논문

고압 금형주조용 Al-9%Si-0.3%Mg 합금의 Fe, Mn 함량이 인장특성에 미치는 영향

김현주[†]

부경대학교 공과대학 금속공학과

Effect of Fe and Mn Contents on the Tensile Property of Al-9%Si-0.3%Mg Alloy for High Pressure Die Casting

Heon-Joo Kim[†]

Dept of Metallurgical Eng., Pukyong National Univ., Busan 608-739, Korea

Abstract

Effect of Fe and Mn contents on the tensile properties has been studied in Al-9wt%Si-0.3wt%Mg alloy. As Fe content of Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.5wt%Mn alloy increased from 0.15wt% to 0.45wt%, tensile strength of as-cast alloy decreased from 192 MPa to 174 MPa, and elongation of the alloy also decreased from 4.8% to 4.2%. Decrease of these properties can be explained as the formation of plate shape, β -Al₃FeSi phase with high Fe/Mn ratio of the alloy. However when Mn content of Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.45wt%Fe alloy increased from 0.3wt% to 0.5wt%, tensile strength of T6 aged alloy increased from 265 MPa to 275 MPa, and elongation of the alloy increased from 2.3% to 3.6%. These improvements attribute to chinese script, α -Al₁₅(Mn,Fe)₃Si₂ phase shape-modified from β -Al₃FeSi phase with low Fe/Mn ratio of the alloy.

Key words: Al-9%Si-0.3%Mg alloy, Tensile properties, α -Al₁₅(Mn,Fe)₃Si₂ phase β -Al₃FeSi phase.

(Received October 8, 2010 ; Accepted January 10, 2011)

1. 서 론

원유 및 원자재 가격 상승과 CO₂배출량 규제에 따른 연비향상의 필요성으로 자동차 부품 경량화가 요구되고 있으며, 이에 따라 경량화에 필수적인 알루미늄 합금 부품의 개발과 적용사례가 선진 자동차업체를 중심으로 증가하고 있다[1-3]. 고품질 부품 개발에 필요한 고압금형주조용 알루미늄 합금은 높은 강도와 신율을 동시에 요구하지만, 최근 자원고갈로 인한 스크랩 사용비율이 늘어남에 따라 합금성분 중 Fe 함량이 증가되면서 β -상으로 일컫는 AlFeSi 화합물을 형성하여 기계적 특성 및 인성을 크게 감소시키고 있다[4,5]. 또 Mn은 판상 β -AlFeSi상을 chinese script 형상으로 개량화 하는 가장 일반적인 원소로 알려져 있으며, Fe가 첨가된 알루미늄 합금에서 Mn으로 인성이 증가된다는 연구 보고도 있다[6].

일반적으로 Al-Si계 합금에서 Fe의 존재는 Al 및 다른 합금 원소들과도 낮은 고용도를 가지기 때문에 응고하는 동안 수지상간 영역내의 액상에서 많은 양이 존재하게 되며, 이 중 Al, Si, Mn, Cr 등과 함께 복잡한 형태의 금속간화합물을 형성하게 된다[4]. 이들은 기지에 용해하지 않은 상태로 존재하며 Fe 함량이 증가할수록 Fe계 금속간 화합물 체적 분율도 증가한다. 이와 같은 Fe 금속간화합물은 취약하며 기지 조직과 낮은 결합

력을 가진 판상(β -plate phase)의 형태로 존재하므로 응력 집중을 야기하여 기계적 특성을 크게 저하시킨다[7,8].

이와 같은 Fe 화합물로 인한 악영향을 감소하기 위해 많은 연구가 이루어졌는데 크게 다음과 같은 3가지로 구분된다. 즉, (1)Fe 화합물의 형상 개량을 위해 Mn, Cr 등의 합금원소를 첨가하는 방법[6,7], (2)냉각속도 조절에 의한 방법[9], (3)용해 온도 조절에 의한 용탕과열 방법[7,10,11]이다.

합금원소 첨가법은 가장 일반적인 방법으로, β -AlFeSi상을 α -AlFe(Mn,Cr)Si상으로 개량화한다. α -AlFe(Mn,Cr)Si상의 형태는 chinese script 형상으로 판상 β -AlFeSi로 인한 응력 집중 현상을 완화시켜준다. 이 중 가장 많이 사용되는 Mn의 경우 Fe/Mn의 비를 기준으로 일정 수준 이상으로 Fe가 많은 경우는 판상의 금속간화합물을 형성하고, Fe가 이 보다 적을 때는 chinese script(α phase) 및 star-like상(primary α phase)의 금속간화합물이 형성되어 재료의 기계적 성질을 향상시킨다[7]. 각 합금에서 이 기준값은 합금성분중 Fe/Mn비와 냉각속도에 따라 변한다. 또한 냉각속도 조절에 의한 방법은 β -phase 성장의 화학적 포텐셜을 감소함으로써 β -phase 형성을 억제하는 방법으로, 냉각속도의 증가는 β -phase 길이를 감소시킨다. Vorrph O. 등의 연구[9]에 의하면 보통 Fe 함량에서 일반 중력주조일 때 Fe β -phase 길이는 약 50-500 μ m이지만, 고압금형주조

[†]E-mail : metjoo@pknu.ac.kr

(HPDC, HigMnPrpssurp D7] Casting)의 높은 냉각속도에서 Fe β -phase 길이는 10-50 μm 로 감소한다는 결과를 보고하였다. 용해온도 조절에 의한 용탕과열 방법은 높은 온도로 용탕을 과열하면, AlFeSi 금속간화합물은 plate 형상보다 chinese script 형상으로 결정화한다[7]. 이 연구 결과에 따르면 낮은 과열온도(액상선에서 약 150°C정도 높은 온도)의 경우 Fe 화합물은 거의 모든 냉각 속도에서 판상의 β -phase로 결정화 되고, 또 높은 과열온도(액상선에서 약 250°C-300°C정도 높은 온도)의 경우 β -phase 및 chinese script 형상으로 결정화한다. 그러나 이 방법의 경우 용탕 온도 상승으로 인한 경제적 손실 및 가스혼입 등의 문제점이 동반될 수 있다.

본 연구는 실제 알루미늄 주조분야에서 가장 많이 사용되는 Al-Si-Mg계 주조용 합금에서 Fe, Mn 함량이 인장특성에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 시료제조

본 실험에 사용된 합금조성은 Table 1과 같다. 제조된 시료의 성분분석은 발광분석기(Spark emission analyzer)로 확인하였으며, 성분분석용 표준시료에 대한 분석기의 오차 범위는 0.03% 이하이다. Table 1의 1번 시료는 상용으로 널리 사용되는 Al-9wt%Si-0.3wt%Mg계의 HPDC용 합금조성으로, 본 실험에서 의도한 개발용 합금의 조성, 미세조직 및 기계적 특성 비교/평가를 위해 선정하였다. Table 1의 1, 2번 조성은 Al-9wt%Si계 조성에서 Fe 함량에 따른 인장특성을 알아보기 Fe 함량을 0.15wt%와 0.45wt%로 변화시켰으며, 2, 3 조성은 Mn 함량에 따른 인장특성을 비교하기 위해 Mn 함량을 0.3wt%와 0.5wt%로 선정하였다.

용해 작업은 60호 흑연 도가니를 사용하여 실리코니트 발열체 전기로에서 행하였으며, Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.3wt%Mn 성분의 잉고트합금을 780°C 온도에서 완전 용해 후, Al-25wt%Fe, Al-25wt%Mn 모합금을 첨가하여 성분조정을 한 후, 직경 30 mm 흑연튜브를 사용하여 20분간 질소가스로 용탕을 탈가스 처리하였다. 용탕 내 가스 농도 측정은 감압장치를 이용한 밀도 측정 방법인 D. I (Density Index)법을 이용하였고, 이 때 각 조성별 D. I 값은 1.0 이하로 제한하였다. 질소 탈

가스처리 후, 미세화 처리제 Al-10wt%Sr, Al-5wt%TiB를 각각 200ppm, 100ppm 첨가하였다. 그 후 최종적으로 성분 분석을 하고 용탕 진정을 위해 20분 유지한 뒤 주입온도 710°C로 금형에 주입하였다.

2.2 조직분석

Al-9wt%Si-0.3wt%Mg 주조용 합금의 Fe, Mn함량 변화에 따른 미세조직과 형성되는 상을 분석하기 위해 광학현미경 조직관찰, 주사전자현미경(SEM/EDX) 분석 및 X선 회절(XRD) 분석을 행하였다. 또한, 냉각속도에 따른 미세조직 변화를 관찰하기 위해 각 몰드의 재질이 동(Copper), 강(Steel), 셸(Shell)인 3종류의 상온 몰드에 710°C인 용탕을 주입하여 냉각시의 응고거동을 측정하였다. 몰드 내부에는 직경 0.3 mm의 K-Type CA 열전대를 설치하여 온도변화를 측정하였다. 미세화제 처리 유·무에 따른 조직 관찰은 셸몰드에서 이루어졌으며, 미세화제 Al-5%TiB를 100ppm을 첨가하여 미세화제 유·무와 냉각속도 차이에 따른 SDAS (Secondary Dendrite Arm Spacing)를 측정하였다. SDAS 측정은 Image-pro 2.0 프로그램을 사용하여, 각 샘플 당 10회 측정 후 산술 평균을 적용하여 나타내었다. Fig. 1은 냉각곡선 측정을 위한 강과 동 재질의 주형과 셸몰드 주형의 2차원 도면을 나타낸 것이다.

2.3 인장 실험

인장 실험은 Table 1의 3가지 조성을 대상으로, 각 조성별 As-cast시료와 T6 열처리 시료로 구분하여 실시하였다. Table 2는 상용 Al-9wt%Si-0.3wt%Mg 합금의 용체화처리 및 T6 시효열처리 조건을 나타내었으며, Fig. 2는 시효시간에 따른 경도 변화를 나타낸다. 용체화 온도 및 시간은 조직 관찰을 통해 용체화 온도 530°C/10hr으로 하였으며, 시효 온도 및 시간은

Fig. 1. Schematic drawing of pouring cup for the measurement of cooling curve: (a) steel and copper mold (b) shell mold.

Table 1. Chemical compositions of the alloys (Wt.%).

No.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Sr	Al
1	9.0	0.15	0.001	0.5	0.3	0.15	0.025	Rem.
2	9.0	0.45	0.001	0.3	0.3	0.15	0.025	Rem.
3	9.0	0.45	0.001	0.5	0.3	0.15	0.025	Rem.

Table 2. T6 heat-treatment condition of Al-9wt% Si alloys.

Alloy	Composition(wt.%)					Solution treatment		Cooling	Aging	
	Si	Mg	Mn	Fe	Cu	Temp. (°C)	Time (hr)		Temp. (°C)	Time (hr)
Used specimen	9.0	0.3	0.3-0.5	0.15-0.45	0.001	530	10	water	160	6.5

Fig. 2. T6 aging heat-treatment curve of Al-9wt%Si-0.3wt%Mg alloy.

Fig. 3. Dimensions of tensile specimen. (KS B0801 #13 sub-size).

160°C/6.5hr의 peak aging으로 고정하였다.

인장 시험편은 평행부 거리 30 mm, 표점거리 25 mm, 두께 4 mm인 KS B0801의 13호 sub size 판상으로 제작 하였으며, 인장 시험편의 치수는 Fig. 3에 나타내었다. 인장 시험편은 중력 주조로 제작하였고 인장 시험편 제작용 몰드의 치수 및 형상은 Fig. 4와 같다. 용탕 주입 시 인장 몰드의 예열온도는 200°C로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 조직분석

광학 현미경 및 주사전자 현미경을 통하여 조성별 미세조직을 관찰한 결과 Fe, Mn 함량에 따라 조직적 차이가 나타났다. Fe, Mn을 함유한 공정 Al-Si계 합금에서 미세조직은 α -Al상, 공정 Si상, β -Al₃FeSi, chinese script 형상의 α -Al₁₅(Mn,Fe)₃Si₂

Fig. 4. Schematic mold drawing for tensile test.

로 구분된다.

Fig. 5는 인장시험편의 각 조성별 시료에 나타난 전형적 미세조직을 나타내었다. Fig. 5의 (a)는 Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.15wt%Fe-0.5wt%Mn 조성의 조직 사진으로 광학 현미경 관찰 결과 α -Al상 및 공정 Si상 이외의 상은 관찰되지 않았다. 이것은 낮은 Fe 함량으로 인한 결과로 판단된다. (b)는 Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.45wt%Fe-0.3wt%Mn 조성으로 광학 현미경 관찰 결과 α -Al상 및 공정 Si상 이외에 판상의 β -AlFeSi 화합물이 관찰 되었다. 이것은 (a)와 비교할 때, 알루미늄 합금 내 Fe 함량이 증가하고, Mn의 함량이 감소한 결과로 해석된다 [12,13]. (c)는 Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.45wt%Fe-0.5wt%Mn 조성으로 광학 현미경 및 파단면 주사전자 현미경 관찰 결과 chinese-script 형상의 AlFeMnSi 상이 관찰되었다. 이것은 (b)와 비교할 때 Mn 함량이 증가하여 β -AlFeSi 화합물이 AlFeMnSi 화합물로 형상 개량되었기 때문으로 판단된다. 예비실험에서 Mn 함량이 0.7%로 증가할 경우, 모든 β -AlFeSi 화합물이 AlFeMnSi 화합물로 형상 개량되는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 6은 냉각곡선 측정 시료에 나타난 Fe, Mn화합물의 SEM/EDX 분석 결과이며, Fig. 7은 Table 1의 1, 2번 조성의 인장시험편에서 채취한 시료의 XRD 상분석 결과이다. Al-

Fig. 5. Typical micrographs of tensile specimens of Al-9.0wt%Si-0.3wt%Mg system alloys.

Fig. 6. SEM/EDX analysis of β -Al₅FeSi and α -Al₁₅(Mn,Fe)₃Si₂ phases.

9wt%Si-0.3wt%Mg-0.15wt%Fe-0.5wt%Mn조성의 경우 소량 chinese script형상의 α -Al₁₅(Mn,Fe)₃Si₂상이 관찰되었다. Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.45wt%Fe-0.3wt%Mn 조성과 같이 Fe함량이 높고 Mn함량이 낮은 경우 β -Al₅FeSi상이 관찰되었다. Fe와 Mn이 일정 비율 공존하는 Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.45wt%

Fe-0.5wt%Mn조성에서 β -Al₅FeSi상과 α -Al₁₅(Mn,Fe)₃Si₂상이 모두 관찰되었다. 그리고 Fe, Mn함량이 모두 높은 Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.45wt%Fe-0.7wt%Mn의 경우 Fe와 Mn의 반응으로 Fe-Mn화합물이 형성되어 다수의 α -Al₁₅(Mn,Fe)₃Si₂상이 존재하였으며, 그 크기 또한 조대하였다[14].

Fig. 7. Result of XRD analysis of Al-9.0wt%Si-0.3wt%Mg system alloys.

3.2 SDAS 측정

SDAS 측정은 결정립의 미세화 정도를 평가하는 기준으로 합금의 기계적 특성과 연관된다. Fig. 8은 시험평가용 합금조성별로 미세화제 첨가 유무에 따른 전형적인 광학 현미경 조직을 보여준다. Table 3은 각 조성의 합금을 대상으로, 미세화제 첨가 유무에 따른 SDAS 측정결과이다. 용탕에 Al-5wt%Ti 미세화제 첨가에 의해 SDAS값이 약 66~69 μm 로 미세화처리를 행하지 않은 시료의 73~78 μm 보다 SDAS가 약 10%정도 적어 미세화 효과를 나타내었다.

Fig. 9는 조성별 냉각속도에 따른 전형적인 광학 현미경 조직을 보여준다. Table 4는 조성별 냉각속도에 따른 SDAS 측정 결과를 보여준다. 냉각속도 차이에 따른 결정립 미세화 효과를 측정하기 위해 냉각속도 측정용 동(Cu)몰드, 강(Fe)몰드, 셸(Shell)몰드에 주입된 시료의 미세조직에서 SDAS 측정결과를 나타내었다. 냉각속도 차이에 따른 SDAS 측정결과 평균 냉각속도 4°C/sec의 동 몰드에 주입된 전체조성의 시료에서 SDAS가 가장 미세한 약 15.38 μm 의 미세조직을 나타내었다.

합금 조성별로 용탕에 Al-5wt%Ti 미세화제를 첨가한 시료와, 냉각속도 측정용 몰드 재료 중에서 열전도성이 우수한 동

Fig. 8. Comparison of microstructure of shell mold specimen according to refining treatment of melts.

몰드에 주입된 시료에서 SDAS가 감소하여 결정이 미세하였고, 인장특성이 향상될 것으로 기대된다.

3.3 알루미늄 합금의 Fe 함량에 따른 인장특성

Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.5wt%Mn 합금계에서 Fe 함량에 따른 인장특성 변화는 Table 1의 1, 2번 합금조성을 대상으로 조사하였다.

Fig. 10은 동일한 0.5wt%Mn 조성에서 Fe 함량이 0.15wt%에서 0.45wt%로 증가할 때 As-cast 및 T6 열처리 상태에서 최대 인장강도(UTS) 및 신율(Elongation) 변화를 나타내었다. As-cast 상태에서 Fe 함량이 0.15wt%에서 0.45wt%로 증가하면, 최대 인장강도는 192 MPa에서 174 MPa로, 신율은 4.8%에서 4.2%로 다소 감소되었다. 이것은 미세 조직 관찰 결과에서 추론해 볼 때 Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.15wt%Fe-0.5wt%Mn 합금조

Table 3. Measurement result of SDAS according to refining treatment of melts(shell mold specimen).

No.	Composition	Secondary Dendrite Arm Spacing(μm)	
		Refining Treatment Not Applied	Refining Treatment Applied
1	Al-9Si-0.3Mg-0.15Fe-0.5Mn	78.33	69.04
2	Al-9Si-0.3Mg-0.45Fe-0.3Mn	73.38	66.33
3	Al-9Si-0.3Mg-0.45Fe-0.5Mn	78.02	66.99

Fig. 9. Typical microstructure depending on different cooling conditions.

Table 4. Measurement result of SDAS depending on different cooling conditions.

No.	Composition	Secondary Dendrite Arm Spacing(μm)		
		Copper Mold	Steel Mold	Shell Mold
1	Al-9Si-0.3Mg-0.15Fe-0.5Mn	15.38	22.78	69.04
2	Al-9Si-0.3Mg-0.45Fe-0.3Mn	17.22	24.02	66.33
3	Al-9Si-0.3Mg-0.45Fe-0.5Mn	17.49	24.06	66.99

성과 비교하여, Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.45wt%Fe-0.5wt%Mn 합금조성은 $\beta\text{-Al}_3\text{FeSi}$ 상이 형성되어 강도 및 신율이 다소 감소하는 것으로 판단된다[7,8].

T6 열처리 상태에서 Fe 함량이 0.15wt%에서 0.45wt%로 증가하면, 최대 인장강도는 275 MPa로 동일 수준이 되며, 신율은 4.1%에서 3.6%로 감소하였다.

3.4 알루미늄 합금의 Mn 함량에 따른 인장특성

Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.45wt%Fe 합금계에서 Mn 함량에 따른 인장특성 변화는 Table 1의 2, 3번 합금조성을 대상으로 조사하였다. Fig. 11은 동일한 0.45wt%Fe 조성에서 Mn 함량

이 0.3wt%에서 0.5wt%로 증가할 때 As-cast 및 T6 열처리 상태에서 최대 인장강도 및 신율 변화를 나타내었다. As-cast 상태에서 Mn 함량이 0.3wt%에서 0.5wt%로 증가하면 최대 인장 강도는 170 MPa에서 174 MPa로 변화하였으며 신율은 2.3%에서 3.6%로 향상되었다.

T6 열처리 상태에서도 Mn 함량이 0.3wt%에서 0.5wt%로 증가하면, 최대 인장강도는 265 MPa에서 275 MPa로 다소 증가되며 신율은 2.3%에서 3.6%로 크게 향상되었다. 이것은 Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.45wt%Fe-0.3wt%Mn 합금조성일 때 판상의 $\beta\text{-Al}_3\text{FeSi}$ 상이 형성되어 응력 집중을 유발하기 때문에 신율이 감소되는 것으로 판단된다. 그러나 Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-

Fig. 10. Effect of Fe contents on tensile properties of Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.5wt%Mn alloys.

Fig. 11. Effect of Mn contents on tensile properties of Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.45wt%Fe alloys.

0.45wt%Fe-0.5wt%Mn 합금조성에서는 판상의 β -Al₃FeSi상이 Mn의 증가로 인해 일부 chinese script형상의 α -Al₁₅(Mn,Fe)₃Si₂상으로 형상 개량되어 신율이 향상되는 것으로 해석할 수 있다 [13]. 또한 Mn이 증가할 때 최대 인장 강도가 약간 증가되는 것은 Mn이 고용되어 나타나는 고용강화 효과인 것으로 추정된다.

4. 결 론

고압 금형주조용 Al-9wt%Si-0.3wt%Mg계 합금의 Fe, Mn 함량이 인장특성에 미치는 영향을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고압 금형 주조용 Al-9wt%Si-0.3wt%Mg계 합금의 미세조직 및 파단면을 관찰한 결과, Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.45wt%Fe-0.3wt%Mn 합금조성에서는 판상의 β -Al₃FeSi상이 관찰되었으며, Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.45wt%Fe-0.5wt%Mn 합금조성에서 chinese-script 형상의 α -Al₁₅(Mn,Fe)₃Si₂상이 관찰되었다.

2. 용탕의 미세화제 처리에 따른 SDAS 측정 결과, Al-5wt%Ti 미세화제 100ppm 첨가에 의해 셸(shell)몰드 시료의 SDAS값이 약 66-69 μ m로 미세화처리를 행하지 않은 시료의

73-78 μ m 보다 SDAS가 약 10%정도 적어 미세화 효과를 나타내었다.

3. 냉각속도에 따른 S.D.A.S.는 평균 냉각속도 4°C/sec인 동(Cu)몰드의 측정시편 중 0.15wt%Fe/0.5wt%Mn 조성이 15.38 μ m로 낮게 나타났으며, 또한 인장강도는 높고 신율은 낮게 나타났다. 몰드재료의 냉각속도 차이에 따른 SDAS 측정결과, 평균 냉각속도 4°C/sec의 동(Cu)몰드에 주입된 합금시료에서 SDAS가 약 15-17 μ m로 가장 미세한 조직을 나타내었다.

4. Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.5wt%Mn 합금계에서 As-cast 상태일 때, Fe 함량이 0.15wt%에서 0.45wt%로 증가하면, 최대 인장강도는 192 MPa에서 174 MPa로, 신율은 4.8%에서 4.2%로 감소되었다. T6 열처리 상태에서 Fe 함량이 0.15wt%에서 0.45wt%로 증가하면, 최대 인장강도는 275 MPa로 동일 수준이 되며, 신율은 4.1%에서 3.6%로 감소하였다.

5. Al-9wt%Si-0.3wt%Mg-0.45wt%Fe 합금계에서 As-cast 상태일 때, Mn 함량이 0.3wt%에서 0.5wt%로 증가하면 최대 인장 강도는 170 MPa에서 174 MPa로 변하였으며 신율은 2.3%에서 3.6%로 향상되었다.

T6 열처리 상태에서도 Mn 함량이 0.3wt%에서 0.5wt%로 증가하면, 최대 인장강도는 265 MPa에서 275 MPa로 다소 증가되며 신율은 2.3%에서 3.6%로 향상되었다.

참고문헌

- [1] J. L. Jorstad (2006), Future technology in Aluminum die casting, Die Casting Engineer, Vol. 9, 18-25
- [2] H. Koch, U. Hielsher, H. Sternau, A. J. Franke (1995), Silafont-36, "the new low iron high-pressure die-casting alloy", TMS, 1011-1018
- [3] M. Makhlof, D. Apelian (2002), "Casting characteristics of Aluminum die casting alloys", ACRC, Paper No. DEFC07-99ID13716
- [4] L. A. Narayanan, F. H. Samuel and J. E. Gruzleski, "Dissolution of iron intermetallics in Al-Si alloys through nonequilibrium heat treatment", Metall. Mater. Trans. A, 26A (1995) 2161
- [5] Mascré, C., "Influence of iron and manganese on type A-S13(Alpax) alloys", Foundrie 108 (1995) 4330-4336
- [6] Couture, A., "Iron in aluminum casting alloys-A literature survey", AFS Int. Cast. Metals Journal 6 (1981) 9-17
- [7] L. A. Narayanan, F. H. Samuel and J. E. Gruzleski, "Crystallization behavior of iron-containing intermetallic compounds in 319 aluminum alloy", Metall. and Mater. Trans. A, 25A (1994) 1761
- [8] Y. H. Tan, S. L. Lee and Y. L. Lin, "Effects of Be and Fe additions on the micro-structure and mechanical properties of A357.0 alloys", Metall. and Mater. Trans. A, 26A (1995) 1195
- [9] Vorren O, Evensen J E and Pedersen T B, "Microstructure and mechanical properties of AlSi (Mg) casting alloys", AFS trans., 92 (1984) 459
- [10] H. J. Kim, "Effects of melt super-heating on the shape modification of β AlFeSi intermetallic compound in AC2B aluminum alloy", J. of the Korean Foundrymen's Society, 21(2001) 179
- [11] Y. Awano, Y. Shimizu, "Non-Equilibrium Crystallisation of AlFeSi Compound in Melt-Superheat Al-Si Alloy Castings", AFS Trans., 98(1990) 889

- [12] Y. Xiufang, Z. Guohua, Z. Shengxu, M. Jiaji, "The Spheroidisation of Needle-Form Iron Compounds in an Al-Si alloy", *Cast Metals*, 51 (1992) 39
- [13] L.Ceschini, I. Borornei, A. Morri, S. Seifeddine and I.L. Svensson, "Microstructure, tensile and fatigue properties of the Al-10Si-2Cu alloy with different Fe and Mn content cast under controlled conditions" *J. Mater. Proc. Tech.*, 209 (2009) 5669
- [14] H. Y. Kim, S. W. Han and H. M. Lee, "The Effect of Mn on the Crystallization of α -Al(Fe,Mn)Si phase in A356 Alloys", *J. Kor. Inst. Met.&Mater.*, 43 (2005) 413