 논문

Ca 첨가 반응고 AZ31 마그네슘 합금의 재가열에 따른 미세조직 변화

김희경 · 성봉학 · 반근호 · 김대환 · 성영록* · 임수근†

경상대학교, i-Cube Center, 공학연구원, *희성정밀주식회사

Microstructure Evolution of Semi Solid AZ31+(Ca) Magnesium Alloys during Reheating Process

Hee-Kyung Kim, Bong-Hak Seong, Guen-Ho Van, Dae-Hwan Kim, Yeong-Rok Seong*, and Su-Gun Lim†

i-Cube Center, Engineering Research Institute, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

*HEESUNG PRECISION. Ltd. Changwon 641-120, Korea

Abstract

In this study, we are aimed to prevent grain growth of semi-solid AZ31 magnesium alloys during reheating process. The semi-solid AZ31+(Ca) billets were investigated by using metallographic analysis, X-ray diffraction, scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopy in order to elucidate the effect of Ca addition during reheating process. The grain growth of semi-solid AZ31+(Ca) billet was reduced with increasing Ca content during reheating. The grain size of AZ31+(Ca) billet decreased with increasing volume fraction of Al_2Ca particles. The grain growth rate constant K calculated by Oswald ripening LSW theory in AZ31+1.5wt.% Ca billet was the lowest 129.

Key words : AZ31 Mg alloy, Cooling plate, Semi-solid metal, Reheating, Microstructure.

(Received February 21, 2011 ; Accepted March 27, 2011)

1. 서 론

최근, 환경 규제 강화로 인한 CO_2 저감 정책으로 에코(eco) 및 고 효율적 수송기기의 생산을 위한 많은 연구들이 진행되고 있고 기존의 무거운 철계 부품을 대신하여 경량 소재를 사용함으로써 무게절감을 위한 경량화가 필수적인 분야에서의 수요가 증가하고 있다. 특히, 저 밀도 및 고 비강도 특성을 지니는 마그네슘 합금은 수송기기의 대부분을 차지하는 철계 부품을 대신할 경우, 기존의 수송기기 중량을 감소시킬 수 있어 더욱 효과적이다. 하지만, 마그네슘 합금은 상온에서의 낮은 성형성(HCP 결정구조)으로 인해 부품의 적용에 많은 한계를 지니고 있어 이를 대체할 방안으로 반응고/반응용 성형법이 있다.

반응고/반응용 성형법은 금속 슬러리의 텍스트로픽 성질을 이용하여 고액 공존 영역에서 금속 재료를 주조 및 성형하는 방법으로 유동성이 향상되어 복잡한 형상의 성형이 가능하며,

압출 압력의 감소로 인하여 다이의 손상을 감소시키는 장점이 있다[1-4]. 그러나 반응용 성형 시 고액공존영역까지 재가열하는 공정을 거치게 되며 재가열 과정에서 빌렛의 결정립이 성장하고, 산소와 반응하여 산화 문제가 발생하게 된다. 내 산화 특성 개선을 위해서는 보호가스를 적용하는 방안과 합금원소를 첨가하는 방안 등이 있으며 그 중 합금원소를 첨가하는 방안은 보호가스를 도포하기 위한 별도의 부가장치를 필요로 하지 않기 때문에 공정상 여러 장점이 있다. 마그네슘 합금 용탕의 내 산화 특성 개선 효과가 있는 것으로 알려진 첨가 원소로는 Be, Ca등이 있으며, 특히 Ca첨가 효과가 탁월한 것으로 보고되고 있다[5-7]. 또한 Mg-Al계 합금계에 Ca를 첨가할 경우 Al_2Ca 상의 생성으로 결정립계 및 아결정립계에 전위의 이동을 억제하여 결정립 미세화와 결정립 성장 억제 효과가 있는 것으로 보고되고 있다[8-12].

따라서 본 연구에서는 첨가 원소를 이용하는 합금화법을 통

†Corresponding author: Su-Gun Lim

[Tel: +82-55-772-1664, E-mail : suglim@gnu.ac.kr]

해 마그네슘 합금의 내산화성을 개선함으로써 마그네슘을 대기 중에서 용해하였고, 마그네슘 합금의 강도 및 가공성 향상을 위해서 경사냉각관법을 사용하여 반응고 빌렛을 제조하였다. 또한 합금을 제조한 후 재가열 공정을 통해 고액공존 영역에서의 미세조직 변화를 알아보려고 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 AZ31+(Ca) 합금은 AZ31 합금과 Al-90 wt.% Ca 모합금을 이용하여 Ca를 각각 0wt.%, 0.5wt.%, 1.0wt.%, 1.5wt.%를 첨가하여 제조하였다. AZ31합금을 전기저항로에서 700°C의 온도로 1시간 가열하여 완전용해 한 후 Al-90wt.%Ca 모합금을 투입하여 10분 등은 유지하였다. 용해 시 합금의 산화로 인한 용탕의 손실을 줄이기 위하여 Ar가스 분위기에서 실시하였다. 반응고 빌렛의 제조는 경사냉각관 방법을 이용하였으며, 완전 용해한 용탕을 주입온도 650°C, 냉각관의 각도 50°, 냉각관의 길이 200 mm, 몰드예열온도 570°C, 유지 시간 10sec 조건으로 제조 후 수냉하였다. 제조한 AZ31+(Ca) 합금의 화학 조성은 Table 1에 나타내었다. 반응용 압출을 진행하기 전에 고액공존영역까지 재가열하는 공정을 거치게 되며 재가열시 미세조직변화는 반응용 압출에서 매우 중요하므로 재가열 온도와 재가열 시간에 따른 조직의 변화를 분석하였다. Ca를 첨가하지 않은 AZ31합금은 재가열 과정에서 산화가 발생하게 되어 배제하였다. AZ31+(0.5~1.5wt%Ca)합금으로 재가열 실험을 진행 하였으며, 제조한 빌렛을 $\Phi 50 \times 85$ mm 크기로 기계가공 하였다. 실제 빌렛의 온도변화를 확인하기 위해 빌렛 중심부에 K-Type열전대를 삽입하여 재가열시 온도변화를 측정하였다. 재가열시 빌렛의 액상을 측정을 위해서 DSC 분석 결과를 부분 적분법을 이용하여 계산하였다[13]. 재가열 실험은 590°C로 등은 유지되고 있는 전기저항로를 사용하였으며, 재가열 온도는 액상율이 10%, 23%인 560°C와 590°C로 설정하였다. 재가열시 각 온도조건에 따른 미세조직변화를 알아보기 위해 수냉하여 미세조직을 관찰하였다. 반응고 빌렛과 재가열후의 미세조직 관찰을 위하여 시편 바닥으로부터 30~40 mm 높이의 중앙부를 채취하였고, 이를 미세 연마한 후, 100 ml 증류수와 4 ml 질산(HNO₃)을 혼합한 용액에 수초 동안 에칭 하여 광학 현미경으로 미세조직을 관찰하였다. Ca를 첨가한 합금의 정출상 관찰을 위하여 X-선 회절 및 분광분석(EDS)을 이용하여 분석 하였다.

Table 1. Chemical composition of semi solid AZ31+(Ca) billets. (wt.%).

Alloys	Al	Zn	Mn	Ca	Si	Cu	Fe	Mg
AZ31	3.49	0.82	0.41	0	0.07	0.08	0.06	Bal.
AZ31+0.5Ca	3.47	0.84	0.39	0.48	0.07	0.08	0.05	Bal.
AZ31+1.0Ca	3.49	0.78	0.42	0.98	0.07	0.08	0.06	Bal.
AZ31+1.5Ca	3.53	0.79	0.39	1.53	0.08	0.08	0.08	Bal.

3. 결과 및 고찰

3.1 반응고 빌렛의 제조에 미치는 Ca의 영향

Fig. 1은 각 합금의 액상선과 고상선을 알아보기 위해서 완전 용해한 용탕을 단열 용기 내에서 서서히 공랭 시켜 시간에 따른 AZ31+(Ca)합금 용탕의 온도 변화를 나타낸 것이며, 각 합금의 고상선과 액상선을 Table 2에 나타내었다. AZ31합금의 경우 액상선 온도는 632°C, 고상선 온도는 568°C로 다른 합금계에 비해 좁은 고·액 공존구간을 가지고 있었으며, AZ31+0.5wt.% Ca합금의 경우 액상선 온도 630°C, 고상선온도는 518°C였고, AZ31+1.0wt.% Ca합금의 경우 액상선 온도는 628°C, 고상선온도는 518°C였다. 그리고 AZ31+1.5wt.% Ca합금의 경우 액상선 온도는 626°C 고상선 온도는 518°C였다. Ca 첨가로 인해 고·액 공존구간이 넓어졌으며, 액상선의 온도는 조성적 과냉에 의해 Ca이 증가함에 따라 점차 낮아졌다. 한편 Ca첨가한 합금의 고상선 온도는 518°C로 일정하였으며,

Fig. 1. Cooling curve of semi-solid AZ31+(Ca) billets.

Table 2. Liquidus and solidus temp. of AZ31+(Ca) alloys (°C).

Alloys	Liquidus temperature	Solidus temperature
AZ31	632	568
AZ31+0.5Ca	630	518
AZ31+1.0Ca	628	518
AZ31+1.5Ca	626	518

이는 Mg-Ca상태도[14]에서의 공정선의 응고온도가 518°C이므로 Ca 첨가한 합금의 고상선 온도가 일정한 것으로 사료된다.

Fig. 2는 경사냉각판에 의해 제조된 반응고 AZ31+(Ca)빌렛의 미세조직 관찰변화를 나타내었다. 경사냉각판법으로 제조된 모든 빌렛의 미세조직은 조대한 수지상의 초정이 아닌 미세하고 구형에 가까운 형상의 초정을 가짐을 확인할 수 있었다. 제조 후의 결정립의 크기는 55~60 μm 로 나타났으며 반응고 주조시 냉각판에 초정이 유리되어 수지상이 적은 구형의 미세한 조직을 갖는 것이라고 사료되며, Ca이 첨가됨에 따라 초정의 크기는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다[15-18]. 일반적으로 주조시 Ca이 증가함에 따라 조성적 과냉에 의해 핵생성을 유도하여 결정립 미세화 역할을 하지만, 경사냉각판법을 이용한 반응고 빌렛 제조에서는 경사냉각판에 의한 핵생성이 더 큰 것으로 생각된다. 한편 Ca을 첨가한 합금의 미세조직을 관찰한

결과 공정계 부분의 변화를 확인할 수 있었으며, 정확한 분석을 위해서 SEM으로 관찰하였다.

Fig. 3은 AZ31+1.5wt.% Ca 합금의 EDS Mapping 결과를 나타내었다. 결정립계를 이루고 있는 공정계는 라멜라층을 이루고 있는 것을 알 수 있었다. Fig. 3의 Mapping 분석 결과를 보면 Al과 Ca이 결정립계를 따라 분포하고 있으며, Al-Ca 화합물을 형성하고 있을 것이라고 생각된다. H. Watanabe와 S. W. Xu[19-20]의 논문에 의하면 Mg-Al-Ca합금의 결정립계가 라멜라층으로 형성되어져 있으며, 결정립계를 이루고 있는 것은 Mg_2Ca , Al_2Ca , $(\text{Mg,Al})_2\text{Ca}$ 상들로 구성되어져 있어 Fig. 3과 일치 한다고 본다.

Fig. 4는 제조한 AZ31+(Ca)빌렛의 XRD 분석 결과를 나타내었다. Ca의 첨가량이 0.5wt.% 이하의 경우는 Mg상만 관찰되었지만, Ca의 첨가량이 1.0wt.% 이상 일때에는 Al_2Ca 상과 Mg상이 확인되었다. Ca이 0.5wt.% 첨가된 빌렛에서는 Ca이 기지조직인 Mg에 모두 고용된 결과라 생각되어진다. J. H. Seo등[21]에 논문에 의하면 Mg에 평형상태에서의 Ca의 고용한은 1.34wt.% 이고 평형상태가 아닌 경우에는 냉각속도나 제조공법에 따라 차이가 나지만 약 0.8wt.% 정도가 마그네슘 기지에 고용된다고 설명하였으며, 본 실험과 일치하였다.

3.2 Ca첨가한 반응고 빌렛의 재가열 특성

반응용 압출에서 온도에 따른 고상과 액상의 비율은 매우 중요하다. 온도변화에 따른 액상율을 알아보기 위해 아르곤 분위기에서 승온 속도 10°C/min로 상온에서 700°C까지 DSC분석을 실시하였다. DSC 열분석 결과를 바탕으로 부분적분법[13]을 이용하여 액상율을 계산하였으며, DSC 열분석 결과와 온도변화에 따른 액상율의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. J. Dong 등과 S. Chayong 등[22,23]은 반응용 압출시 액상율 10%~25% 온도가 가장 적당한 조건이라고 보고 하였다. 따라서 본 실험에서는 계산되어진 액상율을 바탕으로 재가열시 10%,

Fig. 2. Microstructures of semi-solid AZ31+(Ca) billets made by cooling plate method ; (a) 0wt.%, (b) 0.5wt.%, (c) 1.0wt.%, (d) 1.5wt.%.

Fig. 3. EDS mapping of semi-solid AZ31+1.5wt.%Ca; (a) SEM image, (b) Mg, (c) Al, (d) Ca.

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of semi-solid AZ31+(Ca) billets. ; (a) 0wt.%, (b) 0.5wt.%, (c) 1.0wt.%, (d) 1.5wt.%.

Fig. 5. DSC-TGA heating and liquid fraction curves of semi-solid AZ31+0.5wt% Ca billet at a constant heating rate of 10°C/min using the SDT Q600 TA Instruments.

23%를 가지는 온도인 560°C와 590°C를 재가열 온도로 설정하였다. 액상율이 25%이상으로 초과되지 않도록 하기 위해서 전기가열로의 온도를 590°C로 고정하였으며, 재가열시의 온도 상승을 확인하기 위해 시편의 중심부에 K-Type 열전대를 삽입하여 재가열시 실제 온도 변화를 측정하였으며, 그 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 세 합금 모두 재가열 시간이 1800초로 도달하였을 때 목표 액상율 10%인 560°C가 되었고, 2400초가 경과했을 때는 590°C가 되었다.

Fig. 7에 반응고 AZ31+(Ca) 빌렛의 재가열 온도와 Ca첨가량에 따른 미세조직 변화를 나타내었다. 재가열전의 반응고 빌

Fig. 6. Temperature change of semi-solid AZ31+(Ca) billets in heating process.

렛은 결정립 크기가 아주 미세한 조직이 관찰되었고, 빌렛온도 560°C일때는 결정립의 크기가 재가열전의 크기보다 성장하였고, 구형의 형상이 관찰 되었다. 그리고 빌렛온도 590°C 일때는 560°C보다 더 결정립이 성장하였고, 재가열 온도가 높아짐에 따라 결정립 조대화 되는 경향을 나타내었다. S. K. Kim 등 [24]의 논문에 의하면 마그네슘 합금이 구상의 형태를 유지하면서 조대화 되는데 이는 마그네슘합금의 축비($c/a = 1.624$)가 이상적인 값($c/a = 1.633$)에 가까운 HCP구조이며 이방성이 없는 상태이기 때문이라고 설명하고 있다. 따라서 모든 임의의 방향으로 성장이 일어나며 구형의 형태로 조대화 되는 것으로 생각

Fig. 7. Microstructures of semi-solid AZ31+(Ca) billets with increasing billet temperature as adding different amount of calcium.

Fig. 8. Average grain size of semi-solid AZ31+(Ca) billets for each condition after reheating.

Fig. 9. Plot of D^3 against reheating time.

된다. 하지만 Ca의 첨가량이 증가함에 따라 결정립의 성장이 억제되었다. 이는 Ca의 첨가로 인해 Al_2Ca 화합물이 형성되어 결정립의 성장에 장애물로 작용된 것으로 생각된다.

Fig. 8은 반응고 AZ31+(Ca) 빌렛의 재가열 온도와 Ca첨가량에 따른 평균 결정립의 크기를 나타냈다. Ca이 0.5wt.% 첨가된 반응고 빌렛의 경우 재가열 전의 초정 α 의 크기는 61 μm 이며, 재가열 온도가 560°C일때 88 μm , 590°C일때 106 μm 로 재가열 온도가 증가함에 따라 결정립의 크기는 성장하였다. Ca이 1.0wt.% 첨가된 반응고 빌렛의 경우 재가열 전의 초정 α 의 크기는 57 μm 이며, 재가열 온도가 560°C일때 81 μm , 590°C일때 90 μm 로 Ca를 0.5wt.% 첨가한 경우처럼 결정립 성장을 보였고, Ca이 1.5wt.% 첨가된 빌렛의 경우에서도 결정립이 성장하는 것을 볼 수 있었다. 이는 재료 내부의 고상과 액상간의 물질과 열 이동에 의한 조대화 현상으로 예측할 수 있으며, 이를 정량화하기 위하여 Ostwald ripening[25-26]에 의한 LSW(2)이론[27,28]에 적용시켜 보았다. LSW이론은 모상이 액상으로 이루어져 있을 경우 입자의 형상이 완전 구형이라

는 가정 하에 dilute system에서 적용이 되는 식으로, Lifshitz, Slyosow, Wagner가 이론적 해석을 하여 수식화 하였다.

$$D^3 - D_0^3 = Kt \quad (2)$$

K: 조대화 상수

t: 유지시간

D_0 : t=0에서의 고상입자의 평균 결정립 크기

D: t에서의 고상입자의 평균 결정립 크기

위의 식을 이용하여 반응고 AZ31+(Ca) 빌렛의 재가열 시간에 따른 결정립 크기와 조대화 상수(K)값을 Fig. 9로 나타내었다. 재가열 시간이 증가함에 따라 반응고 AZ31+(Ca) 빌렛의 결정립 크기는 점차 증가하였으며, Ca 첨가량에 따라 조대화 상수는 373, 217, 129로 감소하는 경향을 나타내었다. 조대화 상수의 감소는 결정립성장율의 감소를 나타내며, Ca첨가량이 증가함에 따라 결정립 성장을 억제하는 것이라 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 경사냉각관법을 이용한 반응고/반응용 성형법의 적용을 위한 기초단계로서 Ca 첨가한 반응고 마그네슘 합금의 재가열시 미세조직 변화를 관찰하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 경사 냉각관법에 의해 제조된 반응고 마그네슘 합금들은 일반주조의 수지상에 비해 구형의 결정립을 가지는 조직을 관찰할 수 있었으며, Ca 첨가에 의한 조성적 과냉보다 경사냉각관법에 의한 영향이 더 크게 나타나 결정립의 크기가 차이나지 않았다.

2) 반응고 AZ31+(0.5~1.5wt%Ca) 마그네슘 빌렛의 Mapping 분석 결과 Al, Ca이 결정립계를 따라 분포하고 있었으며 라멜라층을 이루고 있음을 확인하였다. 한편, 반응고 AZ31+(0.5~1.5wt%Ca) 마그네슘 빌렛의 XRD 분석결과 Ca의 첨가량이 1.0wt.% 이상 일 때 Al_2Ca 상과 Ca상이 확인되었다.

3) 반응고 AZ31+(0.5~1.5wt%Ca) 마그네슘 빌렛의 재가열시 시간이 증가함에 따라 빌렛의 결정립 크기는 점차 증가하였으며, Ca의 첨가량이 증가함에 따라 조대화 상수는 373, 217, 129로 감소하는 경향을 나타내었다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부의 WPM (World Premier Materials) 사업(No.10037928)을 수행하는 수송기기용 초경량 Mg 소재 사업단의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- [1] Atkinson H. V., Modelling the semisolid processing of

- metallic alloys, *Prog Mater Sci*, 50 (2005) 341-412
- [2] Czerwinski F., Size evolution of the unmelted phase during injection molding of semisolid magnesium alloys, *Scripta Mater*, 48 (2003) 327-331
- [3] Czerwinski F., On the generation of thixotropic structures during melting of Mg-9%Al-1%Zn alloy, *Acta Mater*, 50 (2002) 3265-3281
- [4] Z. Fan., Semisolid metal processing, *Int. Mater. Rev.*, 47(2) (2002)
- [5] B. H. Choi, B. S. You, W. W. Park, I. M. Park, Oxidation Behaviors of Ca Containing AZ91 Magnesium Alloys, *J. Kor. Inst. Met. & Mater*, 42(8) (2004) 673-678
- [6] B. S. You, M. H. Kim, W. W. Park, I. S. Chung, Oxidation Behaviors of Molten Magnesium Containing Calcium, *J. Kor. Inst. Met. & Mater*, 39(4) (2001) 446-450
- [7] S. L. Cheng, G. C. Yang, J. F. Fan, Y. J. Li, Y. H. Zhou, Effect of Ca and Y additions on oxidation behavior of AZ91 alloy at elevated temperatures, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 19 (2009) 299-304
- [8] J. H. Kim, N. E. Kang, C. D. Yim, B. K. Kim, Effect of calcium content on the microstructural evolution and mechanical properties of wrought Mg-3Al-1Zn alloy, *Materials Science and Engineering A*, 525 (2009) 18-29
- [9] C. D. Yim, B. S. You, S. H. Kim, J. S. Lee, W. C. Kim, Hot Rolling Properties of Homogenized AZ31-xCa (x = 0~2.0 wt.%) Gravity Cast, *J. Kor. Inst. Met. & Mater*, (2004) 521-529
- [10] Q. Jin, J. P. Eom, S. G. Lim, W. W. Park, B. S. You, Effect of Ca addition on grain refinement and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy, *J. of the Korea Foundrymen's society*, 23(5) (2003) 251-256
- [11] J. P. Eom, S. K. Jeong, S. G. Lim, H. T. Shin, D. S. Jeong, Grain refinement and mechanical properties of AM60 Mg alloy by CaCN₂ addition, *J. of the Korea Foundrymen's society*, 18(4) (2003) 383-388
- [12] J. H. Jun, B. K. Park, J. M. Kim, K. T. Kim, W. J. Jung., Microstructures and Mechanical Properties of AZ31-(0~0.5%)Ca Alloys, *J. of the Korean Society for Heat Treatment*, (2004) 299-304
- [13] E. Tzimas, A. Zavallangos., Evaluation of volume fraction of solid in alloys formed by semisolid processing, *J. of Materials science*, 35 (2000) 5319-5329
- [14] Edward H., Vol.3 Alloy Phase Diagram, ASM handbook, ASM international, (1992) 555
- [15] D. H. Kim., Y. R. Sung., S. Y. Shim., S. Y. Lee., K. S. Kim., S. G. Lim., *J. Kor. Foundrymen's Soc. The Microstructures and hot extrudability of semi-solid AM100A magnesium alloy fabricated by cooling plate*, 29(3) (2009) 144-149
- [16] D. H. Kim., S. Y. Shim., Y. H. Kim., S. G. Lim., *J. Kor. Foundrymen's Soc. RRA Treatment of Semi-Solid Al-Zn-Mg-Cu Al alloy Fabricated by Cooling Plate*, 29(6) (2009) 265-269
- [17] H. W. Park., D. H. Kim., S. Y. Shim., H. K. Kim., B. H. Seong., C. O. Choi., S. G. Lim., *J. Kor. Foundrymen's Soc. The Effect of Ca Addition on the Grain Growth Inhibition During Reheating Process of Al-Zn-Mg Al Alloys for Thixo-extrusion*, 31(6) (2011) 347-353
- [18] S. Y. Shim., D. H. Kim., Y. R. Seong., S. G. Lim., Statistical Analysis for Influence of Factors on Morphological Evolution in Semi-Solid Al-6Zn-2.5Mg-0.5Cu Alloy by Cooling Plate Method, *Materials Transactions*, 52(5) (2011) 862-867
- [19] S. W. Xu, N. Matsumoto, K. Yamamoto, S. Kamado, T. Honma, Y. Kojima, High temperature tensile properties of as-cast Mg-Al-Ca alloys, *Mater. Sci. Eng. A*, 509 (2009) 105-110
- [20] H. Watanabe, M. Yamaguchi, Y. Takigawa, K. Higashi, Mechanical properties of Mg-Al-Ca alloy processed by hot extrusion, *Mater. Sci. Eng. A*, 454-455, (2007) 384-388
- [21] J. H. Seo, S. K. Kim, Development trend of high temperature Mg alloys, *J. of the Korean Foundry's Society*, 28(6) (2008) 243-250
- [22] J. Dong, Z. Z. Cui, Q. C. Le, G. M. Lu, Liquidus semi-continuous casting, reheating and thixoforming of a wrought aluminum alloy 7075, *Materials Science and Engineering A*, 345 (2003) 234-242
- [23] S. Chayong, H. V. Atkinson, P. Kapranos, Thixoforming 7075 aluminium alloys, *Materials Science and Engineering A*, 390, (2005) 3-12
- [24] S. K. Kim, Y. J. Kim, Semi-liquid forming of Magnesium Alloys, *J. of the Korean Foundry's Society*, 17(4) (1997) 319-326
- [25] P. W. Voorhees, M. E. Glicksman, Solution to the multi-particle diffusion problem with applications to Ostwald ripening-I. Theory, *Acta Metallurgica*, 32 (1984) 2001-2011
- [26] P. W. Voorhees, M. E. Glicksman, Solution to the multi-particle diffusion problem with applications to Ostwald ripening-II. Computer simulations, *Acta Metallurgica*, 32 (1984) 2013-2030
- [27] I. M. Lifshitz, V. V. sloyozov, The kinetics of precipitation from supersaturated solid solutions, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 19 (1961) 35-50
- [28] C. Wagner, Theorie der Alterung von Niederschlagen durch Umlosen (oswald-riefung), *Zeitschrift fur Elektrochemie*, 65(7) (1961) 581-591