

◆ 특집 ◆ 첨단 생산시스템용 산업용 로봇 기술

대형 패널 이송 로봇에 사용되는 타이밍벨트 구동계의 모델링

Modeling of a Timing-Belt Drive System Used in a Large-Scale Panel-Handling Robot

조은임¹, 임성수^{1,✉}
Eunim Jo¹ and Sungsoo Rhim^{1,✉}

¹ 경희대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee Univ.)
✉ Corresponding author: ssrhim@khu.ac.kr, Tel: +82-31-201-3248

Manuscript received: 2013.7.10 / Accepted: 2013.8.9

Most of large scale solar panel handling robots adopt the timing-belt drive system for its driveline because of the simplicity and the easiness of implementation. The vibration caused by the flexure of the timing belt would increase as the size and the weight of the panel that the robot handles increase and the vibration would deteriorate the precision and/or productivity of the whole robot system. For the development of a proper control system and for the improvement of the design of the robot it is important to estimate the oscillatory response of the robot system including the flexible drive system properly. In this paper a flexible multi-body dynamics model of a large-scale solar-panel-handling robot with the flexible timing-belt drive system is developed using a generic multi-body dynamics analysis program, RecurDyn.

Key Words: Flexible Timing Belt Model (유연 타이밍 벨트 모델), Panel Handling Robot (패널 이송 로봇), Multi-body Dynamics Modeling (다물체 동역학 모델링)

기호설명

T = Motor torque on driving pulley
F₁, F₂ = Tension between pulleys
J₁, J₂ = Inertia of pulleys
r₁, r₂ = Radius of pulleys
θ₁, θ₂ = Rotational angle of pulleys
N_i, D_i = Constants
q = Distributed load
δ = Deflection
L = Length of beam
E = Elastic coefficient
I = Moment of area
b, h = Horizontal and vertical length of cross section

1. 서론

현재 대형 솔라셀 패널 이송을 위해 사용되는 대부분의 로봇은 5.5세대 LCD (Liquid Crystal Display) 패널 이송 로봇과 유사한 구조를 갖고 있으며 반복적인 솔라셀 패널 이송 작업을 위한 빔 타입이나 조인트 타입의 솔라셀 패널 이송 로봇의 구동부에는 구조가 간단하고 동력전달이 용이한 타이밍 벨트가 사용되고 있다.¹⁻³

솔라셀 패널은 같은 세대의 LCD 패널보다 무겁기 때문에 이송 과정 중 로봇에 가해지는 부하가 커지게 되고, 그 결과 벨트 구동계의 유연성도 증가하게 된다. 이로 인해 증가된 로봇의 진동은 공정 중의 패널에 손상을 입힐 수 있기 때문에 꼭 제어되어야 할 대상이며, 이를 위해 벨트 구동계

의 동역학적 특성에 대한 연구가 필요하다.^{3-5,8}

솔라셀 패널 이송 로봇이 대형화 되면서 시제품 제작에 많은 시간과 비용이 들게 되어 개발이 어려워졌다. 이를 해결하기 위한 방법 중 하나로, 컴퓨터 프로그램을 이용하여 가상 모델을 개발하는 방법이 있다. 가상 모델은 제작과 수정이 용이하여 개발에 필요한 시간과 비용을 단축 할 수 있고, 실험 환경의 구성 또한 자유롭다는 장점이 있다.

가상 모델을 제작 할 때 실제 시스템과 동일한 거동 특성을 보이도록 제작하는 것이 중요한데, 이를 위한 과정이 쉽지 않다. 실제 시스템에서는 자연스럽게 발생하는 중력과 마찰력, 접촉 등의 힘과 관성 모멘트 등을 일일이 설정해주어야 하며 그것이 작용하는 범위 등을 추정하기도 쉽지 않다. 또한 물성치 등의 모델링 파라미터를 결정하는 것도 쉽지 않다. 로봇의 많은 부분들이 복합체이기 때문에 물성치가 균일하지 않기 때문이다. 솔라셀 패널 이송 로봇의 구동부에 사용되는 타이밍 벨트의 경우 우레탄 고무 사이에 심선이 삽입된 복합체기 때문에 방향에 따라 강성이 다른 이방성 성질을 가지고 있다. 이와 같은 경우는 각 방향의 강성을 측정하는 것이나 이방성 강성을 모델링 틀을 이용하여 적용하는 과정이 쉽지 않다.

본 연구에서는 Fig. 1의 빔 타입 솔라셀 패널 이송 로봇의 벨트 구동계의 동역학적 특성에 대한 해석을 진행하였고, 타이밍 벨트의 모델링 파라미터를 구하는 방법을 제시하였으며, 이를 이용한 유연 다물체 모델을 개발하였다.

2. 솔라셀 패널 이송 로봇의 구성

Fig. 1은 본 연구의 대상이 되는, 최근 산학연구과제를 통해 개발된 빔형 5.5세대 솔라셀 패널 이송로봇이다. 본 연구에서는 특히 Fig. 2에 보인 것과 같이 벨트 구동계를 포함하는 3-링크 다관절 팔 부분에 대한 유연 다물체 동역학 해석을 수행한다.

이 3-링크 다관절 팔은 독특한 구동계 설계를 통해, 베이스 링크(arm base link)에 설치된 하나의 모터와 이에 벨트로 연결된 나머지 두 개의 링크가 동기화되어 움직인다. 동기화된 운동의 목적은, 맨 끝단에 설치된 핸드 브라켓(hand bracket)이 좌우 방향으로 직진운동을 하도록 하는 것이다.

Fig. 2에는 각 링크의 이름과 벨트 구동계의 위치, 각 링크 사이의 연결 관계를 표시하였다. 여기

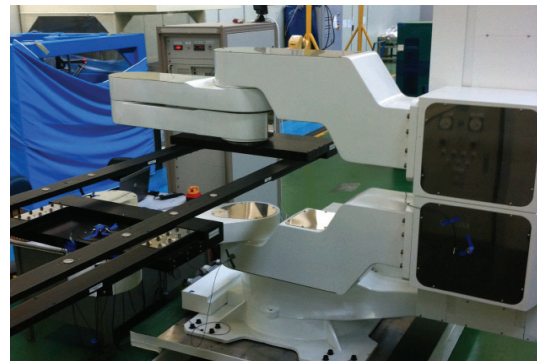


Fig. 1 Solar cell panel transport robot considered in the paper

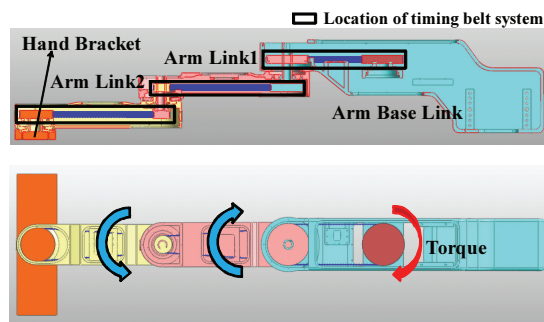


Fig. 2 Robot arm and each timing belt system location

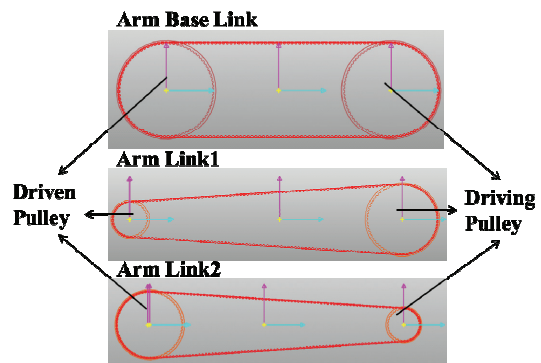


Fig. 3 Timing belt system in each link

서 서로 강제 연결되어 함께 움직이는 링크 요소들을 같은 색깔로 표시하였고, 모터와 벨트의 동기화된 운동에 의해 로봇 팔의 각 링크들이 회전하는 방향을 표시하였다. Fig. 3은 각 링크에 적용된 타이밍 벨트 시스템을 보여준다. 구동부 풀리와 종동부 풀리의 잇수비는 베이스 링크가 1:1, Arm Link 1이 2:1, Arm Link 2가 1:2가 된다. 이와

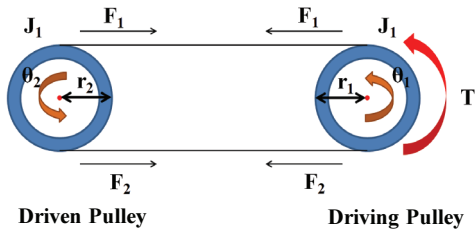


Fig. 4 Schematic diagram of timing belt drive system

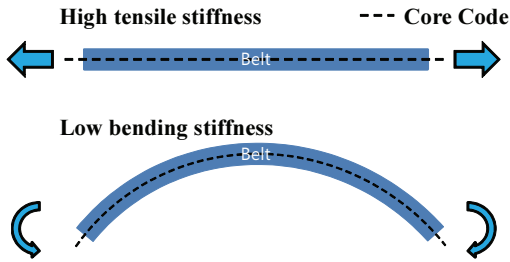


Fig. 5 Anisotropic stiffness of timing belt

같은 링크 사이의 관계와 벨트 시스템의 잇수비에 의해, Fig. 2에 표시된 것처럼 베이스 링크의 벨트 시스템의 구동부 풀리에 가해지는 토크가 Arm Link 1, Arm Link 2의 벨트 시스템에 전달되고 결과적으로 하나의 모터로 로봇 팔 끝의 핸드 브라켓이 직선 궤도를 그리며 운동하게 되는 매커니즘이 된다.⁸

3. 유연 다물체 모델링

3.1 벨트 구동계의 운동방정식

본 연구에 사용되는 빔형 솔라셀 이송 로봇 구동계의 타이밍 벨트시스템은 Fig. 4와 같이 두 개의 타이밍 풀리와 하나의 타이밍 벨트로 구성되어 있다.

여기서 T는 풀리에 가해지는 모터의 구동토크를 나타내고, F₁, F₂는 풀리와 풀리 사이에 가해지는 벨트의 장력을 의미한다. 또한 J₁, J₂는 풀리의 관성을 의미한다. r₁, r₂와 θ₁, θ₂는 각각 구동부와 종동부의 반지름과 회전 각도를 뜻한다.

벨트 시스템의 지배 방정식은 다음과 같다.^{2,6,7}

$$T + (F_1 - F_2)r_1 = J_1\ddot{\theta}_1 \quad (1)$$

$$-(F_1 - F_2)r_2 = J_2\ddot{\theta}_2 \quad (2)$$

또한 벨트의 장력은 인장측(tight side) 장력과

이완측(slack side)장력으로 나누어 진다. 이때 초기 장력 F₀, 인장측 장력, 이완측 장력, 부하토크 사이의 관계는 다음과 같다.

$$F_1 = F_0 - k_1(r_1\theta_1 - r_2\theta_2) - c_1(r_1\dot{\theta}_1 - r_2\dot{\theta}_2) \quad (3)$$

$$F_2 = F_0 + k_2(r_1\theta_1 - r_2\theta_2) - c_2(r_1\dot{\theta}_1 - r_2\dot{\theta}_2) \quad (4)$$

여기서 k₁과 c₁, k₂와 c₂는 구동부와 종동부 사이의 강성요소와 감쇠요소를 표현한 것이다.

위 식들로부터 부하토크와 종동부의 회전 변위 사이의 전달함수를 구하면 아래와 같다.

$$\frac{\Theta_2(s)}{T(s)} = \frac{\sum_{i=0}^2 N_i s^i}{\sum_{i=0}^4 D_i s^i} \quad (5)$$

여기서, N_i와 D_i는 시스템 물성치에 의해 규정되는 상수이다.^{2,8}

3.2 타이밍 벨트 구동계의 모델링

여기서는 Fig. 2와 Fig. 3에 보인 로봇 팔에 대한 유연 다물체 동역학 모델 생성에 대해 설명한다. 다관절 팔 중 벨트 구동계는 유연체로 모델링 되었으며, 다른 요소들은 강체로 모델링하여 벨트 구동계의 유연성으로 인한 진동을 구현하는 데에 초점을 맞췄다. 유연 다물체 동역학 모델링을 위해서 다물체 동역학 해석 프로그램 RecurDyn이 사용되었다.

앞 절에 보인 수학적 모델링에서는 벨트의 인장강도만이 모델링되고, 벨트와 풀리가 만나는 부분에서 일어나는 벨트의 굽힘거동은 무시되었다. 일반적으로, 솔라셀 패널 이송 로봇처럼 고중량 부하 시스템에 사용되는 벨트는 Fig. 5에 보이는 것과 같이 벨트 안에 높은 인장강도를 갖는 심선(core code)을 포함하고 있어서, 매우 높은 인장강성과 낮은 굽힘강성을 갖는 이방성 물성치를 갖는다. 이 절에서는 이러한 이방성 유연 벨트 구동계를 포함하는 다관절 팔에 대한 모델링을 설명한다.

RecurDyn은 벨트 시스템을 여러 개의 강체요소들의 결합으로 모델링한다. 인접한 두 강체요소들을 스프링(spring)과 감쇠기로 연결하여 상미분 방정식으로 표현되는 운동방정식으로 구성한다. 벨트 요소를 생성하는 방법은 쉘 요소(shell element) 혹은 빔 요소(beam element)로 모델링하여 해석하는 2가지 방법이 있다. 본 연구에서는 빔

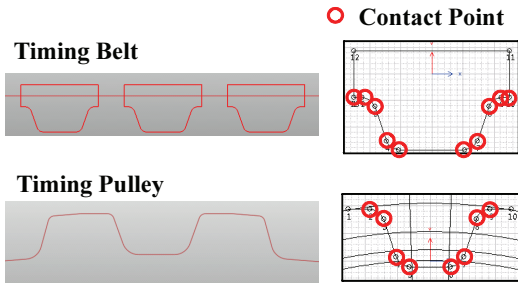


Fig. 6 Profile of teeth and contact points of timing belt and pulley

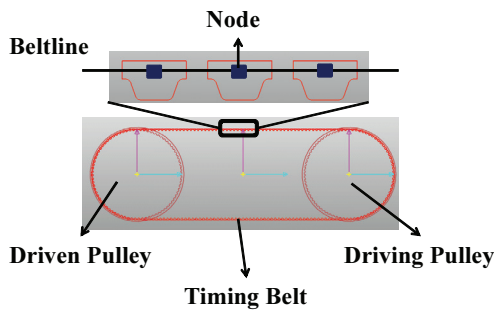


Fig. 7 Typical model of timing belt system

요소를 이용하여 타이밍벨트의 유연체 모델을 구성하는 방법을 이용했다.⁸

Fig. 6는 타이밍 벨트와 타이밍 풀리의 치형을 정의한 프로파일이며, 이는 X, Y 좌표와 곡선 부분에서의 반지름으로 결정된다. 타이밍 벨트 시스템은 벨트와 풀리의 치형이 서로 정확하게 들어맞아야 간섭이 일어나지 않고 맞물려 돌아가게 된다. 벨트에 의한 동력전달과 벨트거동의 정확하고 안정적인 수치해석을 위해서는 프로파일의 정확도가 매우 중요하다.

타이밍 풀리와 타이밍 벨트는 Fig. 6에 동그라미로 표시된, 프로파일의 좌표에 생성된 접촉점(contact point)에서 서로 접촉력이 발생한다. 이 때 접촉력은 주어진 순간에 가장 가까이 위치한 접촉점 사이의 강성력과 감쇠력으로 계산된다.

Fig. 7는 앞서 설명한 기능들로 모델링한 타이밍 벨트 시스템 모델을 보여준다. 여기서, 벨트는 여러 개의 강체요소들로 결합되었고, 이것들을 연결하는 벨트라인이 정의되어 있다.

3.3 파라미터 모델링

일반적인 유연 다물체 동역학 모델링은, 매우

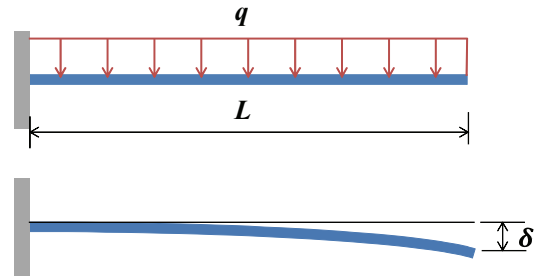


Fig. 8 Deflection of cantilever beam under uniformly distributed load

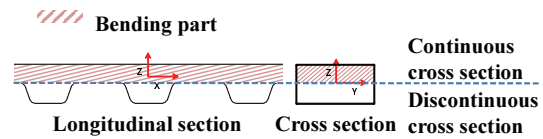


Fig. 9 Cross section and bending part of timing belt

복잡한 유한요소모델을 사용하여의 방법과 앞 절에서 설명한 것과 같은 집중 파라미터 모델링 방법 등 두 가지가 있다.

앞에서 설명한 벨트의 이방성 물성치를 원활하게 모델에 적용하기 위해서는 유한요소기법을 사용하는 것이 효과적이거나 이 경우 증가된 모델의 자유도에 의해서 해석 속도가 현격히 저하되는 문제가 있다. 본 연구에서는 집중파라미터 모델 방법(lumped parameter modeling method)을 이용하여 이러한 문제를 피하고 벨트의 이방성 물성치를 적절히 표현할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

굽힘강성은 식 (6)와 같이 탄성계수(E)와 단면모멘트(I)의 곱으로 나타낸다. 우리는 여기서 탄성계수를 실험으로 얻어진 벨트의 인장탄성계수로 설정하고 단면모멘트를 조절하여 실제 벨트와 동일한 굽힘강성(flexural rigidity)을 표현할 수 있도록 하였다.

$$\text{Flexural Rigidity} = E \times I \tag{6}$$

단면모멘트 조절은 Fig. 8과 같은 외팔보의 처짐을 이용해 구할 수 있다. Fig. 9에 나타내었듯이 타이밍 벨트는 이빨 부분의 불연속 단면과 나머지 연속단면 부분으로 구분 할 수 있다. 여기서 이빨 부분은 불연속 단면이면서 벨트의 길이에 비해 충분히 짧아 이빨이 굽힘에 미치는 영향을 무시할 수 있다 가정한다면, 타이밍 벨트는 균일한 단면을 가진 보라고 가정할 수 있다. 이를 간단한 외

Table 1 Parameters of timing belt flexible model

Parameter	Value	Units
Density	1.817e-6	kg/mm ³
Poisson's Ratio	0.26	
Young's Modulus	12300	N/mm ²
Shear Modulus	4730	N/mm ²
Moment of Area	I _{xx}	0.1745 mm ⁴
	I _{yy}	0.0436 mm ⁴
	I _{zz}	34164.9 mm ⁴

팔보의 상태로 가정한 다면 다음 식 (7)의 외팔보의 처짐량을 계산하는 공식을 이용하여 단면모멘트를 조절할 수 있다.

$$\delta = \frac{qL^4}{8EI} \tag{7}$$

여기서 굽힘이 일어나는 단면의 모양이 직사각형 이므로 단면모멘트는 식 (8)과 같이 계산된다. 단면 모멘트를 제외한 모든 항은 실험적으로 구할 수 있다. 이와 같이 단면모멘트를 계산할 때 주의 할 점은 계산 전후의 벨트의 무게를 같게 하기 위해 벨트의 초기 단면적과 계산 후 단면적이 같아야 한다는 것이다. 여기서 b, h는 단면의 가로, 세로를 나타낸다.

$$I = \frac{bh^3}{12} \tag{8}$$

$$b_{before} h_{before} = b_{after} h_{after} \tag{9}$$

타이밍 벨트의 밀도는 실제 벨트의 무게를 측정 한 뒤, 모델링 틀에서 가상 벨트 모델이 실제 벨트와 같은 무게를 갖도록 밀도 값을 변화시키는 과정을 통해 알맞은 값을 찾아낼 수 있다.

최종적으로 Table 1과 같은 모델링 파라미터들이 결정된다.⁸

4. 해석 결과

타이밍 벨트의 유연성으로 인해 로봇의 많은 부분에서 진동이 일어나지만, 본 논문에서는 로봇 팔 끝의 핸드 브라켓 부분에서의 진동을 중점적으로 보려고 한다.

타이밍 벨트의 유연성은 핸드 브라켓의 회전방향, 진행방향, 진행방향에 수직인 방향의 진동에 영향을 끼친다. 이는 로봇 구동 시 핸드 브라켓

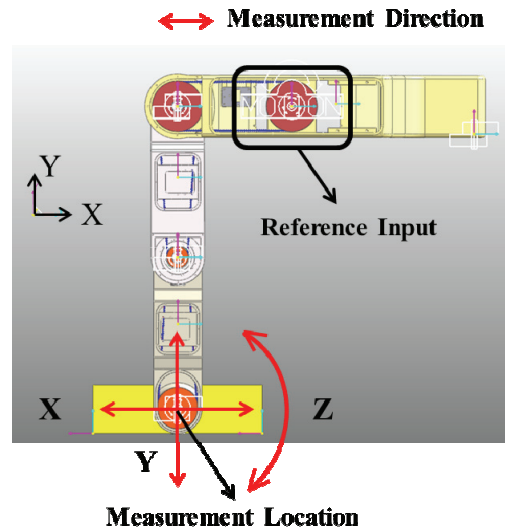


Fig. 10 Initial position of robot arm model and measurement information

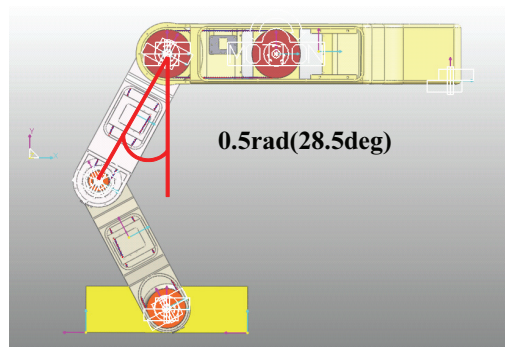


Fig. 11 End position of robot arm model

부분의 큰 관성으로 인해 타이밍 풀리를 회전시키기 위해 타이밍 벨트에 더 큰 힘이 작용하게 되고, 타이밍 벨트의 유연성으로 인해 벨트 구동계의 한쪽 벨트가 인장하게 되는데, 벨트의 탄성력으로 이 인장측이 수축하게 되면 반대편 이완측이 인장하게 되면서 벨트 구동계의 좌우 벨트가 번갈아 인장과 수축을 반복하고, 이로 인해 풀리가 회전방향으로 진동하게 되면서 생기는 진동이다. Fig. 10은 로봇 팔 모델의 시뮬레이션의 초기위치이며, 해석을 위해 타이밍 벨트 모델에 기준입력을 적용하는 부분과 측정위치, 진동 측정방향 등을 표시하였다. Fig. 11은 시뮬레이션의 최종 위치이며 Fig. 12의 입력에 의해 Arm Link 1이 초기위치에서 약 0.5rad (28.5deg) 회전한 모습이다.

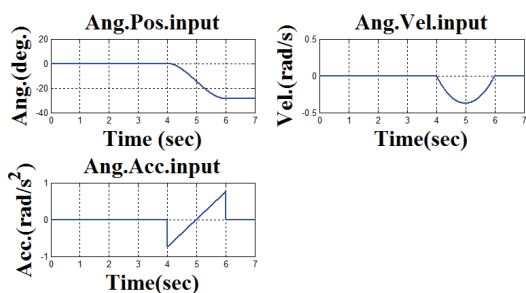


Fig. 12 Information of input motion

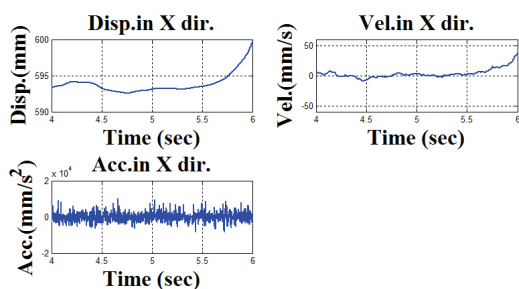


Fig. 13 Simulation result – Translational vibration in X direction

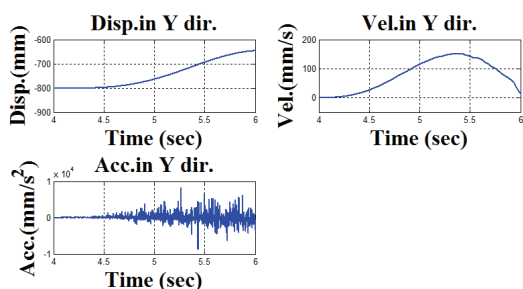


Fig. 14 Simulation result – Translational vibration in Y direction

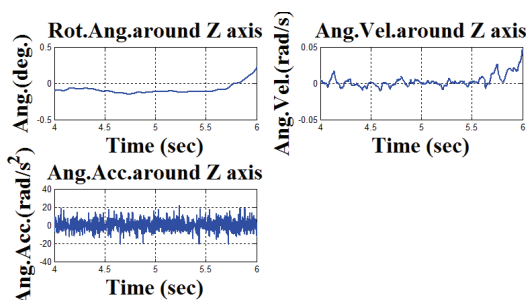


Fig. 15 Simulation result – Rotational vibration in Z direction

Fig. 13 ~ Fig. 15는 시뮬레이션 결과이다. 우린 이 결과를 통해 측정방향 모두에서 진동이 발생한다는 것을 관찰 할 수 있다.

먼저 Fig. 13은 핸드 브라켓의 X방향 진동 특성을 보여준다. 결과 그래프에서, 벨트 진동에 의해 브라켓이 직진운동을 하지 못하고 X 축 방향으로 약 6mm 정도의 오프셋이 생기는 것을 확인 할 수 있다. 이 오프셋은 로봇이 이송하는 패널의 부하가 증가할 수록 더 증가할 것이며 솔라셀 패널 공정 중 로봇의 핸드 브라켓이 목표지점에 제대로 도달하지 못하게 되는 문제를 야기할 수 있다. Fig. 14의 Y 축 방향 응답 그래프에서도 유사한 진동 특성을 확인할 수 있다. Fig. 15에 보인 Z축 회전 진동을 관찰해보면, 앞선 두 축 방향 운동에 비해 높은 더 큰 진동을 관찰할 수 있다.⁸

5. 결론

본 연구에서 유연체인 타이밍 벨트 구동계를 가진 로봇 팔의 가상 모델을 모델링하였고, 가상 모델이 실제 시스템의 거동을 모방할 수 있게 모델링 파라미터를 결정하는 방법을 제시하였다. 특히 물성치의 변화 없이 단면모멘트 조절을 통해 타이밍 벨트의 이방성 강성을 모델링 하는 방법을 제시하였다.

이 로봇 팔의 가상 모델을 이용한 시뮬레이션 결과를 통해 타이밍 벨트의 유연성으로 인해 로봇 팔의 끝 단에서 여러 방향으로 진동이 발생함을 검증하였다.

향후 계획으로는 8.5 세대 솔라셀 이송 로봇의 가상모델 개발과 로봇 팔의 가상 모델을 이용한 진동 제어 시스템의 개발을 진행 할 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업 (과제번호 : 10035218)의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. Cho, E. Y., Kim, J., and Rhim, S., “Modeling of Large Scale Solar Cell Handling Robot with Belt-Driven Flexible Arms,” Proc. of Asian Conference on Multibody Dynamics, Paper No. 177, 2012.
2. Cho, E. Y., Kim, J., and Rhim, S., “Modeling of

- Large Scale Solar Cell Handling Robot with Belt-Driven Flexible Arms,” *Theoretical & Applied Mechanics Letter*, Vol. 3, No. 1, 2013.
3. Seo, J. H., Yim, H. J., Hwang, J. C., Choi, Y. W., and Kim, D. I., “Dynamic load analysis and design methodology of LCD transfer robot,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, No. 4, pp. 722-730, 2008.
 4. Čepon, G., Manin, L., and Boltežar, M., “Validation of a Flexible Multibody Belt-Drive Model,” *J. of Mechanical Engineering*, Vol. 57, No. 7-8, pp. 539-546, 2011.
 5. Gerbert, B. G., “Force and Slip Behaviour in V-belt Drives,” *Finnish Academy of Technical Sciences*, pp. 11-101, 1972.
 6. Kim, H., Marshek, K., and Najj, M., “Forces between an abrasive belt and pulley,” *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 22, No. 1, pp. 97-103, 1987.
 7. Kim, H. and Marshek, K. M., “Belt Forces and Surface Model for a Cloth-Backed and a Rubber-Backed Flat Belt,” *Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design*, Vol. 110, No. 1, pp. 93-99, 1988.
 8. Jo, E. and Rhim, S., “Modeling of a Timing-Belt Drive System Used in a Large Scale Panel Handling Robot,” *Asia Pacific Vibration Conference*, 2013.