

# DTMD를 이용한 플랜트 수직 펌프의 진동저감

## Vibration Reduction of Vertical Pumps in Industrial Plants Using Double TMDs

문영종\*  
Moon, Yeongjong

최현훈\*  
Choi, Hyunhoon

김현수\*\*  
Kim, Hyun-Su

### Abstract

The characteristics and effectiveness of double tuned mass dampers (DTMD) have been studied by many researchers. DTMD usually consists of one larger mass block and one smaller mass block. In this study, DTMD was proposed to reduce the vibration of vertical pumps in industrial plants. In order to assess the efficiency of the proposed method, numerical analysis for the simplified vertical pump model with single and double TMDs was carried out. It was also investigated that the effects of optimal TMD parameters such as frequency ratio and damping ratio on dynamic responses of the main structure. According to analysis results, DTMD are more effective to control the vibration of the vertical pump and show good robustness to the change in the stiffness of TMD.

*Keywords : DTMD(Double Tuned Mass Dampers), Vertical pump, Resonance, Vibration control*

## 1. 서론

발전의 기본원리는 보일러에서 연료를 연소시켜 얻은 에너지로 물을 끓여 고온, 고압의 증기로 터빈을 돌려 전기를 생산하는 것이다. 이때 터빈을 통해 나온 증기는 복수기에서 대량의 냉각수(순환수)를 사용하여 냉각한 다음 복수저장탱크와 급수저장탱크를 거쳐 다시 보일러에 공급한다. 여기서 보일러 급수와 냉각수 공급을 위하여 저장탱크로부터 물을 끌어올리기 위하여 좁은 면적에 설치가 가능한 수직형 펌프가 많이 사용된다<sup>1)</sup>.

수직 펌프는 <Fig. 1>에 나타낸 것과 같이 길이가 긴 강관 파이프 끝단에 중량의 모터가 달린 구조이

다. 이러한 특성 때문에 전체 수직 펌프 시스템의 고유진동수는 펌프의 크기에 따라 약 10~20Hz로 낮다. 따라서 모터 자체의 작동 진동수와 공진(Resonance)이 발생하거나 외부에서 전달되는 진동에 의해 응답이 증폭되는 사례가 종종 발생한다.

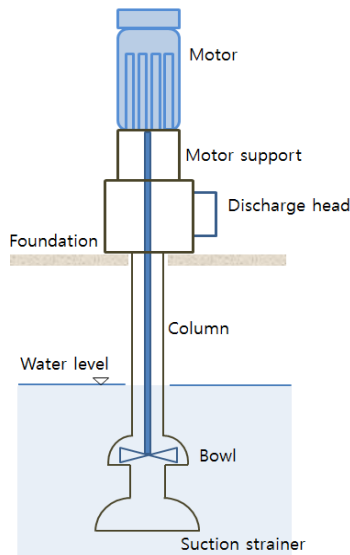
수직 펌프의 진동을 줄이기 위한 방법으로는 크게 2가지를 들 수 있다. 첫 번째는 펌프 시스템의 진동수를 가력 진동수 대역에서 이격하는 것이다. 즉, 강성을 증가시키기 위하여 모터 하부 구조물에 철판을 부착하는 방법과 <Fig. 2>와 같이 모터 상단에 질량을 추가하는 방법이 있다. 더욱 적극적인 방법은 수직 펌프에 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)를 설치하여 응답을 줄이는 방법이 있다.

펌프 시스템의 강성을 증가시키는 경우 모터 하단 케이싱의 보강 위치와 크기를 결정하기 위하여 질량 불균형과 용접작업으로 인한 케이싱의 변형을 고려하여야 한다. 다음으로 질량을 증가시켜 진동수를 변화시키기 위해서는 큰 질량을 펌프의 상단에 추가적으로 부착하여야 하는데 이 경우 늘어난 질

\* 정회원, 에이치디엘(주), 공학박사  
Heun Deul Lim Co., Ltd.

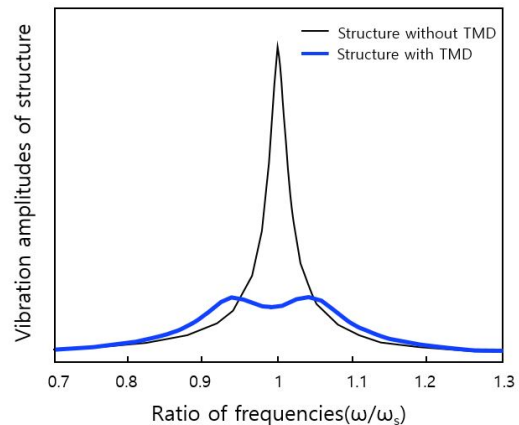
\*\* 교신저자, 정회원, 선문대학교 건축사회환경학부 부교수, 공학박사  
Div. of Architecture, Architectural & Civil Engineering, Sunmoon University  
Tel: 041-530-2415 Fax: 041-530-2839  
E-mail: hskim72@sunmoon.ac.kr

량을 지지하기 위하여 구조물을 보강하거나, 부착 시 발생하는 용접으로 인한 변형도 고려해야 하는 문제점이 있다.



〈Fig. 1〉 Typical vertical pump assembly

한 TMD는 대상 구조물 및 현장 여건, TMD의 요구 특성(질량, 강성, 감쇠비)에 따라 다양한 형태로 제작 및 시공할 수 있다. 그러나, 이 방법도 장치 설계 시 고려한 특정 진동수 대역에서는 제어 성능이 우수하지만, 이 진동수 대역을 벗어난 경우 진동 감소 효과가 떨어진다.



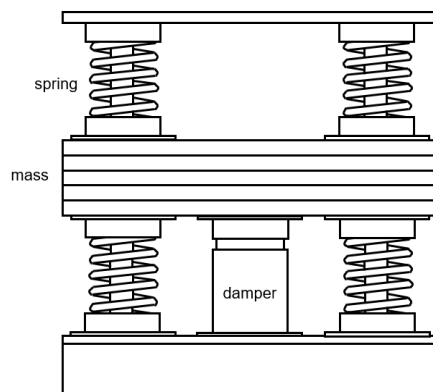
〈Fig. 3〉 Effect of TMD on vibration



(a) Before retrofitting      (b) With added mass

〈Fig. 2〉 Added mass for vibration reduction

앞서 언급한 방법들보다 효과적으로 진동을 제어할 수 있는 방안으로 TMD를 설치하는 것이다. TMD를 이용한 진동제어는 구조체의 특정 진동수와 TMD의 진동수를 일치시켜 구조체의 거동과 반대 방향으로 거동하게 하여 <Fig. 3>에서와 같이 특정 진동수의 진동을 현저히 줄여주는 것이다. 이러한 원리를 이용하여 고층건물의 횡방향 진동, 교량 상판의 수직 진동, 건물 바닥슬래브 수직 진동 저감에 대한 광범위한 연구뿐만 아니라 실제 구조물에 사용되고 있다<sup>2-5)</sup>. 그 실례로 바닥슬래브 수직 진동 저감을 위한 TMD의 형상은 <Fig. 4>와 같다. 이러



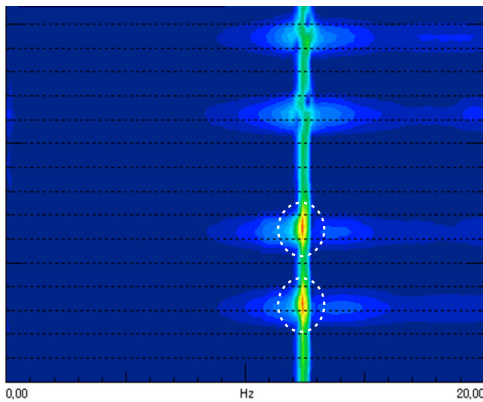
〈Fig. 4〉 Example of TMD

본 연구에서는 단일 TMD 상단에 TMD를 추가적으로 설치한 이중 TMD(Double Tuned Mass Damper, DTMD)<sup>6-10)</sup>를 이용하여 수직 펌프에 부착된 모터의 작동으로 인한 진동과 펌프 시스템 외부로부터 전달되는 진동 제어 효과를 확인하고, 기존 단일 TMD를 적용한 시스템의 응답과 비교하였다.

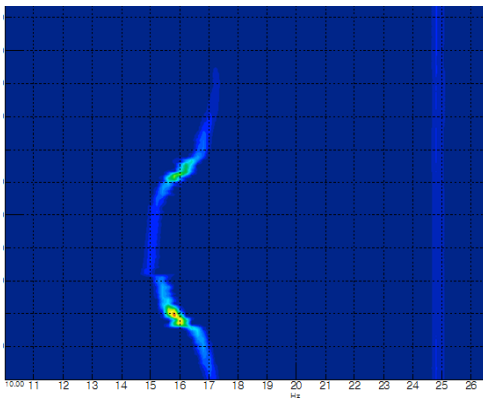
## 2. 수직 펌프의 과도진동 특성

수직 펌프가 가동 중일 때 측정시간에 따른 진동

수별 진동응답을 나타낸 Waterfall 그래프는 <Fig. 5>와 같다. 외력의 영향이 없고 펌프 자체의 진동만 있는 경우인 <Fig. 5 (a)>를 살펴보면 특정 진동수에서 진동이 일정하게 발생함을 알 수 있다. 특히, 햄머로 충격하중을 가했을 때 응답은 점선 안의 주황색과 같은데, 이 수직 펌프의 고유진동수는 펌프의 작동 진동수의 유사한 범위 내에 있음을 알 수 있다. 이 경우 진동저감을 위한 방법으로는 우선 펌프 구조물의 보강을 통하여 강성을 증가시키거나, 추가 질량을 증가시킴으로써 펌프 구조물의 고유진동수를 가력 진동수와 이격시키는 방법이 있다.



(a) Under operation without external excitation



(b) Under external excitation with large frequency variation

<Fig. 5> Waterfall plot of vertical pump vibration

그리고, 펌프 시스템의 고유진동수에 동조시킨 TMD를 설치하여 시스템에 입력된 진동에너지를 TMD가 작동하여 소산시킴으로써 진동을 저감시키는 방법을 사용할 수 있다. 이러한 방법들은 가진

진동수와 구조물의 진동수가 변하지 않고 일정하게 유지될 때 효과적이다.

그러나, 발전소의 경우 많은 기계류 등으로 인해 다양한 외란이 존재하며, 경우에 따라 펌프 고유진동수에 인접한 넓은 범위의 진동수 대역을 갖는 외부 하중이 존재한다. 또는 <Fig. 5 (b)>와 같이 펌프 고유진동수에 인접하여 외란의 진동수가 변하는 경우도 있으며, 이러한 진동이 기초 및 지반을 통해 전달되어 수직 펌프의 공진을 유발할 경우 요구되는 공진회피대역이 커지게 되어 강성 및 질량을 높이는 방법은 상대적으로 어렵게 된다. 또한 일반적인 TMD의 효과도 낮아질 수 있다.

### 3. 이중 동조질량감쇠기

수동형 진동제어장치(Passive damping device) 중 하나인 동조질량감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)는 비교적 단순한 구조적 특성을 가지고 있고, 간편하게 설치할 수 있기 때문에 초고층 빌딩이나 교량과 같은 대형 구조물에서 소형 기계류까지 폭 넓은 산업분야에서 사용되고 있다.

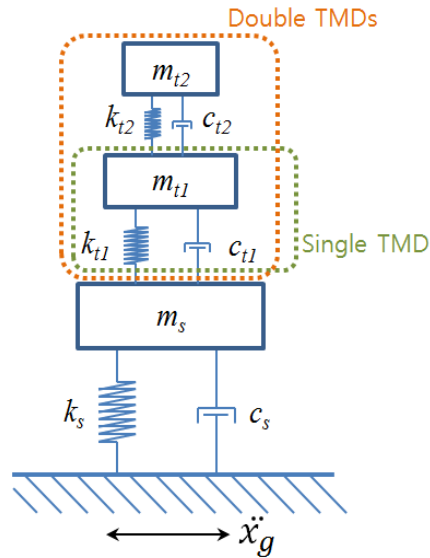
단일 TMD는 <Fig. 6>에서와 같이 질량  $m_s$ , 강성  $k_s$ , 감쇠  $c_s$ 로 구성된 구조물의 상단에 하나의 강성( $k_{t1}$ ), 질량( $m_{t1}$ ), 그리고 감쇠( $c_{t1}$ )로 이루어진 것이다. 그리고, 이중 동조질량감쇠기(Double Tuned Mass Dampers, DTMD)는 단일 TMD 상단에 강성( $k_{t2}$ ), 질량( $m_{t2}$ ), 감쇠( $c_{t2}$ )를 추가로 설치한 것이다. DTMD가 설치된 구조물의 지반가진( $\ddot{x}_g$ )에 대한 운동방정식은 식 (1)~(3)과 같이 나타낼 수 있다<sup>6)</sup>.

$$m_s \ddot{x}_s + [c_s \dot{x}_s + c_{t1} (\dot{x}_s - \dot{x}_{t1})] + [k_s x_s + k_{t1} (x_s - x_{t1})] = -m_s \ddot{x}_g(t) \tag{1}$$

$$m_{t1} \ddot{x}_{t1} + [c_{t1} (\dot{x}_{t1} - \dot{x}_s) + c_{t2} (\dot{x}_{t1} - \dot{x}_{t2})] + [k_{t1} (x_{t1} - x_s) + k_{t2} (x_{t1} - x_{t2})] = -m_{t1} \ddot{x}_g(t) \tag{2}$$

$$m_{t2} \ddot{x}_{t2} + c_{t2} (\dot{x}_{t2} - \dot{x}_{t1}) + k_{t2} (x_{t2} - x_{t1}) = -m_{t2} \ddot{x}_g(t) \tag{3}$$

여기서  $k_s, m_s, c_s$ 는 각각 구조물의 강성, 질량, 감쇠이다. 그리고,  $x_{t1}$ 은 하부 TMD의 변위이고,  $x_{t2}$ 는 상부 TMD의 변위를 나타낸다.



<Fig. 6> Schematic diagram of structure with double tuned mass dampers

일반적으로 TMD가 설치된 구조물의 응답은 식 (4)~(6)과 같이 구조물의 질량에 대한 감쇠기의 질량비( $\mu_1, \mu_2$ ) 강성비( $\lambda_{t1}, \lambda_{t2}$ ) 감쇠장치에 의해 추가되는 감쇠비( $\xi_{t1}, \xi_{t2}$ )에 따라 달라진다.

$$\mu_1 = \frac{m_{t1}}{m_s} \quad \mu_2 = \frac{m_{t2}}{m_s} \quad (4)$$

$$\lambda_{t1} = \frac{\omega_{t1}}{\omega_s} \quad \lambda_{t2} = \frac{\omega_{t2}}{\omega_s} \quad (5)$$

$$\xi_{t1} = \frac{c_{t1}}{2m_{t1}\omega_{t1}} \quad \xi_{t2} = \frac{c_{t2}}{2m_{t2}\omega_{t2}} \quad (6)$$

식 (5)에서  $\omega_s$ 와  $\omega_{t1}, \omega_{t2}$ 는 각각 구조물과 감쇠 장치의 진동수이다.

$$\omega_s = \sqrt{k_s/m_s} \quad \omega_{t1} = \sqrt{k_{t1}/m_{t1}} \quad \omega_{t2} = \sqrt{k_{t2}/m_{t2}} \quad (7)$$

## 4. TMD가 설치된 수직 펌프의 응답

단일과 이중 TMD가 설치된 수직 펌프의 진동 응답을 비교하기 위하여 수치해석을 수행하였다. TMD의 설계변수 변화에 따른 구조물의 응답변화를 살펴보기 위하여 펌프의 해석모델은 <Fig. 6>과 같이 강성( $k_s$ ), 질량( $m_s$ ), 감쇠( $c_s$ )로 단순화하였다.

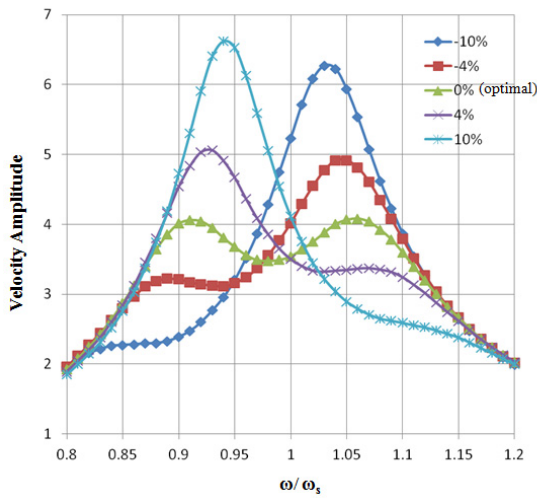
여기서 펌프의 질량은 3,500kg이고, 고유진동수는 16Hz, 감쇠율은 3%로 가정하였다. 그리고 일반적인 펌프의 허용 진동기준으로 속도를 사용하기 때문에 수직 펌프의 응답은 속도값으로 나타내었다. 하중은 조화하중(Harmonic excitation)의 지반가속도를 사용하였다.

### 4.1 단일 TMD가 설치된 구조물

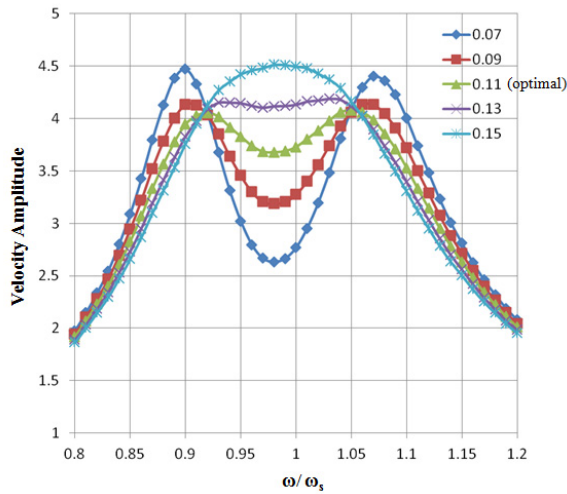
TMD가 하나 설치된 구조물의 제어성능을 평가하기 위하여, TMD의 질량은 구조물 질량의 3% ( $\mu_1 = m_{t1}/m_s$ )인 105kg을 사용하였다. 구조물의 응답을 최소화할 수 있는 TMD의 최적 강성비( $\lambda_{opt}$ )와 감쇠비( $\xi_{opt}$ )는 각각 0.964와 11%이다.

TMD의 강성( $k_{t1}$ )과 감쇠비( $\xi_{t1}$ )의 변화에 따른 구조물의 응답은 <Fig. 7~8>과 같다. 강성의 경우 최적 강성비( $\lambda_{opt} = \omega_{t1}/\omega_s$ )인 0.964보다  $\pm 4\%$ ,  $\pm 10\%$  증가하거나 감소할 때의 응답을 구하였다. 최적 강성비에 대하여 TMD의 강성이 커지거나 작아지는 경우 모두 구조물의 응답이 최대 60% 증가함을 알 수 있다. 이것은 TMD 설계과정에서 산정한 최적 강성비를 실제 구조물에 설치할 때 구현하지 못한다면 구조물 고유진동수 부근의 응답은 감소시킬 수 있지만 인접한 진동수 대역에서 응답이 증가할 수 있음을 나타낸다.

감쇠비의 변화에 따른 응답을 나타낸 <Fig. 8>의 결과에서도 최적 감쇠비( $\xi_{opt}$ )보다 작은 감쇠비에 대해서는 가력진동수( $\omega$ )와 구조물 고유진동수의 비( $\omega/\omega_s$ )가 0.9와 1.07 대역에서 응답이 증가하지만, 감쇠비가  $\xi_{opt}$ 보다 큰 경우 구조물의 고유진동수 부근에서 응답이 증가함을 보여준다.



〈Fig. 7〉 Response spectra for stiffness variation of TMD



〈Fig. 8〉 Effect of damping ratio of TMD on structural response

#### 4.2 이중 TMD가 설치된 구조물

〈Fig. 6〉과 같이 구조물 상단에 2개의 TMD를 설치할 경우 각 TMD의 설계변수의 변화에 따른 구조물의 응답은 〈Fig. 9~12〉와 같다. 하부 TMD (Larger TMD)와 상부 TMD(Smaller TMD)의 질량은 각각 구조물 질량의 2.77%와 0.23%이다. 각 TMD의 최적 강성비와 감쇠비는 〈Table 1〉과 같다.

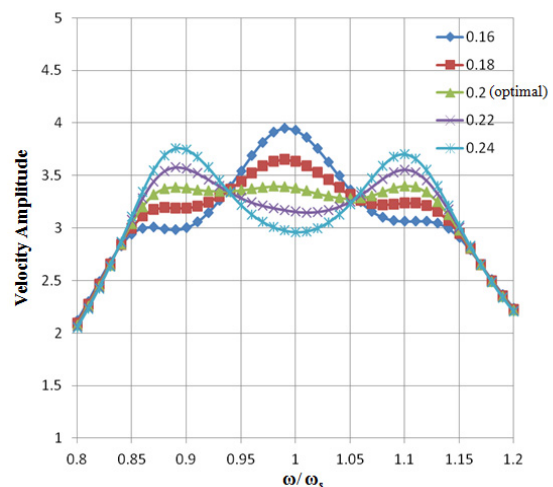
〈Table 1〉 Optimal values of stiffness and damping ratio

Values	Larger TMD	Smaller TMD
$\lambda_{opt}$	1.023	0.942
$\xi_{opt}$	0%	20%

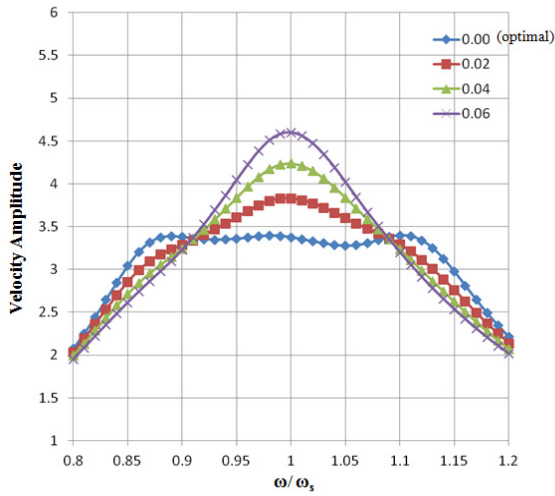
상부 TMD의 감쇠비 변화에 따른 응답을 나타낸 〈Fig. 9〉에 따르면 최적 감쇠비( $\xi_{opt}$ )인 20%인 경우 가력진동수와 구조물 고유진동수의 비( $\omega/\omega_s$ )가 0.87~1.1인 구간에서 응답이 일정하게 제어됨을 알 수 있다. 그러나 감쇠비가 증가할 경우  $\omega/\omega_s$ 이 0.9와 1.1에서 응답이 증가하고, 감쇠비가 감소하면 구조물의 고유진동수에서 응답이 증가하였다. 상부 TMD의 감쇠비를 20%로 고정하고, 하부 TMD의 감쇠비를 0%에서 9%까지 증가시킬 때 구조물의 고유진동수( $\omega/\omega_s = 1$ )에서 응답은 35% 증가하였다.

감쇠기의 감쇠비를 최적 감쇠비로 고정하고, 두 TMD의 강성변화가 구조물 응답에 미치는 영향을 비교하였다. 상부 TMD의 강성변화에 따른 응답을 나타낸 〈Fig. 11〉을 살펴보면 최적 강성비보다 TMD의 강성이 증가하면, 감쇠비의 증가에 따른 응답을 나타낸 〈Fig. 8〉에서와 같이 고유진동수에서 양쪽으로 이격된 진동수 대역( $\omega/\omega_s=0.87, 1.06$ )에서 응답이 비슷한 비율로 증가하였다. 반면 강성이 감소하면 단일 TMD 강성비 변화에 대한 응답인 〈Fig. 7〉의 결과와 유사하게 고유진동수에서 이격된 어느 한쪽의 응답만 급격하게 증가하는 경향을 나타내었다.

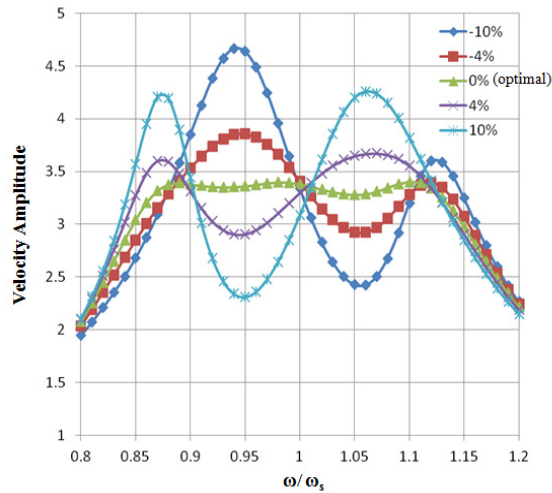
하부 TMD의 강성변화의 영향은 〈Fig. 12〉에서 볼 수 있듯이 단일 TMD의 강성변화에 따른 응답을 나타낸 〈Fig. 7〉과 같은 경향을 보임을 알 수 있다.



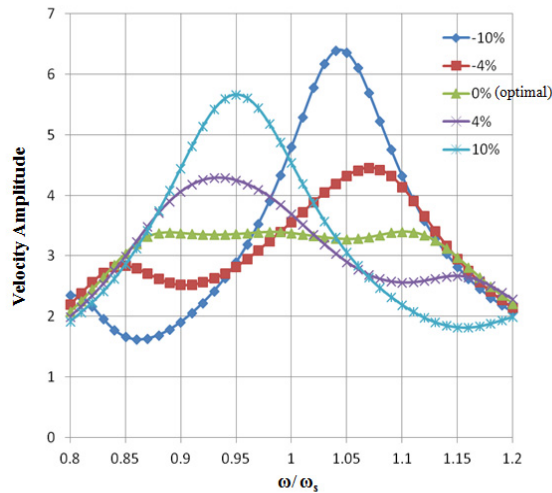
〈Fig. 9〉 Effect of damping ratio of smaller TMD on structural response



〈Fig. 10〉 Effect of damping ratio of larger TMD on structural response



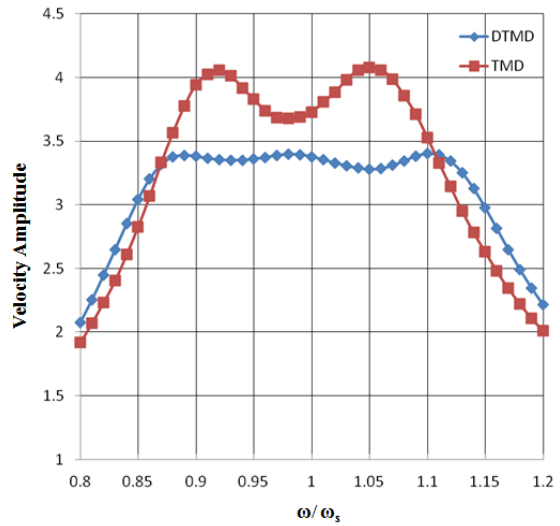
〈Fig. 11〉 Response spectra for stiffness variation of smaller TMD



〈Fig. 12〉 Response spectra for stiffness variation of larger TMD

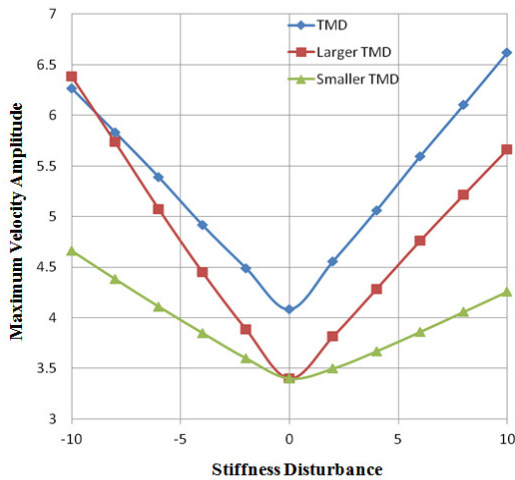
### 4.3 단일과 이중 TMD 제어성능 비교

각 감쇠기의 최적 설계변수를 적용한 경우 구조물의 응답을 비교한 <Fig. 13>을 보면 DTMD가 설치된 구조물의 최대응답이 단일 TMD를 설치한 경우보다 17% 작다. 또한, 진동수 대역별( $\omega/\omega_s$ ) 응답의 변화도 DTMD 설치 구조물의 경우 고유진동수의 비( $\omega/\omega_s$ )가 0.87~1.1인 구간에서 일정하게 유지되어 단일 TMD를 설치한 경우보다 제어성능이 우수함을 알 수 있다.



〈Fig. 13〉 Response of structure with DTMD and TMD respectively

설계된 TMD를 현장에 설치하는 과정에서 감쇠기의 강성을 정확하게 구현하지 못하거나, 사용 중 구조물의 특성이 변화하여 초기 설계 시 고려한 TMD의 최적 강성비의 조정이 필요한 경우가 있다. 이러한 시공상 또는 시스템 특성 변화에도 대응할 수 있는 특성을 나타내는 강인성(Robustness)을 비교하기 위하여 <Fig. 14>와 같이 단일 TMD와 DTMD의 상·하부 TMD의 강성을 최적값에서  $\pm 10\%$ 까지 변화시키면서 응답을 비교하였다.



〈Fig. 14〉 Robustness comparison of each case

해석 결과에 따르면 단일 TMD의 경우 강성이 최적값과 오차가 커질수록 응답이 최대 62%까지 증가한다. DTMD의 경우 하부 TMD의 강성 오차에 따른 응답변화는 최대 88%까지 증가하지만, 응답의 절대값을 비교하면 단일 TMD에 비해 작음을 알 수 있다. 특히 DTMD의 상부 TMD(Saller TMD)의 강성 오차에 따른 응답변화는 37%에 그쳐 전체적으로 DTMD가 단일 TMD보다 앞서 언급한 오차에 대응하는 강인성이 뛰어나다고 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 발전소에서 많이 사용되지만 다양한 진동문제가 발생하고 있는 수직 펌프의 진동저감 방안들에 대하여 성능 및 적용성을 평가하였다.

수직 펌프의 특성상 자체 가진력 및 펌프 주변에서 전달되는 동하중에 의한 공진 문제가 빈번하게 발생한다. 실제 현장에서는 일반적으로 서포트(Support) 설치 등을 통한 강성 증가 및 질량 추가를 통한 공진을 피하는 방법들이 사용하고 있다. 그러나 현장의 여건상 앞서 언급한 방법들을 적용하기가 어려운 경우가 많고, 따라서 보강 공사 기간이 길어지고 시운전이 지연되기도 한다.

따라서 본 연구에서는 상대적으로 작은 부가 질량 및 손쉬운 설계 및 설치가 가능한 TMD와 DTMD의 제어성능을 평가하기 위하여 수치해석을 수행하였다.

설계변수의 최적화를 통해 수직 펌프의 진동 응답을 구하였으며, 실제 현장 적용 시 발생할 수 있는 시공 오차에 의한 성능 저하, 즉 강인성에 대한 평가를 수행하였다. 이를 통해 DTMD가 단일 TMD에 비해 높은 제어 성능을 보이고 외부 진동의 변화에 대한 강인성, 설계 및 시공 오차에 대한 강인성이 모두 높음을 확인하였다. 따라서 DTMD가 수직 펌프의 다양한 진동 원인에 대한 진동저감 장치로서 매우 효과적임을 검증하였다. 마지막으로 추후 현장에 DTMD를 적용하여 진동저감 성능 및 강인성을 확인하고자 한다.

## 감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사드립니다. (NRF-2016R1D1A1A09919159)

## References

1. H. Park and H.S. Yoo, "Vibration Reduction of Vertical Pumps used in the Power Plant Circulating Water System", The Plant Journal. Vol. 9, No. 1, pp. 43-49, 2013
2. A.K. Ghorbani-Tanha, A. Noorzad and M. Rahimian, "Mitigation of Wind-induced Motion of Milad Tower by Tuned Mass Damper", The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 18, No. 4, pp. 371-385, 2009
3. A.Y. Tuan and G.Q. Shang, "Vibration Control in a 101-Storey Building Using a Tuned Mass Damper", Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 141-156, 2014
4. C. Xing, H. Wang, A. Li and Y. Xu, "Study on Wind-Induced Vibration Control of a Long-Span Cable-Stayed Bridge Using TMD-Type Counterweight", Journal of Bridge Engineering, Vol. 19, No. 1, pp.

- 141-148, 2014
5. S.K. Ahn, "Vibration Control for Floor Slabs using Tuned Mass Damper", Journal of the Korean Association for Spatial Structures. Vol. 12, pNo. 2, pp. 24-29, 2012
  6. C. Li and B. Zhu, "Estimating Double Tuned Mass Dampers for Structures under Ground Acceleration using a Novel Optimum Criterion", Journal of Sound and Vibration. Vol. 298, pp. 280-297, 2006
  7. S.V. Bakre and R.S. Jangid, "Optimum Multiple Tuned Mass Dampers for Base Excited Damped Main System", International Journal of Structural Stability and Dynamics, Vol. 4, pp. 527-542, 2004
  8. J.D. Yau and Y.B. Yang, "A Wideband MTMD System for Reducing the Dynamics Response of Continuous Truss Bridges to Moving Train Loads", Engineering Structures, Vol. 26, No. 12, pp. 1795-1807, 2004
  9. J.S. Bae, J.H. Hwang, J.H. Kim and J.H. Lim, "Vibration Suppression of a Cantilever Beam using MTMD", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 21, No. 12, pp. 1091-1097, 2011
  10. G.C. Kim and J.W. Kang, "Optimal Design of Passive TMD for Seismic Behavior Control of Spacial Structures", Journal of the Korean Association for Spatial Structures, Vol. 11, No. 2, pp. 81-88, 2011

- Received : September 28, 2017
- Revised : October 16, 2017
- Accepted : October 17, 2017