

박진호
 인하대학교 건축공학과 교수
 by Park, Jin-ho

곡면 격자 형태의 교차식 지붕구조 : 이론적 고찰과 디자인 실험(下)

Reciprocal Framing Roof Structures: Theory and Design Applications

PART 2 : 디자인 적용(Application): 디자인 스튜디오를 통한 교차식 구조의 다양한 파라메트릭(Parametric) 디자인 실험

곡면 격자 형태의 교차식 구조에서 바람개비 형태 지붕구조에 관한 일련의 이론이나 형태에 관한 연구는 현재, 중간 기둥이 없는 대공간 구조나 파빌리언(pavilion)과 같은 소규모 가설 건축물, 목재지붕구조를 가진 파고라(pergola) 등의 여러 부분에 걸쳐 진행되고 있다. 특히, 파고라(pergola)는 아파트 단지, 공원 등에서 다양하게 이용되고 있으며 현재 그것의 원리나 기술, 재료 그리고 건설 과정 등이 이슈화 되어 활발하게 연구되고 있다. 이와 같은 움직임은 교차식 구조 디자인이 단지 건축물의 일부으로써가 아닌 하나의 주요 디자인영역으로 자리 잡고 있음을 보여준다.

이번 글에서 다루어 질 곡면 격자 형태의 교차식 구조의 디자인 실험에는 하와이 대학교의 건축과 학생들과 인하대학교의 건축과 학생들이 참여하였다. 이 프로젝트는 4주간의 설계 수업 시간을 통하여 진행되었으며, 디자인 작업과정과 모델 실험 등이 순차적으로 이루어 졌다. 본격적인 디자인에 앞서서 우선 학생들에게 곡면 격자 형태의 교차식 구조의 형태인 바람개비 형태의 원리를 간단히 설명하는 시간을 두었다. 여기서는 가급적 기존 사례들을 학생들에게 보여 주는 것을 삼가했다. 이는 학생들이 사례로 본 기존 작품이 잠재의식 속에서 남아, 그러한 디자인을 모방하려는 경향을 경계하기 위함이고, 또한 결과물을 미리 경험함으로써 프로젝트를 기획하고, 아이디어를 스케치하여 디자인을 만들어 가는 과정이 제공할 수 있는 흥미를 잃어버리지 않을까 하는 우려 때문이었다. 물론

기존 작품들을 보면서 미적 질서를 발견하고 조형 의장을 배우는 것도 교육적일 수 있지만 이 프로젝트에서는 기본 디자인원리에 근거해 짧은 시간 동안 학생들의 순수 창작적인 면을 보려는 의도가 있었기 때문에 그러한 측면은 배제시켰다.

두 대학의 스튜디오에서는 전통적인 맞춤에 관한 방식이나 끈은 서까래 그리고 도리의 배열과 같은 사례를 답습하기 보다는 간단한 형태의 부재와 홈 디자인, 그리고 그것들의 결합에 관한 새로운 실험들이 주로 시도되었다. 이러한 구조적인 실험을 위해 학생들은 토론과 연구를 하면서 구조적인 원리를 습득했으며 토론에서 거론되었던 기본 디자인 이외에 다양한 형태의 파라메트릭(Parametric) 디자인 결과물들을 이끌어 내었다.

프로젝트의 참가자 대부분이 건축학과 2학년 학생들이었기 때문에 디자인과정에서 학생들에게 기본적으로 습득시켜야 있어야 하는 여러 사항들이 있었다. 구조물을 구성하기 위한 여러 가지 필요조건들 중 구조재료에 대한 특성파악, 구조물의 자중 및 힘의 전달 방향, 수직하중에 대한 지지능력과 처짐 등에 관한 사항은 그 원리에 대한 기본적인 이해가 필수적인 것이어서 구조전문가를 초청해 이에 대한 특강 시간을 마련하기도 했다. 물론 구조의 이해에 대한 부분은 학생들에게 주어진 시간과 경험의 부족으로 한계를 가질 수밖에 없는 상황이었다. 하지만 구조물의 형상에 대한 기본적인 구조계획 및 개념적 설계단계에서 학생들은 구조재료의 특성과 구조프레임에 관한 자신들의 선형적인 직관에 근거하여 작업을 진행해 나갔고, 여러 시행착오를 거쳐 곡면 격자 형태의 교차식 구조를 디자인하기 시작하였다. 또한 지붕형태에 대한 조형미 및 적합성을 스튜디오 토론과정을 거치며 완성해 나갔다.

이 스튜디오 작업을 통해, 선형 목재부재의 기하학적인 결구 방식을 이용한 2차원적인 면과 3차원적 구조 형태를 이끌어내는 공간 구성방식을 공부하면서 학생들은 체계적인 이론과 방법들을 습득하고, 여러 구조에 대한 실험을 바탕으로 다양한 형태적 가능성들까지도 찾아내는 일련의 과정을 경험하게 되었다. 이는 학생들로 하여금 형태의 추출과 그 형태를 이루는 체계 그리고 개념적인 공간의 생성과정들이 서로 연관되어 있음을 자연스럽게 인지할 수 있는 기회였으리라 생각한다. 또한 학생들은 다양한 형태의 홈을 가진 부재의 사용과 그 결구 방식들을 통해 역동적인 디자인의 가능성을 실험하게 되고, 여러 재료 및 조인트 디테일이 합쳐져서 얼마나 다양한 구조가 형성되는지를 경험할 수 있는 기회이기도 했다.

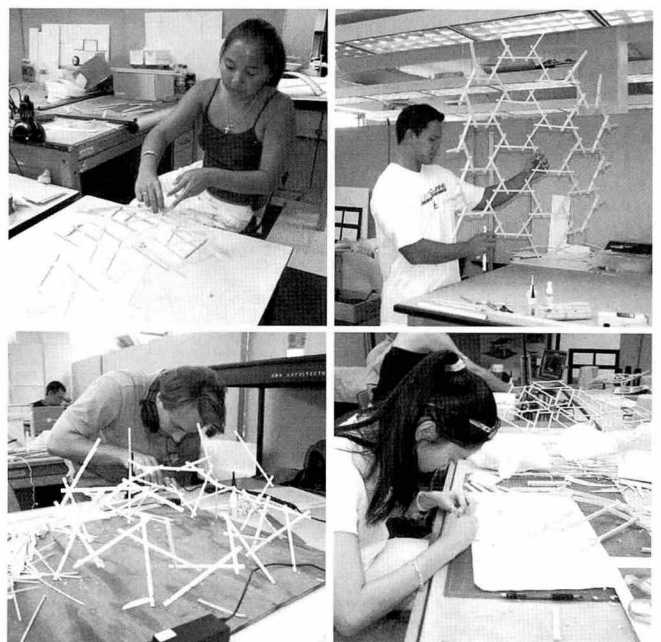


(그림 1) 목공소에서 기본 부재를 만드는 학생들의 작업모습

학생들은 구조의 전체적인 형태를 완성시키기 전에 단위부재들을 끼워 맞춰보고, 홈의 디자인을 생각하며 만들어 부재들을 다양하게 조합해 보면서 떠오르는 형태를 만들어 보는 경험적인 과정을 통해 학생들은 자신의 심미안에 맞는 디자인을 선택하게 된다.

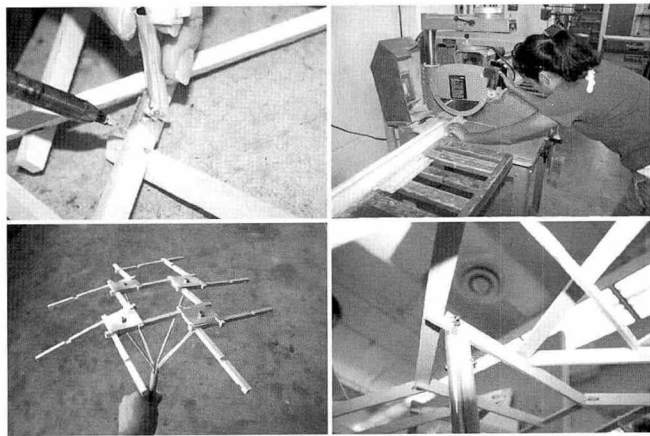
이 과정을 시작하기 전에 학생들은 기본적인 부재의 두께와 길이, 그리고 굽기를 정하거나, 작업과정 중에 최적의 기본부재 및 단위구조를 찾는 방법을 택하게 된다. 기본 단위 구조를 이루기 위해서는 적어도 세 개 이상의 단위부재가 필요한데 여기서 삼각형이나 사각형 형태의 막대나 원형 장대와 같은 부재의 형태를 적절히 선택해야 한다. 따라서 학생들은 스튜디오의 과정 동안에 자신들의 취향에 맞는 결구의 형태를 만들고, 조인트에 적합한 홈의 형태를 시스템을 개발하여 직접 목재를 조직해 보면서 그 시스템들을 발전시켜 나갔다. 이렇게 기본적인 부재와 기하학적인 패턴들을 발전시키고 난 후, 그 다음 단계로 파여질 위치나, 깊이 등을 고려하여 홈을 정확히 만들게 된다. 그리고 나서 학생들은 홈이 파여진 부재들을 맞춰 보기 시작하게 되는데 이때 3차원적 구조를 만들기 전, 삼차원적인 곡면을 형성하기 위해 필요한 2차원적인 평면 패턴과 단위 부재의 바람개비 형태 결구에 따른 다양한 뒤틀림이 만들어지는 방법들도 경험하게 된다.

디자인 실험을 위한 지붕구조 재료로는 베스우드(basswood) 막대 그리고 기둥은 베스우드 장대와 알루미늄 장대가 사용 되었는데, 이를 이용하여 모델을 만들면서 지붕과 기둥에 쓰일 여러 형태의 홈과 조인트들에 대한 테스트가 병행되었다. 최종적인 결과물을 만들기 전까지, 학생들은 그들이 원하는 조합과 곡면을 발견하기 위해 가능한 모든 기하학적인 조합들을 실험해 보게 된다. 지붕의 패턴과 디자인에 따라 부재를 크기를 늘리거나 줄이고, 부재의 홈을 파고 자르고 깎는 일과 지붕과 기둥을 이루는 단위 부재들을 결합, 분해하는 과정이 수 차례 반복 되었다. 게다가 이러한 디자인을 실험 중, 금속판을 이용하거나 볼트나 너트를 이용하여 지붕구조를 서로 연결시켜



(그림 2) 여러 실험과정 후 디자인을 결정하는 단계의 모델 작업과정

보기도 했다. 비록 구조 자체가 못이나 볼트와 같이 고정 시켜주는 도구들 없이도 가능한 것이었지만, 안전 및 미관상의 이유로 볼트(bolt)와 너트(nut)등의 보조재가 사용되기도 했다.



(그림 3) 두께가 얇은 목재와 용접한 알루미늄 기둥을 이용하여 실험한 지붕 구조물. 실험 과정에서 강철 판과 볼트(bolt) 그리고 너트(nut)를 테스트하여 보았다.

최종 디자인을 만드는 과정에, 대부분의 학생들이 목재, 특히 베스우드(basswood)를 기본적인 재료로 사용하였지만, 몇몇 학생들은 얇은 합판이나 판상 형 목재를 직접 선반에서 켜 사용하기도 했다. 직선 부재를 사용하라는 조건을 깨는 경우도 있었는데 CNC milling machine을 이용하여 기본 단위부재를 만들거나 곡선형 틀을 만들어 여러 겹의 얇은 판 부재를 결 방향이 평행하게 접착시켜 부재를 만드는 학생도 있었다(그림 4). 직선형부재보다는 곡선형을 선호하는 학생들의 경우 일단 그들의 선호를 예외적으로 인정해 주었다.



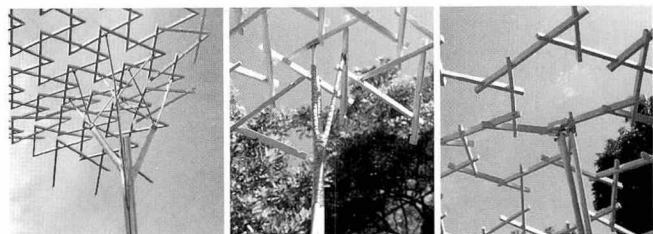
(그림 4) CNC milling machine을 이용하여 기본 단위부재를 만드는 모습과 여러 겹의 얇은 판 부재를 결 방향이 평행하게 접착시켜 부재를 만드는 모습

매 실험 때 마다, 학생들은 마음에 드는 결과물이 나올 때까지 기하학적 패턴에 맞춰 기본적인 조인트들을 합치고 분해하는 작업을 수없이 반복해 나갔다. 이를 통해 단위 구조의 특성에 따라 연속체로 치환된 전체구조물의 특성을 파악하게 되었다. 한정된 시간을 통한 디자인 스튜디오 임을 고려해 작품의 크기는 가로, 세로, 높이가 대략 90cm(약 3피트) 이내가 되도록 약간의 제약을 두었는데, 그 이상의 규모는 자제의 가공과 조립 시 과도한 경비를 초래할 수도 있고 시간 상에도 비효율적인 면이 있다는 판단에 따른 것이다. 결과적으로 디자인 수업이 시작된 지 4주 만에 학생들은 최종적인 작품들을 만들어 내는데 성공했다. 결과물들은 매우 다양한 형태를 가지고 있었는데, 그 중에는 주목 해 볼 만한 작품들도 상당 수 포함되어 있었다. 그림 4는 학생들의 지붕구조 최종작품 중, 기본 단위구조의 몇 예를 보여 준다. 자세히 보면 기본 부재, 홈 디자인이나 그들의 역할이 다양함을 알 수 있다.



(그림 5) 반복된 작업을 통하여 얻어진 단위 구조의 결과물들

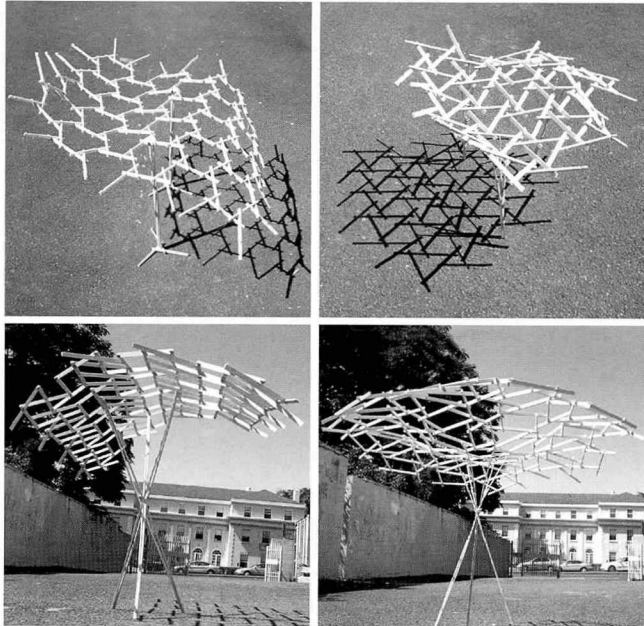
비록 학생들은 디자인을 진행하는 과정 내내 최종 구조물이 받게 될 힘의 흐름을 자연스럽게 처리하는 점에 부담을 가지고 있었지만, 작은 실험모델을 만들어 보면서 학생들은 구조 형태에 따른 힘이 작용하는 방향 등을 충분히 예측할 수 있었다. 프로젝트의 마지막 단계는 조립된 지붕 구조물과 잘 어울리는 지지대, 즉 기둥을 디자인하는 것이다. 지지대는 지붕구조물의 하중을 지반으로 전달하기 위한 구조적인 강성을 갖추는 것 뿐만 아니라 그 디자인도 지붕구조와 조화를 이루어야 할 것이 요구되는 것이다. 기둥을 이루는 구조물들에는 나무 형태로 엮어져 있는 강철 파이프 구조나 나뭇가지구조 또는 여러 장대를 서로 뒤틀어 만들거나 휘어 만든 지지대 등이 디자인 되었다. 지붕과 기둥 사이에 있는 조인트들 간의 디테일은 세심한 주의를 요하는 부분이었다. 상부의 목 구조와 하부 지지대사이의 연결부위는 강철 소켓(socket)과 강철 판 등을 이용하여 지붕과 지지대를 연결시켜 줌으로써, 지지대가 하중을 견디도록 디자인되기도 하였고 접합부가 용접되거나 볼트와 너트를 사용되기도 한다. 여기서 지붕 구조 하부기둥과 적어도 세 개 이상의 지점에서 결합되어 안정성을 추구하도록 제한을 두었다.



(그림 6) 좌 : 나뭇가지형태의 기둥 디자인의 예, 중 : 나뭇가지형태의 지지대를 케이블로 보강한 형태 우 : 상부 목 구조와 하부 지지대사이의 연결부위는 소켓(socket) 디테일

구조물이 세워진 후에, 지붕 즉 목 구조의 윗부분은 구조물의 용도에 따라 다양한 재료를 사용하여 덮는 것이 가능하다. 때에 따라서는, 공간에 건축적인 역동성이나 고유성을 표현하기 위한 인테리어의 일환으로 목재를 완전히 드러내 보일 수도 있을 것이다. 지붕을 덮는 데에는 이미 다른 구조물에서도 많이 사용되고 있는 평평한 패널이나 캔버스와 같은 일반적인 피복재료를 사용할 수도 있을 것이다.

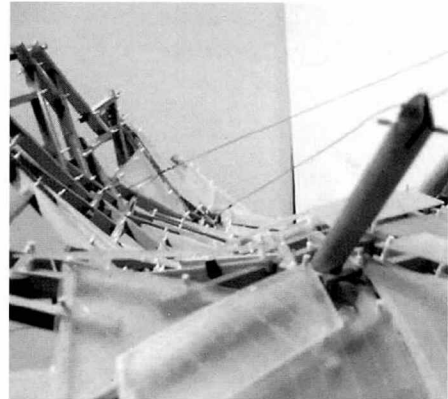
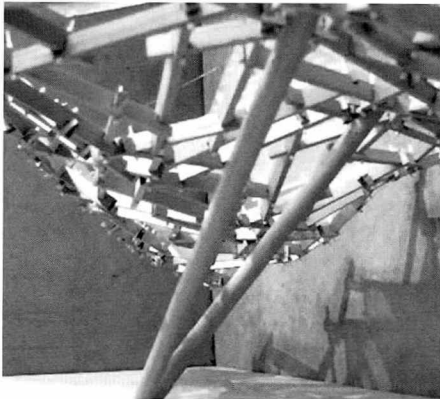
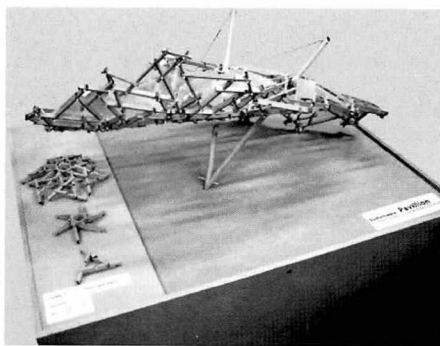
최근 목 구조 공모전(2006)에서 대상을 받은 인하대학교 학생들의 "Sustainable Pavilion"이란 작품도 같은 원리를 응용한 작품이다. 규격 목재를 부재로 이용하여 목조 간이 시설물을 계획하는 것으로, 목재의 재료적 성질에 대한 이해를 바탕으로 "선형적인 특성을 가진 규격 목재를 기하학적인 결구 방식을 통해 2차원적인 면과, 3차원적 형태를 이끌어내어 새로운 방식의 목조공간 구성방식"을 제시하는 작품으로 건축구조의 결구 방식을 응용한 새로운 건축 공간형태의 가능성에 대한 실험의 결과물이다. 여기서는 구조체의 주요부재 뿐 아



(그림 7) 여러 실험과정을 통한 학생들의 최종 디자인 사례들

니라 2차적 부재를 사용하여 복합적인 패턴을 형성하였다.

기본적으로는 삼각형 형태의 선형 목재 결구 방식과 그것을 보조하는 육각형 형태의 결구 방식, 이 두 가지를 연속적으로 조합하여 몇 미터 혹은 수십 미터에 이르는 스펠을 자유롭게 구성할 수 있는 유연성을 가진 구조를 디자인하는 것을 목표로 하고 있다. 이 작품에서는 또한 결구 방식 또한 복잡한 디테일을 피하며 흠파기나 볼트-너트 조임 수준의 단순함을 추구하여 목재의 가공을 최소화 할 수 있는 방법을 택했다.



(그림 8) 인하대학교 건축학과 Design Research and Innovation Lab(D-Lab)의 안형욱, 김영수, 김록명 학생의 2006년 목구조 공모전 대상 수상작

결어

이 프로젝트를 진행하는 동안에, 학생들은 기본적인 부재들과 여러 형태의 흠, 그리고 이 부재들의 기하학적인 결구 방식을 통해 2차원적인 면과, 3차원적 형태를 이끌어내어 형성된 단위 구조들의 조합 방법, 디테일의 해결 등 전체 디자인에서 세세한 부분까지의 모든 조합을 위한 여러 문제에 끊임없이 고민해 왔다. 최종 모델을 만드는 동안에도, 학생들은 전에 실험하였던 모델들을 다시 살펴 보게 되었고, 이 때마다 그들은 시행착오를 통해 더욱더 정제된 디자인을 얻을 수 있었고, 최종 결과물로 이끌어 낼 수 있었다. 이 작업을 통하여 학생들은 각자의 개성이 담긴 구조형태들을 만들면서 자신의 개념에 맞는 구조 디자인에 대한 가능성을 확인하게 되고, 나아가 건축디자인에 있어 구조에 대한 새로운 방향을 제시함과 동시에 셀 수 없을 만큼 많은 부재의 맞춤과 조합하는 방법들을 통해서 생겨날 수 있는 형태의 가능성들과 다양한 지붕 구조 형태의 효과적인 창조의 가능성을 충분히 일깨워 주었다. 일련의 학습 과정과 디자인의 실험적인 시도의 결과, 우리는 이 프로젝트가 학생들로 하여금 구조 디자인이 지닌 다양한 가능성들을 표출해 내고 개성 있는 형태를 만들어 내는데 필요한 논리적인 해결책과 방법을 찾는 데 도움을 줄 수 있으리라 판단한다. 모델을 만들면서 특히 학생들이 주목했던 점은 지금 진행하고 있는 작업이나 프로세스가 실제 규모의 구조물을 건설할 때에도 이용될 수 있다는 점이었다. 하여 학생들 사이에 실제 이러한 구조물이 지어진다면 어떻게 하여야 하는가에 대한 토론도 있었다. 토론 중에, “각 부재의 충분한 강성에 대한 고려, 시공의 정확성도 확보, 또한 공업화를 통해 공장 대량생산이 가능할 것이며 목재 대신 현장에서 쉽게 조립 및 해체가 가능하며 반복적인 사용이 가능한 강재프레임 부재 또한 좋은 재료가 될 것” 등 많은 의견이 제기되었다. 또한 파빌리온(pavilion) 디자인이 완료된 후에, 학생들은 이번 디자인 과정을 통해 얻은 것들을 다음 디자인에서 어떻게 이용할 것인지에 대한 발표를 하였다. 어떤 학생은 “새로운 지붕의 형태를 창조하는 과정은 정말 힘들고 어려운 것이었다”라고 토로하기도 하였지만 대다수의 학생들은 이 프로젝트가 많은 가능성을 가지고 있으며, 이렇게 지붕을 디자인하는 과정들을 계속해서 공부해 보고 싶다는 바람을 보여주기도 했다. ■