

논문

Al-5%Mg 합금의 주조성과 기계적 성질에 미치는 합금원소 Mn 및 Si의 영향

김정민[†] · 성기덕 · 진중환 · 김기태 · 정운재

한국생산기술연구원 경량소재팀

Effects of Mn and Si Contents on the Castabilities and Mechanical Properties of Al-5%Mg Base Alloys

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

Light Materials Research Team, Korea Institute of Industrial Technology

Abstract

High ductility Al-Mg alloys often contain some Mn and Si, however the effects of these minor alloying elements on various properties of alloys have not been fully understood. In this study the castability and mechanical properties of Al-5%Mg alloy were investigated according to the addition of Mn and Si. The fluidity of the alloys was generally increased by increasing Si or Mn contents. The feedability was also increased by increasing Si content, but it was rather decreased by increasing Mn content. Both the tensile strength and the ductility appeared to be deteriorated by Si addition, while they were found to be improved by Mn addition.

Key words : Al-Mg alloy, Fluidity, Feedability, Tensile properties

(Received August 25, 2005; Accepted October 15, 2005)

1. 서 론

대표적인 비열처리용 합금인 Al-Mg계 합금은 우수한 강도, 내식성, 용접성 및 성형성을 가지는 중요 합금계로서 건축, 수송기계 등 여러 분야에서 사용되고 있으며, 향후 수요량이 꾸준히 증가할 것으로 기대된다. 주조용으로 사용되는 Al-Mg계 합금의 강도는 Al기지 내에 고용된 Mg원소의 고용강화작용에 의하여 주로 좌우되기 때문에 Mg함량을 증가시킴으로써 강도를 현저히 향상시킬 수 있다. 그러나 Mg첨가량이 증가할수록 용해조건이 까다로워질 뿐만 아니라 합금의 응력부식균열 저항성을 낮추는 상으로 알려진 Al₃Mg₂나 Mg₅Al₈이 형성되기 때문에 Mg함량은 종종 5-7wt%(이하 %로 표기함)이하로 제한된다[1-3]. 따라서 Mg함량의 제한에 따른 강도 감소분을 보충하기 위하여 새로운 합금원소의 첨가가 필요하지만 이에 대한 연구는 아직 충분하지 않은 것으로 생각된다.

최근 들어, 저자들은 Al-Mg계 합금에 Mn, Zn, Si 등을 첨가하는 연구를 수행하였으며, 그 결과 1%이하의 Mn을 첨가하면 뚜렷한 강도개선효과가 있음을 관찰할 수 있었다[4]. 또한 Si의 경우 Al-Mg합금에 첨가되면 유동성을 현저히 향상시키는 것으로 나타났으나 약 1%이상의 Si이 첨가되면 Mg₂Si의 형성으로 인한 기계적 성질의 저하가 뚜렷하게 관찰되었다. Al-Mg계 합금은 최근 많은 관심을 받고 있는 주단조법과 같이 주조와 소성가공성을 동시에 요구하는 제조공정에

적합한 소재로서 전망이 밝으나 기존의 Al-Si합금에 비하여 주조성이 다소 떨어지기 때문에 적절한 Si의 첨가를 통한 주조성 개선이 필요하며, 이에 대한 추가적인 연구가 수행될 가치가 있다고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 주조 및 주단조용으로 적합한 합금개발을 목표로 Mg의 함량을 5%로 고정하고 소량의 Si 및 Mn원소를 첨가함으로써 주조성 및 기계적 성질을 최적화하고자 하였다.

2. 실험 방법

주조시편을 제조하기 위하여 순도 99.8%이상의 순금속 및 모합금을 전기저항로에서 용해하였으며, Mg에 의한 용탕의 산화를 최소화하기 위하여 SF₆와 CO₂ 혼합가스를 용탕 상부에 지속적으로 흘려주었다. Ar가스를 사용한 탈가스 처리를 마친 용탕은 150°C로 예열된 금형에 주입하여 24 mm 두께의 판재 주조시편으로 제조하였으며, 일부시편에 대해서는 5 mm 두께로 기계가공한 후 2 mm까지 냉간압연 및 어닐링 열처리를 수행하였다.

합금조성별 주조성을 평가하기 위해서는 유동성과 급탕능력을 비교하는 방법을 사용하였으며, 먼저 유동도는 Fig. 1에 나타난 바와 같은 진공흡인 유동도시험(vacuum suction fluidity test)장치를 이용하여 측정하였다[5]. 이때 사용된 흡인관은 내경 3 mm의 석영관으로 용탕 내 깊이 20 mm만큼 침지한 후

[†]E-mail : jmk7475@kitech.re.kr

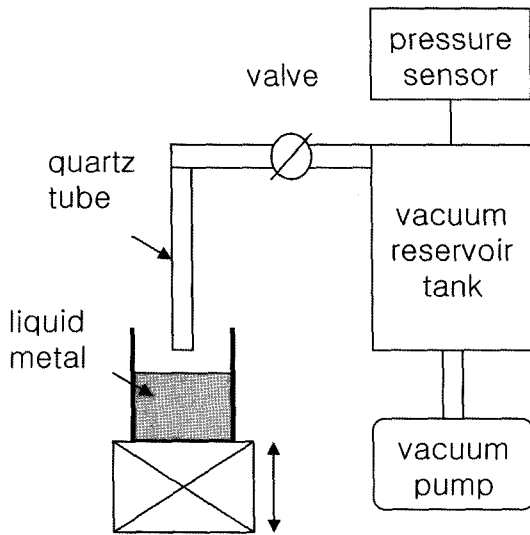


Fig. 1. Schematic illustration of vacuum suction fluidity test apparatus.

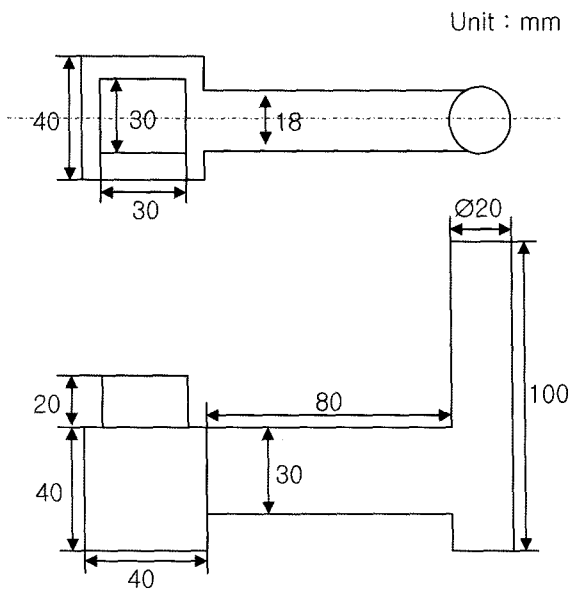


Fig. 2. Schematic diagram of feedability test specimens.

흡인압력 40 KPa에서 시험을 진행하였다. 급탕능력의 경우 직접 정량화하기가 어려우므로 Fig. 2와 같은 주조시편을 제조한 후 열점(hot spot)부근에 존재하는 기공(porosity)의 면적%를 화상분석기를 사용하여 측정, 비교하는 방식을 취하였다. 여기서의 기공은 최종응고부위에서 급탕부족으로 인해 발생하는 응고수축공 및 이와 관련된 기공을 의미한다.

제조시편의 실제 합금조성은 ICP분석을 통해 분석하였고, 조성별 액상선 및 고상선 등은 상용 열역학 모델 프로그램인 Thermo-Calc 데이터베이스 TTAL을 이용하여 예측하였다. 또한 합금의 미세 조직 및 상분석은 광학현미경과 화상분석기 그리고 SEM-EDX를 사용하여 진행하였고, 인장시험은 두께 2 mm의 판상형태의 테스트 시편을 가지고 ASTM B557 규격

Table 1. Chemical compositions of investigated alloys. units: wt.-%

Alloy	Elements Added			
	Mg	Mn	Si	Al
0.5Mn-0.3Si	4.69	0.55	0.27	balance
0.5Mn-0.5Si	4.57	0.56	0.45	"
0.5Mn-0.7Si	4.82	0.56	0.73	"
0.7Mn-0.3Si	4.59	0.73	0.30	"
0.9Mn-0.3Si	4.58	0.88	0.27	"

에 따라 실시하였다. 기본합금조성인 Al-5%Mg-0.5%Mn-0.3%Si에 대해서는 냉간 압연 후 어닐링 열처리에서 따른 강도 및 연성의 변화를 예측하고자 온도, 열처리 시간에 따른 미소 경도의 변화를 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 Al-5%Mg계 합금의 주조성에 미치는 Mn 및 Si의 영향

대표적인 주조용 알루미늄 합금계인 Al-Si계에서 합금의 유동도에 미치는 Si의 영향은 널리 알려져 있는데, Si이 가진 큰 용융잠열이 응고시 발생함으로써 유동도를 현저히 증가시키는 것이 주원인으로 알려져 있다[6,7]. Fig. 3의 유동도 시험결과를 보면 Al-Mg계 합금에서도 Si의 첨가로 인해 유동도가 개선된다는 것을 알 수 있으며, 그 차이가 작게 보일지도 모르나 Si의 함량변화가 매우 작다는 것을 고려하면 Si의 유동도 개선효과는 상당하다고 사료된다. 합금의 유동도에 미치는 여러 주요변수들 중에는 금속의 용융잠열 이외에도 응고구간이나 용탕의 표면장력을 들 수 있는데[8,9], 본 실험에서는 3 mm내径의 석영관을 사용하였기 때문에 표면장력의 영향은 상대적으로 크지 않을 것으로 생각된다[4]. Thermo-Calc 프로그램을 이용하여 Al-5%Mg합금의 액상선-고상선 온도구간을 계산한 결과 Si을 약 1%첨가하면 응고구간이 54°C에서 42°C로 현저히 좁아지는 것을 알 수 있었으며, 이로 인한 유동도 개선효과도 클 것으로 기대된다.

한편, Fig. 4에서는 Si의 함량을 0.3%로 일정하게 놓은 상태에서 Al-5%Mg합금의 유동도에 미치는 Mn의 영향을 조사

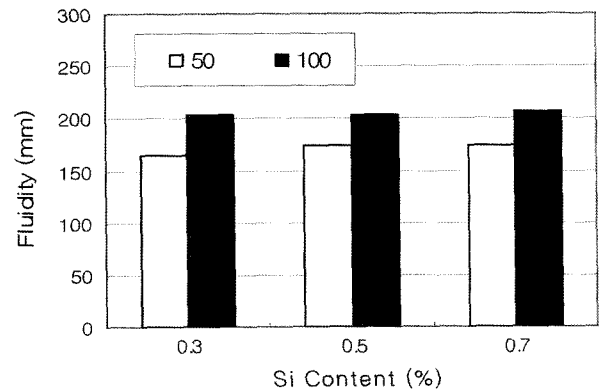


Fig. 3. Effect of Si content on the fluidity of Al-5%Mg-0.5%Mn base alloys (two different superheat).

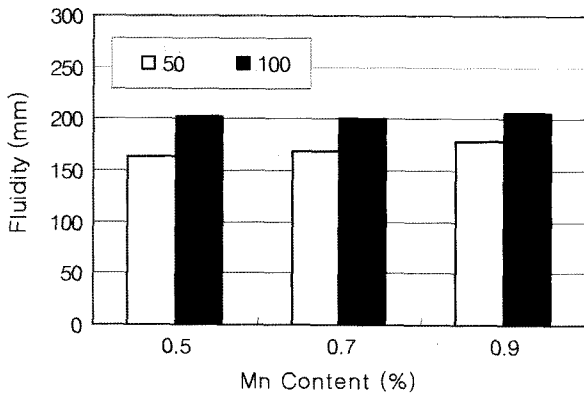


Fig. 4. Effect of Mn content on the fluidity of Al-5%Mg-0.3%Si base alloys (two different superheat)

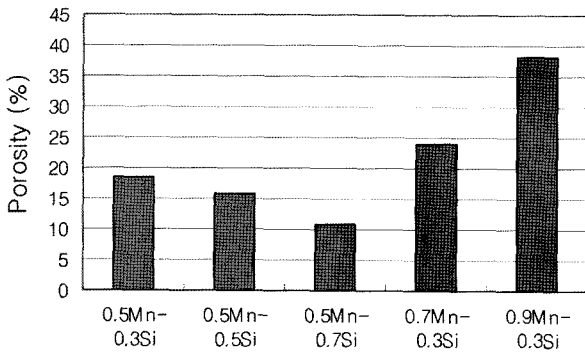


Fig. 5. Feedability (Resistance to porosity formation) of Al-5%Mg base alloys.

한 것으로 Mn첨가 역시 유동도 개선에 효과가 있는 것으로 관찰되었다. 합금의 응고잠열측면에서 보면 Mn의 경우 Al과 비교해서 단위 부피당 약 1.9배의 응고잠열을 방출하기 때문에 어느 정도 유동도개선이 가능할 것을 예측할 수 있다[10]. 응고구간의 경우 Thermo-Calc계산결과 Al-5%Mg에 1%의 Mn을 첨가해도 구간이 약 2°C 정도 늘어나는 정도의 변화밖에 없는 것으로 나타나 그 효과는 미미할 것으로 추측된다.

합금의 주조성을 좌우하는 또 다른 항목으로는 급탕능력이 있으며, 본 시험에서는 급탕능력을 기공율(응고수축공 및 관련 기공)에 반비례하는 것으로 가정하였다. Fig. 5에 나타난 결과를 보면 Si의 함량을 증가시키기에 따라 기공율(porosity%)이 감소하는 경향을 관찰할 수 있었으나 Mn의 경우 오히려 기공율을 현저히 증가시키는 부정적인 효과를 보였다. 합금의 급탕능력은 유동도와 관련이 있지만 조금 다른 변수들에 의하여 영향을 받게 되는데, 유동도의 경우 합금의 응고초반거동에 큰 영향을 받는데 반하여 급탕능력의 경우 상대적으로 응고후반의 특성에 더 민감하기 때문이다. 응고조건에 따라 차이가 있지만 대부분 급탕능력의 경우 응고후반기에 최종적으로 남은 잔류 액상(종종 공정액상)의 양이 증가하면 개선되는 경향을 보인다 [11]. 실제 미세조직의 결정립계 부분을 화상분석기로 정량화한 결과를 Fig. 6에 나타내었으며, 그 경향이 기공율 측정결과와 매우 유사한 것을 인식할 수 있다. 즉, 액상율이 높아질수록

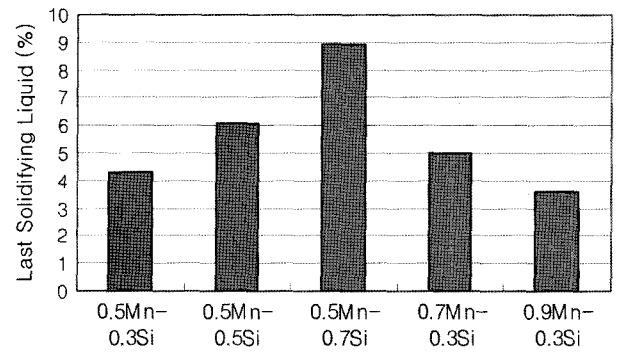


Fig. 6. Fractions of last freezing liquid for Al-5%Mg base alloys.

기공율이 감소하고 따라서 급탕능력은 개선되는 것으로 나타났다. 물론 급탕능력 또한 유동도와 마찬가지로 응고구간의 길이에 대체로 반비례하는 것으로 알려져 있으며 이에 따른 효과도 있을 것으로 추정된다.

3.2 Al-Mg합금의 기계적 성질에 미치는 Mn, Si의 영향

Al-5%Mg-0.5%Mn합금의 인장성질에 미치는 Si함량의 영향은 Fig. 7에서 보여주듯이 부정적인 것으로 관찰되었다. 인장강도 및 연신율이 Si의 첨가량이 증가할수록 연속적으로 감소하는 경향을 보임에 따라 주조성에 미치는 Si의 긍정적인 효과에도 불구하고 첨가량을 엄격히 제한해야 할 것으로 사료된다. 조사된 조성범위 내에서는 Si의 첨가로 인한 Mg₂Si상은 관찰되지 않았으며, 대신 Fig. 8과 같은 Al₁₂(Mn, Fe)₃Si상이 형성된 것을 알 수 있었다. Mn이 포함되지 않은 Al-Mg-Si합금에서 나타나는 Mg₂Si상에 비하여 Al₁₂(Mn, Fe)₃Si상이 기계적 성질의 저하에 미치는 영향이 상대적으로 조금 작은 것으로 추정되지만 역시 부정적인 효과는 있는 것으로 보인다[4].

Fig. 9는 Al-5%Mg합금에서 Si의 함량을 0.3%로 고정한 상태에서 기계적 성질에 미치는 Mn의 영향을 관찰한 것으로 Si과는 반대로 Mn의 첨가에 따라 인장성질이 개선되는 경향을 나타냈다. Mg에 대한 Mn의 고용한도는 최대 1.25%로 크기 때문에 첨가된 Mn의 일부가 Al₁₂(Mn, Fe)₃Si상의 형성에 사용되고 나머지 대부분은 기지에 고용되어 고용강화효과를 나타낼 것으로 예상되며, 이로 인하여 기계적 성질이 개선된 것으로 생각된다.

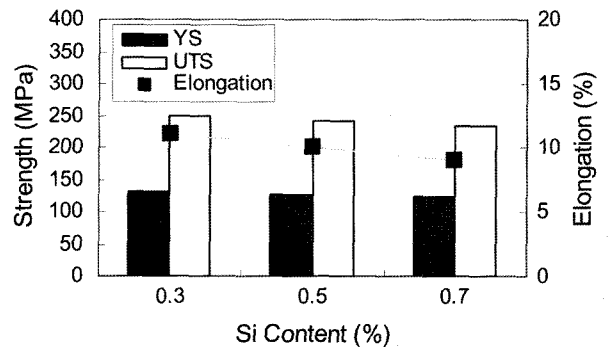


Fig. 7. Effect of Si content on the tensile properties of Al-5%Mg-0.5%Mn base alloys.

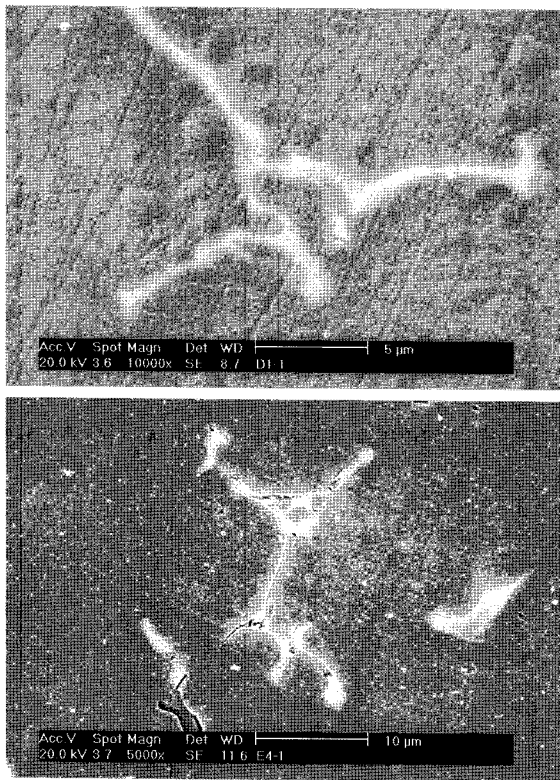


Fig. 8. Typical SEM micrographs of $Al_{12}(Mn, Fe)_3Si$ phases found in Al-5%Mg-Mn-Si alloys.

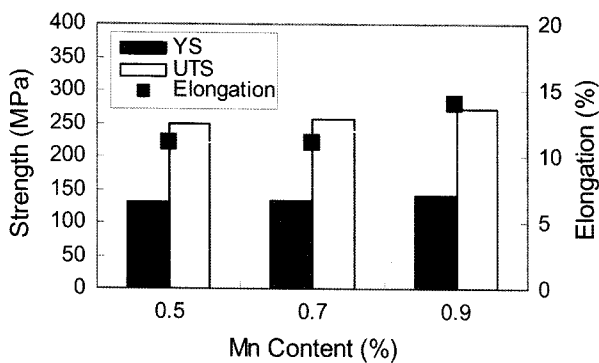


Fig. 9. Effect of Mn content on the tensile properties of Al-5%Mg-0.3%Si base alloys.

3.3 냉간 압연한 Al-Mg합금의 기계적 성질에 미치는 열처리의 영향

지금까지 수행된 주조성 및 인장시험결과를 종합적으로 고려해보면 Si 및 Mn의 함량은 기계적 성질 및 급탕능력의 감소로 인해 제한적으로 허용되어야 함을 알 수 있다. 한편, 서론부에서 언급하였듯이 조사된 조성범위에서의 모든 Al-Mg합금은 대체로 높은 연성을 나타내고 있어 주단조처럼 가공성을 추가로 요구하는 제조공정에 적합할 것으로 기대된다. Fig. 10에서는 냉간압연을 마친 Al-5%Mg-0.5%Mn-0.3%Si 합금판재를 어닐링 열처리를 수행하면서 열처리 온도, 시간에 따른 미소경도변화를 측정하여 어닐링 온도보다는 시간에 더욱

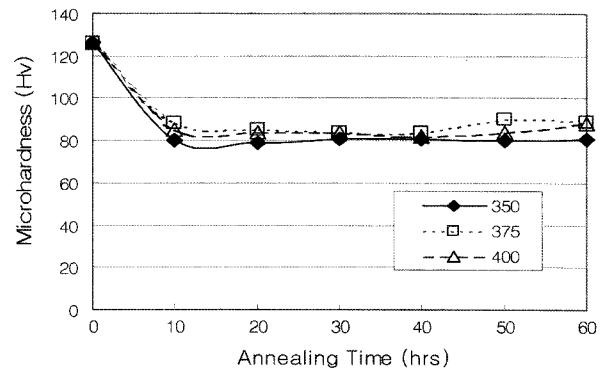


Fig. 10. Microhardness variations of rolled Al-5%Mg-0.5%Mn-0.3%Si alloy during the annealing at different temperatures ($^{\circ}C$).

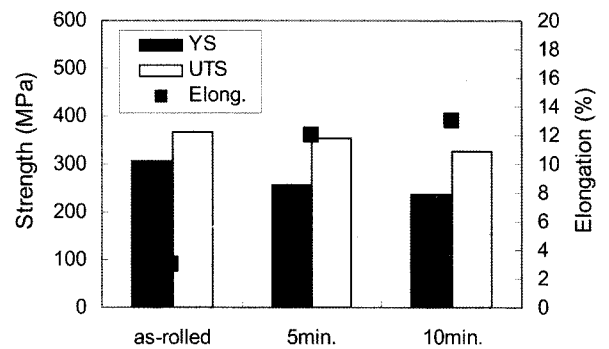


Fig. 11. Mechanical properties of rolled Al-5%Mg-0.5%Mn-0.3%Si alloy, before and after annealing at $350^{\circ}C$.

민감한 것을 보여주고 있다. 즉, 온도에 상관없이 불과 10분 이내에 급격한 경도저하가 관찰되었고 이후의 변화는 매우 작은 것으로 나타났다. 경도시험결과를 통해 예상할 수 있듯이 냉간압연한 판재의 연신율이 5분 만에 뚜렷이 개선되는 것을 Fig. 11에서 볼 수 있다. 인장강도는 연신율에 반비례하는 추세를 나타내고 있기 때문에 조성범위의 조절과 더불어 어닐링 정도(시간, 온도)를 조절하면 합금의 기계적 성질을 폭넓게 제어할 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결론 및 요약

Al-5%Mg계 합금의 주조성과 기계적 성질에 미치는 합금원소, Mn 및 Si의 영향을 조사하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1. Mn함량을 0.5%로 고정된 상태에서 Si의 함량을 0.3에서 0.7%로 증가시키면 유동도와 급탕능력을 포함한 주조성이 현저히 향상되는 것을 알 수 있었다. 그러나 Mn의 경우는 함량을 0.5에서 0.9%로 증가시키며 따라 유동도는 약간 증가하지만 급탕능력이 뚜렷이 저하되는 문제점을 보였다.
2. Al-Mg-Mn-Si합금의 인장성질은 Si함량의 증가와 더불어 저하되는 경향을 보였는데, 이는 취약한 $Al_{12}(Mn, Fe)_3Si$ 상의 형성에 기인한 것으로 사료된다. 이와는 반대로 Mn을 첨가하

면 기계적 성질이 개선되는 효과가 있었고, 그 주원인은 Mn에 의한 고용강화인 것으로 추측된다.

3. 연구된 조성범위 내의 Al-Mg-Mn-Si합금들은 모두 비교적 우수한 연성을 가지는 것으로 나타났으며, 냉간압연을 통해 손쉽게 판재로 성형할 수 있었다. 또한 어닐링을 통해 연성이 빠르게 회복하기 때문에 열처리정도를 조절하여 우수한 기계적 성질을 갖는 소재를 만들 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] 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] J. M. Kim, K. D. Seong, J. H. Jun, K. T. Kim and W. J. Jung: J. of Kor. Foundrymen's Soc., "Variation of fluidity and mechanical properties of Al-Mg alloys with addition of Si, Mn and Zn", 24 (2004) 138-144.

[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] 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.

[7] 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.

[8] M. C. Flemings: Solidification Processing, McGraw-Hill (1974) 219-224.

[9] J. Campbell: Castings, Elsevier Science (2003) 74-98.

[10] F. Cardarelli: Materials Handbook, Springer-Verlag, London (2000) 530-537.

[11] J. Campbell: Castings, Elsevier Science (2003) 212-222.