

## 방진용 고무를 이용한 가새형 감쇠기의 진동 특성에 관한 실험 연구

### Experimental Study of Dynamic Characteristics of Brace-Typed Dampers using Vibration-resistant Rubbers

민경원\* 김진구\*\* 조한욱\*\*\*  
Kyung-Won Min Jinkoo Kim Hanwook Jo

이성경\*\*\*\* 호경찬\*\*\*\*  
Sung-Kyung Lee Kyung-Chan Ho

#### Abstract

Vibration-resistant rubbers, whose elastic and shear behaviors are similar to viscoelastic materials, are used to make brace-typed dampers to reduce the building vibration. Experimental study is carried out to find the vibration characteristics of the dampers installed in the building model. The natural frequencies and modal damping ratios are obtained from the free vibration test and Fourier analysis. Analytical model of the modal strain energy method are used to find the viscoelastic characteristics of the brace-typed dampers from the experimental results. Finally shaking table test is performed to find the response behavior of the building model under earthquake loading. The present experimental study shows that the brace-typed dampers have the behavior of viscoelastic dampers, which increase the modal damping ratios and viscoelastic characteristics.

#### 1. 서론

지진 및 바람에 의한 건물의 진동을 감소시켜주는 것은 건물이 지니고 있는 감쇠능력 때문이다. 그러나, 이러한 능력은 매우 작기 때문에 외부하중에 대하여 건물은 과도한 진동을 일으키기도 한다. 따라서, 이러한 진동을 감소시켜 주기 위하여 인위적으로 건물의 감쇠능력을 향상시키는 점탄성 감쇠기(viscoelastic dampers, 이하 감쇠기라 칭함.)가 많이 이용되고 있으며 건물의 층 사이에 설치되는 가새(brace)와 그 사이에 끼워지는 점탄성 재료(viscoelastic material)로 구성되어 있다. 감쇠기는 층간의 상대응답으로 인한 진단 변형에 따른 에너지를 소산시킴으로써 건물의 진동을 감소시켜 주는 원리를 이용하고 있다. 따라서 점탄성 재료로써 진단 변형에 의한 에너지 소산 능력이 뛰어난 copolymer 또는 glassy substance 같은 재료가 이용이 되고 있으며 계속 재료의 개발이 진행되고 있다.

따라서 위와 같은 감쇠기에 관한 연구는 에너지 분산 능력이 뛰어난 점탄성 재료의 성능실험 결과를 바탕으로 건물 모델에 관한 실험과 해석 모델을 수행할 수가 있다. 뉴욕대학(버팔로 소재)의 연구진들은 미국 3M 회사에서

개발한 점탄성 재료를 감쇠기의 재료로 이용하여 건물 모델에 설치하여 실험을 수행하였으며 이러한 결과를 바탕으로 모드 변형에너지법(mode energy method)이라는 수치해석 모형을 제안하여 감쇠기 설치로 인하여 증가되는 건물의 모드 감쇠비를 정량적으로 나타내었다. 국내에서도 위와 같은 감쇠기를 건물에 설치하여 건물의 지진응답의 제어 성능에 관한 실험과 동일한 해석 모형에 관한 연구를 수행하였으며 다수의 해석 연구가 진행되었다. 그러나 위의 연구는 외국 연구결과인 점탄성 재료에 관한 성능을 근거로 하여 건물 모델의 실험이나 해석을 수행하였기 때문에 국내에서 위의 실험을 수행하기 위해서는 미국 동지에서 개발된 점탄성 재료를 이용하거나 독자적인 재료의 개발 및 성능 분석이 전제되어야 하나 현재 이러한 분야에 대한 연구 개발이 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 점탄성 재료의 진단 변형 및 탄성 변형 특성과 유사한 성질을 지니고 있는 방진용 고무 재료를 이용하여 가새형 감쇠기(brace-typed dampers)를 구성하고 이것을 건물 모델에 설치하였을 경우, 진동 실험을 통하여 에너지 소산 특성과 모드 변형에너지법에 따른 모드 감쇠비를 구하여 점탄성 재료로써의 성능을 분석하여 향후 점탄성 재료의 개발과 감쇠기 설치에 따른 건물 모델의 성능 검증에 대한 기초 자료를 구하는 데 목적이 있다.

\* 인천대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

\*\* 성균관대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사

\*\*\* 삼성물산 건설부문 기술연구소, 수석연구원, 공학박사

\*\*\*\* 인천대학교 건축공학과 대학원 석사과정

## 2. 수치 해석모형과 실험방법

본 연구에서 이용하고 있는 모드 변형에너지법은 뉴욕 주립대학교에서 제안한 수치해석 모형으로 다음과 같은 감쇠기 설치로 인한 건물의 부가 감쇠비를 구하는 식을 제시하고 있다.

$$\xi = \frac{\eta}{2} \left( 1 - \frac{\omega_{\text{건물}}^2}{\omega_{\text{건물+감쇠기}}^2} \right) \quad (1)$$

윗 식에서  $\eta$ 은 소산비로써 다음과 같이 점탄성 재료의 전단 복원계수(shear storage modulus)  $G'$  와 전단 소산계수(shear loss modulus)  $G''$  와의 비를 의미하며  $\omega_{\text{건물}}$  과  $\omega_{\text{건물+감쇠기}}$  는 각각 건물의 1차 고유진동수와 감쇠기가 설치되었을 때 건물의 1차 고유진동수이다.

$$\eta = G'' / G' \quad (2)$$

윗 식 (1)을 보면 모드 감쇠비는 전단 복원계수 및 소산계수와 고유진동수에 관계된 것을 알 수 있다. 따라서 점탄성 재료의 특성인 소산비와 고유진동수의 변화를 파악하면 감쇠기로 인하여 증가된 감쇠비를 알 수 있게 된다.

본 연구의 목적은 에너지 소산 특성이 파악이 되지 않은 방진용 고무를 이용한 감쇠기를 제작하여 건물 모형에 설치한 다음, 감쇠기의 진동 성능 분석을 위한 실험을 통하여 건물의 감쇠 능력과 방진용 고무의 에너지 소산 능력을 알아보기 위한 것이다. 이를 위하여 다음과 같이 방진용 고무의 전단 변형에 따른 역학적 특성을 분석할 필요가 있다.

다음 그림 1.와 같이 원통 형태의 방진용 고무는 전단력  $V$ 가 작용할 때 전단변형을  $\gamma$ 이 생기는 점탄성 재료와 유사한 특성을 가지고 있으며

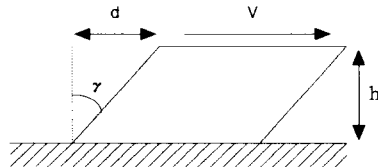


그림 1. 방진용 고무의 전단변형

다음과 같이 전단변형에 대한 횡강성  $k_{ds\#}$  산정할 수 있다.

$$k_{ds} = \frac{V}{d} = \frac{AG'}{h} \quad (3)$$

위의 식에서  $A$ 는 전단력을  $h$ 는 높이,  $\gamma$ 은 전단변형을, 그리고  $G'$ 는 전단계수이다.  $G'$ 는 정하중(static load)  $V$ 에 대한 전단계수이고 식 (1)과 (2)에서 다른 전단  $G'$ 는 동하중(dynamic load)에 대한 전단 복원계수이다. 전단 복원계수  $G'$ 는 하중의 진동수와 외부 온도 등에 민감하여 전단계수  $G$ 와 차이가 있으나 본 연구에서는 진동수 및 온도에 따른 영향은 없고 전단변형에 따른 정적 및 동적 하중의 특성 차이를 무시할 수 있다고 가정을 하면 식 (3)의  $G$ 를 구하여  $G'$ 를 대신할 수 있다. 위의 횡강성 외에 점탄성 재료가 지니고 있는 전단 소산계수  $G''$ 에 관계한 소산강성  $k_{dl}$ 의 식은 다음과 같다.

$$k_{dl} = \frac{AG''}{h} \quad (4)$$

위와 같은 계수  $G'$ 와  $G''$ 는 점탄성 재료의 진동 가진을 통하여 재료의 외력 대 변형의 이력 곡선을 구하며 이러한 특성을 바탕으로 감쇠기를 설계한다. 그러나 본 실험의 방진용 고무를 적용한 감쇠기의 진동연구에서는 위의 방법과는 달리 방진용 고무 재질을 이용하여 감쇠기를 제작하여 건물에 설치하고 진동실험을 통하여 측정된 응답을 분석하여 점탄성 재료로써의 성능을 구하기로 한다.

## 3. 감쇠기의 실험모형

다음 그림 2.와 같이 원통형태로 제작을 하였으며 상하에 얇은 철판을 부착시키고 지름 5mm 볼트를 고정시켜 건물의 슬래브와 가새에 체결이 용이하도록 하였다. 그리고 횡강성을 다양하게 조절하기 위하여 높이를 29mm, 43mm, 58mm인 3종류로 하였으며 내부에 강철판을 각각 2개, 4개, 8개씩 넣어 판에 따른 영향도 고려하였다.

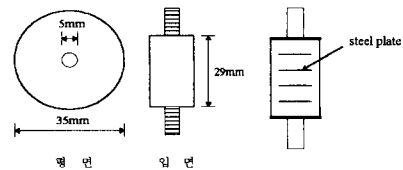


그림 3. 점탄성 고무의 모형

다음 표 1은 방진용 고무의 높이와 내부에 삽입된 철판의 개수에 따른 고무의 명칭을 나타낸 것이다.

표 1. 점탄성 감쇠기의 종류

이름	h29	h43	h58	hp2	hp4	hp8
높이 h (mm)	29	43	58	29	29	29
plate 갯수	.	.	.	2	4	8

원통 형태의 고무는 그림 3.와 같이 상부는 건물 모형의 슬래브에 체결되었으며 하부는 가새의 상부에 연결되었다. 가새의 하부는 지반에 고정시켰으며 건물의 진동에 움직이지 않도록 두께가 굵은 철판으로 제작하였다.

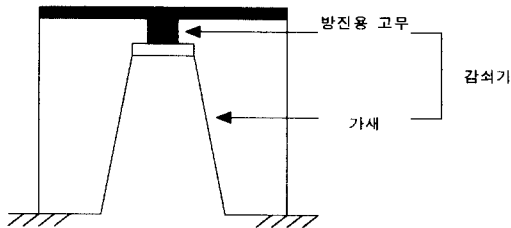


그림 3. 가새형 감쇠기가 설치된 건물모형

방진용 고무와 가새로 이루어진 감쇠기가 설치된 건물 모형은 다음 사진 1.과 같이 소형 진동대 위에 고정시켜 지반 진동 및 자유 진동에 의한 건물의 응답을 측정하여 감쇠기의 특성을 파악하기로 한다. 건물 슬래브는 알루미늄으로 제작되었으며 60cmX60cm의 크기를 가지고 있으며 높이 50cm인 4개의 강철 기둥으로 지지되어 있다. 또한 진동대는 스텝핑 모터(stepping motor)에 의하여 한 방향으로 구동되며 조화진동 및 지진하중을 가할 수 있게 제작되었다. 사진 1과 같이 감쇠기는 건물 모델에서 전후 2개가 설치되어 있으며 건물의 진동시 방진용 고무의 전단 변형 외에 다른 부수적인 진동이 유발되지 않도록 두꺼운 철판의 가새와 연결 볼트로 구성되어 있다.

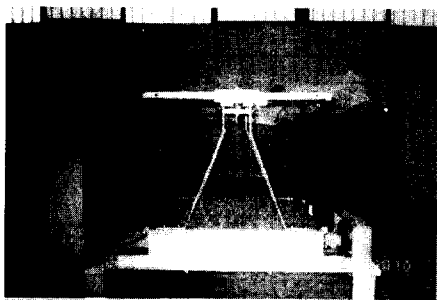


사진 1.가새형 감쇠기가 설치된 건물 모형

#### 4. 실험방법 및 결과

방진용 고무는 전단변형에 의한 횡강성이 존재하므로 건물의 강성을 증가시키게 된다. 그러나 감쇠기의 목적은 건물의 진동응답을 감소시키기 위한 것이므로 횡강성이 크게 되어 건물의 구조 특성을 변경시키는 것이 바람직하지 않다. 또한 식 (3)에서와 같이 횡강성을 통하여 고무 재질의 전단계수를 파악할 수 있으므로 실험의 첫 단계로 감쇠기의 설치 유무에 따른 건물모델에 진동을 가하여 응답의 주파수분석(Fourier analysis)에 의한 모델의 고유진동수의 차이를 구하여 고무의 횡강성을 구하였다. 그리고 식 (3)에서 전단계수  $G$  를 유도하여 전단복원계수  $G'$  를 유도하였다. 또한 진동대위에 설치된 건물모형에 자유진동을 주어 응답을 측정, 로그감소법(logarithmic decrement method)을 이용하여 감쇠기 설치에 따른 모드감쇠비를 측정하였다.

위와 같이 실험을 통하여 감쇠기 유무에 따른 고유진동수와 감쇠비를 구한 다음, 식(1)에 의하여 소산비  $\eta$  을 알 수 있으며 전단소산계수  $G''$  를 구할 수 있다. 표 1.에서와 같이 6종류의 방진용 고무를 이용한 감쇠기의 진동 실험을 통하여 나타난 결과는 그림 4.~7.과 같다. 그림 4.는 감쇠기 설치로 인하여 각 건물모델의 고유진동수의 증가 비율을 나타낸 것인데 건물만 있을 때의 3.882Hz보다 증가한 것을 알 수 있다. 고유진동수가 가장 증가한 모델이 hp8 모델로써 진동수 증가율이 1.89 배이다. 이러한 사실은 식 (1)에서와 같이 고무의 높이가 29mm로 제일 낮아 횡강성이 증가하였을 뿐만 아니라 내부에 강성을 증가시켜주는 철판이 8개 들어 역시 강성을 증가시켜 주었기 때문이다.

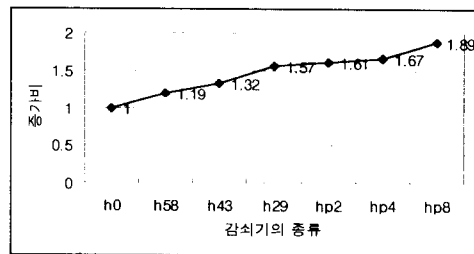


그림 4. 감쇠기 설치에 따른 고유진동수의 증가비

다음 그림 5.은 감쇠기 설치로 인한 건물의 모드 감쇠비의 증가를 감쇠기가 없을 때의 모드 감쇠비의 배수로 나타낸 것이다. 건물만 있을 때의 감쇠비가 0.17%인 것을 고려할 때 감쇠기 설치로 인하여 감쇠비 증가가 많이 이루어진 것을 알 수 있으며 그림 4.에서와 같이 고유진동수의 증가가 많은 감쇠기 모델 순으로 감쇠비 증가가

많이 된 것을 확인할 수 있다. 이러한 사실은 고유진동수가 높을수록 건물 모델의 단위시간당 진동 횟수가 많아지게 되어 감쇠기 고무의 전단 변형의 진동 횟수에 따른 에너지 소산 능력이 증가되기 때문이라고 추측되어 방진용 고무의 점성(viscosity) 특성을 파악할 수 있다.

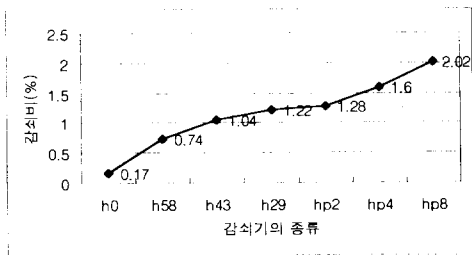


그림 5. 감쇠기 설치에 따른 감쇠비의 증가

다음 그림 6은 감쇠기 설치로 인한 건물의 소산비를 나타낸 것으로 감쇠기 모델에 따른 소산비의 크기가 0.035에서 0.052의 범위에 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 사실은 미국 3M 회사에서 개발한 점탄성 재료의 소산비 범위인 1에서 2사이인 것과 비교할 때 상당한 차이를 나타내고 있어 소산 능력이 매우 낮은 것을 알 수 있다.

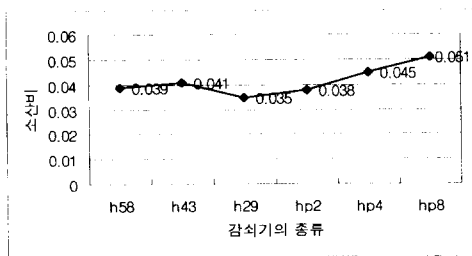


그림 6. 감쇠기 설치에 따른 소산비의 변화

소산비  $\eta$ 는 전단복원계수  $G'$ 와 소산계수  $G''$ 의 비를 의미하는 것인데 고유진동수에서 감쇠기의 강성  $k$ 를 추정하여 식(2)에서  $G'$ 를 구할 수 있다. 또한  $G''$ 는 소산비의 정의인  $\eta = G''/G'$ 에서 구할 수 있다.

위 모델을 진동대 위에 설치하고 모델의 고유진동수와 같은 진동수를 가지는 공진 하중을 주어 건물 모델의 공진 응답의 증폭비(공진응답과 진동대 입력 응답의 비)를 구하여 다음과 같이 나타내었다.

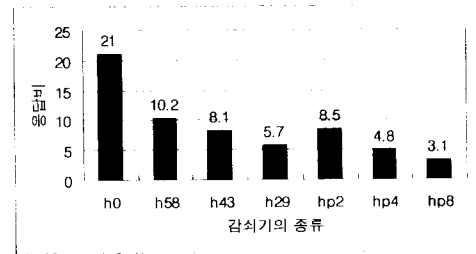
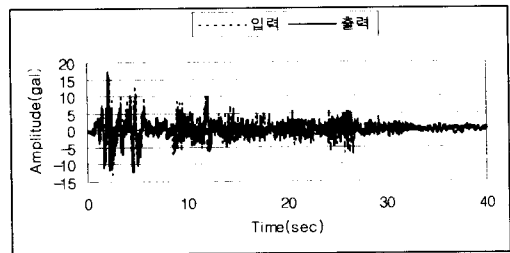


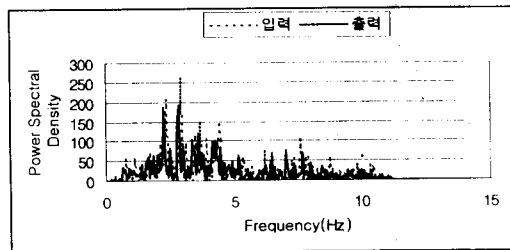
그림 7. 감쇠기의 종류에 따른 건물의 응답비

위의 결과를 보면 감쇠기가 설치되지 않은 건물 모델의 경우(h0 모델), 응답의 증폭비가 21로써 공진에 의한 건물 응답의 증가가 매우 큰 사실을 알 수 있으나, 감쇠기가 설치된 모델의 경우 증폭비가 전 모델에 걸쳐 h0 모델의 1/2 이하로 감소된 것을 알 수 있다. 이러한 사실은 감쇠기의 설치에 따라 건물에 부가된 모드 감쇠비에 따른 그림 5의 결과와 일치하며 모드 감쇠비의 증가가 제일 큰 hp8 모델의 경우 건물의 응답비가 3.1로 제일 적어 감쇠기로서의 성능이 제일 좋은 것을 알 수 있다.

마지막으로 소형진동대를 이용한 지진 입력에 대한 건물 모델의 응답을 측정 비교하였다. 지진 모델은 스테핑 모터의 신호 발생과 토크(torque) 능력을 고려하여 El Centro 지진(NS성분)을 1/20로 축소된 지진파를 입력으로 하였다. 다음 그림 9는 1/20로 축소된 El Centro 지진의 발생을 진동대에서 측정하여 시간 및 진동수 영역에서 나타낸 것으로 입력된 지진파와 비교하여 보았을 때 매우 비슷한 것을 알 수 있다.



(a) 시간영역



(b) 진동수영역

그림 8. 진동대에서 측정된 지진파

이렇게 축소된 El Centro 지진입력을 건물 모델과 감쇠기 효과가 제일 좋은 hp8 모델을 설치한 건물 모델에 가하여 다음과 같은 응답을 비교하였다. 그림 9.과 10.은 건물 모델과 감쇠기가 설치된 건물 모델에서 측정된 응답으로써 각각 시간영역과 진동수영역에서 나타낸 것이다, 감쇠기가 설치된 건물의 경우가 건물 만의 경우 보다 응답이 매우 적어 감쇠기의 효과를 알 수 있다. 그러나 그림 10.의 진동수 분석에 나타나 있듯이 감쇠기가 설치된 모델의 경우, 고유진동수가 7.33Hz 로써 건물의 고유진동수인 3.88Hz 보다 증가되기 때문에 그림 8. (b)의 El Centro 지진파의 파워스펙트럼을 볼 때 건물 모델의 경우보다 입력 크기가 매우 감소된 것을 알 수 있다. 따라서, 지진파에 대한 감쇠기 설치에 따른 건물 응답의 감소는 감쇠기의 역할 외에 고유진동수의 증가에 따른 지진 입력 크기의 감소에 따른 것이라고 분석할 수 있다.

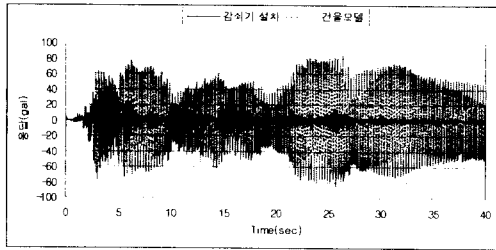


그림 9. 건물 모델과 감쇠기가 설치된 건물의 지진응답(시간영역)

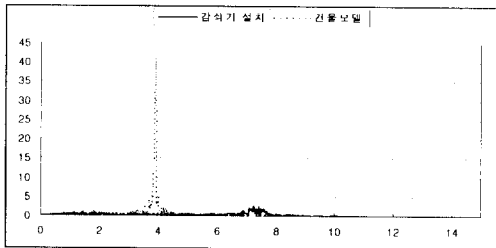


그림 10. 건물 모델과 감쇠기가 설치된 건물의 지진응답(진동수영역)

## 5. 결론

점탄성 재료의 진단 변형 및 탄성 변형 특성과 유사한 성질을 지니고 있는 방진용 고무 재료를 이용하여 가새형 감쇠기를 제작하고 이것을 건물 모델에 설치하여 진동 실험을 수행하였다. 강성 및 크기가 다른 6 종류의 방진용 고무를 설치한 가새를 모형 건물의 층 사이에 고정시켜 실험모형을 제작하였으며 자유 진동실험과 주파수 분석을 통하여 고유진동수 및 모드 감쇠비의 변화를

측정하였다. 또한 이러한 실험 결과를 바탕으로 점탄성 감쇠기가 설치된 건물의 해석방법인 모드 변형에너지법을 적용하여 가새형 감쇠기가 지니고 있는 점탄성 감쇠기로써의 특성을 분석하여 소산비가 매우 적게 나타나는 것을 조사하였다. 마지막으로 소형진동대를 이용하여 건물 모델의 지반에 El Centro 지진파를 가하여 내진 성능을 파악하였다. 가새형 감쇠기의 설치로 인하여 건물의 모드 감쇠비가 증가하였으므로 지진파에 의한 응답은 감소하는 것으로 측정되었다. 그러나 점탄성 감쇠기와는 달리 가새형 감쇠기는 점성보다는 탄성에 의한 강성의 영향이 크게 나타나 건물의 고유진동수를 크게 증가시켜 El Centro 지진파에 의한 응답 감소의 영향이 감쇠비의 증가 외에도 고유 진동수 증가에 따른 건물의 특성이 변형되어 나타난 복합적인 영향이라고 분석된다. 이상과 같은 실험 결과로써 에너지 소산 특성을 구하여 점탄성 재료로써의 성능을 분석하였으며 향후 점탄성 재료의 개발과 감쇠기 설치에 따른 건물 모델의 성능 검증에 대한 기초 자료를 습득하였다.

## 참 고 문 헌

1. R. ZHANG and T.T. SOONG(1989), Seismic response of steel frame structures with added viscoelastic dampers, Earthquake engineering and structural dynamics, Vol.18, 389-396
2. R.F.LOBO(1993), Inelastic response of reinforced concrete structures with viscoelastic braces, Technical report NCEER-93-0006, pp. 2.9-2.11
3. E.H.DOWELL(1979), On some general properties of combined dynamical systems, ASME Journal of Applied Mechanics, Vol.46, pp.206-209
4. D.T.GREENWOOD(1988), Principles of dynamics, 2nd ed. N.J., Prentice-Hall Inc., pp.280-282
5. T.IGUSA(1991), Resonance characteristics of connected subsystems:theory and simple configurations, Journal of Sound and Vibration, Vol.146, No.3, pp.407-421.
6. A.S.VELESTOS and C.E.VENTURA(1986), Modal analysis of non-classical damped linear systems Earthquake engineering and structural dynamics, Vol.14, 217-243
7. BENDAT, J.S., and PIERSOL, A.G.(1971) Random Data : Analysis and Measurement Procedures, John Wiley & Sons.
8. CLOUGH, R.W., and PENZIEN, J. (1975) Dynamics of Structures, McGraw - Hill, New York.