

## ◆ 특집 ◆ 첨단 생산시스템용 산업용 로봇 기술

# 하이브리드 타입 솔라셀 기판 이송용 로봇 진동 제어

## Vibration Control of the Hybrid Type Solar Cell Substrate Handling Robot

박동일<sup>1,\*</sup>, 박철훈<sup>1</sup>, 박주한<sup>1</sup>, 정광조<sup>1</sup>  
Dong Il Park<sup>1,\*</sup>, Cheolhoon Park<sup>1</sup>, Joo Han Park<sup>1</sup>, and Kwang Cho Cheong<sup>1</sup>

1 한국기계연구원, 로봇메카트로닉스연구실 (Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery and Materials)  
\* Corresponding author: parkstar@kimm.re.kr, Tel: +82-42-868-7984

Manuscript received: 2013.7.10 / Accepted: 2013.7.31

*Various types of large substrate handling robots are used in the thin film solar cell manufacturing line as well as LCD or PDP production line. Because the robot handles the heavy substrate at high speed, there are some issues such as vibration control and the optimal design of arms and forks. As the substrate becomes larger and heavier, robot systems are also larger and the vibration issue of the robot end-effector becomes more important. In the paper, we established the robot modeling and the control architecture including the flexible part such as forks. Then, we performed dynamic simulation in the various condition and analyzed the characteristics of the fork vibration. We can reduce the vibration using the trajectory planning and input shaping algorithm and it was proved by experiment.*

Key Words: Vibration Control (진동 제어), Vibration Analysis(진동 해석), Solar Cell Robot (솔라셀 로봇), Substrate Handling Robot (기판 핸들링 로봇), Input shaping (입력 명령 성형)

### 기호설명

$\xi$  = damping ratio

$\omega_n$  = natural frequency

$\omega_d$  = damped natural frequency

$r(t)$ = reference input trajectory

$r_s(t)$ =shaped reference input trajectory

A1= First coefficient of input shaping

A2= Second coefficient of input shaping

A3= Third coefficient of Input shaping

K= Input shaping parameter

T2=First time delay of ZVD input shaping

T3=Second time delay of ZVD input shaping

### 1. 서론

박막형 솔라셀 제조 공정에서는 생산성을 위하여 다양한 형태의 자동화 장비가 많이 사용되고 있다. 특히 대형 기판을 빠른 속도로 이송하는 작업에 카세트 이송 로봇, 기판 핸들링 로봇 등이 적용된다. 박막형 솔라셀 기판을 이송하는 로봇은 넓은 작업 영역에서 고중량의 대형 기판을 빠른 속도로 이송하는 것이 목적이므로, 핸드 또는 포크라고 불리는 가벼운 재질의 말단장치를 사용하고 있고, 이에 따라 고속 이송 후 말단에서의 잔류 진동이 큰 이슈로 대두되고 있다. 잔류 진동의 크기와 지속시간은 여러장의 기판을 적재하는 카세트의 규격과 생산성에 큰 영향을 미치므로 로봇 끝단의 처짐과 진동 억제 기술에 대한 연구가 중요하다. 특히 솔라셀 기판의 경우 기존 같은 크기의 FPD 기판에 비해 3~5배 무겁기 때문에 더욱

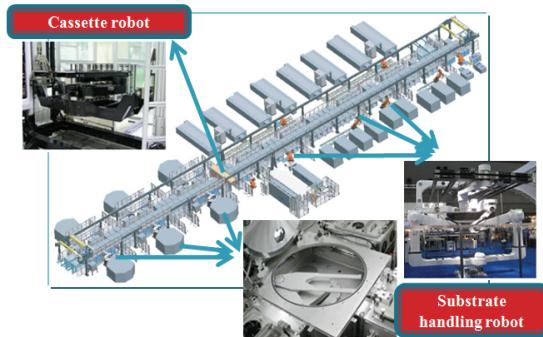


Fig. 1 An example of thin film type solar cell manufacturing line using substrate handling robots

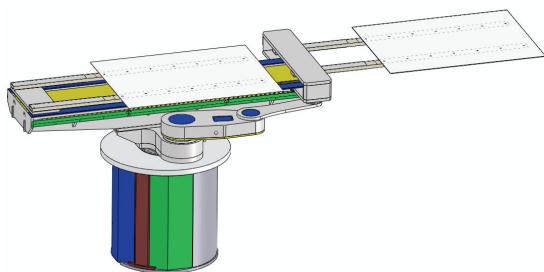


Fig. 2 Hybrid type solar cell substrate handling robot

중요하다.

본 논문에서 수행된 5.5 세대급 박막형 솔라셀 기판 이송 로봇의 진동 제어에 관한 기존의 연구들을 살펴보면, 기판 핸들링 로봇의 암과 핸드부의 처짐 해석과 보상에 관한 연구가 수행된 바 있다.<sup>1-3</sup> 본 연구팀에서도 기판 핸들링 로봇에 대한 진동 분석을 위해 유연체를 포함한 로봇의 모델링 기법, 진동 해석 시뮬레이션 및 로봇의 거동 특성에 대한 연구를 수행해 온 바 있다.<sup>4-7</sup> 본 연구에서는 진동 억제를 위하여 5차 케이스를 이용한 경로 계획과 입력 명령 성형 기법(Input shaping algorithm)을 적용하였으며, 타 시스템에 적용된 입력 명령 성형 기법에 관한 연구도 수행된 바 있다.<sup>8-12</sup>

본 논문에서는 Fig. 2에 나타난 하이브리드 타입 기판 핸들링 로봇의 유연체가 포함된 모델링을 수행하고, 이를 활용하여 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 동적 시뮬레이션 결과를 바탕으로 거동 특성을 분석하고, 진동 제어를 위한 파라미터를 선정하였으며, 실험을 통하여 그 효과를 검증하였다.

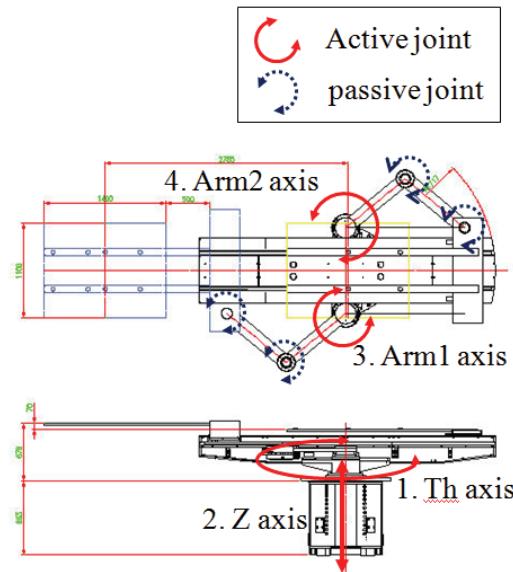


Fig. 3 Active and passive joint of the robot

## 2. 로봇 모델링

### 2.1 강체 및 조인트 모델

본 논문에서 활용된 로봇의 구성은 Fig. 3에 나탄 바와 같이 능동 조인트 4개와 수동 조인트 4개의 회전 조인트가 있으며, 암의 직선 운동을 위한 병진 조인트 구현을 위해 각 암에 리니어 가이드가 부착되어 있다. 로봇 구동을 위한 모터는 회전축(Th), 승강축(Z), 암축(Arm1, Arm2)에 연결되어 있다.

이 로봇 모델을 구성하기 위해 조인트를 기준으로 로봇 구동부 및 링크를 재구성하고, 3D CAD로 부터 구동 부품 및 링크에 해당하는 등가 질량과 관성모멘트를 추출하여 시뮬레이션 모델에 반영하였다. 각 조인트에 부가되는 질량 및 관성 모멘트의 값은 Table 1과 같다.

### 2.2 유연체 모델

이 로봇을 구성하는 대부분의 링크와 부품들은 강체로 모델링하여도 거동을 분석하는데 크게 문제가 없으나 말단장치로 활용되는 포크의 경우 경량화를 위해 CFRP 재질로 제작되어 글라스 이송 작업시 많은 변형과 진동을 발생시키다. 따라서 Fig. 4에 나타난 바와 같이 유한요소 해석이 가능한 유연체 모델을 구성하였고, 모드 해석을 통해 실제 반영 가능한 모드들을 해석 모델에 반영하였다.

Table 1 Equivalent mass and inertia for each joint

	for z joint	for th joint
Model		
Mass(kg)	1292.6	904.4
Inertia(kgm²)	413.7	389.6
for arm joint		for hand
Model		
Mass(kg)	136.5	74.4
Inertia(kgm²)	119.9	65.4

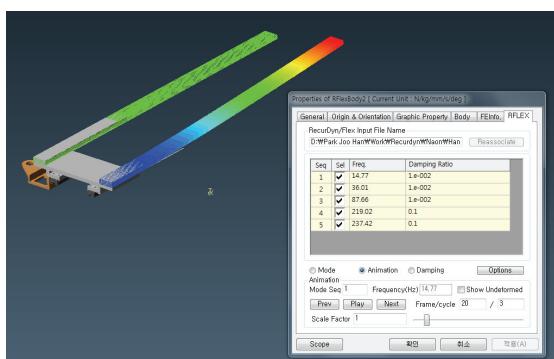


Fig. 4 Flexible body modeling for forks

### 3. 시뮬레이션

2장에서 구성된 강체, 유연체 모델을 바탕으로 Recurdyn 동역학 시뮬레이터를 이용하여 로봇 모델을 구성하였으며, 로봇 제어를 위한 제어 시뮬레이션 툴로는 Matlab Simulink를 활용하였다.

이 시뮬레이션 모델을 활용하여 다양한 조건하에서의 모션 시뮬레이션을 수행하였다. 회전축, 승강축, 암축의 기본 모션은 실제 생산 공정 라인에서 적용되는 택타임을 기반으로 구성되었다. 각 모션의 경로 생성법을 바꾸어 가며 진동 특성에 대해 분석하였으며, Fig. 6은 각 경로 계획에 따른 진동 결과를 나타낸 그래프이다. 5차 다항식을 활용한 경로계획법에서 동일 모션에 가장 우수한 진

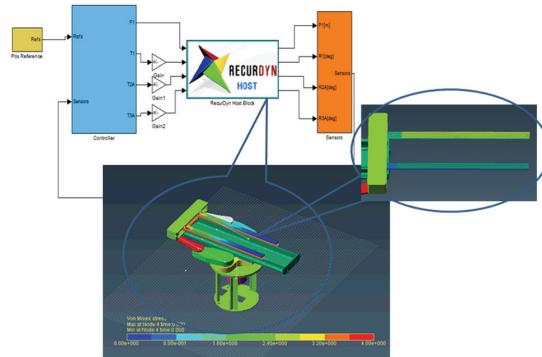


Fig. 5 Simulation model using Recurdyn and Matlab

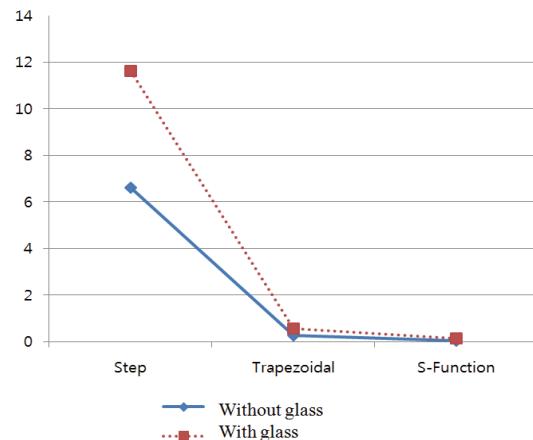


Fig. 6 Simulation result according to the trajectory

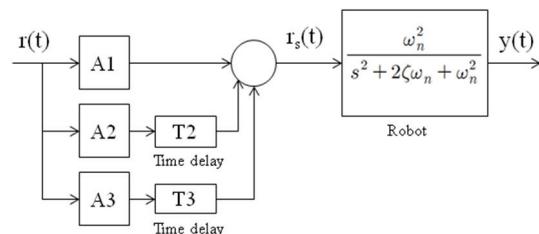


Fig. 7 ZVD input shaping for second order system

동 성능을 보였다.

또한 진동 모드 분석을 통해 포크의 끝단 진동을 2차 감쇠 시스템으로 모델링 하여 진동 저감을 위한 입력 명령 성형 기법을 적용해 보았다. 유연체의 2차 진동 감쇠 시스템의 식은 다음과 같다.

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \quad (1)$$

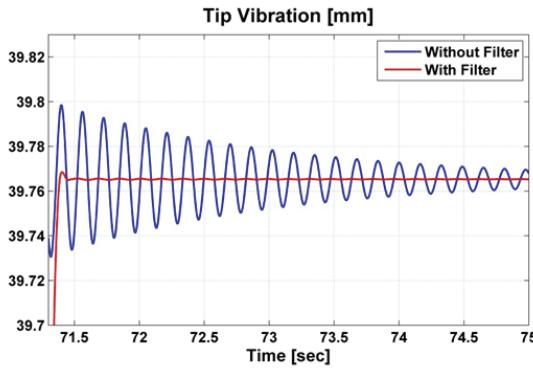


Fig. 8 Vibration reduction with input shaping filter

본 연구에서는 고유진동수 모델 오차에 비교적 강인한 ZVD(zero vibration and derivative input shaping) 입력 성형 기법을 적용하였으며, 그에 따른 성형 명령식은 다음과 같이 나타난다.

$$r_s(t) = A1r(t) + A2r(t - T2) + A3r(t - T3) \quad (2)$$

where

$$A1 = \frac{1}{(1+K)^2}$$

$$A2 = \frac{2K}{(1+K)^2}$$

$$A3 = \frac{K^2}{(1+K)^2}$$

$$T2 = \frac{\pi}{\omega_d}$$

$$T3 = \frac{2\pi}{\omega_d}$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{(1 - \zeta^2)}$$

$$K = e^{-\frac{\zeta\pi}{1-\zeta^2}}$$

이와 같은 명령 성형 기법을 적용하면 2차 진동 감쇠 시스템의 진동 저감 효과는 Fig. 8과 같아 나타났다.

#### 4. 실험

시뮬레이션을 통해 구현된 경로 계획 및 제어 알고리즘을 실제 로봇에 적용함으로써 그 효과를



Fig. 9 Experimental setup of the vibration control

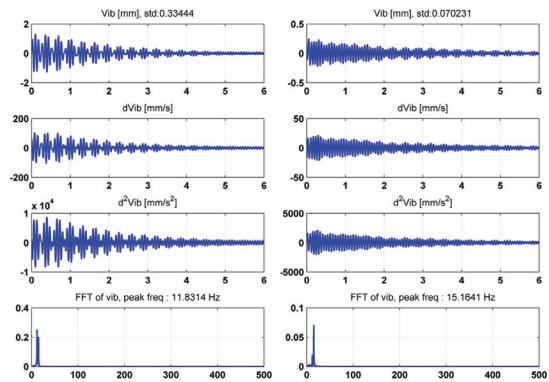


Fig. 10 Experimental results for forking motion: trapezoidal trajectory vs. polynomial trajectory

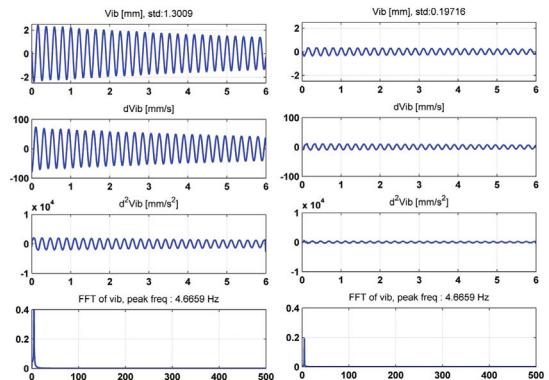


Fig. 11 Experimental results for forking motion: Without input shaping vs. With input shaping

검증해 보았다. 실험 환경은 Fig. 9와 같으며, 포크 끝단의 진동은 분해능 1um의 정밀도를 갖는 레이저 변위센서를 이용하여 측정하였다.

Fig. 10은 두 가지의 경로 계획법에 대한 진동

실험 결과 그래프이며, 감가속이 조절된 5차 다항식을 활용한 경로계획이 약 50% 가량의 진동 저감 효과를 보임을 확인하였다.

Fig. 11은 승강 모션에 따른 진동 결과 그래프이다. 명령성형기법을 적용함으로써 적용하기 전에 비해 약 80%의 진동 저감 효과를 확인할 수 있었다. 시뮬레이션에의 진동 저감 효과보다 상대적으로 적게 나타나는 것은 실제 로봇에서는 기구적 강성, 조인트 강성에 의한 불확실성 오차가 포함되어 있기 때문이다.

## 5. 결론

앞서 설명된 바와 같이 박막형 솔라셀 기판 핸들링 로봇은 기판의 크기가 점차 대형화되고 무거워짐에 따라 말단에서의 진동이 중요한 이슈로 대두되고 있다. 본 논문에서는 대형 기판 이송 로봇의 강체, 유연체 통합 시뮬레이션 모델을 수립하고, 이를 바탕으로 다양한 조건 하의 모션 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 바탕으로 진동 특성을 분석하고, 경로계획 및 명령성형기법을 적용함으로써 진동 제어를 수행하였으며, 실험을 통해 검증하였다.

## 후기

본 연구는 대한민국 산업통상자원부 R&D 사업의 지원으로 이루어졌습니다.

본 연구에 활용된 로봇은 나온테크 사에 의해 개발되었습니다.

## 참고문헌

- Seo, J., Yim, H., Hwang, J., Choi, Y., and Kim, D., "Dynamic load analysis and design methodology of LCD transfer robot," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, No. 4, pp. 722-730, 2008.
- Seo, J., Hwang, J., Choi, Y., and Yim, H., "Analysis and design study of LCD transfer robot using dynamic simulation and experiment," Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 23, No. 4, pp. 1035-1039, 2009.
- Surdilović, D. and Vukobratović, M., "Deflection compensation for large flexible manipulators," Mechanism and Machine Theory, Vol. 31, No. 3, pp. 317-329, 1996.
- Park, C., Park, D., and Do, H., "Controller design and motion simulation of solar cell substrate handling robot in vacuum environment," 2010 Second IITA International Joint Conference on Artificial Intelligence, Paper No. 809, 2010.
- Park, D., Park, C., Yoo, Y., Do, H., and Kyung, J., "Dynamic analysis of beam type substrate handling robot in solar cell manufacturing," The 8th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence, pp. 794-795, 2011.
- Park, C., Park, D., and Do, H., "Controller design and motion simulation of solar cell substrate handling robot in vacuum environment," 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 1017-1019, 2011.
- Park, D., Park, C., and Yoo, Y., "Vibration simulation of hybrid type substrate handling robot in the vacuum environment," 12th International Conference on Control, Automation and Systems, pp. 2131-2134, 2012.
- Singer, N. C., "Residual Vibration Reduction in Computer Controlled Machines," MIT Artificial Intelligence Laboratory Technical, Report Number AITR-1030, 1989.
- Singer, N. C. and Seering, W. P., "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, No. 1, pp. 76-82, 1990.
- Singhose, W. E. and Mills, B. W., "Command generation using specified-negative-amplitude input shapers," Proc. of American Control Conference, Vol. 1, pp. 61-65, 1999.
- Singh, T. and Singhose, W., "Input shaping/time delay control of maneuvering flexible structures," Proc. of the American Control Conference, Vol. 3, pp. 1717-1731, 2002.
- Rhim, S. and Book, W. J., "Adaptive time-delay command shaping filter for flexible manipulator control," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 9, No. 4, pp. 619-626, 2004.