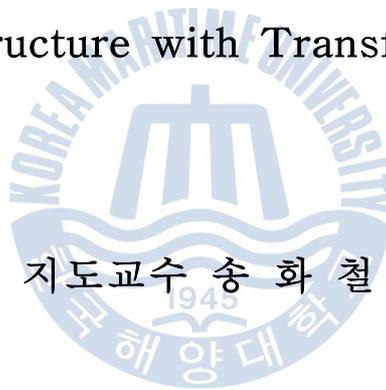


공학석사 학위논문

전이보시스템을 적용한 플로팅 상부
구조물 접합부의 유한요소 해석

Finite Element Analysis on Connection of Floating
Superstructure with Transfer-beam



2013년 2월

한국해양대학교 대학원

해양건축공학과

김 세 철

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

위 원 장 박 수 용 인

위 원 송 화 철 인

위 원 도 근 영 인



2012年 12月

한국해양대학교 대학원

목 차

목 차	i
표 목 차	iii
그림목차	iv
Abstract	vi
1. 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 연구동향	3
1.3 연구범위 및 방법	5
2. 플로팅 구조물 전이보시스템	6
2.1 플로팅구조물 거동의 이론적 고찰	6
2.2 전이보시스템의 해석기법	12
2.3 플로팅 상하부구조물 연결부	15
3. 플로팅 구조물 전이보시스템 해석모델	23
3.1 해석모델 개요	23
3.2 재료 및 요소 모델	25
3.3 요소 모델링	28
3.4 전이보시스템 전체모델	32
3.5 접촉 조건 및 경계조건	35
4. 전이보시스템 구조 해석 및 평가	39
4.1 횡력가력 모델	40
4.2 축력가력 모델	44
4.3 상하부구조 전체해석	50

5. 결론 60

참고문헌 62



표 목차

표 2.1 내부에 보가 없는 슬래브의 최소두께	16
표 2.2 격벽에 따른 구조물 수직 변형량(박종서, 2012)	17
표 2.3 격벽에 따른 구조물 응력 변화(박종서, 2012)	18
표 3.1 강재 물성치 제원	25
표 3.2 고력볼트 물성치 제원	25
표 3.3 콘크리트 매개변수	26
표 3.4 부재의 기하학적 단면형상	33
표 3.5 Step별 부재의 구속조건	38



그림 목차

그림 2.1 FPSO 모델의 수직 휨 형태	9
그림 2.2 FPSO 모델의 수직 뒤틀림 형태	10
그림 2.3 FPSO 모델의 수직 수평 형태	10
그림 2.4 하부구조물의 단면도	11
그림 2.5 상부구조물로 인한 하부구조물의 국부 변형	11
그림 2.6 전이보(Transfer beam)	12
그림 2.7 상세해석기법의 모델	14
그림 2.8 플로팅 구조물 단면도	15
그림 2.9 플로팅 하부구조물의 변형	17
그림 2.10 7m 격벽 하부구조물 응력분포	18
그림 2.11 14m 격벽 하부구조물 응력분포	18
그림 2.12 전이보시스템	19
그림 2.13 모듈러시스템에 전이보 설치 모습	20
그림 2.14 H형강을 이용한 강구조물에 전이보 설치 모습	20
그림 2.15 전이보를 설치한 플로팅 구조물	20
그림 2.16 전체 단면도	21
그림 2.17 전이보 이음부	21
그림 2.18 전이보 주각부	22
그림 3.1 플로팅 구조물 단면도	23
그림 3.2 반강접 접합부	24
그림 3.3 이선형 재료모델	25
그림 3.4 콘크리트 재료모델	26
그림 3.5 3차원 요소	26
그림 3.6 기둥부재 모델링	28
그림 3.7 앵글부재 모델링	29
그림 3.8 전이보부재 모델링	30
그림 3.9 볼트부 모델링	31

그림 3.10 콘크리트 및 철근 모델링	31
그림 3.11 전이보시스템 모델링	32
그림 3.12 부재의 기하학적 단면형상	33
그림 3.13 전이보시스템 제원	34
그림 3.14 볼트 인장력, 축력 및 횡력 가력	37
그림 4.1 횡력가력지점 모식도	40
그림 4.2 더블웹브 앵글 변형 양상	41
그림 4.3 더블웹브 앵글 $M-\theta$ 곡선	41
그림 4.4 탑앤드시트 앵글 앵글 변형 양상	42
그림 4.5 탑앤드시트 앵글 $M-\theta$ 곡선	43
그림 4.6 접합부별 $M-\theta$ 곡선	43
그림 4.7 Step별 응력분포 양상(더블웹브앵글)	45
그림 4.8 전이보 부재의 응력분포 형태	46
그림 4.9 부재별 하중-응력 곡선(더블웹브앵글)	46
그림 4.10 Step별 응력분포 양상(탑앤드시트앵글)	48
그림 4.11 전이보 부재의 응력분포 형태	49
그림 4.12 부재별 하중-응력 곡선(탑앤드시트앵글)	49
그림 4.13 상하부구조물의 전체제원	50
그림 4.14 전체모델 모식도	51
그림 4.15 슬래브 콘크리트 응력분포 및 변위(베이스플레이트)	53
그림 4.16 콘크리트 손상정도(베이스플레이트)	53
그림 4.17 전이보시스템 응력분포	54
그림 4.18 슬래브 콘크리트 응력분포 및 변위(전이보시스템)	55
그림 4.20 베이스플레이트 응력 모식도	57
그림 4.21 전이보시스템 응력 모식도	57
그림 4.22 반력에 따른 중앙부 처짐 곡선	58
그림 4.23 가력하중에 따른 중앙부 처짐곡선	59

ABSTRACT

Finite Element Analysis on Floating Superstructure of Connection with Transfer-Beam

Kim, Se-Cheol

Dept. of Ocean Architectural Engineering
Graduated School, Korea Maritime University

This study was intended to propose and introduce a structural system to solve stress concentration occurring in the base of the floating superstructure. Proposed structural system was investigated whether has structural performance through evaluation of the connection and analysis on stress distribution

This study analyzed the application of semi-rigid connection to reduce the additional moment caused by the deformation of a lower structure by wave load.

Through lateral force modeling, this study looked into the moment performance by drawing the moment-rotation curve of the connection. From axial force modeling, the distribution of stress occurring in transfer-beam and yield mechanism by axial force were analyzed.

The floating pontoon was modelled with concrete and valid performance of distributing stress through transfer-beam system was varified by the entire analysis. The conclusions drawn from this study are presented as follows:

1. In order for the analytical model of floating transfer-beam system like an actual connection, this study chose a option function that has ABAQUS program according to connection conditions. This study simulated the model of floating transfer-beam system with concrete.
2. In the case of the results from the lateral force modeling, the maximum moment performance of double web angle connection was above $20\text{KN}\cdot\text{m}$ compared to the top and seat angle connection. But, displacement was smaller on the same moment.
3. In the case of the results from axial force modeling, it could comprehend the vertical load transfer type of transfer beam system about two connections. Transferred stress was mainly distributed in the place where there is a element contacted with the upper flange of a transfer-beam. It found that vertical load was transferred to a lower flange through transfer-beam web. Also, the two connections had the same area that contacted the upper flange of a transfer-beam. But, the distribution of stress occurring in transfer-beam web was different depending on the density degree of each area.
4. Each connection has a different yield stress path. With respect to the yield type of load force, the double web angle connection generally had yield stress. Whereas the top and seat angle connection generally exceeded yield stress after load force reached 4000KN .
5. Transfer-beam system behaved in the shape of composite structure with concrete. Compared to base plate, it showed an improvement in the moment performance of the central part. By analyzing each support reaction force of the base plate and transfer-beam system model, this study found that the effect of transferring load to partition wall was improved.

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

산업규모의 거대화와 지구온난화, 환경보호에 대한 규제 등으로 인해 육상공간의 활용이 제한됨에 따라 해상공간을 활용하기 위해 플로팅 구조물에 대한 연구가 활발해지고 있다. 이에 따라, 최근 한강의 플로팅 아일랜드와 같이 플로팅 구조물의 수요가 증가하고 있는 추세이다.

플로팅 구조물에서 인간이 생활하고 거주하기 위해서는 플로팅 상부구조의 적합한 기능성, 쾌적성 및 안전성을 반드시 확보하여야 한다. 또한 파랑, 파압 및 하중과 같은 심한 해양환경에 지속적으로 노출되어 있으므로 특별한 설계조건을 만족해야 한다. 해양환경에 대한 내구성과 사용기간 중 영구손상이 발생하지 않아야 되며, 구조물의 붕괴를 방지하기 위해 구조 부재는 외부의 충격에너지와 변형을 적절히 흡수할 수 있어야 한다.

이러한 설계기준을 만족하기 위하여 플로팅 구조물은 파랑에 의해 발생하는 하부구조물의 부가모멘트와 파압에 의한 충격하중에 우수한 내구성을 지녀야 하며, 구조 부재는 충격에너지와 변형을 적절히 흡수하도록 적절한 연성을 가져야 한다.

플로팅 하부구조물은 전통적으로 강재로 건설되어 오고 있었다. 그러나 일부 플로팅 구조물은 콘크리트로 건설되고 있고 점차 콘크리트의 활용도가 증가하고 있다. 재료로서 콘크리트의 장점으로는 강재에 비해 낮은 제작비용과 낮은 유지관리 비용, 파압에 견딜 수 있는 내구성에 장점을 지니고 있다.

플로팅 상부구조물은 기초가 땅이 아닌 하부구조물에 지지되는 구조물로 상부구조물로 내려오는 정적하중은 하부구조물이 분담하는 형태를 띤다. 플로팅 상부구조물의 강재화 및 경량화는 하부구조물에 전달되는 하중을 줄이고, 사용성이 우수하며, 모듈제작에 따른 공기단축 효과를 누릴 수 있다.

일반적으로 지상 건축물의 경우에는 보-기둥 접합부나 주각부는 완전한 강접합이나 마찰이 없는 핀으로 가정된다. 플로팅 구조물 특성상 파랑하중, 풍하중과 같은 횡하중의 영향에 노출되어 있기 때문에 강접합으로 하게 되면 하부구조물의 변형에 의해서 상부구조물에는 부가모멘트가 크게 발생하게 된다. 부가모멘트의 저감을 위해 강재를 이용한 반강접 접합부를 도입하여 위 문제를 해결할 수 있다.

하부구조물은 격벽으로 이루어진 콘크리트 구조물로서 상부구조물에서 내려오는 하중은 격벽을 통해 하부구조물의 밑면에 응력을 전달하게 된다. 플로팅 구조물의 격벽의 경우, 플로팅 구조물이 위치하는 해수 깊이, 염분농도, 파랑하중 등을 고려하여 안전한 흡수확보를 위해 적절한 중공부를 가지게 된다. 기둥이 내려오는 지점마다 격벽을 두어 하중을 전달하는 방식을 선택하면 합체의 단위 중량이 증가되어 적당한 흡수확보를 하지 못하여 월파 등 재해문제에 노출될 가능성이 크다. 부수적인 단점으로 시공적인 단점, 격벽추가로 인한 공사비 증가 등이 있다.

필연적으로 격벽이 설치되지 않은 곳이나 보강부재가 설치되지 않은 곳에 상부구조물의 주각부가 위치하게 되어 상부구조물로부터 내려오는 하중을 격벽으로 제대로 전달하지 못하고 하중집중현상과 처짐에 의한 구조적인 문제가 발생한다.

본 논문에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서 집중응력을 분산시키는 전이보시스템을 제안하고 전이보시스템의 압축력 전달 매커니즘의 성능 개선 효과가 유효한지를 검토하며, 플로팅 철골주각부의 구조성능을 개선함과 함께 경제성과 시공성을 개선하는 주각부 시스템을 개발하기 위하여 전이보시스템을 적용시킨 상부구조물의 접합부에 대한 유한요소해석을 수행하는 것을 목적으로 한다.

1.2 연구동향

플로팅 구조물에 대한 연구는 한국해양대학교에서 해양수산부 주관으로 초대형 부유식 구조물의 상부구조물에 대한 연구(해양수산부 2000~2008)가 이루어졌고, 플로팅 구조물에 대한 반강접 접합부를 고려한 적용한 연구 사례로는 Drain-2D를 사용한 접합부 구속조건을 고정, 50%고정, 힌지를 사용하여 근사 해석한 연구사례와 2차원 플로팅 상부구조물에 대한 Three-Parameter Power model, Richard Power model 제안식을 적용하여 반강접 접합부를 적용한 연구 사례가 있고, 최근 들어 플로팅 상부구조물에 대한 거주성에 대한 연구(송화철 외 2명, 2009)가 이루어졌고 국토해양부에서 주관한 수해양 문화공간을 위한 정주형 플로팅 건축 설계기술 개발 연구(국토해양부, 2010)에서 플로팅 상부구조물에 반강접 접합부를 적용한 연구와 ABAQUS를 사용하여 반강접 접합부를 적용시킨 3차원 모델에 대한 전해석 및 상부구조물에 대한 연구(박종서, 2012)가 있다. 이영옥(2012)은 콘크리트를 이용한 플로팅 함체의 사례를 제시하며, 콘크리트 함체 설계를 위한 기준을 제시하였다.

기존 육상건물의 주각부에 대한 연구로 임우현(1996) 외 3명은 기본적인 주각부 형태인 노출형 철골주각부에서 기초콘크리트에 작용하는 중심축하중에 따른 지압강도 분포를 구명하기 위하여 지압강도에 영향을 미치는 요인 중 지압면적비, 시험체의 단면크기와 높이를 실험변수로 하여 각 실험체의 중심축력에 대한 지압강도의 영향을 분석하였다. 김재봉(1998) 외 1명은 1998년 J.P.Jaspot와 D.Vandegans가 연구한 실험데이터를 바탕으로 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 철골기둥과 베이스플레이가 용접된 철골 주각부를 유한요소로써 모델링하고 해석을 수행하였다. 홍갑표(2005)는 메탈터치에 의한 기둥이음의 응력체계를 구명하여 이음의 합리성을 증진시키고자 이음의 경제성 및 시공성을 위해 틈의 크기를 변수로 하여 메탈터치 실험을 실시하고, 메탈터치 기둥이음부의 거동을 실험적인 방법과 해석적인 방법을 통하여 비교·분석하였다. 같은 해

수행한 연구에서 철골기둥에 압축력을 가했을 때 볼트 또는 용접부등의 응력전달체계를 구명하고, 기둥이음부 밀착접합에서 발생하는 응력전달기구와 변형모드, 이음부의 내력등에 관하여 연구를 수행하였다. 김정현(2005)은 축력과 모멘트를 동시에 받는 철골주각의 거동에 관한 연구로 축력비, 베이스플레이트 두께에 따른 주각부가 받는 지압응력 분포 분석 및 거동을 분석하였다.

전이보 구조시스템에 대한 연구를 살펴보면, 이선문(2002)은 전이보에 대한 해석기법 및 실제 구조해석에 직접 설문지를 작성하여 구조해석을 하는 패턴에 대해 모색하고, 또한 정해치를 찾기 위한 과정으로 2차원, 3차원, 유한요소해석을 통한 비교 검토하였다. 심인기(2003)는 전이보 시스템의 전이보에 작용하는 하중 형태의 분석과 전이층에서의 불균등한 수직응력분포의 산정방안에 대한 연구를 수행하였다.

플로팅 상부구조물의 모듈러공법 적용을 위한 기존 연구동향으로는 국내 모듈러 건축 시스템은 2002년 POSCO와 RIST가 개발한 ‘프레임-스터드 패널형 모듈러 건축시스템’이 대표적이다. 이는 철강의 신규 수요 창출과 학교, 군막사, 재해복구용 주택 등 공기단축과 이동 및 재사용이 가능한 건축시스템을 요구하는 공공 건축물에 적용하기 위해 개발되었으며 이후 모듈러 건축물에 대한 다양한 연구 및 평가가 이루어지고 있다. 김경희(2004)의 2명은 모듈러 학교 건물의 구조시스템을 평가함과 동시에 모듈의 구성, 모듈의 접합 및 양중 설계에 관하여 연구하였다. 이철호(2005)의 4명은 모듈러 공법 적용을 위한 신형상 냉간성형 철골보의 휨거동에 관한 연구를 통하여 보의 단면형상, 보의 춤, 슬래브와 합성유무, 보의 비틀림 방지 등에 대한 휨 실험을 수행하여 사용성을 검토하였다. 송화철 외 1명(2011)은 모듈러시스템을 적용한 플로팅 상부구조물을 MIDAS Gen을 이용하여 모델링을 구현하고 주각부 강제변위로 치환한 파랑하중에 의한 모듈러시스템의 거동 및 변형양상을 연구하였다.

반강접 접합부에 대한 연구는 더블웹브앵글뿐만 아니라 접합부 종류별, 형태별로 다양하게 연구가 진행되었으며, 각각의 접합부에 대한 실험과 해석, 그리고 이를 통한 예측식 모델 도출 등과 같은 반강접 접합부에 대한 연구가 활발

히 진행되었다. Munse 등(1959)에 의해 고력볼트를 사용한 접합부에 대한 모멘트-회전각 관계가 정립되었고, 이후 여러 연구자들에 의해 전단 접합부에 대한 실험을 통하여 더블앵글 접합부의 거동과 보의 웨브강성이 앵글의 거동에 미치는 영향 및 모멘트-회전각 관계곡선에 대한 연구와 더불어 인장력 실험과 압축력 실험을 수행되었다. 그 밖에 고력볼트의 개수 및 앵글두께에 따른 실험 또한 진행되었는데, 양재근(1997)에 의해 축방향 인장력 및 전단력을 받는 더블앵글 접합부에 대해 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 이용하여 거동이 고찰되었다. 그 이후로 김기환(2005)은 비선형 유한요소해석을 통한 더블앵글 접합부의 거동에 대한 연구를 수행하여 단순해석모델을 제안하였다. 천지원(2008)은 무보강 탑-시트 앵글 접합부의 초기강성 및 극한모멘트 예측모델을 제시함으로써 접합부의 거동을 분석하였다.

1.3 연구범위 및 방법

본 논문에서는 플로팅 상부구조물의 주각부에 발생하는 집중응력을 해결하기 위한 구조시스템을 제안 및 소개하고, 제안된 구조시스템이 적합한 구조성능을 가지는지를 검토하고, 접합부 강성평가 및 응력분포 파악을 통해 구조적인 검증하고자 한다.

본 논문의 연구방법으로 파랑하중에 의해 발생하는 하부구조물의 변형에 의한 부가모멘트를 감소시켜줄 반강접 접합부를 적용한 주각부에 대한 해석으로 횡력가력모델을 통한 접합부의 모멘트-회전각 곡선을 도출함으로써 모멘트 성능을 알아보고, 축력가력모델을 통한 전이보에 발생하는 응력분포분석 및 소성해석을 통한 축력에 의한 항복메카니즘을 분석한다. 콘크리트로 모델링된 플로팅 하부구조물이 전이보시스템을 통해서 집중응력을 분산시키는 성능이 유효한지 알아보기 위해 전체해석을 수행하였다.

유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 모델링을 하고 FEM해석을

수행한다

본 논문의 내용을 간략히 정리하면 다음과 같다.

2장에서는 플로팅구조물 거동 및 전이보시스템에 대한 이론을 소개하며, 또한 본 논문에서 제안하고자 하는 플로팅 전이보시스템의 개요 및 연결부에 대해 설명한다.

3장에서는 제안하고자 하는 플로팅 전이보시스템의 제원 및 주각부에 적용시킬 반강접 접합부에 소개하며, 해석모델에 사용된 ABAQUS의 모델링 기법에 대해 기술한다.

4장에서는 횡력가력모델 해석을 통한 접합부의 모멘트 성능을 분석하고, 축력가력모델 해석을 통해서 전이보시스템의 구조성능 개선 효과에 대해 분석한다.

5장에서는 구조해석의 결과를 토대로 플로팅 전이보시스템의 구조성능을 검증한다.



2. 플로팅구조물 전이보시스템

2.1 플로팅 구조물 거동의 이론적 고찰

2.1.1 개요

세계적으로 이용 중이거나 건설중인 플로팅 유닛 시스템이 170개에 달한다. 그 중 55%은 FPSO로 구성되어 있으며, FPSO는 정유시설을 갖춘 상부구조물과 토목으로 이루어진 하부구조물로 나뉜다. 최근 7년간 상부구조물과 하부구조물간의 접합부 시스템의 중요성이 다양한 관점에서 재조명되고 있다. FPSO 프로젝트에서의 가장 큰 쟁점은 설계 및 상부구조물과 하부구조물 사이의 부분을 구조적으로 검증하는 것이다. 플로팅 구조물의 구조적인 안전성을 추구하기 위해서는 상부구조물과 하부구조물간의 설계가 중요시되어 가고 있다. 그리고 또한 접합부의 안전성을 보장하기 위하여 접합부를 평가하는 데에도 초점이 맞춰져 있다. 프랑스 선급협회에서는 구조물에 가해지는 항복, 굽힘, 피로강도 등과 같은 응력 수준을 설정하는 데에 기여해왔다. 평가는 다음과 같이 수행된다. (Guillaume Gourdet, 2008)

- 응력 및 거동을 알아보기 위한 3D 메쉬 모델
- 주요부재의 구조적인 검증을 위한 세부적인 3D 메쉬 모델
- 세부 접합부를 위한 피로강도 분석

2.1.2 플로팅 구조물의 상부 하중

하부구조물의 접촉면은 상부구조물의 하중을 하부구조물로 전달하기 때문에 중요한 요소로 작용하고 있다. 하부구조물과 상부구조물 사이에 지지점을 통한 하중 분포는 상부구조물의 구조적인 설계에 달려있다. 상부구조물의 하중은 다음과 같다.

- 주요 상부구조물의 자중
- 주요 장비의 중심지점 및 하중
- 상부구조물의 잔여공간의 관성, 중심지점 및 하중

하부구조물로 전달되는 상부구조물 하중의 경로는 하부구조물이 위치한 현장의 환경과 가속도에 의해 달라지기도 한다.

2.1.3 플로팅 하부구조물의 변형

하부구조물과 상부구조물의 접촉면을 구조적으로 명시하는 주요 요인은 하부구조물이 강체구조물이 아니기 때문이다. 하부구조물은 끊임없이 파랑하중과 내력에 의해 변형된다. 변형요인으로는 크게 하부구조물의 변형, 응력집중 현상에 따른 영향 등 두 가지로 나눌 수 있다.

(1) 하부구조물의 변형

하부구조물의 변형 형태는 주요 3가지로 나누어진다.

- 수직 휨모멘트
- 수평 휨모멘트
- 뒤틀림

주요 3가지 변형 형태는 하부구조물에 가해지는 중량분포 및 하부구조물에 가해지는 파랑효과로 이루어져 있다. 단·장주기 수직, 수평 휨모멘트 및 뒤틀림은 유사스펙트럼에 의해 계산된다.

① 수직 휨모멘트

‘정수’ 또는 ‘정적’ 일 때의 해석은 자중에 의한 단위당 부력을 산정하는 데에 이용되고, 부력은 하부구조물의 변형, 변위, 홀수차에 의해 정의된다. 정수 중의 하중으로 인한 하부구조물에 가해지는 영향은 정적 소프트웨어 프로그램을 이용함으로써 분석이 가능하다. 최대 수직 휨모멘트는 초기 설계 단계에서 허용치안으로 정의되고, 이는 구조물의 사용주기동안 사용된 모든 하중이 결과값 밑으로 유지되도록 해야 한다.

일반적으로 수직 휨모멘트는 가장 균일한 하중 패턴이고, 파랑에 의한 수직 휨모멘트는 하부구조물의 길이만큼 작용되며 앞쪽과 뒤쪽에 최대로 작용된다. 상부구조물에 비교하여 하부구조물의 강성으로 인해, 상부구조물에 강제변위가 작용된다. 그래서, 상·하부구조물의 접촉면은 특별한 강성을 가진 모듈로 사용되어야 한다. 그림 2.1은 FPSO 모델의 수직 변형을 나타낸 그림이다.

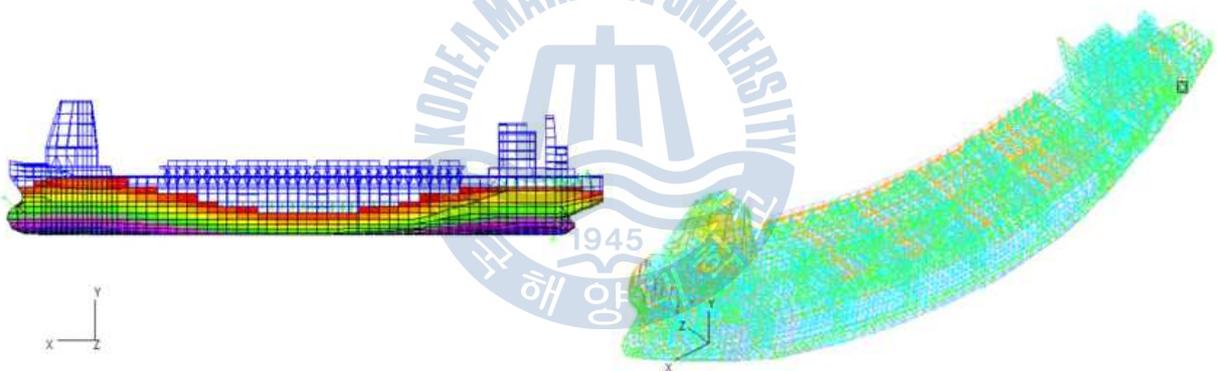


그림 2.1 FPSO 모델의 수직 휨 형태

② 뒤틀림

일반적으로 정적인 뒤틀림은 무시할 정도이고, 하부구조물에 탑재된 정유시설을 위해 계산된다. 뒤틀림에 의한 변형 형태는 다음과 같다. 그림 2.2은 FPSO 모델의 뒤틀림형태를 나타낸 그림이다.

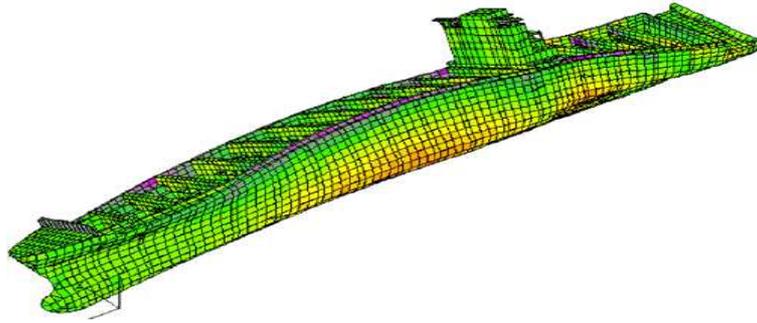


그림 2.2 FPSO 모델의 뒤틀림 형태

파랑에 의한 뒤틀림은 선체의 3분의 1지점에 가장 최대로 발생된다. 이것은 하부구조물의 형태와 밀접한 관계를 맺고 있다. 뒤틀림에 의한 평가는 발생된 뒤틀림의 중심을 알아야 한다.

구조적으로 갑판이 안전하면 무시해도 되지만, 오픈된 갑판 위의 컨테이너와 같은 선체에는 치명적이다. 최근 FPSO 연구에 따르면, 극심한 환경 및 다양한 하중 패턴이 규명되어서 이를 무시할 수 없을 정도이다.

③ 수평 휨모멘트

수평 휨모멘트는 축방향을 중심으로 작용하는 패턴이다. 정수 중에 횡력이 작용되지 않기 때문에 정적인 수평 휨모멘트는 고려할 필요가 없다. 하지만 파랑에 의해 풍랑 또는 너울 방향에 작용할 경우는 반드시 평가되어야 한다. 파랑에 의해 횡력이 부가되는 경우 선체 중간에 큰 수평 휨모멘트가 발생되기 때문이다. 그림 2.3은 FPSO 모델의 수평 휨 형태를 나타낸 그림이다.

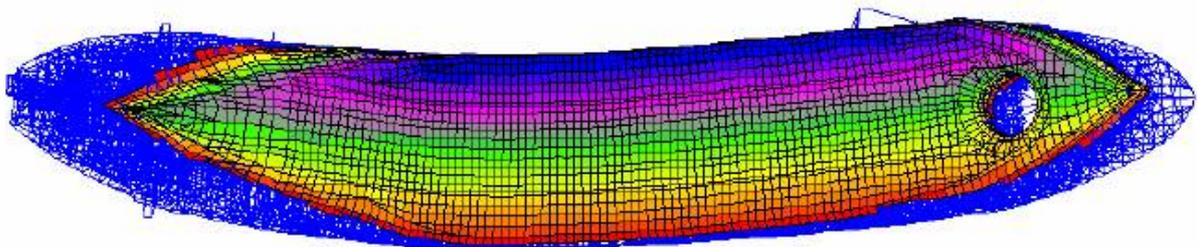


그림 2.3 FPSO 모델의 수평 휨 형태

(2) 응력집중현상에 따른 영향

① 프아송 효과

하부구조물이 호깅(hogging)상태에 놓여있을 때, 선체에 강한 인장력이 발생한다. 이에 따라 횡방향으로 반응하는 경향을 가지고 있다. 이는 정수중에는 무시할 만 하지만, 선체의 횡방향 웨브 프레임구조를 설계하는데 가장 중요한 요인이다. 그림 2.4은 호깅상태에서의 하부구조물의 단면도를 나타낸 그림이다.

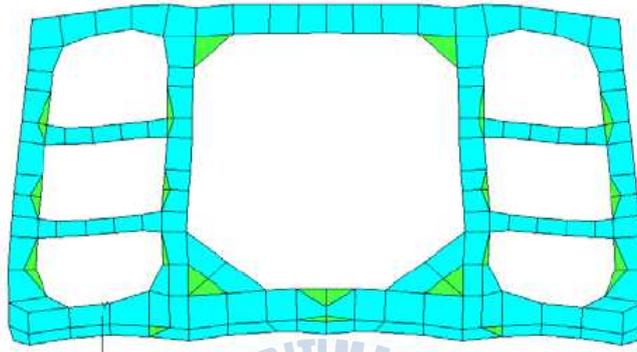


그림 2.4 하부구조물의 단면도

② 상부구조물에 의한 영향

하부구조물의 변형은 상부구조물에 따라 영향을 받는다. 수직하중에 대한 변형은 하부구조물의 높은 강성으로 인한 강제변위로 고려된다. 하지만 이 부분에서 국부변형이 발생되어 하부구조물에 상당한 영향을 끼칠 수 있다.

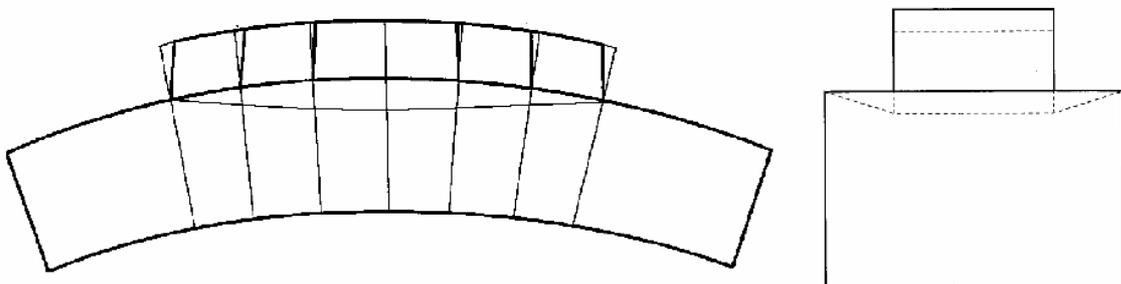


그림 2.5 상부구조물로 인한 하부구조물의 국부 변형

2.2 전이보시스템의 해석기법

기존의 전이보시스템은 육상구조물에 적용한 구조시스템으로 플로팅 상부구조물로 전이보시스템을 적용한 사례가 없어 일반적인 전이보시스템의 이론적 고찰을 위해 육상구조물에 쓰이는 전이보시스템의 해석기법에 대해 고찰한다.

2.2.1 전이 시스템의 형식

최근 도심의 교통문제나 주거문제로 인하여 주상복합, 오피스텔 등과 같은 복합용도의 건축물들이 많이 건설되고 있으며, 그 구조는 하부골조-상부벽식 형태인 복합구조물의 형식을 이루고 있다. 이러한 복합구조물은 상부와 하부의 구조형식 차이로 인하여 상부구조체의 하중을 하부구조체로 원활하게 전달하기 위한 다양한 전이시스템이 요구되어 진다. 이러한 전이시스템의 역할은 상부구조체가 받는 하중을 하부구조체로 원활하게 전달시키기 위한 매개체로 그 대표적인 형식은 전이보(Transfer beam), 전이 트러스(Transfer Truss), 전이판(Transfer Plate) 등이 있다. 이러한 구조시스템 중에 전이보는 상부구조체가 받는 하중을 하부구조체로 원활히 전달하기 위한 매개구조체로서 커다란 보의 형태를 나타내는 보를 말한다. (이선문, 2002)

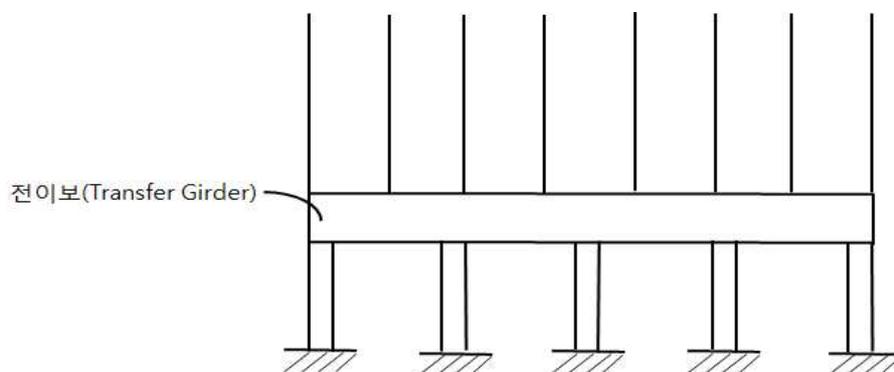


그림 2.6 전이보(Transfer beam)

2.2.2 전이보의 상세해석

전이보를 포함한 구조물의 해석이나 전이보의 설계를 위한 해석과정시 2차원 또는 3차원해석만으로는 실제 구조물의 구조적 거동을 분석할 수 없으며, 주각부의 응력집중현상이나 전이보의 인장응력상태 등을 파악하기 어렵다. 따라서 유한요소해석(Finite element analysis)을 이용하여 상세해석을 수행하는데, 유한요소해석에서는 전이보와 인접부위만을 모델링하는 부분 유한요소해석모델과 전체 유한요소해석으로 나눌 수 있다. 전체 유한요소해석의 경우가 가장 신뢰할 수 있는 결과를 얻을 수 있으나, 출력자료가 방대하고 해석시간이 많이 소요되므로 적절한 방법이라 볼 수 없다.

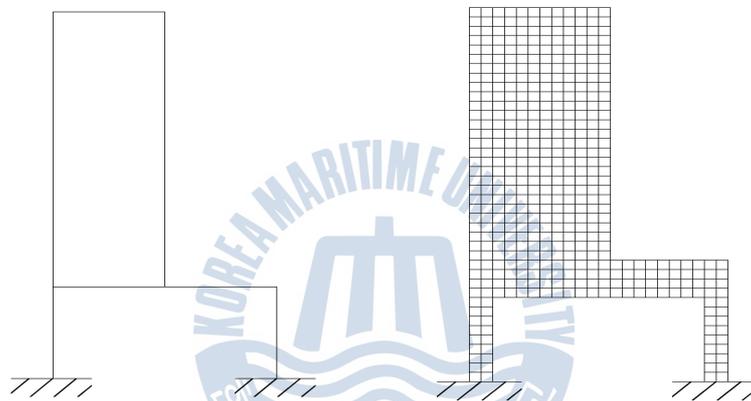
현 구조설계사무소에서 전이보의 설계시 2차원 또는 3차원 해석에 의한 결과만으로 신뢰성에 문제가 있음을 파악하고, 부분적으로 유한요소해석을 병행하고 있는 실정이다. 그러나 유한요소 해석과정은 전문적인 지식이 요구되며 모델링작업이 난해하고 전이층에 존재하는 모든 전이보에 대해 상세해석을 수행할 수 없기 때문에 각 사무소 나름대로 시행착오를 거치면서 얻어진 보다 간단하고 편리한 방법에 의해 유한요소 해석모델을 구현하고, 일부 전이보에 대해서만 상세해석을 수행한다. 그리고 2차원 해석 결과 또는 3차원 해석결과 비교하여 안전율을 확보한 후 전이보의 설계를 수행한다.

전이보의 상세해석모델은 2차원 해석모델의 경우처럼 전체구조물에서 해석하고자 하는 전이보의 열(line)을 잘라 전이보와 하부골조 및 전이보 상부구조물만으로 구성되며, 이러한 해석모델을 바탕으로 사용요소 또는 해석기법을 중심으로 실무에서 적용하는 상세해석기법의 모델을 정리하면 그림 2.7과 같다.

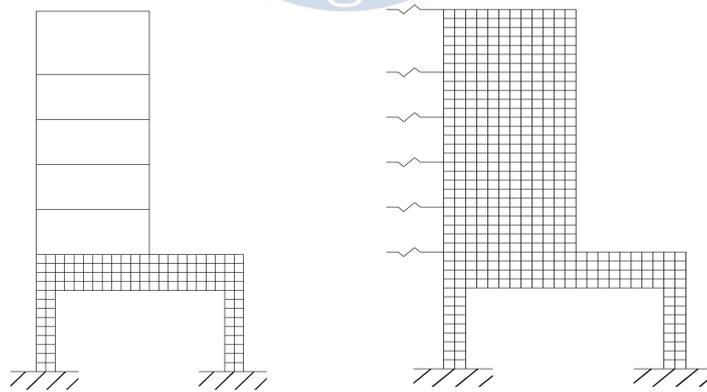
- (a) 모델 1 - 전이보와 기둥은 보요소(beam element)로 모델링하며, 전이보 상부의 전단벽은 셸요소(shell element)로 구성한다. 단 이때 최소 4bay 이상으로 분할한 후 mesh를 설정한다. 이 경우 전이보와 전단벽이 만나는 절점은 서로 공유되며, 전이보의 단면은 보의 중심

선을 기준으로 입력되어진다.

- (b) 모델 2 - 전이보와 기둥 및 상부전단벽을 모두 쉘요소(shell element)로 모델링한 후 쉘의 두께를 각 부재의 해당 두께로 변화하여 상세해석 모델을 구성한다.
- (c) 모델 3 - 모델 2와 동일한 방법으로 전이보와 기둥을 쉘요소로 모델링하고, 전이보 상부전단벽은 유한요소모델이 아닌 일반 판넬(Panel)로서 매 층당 1bay의 벽체로 모델을 구성한다.
- (d) 모델 4 - 모델 2와 동일한 방법으로 유한요소 해석모델을 구성한 후 슬래브의 횡지지 조건을 추가로 고려하여 모델을 구성한다.



(a) 모델 1 (b) 모델 2



(a) 모델 3 (b) 모델 4

그림 2.7 상세해석기법의 모델

2.3 플로팅 상하부 구조물 연결부

2.3.1 전이보시스템 제안배경

플로팅 구조물은 바닥 지지조건은 일반 건축물과는 다르게 바다위에 위치하기 때문에 상부구조물의 자중, 활하중 등에 의해 하부구조물의 변형이 발생하게 된다.

함체는 격벽으로 이루어진 하부구조물로서, 그림 2.8의 A는 기둥과 격벽이 수직으로 일직선으로 내려온다면 하중전달에 문제가 없지만, 그림 2.8의 B는 기둥이 내려온 곳에 격벽이 없거나 중공부에 위치하여 어긋나게 된다면 하중전달이 원활히 되지 못하고 한 곳에 집중되는 형상을 초래한다. 응력집중현상이 심화된다면 상부구조물의 보-기둥 접합부의 경간마다 변위차가 발생되어 상부구조물에 부가모멘트가 발생함은 물론이고, 중공부에 집중된 응력이 구조적인 문제를 발생시킬 우려가 크다.

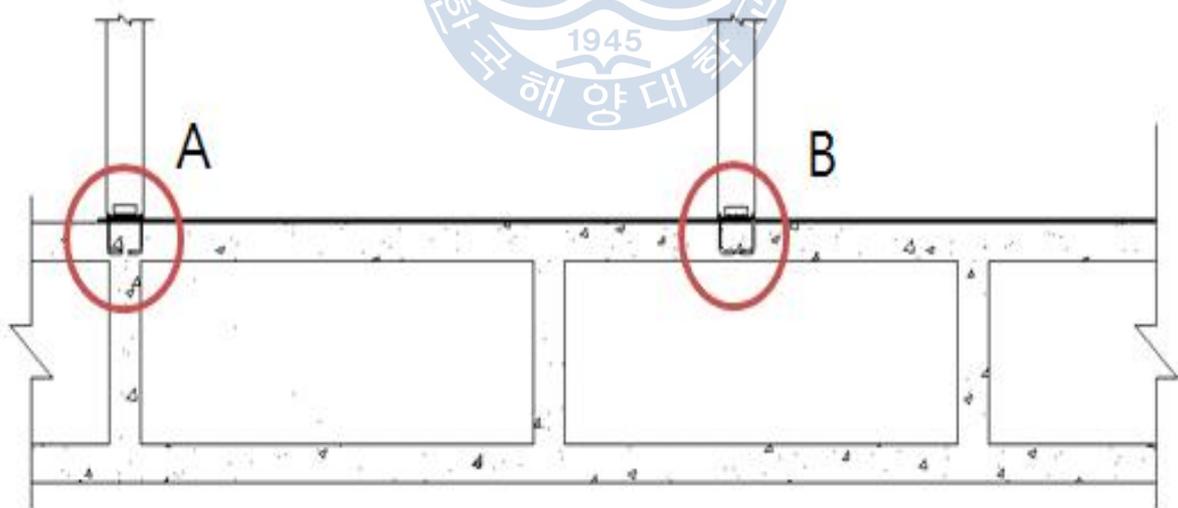


그림 2.8 플로팅 구조물 단면도

2.3.2 플로팅 하부구조물의 응력분포 연구

격벽 유무에 따른 하부구조물에 발생하는 응력분포를 알아보기 위한 결과를 아래에 기술하고자 한다. 플로팅 구조물의 합체 구조물은 콘크리트 구조물로 이루어져 있으며 2009 건축 구조 설계기준 (0511.4.2.3 최소두께)에 따라 지하실 외벽 및 기초벽체의 두께인 200mm를 사용하여 격벽 두께를 설정하였다. 합체 구조물의 슬래브 또한 2009건축구조설계기준인 표 2.1(0504.3.2.2 무량판의 최소 두께)를 적용하였으며 외부에 노출되어 있으므로 외부 슬래브의 테두리보가 없는 경우의 콘크리트 항복강도 400MPa를 적용하여 250mm의 두께로 가정하였다.

표 2.1 내부에 보가 없는 슬래브의 최소두께

설계기준 항복강도(MPa)	외부슬래브		내부슬래브
	테두리보가 없는 경우	테두리보가 있는 경우	
300	$l_n/32$	$l_n/35$	$l_n/35$
350	$l_n/31$	$l_n/34$	$l_n/34$
400	$l_n/30$	$l_n/33$	$l_n/33$

그림 2.9는 하부구조물은 Shell요소로 콘크리트 모델이고, 상부구조물은 Beam요소로 철골 모델링이며, 파랑하중이 없을 경우 자중, 활하중에 의한 수직 변형을 나타낸 것이다. 상부구조물의 기둥의 간격은 7m로 이루어져 있으며 이에 따라 격벽의 간격을 7m와 14m로 가정하여 수직변형량 및 응력분포를 파악하였다.

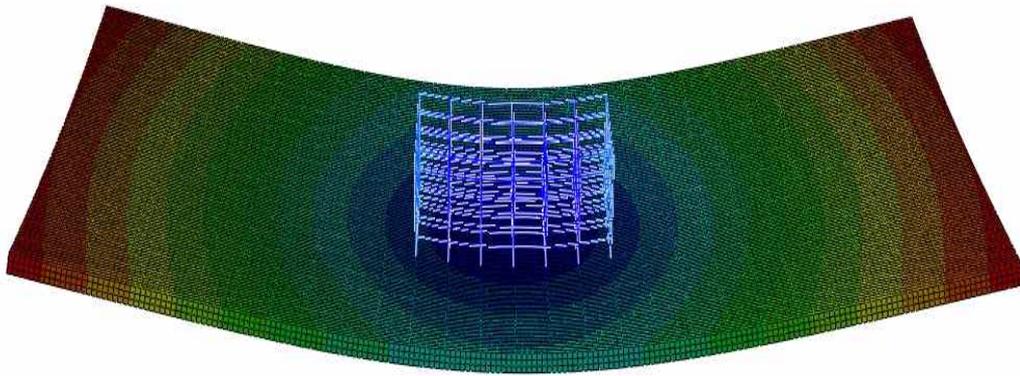


그림 2.9 플로팅 하부구조물의 변형

표 2.2 격벽에 따른 구조물 수직 변형량(박종서, 2012)

	7m 격벽 수직 변형량	14m 격벽 수직 변형량
■	+0.0200 m	+0.0230 m
■	-0.0145 m	-0.0137 m
■	-0.0491 m	-0.0504 m
■	-0.0836 m	-0.0871 m
■	-0.1181 m	-0.1237 m
■	-0.1527 m	-0.1604 m
■	-0.1872 m	-0.1971 m
■	-0.2217 m	-0.2338 m
■	-0.2563 m	-0.2705 m
■	-0.2908 m	-0.3072 m
■	-0.3253 m	-0.3439 m
■	-0.3560 m	-0.3806 m
	-0.3944 m	-0.4472 m

함체의 구조물의 격벽의 간격을 7m와 14m로 하였을 경우 구조물의 수직 변형량은 표 2.2와 같다. 7m 간격의 격벽을 사용하였을 경우 14m의 격벽을 사용하였을 때보다 최대 수직 변위량은 0.0528m의 차이를 보였다.

함체구조물의 응력 변화는 그림 2.10, 2.11과 같다. 7m 간격의 격벽을 사용하였을 경우 14m의 격벽을 사용하였을 때 보다 표 2.2에 보이듯이 최대 응력의 차이는 $+1.93E+6$, $-4.557E+8$ 를 보였다. 그림 2.11는 격벽이 위치하지 않는 곳의 주각부에 응력이 집중되는 현상을 볼 수 있고, 이는 주각부마다 상대변위가 생겨서 상부구조물에 부가모멘트가 발생하게 된다.

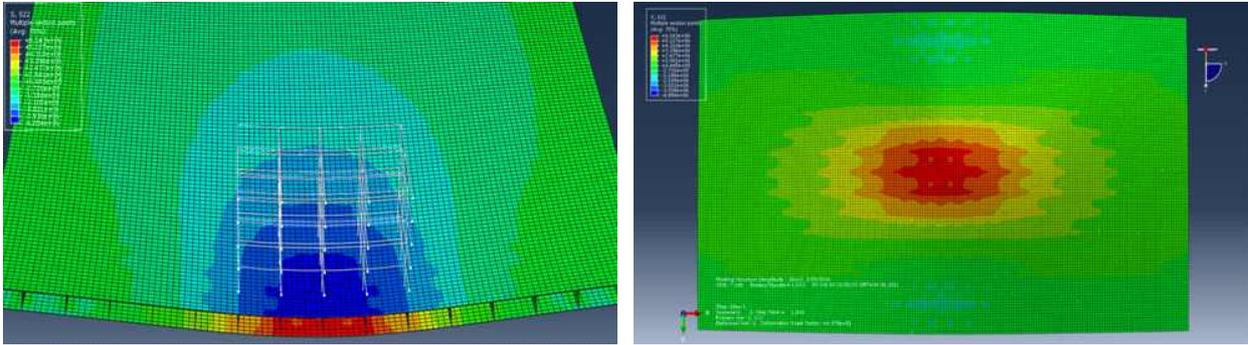


그림 2.10 7m 격벽 하부구조물 응력분포

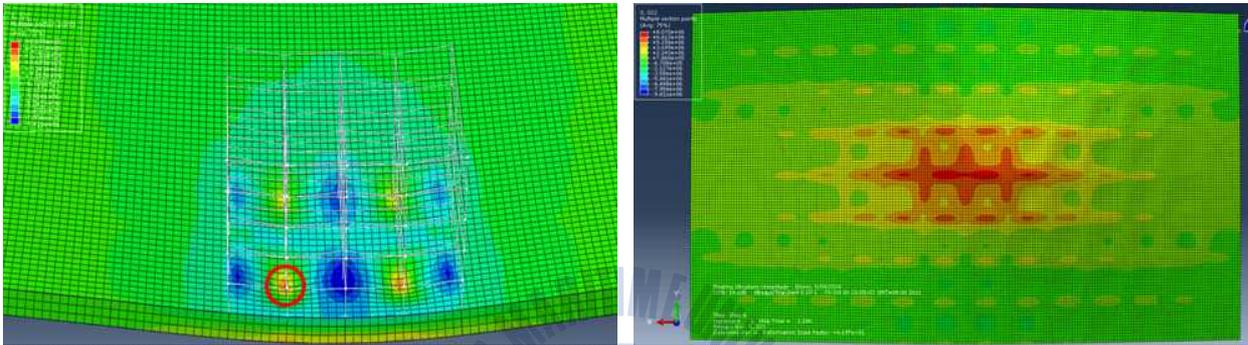


그림 2.11 14m 격벽 하부구조물 응력분포

표 2.3 격벽에 따른 구조물 응력 변화(박중서, 2012)

	7m 격벽 응력 변화	14m 격벽 응력 변화
■	+6.143E+6 N/m ²	+8.070+6 N/m ²
■	+5.227+6 N/m ²	+6.613+6 N/m ²
■	+4.310+6 N/m ²	+5.156+6 N/m ²
■	+3.394+6 N/m ²	+3.699+6 N/m ²
■	+2.477+6 N/m ²	+2.243+6 N/m ²
■	+1.561+6 N/m ²	+7.860+6 N/m ²
■	+6.445+5 N/m ²	+6.708+5 N/m ²
■	-2.720+5 N/m ²	-2.127+5 N/m ²
■	-1.188+6 N/m ²	-3.584+6 N/m ²
■	-2.105+6 N/m ²	-5.041+6 N/m ²
■	-3.021+6 N/m ²	-6.498+6 N/m ²
■	-3.938+6 N/m ²	-7.954+6 N/m ²
■	-4.854+6 N/m ²	-9.411+6 N/m ²

2.3.3 전이보시스템 개요

플로팅 구조물은 강재를 이용한 상부구조물(모듈러 유닛)과 콘크리트를 이용한 하부구조물은 시공의 편의성 및 경제성 등의 이유로 플로팅 구조물을 제작하는데 적합하다.

하지만, 상부구조물과 하부구조물의 구조시스템이 상이하기 때문에 접합부에 하중전이(Load transfer)와 같은 구조적인 문제가 발생되고, 이는 접합부의 안전성을 확보해야함을 의미한다. 또한 기초가 땅이 아닌 대형 하부구조물에 지지되는 접합부에 과량하중에 의한 부가모멘트가 발생되므로 이를 해결하기 위한 방법이 필요하다.

본 구조시스템은 상부구조물의 주각부분과 하부구조물의 접합부분에 발생하는 응력을 줄이기 위해 그림 2.12의 전이보(Transfer Beam)를 만들어 구조적인 문제를 해결하고 시공성 및 경제성을 고려한 반강접 접합부를 설계하고자 한다.

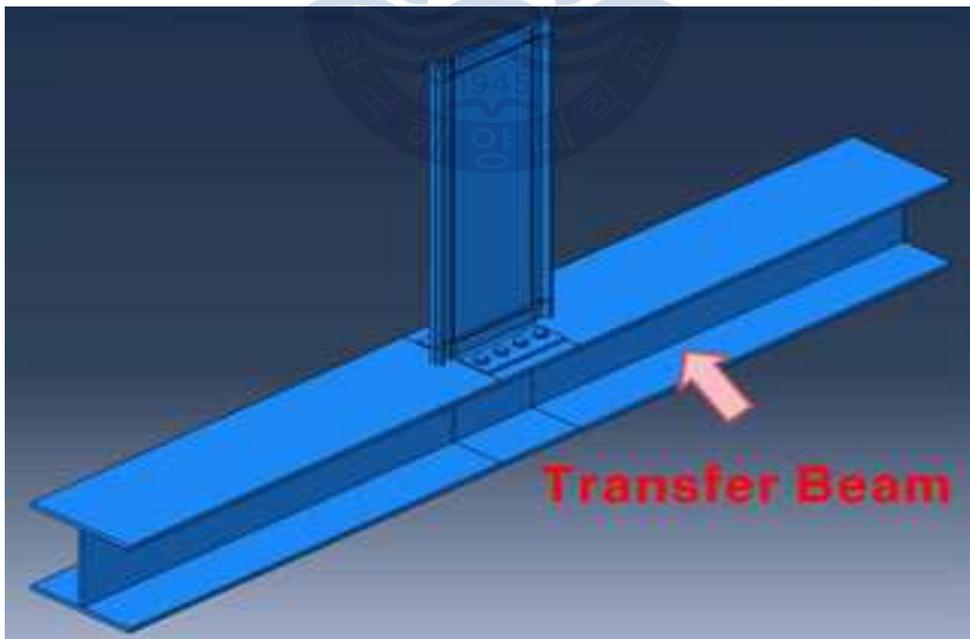


그림 2.12 전이보시스템

그림 2.13, 2.14은 전이보시스템을 다양한 형태의 골조에 적용시킨 예로, 설치 전과 설치후를 나타낸 그림이고, 그림 2.15는 플로팅 상부구조물 주각부에 전이보시스템을 적용한 그림이다.

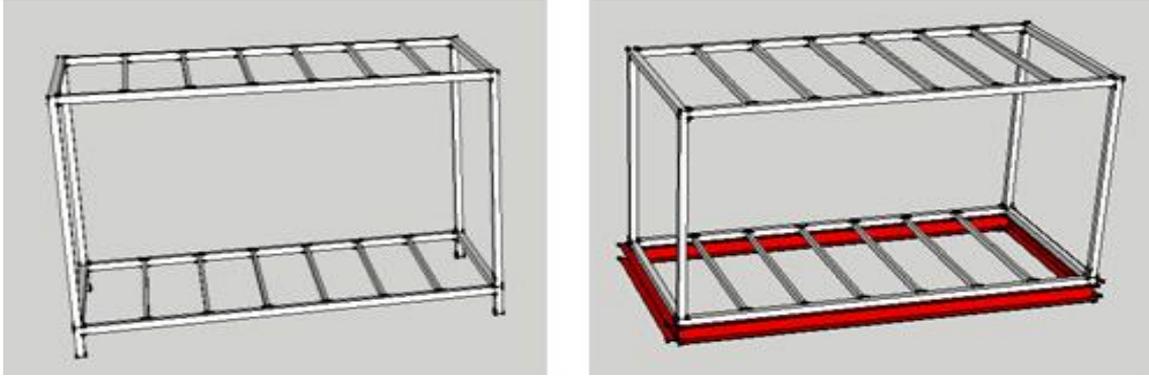


그림 2.13 모듈러시스템에 전이보 설치 모습(좌:설치전, 우:설치후)



그림 2.14 H형강을 이용한 강구조물에 전이보 설치모습 (좌:설치전, 우:설치후)

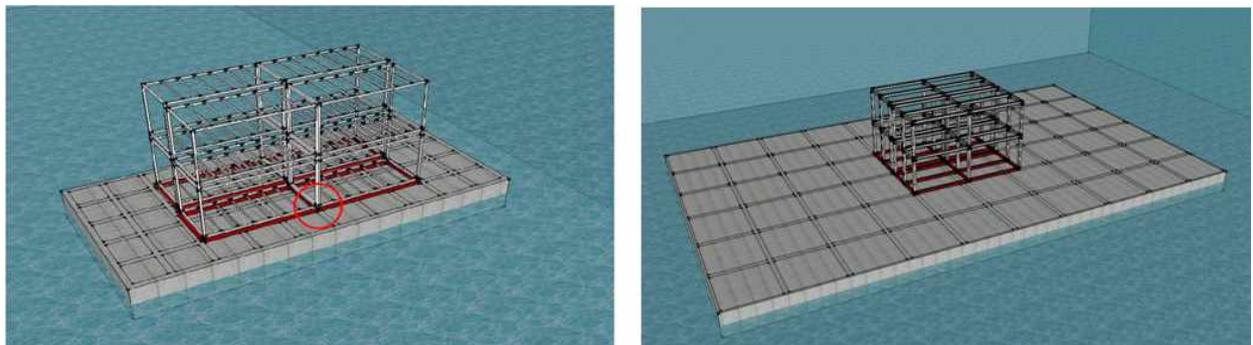


그림 2.15 전이보를 설치한 플로팅 구조물

콘크리트를 이용하여 하부구조물을 제작할 경우 하부구조물의 적절한 중량 및 시공성을 고려하여 격벽으로 중공부가 형성되고, 상부구조물의 주각부가 격벽이 위치하지 않은 곳에 설치될 경우에 그림 2.16의 A-2와 같은 지점에 상부구조물로부터 내려오는 집중하중에 의해 하부구조물에 응력집중현상이 발생한다.

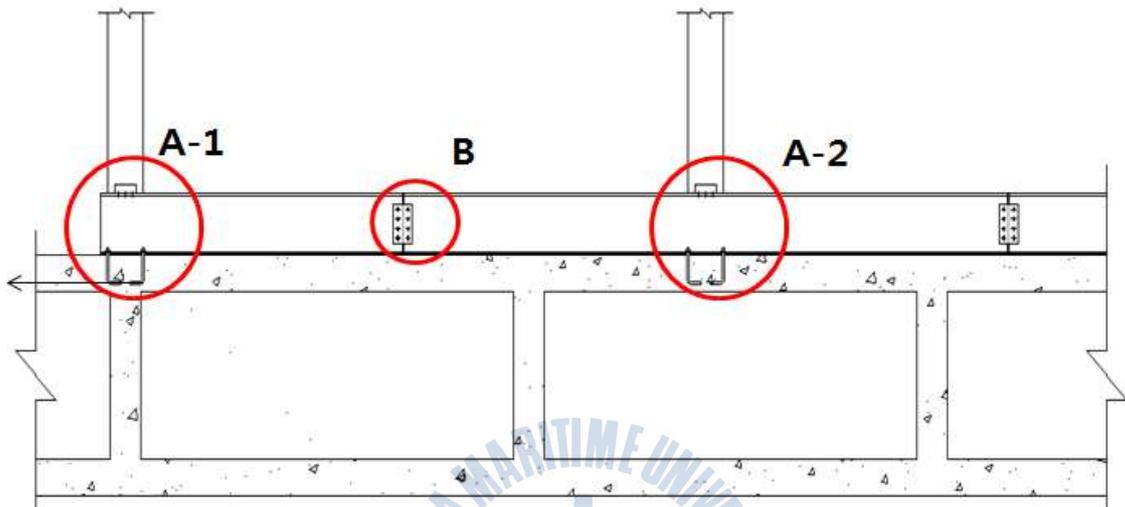


그림 2.16 전체 단면도

본 구조시스템은 응력집중현상에 따른 구조적인 문제를 해결하기 위해 상부구조물의 주각부와 콘크리트 합체 사이에 전이보를 설치한다. 전이보는 강재를 이용한 모든 상부구조물에 설치 가능하며, 작용하는 하중과 사용성을 고려하여 부재의 크기를 선정한다.

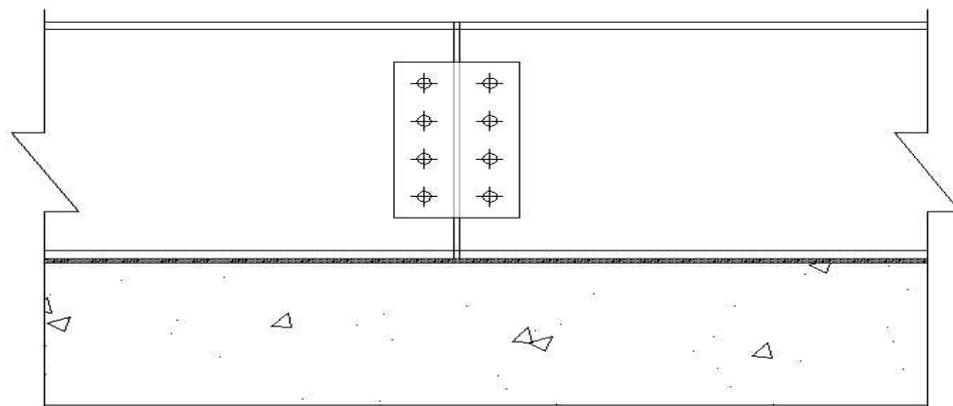


그림 2.17 전이보 이음부

그림 2.17은 그림 2.16의 B부분을 나타낸 그림이다. 전이보의 스패인이 길기 때문에 철골부재의 가공, 운반, 설치 등의 용이성 및 경제성을 고려하여 전이보간에 고력볼트를 이용하여 이음을 실시한다. 고력볼트를 이용한 이음은 힌지접합으로 모멘트가 발생하지 않는다.

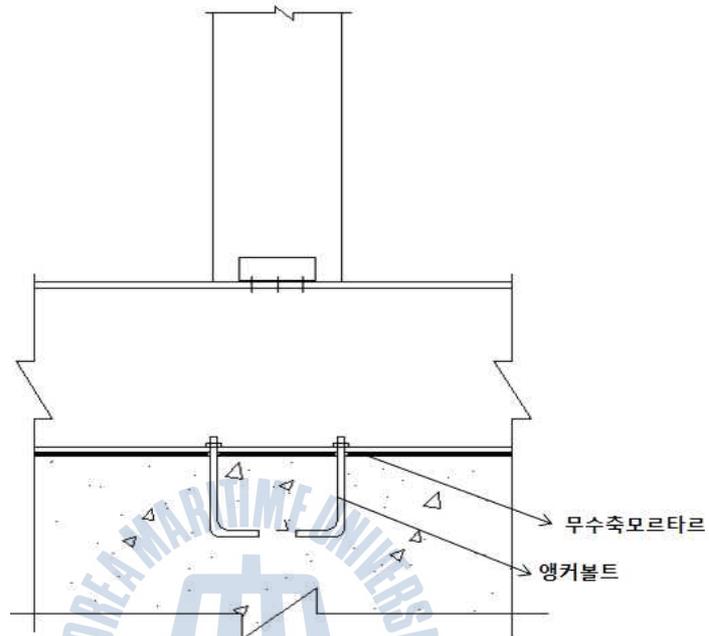


그림 2.18 전이보 주각부

그림 2.18은 그림 2.16의 A부분을 나타낸 그림이다. 전이보와 콘크리트함체 사이의 접합은 기계기초의 앵커부 및 교량받침의 하부를 고정하는 재료로서 가장 많이 사용되는 무수축 모르타르를 이용하여 콘크리트함체와 전이보의 밑면을 밀착하며, 앵커볼트를 이용하여 하부구조물에 지지하고, 앵커볼트의 위치는 주각부가 위치한 곳에 설치한다.

3. 플로팅 구조물 전이보시스템 해석모델

3.1 해석 모델 개요

일반적인 지상 건축물의 주각부의 역할을 플로팅 구조물의 전이보가 하기 때문에 기둥의 플랜지 폭과 전이보의 플랜지 폭을 일치시켜 충분히 하중 전달할 수 있게 설정하였다.

일반적인 지상건축물의 보-기둥 접합부에 쓰이는 접합부와 달리 전이보시스템의 쓰이는 반강접접합부는 기둥과 전이보간의 이격거리가 존재하지 않는다. 일반적인 보-기둥접합부처럼 이격거리가 존재한다면, 기둥과 전이보가 메탈터치(metal touch)되지 않아서 하중을 제대로 전달하지 못하고 앵글부의 볼트에 응력이 집중되는 현상을 초래하게 된다. 전이보시스템에서는 기둥과 전이보간에 간격이 존재하지 않고 메탈 터치(metal touch)되어 있다.

본 연구에서 사용된 비선형 유한요소해석은 상용 프로그램인 ABAQUS 6.10을 이용하였으며, 모델링 구현은 ABAQUS/CAE, 해석은 ABAQUS/standard로 나누어 진행되었다. 그림 3.1은 주각부가 중공부 정 가운데에 위치할 때의 해석모델을 나타낸 그림이다.

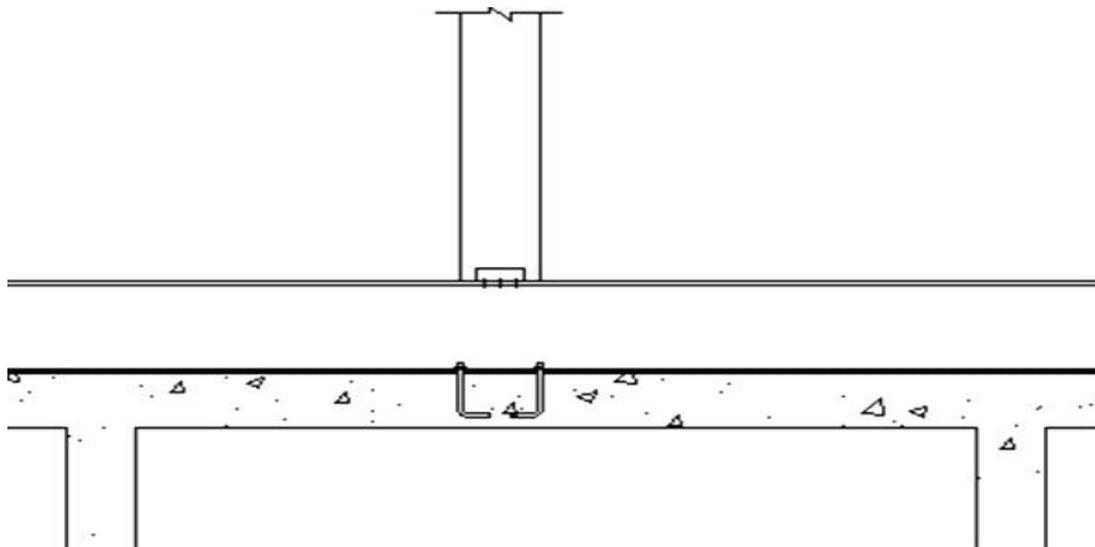


그림 3.1 플로팅 구조물 단면도

본 연구모델의 주각부에 적용시킨 반강접 접합부는 더블앵글접합부인 더블웹앵글접합부, 탑앤드시트앵글 접합부를 적용시킨다.

더블 웹 앵글 접합부는 그림 3.2(a)에서와 같이 기둥과 보 웹 모두에 볼트 또는 리벳으로 접합된 두 개의 앵글을 사용한다. 1950년대에 대부분의 철골 구조 설계에 대한 규준은 리벳 대신 고장력 볼트를 사용하는 것을 허용하였다. 더블앵글 접합부는 앵글의 특별히 굵이 큰 경우 사용하중 하에서 보의 고정단 모멘트의 20% 정도를 전달하지만 AISC ASD 규준 (AISC, 1989)에서는 이 접합부를 단순접합 또는 전단접합으로 분류하고 있다.

그림 3.2(b)는 전형적인 상하 앵글 접합부를 나타내고 있다. 상부앵글은 보의 압축 플랜지의 횡방향을 지지하기 위한 것이고, 하부앵글은 단지 보의 수직 반력을 기둥에 전달하기 위한 것이므로 보의 단부에 모멘트를 구속할 필요는 없다. 그러나 실험결과에 따르면 이 접합부는 수직하중 뿐만 아니라 어느 정도의 보단부 모멘트를 전달하는 것으로 나타났다.

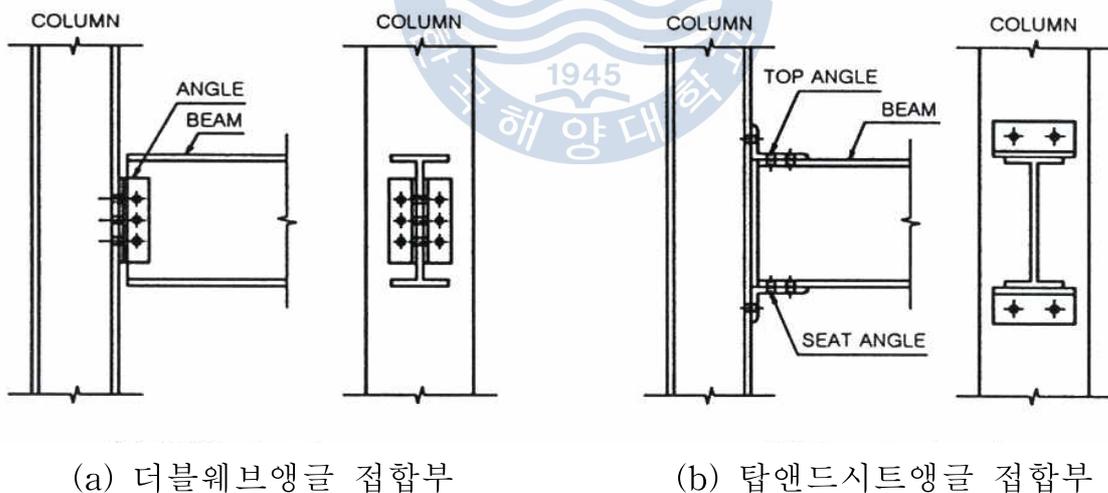


그림 3.2 반강접 접합부

3.2 재료 및 요소 모델

본 논문에서 적용시킬 재료 모델은 그림 3.3와 같이 이선형(bi-linear)재료 모델을 사용한다. 강재의 물성치는 SS400이며, KS D 3503 규격에 맞는 물성치를 다음과 같이 적용시킨다. 고력볼트의 물성치는 F10T이며, KS B 1010 규격에 맞는 물성치를 다음과 같이 적용시킨다. 콘크리트 재료물성치는 그림 3.4, 표 3.3와 같이 기존문헌('IDENTIFICATION OF PARAMETER OF CONCRETE DAMAGE PLASTICITY CONSTITUTIVE MODEL' Tomaz JANKOWIAK, Tomaz LODYGOWSKI 2005)을 참고하였다.

표 3.1 강재 물성치 제원

종류	항복강도(mm)		인장강도 (N/mm^2)	탄성계수 (N/mm^2)	프아송비
	16mm 이하	16초과 40 이하			
SS400	245	235	400	205000	0.3

표 3.2 고력볼트 물성치 제원

볼트의 기계적 성질에 따른 등급	항복강도		인장강도 (N/mm^2)	연신율(%)	단면수축률(%)
	(N/mm^2)	(N/mm^2)			
F10T	900 이상	1000 ~ 1200	14 이상	40 이상	

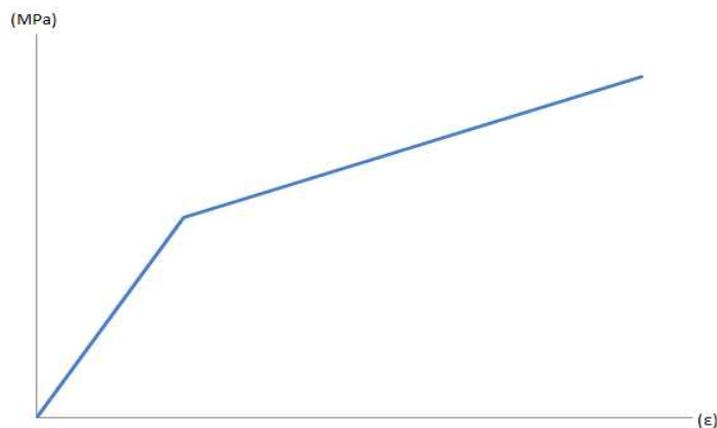
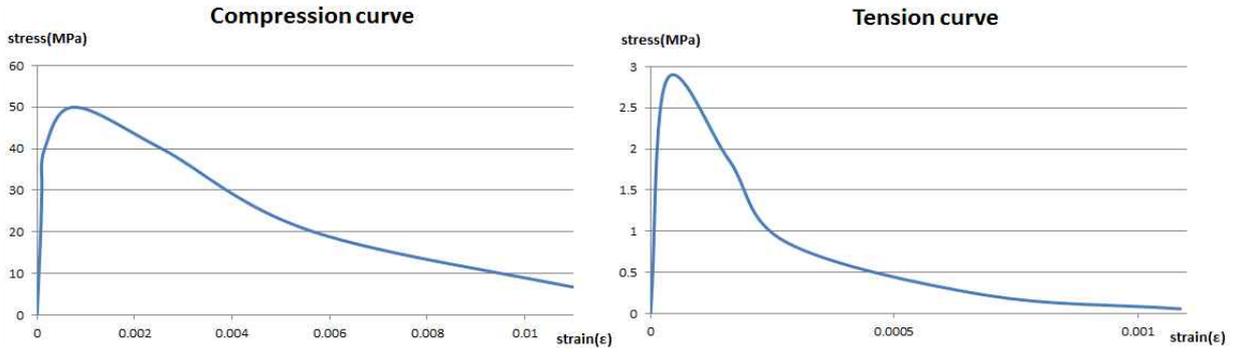


그림 3.3 이선형 재료 모델



(a) 압축 거동

(b) 인장 거동

그림 3.4 콘크리트 재료모델

표 3.3 콘크리트 매개변수

Concrete elasticity		The parameters of CDP model	
		β	38°
E(GPa)	19.7	f_0/f_c	1.12
ν	0.19		0.666

β : 골재 입자 각도, m : 이심률, K : 인장 자오선위의 2차 응력비

f_{t0}/f_c : 초기 등축 항복응력과 초기 비축 항복응력의 비

본 논문에서의 유한요소 해석은 요소의 타입에 민감할 뿐 아니라 메쉬 사이즈와 모델에 방향성에도 결과 및 해석시간에 영향을 미친다. 해석모델의 거동이 실제 접합부의 복잡한 거동과 동일한 거동특성을 나타내기 위해서는 최적의 부재요소와 메쉬크기 또는 올바른 옵션이 필요하다.

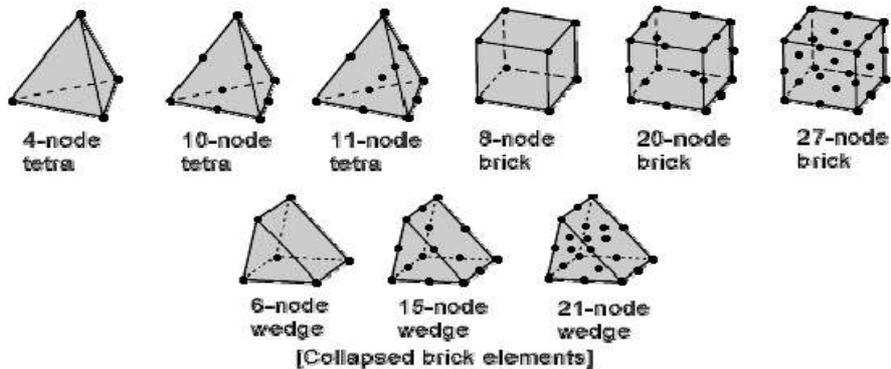


그림 3.5 3차원 요소

본 논문에서 사용한 요소는 6면체요소 (8 node brick element)이며, ABAQUS에서 제공하는 해당 요소는 다음과 같이 세 가지 타입을 포함하고 있다.

- ① A brick element with incompatible deformation modes (C3D8I element)
- ② A brick element with reduced Intergration (C3D8R element)
- ③ A brick element with standard intergration (C3D8 element)

접합부 해석에서 취약지점으로 관심이 되는 위치는 주로 앵글접합부 또는 콘크리트 모델에 삽입된 앵커부 등이 있다. 따라서 이러한 변형이 예상되는 지점에는 메쉬간격을 세분화하여 정확한 응력 및 변형율을 도출할 수 있도록 해야 한다.

사면체 요소와 육면체 요소의 경우 축소 적분을 사용할 수 있다. 축소 적분은 적분점을 줄여서 각 방향에서 한 개의 적분점을 사용한다. 1차 적분 요소의 경우 요소의 도심에 단 한 개의 적분점을 가진다. 1차 축소 적분 요소는 수치 문제로 너무 과도하게 변형되는 특징이 있지만, 적분점을 지나는 선은 길이는 변화하지만 각도는 변화하지 않는다. 이것은 요소의 적분 점에서 모든 응력 성분이 없다는 것을 의미한다. 2차 축소 적분 요소는 복잡한 응력 상태에서도 잠김 현상이 발생하지 않는다. 축소 적분 요소는 일반적인 응력, 변위 해석에서 가장 좋은 결과를 계산한다.

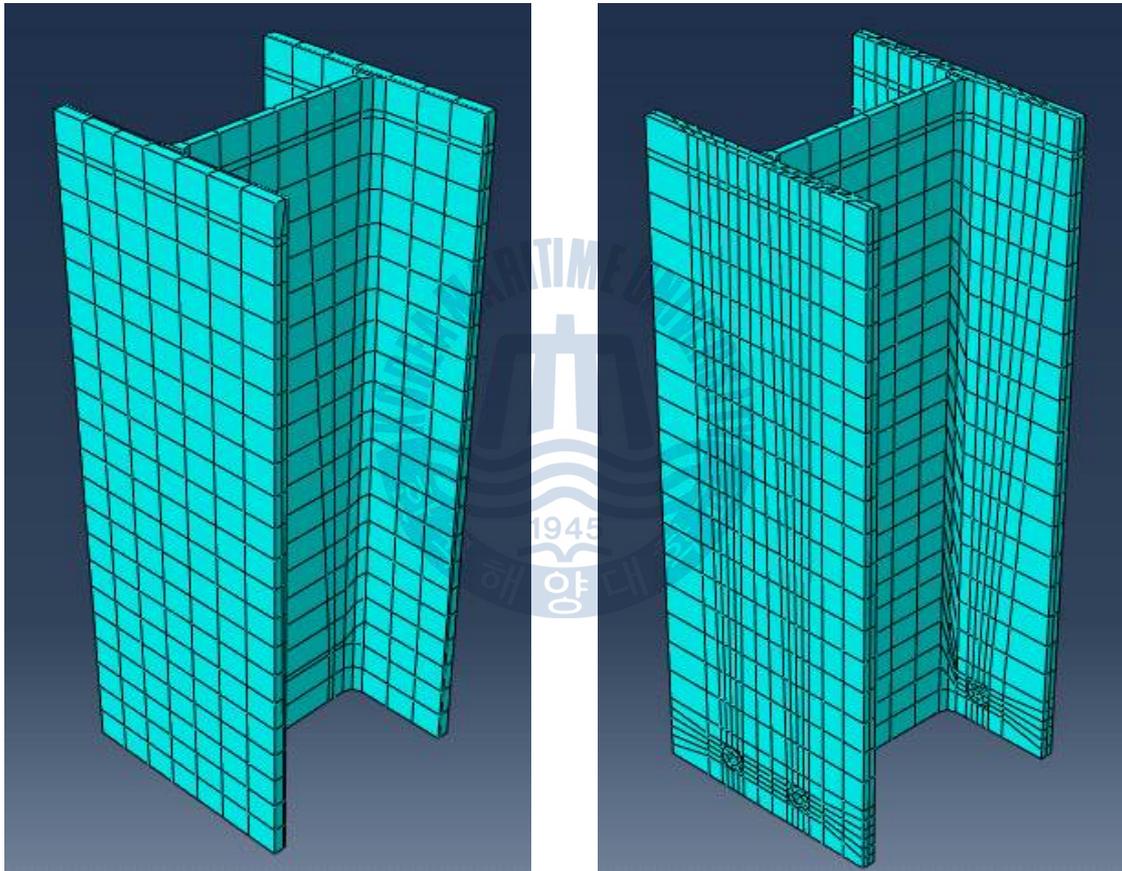
Ricles et al.(2000)의 연구보고에 의하면 감차적분을 사용한 요소를 제외하고 나머지 각 타입의 요소들의 결과는 기둥과 보 플랜지 두께의 요소 분할 수에 큰 영향이 없었다. 이는 C3D8R 요소가 메쉬 분할 수에 아주 민감함을 시사하였다. 또한 C3D8I 요소와 C3D8 요소는 많은 양의 데이터용량과 계산 과정이 복잡하여 해석 시간과 전산처리에 있어서 고성능을 요구한다.

본 연구에서는 효율적인 계산 운영과 해석시간을 줄이기 위하여 감차적분요소(C3D8R)를 사용하였다.

3.3 요소 모델링

(1) 기둥

3.2장에서 언급했듯이 솔리드 요소는 ABAQUS의 C3D8R를 사용하였다. 그림 3.6은 기둥 부재같은 경우 접합되는 면적에 따라 용접부(더블웹브앵글), 볼트(탑앤드시트앵글)부분만 파티션을 나누어 설정하였다. mesh 사이즈는 부재의 중요도, 크기, 해석시간 등을 고려하여 50mm으로 설정하였다.



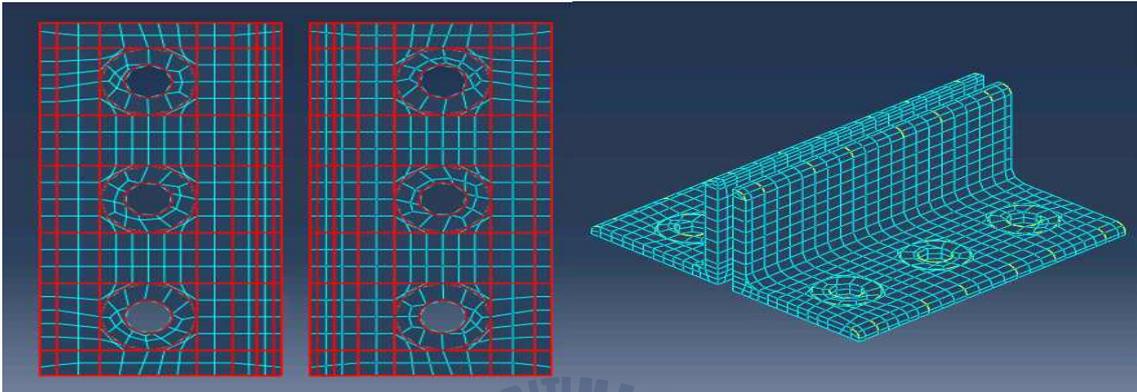
(a)더블웹브앵글

(b)탑앤드시트앵글

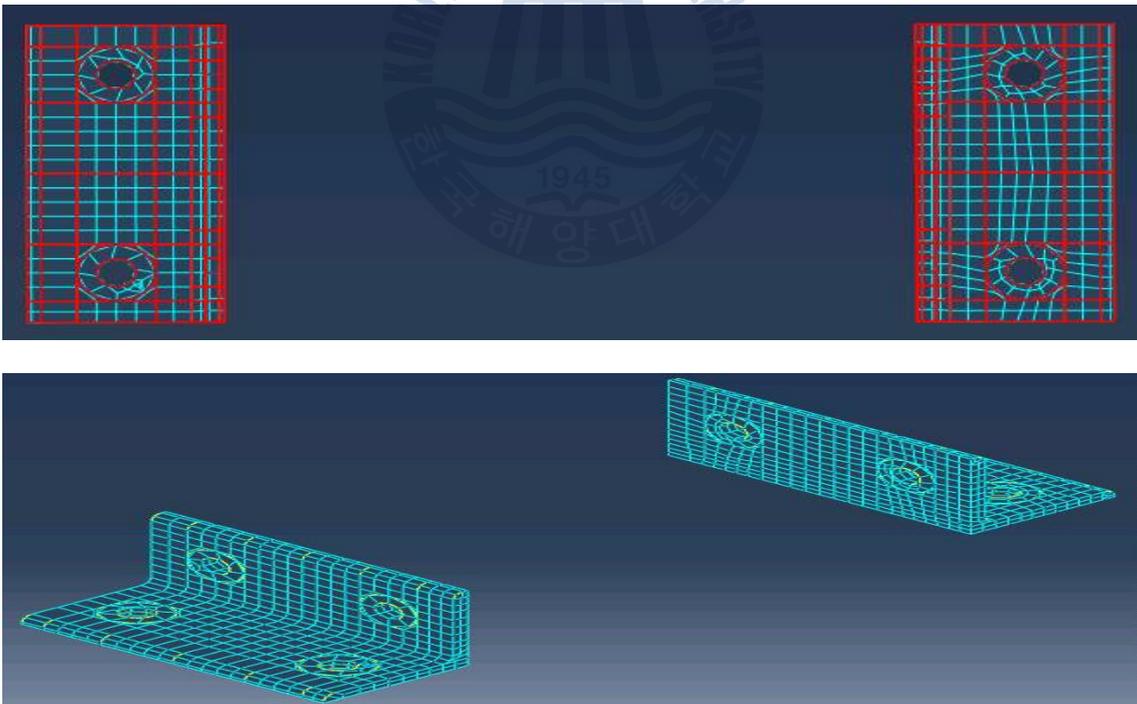
그림 3.6 기둥부재 모델링

(2) 앵글

그림 3.7은 앵글부재의 볼트가 접촉될 부분에 원형형태로 천공이 되어 있기 때문에 천공부분 주위로 정사각형태로 파티셔닝을 수행하였고, 앵글부재의 모서리마다 라운딩되어 있는 Fillet 반경 중심선에서 일직선으로 파티셔닝을 수행하였다. 접합부 부재의 중요도에 따라 mesh간격을 10mm로 설정하였다.



(a) 더블웹브앵글

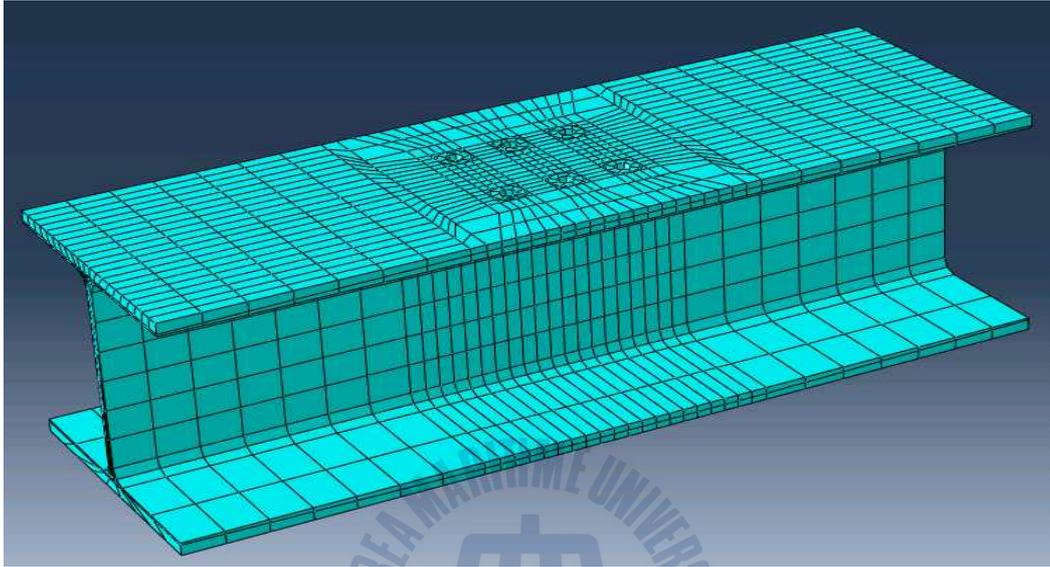


(b) 탑앤드시트앵글

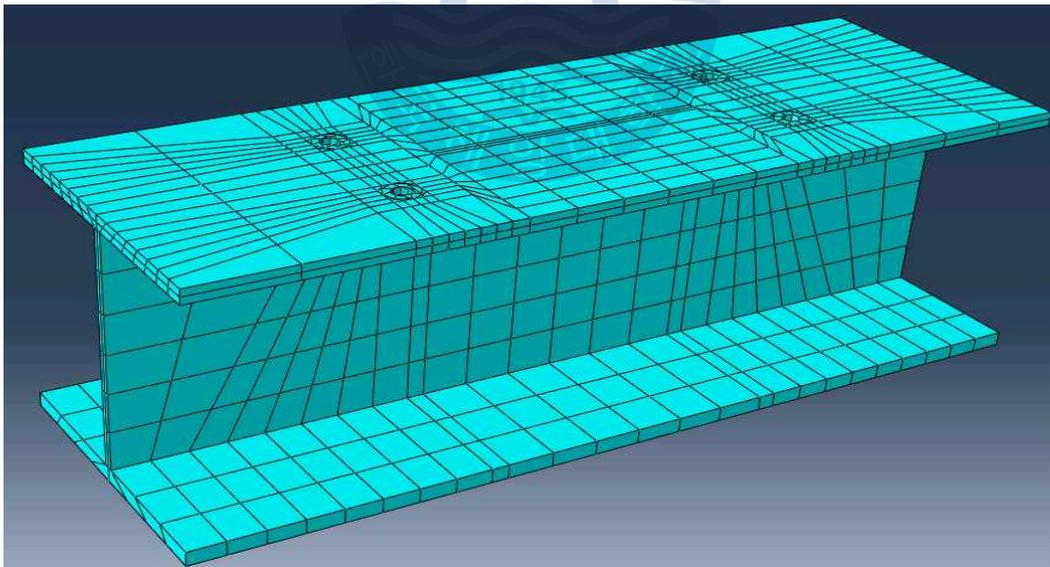
그림 3.7 앵글부재 모델링

(3) 전이보

그림 3.8은 전이보를 나타낸 것으로 볼트가 접촉되는 천공부분 주위로 정사각형 형태로 파티셔닝을 수행하고, 전이보에 부착될 기둥, 스티프너, 앵글 면적을 각각 설정하였다.



(a) 더블웹브앵글

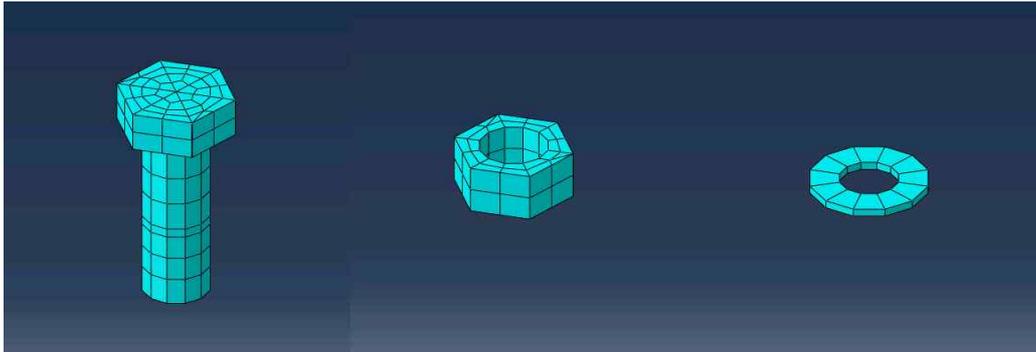


(b) 탑앤드시트 앵글

그림 3.8 전이보부재 모델링

(4) 볼트부

아래와 같은 부재들은 부재의 크기를 고려하여 mesh크기를 10mm으로 설정하였고, 부재의 축방향을 중심으로 대칭적으로 파티셔닝을 수행하였다.



(a)볼트

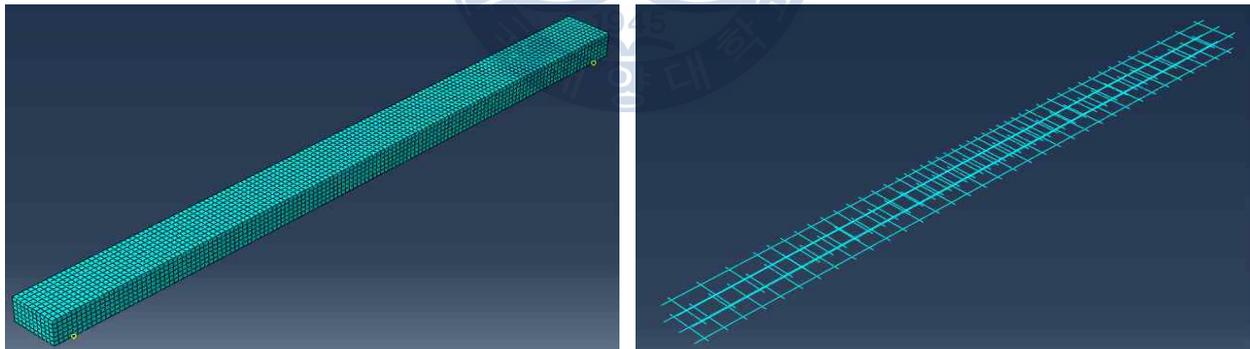
(b)너트

(c)워셔

그림 3.9 볼트부 모델링

(5) 콘크리트 및 철근

콘크리트 부재의 전체 크기 사이즈 및 해석시간을 고려하여 mesh크기 50mm로 설정하였다.



(a) 콘크리트

(b) 철근

그림 3.10 콘크리트 및 철근 모델링

(6) 기타

시공상으로는 전이보시스템과 하부구조물 사이의 부재로 앵커부재와 모르타르부재가 있다. 앵커부재의 경우, 전이보시스템과 하부구조물을 연결하는 부재로서 주로 인발력이 작용할 때 구조성능이 작용된다. 모르타르부재의 경우, 전이보시스템과 하부구조물간의 부착능력을 부여하기 위한 부재로 주로 전단력이나 인발력이 작용할 때 구조성능이 작용되는 공통점을 지니고 있다. 현재 상용되고 있는 내염성을 가지는 무수축 모르타르의 압축강도는 70Mpa까지 발현이 가능하며, 수직하중을 완전히 전달하기 위한 강도를 가지고 있다고 사료된다. 본 연구에서는 수직하중에 의한 압축력만을 고려하므로 본 해석모델에서는 생략한다.

3.4 전이보시스템 전체 모델

그림 3.11과 같이 각 부재를 Assembly시켜서 전체적인 전이보시스템의 제원은 전이보 1m, 기둥 1m 높이로 이루어져 있으며, 축력 가력중에 전이보의 웨브에 좌굴현상을 우려하여 스티프너로 보강한 형태이다.

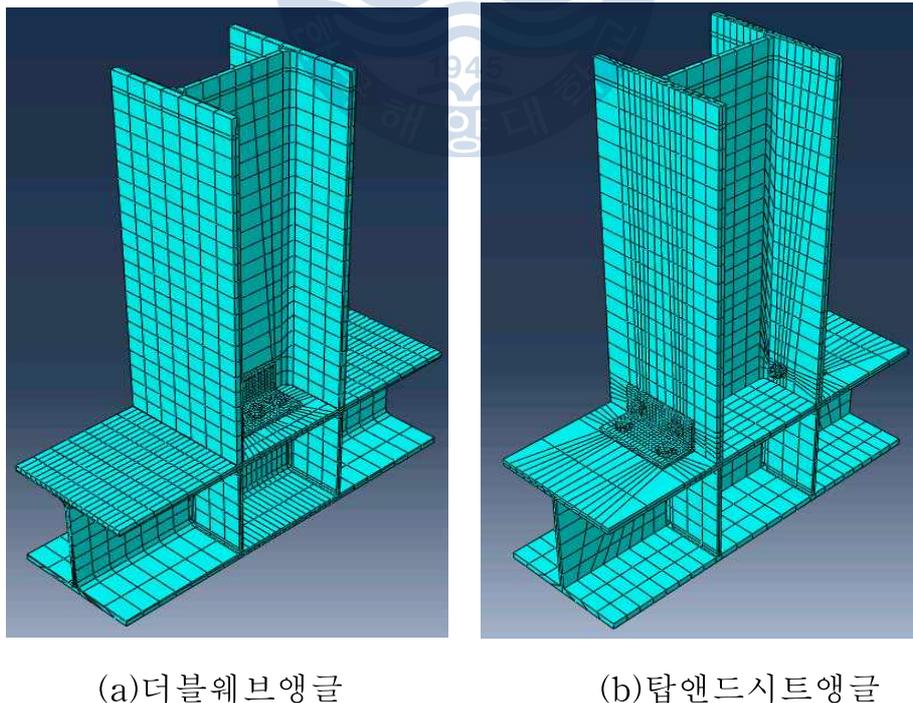


그림 3.11 전이보시스템 모델링

그림 3.12는 전이보시스템에 적용될 각 부재의 기하학적 단면형상을 나타낸 것이고, 표 3.4는 기둥,전이보 및 앵글의 단면성능을 나타낸 것이다. 그림 3.13은 전이보시스템의 전체적인 제원을 나타내었다.

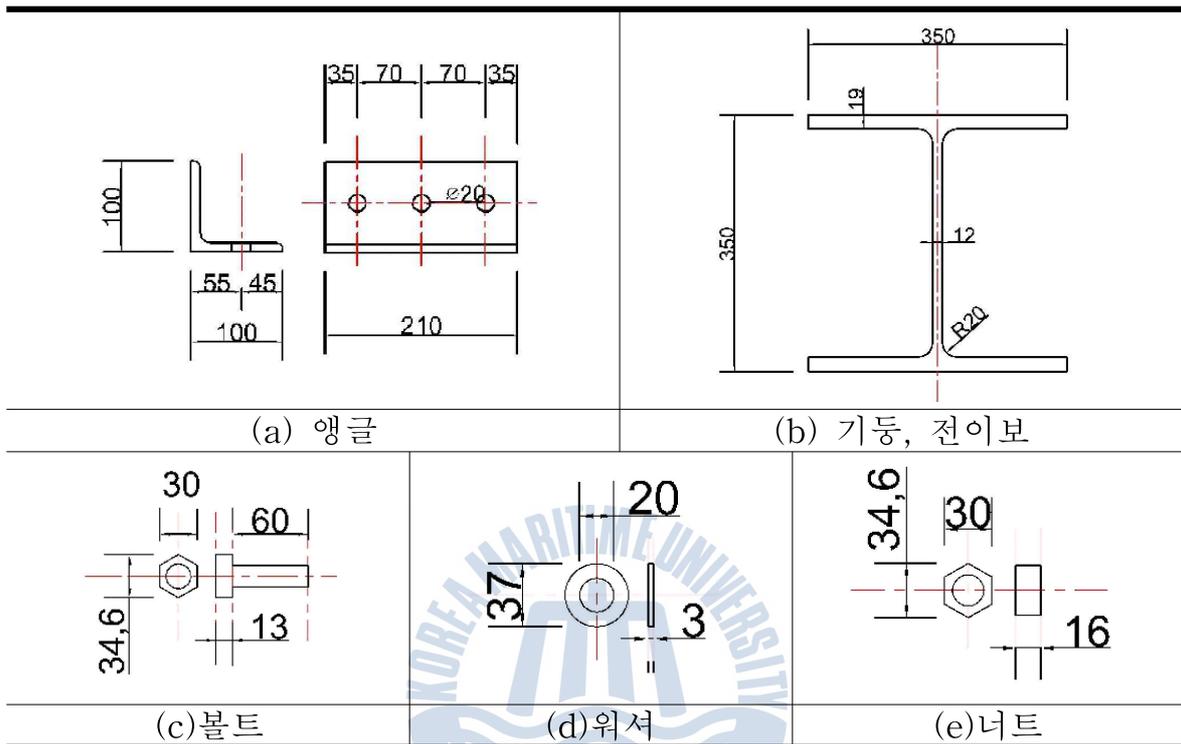
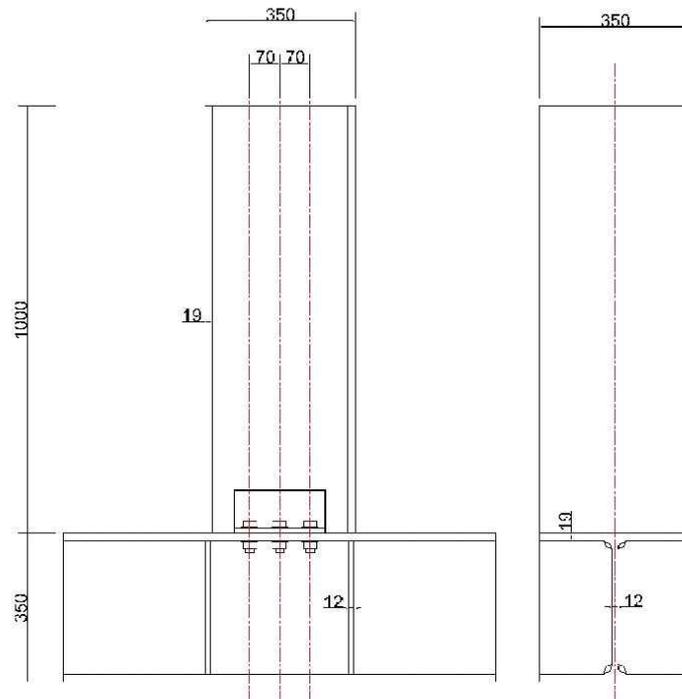


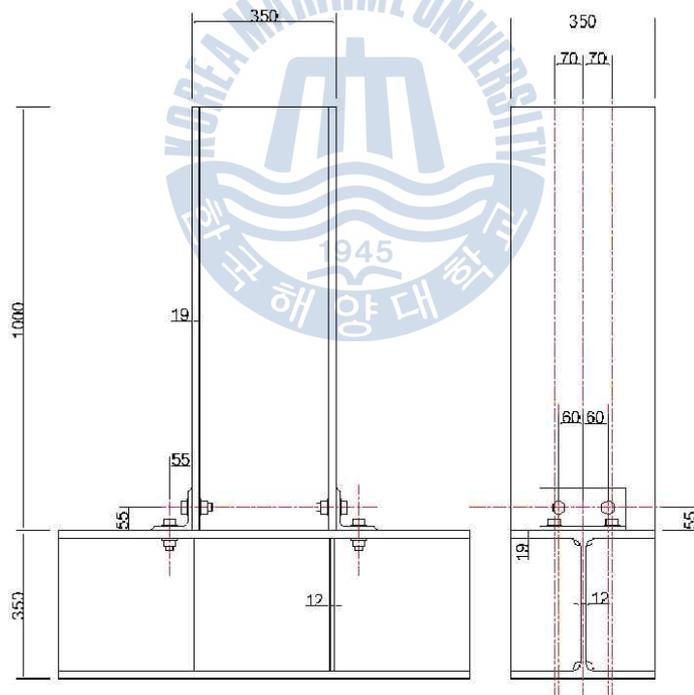
그림 3.12 부재의 기하학적 단면형상

표 3.4 부재의 단면성능

	치수	단면적(m)	단면 2차 모멘트(mm^4)	
			I_x	I_y
기둥, 전이보	350×350×120×19	1.7390×10^4	4.03×10^8	1.36×10^8
	단면 2차 반경(mm)		단면계수(mm^3)	
	r_x	r_y	S_x	S_y
	1.52×10^2	8.84×10^1	2.30×10^6	7.76×10^5
앵글	치수	단면적(mm^2)	단면 2차 모멘트($I_x = I_y$)	
	100×100×10($t=7$)	1.362×10^3	1.29×10^6	
	단면 2차 반경($mm, r_x = r_y$)		단면계수($mm^3, S_x = S_y$)	
	3.08×10		1.77×10^4	



(a) 더블웹브 앵글 전체모델



(b) 탑엔드시트 앵글 전체모델

그림 3.13 전이보시스템 제원

3.5 접촉 및 경계조건

3.5.1 접촉조건

3차원 유한요소해석을 위한 모델링은 부재간의 접촉 및 지압조건, 볼트의 체결 장력 및 너트의 완전체결, 전이보와 콘크리트 사이 접촉부재의 거동 등의 복잡한 현상을 포함하여야 한다. 3차원 유한요소해석에 있어서 해석모델이 실제 접합부의 거동과 가장 유사하게 모델링 하기 위해서는 접촉부재사이의 접촉면 조건을 설정하는 게 중요하므로 ABAQUS가 가지고 있는 적절한 옵션기능을 선택하여야 한다.

(1) 용접 접합

더블웹브 앵글 모델 같은 경우, 기둥의 웹부재와 앵글부재를 연결시켜주는 용접부와 두 접합부 모두 사용될 전이보와 스티프너의 사이는 용접을 이용하여 모델링을 구현시켜야 한다. 이 부분은 용접부에 의해 접합되므로 모두 같은 자유도를 갖도록 모델링 하여야 하므로 MPC 명령의 TIE 옵션을 선택하여 부재간의 접촉조건을 부여하였다.

(2) 볼트 접합

앵글 장변과 전이보 플랜지 사이의 면을 제외한 볼트군에 의해 접촉되는 모든 면은 볼트의 장력에 의해 미끄러짐이 거의 발생하지 않아야 하고, 접촉 후에 서로간의 관입이 일어나지 않아야 한다. 그러므로 Contact 명령의 Small Sliding, Adjust Only Overclosed Nodes 명령을 사용한다.

(3) 메탈터치 접촉

두 가지 접합부 모두 메탈터치 되며, 시공시 어느 한쪽이 미끄러짐이 거의 없는 접촉면으로 Contact 명령의 Finite Sliding 옵션을 적용시키고, 횡하중 가

력시 접촉면 일부가 들림현상이 발생할 수 있기 때문에 Allow Separation After Contact 옵션을 설정하였다. 가력 중 부재간의 접촉면이 서로 관입이 발생되므로 부재간 절점의 관입을 막는 Adjust Only Overclosed Nodes 옵션을 추가한다.

(4) 콘크리트 접촉

본 연구에서는 하부구조물과 전이보시스템간의 수직하중에 의한 하중전달 효과를 알아보기 위한 것이므로, 이 부분은 모두 같은 자유도를 갖도록 모델링하여야 하므로 MPC 명령의 TIE 옵션을 선택하여 부재간의 접촉조건을 부여하였다.

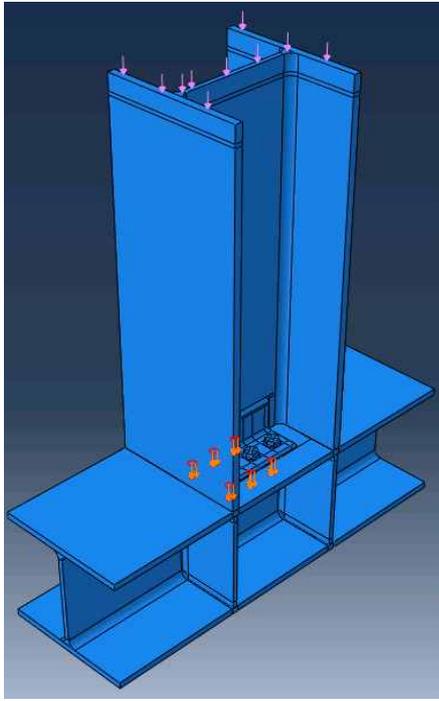
3.5.2 경계조건

전이보시스템의 하중전이효과를 나타내기 위하여 Step별을 구속조건을 나누어 설정하였다. Step1에서는 볼트가 체결된다는 것을 구현하고, Step2에서는 하중 방향에 따른 두 가지 해석으로 나누어 진행되었다.

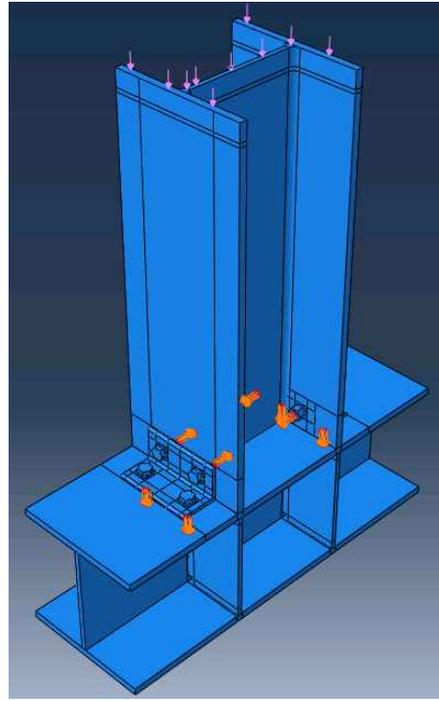
첫 번째 해석의 경우, 접합부 모멘트 성능을 알아보기 위해서 기둥 0.95m 높이에서 횡력을 Static, Riks를 통하여 소성해석을 실시한다.

두 번째 해석의 경우, 축력에 의해서 전이보의 응력분포를 보기 위해서 기둥 전체단면적에 축력을 Static, Riks를 통하여 소성해석을 실시한다. 그림 3.14은 접합부별 볼트인장력 부여 및 축력, 횡력 가력을 나타낸 그림이다.

세 번째 해석의 경우, 축력가력모델과 같은 Step으로 구조해석을 실시한다.

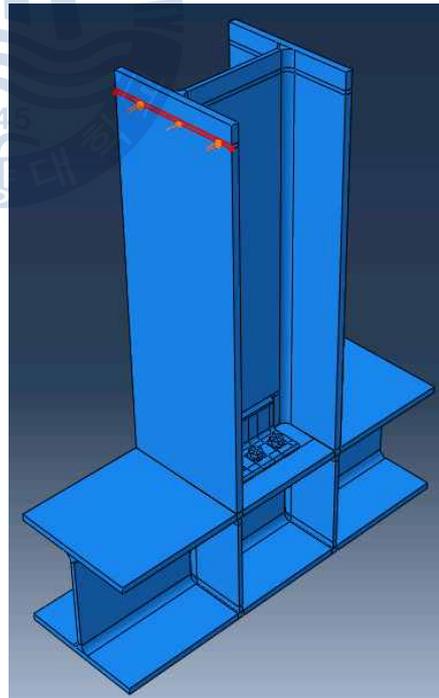
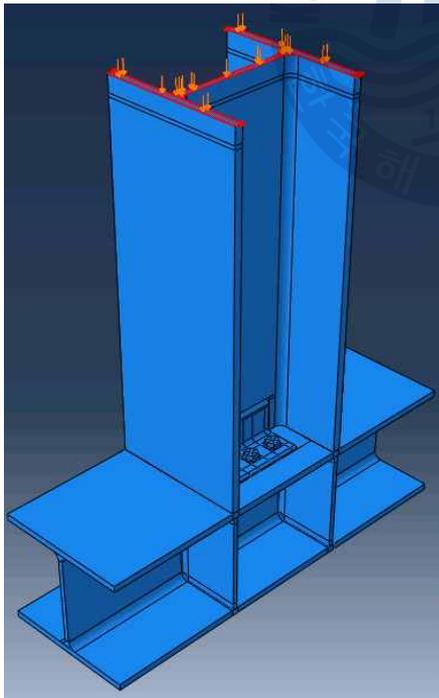


(a) 더블웨브앵글



(b)탑엔드시트앵글

Step1. 볼트인장력



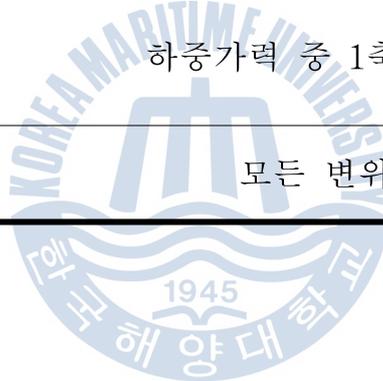
Step2. 축력 및 휨력

그림 3.14 볼트인장력, 축력 및 휨력 가력

본 모델링에서는 Step1에서 볼트 인장력을 구현해주기 위하여 Step별 구속조건을 달리 부여하였다. 표 3.5는 Step별 부재의 구속조건을 나타낸 것이다.

표 3.5 Step별 부재의 구속조건

		initial	Step1	Step2
너트		1,2,3 축 변위 고정		1축 변위 고정
워셔		부재의 축방향 제외한 모든 변위 고정		1축 변위 고정
볼트	헤드	1,2,3 축 변위 고정		1축 변위 고정
	축			
	바닥	-	1,2,3축 변위 고정	1축 변위 고정
기둥		하중가력 중 1축 변위 고정		
용접부				
전이보 밑면 (콘크리트 밑면)		모든 변위 고정		



4. 전이보시스템 구조 해석 및 분석

플로팅 전이보시스템은 상부구조물로부터 내려오는 하중을 충분히 하부구조물에 전달시킬 수 있는 성능을 가지고 있어야 한다. 또한, 플로팅 구조물 특성상 파랑하중에 의해 발생하는 하부구조물의 변형에 의해서 주각부에 부가모멘트가 발생한다. 이러한 부가모멘트를 소산시킬 수 있는 성능과 상부구조물에 거주하는 사람이 사용성에 문제가 발생되지 않도록 변위를 제어해야 한다. 그러므로 횡력에 의한 주각부의 횡변위에 대한 검증과 모멘트 성능 평가가 필요하다. 이러한 요구성능을 만족시킬수 있는 접합부로 반강접 접합부를 적용시키기 위하여 본 논문에서 적용된 접합부 형태로 더블웹브앵글과 탑앤드시트앵글 접합부를 비교·분석하였다. 해석 방법은 접합부 모멘트성능을 검증하기 위한 횡력가력 모델, 하중전이 효과를 검증할 수 있는 축력가력 모델, 축력비에 따른 조합 하중에 의한 모델로 세 가지 가력형태의 모델을 나누어 해석에 적용하였다.

횡력가력 모델에서는 접합부별 $M-\theta$ 곡선 비교, 부재의 변형양상을 분석하였다.

축력가력 모델에서는 하중에 의해 부재에 발생하는 응력을 알아보기 위하여 하중증분에 따른 응력분포, 부재별 하중-응력 곡선, 전이보 응력분포 양상을 검토하였다. 그리고 전이보시스템의 하중전달함에 있어 성능개선효과가 있는지 판단하기 위하여 전이보시스템과 콘크리트 모델을 접합된 구조로 전체해석을 수행한다. 또한, 같은 제원의 콘크리트 모델과 접합된 베이스플레이트 구조해석을 통해 전이보시스템 모델과 비교·검토한다.

4.1 횡력가력 모델

플로팅 전이보시스템의 접합부의 모멘트 성능을 알아보기 기둥의 0.95m 지점에서 횡력에 대한 소성해석을 실시하였다. 횡력 가력 지점은 그림4.1과 같이 적용하였고, ABAQUS를 통해 도출된 변위값을 통하여 간단한 구조식을 통하여 M- θ 곡선을 산출해낸다.

$$= \Delta/l \quad (\text{식 4.1})$$

$$= \Phi \times F \times l \quad (\text{식 4.2})$$

Δ : 변위, l : 기둥의 길이, Φ : 하중계수, F : 작용하중

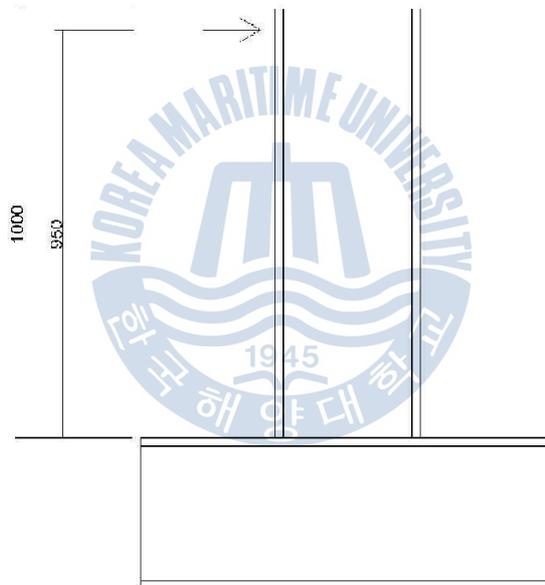
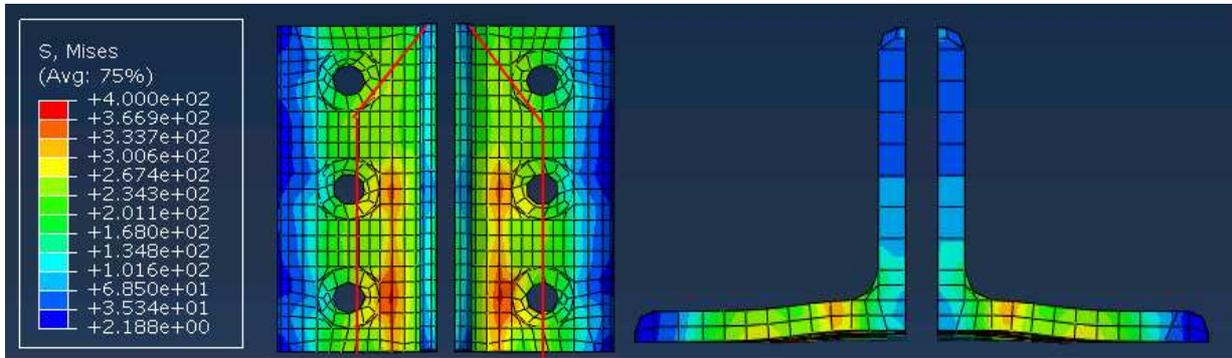
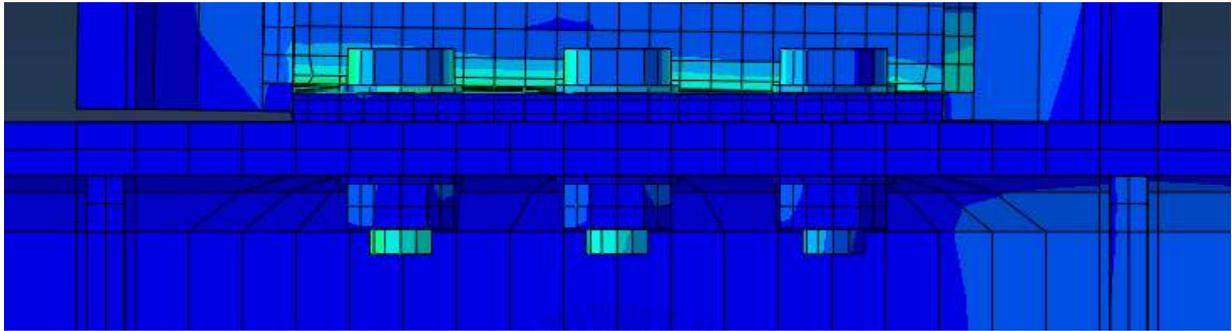


그림 4.1 횡력가력지점 모식도

그림 4.2(a)의 앵글부재의 변형 양상을 보면, 더블웹 앵글 접합부의 경우 양쪽 앵글이 대칭적으로 응력을 분담하는 형태와 가력방향쪽에 집중적으로 응력이 발생하였고, 그림 4.2(b)를 보면 약간의 들림현상이 있었다. 그림4.3의 더블웹 앵글 접합부 경우, 최대가력 84.4KN까지 해석이 진행되었으며, 모멘트 성능 80.2KN·m으로 산정되었다.



(a) 앵글 응력 분포



(b) 앵글 들림 현상

그림 4.2 더블웹앵글 변형 양상

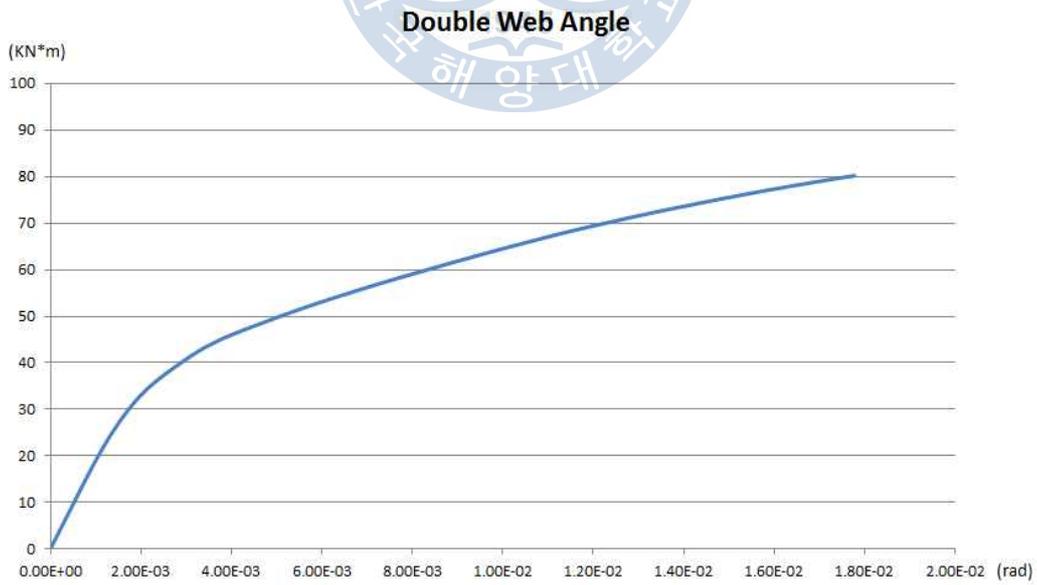
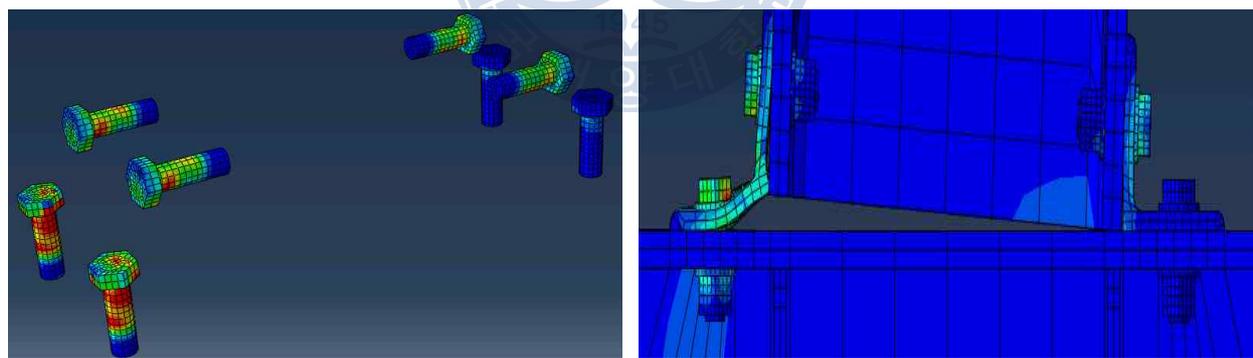


그림 4.3 더블웹앵글 M-θ 곡선

그림 4.4(a)의 탑앤드시트 앵글 접합부의 경우 상하부 앵글이 분담하는 응력 차이를 보였으며, 그림 4.4(b)는 가력방향쪽에 부착된 앵글부의 들림현상이 심화됨에 따라 볼트부에 응력이 집중된 것을 볼 수 있다. 그림 4.5의 탑앤드시트 앵글 접합부 경우, 최대가력 105.2KN까지 해석이 진행되었으며, 모멘트 성능은 99.9KN·m으로 산정되었다. 변위각도 또한 탑앤드시트 접합부가 더블웹앵글 접합부의 비해 3배 정도 높은 수치를 보였다. 그림 4.6은 접합부별 M- θ 곡선을 비교해놓은 것이다.



(a) 앵글 응력 분포



(b) 앵글 들림 현상

그림 4.4 탑앤드시트 앵글 변형 양상

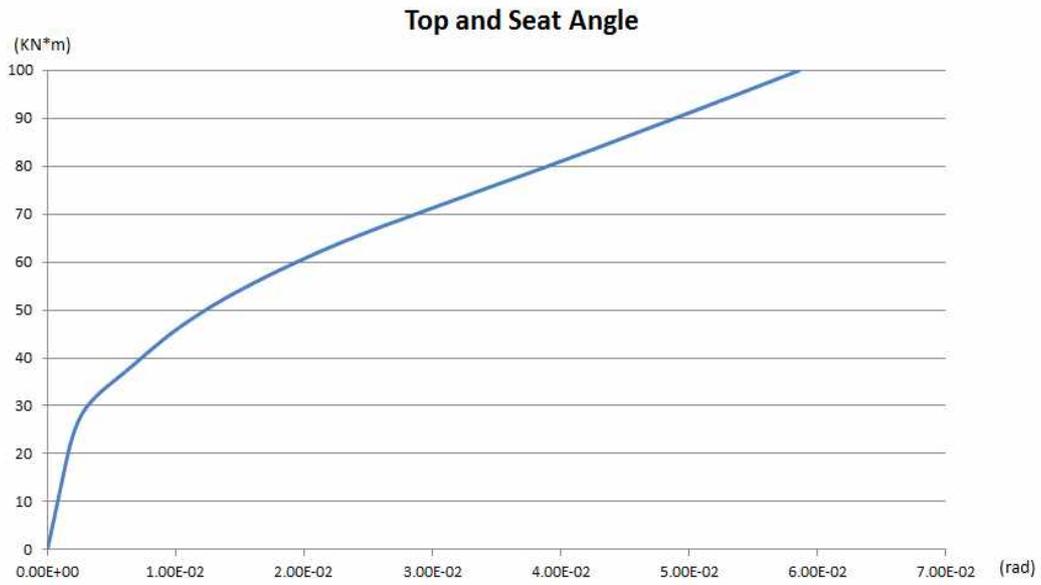


그림 4.5 탑앤드시트 앵글 M- θ 곡선

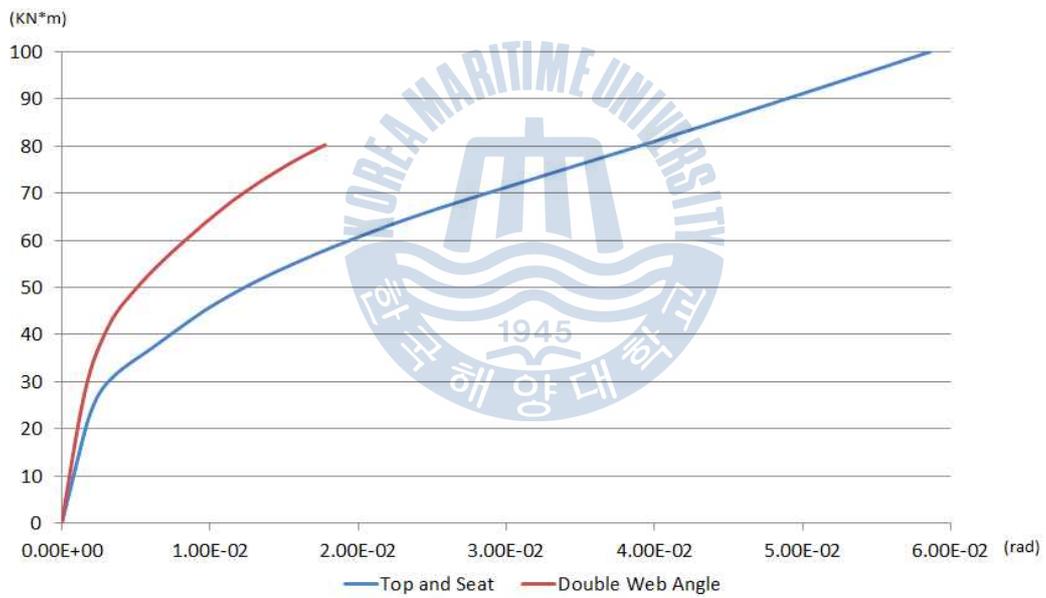


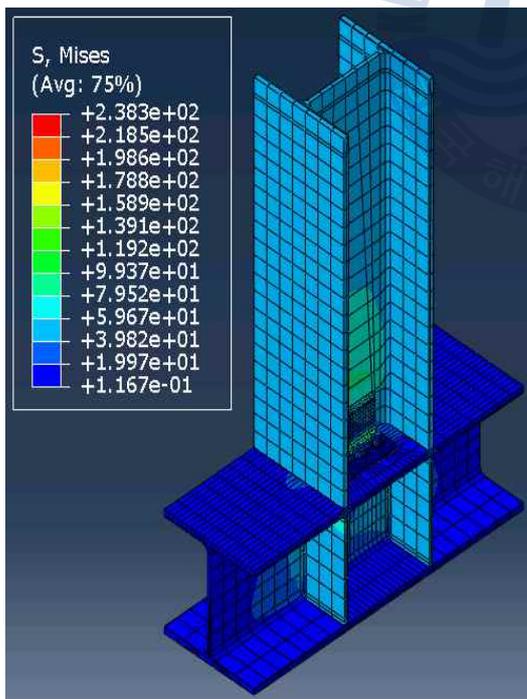
그림 4.6 접합부별 M- θ 곡선

4.2 축력가력 모델

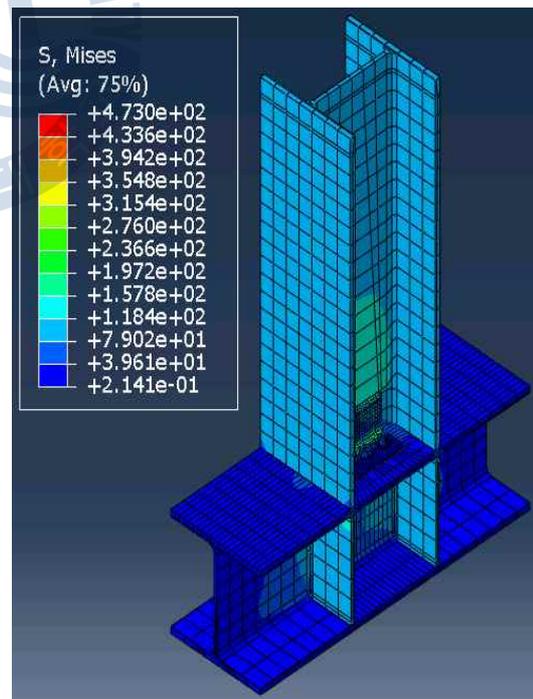
플로팅 전이보시스템이 축력에 의한 응력분포를 알아보기 위해 기둥 전체단면적에 축력을 Static, Riks를 통하여 소성해석을 실시하였다. 응력 전달경로를 알아보기 위해 하중증가에 따른 부재별 하중-응력 곡선을 통해 응력 전달 경로를 파악하였다.

4.2.1 더블웨브앵글 접합부

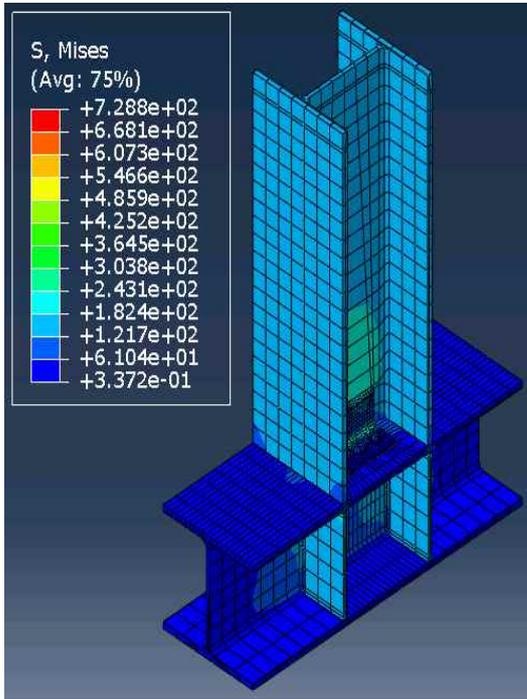
그림 4.7은 더블웨브앵글 접합부의 Step별로 응력분포 양상을 나타낸 것이고, 그림 4.8은 전이보시스템의 부재의 응력분포를 나타낸 것이며, 그림 4.9는 부재별로 하중-응력 곡선을 나타낸 것이다.



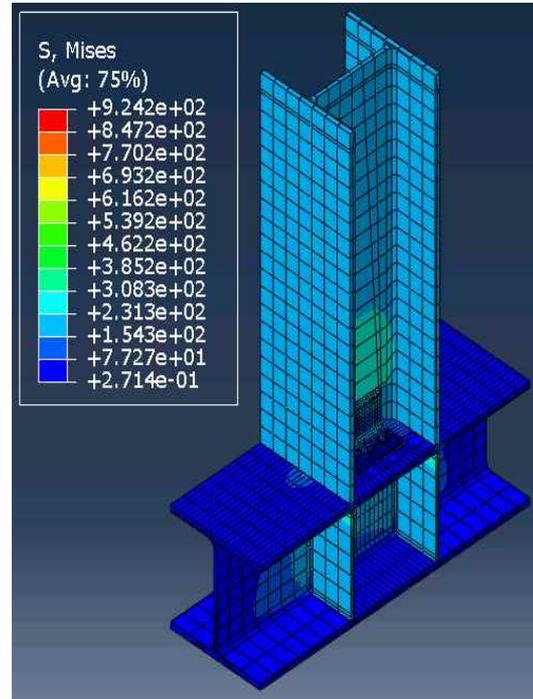
Step19 (1000KN)



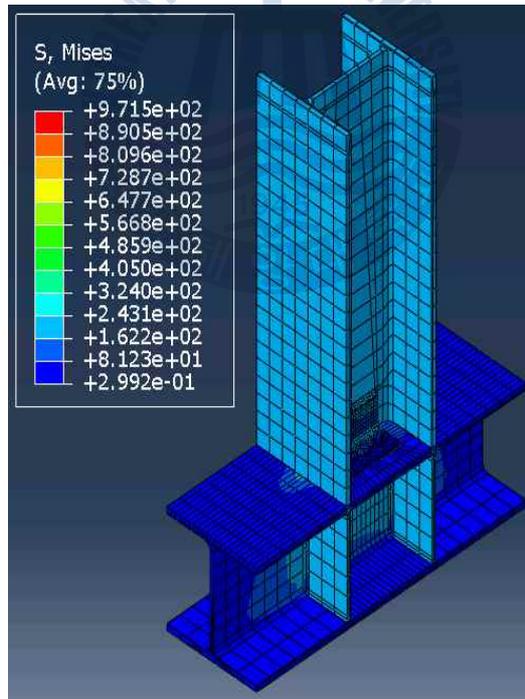
Step37 (2000KN)



Step55 (3000KN)



Step79 (4000KN)



Step118 (4206.8KN)

그림 4.7 Step별 응력분포 양상(더블웨브앵글)

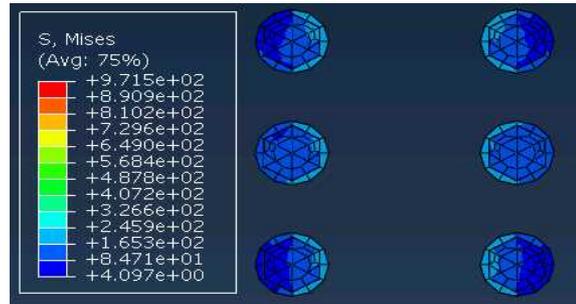
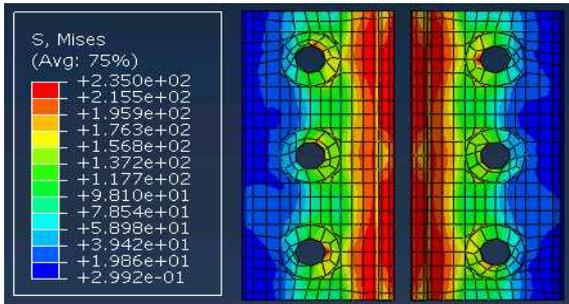
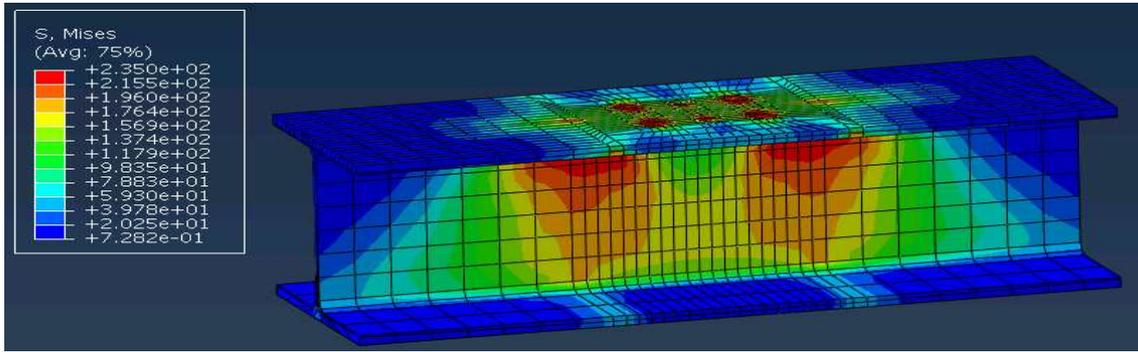


그림 4.8 전이보 부재의 응력분포 형태

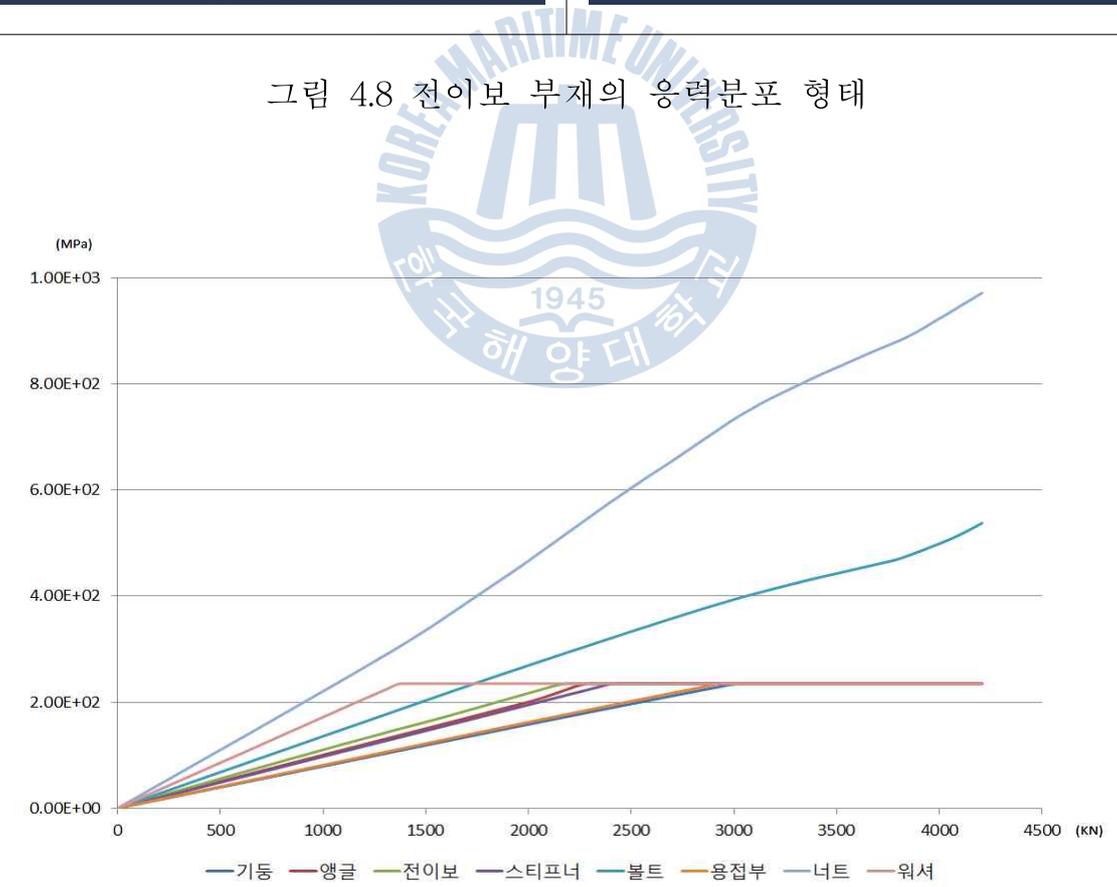


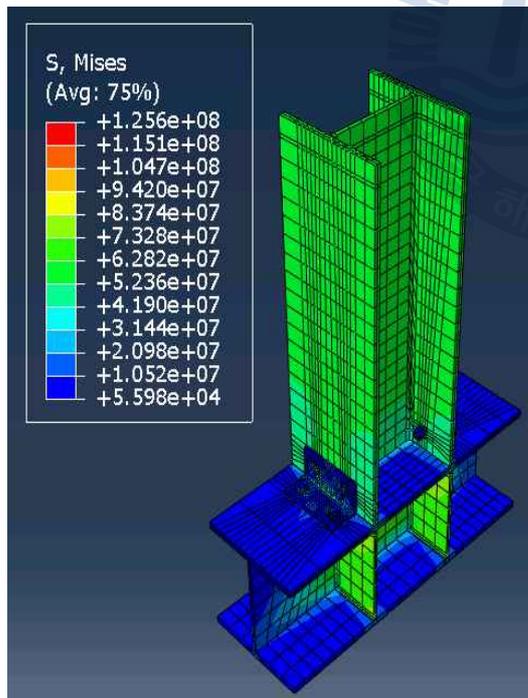
그림 4.9 부재별 하중-응력 곡선

그림 4.8의 전이보 응력분포 양상을 보면 전이보에 접촉된 기둥면적부분에 주로 응력이 분포되었고, 전이보 웨브부분에도 응력이 전달된 형태를 띄고, 앵글부는 천공된 부분을 중심으로 일직선으로 응력 분포 형태를 띤다.

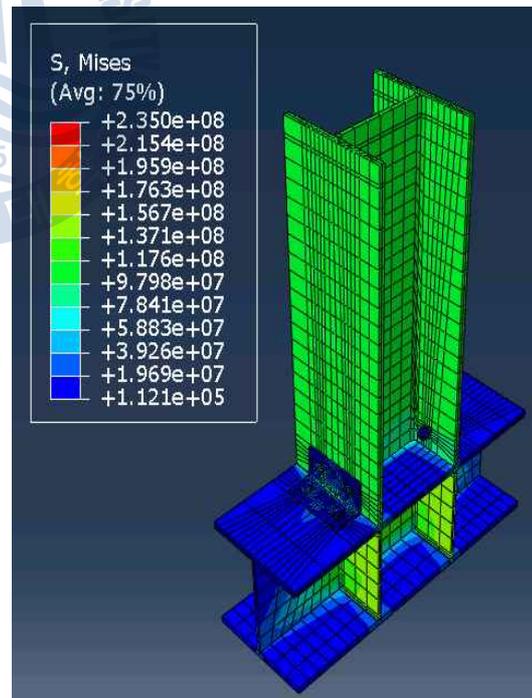
그림 4.9은 부재별 하중-응력 곡선을 나타낸 그림인데, 너트부재에 응력이 증가함에 따라 워셔, 전이보, 앵글, 스티프너, 용접부, 기둥 순으로 항복응력이 발생하였다.

4.2.2 탑앤드시트앵글 접합부

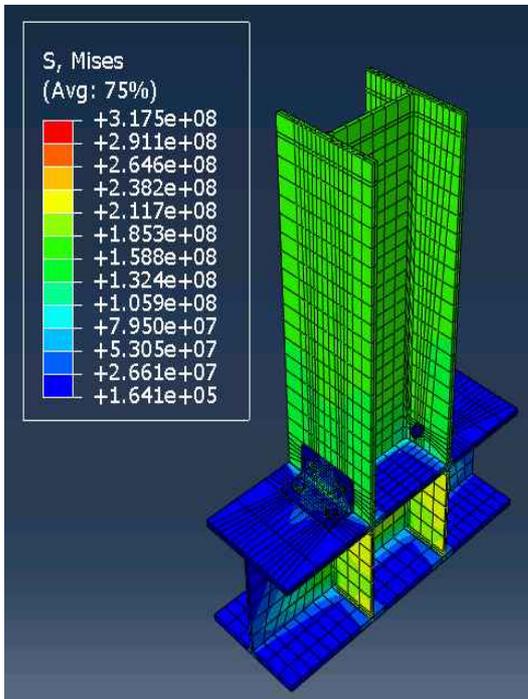
그림 4.10은 탑앤드시트 접합부의 Step별로 응력분포 양상을 나타낸 것이고, 그림 4.11은 전이보시스템의 부재의 응력분포를 나타낸 것이며, 그림 4.12는 부재별로 하중-응력 곡선을 나타낸 것이다.



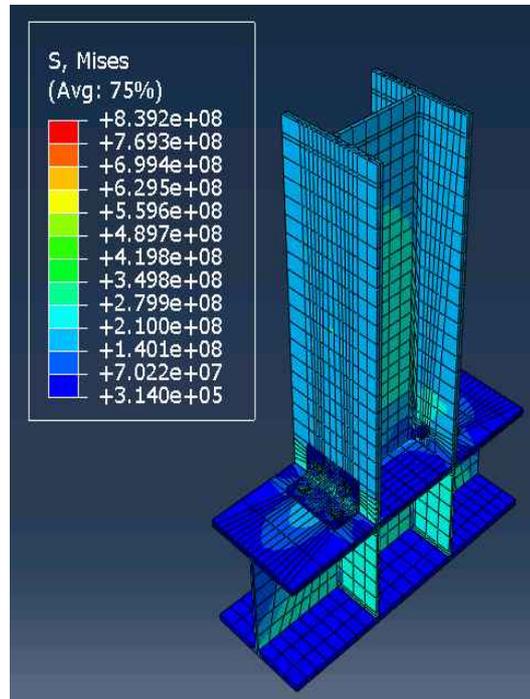
Step3 (1000KN)



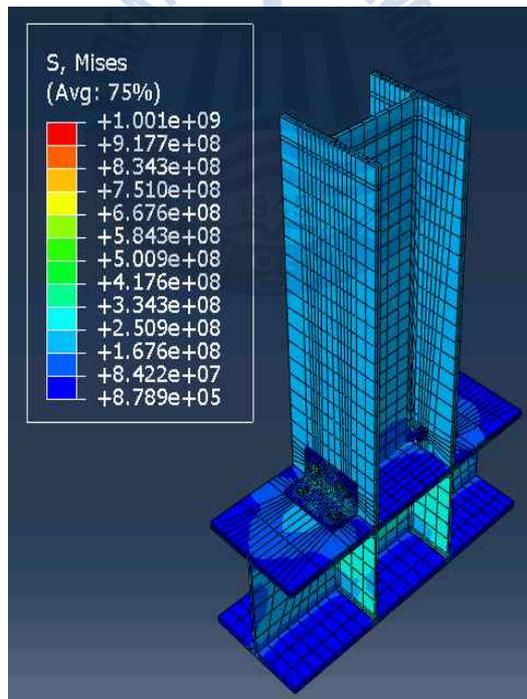
Step6 (2000KN)



Step11 (3000KN)



Step49 (4000KN)



Step 121. (4503KN)

그림 4.10 Step별 응력분포 양상(탑엔드시트앵글)

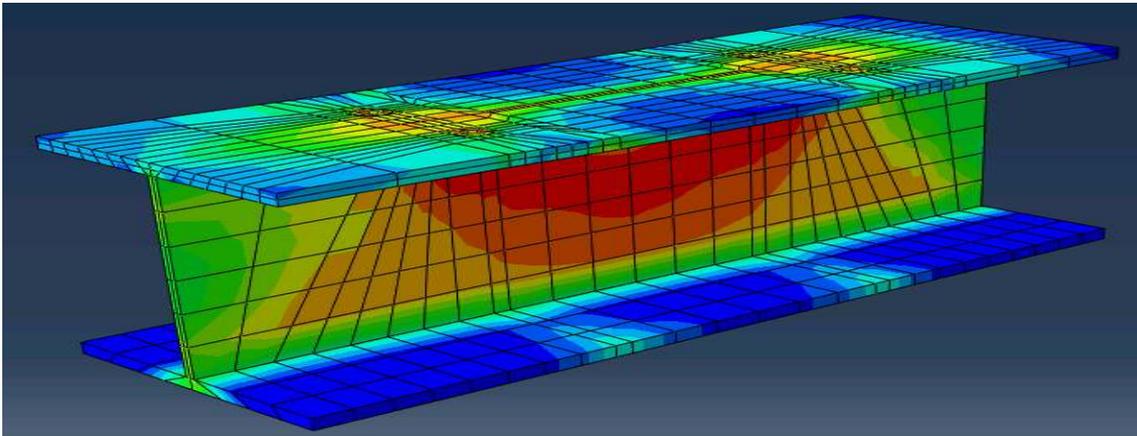


그림 4.11 전이보 부재의 응력분포 형태

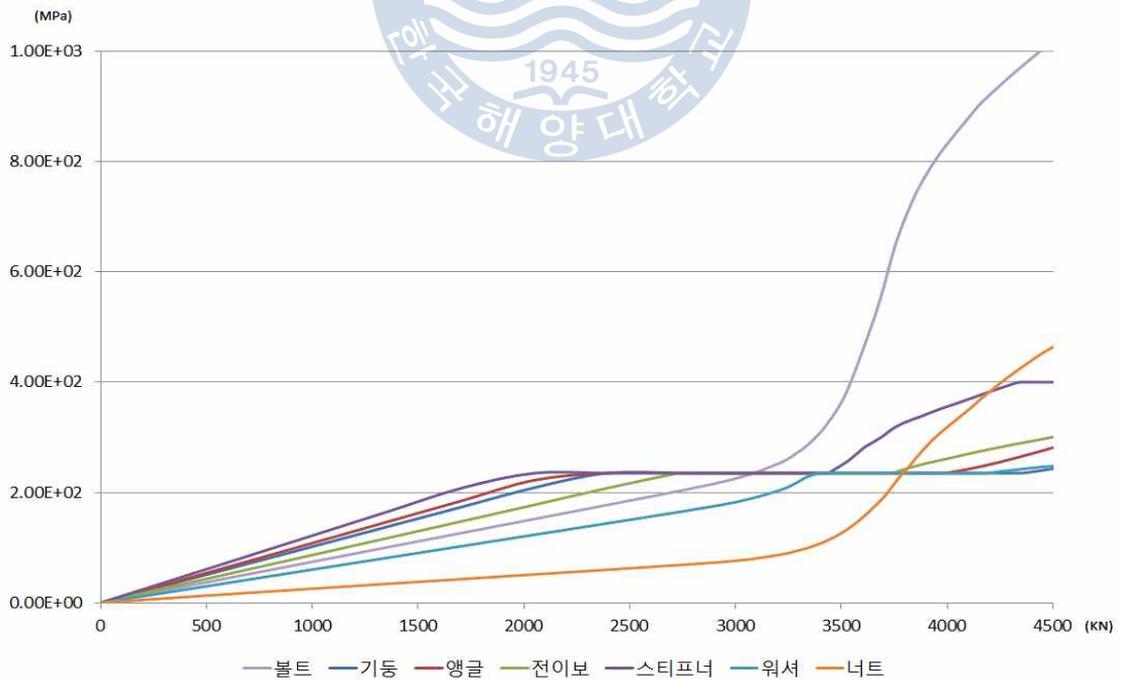


그림 4.12 부재별 하중-응력 곡선

그림 4.11은 전이보 응력분포 양상을 보면 전이보에 접촉된 기둥 및 앵글부분에 주로 응력이 분포되었고, 전이보 웨브부분에도 응력이 전달된 형태를 띤다. 앵글부는 천공된 부분을 중심으로 일직선으로 응력 분포 형태를 띤다.

그림 4.12은 부재별 하중-응력 곡선을 나타낸 그림인데, 최초 항복응력이 발생한 부재로 스티프너이고, 그 다음으로 앵글, 기둥, 전이보 순으로 항복함에 따라, 볼트부에 응력이 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다.

4.3 상하부 구조 전체 해석

상하부구조 전체해석은 전이보시스템의 하중전달함에 있어 성능개선효과가 있는지 판단하기 위하여 전이보시스템과 콘크리트모델을 접합된 구조로 전체해석을 수행한다. 또한 같은 제원의 콘크리트모델과 접합된 베이스플레이트 구조해석을 통해 전이보시스템 모델과 비교한다.

전이보시스템의 축력 가력 해석의 결과로 최대가력하중이 400ton정도인 것을 알 수 있었다. 전체해석의 경우는 그림 4.7, 4.10과 같은 축력가력 모델해석 결과에 비해 최대가력하중이 적게 나올 것으로 사료되어, 더블웨브앵글접합부가 적용된 전이보시스템만 구조해석을 수행하였다.

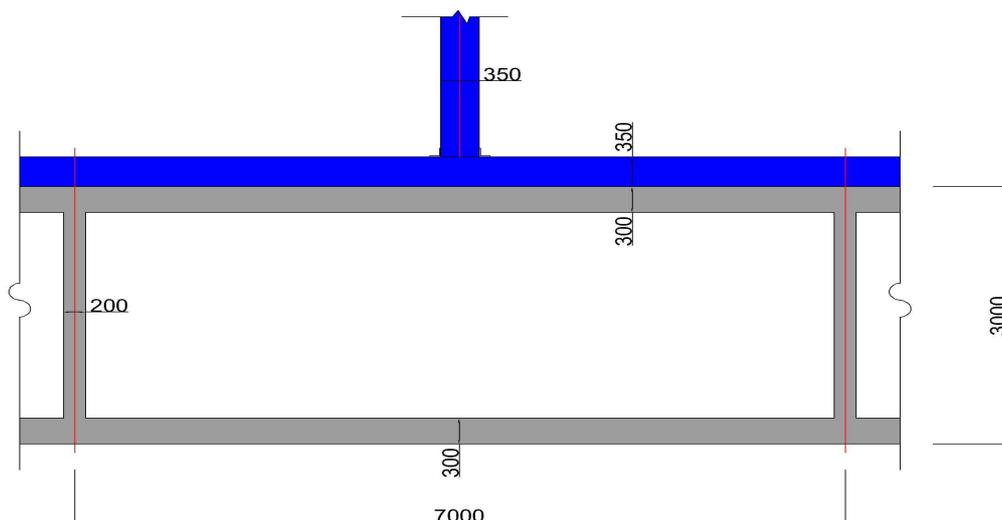


그림 4.13 상하부구조물의 전체제원

본 연구의 상하부구조물의 전체 제원은 그림 4.13과 같다. 기둥의 위치는 중공부의 중앙부에 위치하게 설계를 하였으며, 격벽간격은 7m 이격된 형태로 전이보 또한 격벽간격만큼 연장시켰다.

해석상의 전체모델 구조해석시간을 단축시키기 위하여 격벽을 생략하고 고정조건으로 치환하였다. 해석상 전이보시스템 모델과 베이스플레이트 모델의 모식도는 그림 4.14와 같다. 하중 가력 형태는 축력가력모델과 마찬가지로 전이보시스템의 기둥 전체단면적에 축력을 가력한다.

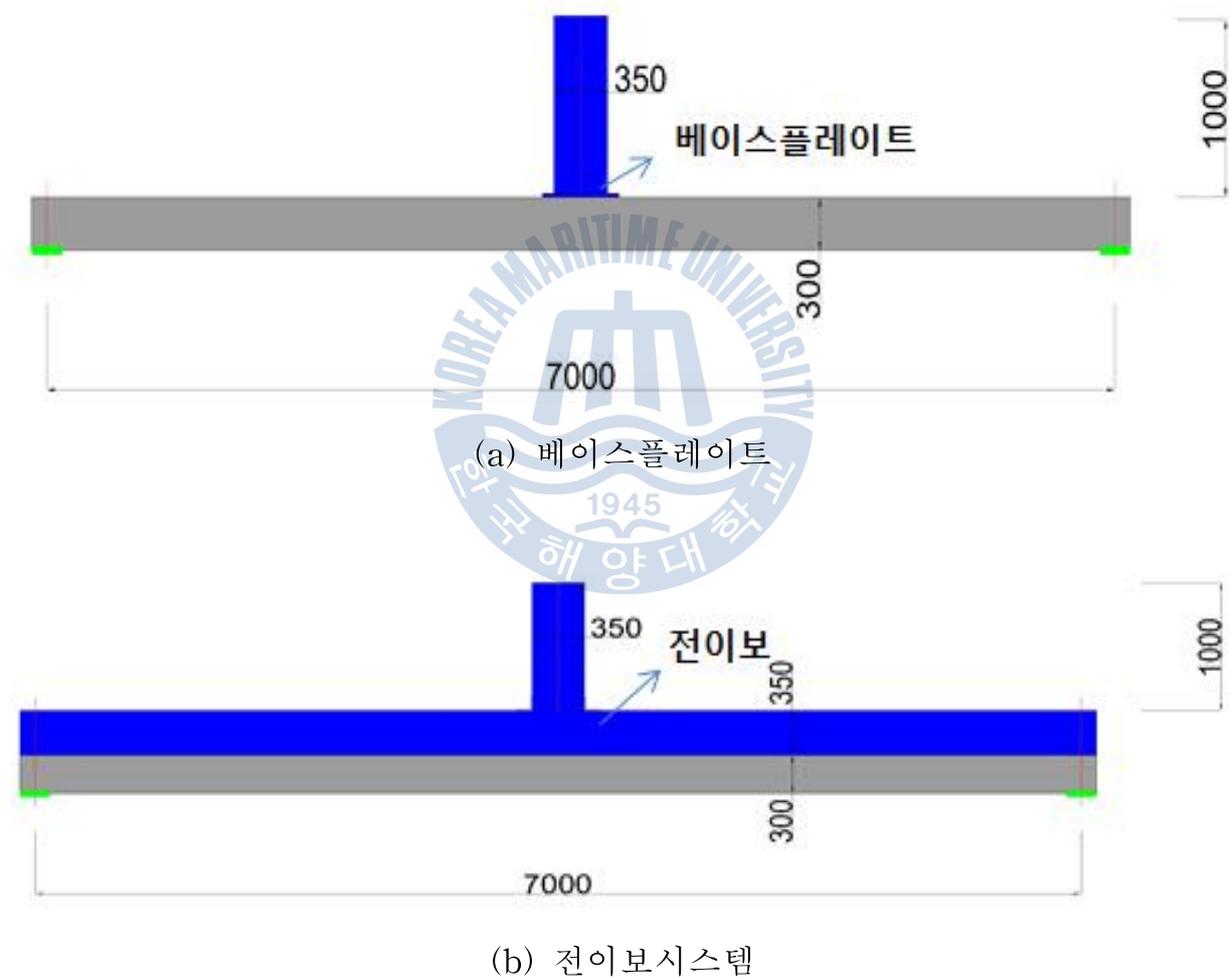
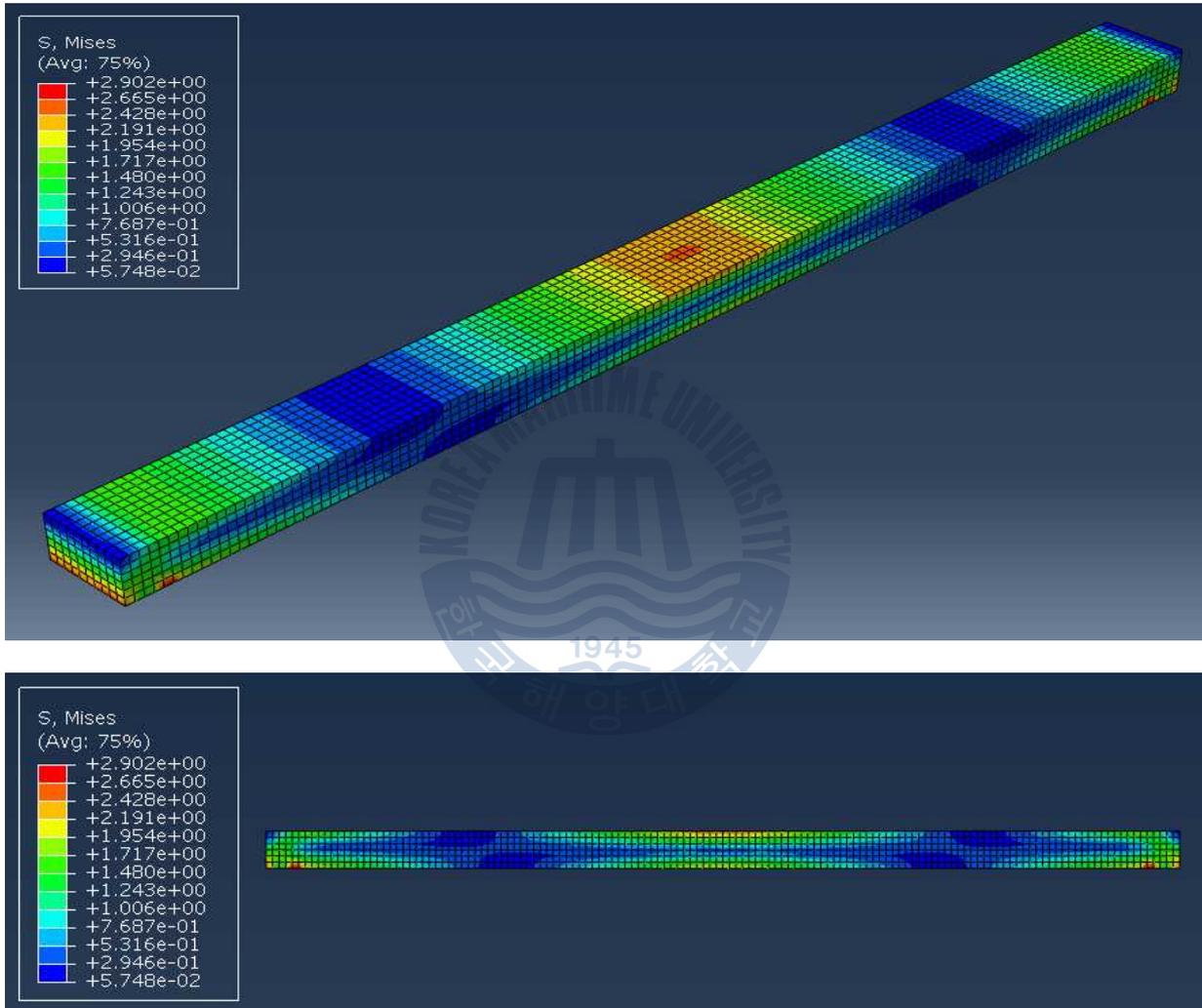


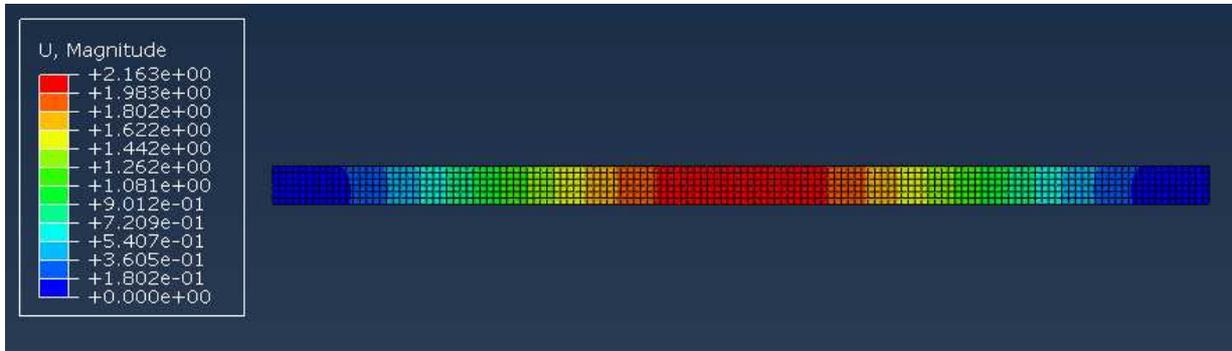
그림 4.14 전체모델 모식도

4.3.1 베이스플레이트

베이스플레이트와 접합된 모델의 경우, 해석종료시까지 가력하중은 2.6ton정도 가력되었으며, 그림 4.15은 콘크리트 부재의 응력 및 변위를 나타낸 것이고, 그림 4.16은 콘크리트 부재의 손상정도를 나타낸 것이다.



(a) 응력분포



(b) 변위

그림 4.15 슬래브 콘크리트 응력분포 및 변위

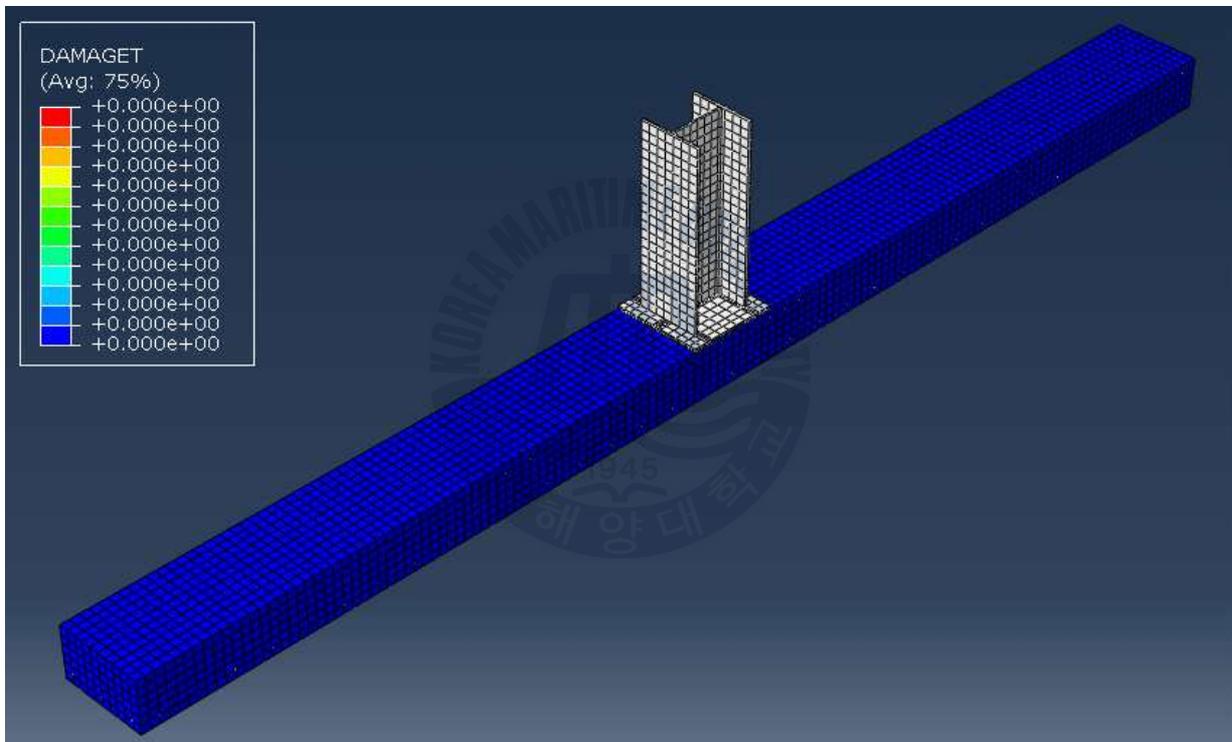


그림 4.16 콘크리트 손상정도

그림 4.15을 보면, 콘크리트 양 끝단에 최대응력은 2.902MPa이 발생되었으며, 콘크리트 중앙부에 동시에 인장응력은 2.0MPa, 압축응력은 2.52MPa이 발생하는 형태와 변위 또한 중앙부에 최대처짐은 2.1mm가 발생되었다.

그림 4.16은 콘크리트 손상정도를 알아보기 위한 것으로 콘크리트 부재가 탄성 범위내에 해석이 진행되었음을 알 수 있다.

4.3.2 전이보시스템

전이보시스템과 접합된 모델링의 경우, 해석 종료시까지 가력하중은 6.3ton정도 가력되었으며, 그림 4.17은 전이보 부재의 응력분포를 나타낸 그림이고, 그림 4.18은 슬래브 콘크리트 부재의 응력 분포 및 변위를 나타내었다. 그림 4.19은 콘크리트부재의 손상정도를 나타낸 것이다.

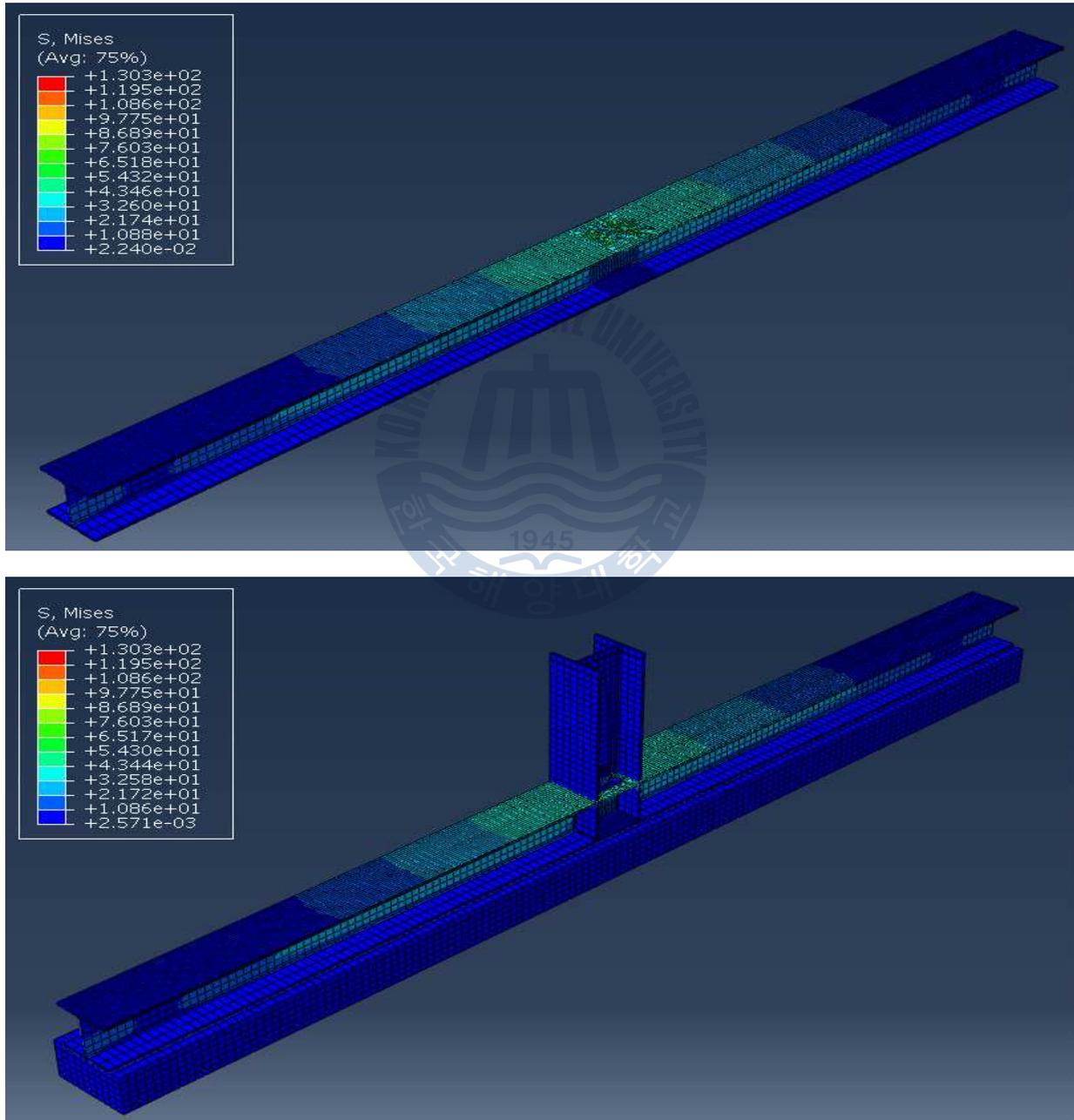
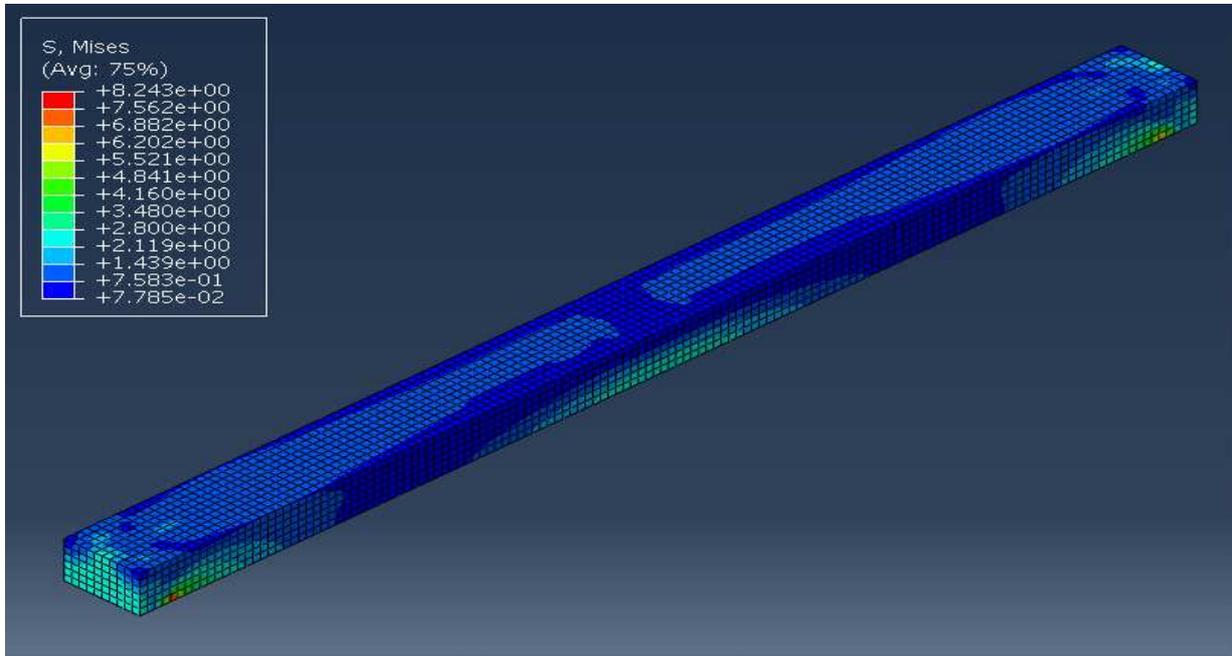


그림 4.17 전이보시스템 응력분포



(a) 응력



(b) 변위

그림 4.18 슬래브 콘크리트 응력분포 및 변위

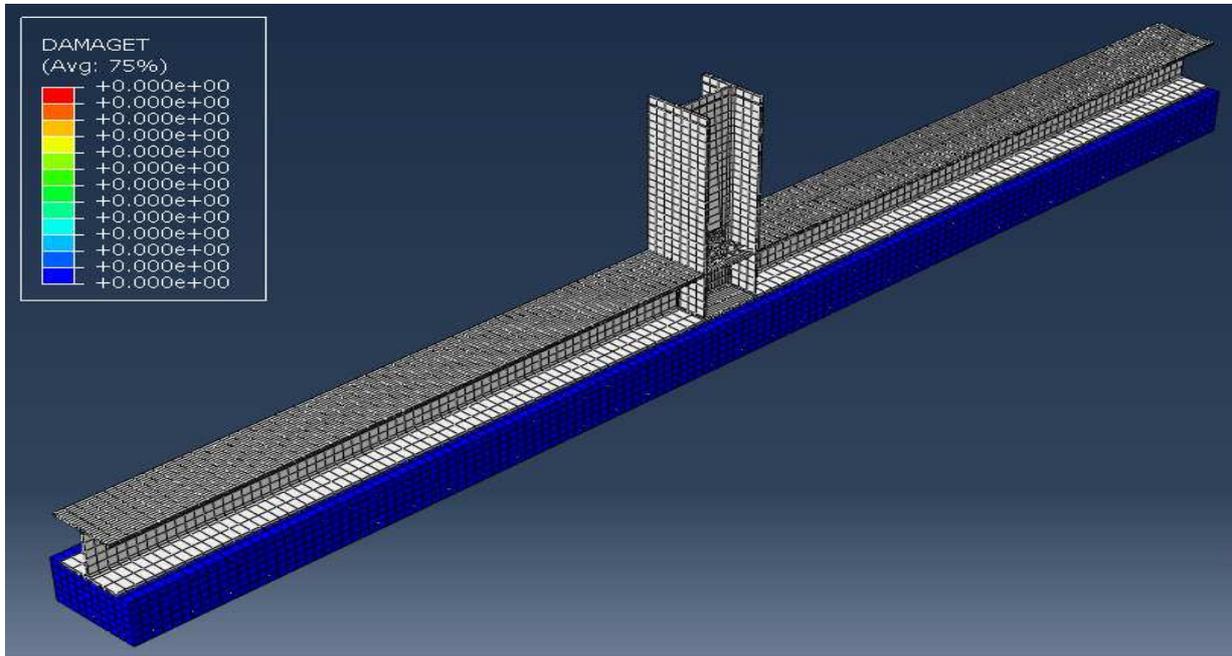


그림 4.19 콘크리트 손상정도

그림 4.17을 보면 수직하중은 전이보 길이방향으로 응력이 분포된 것을 알 수 있었고, 그림 4.18은 콘크리트부재 끝단에 최대응력은 8.423MPa가 발생하고, 중앙부 밑면에 인장력은 2.73MPa가 발생되었고, 베이스플레이트 모델과56 마찬가지로 중앙부의 최대처짐은 1.76mm이 발생되었다. 그림 4.19는 콘크리트 손상 정도를 알아보기 위한 것으로 콘크리트부재가 탄성범위내에 해석이 진행되었음을 알 수 있다.

4.3.3 소결

그림 4.15와 그림 4.18을 비교해 보면, 슬래브 콘크리트 부재에 발생하는 응력분포 양상이 다른 것을 볼 수 있다.

베이스플레이트 모델의 콘크리트 부재가 인장과 압축이 동시에 발생하는 것으로 보아, 응력의 중립선이 콘크리트 부재의 가운데에 위치한다는 것을 확인하였다.

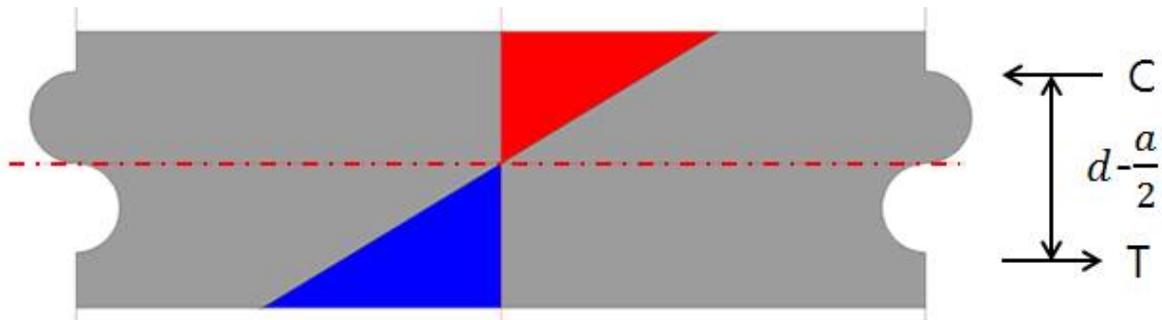


그림 4.20 베이스플레이트 응력 모식도

전이보시스템 모델의 콘크리트 부재는 중앙부 밑면에 주로 인장력 발생하였고, 그림 4.17의 전이보 응력분포는 전이보 윗면에 압축력이 발생하였다. 이는 전이보와 콘크리트부재가 합성구조로써 같이 거동하며, 전이보는 주로 압축응력을 분담하고 슬래브 콘크리트부재는 압축응력을 분담하는 것으로 보아, 콘크리트 부재의 위쪽에 응력의 중립선이 있음을 알 수 있다.

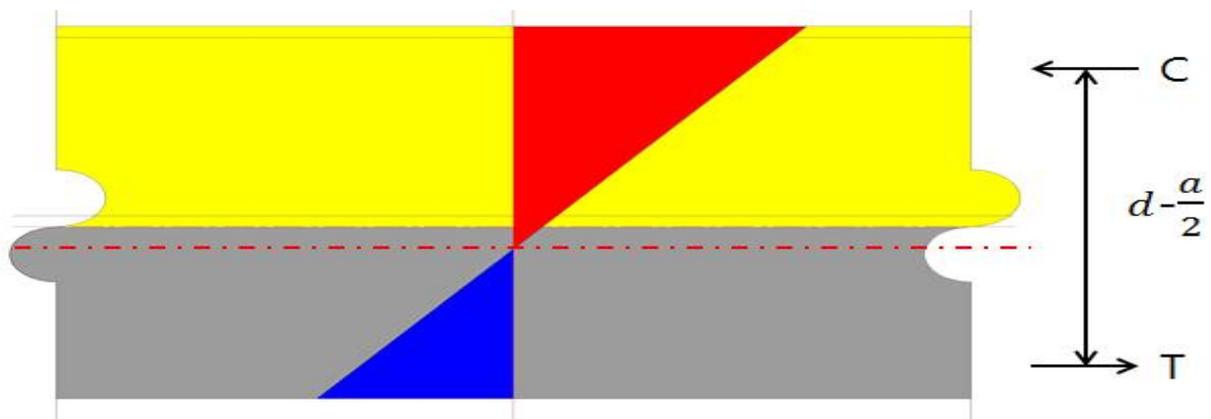


그림 4.21 전이보시스템 응력 모식도

두 가지의 응력분포를 통한 간단한 응력모식도를 분석한 결과, 전이보시스템의 $-\frac{a}{2}$ 이 클 것이라 판단되어 주각부의 모멘트성능이 증진되었다고 볼 수 있다.

하중전달의 개선효과 유무는 콘크리트부재 양 끝단에 발생하는 응력분포를 통해 알 수 있다. 두 가지 모델 모두 지지점에서는 필연적으로 압축응력이 발생한다. 압축응력이 증가함에 따라 지지점에서는 그에 따른 반력이 작용한다. 발생하는 반력의 정도에 따라 격벽에 전달되는 효과가 커진다고 볼 수 있다.

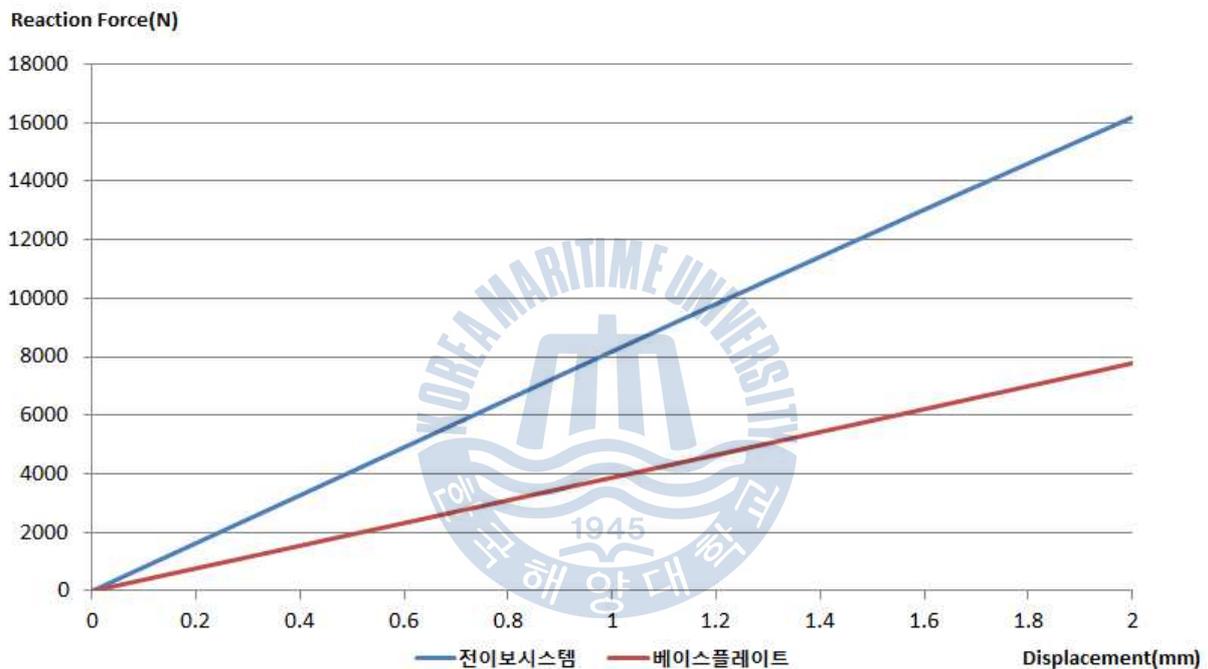


그림 4.22 반력에 따른 중앙부 처짐 곡선

그림 4.22의 X축은 중앙부 처짐을 나타내며, Y축은 지지점에 발생하는 반력을 나타낸다. 콘크리트 부재의 양 끝단에 발생하는 반력에 따른 중앙부 처짐을 비교해본 결과, 같은 처짐이 발생할 시에 전이보시스템 모델의 반력이 베이스플레이트 모델의 반력에 비해 2배 정도 증가한 것을 확인할 수 있다.

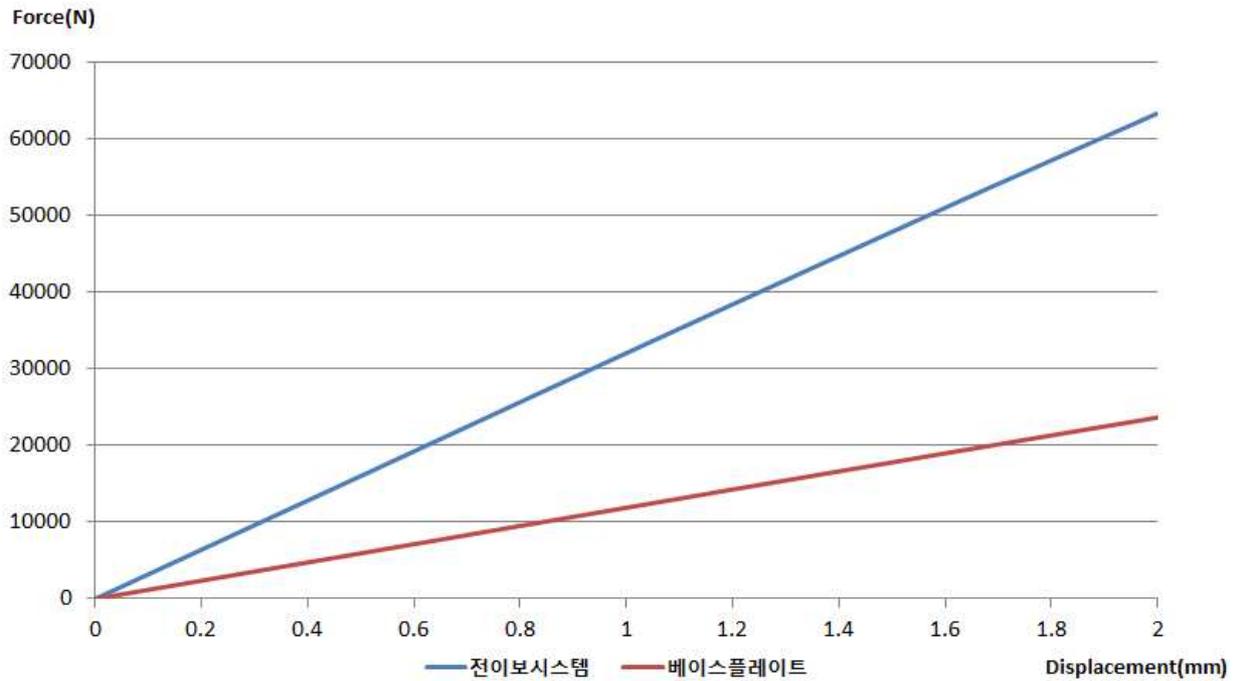


그림 4.23 가력하중에 따른 중앙부 처짐곡선

그림 4.23의 X축은 중앙부 처짐을 말하며, Y축은 가력하중을 나타낸 것이다. 두 구조시스템에 20000N의 가력하중이 작용할 경우를 비교해보면, 전이보시스템 모델의 처짐이 베이스플레이트 모델의 처짐에 비해 1.08mm가 감소되었다.

5. 결론

본 논문에서는 플로팅 구조물의 효율적인 하중전달을 위한 전이보시스템의 유한요소 해석을 실시하였으며, 과량하중에 의한 하부변형에 따른 주각부에 발생하는 부가모멘트를 감소시킬 수 있는 반강접 접합부 및 전이보시스템에 대한 구조해석을 수행하였다. 플로팅 전이보시스템의 접합부 형태에 따른 $M-\theta$ 곡선 도출 및 부재의 거동에 대해 분석하고, 수직하중에 의한 전이보시스템의 응력 분포 형태 및 하중증분에 따른 항복곡선을 도출함으로써 전이보시스템의 구조적인 특성을 분석하였으며, 콘크리트 모델과 접합된 모델을 베이스플레이트 모델과 비교하여 전이보시스템의 하중전달 개선효과를 검증하였다.

1. 플로팅 전이보시스템의 해석모델이 실제 접합부와 같이 거동하기 위해서 접촉조건에 따라 ABAQUS 프로그램이 가지고 있는 적절한 옵션기능을 선택하였으며, 플로팅 전이보시스템과 콘크리트가 접합된 모델을 구현하였다.
2. 횡력가력 모델 결과의 경우, 더블웹브앵글 접합부의 최대모멘트 성능면은 탑앤드시트앵글 접합부에 비해 20KN·m정도 떨어지지만, 동일한 모멘트의 기준에서는 변위가 작았음을 알 수 있었다.
3. 축력가력 모델 결과의 경우, 전이보시스템의 수직하중 전달 형태는 두 접합부 모두 전이보 상단 플랜지 접촉된 부재가 위치한 곳에 주로 응력이 분포되어 있는 것을 알 수 있었고, 전이보 웨브를 통해 하단 플랜지로 전달되었으므로 수직하중에 대해 하중전달 효과가 있다. 또한, 전이보 상단플랜지에 접촉된 면적은 두 접합부 모두 같지만, 면적의 밀집정도에 따라 전이보 웨브에 발생하는 응력분포가 다른 양상을 볼 수 있었다.

4. 접합부마다 항복응력 경로가 상이하지만, 하중가력 중 항복하는 형태를 보면 더블웹브앵글 접합부는 부재별로 전체적으로 항복응력을 유지하는 반면, 탑앤드시트앵글 접합부는 하중가력 4000KN이후에 대체적으로 항복응력을 초과하는 이력을 봄으로써 항복경로를 파악할 수 있었다.

5. 전이보시스템은 콘크리트와 합성구조 형태로 거동되어 베이스플레이트 모델보다 중앙부의 모멘트 성능면에서 개선효과가 있었으며, 베이스플레이트 모델과 전이보시스템의 지지점의 반력을 분석함으로써 격벽에 하중을 전달되는 효과가 개선되었음을 확인하였다.



참고문헌

1. 박중서, “과랑하중을 고려한 3차원 플로팅 구조물의 반강접 접합부 해석”, 한국해양대학교 석사학위 논문, 2012. 2
2. 송화철, 사이조 오사무, 마루요시 코이치, “플로팅구조물의 상부구조체에 대한 거주성 평가” 한국공간구조학회지:제 9권 2호 통권 36호, 2009.6
3. 한국건설교통기술평가원, “수해양 문화공간을 위한 정주형 플로팅 건축 설계 기술 개발 1차년도 최종 보고서”, 2010
4. 이은숙, “과랑하중을 고려한 반강접 접합부의 비선형 해석”, 한국해양대학교 석사학위 논문, 2002. 8
5. 전성삼, “3차원 비선형 유한요소 해석을 통한 무보강 탑-시트 앵글 접합부의 초기강성 및 소성모멘트 저항능력 예측”, 인하대학교 석사학위 논문, 2010. 2
6. 천지원, “무보강 탑-시트 앵글 접합부의 초기강성 및 극한모멘트 예측모델”, 인하대학교 석사학위 논문, 2008. 2
7. 김기환, “비선형 유한요소해석을 통한 더블앵글 접합부의 거동에 대한 연구”, 인하대학교 석사학위 논문, 2005. 2
8. 양재근 외 2명, “전단력을 받는 더블앵글 접합부의 회전강성 산정을 위한 3차원 유한요소해석”, 대한건축학회지, 2005 .5

9. 이길영, “더블앵글 접합부의 초기강성 및 극한강도 산정을 위한 해석모델”, 인하대학교 석사학위 논문 2007. 2
10. 김호근, “수평.수직하중을 동시에 받는 더블앵글로 접합된 골조의 거동에 관한 연구” 인하대학교 석사학위 논문 2005. 2
11. 윤성기외 2명, “강구조 보-기둥 접합부의 비선형 유한요소 모델링 기법”, 대한건축학회, 2010. 3
12. 한상윤, “밀착접합(metal touch)을 이용한 철골 주각뿔의 응력전달과 성능 개선에 관한 연구”, 연세대학교 석사학위 논문, 2005. 12
13. 김정현, “축력과 모멘트를 받는 철골주각의 거동에 관한 해석적 연구” 아주대학교 석사학위 논문, 2005.2
14. 이태권, “축력과 모멘트를 받는 철골주각의 거동에 관한 연구” 아주대학교 석사학위 논문, 2004. 2
15. 이태규, “중심압축 및 조합력을 받는 철골주각의 거동에 관한 연구” 중앙대학교 석사학위 논문 2005. 2
16. 심기철 외 2명, “작은 축력을 받는 H형강 기둥의 베이스 플레이트 거동과 설계”, 한국강구조학회, 2004
17. 홍성욱, “메탈터치에 의한 철골기둥의 응력 전달 거동에 관한 연구”, 연세대학교 석사학위 논문, 2003

18. 이선문, “수직하중을 받는 하부골조-상부벽식 구조의 전이보 해석에 관한 연구” 청주대학교 석사학위 논문, 2003
19. Tomaz JANKOWIAK, Tomaz LODYGOWSKI. "IDENTIFICATION OF PARAMETER OF CONCRETE DAMAGE PLASTICITY CONSTITUTIVE MODEL" Foundations of civil and environmental engineering No.6 2005
20. Guillaume Gourdet "Connectin hull-topsides: principles, designs and return of experience" Breau Veritas-Naval and offshore Engineer 2008
21. Barakat, M. and Chen, W. F., "Practical analysis of semi-rigid frames, "Engineering Journal, AISC, Vol. 27, No.2, pp. 54-68, 1990
22. Barakat, M. and Chen, W. F., "Design analysis of semi-rigid frames", Engineering Journal, AISC, Vol. 28, No. 2, pp. 55-64, 1991
23. Kish, N. and Chen, W. F., "Steel Connection Data Bank Program", Structural Engineering Report No. CE-STR-86-18, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN., 1986
24. Yee, Y. L. and Melchers, R. E., "Moment-Rotation Curves for Bolted Connections, Journal of Structural Engineering", ASCE, Vol. 112, No. 3, March, pp. 615-635, 1986
25. Wu, F. H. and Chen, W. F., "A design model for semi-rigid connections", Engineering Structures, 12(2), pp. 88-97, 1990

26. Kishi, N. and Chen, W. F. and Goto, Y. and Hasan, R., "Behavior of Tall Buildings with Mixed Use of Rigid and Semi-Rigid Connections", Computer & Structures Vol. 61, No. 6. pp 1193~1206, 1996
27. ADINA 상용 소프트웨어 Manual
28. ABAQUS/Standard, User Manual, I ~ III, Version 6.10, Hibbitt Karlsson & Sorensen, Inc, 2010
29. Manual of Steel Construction, Allowable stress Design, ninth edition
30. KBC 2009 건축구조기준, 대학건축학회

