creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

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

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

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

[UCI]I804:24011-200000256563

2012年 2月

碩 士 學 位 論 文

2방향 수평하중을 받는 강재 주각부의 이력거동에 관한 해석적 연구

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科 (建 築 工 學 專 攻)

張 正 鉉

2방향 수평하중을 받는 강재 주각부의 이력거동에 관한 해석적 연구

An Analytical Study on Hysteretic Behavior of Steel Column Base Under Bi-axial Bending

2012年 2月 24日

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

建 築 工 學 科 (建 築 工 學 專 攻)

張 正 鉉

2방향 수평하중을 받는 강재 주각부의 이력거동에 관한 해석적 연구

指導敎授　　崔　宰　赫

이 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함.

2011年　11月

朝 鮮 大 學 校　大 學 院

建 築 工 學 科 (建 築 工 學 專 攻)

張　正　鉉

張正鉉의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 敎授 김 의 식 印

委 員 朝鮮大學校 敎授 최 재 혁 印

委 員 朝鮮大學校 敎授 조 창 근 印

2011年 11月

朝 鮮 大 學 校 大 學 院

차 례

ABSTRACT

제1장 서론 ····· 1
1.1 연구 배경 및 목적 ····· 1
1.2 연구 동향 ····· 2
1.3 연구 방법 및 범위 ····· 4

제2장 노출형 주각부의 구조적 거동 ····· 5
2.1 노출형 주각부의 2방향 실험 ····· 5
2.1.1 실험개요 ····· 5
2.1.2 재료특성 ····· 16
2.2 노출형 주각부의 2방향 유한요소 해석 ····· 18
2.2.1 유한요소 모델링 ····· 18
2.2.2 해석모델 ····· 20
2.2.3 Loading programs ····· 23
2.3 실험결과 해석결과의 비교 ····· 23
2.3.1 1방향 수평하중에 대한 적용 ····· 23
2.3.2 2방향 수평하중에 대한 적용 ····· 32
2.3.3 해석모델 적용 결과 ····· 43
2.4 해석결과와 이론식의 비교 ····· 44
2.4.1 베이스 플레이트 항복 선행형 ····· 44
2.4.2 앵커볼트 항복 선행형 ····· 45
2.4.3 해석 모델 적용결과 ····· 46

제3장 베이스 플레이트 두께에 따른 구조거동 ····· 48
3.1 베이스 플레이트 두께에 따른 해석 모델 개요 ····· 48

3.2 이력루프 응답 ····· 49
3.3 Moment-Drift Angle Response ····· 52
3.4 에너지 흡수 능력 및 핀칭 효과 ····· 55

제4장 베이스 플레이트와 앵커볼트의 항복내력비에 따른 구조적 거동 ··· 58
4.1 항복내력비에 따른 해석 모델 개요 ····· 58
4.2 이력루프 응답 ····· 59
4.3 Moment-Drift Angle Response ····· 63
4.4 에너지 흡수 능력 및 핀칭 효과 ····· 64

제5장 결론 ····· 67

참고문헌 ····· 69

표 차 례

표 2.1 반복 변위 제어 방법 ····· 14
표 2.2 Test code ····· 14
표 2.3 앵커볼트의 재료속성 ····· 16
표 2.4 재료속성 ····· 17
표 2.5 실험과 해석의 최대 휨모멘트의 비교 ····· 43
표 2.6 해석과 이록식의 최대 휨모멘트의 비교 ····· 47
표 3.1 베이스 플레이트 두께에 따른 해석 모델 개요 ····· 48
표 3.2 베이스 플레이트 두께에 따른 비교 ····· 54
표 4.1 항복내력비에 따른 해석 모델 개요 ····· 57

그 림 차 례

그림 2.1 실험체 개요 ····· 5
그림 2.2 용접 개요 ····· 6
그림 2.3 재하 실험 개요 ····· 7
그림 2.4 수평 2방향 엑츄레이터 배치 ····· 8
그림 2.5 앵커 볼트의 치수 ····· 8
그림 2.6 변위측정 방법 ····· 9
그림 2.7 기초의 회전각과 앵커 볼트의 변위 측정 방법 ····· 10
그림 2.8 기둥 축의 기호 방향 ····· 10
그림 2.9 2방향 가력 개요 ····· 11
그림 2.10 컴퓨터를 사용한 실험 시스템의 개요 ····· 12
그림 2.11 2방향 실험의 기하학적 오류 수정 ····· 15
그림 2.12 앵커볼트의 하중-변위 곡선 ····· 17
그림 2.13 Linear Kinematic Hardening ····· 19
그림 2.14 ANSYS 모델링 ····· 21
그림 2.15 베이스 플레이트 메쉬 형상 ····· 22
그림 2.16 1방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9㎜ 이력루프 ····· 24
그림 2.17 1방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9㎜ 주응력 분포 ····· 25
그림 2.18 1방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9㎜ 변형도 ····· 27
그림 2.19 1방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 19㎜ 이력루프 ····· 28
그림 2.20 1방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 19㎜ 주응력 분포 ····· 29
그림 2.21 1방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 19㎜ 변형도 ····· 31
그림 2.22 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9㎜ 기존 실험적 연구 이력루프 ····· 33
그림 2.23 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9㎜ 해석적 연구 이력루프 ····· 34
그림 2.24 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9㎜ 주응력 분포 ····· 35
그림 2.25 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9㎜ 변형도 ····· 37
그림 2.26 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 19㎜ 기존 실험적 연구 이력루프 ····· 38
그림 2.27 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 19㎜ 해석적 연구 이력루프 ····· 39
그림 2.28 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 19㎜ 주응력 분포 ····· 40

그림 2.29 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 19㎜ 변형도 ····· 42
그림 2.30 완전 베이스 플레이트 붕괴 메커니즘 ····· 44
그림 2.31 완전 앵커볼트 붕괴 메커니즘 ····· 45
그림 2.32 베이스 플레이트 9㎜ 해석결과 및 이론식 비교 ····· 46
그림 2.33 베이스 플레이트 19㎜ 해석결과 및 이론식 비교 ····· 47
그림 3.1 실험체 SCUY-P5의 이력루프 (베이스 플레이트 두께 5㎜) ····· 49
그림 3.2 실험체 SCUY-P9의 이력루프 (베이스 플레이트 두께 9㎜) ····· 50
그림 3.3 실험체 SCUY-P15의 이력루프 (베이스 플레이트 두께 15㎜) ····· 50
그림 3.4 실험체 SCUY-P19의 이력루프 (베이스 플레이트 두께 19㎜) ····· 51
그림 3.5 실험체 SCUY-P25의 이력루프 (베이스 플레이트 두께 25㎜) ····· 51
그림 3.6 베이스 플레이트 두께에 따른 모멘트-변형각 ····· 52
그림 3.7 베이스 플레이트 두께에 따른 최대모멘트 ····· 53
그림 3.8 베이스 플레이트 두께에 따른 항복모멘트 ····· 53
그림 3.9 베이스 플레이트 두께에 따른 초기강성 ····· 54
그림 3.10 베이스 플레이트 두께에 따른 누적하중-누적변위 관계 ····· 56
그림 3.11 베이스 플레이트 두께에 따른 에너지소산성능-누적변위 관계 ····· 56
그림 3.12 베이스 플레이트 두께에 따른 에너지소산 능력 ····· 57
그림 4.1 실험체 SCUY-Y1 (항복내력비 1) ····· 59
그림 4.2 실험체 SCUY-Y1.25 (항복내력비 1.25) ····· 60
그림 4.3 실험체 SCUY-Y1.5 (항복내력비 1.5) ····· 60
그림 4.4 실험체 SCUY-Y1.75 (항복내력비 1.75) ····· 61
그림 4.5 실험체 SCUY-Y2 (항복내력비 2) ····· 61
그림 4.6 실험체 SCUY-Y2.25 (항복내력비 2.25) ····· 62
그림 4.7 실험체 SCUY-Y2.5 (항복내력비 2.5) ····· 62
그림 4.8 항복내력비에 따른 모멘트-회전각 ····· 63
그림 4.9 항복내력비에 따른 누적하중-누적변위 관계 ····· 65
그림 4.10 항복내력비에 따른 에너지소산 성능-누적변위 관계 ····· 65
그림 4.11 항복내력비에 따른 에너지소산 성능 ····· 66
그림 4.12 항복내력비에 따른 에너지소산 성능비 ····· 66

Abstract

Non-linear FEM Analysis of Exposed-type Steel Column Base Under Bi-axial Loading

JANG, Jeong hyun
Advisor : Prof. CHOI, Jae hyouk, Ph.D
Department of Architectural Engineering,
Graduate School of Chosun University

Column base have a inportant role that transmit a load which impat to structure to base in steel structure. The column bases behave with a compressive force, shear force and bending moment, particularly moment-rotation behavior which has occur by bending moment have a effect to a horizontal deformation of framework and column safety so it have a inportant roll for analysis of entire structure as non-linear behavior.

Exposed column is consist of base, anchor bolt, base plate and column and it show so complicated behavior that structural behavior need to clearly define as safety of entire structure.

although non-linear behavior of column bases demand enough experimental study and theoretical analysis like this, it is a lack of research compare with beam-column connet.

Therefore. in this study, analysis that column bases by modeling using a general finite element analysis program and reviewing a validity compare with existing

research result, it have an objet in view that structural behavior characteristics of exposed column bases by thickness of base plate, yielding stress ratio of base plate and anchor bolt which is very important element of behavior of column bases.

제1장 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

강구조물에 있어서 주각부는 구조물에 작용하는 하중을 기초에 전달하는 매우 중요한 역할을 한다. 주각부는 압축력, 전단력, 휨모멘트에 대하여 거동하며, 특히 휨모멘트에 의해 발생되는 모멘트-회전 거동은 골조의 수평 변형과 기둥의 안정에 양향을 미치게 되어 전체 구조물 해석에 중요한 역할을 하는 비선형 거동을 하게 된다. 그러므로 강구조물의 해석에서 이와 같은 주각부의 비선형 거동을 정확히 평가하고 예측하는 일이 중요하다.

노출형식 강재 주각부는 일반적으로 강접합 또는 핀접합으로 이상화시켜 이루어지고 있다. 이것은 베이스 플레이트가 앵커볼트로 콘크리트 기초와 연결되고, 콘크리트와 강재의 재료 이질성으로 인하여 각 부분의 비선형 거동이 복합적으로 작용하는 등 실제 주각부의 반강접 거동을 파악하는 것이 어렵기 때문이다.

이와 같이 주각부의 비선형 거동은 많은 실험적 연구와 이론적 분석이 요구되고 있음에도 불구하고, 보-기둥 접합부에 비하여 연구가 부족한 실정이다. 또한, 기존 연구 수행은 모멘트-회전 거동에 관하여 대부분 1방향 모멘트-회전 거동에 관하여 이루어지고 있으며 2방향 모멘트-회전 거동에 관하여 연구가 부족한 실정이다. 그러나 전체 구조물의 비선형 거동파악이 점차 중요시 되고 있으며, 2방향 휨모멘트가 작용할시 주각부의 비선형 거동을 정확히 파악하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Workbench를 이용하여 주각부를 모델링하고, 1방향 및 2방향 수평하중을 작용하여 해석을 수행한 후 기존의 연구결과와 비교하여 타당성을 검토한 후, 주각부의 거동에 중요한 영향을 미치는 요소인 플레이트의 두께, 플레이트와 앵커볼트의 항복내력비에 따른 주각부의 구조적 거동특성을 파악하는데 목적이 있다.

1.2 연구 동향

1955년 Taguchi[1]등은 노출형 주각부의 회전 강성을 결정하기 위해 일련의 실험적 연구를 수행했다. 이 연구에서, 주각의 회전 강성은 3가지 케이스로 분류된다 베이스 플레이트 밑면과 모르타르 위의 표면, 베이스 플레이트와 강재기둥사이의 변형, 베이스 플레이트의 변형이다. 그러나 테스트 결과 모두 탄성범위에 있기 때문에 그 결과를 확인할 수 없었다.

1957년 Salmon과 Shenker[2]등은 축하중만이 작용하는 주각부에 대해 일정한 축하중을 받는 정착부의 상・하부 경계조건을 결정하는 방법을 확정지었다.

1978년 Dewolf[3]는 축하중이 작용할 때 베이스 플레이트와 콘크리트의 지압응력이 불규칙적으로 분포하는 것은 축하중에 따른 베이스 플레이트의 떨어지고 붙는 위치가 일정하지 않다는 것에서 기인함을 증명하였다.

1980년 Dewolf와 Sarisley[4]는 편심하중에 의한 철골기중과 베이스 플레이트를 테스트하는 방법에 관한 연구를 수행하였으며, 1983년 Murray는 모멘트와 함께 축하중이 작용할 때의 주각부 설계에 대한 연구를 하였다.

1986년 Thambiratham과 Paramasivam[5]은 베이스 플레이트의 두께와 하중의 편심에 따른 변형률 분포를 파악하였다.

1990년 Natarajan과 David[6]는 2차원 유한요소 해석방법을 이용하여 베이스 플레이트의 지압분포를 파악하였고, 컴퓨터로 해석한 결과를 실험과 비교하였다.

Hiroshi[7]는 건물의 내진성 평가에 관하여 주각의 여러 형태에 대해서 정리하고 노출형 주각의 베이스 플레이트와 앵커볼트의 상호관계를 설정하기 위해서 실험을 수행하였다. 그리고 수평력을 받는 노출형 주각에 관하여 이론과 실험을 통하여 그 기본형의 항복 또는 파괴모드를 설정하고 있으며 항복내력, 강성, 변형 능력의 평가식을 제안하고 있다. 그리고 콘크리트 파괴 배제 조건과 복원력 특성에 대해서도 정리하고 있다.

Morita[8]는 주각의 복원력 특성의 관점에서 충분한 변형 능력을 가진 탄소성형과 대변형을 가지는 pinching type, 변형능력이 불충분한 pinching type 등 3종류로 분류하고 있다.

Washio와 Suziki[9]는 강재 플레이트와 모르타르 사이의 미끄러짐 영향을 이해하기 위한 연구를 하였다. 이 연구는 앵커볼트를 520-1900*10^{-6}의 영역으로 조았을 때 단조

하중에서 0.20-0.35㎜ 이내에 최대 하중이 떨어지는 미끄러짐의 양을 표시했다. 그러나 미끄러짐이 0.10㎜를 초과할 때 미끄럼 저항의 어떤 영향도 반복 하중에는 나타나지 않았다.

국내에서는 1983년 김부식[10]이 철골 주각부의 역학성상에 관한 실험적 연구로서 베이스 플레이트와 편심량의 변화에 따른 거동에 대하여 연구를 수행하였다.

2000년 김재봉[11]이 범용 유한요소프로그램을 이용하여 철골 주각부의 모멘트-회전 거동특성을 파악하는 해석적 연구를 수행하였다.

2005년 이승준[12]은 철골구조물의 대표적인 주각형태인 노출형 및 매입형 철골주각을 연구 대상으로 하여 설계 시에 필요한 장기 및 단기하중 그리고 반복하중에 대한 주각의 역학적 성능을 실험적 방법과 해석적 방법으로 조사하고 주각의 구조특성이 골조의 거동에 미치는 영향을 연구하며 주각의 설계기준 작성에 필요한 자료를 제시하였다.

이와 같이 철골 주각부에 대한 연구는 베이스 플레이트의 비선형 거동의 중요성과 함께 구조물 전체의 비선형 거동 파악에 대한 연구의 중요성이 증가하고 있어, 철골 주각부에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.

1.3 연구 방법 및 범위

노출형 주각부의 모멘트-회전 거동을 파악하기 위하여 범용 비선형 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Workbench를 이용하여, 주각부의 구성요소인 철골기둥과 베이스 플레이트, 앵커볼트를 3차원 솔리드 요소로 모델링하고 접촉요소의 거동은 Node-to-Node 모델을 이용하는 3차원 접촉요소(CONTA148)를 사용하여 모델링한다.

주각부의 모멘트-회전 거동을 파악하기 위한 적절한 모델링 기법을 제시하기 위하여 기존에 실시된 재하실험 데이터의 재료 상수를 사용하고 재하실험과 동일한 반복입력 진폭을 해석 모델에 강제변위를 가하여 해석 결과의 신뢰성을 검토하였다.

그리고 제시된 주각부의 모델링 방법을 이용하여 베이스 플레이트의 두께 및 베이스 플이트와 앵커볼트의 항복내력비에 따른 1방향 수평하중 작용시 노출형 주각부의 이력거동 및 구조 특성, 에너지소산 성능을 파악하고자 한다.

제2장 노출형 주각부의 구조적 거동

2.1 노출형 주각부의 2방향 실험

2축 반복하중을 받는 노출형 주각부의 비탄성거동을 파악하기 위하여 베이스 플레이트의 두께와 가력방식을 매개변수로 실험을 진행하였다[16].

2.1.1 실험개요

2.1.1.1 실험체 개요

기둥은 냉간성형 된 150×150×6㎜, 유효높이는 1500㎜인 사각형 강관을 사용하였고 1차 실험 후 상하를 바꾸어 2차 실험을 수행하기 위해 반복하중 실험 동안 탄성범위에 머물도록 설계하였다. 베이스 플레이트의 크기는 300×300×19㎜, 300×300×9㎜, 그리고 8개의 Φ12 스크류 앵커 볼트를 사용하였다. 모든 부재는 동일한 용접 방법(필렛 용접)을 사용하였다. 그림 2.1과 2.2는 실험체의 개요와 용접 개요를 나타낸다.

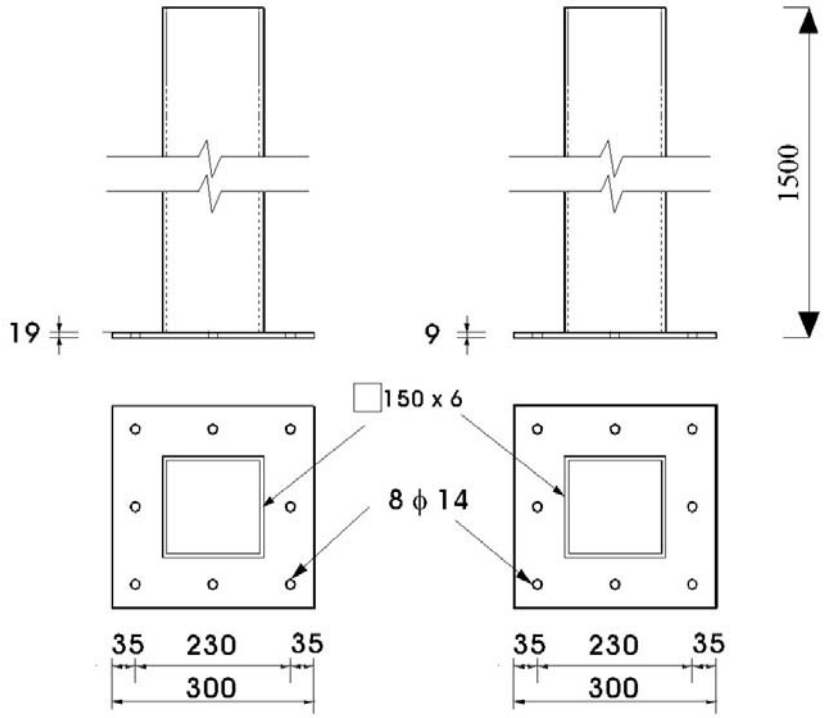


그림 2.1 실험체 개요

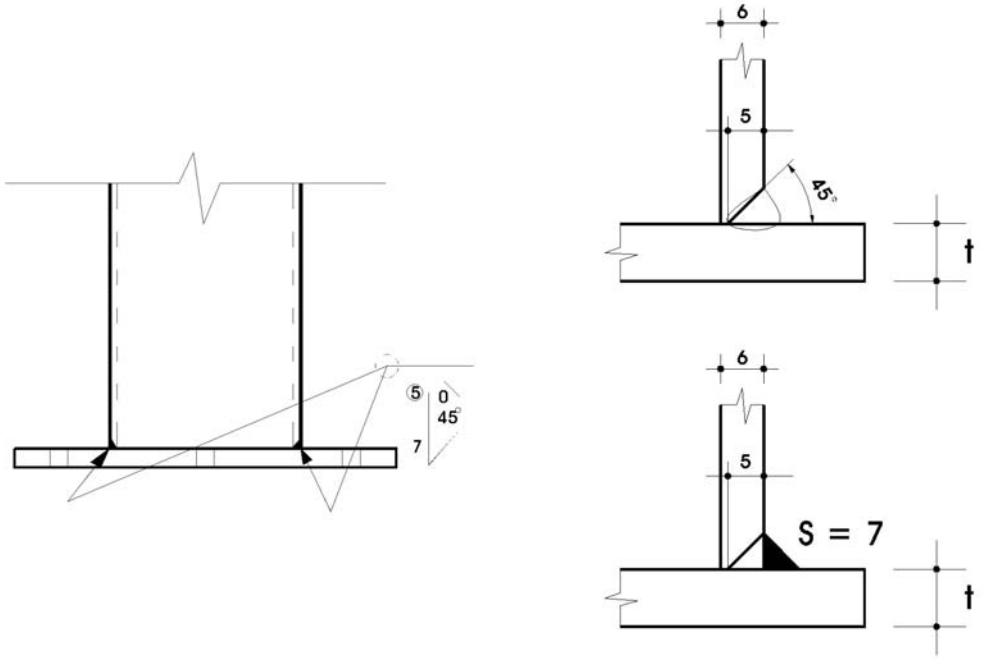


그림 2.2 용접 개요

2.1.1.2 실험 설정

실험은 기초 블록 위에 300×300×19mm, 300×300×9mm의 베이스 플레이트와 □-150×150×6 기둥으로 구성되며 X, Y방향의 유압식 엑츄레이터로 가력하였다. 각 엑츄레이터의 용량은 200kN으로 기둥 상부의 플레이트에 연결되며 각 엑츄레이터에 연결되어 있는 두 개의 유압펌프와 컴퓨터를 통해 변위 제어된다.

기둥은 8개의 M12 앵커볼트로 기초 블록에 고정되고 상부의 loading head는 엑츄레이터와 연결되어 있다(그림 2.3~2.4).

일반적으로 앵커 볼트에 장력을 도입하였을 경우 기둥 기초의 성능에 영향을 미치기 때문에 별도로 장력을 관리할 필요가 있다. 본 실험에서는 각각의 앵커볼트를 토크렌치를 이용하여 장력이 5kN/cm^{2}이 되도록 조정하였고 이중너트로 고정하였다(그림 2.5).

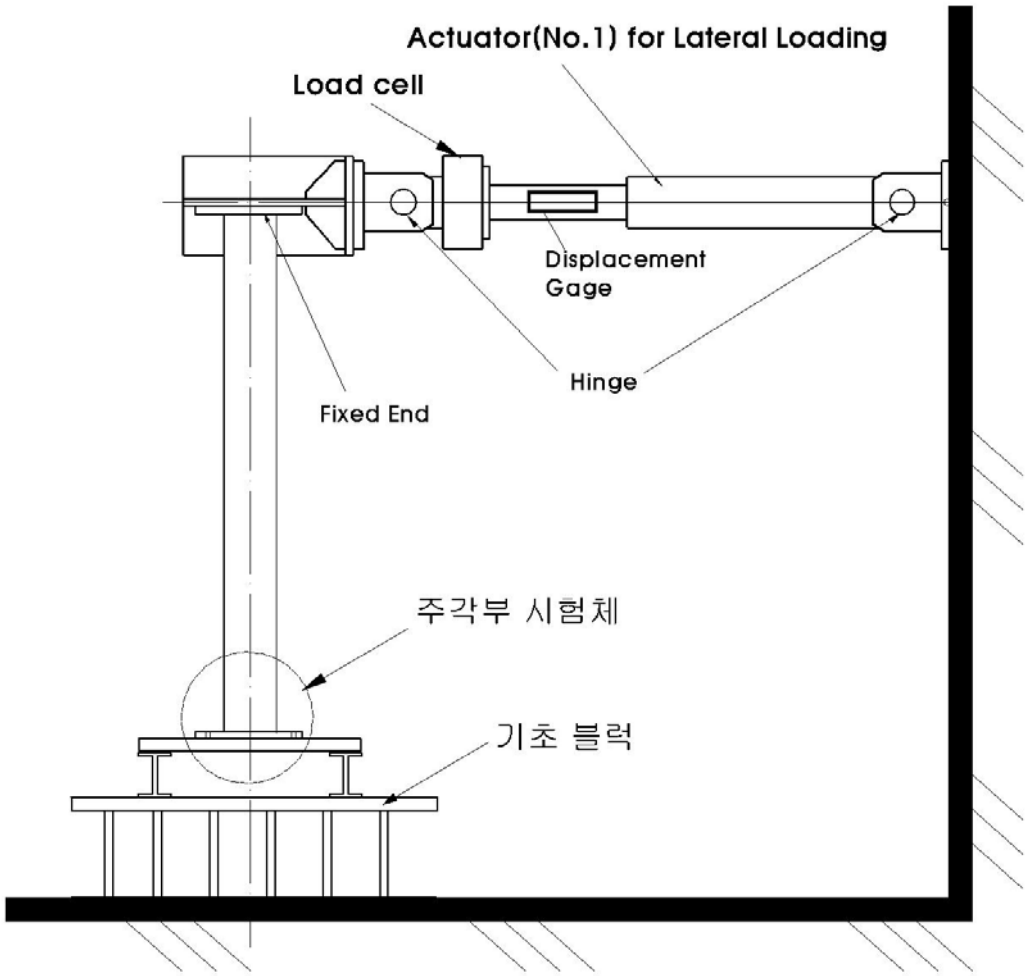

Actuator(No.1) for Lateral Loading
Load cell
Displacement
Gage
Hinge
Fixed End
주각부 시험체
기초 블럭

그림 2.3 재하 실험 개요

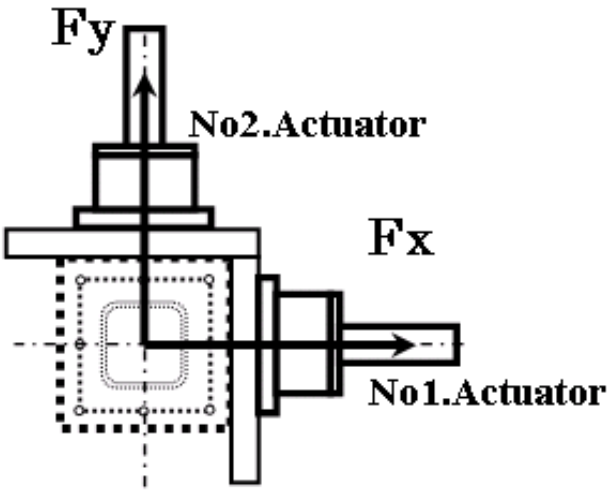


그림 2.4 수평 2방향 엑츄레이터 배치

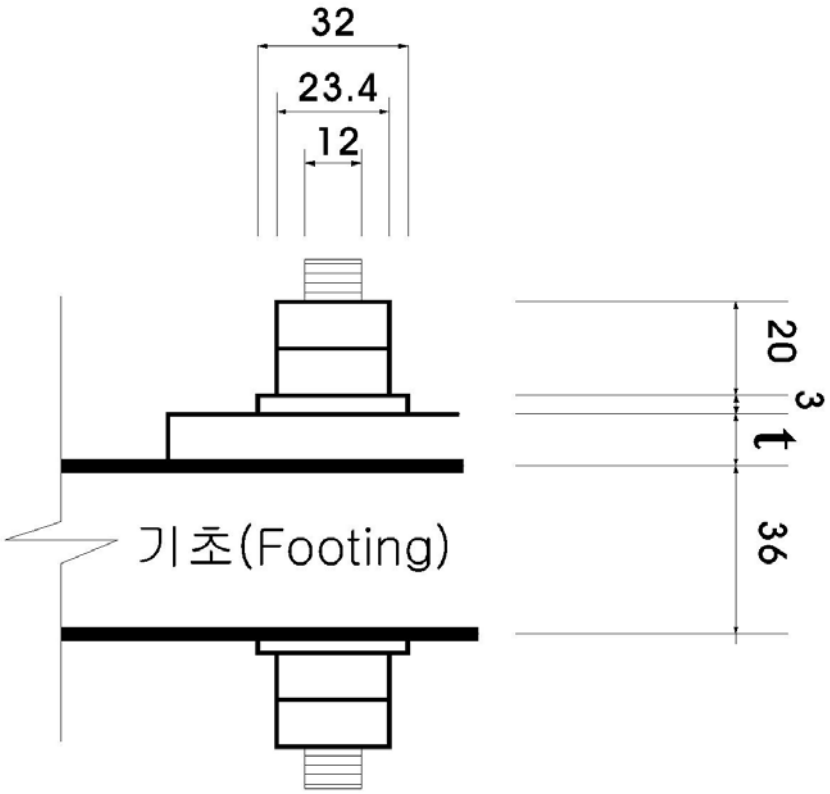


그림 2.5 앵커 볼트의 치수

2.1.1.3 측정 방법

변위 게이지는 기둥 상부의 변위를 측정하기 위해 각 엑츄레이터의 양쪽에 설치하였다. 실험체에는 앵커볼트 상부에 8개의 변위 게이지, 각 기둥의 표면 2개, 베이스 플레이트 아래로부터 25㎝ 떨어진 곳에 설치하였다.

기둥의 하단부분과 각 면은 기둥의 회전을 측정하기 위해 변위 게이지를 설치하였다. 반복하중 실험시 앵커볼트의 변위를 측정하기 위해 각 앵커볼트의 하단부에도 변위 게이지를 설치하였다.

반복하중 실험 동안, 각 엑츄레이터의 변위와 하중, 기둥의 회전, 앵커볼트의 변위의 측정값은 디지털 레코더를 통해 기록된다(그림 2.6~2.8). 컴퓨터를 사용한 두 방향 실험개요와 시스템을 그림 2.9~2.10에 나타내었다.

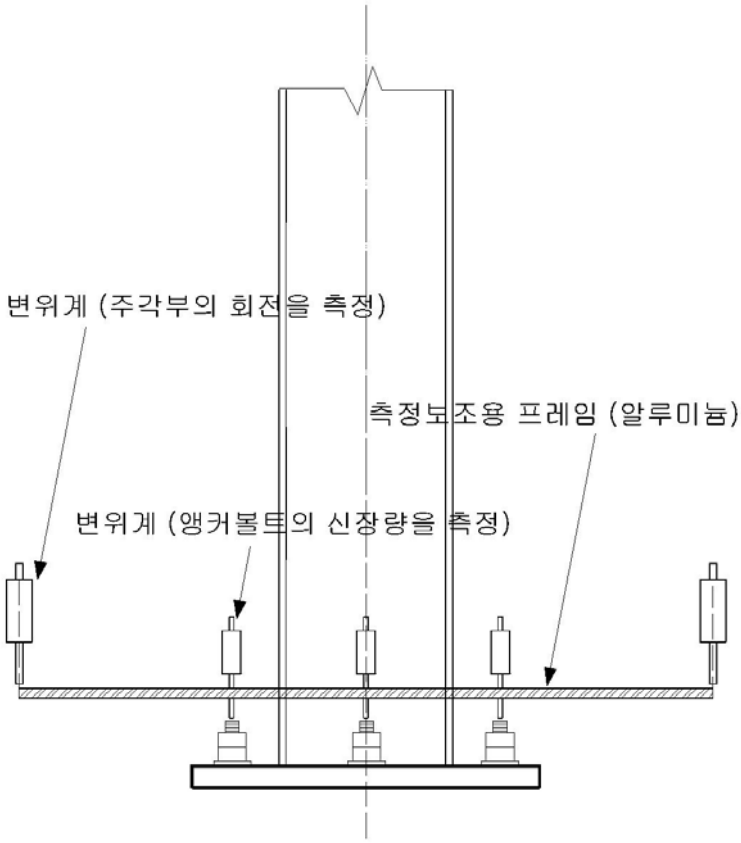


그림 2.6 변위측정 방법

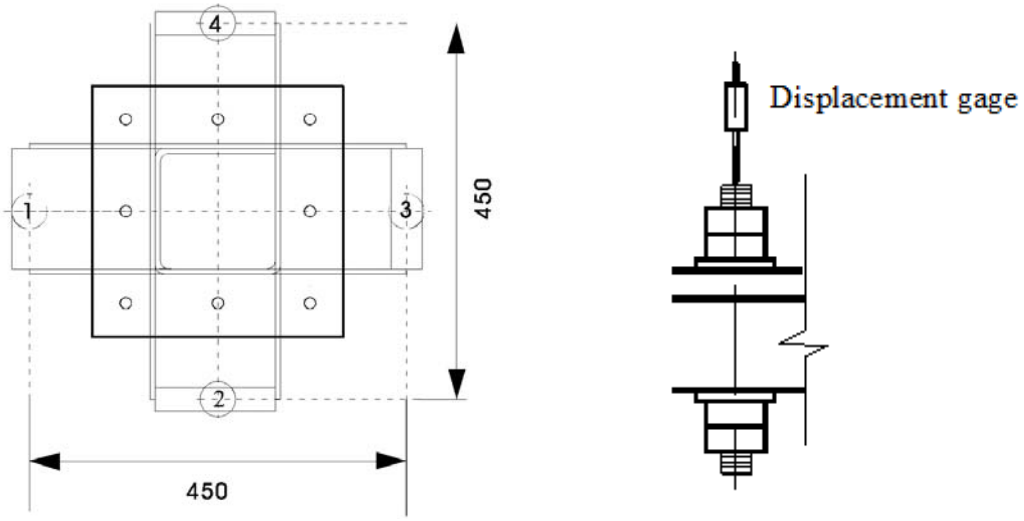


그림 2.7 기초의 회전각과 앵커 볼트의 변위 측정방법

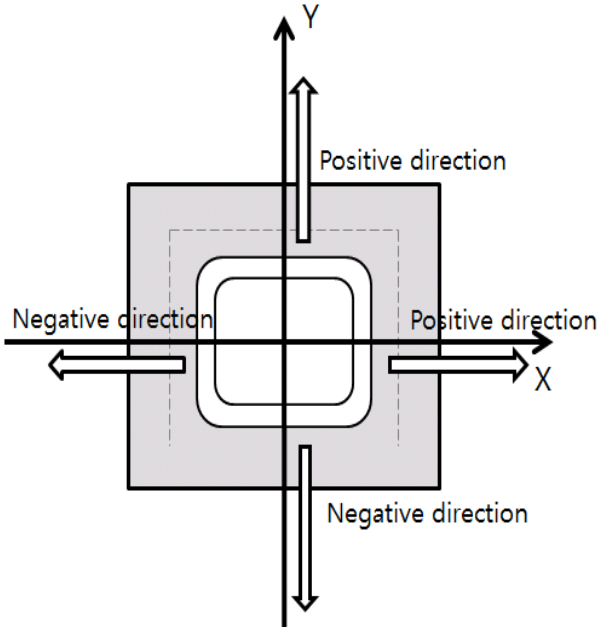


그림 2.8 기둥 축의 기호 방향

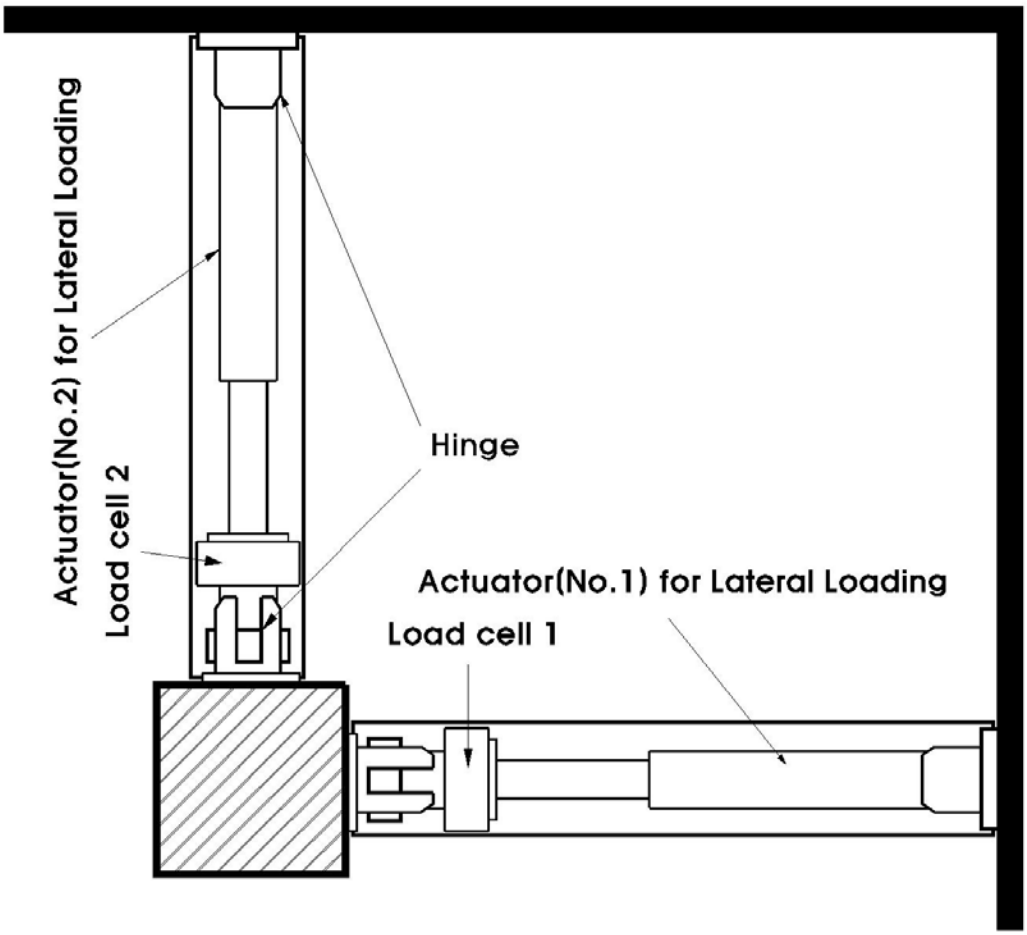


그림 2.9 2방향 가력 개요

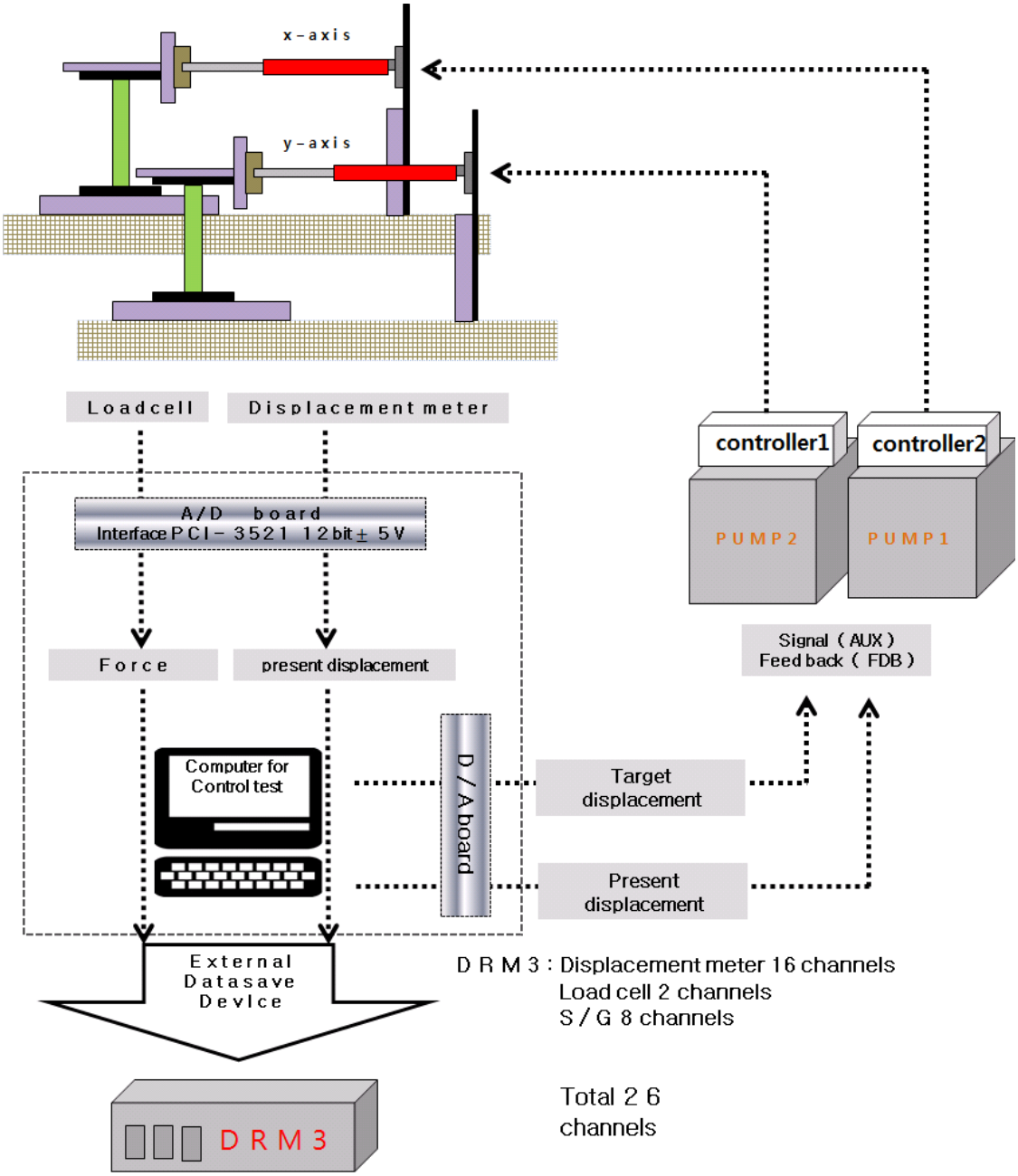
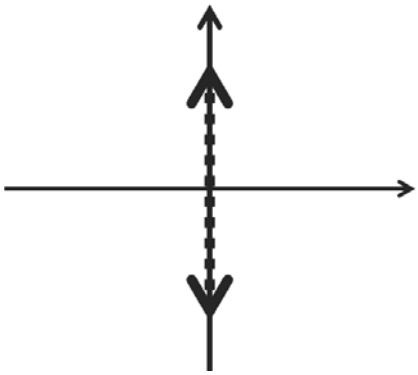


그림 2.10 컴퓨터를 사용한 실험 시스템의 개요

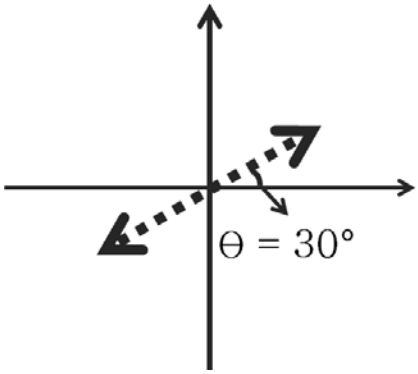
2.1.1.4 Loading program

2축의 반복하중 실험동안 캔틸레버 기둥의 각 실험체는 다른 수평변위이력을 받게 되며 X-Y 평면의 하중만을 위해 변위제어모드를 사용하였다. 실험은 모두 4가지로, 베이스 두께가 9mm, 19mm 두 경우에 대해 먼저 Y방향 1축 정적반복하중(SCUY), 그 후 2축 선형정적반복하중(SCBL)실시하였다.

실험이 시작시 변형각 δ/L 비율은 1/200(L : 기둥의 유효길이, δ : 기둥의 상부변위)이며 기둥의 각각 2 사이클이 끝난 후, 변형각을 1/100, 1/50, 1/25로 변경하여 변위를 증가하였다. 실험은 0.1m/sce 보다 느린 준정적재하를 실시하였다. 표 2.1에 변위제어방법을 나타내었다.



Y방향 1방향 정적반복하중(SCUY) : Y방향으로만 하중부여



2축방향선형정적반복하중(SCBL) : δY /δX값이 1/√3로 X방향의 30도 각도로 하중부여

표 2.1 반복 변위 제어 방법

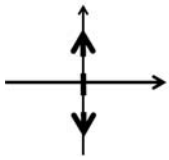
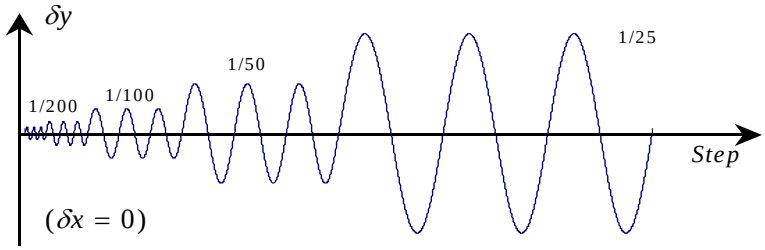
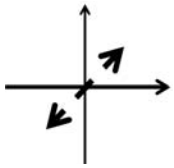
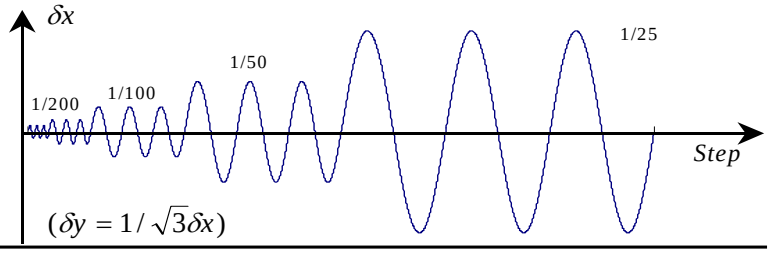
가력 타입	가력 방향	변위 제어 방법
1방향 (SCUY)		
2방향 (SCBL)		

표 2.2 Test code

	Uniaxial-Y(UY)	Biaxial-Linear(BL)
19mm	ECB19SCUY	ECB19SCBL
9mm	ECB9SCUY	ECB9SCBL

2.1.1.5 실험제어

컴퓨터를 통해 제어되는 실험은 각 사이클에서 정해진 변위까지 점진적으로 증가시키며 목표 변위에 도달하면 가력을 정지한다. 실험은 3사이클을 하나의 그룹으로 진행되며 각 3사이클의 그룹에서 기둥은 동일 변위값으로 제어하며 각 3사이클 그룹이 완료된 후 기둥의 변위가 증가한다. 반대방향에 대해서도 동일하게 적용한다.

2방향 가력시 기둥의 상부에서, 2방향 하중실험을 위한 양방향의 엑츄레이터에 의해 기하학적 비선형 단점이 발생한다. 본 실험에서는 이러한 단점을 컴퓨터의 수치해석으로 보완하였다. 이러한 기하학적 효과는 데이터 처리수준에서 설명된다(그림 2.11).

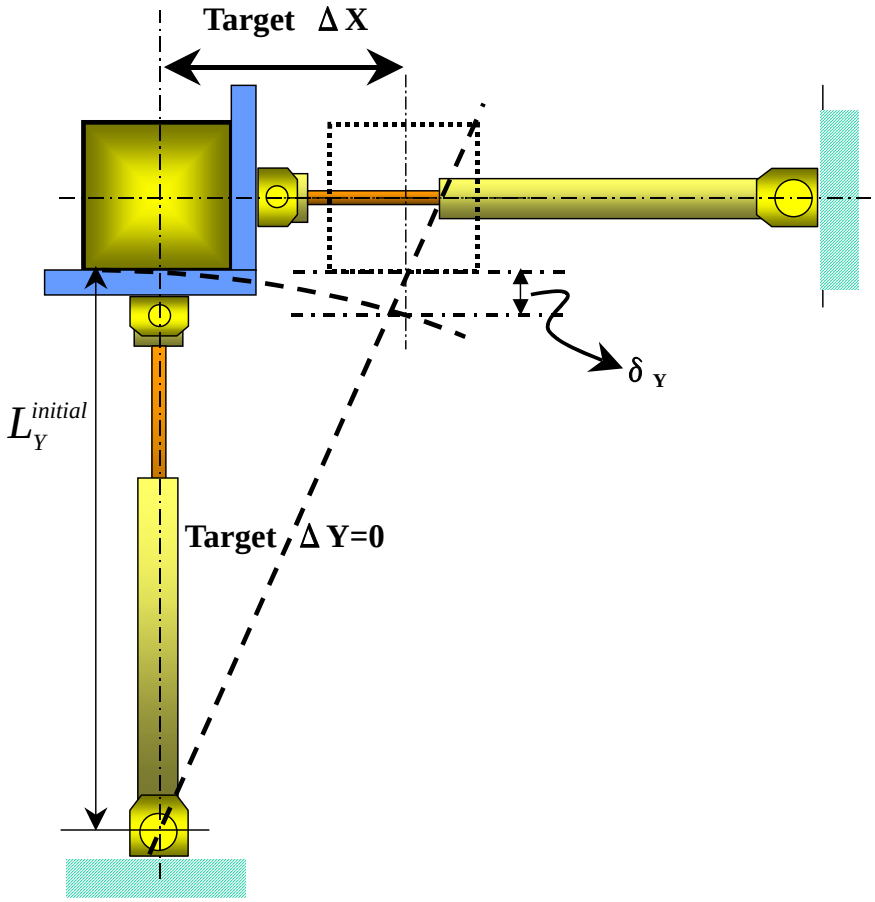


그림 2.11 2방향 실험의 기하학적 오류 수정

$$\delta_X^{error} = \sqrt{(L_X^{initial} + \triangle X)^2 + (\triangle Y)^2} - L_X^{initial} \tag{2.1}$$

$$\delta_Y^{error} = \sqrt{(L_Y^{initial} + \triangle X)^2 + (\triangle Y)^2} - L_Y^{initial} \tag{2.2}$$

여기서, δ_X^{error} : 목표 $\triangle X$의 오류

δ_Y^{error} : 목표 $\triangle Y$의 오류

$L_X^{initial}$: X-방향의 엑츄레이터 초기길이

$L_Y^{initial}$: Y-방향의 엑츄레이터 초기길이

$\triangle X$: X-방향의 목표변위

$\triangle Y$: Y-방향의 목표변위

하중과 변위값은 컴퓨터에 의해 기록되며 실험체의 하중저항이 영점에 가까워지면 실험은 종료된다.

2.1.2 재료특성

기본적으로 강판의 재료특성은 강관의 플레이트의 인장실험으로 결정된다. 앵커볼트의 경우 실제 현장에서 사용하는 10 개를 무작위로 선정하였다. 표 2.3에 실험결과를 나타내었다.

9mm, 19mm 베이스 플레이트와 각형강관의 항복강도 σ_y, 인장강도 σ_u, 그리고 앵커 볼트의 인장력을 표 2.4에 나타내었다. 그림 2.12는 앵커볼트의 일반적인 인장곡선을 나타낸다.

표 2.3 앵커볼트의 재료 속성

	Effect Area (cm^2)	σ_y (kN/cm^2)	σ_u (kN/cm^2)	σ_y/σ_u (%)	δ_{break}/L (%)
A.bolt_a1	0.843 (M12)	52.9	57.8	0.91	12
A.bolt_a2		55.1	58.8	0.93	13
A.bolt_a3		50	58.1	0.86	12
A.bolt_b1		52.3	54.6	0.95	10
A.bolt_b2		49	50.5	0.97	9.6
A.bolt_b3		52	53.1	0.97	9.5
A.bolt_b3		55	56.7	0.97	9.2
A.bolt_c1		56.8	61.7	0.92	10
A.bolt_c2		56.9	61.9	0.91	11
A.bolt_c3		56.8	62.2	0.91	9.5
		53.3	57.6	0.93	10.6

표 2.4 재료속성 [Mpa]

	σ_y	σ_u
Base plate 9mm (JIS SS400)	270	450
Base plate 19mm (JIS SS400)	250	430
SHS 150x150x6 (JIS STKR 400)	782	902

[kN]

	T_y	T_u
M12 A. bolt (With all screw)	44.9	48.6

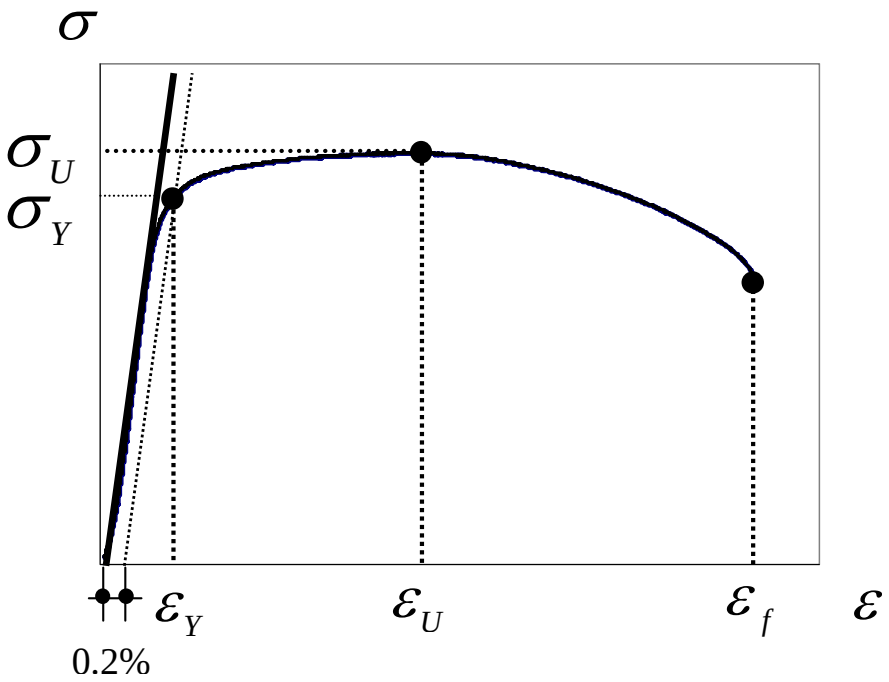


그림 2.12 앵커볼트의 하중-변위 곡선

2.2 노출형 주각부의 2방향 유한요소 해석

2.2.1 유한요소 모델링

노출형 주각부의 해석을 위하여 범용 비선형 유한요소해석프로그램인 ANSYS Workbench V13을 이용하여 모델링하였다. ANSYS 프로그램은 1970년 공학문제의 해석을 위하여 미국의 John Swanson 박사가 개발한 유한요소해석프로그램이다.

철골 기둥 및 베이스 플레이트, 앵커볼트를 3차원 솔리드 요소로 모델링하고, 부재들의 접합부 거동을 나타내기 위하여 접촉요소를 사용하여 주각부를 모델링하였다. 항복이후의 거동을 알아보기 위하여 재료 비선형 및 기하비선형을 고려하였다. 해석모델은 해석의 수렴성을 증가 시키기 위해 실제 실험체의 용접부 및 라운드 처리된 부분은 고려하지 않았으며, 볼트의 모델링 시 볼트축부 및 나사부 전 길이는 하나의 요소로 모델링 하였다. 또한 해석은 하중증분에 따른 오차를 해결하기 위하여 뉴튼랩슨법(Newton Rapson Method)을 사용하였다.

2.2.1.1 재료 특성 모델링

해석 수행시 항복이후의 거동을 알아보기 위하여 재료 비선형 및 기하비선형을 고려하였다. 재료 특성은 탄성계수와 접선계수 및 항복응력을 필요로 하며 재료의 항복기준 및 경화 법칙을 정의 하여야 한다.

탄성계수는 200,000Mpa를 사용 하였으며 접선계수는 2,000Mpa를 사용 하였다. 재료의 항복기준은 재료의 단위체적당 Distorsion strain energy가 시편의 항복응력상태에서의 단위체적당 Distorsion strain energy를 초과하면 항복하는 Von Mises항복 기준을 사용하였다.

경화 법칙은 소성관련 옵션 중 BKIN(Bilinear Kinematic Hardening)을 사용하였다. BKIN은 탄성계수와 접선계수 및 항복응력을 필요로 하며, 바우싱거 효과가 포함되어 있다.BKIN의 Stress-Strain곡선 및 경화 법칙은 그림 2.13과 같으며 관련 식을 식2.3에 나타내었다.

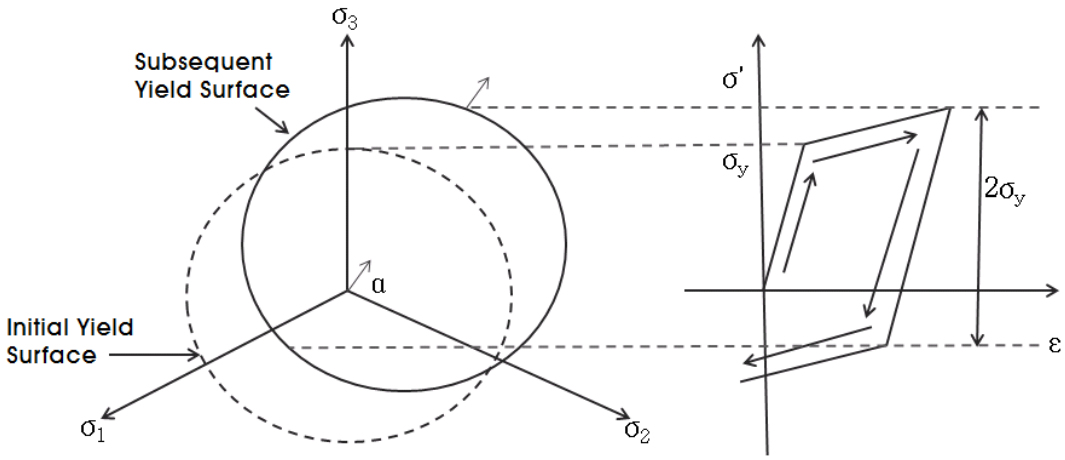


그림 2.13 Linear Kinematic Hardening

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\varepsilon}{C}\right)^{\frac{1}{P}}\right]\left(\sigma_o + \beta E_P \varepsilon_p^{eff}\right) \tag{2.3}$$

여기서, σ_y : 항복함수

C, P : Cowper-Symonds의 속도 매개 변수

σ_o : 초기 항복 응력

ε_P^{eff} : 소성 변형 효과

E_P : 항복 경화 계수

β : 1(= Kinematic Hardening)

2.2.1.2 접촉요소

접촉현상은 여러 개의 부재로 구성되는 구조물에서 흔히 발생하는 현상으로서, 구조물의 변형이 크지 않고 재료가 탄성거동을 하는 경우에도 비선형성을 가지는 문제이기 때문에 수치적 해결이 용이하지 않다. 초기에는 이론해를 통한 접근 방법이 주류를 이루었으나, 수치기법의 발달에 따라 유한요소법이 접촉문제의 해를 구하기 위한 주요 도구로 사용되고 있다. 일반적인 유한요소법의 정식화는 변위자유도에 기초를 두고 이

루어 지는바, 접촉문제에서는 접촉영역의 변위가 불가입성(impenetrability) 조건에 의해 제한된다[17]. 불가입성 조건이란 한 부재의 표면에 위치한 절점이 다른 부재의 내부로 침범할 수 없다는 조건을 의미한다. 불가입성 조건을 구현하는 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있는데, 하나는 정식화과정 자체에서 변위제한 조건을 고려하는 것이고, 다른하나는 접촉요소를 사용해서 접촉하는 영역들을 연결시키는 방법이다. ANSYS Workbench에서 제한조건 및 접촉요소를 이용한 방법을 모델링에 사용할 수 있도록 설정하고 있다.

본 연구 에서는 부재들 사이의 거동을 나타내기 위하여 접촉면간에 상대적 미끄럼이 있을 때, 기하비선형을 고려해야 할 때 사용하는 Node-to-Node 모델을 이용하는 3차원 접촉요소(CONTA148)를 사용하였다. 접촉강성은 해석의 수렴성을 높이기 위하여 0.01을 사용 하였으며 부재들 사이 마찰력을 고려 하였다.

2.2.2 해석 모델

해석에 사용된 모델은 그림 2.1과 같은 기둥 □-150×150×6 , 베이스 플레이트의 크기 300×300×19mm, 300×300×9mm, 앵커 볼트는 Φ12mm볼트를 사용하였다. 시험에 사용된 강재 재료의 특성은 표2.4와 같으며 해석에 있어 앵커볼트의 장력은 도입하지 않았다. 변위제어방법은 2.1장의 표 2.1과 같이 기둥의 상부를 제어 하였다.

두 타입의 ANSYS상의 모델링 및 메쉬(Mesh) 형상을 그림 2.14에 나타냈으며 각 타입의 베이스 플레이트의 메쉬 형상을 그림 2.15에 나타내었다. 메쉬의 형상은 대변형 및 재료비선형의 영향을 고려하기 위하여 Aggressive Mechanical을 사용하였으며 초기 메쉬 사이즈는 Active Assembly를 사용하여 활성화 되어 있는 모델에 의해 결정되게 하였다.

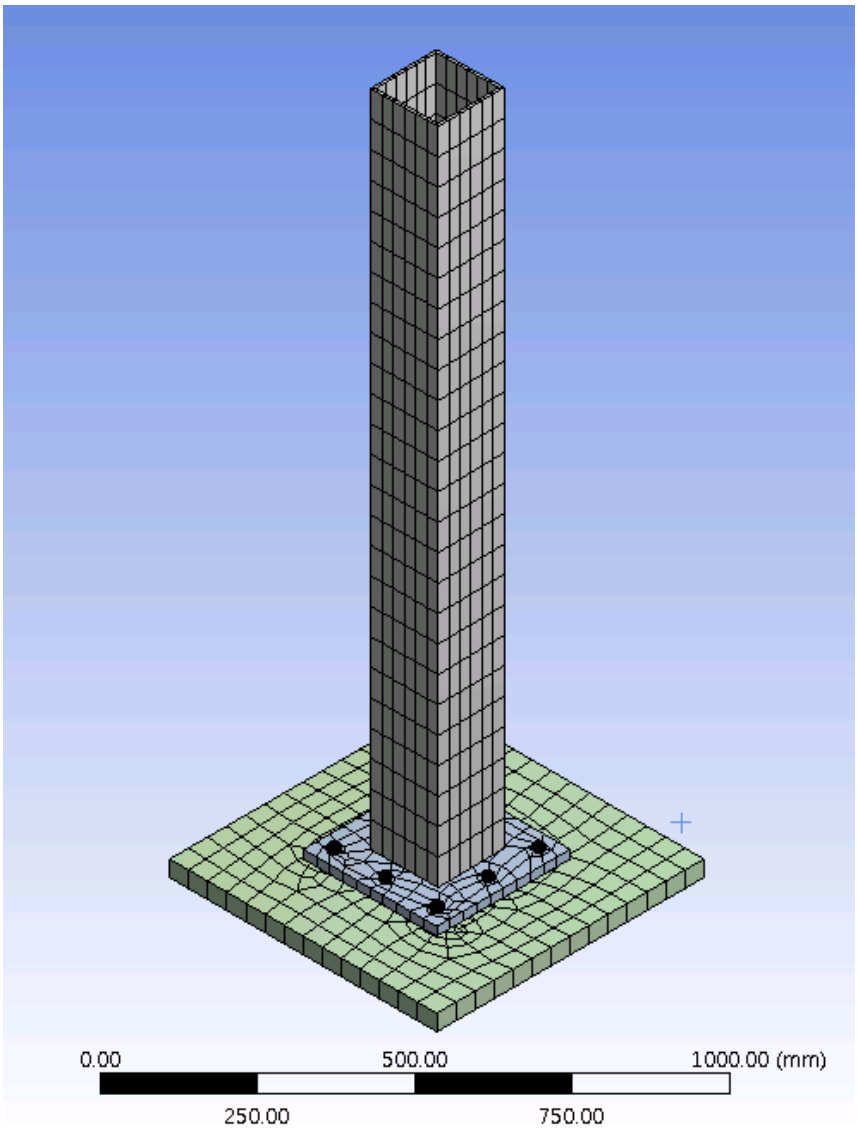
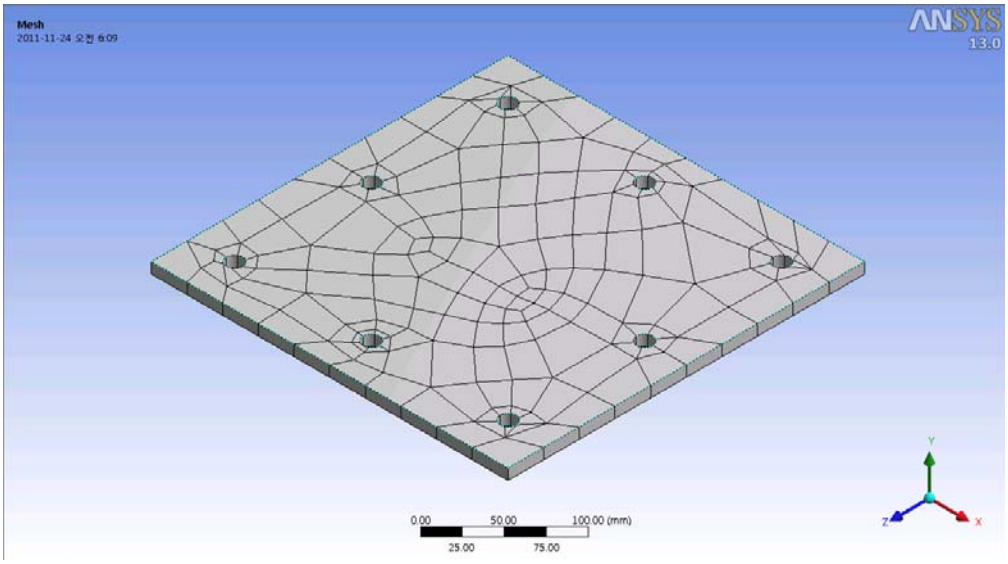
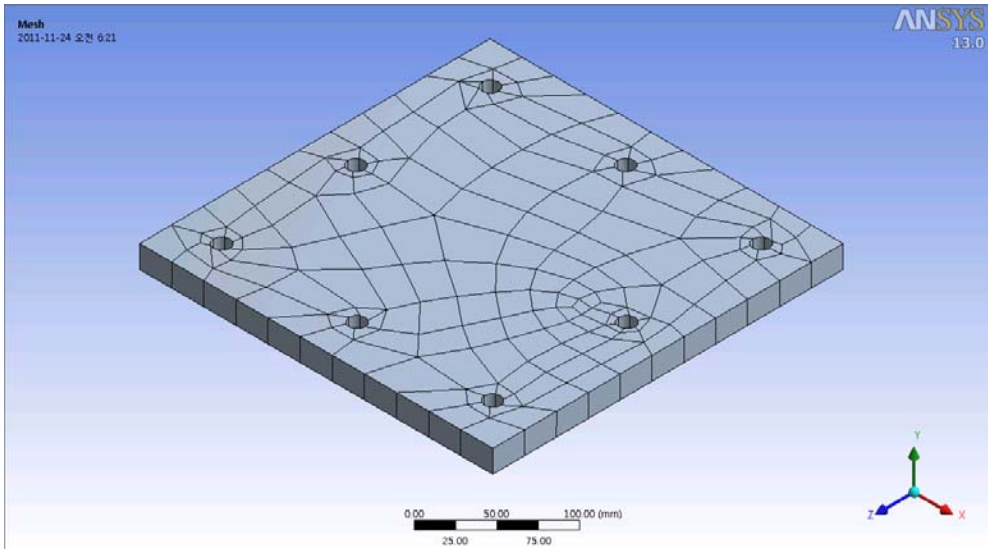


그림 2.14 ANSYS 모델링



(a) 플레이트 9mm 메쉬 형상



(b) 플레이트 19mm 메쉬 형상

그림 2.15 베이스 플레이트의 메쉬 형상

2.2.3 Loading programs

9mm 플레이트 및 19mm 플레이트 모델에 대해 상부 지점의 변위제어방식으로 해석을 수행하였다. 1방향 수평하중(SCUY) 및 2방향 수평하중(SCBL) 작용시의 변위 제어를 표 2.2에 나타내었다. 기둥의 각각 3사이클을 적용하였으며 변위는 1/200, 1/100, 1/50, 1/25 순차적으로 각도를 변경하여 증가시킨다. 1방향 수평하중의 경우 Y방향으로 만 하중을 가력 하였으며, 2방향 수평하중의 경우 δY/δX은 가력 방향이 X축 30도의 각도로 2방향 수평하중이 작용하도록 하였다.

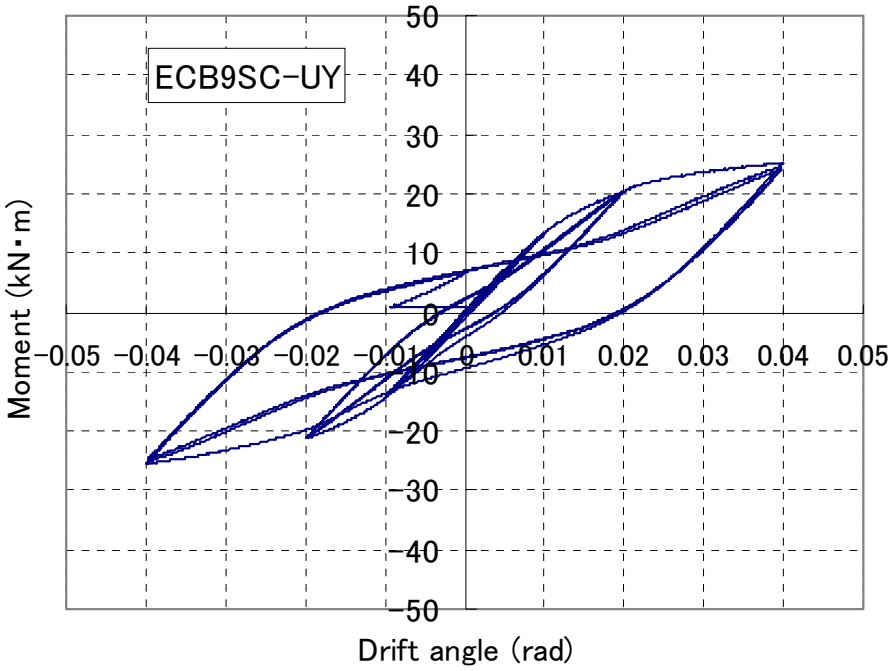
2.3 실험결과와 해석결과의 비교

ANSYS로 모델링한 결과를 비교, 검증하기 위하여 앞에서 설명한 방법으로 노출형 주각부를 모델링하고 해석하여 베이스 플레이트 두께 9mm,19mm에 대한 1방향 및 2방향 수평하중에 대한 기존의 실험적 연구결과와 비교하였다.

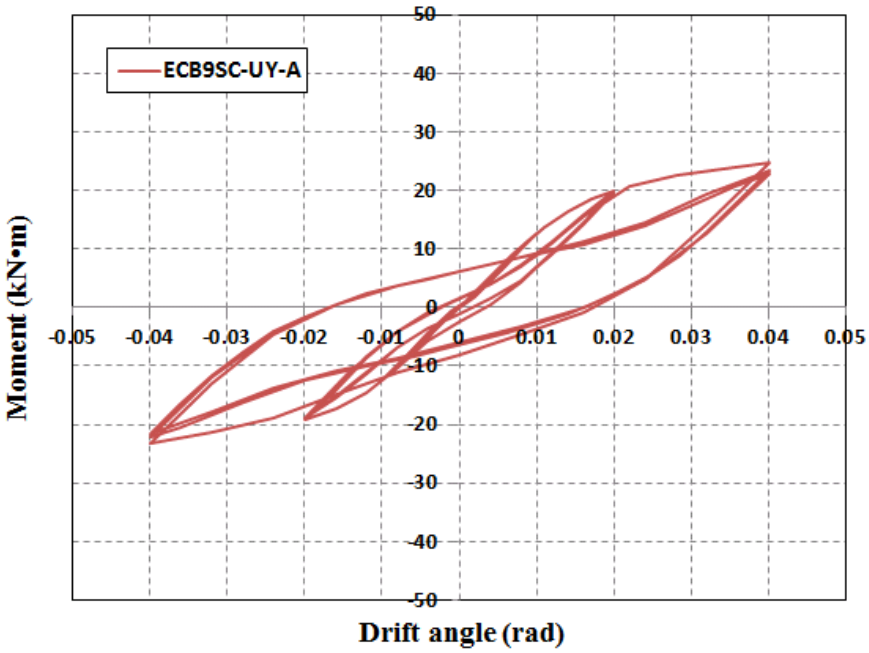
2.3.1 1방향 수평하중에 대한 적용

베이스 플레이트 항복 선행 형인 베이스 플레이트 9mm 실험체의 실험적 연구와 해석적 연구의 이력루프를 그림 2.16에 나타내었다. 초기 강성 및 최대 모멘트 항복 모멘트가 거의 일치 함을 확인 하였으며, 핀칭 현상 및 전체적인 이력루프 현상을 잘 반영하고 있어 베이스 플레이트 항복 선행형의 해석 모델이 잘 구성되어 있음을 알 수 있다.

앵커볼트 항복 선행 형인 베이스 플레이트 19mm의 이력루프를 그림 2.17에 나타내었다. 초기 강성 및 최대 모멘트 항복모멘트가 실험결과 보다 작게 나타남을 확인 할 수 있었으며 전체적인 이력루프 현상 및 핀칭 현상은 잘 반영되고 있고, 특히 이력루프의 슬립 현상을 잘 나타내고 있음을 확인 하였다.

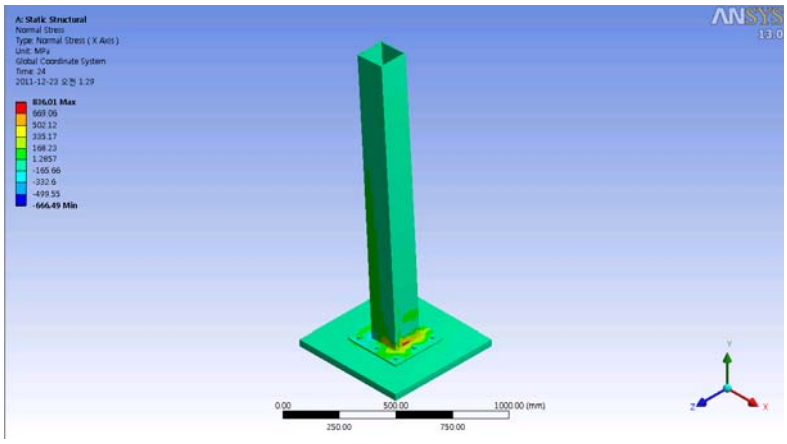


(a) 기존의 실험적 연구

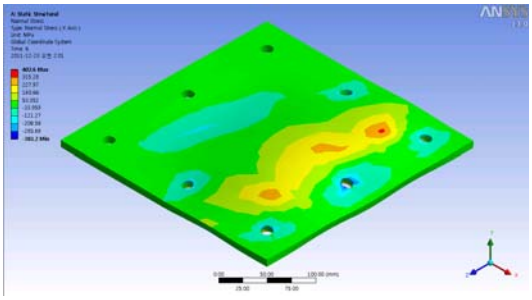


(b) 해석적 연구

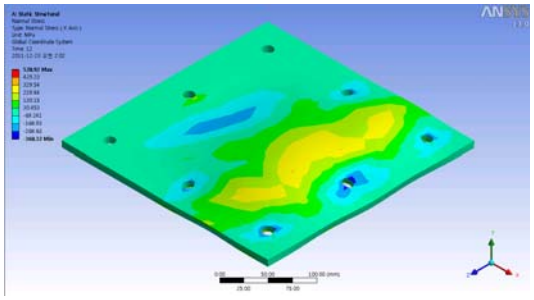
그림 2.16 1방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9㎜ 이력루프



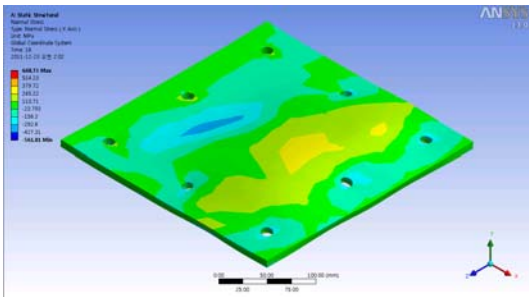
(a) 주각부의 0.04rad일 때 주응력 분포



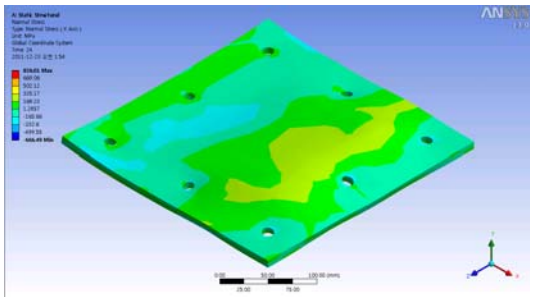
(b)베이스플레이트 0.01rad일 때
주응력 분포



(c)베이스플레이트 0.02rad일 때
주응력 분포

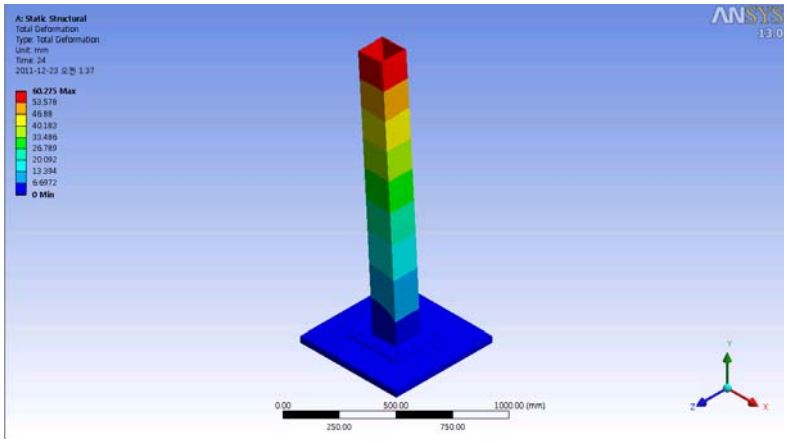


(d)베이스플레이트 0.03rad일 때
주응력 분포

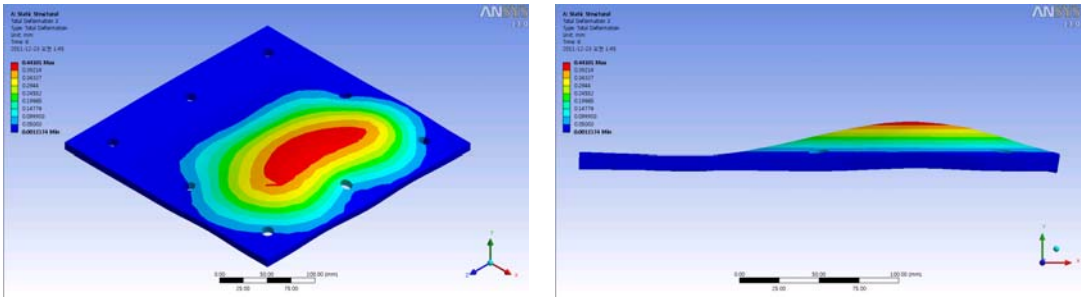


(e)베이스플레이트 0.04rad일 때
주응력 분포

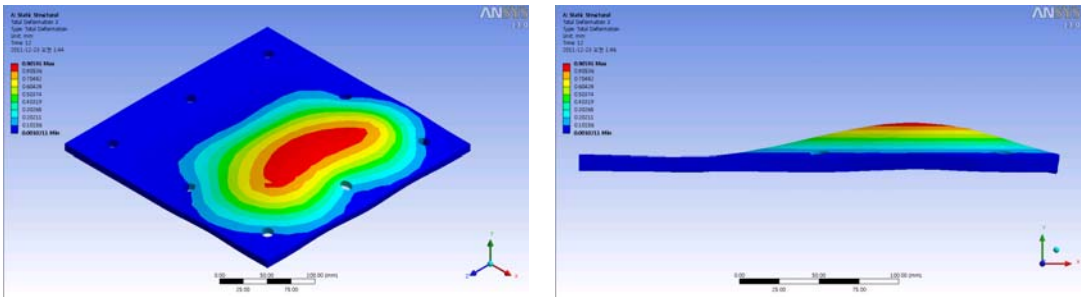
그림 2.17 1방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9mm 주응력 분포



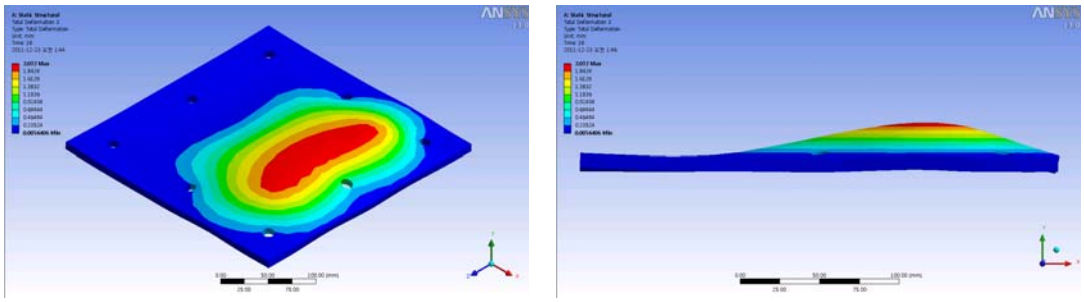
(a) 주각부의 0.04rad일 때 변형도



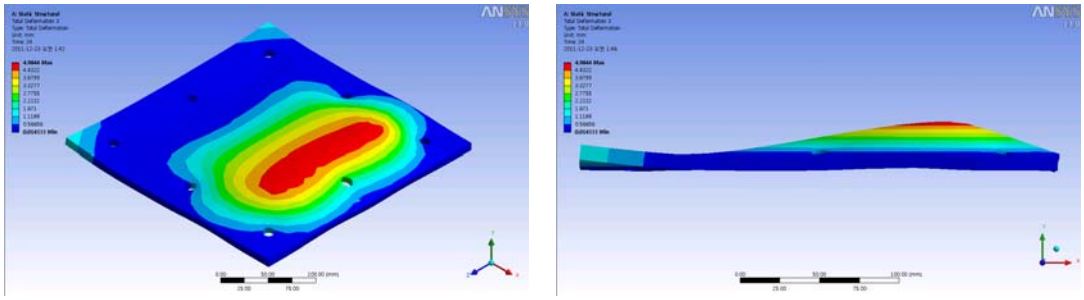
(b)베이스플레이트 0.01rad일 때 변형도



(c)베이스플레이트 0.02rad일 때 변형도

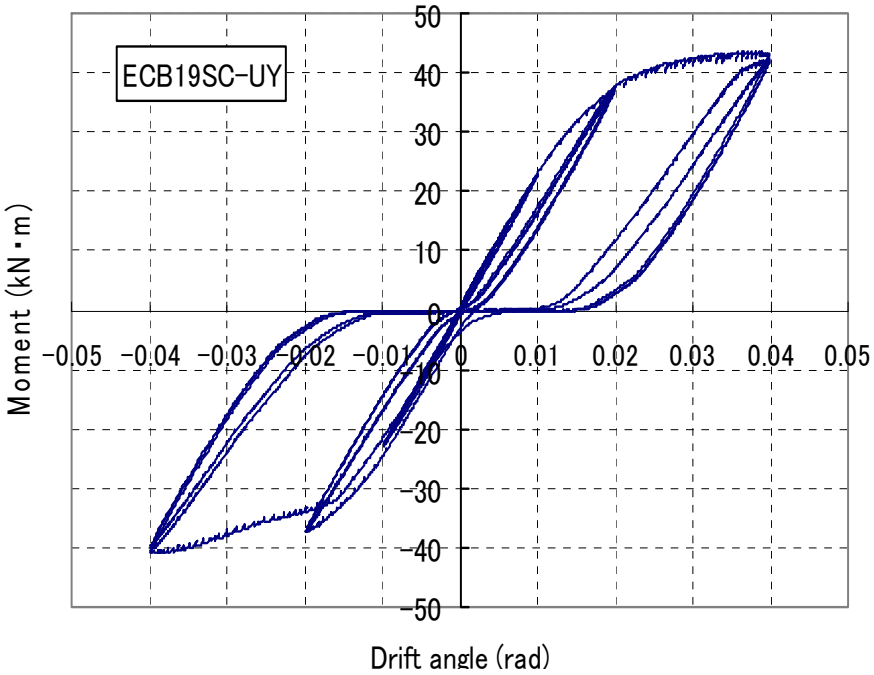


(d)베이스플레이트 0.03rad일 때 변형도

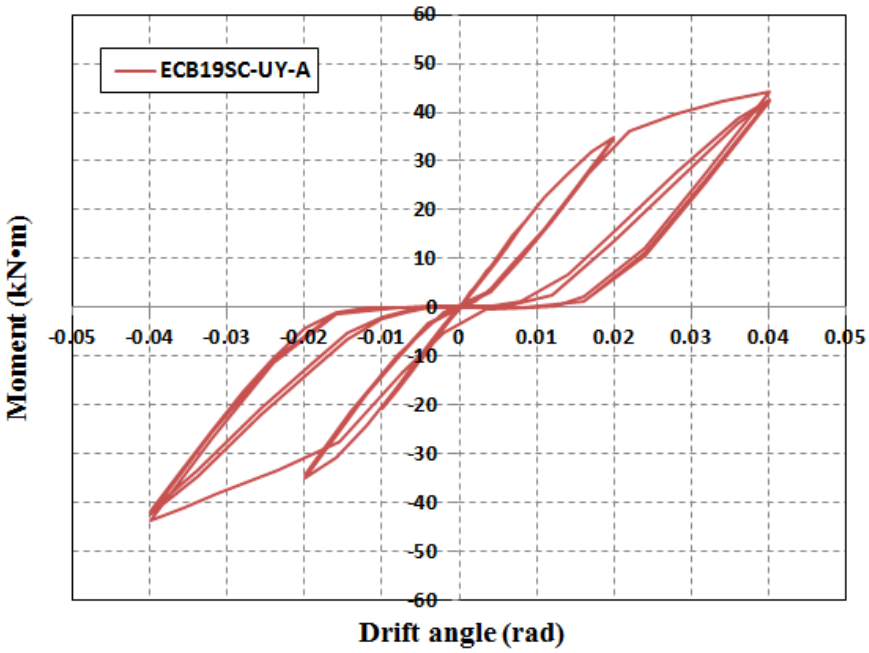


(e)베이스플레이트 0.04rad일 때 변형도

그림 2.18 1방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9㎜ 변형도

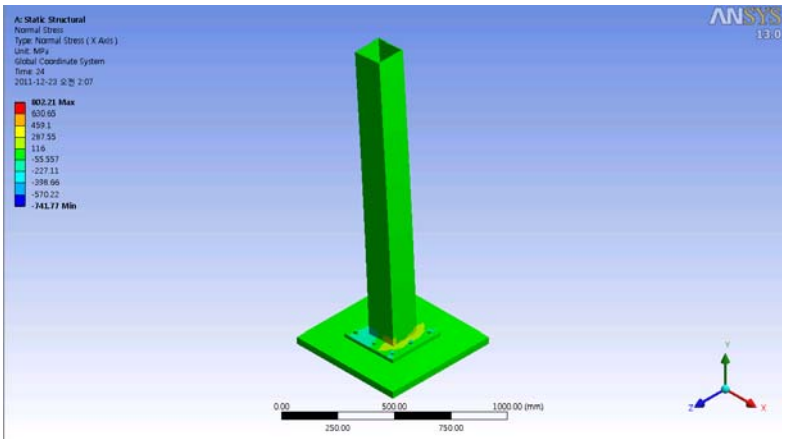


(a) 기존 실험적 연구

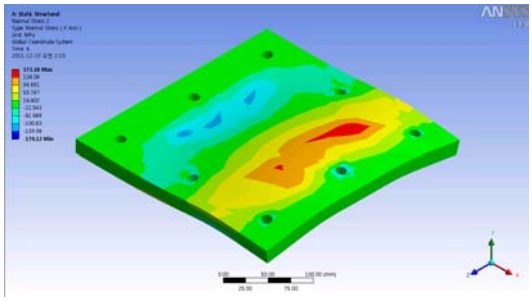


(b) 해석적 연구

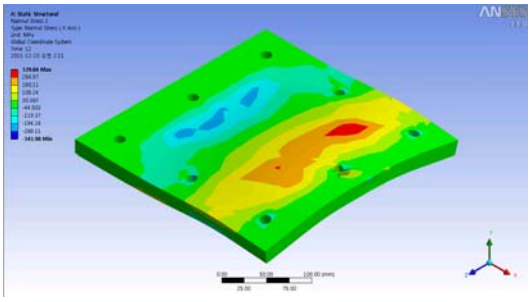
그림 2.19 1방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 19㎜ 이력루프



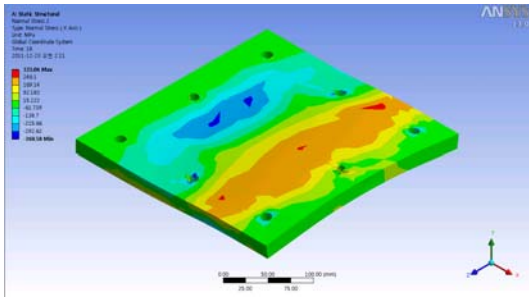
(a) 주각부의 0.04rad일 때 주응력 분포



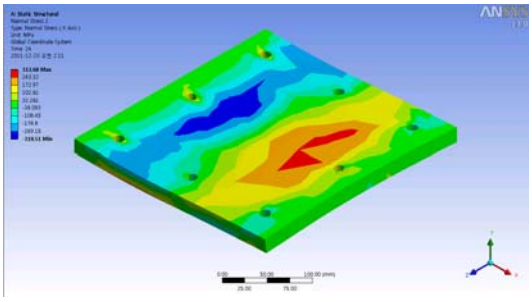
(b)베이스플레이트 0.01rad일 때 주응력 분포



(c)베이스플레이트 0.02rad일 때 주응력 분포

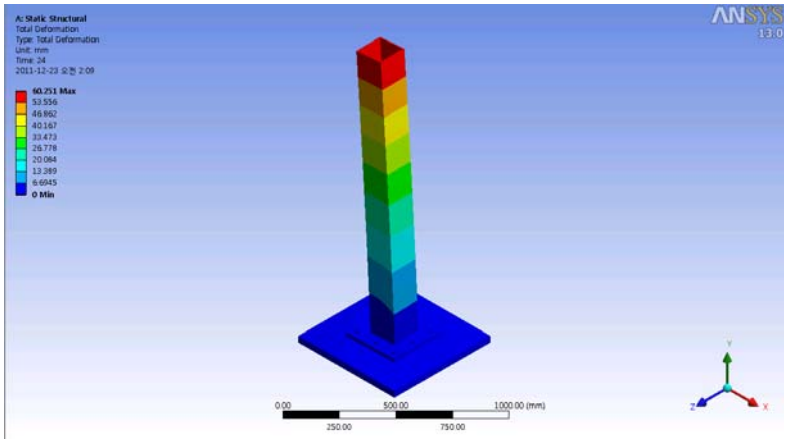


(d)베이스플레이트 0.03rad일 때 주응력 분포

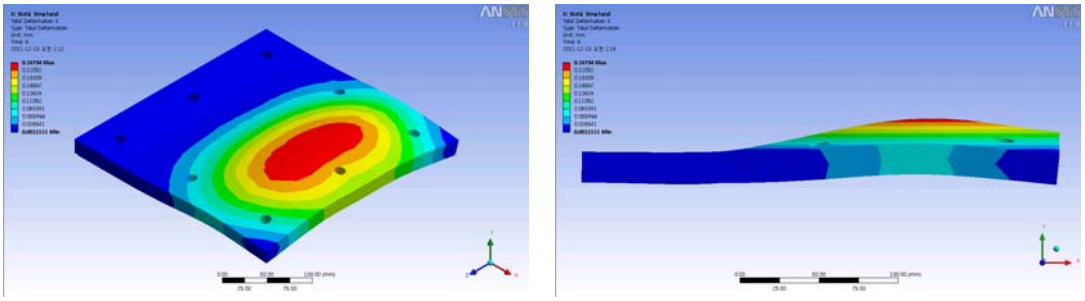


(e)베이스플레이트 0.04rad일 때 주응력 분포

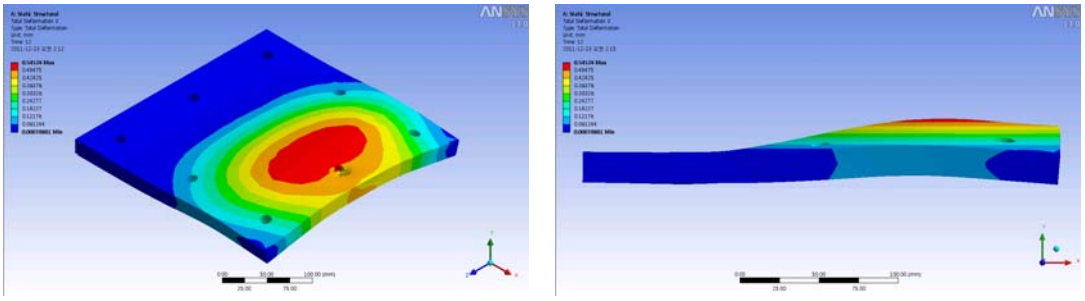
그림 2.20 1방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 19㎜ 주응력 분포



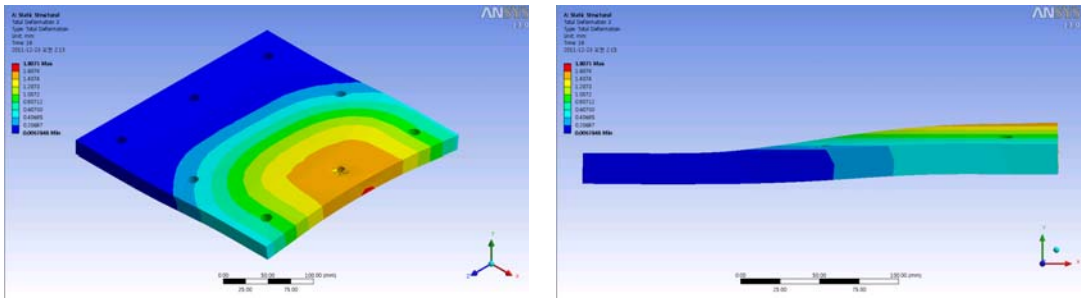
(a) 주각부의 0.04rad일 때 변형도



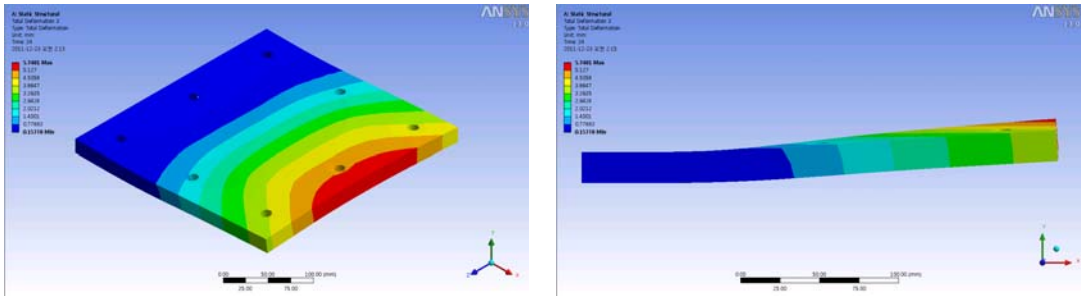
(b)베이스플레이트 0.01rad일 때 변형도



(c)베이스플레이트 0.02rad일 때 변형도



(d)베이스플레이트 0.03rad일 때 변형도



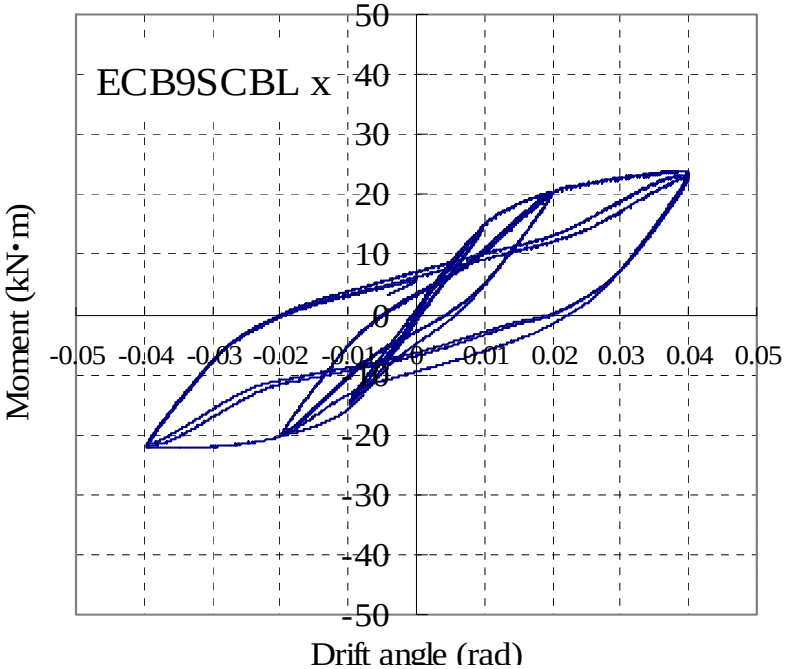
(e)베이스플레이트 0.04rad일 때 변형도

그림 2.21 1방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 19mm 변형도

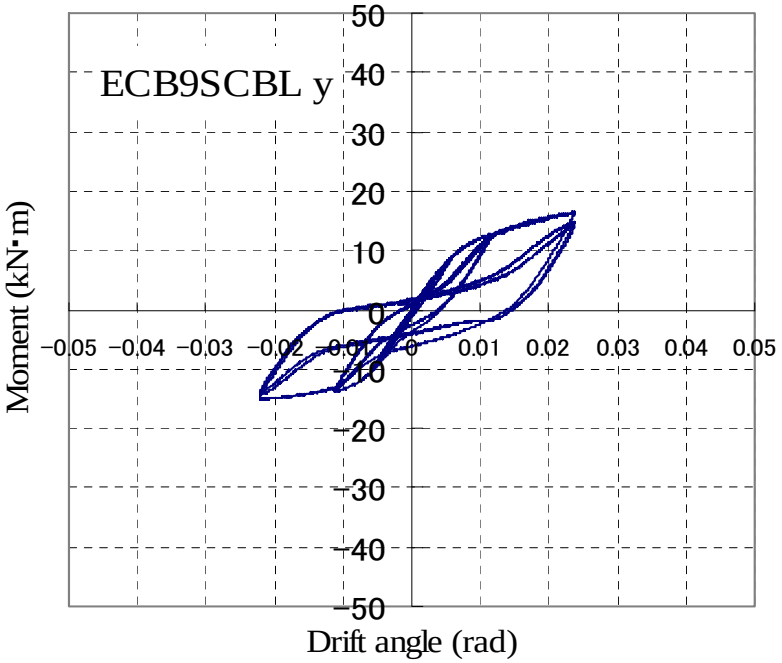
2.3.2 2방향 수평하중에 대한 적용

베이스 플레이트 9mm(베이스 플레이트 항복 선행)의 기본 실험적 연구의 이력루프를 그림 2.18에 나타 내었으며 ANSYS를 이용한 해석결과의 이력루프를 그림 2.19에 나타 내었다. 2방향 수평하중에 대하여 X방향 및 Y방향 모두 초기 강성의 경우 거의 일치하며 최대 모멘트의 경우 2kN·m정도 적게 계산됨을 확일 할 수 있었다. 또한 전체적인 이력루프 형상 및 핀칭 현상등이 거의 일치함을 알 수 있다.

베이스 플레이트 19mm(앵커볼트 항복 선행형)의 기본 실험적 연구의 이력루프를 그림 2.20에 나타 내었으며 ANSYS를 이용한 해석을 통한 이력루프를 그림 2.21에 나타내었다. 기존 실험적 연구 에서는 X방향 0.03rad에서 볼트의 파괴가 발생 하였으며, Ansys Workbench에서는 실험체의 파괴 해석이 불가능 하여 강재의 변형량을 측정 하여 강재의 변형율이 25%이상 증가시 부재가 파괴가 발생하는 것으로 가정한 결과 해석적 연구에서도 X방향 0.03rad에서 강재의 한계 변형율을 초과하고 있으므로 볼트가 파괴가 발생하는 것으로 판단하였다. 해석적 연구를 통해 실험 적 연구와 이력루프의 형상 및 핀칭 현상등이 거의 일치함을 알 수 있다.

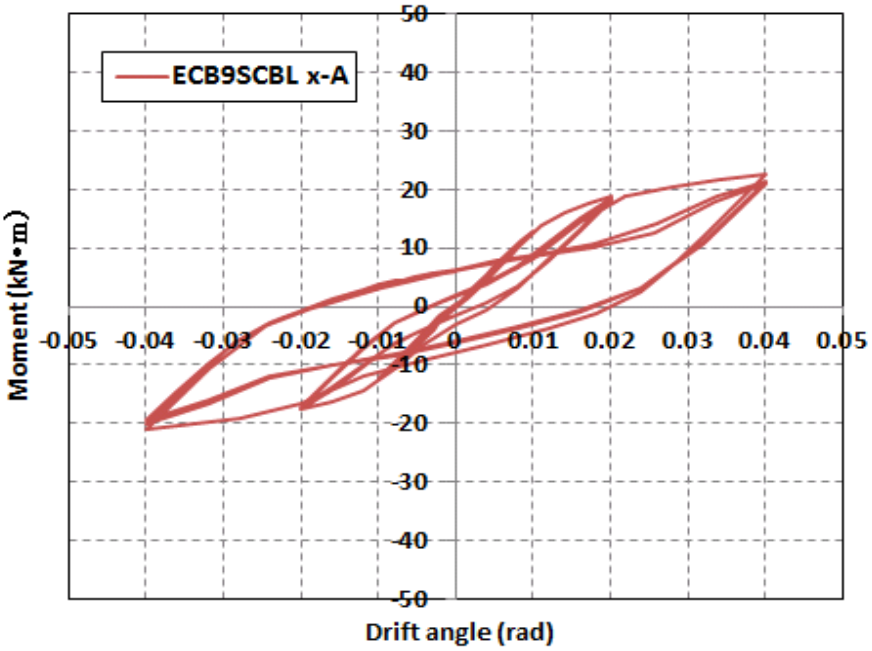


(a) 베이스 플레이트 9㎜ X방향

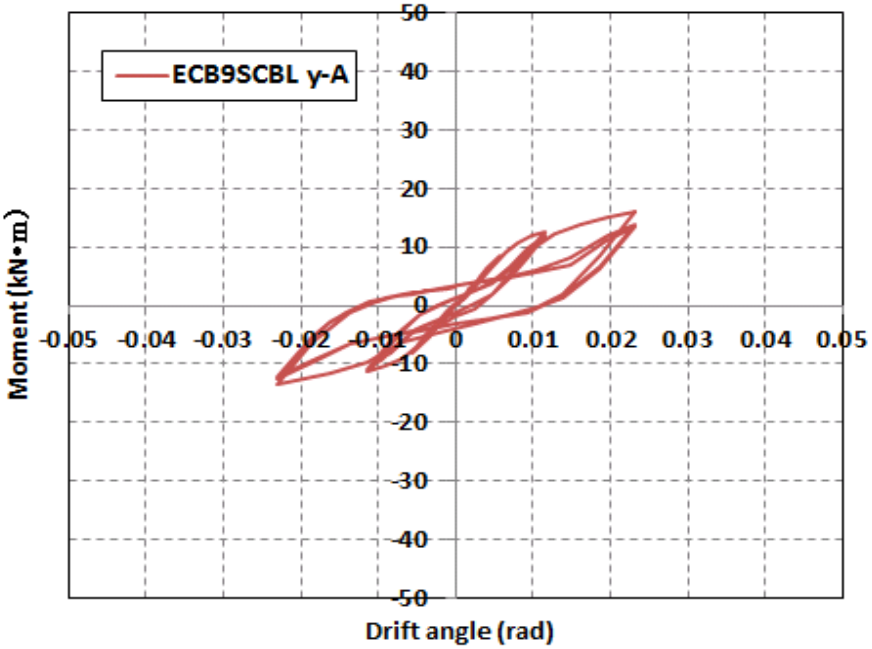


(b) 베이스 플레이트 9㎜ Y방향

그림 2.22 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9㎜ 기존 실험적 연구 이력루프

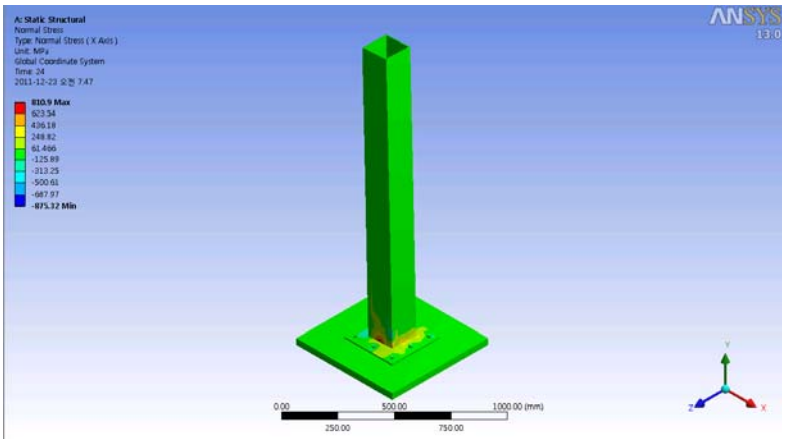


(a) 베이스 플레이트 9㎜ X방향

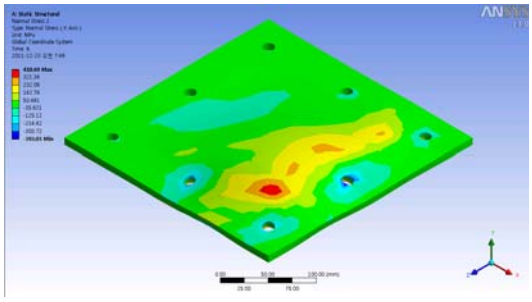


(b) 베이스 플레이트 9㎜ Y방향

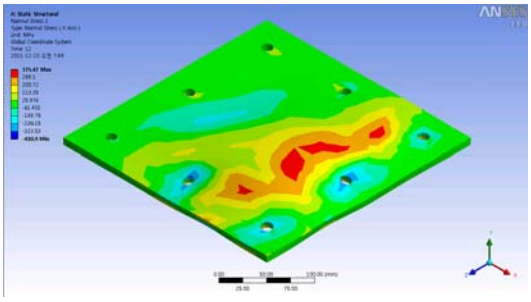
그림 2.23 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9㎜ 해석적 연구 이력루프



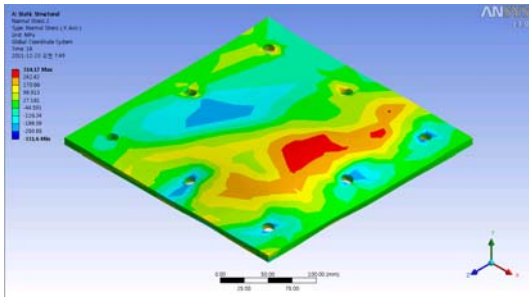
(a) 주각부의 0.04rad일 때 주응력 분포



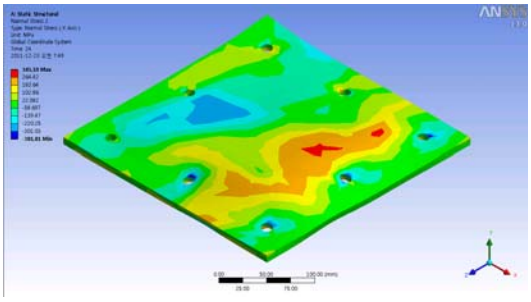
(b)베이스플레이트 0.01rad일 때 주응력 분포



(c)베이스플레이트 0.02rad일 때 주응력 분포

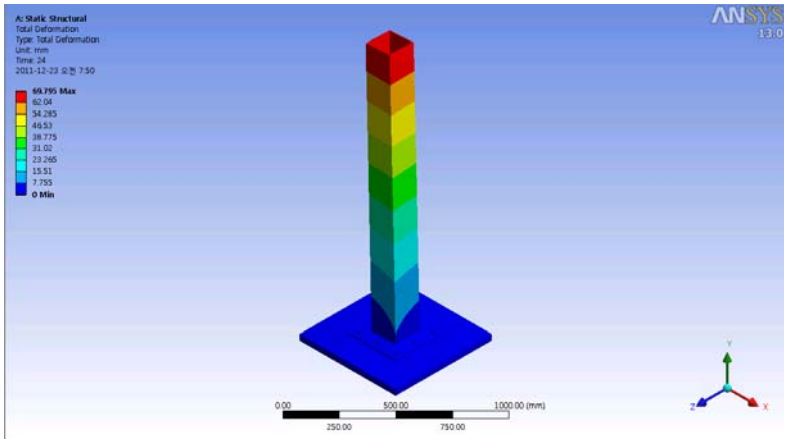


(d)베이스플레이트 0.03rad일 때 주응력 분포

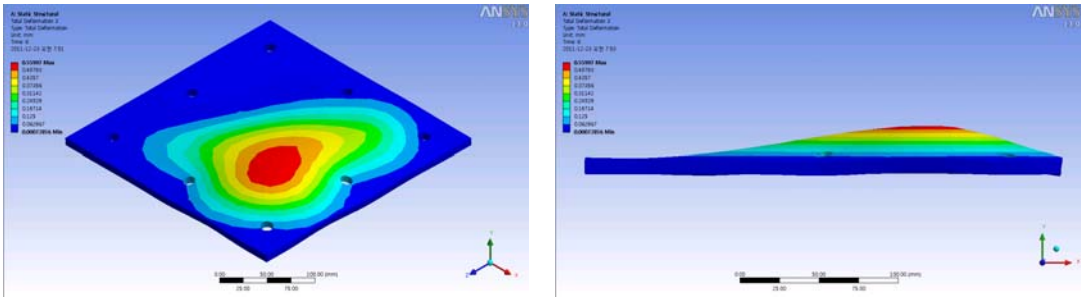


(e)베이스플레이트 0.04rad일 때 주응력 분포

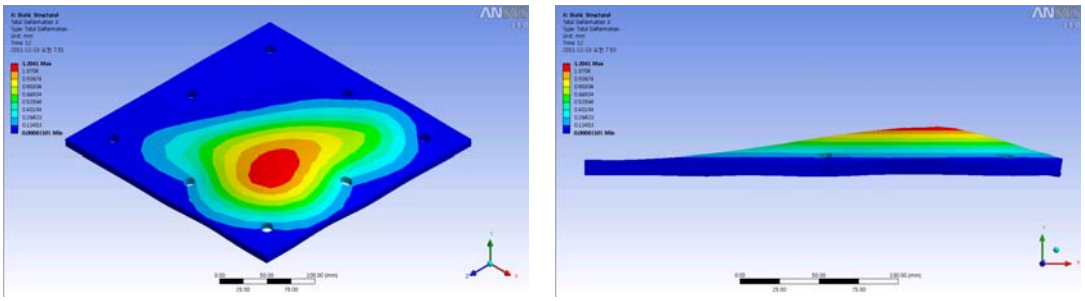
그림 2.24 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9mm 주응력 분포



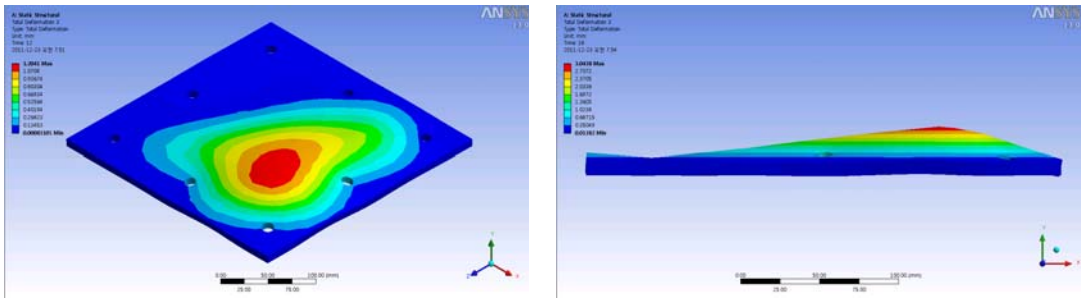
(a) 주각부의 0.04rad일 때 변형도



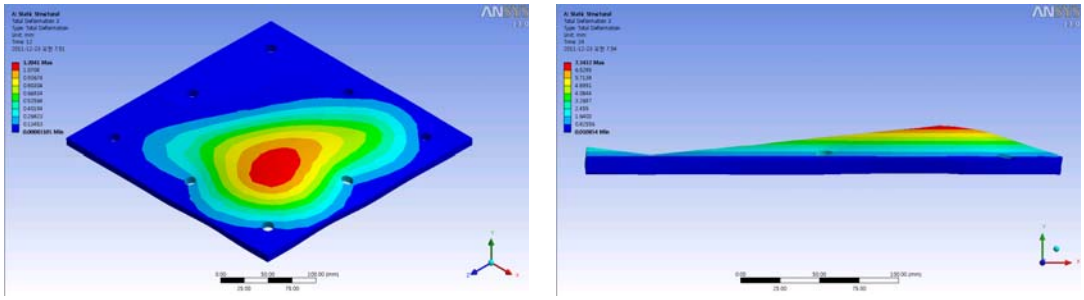
(b)베이스플레이트 0.01rad일 때 변형도



(c)베이스플레이트 0.02rad일 때 변형도

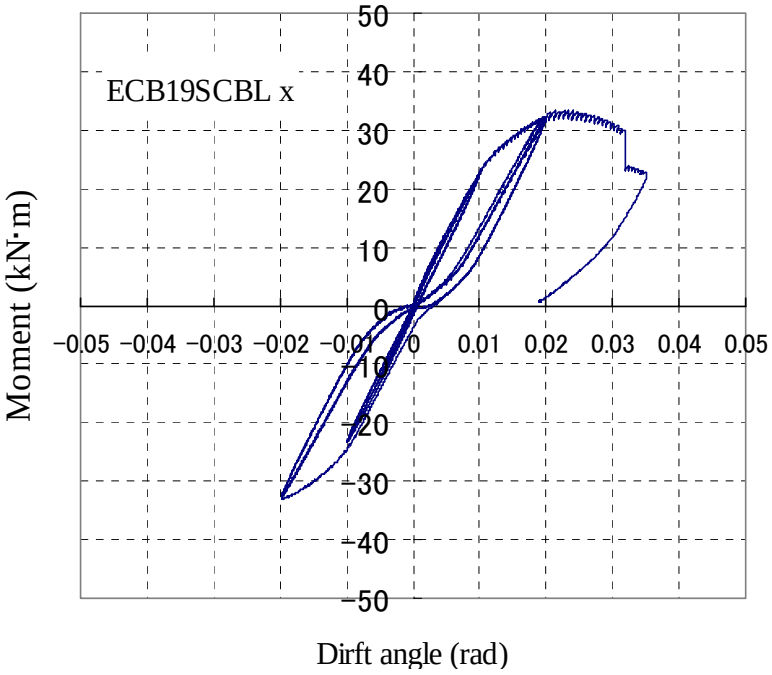


(d)베이스플레이트 0.03rad일 때 변형도

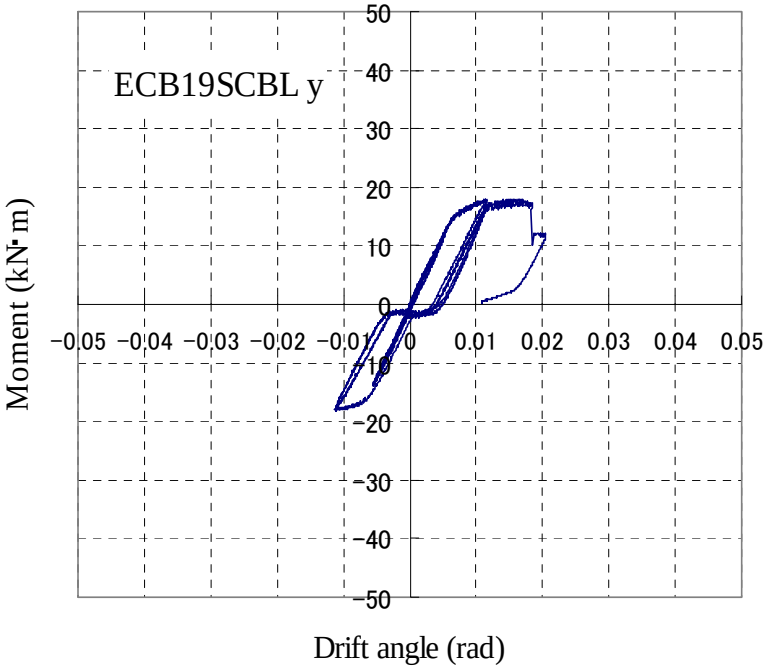


(e)베이스플레이트 0.04rad일 때 변형도

그림 2.25 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9㎜ 변형도

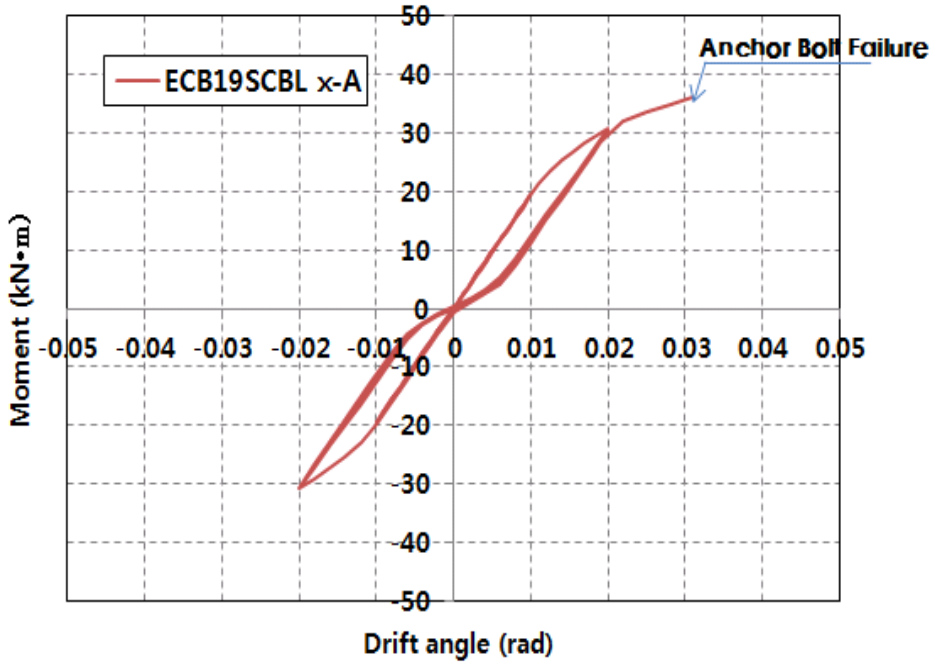


(a) 베이스 플레이트 19㎜ X방향

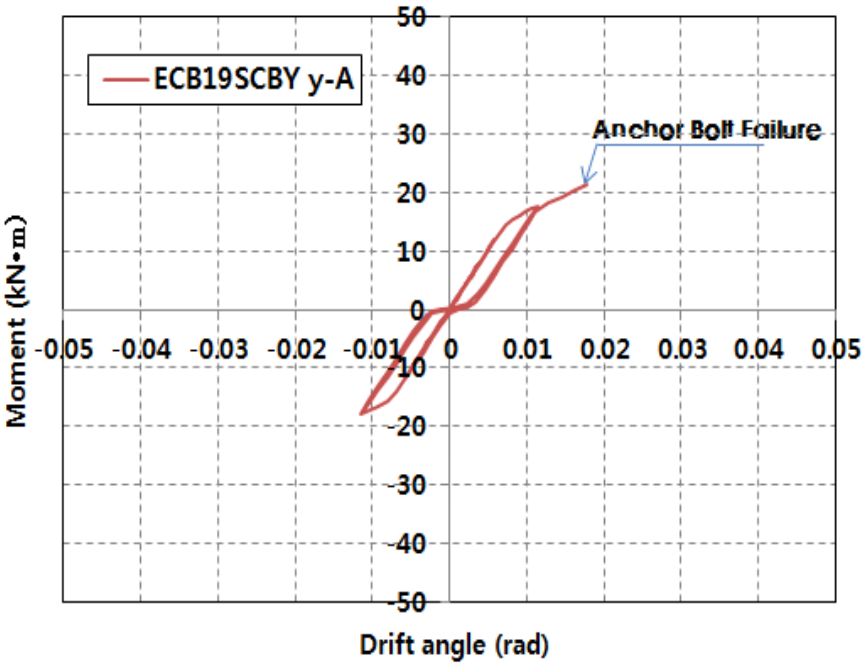


(b) 베이스 플레이트 19㎜ Y방향

그림 2.26 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 19㎜ 기존 실험적 연구 이력루프

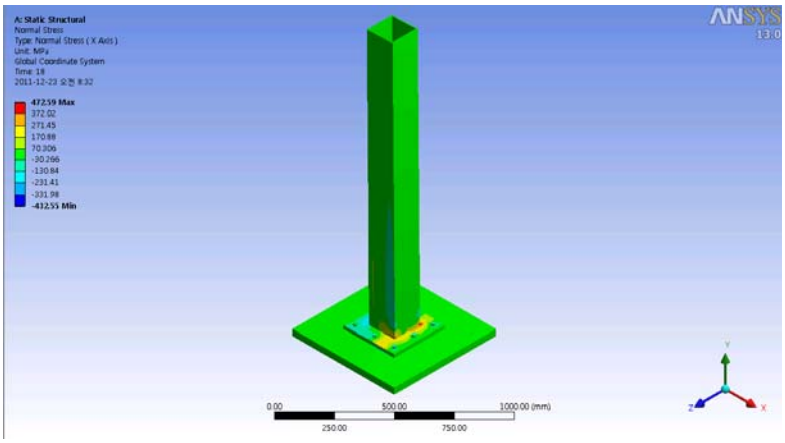


(a) 베이스 플레이트 19㎜ X방향

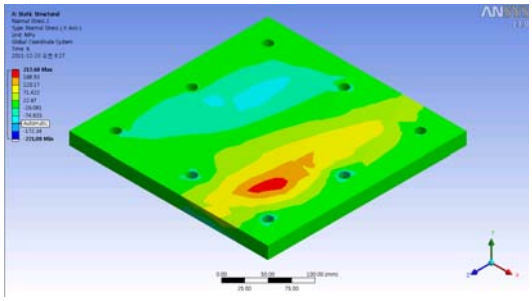


(b) 베이스 플레이트 19㎜ Y방향

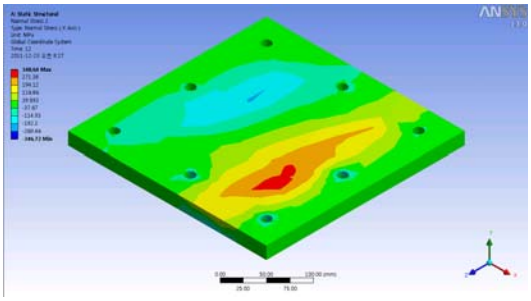
그림 2.27 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 19㎜ 해석적 연구 이력루프



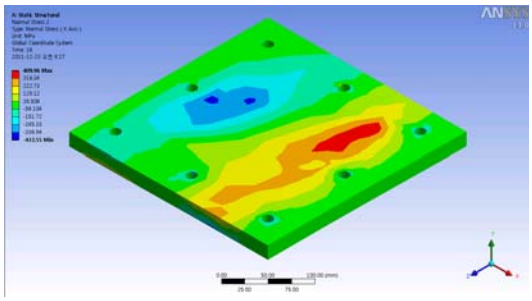
(a) 주각부의 0.03rad일 때 주응력 분포



(b)베이스플레이트 0.01rad일 때 주응력 분포

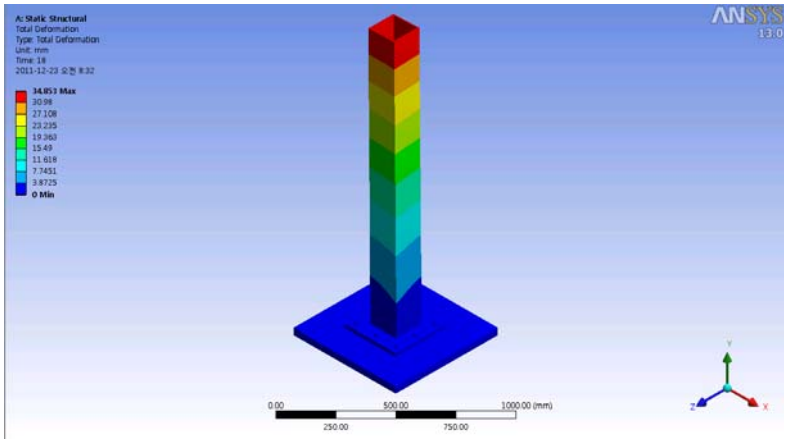


(c)베이스플레이트 0.02rad일 때 주응력 분포

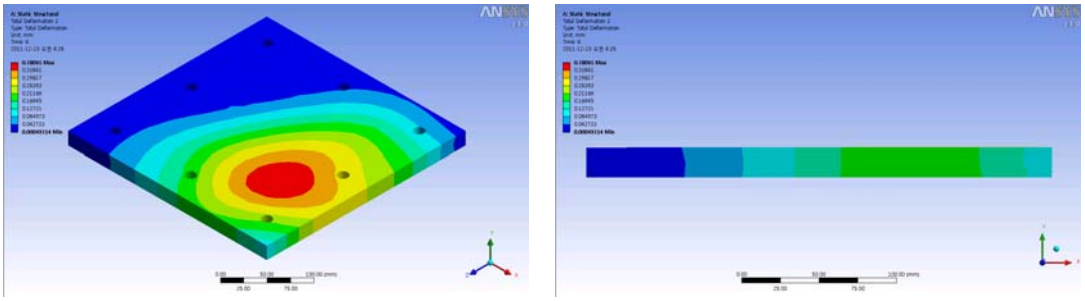


(d)베이스플레이트 0.03rad일 때 주응력 분포

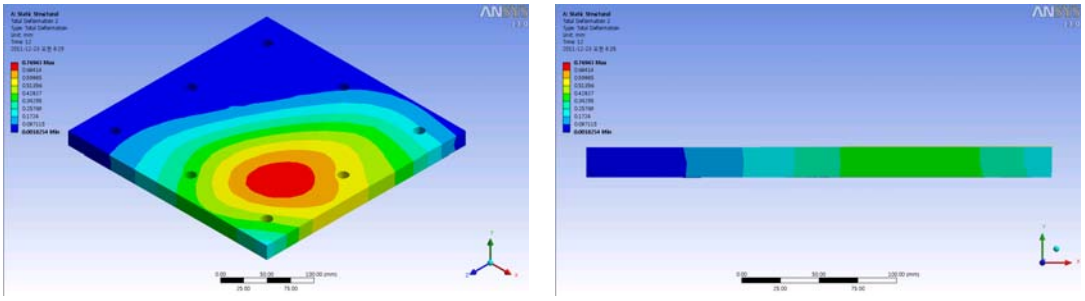
그림 2.28 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 19㎜ 주응력 분포



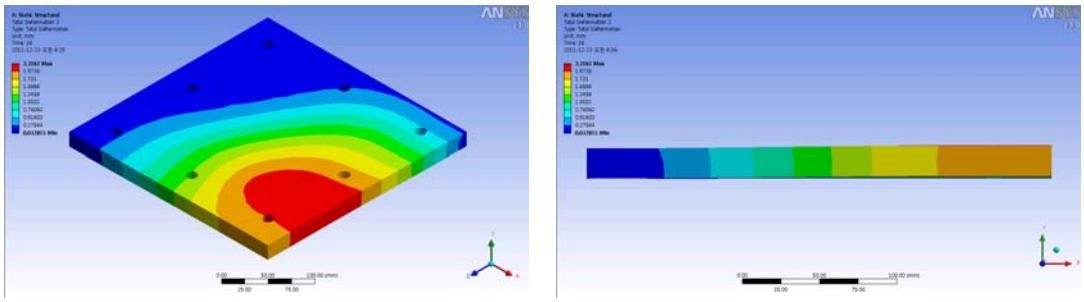
(a) 주각부의 0.04rad일 때 변형도



(b)베이스플레이트 0.01rad일 때 변형도



(c)베이스플레이트 0.02rad일 때 변형도



(d)베이스플레이트 0.03rad일 때 변형도

그림 2.29 2방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 19mm 변형도

2.3.3 해석 모델 적용 결과

해석 모델과 기존 실험결과를 비교하였을 때 실험체의 파괴가 발생하지 않은 ECB9SC-UY, ECB19SC-UY 및 ECB9SC-BL 시험체의 경우 전체적인 이력루프 현상이 잘 반영 되었으며 최대 모멘트의 경우 약 1.6~6.4%의 오차로 신뢰성을 확인할 수 있었으며 실험체의 파괴가 발생한 ECB19SC-BL 시험체의 경우 파괴전까지 이력루프 현상이 일치하나 최대 모멘트의 경우 9~15% 오차가 발생하였다.

Ansys Workbench의 후처리 기능을 이용하여 각 시험체의 응력분포 및 베이스 플레이트의 응력분포를 확인 할 수 있었고 또한 각 시험체의 베이스플레이트의 휨과 좌굴거동을 파악할 수 있었다.

표2.5 실험과 해석의 최대 휨모멘트의 비교

			실험결과(A)[kN · m]	해석결과(A)[kN · m]	$\left(\frac{A}{B}\right)\times 100(\%)$
1방향 가력	ECB9SC-UY		25.2	24.8	101.6%
	ECB19SC-UY		43.5	44.3	98.2%
2방향 가력	ECB9SC-BL	x	24.05	22.6	106.4%
		Y	16.42	15.87	103.7%
	ECB19SC-BL	X	33	36.1	91.4%
		Y	18	21.2	84.9%

2.4 해석결과와 이론식의 비교

강구조 주각부의 보유내력을 평가하기 위하여 가실일의 법칙(virtual work principle)을 통하여 휨내력은 다음과 같이 유도할 수 있다.

2.4.1 베이스 플레이트 항복 선행형

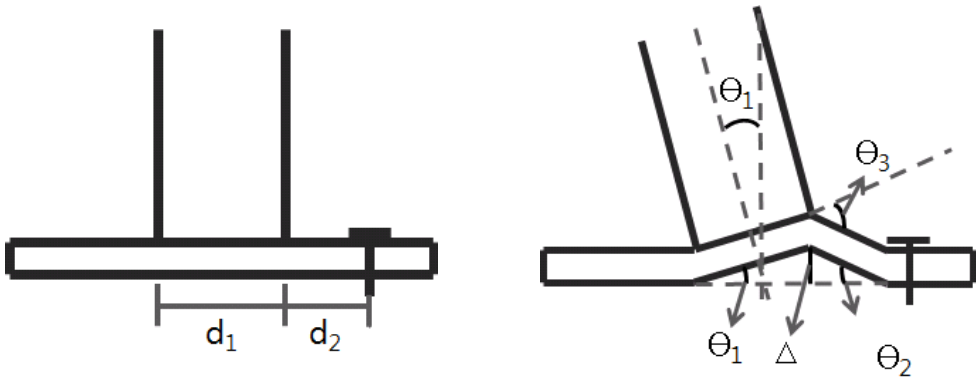


그림 2.30 완전 베이스 플레이트 붕괴 메커니즘

$$M_u^P = M_p \frac{\theta_1 \times \theta_2 \times \theta_3}{\theta_1} = M_p 2d_1 \frac{d_1 + d_2}{d_1 \times d_2} \tag{2.4}$$

여기서, M_u^P : 플레이트 항복 선행형의 휨모멘트

M_p : 플레이트의 소성 모멘트

θ_1 : $\frac{\triangle}{d_1}$

θ_2 : $\frac{\triangle}{d_2}$

θ_3 : $\theta_1 + \theta_2$

2.4.2 앵커볼트 항복 선행형

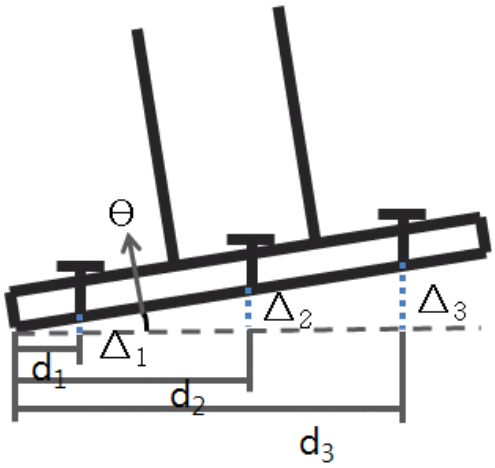


그림 2.31 완전 앵커볼트 붕괴 메커니즘

$$M_u^B = \frac{N \times B_u(\triangle_1 + \triangle_2 + \triangle_3)}{\theta} = N \times B_u(C_1 + C_2 + C_3) \qquad (2.5)$$

여기서, M_u^P : 앵커볼트 항복 선행형의 휨모멘트

B_u : $\sigma_u \times A_b$ (앵커볼트 최대강도 × 앵커볼트 단면적)

$\triangle_1$: $\dfrac{C_1}{\theta}$

$\triangle_2$: $\dfrac{C_2}{\theta}$

$\triangle_2$: $\dfrac{C_2}{\theta}$

2.4.3 해석결과 및 이론식 비교 결과

가상일의 법칙을 이용하여 유도한 식2.4, 2.5를 이용하여 1방향 수평하중에 대한 베이스 플레이트 9mm, 19mm 시험체를 계산하여 비교한 값을 다음에 나타내었다. 베이스 플레이트 파괴형인 ECB9SC 시험체의 경우 이론식에 의해 계산된 값이 31.6kN·m로 해석 값과 약 21%의 오차율이 발생 했으며 앵커볼트 파괴형인 ECB19SC 시험체의 경우 이론식에 의해 계산된 값이 49.76kN·m로 해석 값과 약 11%의 오차율이 발생 하였다.

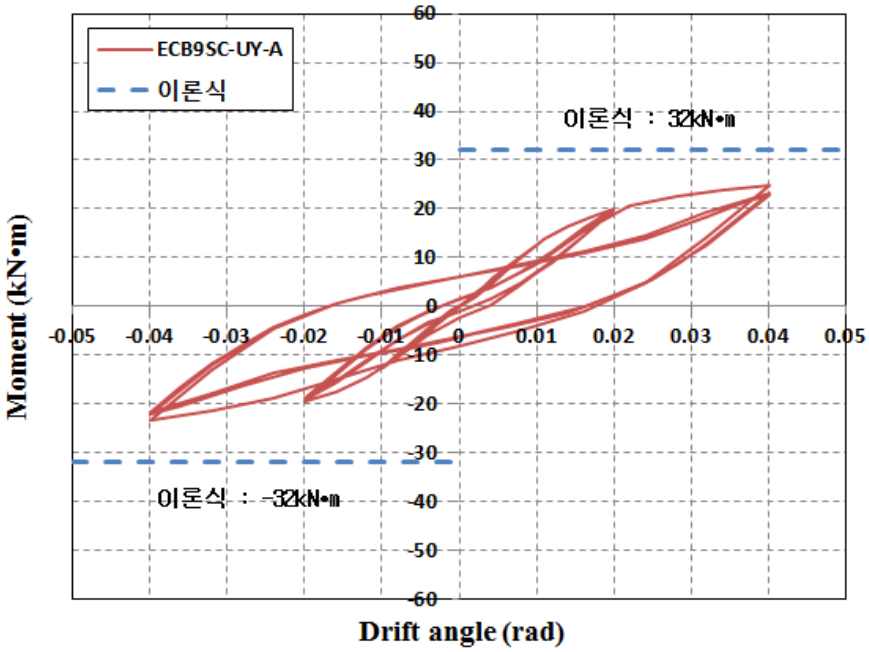


그림 2.32 베이스 플레이트 9mm 해석결과 및 이론식 비교

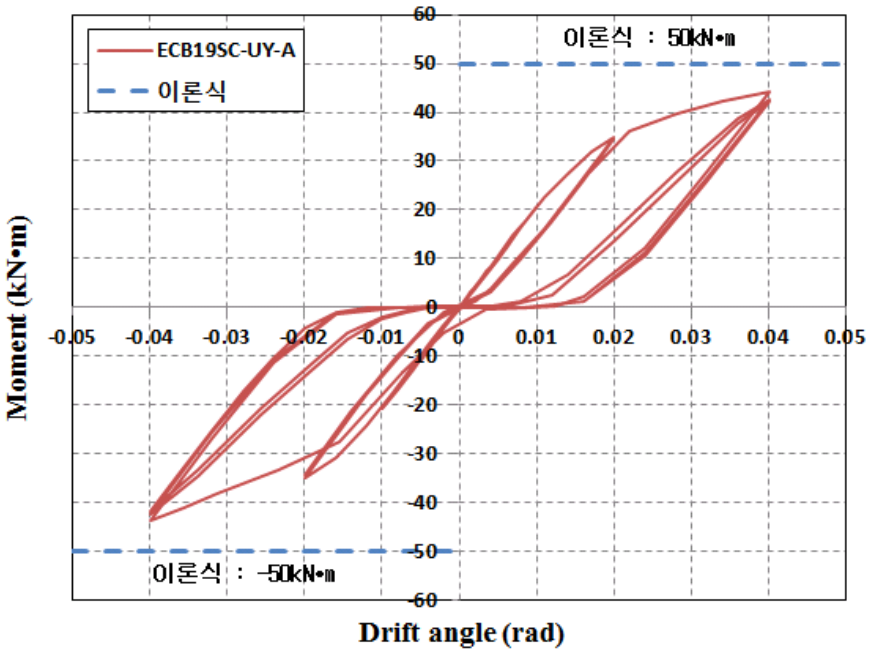


그림 2.33 베이스 플레이트 19㎜ 해석결과 및 이론식 비교

표2.6 해석과 이론식의 최대 휨모멘트의 비교

		해석결과(A)[kN · m]	해석결과(A)[kN · m]	$\left(\frac{A}{B}\right)\times 100(\%)$
1방향 가력	ECB9SC-UY	24.8	31.6	78.5%
	ECB19SC-UY	44.3	49.8	88.9%

제3장 베이스 플레이트 두께에 따른 구조적 거동

3.1 베이스 플레이트 두께에 따른 해석 모델 개요

본 장에서는 베이스 플레이트 두께에 따른 구조적 거동 및 핀칭 효과를 확인하기 위하여 제 2장에서 사용된 모델 및 재료 속성은 동일한 값을 사용하였으며, 베이스 플레이트의 두께 5㎜, 9㎜, 15㎜, 19㎜, 25㎜ 5가지를 설정하였다. 베이스 플레이트의 재료 속성의 경우 두께가 얇아질수록 항복강도가 증가하는 것을 고려하여 베이스 플레이트 5㎜,9㎜ 270Mpa,베이스 플레이트 15㎜ 260Mpa 베이스 플레이트 19㎜,25㎜ 250Mpa를 사용하였다. 가력 방법의 경우 제2장과 같은 Loading Program을 사용하여 각 시험체별로 변형각 1/200, 1/100, 1/50, 1/25에 대하여 3cycle에 대하여 1방향 해석을 수행하였다.

표 3.1 베이스 플레이트 두께에 따른 해석 모델 개요

시험체명	베이스 플레이트 두께	베이스 플레이트 항복내력	앵커볼트 항복내력
SCUY-P5	5㎜	270Mpa	533Mpa
SCUY-P9	9㎜	270Mpa	
SCUY-P15	15㎜	260Mpa	
SCUY-P19	19㎜	250Mpa	
SCUY-P25	25㎜	250Mpa	

3.2 이력 루프 응답

일반적으로 하중이 주각부에 적용되면, 베이스 플레이트에 굴곡이 발생되며 앵커 볼트에는 인장력이 발생한다. 플레이트 5mm, 9mm의 해석 결과 기둥은 탄성 영역에 머물렀으며, 모든 방향에 대해 얇은 베이스 플레이트에 대해 항복이 선행하였으며, 앵커 볼트 또한 변형량이 늘어나면서 항복하였다. 베이스 플레이트의 두께 15mm의 경우 베이스 플레이트가 항복이 선행하였으며 0.01rad일 때부터 앵커 볼트가 같이 항복 하였다. 베이스 플레이트의 두께 19mm의 경우 앵커볼트 항복이 선행하였으나 베이스 플레이트 또한 같이 항복하였다. 베이스 플레이트의 두께 25mm의 경우 앵커 볼트항복이 선행하였으며 베이스 플레이트는 항복하지 않았다.

얇은 베이스 플레이트의 이력루프는 베이스 플레이트 항복이 선행 하여 이력루프는 강성저하모델(Degradation stiffness Model)에 가깝게 나타났으며 두꺼운 베이스 플레이트의 경우 앵커볼트 항복이 선행하여 이력루프는 점진적인 슬립 모델(Progressive Slip Model)에 가깝게 나타났다.

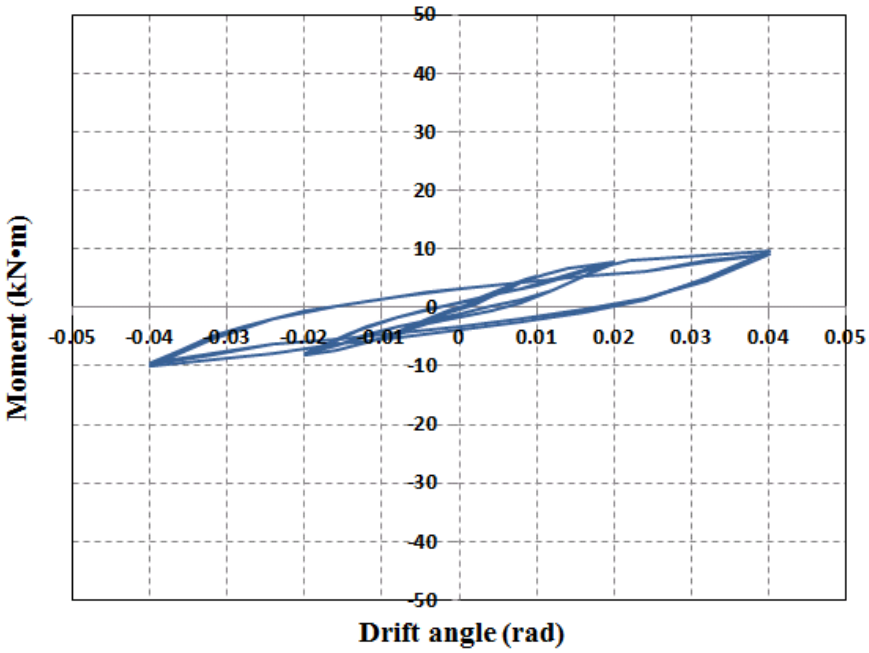


그림 3.1 실험체 SCUY-P5의 이력루프 (베이스 플레이트 두께 5mm)

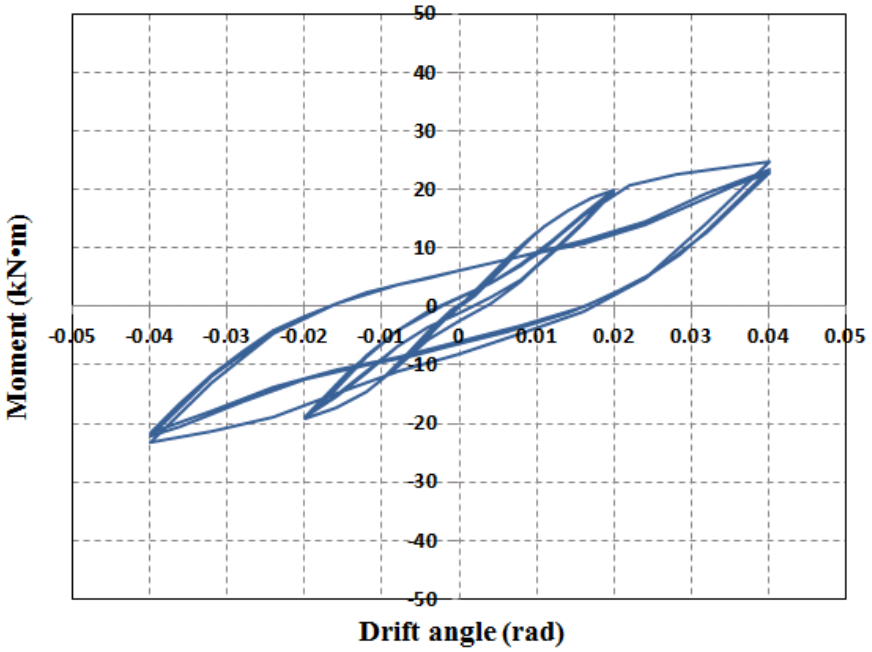


그림 3.2 실험체 SCUY-P9의 이력루프 (베이스 플레이트 두께 9㎜)

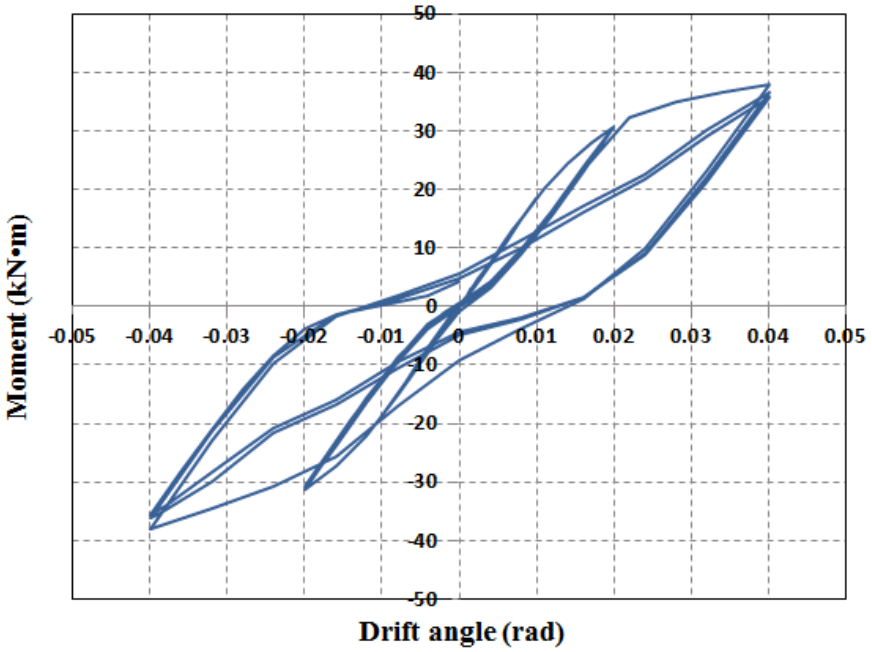


그림 3.3 실험체 SCUY-P15의 이력루프 (베이스 플레이트 두께 15㎜)

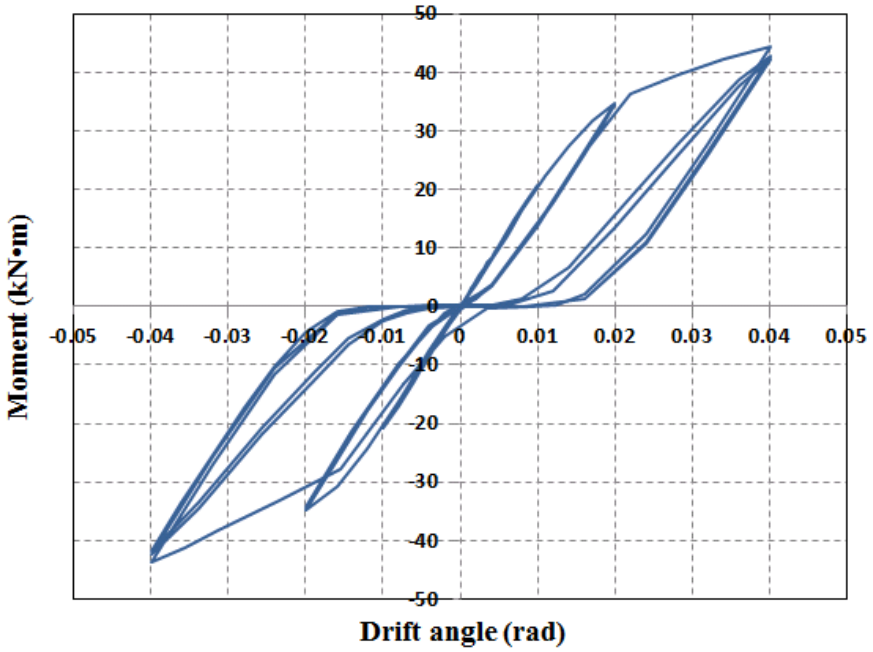


그림 3.4 실험체 SCUY-P19의 이력루프 (베이스 플레이트 두께 19㎜)

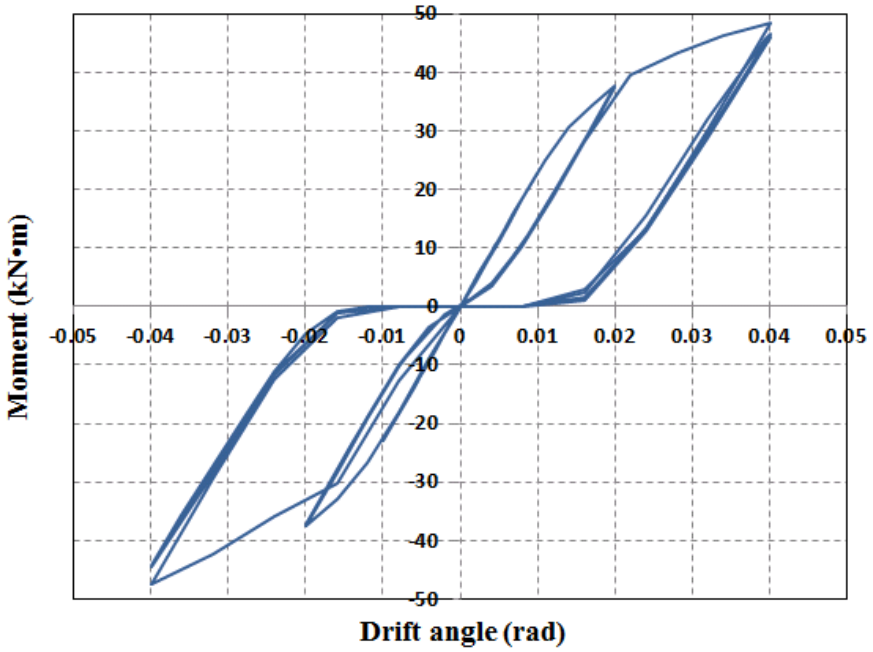


그림 3.4 실험체 SCUY-P25의 이력루프 (베이스 플레이트 두께 25㎜)

3.3 Moment-Drift Angle Response

베이스 플레이트의 두께(5mm, 9mm, 15mm, 19mm)에 따른 모멘트-변형각의 해석결과를 그림 3.6에 나타내었다. 베이스 플레이트의 두께가 증가할수록 최대 모멘트, 항복 모멘트 및 초기강성이 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

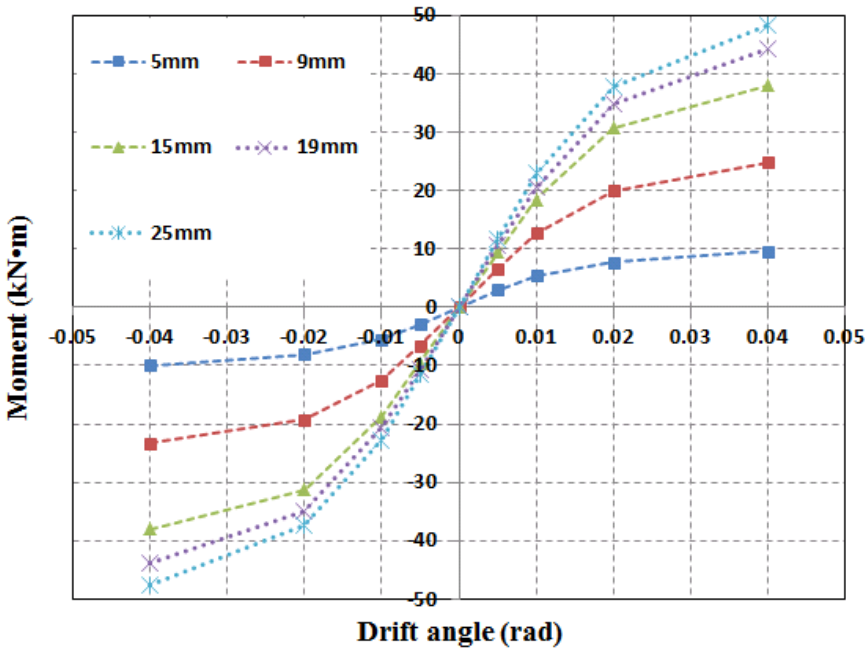


그림 3.6 베이스 플레이트 두께에 따른 모멘트-변형각

그림 3.7~3.9에 베이스 플레이트의 두께에 따른 최대모멘트, 항복모멘트, 초기강성을 나타내었다. 앵커볼트 항복 선행형, 베이스 플레이트 항복 선행형 모두 변형각 0.04rad일 때 베이스 플레이트 및 앵커 볼트가 항복 하여 최대모멘트가 선형적으로 증가함을 확인 할 수 있었으며, 플레이트의 항복내력(250Mpa~270Mpa)보다 앵커볼트의 항복내력(533Mpa)이 약 2배정도 항복내력이 커서 항복모멘트의 경우 앵커볼트 항복이 선행할 경우 플레이트 항복이 선행 할 때 보다 급격히 증가하는 것을 확인 할 수 있었다.

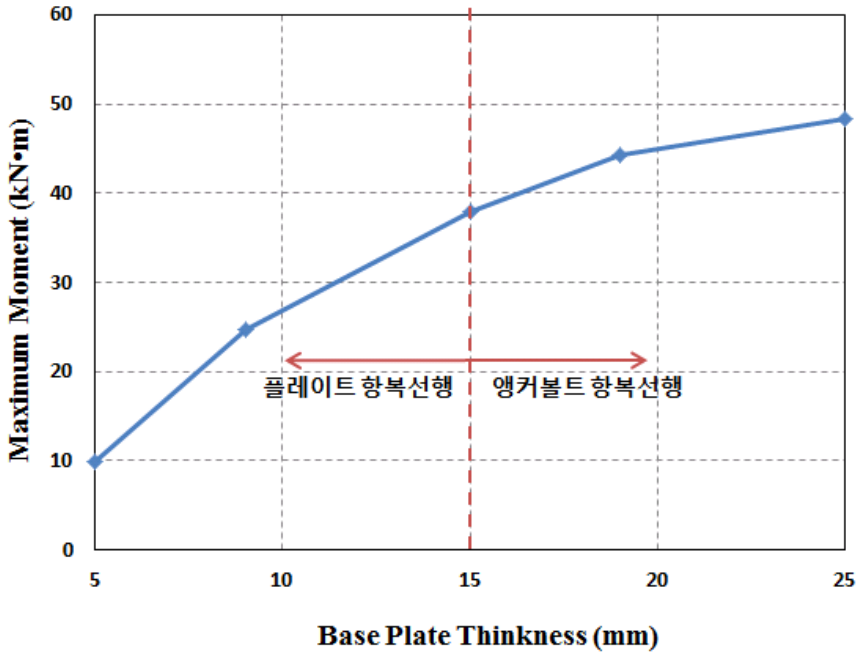


그림 3.7 베이스 플레이트 두께에 따른 최대모멘트

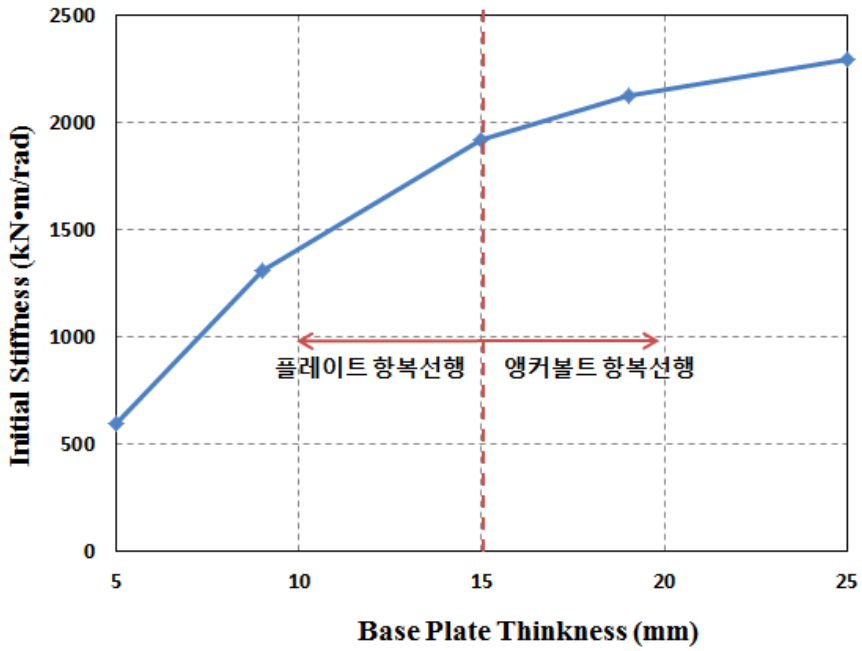


그림 3.8 베이스 플레이트 두께에 따른 항복모멘트

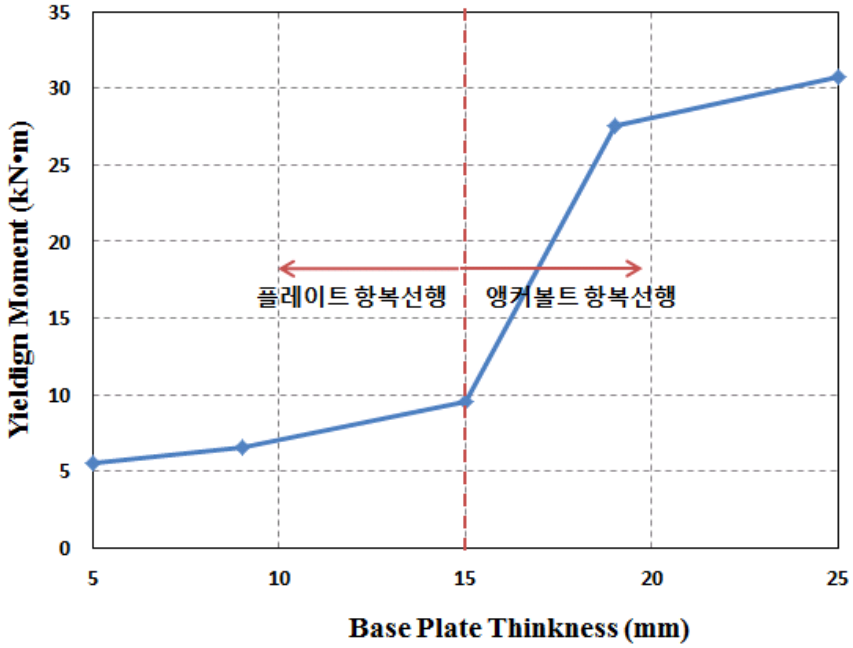


그림 3.9 베이스 플레이트 두께에 따른 초기강성

표 3.2 베이스 플레이트 두께에 따른 비교

모델명	두께 (mm)	초기강성 (kN · m/rad)	항복모멘트 (kN · m)	최대모멘트 (kN · m)
SCBY-P5	5	592	5.5	9.97
SCBY-P9	9	1304	6.52	24.8
SCBY-P15	15	1918	9.52	38
SCBY-P19	19	2122	27.53	44.33
SCBY-P25	25	2290	30.74	48.37

3.4 에너지 흡수 능력

그림 3.10에는 베이스 플레이트 두께에 따른 누적하중-누적변위 관계를 나타내었다. 플레이트 두께가 증가함에 따라 최대 휨모멘트가 동시에 증가 하여 누적 하중 또한 베이스 플레이트 두께가 높을수록 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 3.11에 베이스 플레이트 두께에 따른 에너지소산 성능-누적변위 관계를 나타내었다. 또한, 그림 3.12에는 베이스 플레이트 두께에 따른 에너지소산 성능을 나타내었다. 최대 휨모멘트의 경우 플레이트 두께가 증가함에 따라 최대 모멘트 내력 또한 증가하나 에너지소산 능력은 베이스 플레이트의 두께의 변화에 따라 앵커볼트 항복 선행형, 베이스 플레이트 항복 선행형에 따라 서로 다른 이력거동을 나타냄으로써 에너지소산 능력은 다소 복잡한 양상을 나태 내었다. 이는 앵커볼트 항복선행형인 경우 슬립구간에서는 에너지 흡수가 전혀 이루어지지 않아 큰 휨모멘트 내력을 나타냄에도 불구하고 에너지 흡수 측면에서는 불리한 것으로 판단된다. 베이스 플레이트 두께 15㎜의 에너지소산 성능은 4765kN·㎜로 가장 크게 나타났으며, 다음으로 베이스 플레이트 두께 9㎜로 에너지소산 성능은 4152.4kN·㎜로 나타났으며 베이스 플레이트 두께 5㎜의 경우는 베이스 플레이트 항복 선행형 이긴 하나 최대 모멘트 내력이 9.97kN·m로 적어 에너지 흡수 능력 또한 가장 적은 2038.21kN·㎜로 나타났다.

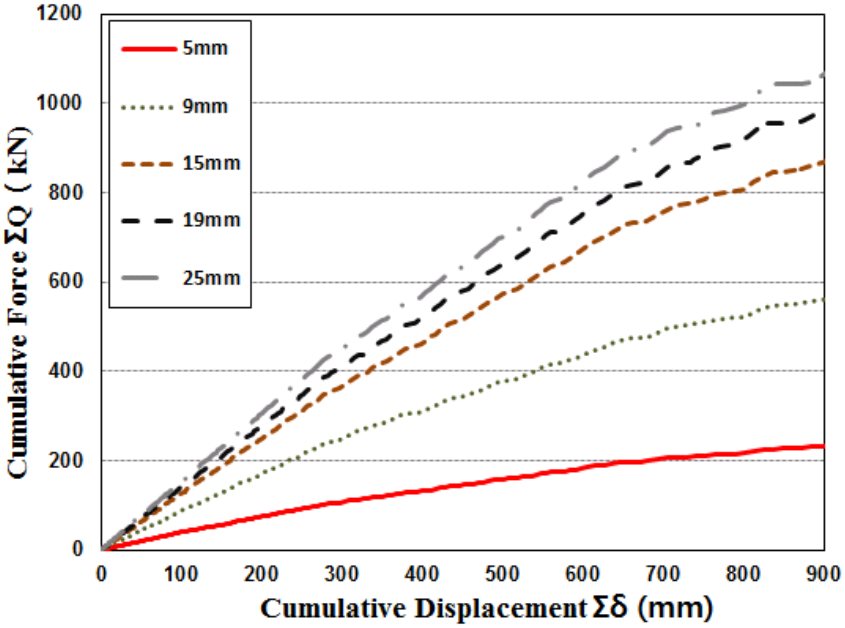


그림 3.10 베이스 플레이트 두께에 따른 누적하중-누적변위 관계

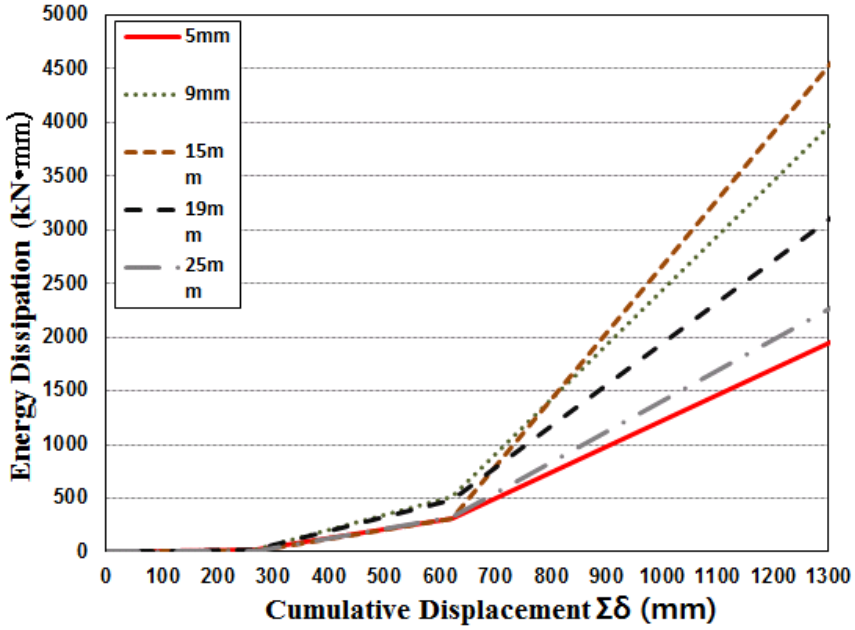


그림 3.11 베이스 플레이트 두께에 따른 에너지소산 성능-누적변위 관계

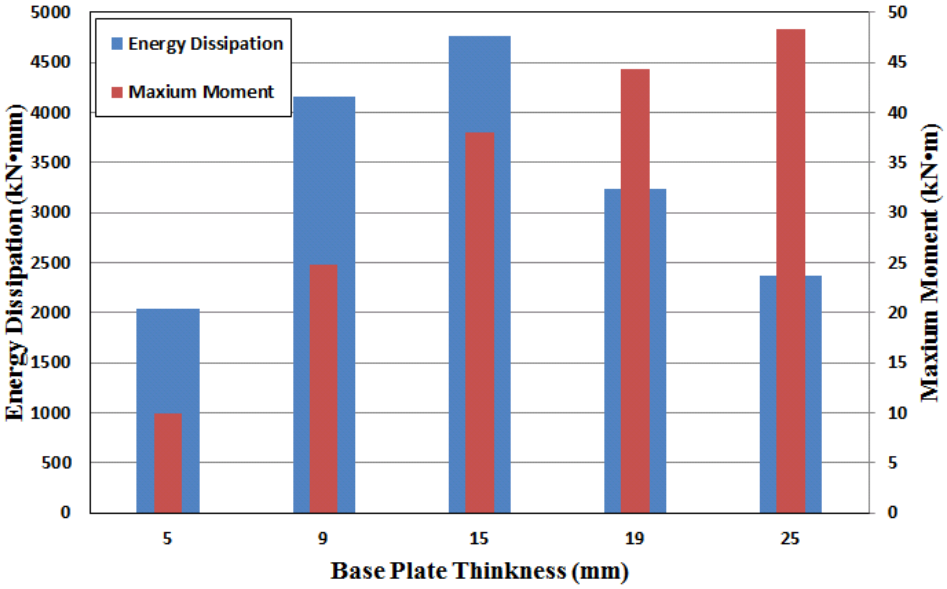


그림 3.12 베이스 플레이트 두께에 따른 에너지소산 성능

제4장 베이스 플레이트와 앵커볼트 항복내력비에 따른 구조적 거동

4.1 항복내력비에 따른 해석 모델 개요

본 장에서는 베이스 플레이트와 앵커볼트의 항복내력비에 따른 구조적 거동을 파악하기 위해 제3장의 베이스 플레이트 15㎜ 시험체를 대상으로 하여 항복내력비 1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5 인 시험체를 선정하여 표 4.1에 나타내었다. 모든 실험체는 최대 모멘트가 약 29~30kN·m 이내로 나타나게 베이스 플레이트와 앵커볼트의 항복내력을 설정하였다. 각 시험체별로 변형각 1/200, 1/100, 1/50, 1/25에 대하여 각 3cylce에 대하여 1방향 해석을 수행하였다. 항복내력비는 식4.1과 같이 정의된다.

$$\zeta(\text{항복내력비}) = \frac{{}_bF_y(\text{볼트항복내력})}{{}_pF_y(\text{플레이트항복내력})} \tag{4.1}$$

표4.1 항복내력비에 따른 해석 모델 개요

시험체명	베이스 플레이트 두께	베이스 플레이트 항복내력	앵커볼트 항복내력	항복내력비
SCUY-Y1	15㎜ (최대 휨모멘트 30kN·m)	260Mpa	260Mpa	1
SCUY-Y1.25		224Mpa	280Mpa	1.25
SCUY-Y1.5		210Mpa	315Mpa	1.5
SCUY-Y1.75		200Mpa	350Mpa	1.75
SCUY-Y2		185Mpa	370Mpa	2
SCUY-Y2.25		175Mpa	394Mpa	2.25
SCUY-Y2.5		165Mpa	412Mpa	2.5

4.2 이력루프 응답

베이스 플레이트와 앵커볼트의 항복내력비에 따른 이력루프를 그림 4.1~4.7에 나타내었다. 항복내력비 1~1.75 구간 에서는 앵커볼트 항복이 선행 하였으며 항복내력비가 커질수록 0.04rad에서 베이스 플레이트가 같이 항복 하여 이력루프의 슬립 현상이 개선 되는 것을 확인 할 수 있었다. 항복내력비 2~2.5 구간 에서는 베이스 플레이트 항복이 선행 하였으며 항복 내력비가 증가 할수록 핀칭 현상이 개선됨을 확인 할 수 있었다.

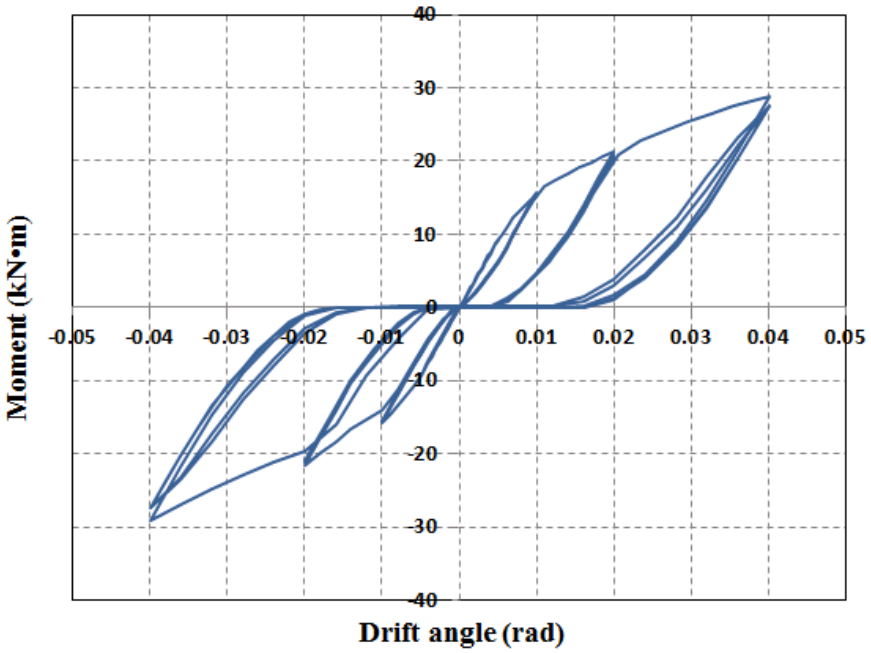


그림 4.1 실험체 SCUY-Y1의 이력루프 (항복내력비 1)

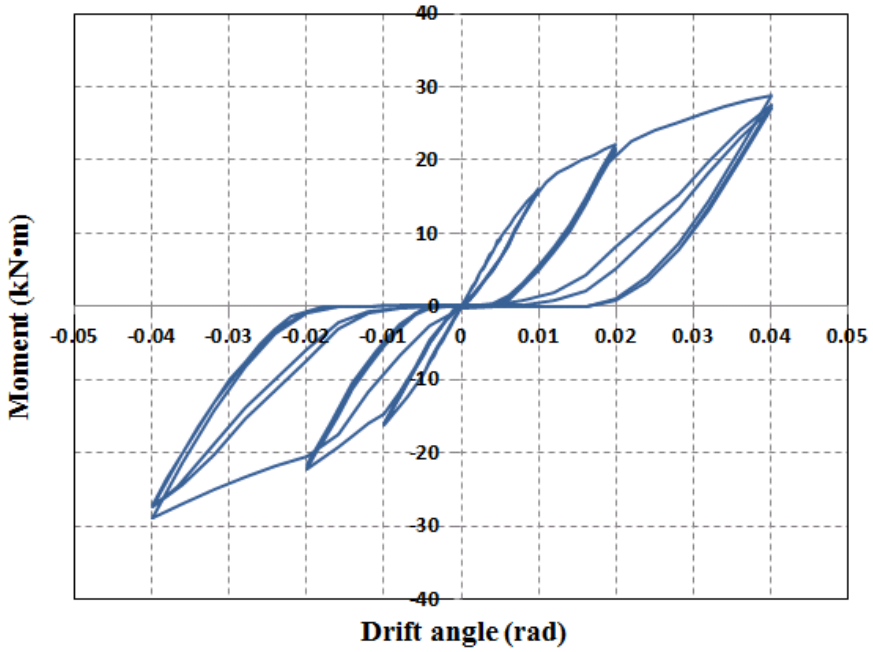


그림 4.2 실험체 SCUY-Y1.25의 이력루프 (항복내력비 1.25)

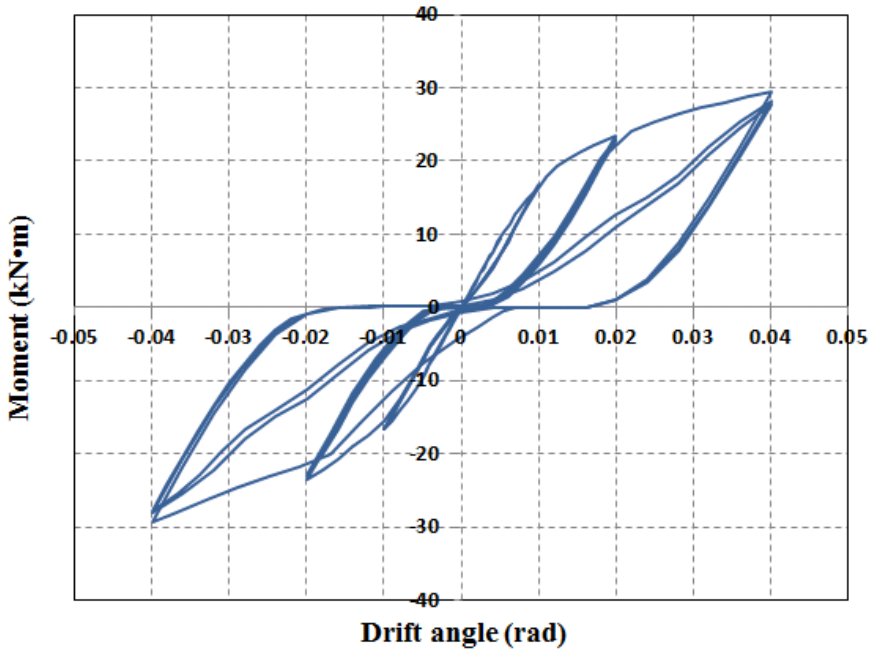


그림 4.3 실험체 SCUY-Y1.5의 이력루프 (항복내력비 1.5)

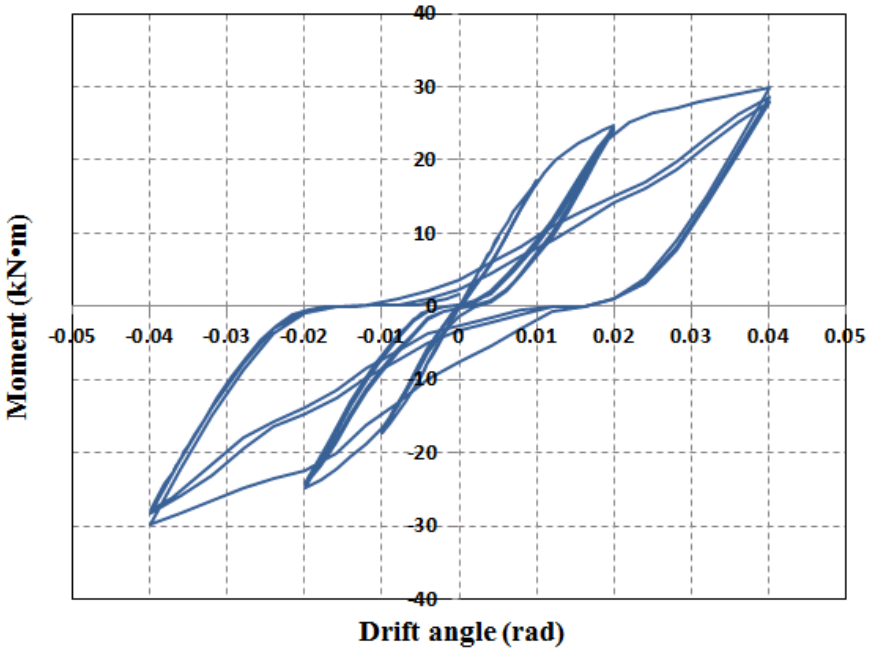


그림 4.4 실험체 SCUY-Y1.75의 이력루프 (항복내력비 1.75)

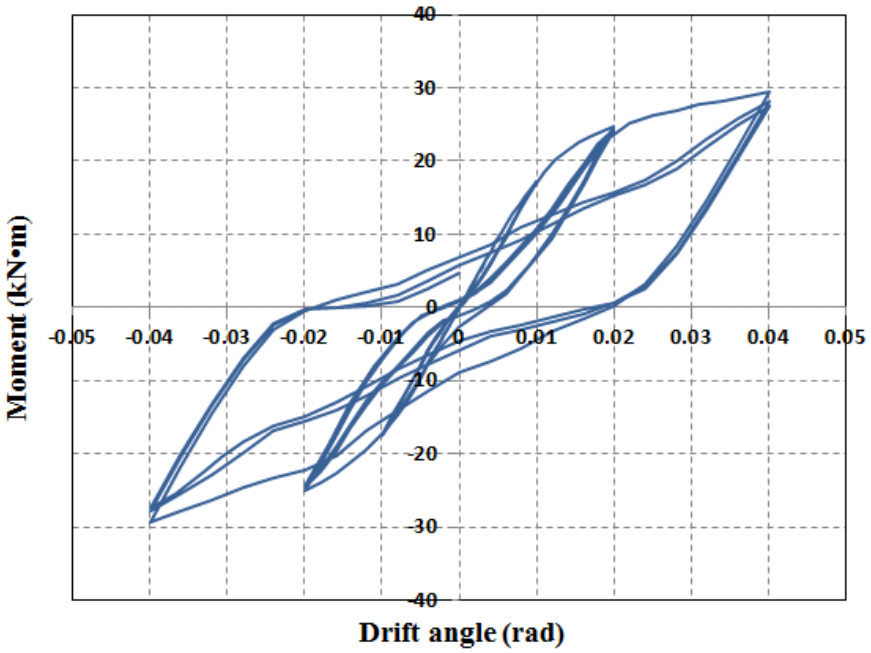


그림 4.5 실험체 SCUY-Y2의 이력루프 (항복내력비 2)

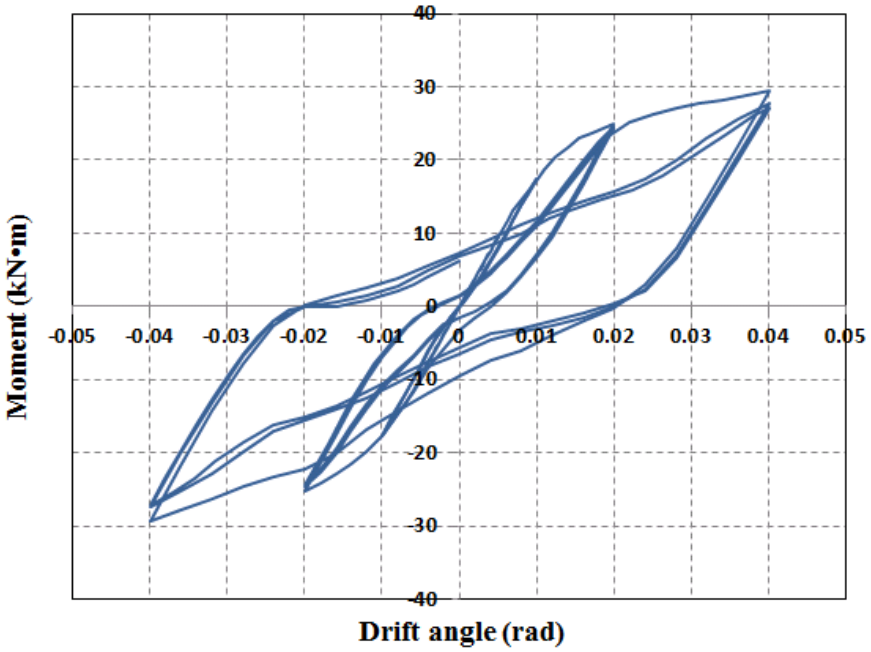


그림 4.6 실험체 SCUY-Y2.25의 이력루프 (항복내력비 2.25)

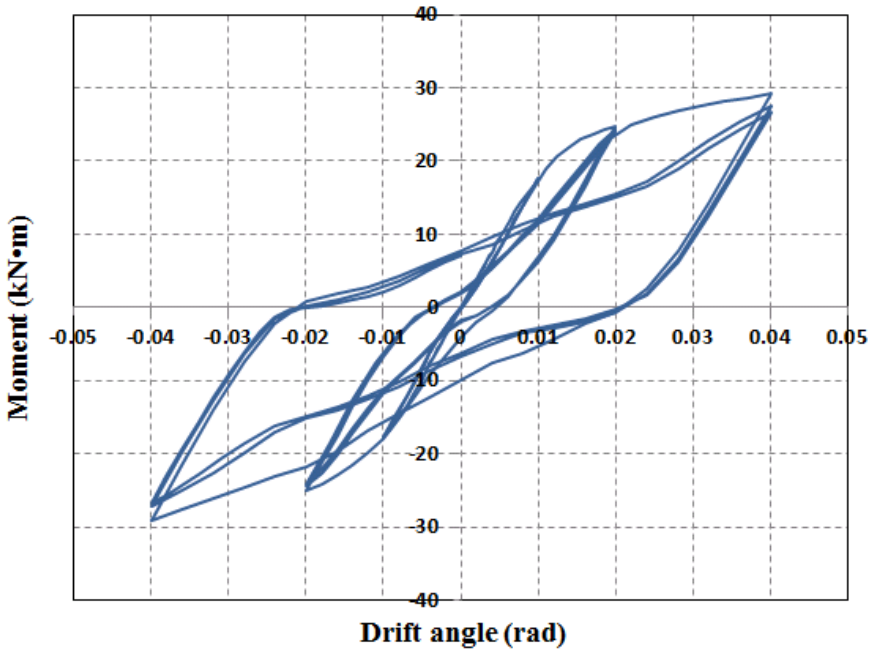


그림 4.7 실험체 SCUY-Y2.5의 이력루프 (항복내력비 2.5)

4.3 Moment-Drift Angle Response

베이스 플레이트와 앵커볼트의 항복내력비에 따른 모멘트-회전각의 관계를 그림 4.8에 나타내었다. 항복내력비 1~1.75(앵커볼트 항복선행)구간 에서는 항복내력비가 증가할수록 0.01 ~ 0.02rad에서 모멘트가 증가하며 최대 모멘트의 경우 거의 일치하게 나타나는 것을 확인 할 수 있었으며, 항복내력비 1.75이상(베이스 플레이트 항복 선행)에서는 0 ~ 0.04rad에서 모든 모멘트가 일치하게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

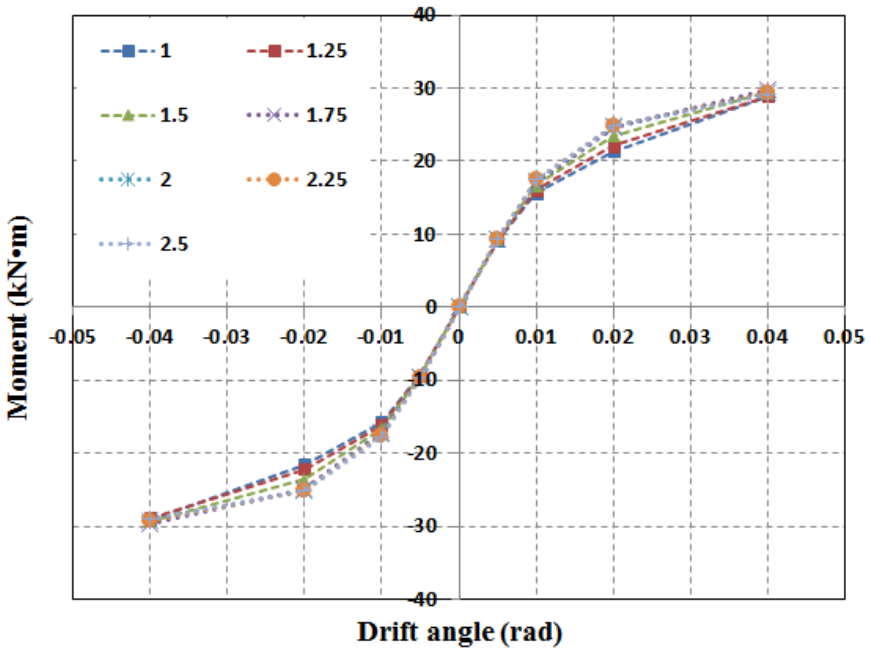


그림 4.8 항복내력비에 따른 모멘트-회전각

4.4 에너지 흡수 능력 및 핀칭 효과

그림 4.9에는 항복내력비에 따른 누적하중-누적변위 관계를 나타내었다. 항복내력비 1~1.75(앵커볼트 항복선행)구간에서는 누적하중이 점점 증가하는 것을 확인 할 수 있었으며 항복내력비 1.75~2.5(베이스 플레이트 항복선행)에서는 누적하중이 거의 일치하게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다.

베이스 플레이트와 앵커볼트의 항복내력비에 따라 달라지는 핀칭 효과 및 에너지 소산성능을 파악하기 위하여 각 시험체의 모멘트-변위 관계의 모든 주기의 면적으로 계산 하였다.

그림 4.10에는 항복내력비에 따른 에너지소산 성능-누적변위 관계를 나타내었다. 항복내력비가 증가 할수록 에너지 소산 성능이 증가 하는데 이는 이력곡선의 핀칭 효과가 개선됨에 따라 에너지 소산 성능이 커지는 것을 알 수 있었다. 또한 그림 4.11 에는 항복내력비에 따른 에너지소산 성능을 나타내었다. 항복내력비 1(앵커볼트 항복형)의 에너지흡수 능력은 1956.77kN · mm로 나타났으며 항복내력비 2.5(베이스플레이트 항복형)의 에너지소산 성능은 5902.16kN · mm로 나타났으며 앵커볼트 항복형에 비해 약 3배 높은 에너지 소산성능을 나타내었다.

베이스 플레이트와 앵커볼트의 항복내력비에 따른 핀칭효과를 명확히 규명하기 위하여 에너지 소산성능을 이용하여 앵커볼트 항복 선행형인 항복내력비 1(SCUY-Y1)의 시험체와 비교하여 에너지 소산성능 비를 그림 4.12에 나타내었다. y축에 표시된 에너지 소산 성능비(식 4.2)는 각각의 시험체의 모멘트-변위곡선에서 계산된 에너지소산 성능을 항복내력비 ξ=1 시험체의 모멘트-변위 곡선의 에너지소산 성능을 나눈 값을 의미한다. 앵커볼트 항복 선행형의 경우 슬립현상의 개선으로 인해 에너지 소산성능이 항복내력비가 증가 함에 따라 크게 증가 하였으며 플레이트 항복 선행형 일 때 부터는 완만하게 증가 하였다.

$$\text{에너지소산성능비} = \frac{A_{\alpha}(\text{각 항복내력비의 에너지소산 성능})}{A_1(\text{항복내력비1의 에너지소산 성능})} \qquad (4.2)$$

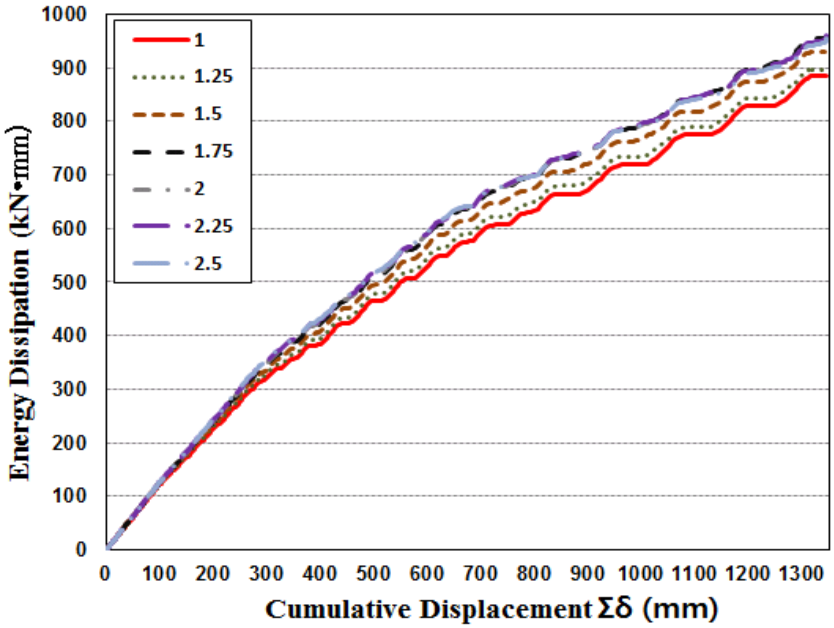


그림 4.9 항복내력비에 따른 누적하중-누적변위 관계

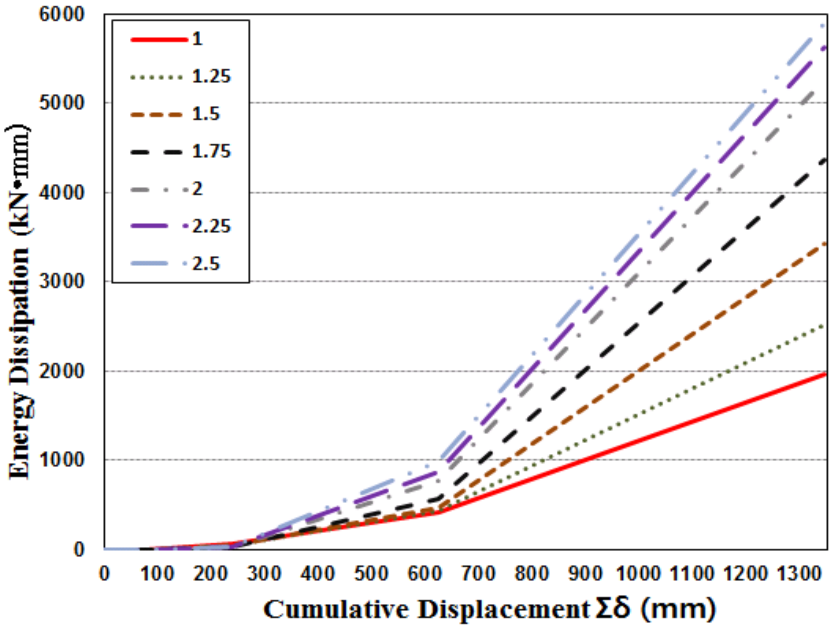


그림 4.10 항복내력비에 따른 에너지소산 성능-누적변위 관계

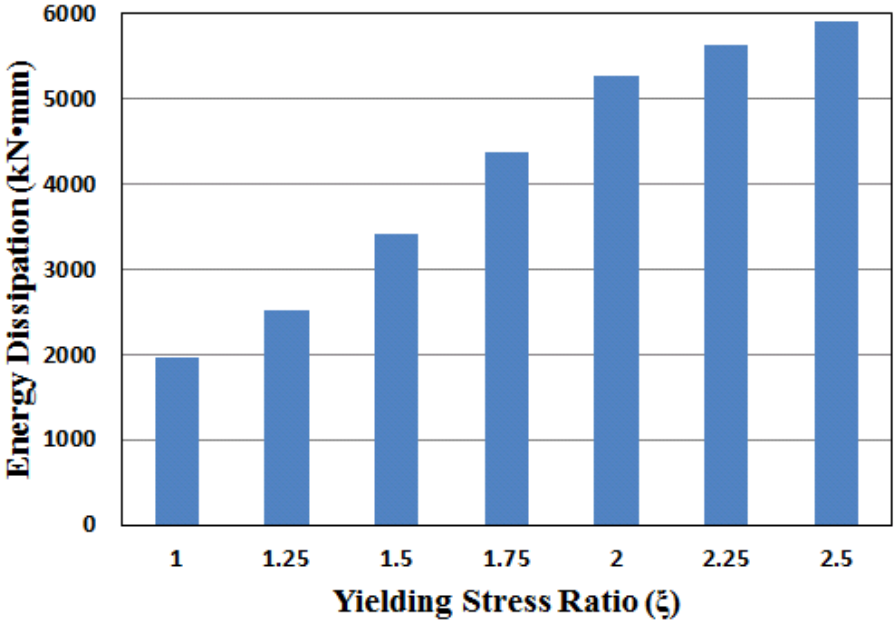


그림 4.11 항복내력비에 따른 에너지소산 성능

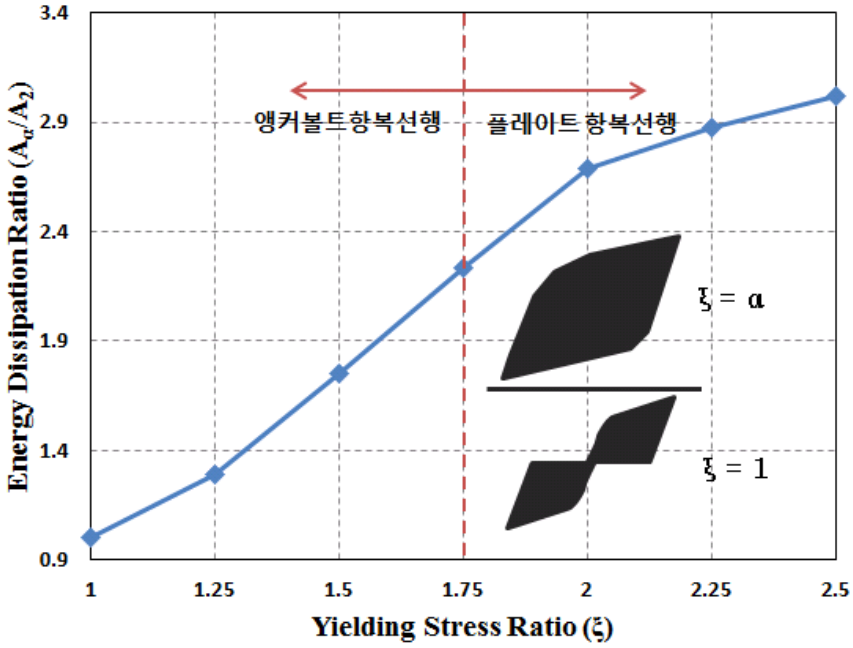


그림 4.12 항복내력비에 따른 에너지소산 성능 비

제5장 결론

본 연구는 철골 주각부의 비선형 거동특성을 파악하기 위해, 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS Workbench를 이용하여 강재 주각부를 모델링하고 1방향 수평하중을 작용하여 베이스 플레이트 두께와 베이스 플레이트와 앵커볼트의 항복내력비의 변화에 따른 주각부의 구조적 거동특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 수평 2방향 하중을 받는 노출형 강재 주각부의 비선형 유한요소 해석을 수행하여 재하실험값과 비교하였다. 비교결과, 수평 1방향의 해석결과는 앵커볼트 항복선행형 및 베이스 플레이트 항복선행형 모두에 대해서 초기강성, 항복내력 및 최대내력이 비교적 정밀하게 예측 가능함을 확인할 수 있었다.
   반면에, 수평 2방향의 해석결과는 초기강성, 항복내력 최대내력값을 비교적 잘 예측하고 있으나 앵커볼트의 항복이후 파단에 이르는 보다 정밀한 해석 프로그램을 통한 해석 수행이 요구된다.

2. 베이스 플레이트의 두께 변화에 따른 역학 거동을 분석한 결과, 베이스 플레이트의 두께가 증가할수록 플레이트 항복 선행형(강성 저하 모델)에서 앵커볼트 항복선행형(점진 슬립 이력모델)으로 실험결과와 동일한 이력거동의 변화를 확인할 수 있었다. 또한, 베이스 플레이트의 두께가 증가할수록 최대 모멘트내력과 에너지소산 성능이 동시에 증가하나, 앵커볼트의 항복으로 인한 슬립현상의 발현으로 플레이트 붕괴 선행형에 비해 다소 감소하는 것을 확인 할 수 있었다.

3. 베이스 플레이트 항복내력($_pF_y$)과 앵커볼트 항복내력($_bF_y$)의 항복내력비(ξ)에 따른 구조적 거동을 파악한 결과 항복내력비가 높을수록 베이스 플레이트 항복 선행형으로 이력거동의 변화를 확인하였다. 또한, 항복내력비가 증가할수록 핀칭효과가 감소하여 에너지소산 성능이 증가하였고, 앵커볼트 붕괴형 보다 플레이트 붕괴형이 에너지소산 성능이 약 3배가량 증가함을 알 수 있었다.

4. 노출형 주각부의 설계시 보유내력의 확보와 더불어 에너지 소산성능 또한 동시에

달성할 수 있도록 항복내력비(ξ)1.75~2.0의 범위에서 설계하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

본 연구에서는 1방향 모멘트만 작용하는 노출형 주각부에 대해 베이스 플레이트 두께 및 베이스 플레이트와 앵커 볼트의 항복내력비에 대한 비선형 거동을 3차원 모델링 기법으로 해석 하였다. 앞으로는 파괴 해석이 가능한 해석 프로그램으로 2방향 모멘트가 작용할시에 관한 연구와, 볼트의 설치거리, 축하중과 모멘트가 동시 작용 시, 콘크리트 지압력에 관한 연구가 이루어져야 하겠다.

참고문헌

[1] Dewolf J.T., Sarisley E.F., “Column Base Plates with Axial Loads and Moment”, J.of Structural Division, ASCE, Vol.106, No.ST11, 1980.

[2] Hon K.K., Melchers R.E., “Moment-rotation curve for ‘pinned’ column-base”, The Structural Engineer, Vol.5, No.3, pp 54~59, 1987.

[3] Ermopoulos J.C., Stamatopoulos G.N., “Mathematical Modeling of Column Base Plate Connections”, J. of Const. Steel Research, Vol. 36, pp 79~100, 1996.

[4] Jaspart J.P, Vandegans D., “Application of the component method to column base”, J. of Const. Steel Research, Vol. 48, pp 89~106, 1998.

[5] Ermopoulos J.C., Michaltsos G.T., “Analysis modeling of stress distribution under column base plate”, J. of Const. Steel Research, Vol. 46, No. 1~3, Paper No. 136, 1998.

[6] Wald F., Jaspart J.P., “Stiffness Design of Column Base”, J. of Const. Steel Research, Vol. 46, No. 1~3, Paper No. 135, 1998.

[7] Nakashima S., “Mechanical Characteristics of Exposed Portions of Anchor Bolts in Steel Column Bases under Combined Tension ans Shear”, J. of Const. Steel Research, Vol. 46, No. 1~3, Paper No. 277, 1998.

[8] 김부식, “철골주각부의 역학성상에 관한 실험적 연구”, 공학석사 학위논문, 부산대학교.

[9] 한국강구조학회, 강구조 건축물의 설계, 강구조편람 제3권.

[10] 정기택, “볼트 접합부의 비선형 해석을 위한 수치해석 방법에 관한 연구”, 공학박사 학위논문, 한국과학기술원, 1995.

[11] 김재봉, “철골 주각부의 모멘트-회전 거동 해석에 관한 연구”, 공학석사 학위논문, 부산대학교, 2000.

[12] 이승준, 김정현, “중심 압축력을 받는 각형강관기둥 베이스플레이트의 지압응력과 설계에 대한 연구”, 한국강구조학회 논문집, 제16권 3호, 2004.

[13] 심기철, 김은화, 김원기, “적은 축력을 받는 H형강 기둥의 베이스플레이트 거동과 설계”, 한국강구조학회 논문집, 제16권 3호, 2004.

[14] 이태규, 이명재, “축압축력을 받는 노출형 원형강관 주각의 거동”, 한국강구조

학회 논문집, 제16권 3호, 2004.
[15] 김정현, 이승준, “축력과 모멘트를 받는 H형강 주각부의 거동에 관한 해석적 연구”, 한국강구조학회 논문집, 제17권 2호, 2005.
[16] Jae-Hyouk CHOI,A Study Inelastic Behavior of Exposed-type Steel Column Bases under Bi-axial Bending, 공학박사 학위논문, 동경대학교, 2003
[17] 정기택, “볼트 접합부의 비선형 해석을 위한 수치해석 방법에 관한 연구”, 공학박사 학위논문, 한국과학기술원, 1995

감사의 글

학부 졸업을 앞두고 진로선택으로 고민하던 제게 연구원으로서의 길을 보여주시며 올바른 길로 인도해 주신 최재혁교수님을 통해 제 인생의 방향과 목표를 갖게 되었습니다. 부족한 저에게 가족과 같은 편안함과 따뜻함으로 대하여 주시고 학문에 대한 열정으로 이끌어주셨습니다. 논문을 마무리하기까지 세심한 배려와 엄한 지도로 학문의 길을 열어주신 최재혁교수님께 깊은 존경과 감사를 드립니다.

또한, 충실한 논문이 될 수 있도록 세심한 지적과 조언으로 각별히 심사를 해주신 위원장 김의식교수님과 조창근교수님, 항상 밝은 미소로 많은 가르침을 주신 김수인교수님, 조용준교수님, 박강철교수님, 임만택교수님, 장동국교수님, 김인호교수님, 염대봉교수님, 서장후교수님께 깊이 감사드립니다.

대학원이랑 길을 택한 제게 힘과 용기를 주시면 언제나 따뜻하게 사랑으로 저를 감싸주시는 부모님, 언제나 잘 챙겨주는 누나에게 마음을 전합니다. 그리고 언제나 든든한 우정이형, 현수형, 재형이형, 나에게 힘이 되어주는 의영이, 준영이, 착한 후배 지훈이, 열홍이, 경석이, 태인이, 대학원 생활 동안 함께 하며 많은 관심과 도움을 준 대학원 선배님, 학부 후배님, 끝으로 언제나 함께할 강구조·내진공학연구실 연구원 모두에게 감사드립니다.

이제 하나의 계단을 올라섰습니다. 아직도 올라갈 계단이 많이 남아있습니다. 저를 아껴주시고 사랑주시는 모든 분들께 감사의 인사를 드리며, 이제 또 하나의 계단을 오르기 위해 열심히 노력하겠습니다.

2011년 12월

장정현 올림