

회전구조물의 모델링 개선 및 제어기 설계

°곽문규*

Modeling Technique and Controller Design for Slewing Smart Structure

Moon Kyu Kwak

Abstract

This research is concerned with the modeling technique and active vibration controller design for slewing smart structures. When cantilever beam rotates about axes perpendicular to the undeformed beam's longitudinal axis, it experiences inertial loading. Hence, the beam vibrates from the initial stage of slewing. In this paper, the analytical model for a single slewing flexible beam with surface bonded piezoelectric sensor and actuator is developed using the Hamilton's principle with discretization by the assumed mode method. It is found from experiments that the theoretical model lacks the frictional effect. The frictional effect is incorporated into the equations of motion by employing the coupling factor. Theoretical and experimental results show problems arising in modeling and controller design.

1. 서론

지능 구조물을 이용한 능동진동제어는 현재 연구가 활발히 진행되고 있는 분야이다. 그러나 대부분의 연구 결과가 회전하지 않는 지능구조물에 대한 제어기의 개발과 관련이 있다.[1-8]

회전운동을 하는 외팔보 형태의 구조물의 진동 해석이나 제어에 대해서는 그동안 많은 연구가 있었음에도 불구하고 아직도 연구가 진행되고 있는 주제이다. 이는 이 분야 연구의 난해성과 중요성을 간접적으로 증명하고 있는 것이라고 말할 수 있다. 지금까지 이 분야에 대한 연구결과는 정확한 모델링에 관한 논문이 많은 부분을 차지하고 있으며 모델링에 고려되었던 물리적 요인변화에 따른 연

구, 모드해석방법과 유한요소법의 적용 등의 수치해석의 방법에 대한 연구이다.[9-15] 그러나 이러한 해석적 방법이 실험적으로 회전하는 구조물에 대해 직접적으로 계측하여 증명된 문헌은 거의 없는 실정이며, 모델링 방법에 대해서도 일부 논문에서 다루어지고 있다[9]. 그만큼 이 분야에 대한 실험은 실험 그 자체가 매우 까다로우며 특히 회전과 관련된 실험이 매우 어려운 분야라고 말할 수 있을 것이다.

회전 구조물의 능동진동제어 분야가 본격적으로 논의가 되기 시작한 것은 우주산업 인공위성과 우주왕복선의 개발과 더불어 활발하게 우주개발이 이루어지던 1970년대와 그 때를 같이한다고 볼 수 있다. 우주개발이 진행되면서 우주공간상에서 작업을 해야 하는 경우가 늘어남에 따라 로봇팔을

* 동국대학교 기계공학과 교수

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 구조물의 모델링과 진동제어 문제가 중요한 연구 과제로 부각되었다.

선행 연구[17]에서는 회전하는 지능구조물에 대하여 모델링 방법을 논의하고 이러한 시스템에 대한 디지털PID와 PPF제어기의 적용방법을 토의하였다. 이론적인 결과의 타당성을 검토하기 위하여 DSP 보드, DC모터, 압전세라믹 감지기와 작동기를 장착한 보 구조물을 이용하였다. 모델 유도는 Kwak[9]에 의해서 제시된 회전구조물의 동적 모델링 방법을 사용하였으며, 주파수응답을 계산하여 실험을 통해서 예측된 결과와 비교하였다. PID 모터제어기를 설계하여 각도제어를 하고 동시에 PPF 능동진동제어기를 이용해서 회전 때문에 발생하는 진동을 제어하였다. 실험 결과로부터 모델에 포함되지 않았던 마찰이 회전운동과 진동에 큰 영향을 주고 있음을 발견할 수 있었다. 이를 바탕으로 연성인자의 도입을 제시하였으며, 연성인자 값에 따른 주파수 응답곡선의 변화와 시간 응답의 변화를 관찰하였다. 회전지능보에 대한 이론 모델의 정확도는 모터에 내재하는 마찰에 대한 정확한 이해 없이는 불가능함을 확인할 수 있었는데 본 논문에서는 이 문제의 해결책을 제시하고자 한다. 모터의 회전 제어는 PID제어를 사용하였는데 PID제어 자체의 강인성으로 인해 이러한 비선형성은 극복됨을 확인할 수 있었다. PPF제어기 설계는 보의 고유진동수를 정확히 알아야 수행할 수 있는데 회전 후에는 고정보의 고유진동수로 진동하기 때문에 쉽게 설계할 수 있다. 실험 결과 진동제어가 회전 후에 용이하게 이루어짐을 확인할 수 있었다.

2. 회전지능보의 모델링

먼저 Fig.1의 회전 지능보를 Euler-Bernoulli 보라 가정하고 회전 지능보의 동적모델을 유도해 보자. 다음의 내용은 선행연구[17]의 연구 결과를 요약한 것이다.

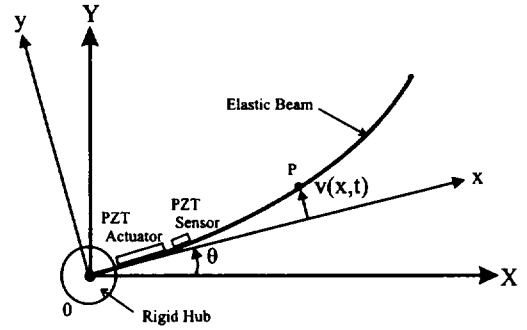


Fig. 1. Configuration of a Cantilever Beam Attached to Rigid Hub

여기서 X 와 Y는 절대좌표를 의미하며 x, y는 강체의 회전 좌표를 의미한다. P는 보위의 임의의 질점을 나타내며, θ 는 강체의 회전각을 의미한다. 그림에서 알 수 있듯이 강체허브는 모터에 연결되어 회전을 유도하며 보의 진동은 보에 부착된 압전 감지기와 작동기를 이용하여 이루어진다.

위 그림에 보인 모델을 대상으로 운동방정식을 유도하면 상미분방정식과 편미분 방정식이 혼합된 형태로 나타난다. 그 이유는 회전체는 이산식으로 표현되지만 보는 연속체이기 때문에 연속식으로 표현되기 때문이다. 이와 같은 혼합미분방정식 제어기 설계와 수치제산에 부적합하기 때문에 탄성 변위 $v(x, t)$ 를 다음과 같이 이산화하는 바람직하다.

$$v(x, t) = \sum_{j=1}^n \phi_j(x) q_j(t) = \Phi q \quad (1)$$

여기서 $\phi_j(x)$ 는 가정모드(assumed mode) 들이며 $q_j(t)$ 는 일반화된 좌표(modal coordinate) 이다 n 은 $q_j(t)$ 의 개수를 나타낸다. 본 연구에서는 Kwak[9]이 제안한 가정모드를 이용하였다.

Hamilton 원리를 적용하고 θ 이 과도하지 않는다면, 즉 slewing이 빠르지 않다고 가정하면 운동방정식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$J \ddot{\theta} + C_m \dot{\theta} + \overline{\Phi} q = T_H \quad (2)$$

$$\overline{\Phi}^T \ddot{\theta} + M \ddot{q} + C \dot{q} + K q = -B_a G_a v_a \quad (3)$$

여기서 J 는 Hub와 보의 총관성질량을 의미하며 다음의 식으로 표현된다.

$$J = J_H + \frac{1}{3} m_b L^2 + m_b r_H^2 + m_b r_H L + \sum_{i=1}^{n_i} \overline{m_{pi}} \left[\frac{1}{3} \beta_i^3 - \frac{1}{3} \alpha_i^3 + r_H^2 (\beta_i - \alpha_i) + r_H (\beta_i^2 - \alpha_i^2) \right] \quad (4)$$

여기서 J_H, r_H 는 허브의 질량관성모멘트와 허브의 반경을 나타내며, m_b, L 은 보의 질량과 길이를 나타낸다. $\overline{m_{pi}}$ 는 i 번째 압전체의 질량을 나타내며, α_i 와 β_i 는 i 번째 압전체의 시작점과 종점을 나타낸다. T_H 는 보의 허브에 작용한 토크를 의미하며 C_m 은 허브의 회전에 대한 감쇠계수를 나타낸다. 그리고

$$M = m_b \int_0^1 \Phi^T \Phi d\xi + \sum_{i=1}^{n_i} \overline{m_{pi}} L \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \Phi^T \Phi d\xi \quad (5)$$

$$\Phi = m_b r_H \int_0^1 \Phi d\xi + m_b L \int_0^1 \xi \Phi d\xi + \sum_{i=1}^{n_i} \left[\overline{m_{pi}} L r_H \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \Phi d\xi + \overline{m_{pi}} L^2 \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \xi \Phi d\xi \right] \quad (6)$$

여기서 무차원 상수 $x = L\xi$ 를 도입하였으며 여기서 $\overline{\alpha}_i = \alpha_i/L, \overline{\beta}_i = \beta_i/L$ 이다.

강성행렬 $K_p = \sum_{i=1}^{n_i} K_{pi}$ 이며,

$$K_b = \frac{E_b I_b}{L^3} \int_0^1 \frac{d^2 \Phi^T}{d\xi^2} \frac{d^2 \Phi}{d\xi^2} dx \quad (7)$$

여기서 E_b, I_b 는 보의 Young's modulus와 단면2차모멘트를 나타낸다.

$$K_{pi} = w_{pi} E_p t_p / L^3 \left(y_i^2 + y_i t_{pi} + t_{pi}^2 / 3 \right) \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \Phi''^T \Phi'' d\xi \quad (8)$$

여기서 w_{pi}, E_p, t_p 는 압전체의 폭, Young's modulus, 두께를 나타낸다. y_i 는 압전체가 부착된 위치, 즉 보 두께의 반이 된다.

C 는 보의 감쇠계수를 나타낸다. 감쇠계수의 추정 은 실험결과를 이용한다.

압전체에 의한 영향계수는 두가지로 분류되는데

작동기로 사용될 경우는 아래에서 언급하는 행렬 B 가 B_a 가 되고 감지기로 사용되는 경우는 B_s 가 된다.

$$B = [b_1, b_2 \dots b_{n_p}] \quad (9)$$

여기서

$$b_i = \frac{d_{31} w_{pi} E_p}{L} \left(y_i + \frac{t_{pi}}{2} \right) \int_{\alpha_i}^{\beta_i} \Phi''^T d\xi \quad (10)$$

가 된다. G_a 는 압전작동기를 구동하는 파워앰프의 이득을 나타낸다.

압전감지기 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$v_s = G_s C_{ps}^{-1} B_s^T q \quad (11)$$

여기서 $G_s C_{ps}^{-1} = -C_c^{-1}$ 이 되며 C_c 는 각각의 Charge Amp에 사용된 컨덴서 값으로 이루어진 대각행렬을 나타낸다.

회전이 없는 경우에 대하여 식 (3)의 고유치 문제를 풀면 고유벡터와 고유치가 얻어진다. 이 경우에 얻어진 고유벡터의 직교성, $U^T M U = I, U^T K U = \Lambda = \Omega^2$ 를 이용하고 감쇠에 대한 가정 $U^T C U = 2Z\Omega$ 를 사용하고 새로운 모달좌표계, $q = U\eta$ 를 도입하면 식(2), (3), (11)을 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$J \ddot{\theta} + C_m \dot{\theta} + c_f \Phi U \eta = T_H \quad (12)$$

$$U^T \Phi^T \ddot{\theta} + \dot{\eta} + 2Z\Omega \dot{\eta} + \Lambda \eta = U^T B_a G_a v_a \quad (13)$$

$$v_s = -C_c^{-1} B_s^T U \eta \quad (14)$$

여기서 식 (12)을 유도하는데 있어 c_f 를 삽입하였다. c_f 는 모터의 마찰력 영향을 반영하는 계수인데, 마찰영향계수의 도입은 이론모델에서 추정했던 응답이 실험에서 얻어지지 않았다는 관찰 결과를 바탕으로 하고 있다. 마찰영향계수를 도입하면 보의 진동이 허브에 전달되는 것을 어느 정도 차단할 수 있다. 즉, 마찰로 인한 효과를 구현할 수 있게 된다. c_f 를 사용하면 회전의 영향이 보의 진동에 영향을 주게 되어 응답 자체에 변화를 주게 된다. 본 연구에서는 이론 모델의 응답이 실험결과와 유사해지는 c_f 값이 얼마가 되는지 조사하였다.

3. 회전 지능보 실험

본 연구를 위하여 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 압전감지기와 작동기를 부착한 외팔보를 DC 모터에 연결하였다. 모터의 각도는 인코더를 이용하여 계측하였으며 보의 탄성변위는 압전감지기를 이용하여 계측하였다.

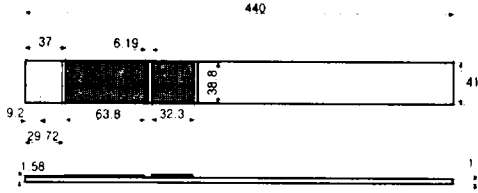


Fig.2 Cantilever with Piezo Sensor and Actuator

모터와 압전작동기 제어 알고리즘은 DSP보드에 다운로드되어 구동되는데, 감지기의 계측값은 DSP보드의 A/D단자에 전달되고 디지털제어기를 이용하여 각도와 보의 변위에 관한 제어력을 계산하고 이를 D/A단자로 출력하여 피드백 제어를 성취하였다.

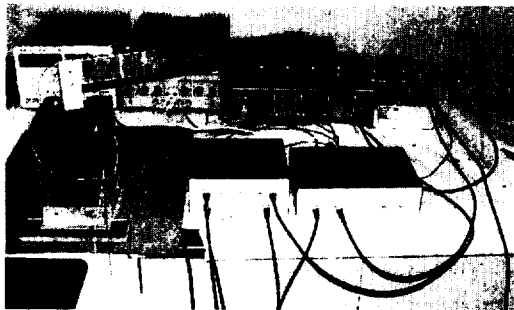
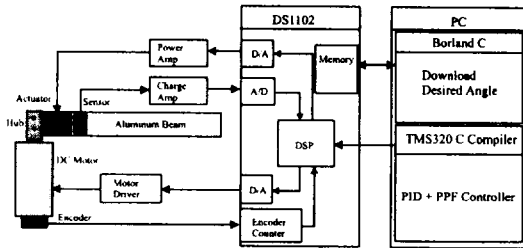


Fig. 3 Experimental Setup

본 연구에서는 먼저 탄성변위를 무시하고 식(12)를 이용하여 디지털 PID제어기를 설계하고 동시에 디지털PPF제어기를 구현하여 회전 운동중에 발생하는 진동과 회전후의 잔류진동을 제어하였다.

본 연구에서 이용한 디지털 PID제어기는 다음과 같다.

$$G(z) = \frac{T_H(z)}{\epsilon(z)} = \left[\left(K_p + \frac{TK_i}{2} + \frac{K_d}{T} \right) z^2 + \left(-\frac{TK_i}{2} - K_p - \frac{2K_d}{T} \right) z + \frac{K_d}{T} \right] / z(z-1) \quad (15)$$

여기서 $\epsilon = \theta_0 - \bar{\theta}$ 이다. 디지털 PID제어기의 견실한 제어성능은 널리 알려져 있어 더 이상 설명이 필요하지 않을 것으로 판단된다. 본 실험에서는 디지털 PID제어기의 세가지이득, 즉 비례이득, 적분이득, 미분이득을 결정하기 위하여 Ziegler-Nichols 방법[16]을 사용하였다. 진동제어를 위해서는 디지털 PPF 제어기[5]를 사용하였다.

4. 실험 결과

다음 그림은 고정된 보에 대하여 이론적인 모델을 바탕으로 얻어진 주파수 응답곡선과 실험으로 구한 주파수응답을 보여주고 있다.

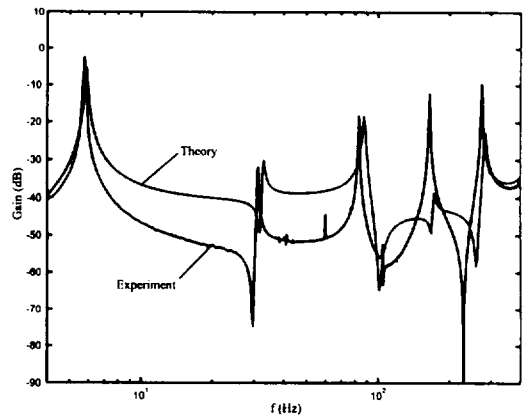


Fig. 4 Uncontrolled Experimental and Theoretical FRFs for Clamped Beam

약간의 차이는 있지만 FFT 신호분석기를 이용한 진동 실험으로부터 지능 외팔보의 고유진동수는 각각 6.25Hz, 32.5Hz, 86Hz, 169.5Hz 임을 알 수 있는데 이론 결과와 거의 일치함을 확인할 수 있었다. Fig. 5는 보가 고정되어 있을 경우와 모터에 부착된 경우의 주파수 응답 곡선을 보여주고 있다. 이 그림으로부터 모터에 부착했을 경우에 고주파수 대역에서는 많은 차이가 있지만 저주파수 대역에서는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

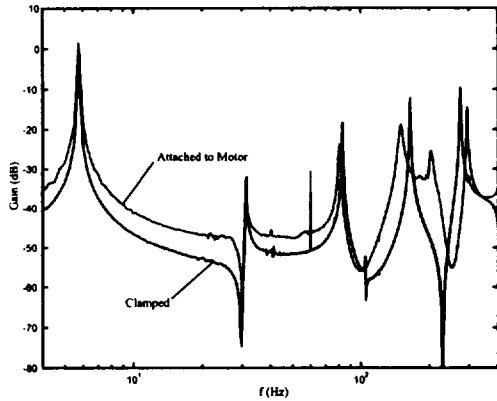


Fig. 5. Experimental FRFs for Clamped Beam and Beam attached to Motor

이와 같은 결과는 이론 결과와 전혀 다른 양상을 보여줄 수 있다. 다음 그림은 마찰영향계수를 변화시켜 가면서 이론적인 주파수 응답곡선의 변화를 보여주고 있다.

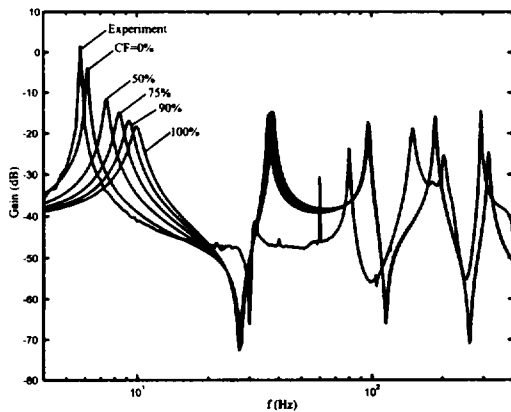


Fig. 6 Experimental and Theoretical FRFs for Beam Attached to Motor

이 그림으로부터 영향계수가 1인 경우에 실험결과와는 전혀 다른 결과를 보여줄 수 있다. 이론적인 결과와 실험 결과의 차이는 모터 자체의 사양의 불확실성과 감쇠계수 추론 방법의 문제로 인해 발생한다고 말할 수 있다.

디지털 PID제어기와 2개의 고유진동모드에 대하여 디지털 PPF제어기를 설계하여 적용하고 시간응답을 구해보았다. 그 결과는 다음과 같다.

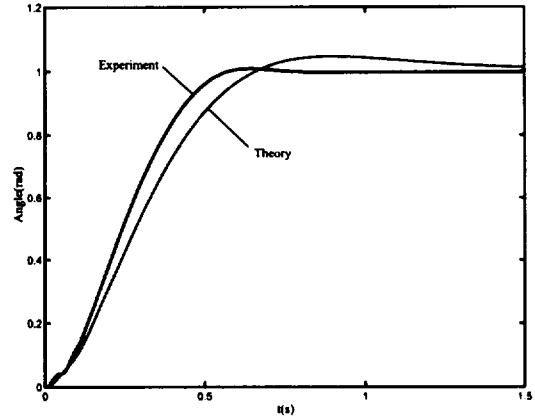


Fig. 7. Experimental and Theoretical Time-Responses of Angle with PID&PPF control

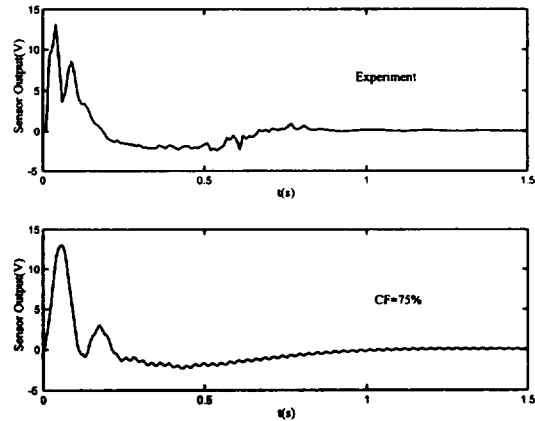


Fig. 10. Experimental and Theoretical Time-Responses of Sensor Outputs with PID&PPF control including Coupling Factors

시간 응답을 구함에 있어 마찰영향계수를 0.75로 하는 경우 가장 비슷한 응답이 나옴을 확인할 수

있었다. 모터의 위치 제어는 무난히 이루어졌음을 확인할 수 있으며 진동제어도 이루어짐을 알 수 있다.

5. 토의 및 결론

본 논문은 DC모터에 의하여 회전하는 지능구조물에 대하여 모델링 방법과 제어기 설계방법을 논의 하였다. 압전세라믹 감지기와 작동기를 포함한 지능구조물이 회전하는 경우에 DC모터로 인해 보에 진동을 유발함을 관찰할 수 있었으나 반대로 보의 진동은 DC모터의 회전에 거의 영향을 주지 못함을 발견할 수 있었다. 이것은 모터 내부에서 발생하는 마찰로 인한 것으로 생각되었다. 결론적으로 회전 지능보를 제어함에 있어 가장 큰 문제는 모터의 질량관성모멘트, 감쇠계수, 모터상수와 같은 모터 파라미터의 정확한 산정과 마찰에 대한 모델링 방법이 필요함을 알 수 있었다.

이러한 불확실성에도 불구하고 각도 제어와 진동제어가 디지털 PID-PPF 제어기를 사용하여 이루어질 수 있음을 확인할 수 있었는데 회전 중에 발생하는 진동문제는 아직 해결하여야 할 과제로 남아 있다.

참고 문헌

- (1) 라완규, 광문규, 윤광준, "압전감지기와 작동기를 이용한 복합재료 격자 구조물의 능동 진동 제어," 한국항공우주학회지, 제25권 제5호, 1997, pp. 76-85.
- (2) 광문규, "압전재료를 이용한 지능구조물의 능동진동제어", 한국소음진동공학회지, 제5권 제3호, 1995년 9월, pp. 292-302.
- (3) 광문규, 라완규, 윤광준, "PPF와 SRF 조합 제어기법을 사용한 지능구조물의 능동진동제어," 한국소음진동공학회지, 제7권 제5호, 1997, pp. 811-817.
- (4) 신태식, 광문규. "수정 LQG 제어기를 이용한 지능구조물의 능동진동제어", 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 용평, 1998년 5월, pp. 664-669.
- (5) Kwak, M.-K., Ra, W.-K., and Yoon, K.-J., "Active Vibration Suppression of a Smart Grid Structure by the Multiple Positive Position Feedback Control," Asia-Pacific Vibration Conference '97, Nov. 1997, Kyounju, Korea, pp. 1271-1276.
- (6) 허석 광문규 "다중 입출력 능동진동제어를 위한 실시간 유전자 알고리즘 개발", 한국소음진동공학회지, 추계학술대회논문집, 1999, pp.205-210.
- (7) K. K. Denoyer, M. K. Kwak "Dynamic Modelling and Vibration Suppression of a Slewing Structure Utilizing Piezoelectric Sensors and Actuators", Journal of sound and vibration (1996) 189(1) pp 13 - pp 31.
- (8) M. K. Kwak "New Admissible Functions For the Dynamic Analysis of Slewing Flexible Beam", Journal of sound and vibration 1998, 210(5), pp 581 - 592.
- (9) Ephraim Garcia and Daniel J. Inman "Modelling of the Slewing Control of a Flexible Structure "State University of New York at Buffalo, New York 14260
- (10) 신호철, 최승복 "압전작동기를 이용한 매우 유연한 로봇팔의 진동 진동제어" 한국소음진동공학회지, 제6권, 제2호, pp187-196, 1996년
- (11) Benjamin C. Kuo, Automatic Control Systems, Prentice Hall International.
- (12) 박정훈, 유홍희 "회전구조물의 진동 해석 및 실험" 대한 기계학회 논문집(A) 제21권 제2호, pp. 272-280, 1997
- (13) 유홍희 "회전 외팔보의 굽힘진동 해석" 대한 기계학회논문집 제16권, 제5호, pp. 891-898 1992
- (14) Richard C. Dorf, Robert H. Bishop "Modern control Systems"
- (15) 남상현, 광문규, "회전구조물의 능동진동제어", 소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, 2000년 6월.