

## 금속급 실리콘용 고순도 규사 제조를 위한 물리적 정제 특성

### Preparation of High-grade Silica Sand for Metallurgical-grade Si Using a Physical Beneficiation

양 영 철(Young-Cheol Yang) · 정 수 북(Soo-Bok Jeong)\* · 채 영 배(Young-Bae Chae) · 김 성(Seong Kim)

한국지질자원연구원 광물자원연구본부

(Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea)

**요약** : 고순도 금속급 실리콘 제조에서는 원료가 되는 실리카 광물의  $\text{SiO}_2$  품위가 매우 중요한 요소이다. 베트남 규사광에 대한 광물학적 분석결과를 토대로, 석영과 불순광물의 광물학적 특성차이를 이용하는 분급, 비중 및 자력선별을 포함하는 물리적 종합정제공정을 구성하여 적용시켰다.  $\text{SiO}_2$  품위 99.8 wt% 이상의 고순도 규사 정광을 93 wt% 이상 회수하였다. 이러한 고순도 규사 정광은 금속급 실리콘의 순도 규격에 적합하였다.

**주요어** : 금속급 실리콘, 고품위 규사, 분급, 비중선별, 자력선별

**ABSTRACT** : It is very important to raise the purity of silica for manufacturing metallurgical-grade silicon because the purification of silicon in the smelting process is very difficult. In present study, the silica sand which is obtained from Vietnam was mineralogically analyzed. Based on the results, a novel process to separate impurities from the silica sand was developed, which consisted of classification, specific gravity and magnetic separation steps. Using the developed process, high-grade silica sand concentrate containing over 99.8 wt%  $\text{SiO}_2$  was prepared, being suitable for manufacturing the metallurgical-grade silicon.

**Key words** : metallurgical-grade silicon, high-grade silica sand, classification, specific gravity separation, magnetic separation

## 서 론

규사(silica sand)는 유리원료, 주물공업 및 각종 화학공업 원료로 주로 사용되어 왔는데, 최근에는 태양전지 및 전자산업에서의 실리콘(silicon) 원료로도 사용되고 있다.

태양광 발전 산업은 지구의 환경 문제와 고유가로 인해 현재 고속으로 성장하고 있는 중이다(김희

영, 2008). 실리콘 결정형 태양전지 원료로 사용되는 다결정 상태의 고순도 실리콘(silicon, Si), 즉, 폴리실리콘(polysilicon)의 년 생산규모가 2005년도에는 31,000톤(주로 반도체 웨이퍼용 단결정 원료)에 불과했지만, 2011년에는 21 GW 태양광 발전용으로 약 15만 톤/년의 Si 공급이 필요한 것으로 전망되어 약 5배의 폴리실리콘 생산 증가가 필요할 것으로 예상된다(Rogal, 2007).

금부상하는 태양광 발전 산업의 시장성장과 대

\*교신저자: sbjeong@kigam.re.kr

**Table 1.** Purity of metallurgical- and solar-grade silicon (Gribov and Zinov'ev, 2003)

Content		Metallurgical grade		Solar grade <sup>***)</sup>
Si		98~99% <sup>*)</sup>	99.5% <sup>**)</sup>	
Impurity (ppm)	Al	1000~4000	50~600	<0.1
	Fe	1500~6000	100~1200	<0.1
	Ca	250~2200	100~300	<1
	Mg	100~400	50~70	<1
	Mn	100~400	50~100	≪1
	Cr	30~300	20~50	≪1
	Ti	30~300	10~50	≪1
	V	50~250	<10	≪1
	Zr	20~40	<10	≪1
	Cu	20~40	<10	<1
	B	10~50	10~15	0.1~1.5
	P	20~40	10~20	0.1~1
	C	1000~3000	50~100	0.5~5

<sup>\*)</sup> References: (Chu *et al.*, 1978; Barthey and Gretella, 1982; Dietl, 1983)  
<sup>\*\*)</sup> References: (Kapoor and Chondary, 1983; Hunt, 1984; Yuge *et al.*, 1999)  
<sup>\*\*\*)</sup> References: (Pelosini *et al.*, 1980; Dietl and Wohlschlager, 1981; Hunt, 1984; Yuge *et al.*, 1999)

체에너지로서의 경쟁력 강화를 위해서는 태양광발전 시스템 구성에 필요한 재료나 장비의 원활한 공급이 필수적이며(Jaeger-Waldan, 2006), 특히 태양전지용 폴리실리콘의 값싸고 안정적인 공급이 반드시 전제되어야 한다. 태양전지급 실리콘(solar-grade Si)을 제조할 수 있는 대부분의 방법들은 품질이 좋은 실리카 광물(규석 혹은 규사)과 코오크스(C)를 아크전기로(Arc electro furnace)에서 반응시켜 얻어지는 약 99% 순도의 금속급 실리콘(metallurgical-grade Si)을 출발원료로 사용한다.

이러한 금속급 실리콘의 고순도화를 위한 정련 공정은 그 과정이 복잡하고 비용부담이 큰 단점이 있으므로, 금속급 실리콘 제조를 위한 출발 원료물 질부터 고품위 실리카를 사용하는 것이 바람직하다. 따라서 물리적 또는 화학적 정제공정을 이용하여 실리카 광물의 불순물 함량을 최대한 감소시켜야 할 필요가 있다.

표 1은 금속급과 태양전지급 실리콘의 불순물 표준 함량을 정리한 것이다. 고순도 실리콘을 제조하기 위한 정련공정에서 붕소(B)와 인(P)의 제거는 매우 어렵다고 알려져 있으므로(Nakamura *et al.*, 2004), 태양전지급 실리콘을 얻기 위해서는 낮은

함량의 붕소와 인을 함유하는 금속급 실리콘을 이용하는 것이 바람직하다.

따라서 본 연구에서는 규사광에 대하여 불순광물의 종류 및 광물학적 특성 등을 조사한 후, 석영 광물과 불순광물의 특성차이를 이용하는 물리적 정제실험을 시행하여 그 특성을 고찰하였다.

### 실험 재료 및 방법

#### 실험재료

본 연구에 사용된 규사광은 베트남 광남성 누이 판군 땀띠엔 지역에 위치하고 있으며, 시료는 지표면에서부터 심도 3.3 m까지 균일한 양을 채취하여 고르게 혼합하여 사용하였다.

시료의 입도분포는  $d_{(10)}$  158  $\mu\text{m}$ ,  $d_{(50)}$  268  $\mu\text{m}$ ,  $d_{(90)}$  459  $\mu\text{m}$ 로서 비교적 균일한 크기를 가지고 있는 것으로 조사되었다. 이는 일반적인 국내 규사광에 비해 미립인 것으로 판단된다.

표 2는 시료의 화학조성 분석 결과이다.  $\text{SiO}_2$ 는 습식분석을 이용하였고, 나머지 불순성분 분석은 ICP (JY-38, Jobin-Yvon, France)를 이용하였다.  $\text{SiO}_2$  함

**Table 2.** Chemical composition of raw sample

Chemical composition (SiO <sub>2</sub> : wt%, others: ppm)													
SiO <sub>2</sub>	Al	Fe	K	Na	Ca	Mg	Mn	Ti	Zr	B	P	V	Ce
99.44	463	498	70.1	45.3	42.4	39.5	18.5	560	8.48	76	6.12	1.58	3.55

량은 99.44 wt% 였고, 불순 성분 중 Al, Fe, Ti 등은 100 ppm 이상의 함량을 나타내었으며, K, Na, Ca, Mg, Mn, B 등은 100~10 ppm, Zr, P, V, Ce 등은 10 ppm 이하였다. 시료는 비교적 고품위 규사 광으로 금속급 실리콘 제조 및 IT분야에서 활용도 및 잠재가치가 높을 것으로 추정된다.

**실험방법**

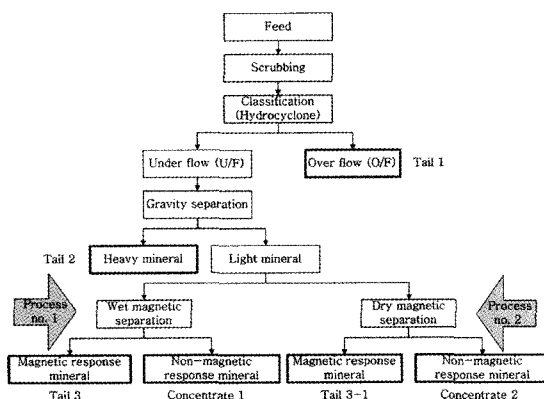
시료에 대하여 습식 체가름(35, 100, 200 mesh)을 적용하여 입자크기별로 분류한 후, 화학조성 분석을 통해 불순광물이 집중되어 있는 입도범위를 규명하였다.

상온(20℃)에서 비중이 2.96인 Tetrabromoethane을 사용하여 비중이 2.7 정도인 석영과 비중이 2.96 이상인 고비중 광물을 분리하는 중액선별 실험을 실시하여 분리된 고비중 광물의 종류 및 특성을 조사하였다. 또한 자력선별 실험에 의해 자력감응 광물을 분리하여 종류 및 특성을 조사하였다. 체가름, 중액 및 자력선별을 통해 분리된 광물들에 대해 화학조성(ICP), XRD 정량분석(DMAX 2500, Rigaku, Japan), 편광현미경(LEICA-DMRX, Leica Microsystems GmbH, Germany), SEM EDS (JSM 6300, JEOL Ltd. Japan) 분석 등을 실시하여 광물종류 및 함유량 등의 특성을 조사하였다.

이상과 같이 구성광물의 종류 및 함량 등을 분석한 후 본 규사광에 적합한 종합 정제공정을 그림 1과 같이 설계하였다.

1차적으로 일반적인 교반기(Scrubber)를 이용하여 점토광물과 응집되어 덩어리진 광체를 해체시킨 후, 습식분급(Hydrocyclone, Liquid-Solid Separation Ltd. UK)을 실시하여 조립산물(U/F)과 미립산물(O/F)을 분리하였다. 이때 해쇄 공정에서의 실험조건은 광액농도 60 wt%, 회전수 700 rpm, 교반시간 5분으로 하였다.

습식분급에 의하여 분리된 조립산물은 비중선별 장치인 요동 테이블(Wifley no. 13, Humprey Co., USA)을 이용하여 중광물(heavy mineral)과 경광물(light mineral)로 분리하였다. 이 때의 실험조건은



**Fig. 1.** Beneficiation flow sheet for purification of raw sample.

요동수 180회/분, 광액농도 20 wt%이었다.

분리된 경광물(light mineral)에 대해서는 12,000 Gauss의 자력세기를 가지는 습식 고자력 선별기 (Model N1-3K-23-11, Eriz manufacturing Co., USA)와 희토류(Nd-Fe-B)합금으로 제조된 10,000 Gauss 자속밀도의 자석을 장착한 영구자석형 자력선별기 (International Process System Co., USA)를 사용하여 습식 및 건식 자력 선별을 실시하여 두 방법에 대한 정제 효과를 비교 검토하였다.

**결과 및 고찰**

**미립 불순광물의 분리**

규사광에 혼입되는 광물들은 석영광물과 불순광물의 입자크기가 서로 다를 수 있기 때문에 체가름을 이용하여 입자크기별 특성을 조사하였다.

표 3은 체가름 실험에 의해 분리된 입도범위별 산출율과 화학조성 분석결과를 정리한 것이다. 35 mesh (500 μm) 이상의 입도범위에서 SiO<sub>2</sub> 품위가 99.78 wt%로 가장 높았으며, 200 mesh (75 μm) 이하의 입도범위에서 95.70 wt%로 가장 낮은 특성을 나타내었다. 불순성분의 경우는 SiO<sub>2</sub> 품위와는 반대로 100 mesh 이상의 조립산물에 함유량이 미미

**Table 3.** Yield and chemical composition of products separated by wet sieving

Particle size (mesh)	Yield, wt%	Chemical composition (SiO <sub>2</sub> : wt%, others : ppm)													
		SiO <sub>2</sub>	Al	Fe	K	Na	Ca	Mg	Mn	Ti	Zr	B	P	V	Ce
+35#	2.54	99.78	203	112	47	29	37	9	2	78	3	54	3	0.4	2
-35#~+100#	84.08	99.71	332	190	61	38	70	29	5	137	4	92	2	1	2
-100#~+200#	12.53	99.49	2,652	3,863	129	107	707	231	120	5,232	188	159	56	12	5
-200#	0.85	95.70	3,561	9,316	519	158	764	383	374	11,680	4,966	48	154	17	131

**Table 4.** Yield and chemical composition of products separated by sink-float test

Product	Yield, wt%	Chemical composition (SiO <sub>2</sub> : wt%, others : ppm)													
		SiO <sub>2</sub>	Al	Fe	K	Na	Ca	Mg	Mn	Ti	Zr	B	P	V	Ce
Sink	0.60	38.76	91,215	93,265	1,519	6,571	2,466	12,274	5,032	132,260	36,428	·	588	217	162
		Ti	Zr	V	Ce	Y	La	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Yb		
		132,260	36,428	217	162	353	200	40.8	158	28.1	2.75	33.9	46.0		
Float	99.40	99.73	289	173	69	29	43	16	3	112	4	4	5	0.7	2
		SiO <sub>2</sub>	Al	Fe	K	Na	Ca	Mg	Mn	Ti	Zr	B	P	V	Ce

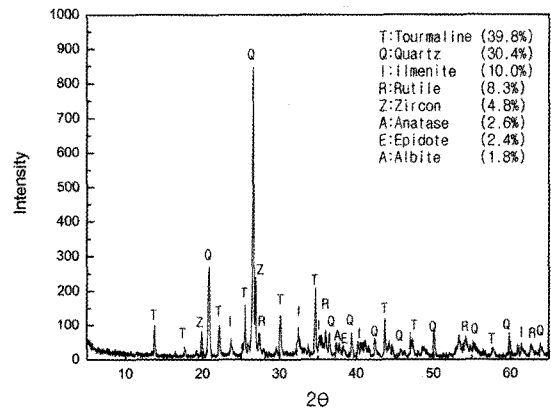
한 반면 100 mesh 이하의 미립 산물에 높은 함유량을 나타내었다. 특히 200 mesh 이하의 산물에 불순성분이 집중되어 분포되는 특성을 나타내었다.

이러한 특성은 규사광에 혼입되는 주요 불순물인 금속광물과 점토류의 광물들이 미세한 결정크기를 갖기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 본 시료의 품위향상을 위해서는 200 mesh 이하의 미립광물의 분리·제거가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

**고비중 광물의 분리**

시료와 같은 해빈사의 경우, 일반적으로 고비중을 갖는 금속광물이 혼입될 수 있다. 이러한 금속광물들의 종류 및 함량 등을 조사하기 위해 중액선별을 이용하여 고비중 광물을 분리한 후 특성을 조사하였다.

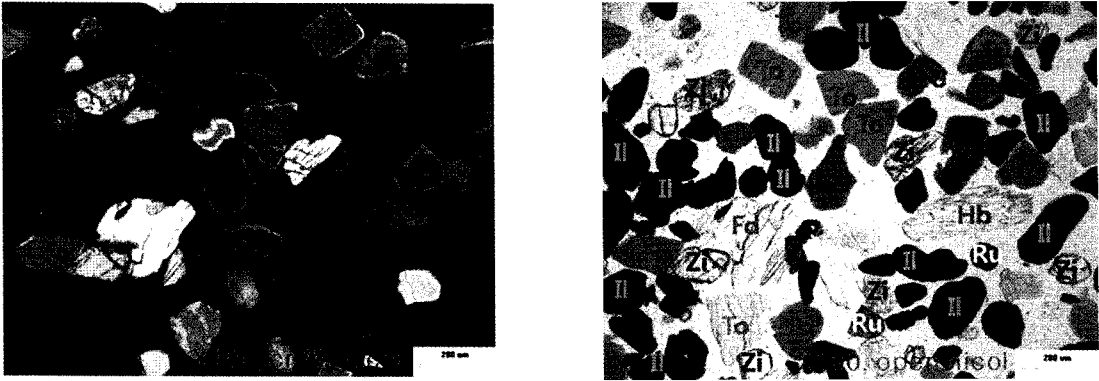
표 4에서 볼 수 있듯이, 비중 2.96 이상의 중광물로 0.60 wt%가 분리되었다. 비중 2.96 이하의 경광물은 SiO<sub>2</sub> 품위가 99.73 wt%로 높은 반면, 중광물에서는 38.76 wt%로 매우 낮은 특성을 나타내었다. SiO<sub>2</sub> 이외의 성분들은 중광물에 집중적으로 분포되었는데, 이들 중광물에는 유용 가능한 희유금속들이 함유되어 있으므로, 별도의 처리공정을 거쳐 유가 자원으로 활용할 수도 있을 것으로



**Fig. 2.** X-ray diffraction (XRD) pattern of the sink mineral separated by sink-float test.

판단된다.

그림 2는 중액선별에 의하여 분리된 중광물을 구성하고 있는 광물의 종류 및 함유량 등을 조사하기 위한 X-선 회절 분석 결과이다. 중광물은 전기석(Tourmaline, (Na,Ca)(Mg,Fe,Al,Li)<sub>3</sub>Al<sub>6</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>18</sub>(OH)<sub>4</sub>), 석영(Quartz, SiO<sub>2</sub>), 티탄철석(Ilmenite, FeTiO<sub>3</sub>), 금홍석(Rutile, TiO<sub>2</sub>), 저어콘(Zircon, ZrSiO<sub>4</sub>), 예추석(Anatase, TiO<sub>2</sub>), 녹립석(Epidote, Ca<sub>2</sub>(Fe, Al)<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>), 조장석(Albite, NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) 등으로 구



(Zi : zircon, Fd : feldspar, Hb : hornblende, Ru : rutile, To : tourmaline, Il : ilmenite)

Fig. 3. Polarization microscopy of the sink mineral separated by sink-float test.

Table 5. Yield and chemical composition of products separated by wet magnetic separation

Product	Yield, wt%	Chemical composition (SiO <sub>2</sub> : wt%, others: ppm)													
		SiO <sub>2</sub>	Al	Fe	K	Na	Ca	Mg	Mn	Ti	Zr	B	P	V	Ce
Mag.	0.45	57.13	55,961	75,877	303	2,679	3,126	11,501	4,270	88,299	3,781	·	409	141	213
Non-mag.	99.55	99.64	354	163	65	32	54	18	3	179	13	9	5	1	2

성되어 있는 것으로 조사되었다. XRD 정량 분석결과 전기석과 석영 광물이 가장 많은 분포비율을 나타내었으며, Fe와 Ti 성분을 포함하는 티탄철석, Ti 성분을 갖는 금홍석, 예추석, Zr성분을 갖는 저어콘 등을 포함하는 것으로 분석되었다.

그림 3은 시료에 대한 편광 현미경 관찰 결과인데, 전기석, 티탄철석, 저어콘, 금홍석, 각섬석류 (Hornblende, Ca<sub>2</sub>Na(Mg,Fe)<sub>4</sub>(Al,Fe,Ti)<sub>3</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>22</sub>(OH,F)<sub>2</sub>), 장석류 (Feldspar, (K,Na,Ca,Ba)<sub>x</sub>(Al,Si)<sub>3</sub>O<sub>8</sub>), 석영 등이 관찰되었다.

중액선별 결과에서 볼 수 있는바와 같이, 본 규석광의 품위향상을 위해서는 고비중의 광물을 분리할 수 있는 비중선별 공정의 적용이 효과적일 것으로 판단된다.

### 자력감응 광물의 분리

시료에는 불순광물로 자력감응특성을 갖는 광물이 혼입되어 있을 것으로 예상되어 자력선별을 실시한 후 그 특성을 조사하였다.

표 5는 자력선별에 의해 분리된 자력감응 광물과 비감응 광물의 산출율과 화학조성분석 결과이다. 비자력감응 광물로 99.55 wt%가 산출되었는데

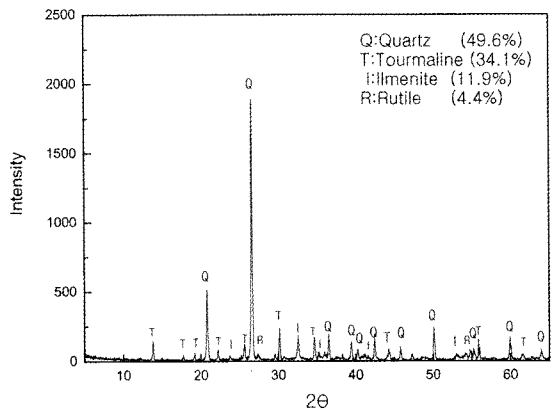


Fig. 4. X-ray diffraction (XRD) pattern of the magnetic response mineral separated by wet magnetic separation.

SiO<sub>2</sub> 품위가 99.64 wt%로 높은 반면 불순성분은 매우 낮은 특성을 나타내었다. 자력감응 광물로는 0.45 wt%가 산출되었는데, 이 산물에 불순성분이 집중되었으며, 특히 Fe와 Ti성분을 각각 7.58 wt% 이상, 8.82 wt% 이상 포함하는 특성을 나타내었다.

그림 4는 습식자력선별에서 분리된 자력감응 광물에 대한 XRD 정량 분석 결과이다. 석영, 전기석,

**Table 6.** Yield and chemical composition of the each product separated by two types of physical separation process

Process	Product	Yield, wt%	Chemical composition (SiO <sub>2</sub> : wt%, others : ppm)													
			SiO <sub>2</sub>	Al	Fe	K	Na	Ca	Mg	Mn	Ti	Zr	B	P	V	Ce
No.1	O/F (tail 1)	0.90	95.20	7,408	9,521	852	152	395	661	290	12,798	2,560	·	83	22	8
	Heavy. (tail 2)	4.51	95.44	18,226	13,825	76	157	7,467	3,443	259	12,408	448	·	84	35	4
	Magnetic. (tail 3)	0.60	90.88	5,604	10,536	194	559	396	347	293	12,618	5,312	·	129	20	126
	Total tail	6.01	94.94	15,345	12,852	204	196	5702	2,717	267	12,487	1,249	·	89	31	17
	Concentrate1	93.99	99.80	263	126	59	17	58	15	2	96	3	6	2	1	4
No.2	O/F (tail 1)	0.90	95.20	7,408	9,521	852	152	395	661	290	12,798	2,560	·	83	22	8
	Heavy. (tail 2)	4.51	95.44	18,226	13,825	76	157	7,467	3,443	259	12,408	448	·	84	35	4
	Magnetic. (tail 3-1)	1.54	96.51	8,671	5,731	269	264	451	899	98	5,391	331	·	61	14	4
	Total tail	6.95	95.64	14,707	11,474	219	180	4,996	2,519	227	10,903	695	·	79	29	4
	Concentrate2	93.05	99.84	251	119	61	17	47	14	2	90	4	2	3	1	3

※ Analysis of B (Boron) was carried out on the concentrate only.



**Fig. 5.** Scanning electron microscope (SEM) photograph of the magnetic response mineral separated by wet magnetic separation.

티탄철석, 금홍석 등이 검출되어, 자력선별에 의하여 Fe 성분을 함유하는 전기석, 티탄철석 등을 용이하게 분리할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 5는 습식자력선별에서 분리된 자력감응 광물에 대한 SEM 사진이다. SEM EDS 분석결과 O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Fe 등이 관찰되었으며, 입

자별 분석에서 관찰된 화학조성으로 광물의 종류를 유추한 결과 석영, 티탄철석, 전기석 등이 혼입되어 있는 것으로 추정되었다.

따라서 베트남 규사광의 경우는 이와 같이 자력 선별에 의해 품위 향상 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

**종합정제공정 적용**

이상과 같이, 베트남 규사광에는 미세 입자크기를 갖는 미립 불순물, 고비중 불순물과 자력감응 불순물 등이 함유되어 있는 것으로 조사되었다. 규명된 불순광물을 분리·선별하기 위하여 광물학적 특성을 토대로 분류, 비중 및 자력선별을 포함하는 물리적 종합정제공정(그림 1)을 적용시켜 그 특성을 고찰하였다.

공정1과 같이 습식 자력 선별 공정을 적용하였을 경우에 회수되는 정제산물과 분리되는 불순물의 특성은 표 6과 같다. 미립(O/F) 불순물(Tail 1)로 0.90 wt%, 비중선별 중광물(Tail 2)로 4.51 wt%, 습식자력선별 자력감응 광물(Tail 3)로 0.60 wt% 등, 총 불순물의 산출량은 6.01 wt%였으며, 고품위 정제

산물(Concentrate 1)로 93.99 wt%가 회수되었다. 이들 불순물은 SiO<sub>2</sub> 이외의 성분 함유량이 매우 높은 반면 최종 정제산물의 경우 SiO<sub>2</sub>의 품위가 99.80 wt%이고 불순물의 함유량이 아주 적어 금속급 실리콘의 순도 규격에 적합함을 확인할 수 있었다. 특별히 정련 공정에서 제거가 어려운 붕소와 인의 함량이 각각 6 ppm, 2 ppm으로서 금속급 실리콘의 순도(표 1)보다 낮은 함량을 나타냈다.

공정 2와 같이 건식 자력선별을 채택한 경우에도 습식 자력 선별을 채택한 결과와 유사한 정제 효과를 나타내었다(표 6). SiO<sub>2</sub> 품위 99.84 wt%인 고품위 규사정광(Concentrate 2)을 93.05 wt% 회수할 수 있었다. 미립(O/F) 불순물(Tail 1) 0.90 wt%, 비중선별 중광물(Tail 2) 4.51 wt%, 건식 자력선별 자력감응 광물(Tail 3-1) 1.54 wt% 등 총 불순광물의 산출율은 6.95 wt%였으며, 이 산물에 불순성분의 함량이 농축되어 있는 것을 알 수 있었다. 습식자력선별과 비교해 볼 때 최종 정제산물의 품위나 산출율 면에서 큰 차이가 없고 거의 유사한 결과를 보여주었다.

## 결 론

베트남 규사광에는 전기석, 티탄철석, 금홍석, 저어콘, 예추석, 녹렴석, 조장석 등이 불순광물로 존재하였다.

해쇄, 분급, 비중선별 및 자력선별을 포함하는 물리적 종합정제공정 적용 결과 SiO<sub>2</sub> 품위가 99.8 wt% 이상이고 불순물의 함유량이 매우 적은 고품위 규사 정광을 93 wt% 이상 회수 할 수 있었다.

최종 규사 정광의 불순물의 함량은 모두 금속급 실리콘의 불순물 함량 규격을 만족하므로, 이와 같은 정제비용이 저렴한 물리적 정제 방법을 이용하면 고순도 실리콘 제조를 위한 정련공정에서의 부담을 감소시킬 수 있을 것으로 기대된다.

## 사 사

이 연구는 2009년도 지식경제부 기본연구사업인 ‘광물 탄산화법에 의한 CO<sub>2</sub> 고정화 기반기술 연구(GP2009-002)’의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사를 표한다.

## 참고문헌

- 김희영 (2008) “태양전지용 폴리실리콘 제조”, Korean Chem. Eng. Res., 46(1), 37-49.
- Barthey, B.R. and Gretella, M.C. (1982) “Solar Grade Silicon”, J. Mater. Sci., 17, 3077-3096.
- Chu, T.L., Van der Leeden, G.A., and Yoo, H.I. (1978) “Purification and Characterization of Metallurgical Silicon”, J. Electrochem. Soc., 125(4), 661-665.
- Dietl, J. and Wohlschlager, M. (1981) FRG Patent Application 2933164.
- Dietl, J. (1983) “Hydrometallurgical Purification of Metallurgical Grad Silicon”, Sol. Cells, 10(1), 145-154.
- Gribov, B.G. and Zinov'ev, K.V. (2003) “Preparation of High-Purity Silicon for Solar Cells”, Inorganic Materials, 39(7), 653-662.
- Hunt, L.P. (1984) “Compositional Analysis of Silicon for Solar Cells”, J. Electrochem. Soc., 131(8), 1891-1896.
- Jaeger-Waldan, A. (2006) “PV Status Report 2006: Research, Solar Cell Production and Market Implementation of Photovoltaics”, EUR-22346EN, European Commission, DG Joint Research Center.
- Kapur, V.K. and Chondary, U.V. (1983) US Patent 43388286.
- Nakamura, N., Baba, H., Sakaguchi, Y., and Kato, Y. (2004) “Boron removal in molten silicon by a steam-added plasma melting method”, Materials Transactions, 45(3), 858-864.
- Pelosini, L., Parisi, A., and Pizzini, S. (1980) FRG Patent Application 2440913.
- Rogal, M. (2007) “SOLA ANNUAL 2007-Big Things in a Small Pack-age, Photon Consulting”, Solar Verlag GmbH.
- Yuge, N., Abe, M., Hanazawa, K., et al. (1999) “Development of NEDO Melt-Purification Process of Solar-Grade Silicon”, Technol. Digest Int. PVSEC, No. 22-A-1, pp. 115-118.

접수일(2009년 7월 17일), 수정일(1차 : 2009년 9월 10일), 게재확정일(2009년 9월 10일)