

준능동 제어시스템을 이용한 사장교의 진동제어 및 비용효율성 평가

Vibration Control and Cost-Effectiveness Evaluation of Cable-Stayed Bridges with Semi-Active Control System

함 대 기* 옥 승 용* 박 원 석** 고 현 무*** 박 관 순****
Hahm, Daegi Ok, Seung-Yong Park, Wonsuk Koh, Hyun-Moo Park, Kwan-Soon

국문요약

다양한 지진 규모 및 주파수 특성을 가지는 지반운동에 대하여 사장교에 장착된 준능동 제어시스템의 제어효과를 분석하고 비용효율성을 평가하였다. Dyke 등에 의하여 제시된 벤치마크 사장교 제어문제에 준능동 제어시스템을 설계하였으며, LQG 최적제어기에 기반한 bi-state 제어방법을 적용하였다. 제어시스템의 비용효율성은 제어시스템을 장착하지 않은 교량의 생애주기 비용에 대한 제어시스템을 장착한 교량의 생애주기비용의 비로서 정의하였으며, 손상비용 규모와 준능동 제어장치의 가격을 매개변수로 하여 그 변화에 따른 비용효율성 평가를 수행하였다. 분석 결과, 제어시스템의 경제적 효율성은 준능동 제어장치의 가격에 크게 민감하지 않은 반면, 손상비용 규모에 따라 민감하게 변화하였다. 또한 중진규모의 연약지반과 강진규모의 견고한 지반에 해당하는 지반운동에 대하여 준능동 제어시스템의 비용효율성이 높은 것으로 평가되었다.

주요어 : 준능동 제어시스템, 진동제어, 비용효율성, 사장교, 생애주기비용

ABSTRACT

This paper presents cost-effectiveness evaluation of semi-active control system for cable-stayed bridge under earthquake excitations with various magnitudes and frequency contents. Semi-active control system, which is operated by using Bi-state control method on the basis of linear quadratic Gaussian (LQG) optimal controller, is designed for the benchmark control problem proposed by Dyke et al. The cost-effectiveness of the proposed control system is defined by the ratio of life-cycle costs between a bridge structure with shock transmission units and a bridge structure with the semi-active control devices. The simulated results show that the damper cost has little influence on the cost-effectiveness of the semi-active control system while the cost-effectiveness is quite sensitive to the damage cost induced by the bridge failure. It is also found that the semi-active control system guarantees relatively high cost-effectiveness for the cable-stayed bridge subject to the ground motions in the regions of moderate seismicity with soft soil condition and strong seismicity with stiff soil condition.

Key words : semi-active control system, vibration control, cost-effectiveness, cable-stayed bridge, life-cycle cost

1. 서 론

구조물 정밀해석 및 설계기술의 발달과 시공기술의 발전이 이루어짐에 따라, 이들의 활용을 극대화할 수 있는 장대교량의 건설이 급속히 증가하고 있다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾ 교량 구조물의 장대화 및 경량화 추세는 필연적으로 구조물의 진동문제를 유발하게 된다. 특히, 사장교와 같은 장대교량 구조물은, 일반형식의 교량과는 달리 케이블에 의하여 지지되는 형식상의 특징과 긴 경간으로 인한 낮은 감쇠비의 특성으로 인하여, 지진이나 바람 등의 동적하중으로 인한 진동문제에 대단히 취약한 구조적 특징을 가진다.⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾ 이러한 장대교량의 진동문제를 해결하기 위한 대책으로서 다양한 제어전략 및 제어시스템이 제안된 바 있으며⁽⁷⁾⁻⁽¹²⁾, 그 대표적인 예로서 MR 감쇠기 (magneto-rheological damper) 등을 이용한 준능동 제어시스템을 들 수 있다.

준능동 제어시스템은 수동형 감쇠기에 가변성을 부가함으로써 시스템을 구성하는 다양한 요소들의 변화에 대하여 적응성을 가지도록 고안되었기 때문에, 유연하면서도 매우 복잡한 동적거동 양상을 보이는 장대교량의 진동제어에 적합한 시스템으로 주목받고 있다.⁽¹³⁾ 특히 최근에는 대표적인 준능동 감쇠장치라 할 수 있는 MR 감쇠기 관련 분야 산업의 급속한 발전에 힘입어 대형 구조물의 진동제어장치로서도 사용 가능한 대용량의 준능동 감쇠장치가 개발되기도 하였다.⁽¹⁴⁾⁻⁽¹⁶⁾ 준능동 제어시스템이 장대교량의 지진응답을 효과적으로 제어할 수 있음이 다양한 연구 결과를 통해 알려짐에 따라, 보다 뛰어난 제어 성능을 발휘할 수 있는 효율적인 제어전략에 대한 연구가 여러 연구자들에 의하여 이루어져 왔다.⁽¹⁷⁾⁻⁽²⁰⁾ 하지만 이러한 연구들은 대부분 제어성능의 극대화에 초점이 맞추어져 있으며, 제어시스템의 경제적 효율성에 대한 검토는 아직 미비한 단계에 머물러 있는 상황이다. 특히, 제어시스템의 경제적 효율성은 구조물이 건설되는 지역의 지진규모 및 지반 특성에 따라서 현저하게 다른 양상을 보일 수 있기 때문에, 다양한 하중 특성에 따른 비용효율성 검토는 준능동 제어시스템의 본격적인 개발 및 적용 이전에 반드시 선행되어야 할 연구 과제라 할 수 있다.

* 서울대학교 지구환경시스템공학부, 박사과정

** 서울대학교 지구환경시스템공학부, BK박사후연구원

*** 정희원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부, 교수

**** 정희원 · 동국대학교 건축공학과, 전임강사(대표저자: kpark@dongguk.edu)

본 논문에 대한 토의를 2005년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2005. 5. 6 / 심사종료일 : 2005. 6. 14)

따라서 이 연구에서는 사장교에의 적용가능성이 높은 준능동제어시스템에 대하여 지진규모 및 지반 특성에 따른 비용효율성 평가를 수행하고자 한다.

현재까지 이루어진 구조제어시스템의 경제적 효율성에 관한 기존 연구를 살펴보면, 빌딩구조물에 장착된 능동형 제어장치⁽²¹⁾와 일반형식의 교량구조물에 장착된 지진격리 장치^{(22),(23)}의 비용효율성 평가 연구가 수행되었으며, 최근 들어 빌딩구조물에 적용된 수동형 점탄성감쇠기에 대한 경제성 평가가 이루어진 바 있다.⁽²⁴⁾ 기존의 이러한 경제적 효율성 평가 연구는 주로 생애주기비용(Life-Cycle Cost, LCC) 개념을 적용하여 이루어져 왔다. 이는 초기 비용과 손상비용의 기대값으로 구성되는 생애주기비용 개념이 구조물의 전 생애주기적 관점에서 사회에 유발하는 비용을 평가하고, 이들 간의 비교를 통해 경제적 효율성 평가의 합리적 기준을 제공하는 틀로서 가장 적합하기 때문이다.^{(25),(26)} 빌딩구조물의 경우는 기존의 연구로부터 충분한 자료가 축적되어, 구조물의 목적이나 규모에 따라 손상비용의 정량적 평가가 어느 정도 가능하다.^{(21),(24)} 이에 반해 교량구조물은 인적, 물적 자원의 이동수단으로 이용되는 구조물이므로, 이들의 단절로 인하여 사회에 파급되는 경제적 효과 및 피해규모는 매우 크며 또한 가변적이다. 따라서 사장교와 같은 대규모 사회기반구조물에 장착되는 제어시스템의 비용효율성 평가를 위해서는 구조물의 파괴로 인한 손상비용 규모의 변화에 따른 매개변수 연구가 반드시 필요하다. 한편, 대용량의 준능동 제어시스템은 주문제작에 의하여 생산되며, 지속적인 유지·보수를 위한 관리비용이 요구되기 때문에 제어시스템 자체의 초기비용도 하나의 정량적인 값으로 일반화시키기는 어렵다. 따라서 이 연구에서는 사장교에 장착된 제어시스템의 비용효율성 평가를 위하여 손상비용 규모와 제어시스템의 초기비용에 대한 매개변수연구를 수행하였다.

이를 위해 2장에서는 다양한 지반운동 특성을 반영할 수 있는 지반운동을 모델링하였으며, 3장에서는 준능동 제어시스템의 설계방법을 다루었다. 준능동 제어시스템은 Dyke 등⁽²⁷⁾에 의하여 제시된 벤치마크 제어문제에 설계되었으며, 제어전략으로는 LQG 최적제어기에 기반한 bi-state 제어방법을 적용하였다. 4장에서는 생애주기비용 개념에 기반한 비용효율성 평가방법을 기술하였다. 제어시스템의 비용효율성은 제어시스템을 장착하지 않은 교량의 생애주기비용에 대한 제어시스템을 장착한 교량의 생애주기비용의 비로서 정의하였다. 각 교량시스템의 생애주기비용은 지진응답해석을 통한 파괴확률의 추정을 통해 얻을 수 있다. 구조물의 지진응답해석은 시간이력해석법을 사용하였고 이의 반복수행을 통하여 응답의 통계값을 산출하였으며, 이로부터 한계상태 초과빈도를 얻음으로써 파괴확률을 추정하였다. 5장에서는 지진규모 및 지반특성과 손상비용 규모 및 제어시스템의 초기비용의 변화에 따른 비용효율성 평가결과를 분석하였다.

2. 지반운동 모델링

구조물의 지진응답 해석기법으로는 스펙트럼밀도함수를 입력 지반운동으로 사용하는 스펙트럼 해석법⁽²⁸⁾과 실제 기록되었거나 인공적으로 생성된 가속도 시간이력을 사용하는 시간이력 해석법⁽²⁹⁾이 주로 사용되고 있다. 스펙트럼밀도함수를 이용하는 방법은, 적은 해석시간을 통해 비교적 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있다는 장점이 있으나, 근본적으로 선형 시스템에만 적용할 수 있다는 한계를 가진다. 가속도 시간이력을 이용하는 방법은 해석시간이 많이 요구되는 반면, 시스템의 비선형성으로 인하여 응답의 추가학적 추정이 난해한 문제에 대하여 통계학적 처리 과정을 통해 파손확률을 추정할 수 있다는 장점이 있다. 이 논문에서는 비선형성을 갖는 준능동 제어시스템이 장착된 교량의 지진응답해석이 요구되므로 시간이력 해석법을 사용하였다.

지진하중의 규모 및 주파수 성분에 따른 준능동 감쇠기의 비용효율성 평가를 위해서는, 이러한 하중 특성을 반영할 수 있는 인공지진 시간이력의 모델링이 필요하다. 일반적으로 설계 기준에서는 지진하중 특성을 반영하기 위하여 각 지역에 해당하는 지진가속도계수와 지반계수에 따라 설계응답스펙트럼을 정의하고 있다. 따라서 이 연구에서는 설계 기준에 정의된 설계응답스펙트럼에 상응하는 인공지진 가속도 시간이력을 생성하는 방법을 사용함으로써 지진 특성을 반영할 수 있는 지반운동을 모델링하였다. 여기서는 우리나라와 같은 중약진지역에 국한되는 것이 아닌, 강진지역을 포함하는 다양한 지진 및 지반 조건에 대한 비용효율성 평가를 목표로 하고 있기 때문에, 이를 모두 포함하는 미국 AASHTO Standard Specification⁽³⁰⁾에 정의된 설계응답스펙트럼과 가속도계수 및 지반계수를 사용하였다.

AASHTO Standard Specification에서는 각 지진구역의 가속도계수(A)와 교량 구조물의 중요도에 따른 내진성능범주(Seismic Performance Category, SPC)를 규정함으로써 해당 지진구역에 요구되는 내진성능을 가속도계수와 중요도에 따라 A부터 D까지의 4단계로 구분하고 있다. 하중의 주파수 성분은 지반특성에 의해 지배적인 영향을 받게 되며, AASHTO Standard Specification에서는 지반조사를 통하여 견고한 지반으로부터 연약한 지반까지, 각각 지반종류(soil profile type) I부터 IV까지의 4가지 중 하나로 결정하고, 그에 따른 지반계수(S)를 정의함으로써 이를 반영하고 있다. 설계응답스펙트럼은 식 (1)과 같이 지진구역계수와 지반계수, 그리고 교량의 고유주기(T)의 함수로 정의되는 지진응답계수(seismic response coefficient) C_s 를 통하여 해당 지역의 지진특성을 반영하도록 구성된다.⁽³⁰⁾

$$C_s = \frac{1.2AS}{T^{2/3}} \quad (1)$$

지진응답계수 C_s 는 일반적으로 $2.5A$ 이하이며, $A \geq 3.0$ 인 지역의 지반종류 III과 IV에 해당하는 지역에서는 $2.0A$ 이하이다.

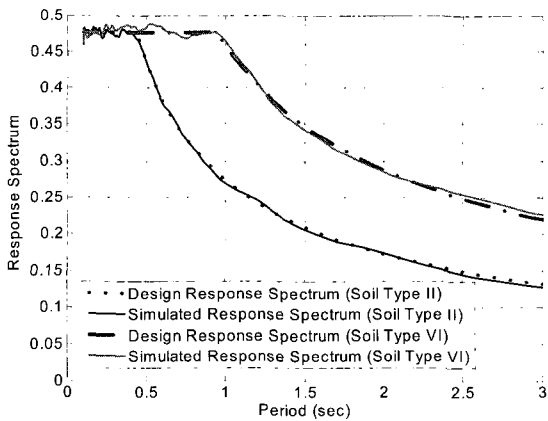
여기서는 교량의 중요도를 I등급으로 가정하고, 각 SPC에 해당하는 최대가속도계수값과 모든 지반계수의 조합에 대하여 주어진 설계응답스펙트럼에 상응하는 스펙트럼밀도 함수 모델을 생성하고,⁽³¹⁾ 이로부터 스펙트럼 표현법(spectral representation method)⁽³²⁾에 의해 인공지진 가속도 시간이력을 생성함으로써 지진규모 및 지반 특성을 반영하는 입력지반운동을 생성하였다. 그림 1(a) 및 1(b)는 각각 중진규모 지진 및 강진규모 지진에 해당하는 SPC B와 SPC D에 대하여 견고한 지반과 연약한 지반에서의 인공지진 가속도 시간이력 100개를 각각 생성하고, 그로부터 얻어진 응답스펙트럼을 설계응답스펙트럼과 비교한 결과를 나타낸 그래프이다. 이를 통하여 볼 때, 생성된 인공지진 파는 설계기준에 제시된 지반운동 특성을 충분히 반영하고 있는 것을 알 수 있다.

3. 준능동 제어기 설계

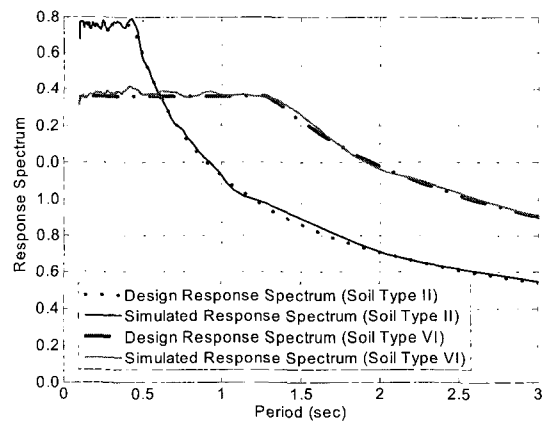
3.1 대상 교량

준능동 감쇠장치의 비용효율성 평가를 위한 대상 교량은 Dyke 등⁽²⁷⁾에 의하여 제안된 벤치마크 교량을 사용하였다. 이 교량은 미국 Missouri주의 Mississippi 강을 가

로지르는 Cape Girardeau 부근에 건설된 Bill Emerson Memorial 교로서 중앙경간장 350.6m, 양 측경간장 142.7m의 사장교이다(그림 2). H형의 주탑은 RC(reinforced concrete)로, 상판은 강재 빔과 프리스트레스트 콘크리트 슬래브로 일체화되었으며, 128개의 케이블로 지지된다. 교량의 기초는 기반암(bedrock) 위에 위치한다는 가정 하에 지반과 구조물간의 상호작용은 고려되지 않으며, 지진응답해석을 위한 하중으로는 교축방향의 지반운동만을 고려한다. 사장교 모델은 모두 579개의 절점을 갖는 3차원 유한요소 모델로서, 162개의 보요소, 128개의 케이블 요소, 420개의 강결요소가 사용되었으며, 134개의 절점에 집중질량이 위치한다. 그리고, 구조해석 프로그램인 ABAQUS[®]를 이용하여 교량의 시공단계별 사하중을 고려한 비선형 정적해석을 수행하여 완성계 사장교의 질량행렬 및 강성행렬을 추출하였다. 이로부터 구성된 질량행렬 및 강성행렬은 효율적인 해석을 위해 정적응축(static condensation)방법을 적용하여 419개의 자유도를 갖도록 재구성되었다. 이 교량은 주탑과 테크간 연결에 STU(Shock Transmission Unit)를 사용하여 교축방향의 변위를 일정 수준으로 제한하고 있으며, 이 때의 저차 10개 모드의 주파수는 각각 0.2899, 0.3699, 0.4683, 0.5158, 0.5812, 0.6490, 0.6687, 0.6970, 0.7102, 0.7203 (Hz)이다. 감쇠행렬은 모든 모드에 3%의 감쇠비를 가정하여 구성하였다. 지진응답 제어를 위하여 MR 감쇠기를 사용하는 경우에는 STU를 MR 감쇠기가 대체하게 된다. 따라서, 제어시스템



(a) 중진규모 지진(SPC B)



(b) 강진규모 지진(SPC D)

그림 1 인공지진 가속도 시간이력을 통해 얻어진 응답스펙트럼과 설계응답스펙트럼의 비교

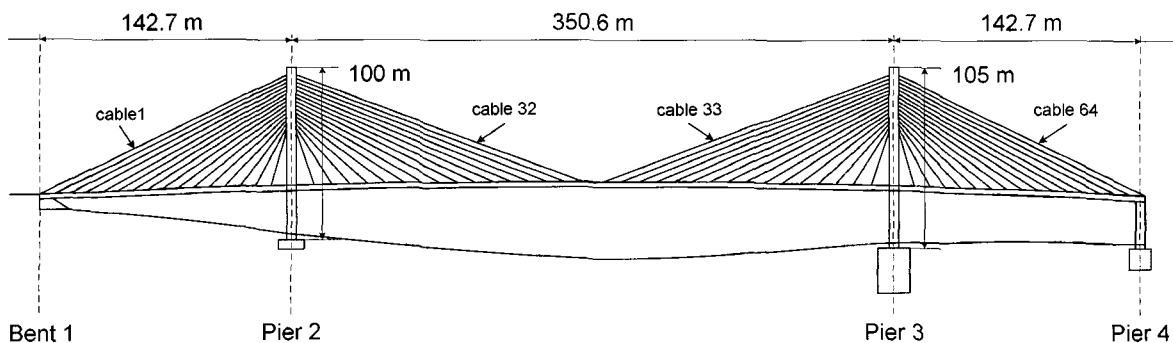


그림 2 Bill Emerson Memorial 교량

의 설계는 STU가 설치되지 않은 교량모델에 대하여 수행된다.

3.2 제어기 설계

전술한 교량모델 및 입력지반 지진가속도로부터 준능동 제어시스템을 설계할 수 있다. 준능동 감쇠기는 능동 제어시스템과 달리 항상 에너지를 소산하는 방향으로만 감쇠력을 발휘한다. 따라서 설계 과정은 목표 제어력을 결정하는 기준 제어기(reference controller)의 설계와 매 순간 준능동 시스템의 소산성(dissipativeness)을 판별하는 부분의 2단계로 구성된다.

3.2.1 기준 제어기 설계

기준 제어기는 능동제어이론에 기반하여 설계되는 것이 일반적이며, 이 연구에서는 LQG 최적제어방법을 적용하여 설계하였다. LQG 제어기는 추정기(estimator)와 제어기(controller)로 구성되는데, 이를 설계하기 위한 제어장치 및 센서의 배치는 그림 3과 같다. 센서로는 총 5개의 가속도계 및 8개의 변위계를 사용하였다. 가속도계는 중앙경간의 데크에 1개, 양 주탑 상단에 각 2개씩 총 5개를, 변위계는 데크와 교각 및 주탑 연결부에 각각 2개씩 총 8개를 설치하는 것으로 하였다. 또한, 제어장치는 데크와 교각 연결부에 각각 2개씩, 데크와 주탑 연결부에 각각 4개씩 총 24개의 준능동 감쇠기를 설치하였으며, 최대용량은 1,000kN을 넘지 않는 것으로 가정하였다. 제어기 설계를 위한 제어변수로는 상부 데크의 수평변위를 선정하였다. 기준 제어기 설계를 위해서는 성능지수를 구성하는 구조물의 응답과 제어력간의 가중행렬을 결정하여야 하는데⁽³³⁾, 이 연구에서는 제어력 가중행렬로는 $I_{8 \times 8}$ 을, 응답에 대한 가중치행렬로는 $10^4 I_{4 \times 4}$ 을 적용하여 설계하였다.

3.2.2 소산성 판별

준능동 제어시스템은 감쇠기 자체의 동역학을 고려하지 않은 이상적인 장치로 가정하여, 감쇠계수와 감쇠기 양단의 속도와의 곱으로서 감쇠력을 정의하였다. 이 가정에 따

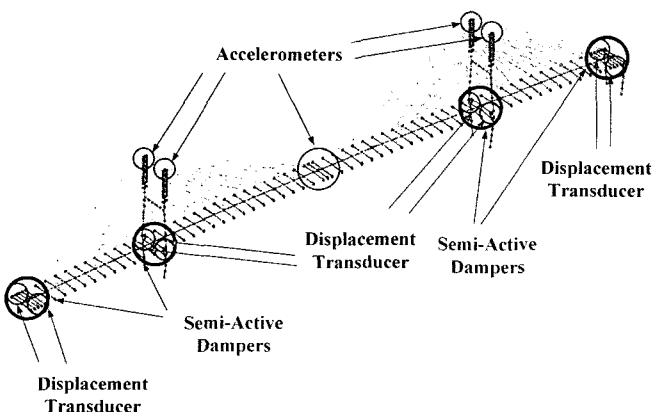


그림 3 준능동 제어시스템과 센서의 배치

라서 감쇠기로부터 발휘되는 감쇠력은 항상 속도의 반대방향으로 작용하게 된다. 준능동 제어시스템의 운용방법으로는 감쇠계수를 on-off의 2단계로만 조절하는 bi-state 기법을 적용하였다. 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 한 능동제어시스템에 근접하는 효과를 발휘한다고 할 수 있다. 따라서 이 연구에서 적용한 준능동 제어장치의 조절방법은 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$u_{SA}^i = \begin{cases} -C_{d,max}^i \cdot v^i, & f_d^i \cdot v^i < 0 \\ 0, & f_d^i \cdot v^i \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서, f_d^i 는 LQG 제어기에 의하여 매 순간 산정되는 i 번째 제어장치의 목표 제어력, v_i 는 i 번째 감쇠장치의 속도, $C_{d,max}^i$ 는 i 번째 감쇠장치의 최대 감쇠계수이다. 소산성의 판별 조건식은 두 물리량의 곱의 부호로서 정의된다.

3.3 설계 결과

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

중진규모의 견고한 지반(SPC B, soil type II)에 해당하는 인공지진 시간이력에 대하여 bi-state 기법에 의해 조절되는 감쇠계수의 매 순간 변화양상 및 그에 따른 감쇠력의 시간이력을 각각 그림 4와 그림 5에 도시하였다.

표 1 위치별 감쇠기의 최대감쇠계수

설치위치	Bent 1	Pier 2	Pier 3	Bent 4
C_d (kN·s/m)	2542.0	2243.0	1495.3	2392.5

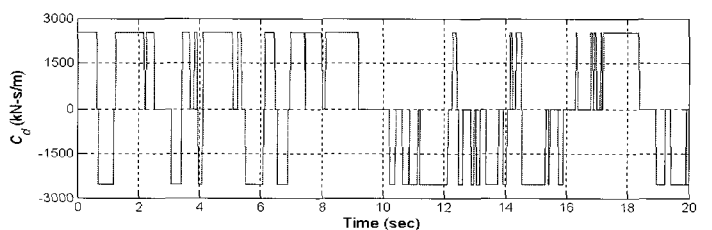


그림 4 감쇠계수의 시간이력 (SPC B, soil type II)

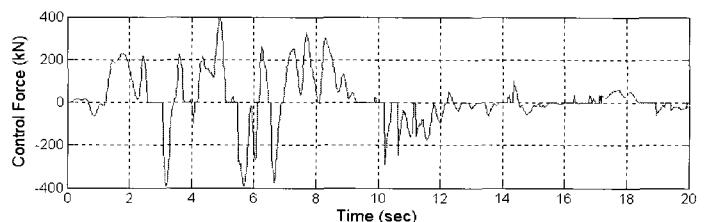


그림 5 감쇠력의 시간이력 (SPC B, soil type II)

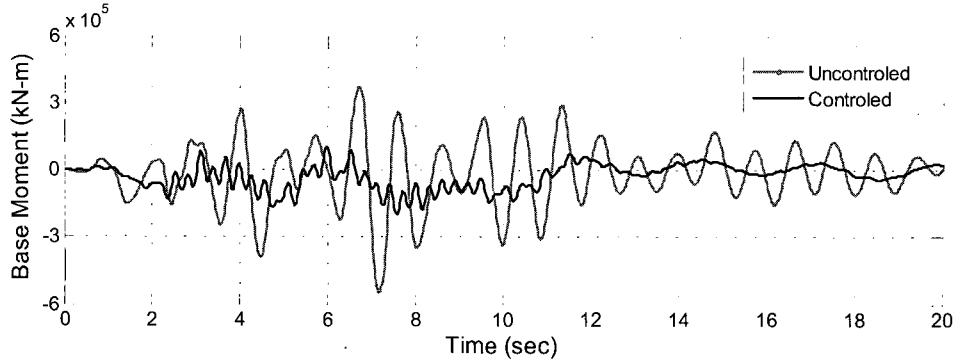
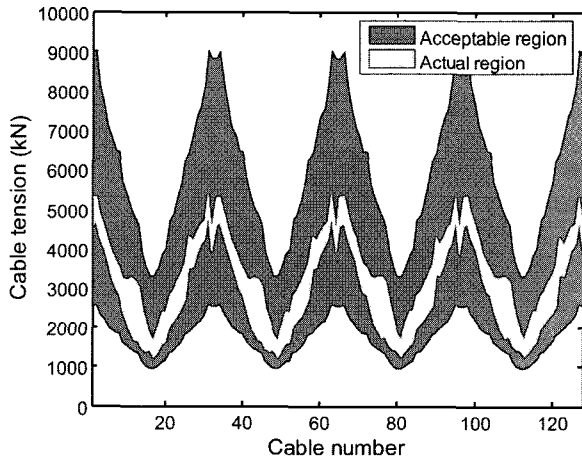
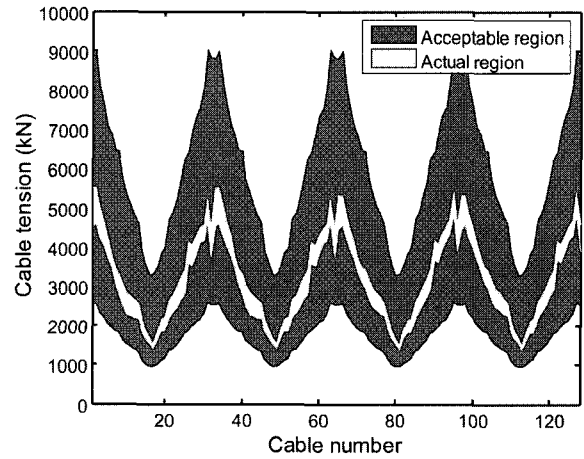


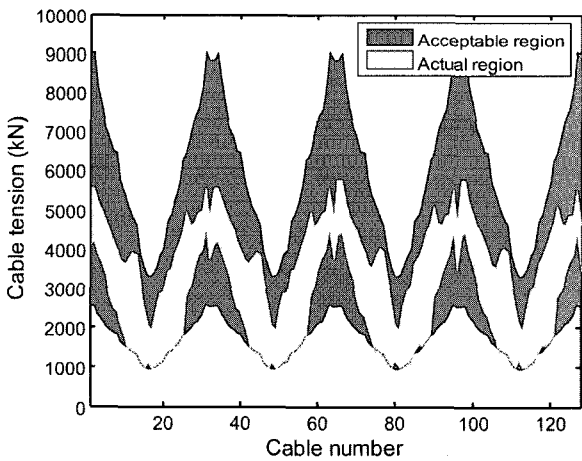
그림 6 STU가 장착된 교량과 준능동 감쇠장치가 장착된 교량의 주탑 하부 모멘트응답 시간이력 (SPC B, soil type II)



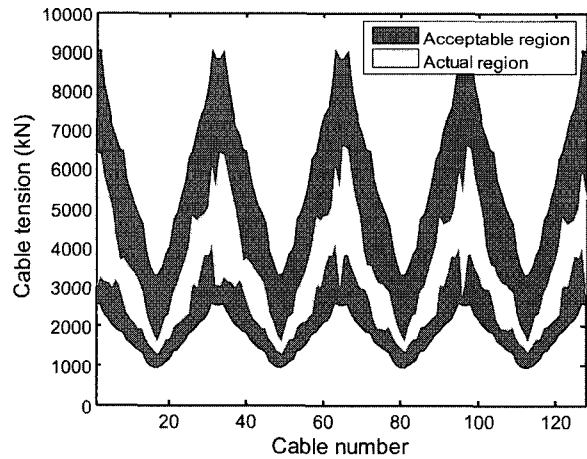
(a) STU 장착 교량 (SPC B, soil type II)



(b) 준능동 감쇠장치 장착 교량 (SPC B, soil type II)



(c) STU 장착 교량 (SPC D, soil type IV)



(d) 준능동 감쇠장치 장착 교량 (SPC D, soil type IV)

그림 7 지반운동 특성에 따른 STU 장착 교량과 준능동 감쇠장치 장착 교량의 케이블 최대장력 비교

제어성능을 살펴보기 위하여 제어장치를 장착하지 않은 사장교의 주탑 하부에서 발생하는 모멘트응답과 제어장치를 장착한 사장교의 주탑 하부에서 발생하는 모멘트응답의 시간이력을 그림 6에 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 매 순간 감쇠성능을 조절함으로써 효과적인 제어성능을 발휘하고 있음을 알 수 있다.

한편, 그림 7에서는 각각 SPC B의 지반조건 II와 SPC D의 지반조건 IV에 해당하는 지반운동에 대하여 제어시스

템을 장착하지 않은 경우와 준능동 제어시스템이 장착된 경우의 케이블 장력 변화량을 비교하였다. 그림에서 가로축은 128개의 케이블을 나타내며, 세로축은 케이블 초기장력에 대한 지진 발생시 케이블 장력의 변화량을 나타낸다. 그림 7(a), 7(b)는 중진지역(SPC B)의 지반조건 II에 해당하는 지반운동에 대한 결과로서, STU가 장착된 사장교와 준능동 제어장치가 장착된 사장교의 케이블 장력이 모두 허용 범위 내에서 변화하지만, 제어시스템이 장착된 경우

그 변동 폭이 현저히 줄어들었다. 한편, 그림 7(c), 7(d)는 강진지역(SPC D)의 연약한 지반조건(soil type IV)에 해당하는 지반운동에 대한 결과로서, 과도한 지반운동으로 인하여 STU를 장착한 교량에서 케이블 장력이 허용범위를 초과하였다. 하지만, 준능동 감쇠장치를 장착함으로써 케이블 장력의 변동을 허용 장력 범위 안쪽으로 제어하고 있으며, 이로부터 설계된 준능동 제어시스템의 진동저감효과를 확인할 수 있다.

4. 파괴확률 추정기법

생애주기비용은 구조물의 전 생애주기를 통해 소요되는 사회적 비용의 총합으로서, 크게 초기 건설비용과 손상비용 기대값의 합으로 정의할 수 있다. 손상비용의 기대값을 얻기 위해서는 구조요소의 파괴확률 추정이 선행되어야 한다. 여기서는 생애주기비용 개념을 도입하기 위한 과정으로서 파괴확률 추정기법에 대하여 기술하도록 한다.

4.1 한계상태 정의

파괴확률의 추정을 위해서는 먼저 파괴에 이르게 되는 상태를 규정하는 한계상태가 정의되어야 한다. 사장교 구조물에는 많은 수의 구조요소가 존재하며, 각 구조요소는 모두 파손에 대한 한계상태를 가지고 있다. 그러나, 파괴확률의 추정과 비용효율성 평가를 위해서는 충분히 많은 횟수의 시간이력해석을 수행하여야 하기 때문에, 모든 구조요소의 파괴에 대하여 한계상태를 정의하고 파손확률을 추정하는 것은 효율적이지 않을 수 있다. 여기서는 지진 발생시 가장 위험한 파괴 원인이라 할 수 있는 주탑의 과도한 전도모멘트에 의한 파손이 전체 사장교의 파괴를 지배하는 것으로 가정하고 이에 대한 한계상태를 정의하였다. 이러한 가정을 통해 준능동 감쇠장치의 경제적 효율성을 평가하기 위한 과정을 간략화 할 수 있다.

임의의 지진구역에 건설되는 사장교에 대하여 제어시스템의 비용효율성을 평가하기 위해서는 지진하중의 특성에 따라 사장교의 설계변수가 변화하기 때문에 주탑 단면형상이나 철근 배근 등의 설계상세에 따라 계산되는 특정한 값의 전도모멘트값으로 한계상태를 정의하여야 한다. 그러나 이 연구에서는 특정한 지진구역에 이미 건설된 사장교에 대하여, 그에 작용하는 지진하중의 규모와 주파수 특성에 따른 준능동 제어 시스템의 비용효율성을 평가하는 것이 목표이므로, 정해진 하중 수준에 대하여 일정한 파괴확률을 가지도록 하는 모멘트값을 한계상태로 정의하는 것으로도 합리적인 결과를 도출할 수 있다. 이는 대부분의 교량이 일정한 수준의 신뢰도를 가지도록 설계되기 때문이다. 여기서는 준능동 감쇠장치가 장착되지 않은 교량에 대하여 SPC B의 지반조건 II인 지역에 발생하는 지진에 의한 파괴확률이 1/1000이 되는 주탑 하부 전도모멘트값을 한계상태값으로 정의하였다.

4.2 파괴확률 산출

파괴확률은 앞서 정의된 한계상태를 양의 기울기로 넘어서는 단위시간당의 빈도수로부터 추정될 수 있다⁽²⁸⁾. 응답이 정규분포를 따르는 것으로 가정할 수 있을 경우, 응답의 한계상태 초과빈도수는 그 평균과 표준편차 값으로부터 간단히 계산될 수 있다. 이 문제의 경우 준능동 제어장치가 선형 시스템이 아니므로 출력 응답의 정규분포가 수학적으로 보장되지는 않는다. 따라서 충분한 회수의 시뮬레이션을 통해 출력 응답의 분포가 정규분포를 따름을 가정하여도 타당할 것인가에 대한 검토를 수행하였다.

무작위변수(random variable)의 확률분포가 정규분포 혹은 특정 확률분포를 따르는지 여부를 판별하기 위한 방법으로는 확률지(probability paper)를 사용하는 방법, chi-square(χ^2) 테스트 방법, Kolmogorov-Smirnov(K-S) 테스트 방법 등이 있다.⁽³⁴⁾ 확률지를 사용하는 방법은 검증 대상이 되는 확률분포가 직선으로 표현되는 확률지에 무작위변수(random variable)의 누적 빈도를 도시하고 그 선형성 여부를 시각적으로 판별하는 방법이다. 이 방법은 간단하게 확률분포 가정을 검증할 수는 있으나 적합성 여부의 정량적인 평가 기준은 없다. 한편, chi-square(χ^2) 테스트 방법과 Kolmogorov-Smirnov(K-S) 테스트 방법은 무작위변수의 확률분포가 특정 확률분포를 따른다는 가정을 검증하기 위한 통계학적 방법으로서, 임의 유의수준에 대하여 테스트의 통과 여부를 정량적으로 판별할 수 있는 방법이다. 여기서는 확률지를 사용하는 방법을 통해 준능동 제어장치가 장착된 사장교 지진응답의 확률분포가 정규분포를 따르게 될 가능성을 확인하고, Kolmogorov-Smirnov(K-S) 테스트를 통해 그 가정을 검증하였다.

그림 8은 주탑 하부 모멘트응답의 확률분포를 나타내는 그래프이다. 그림을 통해 응답의 확률분포가 거의 정규분포를 따르는 것을 볼 수 있다. 그림 9는 확률지를 이용한 검증결과로서, SPC B의 지반종류 II에 해당하는 설계응답 스펙트럼에 상응하는 300개의 인공지진시간이력을 생성하고 시간이력 해석을 통해 얻어진 주탑 하부 모멘트응답의 누적빈도를 정규분포 확률지(normal probability paper)에 도시한 결과이다. 누적 빈도가 직선에 가까울수록 응답의 확률분포는 정규분포에 가깝다고 할 수 있으며, 그림을 통해서 볼 때, 확률밀도함수 분포의 꼬리부분에서 약간의 차이가 있으나 대체적으로 선형성을 가지고 있음을 시각적으로 확인할 수 있다. 한편, 앞서 설명한 바와 같이, 이 연구에서 파손확률의 추정에 사용된 방법은 응답의 꼬리부분을 근사함으로써 시뮬레이션을 통해 파손확률을 얻는 기법이 아닌, 초과이론을 적용하여 평균과 표준편차만으로 파손확률을 추정하는 기법이다. 따라서 꼬리부분의 응답이 정확히 모사되지 않는 경우라 하더라도, 그림에서와 같이 응답의 분포가 전반적으로 정규분포와 일치하고, 합리적인 유의수준 내에서 통계학적으로 응답의 정규분포를 가정할 수 있다면, 신뢰할 수 있는 파손확률 값을 얻을 수 있음에

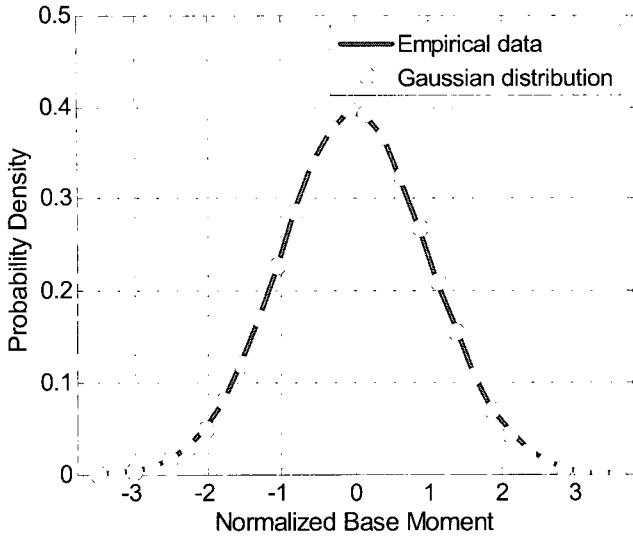


그림 8 정규화된 주탑 하부 모멘트응답의 확률밀도함수

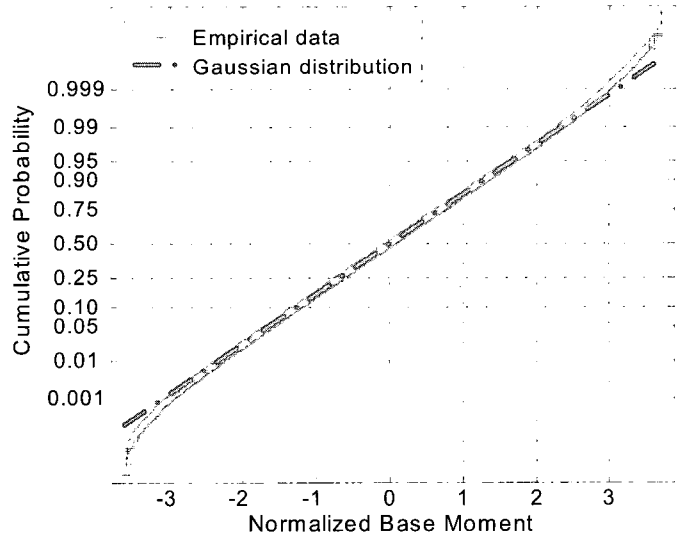


그림 9 확률지(probability paper)를 이용한 주탑 하부 모멘트응답의 확률분포 검증

주목할 필요가 있다.

K-S 테스트에서는 관측된 응답 데이터의 누적빈도와 정규분포의 누적빈도함수간의 차의 최대값을 계산하여 이 값이 표본 수와 유의수준에 의해 결정되는 한계값보다 작으면 가정된 정규분포를 따르는 것이 타당하다고 본다. 이에 따라 주탑 바닥전도모멘트 응답의 누적확률분포와 가정된 정규분포간의 차의 최대값을 계산하면 2.661×10^{-3} 이며, 이 때의 유의수준 5%에 대한 한계값은 2.770×10^{-3} 이다. 따라서 준능동 제어장치가 설치된 사장교의 주탑 하부 모멘트응답은 정규분포를 따른다는 가정은 타당하다고 할 수 있다.

정규분포를 가정할 수 있는 주탑 하부 모멘트응답 M_b 가 단위시간 동안 한계상태 M_{lim} 를 양의 기울기로 넘어설 빈도수는 Rice가 제안한 식에 의하여 다음의 식 (3)과 같이 나타내어진다.⁽³⁵⁾

$$\nu_{M_b}^+ = \int_0^{\infty} \dot{M}_b p(M_b = M_{lim}, \dot{M}_b) d\dot{M}_b = \int_0^{\infty} \dot{M}_b p(M_{lim}, \dot{M}_b) d\dot{M}_b \quad (3)$$

여기서, $\nu_{M_b}^+$ 는 주탑 하부 모멘트응답이 단위시간 동안 양의 범위에서 한계상태를 초과할 빈도수이며, $p(M_b, \dot{M}_b)$ 는 M_b 와 \dot{M}_b 의 결합 확률밀도함수(joint probability density function)이다. 앞서의 K-S 테스트에 의해 강진지속시간 t_d 동안의 주탑 하부 모멘트응답은 Gaussian 무작위과정(random process)으로 가정할 수 있으므로, 식 (3)의 결합확률밀도함수는 다음 식과 같이 계산될 수 있다.

$$p(M_{lim}, \dot{M}_b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{M_b}} \exp\left[-\frac{M_{lim}^2}{2\sigma_{M_b}^2}\right] \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\dot{M}_b}} \exp\left[-\frac{\dot{M}_b^2}{2\sigma_{\dot{M}_b}^2}\right] \quad (4)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입함으로써 주탑 하부 모멘트응답이 단위시간 동안 양의 범위에서 한계상태를 초과할 빈도수는 식 (5)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \nu_{M_b}^+ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{M_b}} \exp\left[-\frac{M_{lim}^2}{2\sigma_{M_b}^2}\right] \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\dot{M}_b}} \exp\left[-\frac{\dot{M}_b^2}{2\sigma_{\dot{M}_b}^2}\right] \dot{M}_b d\dot{M}_b \\ &= \frac{\sigma_{M_b}}{\pi\sigma_{M_b}} \exp\left[-\frac{M_{lim}^2}{2\sigma_{M_b}^2}\right] \end{aligned} \quad (5)$$

정규분포를 따르는 무작위과정(random process)이 임의의 시간간격 동안 특정한 한계상태를 넘어서는 사건의 분포는 포와송 분포를 따르는 것으로 가정할 수 있으므로,⁽²⁸⁾ 모멘트응답이 강진 지속시간 t_d 동안 한번이라도 한계상태를 넘어설 확률 P_f 는 다음 식 (6)에 의하여 얻을 수 있다.

$$P_f = 1 - \exp(-\nu_{M_b}^+ t_d) \quad (6)$$

여기서, ν_{M_b} ($= 2\nu_{M_b}^+$)는 주탑 하부 모멘트응답이 단위시간 동안 양과 음의 양쪽 영역에서 한계상태를 넘는 빈도수이다. 일반적으로 식 (6)을 통하여 계산된 P_f 의 값은 정확한 해석하는 아니지만 근사적으로 안전측의 파괴확률값을 제공하기 때문에 실용적인 목적으로 사용하기에 적합한 것으로 알려져 있다.⁽³⁶⁾

다양한 지반운동 특성의 조합에 따른 STU 장착 교량과 준능동 감쇠장치 장착 교량의 주탑 하부 모멘트로 인한 파괴확률 추정 결과를 표 2에 나타내었다. 전반적으로 준능동 제어시스템이 장착된 경우 파괴확률이 현저히 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 연약한 지반조건과 강진규모의 지진특성의 경우에서 상대적으로 높은 파괴확률값을 보인다. 약진 규모의 지진이므로 할 수 있는 SPC A에 해당하는 지반운동의 경우에는 제어시스템이 장착되지 않은 사장교

표 2 지반운동 특성에 따른 제어시 및 비제어시의 주탑 하부 모멘트로 인한 파괴확률

Soil Profile Type	Seismic Performance Category (SPC)							
	A		B		C		D	
	Controlled	Uncontrolled	Controlled	Uncontrolled	Controlled	Uncontrolled	Controlled	Uncontrolled
I	$< 10^{-16}$	1.110×10^{-15}	$< 10^{-16}$	1.434×10^{-4}	7.385×10^{-8}	5.577×10^{-3}	1.381×10^{-5}	2.597×10^{-2}
II	$< 10^{-16}$	2.093×10^{-9}	1.525×10^{-12}	1.000×10^{-3}	1.625×10^{-6}	1.749×10^{-2}	5.764×10^{-4}	5.147×10^{-2}
III	$< 10^{-16}$	2.158×10^{-6}	3.285×10^{-9}	5.801×10^{-3}	8.664×10^{-5}	4.068×10^{-2}	1.918×10^{-3}	4.355×10^{-2}
IV	$< 10^{-16}$	2.163×10^{-7}	2.677×10^{-5}	8.745×10^{-3}	8.124×10^{-4}	4.490×10^{-2}	1.560×10^{-2}	5.088×10^{-2}

에서도 파괴확률이 대단히 낮은 값을 보였다. 반면, 연약한 지반(soil type III, IV)에서 발생한 강진규모(SPC D)의 지진에 대해서는 제어시스템이 장착된 경우에도 비교적 높은 파괴확률값을 가짐을 알 수 있다.

5. 비용효율성 평가

5.1 비용효율성 평가지수

준능동 감쇠장치의 비용효율성을 평가하기 위한 지표로서, 교각과 상부 데크를 STU로 연결한 교량시스템의 생애주기비용 기대값에 대한 준능동 감쇠장치가 장착된 교량시스템의 생애주기비용 기대값의 비를 비용효율성 평가지수로 정의하였다. 지진 위험에 대한 대상 구조물의 생애주기비용은 식 (7)로 정식화할 수 있다.

$$E[C_T] = C_I + E[C_D]$$

$$= C_I + C_D(r_1 P_1 + r_2 P_2 + \dots + r_k P_k) \frac{\nu}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_{life}))$$

(7)

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 나타낸다.

STU를 장착한 교량시스템의 지진 위험에 대한 생애주기비용 기대값은 식 (8)로 표현되며,

$$E[C_T]_{non} = C_I + C_D \bar{r} \bar{P}_f \frac{\nu}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_{life}))$$

(8)

준능동 감쇠장치가 장착된 시스템의 생애주기비용 기대값은 식 (9)로 정의된다.

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

(9)

여기서, C_{SAD} 는 준능동 감쇠장치의 가격, $\bar{P}_{f,SAD}$ 는 준능동 감쇠장치 장착 구조계의 파괴확률 벡터를 의미한다.

따라서, 비용효율성 평가지수(J_s)는 두 시스템간 생애주기비용의 상대적인 비를 나타내는 식 (10)으로서 나타낼 수 있다. 정의에 따르면 비용효율성 평가지수가 높을수록 준능동 감쇠장치는 높은 비용효율성을 가지게 된다.

$$J_s(\alpha, \beta) = \frac{E[C_T]_{non}}{E[C_T]_{SAD}} = \frac{1 + \beta \cdot \bar{r} \bar{P}_f \frac{\nu}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_{life}))}{1 + \alpha + \beta \cdot \bar{r} \bar{P}_{f,SAD} \frac{\nu}{\lambda} (1 - \exp(-\lambda t_{life}))}$$

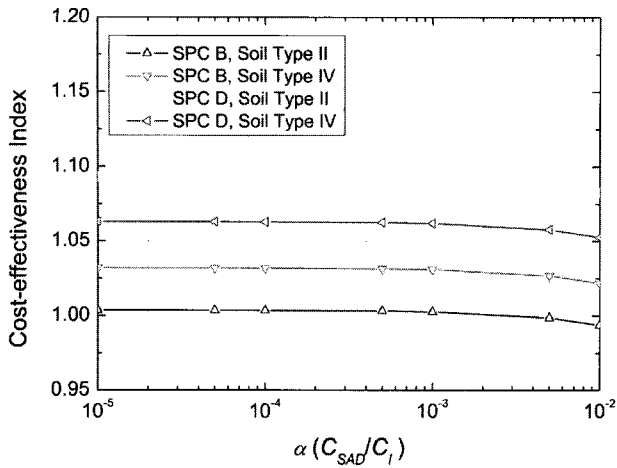
(10)

여기서, $\alpha(=C_{SAD}/C_I)$ 는 초기비용에 대한 준능동 감쇠장치 가격의 비이며, $\beta(=C_D/C_I)$ 는 초기비용에 대한 손상비용 규모의 비이다.

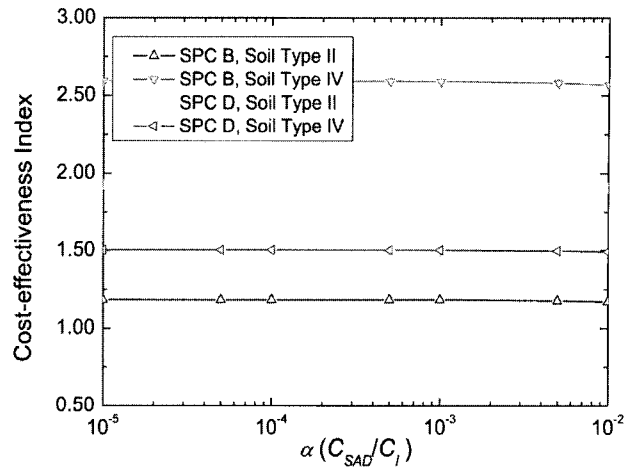
5.2 비용효율성 평가 결과

서론에서 언급한 바와 같이 이 연구에서는 α 와 β 를 매개변수로 하여 사장교에 장착된 제어시스템의 비용효율성 평가연구를 수행하였다. 비용효율성 평가지수 산출을 위한 변수들 중, 연간지진발생빈도(ν)는 0.1이라 가정하였고, 할인율(λ)은 현재의 이자율을 바탕으로 미래의 값을 예측하여 5%의 값을 사용하였으며, 구조물의 생애주기(t_{life})는 50년으로 하였다.

그림 10은 감쇠장치의 가격 변화에 따른 준능동 제어시스템의 비용효율성 변화를 나타낸 그래프이다. 대부분의 지반운동 규모와 지반종류에 대하여 감쇠장치의 가격비는 비용효율성에 큰 영향을 미치지 않는 것을 볼 수 있으며, 비용효율성 평가지수의 값이 전반적으로 1보다 큰 값을 가지는 것으로부터 준능동 제어시스템은 감쇠장치의 가격비와 무관하게 경제적 효율성을 가지는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 10(a)의 결과에서 볼 때, SPC B의 지반종류 II인 지역의 지반운동, 즉 중진지역의 견고한 지반에 해당하는 지반운동에 대해서는 감쇠장치의 가격에 따라 비용효율성이 1.0 주변에서 변화하고 있다. 따라서 교량 시스템의 손상비용규모가 비교적 작은 경우, 중진지역의 견고한 지반에 설치되는 사장교 구조물에 준능동 제어시스템을 설치할 때에는 그 가격에 따른 경제적 효율성에 근거하여 설치 여부를 면밀히 검토하여야 할 필요가 있을 것이다.



(a) $\beta = 10$



(b) $\beta = 100$

그림 10 감쇠장치 가격비(α)에 따른 준능동 제어시스템의 비용효율성

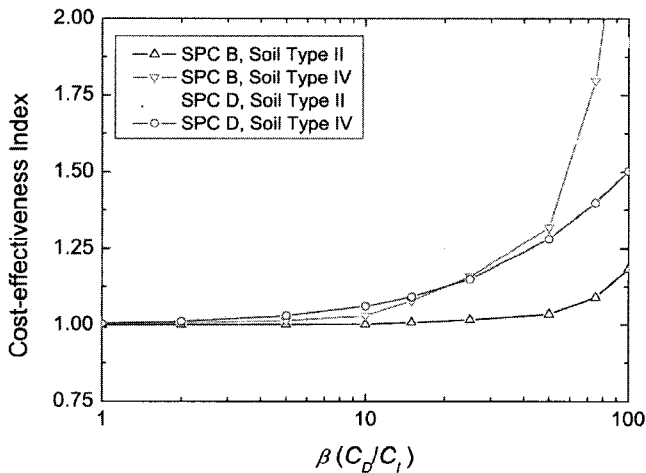


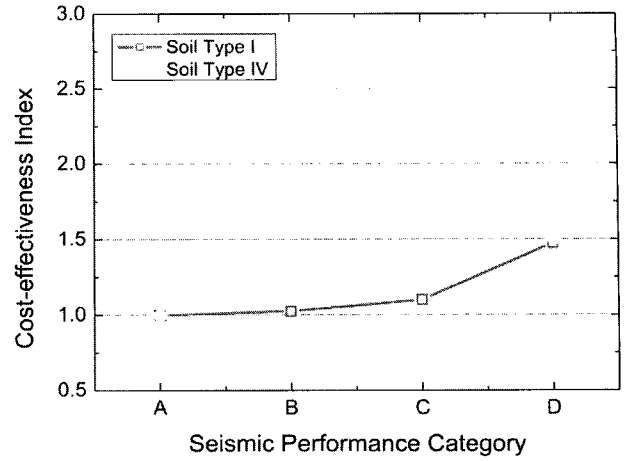
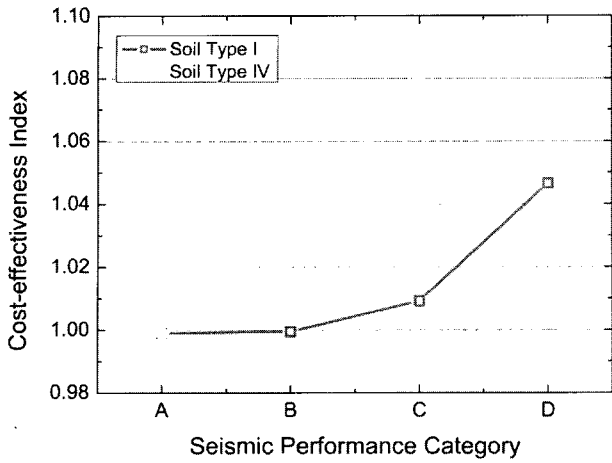
그림 11 손상비용규모(β)의 변화에 따른 준능동 제어시스템의 비용효율성 ($\alpha=0.001$)

감쇠장치의 가격비(α)가 준능동 제어시스템의 비용효율성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타남에 따라 손상비용규모(β)의 변화에 따른 민감도 분석은 고정된 하나의 대표적인 α 값에 대하여 수행하였다. 그림 11은 $\alpha=0.001$ 인 경우, 즉 초기비용에 대한 감쇠장치의 가격비가 0.1%인 경우에 대하여 손상비용 규모의 변화에 따른 준능동 제어시스템의 비용효율성 변화를 나타낸 그래프이다. 감쇠장치의 가격비와는 달리, 손상비용 규모는 제어시스템의 비용효율성에 대단히 민감한 변수로 작용하며, 손상비용 규모가 증가함에 따라 제어시스템의 비용효율성이 급격히 높아지는 것을 볼 수 있다. 이는 교량의 파괴로 인한 손상비용의 규모가 클수록, 즉 교량 구조물의 사회적 중요도가 커질수록 준능동 제어시스템의 비용효율성이 현저히 증가함을 나타내는 결과이다. 구체적인 지진특성에 따른 비용효율성의 민감도를 살펴보면, SPC B의 지반종류 II인 지역의 지반운동, 즉 중진지역의 견고한 지반에 해당하는 지반운동에 대해서는 손상비용 규모의 변화에 그다지 민감하지 않은 편이나, 그 외의 경우, 특히 중진지역의 연약지반에 해당하는 지반운동에 대해서는 손상비용규모의 변화에

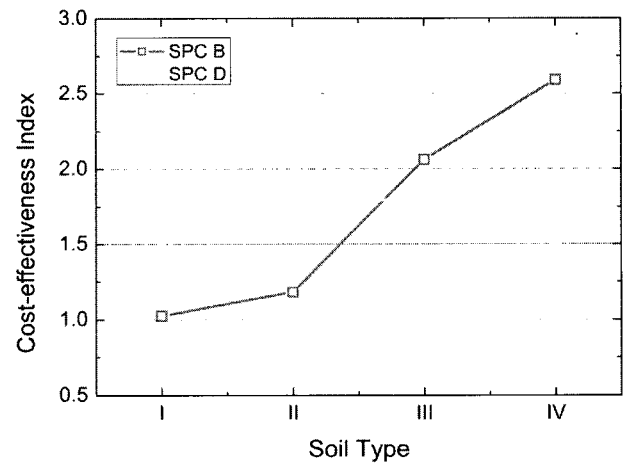
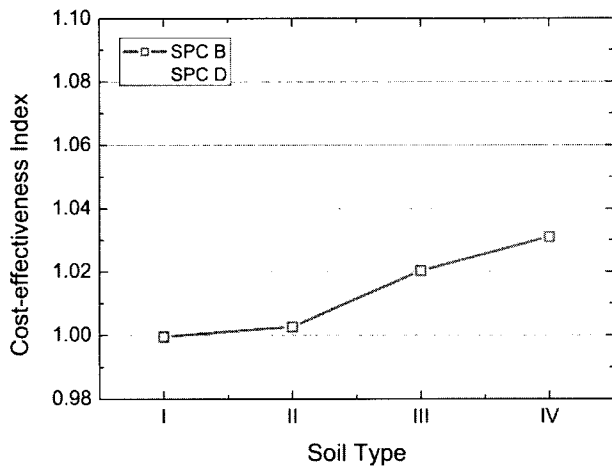
따라 비용효율성이 대단히 민감하게 변화하는 것으로 나타났다. 따라서 중진지역의 연약한 지반에 건설되는 사장교 구조물에 준능동 감쇠장치를 설치하는 경우에 대하여 비용효율성을 평가하고자 할 때에는, 지진 발생에 따른 구조물의 파괴로 인한 사회적 손실에 대한 평가가 특별히 신중하게 검토되어야 할 필요가 있다.

지반운동의 규모에 따른 준능동 제어시스템의 비용효율성 평가 결과는 그림 12(a) 및 12(b)에 나타내었다. SPC A에 해당하는 지역, 즉 약진지역에서 발생 가능한 지진에 대해서는 연약한 지반과 견고한 지반에서 모두 준능동 제어시스템이 경제적 효율성을 갖지 못하였다. 이는 제어시스템을 장착하지 않은 경우에도 구조물의 파손확률이 충분히 낮아서, 큰 규모의 지진이 발생한 경우에 비하여 제어시스템으로 인한 파손확률 감소의 효과가 상대적으로 작기 때문이다. 견고한 지반에서는 지반운동의 규모가 커질수록 제어시스템의 비용효율성이 증가하는 경향을 보였으며, 이는 큰 규모의 지진이 발생할 경우 일반적으로 준능동 제어장치의 장착으로 인한 파손확률의 감소 효과가 상대적으로 커지기 때문이다. 한편, 연약한 지반에서 손상비용의 규모가 작을 때, 즉 $\beta=10$ 일 때에는 강진규모의 지진에 대한 비용효율성이 SPC C에 해당하는 중진규모의 지진하중에 비하여 낮게 평가되었으며, 손상비용 규모가 클 때, 즉 $\beta=100$ 일 때에는 강진규모의 지진에 대한 비용효율성이 중진규모에 해당하는 SPC B와 C 모두에 비하여 낮은 것으로 나타났다. 이는 이 연구에서 사용된 제어장치 용량의 한계로 인해, 강진 규모의 장주기 성분을 많이 포함하는 지반운동에 대해서는 준능동 제어시스템의 지진응답 제어 효과가 상대적으로 줄어들기 때문인 것으로 판단된다.

지진발생지역의 지반종류에 따른 준능동 제어시스템의 비용효율성 평가 결과는 그림 13(a)와 13(b)에 나타내었다. 중진지역에서 발생 가능한 지진에 대해서는 지반이 연약할수록 높은 비용효율성을 보였다. 이는 중진 규모의 지진에 대해서는 장주기 성분이 많이 포함된 주파수 특성을 가지는 지반운동에 대하여 준능동 제어시스템의 지진응답



(a) $\beta=10$ (b) $\beta=100$
 그림 12 지반운동 규모에 따른 준능동 제어시스템의 비용효율성 ($\alpha=0.001$)



(a) $\beta=10$ (b) $\beta=100$
 그림 13 지반종류에 따른 준능동 제어시스템의 비용효율성 ($\alpha=0.001$)

제어효과가 상대적으로 뛰어나기 때문이다. 강진 규모의 지진에 대해서는 지반조건 III과 IV에 해당하는 연약한 지반일수록 오히려 지반조건 II의 경우에 비하여 비용효율성이 감소하는 경향을 보였는데, 이는 앞서 언급된 바와 마찬가지로 이 연구에서 사용된 준능동 제어장치 용량의 한계로 인하여 발생하는 결과인 것으로 판단된다. 따라서, 이러한 강진 규모의 연약지반에 해당하는 지진특성을 가지는 지역의 사장교 구조물에 대하여 준능동 제어시스템의 설치를 고려하는 경우, 더욱 높은 비용효율성을 얻기 위해서는 준능동 제어장치의 용량을 증가시키는 것이 바람직할 수 있을 것이다.

6. 결 론

사장교의 지진응답제어를 위하여 장착된 준능동 제어시스템의 비용효율성 평가연구를 수행하였다. 다양한 지반운동 규모 및 주파수 성분의 조합에 대하여 준능동 제어시스템의 제어효과와 비용효율성을 평가하기 위하여, 설계응답스펙트럼에 상응하는 인공지진 가속도 시간이력을 생성하였다. 대상교량으로는 Dyke 등에 의하여 제시된 벤치마

크 사장교를 고려하였으며, 준능동 제어시스템의 운용은 LQG 최적제어기법을 이용한 bi-state 제어기법을 이용하였다. 수치해석을 통하여 사장교 시스템의 지진응답을 분석한 결과, 준능동 제어시스템이 전반적인 지진특성에 대하여 효과적인 진동저감능을 발휘함을 확인할 수 있었다.

제어시스템의 비용효율성은 주탑과 데크간 연결을 STU로 고정시킨 사장교 시스템과 주탑과 데크간을 준능동 제어시스템으로 대체한 사장교 시스템의 생애주기비용의 상대적 비로서 평가하였다. 시간이력해석법의 반복수행을 통하여 응답의 통계값을 산출하였으며, 이로부터 한계상태 초과빈도를 얻음으로써 파괴확률을 추정하여 생애주기비용을 산출하였다. 준능동 감쇠기의 비용과 교량의 파괴로 인한 손상비용 규모를 매개변수로서 도입하여 이에 대한 비용효율성의 정성적 평가를 수행하였다. 그 결과, 준능동 제어시스템은 전반적인 지반운동 규모와 지반특성에 대하여 경제적 효율성을 가지는 것으로 나타났으며, 제어시스템의 가격은 비용효율성에 큰 영향을 미치지 않은 반면, 교량의 파괴로 인한 손상비용의 규모는 비용효율성에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

지반운동의 규모에 따른 준능동 제어시스템의 비용효율

성 평가 결과, 약한 규모의 지진에 대해서는 준능동 제어 시스템이 경제적 효율성을 갖지 못하는 것으로 나타났으며, 연약한 지반에서의 중진규모 지진과 견고한 지반에서의 강진규모 지진에 대하여 가장 높은 비용효율성을 보였다. 연약한 지반에서의 강진규모 지진에 대해서는 상대적으로 비용효율성이 낮아지는 결과가 나타났는데, 이는 이 연구에서 사용된 준능동 제어장치 용량의 한계에 기인한다. 따라서, 이러한 지진특성을 가지는 지역의 사장교 구조물에 준능동 제어시스템을 설치하고자 할 때에는 비용효율성의 측면에서 준능동제어장치의 용량이 검토되어야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 서울대학교 교량설계핵심기술연구단을 통한 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업 지원금에 의하여 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Ito, M., Fujino, Y., Narita, N. and Miyata, T., *Cable-stayed bridges—their recent developments and their future*, Elsevier, Amsterdam, 1995.
2. Gimsing, N., editor, *Cable-stayed bridges—past, present and future*, IABSE conference, 1999.
3. Chang, S.P., editor, *Cable-supported bridges—challenging technical limits*, IABSE conference, 2001.
4. Yamaguchi, H. and Ito, M., "Full-scale measurements and structural damping of cable-supported bridges," *Proceedings of international bridge conference - bridges into 21st century*, 1995, pp. 557-564.
5. Larsen, A., editor, *Aerodynamics of large bridges*, Rotterdam, Balkema, 1992.
6. Larsen, A. and Esdahl, S., *Bridge aerodynamics*, Rotterdam, Balkema, 1998.
7. Fujino, Y., Soong, T.T. and Spencer, Jr. B.F., "Structural control—basic concepts and applications," *Proceedings of the ASCE Structures Congress XIV*, 1996, pp. 1277-1287.
8. Housner, G.W., Bergman, L.A., Caughey, T.K., Chassiakos, A.G., Claus, R.O., Masri, S.F., Skelton, R.E., Soong, T.T., Spencer, Jr. B.F. and Yao, J.T.P. "Structural control: past, present, and future," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 9, 1997, pp. 897-971.
9. Symans, M.D. and Constantinou, M.C., "Semi-active control systems for seismic protection of structures: a state-of-the-art review," *Engineer-*

- ing Structures*, Vol. 21, No. 6, 1999, pp. 469-487.
10. Fujino, Y., "Vibration, control and monitoring of long-span bridges—recent research, developments and practice in Japan," *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 58, 2002, pp. 71-97.
11. Spencer, Jr. B.F. and Nagarajaiah, S., "State of the art of structural control," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 7, 2003, pp. 845-856.
12. Kobori, T., "Present and future in seismic response control of civil engineering structures," *Proceedings of the Third World Conference on Structural Control*, Vol. 1, 2002, pp. 9-14.
13. 교량설계핵심기술연구단, "교량해석 및 설계 선진화 - 교량의 응답제어기술 개발", 보고서, 건설교통부, 2004.
14. Spencer, Jr. B.F., Carlson, J.D., Sain, M.K. and Yang, G., "On the current status of magnetorheological dampers: seismic protection of full-scale structures," *Proceedings of 1997 American Control Conference*, Albuquerque, NM, 1997, pp. 458-462.
15. Carlson, J.D. and Spencer, Jr. B.F., "Magnetorheological fluid dampers for semi-active seismic control," *Proceedings of Third International Conference on Motion and Vibration Control*, Vol. III, Chiba, Japan, 1996, pp. 35-40.
16. Fujitani, H., Sodeyama, H., Tomura, T., Hiwatashi, T., Shiozaki, Y., Hata, K., Sunakoda, K., Morishita, S. and Soba, S., "Development of 400kN magnetorheological damper for a real base-isolated building," *Conference on Smart Structures and Materials 2003: Damping and Isolation*, SPIE, Vol. 5057, 2003, pp. 265-276.
17. Yang, J.N., Lin, S. and Jabbari, F., "H₂-based control strategies for civil engineering structures," *Journal of Structural Control*, Vol. 10, No. 3-4, 2003, pp. 205-230.
18. Agrawal, A.K., Yang, J.N. and He, W.L., "Applications of some semiactive control systems to benchmark cable-stayed bridge," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 129, No. 7, 2003, pp. 884-894.
19. Bontempi, F., Casciati, F. and Giudici, M., "Seismic response of a cable-stayed bridge: active and passive control systems (benchmark problem)," *Journal of Structural Control*, Vol. 10, No. 3-4, 2003, pp. 169-185.

20. Iemura, H. and Pradono, M.H., "Application of pseudo-negative stiffness control to the benchmark cable-stayed bridge," *Journal of Structural Control*, Vol. 10, No. 3-4, 2003, pp. 187-203.
21. Wen, Y.K. and Shinozuka, M., "Cost-effectiveness in active structural control," *Engineering Structures*, Vol. 20, No. 3, 1998, pp. 216-221.
22. 고현무, 송준호, "사용기간비용 최소화에 의한 지진격리교량의 경제성 평가", 대한토목학회논문집, 제 19권, 제 I-4호, 1999, pp. 539-550.
23. Koh, H.M., "Cost-effectiveness analysis for seismic isolation of bridges," keynote lecture, *Proceedings of the Third World Conference on Structural Control*, Como, Italy, Vol. 1, 2002, pp. 69-83.
24. 박관순, 함대기, 고현무, "생애주기비용 최소화에 의한 점탄성감쇠기 장착 빌딩구조물의 통합최적설계 및 비용효율성 평가", 한국지진공학회논문집, 제 9권, 제 2호, 2005, pp. 17-27.
25. Ang, A.H.-S. and Leon, D.D., "Determination of optimal target reliabilities for design and upgrading of structures," *Structural Safety*, Vol. 19, No. 1, 1997, pp. 91-103.
26. Stewart, M.G., "Reliability-based assessment of ageing bridges using risk ranking and life cycle cost decision analyses," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 74, 2001, pp. 263-273.
27. 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.
28. Newland, D.E., *Random vibrations, spectral & wavelet analysis*, Longman Scientific & Technical, 1994.
29. Chopra, A.K., *Dynamics of Structure: theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 2001.
30. AASHTO, *Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Ed.*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2002.
31. 고현무, 박관순, 송준호, "유체-구조물 상호작용을 고려한 지진격리 수조구조물의 비용효율성 평가", 대한토목학회논문집, 제 20권, 제 2-A호, 2000, pp. 201-215.
32. Shinozuka, M. and Deodatis, G., "Simulation of stochastic processes by spectral representation," *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 44, No. 4, 1991, pp. 191-203.
33. 박관순, 고현무, 옥승용, 서충원, "퍼지관리제어기법을 이용한 사장교의 지진응답제어", 한국지진공학회논문집, 제 8권, 제 4호, 2004, pp. 51-62.
34. Ang, A.H.-S. and Tang, W.H., *Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Vol I - Basic Principles*, John Wiley & Sons, NY, 1975.
35. Rice, S.O., "Mathematical analysis of random noise," *Selected Papers on Noise and Stochastic Processes*, Dover, NY, 1954, pp. 133-294.
36. Roberts, J.B. and Spanos, P.D., *Random vibration and statistical linearization*, John Wiley & Sons, West Sussex, England, 1990.