[논문] 열처리공학회지, 제31권 제6호(2018)
J. of the Korean Society for Heat Treatment.
https://doi.org/10.12656/jksht.2018.31.6.300

아공정 Al-Si-Cu-Mg 합금의 액상선 온도 곡선 예측

김근학* · 박동성* · 오승진* · 전준협* · 윤상일** · 김기선** · 김태영** · 이석재*,†
*전북대학교 신소재공학부, **㈜삼기오토모티브 기술연구소

Prediction of the Liquidus Temperature Curve for Hypoeutectic Al-Si-Cu-Mg Alloy

Keunhak Kim*, Dongsung Park*, Seung-Jin Oh*, Junhyub Jeon*, Sang-Il Yoon, Ki-Sun Kim**, Tae-Young Kim**, Seok-Jae Lee*,†**
**Division of Advanced Materials Engineering, Chonbuk National University*
***Technical Research Center, Samkee Automotive*

Abstract In the present study we proposed new equations to predict the liquidus temperature curve for hypoeutectic Al-Si-Cu-Mg alloy. A thermodynamic simulation was carried out to calculate the liquidus temperature, eutectic temperature and eutectic Si concentration with different Si, Cu, and Mg contents in hypoeutectic Al-Si alloys. Regressed equations were derived using the thermodynamic simulation results by multiple regression analysis. The proposed equations were compared with the equations reported previously by other researchers and agreed better with the experimental data. The addition of Cu and Mg lowered the eutectic temperature. The eutectic Si concentration was decreased by adding Cu whereas that was increased by adding Mg. Al-Si binary phase diagram was successfully predicted with a consideration of the effect of Cu and Mg addition by using the proposed equations.

(Received October 2, 2018; Revised October 15, 2018; Accepted November 6, 2018)

Key words : *hypoeutectic Al-Si-Cu-Mg alloy, phase transformation temperature, thermodynamic calculation*

1. 서 론

대표적인 경량 합금인 Al 소재 가운데 주조용 Al-Si 합금은 낮은 응고 온도, 뛰어난 주조성, 우수한 부식 저항성, 높은 전기 전도도와 열 전도도, 그리고 좋은 가공성 등의 장점으로 인하여 다양한 자동차 부품 소재로 널리 사용되고 있다. Si의 첨가는 주조성과 유동성을 향상시키고 응고 시 부피 증가로 인해 응고 수축율을 감소시키는 효과가 있다. 동시에 Si 첨가에 따른 고액 공존 온도범위의 조절이 용이하여 복잡한 형상의 주물 제작에 적합하다. Si 첨가에 따른 고용강화 효과는 미비하나 Mg_2Si 석출상 형성에 의한 석출강화 효과로 우수한 기계적 성질을 확보할 수 있다. Si과 함께 Cu와 Mg은 주조용 Al-Si 합금의 주요 합금 원소이다. Cu 첨가는 Al_2Cu 상과 Al_2MgCu 상의 석출을 통해 상온 및 고온 강도를 향상시키고 절삭성을 개선시키는 효과가 있다[1, 2]. Mg는 열처리 이후의 경도와 강도 향상을 목적으로 첨가되며 인성이나 주조 건전성 등에 기여하는 것으로 보고되고 있다[3, 4].

우수한 기계적 성질의 Al-Si-Cu-Mg 합금은 일반적인 주조용 Al 합금과 마찬가지로 응고 시 발생되는 다양한 물리적 또는 야금학적 현상들에 의해 크게 영향을 받는다. Al 합금 응고에 대한 실험적 연구나 시뮬레이션을 통한 응고 해석을 위해서 냉각 중 응고가 일어나는 정확한 액상선 온도(liquidus temperature, T_{Liq})를 아는 것이 필수적이다. Al 합금의 합금 조성에 따른 액상선 온도를 계산하는 수식에 대한 연구는 Drossel[5]에 의해 처음 보고되었다. 그는 실험으로 구한 응고 시작 온도 데이터를 이용하여 다음 수식을 제시하였다.

†Corresponding author. E-mail : seokjaelee @jbnu.ac.kr
Copyright ⓒ The Korean Society for Heat Treatment

$$T_{Liq}(^{o}C) = 661 - 4.97Si - 0.15Si^2 - 6.13Cu - 17.4Mg + 2.72Zn + 5.08CuMg \quad (1)$$

첨가 합금은 wt.% 단위이고 실험에 사용된 데이터의 성분 범위는 Si < 9.3%, Cu < 2.5%, Mg < 0.6%, Fe < 1.15%, Mn < 0.4%, Zn < 0.63%, Ni < 0.43%, Ti < 0.05% 이다.

Vijayaraghavan 등[6]은 Al-Si-Cu 합금의 삼원계 상태도로부터 다중회귀 분석을 통해 Si과 Cu 첨가량(wt.%)에 따른 간단한 액상선 온도 예측 수식을 보고하였다.

$$T_{Liq}(^{o}C) = 664 - 6.9Si - 2.5Cu \quad (2)$$

최근에 Robles Hernandez 등[7]은 Al-Si, Al-Cu, Al-Mg 등 Al-X 이원계 상태도에서 응고온도 곡선을 Si, Cu, Mg 등의 합금 원소에 대한 2차 함수로 표현하였다. 합금 성분의 단순한 합을 고려한 평형 Si 계수 개념을 사용하여 다음과 같은 액상선 온도 예측 수식을 제시하고 있다.

$$T_{Liq}(^{o}C) = 660.452 - 6.11(Si + 0.35Cu - 0.027Cu^2 + 0.0258Mg - 0.0088Mg^2) - 0.057(Si + 0.35Cu - 0.027Cu^2 + 0.0258Mg - 0.0088Mg^2)^2 \quad (3)$$

여기서 첨가 합금은 모두 wt.% 단위이다.

아공정 Al-Si 합금에서 액상선 온도 곡선의 범위는 0 wt.% Si(순수 Al)에서 공정 Si 농도까지이다. 공정 Si 농도에서의 온도가 바로 공정 온도이며, 해당 조건이 Al-Si 이원계 상태도의 공정점(eutectic point)이다. Al-Si 합금에서 공정 반응이 일어나는 공정 온도를 예측하는 수식도 문헌 자료와 직접 연구자들이 실험으로 구한 데이터를 이용하여 Mondolfo[8]와 Tenekedjiev 등[9]에 의해 다음과 같은 합금 원소 첨가량(wt.%)의 함수로 제시되었다.

$$T_{Eut}(^{o}C) = 577 - (12.5 / Si)(4.43Mg + 1.43Fe + 1.93Cu + 1.7Zn + 3.0Mn + 4.0Ni) \quad (4)$$

$$T_{Eut}(^{o}C) = 660.452 - (6.11Si + 0.057Si^2)(12.6 / Si) - (3.4Cu + 1.34Fe + 6.3Mg + 1218.9Sr - 32965Sr^2 - 4.293Sb + 186.3Sb^2 - 495.5Sb^3) \quad (5)$$

Table 1. Range of chemical composition for the thermodynamic calculation (wt.%)

Alloy element	Min. value	Max. value	Increment
Si	0.0	12.0	1.0
Cu	0.0	5.0	0.5
Mg	0.0	1.5	0.25

지금까지 Al-Si계 합금에서 실험 데이터나 상태도를 활용하여 액상선 온도와 공정 온도를 예측하는 수식들이 위와 같이 제시되고 있으나 이들에 대한 상호 비교와 다양한 실험 데이터를 활용한 검증에 대해서는 아직 보고된 바가 없다. 본 연구에서는 아공정 Al-Si 합금에서 주요 합금 원소인 Cu와 Mg의 첨가가 액상선 온도와 공정 온도, 그리고 공정 Si 조성에 미치는 영향을 열역학 계산을 통해 분석하고 각 합금 원소간의 상호작용을 고려한 수식을 새롭게 제시하였다. 동시에 다양한 문헌 데이터를 활용하여 기존 수식들과의 예측 정확도를 비교하였다.

2. 예측 식 제안

본 연구에서는 열역학 시뮬레이션 상용 프로그램인 MatCalc[10]를 이용하여 다양한 Al-Si-Cu-Mg 합금 조성에서의 액상선 온도, 공정 온도, 공정 Si 조성을 계산하였다. 열역학 계산은 Table 1과 같이 최소, 최대 범위 내에서 각 증가량만큼 변화하는 Si, Cu, Mg의 합금 조성 조합을 사용하였다. 액상선 온도 변화를 분석하기 위해서 총 1,001개의 Si, Cu, Mg 조성 조합에 대해 냉각 중 응고가 시작되는 온도를 계산하였다. 공정 온도와 공정 Si 조성을 계산하기 위해서는 Cu와 Mg의 함량만을 변화시킨 77개 조성 조합에 대해 열역학 계산을 실시하였다. 열역학 계산 결과들은 다중회귀 분석을 이용하여 아공정 Al-Si-Cu-Mg 합금의 액상선 온도와 공정 온도, 그리고 공정 Si 농도를 합금 원소의 함량(wt.%)로 표현한 아래의 수식을 구하였다.

액상선 온도

$$T_{Liq}(^{o}C) = 660.206 - 5.6828Si - 0.0699Si^2 - 2.4797Cu - 0.0276Cu^2 - 4.7755Mg + 0.0208MG^2 - 0.0435SiCu - 0.0432CuMg + 01749MgSi \quad (6)$$

공정 온도

$$T_{Eut}(^{o}C) = 577.687 - 1.7102Cu - 0.02351Cu^2 - 4.0610Mg + 0.02978Mg^2 - 0.02421CuMg \quad (7)$$

공정 Si 농도

$$Si_{Eut}(wt.\%) = 12.546 - 0.1714Cu - 0.00414Cu^2 + 0.2196Mg + 0.00727Mg^2 - 0.00587CuMg \quad (8)$$

제안된 수식들은 Si, Cu, Mg 합금원소 사이의 상호관계 항을 포함하고 있다. 열역학 계산에 사용된 합금조성에 대해 제안된 수식으로 예측된 결과를 수식을 만드는데 사용된 열역학 계산 결과와 비교함으로써 제안된 수식이 열역학 계산 결과를 잘 반영하는지 확인하였다. 예측 정확도는 평균제곱오차(R^2)를 사용하여 비교하였다. 식 (6), 식 (7), 식 (8)에 대한 평균제곱오차 값은 각각 0.99995, 0.99999, 0.99996 이었다. 제안된 수식들을 이용하면 MatCalc를 사용하여 얻은 열역학 수치들과 거의 동일한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 참고로 주어진 Cu와 Mg 농도에 대해 식 (6)과 식 (7)을 Si에 대한 연립방정식으로 풀면 공정 Si 농도를 계산 가능하다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 제시된 수식들의 신뢰성 검증을 위해 기존 문헌에 보고된 실험 결과들을 수집하였다. 문헌조사를 통해 56개의 아공정 Al-Si 합금들의 액상선 온도를 수집하였다[7, 9, 11-22]. 실험 데이터들의 화학 조성과 액상선 온도 범위를 Table 2에 표시하였다. 비교 실험 데이터들의 Si, Cu, Mg 첨가량의 최대 값은 Table 1에 나타난 바와 같이 제안된 수식을 얻기 위해 사용된 열역학 계산 합금 조성의 최대 값과 거의 동일하다. 따라서 수집된 실험 데이터들은 제안된 식 (6)의 액상선 온도 예측 신뢰성을 평가하는데 적절한 것으로 판단된다.

Fig. 1은 액상선 온도 예측을 위해 기존에 보고된 수식들과 본 연구에서 제시된 수식을 이용하여 Table 2에 명시된 실험 데이터들을 예측한 결과이다. 예측 결과의 정량적인 비교를 위해서 식 (9)와 식 (10)과 같이 2개의 매개 변수를 사용하였다. 매개 변수 D는 그림의 X-Y중앙선과 각 포인트 사이의 평균 절대 거리를 나타내고 매개 변수 E는 그림의 X-Y중앙선과 각 포인트 사이의 평균 거리를 부호와 함께 나타낸다. N은 실험 데이터의 수이고 T_i^{CAL}과 T_i^{EXP}는 각각 계산 온도와 실험 온도를 의미한다. D 값이 작을수록 예측 온도와 실제 온도가 잘 일치함을 의미한다. E 값은 평균적으로 예측된 온도가 실제 온도보다 높게 예측이 됐는지 혹은 낮게 예측이 됐는지를 알려준다. 예를 들어 E 값이 양수를 보이면 예측된 결과가 평균적으로 실제 값보다 높다는 것을 의미한다. 본 연구에서 제시된 식 (6)을 사용한 액상선 온도 예측에서 D 값과 E 값이 모두 가장 우수한 결과를 보였다. 식 (1)은 Zn 첨가의 영향과 Cu와 Mg의 상호관계를 나타내는 항이 포함되어 있으나 수식을 만드는데 사용된 실험 데이터의 Si, Cu, Mg 범위가 비교 실험 데이터인 Table 2의 범위보다 좁아서 가장 낮은 예측 신뢰도를 보이고 있다. 식 (2)는 Mg을 제외한 Si와 Cu의 선형적 효과만을 고려하였음에도 불구하고 각 원소의 2차 함수 형태의 평형 Si 계수 개념을 사용한 식 (3)과 거의 유사한 예측 결과를 보였다. 이는 비교 실험 데이터의 Mg 첨가량이 Si이나 Cu와 비교하여 상대적으로 낮아서 그 효과가 적었을 수 있다. 식 (3)은 실질적으로 Cu와 Mg의 4차항까지 포함하고 있다. 일반적으로 실험 데이터로부터 회귀분석에 의한 수식을 만들 때 변수의 차수가 높아지고 식이 복잡해질수록 사용된 데이터에 대한 예측 정확도는 올라가지만 새로운 조건에 대한 예측 정확도는 어느 한계 이상일 경우 오히려 떨어지게 된다[23]. 이로 인해서 식 (2)와 식

Table 2. Ranges of chemical composition and liquidus temperature for the experimental data used in the present study [7, 9, 11-22]

Si (wt.%)	Cu (wt.%)	Mg (wt.%)	Zn (wt.%)	Fe (wt.%)	Mn (wt.%)	Ti (wt.%)	T_{Liq} (°C)
4.85	0	0	0	0	0	0	565.7
12	4.68	1.55	0.51	0.52	0.11	0.17	626.8

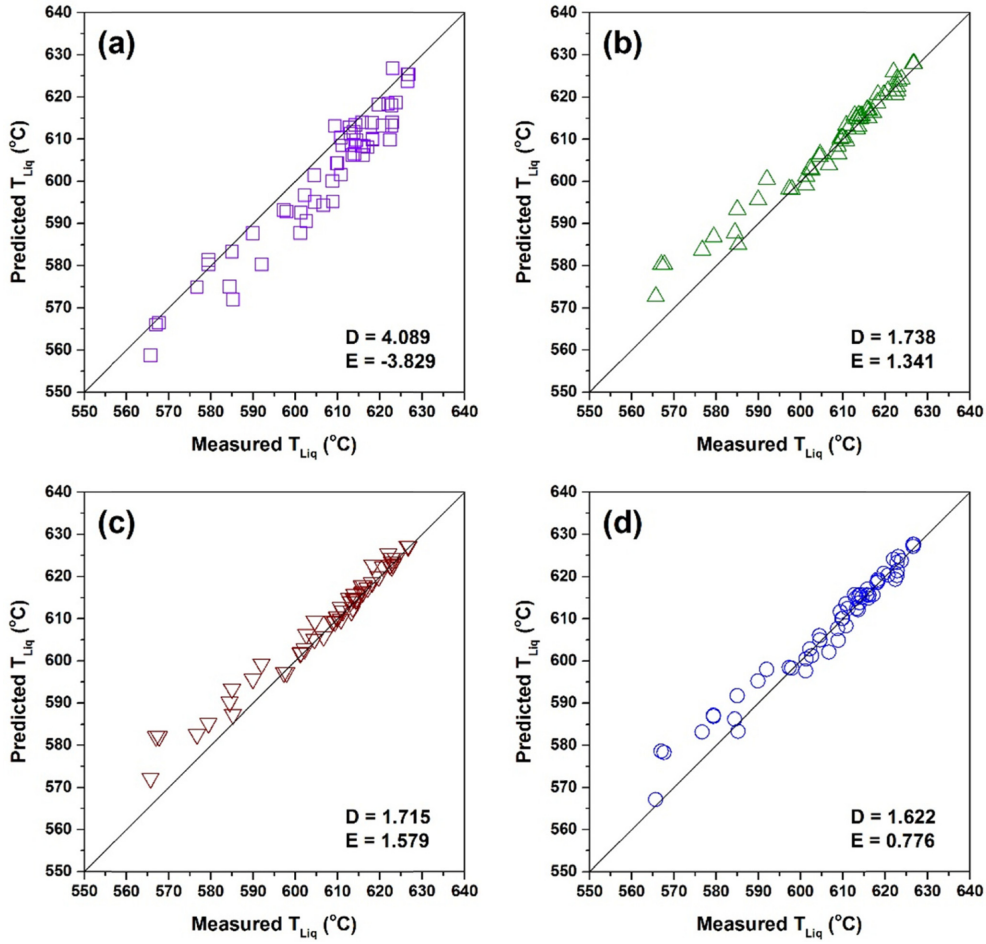

Fig. 1. Predicted liquidus temperature compared with experimental data referred in Table 2. Different equations were used: (a) Eq. (1), (b) Eq. (2), (c) Eq. (3), and (d) Eq. (6).

(3)이 유사한 예측 경향을 보이는 것으로 생각된다.

$$D = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\left|T_i^{CAL} - T_i^{EXP}\right|}{\sqrt{2}}\right) \quad (9)$$

$$E = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{T_i^{CAL} - T_i^{EXP}}{\sqrt{2}}\right) \quad (10)$$

제안된 공정 온도 예측 식 (7)의 예측 신뢰성 평가를 위해 문헌에서 아공정 Al-Si 합금의 화학 조성과 공정 온도에 대한 19개의 실험 데이터를 수집하였다[7, 9, 18, 20-22]. 실험 데이터들의 화학 조성과 공정 온도 범위는 Table 3과 같다. 식 (7)을 유도하는데 사용된 열역학 계산 합금 조성은 Table 3에 보여준 비교 실험 데이터들의 Si, Cu, Mg 조성 범위를 모두 포함하고 있다.

Fig. 2는 공정 온도 예측을 위해 기존에 보고된 수식들과 본 연구에서 제시된 수식을 이용하여 Table 3에 명시된 실험 데이터들 예측한 결과이다. Fig. 1의 액상선 온도 예측식 비교에 사용된 동일한 매개 변수 D와 E를 사용하였다. Fig. 2(a)에서 식 (4)로 예측된 결과는 실제 값보다 모두 낮은 예측 결과를 보이고 있다. Fig. 2(b)와 같이 식 (5)를 사용하여 계산된 공정 온도는 식 (4)의 결과보다는 예측 정확도가 높았으나 평균적으로 예측된 값들이 실제 값보다 낮은 결과를 보이고 있다. 본 연구에서

Table 3. Ranges of chemical composition and eutectic temperature for the experimental data used in the present study [7, 9, 16, 20-22]

Si (wt.%)	Cu (wt.%)	Mg (wt.%)	Zn (wt.%)	Fe (wt.%)	Mn (wt.%)	T_{Eut} (°C)
4.85	0.01	0.01	0	0.08	0	562.4
10.92	4.38	1.28	0.51	0.52	0.11	576

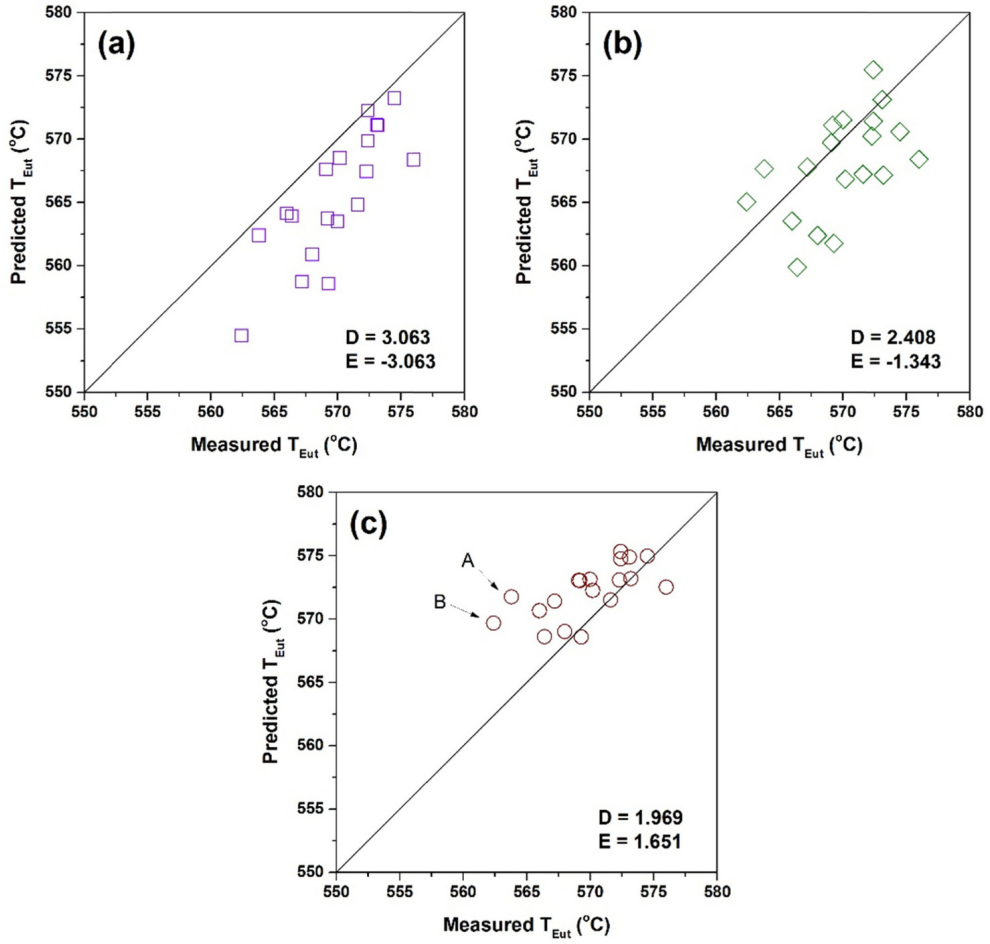

Fig. 2. Predicted eutectic temperature compared with experimental data referred in Table 3. Different equations were used: (a) Eq. (4), (b) Eq. (5), and (c) Eq. (7).

제시된 식 (7)을 사용한 공정 온도 예측 결과가 가장 낮은 D값을 보였다. 이는 식 (7)으로 예측된 공정 온도가 실제 공정 온도를 가장 정확하게 예측함을 의미한다. 하지만 E 값은 1.651로 평균적으로 예측된 공정 온도가 실제 값보다 높았다. 예측 공정 온도와 가장 차이가 큰 포인트 A와 B의 화학 조성은 각각 5.9Si – 3.3Cu – 0.01Mg – 0.07Zn – 0.21Fe – 0.02Mn과 4.89Si – 3.85Cu – 0.26Mg – 0.01Zn – 0.13Fe – 0.01Mn(wt.%)이다. 상대적으로 Si 함량이 낮은 조성에서 예측 결과의 정확도가 떨어졌다. 이는 제시된 수식에 고려된 Si Cu, Mg 외 Zn, Fe, Mn 첨가에 따른 효과가 반영되지 않은 이유로 생각된다. 따라서 향후 Zn, Fe, Mn 첨가 효과를 모두 고려한 개선된 수식을 이용하면 좀 더 신뢰성 높은 예측이

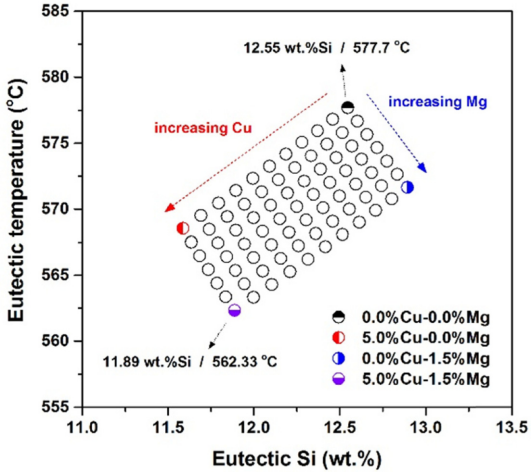

Fig. 3. Effect of Cu and Mg addition on the eutectic temperature and eutectic Si concentration.

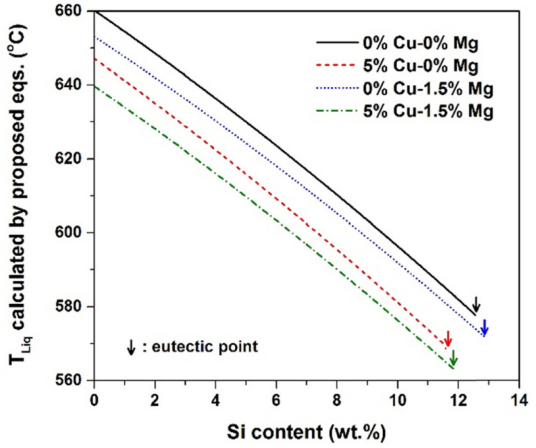

Fig. 4. Al-Si phase diagram calculated by the proposed equations.

가능할 것으로 기대한다.

Al-Si 합금에서 Cu와 Mg 첨가에 따른 공정 온도와 공정 Si 농도의 변화를 본 연구에서 제시된 식 (7)과 식 (8)을 이용하여 Fig. 3에 나타냈다. 이원계 Al-Si 합금의 공정 온도는 577.7°C이고 공정 Si는 12.55 wt.%이다. Cu를 첨가하면 공정 온도와 공정 Si 농도는 모두 감소하지만 Mg을 첨가하면 공정 온도는 감소하지만 공정 Si 농도는 증가한다. Al-Si 합금에서 Cu첨가[24]와 Mg 첨가[25]에 따른 공정 온도의 감소를 실험을 통해 관찰한 연구들이 보고된 바 있다. 이들 연구에서는 Cu나 Mg 첨가에 따른 미세조직 변화 특성 등을 관찰하여 상변태 온도 변화에 대해 설명하고 있다.

Fig. 3은 제시된 수식에 사용된 Cu와 Mg 첨가량의 최대 한계인 각각 5.0 wt.%와 1.5 wt.%까지 첨가된 경우에 대해 계산한 결과를 보여준다. 5% Cu와 1.5% Mg를 모두 첨가한 경우 공정 온도는 15.34°C, 공정 Si 농도는 0.66 wt.% 씩 모두 감소한다. 개별 조성 구간에서의 평균 변화 정도를 비교하면 단위 wt.% 첨가에 따른 공정 온도의 변화는 –1.8277°C/wt.% Cu와 –4.0164°C/wt.% Mg로 Cu보다 Mg 첨가가 공정 온도 감소 효과가 더욱 컸다. 공정 Si 농도 변화에 대해서도 Cu 1.0 wt.% 첨가에 따라 공정 Si 농도는 0.1921 wt.% 감소하지만 Mg 1.0 wt.% 첨가에 대해서는 0.2305 wt.% 만큼 공정 Si가 증가하는 것을 확인하였다. 아공정 Al-Si 합금에서 아공정의 기준이 되는 공정 Si 농도와 공정 온도는 Cu와 Mg 첨가에 대해 서로 다른 효과를 보이며 이는 식 (7)과 식 (8)을 이용하여 정확한 값을 계산할 수 있다.

Fig. 4는 본 연구에서 제안한 아공정 Al-Si-Cu-Mg 합금에 대한 액상선 온도, 공정 온도, 공정 Si 농도 예측 수식을 모두 이용하여 예측된 Al-Si 이원계 상태도를 보여주고 있다. Cu와 Mg 첨가에 따라 액상선 온도 곡선와 공정 온도는 모두 감소한다. 하지만 Fig. 3에서 확인한 바와 같이 Mg의 첨가는 공정 Si 농도를 높이는 효과가 있으며 액상선 온도 곡선을 늘리는 결과를 보인다. 정확한 액상선 온도는 응고 시뮬레이션의 해석 결과의 정확성 확보를 위해 매우 중요하다. 본 연구에서 제시된 수식들을 활용하면 더욱 신뢰성 높은 응고 해석 시뮬레이션이 가능할 것으로 기대한다.

4. 결 론

이번 연구에서는 아공정 Al-Si-Cu-Mg 합금의 액상선 온도 곡선 예측을 위한 액상선 온도, 공정 온도, 그리고 공정 Si 농도 예측이 가능한 수식을 새롭게 제안하였다. 제안된 액상선 온도 예측 수식과 공정 온도 예측 수식은 다양한 문헌 실험 데이터를 활용하여 기존 수식들과 비교 평가를 실시하였다. 새

롭게 제시된 수식들이 기존에 보고된 수식들보다 높은 예측 정확도를 보였다. 새롭게 제시된 수식들을 활용하여 아공정 Al-Si-Cu-Mg 합금의 액상선 온도 곡선을 성공적으로 예측하였다. 따라서 본 연구에서 제시된 수식들을 이용하여 아공정 Al-Si 합금에서 Cu와 Mg를 첨가하여 새로운 합금을 설계할 때 기존 수식들을 이용하는 것보다 좀더 정확한 액상선 온도 곡선 예측이 가능하다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부, 중소벤처기업부의 재원으로 월드클래스300프로젝트 기술개발지원사업 지원에 의하여 이루어진 것임(과제번호 : S2521594).

References

1. I. B. Chyun, S. P. Hong and C. S. Kim : J. Korean Soc. Heat Treat., **27** (2014) 281.
2. S. G. Park and C. S. Kim : J. Korean Soc. Heat Treat., **31** (2018) 97.
3. S. J. Lee, S. K. Lee and N. I. Baik : J. Korean Soc. Heat Treat., **13** (2000) 108.
4. M. Yıldırım and D. Özyürek : Mater. Design, **51** (2013) 767.
5. G. Drossel : Giessereitechnik, **27** (1981) 7.
6. R. Vijayaraghavan, N. Pelle, J. Boileau, J. Zindel and F. Bradley : Scr. Mater., **35** (1996) 861.
7. F. C. Robles Hernandez, M. B. Djurdjevic, W. T. Kierkus and J. H. Sokolowski : Mater. Sci. Eng. A, **396** (2005) 271.
8. L. F. Mondolfo : Aluminum alloys, Structure and Properties, 1st ed, Butterworths, London, England (1976), 213.
9. N. Tenekedjiev, H. Mulazimoglu, B. Closset and J. Gruzleski : Microstructures and Thermal Analysis of Strontium-Treated Aluminium-Silicon Alloys, American Foundryman's Society, Inc. Des Plaines, Illinois, USA (1995) 1.
10. MatCalc software. Available online: http://www.matcalc.at.
11. A. R. E. Singer and S. A. Cottrell : J. Inst. Metals, **73** (1947) 33.
12. L. Bäckerud, G. Chai and J. Tamminen : Solidification Characteristics of Aluminum Alloys, vol. 2, Foundry Alloys, American Foundrymen's Society. Inc., Oslo, Norway (1990) 266.
13. S. C. Jeng and S. W. Chen : Mater. Sci. Forum, **217-222** (1996) 283.
14. K. Kobayashi, P. H. Shingu and R. Ozaki : Scr. Metall., **10** (1976) 525.
15. B. P. Winter, T. R. Ostram, T. A. Sleder, P. K. Trojan and R. D. Pehlke : AFS Transactions, **87** (1993) 259.
16. J. Morice: Proceedings from the Conference on Thermal Analysis of Molten Aluminum, Rosemont, Illinois, (1984) 37.
17. J. Carbonier and C. Rechiney : Proceedings from the Conference on Thermal Analysis of Molten Aluminum, Rosemont, Illinois, (1984) 121.
18. A. Kearney: Proceedings from the Conference on Thermal Analysis of Molten Aluminum, Rosemont, Illinois (1984) 169
19. M. B. Djurdjevic, S. Manasijevic, Z. Odanovic and R. Radisa: Int. J. Mater. Res., **104** (2013) 865.
20. M. B. Djurdjevic and I. Vicario : Revista de Metalurgia, **49** (2013) 340.
21. M. B. Djurdjevic, W. T. Kierkus, G. E. Byczynski and J.H. Sokolowski: AFS Transactions, **47** (1998) 143.
22. A. N. Lakshmanan, S. G. Shabestari and J. E. Gruzelski : Z. Metall., **86** (1995) 457.
23. H. Kim, J. Inoue, M. Okada and K. Nagata : ISIJ Int., **57** (2017) 2229.
24. R. Maniara, L. A. Dobrzański, M. Krupiński and J. H. Sokołowski : Arch. Foundry Eng., **7** (2007) 119.
25. I. Aguilera-Luna, M. J. Castro-Román, J. C. Escobedo-Bocardo, F. A. García-Pastor and M. Herrera-Trejo: Mater. Charac., **95** (2014) 211.