

## 태양전지용 실리콘소재의 기술개발 동향

김희영 책임연구원 (한국화학연구원 석유대체연구센터)

## 1. 서론

최근 태양광발전 (Photovoltaic : PV)산업이 연간 40 % 이상의 급성장이 이루어지면서, 시장의 약 90 %를 차지해오고 있는 결정형 실리콘 (Silicon ; 이하 Si) 태양전지를 이루는 Si 기판 (Wafer)과 이 기판 제조에 사용되는 고순도 태양전지급 Si 소재 (Solar-grade Si ; SoG-Si) 공급의 심각한 부족사태가 지난 2년간 계속되어오고 있다 [1]. 시장전문가들마다 조금씩 차이가 있지만, 2007년이면 끝날 것이라는 그동안의 예상은 SoG-Si 공급부족이 2008년 후반 또는 2009년부터 조금씩 해소될 가능성이 있다는 전망으로 점차 후퇴되고 있는 경향이 지배적이다.

단결정 (Single- 또는 Mono-crystalline)과 다결정 (Multi- 또는 Poly-crystalline) 결정구조로 구분되는 결정형 Si 기판 제조에 필요한 SoG-Si 공급이 부족하면 해당되는 부족분만큼을 무정형 Si 박막 또는 화합물반도체 박막으로 구성되는 박막형 태양전지가 쉽게 대체할 것처럼 예상할 수도 있다. 그러나 무정형 Si (a-Si)이나 화합물반도체 (CdTe, CIGS, GaAs 등)에 기초한 박막형 태양전지뿐만 아니라 염료감응형 및 유기 (고분자) 태양전지와 같은 신 개념 태양전지

분야에서의 기술적 진보 [2,3]와 투자 증가가 꾸준히 계속되고 있지만, 광전변환 효율과 신뢰성 면에서 결정형 Si 태양전지가 여전히 앞서고 있다. 따라서 원재료 공급부족에도 불구하고 오히려 수요가 늘어나는 결정형 Si 태양전지 시장의 속성으로 SoG-Si 소재 부족사태가 완전히 해소될 수 있을지 여부는 여전히 미지수이다. 또한 반도체급 Si (Electronic-grade Si: EG-Si) 기판 및 태양전지 기판의 원료로 그동안 사용되어 오고 있는 폴리실리콘 (다결정실리콘 : Polysilicon ; Polycrystalline Silicon ; 이하 Poly-Si) 제조는 선진국 7개 업체들이 그동안 시장을 주도해 왔는데 [1], 기존 메이저들의 대폭적인 증설 외에 전 세계적으로 150여 군데 이상의 업체가 현재 신규 진입을 검토 중이거나 공장 건설을 진행 중에 있다. 다행히 국내에서도 2008년 상반기부터 Poly-Si 제품생산이 개시되어 선진국 메이저들의 비관적인 예상을 뒤엎는 쾌거를 이루었다. 그러나 신뢰할만한 공정기술 라이선스를 제대로 확보하기 어려워 Poly-Si 제조업에 신규 진출하는 것이 아주 까다롭다는 것을 보여준 최근의 경험에 따르면 [1], 과연 몇 군데의 신규 진입업체가 성공적인 공장건설과 제품생산을 보여줄 수 있는지와 2010년 기준 약 12~15만 톤/년 규모로 예측되는 SoG-Si 소재 수요가 충족될 수 있을지

예측하기 힘들다.

예상보다 급성장을 계속 중인 PV 산업의 약진으로 Si 태양전지 기관용 SoG-Si 소재의 수요가 반도체(전자)산업용 Si 기관용 EG-Si 수요를 이미 초과하기 시작했다. 또 태양전지에 의한 전력비가 기존 전력 공급업체의 전력비와 같아지는 전환점(Grid Parity)이 향후 5년 전후부터 PV 활용 환경이 우수한 지역부터 가시화되기 시작하여 점차 전 세계적으로 확대되어 태양전지의 수요가 폭발적으로 급증할 것으로 예상되는데 최근의 유가 급등은 그 전환점을 더욱 앞당기는 계기가 되었다. 이와 같은 여건 하에서 SoG-Si 소재를 값싸게 대량생산할 수 있는 기술의 개발 및 실용화는 신재생에너지의 활발한 보급 확대를 위해 시급한 기술적 과제이다. 본 논문에서는 태양전지용 Si 소재와 관련하여 상업적 가치가 확인되었거나 실용화가 가시적으로 진행 중인 기술들의 개발 및 활용 동향에 관하여 SoG-Si 재료와 Si 기관을 구분하여 정리해보고 추가적인 개발이 필요한 기술을 제시하고자 한다.

## 2. Si 기관 원재료인 SoG-Si 제조기술

### 2.1 금속급 Si (MG-Si)의 제조

지표면에 존재하는 Si 원소는 규석이나 규사와 같이 바위나 모래 형태로 SiO<sub>2</sub> 성분으로 대부분 존재한다. 탄소(C)성분을 환원제로 하는 용융점 이상의 고온반응 [Carbothermal Reaction: SiO<sub>2</sub> + 2C → Si + 2CO]로 순도가 높은 석영광에서 채굴된 규석(Quartzite)이 SiO<sub>2</sub> 원료로, 코크스(Coke), 목탄(Charcoal), 흑연, 나뭇조각 등이 C 원료로 사용된다. 이 반응은 흑연전극을 사용하는 전기아크 용광로(Submerged Arc Furnace)에서 순도 98% ~ 99% 정도의 실리콘 금속 또는 금속급 Si (Metallurgical Si: MG-Si)이 제조된다.

그림 1과 같은 용광로에서 전극 근처에서 용융되면서 진행되는 다음의 반응단계에서 SiC와 SiO(g)이 중간생성물로 발생되며 Si 용융액에 가라앉은 SiC와 기포상태로 상승하는 SiO(g)와의 반응 (iv)가 Si(l) 생성에 아주 중요하다 [4]:

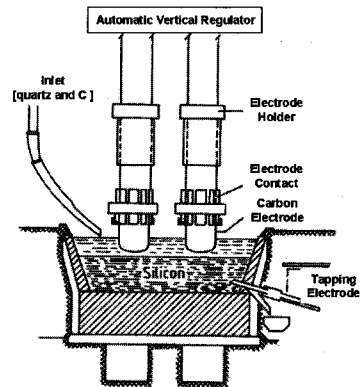


그림 1. 금속급 Si 제조용 아크로.

- (i) SiO<sub>2</sub> + C → SiO(g) + CO
- (ii) SiO + C → SiC + CO
- (iii) 2SiO<sub>2</sub> + SiC → 3SiO(g) + CO
- (iv) SiO + SiC → 2Si(l) + CO

용광로 출구에서는 배출되는 SiO(g)가 SiO<sub>2</sub>와 Si 미분말을 생성시키는데 이 SiO<sub>2</sub> 부산물이 미세분말 형태의 비결정질 실리카(Silica Fume)이다. 용광로 하부의 용융액 출구로부터 레이들에 담겨 배출되는 용융상태 Si 생성물에는 미반응 C, SiC 입자뿐만 아니라 분순물 잔유물들이 함유되어 있다. 이 불순물 성분들은 원료로 투입된 규석, 탄소환원제, 흑연전극, 용광로 내벽 내화재, 운전 방법 등에 기인하는 것으로 금속(주로 산화물), 탄소, 산소뿐만 아니라 반도체 성질에 영향을 미치는 붕소(B)와 인(P) 성분도 ppm 수준 이상 포함된다. 이 상태 MG-Si은 순도가 98% 정도이며 용융액 상태에서의 추가 정련을 통해 약 99% (2N) 정도의 순도를 갖는 MG-Si이 얻어진다.

MG-Si은 현재 약 1.5~2.5 \$/kg의 가격으로 판매되고 있는데 중국, 노르웨이, 러시아 및 주변국, 브라질, 남아공 등 양질의 석영이나 탄소환원제가 풍부하고 전력이 값싸게 공급될 수 있는 곳에서 제조되고 있으며 국내에서는 80년 초까지 생산된 바 있지만 지금은 전량 수입중이다.

## 2.2 원료실란 석출에 의한 SoG-Si (Poly-Si) 제조

98~99 % MG-Si를 태양전지에 사용될 수 있게 99.9999 % (6 N) 또는 그 이상, 심지어 반도체급의 경우 99.999999 % (9 N) 이상 약 11 N의 고순도가 되어야 Si 기관의 원료로 채택될 수 있는 것이다. MG-Si으로 SoG-Si을 제조할 수 있는 주요 경로들은 그림 2와 같다.

MG-Si으로 9 N 이상의 EG-Si이나 6 N 이상의 SoG-Si을 제조하는 것은 2 N 순도 물질을 6~9 N 이상 되는 고순도 물질로 정제하는 정제과정을 포함해야 하는데, 상업적으로는 기-액평형에서의 증기압 차이를 이용하는 증류방식의 화학공학적 정제방법이 그동안 사용되어오고 있다. 이 개념의 정제는 고체의 Si → Si 원소함유 실란화합물 (기체/액체) 합성 → 실란화합물의 초고순도 정제 → 정제된 원료실란의 환원 (화학증기증착; Si 석출)으로 고체의 초고순도 Poly-Si을 제조하게 한다. 즉 Si의 가스화반응 → 원료실란의 정제 → 원료실란의 석출이라는 단계를 거치는 Poly-Si 제조 (그림 2의 굵은 화살표)로 요약된다. 따라서 SoG-Si 가운데 원료실란의 석출과정을 거쳐 제조하는 것을 Poly-Si라 차별화시켜 표시할 수 있다. 원료실란 제조용 가스화공정과 분리 및 정제 공정은 전형적인 화학공정의 특성을 지니고 있지만 초고순도의 원료실란으로부터 고체 Poly-Si을 형성시키는 Si 석출 (Deposition; CVD) 공정은 반도체 박

막공정과는 달리 벌크생산의 특성을 지니지만 일반 화학공장에서는 사용되지 않는 생소한 공정이다.

PV 산업 규모가 1 GWp/년 이하였던 '04년 전까지만 해도 그림 2의 점선부분과 같이 EG-Si 및 반도체용 Si 기관 제조과정에서의 부산물, 불량품이나 폐기물만으로 SoG-Si 공급이 수월하게 이루어졌다. 그러나 그 이후 Poly-Si 제조공장의 부분적인 증설과 재고물량의 소진을 통해 더욱 증가하는 SoG-Si 수요를 충당해왔으나 '07년부터는 EG-Si보다 값싸게 SoG-Si을 제조하고자 기존 Poly-Si 제조공정 설비 및 제조과정을 부분적으로 개선하여 SoG-Si 제조공정을 본격적으로 증설하기에 이르렀고, 신규 업체들의 Poly-Si, 즉, SoG-Si 공장건설도 시작되었다.

현재 Poly-Si 생산 공장에서는 MG-Si을 출발원료로 하는 화학반응, 즉, 가스화공정을 통해삼염화실란 (Trichlorosilane/SiHCl<sub>3</sub>; 이하 TCS) 또는 모노실란 (Mono-silane/SiH<sub>4</sub>; 이하 MS) 가운데에서 한 가지를 선택하여 원료실란으로 생산하고 있는데 석출 반응에 있어서 서로 다른 특성을 지니고 있다 [1]. [MG-Si + HCl → SiHCl<sub>3</sub> + SiCl<sub>4</sub>]의 염화수소화반응으로 제조되는 TCS는 제조 및 저장의 용이성, 경제성 면에서 상대적 장점이 있지만 Si 석출반응에 있어서 950~1150 °C의 높은 반응온도가 필요하고 반응수율도 약 25%보다 낮은 가역반응이므로 부산물전환 공정의 부담이 크다.

70년대 말 이후 TCS 대신 이염화실란 (SiH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) 및 MS를 실란원료로 하여 Si을 석출시키는 반응경로의 개발이 시도된 바 있다. 현재 Poly-Si의 상업생산에도 사용되는 MS는 TCS의 불균일 재배열반응을 거쳐 Cl을 H로 대체하거나 비료부산물로부터 SiF<sub>4</sub>를 제조하고 F를 H로 대체하여 제조할 수 있다. MS를 이용한 유동층 석출공법에 의한 Poly-Si 제조공정은 1990년대 초부터 상업화되어 그동안 미국 MEMC社에 의해 EG-Si 생산에 활용되고 있다. 그리고 REC에서 미국에 대규모로 증설중인 Poly-Si 공장도 MS를 원료실란으로 채택하고 있다. MS는 낮은 석출반응 온도 (550~850 °C)로 석출반응기 가열에 부담이 적고 반응수율도 최소 90% 이상 높은 반면, MS 제조를 위해 TCS 제조 후 Si과 결합하는 Cl을 H로 치환하는 추가공정을 필요로 하고 높은 폭발 위험성으로

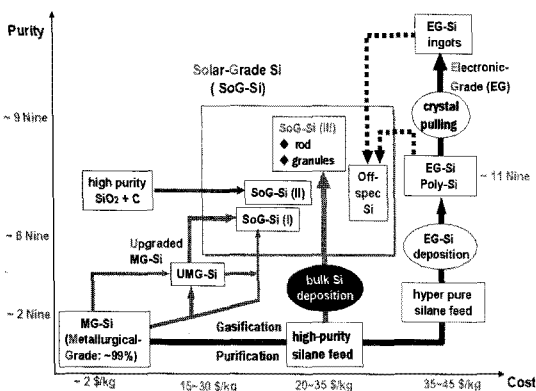


그림 2. 태양전지용 Si 원소재 (SoG-Si)의 다양한 제조 경로.

취급 및 저장이 아주 까다롭다 [5].

원료실란 가스는 고온에서의 수소환원반응 및 열분해반응을 통해 Si원소(미립자)를 생성시키고 이 Si원소(미립자)가 막대(Rod) 또는 입자의 표면에서 다결정상태를 이루면서 Si 결정층을 이루어 나간다. 그림 3에 요약하여 비교하여 나타낸 바와 같이, TCS의 경우 1,000 °C 전후의 고온 Si 표면에 Si 원소가 석출되면서 결정단위를 서서히 키워간다. 이와는 달리 MS의 경우에는 TCS 석출반응 온도 보다 낮은 온도에서의 표면 석출에 추가하여 공간 열분해로 생성되는 Si 핵이 서로 모여 미분말이 생성되고 Si 미분말 일부가 Si 코치 표면에 엉겨 붙는 복잡한 과정이 복합적으로 발생한다. 이 때문에 MS 석출공정에서는 Si 분말이 부산물로 많이 생성되므로 Si 분말을 처리해야 하는 부담이 크다. Si 분말은 그 자체 순도가 아주 높지만 운송, 저장, 성형이 까다롭고 기관 성형에 활용한다 하여도 운전 제약이 심각하다.

따라서 이 두 가지 실란원료의 경제성 면에서의 차이는 뚜렷하지 않지만 대부분의 Poly-Si 생산 공장이나 건설 중인 공장은 대부분 TCS를 원료실란으로 채택하고 있고 MEMC와 REC가 MS를 원료실란으로 채택하고 있다 [1].

현재 Poly-Si 제조공장에서 활용되는 석출공정에는 (i) 막대형 제품 생산용 종형(Bell-jar) 반응기를 이용하는 지멘스(Siemens)석출법과 (ii) 그레놀 제품 생산을 가능하게 하는 유동층반응기(Fluidized Bed

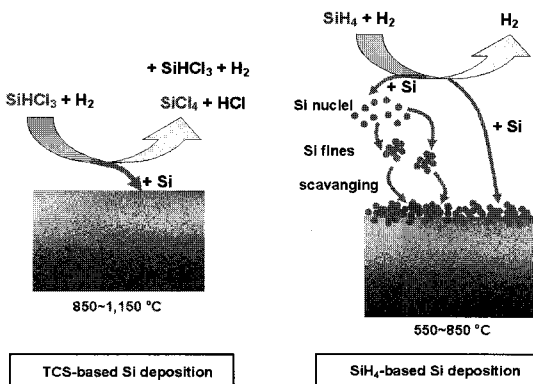
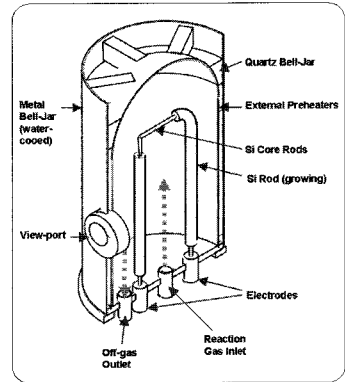


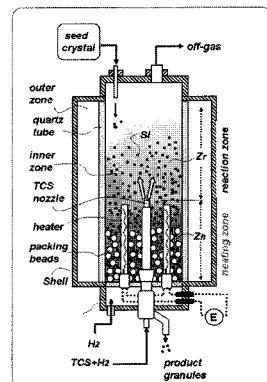
그림 3. 원료실란 (SiHCl<sub>3</sub> 및 SiH<sub>4</sub>) 석출특성의 차이.

Reactor : 이하 FBR)를 이용하는 유동층 석출법(이하 FBR법 또는 FBR 석출법) 가운데에서 한 가지가 선택되어 활용되고 있다 [5]. 지멘스 석출법에 사용되는 Bell-jar형 반응기는 그림 4(a)와 같이 반응기 내부 공간에 한 쌍의 전극에 연결되어 설치되는 U-형의 가는 Si 코어(필라멘트)를 충분히 예열시키고 전기저항 가열을 통해 충분히 가열시킨 다음 반응가스를 공급하여 코어 표면의 두께방향으로 Si Rod를 굵게 키워가는 방법으로 반응기에 의한 불순물오염을 근원적으로 배제하면서 초고순도의 Poly-Si을 제조하는 데에 오랫동안 사용되어오고 있다.

이와는 달리 그림 4(b)에 예시된 바와 같은 유동층



(a) Bell-Jar형 석출반응기 (Siemens공법)



(b) 유동층 석출반응기

그림 4. Si 석출용 반응기 형태에 따른 Si 석출공법 개요.



표 1. 대표적인 Si 석출공법의 특성비교.

	기존 Siemens 석출법	유동층 석출법 (FBR 석출법)
반응기 형태	Bell-jar(종)형 반응기	유동층 (Fluidized Bed Reactor)
제조원리	저항가열 Si Rod 표면에 Si 석출	Si 유동입자 표면에 Si 석출
제품형태	봉 [Chunk/Nugget형 포장 필요]	입자형 (그레놀형)
생산방식	Batch 방식	(반)연속적 생산 가능
석출전력원 단위	60~120 kWh/kg-Si	10~50 kWh/kg-Si
투자비/제조원가	높음	낮음
장점	기존 메이저의 오랜 사용 경험 높은 순도의 제품	낮은 투자비 및 제조원가 입자형 제품의 광범위한 활용
단점	코어 Si 붕 예열과정 필수, 카드로운 전력공급 설비 및 운전, 에너지/인력 소모 과다, 높은 시설투자비 및 감가상각비	Si 입자가열의 어려움, 표면적 과다 → 오염 위험, 내벽면 석출누적 → 연속운전 제한, 이용가능 기술 제한
추가처리 단계	파쇄/분리-→예칭-→세정-→포장 손실발생, 복잡한 과정	입자 저장상태에서 그대로 활용 모노실란: 분말제거 필요

반응기 (FBR)를 사용하는 FBR 석출법은 유동하면서 가열되는 Si (Seed Crystal)입자 표면에 Si 석출을 지속시키고 입경이 커져 무거워진 입자가 바닥으로 가라앉으면서 배출되는 특성으로 이론적으로는 연속 운전이 가능하다. 이 두 가지 석출법은 표 1과 같이 각각 장단점을 지니고 있는데 FBR 석출법이 지멘스 석출법에 비해 반응기 및 전력공급설비 면에서 투자비를 줄이고 전력원단위, 인건비, 분쇄 및 포장비, 감가상각비 면에서 유리하여 SoG-Si의 경제적 생산에 적합하다 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 TCS-FBR 법은 독일 Wacker社, MS-FBR법은 미국 MEMC 및 노르웨이 REC 같은 선진국 메이저들만이 상업생산을 도모할 수 있어 수많은 신규 진출업체들로서는 아직까지 FBR 기술을 활용할 방법이 없다. 국내에서는 한국화학(연)이 마이크로파 가열 TCS-FBR 공정 기술을 1994년 Wacker에 기술 수출한 바 있고, 최근에는 SoG-Si의 경제적 대량생산을 가능하게 하는 FBR석출법과 Siemens 석출법을 개발하여 실용화를 진행 중이다 [1].

이와 같이 원료실란 (가스화공정)-Si 석출공정이

선택되면 가스화공정 및 Si 석출공정에서 배출되는 부산물 및 미반응 원료가스성분들의 회수, 분리 및 재활용에 필요한 재활용공정이 결정되게 되어 Poly-Si 제조공장의 기본골격이 최종적으로 결정된다. 재활용공정은 부산물의 원료화, 폐기물 최소화, 에너지 절감, 부산물의 정밀화학 제품화 등과 이러한 조건에 따라 최종 결정되는 경제성 (투자비 및 제조원가)면에서 아주 중요하므로 여타 화학공장 건설과 마찬가지로 경제성 극대화를 위한 공정 최적화가 아주 중요하다.

### 2.3 MG-Si 업그레이드를 통한 SoG-Si (UMG-Si) 제조

앞에서 설명한 지멘스석출법의 개선, FBR 석출공정의 개발에 병행하여 경제성이 보다 높을 것으로 예상되는 MG-Si 활용에 관한 여러 경로 및 방법의 기술개발이 70년대 말 이후 지속되어오고 있다. 그 가운데 상업적으로 가장 근접한 방법은 그림 2에 나타난 바와 같은 MG-Si의 업그레이드 (정련 및 불순물 제거과정을 망라) 개념으로 UMG-Si (Upgraded MG-Si)을 제조하여 그 자체로 또는 EG-Si과 섞어 Si 기관 제조에 활용한다는 것인데, 실험실적으로 6 N 정도의 순도가 얻어짐이 확인된 바 있어 현재 본격적인 상업화가 시도되고 있다. 미국 Corning社에서는 EG-Si과 함께 섞어 Si 기관을 제조할만한 수준에 도달한 UMG를 판매하기 시작하였고, 노르웨이 Elkem社는 SoG-Si으로 바로 사용 가능한 UMG 제조공장을 제조원가 약 20 \$/kg 이하, 6 N수준의 품질, 2009년 초 생산을 시도할 목표로 1 단계 공장을 현재 건설 중에 있다. 나머지 업체들도 파일럿 규모의 생산을 계속하고 있다.

이들 UMG-Si 기술개발업체들이 공개한 최고의 품질자료 [6]를 원료실란 석출법에 의한 SoG Poly-Si의 품질 [1]과 비교해보면 표 2와 같다. 반복적인 정련을 거친 UMG-Si의 경우 P < 1 ppm, B < 0.1 ppm 조건을 여전히 만족시키지 못하고 있는데 주요 도핑 원소 불순물인 이 값들은 SoG Poly-Si에 비교해볼 때 1,000배 이상 높다. 그런데 UMG-Si만을 이용하여 제조한 셀의 효율이 SoG 및 EG Poly-Si의 결과와 동일 또는 우수하다는 보고 [6]도 있어 혼동을 초래하고 있다. 그러나 이 결과는 성장 초기에 형성되는 잉곳

표 2. UMG-Si와 원료실란 석출법에 의한 SoG Poly-Si과의 순도 비교.

Impurity	Upgraded MG-Si (UMG)			SoG Poly-Si (Siemens/FBR)
	Elkem Solar	Timminco (GD-MS)	Solsil (ICP-MS)	
P	1.5 ppmw	5.2 ppmw	2.25 ppmw	< 1 ppba
B	0.4 ppmw	0.83 ppmw	0.50 ppmw	< 0.1 ppba
Metallic	overall < 30 ppmw	Al: 0.06 ppmw Ge: 1.9 ppmw Cu: 0.05 ppmw	Al: 0.7, Mg: 0.7 Ca: 1.3; Ti: 0.3 Fe: 3.14 ppmw	Heavy metal: < 15 ppbw
C	No Disclosure	No Disclosure	No Disclosure	C < 500 ppba

부분은 불순물에 거의 영향 받지 않고 성장이 진행되면서 누적된 불순물 영향을 심각히 받는다는 점을 고려하면 그리 놀라운 일이 아니어서 [7] UMG-Si에 기초한 Si 기관 품질의 균일성, 가용성 잉곳부분의 수율 등 품질의 검증과 신뢰도가 추가로 검증될 필요가 있고 Poly-Si 생산 공장 건설이 가속화되는 추세 하에서 품질 열세를 만회할 만큼 가격경쟁력이 기대만큼 뛰어난지 여부는 추가로 검증되어야 할 사안이다. 비록 SoG-Si 수요자들 (기관 또는 태양전지 제조업체)의 요구 품질이 최근 태양전지 고효율화 추세에 따라 6~8 N 이상으로 까다로워지고 있지만 UMG-Si 제조 및 활용은 Poly-Si 공급부족이 심각한 경우에는 부족한 Si 원재료 부족부분을 보충한다는 면에서 상업적 가치를 충분히 지니고 있다.

### 3. 태양전지용 Si 기관 제조

앞에서 설명한 바와 같은 막대형 또는 입자형태의 Poly-Si와 UMG-Si을 포함하는 SoG-Si을 원료로 하여 단결정 Si 기관 및 다결정 Si 기관으로 제조하는 경로는 그림 5와 같이 요약된다. Si 원소가 특정 방향으로 규칙적으로 배향되어 있는 단결정 기관에서는 무늬가 관찰되지 않는다. 이와는 달리 단결정 미세 조각들이 서로 결합되어 있는 것처럼 보이는 다결정 기관은 결정영역 (단결정 조각들 사이의 경계면)에 따른 무늬를 나타낸다. 규칙적으로 배열된 다수의

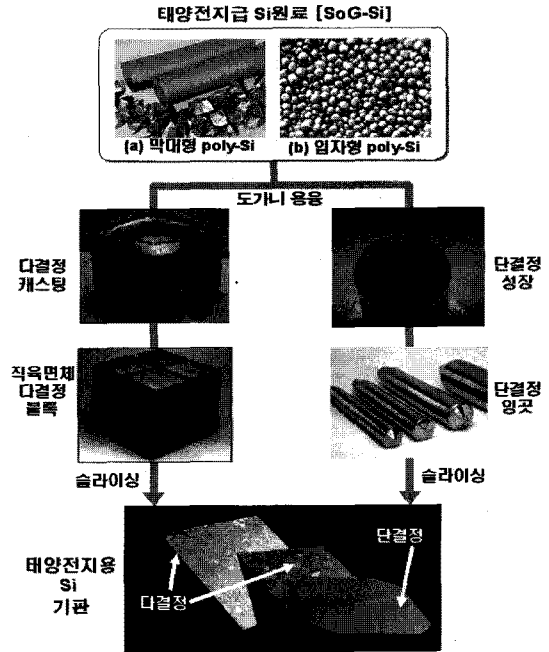


그림 5. 태양전지용 Si 기관 제조경로 개요.

태양전지들로 구성되는 모듈의 면적을 최소화하기 위해 Si 기관 형태는 보통 정사각형이며 한 변의 크기는 100, 125, 156, 200 mm 등으로 다양하다. 가격 면에서는 다결정 기관이 유리하지만 단결정 기관이 모듈효율 (태양광에너지 → 전기에너지 전환)면에서는 약 1%정도 우수하다.

불순물 오염을 방지할 수 있는 분위기 하에서 SoG-Si원재료를 고품질 석영재질의 도가니에서 용융시킨 다음 반도체 웨이퍼 제조과정과 유사한 단결정 잉곳제조 및 슬라이싱 과정을 거치면 태양전지용 단결정 기관을 제조할 수 있다. 단결정 기관의 상업적 제조과정은 다음과 같이 복잡한 과정을 거친다: SoG-Si의 도가니 충전 → 단결정성장 (Crystal Growing) → 봉형 잉곳의 상하부 (Top과 Tail) 절단 (Cropping) → 잉곳단면 사각화 (Squaring) → 잉곳 모서리 가공 (Chamfering) → 잉곳 표면 연마 (Grinding) → 잉곳의 분할 절단 (Cropping) → 분할된 잉곳을 Beam에 부착 (Mounting) → 잉곳 슬라이싱 (Wire Sawing) → 예비 세정 (Pre-cleaning) →

Beam 제거 (Separation) → 본 세정 (Final Cleaning)  
 → 품질검사 (Inspection) → 제품 단결정 기판 분류 (Sorting).

한편, 봉형 단결정 잉곳 성장과는 달리 다결정의 경우 직육면체 형태의 잉곳 (블록) 제조가 필요하다. 육면체의 석영재 도가니 속에서 SoG-Si을 녹인 다음 방향성 고형화과정 (다결정 캐스팅과정)을 통해 다결정 구조의 Si 블록을 제조하고 태양전지 셀 크기의 단면적을 갖는 직육면체 블록으로 슬라이싱한 다음 기판 슬라이싱을 거치면 태양전지용 다결정 기판을 제조할 수 있다. 다결정 기판의 상업적 제조과정도 단결정 기판 제조과정과 유사하나 다음과 같이 직육면체 블록의 제조방법에서 차이가 있다: SoG-Si의 도가니 충전 → 캐스팅 및 지향성 고형화 (Casting & Directional Solidification) → 직육면체 잉곳의 상하부 및 측면 절단 (Cropping) → 절단 및 블록 제조 (Brick) → 잉곳 모서리 가공 (Chamfering) → 잉곳 표면 연마 (Grinding) → 분할된 잉곳을 Beam에 부착 (Mounting) → 잉곳 슬라이싱 (Wire Sawing) → 예비 세정 (Pre-cleaning) → Beam 제거 (Separation) → 본 세정 (Final Cleaning) → 품질검사 (Inspection) → 제품 단결정 기판 분류 (Sorting).

현재 대부분의 태양전지는 이러한 과정을 통해 제조하는데, 기판 두께가 180~220  $\mu\text{m}$  정도 되도록 와이어형 절단기 (Multi-wire Sawing)로 잉곳 (블록)을 수많은 얇은 기판으로 슬라이싱한다. 이 과정에서 약 40% 전후의 Si 분말손실 (Kerf Loss)이 불가피하게 발생한다. PV 산업에 있어서 SoG-Si 부담이 심각해짐에 따라 원료소모량과 분말손실을 줄일 수 있게 Si 기판 (단결정 기판기준) 두께를 160  $\mu\text{m}$  이하로 얇게 하여 SoG-Si 원료 소모량을 9 g/Wp 이하로 줄임으로써 최근 약 1.5~2.5 \$/Wp에 이르는 Si 기판 가격을 낮추려는 노력이 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 그림 6에는 2012년 1 \$/Wp의 모듈단가 목표 달성을 위해 셀 효율의 향상 노력에 추가하여 반드시 이루어져야 할 기판의 박판화, 즉, 단결정과 다결정 기판 두께를 각각 120 및 180  $\mu\text{m}$  두께로 줄이려는 기술개발 목표치의 추이를 나타내고 있다 [8]. 그동안 기술개발 추이에 따르면 모듈단가 실현 가능성은 별도로 하더라도 박판화 목표는 달성될 수 있을

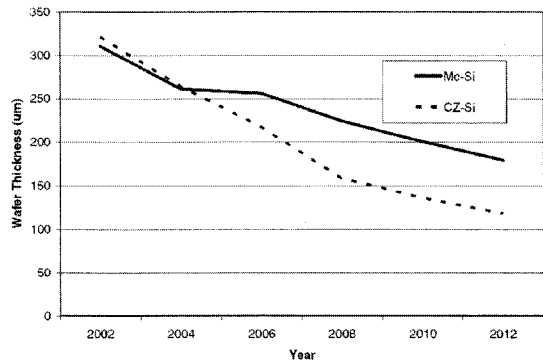


그림 6. Si 기판 (다결정 mc-Si ; 단결정 CZ-Si) 두께의 변화.

표 3. 태양전지용 Si소재의 종류 및 활용 범위 [O : 우수, Δ : 가능, X : 불가].

Si 기판 제조공법	UMG Si	Poly-Si		Si 분말 (SiH4 열분해)
		치멘스 (봉)	FBR (입자)	
다결정 Si기판(*)	○	○	○	×
단결정 Si기판(*)	△	○	○	×
전자기 연속캐스팅(*)	△	△	○	△
리본형 Si결정(+)	△	△	○	△
후박형 Si필름(+)	△	△	○	○

(\*) 잉곳제조→슬라이싱→기판 공정; (+) 반연속 공정

것으로 기대된다.

Si 소재 원단위 절감을 위한 또 다른 접근방법으로서, 현재까지 잉곳 (블록)의 슬라이싱과정에 발생하는 Si 분말손실을 보다 근원적으로 배제함으로써 Si 원료소모량을 줄이기 위하여 SoG-Si 용융 → 잉곳 제조 → 슬라이싱 경로를 대신하여 SoG-Si 용융 → 140~160  $\mu\text{m}$  이하 두께의 리본형 기판의 연속제조 방법이 시도되고 있는데 String 인상법, Edge-defined Film-fed (EFG)성장법, Horizontal Ribbon Growth on Substrate (RGS법), 후박형 Si 필름 등이 여기에 포함된다 [5].

이와 같은 다양한 Si 기판 제조방법은 사용하는 SoG-Si 원재료의 물리적 형태 (불규칙한 모양의 청크/너겟/칩, 미세분말, 1~1.5 mm 평균크기의 그레

늘 등)에 따라 그 효율이 결정된다(표 3). 이 가운데 그레놀 형태 SoG-Si는 잉곳이나 리본 성장에 상응하는 소량의 Si양을 정밀 제어하면서 도가니 내부 용융액을 수월하게 일정량 유지할 수 있게 하는 반면 나머지 형태의 원료는 정량적이고 안정적인 용융액 보충을 아주 까다롭게 하며 결정성장에 지장을 초래한다. 리본법 가운데에서는 미국 Evergreen社의 스트링법이나 독일 Schott Solar의 Edge-defined Film-fed (EFG)성장법이 상업적 활용도에서 두각을 나타내고 있는데 FBR 석출법에 의한 그레놀 형태의 Poly-Si의 생산이 늘면 그 제품의 활용범위가 대폭 늘어날 것으로 예상된다. 또 단결정 성장 및 다결정 캐스팅에 있어서도 그레놀 Poly-Si은 동일 도가니에 대한 Si 충전량을 극대화(칭크/너겟과 그레놀을 혼합하여 공극률을 극소화)할 수 있게 하고, 동일 도가니에서의 잉곳성장을 여러 차례 반복할 수 있게 할 수 있으며, (준)연속적인 잉곳 성장과 캐스팅을 가능하게 하여 Si 기판가격을 저감시키는 데에 크게 기여할 수 있다.

이러한 관점에서 본다면 Si 기판을 가장 경제적으로 생산할 수 있는 기존의(준)연속적 제조 방법을 더욱 개선하거나 종래의 단결정 잉곳 성장이나 다결정 캐스팅 같은 SoG-Si의 성형을 통한 Si 기판 제조과정에 있어서 생산성과 경제성을 더욱 극대화시킬 수 있는 요소들이 곳곳에 산재해 있다. 개선의 여지가 많은 항목에 해당하는 장비와 운전기술의 향상이나 혁신이 구현되기만 한다면 Si 기판재료비 절감은 물론 셀, 모듈 가격 저감, 나아가 PV 산업의 경쟁력을 추가로 발전시키는 중요한 계기가 마련된다. 이와 같이 SoG-Si의 경제적인 성형을 목표로 하는 기술적 노력에 있어서, 원료인 SoG-Si 재료의 물리적 사양과 순도는 반드시 고려해야 할 필요가 있다.

## 4. 결론

최근의 Poly-Si 공급부족에 따른 SoG-Si 시장 가격 폭등으로 Si 기판 평균 판매가격이 아직도 2 \$/Wp 아래로 내려가지 못하고, 그 결과 태양전지 셀 업체가 구매하는 Si 기판 재료비가 결정형 Si 태

양전지에 기초한 태양광발전 시스템 비용의 약 절반 또는 그 이상을 차지하고 있다. 태양전지 발전단가의 충분한 경쟁력 확보에 필요한 모듈단가 2 \$/Wp를 달성하기 위해서는 셀 및 모듈의 제조비용의 절감노력에 병행하여 소요되는 Si 기판비용을 1 \$/Wp 이하로 줄일 수 있게 하는 기술개발과 산업현장의 노력은 필수적이나 얼핏 아주 어려운 목표처럼 여겨진다. 그러나 밸류체인에 기초한 경쟁력을 지니고 있는 선진국 업체들은 이미 그러한 노력을 계속해오고 있고 이러한 목표가 조만간 달성될 것으로 낙관하고 있다.

따라서 거의 절반수준 또는 그 이하로 Si 기판비용을 절감하기 위해서는 제일 먼저 SoG-Si 공급물량을 충분히 확대하여 시장가격을 현재의 절반 수준 또는 그 이하로 낮추어야 한다. 이와 같은 PV 산업의 요구를 제대로 만족시킬 수 있으려면 FBR 석출법이나 고생산성 지멘스 석출법에 기초한 Poly-Si 생산이 값싸게 이루어 질 수 있게 핵심기술의 실용화와 해당 장비의 대형화가 반드시 실현되어야 한다. 한편, 급증하는 SoG-Si 원재료 수요를 Poly-Si 생산 공장 건설/증설만으로는 항상 만족시킬 수는 없는 시장 특성을 고려한다면, 순도 면에서 충분한 신뢰성을 지니면서 보다 저렴한 UMG의 공급도 함께 이루어 질 수 있다면 더욱 바람직하다.

값싼 SoG-Si의 대량생산과 병행하여 Si 기판의 박판화도 보다 가시화되어 Si 기판 단위의 Si 소모량도 10~12 g/Wp로부터 6~8 g/Wp 수준으로 낮추는 것도 Si 재료비 절감에 아주 중요하다. 이를 달성하기 위해서는 잉곳 및 블록 제조 생산성 향상에 필요한 Si 잉곳 성장/성형기술, 잉곳과 기판의 슬라이싱 과정에서 발생하는 폐분말(Kerf) 발생을 배제하거나 최소화시킬 수 있는 절단기술, (준)연속방식의 박판성장을 통한 Si 기판제조기술, 얇은 Si 기판에 대해 불량률을 줄일 수 있는 셀 및 모듈 제조 기술 등 다양한 기술들의 개발과 해당 장비의 상용화가 조속히 이루어져야 한다.

태양광발전이 지구상에 필요한 전력의 겨우 0.1% 정도 공급하는 현실에서 PV 에너지가 중기적(2015~2020)으로 10~25%, 궁극적으로 50% 이상 커버하고자 하는 인류의 꿈을 달성해나가는 과정에





SoG-Si 소재와 Si 기관의 공급부족 사태는 항상 재현될 가능성이 있다. 최근 SoG-Si 신규공장 건설과 기존공장 증설이 일시에 집중되어 단기적으로 공급과잉이나 가격하락의 위험성이 예상되기도 하지만, SoG-Si 공급확대 ⇒ Si소재 가격하락 ⇒ 셀, 모듈 제조 및 설치비용 하락 ⇒ 태양광발전단가 하락 ⇒ 태양광발전 경제성증가 및 수요확대 ⇒ 셀 및 모듈 제조설비 증설 ⇒ SoG-Si 수요 증대 ⇒ SoG-Si 공급부족 및 가격상승 ⇒ SoG-Si 제조공장 증설/신규건설 ⇒ SoG-Si 공급확대의 사이클은 끊임없이 반복될 가능성이 높다. 그리고 박막 태양전지나 염료 및 유기 태양전지의 상업적 활용범위가 확대되어 결정형 Si 태양전지의 시장점유율이 서서히 감소한다 하여도 SoG-Si의 연간 수요량의 증가는 앞으로도 꾸준히 지속될 수밖에 없다.

향후 2010년이 지나면서 정부의 지원정책이 없어도 PV 경제성이 자율적으로 형성되는 시점 (Grid Parity)이 지구 곳곳에서 현실화되기 시작하여 태양전지 시장수요가 폭발적으로 확대되기 시작하면 태양전지 소재의 구성 물질이 무엇인가가 전지 및 소재의 종류와 기술을 결정짓는 중요한 기준이 될 것이다. 지표면을 이루고 있는 원소들 가운데 산소 다음으로 가장 풍부하게 27.6%나 차지하는 Si은 인류의 에너지문제를 궁극적으로 해결해 줄 수 있는 유일한 물질로서 반도체산업에 뒤이어 국가가 지양하는 저탄소 녹색성장을 견인하는 신재생에너지산업의 핵심물질이 될 것임이 분명하다.

### 감사의 글

본 논문과 관련된 연구는 산업자원부 신재생에너지기술개발사업 (2006-N-PV12-P-02)의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

[1] H.Y. Kim, "Preparation of Polysilicon for Solar Cells," Korean Chem. Eng. Res., Vol. 46, No. 1, p.

37-49, 2008.  
 [2] A. Jaeger-Waldau, "PV Status Report 2006: Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics," EUR-22346 EN, European Commission, DG Joint Research Center, August, 2006.  
 [3] A. Mueller, M. Ghosh, R. Sonnenshein, and P. Woditsch, "Silicon for Photovoltaic Application," *Materials Science and Engineering B*, 134, p. 257-261, 2006.  
 [4] J. Dietl, D. Helmreich, and E. Sirtl : *Crystals*, Vol. 5, p. 43, Springer-Verlag, Berlin 1981.  
 [5] B. Ceccaroli and O. Lohne, "Solar Grade Silicon Feedstock," in A. Luque, and S. Hegedus (Eds), *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, p. 154-204, 2003.  
 [6] Presentations by Elkem, Silsilc and Timminco, 6<sup>th</sup> Silicon Conference, Munich, April 1, 2008.  
 [7] K. Hesse, E. Schindlbeck and H.-C. Freiheit: "An Overview on Silicon Feedstock," 22<sup>nd</sup> European Solar Energy Conference, Milan, Italy, 3-7 September 2007.  
 [8] R.M. Swanson, *Prog. Photovolt : Res. Appl.*, 14: p. 443-453, 2006.

### 저자약력



성명 : 김희영

◆ 학력

- 1977년 서울대 화학공학과 공학사
- 1979년 한국과학기술원 화학공학과 공학석사
- 1987년 한국과학기술원 화학공학과 공학박사

◆ 경력

- 1979년 - 1983년 대우조선공업(주) 플랜트영업과장
- 1987년 - 현재 한국화학연구원 석유대체연구센터 책임연구원
- 2002년 - 현재 한국공학한림원 후보회원