

# 고차 모드 불확실성을 고려한 지진응답의 강인제어

## Robust Control of Earthquake Responses Considering Higher Mode Uncertainty

고 현 무\*                      박 관 순\*\*                      박 원 석\*\*\*                      조 익 선\*\*\*\*  
Koh, Hyun Moo      Park, Kwan Soon      Park, Won Suk      Cho, Ik Sun

### 국문요약

구조물의 능동제어 시스템에서 제어기 설계에 사용되는 구조계의 모델과 실구조계의 차이는 시스템의 성능저하 및 불안정성을 유발할 수 있다. 이 연구에서는 무시된 고차모드와 같이 주파수영역에서 표현되는 비구조적 불확실성에 대하여 시스템의 안정성을 보장하도록 강인성을 가지는 LQG/LTR(linear-quadratic Gaussian with loop transfer recovery) 제어이론을 사용하여 구조물의 지진응답 제어에 효과적으로 사용할 수 있는 제어기 설계 방법을 제시한다. 특히 고층건물이나 교탑과 같은 구조물의 지진응답 제어에 적용할 수 있도록 각층의 절대 가속도를 측정변수로, 층간상대변위를 제어변수로 설정하여 최적제어기를 구성한다. El Centro 지진입력을 받는 6자유도 전단빌딩모델에 대하여 제어기를 설계하고 수치모사를 수행하여, 제시한 제어기가 안정도-강인성을 가지고 지진응답제어에 효과적임을 보인다.

**주요어** : 능동적 진동제어, 강인성, 불확실성, LQG/LTR, 가속도피드백, 층간상대변위

### ABSTRACT

In active structural control system, the difference between real structural system and a mathematical model of the structure can cause performance degradation or instability of the control system. This paper presents a robust controller design method for seismic response control of structures considering this modeling error. Robustness and stability against unstructured uncertainty such as ignored higher mode dynamics are achieved using the LQG/LTR(linear quadratic Gaussian with loop transfer recovery) method. For the effective seismic response control of buildings and tower structures, inter-story drifts and absolute accelerations are chosen as controlled variables and measured variables respectively. Numerical simulation results for a 6-story building excited by El Centro earthquake motions show the effectiveness and robustness of the proposed control algorithm for seismic response control of structures.

**Key words** : active vibration control, robustness, uncertainty, LQG/LTR, acceleration feedback, inter-story drifts

## 1. 서 론

구조물의 능동제어 시스템에서 제어기 설계에 사용되는 구조물의 동적 모델은 실제 구조물의 주요 동적 특성을 표현하는 단순하고 저차화된 모델이 일반적이다. 이러한 수학적 모델

은 실제 구조계의 불완전한 묘사이므로, 실 구조계의 거동과 제어기 설계에 사용된 동적 모델과의 사이에 모델링 오차가 존재한다. 이러한 모델링 오차는 전체 제어시스템의 성능을 저하시킬수 있으며, 불안정성을 유발하기도 한다(Balas<sup>(6)</sup>). 따라서, 제어기를 설계할 때 이러한 모델링 오차나 불확실성을 고려할 필요가 있으며(고현무 등<sup>(3)</sup>), 특히 지진응답 제어 문제와 같이 가진 주파수 대역이 넓고 구조물의 동적응답에 불확실성이 큰 경우는 이러한 불확실성 문제가 반드시 고려되어야 한다.

\* 정회원 · 서울대학교 토목공학 교수

\*\* 서울대학교 토목공학과 공학박사

\*\*\* 서울대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\*\* 서울대학교 토목공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2000년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

이 연구에서는 무시된 고차모우드 등 주파수 영역에서 표현되는 비구조적 불확실성(unstructured uncertainty)에 대하여 시스템의 안정성을 보장하도록 강인성(robustness)을 가지며 지진 응답을 감소시키는 제어알고리즘을 제시한다. 제어기의 설계에 있어서 설계 모델의 저차화(model reduction)에 따른 불확실한 동특성에 대하여 안정도-강인성을 갖도록 하기 위하여 LQG/LTR(linear-quadratic Gaussian with loop transfer recovery) 제어기법(Doyle 등<sup>(6)</sup>, 고현무 등<sup>(2)</sup>)을 사용한다. 설계변수인 가중행렬의 결정에 있어서는 지진응답의 효과적인 제어를 위하여, 중간상대변위를 제어변수(regulated output)로 설정하여 최적제어기를 구성한다. 이는 중간상대변위가 고층건물이나 교탑과 같은 고층구조물의 지진응답 제어시 구조물의 안정성에 영향을 미치는 중요한 요소이기 때문이다. 또한 제안된 방법에서는 일반적으로 제어에 필요한 변위와 속도 등의 상태변수를 측정변수로 사용하지 않고 구조물에의 용이한 적용을 고려하여 구조물의 절대 가속도만을 측정변수로 사용할 수 있도록 하였는데, 이는 상태변수의 직접적인 측정이 어렵고 별도의 실시간 계산과정이 요구되기도 하기 때문이다.

이 연구에서 사용한 알고리즘의 타당성과 제어효과를 검증하기 위하여 지진하중을 받는 6자유도 구조물에 대하여 제어기를 설계하고 수치모사를 수행하였다. 지반입력가속도로는 El Centro 지진(1940, NS)을 사용하였으며 일반적인 제어기설계방법과 해석결과를 비교함으로써 제안된 설계방법의 효율성을 검증하였다.

## 2. 불확실성에 대한 시스템의 안정도-강인성

제어시스템에서 고려하는 불확실성은 두 가지로 분류할 수 있다. 하나는 구조적 불확실성(structured uncertainty)으로서 시스템의 파라미터들의 변동이 여기에 속한다. 구조물의 경우 질량이나 강성, 감쇠행렬의 변화 등이 여기에 해당된다(고현무 등<sup>(3)</sup>). 또 다른 하나는 비구조

적 불확실성으로 주파수영역에서 표현되는 시스템의 불확실성으로서 고차시스템의 저차화에 따른 모델링오차, 센서잡음, 고려되지 못한 하중제하기의 동역학 등이 여기에 해당된다. 제어기의 설계시에는 수학적 모델의 자유도가 많을수록 실구조물과 유사한 거동을 보이게 되나 설계의 효율성이 떨어지며 제어기의 실제구현이 어려워진다. 따라서 일반적으로 모델의 차수를 감소시켜서 제어기를 설계하는 기법이 주로 사용되며, 저차화된 모델을 사용한 제어기는 시스템의 안정도를 확보할 수 있도록 설계되어야 한다. 여기에서는 오차에 따른 시스템의 안정도-강인성 조건과 바람직한 성능을 갖기 위한 시스템의 주파수역 성능을 기술한다.

### 2.1 시스템의 안정도

지진하중을 받으며 능동제어 시스템이 장착된 구조물의 상태방정식(state-space equation)과 출력방정식(output equation)은 다음 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{E}\ddot{\mathbf{x}}_g(t) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \quad (2)$$

여기서,  $\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{z}(t) \\ \dot{\mathbf{z}}(t) \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ -\mathbf{M}_s^{-1}\mathbf{K}_s & -\mathbf{M}_s^{-1}\mathbf{C}_s \end{bmatrix}$ ,

$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_s^{-1}\mathbf{E}_1 \end{bmatrix}$ ,  $\mathbf{E} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_s^{-1}\mathbf{E}_2 \end{bmatrix}$  이고,  $\mathbf{z}(t)$ ,  $\mathbf{u}(t)$

$\ddot{\mathbf{x}}_g(t)$ 는 각각 지반에 대한 각층의 상대변위벡터, 제어력벡터, 지반가속도 이며,  $\mathbf{M}_s$ ,  $\mathbf{C}_s$ ,  $\mathbf{K}_s$ 는 각각 질량, 감쇠, 강성 행렬이다. 그리고,  $\mathbf{E}_1$ ,  $\mathbf{E}_2$ 는 각각 제어력과 외란의 위치행렬이다.  $\mathbf{C}$ 와  $\mathbf{D}$ 는 출력변수의 선정에 따라 각각 정하여진다.

모델링오차에 대한 시스템의 안정도조건을 정의하기 위하여 저차화된 시스템을 다음 식 (3), (4)와 같이 가정한다.

$$\dot{\mathbf{x}}_r(t) = \mathbf{A}_r\mathbf{x}_r(t) + \mathbf{B}_r\mathbf{u}(t) \quad (3)$$

$$y_r(t) = C_r x_r(t) + D_r u(t) \quad (4)$$

여기서,  $x_r(t)$ 는  $r$ 차로 감소된 시스템의 상태 변수이며,  $A_r, B_r, C_r, D_r$  등은 저차 시스템의 시스템을 표현하는 행렬들이 된다. 저차화된 시스템의 전달함수행렬(TFM)을  $G_r(s)$ , 실제 구조 시스템의 TFM을  $G(s)$  라 하면, 모델링오차,  $\Delta(s)$  는 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며 그림 1 과 같이 표현된다.

$$\Delta(s) = G(s) - G_r(s) \quad (5)$$

이때 아래의 식 (6)과 같이 강인주파수,  $\omega$ , 를 정의하면, 제어루프의 대역폭  $\omega_b$ 와 관계된 모델링 오차에 대한 페루프 시스템의 안정성 조건을 나타낼 수 있다(식 (7)).

$$\omega_r = \max\{\omega \mid \sigma_{\min}[G_r(j\omega)] \geq \sigma_{\max}[\Delta(j\omega)]\} \quad (6)$$

$$\sigma_{\min}[G_r(j\omega)] \geq \sigma_{\max}[\Delta(j\omega)] \text{ for } \omega < \omega_b \quad (7)$$

여기서,  $\omega$ 는 주파수,  $\sigma_{\min}[\cdot], \sigma_{\max}[\cdot]$ 는 각각 최소 및 최대 특이값(singular value)을 의미한다. 그리고  $\omega_r$ 는 수학적 모델이 실제모델을 대체할 수 있는 가장 큰 주파수이고 대역폭,  $\omega_b$ 는 제어력이 발휘되는 최대 주파수를 의미한다. 이때 small gain theorem(Sanberg<sup>(8)</sup>, Zames<sup>(10)</sup>)에 의하여  $G_r(s)$ 와  $\Delta(s)$ 가 안정하고 식 (7)이 성립하며,  $\omega_b$ 가  $\omega_r$ 보다 작으면 제어장치가 설치

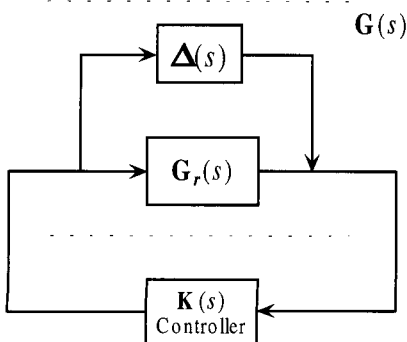


그림 1 모델링오차가 포함된 제어시스템

된 페루프시스템은 항상 안정하다. 즉, 수학적 모델이 실제 모델과 비슷한 영역( $\omega_b < \omega_r$ )에서만 제어력을 발휘하여 제어를 할 때 전체 시스템의 안정도는 보장 받는다는 의미이다. 이 조건은 구조-제어 시스템의 안정도를 평가할 수 있는 기준이 되며 강인성을 갖는 제어기의 설계에 활용할 수 있다.

## 2.2 제어시스템의 주파수역 성능

그림 1에서 루프전달함수행렬(loop transfer function matrix)  $T(s)$ , 감도전달함수(sensitivity transfer function)  $S(s)$ , 페루프전달함수  $C(s)$ 를 각각 정의하면 다음 식 (8), (9), (10)과 같다.

$$T(s) = G_r(s)K(s) \quad (8)$$

$$S(s) = [I + T(s)]^{-1} \quad (9)$$

$$C(s) = [I + T(s)]^{-1} T(s) \quad (10)$$

설계된 제어기가 좋은 명령추종 및 외란제거 성능을 가지려면 각각의 신호가 에너지를 갖는 주파수 역에서  $\sigma_{\min}[T(j\omega)]$ 이 커야 한다. 반면 불확실성에 대한 강인성과 센서잡음에 대한 저감도 성능을 좋게 하기 위해서는 센서잡음이 에너지를 갖는 주파수 역에서  $\sigma_{\max}[T(j\omega)]$ 이 작아야 한다. 그런데 감도전달함수행렬과 페루프 전달함수행렬사이에는 식 (11)이 만족하므로 위의 두 조건이 서로 상충함을 알 수 있다.

$$S(s) + C(s) = I \quad (11)$$

그러나 일반적으로 외부교란과 명령입력은 주로 저주파수 영역에서 높은 에너지 밀도를 갖는 반면, 설계모델의 저차화에 따른 모델링오차와 센서잡음 등에 의한 불확실성 등은 고주파수 영역에서 높은 에너지를 갖는 것으로 알려져 있다. 그러므로 주파수역성능이 좋은 시스템의 루프전달함수행렬의 형상을 그림 2와 같이 표현할 수 있으며 제어기 설계에 있어서 목표필터루프의 형상이 그림 2와 같은 루프형상

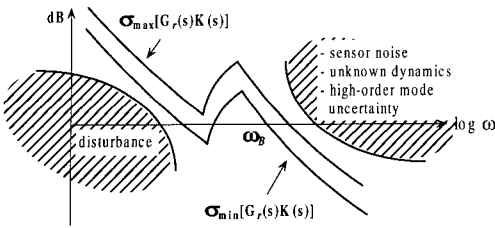


그림 2 주파수역 성능이 좋은 바람직한 루프형상

이 되도록 설계하는 것이 바람직하다.

### 3. 지진응답의 진동제어알고리즘

구조물의 진동제어를 위해 선형 최적제어 알고리즘을 사용할 경우, 일반적으로 측정변수로서 변위와 속도 등의 상태변수(state variable)를 사용할 때 최적의 제어 효과를 얻는다. 그러나, 구조물의 모든 자유도에 대한 변위와 속도는 직접적인 측정이 어려우므로, 제한된 출력 정보만을 사용하거나(고현무 등<sup>(1)</sup>) 관측기 등을 사용한 별도의 실시간 계산과정을 통해 상태변수를 추정하는 방법들이 사용된다. 이 연구에서는 실 구조물에의 용이한 적용을 고려하여 구조물의 절대 가속도만을 측정변수로 사용할 수 있도록 출력방정식(output equation)을 구성하였다. 일반적인 LQG/LTR 방법에서는 측정변수와 제어변수가 같도록 설계변수를 선정하는데, 이로 인해 제어하고자 하는 물리량은 반드시 측정 가능해야만 하는 단점이 있다. 그러나 이 연구에서는 지진응답의 최적제어를 위하여 층간상대변위를 제어변수로 설정하여 제어를 구성할 수 있도록 하였다.

#### 3.1 가속도피드백을 사용한 LQG/LTR

출력벡터를 각층의 상대가속도와 지반가속도의 합으로 표시하면 출력방정식을 상태변수의 조합으로 식 (12)와 같이 표현할 수 있으며 이 식을 사용하여 실제 각 층의 가속도만을 이용하여 제어를 구성할 수 있다.

$$y(t) = \ddot{z}(t) + \ddot{x}_g(t) \quad (12)$$

이때 식 (2)의 행렬은,  $C = [-M_s^{-1}K_s \quad -M_s^{-1}C_s]$ ,  $D = M_s^{-1}E_s$ 이다.

제어기설계에 있어서 식 (12)를 출력방정식으로 한 LQG/LTR기법을 적용하여 불확실성에 대한 강인제어를 설계한다. 먼저 식 (3), (4)와 같은 감소된 시스템에 대해서 시스템의 정상상태 오차를 0으로 만들기 위해서 다음 식 (13), (14), (15)와 같은 적분요소를 추가한 보상된 시스템을 구성한다.

$$\dot{u}_p(t) = u(t) \quad (13)$$

$$\dot{x}_a(t) = A_a x_a(t) + B_a u(t) + L \ddot{x}_g(t) \quad (14)$$

$$y(t) = C_a x_a(t) + \mu n(t) \quad (15)$$

$$\text{여기서, } x_a(t) = \begin{bmatrix} u_p(t) \\ x_r(t) \end{bmatrix}, A_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_r & A_r \end{bmatrix},$$

$$B_a = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}, C_a = [0 \quad C_r] \text{이며 행렬 } L \text{과 상수 } \mu \text{는}$$

설계 변수로 사용된다.

다음은 목표필터루프(target filter loop, TFL)를 설계한다. TFL의 전달함수 행렬은 다음 식 (16)과 같다.

$$G_F(s) = C_a (sI - A_a)^{-1} H \quad (16)$$

여기서, 필터 게인  $H$ 를 선정하기 위해서는 다음 식 (17)과 같은 필터대수 Riccati방정식(filter algebraic Riccati equation)을 풀어서  $P$ 를 구하고 이 값을 식(18)에 대입하여 구할 수 있다.

$$A_a P + P A_a^T + L L^T - \frac{1}{\mu} P C_a^T C_a P = 0 \quad (17)$$

$$H = \frac{1}{\mu} P C_a^T \quad (18)$$

이 때 행렬  $L$ 은 Kalman 필터 문제의 주파수 역 등가식을 통해서 유도된 식 (19)가 그림 2와 같은 바람직한 루프 형상이 되도록 선정한다.

$$G_F(s) \approx \frac{1}{\mu} C_a (sI - A_a)^{-1} L \quad (19)$$

그리고 설계변수  $\mu$ 는 요구되는 대역폭을 만족하도록 시행착오법에 의하여 결정한다.

마지막으로 루프전달회복(loop transfer recovery, LTR)과정을 수행한다. 이것은 보상된 설계플랜트의 루프전달함수를 주파수역 성능이 좋은 바람직한 목표필터루프로 수렴시키는 단계이다. 다음 식 (20)과 같은 제어대수 Riccati 방정식(control algebraic Riccati equation)을 통해  $K$ 를 구하고 이 값을 식 (21)에 대입하여 제어 게인  $G$ 를 구한다.

$$K A_a + A_a^T K + Q - \frac{1}{\rho} K B_a B_a^T K = 0 \quad (20)$$

$$G = \frac{1}{\rho} B_a^T K \quad (21)$$

여기서  $Q$ 는 설계변수로서 일반적으로  $Q = C_a^T C_a$ 가 사용되며(Athans 등<sup>(4)</sup>, 고현무 등<sup>(2)</sup>),  $\rho$ 를 조절하여 만족스러운 루프 전달회복이 이루어 지도록 반복계산을 수행한다.

### 3.2 층간상대변위 제어를 위한 설계변수의 결정

빌딩이나 타워형 구조물의 경우, 지진에 의하여 발생하는 층간상대변위는 중요한 제한조건이 된다. 이는 지진시 과도한 층간상대변위는 구조물의 파괴를 유발할 수 있기 때문이다. 이와 같이 제어의 관심 대상을 층간상대변위로 할 경우, 일반적인 LQG/LTR방법에서는 제어변수와 측정변수가 일치해야 하므로, 실제로 측정하기가 어려운 층간상대변위를 측정해야 한다. 그러나, 제안한 방법은 측정변수와 제어변수를 분리해서 제어를 설계하기 때문에 각 층의 절대가속도응답만을 가지고도 층간상대변위를 효과적으로 제어할 수가 있다. 그림 3과 그림 4는 일반적인 LQG/LTR방법과 제안한 LQG/LTR방법을 도식적으로 비교한 그림이다.

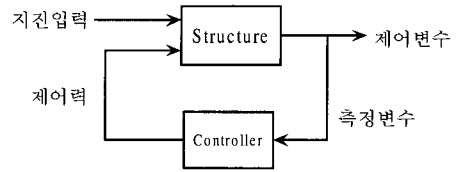


그림 3 일반적인 LQG/LTR 방법

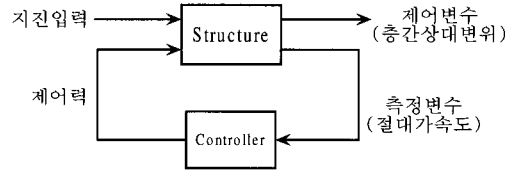


그림 4 제안한 LQG/LTR 방법

제안한 LQG/LTR방법은 다음과 같다. 먼저 제어변수로서 식 (22)와 같은 층간 상대변위 벡터,  $y_c(t)$ 를 선택하고 이에 해당하는 변환행렬  $C_q$ 를 구한다.

$$y_c(t) = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 - z_1 \\ \vdots \\ z_n - z_{n-1} \end{bmatrix} = C_q x_a(t) \quad (22)$$

여기서,  $z_i$ 는  $i$ 층의 지반운동에 대한 상대변위이다.

그리고 설계변수의 선정에 있어서 식 (23)을 사용하고, 식 (20), (21)을 이용하여 제어게인  $G$ 를 구한 뒤 루프전달회복과정을 수행하면 최적 제어기를 구할 수 있다.

$$Q = C_q^T C_q \quad (23)$$

### 4. 제어기설계와 수치모사

제어기설계 및 수치모사의 대상구조물로는 Schmitendorf 등이 사용한 실축척모델인 6자유도 전단빌딩모형(Schmitendorf 등<sup>(3)</sup>)을 사용하였으며 제어형식으로는 AMD(active mass damper)를 가정하여 6층에 제어력을 가하였다. (그림 5) 각 층의 질량, 감쇠, 강성은 동일하며 각각 345,600kg, 2,937kN · s/m, 3,404 × 10<sup>5</sup>kN/m이다.

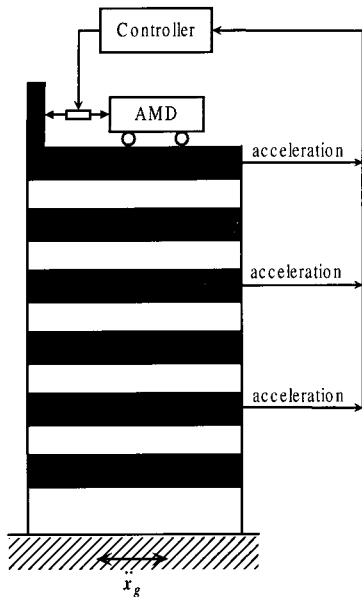


그림 5 해석대상구조물

제어시스템의 구성을 위한 입력정보로는 가속도 센서를 2층과 4층 그리고 6층에 설치하여 3개의 가속도 정보를 측정하여 활용할 수 있는 것으로 하였다. 그리고 해석대상 구조물의 고유진동수와 감쇠비는 다음 표 1과 같다.

표 1 예제 구조물의 동적 특성값

모우드	1차	2차	3차	4차	5차	6차
고유진동수(Hz)	1.20	3.54	5.67	7.48	8.85	9.70
감쇠비(%)	3.26	9.60	15.38	20.27	23.98	26.29

제어기 설계에 있어서는, 우선 총 12개의 상태변수를 가진 모델(실구조물)로부터 모델축소 기법의 하나인 balanced realization technique (Moore<sup>7)</sup>)을 사용하여 4개의 상태변수만을 갖도록 저차화된 모델을 구성하였다. 그리고 저차화된 모델에 대하여 LQG/LTR제어기법을 사용하여 제어기를 설계하였으며, 설계된 제어기를 12개의 상태변수를 가진 실구조물에 대하여 적용하여 수치모사를 수행하였다. 수치모사에 있어서 지반입력가속도로는 El Centro 지진입력(1940, NS)을 사용하였다.

첫번째 예로서 안정도-강인성 기준을 고려하

지 않고 제어기를 설계한 경우이다. 그림 6(a)와 그림 6(b)는 각각 루프전달함수의 특이값 및 축소모델과 모델링오차의 특이값을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 대역폭은  $\omega_b = 11.0Hz$ , 강인주파수는  $\omega_r = 4.8Hz$ 로써 대역폭은 강인주파수를 크게 초과하고 있으며 안정도-강인성조건을 만족시키지 못한다. 지진입력시 1층의 변위 응답을 그림 6(c)에 나타내었다. 응답의 초기에는 제어가 되는 듯하다가 발산함을 알 수 있다.

반면, 그림 7에서는 제시한 안정도-강인성 기준에 맞도록 설계된 결과를 나타내었다. 그림 7(a)와 그림 7(b)에서 대역폭과 강인주파수는 각각  $\omega_b = 4.23Hz$ ,  $\omega_r = 4.8Hz$ 로써 안정도-강인성조건을 만족하고 있다. 지진입력에 대한 1층의 시간이력응답을 그림 7(c)에 나타내었으며 제어가 잘 되고있음을 보여준다.

그림 6의 결과는 제진 성능을 높이하고자 제어기설계에 안정도-강인성을 고려하지 않고 루프게인을 지나치게 높였기 때문이다. 그림 7의 결과로부터 이 연구에서 사용한 제어기법은 안정도-강인성을 고려하며 효율적인 제어효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다

다음에는 상태변수를 측정변수와 제어변수로 하는 일반적인 LQG/LTR방법을 사용한 경우(case I)와 이 연구에서 제안한 가속도 응답을 측정하고, 층간상대변위를 제어변수로 하는 LQG/LTR방법을 사용한 경우(case II)를 서로 비교하였다. 먼저 각각의 경우에 대해서 결정된 설계변수와 **G**, **H**행렬은 다음 표 2와 같다.

그림 8에서 그림 10까지는 case I과 case II에 대하여 제어력, 층간상대변위 시간응답을 나타낸 것이다. 표 3에서는 이 결과를 정리하였다. 지진시 구조물의 안전에 큰 영향을 주는 요소인 층간상대변위에서는 6층-5층간 상대변위를 제외하고는 제안한 방법이 좋은 제진 성능을 나타내고 있으며 절대가속도응답에서도 6층의 응답을 제외하고는 모든 층에서 좋은 성능을 보여주었다.

제어기 설계에 있어서 두 경우의 비교를 위하여 사용하는 제어력의 크기를 비슷하도록 조정

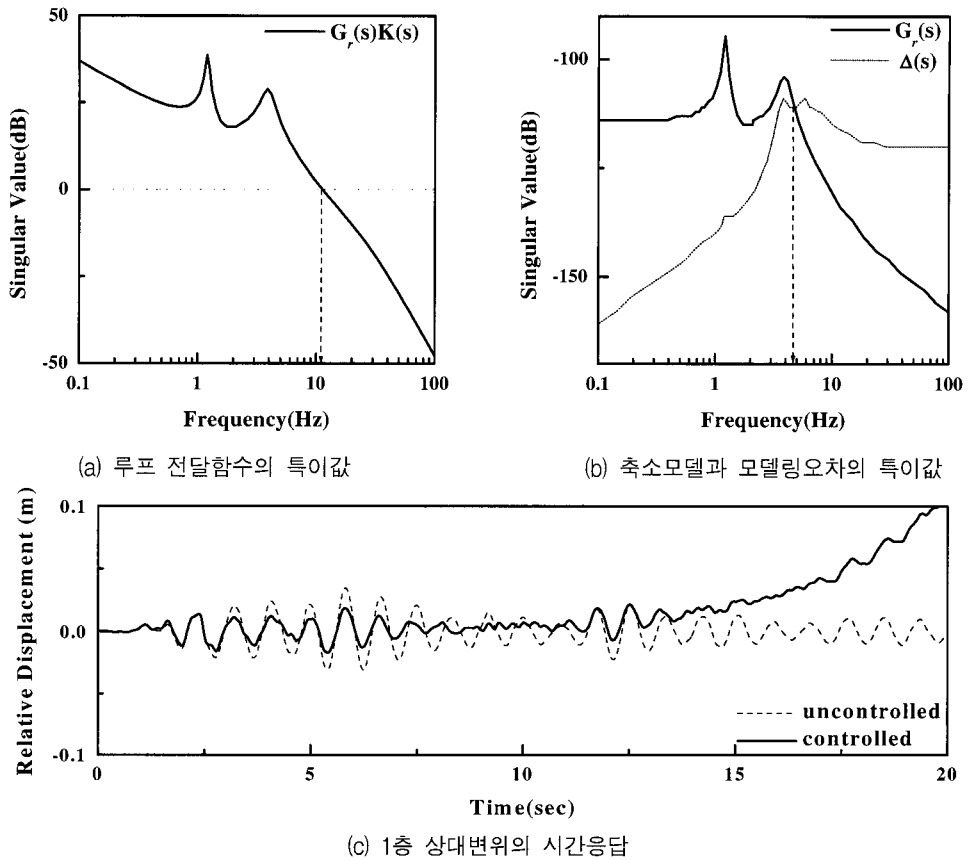


그림 6 안정도-강인성 기준을 만족하지 못한 설계 예

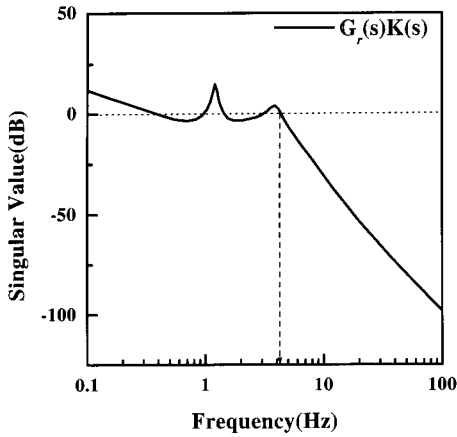
하였다. 평균제어력에 있어서 제안한 방법이 약 6.2%의 제어력을 더 사용하는 반면, 제어장치의 설치시에 필요한 하중재하기의 최대용량을 의미하는 최대제어력에 있어서는 약 5.5% 적게 요구됨을 알 수 있다.

## 5. 결 론

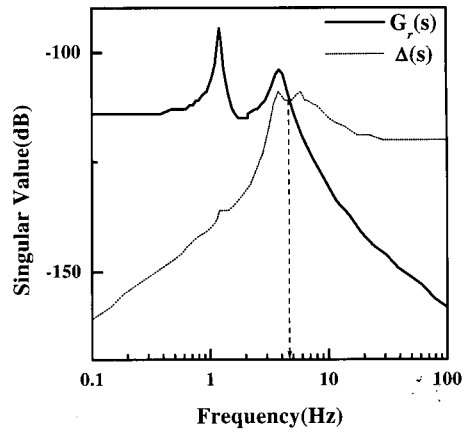
지진에 의하여 발생하는 진동의 능동적인 제어를 위한 시스템의 설계에 있어서, 모델의 저차화에 따른 불확실한 동특성에 대하여 안정도-강인성을 갖는 제어기의 설계방법을 제시하였다. 모델링 오차에 대한 강인성을 보장하고 실제 적용성을 높이기 위하여 가속도피드백을 사용한 LQG/LTR 제어기법을 적용하였으며 지진 응답의 최적제어를 위하여 층간상대변위를 제

어변수로 설정하여 제어기를 구성하였다.

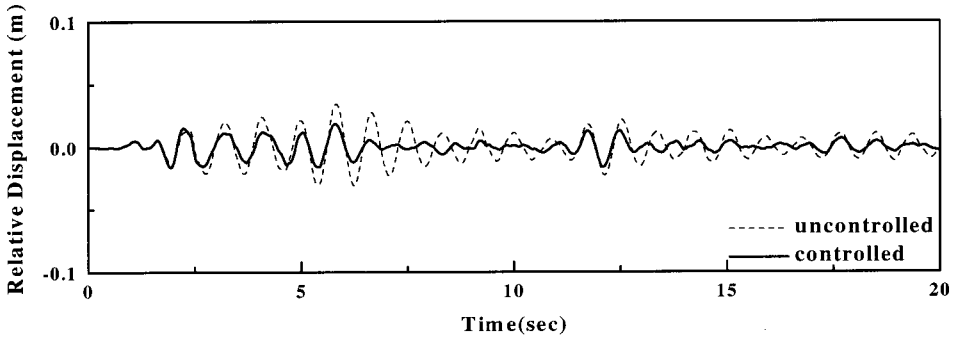
제안된 알고리즘의 효율성을 검증하기 위하여 El Centro 지진입력을 받는 6자유도 전단빌딩 모형에 대한 수치모사를 수행하였다. 수치모사 결과, 제안한 설계방법은 저차화된 모델과 가속도정보만을 사용하였음에도 불구하고 안정도-강인성 조건을 만족시키는 동시에 층간상대변위를 줄이는 제어효과를 발휘할 수 있음을 보여주었다. 12차로 표현된 실구조모델에 대하여 4차의 제어기를 구성함으로써 실시간 계산 속도에 대한 부담을 줄이고, 6개층 중에 3개층만의 절대가속도 정보만을 이용하여 제어기를 설계함으로써 사용된 방법의 유용성을 검증하였다. 층간상대변위를 제어변수로 설정하여 최적 제어기를 설계하고 구조물 상태를 최소화하는 제어기와 성능을 비교하였다. 제진 성능에



(a) 루프 전달함수의 특이값



(b) 축소모델과 모델링오차의 특이값



(c) 1층 상대변위의 시간응답

그림 7 안정도-강인성 기준을 만족하는 설계 예

표 2 설계 결과

Case I		Case II	
$\mu = 10^{-2} \quad \rho = 10^{-15}$		$\mu = 10^{-2} \quad \rho = 10^{-17}$	
$Q = 10^{-4} \times$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0530 & -0.0444 & -0.0376 & 0.0296 \\ 0 & -0.0444 & 0.0423 & 0.0049 & 0.0021 \\ 0 & -0.0376 & 0.0049 & 0.1712 & -0.1536 \\ 0 & 0.0296 & 0.0021 & -0.1536 & 0.1680 \end{bmatrix}$	$Q = 10^{-7} \times$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2538 & -0.2531 & -0.0119 & 0.0125 \\ 0 & -0.2531 & 0.2547 & -0.0096 & 0.0121 \\ 0 & -0.0119 & -0.0096 & 0.2100 & -0.2315 \\ 0 & 0.0125 & 0.0121 & -0.2315 & 0.2764 \end{bmatrix}$
$L = 10^5 \times$	$\begin{bmatrix} 0.6272 & -0.6243 & -4.9198 \\ -0.0007 & -0.0019 & -0.0014 \\ 0.0007 & 0.0020 & 0.0012 \\ 0.0035 & -0.0043 & 0.0019 \\ 0.0049 & -0.0031 & 0.0003 \end{bmatrix}$	$L = 10^5 \times$	$\begin{bmatrix} 0.6272 & -0.6243 & -4.9198 \\ -0.0007 & -0.0019 & -0.0014 \\ 0.0007 & 0.0020 & 0.0012 \\ 0.0035 & -0.0043 & 0.0019 \\ 0.0049 & -0.0031 & 0.0003 \end{bmatrix}$
$G = 10^4 \times$	$[0.0052 \quad 7.5092 \quad 5.1473 \quad -11.816 \quad -8.0702]$	$G = 10^4 \times$	$[0.0030 \quad 5.2481 \quad 4.0452 \quad -2.5003 \quad -3.5492]$
$H = 10^6 \times$	$\begin{bmatrix} -0.7015 & -1.3113 & -4.7717 \\ -0.0012 & -0.0018 & -0.0025 \\ 0.0012 & 0.0016 & 0.0010 \\ -0.0015 & -0.0036 & 0.0062 \\ 0.0017 & 0.0000 & -0.0002 \end{bmatrix}$	$H = 10^6 \times$	$\begin{bmatrix} -0.7015 & -1.3113 & -4.7717 \\ -0.0012 & -0.0018 & -0.0025 \\ 0.0012 & 0.0016 & 0.0010 \\ -0.0015 & -0.0036 & 0.0062 \\ 0.0017 & 0.0000 & -0.0002 \end{bmatrix}$



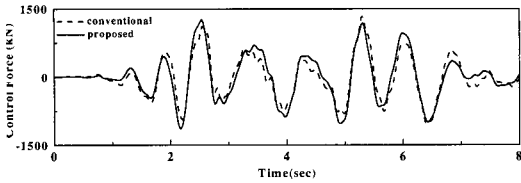


그림 8 제어력 비교

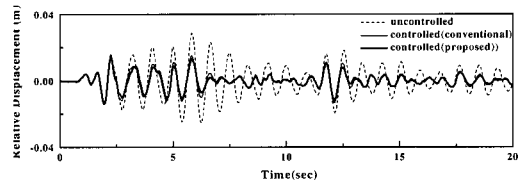


그림 10 3층-2층간 상대변위비교

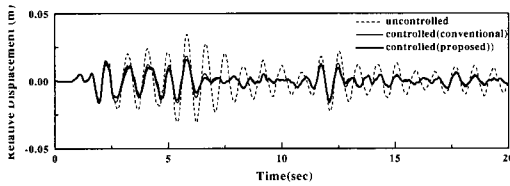


그림 9 1층-지반간 상대변위비교

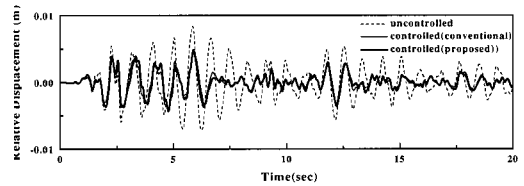


그림 11 6층-5층간 상대변위비교

표 3 지진하중에 대한 구조물의 응답

			비제어시	Case I	Case II	
층간 상대변위(mm)	1층-지반	RMS	9.74	4.99	4.40	
		최대값	34.41	18.41	16.02	
	2층-1층	RMS	9.13	4.67	4.13	
		최대값	32.45	17.39	15.70	
	3층-2층	RMS	8.03	4.08	3.63	
		최대값	28.73	15.87	14.31	
	4층-3층	RMS	6.48	3.25	2.94	
		최대값	23.07	13.41	12.07	
	5층-4층	RMS	4.56	2.24	2.09	
		최대값	16.22	9.38	8.45	
	6층-5층	RMS	2.36	1.18	1.22	
		최대값	8.41	4.49	4.85	
절대 가속도 (m/sec <sup>2</sup> )	2층	RMS	1.20	0.73	0.68	
		최대값	4.16	3.90	3.92	
	4층	RMS	1.92	1.09	0.96	
		최대값	7.13	4.20	4.00	
	6층	RMS	2.33	1.16	1.21	
		최대값	8.30	4.43	4.80	
제어력(kN)			RMS	-	304.04	323.08
			최대값	-	1327.34	1258.42

있어서 두 제어기는 큰 차이를 보이지 않았지만, 최대제어력 및 최대층간상대변위값에서 제시한 방법이 다소 향상된 값을 나타내었으며, 구조물 지진응답 제어에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

### 감사의 글

이 연구는 두번째 저자에 대한 한국학술진흥재단의 '98 박사후연수과정연구지원으로 이루어 졌으므로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 고현무, 박관순, 박원석, "설계제한조건이 고려된 출력되먹임 최적제어에 의한 구조물 진동의 능동제어", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제15권 제6호, 1995, pp. 1535-1544.
2. 고현무, 박관순, 박원석, 이규석, "플러터의 능동제어를 위한 안정도-강인성을 갖는 제어기 설계", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, 1997, pp. 257-260.
3. 고현무, 박관순, 박원석, " $H_{\infty}$ 제어이론과 Bilinear transform을 적용한 불확실한 구조계의 능동적 진동제어", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제19권 제I-6호, 1999, pp. 241-252.
4. Athans, M., Kapsouris, P., Kappos, E., and Spang III, H. A., "Linear-quadratic Gaussian with loop-transfer recovery methodology for the F-100 engine," *Journal of Guidance and Control*, Vol. 9, No. 1, 1986, pp. 45-52.
5. Balas, G. J., "Active control of flexible systems," *Journal of Optimization Theory and Application*, Vol. 25, 1978, pp. 415-436.
6. Doyle, J. C. and Stein, G., "Multivariable feedback design; concepts for a classical/modern synthesis," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-26, 1981, pp. 4-16.
7. Moore, B., "Principal component analysis in linear systems: controllability, observability, and model reduction," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-26, No. 1, 1981, pp. 17-32.
8. Sandberg, I. W., "On the  $L^2$ -boundedness of solutions of nonlinear functional equations," *Bell Syst. Tech. J.*, Vol. 43, 1964, pp. 1581-1599.
9. Schmitendorf, W. E., Jabbari, F., and Yang, J. N., "Robust control techniques for buildings under earthquake excitation," *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 23, No. 5, 1994, pp. 539-552.
10. Zames, G., "On the input-output stability of time-varying nonlinear feed-back systems, Parts I and II," *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-11, 2&3, 1966, pp. 228-238 & 465-476.