특집기사

토목 및 건축 구조물의 진동 저감을 위한 MR 감쇠기를 이용한 반능동 제어 기술

정 형 조*
(세종대학교 토목환경공학과)

MR 감쇠기를 이용한 구조물의 진동 제어 기술은 토목 및 건축 구조물의 자연 재해에 대한 방재 수단으로 매우 유용하게 사용될 수 있으며, 앞으로 실제 구조물에 대한 적용 사례는 더욱더 증가될 것으로 예상되기 때문에, 국내에서도 MR 감쇠기를 기반으로 하는 반능동 진동 제어 기술에 대한 보다 활발한 연구/개발을 통해 독자적인 기술력을 확보하는 것이 매우 중요하리라 사료된다.

1. 머리말

장대 교량과 같은 대형 토목 구조물 및 초고층 건물과 같은 대형 건축 구조물에 대한 진동 저감 기술은 지진, 강풍, 이동하중과 같은 다양한 동적하중이 구조물에 미치는 영향을 평가하고 최소화하는 기술로서, 토목 및 건축 구조물의 붕괴 방지 및 손상 사전 예방을 통해 인명을 보호하고 국가 인프라의 기능성과 안전성을 확보하는 건설 분야의 첨단 기술이다. 최근 들어 토목 및 건축 구조물이 장대화, 세장화 됨에 따라 동적하중에 의한 구조물의 과도한 진동 문제가 주요한 이슈로 부각하였고, 이를 해결하기 위한 다양한 기술이 개발되었다.

일반적으로 구조물의 과도한 진동을 제어하기 위한 방법은 구조물의 외부로부터 추가 에너지 공급의 필요 유무에 따라 수동 제어 (passive control), 능동 제어 (active control) 및 반능동 제어 (semiactive control) 기술로 구분할 수 있다. 먼저, 외부에서 추가 에너지가 공급되지 않는 수동제어 기법은 개념이 간단하고 구조물의 안정성이 보장되기 때문에 기초 격리 시스템 (base isolation system), 점탄성 감쇠기 (viscoelastic damper) 및 동조질량 감쇠기 (tuned mass damper)와 같이 구조물의 진동 제어 기술로 비교적 널리 쓰이고 있다. 하지만, 이 방법은 진동 제어 성능에 한계가 있을 뿐만 아니라 구조물 및 하중 조건 등의 변화에 대한 적응성이 매우 부족한 단점이 있다.

수동 제어 기술의 단점을 극복하기 위해 개발된 진동 제어 기술이 능동 제어 기술이다. 능동 제어는 외부에서 에너지를 가하여 구조물의 응답을 직접 제어하는 기법으로서, 제어 성능을 향상시킬 수 있고 구조물 및 하중 조건 등의 변화에 대한 적응성이 뛰어나다. 하지만, 능동 제어 기술은 이러한 장점에도 불구하고 아직까지 토목 및 건축 분야에서 널리 적용되지 못하고 있다. 그 이유는 능동 제어 기술에는 다음과 같이 해결해야 할 여러 가지 난제들이 존재하기 때문이다[1]. (1) 비용 과다 및 유지관리의 어려움, (2) 과도한 외부 전력 의존도, (3)

* E-mail : hjung1971@hanmail.net / Tel : (02) 3408-3290

시스템의 신뢰성 및 강인성 문제, (4) 비전통적인 기술에 대한 현장 기술자들의 거부감.

최근 들어, 능동 제어와 수동 제어의 장점을 고루 갖춘 반능동 제어 기술이 토목 및 건축 분야에서 각광을 받고 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. 대표적인 반능동 제어 장치로는 가변 오리피스 유체 감쇠기 (variable-orifice fluid damper), 제어가능한 마찰 감쇠기 (controllable friction damper), 가변 강성 장치 (variable-stiffness device), 스마트 동조 질량/액체 감쇠기 (smart tuned mass/liquid damper) 및 제어가능한 유체 감쇠기 (controllable fluid damper (MR 감쇠기 포함))가 있다.

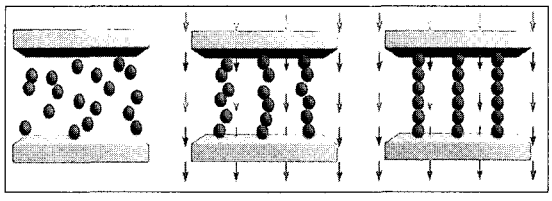
이 글에서는 이 중에서도 90년대 이후 토목 및 건축 분야에서 특히 주목을 받고 있는 반능동 제어 장치인 MR 감쇠기 (magneto- rheological fluid damper)를 이용한 토목 및 건축 구조물의 진동 저감 기술에 대하여 논하고자 한다. 먼저, 기본적인 개념을 설명한 후, 기초격리 구조물에 대한 벤치마크 연구 동향을 소개하고, 마지막으로 실제 구조물에 적용된 사례를 간략하게 기술하고자 한다. 이에 대한 보다 자세한 내용을 원하는 독자는 참고문헌[2-4]를 참고하기 바란다.

2. MR 감쇠기

토목 및 건축 공학 분야에서, 지진 및 강풍과 같은 자연 재해에 의해 발생하는 구조물의 과도한 진동을 제어하는 문제는 매우 중요한 연구 주제이다. 최근 들어, 다양한 스마트재료 (압전 재료 (piezoelectric materials), 형상 기억 합금 (shape memory alloy), ER 유체 (electro-rheological fluid), MR 유체 (magneto-rheolgoical fluid) 등)를 이용한 구조물의 진동 제어 기술이 주목을 받고 있는데, 현재까지 구조물의 진동 저감을 위해 실제 대형 토목 및 건축 구조물에 적용된 사례가 있는 스마트 재료는 MR 유체가 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 1은 MR 유체의 거동 메카니즘을 보여주고 있다.

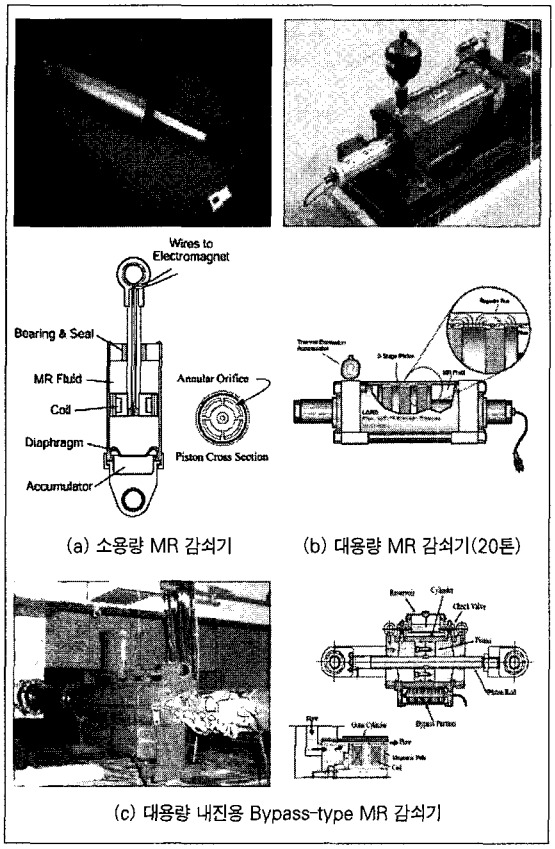
MR 유체를 이용하여 감쇠력을 적절히 조절할 수 있도록 만들어진 제어가능한 유체 감쇠기를 MR 감쇠기라고 한다. 제어 가력기 (control actuator)인 MR 감쇠기는 일반적인 능동 제어 시스템의 경우와는 달리 기계적 에너지를 직접 구조물에 가하지 못하기 때문에, MR 감쇠기를 이용한 진동 제어 시스템은 한정 입출력 (bounded-input bounded- output) 안정도가 보장된다. MR 감쇠기는 또한 장치의 기계적인 단순성 (밸브가 필요 없음), 높은 동적 범위 (MR 감쇠기에 자기장을 가해줌으로써 10배 정도의 힘을 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.

토목 및 건축 분야에서는, 1990년대 중반에 미국 일리노이 대학의 Spencer 교수 연구팀 (당시 Notre Dame 대



(a) 자기장이 없을 때 (b) 자기장이 있을 때

그림 1 MR 유체의 거동 메카니즘 (http://www.rheonetic.com/)



(a) 소용량 MR 감쇠기 (b) 대용량 MR 감쇠기(20톤)

(c) 대용량 내진용 Bypass-type MR 감쇠기

그림 2 다양한 상용 MR 감쇠기

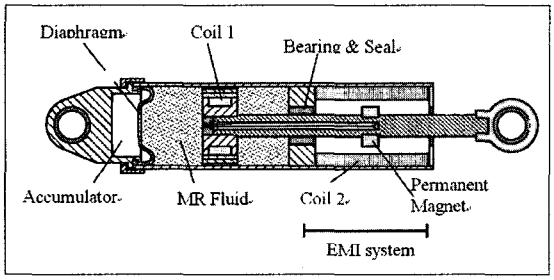


그림 3 신개념 MR 감쇠기의 개략도[5]

학)에 의해 MR 감쇠기가 도입된 이래로, MR 감쇠기를 기반으로 하는 구조물의 진동 제어 기술에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 그림 2 (a)는 기계 분야에서 개발되어 차량 좌석 흡진기로 사용되고 있는 소용량 MR 감쇠기의 개략도이다. 최근에는 토목 및 건축 구조물에 적용하기 적합한 용량의 MR 감쇠기에 대한 설계 및 제작에 대한 연구도 수행되어, 그림 2 (b), (c)와 같은 대용량 내진용 MR 감쇠기도 개발되었다. 또한, 그림 3과 같이 전자기유도 시스템 (Electro-magnetic Induction System)을 구비한 MR 감쇠기도 국내 연구진에 의해서 개발되었다[5]. 이 감쇠기는 전원공급 장치, 계측기 및 컴퓨터가 필요 없이, 구조물의 응답에 따라 전자기유도 시스템에서 전기가 발생하고 이로 인해 자기장이 가해지는 매우 간단하고 경제적인 구조물의 진동 제어 기술이다. 따라서, 다양한 토목 및 건축 구조물에 용이하게 적용할 수 있는 매우 잠재력이 큰 진동 제어 장치라고 할 수 있다. 현재, 개발된 MR 감쇠기의 동특성에 대한 수치적 · 실험적 연구가 수행되고 있으며, 또한 풍하중을 받는 케이블의 진동 제어 성능 향상을 위한 응용 연구가 진행되고 있다.

3. MR 감쇠기를 이용한 제어 문제에 대한 벤치마크 연구 사례

이번 장에서는 미국토목학회에서 주도적으로 진행하고 있는 기초격리 건물 및 교량의 내진 성능 개선을 위한 스마트진동제어 벤치마크 연구에 대하여 간략하게 소개하고자 한다. 이 벤치마크 연구에서는 기초격리 구조물의 내진 성능 향상을 위한 기본적인 제어 방법으로 MR 감쇠기를 이용한 반능동 제어 시스템을 채택하여 제시하고 있다[6-9].

3.1 기초격리 건물에 대한 벤치마크 문제

미국 Rice 대학의 Nagarajaiah 교수 연구팀은 그림 4와 같은 기초격리 건물을 대상으로 벤치마크 문제를 구성하였다[6]. 총 92개의 면진 받침과 총 16개의 MR 감쇠기가 기초와 상부구조 사이에 설치되었다.

수치모의실험을 위해 고려된 MR 감쇠기의 동적 모델은 그림 5 (a)와 같다. 조화하중에 대한 MR 감쇠기의

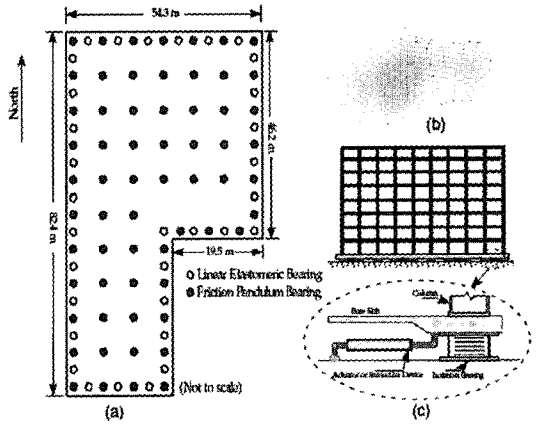


그림 4 기초격리 건물: (a) 평면도, (b) 상부구조의 유한요소 모델, (c) MR 감쇠기가 설치된 구조물[6]

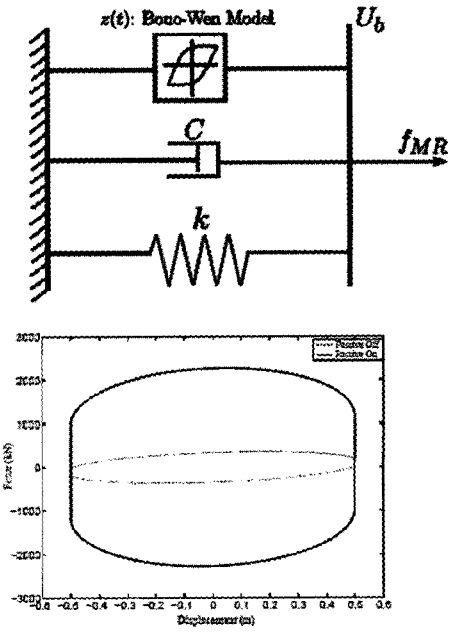


그림 5 MR 감쇠기 모델 및 힘-변위 곡선[7]

힘-변위 특성은 그림 5 (b)와 같다.

그림 6은 기초격리 건물에 대한 능동 제어 시스템과 MR 감쇠기를 사용한 반능동 제어 시스템 (clipped optimal)의 수치해석 결과를 보여준다. 그림에서 Disp.는

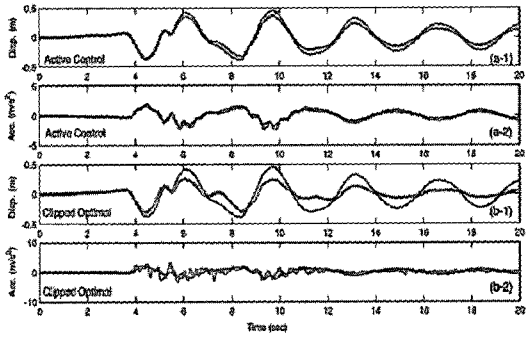


그림 6 기초격리 건물에 대한 수치해석 결과[7]

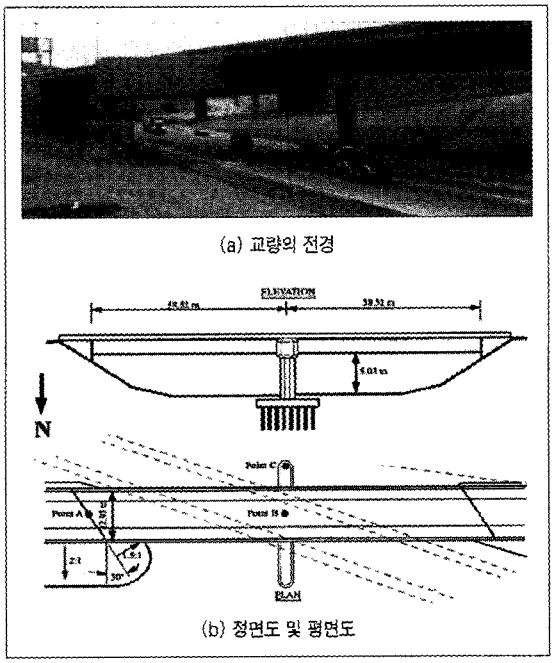


그림 7 기초격리 교량[8]

기초부의 변위, 즉 면진 받침의 변형을 의미하고, Acc.는 최상층에서의 가속도 응답을 의미한다. 그림에서 볼 수 있듯이, 기초부 변위는 반능동 제어의 제진 성능이 능동제어에 비해 우수한 반면에 최상층 가속도는 능동 제어의 성능이 우수하였다.

필자를 포함하여 세계적으로 다수의 연구자들이 기초

기초강좌

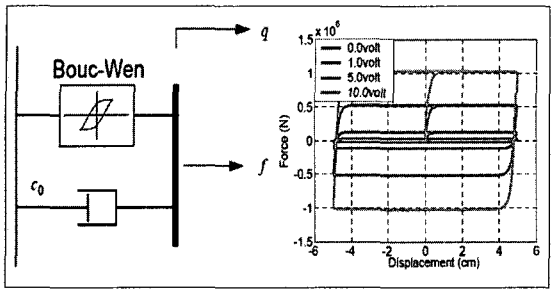


그림 8 MR 감쇠기 모델 및 힘-변위 곡선[9]

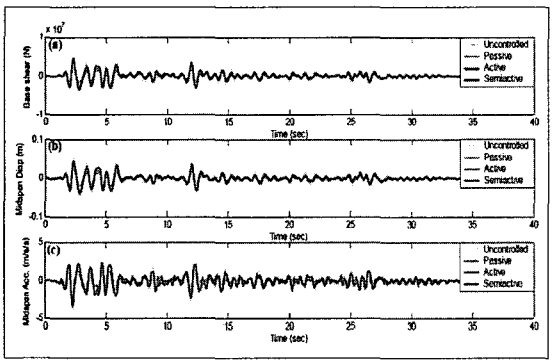


그림 9 기초격리 교량에 대한 수치해석 결과[9]

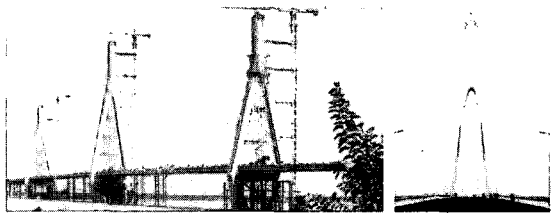
격리 건물에 대한 벤치마크 연구에 참여하였고, 연구 성과를 취합하여 국제 저명학술지에 특별호로 출간하였다. 현재는 다음 단계의 벤치마크 연구가 진행 중이다.

3.2 기초격리 고속도로 교량에 대한 벤치마크 문제

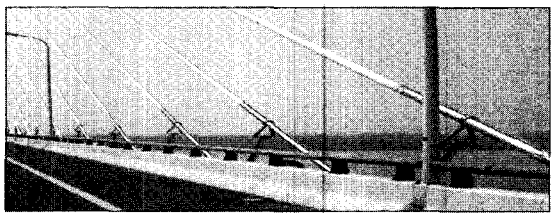
미국 City Univ. of New York의 Agrawal 교수 연구팀은 그림 7과 같은 기초격리 교량을 대상으로 벤치마크 문제를 구성하였다[8]. 총 8개의 면진 받침 (양쪽 교대에 4개씩 설치함)과 총 16개의 MR 감쇠기를 고려하였다.

수치모의실험을 위해 고려된 MR 감쇠기의 동적 모델은 그림 8 (a)와 같다. 조화하중에 대한 MR 감쇠기의 힘-변위 특성은 그림 8 (b)와 같다.

그림 9는 기초격리 교량에 대한 수치해석 결과를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 MR 감쇠기를 사용한 반능동 제어 기술은 능동 제어 기술과 기초전단력, 중앙

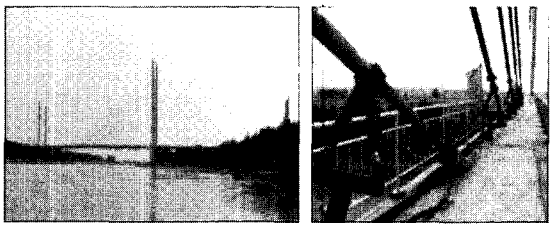


(a) 교량 전경



(b) MR 감쇠기 설치

그림 10 중국 Dongting Lake 교량[1]



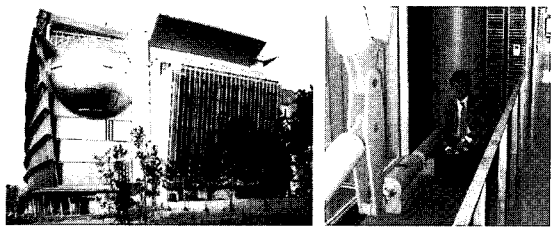
(a) 교량 전경 (b) MR 감쇠기 설치

그림 11 중국 Binzhou Yellow River 교량[10]

경간 변위 및 가속도 응답에 대해서 비슷한 제어 성능을 나타내었다.

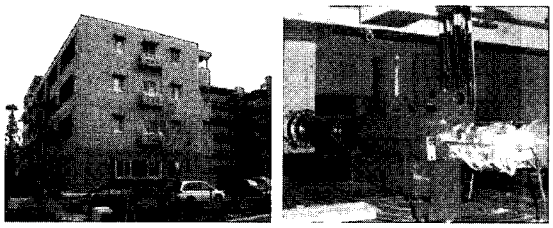
4. 실 구조물 적용 사례

이번 장에서는 MR 감쇠기를 이용한 구조물의 진동제어 기술이 토목 및 건축 구조물에 실제로 적용된 사례를 살펴보았다. 1990년대 초반 이래로 많은 연구자들이 MR 감쇠기의 효용성을 이론적 · 실험적으로 입증하였다. 이러한 기존 연구들을 바탕으로 2001년에 MR 감쇠기가 교량과 건물에 바람 제진용과 내진용으로 각각 적용되었다. 중국의 Dongting Lake 교량에 적용된 제



(a) 건물 전경 (b) MR 감쇠기의 설치

그림 12 일본의 과학미래관[1]



(a) 건물 전경 (b) MR 감쇠기의 설치

그림 13 40톤 MR 감쇠기가 설치된 주거용 건물[11]

진용 소형 MR 감쇠기와 일본의 과학미래관에 내진용으로 적용된 대용량 MR 감쇠기가 토목 및 건축 분야의 세계 최초 적용 사례이다. 이를 기반으로 새로 시공 중인 여러 장대 교량의 케이블 제진을 위해 MR 감쇠기가 설치되고 있으며, 고층 건물의 제진용으로 MR 감쇠기를 적용하기 위한 타당성 연구가 수행 중이다.

중국의 Dongting Lake 교량은 그림 10 (a)에서 보는 바와 같이 사장교 형태이며, 케이블의 진동을 줄이기 위해 각 케이블마다 2개의 MR 감쇠기를 설치하였다. 그림 10 (b)에서 볼 수 있듯이 총 156개의 케이블에 312개의 MR 감쇠기가 설치되었다. 이러한 세계 최초의 실제 적용 프로젝트를 위해, 해석적인 시험 및 실험실 규모의 실험뿐만 아니라 자세한 현장 시험이 수차례 수행되었다. 이러한 프로젝트의 기술적인 지원은 중국의 Central South University (Z.Q. Chen), Hong Kong Polytechnic University (J.M. Ko and Y.Q. Ni) 및 미국의 B.F. Spencer, Jr.가 공동으로 수행하였다. 최초로 적용된 MR 감쇠기를 이용한 구조물의 진동 제어 기술의 성능에 고무되어, 그림 11과 같이 중국에서는 2003년 10월에 Binzhou Yellow River 교량에 제진용 소형 MR 감쇠기가 추가로 설치 완료되었다[10]. 또한, 세계에서 가장 긴 사장교로 현재 홍콩에서 시공 중인 Stonecutter 사장교 (주경간 길이: 1,018 m) 및 중국의 Sutong 사장교 (주경간 길이: 1,088 m)의 케이블 진동 제어를 위해서도 MR 감쇠기를 적용하기 위해서 타당성 연구가 수행 중이다.

2001년 세계 최초로 MR 감쇠기를 실제 건축 구조물에 적용하였다. 이는 일본의 과학미래관으로 지진에 대비하기 위해서 그림 12와 같이 30톤 규모의 MR 감쇠기 2개를 각각 3층과 5층에 설치하였다. 적용된 대용량 MR 감쇠기는 미국 Lord Corporation의 MR 유체를 이용하였고, 일본의 Sanwa Tekki Corporation에서 직접 설계/제작되었다. 최근에는 그림 13과 같이 일본에서 거주용 건축물에 최고의 내진 성능을 제공하기 위하여 적층고무받침, 납 댐퍼, 점성 댐퍼와 함께 40톤 규모의 MR 감쇠기 (Sanwa Tekki Corporation 설계 및 제작)를 적용한 사례도 있다[11].

5. 맺음말

이 글에서는 지진이나 강풍과 같은 자연 재해에 의해 발생하는 대형 토목 및 건축 구조물의 과도한 진동을 저감시키기 위해 활발히 연구되고 있고, 특히 최근 들어 대형 구조물에 실제로 적용되기 시작한 진동 제어 기술인 MR 감쇠기를 이용한 반능동 진동 제어 시스템에 대하여 간략하게 살펴보았다.

먼저, MR 유체 및 MR 감쇠기의 기본적인 개념과 국내 · 외에서 개발된 MR 감쇠기의 종류를 간략하게 설명하였다. 여기서 국내 연구진에 의해 독자적으로 개발된 새로운 개념의 MR 감쇠기를 소개하였는데, 이 감쇠기는 전원공급장치, 계측기, 컴퓨터가 필요 없는 매우 간편하고 경제적인 제진 장치이기 때문에 향후 토목 및 건축 분야에 활용가능성이 매우 높다 하겠다. 그리고, 미국토목학회에서 주도적으로 진행하고 있는 기초격리 건물 및 교량에 대한 벤치마크 구조제어 문제를 간략히

기초강좌

제시하였으며, 마지막으로 기존의 다양한 이론적, 실험적 연구 성과를 바탕으로 현재 일본과 중국에서 실제 토목 및 건축 구조물에 적용된 MR 감쇠기를 이용한 구조물의 진동 제어 기술의 실제 응용 사례를 소개하였다.

이상에서 간략하게 살펴본 바와 같이 MR 감쇠기를 이용한 구조물의 진동 제어 기술은 토목 및 건축 구조물의 자연 재해에 대한 방재 수단으로 매우 유용하게 사용될 수 있으며, 앞으로 실제 구조물에 대한 적용 사례는 더욱더 증가될 것으로 예상되기 때문에, 국내에서도 MR 감쇠기를 기반으로 하는 반능동 진동 제어 기술에 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.

참고문헌

(1) Spencer, Jr. B. F. and Nagarajaiah, S., 2003, "State of the Art of Structural Control", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 129, pp. 845~856.

(2) 정형조, 이인원, 2004, "토목/건축 분야의 스마트제어 기술 - MR 댐퍼-기반 스마트제어 기술을 중심으로", 전산구조공학회지, Vol. 16, No. 3, pp. 41~50.

(3) 최승복, 홍성룡, Wereley, N. M., 2005, "MR 유체의 특성과 진동 분야에 관한 응용연구 사례 및 연구동향", 한국소음진동공학회지, Vol. 15, No. 1, pp. 9~19.

(4) Jung, H. J., Spencer, Jr., B. F., Ni, Y.Q. and Lee, I. W., 2004, "State-of-the-art of Semiactive Control Systems Using MR Fluid Dampers in Civil Engineering Applications", Structural Engineering and Mechanics, Vol. 17, Nos. 3~4, pp. 493~526.

(5) 조상원, 이인원, 2005, "전자기유도부를 구비하는 MR감쇠장치", 특허등록 제0416398호.

(6) Narasimhan, S., Nagarajaiah, S., Johnson E. A. and Gavin, H. P., 2006, "Smart Base-isolated Benchmark Building. Part I: Problem Definition", Structural Control and Health Monitoring, Vol. 13, Nos. 2~3, pp. 573~588.

(7) Nagarajaiah, S. and Narasimhan, S., 2006, "Smart Base-isolated Benchmark Building. Part II: Smaple Controllers for Linear Isolation Systems", Structural Control and Health Monitoring, Vol. 13, Nos. 2~3, pp. 589~604.

(8) Agrawal, A. K., Tan, P., Nagarajaiah, S. and Zhang, J., 2004, "Benchmark Structural Problem for a Seismically Excited Highway Bridge. Part I: Problem Definition", <http: //www-ce.engr.ccny.cuny.edu/People/Agrawal/Benchmark%20Problem.html>.

(9) Tan, P. and Agrawal, A. K., 2004, "Benchmark Structural Problem for a Seismically Excited Highway Bridge. Part II: Sample Control Designs", <http://www-ce.engr.ccny. cuny.edu/People/Agrawal/Benchmark%20Problem.html>.

(10) Ou, J., 2004, "Advanced on Structural Control in Mainland China", Proceedings of the JSSI 10th Anniversary Symposium on Performance of Response Controlled Buildings, Yokohama, Japan, CD-ROM.

(11) Fujitani, H., Sodeyana, H., Tomura, T., Hiwatashi, T., Shiozaki, Y., Hata, K., Sunakoda, K., Morishita S. and Soda, S., 2003, "Development of 400 kN Magneto-rheological Damper for a Real Base-isolated Building", Proceedings of SPIE Conference on Smart Structures and Materials 2003: Damping and Isolation, Vol. 5052, pp. 265~276.

「기획 - 민경원 편집이사 : kwmin@dankook.ac.kr」