

지진을 받는 다자유도 건물의 μ 합성 제어기 설계 및 검증실험

μ -Synthesis Controller Design and Experimental Verification for a Seismic-excited MDOF Building

민 경 원^{*} 주 석 준^{**} 이 영 철^{***}
Min, Kyung Won Joo, Seok Jun Lee, Young Cheol

국문요약

이 논문은 지진을 받는 축소 3층 건물모델의 제어 실험에 관한 것이다. 건물모델에 대해 능동 질량 감쇠기를 사용하여 강인제어기인 μ 합성 제어기를 설계하고 실험적으로 검증하였다. 외란 입력과 제어용 출력에 적합한 주파수 가중함수를 설정하고 가중함수의 조합을 분석하여 최적의 μ 합성 제어기를 제시하였다. 실험 결과 백색잡음 가진 입력에 대한 RMS 응답에서 60-70%의 감소를 보여주었고, 축소 지진 입력에 대한 최대 응답에서 30-45% 정도의 감소효과를 나타내었다. 수치해석결과와 실험의 결과가 매우 정확히 일치하였으며 불확실성을 갖는 구조물에 대하여 제어기가 불확실성의 범위 내에서 강인하다는 것을 보여주었다.

주요어 : μ 합성제어기, 실험적 검증, 강인제어

ABSTRACT

This study is on the structural control experiment for a small scale three-story building structure employing an active mass damper subjected to earthquake loading. μ -synthesis controllers, which belong to robust control strategies, were designed and their performance were experimentally verified. Frequency-dependent weighting functions corresponding to disturbance input and controlled output were defined and combined to produce optimal μ -synthesis controllers. The experiment result shows 60-70% reduction in RMS responses under the band-limited white noise excitation and 30-45% reduction in peak responses under the scaled earthquake excitations. Good agreement was obtained between the simulations based on the identified mathematical model and experimental results. And the simulations for the system with uncertainties show that the designed controllers are robust within a specified range of uncertainties.

Key words : μ -synthesis controller, Experimental verification, Robust control

1. 서 론

1960년대 초 현대 제어 이론의 탄생으로 최적 제어 시스템의 설계와 최적성이 지배적인 관심의 대상이 되었다. 이 시기의 최대의 연구 성과는 LQG 제어이다. 그러나 LQG 제어는 많은 실제 환경에서 제대로 작동되지 못함으로써 실제 적용이라는 제어시스템 연구자들의 주요 목적을 충족시키지 못하였다. LQG 제어의 가장 중요한 문제점은 강인성의 부족이다. 제어기 설계에 사용된 플랜트의 수학적 모델과 실제 플랜트 사이의 오차로 인해 LQG 제어를 사용한 시스템이 불안정해 질 수 있다는 것이다. 이것은 최적성을 지나치게 강조한 나머지 모델의 불확실성에 대한 충분한 고려가 결여되었기 때문이다.⁽¹⁾

1980년대에 이르러 새로운 제어개념으로 H_∞ 제어 이론이 등장하였다. G. Zames에 의해 제안된 감도 최소화 문제에 의해 유발된 H_∞ 제어 문제는 주파수 영역에서의 성능 평가에 의거하는 것이다.⁽²⁾ H_∞ 제어 문제는 제어 성능을 정량적으로 측정하는 평가함수로서 외란과 제어하고자 하는 응답 사이의 전달함수의 ∞ -놈을 사용하며 이것을 최소화하

는 것으로, 일정 정도의 플랜트의 불확실성에 대하여 시스템의 안정성을 보장하여 준다. 그러나 H_∞ 제어는 일반적으로 플랜트의 불확실성에 대하여 보수적인 설계가 되기 쉽다. H_∞ 제어와 같은 시기에 등장한 μ -synthesis 제어는 플랜트의 불확실성을 정량적으로 다룰 수 있으며 보다 경제적인 설계가 가능하게 해 준다. 또한 불확실성에 대한 제어시스템의 안정성과 성능 사양(performance specification)을 동시에 만족하는 강인 성능을 보장해 준다.⁽³⁾ H_∞ -synthesis 제어기의 설계는 강인 성능에 대한 평가 함수로 설정된 구조화된 특이치(structured singular value, 이하 SSV)를 최소화하는 제어기를 찾는 과정으로 D-K 반복에 의하여 가능하다. 일반적으로 제어기의 차수가 매우 높으므로 강인 성능을 만족하면서 차수가 감소된 응축 제어기(reduced order controller)를 구하여 사용하게 된다.⁽⁴⁾ 그러나 이론적인 연구 성과에 비하여 실험에 의한 연구 성과는 아직 미흡한 실정이다. 특히 실험을 통한 연구가 제어효과의 확인에 국한된 것으로 실험결과와 수치모사 결과를 결합시키는 수치해석모델에 대한 성과가 부족하다. 이로 인하여 실제 구조물에 제어 기법을 적용하기 위한 전단계로서 실제 적용 과정에서 발생할 수 있는 전기, 기계적인 문제점들을 파악하고 성능 요구조건을 충족시키기 위한 제어기의 용량을 결정해주는 실험의 실질적인 의미를 발견하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 AMD(Active Mass Driver)가 설치

* 단국대학교 건축공학과 부교수(대표저자 : kwmin@dankook.ac.kr)

** (주)티이솔루션 부장

*** 단국대학교 건축공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2002년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2002. 10. 15 / 심사종료일 : 2002. 11. 12)

된 3층 모델건물을 대상으로 불확실성에 관한 주파수 가중 함수를 설정하고 μ -synthesis 제어기를 설계한다. 그리고 설계된 제어기로 진동대 실험을 수행한 후 수치모사 결과와 비교 하여 이를 바탕으로 새로운 제어 알고리즘의 효율성과 적용가능성을 검증한다. AMD와 3층 모델건물의 수학적 모델은 시스템 식별을 통한 시스템 행렬을 이용하기로 한다.

2. μ -합성 제어 이론

일반적으로 플랜트에 요구되는 성능 사양을 만족시키면서 제어 시스템의 강인 안정성을 보장하는 강인 성능은 최대 SSV를 최소화함으로써 가능하다. SSV해석을 위한 전달 함수는 가상의 성능 블록을 플랜트에 추가함으로써 얻을 수 있다. 이러한 폐회로 전달함수의 구조화된 특이치를 최소화하는 과정을 μ -synthesis라고 한다. H_∞ 제어기의 설계는 μ -synthesis 설계 과정의 첫 단계를 구성하게 된다.

강인 성능은 섭동을 포함한 시스템의 구조화된 특이치를 이용하여 평가할 수 있다. 그림 1과 같은 정규화된 성능 사양과 섭동을 가진 표준 형태의 시스템이 강인 성능을 가지기 위한 필요 충분 조건은 다음과 같다.

$$\sup_{\omega} \{\mu_{\bar{\Delta}}[N(j\omega)]\} < 1 \quad (1)$$

여기서 공칭 폐회로 시스템 $N(s)$ 는 $P(s)$ 와 $K(s)$ 를 결합하여 구하게 된다. 구조화된 섭동 Δ 는 그림 1의 섭동 블록의 대각 전달행렬로 표현된다. \sup 는 상한치(supremum), 위 식의 $\{ \}$ 의 항은 SSV이다. 이것은 시스템의 루프 전달함수의 ∞ -놈이 1보다 작으면 시스템이 내부 안정하게 됨을 의미한다. small-gain 이론으로 알려져 있는 이 결과로부터 제한된 크기의 섭동에 대한 강인 안정성을 검사할 수 있다.⁽⁴⁾

따라서, μ -synthesis 제어기 설계는 다음의 비용함수를 최소화하는 것이라 볼 수 있다.

$$J = \sup_{\omega} \{\mu_{\bar{\Delta}}[N(j\omega)]\} \quad (2)$$

그러나 식 (2)의 비용함수를 직접 최소화하는 것이 매우 어렵기 때문에 하나의 대안으로 다음의 구조화된 특이치의 상한치를 최소화하게 된다.

$$J = \sup_{\omega} \min_{\substack{d_1, d_2, \dots, d_p \\ d_i \in (0, \infty)}} \bar{\sigma}[D_R(j\omega)N(j\omega)D_L^{-1}(j\omega)] \quad (3)$$

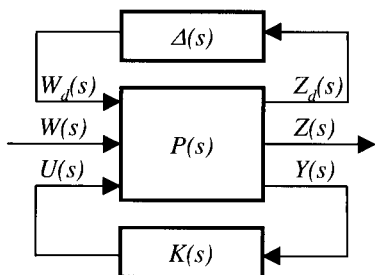


그림 1 플랜트 P-제어기 K-섭동으로 표현된 블록

여기서 D-스케일은 주파수에 따라 달라진다. 식 (3)의 비용 함수는 D-K 반복에 의하여 최소화된다. 이 알고리즘은 D-스케일이 주어진 경우 식 (3)의 비용함수의 최소화는 다음과 같은 ∞ -놈의 최적화 문제가 되는 것에 기초하고 있다.

$$J = \sup_{\omega} \bar{\sigma}[D_R(j\omega)N(j\omega)D_L^{-1}(j\omega)] = \|D_R(j\omega)N(j\omega)D_L^{-1}(j\omega)\|_{\infty} \quad (4)$$

위 식의 D-스케일은 고정된 것이 아니라 폐회로 모델에 따라 달라지며, 폐회로 모델은 제어기에 따라 결정되게 된다. D-K 반복은 ∞ -놈의 최적화와 D-스케일의 최적화를 교차로 수행하여 이러한 문제를 극복하게 된다.⁽⁵⁾ 이 알고리즘은 일반적으로 전역 최소값(global minimum)으로의 수렴을 보장하지 못하지만 성능 및 섭동 블록의 개수가 3이하일 때는 비용함수 식 (2)의 전역 최소값을 제공해 준다. 또한 몇 단계 이내에 비용함수의 최소값을 구할 수 있게 해 준다.

3. 제어기 설계

3.1 플랜트 설계

그림 2은 제어실험 시스템에서 진동대와 3층 건물모형, AMD가 결합된 모습을 보여준다. AMD는 건물의 3층에 설치되었으며 진동대, AMD, 1층, 2층, 3층에 설치된 가속도계에서 계측한 신호를 이용하여 진동제어신호를 설계하여 AMD를 구동하게 된다. 이러한 과정은 실시간으로 진행되며 건물 모형의 주기가 계측시간 간격보다 매우 크기 때문에 시간지연의 영향은 무시할 수 있다. 진동제어신호를 설계하기 위해서는 건물-AMD 시스템의 수학적 모델을 구하여야 한다. 그림 2와 같은 건물-AMD 시스템의 시스템 식별을 통하여 구한 시스템 행렬을 이용하기로 한다.⁽⁶⁾ 표 1은 모델 응축된 건물모델의 동적특성을 나타낸다.

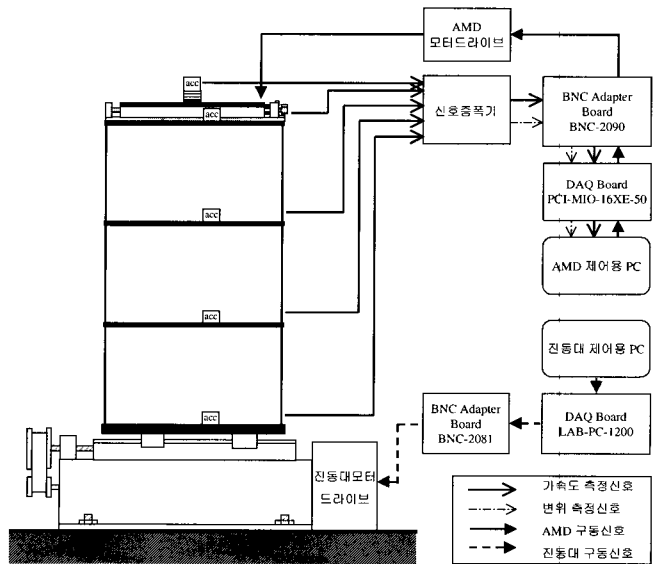


그림 2 실험시스템의 구성

표 1 모델 응축된 건물모델의 동적특성

구 분	고유주파수(Hz)	감쇠비(%)
1차 모드	2.7930	1.0373
2차 모드	7.8682	1.3392
3차 모드	12.2095	1.7535

제어의 대상이 되는 플랜트는 다음의 상태 공간 방정식, 제어방정식, 출력방정식으로 표현된다.

$$\dot{x} = Ax + B_1w + B_2u \tag{5}$$

$$z = C_1x + D_{11}w + D_{12}u \tag{6}$$

$$y = C_2x + D_{21}w + D_{22}u \tag{7}$$

제어기의 설계를 위해서는 우선 제어 대상이 되는 플랜트와 제어기에 요구되는 성능 사양을 명확히 하여야 하며, 이를 제어기 설계를 위한 기본 구조에 포함시키게 된다. μ -synthesis 제어기는 이러한 기본 구조로 불확실성이 있는 피드백 시스템의 표준형을 사용한다. 그림 3은 3층 건물모형-AMD시스템에 불확실성을 고려한 섭동블록을 추가시킨 블록 다이어그램이다. 여기서 플랜트는 건물 모델과 AMD를 비롯하여 제어기의 성능을 향상시키기 위한 여러 가지 가중함수를 포함하고 있으며, 섭동 Δ 와 제어기 K 는 각각 플랜트와 루프를 형성하고 있다. w_g 는 건물모델에 대한 지반가속도 입력을 나타내며, w_s 는 측정신호에 포함된 센서잡음을 의미한다. 플랜트에 대한 외란입력 w 는 $[w_g, w_s]^T$ 로 구성된다. z_a 는 가중치가 부가된 3층의 절대가속도를, z_u 는 가중치가 부가된 모터 입력신호를 각각 나타낸다. 제어의 목표가 되는 제어출력 z 는 $[z_a, z_u]^T$ 로 구성되며, 이것은 건물모델의 가속도응답을 최소화하면서 이때 소요되는 되는

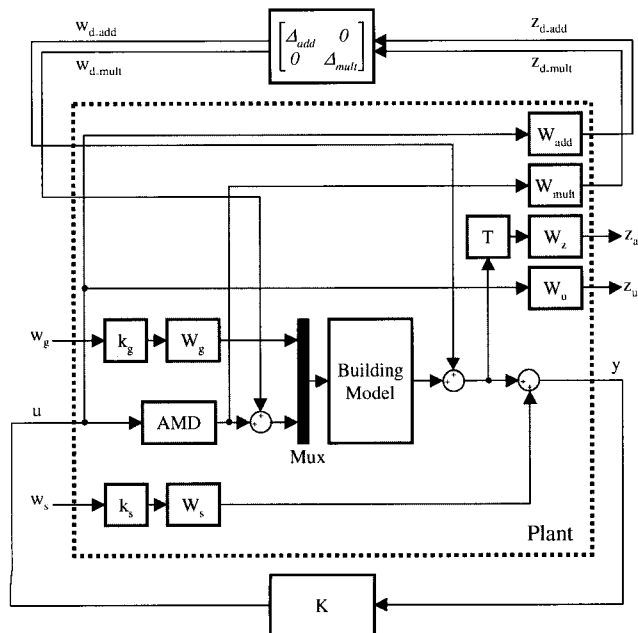


그림 3 지진 응답 제어의 블록 다이어그램

제어력을 동시에 최소화하게 하여 일종의 트레이드-오프 문제를 발생시킨다. y 는 외란 입력에 대한 건물모델의 응답을 나타내며, 제어력 산정을 위해 피드백 된다. u 는 피드백 되어진 y 로부터 산정된 모터 입력 신호로서 제어입력에 해당한다. z_{d_add} 와 z_{d_mult} 는 플랜트에 모델링된 덧셈적 불확실성과 곱셈적 불확실성에 해당되는 섭동 출력으로 섭동에 대해서는 입력이 된다. w_{d_add} 와 w_{d_mult} 는 플랜트에 대한 섭동 입력으로 섭동에 대해서는 출력이 된다. μ -synthesis 제어기에 사용되는 H_∞ 필터는 외란 입력에 대한 항을 포함하지 않으므로 제어기 설계에 고려되는 섭동은 제어입력과 제어출력 사이에만 존재하는 것으로 모델링 하였다.

그림 4는 그림 3의 일반화된 플랜트의 입력과 출력을 정리한 것으로 입력은 섭동입력 w_d , 외란입력 w , 그리고 제어입력 u 를 포함하며 출력은 섭동출력 z_d , 제어출력 z , 그리고 측정출력 y 를 포함한다. 이 플랜트의 상태방정식은 MATLAB SIMULINK TOOLBOX를 이용하여 구하였으며, 이를 위한 SIMULINK 모델은 그림 5와 같다.⁽⁷⁾

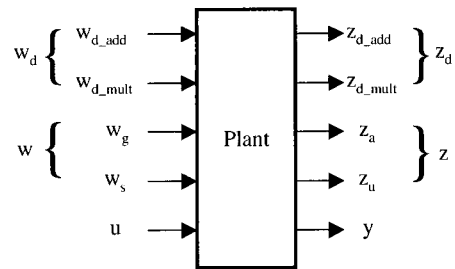


그림 4 일반화된 플랜트(generalized plant)의 입 · 출력

3.2 제어기 설계

그림 3의 플랜트에 포함된 가중함수 중 외란 입력과 제어 출력에 대한 가중함수는 주석준의 논문에서 이용한 H_2 제어의 경우와 동일한 형태의 것을 사용하였다.⁽⁶⁾ 그러나 H_2 제어와는 달리 설계과정에서 불확실성에 대한 직접적인 고려가 가능하도록 불확실성에 대한 가중함수가 플랜트에 추가되어 있다. 이에 대한 사항은 다음과 같다.

- (i) 그림 3에서 덧셈적 불확실성은 제어입력 u 와 측정치 y 사이의 전달함수의 오차에 해당된다. 그림 6은 시스템 식별 결과인 AMD와 건물모델을 직렬로 연결하여 구한 해석적인 전달함수와 실험적으로 구한 전달함수 사이의 차이를 보여준다. 여기서 고주파수 대역으로 갈수록 불확실성이 커지는 것은 미분기 역할을 하는 AMD 동역학의 영향 때문으로 판단되며 AMD 시스템의 극점이 존재하는 22Hz 부근에서 최대가 된다. 이를 고려하여 불확실성 모델을 다음과 같은 형태의 전달함수로 가정하였다.

$$W_{add} = \frac{c_1(s^2 + 2\xi_2\omega_2s + \omega_2^2)}{s^2 + 2\xi_1\omega_1s + \omega_1^2} \tag{8}$$

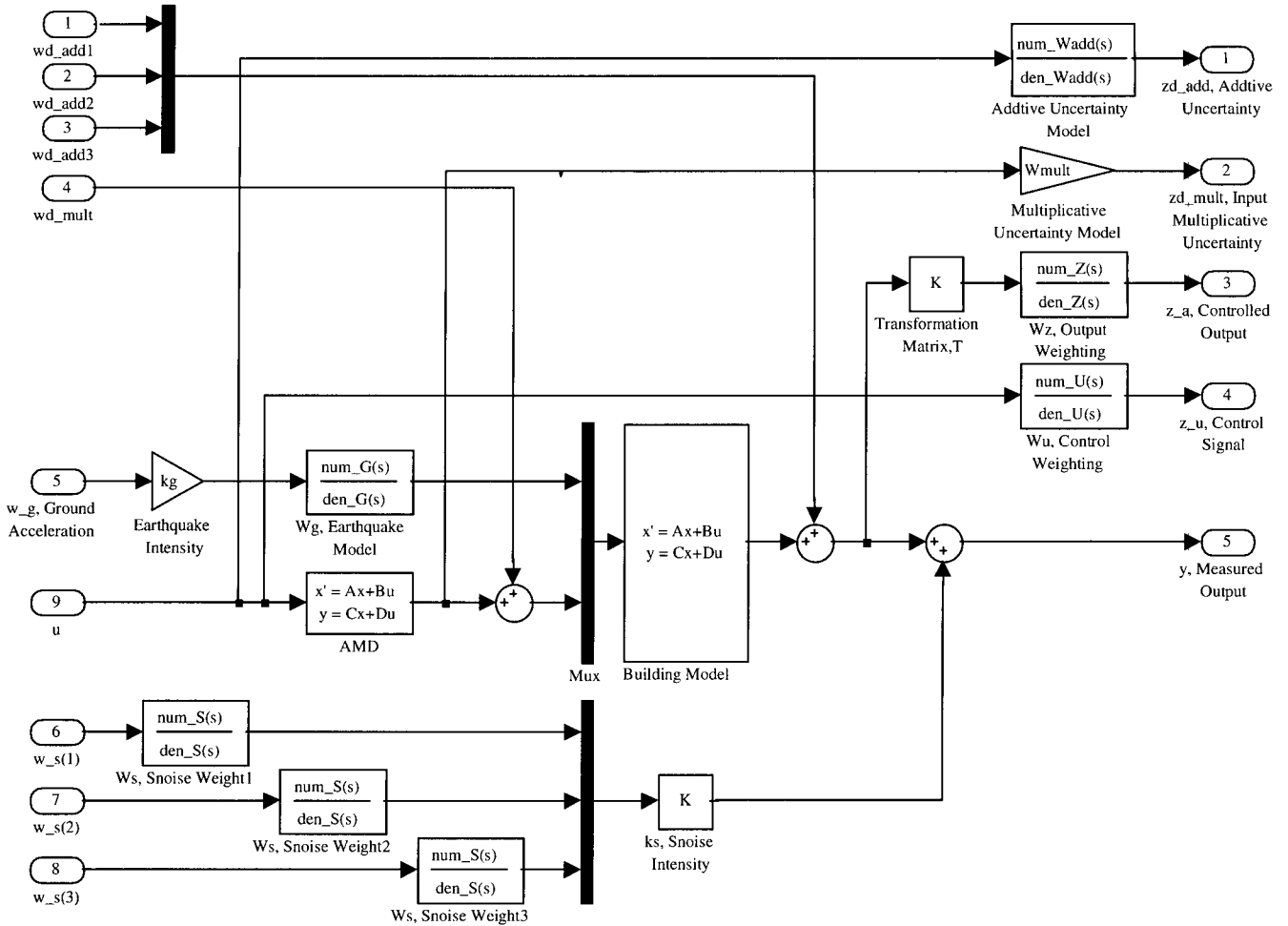


그림 5 플랜트의 SIMULINK 모델

위 식에서 극점(poles)에 관계된 ξ_1 , ω_1 은 전달함수의 최대 오차가 발생하는 지점을 고려하여 $\xi_1=0.4$, $\omega_1=138.2$ 로 지정하였으며, 상수 c_1 은 $s \rightarrow \infty$ 일 때의 전달함수의 크기를 나타내며 3으로 설정하였다. 영점(zeros)에 관계된 $\xi_2=0.8$ 로 지정하였으며, ω_2 는 $s \rightarrow 0$ 일 때의 전달함수의 크기 1/250을 고려하여 다음 식으로부터 구하였다.

$$\frac{c_1 \omega_2^2}{\omega_1^2} = \frac{1}{250} \quad (9)$$

이로부터 최종적으로 결정된 덧셈적 불확실성에 대한 가중함수는 다음과 같다.

$$W_{add} = \frac{3s^2 + 24.23s + 76.43}{s^2 + 110.58s + 19107.55} \quad (10)$$

(ii) 곱셈적 불확실성은 AMD와 건물모델의 상호작용, 입력에서의 전기(기계적인 오차 등에 의해 발생하는 것으로 1%의 오차를 가정하여 다음과 같이 설정하였다.

$$W_{mult} = 0.01$$

가중함수는 주파수에 따라 다른 가중치를 부가할 수 있게 해주며, 구조화된 특이치 산정에 사용되는 불확실성

섭동과 성능블록으로 알려진 가상의 섭동의 크기를 1로 정규화시켜 준다. 그러나 가중함수의 선정에 대한 기준이 명확하지 않기 때문에 앞에서 정의된 가중함수들을 조합하여 다양한 경우에 대하여 제어기를 설계하고 그 성능을 검토함으로써 최선의 가중함수의 조합을 선정하여야 한다.

표 2는 제어출력과 제어력에 대한 가중함수를 각각 1.0, 1.5와 0.2로 고정하고 지진 입력 모델과 센서 잡음에 대한 가중

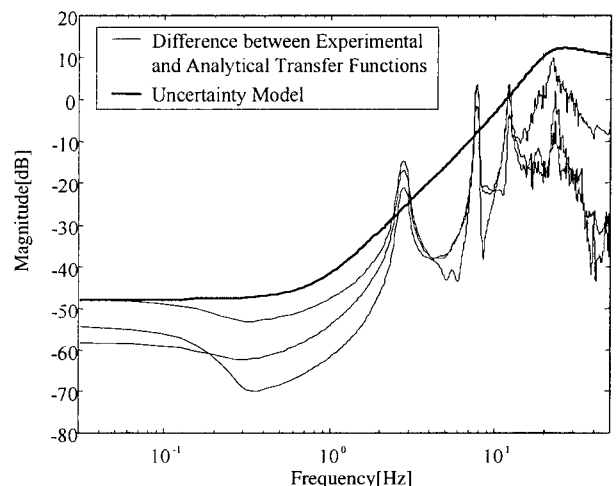


그림 6 제어입력과 건물가속도측정간의 불확실성 모델

표 2 지진 입력 및 센서 잡음의 모델링에 따른 μ -synthesis 제어기의 설계제어기

제어기	K_1	K_2	K_3	K_4
W_g	1	1	$\frac{18.7s+556.8}{s^2+12.2s+364.8}$	$\frac{18.7s+556.8}{s^2+12.2s+364.8}$
W_s	1	$0.30 \frac{s-\frac{1}{60}+1}{s-\frac{1}{200}+1}$	1	$0.30 \frac{s-\frac{1}{60}+1}{s-\frac{1}{200}+1}$
W_z	1.5	1.5	1.5	1.5
W_u	0.2	0.2	0.2	0.2
차수	10	10	12	12
μ	0.4071	0.4136	0.9041	0.7730
$\ H_{z_o, w_g}\ _\infty$	4.4849	4.6495	2.7265	3.2482
$\ H_{z_o, w_s}\ _\infty$	0.5838	0.5791	2.7925	2.2451
$\ H_{uw_g}\ _\infty$	21.2147	21.1516	39.6120	40.2053
제어기	K_5	K_6	K_7	K_8
W_g	$\frac{18.7s+556.8}{s^2+12.2s+364.8}$	$2.23 \frac{1}{s-\frac{1}{20}+1}$	$2.23 \frac{1}{s-\frac{1}{20}+1}$	$2.23 \frac{1}{s-\frac{1}{20}+1}$
W_s	$\frac{0.8s^2+57.3s+2991.5}{s^2+150.8s+15791.4}$	1	$0.30 \frac{s-\frac{1}{60}+1}{s-\frac{1}{200}+1}$	$\frac{0.8s^2+57.3s+2991.5}{s^2+150.8s+15791.4}$
W_z	1.5	1	1	1
W_u	0.2	0.2	0.2	0.2
차수	12	12	12	12
μ	0.7723	0.6304	0.5600	0.5592
$\ H_{z_o, w_g}\ _\infty$	3.2868	3.6024	3.7208	3.8361
$\ H_{z_o, w_s}\ _\infty$	2.2349	1.7346	1.1182	2.2754
$\ H_{uw_g}\ _\infty$	40.3664	21.0073	20.2295	21.0186

함수를 변화시킨 8가지 경우에 대한 제어기 설계 결과를 보여준다. 여기서 각 제어기에 대하여 제어기의 차수와 구조화된 특이치 μ , 가중함수를 제외시킨 폐회로 시스템의 전달함수의 ∞ -놈을 각각 구하여 비교하였다.

일반적으로 μ -synthesis는 플랜트의 차수의 2~3배에 해당되는 차수의 제어기를 제공하므로 제어기의 실제 구현을 위해서는 모델응축을 통하여 제어기의 차수를 줄일 필요가 있다. 여기서는 제어시스템의 성능이 크게 저하되지 않는 범위 내에서 최대 12로 제어기의 차수를 제한하였다. 제어성능을 나타내는 ∞ -놈은 가중함수를 제외한 폐회로 시스템의 지반 가속도 입력과 3층 절대가속도, 3층 센서의 잡음과 3층 절대가속도, 지반가속도 입력과 제어입력 사이의 전달함수에 대하여 각각 계산하였다. 표 3의 제어기의 성능을 나타내는 값들은 이상적인 제어기에 가까울수록 작아진다고 볼 수 있으나, 현실적으로는 이들 상호간에 트레이드-오프 관계가 존재한다. 이를 고려하여 제어기 K_6 의 가중함수를 입력부분의 가중함수로 선택하였다.

위에서 선택된 입력부분의 가중함수에 대하여 출력부분의 가중함수를 선택하기 위하여 제어출력과 제어력에 대한 여러 가지 가중함수의 조합을 지정하고 그에 따라 제어기를 설계하였으며, 이의 성능을 검토하였다. 표 3은 지진입력 모

델과 센서 잡음에 대한 가중함수를 K_6 제어기의 경우로 고정하고 제어출력과 제어력에 대한 가중함수를 변화시킨 8가지 경우에 대한 제어기의 설계 결과를 보여준다. 각각 제어기에 따른 지반가속도 입력으로부터 3층 절대가속도로의 전달함수의 변화, 센서잡음으로부터 3층 절대가속도로의 전달함수의 변화 그리고 지반가속도 입력으로부터 제어입력으로의 전달함수로부터 제어기 K_{15} 가 제어력에 비하여 제어출력과 센서잡음의 영향이 상대적으로 작기 때문에 이에 해당되는 가중함수를 제어기 설계를 위한 최종적인 가중함수로 설정하였다.

그러나 K_{15} 의 가중함수를 그대로 사용할 경우 구조화된 특이치의 값이 1보다 매우 작기 때문에 보수적인 설계가 될 수 있으므로 파라미터 연구를 수행하여 가중함수의 스케일링 요소를 조정할 필요가 있다. 여기서는 제어출력 z_o , z_u 에 대한 가중함수의 스케일링 요소를 각각 3과 0.32로 조정하였다. 이렇게 최종적으로 결정된 가중함수들을 사용하여 μ -synthesis 제어기를 설계하였다. μ -synthesis 제어기의 설계는 플랜트의 상태방정식에 대하여 D-K 반복을 사용하여 이루어진다. 표 4는 D-K 반복의 결과를 보여준다.

다음 표에서 1번째 단계에서 구한 제어기가 H_∞ 제어기에 해당되는데 최종적으로 구한 제어기에 비하여 구조화된 특

표 3 제어 출력에 대한 가중함수에 따른 μ -synthesis 제어기의 설계제어기

제어기	K_9	K_{10}	K_{11}	K_{12}
W_g	$2.23 \frac{1}{s \frac{1}{20} + 1}$	$2.23 \frac{1}{s \frac{1}{20} + 1}$	$2.23 \frac{1}{s \frac{1}{20} + 1}$	$2.23 \frac{1}{s \frac{1}{20} + 1}$
W_s	1	1	1	1
W_z	1	1	$\frac{s \frac{1}{300} + 1}{s \frac{1}{200} + 1}$	$\frac{s \frac{1}{300} + 1}{s \frac{1}{200} + 1}$
W_u	$0.2 \frac{s \frac{1}{20} + 1}{s \frac{1}{200} + 1}$	$0.2 \frac{s \frac{1}{60} + 1}{s \frac{1}{240} + 1}$	0.2	$0.2 \frac{s \frac{1}{20} + 1}{s \frac{1}{200} + 1}$
차수	12	12	12	12
μ	0.6042	0.5670	0.5239	0.5729
$\ H_{z_w, w_g}\ _\infty$	3.5183	3.6099	3.8606	3.6852
$\ H_{z_w, w_s}\ _\infty$	1.8069	2.1678	1.8854	2.1861
$\ H_{uw_g}\ _\infty$	21.8301	21.0240	20.8658	20.9532
제어기	K_{13}	K_{14}	K_{15}	K_{16}
W_g	$2.23 \frac{1}{s \frac{1}{20} + 1}$	$2.23 \frac{1}{s \frac{1}{20} + 1}$	$2.23 \frac{1}{s \frac{1}{20} + 1}$	$2.23 \frac{1}{s \frac{1}{20} + 1}$
W_s	1	1	1	1
W_z	$\frac{s \frac{1}{300} + 1}{s \frac{1}{30} + 1}$	$\frac{s \frac{1}{300} + 1}{s \frac{1}{60} + 1}$	$\frac{s \frac{1}{300} + 1}{s \frac{1}{60} + 1}$	$\frac{s \frac{1}{300} + 1}{s \frac{1}{60} + 1}$
W_u	$0.2 \frac{s \frac{1}{60} + 1}{s \frac{1}{240} + 1}$	0.2	$0.2 \frac{s \frac{1}{20} + 1}{s \frac{1}{200} + 1}$	$0.2 \frac{s \frac{1}{60} + 1}{s \frac{1}{240} + 1}$
차수	12	12	12	12
μ	0.5416	0.5475	0.6000	0.5528
$\ H_{z_w, w_g}\ _\infty$	3.8078	3.7195	3.6049	3.7065
$\ H_{z_w, w_s}\ _\infty$	2.1707	1.3334	1.2871	1.3212
$\ H_{uw_g}\ _\infty$	20.8855	20.9523	21.8755	20.9594

표 4 반복 요약

Iteration #	1	2	3	4
Controller Order	13	19	35	33
Total D-Scale Order	0	6	22	20
Gamma Achieved	3.714	1.070	0.931	0.932
Peak μ -Value	1.527	1.056	0.930	0.929

이치가 크게 나와 보수적인 설계가 될 수 있음을 알 수 있다. 4번의 반복 과정으로 강인 성능을 만족하는 제어기를 구할 수 있었으나 제어기의 차수가 33으로 매우 크게 결정되어 제어기의 차수를 줄이는 응축의 과정을 적용하였다. 그러나 제어기의 응축의 과정은 원래 제어기의 강인성을 보장하지 못하기 때문에 응축과정에서 주의가 요구된다. 여기서는 강인 성능을 만족하도록 하면서 차수를 14로 줄일 수 있었으며, 이때의 μ 는 9.9290으로 원래의 값을 유지하였다. 그림 7은 응축 이전의 제어기와 응축된 제어기의 구조화된 특이치의 값을 보여주는 것으로 응축 이후에도 강인 성능을 만족함을 확인할 수 있다. 여기서 제어기의 설계를 위하여 모델링된 섭동이 성능블록을 포함하여 3개 이므로 구조화된 특이치의 상한치와 하한치가 일치함을 볼 수 있다.

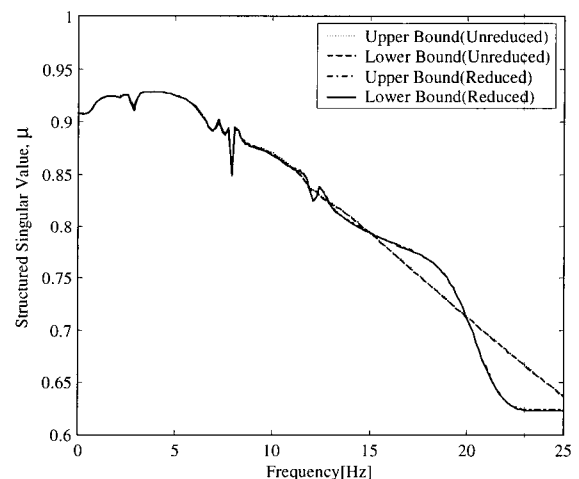


그림 7 폐회로 시스템의

4. 실험검증

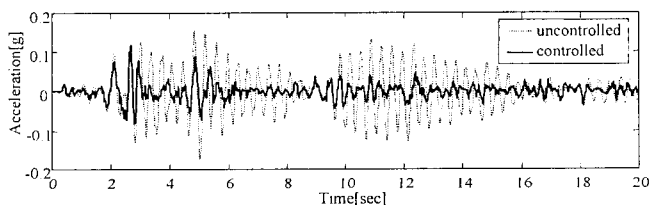
앞의 과정을 통하여 결정된 제어기는 실험을 위하여 시간 간격을 고려하여 이산화된다. 실험에서 사용된 시간 간격은 0.02초이며, 각 시간간격 사이의 플랜트의 상태는 일정(zero-order hold)하다고 가정하였다. 이산화된 제어기는 LABVIEW 파일로 변환하여 실제 제어시의 제어입력 산정에 사용된다. μ -synthesis 제어기를 적용한 제어실험을 수행하여 비제어 시와 제어 시의 건물모델의 응답과 제어력을 측정하였다. 건물모델의 응답으로 측정된 각 층의 절대가속도 y 와 AMD 모터의 구동신호 μ 및 AMD 이동질량체의 3층에 대한 상대가속도 \ddot{x}_m 에 대하여 제한대역 백색잡음(10Hz)에 대한 RMS 값과 El Centro 지진입력에 대한 최대치를 비교하였다. 표 5와 표 6은 이를 정리한 것이다. 여기서 사용된 제어력과 응답의 감소를 비교해 볼 때 실험결과와 수치해석결과는 서로 비슷하며 제어효율이 우수함을 알 수 있다. 그림 8은 실험을 통하여 구한 비제어 시와 제어 시의 절대가속도의 시간이력을 비교한 것으로 응답의 큰 감소를 확인할 수 있다. 그림 9은 제어 시의 경우 수치모사 결과와 실험 결과를 비교한 것으로 매우 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다. 여기서 3층으로 갈수록 실험결과와 수치모사의 결과가 보다 잘 일치함을 볼 수

표 5 제한대역 백색잡음(10Hz)에 대한 수치모사와 제어실험 결과의 비교

제한대역 백색잡음(10Hz)에 대한 시스템의 RMS 응답				
Response	Simulation		Experiment	
	Uncontrolled	Controlled	Uncontrolled	Controlled
$y_{1st} [g]$	0.0295(100)	0.0105(35.6)	0.0298(100)	0.0114(38.1)
$y_{2nd} [g]$	0.0445(100)	0.0135(30.1)	0.0444(100)	0.0150(33.7)
$y_{3rd} [g]$	0.0574(100)	0.0161(28.1)	0.0571(100)	0.0177(31.1)
$u [Volts]$	-	0.1138	-	0.1248
$\ddot{x}_m [g]$	-	0.0572	-	0.0554

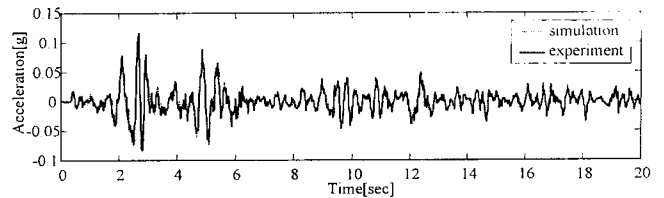
표 6 El Centro 지진입력에 대한 수치모사와 제어실험 결과의 비교

El Centro 지진입력에 대한 시스템의 최대 응답				
Response	Simulation		Experiment	
	Uncontrolled	Controlled	Uncontrolled	Controlled
$y_{1st} [g]$	0.0943(100)	0.069(64.6)	0.0972(100)	0.0642(66.0)
$y_{2nd} [g]$	0.1395(100)	0.0790(56.6)	0.1428(100)	0.0915(64.1)
$y_{3rd} [g]$	0.1679(100)	0.1078(64.2)	0.1778(100)	0.1086(61.1)
$u [Volts]$	-	0.9309	-	1.1471
$\ddot{x}_m [g]$	-	0.3634	-	0.3582



(a) 3층 절대가속도

그림 8 El Centro 지진입력에 대한 가속도 응답



(a) 3층 절대가속도

그림 9 El Centro 지진 입력에 대한 수치모사와 실험결과의 비교

있는데, 이것은 응답이 클수록 센서 잡음의 영향이 상대적으로 작아지기 때문이다.

5. 결론

축소 3층 건물모델에 대해 능동 질량 감쇠기를 사용하여 강인제어기인 μ -synthesis 제어기를 설계하고 실험적으로 검증하였다. 외란 입력과 제어용 출력에 적합한 주파수 가중함수를 설정하고 가중함수의 조합을 분석하여 최적의 μ -synthesis 제어기를 제시하였다. 제어기의 설계를 위하여 지반가속도 입력, 센서잡음, 3층 절대가속도, 제어입력에 대한 각 가중함수의 전형을 설정하고, 이들의 조합에 따라 16가지의 제어기를 각각 설계하였다. 각 제어기에 대한 폐회로 시스템의 전달함수의 크기와 형상, 제어기의 차수를 고려하여 최선의 제어기를 선택하고 이에 대한 제어실험을 수행하였다. 각 제어기는 백색잡음 가진 입력에 대한 RMS 응답에서 60-70%, 축소 지진 입력에 대한 최대 응답에서 30-45% 정도의 감소효과를 나타내었다. μ -synthesis 제어기를 사용한 각각의 실험의 결과를 수치모사를 통하여 정확하게 구현해냄으로써 제어기 설계의 타당성을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 우수연구센터인 스마트 사회기반시설 연구센터의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 대해서 감사드립니다.

참고 문헌

1. Dyke, S. J., Spencer, Jr., B. F., Quast, P., Kaspari Jr., D. C., and Sain, M. K., "Implementation of an AMD using acceleration feedback control," *Microcomputers in Civil Engineering: Special Issue on Active and Hybrid Control*, Vol. 11, pp. 305-323, 1995.
2. Zames, G. and B. A. Francis, "Feedback, minimax sensitivity and optimal robustness," *IEEE Trans. Autom. Control*, AC-28, 585, 1983.
3. Spencer, B. F., Dyke, S. J., and Sain, M. K., "Experimental verification of acceleration feedback control strategies for seismic protection," *Proceedings of the Japanese Society of Civil Engineers, 3rd Colloquium on Vibration Control*

- of Structures, 1995. 8.
4. Zhou, K., Doyle, J. C., "Essentials of robust control," Prentice Hall, 1998.
 5. Burl, J. B., "Linear optimal control - H_2 and H_∞ methods," Addison-Wesley, 1999.
 6. 주석준, "건축구조물의 지진응답의 강인제어에 대한 실험적 연구", 박사학위논문, 서울대학교, 2000.
 7. Balas, G. J., Doyle, J. C., Glover, K., Packard, A., and Smith., μ -Analysis and Synthesis TOOLBOX User's Guide, The MathWorks, 1995.