

■■■■■■■■■■
論 文
 ■■■■■■■■■■

급속응고한 AZ91 합금의 미세조직 및 기계적 특성에 미치는 Misch metal 첨가의 영향

엄승열 · 박훈모 · 남태운

The Effect of Misch Metal Addition on the Microstructure and Mechanical Property of Rapidly Solidified AZ91 Alloy

Seung-yeul Eum, Hoon-Mo Park and Tae-Woon Nam

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of misch metal addition on the microstructure and mechanical property of rapidly solidified AZ91 alloy by melt spinning process. As the contents of misch metal(rare earth element:Ce,La, Nd, Pr) was increased, the microstructure of RS ribbons and extrudates became finer than those of AZ91, and RE related phases (Al_3RE_2 , Al_2RE) were formed. At room temperature, the rapidly solidified AZ91+1 wt%Mm alloy showed the highest tensile strength, 430 MPa due to precipitation strengthening of $\beta(Mg_{17}Al_{12})$ phase and Al_3RE_2 phase. At the elevated temperature, the mechanical property of AZ91+3 wt%Mm alloy was higher than those of other Mg alloys. The reasons were that Al_3La_3 phase was thermally stable and suppressed the grain growth. In contrast with Al_3La_3 phase, β phase was thermally unstable and could not suppress the grain growth at the elevated temperature. Therefore, Al_3RE_2 phase contributed to improve the thermal stability of RS AZ91 alloy.

(Received January 8, 2000)

1. 서 론

최근 항공산업과 자동차산업의 발달로 경량화 재료에 대한 수요가 증가하여 Mg합금에 대한 관심이 높아지고 있다. Mg합금은 비강도, 유동성, 주조성, 가공성 및 진동흡수성 등의 우수한 장점을 가지고 있으나 150°C 이상의 온도에서 고온안정성이 저하되고 대표적 경량 금속인 Al에 비해 낮은 내식성을 가지므로 실용화에 있어 많은 제약을 받아왔다. 최근 이러한 Mg합금의 고온특성과 내식성을 개선하기 위한 연구가 국내 외에서 활발히 진행되고 있다[1-5].

본 연구에서는 Mg 합금의 기계적 특성과 고온안정성을 향상시키기 위하여 대표적 상용 Mg합금인 AZ91 합금에 기여하는 희토류계 원소(rare earth element)를 misch metal의 형태로 첨가하였으며, 조직 미세화, 비평형상 형성 및 화학적 균일성을 증가시킬 수 있는 급속 응고법 중 melt spinning process를 적용하였다. 급속응고한 AZ91-Misch metal 합금 리본 및 압출재

의 미세조직과 기계적 특성, 고온안정성에 미치는 misch metal 첨가의 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 모합금은 대표적 상용 Mg합금인 AZ91합금에 misch metal을 1, 3, 5, 10 그리고 15 wt% 첨가하여 산화 및 불순물의 혼입을 막기 위해 진공도 300 torr의 불활성 분위기의 고주파 진공 유도로(VIM, vacuum induction melting furnace)에서 주조하였고, 급속응고한 리본은 Plasma arc melt spinner에서 200 mm × 2 mm(반경 × 두께)의 Cu wheel을 20 m/s의 선속도로 회전시켜 제조하였다.

모합금과 리본의 화학적 조성을 ICP-AES로 분석하였고 첨가원소의 편석과 석출상의 성분은 SEM-EDS(Jeol, JSM6340F)로 분석하였다. 급속응고한 리본의 화학적 조성을 Table 1에 나타내었다. 급속응고된 리본을 분쇄 후 1XXX계 Al 캔에 장입하여 200°C,

Table 1. Chemical compositions of Mg-Al-Zn-Mm alloys.

| Nominal composition(wt.%) | Analyzed composition(wt%) | | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|
| | Al | Zn | Ce | Nd | La | Pr | Mg |
| Mg-9Al-1Zn | 10.36 | 1.36 | - | - | - | - | bal. |
| Mg-9Al-1Zn-1Mm | 9.76 | 1.45 | 0.20 | 0.03 | 0.09 | 0.01 | bal. |
| Mg-9Al-1Zn-3Mm | 10.41 | 1.39 | 1.47 | 0.34 | 0.62 | 0.06 | bal. |
| Mg-9Al-1Zn-5Mm | 10.04 | 1.29 | 2.17 | 0.64 | 1.00 | 0.12 | bal. |
| Mg-9Al-1Zn-10Mm | 10.52 | 1.27 | 4.28 | 1.39 | 2.20 | 0.28 | bal. |
| Mg-9Al-1Zn-15Mm | 11.10 | 1.50 | 7.32 | 1.64 | 3.43 | 0.33 | bal. |

10⁻² torr에서 1시간동안 탈가스 한 후 250°C, 1시간동안 예열하여 550 ton급 수평식 압출기로 25:1의 압출비로 압출하였다. 급속응고한 AZ91합금의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 misch metal의 영향을 고찰하기 위하여 misch metal 첨가량의 변화에 따른 급속응고된 리본과 압출재의 미세조직 변화, 상(phase)의 변화, 경도, 인장강도, 연신율을 비교평가하였다. 또한 급속응고된 리본과 압출재의 고온안정성에 대해 고찰하기 위하여 석영관으로 진공 처리하여 200, 300, 400°C에서 24시간동안 열처리한 후 수냉하여 미세조직과 상의 변화, 경도에 대하여 비교평가하였다.

급속응고된 리본 및 압출재의 미세조직을 관찰하기 위하여 미세연마 후 두 종류의 부식액 {가: 10 m/HF(48%), 90 m/H₂O, 나: 20 m/ acetic acid, 1 m/HNO₃(conc), 60 m/ ethylene glycol, 20 m/H₂O}을 사용하여 부식시킨 후 광학 현미경과 SEM으로 관찰하였다. Misch metal 함량 및 열처리 온도 변화에 따른 상의 변화를 조사하기 위하여 Cu target($\lambda = 1.541863\text{\AA}$)이 부착된 Philips사의 PW1710 X-ray 회절기를 이용하여 40 kV, 30 mA의 조건으로 회절각(2 θ) 20°~70° 범위에서 상 분석을 행하였다. 급속 응고된 리본재와 압출재의 석출상 확인 및 석출상의 특성을 관찰하기 위해 저온 ion miller(model-FIS CHIONE 1010)를 이용하여 시편을 준비한 후 TEM(Jeol, JEM2010)으로 분석하였다. 급속응고한 리본과 압출재의 경도측정은 마이크로 비커스 경도기(MATSUZAWA SEIKI Co. Ltd., MXT- $\alpha 3$)를 사용하여 하중 10g, 유지시간 10초의 조건 하에서 10회 측정하여 산술평균을 구하였다. 압출재의 인장강도 및 연신율은 ASTM A370의 봉상 인장시편으로 가공하여 25mm 규격의 extensometer를 부착시킨 후 인장시험기(Instron, Model-4206)에서 1 mm/min의 변형속도 조건으로 상온과 200°C에서 5회 이상 시험

하였다.

3. 실험결과

3.1 급속응고한 리본의 특성

3.1.1 급속응고한 리본 단면과 표면의 미세조직

AZ91합금에 misch metal(Mm)을 1, 3, 5, 10, 15 wt% 첨가하여 급속응고시킨 리본단면의 미세조직을 Fig. 1에 나타내었다. AZ91 합금의 경우에는 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상이 입계에 불연속적으로 분포되어 있고 입자들이 비교적 조대한 반면 misch metal을 첨가한 경우의 단면조직은 비교적 미세한 dendrite, equiaxed grain, columnar들로 세 층을 이루고 있다. 리본의 단면조직에서 이러한 3층구조가 나타나는 이유는 리본단면의 부위별 냉각속도 차이 때문이다. 즉, 응고 초기 wheel접촉면에서는 급속응고에 의한 임계값이상의 응고속도이므로 절대안정론이 지배하여 featureless zone이나 미세한 columnar를 형성하지만 응고가 진행됨에 따라 응고속도가 임계속도이하로 감소하면서 조성적 과냉이 크게 영향을 미치게 되고 계면 안정성이 나빠져서 columnar, equiaxed grain, dendrite로의 천이가 나타나게 된다[6]. 이러한 급속응고된 리본 단면조직의 천이에 가장 큰 영향을 미치는 것은 과냉도로서, wheel접촉면에서는 임계값 이상의 과냉에 의하여 과포화 고용체를 이루지만 응고가 진행되어 리본 자유표면으로 갈수록 응고잠열의 방출에 의한 과냉도 감소로 과냉도가 임계값 이하가 되면 최종적으로는 용질이 편석되어 있는 dendrite로의 천이가 일어나게 되는 것이다[7]. 리본 단면에서 misch metal의 함량이 증가함에 따라 columnar층이 차지하는 길이분율이 증가하고 있음을 Fig. 2에서 볼 수 있다. 이러한 columnar 층비의 증가는 misch metal의 함량이 증가함에 따른 조성적 과냉

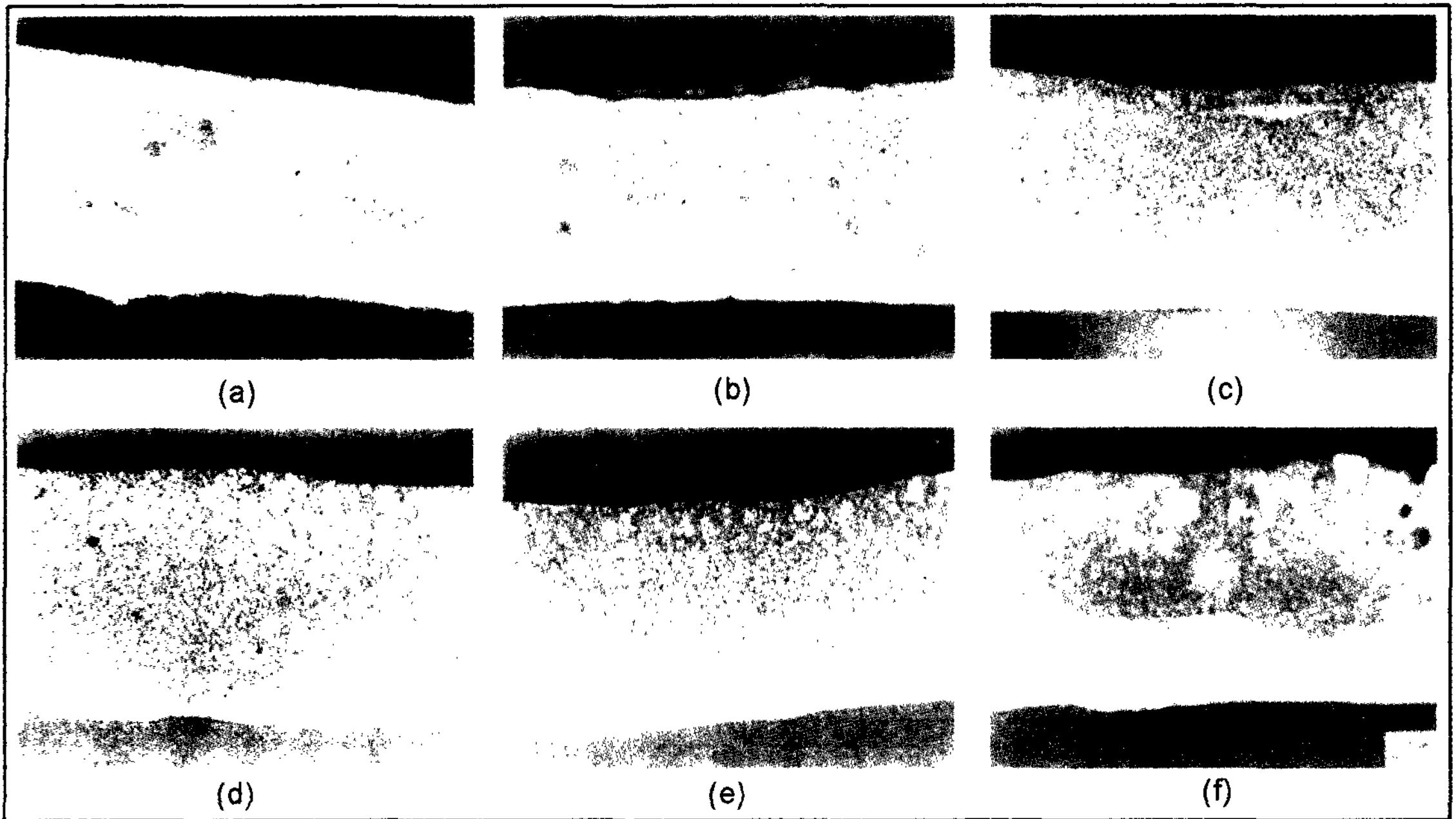


Fig. 1. Optical micrographs of the RSP ribbon (20m/s)
 (a)AZ91, (b)AZ91+1 wt%Mm, (c)AZ91+3 wt%Mm, (d)AZ91+5 wt%Mm, (e)AZ91+10 wt%Mm, (f)AZ91+15 wt%Mm

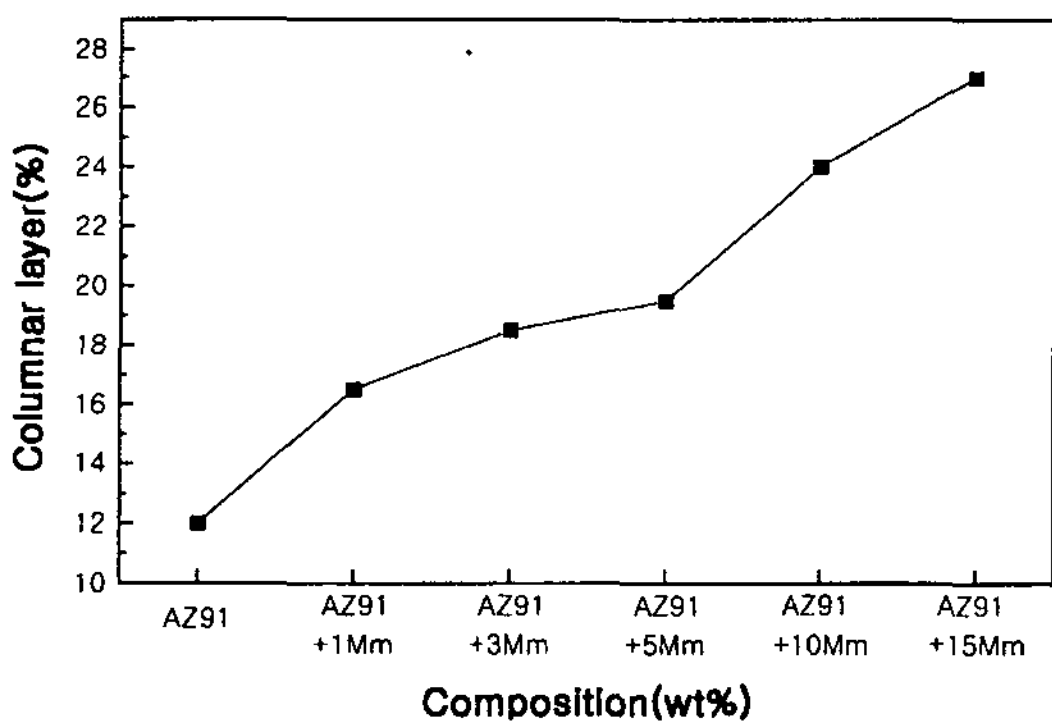


Fig. 2. Columnar layer ratio of the RSP ribbon(20m/s)

의 증가가 응고잠열에 의한 과냉도 감소를 보상하여 dendrite로의 천이를 늦출 수 있었기 때문인 것으로 추측된다. 이러한 리본 자유표면에 형성된 dendrite의 형상을 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3에서는 Pettersen등이 제안한, hcp구조를 갖는 마그네슘합금이 낮은 온도구배와 높은 성장속도로 응고할 때 <1120>방향을 주성장방향으로 하여 여섯 방향으로 수지상 성장을 하는 특징적인 응고거동을 볼 수 있었다[8].

3.1.2 급속응고한 리본의 냉각속도

본 연구에서 급속응고한 리본의 대략적인 냉각속도를 계산하기 위하여 Kattamis와 Flemings 등이 dendrite cell 크기와 국부적 응고시간의 상관관계에 대하여 제안한 실험식을 이용하였다[9-10].

$$GR = \frac{\Delta T_s}{t_f}$$

$$d = 10.5 \cdot t_f^{0.4}$$

GR : cooling rate (K/sec),

t_f : local solidification time(sec.)

ΔT_s : nonequilibrium temperature range of solidification,

d : dendrite cell size(μ m)

본 연구에서 Cu wheel을 선속도 20m/s로 회전시켜 급속응고한 리본의 경우 리본 자유표면부분의 dendrite arm spacing을 측정된 결과 0.2~0.5 mm이며 t_f 는 대략 10^{-4} ~ 10^{-5} sec의 결과를 얻었다. 이로부터 냉각속도 (GR)를 계산하면 10^6 ~ 10^7 K/sec의 값을 구할 수 있었다. 이러한 결과를 Fig. 1의 리본단면 미세조직과 함께 고찰하여 보면, Cu wheel을 선속도 20 m/s로 회전하

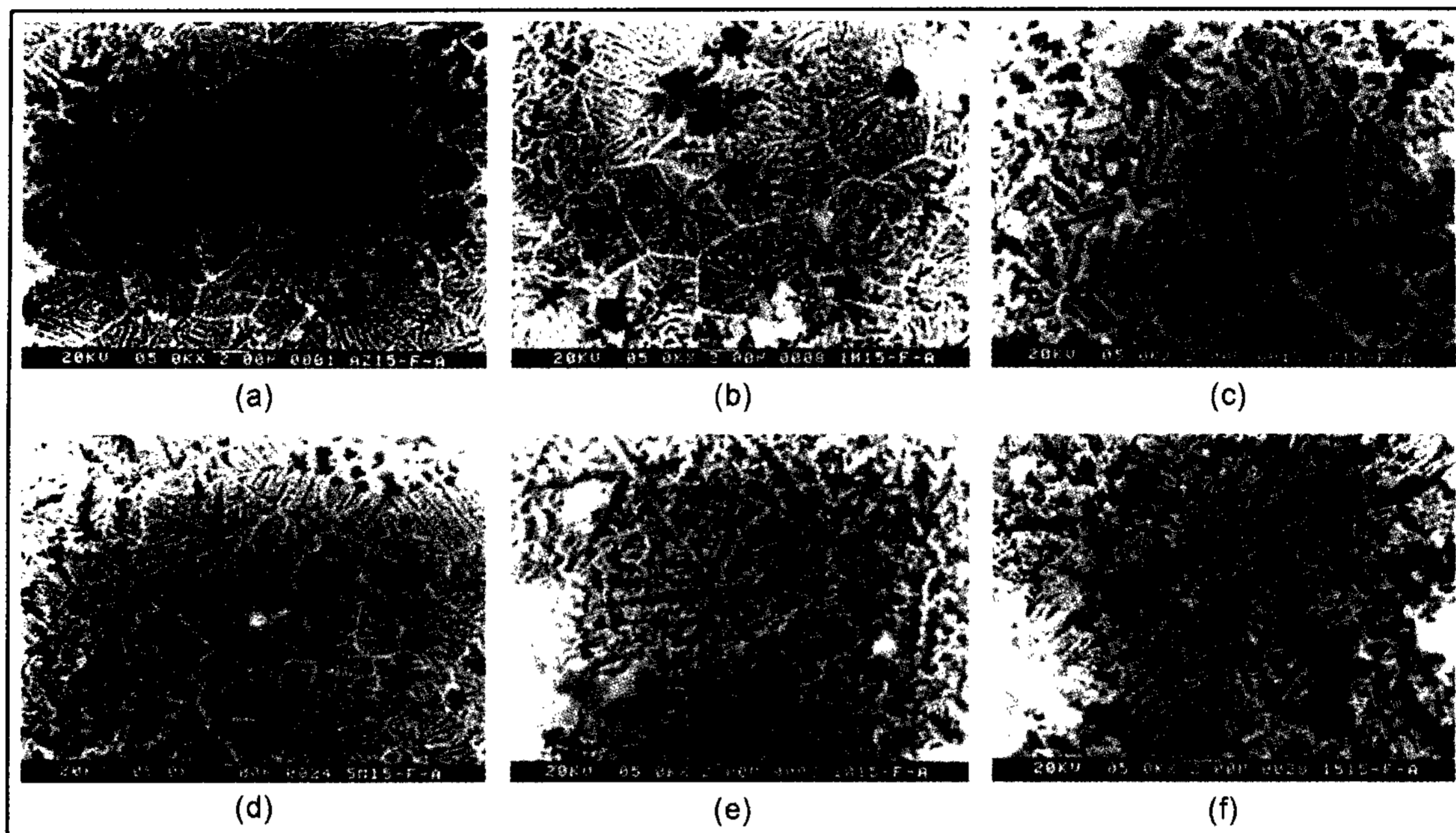


Fig. 3. Scanning electron micrograph of the RSP ribbon (20m/s) (a) AZ91, (b) AZ91+1 wt%Mm, (c) AZ91+3 wt%Mm, (d) AZ91+5 wt%Mm, (e) AZ91+10 wt%Mm, (f) AZ91+15 wt%Mm

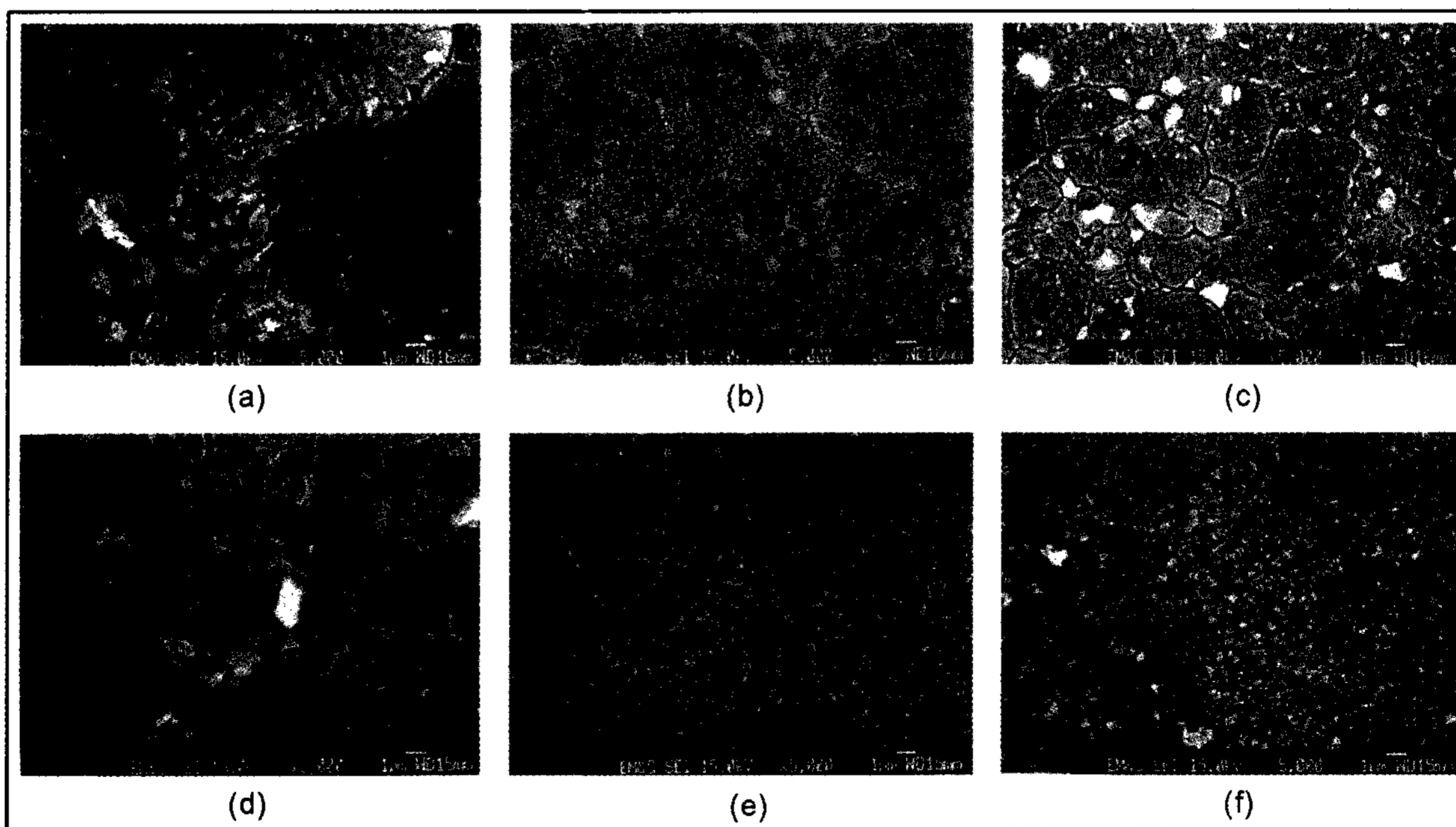


Fig. 4. Scanning electron micrographs of the extrudates(20m/s) (a) AZ91, (b) AZ91+1wt%Mm, (c) AZ91+3wt%Mm, (d)AZ91+5wt%Mm, (e)AZ91+10wt%Mm, (f)AZ91+15wt%Mm

여 급속응고한 본 실험조건에서 misch metal을 5 wt% 이상 첨가한 Fig. 1(e), (f) 경우에는 misch metal 첨가량에 비해 급속응고효과에 의한 과포화 고용효과가 작으므로 고용되지 못한 misch metal이 리본 자유표면에

조대하게 편석되었음을 알 수 있었다.

3.2 압출재의 특성

3.2.1 압출재의 미세조직

급속응고한 리본을 250°C, 25:1의 압출비로 열간 압출한 압출재의 미세조직을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 AZ91합금의 경우 결정립의 크기가 14 μm인데 비해 misch metal의 함량이 가장 많은 AZ91+15 wt%Mm 합금은 대략 1 μm로 크게 감소하였다. 이러한 결정립 크기의 감소는 첨가된 misch metal이 조성적 과냉의 증가와 핵생성 site증가에 크게 기여하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 Fig. 4에서 입계 및 입내에 분포하고 있는 석출상에 대하여 XRD 상분석을 한 결과, AZ91에서는 β(Mg₁₇Al₁₂)상만이 존재하고 misch metal을 첨가한 경우에는 β상과 Al₁₁RE₃상, Al₂RE상이 존재하고 있음을 알 수 있었다 [11]. 이러한 misch metal첨가에 의한 결정립미세화와 석출강화효과로 인하여 misch metal의 함량이 증가함

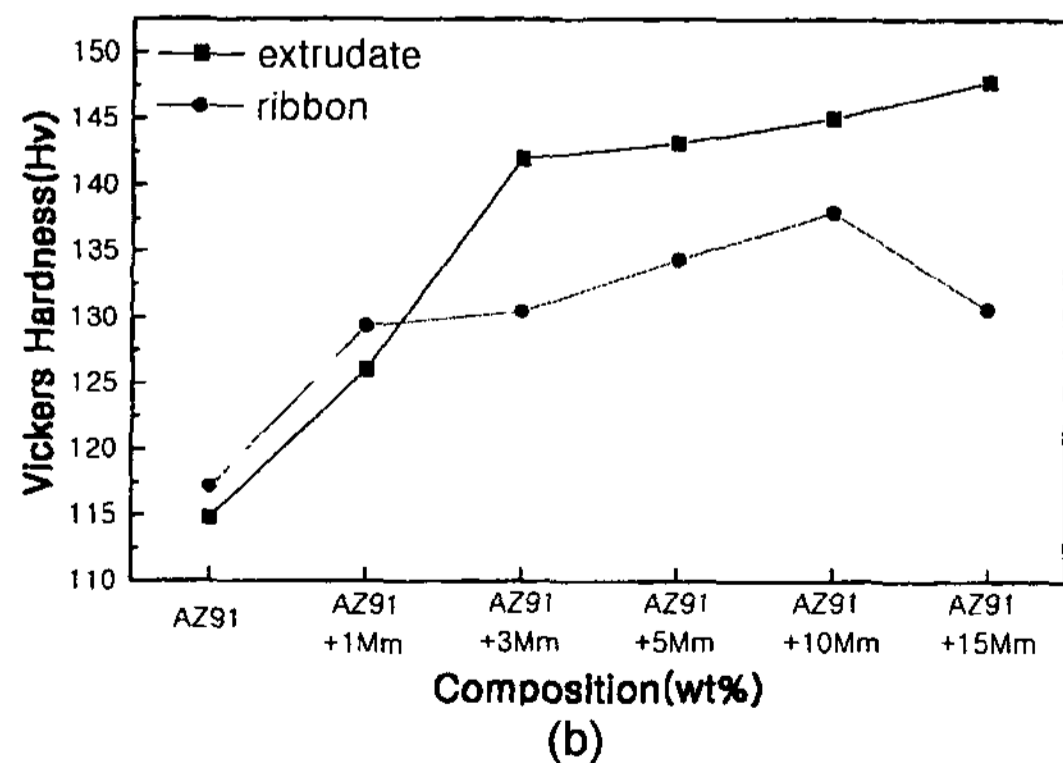
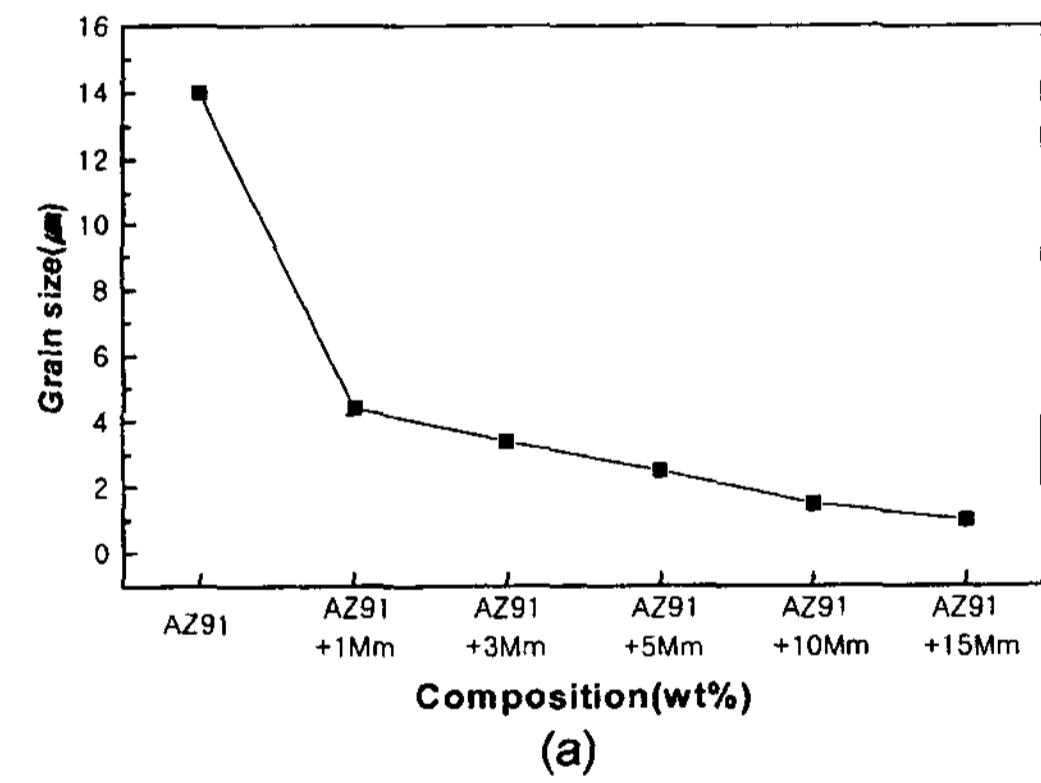
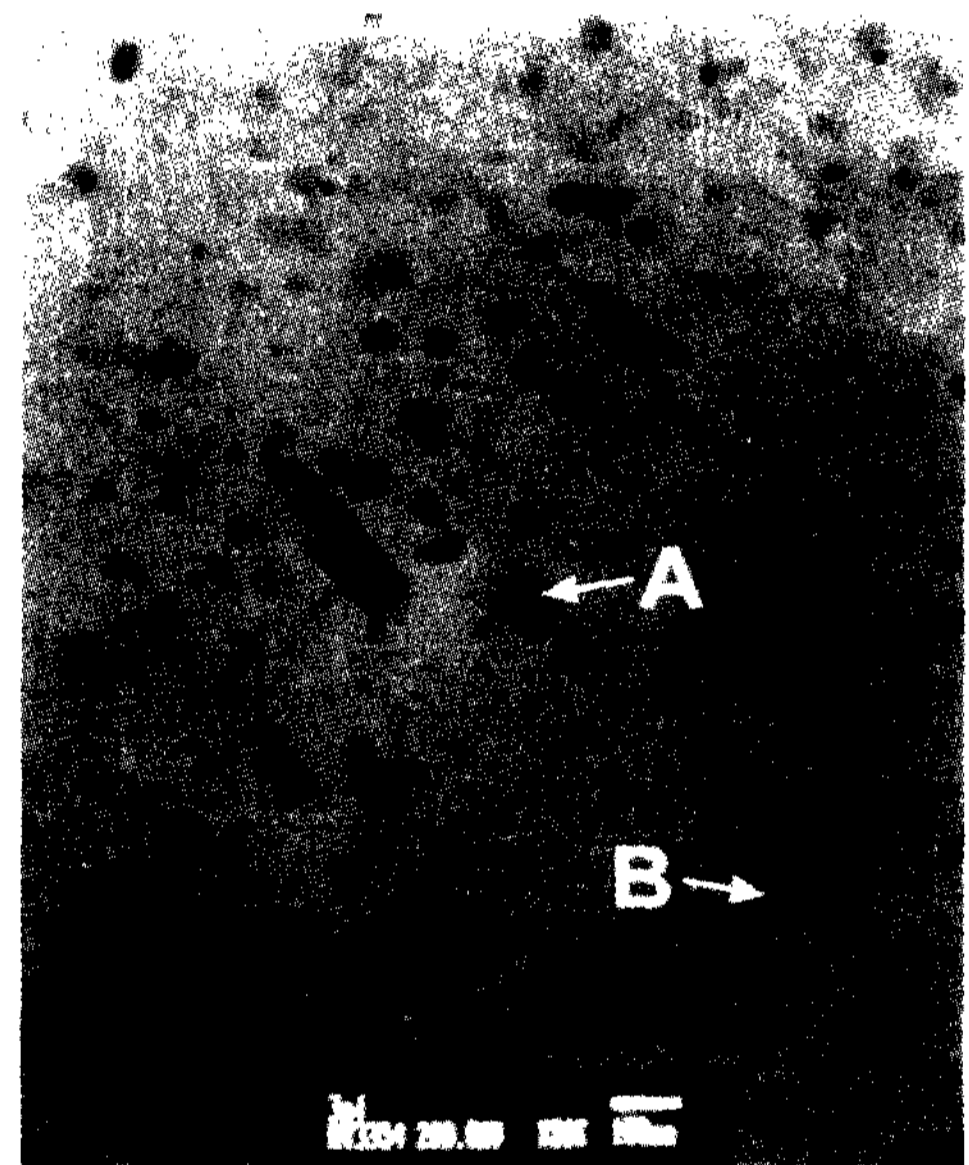
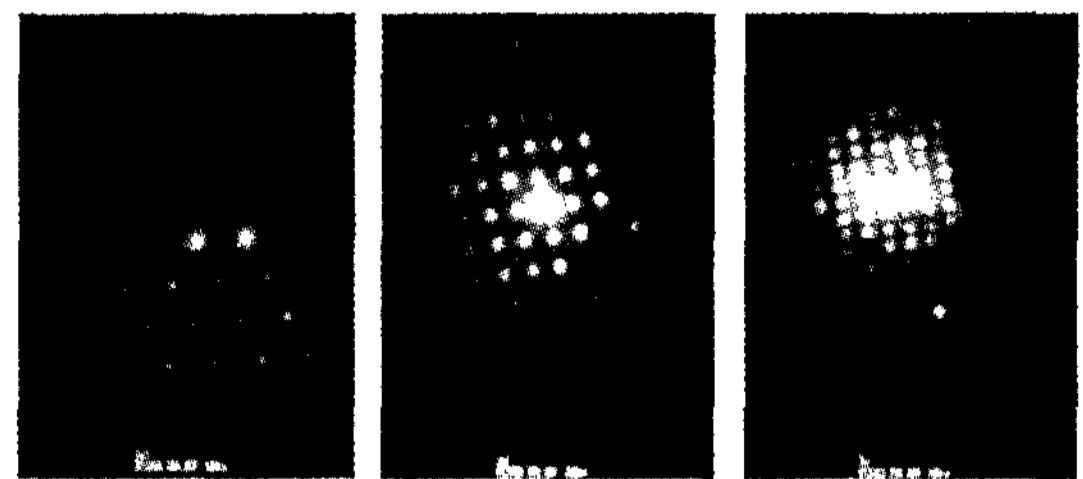


Fig. 5. Effects of Mm addition on the change of grain size and hardness.

에 따라 급속응고한 리본의 경도가 증가하고 있음을 Fig. 5(b)에서 알 수 있다. Wheel 선속도가 20 m/s인 AZ91+3 wt%Mm 압출재의 미세조직에서 관찰된 석출물의 확인 및 형상을 규명하기 위해 TEM을 이용하여 상분석을 하였다. Fig. 6의 (a)와 (b)는 석출상에 대한 명시야상(bright field)과 SADP(Selected Area Diffraction Pattern)이다. (a)의 A부분은 [123] zone으로 Al₁₁La₃ (Orthorhombic, Immm)상이며 B부분은 [110] zone으로 Mg₁₇Al₁₂(Cubic, I43m)상이고 (b)의 [101] zone은 α-Mg matrix로 판단된다. Fig. 7은 기지내에 분포하



(a)



[101]

(b)

[123]

(c)

[110]

(d)

Fig. 6. TEM micrographs of the AZ91 +3 wt%Mm alloy(20m/s). (a) bright field TEM micrograph showing the clusters of type of A and B (b) selected area diffraction pattern obtained from α-Mg matrix (c) selected area diffraction pattern obtained from the A region shown in (a) (d) selected area diffraction pattern obtained from the B region shown in (a)

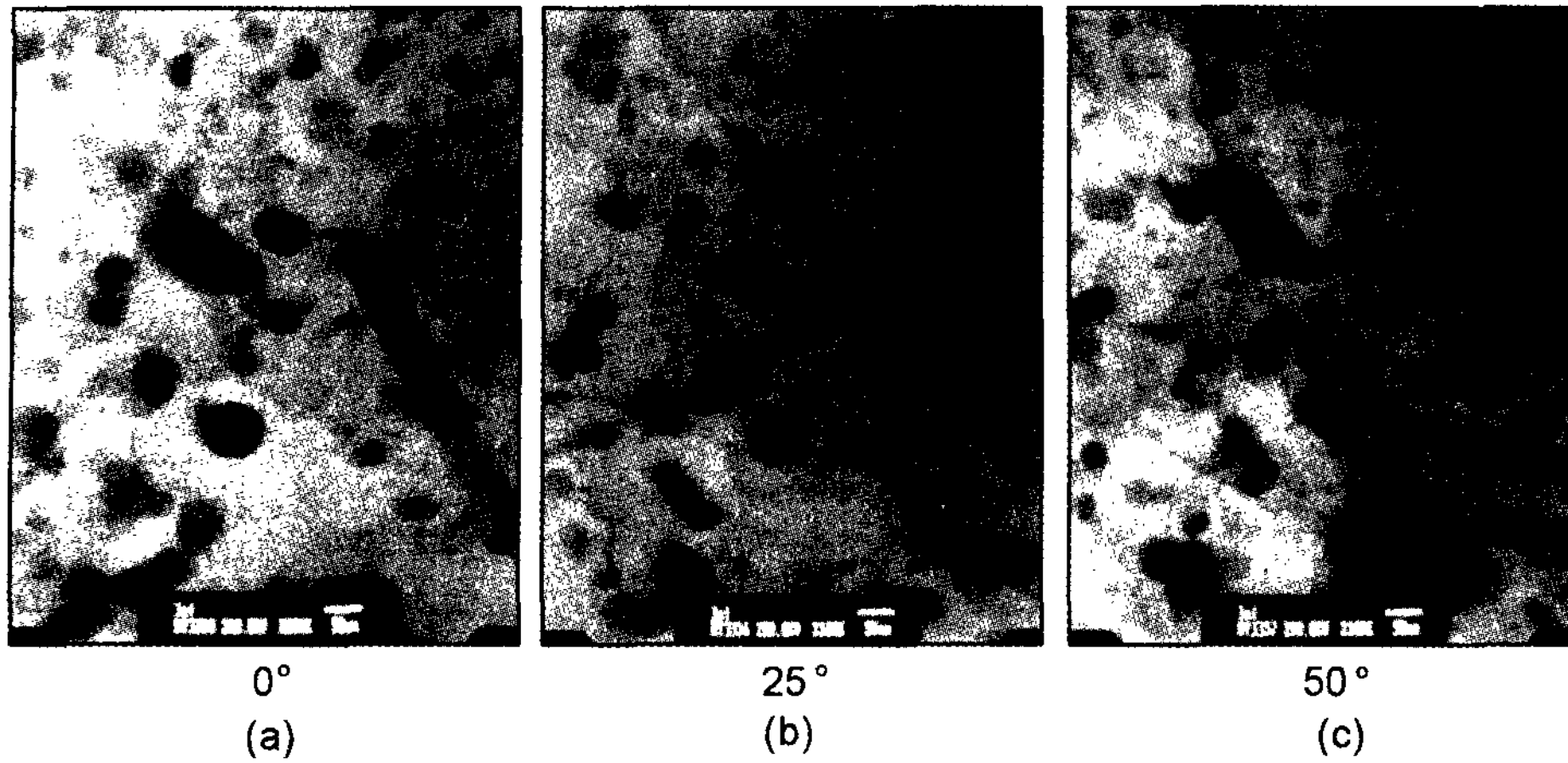


Fig. 7. TEM micrographs showing the complicated shape of the $Al_{11}La_3$ and β phase seen in the AZ91+3 wt%Mm alloy(20m/s). In (b) and (c) the specimen is tilted 25° and 50° respectively compared with (a)

는 $Al_{11}La_3$ 상의 형상을 입체적으로 관찰하기 위해 $0^\circ \sim 50^\circ$ 의 각도로 변화시키며 관찰한 결과이다. 구상으로 존재하는 석출물들이 각도변화에 따라 기둥형태로 변화함을 알 수 있었다. 따라서 $Al_{11}La_3$ 상의 형태는 육각기둥의 형상으로 판단된다. 본 연구에서는 TEM 분석 결과 Al_2RE 계 및 $Al_{11}RE_3$ 계 화합물이 존재함을 알 수 있었으며, 특히 $Al_{11}La_3$ 의 경우는 SADP (Selected Area Diffraction Pattern)에 의해 확인됐지만 Mm에 함유된 Ce, La 및 Nd 원소의 원자반경 (Ce=1.15Å, La=1.17Å, Nd=1.12Å)의 차가 모두 크지 않기 때문에 Al_2RE (RE=Ce, La, Nd)계 화합물의 정확한 화합물을 판단하기는 어려웠다.

3.2.2 석출상이 기계적 특성에 미치는 영향

본 연구에서는 misch metal첨가에 의한 석출상이 압출재의 기계적 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. Evans의 계산식으로 얻어진 석출상의 상분율을 Table 2에 나타내었다[12].

$$X_m = \frac{I_m(abc)}{I_m(abc) + I_t(xyz)}$$

X_m : 화합물의 분율, $I_m(abc)$: 화합물의 (abc)면의 회절강도,

$I_t(xyz)$: $I_m(abc)$ 회절강도를 제외한 전체 회절강도

Table 2에서 나타난 석출상의 상분율에 대하여 고찰해 보면 AZ91과 1 wt%Mm을 첨가한 AZ91의 경우 희토류 화합물은 확인할 수 없었고 마그네슘합금의 주

Table 2. Area fraction of phase with increasing RE content.

| | Extrudate | | |
|-------|------------------|---------------|----------|
| | $Mg_{17}Al_{12}$ | $Al_{11}La_3$ | Al_2RE |
| AZ91 | 14.7 | - | - |
| +1Mm | 15.2 | - | - |
| +3Mm | 9.7 | 19.4 | 2.5 |
| +5Mm | - | 16.1 | 6.5 |
| +10Mm | - | 5 | 12.2 |
| +15Mm | - | 13.7 | 11.8 |

강화상으로 알려진 $\beta(Mg_{17}Al_{12})$ 상만이 존재하고 있었다. Misch metal의 함량이 3 wt% 이상일 경우에는 $\beta(Mg_{17}Al_{12})$ 상은 감소하는 반면 희토류 화합물인 $Al_{11}La_3$ 상과 Al_2RE 상은 증가하는 경향을 보여주고 있다. Misch metal의 함량이 5, 10, 15 wt%인 경우에는 $\beta(Mg_{17}Al_{12})$ 상은 존재하지 않는 반면 희토류 화합물인 $Al_{11}La_3$ 상과 Al_2RE 상만이 존재하고 있었다. 이러한 석출상들이 기계적 특성에 미치는 영향에 대하여 고찰하기 위하여 압출재의 인장강도와 연신율을 측정된 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8(a)의 상온 인장시험결과에서는 마그네슘합금의 주강화상으로 알려진 $\beta(Mg_{17}Al_{12})$ 상의 상분율이 최대인 AZ91+1 wt%Mm이 최고 상온인장강도를 나타내었고 고온 인장시험에서는 고온안정성에 크게 기여하는 것으로 생각되는 $Al_{11}La_3$ 상의 상분율이 최대인 AZ91+3 wt%Mm이 최고 고온인장강도를 나타내었다. 이와 같이 고온인장시험결과와

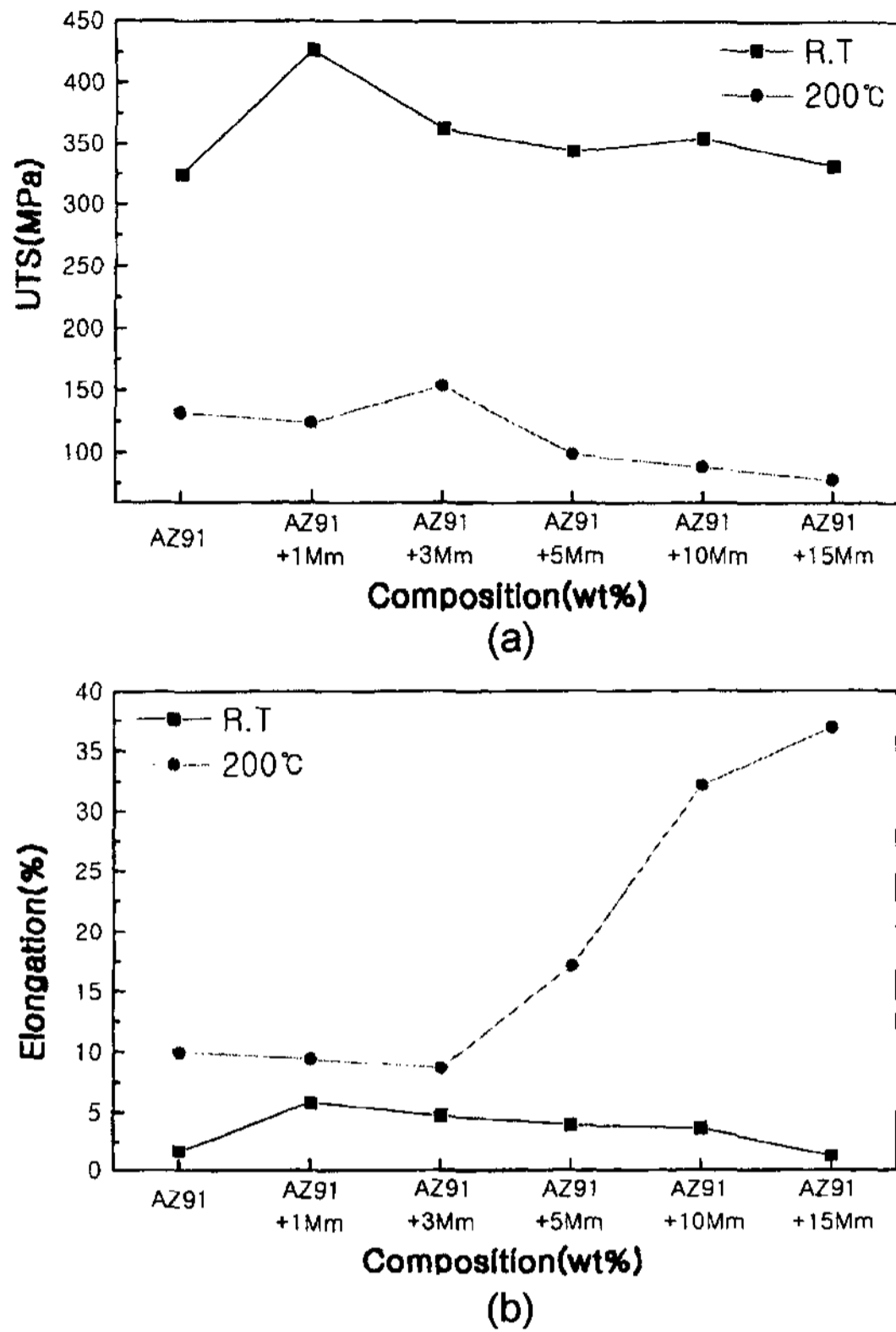
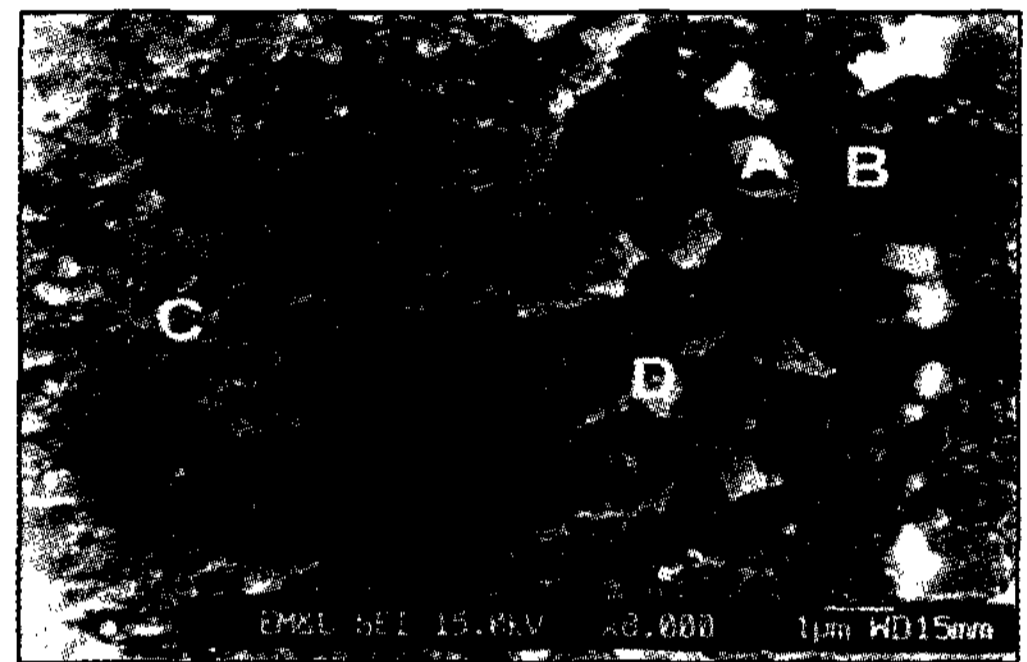


Fig. 8. Effects of Mm addition on tensile property.

상온인장시험결과가 다른 이유는 고온인장시 $\beta(Mg_{17}Al_{12})$ 상은 고온안정성이 부족하여 입내에 석출된 $\beta(Mg_{17}Al_{12})$ 상은 기지로 재고용되고 입계에서는 조대화 되는 반면 $Al_{11}La_3$ 상은 열적으로 안정하여 고온강도에 크게 기여하기 때문이다. Fig. 8의 (b)는 misch metal 첨가에 따른 압출재의 연신율 측정 결과로서 상온에서는 첨가원소의 편석과 입계에 존재시 취약하여 취성과 파괴를 초래하는 것으로 알려진 $\beta(Mg_{17}Al_{12})$ 상때문에 낮은 연신율을 보이지만 고온 인장시에는 $\beta(Mg_{17}Al_{12})$ 상이 기지로 재고용되고 열적안정성이 우수한 회토류계 상만이 존재하므로 상온에 비해 연신율이 크게 증가하였다[13]. 또한 misch metal함량이 증가할 수록 연신율이 크게 증가하고 15 wt%Mm에서 가장 높은 연신율을 보인다. 이러한 이유는 misch metal첨가에 의해 연성을 저하시키는 $\beta(Mg_{17}Al_{12})$ 상의 석출이 억제되었고 조성적 과냉의 증가와 회토류계 석출상에 의한 결정립성장억제로 인하여 결정립이 미세화 되었기 때문이다. 즉, 고온에서는 결정립 크기가 작을수록 결정립



(a)



(b)

| | A | B | C | D |
|----|-------|-------|-------|-------|
| Mg | 73.60 | 78.86 | 78.06 | 76.87 |
| Al | 19.29 | 14.46 | 18.73 | 17.55 |
| Zn | 4.12 | 2.50 | 1.75 | 4.01 |
| La | - | 0.95 | - | - |
| Ce | 1.35 | 2.28 | - | - |

(c)

Fig. 9. SEM-EDS analysis of RSP extrudates(20m/s). (a) SEM of AZ91 alloy (b) SEM of AZ91 +3 wt%Mm (c) EDS of the regions marked by in (b)

계 면적의 증가로 입계미끄럼(grain boundary sliding)을 촉진시켜 연신율이 증가되기 때문이다[14]. Fig. 9는 AZ91과 AZ91+3 wt%Mm압출재의 입계 및 입내에 분포한 석출상의 SEM-EDS분석결과로서 AZ91의 경우는 입계에 조대화된 $\beta(Mg_{17}Al_{12})$ 상들이 분포하고 있는 반면, misch metal을 첨가한 AZ91+3 wt%Mm의 경우에는 불연속 $\beta(Mg_{17}Al_{12})$ 상들과 둥근 형태의 회토류계 화합물들이 입계 및 입내에 분포하여 평면슬립에 의한 슬립밴드를 형성하여 균열을 입내 전파시키기 때문에 기계적 특성 향상에 기여할 것으로 생각된다[15].

즉, misch metal의 첨가는 마그네슘의 주강화상이기

는 하나 입계에 분포시 crack의 시발점이 되거나 전파 경로로 작용하여 강도와 연성을 저하시키고 고온안정성이 부족한 것으로 알려진 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상의 생성을 억제하고, 강화효과와 열적 안정성이 있어 고온강도와 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 희토류계 상을 형성시키는 것으로 생각된다.

3.2.3 압출재의 고온안정성

Misch metal첨가가 압출재의 고온안정성에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 AZ91압출재와 고온 인장강도가 가장 우수한 AZ91+3 wt%Mm압출재를 산화방지를 위해 석영관에 장입하고 진공처리한 후 봉입하여 200, 300, 400°C에서 24시간동안 열처리하여 미세조직과 상의 변화를 고찰하였다. Fig. 10의 (a)~(d)는 열처리 온도에 따른 AZ91 압출재의 미세조직으로 200°C까지는 결정립 크기의 변화를 보이지 않는데 이러한 이유는 석출강화 및 결정립성장억제에 기여하는 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상이 200°C에서 석출되기 때문이다. 즉 급속응고 공정

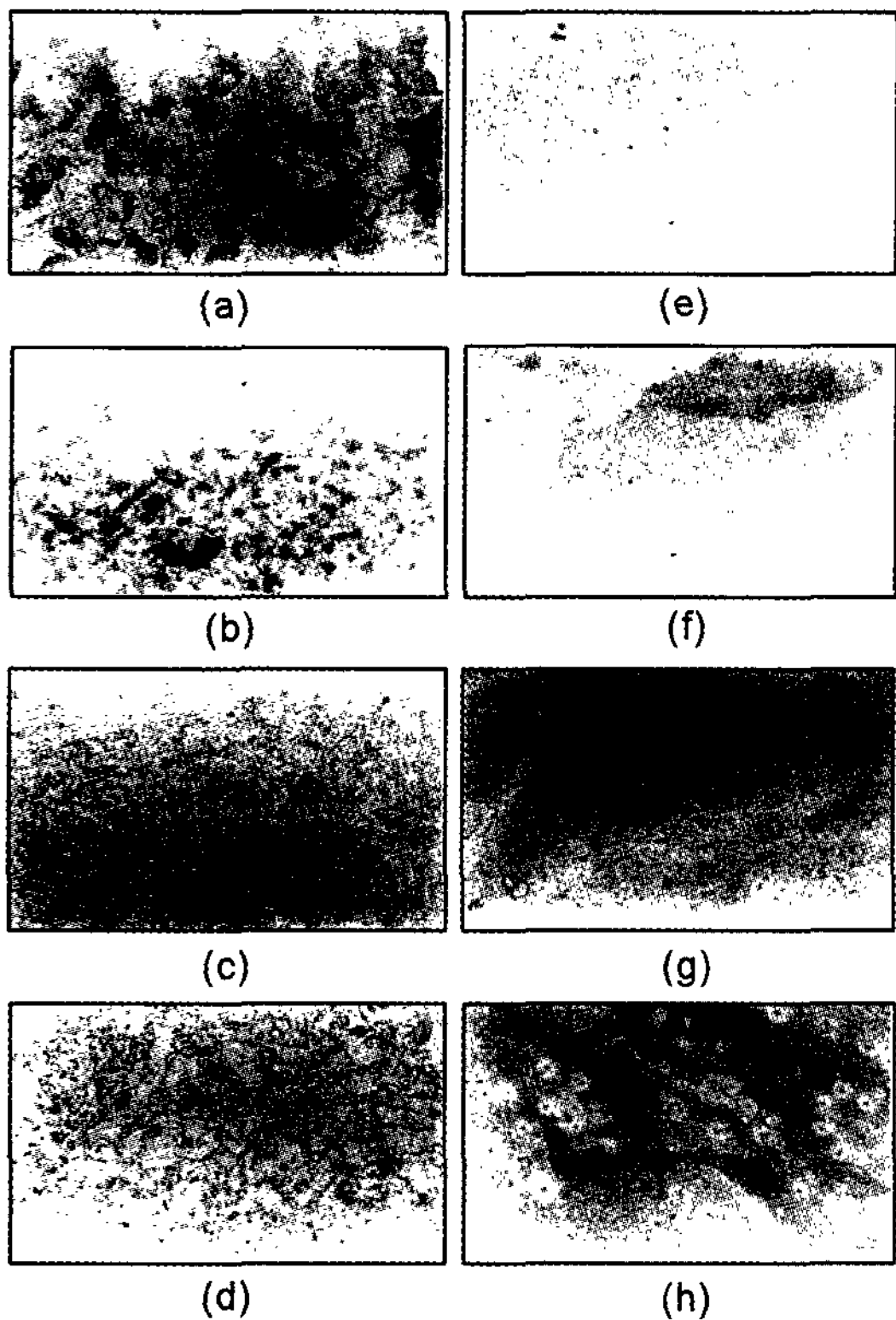


Fig. 10. Optical micrographs of the extrudate after heat treatment (wheel speed : 20m/s) - AZ91 : (a) R.T (b) 200°C (c) 300°C (d) 400°C-AZ91+3 wt%Mm : (e) R.T (f) 200°C (g) 300°C (h) 400°C

Table 3. Area fraction of phase after heat treatment in extrudates

| | AZ91 | | AZ91+3wt%Mm | |
|------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| | $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ | $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ | $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ | Al_2RE |
| Room Temp. | 16 | 9.7 | 19.4 | 2.5 |
| 200°C | 36.5 | 15.6 | 32.1 | - |
| 300°C | 26.9 | 20.7 | 11.1 | - |
| 400°C | 11.6 | - | 31.1 | - |

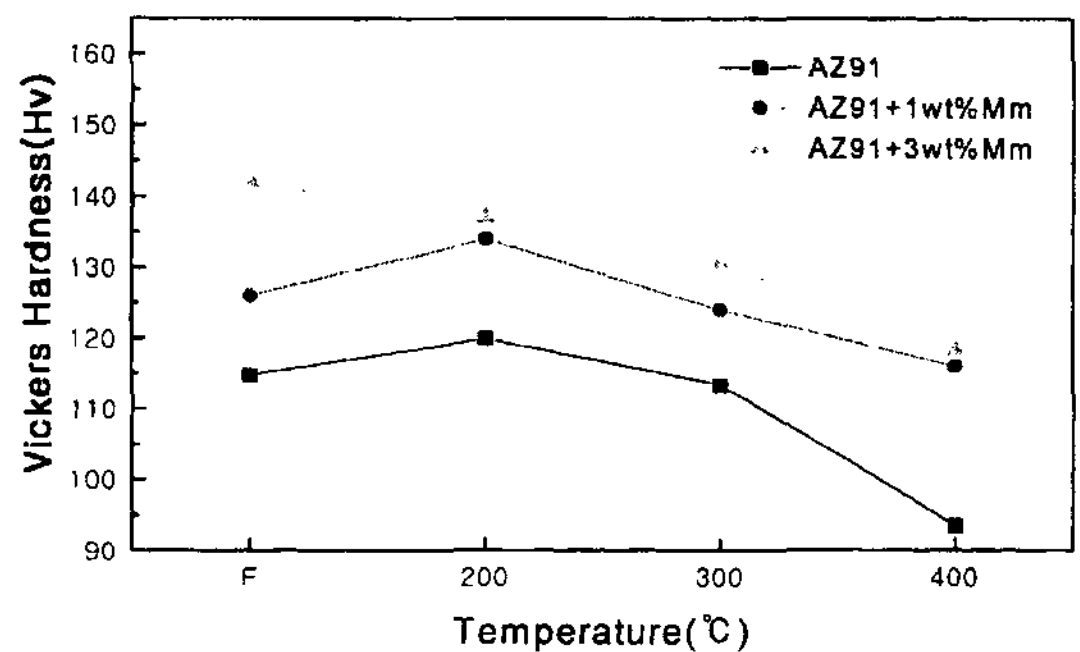


Fig. 11. Variations of hardness of extrudates after heat treatment.

에 의해 과포화 고용되었던 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상들이 200°C에서 석출하여 결정립 성장억제에 기여하기 때문이다. 그러나 300°C이상으로 온도가 상승할 경우에는 입계에 분포한 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상들이 조대화되고 입내의 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상은 기지에 재고용되어 결정립들이 성장하는 것이 관찰되었다. 400°C에서 열처리한 경우는 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상의 조대화 및 결정립 성장이 더욱 증가하였다. 즉, Table 3의 XRD 상분율에서 AZ91의 경우에는 200°C에서 가장 높은 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상분율을 보이지만 β 상의 용점이 약 462°C로 낮기 때문에 300°C이상에서는 입내에 존재하는 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상이 기지로 재고용되어 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상의 상분율이 크게 감소하는 경향을 보인다. 하지만 (e)~(h) 경우는 misch metal을 첨가한 AZ91+3 wt%Mm합금으로서 상분율을 통해 고찰해 보면 온도가 상승함에도 불구하고 열적으로 안정한 희토류계 화합물($\text{Al}_{11}\text{La}_3$)의 상분율이 유지되기 때문에 300°C이상의 고온에서도 결정립 성장이 상당히 억제됨을 알 수 있었다. 반면 Al_2RE 화합물은 상온에서 2.5%의 상분율을 보이나 200°C 이상의 온도에서 상분율의 감소를 나타내므로 열적안정성이 떨어지는 경향을 보여준다. 따라서 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 상이 고온안정성이 가장 우수함을 알 수 있었다. Fig. 11은 AZ91과 AZ91

+3 wt%Mm의 열처리 온도 변화에 따른 경도값을 나타낸 것이다. AZ91의 경우 석출강화효과에 기인하는 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상분율이 최대인 200°C에서 경도값이 가장 우수하였으나 온도가 상승함에 따라 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상분율의 감소로 경도는 급격히 감소하였다. 또한 AZ91+3 wt%Mm의 경우는 온도가 상승하여도 열적으로 안정한 희토류 화합물이 유지되어 경도 감소가 완만하게 진행됨을 알 수 있었다.

4. 결 론

1) Misch metal의 첨가로 인한 핵 생성 사이트의 증가와 조성적 과냉의 증가로 결정립이 미세화되었고, 열적으로 불안정하고 기계적 특성을 저하시키는 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상의 석출을 억제할 수 있었다.

2) Misch metal의 첨가로 인하여 열적으로 안정한 희토류계 화합물인 Al_2RE 및 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 계 화합물이 생성되었다.

3) 상온인장시험에서는 주강화상인 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상 분율이 가장 높은 AZ91+1 wt%Mm 경우가 최대 인장강도를 나타내었고, 고온 인장시험에서는 열적으로 안정한 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 상분율이 최대이고 Al_2RE 상분율이 최소인 AZ91+3 wt%Mm 경우가 가장 우수한 인장강도를 나타내었다.

4) 상온에서는 입계에 분포한 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상때문에 낮은 연신율을 나타내었으나 고온에서는 취약한 $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$ 상이 기지로 재고용되고 misch metal첨가에 의한 결정립미세화로 인하여 높은 연신율을 얻을 수 있었다.

5) 열처리시 AZ91의 경우 200°C에서 가장 높은 β 상분율을 보이며 경도값도 최고치를 보였으나 온도가 증가함에 따라 급격히 감소하였고, AZ91+3 wt%Mm 경우는 300°C 이상의 온도상승에도 불구하

고 열적으로 안정한 희토류 화합물의 상분율이 유지되어 결정립성장이 억제되고 경도감소가 완만하게 진행되었다.

후 기

본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단 대학부설연구소과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] J. Polmear : Mater. Sci. Technol., 10 (1994), 1-16.
- [2] S. L. Couling : Met. Eng. Q., 12 (1972), 7-13.
- [3] G. Foerster : in Proc. Conf. 8th SDCE Int. Die Cast Cong., MI, March (1975) The Society of Die Casting Engineers, 9372.
- [4] G. Foerster : in Proc. Conf. 7th SDCE Int. Die Cast Cong., Chicago, IL, USA, October (1972) The Society of Die Casting Engineers, Paper G-T75-112.
- [5] G. S. Foerster : Met. Eng. Q., 13 (1973), 19-22.
- [6] H. Jones : Mat. Sci. & Eng., 5(1969), 297.
- [7] R. Trivedi, J. Lipton : Acta Metall. Mater., 35(1987), 965.
- [8] K. Pettersen, O. Lohne : Metal. Trans., 21 A(1990), 221-230.
- [9] T. Z. Kattamis, U. T. Holmberg and M. C. Flemings: J. Inst.Met., 95(1967), 343-347.
- [10] Merton C. Flemings : Solidification Process., 146-154.
- [11] H. M. Park, J. K. Kim, T. W. Nam : J. of the Korean Foundrymen's society, 19 (1999), 341.
- [12] P. A. Evans et al. : "Quantitative X-ray Diffraction Analysis of Polyphic Mixes of Pure Zirconia" Br. Ceram. Trans. Soc., 72-4(1989), 612-624.
- [13] S. D. Park, S. B. Kang, H. K. Cho : J. Kor. Inst. Met. & Mat., 37(1999), 163-169.
- [14] O. D. Sherby, J. Wadsworth : "Deformation, Processing and Structure", ASM, (1984), 355.
- [15] J. B. Clark : Acta Metall. 16(1968), 141.