



## 사장 케이블의 진동 저감을 위한 스마트 제진 기술 동향

정 형 조\*, 장 동 두, 이 승 우  
(한국과학기술원 건설 및 환경공학과)

### 1. 머리말

건설 분야의 대표적인 대형 구조물인 사장교(cable-stayed bridge)는 경사지게 매단 케이블로 교통로가 되는 거더를 보강하여 공간을 건너려고 하는 교량 형식으로, 풍부한 조형미와 경제적인 설계, 합리적인 가설 등과 같은 여러 가지 우수한 특성 때문에 20세기 중반 이래 현재까지 꾸준히 건설되고 있는 장대교량 형식 중 하나이다. 우리나라도 1984년 진도대교와 돌산대교가 거의 동시에 완공된 이후, 올림픽대교, 서해대교, 영흥대교, 삼천포대교 등이 건설되어 공용 중이며, 현재도 다수의 장대교량이 사장교 형식으로 설계되거나 시공

중에 있다. 특히 2009년 완공예정인 인천대교는 주경간의 길이(주탑과 주탑 사이의 거리)가 800m로 세계 5위 규모의 해상 교량이다(그림 1 참조).

길이가 매우 긴 케이블로 지지되는 사장교는 대부분 강한 바람이 자주 발생하거나 태풍이 지나가는 해안 또는 해협에 건설되기 때문에, 풍하중에 의한 과도한 구조물 진동(풍우진동, 웨이크 겔로핑, 지점 가진에 의한 진동 등)이 케이블에 발생하게 된다. 또한, 사장 케이블 자체의 구조 감쇠비가 매우 낮을 뿐만 아니라, 사장교의 장경간화 추세에 따른 사장 케이블 길이의 증가와 효과적인 응력 재분배를 위한 케이블 수량 증가 및 이에 따른 부재 당 소요단면적의 감소로 인해 케이블 부

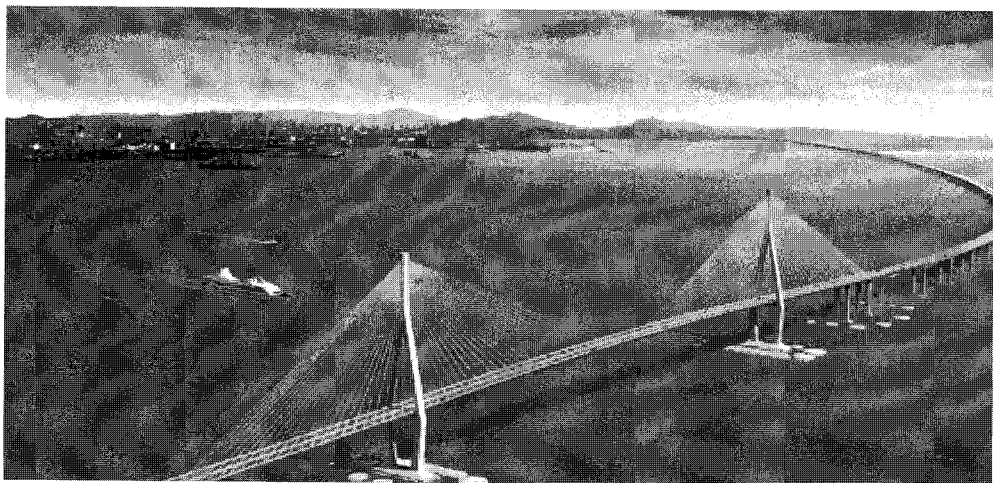


그림 1 인천대교 조감도 (출처: 인천대교 홈페이지)

재의 휨강성은 더욱 작아져서 동적 하중에 대한 취약성이 더욱 높아지게 되었다. 따라서, 1980년대 중반 이후부터 사장교를 건설하고 유지관리를 하고 있는 여러 나라에서 사장교 케이블 시스템의 과도한 진동 및 이로 인한 건전성 확보 문제가 심각하게 대두되고 있는 실정이다. 사장교의 사용연한 동안 케이블 시스템의 진동은 케이블 스트랜드의 피로와 부식에 대한 주요 원인이 되고, 사장교를 이용하는 통행자의 사용성 저하에 커다란 영향을 미치게 된다. 따라서, 사장교의 공용기간 동안 구조적으로 안정하고 높은 사용성을 유지하기 위해서는, 풍하중에 의한 사장 케이블의 과도한 진동에 대한 적극적인 제진 대책을 수립하는 것이 필수적으로 요구된다.

사장 케이블에 발생하는 유해한 진동을 방지하기 위한 여러 가지 대책 중에서 현재 널리 사용되는 방법은 수동형대(passive-type)의 감쇠기를 사장 케이블에 설치하는 것이다. 감쇠기는 일반적으로 앵커 근처에 설치되며 자체 감쇠비가 낮은 케이블에 부가의 감쇠를 제공하는 역할을 한다. 이십여 년 전부터, 수동형 감쇠기에 의한 케이블의 진동 감소 효과와 케이블 감쇠기의 설계에 대한 연구가 수행되고 있으며, 외국에서는 이러한 이론적 연구에 기초하여 실제 사장교 케이블에 점성 또는 점탄성 감쇠기를 설치한 사례도 다수 있다. 수동형 감쇠기가 케이블 제진을 위해 설치된 대표적인 사장교로는 프랑스의 Brotome Bridge, 네덜란드 Erasmus 사장교, 미국 플로리다의 Sunshine Skyway Bridge, 미국 사우스 캐롤라이나의 New Cooper River Bridge, 일본의 Aratsu Bridge, Tsurumi Tsubasa Bridge 등이다. 이상과 같이 실제 교량에 적용된 경우에도, 감쇠기의 위치는 미적인 고려와 설치상의 문제로 인해 교량 상판에 가까운 지점으로 제한되고 있다. 하지만, 수동형 감쇠기의 제진 성능이 어느 이상 보장되기 위해서는 케이블의 길이가 긴 경우에 감쇠기를 부착해야 하는 위치가 앵커로부터 상당히 떨어져 있어야만 하기 때문에 미관 및 설치·유지관리 면에 있어서 커다란 문제점이 있게 된다. 이러한 수동형 감쇠기의 단점은 여러 연구를 통해 검증된 바 있다.

이에 비해, 최근 관심이 높아지고 있는 반능동형(semiactive-type)감쇠기 (특히 MR(magnetorheological 감쇠기)를 이용하면, 수동형 감쇠기에 비해 케이블 진동

에 대한 제진 성능이 우수할 뿐만 아니라, 감쇠기의 설치위치에 따라 성능의 차이가 크게 변하지 않는 매우 강한 케이블 제진 대책을 수립할 수 있다. 반능동 제어 장치는 커다란 전력원 없이 배터리 전력만으로도 능동 제어의 적응성과 수동 제어의 신뢰성을 가지며 뛰어난 제진 성능을 발휘하기 때문에, 향후 매우 유망한 구조물의 진동 제어 기술로 여겨지고 있다.

이 글에서는 스마트 제진 기법을 이용한 사장 케이블 진동 저감 기술에 대한 최근의 주요 연구 동향을 정리한 내용이며, 주로 MR 감쇠기를 이용한 사장 케이블 제진 방법에 대하여 다루었다. 또한, 다수의 유사한 연구를 일일이 나열하기 보다는 관련 연구 분야에서 큰 파급효과를 준 특정 연구 사례를 중심으로 내용을 기술하였음을 밝혀둔다.

## 2. 사장 케이블 진동 저감을 위한 스마트 제진 대책 (MR 감쇠기를 중심으로)

최근 들어 다양한 스마트재료 (압전 재료(piezoelectric materials), 형상 기억 합금(shape memory alloy), ER 유체(electro-rheological fluid), MR유체(magneto-rheological fluid) 등)를 이용한 구조물의 진동 제어 기술이 주목을 받고 있는데, 현재까지 구조물의 진동 저감을 위해 실

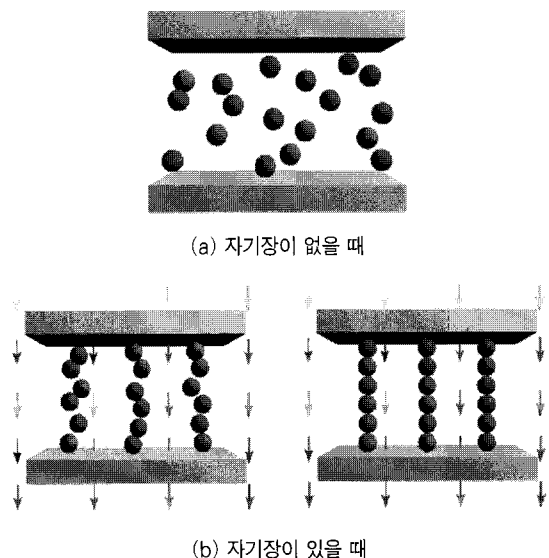
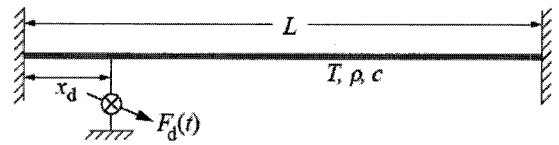


그림 2 MR 유체의 거동 메커니즘 (출처: Lord Corporation 홈페이지)

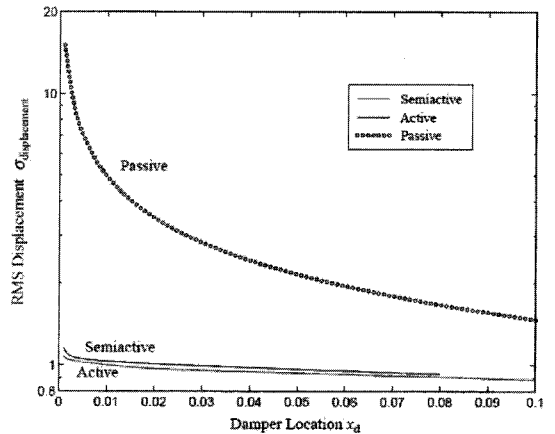
제 대형 토목 및 건축 구조물에 적용된 사례가 있는 스마트 재료는 MR 유체가 거의 유일하다. MR 유체란 어떤 유체(물, 실리콘 오일 등) 내에 미세하고 자성을 띤 입자를 분산시킴으로써, 평소에는 일반적인 점성 유체처럼 자유롭게 유동하다가 자기장이 가해지면 매우 짧은 시간에 입자들이 정렬을 해서 유체의 유동을 제한하고 결과적으로 항복 강도(yield strength)를 발생시키는 제어가능한 유체(controllable fluid)를 말한다. 그림 2는 MR 유체의 거동 메커니즘을 보여주고 있다.

MR 유체를 이용하여 감쇠력을 적절히 조절할 수 있도록 만들어진 제어가능한 유체 감쇠기를 MR 감쇠기라고 한다. 제어 가력기(control actuator)인 MR 감쇠기는 일반적인 능동 제어 시스템의 경우와는 달리 기계적 에너지를 직접 구조물에 가하지 못하기 때문에, MR 감쇠기를 이용한 진동 제어 시스템은 한정 입출력(bounded-input bounded-output) 안정도가 보장된다. MR 감쇠기는 또한 장치의 기계적인 단순성(밸브가 필요 없음), 높은 동적 범위(MR 감쇠기에 자기장을 가해줌으로써 10배 정도의 힘을 얻을 수 있음), 적은 전력 요구량(일반적으로 50 Watt 이하), 커다란 감쇠 능력, 외부 환경에 대한 뛰어난 강인성 등의 훌륭한 특징을 보유하고 있다. 따라서, MR 감쇠기를 이용한 구조물의 진동 제어 기술은 수동 제어 기술과 마찬가지로 높은 신뢰성을 제공할 수 있을 뿐만 아니라 능동 제어 시스템의 장점인 뛰어난 적응성도 유지할 수 있는 특성을 보유하고 있기 때문에, 향후 매우 유망한 구조물 제진 장치로 인정받고 있다.

MR 감쇠기의 사장 케이블에 대한 적용에 대한 연구는 1990년대 후반에 Univ. of Notre Dame의 Spencer 교수(현 Univ. of Illinois 교수)의 연구실을 중심으로 해석적, 실험적으로 수행되기 시작하였다. 먼저, 그림 3과 같이 사장 케이블을 taut string으로 모델링한 후, MR 감쇠기(그림에서는 semiactive로 표현됨)의 케이블 제진 성능을 능동과 수동 제진 장치의 경우와 비교하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, MR 감쇠기를 사용한 경우 수동형 감쇠기보다 케이블 변위가 현저히 작았으며 능동형 감쇠기의 성능과 거의 비슷하였다. 또한 케이블 감쇠기의 설치 위치가 앵커 쪽에 가까워짐에 따라 수동형 감쇠기는 제어 성능의 저하가 뚜렷이 나타났으나 MR 감쇠기는 제어 성능이 그다지 저하되지 않았다. 이후



(a) 감쇠기가 설치된 케이블 모델

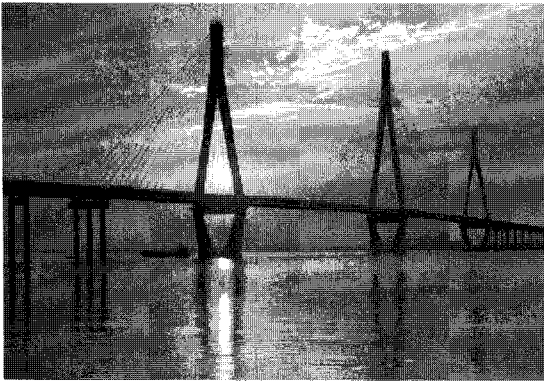


(b) 댐퍼 설치위치에 따른 각 제어방법의 성능비교

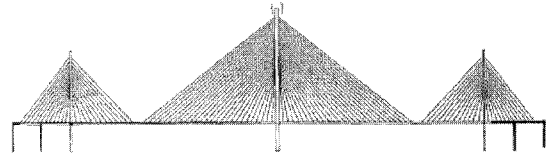
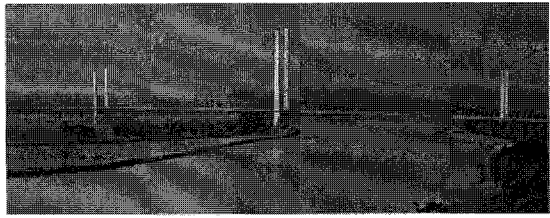
그림 3 케이블 내용 성능 향상을 위해 설치된 MR 감쇠기의 성능 (Spencer 교수팀 연구 결과)

Univ. of Connecticut의 Christenson은 단순한 taut string으로 고려했던 케이블의 모델을 새그, 기울어짐, 축강성 등을 추가로 고려하여 보다 실제와 가깝게 한 모델에 대해 MR 감쇠기의 성능 검증에 수치적/실험적으로 수행하였다.

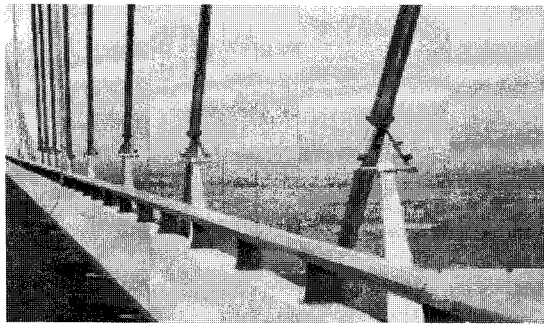
한편, 1999년 중국 후난성 북부 지역에 있는 Dongting Lake에 새로운 사장교가 개통되었는데, 이 교량의 사장 케이블이 풍우진동에 매우 취약함이 관측되었다. 이 문제를 해결하기 위해 중국 Central South Univ. 연구팀과 Hong Kong Polytechnic Univ. 연구팀, 그리고 Spencer 교수팀이 국제 협동연구를 수행하였다. 이들은 사장 케이블의 진동을 저감시키기 위한 방법으로 MR 감쇠기를 고려하고 다양한 수치적, 실험적 연구를 수행하였다. 이 연구는 총 여섯 단계로 이루어졌는데 각 단계에서의 연구내용은 다음과 같이 정리할 수 있다. (1) 제어하지 않은 케이블의 모드 테스트, (2) MR 감쇠기가 설치된 시험 케이블의 강제진동 테스트, (3) MR 감쇠기가 설치된 케이블과 설치되지 않은 케이블의 풍우 가진에 대한 응답 모니터링, (4) 감쇠기 설치 방법에 대한 비교테스트, (5) 현장 설치, (6) 현장 계측 및 실시간 제어 테스트.



(a) Dongting Lake 사장교 전경



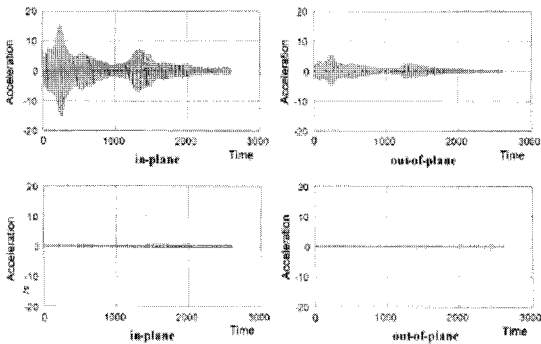
(a) 교량 전경



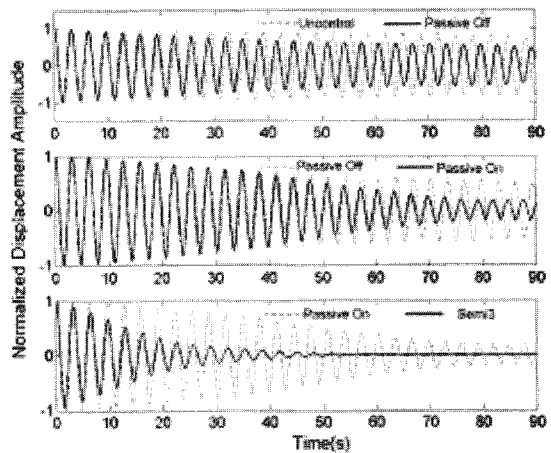
(b) 케이블에 설치된 MR 감쇠기



(b) 케이블에 설치된 MR 감쇠기



(c) 케이블 가속도 응답(상: 비제어, 하: 제어)



(c) 케이블 변위응답 비교

그림 4 교량 구조물에 세계 최초로 MR 감쇠기가 설치된 사례: 중국 Dongting Lake 사장교

교량의 심미성과 지속성을 고려할 때 MR 감쇠기를 실제 교량 케이블에 설치하기 위해서는 진동을 효과적으로 저감시키는 것뿐만 아니라 설치되었을 때 어색함이 없어야 하며 신뢰성과 지속성이 보장되어야 하고 또한 유지 관리가 용이해야 한다. 이런 조건들을 충족시키기 위한 다양한 연구 끝에 사장교의 156개 케이블에

그림 5 중국 Binzhou 황하강 사장교

대해 각 케이블 당 2개씩 총 312개의 MR 댐퍼 (RD-1005, Lord Corporation)를 2001년 7월부터 약 1년여의 기간에 걸쳐 설치하였다. 이는 교량 구조물에 MR 감쇠기를 설치한 세계 최초의 적용 사례로서 큰 의미가 있다. 설치

이후 4년여가 지난 지금까지 많은 후속 연구가 진행되었으며 풍우 진동의 저감에 대한 성능과 지속성에서 훌륭한 것으로 보고되고 있다.

이후 중국에서 또 한 번의 실제 사장교 케이블의 진동을 저감하기 위한 MR 감쇠기 설치에 이루어졌다. 2004년 6월 개통된 중국 산둥성에 위치한 황하강을 가로지르는 Shandong Binzhou Yellow River Highway Bridge가 그 대상으로 가장 긴 케이블 20개에 각각 2개씩 MR 감쇠기가 설치되었다. Harbin Institute of Technology의 Hui Li 교수팀은 이 케이블을 대상으로 상진동 및 자유진동 시험을 통해 케이블의 진동수 및 감쇠비를 추정하고 일련의 현장시험을 수행하여 반능동 MR 감쇠기의 성능을 passive-off(감쇠기 입력 전압 = 0), passive-on(감쇠기 입력 전압 = 최대값)의 경우와 비교하였다. 그림 5(c)



그림 6 사장 케이블에 MR 감쇠기가 설치된 Dr. Franjo Tadjmann 교 (출처: <http://www.dywidag-systems.com>)



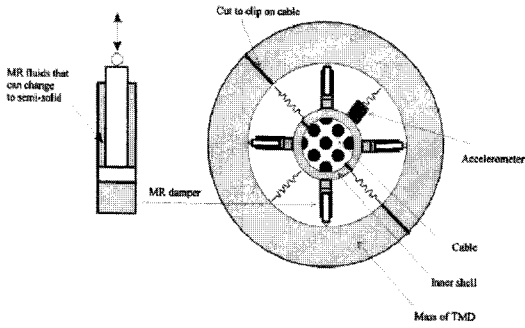
그림 7 중국 Sutong 교량의 사장 케이블에 대한 MR 감쇠기 성능 시험 (출처: <http://www.empa.ch>)

에서 보이듯이 반능동 MR 감쇠기의 경우에 월등히 좋은 진동 저감 효과를 발휘함을 확인 할 수 있다.

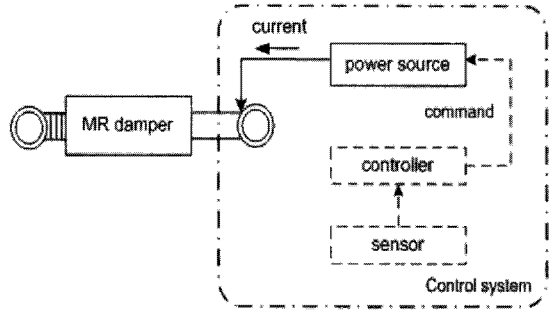
한편 최근 유럽에서도 실제 교량의 케이블 진동 저감을 위해 MR 감쇠기를 이용한 사례가 보고되었다. 스위스의 Materials Science and Technology Research Institution (EMPA)의 Webber 연구팀은 네덜란드의 Eiland Bridge의 사장 케이블에 MR 감쇠기를 설치하여 선행 연구를 수행하였다. 선행 연구 결과를 바탕으로 크로아티아의 Dr. Franjo Tadjmann Bridge의 사장 케이블에 MR 감쇠기를 2006년에 설치하였다. 이 교량의 케이블은 특히 겨울철 눈보라에 젖은 눈발이 케이블 표면에 달라붙어 케이블 본래의 공기역학적 특성을 변화시켜 많은 진동이 발생하였는데 그 크기가 1~2 m에 이를 정도로 심각한 상황이었다. 이 문제를 해결하기 위하여, MR 감쇠기를 설치하여 진동 변위를 1/10 수준인 10~20 cm 정도로 감소시켰다.

이 연구팀은 또한 현재 중국 상하이 양쯔강에 건설 중인 Sutong Bridge의 케이블 제진을 위한 MR 감쇠기에 대한 연구도 수행하였다. Sutong Bridge는 중앙경간이 1080 m에 이르는 세계 최장의 사장교로서 긴 케이블의 경우 그 길이가 480~540 m에 달한다. 이 연구팀은 상대적으로 긴 사장 케이블에 대해서는 MR 감쇠기를, 길이가 짧은 (150~470 m) 사장 케이블에 대해서는 오일 감쇠기를 설치하는 것으로 설계하였다.

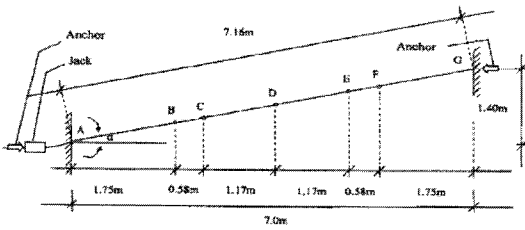
MR 감쇠기를 이용해 케이블의 진동을 줄이는 또 다른 장치로 미국 Louisiana State Univ.의 Cai 교수 연구팀은 MR 감쇠기를 이용한 TMD 시스템을 최근에 제안하였다. 일반 기계적인 감쇠기는 케이블의 진동을 저감시키는 것은 하지만 설치 위치의 제약으로 인해 길이가 매우 긴 케이블의 경우 그 효과가 그다지 크지 않게 된다. 이를 개선하기 위해 tuned mass dampers(TMD)를 사장 케이블에 적용하는 아이디어가 제안되었다. 하지만 TMD는 진동주파수에 민감하게 반응해 처음에 설계한 특정 주파수에 대해서는 훌륭한 성능을 발휘하지만 다른 주파수로 진동이 발생할 때는 큰 효과를 발휘하지 못하게 된다. 이러한 각각의 단점을 보완하고자 질량체, 스프링, 감쇠기 등으로 이루어지는 일반적인 TMD에서 감쇠기 부분을 가해주는 전류량에 따라 특성이 변하는 MR 감쇠기로 대체함으로써 설치위치에 제약이 없는 TMD의 장점과 진동주파수에 대한 조절이 가능한 MR



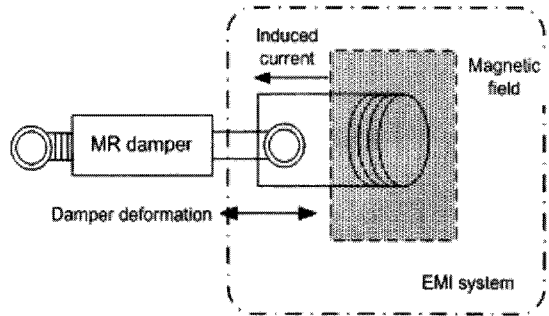
(a) TMD-MR 감쇠기 시스템에 대한 개념도



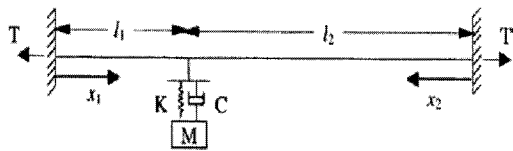
(a) 기존 MR 감쇠기-기반 제진 시스템



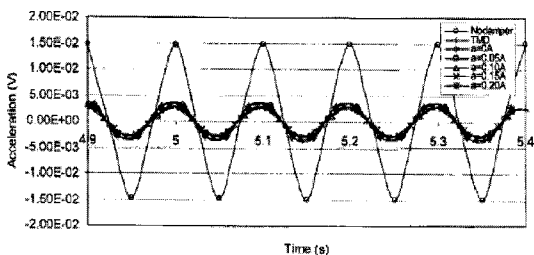
(b) 케이블 실험 장치



(b) 신개념 MR 감쇠기 시스템



(c) 케이블에 설치된 TMD-MR 감쇠기 시스템



(d) 케이블 가속도 응답

그림 8 TMD-MR 감쇠기 시스템 (Cai 교수팀 연구 결과)

그림 9 기존 MR 감쇠기 시스템과 신개념 MR 감쇠기 시스템의 비교

감쇠기의 장점을 결합한 새로운 형태의 TMD 시스템이 제안되었다. Cai 등 (2007)은 튜브형의 TMD와 MR 감쇠기를 결합한 실험실 규모의 감쇠장치를 제작하여 7.16 m의 케이블에 대해 실험적인 연구를 수행하였다. 하지만 아직까지는 실험적 접근을 통한 개념적 연구 수준이기 때문에 실제 사장 케이블에 적용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하리라 생각된다.

비록 MR 감쇠기가 케이블의 진동을 저감시키는 데 훌륭한 장치이기는 하지만, 점성 감쇠기, 마찰 감쇠기 등과 같은 수동형 제진 장치에 비해 설치 및 유지관리가 어렵고 비용이 과다하다는 단점을 가지고 있다. 즉, MR 감쇠기를 설치해 제어 알고리즘을 통해 제어를 하기 위해서는 계측기, 제어용 컴퓨터, 전원공급장치 등의 부대장치가 필요하며 또한 이런 전체 제진 시스템을 조종할 제어러가 필요하다. 이런 단점들을 개선하기 위하여 최근 전자기 유도부가 구비된 MR 감쇠장치(특허 등록번호: 제0416398호)가 개발되었다. 이 신개념 MR 감쇠기는 페러데이의 전자기 유도법칙에 의해 진동에

의한 운동에너지를 전기에너지로 변환시키는 전자기 유도부(electromagnetic induction (EMI) system)를 그림 9(b)와 같이 MR 감쇠기에 장착하여 제어 시스템과 외부 전원을 대신하도록 함으로써 단순하고 경제적인 특성을 갖추게 되었다. 전자기유도부(EMI system)에서 생성되는 전기에너지는 영구자석의 세기와 솔레노이드 코일의 감긴 횟수, 코일의 크기 등을 통해 조절할 수 있다. MR 감쇠기가 설치된 지점의 구조물의 변형 속도에 비례하여 전자기유도부에서 전류가 발생하고 전류의 크기에 따라 MR 감쇠기의 점성이 변화하기 때문에 별도의 계측기와 제어기 없이 구조물의 진동크기에 따라 적절한 제어력을 발생시키게 된다.


그림 9에서 알 수 있듯이 신개념 스마트 제진 시스템에서는 계측기 및 제어기가 필요 없이 단순히 감쇠기가 설치된 위치에서의 속도에 의해 MR 감쇠기에 입력으로 들어가는 전압 값이 달라지는 메커니즘을 가지고 있다. 이 연구팀이 예비적인 타당성 연구를 수행한 바에 의하면 신개념 MR 감쇠기 시스템을 사장 케이블의 진동 저감 대책으로 고려하면 기존 MR 감쇠기-기반 반능동제어 시스템의 결과와 비슷한 수준의 제진 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 길이, 장력 등의 제원이 달라지는 사장 케이블에 보다 적응성 있도록 감쇠기를 설계, 제작, 설치하기 위하여 변위증폭장치를 도입한 감쇠장치 (특허 등록번호: 제10-0770433호)를 개발한 바 있다.

최근 들어, 또 다른 대표적인 스마트 재료 중 하나인 형상기억합금(shape memory alloy)을 이용한 사장 케이블 진동 저감 사례도 몇몇 보고 된 바 있으나, 아직까지는 수치적인 연구이거나 실험실 수준의 실험적 연구에 그치고 있는 실정이다.

### 3. 맺음말

이 글에서는 사장교의 주요 부재인 사장 케이블에 강한 풍하중이 작용하는 경우에 발생하는 과도한 진동을 저감시키기 위한 스마트 제진 대책의 주요 연구동향에 대해 MR 감쇠기를 중심으로 정리하였다.

먼저, MR 유체 및 MR 감쇠기의 기본적인 개념을 간략하게 살펴보았다. 그리고 나서, 1990년대 후반부터 연구되기 시작한 MR 감쇠기를 이용한 사장 케이블의 제진 대책에 대한 주요 연구사례를 소개하였다. 중국 Dongting Lake 사장교에 세계 최초로 설치된 MR 감쇠기에 대한 사례 및 두 번째 현장 적용 사례를 제시한 후에, 유럽 쪽의 연구 동향을 개략적으로 기술하였다. 또한, MR 감쇠기와 TMD를 결합하여 개별 시스템의 단점을 극복하기 위한 최근 연구 사례를 소개하였고, 마지막으로 저자의 최근 연구성과인 신개념 MR 감쇠기를 이용한 타당성 연구에 대해서도 간단히 기술하였다.

이상에서 간략하게 살펴본 바와 같이, MR 감쇠기를 이용한 스마트 제진 기술은 사장 케이블의 과도한 진동을 저감하기 위한 대책으로 매우 유용하게 사용될 수 있으며, 앞으로 실제 사장교에 대한 적용 사례는 더욱 더 증가될 것으로 예상되기 때문에, 국내에서도 이에 대한 보다 활발한 연구/개발을 통해 독자적인 기술력을 확보하는 것이 매우 중요하리라 사료된다. 

### 감사의 글

이 글은 과학기술부·과학재단 지정 우수연구센터인 “스마트 사회기반시설 연구센터”의 지원으로 작성되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.