

프리폼 구조의 노드 기술 현황 분석

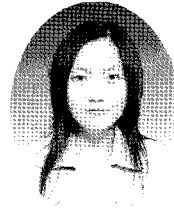
State-of-the-art Node of Freeform Structure



주영규*
Ju, Young-Kyu



오진탁**
Oh, Jin-Tak



이경주***
Lee, Kyoung-Ju



한경수****
Han, Kyung-Soo

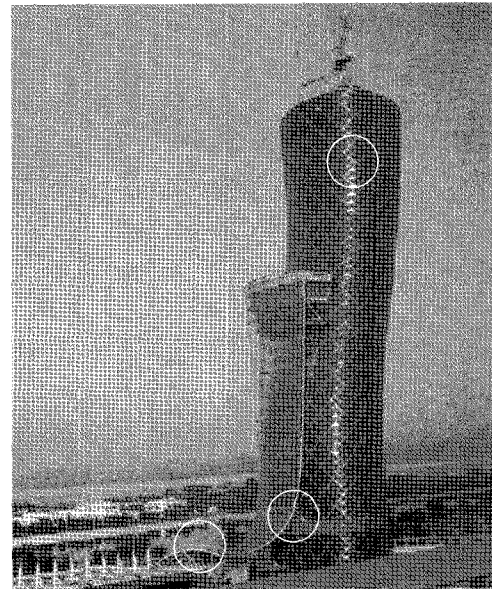
1. 서론

현재 건축양식에 있어서 단순하고 정형화된 사각형 형태의 구조물은 거의 찾아보기 힘들다. 이는 경제성과 효율성만을 추구함을 넘어서 다양한 형태와 자유로운 표현을 통해 건축물의 아름다움을 강조하고 자유로운 의미를 부여하는 것이 중요하게 되고 있다.

특별한 건축물의 건설을 위해 각 나라의 경제력과 기술을 경쟁해 온 결과 각 분야 기술의 급속한 발전을 가능하게 하였고, 보다 더 특별한 건축물에 대한 관심은 비정형 건축물에 대한 관심의 증대로 이어지고 있다. 이러한 비정형성을 보이는 건축물에 적합한 구조로서 프리폼 구조(다이아그리드가 대표적인 구조 시스템임)가 많이 사용되고 있다.

프리폼(free form) 구조는 작용하는 하중의 특성에 따라 축력 지배형(수직 기둥), 모멘트 지배형(지붕 구조) 및 축력-모멘트 조합형(경사 기둥 또는 경사 지붕)으로 구

분할 수 있다.(그림 1)



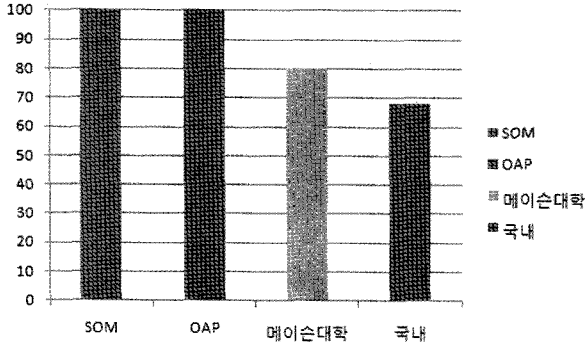
〈그림 1〉 Capital Gate (아부다비, UAE): 수직 기둥, 경사 기둥, 지붕 부재 사례

프리폼 구조 시스템에서 가장 취약하고 중요한 부분은 노드 부분이므로 본 고에서는 프리폼 구조의 노드에 대한 국내외 기술 현황에 대해 알아보고 나아가 하중 특성에 따른 구분 방법을 제시하고자 한다.

* 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수
** 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석박사통합과정
*** 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정
**** 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정

2. 프리폼 구조 기술현황

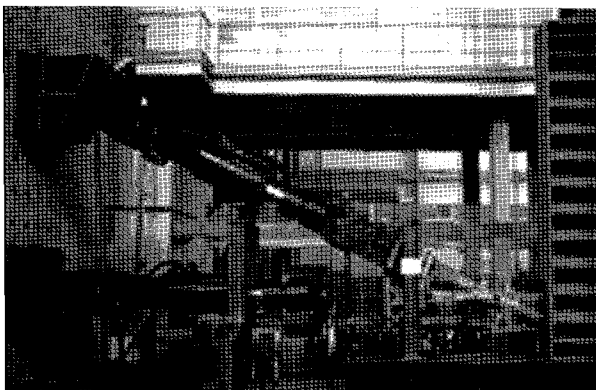
국내 프리폼 구조를 이용한 건축물의 경우 상당 부분을 SOM, Ove Arup 등 외국 기술력에 의존하고 있다.(그림 02)



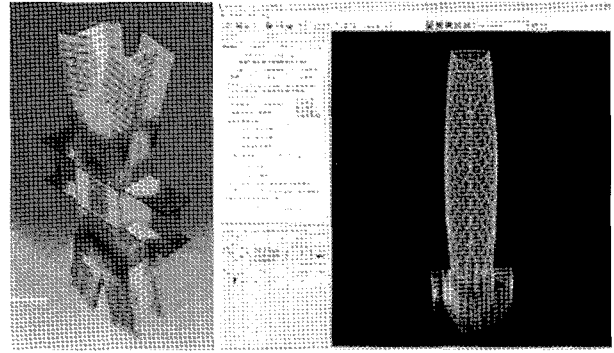
〈그림 2〉 프리폼 구조의 국내외 기술력 비교

국내에서는 주영규(고려대)가 잠실롯데 Diagrid Node, 아산사이클론 타워 Node의 구조성능 평가(압축, 인장, 반복하중 거동) 및 해석을 수행하였고, SOM과 공동으로 Diagrid의 반응수정계수 평가, 아산 사이클론 타워의 내진성능 평가 등에 대해서 연구를 수행하였으며(그림 3), 동양구조안전기술에서 대전의 퓨처 X 프로젝트, CS구조에서 아산사이클론 타워의 설계를 수행하고 있는 중이다.(그림 4)

해외에서는 Ove Arup(영국), SOM(미국), 문경선(예일대학)이 영국의 Swiss Re 타워, 미국의 Hearst Tower 등에 대한 실무적인 차원의 다양한 검토를 수행하였지만 관련 기술이 공개되지 않고 있어 기술 습득이 어렵다.

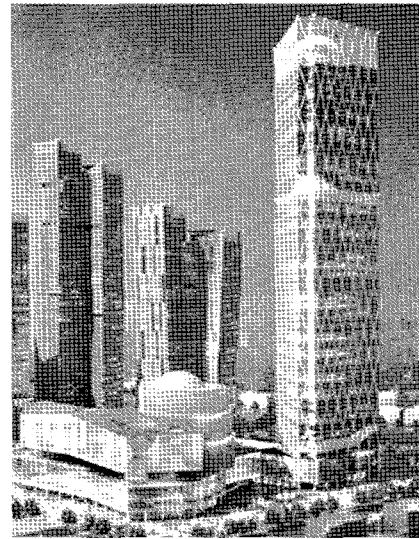


(a) 잠실 롯데 Diagrid Node 구조성능 실험



(b) 프리폼 구조의 해석연구

〈그림 3〉 프리폼 구조의 국내 연구 사례(주영규)



〈그림 4〉 프리폼구조의 국내실무사례 (동양구조안전기술)

현재 동대문 프라자, 전경련 회관 등 고층이 아닌 프리폼 구조 형태의 다양한 프로젝트가 진행되고 있지만, 핵심이 되는 Schematic Design은 해외에 전적으로 의존하고 있는 실정이며 독일, 일본, 미국, 영국 등 선진국에서 다양한 프리폼 구조를 실현하고 있으나 국내에 쉽게 활용되기가 어렵다.

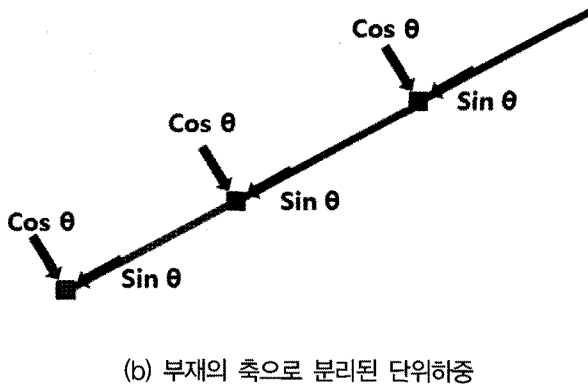
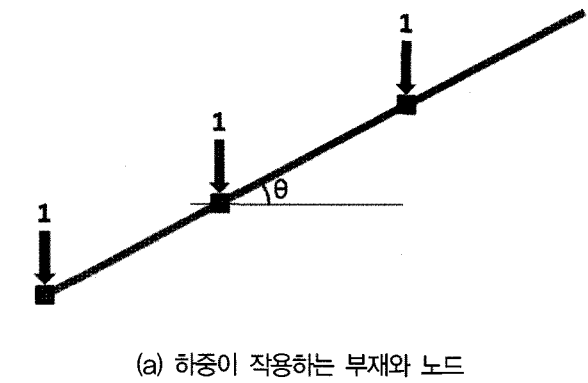
3. 프리폼 구조 노드의 분류

프리폼 구조를 살펴보면 그 부재 각도에 따라 각 건축물을 축력 지배형, 모멘트 지배형, 축력-모멘트 조합형의 세 영역으로 분류할 수 있다.

노드에 연결되어 있는 각각의 부재들이 어느 영역에 속하는지 정확히 알기 위해서는 건물의 전체적인 형상과

하중의 종류, 방향, 크기와 같은 복합적인 요소들을 모두 고려하여 해석되어야 할 것이다.

이러한 해석을 통해서 얻을 수 있는 각 부재 단부에 걸리는 축력 요소와 모멘트 요소의 응력으로 노드를 분류하는 기준을 만들기 위해 간단히 2차원에서 축력만 받을 수 있는 하중, 즉 P_{max} 이라고 가정한 대상을 설정하였다.(그림 05)



〈그림 5〉 구조타입 구분을 위한 부재-노드 모델

부재가 받는 응력을 축력에 의한 요소($\sin\theta$)와 모멘트에 의한 요소($\cos\theta$)로 나타낸다면 다음과 같다.

$$\frac{P}{A} + \frac{M \cdot y}{I} = f_{cu} \quad (1)$$

P: 부재의 축력

A: 부재 단면적

M: 부재 모멘트

y: 부재 단면의 도심에서 최외곽까지의 거리

I: 부재 단면 2차 모멘트

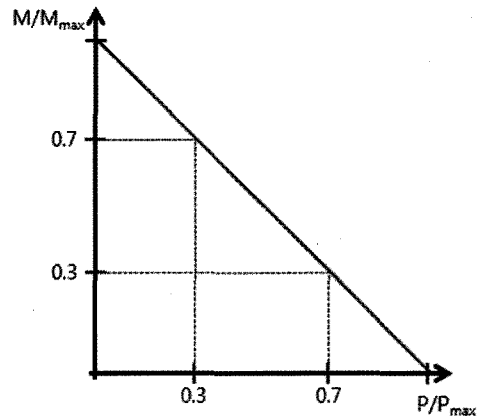
f_{cu} : 부재의 허용응력

식(1)을 변형시키면 식(2)의 과정을 거쳐 식(3)을 구할 수 있다.

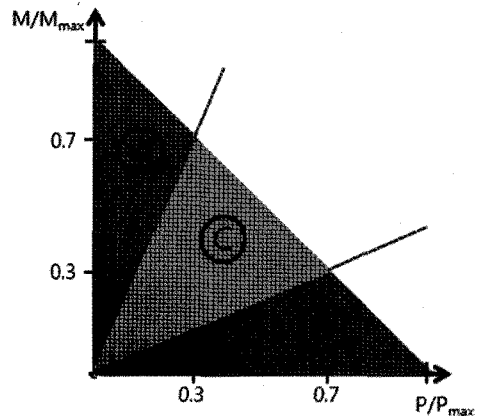
$$\frac{P}{A \cdot f_{cu}} + \frac{M \cdot y}{I \cdot f_{cu}} = 1 \quad (2)$$

$$\frac{P}{P_{max}} + \frac{M}{M_{max}} = 1 \quad (3)$$

θ 가 90° 인 경우는 식(3)에서 축력 요소만 남은 형태가 될 것이고, θ 가 0° 인 경우는 모멘트 요소만 남은 형태가 될 것임을 알 수 있다.



(a) P-M 상관도



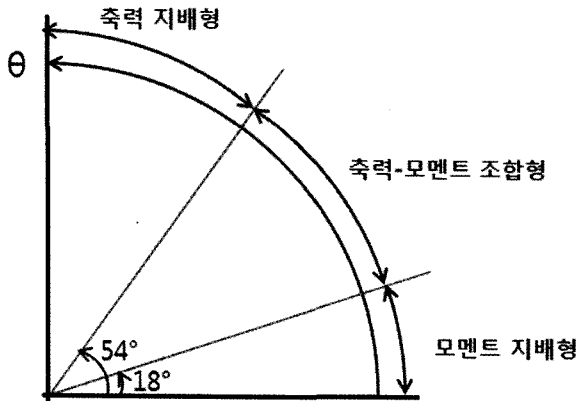
(b) 축력, 모멘트, 축력-모멘트형의 구분

〈그림 6〉 P-M 상관도에 따른 프리폼 구조의 분류

각 요소의 힘이 70%이상 작용하고 있을 경우를 축력 지배형과 모멘트 지배형으로 나누는 기준으로 삼는 것으로 판단하면 P/P_{max} 가 0.7 이상의 값을 가지는 경우는 축력 지배형, 0.3 보다 작은 값을 가지면 모멘트 지배형, 0.3 이상이고 0.7보다 작은 값을 가지는 구간에서는 축력-모멘트 조합형으로 분류할 수 있다.(그림 6)

A부분은 모멘트 지배형, B부분은 축력 지배형, C부분은 축력-모멘트 조합형으로 나누어질 수 있다. 이 그림에서 유의해야 할 점은 단순 축력과 모멘트의 비교가 아닌 부재가 받을 수 있는 최대 축력에서의 축력 비율과 최대 모멘트에서의 모멘트 비율을 고려해야 한다는 것이다.

부재가 전달 수 있는 극한하중이 주어진다 가정할 경우 부재와 수평이 이루는 각 θ 는 축력 지배형이기 위해서는 54° 이상, 모멘트 지배형이기 위해서는 18° 이하이어야 한다.(그림 7)



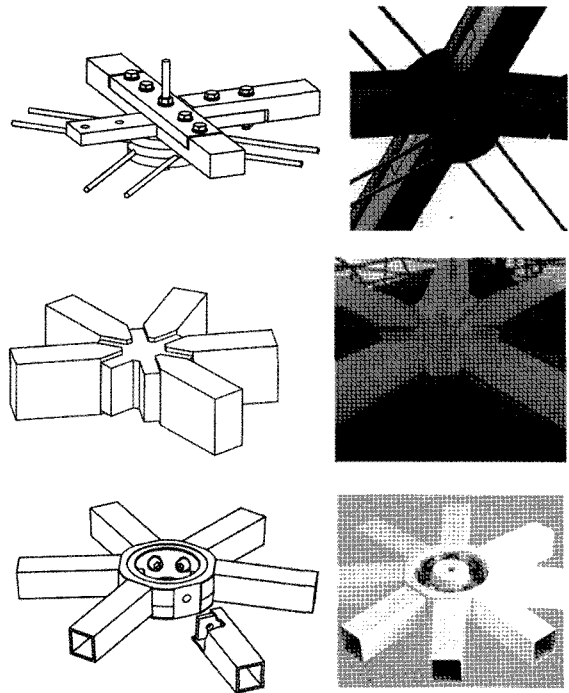
〈그림 7〉 부재각도에 따른 프리폼 구조의 분류

그러나, 최대 P_{max} 및 M_{max} 는 부재가 수평과 이루는 각뿐만 아니라 부재의 강종 및 길이 등에 따라 결정되는 값이므로 최대 하중이 가해지지 않은 상태에서 단순히 부재가 나타내는 각만으로 어떠한 지배형인지 언급하는 것은 부적절할 수 있으므로 주의를 기울여야 한다. 이 항상 필요하므로 이에 대한 고려가 필요하다.

3.1 모멘트 지배형 노드

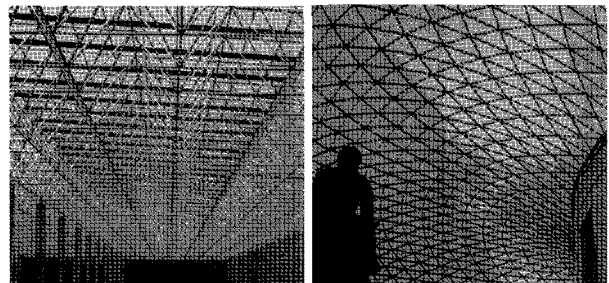
벽프리폼 구조에서 부재각도가 18° 이하가 되면 모멘트 지배형으로 분류하는데, 그 형태가 대부분 지붕 구조로 되어 있다.

모멘트 지배형은 노드부와 노드에 붙는 부재들이 가볍기(약 20kg 정도) 때문에 사람이 들 수 있어 시공성이 좋고 대량 생산이 가능하다는 장점이 있다. 노드의 형태는 힘의 흐름과 쓰임에 따라 다양하다.(그림 8)



〈그림 8〉 모멘트 지배형 프리폼 구조의 노드 사례

모멘트 지배형의 지붕구조에 있어서 기존에는 입체 트러스를 주로 사용하였으나 최근에 적용되는 프리폼 구조에서는 평면형 구조가 주로 사용되고 있다. (그림 9)



(a) 입체 골조

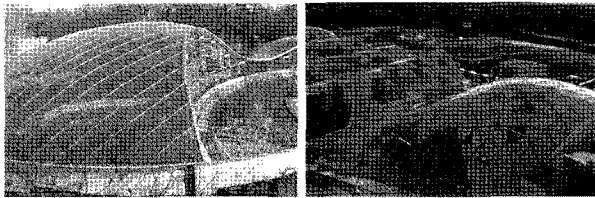
(b) 평면 골조

〈그림 9〉 입체 골조와 평면 골조의 비교

평면형 모멘트 지배형 프리폼 구조에서는 기존의 입체 트러스에 비해서 모멘트에 저항할 수 있어야 하므로 노드부에 대한 설계가 어렵다. 이러한 노드는 국내에서 최근 부분적으로 건설되고 있지만 아직 초기 단계로 독자

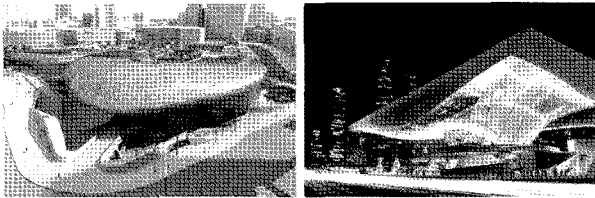
적인 기술을 갖고 있지 못하다. 해외의 경우 독일 Mero 등에서 연구가 활발하여 기술을 도입해 사용하고 있으나 해외 기술은 특히 기술로써 국내에서 쉽게 활용하기 어려우므로 노드부에 대한 개발이 시급한 상태이다.(표 1)

모멘트 지배형 건축물의 국외사례로는 Hippo House (베를린), Atelier Volkmar Burgstaller (찰프부르크) 등이 있으며 국내 사례로는 동대문 디자인 플라자, 부산 영상센터 등이 있다. (그림 10, 11)



(a) Hippo House(베를린) (b) Atelier Volkmar Burgstaller(찰프부르크)

〈그림 10〉 모멘트 지배형 구조의 국외 사례



(a) 동대문 디자인 플라자 (서울) (b) 부산 영상센터(부산)

〈그림 11〉 모멘트 지배형 구조의 국내 사례

모멘트 지배형 구조는 국내 사례가 적으므로 국내외의 기존 형태를 시공성, 경제성 면에서 개선하고 국제 경쟁력을 갖춘 독자적인 기술을 확보해야 해외 건설 공사 수주 및 진출에 있어서도 효과를 거둘 수 있을 것이다.

3.2 축력 지배형

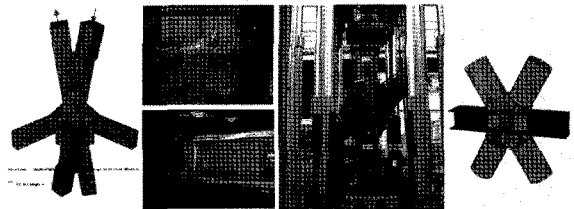
프리폼 구조에서 부재각도가 54° 이상이 되면 수직 기동 형태로 축력의 영향이 커지므로 축력 지배형으로 분류한다. 프리폼 구조에 범용적으로 사용되는 기본 단위는 삼각형 또는 삼각형 2개가 조합된 다이아몬드형으로 가장 많이 쓰이는 구조 시스템은 다이아그리드 시스템이다.

1개의 절점에 6개의 부재가 만나는 구조로 6개의 부재와 1개의 노드를 별도로 제작하여 현장에서 7개의 부재

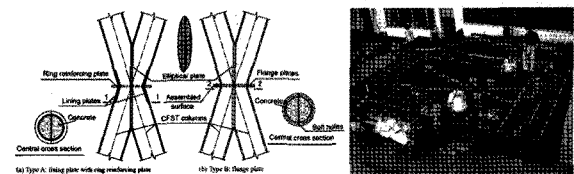
를 연결하고 있다. 축력 지배형 프리폼 구조는 노드의 크기가 크고 가새가 2~4개층에 걸쳐서 설치되기 때문에 중량이다.

축력 지배형 프리폼 구조들에 있어서 미국, 영국의 SOM, Ove Arup 등에서 독자 기술을 보유하고 있지만 국내에는 공개하고 있지 않았다. 그러나 국내에서 잠실 롯데타워, 아산 싸이클론 타워, 대전 Future X 등에 적용하여 그 연구를 수행함으로써 많은 발전 과정에 있으며 다양한 부재형태(원형, 각형, H형강 등)에 따른 노드 상세를 제시하여 실험과 해석을 통한 구조적 거동을 살펴봐왔다.(표 2)

다이아그리드 시스템은 여러 부재가 하나의 노드에서 접합되기 때문에 노드형태별 최적화 상세를 제시하는 연구가 진행되었다. 원형강관을 이용한 아산 싸이클론 타워의 노드와 제2롯데월드 노드를 기준으로 실험과 유한요소해석이 수행되었으며, 초고층 건물에 적용될 노드의 적합성, 안정성 측면이 연구되었다. 현재 이러한 노드에 대한 연구는 지속적으로 검토되고 있다. 그 중 제2롯데월드 노드의 구조성능평가 등이 수행되었는데 다양한 접합형태(웹전이형, 웹연결형, 박스형 등)에 관한 실험 연구가 2008년도에 실시되었고 2009년 유한요소해석 프로그램을 이용한 해석논문이 발표되었으며 타입별 추가 논문이 발표될 예정이다.(그림 12)



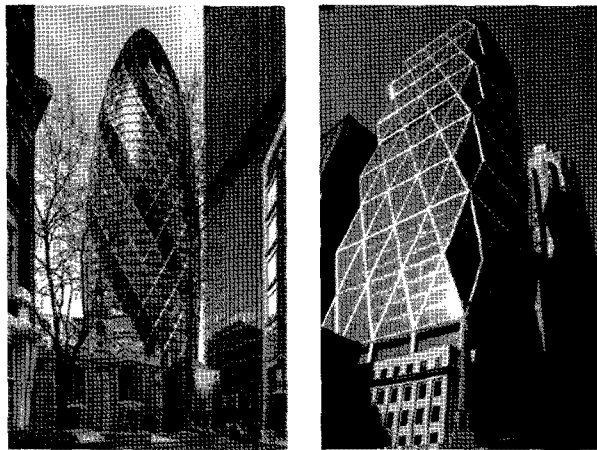
〈그림 12〉 국내 축력 지배형 노드형태별 구조성능평가



〈그림 13〉 CFT를 이용한 노드의 구조적평가

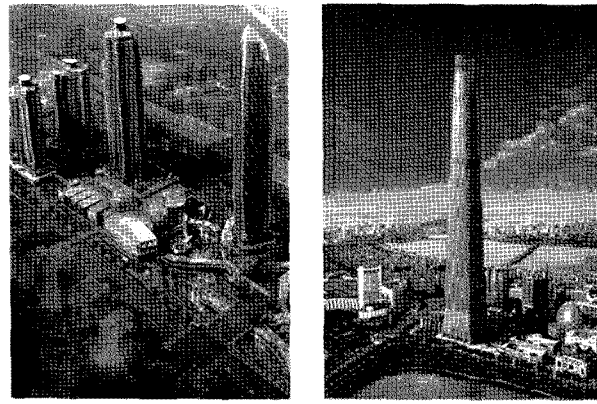
중국에서도 광저우타워 등 다이아그리드 적용사례가 늘어나면서 다이아그리드 노드에 관한 실험 연구가 진행되었다. 국내 연구는 재료가 Steel에 국한되었지만, 중국에서는 CFT를 이용한 노드의 안정성을 검토하였다.(그림 13) 각도 뿐 아니라 접합방법 등을 변수로 한 실험, 해석연구를 진행하였으며 다양한 변수를 이용한 추가적인 연구가 예상된다.

축력 지배형 프리폼 구조의 유명한 국외 사례로는 런던에 30 St Mary Axe와 뉴욕에 있는 Hearst Tower, 국내에는 아산에 있는 아산 싸이클론 타워, 잠실롯데타워(현재 설계 변경됨) 등이 대표적이다.(그림 14, 15)



(a) 30 St Mary Axe (런던) (b) Hearst Tower (뉴욕)

〈그림 14〉 축력 지배형 구조의 국외 사례



(a) 싸이클론 타워 (아산) (b) 잠실롯데타워안 (서울)

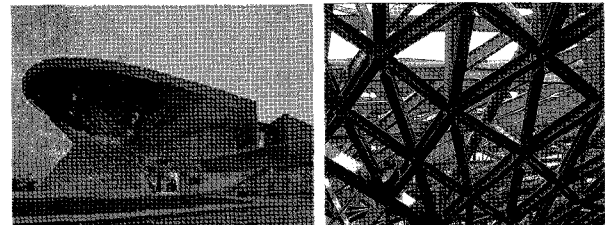
〈그림 15〉 축력 지배형 구조의 국내 사례

3.2 축력-모멘트 조합형

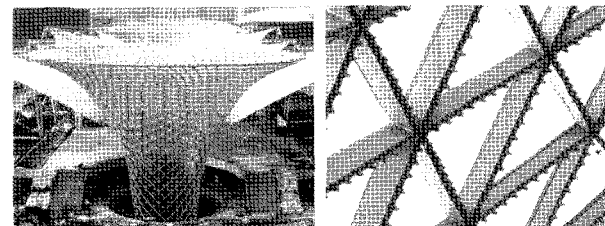
축력과 모멘트가 동시에 걸리는 조합 형태로서 부재

각도가 18°~54°인 경우에 축력-모멘트 조합형이라 한다. 축력 지배형과 모멘트 지배형의 중간 형태를 지니고 있기 때문에 아직까지는 모호한 부분이 많으나, 축력 지배형과 모멘트 지배형의 개발을 통해 발전시킬 수 있다.

사례로는 독일 Munchen의 BMW WELT, Shanghai의 Shanghai World EXPO가 대표적이다.(그림 16)



(a) BMW WELT(뮌헨)



(b) Shanghai World EXPO(상해)

〈그림 16〉 축력-모멘트 지배형 구조의 사례

4. 결 론

최근의 건물의 경향을 반영한 프리폼 구조를 실현하기 위해서는 주요 요소중의 하나인 노드의 기술개발이 필요하다. 특히 노드에 관한 기술들은 선진국에 대한 기술의 존이 크다. 이에 국내외 관련 기술 동향을 통해서 향후 국내의 프리폼 구조 노드의 기술 발전에 본 고가 기여하였으면 한다.

-참고문헌-

1. Hegate, A.: The Art of Structural Engineering. The Work of Joerg Schlaich and his Team, Edition Axel Menges, 1995
2. S. Stephan, Reticulated Structures on Free Form Surfaces.

〈표 1〉 모멘트 지배형 Node Connector 비교 *

Node Connector		Accommodation of Local Geometry			Transferability of Internal Forces		Applicability
Version	Connection	Horizontal Angle U_i	Vertical Angle V_i	Twist Angle W_i	Normal Forces	Bending Moments	Free-Form Structure Type
SBP-1	Bolted Splice	+	+	o	+	o	Geom. Optim., Struct. Optim
SBP-2	Bolted Splice	+	+	o	++	+	Geom. Optim., Struct. Optim
HEFI-1	Bolted Splice	++	+	+	++	++	Geom. Optim., Struct. Optim
SBP-3	Bolted Splice	++	++	++	++	++	Geom. Non-Optim., Struct. Non-Optim.
POLO-1	Bolted Splice	+	++	++	++	++	Geom. Non-Optim., Struct. Non-Optim.
SBP-4	Welded End-Face	++	+	o	+++	+++	Geom. Optim., Struct. Non-Optim.
WABI-1	Welded End-Face	++	++	+	+++	+++	Geom. Non-Optim., Struct. Non-Optim.
OCTA-1	Bolted End-Face	++	+++	++	++	++	Geom. Non-Optim., Struct. Non-Optim.
MERO-1 (Cylinder)	Bolted End-Face	++	++	+	++	++	Geom. Optim., Struct. Non-Optim.
MERO-2 (Block)	Bolted End-Face	++	+++	++	++	++	Geom. Non-Optim., Struct. Non-Optim.
	Welded End-Face	++	+++	++	+++	+++	Geom. Non-Optim., Struct. Non-Optim.
MERO-3 (Dish)	Bolted End-Face	++	++	++	++	+	Geom. Non-Optim., Struct. Optim.
	Welded End-Face	++	+++	++	++	++	Geom. Non-Optim., Struct. Non-Optim.
MERO-4 (Double Dish)	Bolted End-Face	++	++	+	++	++	Geom. Non-Optim., Struct. Non-Optim.
	Welded End-Face	++	+++	++	+++	+++	Geom. Non-Optim., Struct. Non-Optim.
Notation		o Limited Suitability		Geom. Optim.	Geometrically Optimized Surfaces		
		+ Adequate Suitability		Geom. Non-Optim.	Geometrically Non-Optimized Surfaces		
		++ Good Suitability		Struct. Optim.	Structurally Optimized Surfaces		
		+++ Excellent Suitability		Struct. Non-Optim.	Structurally Non-Optimized Surfaces		

*Reference: S. Stephan (MERO GmbH & Co.),
RETICULATED STRUCTURES ON FREE-FORM SURFACES

〈표 2〉 축력 지배형 노드부 연구동향

no	저자 및 연도	국가	하중 종류	변 수	각도	재료	해석/실험/계획	비 고
1	정인용 외 2009	한국	반복 하중	1. Web, Flange 용접방법 2. 수평스티프너 길이 3. 상/하부 스티프너 길이 4. Flange, Flange 용접방법	24°	Steel (웹 연속형)	실험	<ul style="list-style-type: none"> • 웹 연결형 노드부에 대한 용접방법과 설계상세에 따른 구조적 특징을 실험연구 • 파괴형상과 초기강성, 항복강도, 에너지 흡수능력등을 살핌 • 용접부의 품질확보의 중요성
2	정인용 외 2009	한국	반복 하중	1. 용접방법 2. 수평스티프너의 길이	24°	Steel (각형)	실험	<ul style="list-style-type: none"> • 다이아그리드 노드부의 반복하중 저항능력 • 용접방법의 차이는 구조적 성능에 영향을 줌 • 수평스티프너의 길이는 초기강성과 관련 됨
3	HAN Xiaolei 외 2008	중국	축방향 하중	1. 각도(20°, 35°)	20, 35°	CFT	실험 해석	<ul style="list-style-type: none"> • 접합부 설계 값과 활동 축 흡수력의 비는 1.56과 1.61 • 접합부의 재료거동은 짧은 CFST 기둥과 유사함 증명 • CFT재료를 이용한 변수 연구필요
4	Chao Huang 외 2009	중국	압축 하중	1. 노드부의 접합방법 2. 각도(20°, 35°) 3. 하 중 방 법 (symmetric and asymmetric)	20, 35°	CFT	실험 해석	<ul style="list-style-type: none"> • 접합부의 재료거동은 짧은 CFST 기둥과 유사함 증명 • CFT재료를 이용한 변수 연구필요
5	장인화 외 2009	한국	압축 하중	1. 강종(SS400, SM490, SM570) 2. Cap Thickness(40, 50mm) 3. Cap Extend 4. 층하중(0%, -30%)	60°	Steel (강관)	해석 실험	<ul style="list-style-type: none"> • Cyclone Tower 접합부의 구조성능평가 • 고성능강종 사용시 Cost 비교
6	전봉수 외 2008	한국	반복 하중	1. 노드부 형태 (기본형, 웹연결형, 박스연결 +수평플레이트, 박스전이형)	24°	Steel	해석	<ul style="list-style-type: none"> • 강재 SM490 사용 • 대각가새 노드의 횡력에 대한 구조성능평가 • 가새플랜지상부의 횡변위제어하는 해석 연구 • 아바쿠스 프로그램 이용 Shell modeling
7	김영주 외 2009	한국	반복 하중	1. Web, Flange 용접방법 2. 상/하부 스티프너 겹침길이 3. 중간 스티프너의 용접 4. 상/하부 스티프너 용접 5. Flange, Flange 용접방법	24°	Steel (웹전 이형)	실험	<ul style="list-style-type: none"> • 실제 구조물의 설계시 휨파괴에 대한 고려 필요 • 에너지 흡수능력은 용접방법과 겹침길이에 의해 영향을 동시에 받음 • 웹과 스티프너의 겹침길이에 따라 항복 강도차이 뚜렷 • 용접에 의한 영향은 적음
8	주영규 외 2007	한국	2축 압축 하중	1. 연결부의 웹-플랜지 용접방법 2. 웹중첩길이 3. 측면스티프너-플랜지 용접방법	24°	Steel (H형강)	실험	<ul style="list-style-type: none"> • 웹의 중첩길이와 용접방법을 비교 • 웹의 길이가 60% 이상이면 변형, 내력 면에서 차이가 없음. • 국부적인 부분용적 가능
9	김경환 외 2009	한국	축방향 하중	1. 용접방법(완전, 부분용입용접) 2. 웹 중첩길이(0, 60, 100%)	24°	Steel (H형강)	실험	<ul style="list-style-type: none"> • 2축 압축하중 거동평가 외에 2축인장하중과 1축 반복하중에 대한 거동평가 필요
10	김우범 외 2009	한국	압축 하중	1. End Plate 두께 2. 내민길이	60°	Steel (강관)	해석	<ul style="list-style-type: none"> • End Plate에 의한 영향이 큼
11	배재훈 외 2009	한국	반복 하중	1. 접합방법(핀접합, 강접합)	60°	Steel (H형강)	해석	<ul style="list-style-type: none"> • 볼트 조립(4개: 핀접합, 8개:강접합)에 따른 구조성능 비교 • 플레이트 부분의 연결에 대한 고려가 필요
12	이세정 외 2008	한국	반복하중 축방향 하중	1. 평형, X형 스티프너 접합부 2. Cap Plate의 두께 3. extended 길이 4. 스티프너 플레이트 확장	60°	Steel (강관)	해석	<ul style="list-style-type: none"> • 아산배방 싸이클론 타워의 접합부 노드에 대한 유한요소해석 수행 • Cap Plate의 두께 및 Extended 길이에 따른 응력집중현상과 접합부 내력 분석 • Cap Plate두께 대 Extended 길이 비율 1:1.5이상 확보 필요
13	이세정 외 2009	한국		1. Cap Plate의 두께 2. extended 길이	60°	Steel (강관)	실험	<ul style="list-style-type: none"> • 강종 SS400 사용
14	정인용 외 2010	한국	반복하중	1. Web, Flange 용접방법 2. 상/하부 스티프너 겹침길이 3. 중간 스티프너의 용접 4. 상/하부 스티프너 용접 5. Flange, Flange 용접방법	24°	Steel (웹연속형)	해석	<ul style="list-style-type: none"> • 유한요소프로그램을 이용하여 실험값과 비교