고압 다이캐스팅용 알루미늄 합금의 열전도성 및 주조성에 미치는 첨가원소의 영향

김철우¹ · 김영찬¹ · 김정한¹ · 조재익^{1,*} · 오민석^{2,*}

¹한국생산기술연구원 서남지역본부 EV부품소재그룹

²전북대학교 신소재공학부 금속시스템공학과

Effect of Alloying Elements on the Thermal Conductivity and Casting Characteristics of Aluminum Alloys in High Pressure Die Casting

Cheol-Woo Kim¹, Young-Chan Kim¹, Jung-Han Kim¹, Jae-Ik Cho^{1,*}, and Min-Suk Oh^{2,*}

¹Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 61012, Republic of Korea

²Division of Advanced Materials Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea

Abstract: High pressure die casting is one of the precision casting methods. It is highly productivity and suitable for manufacturing components with complex shapes and accurate dimensions. Recently, there has been increasing demand for efficient heat dissipation components, to control the heat generated by devices, which directly affects the efficiency and life of the product. Die cast aluminum alloys with high thermal conductivity are especially needed for this application. In this study, the influence of elements added to the die cast aluminum alloy on its thermal conductivity was evaluated. The results showed that Mn remarkably deteriorated the thermal conductivity of the aluminum alloy. When Cu content was increased, the tensile strength of cast aluminum alloy increased, showing 1 wt% of Cu ensured the minimum mechanical properties of the cast aluminum. As Si content increased, the flow length of the alloy proportionally increased. The flow length of aluminum alloy containing 2 wt% Si was about 85% of that of the ALDC12 alloy. A heat dissipation component was successfully fabricated using an optimized composition of Al-1 wt%Cu-0.6 wt%Fe-2 wt%Si die casting alloy without surface cracks, which were turned out as intergranular cracking originated from the solidification contraction of the alloy with Si composition lower than 2 wt%.

(Received May 11, 2018; Accepted August 30, 2018)

Keywords: thermal conductivity, heat sink, die-casting, radiation of heat

1. 서 론

고압 다이캐스팅 공법은 정확하게 기계 가공된 금형에 용융금속을 주입하여 필요한 주조형상과 완전히 일치하는 주물을 얻는 정밀주조법이다. 다이캐스팅 공정을 적용하면 정밀하고 복잡한 형상의 부품을 빠른 시간에 대량으로 생산할 수 있어 생산성이 매우 높다 [1,2]. 최근 자동차 및 전기전자 산업 등 다양한 분야에서 부품의 고효율화 및 집

적화 등에 기인한 발열 문제가 크게 대두되고 있다. 따라서 부품의 온도상승으로 인한 제품의 효율 저하 및 수명 단축을 방지하기 위해 방열특성이 우수한 부품 개발이 크게 요구된다. 일반적으로 방열특성이 요구되는 부품의 경우 열전도도가 높은 Al 전신재 합금이나 99 wt% 이상의 Al을 이용한 주조공법이 적용되고 있으나 낮은 유동성, 열악한 주조성 및 금형 소착 저항성 때문에 다이캐스팅 공정에는 적용되지 못하고 있다. 반면 유동성 및 기계적 특성이 우수하여 다이캐스팅 공정에 널리 사용되고 있는 대표적인 Al 합금인 ALDC12는 열전도도가 99 W/m·k로 순수 알루미늄(234 W/m·k) 대비 매우 낮아 기존의 합금 조성 및 제조방법으로는 방열부품 제작이 불가하다 [3]. 따라서 높은 열전도도 뿐만 아니라 다이캐스팅 주조가 가능한 고

- 김철우·김영찬·김정한·조재익: 연구원, 오민석: 교수

*Corresponding Author: Min-Suk Oh

[Tel: +82-63-270-2297, E-mail: misoh@jbnu.ac.kr]

*Corresponding Author: Jae-Ik Cho

[Tel: +82-62-600-6220, E-mail: Uwjaeik@kitech.re.kr]

Copyright © The Korean Institute of Metals and Materials

압 다이캐스팅용 Al 합금 개발이 매우 절실하다.

순수 Al 대비 다이캐스팅용 Al 합금의 낮은 열전도도는 합금의 주조성이나 제품의 물리적·화학적 특성 향상을 위해 첨가되는 소량의 금속원소로부터 기인된 것이라 볼 수 있다. 예컨대 용탕의 유동성 및 주조성 향상을 위한 Si 첨가 [4], 강도 및 가공성 향상을 위한 Cu 및 Mn 첨가 [5-7], 금형의 소착 저항성 향상을 위한 Fe 첨가 [8] 등 Al에 첨가되는 상기 미량 금속원소의 양이 증가할수록 제품의 열물성은 열화된다. 따라서 다이캐스팅 주조가 가능하고 방열특성이 우수한 Al 합금 개발을 위해서는 미량 첨가원소의 조성 최적화가 필수적이다. 본 연구에서는 다이캐스팅 공정용 최적 합금조성을 찾기 위해, 첨가되는 합금원소의 성분을 변화시킨 후 열전도성 및 유동성에 미치는 영향을 고찰하였으며, 도출된 최적 합금 조성으로 실제 자동차 음향기기에 적용되는 방열부품을 제작하여 그 성능을 비교 평가하였다.

2. 실험방법

고압 다이캐스팅용 Al 합금의 열전도도에 미치는 첨가원소의 영향을 고찰하기 위해 다양한 금속원소를 첨가한 후 ASTM D 1200 규격에 기초하여 주조시험편을 제조하였다. SiC 도가니에 순수 Al을 장입하고 전기로를 이용하여 용해한 후 용탕중에 Si, Mg, Cu, Fe 및 Mn 등 다이캐스팅 합금제조 시 주로 사용되는 금속원소를 0.2~2 wt%로 조절하여 첨가하였다. 이때 Cu 및 Fe는 순도 99.9%의 단일성분 잉곳을 사용하였고 Si, Mg 및 Mn의 경우는 모합금 형태(Al-25 wt%Si, Al-50 wt%Mg, Al-60 wt%Mn)의 잉곳을 사용하였다. 용탕이 완전 용해된 후 용탕의 온도를 780 °C로 유지하고 용탕내에 Ar 가스를 15분간 불어넣어 탈가스 처리하였으며, 20분간 용탕의 안정화 시간을 거친 후 100 °C로 예열된 금형에 주조하였다. 제조된 합금의 성

Table 1. Chemical composition of Al alloys with various metal additives (wt%).

Alloy elements		Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Al
Si	0.2%	0.290	0.092	0.0061	0.005	0.0056	Bal.
	0.5%	0.496	0.103	0.0011	0.009	0.0036	Bal.
	1.0%	0.868	0.108	0.0017	0.016	0.0043	Bal.
	1.5%	1.405	0.112	0.0024	0.023	0.0048	Bal.
	2.0%	2.195	0.118	0.0034	0.033	0.0060	Bal.
Fe	0.2%	0.149	0.268	0.0063	0.0005	0.0017	Bal.
	0.5%	0.149	0.514	0.0005	0.0015	0.0020	Bal.
	1.0%	0.178	0.968	0.0005	0.0005	0.0026	Bal.
	1.5%	0.111	1.471	0.0005	0.0005	0.0035	Bal.
	2.0%	0.189	1.805	0.0005	0.0069	0.0037	Bal.
Cu	0.2%	0.193	0.143	0.199	0.0023	0.0010	Bal.
	0.5%	0.133	0.123	0.502	0.0006	0.0012	Bal.
	1.0%	0.197	0.145	1.282	0.0005	0.0012	Bal.
	1.5%	0.171	0.103	1.580	0.0005	0.0019	Bal.
	2.0%	0.121	0.129	1.993	0.0009	0.0013	Bal.
Mg	0.2%	0.178	0.140	0.0005	0.151	0.0020	Bal.
	0.5%	0.139	0.135	0.0007	0.471	0.0018	Bal.
	1.0%	0.161	0.134	0.0005	1.033	0.0027	Bal.
	1.5%	0.198	0.123	0.0005	1.548	0.0044	Bal.
	2.0%	0.100	0.100	0.0009	1.865	0.0069	Bal.
Mn	0.2%	0.139	0.135	0.0005	0.0009	0.219	Bal.
	0.5%	0.154	0.151	0.0007	0.0012	0.499	Bal.
	1.0%	0.108	0.153	0.0005	0.0009	0.940	Bal.
	1.5%	0.126	0.103	0.0026	0.0050	1.595	Bal.
	2.0%	0.199	0.072	0.0025	0.0057	1.818	Bal.

분을 분광분석기(Spark emission spectrometer, QUANTRON)를 활용하여 분석하였으며, 그 결과를 표 1에 나타내었다. 성분분석용 표준시료에 대한 분석기의 편차 범위는 0.04% 이하이다. 주조시험편에 대한 열전도도는 Laser flash 기술을 활용한 열물성 분석장치(LFA 477, Netzsch)를 이용하여 측정하였다. 주조된 시험편의 미세조직은 에탄올(100 ml) 및 수산화나트륨(0.2 g) 혼합용액으로 화학 에칭한 후 광학 현미경을 이용하여 관찰하였으며, 조직 내 석출상 및 미세 구조의 변화는 FE-SEM(JSM-7000F, JEOL) 및 EDS를 이용하여 분석하였다. 제조된 합금의 기계적 성질은 ASTM E8M 규격에 따라 인장시험기(AG-IS, SHIMADZU)를 활용하여 실시하였다. 판상형태로 제작된 인장 시험편의 평행부 거리, 표점거리 및 두께는 각각 32 mm, 20 mm 및 3 mm였으며 인장 변형속도는 2 mm/min로 유지하였다. 첨가원소에 따른 다이캐스팅용 Al 합금의 유동성 측정을 위해 서펜타인(Serpentine) 형태의 금형을 이용하여 주조한 후 응고된 주편의 최종 길이를 측정하였다. 이때 금형의 온도는 온도 조절기(3000L, REGLOPLAS)를 이용하여 200 °C로 일정하게 유지하였고, 유동성 측정 시 금형 온도의 영향을 최소화 하기 위해 용탕과열도(Super heat)를 설정하였다. 열역학 해석 프로그램(Pandat)을 이용하여 예측된 각 합금의 Liquidus 온도는 638.2~644.3 °C이었으며,

온도 차이가 크지 않아 640 °C로 간주한 후 각 합금의 용탕 과열도를 100 °C로 유지하였다. 마지막으로 본 연구를 통해 도출된 다이캐스팅용 Al 합금 조성을 이용하여 자동차 음향기기의 방열부품을 고압 다이캐스팅 기법으로 주조하였다. 다이캐스팅 머신은 530 ton 콜드 챔버 형으로 사출 플런저의 직경, 슬리브 길이 및 주조압력을 각각 70 mm, 475 mm 및 60 MPa로 설정하였다

3. 결과 및 고찰

3.1 합금원소 첨가에 따른 열전도성 변화

첨가원소에 의한 Al 합금의 열전도성 변화 관찰을 위해 제조된 시험편에 대한 열전도도를 측정하였다. Laser flash 기법으로 소재의 열확산도를 측정한 후 소재의 비열 및 밀도를 활용하여 열전도도를 계산하였다 [9,10]. 열전도도 및 열확산계수는 재료의 열 전달 특성을 나타내며, 이 두 값의 관계는 식 (1)과 같다.

$$\alpha = \frac{\kappa}{c_p \cdot \rho} \quad (1)$$

여기서 α 는 열확산계수, κ 는 열전도도, C_p 는 비열, ρ 는 밀도이다. 그림 1(a)~(c)는 서로 다른 금속원소가 첨가된

Fig. 1. Thermal properties of alloys with different additive metals; (a) Thermal diffusivity, (b) Specific heat, (c) Density, (d) Thermal conductivity.

시험편에 대한 열확산계수, 비열 및 밀도를 나타내며, 측정된 값을 수식 (1)에 대입하여 계산한 열전도도 값을 그림 1(d)에 나타내었다. 그림 1(a) 및 (b)를 참조하면 Al 합금의 열확산계수 및 비열은 합금원소의 첨가량이 증가할수록 점차 감소하는 경향을 보인다. 결과적으로 그림 1(d)에 보이는 바와 같이 합금원소의 첨가량이 증가할수록 그에 비례하여 열 방출 특성 또한 감소됨을 알 수 있다. 특히 타원소 대비 Mn 첨가에 의한 열 방출 특성 저하가 가장 컸다. Mn의 열전도도는 $7.81 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로써 Al의 열전도도 값인 $234 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 대비 매우 낮으므로 상기 Mn 첨가에 의한 열 방출 특성 저하는 낮은 Mn의 열전도도로부터 기인된 것으로 사료된다. 따라서 Al 합금의 열전도성 저하 방지를 위해 첨가되는 합금 원소의 함량을 가능한 낮게 조절해야 하며, 그 중에서도 특히 Mn의 함량을 최소한으로 낮게 유지해야 함을 알 수 있다.

3.2 합금원소 첨가에 따른 기계적 특성 변화

고압 다이캐스팅 주조를 위해서는 우수한 주조성과 더불어

Fig. 2. (a) Stress-strain curves and (b) change of tensile strength and elongation according to composition of Cu.

어 취출 후 가공이 용이하도록 Al 합금의 기계적 강도 확보가 선행되어야 한다. 서론에서 언급한 바와 같이 Al 합금의 강도는 Cu와 Mn의 첨가로 향상될 수 있다 [5-7]. 본 연구에서는 앞선 열전도도 분석결과를 토대로 강도 향상을 위한 Mn 첨가는 배제하였고, Cu의 함량만을 0.2~2 wt% 범위로 조절하여 Al 합금의 강도변화를 관찰하였다. 기계적 특성 변화 관찰을 위해 인장시험을 수행하였으며 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 Cu 함량이 증가할수록 시험편의 인장강도는 비례하여 증가하였으며 2 wt% Cu 첨가 시 최고 127.1 MPa를 나타내었다. 반면 연신율은 점차 감소하는 경향을 보여 최소 13%를 나타내었다. 그림 3(a)~(c)는 Cu 함량 변화에 따른 Al 합금시험편의 미세조직을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 Cu 함량이 증가함에 따라 조직 내 Al-Cu 2종 금속간 화합물의 석출량이 증가하였다. Cu 첨가에 의한 조직 내 Al-Cu 석출상 증가 현상을 확인하기 위하여 그림 4에 나타난 바와 같이 FE-SEM으로 미세조직을 분석한 후,

Fig. 3. Microstructure of Al alloys with different Cu composition; (a) Al-1.0wt%Cu, (b) Al-1.5wt%Cu, (c) Al-2.0wt%.

Fig. 4. SEM image of (a) Al-1wt%Cu, (b) Al-1.5wt%Cu and (c) Al-2wt%Cu ($\times 200$) and image analysis data of (d) Al-1wt%Cu, (e) Al-1.5wt%Cu and (f) Al-2wt%Cu ($\times 200$).

Fig. 5. (a) SEM image and (b) EDS results of Al alloy with 2 wt% Cu.

image analysis를 통해 Al-Cu 석출상의 면적 분율을 측정하였다. 분석 결과, Cu 함량이 1, 1.5 및 2 wt%로 증가함에 따라 조직 내 Al-Cu 석출상의 분율이 각각 1.44, 1.74 및 2.35%로 비례하여 증가함을 알 수 있었다. 그림 5에 나타난 FE-SEM 및 EDS 측정결과 이 금속간화합물은 45.6 wt%Al-54.4 wt%Cu로 구성된 Al_2Cu 석출상임을 알 수 있었으며 Cu 첨가에 의한 Al 합금의 인장강도 증가는 조직 내 Al_2Cu 석출물의 증가에 기인하는 것으로 판단된다 [11]. 본 연구자들은 상기 연구결과를 기초하여 시험편에 대한 반복적인 가공 테스트를 수행하였으며, 이를 통해 Al 합금의 인장강도는 최소 100 MPa 이상 확보되어야 하며, 이는 1 wt% 이상의 Cu를 첨가함으로써 달성할 수 있음을 알 수 있었다.

3.3 합금원소 첨가에 따른 용탕의 유동성 변화

용해 잠열이 높은 Si은 Al 용탕의 유동성을 향상시키는 원소로 잘 알려져 있다 [4,12]. Si 첨가량 변화에 따른 Al 합금 용탕의 유동성 변화 관찰을 위해 Si을 1~2 wt% 첨가한 Al 합금을 다이캐스팅 주조하였다. Si 첨가 전 Al 합금의 최소 강도(> 100 MPa) 확보와 금형의 소착 저항성 향상을 고려하여 1 wt%의 Cu와 0.6 wt%의 Fe를 첨가하였다 [13]. 비교를 위해 일반 다이캐스팅 주조에 널리 사용되는 Al 합금(ALDC12) 또한 동일한 조건으로 제조하였다. 제조된 Al 합금의 조성은 표 2와 같다. Al 합금의 유동성

Table 2. Chemical composition of Al alloys with various metal additives (wt%).

Alloy	Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Al
1	1.0	0.6	1.0	-	-	Bal.
2	1.5	0.6	1.0	-	-	Bal.
3	2.0	0.6	1.0	-	-	Bal.
ALDC12	11.0	0.8	2.5	0.2	0.3	Bal.

Fig. 6. (a) Schematic of metal mold and (b) injection speed profile for fluidity test.

측정을 위해 그림 6(a)와 같은 서펜타인(Serpentine) 형태의 금형으로 다이캐스팅 주조한 후 응고된 주조시편의 길이를 측정하였다. 금형의 플런저 직경 및 슬리브 길이는 각각 70 mm 및 475 mm이었으며 다이캐스팅 주조압력은 60 MPa로 고정하였다. 저속구간과 고속구간의 사출 속도는 그림 6(b)에 나타난 바와 같이 각각 0.75 m/sec와 1.0 m/sec로 제어하였다.

그림 7에 다이캐스팅 주조된 시험편의 외형과 측정된 최종 길이를 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 Si 함량이 증가됨에 따라 시험편의 길이가 비례하여 증가함을 알 수 있다. 제조된 시험편 중 Si를 10 wt% 이상 함유한 다이캐

Fig. 7. Results of die casting fluidity test; (a) Schematic of die cast specimens, (b) flow length.

스팅용 ALDC12 합금이 가장 우수한 유동특성을 보였다. 이러한 Si 함량 증가에 따른 유동성 향상은 Al 대비 높은 Si의 응고 잠열 때문인 것으로 사료된다. Si의 응고 잠열은 350 cal/gm으로써 Al의 응고잠열 값인 95 cal/gm 대비 약 3.7배 높다 [14]. Si의 함량을 변화시킨 합금을 비교한 결과 Si가 2 wt% 첨가된 Al 합금이 가장 우수한 유동 특성을 보였으며, 이는 ALDC12 합금 대비 약 85% 수준으로 평가되었다.

Si 함량변화에 따른 Al 합금의 열전도성 변화를 관찰하기 위해 제조된 시험편에 대한 열확산계수를 측정하였다. 그림 8(a)는 각각의 시험편에 대한 열확산계수, 비열 및 밀도 값을 나타낸다. 예상한 바와 같이 Si의 함량이 증가함에 따라 시험편의 열확산계수는 서서히 감소하였으며 Si 함량이 10 wt% 이상 첨가된 ALDC12의 경우 Si 함량 변화에 대비 매우 낮은 열확산계수를 보였다. 분석값을 활용하여 각각의 시험편에 대한 열전도도를 계산한 후 그 값을 그림 8(b)에 나타내었다. Si 함량이 1 wt%일 때 185.7 W/m·K였던 열전도도 값은 Si 함량이 2 wt%로 증가함에 따라 172.7 W/m·K로 감소하였다. 주목할 점은 Si 함량이 10 wt% 이상 첨가되어 우수한 주조성을 보였던 ALDC12 합금은 열전도도가 108.4 W/m·K로써 열방출 특성이 매우

Fig. 8. (a) Thermal properties and (b) Thermal conductivity of alloys with different additive metals.

열위하여 방열부품 제조에 부적합함을 알 수 있다.

3.4 방열부품 제작 및 성능 평가

첨가원소에 의한 Al 합금의 열전도성 및 주조성 변화를 관찰하기 위해 자동차 음향기기에 사용되는 방열 부품을 다이캐스팅 기법으로 제작하여 성능을 비교 평가 하였다. 주조품의 형상 및 크기를 그림 9에 나타내었으며 조성은 표 2를 따랐다. 부품 제작을 위해 350 ton 다이캐스팅 머신을 이용하였고 그 조건으로 60 MPa의 주조압력과 함께 저속 구간 및 고속구간의 사출속도를 각각 0.8 및 2.5 m/sec로 제어하였다. 그림 10은 상기 조건으로 다이캐스팅 제조된 방열 부품의 외관을 나타낸다. Si 함량이 1.5 wt% 이하인 합금 조성에서는 공통적으로 그림 10(a)와 같이 제품표면에 균열이 발생하였다. 이 결함은 임계온도 구간에서 액막에 의해 약해진 결정립계가 수축응력 및 구속력을 견디지 못해 발생하는 입계균열(Intergranular cracking)이며 다이캐스팅 주조 시 용탕의 유동성이 확보되지 않아 발생한 것으로 사료된다. 그림 10(b)에 나타난 바와 같이 Si를 2 wt% 이상 첨가한 경우 표면에 균열결함이 발생하지 않았으며, 주조성이 우수한 ALDC12 (그림 10(c))와 동등한 표면특성을 갖는 부품 제작이 가능하였다. 추후 정밀도가 더 우

Fig. 9. Die cast heat sink component (car audio heat sink).

Fig. 10. Diecast car audio heat sink component with various alloy compositions; (a) Al-1.0 wt%Cu-0.6 wt%Fe-1.5 wt%Si, (b) Al-1.0 wt%Cu-0.6 wt%Fe-2.0 wt%Si, (c) Al-2.5 wt%Cu-0.8 wt%Fe-11 wt%Si-0.2 wt%Mg-0.3 wt%Mn (ALDC12).

수한 다이캐스팅 주조를 위해 첨가원소에 대한 추가적인 개발 및 조건 최적화가 필요하다고 판단되지만, 본 연구를 통해 도출된 Al-1 wt%Cu-0.6 wt%Fe-2 wt%Si 합금조성은 기계가공을 위한 강도 확보와 더불어 ALDC12 합금

대비 약 85% 수준의 유동 길이, 2배 이상의 열전도도값을 보여, 다이캐스팅 주조기법을 활용한 자동차 음향기기용 방열부품 제조에 적합할 것으로 판단된다.

방열부품을 제작한 결과 표면특성이 우수하고 ALDC12 합금 대비 2배 이상의 높은 열전도도값을 갖는 다이캐스팅 제품 제작이 가능하였다.

4. 결 론

고압 다이캐스팅용 Al 합금의 열전도성 및 주조성에 미치는 첨가 원소의 영향을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

1. 첨가원소에 따른 열전도성 변화 관찰결과, 알루미늄의 주조 특성 향상을 위해 통상적으로 첨가되는 금속원소의 함량이 증가할수록 열전도도는 감소하였다. 특히 타 원소 대비 Mn 함량 증가에 따른 열 방출 특성 저하가 두드러졌으며, Mn 조성은 최소한으로 낮게 유지해야 함을 알 수 있었다.

2. Al 합금 내 Cu 함량이 증가함에 따라 Al_2Cu 금속간 화합물의 석출량이 증가하였으며 그와 비례하여 인장강도도 증가하였다. 다이캐스팅 제조 후 가공이 용이하며 변형이 없는 건전한 주조품의 최소 인장강도는 100 MPa이었으며 최소 강도 확보를 위한 Cu의 함량은 1 wt% 였다.

3. Si 함량이 증가함에 따라 합금의 유동성이 증가하였으며, 2 wt%의 Si를 함유한 Al 합금의 유동 길이는 주조성이 우수한 일반 다이캐스팅용 ALDC12 합금 대비 약 85% 수준이었다.

4. 본 연구에서 도출된 Al-1.0 wt%Cu-0.6 wt%Fe-2.0 wt%Si 합금 조성을 활용하여 자동차 음향기기에 사용되는

REFERENCES

1. K. P. Keller, IEEE, 10.1109/ITHERM, 112 (1998).
2. K. Keller, IEEE, 10.1109/IEMTE, 113 (1998).
3. J. R. Davis, ASM, 10.1361/autb, 351 (2001).
4. C. R. Loper, Jr., *AFS Trans.* 533 (1992).
5. C. Mascré, *Fonderie*, **108**, 4330 (1995).
6. H. Y. Kim, S. W. Han, and H. M. Lee, *Mater. Lett.* **60**, 1880 (2006).
7. S. S. Sreeja Kumari, R. M. Pillai, T. P. D. Rajan, and B. C. Pai, *Mater. Sci. & Eng. A* **460-461**, 561 (2007).
8. L. A. Naraynan, F. H. Samuel, and J. E. Gruzleski, *Metall. Mater. Trans. A* **26A**, 2161 (2004).
9. W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler, and G. L. Abbott, *J. Appl. Phys.* **32**, 1679 (1961).
10. R. D. Cowan, *J. Appl. Phys.* **34**, 926 (1963).
11. R. A. Goncalves, *Procedia Manuf.* **1**, 683 (2015).
12. L. F. Mondolfo, "Aluminum Alloys: Structure and Properties", Butter Worths (1976).
13. H. J. Kim, C. M. Cho, and C. Y. Jeong, *J.KFS*, **29**, 169 (2009).
14. D. K. Lewis, "Silicon and Its Effect on Fluidity of Aluminum Alloys.", A.S.&R. Co., Inc, Data Sheet.