

AZ91 마그네슘합금 절분 및 스크랩의 재활용에 관한 연구

李斗勉 · 李埈瑞 · 李智煥
仁荷大學校 工科大学 金屬工學科

The study on the recycle for machined chips and scraps of AZ91 magnesium alloy

Doo-Myun Lee, Joon-Seo Lee and Chi-Hwan Lee
Dept. of Metallurgical Eng., Inha University

요 약

AZ91 마그네슘합금 절분 및 스크랩의 재활용을 목적으로 절분 및 스크랩을 상온가압하여 압출용 빌렛을 얻었다. 이 압출용 빌렛을 압출비를 25 : 1로 고정하고, 압출온도를 300~380°C로 변화시켜 가면서 시편을 제조하였으며, 비교재로 마그네슘합금 주조제도 열간압출을 행하였다. 마그네슘합금 절분 및 스크랩을 열간압출함에 따라 매우 미세한 재결정 조직을 얻었으며, 인장강도 및 연신률은 각각 330 MPa, 10%로 주조재를 열간압출한 재료와 거의 비슷한 기계적 특성을 나타내었다.

ABSTRACT

This paper was focused to optimize hot extrusion condition of Mg machined chips and scraps as fundamental basic research for the recycle of Mg alloy. We have been performed to extrude at 300~380°C temperature range under the extrusion ratio of 25 : 1 after cold-pressing AZ91 Mg machined chips and scraps. AZ91 Mg ingots was used as reference materials. Microstructure observation showed that the extruded machined chips were perfectly bonded and extruded materials became fine grain size (20 μm) by recrystallization during hot extrusion. The specimens extruded from the machined chips, scraps and Mg ingot indicated tensile strength of 330 MPa and the elongation of 10% at room temperature.

1. 서 론

마그네슘합금은 실용금속재료 중에서 가장 가벼운 금속으로, 고비강도, 고비탄성 등 우수한 기계적 특성을 가지고 있으며, 진동, 충격, 전자파 등에 대한 흡진성이 우수하여 경량화가 요구되고 있는 자동차, 우주항공분야의 구조용재료 및 전기 기기부품의 기능성 재료로서 여러가지 우수한 특성을 가지고 있다¹⁻³⁾. 특히, 자동차산업의 경우 최근 세계적으로 에너지절약 및 환경공해규제가 대폭 강화됨에 따라 마그네슘합금에 의한 소재 경량화는 매우 긴박한 과제로 대두되고 있다. 따라서 초경량합금 개발의 시급성에 비추어 마그네슘합금을 전자 또는 자동차부품에 적용하는 데는 무엇보다도 제조원가 절감이 기대되는 마그네슘 재활용 기술확립이 시급히 요구되고 있는 실정이다. 현재, 미국이나 일본 등의 선

진국 자동차산업에 사용되어지고 있는 마그네슘합금의 90% 이상이 다이캐스팅에 의해 제조된 주조품이다. 그러나 다이캐스팅에 의한 제조의 경우 sprue, runner, gate, overflow 등의 스크랩이 많이 생겨 이에 따른 소재의 손실률이 커 제조원가 상승의 원인이 되고 있다.

일반적으로 마그네슘합금 스크랩의 후처리방법으로서 재용해에 의한 방법이 제시되고 있으나, 이들 방법은 많은 노력과 비용을 동반할 뿐만 아니라 용해시 드로스(Dross)나 슬러지(Sludge) 등이 많이 생겨 용해폐기물 처리가 커다란 사회문제로 대두되며, 재용해 회수률이 낮아 마그네슘합금 후처리법의 개선이 마그네슘 실용화를 촉진하는데 있어서 하나의 커다란 문제점으로 대두되고 있다. 또한, 마그네슘합금 부품의 기계가공시에 생기는 절분(Chips) 및 미세분말은 활성이 매우 풍부하여 취급이 까다롭고 화재의 위험성이 있으므로 경제적으로

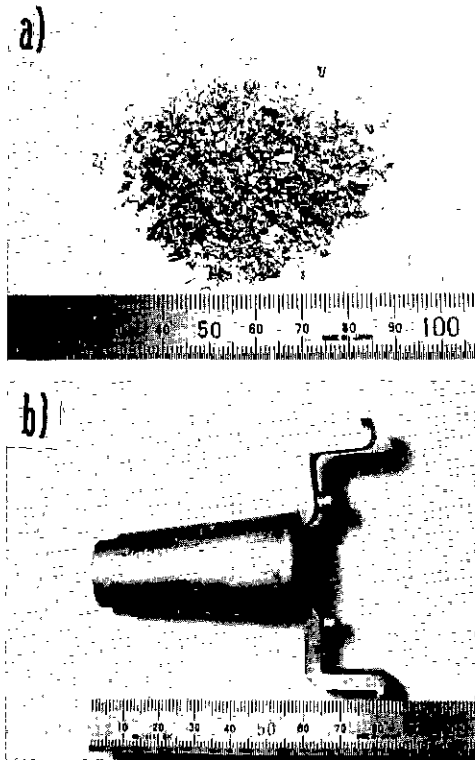


Photo. 1. Machined chips (a) and scraps (b) of AZ91 magnesium alloy.

안전하게 취급하는데는 전문기술이 절실히 요구되고 있다⁴⁻⁶⁾. 국내에서도 94년말 부터는 다이캐스팅에 의한 마그네슘합금 자동차부품이 본격적으로 생산될 예정이므로 부수적으로 생기는 스크랩과 가공시에 발생하는 절분을 유용하게 처리하는 재활용에 관한 연구결과가 부품생산원가를 결정하는데 절대적으로 중요하다고 사료된다.

따라서 이와같은 마그네슘합금 절분 및 스크랩의 효과적인 처리공정의 일환으로 마그네슘합금 절분 및 스크랩을 가압성형한 후 열간압출법을 이용하여 직접 제품화하는 재활용방법에 대하여 기초연구를 행하였으며 이러한 방법에 의해 마그네슘 제품의 원가 절감이 기대된다. 본 연구에서는 다이캐스팅용 마그네슘합금 스크랩 및 기계가공시에 생기는 절분에 대하여 여러가지 조건하에서 열간압출을 행하여 미세조직관찰 및 기계적 특성평가를 통하여 마그네슘합금 재활용 제조기술을 확립하는데 그 목적이 있다.

2. 실험방법

Table 1. Chemical Composition of AZ91 Mg machined chips (mass%)

Alloy	Al	Zn	Fe	Ca	Cu	Mn	Ni	Si	Mg
AZ91	7.93	0.59	0.01	0.002	0.002	0.16	0.004	0.01	Bal

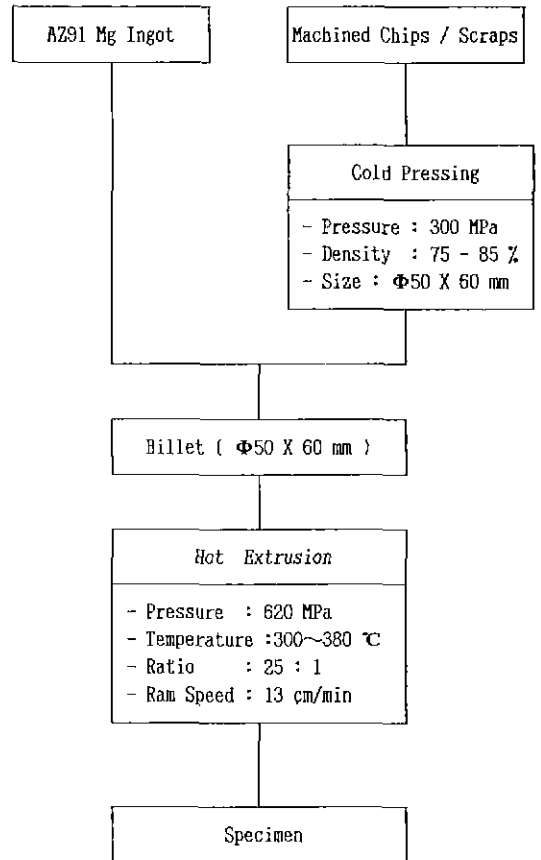


Fig. 1. Process flow chart for hot extrusion of AZ91D Mg alloy.

본 연구에 사용된 재료는 다이캐스팅용 마그네슘합금 중에서 대표적인 합금인 AZ91 마그네슘합금 (일본 UBE Co.)을 사용하였다. 주조에 의해 제조된 합금을 선반가공을 통하여 0.1~5(mm)의 크기로 절분을 제조하였으며, 그 형상 및 조성은 Photo 1(a)와 Table 1에 각각 나타내었다. 또한, 스크랩은 AZ91 다이캐스팅용 마그네슘합금 스크랩을 이용하였으며, 그 형상을 Photo 1(b)에 나타내었다.

본 연구에 사용된 제통도는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 먼저 절분 및 스크랩을 크기 Φ50×60(mm)의 컨테이너

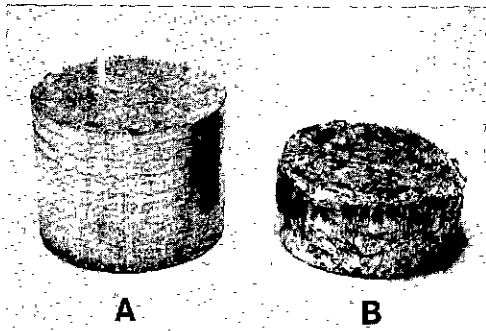


Photo. 2. The billets for extrusion.
(a) machined chips (b) scraps.

에 넣고 300 MPa의 압력으로 상온가압 (Cold Press)하여 성형밀도 80%의 압출용 빌렛을 얻었다. 이 압출용 빌렛을 Photo 2에 나타내었다. 이 압출용 빌렛을 컨테이너에 넣고 압출비를 25 : 1로 고정하고, 압출온도를 300~380°C로 변화시켜 가면서 시편을 제조한 후 압출온도에 따른 압출압력의 변화를 조사하였다. 또한, 절분의 압출조건과 동일한 조건에서 주조재를 열간압출하여 절분 및 스크랩의 압출재와 비교 평가하였다.

각각의 압출재를 압출방향과 평행하게 직경 4 mm, 표점거리 20 mm의 환봉시험편으로 기계가공하였고, 인장시험기 (Model No. Tinius Olsen 5000)을 사용하여 주조재, 주조재의 압출재, 절분의 압출재 및 스크랩을 열간압출한 재료의 상온 인장강도 및 파단연신률을 측정하였으며, 이때의 cross head speed는 1 mm/min이다. 시험 후 주사전자현미경을 이용하여 파단면을 관찰하였다. 또한 열간압출 후의 미세조직변화를 관찰하기 위하여 Nital 부식액 (5 ml HNO₃ + 100 ml 메탄올)을 이용하여 약 40초 동안 상온에서 부식을 행하여 압출전과 후의 미세조직을 관찰하였다. 주조재 및 각 압출재의 밀도는 각기 다른 3 부분을 추출하여 자동밀도측정기인 Pycnometer (AccuPyc 1330, micrometric 사)를 이용하여 각 5회씩 측정 후 평균하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 압출온도

Fig. 2는 AZ91 마그네슘 합금 주조재의 열간압출시 압출온도 변화에 따른 압출압력의 변화를 나타낸 것으로, 압출온도가 증가할수록 압출압력은 점진적으로 감소하고 있다. 이는 열간 압출온도가 높아질수록 재료의 소성유동 응력이 작아지기 때문이라 사료된다. 또한, S. Watanabe²⁾

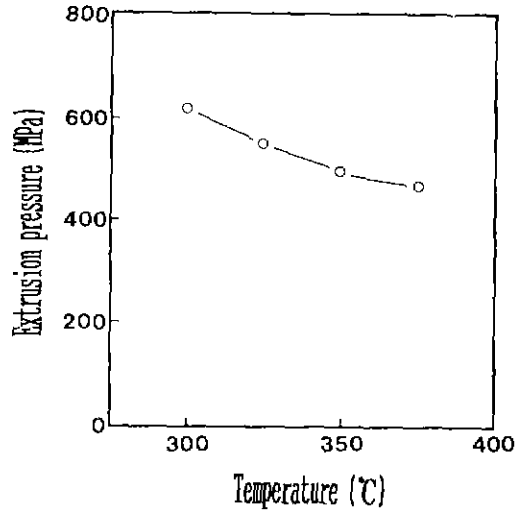


Fig. 2. Effect of extrusion temperatures on extrusion pressure for AZ91 Mg alloy.

등의 연구에 의하면 압출가공시 빌렛의 압출하중은 빌렛의 크기 및 특성, 압출온도, 압출속도, 다이형상, 배어링형상, 압출비 등에 영향을 받으며, 이 관계를 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$F = 3K \cdot A \cdot \ln R + K(4L \cdot A/D + R \cdot C_0 \cdot l_0)$$

F : 압출하중 (kgf)

K : 전단 변형 저항 (kgf/mm²)

A : 빌렛의 단면적 (mm²)

R : 압출비

L : 빌렛의 길이 (mm)

D : 빌렛의 직경 (mm)

C₀ : 다이의 공주길이 (mm)

l₀ : 다이의 배어링길이 (mm)

상기 식에서 나타낸 바와 같이 빌렛의 압출하중은 빌렛의 변형에 따른 항과 컨테이너 및 다이와의 마찰에 따른 항으로 나누어지지만, 빌렛의 압출전단변형 K에 비례한다. 따라서 압출기의 성능을 포함한 압출조건 설정에 있어 빌렛의 K값을 파악하여 두는 것은 중요하다. 따라서 본 연구에서는 윗 식을 도입하여 압출온도에 따른 압출 전단변형저항(K)을 구하여 Fig. 3에 나타내었으며, 압출온도가 증가할수록 압출 전단변형저항값이 비례적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 한편, 압출온도가 증가할수록 압출하중 및 압출 전단변형저항은 감소하지만 Photo 3에서 보는 바와 같이 압출온도 330°C 이상에서는 압출재 표면에 가로균열이 형성되었고 온도가

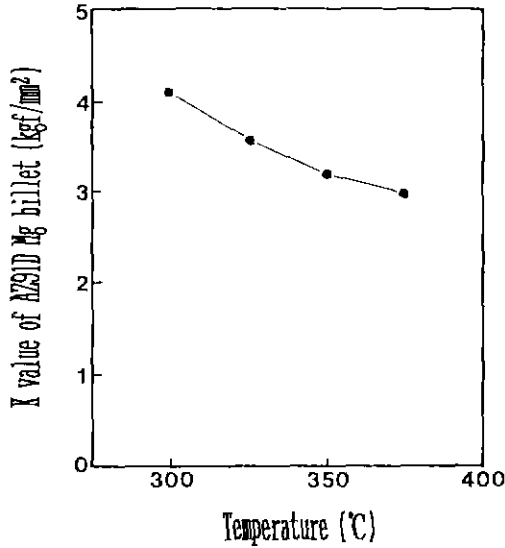


Fig. 3. The variation of K value of Mg alloy with extrusion temperature.

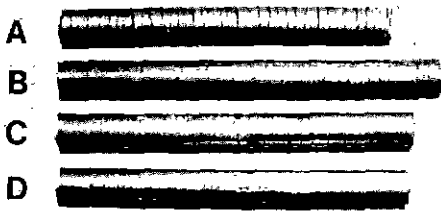


Photo. 3. Extrusion defects of extruded bar with temperatures.
(a) 380°C (b) 350°C (c) 330°C (d) 300°C

올라갈수록 가로균열 현상은 더욱 현저하게 나타났다. 이러한 원인은 Saganuma⁹⁾ 등의 보고로 미루어 볼 때 큰 압출속도에 따른 변형열의 증가뿐만 아니라 압출온도가 증가할수록 압출다이백과 마그네슘 합금과의 마찰열로 인한 시료내의 부분적인 액상이 존재하게 되는 데 기인하는 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에서의 최적의 압출온도는 300°C이며 Table 2에서 보는 바와 같이 각각의 재료를 300°C에서 열간압출한 결과, 밀도는 거의 이론밀도에 가까운 값을 얻었다.

3.2. 미세조직

주조재, 주조재의 압출재 및 절분의 압출재의 미세조직을 Photo 4에 나타내었다. Photo 4(a)에서 보는 바와 같이 주조재는 전형적인 수직상정 조직을 나타내며 이

Table 2. Comparison of density of AZ91 Mg alloy.

Materials	Mg ingot	extruded ingot	extruded chips	extruded scraps
Density	1.79	1.79	1.80	1.80

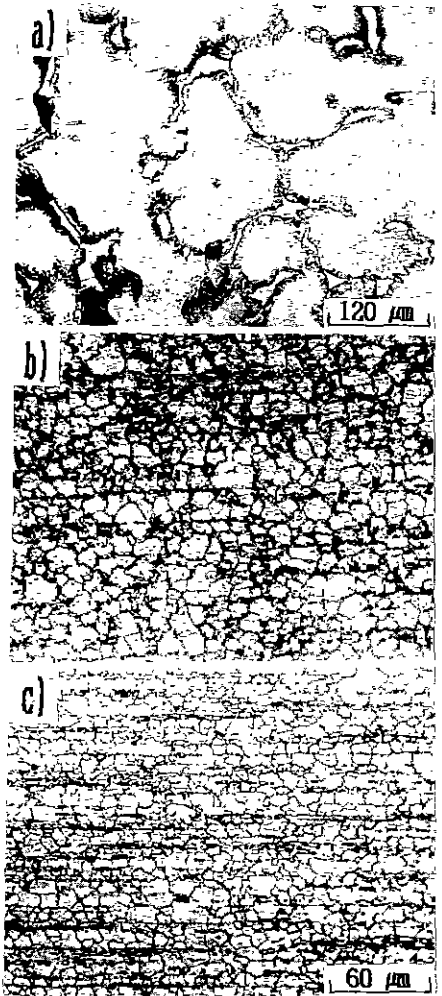


Photo. 4. The microstructure of AZ91 magnesium ally.
(a) ingot (b) extruded ingot (c) extruded chips

조직은 α-Mg 고용체와 α+Mg₁₇Al₁₂ 공정조직이라 생각된다. Photo 4(b)에 나타난 주조재를 압출한 재료는 열간압출을 함에 따라 미세한 등축재결정 조직이 얻어졌으며, 주조조직은 거의 관찰되지 않고 압출가공을 하였음에도 불구하고 결정입경에는 이방성이 보이지 않았다. 또한 평균입경은 20 μm로 미세하였다. 이는 재결정의

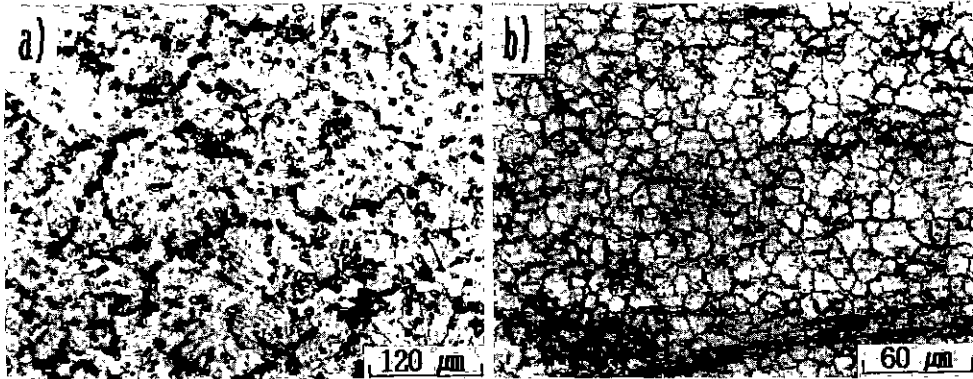


Photo. 5. The microstructure of AZ91 magnesium alloy. (a) scraps (b) extruded scraps

해생성속도는 가공도, 즉 변형량에 따라 증가하므로 높은 변형은 재결정된 결정입자크기를 감소시킨다는 Johnson-Mehl 이론⁹⁾과 일치하고 있다. 한편, Photo 4(c)는 마그네슘합금 절분을 열간압출한 조직으로 결정립경은 18 μm의 미세한 등축 재결정조직을 나타내었으며, 주조압출재와 거의 비슷하였다. 특히, 산화피막 근처에서는 미세한 결정립이 관찰되었다. 이러한 원인으로서는 열간압출시에 산화피막 근처에 많은 전위가 누적되어 재결정이 현저하게 촉진되기 때문이라 사료된다. 또한 절분끼리의 접합은 충분하게 이루어져 절분 경계면 및 균열은 관찰되지 않았으나 부분적으로 산화층이라 생각되는 피막들이 관찰되었다. 이러한 산화물을 분단시키는 방법 중의 하나로 재료에 큰 소성변형력을 가하는 것이 유효한 방법이라는 것이 알루미늄 합금의 경우에 잘 알려져 있으며, 본 연구에서는 열간압출을 통한 큰 변형에 의해 절분의 접합은 충분하게 되었지만 내부의 산화피막층은 완전하게 분단되지 않고 압출방향에 평행하게 잔존하고 있다. 이것은 M. Mabuchi¹⁰⁾ 등의 보고에 의하면 마그네슘은 활성이 큰 금속으로 열간압출시에, 압출온도에서 산화피막층의 발달로 인해 단단한 산화피막층이 형성되기 때문이라 사료된다. Photo 5(a)는 AZ91 마그네슘합금 다이캐스팅 스크랩의 미세조직으로 금속응고에 의해 주조 조직에 비해 균일하고 미세한 결정립조직을 보였고 결정립에 많은 Mg₁₇Al₁₂화합물들이 나타났다. 이것을 열간압출한 조직을 Photo 5(b)에 나타내었다. 이 조직은 절분을 압출한 조직과 마찬가지로 미세한 재결정 조직을 나타내었으며 절분을 압출한 조직에 비해 산화층이라 생각되는 부분이 비교적 적었다. 결국, 미세조직 관찰에서 볼 수 있는 바와 같이 일부 산화 피막층이 재료내에 잔존하여 이들이 미시적 결함으로 작용하고, 또한 기계적 성질에 이방성이 존재하는 것으로 예상된다. 따라서 이들

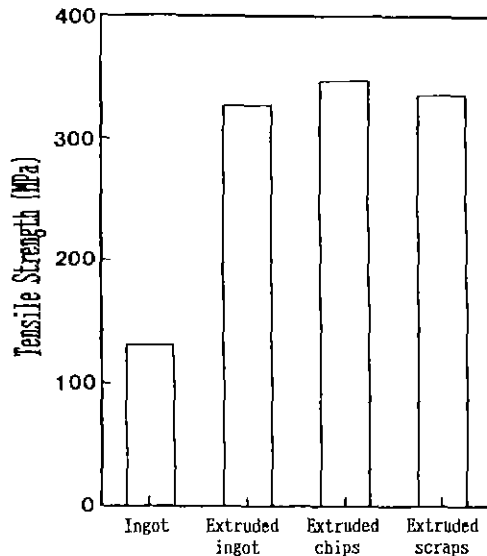


Fig. 4. Tensile strength of AZ91 Mg ingot, extruded ingot, extruded chips and extruded scraps tested at room temperature.

산화피막층의 완전한 분단화가 금후의 과제가 될 것이라 사료된다.

3.3. 인장특성

Fig. 4에서 보는 바와 같이 주조재의 인장강도는 약 130 MPa이었으며 주조재를 열간압출한 경우는 약 325 MPa로 인장강도가 크게 향상되었다. 또한 Fig. 5에서 보는 바와 같이 파단연신률도 약 3%에서 10%로 크게 향상되었다. 이와 같이 기계적 특성이 향상된 이유는 Photo 4(b)에 나타낸 바와 같이 열간압출을 함에 의해 수지상정의 주조조직이 파괴되어 균일한 등축재결정조

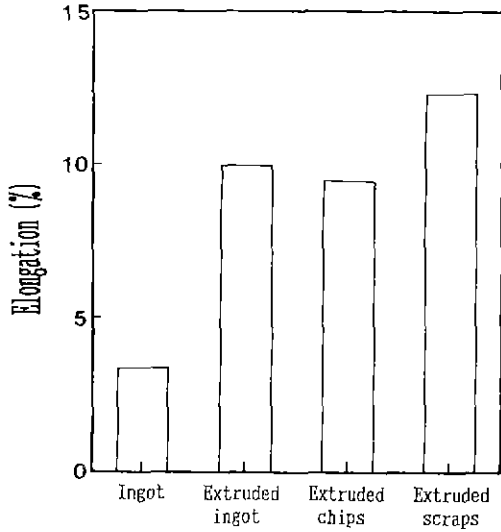


Fig. 5. Elongation of AZ91 Mg ingot, extruded ingot, extruded chips and extruded scraps tested at room temperature.

적이 되었고, 결정립의 미세화에 따른 것이라 사료된다. 또한 절분의 열간압출재와 스크랩의 열간압출재의 인장강도는 각각 340 MPa과 330 MPa이었고, 파단연신률도 약 9%와 12%로 주조재의 압출재와 거의 같은 값을 나타내었다. 이는 열간압출에 의해 절분 및 스크랩의 충분한 접합이 이루어졌고, 주조재의 압출재와 마찬가지로 큰 소성변형력에 의해 결정립이 미세화되었기 때문이라 사료된다. 한편, 파단연신률이 스크랩의 압출재가 주조재 및 절분의 압출재에 비해 약간 증가한 원인으로서는 Photo 5(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 스크랩이 다이캐스팅법에 의해 제조된 것이므로 Photo 4(a)의 마그네슘합금 주조재에 비해 조직이 미세화되었고 $Mg_{17}Al_{12}$ 화합물이 결정입계에 균일하게 분포되어 있기 때문이라 사료된다. 또한, 각 시험편의 상온인장시험 후의 파단면을 Photo 6에 나타내었다. Photo 6(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 주조재는 전형적인 벽개파면을 나타내고 있으며, 주조재의 압출재는 일부 벽개 파면을 나타낸 흔적이 있지만 대부분 마이크로 보이드 함체에 의한 님플(dimple)파면을

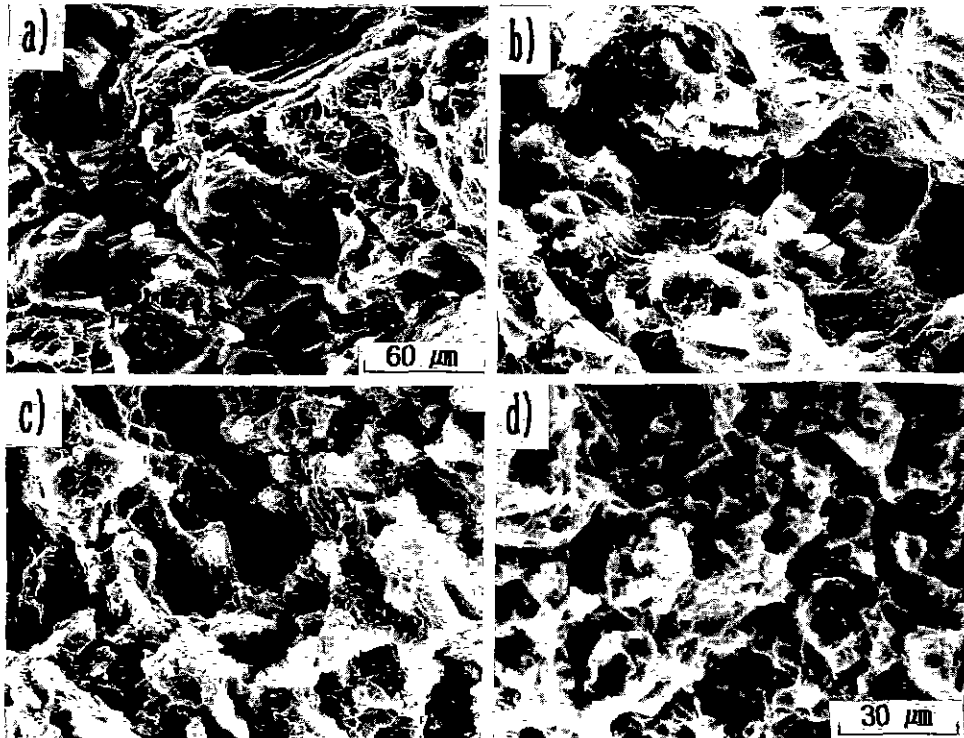


Photo. 6. Fractographs of tensile specimens of ingot, extruded ingot, extruded chips and extruded scraps tested at room temperature.

(a) ingot (b) extruded ingot (c) extruded chips (d) extruded scraps

나타내었으며, 이를 Photo 6(b)에 나타내었다. 또한 Photo 6(c)에서 보는 바와 같이 절분의 압출제도 일부가 벽개파면을 나타냈지만 많은 덩플 파면을 관찰할 수 있어 열간압출가공을 통하여 절분끼리 충분히 접합되었다고 사료되며, 한편 Photo 6(d)에 나타난 스크랩의 압출제도 주조제의 압출제와 파단형상이 거의 비슷하였다. 따라서 본 연구 결과, 마그네슘합금 절분 및 스크랩을 열간압출 가공함에 의해 기계적 특성이 우수한 마그네슘 합금을 얻었으며, 처리가 곤란한 마그네슘합금 절분과 스크랩을 재용해 공정을 거치지 않고 직접 제품화할 수 있는 가능성을 제시할 수 있었다.

4. 결 론

AZ91 마그네슘합금 절분 및 스크랩의 재활용을 목적으로 마그네슘합금 절분 및 스크랩을 열간압출을 통하여 그 조직관찰 및 기계적 성질을 조사하여 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. AZ91 마그네슘합금의 최적의 압출온도는 300°C 이었으며 이때 압출압력은 620 MPa이며 압출 전단 변형저항 K는 3~5 kgf/mm²이다.
2. 절분 및 스크랩에 열간압출을 행함으로써 절분 및 스크랩은 충분히 접합되어 균열과 결함이 거의 없었다.
3. 절분 및 스크랩에 열간압출을 행함으로써 주조제를 열간압출한 재료와 거의 비슷한 미세한 등축제결정 조직 (평균입경 : 19 μm)을 얻었다.
4. 절분을 열간압출한 재료는 상온인장강도가 약 340 MPa, 파단연신률은 약 9%이었고, 스크랩을 열간 압출한 재료는 인장강도가 약 330 MPa, 파단연신률은 약 12%로 주조제의 압출제와 거의 같은 결과를 얻었다.

후 기

본 연구는 93년도 인하대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었기에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Y. Kojma : "Mechanical properties of magnesium", 表面技術, **44**(11), 866-867 (1993).
2. 宮原隆一 : "マグネシウムの應用", マグネシウムマニュアル, マグネシウム委員會, 1-7, 日本輕金屬協會, 東京, 日本 (1993).
3. 이지환 : "자동차 부품용 마그네슘합금의 개발동향", 제 1회 자동차경량화 심포지움, 194-195 (1992).
4. M.D. Pinfeld and Dag Oymo : "An evaluation of refined, recycle AZ91D alloy", *SAE Tech Pap.* 930420, 65-69 (1993).
5. D. Pymo, O. Holta, O.M. Hustoft and J. Henriksson : "Magnesium recycling in the die casting shop", *Metall* **46**(9), 1-5 (1992).
6. L. Garin and H. Wentz : "マグネシウムの リサイクル", *Magnesium*, **21**(3), 1-7 (1992).
7. S. Watanabe, K. Saitoh and S. Okaniwa : "Extrudability of discontinuous fiber reinforced aluminium alloy composites billets", 輕金屬, **40**(4), 279-280 (1990).
8. Saganuma and T. Fujita : "Semisolid extrusion of aluminium alloys reinforced with alumina short fiber cladding", *J. of Met Sci Let.*, **6**, 1347-1348 (1987).
9. W. Johnson and R. Mehl : "Fundamental of physical metallurgy", Chap. 10, J.D. Verhoeven, 348-349, John Wiley & Sons, inc., Canada, (1975).
10. M. Mabuchi, K. Kubota and K. Higashi : "Mechanical properties of AZ91 magnesium alloy processed from its machined chips", 粉體 および 粉末冶金, **40**, 397 (1993).