

의료용 로봇의 미진동제어를 위한 가변감쇠형 동조질량감쇠기 기술 개발

Developing Tuned Mass Damper of Adjustable Damping Type to Control the Vibrations of Medical Robots

차 윤 용* · 전 중 균† · 박 상 곤** · 한 현 희**

WoonYong Cha, ChongKeun Chun, SangGon Park and HyunHee Han

(Received July 7, 2014 ; Revised September 2, 2014 ; Accepted September 3, 2014)

Key Words : Tuned Mass Damper(동조질량감쇠기), Magnetic Fluids(자성유체), Adjustable Damping(가변감쇠), Eddy Current Damping(자기효과감쇠), Frequency Response Function(주파수응답함수)

ABSTRACT

Recently, the medical community has been enthusiastically welcoming robots that are able to provide high-quality medical services across the board, including assisting the surgeons during surgeries. In response, many higher education institutions and research facilities started to conduct various experiments and studies about these robots. During such research, it was discovered that the arm of one particular robot type that is being developed to assist surgeries are prone to vibrate even from the weakest impact, in addition to other residual vibration problems. We attempted to reduce such dynamic response by using a MF-TMD that is produced by adding magnetic fluid to ECD. We verified the MF-TMD's performance by testing it within various frequency bands and attenuations. We then designed a cantilever that was structurally similar to the robot's arm. We attached the MF-TMD to this cantilever and conducted a pilot experiment, which validated our hypothesis that MF-TMD will reduce the robot arm's vibrations through its optimal damping ratio. Henceforth, we attached the MF-TMD to the robot arm in question and conducted a performance experiment in which we tuned the MF-TMD's frequency and damping factor to its optimal level and measured the vibrations of the arm. The experiment demonstrated that the vibrations that occurred whenever the arms rotated were significantly reduced.

기 호 설 명

- μ : 구조물과 TMD 질량의 비(m_2/m_1)
- f : 고유진동수비(ω_2/ω_1)
- g : 가진진동수비(ω/ω_1)

- ζ : 감쇠비(c_2/c_c)
- c_c : 임계감쇠계수($2m_2\omega_1$)

1. 서 론

최근 고령화 사회에 접어들면서 생명연장과 질병

† Corresponding Author ; Member, The Dept. of Mech. Eng., Sunmoon University
E-mail : ckchun@sunmoon.ac.kr
Tel : +82-41-530-2331, Fax : +82-41-530-2981

* Member, The Dept. of Mech. Eng. Sunmoon University

** Member, RMSTechnology Corporation

‡ Recommended by Editor SungSoo Na

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

치료같은 건강에 대한 사람들의 관심이 증대되었고, 이에 의료용 로봇에 대한 관심도 자연스럽게 커졌다. 의료용 로봇은 의사의 수술을 보조하는 역할로서 수술뿐만 아니라 진단, 치료, 재활 등 의료 전반에 걸쳐 로봇이 활용되고 있다.

현재까지 개발된 수술로봇은 KAIST의 미세수술용 원격로봇시스템, 토쿄대의 원격수술로봇시스템, 미국 NASA JPL의 RAMS, 미국 IS사의 다빈치(Da Vinci)가 있으며 이 중 다빈치는 국내를 포함 세계에서 의료용 로봇의 시장을 독점하고 있다⁽¹⁾. 의료용 로봇의 수준 높은 의료서비스와 정교하고 안정된 동작을 바라는 의료진의 요구를 기반으로 국내외 대학 및 연구소에서 의료로봇에 대한 다양한 연구를 활발히 진행하고 있다.

이 중 국내 기업에서 개발중인 수술용 로봇에서 미세한 충격에도 로봇의 arm이 떨리는 현상과 잔류 진동 문제가 발생되었고, 구조물에서 발생하는 동적 응답을 줄이고자 여러 진동제어장치 중 동조질량감쇠기(tuned mass damper)를 사용하였다. 동조질량감쇠기는 1900년대 초에 개발된 이래로 구조 및 원리의 단순성과 우수한 진동제어성능 때문에 많은 구조물에 다양한 형태로 적용되었다^(2,3).

이 연구에서는 자성유체(magnetic fluids)를 이용한 가변 감쇠시스템을 결합한 형태인 가변감쇠형 동조질량감쇠기(MF-TMD)를 로봇 arm에 적용하여 진동을 제어하였다.

2. 시스템의 동역학 모델

2.1 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper)

동조질량감쇠기(tuned mass damper: 이하 TMD)는 Fig. 1과 같이 구조물에 부가적인 질량과 스프링을 부착하는 형태로써 동흡진기(dynamic vibration absorber) 또는 진동흡수장치라고도 불리우며, Den Hartog⁽⁴⁾에 의해 정립되어 현재 건축구조물 및 기계 설비 등 다양한 분야에서 많이 적용되고 있다. TMD의 경우 설계 시 고려된 고유진동수 대역 부근에서는 진동을 흡수하는 성능이 뛰어나지만 주파수 범위가 매우 좁고 특정 주파수 부근에서는 공진 발생의 가능성이 존재하는 제한적인 단점이 있다. 이러한 문제는 TMD에 감쇠를 더함으로써 특정주파수 부근에서의 공진 발생 문제를 해결할 수 있다.

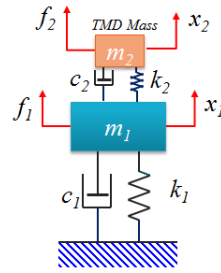


Fig. 1 TMD model

감쇠를 추가하는 방안으로 자성유체(magnetic fluids)를 사용하였고, 가변감쇠 시스템을 적용함으로써 구조물의 응답에 따른 감쇠력을 변화시킬 수 있어 진동흡수성능을 향상시킬 수 있다.

자기효과 감쇠를 더한 MF-TMD의 경우 감쇠력에 따른 효과 차이는 높으나 최적의 감쇠력 결정이 중요하여 이에 대한 실험을 수행함으로써 자기효과에 따른 진동흡수성능을 검증하였다.

2.2 비감쇠 TMD

구조물에 부가적인 질량 m_2 와 스프링강성 k_2 가 더해진 비감쇠 TMD의 운동방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) &= F_0 \sin \omega t \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) &= 0 \end{aligned} \tag{1}$$

또한 구조물과 비감쇠 TMD의 진동 진폭은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{X_1}{\delta_{st}} &= \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \frac{k_2}{k_1}} \\ \frac{X_2}{\delta_{st}} &= \frac{1}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \frac{k_2}{k_1}} \end{aligned} \tag{2}$$

Fig. 2는 구조물의 주파수와 진동진폭에 따른 그래프이며, 비감쇠 동조질량감쇠기가 구조물의 응답에 미치는 영향을 보여준다. 1자유도계가 2자유도계로 변환되어 특정주파수의 진동을 흡수하고 2개의 또 다른 고유진동수가 발생한 것을 확인할 수 있다.

이는 특정 주파수 범위에서는 진동을 흡수하는

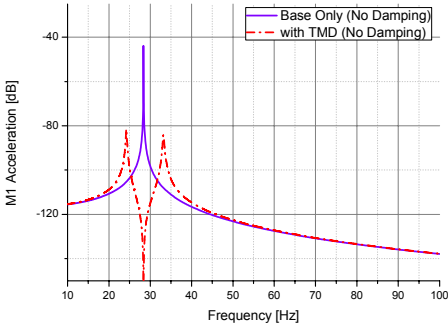


Fig. 2 Acceleration of structure with TMD(no damping)

성능이 뛰어나지만 그 부근의 주파수 범위에서는 공진을 발생시킬 수 있는 문제점을 가지고 있다. 따라서 감쇠를 더하는 방안으로 이러한 문제를 해결할 수 있다.

2.3 감쇠기를 가진 TMD

비감쇠 TMD의 경우 본래 계의 공진 피크값을 제거하지만 두 개의 새로운 공진점을 발생시킨다. 따라서 새로운 두 공진점에 대한 진동크기를 감소시킬 필요가 있으며 이러한 방안으로 감쇠가 있는 TMD를 사용하게 된다.

구조물에 추가적인 질량과 스프링 그리고 감쇠 c_2 가 더해지고 구조물이 가지고 있는 감쇠 c_1 이 0에 수렴한다는 가정하에 두 질량에 대한 운동방정식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned}
 m_1\ddot{x}_1 + k_1x_1 + k_2(x_1 - x_2) + c_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) &= F_0 \sin \omega t \\
 m_2\ddot{x}_2 + k_2(x_2 - x_1) + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

또한 구조물과 TMD의 진동진폭에 대한 각각의 크기를 무차원 비의 관점으로 나타내면 식 (4), (5)와 같이 표현된다.

식 (4)는 구조물 질량에 대한 진폭이 질량비 μ , 고유진동수비 f , 가진진동수비 g 와 감쇠비 ζ 의 함수인 것을 보여주고 있다.

$$\begin{aligned}
 r_1 &= [\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)]^2 \\
 \frac{X_1}{\delta_{st}} &= \sqrt{\frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 - f^2)^2}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + r_1}}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

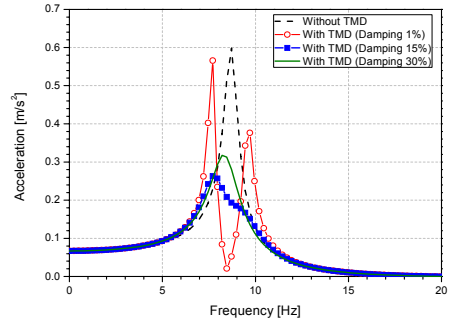


Fig. 3 Acceleration of structure with TMD

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \sqrt{\frac{(2\zeta g)^2 + f^4}{(2\zeta g)^2 (g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + r_1}}
 \tag{5}$$

Fig. 3은 감쇠를 가진 TMD가 구조물에 더해졌을 때의 주파수응답함수(frequency response function)를 실험을 통해 나타낸 것이다. 감쇠비 ζ 가 0에 가까울 경우 Fig. 3에 나타난 것처럼 진동 저감효과가 미비하고 두 개의 비감쇠 고유진동수에서 공진이 발생하여 구조물 내 다른 주파수에 영향을 미칠 수 있다. 또한 감쇠비가 일정이상(damping 30%)으로 높을 경우 최적 감쇠비(damping 15%)에 비해 효율이 떨어지는 것을 확인할 수 있다.

특정 주파수 부근의 새로운 두 피크값에 대한 최적의 감쇠비는 두 피크값의 세로좌표가 똑같은 경우이며, 이것은 식 (6)을 만족시켜야 한다⁽⁵⁾.

$$f = \frac{1}{1 + \mu}
 \tag{6}$$

따라서 식 (6)을 식 (4)의 X_1/δ_{st} 값에 대입하여 g 에 대해 미분하고, 기울기가 0이 되도록 함으로써 식 (7)과 같이 나타내어진다⁽⁶⁾.

$$\zeta^2 = \frac{\mu(3 \pm \sqrt{\mu})}{8(1 + \mu)^3}
 \tag{7}$$

최적 감쇠비는 설치하는 구조물의 특성에 따라 고유진동수나 진동수준이 달라질 수 있으므로 설치 대상의 특성에 맞게 조정 및 설치하여야 최적의 효과를 발휘할 수 있다.

2.4 가변 감쇠시스템

기존 TMD에 가변 감쇠시스템을 적용함으로써 구조물의 응답에 따라 감쇠력을 제어할 수 있어 효과적인 진동제어가 가능하다.

가변 감쇠시스템에 사용되는 자성유체(magnetic fluids)는 자기장에 유도전류가 흐르지 않을 경우 일반적인 유체의 형태를 가지지만, 자기장 부하 시 유체 내의 미세한 입자들간의 결합력으로 입자 층을 형성하고 유체의 점성을 증가시키는 전자기적 특성이 있다.

자기장에서 발생하는 유도전류에 의한 감쇠는 맥스웰(Maxwell)방정식과 로렌츠 법칙(Lorentz law)에 의해 설명되며 식 (8)과 같다.

$$v_{emf} = -\frac{d\Phi}{dt} \tag{8}$$

v_{emf} 는 기전력(electromotive force)을 나타내며 Φ 는 자속(magnetic flux)이다. 식 (8)의 (-)부호는 로렌츠의 법칙이며 자기장에서 발생된 기전력은 로렌츠의 법칙에 의해 자속을 감소시킨다. 따라서 자기장의 상대적인 운동이 반복적으로 일어날 때 유도전류는 생성과 소산을 반복하게 되고 에너지 보존법칙(conservation of energy)에 의해 결과적으로 감쇠의 역할을 하게 된다^(7,8).

자성유체는 자기장 부하 시 자기장의 세기에 따라 유체의 점도를 변화시키는 지능형 유체이다⁽⁹⁾. 이러한 특성을 가지는 자성유체를 바탕으로 넓은 범위의 진동제어가 가능하며 자기효과 감쇠(eddy current damping)를 가지는 자기장과 자성유체의 결합으로 기존에 TMD가 가지는 있는 감쇠효과를 더욱 높일 수 있다.

3. 주파수응답 수치해석

질량비와 감쇠비에 따른 주파수응답의 변화를 수치적으로 해석하고 확인하기 위해 이 연구에서는 수치해석을 MATLAB 프로그램을 이용하여 진행하였다. 감쇠비 ζ 의 변화를 확인하기 위해 식 (4)의 진동진폭과 가진진동수비 g 를 함수로 나타낸 그래프를 그리면 Fig. 4와 같다. 감쇠비가 0보다 클 경우 감쇠비의 크기에 따라 진동진폭의 크기가 감소하는 것을 확인할 수 있고, 가진진동수비와 감쇠비의 관

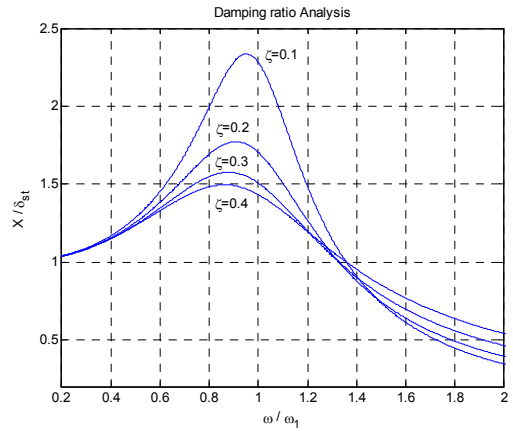


Fig. 4 Damping ratio analysis

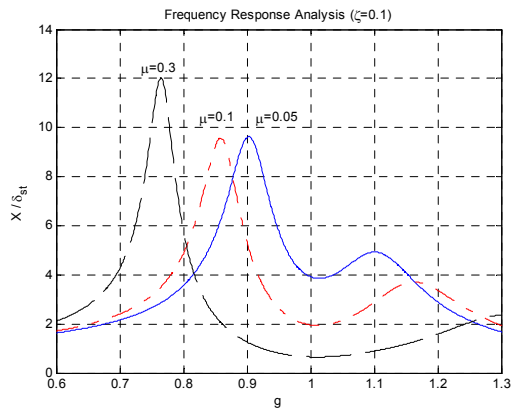


Fig. 5 Frequency response analysis(ζ=0.1)

계는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$g = \sqrt{1-2\zeta^2} \tag{9}$$

식 (9)에서 감쇠비가 0에 수렴할 경우 가진진동수비는 1에 가까워지고 $\omega \approx \omega_1$ 에서 최대가 된다. 따라서 $g \approx 1$ 은 피해야 하는 값이고, 가진주파수 ω 는 고정값이기 때문에 ω_1 에 대한 질량 m 이나 스프링강성 k 값을 변경하여 $g \approx 1$ 을 피할 수 있다.

Fig. 5는 TMD의 질량과 구조물의 질량에 대한 진폭을 진동수비의 함수로 나타낸 것이다. 그래프에서 진동진폭은 감쇠비가 0.1로 동일할 때 질량비가 큰 값으로 증가할수록 0에 접근한다. 질량비가 증가하면 구조물에 작용하는 힘이 변하게 되고 질량의 관성에 의해 고유진동수가 피하고자 하는 특정 주파

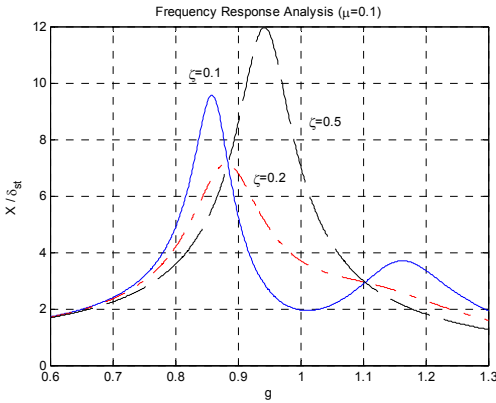


Fig. 6 Frequency response analysis($\mu = 0.1$)



Fig. 7 Medical robot

수로부터 멀어지게 된다. 일반적으로 구조물의 질량이 크기 때문에 이를 고려하여 적절한 TMD의 무게를 산정해야 한다.

Fig. 6은 TMD와 구조물의 질량비가 0.1로 동일할 때 감쇠비의 변화를 그래프로 표현한 것이다. 최적의 감쇠비는 구조물의 특성에 따라 달라지는데 질량비가 0.1일 때의 최적의 감쇠비는 그래프상에서 0.2로 나타내어진다. Fig. 4의 그래프처럼 1자유도계의 감쇠비 변화는 감쇠비가 낮을수록 진동진폭이 저감효과를 보이지만, 구조물에 TMD가 더해진 2자유도계의 감쇠비 변화는 Fig.6처럼 구조물의 특성에 따라 달라진다.

4. MF-TMD 설계

MF-TMD를 적용하고자 하는 대상인 의료용 로봇은 보안관계로 이 논문에 게재할 수 없으며, 유사한 형상의 의료용 로봇은 Fig. 7과 같다.

기동모양의 헤드부에 4개의 arm이 달려있는 형태이며, 미세한 충격에도 로봇의 arm이 떨리는 현상이 발생하였다. 의료용 로봇 arm이 가지고 있는 고유진동수는 5 Hz이며 TMD의 질량이 더해지면 고유진동수가 변하기 때문에 고유진동수를 조절할 수 있도록 가변능력을 갖추어 제작하였고 자기효과 감쇠(ECD)를 가지는 자기장에 자성유체를 결합하여 가변감쇠효과를 높일 수 있도록 설계하였다.

4.1 가변주파수

TMD를 구조물에 설치할 경우 구조물에 TMD의

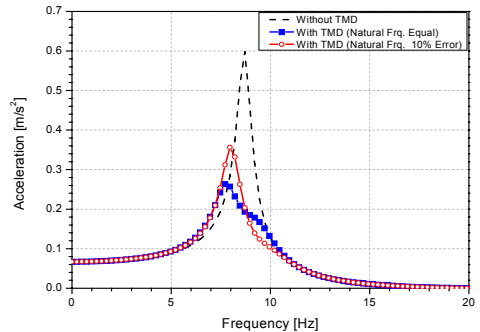


Fig. 8 Acceleration of structure with TMD

질량이 더해져 구조물의 고유진동수가 변하게 되고, 구조물과 TMD의 질량비가 클수록 Fig. 5의 그래프처럼 구조물의 고유진동수가 떨어지는 현상이 발생한다. TMD가 단일 고유진동수를 가지고 있을 경우 적용 범위는 한정적이 되고 대상물과 TMD의 고유진동수가 일치하지 않을 경우 진동저감 효과가 감소한다. Fig. 8에서 대상물과 TMD의 고유진동수가 10% 오차가 발생시 대상물과 TMD의 고유진동수가 일치했을 때보다 진동저감 효과가 감소한 것을 확인할 수 있다. 따라서 TMD의 고유진동수에 대한 가변능력이 필요하며 이를 고려하여 MF-TMD를 설계하였다.

4.2 실험용 MF-TMD 제작

로봇 arm 1개의 질량은 약 60 kg이며 MF-TMD는 로봇 arm 질량의 2%인 1.2 kg으로 설계하였다. Fig. 9와 같이 고유진동수의 경우 MF-TMD의 주파

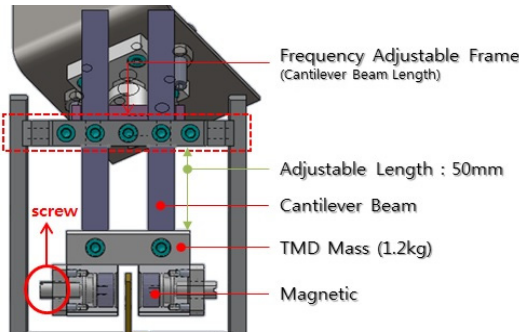


Fig. 9 MF-TMD

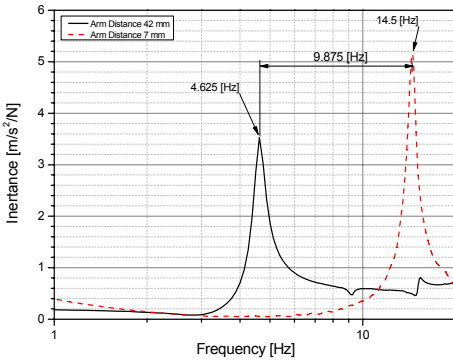


Fig. 10 MF-TMD frequency

수조절용 틀을 통해 외팔보형식으로 보의 길이를 수동으로 조절함으로써 주파수를 가변시킬 수 있다.

MF-TMD 자체의 고유진동수 측정결과 Fig. 10에 나타난 것처럼 최저 4.625 Hz에서 최대 14.5 Hz까지 약 10 Hz의 주파수대역을 가변시킬 수 있다.

MF-TMD의 가변감쇠는 Fig. 9의 하단의 형태와 같이 두 개의 magnetic 사이에 brass가 있으며 Magnetic과 brass 사이의 거리(distance)를 가변함으로써 감쇠능력을 조절할 수 있다. 가변방법은 magnetic과 연결된 나사(screw)를 수동으로 조절하여 거리를 가변한다. Brass는 촘촘하게 구멍이 나 있는 형태이며, 이를 통해 자기장과 결합되어 있는 자성 유체가 서로 결합하여 높은 감쇠효과를 기대할 수 있다.

자성유체가 결합되어 있는 magnetic과 brass 사이의 거리에 따른 감쇠율 측정결과는 Table 1에 나와 있는 것처럼 brass와 magnetic 사이의 거리가 가까울수록 감쇠율이 최대 46.2%까지 높아지는 것을 확인할 수 있다.

Table 1 MF-TMD damping ratio in accordance with gap distance

Gap distance(mm)	Damping ratio(%)
4 mm above	4.3
2.5	5.82
2.1	7.42
1.7	9.36
1.4	12.4
1	14.7
0.6	27.1
0.2	46.2

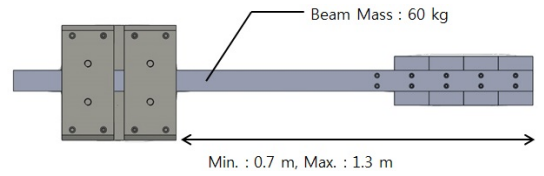


Fig. 11 Cantilever beam

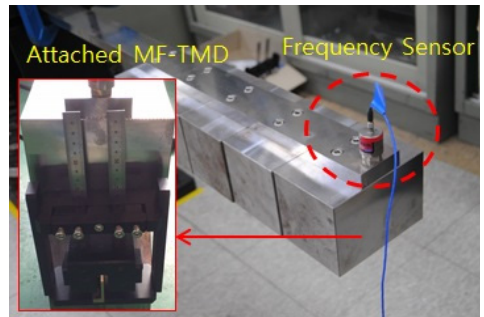


Fig. 12 Cantilever beam with MF-TMD

4.3 예비 실험 결과

로봇 arm은 여러 개의 관절로 구성되어 있고 arm을 구동가능한 범위내에서 최대한 뻗을 시 길이는 1 m이며 헤드부에 달려있는 arm의 형태는 외팔보와 비슷하다. 따라서 의료용 로봇 arm의 진동제어에 앞서 예비 실험을 위해 로봇 arm과 동일한 spec을 지닌 외팔보를 Fig. 11과 같이 제작하였다.

외팔보의 질량은 60 kg이고 길이는 끝단의 고정 부위를 조절함으로써 0.7~1.3 m의 범위만큼 가변이 가능하다. 구조적으로 안정적인 외팔보의 주파수 가변범위는 측정결과 Fig. 13과 같으며 보의 길이가 0.92 m일 때 5 Hz의 주파수를 가진다.

제작한 외팔보에 MF-TMD를 Fig. 12와 같이 장착했을 때 로봇의 고유진동수와 동일한 5 Hz로 맞추

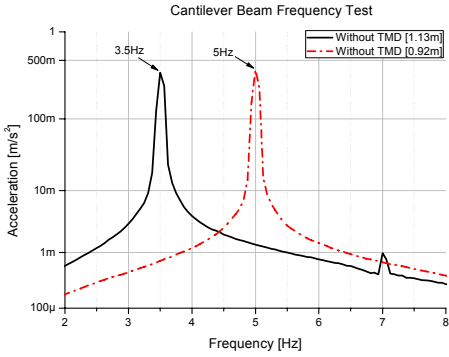


Fig. 13 Frequency spectrum(without TMD)

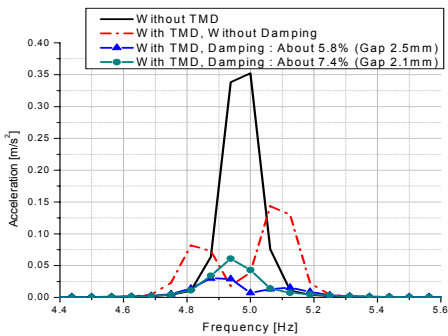


Fig. 14 MF-TMD test in cantilever beam

어놓고 성능을 테스트하였고 그 결과는 Fig. 14와 같다. Brass와 magnetic의 간격이 2.5 mm일 때 가장 최적의 감쇠를 가지며 이는 Table 1을 참고할 때 약 5.8%의 감쇠율을 확인할 수 있다. 또한 5.8% 이상의 감쇠율에서는 진동저감효과가 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

5. 성능 실험

A, B, C, D 4개의 로봇 arm중 구동시 3축 방향 (X, Y, Z) 중 X방향으로의 회전운동에 따른 진동이 가장 심한 arm A 끝에 Fig. 15와 같이 MF-TMD와 두 개의 가속도센서(X, Z방향)를 고정지그에 부착하였고 다른 arm B, C, D에는 각각 두 개의 가속도센서만을 부착하였다.

MF-TMD와 1번 센서의 방향은 로봇 팔의 회전 방향인 X방향이고 2번 센서는 로봇 팔의 길이 방향인 Z방향이다. 수술자세 중 진동에 가장 취약한

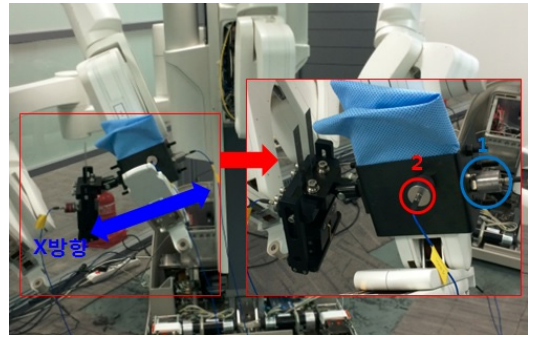


Fig. 15 Two acceleration sensors attached on fixed jig

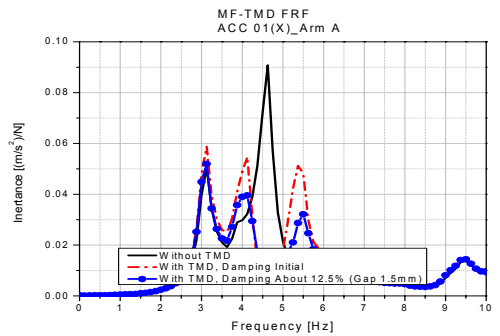


Fig. 16 X direction's TMD FRF at arm A

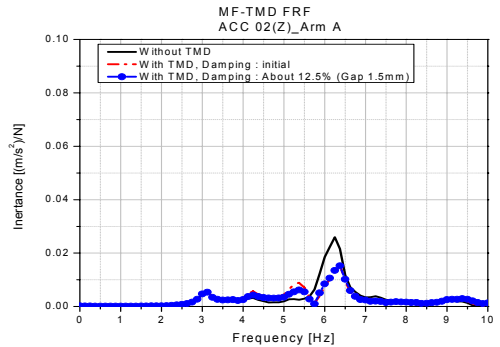


Fig. 17 Z direction's TMD FRF at arm A

자세를 선택하여 로봇 arm A의 진동을 측정하였고, 로봇의 헤드부를 impact hammer로 가진하였을 때와 로봇 arm B의 회전운동에 따른 진동량을 TMD 설치 전과 후로 나누어 측정하였다.

MF-TMD를 장착하였을 때 로봇 팔의 고유진동수는 4.625 Hz였으며 MF-TMD의 주파수를 가변하여 공진점을 4.625 Hz로 동일하게 맞추고 최적의 감쇠

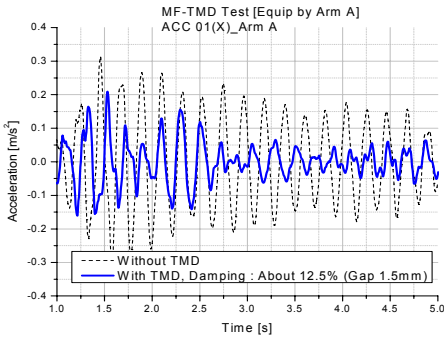


Fig. 18 X direction's time graph at arm A

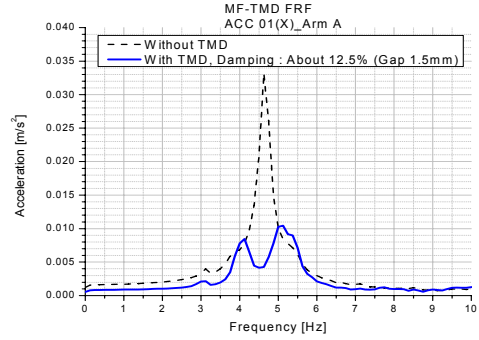


Fig. 19 X direction's TMD FRF at arm A

비를 실험을 통해 튜닝하였다.

Impact hammer로 로봇의 헤드부를 가진하였을 때 arm A의 진동에 대한 실험결과는 X방향에 대한 1번 센서의 Fig. 16과 Z방향에 대한 2번 센서의 Fig. 17과 같다.

Fig. 16에서 X방향에 대한 MF-TMD의 최적의 감쇠율은 12.5%이고, 이 때 X방향에 대한 로봇 arm의 진동진폭이 크게 감소한 것을 확인할 수 있다. 반면 Z방향에 대해서는 진동진폭이 X방향에 비해 미비하고 공진점의 일치로 인한 TMD의 효과는 있으나 감쇠율에 따른 영향은 거의 없는 것을 Fig. 17을 통해 확인할 수 있다.

현재 이 실험에 사용된 수술 로봇은 수술을 진행하기 전에 필요한 수술자세를 고정 후 arm의 Wrist 부분의 미세조정으로 수술을 진행하며, 3축 방향 중 수평(X, Y)방향으로 주된 움직임이 발생한다. Arm의 길이방향인 Z방향은 수술시 움직임이 거의 없으며, 내부 구동부의 제어시스템을 통해 잔류진동 문제를 야기하지 않고 있다.

이 실험에서는 modal test를 통해 MF-TMD의 가변감쇠에 따른 성능을 검증하였고, 다음 실험으로 MF-TMD가 달려있지 않은 arm B가 회전운동을 할 때 arm A의 진동특성이 어떻게 나타나는지를 측정하였다.

Arm B를 동일조건으로 회전운동 시켰을 때, arm A의 X방향에 대한 time spectrum은 Fig. 18과 같고 spectrum 분석을 통해 나온 FRF그래프는 Fig. 19와 같다. MF-TMD를 장착하기 전의 arm A 진동진폭 크기는 약 0.033 m/s^2 이며 MF-TMD를 장착 후 최적의 감쇠비를 튜닝한 결과 진동진폭의 크기가 약

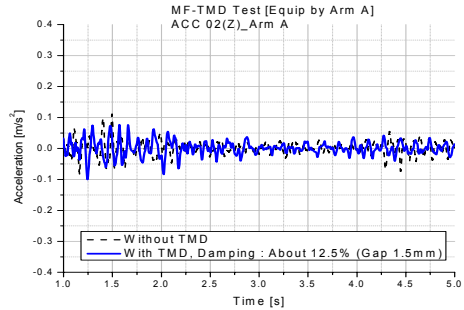


Fig. 20 Z direction's time graph at arm A

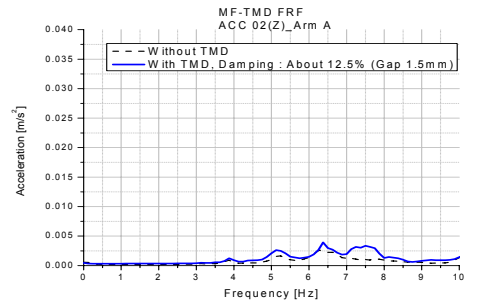


Fig. 21 Z direction's TMD FRF at arm A

64% 감소한 0.011 m/s^2 이다.

Fig. 20은 arm A의 Z방향에 대한 time spectrum이며 Fig. 21의 FRF그래프를 통해 Z방향의 진동진폭은 modal test와 마찬가지로 진동량이 X방향에 비해 적은 것을 확인할 수 있다.

Arm B의 회전운동에 따른 진동을 측정한 결과 잔류 진동이 문제 되는 arm A의 X방향에 대해서는 MF-TMD를 장착 후 진동크기가 감소하였고, 회전운동을 한 arm B와 다른 arm C, D는 측정결과 X와 Z

방향에 대한 진동크기가 작아 이 논문에서 arm A를 제외한 나머지 데이터 값은 제외하였다.

6. 결 론

국내에서 개발중인 수술용 로봇이 미세한 진동에 도 로봇의 특정 arm이 떨리는 현상이 발생되었고, 문제점을 해결하기 위해 자기효과감쇠(ECD)를 가지는 자기장에 자성유체를 결합한 가변감쇠형 동조질량감쇠기를 개발하였다. 로봇 arm 1개 질량 60 kg의 2%인 1.2 kg으로 설계하였으며 개발된 MF-TMD의 자체 성능 테스트를 통해 가변에 따른 주파수의 대역(약 10 Hz)과 가변감쇠율(최대 46.2%)을 확인하였다.

또한 로봇 arm과 spec이 비슷한 외팔보에 MF-TMD를 부착 후 최적의 감쇠비를 튜닝하여 예비실험을 통해 진동저감효과에 대한 검증을 실시하였고, 예비실험 결과 MF-TMD를 외팔보에 부착하였을 때 최적의 감쇠비를 통한 우수한 진동저감효과를 확인할 수 있었다.

실제 문제가 되는 수술용 로봇 arm에 고정지그를 이용하여 MF-TMD를 부착 후 두 가지의 방향성을 가지고 성능실험을 하였다. Impact hammer를 이용한 modal test와 MF-TMD를 부착하지 않은 arm의 회전운동에 따른 진동특성에 대한 성능실험을 실시하였고, 로봇 arm의 진동방향(X방향)과 MF-TMD의 부착방향이 같을 시 진동진폭의 크기가 크게 감소한 것을 time spectrum과 FRF그래프를 통해 확인하였다. 또한 로봇 팔의 길이방향인 Z방향의 진동특성 실험결과 진동량이 매우 미비하고 가변감쇠에 따른 영향을 거의 받지 않았음을 확인하였다.

결과적으로 MF-TMD의 가변주파수 능력을 통해 로봇 arm에 질량이 더해졌을 시 변화되는 고유진동수에 맞춰 공진점을 동일하게 맞추었고, 가변감쇠를 통해 최적의 감쇠비를 튜닝하고 특정 주파수 범위에서는 진동을 흡수하는 성능이 뛰어나지만 그 부근의 주파수 범위에서는 공진을 발생시킬 수 있는 기존의 TMD 단점을 보완하였다.

후 기

이 연구는 중소기업청 2013년도 저변확대형 R&D 사업의 지원으로 수행되었습니다.

References

- (1) Guthart, G. S. and Salisbury, J. K., 2000, The Intuitive Telesurgery System: Overview and Application, Proc. IEEE Int. Conf. Robot. and Automat, pp. 618-621.
- (2) Kareem, A. and Kijewski, T., 1999, Mitigation of Motions of Tall Buildings with Specific Examples of Recent Applications, Wind and Structures, Vol. 2, No. 3, pp. 201-251.
- (3) Dyke, S. J., 2005, Current Directions in Structural Control in the US, 9th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, Kobe, Japan, pp. 1-22.
- (4) Den Hartog, J. P., 1956, Mechanical Vibrations, 4th edn, McGraw-Hill, New York.
- (5) Ormondroyd, J. and Den Hartog, J. P., 1928, The Theory of the Dynamic Vibration Absorber, Transactions of ASME, Vol. 50, p. APM-241.
- (6) Sadek, F., 1996, A Method of Estimating the Parameters of Tuned Mass Dampers for Seismic Applications, National Institute of Standards and Technology.
- (7) Cheng, D. K., 1989, Field and Wave Electromagnetics, 2nd Edition, Addison-Wesley.
- (8) Bae, J. S., Kwak, M. K. and Inman, D. J., 2005, Vibration Suppression of Cantilever Beam Using Eddy Current Damper, Journal of Sound and Vibration, Vol. 284, pp. 805-824.
- (9) Seong, M. S., Lim, S. G., Choi, S. B. and Kim, C. H., 2010, Design and Performance Evaluation of MR Damper for Integrated Isolation Mount, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 20, No. 11, pp. 1046-1051.



Woon Yong Cha received a B.S. degree in the Dept. of Mechanical Engineering in Sunmoon Univ. and M.S. in Dept. of Mechanical Engineering from Sunmoon Univ in 2013~Present. His research interests are vibration analysis and

control.



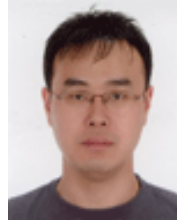
Chong Keun Chun is a professor at the Dept. of Mechanical Engineering of SunMoon Univ. He received his B.S. for mechanical design from Seoul National Univ. and M.S. and Ph.D. for mechanics and structures from the Univ.

of California, Los Angeles(United States). His research interests are vibration and applied mechanics.



Sang Gon Park is a manager at RMS Technology Corp. He received his B.S., M.S. degree in the Dept. of Mechanical Engineering in Pukyung Univ. and Ph.D. for Mechanical Engineering from the SunMoon Univ. His re-

search interests are dynamic behavior of structures and vibration characteristics.



Hyun Hee Han is an assistant manager at RMS Technology Corp. He received his B.S., M.S. degree in the Dept. of Mechanical Engineering in Hanbat Univ. His research interests are dynamic behavior of structures and vibration

characteristics.