

구조가 행동한다 - 이른바 '구조디자인'의 세계

Structure is Behaving - The World of Structural Art

이주나 / 충북대학교 학술연구교수
by Lee, Juna

구조체 없이 지어지는 건축물은 없다. 따라서 구조를 다루지 않는 건축디자인은 실은 없다. 그러나 현실의 건축디자인 안에서 구조를 디자인하는, 즉 구조를 설계개념에 맞게 공리하고 고안해내는 작업은 얼마나 이루어지고 있을까.

최근에 우리는 국내외에서 구조체를 움직여 새로운 형태와 공간을 추구해내는 건축물을 제법 많이 만나고 있다. 꽤 관심을 끄는 형태들도 있는데, 우리는 어떤 면에서 구조체를 이용한 디자인에 의미를 부여하게 되는가를 생각해보자. 먼저 구조체가 이제까지의 중력에 저항하던 방식에서 벗어났다는 독특함에 관심이 끌릴 듯하다. 즉, 힘의 전달 방식에서 이제까지의 방식과 다른 것을 보게 되고, 가끔은 불합리하고 자연의 순리를 거스르는 것 같은 형태에서 특이함을 느끼기도 한다는 것이다. 또 다른 면은 기술적으로 해결하기 어렵다고 느끼던 것이 실현된 것을 봤을 때 난해한 기술에 감탄하는 경우도 있을 것이다. 그러나 그보다 무게를 둘 수 있는 부분은, 힘을 다루는 구조체를 이용하여 형태나 공간적인 측면에서 디자인 효과를 얻었다는 일거양득의 합리적 효과일 것이다.

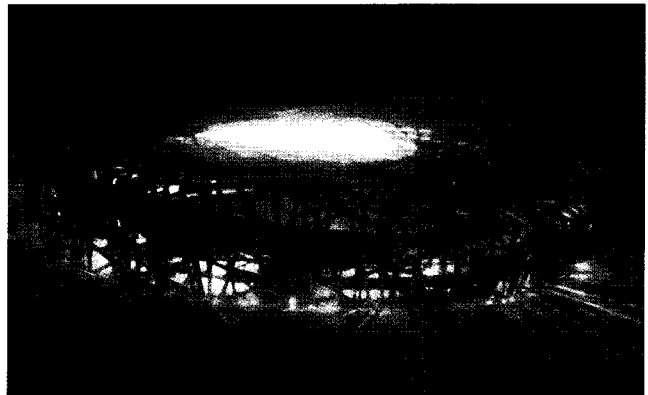
자연의 순리를 거스르는 독특한 구성과 형태는 반복되어 발전하기 어렵다. 고난이도의 기술을 요구하는 것도 그 배경에 디자인 합리성이 동반되어야 설득력이 있을 것이다. 그렇다면 현재 가끔은 무리하게 구조에게 요구되고 있는 디자인 시도는 힘과 관련된 합리성을 언제나 내포하고 있는 것인가. 그러나 이것은 인상과 짐작일 뿐이다. 이 같은 구조디자인의 의미 체계화는 그 구조체가 힘을 다루는 진정한 처지를 알아야 판단할 수 있는 것이 아닌가.

예로 전 세계에 부정형 그리드 설계의 유행을 불러넣은 이토 토요의 켄싱턴가든 전시시설을 살펴보자(그림 1). 분명 구조체와 건축요소를 동일하게 하여 변화된 디자인을 보여주었기 때문에 주목받은 작품이었다. 작가는 몇 개의 선을 교차하여 얻어진 패턴을 나름 규칙적으로 발전시켜 불규칙 그리드패턴을 고안했다고 한다. 이러한 패턴의 표현

과 구조체는 분리될 수도 있었겠지만 작가는 그 패턴 자체가 구조체가 되는 방법을 택했다. 덕분에 구조체는 이제까지와 다른 복잡한 배열을 취하게 되었고, 면형처럼 느껴지는 구성을 보여주기 위해 매우 가늘고 얇은 부재를 채택, 이것이 불규칙하게 접합될 수 있는 복잡한 디테일을 고안해냈다.

일찍이 생각지 못했던 구조체의 형태구성이 우리에게 흥미를 주고 새로운 형태와 공간감을 제공하였지만, 힘의 흐름 자체는 힘응력을 이용한 라멘구조를 복잡하게 배열한 것으로 구조적 효율을 기대한 것이라 보기 어렵다. 그러나 이것은 비교적 소규모의 건축물로, 디자인을 지향하는 구조체의 변신이 그다지 문제될 것은 없다고 생각된다.

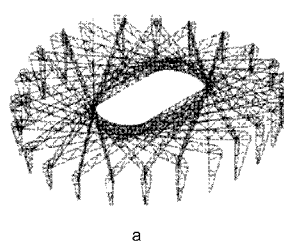
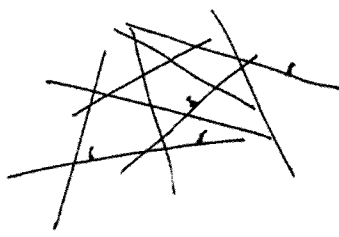
그러나 또 다른 예로 베이징 올림픽 스타디움을 보자(그림 2). 현란한 구조체가 내부 스펠이 300m가 넘는 초대형 스타디움의 형태와 공간, 모든 것을 대변하고 있다. 외부형태 뿐만이 아니라 내부에서도 놀라운 공간감을 표현해 내고 있는 이 보편적이지 않은 구조체의 조합은, 구조시스템적으로 분석했을 때, 그림과 같이 두 가지의 시스템의 조합으로 나누어 볼 수 있다. a는 실제 주된 수직하중에 저항하는 철골 라멘구조시스템이고 b는 라멘골조의 안정성을 위해 부가된 안정 구조시스템이다. 안정부재들은 형태구성효과를 위하여 불규칙한 배열



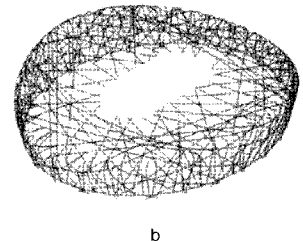
〈그림 2〉 베이징 올림픽 스타디움, 헤르조그 앤 드류론



〈그림 1〉 켄싱턴가든 서펜타인 갤러리, 이토 토요



a



b

을 취하고 있고 과도하게 사용된 경향을 보이기 때문에 접합과 시공에서 어려움을 가중시켰다. 또한 힘의 종류 중에 가장 부재효율이 떨어지는 힘응력 라멘구조를 주 구조로 채택하여 구조시스템 자체에서 힘의 효율적인 저항을 기대하기는 어렵게 되었다. 즉, 베이징 스타디움의 구조디자인은 다분히 이미지 구현을 목표로 한 디자인이었음을 알 수 있는 것이다.

앞서 살펴본 캔싱턴 전시시설의 경우처럼 규모가 작은 경우라면 이야기가 길어질 것이 없다. 그러나 이것은 경간 300m에 도전하는 대공간 스타디움이었고, 힘의 영향은 컸다. 너무 커진 부재체적과 현상용 접합이 허락된 시공성 등 때문에 구조의 부담은 과도하게 커졌고, 베이징 시는 큰 경제적 타격을 입게 되었을 뿐만 아니라, 결국 상부 개폐식 지붕을 포기해야만 했다.

이렇게 우리가 얼핏 구조체를 이용하는 디자인에 합리성을 떠올리기 쉽지만 실상은 그렇지 않은 경우가 많다. 진정한 구조디자인을 위해서는 구조체의 이미지를 변화시키는 것도 중요하지만, 그와 동시에 그 구조가 어떻게 힘을 전달하게 될 것인가를 함께 고민하는 것이 반드시 수반되어야 한다. 그리고 새로운 이미지에 대한 도전 못지않게 합리적인 힘의 전달방식 또한 끊임없이 모색되어야 한다.

사실 힘을 다루는 방법 즉, 힘의 전달체계인 구조시스템은 간단하다. 인장, 압축, 휨이라는 가장 기본적인 힘이 사용되는 세 가지 구조시스템으로 나누어 볼 수 있다(그림 3). 그중에 휨은 형태적 자유도를 가장 크게 가지고 있지만, 힘의 효율이 떨어지고, 인장과 압축은 높은 효율을 자랑하는 대신 형태에 제한을 가진다.



(그림 3) 인장, 압축, 휨구조시스템

우리는 주어진 형태조건과 공간특성에 따라 이들 구조시스템을 적절히 선택하여 사용한다. 재료에 제한이 있었던 과거에는 아치와 같은 일정구조만을 집중적으로 사용할 수밖에 없었던 때도 있었고, 장대한 현수교와 같이 무조건 구조능력만을 생각하는 토목구조에서는 가장 효율 높은 인장구조만이 선호되기도 한다. 그러나 철근 콘크리트와 철골구조가 가능해진 근대 이후로 형태적 자유도가 높은 힘응력구조가 일상적으로 사용되어 오다보니, 건축에서는 힘응력 라멘구조가 우리에게 너무 익숙한 만능의 구조시스템이 되어버린 듯하다.

이중 어느 구조시스템을 사용하던 간에, 구조디자인 측면에서, 다시 말하면 이미지와 힘의 효율적인 측면 둘 다를 고려하여, 여러 새로운 대안을 만들어내는 것이 가능할 것이다. 특히, 시대가 바뀌어 점점 대공간이 나타나고 기술이 발전하다보니 앞서 설명한 세 가지 단순 구조시스템 뿐만 아니라 여기에 여러 부재의 조합을 이용한 복합적인 구조시스템(하이브리드 구조시스템이라 불리움)에 이르기까지 구성이 날로 복잡해지고 있다. 구조디자인에 대한 우리의 연구와 고민이 증가하고 있다고 볼 수 있다. 그러므로 구조디자인이 당면한 과제는 기존 구조시스템의 변화적용과 새로운 시스템의 개발 등을 통해 건축디자인에 기여할 수 있는 구조적 해법을 모색하는 것이라 요약할 수 있다.

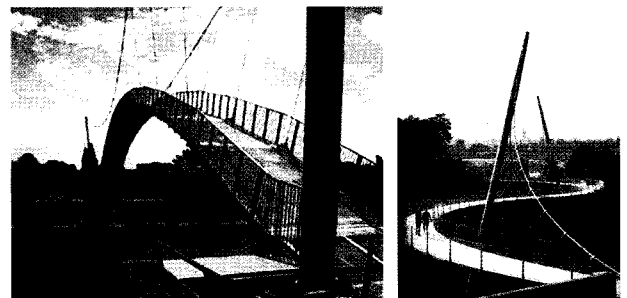
[인장구조시스템을 적용한 보도교 -요르그 솔라히]



· 켈하임 보도교(1987) : 지지기둥을 바깥쪽으로 편심시켜 기울이고 상판 하중으로 균형을 이루도록 디자인하여 역동적인 이미지를 표현



· 막스-오이스보도교(1989) : 단일기둥에 주 케이블만을 2중으로 하여 현수곡선으로 인한 형태구성효과와 하중분산 효과를 의도함

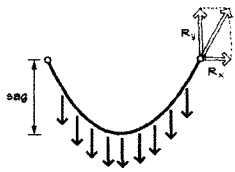


· 듀스부르크 보도교(1999) : 유연한 현수구조의 뒷 정착케이블을 당기는 방식으로 다리상판을 들어올려 배가 통과 가능하도록 하는 가동식 다리를 고안

· 보홀 보도교(2003) : 편심기둥을 두 개 배치하고 곡선형의 상판형태로 하중의 균형을 맞추어 역동적인 이미지를 표현

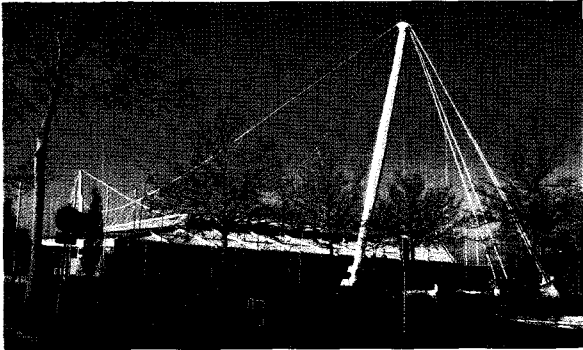
구조디자인의 세계를 구체적으로 살펴보기로 한다. 압축구조시스템이나 휨구조시스템은 너무나 일상적이므로, 아직 좀 낯설지만 상당한 가능성을 가진 인장구조시스템에 대해 그 접근방법을 살펴보자.

순수 인장구조시스템의 구조 원리는 현수교에서 가장 잘 살펴볼 수 있다. 중앙에 고른 하중을 걸었을 때 아래로 둥글게 처지는 현수곡선을 이루며, 안쪽으로 들어오려는 추력에 저항하는 정착구조가 양지점에 필요한 구조방식이다. 이때 순수하게 부재 내부에는 인장응력만이 발생하며 가장 높은 구조효율로 힘을 전달시키는 구조시스템이 된다(그림 4). 이러한 인장구조 기본원리를 이용하여 디자인에 적용시켜나가는 양상은 독일의 구조디자이너 요르그 솔라히의 작품에서 살펴볼 수 있겠다. 솔라히의 인장구조는 주로 보도교 중심으로 시작되었는데, 점차로



〈그림 4〉 순수 인장구조시스템

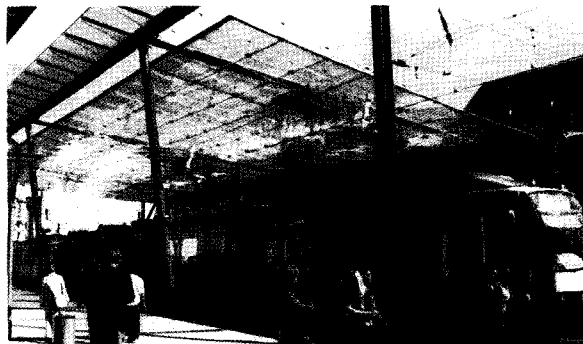
[인장구조시스템을 적용한 건축물과 파사드 -요르그 솔라히]



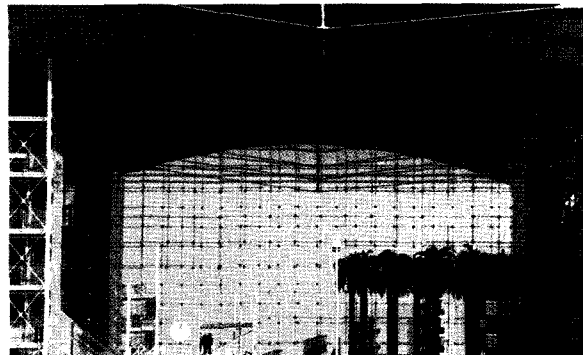
· 칼스루헤 유리파사드 : 주 케이블은 2중으로 하고, 주 케이블에 매달리는 부재의 배열을 다르게 하여 차별화된 현수곡선을 구성함



· 움 철도역 (1993) : 케이블의 처짐을 아주 적게하고 케이블에 면해 유리를 마감. 솔라히만 가정자리 보와 뒷당김 케이블로 정착구조 조성



· 헬브론의 철도역(2001) : 움 철도역과 유사하지만, 유리판을 케이블아래로 달아매고, 중앙에 삽입한 압축재로 정착구조를 형성. 가정자리 보는 움과 달리 보이도록 구성



· 한센 캄핀스키호텔 유리 파사드 (1994) : 거의 평행하게 당겨진 케이블을 이용한 인장구조시스템으로 유리뒷면에 마치 부재가 없는 것처럼 보이는 투명 유리 파사드 면을 완성

건축물에 적용해나가며 다양한 양상으로 발전해왔다. 현수곡선과 정착구조는 동일한 기본구성을 가지지만, 인장재의 개수와 정착방식, 늘어진 정도, 기둥의 위치 등을 변화시켰다. 처짐을 거의 없애면서 강한 프리스트레스를 가해 유리 파사드에도 사용하는 등, 경우에 따라서 대범하고 긴장감을 주는 힘의 배치를 고안해내는 것을 볼 수 있다.

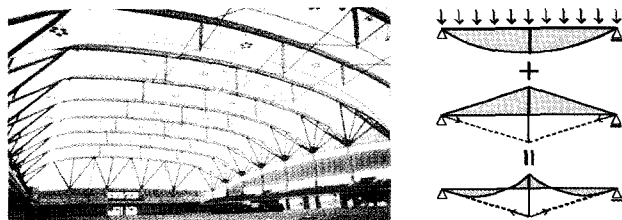
작품에서 보이듯이 순수인장구조를 사용할 경우에는 상당한 규모의 공간이 실처럼 가벼운 부재로 연출된다. 그리고 구조체의 필연적인 현수곡선이 가진 형태적 수려함 또한 얻어낼 수 있다. 반면에 순수인장구조는 가벼운 만큼 안정성을 취하기 어렵고 정착이나 접합에서 기술적 어려움이 큰 구조방식이다. 구성의 변화에 따라 상당한 기술적 해결이 요구된다는 것을 염두에 둘 필요가 있다.

인장구조시스템에는 순수 인장구조만 있는 것이 아니다. 순수인장구조시스템은 가장 효율이 높은 구조방식이긴 하지만, 현수형이라는 제한이 있고 정착구조가 늘 확보되어야 하는 불리한 점도 있다. 따라서 압축구조나 휨구조와 같이 단단한 재료들을 사용하는 구조시스템에 인장재를 복합적으로 사용하여 그들의 효율을 돕는 방향이 적극 검토되고 있다. 이른바 복합구조시스템, 하이브리드 구조시스템이다.

인장복합 구조시스템은 실로 매우 다양한 방식이 있고 점차로 새로운 구조시스템들이 개발되고 있는 현실이므로 본고에서 간단히 언급하기에 어려움이 있다. 그래서 그중 가장 현실적인 적용이 용이하다고 판단하여 최근 본 저자가 주목하고 있는 '들림형 보구조' 시스템을 예로 설명하고자 한다.

들림형 보구조의 기본은 휨재인 보구조이다. 그러나 보의 하단에 짧은 압축재(뚝지주)를 붙여대고 그 밑에서 인장재를 당겨 올려 휨재의 휨모멘트를 감소시키고 그 힘을 인장재로 옮겨오는 구조시스템을 말한다(그림 5). 단순보를 예를 들면 이 같은 인장재의 조합으로 인해 중앙부의 휨모멘트가 약 80% 감소효과를 얻게 되므로 부재체적 감소에 큰 도움이 된다. 따라서 들림형 보구조를 사용한 경우의 건축물은 상당히 개방적인 공간감을 가질 수 있고 대공간도 가벼운 구조로 이뤄낼 수 있다. 또한 기본이 보 구조이기 때문에 형태상의 제약 없이 자유로운 형태로 구성될 수 있으며, 내부에서도 형태구성 효과를 기대할 수 있다. 뿐만 아니라 인장재에 따라오는 정착력은 상부 보가 압축력으로 흡수하는 자체정착식 구성이기 때문에 별도로 정착구조를 고안할 필요가 없다. 보를 이용하는 구조시스템이므로 현수구조보다 매우 안정적이고 시공 또한 비교적 용이하다.

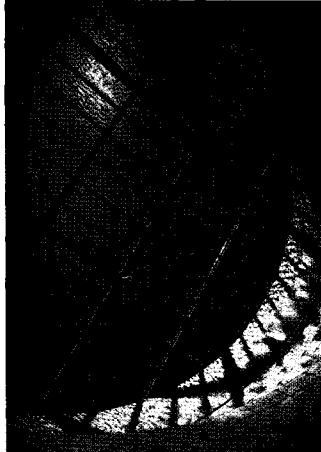
이와 같은 구조적 이점을 가지고 있는 들림형 보구조는 이미지와 부합되어 다양하게 변화되고 적용되고 있다. 이미 일본이나 유럽에서는 사례를 일일이 거론하는 것이 의미 없을 정도로 다수 활용되고 있다. 들림형 보구조의 활용으로 인해 개방적인 공간들의 기능과 표정이 변



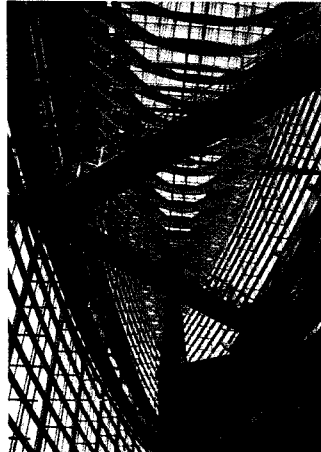
〈그림 5〉 들림형 보구조 원리와 구성형태

화하고 건축물의 각부 구조가 더 가벼워지고 있는 것이다. 흥미로운 것은 이같이 구조의 힘의 합리성에 근거한 구조시스템을 채용하는 경우에도, 힘의 원리에서 요구되었다기보다는 이미지 표현에 치우쳐 조정되고 과장되기도 하는 경우를 빈번히 보게 된다는 것이다. 디자인이라는 작업의 성격을 반영하는 것으로, 표현의 풍부함을 고려한다면, 힘에 관계된 필수적인 부분과 표현을 위한 선택적인 부

[표현적 의도를 가진 들림형 보구조의 디자인 사례]



· 헤메지 물의 관 : 극적인 공간연출을 위해 작은 공간에서도 지붕을 들림형 보로 구성



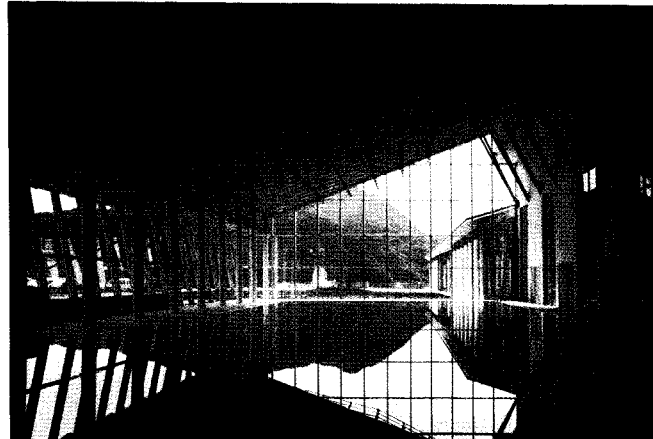
· 동경 도쿄포럼 : 글래스 홀의 내부 공간감을 위해 과장된 U자형 뜯어주름 과도하게 배열



· 모가미가와 공원 : 개방적이면서도 역동적인 공간연출을 위해 부재를 조밀하게 설치하고 뜯어주름을 과장함



· 토모치마치 문화관 : 내부공간의 형태미를 위해 들림형 보 채용하고 과장된 뜯어주름 독특하게 조합 시킴



· 시운드아 뮤지엄 : 물장의 새로운 공간감을 위하여 콘크리트 보에 철재를 조합구성하고, 과도한 뜯어주름 배치함

분을 분별할 수 있는 설계기법의 모색이 필요할 것이다.

구조방식에는 리멘구조 외에도 실로 다양한 구조시스템 구성이 가능하고 이들은 구조체로 존재함과 동시에 건축물의 형태와 공간에 영향을 미친다. 또한 대공간이나 유리 파사드 같이 요구되는 건축기능에 따라서 구조시스템의 차별화는 필수적인 것이 되기도 한다. 채택된 어느 하나의 구조시스템은 건축특성과 결합하여 수많은 방식으로 변화되고 조절될 수 있는 가능성 또한 가진다. 건축가들이 구조의 본질인 힘의 흐름과 구성의 다양성에 대하여 관심을 가진다면 구조는 광대한 디자인 기회를 제공할 것이다.

구조에게 있어서, 마음껏 디자인한 건물을 어떻게든 세워내라는 숙제는 미래지향적인 측면에서 봤을 때 긍정적인 과제라고 여겨지지 않는다. 예를 들어 프리폼 건축을 무너지지 않게 세워내기는 어렵고 막대한 기술이 들지만, 본 저자는 그것을 구조디자인이라 이야기하고 싶지 않다. 또한 구조체를 현란한 형태로 세우고 덧붙이면서 형태적 아름다움을 찾아낼 수도 있겠지만 힘의 원리를 비껴가는 구성의 과대함을 보면서 구조디자인이라 이름 붙이는 것 또한 내키지 않는다. 우리가 원하는 공간과 아름다운 형태를 찾아가는 물체의 조합과정이 디자인이라고 할 때 그 물체의 힘의 조건 또한 함께 편안하게 해나가는 과정을 구조디자인이라고 부르고 싶다. 목표하는 건축물의 형태와 공간을 놓고 그것을 꽃피울 만한 힘의 전달방법을 찾아내는 디자인, 구조와 건축의 균형을 찾아내는 디자인을 위한 시도가 끊임없이 이어졌으면 한다. ㉮

참고문헌

1. 사이토마사오저, 박찬수와 2인역, '건축 공간 구조 이야기', 기문당, 2005.
2. A. Holgate, "The Art of Structural Engineering", Oxford University Press, 1997.
3. 이주나, "건축구조계획을 위한 인장시스템의 특성 및 유형분석", 충북대학교 박사학위논문, 2004.
4. 이주나, "건축계획에 있어 인장구조의 활용을 위한 들림형 보구조의 디자인수법", 대한건축학회 논문집 계획계, 25권 3호, 2009.3., pp.67~75.
5. 박찬수, 이주나, "구조를 이용하는 건축디자인의 구성수법과 전개현황", 대한건축학회 논문집 계획계, 25권 1호, 2009.1., pp.145~154.