

일방향 응고에 의한 금속급 실리콘 중 Fe 제거

사공성대* · 손인준** · §손호상**

*경북대학교 신소재공학부(현 GRM), **경북대학교 신소재공학부

Removal of Fe from Metallurgical Grade Si by Directional Solidification

Seong-Dae Sakong*, Injoon Son** and §Ho-Sang Sohn**

*GRM, Danyang-gun, Chungcheongbuk-do 27008, Korea

**School of Materials Science and Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

요 약

태양전지용 실리콘은 주로 반도체급 실리콘 제조공정에서 발생하는 규격외 실리콘을 사용하여 왔다. 태양전지의 보급 활성화를 위해서는 보다 저렴한 정제 공정의 개발이 필요하다. 태양전지용 실리콘을 위한 저비용이면서 효율적인 방법은 금속급 실리콘을 정제하여 고순도화하는 것이다. 본 연구에서는 금속급 용융 실리콘 중의 Fe를 제거하기 위해 고주파 유도로 중에서 일방향 응고를 실시하였다. 실험 조건과 실험결과를 유효 편석계수, Scheil 식 및 Peclet 수로 평가하였다. 시료의 하강속도가 감소함에 따라 불순물의 매크로 편석과 잉곳의 순도가 증가하였다. 이러한 결과는 시료의 하강속도 감소에 따른 유효 편석계수의 감소에 의한 것으로 생각된다.

주제어 : 태양전지, 금속급 실리콘, 일방향 응고, 철, 편석계수

Abstract

Solar grade silicon (SoG-Si) has been commercially supplied mainly from off-grade high-purity silicon manufactured for electronic-grade Si (EG-Si). Therefore, for wider application of solar cells, the development of a refining process at a considerably lower cost is required. The most cost-effective and direct approach for producing SoG-Si is to purify and upgrade metallurgical-grade Si (MG-Si). In this study, directional solidification of molten MG-Si was conducted in a high-frequency induction furnace to remove iron from molten Si. The experimental conditions and results were also discussed with respect to the effective segregation coefficient, Scheil equation, and Peclet number. The study showed that when the descent velocity of the specimen decreased, the macro segregations of impurities and ingot purities increased. These results were derived from the decrease in the effective segregation coefficient with the decrease in the rate of descent of the specimen.

Key words : solar cell, metallurgical grade silicon, directional solidification, iron, effective segregation coefficient

1. 서 론

태양광 발전은 깨끗하고 재생 가능한 에너지로서 주목

을 받고 있으며, 탄소중립(carbon neutral) 운동에 의해 더 많은 관심이 주어지며 태양전지 수요는 더욱더 늘어날 것으로 예상된다. 결정계 Si를 이용한 태양전지는 신뢰성이나

· Received : May 10, 2021 · Revised : June 3, 2021 · Accepted : June 12, 2021

§ Corresponding Author : Ho-Sang Sohn (E-mail : sohn@knu.ac.kr)

School of Materials Science and Engineering, Kyungpook National University, 80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. 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.

태양 에너지로부터 전기 에너지로의 변환 효율 등의 점에서 다른 종류를 능가하여, 전 세계 태양광 발전량의 약 80%를 점유하고 있지만, 반도체 제조공정에서 발생하는 규격외 스크랩을 원료로 사용하므로 공급량 및 가격이 반도체 산업의 경기 동향에 좌우되고 있다. 태양광 발전량을 확대하기 위해서는 저가격의 원료원을 안정적으로 확보하는 것이 필요하며, 상대적으로 저가인 금속급 Si(MG-Si, metallurgical grade silicon, >98%)을 야금학적인 방법으로 태양전지가 요구하는 순도(>7 N)까지 정제할 수 있다면 저비용으로 태양전지용 Si(SoG-Si, solar grade silicon)을 공급하는 것이 가능하여 많은 관심이 주어지고 있다¹⁾.

지금까지 제안된 태양전지용 Si 원료의 제조 기술은 화학적 제조법과 야금학적 제조법으로 나눌 수 있다. 화학적 제조법에는 실란가스(silane, SiH₄)나 삼염화실란(TCS, trichlorosilane, SiHCl₃)을 경유하는 반도체급 실리콘(EG-Si, electronic grade silicon, >11 N)의 제조 프로세스를 태양 전지용으로 개량한 방법¹⁾이 있으나, 제조 비용이 높은 문제점이 있다. MG-Si를 야금학적으로 정제하는 방법에는 산 처리법^{2,4)}, 슬래그 처리법⁵⁾, 진공용해 정제법^{6,7)}, 일방향 응고 정제법⁸⁾, 용매 이용법^{9,10)} 등이 있다. 이러한 각각의 처리법에서 제거 가능한 원소는 한정되어 있으므로 각 방법 단독으로는 SoG-Si이 요구하는 순도까지 정제할 수는 없으나, 적절한 조합에 의해 SoG-Si로의 정제가 가능할 것이다.

한편 일방향 응고에 의한 정제법은 액상 시료의 응고시 일어날 때 불순물의 고상과 액상 사이의 편석(분배)을 이용하는 것으로, 불순물의 편석(분배) 계수(고상 내 불순물 농도/액상 내 불순물 농도)에 따른 거동을 이용한 정제 방법이다¹¹⁾. Si 내 대부분의 불순물은 용점 직하의 온도에서 고상과 액상 내의 농도가 다르며, 편석계수(segregation or partitioning coefficient)가 낮은 불순물일수록 고상 내에서의 농도는 현저하게 낮아진다. 따라서 용융된 시료가 가열부를 벗어나게 되면 불순물은 가열부 내의 액상 영역으로 분배되어 마지막으로 응고되는 영역에 농축되어 고순도화시키는 방법이다.

이러한 일방향 응고시의 불순물 편석은 응고 조건에 따라 큰 차이가 난다. 따라서 본 연구에서는 MG-Si의 야금학적인 정제 프로세스 개발을 위한 기초연구로서 일방향 응고 조건에 따른 Fe의 제거 거동에 대하여 조사하였다.

2. 이론적 배경

일방향 응고에 의한 정제는 시료가 용융될 때 고상/액상 사이에서의 용질 성분의 편석을 활용하는 방법이며, 용질 성분의 편석계수를 지표로 사용하고 있다. 용질 성분 *i*의 평형 편석계수 k_0 는 다음과 같다.

$$k_0 = C_s^* / C_l^* \tag{1}$$

여기서 C_s^* 와 C_l^* 는 각각 고액 계면에서 고체와 액체 중의 용질 농도(ppm)를 나타내며, 2원계 상태도에서 고상선과 액상선에서의 농도이다. 실제 상태도에서는 고상선과 액상선이 완전한 곡선이지만 여기서는 직선이고 그 비율이 일정한 것으로 가정하고 있다. Table 1에는 Si 중 주요 불순물들의 평형 편석계수값을 SoG-Si에서의 요구 수준과 함께 나타내었다^{6,8,12)}.

고상로의 평형 편석계수가 상대적으로 높은 B, P 등은 제거가 곤란하지만, 편석계수가 낮은 금속 불순물의 제거에는 매우 유효한 방법이 된다. B, P 등을 제외한 대부분의 금속 불순물들은 낮은 평형 편석계수를 가지는 것을 알 수 있다. 특히 MG-Si의 대량 불순물인 Fe(300~25,000 ppm)는 B 등에 비하여 평형 편석계수가 현저하게 낮아(6.4×10^{-6}) 일방향 응고로 정제할 수 있으며, 그 외의 평형 편석계수가 낮은 금속 불순물도 함께 제거할 수 있다.

Table 1. Impurity demand of SoG-Si and segregation coefficient k_0 of impurities in silicon

Element	SoG-Si	k_0
O	<6	0.2~1.25
C	<5	0.034~0.3
B	<0.3	8×10^{-1}
P	<0.1	3.5×10^{-1}
Ca	<0.3	5×10^{-2}
Al	<0.1	8×10^{-2}
Cu	<3	8×10^{-4}
Ni	-	1.3×10^{-4}
Co	-	2×10^{-5}
Mn	-	1.3×10^{-5}
Cr	<0.1	1.1×10^{-5}
Fe	<0.1	6.4×10^{-6}
V	-	4×10^{-6}
Ti	<0.01	2×10^{-6}
Mo	-	4.5×10^{-8}
Zr	-	1.6×10^{-8}

용탕 중 용질성분의 초기 농도를 C_0 (ppm)라 두고, 고상과 액상의 비율을 각각 f_s, f_l 이라 하면 다음의 관계가 있다.

$$C_0 = C_s f_s + C_l f_l, f_s + f_l = 1 \quad (2)$$

액상의 농도가 균일하고 고상에서 확산이 없는 경우에는 Scheil식을 적용하여 고상에서 용질의 농도는 다음과 같이 나타낸다¹³⁾.

$$C_s^* = k_0 C_0 (1 - f_s)^{(k_0 - 1)} \quad (3)$$

한편 실질적으로 응고가 일어날 때, 고액 계면 앞쪽의 액상층에 경계층이 존재하여 농도 구배가 있는 경우에는 유효 편석계수 k_{eff} 를 사용하여야 한다¹⁴⁾.

$$k_{eff} = \frac{k_0}{k_0 + (1 - k_0) \exp\left(-\frac{v \cdot \delta}{D}\right)} \quad (4)$$

여기서 v 는 결정 성장 속도(m/s), δ 는 용질의 경계층 두께(m), D 는 액상에서 불순물의 확산 계수(m²/s)를 나타낸다. 따라서 $(v \cdot \delta)/D \rightarrow 0$ 이면 $k_{eff} = k_0$ 가 되며, $(v \cdot \delta)/D \rightarrow \infty$ 이면 $k_{eff} = 1$ 이 된다. 따라서 액상이 교반 등에 의한 혼합으로 δ 가 매우 작거나 고액 계면의 이동 속도와 동일한 v 가 매우 느려서 액상 내에서의 확산이 충분히 일어나 균일하게 되면 유효 편석계수는 평형 편석계수와 동일한 값으로 되어 고상의 고순도화가 촉진된다. 반면에 액상 내의 혼합이 불완전하거나, v 가 매우 빨라 액상 내에서의 확산에 의한 균일화가 이루어지지 않으면 k_{eff} 는 1에 가까워져 고상의 고순도화는 전혀 진행되지 않는다.

한편 일방향 응고에서는 액상의 위치에 따른 밀도 차이에 의한 자연대류가 일어나며, 대류는 불순물의 편석을 촉진시킨다. 이러한 대류가 불순물의 편석에 미치는 영향은 다음 식의 Peclet수(Pe)로 평가한다¹⁵⁾.

$$Pe = \frac{v \cdot \delta}{D} \quad (5)$$

$Pe \gg 1$ 이면 편석에 미치는 대류의 영향은 무시할 수 있으나, $Pe \ll 1$ 이면 액상은 대류에 의해 완전 혼합이 일어난

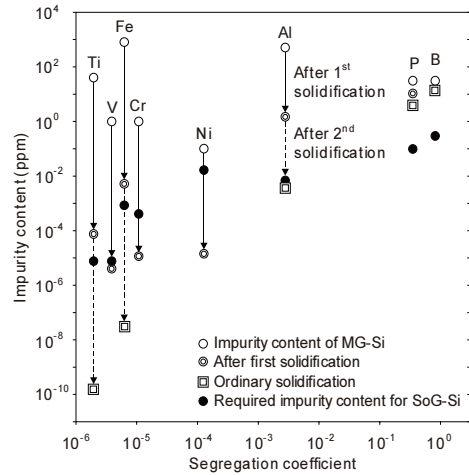


Fig. 1. Change of impurities content in silicon by solidification refining¹¹⁾.

것으로 간주할 수 있다.

Morita 등은 MG-Si의 이상적인 일방향 응고 정제에 따른 Si 중 불순물의 농도 변화를 평형 편석계수 k_0 와 함께 Fig. 1과 같이 나타내었다¹¹⁾. 그림으로부터 V, Cr, Ni 등은 1회 정제로 원하는 수준까지 정제가 가능하며, Fe, Ti, Al 등의 불순물은 2회의 일방향 응고에 의해 SoG-Si의 요구 수준까지 정제가 가능한 것을 알 수 있다.

3. 실험방법

Fig. 2에 실험 장치의 모식도를 나타내었다. 시료의 용융은 고주파 유도 용해로(15 kW, 40 kHz)를 이용하였으며, 반응관으로 사용한 석영관(110 mm ID, 500 mm length)의 상부와 하부에 플랜지를 설치하여 노 내 분위기를 조절할 수 있도록 하였다. 흑연관(100 mm OD, 80 mm ID, 160 mm length)을 반응관 내부의 유도 코일 부분에 위치시켜 발열되도록 하였으며, 흑연관 주위의 열 손실을 방지하기 위해 내화포를 감쌌다. 노 내 온도 조절을 위해 R-type 열전대를 플랜지 상부에서 삽입하여 시료 도가니와 흑연 튜브 사이에 위치시켰고, 반응관 하부에 속도 조절이 가능한 승강 장치를 설치하여 시료 도가니의 상하 이동이 가능하도록 하였다.

본 실험에 사용된 MG-Si의 조성은 Table 2에 나타내었으며, Fe가 1,326 ppm 함유되어 있다. 약 190 g의 MG-Si를 장입한 흑연 도가니(50 mm OD, 40 mm ID, 100 mm L)

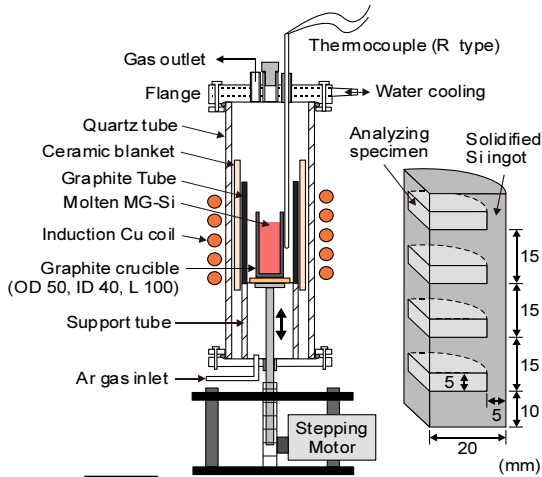


Fig. 2. Experimental apparatus and solidified ingot.

Table 2. Concentration of impurities in MG-Si (ppm)

Elements	Fe	Al	Ca	C	Ti	Mn	P	B
Content	1,326	210	190	230	130	81	73	20

를 반응관 내부의 가열부에 위치시키고 탈산한 고순도 Ar 가스를 플랜지 하부로 송입 하면서 승온을 시작하였다. 시료가 용융되면 1,500 °C에서 1시간 동안 유지 후 하부 승강 장치를 이용하여 0.076~0.883 mm/min의 속도로 하강시켜 하부에서부터 상부로 일방향 응고가 이루어지도록 하였다.

응고가 완료된 시료는 길이 방향으로 절단하여 경면 연마 후 세코(Secco) 에칭액(49 % HF 67 vol% + 0.15 M K₂Cr₂O₇ 33 vol%)¹⁶⁾으로 에칭하여 마크로 조직을 관찰하였다. 그리고 일방향 응고에 따른 불순물 제거 거동을 확인하기 위해 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 위치별로 시료를 채취하여 Si 내 대표적인 불순물인 Fe의 농도를 분석하였다. 채취한 시료를 약 1 mm의 크기로 파쇄하여 불산과 질산의 혼산(1:1 비율)으로 용해시켰다. 침출액을 페난트론(phenanthroline)법으로 발색시킨 후 UV/Vis spectrophotometer(GENESIS 10 uv)로 흡광도를 측정하여 Fe 농도를 구하였다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 3에는 일 방향 응고시킨 시편의 하강 속도에 따른 마크로 조직의 변화를 비교하여 나타내었다. 불순물이 농

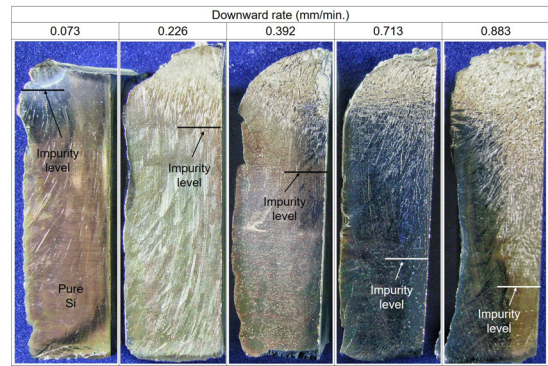


Fig. 3. Photographs of the cross section of solidified MG-Si.

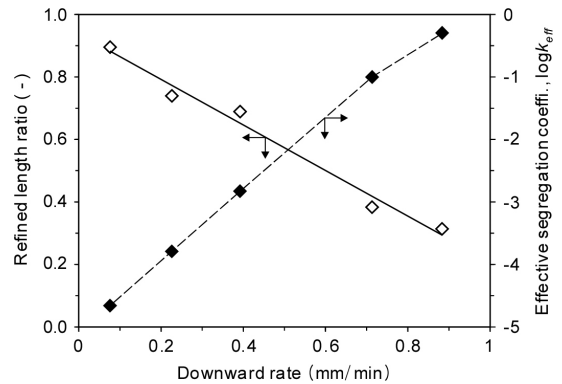


Fig. 4. Change of refined length and calculated k_{eff} with downward rate of sample.

축된 부분은 에칭액에 의한 식각이 일어나 상대적으로 밝게 보이는 시편 상부쪽이며, 일방향 응고에 의해 정제된 부분은 표면이 균일한 아래쪽이다. 그리고 식각된 부분은 V자 모양을 하고 있다. 이는 시편이 가열부를 벗어나면서 하부에서 상부로 응고가 진행될 때, 중심부의 용융 실리콘이 응고되기 전에 하부에서 상부로의 일방향 응고와 측면에서 수평 방향으로의 응고가 동시에 진행되면서 가운데 부분에 불순물이 농축되었기 때문이다. 그림으로부터 하강 속도가 상승할수록 에칭액에 식각된 V자의 아래쪽 위치가 시료의 하부로 내려오는 것을 알 수 있다. 특히 하강 속도가 0.883 mm/min인 경우 시편 길이의 약 3/4까지 불순물에 의한 식각이 발생하였다.

Fig. 4에는 Fig. 3의 마크로 조직으로부터 일 방향 응고 시의 하강 속도에 따른 정제된 부분의 길이와 식(4)로부터 계산한 유효 편석계수의 대수값을 비교하여 나타내었다.

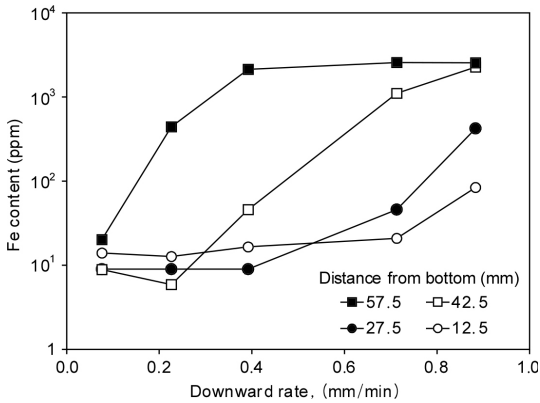


Fig. 5. Change of Fe content of each part with downward rate of sample.

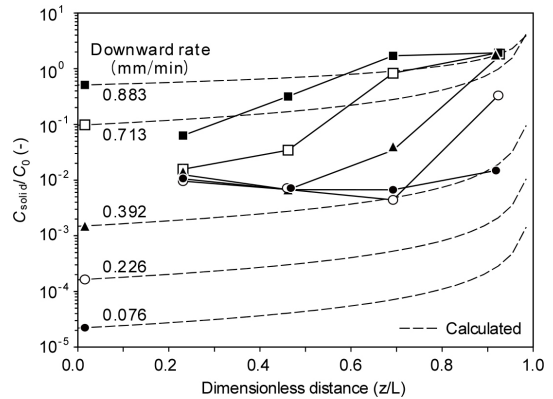


Fig. 6. Change of dimensionless Fe content of each sample with dimensionless distance from bottom.

정제된 부분은 시편 중심의 하부에서부터 불순물이 농축되어 액영액에 의한 식각이 일어난 부분이 시작되는 V자의 아래쪽까지의 길이를 측정하여 구하였다. 그리고 식 (4)의 유효 편석계수는, 용질의 경계층 두께 δ 는 $4 \times 10^{-3} \text{ m}^{14}$, 액상 Si 중 Fe의 확산계수 D_{Fe} 는 $5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}^{17}$, 결정 성장 속도는 시료의 하강 속도로 가정하여 계산하였다. 하강 속도가 증가할수록 일방향 응고에 의한 정제 구간이 선형적으로 감소하였으며, 유효 편석계수의 대수값은 선형적으로 증가하였다. 특히 시료의 하강속도가 0.076 mm/min 이면 유효 편석계수가 평형 편석계수(6.4×10^{-6})에 근접하여 매크로 조직상의 정제구역은 전체 시편 길이의 약 90%에 근접하였다. 이러한 결과는 하강 속도가 느리면 용질 성분이 평형에 가깝게 고상과 액상 사이에서 분배되며, 빠른 하강 속도에서는 불순물이 액상으로 분배되기 전에 응고되기 때문으로 생각된다.

Fig. 5에는 일방향 응고시킨 시료의 위치별 하강 속도에 따른 Fe 농도를 비교하여 나타내었다. 분석 시편은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 바닥부에서부터 10 mm 상부에서 15 mm 간격으로, 벽면쪽 5 mm를 제외한 5 mm 두께로 채취하였다. 시료의 하강 속도가 증가함에 따라 시료의 위치와 무관하게 Fe 농도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 시료의 상부로 갈수록 급격하게 증가하였다. 시료의 하강 속도가 0.4 mm/min 이하에서는 응고 시편 전체의 65% 정도 길이까지 10~45 ppm의 Fe 농도를 나타내었으며, 0.076 mm/min의 가장 낮은 하강 속도에서는 응고 시편의 약 90% 길이까지 10 ppm 전후의 낮은 Fe 농

도를 나타내었다. 이러한 결과는 Fig. 4에 나타난 시편의 정제구역 길이와 비교적 잘 일치하였다.

Fig. 6에는 Fig. 5의 결과를 시료의 하강 속도별 시료의 무차원 위치(z/L)에 따른 Fe의 무차원 농도(C_{solid}/C_0)를 비교하여 나타내었다. 시료 위치와 무관하게 하강 속도가 빠를수록 Fe 농도가 높은 경향을 나타내었다. 그리고 시편 상부로 갈수록 Fe 농도가 높게 나타났으며, Fe 농도가 급격하게 증가하는 위치는 하강 속도가 빠를수록 시료 하부로 이동하였다. 시료의 하강 속도가 가장 빠른 0.713 mm/min 이상에서는 전체 길이의 약 70% 위치에서부터 Fe 농도는 초기 농도를 초과하였으며, 0.883 mm/min에서는 초기 농도의 1.7배 이상을 나타내어 MG-Si 중 Fe가 액상에 농축되어 응고된 것을 알 수 있다.

한편 Fig. 6에는 상기한 식 (3)의 Scheil식 중 평형 편석계수 k_0 대신에 식 (4)로부터 계산한 유효 편석계수 k_{eff} 를 대입하여 계산한 Fe의 무차원 농도(C_{solid}/C_0)를 비교하여 나타내었다. 시료의 하강 속도가 빠른 경우에는 비교적 계산 결과에 가까운 값을 나타내지만, 하강 속도가 느린 경우에는 계산값과 큰 차이를 나타내었다. 이러한 결과는 식 (3)의 Scheil식이 액상 중의 농도가 균일하고 고상 내에서의 확산이 없는 경우를 가정한 것이기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7에는 시료의 하강 속도에 따른 식 (5)에 나타난 Peclet수의 변화를 나타내었다. 시료의 하강 속도가 증가할수록 Peclet수가 직선적으로 증가하였으나, 1~12 정도의 값을 나타내어 본 실험 조건에서는 액상이 완전히 혼합

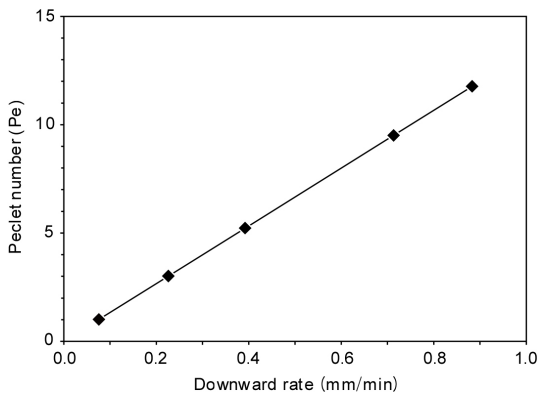


Fig. 7. Change of calculated Peclet number with downward rate of sample.

되어 균일한 것으로는 가정할 수 없을 것으로 생각된다. 그리고 Pe가 1보다 매우 큰 값이라고 할 수는 없으므로 대류의 영향을 무시할 수 있는 정도는 아니며, 천이 상태에 있는 것으로 생각된다. 따라서 Fig. 6에 나타난 바와 같이 액상 중의 농도가 균일한 것으로 가정한 Scheil식으로 계산한 결과와 차이가 나는 것으로 생각된다.

한편 실험값과 Scheil식에 의한 계산값에 차이는 있으나, 일방향 응고에 의한 정제효과는 유효 편석계수를 적용하여 평가할 수 있는 것으로 생각된다. 그리고 액상의 대류가 정제에 미치는 영향은 Peclet 수를 이용하여 평가할 수 있을 것으로 생각된다. 향후 일방향 응고 조건을 선정함에 있어서 이러한 Scheil식, 유효 편석계수, Peclet 수를 계산하여 반영한다면 보다 양호한 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결 론

본 연구는 MG-Si의 야금학적인 정제 프로세스를 구축하기 위한 기초 연구로서 일방향 응고 조건에 따른 Fe의 제거 거동에 대해 조사하였으며, 그 결과를 종합하면 다음과 같다.

1) 금속급 실리콘의 일방향 응고에서 시료의 하강 속도가 느릴수록 정제구역이 길어지고 정제 효율이 향상되는 경향을 나타내었으며, 이러한 결과는 하강 속도에 따른 유효 편석계수의 경향과 양호한 상관관계를 나타내었다.

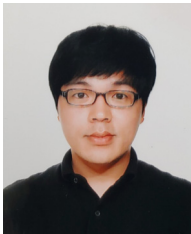
2) 시료의 하강 속도가 0.076 mm/min인 경우 응고된 시료의 약 90%까지 10 ppm 전후의 낮은 Fe 농도를 나타내었으며, 2회의 일방향 응고를 거치면 SoG-Si의 요구 수준을 달성할 수 있을 것으로 생각된다.

3) 본 연구의 실험조건에서 Scheil식으로 계산한 고상 Si 중 Fe 농도는 액상에서의 자연대류 등에 의한 균일 혼합의 차이에 따라 시료의 하강 속도가 느릴수록 실험값과 큰 차이를 나타내었으나, 유효 편석계수, Peclet 수, Scheil식 등을 일방향 응고 조건을 선정하기 위한 지표로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

References

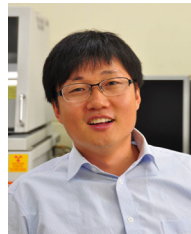
1. Chigondo, F., 2018 : From Metallurgical-Grade to Solar-Grade Silicon, *Silicon* 10, pp.789-798.
2. Sakong, S. D. and Sohn, H. S., 2011 : Removal of Iron and Phosphorus from Metallurgical Grade Silicon by Melting with Ca and Aqua Regia Leaching, *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, 20(5), pp.34-39.
3. Sakata, T., Miki, T., and Morita, K., 2002 : Removal of Iron and Titanium in Poly-Crystalline Silicon by Acid Leaching, *J. Jpn. Inst. Met.*, 66(5), pp.459-465.
4. T. Shimpo, T. Yoshikawa and K. Morita, 2004 : Thermodynamic Study of the Effect of Calcium on Removal of Phosphorus from Silicon by Acid Leaching Treatment, *Metall Trans. B*, 35B, pp.277-284.
5. Sakong, S. D. and Sohn, H. S., and Choi, B. J., 2011 : Removal of Boron from Metallurgical Grade Silicon by Slag Treatment, *J. of Korean Inst. of Resources Recycling*, 20(3), pp.55-61.
6. Kato, Y., Hanazawa, K, Baba, H., et al., 2000 : Purification of Metallurgical Grade Silicon to Solar Grade for Use in Solar Cell Wafers, *Tetsu-to-Hagane*, 86(11), pp.717-724.
7. Ikeda, T. and Maeda, M., 1996 : Elimination of Boron in Molten Silicon by Reactive Rotating Arc Melting, *Mater. Trans. JIM*, 37(5), pp.983-987.
8. Martorano, M. A., Ferreira Neto, J. B., Oliveira, T. S., et al., 2011 : Refining of metallurgical silicon by directional solidification, *Materials Science and Engineering B*, 176, pp.217-226.
9. Yoshikawa, T. and Morita, K., 2005 : Refining of Si by the Solidification of Si-Al Melt with Electromagnetic Force, *ISIJ Inter.*, 45(7), pp.967-971.
10. T. Yoshikawa and K. Morita, 2007 : Continuous solidification of Si from Si-Al melt under the induction heating, *ISIJ International*, 47, pp.582-584.
11. Morita, K. and Miki, T., 2003 : Thermodynamics of solar-

- grade-silicon refining, *Intermetallics*, 11, pp.1115-1117.
12. Hopkins, R. H. and Rohatgi, A., 1986 : Impurity Effects in Silicon for High Efficiency Solar Cells, *J. Crystal Growth*, 75, pp.67-79.
 13. Kirkwood, D. H., 1984 : Microsegregation, *Materials Science and Engineerin*, 65, pp.101-109.
 14. Martorano, M.A., Neto Ferreira, J.B., Oliveira, T.S., et al., 2011: Macrosegregation of Impurities in Directionally Solidified Silicon, *Metall. & Mater. Trans. A*, 42A, pp. 1870-1886.
 15. Favier, J. J., 1981 : Macrosegregation-I Unified Analysis During Non-Steady State Solidification, *Acta Metall.*, 29, pp.197-204.
 16. F. Secco d' Aragona, 1972 : Dislocation Etch for (100) Planes in Silicon, *J. Electrochem. Soc.*, 119, pp.948-951.
 17. Tang, K., Øvrelid, E. J., Tranel, G., et al., 2009 : Critical assessment of the impurity diffusivities in solid and liquid silicon, *JOM*, 61(11), pp.49-55.



사공성대

- 2008년 경북대학교 금속신소재공학과 공학사
- 2010년 경북대학교 대학원 금속신소재공학과 공학석사
- 현재 (주)지알엠(GRM)



손인준

- 경북대학교 금속공학과 학사
- Kyushu University 석사, 박사
- 일본 N.E.CHEMCAT(주) 기술과 주임
- 현재 경북대학교 금속신소재공학과 부교수



손호상

- 현재 경북대학교 금속신소재공학과 교수
- 당 학회지 29권 1호 참조