

단결정 실리콘 성장기의 성능향상을 위한 직경 제어

(The Diameter Control for improved performance of the Crystal Grower)

이석원* · 박종식 · 이진우

(Suk-Won Lee · Jong-Sik Park · Jin-Woo Lee)

요 약

본 연구에서는 실제의 산업현장(MEMC Korea)에서 생산 공정에 투입되고 있는 단결정 실리콘 성장기(CZ-150 Crystal Grower)의 직경을 자동으로 제어하는 시스템의 성능을 개선하기 위한 제어기를 설계하였다.

설계된 제어기의 설계파라미터들의 효용성을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하고, 제안된 제어기가 항상 정상상태 오차가 존재하는 기존의 PD 제어기보다 성능이 우수함을 보였다.

Abstract

In this paper the automatic diameter control system of the CZ-150 Crystal Grower is proposed in order to achieve a good performance for the industry applications in MEMC Korea.

The effectiveness of the design parameters is verified by means of the computer simulations and the proposed controllers showed the better performance than the conventional PD controllers which always have steady-state errors.

Key Words : Crystal Grower, automatic diameter control, time-delay, steady-state error

1. 서 론

단결정 실리콘 성장기(Crystal Grower-FFCZ150)는 밀폐된 석영 도가니 내의 다결정 실리콘을 고진공 하에서 1450[°C] 이상으로 가열 용융시킨 후, 단결정 실리콘의 종자(Seed)를 접촉시켜 봉상의 단결정 실리콘을 정해진 직경에 따라 자동적으로 성장시키는 장비로서 실리콘 웨이퍼를 생산하는 데 있어서의 주요 장비이다.

단결정 실리콘의 성장과정 중 Melt의 표면에 종

자(Seed)를 접촉시켜 Dipping 작업을 하는데 Seed 주위에 밝은 환형이 나타나고 이것을 Meniscus라 부르는데 이는 액체 상태의 실리콘과 고체 상태의 실리콘 종자사이의 접촉면의 가장자리의 상태를 정확히 파악하여 좋은 단결정 실리콘을 성장시킬 수 있게 한다. Meniscus가 양호한 상태에서 종자를 회전 및 인상시키면 단결정 실리콘이 종자의 결정 방향으로 성장이 되는데 인상속도에 따라 직경의 크기가 결정된다. 자동 직경 제어는 두 단계로 나뉘며, 초반부는 Machine Vision System에서 측정되는 Ingot의 직경을 피드백하여 Ingot의 인상속도를 PID 제어로 조절하며, Body Length 100[mm] 이후부터는 Ingot의 인상속도를 고정하고 석영도가니에 가해지는 히터(Heater)의 전력을 제어하여 성장을 하게 된다.

* 주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 교수

Tel : 041-540-5672, Fax : 041-540-5693

E-mail : swlee@office.hoseo.ac.kr

접수일자 : 2003년 11월 26일, 1차심사 : 2003년 11월 28일

2차심사 : 2004년 1월 15일, 3차심사 : 2004년 2월 6일

심사완료 : 2004년 7월 7일

단결정 실리콘 성장기의 성능향상을 위한 직경 제어

본 논문에서는 Ingot 성장부분의 Boby growth 부분의 자동 직경 제어 시스템을 보완하여 부하 외란에 강인한 제어를 설계하는 것을 목적으로 하고 있다. 플랜트에 적분기가 존재할 경우 정상상태 오차가 발생하는 단점을 보완하기 위해 변형된 Smith Predictor의 시간지연 보상기가 Watanabe에 의해 제안되었는데, 이를 적분기를 갖는 단결정 실리콘 성장기의 자동 직경 제어기에 적용함으로써 부하 외란에 대한 응답 특성을 개선시키면서 정상상태의 오차를 제거할 수 있다.

본 논문에서는 주제어기로 2계근사모델의 PID 제어를 이용하고 시간지연 보상기 $M(s)$ 를 추가한 구조의 시간지연 제어를 적용함으로써 기준 입력 및 부하 외란에 대한 응답 특성이 개선되는 것을 확인할 수 있었고, 이를 CZ-150 Crystal Grower에 적용하여 결정봉의 직경과 인상 속도를 최적화하여 제어함으로써 결정봉의 제품에 직접적인 영향을 주는 결정 결함 및 미달 및 초과 직경의 결함을 줄임으로써 제품의 질과 수율을 향상시킬 수 있다.

2. 단결정 실리콘 성장기의 자동직경제어

2.1 단결정 실리콘 성장기의 개요

단결정 실리콘 성장기(Crystal Grower - FF CZ150)는 밀폐된 석영 도가니 내의 다결정 실리콘을 고진공하에서 1450[°C] 이상으로 가열 용융시킨 후, 단결정 실리콘의 종자(Seed)를 접촉시켜 봉상의 단결정 실리콘을 정해진 직경에 따라 자동적으로 성장시키는 장비이며, 그림 1은 단결정 실리콘 성장기의 구성도를 나타내고 있다.

그림 2에 나타나 있는 단결정 성장기를 구성하고 있는 구성품의 특징을 살펴보면 다음과 같다.

1) PLC : 단결정 성장기의 전체적인 공정을 제어하기 위한 장치이며 텍사스 인스트루먼트(Texas Instrument)사의 T1575 PLC를 사용한다.

2) 서보 모터 : 석영 도가니와 종자를 회전시키면서 서서히 끌어올려 액체상태의 실리콘을 고체상태의 단결정 봉으로 만든다. 4개의 DC서보 모터를 사용한다.

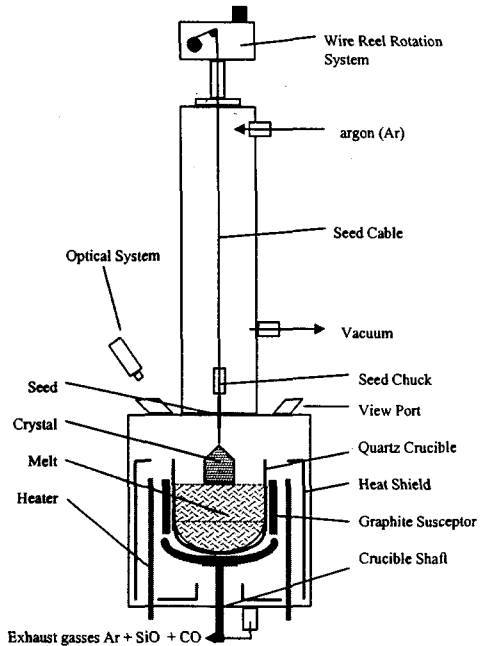


그림 1. 단결정 실리콘 성장기의 구성도(FF-CZ150)
Fig. 1. The Structure of the Crystal Grower

3) 카메라 시스템 : Machine Vision System에서 성장되는 Ingot의 직경을 측정하게 된다. Machine Vision에서는 성장되는 Ingot의 직경을 측정하게 되는데, 이는 1000[ms]에 한 프레임씩 Ingot의 직경을 측정하여 자동직경제어기의 실제의 값으로 사용한다.

4) 웨이트 콘트롤러 : 단결정 봉의 무게를 측정하는 장치이다.

5) 압력 시스템 : 단결정 성장기의 내부는 아르곤 가스를 주입하고 진공 펌프로 펌핑을 하는데 단결정 성장기 내부의 압력을 일정하게 유지하기 위한 장치이다.

6) 진공 펌프 : 단결정성장기 내부를 고 진공으로 유지시켜 주기 위해 고 순도의 아르곤 가스를 주입하면서 진공 펌프로 펌핑을 한다.

7) Feeder 시스템 : 단결정 성장기에 라이트 폴리 실리콘을 공급하는 장치이다.

8) 히터 파워 서플라이 : 1450도에서 녹는 실리콘을 녹이기 위해 250[Kw]의 전기를 단결정 성장기에 공급한다.

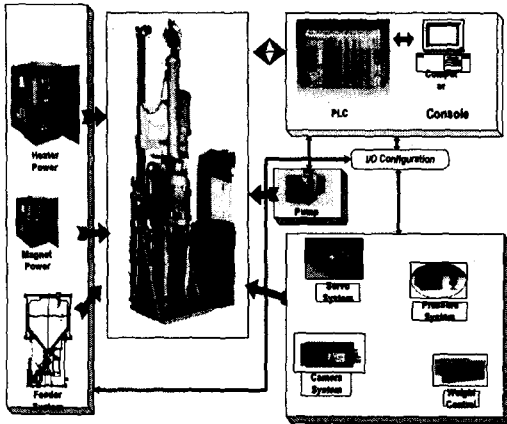


그림 2. 단결정 실리콘 성장기의 구성품
Fig. 2. Components of the Crystal Grower

9) 마그네트 파워서플라이 : 단결정성장기의 바깥 쪽으로 자기장을 걸어 Ingot의 산소 농도 등을 조절 하기 위한 장치이다.

2.2 Czochralski법에 의한 단결정 성장 공정

Czochralski법에 의한 단결정 성장의 공정은 주원료인 Poly-Si과 Dopant를 석영도가니 내에 넣고, 고온에서 용융하여 Ingot를 성장시키는데 Dopant는 Ingot의 Type를 결정지으며 P-Type에는 B(붕소) N-Type에는 P(인), Sb(안티몬) 등이 사용된다.

석영도가니 내에 원재료인 Poly-Si과 Dopant를 넣고 단결정 실리콘 성장기내에 있는 전기로의 온도를 높이면 석영도가니내의 Poly-Si이 완전히 녹은 Melt 상태가 되는데 이때의 온도는 1450[°C]정도가 된다. 석영도가니의 온도를 균일하게 유지시키기 위해 도가니를 회전시킨다.

이 Melt의 표면에 종자(Seed)를 접촉시켜 Dipping 작업을 하는데, 종자 주위에 나타나는 밝은 환형을 Meniscus 라고 부른다. 이는 액체 상태의 실리콘과 고체 상태의 실리콘 종자사이의 접촉면의 가장자리의 상태를 정확히 파악하여 좋은 단결정실리콘을 성장시킬 수 있게 한다. Meniscus가 양호한 상태에서 종자를 회전, 인상시키면, 단결정실리콘이 종자의 결정 방향대로 성장이 되는데 인상속도에 따라 직경의 크기가 결정된다. 5~8[mm] 정도의 직경으

로부터 250[mm] 길이로 성장하는데 이 공정을 넥킹(Necking)이라고 한다. 넥킹 공정이 끝나면 단결정 실리콘의 직경을 8인치까지 확장시켜야하며 이 공정을 Crown 또는 Shouldering 이라고 한다. 이때는 인상속도를 줄이고 석영도가니에 가해지는 전기로의 온도를 서서히 줄이면 실리콘은 고체 상태의 실리콘에 용착되어 고체화되는 속도가 빨라져 직경이 커지게 된다.

Crown 작업공정에서 8인치 직경 정도로 성장이 되면 그 결정의 직경을 계속 유지하면서 Ingot을 주어진 길이로 성장시키는데, 이 작업을 Body Growth 이라고 한다. Body부분은 실리콘 웨이퍼를 만드는 공정에 직접 사용하는 제품이 된다.

Body growth 의 자동직경제어는 두 스텝으로 나뉘어 초반부는 Machine Vision System에서 측정되는 Ingot의 직경을 피드백하여 Ingot의 인상속도를 PID 제어로 조절하며(ADC1) Body Length 100[mm] 이후부터는 Ingot의 인상속도를 고정하고 석영도가니에 가해지는 히터의 전력을 제어하여 성장을 하게 된다(ADC2).

이 성장기에 의해서 만들어진 Ingot은 그림 3에 그 사진이 나타나 있는데, 이 것을 절단 및 표면 연마 후 Slicing, Polishing, Cleaning절차를 거치면 반도체의 기초소자인 실리콘 웨이퍼가 완성된다.

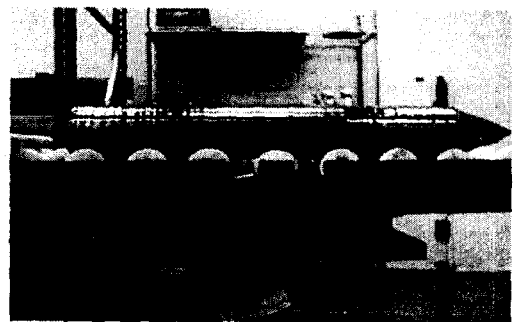


그림 3. 성장된 Ingot
Fig. 3. A grown Ingot

2.3 자동직경 제어시스템의 개요

본 논문에서 적용한 CZ-150 Crystal Grower에서, Meniscus를 Machine Vision System에서 성장되는 Ingot의 직경으로 측정하게 된다. Machine

단결정 실리콘 성장기의 성능향상을 위한 직경 제어

Vision에서는 성장되는 Ingot의 직경을 1000[ms]에 한 프레임씩 측정하여 자동직경제어기의 실제의 값으로 사용한다.

CZ-150 Crystal Grower는 Ti Soft 사의 Ti575 PLC를 이용하여 디지털 PID 제어기로 Ingot을 성장하게 된다. 단결정 실리콘 성장기의 자동직경 제어의 성능은 결정 성장 중 발생하는 결함에 직접적인 영향을 주는 중요한 부분으로 PID 제어를 이용하여 간단한 구조 및 비교적 좋은 제어성능을 가지고 있지만, 제어대상 및 제어기의 매개변수에 크게 의존하는 단점을 가지고 있다[2].

본 논문에서는 적분기를 포함한 긴 시간지연을 가지는 플랜트인 단결정 실리콘 성장기에 적용되는 그림 4의 자동 직경 제어시스템(Automatic Diameter Control)을 설계하는 데 있어, 2계 근사화 모델에 근거한 PID제어기 설계방법을 적용함으로써 성능 개선이 이루어짐을 보였다[3].

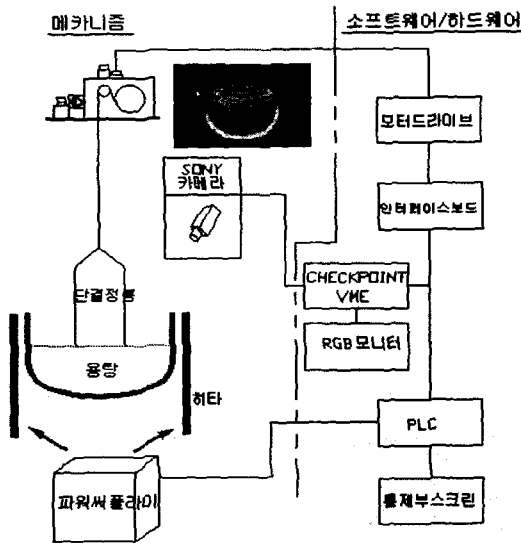


그림 4. 자동직경제어 시스템
Fig. 4. Automatic Diameter Control System

또한 Watanabe가 제안한 변형된 스미스 예측기를 적용하여 적분기를 포함한 시스템에 시간 지연 보상을 가지는 구조로 부하 외란 입력에 대한 응답 특성이 개선된 자동 직경 제어 시스템을 설계하였다[4].

3. 자동직경 제어 시스템의 설계

3.1 근사화 모델을 이용한 PID 제어기의 설계

프로세스의 전달함수 $G(s)$ 또는 주파수 응답 $G(j\omega)$ 가 이용 가능하고, 단일 루프 제어기의 구성이 그림 5에서 보여준 것이라고 가정하자. PID 제어기의 식은

$$K(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (1)$$

의 형태이고, 여기서 설계해야하는 파라미터들은 K_p, K_I, K_D 들이다.

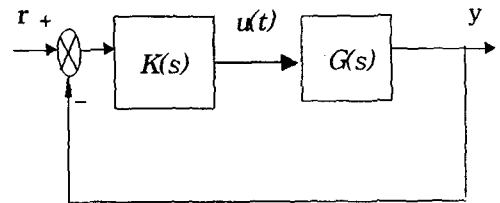


그림 5. 피드백 제어기의 구성
Fig. 5. Feedback Controller

본 논문에서는 시간지연이 포함된 고차 시스템 (high-order system)을 저차 시스템으로 근사화 하는 방법을 이용하여 PID제어기를 설계한다.

주파수 응답을 이용하여 시간 지연항을 포함한 2계 근사모델 $\tilde{G}(s)$ 은 플랜트의 주파수 응답 중 단지 두 점만을 이용하여 다음과 같은 2계 근사화 모델을 고려한다.

$$\tilde{G}(s) = \frac{e^{-sL}}{as^2 + bs + c} \quad (2)$$

a, b, c, L의 값들이 2계 근사화 모델에서 계산하여야 하는 파라미터들이며, 이를 결정하기 위해 주파수 응답의 위상은 식(3)과 같이 된다.

$$\angle G(j\omega_c) = -180, \angle G(j\omega_b) = -90 \quad (3)$$

우선 식(3)을 만족하는 두 개의 주파수 포인트 $s=j\omega_c, s=j\omega_b$ 를 선정한다.

이때, $G(j\omega_c) = \mathcal{G}(j\omega_c)$, $G(j\omega_b) = \mathcal{G}(j\omega_b)$ 라고 가정하면 식(4) 및 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$c - a\omega_b^2 + jb\omega_b = \frac{\cos(\omega_b L) - j\sin(\omega_b L)}{-j|G(j\omega_b)|} \quad (4)$$

$$c - a\omega_c^2 + jb\omega_c = \frac{\cos(\omega_c L) - j\sin(\omega_c L)}{-|G(j\omega_c)|} \quad (5)$$

위의 두 식으로부터 a, b, c의 관계식을 유도한다.

$$a = \frac{1}{\omega_c^2 - \omega_b^2} \left[\frac{\sin(\omega_b L)}{|G(j\omega_b)|} + \frac{\cos(\omega_c L)}{|G(j\omega_c)|} \right] \quad (6)$$

$$b = \frac{\sin(\omega_c L)}{\omega_c |G(j\omega_c)|} \quad (7)$$

$$c = \frac{1}{\omega_c^2 - \omega_b^2} \left[\frac{\omega_b^2 \sin(\omega_b L)}{|G(j\omega_b)|} + \frac{\omega_c^2 \cos(\omega_c L)}{|G(j\omega_c)|} \right] \quad (8)$$

$$\frac{\sin(\omega_c L)}{\cos(\omega_b L)} = \frac{\omega_c |G(j\omega_c)|}{\omega_b |G(j\omega_b)|} = \theta \quad (9)$$

식(9)는 비선형방정식이므로 Newton-Raphson 방법으로, 식(10)의 근사식을 이용하여 근사해를 구하였다.

$$\sin(x) = px^2 + qx, \cos(x) = rx^2 + rx + 1 \quad (10)$$

여기서,

$$p = \frac{8}{\pi^2}(1 - \sqrt{2}), q = \frac{2}{\pi}(2\sqrt{2} - 1), r = \frac{2}{\pi}(2\sqrt{2} - 3) \text{이다.}$$

식(9)와 식(10)으로부터 다음을 얻는다.

$$p(\omega_c^2 - \theta\omega_b^2)L^2 + (q\omega_c - \theta r\omega_b)L - \theta = 0 \quad (11)$$

식(11)의 해 중에서 작은 절댓값을 선택해서 다음의 Newton-Raphson방법의 초기 값으로 이용한다.

$$f(L) = \frac{\sin(\omega_c L)}{\cos(\omega_b L)} - \frac{\omega_c |G(j\omega_c)|}{\omega_b |G(j\omega_b)|}$$

$$f'(L) = \frac{\omega_b \sin(\omega_b L) \sin(\omega_c L) + \omega_c \cos(\omega_b L) \cos(\omega_c L)}{\cos^2(\omega_b L)}$$

$$L_2 = L_1 - \frac{f(L_1)}{f'(L_1)} \quad (12)$$

식(12)에 의해 얻어진 L을 식(6),(7),(8)에 대입하여 2계 근사화 모델을 얻는다. PID 제어기의 식(1)로부터 다시 형태를 바꾸어 쓰면 식(13)과 같이 표현된다.

$$K(s) = k \left(\frac{As^2 + Bs + C}{s} \right) \quad (13)$$

여기서 $A = (K_D/k)$, $B = (K_P/k)$, $C = (K_I/k)$ 이다. 개루프 전달함수 $\mathcal{G}(s)K(s)$ 의 결과를 근사화하면 식(14)와 같다.

$$\mathcal{G}(s)K(s) = k \left(\frac{As^2 + Bs + C}{s} \right) \frac{e^{-sL}}{as^2 + bs + c} = \frac{k}{s} e^{-sL} \quad (14)$$

페루프 시스템의 극점들은 적절한 k의 값을 지정하고 루프의 근계적을 이용하여 선택할 수 있다.

3.2 시간지연 제어기의 설계

플랜트에 적분기가 존재할 경우 정상상태 오차가 발생하는 단점을 보완하기 위해, Watanabe에 의해 변형된 Smith Predictor의 시간지연 보상기가 제안되었는데, 이를 적분기를 갖는 단결정 실리콘 성장기의 자동 직경 제어시스템에 적용함으로써 부하 외란에 대한 응답 특성을 개선시키면서 정상상태의 오차를 제거할 수 있다.

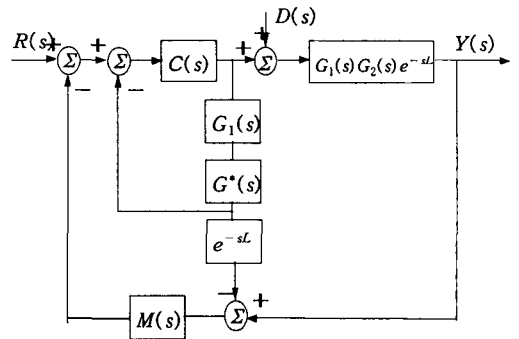


그림 6. 시간 지연 제어기
Fig. 6. A Controller with time delay

본 논문에서는 주제어기로 2계 근사 모델의 PID

단결정 실리콘 성장기의 성능향상을 위한 직경 제어

제어기를 이용하고 시간지연 보상기 $M(s)$ 를 추가한 구조의 시간지연 제어기를 설계한다. 그림 6은 근사화 모델의 PID를 주제어기로 이용한 시간 지연 제어기의 구조이다. $R(s)$ 는 기준입력을, $Y(s)$ 는 출력을, $D(s)$ 는 외란을 각각 나타내며, $C(s)$ 는 주 제어기이고 $M(s)$ 는 외란에 대한 보상기이다.

적분요소 및 시간지연을 갖는 플랜트의 모델식은 식(15)와 같다.

$$G(s) = \frac{1}{(rs+1)} \frac{K}{s} e^{-sL} = G_1(s)G_2(s)e^{-sL} \quad (15)$$

여기서

$$G_1(s) = \frac{1}{(rs+1)}, \quad G_2(s) = \frac{K}{s}, \quad G^*(s) = \frac{K}{s+\alpha}$$

기준입력 $R(s)$ 에 대한 출력 $Y(s)$ 의 전달함수를 구하면

$$G_d(s) = \frac{C(s)G_1(s)G_2(s)e^{-sL}}{1+C(s)(G_1(s)G^*(s)+M(s)G_1(s)(G_2(s)-G^*(s))e^{-sL})}$$

분모 항으로부터 특성방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 0 &= 1 + C(s)(G_1(s)G^*(s) + M(s)G_1(s)(G_2(s) - G^*(s))e^{-sL}) \\ &= (1 + C(s)G_1(s)G^*(s)) \left(1 + \frac{M(s)C(s)G_1(s)G^*(s)}{1 + C(s)G_1(s)G^*(s)} \frac{\alpha}{s} e^{-sL} \right) \end{aligned}$$

이 시스템이 안정하기 위한 필요충분조건으로 식(16)의 벡터도(plot)가 복소평면에서 점(-1,0)을 둘러싸지 않으면 된다.

$$\frac{M(s)C(s)G_1(s)G^*(s)}{1 + C(s)G_1(s)G^*(s)} \frac{\alpha}{s} e^{-sL} \quad (16)$$

외란 $D(s)$ 에 대한 출력 $Y(s)$ 의 전달함수 $G_d(s)$ 는 식(17)과 같이 된다.

$$\begin{aligned} G_d(s) &= \frac{G_1(s)G_2(s)e^{-sL}}{1 + C(s)G_1(s)G^*(s) + M(s)G_1(s)(G_2(s) - G^*(s))e^{-sL}} \\ &+ \frac{C(s)G_1(s)G_2(s)e^{-sL}}{1 + C(s)(G_1(s)G^*(s) + M(s)G_1(s)(G_2(s) - G^*(s))e^{-sL})} \\ &\cdot (G_1(s)G^*(s) - M(s)G_1(s)G^*(s)e^{-sL}) \quad (17) \end{aligned}$$

만약에 $G(s)$ 가 적분기를 가지고 있다면 외란 보상기 $M(s)$ 에 의해 정상상태의 오차는 식(18)과 같이 0이 된다.

$$\begin{aligned} \lim_{s \rightarrow 0} G_d(s) &= \lim_{s \rightarrow 0} (G_1(s)G^*(s) - M(s)G_1(s)G^*(s)e^{-sL}) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} (1 - M(s)e^{-sL})G_1(s)G^*(s) \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} (1 - M(0)) \frac{K}{\alpha} = 0 \quad (18) \end{aligned}$$

외란 스텝입력에 대해 정상상태의 오차를 0으로 만들기 위해서는 $M(0)=1$ 을 만족해야 한다.

외란에 대한 과도응답 속도를 개선하기 위해서 극점 $-\alpha$ 는 $1 - M(s)e^{-sL}$ 에 의해서 제거되어야 한다.

$$G_1(s)(G^*(s) - M(s)G^*(s)e^{-sL}) = \frac{1}{rs+1} (1 - M(s)e^{-sL}) \frac{K}{s+\alpha} \quad (19)$$

보상기 $M(s)$ 는 다음을 만족해야 한다.

$$1 - M(-\alpha)e^{-\alpha L} = 0 \quad (20)$$

여기서 $M(s)$ 는 식(21)과 같이 정의한다.

$$M(s) = \frac{as+b}{s+\mu} \quad (21)$$

$\mu > 0$ 인 임의의 값을 선택하고 $b = \mu$ 로 하여 a 를 다음과 같이 구한다.

$$a = \frac{\mu + (\alpha - \mu)e^{-\alpha L}}{\alpha} \quad (22)$$

4. 컴퓨터 시뮬레이션

4.1 자동직경 제어기의 모델식

4.1.1 자동직경 제어기의 모델식(ADC1)

Automatic Diameter Control 1(ADC1)은 Body length 100[mm] 이전의 제어기로 인상 속도에 따른

Ingot의 직경응답에 대한 제어를 말한다.

단결정 실리콘 성장기의 직경 응답은 MMSE (Minimum Mean Square Error) 모델을 이용하여 24인치 200[mm] Hot Zone과 GQZ Reflector, Two Side Rings 그리고 Organ Heater를 사용하여 실제 모델을 구한 것이다[1]. 아래의 표 1은 인상 속도에 따른 Ingots의 직경응답 모델식의 파라메타 들이다.

표 1. 인상속도에 따른 직경응답의 모델 파라미터
Table 1. Model parameters for pulling speed

Parameter	Pull input
Gain	0.90
Time constant	2 [minutes]
Pure time delay	8 [minutes]

단결정 실리콘 성장기의 자동직경 시스템의 ADC1의 모델식은 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)} e^{-sL}$$

여기서 시간지연 $L=8[\text{min}]$, $\tau=2[\text{min}]$, $K=0.9$ 이고, 전체 시스템의 피드백 게인 $H(s)=12/345$ 이다.

4.1.2 자동직경 제어기의 모델식(ADC2)

Auto Diameter Control 2 (ADC2)는 Body length 100[mm] 이후의 제어기로 파워 입력에 따른 Ingots의 직경응답에 대한 제어를 말한다.

단결정 실리콘 성장기의 직경 응답은 ADC1과 같은 방법을 사용하여 실제 모델을 구한 것이다[1]. 아래의 표 2는 파워 입력에 따른 Ingots의 직경응답 모델식의파라메타 들이다.

표 2. 파워입력에 따른 직경응답의 모델 파라미터
Table 2. Model parameters for power input

Parameter	Pull input
Gain	0.17
Time constant	11 [minutes]
Pure time delay	66 [minutes]

단결정 실리콘 성장기의 자동직경 시스템의 ADC2의 모델식은 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{K}{s(\tau s + 1)} e^{-sL}$$

여기서 시간지연 $L=66[\text{min}]$, $\tau=11[\text{min}]$, $K=0.17$ 이고, 전체 시스템의 피드백게인 $H(s)=0.04$ 이다.

4.2 근사와 모델을 이용한 제어기의 시뮬레이션

4.2.1 근사와 모델의 자동직경 제어기(ADC1)

Auto Diameter Control 1(ADC1)에서 적분기를 갖는 2차 시스템의 경우 PID 제어기 설계를 위해 2차 모델로 근사화하면 아주 작은 값의 K_I 값이 얻어진다. 2계 근사화 방법으로부터 주파수응답 $\omega_c=0.1624\text{rad/s}$ 와 $\omega_b=0.001\text{rad/s}$ 의 두 점에서 이고, $G(j\omega_c)=-0.1832\text{rad/s}$ 와 $G(j\omega_b)=-31.2984$ 이 각각 정해진다.

Newton-Raphson의 방법에 의해 모델은 다음과 같이 추정된다.

$$G(s) = \frac{1}{65.7513s^2 + 31.8819s + 0.000311} e^{-7.6840s}$$

$\xi_0 > 0.7071$ 이므로 $k = 0.5/L = 0.0651$ 을 얻는다.

PID 파라미터들은 식(13)으로부터 계산된다.

$$K(s) = 0.0651 \frac{65.7513s^2 + 31.8819s + 0.000311}{s} = \frac{4.2785s^2 + 2.0746s + 0.0000203}{s}$$

자동 직경 제어 시스템의 PD 제어기는 다음과 같다.

$$K(s) = \frac{6s^2 + 2.7s}{s}$$

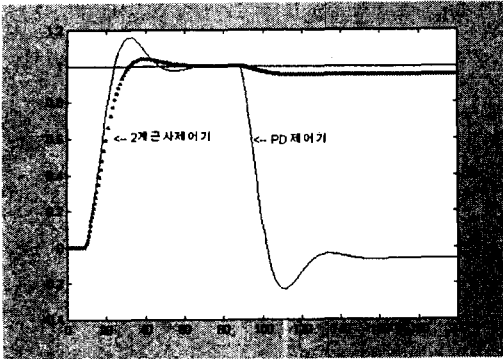


그림 7. 2계 근사제어기의 단위계단응답(ADC1) 횡축은 시간(분)을 나타내고, 종축은 응답의 크기를 나타낸다.

Fig. 7. Unit Step Response of the second order system(ADC1)

80분에서 -0.05의 부하 외란을 주었을 때 그림 7에서처럼 부하 외란에 대해 4.8[%]의 오차를 가지고 있다. 이 방법은 플랜트가 적분기를 포함하는 경우 정상상태의 오차가 발생하기 때문에 외란에 대해 만족할만한 성능을 얻기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 시간지연보상기 $M(s)$ 를 추가하여 외란에 대한 응답특성을 개선하였다.

4.2.2 근사화 모델의 자동직경 제어기(ADC2)

Automatic Diameter Control 2(ADC2)에서 적분기를 갖는 2차 시스템의 경우 PID 제어기 설계를 위해 2차 모델로 근사화하면 아주 작은 값의 K_I 값이 얻어진다.

2계 근사화 방법으로부터 주파수 응답은 $\omega_c = 0.0211 \text{ rad/s}$ 와 $\omega_b = 0.001 \text{ rad/s}$ 의 두 점에서 $G(j\omega_c) = -0.3143 \text{ rad/s}$ 와 $G(j\omega_b) = -6.7794 \text{ rad/s}$ 이 각각 정해진다.

Newton-Raphson의 방법에 의해 모델은 다음과 같이 추정된다.

$$\hat{G}(s) = \frac{1}{1676s^2 + 147.0604s + 0.0011} e^{-63.5880s}$$

$\zeta_0 > 0.7071$ 이므로 $k = 0.5/L = 0.0079$ 을 얻는다.

PID 파라미터들은 식(13)으로부터 계산된다.

$$K(s) = 0.0079 \frac{1676s^2 + 147.0604s + 0.0011}{s} = \frac{13.1782s^2 + 1.1564s + 0.000086881}{s}$$

자동 직경 제어 시스템의 PD 제어기는 다음과 같다.

$$K(s) = \frac{12s^2 + 1.6s}{s}$$

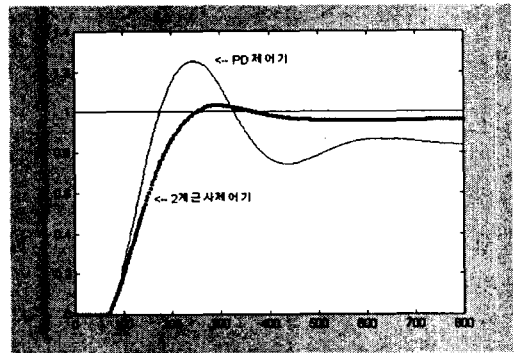


그림 8. 2계 근사제어기의 단위 계단응답(ADC2)- 횡축은 시간(분)을 나타내고, 종축은 응답의 크기를 나타낸다.

Fig. 8. Unit Step Response of the second order system(ADC2)

200분에서 -0.05의 부하 외란을 주었을 때 그림 8에서처럼 부하 외란에 대해 4.0[%]의 오차를 가지고 있다. 이 방법은 플랜트가 적분기를 포함하는 경우 정상상태의 오차가 발생하기 때문에 외란에 대해 만족할만한 성능을 얻기가 어렵다. 따라서 본 논문에서는 시간지연보상기 $M(s)$ 를 추가하여 외란에 대한 응답특성을 개선하였다.

4.3 시간지연 제어기의 시뮬레이션

4.3.1 시간지연 제어기의 시뮬레이션(ADC1)

ADC1의 제안된 시간 지연 제어기는 적분기를 포함하므로 3.1에서 설계한 식(13)의 2계 근사화 모델을 이용한 PID 제어기는 다음과 같다.

$$K(s) = \frac{4.2785s^2 + 2.0746s + 0.0000203}{s}$$

여기서 K_I 값이 0.1 보다 클 경우에는 K_I 값을 제어기의 적분기 값으로 사용을 할 수 있으나 이하일 경우에는 0.1을 사용하여 시간 지연 제어기의 $C(s)$ 를 구한다.

$$C(s) = \frac{4.2785s^2 + 2.0746s + 0.1}{s}$$

$$G_1(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)}, \quad G_2(s) = \frac{K}{s}$$

$\alpha = 0.0000203$ 로 놓고

$$G^*(s) = \frac{K}{s + \alpha} = \frac{K}{s + 0.0000203}$$

$b = \mu = 1$ 로 하여 시간지연 보상기 $M(s)$ 를 구하면

$$M(s) = \frac{8.9992s + 1}{s + 1}$$

그림 9에서 2계 근사모델의 PID 제어기의 파라미터를 이용하고, 시간지연 보상기 $M(s)$ 를 추가한 구조의 시간지연 제어기의 기준 입력 및 부하 외란에 대한 응답 특성이 개선되는 것을 확인할 수 있다.

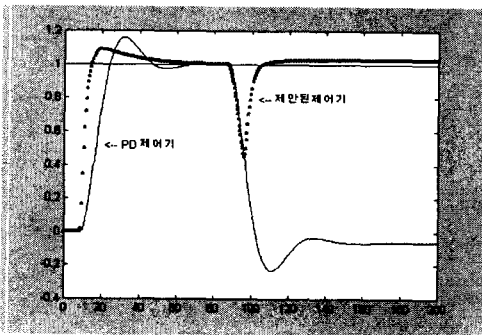


그림 9. 제안된 제어기의 단위 계단응답(ADC1)
Fig. 9. Unit Step Response of the proposed Controller(ADC1)

4.3.2 시간지연 제어기의 시뮬레이션(ADC2)

ADC2의 시간 지연 제어기는 적분기를 포함하므로 3.1에서 설계한 식(13)의 2계 근사화 모델을 이용한 PID 제어기는 다음과 같다.

$$K(s) = \frac{13.1782s^2 + 1.1564s + 0.000086881}{s}$$

여기서 K_I 값이 0.1 보다 클 경우에는 K_I 값을 제어기의 적분기 값으로 사용을 할 수 있으나 이하일 경우에는 0.1을 사용하여 시간 지연 제어기 $C(s)$ 를 구한다.

$$C(s) = \frac{13.1782s^2 + 1.1564s + 0.1}{s}$$

$$G_1(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)}, \quad G_2(s) = \frac{K}{s}$$

$\alpha = 0.000086881$ 로 놓고

$$G^*(s) = \frac{K}{s + \alpha} = \frac{K}{s + 0.000086881}$$

$b = \mu = 1$ 로 하여 시간지연 보상기 $M(s)$ 를 구하면

$$M(s) = \frac{66.8054s + 1}{s + 1}$$

그림 10에서 2계 근사모델의 PID 제어기의 파라미터를 이용하고, 시간지연 보상기 $M(s)$ 를 추가한 구조의 시간지연 제어기의 기준 입력 및 부하 외란에 대한 응답 특성이 개선되는 것을 확인할 수 있다.

5. 적용 실험 및 결과

5.1 실험에 사용된 자동직경 제어기

본 절에서는 앞의 절에서 살펴본 자동직경조정 시스템에 사용 중인 제어기에 대하여 살펴본다. 본 장 비에서 사용되는 PLC는 텍사스 인스트루먼트

단결정 실리콘 성장기의 성능향상을 위한 직경 제어

(Texas Instrument)사의 TI575이며 64개 이상의 PID제어기를 구성할 수 있다. PID 알고리즘의 위치와 속도형태로써 실행되며, 위치 알고리즘을 위해서는 조정되는 장치의 위치는 에러에 기초하여 정보처리된다. 속도형태는 에러에 근간된 장치위치의 변화에 의하여 처리된다.

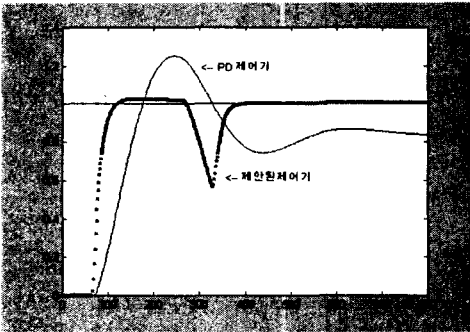


그림 10. 제안된 제어기의 단위 계단응답(ADC2)
Fig. 10. Unit Step Response of the proposed Controller(ADC2)

표 3은 현재 단결정 실리콘 성장기에 사용되는 13개의 루프들을 분류한 것이다. 루프 1은 온도 조절에 의해서 히터의 파워를 조절하며 멜트부터 테일 공정까지 사용된다. 루프 2, 4, 5는 카메라에 의한 결정봉의 편차값이 입력이 되어 시드-리프트를 조정하여 제품의 원하는 직경을 얻는 자동 직경 조정기 기능을 수행하고 루프 2는 넥킹공정에서, 루프 4, 5는 Body공정에서 각각 사용된다. 루프 3, 7, 8은 온도의 목표치를 조절함으로써 시드-리프트의 평균값을 통제하는 기능으로, 루프 3은 넥킹공정에서, 루프 7, 8은 Body공정에서 사용된다. 루프 9는 챔버내의 압력을 조정하는 기능으로 전체 공정에 사용된다. 루프 10은 챔버내로 미세한 폴리 의 적절한 양을 공급하기 위한 조정기로 멜트공정에서만 사용된다. 루프 11, 12, 13은 히터전원 조정기로서 멜트부터 테일공정까지 사용된다.

본 논문에서는 루프 4에 대해서 2계 근사 모델을 이용하여 제어기를 설계하였으며 시간지연 보상기를 적용하여 단결정 실리콘 성장기의 자동직경 제어를 설계하였고, 루프 8에 대하여 2계 근사화 모델을 이용하여 제어기를 설계하였다.

표 3. PID 루프들의 분류표
Table 3. List of PID loops

PID 루프	기능
루프 1	히터 온도 조정기
루프 2	넥킹공정 자동 직경 조정기 1(ADC1)
루프 3	자동 직경 조정기 2(ADC2)
루프 4	Body공정 자동 직경 조정기 1A(ADC1A)
루프 5	Body공정 자동 직경 조정기 1B(ADC1B)
루프 6	레이저-용탕표면 조정기
루프 7	Body공정 자동 직경 조정기 2A(ADC2A)
루프 8	Body공정 자동 직경 조정기 2B(ADC2B)
루프 9	챔버 진공도 조정기
루프 10	미세 폴리 피팅 조정기
루프 11	메인 히터 전원 조정기
루프 12	보조 히터 전원 조정기
루프 13	파워 필터기

5.2 자동직경 제어기의 적용 실험 결과

그림 11은 MEMC에서 현재 사용 중인 PID 제어기를 사용한 단결정 실리콘 성장기의 제품 생산의 결과이다. Diameter는 단결정 성장 후 Ingot 의 직경을 측정하는 것이며 TGT_DIA는 성장 직경의 목표치이다. 오차는 성장 직경의 목표치와 Ingot의 직경의 차이를 나타낸다.

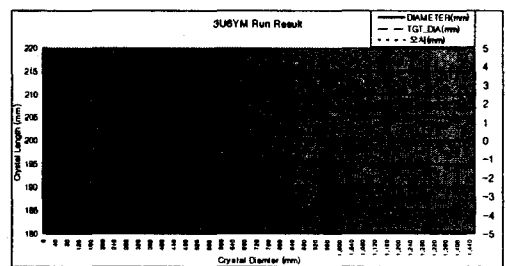


그림 11. 실험 적용 전 단결정 실리콘 성장의 결과(3U6YM Run)

Fig. 11. Results of A Crystal Grower before experiments

그림 12는 2계 근사 제어기를 사용한 단결정 실리콘 성장기의 제품 생산의 결과이다.

실제 성장되는 Ingot Diameter와 측정에 사용되는 Camera의 Ingot Diameter는 Offset 이 존재하므로 실험 전후의 실제 성장된 Ingot Diameter의 표준

편차를 계산하였다. 표 4는 실험 전 후의 결과를 분석한 표로 성장된 Ingot Diameter의 표준편차가 2계 근사제어기를 사용하였을 때 2.03에서 0.97로 줄어들었음을 보여준다.

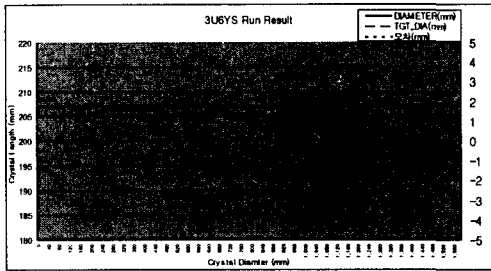


그림 12. 실험 적용 후 단결정 실리콘 성장의 결과(3U6YM Run)

Fig. 12. Results of A Crystal Grower after experiments

표 4. 실험 결과
Table 4. Experiment Results

	3U6YM	3U6YS
평균	208.315	207.86
분산	4.15205	0.945585
표준편차	2.03766	0.972412
중앙값	208.3	208
최대값	201.8	205.6
최소값	216.3	210

6. 결 론

본 논문에서는 현재 산업 현장에서 사용되고 있는 자동 직경 제어시스템의 PID 제어기의 Tuning 방법을 제시하였으며, 단결정 실리콘 성장기의 자동직경 제어시스템에 시간지연 제어기를 적용함으로써 기준입력 및 부하 외란에 대한 응답 특성을 향상 시켰다.

크리스탈의 성장비율 및 열 조건들 사이의 편차가 원인이 되어 단결정 실리콘의 직경이 불안정하게 성장하게 되는데, 본 실험을 통해서 2계 근사 모델을 이용하여 시간지연제어기의 주제어기인 PID제어기를 사용함으로써 공정 중의 직경 오차를 줄여 단결정 실리콘의 직경을 안정하게 제어 할 수 있었다.

향후 단결정 실리콘 성장기의 복합적인 기능에 맞는 모델식을 정확히 식별하여 시간지연 제어기를 설계하고 이를 적용할 수 있는 방법에 대한 연구가 더 필요하다.

References

- (1) Massoud Amin, S. L. Kimbel : Next Steps in Process Modeling and Controller Design for Crystal Growth, Washington University in St. Louis CT-5-94-1, 21 pp. 1994.
- (2) K. J. Astrom and T. Hagglund, "PID Controllers: Theory, Design, and Tuning", ISA, 1995.
- (3) Q. G. Wang, T. H. Lee, h. W. Fung, Q. Bai, and Yu Zang, "PID Tuning for Improved Performance", IEEE Trans. Contr. syst. Technol., vol. 7, pp. 457-465, 1999.
- (4) K. Watanabe, "A New Modified Smith Predictor Control for Time-Delay Systems with an Integrator", Proc. 2nd Asian Contr. Conf., Vol.3, pp. 127-130, 1997.
- (5) K. J. Astrom, C. C. Hang, and B. C. Lim, "A New Smith Predictor for controlling a Process with an Integrator and Long Dead-Time", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 39, No. 2, 1994.
- (6) O. J. Smith, "A Controller to Overcome Dead Time", ISA. J., Vol. 6, No 2, pp. 28-33, Feb. 1995.
- (7) W. K. Ho, C. C. Hang and L. S. Cao, "Tuning of PID Controllers based on Gain and Phase Margin Specifications", Automatica, Vol. 31, No. 3, pp. 497-502, 1995.
- (8) M. R. Matausec and A. D. Micic, "A Modified Smith Predictor for Controlling a Process with an Integrator and Long Dead-time", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. 41, No. 8, pp. 1199-1203, 1996.

◇ 저자소개 ◇

이석원 (李錫元)

1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동대학원 전기공학과 졸업. 1988년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990년~현재 호서대 전기정보통신공학부 교수.

박종식 (朴宗植)

2001년 호서대 공대 정보제어공학과 졸업. 2003년 동대학원 정보제어공학과 졸업(석사). 1998년~현재 MEMC코리아 단결정장비기술팀 팀장.

이진우 (李鎭雨)

1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동대학원 전기공학과 졸업. 1990년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990년~1994년 세명백트론(주) 연구실장. 1994년~현재 호서대 전기정보통신공학부 교수. 본 학회 편수이사.