

단결정 실리콘 성장기의 자동 직경 제어

박종식, *이재민, *양승현, *이석원

MEMC Korea, *호서대학교 정보제어공학과

전화 : 041-540-5429 / 041-550-4315

Automatic Diameter Control for Crystal Grower

Jong-Sik Park, *Jae-Min Lee, *Seung-Hyun Yang, *Suk-Won Lee

Dept. Information & Control Eng. Hoseo Univ

E-mail : jongsikpark@memc.co.kr

Abstract

The automatic diameter control system of the Crystal Grower has a good performance with only PD control. But it contained the integrator the plant which has a long time delay. In this paper, we show the secondary approximate model and applies time delay controller which is good performance for in the long time delay plant. It will be able to improve the response characteristic against a standard input and a load disturbance.

I. 서 론

본 논문에서는 적분기를 포함한 긴 시간지연을 가지는 플랜트인 단결정 실리콘 성장기의 자동 직경 제어 시스템(Automatic Diameter Control)에 2계 근사화 모델에 근거한 PID 제어기 설계 방법을 적용하여 성능 개선이 이루어짐을 보인다. 또한 Watanabe가 제안한 변형된 스미스 예측기를 적용하여 적분기를 포함한 시스템에 시간 지연 보상기를 가지는 구조로 부하 외란 입력에 대한 응답 특성이 개선된 자동 직경 제어 시스템을 설계하여 현재 산업 현장에서 사용 중인 단결정 실리콘 성장기(Crystal Grower -FF CZ150)의 자동 직경 제어 시스템에 적용하였다.

본 실험을 통해 결정봉의 직경과 인상 속도를 최적화

하여 제어함으로써 결정봉의 제품에 직접적인 영향을 주는 결정 결함 및 언더나 오버의 직경 이상을 줄임으로써 제품의 질과 수율을 향상시킬 수 있다. 또한 기존의 자동직경제어시스템의 고전적인 제어를 보완함으로써 결과적으로 생산량 증가 및 제품의 질 향상에 이바지를 하고 새로이 요구되는 고객의 신기술 요구에 대한 현 장비의 제한성을 극복하는데 큰 기여를 할 것으로 기대 된다.

II. 시스템 구성

2.1 단결정 실리콘 성장기의 구성

단결정 실리콘 성장기(Crystal Grower -FF CZ150) 자동직경 제어 시스템은 밀폐된 석영 도가니 내의 다결정 실리콘을 고진공하에서 1450℃ 이상으로 가열 용융시킨후, 단결정 실리콘의 핵(Seed)을 접촉시켜 봉상의 단결정 실리콘을 성장시키는 장비의 핵심이 되는 제어기로 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℃정도가 된다. 석영도가니의 온도를 균일하게 유지시키기 위해 도가니를 회전시킨다. Melt의 표면에 종자(Seed)를 접촉시켜 Dipping 작업을 하는데 Seed 주위에 밝은 환형이 나타나고 이것을 Meniscus 라고 부른다. 이는 액체 상태의

실리콘과 고체 상태의 실리콘 Seed 사이의 접촉면의 가장자리의 상태를 정확히 파악하여 좋은 단결정 실리콘을 성장시킬 수 있게 한다.

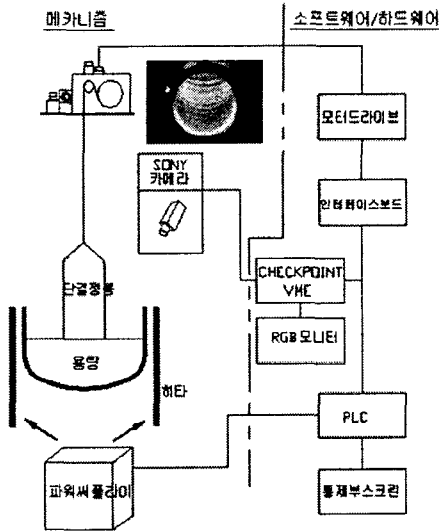


그림 2. 자동 직경 조정 시스템

논문에서 적용된 CZ-150 Crystal Grower에서는 이 Meniscus를 Machine Vision System에서 성장되는 Ingot의 직경을 측정하게 된다. Meniscus가 양호한 상태에서 Seed를 회전, 인상시키면 단결정 실리콘이 Seed의 결정 방향대로 성장이 되는데 인상속도에 따라 직경의 크기가 결정된다. 자동직경제어는 두 스텝으로 나누어 초반부는 Machine Vision System에서 측정되는 Ingot의 직경을 피드백 하여 Ingot의 인상속도를 PD 제어로 조절하며 Body Length 100mm이후부터는 Ingot의 인상속도를 고정하고 식영도가나이에 가해지는 Heater의 Power를 제어하여 성장을 하게 된다. 본 논문에서는 Ingot 성장부분의 Body growth 부분의 자동직경제어 시스템을 보완하여 부하 외란에 강인한 제어를 설계할 목적으로 하고 있다.

III. 제어기의 설계 및 적용

3.1 PID 제어기의 설계와 시뮬레이션

시간지연이 포함된 고차 시스템(high-order system)을 저차 시스템으로 근사화 하는 방법을 이용하여 제어기를 설계한다. 주파수 응답을 이용하여 시간 지연 항을 포함한 2계 근사 모델 $G(s)$ 은 플랜트의 주파수 응답 중 단지 두 점만을 이용하여 다음과 같은 2계 근사화 모델을 고려한다.[3]

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

a, b, c, L의 값들이 2계 근사화 모델에서 계산하여야 하는 파라미터들이며, 이를 결정하기 위해 주파수 응답의 위상이 $\angle G(j\omega_c) = -180^\circ, \angle G(j\omega_b) = -90^\circ$ 를 만족하는 두 개의 주파수 포인트 $s = j\omega_c, s = j\omega_b$ 를 선정한다.

이때, $G(j\omega_c) = \mathcal{T}(j\omega_c), G(j\omega_b) = \mathcal{T}(j\omega_b)$ 라고 두면

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

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

위의 두 식으로부터 a, b, c의 관계식을 유도한다.

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

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

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

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

θ 식은 비선형 방정식이므로 Newton-Raphson 방법을 이용 근사화된 L를 구할 수 있다. 프로세서의 전달함수 $G(s)$ 또는 주파수 응답 $G(j\omega)$ 가 유용하고 피드백 제어기의 구성을 그림4와 같은 구조로 가정하고 PID 제어기의 식을 다음의 형태로 구성한다.

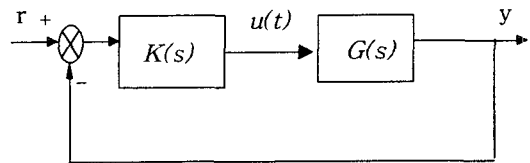


그림4. 피드백 제어기의 구성

$$K(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s$$

위 식으로부터 형태를 바꾸어 쓰면 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 $A = (K_D/k), B = (K_I/k), C = (K_P/k)$ 이다.

개루프 전달함수 $G(s)K(s)$ 의 결과는 다음으로 근사화 된다.

$$G(s)K(s) = \frac{k}{s} e^{-sL}$$

페루프 시스템의 극점들은 적절한 k 의 값을 지정함으로써 loop 의 근계축을 가지고 선택할 수 있다. 단결정 실리콘 성장기의 자동적경 시스템의 모델 식은 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.[1]

$\omega_c = 0.1624\text{rad/s}$ 와 $\omega_b = 0.001\text{rad/s}$ 의 두점에서 이고 $G(j\omega_c) = -0.1832\text{rad/s}$ 와 $G(j\omega_b) = -31.2984\text{rad/s}$ 에 각각 정해진다. Newton-Raphson의 방법에 의해 모델은 다음과 같이 추정된다.[3]

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

$\zeta_0 > 0.7071$ 이므로 $k = 0.5/L = 0.0651$ 을 얻는다.

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

자동 직경 제어 시스템의 PD제어기는 다음과 같다.

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

80분에서 -0.05의 부하 외란을 주었을 때 그림5에서 처럼 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.[2][4]

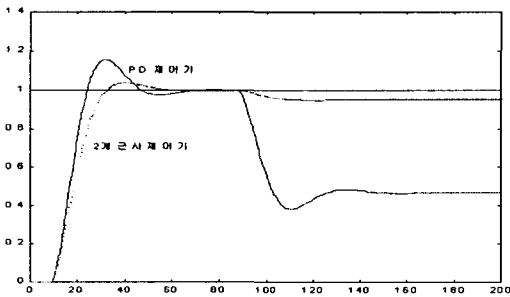


그림5. 2계 근사제어기의 단위 계단응답

3.2 시간 지연 제어기설계와 시뮬레이션

그림6은 근사화 모델의 PID를 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.[4]

적분요소를 갖는 시간지연 플랜트의 모델식은

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

$G_1(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)}$, $G_2(s) = \frac{K}{s}$, $G^*(s) = \frac{K}{s + \alpha}$
시간지연 보상기

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

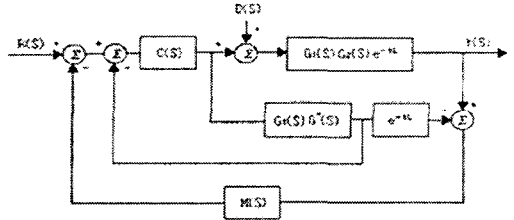


그림6. 시간 지연 제어기

제안된 시간 지연 제어기는 적분기를 포함함으로써 식 (1)과 같이 설계한 2계 근사화 모델을 이용한 PID제어기로부터 K_I 값이 0.1 보다 클 경우에는 K_I 값을

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

제어기의 적분기 값으로 사용할 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

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

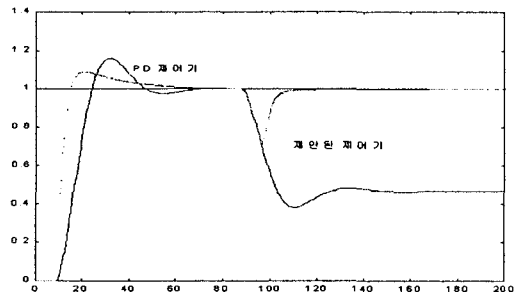


그림7. 제안된 제어기의 단위 계단응답

그림7에서는 2계 근사모델의 PID 제어기의 파라미터

를 이용하고 시간지연 보상기 $M(s)$ 를 추가한 구조의 시간지연 제어기의 기준 입력 및 부하 외란에 대한 응답 특성이 개선되는 것을 확인할 수 있다.

IV. 자동직경 제어기의 실험 결과

그림8은 MEMC에서 현재 사용중인 PID 제어기를 사용한 단결정 실리콘 성장기의 제품 생산의 결과이다. Diameter는 단결정 성장후 Ingot의 직경을 측정한 것이며 TGT_DIA는 성장 직경의 목표치이다. 오차는 성장 직경의 목표치와 Ingot의 직경의 차이를 나타낸다. 그림9는 2계 근사 제어기를 사용한 단결정 실리콘 성장기의 제품 생산의 결과이다.

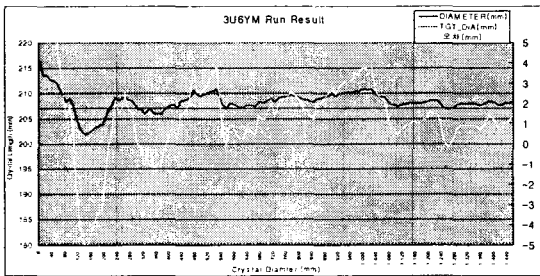


그림 8. 실험 적용 전 단결정 실리콘 성장 (3U6YM Run)

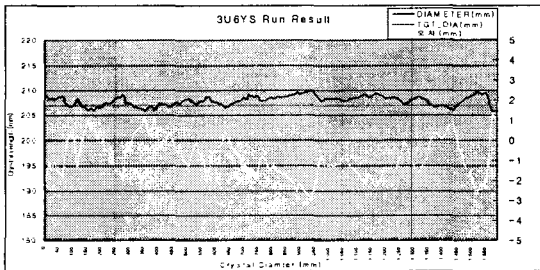


그림 9. 실험 적용 후 단결정 실리콘 성장 (3U6YS Run)

실제 성장되는 Ingot의 직경과 Run 중에 사용되는 Camera의 Ingot의 직경과는 Offset이 존재하므로 실험 전후의 데이터의 표준 편차를 계산하였다. 표 1에서는 실험 전후의 결과를 분석한 표로 제품의 직경의 표준편차가 2계근사제어기를 사용하였을 때 2.03에서 0.97로 줄어들었음을 보여준다.

	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

표 1. 실험 결과 분석표

V. 결 론

현재 산업 현장에서 사용되고 있는 자동 직경 제어시스템의 PD제어기는 부하외란에 대해 정상상태의 오차가 존재하는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 2계 근사화 모델을 이용한 PID 제어기를 설계하여 오버슈트와 정상상태 오차를 줄였으며 시간 지연 보상기를 적용함으로써 기준입력 및 부하 외란에 대한 응답 특성을 향상 시켰다.

본 실험을 통해 결정봉의 직경과 인상 속도를 최적화하여 제어함으로써 결정봉의 제품에 직접적인 영향을 주는 결정 결함 및 언디나 오버의 직경 이상을 줄임으로써 제품의 질과 수율을 향상시킬 수 있다. 또한 기존의 자동직경제어시스템의 고전적인 제어기를 보완함으로써 결과적으로 생산량 증가 및 제품의 질 향상에 이바지를 하고 새로이 요구되는 고객의 신기술 요구에 대한 현 장비의 제한성을 극복하는데 큰 기여를 할 것으로 기대 된다.

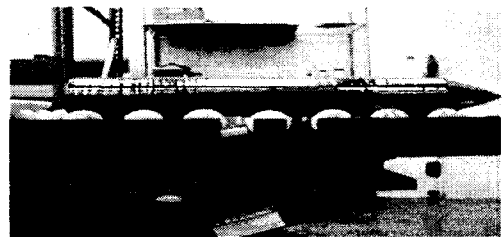


그림 8. 성장된 크리스탈 결정봉

참고문헌

- [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