

논문

Cold crucible 을 이용한 실리콘의 전자기주조

신제식[†] · 이상목 · 문병문

한국생산기술연구원 신소재개발본부 신소재공정팀

Cold Crucible Electromagnetic Casting of Silicon

Je-Sik Shin[†], Sang-Mok Lee, and Byung-Moon MoonNew Materials Processing Team, Advanced Materials R&D Center, Korea Institute of Industrial Technology,
994-32 Dongchun-Dong, Yeonsu-Gu, Incheon, 406-130 Korea

Abstract

In the present study, an EMC (Electromagnetic Casting) process, using a segmented Cu cold crucible under a high frequency alternating magnetic field of 20 kHz, was practiced for the fabrication of poly-crystalline Si ingot of 50 mm diameter. The effects of Joule heating and electromagnetic pressure in molten Si were systematically investigated with various processing parameters such as electric current and crucible configuration. A preliminary experimental work was initiated with the pure Al system for the establishment of a stabilized non-contact working condition, and further adapted to the semiconductor-off-grade Si system. A commercialized software such as Opera-3D was utilized in order to simulate electromagnetic pressure and Joule heating. In order to evaluate the meniscus shape of the molten melts, shape parameter was used throughout the research. A segmented graphite crucible, which was attached at the upper part of the cold crucible, was introduced to enhance significantly the heating efficiency of Si melt keeping non-contact condition during continuous melting and casting processes.

Key words: Cold crucible, Poly-crystalline Si, Electromagnetic casting, Electromagnetic pressure, Joule heating, Segmented graphite crucible

(Received November 29, 2004; Accepted June 2, 2005)

1. 서 론

전자장 기술을 이용하여 생산공정을 개선하고 품질을 향상시키려는 시도가 산업 전반에 걸쳐 널리 이루어지고 있는데, 특히 주조공정에 있어 전자장 기술의 사용은 20세기 초 금속을 용해시키기 위해 전자기유도로를 사용하면서 시작되었다. 그 이후 다양한 응용기술이 시도되고 있는데, 그 중 대표적인 것은 전자기주조기술(Electromagnetic Casting, EMC)이다. 전자기주조기술에 있어 코일에 교류 전류를 인가하여 자기장(B) 변화를 유발하면 용탕에 유도전류(J)가 발생하여 용탕을 가열(Joule heating) 시키게 되며 또한 유도전류는 자기장과 작용하여 용탕에 전자기력(Lorentz force, F)을 발생시킨다 (Fig. 1 참조). 이 때 전자기력은 코일 전류의 방향이 바뀌더라도 플레밍의 왼손법칙에 따라 항상 중심방향으로 향하게 되어 전자기압(electromagnetic pressure)과 같이 작용하는 효과(pinch effect)가 있어 용탕과 주형 벽면과의 접촉을 방지하거나 무주형 주조(moldless casting)를 가능하게 한다. 그 예로서 알루미늄은 비중이 작고 전기전도도가 좋은 소재로서 1980년대에 무주형 주조법이 실용화되어 대량 생산되고 있으며, 상대적으로 비중이 크고 전기전도도가 낮은 철강은 반접촉식 주조(soft contact casting)가 상용화되고 있다 [1-3].

최근 들어서는 태양전지 기판용 다결정 실리콘 주괴를 cold crucible을 이용한 전자기주조법에 의해 제조하려는 연구가 집중적으로 이루어지고 있다. 세계 태양전지 시장을 살펴보면, 1990년대 중반까지는 단결정 태양전지가 주종을 이루었는데 (단결정 60%, 다결정 25%), 최근에는 제조단가 문제 및 변환 효율 향상에 대한 기술개발의 노력으로 다결정 태양전지가 대량 생산되고 있어 (단결정 33%, 다결정 56%), 주력 연구개발 방향이 바뀌어 가고 있는 실정이다. 태양광발전이 대체에너지로서 널리 보급 실용화되기 위해서는 변환효율이 크게 향상되고 생산원가가 획기적으로 절감되어야 하는데, 그 중에서도 특히 전체 태양전지 모듈원가의 50% 이상을 차지하는 실리콘 기판을 저렴하게 제조할 수 있는 기술이 우선적으로 개발되어야 한다 [4,5].

지금까지는 태양전지용 다결정 실리콘 기판을 제조하기 위해서는 흑연도가니 안이나 또는 흑연도가니 내부에 위치시킨 석영도가니 안에서 실리콘을 용해한 후 수냉되는 주형 바닥으로부터 서서히 방향성 응고시켜 주괴를 제조하는 HEM법(Heat Exchange Method)이 가장 널리 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 대폭적인 제조단가의 저감과 변환효율의 향상을 이루기 위하여 일본, 프랑스 등을 중심으로 전자기주조법에 의한 제조 기술을 중점적으로 개발하여 상용화하고 있는 것으로 보고되고

[†]E-mail : jsshin@kitech.re.kr

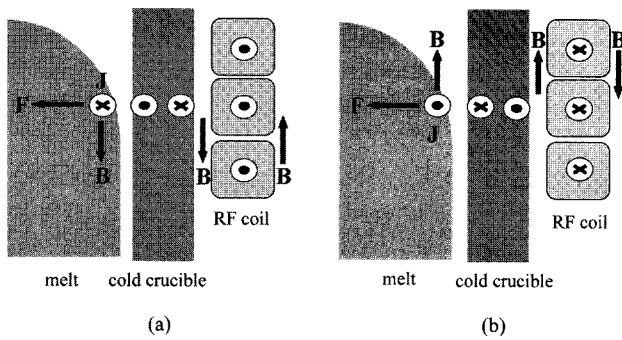


Fig. 1. The principle of pinch effect in EMC process. Coil current is (a) coming from and (b) penetrating into paper plane, respectively.

있다. 전자기주조법은 Table 1에서 볼 수 있듯이 도가니와의 접촉 경감 효과에 의하여 원료의 오염이 억제되고 주괴 제품의 품질이 향상되며 동시에 주형이 소모·교체되지 않아 설비 비용이 줄어들고 연속적인 조업이 가능하여 생산성이 향상되는 이점이 있다(동일 시간당 생산성 HEM법의 약 5배, Czochralski법의 7~15배) [6-8].

하지만 이와 같은 전자기주조법은 cold crucible이 수냉 구조로 되어있기 때문에 실리콘처럼 용융점이 높고 전기전도도가 낮은 재료를 고 순도의 주괴로 제조하는 데에 문제점이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 cold crucible을 이용하여 실리콘을 무접촉 상태에서 연속적으로 용해하며 주조할 수 있는 전자기주조 공정을 확립하고자 코일전류 및 도가니 구조가 Joule 가열 효과 및 pinch 효과에 미치는 영향을 체계적으로 조사하였다. 실리콘보다 용융점이 낮으면서도 비중이 비슷한 알루미늄을 이용한 기초실험을 통하여 무접촉 용해조건을 조사한 후 실리콘에 대한 적용실험을 수행하였다.

2. 실험 방법

2.1. 실험장치

Fig. 2에는 본 연구에 사용된 고주파 전원과 cold crucible을 이용하는 무접촉식 전자기 연속주조 장치의 개념도를 도시하였다. 철강이나 알루미늄의 전자기 연속주조에서는 고 순도를 요하지 않기 때문에 원료를 미리 용해하는 용해공정이 별도로 존재하고 cold crucible 형태인 EMC 주형에서는 단지 주조공정만이 이루어지는 반면, 태양전지 기관용 실리콘 주괴와 같이 고 순도를 요하는 경우에는 cold crucible 내에서 용해공정과 주조공정이 함께 연속적으로 이루어져야 한다. 코일에 교류 전류를 인가하면 cold crucible의 세그먼트에는 인가 코일의 전류와 반대 방향인 유도전류가 생기고, 다시 세그먼트의 유도전

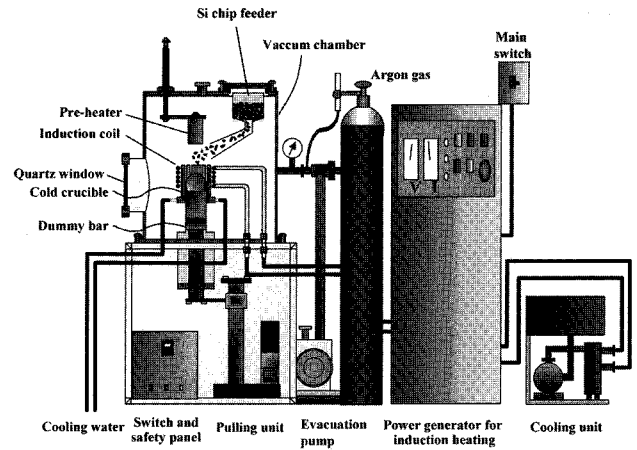


Fig. 2. Schematic diagram of EMC equipment using a segmented Cu cold crucible and a high frequency electric power.

류에 의한 자기장과 슬릿을 통해 들어온 자기장의 변화에 의해 용탕에 유도전류가 발생하게 된다. 이렇게 용탕에 유도된 전류는 자기장과 작용하여 전자기력을 유발 cold crucible 벽면과의 무접촉 상태를 유지시키고 연속적으로 장입되는 원료를 용해시킨다. 한편 실리콘은 고체 상태에서는 반도체로서 전기전도도가 낮고 용해하면서 전도 전자 밀도(conduction electron density)가 금속과 같은 상태가 되는 재료이기 때문에 [9], 용융점이 높고 전기전도도가 우수한 흑연으로 dummy bar나 예열체를 만들어 cold crucible 내에 위치시켜 초기 용탕을 형성시킨다.

본 연구에 사용된 cold crucible은 하부가 개방된 수직 연속주조형으로서 높은 전기전도도와 열전도도를 가지고 가스 방출이 적은 무산소용 재료로 제작하였다. 규격은 내경 50 mm, 외경 80 mm, 높이 200 mm로서 0.3 mm의 슬릿에 의해 12개의 세그먼트로 분할되어 있으며 각 세그먼트 내부로 냉각수가 흘러 수냉되는 구조로 되어 있다. 인가 코일은 10 mm 직경의 동관을 사용하여 내경 100 mm, 높이 54 mm인 5턴의 슬레노이드로 cold crucible 외부에 설치하였다. 전원장치의 최대출력은 50 kW이며 주파수는 용탕면의 안정성을 확보하기 위하여 20 kHz의 고주파를 선택하였다.

실리콘의 경우에는 수냉되는 cold crucible 내에서 용해공정이 이루어져야 함에도 불구하고 전기전도도가 낮아 Joule 발열량은 적은 반면 용융점이 높아 복사열 방출이 크기 때문에 소재를 효율적으로 연속 용해하는 데에 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 Joule 가열효과를 극대화시키기 위하여 cold crucible의 상부에 cold crucible과 동일한 방법으로 0.3 mm의 슬릿들에 의해 12개의 세그먼트로 분할된 높이 3 cm 흑연 도가니를 설치하였다.

Table 1. Comparison of poly-crystalline Si ingots produced by EMC and HEM processes [6-8]

	Electric power consumption (kWh/kg)	Production rate (ton/h)	Impurity level		Conversion yield (%)
			O (cm ⁻³)	C (cm ⁻³)	
HEM	22~28	0.6	6.7×10 ¹⁷	5×10 ¹⁷	13.7
EMC	18	3	<0.2×10 ¹⁷	3.4×10 ¹⁷	13.9

2.2. 공정평가

인가 코일에 흐르는 전류는 고주파의 고전류로서 통상적으로 쓰이는 교류전류계로는 측정할 수 없다. 따라서 인가 코일 근처에서의 자장 변화에 의해 솔레노이드 센서 코일에 발생하게 되는 유도기전력(ϵ)을 측정 후 패러데이 유도법칙(식 (1))을 이용하여 계산하는 방식[10,11]을 취하였다.

$$\epsilon = -NA \frac{\partial B}{\partial t} \tag{1}$$

코일 반경 a , 턴 수 n 의 솔레노이드 코일이 주파수 f , 자속 밀도 B 의 자기장 속에 위치하는 경우 식 (1)로부터 식 (2)를 도출할 수 있다.

$$B = \frac{\phi_{p-p}}{4\sqrt{2}\pi^2 a^2 n f} \tag{2}$$

여기서 B 는 자속밀도 ϕ_{p-p} 는 유도기전력의 진폭이다. 따라서 솔레노이드 센서코일과 오실로스코프를 이용하여 유도기전력을 측정하면 자속밀도 값을 알 수 있고, 식 (3)과 같은 관계로부터 고주파 전원장치에 의해 유도코일에 인가되는 전류의 값을 알 수 있다. $X(r,z,n)$ 은 인가 코일의 모양에 의해 결정되는 함수이며 I 는 인가 코일에 흐르는 전류이다.

$$B = X(r, z, n)I \tag{3}$$

본 연구에서 센서 코일은 0.2 mm의 에나멜 동선을 직경 3.0 mm의 유리막대에 10회 감아서 코일 전체 길이를 6.0 mm 가 되도록 하였으며, 센서 코일과 오실로스코프 사이를 연결하는 도선을 균일하게 꼬아서 센서 코일 이외 부분의 면적을 통과하는 자속에 의한 영향을 차폐하였다. 위의 방법으로 전류를 측정된 결과 본 실험에서 사용한 전원장치에 의해 인가 코일에 흐르는 전류는 최대출력 50 kW에서 1,230 A였다.

용탕이 cold crucible 벽면과 접촉하는 것을 감지하기 위해서는 cold crucible의 슬릿에 높이 방향으로 5 mm 간격이 되도록 6개의 열전대를 삽입한 후 온도 변화를 측정하였다. 연속 주조 공정에서의 적합성 판단을 위한 용탕 자유표면 모양을 분석하기 위해서는 Ren Zhongming 등[12]이 정의한 모양변수를 사용하였다. 이 때 자유표면의 모양을 측정하기 위해서는 용해 도중에 MgO 분말(100 μ m)을 용탕과 cold crucible의 틈에 들어가게 한 후 전력을 차단 응고시킨 후 절단면을 관찰하는 방법[10]을 사용하였다. 하지만 이러한 방법으로는 알루미늄과 같이 응고수축이 일어나는 경우에는 용탕 윗부분의 모양을 정확히 알 수 없기 때문에 알루미늄 박판을 용탕에 짧은 시간 침적시켜 녹은 모양을 측정하는 방법[12]을 병행하여 용탕 자유표면의 형상을 파악하였다.

코일전류 및 도가니의 구조가 Joule 발열량과 전자기압에 미치는 효과를 정량적으로 관찰하기 위해서는 Vector Fields Ltd., Co.에서 개발한 유한요소 프로그램인 OPERA-3D를 사용하여 전자기장 수치해석을 수행하였다. 도체에 유도전류가 유기되는 경우에는 Biot-Savart법칙의 적용이 불가능하므로 자기장 벡터 포텐셜을 도입하였으며, 요소는 유도전류의 발생을 수

Table 2. Electric conductivities and skin depth of silicon, copper, and graphite for electromagnetic analysis [13]

	Silicon	Copper	Graphite
Electric conductivity (1/ Ω m)	1.33×10^6	5.98×10^7	1.59×10^5
Skin depth at 20 kHz (m)	3.08×10^{-3}	4.60×10^{-4}	8.92×10^{-3}

치해석적으로 정확히 모사하기 위해서 cold crucible은 표면으로부터 표피두께(skin depth)의 2배 되는 지점까지 5분할하였으며 용탕은 표피두께 길이 안에서 5분할하여 형성하였다. Table 2에는 전자기장 수치해석에 사용된 용해재료 실리콘과 crucible 소재 등과 흑연의 전기전도도 값 및 주파수 20 kHz에서의 표피두께를 정리하였다.

2.3. 용해재료

실리콘의 전자기주조에 앞선 기초실험으로 용융점이 비교적 낮으면서도 실리콘과 비중이 비슷한 알루미늄의 용해실험을 수행하여 실리콘의 무접촉 용해조건을 조사하였다. 용탕의 자유표면의 형상은 전자기압(P_m)과 표면장력에 의한 압력(P_s)이 용탕의 높이에 비례하는 정수압(P_g)과 균형을 이룰 때 평형을 이룬다 (식 (4)).

$$\delta(P_m + P_s + P_g) = 0 \tag{4}$$

$$P_m = \frac{B^2}{2\mu} \tag{5}$$

$$P_s = \frac{2\gamma}{r} \tag{6}$$

$$P_g = \rho gh \tag{7}$$

이 때, P_m 은 반무한의 용융금속 내를 전파하는 자기장의 1차원 모델로부터 계산된 것으로서 [14] B 는 용탕 표면에서의 자속밀도의 실효치(root mean square)이고 μ 는 투자율이며, P_s 에서 γ 는 표면장력, r 은 자유표면의 곡률이며, P_g 에서 ρ 는 용탕의 밀도, g 는 중력가속도, h 는 용탕 높이이다. 표면장력에 의한 압력은 상대적으로 미미하여 무시할만하고 또한 cold crucible과 용탕은 비자성체라고 생각할 수 있으므로 용탕이 cold crucible과 무접촉 상태를 유지할 수 있는 최대 높이 h_{max} 는 식 (8)과 같이 표현될 수 있다.

$$h_{max} = \frac{\mu}{2\rho g} [f(x)I]^2 \tag{8}$$

이 때 $f(x)$ 는 인가 코일과 cold crucible의 형상에 의해 결정되는 함수이고 I 는 인가 코일에 흐르는 전류값이다. 용탕이 무접촉 상태를 유지할 수 있는 높이가 용탕의 전기전도도나 전원의 주파수가 아니라 용탕의 밀도에 반비례하고 코일 전류의 제곱에 비례한다는 사실은 매우 흥미로운 것이다. 식 (8)은 몇 가지 조건을 가정하여 얻어진 근사식임에도 불구하고 초기 실험조건을 예측하는 데에는 매우 유용하게 활용될 수 있다.

Table 3. Compilation of physical properties of Al and Si [13]

Properties	Al	Si
Density at 20°C (kg/m ³)	2,700	2,330
Density at melting point (kg/m ³)	2,385	2,550
Electric conductivity at 20°C (1/Ωm)	3.70 × 10 ⁷	10 ² ~10 ⁵
Electric conductivity at melting point (1/Ωm)	4.17 × 10 ⁶	1.33 × 10 ⁶
Melting point (°C)	660	1,420
Total energy necessary for melting material from 20°C (kJ/kg)	1,195	3,047

즉 실리콘과 매우 유사한 밀도를 갖는 알루미늄으로 실리콘 용탕의 pinch effect를 모사할 수 있을 것으로 사료된다. 기타 전자기구조 공정에 중요한 알루미늄과 실리콘의 물성치들은 Table 3에 비교 정리하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Cold crucible의 특성

Cold crucible 내의 자속밀도 분포는 Joule 발열 및 전자기압에 큰 영향을 미치기 때문에 이를 평가하는 것은 대단히 중요하다. Fig. 3에는 코일전류 값이 970 A일 때 cold crucible 내부 공간에서 r방향과 z방향 위치 변화에 따른 수직 방향의 자속밀도 성분 B_z의 분포를 도시하였다. 수직 방향의 자장 성분이 용탕 표면의 유도전류와 상호작용을 하여 플레밍의 왼손 법칙에 의해 용탕을 중심 축 방향으로 집중시키는 전자기압에 기여하게 된다. 그림에서처럼 솔레노이드 센서 코일을 이용한 측정값과 전자기장 해석 프로그램인 OPERA-3D로 계산한 계산값이 비교적 잘 일치하고 있다. Fig. 3(a)는 인가 코일의 중앙에 위치하는 높이(z=27 mm)에서 r방향 위치 변화에 따른

자속밀도 분포로서, 자속밀도는 중심 축으로부터 cold crucible의 벽면으로 가까워질수록 약간 증가하는 경향을 보인다. 또한 Fig. 3(b)에서 보면 cold crucible 중심 축 상에서의 최대 자속밀도 값은 인가 코일의 중앙 위치로부터 위쪽으로 이동한 곳에 나타났다. 이는 cold crucible 상단부에서의 모서리 효과 [15]와 cold crucible 하부가 수냉용 입출수 라인으로 인하여 슬릿에 의해 분할되지 못한 구조로 인한 자장 차폐 효과 때문인 것으로 보인다.

Fig. 4에는 코일전류 값을 변화시켜 가며 실제 측정된 수직 방향의 자속밀도 값을 도시하였다. Cold crucible의 소재인 동이 비자성체이기 때문에 자속밀도는 인가되는 코일전류에 비례하여 선형적으로 변화하는 것을 확인할 수 있다. 또한 본 실험에 사용된 cold crucible을 통과하여 내부로 전달되는 자기장은 약 60% 수준임을 알 수 있다.

세그먼트 중앙 부분과 슬릿 부분에서의 자속밀도 편차는 6% 이하로 매우 작았다. 따라서 용융 실리콘의 전기전도도를

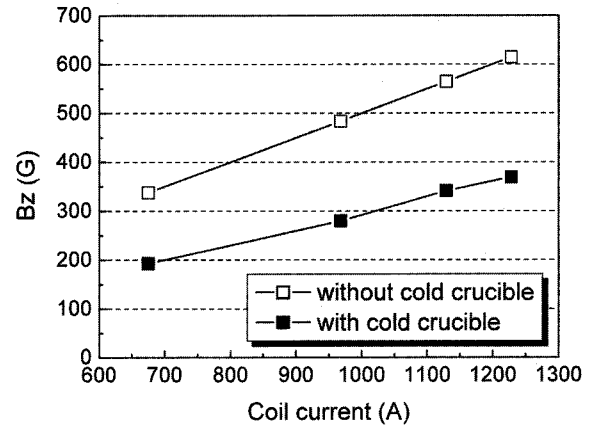


Fig. 4. Variation of magnetic induction with induction coil current.

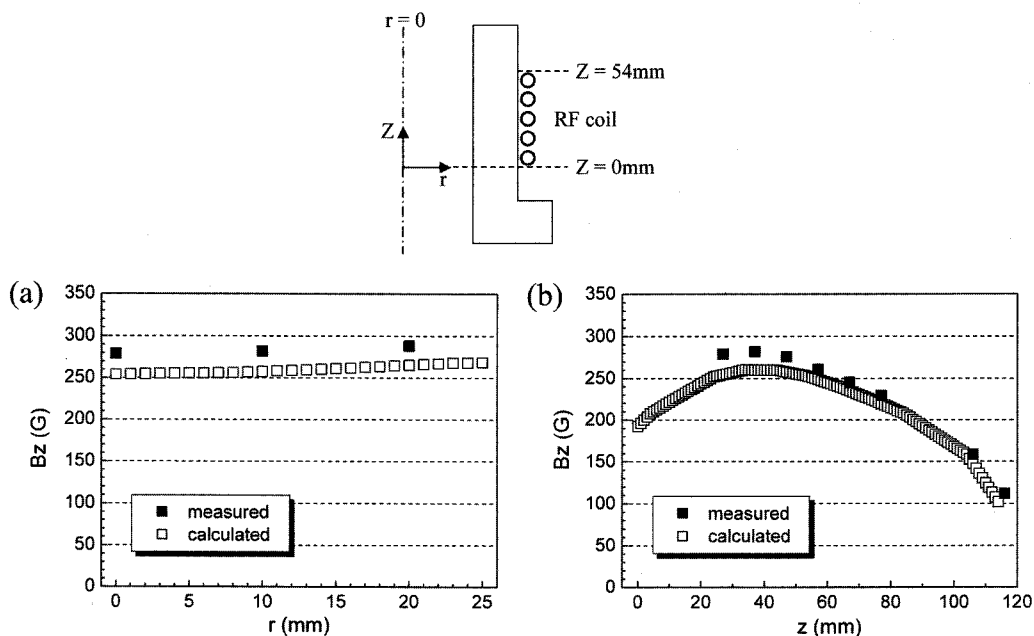


Fig. 3. The distribution of magnetic induction with (a) r direction and (b) z direction.

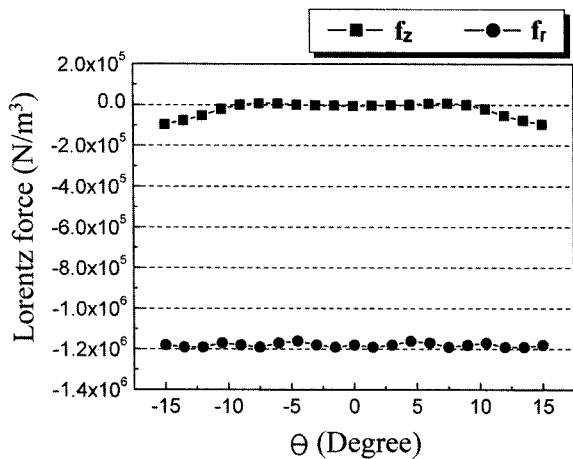


Fig. 5. Variation of Lorentz force with radial direction.

갖는 직경 48 mm의 원통형 전도체를 cold crucible 내에 위치시킨 후 1,230 A를 흘려주는 경우에 대해 전자장 해석을 수행하여 인가 코일의 하단 위치에서의 Lorentz 힘을 계산해보면, Fig. 5에서 보는 바와 같이 전자기압에 기여하는 r방향의 Lorentz 힘(f_r)은 원주 방향에 대하여 균일하였다. 음의 부호는 Lorentz 힘이 중심 축 방향으로 작용한다는 것을 의미하며, 규칙적으로 나타나는 변화는 단지 요소 크기에 기인하는 결과이다. z방향의 Lorentz 힘(f_z)은 원주 방향에 따라 다소 편차를 보이는데 세그먼트 중심($\theta=0^\circ$)에서는 거의 존재하지 않고 슬릿($\theta=15^\circ$) 부분에서는 아래쪽으로 작용한다. 하지만 그 크기는 r 방향 Lorentz 힘의 10% 미만에 해당하는 정도로 미약하다.

3.2. 알루미늄 용해

실리콘은 용융점이 높으며 증발압이 매우 커 대기 중에서 육안으로 용탕을 관찰하기가 어렵다. 따라서 코일전류를 용탕 자유표면의 형상 및 cold crucible과의 무접촉성 등에 미치는 효과를 효과적으로 관찰하기 위하여, 용융점이 낮으면서도 실리콘과 밀도가 비슷해 전자기압 효과를 모사할 수 있는 알루미늄을 사용하여 실험을 수행하였다. 코일전류를 변화시켜가며 알

루미늄 용탕 160 g의 형상을 관찰한 결과 코일전류가 670 A에서 840 A로 증가함에 따라 알루미늄 용탕이 cold crucible로부터 떨어지는 것처럼 보였다. 하지만 이러한 방법으로는 cold crucible로 인하여 용탕을 측면에서는 관찰할 수 없고 위쪽에서 관찰해야 하므로 무접촉 조건을 자세히 조사하기에는 한계가 있다.

따라서 용탕의 무접촉 상태를 Fig. 6과 같이 cold crucible의 슬릿에 열전대를 삽입한 후 코일전류를 변화시켜가며 각 위치에서의 온도변화를 관찰함으로써 확인하였다. 열전대가 자장의 변화에 영향을 받고 수냉되는 cold crucible에 접촉하고 있으므로 위와 같은 방법으로 측정된 온도가 용탕의 실제 온도는 아니지만 그 변화 거동은 의미가 있다. 코일전류가 840 A에서 970 A로 증가하면 오히려 용탕의 하단에 인접한 T/C₁과 T/C₂ 위치에 있는 열전대에 측정되는 온도는 급격히 감소한다. 반대로 코일전류가 970 A에서 840 A로 감소하면 T/C₁과 T/C₂ 위치의 열전대 온도는 급격히 증가한다. 코일전류가 840 A에서 670 A로 변화하는 경우는 이보다 위에 위치한 T/C₃의 온도가 가장 급격히 변화한다. 이로부터 약 55 mm 높이의 알루미늄 용탕을 20 kHz, 970 A의 조건에서 cold crucible과 무접촉 상태로 유지할 수 있음을 알 수 있다.

3.3. 실리콘 전자기주조

알루미늄의 무접촉 용해 조건인 970 A의 코일전류를 인가해 실리콘을 용해하여 보았다. 실리콘은 고체 상태에서는 전기전도도가 낮아 유도용해가 불가능하므로 흑연 소재의 가열체를 cold crucible 내에 위치시켜 초기 용탕을 형성시켰다. 용탕이 형성된 후에는 전기전도도가 증가하여 금속과 같은 특성을 보이기 때문에 Joule 가열이 가능하여 용융 상태가 유지될 것으로 기대하였으나, 알루미늄에 비하여 전기전도도는 낮고 용융점은 높아 가열체를 제거한 후에는 용융 상태를 오래 유지할 수 없었다. 코일전류를 1,230 A로 증가시킨 경우에는 용융상태를 유지할 수 있었으며 cold crucible과의 무접촉 상태도 가능하였으나, 연속주조를 위하여 2.8~10 mm 크기로 파쇄된 실리콘 원료를 7.4 g/min의 속도(1.5 mm/min의 연주속도에 해당)로

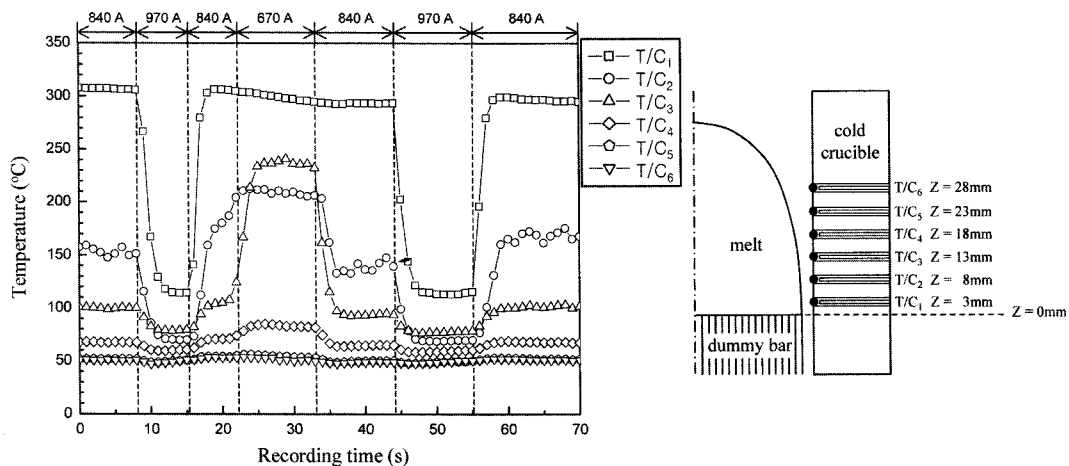


Fig. 6. The temperature variation of the thermocouples, which are inserted at different levels along a slit of the cold crucible, with the induction coil current.

장입하는 경우에는 용탕면에 응고 스케일이 형성되는 문제점이 발생하였다.

실리콘은 밀도가 작아 무접촉 용해를 위한 전자기압 효과는 뛰어나나 전기전도도가 낮아 Joule 발열로 인한 가열효과는 작은 반면 용융점이 높아 복사열 방출로 인한 냉각효과는 커 소재를 효율적으로 연속 용해하는 데에 어려움이 있는 것으로 판단된다. 따라서 현재는 대부분 수백 kW에 이르는 대용량의 전원장치를 사용하거나 [16] 별도의 2차 가열원으로서 플라즈마 가열을 병용하고 있다 [17]. 본 연구에서는 일정 전력 투입 조건 하에서 전력효율을 향상시키며 Joule 가열 효과와 전자기압 효과를 최적화하기 위하여, Fig. 7(b)와 같이 cold crucible의 상부에 cold crucible과 동일한 방법으로 종방향 슬릿들에 의해 분할된 높이 3 cm의 흑연 도가니를 설치하고 세라믹 울로 단열 처리한 후 1,230 A의 코일전류를 인가해줌으로써 실리콘을 7.4 g/min의 속도로 연속 용해주조할 수 있었다.

위와 같은 방식의 정량적인 효과를 조사하기 위하여 전자장 해석 전용 프로그램인 OPERA-3D를 사용하여 수치해석을 수행하였다. Table 4는 코일전류 값이 1,230 A일 때 55 mm 높이의 실리콘 용탕에 발생하는 Joule 발열량을 도가니의 구조에 따라 계산하여 정리한 것이다. 전자기장 수치해석 시 필요한 용탕의 형상은 지속밀도 분포와 서로 영향을 주고받으며 전자기변수가 바뀔 때 따라 계속 바뀌게 되는데, 이를 수치해석적인 방법으로 예측하여 사용하려면 여러 가지 가정이 필요하고 또한 많은 수의 지배방정식이 커플링돼 비선형성이 심하기 때문에 [18], 본 연구에서는 MgO 분말법[10]으로 측정하여 사용하

였다. 수치해석 결과 cold crucible만을 사용하는 경우에는 총 Joule 발열량의 약 67%가 cold crucible에서 발생하여 냉각수로 손실되는데, cold crucible 위에 분할형 흑연 도가니를 얹는 경우에는 cold crucible에서 발생하는 Joule 발열량은 14% 정도 줄어드는 반면 실리콘 용탕에 발생하는 발열량은 큰 차이가 없고 흑연 도가니에서 많은 양의 Joule 열이 발생하게 되어, 전체적으로는 총 Joule 발열량의 약 50%만 cold crucible에서 발생되어 냉각수로 손실됨을 알 수 있다. 이 때, i) 분할형 흑연 도가니의 외벽면과 상하면을 단열재로 처리하여 흑연 도가니에서 발생한 Joule 열의 80%가 내벽면만을 통하여 방출되며, ii) 흑연, 실리콘, 챔버가 회색체(gray body)이고 방사율(emissivity)이 0.5이며, iii) 실리콘 용탕과 챔버의 표면온도가 각각 1,420°C, 25°C이며, iv) 흑연 도가니와 실리콘 용탕 사이 그리고 흑연 도가니와 챔버 사이의 형태계수(view factor)가 각각 0.7과 0.25라고 가정하면 [19], 흑연 도가니의 온도는 2,140°C에 이르고 실리콘 용탕으로는 2,214 W의 열이 복사 열전달되어, 실리콘의 가열 효과는 cold crucible만을 사용하는 경우에 비하여 약 43% 정도 증가하게 된다. 한편, 흑연 도가니의 크기가 상대적으로 작고 전기전도도 또한 비교적 낮음에도 불구하고 많은 양의 Joule 열이 발생하는 것은 유도코일과의 상대적인 위치에 기인하는 결과로 설명할 수 있다. 즉, 흑연 도가니는 cold crucible에 비교하여 높이는 크지 않지만 대부분이 유도코일 내부에 위치하며, 또한 유도코일과의 사이에 cold crucible 및 흑연 도가니가 존재하는 실리콘 용탕과는 달리 유도코일과의 사이에 전도체가 존재하지 않아 유도코일에 의한 자기장 변화에 따른 직접적인 유도전류가 발생하기 때문이다.

도가니 구조에 따라 실리콘 용탕이 cold crucible 및 흑연 도가니의 벽면과 무접촉 상태를 유지할 수 있는지 조사하기 위하여, 시간과 공간에 따라 변하는 지속밀도(B)와 유도전류(J)로부터 식 (9)를 이용하여 Lorentz 힘(f)을 계산하고, 이로부터 식 (10)을 이용하여 전자기압(P_m)을 구한 후 용탕 높이에 의한 정수압(P_g)과 비교하였다. Fig. 7에 도시된 Lorentz 힘은

Table 4. Joule heating power with crucible configuration under the induction coil current of 1,230 A

Joule heating power Crucible configuration	Si melt (W)	Cu cold crucible(W)	Graphite crucible(W)
Cu cold crucible	5,386	11,037	-
Cu + graphite crucible	5,478	9,518	4,183

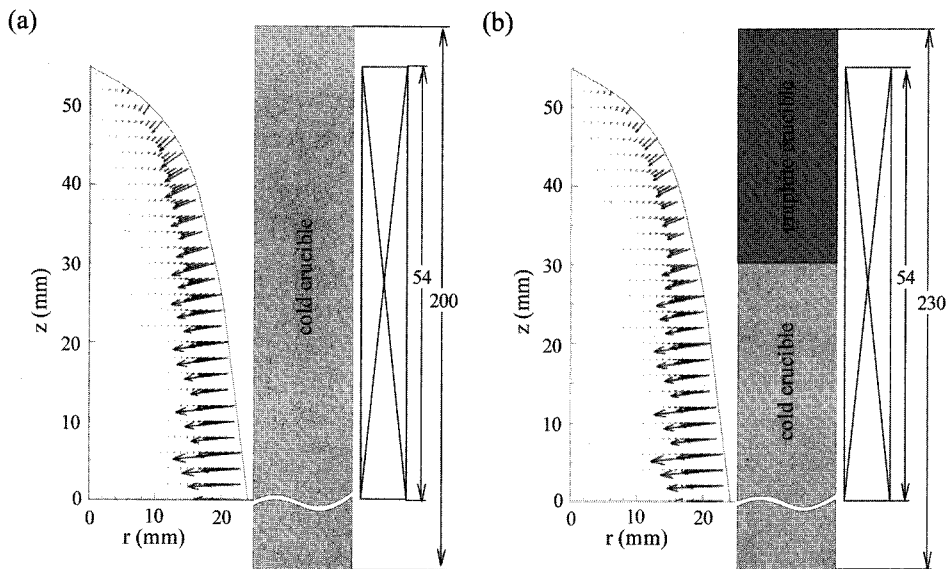


Fig. 7. Lorentz force distribution in Si melt with (a) in Cu cold crucible and (b) in Cu cold crucible + graphite crucible.

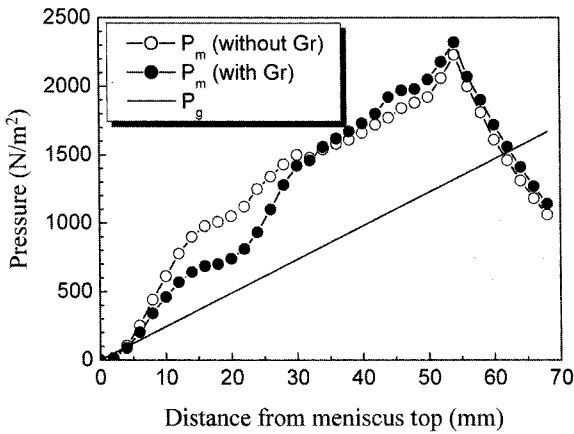


Fig. 8. Relationship between the electromagnetic pressure under the induction coil current of 1,230 A and the hydrostatic pressure with crucible configuration.

한 주기(T)에 걸쳐 평균을 취한 실효치의 분포도이며, Fig. 8에 도시된 전자기압은 Lorentz 힘 중 r방향의 성분(f_r)을 한 주기에 걸쳐 평균을 구한 후 다시 이를 용탕 표면($r=R$)에서 중심 축($r=0$)까지 적분하여 구하였다.

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \tag{9}$$

$$P_m = \frac{1}{T} \int_0^R \int_0^{2\pi} f_r dt dr \tag{10}$$

계산 결과 cold crucible 위에 분할형 흑연 도가니를 설치하는 경우 용탕의 상부에서 전자기압이 다소 감소하고 있으나, 이 구간은 정수압 역시 작은 구간이어서 용탕의 전 구간에 걸쳐 전자기압이 정수압보다 커 무접촉 상태를 유지할 수 있음을 알 수 있다.

용탕의 자유표면 형상이 연속주조공정에 적합한지를 판단하기 위해서는 Fig. 9(a)와 같이 정의되는 모양변수(S_A)를 도입하여 평가하였다. 용탕이 cold crucible의 벽면과 접촉하지 않는 범위 내에서는 S_A 가 클수록 전자기변수의 진동과 같은 불안정한 연속주조 조건에도 불구하고 일정한 직경을 갖으며 표면품질이 우수한 주괴를 연속주조할 수 있다. 코일전류를 변화시켜 가며 측정된 결과 Fig. 9(b)에서와 같이 알루미늄의 S_A 값은 코일전류가 670 A로부터 무접촉 조건인 970 A까지 증가함에 따라 0.9에서 0.75로 감소하였는데, 코일전류가 증가함에 따라 급격히 감소하다가 900 A 이상에서는 감소하는 정도가 완만해지는 것을 알 수 있다. 실리콘의 경우에는 무접촉 상태를 유지하면서도 연속적인 용해작업이 가능하기 위해서는 코일전류를 1,230 A까지 올려야 했지만, 이 때의 S_A 값은 알루미늄의 무접촉 조건에서의 S_A 값과 큰 차이를 보이지 않았다. 이로부터 cold crucible을 이용하는 경우에 있어 실리콘은 알루미늄과 비슷한 전자기 연속주조 특성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 하부가 개방된 cold crucible을 이용하여 실

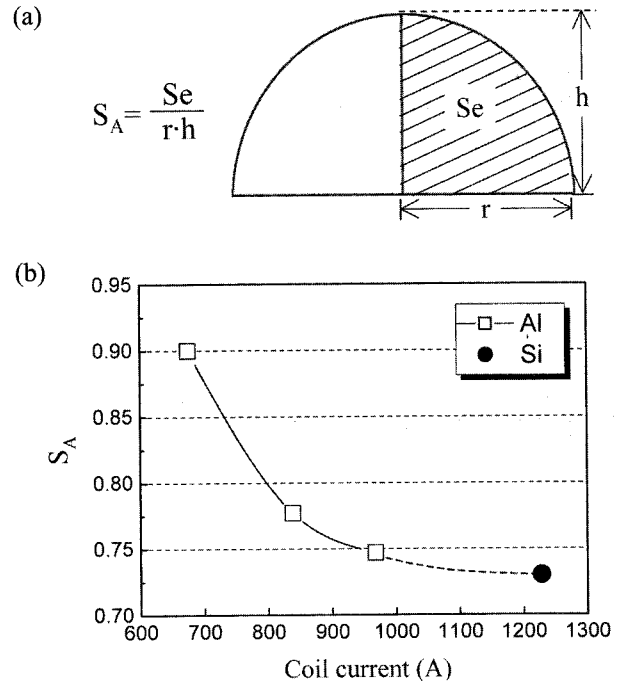


Fig. 9. (a) The definition of meniscus shape parameter S_A and (b) the variation of S_A with the induction coil current and charge materials.

리콘을 연속적으로 용해하며 주조할 수 있는 전자기연속주조 공정을 확립하고자 코일전류 및 도가니 구조가 Joule 가열 효과 및 pinch 효과에 미치는 영향을 조사하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유도기전력을 측정함으로써 고주파의 코일전류와 자속밀도를 측정할 수 있었으며 이는 전자장 수치해석에 의한 계산 결과와 매우 잘 일치하였다. Cold crucible 내에 장입체가 없는 경우 본 연구에 사용된 cold crucible을 통하여 내부로 전달되는 자속밀도는 60% 수준이었다.
- (2) 실리콘과 밀도가 비슷한 알루미늄을 이용한 모사실험을 통하여 실리콘 용탕과 cold crucible 벽면과의 무접촉 용해 조건을 효과적으로 조사할 수 있었다.
- (3) 많은 전력을 요하는 실리콘의 전자기주조의 경우 정수압이 낮은 용탕의 상부는 수냉하지 않는 분할형 흑연 도가니 내에 위치하고 정수압이 증가하는 용탕의 하부는 cold crucible 내에 위치하도록 도가니 구조를 설정함으로써, 55 mm의 용탕 전 구간에 걸쳐 전자기압이 정수압보다 크게 유지하면서도 용탕에 대한 Joule 가열 효과를 40% 이상 향상시킬 수 있었다.
- (4) 알루미늄과 실리콘의 무접촉 연속 용해 조건 하에서의 모양변수 값은 큰 차이가 없어, 수직 연속주조형 cold crucible을 이용하는 경우에 있어 실리콘은 알루미늄과 비슷한 전자기 연속주조 특성을 확보할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] S. Asai: Proceeding of the 6th International Iron and Steel Congress, (1990) 370-379.

- [2] M. Furui, Y. Kojima and M. Matsuo: ISIJ, 33 (1993) 400-404.
- [3] J. P. Park, H. T. Jeong, D. J. Sim and H. Y. Kim: J. Kor. Inst. Met. & Mater., 36 (1998) 1598-1604.
- [4] M. Schmela: Photon International, March (2004) 46-53.
- [5] M. Schmela: Photon International, April (2004) 34-38.
- [6] I. Perichaud, S. Martinuzzi and F. Durand: Solar Energy & Solar Cells, 72 (2002) 101-107.
- [7] E. Ehret: Solar Energy Materials and Solar Cells, 53 (1998) 313-327.
- [8] 第1回 エネルギー使用合理化シリコン製造プロセス開発 (事後評價) 分科會 資料 6-1
- [9] V. M. Glazov, S. N. Chizhevskaya and N. N. Glagoleva: "Liquid semiconductors", Plenum press, New York (1969) 55-83.
- [10] M. J. Ha and Z. H. Lee: J. Kor. Foundrymen's Soc., 14 (1994) 159-167.
- [11] M. J. Ha: "Effect of Inductor Coil Shape on the Free Surface Shape of Molten Tin", KAIST M.S. thesis (1994).
- [12] C. R. Paul and S. A. Nasar: "Introduction to Electromagnetic Field", McGraw-Hill Int. Edition (1987).
- [13] W. F. Gale and T.C. Totemeier: "Smithells Metals Reference Book 2", Elsevier Inc. (2004).
- [14] K. Sassa and S. Asai: Journal of Japan Soc. for Heat Treatment, 30 (1990) 80-86.
- [15] S. H. Chung, Y. J. Oh, Y. W. Cho, K. W. Yi and J. D. Shim: J. Kor. Inst. Met. & Mater., 33 (1995) 1360-1367.
- [16] European Patent No. 1-254-861-A1.
- [17] Japanese Patent No. 2001-19594.
- [18] F. Negrini, M. Fabbri, M. Zuccarini, E. Takeuchi and M. Tani: Energy Conversion & Management, 41 (2000) 1687-1701.
- [19] D.R. Poirier and G.H. Geiger: "Transport Phenomena in Materials Processing", TMS (1994).