

# 축방향으로 전개되는 보의 중력에 의한 횡진동 저감 연구

## A Study on Suppression of Lateral Vibration for Axially Deploying Beams under Gravity

임재곤<sup>1</sup>, 윤원상<sup>1</sup>, 범희락<sup>2</sup>, 홍성욱<sup>3,✉</sup>  
Jae-Gon Lim<sup>1</sup>, Won-Sang Yoon<sup>1</sup>, Hee Rak Beom<sup>2</sup> and Seong-Wook Hong<sup>3,✉</sup>

1 금오공과대학교 대학원 기전공학과 (Department of Mechatronics, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology)

2 미래산업(주) (Mirae Cooperation)

3 금오공과대학교 기전공학과 (Department of Mechatronics, Kumoh National Institute of Technology)

✉ Corresponding author: swhong@kumoh.ac.kr, Tel: 054-478-7344

Manuscript received: 2011.3.16 / Accepted: 2011.5.27

*This paper presents the dynamic modeling and vibration suppression methods for axially deploying beams subjected to gravity. A modal modeling method is employed to develop the lateral vibration model for axially deploying beams. Simulation is made to validate the proposed model as well as to investigate the dynamics of axially deploying beams. This paper rigorously investigates the gravity effect as a source of vibration for axially deploying beams. In order to suppress lateral vibration for deploying beams, the moving speed command is modified by using the input shaping method. Experiments are also performed to prove the proposed vibration suppression method. The simulations and experiments show that the proposed modeling and input shaping methods are effective for the dynamic analysis and vibration suppression of axially deploying beams subjected to gravity.*

Key Words: Deploying Beams (전개되는 보), Lateral Vibration (횡진동), Input Shaping (입력성형)

### 1. 서론

자동화된 공정에서 부품 투입이나 이송방향 전환 등의 기능을 하는 로봇은 대부분 공간의 제약 하에 그 기능을 수행할 수 있어야 한다. 따라서 긴 로봇 팔이 필요한 경우, 여러 개의 보가 겹쳐진 형태를 선호하게 되며 이를 실현하는 유용한 방식 중 하나가 망원경 형태의 메커니즘을 갖는 전개(Deploying)되는 보의 형태이다. Fig. 1 은 태양광 셀공정에서 유리판을 이송하는 로봇의 개념도로서 이와 같은 메커니즘을 활용한 예이다. 망원경 형태의 메커니즘에서 보가 축방향으로 전개하게 되면 정지된 상태의 보와는 다른 특이현상이 발생하게 된다.

축방향으로 전개되는 보 구조의 로봇 팔은 구조적으로 처짐과 진동이 발생되어 전체 시스템에 나쁜 영향을 미치게 된다. 특히, 보의 전개나 복귀를 통해 부품이나 제품을 공정에 투입하거나 반출하는 과정에서 횡진동(Lateral Vibration)에 노출된다. 즉, 보가 전개되거나 복귀하는 과정에서 보의 길이 변화에 의한 동특성 변화와 함께, 전개되는 방향의 수직방향으로 횡진동이 발생된다.<sup>1-7</sup>

축방향으로 이동하는 보에 관련된 동적 모델링 및 해석은 Mote,<sup>1</sup> Tabarrok<sup>2</sup> 등에 의해 최초로 소개된 후 많은 공학적 문제에 적용되어왔다. 특히 축방향으로 전개 또는 복귀되는 과정에서의 안정성 해석이 매우 중요하게 취급되어 왔다.<sup>3-6</sup> 예컨대 압연강판 공정 등에서 보나 판재료가 감겨지는 경우

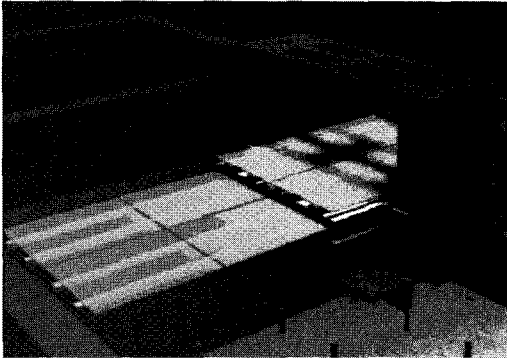


Fig. 1 Robotic arms based on telescopic mechanism with solar cell glasses

에 발생하는 불안정 현상에 대한 규명이나 대책 등이 그 좋은 예이다.<sup>5</sup>

축방향으로 이동하는 보에 대한 초기연구는 세장비가 큰 보를 주로 다루게 됨으로서 Euler Bernoulli 보이론에 기반을 둔 해석적 모델을 이용한 동적 모델링 및 해석이 많이 발표되었으며<sup>1-5</sup> 이후 판성향을 고려한 Rayleigh 모델<sup>7</sup> 과 전단변형을 고려한 Timoshenko 모델<sup>8</sup> 로 확장되었다. 전개되는 보 문제에서는 보가 전체적으로 균일한 형상을 가지게 되나 그 길이가 시간에 따라 변한다는 측면에서 이산화 모델의 도입에 다소의 어려움이 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 요소의 길이를 시간에 따른 함수로 두는 방법을 도입하여 왔다.<sup>3,7</sup> 대부분의 동적 해석은 이와 같은 과정에서 얻어지는 시변 동적 모델을 기초로, 주로 시스템의 안정성 분석에 중점을 두어 왔으며, 진동원에 대한 분석은 많지 않았다. 특히 중력은 보가 전개되는 과정에서 진동을 야기할 수 있는 중요한 원인이 되나 이에 대한 분석 및 개선 방안에 대한 연구는 많지 않은 실정이다.

본 연구에서는 중력을 받는 상태에서 축방향으로 전개되는 보의 횡진동을 분석하였고 이에 대한 개선 방법을 제안하였다. 보의 동특성 해석을 위한 단순화된 동적 모델을 도입하였고 이를 이용하여 시스템의 진동특성을 분석하였으며, 진동을 저감하는 방법을 연구하였다. 잔류진동을 저감하는 방법으로는 입력성형기법(Input Shaping Method)<sup>9-11</sup> 을 적용하였으며 그 타당성을 확인하였다. 실험 장치를 구성하여, 시뮬레이션을 통해 확인한 보의 횡진동 현상과 진동저감기법을 검증하였다.

## 2. 전개되는 보의 모델링

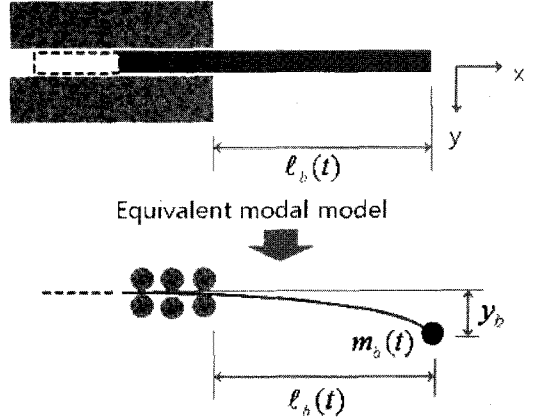


Fig. 2 Schematic diagram of axially deploying beam

### 2.1 시스템 모델링

Fig. 2는 본 연구에서 고려하고 있는 모델에 대한 개략도를 나타낸다. 보가 전개되는 축방향과 수직방향을 제외한 나머지 모든 자유도가 구속된 상태인 것으로 가정하였다. 이와 같이 전개되는 보에는 전개되는 방향의 수직방향 횡진동이 발생하게 된다. 그림을 통해 알 수 있듯이 분포되어 있는 보의 질량을 끝단에 집중된 모달 질량(Modal Mass)으로 가정하고, 보의 강성(Stiffness)은 끝단에서의 정적 강성으로 가정하였다.<sup>4,12</sup>

Fig. 2에서 전개되는 보를 외팔보 구조로 두고, 외팔보의 끝단에서의 변위를 고려하며, 전단변형을 무시하고 강성을 구하면, 외팔보의 끝단에서의 횡방향 변위에 대한 처짐공식으로부터 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$k_b = \frac{3EI}{\ell_b(t)^3} \tag{1}$$

보의 질량은 외팔보 끝단에 집중된 모달 질량으로 두고 순간고유진동수(Instantaneous Natural Frequency)와 강성 정보를 통해 계산한다. 주어진 조건에서 모달질량을 구하면 다음과 같다.

$$m_b = \frac{3\rho A \ell_b(t)}{\beta^4} \tag{2}$$

여기서  $EI$ 는 보의 강성계수(Rigidity)를,  $\rho, A$ 는

각각 밀도와 단면적을 의미한다. 또,  $\beta$ 는 고유모드에 의해 결정되는 무차원수로서 여기서는 1.8751이다.

이상과 같은 모달 변수를 이용하여, 축방향으로 이동하는 상태에서의 보 운동방정식을 에너지 방법에 의해 유도하면 다음과 같다.

$$m_b(t)\ddot{y}_b + \left\{ m_b(t)\frac{\dot{\ell}_b(t)}{\ell_b(t)} + c_b \right\} \dot{y}_b + k_b(t)y_b = m_b(t)g \quad (3)$$

여기서  $g$ 는 중력가속도이며,  $c_b$ 는 시스템에 인가되는 등가감쇠계수이다. 식(3)에서 확인할 수 있는 바와 같이 축방향 이동에 의해 질량과 강성뿐만 아니라 감쇠에도 시변항이 포함되는데, 이 항은 보의 축방향 전개에 따른 질량의 시간변화로부터 유도되며, 시스템 전체의 안정성에 영향을 미치게 된다.

**2.2 모델 검증 및 중력에 의한 응답해석**

기존의 연구에서는 전개되는 보의 안정성에 초점을 맞춘 시뮬레이션이 이루어졌으며, 진동을 발생시키게 되는 중력 효과는 고려한 경우가 많지 않았다. 본 연구의 궁극적인 목표는 앞서 언급한 바와 같은 망원경식 메커니즘을 갖는 로봇 팔의 진동을 저감하는 것이며, 로봇 팔이 전개되는 과정에서 유발되는 중력 가진이 매우 중요한 영향을 미치게 된다. 따라서, 시변시스템(Time-varying system)인 식(3)의 우변 중력항이 시스템을 가진하여 발생하게 되는 진동 응답에 대한 해석과 그 대책을 검토하고자 한다.

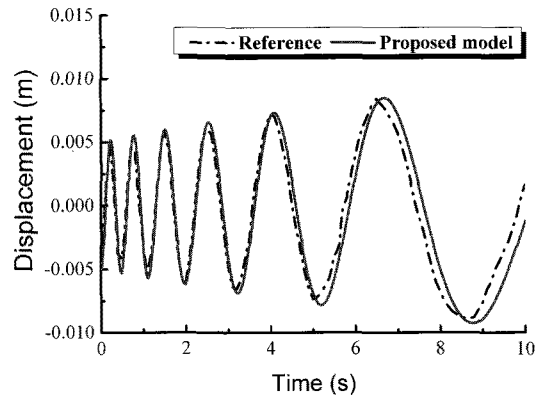


Fig. 3 Comparison of lateral vibrations from the proposed model and reference7

먼저, 계산 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 제안된 모델에 대한 시뮬레이션 결과를 참고문헌<sup>7</sup>에서 유한요소법을 이용하여 계산한 결과와 비교하였다. Table 1에 사용된 매개변수 값들을 나타내었다. 참고문헌과의 비교를 위해 여기서는 중력을 고려하지 않았다.

Fig. 3에서 제시된 모델과 참고문헌의 결과를 비교하여 나타내고 있다. 그림을 통하여 확인할 수 있는 바와 같이 결과가 매우 잘 일치하고 있어, 제시된 모델이 전개되는 보의 진동특성을 잘 반영하고 있는 것으로 판단된다.

한편, 중력에 의한 진동 특성을 확인하기 위해 시뮬레이션을 실시하였다. 본 시뮬레이션은 실험에 사용된 보를 기준으로 매개변수값들을 설정하였으며 Table 2에 그 값을 나타내었다. 시간에 따른 진동응답의 소멸을 고려하기 위해 감쇠를 포함

Table 1 Simulation parameters for model validation<sup>7</sup>

Parameter	Symbol	Value
Material	-	Aluminum
Initial Length(m)	$L_0$	1.8
Initial Deflection(m)	$\delta_0$	-0.005
Deploying Velocity(m/s)	$v$	0.32~0.56
Deploying Time(s)	$t$	10
Density(Kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	2770
Young's Modulus(GPa)	$E$	69
Cross Section Area(m <sup>2</sup> )	$A$	0.152x0.0095
Area Moment of Inertia(m <sup>4</sup> )	$I$	0.152x0.0095 <sup>3</sup> / 12

Table 2 Simulation parameters for gravity effect

Parameter	Symbol	Value
Material	-	Aluminum
Initial Length(m)	$L_0$	0.26
Initial Deflection(m)	$\delta_0$	0
Deploying Velocity(m/s)	$V$	0.4~0.8
Deploying Time(s)	Acc/Dec	0.05
	Constant	1
Material Density(kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	2770
Young's Modulus(GPa)	$E$	69
Cross Section Area(m <sup>2</sup> )	$A$	0.04×0.002
Area Moment of Inertia(m <sup>4</sup> )	$I$	0.04× 0.002 <sup>3</sup> /12

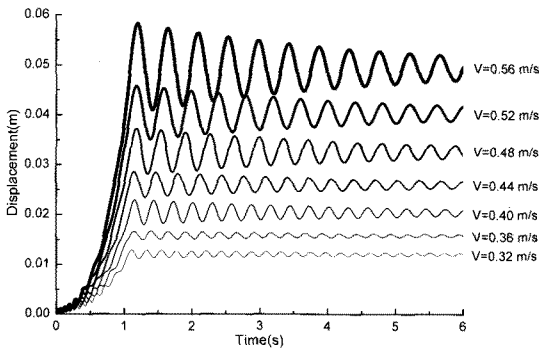


Fig. 4 Simulation result of lateral vibration for deploying beam under gravity effect with the deploying velocity varied

시켰으며 감쇠비를 0.015 로 가정하였다. 또한, 실제 운전되는 시스템의 특성을 고려하여 보의 전개 속도를 가감속구간과 등속 구간으로 구분하였으며 전개속도를 변경시키면서 계산하였다.

Fig. 4 는 중력에 의한 횡진동을 계산한 결과이다. 보의 전개과정에서 횡진동 주파수가 급격하게 바뀌며, 전개가 종료되면 보의 일정한 주파수로 횡진동하게 된다. 그러나 보의 전개과정에서는 주파수도 높고 진폭이 작은 반면 정지 후 상대적으로 큰 진동이 잔류하게 된다.

특히 보의 전개과정에서는 등가질량의 시간변화에 따른 감쇠가 크게 나타나게 되어 응답을 억제하는 효과가 있다. 전개속도가 높아지면 보의 최종 길이가 길어져 주파수가 낮아지며 최종적인 정적 처짐 또한 커지게 됨을 알 수 있다.

### 3. 진동 저감방법 및 적용

#### 3.1 입력성형기법

입력성형기법은 이송기구의 출발, 정지나 속도를 조절함에 있어 가감속 방법을 한 단계로 실행하는 것이 아니라 입출력 특성에 근거하여 여러단계로 나눔으로써 자체의 입력에 의한 진동 상쇄효과를 얻을 수 있도록 하는 것이다.<sup>9-11</sup> 본 연구에서는 전개되는 보의 횡방향 진동의 저감을 위해 입력성형기법을 적용하였다.

본 연구에서 고려하고 있는 시스템에 미치는 외력항은 중력에 의한 가진력으로서, 전개되는 축방향 변위에 비례하여 커지게 되므로 이를 입력성형하게 되면 잔류진동을 억제할 수 있다. 그러나

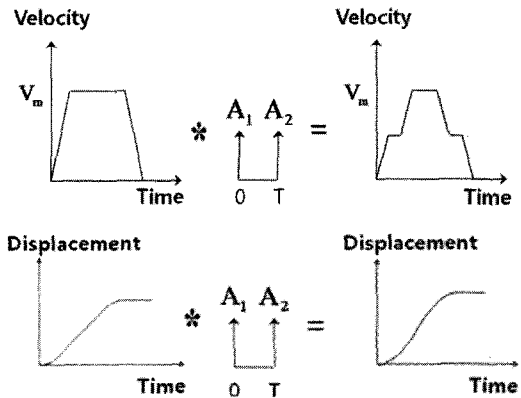


Fig. 5 Input shaping process for deploying velocity and displacement

일반적인 시불변시스템(Time-invariant system)과는 달리 외력이 가해지는 과정에서 시스템의 특성이 변하게 되므로 입력성형의 유효성에 대한 검증이 필요하다.

Fig. 4 에서 확인할 수 있는 바와 같이 보의 전개가 완료된 후 일정한 주파수로 진동하게 되므로, 입력성형기를 설계하기 위한 주파수를 전개가 완료된 상태의 고유진동수를 기준으로 선정하였다.

#### 3.2 중력에 의한 진동저감 시뮬레이션

입력성형에 의한 진동저감 가능성을 검토하기 위해 대표적으로 널리 이용되는 ZV 입력성형기<sup>9</sup>를 이용한 진동저감 시뮬레이션을 실시하였다. Fig. 5 는 실제 입력에 적용되는 ZV 입력성형과정을 예시하고 있다. 그림에서 T 는 입력성형기 임펄스 간의 시간간격으로서 ZV 입력성형기의 경우 고유주기의 1/2 로 결정한다. 시스템의 실제 외력에 영향을 미치는 것은 축방향 변위이나, 속도에 대한 입력성형을 시행함으로써 변위에 대한 입력성형효과를 가져올 수 있다. 본 시뮬레이션에서는 전개속도 0.40, 0.44m/s 인 두 가지 경우를 고려하였고 이 때 전개종료상태의 고유진동수는 각각 약 3.5, 3.1Hz 가 된다.

Figs. 6, 7 에 두 속도에서 입력성형을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우를 비교해서 보여주고 있다. 특히, 입력성형기 주파수를 변화시킬 경우의 변화를 같이 도시하였다. 두 경우 모두 진동저감 효과가 뚜렷이 관측되고 있으나 시불변시스템과는 달리 입력성형기 설계주파수를 고유진동수와 다소 차이가 나도록 설정한 경우에 더 좋은 진동 저감

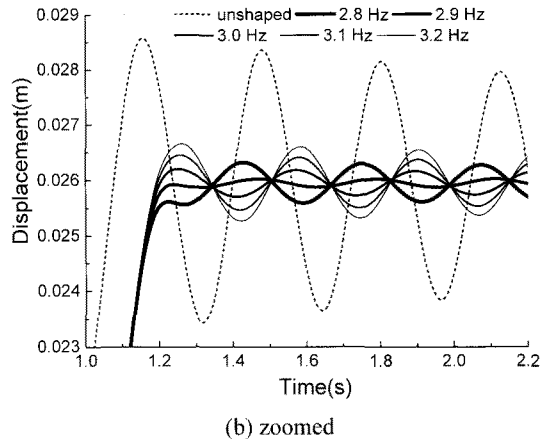
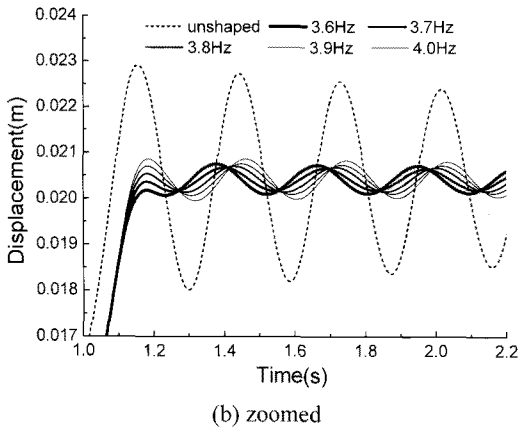
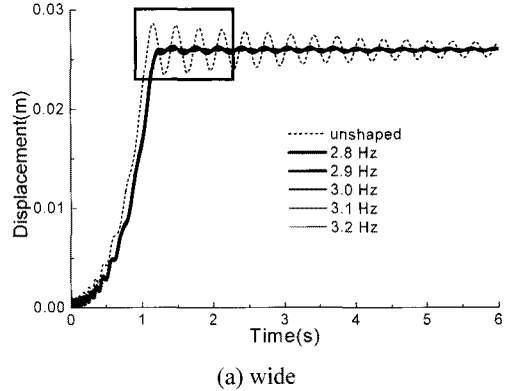
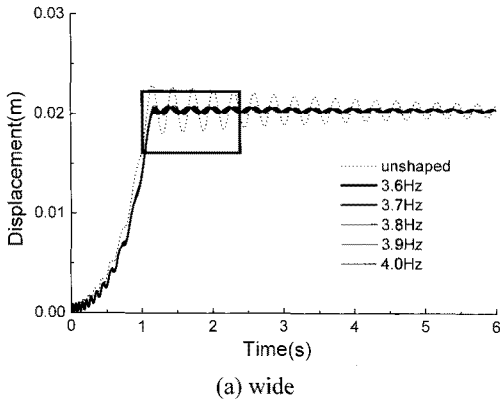


Fig. 6 Simulation result with and without input shaping when the input shaper design frequency changes and the deploying velocity is 0.40m/s

Fig. 7 Simulation result with and without input shaping when the input shaper design frequency changes and the deploying velocity is 0.44m/s

효과를 보이고 있다. 또한, 입력성형에도 불구하고 어느 정도의 잔류진동이 남게 됨을 볼 수 있다. 이와같은 특성은 전개속도 및 시스템 특성에 따라 다르게 나타나게 되는데, 이는 확정된 주파수를 기초로 설계된 입력성형기를 시변시스템에 적용함에 따른 한계로 생각된다.

Fig. 8 은 전개되는 보의 속도를 변화시켰을 때, 잔류진동을 최소화시킬 수 있는 입력성형기의 설계주파수를 최종상태의 고유진동수와 비교해서 보여주고 있다. 설계주파수 결정을 위한 계산범위를 최종상태의 고유진동수로부터 +/- 0.5Hz 로 한정하였다. 이미 앞서서도 언급한 바와 같이 입력성형기의 설계주파수로 최종상태의 고유진동수와 다소 차이를 두는 것이 좋은 것으로 나타나고 있다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 3.1Hz 에서는 설

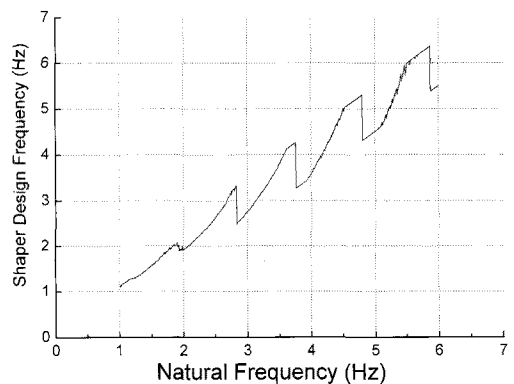


Fig. 8 Input shaper design frequency at which the residual vibration is minimized with the natural frequency varied

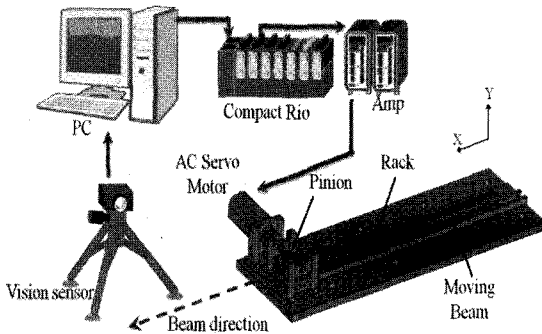


Fig. 9 Schematic diagram of experimental setup

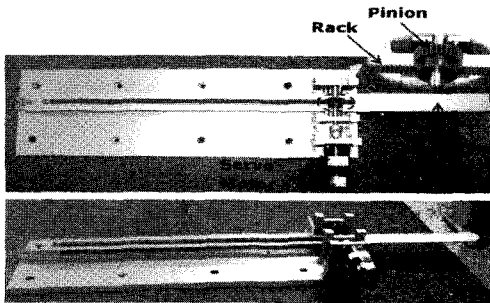


Fig. 10 Experimental setup for axially deploying beam

계주파수를 다소 낮게, 3.5Hz 에서는 다소 높게 설정하는 것이 잔류진동을 최소화할 수 있다.

#### 4. 실험 및 토의

##### 4.1 실험장치의 구성

전개되는 보의 동특성을 직접 관찰하고 입력성형기법에 의한 횡진동 저감방법의 타당성을 확인하기 위해 실험을 실시하였다.

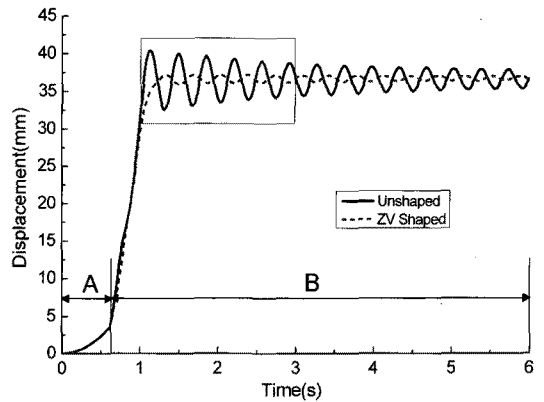
Fig. 9 는 실험장치의 개념도를 나타내고 있다. 본 실험에서는 모션 컨트롤러로 실시간 제어가 가능하도록 개발된 컴팩리오(CompactRIO)를 이용하였다. LabView 를 이용하여 제어 프로그램을 구성하였으며, 데이터저장 및 제어변수(속도, 가속도) 수정은 실시간으로 처리 가능하도록 하였다. 또한, 전개되는 보의 횡진동 측정을 위해 프레임속도(Frame Rate)가 60fps 인 카메라를 사용하였다. 보의 횡진동을 측정하기 위해 전개되는 보의 끝단에 원형의 타겟(Target)을 부착하여 보의 전개 중 측정된 영상에서 영상처리를 통해 타겟의 중심점 위치를 추적하는 방식을 이용하였다, 영상의 크기를 확대하여 측정의 정밀도를 높일 목적으로 측정범위를

전개과정의 후반부와 종료 후를 위주로 측정하였다.

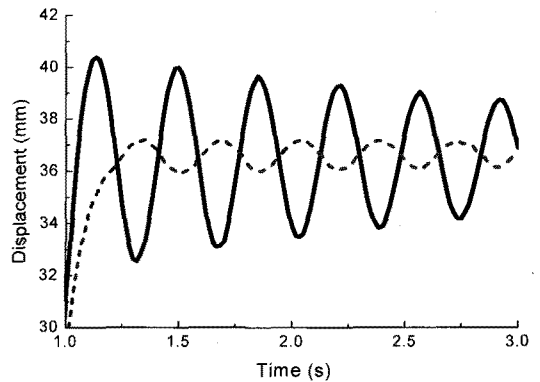
Fig. 10 은 본 연구의 실험을 위해 제작한 실험장치 사진을 보여주고 있다. 실험에 사용된 보의 Table 2 의 시뮬레이션 보 사양과 동일한 얇은 알루미늄 보이나, 전개를 위해 보의 위면에 레크(Rack)를 부착하였으며 피니언(Pinion)과 맞물려 전개되도록 하였다. 구동장치로는 서보모터(Servo Motor)를 사용하였으며 모터의 동력은 축을 통해 피니언으로 직결하여 전달하였다.

##### 4.2 횡진동 저감 실험

보의 횡진동을 저감하기 위해 입력성형기법을 적용하였다. Fig. 11 은 ZV 입력성형기를 적용하기 전 후의 측정결과를 비교하여 나타내고 있다. 보의 이송속도는 0.44m/s 이며 가속속 시간은 50ms 이고 1 초 동안 입력을 준 경우로서, 전개 후 보의



(a) wide



(b) zoomed

Fig. 11 Experimentally measured vibrations of axially deploying beam subjected to gravity with and without input shaping

총 길이가 720mm 일 때 보의 끝단에서 발생하는 횡진동을 얻은 결과이다. 여기서 제시한 실험결과는 보의 전개가 완료된 후 발생하는 횡진동의 주파수보다 약간 낮은 주파수를 사용하여 설계한 ZV 입력성형기를 이용한 경우이다.

Fig. 11(a)의 A 영역은 B 영역의 실측정결과로부터 보간하여 나타낸 부분이다. 그림에서 보여주는 결과는 입력성형기 설계주파수를 최종고유진동수보다 낮은 2.8Hz 로 설정한 경우로서 입력성형방법에 의해, 전개되는 보에서 발생한 횡진동이 70% 이상 확연히 저감됨을 확인할 수 있다. 그러나 앞서 시뮬레이션을 통해 확인했던 바와 같이 기존의 입력성형기로는 잔류진동을 완전히 저감할 수는 없었다.

실험에서 얻어진 잔류진동결과가 시뮬레이션에 비해 다소 크게 나타나고 있는 것은 래크와 피니언에서의 백래쉬와 래크 연결부위에서의 불연속성, 그리고 모터시스템 자체의 시간지연 등의 영향을 받은 것으로 판단되며, 시변효과와 더불어 이같은 시스템 특성을 반영할 수 있도록 입력성형기를 최적화 한다면 더욱 우수한 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 중력을 받는 조건에서 전개되는 보의 동특성 해석을 위하여 모달 모델링 기법을 도입하였고, 제안된 방법의 타당성을 확인하기 위해 기존문헌에서 계산된 결과와 비교 검증하였다.

중력을 받는 조건에서 전개되는 보의 횡진동 특성을 확인하였으며 이를 저감하기 위해 입력성형기법을 적용하여 그 가능성을 확인하였다. 진동 저감을 위해 ZV 입력성형기를 적용하였고, 전개과정 중의 시스템 특성 변화에도 불구하고 전개과정 완료 후 고유진동수를 기초로 설계된 입력성형기가 우수한 진동 저감 효과를 나타내고 있음을 보였다. 실험 장치를 통해 중력에 의해 발생하는 횡진동을 측정하였으며 입력성형기법을 통해 전개되는 보의 횡진동을 적절히 저감할 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부에서 지원하는 산업핵심기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Mote, C. D. Jr., "Dynamic Stability of Axially Moving Materials," Shock and Vibration Digest, Vol. 4, No. 4, pp. 2-11, 1972.
2. Tabarrok, B., Leech, C. M. and Kim, Y. I., "On the Dynamics of an Axially Moving Beam," J. of the Franklin Institute, Vol. 293, No. 3, pp. 201-220, 1974.
3. Stylianou, M. and Tabarrok, B., "Finite Element Analysis of an Axially Moving Beam, Part Integration," J. of Sound and Vibration, Vol. 178, No. 4, pp. 433-453, 1994.
4. Imanishi, E. and Sugano, N., "Vibration Control of Cantilever Beams Moving along the Axial Direction," JSME International J., Vol. 34, No. 2, pp. 527-532, 2003.
5. Sreeram, R. T. and Sivaneri. N. T., "FE-Analysis of Moving Beam Using Lagrangian Multiplier Method," Int. J. Solids Structures, Vol. 35, No. 28-29, pp. 3675-3694, 1998.
6. Sugiyama, H. and Kobayashi, N., "Analysis of Spaghetti Problem Using Multibody Dynamics," Trans. JSME(C), Vol. 65, No. 631, pp. 910-915, 1999.
7. Chang, J. R., Lin, W. J., Huang, C. J. and Choi, S. T., "Vibration and Stability of Axially Moving Rayleigh Beam," Applied Mathematical Modelling, Vol. 34, No. 6, pp. 1482-1497, 2010.
8. Lee, U., Kim, J. and Oh, H., "Spectral Analysis for the Transverse Vibration of an Axially Moving Timoshenko Beam," J. of Sound and Vibration, Vol. 271, No. 3-5, pp. 685-703, 2004.
9. Singhose, W. and Seering, W., "Command Generation for Dynamic System," Lulu.com, 2011.
10. Hong, S. W., Park, S. W. and Singhose, W., "Input Shaping for Vibration Reduction in Precise Positioning System," J. of the KSPE, Vol. 25, No. 4, pp. 26-31, 2008.
11. Park, S. W., Hong, S. W. and Jang, J. W., "Command Generation Method for High-Speed and Precise Positioning of Positioning Stage," J. of the KSPE, Vol. 25, No. 10, pp. 122-129, 2008.
12. Lim, J. G., Hong, S. W., Kim, M. D. and Beon, H. R., "A Study on Reduction of Transverse Vibration for Deploying Beam," Proc. of the KSPE Autumn Conference, pp. 889-890, 2010.