

프리폼 구조물을 위한 접합 시스템

Connection system for Free-form structures



오진탁*
Oh, Jin-Tak



황경주**
Hwang, Kyung-Ju



주영규***
Ju, Young-Kyu

1. 서론

과거 수십년간, 대공간 구조물은 건축 분야에서 눈에 띄는 발전을 했다. 특히 대공간 구조물에서 싱글 레이어 시스템은 기존의 더블 레이어 시스템에 비해 가볍고 투명하여 미적인 측면뿐만 아니라 재료를 줄일 수 있는 경제적인 이점까지 있어서 더욱 선호되고 발전 가능성이 높다. 최근 이러한 경향을 반영하여 프리폼 대공간 구조물이나 복잡하고 다양한 형상이 건축분야에서 많이 이용되고 있다. 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) 등이 이를 잘 나타내는 예이다.

하중을 축력으로만 받는 더블 레이어 시스템과는

달리 싱글 레이어 시스템은 축력 뿐만 아니라 모멘트도 함께 받아야 하기 때문에 접합부의 성능이 더욱 중요해지며 이를 위해 기하학적인 최적의 형상을 정하는 것과 적절한 노드의 강성을 구현해야 한다. 이를 위해 국외에서는 많은 연구들이 이루어져 각 시스템별로 접합부의 노드들이 제안되어 있다. 국내에서는 최근에 싱글레이어 시스템에 대한 연구가 진행되고 있다.

본 기사에서는 대공간 구조물에 적용되고 있는 노드의 발전 과정과 현황에 대해 알아보고, 국내에서 개발되고 있는 노드를 소개하고자 한다. 구체적으로 2장에서는 더블레이어 구조에 사용되는 접합부 시스템, 3장에서는 싱글레이어 구조에 사용되는 접합부 시스템에 대해 설명한다.

* 학생회원, 고려대학교 건축사회환경공학과 석박사통합과정

** 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 BK21연구교수

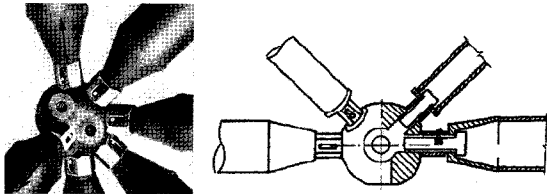
*** 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수

2. 더블 레이어 구조에 사용된 접합 시스템

2.1 메로시스템(Mero system)

1942년에 Mengerlinghausen 박사가 고안한 메로 시스템은 산업용 건물과 교회, 돔에 널리 사용된다. 강관 부재들이 <그림 1>에서처럼 육각 슬리브와 고정 핀에 의해 고정된다.

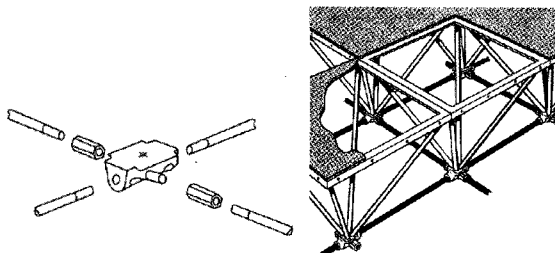
제조 단계에서 필요에 따라 노드의 지름을 46.5mm에서 350mm까지 조절할 수 있으며 이에 따라 볼트의 크기도 조절되며 최대 1,413KN을 견딜 수 있다. 이러한 메로 시스템은 모든 힘을 한 점으로 모을 수 있어서 편심 하중이 작용하지 않아 축력만으로 하중을 견딜 수 있는 것이 특징이다.



<그림 1> 메로 시스템 사례 (Borrego 1968, Lan 1999)

2.2 입체 텍크시스템(Space Deck system)

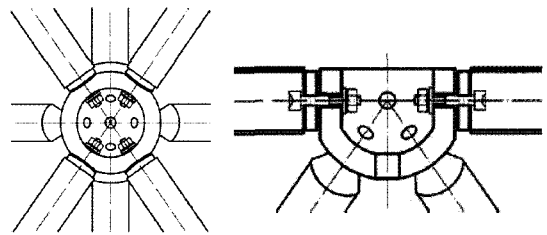
약 40년 전 영국에서 소개된 이 입체 텍크 시스템(Space deck system)은 공업 시설물을 위한 공간 프레임 등에 광범위하게 사용되었다. 기본 유닛은 상부의 트레이에 네 개의 대각 가새들이 결합하는 형식으로 피라미드 형태를 뒤집어 놓은 형상으로 이루어지고, 각 유닛들은 상부에서 볼트로 연결되고 하부에서는 높은 인장력을 가지는 강재의 타이 바(tie bar)로 연결되었다 <그림2>.



<그림 2> 입체 텍크시스템 상세 및 개념도 (Borrego 1968)

2.3 Bowl 노드 (NK형)

Bowl 노드<그림 3>에서 보여지고 있듯이 반구형의 노드가 상부의 현(chord) 부재와 대각 구조 부재(truss)들과 일반적으로 하나의 볼트로 연결되어 있다. 상부 현 부재는 사각형 단면을 가지고 노드면에 끼워짐으로써 전단력을 받는다. Bowl node는 곡면에서 더블 레이어를 사용하고자 할 때 이용된다. 이 시스템은 영국의 Eden 프로젝트에 사용되었다. <그림 4, 5>



<그림 3> Bowl 노드 상세 (NK형) (Lan 1999)



<그림 4> Eden 프로젝트에 적용된 Bowl노드 상세 (Knebel 외, 2001)

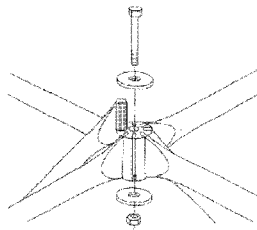


<그림 5> 영국 Eden프로젝트 (Knebel 외, 2011)

2.4 Triodetic 시스템

Triodetic 접합 시스템은 캐나다 회사인 S. Fentiman에서 개발하였다. 이 시스템은 톱니 모양을 가지는 압축 성형된 알루미늄 노드 연결 허브로 이루어져 있고, <그림 6>에서 보여지듯이 각 부재의 끝이 허브에 들어갈 수 있도록 제작되었다.

최대 힘을 받기 위해 튜브 단면에 닿는 부분을 늘리고, 톱니 모양의 연결부위는 노드의 미끄러짐을 방지하며 동시에 축력 전달의 손실을 줄인다.

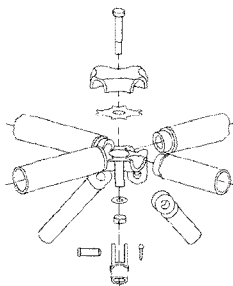


<그림 6> Triodetic 시스템 상세 (Makowski 2002, Borrego 1968)

2.5 NODUS 시스템

1972년 영국철강협회 강관위원회가 소개한 NODUS 시스템은 접합부의 중심에 다른 부분을 감쌀 수 있는 두 개로 나누어진 부분이 있고 이는 고력 볼트에 의해 접합된다.

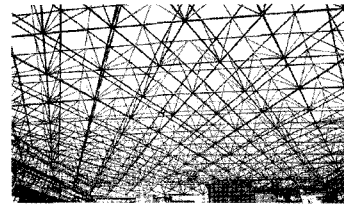
4개의 구멍이 뚫린 러그에 대각 부재들이 45°로 연결되어 있고 수평 방향의 부재들은 접합부의 홈에 연결하여 맞댐 용접한다. 대각부재의 끝은 두 갈래로 나누어져 중앙의 러그와 핀으로 연결한다. <그림 7>



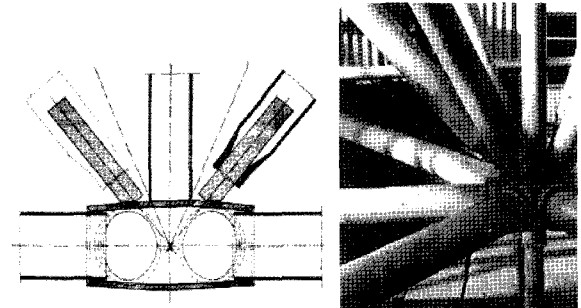
<그림 7> Nodus 시스템 상세 (Makowski 2002)

2.6 SDC 시스템

SDC 노드 접합 시스템은 프랑스 디자이너 M. S. du Chateau에 의해 개발되었다 <그림 8, 9>. 노드는 용접하여 여섯 개의 구멍이 생기는 주조된 셀로 구성되어 있고 <그림 9>에서 확인할 수 있듯이 총 13개의 연결구멍이 생긴다. 원형의 부재를 밀어 넣어서 연결하고 이에 따라 일정한 각도를 조절할 수 있으므로 구조물의 전체적인 형상이 완만한 각을 가질 수 있도록 해준다.



<그림 8> SDC 시스템 입체 구조 (Borrego 1968)



<그림 9> SDC 시스템 접합상세 (Borrego 1968)

3. 싱글 레이어 구조에 사용된 접합 시스템

입체적인 형상인 더블 레이어 구조와는 달리 싱글 레이어 구조는 셀과 같이 하나의 면으로 이루어져 있다.

축력만 고려하는 더블 레이어 구조와는 달리 축력과 동시에 모멘트도 고려해야 하는 싱글 레이어 구조물은 그 형상의 자유로움이나 미적인 측면에서는

우수하지만 노드가 구조적으로 더욱 취약해지므로 이 부분에 대한 많은 연구와 보강이 외국에서 이루어져 왔다.

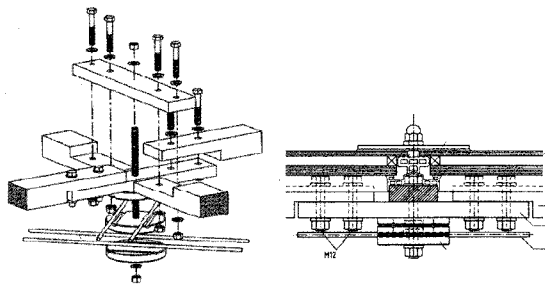
싱글레이어 구조에 사용되는 접합시스템은 크게 겹침 연결형(Splice node connection type)과 단부면 연결형(End-face node connection type)으로 분류할 수 있다.

3.1 겹침 연결형 (Splice node connection type)

겹침 연결형(Splice node connection type)의 가장 큰 특징은 축력을 볼트나 다른 연결부의 전단력으로 전달하고 저항하는 것이다.

1) SBP-1

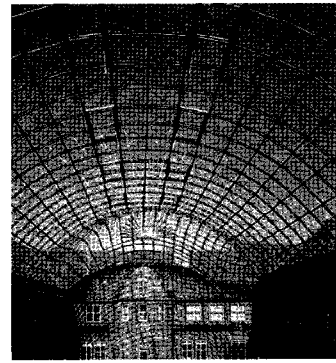
〈그림 10〉에서 볼 수 있듯이 중앙의 볼트로 수평 각을 조절하고 상부와 하부의 분리된 플레이트는 2개 이상의 볼트로 연결되어 전단력을 받는다.



〈그림 10〉 Detail of SBP-1

수평 방향으로는 각도를 조절하기 용이하지만 수직 방향으로는 조립되는 판을 접어서 나타내어야 하며 비틀림각 등을 구현하기는 어렵다. 〈그림 10〉에서 볼 수 있는 바와 같이 부재와 겹침부(splice) 사이의 전단면이 단지 1면으로 구성되어 있어 모멘트에 대한 접합부의 강성은 비교적 낮다.

대표적으로 독일 함부르크의 City History Museum에 사용되었다. 〈그림 11〉

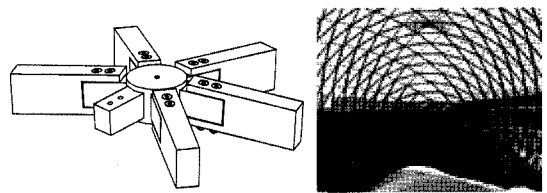


〈그림 11〉 City History Museum

2) SBP-3

〈그림 12〉는 독일 Schlaich Bergermann사에서 1998년 베를린의 DZ-Bank 중정에 자유형상으로 된 유리지붕의 접합시스템에 적용하기 위해서 만든 SBP-3 시스템의 노드이다. 노드에 6개의 수평 finger splice plate가 있어서 포크(fork) 모양으로 가공된 부재의 끝부분과 볼트로 연결하여 전단면이 2개가 되도록 설계하였다.

finger splice plate를 접합부에 어떻게 결합하느냐에 따라 수평, 수직, 비틀림 각도를 조절할 수 있다.



〈그림 12〉 SBP-3 상세 및 DZ-Bank 적용 사례

3.2 단부면 연결형 (End-face node connection type)

단부면 연결형(End-face node connection type)의 가장 큰 특징은 노드와 연결되는 부재의 끝부분이 길이 방향 축으로 맞대어 있어서 그 부분을 볼트 접합하거나 용접하는 것이다.

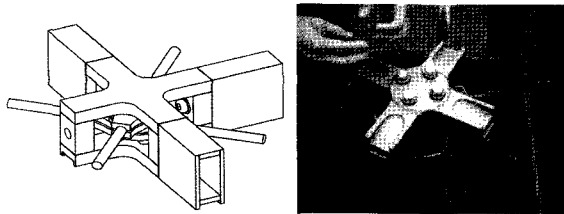
1) SBP-4

SBP-4는 독일 베를린의 Schlueterhor 역사박물관 중정 지붕에 사용하기 위해 Schlaich Bergermann사에서 2002년 개발하였다. <그림 13>

2개의 십자 모양의 플레이트가 아래 위로 있고 각 4개의 튀어나온 부분에 판을 용접시켜 공간을 두었다. 구조용 보 부재가 노드의 끝부분에 와서 맞댐 용접을 하며 일시적으로 볼트를 이용해서 연결할 수 있다.

구조적으로 더 큰 기능을 하기 위해 2개의 케이블이 십자 모양 플레이트 사이 공간에 교차하여 들어간다.

수평각은 십자 모양 플레이트의 기하학적인 형상을 조절하고, 수직각은 부재와 맞닿는 부분을 깎아서 조절한다. 하지만 비틀림 각은 나타내는데 제한이 있다. 단면의 높이비가 크므로 큰 모멘트에 저항할 수 있다.

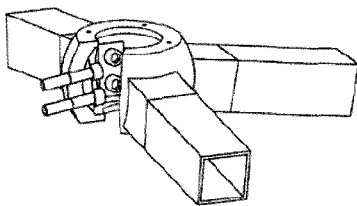


<그림 13> SBP-4 상세

2) OCTA-1

OCTA-1은 구멍이 있는 구 모양의 중앙 노드에 구조용 보 부재가 볼트로 연결되어 있다. <그림 14>

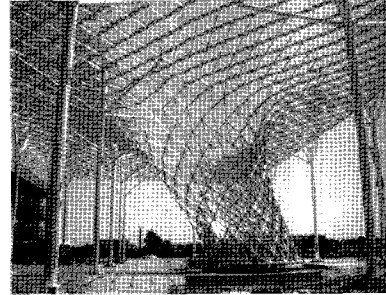
각각의 부재는 볼트 2개로 연결되어 있으며 구 안에서 부재 방향으로 일방향 볼트 접합 하도록 되어 있다. 2개의 볼트 구멍을 조절함으로써 수평, 수직, 비틀림 각을 조절할 수 있다.



<그림 14> OCTA-1 상세

3) MERO-4

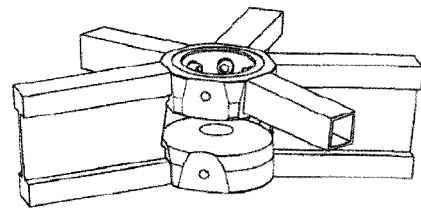
MERO-4는 이탈리아 밀란의 New Fair 서비스센터<그림 15>와 Center Axis의 자유로운 형상 지붕에 사용하기 위해 MERO사에서 개발하였다.



<그림 15> New Fair(밀란)의 프리폼 형상

기본적으로 중앙에 2개의 접시 모양 노드가 있고 여기 I 모양의 부재가 상하로 하나의 볼트에 의해 연결되어 있다. 기하학적으로 사전에 어떻게 조립하느냐에 따라 수직, 수평, 비틀림각을 조절할 수 있고 단면 상하비가 높아서 큰 모멘트에 저항할 수 있다.

<그림 16>



<그림 16> MERO-4 상세

4. 국내의 싱글레이어 노드의 개발

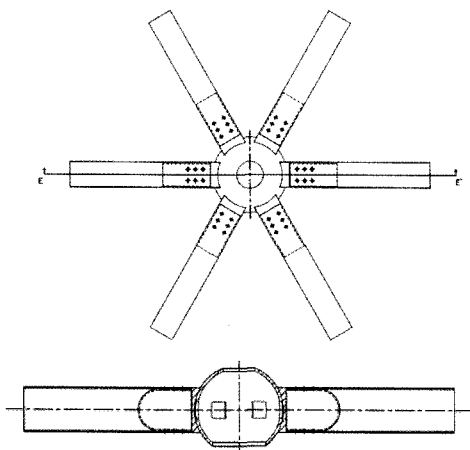
전술한 바와 같이 접합 노드 시스템들은 모두 해외에서 개발되고 사용된 것들로서 국내에서는 개발 사례가 없으며, 따라서 많은 설계비용과 로열티를 해외 업체에 지불하고 사용하고 있는 것이 현재의 실정이다. 따라서 국내 기술로 접합 노드를 개발하는 것이 반드시 필요하다.

따라서 본 저지는 새로운 형태의 노드를 개발함에 있어서 수평, 수직, 비틀림 각을 자유롭게 표현하고 축력과 모멘트에 강한 저항력을 가지는 형상을 나타내기 위해 <그림 17>과 같은 노드를 제안하였다.



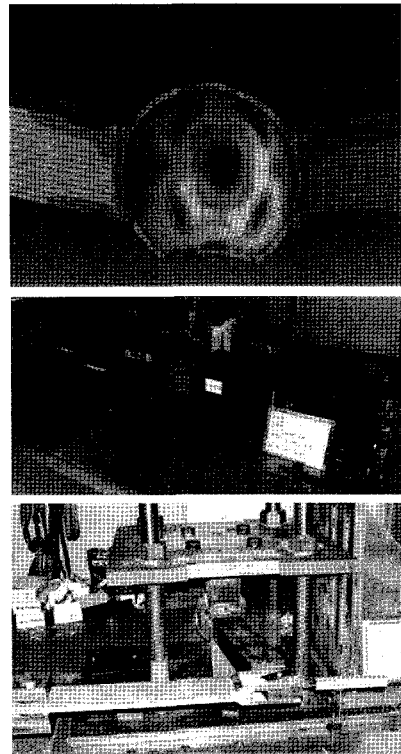
<그림 17> 제안된 새로운 접합 노드

제안된 노드는 가운데의 구 형상으로 수직, 수평, 비틀림 각에 자유롭게 부재와 결합하는 6개의 Wing 부분에 볼트 접합 할 수 있도록 설계함으로써 현장에서의 시공성 역시 고려하였다. <그림 18>

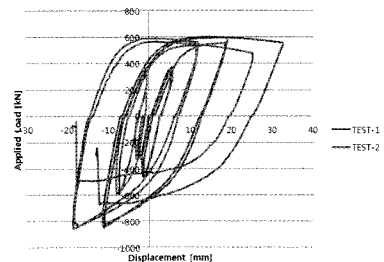


<그림 18> 제안된 새로운 접합 노드 상세

제안된 노드의 성능 평가를 위해 FE해석과 실험을 수행하였고(<그림 19>), FE해석에서 구한 항복강도는 인장력, 압축력 각각 548KN, 458KN이고, 실험에서 구한 항복강도는 각각 501KN, 399KN이다. <그림 20>



<그림 19> 제안된 새로운 접합 노드의 해석과 실험



<그림 20> 제안된 새로운 접합 노드의 인장·압축 실험 그래프

5. 결 언

건축 분야의 자유로운 형상 표현을 위한 디자인 의도들로 인해 앞으로 더욱 많은 프리폼 구조물들이 등장할 전망이다. 해외의 기술력에 전적으로 의존하고 있는 현 상황을 탈피하기 위한 노력으로 자체 기술로 Node Prototype을 성능평가하였고, 인장력 501KN, 압축력 399KN의 결과를 실험을 통해 얻었다. 더 많은 연구와 노력으로 국내 뿐만 아니라 국외

에서도 대공간 프리폼 구조물에 국내에서 개발된 획기적인 노드 시스템이 사용되는 것을 기대한다.

- 참고문헌 -

1. Soeren STEPHAN et al(2004), Reticulated Structures on Freeform Surfaces, Proceedings of the IASS Symposium, France 20 Sep 2004 – 24 Sep 2004
2. Kyung-Ju Hwang(2010), Advanced Investigations of Grid Spatial Structures Considering Various Connection Systems, Doctoral dissertation, University of Stuttgart
3. Lan, T.,T.(1999), Space Frame Structures, CRC Press LLC
4. Heinle, E. and Schlaich, J., Kuppeln(1996), Deutsche Verlags Anstalt GmbH
5. 주영규, 오진탁, 이경주, 한경수(2010), 프리폼 구조의 노드 기술 현황 분석, 한국공간구조학회지, v.10 n.3(통권 41호)