

## 마그네슘합금의 組織制御와 成形加工 및 스크랩 리사이클링 技術<sup>†</sup>

†沈載東·李東輝

韓國科學技術情報研究院 專門研究委員

### Microstructure Control, Forming Technologies of Mg Alloys and Mg Scrap Recycling<sup>†</sup>

†Jae-Dong Shim and Dong-Hui Lee

Korea Institute of Science and Technology Information

#### 요 약

마그네슘 합금은 비중이 1.74로 가벼운데다 비강도는 구조용 금속 중에서 가장 크며, 방진성, 전자파 차폐성, 저융점 등 여러 가지 장점이 있어 최근 자동차 부품과 전자산업 제품 분야에서 이용이 크게 기대되는 금속이다. 그러나 마그네슘의 결정구조는 조밀 육방정이기 때문에 소성변형이 가능한 슬립면이 한정되어 있으며 압연이나 압출가공 시에는 강한 집합조직이 형성되어 상온가공이 곤란하다. 따라서 지금까지 성형성 개선을 위한 조직제어와 성형기술 분야에서 많은 연구개발이 이루어져 왔다. 본고에서는 결정립과 집합조직에 관한 미세조직의 제어방법, 용체성형, 압연 및 압출에 관한 성형가공 기술과 마그네슘 스크랩 리사이클링 기술에 관하여 최근의 연구개발 사례를 소개한다.

**주제어** : 마그네슘합금, 결정립 미세화, 집합조직, 성형기술, 스크랩 리사이클링

#### Abstract

Recently, magnesium alloys are in the spotlight as a promising materials in the fields of automobile parts and electronic appliances due to their merits representing light weight, high specific strength, damping property, shielding of electromagnetic wave and so on. However, magnesium alloys show a poor formability at room temperature because magnesium has HCP crystal structure with limited slip planes and strong basal texture is formed during plastic deformation process such as rolling and extrusion. Therefore, many R&D efforts have been paid for improvement of formability through grain refinement, texture control and various forming technologies. This paper is giving an overview about recent achievements on control of microstructures, forming technologies and magnesium scrap recycling.

**Key words** : magnesium alloy, grain refinement, texture, forming technology, scrap recycling

#### 1. 서 론

마그네슘은 실용되고 있는 구조용 금속재료 중에서 비강도(단위중량당 강도)가 가장 크기 때문에 경량화를 목적으로 하는 구조설계에는 매우 적합한 재료이다. 따라서 카메라, 휴대폰, 컴퓨터로 대표되는 3C제품을 위시

하여 자동차의 CO<sub>2</sub> 배출량 저감을 위한 연비절감 차원에서 경량부품의 개발과 용도확대가 주목되고 있다.

그러나 마그네슘은 조밀육방정 결정구조를 갖고 있어 상온에서 압연이나 압출 등과 같은 소성가공이 곤란하다. 예를 들어 열간압연→온간압연→냉간압연의 단계를 거쳐 제조되는 박판재의 경우 1팩스 당 최대 압하량은 300℃에서 30%, 온간에서 15%, 상온에서 5%가 보통이므로 재가열에 의한 다팩스 압연이 불가피하여 생산성의 저하와 공정비용의 증가가 초래된다. 또 가공 시

<sup>†</sup> 2010년 11월 2일 접수, 2010년 11월 30일 1차수정

2010년 12월 15일 2차수정, 2010년 12월 30일 수리

\* E-mail: jidshim@kist.re.kr

에는 (0001)면이 판면에 평행하게 배열하는 저면집합조직이 형성되며 집합조직은 어닐링 후에도 완전히 제거되지 않으므로 기계적 성질에 이방성이 발생한다. 따라서 마그네슘 판재의 프레스 성형성에도 문제가 있다. 이와 같은 결점 때문에 마그네슘합금의 이용은 주로 다이캐스팅과 같은 용융가공에 의존하고 있어 용도의 확대가 제한되고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 연구개발이 세계적으로 추진되고 있다. 예를 들면 일본의 NEDO project, EU의 MAGFORGE Project, 북미의 Magnesium Vision 2020 등에서는 성형용 마그네슘합금의 개발, 조직제어를 통한 성형성의 개선, 새로운 성형가공기술 등을 경쟁적으로 개발하고 있다. 본 기술해설에서는 마그네슘합금의 성형성 개선을 위한 조직제어, 옹고성형 기술과 소성가공 기술 및 스크랩 리사이클링에 대한 최근의 기술동향과 연구개발 사례를 소개한다.

## 2. 마그네슘합금의 조직제어

### 2.1. 강소성 가공에 의한 결정립 미세화

성형성에 기여하는 연성의 증대와 우수한 강도를 양립시키는 조직제어 수단으로는 철강재로나 알루미늄 합금에서와 같이 결정립 미세화가 유효하며 여기에는 가공 후의 열처리에 의한 재결정을 이용한다. 그러나 마그네슘 합금의 경우에는 다 패스 압연에서와 같이 고온에서 변형률이 낮은 가공을 반복하기 때문에 변형에너지의 축적이 불충분하여 동적재결정에 의한 결정립의 미세화를 기대하기 어렵다. 이를 개선하는 방법으로서 고속대압압 압연에 의한 결정립 미세화가 제안되고 있다.<sup>1)</sup> 예를 들어 압연속도를 1000 m/min 이상의 고속으로 하면 롤과 재료의 접촉시간이 짧고 단열적으로 변형하므로 롤의 가열이 없어도 온도상승 효과에 의하여 압연가공성이 비약적으로 개선되어 200°C 이하에서 1패스당 60%이상의 압하율로 압연이 가능하다. 따라서 동적재결정에 의하여 압연 후의 급랭으로 미세결정립을 얻는다. Fig. 1에서 재결정 조직과 압연조건의 관계를 보면 압연온도 200°C, 압하율 50% 부근에서 결정립은 2.2 μm으로 되어 현재 양산되고 있는 AZ31B 판재의 6-7 μm보다 훨씬 미세하다. 이 경우 집합조직은 소압하의 반복압연에서는 기대할 수 없는 double peak형으로 되어 우수한 성형성이 기대된다.

한편 마그네슘의 난가공성을 해결하는 결정립 미세화의 유효한 수단으로서 변형률( $\epsilon$ ) 3.0 이상의 초강가공

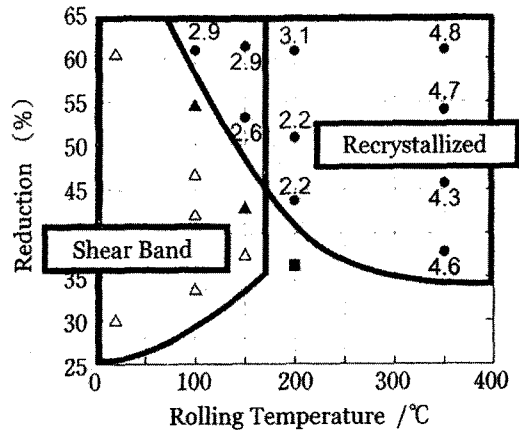


Fig. 1. Effect of rolling condition on grain size of AZ31B quenched after high speed severe rolling (figures are representing grain diameter).

(super plastic deformation)을 가하여 동적재결정을 촉진시키는 방법이 있다. 마그네슘합금에 대하여는 Fig. 2에 나타난 ECAE(Equal Channel Angular Extrusion)법,<sup>2)</sup> MDF(Multi-Directional Forging)법,<sup>3)</sup> TE(Tortion Extrusion)법<sup>4)</sup> 등이 적용되고 있다. 이들 방법은 재료의 형상이 가공 전이나 후에도 동일하게 유지되는 형상불변형 가공법이기 때문에 원리적으로는 변형률을 무한대로 부여할 수 있으며  $\epsilon=3.0$  이상의 변형률에서는 1 μm 이하의 초미세립이 실현되고 있다.

ECAE법은 단면적을 감소시키는 기존의 압출법과는 달리 동일한 단면적을 갖는 두개의 채널로 된 다이틀 통하여 플런저의 압력에 의한 연속적인 전단변형으로 강한 소성변형을 부여하는 가공방법이다. MDF법은 가공할 때마다 소재를 90°회전시켜 온도강하 중에 압축을 행하는 가공법으로 압축방향을 90°씩 바꿀 때 변형률의 차( $\Delta\epsilon$ )를 일정하게 하면 치수비도 일정하게 되어 반복 압축을 무한대로 할 수 있다. TE법은 내면이 비틀어진 컨테이너 내에서 재료를 반복적으로 압출하는 방법이다. 압출 시에 다이가 회전하면서 생기는 높은 정수압으로 변형에 수반하는 파괴가 없으므로 큰 변형을 부여할 수 있다.

Fig. 3은 ECAE가공에 의한 AZ61합금의 미세조직과 이의 어닐링조직으로서 8 pass 반복가공으로 0.5 μm의 극미세 결정립이 얻어지고 있으며 Hall-Petch 관계식에 따라 강도는 증가하고 연신율도 30% 이상에 달하여 양호한 성형성이 기대된다. Fig. 4는 623K에서 423K로 강하시키면서 다축단조한 경우의 미세조직으로서 누적

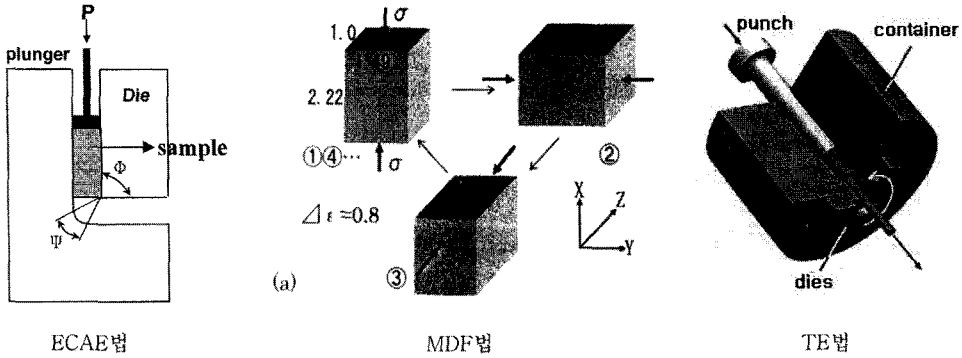


Fig. 2. Concepts of super plastic deformation.

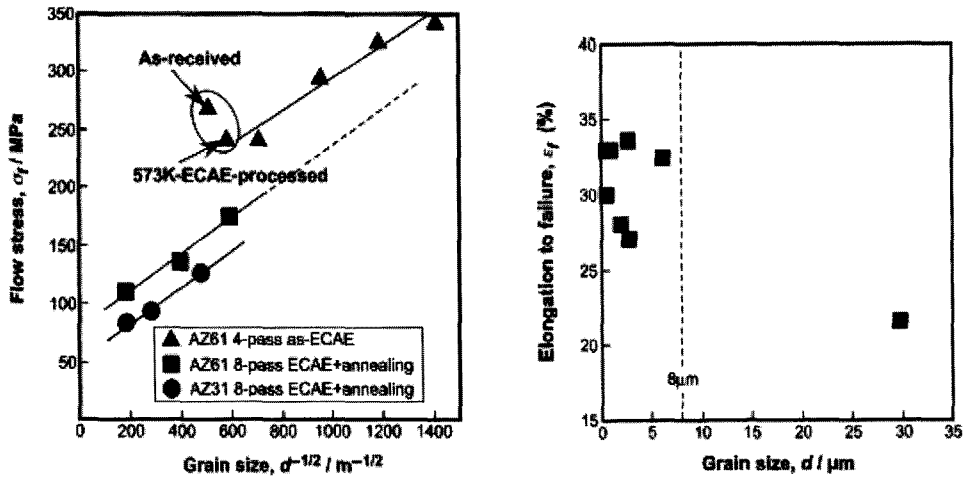


Fig. 3. Effect of grain refinement on flow stress and elongation of AZ61 alloy deformed by ECAE.

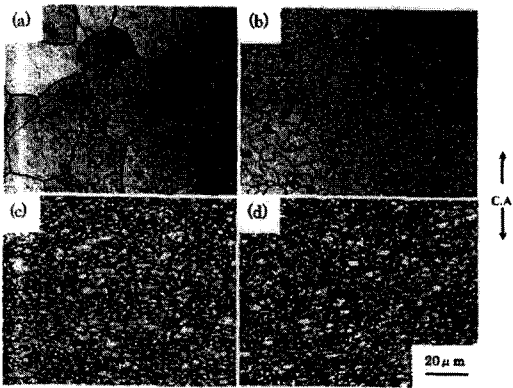


Fig. 4. Microstructures evolved in AZ31 alloy during MDF with continuous decreasing temperature. (a) as annealed, (b)  $T=623K$ ,  $\Sigma\epsilon=0.8$ , (c)  $T=523K$ ,  $\Sigma\epsilon=1.6$ , (d)  $T=473K$ ,  $\Sigma\epsilon=3.2$ .

변형율( $\Sigma\epsilon$ )의 증가에 따라 결정립 미세화가 현저하게 진행하여  $\Sigma\epsilon=3.2$ 에서 결정립경은  $0.8 \mu m$ 까지 세립화된다.<sup>3)</sup> 초미세립 시료( $d=0.36 \mu m$ )에 대한  $423K$  인장시험의 경우 변형속도  $8.3 \times 10^{-5} / sec$ 에서 총연신율은 250%로 초소성특성을 나타내고 있으므로 미세립화에 의하여 성형성의 현저한 개선이 기대된다. Fig. 5는 AZ31합금에 대하여 압입속도  $0.06 mm/sec$ , 회전속도  $150 rpm$ 으로 TE가공한 경우의 조직으로 시료의 외주부는 동적재결정에 의하여 약  $1.1 \mu m$ 의 초미세립이 달성되고 있으며 실온가공에서도 마찰발열에 의하여 재결정이 일어나는 것이 특징이다.<sup>4)</sup> 그러나 이상과 같은 강소성 가공법은 아직 실험실 수준에 있으며 실용화에 이르기까지는 공정의 연속화 문제, 설비 엔지니어링 문제 등 극복해야 할 난제가 많이 남아 있다.

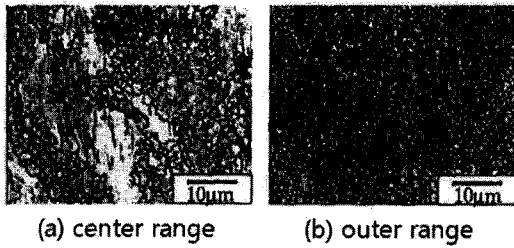


Fig. 5. Microstructures of AZ31 alloy deformed by TE (twist extrusion) (extrusion rate : 0.06 mm/s, dies rotating : 150 rpm).

2.2. 집합조직 제어 압연법

마그네슘 합금의 가공 시에 나타나는 저면집합조직

은 저온에서 압하율이 높아지면 Fig. 6의 A도와 같이 (0001)극의 집적이 RD축상에 TD위치를 중심으로 2개로 분리되어 double peak의 방위를 나타내나 통상은 B도와 같이 각 결정의 c축이 압연 면에 수직방향으로 집적된 동심원으로 된다. 압출판재의 경우에 피크의 방위는 C도와 같이 폭 방향으로 퍼지고 있으나 압연재와 유사하게 강한 집적을 나타낸다.<sup>5)</sup>

집합조직을 제어하는 압연법의 하나로서 상하의 롤의 회전속도를 달리하여 롤의 접촉면에 큰 전단응력을 발생시키는 異周速 압연법(different roll speed rolling)이 있다.<sup>6-8)</sup> 이 압연법은 Fig. 7에서와 같이 고속롤 측에서는 중립점이 출구 측 근방으로 이동하고, 저속롤 측에서는 입구 측 근방으로 이동하므로 양 중립점 사이의 영

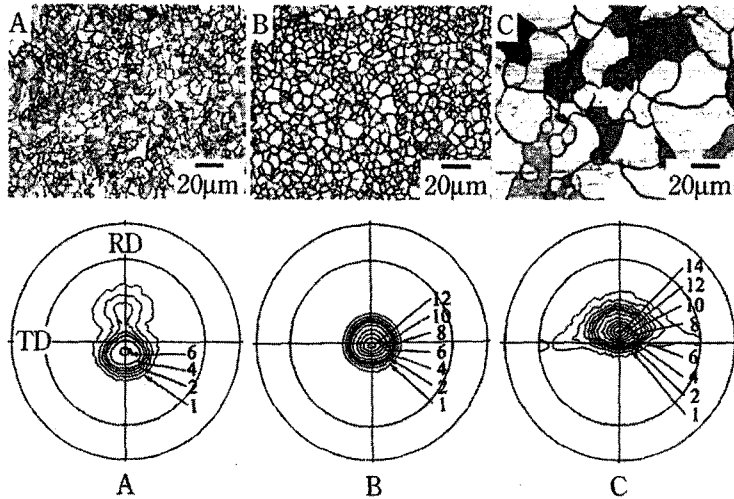


Fig. 6. Microstructures and (0001) pole figures of AZ31 sheets after homonization (A, B : rolled sheets, C : extruded sheet).

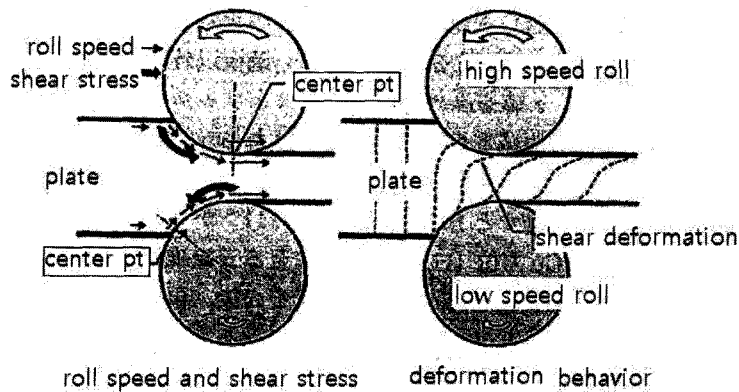


Fig. 7. Schematic view of different roll speed rolling and deformation behavior.

역에서는 상하면에서의 전단응력 방향이 반대로 되는 교차전단 영역이 형성된다. Al박판의 경우 이주속압연 후의 재결정에서 압연집합조직의 일부가  $\gamma$ 섬유집합조직을 형성하여 r값(Lankford 값)이 2배나 향상된다고 보고되고 있다.<sup>6)</sup> 마그네슘 합금의 異周速 압연에서는 Fig. 8과 같은 전단대가 형성되고 또 압축변형에 전단변형이 부가되는 효과에 의한 equivalent strain의 증가에 의하여 집합조직의 변화와 결정립의 미세화가 달성된다. Fig. 9는 異周速 압연재의 성형실험 결과로서 Erichsen값의 증가, 높은 한계성형비(1.5), deep drawing온도의 저하 등이 달성되고 있으며, {0001}면이 RD의 반대방향과 5° 기울어져 있어 길이방향과 두께방향에서 성형성이 향상된다.<sup>7)</sup> 中浦 등의 연구에서도 온도 250°C, 압하율 62%, 주속비 1.5로 AZ31합금을 압연하는 경우 동적재결정에 의하여 평균입경 2.4  $\mu\text{m}$ 의 미세한 결정립 형성이 보고되고 있다. 또 주속비를 증가시키면 더욱 미세한

결정립을 얻을 수 있으며 1패스 당 한계압하율(LDR)은 통상압연의 약 2배로 증가하여 박판압연의 가공성 향상에 유효함이 실증되고 있다.<sup>8)</sup>

압연 시에 판 두께 방향으로 전단변형을 도입하는 방법으로서 cross roll 압연법<sup>9)</sup>이 있다. 이것은 Fig. 10과 같이 working roll의 축선과 압연방향이 만드는 각을 어긋나게 해서 롤의 표면에서 폭 방향의 속도성분을 발생시켜 ND-TD면에서 전단변형을 생기게 하는 방법이다. RD-TD 면에서 TD에 대하여 7.5° 틀어진 cross roll 압연에서 AZ31합금을 20%압하율로 압연하면 강한 전단변형이 일어나 집합조직의 강도는 통상의 압연보다 감소하여 Erichsen값은 통상압연의 경우보다 1.6~1.8배나 높아진다. 따라서 Fig. 11에서 보는 바와 같이 프레스 성형성은 매우 양호해 진다. 또 기계적 특성의 이방성

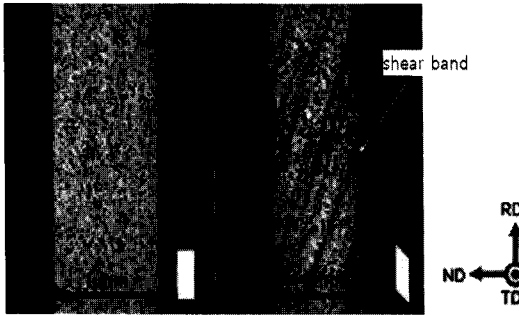


Fig. 8. Microscopic structures of ordinary rolled and different roll speed rolled sample (AZ31B alloy, 6 pass rolling).

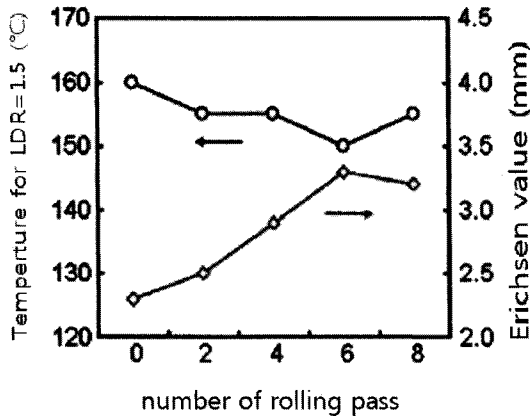


Fig. 9. The results of deep drawing test of the sheets rolled by different roll speed.

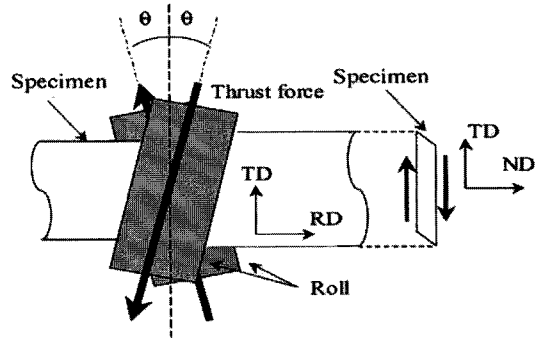


Fig. 10. Schematic view of cross-rolled rolling.

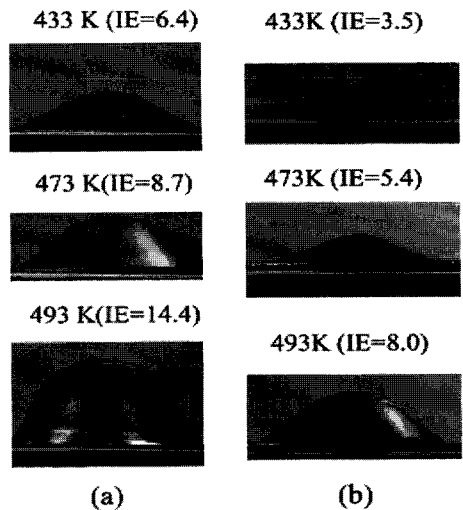


Fig. 11. The specimens after Erichsen test, where (a) the cross-rolled and (b) the normal-rolled specimens.

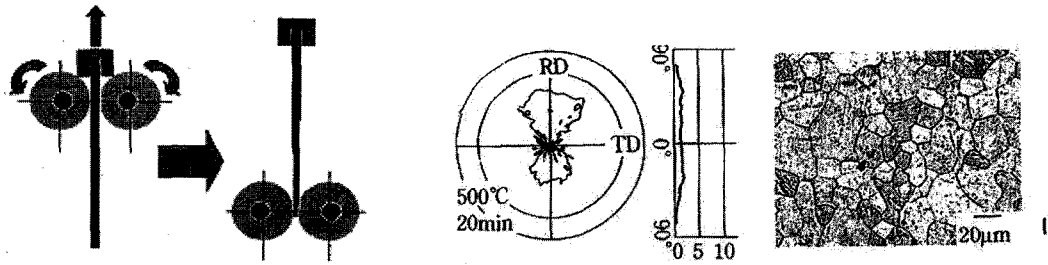


Fig. 12. Schematic view of asymmetric roll drawing and texture/microstructure after asymmetric rolling followed by annealing.

을 완화하기 위하여 판재를 길이 방향으로 압연한 후에 90° 회전시켜 폭 방향으로 압연하는 교차 압연에서도 집합조직의 강도가 약해지기 때문에 Erichsen값이 상승하여 성형성이 양호해 지는 것으로 보고되고 있다.<sup>10)</sup> 이외에 롤의 축을 Fig. 12와 같이 편심시켜 연속적으로 판 두께를 변화시키는 편심롤(asymmetric roll) 인발압연법이 있다. 집합조직의 random화는 실온성형성의 관점에서 이상적인 조직으로 편심롤 압연(압연온도 200°C, 압하율 22%)의 전과 후에서 어닐링을 실시하는 경우 Fig. 12에서 보는 바와 같이 성형성에 기여하는 double peak형 집합조직이 형성된다.<sup>5)</sup>

### 3. 응고성형 기술

전술한 바와 같이 마그네슘은 상온가공이 곤란하여 부품성형은 다이캐스팅과 같은 용체성형에 주로 의존하여 왔다. 다이캐스팅은 생산성이 높고 near net shaping이 가능하고 응고조직이 미세한 점 등의 장점이 있어 고속사출, 고진공, 금형온도 제어 등의 기능을 조합한 다이캐스팅 기술이 실용되고 있다. 최근 용체성형기술의 일종으로 반응고성형 또는 반응용성형으로 불리는 SSF(Semi-solid forming)법이 주목되고 있다. 이 방법은 고액 공존상태의 저점도 유동성을 갖는 반응고 슬러리를 금형에 장입하여 성형하는 기술로서 응고조직은 Fig. 13과 같이 수지상정의 주조조직과는 달리 응고과정에서 수지상정이 분리되어 구상조직으로 되므로 기계적 특성, 치수정밀도, 금형수명 등이 현저하게 개선된다. 이러한 성형법으로 고액 공존상태에서 금형하여 만든 빌렛(직경 40~70 mm)을 반응용상태로 재가열 한 후 다이캐스팅기로 사출하여 성형하는 Fig. 14와 같은 thixocasting 법<sup>11)</sup>이 있다. 또 수mm의 마그네슘 칩을 실린더 내에 장입하고 이를 스크류 회전에 의한 이동과정에서 가열하여 반응용 상태로 한 후 노즐을 통하여 금형 내로 고속 사

출하여 성형하는 thixomolding법<sup>12)</sup>이 실용되고 있다. 이와 같은 반응고 성형법은 성형온도가 낮으므로 응고결함이 없고 치수정밀도와 회수율이 높으며 수10%의 고상율에서도 성형이 가능하여 제품의 형상이나 요구품질에 대응하여 최적의 고상율을 선택할 수 있다. thixomolding으로 실행상 프리폼을 만들어 이를 단조공정에서 성형하는 고강도화 신공정기술도 개발되고 있다.

최근 휴대폰이나 노트북 PC에 마그네슘 박판의 수요가 증가함에 따라 반응고 슬러리어서 직접 박판을 제조하는 방법도 개발되고 있다.<sup>13)</sup> 즉 Fig. 15와 같이 마그네슘 용탕을 경사냉각판에 흘려 반응고 슬러리를 제조하고 이를 연속주조법으로 thixocasting용 또는 thixomolding용 빌렛을 제조한다. 경사냉각판의 길이와 온도를 적절히 제어하면 응고조직은 Fig. 13에서와 같이 수지상의 주조조직과는 달리 초정이 퇴적하여 성장한 입상조직으로 된다. 이와 같은 방법으로 AZ91D 및 AZ31B합금의 빌렛(직경40~70 mm) 제조하고 이를 thixocasting에 의하여 휴대폰의 문자판을 제조하는 방법이 개발되고 있다. 또 Fig. 15의 연속주조 장치를 twin roll 장치로 교체하여 반응고 슬러리로부터 직접 박판을 제조하는 방법을 AZ31B합금에 적용하여 두께 2 mm 및 3 mm, 폭

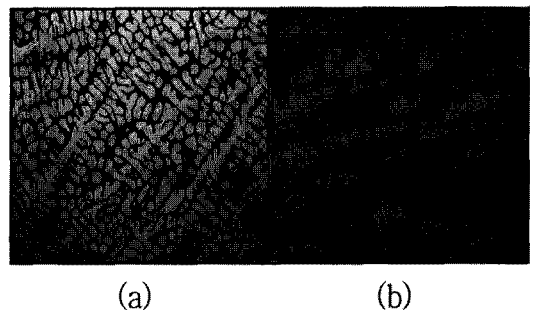


Fig. 13. Comparison of dendritic casting structure(a) with semi-solid granular structure(b).

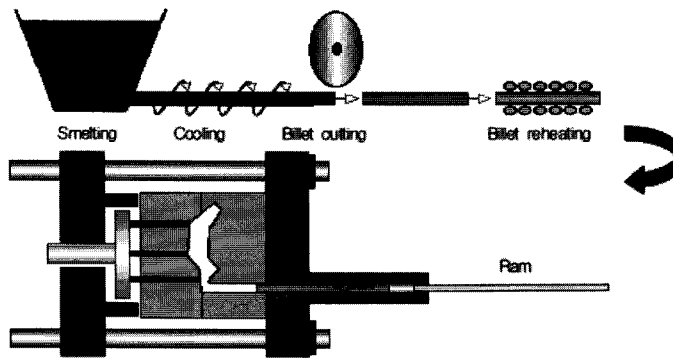


Fig. 14. Schematic view of thixocasting process.

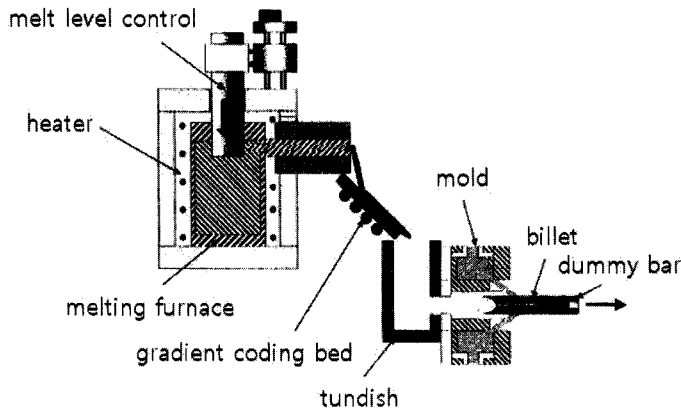


Fig. 15. Continuous casting equipment of semi-solid slurry formed on gradient cooling bed.

200 mm의 박판재 제조에 성공하고 있다. 이와 같이 제조된 박판재는 입상결정이 균일하게 분포하여 성형성이 우수하므로 1패스로 압하율 25% 까지 냉간압연이 가능하며, 열간에서는 두께 2 mm에서 0.4 mm까지 압연이 가능하다고 보고되고 있다.<sup>13)</sup>

#### 4. 소성가공기술

##### 4.1. 판재압연기술

압연용 마그네슘 합금으로는 AZ31B 합금이 주로 사용되나 가공도의 한계 때문에 박판재의 제조에는 반복 압연이 불가피하며 마무리 압연은 보통 473K이상의 온대에서 이루어진다. 박판재는 sheet압연이나 coil압연으로 제조되며 sheet압연은 세계적으로 가장 많이 적용되는 방법으로 설비와 공정이 간단하나 형상제어성이나 생산성이 낮고 표면결함이 발생하기 쉬운 점이 문제가 되고 있다. 독일에서는 sheet압연으로 폭이 1000 mm가 넘

는 광폭재가 제조되고 있다. coil압연은 대량생산의 장점이 있으나 설비가 대형화하고 온도관리가 어려운 점이 결점이다. 최근 日本金屬(株)에서는 금형을 이용한 중력주조와 냉각제어를 통하여 주조조직이 제어된 잉곳(150 mmT×720 mmW×1470 mmL)을 제조하고 이를 열간압연 전에 균질화 처리하여 Al-Mn계 금속간화합물의 정출이 억제된 α단상으로 한 후, 4단 Stekel mill에 의하여 두께 4.5 mm 까지 양질의 박판을 제조하는 coil압연에 성공하고 있다. 또 마무리 압연에서는 reversive mill에 의한 온간압연으로 두께 0.3~3 mm 범위에서 폭 320 mm까지, 두께 0.3~0.045 mm 범위에서 폭 200 mm의 박판재를 제조하고 있으며, 두께 50 μm의 극박 판재까지 제조하고 있다.<sup>14)</sup> 그러나 6방정의 저면이 판면에 평행으로 배열하는 압연집합조직은 재결정 후에도 그대로 유지되기 때문에 판재의 성형성을 저해하고 기계적 성질의 이방성의 원인이 된다. 따라서 성형성의 개선과 집합조직의 형성을 완화시키는 압연법으로서 전술

한 異周速 압연법, cross roll 압연법, 편심롤 인발압연법 등이 향후의 신기술로서 주목되고 있다.

#### 4.2. 압출기술

압출용 마그네슘합금으로는 AZ31, AZ61이 주로 사용되며 압출방법에는 소재를 ram에 의하여 금형으로 밀어내는 직접압출법과 금형에 부착된 튜브형 hollow stem을 밀어 압력의 인가방향과 제품의 압출방향을 반대로 하는 간접압출법이 있다. 실용적으로는 직접압출법이 많이 사용되나 최근에는 마찰발열, 압출속도, 표면품질, 미세조직 등에서 유리한 간접압출법에 관심이 증대되고 있다. 압출의 경우에도 슬립게가 제한되기 때문에 압연에서와 같이 250°C이상으로 가열하여 열간에서 성형해야 하나 빌렛과 압출다이 사이의 마찰로 인한 표면결합의 발생과 낮은 압출속도 때문에 제조비용이 높다. 이러한 단점을 극복하기 위한 새로운 압출법으로 靜水壓 압출법<sup>15)</sup>이 최근 일본과 유럽에서 활발히 연구되고 있다. 靜水壓 압출법은 Fig. 16과 같이 유체의 정수압이 소재에 가해지는 상태에서 압출되므로 소재와 컨테이너 사이에 마찰이 없고 항복응력은 불변이나 인장응력은 균열을 유발하는 임계값 이하로 낮아져 내부결합이 적고 치수 정밀도도 양호하다. 압출속도는 50~100 m/min으로 알루미늄 압출과 같은 속도까지 개선되고 있으며 직경 160 mm, 길이 790 mm의 빌렛을 원소재로 하여 원형관, 앵글 등의 압출에도 성공하고 있다. 한편 제품 기술로서 최근 일본에서는 압출법으로 어느 정도 두께의 판재를 제조한 후 마무리 압연으로 박판재를 제조하는 압출+압연의 복합공정이 실용화 되고 있다. 이 방법

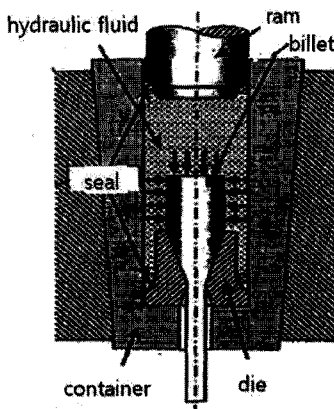


Fig. 16. Schematic view of hydrostatic extrusion of hollow shapes.

으로 판폭 130 mm에 대하여 최소 두께 0.4 mm, 판폭 300 mm에 대하여 최소두께 1 mm인 판재의 제조가 가능하여 프레스 성형품이 디지털카메라, 노트북 컴퓨터, 휴대폰 등에 적용되고 있다.<sup>16)</sup> 이 방법은 주조슬래브의 반복압연으로 박판을 제조하는 기존의 방법보다 공정능률이 높은 것으로 평가되고 있다.

#### 5. 스크랩 리사이클링

마그네슘의 성형에 가장 많이 이용되는 다이캐스팅 공정에서 제품회수율은 50% 정도에 불과하며 나머지는 스크랩으로 발생되므로 원가절감에는 이의 재활용이 필수적이다. 스크랩에 함유된 주요 불순물은 연강계 용해로나 캐스팅 다이에서 유래하는 Fe와 대기 중 또는 부착수분에서 유래하는 수소이다. Fe는 마그네슘합금의 내식성을 저해하므로 AZ91D나 AM60B에서는 0.005%이하로 규제하고 있다. 650~750°C에서 순수한 Mg, Mg-Al합금 및 Mg-Mn합금의 Fe용해도는 각각 다음 식으로 표시되어 Al과 Mn의 함량이 높아질수록 Fe의 용해도는 낮아진다.<sup>17)</sup> 따라서 스크랩을 용해하여 Al과 Mn을 적당량 첨가하면 Fe는 Al-Fe계, Mn-Fe계 또는 Al-Mn-Fe계 정출물로 석출시켜 제거할 수 있다. 이러한 방법으로 KIST에서는 스크랩의 정련으로 1차지급과 유사한 수준의 정련지금을 제조하는데 성공하였다.<sup>18)</sup>

$$\log[\%Fe]_{in Mg} = -\frac{4,133}{T} + 2.846$$

$$\log[\%Fe]_{in Mg-Al} = [\%Al]^{-0.46} \cdot e^{6.6-10036/T}$$

$$\log[\%Fe]_{in Mg-Mn} = \left(\frac{4133}{T} + 2.846\right) - \left(\frac{3662}{T} - 3.267\right) [\%Mn]$$

한편 스크랩 표면에 부착된 수분에 의해 마그네슘 용체에는 수소가 용해되어 용고 시에 미세기공으로 잔존하여 기계적 성질을 저해한다. 이러한 수소의 제거를 위하여 용탕에 Ar등의 불활성 가스를 취입하는 방법이 널리 이용되고 있다. 용체 중에 Ar가스를 취입하면 용체 중에 gas bubble이 생성되고 bubble의 내부는 H<sub>2</sub>에 대하여 진공상태이므로 Ar bubble과 melt 계면에서 탈수소 반응이 일어난다. 탈수소 반응은 ①용존수소(H)의 bubble계면으로의 이동, ②bubble/Liquid metal 계면의 liquid측 경계층을 통하는 H의 이동, ③Ar Bubble 표면에서 H<sub>2</sub> gas의 생성반응(H=1/2H<sub>2</sub>), ④(H<sub>2</sub>+Ar) bubble의 합체 및 표면으로 부상분리의 과정을 통하여 일어



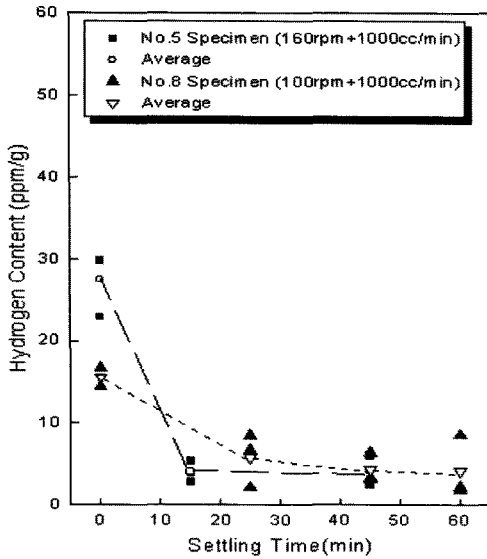


Fig. 17. Variation of Hydrogen content in Mg melt by Ar bubbling and Impeller stirring.

난다. 금속용체를 강하게 교반하는 경우에는 ①~④의 과정은 빠르게 진행하므로 효과적인 탈수소가 가능하다. Fig. 17은 AZ91D 스크랩을 용해하여 Ar가스를 용탕 중에 1000 cc/min로 취입하면서 임펠러의 회전속도를 100 rpm 및 160 rpm으로 용탕을 교반하는 경우 수소농도의 변화를 나타낸 것으로서 10분 이내에 일차지급에 버금가는 수준으로 수소함량의 저감이 가능하다.

한편 마그네슘의 기계가공에서는 절삭분과 같은 스크랩도 많이 발생한다. 특히 마그네슘 분진은 폭발의 가

능성이 있으므로 이러한 분진이 함유된 스크랩의 리사이클링에는 폭발특성에 대한 이해가 필요하다. 분진의 폭발은 개개 입자의 연소에 기인하므로 비표면적이 큰 입자일수록 폭발하기 쉽다. 따라서 미세한 입자일수록 폭발하한농도가 낮아진다. Fig. 18에서 보면 폭발하한농도는 약 90 g/m<sup>3</sup>으로 입자직경이 약 74 μm보다 크면 폭발하한농도는 약 270g/m<sup>3</sup>으로 되고, 입자직경이 약 125 μm 이상이면 폭발하한농도는 500g/m<sup>3</sup>으로 되어 입자직경이 약 74 μm이상에서 폭발성은 매우 낮아진다.<sup>19)</sup> 마그네슘 스크랩의 리사이클링에서는 이와 같이 미세 분진의 크기와 함량을 고려할 필요가 있다.

### 6. 결 론

마그네슘합금에 대한 조직제어 기술의 연구개발 동향은 결정립 미세화와 난가공성의 개선을 위한 집합조직 제어의 두 방향에서 전개되고 있다. 결정립 미세화의 수단으로는 동적재결정을 이용하는 방법이 주로 이용되어 동적재결정이 용이한 합금설계와 고속-대압하 압연기술 등에 의하여 기존의 실용합금인 AZ31합금에서는 기대할 수 없는 미세한 결정립과 우수한 한계가공비(LDR)가 달성되고 있다. 또 마그네슘 합금의 취약한 강도와 성형성을 개선하기 위한 초강가공법으로 ECAE법, MDF법, TE법 등이 시도되어 서브 마이크론 수준의 초미세립을 얻고 있다. 그러나 아직은 실험실 단계에 머무르고 있으며 실용기술로 발전하기 위해서는 양산성을 고려한 설비기술의 개발이 필요하다. 마그네슘 합금의 성형을 어렵게 하는 집합조직의 형성을 완화시키기 위한 가공법

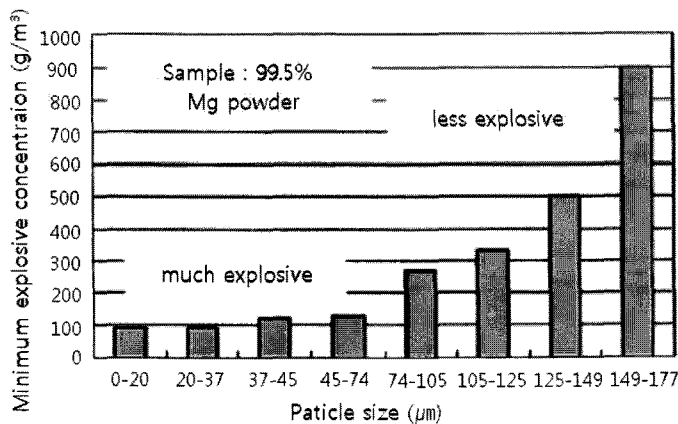


Fig. 18. Relation between Mg particle size and Minimum explosive concentration.

으로서 異周速(different roll speed rolling)압연법의 유용성이 실증되고 있다. 이외에도 크로스롤(cross roll) 압연법, 편심롤(asymmetric roll) 인발압연법의 가능성도 보고되어 향후의 기술로서 주목된다.

용고성형 기술에서는 고상과 액상이 공존하는 상태에서 성형하는 반응고 가공법(semi-solid forming)의 하나로서 thixocasting법과 thixomolding법이 실용수준으로 발전하고 있다. 또 반응고 슬러리의 연속주조에 의하여 thixocasting용 빌렛을 제조하는 기술, 반응고 슬러리로 부터 박판을 직접 제조하는 twin roll 압연법의 기술적 가능성도 실증되고 있다.

마그네슘 합금은 展伸材로서의 용도가 많은 만큼 소성가공 기술은 압연기술, 압출기술, deep drawing 기술을 중심으로 발전하여 왔다. sheet압연에서는 폭 1000 mm이상의 팽폭 판재가 제조되고 있으며, coil압연에서는 온간압연으로 50  $\mu$ m의 극박 판재까지 제조되고 있다. 압출에서는 압출속도, 미세조직, 표면품질 등이 우수한 간접압출법에 대한 관심이 높아지고 있다. 또 정수압 압출법이 원형관이나 앵글의 압출에 성공하여 자동차를 위시한 운송기기 부품의 제조법으로 유망 시 된다. 프레스 성형기술에서는 편치의 만곡부에서 일어나는 파단을 방지하는 편치냉각 및 블랭크 가열식 deep drawing방법, 컵 벽의 균일변형을 가져오는 정수압 이용 drawing법, 소각반경을 갖는 각종용기의 2단 프레스 냉간성형법 등이 신기술로서 등장하고 있다.

마그네슘합금의 용용에 대한 관심은 자동차 산업, IT 산업, 스포츠 산업을 중심으로 고조되고 있으나 가격, 품질, 가공기술 부문에서 해결해야 할 과제가 많이 남아 있으며 마그네슘 제품의 제조 측면에서는 접합기술과 표면처리기술의 개발도 중요하다. 또 원재료의 확보 측면에서 마그네슘의 리사이클링을 위한 용해, 정련기술도 필요하다. 스크랩에 함유된 유해 불순물인 Fe는 Mn이나 Al계 정출물로 침강시켜 제거가 가능하고, 용존 수소는 용탕의 Ar bubbling으로 제거가 가능하다. 그러나 스크랩의 재용해 시에는 폭발의 위험성이 있는 미세립 분진이 많이 함유되지 않도록 주의가 요한다. 국내의 경우 자동차 산업, 전자산업, 정보통신산업 등 마그네슘의 수요산업이 강한 만큼 산학협력에 의한 마그네슘 소재분야의 연구발전이 요구된다.

## 후 기

본 총설은 한국과학기술정보연구원(KIST)의 「심층정

보기술동향분석」 보고서를 기초로 하여 작성된 것으로서 KISTI의 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

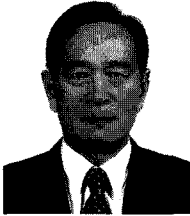
1. 左海哲夫, 2009: マグネシム合金の壓延による組織制御, 塑性と加工, **50**(578), pp. 201-205.
2. Yu Yoshida et al, 2005: Realization of high strength and high ductility for AZ61 magnesium alloy by severe warm working. *Sci. Tech. Adv. Mater.*, **6**, pp. 185-194.
3. Jie Xing et al., 2004: Formation of fine grained structure in a alloy AZ31 during multi-directional forging with decreasing deformation temperature, *J. Japan Inst. Light Met.* **54**(11), pp. 527-531.
4. 水沼 晋, 2009: ねじり壓出しにおける大ひずみ加工特性と結晶粒微細化, 塑性と加工, **50**(578), pp. 186-191.
5. 高津正秀, 2009: マグネシム合金板の成形性評価と成形性改善の取組み, 塑性と加工, **50**(576), pp. 13-17.
6. 小山克己, 小松原俊雄, 2009: 温間異周速壓延による高r値のアルミニウム薄板の創製, 塑性と加工, **50**(578), pp. 211-215.
7. 異周速壓延法: <http://unit.aist.go.jp/mrisus/ci/group/microcg/dsr.html>
8. 中浦祐典, 渡部 晶, 大堀 紘一, 2008: 異周速壓延によるマグネシム合金板の結晶粒微細化と壓延加工性向上, *金屬*, **78**(4), pp. 341-346.
9. Yasumasa Chino et al., 2006: Enhanced formability at elevated temperature of a cross-rolled magnesium alloy sheet, *Material Science Engineering*, **A441**, 2006, pp. 349356.
10. Yasumasa Chino et al., 2006: Press formability of a rolled AZ31 Mg alloy sheet with controlled texture, *Materials Letters*, **60**, pp.173-176.
11. 심재동, 2007: KISTI 유망기술 100선(가공성형성이 우수한 마그네슘 합금), KISTI 발간, pp. 1-52.
12. 附田之欣, 2007: マグネシウム合金のチクソモルディグ, 塑性と加工, **48**(556), pp. 396-400.
13. 茂木徹一, 2008: 小形薄肉加工できるマグネシム合金の半凝固半溶融鑄造, *工業材料*, **56**(7), pp. 62-67.
14. 左藤雅彦, 2007: Mg合金の板壓延とその利用, 塑性と加工, **48**(556), pp. 373-378.
15. A. J. Den Bakker A. J. et al., 2004: Process and Alloy Development for Hydrostatic Extrusion of magnesium, *Proc. 6th Inter. Conf. on Mag. Alloys & Appl.*, Wiley-VCH Verlag, 2004, pp. 324-330.
16. 村井 勉, 2007: マグネシウム合金の壓出し架空と形材への利用, 塑性と加工, **48**(556), pp. 379-383.
17. J. Y. Byun et al., 1998 : Effect of Alloying Elements on the Iron Solubility of Magnesium alloys, *J. Kor. Inst. Met. &*

Tater. 36(10), pp. 1715-1721.

18. 심재동, 변지영 : 경량부품소재의 Recycling기술개발, KIST보고서 2000-G-AM-01-C-007.

19. 東 健司, 2009: NEDO 프로그램 「マグネシウム鍛造部材技術開發プロジェクト」の目指す新展開, 輕金屬, 59(10), pp. 576-588.

沈 載 東



- 1961~1968 서울대학교 공과대학 금속공학과 학사
- 1975~1977 일본 Tohoku Univ. 대학원 공학석사
- 1977~1980 일본 Tohoku Univ. 대학원 공학박사
- 1968~2003 한국과학기술연구원 (KIST) 책임연구원
- 현재 한국과학기술정보연구원 전문연구위원

李 東 輝



- 1960~1965 인하대학교 자원공학과 학사
- 1974~1976 인하대학교 대학원 공학석사
- 1976~1979 인하대학교 대학원 공학박사
- 1971~2003 한국과학기술연구원 (KIST) 책임연구원
- 현재 한국과학기술정보연구원 전문연구위원

〈 廣 告 〉 本 學 會 會 社 發 刊 的 資 料 를 販 賣 하 오 니 學 會 會 社 務 室 로 문 의 바 략 니 다.

- \* EARTH '93 Proceeding(1993) 457쪽, 價 格 : 20,000원  
(The 2th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
- \* 자원리사이클링의 실제(1994) 400쪽, 價 格 : 15,000원
- \* 학회지 합본집 I~VIII 價 格 : 40,000원, 50,000원(비회원)  
(I : 통권 제1호~제10호, II : 통권 제11호~제20호, III : 통권 제21호~제30호, IV : 통권 제31~제40호, V : 통권 제41호~제50호, VI : 통권 제51호~제62호, VII : 통권 제63호~제74호, VIII : 통권 제75호~제86호)
- \* 한 · 일자원리사이클링공동워크샵 논문집(1996) 483쪽, 價 格 : 30,000원
- \* 한 · 미자원리사이클링공동워크샵 논문집(1996) 174쪽, 價 格 : 15,000원
- \* 자원리사이클링 총서I(1997년 1월) 311쪽, 價 格 : 18,000원
- \* '97 미주 자원재활용기술실태조사(1997년) 107쪽, 價 格 : 15,000원
- \* 日本의 리사이클링 産業(1998년 1월) 395쪽, 價 格 : 22,000원, 발행처-文知社
- \* EARTH 2001 Proceeding (2001) 788쪽, 價 格 : 100,000원  
(The 6th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)
- \* 오재현의 자동차 리사이클링기행(2003년 2월) 312쪽, 價 格 : 20,000원, 발행처-MJ미디어
- \* 리사이클링백서(자원재활용백서, 1999년) 440쪽, 價 格 : 15,000원, 발행처-文知社
- \* 리사이클링백서(자원재활용백서, 2004년) 578쪽, 價 格 : 27,000원, 발행처-淸文閣
- \* 리사이클링백서(자원재활용백서, 2009년) 592쪽, 價 格 : 30,000원, 발행처-淸文閣
- \* EARTH 2009 Proceeding (2009) 911쪽, 價 格 : 100,000원  
(The 10th International Symposium on East Asian Resources Recycling Technology)