

<h1 style="font-size: 2em;">특집</h1> <p>○○○</p> <h2 style="font-size: 1.2em;">대형 구조물의 능동제어기술</h2>	<h2 style="font-size: 1.5em;">기초격리 교량의 내진 성능 향상을 위한 자기유변 유체 댐퍼 - 기반 스마트 수동제어 시스템</h2> <p style="font-weight: bold;">정 형 조*, 정 찬 국**, 최 강 민***, 이 인 원***</p> <p>(*, ** 세종대학교 토목환경공학과, *** 한국과학기술원 건설 및 환경공학과)</p>
--	--

1. 머리말

기초격리 시스템(base isolation system)은 전 세계적으로 교량의 내진 대책으로 널리 사용되고 있는 방법 중 하나이다. 일반적으로 면진 시스템을 교량에 적용하는 경우에는 주형(girder)과 같은 상부 구조와 교대 및 교량 상부 사이에 탄성 받침(elastomeric bearing), 납-고무 받침(lead-rubber bearing, LRB)과 같은 기초격리 장치(base isolators)를 설치하여 상부구조의 질량에 의해 발생하는 관성력을 교각에 전달하지 않도록 하여 교각을 지진으로부터 보호한다. 국내에서도 8,90년대 이후 내진 성능 향상을 위해 기초격리 교량의 설계 및 시공이 늘어나는 추세이다.

하지만 기초격리 시스템을 통해 기존 교량의 응답을 상당히 감소시킬 수 있다 하더라도, 기초격리 장치가 설치되어 있는 부분의 변위가 과도하게 커지는 문제점이 발생한다. 이러한 변위를 감소시키기 위해 기초격리 장치에 추가적으로 수동형 댐퍼(passive-type damper)를 설치해 감쇠를 키우는 방법이 적용되기도 하지만, 이로 인해 교각 하부의 응답 및 교각의 변형이 증가하게 되는 단점도 유발한다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 복합제어(hybrid control) 기법이 최근 들어 연구되고 있다. 복합제어란, 수동제어 방법인 기초격리 장치에 능동 또는 반능동제어 방법인 유압식 기력기 또는 자기유변 유체 댐퍼(magneto-rheological (MR) fluid damper)를 같이 설치하는 것이다. 이러한 방법은 단순히 기초격리 장치에 수동형 감쇠기를 설치한 경우

보다 성능이 우수한 것으로 알려져 있다. 특히 자기유변 유체 댐퍼와 같은 반능동 제진 장치는 지진 발생 시의 신뢰성 및 다양한 지진 하중에 대한 적응성, 낮은 전력 요구량 등의 장점 때문에 최근 들어 수요가 늘어나고 있다⁽¹⁻⁵⁾.

자기유변 유체 댐퍼를 이용한 반능동 제진 시스템의 장점에도 불구하고 실제 토목/건축 구조물에 적용하는 데는 아직 여러 가지 문제점이 존재한다. 즉, 부대장치(계측기, 제어용 컴퓨터, 전원 공급장치, 전선)가 너무 많을 뿐만 아니라, 극한 환경에 설치된 구조물에는 적용하기 힘들고, 전체 제진 시스템을 조종할 공간(제어룸)이 필요하다는 문제점 등이다. 이와 같은 제한 사항을 해결해야만 반능동 제진 시스템이 실제 구조물에 적극 활용될 것으로 예상된다.

조상원 등⁽⁶⁻⁸⁾은 위와 같은 기존 MR 감쇠기-기반 스마트 진동제어 시스템의 문제점을 최소화하기 위한 방법으로 스마트 수동제어 시스템을 제안하였다. 이 시스템은 자기유변 유체 댐퍼와 전자기 유도부(electromagnetic induction (EMI) part)로 구성된다. 전자기 유도부에서 Faraday의 전자기 유도법칙을 이용하여 전류를 발생시켜서 이 전류를 MR 감쇠기의 감쇠 특성을 바꾸기 위한 입력 전류로 활용하기 때문에 외부 전원장치가 따로 필요 없을 뿐만 아니라, 구조물 응답 크기에 따라 발생 전류의 크기가 적절하게 변화하기 때문에 계측기 및 제어기도 필요 없다. 따라서, 스마트 수동 제어 시스템은 기존 시스템에 비해 매우 간단하고 경제적인 진동제어 대책이다.

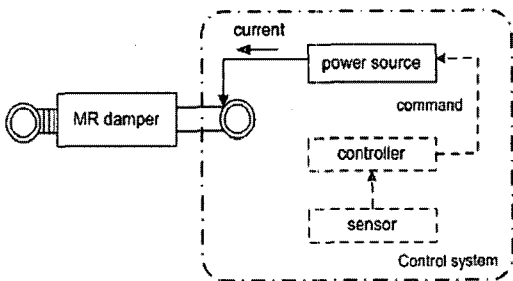
이 글에서는 기초격리 교량의 내진 성능 향상 대책으로 자기유변 유체 댐퍼-기반 스마트 수동 제어 시스템에 대한 적용 가능성을 수치적으로 검증한 내용을 다루고 있다. 이러한 목적을 효과적으로 수행하기 위해 미국토목학회에서 제시한 기초격리 교량에 대한 벤치마크 제어 문제^(9,10)를 활용하였다. 기초격리 교량에 대한 스마트 수동 제어 시스템의 진동 제어 성능을 기존의 자기유변 유체 댐퍼-기반 반능동 제어 시스템과 비교하였다. 기초격리 교량에 대한 수치적 검증 이외에도 축소건물 모형을 이용한 실험적 검증⁽¹¹⁾, 기초격리 건물에 대한 수치적 검증⁽¹²⁾ 등 다양한 구조물에 대한 스마트 수동 제어 시스템의 타당성 검토가 수행 중에 있다.

2. 자기유변 유체 댐퍼-기반 스마트 수동 제어 시스템

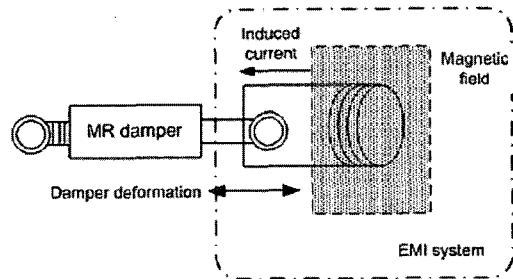
이 글에서 기술하고자 하는 스마트 수동 제어 시스템은 효과적인 반능동 제어 장치로 알려진 자기유변 유체 댐퍼에 전자기 유도부를 도입하여 구조물의 응답 변화에 따라 자기유변 유체 댐퍼에 입력되는 전류를 변화시킴으로써 댐퍼의 감쇠 특성을 조절하는 새로운 개념의

스마트 제진 시스템이다. 이에 앞서 자기유변 유체 댐퍼를 사용하는 기존 반능동 제진 시스템에 대하여 간단히 살펴보기로 하자. 그림 1은 기존 반능동 제진 시스템의 개념도와 전형적인 설치 예를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 이 제진 시스템에는 구조물의 응답을 측정하기 위한 계측기, 최적의 자기유변 유체 댐퍼의 입력전류 값을 계산하기 위한 제어기(컴퓨터) 및 자기유변 유체 댐퍼에 제어기에서 계산된 전류를 공급해주는 외부 전력공급 장치가 필요하다.

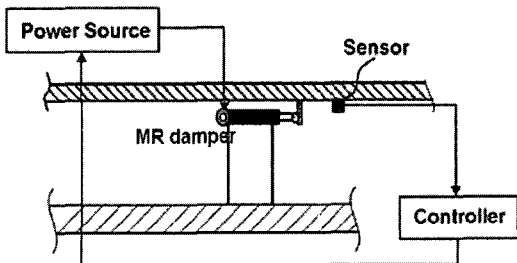
그림 1에서 알 수 있듯이 자기유변 유체 댐퍼를 이용한 기존 반능동 제진 시스템은 다양한 부대 장치로 인해 대형 구조물에 실제로 설치하기에 용이하지 않을 뿐만 아니라 유지관리 비용도 많이 소요되는 문제점이 있다. 이상의 문제점을 해결하는 한 방법으로 조상원 등⁽⁶⁻⁸⁾은 그림 2와 같은 스마트 수동 제어 시스템을 제안하였다. 그림 1과 2를 비교하면 알 수 있듯이, 스마트 수동 제어 시스템에서는 영구 자석과 솔레노이드 코일로 구성된 전자기 유도부(EMI system)를 도입함으로써 기존 반능동 제진 시스템의 제어 시스템(control system; 계측기, 제어기, 전원 공급장치로 구성됨) 부분을 대체하였다. 이로 인해, 그림 2(b)에서 볼 수 있듯이 제진 시스템을



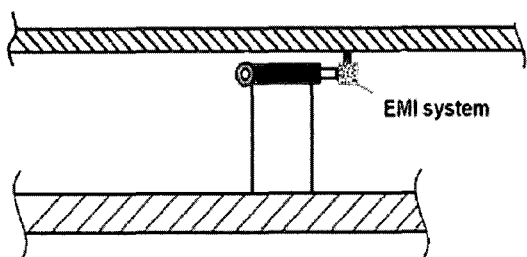
(a) 제진 시스템 개념도



(a) 제진 시스템 개념도



(b) 제진 시스템 설치 예



(b) 제진 시스템 설치 예

그림 1 자기유변 유체 댐퍼를 이용한 기존 반능동 제진 시스템

그림 2 자기유변 유체 댐퍼를 이용한 스마트 수동제어 시스템

설치하고 유지관리 하는 것이 매우 용이할 것으로 기대된다.

스마트 수동제어 시스템의 거동 메커니즘을 설명하면 다음과 같다. 먼저 식 (1)과 같은 페르데이의 전자기 유도 법칙(Faraday's law of electromagnetic induction)을 따라서 전자기 유도부에 유도기전력이 발생한다.

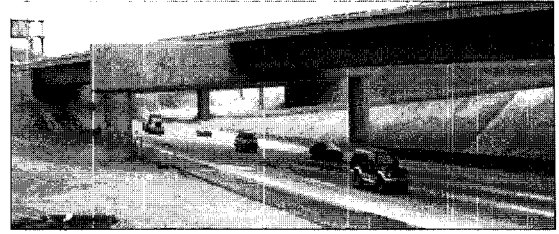
$$u_a = -N \frac{d\Phi_B}{dt} = -N \cdot B \frac{dA}{dt} = -N \cdot B \cdot \omega \frac{dx}{dt} = -K_{emf} \frac{dx}{dt} \quad (1)$$

이때 u_a 는 유도기전력, N 은 코일이 감긴 횟수, Φ_B 는 magnetic flux, B 는 자기장의 세기, A 는 자기장 내부에 위치한 코일의 면적, ω 는 코일의 폭, x 는 감쇠기의 변형이다. 따라서 전자기 유도부에서 생성되는 전기에너지는 영구 자석의 세기 그리고 솔레노이드 코일의 감긴 횟수와 코일의 크기 등을 통하여 조절할 수 있고, 자기유변 유체 댐퍼가 설치된 지점의 구조물의 변형 속도에 비례하여 댐퍼의 점성을 증가시킨다. 따라서 코일의 감긴 횟수와 자기장의 세기 및 코일의 폭의 곱을 K_{emf} 로 지정하여 K_{emf} 를 변화시킴으로써 전자기 유도부의 성능은 물론이고 이로 인해 자기유변 유체 댐퍼의 감쇠 특성을 변화시킬 수 있다.

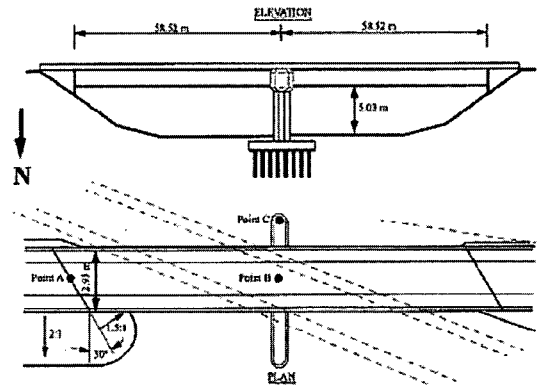
3. 벤치마크 구조 제어 문제를 이용한 스마트 수동제어 시스템의 성능 검증

이번 장에서는 미국토목학회에서 주도적으로 진행하고 있는 기초격리 교량의 내진 성능 개선을 위한 스마트 진동제어 벤치마크 문제를 이용하여 소개된 스마트 수동제어 시스템의 제진 성능을 수치적으로 검증하고자 한다. 이 벤치마크 연구에서는 기초격리 구조물의 내진 성능 향상을 위한 기본적인 제어 방법으로 자기유변 유체 댐퍼를 이용한 반능동 제어 시스템을 채택하여 제시하고 있다^(9,10). 미국 City Univ. of New York의 Agrawal 교수 연구팀은 그림 3과 같은 기초격리 교량을 대상으로 벤치마크 문제를 구성하였다⁽⁹⁾. 총 8개의 기초격리 받침(양쪽 교대에 4개씩 설치함)을 고려하였다.

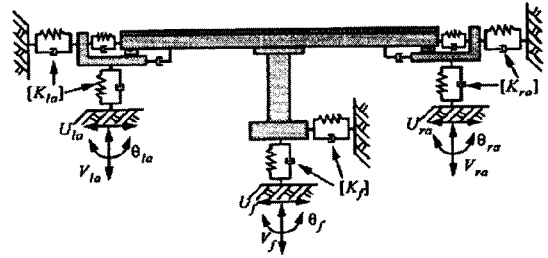
수치모의 실험을 위해 고려된 자기유변 유체 댐퍼의 동적 모델은 그림 4(a)와 같다. 조화하중에 대한 자기유변 유체 댐퍼의 힘-변위 특성은 그림 4(b)와 같다.



(a) 교량의 전경

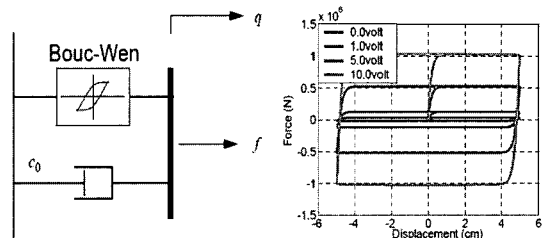


(b) 정면도 및 평면도



(c) 이상화된 교량 모델

그림 3 벤치마크 기초격리 교량⁽⁹⁾



(a) 동적 모델

(b) 힘-변위 곡선

그림 4 자기유변 유체 댐퍼에 대한 수치 모델⁽¹⁰⁾

그림 5는 자기유변 유체 댐퍼의 설치 위치를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 각 교대에 8개씩 (4개

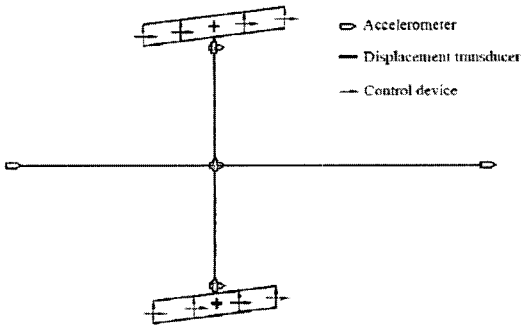


그림 5 자기유변 유체 댐퍼의 설치 위치⁽¹⁰⁾

는 수평 방향, 4개는 수직 방향) 설치하여, 총 16개의 자기유변 유체 댐퍼를 고려하였다.

수치해석을 위하여 제진 시스템이 설치된 기초격리 교량에 가해질 입력 지진하중으로는 총 6개의 역사 지진 자료를 사용하였다. 사용된 6개의 지진은 North Palm Spring 지진(1986), Chi-Chi 지진(1999), El Centro 지진(1940), Northridge 지진(1994), Turkey 지진(1999), 및 Kobe 지진(1995)이다. 각 지진의 시간 이력곡선은 그림 6과 같다.

이 연구에서는 제진 시스템의 내진 성능을 평가하기 위해 고려한 성능 지수(performance indices)는 다음과 같

다. 먼저 기초격리 교량의 최대값에 대한 응답 8가지 (기초 전단력 (J_1), 전도 모멘트 (J_2), 중앙부의 변위 (J_3), 중앙부의 가속도 (J_4), 기초격리 장치 변형 (J_5), 연성도 (J_6), 소산 에너지 (J_7), 소성 연결부 (J_8))를 비교 평가한다. 여기서 각 응답들은 비제어시의 값으로 정규화 되어 있다. 또한 기초격리 교량의 응답의 평균치를 비교 평가하기 위해 RMS 응답 6가지 (기초 전단력 (J_9), 전도 모멘트 (J_{10}), 중앙부의 변위 (J_{11}), 중앙부의 가속도 (J_{12}), 기초격리 장치 변형 (J_{13}), 연성도 (J_{14}))를 비교한다. 마지막으로 제진 시스템의 비교를 위해 6가지 기준 (최대 제어력 (J_{15}), 제진장치 최대 스트로크(J_{16}), 최대 전력 (J_{17}), 전체 전력 (J_{18}), 제진장치 개수(J_{19}), 계측기 개수(J_{20}))을 마련하였다. 구체적인 각각의 성능 평가 기준에 대한 설명은 참고문헌 (9)에 제시되어 있다.

최적의 스마트 수동 제어 시스템을 얻기 위해, 6개의 지진에 대해 전자기 유도부의 gain값인 K_{emf} 을 변화시키며 수치해석을 수행한 후 그 결과를 평균하였다. 그림 7은 K_{emf} 증가에 따른 최대값과 관련된 성능 지수 (J_1 - J_6)의 변화 추이를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 K_{emf} 가 작을 때 ($K_{emf} = 5$ 또는 10일 때) 성능 지수가 급격히 감소하다가 그 이후에는 매우 완만하게 감소하는 추세를 보이고 있다. $K_{emf} = 70$ 에서 최소값을 보이

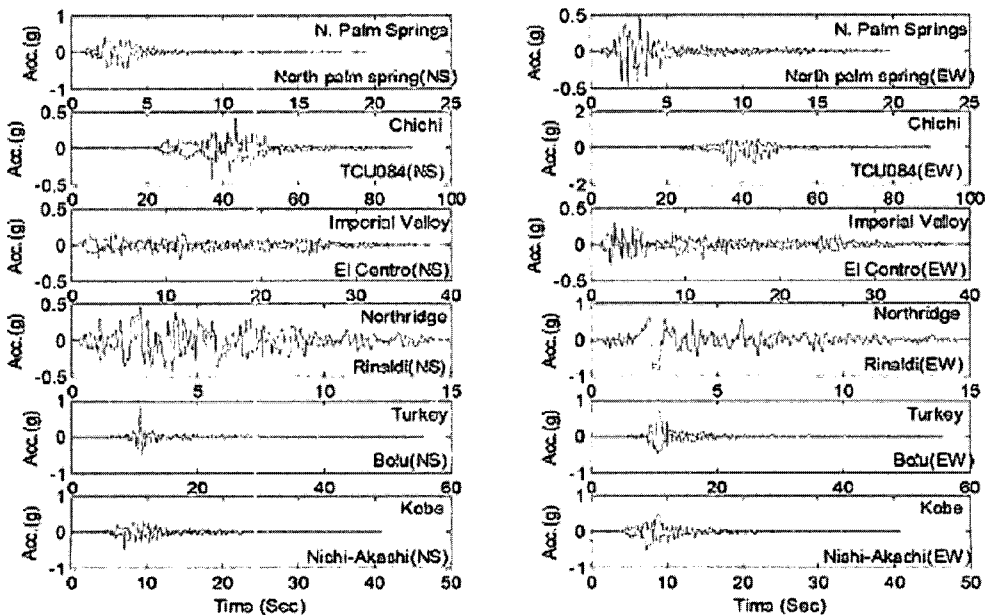
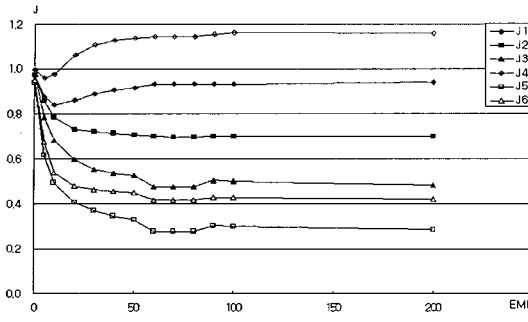
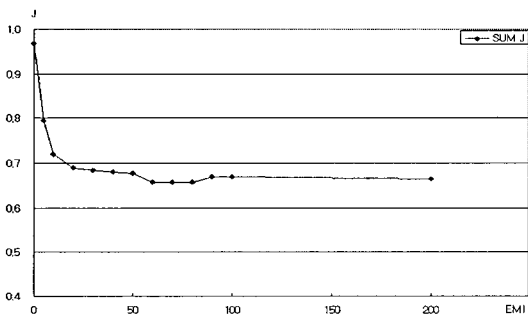


그림 6 수치해석에서 고려한 역사 지진⁽⁹⁾

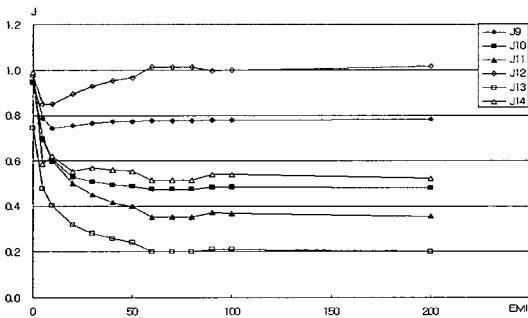


(a) 각 성능지수 별 결과

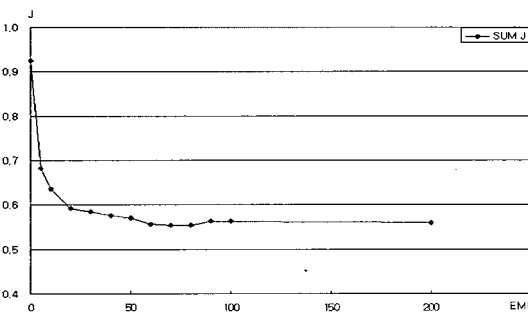


(b) 성능지수 평균값

그림 7 K_{emf} 와 최대값과 관련된 성능 지수 ($J_1 \sim J_6$)의 관계



(a) 각 성능지수 별 결과



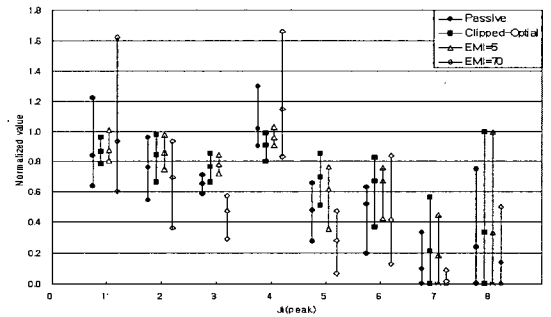
(b) 성능지수 평균값

그림 8 K_{emf} 와 RMS와 관련된 성능 지수 ($J_9 \sim J_{14}$)의 관계

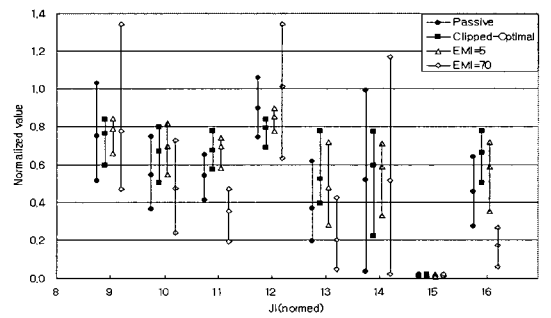
고 있다. 또한, 교량 중앙부의 가속도의 성능지수는 K_{emf} 가 10보다 큰 경우에 1보다 커지게 되므로 이에 대한 고려가 필요하다.

그림 8은 K_{emf} 증가에 따른 RMS값과 관련된 성능 지수 ($J_9 \sim J_{14}$)의 변화 추이를 보여주고 있다. 최대값의 경우와 마찬가지로 K_{emf} 가 작을 때 성능 지수가 급격히 감소하다가 그 이후에는 매우 완만하게 감소하는 추세를 보이고 있으며, $K_{emf} = 70$ 에서 최소값을 보이고 있다. 또한, 교량 중앙부의 가속도는 K_{emf} 가 50보다 큰 경우에 비제어시(즉 기초격리 받침만 설치한 경우)보다 커지게 되는데, 이는 기초격리 받침에 의해 교량 상부와 교각을 분리하는 기초격리 효과가 줄어들었다는 것을 의미하므로 이에 대한 주의가 필요하다.

이상의 예비 수치해석을 통해 최적의 스마트 수동 제어 시스템으로 $K_{emf} = 70$ 인 경우와 $K_{emf} = 5$ 인 경우를 선정하였다. $K_{emf} = 70$ 은 전체 성능 지수 합이 평균이 최소인 경우이고, $K_{emf} = 5$ 는 개별 성능 지수가 모두 1보다 작으면서 감소하는 경향을 보이는 경우이다. 이와 같은 두 가지 경우의 스마트 수동 제어 시스템(EMI=70,

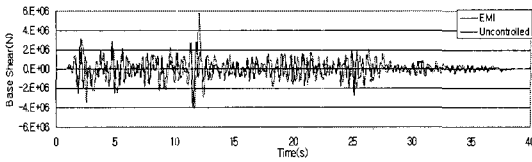


(a) 최대값과 관련된 성능 지수 ($J_1 \sim J_6$)

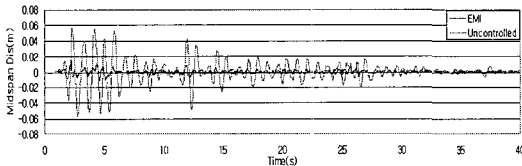


(b) RMS와 관련된 성능 지수 ($J_9 \sim J_{14}$)

그림 9 기초격리 교량에 대한 수치해석 결과



(a) 기초 전단력



(b) 중앙부 변위

그림 10 El Centro 지진에 대한 교량 응답의 시간이력 곡선

EMI=5)과 비선형 점성 댐퍼를 사용한 수동 제어 시스템(passive) 및 clipped optimal 제어 알고리즘을 사용한 반능동 제어 시스템(clipped-optimal)의 수치해석 결과를 그림 9와 같이 비교하였다. 각 성능 지수 별로 네가지 제진 시스템의 결과를 의미하는 직선이 표시되어 있고, 각 직선에는 세 개의 표식이 있는데 맨 위는 6개 지진 입력하중 경우에서 최대값, 맨 밑은 최소값을 나타내며 가운데 표식은 6개 입력하중 경우의 평균값을 표시하고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 성능 지수의 최소값이나 평균값 측면에서는 $K_{emf}=70$ 인 스마트 수동 제어 시스템과 비선형 점성 댐퍼를 사용한 수동 제어 시스템의 제진 성능이 우수하나 최대값 측면에서 살펴보면 오히려 $K_{emf}=5$ 인 스마트 수동 제어 시스템과 clipped optimal 제어 알고리즘을 사용한 반능동 제어 시스템의 성능이 보다 안정적이었다. 특히, 기초 전단력 (J_1 및 J_2)이나 교량 중앙부 가속도 (J_6 및 J_{12})에 대해서는 $K_{emf}=70$ 인 스마트 수동 제어 시스템과 비선형 점성 댐퍼를 사용한 수동 제어 시스템의 경우에 성능 지수가 1보다도 큰 값을 나타내는데 이는 특정 지진의 경우에는 제진 장치를 설치하지 않은 경우(즉, 단순히 기초격리 받침만을 설치한 경우)보다도 기초 전단력이나 중앙 가속도가 크게 발생한다는 의미이므로 이러한 역효과에 대한 면밀한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

그림 10은 El Centro 지진에 대한 스마트 수동 제어 시스템의 제진 성능을 비제어시의 결과와 비교한 시간이력 곡선이다. 그림 10(a)는 기초 전단력에 대한 결과이고, 그림 10(b)는 교량 중앙부의 변위에 대한 결과이다.

알 수 있듯이, 스마트 수동 제어 시스템을 사용함으로써 교각의 기초 전단력의 최대값을 40% 이상 감소시켰고, 교량 중앙부의 변위는 70% 정도 감소시키는 효과를 얻었다.

4. 맺음말

이 글에서는 자기유변 유체 댐퍼를 이용한 새로운 형태의 스마트 제진 시스템을 제안하고, 수치해석을 통하여 기초격리 교량에 이 제진 시스템이 적용 될 수 있음을 검증하였다. 이 글에서 소개한 스마트 제진 시스템은 자기유변 유체 댐퍼를 기본으로 하고, 여기에 영구 자석과 솔레노이드 코일로 구성된 전자기 유도부를 결합하여 구성된다. 전자기 유도부에서는 Faraday의 전자기 유도 법칙에 의하여 입력 하중의 강도에 비례하여 유도기전력이 발생하고, 이 전압이 자기유변 유체 댐퍼의 입력 전압으로 제공됨으로써 응답 의존적인 수동형 스마트 제진 시스템을 구현할 수 있다. 이러한 스마트 수동 제어 시스템은 기존 반능동 제어 시스템의 커다란 단점인 복잡한 제어 시스템(계측기, 제어용 컴퓨터 및 전원 공급 장치)이 필요하다는 문제점을 획기적으로 해소할 수 있을 뿐만 아니라, 제작과 유지관리가 용이하여 비용이 절감된다는 장점을 가지고 있기 때문에 향후 매우 유망한 제진 시스템이 될 것으로 기대된다.

기초격리 교량에 대한 수치해석 결과 전반적으로 스마트 수동 제어 시스템의 제진 성능이 기존 반능동 제어 시스템의 성능과 유사한 것으로 나타났다. 스마트 수동 제어 시스템의 경우 전자기 유도부의 gain 값인 K_{emf} 을 조절하여 적절한 제진 시스템을 설계할 수 있는데, 교각의 소성 거동 및 기초격리 받침의 변형을 줄이기 위해서는 K_{emf} 값이 큰 경우가 적절하지만, 이로 인해 교량 중앙부에서의 가속도 값이 크게 증가하기 때문에 기초격리 교량의 내진 성능을 전반적으로 향상시키기 위해서는 K_{emf} 값이 상대적으로 작은 경우가 보다 적절한 것으로 사료된다.

최근 새롭게 제안된 자기유변 유체 댐퍼-기반 스마트 수동 제어 시스템은 기존 자기유변 유체 댐퍼-기반 반능동 제어 시스템의 한계를 극복하기 위한 새로운 시도이며, 이러한 시도가 성공하면 건설 분야로의 파급 효과가 매우 클 것으로 기대된다. 이를 위해, 현재 다양한

실험적, 수치적 후속 연구가 활발하게 진행 중이다.

감사의 글

이 글은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2005년도 건설핵심기술연구개발사업 (05산학연C105A1000021-06A0300-01910) 및 한국과학재단·과학기술부 지정 우수연구센터인 “스마트 사회기반시설 연구센터”의 지원으로 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Spencer, Jr. B.F. and Nagarajaiah, S., 2003, “State of the Art of Structural Control”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, pp. 845~856.
- (2) Jung, H.J., Spencer, Jr. B.F., Ni, Y.Q. and Lee, I.W., 2004, “State-of-the-art of Semiactive Control Systems Using MR Fluid Dampers in Civil Engineering Applications”, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 17, Nos. 3~4, pp. 493~526.
- (3) 정형조, 이인원, 2004, “토목/건축 분야의 스마트제어 기술 - MR 댐퍼-기반 스마트제어 기술을 중심으로”, *한국전산구조공학회지*, 제 16 권, 제 3 호, pp. 41~50.
- (4) 최승복, 홍성룡, Wereley, N.M., 2005, “MR 유체의 특성과 진동 분야에 관한 응용연구 사례 및 연구동향”, *한국소음진동공학회지*, 제 15 권, 제 1 호, pp. 9~19.
- (5) 정형조, 2006, “토목 및 건축 구조물의 진동 저감을

- 위한 MR 감쇠기를 이용한 반능동 제어 기술”, *한국소음진동공학회지*, 제 16 권, 제 5 호, pp. 66~72.
- (6) Cho, S.W., Jung, H.J. and Lee, I.W., 2005, “Smart Passive System Based on Magnetorheological Damper”, *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, pp. 707~714.
- (7) Cho, S.W., Jung, H.J., Lee, J.H. and Lee, I.W., 2004, “Smart Passive System Based on MR Damper”, 10th JSSI Symposium on Performance of Response Controlled Buildings, Yokohama, Japan, Nov. 17~19.
- (8) 조상원, 이인원, 2005, “전자기유도부를 구비하는 MR감쇠장치”, 특허등록 제0416398호.
- (9) Agrawal, A.K., Tan, P., Nagarajaiah, S. and Zhang, J., 2004, “Benchmark Structural Problem for a Seismically Excited Highway Bridge. Part I: Problem Definition”, <<http://www-ce.engr.ccny.cuny.edu/People/Agrawal/Benchmark%20Problem.html>>.
- (10) Tan P. and Agrawal, A.K., 2004, “Benchmark Structural Problem for a Seismically Eexcited Highway Bridge. Part II: Sample Control Designs”, <<http://www-ce.engr.ccny.cuny.edu/People/Agrawal/Benchmark%20Problem.html>>.
- (11) Jung, H.J., Choi, K.M., Cho, S.W. and Lee, I.W., 2006, “An MR Damper-based Control System Introducing Electromagnetic Induction Part”, *The 4th World Conference on Structural Control and Monitoring*, San Diego, USA.
- (12) 정찬국, 정형조, 조상원, 최강민, 2006, “스마트 수동 제어 시스템을 이용한 면진 건물의 내진 성능 개선”, *한국지진공학회논문집*, 제 10 권, 제 6 호.