

## 金屬級 실리콘에서 酸洗滌에 의한 不純物の 除去<sup>†</sup>

†李晚承 · 金炯濬\*

木浦大學校 工科大學 新素材工學科, \*이노베이션 실리콘

## Removal of Impurities from Metallurgical Grade Silicon by Acid Washing<sup>†</sup>

†Man-Seung Lee and Dong-Ho Kim\*

Department of Advanced Materials Science & Engineering, Mokpo National University, Chonnam 534-729, Korea

\*Innovation Silicon Co Ltd., Chonnam 611-27, Korea

### 요 약

산세척을 통해 금속급 실리콘을 정련하기 위해 황산, 질산, 염산과 불산의 혼산 용액을 사용하여 50°C에서 불순물의 제거 거동을 조사하였다. 금속급 실리콘에 함유된 불순물중 붕소는 산세척으로 제거되지 않았고, 농축효과로 인해 처리 후 농도가 증가하였다. 본 실험범위에서 인은 약 60% 정도 제거되었다. 황산과 질산용액으로 처리시 주요 불순 금속의 제거율은 50% 미만으로 정련 효과가 크지 않았다. 염산과 불산의 혼산으로 산세척하면 주요 불순 금속이 90% 정도 제거되었다. 각 산세척조건에서 얻은 실리콘의 순도와 주요 불순 금속들의 제거율에 대한 자료를 제시하였다.

주제어 : 금속급 실리콘, 태양전지, 정련, 염산, 불산

### Abstract

Impurity removal from metallurgical grade silicon by acid washing at 50°C was investigated by employing sulfuric, nitric acid and the mixture of hydrochloric and hydrofluoric acid. Acid washing treatment had no effect on the removal of boron and the concentration of this element after treatment was rather increased. In our experimental range, the removal percentage of phosphorus was 60%. In the acid washing with sulfuric and nitric acid, the removal percentage of major impurities was below 50%, which indicates that refining effect was not great with these acids. Acid washing with the mixture of hydrochloric and hydrofluoric acid led to removal percentage of higher than 90%. Data on the purity of silicon after acid washing at various conditions are reported.

Key words : MG-Si, Solar cell, Refining, HCl, HF

### 1. 서 론

태양전지는 반도체에 태양광을 비췌었을 때 생기는 광전효과를 이용하여 태양에너지를 전기에너지로 전환시킨다. 현재는 실리콘 전지가 태양광 전지의 소재로 사용되고 있다. 실리콘 태양전지는 결정상태에 따라 단결정, 다결정, 비정질로 분류된다. 여러 실리콘중에서 단결정 실리콘이 가장 비싸고 다결정, 비정질순으로 가격

이 저렴하다.<sup>1)</sup>

광전변환 효율과 신뢰성이 우수한 결정형 실리콘 태양전지 기관을 제조하기 위해서는 6N의 순도를 지닌 태양전지 실리콘(SoG-Si, Solar Grade Si)의 공급이 필수적이다.<sup>2)</sup> 현재 태양전지 실리콘과 반도체급 실리콘(EG-Si)은 금속급 실리콘(Metallurgical grade, MG-Si)으로부터 제조되고 있다. 석영광에서 채굴된 고순도 규석을 전기 아크로에 장입한 다음 환원제로 코크스나 목탄 또는 흑연등을 첨가하여 규석을 고온에서 환원시켜 금속급 실리콘을 제조한다. 이와 같이 전기 아크로에서 환원된 금속급 실리콘의 순도는 보통 98-99% 정도이다.

<sup>†</sup> 2011년 1월 14일 접수, 2011년 2월 1일 1차수정

2011년 2월 10일 수리

\*E-mail: mslee@mokpo.ac.kr

금속급 실리콘은 주로 중국, 노르웨이, 러시아, 브라질 및 남아프리카공화국과 같이 양질의 석영과 탄소환원체가 풍부하며 전기료가 저렴한 국가에서 생산되고 있다.<sup>1)</sup> 현재 금속급 실리콘은 1kg에 약 \$ 1.5-2.5의 가격으로 판매되고 있으며, 국내에서는 1980년대 초까지 생산되었지만 현재는 전량 수입에 의존하고 있는 실정이다.<sup>1)</sup>

반도체급 실리콘의 생산공정은 실란법(Silane)으로 먼저 순도가 98-99%정도인 금속급 실리콘을 기체상의 실란화합물로 합성하여 초고순도로 정제한 다음 실란을 석출시켜 11N급의 초고순도 다결정 실리콘을 제조한다.<sup>3)</sup> 현재까지는 반도체급 실리콘 제조과정에서 발생하는 부산물, 불량품으로부터 SoG-Si의 수요량을 충족시킬 수 있었다. 그러나 최근 태양광 발전 산업이 연간 40% 이상 급성장하면서, 향후 연간 15만톤 정도의 SoG-Si이 필요할 것으로 예측되고 있다.<sup>1)</sup> 따라서 금속급 실리콘에 함유된 불순물을 제거하는 정련과정을 통해 업그레이드시킨 UMG-Si(Upgraded MG-Si)을 제조하려는 연구가 시도되고 있다.<sup>1)</sup> 연구결과에 의하면 UMG-Si으로 제조한 태양전지셀의 효율이 SoG-Si과 EG-Si으로 제조한 셀과 큰 차이가 없다.<sup>1)</sup> 따라서 향후 SoG-Si의 수요량이 폭발적으로 증가하는 경우를 대비하여 MG-Si으로부터 UMG-Si을 경제적으로 제조할 수 있는 공정의 개발이 시급하다.

금속의 정련법은 습식법, 건식법, 전기화학법으로 분류된다. 습식법에는 침출, 용매추출, 이온교환등이, 건식법에는 진공정련, 대정련, 플라즈마법등이 있다. 또한 전기화학법에는 전해정련과 전해채취가 있다. 건식법은 초기 설치가 비싸고 환경오염의 문제가 심각하지만 대규모 처리가 가능하다는 장점이 있다. 이에 반해 습식법은 소규모 처리가 가능하면서 환경친화적이다. 금속 정련에서 습식법과 건식법은 상호 보완적이며, 일반적으로 고순도 금속을 제조하기 위한 제조공정은 습식법에 이은 건식법으로 구성되어 있다.

산성용액에서 실리콘 표면은 부동태되어 용해되지 않는 반면, 고온의 알칼리용액에서는 잘 녹는다.<sup>4)</sup> 실리콘이 산성용액에서 잘 용해되지 않는 특성을 이용하여 왕수, 황산, 불산에서 산침출로 금속급 실리콘을 정련한 연구 결과가 발표되었다.<sup>3,5-10)</sup> 선행 연구결과에 의하면 왕수 또는 불산과 염산의 혼산에서 정련효과가 가장 크다고 알려져 있다. 그러나 왕수를 사용하면 비교적 고가인 염산과 질산의 소비로 인한 경제적인 문제와 부식 문제가 발생하고 또한 처리과정에서 발생한 산무의 처리를 위한 세정시설의 설치가 필요하다. 98% 정도의

순도를 지닌 금속급 실리콘에는 약 20여종 이상의 불순 금속이 함유되어 있다. 그러나 문헌에 발표된 선행 연구결과에는 몇 개의 특정 금속의 정련효과에 대한 결과만 발표되었다. 따라서 본 논문에서는 산성용액에서 금속급 실리콘을 정련시 실리콘에 함유된 불순금속의 제거율에 대한 기초 자료를 조사하였다. 이와 같은 자료는 금속급 실리콘을 정련하기 위한 경제적인 공정을 설계하는데 필요하다. 이러한 목적을 위해 황산, 질산, 염산과 불산의 혼산에서 산의 농도에 따른 불순물의 제거 정도를 조사하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

본 실험에서 사용한 금속급 실리콘의 화학조성을 Table 1에 나타냈다. 산세척에 의한 금속급 실리콘의 정련효과를 조사하기 위해 시약급 황산, 질산, 염산과 불산을 혼합한 혼산의 농도를 조절하여 실험하였다. 부피가 500 mL인 테프론 비이커에 침출용액을 넣고 핫플레

**Table 1.** Chemical composition of metallurgical grade silicon used in this study and after treatment

Element	Concentration(ppm)	5% HF+30% HCl
B	10.6	19.0
P	46.7	24.9
Al	2655.6	550.1
Ca	553.2	164.4
Co	2.8	0.4
Cr	4.8	0.7
Cu	15.2	1.5
Fe	4874.6	248.6
K	50.9	10.2
Li	7.6	5.0
Mg	4.2	5.5
Mn	163.2	10.8
Na	11.9	20.7
Ni	71.5	4.9
Ta	2.6	2.4
Ti	255.8	19.8
V	196.7	12.4
Zn	1.3	1.5
Purity	99.1071%	99.8915

이트를 사용하여 반응온도인 50°C까지 가열하였다. 반응온도에 도달하면 반응조에 금속급 실리콘을 장입하여 교반속도를 조절하면서 산세척했다. 반응온도와 교반속도를 조절하기 위해 디지털 교반기를 사용하였다. 반응도중 침출용액의 증발을 억제하기 응축기를 사용하였으며, 온도계로 용액의 온도를 측정하였다. 산세척실험의 표준조건으로 반응온도는 50°C, 교반속도를 200 rpm으로 조절했으며 100 mL의 침출용액에 금속급 실리콘을 100 g/L의 광액밀도로 장입하여 2시간동안 반응시켰다. 반응 완료 후 실리콘과 침출용액을 세라믹 필터로 분리한 다음 실리콘을 전기로에서 건조시켜 분석하였다. 산세척 실험시 산무가 발생하므로 Fume hood에서 실험을 수행하였다.

산세척조건에 따른 불순 금속의 제거율을 구하기 위해 침출용액을 분석하는 경우 침출용액에 함유된 불순물로 인해 금속급 실리콘에서 용해된 불순 금속의 농도를 따로 측정하기 어렵다. 따라서 산세척 처리후 건조된 실리콘을 전처리한 다음 용액에 용해시켜 ICP-OES(thermo 6300)로 실리콘에 잔존하는 불순물의 농도를 측정하였다.<sup>11)</sup>

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 금속급 실리콘 입도의 영향

금속급 실리콘에 함유된 불순 금속의 편석계수가 크므로 용융 실리콘을 응고시킬 때 대부분의 불순 금속들

은 입계에 석출한다.<sup>7)</sup> 따라서 산세척을 통해 금속급 실리콘에 함유된 불순 금속을 제거하기 위해서는 입계에 석출된 불순 금속들이 산용액과 용이하게 접촉할 수 있도록 금속급 실리콘을 미분으로 분쇄하는 것이 필요하다. 선행연구에 의하면 20-150 μm정도의 입도를 지닌 금속급 실리콘에서 산세척에 의한 정련효과가 크다고 알려졌다.<sup>7)</sup> 그러나 금속급 실리콘을 미분쇄하기 위해서는 분쇄비용이 많이 소요되고, 제조 방법이 다른 금속급 실리콘의 침출거동이 제각기 다른 특성이 있다.<sup>7)</sup> 따라서 본 논문에서 사용한 금속급 실리콘에 대해 산세척에 적절한 입도를 선정하기 위해 실리콘의 입도를 0.1 mm 이하, 0.1-0.3 mm, 0.3-0.5 mm로 분류하여 실험을 수행하였다. 이때 부피비 15%의 염산에 5%의 불산을 혼합한 용액을 산세척용액으로 사용하였다. 상기 용액으로 50°C에서 2시간 산세척 후 용액에서 불순금속의 농도를 측정하여 Fig. 1에 나타냈다. 본 논문에서 분류한 입도범위에서는 입도에 따른 산세척 효과가 거의 동일하였다. 따라서 입도가 0.1-0.3 mm인 금속급 실리콘을 사용하여 추가 산세척실험을 수행하였다.

#### 3.2. 산의 종류에 따른 정련 효과

산의 종류 및 농도에 따른 금속급 실리콘의 정련효과를 조사하기 위해 먼저 황산과 질산을 사용하여 농도를 변화시켜 표준조건에서 산세척 실험을 수행하였다. 금속급 실리콘의 화학조성을 나타낸 Table 1을 보면 실리콘에 함유된 불순 금속은 약 18종으로 함유량에 따라

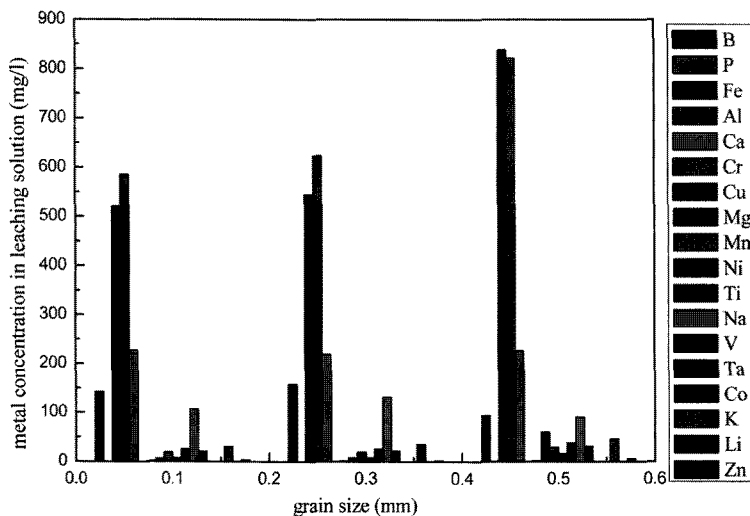


Fig. 1. Effect of grain size on the removal of impurities from MG Si.

다음과 같이 분류할 수 있다.

- 제 1군 : 농도가 1000 ppm 이상인 불순물 (Al, Fe)
- 제 2군 : 농도가 100에서 1000 ppm 사이인 불순물 (Ca, Mn, Ti, V)
- 제 3군 : 농도가 10에서 100 ppm 사이인 불순물 (B, P, Cu, K, Na, Ni)
- 제 4군 : 농도가 10 ppm 미만인 불순물 (Co, Cr, Li, Mg, Ta, Zn)

일반적으로 산세척과 같은 습식법으로 금속을 정련시 얻을 수 있는 최대 순도는 99.99% 정도이다. 따라서 금속급 실리콘을 산세척하여 정련하는 경우 상기 불순 금속중에서 1군과 2군은 반드시 제거해야 한다. 한편 3군 중에서 붕소와 인을 금속급 실리콘으로부터 제거하는 것은 어렵다고 알려졌다.

산세척에 따른 정련효과를 비교하기 위해 불순 금속의 제거율을 식 (1)과 같이 정의하였다. 또한 산세척후 1, 2, 3군 금속의 제거율과 4군 금속의 제거율을 나눠서 불순 금속의 제거율을 그림으로 나타냈다.

$$\text{Removal percentage} = \frac{\text{initial mass of impurity in Si} - \text{final mass of impurity in Si}}{\text{initial mass of impurity in Si}} \times 100 \quad (1)$$

황산농도를 1에서 5 M까지 변화시켜 표준조건에서 산세척한 금속급 실리콘에서 불순 금속의 제거율을 Figs. 2와 3에 나타냈다. 본 연구결과에 의하면 황산용액으로 처리시 붕소는 거의 제거되지 않으나, 인의 경우 60% 정도 제거되었다. 인의 경우 황산농도에 따라 제거율에 큰 변화가 없지만, 다른 불순 금속의 경우 황산농도가 1에서 5 M로 증가함에 따라 제거율이 감소하는 경향을 보였다. 이로부터 금속급 실리콘을 황산으로 산세척하는 경우 1 M 농도가 적당함을 알 수 있다. 금속급 실리콘에서 함유량이 많은 1군 금속인 알루미늄과 철의 제거율은 약 30%, 망간은 최대 50% 정도 제거되었다. 또한 구리, 칼륨, 니켈, 티타늄 및 바나듐의 경우 대부분 50% 미만의 제거율을 나타냈다. 또한 Fig. 3을 보면 4군 금속인 코발트, 크롬, 리튬과 탄탈륨도 본 실험 범위에서 50% 미만의 제거율을 나타냈다.

질산농도를 1에서 5 M까지 변화시켜 표준조건에서 산세척한 금속급 실리콘에서 불순 금속의 제거율을 Figs.

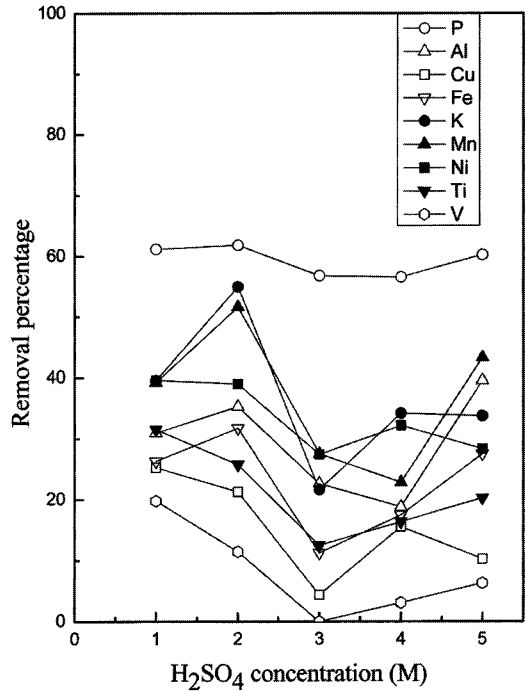


Fig. 2. Effect of sulfuric acid concentration on the removal of major impurities from silicon.

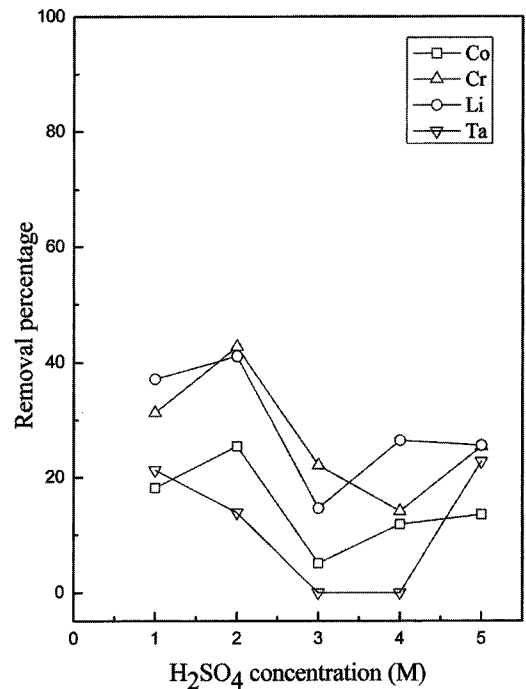


Fig. 3. Effect of sulfuric acid concentration on the removal of major impurities from silicon.

4와 5에 나타났다. 인의 제거율이 60% 정도로 가장 높았으며, 인 이외의 주요 불순 금속인 1, 2, 3군 금속 가운데 구리를 제외한 다른 금속의 제거율은 50% 미만이었다. 황산과 달리 질산용액으로 처리시 질산농도 1에서 5 M 사이의 범위에서 각 금속의 제거율은 일정하였다. 금속급 실리콘에 미량 함유된 4군 금속의 제거율도 전반적으로 낮았다. 탈륨의 경우 질산농도가 2에서 5M로 증가함에 따라 제거율이 급격히 증가하는 특성을 보였다.

선행 연구결과에 의하면 염산과 불산이 혼합된 혼산에서 금속급 실리콘의 정제효과가 우수하다.<sup>3)</sup> 본 논문에서 시료로 사용한 금속급 실리콘의 산세척액으로 적절한 염산과 불산의 혼합비율을 조사하기 위해 먼저 5%의 불산에 염산의 부피비를 5에서 32%까지 변화시켜 혼합한 혼산으로 표준조건에서 산세척한 실험결과를 Figs. 6과 7에 나타냈다. 인의 경우 60% 미만의 제거율을 얻는데 반해 알루미늄의 제거율은 최대 80% 정도였다. 1군 금속에서 철은 최대 95% 제거되었으며, 다른 주요 불순 금속의 경우에도 제거율이 88에서 95% 사이로 황산이나 질산으로 산세척하는 조건에 비해 제거율이 훨씬 높았다. 불산 5% 용액에 대해 염산 농도

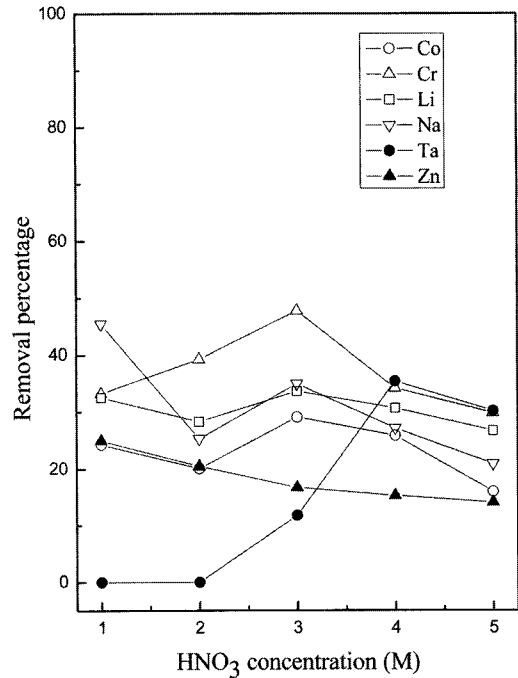


Fig. 5. Effect of nitric acid concentration on the removal of major impurities from silicon.

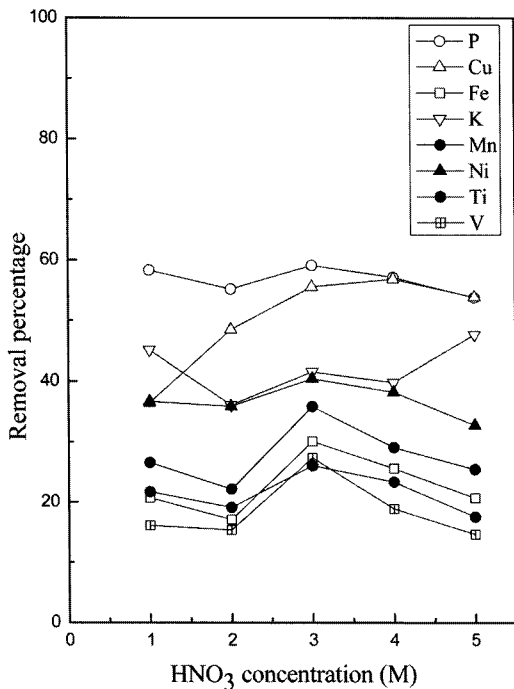


Fig. 4. Effect of nitric acid concentration on the removal of major impurities from silicon.

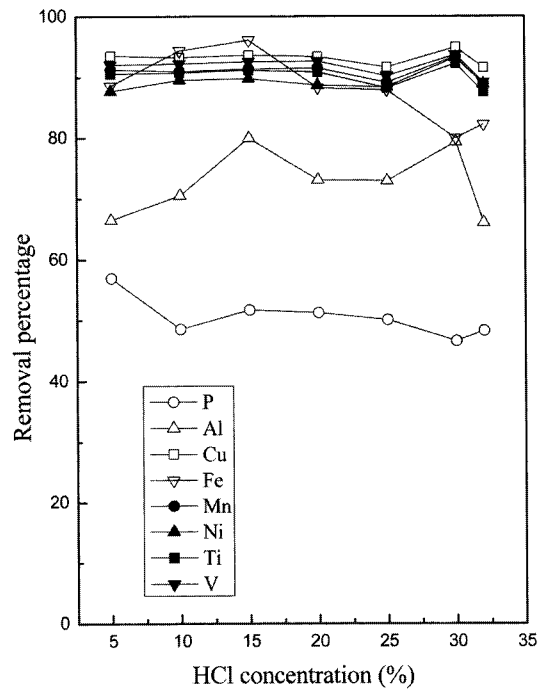


Fig. 6. Effect of HCl concentration in the mized solution of 5% HF on the removal of major impurities from silicon.

를 5에서 32%까지 변화시키더라도 금속의 제거율에는 큰 차이가 없었다. Fig. 7을 보면 미량금속인 코발트와 크롬의 경우 8에서 90% 정도의 제거율을 얻었으나, 리튬의 제거율은 약 40% 정도로 매우 낮았다.

염산 15%의 용액에서 불산의 부피비를 8에서 20%까지 변화시킨 혼산으로 표준조건에서 금속급 실리콘을 산세척한 결과를 Figs. 8과 9에 나타냈다. 상기 그림에서 불산의 농도를 8에서 20%까지 증가시키더라도 금속급 실리콘에 함유된 불순 금속의 제거율에는 큰 변화가 없었다. 일반적으로 불산의 농도가 증가함에 따라 불용성 불화물의 생성으로 인해 불순물 제거효과가 감소한다고 알려졌다.<sup>3)</sup> 그러나 본 실험범위에서 불산 농도는 금속제거율에 큰 영향을 미치지 않았다. 인의 경우 본 실험범위에서 60% 미만의 제거율을 얻었고, 알루미늄의 제거율은 70% 정도였다. 그 이외의 주요 불순물의 제거율은 최대 90% 정도로, 5%의 불산에서 염산농도를 변화시킨 혼산에서의 실험결과와 비교하면 제거율이 약간 낮았다. 미량 함유되어 있는 4군 금속가운데 크롬은 99%이상 제거되나 리튬의 제거율은 33에서 45% 사이로 정련효과가 적다.

본 논문에서 실험한 산세척조건에서 얻은 금속급 실

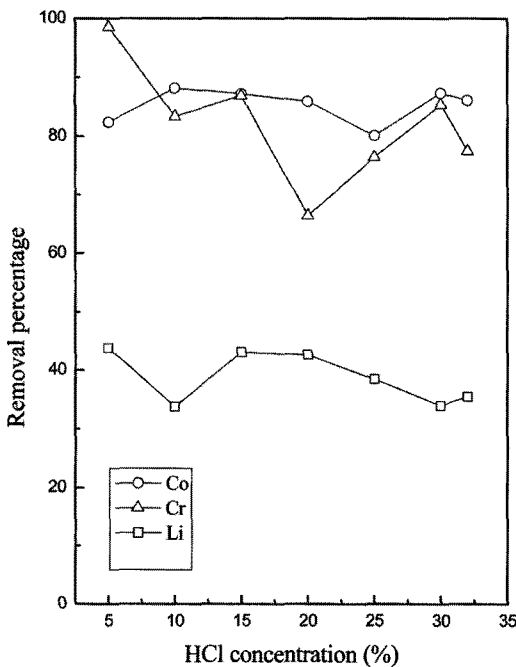


Fig. 7. Effect of HCl concentration in the mized solution of 5% HF on the removal of major impurities from silicon.

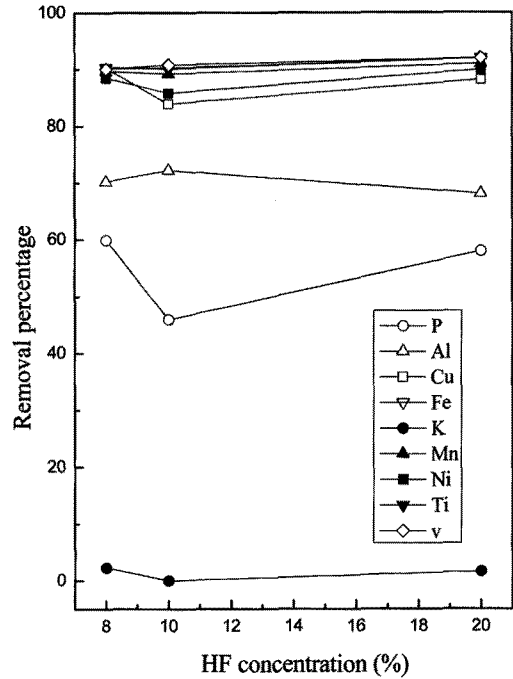


Fig. 8. Effect of HF concentration in the mized solution of 15% HCl on the removal of major impurities from silicon.

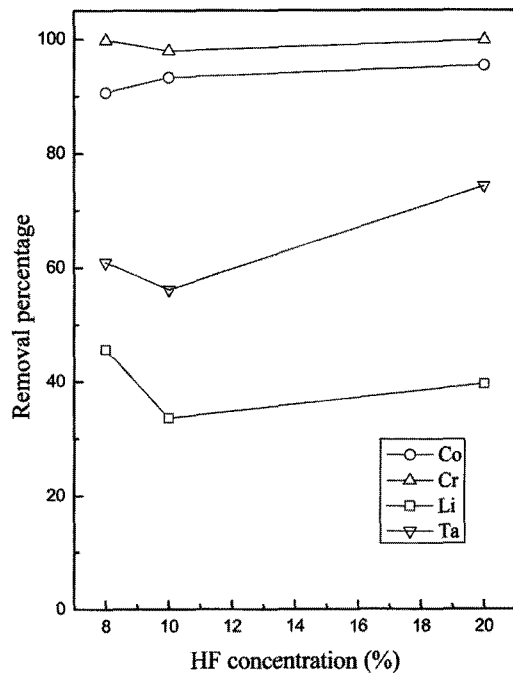


Fig. 9. Effect of HF concentration in the mized solution of 15% HCl on the removal of major impurities from silicon.

**Table 2.** Variation in the purity of silicon with the nature of acids and concentration

No	Purity	Condition
1	99.1071	Starting material
2	99.7983	HF 5%+HCl 5%
3	99.8389	HF 5%+HCl 10%
4	99.8858	HF 5%+HCl 15%
5	99.8457	HF 5%+HCl 20%
6	99.8528	HF 5%+HCl 25%
7	99.8915	HF 5%+HCl 30%
8	99.8147	HF 5%+HCl 32%
9	99.3731	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1M
10	99.4088	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 2M
11	99.2506	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 3M
12	99.2832	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 4M
13	99.3808	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 5M
14	99.1359	HNO <sub>3</sub> 1M
15	99.0862	HNO <sub>3</sub> 2M
16	99.2111	HNO <sub>3</sub> 3M
17	99.2139	HNO <sub>3</sub> 4M
18	99.1707	HNO <sub>3</sub> 5M
19	99.7720	HCl 15%+HF 8%
20	99.7849	HCl 15%+HF 10%
21	99.8009	HCl 15%+HF 20%

리콘의 순도를 Table 2에 나타냈다. 황산용액에서 처리한 금속급 실리콘의 경우 99.2에서 99.4%의 순도를, 질산용액에서 처리한 경우 99.0-99.2%의 순도를 얻었다. 염산과 불산의 혼산에서 세척하면 99.7-99.8%의 순도를 얻었으며, 불산과 염산의 부피비가 각각 5와 30%인 혼산에서 최고인 99.8915%의 순도를 얻었다. 불산과 염산의 부피비가 5와 30%인 혼산에서 산세척한 금속급 실리콘에 함유된 불순물의 농도를 Table 1에 같이 나타냈다. 주요 불순 금속인 알루미늄, 칼슘, 철, 망간과 티타늄은 제거되는데 반해 붕소는 농축효과로 인해 오히려 산세척 후 농도가 증가하였다. 리튬, 마그네슘, 나트륨, 탄탈륨과 아연의 경우 산세척을 통해 제거하는 것이 어렵다. 4군 금속 가운데 탄탈륨을 제외한 다른 금속의 경우 증기압이 높으므로 진공정련을 통해 제거하는 것이 가능하다. 본 논문에서 시료로 사용한 금속급 실리콘에 함유된 1, 2, 3군 금속중 붕소를 제외한 다른

불순 금속은 염산과 불산의 혼산으로 제거하는 것이 가능하다. 따라서 염산과 불산의 혼산에 대해 1, 2, 3군 금속의 제거율을 향상시키도록 반응온도와 시간에 대한 추가 자료의 확보가 필요하다. 붕소를 제외한 1, 2, 3군 금속을 산세척으로 제거한다면 4군 금속의 대부분은 진공정련으로 제거하는 것이 가능하다. 향후 금속급 실리콘으로부터 붕소의 제거 및 진공정련에 의한 4군 금속의 제거에 대한 연구를 통해 금속급 실리콘으로부터 산세척 및 진공정련으로 99.99% 이상의 순도를 지닌 실리콘을 제조하는 것이 가능하다.

#### 4. 결 론

황산, 질산, 염산과 불산의 혼산을 사용하여 50°C에서 2시간 동안 산세척을 실시하여 금속급 실리콘에 함유된 불순물의 제거율을 조사하였다. 금속급 실리콘에 함유된 성분중 제거가 가장 어려운 불순물의 하나인 붕소의 경우 산세척을 통한 제거효과가 전혀 없었다. 이에 반해 본 논문의 실험범위에서 인의 제거율은 60% 정도였다. 1에서 5 M사이의 황산과 질산용액에서 금속급 실리콘을 처리하는 경우 주요 불순 금속의 제거율이 50% 미만으로 산세척에 의한 정련효과가 작았다. 염산과 불산의 혼산에서 금속급 실리콘을 산세척하면 주요 불순 금속의 제거율이 90% 정도 되어 정련효과가 확인 되었으며, 최적 조성인 불산과 염산의 부피비가 각각 5와 30%인 혼산에서 99.8915%의 순도를 지닌 실리콘을 얻었다. 그러나 혼산에서 금속급 실리콘을 산세척하더라도 리튬, 마그네슘, 나트륨, 탄탈륨 및 아연의 제거율은 매우 낮다. 탄탈륨을 제외한 리튬, 마그네슘, 나트륨 및 아연의 증기압이 큰 점을 이용하여 산세척 후 진공정련으로 상기 금속을 제거하는 것이 가능하다.

#### 감사의 글

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성 사업의 연구결과입니다.

#### 참고문헌

1. 김희영, 2008: 태양전지용 실리콘소재의 기술개발 동향, 전기전자재료, 21(11), pp. 3-11.
2. 신제식, 김대석, 김기영, 손인진, 문병문, 2009: 태양전지

- 원재료로 사용하기 위한 폴리실리콘 미세분말의 무점결  
제 성형, 자원리싸이클링, **18(1)**, pp. 38-43.
3. Santos, I.C., Gonaves, A.P., Santos, C.S., Almeida, M.,  
Afonso, M.H. and Cruz, M.J., 1990: Purification of met-  
tallurgical grade silicon by acid leaching, *Hydrometallurgy*,  
**23**, pp. 237-246.
  4. Habashi, F., 1997 : *Handbook of extractive metallurgy Vol*  
*4*, Wiley-VCH, NY., p. 1863.
  5. Ciftja, A., Zhang, L., Engh, T.A. and Kvithyld, A., 2006:  
Purification of solar cell materials through filtration, *Rare*  
*metals*, **25**, pp. 180-185.
  6. Yuge, N., Baba, H, Sakaguhi, Y., Nishikawa, K., Terashima,  
H. and Aratani, F., 1994: Purification of metallurgical  
silicon up to solar grade, *Solar Energy Materials and Solar*  
*Cells*, **34**, pp. 243-250.
  7. Margarido, F., Bastos, M.H., Figueiredo, M.O. and Martins,  
J.P., 1994: The structural effect on the kinetics of acid  
leaching refining of Fe-Si alloys, *Materials Chemistry and*  
*Physics*, **38**, pp. 342-347.
  8. Margarido, F., Martins, J.P., Figueiredo, M.O. and Bastos,  
M.H., 1993: Kinetics of acid leaching refining of an  
industrial Fe-Si, *Hydrometallurgy*, **34**, pp. 1-11.
  9. Margarido, F., Martins, J.P., Figueiredo, M.O. and Bastos,  
M.H., 1993: Refining of Fe-Si alloys by acid leaching,  
*Hydrometallurgy*, **32**, pp. 1-8.
  10. Juneja, J.M. and Mukherjee, T.K., 1986: A study of the  
purification of metallurgical grade silicon, *Hydrometallurgy*,  
**16**, pp. 69-75.
  11. 정혜영, 김영운, 유학도, 이상학, 1999: 실리콘 웨이퍼중의  
금속 불순물 분석을 위한 전처리, *대한화학회지*, **43(4)**,  
pp. 412-417.

---

### 李 晚 承

- 현재 목포대학교 신소재공학과 교수
- 당 학회지 제11권 1호 참조

---

### 金 炯 濂

- 현재 (주)이노베이션실리콘 부사장

