

마찰받침이 있는 지진격리교량의 최적설계

Optimal Design for Seismically Isolated Bridges with Frictional Bearings

이계희* · 유상배** · 하동호***

Lee, Gye-Hee · You, Sang-Bae · Ha, Dong-Ho

Abstract

In this paper, the optimization of frictional bearings that applied to improve the seismic performance of conventional bridges were conducted. The nonlinear dynamic analysis of steel bridges and concrete bridges are carried out with the El Centro and artificial earthquake motions, and the reponses of the bridges were optimized by genetic algorithm. The object functions were considered with two parameters, such as shear forces and displacements at bearing, and the optimum object functions were searched by varying the weighting factors of the two parameters. As results, in case of the steel bridges, the optimum results were obtained when larger weight factor was imposed to the shear force. However, in case of concrete bridges, larger weight factor was need to the displacement for optimum results.

Keywords : μ -GA, frictional bearing, seismically isolated bridge, optimal design

요 지

본 논문에서는 내진설계되지 않은 교량의 내진보강에 사용될 수 있는 지진격리장치의 하나인 마찰받침의 설계최적화에 대하여 연구하였다. 강상형교와 콘크리트교에 대하여 El Centro지진파와 인공지진파를 적용하여 마찰받침을 가진 교량구조물의 비선형동적해석을 수행하고 유전자알고리즘을 사용하여 구조물의 응답을 최적화하였다. 이 때 마찰받침의 전단력과 변위를 동시에 고려할 수 있도록 목적함수를 작성하고 전단력과 변위의 가중치를 변화시키면서 최적화를 수행하였다. 그 결과 상대적으로 경량인 강교에서는 전단력에, 상대적으로 중량인 콘크리트교에서는 변위에 큰 가중치를 주는 경우 최적의 응답을 얻을 수 있었다.

핵심용어 : 유전자알고리즘, 마찰받침, 지진격리교량, 최적설계

1. 서 론

국내에서 교량에 대한 내진설계는 1992년 도로교시방서에 AASHTO에 기초한 내진설계기준이 도입되면서 활성화되었다고 할 수 있다. 그러나 현실적으로 90년대까지 완공된 대부분의 교량은 지진에 대한 내진성능이 충분하다고 할 수 없으며 심지어 최근에 완공된 일부 교량에서도 내진성능이 부족한 경우가 발견되고 있다(하동호, 2007). 이런 교량을 내진기준에 적합하도록 보강하는 경우 개축하는 방안과 기존 교량에 적절한 지진보호장치를 추가하여 내진성능을 향상시키는 방법이 있다. 이 두 가지 접근법 중 적절한 장치를 추가하여 내진안전성을 확보하는 것이 상대적으로 경제적인 접근이라 할 수 있다. 이러한 지진보호장치중의 하나로 구조물의 고유진동수를 동적중복계수가 작은 진동수영역으로 이동시켜 구조물의 내진거동을 향상시키는 장치인 지진격리장치가 최근에 사용되고 있다. 그러나 지진격리장치는 장주

기 성분이 탁월한 1985년 Mexico City지진이나 1995년 Kobe지진과 같은 지진파에서는 지나치게 큰 변위를 보여 낙교나 지진격리장치의 기능적 손상을 일으킬 수 있다. 이런 점을 극복하기 위하여 일반적인 지진격리효과와 마찰력에 의한 감쇠를 동시에 고려하는 마찰형 지진격리 장치를 도입한 교량받침(이하 마찰받침(frictional bearing)이라 표기)이 개발되었다. 마찰형 지진격리장치는 지진의 주기 특성의 변화나 강도변화에 따른 구조물의 응답이 민감하지 않으며, 마찰에 의한 감쇠효과로 지진에너지를 소산시킬 수 있어 구조물의 피해를 줄일 수 있는 장점이 있다. 특히 다른 지진격리장치의 경우보다 변위응답을 크게 줄일 수 있어 낙교방지공이나 신축이음 등의 거동을 고려할 때 교량에 보다 효율적인 지진격리장치라고 할 수 있다(하동호, 2000). 그러나 이 장치에 대한 설계와 운용에 대한 이해는 부족한 편이며 지속적인 연구가 필요한 상태이다.

본 논문에서는 유전자알고리즘의 하나인 μ -GA를 이용하여

*정회원 · 목포해양대학교 해양시스템공학부 부교수 (E-mail : lghisk@mmu.ac.kr)

** (주)케이이엔씨 기술연구소 연구원 (E-mail : sbyou@krenc.com)

***정회원 · 교신저자 · 건국대학교 토목공학과 부교수 (E-mail : hadongho@konkuk.ac.kr)

마찰반침에 나타나는 두 가지의 큰 구조응답인 전단력과 응답변위를 변수로 하는 목적함수를 작성하고 이를 최적화하여 마찰반침의 효율적인 설계파라미터를 선정하고자 하였다. 이를 위하여 강상형교량과 콘크리트교량을 대상으로 계측지진파와 인공지진파에 대하여 비선형동적해석을 수행하고 이의 응답을 최적화하였다.

2. 마찰반침

마찰반침은 마찰력을 제공하여 감쇠거동을 구현하는 마찰면과 변형이 일어난 받침을 복원시켜주는 복원스프링으로 구성된다(하동호, 2000)(그림 1, 2).

2.1 운동방정식

일반적으로 복원스프링은 선형감쇠기로 모델링할 수 있으며, 마찰반침은 간단한 Coulomb마찰로 표현할 수 있다(하동호,

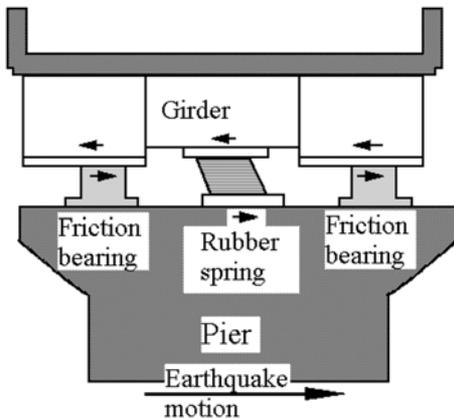


그림 1. 마찰형 지진력리장치의 구성

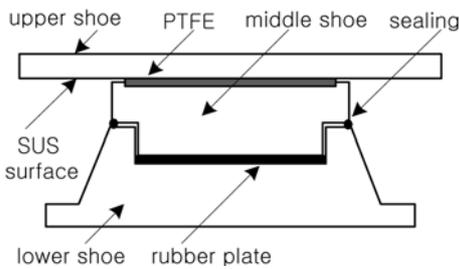


그림 2. 마찰반침

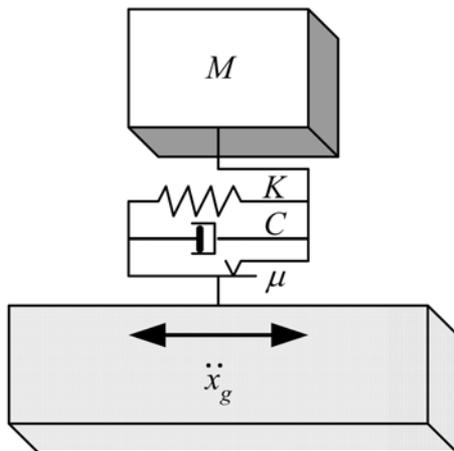


그림 3. 마찰요소를 가진 Coulomb의 1자유도계 모델

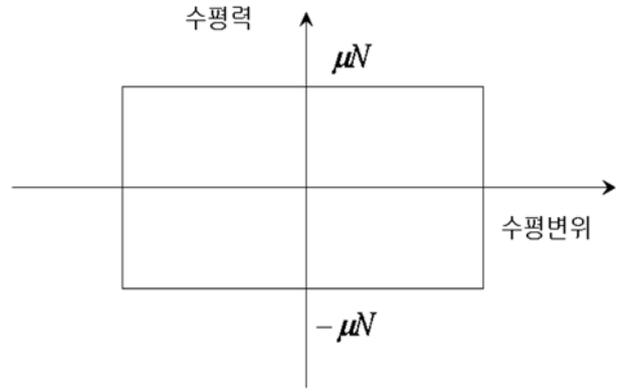


그림 4. Coulomb 마찰의 힘-변위관계

2000). 그림 3과 같은 1자유도 모델의 경우 그 응답은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

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

$$F = \mu N \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (2)$$

여기서, M =질량, C =감쇠계수, K =스프링의 탄성계수, F =마찰력, μ =마찰계수, N =연직하중(= Mg), g =중력 가속도, x =질량 M 의 지반에 대한 상대변위, \ddot{x}_g =지반가속도이다.

이때, 마찰력은 마찰계수와 연직하중에 비례하고, 그 힘의 방향은 속도의 반대 방향이 된다(식 (2)). 위와 같이 모델링할 경우, 마찰반침만의 힘-변위 관계는 그림 4와 같다.

지진력리에 사용되는 마찰반침은 마찰면에 테플론(PTFE: Poly-tetra-fluoro-ethylene)과 연마 스테인리스 스틸(SUS316)을 사용함으로써 운동마찰계수가 정지 마찰계수보다 크다는 특징을 가진다. 이는 마찰반침을 지진력리받침으로 사용시에 대단히 유용한 특성으로 온도변위시에는 마찰저항이 작지만, 지진시에는 마찰저항이 증가하여 감쇠능력을 향상시키고, 이에 따라 응답변위가 감소한다. 이와 같은 특징을 고려할 경우에 식 (1)의 운동방정식은 정지마찰계수와 운동마찰계수를 도입하여 식 (3)-(6)과 같이 수정될 수 있다.

(a) 동적 상태의 운동 방정식

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + F = -M\ddot{x}_g \quad (3)$$

$$F = \mu_d N \operatorname{sgn}(\dot{x}) \quad (4)$$

(b) 정지에서 동적으로 되는 조건

$$|-M\ddot{x}_g - Kx| > \mu_s N \quad (5)$$

(c) 동적에서 정지로 되는 조건

$$|\dot{x}| = 0 \quad \text{and} \quad |-M\ddot{x}_g - Kx| > \mu_s N \quad (6)$$

여기서, μ_s =정지마찰계수, μ_d =운동마찰계수이다.

2.2 운동마찰계수

PTFE와 SUS의 마찰면 사이의 마찰계수는 미끄럼속도에 따라 변화하므로 운동마찰계수의 속도에 따른 변화를 식 (1)과 식 (6)을 이용하여 정지시에는 마찰계수가 작고 미끄럼 속도의 증가에 따라 마찰계수가 증가하도록 표현 했다. 많은 실험결과에 의하면 운동마찰계수의 변화는 아래와 같이 지수함수로 표현하는 것이 적절하다고 알려져 있다(하동호, 2000).

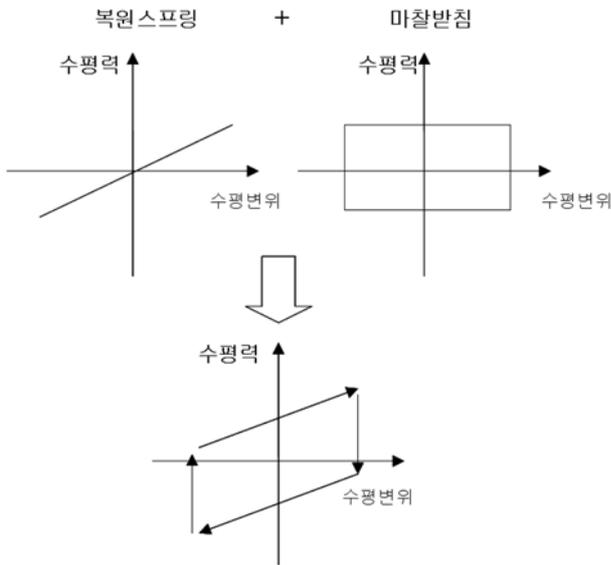


그림 5. 지진격리받침의 거동모델

$$\mu_d = \mu_{\max}(-\mu_{\max} - \mu_s) \exp(-a|\dot{x}|) \quad (7)$$

여기서, μ_{\max} 는 운동마찰계수의 최대값, a 는 상수, \dot{x} 는 미끄럼속도이다.

2.3 지진격리받침의 거동모델

마찰받침의 모델링에 있어서 복원스프링은 수평하중에 대한 복원력만을 갖고 있는 것으로 가정하고 자체의 이력감쇠는 무시하였으며, 이를 스프링요소로 모델링하였다. 이와 같은 복원스프링과 마찰받침을 적용한 경우 그림 5와 같이 모델링할 수 있다.

3. μ -GA를 이용한 최적화

구조물의 미끄러짐을 포함하는 해석은 비선형성이 매우 크므로 일반적인 최적화방법으로는 전체적인 최적화를 달성하기 어렵다. 따라서 고도의 비선형성을 가진 복잡한 문제에 대한 최적화 기법으로 최근 많이 사용되고 있는 유전자 알고리즘의 하나인 μ -GA를 이용하여 최적화를 수행하고 구조물의 거동을 평가하였다.

3.1 μ -GA의 개요

이 방법은 Krishnakumar(1989)가 제안한 방법으로 적은 수(일반적으로 5개)의 인구를 가지고 연산을 수행한다. 이 방법에는 내부루프와 외부루프가 있어 내부루프에서는 선택과 교배연산이 수행되고 각 세대에서 최적의 값을 가진 염색체가 저장된다. 이러한 과정이 일정한 수렴조건을 만족시키면 내부루프의 최대 적합도를 가진 염색체에 대하여 돌연변이를 일으켜 새로운 세대의 인구를 다시 발생시킨다. 이 새로운 인구는 다시 내부루프로 들어가서 연산이 수행된다. 이 방법의 특징은 적은 수의 구성원들에게 내부루프에서의 돌연변이가 확률을 작게 하여 각 세대의 구성원들이 일정한 단계에 수렴하게 하고 수렴된 세대의 구성원에 대해 돌연변이를 일으켜 이 과정을 반복하는 것이다. 이 방법에 의하면 적은 수의 인구를 사용하므로 세대를 구성하는 인구에 대한

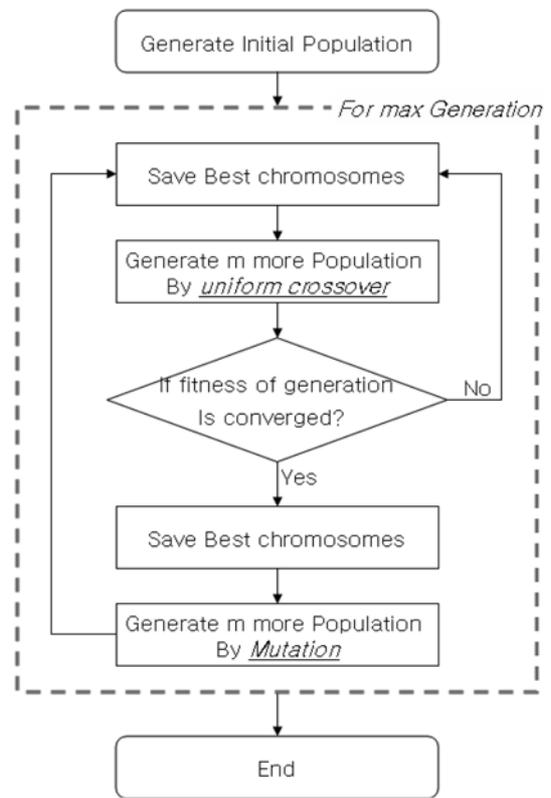


그림 6. μ -GA의 흐름도

계산시간을 줄일 수 있고 수렴도가 큰 구성원에 대한 반복 계산으로 적합도가 떨어지는 개체의 평가에 대한 계산시간을 줄일 수 있다. 이러한 특성은 단위해석시간이 큰 비선형 동적해석 문제에 유리하게 적용할 수 있다. μ -GA의 전반적인 계산 과정은 그림 6과 같다.

μ -GA에는 적은 인구수를 가지고 연산을 수행하기 때문에 내부루프는 매우 빠른 속도로 수렴하고 외부루프는 수렴된 이외의 영역에 대한 검사를 위해 돌연변이를 도입하는 특성을 가지고 있다. 실제 연산에서 적합도의 개선은 처음 몇 개의 세대에서 집중적으로 이루어지고 대부분의 세대에서는 아주 드물게 해의 개선이 이루어진다. 이러한 과정으로 최적 설계의 한 과정을 가정하면 우리가 설정한 정확도의 근접기준에 수렴했다고 판단되었을 경우 계산을 중지할 수 있다.

3.2 목적함수

본 연구에서 최적화의 대상인 받침의 변위와 전단력을 동시에 고려하는 목적함수를 작성하기 위하여 설계파라미터인 받침의 변위와 전단력을 다음과 같이 가정하였다.

$$sh_{low} = \frac{sh_{up}}{2} \quad (8)$$

$$s = sh_{up} - sh_{low} \quad (9)$$

$$U_{com} = \frac{U_{cal}}{U_{\max}} \quad (10)$$

sh_{up} : 비보강 상태의 고정된 교각하부 발생 최대 전단력

sh_{low} : 전단력의 최소값(lower bound)

sh_{cal} : 보강 후 교각하부에 발생하는 최대 전단력

S : 보강 후 발생가능 최대 최소 전단력의 차

U_{cal} : 교량 보강 후 받침에 발생하는 최대 변위

U_{\max} : 교량받침의 최대 허용변위

U_{com} : 교량받침의 최대 허용변위에 대한 발생 변위의 관계식이다.

기존의 많은 논문(하동호, 2000; 이지훈, 2006; Priestley, 2000; Skinner, 1993)에서 검증된 바와 같이 보강 후 교각에 발생하는 전단력은 마찰받침의 미끄러짐에 의해 보강전 최대 발생 전단력에 비하여 감소한다. 본 연구에서는 이러한 마찰력의 감소특성을 파악하기 위하여 비보강상태에서 발생하는 최대발생전단력의 50%를 최적화해석시 기준으로 삼았다. 이는 적합도의 증감효과를 증폭시키는 효과가 있다. 받침의 변위에 대해서는 최대받침변위에 대한 내진보강교량의 변위비를 변수로 삼았다. 이러한 두 가지 변수로 목적함수를 다음과 같이 표현하였다.

$$F = \left(1.0 - \left(\frac{sh_{cal} - sh_{low}}{S}\right)\right) \times v + \left(1.0 - \frac{U_{com}}{1.0 + U_{com}}\right) \times (1 - v) \quad (11)$$

여기서 F 는 목적함수의 적합도(fitness)이고 sh_{cal} 와 U_{cal} 의 값이 작아질수록 증가한다. 또한 전단력에 대한 보강효과가 발생하지 않는 경우 즉 $sh_{cal} > sh_{up}$ 인 경우에는 전단력항의 적합도가 '0'이 되도록 제한함으로써 부적합설계가 되는 것을 방지 하였다.

전단력과 변위의 두 변수의 상대적인 비중은 각각의 변수로 구성되는 목적함수의 항에 가중치 v , $(1-v)$ 를 각각 곱하여 고려할 수 있도록 하였다. 이 때 v 값의 범위는 0에서 1 사이의 값으로 하여 최적의 보강효과를 얻을 수 있는 변수의 가중치를 얻을 수 있도록 하였다. 이 가중치값이 변함에 따라 적합도의 값은 동일한 구조물이라 하여도 다르게 나온다. 이 때 적합도의 수치적인 상대값으로 각각의 가중치 모델에서 해의 개선효과를 파악할 수 있다.

4. 대상구조물의 최적화

마찰받침에 대한 최적설계를 위하여 강상형교량과 콘크리트상형교량을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 본 연구에 사용된 마찰받침은 상판의 지중과 횡방향 변위 발생시 발생하는 마찰력을 교각에 전달할 수 있도록 SAP2000프로그램(SAP2000 User Manual, 2002)의 비선형연결요소를 사용하여 비선형을 고려하였다. 이때 사용되는 정적 마찰계수와 운동마찰계수, 복원력을 제공하는 복원스프링의 계수 등을 설계파라미터로 잡고 유전자 알고리즘을 통하여 목적함수에 가장 적합한 계수 값을 찾았다.

해석수행과정은 유전자코드에 따라 마찰받침의 특성을 결정하는 정·동마찰계수와 탄성스프링에 대한 입력자료를 발생시키고 지진파에 대한 비선형동적해석을 수행한다. 해석결과 얻어진 받침에서의 최대전단력과 최대변위에 대한 시한이력을 검색하여 그 값을 이용한 적합도함수값을 계산한다. 이 과정은 μ -GA의 각 세대의 각 인구에 대해서 수행되었다. 전체적인 유전자 알고리즘의 적용은 참고문헌(Carroll, 2001)의 결과를 이용하였다.

4.1 해석대상 교량

4.1.1 강상형 교량

해석에 사용되는 강교는 2개의 상자형 거더를 가진 교량으

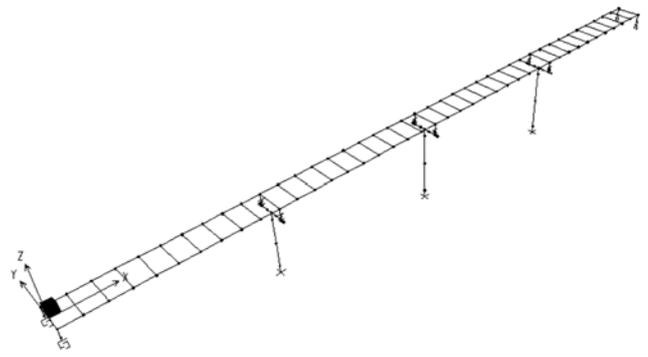


그림 7. 강상형 교량의 모델링

표 1. 강상형 교량의 물성치

구분		특성
상부구조	단위m당 중량	139.5 kN
	상부구조 형식	강상형
교각	교각형식	원형 (높이: 18,200 mm)
	면적	1,131,000 mm ²
	유효단면강성 (E·I _{eff})	4.072×10 ¹² kN·mm ² (교축방향)
		4.072×10 ⁷ kN·mm ² (교축직각방향)
	철근항복응력(f _y)	300,000 kN/mm ² (SD30)
콘크리트강도(f _{ck})	21,000 kN/mm ²	

로 상부구조와 하부구조를 모두 보요소로 모델링하였다. 일반적으로 비선형동적거동의 유전자알고리즘 최적화는 많은 계산 시간을 필요로 하므로 구조물의 거동특성을 나타낼 수 있는 단순한 해석모델이 필요하다. 본 연구의 대상구조물이 내진보강된 교량의 경우 주관심대상인 구조거동은 받침 및 받침과 인접한 부재에서 국한되므로 상부구조에 복잡한 유한요소의 적용은 불필요할 것으로 판단하였다. 다음은 대상교량의 해석 모델(그림 7)과 물성치(표 1)는 도표에 나타내었다.

4.1.2 콘크리트 교량

해석의 대상인 된 콘크리트교량은 국내 설계도서 및 BMS 자료(이지훈, 2006)를 분석하여 이를 바탕으로 작성한 구조부위별 특성을 기준으로 모델링하였다(표 2).

강상형교량에 비하여 상부 지중이 크며 이로 인하여 교각 하부의 전단력과 받침에서의 발생변위가 더 클 것으로 판단된다. 또한 콘크리트 교량에 사용되는 탄성받침은 받침의 유연성이 지진력을 감쇠시킬 수 있는 효과가 있는 것으로 알

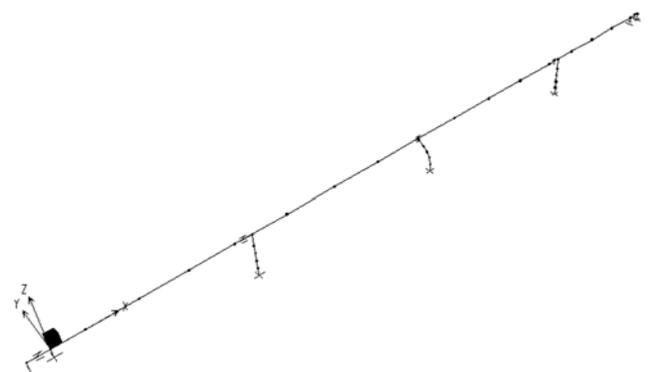


그림 8. 콘크리트 교량의 모델링

표 2. 해석대상 콘크리트형 교량의 물성치

구분		특성
상부구조	단위m당 중량	212.5 kN
	상부구조 형식	콘크리트 슬레브
교각	교각형식	원형 (높이 : 10700 mm)
	면적	2544700 mm ²
	유효단면강성 (E _{ieff})	5.153×10 ¹² kN-mm ² (교축방향)
		5.153×10 ¹² kN-mm ² (교축직각방향)
	철근항복응력 (f _y)	300000 kN/mm ² (SD30)
콘크리트강도 (f _{ck})	21000 kN/mm ²	
탄성받침*	탄성강도(kN/m)	18234 kN/m

*탄성받침 해석시에만 적용

려져 있어 이 조건을 갖는 경우도 해석하여 비교하였다. 다음은 콘크리트교량의 모델링(그림 8)과 물성치(표 2)이다.

4.2 지진파

대상구조물의 지진에 대한 동적거동은 실측지진파와 인공 지진파에 대하여 검토되었다. 실측지진파로서는 1940년 발생한 El Centro의 지진파를 사용하였으며, 국내설계기준에서 제시한 것과 부합하도록 크기를 조정하여 사용하였다(그림 9a)). 그러나 El Centro지진파 같은 강진지역의 지진파를 중앙진 지역인 국내에 적용하는 경우에 발생할 수 있는 문제점을 보완하기 위하여 국내 시방서 기준에 부합하도록 산출한 인공지진파를 사용한 해석을 추가하였다(김남식, 2005). 본 논문에서 사용된 인공지진파의 경우 Soil Type의 조건에 부합하는 입력지진운동이다(김남식, 2005)(그림 9b).

4.3 목적함수의 가중치모델

본 연구에서는 마찰받침으로 내진보강된 교량의 거동을 받침에서의 최소전단력과 변위에 대하여 최적화하였다. 이 때 전단력과 변위의 두 파라미터의 가중치를 조절하여 최적의 내진보강을 결정하는 요소들의 특징을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 표 3과 같은 가중치모델에 대하여 각각 최적화를 수행하였다. 두 종류의 대상교량에 대하여 각각의 가중치

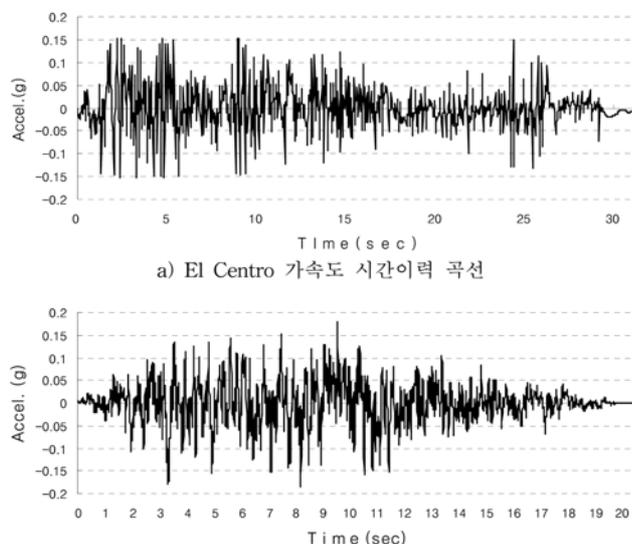


그림 9. 인공지진파 가속도 시간이력곡선

표 3. 우선 최적화의 가중치모델

	가중치모델				
	I	II	III	IV	V
전단력가중치(v)	0%	20%	50%	80%	100%
변위가중치(1-v)	100%	80%	50%	20%	0%

모델을 적용한 목적함수를 최적화하였으며 이 때 사용된 인공수는 5, 세대수는 200으로 하였다. 따라서 하나의 가중치 모델에 대한 최적해를 얻기 위해 1000번의 반복계산을 수행하였다.

5. 수치해석결과 분석

5.1 강상형 교량

계측지진파를 사용한 최적화해석의 결과, 5가지 경우 모두 비보강의 경우에 비교하여 전단력과 변위 등의 응답이 감소하는 결과를 얻었다. 그러나 변위에 큰 가중치를 준 모델 I, II의 경우 적합도의 상승효과는 다른 경우와 비교하여 상대적으로 미미하다(그림 10). 최소전단력이 얻어진 경우는 모델 IV의 경우였다. 이 경우 변위값은 3.8 cm 정도로 나타났다. 그러나 모델 V의 경우에는 전단력이나 변위응답 모두 다른 목적함수 모델에 비하여 적합도가 떨어지는 값을 보여주었다(표 4).

인공지진파에 의한 변위와 전단력도 유사한 양상을 보여주었다(그림 11). 마찰 받침을 적용한 모든 경우에 비보강교량에 비하여 낮은 구조응답을 보여주었다. 다만 전단력제어만 한 경우(모델 V)와 변위제어만 한 경우(모델 I)는 다른 경우에 비하여 제어를 수행하지 않은 부분의 응답이 월등히 나빠지는 것을 볼 수 있었다. 전반적으로는 전단력에 중점을 두거나 전단력과 변위를 같은 비중으로 제어하는 모델 III, IV가 효율적인 거동을 보인다.

5.2 콘크리트 교량

상부의 지중이 비교적 큰 콘크리트교량에 마찰받침을 적용한 경우도 비보강의 경우에 비하여 매우 큰 전단력감소 및 변위의 개선효과가 나타났다. 특히 콘크리트교량의 지진격리 장치로 널리 사용되고 있는 탄성받침에 비해서도 우월한 지진응답을 나타내었다. El Centro 지진파를 사용하여 해석한 결과(그림 12), 변위와 전단력에 대해서만 제어한 목적함수 모델을 사용한 경우 일반적인 탄성받침 정도의 효율을 보이거나 비보강의 경우보다 변위가 크게 나타났다. 따라서 이 경우에는 마찰받침을 사용해야 하는 당위성을 찾기는 힘들다. 여러 목적함수모델중 변위와 전단력에 동일한 가중치를 준 경우(모델 III)와 변위에 보다 중점을 둔 경우(모델 II)가 기대했던 응답을 보여주었다. 그러나 변위와 전단력을 동등한 가중치로 제어한 경우에는 비록 탄성받침을 적용한 경우보다 전단력에서 우수한 응답거동을 보이거나 변위에 있어서 탄성받침과 유사한 크기의 응답을 보여주고 있다. 이러한 경향은 인공지진파를 사용한 경우(그림 13)에 더욱 두드러졌는데 모델 III의 경우에는 전단력에 있어서 탄성받침을 사용한 경우에 비해 월등한 응답을 보이거나 변위에 있어서는 그 개선

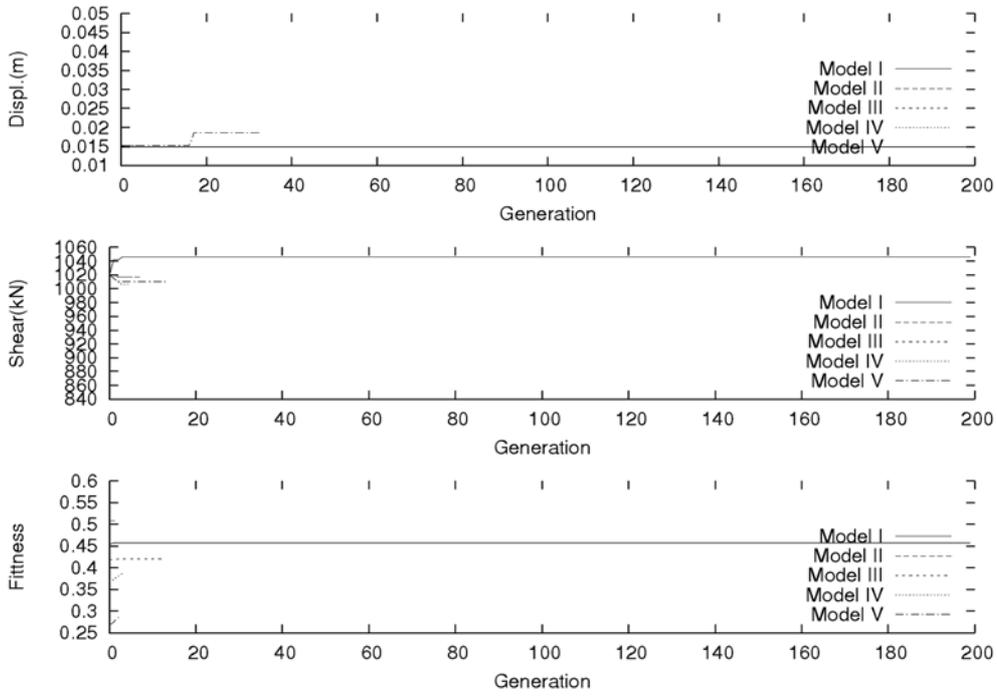


그림 10. 세대별 응답변화(EI centro 지진파, 강상형교량)

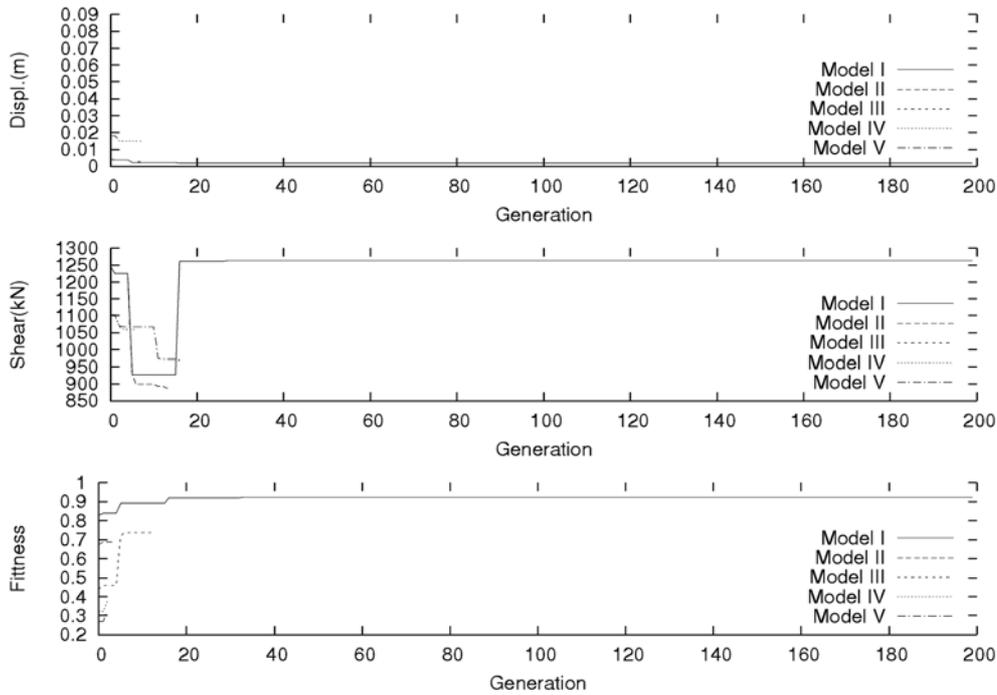


그림 11. 세대별 응답변화(인공지진파, 강상형교량)

표 4. 강상형교량의 최종세대의 변위와 전단력의 비교

		비보강 교량	마찰받침적용 (가중치모델)				
			I	II	III	IV	V
El centro	전단력 (kN)	3174.9	1045.0	991.5	984.8	852.2	900.6
	변위 (m)	0.088	0.015	0.015	0.015	0.039	0.049
인공 지진파	전단력 (kN)	2861.6	1261.8	932.4	886.1	866.1	876.7
	변위 (m)	0.080	0.002	0.003	0.003	0.003	0.076

량이 미미한 편이다. 이러한 점에서는 전단력과 변위가 모두 개선되는 모델 II가 좀 더 바람직한 응답을 보인다. 이러한 경향은 강상형의 경우와 반대의 경향을 보이는 것으로 강상

형의 경우는 전단력에 중점을 두어 제어한 경우가 좋은 응답을 보였었다. 이러한 현상은 콘크리트교의 경우 상부구조의 증량이 강상형 교량에 비하여 상대적으로 커 큰 마찰력

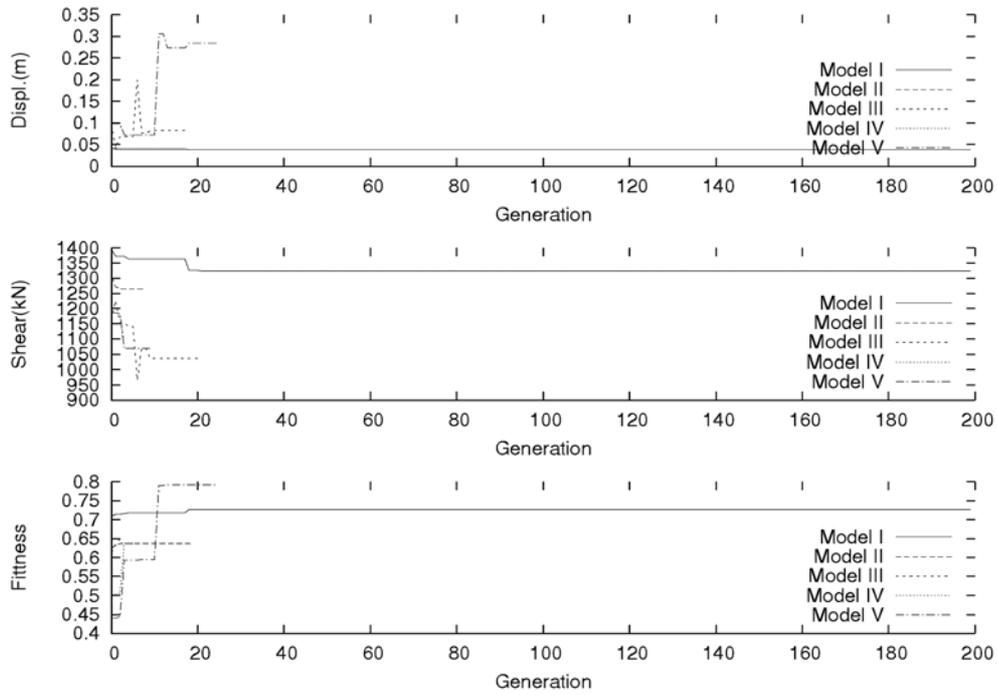


그림 12. 세대별 응답변화(El Centro 지진파, 콘크리트교량)

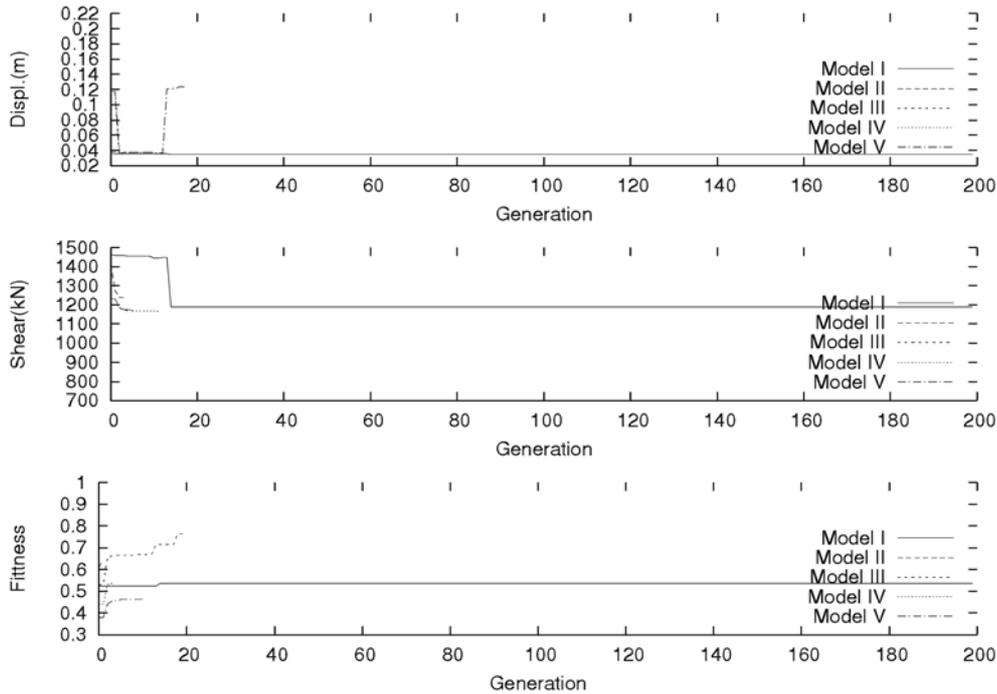


그림 13. 세대별 응답변화(인공지진파, 콘크리트교량)

표 5. 콘크리트 교량의 최종세대의 변위와 전단력의 비교

		비보강 교량	마찰받침적용 (가중치모델)					탄성받침 적용
			I	II	III	IV	V	
El Centro	전단력 (kN)	6602.1	1332.4	1227.4	988.0	918.6	917.38	1368.1
	변위 (m)	0.164	0.038	0.042	0.083	0.237	0.280	0.096
인공 지진파	전단력 (kN)	6936.4	1186.1	1038.3	768.9	760.6	760.2	1398.5
	변위 (m)	0.147	0.035	0.042	0.127	0.149	0.140	0.139

을 기대할 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 콘크리트교량에 적용하는 최적마찰받침은 변위에 중점을 두어 제어하는 경우에 보다 바람직한 응답을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5.3 설계파라미터

인공지진파를 사용한 경우 얻어진 최종세대에서 가장 높은 적합도를 보이는 해석파라미터의 값은 표 6과 같다. 이 때 변위나 전단력을 동시에 최적화 파라미터로 고려한 가중치

표 6. 최종세대에서의 설계파라미터값

설계파라미터		가중치모델		
		II	III	IV
강상형교량	μ_s	0.038	0.038	0.026
	μ_d	0.150	0.100	0.140
	K(kN/m)	68855	51361	44168
콘크리트교량	μ_s	0.032	0.039	0.043
	μ_d	0.153	0.171	0.160
	K(kN/m)	48608	20433	7654

모델에서의 해석파라미터의 값을 나타내었다. 이 표에서 볼 수 있듯이 정동마찰계수는 가중치 모델에 따라 최적의 값을 나타내는 값의 경향을 산정하기가 어려운 결과를 보였다. 즉 최적의 구조거동을 나타내는 값은 일정한 범위 안에 있지만 가중치 모델에 따라 그 값의 변화가 둔감한 것으로 나타났다. 특히 각 세대별에서 얻어진 최적파라미터의 변화를 보면 정적 마찰계수가 최적화에 미치는 영향은 미미한 것으로 보인다. 동적마찰계수도 가중치에 따라 비교적 둔감하나 이 값이 표에서 보인 것보다 지나치게 낮거나 높은 경우에는 적합도가 떨어지는 해를 보였다. 그러나 마찰받침의 강도는 전단력의 가중치가 증가할수록 낮은 값을 보여주었다. 특히 관성력이 비교적 작은 강상형교량의 경우가 상대적으로 중량이 큰 콘크리트교량의 경우보다 큰 강도를 나타냈다. 이는 마찰에 의한 구조물의 에너지소산효과가 콘크리트교량에서 크게 나타나기 때문인 것으로 추측된다.

본 연구에서 얻어진 표 6의 설계파라미터는 실현가능한 범위(Ogawa *et al.*, 1998)이지만, 실제 교량에 적용하기 위해서는 경제성의 검토가 필요하리라 생각된다. 교량받침의 마찰계수를 증가시키는 일반적인 방법은 지압응력을 줄이는 것이고 이는 받침의 크기 확대와 비용증가로 이어진다.

6. 결 론

본 연구에서는 마찰받침을 강상형교량과 콘크리트교량에 적용하는데 있어서 유전자알고리즘을 이용한 최적의 제어조건에 대하여 연구하였다.

각 교량은 받침의 미끄러질 때 발생하는 마찰력과 복원성을 나타낼 수 있도록 비선형구조모델을 작성하였고, 이 해석 모델에 계측지진파와 인공지진파를 각각 적용시켜 최대변위와 받침에 작용하는 최대전단력을 산정하였다. 이를 위해 받침에서의 전단력과 변위를 목적함수의 변수로 하고 각각의 가중치에 따라 5개의 목적함수모델을 만들고 최적화를 수행하였다. 해석결과 대부분 경우에 마찰받침을 적용한 경우가 비보강인 경우에 비하여 개선된 구조응답을 나타내었다. 특히 콘크리트교량의 경우는 기존의 지진격리장치인 탄성받침

을 사용한 경우보다 개선된 구조응답을 보여주었다. 가중치 모델에 따른 최적응답은 변위와 상부구조 질량이 다른 강상형교량과 콘크리트교량은 서로 다른 응답을 보였다. 두 경우 모두 변위와 전단력을 동시에 이용해 최적화를 수행한 경우가 가장 좋은 응답을 보였지만 강상형교량의 경우에는 전단력에 보다 중점을 두는 경우가 최적의 응답을 보였고 콘크리트교량은 변위에 중점을 두는 목적함수가 최적의 응답을 보였다. 이러한 경향은 계측지진과 인공지진파에 의한 응답에서 동일하게 나타났다. 이러한 상부구조의 특징에 따른 마찰받침의 거동은 추후 마찰받침의 설계 및 적용에 참조할 수 있을 것으로 판단된다.

추후로 이러한 수치적인 접근과 비선형거동에 대한 해석적인 모델을 융합하여 한반도의 지진특성을 고려한 마찰받침을 가진 지진격리교량의 설계기준작성에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

건설교통부(2004) 기존교량의 내진성능 향상요령.
 건설교통부(2004) 기존교량의 내진성능 평가요령.
 국가지진센터 "http://www.kmaneis.go.kr/"
 김남식, 김재민, 이계희, 강형택(2005) 지진격리교량의 지진해석을 위한 인공지진파의 작성, 한국지진공학회 학술발표회논문집, 한국지진공학회.
 김효범, 정길영, 음성우, 박종찬(1999) PTFE 미끄럼받침을 적용한 지진격리교량의 해석적 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제19권 제1-2호, pp. 149-159.
 서형렬(2006) 구조물의 확률론적 지진위험도 평가, 석사학위논문, 군산대학교.
 이계희, 하동호(2005) μ -GA를 이용한 원전 캐비닛구조물의 최적 감쇠보강, 한국지진공학회 논문집, 한국지진공학회, 제9권 제1호, pp. 1-7.
 이지훈(2006) 가중치 평가기법에 의한 기존 교량의 내진보강방안 결정, 박사학위논문, 건국대학교.
 하동호, 고현무(2000) 마찰받침을 가진 지진격리교량의 지진응답 특성, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제20권 제6호, pp. 937-944.
 하동호, 이지훈, 박광순, 이용재(2007) 기존 도로교의 내진성능향상 방법 선정을 위한 가중치 평가기법, 한국지진공학회논문집, 한국지진공학회, 제11권 제3호, pp. 43-52.
 Priestley, M.J.N., Seible, F., and Calvi, G.M. (2000) 교량의 내진 설계와 내진보강, 박정배, 양용수 옮김, 과학기술부.
 Carroll, D.L. (2001) http://cuerospace.com/carroll/ga.html
 Krishnakumar, K. (1989) Micro-genetic algorithms for stationary and non-stationary function optimization, *SPIE: Intelligent control and adaptive systems*, Philadelphia, PA.
 Ogawa, K., Tamaki, T., Yabe, J., Sakai, F., Nishida, T., Saitoh, T., and Ha, D.-H. (1998) Experimental study on isolation system with friction damping. IABSE Reports, Vol. 79, pp. 667-672.
 SAP2000 User Manual, CSI, 2002.
 Skinner, R.I., Robinson, W.H., and McVerry, G.H. (1993) *An Introduction to Seismic Isolation*, John Wiley & Sons.

(접수일: 2008.4.21/심사일: 2008.6.23/심사완료일: 2008.9.30)