

공학석사 학위논문

반강접 집합부를 적용한 초대형 부유식
구조물의 상부구조체에 대한 동적해석

Dynamic Analysis of Superstructures on Very Large
Floating Structures with Semi-Rigid Connections

지도교수 송 화 철

2005년 2월

한국해양대학교 대학원

해 양 건 축 공 학 과

김 우 년

공학석사 학위논문

반강접 집합부를 적용한 초대형 부유식
구조물의 상부구조체에 대한 동적해석

Dynamic Analysis of Superstructures on Very Large
Floating Structures with Semi-Rigid Connections

지도교수 송 화 철

2005년 2월

한국해양대학교 대학원

해 양 건 축 공 학 과

김 우 년

本 論 文 을 金 佑 年 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

위 원 장 도 근 영 인

위 원 이 치 형 인

위 원 송 화 철 인

2004년 12월

한국해양대학교 대학원

목 차

Abstract	vi
1. 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향	3
1.3 연구범위 및 방법	4
2. 반강접 접합부의 분류방법 및 해석모델	7
2.1 반강접 접합부의 개요 및 기준에 따른 분류	7
2.2 반강접 접합부 모멘트-회전각 해석모델	13
3. 반강접 접합부의 시간이력해석	17
3.1 모멘트-회전각 특징	17
3.2 모멘트-축력 상관관계	19
3.3 부재의 변형	21
3.4 반강접 접합부 모델의 특징	23
4. 적용 예제구조물의 개요 및 특성	25
4.1 적용 예제구조물	25
4.1.1 4경간 3층 예제구조물	25
4.1.2 4경간 8층 예제구조물	28
4.2 각형강관 외다이아프램 접합부의 적용치수 및 변수	29
4.3 하중산정	31

4.3.1	정하중	31
4.3.2	파랑하중	33
5.	적용 예제구조물의 동적응답 분석	37
5.1	4경간 3층 예제구조물	37
5.1.1	모멘트응답 분석	38
5.1.2	수평변위응답 분석	45
5.2	4경간 8층 예제구조물	51
5.2.1	모멘트응답 분석	52
5.2.2	수평변위응답 분석	56
5.2.3	수평가속도응답 분석	57
6.	결론	59
	참고 문헌	61

표 목 차

표 3.1 소성힌지의 형성에 따른 강성계수 변화	22
표 4.1 부재성능	25
표 4.2 각형강관 외다이아프램 부재치수 및 적용변수	29
표 4.3 치환부재 모델의 적용변수	30
표 4.4 고정하중 산출근거	31
표 5.1 모드별 고유주기	38
표 5.2 집합부별 최대모멘트 응답	39
표 5.3 진폭비에 따른 최대모멘트 응답	41
표 5.4 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대모멘트 응답	43
표 5.5 집합부별 최대수평변위 응답	45
표 5.6 진폭비 변화에 따른 최대수평변위 응답	46
표 5.7 풍하중 하중증분계수 변화에 따른 최대수평변위 응답	48
표 5.8 파랑하중의 주기변화에 따른 최대수평변위 응답	49
표 5.9 모드별 고유주기	52
표 5.10 집합부별 최대모멘트 응답	52
표 5.11 층별 최대모멘트 응답	55
표 5.12 집합부별 최대수평변위 응답	56
표 5.13 집합부별 최대수평가속도 응답	57

그 립 목 차

그림 1.1 연구 모식도	6
그림 2.1 반강접 접합부의 모멘트-회전각 곡선	7
그림 2.2 AISC-LRFD에 의한 접합부의 분류	9
그림 2.3 Eurocode 3에 의한 접합부의 분류	10
그림 2.4 Bjorhovde에 의한 분류	12
그림 2.5 강관과 다이아프램의 접합 형식	14
그림 2.6 Three-Parameter Power Model	14
그림 2.7 각형강관 외다이프램 접합부의 모멘트-회전각 곡선함수	15
그림 3.1 부재의 모멘트-회전관계($M-\Theta$)	18
그림 3.2 항복상관곡선면	19
그림 3.3 항복면 초과시 평형조건에 의한 수정	20
그림 3.4 부재의 변형과 변위	21
그림 3.5 반강접 접합부 모델	23
그림 3.6 반강접 접합부의 거동	24
그림 4.1 4경간 3층 예제구조물	26
그림 4.2 감소단면2차모멘트 치환부재	27
그림 4.3 4경간 8층 예제구조물	28
그림 4.4 각형강관 외다이아프램 접합부	29
그림 4.5 각형강관 외다이아프램 접합부 모멘트-회전각 곡선	30
그림 4.6 정하중 입력	32
그림 4.7 $t = 0$ 일때의 지점별 변위데이터($Re(z)$)	34
그림 4.8 $t = T/4$ 일때의 지점별 변위데이터($Re(z)$)	34
그림 4.9 초대형 부유식 구조물의 유탄성 응답	35
그림 4.10 시간이력하중(주기 13초)	35
그림 4.11 시간이력하중 입력	36

그림 5.1 4경간 3층 예제구조물 질량 입력	38
그림 5.2 파랑하중의 접합부에 따른 최대모멘트 응답	39
그림 5.3 조합하중의 접합부에 따른 최대모멘트 응답	40
그림 5.4 파랑하중의 진폭비 변화에 따른 최대모멘트 응답	41
그림 5.5 파랑하중의 진폭비 변화에 따른 최대모멘트 응답(강접)	42
그림 5.6 파랑하중의 진폭비 변화에 따른 최대모멘트 응답(반강접)	42
그림 5.7 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대모멘트 응답(반강접)	43
그림 5.8 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대모멘트 응답(강접)	44
그림 5.9 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대모멘트 응답(반강접)	44
그림 5.10 조합하중의 접합부에 따른 최대수평변위 응답	45
그림 5.11 조합하중의 진폭비 변화에 따른 최대수평변위 응답(강접)	47
그림 5.12 조합하중의 진폭비 변화에 따른 최대수평변위 응답(반강접)	47
그림 5.13 풍하중 하중증분계수 변화에 따른 최대수평변위 응답	48
그림 5.14 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대수평변위 응답	49
그림 5.15 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대수평변위 응답(강접)	50
그림 5.16 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대수평변위 응답(반강접)	50
그림 5.17 4경간 8층 예제구조물 질량 입력	51
그림 5.18 동하중에 의한 접합부별 최대모멘트 응답	53
그림 5.19 조합하중에 의한 접합부별 최대모멘트 응답	54
그림 5.20 조합하중에 의한 접합부별 최대모멘트 응답(내부경간)	55
그림 5.21 조합하중에 의한 접합부별 최대수평변위 응답(최상층)	56
그림 5.22 강접 구조물에 대한 최대수평가속도 응답	57
그림 5.23 전체 반강접 구조물에 대한 최대수평가속도 응답	58
그림 5.24 부분 반강접 구조물에 대한 최대수평가속도 응답	58

Dynamic Analysis of Superstructures on Very Large Floating Structures with Semi-Rigid Connections

Kim, Woo-Nyon

Dept. of Oceanic Architectural Engineering, Graduate School,
Korea Maritime University

Abstract

Available space near shore area was exhausted by rapid industrialization and concentration of population toward the cities. Furthermore, reclamation techniques have no longer merits technically and economically as well as in view of environmental conservation. Therefore it is necessary to find a new technology, such as Very Large Floating Structures(VLFS), which can provide pleasant ocean space.

If VLFS technology is developed, we can get the various ocean spaces such as harbor facilities, airport facilities, leisure and sports facilities. but, that technology should be technically safe and economic.

The additional moment occurs because the superstructures of VLFS are influenced by wave loads instead of earthquake loads. In order to reduce the additional moment, this study used the semi-rigid connections which lie between fully rigid and pinned. If the semi-rigid connections are used for superstructures of VLFS, the moment of beams can be reduced and more economical construction will be possible.

This study aims to show the effect of wave loads on structure and the efficiency of the semi-rigid connections due to wave loads by analyzing the time history responses. The dynamic behaviors of the rigid frame are compared with those of the semi-rigid frame considering of static loads, wave loads and combination loads for 4-bay 3 and 8-story frames. To analyze the responses of the semi-rigid frame, the amplitude and period of wave loads are varied. Two models such as the spring and the substitute bar are used to represent the semi-rigid connections. Wave loads have 13 seconds period and 22.63cm amplitude, and the semi-rigid connection type is a steel tubular column with square external-diaphragm connections.

The conclusions of this study are as follows.

1. The additional moment responses due to wave loads increase 33% in the rigid frame, 26% in the spring model and 31% in the substitute bar model. The additional moments occupy 20%~25% of the whole responses for superstructures on VLFS. The results show that the additional moment due to wave loads should be examined for the design of superstructures on VLFS.
2. As the semi-rigid connections are applied as a whole for the frame, the maximum moments are reduced by about 30~45% compared to those of the rigid frame. If the semi-rigid connections are applied partially for the frame, the maximum moments increase. That is the reason why the reduced moments of beams in the semi-rigid regions are transferred to beams of the rigid regions.

3. As the amplitude of wave loads is varied, the additional moments of the semi-rigid frame change smaller than those of the rigid frame. The additional moments of the semi-rigid frame due to period variations change also smaller than those of the rigid frame. The results show that the system of superstructures is designed economically by using the semi-rigid connections.

4. In case of the lateral displacement responses, the effects due to static loads are very little and the effects due to wave loads are dominant. As the stories of superstructures are higher, the lateral displacement responses by the semi-rigid connections increase. In case of the lateral acceleration responses, the maximum accelerations of the whole semi-rigid frame are reduced by 25% but, those of the partial semi-rigid frame are increased by 7%.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

급속한 산업화와 육상 자원의 고갈, 육지면적의 부족 등으로 세계적으로 새로운 자원의 개발과 더불어 장기적인 공간 확보를 위한 해양 개발에 관심이 증대되고 있다. 더욱이 해상호텔, 크루즈쉽, 수족관, 해양전망대, 해상스포츠 시설 등 해상 관광 및 해양성 레크리에이션에 대한 인간의 수요가 증가하면서, 해양 개발 및 이용은 계속해서 확장되어 갈 것이다.

일찍이 세계 각국은 육상에서 해상으로의 진출을 위해 해양개발에 많은 노력과 연구를 진행해 왔으며, 특히 가까운 일본의 경우 간사이 공항 계획안 및 메가플로트 공항 이용에 관한 실증적인 연구를 수행하였다. 삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라의 경우 지리적인 이점에도 불구하고 해상으로의 개발은 미비한 상태에 있으며, 또한 국내 연안역은 매립에 의해 환경 악화와 생태계 파괴 등 다양한 문제점을 일으키고 있다. 이에 친환경적이고 쾌적한 해양 개발을 위한 초대형 부유식 구조물(Very Large Floating Structure : VLFS)에 대한 기술개발이 요구되고 있다.

인간의 활동장소인 초대형 부유식 해상구조물의 상부시설은 이용자를 위해 시설의 적합한 기능성과 안전성을 반드시 확보하여야 한다. 그리고 초대형 부유식 구조물의 안전성을 확보하기 위해서는 해상이라는 특수한 환경조건의 분석을 통해 해상 특유의 하중 조건을 선정하고, 구조계획 및 상세설계시 동적해석 및 상세해석을 수행해야 한다.

VLFS의 경우 육상 구조물과 같이 지진하중의 영향을 받지는 않지만 파랑하중에 의한 영향이 크게 작용하기 때문에 해상구조물의 하부부체가 변형을 일으켜 상부구조물에 부가모멘트를 발생시키는 요인이 된다. 따라서 파랑하중에 대한 시설의 안전성을 확보하기 위해서는 파랑하중의 변화에 따른 구조물의 영향을 분석하고, 사용부재 및 접합형식 등 구조물의 다양

한 조건에 따라 구조물의 거동을 비교, 분석해야 한다.

종래의 부유식 구조물에 대한 연구는 주로 하부부체의 거동에 대해서만 이루어졌으며 상부구조물에 대한 연구는 아주 미흡한 상태로 일본의 경우 메가플로트에 대한 상부구조체의 연구가 초기 단계에 있으며, 국내의 경우는 초대형 부유식 구조물의 상부구조체에 대한 연구가 진행중에 있으나 매우 미비한 상태에 있다. 따라서 초대형 부유식 구조물 상부구조체에 대하여 파랑하중 및 구조물의 조건에 따른 구조물의 거동을 상세하게 분석하고, 상부구조체의 안전성 확보를 위한 방안을 강구해야 한다.

일반적으로 철골구조물의 보-기둥 접합부는 볼트의 경우 핀접합으로 모멘트에 대한 구속력이 없다고 가정하고 있으며 해석 및 설계시에도 편의상 모멘트 전달과 회전 구속력에 대해 강접합과 핀접합 2종류로 이상화하여 사용하고 있다. 하지만 실제의 보-기둥 접합부는 작용하는 외력에 대하여 어느 정도의 회전강성을 가지고 있기 때문에 철골골조 해석시 실제 회전강성을 고려하여 반강접 접합부에 대한 접근을 해야 하며, 그러한 접근방식은 구조물의 응답저감효과로 상부구조체의 안전성 확보를 기대할 수 있다. 또한 경제적인 측면에서도 제작비 절감을 유도할 수 있기 때문에 반강접 접합부에 대한 연구는 이루어져야 한다. 특히 반강접 접합부를 VLFS와 같이 대형부체에 적용할 경우 파랑에 의한 부가모멘트를 효과적으로 저감할 수 있을 뿐만 아니라, 더욱 안전하고 경제적인 설계를 유도할 수 있다. 그러나 파랑하중을 고려한 VLFS의 반강접 접합부 효율성 및 동적응답특성 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 초대형 부유식 구조물의 상부구조체에 파랑하중을 고려한 시간이력하중을 적용하여 강접 골조와 반강접 골조 시스템에 대한 동적해석을 수행하였다. 이를 통해 파랑하중이 상부구조물의 거동에 미치는 영향을 고찰하고 파랑하중의 진폭 및 주기, 구조물의 규모 그리고 접합부 변화에 따른 반강접 접합부의 효율성을 검토하는데 그 목적이 있다.

1.2 연구동향

초대형 부유식 구조물에 대한 연구는 일본의 경우 1995년 초대형 부유식 해양구조물에 대한 연구를 수행하여 간사이 공항¹⁾ 등 상부구조물에 대한 연구를 진행하였으며, 해양공간의 확보와 초대형 부유식 구조물에 대한 기술개발의 요구에 따라 “MEGA FLOAT PROJECT”를 수립하였다. 1995년에서 1997년에는 300m×60m×2m의 초대형 부유식 모형을 통한 실험실 증 시험을 수행하였으며, 1998년에서 2000년에는 “메가플로트의 공항이용에 관한 실증적 연구”를 수행하여 1000m×121m×3m 크기의 세계최대의 부유식 공항구조물²⁾을 제안하였다. 이는 부유식 구조물의 기초기반기술의 확립과 더불어 공항이용에 관련된 기술적 과제를 해결하는 성과를 올렸다.

국내의 경우는 1990년대에 들어 초대형 부유식 구조물에 대한 연구를 시작하여 1993년~1996년에 울산대학교 및 10개 기관에서 “초대형 부유식 해양구조물에 관한 연구” 프로젝트를 수행하였으며, 이를 통해 “초대형 부유식 해양구조물의 초기설계 지침서³⁾”를 발간하였다. 1994년~1999년에는 선박해양공학연구센터 및 한국기계연구원 주관으로 해양구조물에 대한 거동 해석 기법 개발과 기술개발에 관한 연구⁴⁾를 수행하여 1999년부터 한국해양대학교에서 해양수산부 주관의 상부구조물에 대한 동적해석기법 및 안전성 평가 등의 연구가 수행되고 있다^{5~9)}.

각형강관 외다이하프램을 이용한 반강접 접합부에 관한 연구는 지진의 영향으로 강하고 확실한 접합부를 필요로 했던 일본보다는 구미를 중심으로 보-기둥 접합부를 용접보다는 고력볼트를 이용하여 간단하게 접합하려는 시도와 함께 시작하였다. 일본의 경우 1995년 고베지진을 계기로 강접합부의 응력집중에 의한 파괴와 전체골조의 에너지흡수 능력 측면에서 반강접 골조의 유효성이 인식되기 시작하면서, 반강접 접합부에 대한 실험은 물론 이를 골조해석에 적용시키려는 연구가 활발히 진행되어졌다. 국내의 경우 1997년 건설교통부와 서울대학교 공학연구소에서 각형강관 외다이하프램에 관한 보-기둥 접합부의 단순인장실험 및 중주가력실험, 외주가력실험

힘이 이루어졌으며, 접합부의 반강접성을 예측할 수 있는 모멘트-회전각 곡선함수를 제안하여 해석결과와 실험결과와 비교 분석을 통한 연구가 많이 이루어졌다.

현재는 축적된 실험데이터를 이용해 각각의 접합모델을 주요한 설계변수에 의하여 간단하게 모멘트-회전각곡선함수를 도출하고, 이를 해석프로그램에 적용하여 접합부의 변형을 고려한 탄소성해석은 물론 실제 설계에도 적용 가능한 단계까지 와 있다. 접합부의 반강접성을 나타내는 함수들은 일찍이 가장 간단한 Linear & Bilinear 모델¹⁰⁾에서부터 Sommer¹¹⁾, Frye-Morris¹²⁾에 의한 다항식 모델, Richard Abbott 모델¹³⁾, 지수형 모델¹⁴⁾까지 여러 연구자들에 의해 제시되어 왔다. 그 중에서 철골구조의 항복경화 영역까지도 표현 가능하고 강성매트릭스를 이용한 프로그램의 적용성이 좋은 모델로 먹급수형태의 Richard Abbott 모델과 이를 단순화시켜 정리한 Kishi-Chen¹⁵⁾의 Three -Parameter 먹급부 모델 등이 최근에 많이 사용되어지고 있다.

1.3 연구범위 및 방법

초대형 부유식 구조물은 크게 하부구조물, 상부구조물, 계류시스템으로 구성되며 본 논문에서는 부체구조물과 상부구조물을 분리하여 해석하는 것을 전제로 한다. 상부구조물에 대한 동적해석을 위해 부유체의 유탄성응답 해석의 결과인 변형모드를 이용하여 시간이력하중을 산정하였으며, 산정된 하중을 상부구조물의 각각의 주각부에 입력하여 파랑하중에 의한 영향을 고려하였다.

예제구조물은 저층 구조물과 중층 구조물간의 응답분석과 더불어 반강접 접합부 적용에 따른 응답특징을 비교하기 위해 강접 골조와 각형강관 외다 이아프램 접합부를 적용한 반강접 골조를 이용하여 4경간 3층 구조물과 4경간 8층 구조물에 대하여 고유주기 및 동적거동을 분석하였다.

4경간 3층 예제구조물의 경우 반강접 접합부의 동적응답을 살펴보기 위

해 정하중(고정하중, 활하중, 풍하중), 동하중(파랑하중), 조합하중에 대한 최대모멘트 응답 및 최대수평변위 응답을 검토하였으며, 접합부 모델링은 스프링 모델과 감소단면2차모멘트를 적용한 치환부재 모델을 이용하였다. 또한, 파랑하중의 진폭 및 주기를 변화시켜 파랑하중의 불규칙적이고 가변적인 특성에 따른 구조물의 거동과 더불어 반강접 접합부의 효율성에 대하여 분석하였다.

마찬가지 방법으로 4경간 8층 예제구조물의 경우 접합부 위치에 따른 거동응답을 분석하기 위해 강접 골조와 반강접 접합부를 구조물 전체에 적용한 경우와 부분적으로 적용한 경우에 대하여 정하중, 동하중, 조합하중에 따른 최대모멘트 및 최대수평변위, 최대수평가속도 응답을 분석하였다.

상부구조물에 대한 동적해석을 위해서 Drain-2DX¹⁶⁾의 윈도용 구조해석 프로그램인 RAM-Xlinea¹⁷⁾를 이용하여 정밀 동적해석법인 시간이력해석(Time History Analysis)을 수행하였다. 동적 비선형해석이 가능한 이 프로그램은 절점에 변위시간이력을 적용할 수 있어 구조물의 각 부재에 대해서 동적응답을 분석할 수 있다. 본 연구를 수행하기 위한 연구 방법을 도식화하면 그림 1.1과 같다.

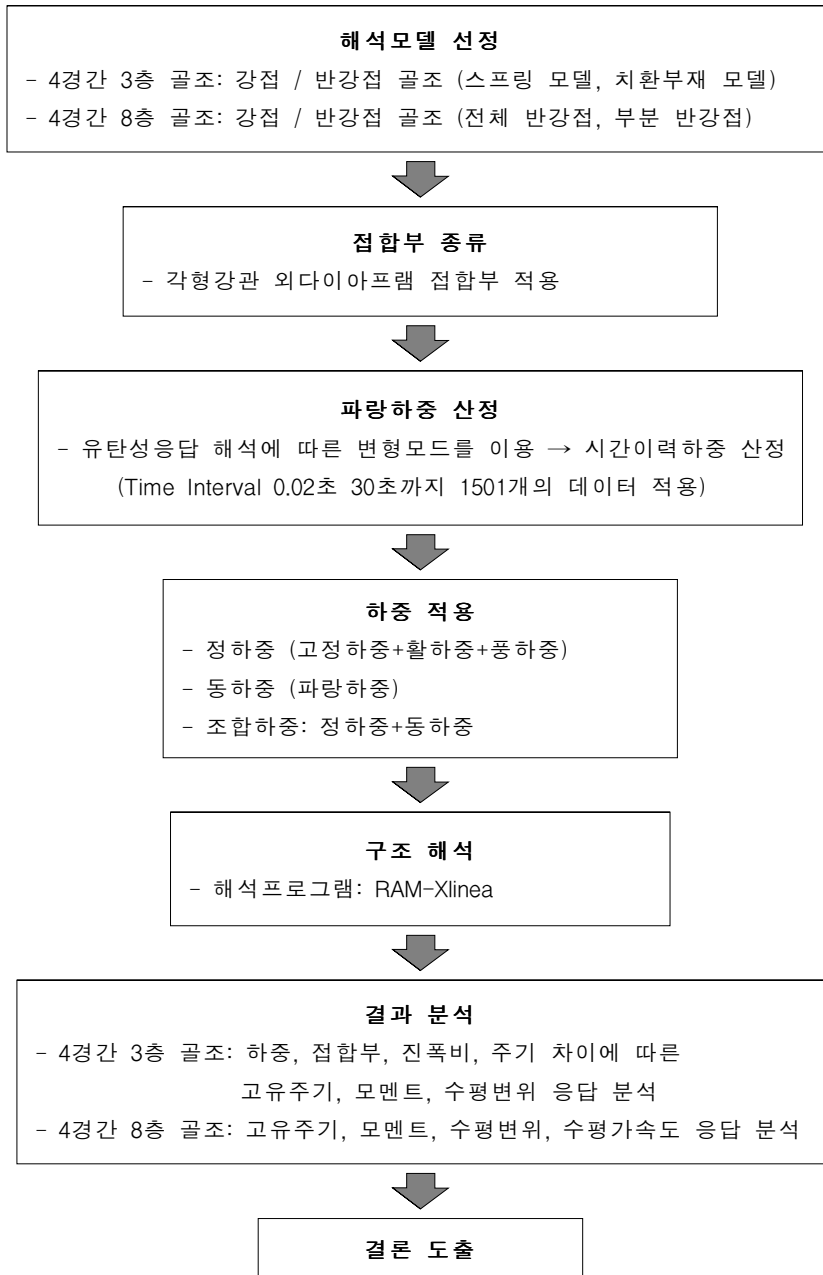


그림 1.1 연구 모식도

2. 반강접 접합부의 분류방법 및 해석모델

2.1 반강접 접합부의 개요 및 기준에 따른 분류

일반적으로 철골구조물의 보-기둥 접합부는 볼트의 경우 핀접합으로 모멘트에 대한 구속력이 없다고 가정하고 있으며 해석과 설계시에도 해석의 편의상 모멘트 전달과 회전 구속력에 대해 강접합과 핀접합 2종류로 이상화하여 사용하고 있다. 하지만 실제로 이러한 보-기둥 접합부는 작용하는 외력에 대하여 어느 정도의 회전강성을 가지고 있기 때문에 철골골조 해석시 실제 회전강성을 고려하여 반강접 접합부에 대한 접근을 해야 하며, 경제적인 측면에서도 반강접 접합부가 강접합에 비해 제작비 절감 등의 장점을 가지고 있어 이에 대한 필요성이 제기되고 있다.

보-기둥 접합부의 거동은 축력, 전단력, 비틀림에 의한 영향이 휨모멘트에 비해 그다지 크지 않기 때문에 일반적으로 그림 2.1과 같이 모멘트-회전각 관계로 나타낼 수 있다.

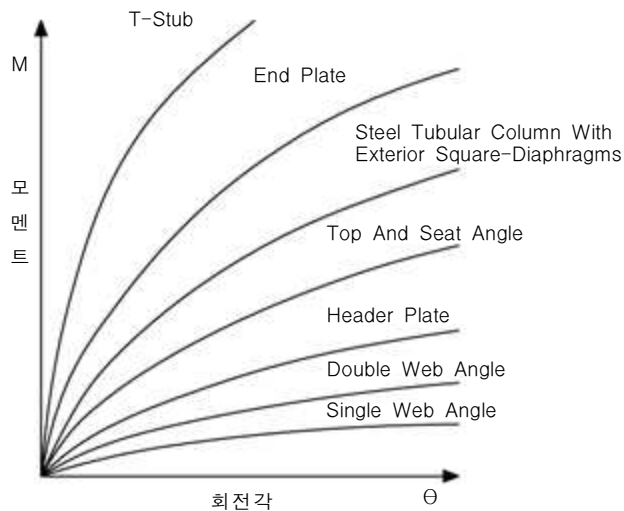


그림 2.1 반강접 접합부의 모멘트-회전각 곡선¹⁸⁾

그림에서 알 수 있듯이, 접합부의 모든 형태는 이상적인 완전 강점과 편 접합의 사이에 위치하며 모멘트-회전각 곡선은 비선형의 형태를 나타낸다. 또한, 같은 모멘트에 대하여 접합부가 유연할수록 회전각은 더 크게 나타나며, 접합부가 전달할 수 있는 최대모멘트는 접합부가 유연할수록 감소됨을 알 수 있다.

이러한 반강접 접합부의 거동을 고려한 해석이 수행되어야 하지만, 모멘트-회전거동에 대한 적절한 실험 데이터의 부족과 분류상식에 대한 연구가 미흡한 관계로 현재 널리 사용되지 못하고 있다.

철골 구조물의 접합부는 회전강성(rotation stiffness)에 따라 여러 가지 방법으로 분류될 수 있으며, 재료의 강도(strength), 강성(stiffness) 및 연성(ductility)에 따라서도 다양하게 분류되고 있다. 여기에서는 반강접 접합부를 AISC-LRFD, Eurocode, 그리고 Bjorhovde 등 각 규준에 따른 접합부 분류를 개략적으로 살펴보기로 한다.

(1) AISC-LRFD(1999) 규준에 의한 접합부의 분류

접합부의 강도에서 중요한 것은 접합부와 연결되는 보의 강도에 있다. 보의 강도보다 접합부의 강도가 큰 경우는 접합부의 연성이 중요하다. 그림 2.2에서 M_n 을 접합부의 모멘트, M_p 를 보의 소성 모멘트라고 하면, 아래와 같이 분류할 수 있다.

$M_n > M_p$: 완전강도(FS, Fully Strength)

$M_n \leq M_p$: 부분강도(PS, Partial Strength)

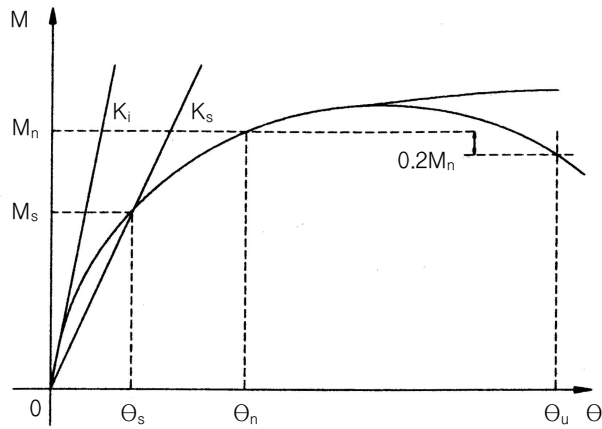


그림 2.2 AISC-LRFD에 의한 접합부의 분류¹⁹⁾

구조물의 변형이 부분구속 접합부에 집중될 때 접합부의 연성은 중요한 요소이다. 그림 2.1에서 θ_u 를 최대 모멘트의 80%가 되는 점에서의 회전각으로 하면 접합부의 연성은 아래와 같이 분류한다. 내진설계인 경우는 구조시스템에 따라 한계값이 달라진다.

$$\theta_u \geq 0.03\text{rad} : \text{연성적}$$

$$\theta_u < 0.03\text{rad} : \text{취성적}$$

사용단계에서 접합부의 초기강성 K_i 는 접합부의 응답을 적절하게 나타내지 못하는 반면, 접합부의 강성이 거의 선형인 단계에서는 할선강성 K_s 가 좀더 접합부의 응답을 잘 나타낸다. $a = K_s L / EI$ 를 접합부에 연결되는 보의 강성에 대한 접합부의 강성비로 하면 접합부의 강성도를 아래와 같이 분류할 수 있다.

$$a \geq 20 : \text{완전구속(Fully Restrained)}$$

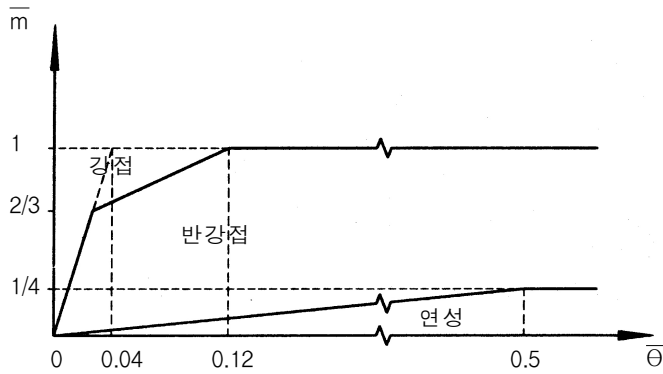
$$2 \leq a \leq 20 : \text{부분구속(Partially Restrained)}$$

$$a < 2 : \text{단순지지(Simply Support)}$$

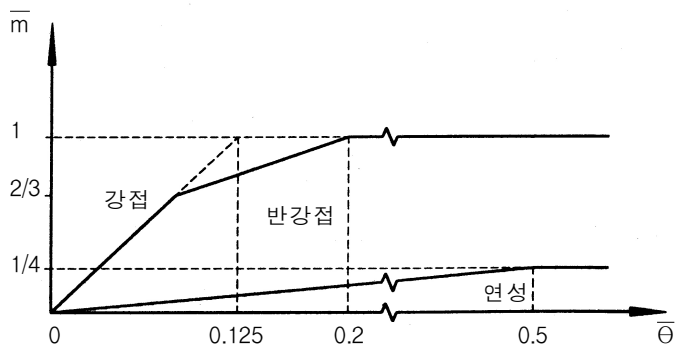
반강점을 정의하는 한계값 α 는 명확한 값이 아닌 개략적인 값이며 비가새 골조로 제한된다.

(2) Eurocode 3(1992)에 의한 분류

Eurocode 3은 접합부를 회전강성과 접합부의 극한강도에 따라 강접, 반강접, 회전단 세가지로 분류하고 있으며, 접합부의 거동이 가새 유무에 의해 수평이동이 있는 구조인지 아닌지에 따라 구분하고 있다.



(a) 비가새 골조



(b) 가새 골조

그림 2.3 Eurocode 3에 의한 접합부의 분류²⁰⁾

접합부 모멘트는 보의 소성모멘트에 의해서 무차원화 되며, 접합부 분류에 사용되는 매개변수는 식 2.1과 식 2.2와 같다.

$$\bar{m} = \frac{M}{M_p} \dots\dots\dots(\text{식 2.1})$$

$$\bar{\Theta} = \frac{\Theta}{\Theta_p} = \frac{\Theta}{L_b M_p / EI} \dots\dots\dots (\text{식 2.2})$$

여기서 M_p 는 보의 완전소성모멘트를 나타내며, Θ 는 부재간의 상대회전각, $\Theta_p = M_p / (E_b I_b / L_b)$, $E_b I_b$ 와 L_b 는 보의 휨 강성과 길이를 의미한다.

반강접과 강접의 경계는 세 개의 직선으로 이루어져 있으며, 그림 2.3에서 정의하고 있는 접합부의 분류는 다음과 같다.

(a) 비가새 골조(수평이동이 생기는 경우)

$$\bar{m} \leq 2/3 \quad : \quad \bar{m} = 25\bar{\Theta}$$

$$2/3 < \bar{m} \leq 1.0 \quad : \quad \bar{m} = \frac{25\bar{\Theta} + 4}{7}$$

(b) 가새지지 골조(수평이동이 구속된 경우)

$$\bar{m} \leq 2/3 \quad : \quad \bar{m} = 8\bar{\Theta}$$

$$2/3 < \bar{m} \leq 1.0 \quad : \quad \bar{m} = \frac{20\bar{\Theta} + 3}{7}$$

강접과 반강접의 경계선에서의 강성은 접합부의 하중전달 감소가 오일러 좌굴하중 5%를 넘지 않도록 하는 것이고, 강도는 보의 완전 소성 모멘트가 경계이다. 단 접합부의 모멘트 지지력이 $1.2M_p$ 이상인 경우는 회전성능을 검토할 필요가 없다. 이는 접합부의 극한모멘트가 연결부재의 극한모멘트보다 클 때 소성한지가 부재 내에서 생성되기 때문이다.

(3) Bjorhovde(1990)에 의한 분류

접합부 형태에 따라 산정된 기준길이와 극한 모멘트를 실험결과로부터 구하면, 접합부의 회전강성과 보의 휨강성이 같거나 강한 접합부일수록 보의 길이를 짧게 하여야 한다. 강접 접합부와 반강접 접합부의 경계를 나타내기 위해 그림 2.4와 같이 보춤 d 를 이용하여 보의 기준길이 l_e 를 $2d$ 로 하고, 반강접 접합부와 연성 접합부는 $10d$ 로 하였다.

접합부 극한 모멘트의 경계는 $0.2M_p$ 와 $0.7M_p$ 로 하며, 강접 접합부영역에서 파괴가 일어날 경우, 접합부의 극한모멘트 성능 M_p 값보다 경계영역 값이 클 수 있다. 접합부 강성과 연성영역에 따라 경계를 추가하여 직선으로 간략화 시켰다. 여기서 $\bar{m} = M/M_p$, $\bar{\theta} = \theta/\theta_p = \theta/\{EI/(5d)M_p\}$ 를 의미한다. 이 과정은 보단부의 모멘트비 0.2와 0.7, 그리고 접합부 형태별 초기강성인 $EI/10d$ 와 $EI/2d$ 에 근거해서 얻어지며, 연성경계를 나타내는 직선에 있어서, 회전 성능 값은 무차원 회전축에 대해서 2.7이고, 모멘트가 M_p 인 부분에 대해서는 1.2로 하였다.

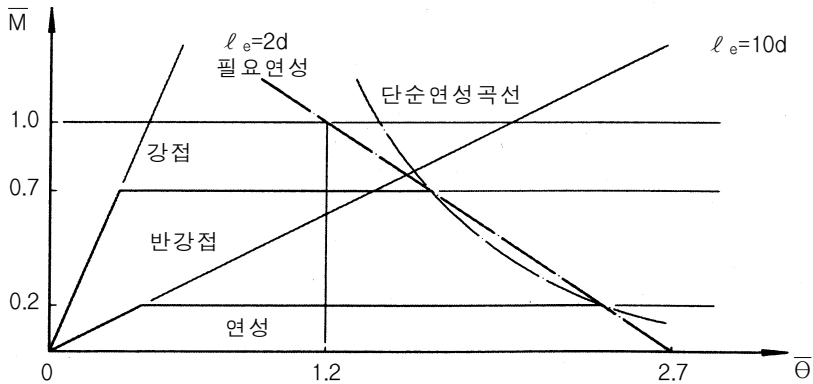


그림 2.4 Bjorhovde에 의한 분류²¹⁾

2.2 반강접 접합부 모멘트-회전각 해석모델

초대형 부유식 구조물의 상부구조물은 기초가 땅이 아닌 대형부체에 지지되기 때문에 과랑하중의 영향을 크게 받는다. 대형부체의 경우 그 두께가 매우 얇기 때문에 과랑하중에 의해 탄성거동을 하게 되며, 이러한 변형이 상부구조물의 주각부로 전달되어 구조물에 영향을 끼친다. 이러한 과랑하중은 그 형태가 매우 불규칙적이고 파향이 다양하게 전달되므로, 주각부가 H형강과 같은 개단면 부재일 경우 좌굴과 같은 많은 문제점을 발생시키며, 더욱이 초대형 부유식 구조물과 같이 대형 공간 확보를 위해 스펜간 거리가 클 경우 단면 성능이 우수하고, 휨에 대한 축 방향성이 없는 부재가 유리하다.

각형강관은 H형강과 같은 개단면 부재에 비해 단면 2차반경 및 단면계수가 크기 때문에 좌굴에 강하고, 휨에 대한 축 방향성이 없는 장점을 가지고 있다. 또한 원형 강관에 비해 시공이 용이하며, 역학적 거동에 대한 이해가 명료하고, 마감이 용이할 뿐만 아니라 공간 활용성도 좋다. 하지만, 각형강관의 접합부 처리가 까다롭기 때문에 시공과 제작이 어려운 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 기둥-보 접합부를 보강하기 위한 다양한 방법이 개발되고 있으며, 그 중 가장 많이 사용되는 것이 다이아프램 접합 형식이다. 다이아프램 형식의 하나인 외다이아프램은 강재량은 많지만, 용접량이 적고 용접이 쉬우며 균열 발생 후 변형 능력이 크다는 장점을 갖는다.

본 논문에서는 반강접 접합부로 각형강관-H형강보로 접합된 각형강관 외다이아프램 접합부²⁴⁾를 적용하였다. 각형강관 외다이아프램 접합부는 보 플랜지 접합 위치에 따라 C-TYPE, E-TYPE, S-TYPE으로 나눌 수 있다. C-TYPE은 보 중심선과 강관 중심선이 일치하는 경우이며, E-TYPE은 보 단부면과 강관 웹면이 일치하는 경우이다. 그리고 S-TYPE은 보 단부면과 다이아프램 단부면이 일치하는 경우로 그림 2.5에 나타내었다.

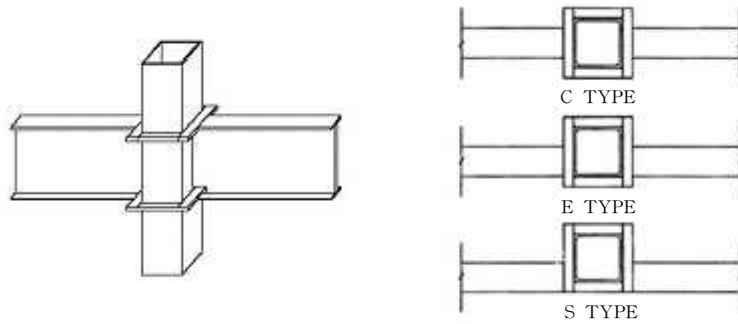


그림 2.5 강관과 다이아프램의 접합 형식²⁵⁾

본 모델에서 적용한 반강접 접합부는 비충전 강관의 중앙접합타입(C-TYPE)에 대한 각형강관 외다이아프램 접합부로, Three-Parameter Power Model을 근간으로 소성강성을 초기강성의 1/50로 처리하여 접합부의 변형을 나타낸 식을 적용하였다²⁶⁾. Kishi-Chen에 의해 제안된 Three-Parameter Power Model은 초기접합부 강성, 접합부 모멘트 극한강도, 형상계수 등 세가지 변수를 포함하고 있으며 식 2.3과 그림 2.6과 같이 나타내어진다.

$$M = \frac{R_{ki} \Theta_r}{[1 + (\Theta_r / \Theta_0)^n]^{1/n}} \dots\dots\dots (식 2.3)$$

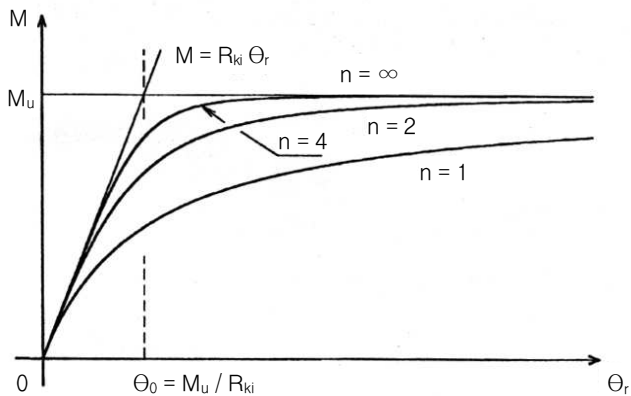


그림 2.6 Three-Parameter Power Model¹⁵⁾

여기서 $\Theta = \Theta_r / \Theta_0$, $\Theta_0 =$ 기준소성회전각 ($= M_u / R_{ki}$), $M_u =$ 접합부의 모멘트 극한강도, $R_{ki} =$ 초기 접합부의 강성, $n =$ 형상계수이다. 형상계수 n 이 작을 경우 초기 강성에 최대 모멘트에 이르기까지 완만한 곡선을 나타내며 초기 강성이 큰 경우에는 기울기가 큰 곡선을 나타낸다.

각형강관 외다이아프램 접합부 회전거동에 관한 식은 식 2.4와 같으며, 그림 2.7은 각형강관 외다이아프램 접합부의 모멘트-회전각 곡선함수를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 M(\Theta) &= \frac{R_{ki} \cdot \Theta}{\left(1 + \left|\frac{\Theta}{\Theta_0}\right|^n\right)^{1/n}} + R_p \cdot \Theta \\
 &= \frac{M_0 \cdot \left|\frac{\Theta}{\Theta_0}\right|}{\left(1 + \left|\frac{\Theta}{\Theta_0}\right|^n\right)^{1/n}} + \frac{R_{ki}}{50} \cdot \Theta \quad \dots\dots\dots (\text{식 2.4})
 \end{aligned}$$

여기서, $M_0 =$ 기준모멘트, $\Theta_0 =$ 기준회전각, $n =$ 형태결정계수, 그리고 $\Theta_0 = M_0 / R_{ki}$ 이다.

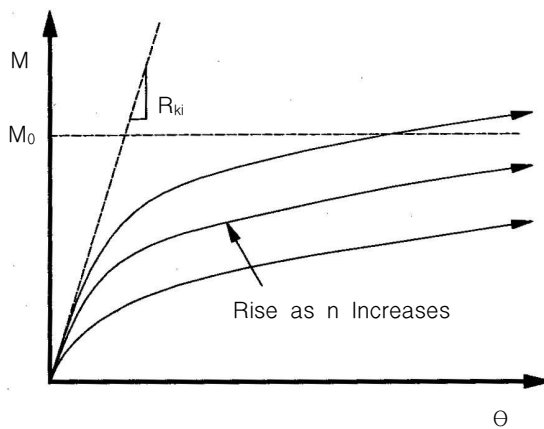


그림 2.7 각형강관 외다이아프램 접합부의 모멘트-회전각 곡선함수⁶⁾

그림 2.7과 같은 모멘트-회전각 곡선식에서 기준모멘트(M_0)는 식 2.5와 같이 단순인장실험에서 항복선 이론을 이용하여 각형강관의 인장축 보플랜지의 종국상황을 예측하는 이론식에 의한 예측 가능한 값인 종국인장내력(P_{cal})에 보충을 곱한 값(M_{cal})과 보의 전소성모멘트(M_p)에 변형경화를 고려해 10%로 증가시킨 값 중에 작은 값을 M_0 로 사용하였다²⁶⁾.

$$M_0 = \text{MIN} [1.1 \times M_p, M_{cal}(= P_{cal} \times H_b)] \dots\dots\dots (\text{식 } 2.5)$$

여기서, P_{cal} 는 인장축 보플랜지에 의해 강관기둥에 항복하는 상황을 간략화하여 정리한 식 2.6을 이용하였다.

$$P_{cal} = 4M_p \left(\frac{b_c}{x} + \frac{2x}{m} + \frac{t_s}{m} \right) + \frac{2\sigma_{us} t_s h_s}{\sqrt{3}} \dots\dots (\text{식 } 2.6)$$

$$\text{단, } M_p = \frac{\sigma_{yc} t_c^2}{4}, \quad x = \sqrt{\frac{b_c m}{2}}, \quad m = \frac{b_c - b_f}{2}$$

접합부의 초기강성 및 형태결정계수는 식 2.7과 식 2.8에 보듯이, 재료의 강도에 그다지 큰 영향을 받지 않으며 플랜지 폭과 다이아프램의 폭과 같은 접합부의 기하학적 치수들에 의한 영향이 크다.

$$R_{ki} = 0.4102 \times b_c^{1.080} \times t_c^{0.118} \times b_f^{1.335} \times h_s^{0.618} \times t_s^{0.364} \dots\dots (\text{식 } 2.7)$$

$$n = 1.865 \times b_c^{-0.624} \times t_c^{-0.370} \times b_f^{0.037} \times h_s^{0.622} \times t_s^{0.876} \dots\dots (\text{식 } 2.8)$$

여기서, b_c = 강관의 폭, t_c = 강관의 두께, b_f = 보 플랜지의 폭, h_s = 직각 외다이아프램의 폭, t_s = 직각 외다이아프램의 두께, σ_{us} = 직각 외다이아프램의 최대응력, σ_{yc} = 강관의 항복응력이다.

3. 반강접 접합부의 시간이력해석

반강접 접합부의 시간이력해석을 위해 2차원 비탄성해석 프로그램인 Drain-2dx를 사용하였다. 비선형 정적, 동적해석이 가능한 이 프로그램은 임의의 절점에 동적변위하중 입력이 가능할 뿐만 아니라, 동적해석시 시간간격의 변경 및 오차한계 규정이 가능하다. 또한 단계별 시간이력해석을 할 경우 중간에 하중평형 조건과 에너지 평형조건에 대한 보정을 통해 정확한 해를 구할 수가 있다.

본 장에서는 Drain-2dx를 기본으로 비탄성 동적해석에서 모멘트-회전각 및 모멘트-축력, 부재의 변형에 대한 상관관계를 서술하고, 반강접 접합부에 대한 모델 형태 및 거동 특징에 대하여 기술한다.

3.1 모멘트-회전각 특징

접합부에 대한 실험적 해석결과에 따르면 반복하중을 받는 접합부는 실제적으로 볼트, 접합부재 그리고 구성부재 등의 순차적인 항복으로 비선형적으로 거동을 한다. 특히 접합부가 연성적일 경우 부재의 휨응력을 포함하여 힘의 분배, 동적응답 등이 구조물 전반에 걸쳐 변하게 된다.

이러한 반강접 구조물의 거동에 대한 해석을 위해서는 반복하중에 의한 접합부의 거동모델이 정의되어야 하며, 일반적으로 반강접 접합부의 거동 모델은 모멘트-회전각($M-\theta$)관계로 나타내어진다. 그 이유는 대개의 경우 반강접 접합부는 축력, 전단력, 휨모멘트 그리고 비틀림과 같은 힘을 받게 되지만, 평면 해석에서는 면내하중과 변형만을 고려하기 때문에 비틀림에 대한 영향은 무시하며, 축방향 변형과 전단변형은 휨변형에 비해서 그다지 크지 않기 때문이다.

모멘트-회전관계는 그림 3-1(b)에서와 같이 부재의 강도와 휨모멘트가 일정하게 유지될 경우 변형경화 모델에서 부재 자체의 모멘트-곡률($M-\Phi$)

관계와 동일한 형상을 갖는다. 이 경우 곡률과 회전은 직접 비례한다. 그러나 휨모멘트와 강도가 변하면 곡률과 회전은 더 이상 비례하지 않으며 그림 3-1(c)에서와 같이 모멘트-회전과 모멘트-곡률의 변화는 차이를 나타낸다.

부재의 양단에서 소성모멘트는 양의 값과 음의 값으로 서로 다르게 규정할 수 있으며 항복시의 축력과 휨모멘트의 상관관계는 근사적으로 고려할 수 있다. 부재면에 작용하는 정적하중은 고정단 하중으로 치환하여 고려될 수 있으며 2차 효과는 부재의 축방향력에 의한 단순 기하학적 강성을 포함하여 근사화된다.

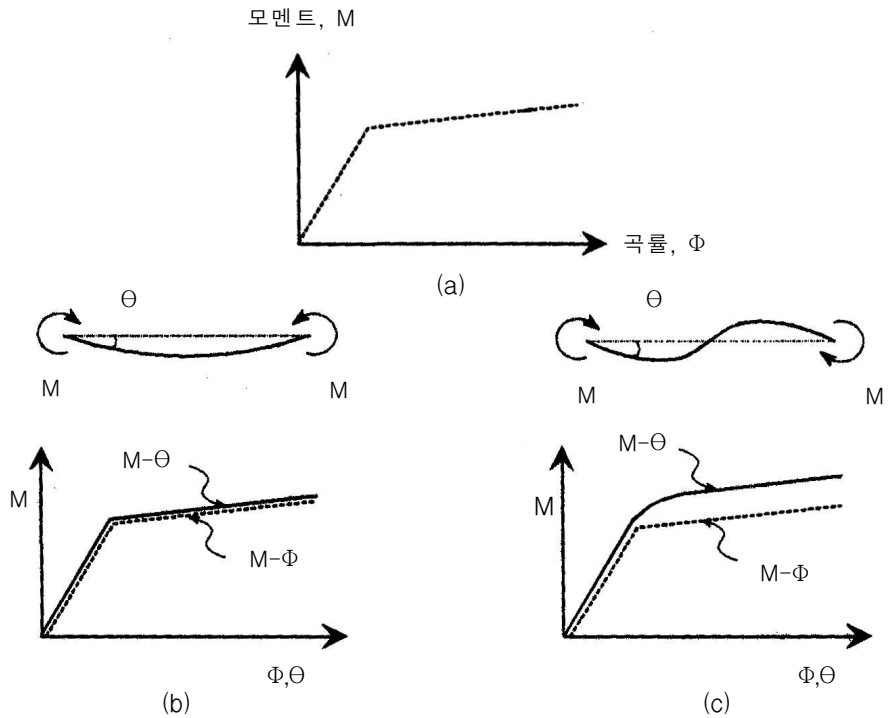


그림 3.1 부재의 모멘트-회전관계(M- θ)

3.2 모멘트-축력 상관관계

모멘트-축력의 상관관계는 부재의 종류에 따라 그림 3.2에서와 같이 3가지로 정의할 수 있다.

- ① 보형 (형상코드 : 1, 그림 3.2(a)) - 항복은 휨모멘트에 의해서만 영향을 받으며, 축력이 작거나 무시할 수 있을 경우에 이 상관관계를 적용한다.
- ② 철골 기둥형 (형상코드 : 2, 그림 3.2(b)) - 철골 기둥에만 적용한다.
- ③ 콘크리트 기둥형 (형상코드 : 3, 그림 3.2(c)) - 콘크리트 기둥에만 적용한다.

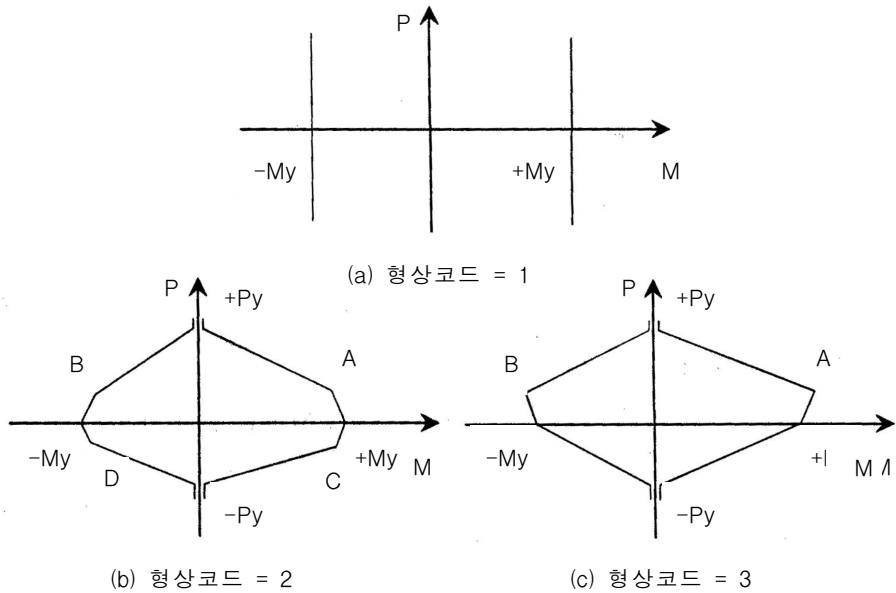


그림 3.2 항복상관곡선면

축력과 휨모멘트를 조합하여 구한 값이 항복면 내에 있으면 그 부재의 단면은 탄성으로 가정하며 축력과 휨모멘트를 조합하여 구한 값이 항복면 경계선에 있거나 밖에 있으면 소성힌지가 발생하는 것으로 가정한다. 축력

과 휨모멘트를 조합하여 구한 값이 항복면 밖에 있게 되면, 다음 단계에서 보정하중(corrective loads)을 적용하여 수정한다. 이러한 과정은 항복 후 축방향 변형과 휨변형이 상호 작용하므로 반드시 옳다고 할 수 없다. 그래서 축방향 강성은 변하지 않고 휨강서만 변하는 경우에는 이러한 과정을 적용할 수 없다.

임의의 하중 증분 단계에서 축력과 휨모멘트를 조합하여 구한 값이 항복면 내의 값에서 항복면 밖의 값으로 변하게 되면(t 점에서 $t+\Delta t$ 점으로 변하게 되면) 평형관계를 만족시키기 위해 그림 3.3(a)에서처럼 수정해야 한다. 축방향 강성은 변하지 않으므로 후속 단계에서 소성힌지가 형성될 때의 축력과 휨모멘트의 조합은 임의의 단계에서 그림 3.3(b)에서처럼 항복선으로 부터 이동하게 된다. 그래서 평형조건에 대해 수정이 이루어진다.

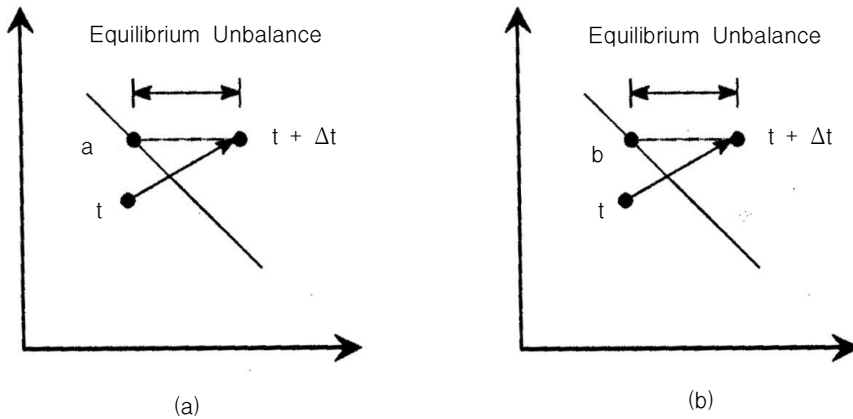


그림 3.3 항복면 초과시 평형조건에 의한 수정

기동형 상관관계를 가지는 부재에서 축력의 항복(P_V)은 모멘트가 0일 경우이므로 실제로는 축력이 항복값을 초과할 수 없지만, 계산에 의해 항복을 초과하는 축력이 계산될 수도 있다. 그러므로 축력이 항복값을 초과하는 경우 이 때의 항복 모멘트는 0으로 가정한다.

3.3 부재의 변형

보-기둥 부재는 축방향 변형, 양단에서의 휨회전 등 3가지 형상의 변형을 나타낸다. 그림 3.4에서와 같은 변형과 변위 증가에 따른 변위의 변환행렬은 식 3.1과 같다.

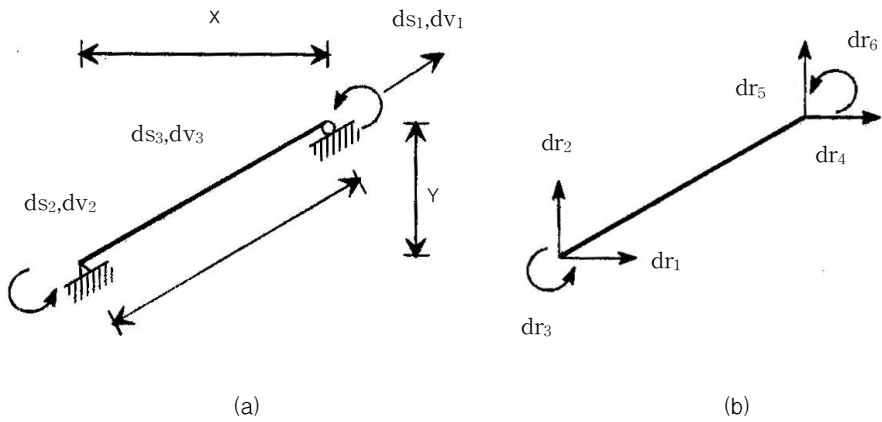


그림 3.4 부재의 변형과 변위

$$\begin{Bmatrix} dv_1 \\ dv_2 \\ dv_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{X}{L} & -\frac{Y}{L} & 0 & \frac{X}{L} & \frac{Y}{L} & 0 \\ -\frac{Y}{L^2} & \frac{X}{L^2} & 1 & \frac{Y}{L^2} & -\frac{X}{L^2} & 0 \\ -\frac{Y}{L^2} & \frac{X}{L^2} & 1 & \frac{Y}{L^2} & -\frac{X}{L^2} & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dr_1 \\ dr_2 \\ dr_3 \\ dr_4 \\ dr_5 \\ dr_6 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(\text{식 3.1})$$

여기서, X, Y = 변형전 부재의 투영거리, L = 변형전 부재의 길이, dv_1 = 부재의 축방향 변형 벡터, $dv_{2,3}$ = 양단부 휨회전 변형 벡터이다.

소성힌지는 부재의 비탄성 성분의 모멘트가 항복에 도달하였을 경우 형성되며 비탄성 성분에는 힌지가 형성되지만 탄성성분은 변화하지 않는다.

이 때 휨소성 변형은 소성힌지의 회전량으로 평가한다.

부재 전체의 휨회전 dv_2, dv_3 가 증가할 때 소성힌지에서의 회전량의 증가 dv_{p2}, dv_{p3} 는 식 3.2와 같이 표현된다.

$$\begin{Bmatrix} dv_{p2} \\ dv_{p3} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dv_2 \\ dv_3 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (\text{식 3.2})$$

여기서, A, B, C, D의 값은 표 3.1과 같다.

표 3.1 소성힌지의 형성에 따른 강성계수 변화²⁷⁾

항복 조건	A	B	C	D
양단 탄성	0	0	0	0
i 단 소성힌지	1	1/2	0	0
j 단 소성힌지	0	0	1/2	1
양단 소성힌지	1	0	0	1

힌지의 회전증가량의 부호가 휨모멘트와 부호와 반대로 되면 그것은 하중재하를 의미하며 이 때 비탄성 축방향 변형은 발생하지 않는 것으로 가정한다. 그러므로 축력-휨모멘트의 상관효과를 고려한 근사과정만이 해석에 포함되며 실제 적용시에 상당한 합리성을 가지고 있다.

3.4 반강접 접합부 모델의 특징

반강접 접합부의 동적거동을 분석하기 위하여 Drain-2dx의 Simple Connection Element(semi-rigid connection) 요소를 이용하여 스프링 모델을 적용하였다. Semi-rigid Connection요소의 경우 보-기둥 접합부에서 발생하는 회전각 변화를 구조응답에 반영할 수 있으며, 특히 철골 구조물에서 판넬존 변형에 대하여 나타낼 때 사용되어 진다.

구조물에 반강접 접합부를 적용하기 위해서는 반강접 접합부가 위치할 곳에 동일 좌표(zero-length element)의 **I**, **J** 절점을 위치하여야 한다. 접합부는 그림 3.5와 같이 회전스프링과 변위스프링으로 모델링이 가능하며, 변위스프링은 수평·수직방향으로는 연결될 수 있으나, 경사진 사선방향으로는 모델이 불가능하다.

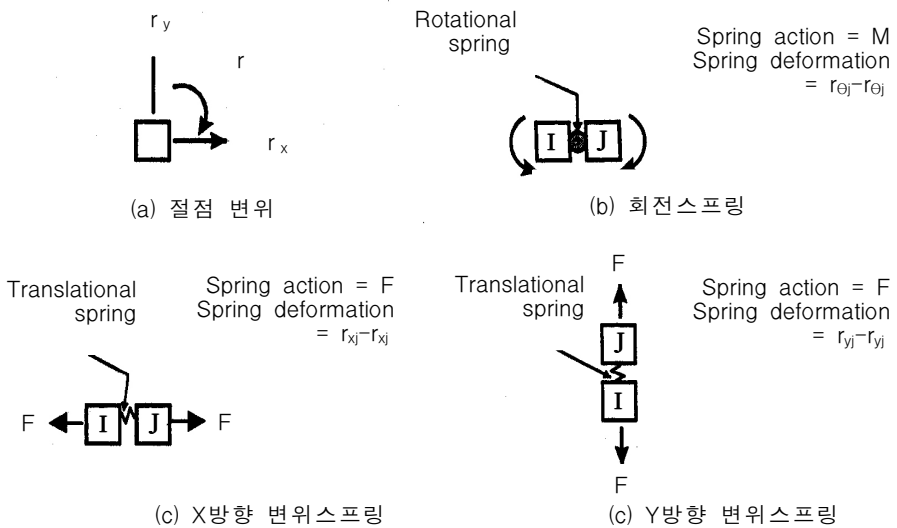
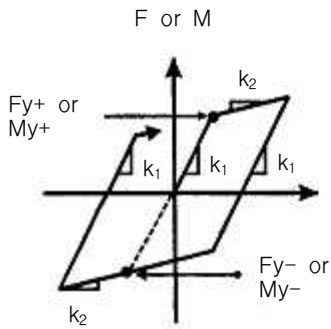


그림 3.5 반강접 접합부 모델¹⁶⁾

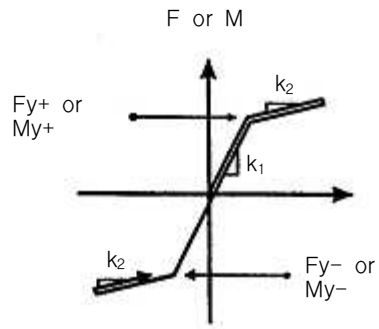
스프링 모델은 그림 3.6과 같이 탄성·비탄성 거동 분석이 가능하며, 스프링 부재를 병렬적으로 배치함으로써 더욱 복잡한 모드의 거동 분석도 가능하다.

탄성코드에 따른 반강접 접합부의 거동을 나타내면 다음과 같다.

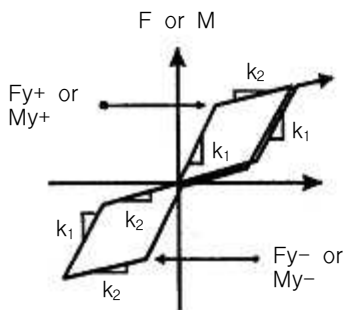
- ① Unload inelastically (탄성코드 : 0, 그림 3.6(a))
- ② Unload elastically (탄성코드 : 1, 그림 3.6(b))
- ③ Unload inelastically with gap (탄성코드 : 2, 그림 3.6(c))



(a) 탄성코드=0



(b) 탄성코드=1



(c) 탄성 코드=2

k_1 =initial stiffness.
 k_2/k_1 =strain hardening ratio

Yield code is as follows:
 =0 when $k=k_1$
 =1 when $k=k_2$ and element is yielding
 =2 when $k=k_2$ and gap is open

그림 3.6 반강접 접합부의 거동¹⁶⁾

4. 적용 예제 구조물의 개요 및 특성

하부부체의 파랑하중에 의한 상부구조물의 동적 영향을 분석하기 위하여 상부구조물의 주각부 지점에 유탄성응답에 의해서 산정된 변위시간이력을 작용시키고 더불어 시간지연 조건을 적용시켜 정하중, 파랑하중, 조합하중에 의한 상부구조물 동적응답특성을 검토한다.

예제 구조물로는 4경간 3층 구조물과 4경간 8층 구조물을 선정하였다. 4경간 3층 구조물의 경우 강접 구조물과 스프링 모델 및 치환부재 모델²⁸⁾을 적용한 반강접 구조물을 이용하여 동적응답을 검토하였으며, 4경간 8층 구조물의 경우는 강접 구조물과 반강접 접합부를 구조물 전체에 적용한 경우와 부분적으로 적용한 경우로 나누어 분석하였다.

4.1 적용 예제 구조물

4.1.1 4경간 3층 예제 구조물

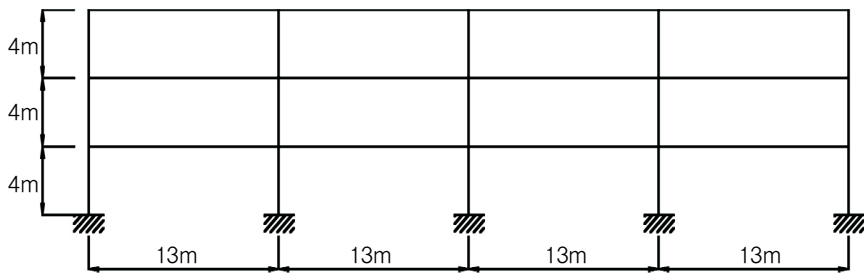
예제구조물은 층고 4m, 스패น 13m의 4경간 3층으로 강접인 경우와 스프링 모델과 치환부재 모델을 적용한 반강접 구조물을 이용하였다. 보단면은 H형강인 H 800×300×14×26, 기둥단면은 각형강관인 □ 700×700×19로 각각의 단면 성능은 표 4.1과 같으며, 적용모델은 그림 4.1에 나타내었다.

표 4.1 부재 성능

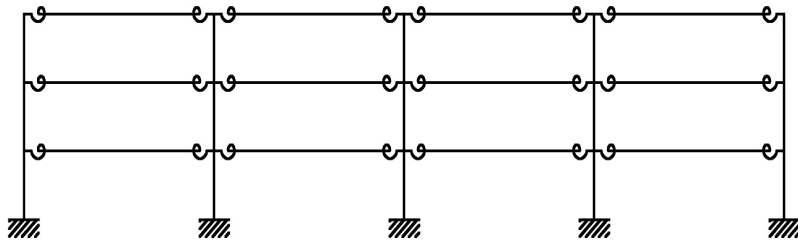
부재	부재 단면	단면 성능
보	H 800×300×14×26	A=261cm ² I=282600cm ⁴ S=7064cm ³
기둥	□ 700×700×19	A=518cm ² S=11400cm ³ r=27.81cm
재료	SM 490(항복강도: 324 Mpa, 영계수: 2.1×10 ⁵ Mpa)	

하부부체의 파랑하중에 의한 영향을 상부구조물에 동적하중으로 입력하기 위해서 Drain-2DX¹⁶⁾의 윈도용 구조해석 프로그램인 RAM-Xlinea¹⁷⁾를 사용하였다.

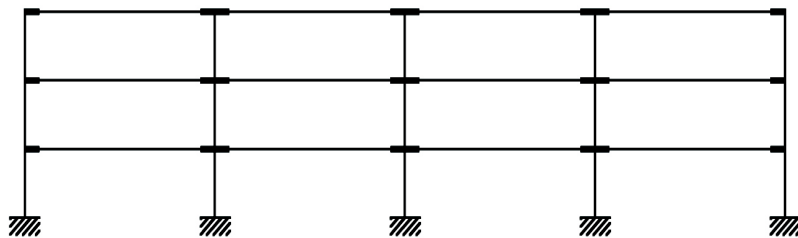
강접 구조물의 경우 기둥과 보부재는 Drain-2DX의 TYPE 2 (Plastic Beam-Column Element)를 적용하였으며, 반강접구조물의 스프링 모델의 경우 반강접 거동을 고려하기 위해 TYPE 4(Simple Connection Element)를 양단부에 적용하였다. 치환부재의 경우는 접합부 양단부에 스프링요소 (TYPE 4) 대신에 기둥-보 요소(TYPE 2) 요소로 치환하여 감소단면2차모멘트²⁹⁾(I_{iR})를 적용하였다.



(a) 강접 구조물



(b) 스프링 모델(반강접)



(c) 치환부재 모델(반강접)

그림 4.1 4경간 3층 예제구조물

반강접 접합부를 가지는 구조물의 사용성평가지에는 탄성해석을 수행한다. 탄성해석시에 스프링 모델 대신에 치환부재를 이용할 경우 감소단면2차모멘트를 이용하여 반강접 효능을 간단히 살펴볼 수 있으며, 스프링모델 기능이 없는 일반 구조해석 프로그램에서도 반강접 구조물의 거동을 파악할 수 있다.

그림 4.2는 감소단면2차모멘트의 치환부재를 나타내며 치환부재의 길이(Element length)는 강관 폭의 1/2을 적용하였다. 감소단면2차모멘트(I_{iR})는 스프링모델의 동적응답해석을 통해 구할 수 있으며, 스프링의 초기강성과 치환부재의 재료 및 기하학적 조건에 의한 관계식은 식 4.1~2와 같다³⁰⁾.

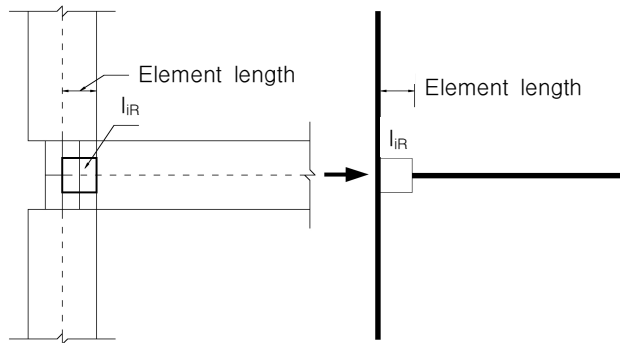


그림 4.2 감소단면2차모멘트 치환부재²⁸⁾

$$R_{ki} = I_{iR} \times \alpha = \frac{4EI}{L} \times \frac{v}{1-v} = \frac{4EI}{L} \times \beta \quad \dots\dots (\text{식 4.1})$$

$$I_{iR} = \frac{4EI}{L} \times \frac{\beta}{\alpha} = I \times \gamma \quad \dots\dots\dots (\text{식 4.2})$$

$$\text{단, } \frac{v}{1-v} = \beta, \quad \gamma = \frac{4E}{L} \times \frac{\beta}{\alpha}$$

여기서 R_{ki} = 스프링 모델의 접합부 초기강성, I = 단면2차모멘트, I_{iR} = 감소단면2차모멘트, $\beta \cdot \gamma$ = 치환부재의 매개변수, v = 접합부강성변수 ($0 < v < 1$) 이다.

4.1.2 4경간 8층 예제구조물

예제구조물은 층고 4m, 스패น 13m의 4경간 8층 구조물로 강접 구조물과 반강접 접합부를 구조물 전체에 적용한 경우와 부분적으로 적용한 경우로 나누어 분석하였다. 부분 반강접 골조의 경우 내부경간(2,3경간)의 양단부에는 반강접 접합부를 적용하고 외부경간(1,4경간)의 양단부에는 강접 접합부를 적용하였다. 보단면 및 기둥단면은 4경간 3층 구조물과 동일하게 적용하였으며, 적용모델을 도시하면 그림 4.3과 같다.

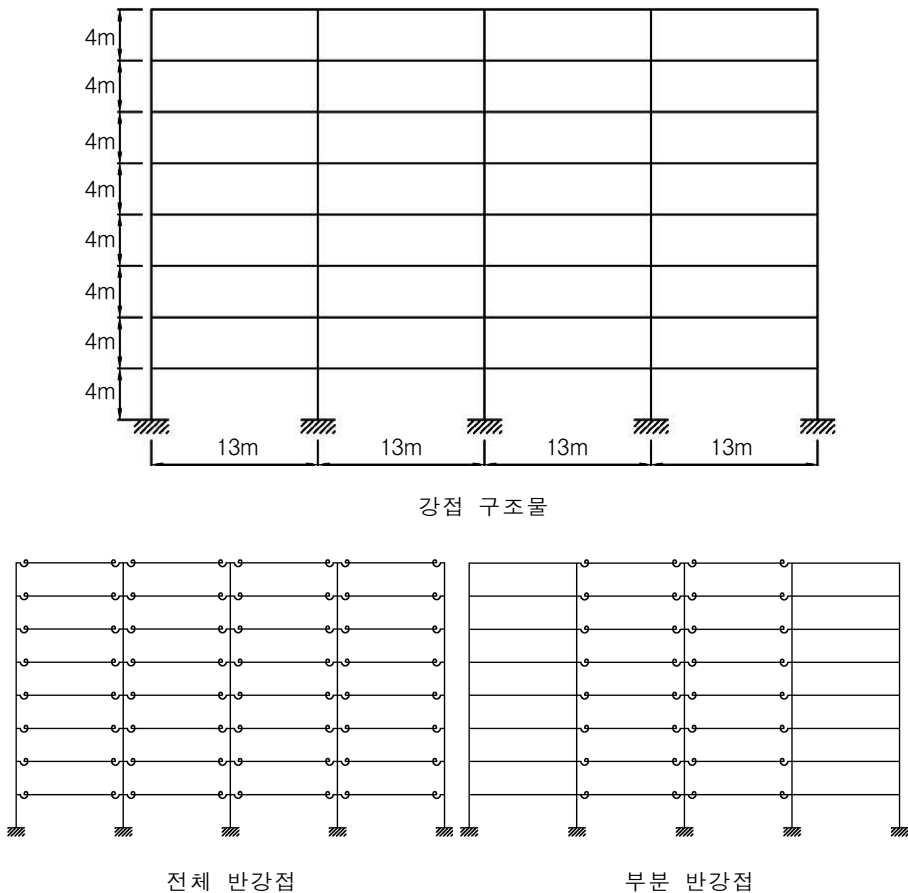


그림 4.3 4경간 8층 예제구조물

4.2 각형강관 외다이아프램 접합부의 적용치수 및 변수

구조물에 적용된 각형강관 외다이아프램 접합부를 그림 4.4에 나타내었으며, 사용된 부재치수 및 적용변수값은 표 4.2와 같다. 그림 4.5는 각형강관 외다이아프램 접합부의 모멘트-회전각 곡선을 나타낸다.

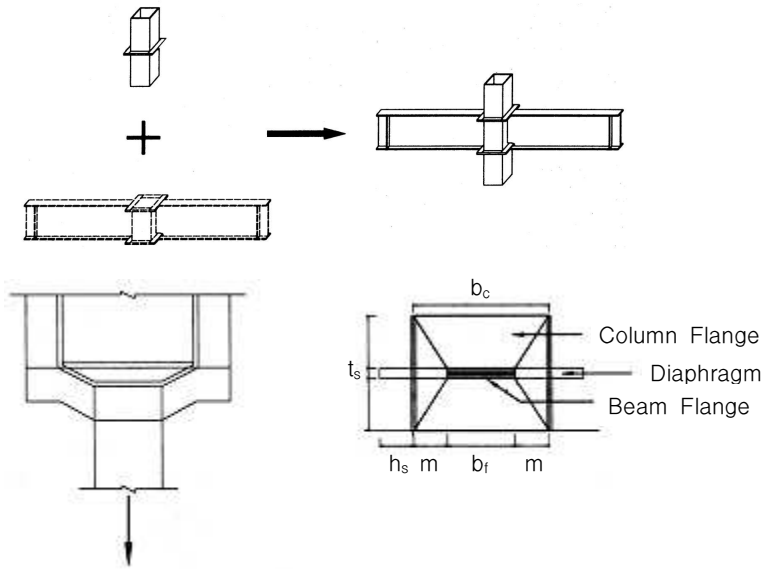


그림 4.4 각형강관 외다이아프램 접합부²⁶⁾

표 4.2 각형강관 외다이아프램 부재치수 및 적용변수

부재 치수(cm)				적용변수	
B_c	70	B_s	7.5	M_0	1991 kNm
t_c	1.9	t_s	1.8	R_{ki}	187719 kNm/rad
B_f			30	n	0.71

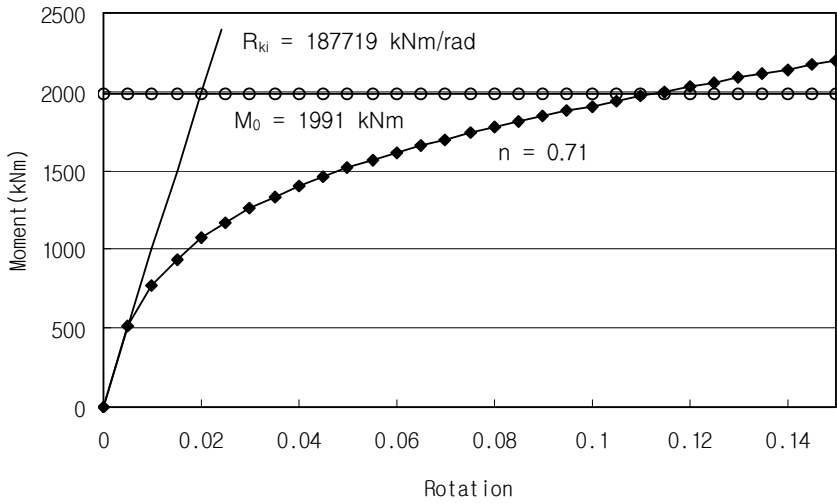


그림 4.5 각형강관 외다이아프램 접합부 모멘트-회전각 곡선

본 논문에서는 각형강관 외다이아프램의 특성을 해석프로그램에 적용시키기 위해 반강접 접합부의 모멘트-회전각 곡선을 이선형(bilinear) 모델로 변환하여 사용하였다.

치환부재 모델을 적용한 반강접 접합부의 경우 동적거동을 분석하기 위해 표 4.3과 같은 적용변수값을 적용하였다.

표 4.3 치환부재 모델의 적용변수

R_{ki}	187719 kNm/rad	β	1.015
I	0.002920 m ⁴	γ	0.158
I_{iR}	0.000460 m ⁴	ν	0.504

4.3 하중 산정

초대형 부유식 구조물에서는 육상건물과는 달리 지진하중을 받지 않는 대신 파랑하중의 영향을 크게 받기 때문에 하중 산정시 이를 고려해야 한다. 하중산정은 고정하중, 활하중, 풍하중을 고려하여 정하중, 동하중, 그리고 조합하중 세 가지로 나타내었다.

4.3.1 정하중

정하중은 고정하중 및 활하중, 풍하중의 조합으로 나타내었다. 고정하중은 구조물 자체의 무게와 구조물에 지속적으로 작용하는 하중으로, 구조체를 구성하는 골조하중 및 마감재, 칸막이, 조적벽체, 고정기계 설비시설 등과 같이 구조물에 장기적으로 작용하는 하중들을 말하며, 하중의 성격상 장기하중으로 취급하게 된다. 활하중은 넓은 의미로 고정하중 이외의 모든 하중으로 볼 수 있지만 일반적으로 구조물 내부에 실리게 되는 점유물의 무게를 말하며, 고정하중과는 달리 가변성이 크고, 시간과 위치에 따라서 변화하는 특성을 갖는다. 본 논문에서 적용된 고정하중은 건물의 마감, 콘크리트 토핑, 파티션, 그리고 천장의 하중을 고려하여 표 4.4와 같이 4.64×10^3 pa을 적용하였다.

표 4.4 고정하중 산출근거

구성 요소	하중 (pa)
마감(t=30mm)	0.294×10^3
데크플레이트위 콘크리트 토핑	4.0×10^3
파티션	0.147×10^3
천장	0.196×10^3
Total	4.64×10^3

활하중은 일본 건축물하중지침³¹⁾에 제시된 광장, 호텔, 영화관, 집회장 등을 고려하여 골조계산용 하중인 2.65×10^3 pa값을 적용하였다.

풍하중은 4경간 3층 구조물의 경우 Floor층은 80kN, Roof층은 40kN값을 적용하였으며, 4경간 8층 구조물의 경우 Floor층은 100kN, Roof층은 50kN 값을 적용하였다.

정하중에 의한 구조물의 영향을 도시하면 그림 4.6과 같다.

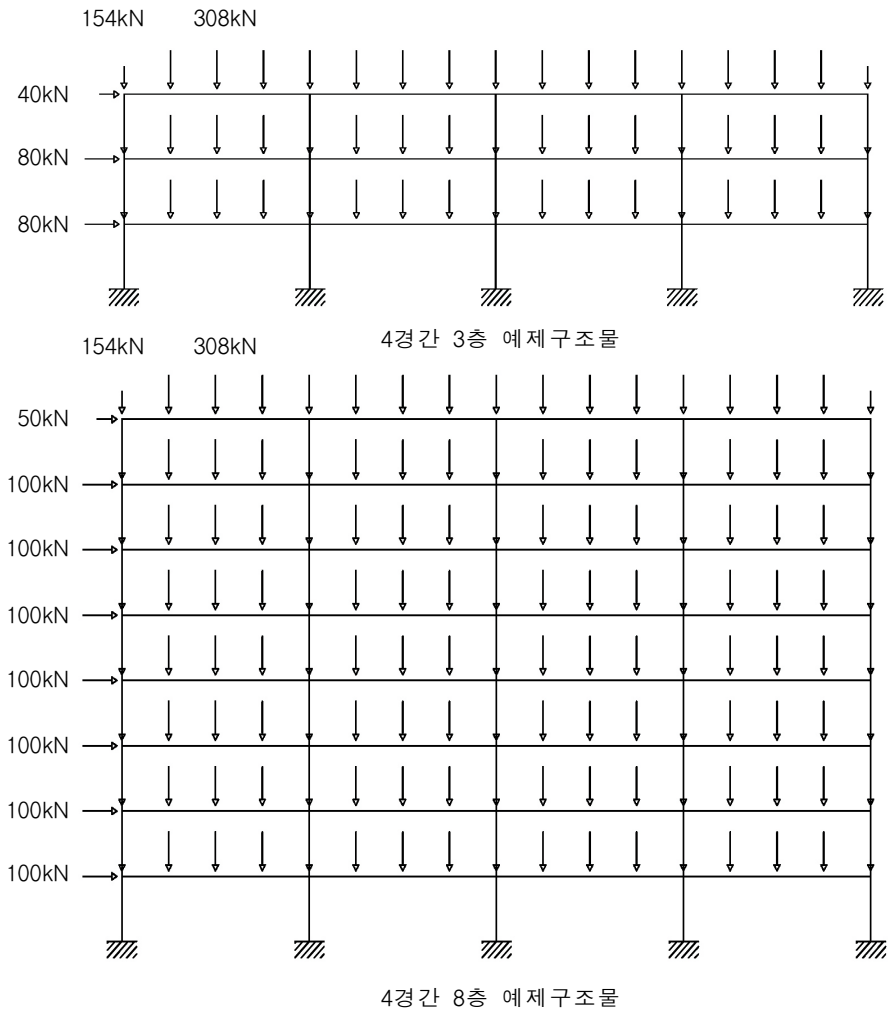


그림 4.6 정하중 입력

4.3.2 파랑하중

파랑하중이란 구조물이 파도에 의해 받는 힘을 하중효과로서 나타낸 것으로 전체파압 혹은 부분파압으로서 파악하여 직접 설계하중으로 취급하는 것이다³²⁾. 변형모드의 상하진폭이 클 경우 상하변위차에 의한 상부구조물의 응력증가가 매우 크게 되며, 시간이력곡선의 기울기가 커질수록 그 영향은 더욱 증가한다.

초대형 부유식 구조물은 하부구조물, 상부구조물, 계류시설로 구성되며 본 논문에서는 부체구조물과 상부구조물을 분리하여 해석하는 경우를 전제로 한다. 초대형 부유식 구조물은 얇은 박판과 같이 길이는 수 km인 반면 두께의 경우 수 m에 불과하기 때문에 파랑하중에 의해 강체거동을 하지 않고 탄성변형을 하게 되며 하부부체의 이러한 거동은 상부구조물에 영향을 주게 된다.

파랑하중을 고려한 상부구조물의 동적해석법인 시간이력해석을 위해서는 하부부체의 거동을 시간이력하중으로 치환하여 상부구조물에 적용하여야 한다. 이와 같은 시간이력해석을 위해서는 시간이력하중을 산정하는 것이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 한국해양연구원에서 수행한 500m×300m×6m 부유체의 유탄성응답 해석의 결과인 변형모드를 상부구조물의 주각부에 입력하여 파랑하중을 고려하였다^{5~8)}.

식 4.3은 유탄성응답에 따른 지점별 데이터를 이용하여 시간에 따른 일정한 파주기에 대한 지점별 변위를 나타낸 식이며 그림 4.7과 그림 4.8은 시간 $t = 0$, $t = T/4$ 초일 때의 지점별 변위데이터를 나타낸다.

$$Z(t) = \text{Re}(z) \cos\left(\frac{2\pi}{T} \times t\right) + \text{Im}(z) \sin\left(\frac{2\pi}{T} \times t\right) \dots\dots (\text{식 4.3})$$

여기서, t = 시간 (Time), $Z(t)$ = 시간에 따른 지점변위, T = 파주기, $\text{Re}(z)$ 및 $\text{Im}(Z)$ = 유탄성응답에 따른 지점별 변위데이터이다.

$Z(t)$ at $t = 0$

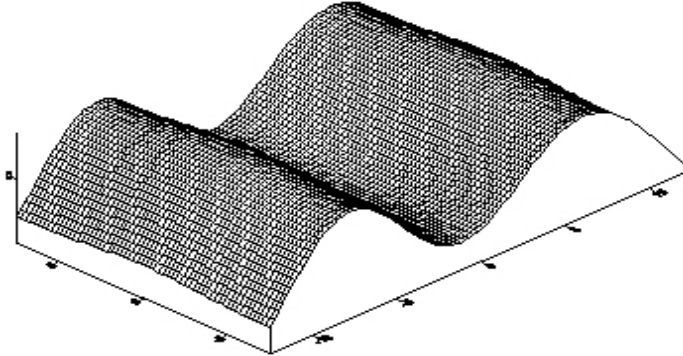


그림 4.7 $t = 0$ 일때의 지점별 변위데이터($\text{Re}(z)$)

$Z(t)$ at $t = T/4$

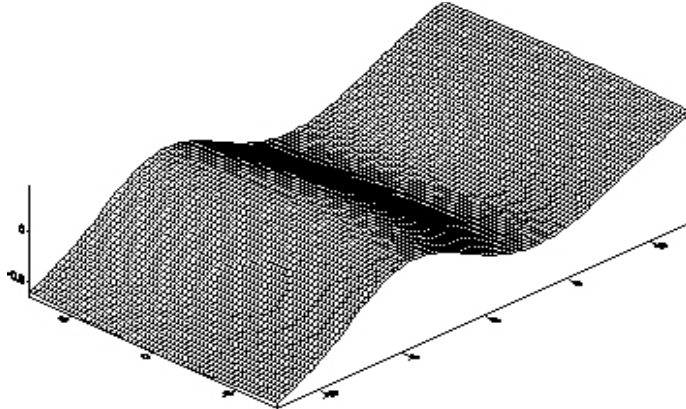


그림 4.8 $t = T/4$ 일때의 지점별 변위데이터($\text{Re}(z)$)⁸⁾

그림 4.9은 초대형 부유식 구조물의 하부부체에 파고 1m, 주기 13초의 설계파가 작용하는 것으로 가정하여 $t = 0, 3.25\text{초}, 6.5\text{초}, 9.75\text{초}$ 일 때의 파고 모형의 결과를 나타낸다.

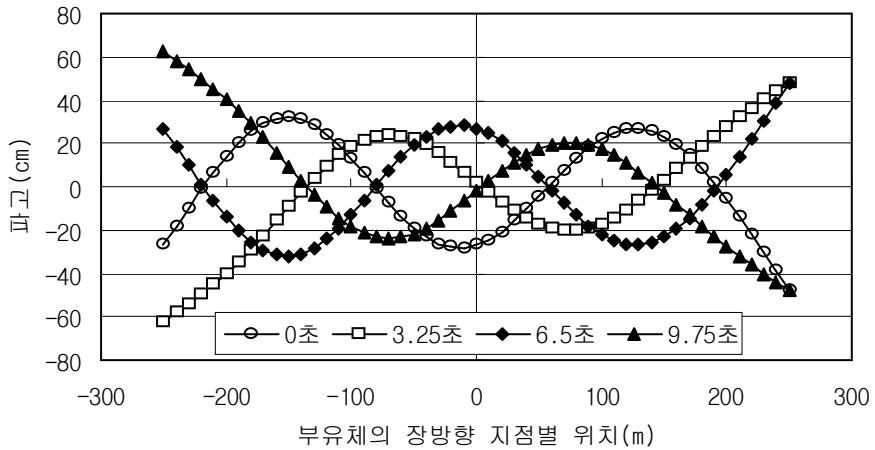


그림 4.9 초대형 부유식 구조물의 유탄성 응답

시간이력해석을 위한 시간이력하중을 산출하기 위하여 상부구조물 주각부의 위치에 해당하는 지점에 13초의 파주기를 적용하였다. 시간은 0.02초 간격 (Time interval)으로 30초까지 1501개의 데이터를 산출하여 적용하였으며, 산출된 시간이력하중은 주기 13초, 진폭 22.63cm의 파랑하중으로 그림 4.10과 같다.

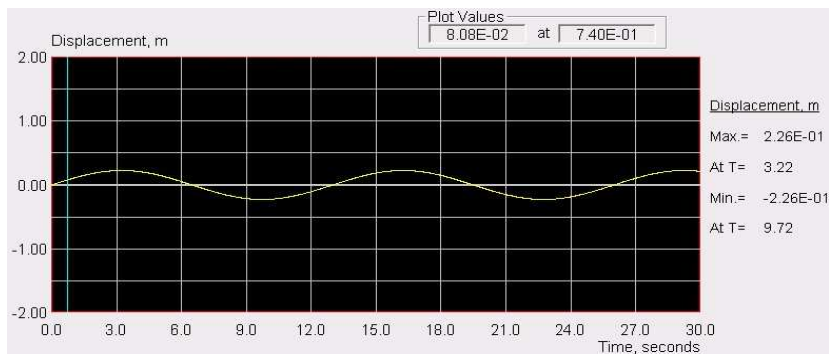


그림 4.10 시간이력하중(주기 13초)

Drain-2DX에서 지점변위 데이터를 각 주각부에 입력하기 위하여 각 주각부의 자유도 제약조건을 스프링으로 지정하였으며, 본 예제구조물에서는 변위시

간이력이 수직방향으로 작용하기 때문에 각 주각부의 Y방향의 구속조건을 스프링으로 하였다. 그리고 예제구조물에 out-of-phase 효과를 반영하기 위하여 각 주각부에 0.5초의 시간지연(Time delay) 조건을 적용하였다. 그림 4.11은 4경간 3층 예제구조물의 시간이력하중 입력을 도식화한 것이며, 4경간 8층 예제구조물의 경우에도 동일하게 적용하였다.

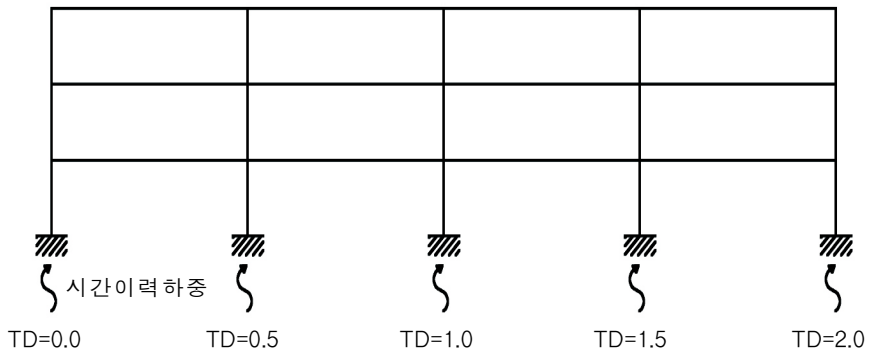


그림 4.11 시간이력하중 입력

5. 적용 예제 구조물의 동적응답 분석

초대형 부유식 구조물의 상부시설에 파랑하중이 가해질 경우 상부구조체는 각각의 주각부에 동적으로 입력되는 파랑하중의 상대적인 변위차에 의해 부재응력이나 동적거동이 증가하게 되며, 상하진폭이 큰 하중이 적용될 경우 각 기둥에 작용하는 상하 변위차가 커서 응력증가로 인한 부가모멘트가 크게 작용한다.

본 장에서는 구조물의 각 주각부에 시간이력하중을 적용하여 동적해석에 의한 상부구조물의 동적특징을 분석하기 위하여 4경간 3층의 저층 구조물과 4경간 8층의 중층 구조물로 나누어 살펴본다.

4경간 3층 예제구조물의 경우 파랑하중에 의한 구조물의 동적응답을 분석하기 위하여 강접 구조물과 반강접 구조물에 대해서 파랑하중의 진폭비 및 주기를 변화시켜 모멘트응답과 수평변위응답을 분석하고, 더불어 반강접 구조물 해석시 스프링 모델과 치환부재 모델을 적용하여 동적거동의 특성을 비교한다.

4경간 8층 예제구조물의 경우 접합부 위치에 따른 구조응답을 분석하기 위해 강접 골조와 반강접 접합부를 구조물 전체에 적용한 골조와 부분적으로 적용한 골조에 대하여 동적응답을 분석한다.

5.1 4경간 3층 예제구조물

파랑하중에 의한 구조물의 동적 거동을 분석하기 위하여 고유치해석(Eigenvalue analysis)에 의해서 모드별 고유주기 및 고유주파수를 산출하였다. 질량(Mass)은 그림 5.1과 같이 각 절점에 집중되는 집중질량(Lumped mass)으로 가정하여 중앙부 절점에 $80\text{kN} \cdot \text{sec}^2/\text{m}$, 가장자리 절점에 $40\text{kN} \cdot \text{sec}^2/\text{m}$ 을 적용하였으며, 1, 2, 3차에 대한 고유주기와 고유주파수를 표 5.1에 나타내었다.

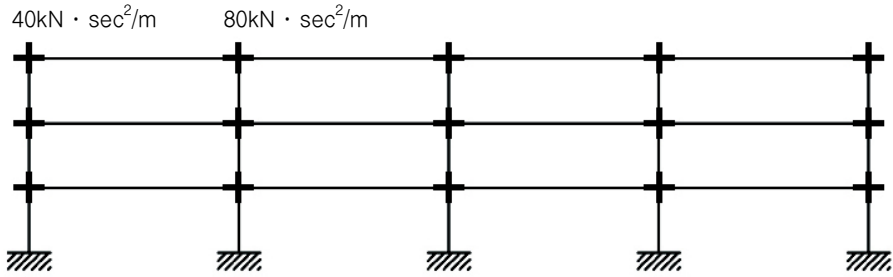


그림 5.1 4경간 3층 예제 구조물 질량 입력

표 5.1 모드별 고유주기

	1차		2차		3차	
	주기(sec)	주파수(Hz)	주기(sec)	주파수(Hz)	주기(sec)	주파수(Hz)
강접 구조물	0.576	1.736	0.160	6.237	0.123	8.144
반강접 구조물	0.689	1.452	0.178	5.628	0.123	8.144

강접 및 반강접 구조물에 대한 고유주기 및 고유주파수를 살펴보면, 1차 주기의 경우 강접 구조물에 비해 반강접 구조물의 주기는 약 20%정도 증가하며 고유주파수는 감소된다.

5.1.1 모멘트응답 분석

가. 접합부별 최대모멘트응답 분석

주기 13초, 최대진폭 22.63cm의 파랑하중이 작용할 경우 접합부별 최대 응답모멘트는 4경간 1층 보에서 발생하며, 정하중, 동하중, 조합하중에 대한 응답을 정리하면 표 5.2와 같다.

강접 구조물의 경우 정하중에 의한 최대모멘트는 1336.16kNm, 파랑하중에 의한 최대모멘트는 435.85kNm로 파랑하중에 의해 정하중의 최대모멘트 응답이 33% 증가하며, 스프링 모델의 경우 26%, 치환부재 모델의 경우 31% 증가하였다. 그리고 조합하중에 대한 파랑하중의 최대모멘트 응답이

표 5.2 접합부별 최대모멘트 응답 단위: kN · m

	강 접	반 강 접	
		스프링 모델	치환부재 모델
정하중	1336.16	876.42	874.21
동하중	435.85	231.01	272.27
조합하중	1734.97	1091.89	1126.60

차지하는 비율은 강접 구조물의 경우 파랑하중에서 435.85kNm, 조합하중에서 1734.97kNm로 약 25% 차지하며, 스프링 모델의 경우 21%, 치환부재의 경우 24% 차지한다. 이는 파랑하중에 의한 최대모멘트 응답이 전체 응답에서 약 20~25%정도 차지하는 것으로, 부유식 상부구조물의 구조해석 시 파랑하중에 의한 부가모멘트의 검토가 수행되어야 한다.

강접 구조물에 대한 반강접 구조물의 최대모멘트 응답은 정하중 작용시 강접 구조물에서 1336.16kNm, 스프링 모델에 의한 반강접 구조물에서 876.42kNm로 34.4% 감소하였으며, 동하중 및 조합하중에서는 각각 47.0%, 37.1% 감소하였다. 동하중 및 조합하중에 의한 보의 최대모멘트 응답이력을 나타내면 그림 5.2와 그림 5.3과 같다.

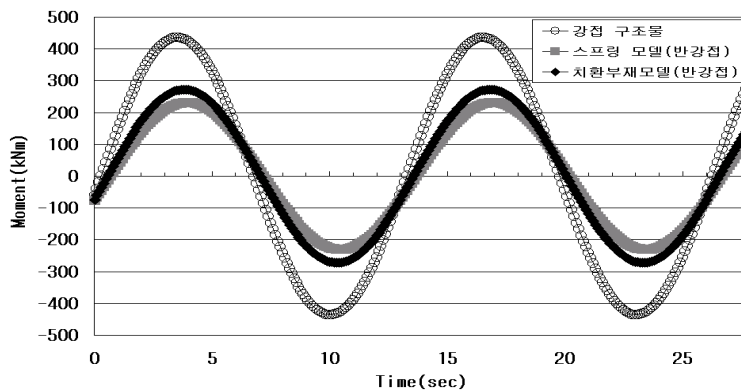


그림 5.2 파랑하중의 접합부에 따른 최대모멘트 응답

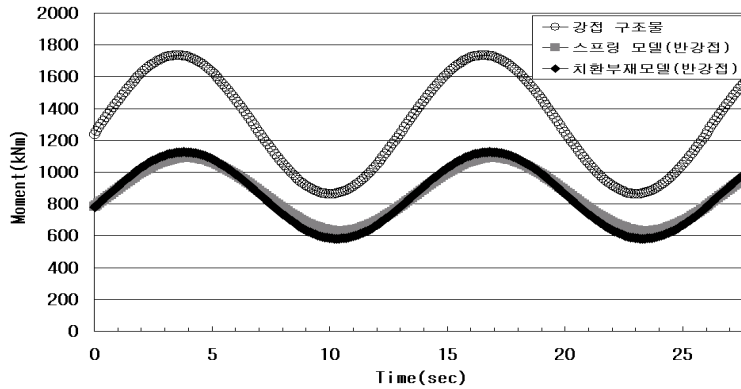


그림 5.3 조합하중의 접합부에 따른 최대모멘트 응답

감소단면2차모멘트의 치환부재를 적용하여 탄성해석을 할 경우 하중별 모멘트 응답은 스프링 모델의 응답과 유사한 결과를 보이고 있으며, 조합하중에 대한 모멘트 응답을 살펴보면 스프링 모델과의 오차는 3%로 매우 근사한 결과치를 갖는다. 따라서 스프링 모델 기능이 없는 일반 구조해석 프로그램에 치환부재를 이용한 해석이 가능한 것으로 사료된다.

나. 진폭비 변화에 따른 최대모멘트 응답 분석

강접 및 반강접 접합부에 대하여 과량하중의 진폭비 변화에 따른 최대모멘트 응답은 정리하면 표 5.3과 같다. 강접 구조물에 대한 과량하중의 최대모멘트 응답은 진폭비 1(진폭 22.63cm)인 경우 435.85kNm, 진폭비가 1/2인 경우 217.93kNm, 진폭비가 1/4인 경우 108.96kNm로 진폭비가 변화에 따라 선형적으로 감소하며, 반강접 구조물에서도 강접 구조물과 같이 선형비례 관계를 가졌다. 과량하중의 진폭비 변화에 따른 강접 및 반강접 구조물의 최대모멘트 응답을 나타내면 그림 5.4와 같다.

표 5.3 진폭비에 따른 최대모멘트 응답

단위: kN · m

		진폭비 1	진폭비 1/2	진폭비 1/4
정 하 중	강 접	1336.16	1336.16	1336.16
	반 강 접	876.42	876.42	876.42
동 하 중	강 접	435.85	217.93	108.96
	반 강 접	231.01	115.50	57.75
조합하중	강 접	1734.97	1517.05	1408.08
	반 강 접	1091.89	976.39	918.63

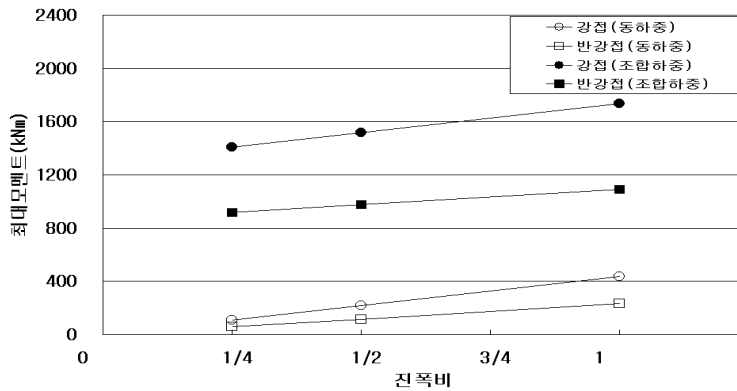


그림 5.4 파랑하중의 진폭비 변화에 따른 최대모멘트 응답

강접 구조물의 경우 진폭비 1에서 최대모멘트 응답이 정하중 작용시 1336.16kNm, 조합하중 작용시 1734.97kNm로, 정하중을 기준으로 조합하중의 최대모멘트가 29.8% 증가하며, 진폭비 1/2에서는 13.5%, 진폭비 1/4에서는 5.4% 증가한다. 반강접 구조물의 경우에는 진폭비 1에서 24.6%, 진폭비 1/2에서 11.4%, 진폭비 1/4에서 4.8% 증가하였다. 파랑하중의 진폭비 변화에 따른 강접 및 반강접 구조물의 최대모멘트 응답이력을 나타내면 그림 5.5~6과 같다.

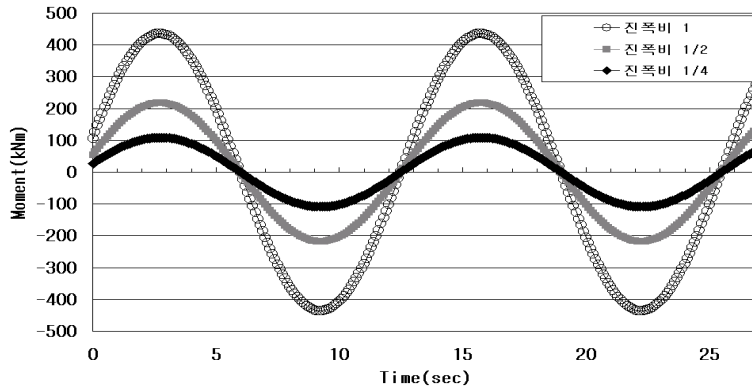


그림 5.5 파랑하중의 진폭비 변화에 따른 최대모멘트 응답(강점)

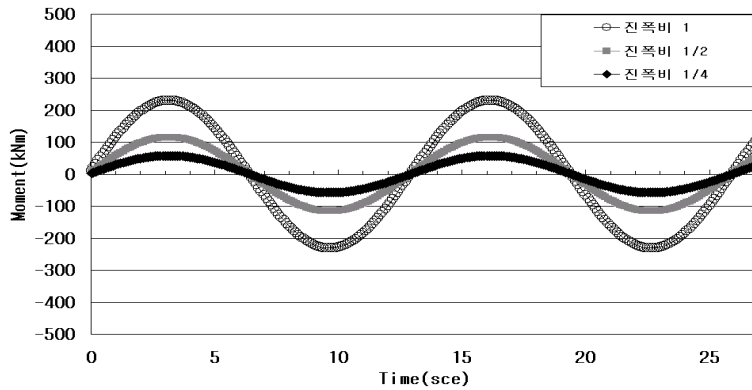


그림 5.6 파랑하중의 진폭비 변화에 따른 최대모멘트 응답(반강점)

다. 주기 변화에 따른 최대모멘트 응답 분석

상부구조물의 1차주기는 0.576으로 부체변형 주기 13초와 차이가 크기 때문에 동적응답이 작게 나타난다. 만약 파랑하중의 주기가 작아질 경우 구조물의 고유주기와 하중의 주기가 근접해져서 동적응답이 증가하게 될 것이다. 따라서 파랑하중의 주기 변화에 따른 동적응답을 분석해야 한다. 표 5.4와 그림 5.7은 파랑하중의 주기 변화에 따른 진폭비별 최대모멘트 응답을 나타낸다.

표 5.4 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대모멘트 응답 단위: kN · m

파랑하중 주기		3.25초	6.5초	9.75초	13.0초
진폭비 1	강 접	3890.65	1333.58	683.10	435.85
	반 강 접	1699.07	619.82	341.23	231.01
진폭비 1/2	강 접	1945.80	666.79	341.55	217.93
	반 강 접	849.54	309.91	170.61	115.50
진폭비 1/4	강 접	972.90	333.40	170.77	108.96
	반 강 접	424.77	154.96	85.31	57.75

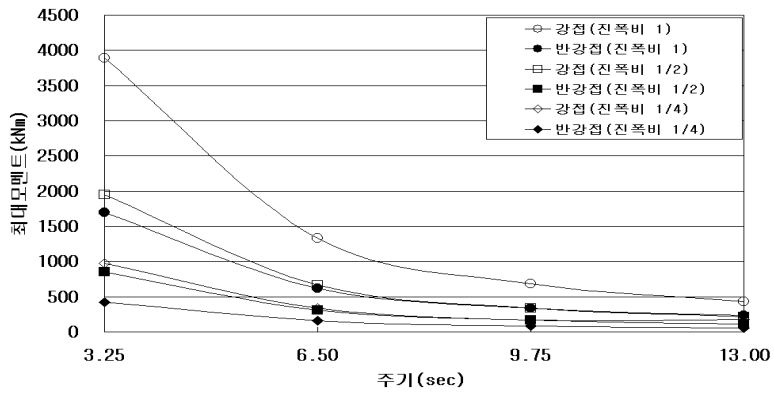


그림 5.7 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대모멘트 응답(반강접)

파랑하중의 주기가 변화하면 최대모멘트 응답은 비선형거동을 보이며, 특히 강접 구조물에서 비선형거동이 두드러지게 나타난다. 파랑하중이 단주기화 될수록 최대모멘트 응답은 증가하며, 진폭비 1인 경우 주기 13.0초에 대한 3.25초의 모멘트 응답은 강접 구조물에서 8.92배, 반강접 구조물에서 7.35배 증가하였다.

그림 5.8~9는 진폭비가 1인 경우 강접 및 반강접 구조물에 대한 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대모멘트 응답이력을 나타낸다.

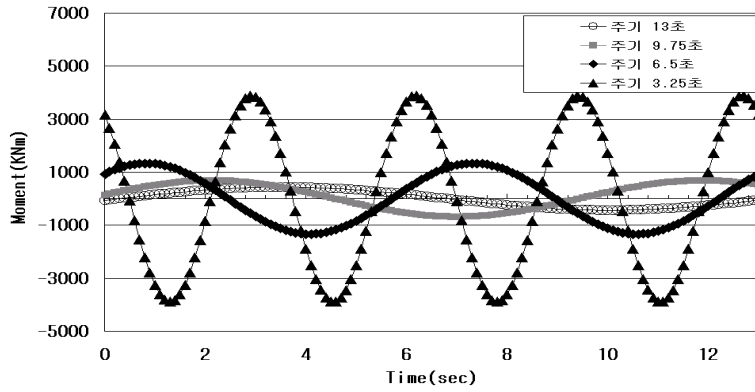


그림 5.8 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대모멘트 응답(강접)

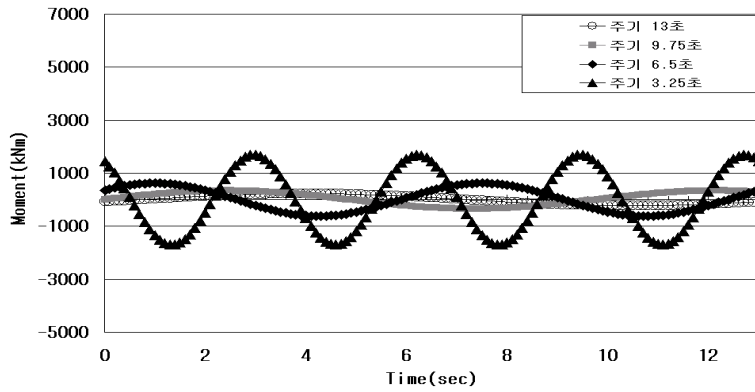


그림 5.9 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대모멘트 응답(반강접)

5.1.2 수평변위응답 분석

가. 접합부별 최대수평변위 응답 분석

주기 13초, 최대진폭 22.63cm의 파랑하중이 작용할 경우 정하중, 동하중, 조합하중에 대한 접합부별 최대수평변위 응답을 정리하면 표 5.5와 같다.

표 5.5 접합부별 최대수평변위 응답 단위: cm

	강 접	반 강 접	
		스프링 모델	치환부재 모델
정하중	0.387	0.487	0.449
동하중	3.489	3.011	3.201
조합하중	3.880	3.496	3.649

하중에 따른 반강접 구조물의 최대수평변위 응답은 정하중이 작용할 경우 강접 구조물에 비해 25.8% 증가하고 있으며, 동하중이 작용할 경우에는 13.7% 감소하고 있다. 하지만 정하중에 의한 변위 응답은 미소한 반면 동하중에 의한 변위는 전체변위 응답에서 지배적으로 작용하고 있어 강접 및

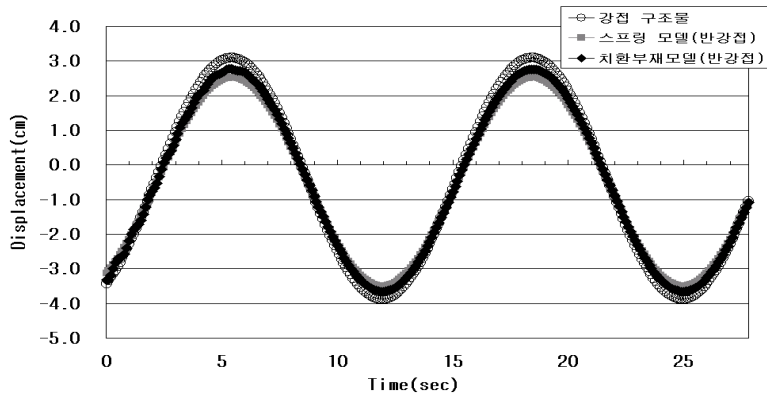


그림 5.10 조합하중의 접합부에 따른 최대수평변위 응답

반강접 접합부에 따른 구조물의 변위 응답은 하중별로 비슷한 양상을 보이고 있다. 그림 5.10은 조합하중에 의한 최대수평변위 응답이력을 나타내며, 본 예제건물은 저층 구조물이므로 접합부별 차이가 없는 것으로 사료된다.

나. 진폭비 · 하중증분에 따른 최대수평변위 응답 분석

강접 및 반강접 접합부에 대하여 과량하중의 진폭비 변화에 따른 최대수평변위 응답을 표 5.6에 나타내었다.

표 5.6 진폭비 변화에 따른 최대수평변위 응답 단위: cm

		진폭비 1	진폭비 1/2	진폭비 1/4
정 하 중	강 접	0.387	0.387	0.387
	반 강 접	0.487	0.487	0.487
동 하 중	강 접	3.489	1.744	0.872
	반 강 접	3.011	1.506	0.753
조합하중	강 접	3.880	2.135	1.263
	반 강 접	3.496	1.990	1.237

진폭비 변화에 따른 최대수평변위 응답을 살펴보면 동하중의 경우 최대 모멘트 응답과 같이 진폭비 1을 기준으로 하여 강접 및 반강접 구조물 모두 진폭비 1/2일 때는 50%, 1/4일 때는 25%로 선형비례로 변화하고 있음을 알 수 있다. 진폭비가 1일 경우에는 정하중보다는 동하중에서 수평변위가 지배적으로 작용하고 있어 조합하중에 의한 전체 수평변위도 동하중에 의한 수평변위에 따르고 있음을 알 수 있다. 하지만, 진폭비가 1/4인 경우에는 정하중에 의한 수평변위와 동하중에 의한 수평변위가 유사하게 나타나고 있다. 이 경우 강접 구조물을 기준으로 반강접 구조물의 하중별 증가 비율을 살펴보면 정하중의 경우 25.8% 증가하고 있으며, 동하중의 경우 13.7% 감소하고 있어 반강접 구조물 적용시 동하중보다는 정하중에서 더

속 민감하게 반응하고 있음을 알 수 있다. 그림 5.11~12는 조합하중에 의한 진폭비 변화에 따른 최대수평변위 응답을 강접 및 반강접 구조물에 대하여 나타낸 것이다.

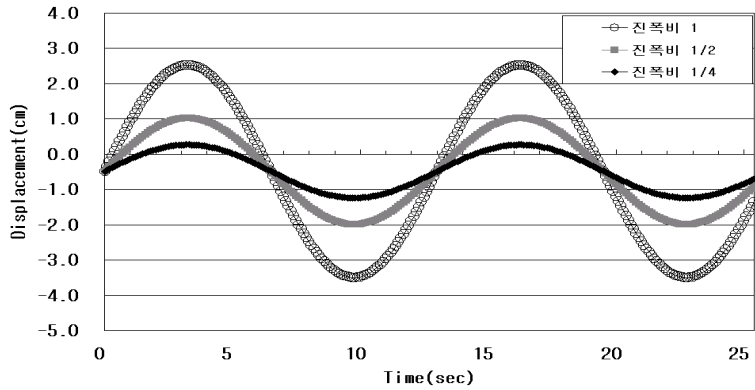


그림 5.11 조합하중의 진폭비 변화에 따른 최대수평변위 응답(강접)

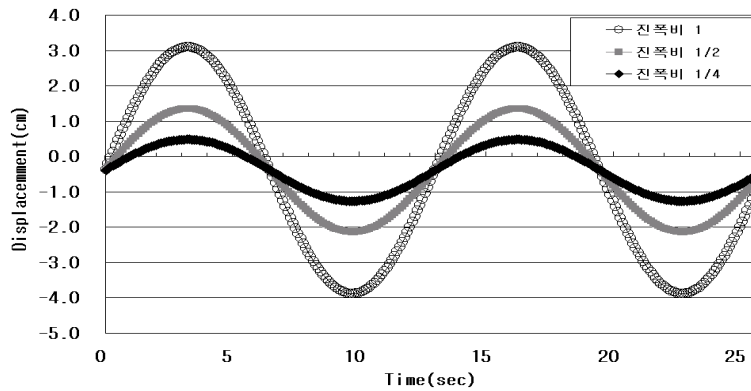


그림 5.12 조합하중의 진폭비 변화에 따른 최대수평변위 응답(반강접)

표 5.7은 진폭비가 1/4일 경우 풍하중의 하중증분계수 변화에 따른 하중별 최대수평변위 응답을 나타낸 것으로, 정하중에서는 강접 구조물에 대한 반강접 구조물의 최대수평변위 응답이 하중증분계수가 1.0일 경우 25.8%, 하중증분계수가 2.0일 경우 40.2%, 하중증분계수가 4.0일 경우에는 51.8%

증가하고 있다. 조합하중에 의한 반강접 접합부의 최대수평변위는 그림 5.13과 같이 하중증분계수가 1일 경우에는 강접 구조물과 응답이 유사하게 발생하지만, 하중증분계수가 증가하게 되면 최대수평변위 응답이 강접 구조물에 비해 증가하게 된다.

표 5.7 풍하중 하중증분계수 변화에 따른 최대수평변위 응답 단위: cm

풍하중 하중증분계수		1.0	2.0	4.0
정 하 중	강 접	0.387	0.587	0.993
	반 강 접	0.487	0.823	1.507
동 하 중	강 접	0.872	0.872	0.872
	반 강 접	0.753	0.753	0.753
조합하중	강 접	1.263	1.467	1.875
	반 강 접	1.237	1.580	2.265

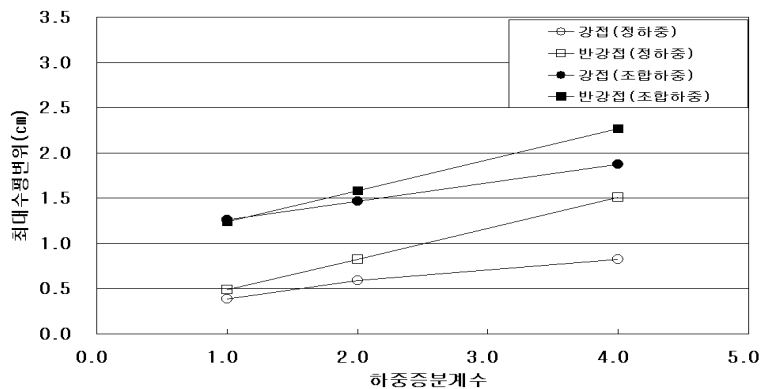


그림 5.13 풍하중 하중증분계수 변화에 따른 최대수평변위 응답

다. 주기 변화에 따른 최대수평변위응답 분석

파랑하중의 주기 변화에 따른 강접 및 반강접 구조물의 최대수평변위 응답을 진폭비별로 나타내면 표 5.8과 그림 5.14와 같다. 파랑하중의 주기가

작아질수록 최대수평변위 응답은 증가하고 있으며, 진폭비가 1인 경우 주기 13.0초에 대한 3.25초의 최대수평변위 응답은 강접 구조물에서는 1.96배, 반강접 구조물에서는 1.98배 증가한다. 강접 구조물에 대한 반강접 구조물의 최대수평변위 응답은 진폭비 1인 경우 13.0초에서 13.7%, 9.75초에서 13.6%, 6.5초에서 13.5%, 3.25초에서 12.3% 감소하고 있으며, 진폭비 1/2과 1/4인 경우에도 유사한 응답을 보이고 있다. 즉 강접 구조물에 대한 반강접 구조물의 최대수평변위 응답이 각 주기에서 유사한 비율로 감소되고 있음을 알 수 있다.

표 5.8 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대수평변위 응답 단위:cm

파랑하중 주기		3.25초	6.5초	9.75초	13.0초
진폭비 1	강 접	6.799	6.153	4.505	3.489
	반 강 접	5.964	5.321	3.890	3.011
진폭비 1/2	강 접	3.412	3.077	2.253	1.744
	반 강 접	2.983	2.661	1.945	1.506
진폭비 1/4	강 접	1.706	1.538	1.126	0.872
	반 강 접	1.491	1.330	0.973	0.753

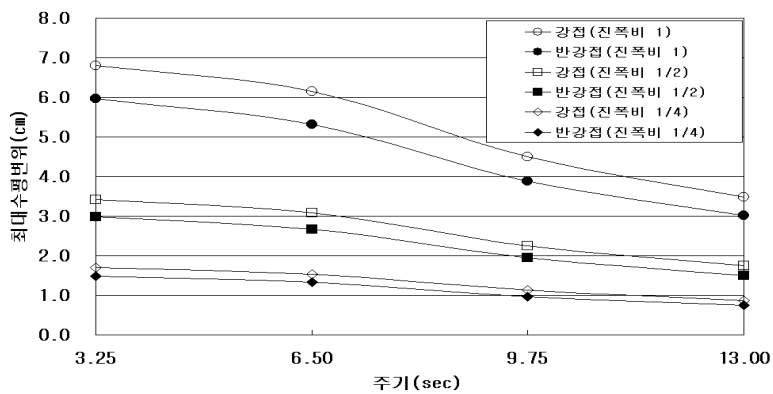


그림 5.14 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대수평변위 응답

그림 5.15~16은 진폭비가 1인 경우 파랑하중의 주기 변화에 따른 강점 및 반강점 구조물의 최대수평변위 응답을 나타낸다.

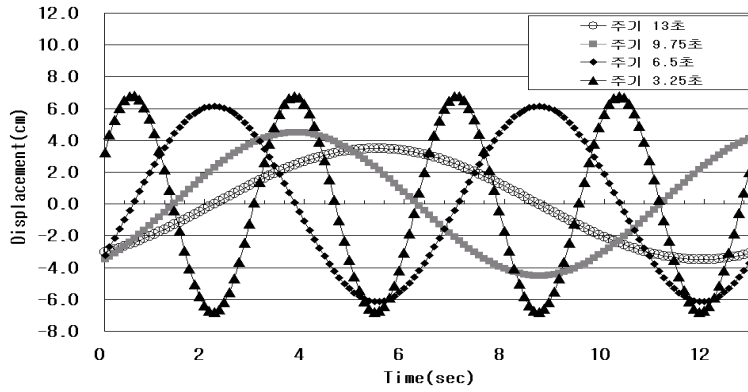


그림 5.15 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대수평변위 응답(강점)

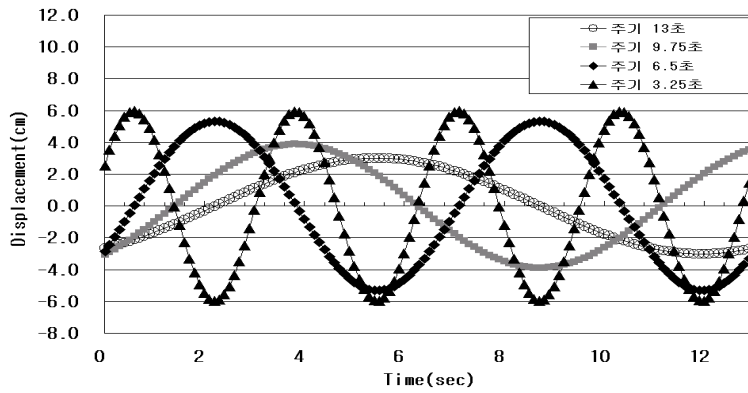


그림 5.16 파랑하중의 주기 변화에 따른 최대수평변위 응답(반강점)

5.2 4경간 8층 예제구조물

5.1장에서는 초대형 부유식 구조물의 상부구조체가 4경간 3층의 저층 구조물일 경우 파랑하중의 진폭 및 주기 변화에 따른 강접 및 반강접 구조물의 모멘트 및 수평변위 응답에 대해 분석하였다. 상부구조체가 중층 이상의 구조물일 경우 정하중, 동하중, 조합하중에 의한 응답거동이 저층 구조물과 다르게 나타나므로, 이에 대한 분석이 필요하다. 본 장에서는 4경간 8층의 중층 구조물을 예제 구조물로 선정하였으며, 강접 구조물과 반강접 접합부를 구조물 전체에 적용한 경우와 내부경간(2,3경간) 양단부에 부분적으로 적용한 경우로 나누어 모멘트 및 수평변위, 수평가속도 응답에 대해 분석하였다.

파랑하중에 의한 예제구조물의 동적 거동을 분석하기 위하여 고유치해석(Eigenvalue analysis)에 의해서 모드별 고유주기 및 고유주파수를 산출하였다. 질량(Mass)은 그림 5.17과 같이 4경간 3층 예제구조물과 동일한 값을 적용하였으며, 모드별 고유주기 및 고유주파수를 표 5.9에 나타내었다.

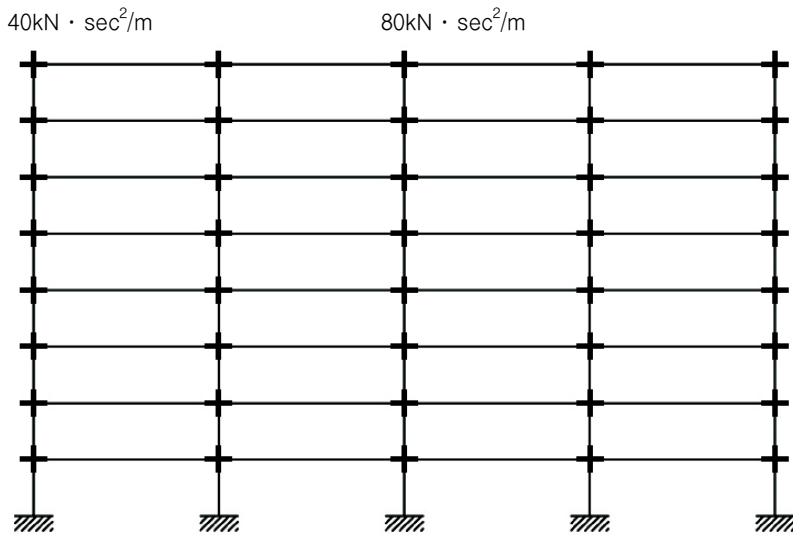


그림 5.17 4경간 8층 예제구조물 질량 입력

표 5.9 모드별 고유주기

	1차		2차		3차	
	주기(sec)	주파수(Hz)	주기(sec)	주파수(Hz)	주기(sec)	주파수(Hz)
강접 구조물	1.636	0.611	0.515	1.943	0.281	3.560
전체 반강접	2.128	0.470	0.648	1.543	0.336	2.977
부분 반강접	1.829	0.547	0.567	1.765	0.303	3.301

강접 및 반강접 구조물에 대한 고유주기 및 고유주파수를 살펴보면, 1차 주기의 경우 부분 반강접 구조물의 고유주기는 1.829초, 전체 반강접 구조물은 2.218초로 강접 구조물의 고유주기 1.636초에 비해 각 약 12%, 30%정도 증가하였다. 즉 구조물에 반강접 접합부의 수가 증가할수록 주기는 증가한다.

5.2.1 모멘트응답 분석

주기 13초, 최대진폭 22.63cm의 파랑하중이 작용할 경우 접합부별 최대 응답모멘트값은 4경간 1층 보에서 발생하며, 정하중, 파랑하중, 조합하중에 대한 응답값을 정리하면 표 5.10과 같다.

표 5.10 접합부별 최대모멘트 응답 단위: kN · m

	강접 구조물	전체 반강접	부분 반강접
정하중	1439.94	1008.81	1515.56
동하중	439.49	234.05	485.11
조합하중	1971.87	1280.55	2071.58

정하중이 작용할 경우를 기준으로 하여 조합하중이 작용할 경우에는 최대모멘트가 강접 및 전체 반강접, 부분 반강접 골조에서 각각 1.37배, 1.27배, 1.37배 증가하여 파랑하중에 의한 모멘트 응답이 전체응답의 약 27~

37%정도 차지하는 것을 알 수 있다. 즉, 상부구조물이 중층 이상의 구조물일 경우 파랑하중에 의한 부가모멘트가 저층 구조물에 비해 증가한다.

강접 구조물과 전체 반강접 구조물의 모멘트 변화율을 하중별로 살펴보면 정하중의 경우 29.9%, 동하중 46.7%, 조합하중 35.1% 감소되며, 파랑하중 및 조합하중에 의한 보의 최대모멘트 응답이력을 그림 5.18과 그림 5.19에 나타내었다.

구조물에 반강접 접합부를 부분적으로 적용할 경우 강접 구조물에 비해 최대모멘트 응답이 크게 나타나는데, 이는 반강접 접합부가 적용된 부분의 모멘트가 강접 접합부 부분으로 전이하면서 반강접 접합부가 적용된 부분은 모멘트가 감소하고, 강접 접합된 부분의 모멘트는 증가하는 현상을 보인다.

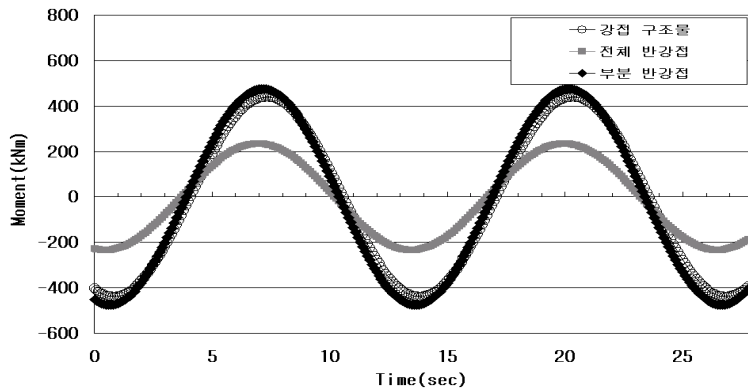


그림 5.18 동하중에 의한 접합부별 최대모멘트 응답

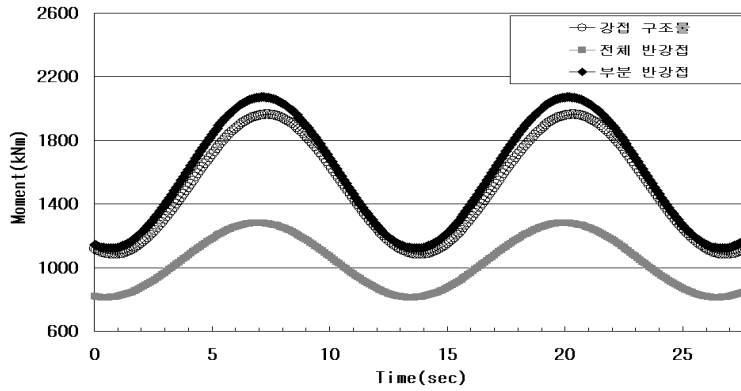


그림 5.19 조합하중에 의한 접합부별 최대모멘트 응답

4경간 8층 예제구조물에 대하여 조합하중에 의한 강접 및 전체 반강접, 부분 반강접 골조의 층별 최대모멘트 응답을 나타내면 표 5.11과 같다. 각 층별 최대모멘트 응답은 4경간 오른쪽 단부에서 발생하며, 구조물에 반강접 접합부를 부분적으로 적용시 반강접 접합부가 적용된 내부경간의 최대모멘트 응답은 감소하지만, 강접 접합된 외부경간의 최대모멘트 응답은 모멘트 전이현상으로 인해 증가함을 알 수 있다. 반강접 접합부 적용에 따른 층별 모멘트 감소율을 살펴보면, 내부경간의 경우 약 32%, 외부경간의 약 36%정도로 각 층별 모멘트 감소는 균등하게 발생하고 있다.

표 5.11 층별 최대모멘트 응답

단위: kN · m

	강접 구조물		전체 반강접		부분 반강접	
	내부경간	외부경간	내부경간	외부경간	내부경간	외부경간
8층	1389.21	1417.65	932.17	994.68	907.02	1465.19
7층	1438.30	1760.69	959.26	1126.50	935.10	1797.09
6층	1469.89	1847.55	994.99	1175.46	956.32	1892.54
5층	1517.90	1879.28	1038.72	1210.56	974.18	1941.27
4층	1565.86	1911.56	1082.67	1245.13	1012.10	1990.38
3층	1613.09	1938.75	1149.81	1271.73	1039.61	2032.09
2층	1670.15	1940.15	1167.77	1279.97	1071.08	2045.07
1층	1802.40	1971.87*	1216.80	1280.55*	1133.74	2071.58*

* 주) 최대모멘트 응답

그림 5.20은 내부경간의 조합하중에 의한 보의 최대모멘트 응답을 나타내며, 외부경간의 경우와는 달리 반강접 골조의 모멘트 응답분포가 강접 골조에 비해 낮게 나타난다.

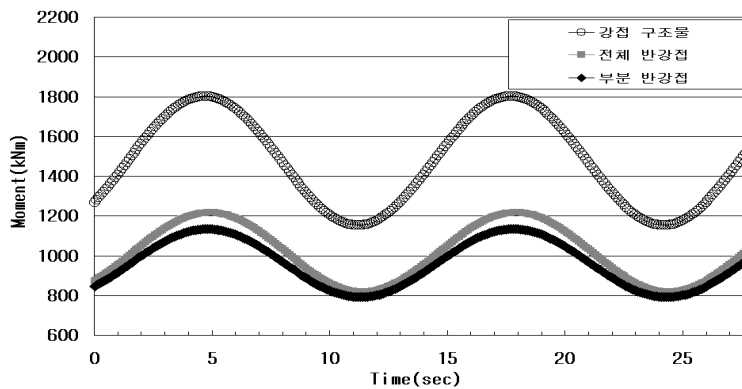


그림 5.20 조합하중에 의한 접합부별 최대모멘트 응답(내부경간)

5.2.2 수평변위응답 분석

주기 13초, 최대진폭 22.63cm의 파랑하중이 작용할 경우 정하중, 파랑하중, 조합하중에 대한 접합부별 최대수평변위값을 정리하면 표 5.12와 같다.

표 5.12 접합부별 최대수평변위 응답 단위: cm

	강접 구조물	전체 반강접	부분 반강접
정하중	2.573	4.863	3.265
동하중	11.556	11.016	11.244
조합하중	14.168	15.907	14.581

정하중에 의한 변위응답은 미소한 반면 동하중에 의한 변위는 전체변위 응답에서 지배적으로 작용하고 있으며, 4경간 3층 예제구조물의 경우 조합하중에 의한 수평변위응답이 큰 차이가 없었으나, 4경간 8층 구조물의 경우에는 풍하중에 의한 수평변위의 증가로 인해 반강접 접합부 적용시 강접 구조물에 비해 증가하고 있다. 그림 5.21은 조합하중에 따른 강접 및 반강접 구조물의 최대수평변위 응답을 나타내며, 반강접 접합부의 수가 증가할수록 전체수평변위 응답이 증가하고 있음을 알 수 있다.

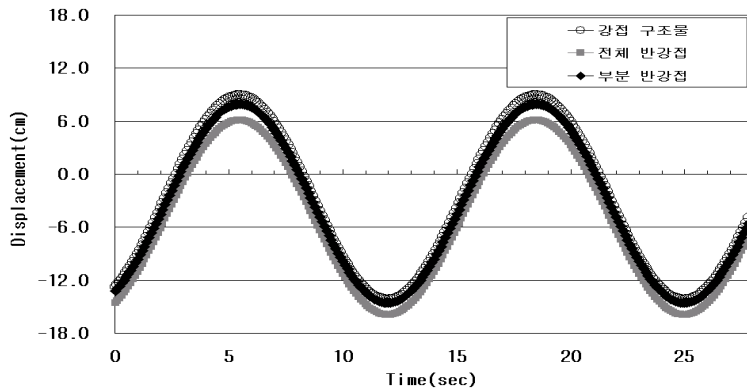


그림 5.21 조합하중에 의한 접합부별 최대수평변위 응답(최상층)

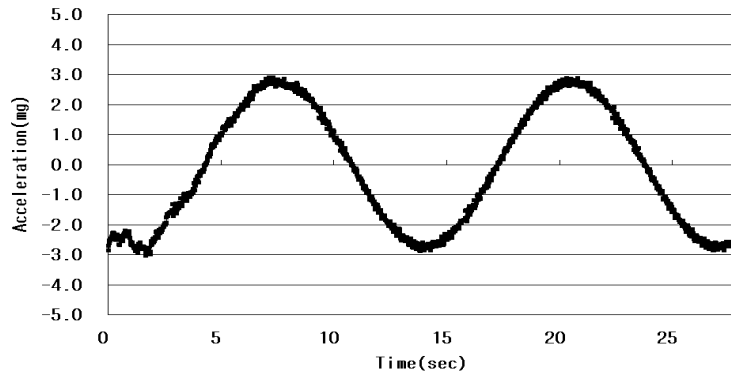


그림 5.23 전체 반강접 구조물에 대한 최대수평가속도 응답

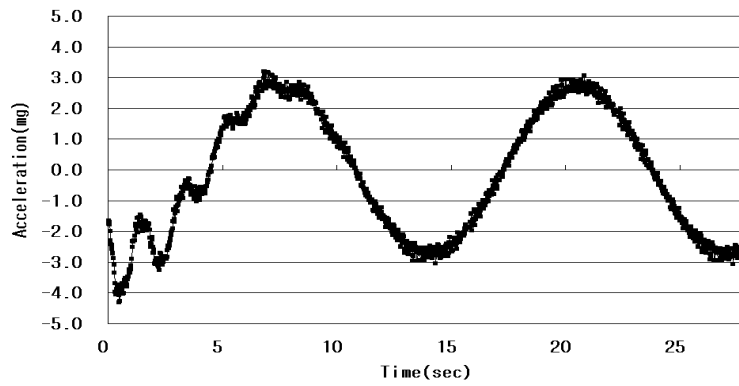


그림 5.24 부분 반강접 구조물에 대한 최대수평가속도 응답

6. 결론

본 논문에서는 초대형 부유식 구조물의 상부구조물에 시간이력하중을 적용하여 강접 골조와 반강접 골조 시스템에 대한 동적해석을 수행하였다. 동적해석을 위해 유탄성응답 해석에 의한 변형모드를 이용하여 파랑하중을 산정하였으며, 산정된 파랑하중의 진폭 및 주기 등을 변화시켜 반강접 접합부의 효율성을 검토하였다. 스프링 모델과 치환부재 모델을 이용하여 반강접 접합부의 해석을 수행하고, 구조물의 층수 및 반강접 접합부 위치에 따른 응답을 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 초대형 부유식 구조물의 상부구조물에 대한 파랑하중의 영향을 살펴보면, 본 예제구조물의 경우 파랑하중에 의해 정하중의 최대모멘트 응답이 강접 구조물에서 33%, 스프링 모델에서 26%, 치환부재 모델에서 31% 증가하였다. 이는 파랑하중에 의한 최대모멘트 응답이 전체응답에서 20~25%정도 차지하는 것으로, 부유식 상부구조물의 경우 파랑하중에 의한 부가모멘트의 검토가 수행되어야 한다.

2. 각형강관 외다이아프램을 이용한 반강접 접합부 적용시 최대모멘트 응답은 4경간 3층 구조물의 경우 강접합에 비해 정하중, 동하중, 조합하중에서 각각 34.4%, 47.0%, 37.1% 감소하였으며, 4경간 8층 구조물의 경우 29.9%, 46.7%, 35.1% 감소하였다. 따라서 구조물에 반강접 접합부 적용시 모멘트저감으로 인한 구조물량의 감소와 경제적인 설계를 유도할 수 있다.

3. 반강접 접합부를 전체적으로 적용할 경우 구조물 전체의 모멘트 응답은 감소하게 되지만, 반강접 접합부를 부분적으로 적용할 경우에는 반강접 접합된 부분의 모멘트응답은 감소하고, 강접 접합된 부분의 모멘트응답은 모멘트 전이현상으로 인해 증가하게 된다.

4. 과량하중의 진폭비 변화에 따른 최대모멘트 응답은 진폭비가 1, 1/2, 1/4로 감소함에 따라 동적 응답값이 선형적으로 감소하였으며, 반강접 구조물이 강접 구조물에 비해 진폭비 변화에 따른 모멘트 변화가 적게 나타났다. 과량하중의 주기변화에 따른 최대모멘트 응답은 주기가 짧아질수록 비선형적으로 증가하며, 특히 강접 구조물에서 비선형거동이 두드러지게 나타났다.

5. 최대수평변위 응답의 경우 정하중에 의한 영향은 미소한 반면 동하중에 의한 변위는 전체변위응답에서 지배적으로 작용하였으며, 구조물이 고층화될수록 반강접 접합부 적용에 의한 수평변위응답은 증가하였다. 최대수평가속도 응답은 구조물 전체에 반강접 접합부를 적용할 경우 가속도 응답이 약 25% 감소하며, 부분적으로 반강접 접합부를 적용할 경우에는 7% 증가하였다.

본 논문에서는 초대형 부유식 구조물의 상부구조물에 대하여 탄성 동적 해석을 수행하였으며, 향후 연구에서는 비탄성 동적해석을 수행하여 소성 해석에 의한 구조물의 거동과 더불어 소성힌지의 분포 및 발생 메커니즘에 대한 검토가 이루어져야 한다.

참 고 문 헌

1. 竹中工務店, 三井造船, 상재건조물 구조배치의 조사연구, 1999.03
2. 정태영, VLFS 관련기술의 적용가능성과 추후 활용방안, 2001부산해역의 미래개발을 위한 심포지엄, 2001.07
3. 신현경 외, 부유식 해양구조물에 관한 연구, 울산대학교, 과기처 특정 연구개발 사업보고서, 1994~1996
4. 홍사영 외, 대형 해양구조물 거동해석 기법 개발, 선박해양공학연구센터, 과기처 특정 연구개발사업 보고서, 1994~1996
5. 해양수산부, 초대형부유식 해상구조물 기술개발 연구보고서(1차년도), 1999.12
6. 해양수산부, 초대형부유식 해상구조물 기술개발 연구보고서(2차년도), 2000.12
7. 해양수산부, 초대형부유식 해상구조물 기술개발 연구보고서(3차년도), 2001.12
8. 해양수산부, 초대형부유식 해상구조물 기술개발 연구보고서(4차년도), 2002.12
9. 송화철 외, 超大型 浮遊式 海上構造物 上部 構造體의 構造解析, 第2回 日·韓 海洋建築及び 沿岸域利用に關する シンポジウム論文集, 2001.08
10. Lother, J. E., Elastic Restraint Equations for Semi-Rigid Connections, Transactions, ASCE, 116, pp. 480~502, 1951
11. Chen, W. F., and Toma, S., Advanced Analysis of Steel Frames, CRC Press, 1994
12. Frye, M.J., and Morris, G.A., Analysis of Flexibly Connected Steel Frames, Canadian Journal of Civil Engineers, Vol, 2, pp 119~136, 1975
13. Richard, R. M. and Abbott, B. J., Versatile Elastic-Plastic

- Stress-Strain Formula, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, pp. 511~515, 1975
13. Chen, W. F., Goto, Y., and Richard Liew, J. Y., Stability Design of Semi-Rigid Frames, John Wiley and Sons, 1996
 14. Chen, W. F., Joint Flexibility in Steel Frames, Elsevier Applied Science, 1987
 15. Hasan, R., Kishi, N., Chen, W. F., A new nonlinear connection classification system, Journal of Constructional Steel Research, 47, pp119~140, 1998
 16. V. Prakash, G. H. Powell, S. D. Campbell, F. C. Filippou, DRAIN-2DX Preliminary Element User Guide, 1992.12
 17. RAM Xlinea, user's manual, 1998
 18. Chen, W. F. and Kim, Seung-Eock, LRFDD steel design using advanced analysis, Boca Raton: CRC Press, 1997
 19. AISC, Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Inc., 1999
 20. BSI, Eurocode 3, Design of Steel Structures, Part 1-1, British Standards Institution, 1992
 21. Chen, W. F., Goto, Y., and Richard Liew, J. Y., Stability Design of Semi-Rigid Frames, John Wiley and Sons, 1996
 22. 이은숙, 파랑하중을 고려한 반강접 접합부의 비선형해석, 한국해양대학교 석사학위논문, 2002.08
 23. 이치형, 접합부의 반강접성을 고려한 철골조의 구조신뢰성해석, 부산대학교 공학박사논문, 2003.02
 24. 이상훈, 직각 외다이아프램형식을 이용한 각형 강관 접합부해석을 위한 실험적 연구, 서울대학교 석사학위논문, 1997.02
 25. 차은지 외, 직각판형 외다이아프램 각형강관 기둥-H형강보 접합부의

- 신뢰성 해석, 한국강구조학회 학술발표논문집, pp.599~606, 2002.06
26. 채용수, 각형강관기둥 H형강보 접합부를 가진 반강접 골조의 해석방법에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위논문 2002.02
 27. 대우건설, 초고층건물 구조시스템의 설계 및 해석에 관한 연구(내진 해석용 비탄성해석법 개발에 관한 연구), pp45~82, 1997.02
 28. 김승훈, RC 띠장-철골 보 접합부의 고정도에 따른 SPS 지하복합골조 거동 해석, 한국구조물진단학회지, 제8권 3호, pp243~250, 2004.07
 29. 송화철, 무보강 반강접 철골접합부의 비선형해석에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 제2권 2호, pp99~105, 2000.05
 30. S.L. Chan, P.P.T. Chui, Non-Linear Static And Cyclic Analysis Of Steel Frames With Semi-Rigid Connections, pp195-263 Elsevier, 2000
 31. 건축물 하중기준 및 해석, 사단법인 대한건축학회, 2000
 32. 이한석, 도근영, 이명권 공역, 해양건축용어사전, 기문당, 2004.04
 33. 김옥선, 홍갑표, 반강접 접합부를 가진 철골 구조물의 거동에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 제13권 1호, pp307~312, 1993.04
 34. 임상민, 강석봉, 철골구조물 반강접 접합부 거동에 대한 해석모델에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 제19권 1호, pp253~258, 1999.04
 35. 양철민, 김정환, 김영문, 반강접 접합부를 갖는 문형골조의 거동 특성, 대한건축학회 논문집, 제20권 1호, pp197~200, 2000.04
 36. 김상대 외, 반강접 접합부를 가진 철골조 건물의 비탄성 거동에 관한 연구, 대한건축학회 논문집, 제20권 1호, pp39~42, 2000.04
 37. 채용수, 최성모, 김동규, 직각관 외다이아프램형식 각형강관기둥-H형강보 반강접접합부를 가진 골조의 탄소성 거동에 관한 해석적연구, 대한건축학회 논문집, 제17권 10호, pp11~18, 2001.10
 38. Chen, W. F., Practical Analysis for Semi-Rigid Frame Design, World Scientific, 1999

감 사 의 글

논문을 시작하고 완성한다는 것이 무척이나 힘들고 어렵다는 것을 알았습니다. 많은 문제와 고민 속에서 때론 헤매기도 하였지만, 그때마다 많은 분들의 조언과 가르침이 있었기에 여기까지 올 수 있었습니다.

학부시절 진로에 대해 고민하던 저에게 구조를 배울 수 있는 기회를 주시고, 많은 가르침과 세심한 지도로 저를 이끌어 주신 송화철 교수님께 진심으로 감사를 드립니다.

주심으로서 좋은 논문이 될 수 있도록 도와주신 도근영 교수님과 학부, 대학원 생활동안 아낌없는 격려와 관심을 가져주신 이한석 교수님, 도근영 교수님, 이명권 교수님, 안윙희 교수님, 오광석 교수님, 조훈희 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

바쁘신 와중에서도 언제나 많은 가르침을 주시고, 격려해 주신 이치형 교수님과 갑작스런 질문에 성심껏 답해주시고, 많은 자료와 논문을 주신 포스코의 채용수 대리님께도 감사의 마음을 전합니다.

대학원 2년 동안 힘들고 지칠 때마다 항상 격려와 용기를 북돋아 준 윤성이형, 그리고 언제나 묵묵히 논문을 도와준 연구실 후배 승우, 수환에게도 고마움을 전하며 앞으로 뜻깊은 대학원 생활을 이끌어 가길 바랍니다.

끝으로 항상 저를 걱정하시고 아낌없는 사랑으로 지켜주신 아버지, 어머니께 진심으로 감사드리며, 지금까지 묵묵히 지켜봐 주시고 아들로서 부족한 저를 사랑으로 대해주신 장인어른 그리고 언제나 격려와 힘이 되어준 동생과 처제에게 감사의 마음을 전합니다. 마지막으로 어려운 조건에서도 항상 곁에서 아껴주고 사랑해준 정화와 이 기쁨을 함께 하였으면 합니다.

2004. 12.

金 佑 年