

수정된 **King-Post Mechanism**을 이용한
교량구조물의 최적진동제어

**Optimal Active Vibration Control of
Bridges by Modified King-Post Mechanism**

Optimal Active Vibration Control of Bridges by Modified King-Post Mechanism

Advisor : Professor In-Won Lee

by

Joon-Hyoung Kim

Department of Civil Engineering

Korea Advanced Institute of Science and Technology

**A thesis submitted to the faculty of the Korea Advanced
Institute of Science and Technology in partial fulfillment of the
requirements for the degree of Master of Engineering in the
Department of Civil Engineering**

Taejon, Korea

1995. 12. 13.

Approved by



Professor In-Won Lee

Major Advisor

수정된 **King-Post Mechanism**을 이용한 교량구조물의 최적진동제어

김 준 형

위 논문은 한국과학기술원 석사학위논문으로 학위논문심사
위원회에서 심사 통과하였음.

1995년 12월 13일

심사위원장 이 인 원



심사위원 최 창 근



심사위원 윤 정 방



MCE 김 준 형. Joon-Hyoung Kim.
943124 **Optimal Active Control of Bridges by Modified
King-Post Mechanism. 수정된 King-Post
Mechanism을 이용한 교량구조물의 최적진동제어.
Department of Civil Engineering. 1996. 29p.
Advisor : In-Won Lee**

ABSTRACT

This paper develops a new control system to reduce the vibration of bridges using King-post mechanism. The optimal active control theory is used in the control system. The positions of post and roller in the King-post mechanism are important factors, since the vibration of bridges is very sensitive to their variations. To demonstrate the efficiency of the proposed control mechanism, a simply supported beam under moving load is considered.

목 차

| | |
|--|-----------|
| 초 록..... | i |
| 목 차..... | ii |
| 그림 및 표 목록..... | iv |
| | |
| 1. 서론..... | 1 |
| 1.1 연구의 필요성..... | 1 |
| 1.2 연구의 목적 및 범위..... | 2 |
| | |
| 2. Classical Linear Optimal Control | 4 |
| 2.1 이론적 배경..... | 4 |
| 2.2 Independent Modal-Space Control | 9 |
| | |
| 3. King-Post Mechanism..... | 13 |
| | |
| 4. Proposed Control Mechanism..... | 15 |

5. 수치 해석..... 18

 5.1 Case I..... 19

 5.2 Case II 22

 5.3 Case III 24

 5.4 Discussion 27

6. 결론..... 28

참고문헌..... 29

그림 및 표 목록

| | |
|--|----|
| 그림.1 King-Post Mechanism..... | 13 |
| 그림.2 Modified King-Post Mechanism..... | 15 |
| 그림.3-1 Case I에서 Actuator 끝단의 변화..... | 20 |
| 그림.3-2 Case I에서 변위 비교..... | 20 |
| 그림.3-3 Case I에서 제어하는 경우의 변위 비교..... | 21 |
| 그림.4-1 Case II에서 Actuator 끝단의 변화..... | 23 |
| 그림.4-2 Case II에서 변위 비교..... | 23 |
| 그림.4-3 Case II에서 제어하는 경우의 변위 비교..... | 24 |
| 그림.5-1 Case III에서 Actuator 끝단의 변화..... | 25 |
| 그림.5-2 Case III에서 변위 비교..... | 26 |
| 그림.5-3 Case III에서 제어하는 경우의 변위 비교..... | 26 |
| 표.1 Case I에서의 물성치..... | 19 |
| 표.2 Case II에서의 물성치..... | 22 |
| 표.3 Case III에서의 물성치..... | 25 |

1. 서 론

1.1 연구의 필요성

근래에 구조해석기술의 발달과 고강도 및 경량 구조재료의 개발에 힘입어 고층 빌딩과 장대교량 등 대형구조물의 건설이 늘어나고 있다. 그러나 구조물이 대형화 되고 전체적인 형상이 길어짐에 따라 구조물은 더 유연해지고 따라서 구조물의 기본 진동수는 작아지게 된다. 그래서 태풍, 지진, 파랑 등 동적하중에 의한 진동 현상으로 인한 구조물의 안전 문제가 새로이 부각되고 있다. 또 구조물의 안전 뿐만 아니라 사용성(serviceability)이라는 측면에서도 구조물의 대형화는 여러가지 불리한 점을 가진다.

이렇듯 상재하지 않고 예측할 수 없는 동적하중에 대하여 항상 그 하중을 견딜 수 있도록 구조물을 설계하는 것은 비효율적이고 비경제적이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 최근 각광받고 있는 것이 구조물의 진동제어(vibrational control)이다.

기계적, 구조적 시스템의 안전성과 보존성을 향상시키는 가능한 방법으로 최근 구조적 능동제어에 대한 적지 않은 관심이 생겨났다. 구조물의 능동제어란 구조물에 가해지는 동적하중과 이로 인한 구조물의 응답를 측정하여, 구조물의 안전과 사

용성을 위하여 구조물의 거동이 줄어들도록 인위적인 힘을 가함으로써, 다양한 종류의 하중조건에서도 효율적으로 구조물의 거동을 제어하도록 하는 방식이다.

이렇게 구조물을 제어하는 방식은 전자공학이나 기계공학 등에서 많이 발전되어 온 제어 알고리즘을 구조적인 시스템에 적용하여 구조물의 응답를 줄이는 것이다. 근래 건물에 actuator와 tendon을 이용하여 제어하는 것이 실제 구조물에 적용된 사례도 있다.

1.2 연구의 목적 및 범위

본 논문에서 다루고자 하는 control mechanism은 King-post mechanism^{[1], [3], [4]}이다. 이 King-post mechanism은 앞의 사례와 마찬가지로 actuator와 tendon을 사용하고 있다. 이 mechanism은 이전에 여러 사람들에 의해 소개되어 지고 발전되어 졌다. 하지만 본 논문에서는 이 시스템을 건물이 아닌 교량에 적용하고자 한다. 그리고 다리에 적용할 때, 더욱 효과적이고 경제적이며 실제로 구현 가능하도록 Modified King-post mechanism을 고안하여 적용하였다. 그리고 Modified King-post mechanism이 얼마나 효과적인가를 증명하였다.

2장에서는 이 control mechanism에 적용하는 제어 알고리즘인 classical linear optimal control^{[1], [4]}에 대하여 설명하고 이 이론을 연속적인 시스템에 적용할 수 있

도록 independent modal-space control^{[2], [3]}에 대하여서도 설명하였다. 3장에서는 King-post mechanism의 모형과 수학적 모델을 소개하였고, 4장에서는 3장에서 소개한 King-post mechanism을 수정한 Modified King-post mechanism의 모형과 수학적 모델을 살펴 보고 왜 이러한 시스템을 생각했는지에 대하여 소개한다. 5장에서는 3장과 4장에서 소개한 시스템을 비교하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치 해석을 수행한 후 그 결과를 분석하고 결론을 유추한다.

2. Classical Linear Optimal Control

제어 이론 중에서 가장 기본이 되고 기초적인 알고리즘인 classical linear optimal control theory에 대하여 살펴보고, 그 이론을 연속적인 시스템에 응용할 수 있도록 모우드 영역에 적용하였다.

2.1 이론적 배경

구조물을 이상화시켜 모델링하여 n 개의 자유도를 가지도록 했다면 그 수학적 표현은 식(1)과 같다.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = Du(t) + Ef(t) \quad (1)$$

여기서 $x(t)$ 는 n 차원의 변위 벡터이고, $f(t)$ 는 작용하는 하중이나 외력을 나타내는 r 차원의 하중 벡터이다. 또 M, C, K 는 각각 $(n \times n)$ 인 질량, 감쇠, 강성 행렬이고, D 는 제어력의 위치를 정의하는 $(n \times m)$ 인 위치 행렬, E 는 외력의 위치를 정의하는 $(n \times r)$ 인 위치 행렬이다. 상태 변수(state variable)를 도입하여 식(1)을 변환하면 식(2)와 같은 상태방정식(state-space equation)이 된다.

$$\dot{z}(t) = Az(t) + Bu(t) + Hf(t), \quad z(0) = z_0 \quad (2)$$

여기서 $z(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix}$ 는 $2n$ 차원의 상태 벡터, $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$ 는 $(2n \times 2n)$ 인

시스템 행렬, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D \end{bmatrix}$ 는 $(2n \times m)$ 인 제어력의 위치 행렬, $H = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{bmatrix}$ 는

$(2n \times r)$ 인 외력의 위치 행렬이다.

고전적 선형 최적 제어 이론에서 제어벡터 $u(t)$ 는 식(2)에 따라서 성능지수 (performance index) 또는 가격함수(cost function)라 정의된 식(3)을 최소화 시키는 값으로 선택한다.

$$J = J_1[z(t_0), z(t_f), t_0, t_f] + \int_0^{t_f} J_2(z, \dot{z}, u, \dot{u}, t) dt \quad (3)$$

위의 식(3)에서 첫번째 항 J_1 은 초기값과 마지막값으로 정의 되고, J_2 는 그 중간 과정의 값으로 정의된다. 그래서 식(3)을 최소화되도록 하면 초기값와 그 중간과정 뿐만 아니라 마지막 값도 최소화 되도록 제어 벡터를 결정할 수 있다.

식(3)에서 $t_0 = 0$ 라 하고 t_f 를 외력이 작용하는 시간보다 훨씬 길게 잡으면 식(3)의 첫번째 항인 J_1 은 0(zere)가 된다. 그리고 J_2 는 상태변수와 제어벡터의 2차식 (quadratic)으로 정의하면 식(4)와 같아진다.

$$J = \int_0^T [z^T(t)Qz(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (4)$$

여기서 Q 는 $(2n \times 2n)$ 의 positive semi-definite, R 는 $(m \times m)$ 의 positive definite인 가중 행렬(weighting matrices)이다. Q , R 행렬 속의 각각의 요소는 제어하는 목적에 따라 그 크기를 선택한다. Q 행렬의 요소에 큰 값을 할당하면 응답을 많이 줄일 수 있으나 제어력을 많이 쓰는 노력을 해야 하고, 반대로 R 행렬의 요소에 큰 값을 할당하면 제어력을 작게 잡을 수 있다. 그러므로 경제성을 고려하여 Q , R 행렬의 요소에 적절한 값을 정해야 한다.

이제 식(4)와 같이 정의된 최적제어 문제를 풀기 위하여 Lagrange multiplier $\lambda(t)$ 를 사용하여 식(5)와 같이 Lagrangian L 을 정의한다.

$$L = \int_0^T \left\{ z^T(t)Qz(t) + u^T(t)Ru(t) + \lambda^T(t)[Az(t) + Bu(t) + Hf(t) - \dot{z}(t)] \right\} dt \quad (5)$$

식(5)와 같이 정의된 Lagrangian을 상태변수와 제어벡터에 대하여 1차의 variation을 취하면 식(6)과 같이 된다.

$$\delta L = -\lambda^T(t_f)\delta z(t_f) + \lambda^T(0)\delta z(0) + \int_0^T \left[\left(\lambda^T \delta z + \frac{\partial H}{\partial z} \delta z + \frac{\partial H}{\partial u} \delta u \right) \right] dt \quad (6)$$

여기서 $H = z^T(t)Qz(t) + u^T(t)Ru(t) + \lambda^T(t)[Az(t) + Bu(t) + Hf(t) - \dot{z}(t)]$ 는 식(5)의 integrand로 정의된 Hamiltonian이다.

최적제어에서 필요한 조건식을 구하기 위하여 식(6)과 같이 구해진 variation을 0(zero)로 놓으면 다음과 같이 식(7), 식(8) 그리고 경계조건식인 식(9)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0, \quad 0 \leq t \leq t_f \quad (7)$$

$$\dot{\lambda}^T + \frac{\partial H}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

$$\lambda^T(t_f) = 0 \quad (9)$$

이렇게 구해진 식(7), 식(8), 식(9)는 최적제어를 위한 필요조건이다. 이 식들을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{\lambda}^T = -A^T\lambda - 2Qz, \quad \lambda(t_f) = 0 \quad (10)$$

$$u = -\frac{1}{2}R^{-1}B^T\lambda \quad (11)$$

그래서 식(2), 식(10), 식(11)로부터 최적해인 $z(t)$, $u(t)$, $\lambda(t)$ 를 구한다. 이러한 방정식은 $t=0$ 일 때의 $z(t)$ 값과 $t=t_f$ 일 때의 $\lambda(t)$ 값이 정의되어 있으므로 a two-point boundary value problem이라 부른다.

이때 이 제어 시스템을 closed-loop control이라 하면 제어벡터를 상태벡터로부터 구한다고 가정하게 되고, 식(12)와 같이 놓을 수 있다.

$$\lambda(t) = P(t)z(t) \quad (12)$$

여기서 미지의 행렬 $P(t)$ 를 Ricatti matrix라 부르는데, 이 $P(t)$ 를 결정하기 위해 외력 $f(t)$ 를 0, $P(t)$ 를 시간에 대하여 변하지 않는 행렬 P 라고 가정하고 식(12)에 식(2), 식(10), 식(11)를 대입하면 식(13)과 같은 Ricatti equation을 구해낼 수 있다.

$$PA - \frac{1}{2}PBR^{-1}B^T P + A^T P + 2Q = 0 \quad (13)$$

식(13)을 풀어서 행렬 P 를 구하여 식(12)를 식(11)에 대입하면 선형최적제어법칙(linear optimal control law)을 의미하는 식(14)를 얻을 수 있다.

$$u(t) = Gz(t) = -\frac{1}{2}R^{-1}B^T Pz(t) \quad (14)$$

여기서 $G = -\frac{1}{2}R^{-1}B^T P$ 는 control gain matrix이다.

식(14)를 식(2)에 대입하면 식(15)를 구한다.

$$\dot{z}(t) = (A + BG)z(t) + Hf(t), \quad z(0) = z_0 \quad (15)$$

식(15)를 시뮬레이션하면 모든 응답를 구해낼 수 있다.

2.2. Independent Modal-Space Control

앞 절에서 살펴본 linear optimal control theory를 연속적인 시스템에 적용해 보자.

먼저 연속적인 시스템을 수학적으로 모델링하면 식(16)과 같이 표현된다.

$$\ddot{w}(x,t) + M_1(x,D)\dot{w}(x,t) + M_2(x,D)w(x,t) = f(x,t) + q(x,t) \quad (16)$$

여기서 $w(x,t)$ 는 어떤 시각 t 일 때 x 점에서의 변위, $f(x,t)$ 는 외력, $q(x,t)$ 는 제어력을 나타내고, $M_i(x,D)$ 는 미분 연산자로 구조물의 물성치와 기하학적 형상에 따라 달라진다. 또 $D = \frac{\partial}{\partial x}$ 를 나타낸다.

연산자 M_1 과 M_2 의 k 번째 고유함수를 $w_k(x)$ 라 하면 이 고유함수 $w_k(x)$ 는 직교함수이므로 변위 $w(x,t)$, 외력 $f(x,t)$, 제어력 $q(x,t)$ 는 다음 식들로 표현된다.

$$w(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} w_k(x) z_k(t) \quad (17)$$

$$f(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} w_k(x) F_k(t) \quad (18)$$

$$q(x, t) = \sum_{i=1}^p q_i(t) \delta(x - x_i) = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \sum_{i=1}^p w_k(x_i) q_i(t) \right\} w_k(x) = \sum_{k=1}^{\infty} w_k(x) Q_k(t) \quad (19)$$

여기서 $z_k(t)$, $F_k(t)$, $Q_k(t)$ 는 temporal part로서 각 고유함수의 계수가 된다. 또 p 는 actuator의 갯수이다.

그리고 각각의 미분 연산자 $M_1(x, D)$ 에 대하여 고유치 문제를 풀어서 고유치를 구하면 식(20)과 같다.

$$M_1(x, D)w_k(x) = \lambda_k w_k(x), \quad M_2(x, D)w_k(x) = \nu_k w_k(x) \quad (20)$$

식(17) ~ 식(20)을 이용하여 각 모드에 대하여 식(16)을 정리하면 식(21)과 같이 표현된다.

$$\ddot{z}_k + \lambda_k \dot{z}_k + \nu_k z_k = F_k + Q_k \quad \text{for } k \text{ th-mode} \quad (21)$$

식(21)은 앞 절에서와 마찬가지로 상태방정식의 형태로 표현하면 각 모드에 대하여 식(22)와 같이 나타내어 진다.

$$\dot{\eta}_k(t) = A_k \eta_k(t) + Bu(t) + Hf_k(t) \quad (22)$$

여기서 $\eta_k(t) = \begin{bmatrix} z(t) \\ z(t) \end{bmatrix}$ 는 2 차원의 상태 벡터, $A_k = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -v^k & -\lambda^k \end{bmatrix}$ 는 (2×2) 인 시스템 행렬, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 는 (2×1) 인 제어력의 위치 행렬, $H = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 는 (2×1) 인 외력의 위치 행렬이다.

또한 앞 절에서와 마찬가지로 성능지수(performance index)를 정의하면 식(23)과 같다.

$$J_k = \int_0^T \left[\eta_k^T(t) Q_k \eta_k(t) + u_k^T(t) R u_k(t) \right] dt \quad (23)$$

각 모드에 대하여 식(23)으로 주어진 가격함수(cost function)를 최소화하도록 Riccati equation을 풀어 gain matrix를 구성한다. 이렇게 구성된 gain matrix를 이용하여 각 모드에 대한 temporal part를 줄이도록 제어한다.

이렇게 각 모드에 대하여 제어한 것은 식(24)에서 알 수 있는 것처럼 전체 모드에 대하여 가격함수를 줄인 효과가 있다.

$$\min J = \min \sum_{k=1}^{\infty} J_k \cong \sum_{k=1}^{\infty} \min J_k \quad (24)$$

그래서 전체적인 변위가 작아지도록 제어하면서 제어력도 줄일 수 있다.

3. King-Post Mechanism

이전까지 발전되어온 mechanism인 King-post mechanism은 아래의 그림.1과 같다.

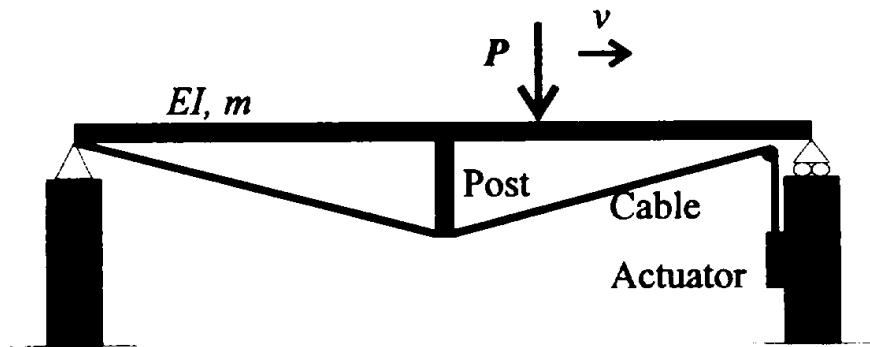


그림.1 King-post Mechanism

이 시스템의 수학적 모델링은 아래의 식(25)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} - 2\gamma \sqrt{\frac{EI}{m}} \frac{\partial^3 w(x,t)}{\partial x^2 \partial t} + \frac{EI}{m} \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} \\
 = -\frac{P}{m} \delta(x-vt) + \frac{2k_c \cos\alpha}{m} u(t) \delta\left(x - \frac{L}{2}\right)
 \end{aligned} \tag{25}$$

여기서 2.2절의 식(16)과 비교해 보면 $M_1 = -2\gamma \sqrt{\frac{EI}{m}} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$, $M_2 = \frac{EI}{m} \frac{\partial^4}{\partial x^4}$ 가 되고

이 미분 연산자의 고유함수를 다음과 같이 식(26)로 가정한다.

$$w_k = \sin(k\pi x/L) \quad (26)$$

이렇게 가정하는 이유는 적용하고자 하는 구조물이 다리이기 때문이다. 그러면 모우드 영역상에서 각 모우드에 대한 식은 식(27)으로 표현된다.

$$\ddot{z}_k + 2\gamma \sqrt{\frac{EI}{m}} \left(\frac{k\pi}{L}\right)^2 \dot{z}_k + \frac{EI}{m} \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4 z_k = -\frac{2P}{mL} \sin\left(\frac{k\pi}{L} vt\right) + \frac{4k_c \cos\alpha}{mL} u(t) \quad (27)$$

식(27)도 상태방정식으로 바뀌면 식(22)과 같다. 그래서 식(23)과 같이 성능지수를 구성하여 최적제어하면 된다.

4. Proposed Control Mechanism (Modified King-post Mechanism)

3장에서 소개되어진 King-post mechanism을 더욱 효율적이고 경제적이며 실제 구현가능한 시스템으로 수정보완한 것이 아래 그림.2와 같은 Modified King-post Mechanism이다. 경간의 길이가 길어지면 그림.1과 같은 구조로 시스템을 실제로 구성하기가 어렵기 때문에 이러한 점을 보완하였다.

또 post와 roller의 위치를 적절히 결정하면 생각이상으로 King-post mechanism보다 더욱 효율적이다.

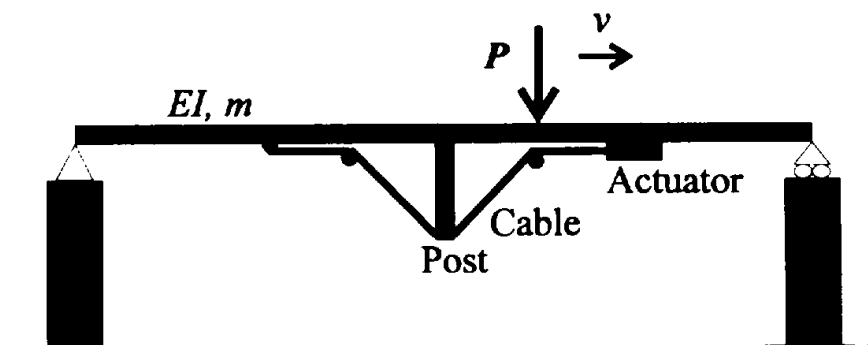


그림.2 Modified King-post Mechanism

이 시스템의 수학적 모델링은 아래의 식(28)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} - 2\gamma \sqrt{\frac{EI}{m}} \frac{\partial^3 w(x,t)}{\partial x^2 \partial t} + \frac{EI}{m} \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} \\ & = -\frac{P}{m} \delta(x-vt) + \frac{2k_c \cos\alpha}{m} u(t) \left\{ \delta(x-\alpha L) - \delta(x-\beta L) - \delta(x-(1-\beta)L) \right\} \end{aligned} \quad (28)$$

여기서 α 는 post의 위치를 나타내는 변수(parameter)로 αL 이 post의 위치이고, β 는 roller의 위치를 나타내는 변수이다.

앞 장과 마찬가지로 고유함수를 식(26)와 같이 가정하면 식(28)의 k th 모드에 대한 모드 방정식은 식(29)과 같다.

$$\begin{aligned} & \ddot{z}_k + 2\gamma \sqrt{\frac{EI}{m}} \left(\frac{k\pi}{L}\right)^2 \dot{z}_k + \frac{EI}{m} \left(\frac{k\pi}{L}\right)^4 z_k \\ & = -\frac{2P}{mL} \sin\left(\frac{k\pi}{L} vt\right) + \frac{4k_c \cos\alpha}{mL} u(t) \left\{ \sin(k\pi\alpha) - \sin(k\pi\beta) - \sin(k\pi(1-\beta)) \right\} \end{aligned} \quad (29)$$

식(28)도 상태방정식으로 바뀌면 식(22)과 같이 되고 식(23)과 같이 성능지수를 구성하여 최적제어하면 된다.

역학적으로 생각해 볼 때 post에 똑같은 힘이 작용한다고 가정하면 Modified king-post mechanism가 King-post mechanism보다 tendon에 더 적은 힘이 작용한다. 바

꾸어 말하면 똑같은 힘이 tendon에 작용한다고 하면 Modified king-post mechanism가 제어하기에 더 유리하다고 말할 수 있다.

5. 수치 해석

앞 장에서 제안된 시스템의 효율성을 검증하기 위해 simply supported single span bridge를 대상으로 3가지 예제에 대하여 수치해석을 수행하였다. 하중은 속도 v 를 가지는 이동하중을 사용했다.

Tendon은 초기에 인장을 주어 Actuator는 압축과 인장 모두 작용할 수 있다고 가정한다.

또 식(4)에서 소개되어진 Q, R 행렬의 요소는 식(30)와 같이 사용하였다.

$$Q = \begin{bmatrix} EI & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R = [\mu k_c] \quad (30)$$

여기서 행렬 Q, R 을 식(30)와 같이 잡은 이유는 단지 변위만을 대상으로 제어하기 때문이다. μ 는 제어 효과와 경제성의 상관관계를 정의하는 상대변수이다. 만약 $\mu = 0$ 라면 어떠한 노력이라도 들여 변위를 0(zero)로 만들고 $\mu = \infty$ 라면 제어를 하지 않는다는 것이다. 이 수치해석에서는 $\mu = 5.0$ 을 사용하였다.

5.1 Case I

이 예제에서는 제어하지 않는 경우와 제어하는 경우를 비교하고, 또 Modified king-post mechanism이 얼마나 효과적인가를 King-post mechanism과 비교하여 보여 준다. 물성치는 표.1과 같이 사용했다.

결과를 보면 그림.3-1, 3-2, 3-3과 같이 나타난다.

먼저 그림.3-1을 보면 제어하지 않은 경우는 제어변위가 0으로 나타난다. 그림.3-1에서 King-post mechanism과 Modified king-post mechanism의 경우를 비교하면 Modified king-post mechanism의 경우가 Actuator 끝단의 변위가 더 적게 나타난다.

표.1 Case I에서의 물성치

| | |
|------------|---|
| 밀도 | $\rho = 7851 \text{ kg/m}^3$ |
| 탄성계수 | $E = 2.04 \times 10^9 \text{ Pa}$ |
| 감쇠계수 | $\gamma = 1.24\%$ |
| 길이 | $L = 19.9 \text{ m}$ |
| 단면적 | $A = 0.0442 \text{ m}^2$ |
| 관성 모멘트 | $I = 25.063 \times 10^{-3} \text{ m}^4$ |
| tendon의 강성 | $k_c = 372 \text{ kPa}$ |
| 이동하중의 크기 | $P = 1000 \text{ N}$ |
| 이동하중의 속도 | $v = 144 \text{ km/h} = 40 \text{ m/s}$ |
| post의 위치 | $\alpha = 0.5$ |
| roller의 위치 | $\beta = 0.4$ |

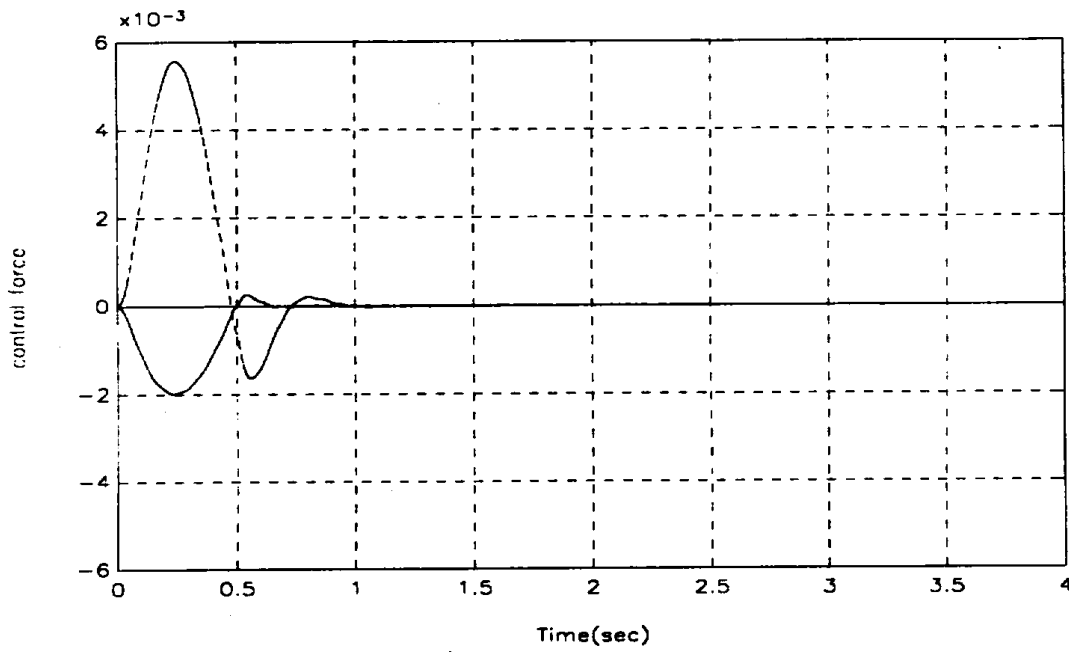


그림.3-1 Case I에서 Actuator 끝단의 변화

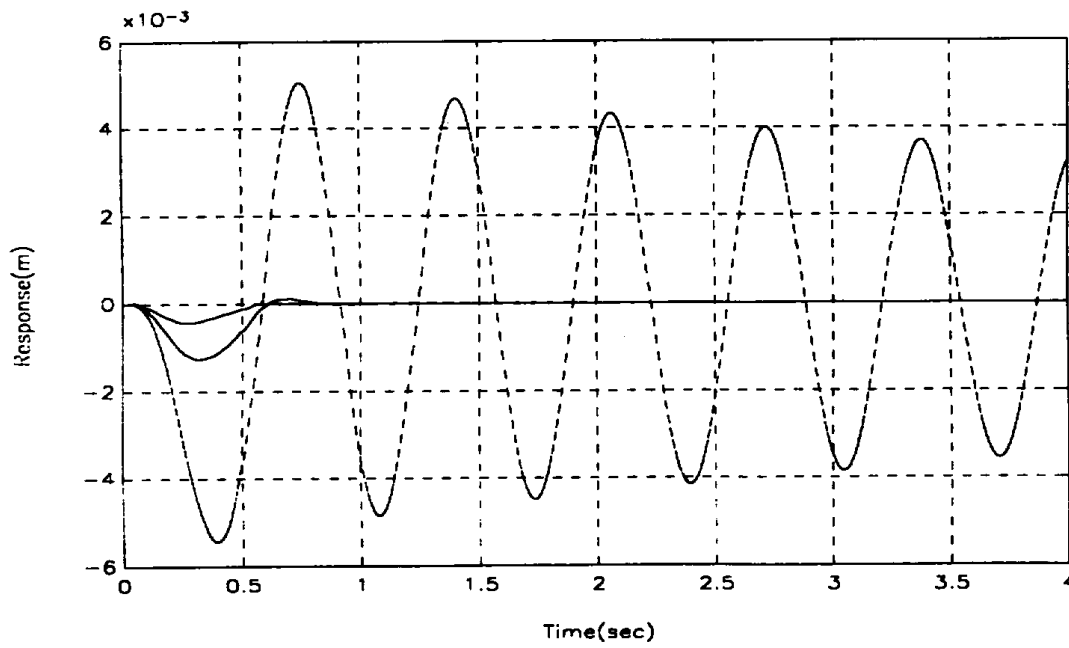


그림.3-2 Case I에서 변위 비교

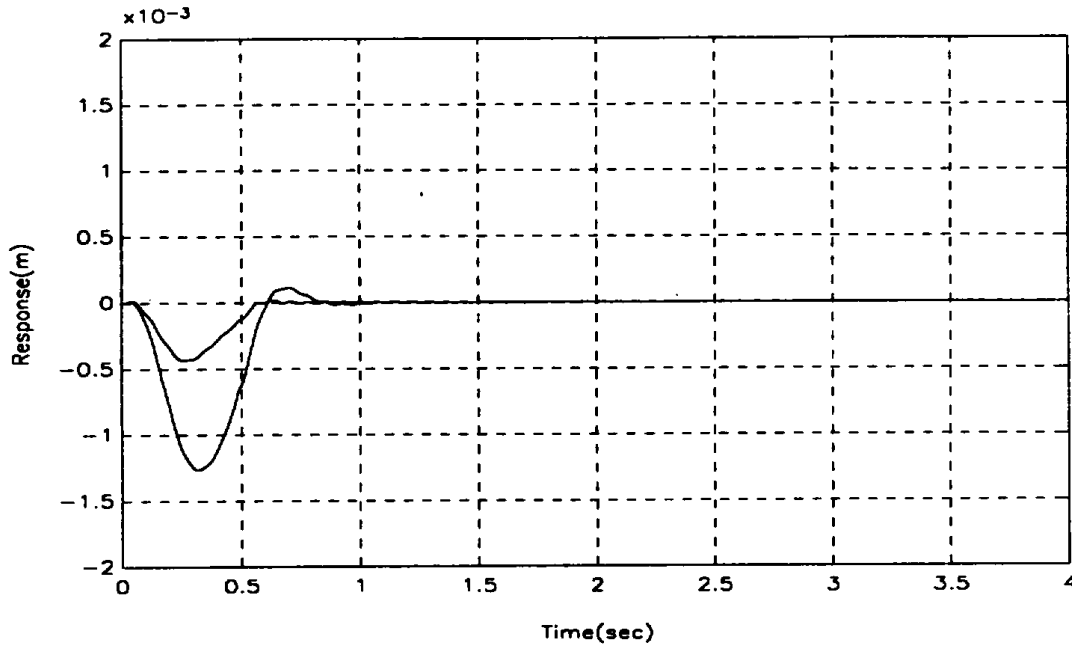


그림.3-3 Case I에서 제어하는 경우의 변위 비교

변위를 비교해보면 그림.3-2와 같이 나타나는데 크게 진동하는 것이 제어하지 않는 경우이고 작게 나타나는 두가지 경우가 제어하는 경우이다.

또 그림.3-3은 제어하는 경우만을 비교한 그림이다. 이 그림을 보면 Modified king-post mechanism가 King-post mechanism에 비하여 변위가 작게 나타남을 알 수 있다.

여기서 알 수 있는 것은 Modified king-post mechanism가 Actuator 끝단의 변위를 적게 발생하면서 더 효과적으로 제어하는 것을 알 수 있다.

5.2 Case II

이 예제는 대상구조물을 앞의 예제보다 더 유연한 구조물을 사용하여 제어하지 않는 경우와 제어하는 경우를 비교하고, 또 Modified king-post mechanism이 얼마나 효과적인가를 King-post mechanism과 비교하여 보여준다. 그래서 구조물이 더 유연할 때를 Case I과 비교해 볼 수 있다. 물성치는 표.2와 같이 사용했다.

결과를 보면그림.4-1, 4-2, 4-3과 같이 나타나는데, Case I과 비슷한 양상을 보여 준다. 이 예제를 Case I과 비교해 보면 구조물이 유연해지면 결과가 더 좋아짐을 알 수 있다.

표.2 Case II에서의 물성치

| | |
|------------|---------------------------------------|
| 밀도 | $\rho = 7851 \text{ kg/m}^3$ |
| 탄성계수 | $E = 2.04 \times 10^9 \text{ Pa}$ |
| 감쇠계수 | $\gamma = 1.24\%$ |
| 길이 | $L = 40.0\text{m}$ |
| 단면적 | $A = 0.0884\text{m}^2$ |
| 관성 모멘트 | $I = 50.126 \times 10^{-3}\text{m}^4$ |
| tendon의 강성 | $k_c = 372\text{kPa}$ |
| 이동하중의 크기 | $P = 1000\text{N}$ |
| 이동하중의 속도 | $v = 144 \text{ km/h} = 40\text{m/s}$ |
| post의 위치 | $\alpha = 0.5$ |
| roller의 위치 | $\beta = 0.4$ |

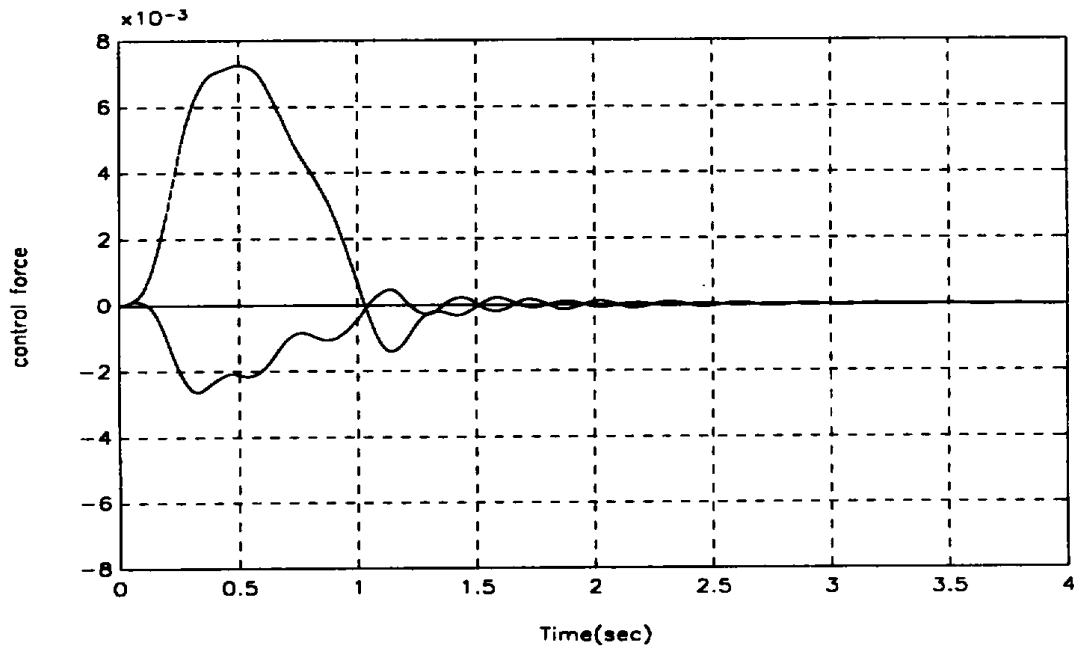


그림.4-1 Case II에서 Actuator 끝단의 변화

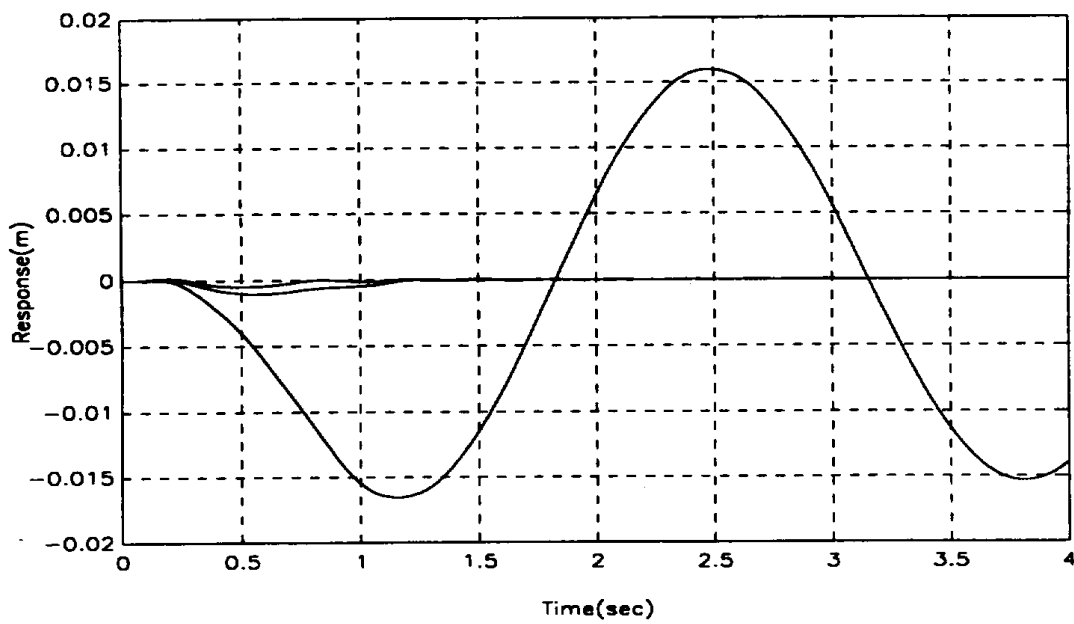


그림.4-2 Case II에서 변위 비교

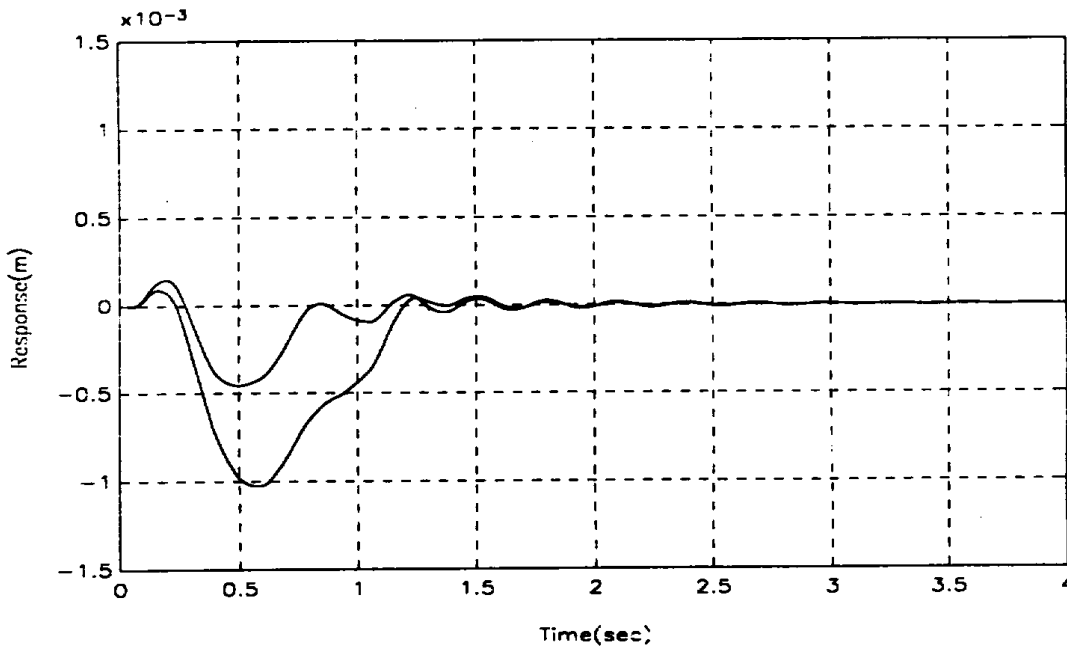


그림.4.3 Case II에서 제어하는 경우의 변위 비교

5.3 Case III

이 예제는 Case I과 같은 물성치를 사용하고 단지 post와 roller의 위치만을 조금 이동시켰다. 이 경우에 대해서 그 결과들을 비교해 본다.

결과는 그림.5-1, 5-2, 5-3과 같이 나타난다. Case I과 결과를 비교해 볼 때 Case III가 더 좋다는 것을 알 수 있다. 그 이유를 생각해 보면 하중이 한쪽에서 들어오기 때문에 post와 roller를 그쪽으로 이동시키기 때문에 결과가 더 좋아진다고 생각된다.

표.3 Case III에서의 물성치

| | |
|------------------------|---|
| 밀도 탄성계수 감쇠계수 | $\rho = 7851 \text{ kg/m}^3$ $E = 2.04 \times 10^9 \text{ Pa}$ $\gamma = 1.24\%$ |
| 길이 단면적 관성 모멘트 | $L = 19.9 \text{ m}$ $A = 0.0442 \text{ m}^2$ $I = 25.063 \times 10^{-3} \text{ m}^4$ |
| tendon의 강성 | $k_c = 372 \text{ kPa}$ |
| 이동하중의 크기 이동하중의 속도 | $P = 1000 \text{ N}$ $v = 144 \text{ km/h} = 40 \text{ m/s}$ |
| post의 위치 roller의 위치 | $\alpha = 0.47$ $\beta = 0.43$ |

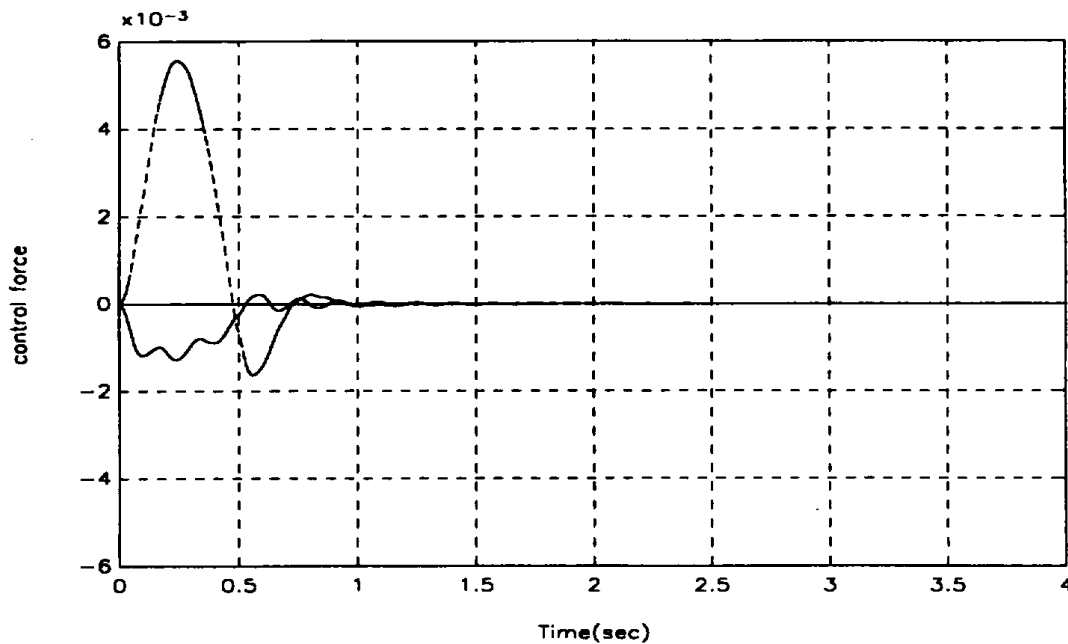


그림.5-1 Case III에서 Actuator 끝단의 변화

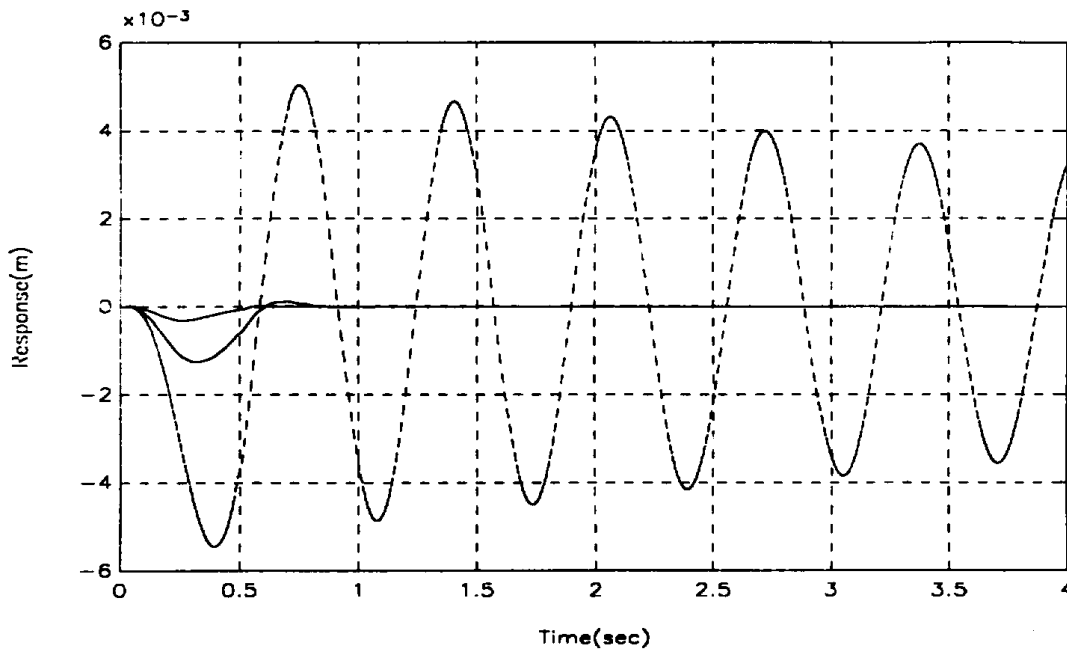


그림.5-2 Case III에서 변위 비교

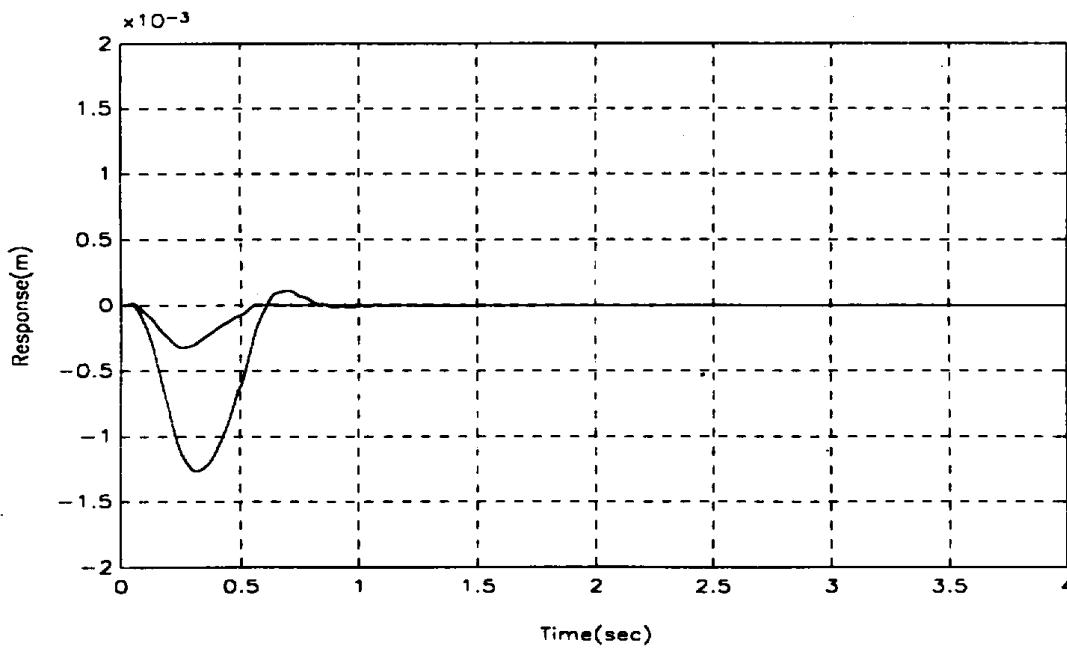


그림.5-3 Case III에서 제어하는 경우의 변위 비교

5.4 Discussion

앞의 예제들에서 King-post mechanism이나 Modified king-post Mechanism 모두 좋은 결과를 준다는 것을 알 수 있다. 특히 유연한 구조물에 더욱 효과적이다.

또 King-post mechanism보다는 Modified king-post Mechanism가 더 효과적임을 알 수 있다. Modified king-post mechanism이 King-post mechanism에 비하여 Actuator 끝단의 변위를 비교하면 약 60%, 다리의 변위를 보면 약 80% 감소함을 알 수 있다.

Modified king-post Mechanism에서 post나 roller의 위치를 적절히 조절해주면 더욱 좋은 결과를 준다.

6. 결 론

본 논문에서는 진동제어를 위한 새로운 시스템을 제안하였다. 이 시스템은 기존에 제안된 King-post Mechanism을 수정한 Modified king-post Mechanism이다. 이 Modified king-post Mechanism은 King-post Mechanism에 비하여 설치하기에 용이하다는 장점을 가진다.

수치해석의 결과에서 King-post Mechanism, Modified king-post Mechanism 모두 좋은 결과를 주지만 특히 Modified king-post Mechanism가 King-post Mechanism에 비해 제어 능력적인 면에서나 경제적인 면에서 훨씬 효과적임을 알 수 있다.

참고 문헌

1. T. T. Soong, 1990, **Active Structural Control : Theory and Practice**, *Longman Scientific & Technical*
2. L. Meirovitch, 1990, **Dynamic and Control of Structures**, *John Wiley & Sons, Inc.*
3. M. Abdel-Mooty and J. Roorda, **Optimal Configuration of Active-Control Mechanism**, *Journal of Engineering Mechanics*, 120(3), 535-555
4. J. Z. Cha, J. M. Pitarresi and T. T. Soong, 1987, **Optimal Design Procedures for Active Structures**, *Journal of Structural Engineering*, 114(12), 2710-2723
5. R. S. Esfandiari, I. S. Sadek, and J. M. Sloss, 1993, **Optimal Open-Closed Loop Control of Mechanical Systems with Structural Damping**, *Journal of Sound and Vibration*, 163(1), 47-56
6. 김 상범, 1993, 대형 구조물의 최적 진동 제어, 한국과학기술원 석사학위논문

감사의 글

지난 2년간을 되돌아보면 먼저 아쉬움이 남습니다. 조금만 더 열심히 했더라면 하는 ..., 이것이 마지막 학창생활이구나하는.... 그렇지만 후회는 없습니다. 나름대로 뜻깊은 시간들이었고 제자신이 더욱 성숙되는 시간이었습니다. 앞으로 제가 남은 삶을 살아갈 때 지난 2년간을 되돌아 보며 제자신을 더욱 채찍질해야 겠지요.

2년간의 결실로 이렇게 책 한권이 엮어졌습니다. 제가 이 작업을 무사히 끝낼 수 있도록 여러모로 도움을 주신 많은 분들께 어떻게 감사를 드려야 할지 모르겠습니다. 어쩌면 보잘것없고 초라해 보일지 모르지만 제 노력의 결실이며 많은 분들의 충고가 서려있습니다.

특히 못한 저의 가능성을 믿고 성심성의껏 지도해주신 이인원 교수님께 큰 감사를 드립니다. 이 은혜는 평생 잊지 못할 것입니다. 또 바쁘신 중에도 시간을 내어 이 논문을 심사해 주신 최창근 교수님, 윤정방 교수님께도 감사드립니다. 아울러 저에게 나아갈 길을 알려주신 모든 토목공학과 교수님들께도 감사드립니다.

지난 2년간 함께 생활하면서 많은 도움을 주신 실험실의 선배님들께 감사드립니다. 학업과 생활 모든 면에서 저를 이끌어 주신 길호형, 부족한 저에게 어떤 조언도 아끼지 않으신 동욱이형, 언제나 저를 따뜻하게 대해주신 만철이형, 언제나 제게 모범을 보이시는 호철이형, 날 걱정하며 애써준 형조, 부담없이 대해준 주태에게 감사하다는 말 드립니다. 또 저의 밑에서 고생한 현택, 환진에게 감사 전하며 좋은 논문 쓰길.... 그외 제게 도움주신 많은 토목과 선배님들과 동기, 후배들에게도 감사드립니다.

지금까지 우정과 사랑으로 서로를 아끼며 생활해온 많은 친구들에게도 감사드립니다. 경남과학고 동문 모두에게 행운이 함께하길 특히 나를 아껴준 진욱, 종화, 규찬, 필집에게 고맙다는 말 전하며, 2년간 동거동락한 주연이형에게 감사드립니다.

오늘 제가 있기까지 낳아주시고 길러주신 어머니에게 제일 큰 감사를 드려야 할 것 같습니다. 어머니께서 베풀어 주신 은혜에 보답할 길이 없어 항상 죄스럽고 송구스럽습니다. 앞으로 어머니 기대에 어긋나지 않는 아들이 되도록 노력하겠습니다. 저에게 무한한 상상력과 가능성을 주신 아버지 영전에 이 논문을 받칩니다. 또 항상 오빠때문에 뒷전이 되어진 동생 준희, 노심초사 제 걱정만 하시는 할머니, 그밖의 여러 친척분들께도 감사하단 말씀드립니다.

끝으로 사랑으로 제게 무한한 힘을 주는 주연이에게도 감사하단 말 전합니다.

이 력 서

성 명 : 김 준 형

생년월일 : 1971년 10월 25일

출 생 지 : 부 산

본 적 : 경상남도 양산군 원동면 원리 877번지

학 력

1990. 3 - 1994. 2 한국과학기술원 토목공학과 학사과정 (B. S.)

1994. 3 - 1996. 2 한국과학기술원 토목공학과 석사과정 (M. S.)