



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

기계적 특성 조정을 통한 기초 질량부가
포함된 비상 발전기 마운트 모델 응답 특성

최적화 연구



2023년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

무기체계공학과

박 진 우

공 학 석 사 학 위 논 문

기계적 특성 조정을 통한 기초 질량부가
포함된 비상 발전기 마운트 모델 응답 특성

최적화 연구

지도교수 김 찬 중

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2023년 8월

부 경 대 학 교 대 학 원

무기체계공학과

박 진 우

朴眞禹의 工學碩士 學位論文을 認准함.

2023년 8월 18일

위 원 장 공학박사 유 증 인 

위 원 공학박사 김 찬 중 

위 원 공학박사 김 창 원 

목 차

I. 서 론	1
1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적	3
1.3 논문 구성	5
II. 비상 발전기 마운트 모델의 모델링	6
2.1 비상 발전기 제원 및 마운트 모델 구조 소개	6
2.2 비상 발전기 마운트 모델 3-자유도 모델링	10
2.3 비상 발전기 마운트 모델 기계적 특성값 측정	11
2.3.1 스프링 마운트 기계적 특성값 측정 장비 소개	11
2.3.2 스프링 마운트 기계적 특성값 측정 결과	13
2.3.3 3-자유도 모델 기반 기계적 특성값 정리	18
III. 비상 발전기 마운트 모델 이론적 응답 특성	19
3.1 기초 진동 이론	19
3.1.1 감쇠 시스템의 정상 상태 응답	19
3.1.2 감쇠 시스템의 바닥 가진	23
3.2 이론적 응답 특성 도출	27

IV. 비상 발전기 마운트 모델 성능 평가 지표 제안 및 성능 평가	30
4.1 성능 평가 지표 도출	30
4.2 비상 발전기 상부 기계적 특성 조정 및 응답 특성 분석	33
4.3 마운트 모델 내 기초 질량부의 영향 분석	40
V. 결론	42
참고문헌	44
감사의 글	48

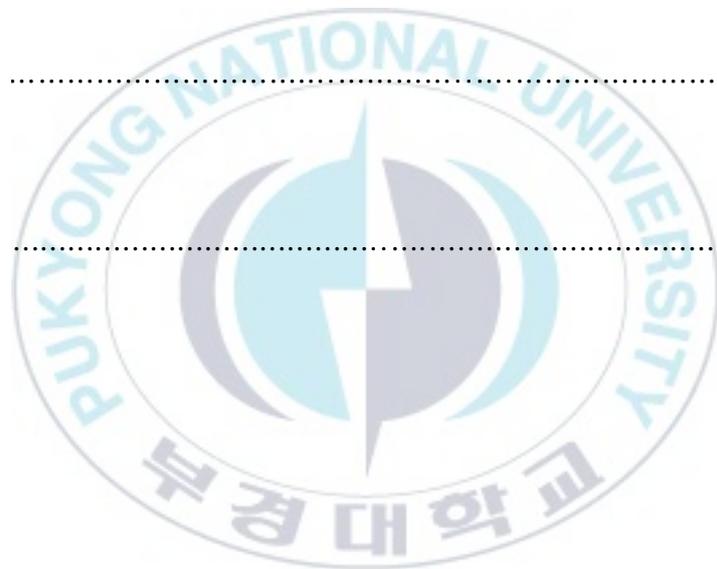


Table List

Table. 1 Specification of emergency electric generator	7
Table. 2 Specifications of high frequency busch dynamic characteristics assessment system	11
Table. 3 Configuration of spring mount and under pad	13
Table. 4 Criteria of static and dynamic characteristics evaluation ...	16
Table. 5 Mechanical property of passive-type mount module	18
Table. 6 Four cases of modified mechanical properties in the upper mount	33
Table. 7 Comparison of first index value between case I and reference one	37
Table. 8 Comparison of second index value between case I and reference one	37

Figure List

Fig. 1 Examples of various vibration isolators	1
Fig. 2 Configuration of emergency electric generator	7
Fig. 3 Passive-type mount module of emergency electric generator including basement mass-block	9
Fig. 4 Simplified theoretical models of mount module with basement mass-block	10
Fig. 5 Configuration of high frequency busch dynamic characteristics assessment system	12
Fig. 6 Static characteristics result of spring	14
Fig. 7 Configuration of spring dynamic characteristics measurement	15
Fig. 8 Dynamic stiffness and damping rate (Initial Load 25%) result of spring	16
Fig. 9 Dynamic stiffness and damping rate (Initial Load 50%) result of spring	17
Fig. 10 The variation of magnitude as frequency ratio function ...	22
Fig. 11 The variation of displacement transmissibility ratio to mass as frequency ratio function	24

Fig. 12 The variation of force transmissibility ratio to mass as frequency ratio function	26
Fig. 13 First performance index in frequency band of interest ...	31
Fig. 14 Second performance index in frequency band of interest ..	32
Fig. 15 Comparison of first index variations in frequency band of interest	34
Fig. 16 Comparison of second index variations in frequency band of interest	34
Fig. 17 Comparison of first performance index between case I and original one	36
Fig. 18 Comparison of second performance index between case I and original one	36
Fig. 19 Result of frequency variation for each different observatory when po-hang earthquake	39
Fig. 20 Variation in first index according to different mass-block condition	40

Nomenclature

- M_P : Mass of emergency electrical generator
- M_M : Mass of basement
- M_B : Mass of surrounding building
- C_P : Damping coefficient of between M_P and M_M
- K_P : Stiffness coefficient of between M_P and M_M
- C_M : Damping coefficient of between M_M and M_B
- K_M : Stiffness coefficient of between M_M and M_B
- K_B : Stiffness coefficient of ground
- X_P : Response of emergency electrical generator
- X_M : Response of basement
- X_B : Response of surrounding building
- F_P : Excitation force of emergency electrical generator
- F_B : Excitation force of surrounding building

**Optimization study of the emergency generator mount
model which included base mass response characteristics by
mechanical properties adjustment**

Jin Woo Park

Department of Weapon Systems Engineering,
Graduate School, Pukyong National University

Abstract

The vibration isolator suitable for controlling harmonic or random excitation is a key component for the vibration fine-tuned mechanical system. So, various types of vibration-isolators, passive, active, and semi-active, have been adapted to cope with the source of excitations. This paper proposed an optimal design to minimize the vibration response of an emergency electric generator, which generates vibration during operation. The concerned mount module comprised six upper sub-mounts and one basement mass-block and should be effective for both self-excitation as well as basement input. Previous studies addressed the mount optimization of emergency electric generators; the first study proposed a design of excluded the basement mass to reduce the maintenance cost and time of the concrete basement mass and the second one focused on the fine-tuning of mechanical properties of sub-mounts. On the other hand, this study focused on the optimal design of the upper sub-mount. The optimal selection of the upper sub-mount was simulated via three degree-of-freedom model regarding the

emergency electric powerplant. Two performance indices regarding the total supporting mount were used to evaluate the control capability of the supported system according to several candidates of the upper sub-mount. It can be found the advancement of the upper sub-mount can be derived for case I as compared to the original one from the simulation consequences. In addition, the effect of the mass volume of the mass-block was also evaluated from the same simulation model.



I. 서론

1.1 연구 배경

“진동”이란 정지된 위치에서 시간의 흐름에 따라 반복하여 움직이는 운동하는 현상이다. 진동이 발생하는 원인은 매우 다양한데 대표적인 예로 피스톤 작동기와 같이 왕복운동에 대한 진동이 발생하거나 엔진의 회전력에 의한 진동, 편심에 의한 회전자 진동 등과 같이 우리의 일상생활 속 곳곳에서 찾아볼 수 있다. 또한, 모든 물체는 고유 진동수를 가지고 있으며 기계 시스템 작동 시의 구동 주파수와 관심 물체의 고유 진동수가 일치하거나 근접하게 될 때 진동 진폭이 매우 커지는 공진 현상을 관찰할 수 있다.⁽¹⁻²⁾ 따라서 위와 같이 기술한 공진 현상이 일정 기간 이상 반복 또는 지속할 경우 관심 물체의 기계 시스템의 변형이나 구조적인 파괴를 초래하기 때문에 진동 전달을 효과적으로 감소시켜 관심 물체의 작동 시 진동으로 인한 자체적인 부정적 영향과 진동이 하부로 전달되어 관심 물체가 설치되는 면의 부정적인 영향을 감소시키는 Fig. 1과 같은 방진 마운트의 구성품을 설치하여 진동을 보다 효과적으로 제어하는 것이 필요하다.



(1-A) Metal Spring

(1-B) Rubber Pad

Figure 1 Examples of various vibration isolators⁽²⁾

Fig. 1과 같이 진동을 절연하기 위한 방진 마운트는 기계에서 발생하는 가진력이 바닥으로 전달되는 전달력 비(Transmission Ratio)와 주파수 비와의 관계를 이용하여 설계할 수 있다. 주파수 비와 전달력 비와의 관계는 방진 마운트 설계에 있어 상당히 중요한데 그 중 주파수 비가 1인 경우 전달력 비는 무한대이며 이것은 공진 상태로 정의할 수 있다. 방진 마운트를 통하여 대상 물체에 전달되는 전달력이 외부에서 가진 되는 외력에 비하여 크거나 같지 않도록 설계하여야 한다. 따라서 외부의 외력보다 전달력이 더 작은 경우를 설계하여야 하며 이러한 경우를 방진 유효 영역으로 정의할 수 있고 대부분의 방진 마운트는 방진 유효 영역 내에서 설계하고 있다. ⁽²⁾

위의 기술한 예와 같이 다양한 기계 시스템의 진동을 제어하는 방진 마운트의 예는 곳곳에서 찾아볼 수 있는데 이들 중 본 논문에서는 관련 법규에 의하여 단전(斷電)상황에도 지속적인 전기를 공급할 수 있는 특수 시설 등에 필수적으로 설치되는 비상 발전기를 지지하는 방진 마운트 시스템에 대하여 기계적 응답 특성을 분석하고 비상 발전기를 지지하는 최적의 방진 마운트 시스템을 설계 및 제안하고자 하였다.

1.2 연구 목적

본 연구의 대상 물체인 비상 발전기 방진 마운트 시스템은 후술할 2장에서
서의 비상 발전기 마운트 모델의 구조 설명과 같이 비상 발전기 하단부의
수동형 방진 마운트인 스프링 마운트와 방진 패드가 내장되고 콘크리트로
시공된 기초 질량부로 이루어져 있다. 김찬중(2018)⁽³⁾이 수행한 기존 연구
에서는 고무 물성의 방진 패드가 내장된 기초 질량부는 고무 물성 재료
수명 한계에 따라 주기적으로 해당 패드를 교체하여야 하며 콘크리트로
시공된 기초 질량부는 운용 기간이 길어질수록 콘크리트 균열 등의 결함
발생으로 해당 기초 질량부의 유지 및 보수 비용이 과다하게 소요된다는
점을 들어 해당 방진 마운트 모델의 기초 질량부를 제거한 후 새로운 스
프링-댐퍼로 구성된 수동형 방진 마운트를 장착하여 기존 방진 마운트 모
델과 같은 응답 특성을 내는 방진 마운트 모델을 제안하였다. 하지만 기
초 질량부를 제거하였기 때문에 5Hz 미만의 저주파 영역에서의 진동에 대
한 응답이 큰 단점을 추가로 확인하였다.

김찬중 등(2023)⁽⁴⁾이 수행한 최근 연구에서는 비상 발전기 마운트 시스
템에서의 기초 질량부를 그대로 존치하였고 기초 질량부 하부의 기계적
구성요소들의 특성값을 조정하여 5Hz 미만의 저주파 영역에서의 응답 특
성을 개선하고자 하였으며 일부 개선됨을 확인하였다. 하지만 해당 연구⁽⁴⁾
는 기초 질량부 하부의 기계적 구성요소들의 특성값들만을 조정하였기 때
문에 한계가 존재하였다.

본 논문의 목적은 기존 연구⁽³⁻⁴⁾의 한계점을 보완하고 비상 발전기 방진 마운트 시스템 내 기초 질량부 상부의 기계적 구성요소들의 특성값들을 조정하여 응답 특성이 개선된 방진 마운트 모델을 최적화하여 제안하고자 하였다. 또한, 본 논문 이후 수행될 후속 연구에서 기존 연구들과 본 논문의 결과를 적용하여 5Hz 미만의 저주파 영역에서의 응답 특성을 최소화하며 기존 마운트 모델과 동등한 성능을 내는 신규 마운트 모델 설계 및 제안 연구에 참고 자료로 사용될 것을 기대한다.



1.3 논문 구성

본 논문의 서론에 이어 II장에서는 비상 발전기의 제원 및 마운트 모델 구조에 대한 소개, 비상 발전기 마운트 모델의 3 자유도 모델링과 모델링한 결과를 바탕으로 해당 마운트 모델의 기계적 특성값을 장비를 사용하여 측정한 결과를 기술하였다. III장에서는 기초 진동이론 중 본 논문에서 적용될 힘 전달률과 변위전달률을 쉬운 접근을 위하여 1 자유도 운동 방정식을 이용하여 기술하였고 II장에서의 모델링 결과를 기반으로 마운트 모델의 이론적인 응답 특성을 도출하였다. IV장에서는 III장에서 도출된 이론적 응답 특성을 바탕으로 신규 제안할 비상 발전기 마운트 모델의 성능을 기존의 마운트 모델과 비교하기 위하여 성능 평가 지표를 제안하였고 이를 통하여 비상 발전기 마운트 모델 내 기초 질량부 상부의 기계적 특성을 조정하여 해당 마운트 모델의 최적화를 수행하여 비상 발전기 자체 가진과 바닥 가진 둘의 경우로 나누어 신규 제안한 마운트 모델의 기계적 응답 특성을 분석하였다. 마지막으로 V장에서는 본 논문의 연구 결과와 연구 수행 중 발생한 미흡 사항에 대하여 후속하여 진행될 연구의 방향을 제시하였다.

Ⅱ. 비상 발전기 마운트 모델 모델링

본 장에서는 본 연구에서 활용될 비상 발전기의 제원 및 비상 발전기를 지지하는 마운트 모델의 구조, 해당 마운트 모델을 3 자유도로 모델링한 뒤 장비를 이용하여 측정된 기계적 특성값을 정리하였다.

2.1 비상 발전기 제원 및 마운트 모델 구조 소개

비상 발전기는 기존 연구⁽³⁻⁴⁾와 같은 모델을 사용하였으며 앞서 기술하였듯이 단전 시 비상 전원을 생산하여 관련 계통에 공급함으로써 전기 사용이 제한되는 상황에서도 지속적인 전기 사용을 할 수 있도록 의료 시설, 소방시설 등과 같은 필수적인 시설에 설치되는 장비이다. 비상 발전기는 국토교통부 국가 건설 기준 등에 의하여 용량을 여러 출력의 등급과 형식으로 산정하며 이 중 설치하여 운용하는 사용자 또는 건축물의 설계자가 설계 기준에 맞추어 여러 형식과 등급의 비상 발전기 중 하나를 지정 후 설치하여 사용 중이다. 또한, 비상 발전기를 시설에 설치한 뒤 유지 및 보수하여야 하는데 관련 점검 기준에 대하여 최승규(2020)⁽⁵⁾에 따르면 비상 발전기는 의무적으로 비상용 부하를 연결하여 시험하여야 하고 비상 발전기의 시험 방식은 무부하 시험과 부하 시험으로 나눌 수 있지만 부하 시험 시 시설의 전기 계통이 일정 시간 이상 차단되고 시험 후 복전 되는 과정에서 전기 기기 등의 손상 가능성이 있어 일정 주기를 정하여 무부하 시험과 비상 발전기 외부의 기계적 손상 등을 점검하고 있으며 이와 같은 방식은 본 논문에서 활용될 비상 발전기 운용 시에도 적용되고 있다.

본 논문에서 활용될 비상 발전기는 업체 시설 내에 설치되어 기타 사유로 인한 주 전력 차단 시 비상 전력을 비상 발전기 내부의 내연 기관(디젤 엔진)을 사용하여 생산하며 비상 발전기의 형상은 Fig. 2와 같고 세부적인 비상 발전기의 제원은 아래의 Table 1과 같다.



Figure 2 Configuration of emergency electric generator⁽³⁾

Table 1 Specification of emergency electric generator⁽³⁾

Item		Value
Dimension	Length	3390 (mm)
	Width	1397 (mm)
	Height	2180 (mm)
Mass		6070 (kg)
Electrical Capacity		750 (kW)
Electrical Voltage		380/220 (V)
Engine Cylinder Type		12 (V-type)
Engine Constant Running Speed		1800 (rev/min)

위의 Table 1.에 기술된 바와 같이 비상 발전기를 가동 시 비상 전력을 생산하는 정격 회전 속도는 1800 rev/min이다. 따라서 비상 발전기의 정격 회전 속도를 주파수로 전환하게 되면 30Hz이며 비상 발전기 회전에 따른 기본 진동 주파수가 된다. 본 논문에서는 기본 진동 주파수 영역부터 4차 고조파 주파수(하모닉 주파수)인 120Hz까지를 관심 주파수 영역으로 두었다.

서론에서 기술한 바와 같이 다양한 가진으로 발생하는 지속적인 진동으로부터 기계 시스템을 보호하는 방법은 방진 마운트를 설치하여 진동으로 인한 기계 시스템에 피로도가 누적되지 않게 하여 파괴를 방지하는 방법이다. 따라서 위와 같은 이유로 본 논문에서 활용될 비상 발전기 하부에도 아래의 Fig. 3과 같은 비상 발전기를 지지하는 방진 마운트 모델이 설치되어 있다. 방진 마운트 모델은 방진 방식에 따라 수동형, 능동형, 반 능동형으로 구분할 수 있다. Alexey M. Bazinenkov(2015)⁽⁶⁾에 따르면 수동형은 고주파수, 저 진폭의 진동에 효율적이며 진동이 발생하는 질량체를 스프링 및 댐퍼와 같은 기계적 요소로 직접 지지하는 방식이며 능동형은 저주파수, 고 진폭의 진동에 효율적인 방식으로서 작동기를 사용하여 진동을 소산하는 방식이며 반 능동 방식은 수동형과 능동형의 장점을 각각 적용한 방식이다. 또한, 수동형 마운트 모델은 고 단가의 작동기를 사용하는 능동형 마운트 모델보다 설치 비용이 저렴하여 현장의 여러 분야에서 사용되고 있다. ⁽⁶⁻²³⁾ 현재 본 논문에서 활용될 방진 마운트 모델은 수동형 마운트 모델로서 진동이 발생하는 비상 발전기 하부에 스프링 마운트 6개가 장착되어 지지하고 있으며 스프링 마운트 하부에는 내부에 고무 물성 재료의 방진 패드가 설치되고 콘크리트로 시공한 기초 질량부가 설치되어 있으며 기초 질량부는 지면과 닿아 있고 스프링 마운트를 지지한다.



Figure 3 Passive-type mount module of emergency electric generator including basement mass-block⁽³⁾

2.2 비상 발전기 마운트 모델 3 자유도 모델링

본 논문의 목적인 비상 발전기 마운트 모델의 기계적 특성값을 조정하여 최적화를 하고자 비상 발전기 마운트 모델을 간단하게 3 자유도로 모델링 하였다. 마운트 모듈은 기존 연구에서 활용된 것과 같이 비상 발전기(M_p)와 기초 질량부(M_M)를 이격시키는 스프링 마운트 내부의 탄성 계수(K_p)와 감쇠 계수(C_p)를 각각 표현하였고 비상 발전기 작동 시 발생하는 진동을 지면과 주변 시설물(M_B)등에 영향을 받지 않게 스프링 마운트를 지지하는 콘크리트로 시공된 기초 질량부 내부의 고무 물성의 탄성체의 탄성 계수(K_M)와 감쇠 계수(C_M)를 표현하였다. 주변 시설물(M_B)는 지면과 일정 강성(K_B)을 가지는 것으로 설정하였으며, 최종 3 자유도 모델은 Fig. 4와 같다.

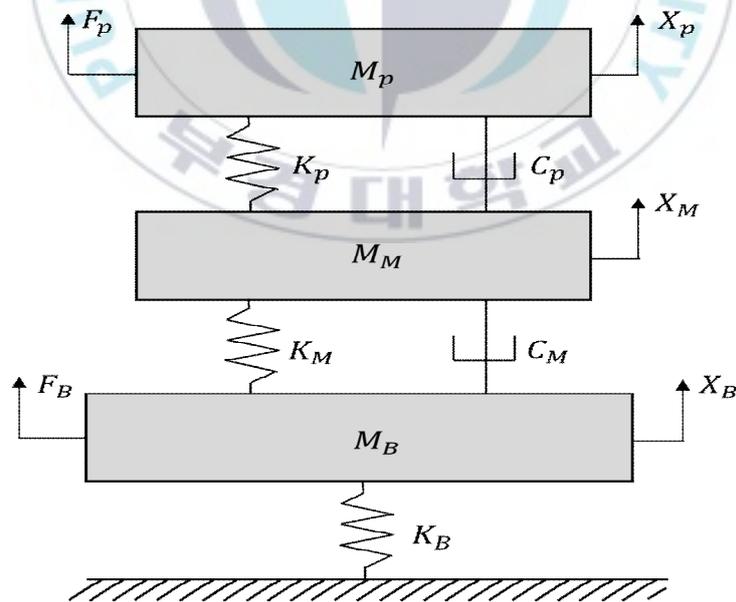


Figure 4 Simplified theoretical models of mount module with basement mass-block⁽³⁾

2.3 비상 발전기 마운트 모델 기계적 특성값 측정

본 절에서는 본 논문의 목적인 신규 비상 발전기 마운트 모델 제안을 위하여 자동차 부품 연구원에서 보유하고 있는 고주파 부쉬 동특성 평가 시스템 등을 이용하여 비상 발전기 하부를 지지하는 스프링 마운트의 기계적 특성값을 측정하였다. 또한, 비상 발전기의 제원 등을 참고하여 2.2절에서 기술한 3 자유도 비상 발전기 모델링에서 표현한 주변 시설물들의 질량 등과 같은 기계적 특성값들을 가정하여 후술하였다.

2.3.1 스프링 마운트 기계적 물성치 측정 장비 소개

본 논문에서의 비상 발전기 마운트 모델의 스프링 마운트 기계적 물성치(K_p , C_p)는 자동차 부품 연구원의 고주파 부쉬 동특성 평가 시스템(MTS 831.50, 1000Hz)를 이용하여 측정하였으며 해당 측정 장비의 제원은 Table. 2와 같으며 형상은 Fig. 5와 같다.

Table 2 Specifications of high frequency busch dynamic characteristics assessment system

Category	Specifications
External Size	1,100(W)×781(D)×2,060(H) mm
Maximum test frequency	1000 Hz
Maximum dynamic load	±10 kN
Maximum displacement	±20 mm (dynamic)
Flow rate of servo valve	5 gpm (19 lpm)
Supply pressure	210 bar (3000 psi)
Supply flow rate	7 gpm (26.5 lpm)
Noise level	Less than 58 dB(A) (Measured at 1m)



(5-A)



(5-B)



(5-C)

Figure 5 Configuration of high frequency busch dynamic characteristics assessment system

2.3.2 스프링 마운트 기계적 특성값 측정 결과

본 논문에서 활용될 비상 발전기를 지지하는 스프링 마운트와 하부 패드의 제원은 아래의 Table 3과 같다. 해당 스프링 마운트의 기계적 특성값 측정을 위하여 Table 4와 같이 하중, 변위, 가진 조건 등을 설정하였고 측정된 스프링 마운트의 정적 강성은 Fig 6.과 같고 동적 강성과 하중 조건에 따른 주파수별 응답 특성의 평가 형상은 Fig 7.과 같으며 평가 결과는 각각 Fig 8. 및 Fig 9.와 같다.

Table 3 Configuration of spring mount and under pad

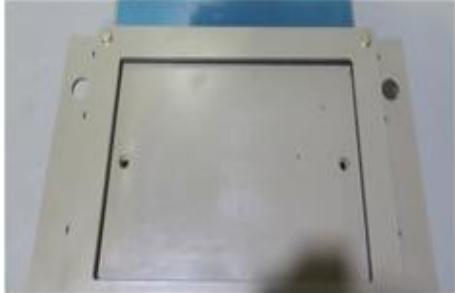
Model	Configuration	Weight (kg)
SMB-1500 (Spring)		11.89
SMB-1500 (Pad)		33.7

Table 4 Criteria of static and dynamic characteristics evaluation

Sample	Static Characteristics condition	Dynamic Characteristics condition		
	Displacement (mm)	Initial Load	Frequency (Hz) Displacement (mm)	Frequency (Hz) Displacement (mm)
SMB-1500	0mm ~ 6mm	25% (375kgf)	1Hz ~ 150Hz ±0.6mm	150Hz ~ 300Hz ±0.3mm
		50% (750kgf)	1Hz ~ 150Hz ±0.6mm	150Hz ~ 300Hz ±0.3mm

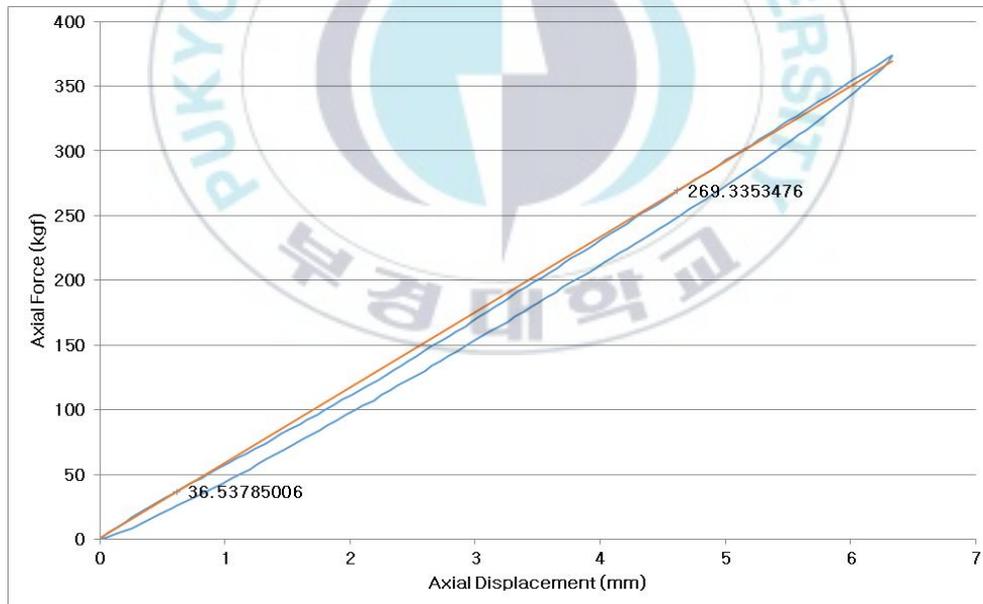
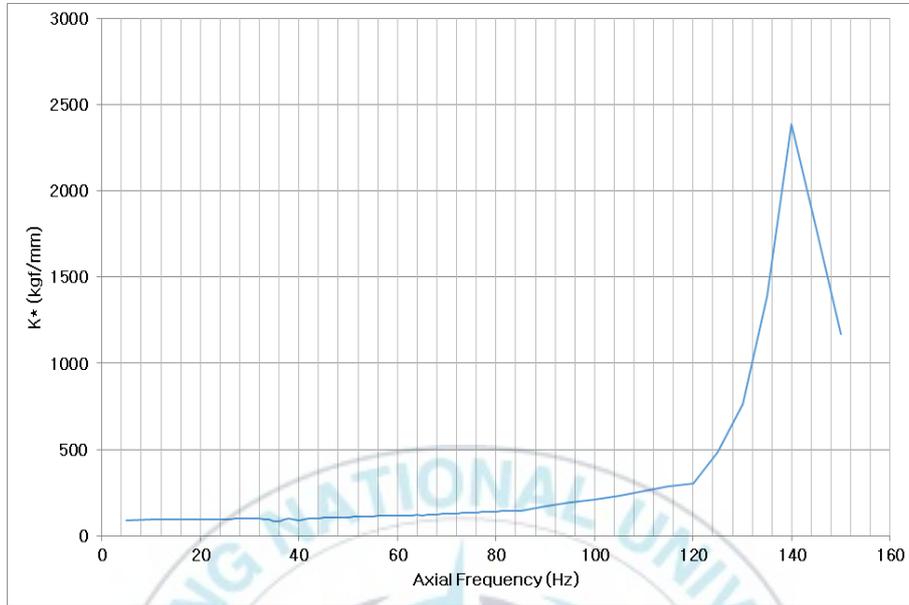


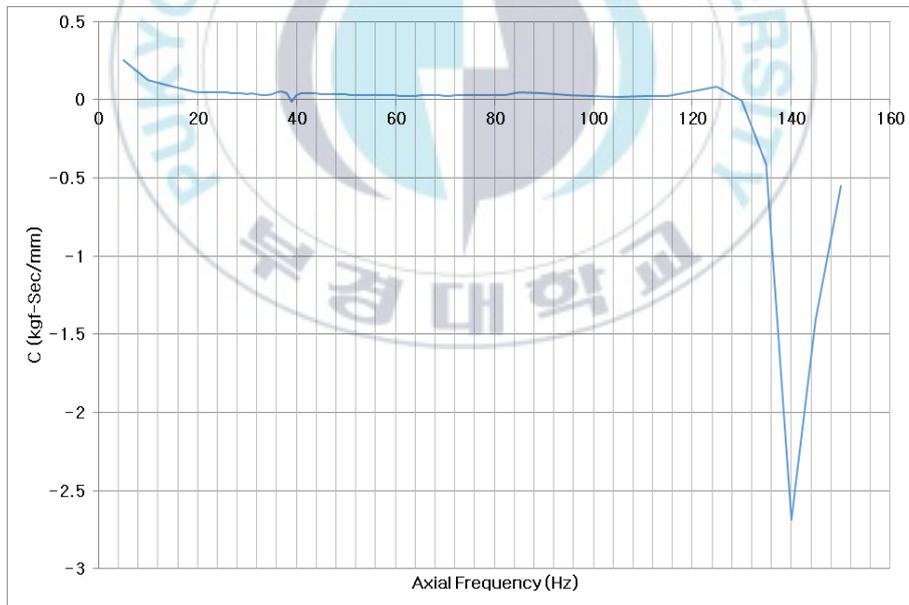
Figure 6 Static characteristics result of spring



Figure 7 Configuration of spring dynamic characteristics measurement

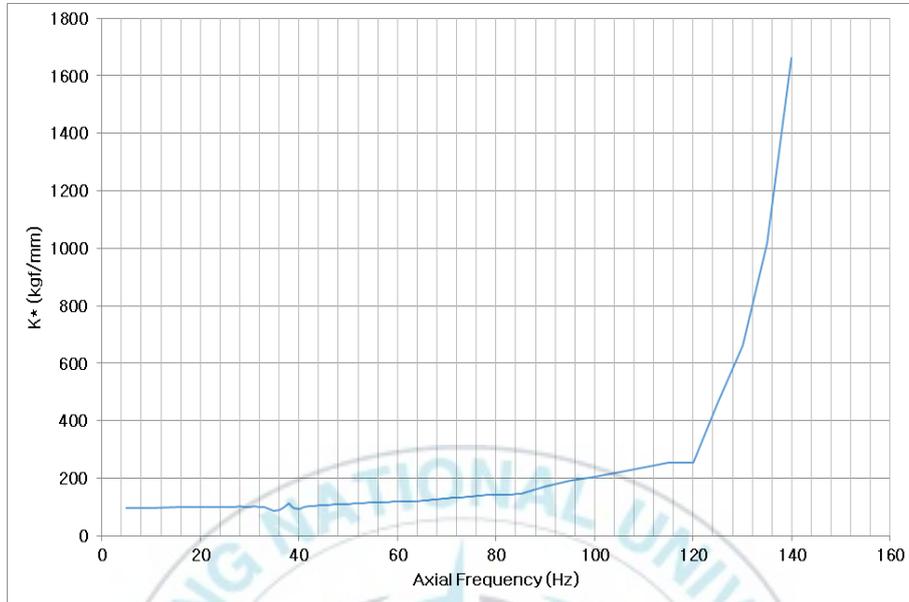


(8-A) Dynamic stiffness (Initial Load 25%)

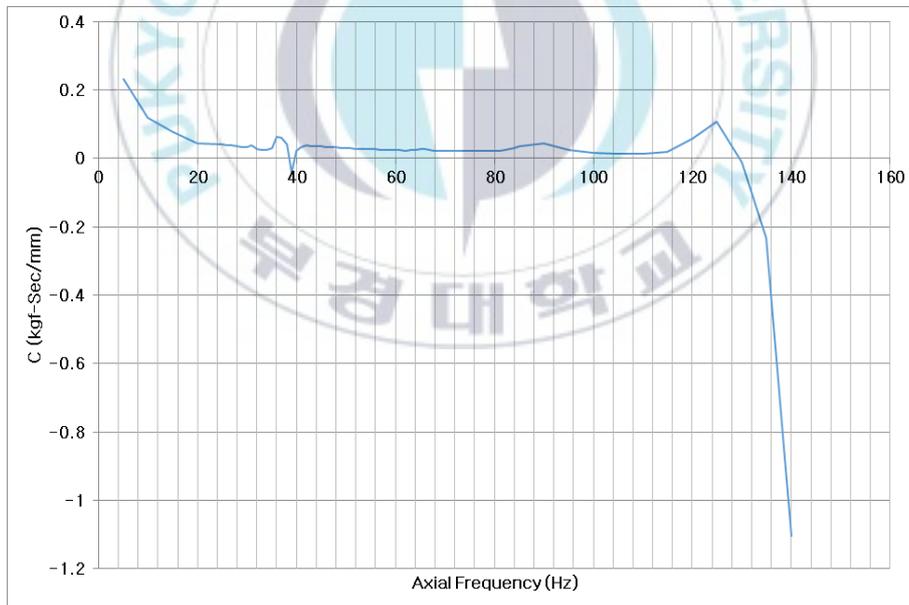


(8-B) Damping rate (Initial Load 25%)

Figure 8 Dynamic stiffness and damping rate (Initial Load 25%) result of spring



(9-A) Dynamic stiffness (Initial Load 50%)



(9-B) Damping rate (Initial Load 50%)

Figure 9 Dynamic stiffness and damping rate (Initial Load 50%) result of spring

2.3.3 3-자유도 모델 기반 기계적 특성값 정리

본 절에서는 본 논문에서 활용될 관심 주파수 영역과 천이 구간의 주파수 영역에서 5가지의 주파수를 선정 후 선정된 주파수에 해당하는 측정된 기계적 특성값(K_P, C_P) 값을 정리하였고 주변 시설물의 질량은 비상 발전기의 질량의 10배로 가정하는 등 비상 발전기 마운트 모델의 기계적 특성값을 아래의 Table 5.와 같이 정리하였다.

Table 5 Mechanical property of passive-type mount module

Variable	Value
M_P (kg)	6,070
M_M (kg)	6,900
M_B (kg)	$10 \times M_P$
C_P (Ns/m)	603(1Hz), 376(30Hz), 216(60Hz), 184(90Hz), 158(120Hz)
K_P (kN/m)	940(1Hz), 1,050(30Hz), 1,245(60Hz), 1,881(90Hz), 4,399(120Hz)
C_M (Ns/m)	$(1.5 \times 10^6) \times C_P$
K_M (kN/m)	$(5 \times 10^6) \times K_P$
K_B (kN/m)	$10^{-1} \times K_P$

Ⅲ. 비상 발전기 마운트 모델 이론적 응답 특성

3.1 기초 진동이론

본 논문에서는 비상 발전기 가진으로 인하여 비상 발전기 마운트 모델을 통해 지면(바닥)으로 전달되는 가진력과 이에 대한 응답 특성 그리고 바닥 가진 발생 시 비상 발전기 마운트 모델을 통하여 전달되는 가진력과 이에 대한 응답 특성도 고려하였다. 본 절에서는 본 논문에서 활용될 비상 발전기 마운트 모델과 같은 감쇠 시스템을 가지는 마운트 모델이 질량체에 장착될 경우 질량에서 발생하는 가진력이 마운트 모델에 감쇠비에 따라 전달되는 정도와 바닥의 가진력이 마운트 모델을 통해 질량체로 전달되는 이론적 응답 특성을 Inman, D.J.(2013)⁽¹⁾을 참고하여 기술하였으며 이 과정에서 변위 및 힘 전달률을 도출하였다. 변위 및 힘 전달률은 후술할 비상 발전기 마운트 모델의 이론적 응답 특성 및 성능 평가 지표 도출을 위하여 사용되었다.

3.1.1 감쇠 시스템의 정상 상태 응답

본 연구에서 적용될 비상 발전기 마운트 모델은 감쇠 계수가 존재하는 감쇠 시스템이다. 조화 가진을 받는 1 자유도 감쇠 시스템의 운동 방정식은 식 (3.1.1)과 같다. 후술할 3.2절의 본 연구에서 적용될 마운트 모델의 이론적 응답 특성을 도출할 때 식 (3.1.1)의 1 자유도 운동 방정식을 응용하여 3 자유도 시스템의 운동 방정식으로 모델링되지만 본 절에서는 본 논문에서 적용될 기초 진동이론의 이해를 위하여 1 자유도 감쇠 시스템의 정상 상태 응답 도출 과

정만을 기술하였다. 또한, 도출 과정 중 사용된 구동력 함수는 4장에서 후술할 비상 발전기 마운트 모델의 성능 평가 지표에도 사용되었다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (3.1.1)$$

여기서 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$, $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$, $f_0 = \frac{F_0}{m}$ 를 적용하고 질량 m 으로 식 (3.1.1)을 나누면 아래의 식 (3.1.2)와 같다.

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = f_0 \cos \omega t \quad (3.1.2)$$

이후 식 (3.1.2)의 특수 해를 미정 계수법을 사용하여 식 (3.1.3)과 같이 표현할 수 있으며 식 (3.1.3)을 간단하게 표현하면 특수해는 식 (3.1.4)와 같이 쓸 수 있다. 식 (3.1.4)를 미분하면 식 (3.1.5)가 도출되고 식 (3.1.5)를 다시 미분하면 식 (3.1.6)을 얻을 수 있다.

$$x_p(t) = \sqrt{A_S^2 + B_S^2} \cos\left(\omega t - \tan^{-1} \frac{B_S}{A_S}\right) \quad (3.1.3)$$

$$x_p(t) = A_S \cos \omega t + B_S \sin \omega t \quad (3.1.4)$$

$$\dot{x}_p(t) = -\omega A_S \sin \omega t + \omega B_S \cos \omega t \quad (3.1.5)$$

$$\ddot{x}_p(t) = -\omega^2 (A_S \cos \omega t + B_S \sin \omega t) \quad (3.1.6)$$

위의 식 (3.1.4)-(3.1.6)를 운동 방정식인 식(3.1.2)에 대입하여 정리하면 아래의 식 (3.1.7)와 같다.

$$(-\omega^2 A_S + 2\zeta\omega_n\omega B_S + \omega_n^2 A_S - f_0)\cos\omega t + (-\omega^2 B_S - 2\zeta\omega_n\omega A_S + \omega_n^2 B_S)\sin\omega t = 0 \quad (3.1.7)$$

식 (3.1.7)을 행렬로 정리한 뒤 이를 다시 Cremer 공식을 적용하여 풀이하면 미정 계수 A_S 와 B_S 는 각각 아래의 식 (3.1.8), 식 (3.1.9)와 같다.

$$A_S = \frac{(\omega_n^2 - \omega^2)f_0}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2} \quad (3.1.8)$$

$$B_S = \frac{2\zeta\omega_n\omega f_0}{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2} \quad (3.1.9)$$

식 (3.1.8)과 식 (3.1.9)를 식 (3.1.3)에 대입하여 정리하면 아래의 식 (3.1.10)과 같다.

$$x_p(t) = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega)^2}} \cos\left(\omega t - \tan^{-1} \frac{2\zeta\omega_n\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}\right) \quad (3.1.10)$$

식 (3.1.10)에서 \cos 함수 앞부분은 진폭을 나타내고 뒷부분은 위상을 나타낸다. 앞서 $f_0 = \frac{F_0}{m}$ 과 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 를 이용하여 진폭을 나누게 되면 아래의 식 (3.1.11)이 도출되며 주파수 비(r)는 $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ 로 표기하였다. 위상 또한 같은 방식으로 도출하면 식 (3.1.12)와 같으며 Fig. 10은 여러 감쇠비 값에

대한 주파수 비의 함수로 나타낸 진폭전도를 로그 좌표로 나타내었다.

$$\frac{X\omega_n^2}{f_0} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (3.1.11)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\zeta r}{1-r^2} \quad (3.1.12)$$

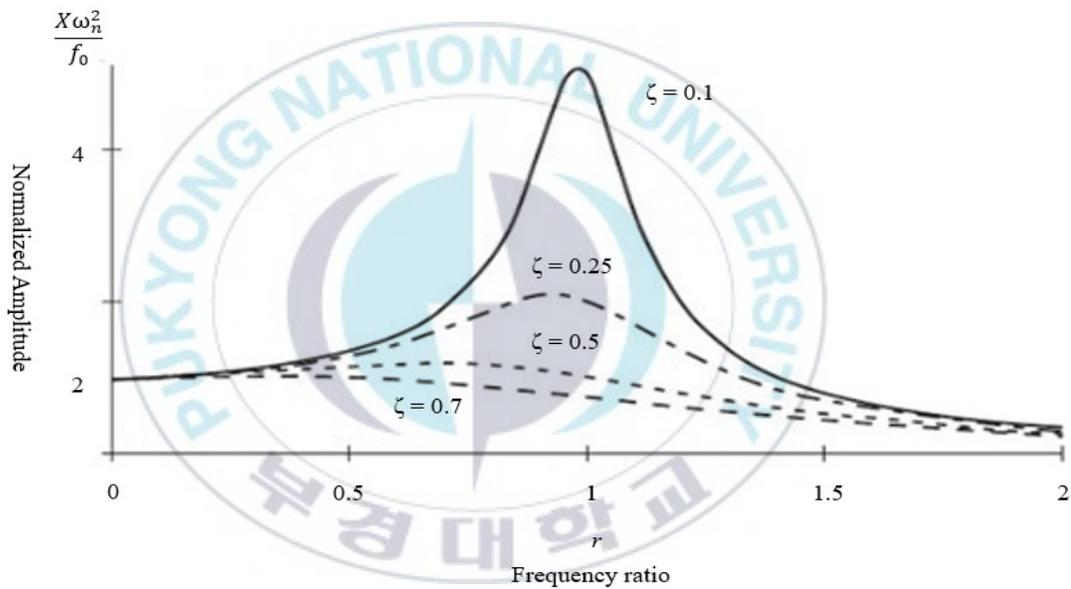


Figure 10 The variation of magnitude as frequency ratio function⁽¹⁾

위의 Fig. 10에서 볼 수 있듯이 주파수 비가 증가할수록 진폭은 작아지며 주파수 비가 1이 될 때(공진점) 진폭이 상당히 증가하는 것을 확인할 수 있다.

3.1.2 감쇠 시스템의 바닥 가진

위의 기술한 것과 같이 동일한 감쇠 시스템을 가지는 마운트 모델과 질량체가 존재할 때 바닥 가진($y(t)$)이 바닥 운동의 진폭 Y 와 같이 존재하고 바닥진동의 진동수가 ω_b 일 때, 바닥의 조화운동은 $y(t) = Y\sin\omega_b t$ 이다. 이를 위의 식 (3.1.1)에 대입하여 운동 방정식을 기술하면 아래의 식 (3.2.1)이 도출된다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = cY\omega_b \cos\omega_b t + kY \sin\omega_b t \quad (3.2.1)$$

식 (3.2.1)을 3.1.1 절의 계산 과정과 같이 질량으로 나누고 $\zeta = \frac{c}{2m\omega_n}$, $\omega_b = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 를 적용하여 코사인 항과 사인 항의 특수 해를 구하면 아래의 식 (3.2.2)와 식 (3.2.3)이 도출된다.

$$x_p^{(1)} = \frac{2\zeta\omega_n\omega_b Y}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega_b^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega_b)^2}} \cos(\omega_b t - \theta_1) \quad (3.2.2)$$

$$x_p^{(2)} = \frac{\omega_n^2 Y}{\sqrt{(\omega_n^2 - \omega_b^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega_b)^2}} \sin(\omega_b t - \theta_1) \quad (3.2.3)$$

선형 시스템의 원리를 이용하여 특수해 $x_p^{(1)}$ 과 $x_p^{(2)}$ 를 더하면 아래의 식 (3.2.4)이 된다.

$$x_p = \omega_n Y \sqrt{\frac{\omega_n^2 + (2\zeta\omega_b)^2}{(\omega_n^2 - \omega_b^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega_b)^2}} \sin(\omega_b t - \theta_1 + \theta_2) \quad (3.2.4)$$

특수해 x_p 의 진폭을 X 로 하고 주파수 비(r)을 사용하여 식을 정리한 뒤 바닥 운동의 진폭 Y 로 나누면 식 (3.2.5)와 같으며 이 식은 바닥 운동의 진동이 질량체로 얼마나 전달되었는지를 나타내는 변위전달률이다. 식 (3.2.5)와 더불어 아래의 Fig. 11은 다양한 감쇠비에 따른 변위전달률을 보여준다.

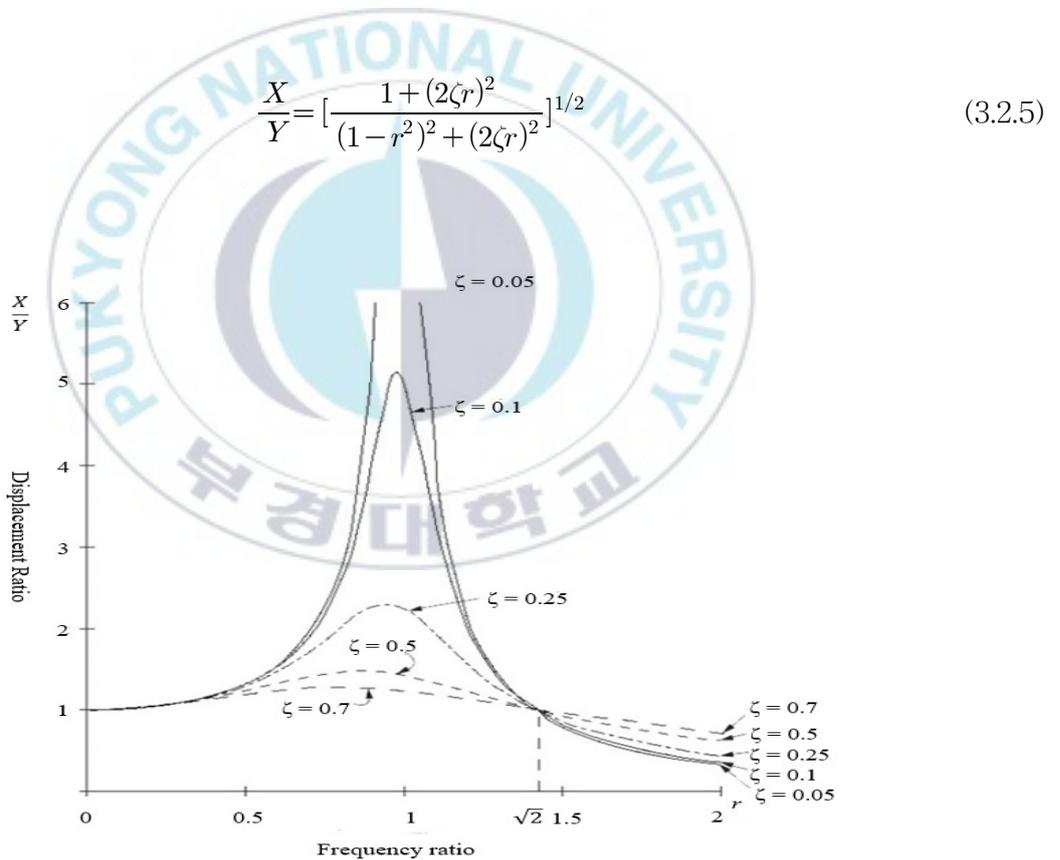


Figure 11 The variation of displacement transmissibility ratio to mass as frequency ratio function⁽¹⁾

힘 전달률은 진폭 Y 인 바닥의 변위가 얼마만큼의 힘($F(t)$)으로 질량체에 전달되는지를 볼 수 있는 척도이며 힘과 질량 m 이 관성력에 의하여 평형을 이루는 것을 이용하여 도출할 수 있다. 식 (3.2.5)를 2번 미분하고 $F(t) = -m\ddot{x}(t)$ 를 대입하면 아래의 식 (3.2.6)으로 정리된다.

$$F(t) = m\omega_b^2\omega_n Y \sqrt{\frac{\omega_n^2 + (2\zeta\omega_b)^2}{(\omega_n^2 - \omega_b^2)^2 + (2\zeta\omega_n\omega_b)^2}} \sin(\omega_b t - \theta_1 + \theta_2) \quad (3.2.6)$$

식 (3.2.6)을 주파수 비(r)를 이용하여 간단히 정리하고 바닥 변위 kY 와 전달된 힘 F_T 의 관계를 이용하여 표현하면 아래의 식 (3.2.7)과 같다.

$$F_T = r^2 \left[\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2} \right]^{1/2} \quad (3.2.7)$$

위의 식 (3.2.7)을 이용하여 아래의 Fig. 12를 통하여 다양한 감쇠비에 따른 힘 전달률의 변화를 확인할 수 있다.

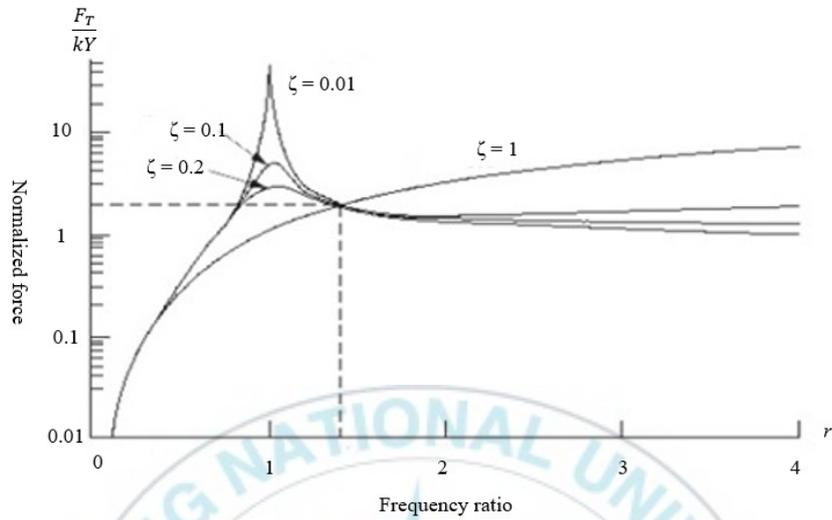


Figure 12 The variation of force transmissibility ratio to mass as frequency ratio function⁽¹⁾

주파수 비는 앞서 설명하였듯이 $r = \frac{\omega}{\omega_n}$ 이며 일정 진동수 ω 에 대하여 $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$ 이기 때문에 질량이 증가하고 강성이 감소할수록 r 값이 증가하게 되어 전달되는 힘 F_T 의 값이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 본 논문의 이후 이어질 내용에서 신규 방진 마운트 모델은 기초 질량부 상부 기계적 요소인 K_P 와 C_P 를 조정할 4가지 안을 제안한다. 위와 같은 특성으로 인하여 K_P 및 C_P 의 값이 모두 낮은 방진 마운트 모델의 응답 특성이 가장 우수할 것으로 예상되며 기초 질량부의 질량 증감 여부에 따라 해당 방진 마운트 모델의 응답 특성 또한 변화될 것으로 예측할 수 있다.

3.2 이론적 응답 특성 도출

본 절에서는 2장에서 기술한 비상 발전기 마운트 모델의 3 자유도 모델링과 3장 1절에서 기술한 기초 진동이론을 기반으로 비상 발전기 마운트 모델의 이론적인 응답 특성을 볼 수 있는 각각의 질량에 대한 운동 방정식인 2계 상미분 방정식을 도출하였다. 먼저 식 (3.2.1)은 비상 발전기의 질량(M_P)에 대한 운동 방정식이며 식 (3.2.2)는 기초 질량부 질량(M_M)에 대한 운동 방정식, 식 (3.2.3)은 주변 시설물 질량(M_B)에 대한 운동 방정식을 아래와 같이 나타내었다.

$$M_P \ddot{X}_P + C_P \dot{X}_P + K_P X_P = C_P \dot{X}_M + K_P X_M + F_P \quad (3.2.1)$$

$$M_M \ddot{X}_M + (C_P + C_M) \dot{X}_M + (K_P + K_M) X_M = C_P \dot{X}_P + K_P X_P + C_M \dot{X}_B + K_M X_B \quad (3.2.2)$$

$$M_B \ddot{X}_B + C_M \dot{X}_B + (K_M + K_B) X_B = C_M \dot{X}_M + K_M X_M + F_B \quad (3.2.3)$$

위의 3가지 식을 이용하여 주파수 영역에서 계산하고 전달함수로 나타내기 위하여 초기 변위(x_0)와 초기 속도가 (v_0) 0이라는 가정 아래 미분방정식을 쉽게 풀기 위하여 적분 형태 또는 대수적 계산으로 미분방정식을 변환하는 라플라스 변환(s-domain)을 수행하였다. 식 (3.2.1) - 식 (3.2.3)에 대한 라플라스 변환은 아래의 식 (3.2.4) - 식 (3.2.6)과 같다.

$$[s^2 M_P + s C_P + K_P] X_P(s) = [s C_P + K_P] X_M(s) + F_P(s) \quad (3.2.4)$$

$$\begin{aligned} [s^2M_M + s(C_P + C_M) + (K_P + K_M)]X_M(s) & \quad (3.2.5) \\ = [sC_P + K_P]X_P(s) + [sC_M + K_M]X_B(s) \end{aligned}$$

$$[s^2M_B + s + C_M + (K_M + K_B)]X_B(s) = [sC_M + K_M]X_M(s) + F_B(s) \quad (3.2.6)$$

이후 비상 발전기 자체에서 발생하는 하중 조건에 대한 응답 특성을 얻어 내기 위하여 바닥에서 발생하는 하중이 없다는 가정($F_B = 0$)을 한 뒤 해당 조건에서 식 (3.2.4) - 식 (3.2.6)을 연립 방정식으로 풀이하였다. 이 과정에서 반복되는 식은 각각 $\alpha(s)$, $\beta(s)$, $\gamma(s)$ 로 식 (3.2.7) - 식 (3.2.9)와 같이 가정하여 풀이하였으며 위를 이용하여 아래의 식 (3.2.10)과 식 (3.2.11)을 도출하였다. 아래의 식 (3.2.10)과 식 (3.2.11)은 전달함수를 이용하여 표현하였는데 여기서 본 논문의 방진 마운트 모델의 성능 평가 지표 등으로 사용될 전달함수는 앞서 3.1.2절에서 사용한 변위 및 힘 전달률 식을 이용하여 입력되는 가진(구동력)과 출력되는 응답 값의 비율을 나타낸 것이다. 따라서, 식 (3.2.10)은 발전기로부터의 입력 하중(F_P)에 대한 지면의 응답(X_B)의 전달함수이며 식 (3.2.11)은 발전기로부터의 입력 하중(F_P)에 대한 발전기 자체의 응답(X_P)의 전달함수이다.

$$\alpha(s) = s^2M_P + sC_P + K_P \quad (3.2.7)$$

$$\beta(s) = s^2M_M + s(C_P + C_M) + (K_P + K_M) \quad (3.2.8)$$

$$\gamma(s) = s^2M_B + sC_M + (K_M + K_B) \quad (3.2.9)$$

$$\frac{X_B(s)}{F_P(s)} = \frac{(sC_M + K_M)(sC_P + K_P)}{\alpha(s)\beta(s)\gamma(s) - \alpha(s)(sC_M + K_M)^2 - \gamma(s)(sC_P + K_P)^2} \quad (3.2.10)$$

$$\frac{X_P(s)}{F_P(s)} = \frac{\beta(s)\gamma(s) - (sC_M + K_M)^2}{\alpha(s)\beta(s)\gamma(s) - \alpha(s)(sC_M + K_M)^2 - \gamma(s)(sC_P + K_P)^2} \quad (3.2.11)$$

위의 기술한 전달함수는 비상 발전기로부터의 입력 하중 발생 시에 대한 비상 발전기의 응답 특성과 지면의 응답 특성을 볼 수 있는 전달함수이지만 지진 및 주위 시설물에서 전달되는 가진 등의 영향으로 지면의 변위가 변하는 경우는 발전기의 입력 하중(F_P)과 지면의 입력 하중(F_B)이 모두 없는 상태에서 발생하며 위의 기술한 식을 대입하여 정리하면 아래의 식 (3.2.12)와 같다.

$$\frac{X_P(s)}{X_B(s)} = \frac{\gamma(s)(sC_P + K_P)}{\alpha(s) - (sC_M + K_M)} \quad (3.2.12)$$

IV. 비상 발전기 마운트 모델 성능 평가 지표 제안 및 성능 평가

4.1. 성능 평가 지표 도출

본 절에서는 후술할 비상 발전기 마운트 모델 상부의 기계적 특성을 조정하였을 경우 앞서 기술한 3장 2절에서 도출한 전달함수를 사용하여 비상 발전기 마운트 모델의 성능을 비교 및 평가할 수 있는 2가지의 지표를 제안하였다. 먼저 첫 번째 성능 평가 지표는 비상 발전기 자체의 하중 입력 (F_p)에 대하여 진동 전달을 특성을 평가하기 위하여 식 (3.2.10)과 식 (3.2.12)를 이용하여 성능 평가 지표(I_1)를 제안하기 위하여 비상 발전기의 변위를 입력 값으로 두고 출력 값은 지면의 변위로 두었을 경우 비상 발전기 자체의 가진력($F_p(s)$)가 소거되며 그 결과는 아래의 식(4.1.1)과 같다. 지면으로부터 비상 발전기로 입력이 발생하여 변위로 나타나는 경우를 평가하기 위하여 두 번째 성능 평가 지표(I_2)를 사용하였고 이는 앞선 3장 2절에서 설명하였듯 하중 조건이 모두 없는 상태에서 발생하기 때문에 지면의 응답으로부터의 비상 발전기 응답의 비율로 아래의 식 (4.1.2)와 같이 제안하였다. 본 절에서 제안한 두 가지의 성능 평가 지표들은 입력에 대한 출력의 비율이므로 지수 값들의 값이 작을수록 해당 주파수 내에서 방진 성능이 우수한 것을 알 수 있다.

$$I_1(s) = \frac{X_B(s)}{F_P(s)} \frac{F_P(s)}{X_P(s)} = \frac{X_B(s)}{X_P(s)} = \frac{(sC_M + K_M)(sC_P + K_P)}{\beta(s)\gamma(s) - (sC_M + K_M)^2} \quad (4.1.1)$$

$$I_2(s) = \frac{X_P(s)}{X_B(s)} = \frac{\gamma(s)(sC_P + K_P)}{\alpha(s) - (sC_M + K_M)} \quad (4.1.2)$$

위처럼 제안된 2가지의 성능 평가 지표(I_1, I_2)들을 이용하여 기존 비상 발 전기 마운트 모듈의 응답 특성을 분석한 결과는 Fig. 13, Fig. 14와 같다.

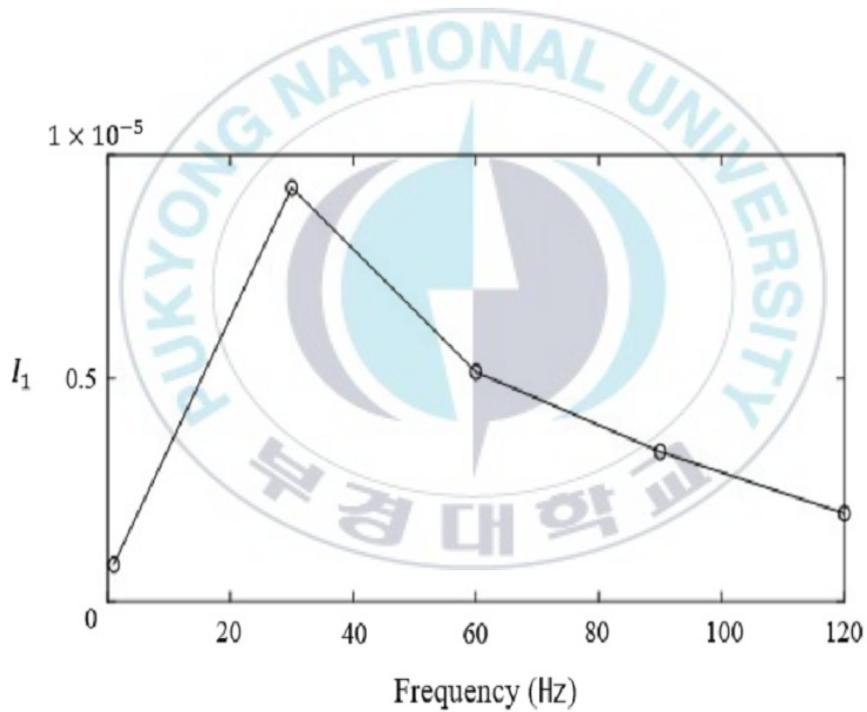


Figure 13 First performance index in frequency band of interest

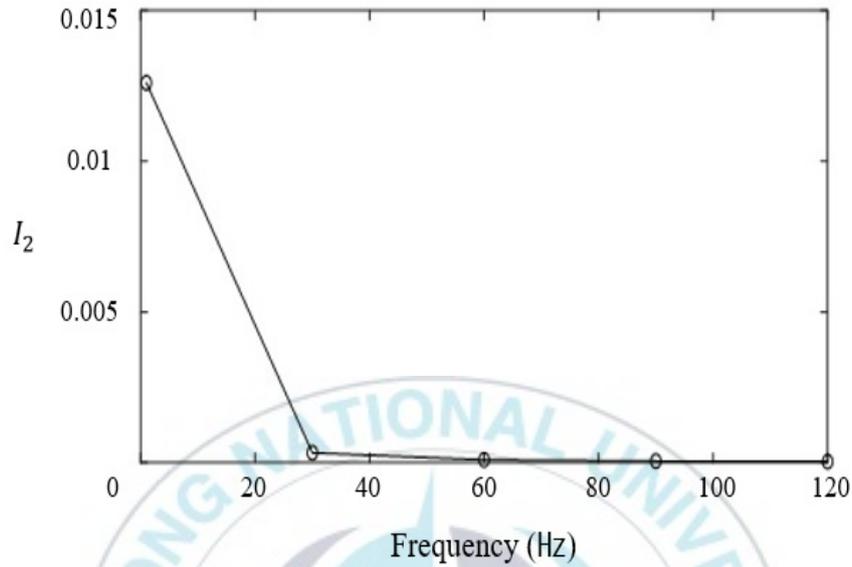


Figure 14 Second performance index in frequency band of interest

위와 같이 도출된 성능 평가 지표의 지수 값들을 통하여 기존 비상 발전기 마운트 모델의 특성을 분석할 수 있다. 먼저 비상 발전기 자체의 응답 (X_p)에 대한 지면의 응답 비율(X_B)과 성능 평가 지표(I_1)가 나와 있는 Fig. 13을 보면 비상 발전기가 시동 후 정속 주행(1800 rev/min)하기까지의 주파수 영역 대역(0Hz ~ 30Hz)에서의 응답 특성이 높은 것을 확인할 수 있으며 이후 상대적인 고주파 영역 대역(30Hz ~ 120Hz)에서는 점차 응답 특성이 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 지면 응답(X_B)과 발전기 응답(X_p)의 비율인 성능 평가 지표(I_2)가 나와 있는 Fig. 14에서는 성능 평가 지표(I_1)와 같이 저주파 영역 대역(0Hz ~ 30Hz)에서의 응답 특성이 높고 고주파 영역 대역에서의 응답 특성은 0으로 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.

4.2. 비상 발전기 상부 기계적 특성 조정 및 응답 특성 분석

본 절에서는 김찬중 등 (2023)⁽⁴⁾이 수행하였던 기존 연구에서 조정하지 않았던 비상 발전기 하부와 기초 질량부 사이의 탄성 계수(K_p)와 감쇠 계수(C_p)로 이루어진 기계적 특성을 아래의 Table 2와 같이 조정 조건들을 정하였다. 해당 조건들을 앞서 제안한 비상 발전기 마운트 모델 성능 평가 지표(I_1, I_2)를 적용하여 관심 주파수 대역(30Hz ~ 120Hz)에서의 응답 특성을 분석하였으며 각각의 조건들을 대입하여 성능 평가 지표를 활용한 응답 특성 분석 결과는 Fig. 15 및 Fig. 16과 같다.

Table 6 Four cases of modified mechanical properties in upper mount

Case	Value
I	$C_p \div 10, K_p \div 10,$
II	$C_p \div 10, K_p \times 10$
III	$C_p \times 10, K_p \div 10$
IV	$C_p \times 10, K_p \times 10$

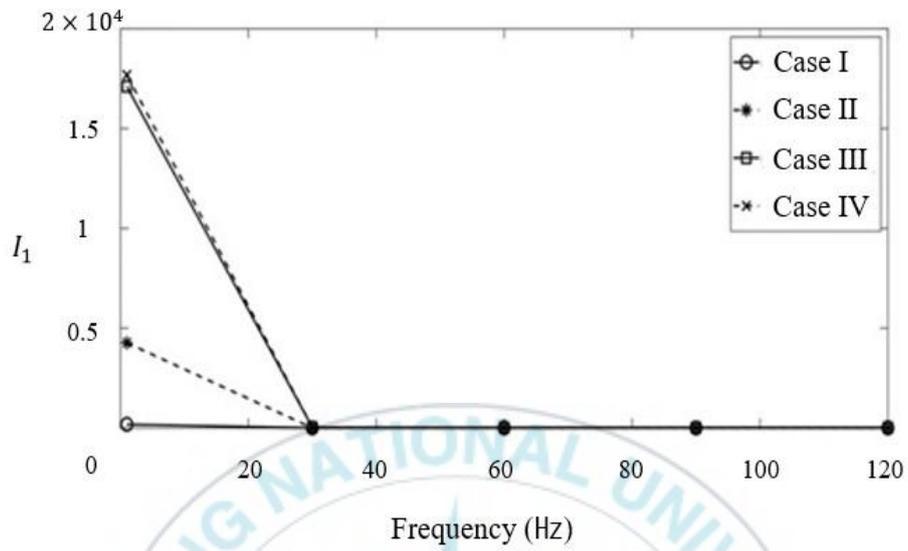


Figure 15 Comparison of first index variations in frequency band of interest

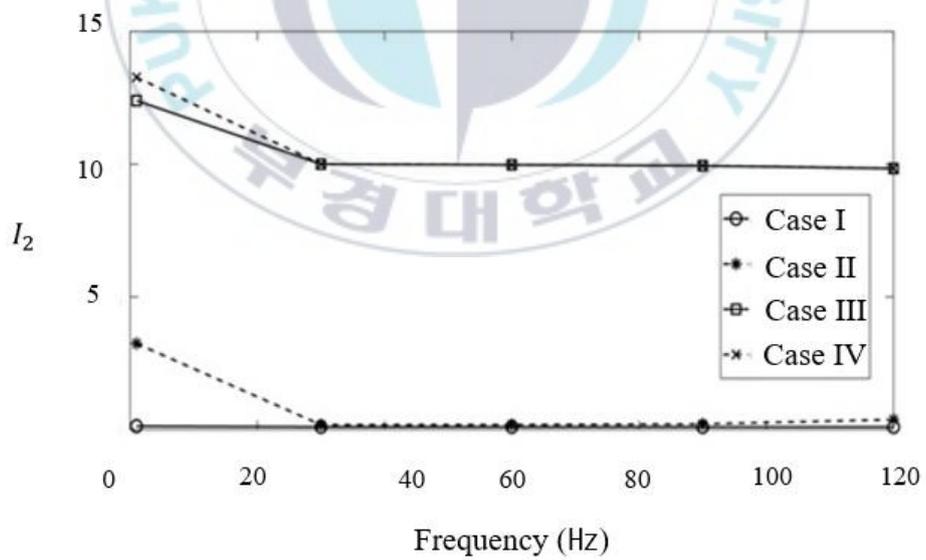


Figure 16 Comparison of second index variations in frequency band of interest

신규 제안한 비상 발전기 마운트 모델의 Case 별 성능 평가 결과 탄성 계수(K_p)와 감쇠 계수(C_p)가 본래의 기준치보다 낮은 Case I의 응답 특성이 다른 조건들보다 우수한 것을 확인하였다. 세부적인 측면에서 보면 비상 발전기의 응답(X_p)에 대한 지면의 응답(X_B) 비율인 성능 평가 지표(I_1)에서 Case III과 IV는 유사하게 Case I 과 II과 비교하여 높은 지수 값을 보여 우수하지 못했으며 Case I 과 II의 응답 특성이 유사하나 비상 발전기 시동 후 정속 주행 시까지의 천이 구간인 저주파수 영역(0Hz ~ 30Hz)에서의 응답 특성은 Case I이 월등히 우수한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 지면 응답(X_B)과 발전기 응답(X_p)의 비율인 성능 평가 지표(I_2)에서는 Case I이 다른 Case들과 비교하여 월등하게 낮은 지수 값을 보여주고 있음을 확인할 수 있었다. 하지만 Fig. 15과 Fig. 16을 통하여 Case I과 같은 비상 발전기 마운트 모델의 탄성 계수(K_p)와 감쇠 계수(C_p)의 조정안의 응답 특성이 우수한 것을 확인하였으나 다른 Case들의 지수 값들이 Case I과 비교하여 상대적으로 크기 때문에 Case I을 적용한 마운트 모델과 기존 비상 발전기 마운트 모델 간의 비교를 아래의 Fig. 17과 Fig. 18 같이 앞서 제안한 두 가지의 성능 평가 지표를 활용하여 비교하였으며 세부적인 지수 값들은 Table. 7 및 Table. 8로 정리하였다.

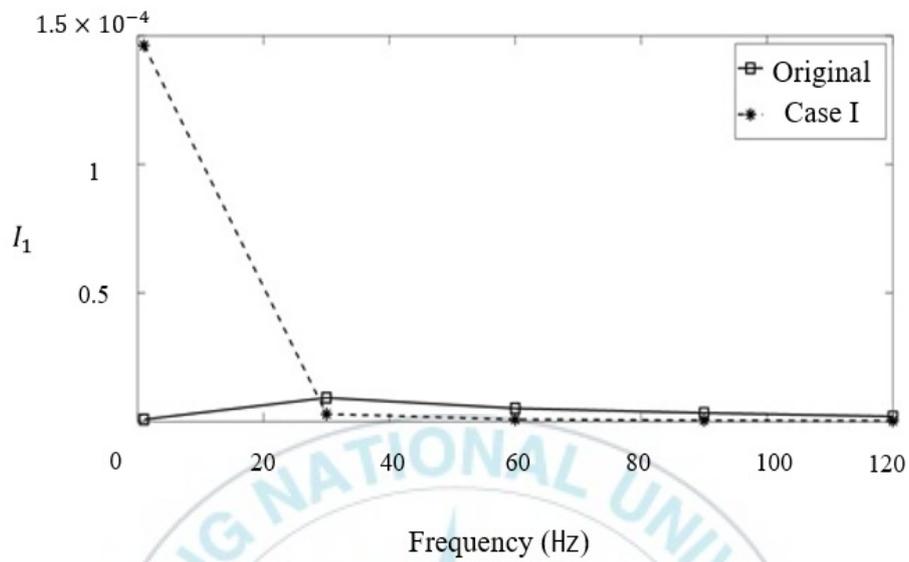


Figure 17 Comparison of first performance index between case I and original one

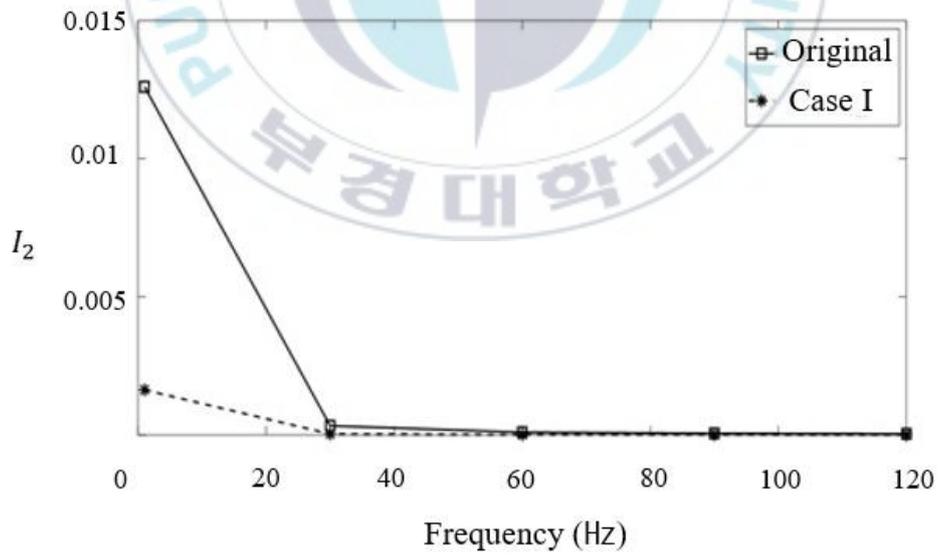


Figure 18 Comparison of second performance index between case I and original one

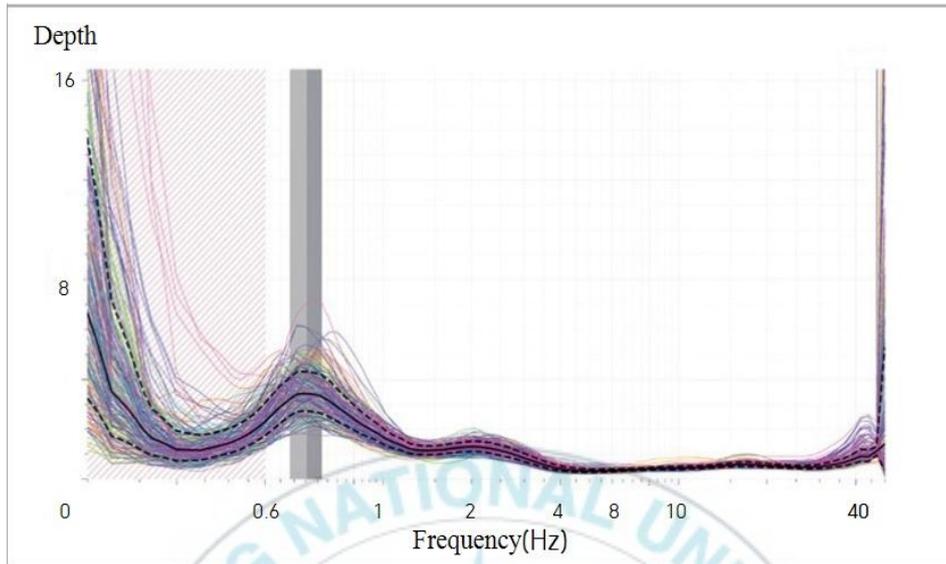
Table 7 Comparison of first index value between case I and reference one

Case	First index value ($\times 10^{-6}$)				
	1Hz	30Hz	60Hz	90Hz	120Hz
Original case	0.83	9.26	5.15	3.36	1.98
Case I	14.6	2.95	0.85	0.48	0.31

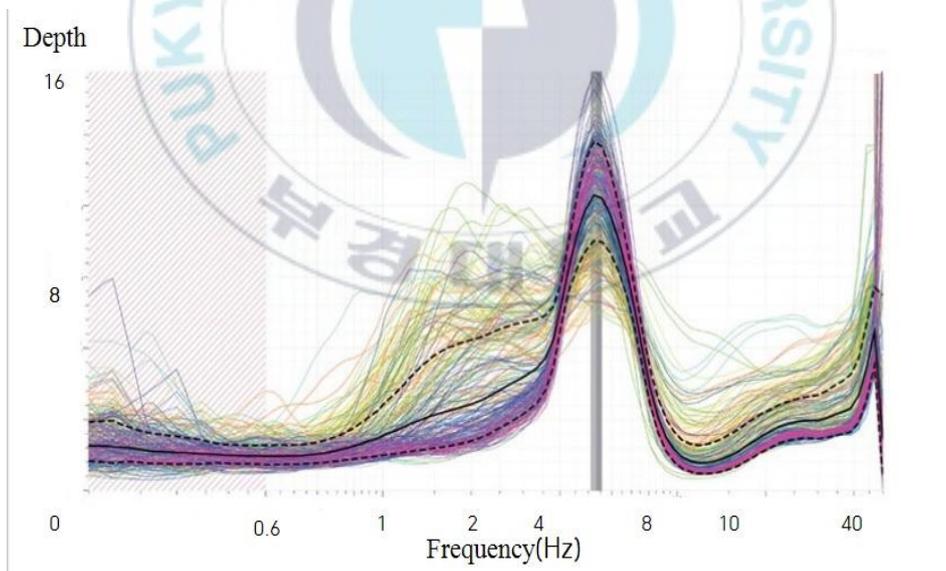
Table 8 Comparison of second index value between case I and reference one

Case	Second index value ($\times 10^{-3}$)				
	1Hz	30Hz	60Hz	90Hz	120Hz
Original case	12.6	0.32	0.009	0.005	0.003
Case I	1.63	0.03	0.009	0.005	0.003

기존 비상 발전기 마운트 모델과 Case I의 조정된 기계적 특성이 적용된 신규 비상 발전기 마운트 모델을 성능 평가 지표를 기반으로 하여 비교한 결과 기존 마운트 모델 대비 Case I 마운트 모델의 비상 발전기 초기 시동 시부터 정속 주행 시까지의 천이 구간 주파수 영역(0Hz ~ 30Hz)에서 응답 특성이 좋지 못한 것을 확인할 수 있었다. 하지만 해당 영역은 관심 주파수 영역에서 벗어난 진동 지속 시간이 짧은 천이 구간이며 비상 발전기 작동 후 오랜 시간 진동이 전달되는 30Hz 이상의 본 논문의 관심 주파수 영역에서의 응답 특성은 기존 마운트 모델보다 우수한 것으로 확인되었다. 지면의 응답이 전달되는 비율인 성능 평가 지표(I_2)에서는 기존 마운트 모델 대비 Case I 마운트 모델이 모든 주파수 영역에서 우수하였고 추가로, 지진 발생 시 응답 특성 분석과 관련하여 지진은 주파수 만이 아닌 진앙의 깊이, 해당 지층의 형태 및 성질, 지진과 전달속도가 깊은 연관이 있으나 본 논문에서는 주파수 측면에서 포항 지진 발생 당시의 지진 우세 주파수만 비교하여 동일 상황에서의 내진 설계의 적합성을 검토하였다. 내진 설계 적합성 비교를 위하여 지진 발생 시 주파수의 표본이 될 지진은 본 연구 대상 비상 발전기가 설치된 부산광역시와 인접한 포항시에서 2017년 일어난 진도 5.4의 포항 지진으로 선정하였다. 해당 지진의 분석 자료인 포항 지진 분석 보고서(2017)⁽²³⁾에 따르면 지진 발생 시 관측소에서 측정된 지진 우세 주파수가 최대 5.32Hz이었고 저주파수 대역에서 발생하였음을 알 수 있었으며 그 결과는 아래의 Fig. 19와 같다. 따라서 이를 적용하여 Fig. 18의 결과를 분석하면 해당 지진과 같은 지진이 발생하였을 경우 해당 주파수 영역에서의 응답 특성은 Case I이 기존 마운트 모델보다 우수함을 알 수 있었다. 따라서 위의 결과를 토대로 본 논문에서 제안한 Case I 마운트 모델이 관심 주파수 영역에서 기존 마운트 모델보다 발전기에서 발생한 진동이 하부로 전달되는 비율과 지면에서의 변위가 발전기로 전달되는 비율 모두에서 우수한 마운트 모델임을 증명하였다.



(19-A) Result of frequency variation as depth in heung-hae town



(19-B) Result of frequency variation as depth in gang-dong town

Figure 19⁽²³⁾ Result of frequency variation for each different observatory when during po-hang earthquake

4.3. 마운트 모델 내 기초 질량부의 영향 분석

앞선 4.2절에서 본 논문에서 제안한 Case I 마운트 모델과 기존 마운트 모델 간의 응답 특성 비교에서 Case I 마운트 모델이 비상 발전기 초기 시동 시부터 정속 주행 시까지의 천이 구간 주파수 영역(0Hz ~ 30Hz)에서의 응답 특성이 좋지 않음을 확인할 수 있었다. 해당 구간은 진동 지속 시간이 짧은 비 관심 주파수 영역이지만 해당 영역에서의 응답 특성을 개선하면 비상 발전기 운용 시의 신뢰성과 마운트 모델의 더 긴 수명을 보장할 수 있으므로 본 논문에서는 추가적인 대안으로 기초 질량부의 질량(M_M) 증가를 통하여 개선하고자 하였으며 그 결과는 아래의 Fig. 19과 같다.

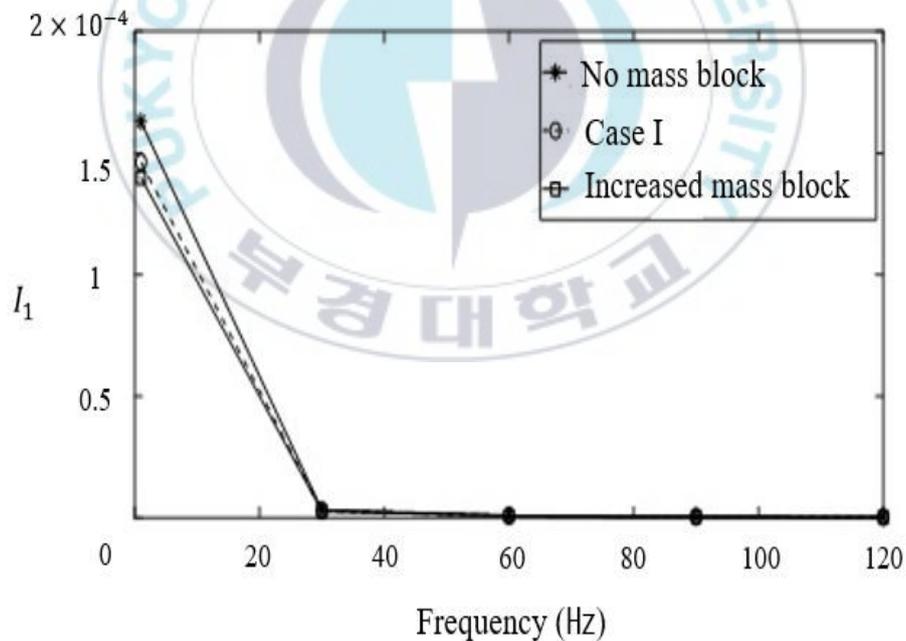


Fig 20 Variation in first index according to different mass-block condition

위의 Fig. 19에서는 비상 발전기의 응답으로부터 지면의 응답 전달 비율인 성능 평가 지표(I_1)에서 응답 특성을 기초 질량부를 제거한 마운트 모델, Case I 마운트 모델, 기초 질량부를 증가시킨 마운트 모델 등으로 구분하여 비교하였다. 각 모델을 비교한 결과 기초 질량부 질량의 증가로 해당 영역의 응답 특성이 감소하는 것을 확인할 수 있었지만 뚜렷한 개선을 가져오진 못하였다. 따라서 추가적인 연구를 통하여 기초 질량부 상부 기계적 특성뿐만이 아닌 하부 기계적 특성을 동시에 조정하며 해당 영역의 응답 특성의 개선이 필요할 것으로 판단된다.



V. 결 론

기존 수행되었던 연구에서는 방진 마운트 모델 내 콘크리트 시공된 기초 질량부를 제거하여 구조를 간단하게 제안하였으나 기초 질량부의 삭제로 비상 발전기 시동 후 정속 회전 주파수 대역까지의 천이 구간에서 응답 특성이 큰 단점을 확인하였고 이후 이어진 최근 후속 연구에서는 기초 질량부를 그대로 존치하고 기초 질량부 하부의 탄성 및 감쇠 계수 조정을 통하여 해당 주파수 영역에서의 단점을 최소화하고자 하였으나 기초 질량부 상부의 탄성 및 감쇠 계수를 조정하지 않아 한계점이 있었다. 따라서 본 논문에서는 해당 방진 마운트 모델을 3-자유도로 모델링한 뒤 모델링된 결과를 바탕으로 힘 전달률 및 변위전달률 함수를 응용하여 비상 발전기 가동 중 발생하는 가진력이 바닥에 전달되는 응답 특성, 바닥 가진으로부터 비상 발전기 방진 마운트 모델을 통하여 전달되는 비상 발전기의 응답 특성을 라플라스 변환을 통하여 이론적으로 도출하였으며 본 논문에서 제안할 방진 마운트 모델의 응답 특성을 비교 평가하기 위하여 성능 평가 지표 또한 도출하였다. 이후 기초 질량부 상부의 탄성 및 감쇠 계수를 4가지의 제안 모델로 나누어 응답 특성을 분석한 결과 탄성 및 감쇠 계수 모두가 낮은 모델의 응답 특성이 가장 우수하였음을 확인하였고 이를 기존 방진 마운트 모델과 비교한 결과 지진과 주변에서의 진동 등 발생 가능한 바닥 가진으로부터 비상 발전기로 전달되는 응답 특성은 기존 모델 대비 모든 주파수 영역에서 우수하였으며 현재 비상 발전기 방진 마운트 모델이 설치된 부산광역시와 인접한 곳에서 최근 일어났던 진도 5.4의 포항 지진 발생 당시의 지진 우세 주파수를 대입하여 비교하여 보았을 때 해당 지진 발생 시에도 응답 특성이 우수하여 내진 성능을 검증하였다.

추가적으로, 비상 발전기의 가동 시 발생하는 가진력으로부터 바닥에 전달되는 응답 특성 중 본 논문의 II장에서 설정한 관심 주파수 영역(30 Hz~120Hz)에서의 응답 특성은 기존 모델 대비 우수하였으나 최근 연구의 결과와 같이 천이 구간(1Hz~30Hz)에서의 응답 특성은 기존 모델 대비 높은 단점 또한 보여주었다. 이후 해당 영역을 개선하고자 본 논문에서는 기초 질량부의 존재 여부에 따른 방진 마운트 모델 내 응답 특성 영향에 대하여 분석하였고 기초 질량부의 질량이 증가할수록 천이 구간대의 응답 특성이 조금 개선되는 점을 확인하였으나 콘크리트로 시공되고 내부 고무 물성 패드의 수명 한계로 인하여 주기적으로 유지 및 보수하여야 하는 기초 질량부를 무리하게 증가시키는 것이 해당 영역에서의 큰 변화를 가져오지 못하는 것 또한 확인할 수 있었다. 따라서 이후 후속될 연구에서 본 논문의 관심 영역이었던 기초 질량부 상부 기계적 특성 조정뿐만 아닌 최근 연구에서 수행하였던 기초 질량부 하부 기계적 특성 조정을 동시에 수행이 필요하다는 점 또한 확인하여 이후 후속될 연구에서 해당 부분을 적용하여 본 논문에서 제안한 최적화된 신규 방진 마운트 모델보다 모든 주파수 영역에서의 응답 특성이 우수한 방진 마운트 모델을 제안할 계획이다.

참고문헌

- [1] Inman, D.J., Engineering Vibration(fourth ed.), Pearson, Singapore pp. 121-147, 2013
- [2] Anti-vibration education sheet, NSV company, pp. 7-8
- [3] Kim, C.-J. Design criterion of damper component of passive-type mount module without using base mass-block, Energies, 2018
- [4] Park, Y.W., Kim, T.-W. and Kim, C.-J Compromised vibration isolator of electric power generator considering self-excitation and basement input, Inventions,, 2023.
- [5] Choi S.G, A Study on Operation Method of ESS Load Test Device for Site Acceptance Test of Emergency Generator, Page 1-2, Feb 2020.
- [6] Alexey M. Bazinenkov, Valery P. Mikhailov, Active and semi active vibration isolation systems based on magnetorheological materials, Procedia Engineering 106, Page 170-174, 2015.

- [7] Oh, H.U., Lee, K.J. and Jo, M.S. A passive launch and on-orbit vibration isolation system for the spaceborne cryocooler, *Aerospace Science and Technology*, Vol.28(1), pp. 324-331, 2013,
- [8] Wu, Z., Jing, X., Sun, B. and Li, F. A 6DOF passive vibration isolator using X-shape supporting structures, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.380, pp. 90-111, 2016
- [9] Lee, J. and Okwudire, C.E., Reduction of vibrations of passively-isolated ultra-precision manufacturing machines using mode coupling, *Precision Engineering*, Vol.43, pp. 164-177, 2016,
- [10] Ribeiro, E.A., Lopes, E.M.O. and Bavastri C.A. A numerical and experimental study on optimal design of multi-DOF viscoelastic supports for passive vibration control in rotating machinery, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.411, pp. 346-361, 2017,
- [11] Alujevic, N., Cakmak, D., Wolf, H. and Jokic M. Passive and active vibration isolation system using inerter, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.418, pp. 163-183, 2018,

- [12] Siami, A., Karimi, H.R., Cigada, A., Zappa, E. and Sabbioni, E. Parameter optimization of an inerter-based isolator for passive vibration control of Michelangelo's Rondanini Pieta, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.98, pp. 667-683, 2018,
- [14] Oh, H.U. and Choi, Y.J., Enhancement of pointing performance by semi-active variable damping isolator with strategies for attenuating chattering effects, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.165, pp. 385-391, 2018
- [15] Azadi, M., Behzadipour, S. and Faulkner, G. Performance analysis of a semi-active mount made by a new variable stiffness spring, *Journal of Sound and Vibration*, Vol.330(12), pp. 2733-2746, 2011
- [16] Santos, M.B., Coelho, H.T., Neto, F.P.L. and Mafhoud, J. Assessment of semi-active friction dampers, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol.94, pp. 33-56, 2017,
- [17] Pingzhang, Z., Jianbin, D., Zhenhua, L. Simultaneous topology optimization of supporting structure and loci of isolators in an active vibration isolation system. *Computers & Structures* 2018, pp. 194, 74-85.

- [18] Beijen, M.A., Tjepkema, D., Dijk, J. Two-sensor control in active vibration isolation using hard mounts. *Control Engineering Practice* 2014, pp. 26, 82-90.
- [19] Yang, X.L., Wu, H.T., Li, Y., Chen, B. Dynamic isotropic design and decentralized active control of a six-axis vibration isolator via Stewart platform. *Mechanism and Machine Theory* 2017, pp. 117, 244-252.
- [20] Wang, Z., Mak, C.M. Application of a movable active vibration control system on a floating raft. *Journal of Sound and Vibration* 2018, pp. 414, 233-244
- [21] Li, Y., He, L., Shuai, C.G., Wang, C.Y. Improved hybrid isolator with maglev actuator integrated in air spring for active-passive isolation of ship machinery vibration, *Journal of Sound and Vibration* 2017 pp. 407, 226-239.
- [22] Yang, J., Xiong, Y.P., Xing, J.T. Vibration power flow and force transmission behavior of a nonlinear isolator mounted on a nonlinear base. *International journal of Mechanical Sciences* 2016, pp. 115-116, 238-252.
- [23] Pohang earthquake analysis report, Korea meteorological administration 2017, pp. 34-36.

감사의 글

16년 3월, 어리숙한 모습으로 처음 살아보는 도시에 다른 또래 친구들보다 일찍 직장 생활을 시작하게 되었습니다. 선배분들의 따뜻한 관심과 격려 속에 성장하여 업무를 배우던 중 20년 가을 같은 지역에서 근무하고 있던 동기가 이곳 부경대학교 무기체계공학과를 소개하여 주었습니다. 같은 나이의 다른 친구들과는 달리 학부 과정을 제대로 밟지 않고 직장 생활부터 한 저는 대학을 다니는 다른 친구들의 배움의 기회가 부러웠고 부경대학교에 진학하고자 학사 학위 과정을 틈틈이 진행하여 취득한 후 21년 9월 부경대학교 대학원 석사 학위 과정을 시작할 수 있게 되었습니다. 석사 학위 과정을 시작하기 위하여 노력했던 만큼 대학원에서 다양한 공학 관련 과목을 배운 지난 2년은 저에게 가장 뜻깊었던 순간이었고 학업에 목말라 있던 저에게 무엇보다 값지고 소중한 시간이었습니다. 석사 과정을 진행하며 직장 생활과 학업을 병행하는 저에게 지난 2년은 도전의 연속이었고 쉬운 길은 결코 아니었지만 스스로 다그치며 최선을 다하여 노력한 시간이었습니다. 이렇듯 제가 본 석사 학위를 마칠 수 있게 많은 도움을 주신 분들에게 진심을 담아 아래와 같이 감사의 말씀을 드리고 싶습니다.

먼저, 본 논문을 완성할 수 있도록 많은 조언과 지도를 해주신 김찬중 지도 교수님께 감사의 말씀을 먼저 드리고 싶습니다. 3학기 교수님의 수업을 통하여 진동 제어라는 학문에 제가 관심을 가질 수 있었고 교수님의 아낌없는 조언들을 통하여 제 미래의 학업과 진로 설계에 큰 도움이 되어주셨으며 교수님의 따뜻한 응원과 격려를 통하여 본 석사 학위를 마칠 수 있음에 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 더불어, 본 논문의 심사를 맡아주신 유동인 교수님과 김창원 교수님께도 감사의 말씀을 전해 드립니다.

매주 반복되는 주말 임무와 야간 임무, 코로나 상황 등 어려운 근무 환경에도 학업을 계속 진행할 수 있도록 많은 배려와 도움을 주신 차종화 반장님, 김성문 선배님, 정민호 선배님, 김기덕 선배님과 윤찬준 후배님 그리고 다른 부속반 선후배님들과 부경대학교 석사 학위 과정을 시작할 수 있게 해주고 목표 의식이 없던 저에게 새로운 목표를 설정하고 일깨워준 존경하는 동기이자 친구 정찬호 님에게도 감사의 말씀을 전해 드립니다.

지난 석사 학위 과정 동안 많은 걱정과 우려에도 부족한 아들을 믿어주시고 아낌없는 지원을 해주셨던 사랑하는 부모님과 장인어른, 장모님 어려운 상황마다 조언을 해주었던 형 그리고 가족들에게도 깊은 감사를 전해 드립니다. 마지막으로, 항상 부족한 남편의 학업과 직장 생활의 병행으로 주말 및 퇴근 후의 시간에도 많은 시간을 함께해주지 못하였지만 본 석사 학위 과정을 마칠 수 있도록 묵묵히 옆에서 따뜻한 관심과 배려를 해준 사랑하는 아내 이주연 님에게 이 논문을 바칩니다.