

# 외팔보의 Slewing 실험을 통한 동적 특성 분석

## Dynamic Characteristic Analysis of Slewing Beam by Experiment

곽문규† · 양동호\* · 이재하\*

Moon K. Kwak, Dong-Ho Yang and Jae-Ha Lee

### 1. 서론

회전운동을 하는 외팔보 형태의 구조물의 조종 및 진동제어에 대한 연구는 유연한 대형 우주 구조물(Large Flexible Space Structure)의 출현과 더불어 시작되었다고 말할 수 있다. 또한 우주개발이 진행되면서 우주공간상에서 작업을 해야 하는 경우가 늘어남에 따라 로봇팔을 이용하는 것을 고려하게 되었다. 그러나 지상에서 사용되는 로봇의 팔이 기계적인 진동을 줄이기 위해 상대적으로 큰 무게와 부피를 갖도록 설계가 된 반면에 우주 개발 사업에 있어서는 그러한 무게와 부피를 허용할 수 없었기 때문에 회전하는 유연 구조물의 모델링과 진동제어 문제가 중요한 연구과제로 부각되었다.

이런 구조물의 조종 및 진동제어에 대해 최소 시간 제어 (Minimum Time Control), 입력 성형 제어기(Input Shaping Control), 슬라이딩 모드 제어(Sliding Mode Control) 등과 같이 다양한 제어 이론들이 제시되었다. 그러나 동적 모델의 유도과 이를 이용한 수치 모사에 의한 이론 연구에 비해 실험으로 그 이론들을 입증한 연구는 매우 희박하다. 그 이유는 실험에 의해 우주 공간상에서 회전하는 유연보를 지상에서 구현하는 것이 어렵기 때문인데, 이론 모델에서 가정하고 있는 것처럼 구조물의 허브에 작용하는 모멘트의 구현이 어렵기 때문이다. 지상에서 실험을 하기 위해서는 회전을 위해 DC 모터를 사용해야 하는데 회전과 진동의 연성을 위해서는 기어드 모터가 사용될 수 없다. 기어드 모터를 사용하는 경우 기어 내부의 마찰로 인해 보의 진동이 모터 로터의 회전으로 이어지지 않는다. 이와 같이 이 분야에 대한 실험은 실험 그 자체가 매우 까다롭다고 말할 수 있다.

선행 연구에서는 회전하는 지능구조물에 대하여 모델링 방법을 제시하고 실험을 통해 동적 모델의 타당성을 검증하고자 하였다. 그리고 입력성형제어기를 이용해 진동을 억제할 수 있음을 이론과 실험으로 입증하였다. 그러나 압전 세라믹 센서의 특성으로 인해 Bang-Bang 입력을 통해

나타나는 저주파 대역의 변위는 계측되지 못했다. 따라서 본 연구에서는 Flex sensor 를 이용해 이론 계산과 유사한 형태의 변위의 계측을 시도하였다.

### 2. Slewing 보의 동적 모델링

Fig. 1 과 같은 회전 유연보를 고려해보자. 유연보는 Euler-Bernoulli 보로 가정하고, 가정 모드법을 도입해 운동 방정식을 유도하면 다음과 같다.

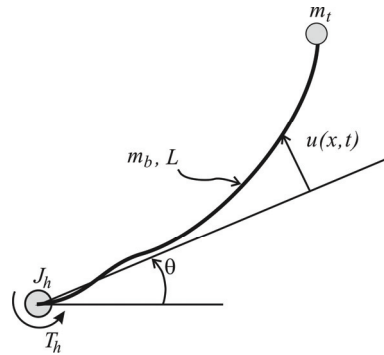


Fig. 1 Experimental Setup for Slewing

$$J_h \ddot{\theta} + \tilde{\Phi}_i \dot{\mathbf{q}} = T_h \quad (1a)$$

$$\tilde{\Phi}_i^T \ddot{\theta} + \mathbf{M}_i \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_i \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_i \mathbf{q} = 0 \quad (1b)$$

여기서  $\theta$  와  $\mathbf{q}$  는 각각 모터축의 회전각도와 탄성변위를 나타내는 일반좌표계를 나타내며,  $J_h$  는 모터축의 회전질량 관성모멘트와 보로 인한 회전 질량 관성모멘트를 합한 총 회전질량관성 모멘트이다.  $\mathbf{C}_i$  는 보의 감쇠행렬을 나타낸다.  $\mathbf{M}_i$  과  $\mathbf{K}_i$  는 질량행렬과 강성행렬을 나타낸다. 그리고  $\tilde{\Phi}_i$  는 허용함수의 적분으로 구해지는 행렬이며,  $T_h$  는 허브에 작용하는 토크이다. 이와 같은 운동방정식을 이용해 허브에 Bang-Bang 제어가 3 초간 작용하는 경우 보의 끝 단 변위의 예는 다음 그림과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 1.5 초 동안의 회전 방향의 반대방향으로 휘어진 상태에서 진동이 일어나며 감속 구간에서는

† 교신저자; 동국대학교 기계로봇에너지공학과  
E-mail : kwakm@dgu.edu  
Tel : (02) 2260-3705  
\* 동국대학교 기계공학과

전진방향에서 진동함을 알 수 있다. 그러나 이와 같은 진동은 압전세라믹 센서를 이용하는 경우 계측이 불가능하다. 그 이유는 압전세라믹 센서가 전하 형태의 센서로 Bias 형태의 신호는 계측하지 못하기 때문이다.

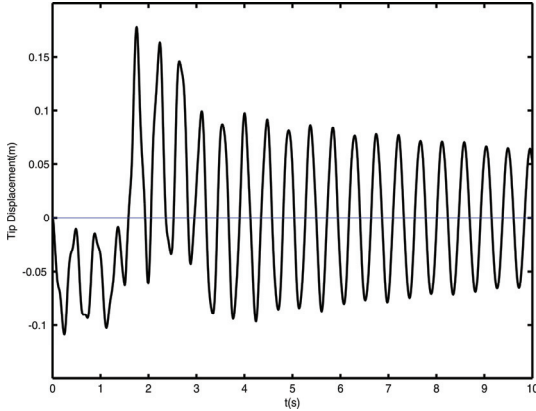


Fig. 2. Time history of tip displacement

### 3. Slewing 실험 구성

본 연구를 위하여 Fig. 3 에서 보이는 바와 같이 압전감지기와 작동기를 부착한 외팔보를 BLDC 모터에 연결하였다. 모터의 각도는 인코더를 이용하여 계측하였으며 보의 탄성변위는 압전감지기를 이용하여 계측하였다. 더 나아가서 Fig. 4 와 같은 Flex sensor 를 보의 양면에 부착하였다. 본 연구에서 사용한 Flex sensor 는 한 방향 Flex sensor 로서 굽혀질 경우 저항이 변화하는 센서이다. 정상상태에서 약 10kΩ의 저항을 가진다. Flex sensor 는 일종의 각도 센서라고 말할 수 있는데 0~90 도의 한 방향 휘어짐을 계측하기 때문에 보의 양면에 Flex sensor 를 부착하였다.

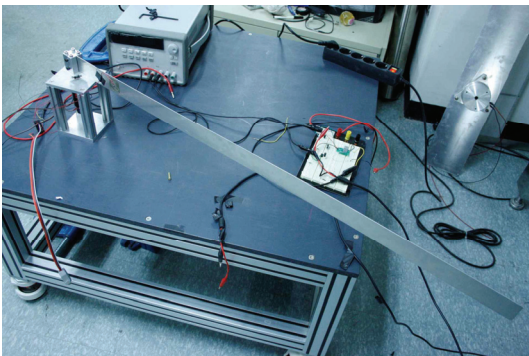


Fig 3. Experimental Setup for Slewing

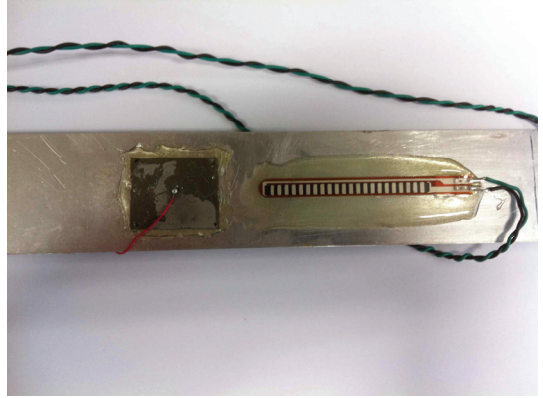


Fig. 4. Flex sensor glued to the aluminum beam

Flex sensor 로부터 신호를 계측하기 위해서는 Fig.5 와 같은 전자 회로가 필요하다. 이 전자회로는 전압 분배(Voltage divider)회로 인데 OP 앰프는 임피던스 버퍼의 역할을 한다. 출력전압은 다음 식으로 계산된다.

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

이 식을 이용하면 Flex sensor 의 저항 변화를 전압으로 전환할 수 있다.

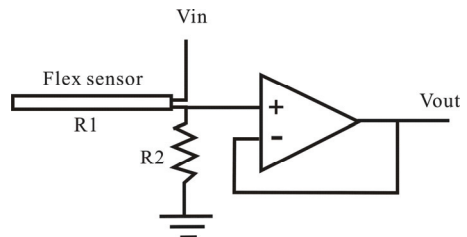


Fig. 5. Flex sensor circuit

### 결 론

본 연구에서 실험을 통해 이론 모델이 예측하고 있는 slewing 유연보의 동적 거동을 입증하는 시도를 하였다. 여러 가지 방안을 놓고 검토한 결과 굽힘에 대해 저항값이 변하는 Flex 센서를 이용하는 방안이 제시되었으며 현재 이 센서를 이용한 실험이 진행중이다. 실험 결과를 토대로 이론과 실제의 차이점을 분석할 예정이다.

### 후 기

본 연구는 한국 연구재단의 "유연 다물체 지능구조물의 동적 모델링 및 능동진동제어" 과제의 일환으로 수행되었습니다.