

생애주기비용 최소화에 의한 점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물의 통합최적설계 및 비용효율성 평가

Integrated Optimum Design and Cost Effectiveness Evaluation of Viscoelastically Damped Building Structures based on Life-Cycle Cost Minimization

박관순* 함대기** 고현무***
Park, Kwan-Soon Hahm, Daegi Koh, Hyun-Moo

국문요약

점탄성감쇠기가 설치된 구조물의 통합최적설계기법 및 비용효율성 평가기법을 제시하였다. 구조부재와 점탄성감쇠기의 사용량을 설계변수로 하여, 생애주기 비용을 최소화하도록 최적화문제를 정식화하였으며, 유전자알고리즘을 적용하여 최적의 설계변수를 검색하였다. 수치예제에 대한 통합최적설계 수행 결과를 통해 지반운동 특성에 따른 점탄성감쇠기의 최적배치 및 각 층 감쇠의 최적분포 경향을 분석하였으며, 점탄성감쇠기가 설치되지 않은 구조시스템과의 생애주기비용 비교를 통하여 비용효율성을 평가하였다. 점탄성감쇠기는 특히 중약진지역에서 높은 비용효율성을 보이는 것으로 나타났다.

주요어 : 통합최적설계, 비용효율성, 점탄성감쇠기, 생애주기비용, 유전자알고리즘

ABSTRACT

This paper presents an integrated optimum design and a cost effectiveness evaluation method of a viscoelastically damped structural system. The criterion selected for the optimization is the minimization of the life cycle cost which is a function of structural sizing variables and the amount of the viscoelastic damper. A genetic algorithm is used as a numerical searching technique in order to simultaneously find the optimum parameters of the integrated system. Optimal distributions of design variables according to various seismic characteristics are investigated by applying the proposed design method to a numerical example of a 10 story building structure. The cost effectiveness of viscoelastically damped structural system is also evaluated by comparing the life-cycle cost of the structure without viscoelastic dampers. The results show that the viscoelastic damper is effective in a region of low to moderate seismicity.

Key words : integrated optimum design, cost effectiveness, viscoelastic damper, life-cycle cost, genetic algorithm

1. 서 론

구조 해석 및 설계기술의 발달로 가능하게 된 빌딩구조물의 고층화 및 경량화 추세는, 필연적으로 구조물의 진동문제를 유발하게 된다. 점탄성감쇠기는 건물의 감쇠효과를 증가시켜 진동에너지를 소산시킴으로써 이러한 진동문제를 효과적으로 해결할 수 있는 장치로서, 이미 많은 이론적 실험적 연구를 통해 그 성능이 입증되었으며, 다양한 구조시스템의 진동제어에 실제 적용된 바 있다⁽¹⁾⁻⁽³⁾. 또한 점탄성감쇠기의 빌딩구조물에 대한 적용이 점차 증가함에 따라 점탄성감쇠기의 효율적인 배치와 최적화된 설계를 위한 연구가 최근에 이르러 다양한 연구진에 의하여 활발히 수행되고 있다.⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾

기존의 점탄성감쇠기 최적 배치 및 최적 설계 연구들은 점탄성감쇠기를 구조물에 설치된 부가적 장치로서 인식하여 점탄성감쇠기만의 설계변수를 최적화함으로써, 전체 구조시스템의 성능 및 경제적 효율성을 극대화하지 못

하는 한계를 지니고 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여, 구조물과 제어장치를 하나의 통합된 시스템(Integrated system)으로 간주함으로써, 구조물의 설계단계에서부터 제어장치의 특성을 고려하고, 구조물과 제어시스템을 동시에 최적화하는 개념이 제안되었다.⁽⁷⁾ 최근에는 동시통합최적설계의 개념을 점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물에 적용하여, 구조부재의 강성을 증가시키는 방법과 제어시스템을 설치하는 방법을 동시에 고려한 통합최적설계를 수행함으로써, 그 성능과 효율성을 극대화하기 위한 시도가 이루어진 바 있다.⁽⁸⁾ 그러나, 동시통합최적설계에 의한 점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물의 최적 배치 및 최적 설계 연구 또한 제한적인 하중 조건에 대한 최적화의 수준에 그치고 있으며, 다양한 하중 특성에 따른 점탄성감쇠기 장착 구조시스템의 최적 배치 및 최적 설계를 수행하고, 효율성을 검증하기 위한 연구는 아직 이루어진 바가 없다.

한편, 구조물의 동적해석 및 응답제어를 위한 이론적 실험적 연구가 활발히 진행되고, 국내외적으로 다양한 구조물에 대하여 적용이 이루어지게 됨에 따라^{(9),(10)}, 구조물 응답제어시스템의 경제적 효율성 검증을 위한 연구가 필요하게 되었다. 지금까지는 능동형제어장치와⁽¹¹⁾ 지진격리

* 정회원 · 동국대학교 건축공학과, 전임강사(대표저자: kpark@dongguk.edu)

** 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정

*** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

본 논문에 대한 토의를 2005년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2005. 1. 3 / 심사종료일 : 2005. 2. 4)

장치에 대하여^{(12),(13)} 생애주기비용 평가에 기반한 비용효율성 평가를 위한 연구가 수행된 바 있으나, 수동형제어 장치에 대한 경제적 효율성 평가에 관한 연구는 아직 국내외적으로 미진한 상황이다. 특히, 점탄성감쇠기를 비롯한 수동형제어시스템은 진동하중의 크기 및 주파수 특성에 따라 성능 및 경제적 효율성이 현저히 달라질 가능성이 있기 때문에, 다양한 하중 특성에 대한 검증이 이루어져야 할 필요가 있다. 그러므로 진동하중의 크기 및 주파수 성분에 따른 점탄성감쇠기의 최적 배치 및 최적 설계를 위한 연구와, 하중 특성에 따른 진동제어 성능 및 경제적 효율성의 검증을 위한 연구가 필요한 시점이라 할 수 있다.

이 연구에서는 점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물에 작용하는 다양한 지진규모, 지반특성의 하중조합에 대하여 통합최적설계의 기법을 적용함으로써 설계변수의 최적배치 및 최적설계를 수행하고 그 효율성을 검증하였으며, 구조시스템의 생애주기비용 산출을 통하여 지진특성에 따른 점탄성감쇠기의 비용효율성을 평가하였다. 이를 위해 2장에서는 다양한 지반운동 특성을 반영할 수 있는 지반운동을 모델링하였으며, 3장과 4장에서는 각각 점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물의 생애주기비용을 최소화하는 통합최적설계 문제를 구성하고 유전자알고리즘을 적용한 최적설계를 수행하였다. 지반운동 규모 및 지반종류에 따른 점탄성감쇠기의 비용효율성 평가 결과는 5장에 나타내었다.

이 연구를 통하여 다양한 지진규모 및 지반특성을 가지는 지진에 대한 점탄성감쇠기 및 구조시스템의 최적 설계안을 얻을 수 있었으며, 그에 따른 점탄성감쇠기의 비용효율성을 평가할 수 있었다. 점탄성감쇠기의 비용효율성은 견고한 지반의 경우 전반적으로 높은 비용효율성을 가지며, 연약한 지반의 경우에는 강진지역보다 중약진지역에서 현저히 높은 비용효율성을 가지는 것으로 나타났다.

2. 지반운동 모델링

구조물의 지진응답 해석을 위한 입력 지반운동 모델로는, 스펙트럼밀도함수 또는 실제 기록되었거나 인공적으로 생성된 가속도 시간이력이 사용되고 있다. 가속도 시간이력을 이용하는 방법은 실제 지진기록 중 목적에 알맞은 것을 몇 가지 선택하거나 인공지진 시간이력을 생성하여 사용하며, 동역학적 시간이력해석 등 결정론적 해석과정의 반복을 통해 응답을 얻음으로써 파손확률을 추정할 수 있다. 이 방법은 구조물이 비선형성을 가지는 경우와 같이 해석적 추정이 난해한 추계학적 문제에 대하여, 비교적 간단한 통계학적 처리 과정을 통해 파손확률 등의 관심을 가지는 통계값을 추정할 수 있다는 장점이 있으나, 신뢰성 있는 결과를 얻기 위해서는 많은 횟수의 시간이력 해석을 반복하여야 한다는 문제점이 있다⁽¹⁴⁾. 반면, 스펙트럼밀도함수를 이용하는 방법은, 주파수 영역에서의 스펙트럼 해석을 통해 응답의 통계값을 얻음으로써 비교

적 간단히 파손확률을 산출할 수 있는 방법이다. 이 연구에서 사용하고자 하는 유전자알고리즘을 이용한 최적화의 경우, 다양한 설계변수의 조합에 대하여 많은 횟수의 반복 계산을 필요로 하기 때문에, 적은 해석시간을 통해 신뢰성있는 결과를 얻기 위하여 스펙트럼 해석법을 사용하고, 그 입력 지반운동 모델로서 스펙트럼밀도함수를 생성하였다.

이 연구에서 목표로 하고 있는 진동하중의 크기 및 주파수 성분에 따른 점탄성감쇠기 장착 구조시스템의 최적 설계를 위해서는, 이러한 하중 특성을 반영할 수 있는 스펙트럼밀도함수의 모델링이 필요하다. 지금까지 입력지반운동의 스펙트럼밀도함수 모델로 Kanai Tajimi Model, Clough Penzien Model 등이 개발되어 왔으나, 이 모델들은 지진 스펙트럼밀도함수를 정의하는 여러 매개변수들이 특정지역의 지진 특성, 즉 지진가속도 및 지반특성과 어떠한 상관관계를 갖고 있는지를 밝혀내기가 쉽지 않다. 이 연구에서는 설계기준에 정의된 설계응답스펙트럼에 상응하는 스펙트럼밀도함수를 생성하는 방법을 사용함으로써 지진 특성을 반영할 수 있는 지반운동을 모델링하였다.

일반적으로 설계기준에서는 지진하중 특성을 반영하기 위하여 각 지역에 해당하는 지진가속도와 지반 특성에 따른 설계응답스펙트럼을 정의하고 있다. 여기서는 우리나라와 같은 중약진지역에 국한되는 것이 아닌, 강진지역을 포함하는 다양한 지진 및 지반 조건에 대한 최적설계와 비용효율성 평가를 목표로 하고 있기 때문에, 미국에서 건축물에 대하여 적용되고 있는 Uniform Building Code (UBC 97)를 따라 지진의 위험도를 나타내는 지진구역(seismic zone)과 그에 따른 지진구역계수 Z를 정의하였다.

각 지진구역에 따른 지진위험도는 해당 지진구역에서 발생 가능한 최대 지진가속도 또는 최대 진도로서 표현될 수 있는데, 각 지진구역에 대한 지진구역계수와 지진위험도는 다음의 표 1과 같다.⁽¹⁵⁾

표 1 지진구역에 따른 지진구역계수와 최대가속도

지진구역	지진구역계수 (Z)	최대가속도
0	0.04	0.040g
1	0.075	0.075g
2A	0.15	0.150g
2B	0.2	0.200g
3 (not near a great fault)	0.3	0.300g
4 (near a great fault)	0.4	0.400g

국내 건축물 설계를 위한 하중기준⁽¹⁶⁾ 상의 지진구역 I에 위치한 중요 건축물에 작용하는 지진하중은 표 1의 지진구역 2A에 해당되는 지진규모와 유사한 크기라 할 수 있다. 하중의 주파수 성분은 지반 특성에 의해 지배적인 영향을 받게 되며, UBC 97에서는 다음의 표 2와 같이

지반조사에 의하여 지반종류(soil profile type)를 정의함으로써 지진하중에 지반 특성을 반영하도록 하고 있다.

표 2 지반 특성에 따른 지반종류

지반종류	지반 특성
S_A	경암지반
S_B	보통암지반
S_C	매우 조밀한 토사지반 또는 연암지반
S_D	단단한 토사지반
S_E	연약한 토사지반
S_F	부지 고유의 특성평가가 요구되는 지반

설계응답스펙트럼은 지진구역계수와 지반종류 각각의 조합에 따라 주어지는 지진응답계수(seismic response coefficient) C_a 및 C_v 에 의하여 그림 1과 같이 구성되어, 해당 지역의 지진 특성을 반영하게 된다.⁽¹⁷⁾ 설계기준상의 설계응답스펙트럼에 상응하는 스펙트럼밀도함수를 생성하기 위한 방법은 다음과 같다. 먼저 각 지진구역마다 설정된 지진구역계수(seismic zone factor) 및 지반종류에 따른 응답스펙트럼을 구성하고, 초기에 백색잡음(white noise)으로 가정된 스펙트럼밀도함수로부터 스펙트럼 표현법(spectral representation method)⁽¹⁸⁾에 의해 생성된 시간이력으로 별도의 응답스펙트럼을 구성한다. 설계응답스펙트럼과 생성된 시간이력의 응답스펙트럼을 비교하여 스펙트럼밀도함수를 보정함으로써, 특정지역의 지진크기, 지반종류의 조합에 상응하는 스펙트럼모델을 시방서의 응답스펙트럼을 통하여 생성할 수 있다.⁽¹⁹⁾ 암반지반에 해당하는 지반종류 S_B 에서의 지진구역에 따른 스펙트럼밀도함수의 예와, 중약진지역에 해당하는 지진구역 2A에서의 지반 특성에 따른 지반운동 스펙트럼밀도함수의 예를 각각 도시하면 그림 2(a) 및 2(b)와 같다.

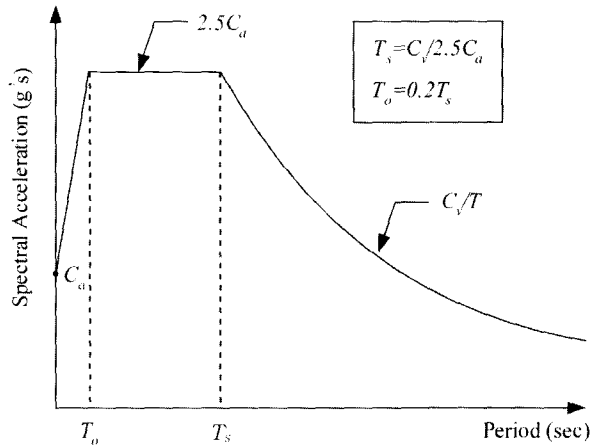
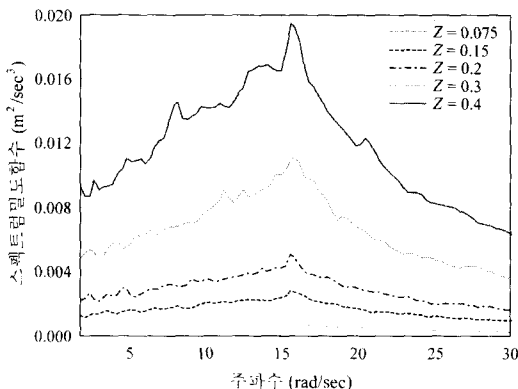


그림 1 UBC-97의 설계응답스펙트럼

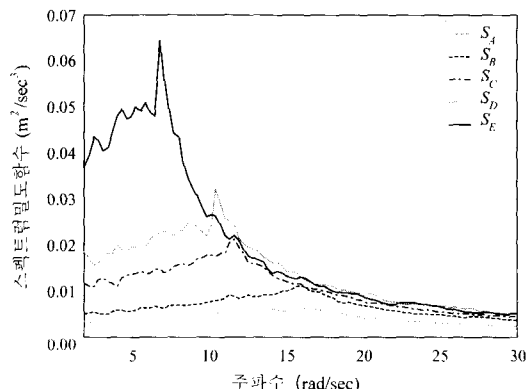
그림 2(a)에서 확인할 수 있는 바와 같이 가속도 응답스펙트럼으로부터 생성된 가속도 스펙트럼밀도함수의 크기는 지진구역계수에 비례한다. 이것은 지진구역계수로 표현된 특정지역 지진 가속도 크기를 연구에서 사용하고 있는 모델이 잘 반영하고 있음을 의미한다. 그림 2(b)는 지반이 연약하여질수록 스펙트럼밀도함수가 저주파쪽으로 이동하면서 동시에 그 크기가 증가함을 보여준다. 그러므로 이 스펙트럼밀도함수 모델은, 연약지반의 저주파 지반운동 특성 및 지반 구조물 상호작용으로 인한 지반운동 규모의 확대를 설계응답스펙트럼에 근거하여 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

3. 생애주기비용 최소화

구조물의 설계시, 어느 정도의 안전성과 신뢰도를 가지도록 설계하여야 할 것인가의 문제는 최적설계 문제의 중요한 논점이 되어 왔다.⁽²⁰⁾ 점탄성감쇠기가 설치된 빌딩구조물의 경우, 수평력 저항 부재의 강성을 크게 하거나 점탄성감쇠기의 사용량을 증가시킴으로써 지진하중에 대하여 보다 안전하고 신뢰도 높은 설계가 가능하다. 이 방법은 이는 향후 발생 가능한 지진으로 인해 예측되는 손상비용의 기대값을 줄일 수 있는 반면, 초기 건설비용의 증가를 유발하게 된다. 따라서, 구조물의 합리적인 설계 수



(a) 지반종류에 따른 스펙트럼밀도함수



(b) 지진구역에 따른 스펙트럼밀도함수

그림 2 지반운동의 스펙트럼밀도함수

준은 초기 건설비용과 손상비용 기대값 간의 조정을 통해, 이들 비용의 합으로 표현되는 전체 생애주기비용을 최소화하도록 결정하는 것이 바람직하다.⁽²¹⁾ 또한 생애주기비용 개념은 근본적으로 비용과 이득간의 관계에 기반하고 있기 때문에, 점탄성감쇠기를 사용하는 것과 같이 추가적인 비용이 발생하는 경우, 그로 인한 이득, 즉 경제적 효율성을 평가하고, 제진장치의 사용 여부에 대한 의사를 결정하는 데에 매우 유용한 개념이라고 할 수 있다.⁽²²⁾ 따라서 이 연구에서는 구조제어시스템의 최적설계를 위한 목적함수로서 최소생애주기비용 개념을 이용하고, 최적설계된 구조계의 생애주기비용에 기반하여 점탄성감쇠기가 장착된 빌딩구조물의 경제적 효율성을 평가하도록 한다. 이를 위해서는 먼저 구조물을 모델링하고, 지진하중에 대한 파손확률을 추정하여야 하며, 추정된 파손확률을 이용하여 생애주기비용의 기대값을 산출하고, 이를 최소화하는 최적설계문제를 구성하는 과정이 필요하다. 이 장에서는 이러한 과정에 대하여 기술하도록 한다.

3.1 점탄성감쇠기가 장착된 빌딩구조물의 운동방정식

일반적으로 빌딩구조물의 해석 및 설계를 위한 모델링은 해석 목적 또는 설계 단계에 따라 다른 기법을 사용하게 된다. 지진으로 인한 빌딩구조물의 정확한 손상평가를 위해서는 해석 시에 구조물의 손상상태를 표현할 수 있는 특수한 모델링 기법이 필요하며, 상세 설계의 단계에서는, 구조상세에 따른 응답을 반영하기 위한 정밀 3차원 모델링 기법을 사용하기도 한다. 그러나 이 연구에서는 예비설계의 단계에서 점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물의 최적 설계변수 분포를 파악하고, 다양한 지반운동 특성에 따른 경제적 효율성을 평가하는 것을 목표로 하고 있기 때문에, 정밀 해석 및 설계를 위한 모델링 기법을 적용하는 것 보다는 간편한 해석에 의해 점탄성감쇠기의 최적 배치 및 용량을 결정하고, 구조물의 수평력 저항 부재에 대한 최적 강성의 분포를 파악할 수 있는 모델링 기법을 사용하는 것이 효율적이다. 따라서 점탄성감쇠기가 장착되는 빌딩구조물을 각 층에 하나씩의 수평자유도를 가지는 전단빌딩으로 모델링 하도록 한다.

점탄성감쇠기가 장착된 n자유도 전단빌딩 구조물의 운동방정식은 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = -\mathbf{M}\mathbf{1}\ddot{x}_g \quad (1)$$

여기서, \mathbf{M} , \mathbf{C} , \mathbf{K} 는 각각 점탄성감쇠기가 장착된 구조물의 질량행렬, 감쇠행렬, 강성행렬을 각각 나타내며, \mathbf{x} 는 각 층의 지반에 대한 상대변위를 나타내는 벡터이다. $\mathbf{1}$ 은 영향벡터이며, \ddot{x}_g 는 지반가속도이다. 이와 같이 점탄성감쇠기가 설치된 구조물의 경우, 점탄성감쇠기를 통하여 제공되는 강성과 감쇠비의 영향을 고려하여 감쇠행렬과 강성행렬을 구성하여야 한다.

점탄성감쇠기의 설치로 인하여 j층에 발생하는 추가적인 강성은 외부입력 주파수의 함수인 전단저장계수(shear storage modulus)를 이용하여 다음의 식과 같은 등가강성 계수로서 나타낼 수 있다.^{(3),(23)}

$$k_{d,j} = \frac{a_{d,j}G'}{h} \quad (2)$$

여기서, $a_{d,j}$ 는 j층에 설치된 점탄성감쇠기의 전단면적, h 는 점탄성 재료의 높이를 각각 나타내며, G' 은 한 사이클 당 저장되는 에너지의 양을 의미하는 점탄성 물질의 전단저장계수로서, 실험을 통해 1차모드 고유진동수의 함수로서 표현되는 값을 사용할 수 있다.⁽³⁾

한편, 점탄성감쇠기가 장착된 구조물의 i번째 모드에 추가되는 감쇠비는 모드변형에너지방법(modal strain energy method)에 의하여 다음과 같이 표현할 수 있다.⁽²⁴⁾

$$\xi_i = \frac{\eta_v}{2} \left(1 - \frac{\bar{\omega}_i^2}{\omega_i^2} \right) \quad (3)$$

여기서, w_i 와 \bar{w}_i 는 각각 점탄성감쇠기의 기여를 고려한 강성행렬에 의하여 수정된 i번째 모드의 진동수와 점탄성감쇠기가 장착되지 않은 i번째 모드의 진동수이며, η_v 는 손실 계수(loss factor)로써 일반적으로 점탄성 물질의 에너지 소산 용량을 표현하는데 쓰이며, 전단저장계수에 대한 전단손실계수의 비로서 정의되는 값이다. 이제 식(2)와(3)을 이용하여 점탄성감쇠기가 장착된 구조물의 강성 및 감쇠행렬을 구할 수 있으며, 이를 통해 식(1)의 운동방정식을 구성할 수 있다.

3.2 파손확률 산출

구조물의 파손확률 산출을 위해서는 먼저 구조요소에 대한 한계상태를 정의하여야 한다. 수평지반운동으로 인하여 구조요소에 발생하는 전단응력과 휨응력은 층간상대변위에 의하여 크게 영향을 받으므로, UBC⁽¹⁷⁾에서 제한하고 있는 최대층간변위응답 제한식을 이용하여 식(4)와 같이 이에 대한 한계상태를 정의하였다.

$$\begin{cases} \Delta \leq \Delta_{lim} = \frac{0.025h_s}{0.7R} & \text{for } T_n \leq 0.7\text{sec} \\ \Delta \leq \Delta_{lim} = \frac{0.020h_s}{0.7R} & \text{for } T_n > 0.7\text{sec} \end{cases} \quad (4)$$

여기서, Δ 및 Δ_{lim} 은 각각 층간 상대변위 및 UBC에서 제한하고 있는 최대 층간 변위이며, h_s 는 층간높이, R 은 구조물의 형식 및 재료에 따라 결정되는 계수, T_n 은 구조물의 고유주기를 각각 나타낸다. 한편, 점탄성감쇠기에 발생하는 과도한 전단변형은 점탄성감쇠기의 파손을

유발하므로, 점탄성물질의 상대변위에 대한 한계상태를 다음의 식 (5)과 같이 정의하였다.

$$d_d < d_{lim} = \gamma_{lim} \cdot h \quad (5)$$

여기서, d_d 및 h 는 각각 점탄성물질의 상대변위 및 두께를 나타내며, γ_{lim} 는 점탄성물질의 한계 전단변형률로써, 여기에서는 일반적으로 사용되는 60%의 값을 적용하였다.

이 연구에서는 하중이 가해지는 일정한 시간 간격 동안 구조물의 응답이 파손에 이르게 될 확률을 구하기 위하여, 어느 한 층의 변위 응답이라도 앞서 정의된 한계상태를 초과하게 되면 구조물의 파손이 발생하는 것으로 간주하였다. 구조물의 파손확률 또는 신뢰도를 평가하기 위한 문제 중, 파손의 조건이 이와 같이 정의되는 문제를 일컬어 일반적으로 일차통과문제(first-passage problem)라 하며, 이러한 파손확률을 산출하기 위해서는 j 층의 응답이 한계상태를 한번이라도 넘어설 확률 $P_{f,j}$ 를 얻어야 할 필요가 있다.

랜덤프로세스(random process)로 표현되는 구조물의 응답이 어떠한 한계상태를 넘어서게 될 확률은 응답의 통계적 특성값을 계산함으로써 산출될 수 있다. 이 연구에서 적용된, 초과이론을 이용한 파손확률의 산출 방법은 각 층의 층간 변위와 속도응답의 표준편차 값을 필요로 하며, 이는 다음과 같은 주파수 영역에서의 해석을 통해 간단히 얻을 수 있다. 먼저, 식 (1)의 운동방정식으로부터 j 층의 지반에 대한 상대변위의 전달함수($h_{g,j}(w)$)들로 구성된 전달함수 벡터 $h_g(w)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_g(w) &= [h_{g,1}(w), h_{g,1}(w), \dots, h_{g,n}(w)]^T \\ &= [\omega^2 \mathbf{I} - i\omega \mathbf{M}^{-1} \mathbf{C} - \mathbf{M}^{-1} \mathbf{K}]^{-1} [\mathbf{1}] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $i^2 = -1$ 이다. 이제, j 층의 층간 변위의 전달함수 $h_j(w)$ 는 $h_{g,j}(w)$ 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h_j(w) = \begin{cases} h_{g,1}(w) & , \text{for } j = 1 \\ h_{g,j}(w) - h_{g,j-1}(w) & , \text{for } j = 2, 3, \dots, n \end{cases} \quad (7)$$

따라서, j 층의 층간 변위 및 속도 응답의 표준편차는 주파수 영역에서의 적분을 통해 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_{\Delta_j}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |h_j(w)|^2 S_g(w) dw, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$\sigma_{\dot{\Delta}_j}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 |h_j(w)|^2 S_g(w) dw, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

여기서, σ_{Δ_j} 와 $\sigma_{\dot{\Delta}_j}$ 는 각각 j 층의 층간 변위 및 속도 응답의 표준편차이며, $S_g(w)$ 는 입력 지반운동의 스펙트럼 밀도함수이다.

한편, 단위시간 동안 j 층의 층간 변위응답 Δ_j 가 한계상태 Δ_{lim} 를 양의 기울기로 넘어설 빈도수는 Rice가 제안한 식에 의하여 다음의 식 (10)과 같이 나타내어진다.⁽²⁵⁾

$$\begin{aligned} v_{\Delta_j}^+ &= \int_0^{\infty} \dot{\Delta}_j p(\Delta_j = \Delta_{lim}, \dot{\Delta}_j) d\dot{\Delta}_j \\ &= \int_0^{\infty} \dot{\Delta}_j p(\Delta_{lim}, \dot{\Delta}_j) d\dot{\Delta}_j \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $v_{\Delta_j}^+$ 는 j 층의 층간 변위가 단위시간 동안 양의 범위에서 한계상태를 초과할 빈도수이며, $p(\Delta_j, \dot{\Delta}_j)$ 는 Δ_j 와 $\dot{\Delta}_j$ 의 결합확률밀도함수(joint probability density function)이다. 강진지속시간 t_d 동안의 지반운동을 평균이 0인 Gaussian 랜덤프로세스(stationary random process)로 가정하면, 선형 구조계의 변위응답 Δ_j 와 속도응답 $\dot{\Delta}_j$ 는 평균이 0인 Gaussian 과정을 따른다. 그러므로, 식 (10)의 결합확률밀도함수는 다음 식과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} p(\Delta_{lim}, \dot{\Delta}_j) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta_j}} \exp\left[-\frac{\Delta_{lim}^2}{2\sigma_{\Delta_j}^2}\right] \\ &\quad \exp\left[-\frac{\dot{\Delta}_j^2}{2\sigma_{\dot{\Delta}_j}^2}\right] \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)을 식 (10)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{\Delta_j}^+ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta_j}} \exp\left[-\frac{\Delta_{lim}^2}{2\sigma_{\Delta_j}^2}\right] \\ &\quad \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\dot{\Delta}_j}} \exp\left[-\frac{\dot{\Delta}_j^2}{2\sigma_{\dot{\Delta}_j}^2}\right] \dot{\Delta}_j d\dot{\Delta}_j \\ &= \frac{\sigma_{\dot{\Delta}_j}}{\pi\sigma_{\Delta_j}} \exp\left[-\frac{\Delta_{lim}^2}{2\sigma_{\Delta_j}^2}\right] \end{aligned} \quad (12)$$

이제, 이 값은 식 (8), (9)에서 얻어진 변위응답과 속도응답의 표준편차값을 이용하여 계산할 수 있다.

한계상태를 넘어서는 사건의 분포가 포와송 분포를 따른다고 가정하면, j 층의 층간 변위가 강진 지속시간 동안 한번이라도 한계상태를 넘어설 확률 $P_{f,j}$ 은 다음 식 (13)에 의하여 얻을 수 있다.

$$P_{f,j} = 1 - \exp(-v_{\Delta_j}^+ t_d) \quad (13)$$

여기서, $v_{\Delta_j} (= 2v_{\Delta_j}^+)$ 는 j 층의 층간 변위가 단위시간 동안 양과 음의 양쪽 영역에서 한계상태를 넘는 빈도수이다. 일반적으로 $P_{f,j}$ 의 정확한 해석해를 얻는 것은 불가능하지만, 식 (13)을 통하여 얻어진 해는 근사적으로 안전측의 파손확률값을 제공하기 때문에, 설계의 목적에서 사용하기에 적합한 것으로 알려져 있다.⁽²⁶⁾

이제, 지진으로 인하여 어느 한 층의 층간 변위라도 한계상태를 넘어서게 되는 빌딩구조물의 파손확률 P_f 는 다음의 식 (14)와 같이 산출할 수 있다.

$$P_f = 1 - \prod_{j=1}^n (1 - P_{f,j}) \quad (14)$$

3.3 최적설계문제

특정 구조시스템이 생애주기를 통하여 유발하는 사회적 비용은 초기 건설비용과 예상되는 손상비용의 현재 가치의 합으로, 그림 3과 같이 표현할 수 있다.

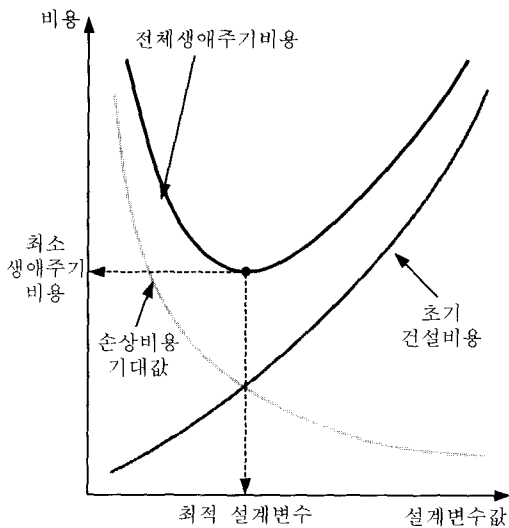


그림 3 생애주기비용 개념

빌딩구조물의 전체 생애주기비용에는 구조물의 계획단계에서부터 해체시점까지 소요되는 모든 비용이 포함되나, 이 연구를 통해서 주목하고자 하는 것은 구조물의 절대적 생애주기비용이 얼마인지를 산정하는 것이 아니라 생애주기비용을 목적함수로 하여 최적설계수준의 해를 구하는 것이므로, 생애주기비용 함수를 정의하는 데에 있어서는 실제 비용에 포함되는 모든 비용요소를 포함시킬 필요는 없다. 즉, 손상비용을 포함한 구조물의 생애주기비용에 큰 차이를 유발하는 설계변수 조합간의 최적화를 통해 상대적으로 최소비용을 유발하는 설계수준을 채택하는 것이 보다 합리적이다.⁽¹⁹⁾ 따라서 이 연구에서는 설계변수로서 각 층에 대한 기둥의 강성(\mathbf{k}_c) 및 점탄성감쇠기의 단면적(\mathbf{a}_d)을 식 (15)와 같이 정의하고, 건설시기 등 구조외적 요인에 따라 민감하게 변화할 수 있는 기둥부재의

단위부피 당 건설비용으로 전체 비용을 나누어 줌으로써 식 (16)과 같이 정규화된 생애주기비용함수를 정의하였다.⁽⁸⁾

$$\mathbf{k}_c = \{k_{c,1}, \dots, k_{c,n}\}^T, \quad \mathbf{a}_d = \{A_{d,1}, \dots, A_{d,n}\}^T \quad (15)$$

$$E[\tilde{C}_T(t_{life}, \mathbf{k}_c, \mathbf{a}_d)] = V_s(\mathbf{k}_c) + r_{d/c} V_d(\mathbf{a}_d) + V_f P_f(\mathbf{k}_c, \mathbf{a}_d) \frac{v}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{life}}) \quad (16)$$

여기서, V_s 와 V_d 는 각각 \mathbf{k}_c 및 \mathbf{a}_d 의 함수로 표현된 구조물의 부피와 점탄성 재료의 부피를 나타내며, v , λ 와 t_{life} 는 각각 연간지진발생빈도와 할인율, 그리고 생애주기를 의미한다. $E[\tilde{C}_T(\cdot)]$ 는 점탄성감쇠기가 장착된 빌딩구조물의 정규화된 생애주기비용 기대값, $r_{d/c}$ 는 동일부피의 기둥부재비용에 대한 점탄성감쇠기비용의 비, V_f 는 단위 부피의 기둥부재비용으로 정규화된 손상비용, P_f 는 빌딩구조시스템의 파손확률을 각각 나타낸다.

이제, 주어진 생애주기 동안 최소의 사회적 비용을 유발하는 구조제어시스템의 최적설계문제는 식(16)을 최소화하는 \mathbf{k}_c 및 \mathbf{a}_d 를 찾는 것으로 정의되며, 다음 식(17)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } E[\tilde{C}_T(\mathbf{k}_c, \mathbf{a}_d)] \\ & \text{subject to } k_{c_{\min}} \leq k_{c,j} \leq k_{c_{\max}} \\ & \quad \quad \quad A_{d_{\min}} \leq A_{d,j} \leq A_{d_{\max}} \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, $k_{c_{\min}}$, $k_{c_{\max}}$ 는 각각 j 층의 기둥강성의 최소 및 최대 허용값을 나타내며, $A_{d_{\min}}$, $A_{d_{\max}}$ 는 각각 j 층의 점탄성 재료 단면적의 최소 및 최대 허용값을 나타낸다.

4. 유전자알고리즘을 적용한 통합최적설계

4.1 유전자알고리즘

유전자알고리즘⁽²⁷⁾은 자연적인 진화과정의 모사를 통하여, 주어진 영역 내에서 설계변수들에 따른 목적함수의 적합도(fitness)를 기준으로 해를 찾아가는 추계학적 최적화방법(stochastic optimization method)의 하나이다. 설계변수들은 매핑을 통하여 해당하는 기호열(string)로 할당된 후, 이 기호열을 하나의 염색체(chromosome)로 간주하여 교배(crossover), 변이(mutation), 재생산(reproduction) 등의 과정을 통하여 우수한 염색체, 즉 적합한 최적해를 스스로 찾아 나아간다. 이 연구에서는 설계변수들, 즉 각 층의 강성(\mathbf{k}_c)과 각 층에 사용되는 점탄성 재료의 단면적(\mathbf{a}_d)을 각각 n_k^b -bit, n_a^b -bit의 2진코드(binary code)로 변환하였다. n_k^b 와 n_a^b 가 모두 4-bit의 값을 가질

경우, 설계변수들의 2진코드법에 의한 기호열표현은 다음의 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

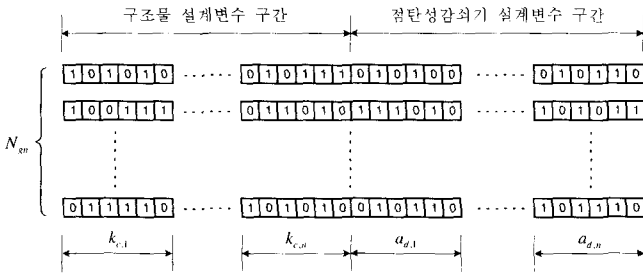


그림 4 2진코드법에 의한 기호열표현

유전자알고리즘에서는 이러한 염색체를 미리 정한 개체수(\$N_{gn}\$)만큼 생성하여 하나의 개체군을 구성한 뒤, 각각의 개체에 대하여 적합도를 계산한다. 개체선택의 지표가 되는 적합도함수는 식(16)의 목적함수를 사용하여 다음 식(18)로 정의하였다.

$$F_i^l = \frac{[\max(E[\tilde{C}_T]_i^l) - \min(E[\tilde{C}_T]_i^l)] + E[\tilde{C}_T]_i^l}{\frac{1}{N_{gn}} \sum_{j=1}^{N_{gn}} E[\tilde{C}_T]_j^l} \quad (i=1, 2, \dots, N_{gn}) \quad (18)$$

여기서 \$E[\tilde{C}_T]_i^l\$와 \$F_i^l\$는 각각 \$l\$회 반복계산시 \$i\$번째 개체에 따른 정규화된 생애주기비용 및 그 때의 적합도를 의미한다. 적합도함수값은 각 세대별로 매 개체마다 산정되고, 선택, 교배, 변이, 재생산 등의 유전연산자(genetic operator)를 조작함으로써 더 나은 해를 찾기 위한 과정을 반복해 나간다. 이러한 과정을 통하여 산정된 최적 적합도값이 동일한 값으로 일정횟수이상 반복될 때, 최적해가 결정된다. 이 연구에서는 개체의 선택에 있어서 룰렛 휠방식(Roulette Wheel Rule)을 사용하였으며, 교배에 있어서는 2점교배방식을 적용하였다. 돌연변이의 생성에는 선택된 개체의 2진코드를 변이확률에 따라서 대립유전자로 역위(inversion)시키는 방식을 따랐다.

4.2 설계 예

지진하중에 대한 점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물의 유전자알고리즘을 적용한 통합최적설계 예로서 그림 5와 같이 점탄성감쇠기가 설치된 10층(\$n=10\$) Steel-frame 빌딩구조물을 사용하였으며, 구조물의 주요규격은 다음의 표 3에 나타난 바와 같다. 먼저 임의의 기동강성 범위 내에서 최적설계를 수행하고 그를 통하여 얻어진 최소, 최대값을 각각 \$k_{c,min}\$, \$k_{c,max}\$의 값으로 결정함으로써 동일한 bit수의 설계변수 기호화에 대하여 가장 높은 해상도의 해를 얻을 수 있도록 하였다. 점탄성 재료 단면적의 최대값(\$A_{d,max}\$)은 구조물에의 장착 가능 여부를 고려하여 설계

자가 결정할 수 있으며, 여기서는 표 3에 나타난 값과 같이 결정하였다.

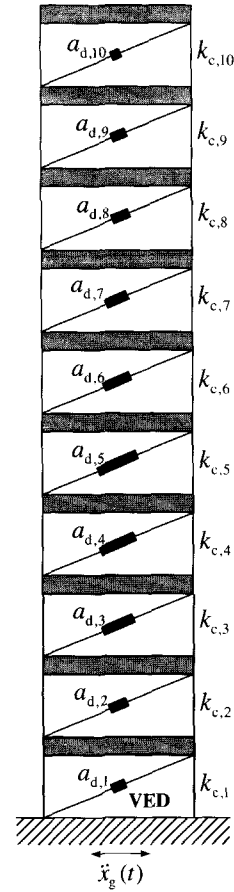


그림 5 점탄성감쇠기가 장착된 빌딩구조물 모델링

표 3 구조물 주요제원 및 지진특성

층간 높이(\$h_s\$)	3.0m	구조물 자체감쇠비	2%
층별 질량 (\$m_j, j=1, \dots, 10\$)	\$10^5\$kg	점탄성 재료 단면적 최대값(\$A_{d,max}\$)	\$6.0 \times 10^{-1} m^2\$
기동강성 최소값(\$k_{c,min}\$)	\$6.5 \times 10^4 kN/m\$	기동강성 최대값(\$k_{c,max}\$)	\$2.1 \times 10^5 kN/m\$

식(7)에서 빌딩구조물의 층간변위응답 한계상태를 정의할 때, 구조물의 형식 및 재료에 따라 결정되는 계수(\$R\$)는 UBC에서 일반적인 모멘트저항 Steel-frame에 대하여 지정된 4.5의 값을 사용하였다. 식(14)의 생애주기비용함수 구성 시, 손상비용규모 \$C_D\$는 지진재해로 인한 복구비용, 내용물 비용, 부상자비용, 사망자비용, 간접경제비용 등의 총 합으로 이루어지는 변수로서, ATC-13⁽²⁸⁾에서 연구된 자료를 바탕으로 국내 사무실 용도의 건축물에 대하여 추정된 값을 사용하여, 초기비용의 6.13배의 값을 가지는 것으로 가정하였다.⁽²⁹⁾ 그 밖에 생애주기비용 산출을 위하여 필요한 계수로서, 연간지진발생빈도(\$\nu\$)는 0.1이라 가정하였으며⁽¹²⁾, 할인율(\$\lambda\$)은 현재의 이자율을 바탕으로 미래의 값을 예측하여 5%의 값을 사용하였다. 구조물의 생애주기(\$t_{life}\$)는 ISO2380

규준의 일반 건축물에 대한 내용연수를 참고로 하여 50년으로 하였다. 이러한 변수들은 이 연구와 같이 정확한 생애주기비용의 산출이 아닌 각각의 대안에 대한 비교를 목적으로 하는 경우에는 그 우선순위의 결과에 큰 영향을 미치지 않는다.

최적화의 방법으로 사용된 유전자알고리즘의 적용시, 교배확률은 0.85, 변이확률은 0.01, 각 세대의 개체수 (N_{gen})는 50개로 하였으며, 설계변수의 기호화에는 모두 64bit($n_k^b=4, n_a^b=4$)를 사용하였다. 그림 6은 지진구역 4, 지반종류 S_B 인 지역에 대한 최적설계를 수행한 결과로서, 임의의 한 세대에서 가장 좋은 적합도를 갖는 것으로 선정된 설계변수벡터로부터 평가된 목적함수값, 즉 정규화된 생애주기비용의 최소값($E[\tilde{C}_T]_{min}$)과 그 비용을 구성하는 초기비용 및 손상비용 기대값을 보여주는 그래프이다. 초기 세대에서는 초기비용을 적게 사용함으로써 손상비용이 상대적으로 크게 나타났으나, 약 40회 가량 세대가 진행된 이후에는 초기비용을 최적해의 경우와 거의 유사하게 사용함으로써, 점차 최적해에 근접한 값을 찾아가는 과정을 볼 수 있다. 한편, $E[\tilde{C}_T]_{min}$ 의 경우, 초기에 급격히 감소하나 20회를 넘어서면서 서서히 감소율이 떨어지며 약 200회 이후 수렴하는 양상을 보인다.

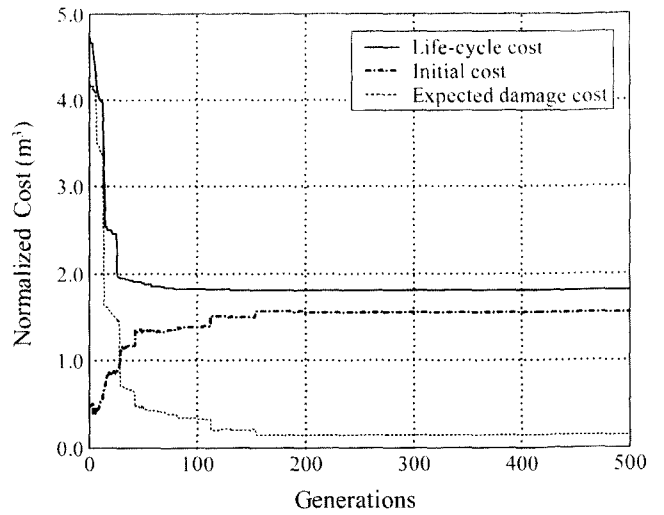


그림 6 생애주기비용, 초기비용 및 손상비용 기대값의 반복이력

4.3 통합최적설계 결과

앞서 정의된 점탄성감쇠기가 장착된 빌딩구조물을 다양한 지진구역 및 지반종류에 따라 주어지는 지진에 대하여 최적설계 한 결과는 다음의 그림 7과 같다. 각 그림은 층별 기둥부재 및 점탄성감쇠기에 사용된 초기비용을 기둥부재의 단위부피당 건설비용으로 정규화하여 나타낸 값

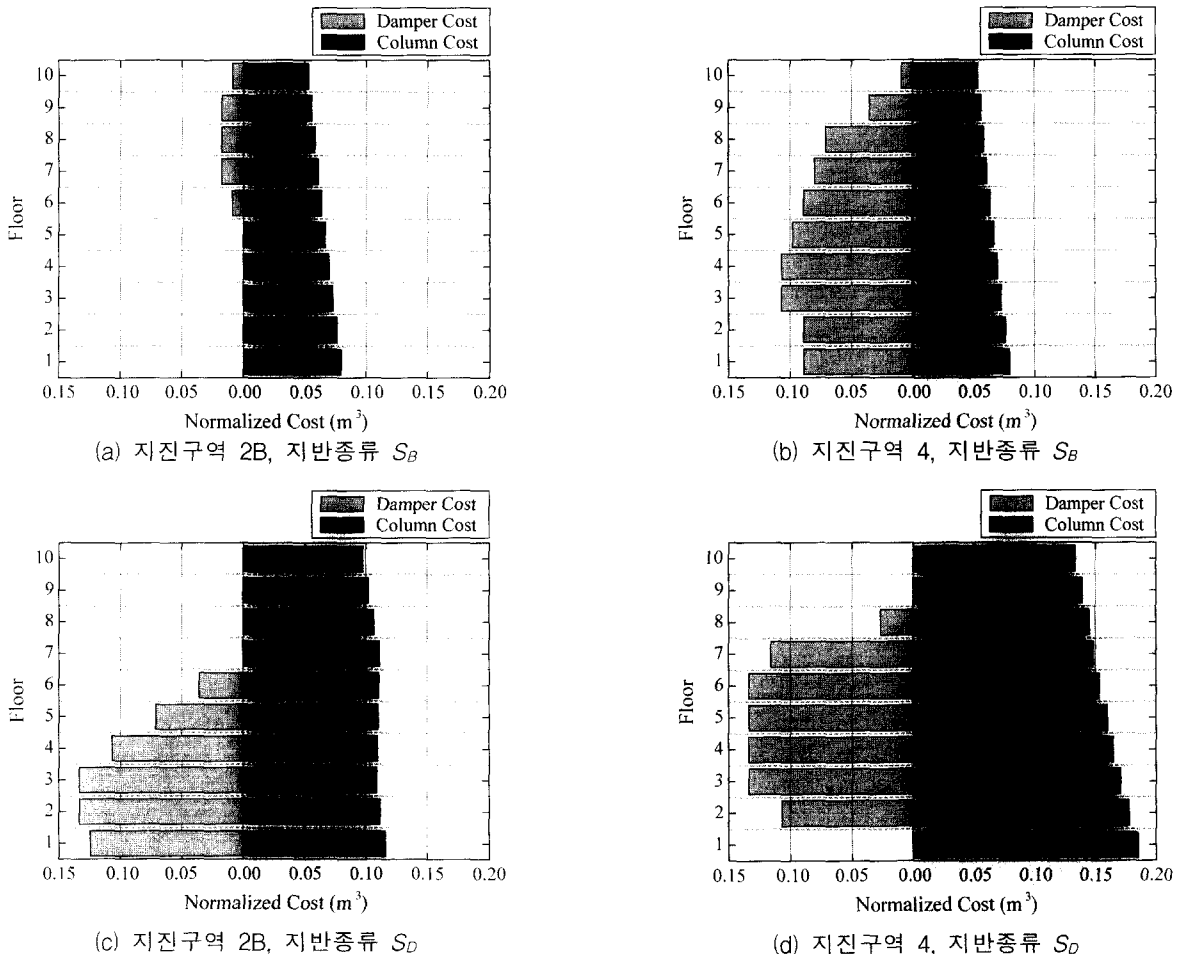


그림 7 지진특성에 따른 최적설계변수

으로서, 이를 통해 최적화된 기둥부재 및 점탄성감쇠기의 배치 상태와 사용량을 파악할 수 있다. 그림 7(a) 및 7(b)는 지반종류 S_B , 즉 압반지반 지역일 경우에, 각각 지진 구역 2B 및 4에 해당하는 지진 규모의 지반운동에 대한 최적설계의 결과이다. 그림 7(a)를 통해 볼 때, 최적설계 결과는 아래층에 상대적으로 많은 양의 기둥부재를 사용하고 점탄성감쇠기는 상층부에만 사용되고 있는 것을 볼 수 있다. 반면 지반운동 규모가 커질 경우에는 그림 7(b)의 결과와 같이, 기둥부재의 사용량은 거의 동일하나 점탄성감쇠기의 최적 사용량이 현저히 증가하게 된다. 또한 그 배치도 상층부 보다는 하층부에 상대적으로 많은 양을 집중적으로 사용하는 것이 효율적인 것으로 나타나, 통합 최적설계를 수행할 경우 지반운동의 규모에 따라 점탄성감쇠기의 최적 사용량뿐만 아니라 최적 배치의 경향도 변화하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7(c) 및 그림 7(d)는 지반종류 S_D , 즉 토사지반 지역일 경우, 각각 지진구역 2B 및 4에 해당하는 지진 규모의 지반운동에 대한 최적설계의 결과이다. 그림 7(c)를 통해 볼 때, 연약한 지반의 중약진지역의 경우, 기둥부재는 아래층에서 상대적으로 많은 양을 사용하고, 점탄성감쇠기는 상층부보다는 하층부에 집중적으로 배치하는 것이 효율적임을 알 수 있다. 그림 7(d)의 결과는 연약한 지반의 강진지역에 해당하는 경우로서, 중약진지역에 비하여 기둥부재와 점탄성감쇠기의 사용량이 동시에 현저히 증가하는 것을 볼 수 있으며, 점탄성감쇠기의 최적 배치는 상층부나 최하층부 보다는 중간층에 많은 양을 사용하는 것이 효율적인 것으로 나타났다. 그림 7(c) 및 7(d)는 각각 그림 7(a) 및 7(b)와 같은 지진구역에 대한 최적설계 결과임에도 불구하고, 지반종류에 따라 최적화된 설계변수의 크기가 전반적으로 현저히 증가하고, 최적 배치의 경향도 판이하게 다를 수 있다. 이는 점탄성감쇠기가 장착된 빌딩구조물의 최적설계에 지반 운동의 규모뿐만 아니라 지반종류에 따른 하층의 주파수 특성이 큰 영향을 미친다는 것을 의미하므로, 최적설계와 성능 및 비용효율성의 평가시에 이에 대한 고려가 반드시 필요할 것이다.

이러한 통합최적설계의 결과를 종합하여 볼 때, 결론적으로, 기둥부재는 하층부에 상대적으로 많은 양을 사용하

는 것이 효율적이며, 지반이 연약하고 지반운동 규모가 커질수록 전체적인 사용량이 증가함을 알 수 있다. 점탄성감쇠기는, 기둥부재와 마찬가지로 연약한 지반일수록, 지반운동 규모가 증가할수록 그 사용량이 증가하고, 최적 배치의 측면에서는, 중약진지역일 경우, 견고한 지반에서는 상층부에, 연약한 지반에서는 하층부에 집중적으로 배치하는 것이 효율적이다.

5. 비용효율성 평가

점탄성감쇠기가 장착된 빌딩구조물의 경제적 효율성을 평가하기 위해서는 비용효율성지수의 정의가 필요하다. 여기서는 점탄성감쇠기를 설치하였을 경우의 상대적 비용이득을 나타내는 비용효율성지수 $E_{VED/non}$ 를 다음의 식과 같이 정의하였다.

$$E_{VED/non} = \frac{E[\tilde{C}_T]_{non} - E[\tilde{C}_T]_{VED}}{E[\tilde{C}_T]_{non}} \times 100 \quad (19)$$

여기서, $E[\tilde{C}_T]_{VED}$ 와 $E[\tilde{C}_T]_{non}$ 은 각각 점탄성감쇠기가 장착된 경우와 점탄성감쇠기가 장착되지 않은 경우에 대하여 이 연구에서 제안하고 있는 통합최적설계를 수행한 경우의 생애주기비용 기대값을 각각 나타낸다. 비용효율성지수의 정의에 따라, 큰 값의 비용효율성지수는 점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물이 점탄성감쇠기를 사용하지 않은 빌딩구조물에 비하여 상대적으로 높은 비용이득을 가져옴을 나타낸다.

그림 8과 그림 9는 각각 지진구역 및 지반종류에 따른 점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물의 비용효율성을 나타낸다. 그림에서 견고한 지반(Stiff soil profile type) 및 연약한 지반(Soft soil profile type)은 UBC 97에서 정의하고 있는 지반종류 S_B 및 S_D 를 각각 의미하며, 중약진지역(Low/Moderate Seismicity)과 강진지역(High Seismicity)은 각각 지진구역 2B 및 4로서, 각 지진구역에 해당하는 대략적인 최대 지반운동 가속도는 각각 0.2g 와 0.4g이다.⁽¹⁵⁾ 그림 8은 점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물이 강진지역보다는

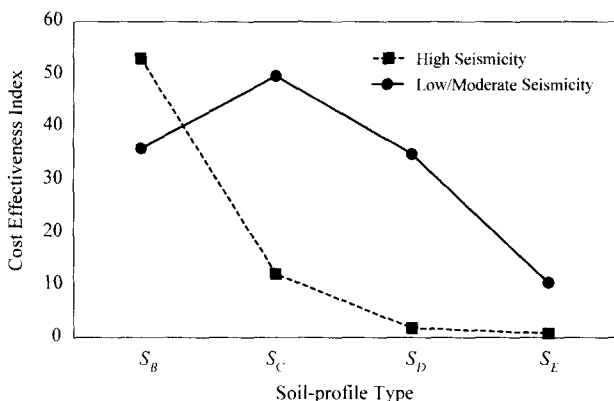


그림 8 지진구역에 따른 점탄성감쇠기의 비용효율성

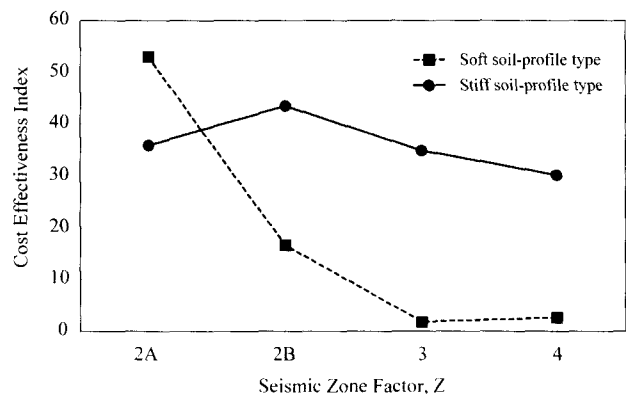


그림 9 지반종류에 따른 점탄성감쇠기의 비용효율성

중약진지역에서 대체적으로 높은 비용효율성을 가지는 것을 보여준다. 중약진지역의 경우 매우 연약한 지반조건을 가지는 때를 제외하고는 약 35~50%의 비교적 높은 비용효율성을 나타내었으나, 강진지역의 경우 견고한 지반조건일 때를 제외하고는 중약진지역에 비하여 상대적으로 낮은 효율성을 가지는 것을 볼 수 있다. 이는 중약진지역의 경우 강진지역에 비하여 적은 양의 점탄성감쇠기를 사용하는 것으로도 충분한 지진응답 제어효과를 기대할 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

한편, 견고한 지반의 경우, 점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물은 지진구역에 큰 영향을 받지 않고 약 30~45%의 높은 비용이득을 가지는 것을 볼 수 있다. 그러나 연약한 지반의 경우에는 강진지역에서 5% 미만의 낮은 비용효율성을 가지는 것을 알 수 있는데(그림 9), 이 결과는 예제구조물의 지진에 대한 위험도가 점탄성감쇠기의 지진응답 제어 효과를 상당히 초과하기 때문이며, 향후 강진지역의 연약지반에서 보다 높은 효율성을 가지는 지진응답 제어장치의 설계 및 배치에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

6. 결 론

점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물에 작용하는 다양한 지진 규모, 지반특성의 하중조합에 대하여 통합최적설계의 기법을 적용한 최적설계를 수행하였으며, 구조시스템의 생애주기비용 개념에 기반하여, 지진특성에 따른 점탄성감쇠기의 비용효율성 평가 기법을 제시하고, 점탄성감쇠기가 장착된 빌딩구조물의 비용효율성 평가를 수행하였다.

통합최적설계의 결과, 하중 특성에 따라 점탄성감쇠기의 최적 배치 및 설계의 결과가 현저히 변화함을 확인하였다. 최적 배치의 측면에서는, 기둥부재는 아래층으로 갈수록 많은 양을 사용하는 것이, 점탄성감쇠기는 중약진지역일 경우, 견고한 지반에서는 상층부에, 연약한 지반에서는 하층부에 집중적으로 배치하는 것이 각각 효율적인 것으로 나타났다. 최적 사용량의 측면에서는 기둥부재와 점탄성감쇠기 모두 연약한 지반일수록, 지반운동 규모가 커질수록 그 양이 증가하는 경향을 나타내었다. 이같이 점탄성감쇠기가 장착된 빌딩구조물의 최적설계에 지반 운동의 규모뿐만 아니라 지반종류에 따른 하중의 주파수 특성이 큰 영향을 미치는 것을 볼 때, 점탄성감쇠기의 성능 평가 혹은 비용효율성 평가 시 이에 대한 고려가 필요함을 알 수 있다.

비용효율성 평가의 결과, 점탄성감쇠기는 견고한 지반의 경우 지반운동 규모에 큰 영향을 받지 않고 높은 비용효율성을 가지는 것으로 나타났으며, 연약한 지반의 경우에는 강진지역보다 중약진지역에서 현저히 높은 비용효율성을 가지는 것을 볼 수 있었다. 강진지역의 경우, 연약한 지반에서는 점탄성감쇠기를 장착한 빌딩구조물의 상대적 비용이득이 견고한 지반인 경우에 비하여 현저히 낮

은 것으로 나타났으며, 이는 예제구조물의 지진에 대한 위험도가 점탄성감쇠기의 지진응답 제어 효과를 상당히 초과하기 때문일 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 서울대학교 교량설계핵심기술연구단을 통한 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업 지원금에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Mahmoodi, P and Keel, C.J., "Performance of structural dampers for the Columbia Center Building," *Building motion in wind*, New York, 1986, pp. 83-106.
2. Zhang, R.H. and Soong, T.T., "Seismic design of viscoelastic dampers for structural applications," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 118, No. 5, 1992, pp. 1375-1392.
3. Shen K.L., Soong, T.T., Chang, K.C. and Lai, M.L., "Seismic behaviour of reinforced concrete frame with added viscoelastic dampers," *Engineering Structures*, Vol. 17, No. 5, 1995, pp. 372-380.
4. Shukla, A.K. and Datta, T.K., "Optimal use of viscoelastic dampers in building frames for seismic force," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 125, No. 4, pp. 401-409.
5. Takewaki, I., *Dynamic structural design - inverse problem approach*, Southampton, UK: WIT Press, 2000.
6. Singh, M.P. and Moreshchi, L.M. "Optimal placement of dampers for passive response control," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, 2002, pp. 955-976.
7. 박관순, "Physical Programming 및 Genetic Algorithm을 이용한 통합구조-제어시스템의 동시최적설계. 대한토목학회논문집", 대한토목학회, 제 21권, 제 4-A호, 2001, pp. 455-466.
8. 박관순, 고현무, 함대기 "점탄성감쇠기가 설치된 구조물의 통합최적설계", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 22권 2-A호, 2002, pp. 413-422.
9. Koh, H.M., Park, K.S. and Park, W., "Serviceability Assessment and Active Vibration Control of Air Traffic Control Tower at Incheon", *the 2nd European Conference on Structural Control*, ECSC., Paris, France.
10. Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K.,

- Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton R.E., Soong T.T., Spencer, B.F. and Yao J.T.P. "Structural control: past, present, and future", *Journal of Engineering Mechanics.*, Vol. 123, No. 9, 1997.
11. Wen, Y.K. and Shinozuka, M., "Cost-effectiveness in active structural control," *Engineering Structures.*, Vol. 20, No. 3, 1998, pp. 216-221.
 12. 고현무, 송준호, "사용기간비용 최소화에 의한 지진격리교량의 경제성 평가", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 19권, 제 1-4호, 1999, pp. 539-550.
 13. Koh, H.M., Cost-Effectiveness Analysis for Seismic Isolation of Bridges, *Proceedings of the Third World Conference on Structural Control*, Como, Italy, Vol. 1, pp. 2002, 69-83.
 14. Soong, T.T. and Grigoriu, M., *Random vibration of mechanical and structural systems*, New Jersey, PRT Prentice-Hall, 1993.
 15. Lindeburg, M.R. and Baradar, M., *Seismic design of building structures*, Professional Publications, Inc., Belmont, CA, 2001.
 16. 건축물 하중기준 및 해설, 대한건축학회, 2000.
 17. ICBO 1997 *Uniform Building Code - Volume 2*, International Conference of Building Officials, Whittier, CA, 1997.
 18. Shinozuka, M. and Deodatis, G, Simulation of stochastic processes by spectral representation," *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 44, No. 4, 1991, pp. 191-203.
 19. 고현무, 박관순, 송준호, "유체-구조물 상호작용을 고려한 지진격리 수조구조물의 비용효율성 평가. 대한토목학회논문집, 대한토목학회", 제 20권, 제 2-A호, 2000, pp. 201-215.
 20. Aktas, E., Moses, F. and Ghosn, M., "Cost and safety optimization of structural design specifications," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 73, 2001, pp. 205-212.
 21. Ang, A.H.-S. and Leon, D.D., "Determination of optimal target reliabilities for design and upgrading of structures," *Structural Safety*, Vol. 19, No. 1, 1997, pp. 91-103.
 22. Stewart, M.G., "Reliability-based assessment of ageing bridges using risk ranking and life cycle cost decision analyses," *Reliability Engineering and System Safety.*, Vol. 74, 2001, pp. 263-273.
 23. Soong T.T. and Dargush G.F., *Passive energy dissipation systems in structural engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1997.
 24. Chang, K.C., Lai, M.L., Soong, T.T., Hao, D.S. and Yeh Y.C., *Seismic behavior and design guidelines for steel frame structures with added viscoelastic dampers*, NCEER 93-0009, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, 1993.
 25. Rice, S.O., *Mathematical analysis of random noise, Selected Papers on Noise and Stochastic Processes*, Dover, NY, 1954, pp. 133-294.
 26. Roberts, J.B. and Spanos, P.D., *Random vibration and statistical linearization*, John Wiley & Sons, West Sussex, England, 1990.
 27. Holland, J.H., *Adaptation in natural and artificial systems*, Ann Arbor, MI, University of Michigan Press, 1975.
 28. ATC-13 *Earthquake damage evaluation data for California*. Redwood City, CA, Applied Technology Council, 1986
 29. 주요시설물 내진설계기준의 재정비, 한국지진공학회, 건설교통부/한국건설기술연구원, 2002.