

동흡진기 적용을 통한 원전기기의 내진성능향상에 관한 수치적 연구

곽 신 영^{1*} · 곽 진 성² · 이 환 호² · 오 진 호² · 구 경 회³

¹한국원자력연구원 구조지진안전연구실, ²한국원자력연구원 연구로설계종합실, ³한국원자력연구원 SFR계통설계부

A Numerical Study on Improvement in Seismic Performance of Nuclear Components by Applying Dynamic Absorber

Shinyoung Kwag^{1*}, Jinsung Kwak², Hwanho Lee², Jinho Oh² and Gyeong-Hoi Koo³

¹Structural and Seismic Safety Research Team, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057, Korea

²Research Reactor System Engineering Team, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057, Korea

³SFR System Design Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057, Korea

Abstract

In this paper, we study the applicability of Tuned Mass Damper(TMD) to improve seismic performance of piping system under earthquake loading. For this purpose, a mode analysis of the target pipeline is performed, and TMD installation locations are selected as important modes with relatively large mass participation ratio in each direction. In order to design the TMD at selected positions, each corresponding mode is replaced with a SDOF damped model, and accordingly the corresponding pipeline is converted into a 2-DOF system by considering the TMD as a SDOF damped model. Then, optimal design values of the TMD, which can minimize the dynamic amplification factor of the transformed 2-DOF system, are derived through GA optimization method. The proposed TMD design values are applied to the pipeline numerical model to analyze seismic performance with and without TMD installation. As a result of numerical analyses, it is confirmed that the directional acceleration responses, the maximum normal stresses and directional reaction forces of the pipeline system are reduced, quite a lot. The results of this study are expected to be used as basic information with respect to the improvement of the seismic performance of the piping system in the future.

Keywords : tuned mass damper(TMD), piping system, optimal design, seismic response analysis

1. 서 론

동조질량감쇠기(tuned mass damper, TMD)는 구조 진동 제어를 위해 많이 사용되는 장치 중 하나이다. TMD를 이용한 진동 제어 개념은 1909년 Frahm이 동역학적 진동 흡수기(dynamic vibration absorber)라 부르는 진동 제어 기기를 개발함으로써 시작되었다. TMD는 구조 진동 제어 기법 중 가장 오래된 개념일지라도, 현재에도 다양한 형태의 장치 개념이 실험적으로 검증되고 있고(Lee *et al.*, 2008) 또한 많은 분야에 적용되고 있다. 하나의 예로, 일본 및 중국에 새롭게 지어지는 초고층빌딩에 바람과 지진 하중에 대한 구조물 응답을 저

감하기 위하여 이러한 TMD 기술이 활용되었다. 이러한 TMD는 이 밖에도 교량, 관제탑, 기계적 구조물, 등 다양한 토목/건축/기계 구조 시스템에 적용된다. Fig. 1은 대표적인 예로 타이페이 101 초고층 건물과 교육시설 바닥판에 적용된 TMD를 보여주고 있다.

TMD는 대상 구조물에 질량, 스프링, 감쇠기로 구성된 보조적인 장치로서 부착하고, 이를 통하여 구조물의 주된 진동을 TMD 내의 운동으로 변환시키고 구조물 자체 진동은 저감시킨다. TMD의 주요 변수인 질량비, 강성계수 및 감쇠계수의 설계에 대한 연구는 현재까지 다수 수행되어 왔다. Den Hartog (1956)는 조화 가진을 받는 비감쇠 단자유도(single-degree

* Corresponding author:

Tel: +82-42-868-4523; E-mail: skwag@ncsu.edu;

Received October 11 2018; Revised November 2 2018;

Accepted November 18 2018

©2019 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Fig. 1 Examples of TMD application: (a) Taipei 101; (b) Slab of education facility(DEICON)

-of-freedom) 구조물에 대한 최적의 TMD 설계값을 질량비에 따른 단항식으로 제안하였다. Warburton(1982)는 다양한 진동 하중 조건에서 비감쇠 단자유도 구조물에 대한 최적의 TMD 설계값에 대한 단항식을 유도하였다. 그러나 감쇠 구조물의 경우, TMD 설계값에 대하여 질량비에 따른 최적의 TMD 설계값을 단항식 형태로 유도할 수 없다. 또한, 현실적으로 대상 구조물이 다자유도(multi-degree-of-freedom)의 복잡한 시스템으로 구성되기 때문에 이에 대한 TMD 최적 설계값 공식을 구하는 데는 현실적인 제약이 있다. 이에 따라 Rana와 Soong(1998)은 감쇠 다자유도 구조물을 진동 저감 목표로 하는 모드에 대하여 감쇠 단자유도 구조물로 치환하고, 이를 기반으로 TMD 설계값을 수치적으로 찾는 방법을 제안하였다. 이 밖에도 다수의 연구자에 의해 여러 가지 수치 최적화 기법을 통하여 다양한 진동 하에서 최적의 TMD 설계값을 찾는 연구가 현재까지 활발하게 진행되고 있다(Jang *et al.*, 2009; Kang & Kim, 2011; Zhang & Zhang, 2017).

이와 같이 현재까지의 TMD 성능 및 설계에 대한 연구는 고층 건물, 타워 및 교량 등의 내진 설계에 중요한 이론적 통찰력 및 방법론을 제공하였고, 이를 통하여 이러한 대상구조물에 대하여 TMD를 직관적으로 설계할 수 있게 해 주었다. 그러나 파이핑 시스템과 같이 다양한 모드가 전체응답에 많은 영향을 미치는 복잡한 시스템의 경우에 대해서는 이러한 기존의 TMD 설계 방법론을 적용하기 쉽지 않다. 또한, 다수의 지배적인 모드가 존재하는 파이핑 시스템에 대하여 지진동 하에서 TMD가 얼마나 정량적으로 지진응답을 저감시키고 또한 내진성능향상에 도움을 줄 수 있는지에 대한 연구는 수행된 바가 거의 없다.

이러한 배경 아래 본 연구에서는 지진동 하중을 받는 파이핑 시스템에 대하여 TMD 적용성을 검토하였다. 구체적으로 파이핑 시스템을 대상으로 모드형상 분석을 통하여 효과적인 TMD 설치 위치를 선정하고, 최적의 TMD 설계값을 유전자알고리즘(genetic algorithm, GA) 기법을 통하여 도출하였다. 이러

한 설계 작업 후 TMD 유무에 따라 대상 파이핑 시스템의 주파수 응답해석을 수행하였고, 응답결과를 비교·분석하였다. 또한 TMD 설치 개수 및 위치와 관련하여 파이핑-TMD 시스템에 대한 성능을 비교하였다. 마지막으로 실제 지진동하에서 TMD 설치 유무가 대상 파이핑시스템 응답에 어떠한 영향을 주는 지 지진 시간이력해석을 통하여 비교·분석하였다.

2. TMD 설계 개념

수동 진동제어 장치인 TMD는 대상 구조물에 질량, 스프링, 감쇠기로 구성된 보조적인 장치로 부착됨으로써 구조물의 주된 진동을 TMD로 흡수하는 진동 흡수 장치이다. 이는 가진 진동수 대역이 좁은 바람하중, 보도하중, 교통하중 등의 진동 제어에 효과적이고, 지진하중에 대하여도 경제적인 제어 시스템으로 알려져 있다. 일반적으로 최적 TMD의 질량은 대상 구조물 질량의 1% 내외이고, 진동수는 대상 구조물의 고유 진동수에 거의 근접한 값이 사용된다. 실제 대상 구조물은 많은 고유 진동수를 가지고 있지만, TMD의 기본 개념을 설명하기 위하여 Fig. 2와 같은 단자유도 구조물-TMD 장치로 구성된 2자유도 시스템을 사용하여 TMD가 설치된 구조 시스템의 응답을 살펴보기로 하자.

2.1 TMD 기본 개념

Fig. 2의 모델을 기반으로 2자유도 구조물-TMD 시스템의 지배방정식은 아래와 같이 구성된다.

$$M\ddot{X} + KX - [c(\dot{x} - \dot{X}) + k(x - X)] = P(t) \quad (1a)$$

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{X}) + k(x - X) = p(t) \quad (1b)$$

여기서, M 은 대상 구조물 질량, m 은 TMD 질량, K 는 구조물

스프링 강성, k 는 TMD 스프링 강성, c 는 TMD 감쇠 계수, $P(t)$ 는 구조물 질량에 작용하는 힘(가속도를 가진 지반가속도 $\ddot{x}_g(t)$ 경우에는 $P(t) = -M\ddot{x}_g(t)$ 임.)을 각각 의미한다. $p(t)$ 는 TMD 질량에 작용하는 힘으로써 지반가속도일 경우 $(m/M) \cdot P(t)$ 이고, 구조물 질량에 작용하는 가진일 경우 0이 된다. 위의 지배방정식을 기초로 추가적인 논의를 위하여 다음과 같은 파라미터를 정의하였다. μ 는 구조물과 TMD 질량비(m/M), ω 는 외부 가진의 고유 진동수, Ω 는 구조물의 고유진동수, ω_a 는 TMD의 고유진동수를 각각 의미한다. 또한 β 는 구조물의 진동수와 외부 가진 진동수의 비(ω/Ω), f 는 구조물과 TMD의 진동수 비(ω_a/Ω), ζ_d 는 TMD의 감쇠비, ζ 는 구조물의 감쇠비, R 은 동적증폭계수(동적최대응답과 정적최대응답의 비, X_{max}/X_{st})를 각각 나타낸다.

Den Hartog(1956)는 구조물 질량에 작용하는 조화 가진을 받는 구조물 정상상태 응답(steady-state response)을 최소화시키는 닫힌 형식의 최적의 TMD 파라미터 진동수비 f 와 TMD 감쇠비 ζ_d 식을 제안하였다. 여기서 조화 가진은 $P(t) = P_0 \sin(\omega t)$ 로 고려하였고, 구조물의 감쇠효과는 무시하였다. 이에 따른 동적증폭계수는 아래와 같이 나타낼 수 있다($X_{st} = P_0/K$).

$$R = \frac{(f^2 - \beta^2)^2 + (2\zeta_d f \beta)^2}{\sqrt{[(f^2 - \beta^2)(1 - \beta^2) - f^2 \beta^2 \mu]^2 + (2\zeta_d f \beta)^2(1 - \beta^2 - \beta^2 \mu)^2}} \quad (2)$$

최적의 TMD 파라미터 값은 위의 동적증폭계수가 ζ_d 와 무관하게 2개의 양 끝 고정점을 지난다는 것에 착안하여 유도되었고, 아래와 같이 공식화되었다.

$$f_{opt} = \frac{1}{1 + \mu} \quad (3)$$

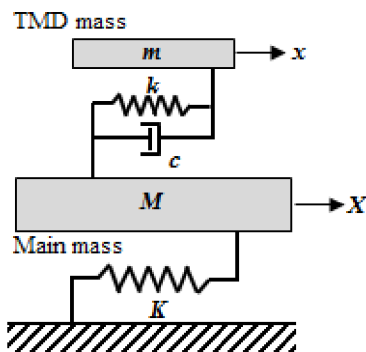


Fig. 2 Structure-TMD 2-DOF system

$$\zeta_{d,opt} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1+\mu)}} \quad (4)$$

2.2 구조물 감쇠 고려

Den Hartog의 최적 TMD 파라미터 유도 시 구조물의 감쇠는 고려하지 않았다. 그럼에도 불구하고 이로부터 유도된 최적 값들은 굉장히 유용한 정보를 제공해 준다. 그러나 TMD의 감쇠비와 무관하게 존재했던 고정점 2개는 구조물의 감쇠로 인해 더 이상 유효하지 않게 된다. 그러므로 최적 TMD 파라미터는 닫힌 형식의 공식으로 도출될 수 없고, 이는 동적증폭 계수를 최소화시키는 파라미터를 수치적인 방법을 통해서만 구할 수 있게 된다. 이 경우 지배방정식은 식 (1a)의 왼쪽 항에 $C\dot{X}$ 을 추가함으로써 구성할 수 있게 된다. 이러한 지배방정식을 통하여 조화 가진에 대한 동적증폭계수를 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{\sqrt{\left(1 + \Delta\mu - \frac{\beta^2}{f^2}\right)^2 + 4\left(\frac{\zeta_d \beta}{f}\right)^2 (1 + \Delta\mu)^2}}{Z} \quad (5a)$$

$$Z = \left[\left\{ \frac{\beta^4}{f^2} - \frac{\beta^2}{f^2} - \beta^2(1 + \mu) - 4\frac{\zeta_d \beta^2}{f} + 1 \right\}^2 + \left\{ 2\frac{\zeta_d \beta^3}{f} + 2\frac{\zeta_d \beta^3}{f}(1 + \mu) - 2\frac{\zeta_d \beta}{f} - 2\zeta \beta \right\}^2 \right]^{1/2} \quad (5b)$$

$$\Delta = \begin{cases} 1: & \text{ground excitation} \\ 0: & \text{main mass excitation} \end{cases} \quad (5c)$$

수치적 접근법에서 TMD 파라미터 f 및 ζ_d 의 여러 가지 조합이 동적증폭계수를 가장 최소화시키는 최적의 조합이 구해질 때까지 시도될 수 있다. 실제 대상 구조물이 보통은 작은 감쇠비 값을 가지므로, 구조물의 감쇠 능력을 고려하지 않는 식 (3) 및 식 (4)의 Den Hartog 제안식 값이 수치 최적화에서 좋은 시작점이 될 수 있다. 이와 관련한 상세한 분석은 다양한 외부 가진 조건에서 여러 연구자에 의해 수행된 바 있다. 이러한 분석은 모두 대상 구조물이 작은 감쇠값을 갖는다는 가정 하에 수행되었다.

2.3 TMD 설계 방법

지금까지 제안된 식은 모두 단자유도 구조물-단자유도 TMD의 2자유도 구조물-TMD 시스템에 대하여 대상 구조물 감쇠 유무와 여러 가지 외부 가진 조건에 따라 개발되었다. 그럼에도 불구하고, 다자유도의 복잡한 구조물에도 제안된 식의

유효함이 입증되었고, 이를 기반으로 간단한 설계 방법 도 제안 된 바 있다(Rana and Soong, 1998).

이러한 이론적 배경 아래 이번 연구에서는 대상 다자유도 파이프 시스템에 대하여 전체응답에 기여가 큰 몇몇의 지배적인 모드를 단자유도 감쇠 시스템으로 치환하고, 이를 바탕으로 각각의 모드에 대하여 2자유도 구조물-TMD 시스템을 구성하였다. 이렇게 구성된 비연계(decoupled)된 목표 모드별 2자유도 시스템과 식 (5)를 기반으로 정의된 응답증폭계수를 최소화시키는 f_{opt} 및 $\zeta_{d,opt}$ 값을 GA를 활용하여 도출하였다(Kwag and Ok, 2013). 아래 표현은 이러한 TMD 설계 최적화 과정을 정식화한 내용이다.

$$\text{Given } \zeta \text{ and } \mu, \quad \text{Min } R(f, \zeta_d) \quad (6)$$

3. 수치 연구

본 연구에서는 지진 하중 하에서 파이프 시스템의 내진성능 향상을 위하여 TMD를 적용하였다. 이를 위하여 대상 파이프는 Bezler 등(1985)에 소개된 벤치마크 시스템을 대상으로 하였다. 이 연구에서는 2개의 서로 다른 높이에 있는 양 끝 지점 사이를 연결하는 3.5 인치 직경의 물이 흐르는 파이프라인을 대상으로 하였다. 서로 다른 높이의 파이프라인 양 끝 지점은 앵커로 고정되어 있고, 양 끝 지점 사이 파이프는 중간 지지점들로 구속되어 있다. 구체적인 모델링 정보와 재료 물성치 그리고 이 시스템에 대한 원래의 모드해석 결과는 위에서 언급한 참고문헌에 잘 정리되어 있다.

본 연구에서는 TMD 적용을 ANSYS Workbench(WB) 프레임워크 내에서 수행하였기 때문에, 우선 위에 정의된 대상

파이핑을 ANSYS WB로 모델링하였다. 요소는 빔요소 및 링크를 사용하였고, 전체 시스템 질량은 444.1kg이며, 총 844개의 절점과 281개 요소로 대상시스템을 구성하였다. Fig. 3(a)는 ANSYS WB 내에서 모델링 된 대상 파이프 시스템 FE 모델을 보여주고 있다. Table 1은 ANSYS WB를 통하여 구해진 모드 해석 결과를 보여주고 있다. ANSYS WB를 통한 구체적인 모드 형상과 모드 형상에 따른 방향 별 질량 참여율은 각각 Fig. 3(b)~(d) 및 Table 1에 추가적으로 정리하였다. 다음 단락부터는 이렇게 검증된 파이프라인 수치 모델을 기반으로 TMD 적용성을 검토해 보았다.

우선, 지진 하중에 대하여 TMD를 이용하여 파이프라인의 내진 성능을 향상시키기 위해서는 TMD 설치 위치를 결정하여야 한다. 통상적인 지진 하중의 지배적인 가진 주파수는 1~10 Hz 구간이다. 그러므로 지진 가진에 대한 파이프라인의 TMD 설치 효과를 높이기 위해서는 지진 하중의 지배적인 가진 주파수 대역에 있는 모드 형상을 고려하여 최대 응답이 나타날 수 있는 지점에 TMD를 설치하여야 한다. 이 때 TMD의 설계 감쇠 계수(c) 및 강성(k) 값은 해당 모드 질량을 고려하여 도출하여야 한다. 이러한 내용을 위에서 정의한 해당 파이프라인 수치모델에 대하여 적용하면, 4개의 모드가 1~10Hz의 지진 하중의 지배적인 가진 주파수 영역에 해당된다(Table 1 참조). 구체적으로, 첫 번째와 두 번째 모드는 각각 6.01Hz 및 6.24Hz이고, Z방향에 대하여 질량참여율이 각각 약 10%로, Z방향 파이프 최종 모드 형상에 대하여 두 모드는 총 20%의 기여를 보여주고 있다. 세 번째 모드는 7.86Hz로, X방향과 Z 방향으로 약 2% 및 4% 정도의 질량참여율을 보여주고 있다. 네 번째 모드는 8.80Hz이고, Y방향에 대하여 질량참여율이 약 60%로, Y방향 파이프 최종 모드 형상에 대하여 총 60%정

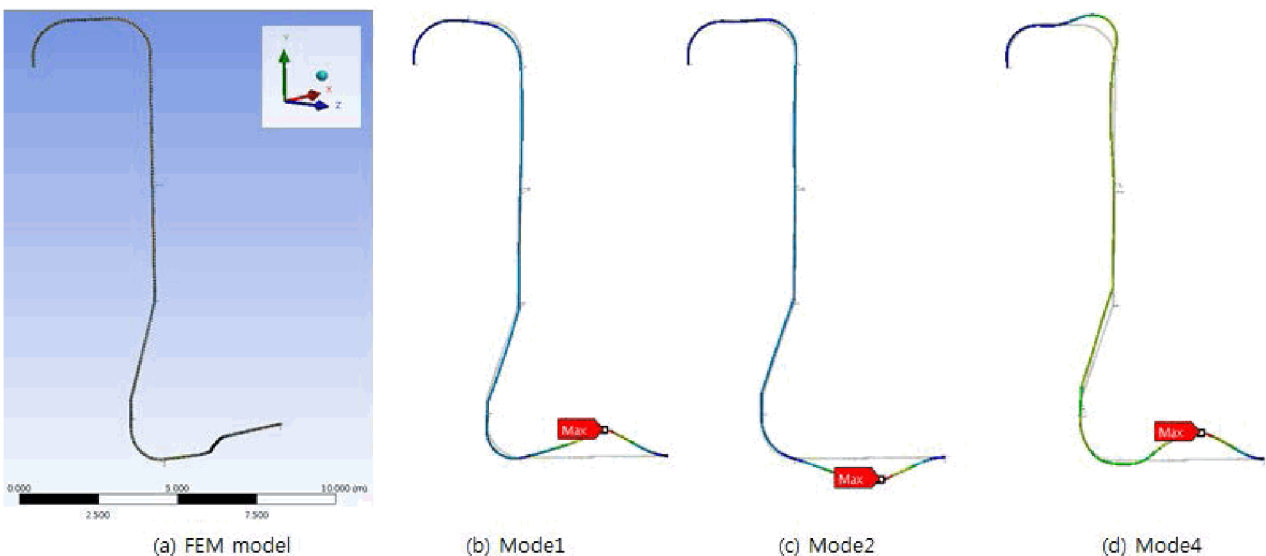


Fig. 3 Piping FE model and mode shapes(1st, 2nd, and 4th modes)

Table 1 Mode analysis results

Mode	Freq. (Hz)	X-dir.		Y-dir.		Z-dir.	
		mass(kg)	ratio	mass(kg)	ratio	mass(kg)	ratio
1	6.01	0.47	0.00	0.50	0.00	42.59	0.10
2	6.24	0.58	0.00	1.42	0.00	44.10	0.10
3	7.86	10.28	0.02	0.08	0.00	15.96	0.04
4	8.80	7.81	0.02	263.21	0.59	0.31	0.00
5	12.40	0.96	0.00	3.67	0.01	3.18	0.01
6	12.81	3.12	0.01	0.67	0.00	3.50	0.01
7	13.85	29.19	0.07	0.78	0.00	15.31	0.03
8	15.16	8.86	0.02	2.29	0.01	4.08	0.01
9	15.66	2.24	0.01	2.55	0.01	11.09	0.03
10	17.82	38.84	0.09	17.49	0.04	30.44	0.07
11	18.77	0.71	0.00	6.36	0.01	26.08	0.06
12	22.03	17.13	0.04	3.49	0.01	64.80	0.15
13	22.84	143.21	0.32	22.06	0.05	9.23	0.02
14	24.82	1.39	0.00	0.24	0.00	12.99	0.03
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
Total		444.1	1.00	444.1	1.00	444.1	1.00

도의 기여를 보여주고 있다. 그러므로 TMD 설치로 인한 내진 성능 효과를 높이기 위해서는 TMD를 Z방향에 대해서는 첫 번째 및 두 번째 모드의 최대 응답 지점에, Y방향에 대해서는 네 번째 모드의 최대 응답 지점에, 설치하는 것이 바람직할 것으로 판단된다(Fig. 3 참조). 반면에, X방향에 대해서는 지진 하중의 지배적인 가진 주파수 대역에 존재하는 질량참여율이 높은 모드 형상이 없기 때문에 별도로 TMD를 설치하지 않는 것이 좋을 것으로 판단된다. 그러나 네 번째 모드의 X방향 질량참여율이 약 2%정도 되기 때문에 네 번째 모드의 최대 응답 지점에 설치한 TMD가 X방향의 지진 응답 절감효과를 나타낼 것으로 예상된다.

3.1 적용 TMD 설계

위의 절의 분석에 따라, 파이프라인의 내진 성능 향상에 효과

적인 TMD 설치 위치는 총 3곳(모드 1, 2, and 4)로 판단된다. 그러므로 2.3절에 소개된 TMD 설계 방법에 따라 총 3개 모드와 관련하여, 비 연계된 2자유도 파이핑-TMD 시스템을 구성하고, 이에 대하여 각각 TMD 설계를 수행하였다. 구체적으로 TMD 설계 과정에서 하중으로서 지반 조화가진 조건임을 가정하였고, 각각의 파이프라인 목표 모드와 TMD를 모두 감쇠 SDOF 시스템으로 가정하였다. 이에 따라 식 (5) 및 식 (6)을 기반으로 정의된 응답증폭계수를 최소화시키는 f_{opt} 및 $\zeta_{d,opt}$ 값을 GA를 활용하여 도출하였다. 본 연구에서는 TMD 질량을 전체 파이프라인 질량의 0.9%(약 1%)인 4kg로 가정하였고, 파이프라인의 감쇠비(ζ)는 0.02로 선정하였다. GA 최적화는 MATLAB 'ga' function을 통하여 수행하였고, 세대수 및 개체수는 수렴과정을 고려하여 각각 1000 및 100으로 설정하였다. TMD 3개에 대한 구체적인 설계 값과 설치 위치는 Fig. 4에 나타내었다.

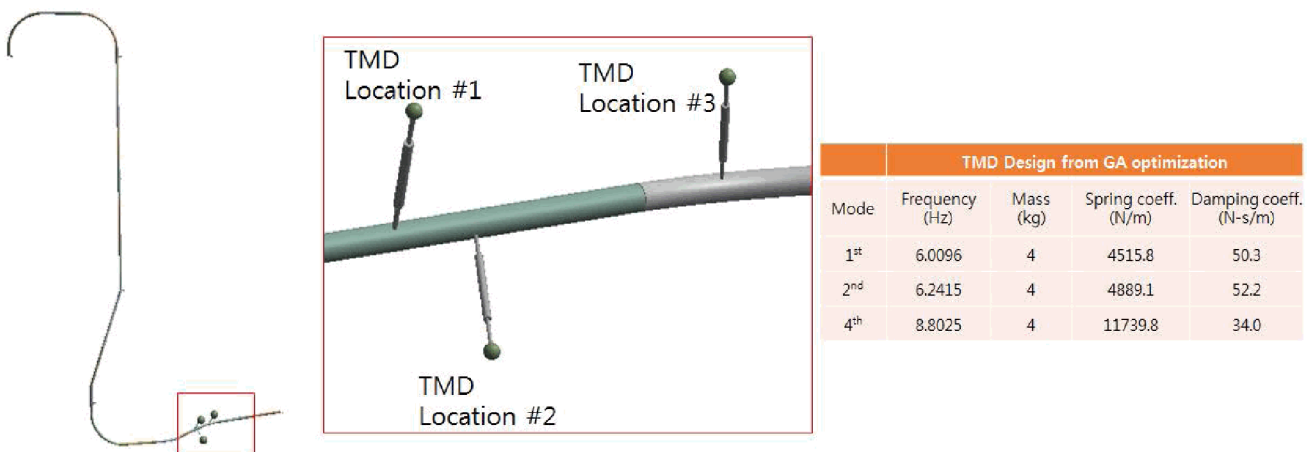


Fig. 4 TMD installation locations and design values applied to the target pipeline

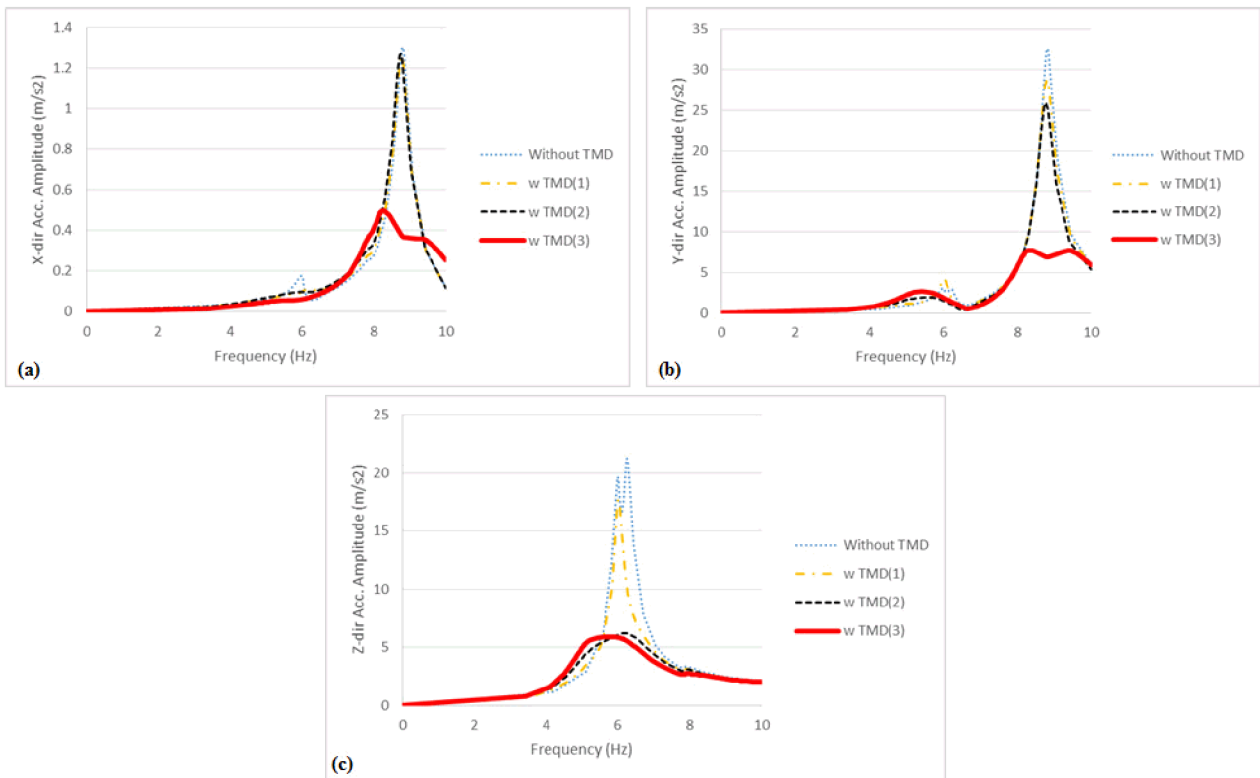


Fig. 5 Comparison of frequency-responses in terms of a number of TMD installation: (i) without TMD; (ii) TMD(1): TMD #1 installation; (iii) TMD(2): TMD #1 installation; (iv) TMD(3): TMD #1, #2 & #3 installation

3.2 주파수응답해석

TMD 설치 유무에 따라 파이프라인의 성능 비교를 위하여 TMD가 설치된 파이핑 시스템과 TMD가 설치되지 않는 파이핑 시스템에 단위 가속도 $1m/s^2$ 을 갖는 조화 가진을 각각의 방향 별 입력으로 적용하였다. 이에 따라 서로 다른 두 시스템과 관련하여 TMD가 적용된 배관부 위치에서 입력 가속도의 주파수 변화에 따른 최대 가속도 응답 선도를 비교하였다. 구체적으로 Fig. 5는 TMD를 설치하지 않는 경우, TMD 1개를 첫 번째 모드의 최대 응답 지점에만 설치하는 경우, TMD 2개를 첫 번째와 두 번째 모드의 최대 응답 지점에 설치하는 경우, 그리고 TMD 3개를 첫 번째, 두 번째, 및 네 번째 모드의 최대 응답 지점에 설치하는 경우에 대하여 응답을 비교하였다.

구체적으로 X방향에 단위 가속도를 갖는 조화 가진을 적용하였을 때, TMD가 적용된 배관부 위치에서 X방향 주파수-최대가속도응답 선도를 Fig. 5(a)에 나타내었다. 구체적으로 4가지 경우: (i) TMD가 없을 때; (ii) TMD(1): TMD location #1에만 설치될 때(총 1개); (iii) TMD(2): TMD location #1과 #2에 설치될 때(총 2개); (iv) TMD(3) TMD location #1, #2와 #3에 설치될 때(총 3개)에 대하여 비교해 보았다. 그림에서 보는 바와 같이 (i)의 경우와 (ii) 및 (iii)의 경우는 큰 차이를 보이지 않았다. 반면에 (iv)의 경우는

TMD를 설치하지 않는 경우인 (i)과 비교하여 최대 가속도 응답이 1/3 가까이 줄어들음을 확인할 수 있다. (i), (ii), (iii)의 결과가 큰 차이를 보이지 않는 이유는 Table 1에서 보는 바와 같이 첫 번째와 두 번째 모드의 X방향 질량참여율이 모두 약 0.1%이므로 X방향의 응답에 거의 영향을 미치지 않기 때문으로 판단된다. 반면에 네 번째 모드의 X방향 질량참여율이 약 2% 정도이기 때문에 TMD 설치로 인하여 응답 저감효과를 가져온 것으로 보인다.

다음으로 Y방향에 단위 가속도를 갖는 조화 가진을 적용하였을 때, TMD가 적용된 배관부 위치에서 Y방향 주파수-최대 가속도응답 선도를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 위에서와 마찬가지로 4가지 경우에 대하여 응답을 비교해 보았다. (i), (ii) 및 (iii)의 경우는 첫 번째와 두 번째 모드의 Y방향 질량참여율이 비교적 많이 작기 때문에 큰 차이를 보이지 않았다. 반면에 (iv)의 경우는 네 번째 모드의 Y방향 질량참여율이 약 60% 정도이므로 TMD 설치로 인한 응답 저감효과가 큰 것으로 판단된다.

마지막으로 Z방향에 단위 가속도를 갖는 조화 가진을 적용하였을 때, TMD가 적용된 배관부 위치에서 Z방향 주파수-최대가속도응답 선도를 Fig. 5(c)에 나타내었다. 위에서와 마찬가지로 4가지 경우에 대하여 응답을 비교해 보았다. (i)의 TMD를 설치하지 않은 경우와 (ii) 및 (iii)의 경우를 비교했을

때 첫 번째와 두 번째 모드 위치에 TMD를 모두 설치하는 경우에 응답 저감 효과가 크을 확인할 수 있다. 이는 첫 번째와 두 번째 모드의 질량참여율이 각각 10%정도 되기 때문에 두 위치 모두에 TMD를 설치했을 때 훨씬 더 큰 응답 저감효과를 가져온 것으로 보인다. 반면에, (iii)과 (iv)의 경우에는 응답 변화가 거의 없는데, 이는 네 번째 모드에 설치된 TMD가 Z방향에 대해서는 응답효과를 보이지 않기 때문으로 판단된다. 이 결과는 네 번째 모드의 Z방향 질량참여율이 거의 없기 때문에 나타난 현상으로 보인다.

그러므로 위의 분석 결과를 정리해 보면 TMD를 총 3군데 모두 설치하는 것이 모든 방향의 주파수-가속도 최대응답을 저감시키는데 가장 효과적인 것으로 판단된다. 이에 따라 다음 절 부터는 TMD를 설치하지 않은 파이핑 시스템과 TMD를 3곳에 모두 설치한 파이핑 시스템에 대하여 실제 지진 하중 하에서 어떠한 응답 변화를 보이는지 살펴보았다.

3.3 지진응답해석

이번 절에서는 실제 지진 가진 하에서 TMD 설치 유무에 따라 대상 파이프라인의 내진 성능에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 위하여 지진 입력으로 US NRC RG 1.60에 정의된 설계응답스펙트럼(design response spectrum, DRS)을 이용하였다. 이 연구에서는 수평방향 및 수직방향 설계기준지진(design basis earthquake)을 0.3g로 정의하였다. 이에 따라 도출된 수평방향 설계응답스펙트럼을 Fig. 6에 나타내었다. 또한, 설계응답스펙트럼을 포괄하는 인공지진하중을 방향 별로 생성하였고, 이에 따른 수평방향 응답스펙트럼의 형상을 Fig. 6에 목표스

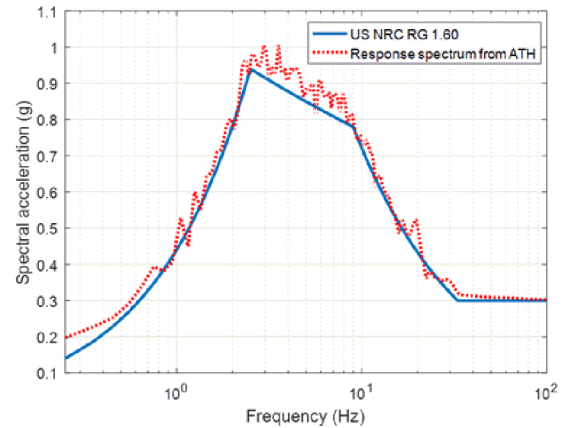


Fig. 6 US NRC RG 1.60, 5% damping DRS and spectrum compatible artificial time history loading

펙트럼과 함께 나타내었다. 생성된 인공지진 시간이력하중은 SRP 3.7.1 인공지진하중 요건을 만족시키도록 도출하였다. Fig. 6과 같이 생성된 입력 설계 지진의 최대증폭 구간은 2.5Hz ~9Hz 영역임을 확인할 수 있다.

위에서 생성된 세 방향의 인공지진 시간이력을 TMD가 설치되지 않은 파이프라인과 TMD가 3곳(1차, 2차 및 4차 모드 최대응답지점)에 설치된 파이프라인 모델의 입력하중으로 적용하였다. 적용 결과로써 먼저 TMD 설치 구간 배관부에서 방향별 가속도 응답을 시간 영역(Fig. 7 참조) 및 주파수영역(Fig. 8 참조)에서 서로 비교해 보았다. 주파수영역 응답은 방향별 가속도 응답스펙트럼을 활용하여 비교하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 전체적으로 모든 방향에서 시간에 따른 가속도 응답이 감소함을 확인할 수 있다. 구체적으로 X방향에서 TMD 설치로 인해 원래 최대 응답 대비 18%가 감소했고, Y방향 및

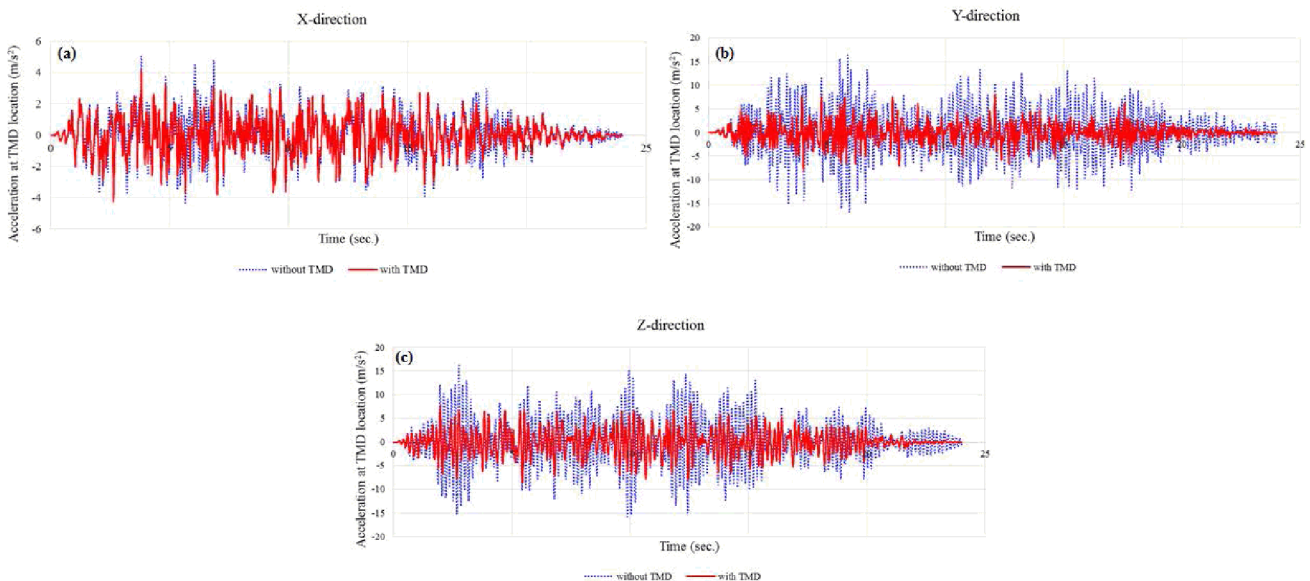


Fig. 7 Comparison of directional acceleration responses at TMD locations

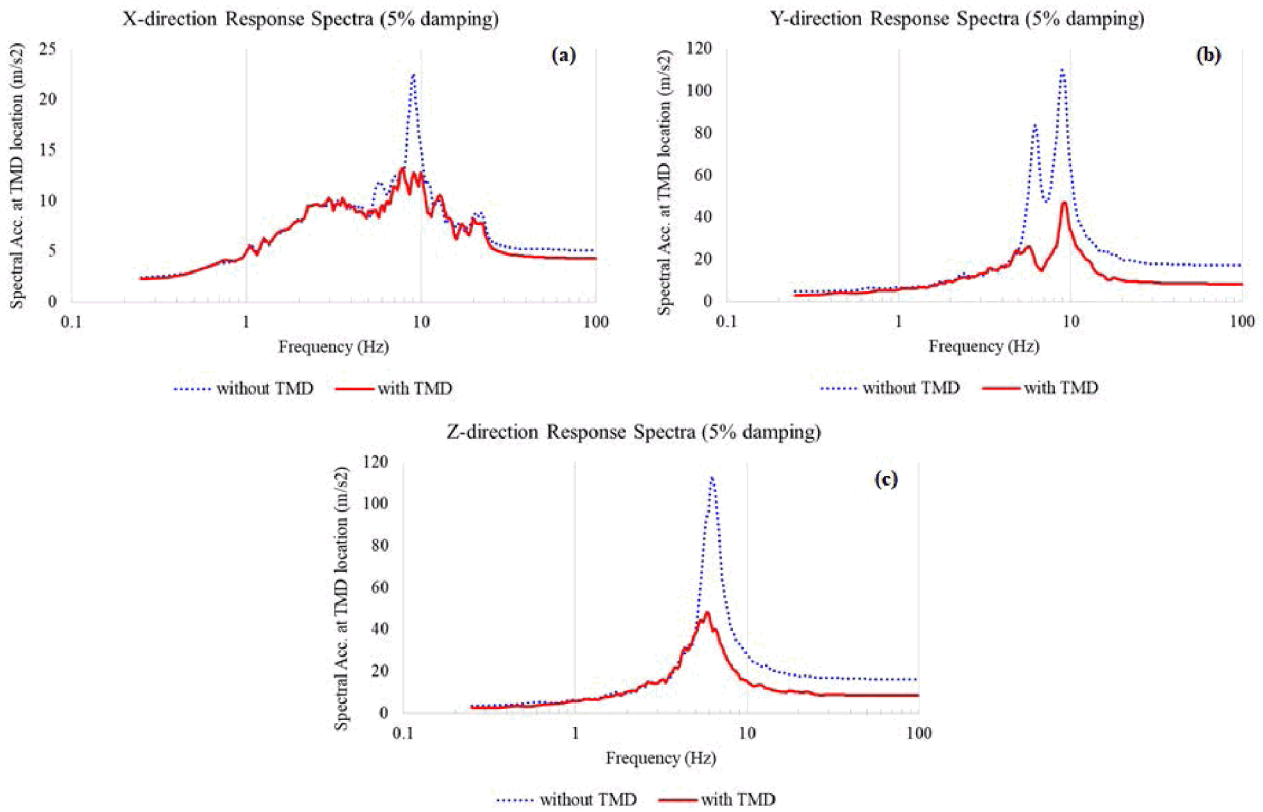


Fig. 8 Comparison of directional response spectra at TMD locations

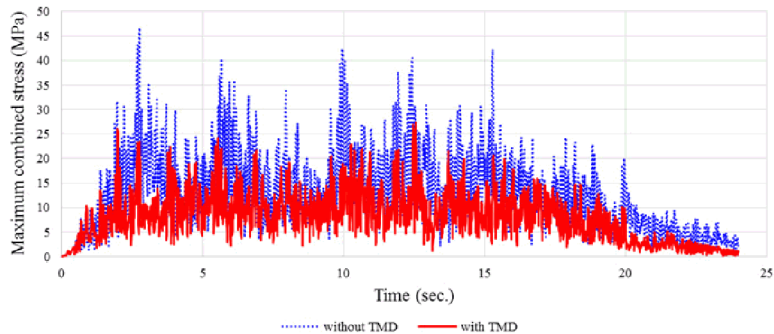


Fig. 9 Comparison of maximum combined normal stresses: w/o TMD vs. w/ TMD

Z방향에서 각각 원래의 최대 응답 대비 51% 및 49%가 감소했다. 여기서, Y 및 Z방향 최대응답 감소치가 X방향 최대응답 감소치 보다 비교적 큰 이유는 TMD 설치 목표 모드 (즉, 1차, 2차 및 4차 모드)의 Y 및 Z방향 질량참여율이 X방향 질량참여율보다 크기 때문인 것으로 보인다. 이러한 결과의 경향은 Fig. 8의 응답스펙트럼 비교를 통해서도 확인할 수 있다. 구체적으로, 방향 별 응답스펙트럼 비교 결과로부터 5Hz 이상 구간에서 전체적인 응답 감소를 볼 수 있고, 특히나 TMD 목표 모드 주파수 영역에서 응답감소가 두드러짐을 확인할 수 있다.

다음으로 TMD가 설치되지 않은 파이프라인과 TMD가 설치된 파이프라인 모델의 시간에 따른 최대 수직응력을 비교

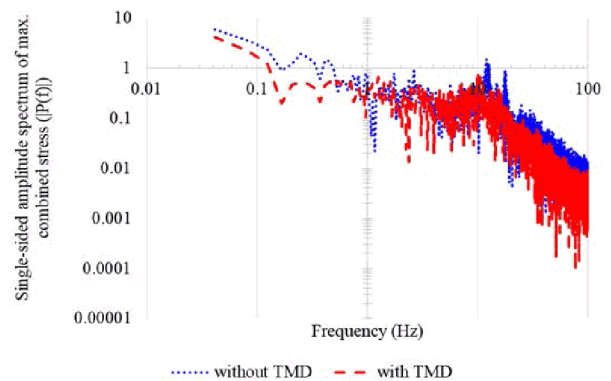


Fig. 10 Comparison of maximum combined stress in frequency domain: w/o TMD vs. w/ TMD

해 보았다(Fig. 9 참조). Fig. 9에서 보는 바와 같이 TMD 설치로 인하여 전 시간 영역에서 최대 수직응력의 크기가 상당히 감소함을 확인할 수 있다. 전체 시간영역에서 최대가 되는 값을 비교해 보면 TMD 설치로 인하여 41%의 응력 감소가 있음을 확인할 수 있다. 이러한 TMD를 통한 응력 감소는 FFT(fast fourier transform)에 의한 주파수영역에서 최대 수직응력 응답비교(Fig. 10)를 통하여도 확인할 수 있다. 구체적으로

전체 주파수 영역에서 응력 감소를 볼 수 있고, 이는 TMD가 배관에 입력되는 지진에너지 일부를 배관을 대신하여 흡수 하였기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

마지막으로 파이프라인 시스템의 최하단 앵커지점의 방향별 반력을 비교해 보았고, Fig. 11은 이러한 결과를 비교해서 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 전 시간 영역에서 해당 지지점의 모든 방향에서 상당한 반력 감소를 확인할 수 있다.

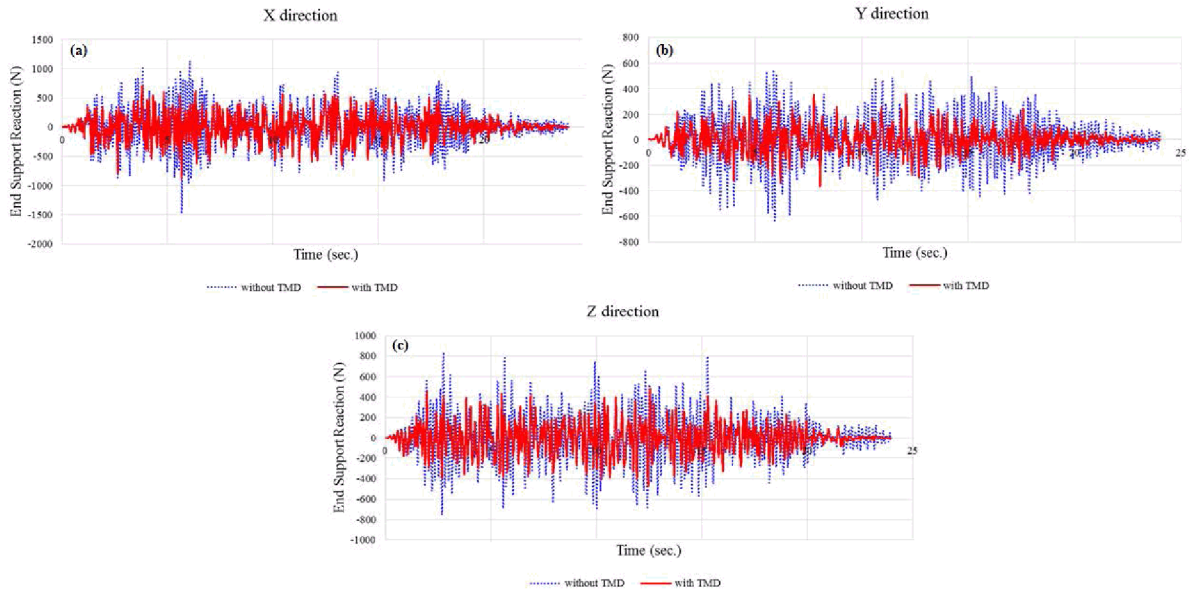


Fig. 11 Comparison of reaction forces at the lowest level anchor: w/o TMD vs. w/ TMD

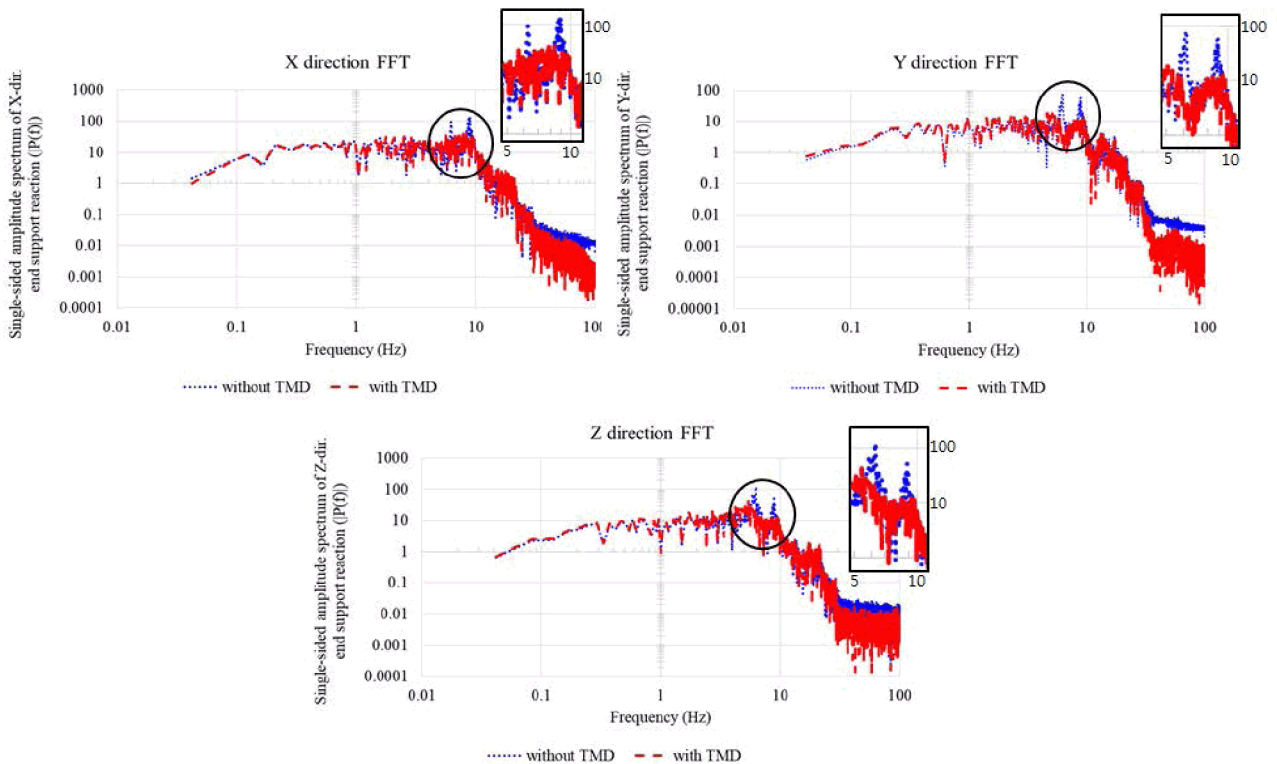


Fig. 12 Comparison of reaction forces at the lowest level anchor in frequency domain : w/o TMD vs. w/ TMD

구체적으로 보면, X, Y, Z방향의 원래 최대 반력 세기 대비 각각 37%, 34%, 43% 감소됨을 확인할 수 있다. Fig. 12는 반력의 시계열 응답을 FFT 변환을 통하여 주파수 영역에서 비교한 결과를 보여준다. 전반적으로 세 방향 모두에서 전체 주파수 영역에서 반력 응답 감소를 볼 수 있고, 이는 TMD 목표모드 주파수 및 30Hz 이상 고주파 영역에서 두드러짐을 확인할 수 있다. 이러한 현상의 원인은 마찬가지로 TMD가 배관에 입력되는 지진에너지 일부를 대신하여 흡수하였고, 이러한 TMD의 에너지 흡수현상이 지지점의 반력 감소를 유발한 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 지진 하중 하에서 파이핑 시스템의 내진성능 향상을 위한 TMD의 적용성을 검토하였다. 이를 위하여 Bezler 등(1985)에 소개된 벤치마크 시스템을 TMD 적용 대상 배관계로 선정하였다. 우선 TMD 설치 위치 및 개수를 결정하기 위하여 대상 파이프라인의 모드해석을 수행하였다. 해석 결과 통상적인 지진 하중의 지배적인 가진 주파수 대역에서 총 4개의 모드가 발견되었고, 이 중 방향 별 질량참여율이 비교적 큰 1, 2 및 4번째 모드를 TMD 설치 위치로 선정하였다. 선정된 위치의 TMD 설계를 위하여 각각의 해당 모드를 단자유도 감쇠모델로 치환하고, TMD를 단자유도 감쇠모델로 고려하여 해당 파이프라인을 2자유도 시스템으로 변환하였다. 다음으로 조화 지반 가진을 받는 변환된 2자유도 시스템의 응답증폭계수를 최소화할 수 있는 TMD의 강성 및 감쇠계수 값을 GA 최적화 방법을 통해 도출하였다. 이렇게 도출된 TMD 설계 값을 파이프라인 수치 모델에 적용하여 TMD 설치 유무에 따른 내진 성능을 분석하였다.

첫 번째로 TMD 유무에 따른 해당 파이프라인의 주파수 응답 해석을 수행하여 그 결과를 비교하였다. TMD 설치에 따라 파이프라인의 가속도 응답이 상당히 감소함을 확인하였다. 최종적으로, 모든 방향 별로 주파수에 따른 최대 가속도 응답을 저감하기 위해서는 설치 위치로 선정된 3곳 모두에 TMD를 적용하는 것이 가장 효과적인 것으로 평가되었다. 두 번째로 TMD 유무에 따른 해당 파이프라인의 지진응답해석을 수행하였다. 이를 위한 설계 입력지진으로는 US NRC RG 1.60 설계응답 스펙트럼을 포괄하는 인공지진하중을 생성하였고, 각각의 수치모델에 적용하였다. 수치해석 결과, TMD 설치 구간 배관부에서 방향 별 가속도 응답이 18%~51% 가량 감소함을 확인할 수 있었다. 배관부에 발생할 수 있는 최대 수직응력의 크기는 TMD 설치로 인하여 41%의 응력 감소가 있음을 확인할 수 있었다. 파이프라인 시스템의 최하단 앵커지점의 방향 별 반력은

원래의 최대 반력 세기에서 각각 37%, 34%, 43% 감소됨을 확인할 수 있었다. 이러한 연구 결과는 향후 목표로 하는 원전의 주요 파이핑 시스템의 내진 성능 향상과 관련한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 분석된 내용을 바탕으로 동흡진기에 대한 개념설계, 시제작, 성능 시험, 등의 추가적인 작업을 수행할 예정이고, 이는 궁극적으로는 실제 원전 배관시스템뿐만 아니라, 중요한 원전 기기의 직접적인 내진 성능 향상을 위한 기본적인 연구로 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20171510102050).

References

Bezler, P., Subudhi, M., Hartzman, M. (1985) Dynamic Analysis Independent Support Motion Response Spectrum Method, Vol. II, NUREG/CR-1677, Brookhaven National Laboratory, p.455.

Den Hartog, J.P. (1956) Mechanical Vibrations, 4th edition, McGraw-Hill, New York.

Jang, S.J., Brennan, M.J., Rustighi, E., Jung, H.J. (2009) Theoretical Investigation of 2DOF Vibrating System and Its Application to Dynamic Vibration Absorber, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 22(4), pp.371~377.

Kang, J.W., Kim, H.S. (2011) Fuzzy Control of Smart TMD using Multi-Objective Genetic Algorithm, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 24(1), pp.69~78.

Kwag, S., Ok, S.-Y. (2013) Robust Design of Seismic Isolation System using Constrained Multi-objective Optimization Technique, *KSCE J. Civil Eng.*, 17(5), pp.1051~1063.

Lee, S.K., Min, K.W., Prak, E.C. (2008) Dynamic Characteristic of A Bi-directional Damper using a Tuned Mass Damper and a Tuned Liquid Column Damper, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 21(6), pp.589~596.

Rana, R., Soong, T.T. (1998) Parametric Study and Simplified Design of Tuned Mass Dampers, *Eng. Struct.*, 20, pp.193~204.

USNRC RG 1.60 (2014) Design Response Spectra for

- Seismic Design of Nuclear Power Plants, Rev. 2, U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- USNRC SRP 3.7.1** (2007) Seismic Design Parameters, NUREG-0800, U.S. Nuclear Regulatory Commission.
- Warburton, G.B.** (1982) Optimal Absorber Parameters for Various Combinations of Response and Excitation Parameters, *Earthq. Engng. & Struct. Dyn.*, 10, pp.381~401.
- Zhang, H.Y., Zhang, L.J.** (2017) Tuned Mass Damper System of High-Rise Intake Towers Optimized by Improved Harmony Search Algorithm, *Eng. Struct.*, 138, pp.270~282.

요 지

본 논문에서는 지진 하중 하에서 파이핑 시스템의 내진성능향상을 위하여 TMD의 적용성을 검토하였다. 이를 위하여 대상 파이프라인의 모드해석을 수행하였고, 이 중 방향별 질량참여율이 비교적 큰 1, 2 및 4번째 모드를 TMD 설치 위치로 선정하였다. 선정된 위치에 TMD 설계를 위하여 각각의 해당 모드를 단자유도 감쇠모델로 치환하고, TMD를 단자유도 감쇠모델로 고려하여 해당 파이프라인을 2자유도 시스템으로 변환하였다. 다음으로, 조화 지반 가진을 받는 변환된 2자유도 시스템의 응답증폭계수를 최소화할 수 있는 TMD의 강성 및 감쇠계수 값을 GA 최적화 방법을 통해 도출하였다. 이렇게 도출된 TMD 최적 설계 값을 파이프라인 수치모델에 적용하여 TMD 설치 유무에 따른 내진성능을 분석하였다. 수치해석 결과, TMD 설치 구간 배관부에서 방향 별 가속도 응답이 18%~51% 가량 감소함을 확인할 수 있었다. 배관부에 발생할 수 있는 최대 수직응력의 크기는 TMD 설치로 인하여 41%의 응력 감소가 있음을 확인할 수 있었다. 파이프라인 시스템의 최하단 앵커지점의 방향 별 반력은 원래의 최대 반력 세기에서 각각 37%, 34%, 43% 감소됨을 확인할 수 있었다. 이러한 연구 결과는 향후 목표로 하는 원전의 주요 파이핑 시스템의 내진성능향상과 관련한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 동조질량감쇠기, 파이핑 시스템, 최적 설계, 지진응답해석