

특집

대형 구조물의
준능동제어기술대형구조물 제어를 위한 **대용량** 자기유변유체댐퍼 기술
- 사장교 **지진응답** 제어에 대한 비용효율성 평가

박 원 석*, 고 현 무**, 함 대 기**, 박 관 순***

(서울대학교 *교량설계핵심기술연구단, **지구환경시스템공학부, ***동국대학교 건축공학과)

1. 머리말

최근 자기유변(magneto-rheological, MR)유체 댐퍼 관련 분야의 산업이 급속히 발전함에 따라 대형구조물의 지진응답 제어에 적용가능한 대용량 준능동형 또는 스마트 감쇠기의 생산이 이루어지고 있다. 그러나 지진응답 제어를 위하여 MR 댐퍼를 실구조물에 적용하기 위해서는 먼저 MR 댐퍼가 경제적으로 효율성을 가질 만큼의 충분한 제어 성능을 발휘할 수 있는지의 여부에 대한 검증이 이루어져야 한다. 따라서 대표적인 대형 토목 구조물로서 최근 준공된 사장교 구조물인 제2진도대교를 대상으로 하여, MR 댐퍼를 사용한 대용량 지진응답 제어 시스템이 기존의 탄성받침과 비교하여 어느 정도의 경제적 효율성을 가지는지를 평가할 수 있는 기법을 제안하였다. 지진응답 제어시스템의 경제적 효율성은 지반운동의 특성 및 구조물의 중요도 등에 따라 변화하게 되므로 이에 대한 경향을 분석하였다. 또한, MR 댐퍼의 성능과 가장 밀접한 관련을 가지는 설계인자 중 하나인 댐퍼 용량에 따라 제어 시스템의 경제적 효율성이 어떻게 변화하는가를 분석하였다.

MR 댐퍼를 사용한 진동제어 시스템의 제어전략으로는 LQG 최적제어기에 기반한 modified clipped-optimal 제어방법을 적용하였다. MR댐퍼의 비용효율성 평가지수는 초기 투자비용 및 손상비용의 기댓값의 합으로서 표현되는 생애주기비용 개념을 이용하여 정의하였다. 사장교의 손상비용 기댓값은 파괴확률에 대한 함수로서 정의되므로, 지반운동과 사장교 구조물의 불확실성을

고려한 수치해석 시뮬레이션을 통해 관심을 가지는 응답의 최대값을 계산하고, 응답의 추계학적 처리과정을 거쳐 얻어진 확률밀도함수로부터 한계상태를 초과하게 될 파괴확률을 추정하였다. 사장교 구조물의 파괴로 인한 직·간접 손상비용의 정량적인 추정을 대신하여, 손상비용의 규모에 대한 매개변수 연구를 수행하였다.

2. 입력지반운동 및 구조물 불확실성 모델링

일반적으로 지진응답 제어를 위한 에너지 소산장치의 성능과 효율성은 지반운동의 규모와 주파수 성분에 영향을 받는다. 따라서, MR 댐퍼의 지진응답 제어 성능과 경제적 효율성을 평가하기 위해서는 다양한 특성의 지반운동에 대한 고려가 필요하다. 이 연구에서는 지반운동 규모와 주파수 성분 특성의 조합에 따라 4가지의 지반운동 특성을 고려하고, 각각에 대하여 10개씩의 역사지진 가속도 시간이력 자료를 추출하여 입력 지반운동으로 사용하였다. 지반운동 규모에 대해서는 MR 댐퍼의 사용이 기대되는 중진 및 강진의 규모를 고려하여 AASHTO standard specification의 SPC B 및 D에 각각 해당하는 0.19 g와 0.39 g의 최대 지반운동 가속도를 가지는 지반운동을 대상으로 하였다. 주파수 성분은 단주기 성분이 지배적인 Soil Type I, 즉 견고한 지반과 장주기 성분이 지배적인 Soil Type III, 즉 연약한 지반에 해당하는 지반운동을 고려하였다. 각각의 지반운동이 가지는 주파수 성분을 보기 위하여 견고한 지반과 연약한 지반에 해당하는 가속도 시간이력에 대하여 각각의 가속도

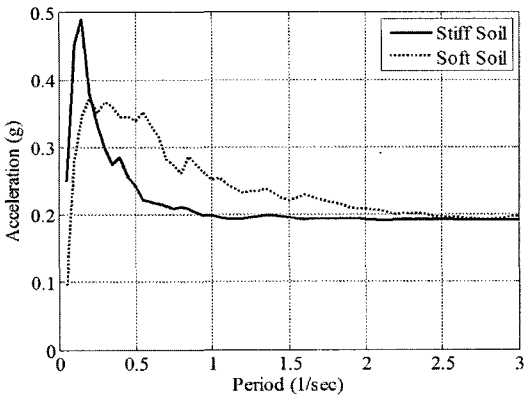


그림 1 지진가속도 시간이력의 가속도 응답 스펙트럼

응답 스펙트럼의 평균값을 그림 1에 나타내었으며, 이를 통하여 지반특성에 따른 가속도 시간이력에 대하여 지배적인 주파수 성분을 확인할 수 있다.

구조부재의 경우 일반적으로 제작·시공 오차 또는 재료 물성치의 변동 등으로 인하여 동역학적 모델링 시에 필연적으로 불확실성이 내포된다. 이러한 불확실성은 동적 해석 시 구조물의 강성에 변화를 일으킴으로써 응답에 큰 영향을 미치게 된다. 이 연구에서는 다음 식과 같이 불확실성이 고려된 요소단위 강성행렬로부터 전체 구조계의 강성행렬을 얻음으로써 사장교 해석 모델을 구성하였다.

$$\left. \begin{aligned} [K_1]_{12 \times 12} \times \alpha_1 &= [K_1]_{12 \times 12}^* \\ [K_2]_{12 \times 12} \times \alpha_2 &= [K_2]_{12 \times 12}^* \\ [K_n]_{12 \times 12} \times \alpha_n &= [K_n]_{12 \times 12}^* \end{aligned} \right\} [K]_{m \times m}^* \quad (1)$$

여기서 α_i 는 정규분포 $N(1, \sigma)$ 를 따르는 확률변수이고, $[K_i]_{12 \times 12}$ 와 $[K_i]_{12 \times 12}^*$ 는 각각 공칭 요소 단위 강성행렬과 강성의 불확실성이 고려된 요소 단위 강성행렬이다. 또한, $[K]_{m \times n}^*$ 은 n 개의 불확실성이 고려된 요소 단위 강성행렬로부터 재구성된 전체 구조 시스템의 강성행렬이다.

3. 사장교의 준능동 제어

대상 교량은 전남 해남과 진도를 연결하는 연육교로서 1983년 준공되어 최근 완공된 제2진도대교를 선정하였다. 이 교량은 그림 2와 같이 중앙경간장이 344 m, 양측경간장이 70 m인 비대칭형 사장교로서, 모두 60개의 케이블로 지지되고 있다.

제어장치로 사용된 MR 댐퍼는 주탑과 보강형 사이에 설치하는 것으로 하였으며(그림 2), 최소 4개로부터 최대 12개까지 감쇠장치의 개수를 변화시켜가면서 설치되도록 하였다. MR 댐퍼는 지진 발생시 비선형성이 큰 이력 거동을 보이기 때문에, 지진응답 시뮬레이션을 위해서는 비선형 거동 특성을 모사할 수 있는 모델의 도입이 필요하다. 이 연구에서는 Bouc-Wen 요소와 점성 댐퍼가 병렬로 연결된 모델을 적용하였다(그림 3). 이 모델은 실규모의 MR 댐퍼의 역학적 모델로서 적합한 것으로 알려져 있다(Yi 등, 2001).

MR 댐퍼의 제어를 위하여 LQG 제어알고리즘을 기준 제어기로 사용한 modified clipped-optimal 제어 알고리즘(Yoshida 등, 2004)을 사용하였다. 이 알고리즘은 입력 전압을 0V로부터 최대 전압 V_{max} 의 범위 내에서 연속적으로 변화시킬 수 있도록 함으로써 기존의 bi-state clipped-

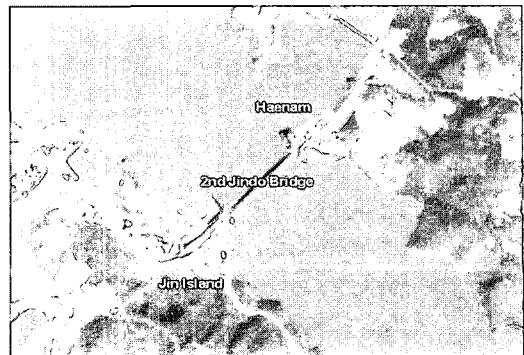
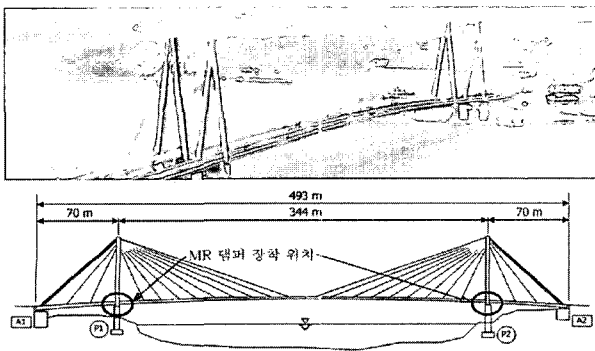


그림 2 제2진도대교 및 MR 댐퍼 장착 위치

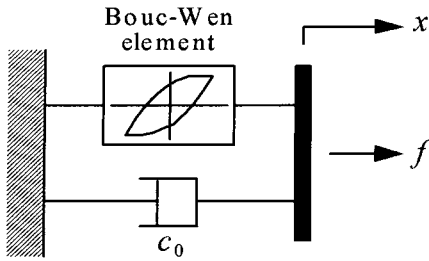


그림 3 MR 댐퍼의 역학적 모델

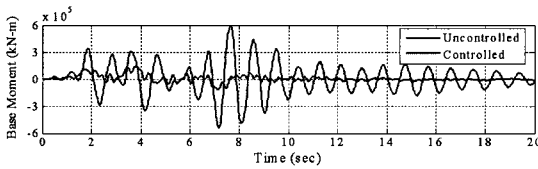


그림 4 바닥전도모멘트 응답 비교

optimal 제어 알고리즘이 가지고 있는 과도한 가속도 발생 문제를 완화시킬 수 있는 것으로 알려져 있다.

중진지역의 견고한 지반(0.19 g, Soil Type I)에 해당하는 역사지진의 한 예에 대하여 MR 댐퍼의 장착을 가정한 제2진도대교와 탄성받침이 장착된 제2진도대교 주탑 바닥전도모멘트 응답의 시간이력을 그림 4에 나타내었다. 최대 응답을 약 74.2 % 감소시키는 것을 통해 MR 댐퍼와 사용된 제어알고리즘의 지진응답 제어성능을 확인할 수 있다.

4. 파괴확률 추정

생애주기비용 개념을 적용한 MR 댐퍼의 비용효율성 평가를 위해서는 먼저 파괴확률의 추정이 필요하다. 파괴확률의 추정을 위해서는 파손상태를 규정하는 한계상태의 정의가 선행되어야 한다. 여기서는 지진 시 가장 위험한 파괴 원인이라 할 수 있는 주탑의 전도 모멘트에 의한 파손에 대한 한계상태를 고려하였으며, 설계 단면의 철근이 항복하는 상태를 파괴로 간주하여 주탑 하단부의 모멘트 응답이 520,000 kN-m를 넘어서는 것을 한계상태로 정의하였다.

일반적으로 구조물의 최대응답의 분포는 대수정규분포를 따르는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서도 하나의 지반운동 특성 당 강성 불확실성을 고려한 10개의 구조물 모델과 10개의 역사지진 가속도 시간이력의 조

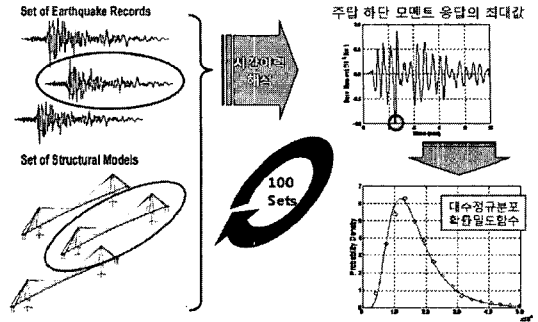


그림 5 파괴확률 추정 과정

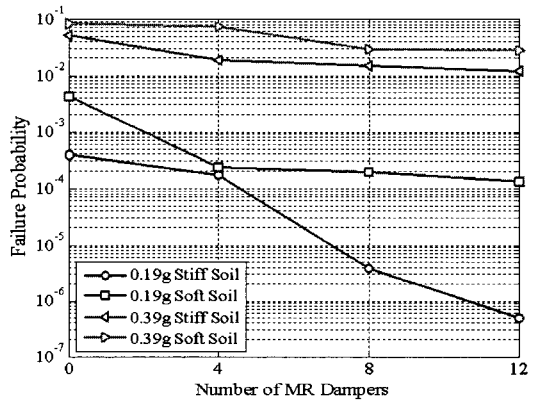


그림 6 지반운동 특성과 댐퍼 개수에 따른 파괴확률

합을 통하여 모두 100회의 시간이력 해석을 수행한 결과 주탑 하단부 모멘트 응답의 최대값은 대수정규분포를 따르는 것을 확인할 수 있었다. 이 과정을 개략적으로 나타내면 그림 5와 같다. 따라서 이 최대 응답의 추계학적 처리과정을 거쳐 얻어진 대수정규분포 확률밀도함수로부터 한계상태를 초과하게 될 파괴확률을 추정하는 기법을 적용하였으며(함대기 등, 2006), 각각의 지반운동 특성과 댐퍼 개수에 따른 파괴확률을 그림 6에 나타내었다.

5. 비용효율성 평가

준능동 감쇠장치의 비용효율성을 평가하기 위해서는 구조물의 전 생애주기를 통하여 감쇠장치의 설치로 인해 발생하는 손상비용 감소 효과, 즉 비용 이득을 평가하여야 한다. 이 연구에서는 기존 교량의 설계·시공에 사용된 탄성받침을 사용한 경우와 그 대안으로서 MR 댐퍼를 사용한 경우 각각에 대하여 장치의 가격과

손상비용의 합을 산출하고, 식 (2)와 같이 이들 간의 비로서 비용효율성 평가지수를 정의하였다.

$$J_{MR}(\alpha, \beta) = \frac{\alpha_{EB} + \beta P'_{f,EB} \frac{v}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_{life}))}{\alpha + \beta P'_{f,MR} \frac{v}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_{life}))} \quad (2)$$

여기서 α_{EB} 는 초기비용에 대한 탄성받침의 가격비이며 이 연구에서는 제2진도대교에서의 자료를 근거로 하여 0.0025의 값을 사용하였다. α 는 초기비용에 대한 MR 댐퍼의 가격비이며, β 는 초기비용에 대한 손상비용 규모의 비이다. $P'_{f,MR}$ 은 MR 댐퍼가 장착된 구조계의 파괴확률이며, $P'_{f,EB}$ 는 비제어시의 파괴확률이다. v 는 연간 지진 발생 빈도, λ 는 할인율, t_{life} 는 대상 구조물의 생애주기를 각각 나타낸다. 비용효율성 평가지수의 정의에 의하면 이 지수가 1보다 클수록 MR 댐퍼는 높은 비용효율성을 가지는 것을 의미한다.

이 연구에서 α 는 0.01로 가정하였으며, β 를 매개변

수로 하여 사장교에 장착된 MR 댐퍼의 비용효율성 평가 연구를 수행한 결과는 그림 7과 같다. 지반운동 특성과 β 값의 변화에 따른 비용효율성 평가 결과 비용효율성 평가지수의 값은 전반적으로 1보다 크게 나타났으며, 이는 MR 댐퍼가 기존에 사용된 탄성받침에 비하여 경제적으로 효율성을 지님을 의미한다. 지반운동의 특성에 따른 MR 댐퍼의 효율성을 비교하여 볼 때, 중진 지역의 견고한 지반에 해당하는 지반운동, 즉 Soil Type I의 0.19g에 해당하는 지반운동에서 MR 댐퍼의 효율성이 상대적으로 가장 높게 나타났으며, 지진으로 인한 위험도가 커질수록, 즉 큰 규모의 지반운동과 장주기 성분을 많이 포함하는 지반운동일수록 MR 댐퍼의 비용효율성이 낮아지는 것으로 나타났다. 특히 MR 댐퍼를 4개 설치한 경우, Soil Type III의 0.39g에 해당하는 지반운동에 대해서는 비용효율성 평가지수가 1 근방에 위치하는 것을 볼 수 있으며, 이는 MR 댐퍼의 효율성이 지극히 낮음을 의미한다. 이는 그림 3에서 보듯이 이 경우에 탄성받침을 사용하는 경우에 대한 파손확률의 감

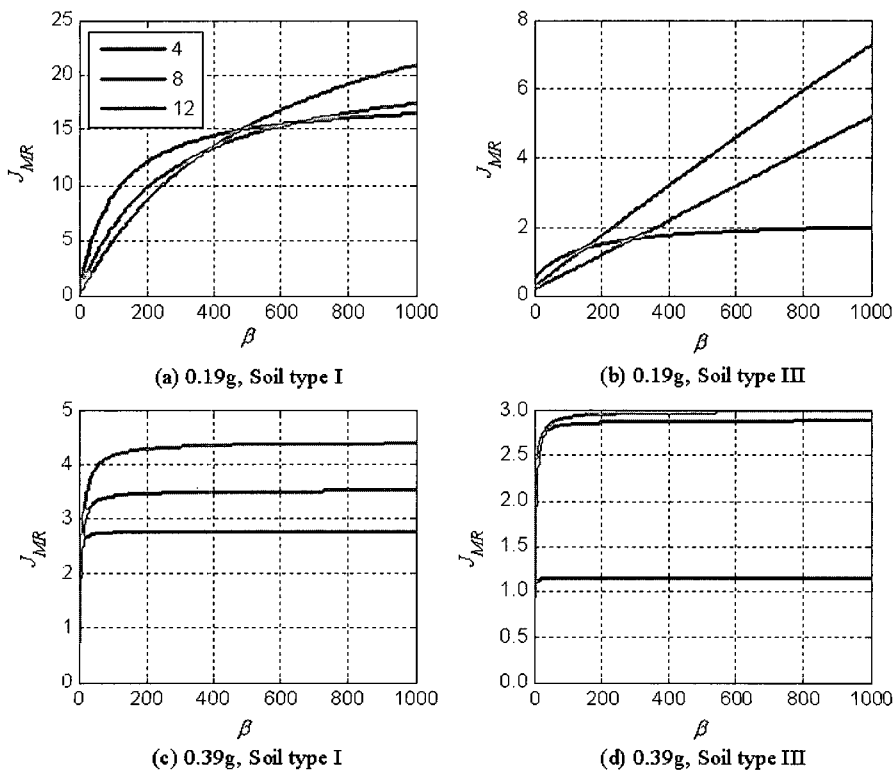


그림 7 MR 댐퍼의 비용효율성 평가 결과

소 효과가 미미하기 때문인 것으로 판단된다.

이 결과에서 또한 주목할 것은, 지반운동의 특성과 손상비용 규모의 변화에 따라 가장 높은 효율성을 보이는 MR 댐퍼의 개수가 변화한다는 것이다. Soil Type I의 0.19 g에 해당하는 지반운동의 결과를 볼 때, 손상비용 규모가 500 이하일 경우에는 가장 적은 수의 댐퍼를 설치하는 것이 효율적인 것으로 나타났으나, 1000 이상인 경우, 즉 교량이 사회·경제적으로 대단히 중요하여 파괴 시 손상 비용의 규모가 막대하게 클 경우에는 12개의 댐퍼를 설치하는 것이 효과적인 것을 알 수 있다. 반면 지반운동 규모가 증가하여 강진지역에 해당하는 지반운동의 경우에는 손상비용의 규모에 무관하게 가장 많은 수의 댐퍼를 설치하는 것이 가장 효율적임을 볼 수 있었다.

6. 맺음말

사장교의 지진응답제어를 위하여 장착된 MR 댐퍼의 비용효율성 평가연구를 수행하였다. 제어시스템의 비용효율성은 주탑과 보강경간 연결을 탄성받침으로 연결시킨 사장교 시스템에 대하여 비용효율성 평가지수를 정의함으로써 평가하였다. 사장교 구조물의 파괴로 인한 직·간접 손상비용의 규모를 매개변수로 하여 비용효율성을 평가하였으며, 지반운동의 특성과 구조물의 중요도에 따른 최적의 댐퍼용량을 도출하였다. 사장교 구조물의 지진응답 제어를 위하여 장착된 MR 댐퍼는 구조물의 중요도가 높지 않을 경우에 중진규모의 지반운동에 대하여 경제적으로 효율적이지 못하였다. 그러나 중진규모의 지반운동이라 하더라도 구조물의 파괴로 인한 경제적 손실의 규모가 크거나, 설계 지반운동의 규모를 초과하는 강진규모의 지반운동에 대해서는 사장교의 지진응답 제어를 위한 효율적 대안이 될 수 있는 것으로 나타났다. 지반운동의 특성에 대한 MR 댐퍼의 최적 용량을 분석한 결과, 지반운동의 규모가 증가할수록, 그리고 연약지반에 대하여 장주기 성분이 많이 포함된 주파수 특성을 가질수록, 요구되

는 최적의 MR 댐퍼 용량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 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, No. 7, pp. 845~856.
- (2) 함대기, 옥승용, 박원석, 고현무, 박관순, 2005, "준능동 제어시스템을 이용한 사장교의 진동제어 및 비용효율성 평가", 한국지진공학회논문집, 제 9권, 제 4호, pp. 43~54.
- (3) Dyke, S.J., Caicedo, J.M., Turan, G., Bergman, L.A., and Hague, S., 2003, "Phase I Benchmark Control Problem for Seismic Response of Cable-stayed Bridges", Journal of Structural Engineering, Vol. 129, No. 7, pp. 857~872.
- (4) Yi, F., Dyke, S.J., Caicedo, J.M. and Carlson, D., 2001, "Experimental Verification of Multiinput Seismic Control Strategies for Smart Dampers", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 127, No. 11, pp. 1152~1164.
- (5) Yoshida, O. and Dyke, S.J., 2004, "Seismic Control of a Nonlinear Benchmark Building Using Smart Dampers", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 130, No. 4, pp. 386~392.
- (6) 함대기, 옥승용, 박원석, 고현무, 박관순, 2006, "제 2 진도대교에 대한 MR 댐퍼의 비용효율성 평가", 대한토목학회정기학술대회, 광주.