 논문

반응고 A356 합금의 재가열 특성 및 반응용 압출

김대환 · 정현주 · 심성용 · 임수근*[†] · 이상용**

경상대학교 나노·신소재 공학부, *공학연구원, **한국 폴리텍 VII대학 진주캠퍼스

Thixo Extrusion and Reheating Characteristics of Semi Solid A356 Alloy

Dae-Hwan Kim, Hyun-Ju Jung, Sung-Yong Shim, Su-Gun Lim*[†] and Sang-Yong Lee**

Dept. of Metallical and Materials Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

*Engineering Research Institute (Gyeongsang National University), Jinju 660-701, Korea

**Jinju Campus of KOREA POLYTECHNIC Jinju 660-996, Korea

Abstract

This work presents the results of a thixo-extrusion process applied to aluminum alloy and and reheating characteristics of semi-solid A356 Alloy using have been discussed. The reheating experiment was performed using an electric resistance furnace and multistage heating for uniform reheating. The thixo-extrusion was performed at the optimal reheating conditions of the semi-solid A356 alloy, the the extrusion conditions were an extrusion ratio of 33 and ram speed of 6 mm/sec. The results showed that the thixo-extrusion of semi-solid A356 alloy fabricated by the cooling slope reduced the extrusion pressure by 180% in comparison with hot extrusion, and that a sound extrusion could be obtained in spite of the same extrusion ratio and strain rate.

Key words : Cooling plate method, Reheating process, Semi-solid alloy, Thixo-extrusion

1. 서 론

최근 산업전반으로 환경규제 강화와 에너지 효율의 극대화에 대한 관심이 증가함에 따라 경량소재에 대한 소비 또한 증가하고 있는 추세이다. 현재 선박, 항공기, 그리고 자동차 등의 구조물에 사용되고 있는 대부분의 부품 소재는 철계 소재로 많은 부분 이용되고 있으며, 에너지 효율의 증대를 위하여 이러한 부품소재를 대신해 알루미늄 합금 등의 경량소재로 대체/적용하려는 많은 연구들이 진행되고 있다. 하지만, 알루미늄 합금 부품 소재의 경우 철계 소재에 대비해 낮은 기계적 성질과 난성형에 의한 생산성 저조로 인하여 부품소재로의 적용에는 많은 어려움을 겪고 있다. 최근에는 이러한 난항을 극복하기 위하여 주/단조, 스queeze캐스팅(squeeze casting), 그리고 반응용/반응고 성형(Thixo/Rheo forming) 등의 복합공정을 적용함으로써 주조에서의 낮은 기계적 특성과 소성공정에서의 부품 성

형의 어려움을 해결하려는 노력들이 시도되고 있다[1-4]. 이중 반응용 압출법은 기존의 압출법과 그 방법은 동일하나 압출용 빌렛을 고체상의 빌렛이 아닌 주조와 소성가공의 장점을 도모한 유변학적(Thixotropic) 특성을 갖는 반고상 빌렛을 사용한다는 특징이 있다[5-7]. 이 때문에 반응용 압출법은 제품 제조 시 합금 소재의 유동성을 증가시켜 압출 응력을 저감시킬 수 있어 금형의 수명을 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 난성형 합금의 압출 및 복잡한 형상의 압출이 가능하다[8-10]. 또한, 균일한 내부 조직을 형성하여 제품의 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 장점이 있다[11,12]. 그러나 반응용 압출의 경우 압출 전 수행되는 반응고 합금의 재가열 공정에 의해 제품의 특성에 많은 영향을 줄 수 있어 이에 대한 조사가 필요하다[13-15]. 따라서, 본 연구에서는 반응용 성형의 기초 연구로서, 반응고 A356 알루미늄 합금을 제조하고 이 합금에 대한 재가열 특성 및 반응용 압출을 실시하였으며, 제조한 반응용

Received: Feb. 14, 2014 ; Revised: Jul. 3, 2014 ; Accepted: Aug. 21, 2014

[†]Corresponding author: Su-Gun Lim (Gyeongsang National Univ.)

Tel: +82-55-772-1664, Fax: +82-55-772-1670

E-mail: suglim@gnu.ac.kr

Journal of Korea Foundry Society

2014. Vol. 34 No. 4, pp. 123~129

<http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2014.34.4.123>

ISSN 1598-706X

© Korea Foundry Society, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1. Chemical composition of A356 Al alloy (wt.%).

Elements	Si	Mg	Fe	Ti	Cu	Zn	Mn	Al
Contents	7.1	0.3	0.12	0.2	0.1	0.1	0.1	Bal.

압출재의 기계적 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서는 상용의 A356 알루미늄 합금을 사용하였으며, 냉각판 법에 의해 반응고 알루미늄 합금을 제조하였다. 합금의 고상 및 액상 영역을 확인하기 위하여 700°C에서 용해한 용탕을 서서히 냉각시키며 냉각 곡선을 측정하였고, 이를 바탕으로 반응고 합금을 제조하기 위한 냉각판 조건을 설정하였으며, 주

Table 1. Chemical composition of A356 Al alloy (wt.%).

Elements	Si	Mg	Fe	Ti	Cu	Zn	Mn	Al
Contents	7.1	0.3	0.12	0.2	0.1	0.1	0.1	Bal.

Fig. 1. Cooling curve of A356 aluminum alloy.

입온도 630°C, 몰드온도 550°C 유지시간 1분의 조건에서 반응고 알루미늄 합금을 제조하였다. 반응용 압출을 위한 재가열 조건은 반응고 합금의 DSC 분석을 통하여 온도별 액상율에 대한 예측과 목표 액상율을 가지는 온도에서의 유지시간에 따른 미세조직 변화를 조사하여 액상율이 10% 미만으로 제어하기 위한 재가열 온도 및 유지시간을 설정하였다. 이 후 반응용 압출은 설정된 재가열 조건(재가열온도: 570°C, 유지시간: 30분)에서 재가열 된 반응고 소재를 사용하여 압출비 33:1, 램 속도 2 mm/s 조건으로 압출하였으며, 동일한 압출비 및 램속도에서 열간(열간 압출온도: 300°C) 압출한 합금과 그 특성을 비교하였다. 냉각판에 의해 제조된 합금 및 반응용 압출재의 특성은 광학 현미경, 화상분석기(image analazer), DSC 등을 이용하여 분석하였으며, 제조된 압출재의 기계적 특성은 만능시험기를 이용하여 평가하였다. 사용한 합금의 조성 및 산출한 냉각 곡선은 Table 1과 Fig. 1에 각각 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 냉각판법에 의한 반응고 합금 제조(Semi-solid A356 alloy fabricated by cooling slope method)

Fig. 2는 중력주조 및 반응고 주조에 의한 A356 알루미늄 합금의 미세조직을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)의 중력주조 합금의 경우 조대한 수지상 조직 주변으로 공정 상들이 분포하는 A356 합금의 전형적인 주조 조직으로 구성되어 있는 반면, Fig. 2(b)의 냉각판법에 의한 반응고 주조 조직의 경우 비교적 균일한 크기의 미세한 구상 혹은 로젯(rosette) 형상의 초정 입자와 그 주변으로 공정 조직이 구성되어 있는 것으로 나타났다. 보통의 반응고 금속의 제조법은 용고 중인 합금을 기계 및 전자기적인 방법에 의해 수지상 조직을 파괴시켜 이와 같은 미세조직을 형성하나 교반자와 용탕의 반응으로 인한 불순물의 혼입과 많은 비용이 드는 단점을 지니고 있다. 하지만, 본 연구에서 적용한 냉각판 법의 경우 용탕을 냉각판 상에 흘려줌으로써 구형의 미세한 초정 입자 지닌 반응고 합금을 보다 적은 비용으로 쉽고 간편하게 얻을 수 있었으며, 일반적인 주조에 비해 건전한 주조품을 얻을 수 있었다. 이는 반응고

Fig. 2. Microstructures of A356 Al alloy fabricated by the (a) gravity casting and (b) semi solid casting.

금속 주조의 경우 응고하는 동안 초기에 형성된 미세한 구형의 초정이 수지상 조직에 비해 초정의 응고 수축을 보완하기 위한 용탕의 공급이 신속하게 이루어짐에 따라 주조 결함으로 발생될 수 있는 수축 및 기공의 형성이 적었기 때문이다 [5,11]. 또한, 일반적인 중력주조에 비해 냉각판에 의한 반응고 금속 주조의 경우, 빠른 냉각속도로서 냉각판 상에서 금속 초정 상이 생성/유리됨에 따라 중력주조에 의한 주조조직 보다 미세한 조직을 가지며, 기존의 교반법에 의한 반응고 금속 제조에 비해 이러한 구형의 미세한 주조 조직을 보다 쉽고 간단하게 제조가능 하였다[6,7,16].

3.2 반응고 금속의 재가열 특성(Reheating characteristics of Semi-solid A356 alloy)

반응고 금속 성형의 경우 이 금속이 틱소트로픽(thixotropic)한 성질을 얻기 위한 소정의 열처리(reheating)가 필요로 하게 되며, 이러한 특성에 대한 조사가 필요하다[17]. Fig. 3은 반응고 금속의 재가열 특성을 조사하기 전 냉각판에 의하여 제조된 반응고 금속의 미세조직 및 초정 상의 크기를 측정된 결과를 나타낸 것이다. 냉각판법에 의해 제조된 반응고 주조 조직의 경우 평균 입도가 약 $67\mu\text{m}$ 정도의 비교적 균일한 크기의 초정 상들이 분포하는 것으로 확인되었다. 반응용 압출과 같은 틱소 성형에서는 재가열을 통하여 얻어진 반응고 소재의 액상율에 따라 성형 시 가해지는 하중 및 최종 제품의 특성에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 재가열에 의한 반응고 금속의 액상율에 대한 조사는 매우 중요시 되며, 액상율을 조사하기 위한 여러 연구들이 진행되고 그 성과들이 적용되고 있다. 그 중 DSC 분석결과를 이용한 부분 적분법은 합금의 조성에 의존하여 오차가 적어 많이 적용되고 있으며[18-21], 본 연구에서도 이를 통하여 반응고 A356 합금의 온도에 따른 액상율을 예측하였다.

Fig. 4는 최적 조건에서 제조된 반응고 A356 합금의 재가열 조건을 설정하기 위하여 주사열분석기(DSC) 열분석을 행

Fig. 4. Relationship between temperature and liquid fraction of the semi solid A356 Al alloy at a constant heating rate of $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

한 후 이를 통해 얻어진 반응고 A356 합금의 승온 분석 결과와 부분적분법을 이용하여 산출한 액상율의 결과를 나타낸 것이다. Shim 등에 의하면 반응용 성형 시 건전한 성형품을 제조하기 위해서는 재가열 시 액상율이 10% 미만이어야 하며 [22], 그 이상일 경우 액상의 유출에 의하여 건전한 성형품을 얻지 못한다고 보고하였다. 따라서, Fig. 4의 액상율에 대한 결과를 바탕으로 반응용 압출을 위한 반응고 A356 합금의 재가열 온도는 액상율이 10% 미만인 570°C 로 설정하였다.

부분적분법에 의한 반응고 합금의 액상율은 목표한 온도에서의 액상율에 대한 예측에 불과하므로 목표온도에서의 유지 시간에 따른 변화를 조사할 필요가 있다. 본 연구에서는 부분적분법에 의하여 목표한 액상율을 갖는 온도를 산출하고 이 온도에서 유지시간을 변화하였을 때 반응고 A356 금속의 미세조직 변화를 조사하였다. 재가열 공정 동안 반응고 A356 합금의 내/외부의 온도편차를 최소화하기 위하여 다단 재가열 채택하여

Fig. 3. Microstructure and average primary α size of the semi solid A356 Al alloy by the cooling slope method.

Fig. 5. Temperature variation of the surface and center of the semi solid A356 Al alloy during the multi-stage reheating.

수행하였으며, 반응고 A356에 대한 재가열 시의 온도 변화는 Fig. 5에 나타내었다. 반응고 A356 합금의 다단 재가열 방식은 분당 10°C의 승온 속도로서 200°C에서 10분 유지 후 최종 목표 온도 570°C에 도달하도록 하였다. 다단 재가열에 의해 반응고 A356 합금의 내/외부의 온도 편차는 5°C 이내로 최소화시킬 수 있었으며, 내/외부 미세조직의 차이 또한 크지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 재가열 목표 온도 도달 후 5분, 10분, 30분 그리고 1시간 재가열 유지한 반응고 A356합금의 미세 조직 변화 나타낸 것이다. Fig. 6(a)와 (b)의 재가열 5분 및 10분 유지한 반응고 A356 합금의 미세조직은 냉각관에 의해 형성된 초기 미세한 로제트형의(rose) 조정 상과 그 주변으로 분포하는 공정 상들이 높은 재가열 온도에 의해 다소 성장한 것으로 나타났다. 등온유지시간이 증가함에 따라 이 확인의 조정은 점차적으로 구형화 되는 것으로 나타났다. Fig. 6(c)의 보다 긴 시간으로 유지한 합금의 미세조직에서는 조정 상이 100 μm 이상 성장함과 동시에 등축의 조정 조직을 형성한 것으로 나타났으며, 등온 재가열 하는 동안 등축 조정과 조정 사이의 계면과 조정상 내부에 일부 용해한 흔적을 관찰할 수 있었다. Fig. 6(d)의 재가열 60분 유지 한 합금에서는 반응용 금속으로서의 고상 및 액상의 구분이 명확하였으며, 재가열 유지에 의하여 형성된 액상에 의하여 더 이상의 조정의 성장 없이 고상 및 액상의 계면을 형성하고 있음을 알 수 있었다. 또한, 조정 상 내부에서 조성 차에 의하여 용해한 흔적인 재가용 풀(remelted pool)이 존재하였으며[22], 부분적분법에 의해 산출한 액상율에 비해 재가열 유지시간이 증가함에 따라 액상율의 분율이 재가열 유지시간에 따라 점차적으로 증가함을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서의 반응고 A356 합금의 반응용 압출을 위한 재가열 공정은 570°C의 온도에서 약 30분 이내로 재가열 유지하여 수행하였다.

Fig. 6. Microstructures of the semi solid A356 Al alloy with the holding time during the reheating; Holding time of (a) 5, (b) 10, (c) 30, and 60 min.

3.3 반응용 압출(Thixo-extrusion of Semi solid A356 alloy)

Fig. 7은 압출 속도 및 압출 비가 동일한 조건에서 열간 (300°C) 및 반응용(570°C) 압출하였을 때 램의 행정에 따른 압출 압력의 변화와 각 압출 조건에서 제조한 압출재를 나타낸 것이다. 압출에 의한 제품 제조 시 생산성을 고려하여 비교적 빠른 압출 램 속도(6 mm/s)로 압출하였으며, 이 때의 최대 압출 압력은 열간 압출의 경우 약 1100MPa로 비교적 높은 압출 하중으로 압출된 것으로 나타났다. 하지만, 반응용 압출의 경우 압출하는 동안 가해진 최대 압출 압력은 약 380MPa로 열간 압출과 비교하여 약 180% 압출 압력의 감소 효과를 가져왔으며, 현저히 낮은 것으로 나타났다. 그리고 열간

압출의 경우 컨테이너에 빌렛이 충전될 때까지 램의 진행에 따라 압출 압력이 빠르게 증가하다 최대압출압력(압출시작압력)에서 압출되기 시작하여 압출이 진행됨에 따라 점차적으로 감소하는 전형적인 직접 압출 거동을 나타내었지만, 반응용 압출의 경우 압출 압력은 램의 행정에 대하여 거의 일정하게 유지되는 간접 압출의 거동과 유사한 거동을 나타내었다. 보통 직접 압출의 경우 최대 압출 압력 이후 램의 행정에 따라 압출 컨테이너에 충전된 빌렛의 양이 감소함에 따라 압출 압력이 감소하는 거동을 나타내지만, 반응용 압출의 경우 재가열 공정 에 의해 형성된 액상에 의해 압출 시 반응고 금속의 금속 유동이 증가하여 압출 컨테이너와 빌렛 간의 마찰력을 상대적으로 감소시킴에 따라 압출하는 동안 압출 압력이 거의 일정하

Fig. 7. Change in extrusion pressure of A356 Al alloys during the hot and thixo extrusion and its extruded bar by (a) hot and (b) thixo extrusion.

Fig. 8. Microstructures of the extruded bars; (a, b, e, f) hot- and (c, d, g, h) thixo-extruded bar.

Fig. 9. Nominal stress and strain curves of the extruded A356 alloy bars.

게 유지되는 것으로 판단된다[23].

각 조건에서 제조된 압출재(Fig. 7(a)와 (b))는 외관상 매우 건전한 것으로 확인되었으며, 두 압출재 모두 경면(鏡面)의 아주 미려(美麗)한 표면을 가지는 것으로 나타났다. 각 압출재의 미세조직적 특성을 분석하기 위하여 압출한 방향으로 압출 초기부와 정상 상태 부위에서 시료를 채취하여 미세조직을 관찰하였으며, Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8은 열간 및 반응용 압출에 의해 제조된 압출재의 부위별 미세조직을 나타낸 것이다. Fig. 8(a) 및 (b)의 열간 압출재의 압출 초기 미세조직에서는 냉각판에 의해 제조된 구형 및 로켓 형의 초정 입자들이 어떠한 변형 없이 압출된 것으로 나타났으며, 이러한 조직이 높은 압출 압력에 의해 다이홀을 통과함에 따라 Fig. 8(e)와 (f)의 정상 상태에서 관찰된 미세조직과 같이 높은 전위밀도와 흐름응력에 의해 동적 회복 및 재결정 됨으로써 미세한 등축 및 섬유상 조직을 가지는 것으로 나타났다. 하지만, 반응용 압출에 의해 제조된 압출재의 경우 압출 초기 조직의 경우 높은 재가열 온도에 의한 국부적인 재용융과 성장한 초정 및 공정 상이 관찰되었으며(Fig. 8(c) 및 (d)), 정상 상태의 미세조직에서는 섬유상 조직인 아닌 공정 상이 비교적 균일하게 분포한 형태의 미세조직을 형성하는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 높은 온도로 재가열 된 반응고 합금 소재가 반응용 압출됨에 따라 소성가공 후 재결정이 빠르게 진행되고 이 결정들이 빠르게 성장한 결과라 판단된다.

Fig. 9는 열간 및 반응용 압출재에 대하여 인장시험 후 응력-변형을 곡선을 나타낸 것이다. 열간 압출재의 경우 인장 및 항복 강도는 187MPa과 100MPa 이며, 반응용 압출재는 각각 174MPa과 78MPa로 열간 압출재가 더 높은 강도를 나타내었다. 하지만 각 압출재의 과단 연신율의 경우 열간 압출재는 15%이며, 반응용 압출재는 약 20%로서 열간 압출재 보다 반응용 압출재가 더 높은 것으로 나타났다. 일반적으로 반응용 압출의 경우 압출 시 높은 온도에서 반응용 압출됨에 따라 등

축 압출 조직을 형성하게 되고 이러한 등축 조직에 의해 강도는 크게 저하시키지 않고 높은 연신율을 가지는 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 반응고 A356 합금의 재가열 및 반응용 압출 특성에 대하여 조사하였으며, 제조한 압출재의 미세조직 및 기계적 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 연구에서 적용한 냉각판 법에 의한 반응고 금속 제조의 경우 금속 용탕을 냉각판 상에 흘려줌으로써 구형의 미세한 초정 입자 지닌 조직을 보다 쉽고 간편하게 얻을 수 있었다.
- 2) 초기에 형성된 미세한 구형의 초정 입자들에 의해 응고 수축을 보완하기 위한 용탕의 공급이 신속하게 이루어짐에 따라 주조 결함으로 발생될 수 있는 수축 및 기공의 형성이 적어 건전한 주조품을 얻을 수 있었다.
- 3) 반응용 압출을 위한 반응고 금속의 다단 재가열 공정은 반응용 성형 시 액상 유출을 제어하기 위하여 액상 분율이 10% 이내인 조건으로 재가열 온도는 570°C이며, 유지시간은 목표 온도 도달 후 30분 이내로 설정하는 것이 적절하다.
- 4) 냉각판에 의해 제조된 반응고 A356 합금의 반응용 압출은 열간 압출에 비해 180%의 압출 압력 감소효과를 가져올 수 있으며, 동일한 압출비 및 변형을 속도에서도 건전한 압출재를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] M.C. Flemings, Metall. Trans., "Numerical simulation of Semi-solid casting of an automotive component", **22** (1991) 957-981.
- [2] Z. Fan, Int. Mater. Rev. "Advances in Material Forming: Esaform 10 years on", **47** (2005) 49-85.
- [3] M. Kiuchi and R. Kopp., Present and Future. Ann. CIRP, "Pitting corrosion of rheocast A356 aluminium alloy in 3.5 wt.% NaCl solution", **51** (2002) 653-670.
- [4] Amita Iyer, Squeeze casting, The future, ISS Institute Inc. (2011) 13-37.
- [5] S.Y. Shim, H.W. Park, I.S. Jeong and S.G. Lim, Sur. Rev. Lett. "The optimizing conditions by taguchi method for fabricating Semi-solid Al-Zn-Mg alloy slurry by cooling plate method", **17** (2010) 185-188.
- [6] S.Y. Shim, D.H. Kim, Y.R. Seong and S.G. Lim, Trans., "Statistical Analysis for Influence of Factors on Morphological Evolution in Semi-Solid Al-6Zn-2.5Mg-0.5Cu Alloy by Cooling Plate Method", **52** (2011) 862-867.
- [7] S.Y. Shim, D.H. Kim, S.H. Choi, Y.H. Kim, He Bai and S.G. Lim, Met. Mater. -Int "The analysis of variance on process parameters affecting the microstructures of semi-solid Al-Zn-Mg alloy billet by cooling plate method", **16** (2010) 1009-1017.
- [8] Y.O. Yoon, D.I. Jang, H.H. Jo, Y.J. Kim and S.K. Kim, RARE METALS, "Effect of thixoextrusion parameters on mechanical properties of 7003 Aluminum wrought alloy", **25** (2006) 124-

- 128.
- [9] M.A. Bayoumi, M.I. Negm and A.M. El-Gohry, *Mater. Dws.* **30** (2009) 4469-4477.
- [10] Y. Birol, *J. Mater. Process. Technol.* **207** (2008) 200-203.
- [11] D.H. Kim, Y.S. Han and H.I. Lee, *J. KFS*, "Development of Semi-solid process(I) -Examples of actual application", **12** (1992) 108-116.
- [12] Y.S. Han, D.H. Kim and H.I. Lee, *J. KFS*, "Development of Semi-solid process(II) -Examples of actual application", **12** (1992) 117-124.
- [13] T.H. Kim, S.Y. Shim, H.W. Park and S.G. Lim, *J. KFS*, "Optimum fabrication conditions and reheating characteristic of Semi-Solid Al-Zn-Mg-(Sc) alloy by inclined cooling plate", **29** (2009) 213-219.
- [14] S. Ashouri, M. Nili-Ahmadabadi, M. Moradi and M. Iranpour, *J. Alloys Compd.*, "Semi-solid microstructure evolution during reheating of aluminum A356 alloy deformed severely by ECAP", **466** (2008) 67-72.
- [15] S. Kleiner, O. Beffort and P.J. Uggowitzer, *J. Scripta. Mater.*, "Microstructure evolution during reheating of an extruded Mg-Al-Zn alloy into the semisolid state", **51** (2004) 405-410.
- [16] D.H. Kim, Y.R. Sung, S.Y. Shim, S.Y. Lee, K.S. Kim and S.G. Lim, *J. KFS*, "The microstructures and hot extrudability of Semi-solid AM100A magnesium alloy fabricated by cooling plate", **29** (2009) 144-149.
- [17] M. Kiuchi and S. Sugiyama, *J. Mater. Shaping Technol.* "Application of mashy state extrusion", **8** (1990) 39-51.
- [18] Y. Birol, *J. Alloys Comp.*, "Analysis of macro segregation in twin-roll cast aluminium strips via solidification curves", **486** (2009) 173-177.
- [19] D. Liu, H.V. Atkinson and R.L. Higginson, *Mater. Sci. Eng. A*, "Disagglomeration in thixoformed wrought aluminium alloy 2014", **392** (2005) 73-83.
- [20] S.J. Qum A.H. Feng, L. Geng, Z.Y. Ma and J.C. Han, *Scr. Mater.* "DSC analysis of liquid volume fraction and compressive behavior of the semi-solid Si3N4w/Al-Si composite", **56** (2007) 951-954.
- [21] E. Tzimas and A. Zavallangos, *J. Mater. Sci.* "Synthesis of lightweight metals III (ed. P. H. Froes et al.)", **35** (2000) 5319-5329.
- [22] S.Y. Shim, Ph. D. Thesis. Gyeongsang National University, Jinju (2010) 71-81.
- [23] G.E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, the McGraw-Hill Book Company, USA (1961) 458-468.