

프리폼 구조물을 위한 FREE NODE의 개발과 현장적용

Development and Application of FREE NODE for Free-Form Structures



오진탁*
Oh, Jin-Tak



정광량**
Chung, Kwang-Ryang



김성원***
Kim, Seong-Weon



이우종****
Lee, Woo-Jong



주영규*****
Ju, Young-Kyu

1. 서론

현대 건축은 기능적이고 합리적이지만 획일적인 박스형에서 탈피해 형태와 공간의 다양한 변화를 시도하고 있다. 대공간 구조물에도 이러한 흐름이 강하게 나타나고 있으며 베를린의 DZ-Bank (Frank O. Gehry), 런던의 British Museum (Norman Foster), 밀란의 New Fair (Massimiliano Fuksas), 런던의 Westfield (Buchan Group International / Benoy), 그리고 프랑크푸르트의 My Zeil (Massimiliano Fuksas) 등에서 이를 확인할 수 있다.

기능적이 부분이 강조되어 축력으로만 저항하는 기존의 더블 레이어 시스템의 노드와 달리 싱글 레

이어 시스템의 노드는 축력과 모멘트를 동시에 받아야 하고 기하학적 형상을 유지하여 전체 구조물의 저항 메커니즘의 구성요소로 작용하므로 그 중요성이 더욱 크다. 싱글 레이어 시스템을 이용한 사회적인 요구가 늘어남에 따라 노드에 대한 많은 연구들이 활발히 이루어져있는 국외의 경우 많은 접합부의 노드들이 제안되어 있고 실제 구조물에 적용되어있다.

본 기사에서는 국내에서 개발된 노드를 소개하고 싱글 레이어 구조물에 적용시킨 과정을 설명하고자 한다. 구체적으로 2장에는 개발된 FREE NODE의 구성 및 세부사항, 3장에서는 실험을 통한 구조성능 평가, 4장에서는 실제 적용을 위한 과정에 대해 기술한다.

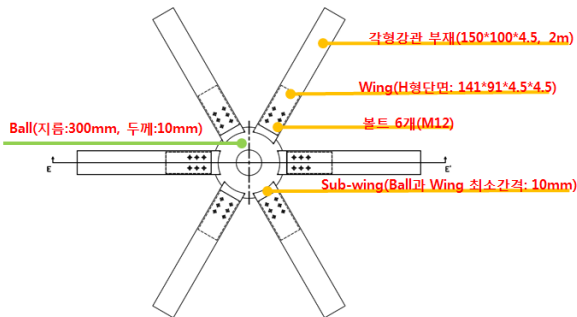
2. FREE NODE

2.1 FREE NODE의 구성

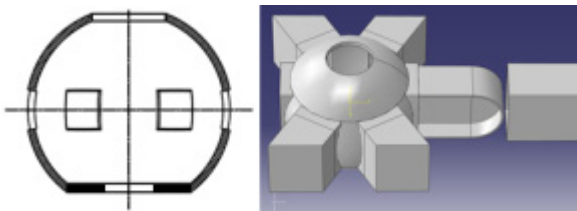
FREE NODE(Flexible, Resilient, Efficient,

* 학생회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 석박사통합과정
** 정회원, 동양구조안전기술 대표, 공학박사
*** 삼영엠텍(주) 기술연구소 소장, 공학박사
**** 신성건설(주) 스틸사업본부 본부장
***** 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수

Economic NODE)의 구성은 <그림 1>과 같다. FREE NODE는 Ball, Sub-Wing, Wing으로 이루어져 있고 각각 공장 용접되며 노드와 노드를 연결하는 각형강관 부재를 <그림 2>와 같은 방법으로 끼워 넣고 수직 방향으로 볼트를 체결한다. Ball은 구를 기본 형상으로 하여 프리폼 구조물에서 발생하는 다양한 수평, 수직, 비틀림 각에 대응할 수 있는 것이 특징이다. Sub-Wing의 Ball과 접합되는 부분은 Ball의 곡률과 동일하고 Wing과 접합되는 부분은 평면으로 되어있어, 해당되는 각도에 따라 위치만 설정하면 Ball의 어느 곳이나 붙일 수 있고 Wing을 연결할 수 있다. Wing과 각형강관은 길이 방향에 수직으로 볼트 체결하며, 필요한 내력에 따라 볼트 숫자를 조절할 수 있는 장점이 있다. 또한 필요에 따라서는 Wing을 생략하고 Sub-Wing에 각형강관을 용접으로 바로 연결할 수도 있다.



<그림 1> FREE NODE 구성

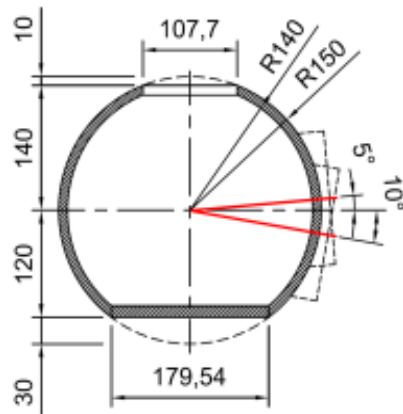


<그림 2> FREE NODE의 형상 및 접합방법

2.2 FREE NODE 세부 사항

노드를 연결하는 부재를 기준으로 노드의 크기를 결정하였다. 부재인 각형강관은 시공성을 고려하여 인부 2명이 들 수 있는 중량 40kg으로 제한하였고

그에 따라 길이 2m의 각형강관 150×80×6을 고려하였지만, 볼트로 접합할 경우 연단거리 확보를 위해 150×100×4.5(SPSR400)을 선택하였다. 또한 노드의 수직각 변화는 중심을 기준으로 최대 15°까지 가능하게 하고, Ball은 형상의 자유로움을 위해 주물 제작하여야 하므로 제작 가능한 최소 두께인 10mm를 넘도록 설계되었다<그림 3>.



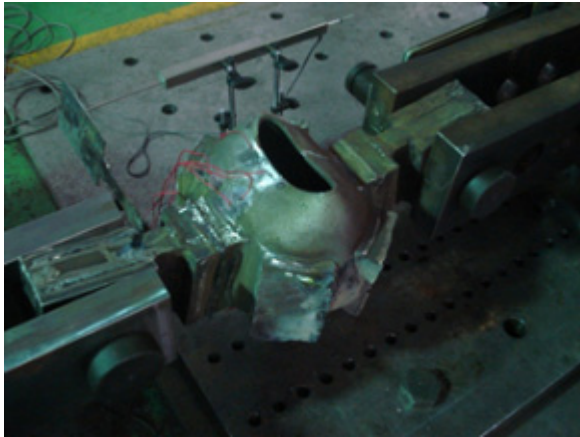
<그림 3> Ball 단면 상세

3. FREE NODE 구조성능 평가

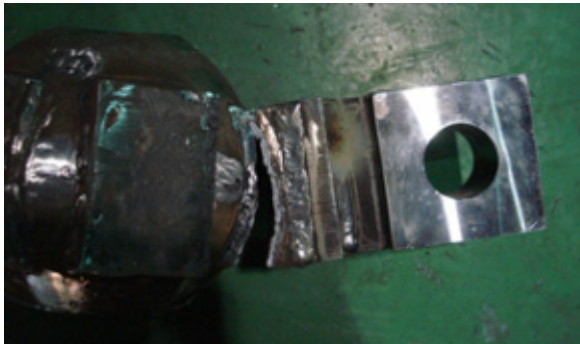
3.1 축력을 받는 FREE NODE 구조성능

Ball의 성능을 파악하기 위해 Wing과 각형강관을 생략하고 Ball에 Sub-Wing만 부착하여 압축 및 인장을 가력 하였다. 설명한 바와 같이 노드는 싱글 레이어 구조물에서 특별히 중요한 부분이므로 개발된 FREE NODE가 각형강관, 즉 노드를 연결하는 부재에 비해 높은 구조 성능을 가져야 한다.

<그림 4>와 <그림 5>에서는 압축 및 인장력을 받을 때 FREE NODE의 파괴 형상을 나타내고 있다. 압축력을 받고 있을 때는 상·하부의 오프닝 부분에 강한 응력이 걸리게 되며 그로인해 상대적으로 약한 부분인 상부의 오프닝에서 좌굴이 일어나며 파괴된다. 인장력을 받을 때는 Ball과 Sub-Wing의 용접한 부근에 응력이 집중되고 그로인해 용접 부위가 찢어지는 것을 관찰할 수 있다.



〈그림 4〉 압축력에 의한 파괴형상



〈그림 5〉 인장력에 의한 파괴형상

〈표 1〉에 Ball의 축력에 의한 항복내력 값과 각형강관의 경우 압축력을 받을 때 좌굴에 의해 항복할 경우 435kN의 항복내력을 가지고, 인장력을 받을 때는 볼트 접합 부분에서 블록쉬어가 일어나 250kN의 항복 내력을 가진다. 실험에 의한 Ball의 압축에 의한 항복 내력은 786kN, 인장에 의한 항복내력은 850kN으로 기준보다 각각 80%, 240% 높은 내력을 가지고 있음을 확인했다.

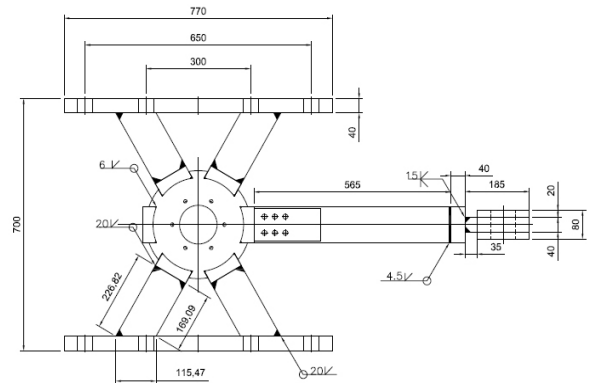
〈표 1〉 압축 및 인장 내력

가력	구 분	항복내력 (kN)
압축	FREE NODE	786
	각형강관	435
인장	FREE NODE	850
	각형강관	250

3.2 모멘트를 받는 FREE NODE 구조성능

FREE NODE를 디자인 할 때 축력뿐만 아니라 모멘트에 대해서도 강한 힘을 받을 수 있는 구의 형상으로 계획을 하였기 때문에 높은 모멘트 성능을 가질 것으로 예상되고, 이러한 성능을 실험을 통해 검증하였다.

실험체 상세는 〈그림 6〉과 같다. 노드의 성능 평가이므로 Ball과 Sub-Wing 6개로 구성하고 아래 위 대칭으로 4개의 Sub-Wing에는 노드가 움직이지 못하도록 잡아줄 플레이트에 강하게 연결하고 하나의 Sub-Wing에만 캔틸레버와 같이 길게 밖으로 빼내어 액추에이터로 가력 할 수 있게 하였다.



〈그림 6〉 모멘트 실험 상세

2m 길이의 각형강관 부재를 사용할 때, 고정하중, 활하중, 적설하중, 풍하중 등의 하중조합을 고려하여 노드 하나에 걸릴 수 있는 모멘트를 산정하면 11,54kN·m이고 실험을 통해 얻은 FREE NODE의 모멘트-회전각의 결과에서 항복모멘트는 55.7kN·m, 최대모멘트는 84.1kN·m로 기준에 비해 380% 이상 높은 것을 확인할 수 있다.

압축, 인장, 모멘트의 구조 성능을 비교해 보았을 때 압축력에 의해 노드의 성능이 좌우되는 것을 알 수 있고, 이는 싱글 레이어 프리폼 구조물이 기하학적인 형상에 의해 거동함을 비추어 고려하였을 때 예상할 수 있는 결과이기도 하다.

4. 현장 적용

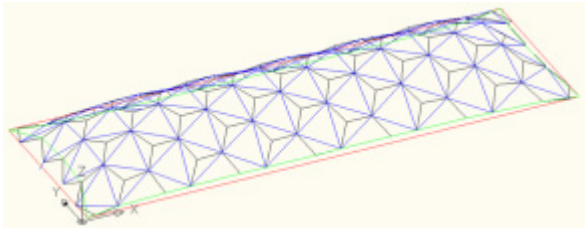
4.1 적용대상

앞에서 소개한 실험을 통해 FREE NODE의 구조 성능을 검증하였고, 충청북도 충주시 동량면 대전리 14-1번지에 위치한 신성건설주식회사의 신기술 적용 및 전시용 건물의 지붕에 FREE NODE를 적용하였다.

4.2 설계과정

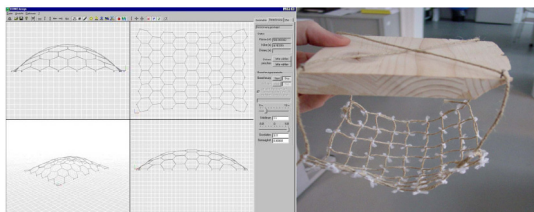
4.2.1 지붕 형상 디자인

삼각형 모양의 셀을 만들기 위하여 「DomeDesign」 프로그램을 이용하여 원하는 형태의 면을 형성하였다. 「DomeDesign」은 삼각형 그리드를 지원하지 않아 육각형의 그리드로 형태를 만들고 육각형의 점들을 연결하여 원하는 삼각형 그리드를 구현 하였다.



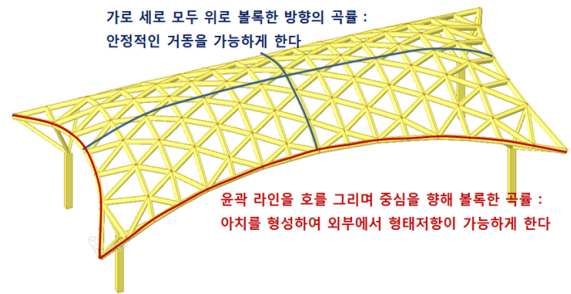
〈그림 7〉 육각형을 이용한 삼각형 그리드 형성

〈그림 7〉은 「DomeDesign」 프로그램을 이용하여 형태를 구현하는 과정을 캡처한 것으로 그 원리는 〈그림 8〉에서 표현되는 것과 같이 고정시키고 싶은 점을 정하고 중력 방향으로 늘어뜨린 것과 같은 방식이다. 최대 늘어뜨려지는 높이를 지정하여 사용자가 원하는 만큼의 곡률을 가질 수 있게 해준다.



〈그림 8〉 DomeDesign 프로그램 및 형태 구현 원리

대상 건물의 가로 세로 길이가 7mX20m로 장변의 중간에 기둥이 없기 때문에 안정적인 거동을 위해서 위로 볼록한 형상을 택하였으며(〈그림 9〉), 네 변에서도 곡률을 가지게 하기위해 건물면적보다 지붕을 크게 하여 안으로 들어가는 형상을 취했다.



〈그림 9〉 형태저항을 위한 2중곡률 형상

4.2.2 구조해석

고정하중 · 활하중 · 풍하중 · 설하중 · 노드가 작용하는 부분의 노드하중들을 하중 조합하여 해석함으로써 가장 불리한 조건에서의 처짐이 어느 지점에서 얼마나 생기는지 파악하였다. 싱글 레이어 구조물에서는 부재의 로컬 좌굴로 구조물의 파괴가 일어나는 것 보다 전체적인 기하학적 거동으로 인한 파괴의 위험도가 더 높으므로 부재의 로컬 좌굴의 체크와 함께 전체적인 처짐과 거동 여부를 체크하는 것이 중요하다.

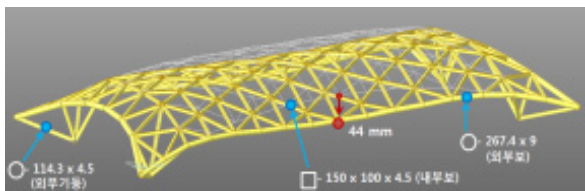
[표 3]에서 적용한 하중조합을 나타내었으며 이중 가장 처짐이 크게 생기는 하중조합은 Case 9의 1.2D+1.6L+0.95Wy1+Sx/2이다. 〈그림 10〉에서 나타내듯이 이때의 처짐은 44mm(장변의 0.22%)로 기둥이 없이 긴 거리를 지지해야하는 외부 보의 중앙 부분에서 발생하였고, 이 결과는 기하학적 형태로 판단할 때 예상이 가능했던 부분이다. 따라서 외부 보는 내부 보에 비해 단면적을 넓혀서 전체적인 구조물 거동을 최소화 시키고자 시도한 것은 좋은 판단이라 사료된다. 각 부재의 사이즈는 [표 2]에 정리하였다.

〈표 2〉 부재 상세

종 류	부 재	재 료
내부보	B 150×100×4.5	SPSR400
외부보	P 267.4×9	
외부기둥	P 114.3×4.5	
※ 외부기둥은 지붕과 건물의 기둥을 연결하는 기둥		

〈표 3〉 하중조합

Case	하 중 조 합
1	1,4D
2	1,2D + 0,5L
3	1,2D + 1,6L + 0,65W _x
4	1,2D + 1,6L + 0,65W _{y1}
5	1,2D + 1,6L + 0,65W _{y2}
6	1,2D + 1,3W _x + 0,5L
7	1,2D + 1,3W _{y1} + 0,5L
8	1,2D + 1,3W _{y2} + 0,5L
9	1,2D + 1,6L + 0,65W _{y1} + S _{x/2}
10	1,2D + 1,6L + 0,65W _{y1} + S _{y/2}
※1	D : 고정하중 L : 활하중 W _x : X 방향으로 작용하는 풍하중 W _{y1} : Y 방향으로 작용하는 풍하중 case1 W _{y2} : Y 방향으로 작용하는 풍하중 case2 S _{x/2} : X 방향의 절반에 작용하는 설하중 S _{y/2} : Y 방향의 절반에 작용하는 설하중
※2	설하중의 경우 활하중을 고려하므로 하중조합에 고려하지 않아도 무방하지만 보수적인 설계를 하기위해 하중조합 Case 1~8 중 가장 많은 처 짐이 생기는 Case 4에 설하중을 추가하였다. 또한 지붕 전체에 하중을 재하하는 것보다 일부분에만 재하되는 경우가 더욱 큰 처짐을 나타낼 것이다.



〈그림 10〉 하중조합 Case9에서의 기하학적처짐

실제 구조물에서 부재와 부재는 노드에 연결되어 접합이 되지만 마이다스와 같은 프로그램에서 절점을 모델링 하여 반영하기 힘들므로 실험으로 구한

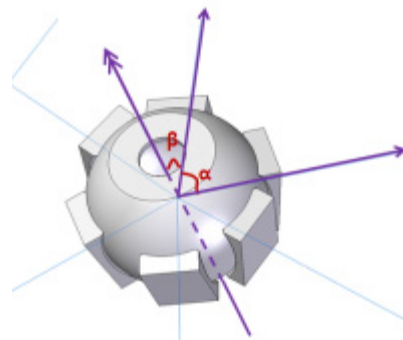
노드의 강성 값을 노드가 있어야 할 부분을 다른 부재로 대체해 맞추었다. 실제 구조물에 적용되는 볼트 6개로 접합한 실험체의 모멘트-회전각 그래프를 그려서 초기강성을 구하고, 초기강성과 비슷한 성능 효과를 낼 수 있는 B-80x40x3.2 부재를 선택하여 노드가 들어가야 할 부분을 대신하여 해석하였다.

또한 설계하중의 가장 불리한 하중 조합을 받고 있을 때 구조물의 부재들에 발생하는 응력을 체크하여 부재의 로컬 좌굴에 대한 위험도를 파악하였다. 내부보 중에서 가장 높은 응력을 받는 부재는 허용 응력에 비해 46%, 외부보의 가장 높은 응력을 받는 부재는 허용 응력에 비해 50.9%로 예상치 못한 추가적인 하중에 대해서도 안전할 수 있도록 보수적인 안전율을 가지도록 하였다.

4.2.3 3차원 각도 산정

노드의 위치 좌표는 전체적인 형상을 구현하면서 그리드를 연결하여 결정이 된다. 노드들의 위치 관계에 따라 노드마다 각기 다른 각도를 가지게 되므로 제작단계에서 공장 자동화 공정을 거쳐 조립하기 위해서는 정확한 각도의 데이터를 설계과정에서 구해야 한다.

지붕 정중앙의 일부분을 제외하고는 노드들이 기울어져 있기 때문에 단순히 수평 수직각을 도면상에서 측정할 수 없고 비틀림까지 고려해야 하므로 노드의 벡터를 이용하여 수평·수직·비틀림 각을 결정하였다. 〈그림 11〉에서 살펴볼 수 있듯이 노드의



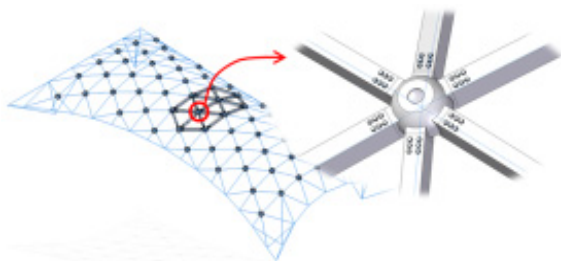
〈그림 11〉 벡터를 이용한 Sub-Wing 각도 계산



〈그림 12〉 벡터를 이용한 Sub-Wing 수평 수직 비틀림각 계산

상부 구멍으로 나가는 기준벡터와 Ball의 중심에서 인접 노드의 중심으로 나가는 벡터와의 관계에서 수평·수직각을 결정할 수 있고, 인접 노드와의 기준벡터가 가지는 각을 측정하면 비틀림각을 구할 수 있다.

각각의 노드에 대해 Sub-Wing의 각도를 일일이 직접 계산하는 것은 비효율적이다. 그러므로 초기 데이터인 노드의 절대 좌표값만 입력을 하면 주변 노드의 좌표값을 이용하여 노드 Ball에 Sub-wing이 어떤 각도로 붙어야 하는지 간편하고 한눈에 알 수 있도록 엑셀 시트를 작성하였다. 〈그림 12〉에서 노드위치 입력 부분에 노드의 글로벌 X, Y, Z 좌표만 입력을 하면 여러 단계의 계산을 거쳐 노드마다 6개의 수평·수직·비틀림 각도를 표시한다. 이렇게 구해진 각도는 〈그림 13〉과 같이 Solid Edge 프로그램을 통해 직접 조립해 보아서 지붕의 선과 각도에 따라 부착한 Sub-wing의 위치가 일치하는지 확인하였다.



〈그림 13〉 BIM 기반의 3D 모델링

4.3 현장설치

3D 모델링을 통해 검증된 도면을 바탕으로 Ball과

Sub-Wing을 계산된 각도대로 공장 용접하여 현장으로 배송되고, 현장에서는 노드를 해당 좌표에 위치시켜 각형강관을 연결하였다. 이때 작업의 편의성을 위해 노드의 6개 부재중에서 4개는 볼트접합으로 2개는 용접으로 연결하였다(〈그림 16〉). 지붕은 〈그림 14〉와 같이 설치 현장 옆의 신성건설 공장에서 조립되어 현장으로 옮겼다.

지붕을 모듈화하여 조립 및 설치하는 방안에 대해 많은 토의가 있었다. 해당 지붕 건축물은 7mX20m의 비교적 작은 구조물임을 감안해 공장에서 하나의



〈그림 14〉 공장 조립중인 FREE NODE 지붕



〈그림 15〉 설치 완료된 FREE NODE 지붕



〈그림 16〉 설치 완료된 FREE NODE 디테일

모듈로 조립하고 현장에서 설치하는 방법을 채택하였다(〈그림 15〉).

5. 결 언

본 기사에서는 싱글 레이어 프리폼 구조물에 적용되는 FREE NODE에 대한 구조 성능을 검토하여 실제 적용되는 과정을 살펴보았다.

노드 형상을 결정하기 위해 다양한 노드들을 FEM 해석을 통해 변수 스테디하여 새로운 FREE NODE를 개발하였다. 싱글 레이어 프리폼 구조에서 노드는 축력과 모멘트를 동시에 받아야하고, 기하학적 형상을 결정하는 중요한 요소이다. 따라서 노드와 노드를 연결하는 부재의 성능보다 우수해야하므로 실험을 통해 개발된 노드의 성능을 검증하였다.

검증된 FREE NODE를 설계하고, 3D 모델링을 통해 검토하여 공장 제작 및 현장 조립으로 건물에 설치하였다.

국내에서 아직까지 생소한, 싱글 레이어 프리폼 구조물을 모듈화 할 수 있는 노드를 개발하고 이를 직접 적용시키는 경험을 통해 설계, 제작, 설치에 노하우를 축적하였다. 또한 FREE NODE는 비싼 로열티를 지불해야하는 국외의 제품을 대체할 수 있는 국내 기술 개발의 초석으로써 큰 의미를 가진다 하겠다.

참고문헌

1. Jintak Oh(2012), Cast iron joint for single layer space structure subjected to axial loadings, Proceedings of the AMPT 2012, Wollongong, Australia
2. 이경주 외 4인 (2012), 단층 프리폼 대공간 구조물의 노드에 대한 축하중 구조성능 평가, 한국강구조학회 논문집 제24권 1호(통권116호), 59-71
3. Jintak Oh(2011), Axial load capacities of structural node for single layer free form structures, Proceedings of the ISSS 2011, Seoul, Korea
4. Kyung-Ju Hwang(2011), Bending Tests on an Advanced Spherical Node System in the Steel Free Form Spatial Structure, Proceedings of the ISSS 2011, Seoul, Korea
5. 오진탁 외 4인(2011), 단층 프리폼 구조의 노드 개발을 위한 유한요소해석, 한국공간구조학회지, v.12 n.3(통권45호)
6. 주영규 외 3인(2010), 프리폼 구조의 노드 기술 현황 분석, 한국공간구조학회지, v.10 n.3(통권41호)
7. Kyung-Ju Hwang(2010), Advanced Investigations of Grid Spatial Structures Considering Various Connection Systems, Doctoral dissertation, University of Stuttgart
8. Hwang, K.J.(2009), Influence of various types node connectors on the buckling loads of grid shells, Proceedings of the IASS Symposium 2009, Valencia
9. Jaime SANCHEZ-ALVAREZ(2009), Practical aspects determining the modelling of the space structure for the free-form envelope enclosing Baku's Heydar Aliyev Cultural Centre, Proceedings of the IASS Symposium 2009, Valencia
10. 한국강구조학회(2009), KBC2009 강구조설계, 구미서관
11. Soeren STEPHAN et al(2004), Reticulated Structures on Freeform Surfaces, Proceedings of the IASS Symposium, France 20 Sep 2004 - 24 Sep 2004