

사장교에 장착된 준능동형 제어시스템의 비용효율성 평가

Cost-Effectiveness Evaluation of Semi-Active Control System for Cable-Stayed Bridge

함대기* · 박원석** · 고현무*** · 옥승용**** · 박관순*****

Daegi Hahm · Wonsuk Park · Hyum-Moo Koh · Seung-Yong Ok · Kwan-Soon Park

ABSTRACT

This paper presents cost-effectiveness evaluation of semi-active control system for cable-stayed bridge under earthquake excitation. Bi-state control method with Linear Quadratic Gaussian(LQG) optimal controller is used for generic semi-active dampers. Cost-effectiveness of the structural control system is investigated by using the life-cycle cost(LCC) concept. The evaluation results show that the efficiency of semi-active control system is increased when the damage cost due to the failure of bridge system or the bridge importance is enlarged. It was also found that the damper cost had little influence on the cost-effectiveness of semi-active control system if it was relatively small to the initial construction cost.

1. 서론

자연재해에 대한 구조물의 안정성을 확보하기 위한 방법으로 구조제어시스템이 최근 수십 년 동안 활발히 적용되어 왔다. 이에 힘입어 구조제어시스템의 적용기법이 최근 십여 년 동안 괄목할 만한 수준으로 발전되어 왔으나, 사장교 및 현수교와 같은 장대 교량구조물에 있어서는 여전히 초보적인 수준에 머물러 있는 상태이다. 이는 이러한 특수형식의 교량은 일반형식의 교량과는 달리, 주탑이나 케이블에 의하여 지지되는 형식상의 특징과 긴 경간으로 인한 낮은 감쇠비의 특성으로 인하여 유연하면서 매우 복잡한 동적거동 양상을 띠기 때문이다. 따라서 최근 들어서 여러 연구자들에 의하여 사장교의 지진응답제어를 위한 효과적인 제어전략 및 제어시스템이 몇몇 제시된 바가 있으며, 그 대표적 예로 MR 감쇠기(Magneto-rheological damper)를 이용한 준능동 제어시스템을 들 수 있다(Spencer 등, 1998). 하지만, 이러한 연구들은 대부분 제어성능에 초점을 맞춰서

* 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정
** 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사후연구원
*** 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수
**** 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정
***** 정회원 · 동국대학교 건축공학과, 전임강사

수행되었으며, 제어시스템의 비용효율성에 대한 연구는 수행되지 않았다. 그러므로 이 연구에서는 사장교의 지진응답에 대한 준능동 제어시스템의 적용에 따른 비용효율성 평가를 수행하고자 한다.

준능동 제어시스템은 Dyke 등(2003)에 의하여 제시된 벤치마크 제어문제에 설계되었으며, 제어 전략으로는 LQG 최적제어기에 기반한 Bi-state 제어방법을 적용하였다. 제어시스템의 비용효율성은 제어시스템을 장착하지 않은 교량시스템에 대한 제어시스템을 장착한 교량의 생애주기비용(Life-Cycle Cost, LCC)의 비로서 평가하였다. 각 시스템에 대한 비용효율성 지수는 교량의 초기 건설비용과 준능동 감쇠기의 초기비용, 그리고 지진으로 인한 각 교량시스템의 손상비용으로 구성된다. 이 연구에서는 이러한 비용효율성 지수를 구성하는 제어시스템의 소요비용과 교량구조물의 파괴에 따른 복구비용 등의 매개변수에 따른 제어시스템의 비용효율성을 평가하고자 한다.

2. 준능동 제어시스템 설계

2.1 벤치마크 사장교

벤치마크 교량은 미국 Missouri주의 Mississippi 강을 가로지르는 Cape Girardeau 부근에 건설된 Bill Emerson Memorial 교량으로서 중앙경간장 350.6m, 양 측경간장 142.7m의 사장교이다(그림 1). H형의 주탑은 RC(reinforced concrete)로, 상판은 강재 빔과 프리스트레스트 콘크리트 슬래브로 일체화되었으며, 128개의 케이블로 지지된다. 구조물에 대한 세부적인 상세는 Dyke 등(2000)에 제시되어 있다.

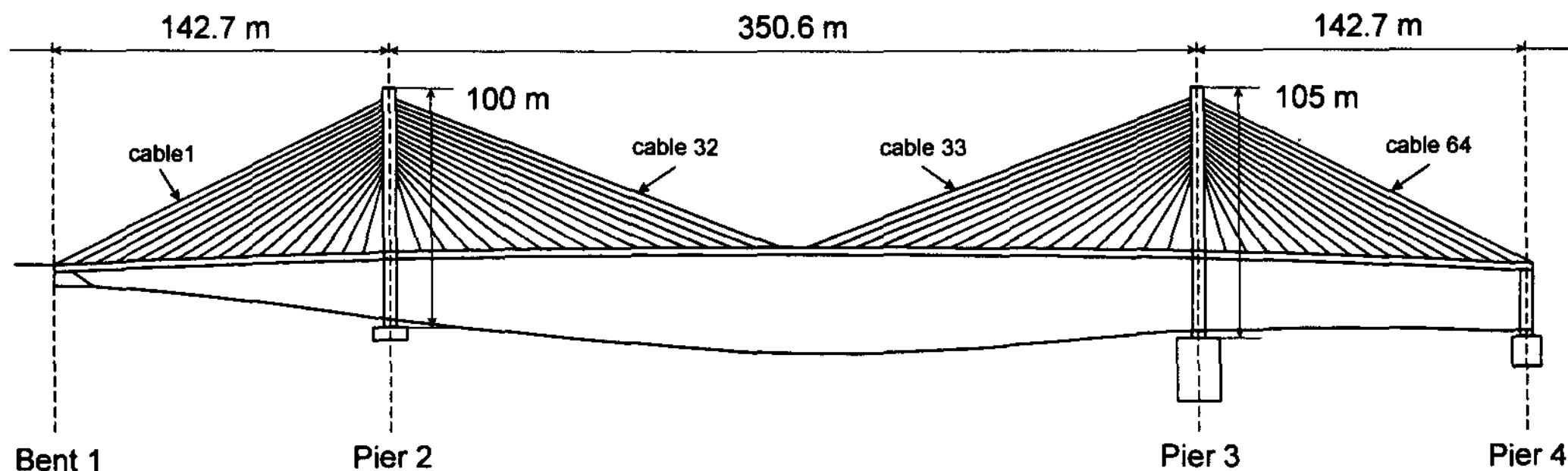


그림 1. Bill Emerson Memorial Bridge

2.2 입력지반운동 모델링

제어시스템의 설계 및 제어기-교량시스템의 파괴확률을 산출하기 위해서는 건설부지 특성을 반영할 수 있도록 AASHTO 시방서(1997)에 제시된 가속도 계수 및 지반계수로 표현되는 설계응답 스펙트럼으로부터 이에 상응하는 등가의 스펙트럼밀도함수를 산정한 후, 스펙트럼표현법(고현무 등, 1999)을 이용하여 충분히 많은 개수의 인공지진시간이력을 생성하여 입력지반운동으로 모델링하여야 한다(Koh 등, 2000). 그림 2는 이 연구에서 적용하고자 하는 벤치마크 교량이 위치한 부지의 지진특성을 반영한 설계응답스펙트럼에 상응하는 스펙트럼밀도함수를 나타내고 있으며, 이로부터 생성된 하나의 입력지반가속도의 시간이력을 그림 3에 제시하였다.

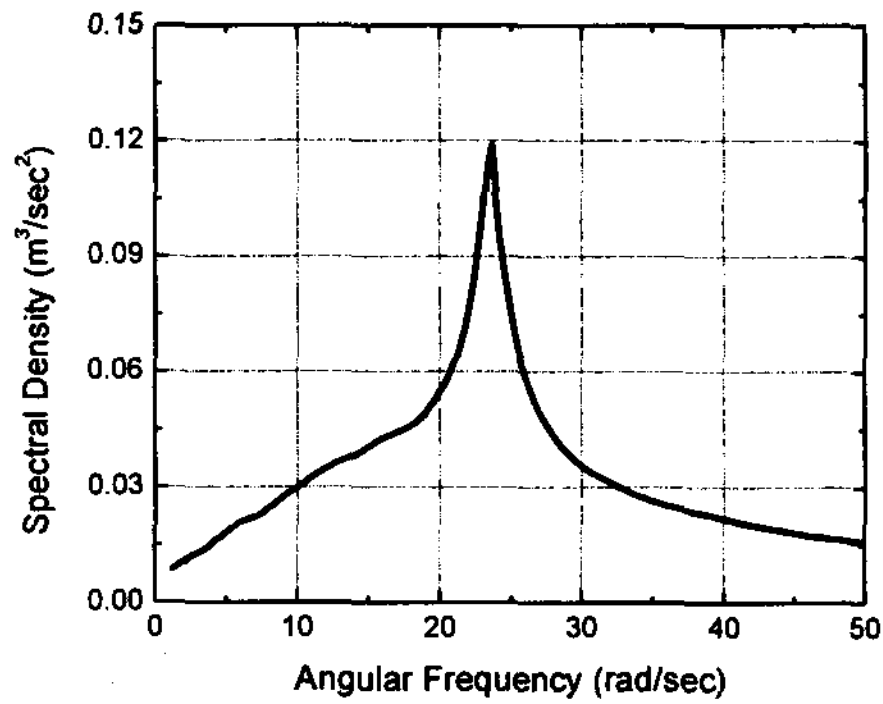


그림 2. 스펙트럼밀도함수

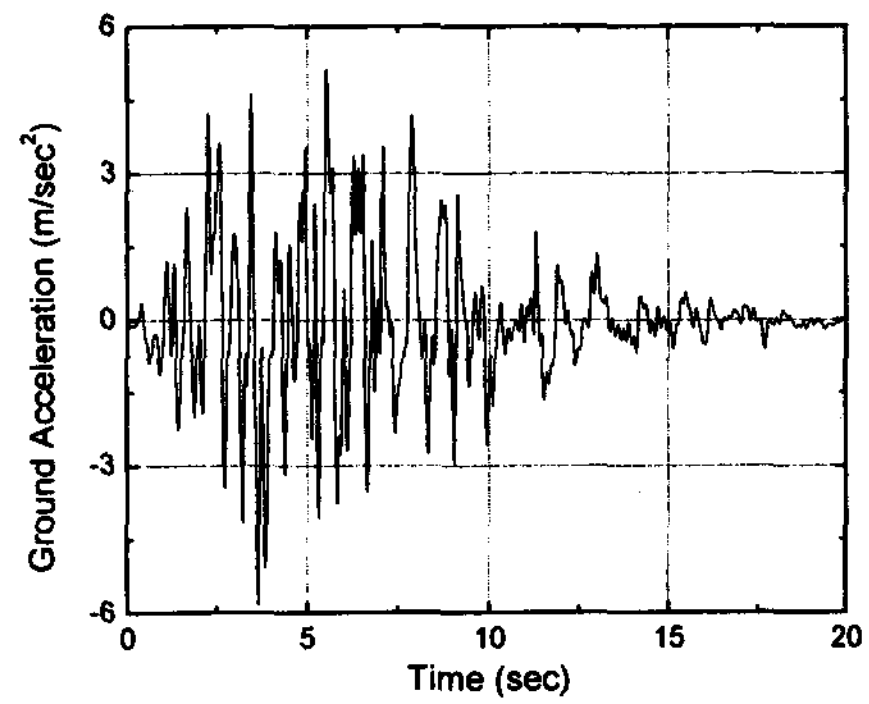


그림 3. 인공지진 시간이력곡선

2.3 준능동 제어시스템의 설계

전술한 교량모델 및 입력지반 지진가속도로부터 준능동 제어시스템을 설계할 수 있다. 준능동 감쇠기는 능동 제어시스템과 달리 항상 에너지를 소산하는 방향으로 감쇠력을 발휘하여야 한다. 따라서 제어시스템의 설계는 목표 제어력을 결정하는 기준 제어기(reference controller)의 설계와 준능동 시스템의 소산성(dissipativeness)을 판별하는 부분의 2단계로 구성된다.

(1) 기준 제어기 설계

기준 제어기는 일반적으로 능동제이론에 기반하여 설계되는데, 이 연구에서는 LQG 최적제어 방법을 적용하여 설계하였다. LQG 제어기는 추정기(estimator)와 제어기(controller)로 구성되는데, 이를 설계하기 위한 제어장치 및 센서의 배치는 그림 3과 같다. 센서로는 총 4개의 가속도계 및 8개의 변위계를 사용하였다. 가속도계는 중앙 경간의 데크에 1개, 양 주탑 상단에 각 2개씩 총 5개를, 변위계는 데크와 교각 및 주탑 연결부에 각각 2개씩 총 8개를 설치하는 것으로 하였다. 또한, 제어장치로는 데크와 교각 연결부에 각각 2개씩, 데크와 주탑 연결부에 각각 4개씩 총 24개의 준능동 감쇠기를 설치하였으며, 이들의 각 용량은 1,000kN로 가정하였다. 제어기 설계를 위한 제어 변수로는 상부 데크의 수평변위를 선정하였다. 기준 제어기 설계를 위해서는 성능지수를 구성하는 구조물의 응답과 제어력간의 가중행렬을 결정하여야 하는데(박관순 등, 2004), 이 연구에서는 제어력 가중행렬로는 $I_{8 \times 8}$ 을, 응답에 대한 가중치행렬로는 $10^4 I_{4 \times 4}$ 을 적용하여 설계하였다.

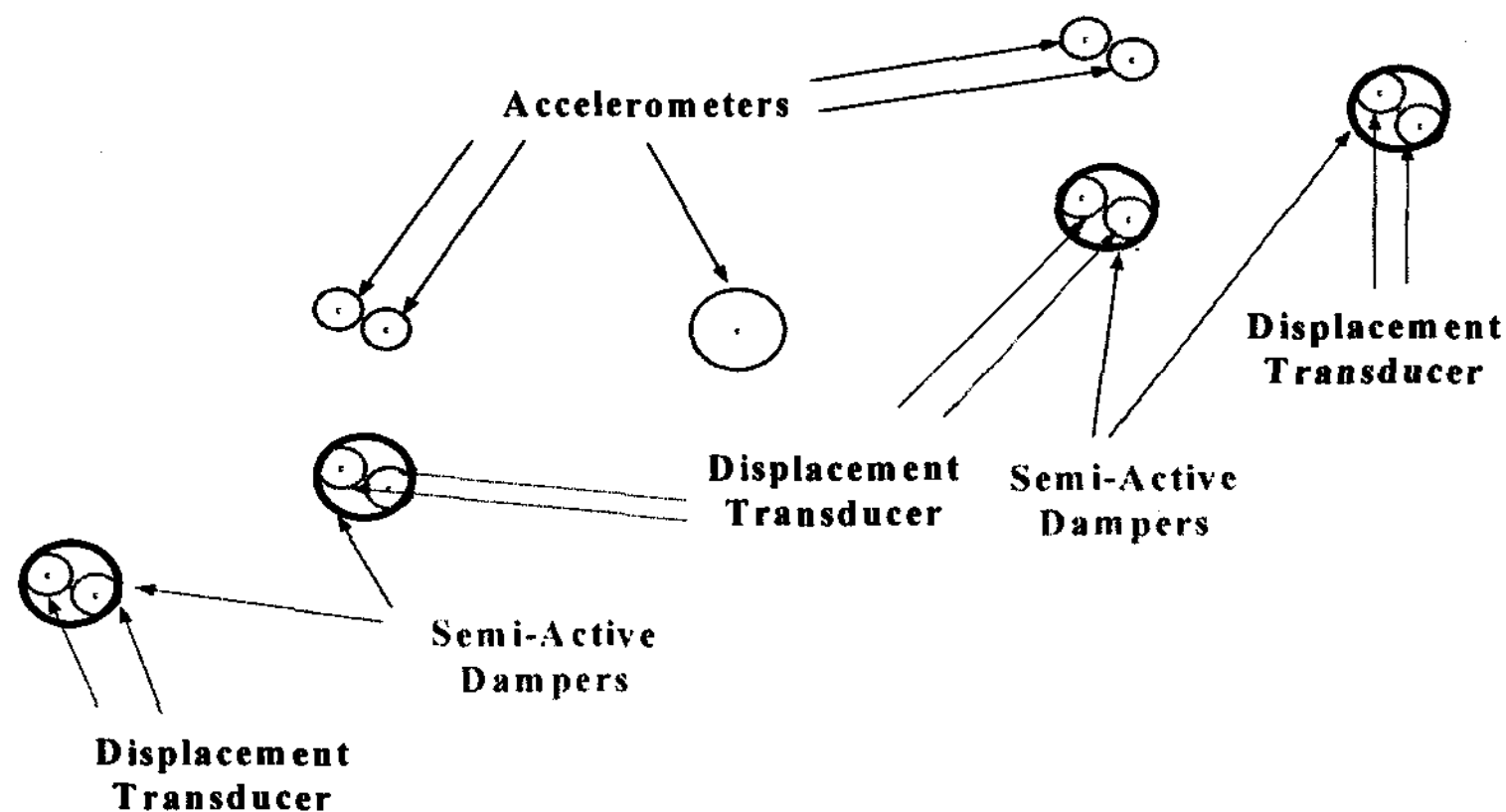


그림 3. 준능동 감쇠기 및 센서의 배치

(2) 소산성 판별

준능동 제어시스템은 감쇠기 자체의 동역학을 고려하지 않은 이상적인 장치로 가정하였으며, 발휘되는 감쇠력은 감쇠계수와 감쇠기 양단의 속도와의 곱으로서 정의하였다. 이 가정에 따라서 감쇠기로부터 발휘되는 감쇠력은 항상 속도의 반대방향으로 작용하게 된다. 그러므로 LQG 제어기에 의하여 결정되는 목표 제어력과 감쇠기 양단의 속도가 반대방향인 경우, 즉 소산성을 만족하는 경우에는 최대 감쇠계수를 적용하는 것이 바람직하며, 목표 제어력과 감쇠기 양단의 속도가 동일한 방향이라면 최소 감쇠력을 적용하는 것이 가능한 능동제어시스템에 근접하는 효과를 발휘한다고 할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 준능동 제어시스템의 운용방법으로 이러한 감쇠계수를 최대-최소, 즉 on-off의 2단계로만 조절하는 Bi-state 기법을 고려하였으며, 이는 가정에 의하여 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$u_{SA}^i = \begin{cases} C_d^i \cdot v^i, & f_d^i \cdot v^i < 0 \\ 0, & f_d^i \cdot v^i > 0 \end{cases} \quad (1)$$

여기서, f_d^i 는 LQG 제어기에 의하여 매 순간 산정되는 i 번째 제어장치의 목표 제어력, v^i 는 i 번째 감쇠장치의 속도, C_d^i 는 i 번째 감쇠장치의 최대 감쇠계수이다. 소산성의 판별 조건식은 두 물리량의 곱의 부호로서 정의된다.

3. 비용효율성 평가

준능동형 감쇠 장치의 비용효율성 평가를 위해서 이 연구에서는 생애주기비용 개념을 도입하였다. 생애주기비용은 구조물의 전 생애주기를 통해 소요되는 사회적 비용의 총합으로서, 크게 초기 건설비용과 손상비용 기댓값의 합으로 정의할 수 있다. 손상비용의 추정을 위해서는 구조요소의 파괴확률 추정이 선행되어야 한다. 여기서는 생애주기비용 개념을 도입하기 위한 과정으로서 파손 확률 추정 기법과 비용효율성 평가지수의 정의에 대하여 간략히 설명하도록 하겠다.

3.1 한계상태

파괴확률의 추정을 위해서는 먼저 파손 상태를 정의하는 한계상태가 정의되어야 한다. 사장교 구조물에는 많은 수의 구조요소가 존재하며, 각 구조요소는 모두 파손에 대한 한계상태를 가지고 있지만, 여기서는 지진 시 가장 위험한 파괴 원인이라 할 수 있는 주탑의 전도 모멘트에 의한 파손과 상부구조에 발생하는 과도한 변위응답으로 인한 낙교에 대하여 한계상태를 정의하였다. 이러한 가정을 통해 준능동형 감쇠 장치의 경제적 효율성을 평가하기 위한 과정을 간략화 할 수 있다. 각각의 한계상태는 감쇠 장치가 장착되지 않은 교량의 파손확률로부터 정의하였다.

3.2 파괴확률

파괴확률은 앞서 정의된 한계상태를 양의 기울기로 넘어서는 단위시간당의 빈도수로부터 추정될 수 있다(Newland, 1994). 응답의 한계상태 초과빈도수는 응답의 정규분포를 가정할 수 있을 경우 그 평균과 표준편차 값으로부터 계산될 수 있다. 이 문제의 경우 준능동 제어 장치가 선형 시스템이 아니므로 응답의 정규분포가 수학적으로 엄밀하게 보장되지는 않으나, 시뮬레이션을 통해

응답의 분포를 분석한 결과 정규분포임을 가정하여도 충분한 것으로 판단되었다. 상부구조 변위 및 바닥 휨모멘트 응답의 평균은 지진 가속도와 구조물의 대칭성으로부터 0의 값을 가지며, 표준편차는 각각의 강진 지속시간 응답의 RMS 값으로부터 계산하였다. 이러한 가정 하에, 응답이 단위시간 동안 한계상태를 초과할 빈도수는 식 (2)를 통해 계산될 수 있다.

$$\nu_i = \frac{1}{2\pi} \frac{\sigma_{R_i}}{\sigma_{R_i}} \exp(-R_{lim}^2 / 2\sigma_{R_i}^2) \quad (2)$$

여기서, ν_i 는 i 번째 응답의 한계상태 초과 빈도수, σ_{R_i} 는 i 번째 응답의 표준편차, R_{lim} 는 i 번째 응답의 한계상태를 각각 나타낸다.

이와 같이 응답의 초과빈도수를 계산하였을 때, 파괴의 발생은 포와송 분포를 따르는 것으로 알려져 있으므로, 다음의 식을 통해 지진이 발생하였을 때의 파손확률을 추정할 수 있다.

$$P_{f,eq} = 1 - \exp(-\nu_M t_d) \quad (3)$$

여기서 t_d 는 강진지속시간을 의미한다.

3.3 비용효율성 평가지수

준능동 감쇠장치의 비용효율성을 평가하기 위한 지표로서 교각과 상부구조간을 STU(Shock Transmission Unit)으로 연결한 시스템의 생애주기비용 기댓값에 대한 준능동 감쇠장치가 장착된 시스템의 생애주기비용 기댓값의 비로서 비용효율성 평가지수를 정의하였다. 간략한 평가를 위하여 유지·보수비용을 제외하고 지진 위험에 대한 대상 구조물의 생애주기비용을 정식화하면 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E[C_T] &= C_I + E[C_D] \\ &= C_I + C_D(r_1 P_1 + \dots + r_k P_k) \frac{\nu}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_{life})) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 C_I 는 초기비용을 나타내며, C_D 는 손상비용, P_i 는 각 한계상태에 대한 파손확률이다. r_i 는 각 한계상태에 대한 가중치이며, ν 는 연간 지진 발생 빈도, λ 는 할인율, t_{life} 는 대상 구조물의 생애주기를 각각 나타낸다. 준능동 감쇠장치가 장착되지 않은 시스템의 지진 위험에 대한 생애주기비용 기댓값은 다음 식과 같이 표현되며,

$$E[C_T]_{NON} = C_I + C_D \vec{P}_f \frac{\nu}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_{life})) \quad (5)$$

준능동 감쇠장치가 장착된 시스템의 생애주기비용 기댓값은 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$E[C_T]_{NON} = C_I + C_{SAD} + C_D \vec{P}_{f,SAD} \frac{\nu}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_{life})) \quad (6)$$

여기서 C_{SAD} 는 준능동 감쇠장치의 가격을, $\vec{P}_{f,SAD}$ 는 준능동 감쇠장치가 장착된 구조계의 파손확률 벡터를 각각 의미한다.

이제 비용효율성 평가지수는 다음의 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$J_S(\alpha, \beta) = \frac{E[C_T]_{NON}}{E[C_T]_{SAD}} = \frac{1 + \beta r \vec{P}_f \frac{\nu}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_{life}))}{1 + \alpha + \beta r \vec{P}_{f,SAD} \frac{\nu}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_{life}))} \quad (7)$$

여기서 α 는 초기비용에 대한 준능동 감쇠장치 가격의 비이며, β 는 초기비용에 대한 손상비용 규모의 비이다. 비용효율성 평가지수의 정의에 의하면 이 지수가 높을수록 준능동 감쇠장치는 높은 비용효율성을 가지는 것을 의미한다.

4. 제어시스템 설계 및 비용효율성 평가에 따른 해석결과

4.1 제어시스템의 설계결과

준능동 제어시스템의 비용효율성 평가를 위하여 준능동 감쇠기-사장교 시스템의 수치해석을 수행하였다. 이 때, 준능동 감쇠기의 감쇠계수의 최대값은 그림 3에 제시된 감쇠기의 설치위치별로 표 1에 제시되어 있다.

표 1. 위치별 감쇠기의 최대 감쇠계수

| 설치위치 | Bent 1 | Pier 2 | Pier 3 | Bent 4 |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|
| $C_d(kN \cdot s/m)$ | 2542.0 | 2243.0 | 1495.3 | 2392.5 |

Bi-state 기법에 의하여 조절되는 감쇠계수의 매 순간 변화양상, 즉 시간이력을 그림 4에 도시하였으며, 이에 상응하는 감쇠력의 시간이력을 그림 5에 나타내었다. 제어성능을 살펴보기 위하여 제어장치를 장착하지 않은 사장교의 주탑 하부에서 발생하는 바닥전단력과 제어장치를 장착한 사장교의 주탑 하부에서 발생하는 바닥전단력의 시간이력을 그림 6에 비교 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 매 순간 감쇠성능을 조절함으로써 효과적인 제어성능을 발휘하고 있음을 알 수 있다.

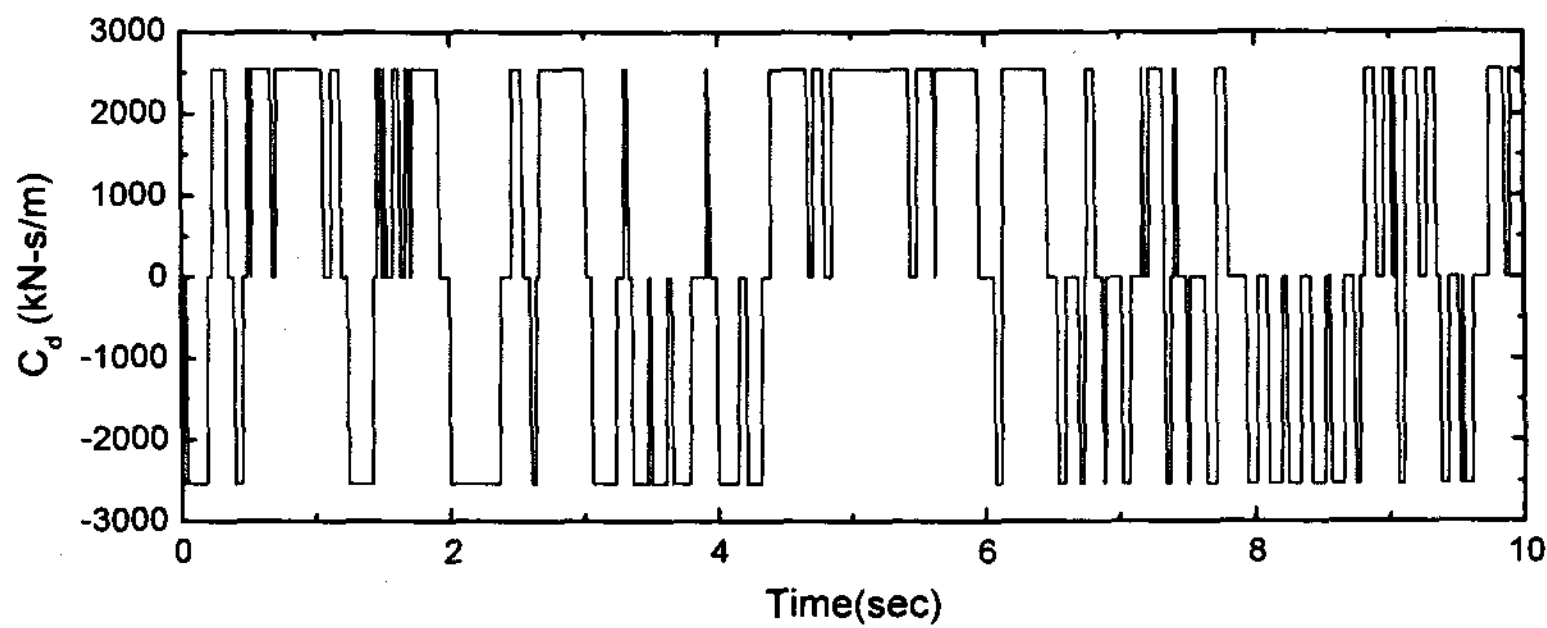


그림 4. 감쇠계수의 시간이력

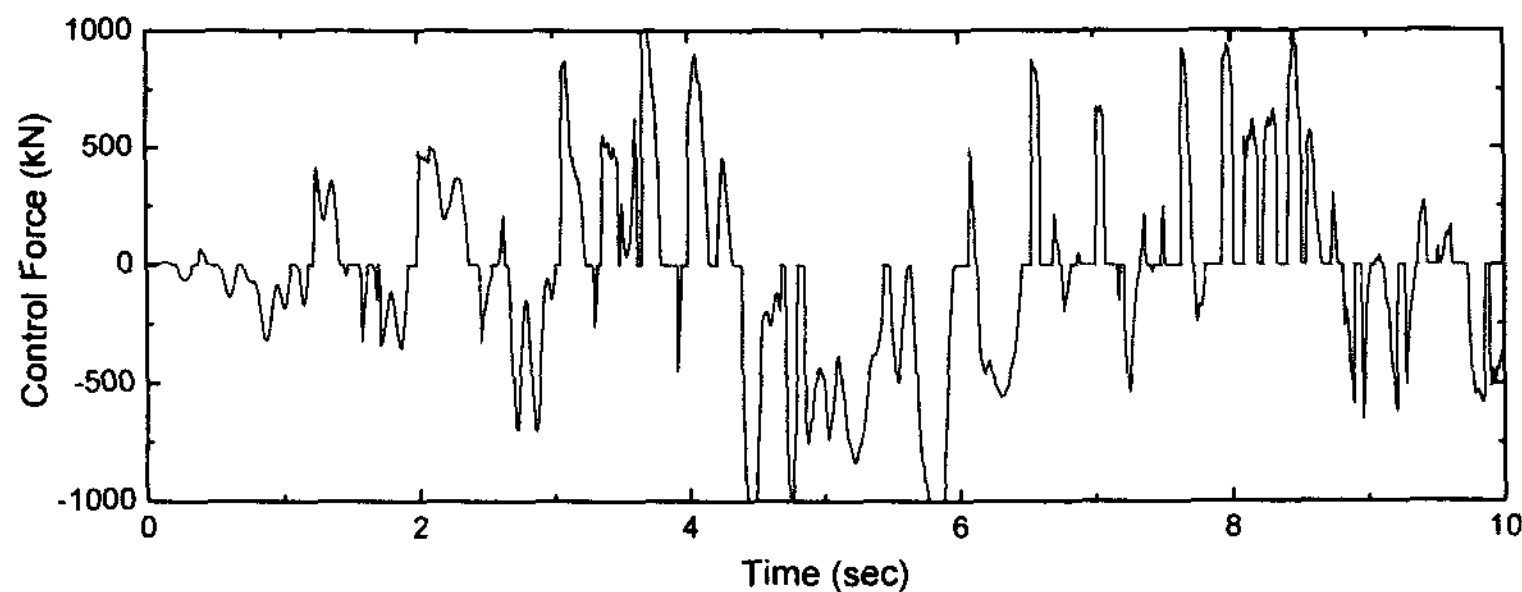


그림 5. 감쇠력의 시간이력

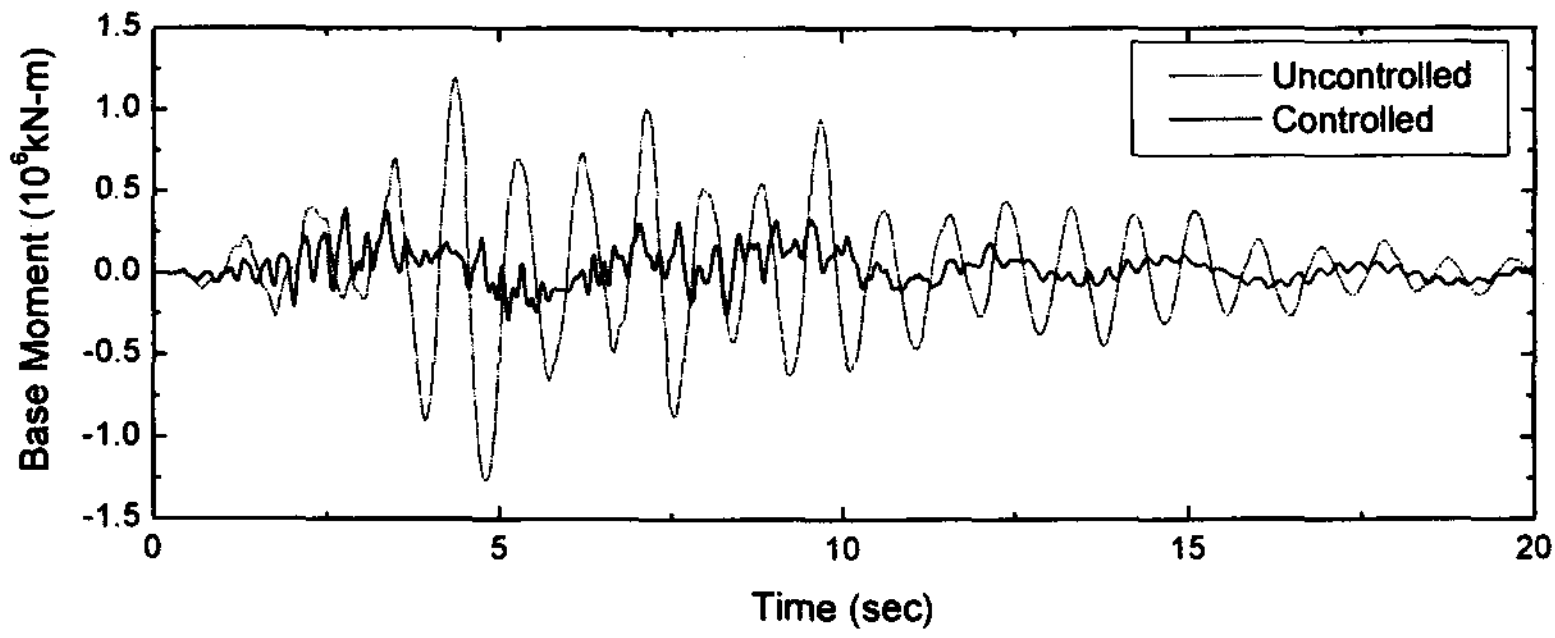


그림 6. 비제어시스템 및 제어시스템의 주탑 하부 바닥전단력 비교

4.2 제어시스템의 비용효율성 평가

감쇠장치의 가격과 손상비용 규모에 따라 비제어 시스템에 대한 준능동형 제어시스템의 경제적 효율성을 평가하였다. 준능동형 감쇠장치의 제작은 그 성능과 용량, 신뢰도 등의 제작 요건에 의해 이루어지기 때문에, 표준화된 가격을 결정하는데에는 무리가 있다. 따라서 여기서는 준능동 감쇠장치의 가격 변화에 따른 상대적 비용효율성을 평가하였다(그림 8). 그림에서 볼 때, 준능동형 감쇠장치의 가격이 초기비용의 0.1%보다 작을 때에는 손상비용의 규모 또는 교량의 중요도에 상관없이 제어 시스템을 사용하는 것이 경제적으로 효율적임을 알 수 있다. 한편, 그림 9는 손상비용 규모에 따른 제어시스템의 비용효율성 평가 결과이다. 교량에 파괴가 발생하였을 때 소요되는 비용의 규모가 증가할수록, 즉 교량의 사회적 중요도가 클수록 제어시스템을 사용하는 것이 효율적임을 볼 수 있으며, 손상비용 규모가 초기비용의 약 5배 이상에 이를 경우에는 준능동형 감쇠장치의 가격이 전체 교량 시스템의 0.5%에 이르더라도 제어시스템을 사용하는 것이 효율적임을 알 수 있다.

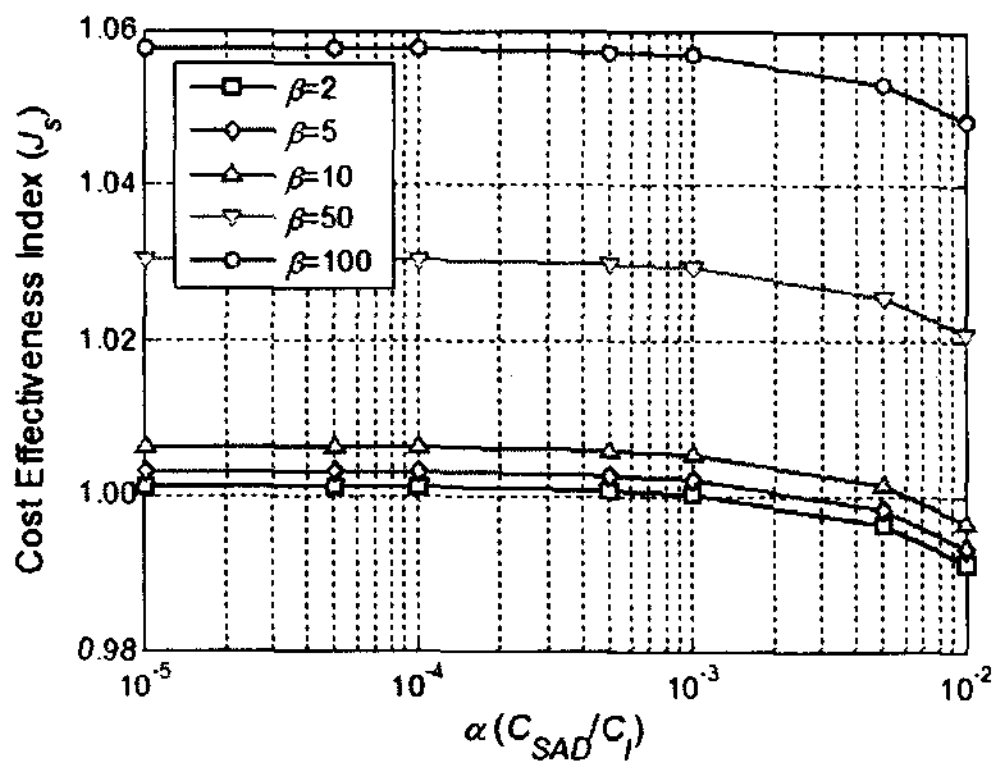


그림 8. 준능동형 감쇠장치 가격에 따른 비용효율성 평가지수

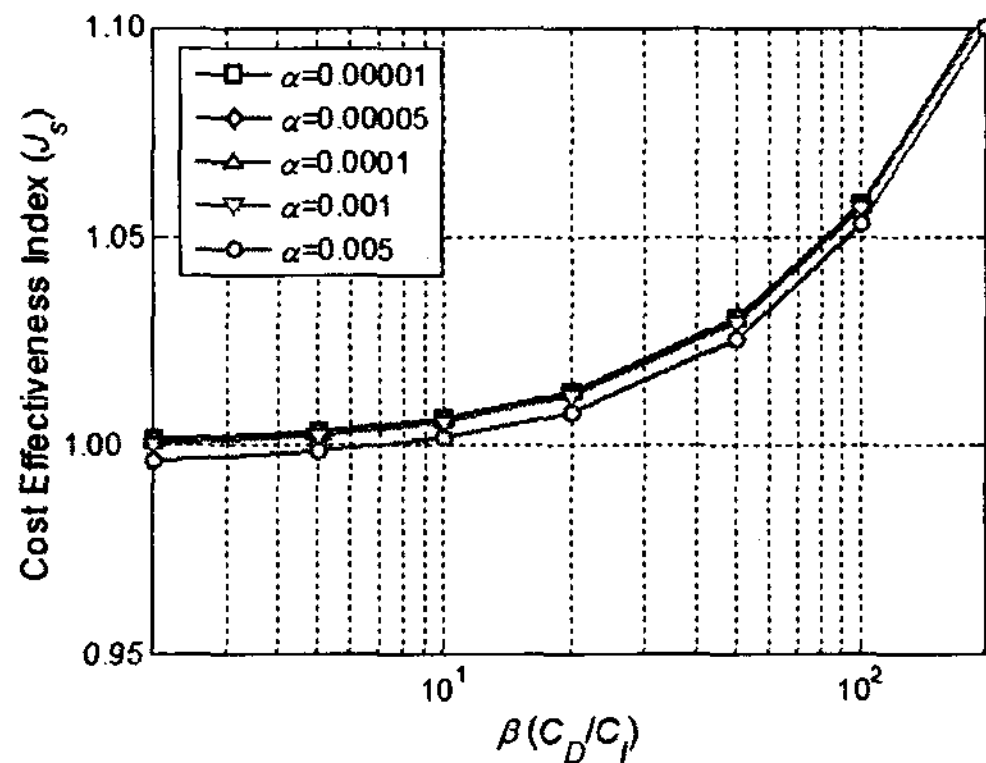


그림 9. 손상비용 규모에 따른 비용효율성 평가지수

5. 결 론

사장교의 지진응답제어를 위한 준능동 제어시스템의 비용효율성 연구를 수행하였다. 대상교량으로는 벤치마크 사장교를 고려하였으며, 준능동 제어시스템의 운용은 LQG 최적제어기법을 이용한 Bi-state 제어기법을 이용하였다. 사장교에 대한 제어시스템의 비용효율성은 제어시스템을 장착하지 않고 주탑과 데크간 연결을 STU로서 고정시킨 사장교시스템과 주탑과 데크간 연결을 준능동 제어시스템으로 대체한 사장교시스템의 생애주기비용의 상대적인 양으로서 평가하였다. 인공지진의 가속도 시간이력을 이용한 수치해석 결과, 제안하는 준능동 제어시스템이 주탑 하단부의 바닥 전단력 및 모멘트를 효과적으로 감소시키고 있음을 알 수 있었다. 또한, 준능동 감쇠기의 비용과 교량의 손상에 따른 복구비용을 매개변수로서 도입함으로써 이에 따른 비용효율성의 정성적인 평가를 수행하였다. 그 결과, 교량의 파괴에 따른 손상(복구)비용이 증가함에 따라 준능동 제어시스템의 비용효율성은 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 즉, 손상비용이 많이 요구되는 중요 교량의 경우에 있어서는 준능동 제어시스템을 적용하는 것이 보다 경제적인 대안이라 할 수 있다.

6. 참고문헌

- [1] SPENCER Jr. B.F., YANG G, CARLSON J.D., and SAIN M.K., "'Smart' Dampers for Seismic Protection of Structures: A Full-Scale Study," Proceedings of the Second World Conference on Structural Control (2WCSC), Kyoto, Japan, June 28 - July 1, 1998, Vol. 1, pp. 417-426.
- [2] Dyke, S. J., Caicedo, J. M., Turan, G., Bergman, L. A., and Hague, S., "Phase I Benchmark Control Problem for Seismic Response of Cable-Stayed Bridges," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 7, 2003, pp. 857-872.
- [3] DYKE S.J., TURAN G., CAICEDO J.M., BERGMAN L.A., and HAGUE S., Benchmark control problem for seismic response of cable-stayed bridges, 2000, <http://wusceel.cive.wustl.edu/quake>
- [4] AASHTO, *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, Draft, AASHTO T-3 Task Group, 1997.
- [5] 고현무, 송준호, "사용기간비용 최소화에 의한 지진격리 교량의 경제성 평가", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제 19권, 제 I-4호, 1999, pp. 539-550.
- [6] KOH, H.M., SONG, J., and HA, D.H., "Cost Effectiveness of Seismic Isolation for Bridges in Low and Moderate Seismic Region", *Proc. of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, WCEE*, Auckland, New Zealand, Jan. 30~Feb. 4 2000.
- [7] 박관순, 고현무, 옥승용, 서충원, "퍼지관리제어기법을 이용한 사장교의 지진응답제어", 한국지진공학회 논문집, 제 8권, 제 4호, 2004, pp. 51-62.
- [8] Newland D.E., *Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis*, Longman Scientific & Technical, 1994.