

복합감쇠기를 이용한 장대교량의 내진성능향상

Improvement of Seismic Performance of Long-span Bridges using Complex Dampers

하동호¹⁾ · 박관순²⁾ · 박원석³⁾ · 편무욱⁴⁾

Ha, Dong-Ho · Park, Kwan-Soon · Park, Won-Suk · Pyeon, Mu-Wook

국문 요약 >> 이 연구에서는 작용하는 하중특성에 따라 적절한 감쇠력을 발휘할 수 있는 복합감쇠기(complex damper)를 제안하고 그 유용성을 장대교량의 지진응답해석을 통하여 검토하였다. 제안한 복합감쇠기는 두개 이상의 탄소성감쇠기(elasto-plastic damper)와 오일 감쇠기(oil damper)의 조합에 의하여 구성되며, 탄소성감쇠기의 변위의존적인 특성과 오일감쇠기의 속도의존적인 특성을 적절히 결합함으로써 효율적인 감쇠시스템의 구성이 가능하게 하였다. 중소형의 지진이나 작은 진폭의 진동에서는 오일감쇠기가 주로 진동을 흡수하며, 발생 빈도가 낮으나 규모가 큰 지진 등에 대해서는 탄소성 감쇠기가 진동에너지를 흡수한다. 이와 같이 복합감쇠기는 두 가지 종류의 감쇠기 역할을 잘 구분시켜 경제적이고 제진효율성이 뛰어난 설계를 가능하게 한다. 복합감쇠장치의 수학적 모델을 정립하였고, 수치모사를 통하여 응답특성과 효율성을 평가하였다. 수치모사 결과, 복합감쇠기는 단일의 수동형감쇠기를 이용하는 경우보다 뛰어난 감쇠효과를 더욱 경제적으로 구현할 수 있으며 내진성능을 크게 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

주요어 장대교량, 복합감쇠기, 진동에너지, 내진성능

ABSTRACT >> This paper presents a new vibration control method for long-span bridges using complex damper system. The new system presents simple mechanical configuration with oil and elasto-plastic dampers which have velocity and displacement dependency in vibration energy absorbing. This system can produce various damping forces according to the applied external forces by the velocity and displacement-dependent characteristics of the dampers. The oil damper dissipates vibration energy for relatively frequent and small amplitude like in the case for small to moderate earthquakes, whereas the elasto-plastic damper system works for rare and large amplitude vibration such as high seismic excitation. Thus, the proposed system exhibits the advantage of low cost with high performance since the roles of the two different dampers are effectively separated. A numerical model is established for the complex damper system, and the response characteristics and effectiveness of the proposed system are presented through numerical simulations. Numerical results show that the proposed complex damper system can significantly improve the seismic performance of long-span bridge structures with much more effective damping mechanism than single conventional passive damper systems.

Key words long-span bridges, complex damper, vibration energy, seismic performance

1. 서론

현대건설기술을 뒷받침하는 재료의 발달과 설계기술, 시공기술 등의 향상으로 유연하고 날렵한 형태의 초장대교량의 건설이 크게 증가하고 있으며, 장대교량들은 경제성이

뛰어날 뿐만 아니라, 수려한 미관으로 인하여 새로운 경관을 만드는 문화관광 산업의 한 부분으로서도 자리잡아가고 있다. 장대교량으로 대표되는 사장교, 현수교 등의 교량들은 날렵하고 긴 주탑, 가늘고 긴 케이블 등의 구조적인 특성상 고유주기가 길고 감쇠비가 매우 작아서 진동이 쉽게 발생하고, 발생한 진동은 오랫동안 지속된다. 특히, 최근 빈번해지고 있는 지진과 태풍 등의 자연재해로 인해 구조물의 붕괴 사고 및 그로 인한 경제적 손실이 증가함에 따라, 전 세계적으로 구조물의 안정성을 확보하려는 구조제어시스템에 대한 관심이 증폭되고 있으며, 장대교량에는 동적응답을 저감하기 위한 방안으로서 부가적인 감쇠장치(damping devices)를 이용하여 감쇠성능을 향상시키는 경우가 많다. 최근에는,

¹⁾ 정회원 · 건국대학교 토목공학과 조교수

(대표지자: hadongho@konkuk.ac.kr)

²⁾ 정회원 · 동국대학교 건축공학과 조교수

³⁾ 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 선임연구원

⁴⁾ 건국대학교 토목공학과 부교수

본 논문에 대한 토의를 2007년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2007. 3. 20 / 심사종료일 : 2007. 4. 9)

대형 유압가진기(hydraulic actuator)와 대규모의 전력을 동원한 능동제어기법(active control technique)도 이론적인 연구가 활발히 진행되고 있다⁽¹⁾. 그러나, 능동제어기법이 교량에 적용되는 경우에는 제어를 위한 센서장치, 연산장치 등의 복잡한 전기전자 기기 이외에도 항시 사용 가능한 대규모의 전력과 고가의 대형 유압가진기를 필요로 하는 등, 경제적인 문제로 인하여 아직은 실제 교량에의 적용이 극히 제한적이다. 이러한 단점을 극복하고자 작은 전력으로도 작동이 가능한 준능동형 감쇠장치(semi-active damping devices)의 적용성에 대하여 많은 관심을 갖고 연구가 진행 중이다^(2,3). 특히, 적용성이 높을 것으로 알려진 MR감쇠기(magneto-rheological damper)는 여러 연구자들에 의하여 이론적, 실험적 연구가 적극적으로 진행된 바 있다⁽⁴⁻⁶⁾. 그러나 MR감쇠장치와 같이 작은 전력을 사용하는 경우에도 제어를 위한 감지장치, 연산장치 등의 복잡한 전기전자 기기가 실외에서 장기간 신뢰성 높게 그 기능을 수행하도록 유지 관리되어야 할 뿐 아니라, 아직까지도 실제 적용을 하기에는 시스템 자체의 구성에 적지 않은 비용이 요구된다. 한편, 일반적으로 사용 가능한 수동형감쇠기들(passive dampers)은 고려의 대상이 되는 작용하중의 크기에 따라서 설계하게 되는 데, 빈도는 높으나 크기가 작은 동적하중과 빈도는 낮으나 피해규모가 큰 대규모의 지진하중 사이에서 적합한 설계점(design point)을 찾기가 어려운 실정이다. 그러므로 실용적인 측면을 고려한다면, 능동형이나 준능동형 제어장치와 같이 교량의 진동상태 및 가진력의 특성에 따라 감쇠특성을 변화시킬 수 있는 장점, 즉, 외부하중의 환경에 적응하여 적절한 감쇠력을 발휘하면서도 구성이 간단하고 유지관리가 손쉬운 경제적인 제진장치의 개발이 절실한 시점이라고 하겠다.

이 연구에서는 능동제어장치나 준능동제어장치 보다 구성이 간단하면서도 작용하는 하중에 따라 감쇠력을 다르게 발휘할 수 있는 수동형감쇠장치의 일종인 복합감쇠기(complex damper)를 제안하였다. 복합감쇠기는 오일감쇠기(oil damper)와 탄소성감쇠기(elasto-plastic damper)의 조합에 의하여 구성되는 것으로, 중소규모의 지진하중 및 풍하중 상태에서는 경제적인 효율성을 고려하여 오일감쇠기의 감쇠력을 이용하고, 대규모의 지진에 대해서는 큰 항복하중 및 에너지 흡수능력을 가진 탄소성감쇠기를 이용함으로써, 경제적이고 실용성 높은 감쇠력을 제공하게 된다. 제안하는 제어장치의 효율성을 평가하기 위하여, 복합감쇠기를 사장교에 적용하고 수치모사를 통하여 지진응답해석결과를 단일 종류의 감쇠기가 이용된 경우와 비교하였다. 수치모사 결과, 복합감쇠기는 단일의 수동형감쇠기를 이용하는 경우보다 매우 효과적인 감쇠효과를 경제적으로 구현할 수 있으며 내진성능을

크게 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

2. 복합감쇠기

2.1 개요

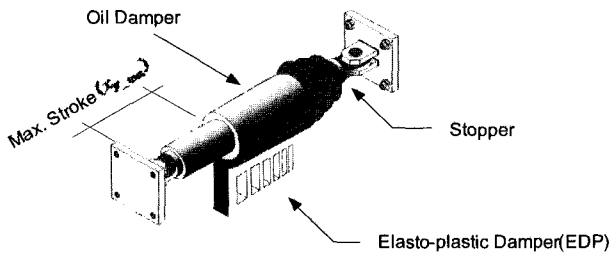
최근 들어 유체를 이용한 감쇠장치를 대형 구조물에 설치하여 진동저감효과를 얻고자 하는 많은 연구와 적용이 이루어지고 있다⁽⁷⁾. 유체를 이용한 감쇠기에는 유체의 점성에 의존하여 에너지를 흡수하는 점성감쇠기와 각종 밸브로 유체의 흐름을 제어하여 에너지를 흡수하는 오일감쇠기 등이 있다. 일반적으로 유체의 점성은 온도에 따라 변화가 심하지만, 오일감쇠기는 유체의 점성에 의존하지 않고 온도 의존성이 낮으므로, 점성감쇠기에 비하여 감쇠특성을 다양하게 구현할 수 있다.

오일감쇠기의 내부에는 감쇠밸브, 유압제어밸브, 유류방향제어밸브, 유속제어밸브 등이 설치되어 이들의 복합적인 역할에 의하여 여러가지 이력특성을 재현한다. 오일댐퍼의 비용은 주로 최대감쇠력, 최대속도, 충스트로크에 의하여 결정되나, 부품의 개수가 많고, 내부구조도 복잡하여 상대적으로 고가이다. 따라서, 빈도가 낮은 최대지진하중 및 최대풍하중 등의 규모와 최대성능의 사용빈도를 고려할 때, 오일댐퍼만을 대형구조물에 적용하는 것은 매우 비경제적이라고 할 수 있다.

한편, 탄소성감쇠기는 상대적으로 저가의 금속으로 만들어지고, 재료의 이력변형에 의한 에너지흡수를 이용하여 진동을 줄이는 감쇠기이다. 탄소성감쇠기는 소재, 형상 등에 따라 다양한 장치가 있다. 대표적인 제품으로는 연철의 휨 혹은 비틀림에 의한 항복시의 에너지 흡수를 이용한 Flexural Mild Steel Damper, Torsional Mild Steel Damper, 납의 전단 혹은 압출에 의한 항복시의 에너지 흡수를 이용한 Lead Flexural Damper, Lead Extrusion Damper 등이 있으며, 최근에는 초저항복점강재를 이용한 장치도 개발되고 있다⁽⁹⁻¹³⁾. 이러한 장치들은 대규모의 진동에 효과적으로 작용하나 이력변형에 의하여 진동에너지를 흡수하게 되므로 잔류변형(residual strain)이 남는다는 단점이 있다.

이 연구에서는 오일감쇠기와 탄소성감쇠기의 특성을 이용하여 각각의 장점을 살린 복합감쇠기를 제안하였다. 제안하는 복합감쇠기는 그림 1과 같이 오일감쇠기, 탄소성감쇠기, 변위제한장치(stopper)의 조합에 의해 구성된다.

이렇게 두 종류의 감쇠기가 결합된 복합감쇠기는 오일감쇠기의 속도의존성과 탄소성감쇠기의 변위의존성을 동시에 가지고 진동에너지를 흡수한다. 주요 장점은 두 가지 종류



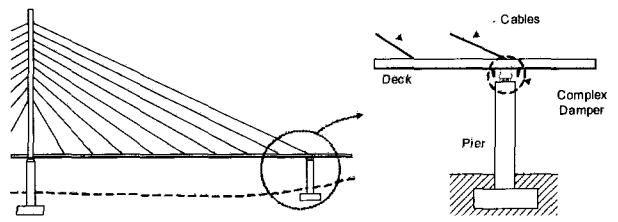
〈그림 1〉 복합감쇠기의 구성도

의 감쇠기의 역할을 잘 구분시켜 경제적인 설계를 가능하게 한다는 것이다. 즉, 중소형의 지진, 소진폭의 진동 및 저속의 빈번한 진동에 대해서는 오일감쇠기가 효과적으로 진동을 제어하며, 발생 빈도가 낮은 큰 지진 및 대진폭의 진동에 대해서는 사이클당 에너지 흡수량이 크고 상대적으로 저렴한 탄소성감쇠기로 대비한다. 만약, 대형 탄소성감쇠기를 단독으로 사용할 시에는 소규모 지진이나 저진폭의 풍하중에는 대비할 수 없다는 단점이 있으나, 제안한 복합감쇠기는 폭넓은 진동범위에서 효율적으로 진동에너지를 흡수할 수 있다. 또한, 진동변위가 오일감쇠기의 스트로크 한계치를 넘어서는 경우나 변위속도가 오일감쇠기의 성능을 초과하는 경우에도 탄소성감쇠기로 그 진동을 효율적으로 제어하는 것이 가능하며, 탄소성감쇠기의 변형은 오일감쇠기에 과대한 힘이 작용하여 감쇠기가 손상되는 것을 방지한다. 이 때의 과대한 변위는 변위제한장치(stopper, 그림 1)에 의하여 제한되어 오일댐퍼를 보호하게 된다. 위와 같이 복합감쇠기는 제진효율성과 경제성을 함께 확보할 수 있는 특징이 있다. 또한 오일감쇠기를 준능동감쇠기로 대체하는 경우에는 보다 효율성 높은 진동제어시스템을 구성할 수도 있을 것으로 기대된다.

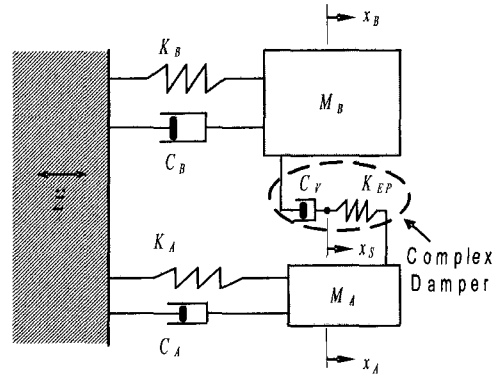
2.2 복합감쇠기의 역학적 모델링

제안하는 복합감쇠기는 교량과 교각의 사이에 그림 2와 같이 설치가 되며 이를 단순화하여 2자유도 시스템으로 모델링 하면 그림 3과 같이 표현할 수 있다.

그림 3에서, M_B, K_B, C_B 는 각각 교량의 질량, 강성, 감쇠계수를 나타내며, M_A, K_A, C_A 는 각각 양측 단부교각의 질량, 강성, 감쇠계수를 나타낸다. x_B 는 교량의 지반에 대한 상대변위, x_A 는 단부교각의 지반에 대한 상대변위, x_S 는 두감쇠기 연결부의 지반에 대한 상대변위, C_V 는 오일감쇠기의 감쇠계수, K_{EP} 는 탄소성감쇠기의 1차강성, \ddot{z} 는 지반가속도를 나타내며 그림 5로 표현된 시스템의 운동방정식은 오일감쇠기의 상태에 따라 다음의 2가지 경우로 나누어 고려할 수 있다.



〈그림 2〉 교량의 상판과 단부교각의 사이에 설치된 복합감쇠기



〈그림 3〉 복합감쇠기를 적용한 2자유도모델

2.2.1 오일감쇠기의 변위가 최대치 이하인 경우

이는 복합감쇠기의 변위제한장치가 작동하지 않아 감쇠기의 피스톤이 자유롭게 움직일 수 있는 상태를 의미하며, 탄소성감쇠기는 오일감쇠기의 감쇠력을 전달받아 교각으로 다시 전달하는 역할을 한다. 이때 탄소성감쇠기는 탄성적으로 혹은 소성적으로 변형하게 되며, 탄소성감쇠기에 작용하는 힘은 식 (1)로 쓸 수 있다.

$$F_{EP} = F_{oil} = C_V \times V_P \tag{1}$$

여기서, F_{EP} : 탄소성감쇠기에 작용하는 힘

F_{oil} : 오일감쇠기에 작용하는 힘

V_P : 피스톤의 변위속도

또한, 탄소성감쇠기의 힘-변위 관계가 이중선형(bilinear) 특성을 가지며, 항복 후 강성이 0일 때, 피스톤의 최대변위속도는 식 (2)와 같이 결정된다.

$$(V_P)_{max} = F_o / C_V \tag{2}$$

여기서, $(V_P)_{max}$ 는 피스톤의 최대변위속도, F_o 는 탄소성감쇠기의 항복하중이다. 즉, 오일감쇠기에 작용하는 최대하중의 크기가 탄소성감쇠기의 작용력에 의하여 결정된다.

이때, $x_{v, max}$ 를 최대스트로크(그림 1), F 를 복합감쇠기의 감쇠력이라 하면, $(x_B - x_S)$ 가 오일감쇠기의 변위가 되므로, 탄소성감쇠기의 작용력 $K_{EP}(x_S - x_A)$ 는 복합감쇠기의 감쇠력 $C_V(\dot{x}_B - \dot{x}_S)$ 와 동일하게 된다. 따라서, 그림 3의 시

시스템에 대하여 운동방정식을 식 (3), (4), (5), (6)으로 표시할 수 있으며,

$$|x_B - x_S| < x_{v_max} \tag{3}$$

$$M_B \ddot{x}_B + C_B \dot{x}_B + K_B x_B + F = -M_B \ddot{z} \tag{4}$$

$$M_A \ddot{x}_A + C_A \dot{x}_A + K_A x_A - F = -M_A \ddot{z} \tag{5}$$

$$F = K_{EP}(x_S - x_A) = C_V(\dot{x}_B - \dot{x}_S) \tag{6}$$

식 (6)을 이용하면 다음 식 (7)이 유도되며,

$$\dot{x}_S = \dot{x}_B - \frac{K_{EP}}{C_V}(x_S - x_A) \tag{7}$$

식 (4), (5), (7)을 행렬형태로 표현하면, 식 (8)과 같은 행렬형태의 미분방정식이 얻어진다.

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \dot{x}_B \\ x_B \\ \dot{x}_S \\ x_S \\ \dot{x}_A \\ x_A \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_B}{M_B} & -\frac{K_B}{M_B} & -\frac{K_{EP}}{M_B} & 0 & \frac{K_B}{M_B} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -\frac{K_{EP}}{C_V} & 0 & \frac{K_{EP}}{C_V} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{EP}}{M_A} & -\frac{C_A}{M_A} & -\frac{K_A + K_{EP}}{M_A} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{M_A}{0} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_B \\ x_B \\ x_S \\ x_S \\ x_A \\ x_A \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\ddot{z} \\ 0 \\ 0 \\ -\ddot{z} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{8}$$

2.2.2 오일감쇠기의 변위가 최대값에 이른 경우

변위제한장치로 인하여 오일감쇠기의 피스톤이 한쪽 방향으로 움직일 수 없는 상태, 즉 제한된 방향으로 오일감쇠기가 감쇠력을 제공하지 못하는 상태를 의미하며, 교각과 거더사이의 상대변위 증가분은 모두 탄소성감쇠기에 발생하는 변위와 같아진다. 이때, 그림 3로 표현되는 시스템의 운동방정식은 식 (9)~식 (13)과 같다.

$$|x_B - x_S| = x_{v_max} \tag{9}$$

$$M_B \ddot{x}_B + C_B \dot{x}_B + K_B x_B + F = -M_B \ddot{z} \tag{10}$$

$$M_A \ddot{x}_A + C_A \dot{x}_A + K_A x_A - F = -M_A \ddot{z} \tag{11}$$

$$F = K_{EP}(x_S - x_A) \tag{12}$$

$$\dot{x}_S = \dot{x}_B \tag{13}$$

교량의 운동방정식, 식 (10), (11), (13)을 행렬형태로 표현하면, 아래의 식 (14)와 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \dot{x}_B \\ x_B \\ \dot{x}_S \\ x_S \\ \dot{x}_A \\ x_A \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_B}{M_B} & -\frac{K_B}{M_B} & -\frac{K_{EP}}{M_B} & 0 & \frac{K_B}{M_B} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_{EP}}{M_A} & -\frac{C_A}{M_A} & -\frac{K_A + K_{EP}}{M_A} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \frac{M_A}{0} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_B \\ x_B \\ x_S \\ x_S \\ x_A \\ x_A \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -\ddot{z} \\ 0 \\ 0 \\ -\ddot{z} \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \tag{14}$$

3. 수치모사

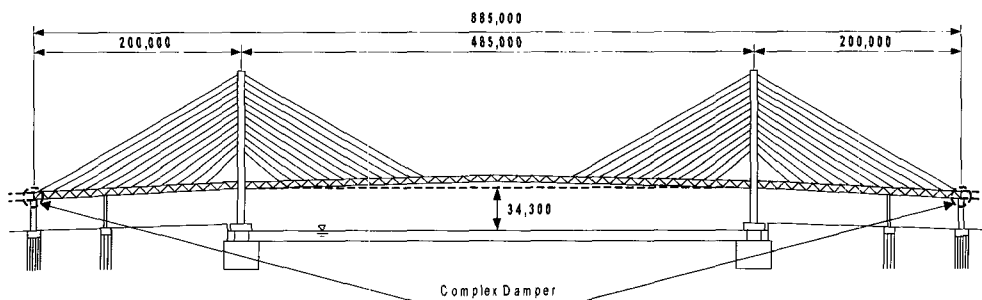
3.1 해석대상교량

제안한 복합감쇠기의 제진성능과 효율성을 검증하기 위하여 장대교를 대상으로한 해석을 수행하였다. 해석교량은 사장교인 Higashi Kobe Bridge를 대상으로 하였다(그림 4).

Higashi Kobe Bridge는 주형을 케이블로만 지지한 자유단(all-free)형식으로 고유주기가 4.4초에 달하였으며, 단부교각에 Vane Damper를 설치하는 등, 우수한 내진성능을 확보하도록 설계 시공되었다. 그러나, 1995년의 고베지진에서 설계지진을 초과하는 지진동으로 손상이 발생하였다⁽¹⁴⁾. 당시 개발되어 적용된 Vane Damper는 세계최대규모의 것으로 상당한 기술적 경제적 비용이 소요되었다. 이 연구에서는 제안한 복합감쇠기의 효율성을 확인하고자, 원래 사장교의 단부교각에 설치된 Vane Damper대신에 복합감쇠기가 설치된 모델의 해석을 수행하였다(그림 4). 사장교는 거의 완전대칭에 가까운 형태를 가지고 있고, 그 동적 특성으로 인하여 그림 3과 같은 2 자유도의 단순 모형으로도 교축 방향의 주요 동적거동이 잘 표현되는 것으로 확인되었다. 이 연구에서는 2자유도의 단순 모형을 사용하여 해석을 수행하였으며, 해석에 사용한 물성치는 표 1과 같다⁽¹⁵⁾. 여기

〈표 1〉 해석에 사용된 모델의 물성치

교량의 물성		단부교각의 물성	
M_B	$13705.0 \times 10^3 \text{kg}$	M_A	$123.2 \times 10^3 \text{kg}$
K_B	27973.2kN/m	K_A	78484.9kN/m
C_B	$387.5 \text{kN} \cdot \text{s/m}$	C_A	$62.2 \text{kN} \cdot \text{s/m}$



〈그림 4〉 Higashi Kobe Bridge

서 사장교의 주탑 및 단부 교각의 경우 설계 지진력 상태에서 탄성 거동하도록 설계되는 것이 일반적이므로 교량 및 단부 교각의 강성을 선형으로 가정하였다.

3.2 정현파입력에 대한 응답특성

복합감쇠기가 장착된 사장교의 동적응답특성을 알아보기 위하여 우선, 정현파 지진입력에 대한 해석을 수행하였다. 해석에 사용한 입력파와 복합감쇠기의 물성치는 표 2와 같다.

3.2.1 정현파입력 0.3 Hz-35 gal 해석결과

0.3 Hz-35 gal의 정현파입력 시의 교량의 전체적인 응답은 그림 5와 같다. 교각의 지진응답에서 고진동수의 불규칙적인 파형을 볼 수 있다. 이러한 응답의 원인은 본 절 후반부의 감쇠기 변위응답을 확인함으로써 설명할 수 있다.

그림 6은 복합감쇠기의 합변위관계로서 타원 모양의 이력 곡선과 더불어 양 끝에서 급한 기울기의 직선이 나타남을 알 수 있다. 그림 7에서 복합감쇠기의 최종 변위는 오일감쇠기의 변위와 탄소성감쇠기 변위의 합으로 나타남을 확

인할 수 있으며, 이 변위가 정확하게 350mm에 도달한 이후부터 그림 6에서 좌우의 직선이 나타남을 확인할 수 있다. 이것은 오일감쇠기의 변위가 최대스트로크에 도달하였음을 나타내며, 변위제한장치에 의하여 오일감쇠기에서는 추가적인 변위가 발생하지 않고 증가하는 변위는 탄소성감쇠기의 탄성변위로 수용되는 것을 나타낸다. 그림 7에서 탄소성감쇠기는 탄성상태의 범위에서만 거동하였고 그 변위와 하중은 항복변위(100mm, 표 2)와 항복하중($3.8 \times 10^6 \text{N}$, 표 2, 그림 8) 값을 넘지 않았다. 이는 탄소성감쇠기가 감쇠기로서의 역할은 하지 않고 단지 오일감쇠기와 교각을 잇는 스프링으로서 거동한 것을 의미한다.

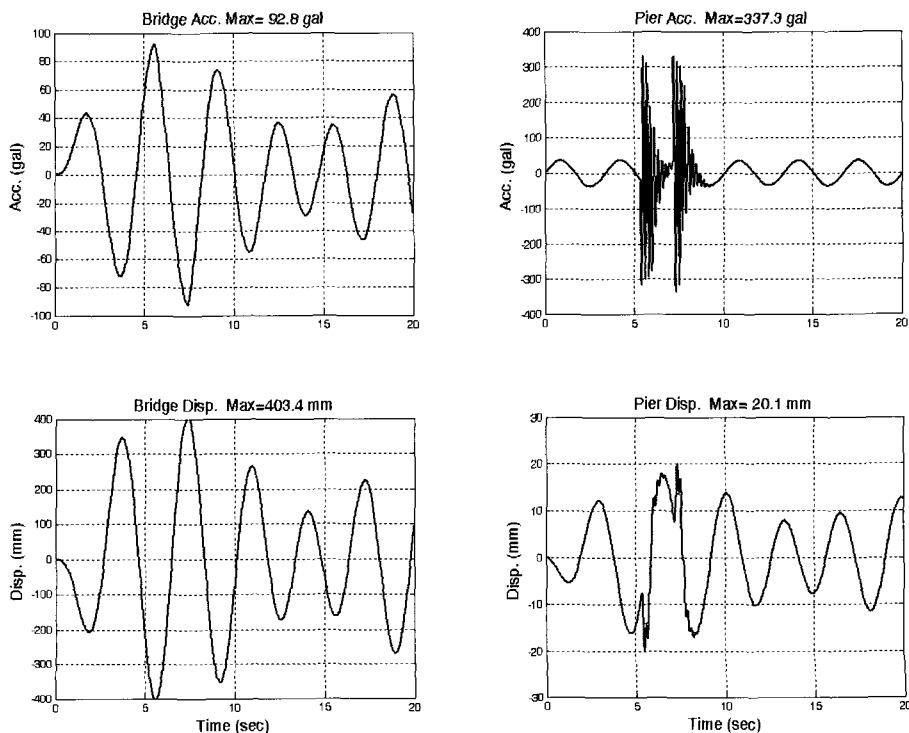
그림 7에서, 5초와 8초 사이 2회에 걸쳐 오일감쇠기의 최대 변위가 350mm에 다다른 직후, 탄소성감쇠기의 변위가 갑자기 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 이 때, 증가한 전단력이 단부교각의 가속도와 변위에 영향을 끼쳐, 가속도 응답이 급격히 증가하며 변위응답도 갑자기 증가하는 모습을 보인다(그림 5).

3.2.2 정현파입력 0.3Hz-45gal 해석결과

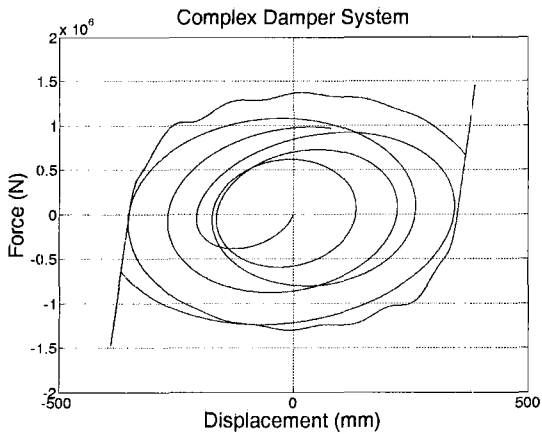
0.3Hz-45gal의 정현파입력 시의 교량의 전체적인 응답은

〈표 2〉 정현파해석 시의 물성치

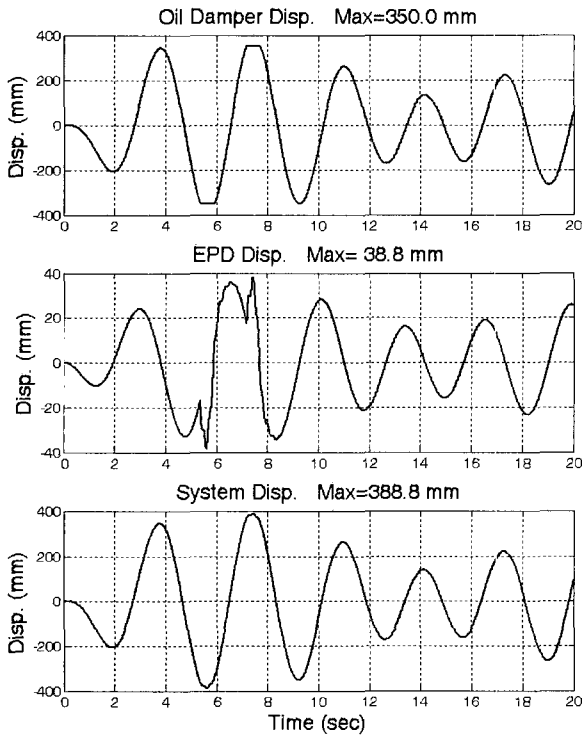
입력지진	탄소성감쇠기의 항복력 (F_0)	항복변위	오일감쇠기의 감쇠비	오일감쇠기의 최대스트로크($X_{V \max}$)
정현파 0.3Hz, 35gal	$3.8 \times 10^6 \text{N}$	100mm	5%	350mm
정현파 0.3Hz, 45gal	$3.8 \times 10^6 \text{N}$	100mm	5%	350mm



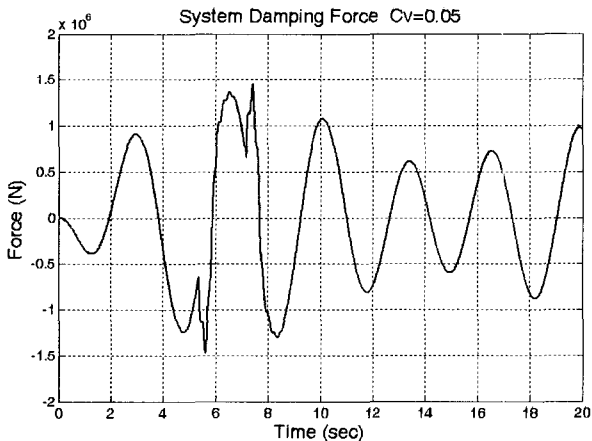
〈그림 5〉 복합감쇠기를 가진 사장교의 응답(정현파 35gal)



〈그림 6〉 복합감쇠기의 힘변위 관계(정현파 35gal)



〈그림 7〉 오일감쇠기, 탄소성감쇠기, 복합감쇠기의 변위응답(정현파 35gal)



〈그림 8〉 복합감쇠기의 감쇠력(정현파 35gal)

그림 9와 같다. 교각의 지진응답에서 고진동수의 불규칙적인 파형의 원인은 3.2.1에서와 같이 감쇠기 변위응답으로 설명할 수 있다.

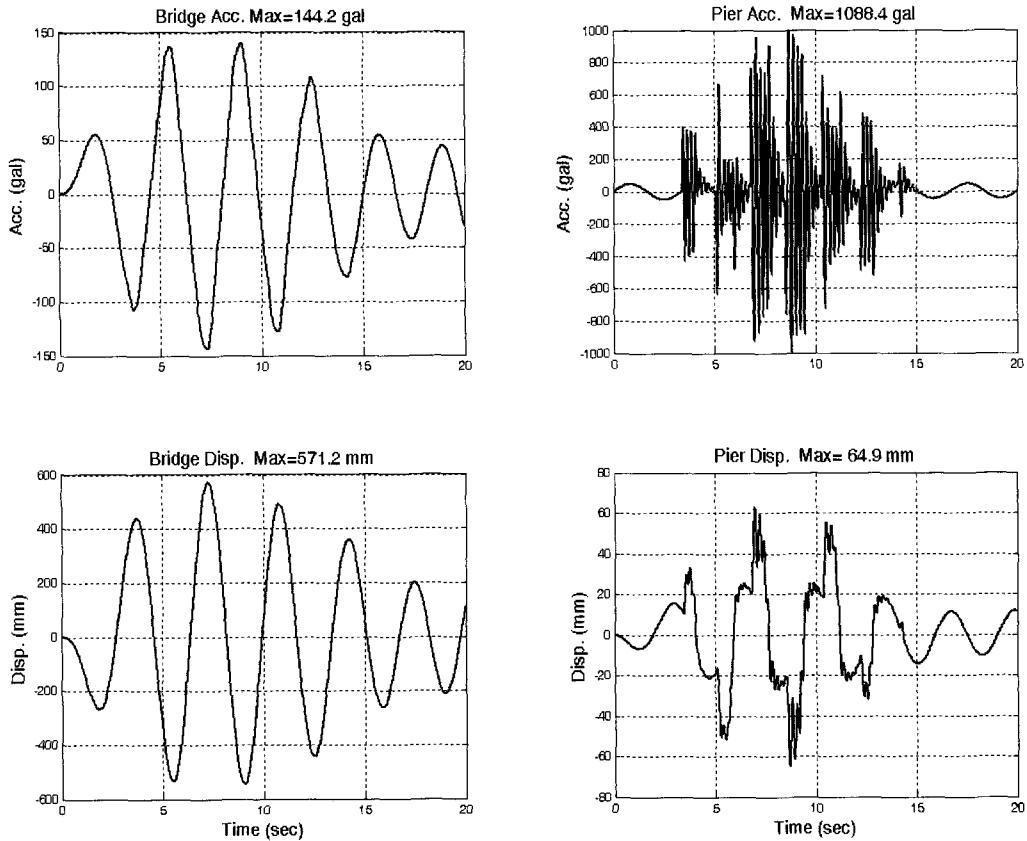
그림 10은 복합감쇠기의 힘-변위관계로서 중앙부 타원형상의 이력 곡선은 오일감쇠기의 일반적인 형상이지만, 좌우에는 탄소성감쇠기의 전형적인 소성거동 형태를 확인할 수 있다. 즉 복합감쇠기의 변위응답이 증가하여 그 변위량이 오일감쇠기의 변위가 최대값에 도달한 후부터는 탄소성감쇠기가 작동한 경우이다. 그림 11은 시간에 따른 오일감쇠기와 탄소성감쇠기의 변위이력을 나타낸다. 6회에 걸쳐 오일감쇠기의 최대변위 350mm에 도달할 때에, 탄소성감쇠기의 변위가 갑자기 늘어나는 것을 확인할 수 있으며, 이때마다, 증가한 전단력은 단부교각의 가속도와 변위에 영향을 끼쳐, 가속도 응답이 급격히 증가하며 변위응답도 갑자기 증가하는 모습을 보인다(그림 9). 이와 같이 그림 9에서, 속도의존적인 감쇠력을 발휘하는 오일감쇠기가 작동하는 경우와는 달리, 변위의존적인 탄소성감쇠기가 작동할 때에 구조물에 고진동수의 동응답이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

3.3 지진응답해석

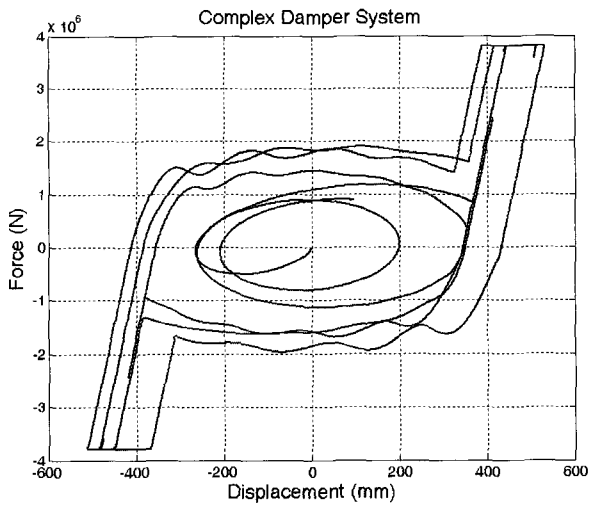
복합감쇠기가 적용된 대상 교량의 지진응답해석을 통하여 동적응답특성을 파악하였다. 사용한 지진입력은 1995년 고베지진시에 Higashi Kobe Bridge의 기초에서 계측된 지진파⁽¹⁶⁾를 이용하였다. 이 지진파는 연약지반에서 계측된 지진파로서 장주기의 지반운동이 길게 이어져서 장대교량의 동적응답을 증폭시킨 것으로 알려져 있다. 사용된 지진파와 지진파에 대한 응답스펙트럼(감쇠비 5%)을 그림 12에 나타내었다. 이 지진파의 변위응답스펙트럼(그림12 (d))에 의하면 고유주기 4.4초인 대상 구조물의 등가감쇠비를 5%까지 확보한 경우에 변위응답은 900mm 이상에 이른다.

이 때 설정한 복합감쇠기의 설계값은 표 3과 같다. 오일감쇠기의 변위제한장치에 의하여 탄소성감쇠기의 작동시점이 좌우되므로 오일감쇠기의 최대스트로크는 구조물전체의 응답을 결정하는 중요한 변수이고 본 해석에서는 470mm로 하였다. 탄소성감쇠기의 항복변위는 소성거동에 의한 에너지 흡수능력을 기대할 수 있도록 5mm로 설정하였다.

해석대상 사장교의 지진응답을 그림 13에 나타내었다. 해석은 입력지진의 주진동이 잦아들기 시작하는 20초까지로 하였다. 교량의 지진응답은 7초에서 10초 사이에 크게 증가하는 모습을 보인다. 이 때의 복합감쇠기의 감쇠력 변화는 그림 14에서 보인 바와 같이 크게 변동하는 사실을 확인할



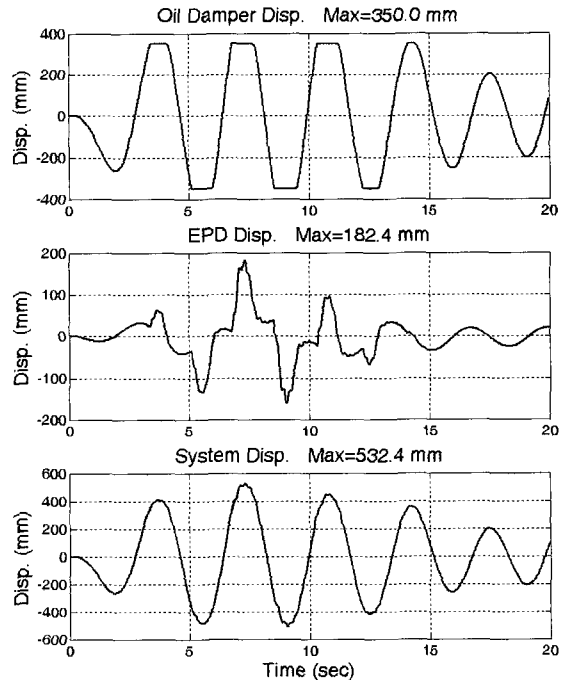
〈그림 9〉 복합감쇠기를 가진 사장교의 응답(정현파 45gal)



〈그림 10〉 복합감쇠기의 힘변위 관계(정현파 45gal)

수 있다. 7초에서 10초 사이에 복합감쇠기의 탄소성감쇠기는 큰 이력거동을 통하여 대량의 에너지를 흡수한다(그림 15). 탄소성감쇠기는 대변위 이력거동에 의한 감쇠력을 지속적으로 발휘할 수는 없지만, 큰 감쇠력이 필요한 구간에서 그 효용가치를 발휘한다.

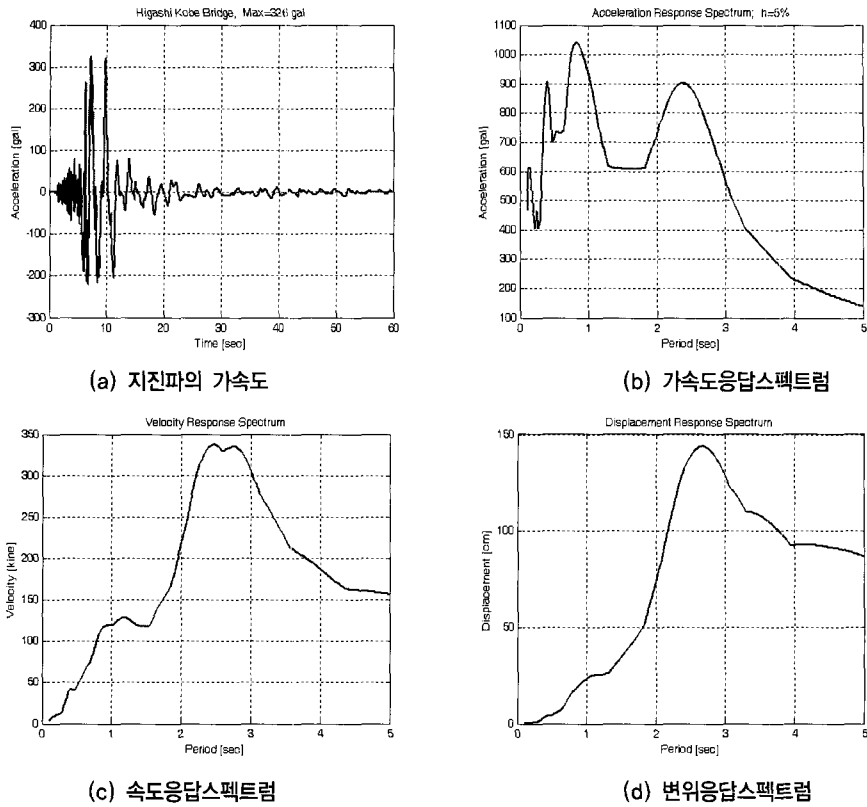
지진파입력시 각 감쇠기의 변위응답은 그림 16과 같다. 탄소성감쇠기는 1회 왕복정도의 이력거동을 했을 뿐, 대부분의 변위는 오일감쇠기에서 발생하였다. 복합감쇠기는 중



〈그림 11〉 오일감쇠기, 탄소성감쇠기, 복합감쇠기의 변위응답(정현파 45gal)

립위치로 복원되고 있으나, 탄소성감쇠기에는 잔류변위가 발생한 사실도 확인할 수 있다.

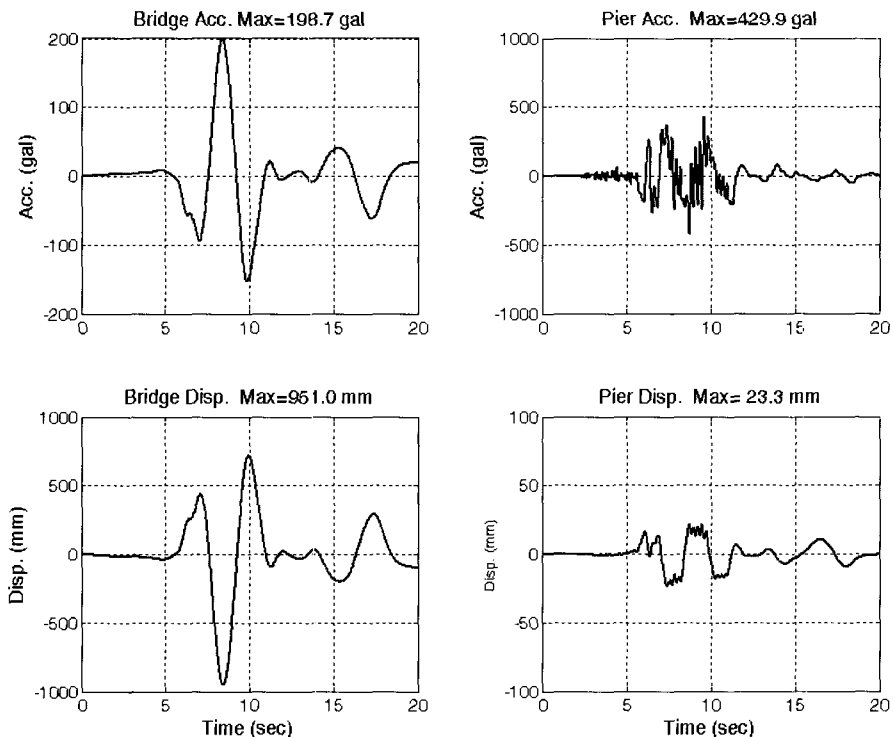
그림 6, 10, 15에서의 복합감쇠기의 힘-변위관계로부터



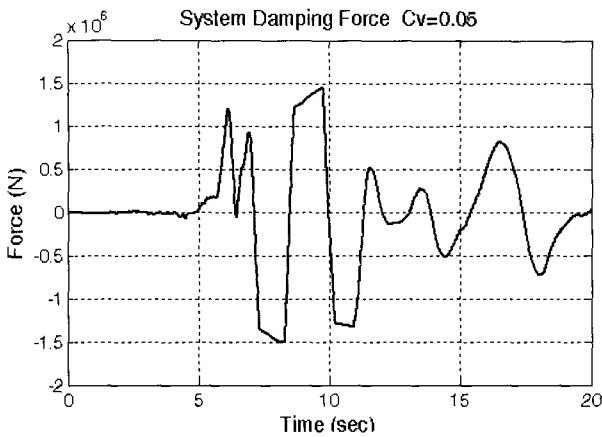
〈그림 12〉 Hyogo-ken Nambu Earthquake 시의 Higashi Kobe Bridge 지진파(NS)

〈표 3〉 지진응답해석에 사용된 복합감쇠기의 설계값

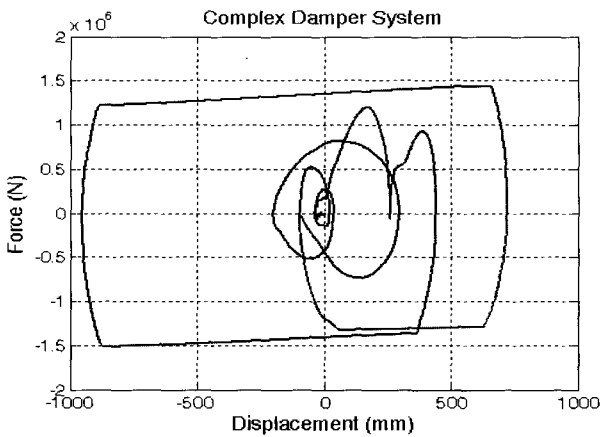
구분	오일감쇠기		탄소성감쇠기	
	감쇠비	최대스트로크	1차강성	항복변위
설계값	5%	470mm	2.7E8N/m	5mm



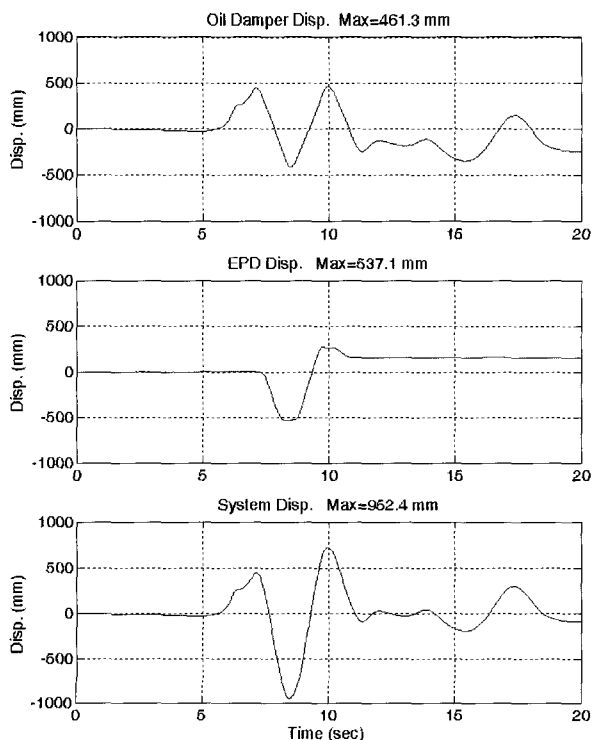
〈그림 13〉 복합감쇠기를 가진 사장교의 지진응답



〈그림 14〉 복합감쇠기의 감쇠력(지진파 입력)



〈그림 15〉 복합감쇠기의 힘-변위 관계(지진파 입력)



〈그림 16〉 오일감쇠기, 탄소성감쇠기, 복합감쇠기의 변위응답(지진파 입력)

복합감쇠기의 거동특성변화를 확인할 수 있다. 그림 6에서는 탄소성감쇠기가 탄성영역에서만 거동하였고, 그림 10에서는 오일감쇠기가 최대변위에 도달한 다음에 탄소성감쇠기가 이력저동을 개시한 예이고, 그림 15에서는 오일감쇠기의 변위가 최대치에 도달하기 이전에 오일감쇠기의 변위속도에 의하여 증가한 감쇠력으로 탄소성감쇠기가 항복하여 비선형이력저동을 하고 있는 경우임을 확인할 수 있다.

제안한 복합감쇠기의 제진효율성을 검토하기 위하여 단일의 오일감쇠기만 적용된 경우에 대하여 지진응답해석을 수행하고 그 결과를 표 4에 비교하였다. 해석에 있어서 오일감쇠기만 적용한 경우에는 스트로크의 제한은 없으며 5%의 감쇠비를 갖는다고 가정하였다. 표 4의 결과는 상부구조의 변위를 어느 정도 허용하여 주탑 및 단부 교각의 변위를 감소시키는 전형적인 사장교 진동 제어 거동을 잘 보여준다. 변위의 제한으로 인해 가속도의 값이 상대적으로 늘어나는 특성도 관찰할 수 있다. 표 4에서, 교량의 변위는 오일감쇠기 적용시에 비하여 40mm증가하였으나, 교각의 변위는 감쇠비 5%의 감쇠기구를 가진 경우의 값 43mm에 대비하여 절반에 가까운 23mm로 감소하였다. 이는, 교량의 변위는 약 4.4% 만 증가한 반면, 교각의 변위는 46.5% 수준으로 감소시킴으로써, 제시한 복합감쇠기의 우수성을 잘 보여주고 있다고 할 수 있다. 또한 여기서 검토한 두 시스템을 실제 구현하는 경우에 표 5와 같은 차이를 보여, 탄소성감쇠기에 비하여 상대적으로 고가인 오일감쇠기의 특성을 고려할 때, 제시한 감쇠시스템의 경제성을 확인할 수 있다.

위와 같이 세가지 종류의 가진에 의한 동적응답특성을 파악함으로써, 탄소성감쇠기의 항복경향과 지진에너지 흡수분담률은 복합감쇠기의 설계에 따라서 자유롭게 조절할 수 있다는 사실을 확인할 수 있으며, 설계변수의 적절한 설정에 따라 대상 구조물에 최적의 복합감쇠기 설계가 가능하다.

〈표 4〉 감쇠기에 따른 사장교의 지진응답비교

구 분	복합감쇠기 적용	오일감쇠기 적용
교량가속도	199gal	190gal
교량변위	951mm	911mm
교각가속도	430gal	346gal
교각변위	23mm	43mm

〈표 5〉 오일감쇠기의 설정치 및 응답치 비교

구 분	설정치		응답치	
	오일감쇠기 최대감쇠력	오일감쇠기 최대변위	오일감쇠기 최대감쇠력	오일감쇠기 최대변위
복합감쇠기적용 시	1.35E6N	470mm	1.35E6N	470mm
오일감쇠기적용 시	∞	∞	3.18E6N	924mm

4. 결론

장대구조물의 진동제어를 위한 복합감쇠기를 제안하고 그 동특성을 표현하는 운동방정식을 제시하였다. 제시한 복합감쇠기는 두개 이상의 탄소성감쇠기와 오일감쇠기의 조합에 의하여 구성되며, 탄소성감쇠기의 변위의존적인 특성과 오일감쇠기의 속도의존적인 특성을 적절히 조합함으로써 효율적인 감쇠시스템의 구성이 가능하게 하였다. 복합감쇠기의 주요설계변수로는 오일감쇠기의 감쇠계수, 오일감쇠기의 최대변위, 탄소성감쇠기의 1차강성, 2차강성, 항복하중 등이 있으며, 이들 설계변수의 조합에 따라 다양한 응답 특성을 가진 복합감쇠기의 설계가 가능하다. 이에 따라, 저강도-고빈도의 진동원과 고강도-저빈도의 진동원에 대한 대응이 동시에 가능하여, 경제성과 제진효율성을 두루 갖춘 감쇠시스템의 구성이 가능할 것으로 판단된다.

조화하중과 지진하중을 받는 장대사장교를 대상으로 한 수치해석을 통하여 복합감쇠기의 효율성과 유용성을 검증하였다. 해석결과에서, 제시한 복합감쇠기는 탄소성감쇠기와 오일감쇠기의 감쇠특성이 적절히 분배되어 지진응답의 제어에 매우 효과적인 것으로 확인되었다.

감사의 글

이 연구는 2006년도 건국대학교 학술진흥연구비 및 2005년도 동국대학교 학술연구비 (DRIMS 2005-2002-0)의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 고현무, 박관순, 박원석, "설계제한조건이 고려된 출력피드백 최적제어에 의한 구조물 진동의 능동제어," 대한토목학회 논문집, Vol. 15, No. 6, 1995, pp. 1535-1544.
- 함대기, 옥승용, 박원석, 고현무, 박관순, "준능동 제어시스템을 이용한 사장교의 진동제어 및 비용효율성 평가," 한국지진공학회논문집, Vol. 9, No. 4, 2005, pp. 43-54.
- 옥승용, 김동석, 박관순, 고현무, "사장교의 지진응답제어를 위한 준능동 MR 감쇠기의 퍼지제어," 한국지진공학회논문집, Vol. 9, No. 6, 2005, pp. 75-90.
- 박관순, 고현무, 옥승용, 서충원, "MR Damper가 장착된 교량 구조물의 준능동 퍼지제어," 대한토목학회 논문집, Vol. 22 No. 4-A, 2002, pp. 847-857.
- 정형조 박규식 Spencer. B.F. 이인원, "MR 유체 댐퍼의 동적 모델을 고려한 사장교의 반능동제어," 한국지진공학회논문집, Vol. 6, No. 2, 2002, pp. 63-71.
- 이상현 민경원 이명규, "선형화 기법을 이용한 MR 감쇠기 성능평가," 한국지진공학회논문집, Vol. 9, No. 2, 2005, pp. 1-6.
- 한국지진공학회, "기존 교량의 내진성능평가 및 향상," 제12회 기술강습회, 2003, pp. 219-280.
- KYB Damper Catalogue, KYB, 2003.
- Proving Test on Seismic Reliability of The Main Steam Piping System, Part 4: Response Characteristics of BWR Feed-Water Piping Supported by Energy Absorbing Support Under Very Large Seismic Input, 1996. 5.
- Proving Test on the Seismic Reliability of The Main Steam Piping System, Part1: Seismic Response and Dissipated Energy of Elasto-Plastic Damper LED of M-Line, 1996. 5.
- T. Iwatsubo et al., "NUPEC Project: Seismic Proving Test of Heavy Component with Energy Absorbing Support," 7th International Conference on Nuclear Engineering, Tokyo, Japan. 1999. 4.
- Robinson, W.H. Et Al., "An Extrusion Energy Absorber Suitable for the Protection of Structures During an Earthquake", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 4, 1976, pp. 251-259.
- 建設省土木研究所, 高減衰材料を用いた長大橋の免震技術の開発に関する共同研究報告書(その3), 1996. 3.
- Japan Society of Civil Engineers, Report on the Hanshin-Awaji Earthquake Disaster, No. 1 Bridge Structures, 1996. 12.
- 阪神高速道路公団, 東神戸大橋, 工事誌, 1994. 5.
- Japan Meteorological Agency, The 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake and its after shocks. *Report Coord. Comm. Earthq. Pred.*, 54. 1995.