하기에 어려운 점이 있지만, 결정립 미세화와 집합조직 변화를 통하여 연신율을 증가시킬 수 있음을 보인 점은 상당히 의미 있는 결과라 할 수 있다.

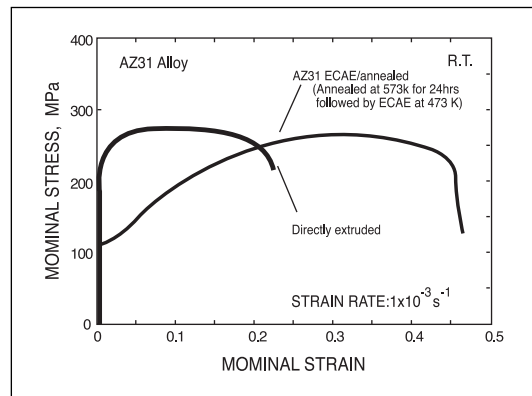


그림 9. ECAP한 AZ31의 상온 연신율 증가는 매우 고무적이다.^[17]

3.3 비대칭 압연 (Asymmetric rolling)

ECAP과 비슷한 효과를 가지면서, 좀더 산업화 가능성이 높은 공정이 비대칭 압연이다^[18]. 비대칭 압연은 상부롤과 하부롤의 선속도를 다르게 하여 압연하는 방법인데, 두 롤의 크기를 달리하거나, 두 롤의

회전 속도를 달리하는 방법이 있으며, 그 효과는 두 방법이 크게 다르지 않다. 비대칭 압연은 알루미늄 합금 판재에 전단변형 집합조직을 발달하게 하여 성형성을 증가시키려는 의도로 연구되었으나, 이후에 다양한 금속 재료에 대하여 결정립 미세화와 전단변형 집합조직 발달에 대한 연구가 있어 왔다. 마그네슘의 비대칭 압연에 대해서는 연구가 많지 않으나, 최근 보고된 바에 의하면, 결정립 미세화의 방법으로 서 사용할 수 있을 것으로 기대할 수 있다^[6]. 산업화 가능성을 고려한다면, 비대칭 압연은 ECAP에 비하여 우위에 서 있다. 마그네슘 판재의 비대칭 압연은 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

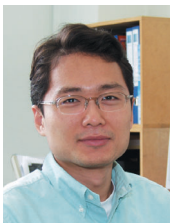
4. 결 언

지금 많은 사람들이 경량화를 요구하는 다양한 제품에 대하여 판재 형태의 마그네슘을 사용할 수 있을 것으로 기대하고 있으며, 특히 자동차 부품에 사용량을 늘려 궁극적으로 연료 절감을 기대하고 있다. 이와 같은 분야에 가공용 마그네슘의 사용 범위를 확장하기 위해서는 가공 및 성형 기술의 확보가 무엇보다도 필요하다. 재료적인 측면에서는 미세조직과 집합조직을 제어하는 것이 필수적인 사항이다. 좀더 복잡한 형태의 제품, 더 얇고 대면적의 판재 제품, 좀더 값싼 제품 등에 적용하려면 지금까지 알려진 기술만으로는 부족할 수도 있다. 이미 마그네슘합금의 가공 및 성형성에 관해서는 국내에서도 많은 연구자들에 의하여 연구되고 있으며, 한국기계연구원에서도 이에 대한 연구가 수행 중에 있다. 이러한 전 세계적이며 집중적인 연구를 통하여 향후 마그네슘 가공 및 성형 기술의 혁신을 가져올 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] R. F. Brown, "Magnesium Wrought and Fabricated Products Yesterday, Today, and Tomorrow", in Proc. Magnesium Technology 2002, 2002, p. 155
- [2] S. Schumann and H. Friedrich, "The Route From the Potential of Magnesium to Increased Application In Cars", in Proc. Annual World IMA 2003 Magnesium Conference, 2003, p. 35
- [3] P. Juchmann, S. Wolff, "Magnesium Sheet Components for Ultralight Construction", in Proc. Annual World IMA 2002 Magnesium Conference, 2002, p. 49
- [4] 한국마그네슘기술연구조합 제공 자료
- [5] E. Doege and K. Droder, "Sheet Metal Forming of Magnesium Wrought Alloys-Formability and Process Technology", J. Materials Processing Technology, 115, 2001, p. 14
- [6] 김수현, 임창동, 유봉선, 서영명, 황염빈, 정인상, "공정조건에 따른 AZ31 마그네슘 압연 판재의 미세 조직 및 집합조직 발달", 2004 대한금속 재료학회, 2004, p. 13
- [7] G. Siebel, in Technology of Magnesium and Its Alloys, Hughes, London, 1940
- [8] J. Koike, T. Kobayashi, T. Mukai, H. Watanabe, M. Suzuki, K. Maruyama, and K. Higashi, "The Activity

- of Non-Basal Slip Systems and Dynamic Recovery at Room Temperature in Fine-Grained AZ31B Magnesium Alloys”, *Acta Materialia*, 51, 2003, p. 2055
- [9] S. Yoshihara, H. Yamamoto, K. Manabe, and H. Nishimura, “Formability Enhancement in Magnesium Alloy Deep Drawing by Local Heating and Cooling Technique”, *J. Materials Processing Technology*, 143-144, 2003, p. 612
- [10] P. E. Krajewski, “Elevated Temperature Behavior of Sheet Magnesium Alloys”, GM Research & Publication Center, 2001, R&D 9233
- [11] P. E. Krajewski, “Elevated Temperature Forming of Sheet Magnesium Alloys”, GM Research & Publication Center, 2001, R&D 9209
- [12] F. Kaiser, D. Letzig, J. Bohlen, A. Styczynski, C. Hartig, and K. U. Kainer, “Anisotropic Properties of Magnesium Sheet AZ31”, *Mater. Sci. Forum*, 419-422, 2003, p. 315
- [13] S. R. Agnew, “Plastic Anisotropy of Magnesium Alloy AZ31B Alloy”, *Magnesium Technology 2002*, 2002 TMS Annual Meeting, 2002, p. 169
- [14] R. Ohyama, J. Koike, M. Suzuki, and K. Maruyama, “Texture Dependence of Elongation Anisotropy in An AZ61 Magnesium Alloy Sheet”, *J. Japan Institute of Metals*, 68, 2004, p. 27
- [15] J. A. del Valle, M. T. Perez-Prado, and O. A. Ruano, “Texture Evolution During Large-Strain Hot Rolling of the Mg AZ61 Alloy”, *Materials Science and Engineering*, A355, 2003, p. 68
- [16] C.-H. Choi, J.-W. Kwon, K. H. Oh, and D. N. Lee, “Analysis of Deformation Texture Inhomogeneity and Stability Condition of Shear Components in FCC Metals”, *Acta Materialia*, 45, 1997, 5119
- [17] T. Mukai, M. Yamanoi, H. Watanabe, and K. Higashi, “Ductility Enhancement in AZ31 Magnesium Alloy by Controlling Its Grain Structure”, *Scripta Materialia*, 45, 2001, p. 89
- [18] S.-H. Kim, J. K. Lee, and D. N. Lee, “Grain refinement and Texture Development in Asymmetrically Rolled Aluminum Alloy Sheets”, in *Proc. Ultrafine Grained Materials*, 2002 TMS Annual Meeting, 2002, p. 55
- [19] T. Imai, S. Dong, N. Saito, and I. Shigemastu, in *Proc. Magnesium Technology 2004*, 2004 TMS Annual Meeting, 2004, p. 91



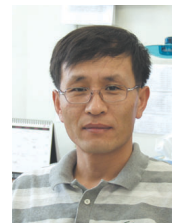
김 수 현

- 한국기계연구원 재료연구부 선임연구원
- 관심분야: 미세 조직, 비철 재료
- E-mail: shawnkim@kmail.kimm.re.kr



임 창 동

- 한국기계연구원 재료연구부 선임연구원
- 관심분야: 경량 재료, 에너지 재료
- E-mail: cdyim03@kmail.kimm.re.kr



유 봉 선

- 한국기계연구원 재료연구부 책임연구원
- 관심분야: 연속주조, 성형가공
- e-mail : bsyou@kmail.kimm.re.kr