

## 동력전달용 타이밍벨트의 강성 개선

이경연<sup>1</sup>, 변경석<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>국방과학연구소, <sup>2</sup>목포대학교 기계공학과

### Stiffness Improvement of Timing Belt in Power Transmission

Kyeong-Yeon Lee<sup>1</sup>, Kyung-Seok Byun<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Agency for Defense Development

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Mokpo National University

**요 약** 타이밍벨트는 동력전달 요소로서 V벨트와 기어의 장점을 살린 톱니붙이 전동 벨트로서 미끄러지지 않고 소음도 적어 기구에서 회전축이나 직선 운동에서 동력을 전달할 때 동력 전달 장치로 사용되고 있다. 기어처럼 등간격의 홈을 가진 벨트 풀리와 홈에 정확히 맞물리도록 동일한 간격의 홈을 가진 타이밍 벨트를 통해 회전을 정확하게 전달할 수가 있다. 특히 출력 축에 타이밍벨트가 사용된 메커니즘에서 타이밍벨트의 강성을 포함한 동적 특성이 시스템 전달 특성을 결정하게 되므로 그 중요성이 커진다. 본 논문에서는 제한된 범위의 움직임을 갖는 타이밍 벨트에 적용하여 강성을 증가시킬 수 있는 강성 강화 벨트를 제안하였다. 강성 강화 벨트의 동특성을 연구하기 위하여 강성 강화 벨트에 대한 운동방정식을 수립하고, 강성 강화 벨트에 대한 시뮬레이션 모델을 만들어 분석을 수행하였다. 운동 방정식과 시뮬레이션 모델의 분석 결과를 확인하기 위하여 강성 강화 벨트를 사용한 1축 회전 실험 장치를 제작하고 실험을 수행하였다. 운동 방정식, 시뮬레이션 모델, 실험을 통하여 제안한 강성 강화 벨트를 적용하면 타이밍벨트의 강성과 동특성을 개선할 수 있음을 확인하였다.

• 주제어 : 타이밍벨트, 강성강화 타이밍벨트, 타이밍벨트의 동적 특성, 타이밍벨트의 강성

**Abstract** As a power transmission element, the timing belt is a toothed transmission belt that takes advantages of V-belts and gears. It has characteristics of non-slip and low noise. It is used as a power transmission device when transmitting power from a rotating shaft or linear motion in a mechanism. Rotation can be accurately transmitted through a belt pulley with grooves like a gear and a timing belt with grooves to precisely match with the belt pulley. In particular, in the mechanism in which the timing belt is used for the output shaft, the dynamic characteristics including the rigidity of the timing belt determine the transmission characteristics of the system, so its importance increases. In this paper, a stiffness reinforced belt that can be applied to a timing belt with a limited range of motion to increase its stiffness is proposed. To study the dynamic characteristics of the stiffness reinforced belt, the equation of motion for the stiffness reinforced belt was established, and a simulation model for the stiffness reinforced belt was created and analyzed. In order to confirm the analysis results of the motion equation and simulation model, a 1-axis rotation experimental equipment using a stiffness reinforcing belt was developed and the experiment was conducted. Through motion equations, simulation models, and experiment results, it was confirmed that the stiffness and dynamic characteristics of the timing belt could be improved by applying the proposed stiffness reinforcement belt.

• Key Words : Timing belt, Stiffness reinforced timing belt, Dynamic characteristics of Timing belt, Stiffness of Timing belt

Received 16 March 2022, Revised 24 March 2022, Accepted 26 March

\* Corresponding Author Kyung-Seok Byun, Dept. of Mechanical Engineering, Mokpo National University,  
1666, Youngsan-ro, Cheonggye-myeon, Muan-gun, Jeonnam-do, Korea. E-mail: ksbyun@mokpo.ac.kr

## I. 서론

타이밍벨트는 직선 이송이나 회전축 간의 동력 전달에 사용되는 동력 전달 요소이다. 타이밍벨트는 윤활이 필요 없으며 치형이 맞물려 있기 때문에 미끄럼이 없이 회전의 동기를 취할 수 있다. 그리고 기어 전동에 비해 정숙성이 높으며 가벼운 하중으로 축 간의 중심거리가 큰 경우 동력을 전달할 수 있는 특성을 가지므로 대형로봇이나 역진자 시스템, 모형 크레인 장치 같은 실험 장치나 자동화 장치에 많이 사용되고 있다[1-2].

타이밍벨트를 사용한 동력전달 메커니즘은 입력축에 공유되거나 출력축에 공유되는 방식으로 사용된다. 감속기의 입력축을 공유하는 방식에서는 감속비의 영향으로 출력 특성에 대한 타이밍벨트 특성의 영향이 적다. 예를 들면 감속비가 100:1인 구조에선, 타이밍벨트의 동특성이 1/100로 감소하여 반영된다. 그러나 출력축을 공유하는 방식[3-5]의 경우 출력 부하에 의한 타이밍벨트의 강성과 감쇠의 영향이 출력에 바로 반영된다. 이는 유연 시스템으로서의 특성을 갖게 된다[6].

본 논문에서는 유한한 각도로 회전하는 출력축 공유방식의 타이밍벨트에 적용할 수 있는 강성 강화 벨트를 제안하였다. 제안된 강성 강화 타이밍벨트의 동특성을 분석하고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 특성과 유효성을 확인하였다.

## II. 강성 강화 타이밍벨트

### 2.1 타이밍벨트 메커니즘

기존의 타이밍벨트를 사용한 폴리의 연결은 Fig 1과 같이 1개 이상의 아이들러 폴리를 사용하여 초기 장력을 조절하게 된다.

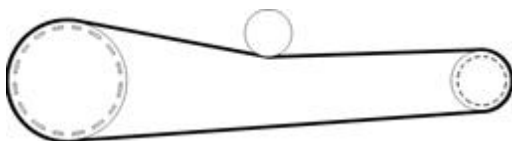


Fig. 1. Timing belt and pulley using idler

동력이 인가되는 폴리가 고정된 상태에서 인가된

토크가  $T$ 이고, 인가된 토크로 인한 각도 변위가  $\theta$  라면 타이밍벨트에 의한 동력전달 시 회전 강성  $K$ 는 식 (1)으로 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{T}{\theta} \quad (1)$$

타이밍벨트의 강성은 타이밍벨트의 단위 길이 · 폭 당 강성이  $K_0$ , 벨트의 길이  $L$ , 벨트의 폭  $W$ 라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = K_0 \times \frac{W}{L} \quad (2)$$

즉, 동일한 벨트 폭에 대하여 동력을 전달하는 벨트 길이가 작아질수록 강성이 증가한다.

Fig. 2는 타이밍벨트를 사용한 로봇의 예를 나타낸 것이다. 모터에 연결된 타이밍벨트는 입력축 공유방식으로 사용된 것이고, 감속기의 출력에 연결된 타이밍벨트는 출력축 공유방식으로 사용된 것이다.

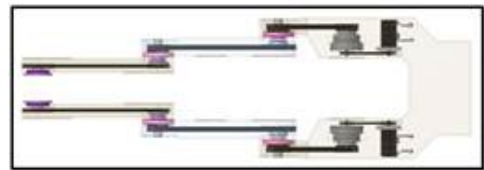


Fig. 2. Robot arm using timing belt

입력축 공유 방식은 각 관절에 설치된 감속기의 입력축을 타이밍벨트 등으로 연결하는 방식이다. 타이밍벨트의 강성은 감속기에 의해 그 영향이 감소해서 링크의 운동이 감속기의 강성에 의해 영향을 받는다.

출력축 공유 방식은 각 관절에 감속기를 설치하지 않고 타이밍벨트 등으로 직접 동력을 전달하는 방식이다. 고가의 감속기를 사용하지 않아 생산단가를 낮출 수 있다. 그러나 타이밍벨트의 강성이 링크의 회전 운동에 반영되어 강성이 낮아진다.

### 2.2 강성 강화 타이밍벨트의 원리

본 논문에서는 강성 강화 타이밍벨트를 제안하였다. 강성 강화 벨트를 사용하여 강성을 증가시키면 출력축 공유 방식의 단점을 보완시킬 수 있다.

강성 강화 벨트는 타이밍벨트의 일부를 강성이 큰 타이밍벨트 연결부로 대체한다. 대체된 길이만큼 벨트의 길이가 감소하여 동력전달을 위한 강성이 증가하게 된다.

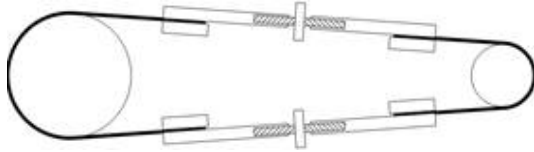


Fig. 3. Configuration of stiffness reinforced timing belt

Fig. 3은 제안된 강성 강화 벨트의 구조를 나타낸 것이다. 2개의 풀리에 연결된 타이밍벨트를 2개의 타이밍벨트 연결부로 결합한다. 강성 강화 벨트는 장력 조절을 위하여 길이를 조절할 수 있는 결합부, 타이밍벨트와 연결되는 체결부, 윈나사와 오른나사로 구성된 나사부, 체결부와 나사부를 연결하는 몸체로 구성된다. 나사부는 윈나사와 오른나사, 가운데에 나사부 회전을 용이하게 하기 위한 회전 손잡이로 구성된다.

타이밍벨트의 초기장력이 0일 때 타이밍벨트 연결부의 길이를 기준으로 각 타이밍벨트 연결부의 길이 감소량을  $d_1$ ,  $d_2$ , 타이밍벨트의 강성을  $K$ 라고 하면, 타이밍벨트의 초기장력은  $K(d_1 + d_2)$ 이다.

동력이 전달되어 풀리가 회전하면 타이밍벨트 연결부는 왕복운동을 하게 된다. 제한된 각도로 회전하여 타이밍벨트의 일부가 풀리와 접촉하지 않는 경우에 적용 가능하며, 풀리의 회전에 의해 타이밍벨트 모두 사용되는 경우에는 이러한 연결부를 적용할 수 없다. 따라서 제한된 각도로 회전하는 출력축 공유 방식에서 제안된 강성 강화 벨트가 활용될 수 있다.

Fig. 4는 제작된 강성 강화 벨트를 나타낸 것이다. 타이밍벨트의 일부를 연결 링크로 연결하고 있다. Fig. 5는 연결 링크를 나타낸 것이다.



Fig. 4 Stiffness reinforced timing belt



Fig. 5. Connecting link of stiffness reinforced timing belt

### III. 강성 강화 타이밍벨트의 동역학

3장에서는 강성 강화 타이밍벨트의 동역학 식을 살펴본다. Fig. 6은 강성 강화 벨트의 개략도를 나타낸 것이다.

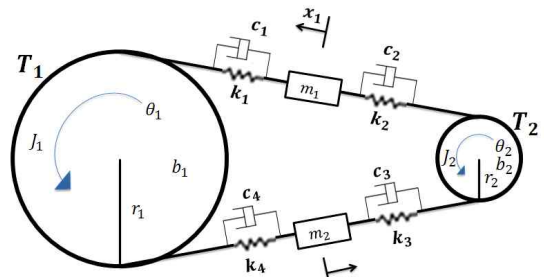


Fig. 6 Stiffness reinforcement belt model

왼쪽 풀리1 관점에서 풀리와 타이밍벨트의 관계식은 식(3)과 같다.

$$T_1 = J_1 \ddot{\theta}_1 + b_1 \dot{\theta}_1 + k_1(r_1\theta_1 - x_1)r_1 + c_1(r_1\dot{\theta}_1 - \dot{x}_1)r_1 + k_2(r_2\theta_2 - x_1)r_1 + c_2(r_2\dot{\theta}_2 - \dot{x}_1)r_1 \quad (3)$$

오른쪽 풀리2와 풀리2에 연결된 타이밍벨트의 관계는 식(4)와 같다.

$$T_2 = J_2 \ddot{\theta}_2 + b_2 \dot{\theta}_2 + k_2(r_2\theta_2 - x_1)r_2 + c_2(r_2\dot{\theta}_2 - \dot{x}_1)r_2 + k_3(r_2\theta_2 - x_{21})r_2 + c_3(r_2\dot{\theta}_2 - \dot{x}_2)r_2 \quad (4)$$

여기서, 스프링 상수는 다음과 같다.

$$k_1 = \frac{k_0 W}{L_0 - x_1}, \quad k_2 = \frac{k_0 W}{L_0 + x_1} \quad (5)$$

$$k_3 = \frac{k_0 W}{L_0 - x_2}, \quad k_4 = \frac{k_0 W}{L_0 + x_2}$$

여기서,  $k_0$ 는 단위 길이·폭당 타이밍벨트의 강성 계수로서 타이밍벨트의 물성이므로 인장시험을 통해 구할 수 있다.  $W$ 는 벨트 폭,  $L_0$ 는 타이밍벨트의 스펀 길이를 나타낸다. 즉, 타이밍벨트의 폭이 넓을수록 강한 스프링으로 작용을 하고, 길이가 길수록 약한 스프링으로 작용하는 것을 알 수 있다.

또한, 점성마찰계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{c_0 W}{L_0 - x_1}, \quad c_2 = \frac{c_0 W}{L_0 + x_1} \\ c_3 &= \frac{c_0 W}{L_0 - x_2}, \quad c_4 = \frac{c_0 W}{L_0 + x_2} \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $c_0$ 는 타이밍벨트의 단위 길이·폭당 점성마찰계수로서 타이밍벨트의 물성이다. 타이밍벨트의 폭이 넓을수록 강한 점성마찰을 나타내고, 길이가 길수록 약한 점성마찰 작용을 하는 것을 알 수 있다. 이러한 점성마찰계수는 동적 거동에 대한 분석을 통하여 다음과 같이 구할 수 있다.

질량, 스프링, 점성마찰을 갖는 2차 시스템의 자유 운동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (7)$$

이때, 감쇠가 과소 감쇠(under damping) 상태인 경우의 시간에 대한 위치 거동은 다음과 같다.

$$x_m = e^{-\frac{\alpha}{2m}t} \sin(\omega_d t + \varnothing) \quad (8)$$

속도 거동 또한 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_m = -\frac{\omega_d c}{2m} e^{-\frac{\alpha}{2m}t} \cos(\omega_d t + \varnothing) \quad (9)$$

감쇠 진동수에 해당하는 주기  $\tau$ 마다 최고점의 감쇠비  $\eta$ 는 다음과 같다

$$\eta(\text{감쇠비}) = e^{-\frac{c\tau}{2m}} \quad (10)$$

이 식으로부터 점성마찰계수  $c$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$c = -\ln \eta \cdot \frac{2m}{\tau} \quad (11)$$

즉, 감쇠비와 감쇠 주기, 질량을 측정하면 점성마찰 계수를 측정할 수 있다.

따라서, 타이밍벨트 일부를 대체한 연결 링크 1, 2와 타이밍벨트의 관계는 각각 식(12), (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m_2 \ddot{x}_2 &= k_3(\theta_2 r_2 - x_{21}) + c_3(\dot{\theta}_2 r_2 - \dot{x}_2) + \\ &k_4(\theta_1 r_1 - x_{21}) + c_4(\dot{\theta}_1 r_1 - \dot{x}_2) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 &= k_1(\theta_1 r_1 - x_{11}) + c_1(\dot{\theta}_1 r_1 - \dot{x}_1) + \\ &k_2(\theta_2 r_2 - x_{11}) + c_2(\dot{\theta}_2 r_2 - \dot{x}_1) \end{aligned} \quad (13)$$

#### IV. 강성 강화 타이밍벨트의 시뮬레이션 모델

3장에서 구축한 타이밍벨트의 스프링 강성과 점성마찰을 특성을 반영하여 Matlab/Simulink를 이용해서 강성 강화 벨트의 시뮬레이션 모델을 구축하였다. Fig. 7은 전체 시뮬레이션 모델을 나타낸 것이다.

시뮬레이션 모델은 그라운드, 2개의 폴리부, 2개의 연결부와 이를 연결하는 4개의 타이밍 벨트부로 구성되어 있다. 가운데에 그라운드링크를 중심으로 좌우에 폴리 1과 폴리 2를 배치하였고, 상하에 타이밍벨트를 모델링 하였다.

폴리는 그라운드 링크에 회전 관절로 연결되어 회전 관성을 갖고 회전하게 된다. 이러한 폴리와 회전 관절에 사다리꼴 속도 프로파일의 모션이 주어지고, 폴리는 이를 추종하게 된다. 또한, 폴리의 회전 시 베어링에 의한 점성마찰계수를  $b$ 로 나타내고, 타이밍벨트에 의해 주어지는 힘은 반지름  $r$ 이 곱해져서 베어링 점성마찰력과 함께 폴리에 인가된다.

기존의 모델링 틀에 포함된 스프링 댐퍼 모델은 폴리에 맞물려 돌아가는 타이밍벨트의 특성을 반영할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 함수를 이용하여 스프링과 댐퍼를 구현하였다

모델 내의 스프링과 댐퍼 함수는 식 (14)-(15)를 이용한 것이다. 여기서, 스프링의 변위는 다음 식과 같이

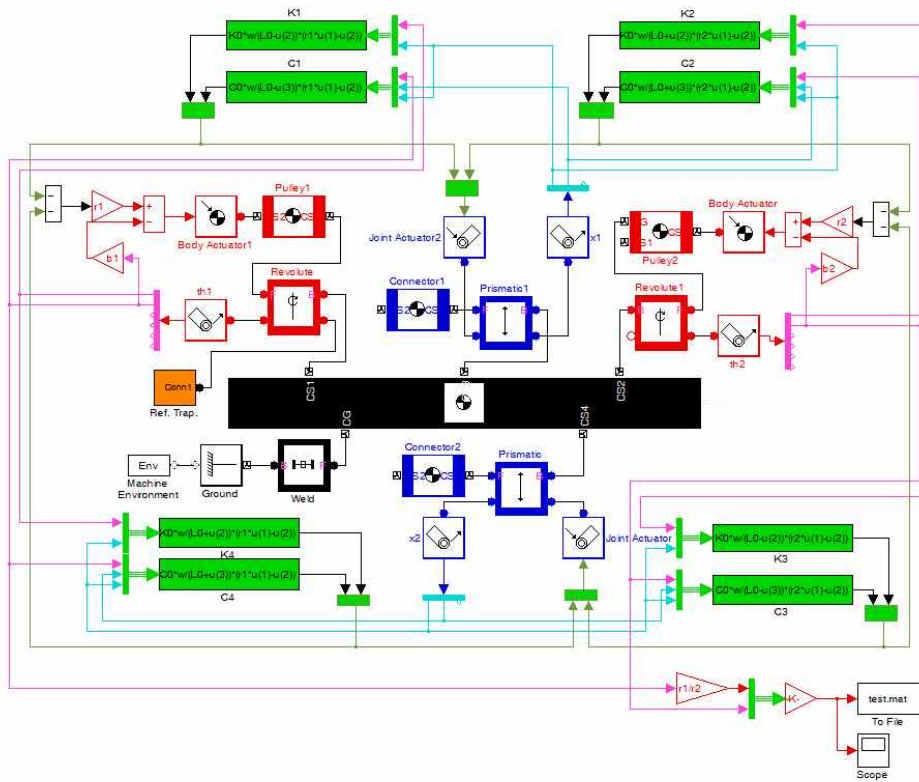


Fig. 7. Simulation model of stiffness reinforcement timing belt

각 풀리의 각도 범위에서 반지름을 곱하여 차를 구한 것에 해당한다.

$$\Delta x = r_1 \theta_1 - r_2 \theta_2 \quad (14)$$

또한 댐퍼에 곱해지는 속도는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta \dot{x} = r_1 \dot{\theta}_1 - r_2 \dot{\theta}_2 \quad (15)$$

시뮬레이션 모델에서 각각의 타이밍벨트는 식 (5)와 식(6)을 반영한 것이다. 즉, 연결 링크가 움직임에 따라서 벨트 길이가 증감하고, 이를 반영하여 강성계수와 댐핑 계수를 계산한 것이다.

연결 링크 2개는 그라운드와 병진 조인트 타이밍벨트 1과 2, 3과 4 사이에 연결되어 힘을 전달하는 역할을 수행한다.

## V. 실험

### 5.1 강성 측정 실험

타이밍벨트의 강성을 측정하기 위하여 인장실험을 수행하였다. 타이밍벨트는 인장 부재로 탄소섬유를 적용한 게이츠사의 8MGT-CB 폭 5mm를 사용하였다.



Fig. 8. Measurement of stiffness

Fig. 9는 인장시험으로 측정한 8MGT-CB 타이밍벨트의 인장력과 변형을 결과를 나타낸 것이다

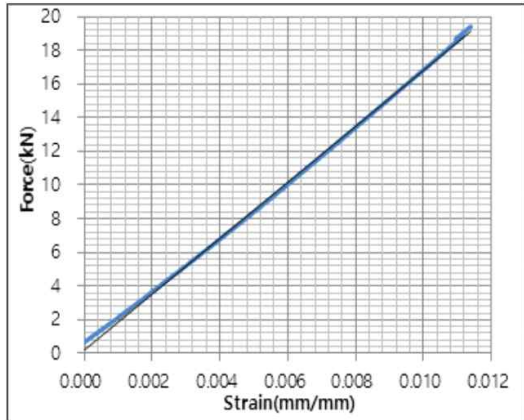


Fig. 9. Tensile test results of 8MGT-CB

## 5.2 동적 특성 실험 장치

Fig. 10은 강성강화 타이밍벨트의 동적 특성 측정을 위한 1축 회전 실험 장치를 나타낸 것이고, Fig. 11은 본 연구에서 제안한 강성 강화 벨트를 감속기의 출력 축 풀리와 부하의 풀리에 장착해서 동력을 전달하는 것을 보여준다.

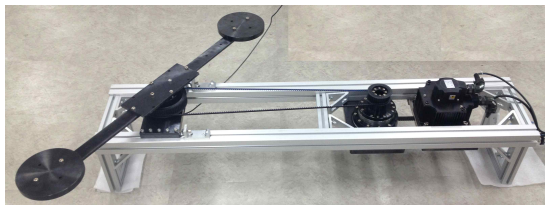


Fig. 10. 1-Axis experimental equipment



Fig. 11. Experimental equipment with stiffness reinforced timing belt

## 5.3 동적 특성 실험 결과

Fig. 12는 폭 5mm, 길이 2,000mm의 8MGT-CB 모델과 강성 강화 모델을 대한 실험 결과를 비교한 결과를 나타낸 것이다. 강성은 997[N/mm]에서 2,120[N/mm]으로 증가하고, 감쇠 주기가 0.139초에서 0.106초로 감소하였다.

Fig. 13은 강성강화 모델에 대한 실험과 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과도 실험 결과와 동일하게 강성이 증가한 것을 확인할 수 있다.

시뮬레이션과 실험 결과를 통해 본 논문에서 제안된 강성강화 타이밍벨트의 강성이 증가하여 동적 특성이 개선된 것을 확인할 수 있다.

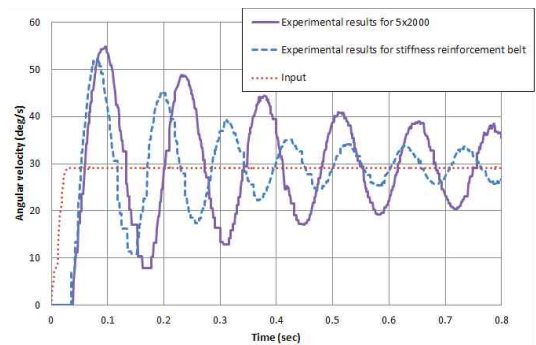


Fig. 12. Compared Experimental results between 8MGT-CB and stiffness reinforcement belt

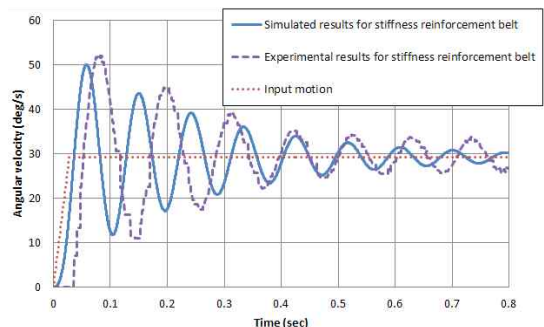


Fig. 13. Simulation results in equal conditions belt

## VI. 결론

본 논문에서는 타이밍벨트를 사용한 동력전달메커니즘의 동특성에 대한 연구를 수행하였다. 타이밍벨트가 제한된 회전을 하여 직선을 유지하는 구간이 있는 메커니즘에 대해서 강성을 강화할 수 있는 강성강화 타이밍벨트를 제안했다.

제안된 방식은 타이밍벨트의 직선 구간을 강성이 강한 연결 링크로 바꾸는 것이다. 강성강화 타이밍벨트에 대해서 동역학식을 수립하였고, 이를 기반으로 Matlab/Simulink를 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 1축 회전 실험 장치를 통해 비교실험을 수행하였다. 기존의 타이밍벨트와 강성강화 타이밍벨트의 비교 실험 결과 강성이 강해짐을 확인할 수 있었다.

## REFERENCES

- [1] S. J. Han and D. Y. Pang, "QLQG/LTR Control of the Nonlinear Timing-Belt Driving System Using DSP," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers Vol. 10, No.4, 2001.
- [2] A. F. Al-Dwairi, S. E. Al-Lubani, "Modeling and dynamic analysis of a planetary mechanism with an elastic belt," Mechanism and Machine Theory, Vol. 39, No. 4, 2004.
- [3] E. I. Jo and S. S. Rhim, "Modeling of a Timing-Belt Drive System Used in a Large-Scale Panel-Handling Robot," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 30, No. 9, 2013
- [4] J. Y. Kim and C. G. Kang, "Analysis of Chattering Problem of a Glass Transfer Robot Hand," Journal of the Korea Society of Precision Engineering, Vol. 22, No. 2, 2005.
- [5] T. Kikuchi, J. Furusho, M. Nakayama and H. Nishio "Effect of High-Stiffness Timing Belt for Oscillation Damping in Position Control of Robotic Arm," Journal of the Japan Society for Precision Engineering, Vol. 76, No. 9, 2010

- [6] W. Singhose, "Command Shaping for Flexible Systems : A Review of the First 50 Years," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, vol. 10, no.3, pp. 153-168, 2009.

---

## 저자소개

---

이 경 연 (Kyeong-Yeon Lee)



2011년 2월 : 목포대학교  
기계공학과(공학사)  
2013년 2월 : 목포대학교  
기계공학과(공학석사)  
2014년 10월~현재 :  
국방과학연구소 연구원  
관심분야 : 안정화 제어, EOIR

센서

변 경 석 (Kyung-Seok Byun)



1996년 2월 : 고려대학교  
기계공학과(공학사)  
1998년 2월 : 고려대학교  
기계공학과(공학석사)  
2002년 8월 : 고려대학교  
기계공학과(공학박사)  
2002년 9월~2006년 2월 : 삼성전자

메카트로닉스센터(책임연구원)

2006년 3월~현재 : 목포대학교 기계공학과(교수)  
관심분야 : 메카트로닉스시스템, 제어응용 시스템,  
로봇설계