

## 종형 반응기에서 규소증착 반응의 증착속도 및 소비전력 예측

김만영\*·소원욱·윤 풍

한국화학연구소 화공부

\*한국소비자 보호원

(1987년 8월 2일 접수, 1987년 12월 24일 채택)

## Deposition Rate and Power Consumption Prediction of Silicon Deposition Reaction in the Bell-Jar Type Reactor

Mann Young Kim\*, Won Wook So and Poong Yoon

Korea Research Institute of Chemical Technology, Dae-jeon 302-343, Korea

\*Korea Consumer Protection Board

(Received 2 August 1987; accepted 24 December 1987)

### 요 약

반도체 재료용 고순도 규소를 제조하기 위한 종형 반응기내에서 TCS와 수소를 원료로 하는 규소증착 반응의 증착 속도에 대한 반응온도, 반응물 가스유량, TCS 농도 등의 영향을 조사하여 규소증착 속도를 예측할 수 있는 경험식을 제안하였다. 또한 이 경험식과 복사열 결감율을 도입하여 종형 반응기에서의 소비전력을 산출할 수 있는 이론식을 제안하였다. 제안된 식들에 의해 계산된 결과는 실험 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

**Abstract**—Experiments of silicon CVD (Chemical Vapor Deposition) using trichlorosilane and hydrogen gas mixture were conducted to determine the deposition rate and power consumption for the bell-jar type reactor used for semiconductor grade polycrystalline silicon manufacture. We studied the effects of reaction temperature, flow rate of reactant gas, and trichlorosilane concentration on the silicon deposition rate experimentally.

An empirical equation to predict the silicon deposition rate was proposed and was compared with experimental data. On the other hand, a model equation to predict power consumption of the bell-jar type reactor was derived from the deposition rate equation and the heat saving equation in the reactor. Predictions by this model were agreed well with experimental data.

### 1. 서 론

현재 가장 많이 이용되고 있는 반도체 재료용 고순도 규소 제조방법은 Trichlorosilane( $\text{SiHCl}_3$ : 이하 TCS라고 부름)과 수소를 원료로 하고, 냉각 jacket이 부착된 종형 반응기(일명 Siemens 반응기)내에 설치

된 수평의 고순도 규소심봉위에 TCS를 화학 증착시켜 규소를 생산하는 방법이다[1, 2]. 이러한 Siemens 반응기는 장치의 규모와 전력소비량에 비해 규소의 생산 속도가 작고, 연속공정이 불가능하며, 생산 초기부터 말기까지의 원료가스 공급속도 및 전력의 공급 범위가 넓다는 단점이 있어, 최근에는 유동층 반응기를 이용한

규소 제조에 관한 연구가 활발히 시도되고 있다[3-5]. 그러나 유동층 반응기에서 생산되는 규소는 반응기 벽으로부터의 불순물 혼입 문제와 입자 상태로 생산되는 규소의 후처리 과정 등의 문제 때문에 현재 실용화되지 못하고 있다.

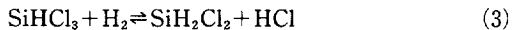
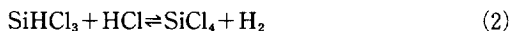
본 실험에서는 상기 두 가지 반응기에서 규소를 생산할 때 야기되는 단점들을 보완하기 위해 중형 반응기내에 규소심봉 대신 규소박판을 설치하여 TCS를 화학 증착시켜 규소를 생산하는 방법을 시도하였다. 즉, 기존의 Siemens 반응기의 장점인 고순도 규소의 생산을 가능하게 하면서 규소의 생산속도를 크게 하고, 시간에 따른 규소의 생산속도, 공급전력 및 규소화합물의 공급 속도의 범위가 Siemens 반응기에 비해 훨씬 좁을 뿐만 아니라 반응기 내에 설치하는 규소박판을 서로 마주보도록 설치하므로써 규소박판으로부터 반응기벽으로 빠져나가는 복사열을 대향 복사에 의해 절감시키기 위해 본 실험을 행하였다.

이러한 Siemens 반응기를 개조한 반응기는 물론 Siemens 반응기에서의 규소증착 속도와 소요전력을 예측하는 문헌은 전무한 실정이다. 본 연구에서는 이러한 중형 반응기에서 규소를 생산하는데 있어서, 여러 조업 조건에 대한 규소증착 속도 및 소요전력을 예측하는 식을 제안하였다.

## 2. 이 론

### 2-1. 규소증착 반응 및 증착 속도

규소박판의 표면에 TCS를 화학 증착시키면 아래의 식으로 표시되는 일련의 반응들이 일어난다.



그리고 이들 반응식 (1), (2), (3)을 이용하면 반응물의 Cl/H의 비가 결정되었을 때 생성물의 평형농도를 결정할 수 있다[6, 7]. 즉, 일정온도에서 규소증착 반응의 평형수율은 반응물의 Cl/H의 비에 따라 결정된다. 반응압력에 따라서도 평형수율이 변하게 된다. 반응물이 TCS와 수소인 경우 TCS 농도가 20% 이하의 낮은 농도에서는 압력의 증가에 따라 규소의 평형수율이 증가하지만 TCS 농도 20% 이상의 고농도에서는 압력 변화에 따른 규소의 평형수율의 변화가 심하지 않으며, TCS 농도가 50% 이상인 경우에는 평형수율이 약간 올라가는 경향을 띤다[7].

중형 반응기내에서 TCS와 수소를 원료로 하는 규소

증착 반응은 고온인 규소박판의 표면에서만 반응이 일어나므로, 규소증착 속도는 반응온도, 반응압력 뿐만이 아니라 반응기내로 유입되는 혼합가스 유량, TCS 농도, 반응이 일어나는 규소박판 또는 규소심봉의 표면적 등이 중요한 변수로 작용한다. 여기서 반응물의 조성, 반응온도, 반응압력 등은 규소증착 반응의 고유 반응속도(intrinsic reaction rate)를 결정하는 변수이며, 가스의 유량, TCS 농도, 규소의 표면적 등은 물질전달 속도를 결정하는 변수가 된다. 따라서 반응물이 TCS-H<sub>2</sub>인 경우, 고유 반응속도,  $r_{\text{Si}}$ 와 물질 전달을 고려한 규소증착 속도,  $R_{\text{Si}}$ 는 다음식으로 표시된다.

$$r_{\text{Si}} = r_{\text{Si}}(C_{\text{TCS}}, T, P) \quad (4)$$

$$R_{\text{Si}} = R_{\text{Si}}(v, C_{\text{TCS}}, S, T, r_{\text{Si}}) \quad (5)$$

또한 규소증착 속도,  $R_{\text{Si}}$ 는 몇가지 기본적인 가정을 거치면 규소박판의 표면적, S에 정비례하게 된다. 따라서 규소 단위표면적당 규소증착 속도,  $y$ 는 가스유량,  $v$ , TCS 농도,  $C_{\text{TCS}}$ , 규소박판의 온도,  $T_1$ , 고유 반응속도  $r_{\text{Si}}$  함수로 표시된다.

$$y = R_{\text{Si}}/S = y(v, C_{\text{TCS}}, T_1, r_{\text{Si}}) \quad (6)$$

식 (4)와 식 (6)으로부터 규소 단위표면적당 규소증착 속도는 식 (7)로 표현할 수 있다.

$$y = y(v, C_{\text{TCS}}, P, T_1) \quad (7)$$

즉, 단위표면적당 규소증착 속도는 반응물 유량, 반응물 조성 및 규소박판의 온도, 압력 등의 함수로 표시된다.

규소의 단위표면적당 규소증착 속도는 반응기의 종류 및 형태에 따라 다르고, 이를 이론적으로 계산하는 것은 거의 불가능하다. 따라서 실험에 의해 단위표면적당 증착 속도를 구하여 중형 반응기에서의 규소증착 속도에 관한 경험식을 제안하고자 한다.

### 2-2. 중형 반응기의 소비전력

식 (7)에 의하면, 반응물의 조성, 반응온도와 압력이 주어지면 규소증착 속도는 반응물 가스 유량만의 함수이다. 중형 반응기에서 규소를 생산할 때에는 일반적으로 반응가스 유량을 시간에 따라 변화시키므로 반응가스 유량을 반응시간의 함수로 나타내면 규소증착 속도도 반응시간의 함수가 된다. 이와같이 반응시간에 따라 변화시키는 반응가스의 유량에 따라 변화하는 규소증착 속도로부터 반응 완료시까지의 소비전력의 산출방법을 정리한다.

어떤 조건하에서 규소의 증착이 규소박판의 전 표면에서 같은 속도로 일어난다고 가정하면 규소박판 전 표면에서 박판두께,  $T(t)$ 는 균일하다.  $T(t)$ 를 계산하는

식은 다음과 같다.

$$dT(t)/dt = (2/\rho_{Si})y(t) \quad (8)$$

(8)식을 적분하여 정리하면

$$T(t) = T_i + (2/\rho_{Si}) \int_0^t y(t) dt \quad (9)$$

규소박판의 표면적,  $S(t)$ 를 계산하는 식은 다음식으로 정의된다.

$$S(t) = 2wl + \pi L T(t) \quad (10)$$

여기에 (9)식을 대입하면 시간에 따른 규소박판의 표면적,  $S(t)$ 는 (11)식으로 표시된다.

$$S(t) = 2wl + \pi L [T_i + (2/\rho_{Si}) \int_0^t y(t) dt] \quad (11)$$

시간에 따른 단위표면적당 TCS유량,  $x(t)$ 를 지정할 때 시간에 따른 TCS 공급량,  $X(t)$ 는 (12)식으로 표현된다.

$$X(t) = x(t) S(t) \quad (12)$$

여기에 (11)식을 대입하면 시간에 따른 TCS 공급량,  $X(t)$ 가  $x(t)$ 와  $y(t)$ 의 함수로 표시된다.

$$X(t) = (2wl + \pi L T_i) \times (t) + (2\pi l/\rho_{Si}) \times (t) \int_0^t y(t) dt \quad (13)$$

또한, 시간에 따른 규소박판의 무게,  $W(t)$ 를 계산하는 식은 (14)식으로 정의된다.

$$W(t) = (l\rho_{Si}) [wT(t) + (\pi/4)T(t)^2] \quad (14)$$

(9)식을 대입하면 박판의 무게,  $W(t)$ 를 단위표면적당 규소증착 속도,  $y(t)$ 의 함수로 구할 수 있다.

$$W(t) = (wl\rho_{Si}) [T_i + (2/\rho_{Si}) \int_0^t y(t) dt] + (\pi l\rho_{Si}/4) [T_i + (2/\rho_{Si}) \int_0^t y(t) dt]^2 \quad (15)$$

복사에 의한 열손실은 규소박판 전 표면으로부터 전 공간에 대하여 이루어지며, 맞은편 규소박판에 의해 포착되는 복사열만큼이 절감된다. 한쌍의 규소박판을 고려해 볼 때 Fig. 1에 나타낸 것 같이 규소박판의 한 지점에서 다른쪽 규소박판이 포착되는 각도를  $\theta$ 라고 하면, 포착각,  $\theta(t)$ 는 (16)식으로 표시된다.

$$\theta(t) = \tan^{-1} \left( \frac{w_1}{D(t)} \right) + \tan^{-1} \left( \frac{w - w_1}{D(t)} \right) \quad (16)$$

여기서 박판간의 거리,  $D(t)$ 는 (9)식을 이용하면

$$D(t) = D_o - T(t) \quad (17)$$

$$= D_o - T_i - (2/\rho_{Si}) \int_0^t y(t) dt \quad (18)$$

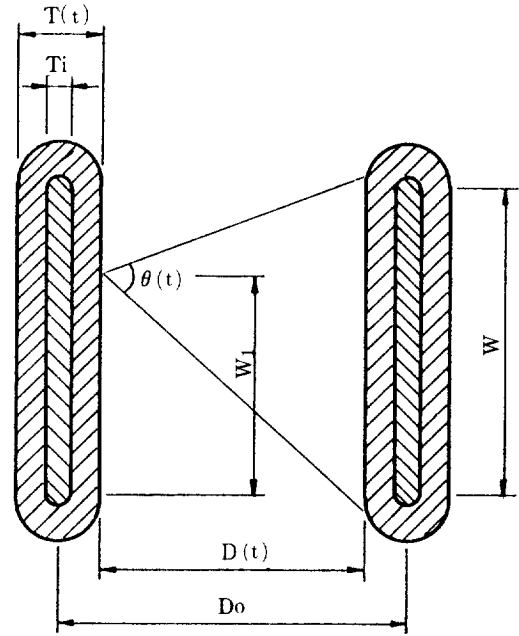


Fig. 1. View angle,  $\theta(t)$ .

박판 각 지점에서의 포착각,  $\theta(t)$ 의 평균치,  $\bar{\theta}(t)$ 는 (19)식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \bar{\theta}(t) &= \int_0^{0.5w} \theta dw_1 / \int_0^{0.5w} dw_1 \\ &= (2/w) \int_0^{0.5w} [\tan^{-1}(w_1/D(t)) + \tan^{-1}((w-w_1)/D(t))] dw_1 \end{aligned} \quad (19)$$

대향면 이외의 부분에 대해서는 규소박판으로의 대향 복사가 일어나지 않는다고 가정하면 방출되는 복사열의 절감율,  $\eta(t)$ 는 (20)식으로 표시된다.

$$\eta(t) = (wl) (\bar{\theta}(t)/\pi) / S(t) \quad (20)$$

(20)식에 (11)식과 (19)식을 대입하면 복사에너지 절감율,  $\eta(t)$ 는 단위표면적당 규소증착 속도  $y(t)$ 의 함수로 표시할 수 있다.

일정시간,  $t$ 에서 소비되는 전력은 반응기의 벽을 통한 열손실과 반응물 및 생성물을 가열하는데 필요한 열손실 및 반응열의 합으로 계산할 수 있다. 본 연구의 경우 소비전력을 기존의 Siemens 반응기와 비교하기 위해 다음과 같은 가정을 통하면 소비전력을 (21)식으로 구할 수 있다.

(1) 반응기내의 열손실중 가스 대류에 의한 열전달은 무시한다.

(2) 반응열과 규소박판의 끝부분에 연결된 전극을 통

하여 전도되는 열전달은 무시한다.

(3) 반응가스와 생성가스의 비열과 물 분자의 곱, 즉  $\Sigma(\dot{m}_i C_{pi})$ 는 반응의 진행 정도와 관계없이 일정한 것으로 간주한다.

(4) 반응기 벽면의 빛 흡수율은 규소박판의 반사율과 동일하다고 간주한다.

(5) 생성가스의 온도는 반응시간에 따라 일정하다고 간주한다.

$$\begin{aligned}
 q(t) = & S(t) \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \{1 - \eta(t)\} + (\dot{m}_H C_{pH} \\
 & + \dot{m}_T C_{pT}) (T_4 - T_3) + q_{c\phi_{NV}} + q_{c\phi_{ND}} + q_{R\phi_{N}} \\
 = & S(t) \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \{1 - \eta(t)\} \\
 & + (\dot{m}_H C_{pH} + \dot{m}_T C_{pT}) (T_4 - T_3) \quad (21)
 \end{aligned}$$

(21)식에 (20)식과 (11)식을 대입하면 시간에 따른 소비전력,  $q(t)$ 는 단위표면적당 TCS 유량,  $x(t)$ 와 단위표면적당 규소증착 속도,  $y(t)$ 의 함수로 표시할 수 있다. 또한 시간,  $t$ 까지의 총괄 소비전력량,  $Q(t)$ 는 소비전력,  $q(t)$ 를 시간에 대해 적분하여 얻을 수 있다.

### 3. 실험

#### 3-1. 반응물

본 실험의 반응물은 TCS와 수소인데, TCS는 비저항 200 ohm-cm인 미국 Synthatron사 제품을 사용하였고, 수소는 순도 99.995%인 한국 수소사 제품을 정제 장치를 통과시켜 사용하였다.

#### 3-2. 실험장치

1050°C 이상의 고온으로 유지되는 규소박판위에 기상의 TCS 및 수소의 혼합가스를 공급하여 규소를 증착, 성장시키는 본 실험장치는 원료가 되는 TCS와 수소가스 실린더, 반응기내로 공급되는 TCS와 수소를 예열하기 위한 예열장치, 예열된 TCS와 수소를 혼합하는 혼합장치, 혼합가스를 반응시키는 반응기, 반응 후 배출가스를 처리하는 냉각기 등으로 구성되어 있으며 이를 Fig. 2에 나타냈다. TCS와 수소 공급라인 및 반응기 등의 모든 라인과 장치는 실험전에 진공을 뽑고, 순도 99.995%의 Argon 가스를 흘려 세척(purge)한다.

#### 3-3. 반응기

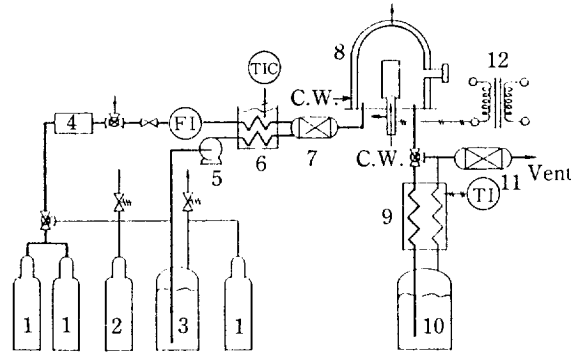


Fig. 2. Schematic flow diagram of the experimental TCS CVD system.

1. H<sub>2</sub> cylinder      2. Ar cylinder
3. TCS tank        4. H<sub>2</sub> purifier
5. Metering pump
6. TCS vaporizer & preheater
7. Static mixer
8. Bell jar type reactor
9. Condenser
10. TCS, SiCl<sub>4</sub> storage tank
11. HCl scrubber    12. Voltage regulator

본 실험에 사용한 반응기는 기존의 Siemens 반응기를 참고로 제작한 중형의 반응기이며, 규소심봉을 설치하여 사용하는 경우에는 Siemens 반응기로도 사용할 수 있도록 하였으며, 대표적인 사양은 다음과 같다.

·반응기: 재질 STS 316, TFE seal, 석영바닥, 냉각 jacket

·반응기 크기: 직경 15cm, 높이 19cm, Dome부 크기 7.8cm

·전극: 간격 5cm, 2개, 수냉, 구리에 온도감

·전력공급: 2대의 전압 조정기 이용

이 반응기의 개략도를 Fig. 3에 도시하였다.

#### 3-4. 실험방법

중형 반응기내에 규소심봉 또는 박판을 설치하고 장치의 전 라인을 진공으로 뽑고 Argon 가스를 흘려 세척한 후 규소심봉 또는 박판을 원하는 반응온도(1050-1200°C)까지 올린다. 반응기 벽의 냉각수의 온도가 충분히 올라가면 70°C까지 예열시킨 TCS와 수소의 혼합물을 주입시켜 증착 반응을 행한다. 증착 반응을 행한 후에는 중형 반응기내로의 TCS 및 수소 공급을 중단하고 불활성가스인 Argon을 계속 흘린 후, 수 분이 지나면 규소심봉 또는 박판에 전기 공급을 중단하여 박판의 온도를 실온까지 내린다.

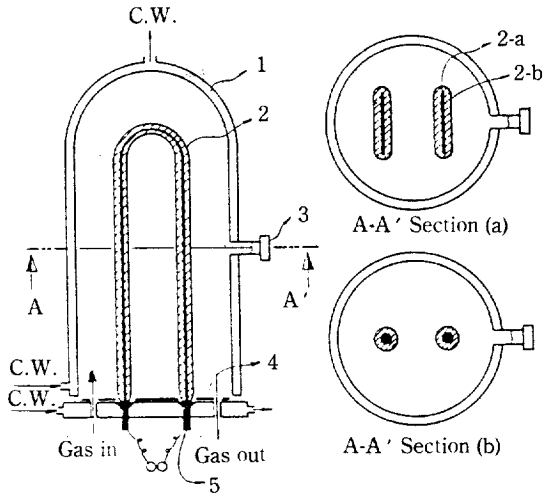


Fig. 3. Bell-jar type reactor.

- (a) Proposed model, (b) Siemens model  
1. Ball-jar, 2. Silicon sheet or rod, (a): seed, (b): deposited silicon, 3. Sight glass, 4. Quartz plate, 5. Electrode

박판의 온도가 실온까지 내려가면 반응기내로 흘러든 Argon 가스를 차단하고 반응기 내부를 진공으로 뽑고 Argon을 흘려 반응기 내부를 세척한 후, 반응기를 분해하여 반응기 내부에 설치되어 있던 규소봉 또는 판의 무게를 달아 평균증착속도를 측정하였으며, 소비전력은 전압 조절기에 부착되어 있는 전압계와 전류계의 눈금을 증착반응 진행중에 시간에 따라 읽어 전압과 전류의 곱을 측정하였다. 또한 규소심봉 또는 박판의 온도 측정은 중형 반응기밖에 설치한 optical pyrometer로 측정하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

중형 반응기내에 규소박판을 일정 크기로 설치하고 전압 조절기에 의해 규소박판의 온도를 반응 온도까지 올린 후, 기상의 TCS와 수소를 유입시켜 증착이 일어나도록 하는 실험을 반응조건을 달리해서 규소박판 또는 규소심봉의 단위표면적당 규소증착 속도 및 공급전력에 미치는 영향을 살펴보았다.

##### 4-1. 규소증착 속도

규소박판의 온도가 1100°C, 1150°C, 1200°C인 경우의 실험결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이 결과를 보면 박판의 온도가 증가할수록 규소증착 속도가 증가하는

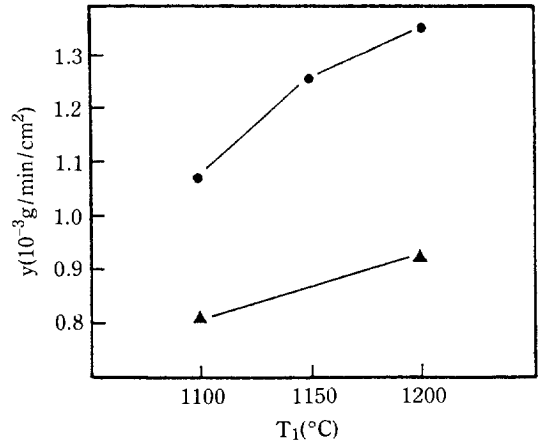


Fig. 4. Effect of silicon sheet temperature on silicon deposition rate.

Gas flow rate (1 atm, 25°C):  $5.96-6.07 \times 10^{-2}$  l/min/cm<sup>2</sup>

TCS concentration: 9.7-10.5% ●; 5.1% ▲

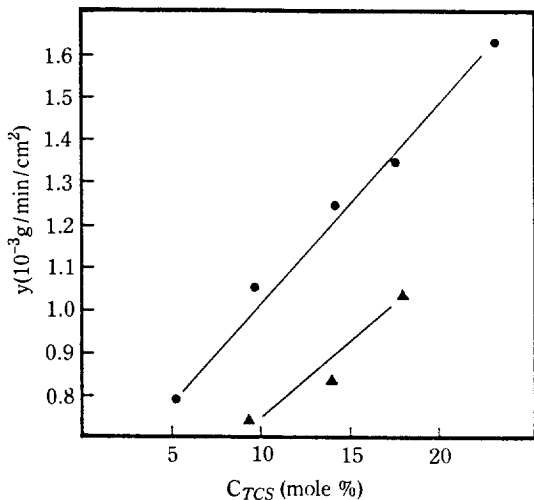
Silicon sheet size:  $2.5 \times 0.1 \times 30$  cm

Space velocity:  $2.24-2.37$  min<sup>-1</sup>

경향을 띄었는데, 이것을 반응 평형의 측면에서 고려하여 보면 반응온도가 증가할수록 규소증착 반응의 평형수율은 감소하지만 중형 반응기의 경우에는 반응기내에서 반응물의 평균 체류시간이 충분히 크지 않아 평형에 훨씬 미치지 못했기 때문이다. 즉 반응 초기에는 규소증착 반응인 정반응이 역반응보다 훨씬 크고 반응속도는 온도 증가에 따라 증가하기 때문이다.

Fig. 5는 1100°C에서 TCS 농도를 5.1-22.7%까지 변화시켜가며 실험한 결과를 TCS 농도와 단위표면적당 규소증착 속도에 대하여 도시한 것으로, 규소증착 속도는 TCS 농도 증가에 따라 증가하는 경향을 띄었다. 여기에서 TCS 농도 증가에 따라 단위표면적당 규소증착 속도가 거의 직선적으로 나타난 것은 실험 data가 TCS 농도가 큰 값일수록 단위표면적당 반응가스의 유량이 커졌기 때문에 나타난 것으로 생각되며, 단위표면적당 반응가스의 유량이 일정하고 TCS와 수소의 혼합기체가 규소박판 표면에서 film을 형성시킬 때의 특성이 TCS와 수소의 혼합비에 무관하다면 규소증착 속도는 TCS 농도의 0.5승에 비례하는 것으로 나타났다.

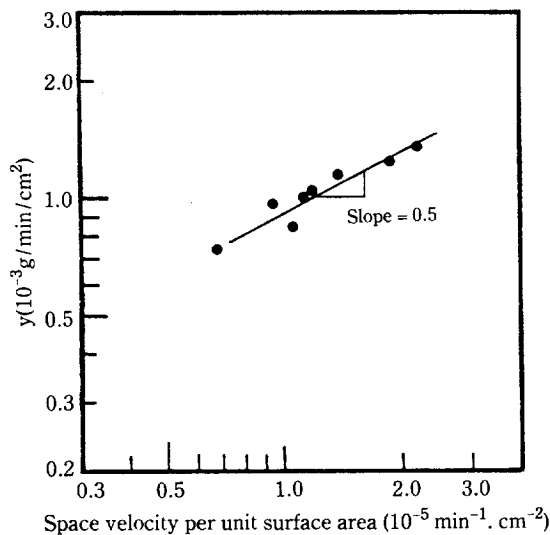
반응기 내에서의 혼합가스 유속을 측정하기는 어려우므로 1기압 25°C에서의 단위표면적당 공간속도를 parameter로 하여 단위표면적당 규소증착 속도에 대한 영향을 살펴보았다. 증착온도 1100°C, TCS 농도



**Fig. 5. Effect of TCS concentration on silicon deposition rate.**

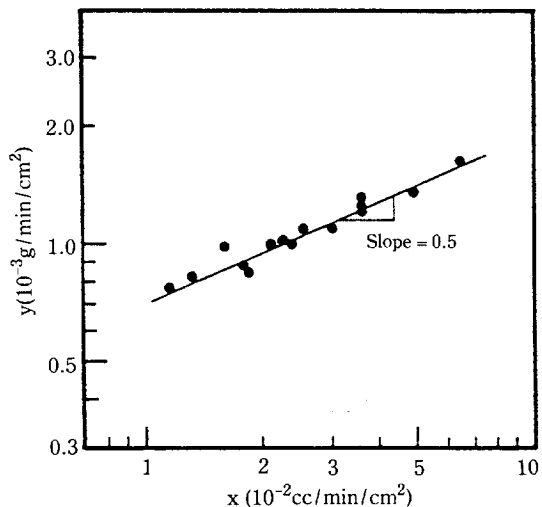
Silicon sheet temperature: 1100°C  
 Gas flow rate:  $5.87 - 6.87 \times 10^{-2} \text{ l/min/cm}^2$  ●;  
 $2.94 - 3.21 \times 10^{-2} \text{ l/min/cm}^2$  ▲  
 Silicon sheet size:  $2.5 \times 0.1 \times 30 \text{ cm}$  ●;  
 $3.5 \times 0.1 \times 46 \text{ cm}$  ▲  
 Space velocity:  $2.24 - 2.75 \text{ min}^{-1}$

9.1-9.7%인 경우 공간속도가  $1.56 \text{ min}^{-1} - 3.76 \text{ min}^{-1}$ 인 경우에 대하여 실험하였으며 그 결과를 Fig. 6에 실었다. 이 결과에 의하면 단위표면적당 규소의 증착 속도는 반응기체적 및 규소박판의 표면적이 일정할 때 공



**Fig. 6. Effect of space velocity per unit surface area on silicon deposition rate.**

Silicon sheet temperature: 1100°C  
 TCS concentration: 9.1-9.7% TCS



**Fig. 7. TCS feeding rate vs. silicon deposition rate at various TCS concentrations.**

Silicon sheet temperature: 1100°C  
 TCS concentration: 9.1-22.7%  
 Space velocity:  $1.56 - 3.76 \text{ min}^{-1}$

간 속도의 0.5승에 비례하는 것으로 나타났는데, 이는 본 실험 조건하에서 본 반응의 율속단계가 물질전달이기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

위의 결과를 종합하면 반응기의 체적이 일정할 때의 규소증착 속도는 단위표면적당 TCS의 공급량의 0.5승에 비례함을 알 수 있었으며, 그 실험결과를 Fig. 7에 실었다. 따라서 단위표면적당 규소의 증착 속도,  $y(t)$ 는 다음식으로 표시된다.

$$y(t) = k \times (t)^{0.5} \quad (22)$$

이 관계식과 실험 자료로부터 계산한 증착 반응의 속도상수,  $k$ 를 계산하여 Table 1에 실었다. 즉 식 (22)와 Table 1의 자료를 이용하면 공간속도  $1.56 \text{ min}^{-1} - 3.76 \text{ min}^{-1}$ 인 중형 반응기에서의 규소증착 속도를 추정할 수 있다. 또한 실험 자료로부터 계산한 속도상수  $k$ 를 온도에 대해 Arrhenius식으로 해석하여 결보기 활성화 에너지를 구한 결과  $10 \text{ kcal/mole}$  정도로 아주 작은

**Table 1. Values of rate constant at each condition.**

Condition	Value
1100°C, 1 atm	$6.7 \times 10^{-3}$
1150°C, 1 atm	$7.7 \times 10^{-3}$
1200°C, 1 atm	$8.3 \times 10^{-3}$

Standard deviation,  $S_D = 0.21 \times 10^{-3}$

**Table 2. Experimental conditions & data.**

Experimental conditions and results	Experiment #1	Experiment #2
Silicon rod size (diameter × length)	0.8cm × 33.6cm	0.8cm × 35.0cm
Initial rod weight	16.9 g	17.6 g
Rod temperature	1100°C	1100°C
TCS flowrate	13 cc TCS/min	5.4 cc TCS/min
TCS concentration	35.7 %	19.7 %
Run time	240 min	240 min
Deposited silicon	67.6 g*	42.0 g*
	61.0 g**	38.1 g**

\*Experimental value

\*\*Calculated value

값을 가졌으며, 이는 규소증착 반응의 율속단계가 반응 기체의 확산이기 때문인 것으로 해석할 수 있다.

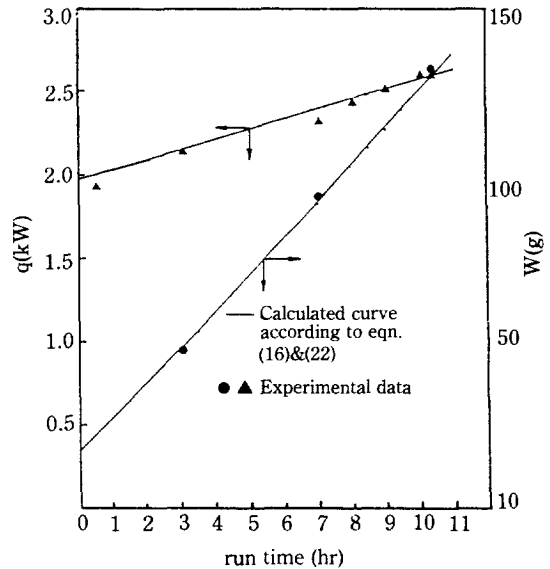
앞에서 제안한 규소증착 속도식의 타당성을 검토하기 위해 직경 8mm의 다결정 규소심봉 한쌍을 Fig. 3-(b)와 같이 중형 반응기내에 설치하고 증착 실험을 행하였으며, 실험조건과 실험결과를 Table 2에 실었다. 그리고 앞에서 제안한 증착 속도식에 의해 계산된 결과를 병기하였다.

#### 4-2. 소비전력

시간에 따른 소비전력을 계산하는 (21)식에 (11), (16), (18), (19), (20)식 및 실험에 의해 제안된 (22)식을 대입하면 시간에 따른 소비전력  $q(t)$ 는 단위표면적당 TCS의 유량,  $x(t)$ 만의 함수로 표시할 수 있다. Fig. 8은 소비전력을 계산하는 식의 타당성 검토를 하기 위해 규소박판 한쌍을 중형 반응기내에 설치하고 장시간 증착 실험을 행하였으며 그때의 시간에 따른 규소박판의 무게와 소비전력을 계산치와 비교한 그림이다. Fig. 8에서 보듯이 각 시간에 따른 규소박판의 무게와 전력량 등이 실험결과와 거의 일치하고 있다. 따라서 앞에서 제안한 증착 속도식을 대입한 소비전력을 계산하는 식으로 중형 반응기에서의 규소증착 반응시 소비전력을 추정할 수 있다.

### 5. 결 론

중형 반응기내에 규소박판을 설치하고, TCS와 수소를 원료로하여 여러 조업조건에 대한 규소증착 속도와 소요전력에 대한 실험을 행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.



**Fig. 8. An example of electric power and weight of the silicon sheet according to run time.**

Initial sheet size:  $2.5 \times 0.1 \times 30$ cm

Silicon sheet temperature: 1100°C

TCS feeding rate: 4cc/min

TCS concentration: 9.7 mole %

1. 중형 반응기에서 단위표면적당 규소증착 속도는 공간 속도가  $1.56\text{--}3.76\text{min}^{-1}$ 인 경우에 단위표면적당 TCS 주입량의 0.5승에 비례하는 것으로 나타났다.

2. 경험식인 단위표면적당 규소증착 속도식을 이용하여 제안한 시간에 따른 규소증착 속도식은 실험결과와 잘 일치하였다.

3. 경험식인 단위표면적당 규소증착 속도식과 복사열 절감율을 도입하여 얻은 중형 반응기에서의 소요전력에 관한 식은 실험결과와 잘 일치하였다.

### NOMENCLATURE

- $C_{pi}$  : Specific heat at constant pressure for component i, J/g/K
- $C_{TCS}$  : Concentration of TCS, mole %
- $D_o$  : Distance defined by Fig. 7, cm
- $D$  : Distance between the electrodes, cm
- $k$  : Constant defined by equation (22)
- $l$  : Total length of the silicon sheets or rods, cm
- $\dot{m}_i$  : Mass flow rate for component i, g/min
- $P$  : Reaction pressure, bar
- $Q$  : Electric energy consumption, W-hr
- $q$  : Electric power consumption, W
- $R_{Si}$  : Silicon production rate, g-Si/min

$r_{Si}$  : Intrinsic reaction rate, g-Si/min  
 $S$  : Surface area of the silicon sheet or rods,  $cm^2$   
 $T$  : Thickness of the silicon sheet or rod, cm  
 $T, T_1, T_2, T_3, T_4$  : Temperature; of the silicon sheet; at the reactor wall; of inlet gas; of outlet gas, K  
 $t$  : Run time, min  
 $v$  : Volumetric flow rate of reactant gas at 25°C, l atm //min  
 $W$  : Weight of the silicon sheets, g  
 $w$  : Width of the silicon sheet, cm  
 $X$  : TCS feeding rate, cc/min  
 $x$  : TCS feeding rate per unit surface area, cc/min/ $cm^2$   
 $y$  : Silicon deposition rate per unit surface area, g/min/ $cm^2$

### Greek Letters

$\epsilon$  : Emissivity, —  
 $\eta$  : Factor of heat saving effect, —  
 $\theta, \bar{\theta}$  : View angle; average value of, radian

$\rho_{Si}$  : Density of silicon, g/ $cm^3$   
 $\sigma$  : Stefan-Boltzmann constant,  $3.406 \times 10^{-6}$  J/min/ $m^2/K^4$

### REFERENCES

1. Dietze, W., Keller, W. and Muhlbauer, A.: "Crystals: Growth, Properties, and Applications", Ed. J. Grabmaier, vol 5, Springer-Verlag, Berlin (1981).
2. DE Patent P2, 912,661.2 (1979).
3. 강신이, 박대원, 윤풍, 이광순 : 화학공학, **24**(6), 503 (1986).
4. 한명완, 전종열, 강신이, 박대원, 윤풍 : 화학공학, **25**(4), 327 (1987).
5. Hsu, G., Hogle, R., Rohatgi, N. and Morrison, A.: *J. Electrochem. Soc.*, **131**(3), 660 (1984).
6. Niederkorn, I. and Wohl, A.: *Revue Roumaine de Chimie*, **11**, 85 (1966).
7. Erk, H.F.: The Science of Silicon Material Preparation Workshop, Phoenix, Aug. 23-25 (1982).