

# 구조물의 모델링 불확실성을 고려한 능동 제어기의 실험 연구

## Experimental Study on the Active Controller of Structures Considering Modeling Uncertainty

민 경 원\*                      김 성 춘\*\*  
Min, Kyung Won              Kim, Sung Choon

### 국문요약

능동 제어기를 설계하기 위해서는 제어대상 구조물의 수학적 모델을 구해야 한다. 그러나, 무한차원의 구조물에 대하여 정확한 모델을 구하는 것은 불가능하므로 유한차원인 저차원화된 모델을 사용하여 제어기를 설계한다. 그러나, 실제 구조물과 저차원화된 모델 사이의 오차에 의하여 제어기의 성능이 저하가 되며 제어기와 구조물의 상호 작용, 지진과 같은 외란 등의 불확실성, 지진시 구조물의 동적특성 변화로 인하여 제어기의 성능이 더욱 저하가 된다. 이러한 저하 요인은 제어기 설계시 요구되는 구조물의 수학적 모델에 대한 불확실한 요소로 작용하기 때문에 제어성능의 저하를 일으키며 응답의 불안정을 유발하기도 한다.

본 연구에서는 질량형 능동제어기(AMD)가 설치된 3층 건물 모형의 모델 오차에 관한 불확실성을 반영한 강인제어기법을 적용하여 제어성능과 안정성을 실험을 통하여 분석하였다. 강인제어 기법인  $\mu$  합성법에 요구되는 여러가지 가중함수인 주파수필터는 건물과 AMD의 특성, 모델 오차, 제어율과 AMD 성능의 상관관계, 측정잡음 및 지진외란의 특성 등을 고려하여 정량적으로 선택되었다.  $\mu$  합성법에 의하여 제어기를 설계하였으며 강인성을 비교하기 위하여 불확실성이 고려되지 않는 LQG 기법에 의한 제어기를 선택하였다.  $\mu$  합성법은 규정된 불확실성에 대하여 제어의 강인성을 가지므로 동적특성이 바뀐 건물모형에 관한 강인성을 LQG 기법에 의한 제어성능과 비교하였다. 그 결과 동적특성이 변화된 건물에 대하여  $\mu$  합성법만이 제어의 효율성이 유지되는 강인성을 나타내었다.

**주요어** : 불확실성, 제어기, 강인제어기법,  $\mu$  합성법, 안정성, 실험적 검증

### ABSTRACT

It is prerequisite to find the mathematical model of a real structure to design an active controller. However, as the structure has inherently infinite number of degrees-of-freedom, it is impossible to obtain an exact dynamic model of the structure. Instead, a reduction model with finite degrees-of-freedom is used for the design of a controller. So there exists uncertainty between a real model and a reduction model which causes poor performance of control. In addition, there are uncertainties on the structure-controller interaction, measurement noises, unknown spectral characteristics of earthquake loadings and changes of stiffness and damping due to inelastic deformation under earthquakes. All these uncertainties can degrade the control performance and even cause the control instability.

Thus, robust control strategy considering the above uncertainties can be an alternative one to guarantee the performance and stability of the control. This study deals with the experimental verification of robust controller design for the active mass driver.  $\mu$ -synthesis technique is employed as a robust control strategy. Some weights are chosen based on the difference between the nominal plant with which the controller is designed and the perturbed plant to be controlled having some degrees of uncertainty. The robustness of  $\mu$ -synthesis technique is compared with the result of LQG strategy, which does not consider the uncertainty.

**Key words** : uncertainty, controller, robust control strategy,  $\mu$ -synthesis, stability, experimental verification

\* 정희원 · 인천대학교 건축공학과 교수

\*\* 인천대학교 건축공학과, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2001년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

능동제어 기법에서 제어기 설계시 구조물의

동적모델을 구해야 한다. 그러나, 무한차원의 구조물의 정확한 모델을 구하는 것은 불가능하므로 단순하고 유한 차원인 저차원된 모델을 사용하여 제어기를 설계한다. 그러나, 실제 구조물과 저차원된 모델 사이의 오차, 제어기와 구조물의 상호 작용, 측정 신호와 지진외란 등의 불확실성 및 지진시 구조물의 동적특성 변화로 인하여 능동 제어시 제어성능의 저하가 발생된다. 또한 이러한 모든 불확실성들은 제어 시스템의 성능저하는 물론 응답의 불안정을 유발시키기도 한다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 AMD가 설치된 3층 건물모형에 대한 불확실성을 반영하여 강인제어의 성능과 안정성을 실험을 통하여 분석하였다. 강인제어 기법으로는 LQG/LTR (linear-quadratic gaussian with loop-transfer recovery)<sup>(2)</sup>, 슬라이딩 모드 제어(sliding mode control)<sup>(3)</sup> 및  $\mu$  합성법<sup>(4)</sup> 등이 있으나 본 연구에서는 연구자가 수행하였던<sup>(5)</sup> 제어기법인  $H_2$ ,  $H_\infty$  방법이 발전된  $\mu$  합성법을 이용하기로 한다. AMD가 설치된 3층 건물 모형에 대하여 실험으로 동적 모델을 식별하였으며, 실제모델과 수학모델과의 오차에 따른 불확실성 가중 함수인 주파수 필터를 설계하였다. 강인성을 비교하기 위하여 불확실성이 고려되지 않는 LQG 기법에 의한 제어기를 선택하였다.<sup>(6)</sup>  $\mu$  합성법은 규정된 불확실성에 대하여 제어의 강인성을 가지므로 동적특성이 바뀐 건물 모형에 관하여 강인성을 LQG 기법에 의한 제어성능과 비교하였다.

## 2. 강인제어 기법

구조물 모델의 불확실성이 반영된 강인 제어기 문제는 그림 1의 상호 연관도로 묘사된다.  $P$ 는 알고 있다고 가정한 공칭모델의 전달 함수이고  $K$ 는 설계가 된 제어기이다. 이 시스템은 구조적 불확실성  $\Delta$ 에 의해 섭동이 발생된다.  $w, z, y, u$ 는 각각 외란 입력, 제어 출력, 측정 출력 그리고 제어 입력이다. 제어 시스템에

허용 가능한 섭동에 대하여 강인 성능을 부합하는 제어기  $K$ 가 선택된다. 제어기가 공칭모델에 대하여 설계되므로 공칭 폐회로 시스템은 안정하다고 가정할 수 있다.<sup>(7)</sup>

여기서 공칭 폐회로 시스템  $M(P, K)$ 는  $P$ 와  $K$ 를 결합하여 구하여 안정하다고 가정한다. 이 때 성능 사양과 섭동을 가진 시스템이 강인 성능을 가지기 위한 필요충분 조건은 다음과 같다.

$$\sup_{\omega} \{\mu_{\Delta}[M(j\omega)]\} < 1 \tag{1}$$

여기서 sup는 상한치(supremum),  $\mu_{\Delta}$ 는 전달함수  $M$ 에 대한 구조화된 특이치이며 시스템 루프 전달함수의  $\infty$ -norm이 1보다 작으면 시스템이 내부 안정하게 됨을 의미한다.

$\mu$  합성법은 이러한 최대 구조화된 특이치 (Structured Singular Value)를 최소화하는 과정을 말하며 제어기 설계는 다음의 비용함수를 최소화하는 것이라 볼 수 있다.

$$J = \sup_{\omega} \{\mu_{\Delta}[M(j\omega)]\} \tag{2}$$

그러나, 비용함수를 직접 최소화하는 것이 매우 어렵기 때문에 하나의 대안으로 다음의 구조화된 특이치의 상한치를 최소화하게 만든다.

$$J = \sup_{\omega} \left\{ \min_{\{d_1, d_2, \dots, d_p\}} \bar{\sigma}[D(j\omega)M(j\omega)D^{-1}(j\omega)] \right\} \tag{3}$$

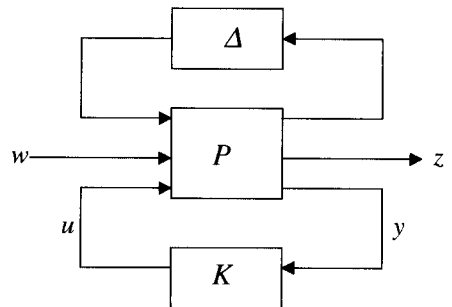


그림 1 합성법 피드백 시스템

여기서  $\sigma$ 는 최대 특이치이며 대각 스케일링 행렬  $D(j\omega)$ 은 주파수에 따라 달라진다. 식 (3)의 비유합수를 이용하여  $D$ -K반복 알고리즘에 의해 최적의 제어기를 찾는다. 본 논문에서는  $D$ -K반복 알고리즘의 내용은 생략하기로 하며 자세한 내용은 참고문헌<sup>(4),(8)</sup>에 나타나 있다.

그림 2는 제어기가 포함된 특정한 구조물의 폐회로에 관하여 모든 주파수 대역에 구조화된 특이치가 1이하로 되어 강인 성능을 만족함을 볼 수 있다.

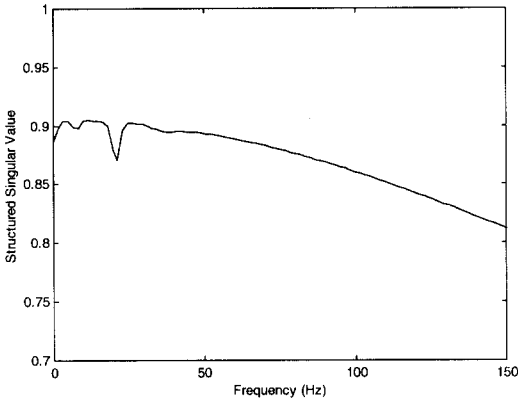


그림 2 폐회로 시스템의  $\mu$

### 3. 실험 시스템

본 실험 모델은 그림 3과 4에 나타나 있듯이 3층 건물의 최상층에 AMD를 설치한 모델이며 AMD의 이동 질량체의 관성력으로 건물의 제어력을 가하게 된다.

산정된 제어력을 정확히 구현하기 위해서는 AC 서보모터의 회전에 따라 AMD의 이동질량체가 움직여야 된다. 신호처리 보드에서 모터 컨트롤러로 신호를 보내 모터의 회전운동을 제어하게 된다. 토크성능이 뛰어나며 고속회전이 용이하고 제어성능이 좋은 영국 Parker motion & control사의 AC서보 모터를 이용하였다.

AMD를 구동시키기 위하여 모터 드라이버에 보내야 할 신호가 아날로그 신호이므로 컴퓨터에서 계산된 디지털 신호를 아날로그 신호로 바꾸기 위해 D/A 보드를 사용하여야 하며, 이와

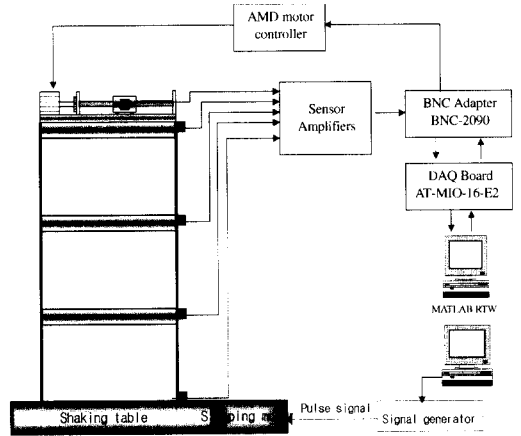


그림 3 실험 모델 구성도



그림 4 실험 모델

반대로 가속도계에서 측정된 건물 응답의 아날로그 신호를 컴퓨터가 처리할 수 있도록 A/D 보드를 사용하여 신호를 이산화시켜야 한다. 본 연구에서 사용한 A/D 및 D/A 보드는 미국 national instruments사 제품이며 모델명은 AT-MIO-16-E2이다. 최대 샘플링 속도는 100kHz이며 실험에서는 축소된 건물 모델의 주된 주파수 대역이 저주파수임으로 이를 잘 표현하는 50Hz로 하였다.<sup>(5),(9)</sup>

### 4. 가중 함수 모델

제어기 설계를 위해서는 우선 제어 대상이

되는 플랜트에 요구되는 가중 함수를 명확히 하여야 하며 제어기 설계를 위한 기본 구조에 포함시켜야 한다. 다음 그림 5은 제어기 설계를 위한 불확실성 모델이 포함된 블록 다이어그램이다. 플랜트는 건물 모델과 AMD를 비롯하여 제어기의 성능을 향상시키기 위한 여러 가지 가중 함수를 포함하고 있으며, 섭동  $\Delta$ 와 제어기  $K$ 는 각각 플랜트와 루프를 형성하고 있다. 또한 이 플랜트의 수치 해석을 위한 matlab의 simulink 모델은 다음 그림 6과 같다.

본 실험에서는 가중 함수 중 외란 입력과 제어 출력에 대한 가중 함수와 불확실성에 대한 직접적인 고려가 가능하도록 불확실성에 대한 가

중함수가 플랜트에 추가되었다. 다음 사항들은 가중 함수에 대한 설명이다.<sup>(10)</sup>

- 1) 지진 입력 모델에 관한 가중 함수  $W_g$ 는 건축 구조물에 작용하는 지진하중의 주파수 스펙트럼을 나타내며, 건물의 주요 주파수가 포함된 대역으로 모델링하며 Kanai-Tajimi 모델을 사용하였다.

$$W_g = \frac{\sqrt{S_0}(2\zeta_g \omega_g s + \omega_g^2)}{s^2 + 2\zeta_g \omega_g s + \omega_g^2} \quad (4)$$

여기서 사용된 변수는  $S_0=2.34$ ,  $\zeta_g=0.32$ ,  $\omega_g=38.9rad/s$ 이다.

센서 잡음에 관한 가중 함수  $W_s$ 은 모든 주파수 대역의 백색 잡음으로 간주하였다. 크기는 가속도계 센서에서 측정하여 얻은 3.7gal로 선택하였다.

$$W_s = 0.0037 \quad (5)$$

제어 출력 가중 함수  $W_z$ 은 건물모델의 응답이 저주파수 대역에서 크게 발생하므로 제어 에너지를 저주파수 대역에 집중할 필요가 있다. 따라서 건물 모델의 1, 2차 모드의 고유진동수를 고려하여 다음과 같이 설정하였다.

$$W_z = 1.5 \frac{\frac{1}{300} s + 1}{\frac{1}{60} s + 1} \quad (6)$$

제어 입력 가중 함수  $W_u$ 는 시스템 식별시 고주파수 대역의 모드는 응답에 대한 영향이 작고 상대적으로 정확한 식별이 어렵기 때문에 시스템의 모델링 과정에서 제외했다. 따라서 이러한 제외된 모드에 대한 제어력의 가진으로 인해 발생하는 스풀오버 효과를 방지하기 위해서는 고주파수 대역에 대한 제어력의 사용을 억제할 필요가 있어 다음과 같이 설정하였다.

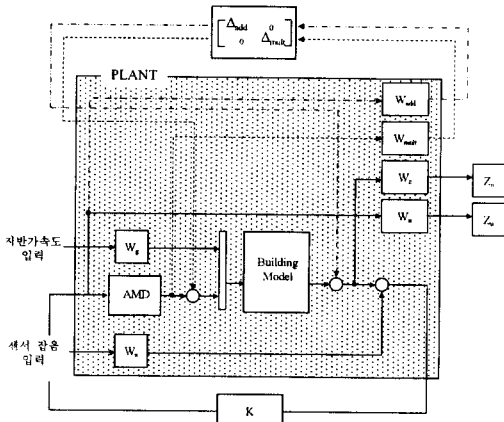


그림 5 불확실성 플랜트 모델

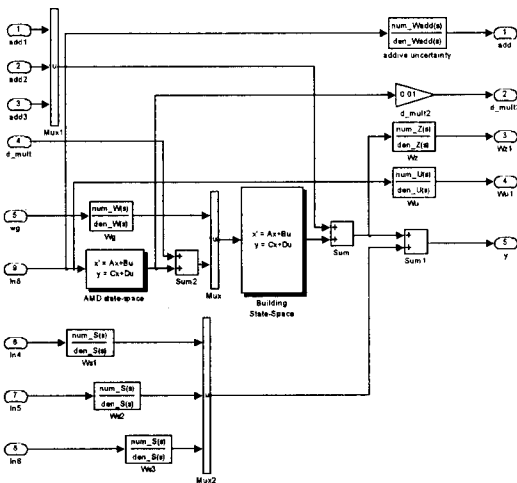


그림 6 Simulink 모델

$$W_u = 0.2 \frac{\frac{1}{60} s + 1}{\frac{1}{240} s + 1} \quad (7)$$

위 사항에서 언급한 가중 함수는 그림 7에 표시되어 있어 주파수 영역에 따른 특징을 파악할 수 있다.

2) 구조물의 모델링에 대하여는 두 개의 불확실성 모델을 포함시켰다. 첫번째 모델은 덧셈 불확실성 가중 함수  $W_{add}$ 이다. 제어 입력  $u$ 와 건물 모델 각 층의 가속도 측정치  $y$ 사이의 오차가 고주파수 대역으로 갈수록 커지는 경향이 있어 이에 관한 불확실성 모델  $W_{add}$ 은 다음 그림 8과 같은 형태의 전달함수로 가정하였다.

$$W_{add} = \frac{10s^2 + 20s + 1}{s^2 + 88s + 12100} \quad (8)$$

그림 8은 AMD와 건물모델을 직렬로 연결하여 구한 해석적인 전달함수와 실험적으로 구한 전달함수 사이의 차이를 보여주며 이것을 공식화한 식 (8)과의 차이를 나타내 준다.

또한, AMD와 건물모델의 상호작용, 입력에서의 전기 기계적인 오차 등에 의해 발생하는 것으로 5%의 오차를 가정하여 곱셈 불확실성 가중함수를 다음과 같이 설정하였다.

$$W_{mult} = 0.05 \quad (9)$$

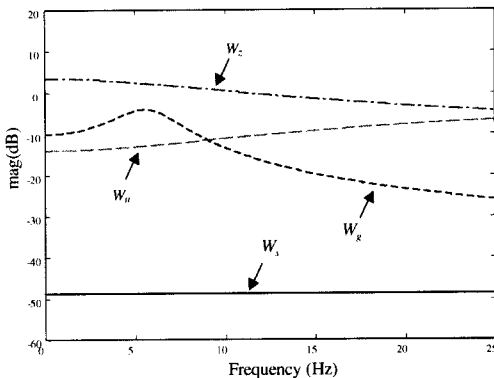


그림 7 사용된 가중치 함수

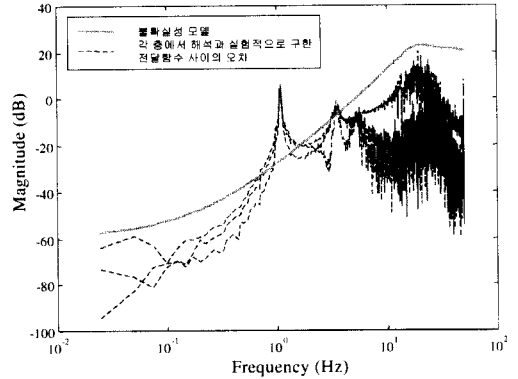


그림 8 불확실성 모델

### 5. 강인제어 실험 및 분석

지진하중 작용 시 구조물은 강성 저하와 소성 영역의 비선형 거동을 나타내어 제어기 설계 시 초기 구조물의 동적 특성이 변화하게 된다. 또한 구조물의 유한차원 모델화로 인하여 고주파수 영역에 관한 오차가 제어기 설계 시 포함이 된다. 따라서 이러한 변화 및 오차를 초기에 설계에 반영을 하여  $\mu$  합성법에 의한 제어기 설계를 4절에서 수행하였다. 본 절에서는  $\mu$  제어기의 강인성을 실험으로 검증하기 위하여 불확실한 섭동을 건물 모형에 주어 강인성이 고려되지 않은 기법인 LQG방법과 비교하기로 한다.

그림 3과 같은 3층 건물 모델의 1, 2층 슬래브 질량을 제거하여 진동수와 감쇠비 등의 변화를 유발시켜 오차가 있는 섭동 모델(perturbed model)을 구성하였다. 그림 9와 표 1은 질량체 제거 시 변화된 섭동 모델의 동적 특성인 전달함수, 고유치와 감쇠비를 제어기 설계 시의 공칭모델인 원형모델(unperturbed model)과 비교한 것이다.

그림 9와 표 1과 같이 슬래브의 질량 제거에 따라 섭동 모델의 특성이 고주파 대역으로 고유 진동수가 변화하였으며 감쇠비는 낮게 나타났다. 4절에서와 같이 고주파수 대역의 불확실성을 고려하여 제어기를 설계하였기 때문에 이러한 섭동 모델은 강인 제어 실험에 적합한 모델로 판단된다.

불확실성을 고려하지 않은 LQG 제어 기법과

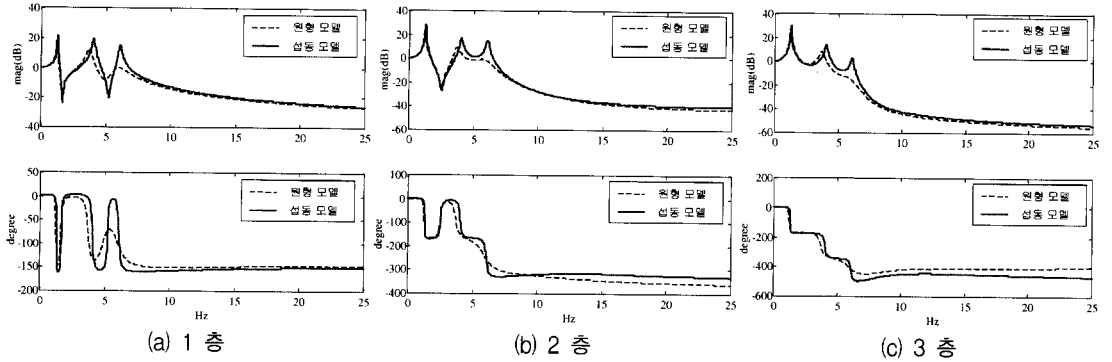


그림 9 질량 변화에 따른 건물의 전달함수와 위상

표 1 원형 모델과 섭동 모델의 건물 특성 변화

		1 mode	2 mode	3 mode
원형 모델	고유 진동수	1.23Hz	3.71Hz	5.94Hz
	감쇠비	2.77%	4.49%	10.6%
섭동 모델	고유 진동수	1.29Hz	4.04Hz	6.1Hz
	감쇠비	1.54%	2.21%	1.57%

고려한  $\mu$  합성법을 이용하여 원형 모델에 대한 제어기를 설계하여 원형 및 섭동 모델에 대한 제어 응답을 비교하였으며 제어 기법의 안정성을 살펴 보았다. 그림 10은 원형 모델에 대한 3층 건물의 제어 응답과 전달함수로써 두 기법 모두 원형 모델에 대하여 제어가 이루어지는

것을 확인할 수 있다. Kanai-Tajimi 모델이 플랜트에 반영이 되어 있기 때문에 외란 입력으로는 25Hz 이상 주파수대역을 제거한 PGA가 0.08g인 랜덤파를 이용하였으며 Kanai-Tajimi 모델의 주요 스펙트럼 대역이 실험모델의 1차주파수를 포함하고 있다. 그리고 그림 11은 섭동 모델에 대한 3층 건물의 가속도 응답과 전달함수이다. 표 2는 원형 모델과 섭동 모델의 제어 시와 비제어 시의 응답을 비교한 것이다.

다음 그림 11과 같이 불확실성을 고려한  $\mu$  합성 제어기법은 최대 특이값을 최소화하는 제어기가 설계되므로 섭동 모델에 관해서도 건물의 주된 모드인 1차 모드의 크기를 감소시킬 수 있어

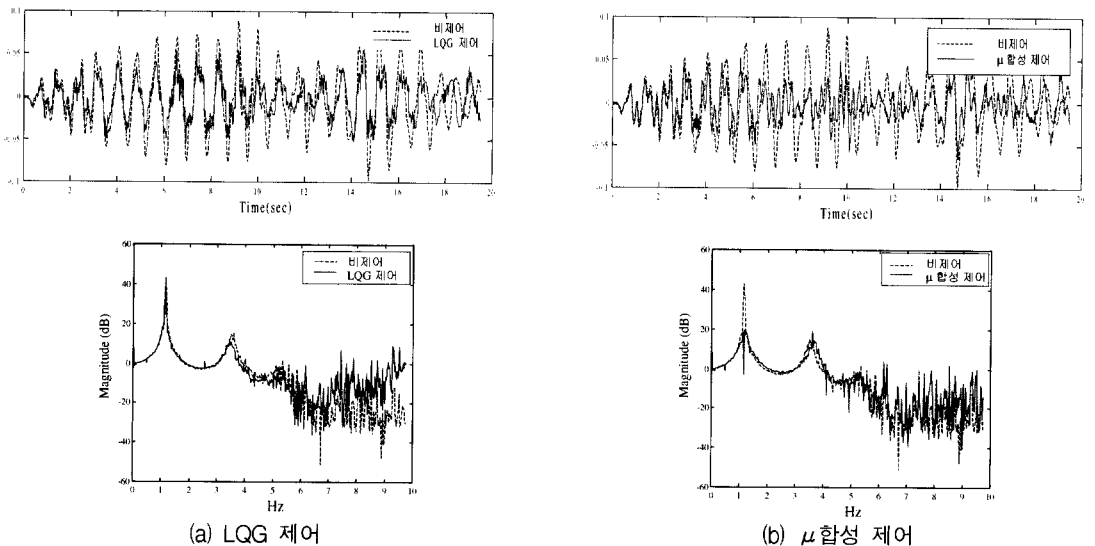
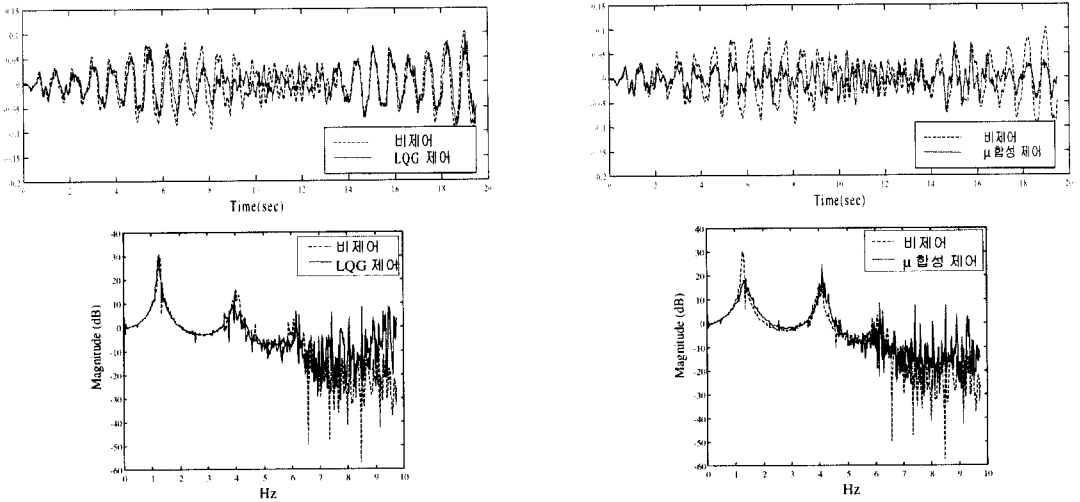


그림 10 원형 모델에 대한 3층 건물의 가속도 응답과 전달함수



(a) LQG 제어

(b)  $\mu$  합성 제어

그림 11 섭동 모델에 대한 3층 건물의 가속도 응답과 전달함수

표 2 건물의 응답 비교

			1 층	2 층	3 층	AMD 입력 볼트값 [V]	
비제어시 응답	원형 모델 [g]	Peak value	0.075	0.094	0.098	X	
		RMS	0.025	0.030	0.035		
	섭동 모델 [g]	Peak value	0.086	0.110	0.104		
		RMS	0.027	0.034	0.041		
LQG 제어 응답	원형 모델	가속도 응답 [g]	Peak value	0.058	0.054	0.057	0.270
			RMS	0.017	0.018	0.021	0.108
	제어율 [%]	Peak value	77.33	57.45	58.16	X	
		RMS	68.00	60.00	60.00		
	섭동 모델	가속도 응답 [g]	Peak value	0.059	0.078	0.098	0.300
			RMS	0.020	0.026	0.031	0.137
	제어율 [%]	Peak value	68.60	70.91	94.23	X	
		RMS	74.07	76.47	75.61		
	제어율 변화비		Peak value	0.89	1.23	1.62	1.11
			RMS	1.09	1.27	1.26	1.27
$\mu$ 합성법 제어 응답	원형 모델	가속도 응답 [g]	Peak value	0.056	0.055	0.065	0.470
			RMS	0.019	0.016	0.019	0.219
	제어율 [%]	Peak value	74.67	58.51	66.32	X	
		RMS	76.00	53.33	54.29		
	섭동 모델	가속도 응답 [g]	Peak value	0.067	0.060	0.071	0.490
			RMS	0.021	0.019	0.021	0.222
	제어율 [%]	Peak value	77.91	54.55	68.27	X	
		RMS	77.78	55.88	51.22		
	제어율 변화비		Peak value	1.04	0.93	1.02	1.04
			RMS	1.02	1.05	0.94	1.01

불확실성에도 효과적인 제어가 가능하였다. 그러나, LQG 제어기법은 섭동 모델 시 건물의 1차 모드를 효과적으로 제어하지 못하여 건물 3층의 가속도값이 시간이 지날수록 제어 효과가 떨어지는 경향을 나타낸다. 표 2는 응답과 AMD에 입력 전압 볼트값을 정량화한 것으로 원형 모델과 섭동 모델의 제어율 변화인 제어율 변화비를 분석해 볼 때 3층 가속도 응답인 경우  $\mu$  합성법일 때 1에 근접하여 매우 안정적으로 제어가 이루어지는 것을 알 수 있다. 그러나 LQG 기법은 최대치인 경우 1.62가 되어 섭동 모델의 경우 제어 효율이 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 또한, AMD에 입력되는 전압의 RMS값도 원형 모델 시 0.108에서 섭동 모델에서는 0.137로 약 1.27배로  $\mu$  합성 제어시의 1.01배보다 오히려 더 커지는 경향이 있어 건물의 불확실성에 의해 제어 시스템이 불안정해 질 수가 있다.

그림 12는 원형 모델의 실험치와 수치 해석치를 3층 제어 응답과 전달함수로 비교한 것으로서 시간 지연과 같은 오차가 거의 발생하지 않았으며 응답의 크기와 전달함수의 형태도 거의 일치한다. 따라서 올바른 제어기 설계 시에는 제어시스템의 불확실성에 의한 제어 저하를 방지할 수 있다.

## 6. 결 론

실제 구조물과 저장된 모델 사이의 오차에 의하여 제어기의 성능이 저하가 되며 제어기와 구조물의 상호 작용과 지진과 같은 외란 등의 불확실성과 지진작용 시 구조물의 동적특성 변화로 인하여 제어기의 성능이 더욱 저하가 된다. 이러한 저하 요인은 제어기 설계 시 요구되는 구조물의 수학적모델에 대한 불확실한 요소로 작용하기 때문에 제어성능의 저하를 일으키며 응답의 불안정을 유발하기도 한다.

본 논문에서는 이러한 구조물의 동적 특성 변화와 불확실성을 고려한 강인제어기법을 이용하여 제어기를 설계하였으며 강인성능을 실험으로 검토하였다. 고주파 대역으로 갈수록 구조 시스템의 불확실성이 커지는 경향이 있으므로 실험에서는 구조물에서 슬래브의 질량을 제거하여 동적 특성을 변화한 시스템에 불확실성을 고려한  $\mu$  합성법 제어기와 그렇지 못한 LQG 제어기를 적용하여 제어 성능 및 강인성을 살펴보았다.

LQG 제어기법은 섭동 모델의 1차 모드를 제어하지 못하여 시간이 지날수록 제어 효과가 떨어지는 경향을 나타낸다. 또한, AMD에 입력되는 전압도 섭동 모델에서 오히려 더 커지는

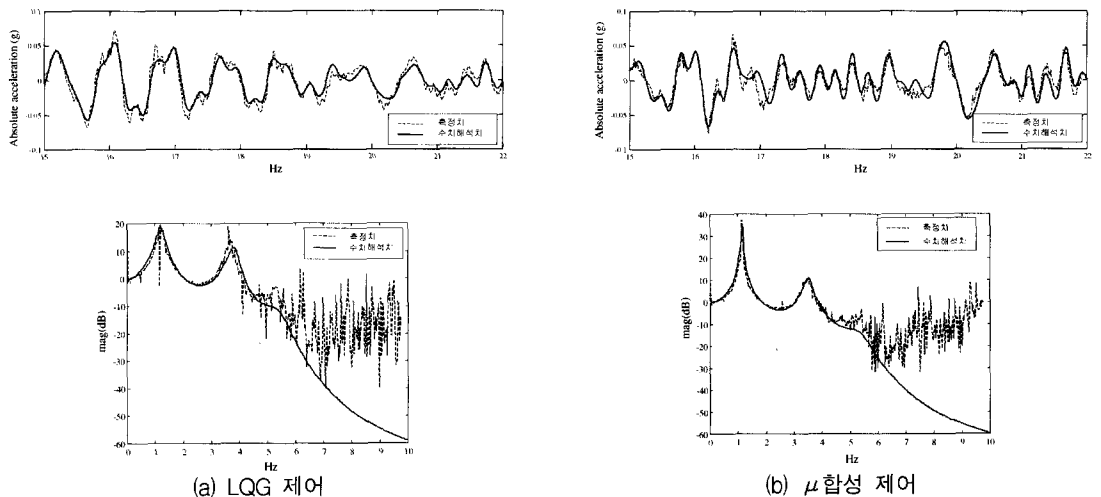


그림 12 원형 건물의 제어 응답과 전달함수 비교



경향이 있어 건물의 불확실성에 의해 제어 시스템이 불안정해 질 수가 있다. 그러나,  $\mu$  합성 제어기법은 주파수 영역에서의 성능 평가에 의거하여 제어 모델의 불확실성을 정량적으로 다룰 수 있으며 효과적인 제어기 설계를 가능하게 해 준다. 그리고, 실험 결과에서와 같이 구조물 특성의 변화에도 제어시스템의 안정성 및 성능을 동시에 만족하는 강인 성능을 보장해주는 것을 알 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호:1999-1-310-001-3)지원으로 수행되었음.

### 참고 문헌

1. Balas, G. J., "Synthesis of controllers for the active mass driver system in the presence of uncertainty," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, 1998, pp. 1189-1202.
2. 고현무, 박관순, 박원석, 조인선, "LQG/LTR 제어 기법을 이용한 지진응답의 능동적 진동 제어", 추계 한국지진공학회 학술발표회 논문집, 한국지진공학회, Vol. 3, No. 2, 1999, pp. 244-250.
3. Wu, J. C., Yang, J. N., and Agrawal, A. K., "Applications of sliding mode control to to benchmark problems," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, 1998, pp. 1247-1265.
4. Balas, G. J., Doyle, J. C., Glover, K., Packard, A., and Smith, R.,  *$\mu$ -Analysis and Synthesis TOOLBOX User's Guide*, The MathWorks, 1998.
5. 민경원, 김성춘, 황성호, 호경찬, 정진욱, 주석준, "Matlab을 이용한 축소 모형건물의 시스템 식별과 제어기 설계", 소음진동충격 학술대회논문집, 한국소음진동공학회, Vol. 2, 2000, pp. 978-983.
6. Shahian, B. and Hassul, M., *Control System Design Using MATLAB*, Prentice Hall, 1993.
7. Young, P. M. and Bienkiewicz, B. B., "Robust controller design for the active driver benchmark problem," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 27, 1998, pp. 1149-1164.
8. Burl, J. B., *Linear Optimal Control and Methods*, Addison-Wesley, 1998.
9. Dyke, S. J., Spencer, B. F., Quast Jr., P., Kaspari Jr., D. C., and Sain, M. K., "Implementation an AMD using acceleration feedback control," *Microcomputers in Civil Engineering : Special Issue on Active and Hybrid Structural Control*, 1995.
10. 주석준, "건축구조물의 지진응답의 강인제어에 대한 실험적 연구", 공학박사학위논문, 서울대학교, 2000.