

변형률연화와 국소화 파괴의 모델링 리뷰

Review on the Modeling of Strain Softening and Localization Failure



박관순*

*서울대학교 지구환경시스템공학부 BK조교수

1. 통합최적설계 개념

경제분야에서 이룩된 성과는 사회 각 분야에 대하여 보다 미래 지향적인 높은 수준을 요구하고 있다. 구조물의 경우에도, 정적 또는 동적 하중에 대한 안전성뿐만 아니라 사용성에 대한 요구까지도 증대되고 있으며, 이는 가까운 미래에 있어서 제어시스템의 설치를 더 이상 특정 국가의 특수 구조물에 국한되어지는 현상이 아닌, 주요한 구조물에 요구되어지는 일반적인 설계 항목으로 인식되게 할 것이다(박관순 등, 2002). 따라서, 가까운 미래에는 제어시스템을 구조물에 부가적으로 장착하여 응답을 개선시키기 위한 장치로서 인식하던 기존의 개념으로부터 탈피하여, 제어시스템 자체를 동적응답능력 향상을 위한 구조부재의 한 종류로서 인식하는 새로운 개념이 도입될 수 있다. 이러한 개념에 기초한다면, 구조물과 그에 설치될 제어장치를 하나의 통합된 시스템(integrated system)으로 간주함으로써, 구조물의 설계단계에서부터 제어장치의 특성과 설계 제한조건 등을 고려하여 제어시스템과 구조물을 동시에 최적화 할 수 있다(박관순, 2001; Park and Koh, 2004).

여기서는 구조물의 설계단계에서부터 제어시스템의 장착을 가정하고, 두 시스템을 통합하여 동시최적설계를 수행함으로써, 구조제어시스템(structural control system)의 지진응답 제어성능을 극대화할 수 있는 새로운 설계방법을 소개하고자 한다. 기존의 제어장치 장착 구조물에 대

한 설계에는, 구조물 설계를 먼저 수행한 후에 외부하중에 대한 응답을 최소화하도록 부가적인 제어장치를 설계하는, 순차적 설계개념(그림 1(a))이 사용되어져 왔다. 이러한 순차적 설계방법은 구조물과 제어장치를 별개의 시스템으로 간주하기 때문에, 제어장치의 극대화된 성능을 구현하는 데에 근본적인 제약을 가지고 있다. 뿐만 아니라, 최적해를 얻기 위하여 반복계산을 수행하기 때문에, 필연적으로 계산 상의 효율성이 저하되고, 경우에 따라서는 최적해를 얻지 못하게 되는 경우가 발생할 수도 있다. 한편, 통합설계개념은 주어진 구조물에 대한 제어장치의 구조적 특성만을 설계 변수로 취하는 것이 아니라, 구조물의 설계인자도 동시에 설계변수로서 취하여 동합최적화를 수행한다. 그 결과, 진동을 제어하기 위한 두 가지의 방법, 즉 구조부재의 강성을 증가시키는 방법과 제어시스템을 설치하는 방법을 동시에 고려하면서, 가장 효율적인 설계변수 값을 취할 수 있게 된다. 이를 위해서는 다수의 설계변수를 동시에 최적화 할 수 있는 기법이 필요하며, 또한 통합시스템의 안전성과 경제성을 동시에 평가할 수 있는 적절한 목적함수의 도입이 필요하다. 그림 1(b)는 생애주기비용을 목적함수로 사용하는 통합최적설계의 개념도이다. 구조제어 시스템이 생애주기를 통하여 사회에 유발하는 비용의 기대값인 생애주기비용을 최소화하도록 설계변수를 결정하게 되면, 제어장치가 장착된 구조시스템의 사회/경제적 이익을 극대화하는 설계뿐만 아니라, 제어장치의 비용 효율성에 대한 간접적인 평가 또한 가능하도록 할 것이다.

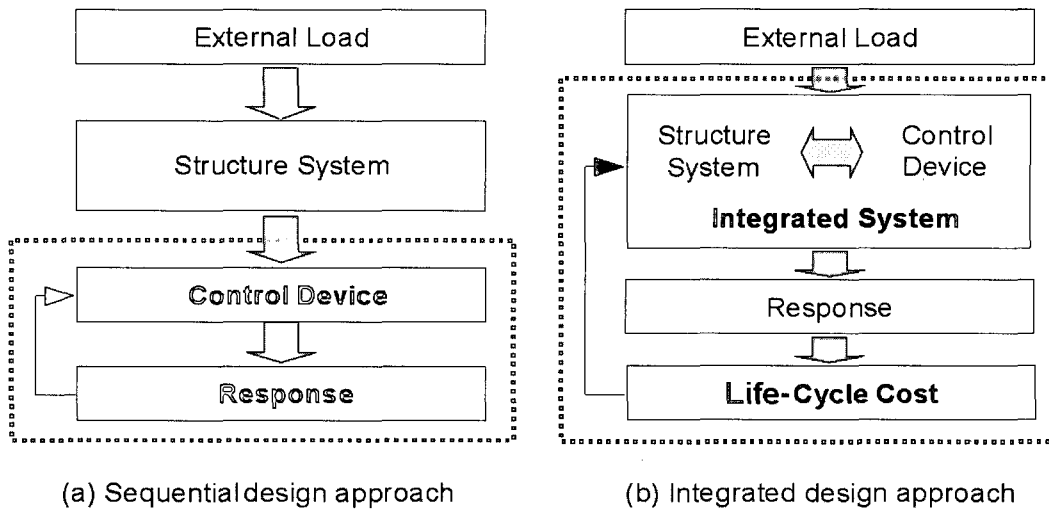


그림 1 순차적설계와 통합설계

적용 예로서, 점탄성감쇠기가 장착된 빌딩구조물에 대하여 최적화 문제를 구성하여 최적설계를 수행하는 과정 및 방법에 대해 설명하고, 설계 결과를 통하여 그 적용성과 효율성을 검토한 사례를 소개하도록 하겠다.

2. 생애주기비용함수를 이용한 최적설계 문제의 구성

앞서 설명하였듯이, 구조제어시스템의 최적설계를 위한 목적함수로서는 생애주기비용을 사용한다. 구조물의 생애주기비용은 건설부터 생애주기의 종료시점까지 기대되는 모든 비용의 현재가치의 합으로서 정의되며, 특정 구조시스템이 생애주기를 통하여 유발하는 사회적 비용은 초기 건설비용과 예상되는 손상비용의 합으로 표현할 수 있다 (그림 2).

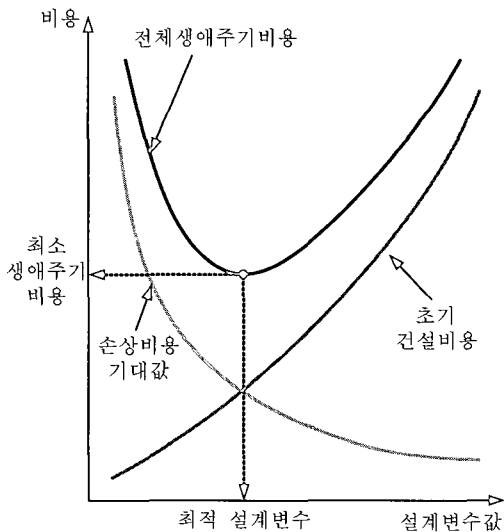


그림 2 생애주기비용 개념

사회에 끼치는 유익을 극대화하여 구조시스템을 설계하기 위해서는 총 생애주기비용을 최소화할 필요가 있다. 빌딩 구조물의 총 생애주기비용에는 구조물의 계획단계에서부터 해체시점까지 소요되는 모든 비용이 포함되어야 하나, 구조적 부재의 건설비용을 제외한 기타 항목의 비용은 구조적 신뢰수준을 결정하는 데에 직접적으로 영향을 미치지 않으며, 비구조적 요소 등에 의해 민감한 영향을 받는다 (박순규 등, 1997). 또한 여기서와 같이 생애주기비용을 목적함수로 하여 최적설계수준의 해를 구하는 데에 목적이 있을 때에는, 생애주기비용 함수를 정의함에 있어서 실제 비용에 포함되는 모든 비용요소를 포함시킬 필요 없이, 구조물의 생애주기비용에 큰 차이를 유발하는 설계변수 조합간의 최적화를 통해 상대적인 최소비용을 유발하는 설계수준을 채택하는 것으로 충분하다(Wen and Kang, 2001). 따라서, 그림 3과 같이 모델링된 점탄성감쇠기 장착 8층($n=8$) 철근 콘크리트 빌딩구조물을 설계예제구조물로 할 때, 그 설계변수로서는 각 층의 기동강성(K_c) 및 점탄성감쇠기 단면적(A_d)을 선택할 수 있다. 이는 점탄성감쇠기의 설치로 인하여 구조물의 응답이 감소하게 되고, 이로 인해 구조물의 강성을 줄여 초기비용을 절감할 수 있는 특성을 가지므로 이들이 생애주기비용 함수의 주된 변수가 되기 때문이다.

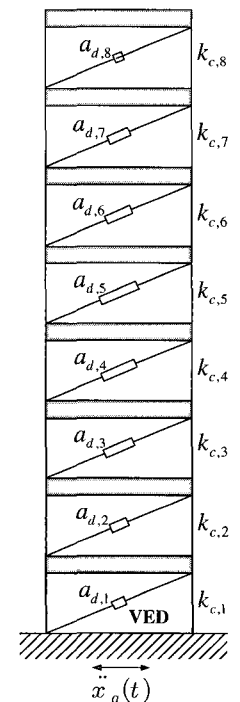


그림 3 설계예제구조물

이제, 초기비용과 손상비용 기대값의 합으로 표현되는 구조시스템의 전체생애주기비용합수를 다음의 식(2)와 같이 설계변수의 함수로서 구성할 수 있다.

$$K_c = \{k_{c,1}, \dots, k_{c,n}\}^T, A_d = \{A_{d,1}, \dots, A_{d,n}\}^T \quad (1)$$

$$E[C_T(t, \mathbf{K}_c, \mathbf{A}_d)] = C_s V_s(\mathbf{K}_c) + C_d V_d(\mathbf{A}_d) + C_D P_f(\mathbf{K}_c, \mathbf{A}_d) \frac{V}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{life}}) \quad (2)$$

여기서, V_s 와 V_d 는 각각 K_c 및 A_d 의 함수로 표현된 구조물의 부피와 점탄성 재료의 부피를 나타내며, ν , λ 와 t_{life} 는 각각 연간지진발생빈도와 할인율, 그리고 생애주기를 의미한다. C_s 와 C_d 는 각각 기둥부재의 단위부피 당 건설비용 및 점탄성 재료의 단위부피 당 감쇠기비용을 의미하며, C_D 는 파손이 발생하였을 때의 손상비용을 나타낸다. 한편, P_f 는 층간변위응답이 한계상태에 이르게 될 확률이다.

식(2)에서, 단위부피 당 건설비용은 건설시기에 의존하여 변화할 수 있으므로, 비용합수를 기둥부재의 단위부피 당 건설비용(C_s)으로 나누어 정규화시킨 값을 최적화를 위한 목적함수로 사용하는 것이 바람직하며, 이 때 모든 비용은 그에 상응하는 건설비용을 유발하는 기둥부재의 부피단위로서 표현된다. 따라서 정규화된 생애주기비용은 다음 식(3)과 같다.

$$E[\tilde{C}_T(t, \mathbf{K}_c, \mathbf{A}_d)] = V_s(\mathbf{K}_c) + r_{d/c} V_d(\mathbf{A}_d) + V_f P_f(\mathbf{K}_c, \mathbf{A}_d) \frac{V}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_{life}}) \quad (3)$$

여기서, $E[\tilde{C}_T(\cdot)]$ 는 구조시스템의 정규화된 생애주기 비용 기대값, $r_{d/c}$ 는 동일부피의 기둥부재비용에 대한 점탄성감쇠기비용의 비, V_f 는 단위부피의 기둥부재비용으로 정규화된 손상비용을 나타낸다.

이제, 주어진 생애주기 내에서 최소의 사회적 비용을 유발하는 구조제어시스템의 통합설계문제는 식(3)을 최소화 하는 \mathbf{K}_c 및 \mathbf{A}_d 를 찾는 것으로 정의되며, 다음 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{minimize } E[\tilde{C}_T(\mathbf{K}_c, \mathbf{A}_d)] \\ & \text{subject to } k_{c,\min} \leq k_{c,j} \leq k_{c,\max} \\ & \quad A_{d,\min} \leq A_{d,j} \leq A_{d,\max} \quad (j = 1, \Lambda, n) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $k_{c,\min}$, $k_{c,\max}$ 는 각각 j 층의 기둥강성 $k_{c,j}$ 의 최소 및 최대 허용값을 나타내며, $A_{d,\min}$, $A_{d,\max}$ 는 각각 j 층의 점탄성 재료 단면적 $A_{d,j}$ 의 최소 및 최대 허용값을 나타낸다.

3. 유전자알고리즘을 이용한 동시최적설계

유전자알고리즘(Holland, 1975)은 자연적인 진화과정의

모사를 통하여, 주어진 영역 내에서 설계변수들에 따른 목적함수의 적합도(fitness)를 기준으로 해를 찾아가는 추계학적 최적화방법(stochastic optimization method)의 하나이다. 이 알고리즘은 다수의 정수형 설계변수와 실수형 설계변수를 동시에 최적화 할 수 있는 방법으로서, 정수형 설계변수인 제어기의 설치위치와 실수형 설계변수인 구조부재강성 및 제어기용량을 동시에 최적화하여야 하는 통합설계 문제의 최적화에 매우 적합한 알고리즘이라고 할 수 있다.

유전자알고리즘에서 설계변수들은 매핑을 통하여 해당 하는 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.

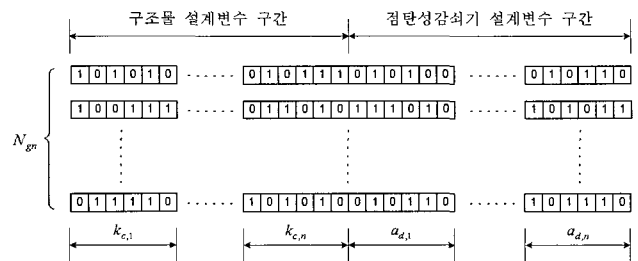


그림 4 2진코드법에 의한 기호열표현

유전자알고리즘에서는 이러한 염색체를 미리 정한 개체 수(N_{gn})만큼 생성하여 하나의 개체군을 구성한 뒤, 각각의 개체에 대하여 적합도를 계산한다. 개체선택의 지표가 되는 적합도함수는 식(4)의 목적함수를 사용하여 다음 식(5)으로 정의하였다.

$$F'_i = \frac{[\max(E[\tilde{C}_T]_i) - \min(E[\tilde{C}_T]_i)] + E[\tilde{C}_T]_i}{\frac{1}{N_{gn}} \sum_{j=1}^{N_{gn}} E[\tilde{C}_T]_j}, \quad (i = 1, 2, \Lambda, N_{gn}) \quad (5)$$

여기서 $E[\tilde{C}_T]_i$ 와 F'_i 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 조합함으로써 더 나은 해를 찾기 위한 과정을

표 1 구조물 주요 규격 및 지진특성

층간 높이(H_s)	3.0m	구조물 자체감쇠비	2%
층별 질량 ($m_j(j=1, \dots, 8)$)	10^5kg	점탄성 재료 단면적 최대값($A_{d_{max}}$)	$6.0 \times 10^{-1} \text{m}^2$
기동강성 최소값($k_{c_{min}}$)	$5.0 \times 10^3 \text{kN/m}$	기동강성 최대값($k_{c_{max}}$)	$2.1 \times 10^5 \text{kN/m}$

반복해 나간다. 이러한 과정을 통하여 선정된 최적적합도 값이 동일한 값으로 일정횟수이상 반복될 때, 최적해가 결정된다. 여기서는 개체의 선택에 있어서 룰렛휠방식(Roulette Wheel Rule)을 사용하였으며, 교배에 있어서는 2점교배방식을 적용하였다. 돌연변이의 생성에는 선택된 개체의 2진코드를 변이확률에 따라서 대립유전자로 역위(inversion)시키는 방식을 따랐다.

4. 최적설계 결과

최적설계 및 그 결과의 검증에 사용될 지진하중은 UBC에서 제시된 설계응답스펙트럼에 상응하는 스펙트럼밀도 함수를 생성하여 이용하였다(Park 등, 2004). 설계예제구조물의 주요 규격과 설계변수 제한조건은 다음의 표 1에 나타난 바와 같다. 그 밖에 생애주기비용함수를 구성하는 계수들은 표 2의 값을 사용하였다.

표 2 생애주기비용의 구성에 사용된 계수

연간지진발생빈도(ν)	0.1
할인율(λ)	5%
구조물 생애주기(t_{life})	50년

최적화의 방법으로 사용되어진 유전자 알고리즘의 적용시, 교배확률은 0.85, 변이확률은 0.01, 각 세대의 개체수(N_{gn})는 50개로 하였으며, 설계변수의 기호화에는 모두 64bit($n_k^b = 4, n_a^b = 4$)를 사용하였다. 그림 5는 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 나타나지만, 200회 가량 세대가 진행가까 지 점차 최적해에 근접한 초기비용값을 찾아가는 과정을 볼 수 있다. 한편, $E[\tilde{C}_T]_{min}$ 의 경우, 초기에 급격히 감소하나 40회를 넘어서면서 서서히 감소율이 떨어지며 200회 이후 수렴하는 양상을 보인다. 결정된 최적 설계변수값들을 나타내면 그림 6과 같다.

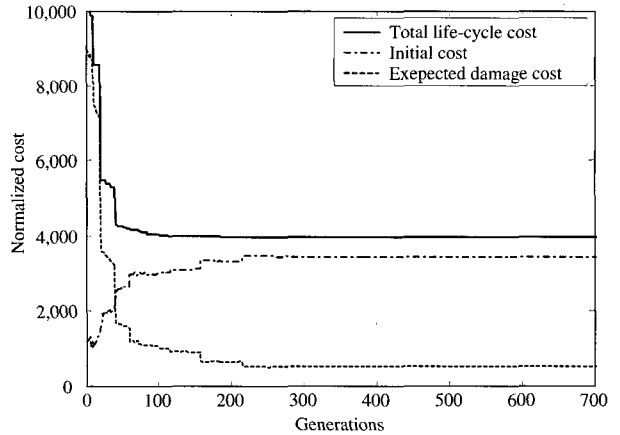


그림 5 생애주기비용, 초기비용 및 손상비용의 최적화 과정

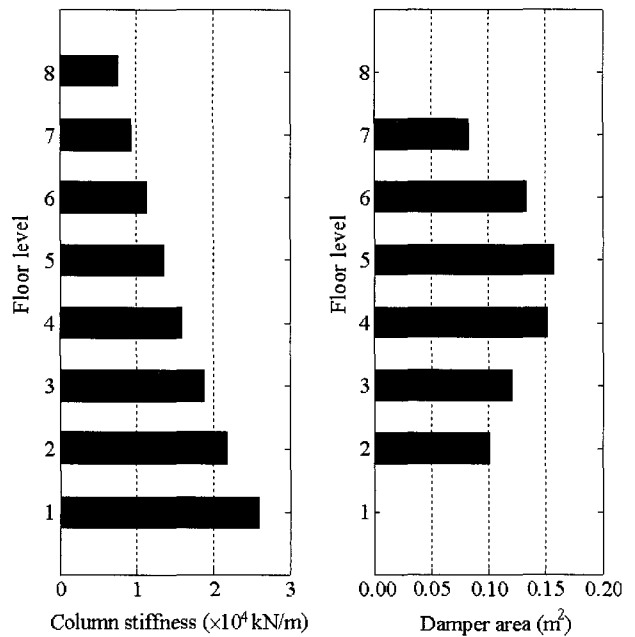


그림 6 예제 구조물의 최적설계변수 분포

동일한 초기비용을 이용하여 점탄성감쇠기가 장착된 구조시스템을 설계하였을 때, 최적설계를 수행한 경우와 그렇지 않은 경우의 응답을 비교하기 위하여, 각 층별로 균일하게 기동강성 및 점탄성감쇠기 단면적을 배치한 경우 얻어진 응답과 비교하여 보았다. 각각의 경우에 대하여 각 층의 rms(root mean square)변위응답에 의한 변형형상을 도시하면 그림 7과 같다. 두 가지 경우 모두 동일한 초기

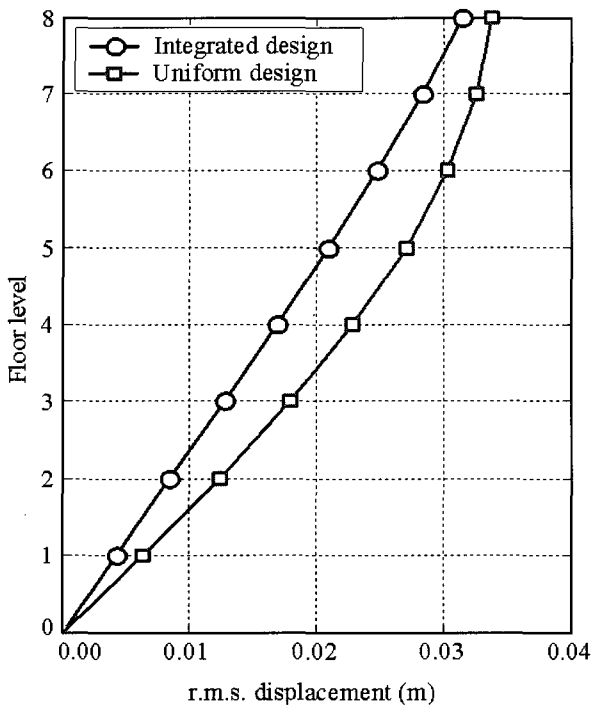


그림 7 층별 rms 변위 응답 비교

비용을 사용하였음에도 불구하고 소개하고 있는 통합최적 설계기법을 적용한 경우가 균일하게 설계변수를 분포시킨 경우에 비하여 뛰어난 내진성능을 보임을 확인할 수 있다. 최상층에서의 rms 변위 응답은 통합최적설계기법을 적용할 경우 7%가량 줄어드는 것으로 나타났다.

또한 통합최적설계를 수행한 경우와 각 층별로 균일하게 동일한 초기비용의 기둥강성 및 점탄성감쇠기 단면적을 배치한 경우에 대하여, 정규화된 구조물 비용, 점탄성감쇠기비용 및 이들의 합으로 표현되는 초기비용과, 손상비용 기대값, 전체생애주기비용 등을 지진구역 및 지반조건에 따라 비교한 결과는 표 3과 같다. 소개하고 있는 통합최적설계기법을 적용할 경우 지진 위험으로 인한 손상비용 기대값 및 전체생애주기비용의 크기가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 제안된 통합최적설계기법을 적용할 경우, 내진성능의 향상뿐만 아니라 경제적 효율성의 극대화도 기대할 수 있음을 확인할 수 있다.

한편, 통합최적설계를 수행한 경우, 견고한 지반에서는 지진 규모에 따라 구조물 비용은 거의 동일한데 반하여, 점탄성감쇠기 비용은 강진지역이 중진지역에 비하여 약 5 배 가량 많이 소요되는 것을 볼 수 있다. 따라서, 견고한 지반에서 구조물이 보다 높은 내진성능을 가지도록 하기 위해서는 구조물 자체의 강성을 증가시키는 것 보다 점탄성감쇠기의 장착을 증가시키는 것이 보다 효율적일 것으로 판단된다. 반면, 연약한 지반의 경우에는 이와 반대로, 지진 규모에 따라 점탄성감쇠기 비용은 거의 동일하고, 구조물 비용은 강진지역의 경우가 약 26%가량 큰 것으로 나타났다. 이를 통해 볼 때, 연약지반에서의 내진성능 향상을 위해서는 점탄성감쇠기의 양을 증가시키는 것 보다 구조물 자체의 강성을 증가시키는 것이 효율적임을 유추하여 볼 수 있다.

5. 결론

지금까지 구조물과 제어장치를 하나의 통합된 시스템으로 고려함으로써, 설계초기단계에서부터 제어장치와 구조물의 동시에 최적화하는 방법을 살펴보았으며, 지진하중을 받는 빌딩구조물 수치예제를 통하여, 통합최적설계 방법의 적용성 및 효율성을 검증한 결과를 소개하였다. 비록, 아직까지는 제어장치의 도입조차 활발히 이루어지지 않고 있는 실정이지만, 앞으로 초장대 교량, 초고층 구조물의 건설이 늘어날수록 제어장치의 활용은 늘어날 것이며, 제시된 통합최적설계 개념은 미래 구조물건설의 안전성 및 경제적 효율성을 동시에 극대화 할 수 있는 방법이 될 수 있을 것이다.

후기

이 기사는 저자의 게재논문들을 중심으로 재구성한 것으로, 내용 중 부족한 부분은 해당 논문을 참고하기 바랍니다.

표 3 지진구역 및 지반종류에 따른 생애주기비용 비교

지반종류	견고한 지반 (S_B)				연약한 지반 (S_E)			
	중진지역 (0.15)		강진지역 (0.30)		중진지역 (0.15)		강진지역 (0.30)	
지진구역 (Z)	Uniform	Integrated	Uniform	Integrated	Uniform	Integrated	Uniform	Integrated
설계 방법	Uniform	Integrated	Uniform	Integrated	Uniform	Integrated	Uniform	Integrated
구조물 비용	3,255	3,255	3,348	3,348	3,885	3,885	4,894	4,894
점탄성감쇠기 비용	27	27	133	133	256	256	249	249
초기 비용	3,283	3,283	3,481	3,481	4,141	4,141	5,144	5,144
손상비용 기대값	5,025	294	4,260	473	12,479	443	57,045	553
전체 생애주기비용	8,566	3,577	8,168	3,955	16,953	4,585	62,571	5,697

(단위: cm^3)

참 고 문 헌

1. 고희무, 송준호 (1999) 사용기간비용 최소화에 의한 지진격리교량의 경제성 평가. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제19권, 제14호, pp. 539~550
2. 박관순 (2001) Physical Programming 및 Genetic Algorithm을 이용한 통합구조-제어시스템의 동시최적 설계. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제21권, 제 4-A호, pp. 455~466
3. 박관순, 고희무, 함대기 (2002) 점탄성감쇠기가 설치된 구조물의 통합최적설계. 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제22권, 제 2-A호, pp. 413~422
4. 박순규, Ang, A.H-S. (1997) 철근콘크리트구조의 경제적인 내진 신뢰성. 콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 제9권, 제 5호, pp. 137~148
5. Holland, J. H. (1975) *Adaption in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, MI.
6. Park, K.S., Koh, H.M. (2004) Performance-based Optimum Design of an Integrated Structural Control System using Genetic Algorithms, *Advances in Engineering Software*, Vol. 35, 85~94
7. Park, K.S., Koh, H.M. and Hahm, D. (2004) Integrated Optimum Design of Viscoelastically Damped Structural Systems, *Engineering Structures*, Vol. 26, 581~591
8. Wen, Y.K. and Kang, Y.J. (2001) Minimum building life-cycle cost design criteria. I: Methodology. *Journal of Structural Engineering.*, ASCE, Vol. 127, No. 3, pp. 330~337 