

BIM기반의 구조물 진동제어를 위한 Passive Magnetic Device 개발에 관한 연구

A Study of Passive Magnetic Device based on BIM for the Vibration Control of Structures

구선모¹⁾, 김재준²⁾
Koo, Sun-Mo¹⁾ · Kim, Jae-Jun²⁾

Received September 9, 2016; Received September 19, 2016 / Accepted September 21, 2016

ABSTRACT: Structural members are designed to maintain the load-carrying capacity as well as structural strength, and the structural serviceability such as the deflection, cracks, and vibration to give the occupants uncomfortable environment should be checked. Recently, the importance of the vibration has been issued since the Techno Mart accident due to vibration resonance. This study provides a passive vibration control system using the repulsion force of magnets to reduce dynamic vibrations. The system is devised by importing the constraint condition by a hinge to operate magnets installed at two adjacent locations. The effectiveness of the proposed system is investigated by the vibration control test of a steel beam with and without the control system. It is illustrated in the test that the system is activated by the control forces executed by the magnets and can be utilized in reducing the dynamic responses. The system can be applied to pedestrian bridge and traffic bridge. The applicability is expected in the future by optimizing the factors to affect the dynamic responses like the intensity, mass, locations of magnets.

KEYWORDS: Passive Vibration Control System, Vibration Control, Control Force, Constraint, BIM, Modeling

키워드: 진동제어시스템, 진동제어, 제어력, BIM 모델링

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 들어 구조물은 건설기술 및 재료의 발전으로 단면의 감소 및 장경간화 되고 있으며, 더불어 구조물의 안전성을 확보하고 구조적 기능을 원활히 수행 할 수 있도록 성능을 개선·평가·관리하는 기술이 크게 증가하고 있다(Heo et al., 2010). 구조물은 충분한 강도를 확보토록 단면이 설계되고 이후 사용 중에 발생할 수 있는 처짐, 균열 및 진동 등에 대해 평가된다. 이들은 사용자에 불쾌감을 유발할 수 있는 요인들로 저평가될 수 없다. 특히 진동은 설계단계에서 충분히 평가될 수 없으므로 사용 중에 다수의 문제를 야기할 수 있다.

테크노마트에서 공진에 의해 사용자에 큰 불쾌감을 주듯이 지진이나 바람과 같은 외부에서 작용하는 동하중 외에 미세한 진동이 구조물에 악영향을 미칠 수 있다. 재료의 고강도화로 인

한 단면의 감소는 구조물의 진동과 깊은 연관이 있다. 현재 교량 혹은 보도교는 최근 차량의 증가로 인해 야기되는 교통의 혼잡을 피하기 위해 도로 위의 도로의 폭이 점차 넓어지고 있다(Choi et al., 2003). 장경간의 바닥판에도 불쾌감을 주는 진동이 발생할 수 있다. 이로 인해 외부의 진동원에 의한 진동으로 사용자에 게 불쾌감을 주거나 혹은 외부에서 불어오는 바람이나 지진에 의해 발생하는 진동은 구조물에 큰 손상을 입히거나 심지어 인명피해를 발생시키며, 단순히 진동과 소음을 발생시키는 수준을 넘어서 각종 시스템의 수명을 단축시키거나 오작동을 일으키는 원인을 제공하기도 한다.

이를 위해 구조물의 진동을 제어하기 위한 방법으로 구조물의 강성을 아주 높게 하는 강성제어방법(stiffness control), 지진과 같은 가진력이 구조물로 전달되는 것을 차단하는 원리를 이용한 방진(vibration isolation), 그리고 구조체에 진동에너지를 열로 소산시켜 진동을 억제하는 댐퍼(damper)를 부착하는

¹⁾학생회원, 한양대학교 건축공학과 석사과정 (readerkoo@gmail.com)

²⁾정회원, 한양대학교 건축공학과 교수 (jjkim@hanyang.ac.kr) (교신저자)

방법 등 여러 가지 방법들이 제시되었다. 이들 방법들을 소형화 할 필요가 있으며, 보다 실제적이며 효율적이며 경제적으로 설치할 수 있는 방법을 강구할 필요가 있다. Choi(2003)와 Yoo (2003)는 TMD(tuned mass damper)를 이용한 기존 보도교의 진동을 제어하는 방법을 제시하였다. 이 방법은 진동 제어는 효율적이지만 설치나 경제적인 측면에서 실용화하는데 어려움이 있으리라 판단된다.

또한, Lee(2000)는 점성유체를 사용하여 유체가 에너지를 흡수하여 구조물에 미치는 에너지를 감소시키는 점성 댐퍼를 제시하였다. 이 방법은 유체(액체)의 누출 위험이 크고, 온도 등 환경에 따른 유체 고유의 특성이 변질될 위험이 있어 어려움이 있으리라 판단된다.

본 연구에서 제안하는 자기력에 의한 진동제어시스템(passive magnetic device, PMD)은 구조물의 미세진동을 제어하기 위하여 자석의 척력을 제어력으로 활용하여 그 힘에 의해 진동을 제어하게 된다. 외부에서 작용하는 동하중에 의해 발생하는 수직진동을 이웃한 위치에 자석과 자석들의 변위를 구속하는 척력에 의해 구조물의 수직진동을 제어하게 된다. 이 방법은 기존의 방법과 비교하여 명확하게 진동을 제어할 수 있는 장점이 있으며, 실용성 및 경제성이 있는 제어시스템으로 활용이 기대된다.

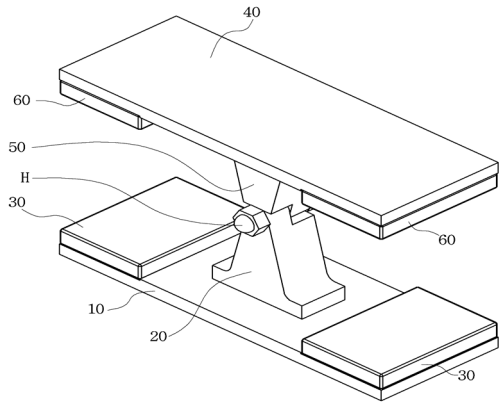
또한, 현재 공공기관이 주축이 되어 시장 확산을 주도하고 있는 BIM 분야에서 구조분야는 구조부재에 대한 물량산출, 재료 일람 등의 추출이 가능해지며, 구조정보를 포함한 BIM을 활용하여 공정관리의 효율성을 높이는 등 다양하게 활용되고 있다.

따라서, 본 연구는 BIM Tool을 이용하여 진동제어장치(PMD)를 모델링하여 시각적인 효과를 더해 진동제어의 원리를 설명하고, 실제 이를 구조물에 적용하였을 시 유지관리 측면에서 BIM의 활용방안을 제시하여 실제 시공 및 운영에 대한 활용이 기대된다.

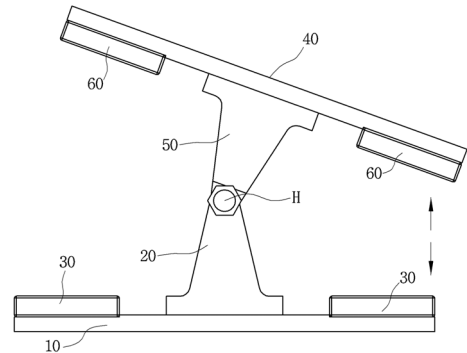
2. 제어시스템의 기본원리

PMD의 기본개념은 시소의 원리에서 도입하였으며, 시소와 같은 형태로 제작하였다. 가운데 힌지를 두어 위·아래로 윗면이 움직일 수 있게 하였고 자석을 부착하는 모델의 재료는 자성에 영향을 받지 않는 알루미늄으로 코팅하여 도면화 한 후 제작하였다¹⁾.

감쇠효과는 구조물과 같은 물리적인 시스템이 외부의 자극으로부터 입력된 에너지를 소산시키거나 구조물의 전체적인 반응을 저감시키며 이에 대한 움직임을 지배하는 것을 말한다. 시소의 원리에 근거하여 모델 디자인을 하였고, 플레이트 가운데에



(a)



(b)

Figure 1. Structure of PMD system: (a) shape of pmd, (b) control force exerted by the pmd

PMD를 설치하여 진동을 제어 하도록 설계하였다. 장치의 왼편 위·아래 끝 면에 자석을 부착하고 가운데 힌지를 두어 보에 수직진동이 발생했을 때 척력이 작용하여 진동과 반대되는 힘의 방향으로 작용하여 제어하는 원리이다. 시소처럼 양쪽 면에서 상호작용하기 때문에 더욱 효율적이다. 힘은 질량에 비례하기 때문에 질량만으로도 진동 제어 효과가 있지만, 거기에 자석의 척력이 더해져서 효율적이다.

PMD는 Figure 1의 하판과 하판의 상면에 설치되는 하부연결바, 하판에 설치되는 하부자석, 하판의 상측에 일정거리 이격되게 배치되는 상판, 상판의 저면에 설치되는 상부연결바, 상판에 설치되는 상부자석으로 구성된다. 하판은 넓은 평판 형상으로서 그 재질은 부도체로 구성된다. 하부연결바는 하판의 상면 중앙에 직립되게 돌출 모양으로 형성된다. 하부자석은 하판의 상면 양측단에 설치된다. 상·하부의 연결바는 진동이 발생하였을 때, PMD로 인한 척력이 작용하기 위한 판들의 거동을 가능하게 하는 역할을 한다.

상판은 하판과 동일하게 넓은 평판 형상을 취하는 것으로서, 이러한 상판은 하부연결바와 상부연결바를 통하여 하판에 회전

1) 10: 하판, 20: 하부연결바, 30: 하부자석, 40: 상판, 50: 상부 연결바, 60: 상부자석, H: 힌지

이 가능하게 설치된다. 상부연결바는 상판의 저면 중앙에 직립되게 돌출 형성된다. PMD를 실험장치에 설치하여 진동을 가하면 상부연결바는 하부연결바와 힌지결합되어 진동에 의해 수직으로 회전하게 되며 이때, 상·하부에 부착되어있는 자석에 척력이 작용하게 된다. 즉, 상부연결바의 하단 부분과 하부연결바의 상단 부분은 겹쳐지고, 이 겹쳐지는 부분에 힌지가 설치되어 상부연결바와 하부연결바가 거동하면서 척력이 더해져 진동을 감쇠시키는 효력을 발휘하게 된다.

이러한 힘이 진동제어장치에 발생되고 이 힘을 제어력이라고 한다. 이 힘에 의해 발생하는 진동을 제어하게 된다. 이런 기본 개념 하에서 다음 장에서 제작된 시스템에 의해 그 활용성을 검증하는 실험을 실시하였다.

3. 진동제어실험

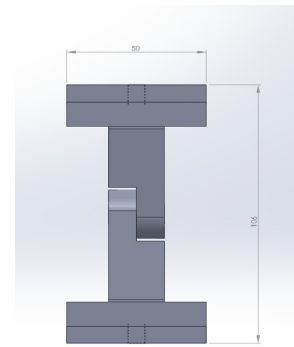
3.1 실험계획

본 연구는 PMD의 진동 제어 효과를 측정하기 위하여 다음과 같이 수행하였다. 단순보 형태의 실험장치를 고안하여 길이가 1500mm이며 두께가 6mm인 강철 슬래브를 이용하였고, 슬래브의 휨강성은 두께에 따라 달리 하므로 PMD의 제어 효과 차이를 확인하기 위하여 두께를 9mm와 11mm로 구분하여 실험을 실시하였다.

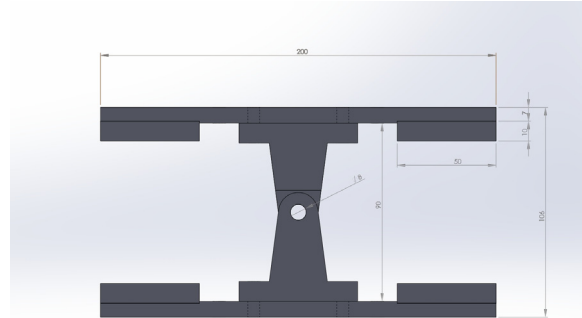
본 실험은 구조물 자체로 인한 진동감쇠는 고정적으로 존재한다고 가정하였고, PMD의 유무에 따른 시간/가속도 그래프의 진폭의 크기 변화로 인한 진동제어 효과를 확인하는 것에 범위를 제한하였다. 이는 기존 질량에 대한 진동 제어 모델인 TMD가 이미 존재하므로 차별성을 두기 위함이다.

진동을 발생시키는 장치(가진장치)는 일정하게 진동을 발생시키도록 핸드폰진동과 임팩트 해머를 통해 보에 진동을 주었다. 해머진동은 직접 사람이 치기 때문에 일정하기 않아 6~7번 정도 친 후에 같은 힘의 크기를 비교하여 제어 효과를 측정하였다. 진동의 계측센서로는 가속도계를 사용하였으며 계측된 데이터는 DEWE 43 이라는 데이터 수집장치에 의해 저장되었다. 가속도계는 PMD를 중심으로 양쪽에 같은 간격으로 3개씩 장착하였다.

본 모형은 BIM Tool인 Revit을 활용하여 설계하였고, 도면화한 후 주문제작을 통해 모델을 제작하였다. 모형(PMD)의 크기는 남춘천역에 설치된 보도교와 춘천시외버스터미널에 설치된 육교를 측정하여 실험실에 있는 보에 맞게 소형화 하였다. Figure 2의 Figure 3과 같이 완성된 장치의 감쇠효과를 측정하기 위해 실험을 실시하였다. 가진동 외의 진동을 최소화하기 위하여 방음시설을 갖춘 공간에서 실험을 진행하였다. 실험의 변수는 보의 두께(9mm, 11mm)와 모형의 형태로 지정하였다. 슬래



(a)



(b)



(c)

Figure 2. Impact hammer test of installed pmd: (a) side view of pmd, (b) front view of pmd, (c) experiment view

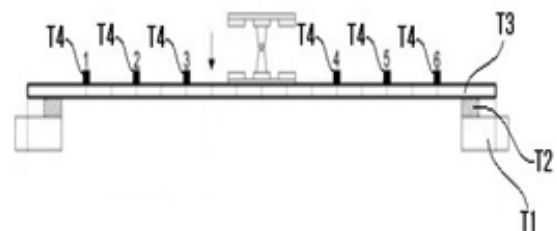


Figure 3. Installed the pmd slab

브 양단은 rubber packing에 의해 지지하여 진동에 의해 발생하는 진동에너지를 흡수토록 하였다. PMD의 형태에 대한 것은

힌지가 있는 높이를 'A'로 표기하였고, 자석이 부착되어 있는 가로 부분을 'B'라고 표기하였다. 실험 데이터는 PMD의 유무에 따른 가속도 그래프의 진폭 변화를 통하여 진동 제어 및 감쇠 효과를 측정하였다.

3.2 적용이론

본 연구의 PMD는 자기력을 이용한 진동제어장치이다. 힌지를 중심으로 자석의 중심까지 좌우측의 길이 $l_a = 60\text{mm}$, $l_b = 60\text{mm}$ 이며, 상하 자석 사이의 높이 $h = 20\text{mm}$ 이다. 두 개의 자석 사이에 발생하는 자력 f^c 는 다음과 같이 산정된다.

$$f^c = \frac{\mu q_{m1} q_{m2}}{4\pi r^2} \quad (1)$$

또한 자석에 대한 정보는 다음과 같이 정의된다.

$$f_a = \frac{c_a}{h - (\mu_a - \mu_i)^2} \quad (2)$$

$$f_b = \frac{c_b}{h - (\mu_b - \mu_j)^2} \quad (3)$$

여기서, f_a 는 자석이 위치한 점 a와 절점 i 사이에 자석에 의해 발생한 자기력이라 정의하였고, f_b 는 절점 b와 절점 j 사이에 발생한 자기력으로 외력에 작용하게 된다. 또한, $C = \frac{\mu q_{m1} q_{m2}}{4\pi}$ 를 나타내며, 이 수치실험에서는 이들 값을 각각 $C_a = 20,000\text{N/mm}^2$ 와 $C_b = 25,000\text{N/mm}^2$ 로 가정하였다. 힌지를 중심으로 각각 l_a 와 l_b 에 위치한 자석이 있는 위치에서의 변위는 다음과 같은 구속조건(constraint)을 만족하여야 한다.

$$\mu_a = -l_a \frac{u_b}{l_b} \quad (4)$$

보의 진동응답을 산정하는 동안에 식 (4)의 구속조건을 모든 시간에서 만족하도록 구속력(constraint force)이 작용하게 되며 이 구속력을 제어력(control force)이라 일컫는다.

3.3 임팩트 해머 진동 제어 효과

외부의 가진으로 임팩트 해머를 사용하고 이에 대응하는 가속도 응답을 가속도계로 측정하였다. PMD 설치 전후에 임팩트 해머에 의한 가력의 크기를 동일하게 하기 위하여 조율하였다. 가력으로 인한 가속도의 저감 여부를 평가하여 PMD의 효과를 검증할 수 있을 것이다.

임팩트 해머에 의한 PMD의 유무에 따른 응답을 Figure 4와

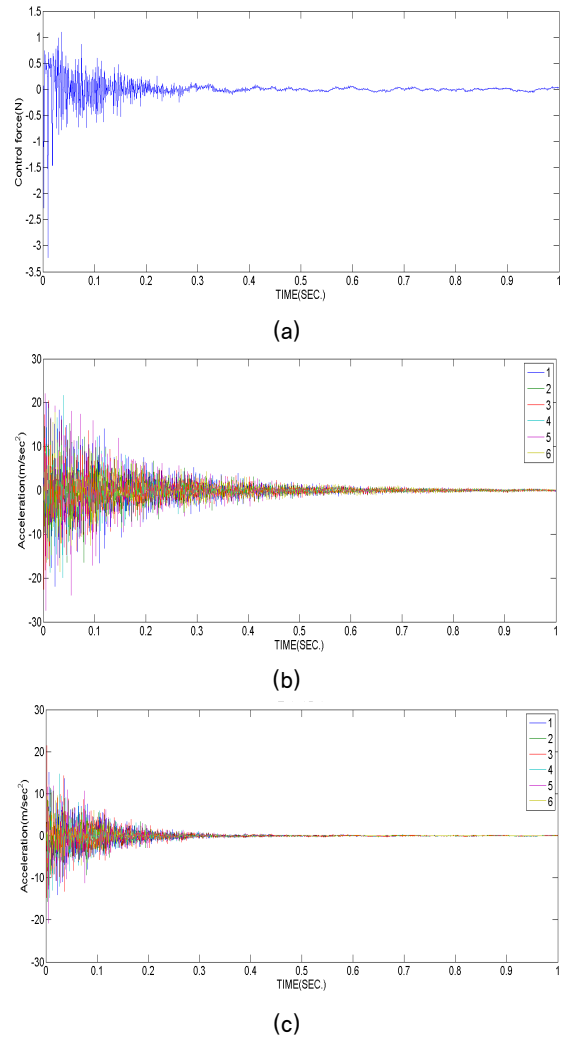


Figure 4. Test of 9t steel beams: (a) control force, (b) acceleration of uninstalled pmd, (c) acceleration of installed pmd

50에 강철보의 두께에 따른 결과를 나타내었다. Figure 4와 5의 (b)와 (c)에서 가로축은 시간(sec)이며 세로축은 가속도(m/sec^2)를 나타낸다. 이 그림에서 PMD 설치 전후에 모든 측정절점에서 가속도의 변화를 관찰할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 PMD의 감쇠효과가 있음을 알 수 있으며, 각 절점에서 평균 감쇠효과가 평균 50% 이상임을 볼 수 있다. 이들 그림의 비교를 통해 보의 두께에 따라 강성이 다르기 때문에 가속도의 최대진폭 크기가 달랐으며, 12T 플레이트의 평균 진동 제어 효과가 9T 보다 더 높게 나타난 것을 볼 수 있다. 이는 강철보에 작용하는 제어력의 작용에 기인한다고 평가된다. PMD에 의한 진동감소효과는 자기력으로써 척력의 작용에 의한 제어력의 작용에 의한다. 이 제어력을 Figure 4와 5의 (a)에 나타내었다. 이 제어력의 작용으로 강철보의 진동이 감소되었으며, 단면두께가 작을수록 작은 제어력에 의해 진동이 제어됨을 볼 수 있다.

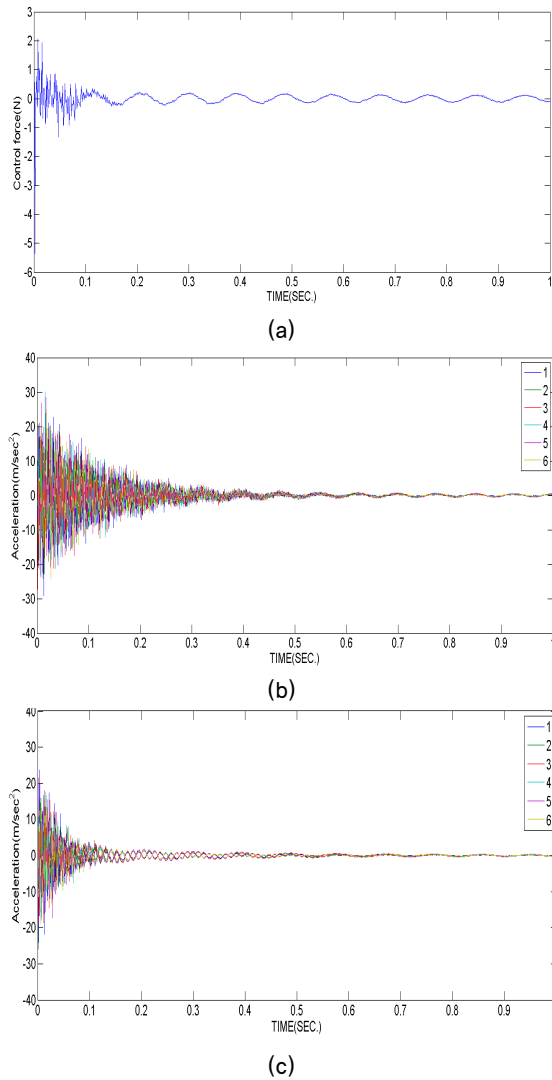


Figure 5. Test of 12t steel beams : (a) control force, (b) acceleration of uninstalled pmd, (c) acceleration of installed pmd

Figure 4와 5의 (b),(c)에서 확인 할 수 있듯이 PMD의 설치 유무에 따라 진폭의 차이를 확실하게 확인할 수 있다. Figure 4 (b)의 진폭의 절대값은 35, (c)는 20으로 측정되었고, Figure 5 (b)는 55, (c)는 35로 나타났다. 이는 두께에 따른 PMD의 진동 제어 효과를 나타내고 있다. 이들 그림에서 PMD에 의한 응답감소 효과를 관찰 할 수 있다. 즉, 자기력의 척력에 의해 발휘되는 제어력에 의해 진동 제어 효과가 있음을 인지 할 수 있다.

3.4 임팩트 핸드폰 고정 진동 제어 효과

교량이나 육교 등에는 지속적으로 동하중이 작용하는 것을 감안하여 백색잡음(white noise)에 의한 진동저감효과를 조사 하였다. 백색잡음은 진동모드의 핸드폰에 의해 연출하였다.

9T 강철보에 핸드폰으로 가진을 1분 동안 발생시켰고, 진동

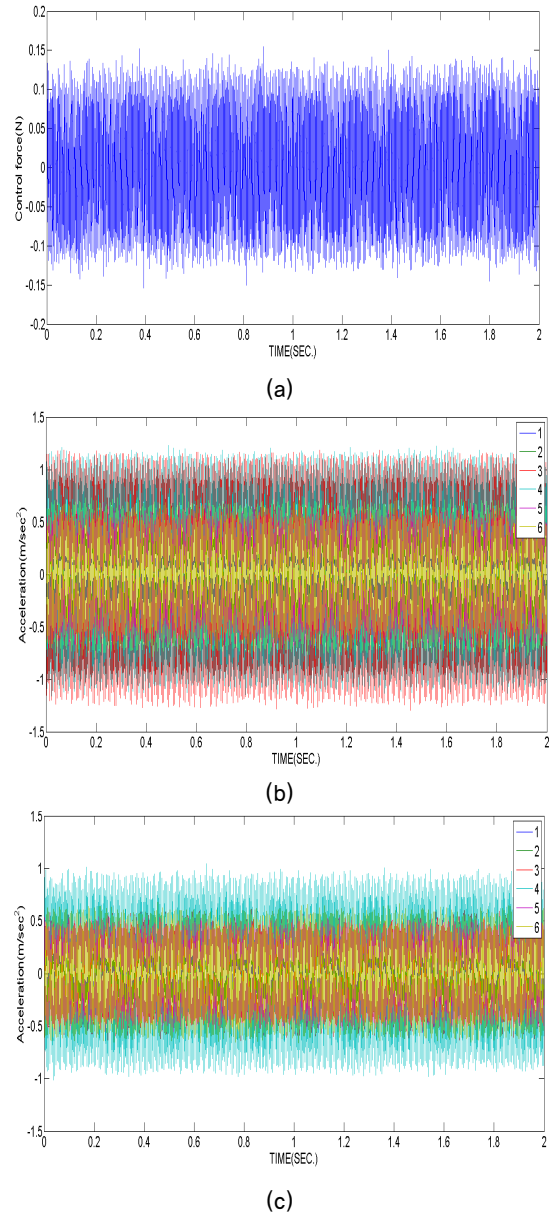
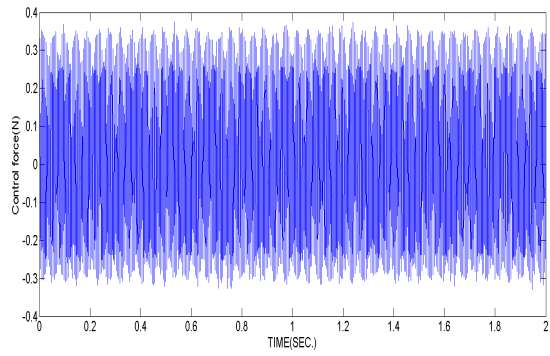
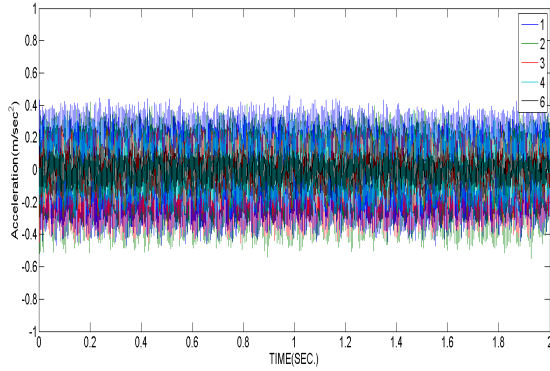


Figure 6. 9T steel beam experiments under white noise: (a) control force, (b) acceleration of uninstalled pmd, (c) acceleration of installed pmd

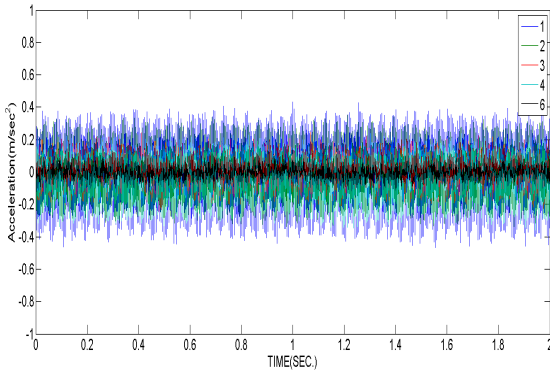
제어를 확인하기 위하여 가진시간을 최대 2초로 설정하였다. 임팩트 해머를 사용한 실험결과와 비교해보면 일정한 진동을 유지 하기 때문에 PMD 진동 제어 효과를 확인하는데 더 명확하다. 실험결과는 임팩트 해머를 사용한 결과와 유사한 것을 볼 수 있다. Figure 6과 7에 실험결과를 나타내고 있다. 자기력에 의해 발생하는 제어력을 Figure 6과 7의 (a)에 나타내었다. Figure 6 (b)의 진폭의 절대값은 20이고, (c)는 1로 약 50% 감소되었음을 알 수 있다. 또한 Figure 7 (b)는 0.8, (c)는 0.4로 측정되었다. 이를 통하여 강철보의 두께가 증가할수록 큰 제어력이 발생하는 것을 볼 수 있다. 이 제어력에 의해 수직진동이 저감되는 것을



(a)



(b)



(c)

Figure 7. 12T steel beam experiments under white noise: (a) control force, (b) acceleration of uninstalled pmd, (c) acceleration of installed pmd

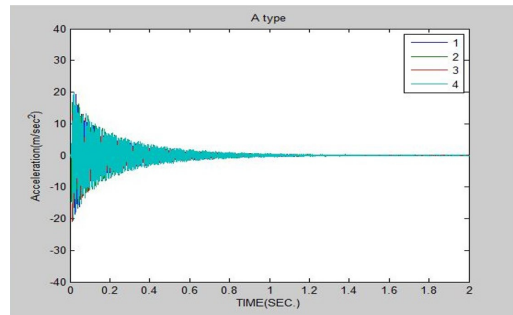
예상할 수 있다. Figure 6과 7의 (b)와 (c)에는 측정된 가속도 응답을 나타내고 있다. 이들 그림에서 PMD에 의한 응답감소 효과를 관찰할 수 있다. 즉, 자기력의 척력에 의해 발휘되는 제어력에 의해 진동제어 효과가 있음을 인지할 수 있다.

3.5 PMD의 형태에 따른 진동 제어 효과

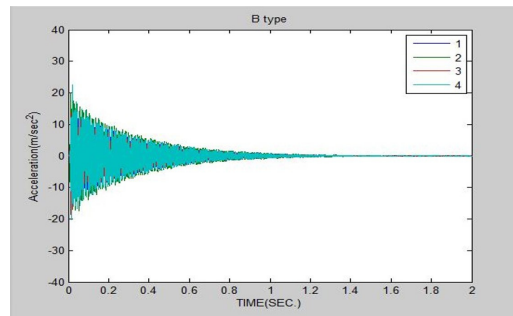
본 실험은 PMD의 형태에 따른 진동 제어 효과를 측정된 것이다. 모델의 높이와 경간의 길이에 따른 진동 제어 차이를 Figure 8에 나타내었다. Table 1은 PMD 변형된 형태를 O와 X로 표시

Table 1. Modified forms of pmd

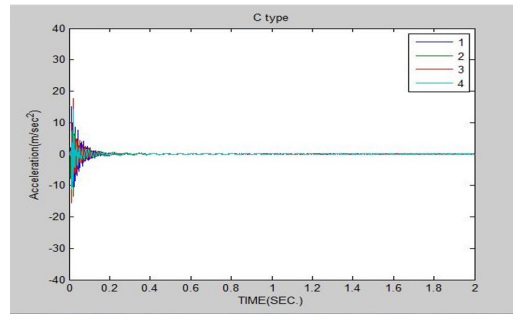
Case	A(PMD의 높이)	B(PMD의 넓이)
(a)	O	O
(b)	O	X
(c)	X	O
(d)	X	X



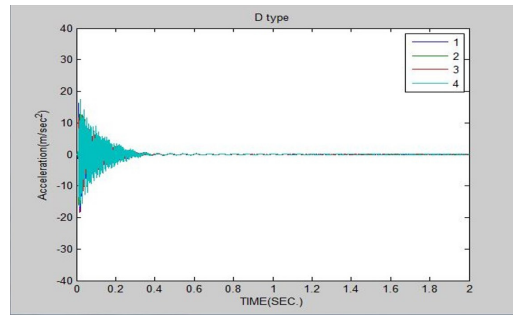
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 7. Comparison vibration reduction effects of PMD shape change.: (a) case (a), (b) case (b), (c) case (c), (d) case (d)

한 것이다. 예를 들면, case (a)는 PMD의 높이를 증가시키고, 상·하단부의 길이를 증가시켜 실험한 것을 의미한다. 실험결과, PMD의 높이를 증가시키고 경간의 길이를 줄였을 때인 case (b)의 경우가 가장 진동을 저감시키는 효과를 나타내는 것을 확인하였다.

4. PMD의 유지관리를 위한 BIM 적용방안

구조 분야에서는 구조 BIM 활성화를 위하여 한국구조기술사회를 중심으로 구조 BIM 작성지침과 구조데이터베이스 구축을 위한 연구용역을 수행하고 있다. 이와 같이 구조 BIM의 실시는 관심수준에서 필수사항으로 변모하고 있으며, 타 건축 및 건설 분야의 BIM체계와 상호연계를 통하여 보다 발전하는 구조 BIM 체계가 이루어져야 할 것이다.

이를 위해 향후 본 연구에서 개발한 PMD에 RFID 센서를 적용하여 유지관리 측면에서 구조물에 발생하는 진동을 실시간 모니터링을 통한 진동 제어 효과를 검증 및 분석하고, 구조물 사용자 측면에서도 실시간으로 제공되는 정보를 통하여 구조물에 대한 안전성과 신뢰성을 갖게 되는 효과를 기대할 수 있다.

5. 향후 연구 진행 방향 및 결론

본 연구는 PMD를 사용하여 자기력에 의해 진동 에너지 감쇠 및 제어 효과를 확인하였다. PMD의 진동제어 성능을 평가하기 위하여, 보도교를 소형화하여 만든 보에 임의의 두 종류의 가진을 주어 진동제어 실험을 수행하여 다음과 같은 결과들을 얻을 수 있었다.

- (1) 자기력의 척력을 이용하여 수동적으로 진동을 제어할 수 있는 시스템을 제시하였다. 이 시스템은 기존 동조질량감쇠기 등과 비교하여 경제적이며, 설치가 용이하고 제어효과가 분명한 장점이 있으므로 실용화가 가능하다고 판단된다.
- (2) 자기력의 세기는 두 물체의 거리와 중량에 영향을 받으며 자중이 클수록 더 큰 자기력인 제어력이 발생하게 되므로

제어효과가 큼을 관찰하였다. 자기력에 의한 효과를 고려한 최적의 설계방안을 제시하여야 할 필요가 있다.

- (3) 본 시스템의 위치는 진동제어효과와 밀접한 관계가 있으므로 최적의 위치를 설정해야 하는 등 향후 많은 후속연구가 필요하다.
- (4) 이 연구의 결과를 실용화하기 위하여 자기력에 의한 진동제어에 영향을 미치는 자력의 세기, 최적설계 등을 고려한 후속연구의 필요성이 있으며, 그 적용범위는 다양하며 제진시스템으로써 활용성이 기대된다.

References

ASTM E756-04, Standard Test Method for Measuring Vibration Damping Properties of Materials.

Choi, S. J., Yoo, M. S., Ahn, S. G. and Park, C. H. (2003). Effective Vibration Control of Existing Footbridge Using Tuned Mass Damper, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 4, No. 4, pp. 263-269.

Heo, G. H., Jeon, J. R., Park, S. B. and Oh, S. K. (2010). Real-time Vibration Control of Bridges by MR damper and Lyapunov Control Algorithm, Transactions of the Korean Society for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 14, No. 4, pp. 55-61.

Lee, J. I., Jeon, S. H., Yoo, M. S. and Hiroshi, K. (2002). Effective Vibration Control of Pedestrian Bridge Using Tuned Mass Damper, Transactions of the Korean Society for Civil Engineering, Vol. 4, No. 4, pp.

Yang, D. H., Kim, K. Y., Heo, S. and Kwak, M. K. (2011). Vibration Control of Structure using Variable Frequency Tuned Mass Damper, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol 5, No.4, pp. 271-272.