

논문

합금원소 Si, Mn, Zn 첨가에 따른 Al-Mg 합금의 유동도 및 기계적 성질 변화

김정민** · 성기덕 · 전중환 · 김기태 · 정운재

Variation of Fluidity and Mechanical Properties of Al-Mg Alloys with the Addition of Si, Mn, and Zn

Jeong-Min Kim†*, Ki-Dug Seong, Joong-Hwan Jun, Ki-Tae Kim and Woon-Jae Jung

Abstract

Effects of alloying elements such as Si, Mn, Zn on the fluidity and mechanical properties of high ductility Al-Mg based alloys were investigated. The fluidity of alloys was evaluated using a vacuum suction fluidity test, and Si addition was observed to increase the fluidity of Al-Mg binary alloys substantially while Zn somewhat decreased the fluidity. However, both the strength and ductility were significantly deteriorated by the Si additions. It was observed that a small amount of Mn addition to Al-Mg alloy increased the tensile strength effectively without losing much ductility but the effect of Zn addition on the strength was relatively small.

Keywords : Al, Mg, fluidity, strength, ductility

(Received May 2, 2004 ; Accepted June 15, 2004)

1. 서론

Al-Mg계 합금은 강도, 내식성, 용접성, 성형 가공성 등이 우수하기 때문에 건축용 내외장재 및 수송기계용 구조재료로 널리 쓰이고 있으며, 특히 열처리 없이도 상당한 강도와 동시에 연성을 가지기 때문에 다양한 분야에서의 잠재수요를 가진 중요한 합금계이다. 이처럼 우수한 특성은 상당부분 주 합금원소인 Mg에 의하여 발현되는데, 즉 Mg은 Al기지에 있어서 고용한도가 높고 고용강화효과가 크기 때문에 우수한 강도를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 미세조직을 Al단상으로 유지함으로써 동시에 우수한 연성을 가질 수 있게 한다. 하지만 Mg의 첨가에 따른 부정적인 요소도 있는데, 즉 Mg은 산화성이 크기 때문에 용해/주조시 작업조건이 까다로워질 뿐만 아니라 응력부식균열 저항성을 낮추는 상으로 알려진 Al3Mg2나 Mg5Al8이 석출하는 것

등이다[1-3].

결과적으로 Al-Mg합금에서의 Mg함량은 용도에 따라 다르나 5-7wt% 이하로 제한하는 경우가 많은데, 함량을 줄이면 고용강화효과가 감소하여 강도는 현저히 감소하고 연성은 약간 증가하는 경향을 보이기 때문에 줄어드는 강도를 보상해 줄 필요가 있다. 특히 주조용 합금에서는 가공용에 비하여 가공경화 공정이나 열처리가 제한적으로 이루어지기 때문에 Mg의 함량을 줄이면서도 강도를 유지하기 위해서는 적절한 대체 합금원소의 첨가가 필요하며, 또한 새로운 합금원소의 첨가에 따라 기계적 성질 외에도 유동도 같은 주조특성의 변화에 대한 검토가 매우 중요하다.

최근 들어 주단조법과 같이 주조와 소성가공을 동시에 수행함으로써 최종제품을 제조하는 가공법이 새롭게 주목을 받기 시작하면서 주조성과 소성가공성을 동시에 겸비한 합금개발이 요구되고 있는 데[4], Al-Mg

한국생산기술연구원 경량소재팀(Light Materials Research Team, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 406-130, Korea) †E-mail : jmk7475@kitech.re.kr

계 합금의 경우 강도 및 연성 모두 우수하지만 Al-Si 계 합금에 비하여 주조성이 낮은 경향이 있다. 현재까지 Al-Mg계 합금은 주로 가공용으로 많이 쓰이고 연구되어 왔으며 그 결과 합금원소의 첨가에 따른 기계적 성질의 변화와 주조성에 미치는 영향을 동시에 연구한 결과는 그리 많지 않은 상황이다[1]. 따라서 본 연구에서는 가공용뿐만 아니라 주조 및 주단조 등의 분야에서 널리 사용될 수 있는 Al-Mg계 합금개발의 일환으로서 대표적인 주조용 Al-Mg합금조성인 Al-5wt%Mg 및 Al-7wt%Mg을 기준으로 실용적인 합금원소 Mn, Zn, Si의 첨가로 인한 미세조직, 기계적 성질, 유동도의 변화 등을 종합적으로 조사하고자 하였다.

2. 실험 방법

순도 99.8% 이상의 상용 Al, Mg, Zn, Si 순금속 및 Al-20wt%Mn을 장입재로 사용하여 전기저항로에서 용해를 하였으며, SF₆와 CO₂혼합가스를 용탕 상부에 지속적으로 흘려줌으로써 Mg이 첨가된 용탕의 산화를 최소화하고자 하였다. 금속이 완전히 용해되면 Ar을 용탕 내로 교반하며 주입하여 탈가스 처리를 하였고 약 150°C로 예열된 금형에 주입하여 100×60×24 mm의 판재주조시편을 제조하였으며, 시편의 합금조성에 대한 ICP분석결과는 Table 1에 나타내었다. 조성에 따른 액상선, 고상선, 및 평형상은 상용 열역학 모델 프로그램인 Thermo-Calc 데이터베이스 TTAL을 이용하여 예측하였다.

합금 조성에 따른 유동도의 변화는 Fig. 1과 같은 vacuum suction fluidity test법을 이용하여 측정하였으며[5,6], 측정용 tube로는 내경 3 mm의 석영관을 사용하였다. 용해 및 탈가스가 완료되면 용탕을 일정한 과

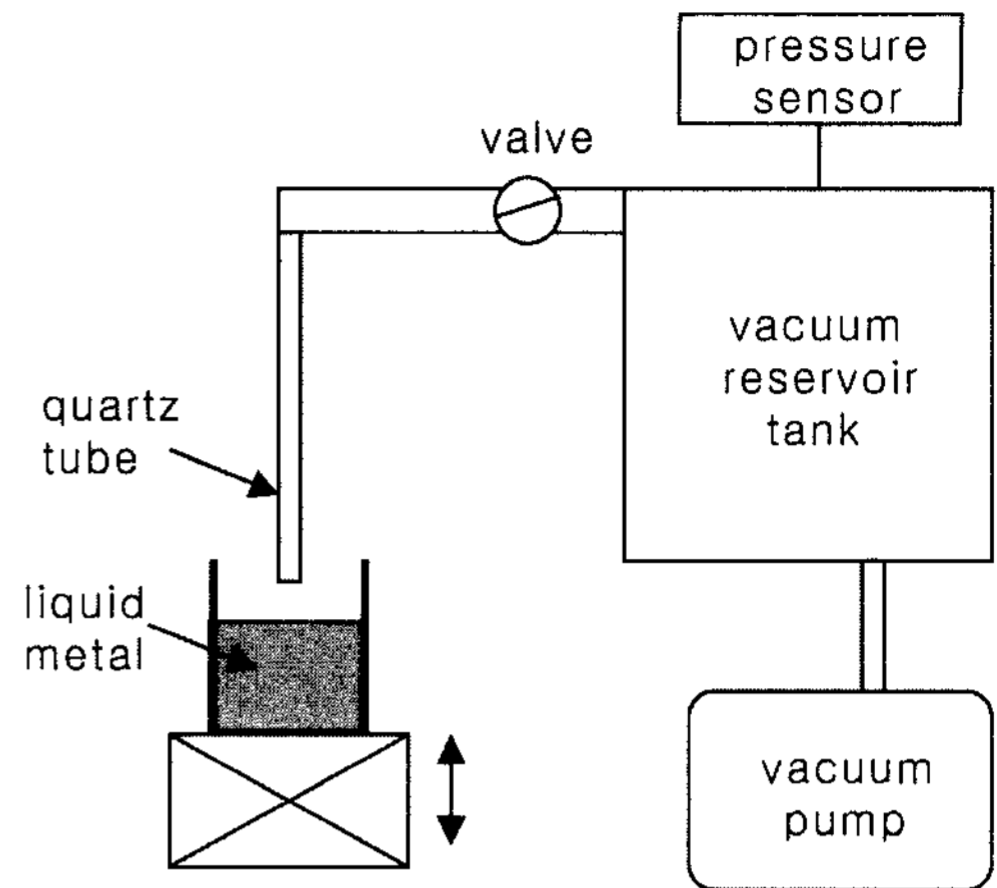


Fig. 1. Schematic illustration of vacuum suction fluidity test apparatus

열도를 갖도록 준비하고 석영관을 용탕 내 깊이 20 mm만큼 침적한 후 흡인압력 40 KPa에서 일련의 유동도 시험을 수행하였다.

시편의 미세 조직은 광학현미경 및 SEM으로 관찰하였으며, 석출상의 분석은 XRD와 SEM-EDX를 이용하여 수행하였다. 인장시험은 제조한 주조시편의 상부 및 하부를 제외한 중간부위에서 두께 2 mm의 판상시편을 채취하여 추가적인 열처리 없이 ASTM B557 규격에 따라 이루어졌다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Al-Mg합금의 유동도 및 기계적 성질에 미치는 Si의 영향

Al-Mg의 유동도 및 기계적 성질에 미치는 Si의 영향을 파악하기 위하여 5% 및 7%Mg 합금에 약 1%의 Si을 첨가하였으며 그 결과 초정 Al상 이외에 Mg₂Si상이 추가로 형성된 것을 Fig. 2의 XRD 분석결과로부터 알 수 있었다. Al-rich Al-Mg계 합금에서 형성되는 평형상 Al₃Mg₂는 Thermo-Calc를 사용한 예측에서는 형성될 것으로 생각되었으나 실제 시편에서는 관찰되지 않았다[7].

Fig. 3에서 나타낸 유동도 결과를 보면 5%Mg과 7%Mg 합금의 경우 Mg함량의 차이에도 불구하고 상당히 유사한 유동도를 가지며, 소량의 Si 첨가로 인하여 두 조성 모두에서 유동도가 뚜렷이 증가하는 것을 나타내고 있다. 또한 용탕온도(과열도)에 따라 유동도

Table 1. Chemical compositions of alloys

Alloy	Mg	Mn	Zn	Si	Al
5Mg	4.95	--	--	--	balance
7Mg	6.96	--	--	--	"
5Mg-Si	4.82	--	--	1.14	"
7Mg-Si	6.87	--	--	1.17	"
5Mg-Mn	4.86	0.93	--	--	"
5Mg-Zn	4.89	--	0.90	--	"
5Mg-Mn-Zn	5.06	0.92	0.80	--	"
5Mg-Mn-Zn-Si	4.77	0.98	0.51	0.38	"
4Mg-2Mn	3.80	1.88	--	--	"

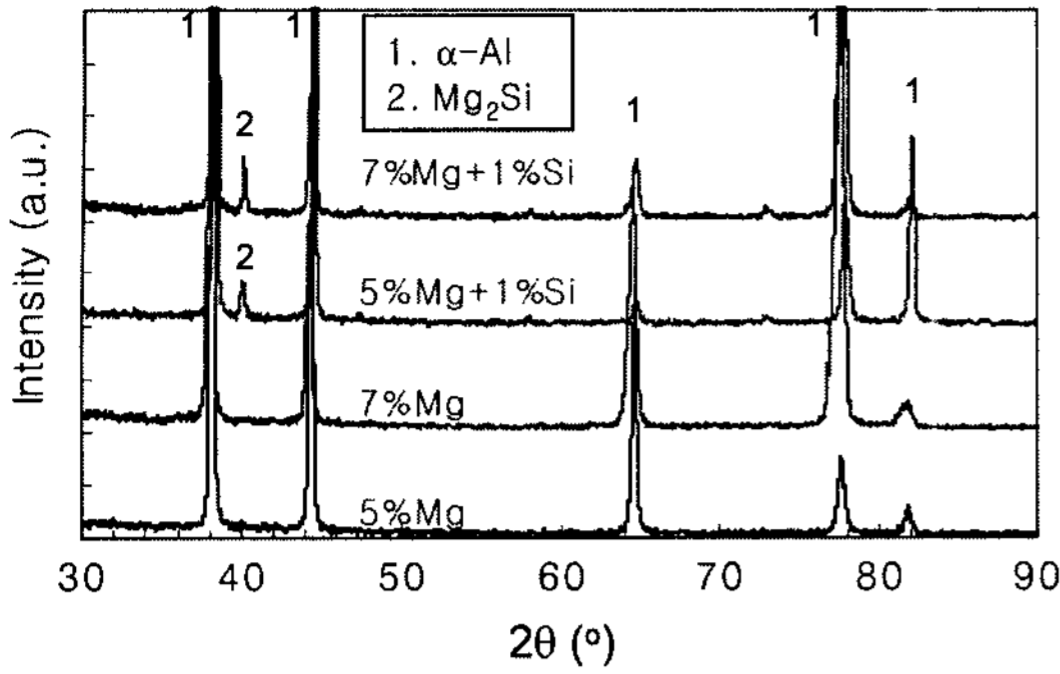


Fig. 2. XRD analysis result of as-cast Al-Mg-(Si) alloys.

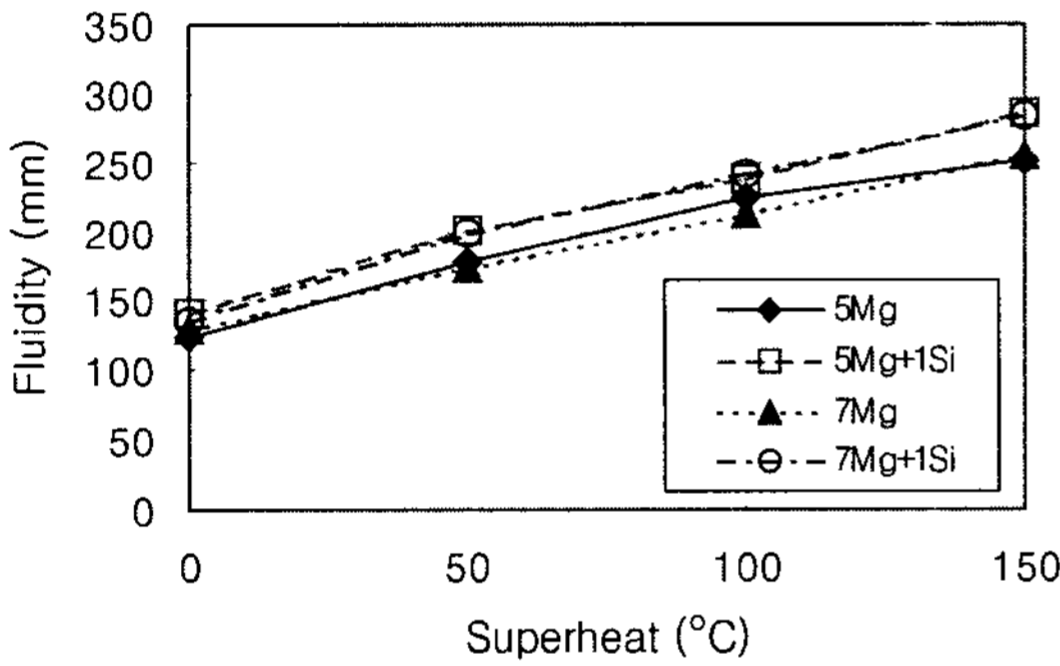


Fig. 3. Effect of Si addition on the fluidity of Al-Mg alloys.

가 거의 직선적으로 비례하여 증가하는 것을 알 수 있는데, 기울기는 대략 용탕의 비열에 해당하기 때문에 같은 합금계에 속하는 조성들에서 매우 유사한 기울기를 보이는 것은 타당해 보인다[8,9].

금속의 유동도에 영향을 미치는 변수들에는 여러 가지가 있으며, 기본적인 개념은 Flemings[8], Campbell [10] 등에 의하여 자세히 논의된 바 있다. Vacuum suction fluidity 시험에서 액상 금속이 석영관을 통해 흡인되어 이동하다 결국 멈추게 되는 것이 주로 응고에 의한 것이라 생각할 때 합금원소의 첨가에 따른 응고잠열의 변화는 고려해야 할 중요한 변수라고 추론할 수 있다. Si의 응고잠열은 매우 높기 때문에 순수 Al 과 Si이 유동 channel에서 응고하는데 소요되는 시간을 용융점, 밀도, 응고잠열의 세 가지 변수에 대한 식으로 서로 비교하면 Si의 경우가 약 3.4배 길게 나타나며[10], 실제 Al합금에 있어서 Si은 응고시 방출하는 다량의 응고잠열로 인하여 유동도를 향상시키는 주요 원소로 알려져 왔다[6,11,12].

유동도에 미치는 중요한 변수에는 또한 용탕의 표면

장력을 들 수 있는데, 용탕이 주형의 빈 공간을 채우며 이동할 때 주형과의 젖음(wetting)이 좋지 않다면 이동을 방해하는 back pressure가 작용하게 된다. 이와 같이 용탕의 표면장력에 의하여 발생하는 back pressure, P 는 $2\gamma/r$ 의 단순한 식으로 나타낼 수 있는데 여기서 γ 와 r 은 각각 표면장력과 용탕이 흐르는 tube의 반지름을 의미한다. 예상할 수 있듯이 back pressure의 중요성은 용탕이 좁은 공간을 충전할 때 나타나며, 본 실험에서는 3 mm의 석영관을 사용하였으므로 순 Al의 표면장력(용융점 근처에서 약 868 mN/m [13])을 대입하여 계산해 보면 그 크기가 약 1.16KPa로써 흡인압력 40KPa을 약간 감소시키는 정도에 불과할 것으로 생각된다. 특히 산화성이 강한 Mg의 첨가로 인하여 실제 용탕의 표면장력은 더 작을 것으로 기대된다. 참고로 Flemings[8]는 유동도에서 표면장력의 영향이 뚜렷해지는 유동채널의 직경을 약 2.5 mm 이하로 제시하였다.

Al-Mg합금의 유동도는 Si의 첨가에 의해 뚜렷하게 개선되나 Fig. 4와 같이 기계적 성질은 Si에 의해 강도와 연신율 모두 현저히 감소되는 것으로 나타났는데, 이 또한 Mg_2Si 상의 형성에 의한 것으로 생각된다. Si이 첨가되면 Fig. 5에서 보여주는 것과 같이 chinese script형태의 Mg_2Si 상들이 결정립계에 다수 형성되며, 인장시험 중 이 영역에서의 응력집중 및 균열발생이 용이할 것으로 추정되기 때문이다. Mg_2Si 상의 형상 및 크기를 제어하면 기계적 성질이 다소 향상될 것으로 기대되나 우수한 연성을 유지하기 위해서는 결국 Si의 함량이 매우 제한적일 수밖에 없을 것으로 보인다. 한편, 최근 보고[14]에 의하면 압출 후 325°C에서의 열처리를 마친 Al-Mg합금의 항복강도는 Mg함량이 5, 6.5%일 때 각각 115, 130 MPa로써 본 실험에서 조사

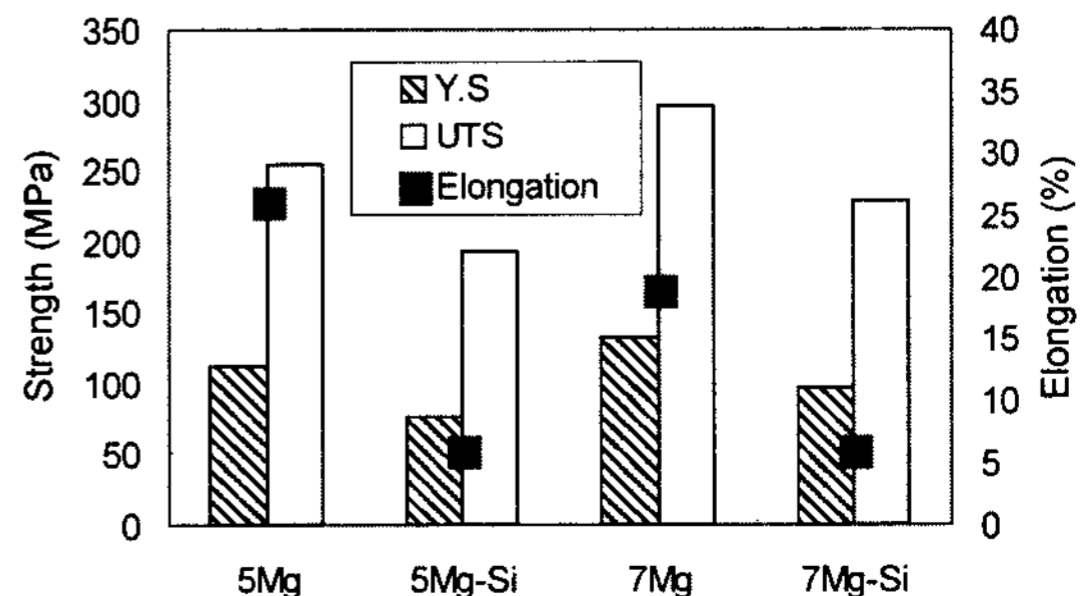


Fig. 4. Effect of Si addition on the mechanical properties of Al-Mg alloys.

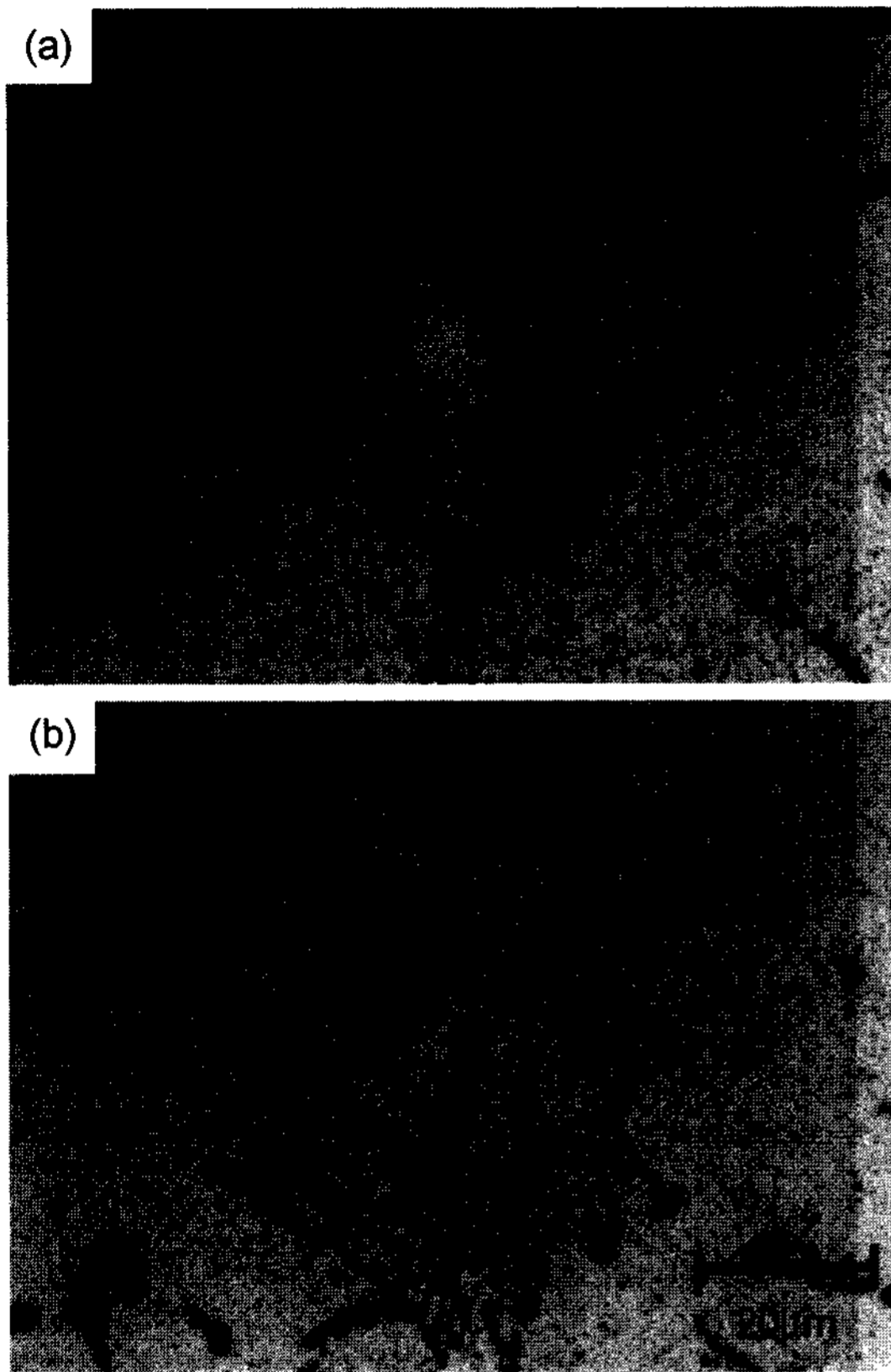


Fig. 5. Typical microstructure of Mg_2Si phase observed in as-cast Al-Mg-Si alloys : (a) 5%Mg-1%Si (b) 7%Mg-1%Si.

한 구조시편에 비하여 약간 낮은 것을 알 수 있다. 특히 Mg의 함량이 높은 경우에 그 차이가 큰 것으로 나타났으며, 이것은 구조시편의 제조과정에서 비교적 빠른 응고가 일어나 평형치 보다 많은 Mg이 Al기질 내에 고용되었기 때문으로 보인다. 일반적으로 알려진 Mg의 고용도는 약 3-5%에 불과하지만 실제로 7%Mg 구조시편의 미세조직에서 Al_3Mg_2 상이 관찰되지 않고 $\alpha-Al$ 단상을 보인다는 사실이 이 가정을 뒷받침해주고 있다.

3.2. Al-Mg합금의 유동도 및 기계적 성질에 미치는 Mn, Zn의 영향

5%Mg합금은 7%Mg합금에 비하여 강도는 다소 낮으나 연성이 우수하며, 또한 응력부식의 원인이 되는 것으로 알려진 Al_3Mg_2 나 Mg_5Al_8 상이 석출될 가능성이 낮을 뿐만 아니라 상대적으로 낮은 Mg함량 때문에

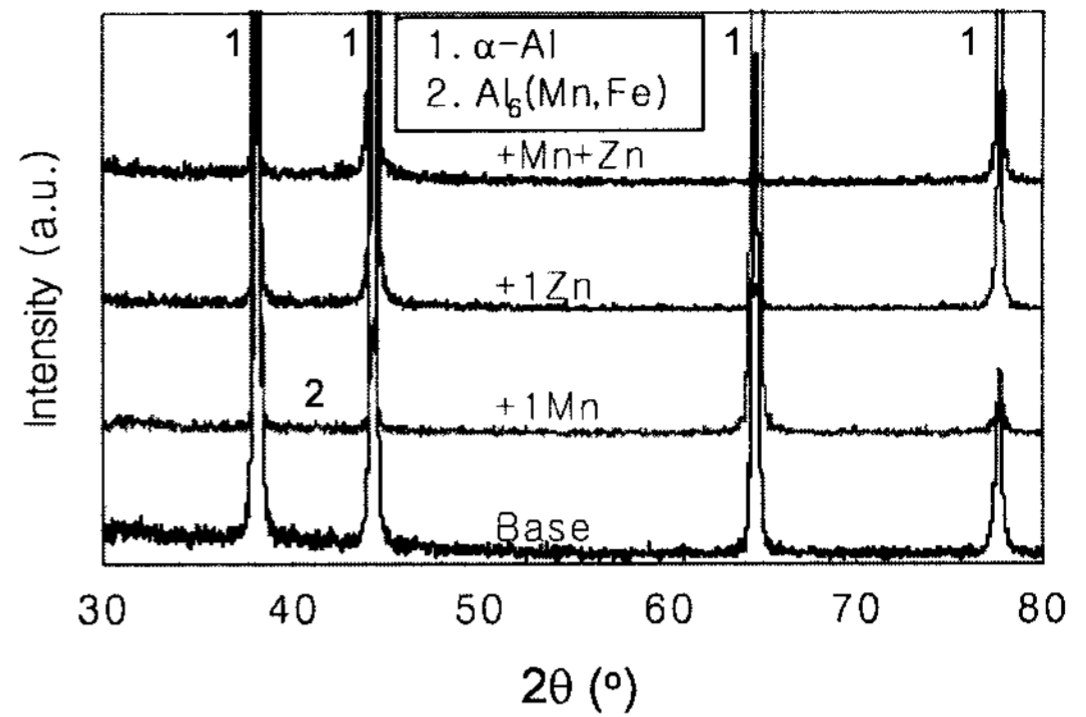


Fig. 6. XRD analysis result of as-cast Al-5%Mg based alloys.

용해 및 구조가 용이하다는 장점이 있다. 따라서 Al-5%Mg을 기준으로 Mn 및 Zn를 첨가함으로써 기계적 성질, 특히 강도를 향상시키고자 하였다. Mn의 경우 소성가공시 결정립미세화와 강도증가의 효과가 크며, Zn는 결정립에 석출되는 Al_3Mg_2 의 양을 감소시킴으로써 응력부식균열 저항성을 높이는 것으로 보고 된바 있다[15,16]. Fig. 6의 결과를 보면 Mn이나 Zn의 첨가에 의하여 미세조직은 큰 변화 없이 Al단상을 유지하며, Mn의 첨가여부에 따라 크게 두 가지의 Fe함유 석출물이 소량 존재하는 것을 알 수 있다. 즉, Mn이 첨가되지 않은 합금들에서는 불순물로 존재하는 Fe 때문에 Fig. 7(a)와 같은 Al-Fe상이 소량 형성되며, Mn이 첨가되면 7(b)와 같은 $Al_6(Mn,Fe)$ 상이 주로 발견되었다. 그러나 Zn의 경우에는 기지에 모두 고용되어 석출상 형성에는 기여하지 않는 것으로 생각된다.

Al-5%Mg합금의 유동도에 미치는 Mn 및 Zn의 영향은 Fig. 8에 나타내었는데, Mn의 경우 유동도에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 관찰되었다. 이와는 대조적으로 Zn의 경우에는 유동도를 다소 감소시키는 경향을 보였으며 이것은 부분적으로는 Zn의 응고잠열이 상대적으로 낮기 때문인 것으로 추정된다[11,12]. 순수 Zn와 Al의 응고잠열을 비교하면 Zn는 Al에 비하여 단위 중량당 28.7%에 불과한 잠열을 방출하며, 밀도차이를 고려해 단위 부피로 환산하여도 약 75.9% 정도이다. 이에 반해 Mn은 오히려 Al에 비해 단위 부피당 약 1.9배의 응고잠열을 방출한다. 하지만 합금원소가 많이 첨가된 금속의 유동도는 tube를 흐르는 액상금속의 선단부의 응고거동에 따라 좌우되기 때문에 응고잠열의 비교만으로 충분한 설명은 곤란하다.

한편 Fig. 9는 합금원소 첨가에 따른 Al-5%Mg계

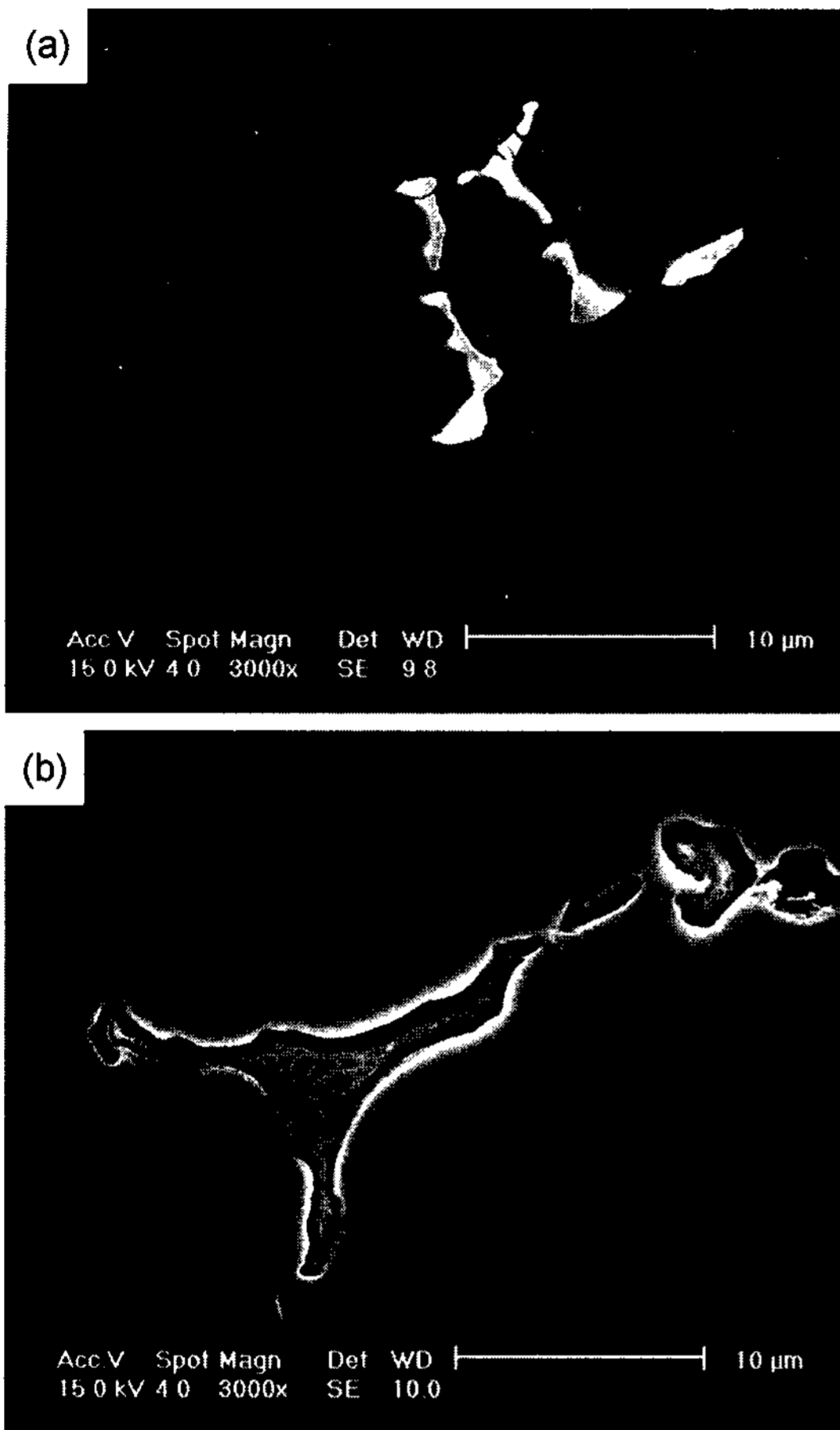


Fig. 7. SEM micrographs of precipitates observed in as-cast Al-Mg based alloys : (a) Al-Fe phase (b) $Al_6(Mn,Fe)$ phase.

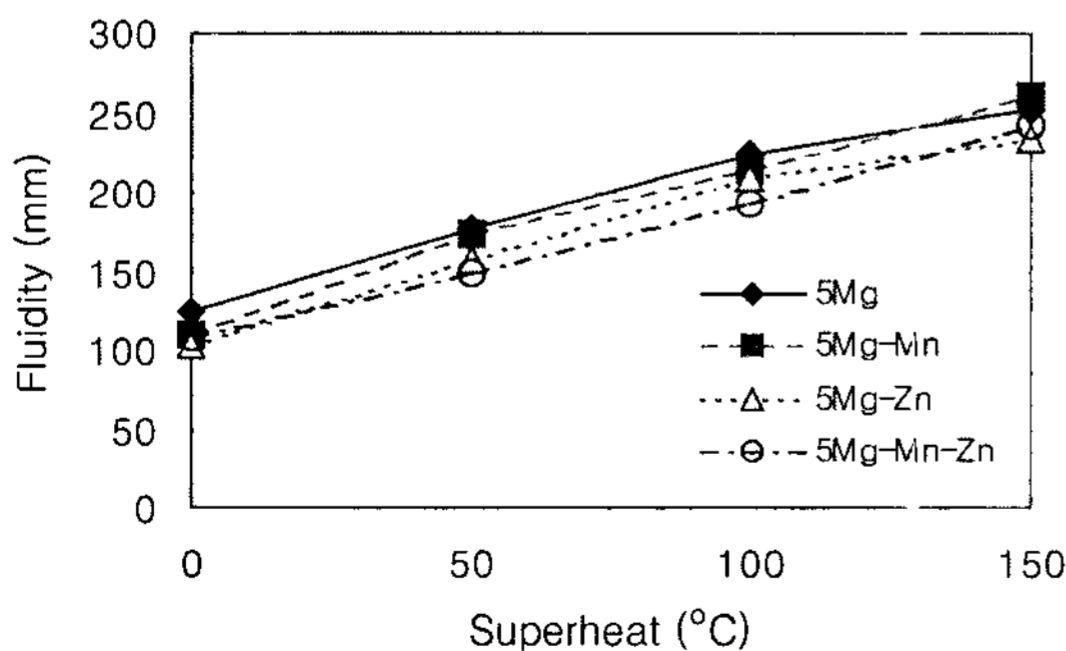


Fig. 8. Effects of Mn and Zn additions on the fluidity of Al-5%Mg alloys.

합금의 기계적 성질의 변화를 보여주는 것으로 강도의 증가에 미치는 Mn의 효과를 뚜렷하게 관찰할 수 있었

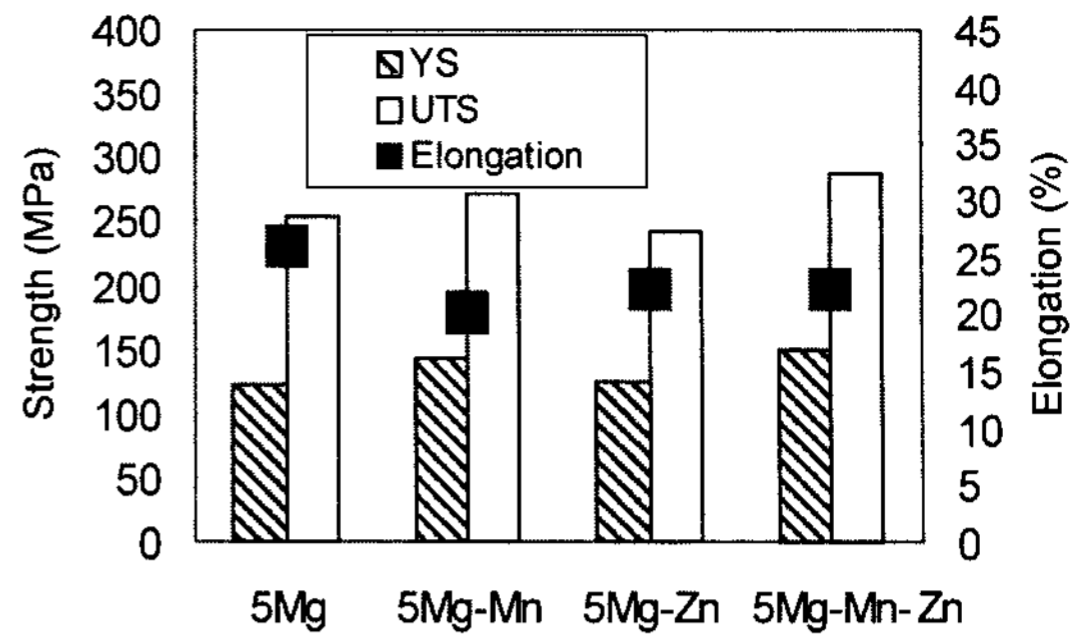


Fig. 9. Effects of Mn and Zn additions on the mechanical properties of Al-5%Mg alloys.

다. Al기지에 대한 Mn의 최대고용한도는 약 1.25wt% 로써 강도증가의 원인은 주로 고용강화효과로 생각되며, Zn의 경우 Mn과 함께 첨가될 경우 인장강도의 향상에 기여하였으나 단독으로 첨가되었을 때는 효과적이지 못한 것으로 나타났다. 종합적인 고찰이 필요하겠지만 고용강화의 효과에 미치는 변수 중의 하나인 용매와 용질원자의 크기차이를 비교하면 Zn가 Mn에 비하여 그 차이가 작아 고용강화효과가 상대적으로 작을 것으로 기대된다.

3.3. Al-Mg-Mn계 합금

앞의 연구결과를 통해 Mn을 단독 또는 Zn와 함께 첨가함으로써 Al-5%Mg의 연성을 크게 저하시키지 않으면서도 강도를 향상시킨다는 것을 알 수 있었다. 그러나 여전히 유동도의 개선이 필요하고 Mg의 함량을 추가로 낮추는 것이 가능하다면 바람직하기 때문에 Si이 소량 첨가된 합금과 Mg의 함량을 줄이고 대신 Mn을 추가로 첨가한 합금을 설계, 유동도와 기계적 성질을 조사하였다. Fig. 10의 XRD분석과 Fig. 11의 SEM관찰을 통해 Si이 첨가된 합금에서는 Mg_2Si 와 함께 소량의 $Al_{12}(Mn, Fe)_3Si$ 상이 형성된 것을 알 수 있으며, 새로운 조성 모두 Mn이 첨가되었기 때문에 5%Mg-1%Mn합금의 경우와 마찬가지로 $Al_6(Mn, Fe)$ 상을 관찰할 수 있었다.

Fig. 12의 유동도 결과를 보면 소량의 Si첨가로도 약간의 개선이 가능한 것을 알 수 있으며, Mn의 함량이 2%까지 증가하는 것은 부정적인 효과가 있는 것으로 나타났다. 4%Mg-2%Mn의 경우 액상선 온도가 약 670°C로써 5%Mg-1%Mn의 633°C에 비하여 상당히 높기 때문에 동일한 주입온도를 사용할 경우 유동도

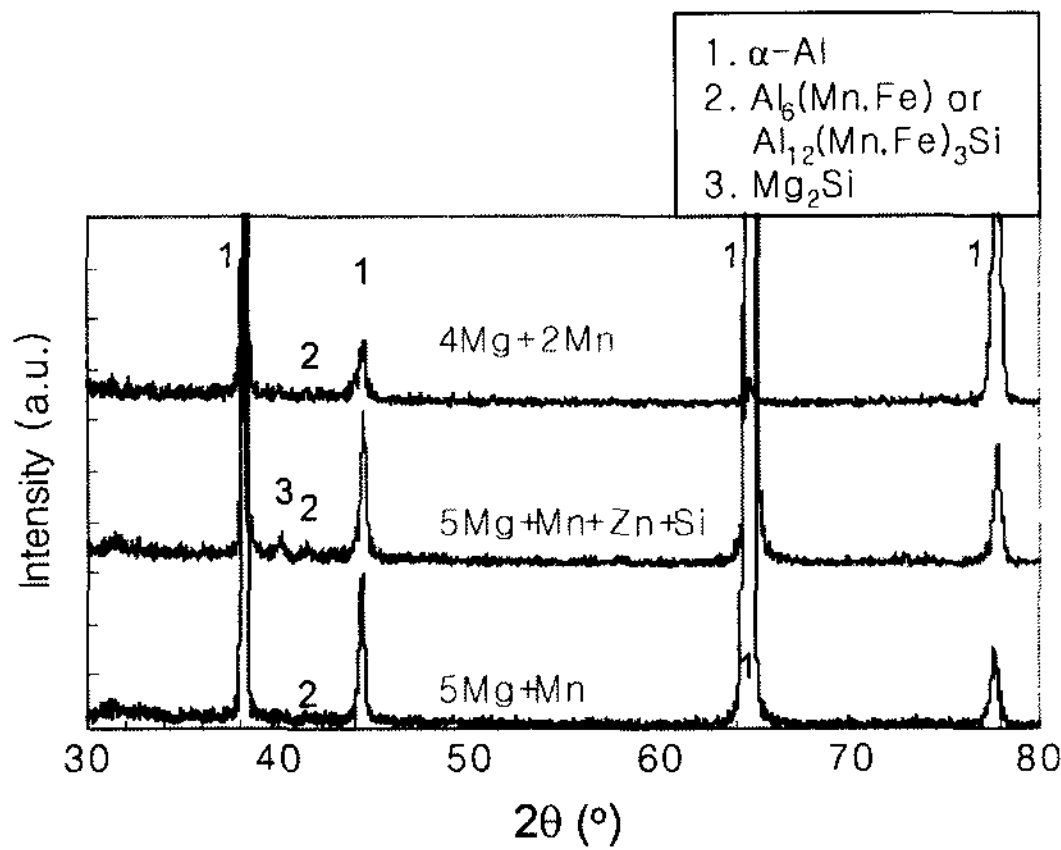


Fig. 10. XRD analysis result of as-cast Al-Mg-Mn based alloys.

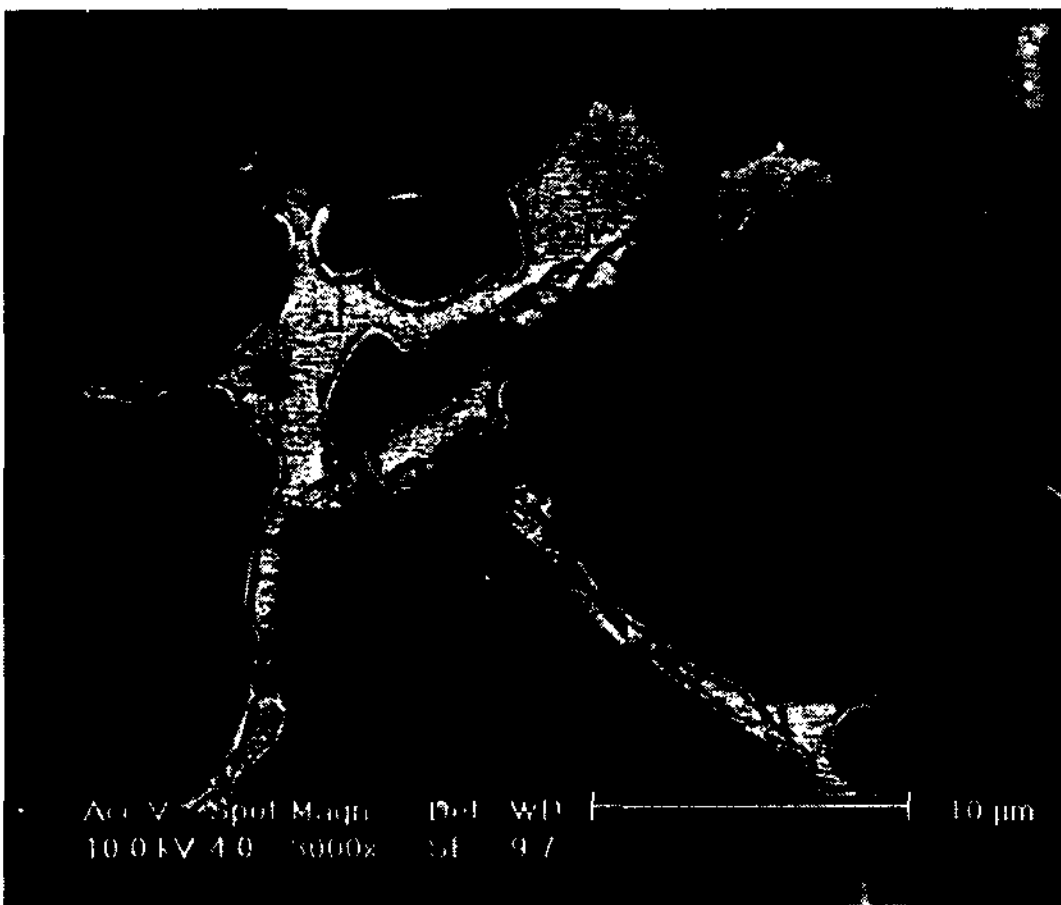


Fig. 11. SEM micrograph of $Al_{12}(Mn,Fe)_3Si$ precipitates observed in Al-5Mg-1Mn-0.5Zn-0.5Si alloy.

차이는 더욱 커질 것으로 예상되며, 이와 같이 유동도가 낮은 것은 4Mg-2Mn의 응고고구간이 평형상태에서 약 79°C로 비교적 넓기 때문인 것으로 보인다(5Mg-1Mn의 경우 약 56°C). 일반적으로 합금의 유동도는 응고구간의 길이에 반비례하는 경향을 나타낸다 [8,10,11].

합금조성별로 기계적 성질을 비교한 결과는 Fig. 13에 나타냈으며, 강도와 연신율 모두 5Mg-1Mn에 비해 새로운 조성에서 낮은 것을 알 수 있다. 4Mg-2Mn의 경우 우선 Mn의 밀도가 Mg에 비하여 4배 이상 높아 동일한 wt%로 첨가되었을 때 실제 고용된 양이 적기 때문인 것으로 보이며 그림에도 연성의 저하는 더 큰

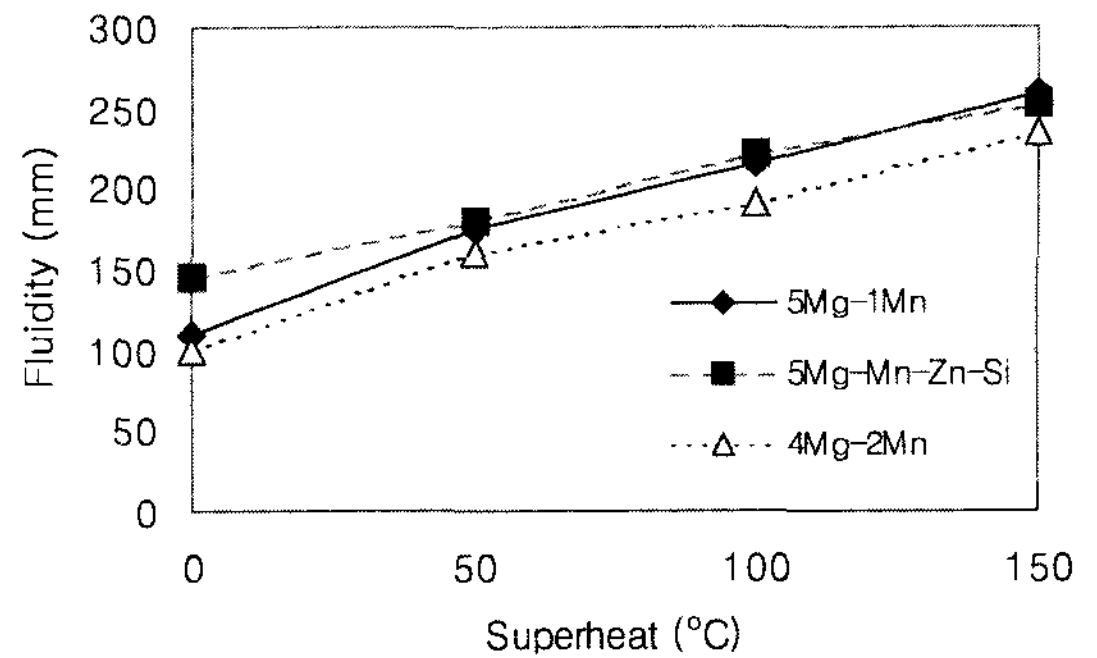


Fig. 12. Fluidity of Al-Mg-Mn based alloys.

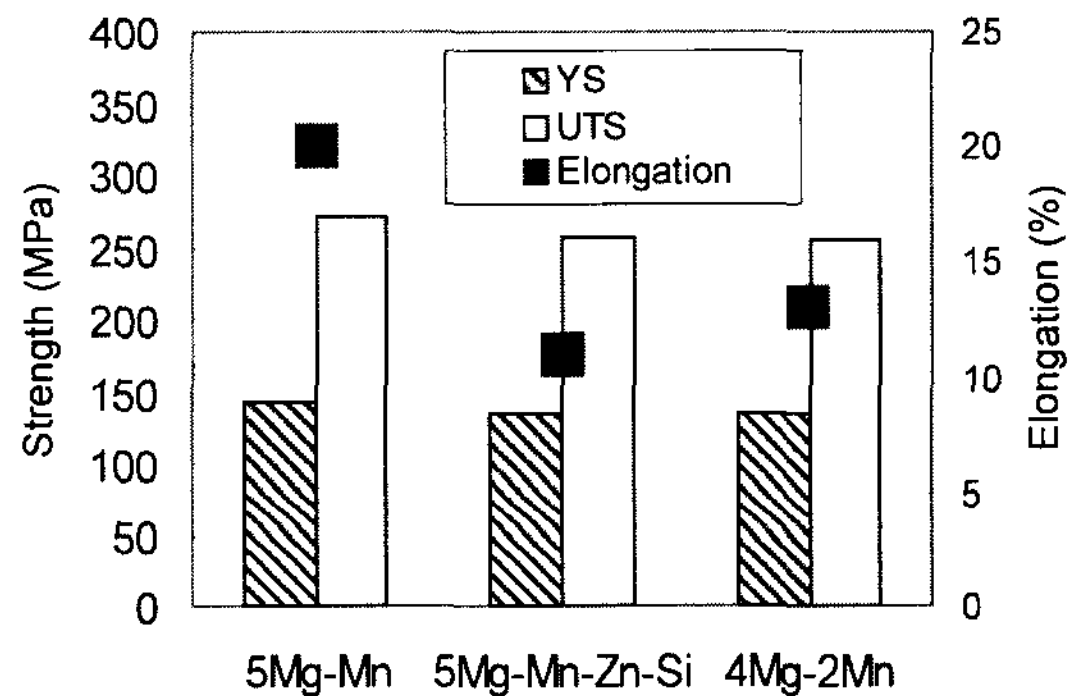


Fig. 13. Tensile properties of Al-Mg-Mn based alloys.

것으로 나타나 1%를 초과하는 Mn의 첨가는 유동성과 기계적 성질 측면에서 모두 바람직하지 않다는 잠정적인 결론을 얻었다. 한편 5Mg-Mn-Zn-Si합금의 경우 0.5%의 Si첨가로 비록 약간의 기계적 성질의 저하가 일어나나 유동도의 개선이 가능하다는 것을 보여주었으며, 이에 대한 원인은 전술한 바와 같이 Si의 첨가에 따른 응고잠열 증가와 Mg_2Si 상의 형성에 따른 연성저하에 의한 것으로 생각된다. 본 합금조성에 대한 결과는 Si의 함량을 조절함으로써 합금의 용도에 적합하도록 어느 정도 주조성과 기계적 성질을 제어할 수 있음을 시사하는 것이다.

4. 결론 및 요약

Al-Mg계 합금의 유동성과 기계적 성질에 미치는 합금원소의 영향을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. Al-Mg계 합금에 약 1%의 Si를 첨가하면 응고

중 방출되는 잠열의 양이 증가하여 유동도는 뚜렷이 개선되었으나 chinese script 형태의 Mg_2Si 상이 형성되기 때문에 강도와 연성은 모두 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

2. Mg의 함량을 낮게 유지하면서도 높은 강도를 얻기 위하여 5%Mg을 기준으로 Mn, Zn를 첨가시킨 결과 Mn은 유동도에 큰 영향 없이 강도를 향상시키는 것을 알 수 있었으며, Zn는 단독으로 첨가되면 강도증가 없이 오히려 유동도를 저하시키는 것으로 나타났다.

3. Mg의 함량을 더욱 낮게 하면서도 충분한 강도를 얻기 위하여 5Mg-1Mn조성에서 Mg의 함량을 4%로 감소시키고 Mn을 2%로 증가시킨 결과 유동도, 기계적 성질 모두 저하되는 결과를 얻었다.

4. 5Mg-1Mn-0.5Zn에 0.5%의 Si을 첨가시키면 강도는 약간 저하되나 유동도는 증가하는 것으로 관찰되어 Si의 함량을 제어함으로써 우수한 강도와 유동도를 동시에 얻는 것이 어느 범위 내에서 가능한 것으로 확인되었다.

참 고 문 헌

[1] Edited by J. R. Davis: ASM Specialty Handbook, "Aluminum and aluminum alloys", ASM international, Materials Park, OH (1993) 88-94, 579-622.
 [2] M. Popovic and E. Romhanji: J. of Mater. Process. Tech. "Stress corrosion cracking susceptibility of Al-Mg alloy sheet with high Mg content", 125-126, (2000) 275-280.
 [3] J. Y. Park, J. C. Kim, H. B. Kim and C. O. Choi: J. of Kor. Foundrymen's Soc., "Effect of solidification condition on the structure and mechanical properties of Al-5wt%Mg alloy by metallic mold casting", 17, (1997) 237-244.
 [4] Y.S. Han and H.I. Lee: J. of Kor. Foundrymen's Soc.,

"Development of new Al alloys for premium quality casting", 19, (1999) 384-392.
 [5] E. Niyama, K. Anzai, T. Funakubo and S. Hiratsuka: J. of Mater. Process. Tech., "Some basic research for thin-wall casting technology", 63, (1997) 779-783.
 [6] W. S. Lee and B. J. Ye: J. of Kor. Foundrymen's Soc., "Variation of fluidity in Al alloys with the addition of Si, Mg and melt treatments", 19, (1999) 310-317.
 [7] D. Hamana, L. Baziz and M. Boucheur: Mater. Chem. & Phys., "Kinetics and mechanism of formation and transformation of metastable β -phase in Al-Mg alloys", 84, (2004) 112-119.
 [8] M. C. Flemings: Solidification Processing, McGraw-Hill (1974) 219-224.
 [9] Y. D. Kwon, Z. H. Lee and K. H. Kim: J. of Kor. Foundrymen's Soc., "The effect of grain refinement on fluidity of Al-4.8%Cu-0.6%Mn alloy", 22, (2002) 109-113.
 [10] J. Campbell: Castings, Elsevier Science (2003) 74-98.
 [11] J. M. Kim and C. R. Loper, Jr.: AFS Trans., "Effect of solidification mechanism on the fluidity of Al-Si casting alloys", 103, (1995) 521-529.
 [12] F. Cardarelli: Materials Handbook, Springer-Verlag, London (2000) 530-537.
 [13] S. H. Park, S. Y. Kim, D. K. Ahn, D. I. Ha, S. H. Cho, S. C. Bae and B. Y. Hur: Kor. J. of Mater. Res., "A study on the viscosity and surface tension for foaming materials and the effects of addition elements", 12, (2002) 729-734.
 [14] K. L. Kendig and D. B. Miracle: Acta Mater., "Strengthening mechanisms of an Al-Mg-Sc-Zr alloy", 50, (2002) 4165-4175.
 [15] S. A. Court, K. M. Gatenby and D. J. Lloyd: Mater. Sci. Eng. A, "Factors affecting the strength and formability of alloys based on Al-3wt%Mg", 319-321, (2001) 443-447.
 [16] Edited by K. Hirano, H. Oikawa and K. Ikeda: "Science and engineering of light metals", Japan Inst. of Light Met., Tokyo (1991) 419-424.