

# 건축구조 기능과 창조적 구조설계

## DISSERTATION

### Structure; It's Function and Creative Design

by Lee, Soo Gon

## I. 서론

일찌기 로마시대의 건축가 Vitruvius는 그의 저서 「건축10서(Ten Books on Architecture)」에서 건축의 3대 요소는 기능(function), 미(esthetic), 구조(Construction)라고 하였다. 오늘날 까지도 이 말은 많은 건축학도의 입에 자주 오르는 말로 본 소고에서는 필자가 전공하고 있는 건축구조에 국한하여 얘기를 전개시키기로 한다. 필자가 대학에서 건축공부를 할 때를 돌이켜 보면 그 당시는 참고서는 물론 교과서조차 없어 다른 과목에 비하여 특히 수학공식이 자주 나오는 구조공학 계통의 과목 때문에 많은 고통을 당한 기억이 생생하다. 그 만큼 수학을 빼놓고 건축구조를 얘기하려면 자칫 오해를 불러 일으킬 수도 있다. 따라서 본 소고에서는 가능한 한 평이하게 건축구조학 또는 건축구조공학이란 무엇이며 이것이 건축설계와 연결된 다음 단계인 건축작품(물론 작품으로서만 끝나지 않고 지상에 건조된) 몇개를 간단히 소개하므로써 글을 끝맺으려 한다. 귀중한 지면을 더럽히는 결과가 되지 않을까 하는 두려움도 있으나 본 지를 애독하는 많은 분들이 이 줄고를 통하여 건축구조가 무엇인지 다소나마 이해할 수 있게 되었으면 하는 것이 필자의 바람이다.

## II. 구조의 건축적 기능

간단히 말하면 건축구조의 역할은 건물을 안전하게 지탱하는 것이고 좀 더 구체적으로는 구조의 기능은 건물의 각 부분에 작용하는 복잡하고 다양한 외력을 무리없이 기초에 전달하는 것이라고 할 수 있다. 우리 주위를 둘러보면 이런 기능을 완수하는데는 여러가지 방법이 있음을 알 수 있다. 예를 들어 벽돌조 같이 벽체가 바닥이나 지붕 등에 가하여진 외력(이하 건물에 작용하는 외력은 하중(load)이라 부르기로 한다)은 물론 자체의 무게를 기초에 전달하는 조직식 구조가 있는가 하면 아득한 조상때 부터 우리에게 익숙한 목조 집 및 고층빌딩에서 흔히 채택하는 철골조에서와 같이 기둥과 보가 접합된 가구식 구조도 있다. 그러나 현대의 도시에서 살고 있는 우리에게 가장 익숙한 구조는 철근콘크리트조로서 이 구조는 거푸집(form)을 이용하여 기초, 기둥, 보

등이 일체로 만들어지기 때문에 일체식 구조라고 한다. 구조체가 감추어진 경우나 노출된 경우나 관계없이 구조의 기능, 즉 다양한 하중에 견디어야 한다는 구조의 기능은 변함이 없다. 그러면 건물에 작용하는 하중에는 어떤 것이 있는가? 철근콘크리트조의 고층 사무실을 예로 들면, 우선 골조를 구성하는 바닥상판, 보, 기둥, 내력벽 외에 건물내외의 창호 하중 등이 있는데, 이를 구조공학에서는 고정하중(dead load)이라 한다. 또 사람, 사무용 집기, 기계 등 건물에 실리는 무게가 있는데 이를 적재하중(live load)이라 한다. 이들 고정하중과 적재하중은 상시하중으로 흔히 장기하중이라고 하고, 지구중심으로 향하는 하중이기 때문에 연직하중(Vertical load)이라고도 한다. 이런 장기하중외에 그 작용시간으로 보아 짧은 기간에 그치는 단기하중으로 풍하중, 지진 등의 수평하중(horizontal load)이 있고 쌓인 눈으로 인한 설하중과 같은 연직하중이 있다. 또 작용기간은 극히 짧지만 그 영향이 대단히 큰 충격하중(impact load)도 있다. 여기서 바로 짐작되는 것이 구조설계의 가장 기본이 되는 하중을 어떻게 산정 하느냐가 그렇게 간단치는 않을 것이라는 점이다. 즉 건물구조체에 작용하는 하중은 모두 불확정 인자를 많이 내포하고 있음을 알 수 있다. 건물이 그것에 작용하는 하중에 저항할 수 있으려면 구조재료의 강도(strength)와 강성(stiffness)은 물론 그 재료가 적절한 형태로 사용되어야 한다. 다시 말하면 구조체는 통합성(integrity)을 지녀야 한다. 본질적으로 상이한 기능을 발휘해야 하는 구조요소들이 접합되어 이루어진 구조물은 구조물 전체로 볼 때는 적절한 것이라 할 수 있을지 모르나 통합성을 잃게 될 수도 있다. 이와는 반대로 구조요소들이 연속적이고 단일체적 역할을 하면서 상호 관통하는 구조는 통일된 그리고 때에 따라서는 보다 자유로운 건축적 표현을 가능하게 한다. 그 예로 구조요소인 보나 기둥 등을 목재나 석재를 사용하여 만들고 이들을 맞춤과 이음에 의하여 구조물을 완성하는 가구식 구조로서는 도저히 불가능한 형태를 일체식인 철근콘크리트 조는 가능하게 한다. 따라서 건축형태와 관련된 구조에 관해서라면 구조는 원하는 건축형태를 지탱하기 위하여 은밀하면서도 합리적으로 은폐될 수도 있고 구조형태가

바로 건축형태라는 점을 강조하면서 공공연하고 대담하게 될 수도 있다.

### III. 창조적 구조설계

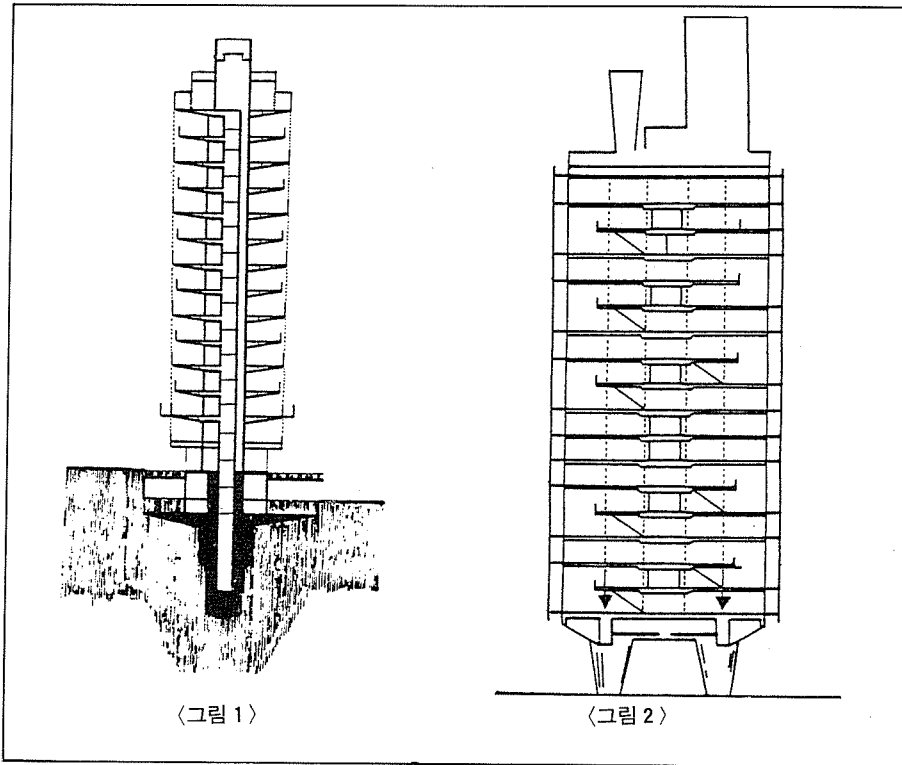
거의 불가능한 일이긴 하나 이상적으로 말하면 창조적 구조설계는 넓고 깊은 구조공학 지식, 경험, 상상력, 직관력 등을 고루 갖추고 있는 구조기술자에게서나 기대할 수 있다. 회화나 조각과는 달리 구조를 염두에 두지 않는 건축설계는 무의미한 환상이고 또 건축설계가 실제로서 지상에 건립될 것을 전제로 하지 않은 구조설계는 복잡하게 나열된 계산식, 거의 숫자만으로 가득채워진 Computer Output 등으로 공허하고도 황량한 것이다. 따라서 창조적 구조설계는 창조적 건축 설계 자체와 밀접한 관계를 갖는다. 앞에서 말한 것처럼 구조설계란 근본적으로 건물에 가하여진 하중과 이 하중에 저항하는 재료 사이의 균형을 찾는 Process라고 할 수 있다. 그런데 재료의 강도, 강성 역시 하중과 똑같이 불확정인자가 대단히 많으므로 선인들은 안전율(safety factor)이라는 개념을 도입하였다. 안전율은 동일한 하중조건에서 구조부재의 치수를 어떻게 했을 때 파손되고, 어떻게 했을 때는 파손되지 않는가를 관찰함으로써 얻은 지극히 경험적인 수치이다. 그러나 참신하고도 창조적인 구조설계가 가능하게 되려면 불합리한 과거의 경험에서 탈피하고 하중은 물론 재료의 강도와 강성을 오랫동안 실측한 자료를 기본으로 한 통계학적 접근방법이 요구된다. 구조적인 입장에서 볼 때 건물은 그 건물이 완성된 후에 작용할 것으로 예상되는 하중하에서 붕괴되어서도 안되지만, 과도한 변형(deformation)이 생겨서도 안된다. 건물의 어느 부분이 붕괴되지는 않았다 해도 과도한 변형이 발생한 현상을 목격하거나 또는 경험할 때 인간은 심한 심리적 자극을 받게 된다. 장미철에 끈 허물어져 내릴 것 같은 축대 밑을 걸어갈 때, 계곡과 계곡 사이에 걸려진 쇠줄다리 위를 걸어 가는데 앞으로 나아갈수록 진동이 심하게 느껴질 때 우리는 불안감에 사로 잡히게 된다. 과도 또는 영구변형을 막으려면 탄성재료(elastic material)를 사용함이 바람직하다. 또 설계하중으로 인한 응력이 탄성한계를 넘지 않아야 된다.

이렇게 하면 구조체에 가하여진 하중이 제거되었을 때 원래의 상태로 되돌아 오게 된다. 일찌기 갈릴레오는 나무나 동물이 어떤 일정한 정도 이상 자랄 수 없음을 자체의 무게(고정하중)가 어떤 한계치에 달하게 되면 더 지탱하지 못하고 가지나 뼈가 부러지기 때문이라고 했다. 그러나 점진적인 기술진보는 점점 고강도의 재료를 출현시켰다. 이런 고강도의 재료를 쓰면 구조부재의 치수는 당연히 작아지고 따라서 구조물 전체로 볼 때 더욱 치수 또는 하중감소가 가능하게 된다. 이렇게 볼 때 구조기술자는 자연이 실패한 것을 성공으로 이끌었다고 할 수 있다. 고강도의 망을 사용하면 지점거리가 수km나 되는 인장케이블(tension cable)이 가능한데 이는 자연계에서는 도저히 불가능한 일이다. 자연계의 재료는 원칙적으로 압축력(compressive force)에 더 잘 견디는 재료여서 이처럼 먼 거리를 자유롭게 경량으로 뻗을 수는 없다. 따라서 창조적 구조설계에는 신재료의 역할이 대단히 중요하고 구조의 대담성은 과학기술의 진보와 병행함을 쉽게 짐작할 수 있다. 구조물을 구성하는 요소는 각각에게 부여된 역할을 충실히 함은 물론 다른 요소들이 기능을 발휘하는데 협조할 수 있어야 한다. 이렇게 되면 전체구조는 유기적으로 통일되고 완벽하게 된다. 이와 같은 상호작용은 건물 어느 부분에 국부적으로 작용된 하중을 구조체의 보다 넓은 부분에 확산시킴으로서 하중분포를 균등하게 한다. 그러나 상호작용은 어떤 한가지 하중의 작용이나 그 영향이 다른 부분에 미치지 못하게 할 때에 진정한 의미를 가질 때가 있다. 예를 들어 건물의 어느 한 부분이 진동을 받을 때는 이 부분을 다른 부분으로 부터 고립시킴으로서 진동장해를 제거 또는 감소시킬 수 있다. 또 건물의 한 부분이 상당한 열팽창을 받게 될 때는 신축줄눈(Expansion joint) 등을 설치하여 이 부분을 나머지 부분과 격리시키는 것이 좋다. 구조설계에 있어서 서로 다른 구조요소가 접합 또는 결합되는 접합부(joint) 설계는 대단히 중요하다. 이 접합부의 잘 잘못은 곧 건물 전체의 수명을 좌우하기 때문에 신중을 기하여 설계, 시공해야 한다. 건축가나 구조기술자가 공동으로 추구하는

하나의 철학으로서의 단순성(simplicity)은 접합부 설계에도 그대로 적용된다. 설계가 잘 된 접합부는 한 요소에 작용하는 응력을 다른 요소에 합리적으로 전달 시킨다. 예를 들면 용접에 의한 접합부는 볼트나 리벳에 의한 접합부보다 힘의 전달을 보다 유연하게 한다. 그 이유는 용접에 의한 접합부는 금속의 용접으로 인하여 두 개 이상의 구조 요소가 결합되는데 반하여 볼트나 리벳에 의한 접합부는 단편적으로만 결합되기 때문이다. 아무리 창조적인 구조설계라 해도 과거의 기술 위에 바탕을 두고 있음은 틀림없는 사실이다. 그러나 오늘의 새로운 상황은 새로운 해결을 요구하기에 이르렀다. 복잡한 수학적(구조공학 공식)이나 고성능 Computer가 있다 해도 인간 마음 속에 없는 것을, 즉 우리가 input 시키지 않은 Output은 얻을 수 없다. 따라서 창조적 구조설계는 수 많은 지식을 저장하고 이것들을 융화할 수 있는 두뇌를 가진 인간의 잠재의식으로 부터 출발한다. 전광석화와 같은 직관력으로 얻은 아이디어는 그 실현 가능성을 여러가지 면에서 검토해야 한다. 창조적 아이디어를 구조공학적인 증명없이도 실현시킬 수 있는 거장이 더러 있을 수는 있겠으나, 대부분은 먼저 수학이나 물리적 실험을 통하여 그 아이디어의 인정을 받는 것이 현명하다. 끝으로 우리 나라나 외국이나 마찬가지로 문명의 대가만이 훌륭한 문학작품을 남길 수 있는가를 생각해 볼 때, 창조적 구조설계란 언제나 하나의 개념이 역학공식을 앞서는 것이지 그 반대는 아니라는 것이다. 다음은 구조공학적 입장에서 현대건축을 논할 때 결자이라고 손꼽히는 몇가지 건축작품을 작가와 함께 간략하게 소개키로 한다.

① Frank Lloyd Wright의 Johnson Wax Laboratory Tower

이 건물에서 우리가 바로 짐작할 수 있는 것은 Wright가 자연계의 나무로 부터 구조형태의 아이디어를 얻었을 것이라는 것이다. 엘리베이터·화장실 등 건물의 공동부분을 포함하는 중앙부 Core는 나무의 줄기를, 중앙부 Core에서 캔틸레버(cantilever)로 돌출한 바닥은 나무가지를 땅 속 깊숙히 묻힌 기초는 나무 뿌리를 나타낸다. 따라서 전체 구조체는 그 구성이 생명을 가진 유기체와 비슷함을 알 수 있다.



〈그림 1〉

〈그림 2〉

생명을 가진 모든 유기체의 공통 특성인 비선형적 현상 모두를 수학이나 Computer 이용으로 분석, 예측할 수 없음과 마찬가지로 힘의 흐름이 연속적이고 구조요소, 상호간에 조화를 이루고 있는 이 건물의 완전한 수학적 해석은 불가능한 상태다. Wright는 자기 작품의 이론적 배경으로 유기적 건축(Organic Architecture)을 주장하였다. 그의 정의에 따르면 유기적이란 실제의 완전한 파악을 의미하며 사고와 감성을 하나로 합치려고 하는 상태이다.

② Le Corbusier의 Unite d' Habitation 철근 콘크리트조의 이 아파트먼트 빌딩은 일광 차단용 수직 루우바가 바다, 벽체, 상판 등과 일체가 되어 전체가 하나의 별집과 같은 복합상자형 단면을 형성한다. 이 아파트는 1인 1방 주거에서 한 가족 8인의 주거에 이르기까지 다양하여 337 세대의 아파트가 23종류로 구분되어 계획되었다. 이 건물에서는 외부로부터 가해진 하중이 상자의 면요소를 통하여 전달되기 때문에 별도의 보나 기둥은 필요없다.

각 단위 상자의 강한 Corner부와 관통하는 전단벽(Shear wall) 때문에 건물은 전체로 볼 때 지진과 같은 큰 수평력에도 효과적으로 저항할 수 있다.

③ Eduarbo Torija의 Race-course Stadium 셸(Shell)

아치(arch) 작용이 정교하게 조화된 이

구조물은 대담한 형태를 나타낸다. 전체 구조물에서 arched shell은 지붕에 가하여진 하중을 압축 모응력(compressive membrane stress)에 의하여 캔틸레바 리브(cantilever rib)로 전달한다. 이하 그의 저서인 「Philosophy of structure」에서 그의 명언 몇가지를 열거해 보고자 한다.

「아치는 먼 거리로의 도약을 의미한다. 따라서 아치는 승리의 영예를 선언하는 듯하다」 「모든 수학곡선은 자체의 특성을 가지고 있고 법칙에 따르는 정확성이 있기 때문에 한 아이디어를 넉넉히 표현하며 그대로 장점이 될 수 있다」 「미래의 건축은 구조적 건축이다」

④ Felix Candela의 Restaurant in Xochimilco

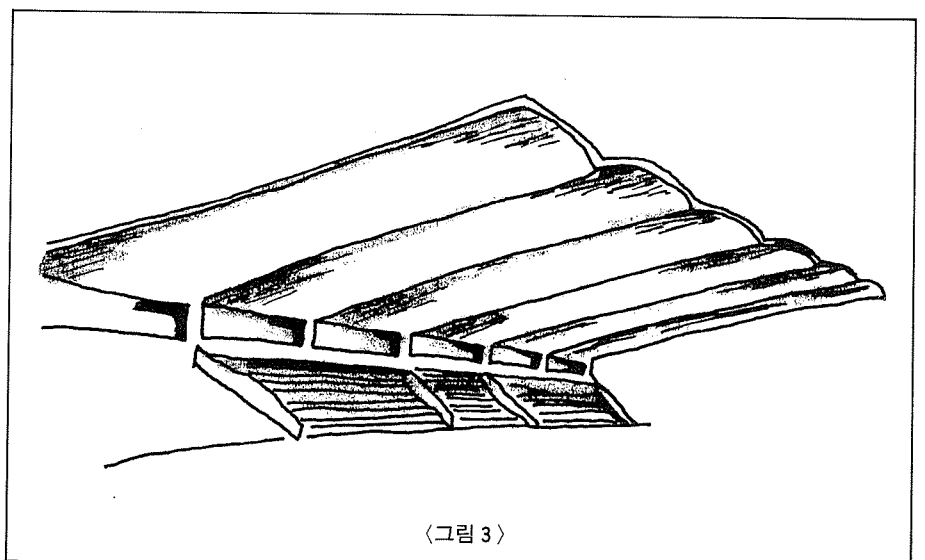
이 건물의 파형과 같은 각 부분은 근본적으로 쌍곡 거물면(hyperbolic paraboloid, H. P)으로 하중전달은 휨(bending)이 아닌 막(membrane) 작용에 의한다. 그러나 통상의 H·P 셸에서 하중지지 역할을 하는 테두리보(edge beam)를 없앴기 때문에 막작용에 의한 응력 분포는 복잡하다. 파형의 여러 부분은 이들이 만나는 점에서 교묘히 결합되어 그림의 빗금친 부분에서 보는 것처럼 교차된 3-회전단 아치(3-hinged arch)를 이룬다. Candela는 상기 Xochimilco 식당 외에 H·P 셸을 가지고 많은 걸작을 남긴 구조기술자이다. Candela가 남긴 다음의 글귀는 우리 후학들이 깊이 음미해 볼만한 것들이다.

사각형 mass에 사각형 유리를 끼고 이것을 벽화나 나무로 장식한 것이 건축이다(소위 국제주의 양식)라는 생각이 커가는 세대의 마음 속에 자리 잡는다면 그것은 말할 수 없는 비극이다.

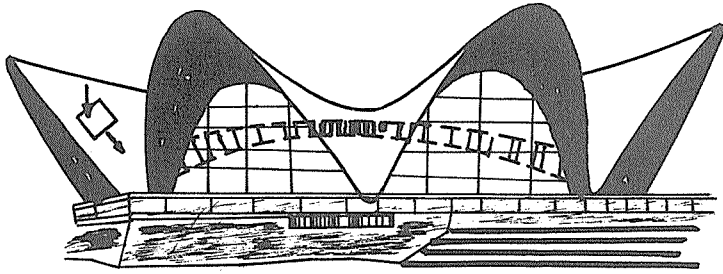
⑤ Robert Maillart의 도로교

이 교량은 철근 콘크리트조로써 스위스의 알프산에 위치하고 있다. 이 교량의 주구조요소는 3-회전단 아치지만 아치 위에 세운 수직기둥을 통하여 노면상판이 아치와 복합작용을 한다. 이런 복합작용은 구조의 표현을 통일시키고 구조부재의 크기, 또 이에 따라 전체의 중량도 감소시킬 수 있게 하였다. 이 아치교는 구조표현이 우아하고 극적인 동시에 그 주위의 환경과도 미적으로 잘 조화되는 예이다.

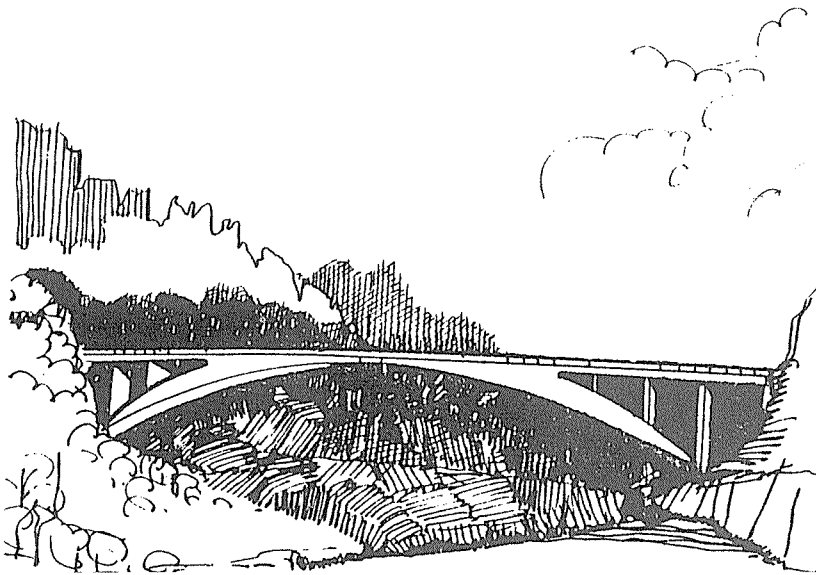
⑥ Pier Luigi Nervi의 Sports Palace



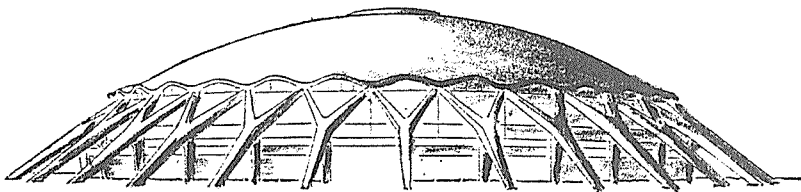
〈그림 3〉



〈그림 4〉



〈그림 5〉



〈그림 6〉

1960년 로마올림픽을 위하여 세워진 이 건물은 1만5천명을 수용할 수 있는 비교적 작은 규모의 실내체육관이나 콘크리트로 만들어진 「파르테논」이라 할 만큼 아름다운 건물이다. 그림에서 알 수 있듯이 외조에는 Y형단위의 중심에 기둥과 갈라진 가지가 강접되어 있는데 부재의 양단은 모두 편접합으로 되어 있다. 갈라진 가지 위에 올려 놓은 파형 돔(dome)의 파형은 지지점간에서 휘는 것을 막는 역할을 하고 있다. 기능과 구조와 미가 하나의 것으로 되어 구조 바로 그것이 장식이 될 수 있다는 좋은 예이다. 구조설계 입장에서 볼 때 구조물은 하나의 예술작품이어야 한다. 수리학 법칙에 충실하게 따른 결과로 만들어진 맵시있는 경주용 보트, 고도로 발달된 항공역학 법칙이 잘 반영된 초음속 항공기가 예술작품이라고 할 때 자연법칙적인 물리학(또는 구조공학) 법칙에 조화롭게 이루어진 구조물이 예술작품이 아니고 무엇이겠는가? 지금까지 열거한 몇 사람 거장의 배경을 살펴보면 좀 흥미있는 일이 있는데, Wright 나 Le Corbusier 는 원래 부터 건축가였고 Torroja 나 Maillart 는 구조기술자였다. 그런가 하면 Candela 나 Nervi 는 건축가 겸 구조기술자였다. 그러나 그들의 정확한 칭호야 어떻게 되었든간에 이들 거장들은 모두 창조적작품 제작에 가장 기본이라 할 수 있는 남다른 미적 감각과 직관적인 구조 감각을 겸비한 사람들이었다.

〈참고문헌〉

1. C. Siegel, "Strukturformen der Modernen Architektur", 金圭石譯, "現代建築의 構造와 表現", 技文堂, (1977)
2. M. Salvadori, "Structural Design in Architecture", 金容浮譯, "建築의 構造設計", 民音社, (1975)
3. 森井 孝, "建築構造とデザイン", 株式会社丸善, (1973)
4. P.L. Nervi, "Structures", Mc Graw-Hill Book Co. Inc., (1956)
5. E. Torroja, "Philosophy of Structures", 木村 俊彦 譯, "現代建築의 構造設計", 株式会社 彰國社, (1967)
6. H.W. Rosenthal, "Essence Book on Building, Structure", Macmillan, (1972)