

구조의 역사와 철학

-History and Philosophy of Structures -



조 한 옥*

Cho, Han-Wook

1. 서론

건축과를 졸업한 많은 사람들은 한 때 유능한 건축가의 꿈을 꾸어 본 기억을 가지고 있을 것이다. 그러나 차츰 공부를 해 나가면서 건축 안에 여러 전공분야가 있다는 것을 배우면서, 각자의 적성에 맞추어, 혹은 사회적인 환경이나 주위 여건에 따라서 건축가, 기술자, 시공자 등의 다양한 경로로 진출하게 된다. 사회가 발전하면서 나타나는 각종 기술의 전문화 현상은 고대의 기술자 겸 건축가를, 현대에 와서 다른 분야를 잘 알지 못하는 설계만의 전문가로 응색하게 만드는 경향이 없지 않다. 그러나 르네상스 시대에 태동한 새로운 개념의 건축가는 그 시대의 건축 양식을 리드하는 건축의 주관자로서 책임을 훌륭히 수행해 왔으며, 21세기 현대에서도 여러 분야의 기술을 종합, 구현하여 건축물에 생명을 불어넣는 중요한 임무를 가지고 있다.

한편, 건축물이 무너지지 않고 세워져 있기 위해서 필요한 “구조”라는 기술은 아마도 인류의 자취만큼이나 유구한 역사를 가지고 있을 것이다. 그러나 이 분야가 독립된 분야로 성숙되고 인정을 받은

것은 아주 오래지 않다. 구조의 발전을 위해 과학자나 기술자들이 얼마나 치열하게 노력해 왔는가를 뒤돌아보는 것은 마치 문명의 역사를 살펴보는 듯하다. 건축 안에서 존재하였던 구조는 새로운 구조재료와 과학기술의 발전으로 건축으로부터 독립을 하게 된다. 현대의 구조 기술자는 건축물의 골조를 책임지지만, 때로는 직접 노출된 구조미를 보여 주며 건축가의 역할을 겸임하기도 한다. 먼 옛날, 같은 뿌리였던 건축가로부터 분리되었지만, 지금은 함께 동행하는 동지이며 독립된 분야의 담당자로서 당당히 자리를 잡고 있다. 현대 사회에서의 구조 엔지니어링 위상을 조명해보기 위해 구조재료, 역학, 구조물의 역사(서양건축기술을 중심으로)를 회고해 보고, 구조의 의미를 분석해 본다.

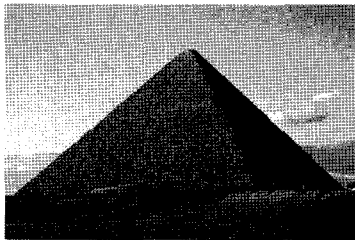
2. 구조재료의 역사¹⁻⁵

목재, 조적재와 콘크리트는 초기에 사용되었던 가장 일반적인 재료이다. 그 중에서 아마도 건축재료로 가장 오랜 역사를 가진 목재는 쉽게 얻을 수 있는 가벼운 재료이면서 상당히 큰 강도($150\sim 400\text{ kg/cm}^2$)를 가지고 있다. 목재는 재료의 비균질성

* 정회원 · 한미파슨스, 공학박사

과 불에 약한 치명적인 결함을 가지고 있지만, 이를 극복하기 위한 노력은 다양하게 검토되어 왔다. 동양에서는 지속적으로 목재의 전통을 이어 왔지만, 서양에서는 일찌기 주요 건축 재료가 석재로 변화되었다. 그러나 목재는 부분적으로 계속 사용되어 왔고, 현대에서도 중요한 구조재료의 한 부분을 차지하고 있다.

조적조의 재료는 진흙, 돌, 시멘트, 얼음 등 다양



〈그림 1〉 Great Pyramid

하다. 역사적으로는 수천 년전의 피라미드의 석회암과 화강암, 메소포타미아 지방에 존재하였을 바벨탑의 진흙 벽돌

역사로 거슬러 올라갈 수 있다. 조적재료는 일반적으로 주위에서 재료를 쉽게 구할 수 있고 외관을 자유롭게 표현할 수 있는 이점이 있는 반면, 조적 구조는 인장력에 약한 단점이 있다. 주요 재료 중의 하나인 석재는 큰 압축강도(예: 석회암, 약 2000 kg/cm²)를 보유하고 있어 대형 구조물에 많이 사용되어 왔다. 목구조 형식을 빌린 그리스 시대의 대리석 파르테논 신전을 위시하여, 로마 시대를 거쳐 로마네스크, 고딕 시대까지 석조는 다양한 형식으로 사용되어 왔다. 큰 압축강도와 작은 인장강도라는 석재의 물성은 구조물의 형태를 제한하면서 하나의 양식을 구축하는데 기여하였지만, 새로운 건축 양식이 도래하면 석조 시스템의 개선과 도약이 요구되었다. 조적조에 절대적으로 필요한 몰탈은 석회와 모래의 혼합물로 구성되었다. 이 몰탈은 오랜 시간동안 경화 및 탄산화 과정을 거치면서 경화한다.

콘크리트는 고대 로마 시대부터 나폴리 근처의 포졸리(Pozzoli)에서 생산되는 산성 화산재의 수경성을 이용하여 만들어진다. 그렇지만 만신전(Pantheon, 직경 43.6 m)을 포함한 많은 건축물에 적용된 이 콘크리트 기술은 서로마 제국이 멸망하면서 소멸하게 된다. 그러나 수경성 석회에 대한 연구는 간헐적으로 이어지고, 드디어 1824년 영국

의 Joseph Aspdin은 Portland Cement를 발명하여 특허를 내게 된다. 굳은 시멘트가 영국의 Portland 섬의 돌과 비슷하다고 하여 명명된 이 이름은 지금까지도 널리 사용되고 있다. 압축강도의 1/10 정도 밖에 되지 않는 인장강도와 콘크리트의 취성은 이를 사용한 구조물의 안전성에 대한 문제를 제기하였다. 이러한 약점을 보완하기 위하여 19세기 중반부터 콘크리트 내부에 철근을 사용하는 연구로 이어지고, 20세기에는 철근 콘크리트의 구조설계 방법이 확립되면서 현대의 중요한 구조재료의 하나로써 자리를 잡는다.

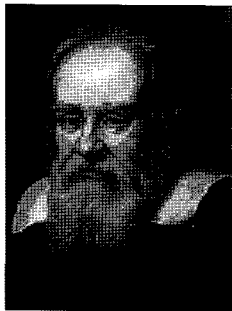
철은 인류 문명의 역사에서 떼어낼 수 없는 유용한 재료로 주로 무기나 도구로 사용되었고, 구조재료로는 오랜 역사를 가지고 있지 못하다. 기원전 10세기에 시작되었다고 생각되는 철의 사용은 전쟁에서 가공할 만한 영향을 끼쳤다. 기원전 490년의 마라톤 평야에서 그리스 군은 페르시아 군이 보유하지 못한 철제 갑옷을 착용하고 있었다. 고대에서 철의 사용은 단철(원석을 반복적으로 숯불에 가열하여 탄소를 없애고, 물에 담금질하여 불리거나 원하는 모양으로 두들겨 뽑아냄)에 머물렀지만, 건축물의 꺾쇠나 연결재와 같은 삽입물로 많이 사용되었다. 구조재료로서의 철은 중국이나 인도에서 부분적으로 이용된 기록이 있으나, 본격적인 사용은 18세기까지 기다려야만 했다. 그 이유는 용광로의 온도를, 철을 녹일 수 있는 고온으로 높일 수 없기 때문이었다. 그러나 산업혁명은 코우크스의 사용과 함께 이를 가능하게 하면서 주철을 생산하게 된다. 주철을 사용한 교량이 많이 건설되지만 취성으로 인한 파괴 사례를 경험하게 되고, 이 약점을 보완한 연철과 강철의 제조방법이 개발된다. 강철은 19세기 말부터 고층건물의 구조재로 사용되었으며, 현재에도 철골이나 복합 고층건물의 주요 구조재로 일반화되어 있으며, 현수교나 인장 구조물의 주요 구조재인 인장재 케이블에도 활용된다.

한편, 수천 년의 역사를 가진 텐트 구조는 본격적인 경량 구조물의 형태로 발전하여, 임시 구조물이 아닌 영구 구조물에도 사용되기 시작한다. 19세기의 부분적인 시도 후에, 20세기 중반부터 박람회나 체육관 구조물로 많이 적용되는 막 구조는 골조

막, 현수막, 공기막 구조로 분류할 수 있으며, 막의 주요 재료로 PVC나 테프론(PTFE) 등이 사용된다.

3. 재료역학의 역사⁶⁻⁹

15세기의 레오나르도 다빈치는 위대한 과학자로 많은 영감을 스케치로 보여준다. 그는 역학분야는 수학의 성과물을 거둘 수 있기 때문에 과학의 낙원



〈그림 2〉 Galileo

이라고까지 말했다. 본격적인 재료역학은 16세기 후반기부터 활동한 갈릴레오(1564~1642)로부터 시작한다. 그는 물리학과 천문학의 발전에 기여했으며, “두가지의 새로운 과학(Two New Sciences)”의 저술에서 체계적인 구조역학을 처음으로 소개한다. 이 책은 주로 재료역학에 대한 저술로 구조물 높이 한계에 대한 고찰, 내민보와 단순보에 대한 휨 모멘트에 대하여 분석한다. Robert Hooke(1635~1703)는 천체의 인력, 보의 처짐과 압축, 인장에 대한 연구 및 스프링의 연구를 통하여 탄성론의 기초가 되는 힘과 변형에 관한 유명한 Hooke's Law를 확립하였다. 재료역학의 역사는 주로 보 연구의 역사로 계속적으로 발전해 오면서, Euler, Lagrange에 의해 좌굴에 대한 연구가 시작된다. Thomas Young(1773~1820)은 보의 변형, 탄성계수 개념의 소개, 충격에 의한 응력해석, 곡선보의 좌굴 등의 여러 업적을 남긴다. 1826년 Navier의 책은 18세기와 비교하여 재료역학의 엄청난 발전을 보여주고 있다. 그는 탄성범위에서 구조 엔지니어들이 잘 알고 있는 보의 식 $EI \frac{d^2y}{dx^2} = M$ 을 제안하였을 뿐만 아니라, 부정정보의 체계적인 해석방법을 제시하였다.

18세기의 재료실험은 주로 파괴강도에 대한 관심으로 추진되었으며, 19세기 초에 들어와서는 탄성한계 안에서의 나무와 철로 만든 보를 실험하고, 아치와 현수교에 대한 이론 연구도 진행된다. 19세기 전반기는 이론의 발전과 병행하여 매우 다양한 실험이 병행되었다.

보의 재료역학에서 더 나아가, 보다 근원적인 탄성체 역학의 기초를 확립하고자 하는 노력이 나타난다. 탄성론은 Navier(1785~1836), Cauchy(1789~1857), Poisson(1781~1840), Lamé(1795~1870) 등의 연구로 체계적으로 발전하고 판 이론도 완성되며, 충격과 진동, 휨과 비틀림, 소성에 대한 연구도 진행된다.

19세기 전반에 영국은 산업혁명으로 제철능력이 1827년의 69만 톤에서 1857년의 366만 톤으로 급격하게 늘게 된다. 영국은 이론보다는 철도를 위주로 실질적인 실험 위주로 연구를 한 반면에, 프랑스는 이론적인 탄성이론의 연구로 관심을 모았다. 독일은 나폴레옹 전쟁 후에 뒤늦게 출발했지만, 최초의 근대식 학교인 프랑스의 Ecole Polytechnique(1794~)를 모방하고 개선하여 오늘날의 대학과 유사한 학교를 설립하여 19세기 중반에 벌써 획기적으로 발전하게 된다.

로마시대의 목재 트러스는 르네상스 시대에는 약 30m, 18세기에는 약 120m의 경간을 가질 수 있었지만, 철도시대의 도래로 철제 트러스가 필요하게 된다. 1840년 최초의 철제 트러스를 시작으로 다양한 모양의 트러스가 제안되고 정정 및 부정정 구조에 대한 해석법도 연구된다.

Green(1793~1841)은 Potential 개념을 도입하여 탄성론에 에너지 개념을 도입하는 근거를 제시한다. 탄성론의 지속적인 연구가 진행되면서 항복점, 반복응력, Mohr's Circle, 보의 미분방정식, 에너지의 개념, Castigliano(1847~1884)의 최소일 정리가 확립된다. 이와 더불어 반무한체(semi-infinite), 유체역학, 쉘, 탄성 스프링, 곡률 보 등에 대한 연구 등 많은 분야의 이론이 발전된다. 20세기에도 역학은 빠른 진전을 보이며, 탄성한계, 등온도(isothermal), 응력의 이력과 이완, 균열, 항복, 크리프, Photoelasticity 등이 실험적으로 연구되고, 소성에 대한 이론도 체계를 잡아간다. 탄성론은 3차원으로 확대되고 안정론, 판좌굴, 국부응력, 진동, 충격 등의 연구로 이론적으로도 완성된다.

철 구조재로서의 활용이 증대하면서 탄성 안정론의 문제가 대두된다. 19세기 말에는 정정, 부정정, 스페이스 트러스 이론이 체계를 잡고, 아치와

용벽에 대한 연구도 진행된다. 트러스에 한정되었던 부정정 구조물의 연구는 20세기 전반기에 보의 처짐각법, 모멘트 분배법으로 확대된다. 과학의 발전은 점차 다양한 경우에 대한 응력 해석의 정확성을 요구하나, 수학적 이론은 매우 제한된 문제에 한 해를 제공하는 한계를 가지고 있다. 근사해를 구할 수 있는 방법에 대한 요구가 증대되면서 유한차분법, Rayleigh-Ritz 방법 등이 제시된다.

20세기 후반기는 연속체 탄성론이 확립된 시기로 많은 적용 연구가 진행되고, 다양한 소성론에 대한 이론과 실험이 시도된다. 컴퓨터의 발명과 함께 태동한 유한요소법은 획기적으로 발전하였고, 오늘날에는 컴퓨터를 이용한 유한요소 구조해석이 일반화되었다.

4. 다리의 역사^{6,10,11}

“나, 영원히 존재하는 다리를 만들리라.”

스페인에 있는 고대 로마시대의 수도교 알칸타라교를 만든 기술자가 남긴 말이다.

동서양을 통해 수많은 다리가 세워졌지만, 특히 고대 로마의 도로 및 다리와 관련한 토목 기술은 경이로울 정도이다. 서기 1세기 말 경에 약 100만 정도의 로마 인구를 위하여 하루에 인당 1000리터의 물을 공급하도록 11개의 수도(水道)가 건설되어 있었다. 수도에는 많은 석재 고가교(高架橋)가 필요했는데, 로마 전역에 걸쳐 많이 세워진 수도교 중의 하나로써 기원전 19년에 건조된 남 프랑스의 퐁드 가르 교는 3층의 아치로 약 50m의 높이에 길이 275m의 장대함을 자랑한다.

교량 구조시스템의 역사를 생각해 볼 때, 교량의 원형은 형교(Girder가 주요 구조재인 교량)이며, 아치교를 거쳐 트러스교, 라멘교, 현수교, 사장교로



〈그림 3〉 Forth Bridge

발전해 간다. 다리의 역사는 주각 사이의 거리인 경간 길이의 증가 역사라고 할 수 있다. 로마의 다리는 아치가 전형이며, 경

간은 50~ 60m를 넘을 수 없었다. 현대의 강철 구조재료를 사용하더라도 아치교는 500m 정도가 한계 경간이라고 알려져 있다.

산업혁명에 의해 발전된 제철 능력으로 주철을 이용한 교량이 건설된다. 첫 번째 주철 다리가 1776년부터 1779년까지 Darby에 의해 영국 Severn 강에 아치 형태로 세워졌다. Thomas Bouch는 철제 트러스 교량인 테이 교(Tay Bridge)를 1871년부터 7년간에 걸쳐 건설하였다. 이 다리는 75m의 경간을 이어서 만든 전장 3,200m가 넘는 엄청난 장대교 이었으나, 개통된 지 불과 19개월 만인 1879년 12월 28일 저녁 7시 20분 경 열차와 함께 교량 중앙부 수백 미터가 없어져 버렸다. 조사 결과, 교각이 하중을 견디지 못했고, 설계 및 시공에 모두 문제가 있음이 밝혀졌으며, 교각의 재료였던 주철의 품질 결함이 있음이 발견되었다. 지금은 새로운 테이 교가 세워져 있다.

테이 교의 붕괴는 1883년 시작된 포스 교 (Forth Bridge)의 건설에 커다란 영향을 미쳤다. 강철이라는 신소재를 사용하고, “홀바인 앙버팀”이란 켄틸레버 트러스 구조를 채용하였다. 1890년에 주탑 높이 137m, 수면 위 48m, 길이 2.5km, 철강 중량 54,000톤을 자랑하는 세계 제일의 복선 철도교량으로 완공된 후에, 과잉설계로 공룡이라는 별명을 들어야 했지만 지금도 엄청난 위용을 자랑하고 있다.

현수교의 역사는 붕괴의 역사라고 할 수 있다. 19세기부터 20세기 전반부까지 세계적으로 100회 이상의 사고 사례가 있으며, 교량의 하중 실험 중에도 19세기에만 13개의 실패 사례와 강풍, 적설, 화재 등에 의한 다양한 파괴 보고가 기록되었다. 진보한 최초의 현수교는 James Finley에 의해 1796년 건설된다. 로블링은 1841년의 연철제 와이어 로프의 특허로 내고, 이를 발전시킨 평행선 케이블을 발명하여 현수교의 발전에 크게 이바지 한다. 그의 대표적인 현수교로는 나이아가라에 위치한, 1855년 완공된 250m 경간의 세계 최초의 철도 현수교와 1883년 완공된 486m 경간의 뉴욕 Brooklyn Bridge이다. 현대 현수교의 효시라 불리는 브루클린 교는 강철제 와이어, 평행선 케이블, 보강 트러스, 와이어의 아연 도금 처리 등 최첨단 기술을 동원하여

건설되었고, 이 기술은 현대 현수교의 표준이 되었다. 교량의 기초를 위하여 뉴매틱 케이슨 공법이 사용되었는데, 공기로 수압에 대항해야 하는 이 공법에서 수심이 깊어지면 케이슨 내부 기압을 높게 만들어야 하므로, 이 곳의 작업자들이 '잠수병'에 노출되는 계기가 된다. 로블링 가족은 현수교라는 복잡한 구조물에 대해 정확한 해석이나 설계이론을 확립하지 못했지만, 경험에 기초하여 바람에 의한 교량의 변형을 케이블과 보강 트러스를 이용하여 제어했다고 할 수 있다.

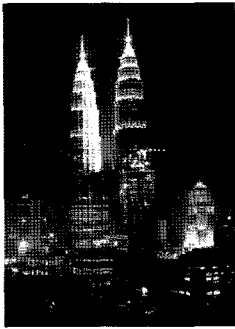
현수교는 재료 및 기술의 발전과 더불어 미국의 1931년 1067m 조지워싱턴교, 1935년 1280m 금문교, 1964년 1298m 웨라자노해협교, 영국의 1981년 1410m 햄버그교, 일본의 1988년 1100m 세토대교, 1998년 1990m 아카시 대교, 한국의 2000년 550m의 3차원 자정식 영종대교 등의 사례가 있다. 현수교의 해석은 브루클린 다리 건설 전의 간단한 무보강 이론, 강체 이론으로부터 1888년 탄성이론, 1901년 처짐 이론 (Deflection Theory)으로 발전하였다. 1940년 타코마 교의 초속 19m 풍속 바람에 의한 붕괴는 바람에 의한 교량의 진동 연구를 촉발시켰으며, 가벼워져만 가던 현수교를 다시 무겁도록 만들게 하였다. 사장교는 1820년대에 영국과 프랑스에서 최초로 건설되었다고 기록되어 있으며, 현재 세계 최장 사장교는 1996년 완공된 유선형 상자 형태의 거더를 이용한 일본의 Tataru 교량(중앙 경간: 890m)이며, 국내 최장 사장교는 2000년 완공된 서해대교(중앙 경간: 470m)이다.

5. 고층건물의 역사¹²⁻¹⁷

기원전 2560년 경의 이집트 석재 조적물인 Great Pyramid는 146.7m의 높이를 자랑하고 있으며, 바빌로니아의 Ziggurat도 이 정도의 높이가 되었으리라고 추정된다. 신전의 성격을 가졌던 바벨탑, Ziggurat, 피라미드 등의 고대의 유적은 높은 곳을 향한 인간의 희망을 보여주고 있으며, B.C. 18세기의 바빌로니아 왕국 함무라비 대왕의 법전에서 건축물 붕괴시의 처벌에 관한 언급에서도 높은 건물의 존재 가능성을 생각해 볼 수 있다.

고대 로마가 세계를 제패하면서 수도 로마로 인구가 유입하게 되는데, 서기 1세기 후반에는 약 100만의 인구가 모여 살면서 "인술라"라는 중하층 주민을 위한 5~6층 규모의 석재와 목재의 공동주택이 유행하게 된다. 서기 64년 네로 황제 시대의 대화재 발생 후에 재건을 하기 위해서 내린 조치 중의 하나가, 건물의 높이를 약 17m로 제한하는 것이다. 서기 2세기에는 콘크리트를 사용하여 직경 43.6m인 판테온이 재건되었고, 6세기에는 콘스탄티노플에 62m 높이의 하기아 소피아 성당이 건설된다. 이 후로 높이에 대한 진전은 별로 없었으며, 11세기 무렵의 로마네스크 양식과 뒤이은 고딕 양식에 의해 건물의 높이가 올라가는 추세를 보인다. 첨두아치, 부축벽(flying buttress) 등의 기술은 높이를 추구하는 고딕 양식의 중요한 부분이며, 12세기 말부터 세워진 프랑스의 사르트르 성당의 예는 115m의 높이를 보여준다.

건물의 높이는 철의 발전과 더불어 19세기 말부터 획기적으로 높아졌다. 취성적 성격을 가진 주철(Cast Iron)의 본격적인 생산은 18세기에 시작되고, 19세기 중반의 연철(Wrought Iron)에 이어, 1856년 Bessemer 방식의 개발로 강(Steel)의 시대로 발전하게 된다. 1889년 Eiffel은 교량의 경험을 바탕으로 연철을 재료로 하여 파리에 380m의 에펠탑을 건설한다. 고층건물의 역사는 19세기 말부터 1970년대까지 미국의 역사를 말하게 되는데, 1885년 미국 최초의 마천루 건물이라고 불리는 10층 Home Insurance Building 부터 시작하여, 1913년의 58층 Woolworth Building, 1930년 77층 Chrysler Building (319m), 1931년 102층 Empire State Building(381m, 공기: 13.5개월) 이 완공될 때까지 눈부신 발전을 하게 된다. 세계 경제공황과 제2차 세계대전으로 약 사반세기 동안 소강상태를 거치게 된 후, 1950~60년대 건축의 국제주의와 더불어 새로운 초고층 시대를 열게 된다. 1960년대에 S.O.M.의 Fazlur Khan은 건축가 Mies van der Rohe의 국제주의에 어울리는, 3차원 횡하중 저항구조를 체계적으로 제시하여 구조자의 시대(1960~70년대)를 구현한다. 1974년에 준공된 Sears Tower (443m, Bundled Tube 시스템)는 1998년에 완공된 말레이



〈그림 4〉 KLCC

시아 KLCC 빌딩(Kuala Lumpur City Center, 452m, 복합구조)가 나타날 때까지 세계 최고의 영예를 누린다.

콘크리트 구조는 철골건물보다 조금 늦게 고층건물에 적용되기 시작하였는데, 1975년의 미국은 벌써 630

kg/cm² 강도의 콘크리트를 사용하여 262m 높이의 Water Tower Place를 건설하였다. 고강도 콘크리트의 발전과 콘크리트 골조의 공사속도 개선은 고층건물에의 적용은 크게 증가한다. 또한, 콘크리트는 철골에 비해 상대적으로 싸고, 건물의 거주성에 유리하기 때문에, 최근의 고층건물은 콘크리트, 혹은 철골과의 복합구조로 건설되는 경향이 일반화되고 있다.

1980년대 이후에는 건물 외관이 단순한 프리즘 형태에서 다양한 표현을 추구하는 경향을 보이며, 구조시스템도 복합적으로 사용하게 된다. 1990년대 이후에 아시아 지역에 건설된 고층건물들은 주로 복합구조인데, Shuh Hing Square (69층, 384m, 1996), Citic Plaza (80층, 391m, 1997), Jin Mao Tower (88층, 421m, 1998), Two International Financial Center (88층, 420m, 2003) 등이 세워졌으며, 현재 대만의 Taipei에 101층 508m의 복합구조 건물이 마무리 공사 중에 있고, Dubai에 160층 약 700m 정도의 초고층 건물이 착공을 기다리고 있다.

20세기에 들어와서 고층건물의 출현은 건설 관련 기술의 발전과 일치한다. 바람과 지진에 대한 이해와 효율적인 횡력 저항구조, 구조 재료, 해석/실험 방법, 컴퓨터 활용은 물론, 고층과 관련된 계획, 지반, 설비, 시공 분야의 기술 발전도 괄목할 만 하다. 특히, 구조 엔지니어링의 측면에서는 바람과 지진으로 인하여 발생하는 문제점의 효율적인 대처가 제일 큰 과제이다. 고층건물이기 때문에 건물의 횡변위, 가속도, P-delta 효과, 인발력, 풍동실험 등의 세심한 고려가 설계과정에서 추가로 필요하며, 시공성의 개선 노력도 매우 중요하다. 대형 프로젝트

이기 때문에 건물의 안전성, 거주성, 경제성 등의 효율성 제고노력은 아무리 강조해도 지나치지 않다.

초고층건물의 완공을 위해서는 아직도 연구가 필요한 여러 분야가 있지만, 500m 정도의 건물의 건설을 위한 요소기술은 국내에서 보유하고 있다고 생각된다. 그러나 모든 건축기술의 집합체인 초고층건물의 구현을 위해서, 국내 건설업의 고층건물에 대한 경험을 축적, 소화, 활용하고자 하는 자세와 이해, 노력이 미흡하다. 기술에 대한 이해 부족과 협조체제의 미숙으로 인하여 실제 프로젝트의 경험은 체계화된 축적이 아닌 개인의 경험으로 끝나고, 많은 경우에 시행착오를 반복하는 경향이 있다고 생각된다.

6. 구조의 철학¹⁸⁻²¹

건축물의 아름다움은 시각을 통해서 지각된다. 구조가 전문화되기 전인 고대의 많은 건축물들은 아름다움과 올바른 구조를 동시에 보여주기도 하지만, 반면에 그렇지 못한 사례도 많이 볼 수 있다. 구조의 정당성은 미의 충분조건이 아닌 필요조건이지만, 분명히 상호 보완적이다. 미학적으로 지각될 수 없는 구조물들은 구조기술과 경제의 엔지니어링 원칙에 의해 평가될 것이다. 구조는 건축물이 제대로 표현될 수 있도록 지원하지만, 건축물이 존재하기 위한 본질적인 기능을 수행한다. 건물의 창조와 같이, 구조설계의 과정도 무에서 유를 창조해 나가는 예술 과정이다. 그 성과물은 해석과 설계 과정을 연역적으로 거치는 합리적인 결과이기 보다는, 직관(경험)과 지식을 바탕으로 하는 개인적인 창조력과 상상력의 결과물이다. 구조 작품은 결코 단순한 구조계산에 의해 탄생되는 것이 아니다.

건축가가 구조에 대한 충분한 지식을 필요로 하는 것은 틀림없지만, 구조 엔지니어의 도움이 전혀 없이 건축물을 짓는다는 것은 불가능한 일이다. 그러나 그것이 구조 엔지니어의 역할이 커졌다는 것을 의미하지는 않는다. 구조 엔지니어도 기술의 발전에 따라 점차 그 안에서 세분화 되어간다. 그는 효율성이라는 이름 하에 시간과 돈의 굴레에서 자유롭지 못하고, 구조의 기능성과 안전성을 책임

지면서 점차 작아져만 가는 자신의 역할을 인지하고 있다. 멀리 거장의 시대를 그리워하지만, 빠르게 발전하는 기술의 역작용으로 자아 성찰 부족과 방향감 상실을 느끼며, 주어지지 않는 기회를 이야기 하며 대가가 되고 싶은 의욕이 좌절되고 있음을 느낀다. 그러나 예술이 시대에 따라 변하고 존재의 의미를 추구하는 것처럼, 구조도 현대의 건축에서 그 역할과 의미를 찾는 노력을 끊임없이 지속해야 한다. 구조 엔지니어는 그의 건축물을 정복할 수 있어야 한다.

수세기에 걸쳐 발전한 재료, 역학, 기술 등의 발전으로 구조 엔지니어는 공부해야 할 대상이 무척 많아졌다. 자신의 전문분야에 대한 깊이뿐만 아니라 인접 엔지니어링에 대한 이해도 필수적인 요소가 되고 있다. 너무나 크고 많은 지식의 분량은 구조 엔지니어에게 자신의 전문분야 경계설정에 대한 의문을 제시하게 하고, 끊임없는 배움의 노력을 요구한다. 이러한 상황 하에서 유능한 구조 엔지니어는 해석, 설계뿐만이 아니라, 관련된 설계도서 및 시공, 공사비, 관련 업무처리까지도 능동적으로 리더쉽을 가지고 수행할 수 있어야 한다. 이를 위해서 전문 기술의 깊이 뿐만 아니라 폭넓은 관련 기본지식, 엔지니어링 판단력(Engineering Judgement), 프로페셔널리즘, 사회에 대한 사명감 등을 갖추어야 한다.

구조 엔지니어의 필요 덕목은 지식과 직관이다. 지식은 기본적인 수학과 물리학을 도구로 하여 대상이 되는 구조의 거동을 이해하도록 도와준다. 현대의 컴퓨터는 지식이 역학(해석)에 투자해야 할 시간을 크게 절약할 수 있게 한다. 그러나 이러한 기술의 발전은 역학에 깊은 지식이 없는 사람도 쉽게 해석 과정을 취급하게 되면서, 실수가 발생할 가능성이 더욱 높아지게 된다. 최근 50년간 미국에서 발생한 구조 재해의 1/3이 인간의 실수로 발생했다는 사실은, 기술발전이 구조의 실패와 별로 관계가 없다는 것을 보여준다.¹⁸⁾ 그러므로 기술의 발전은 오히려 실패의 감소보다는 증가로 연결되기 쉬우며, 이를 방지하기 위해서는 인간과 사회의 깊은 책임의식을 필요로 한다.

구조해석의 한 과정인 모델링은 지식을 적용하

는 중요한 논리의 단계로, 실제 상황을 단순화시키는 과정에서 많은 가정이 전제가 된다. 우리는 단지 해석모델의 가정에 대하여 이론적으로 “완벽한 의미에서 올바르다”라고 증명할 수 없으며, “오직 어느 정도까지 틀리지 않다”라는 점만 보여 줄 수 있다. 해석결과는 주어진 가정의 한계 내에서만 정확할 뿐이다. 우리가 해석하고자 하는 구조물의 모델링에 대해 다음 사항들을 인식할 필요가 있다.

- 1) 모든 해석모델은 실제 구조물 거동의 관찰에 근거하나, 파괴가 일어나는 경우를 제외하고는, 실제로 일반적인 관찰은 명확히 인식하기가 어렵고, 유용한 정보를 주지 않는 경우가 많다.
- 2) 실제 구조물의 거동을 관찰하기는 매우 어렵다. 그 이유로는 첫째 적용된 하중을 정확히 평가하기 어렵고, 둘째 구조물 내의 비구조재 영향이 존재하며, 셋째 가정된 해석모델의 거동은 실제 구조물의 거동과 다를 경우가 많기 때문이다(예: 지진).
- 3) 부재실험, 시험실 내 실험 등의 결과는 부분적인 정보를 제공할 뿐이다.
- 4) 가정은 충분한 이해가 전제되지 않으면 안 된다.
- 5) 다양한 설계변수를 이용한 분석을 통하여, 그 효과를 분석해 볼 수 있다.
- 6) 단순한 모델을 이용한 손 해석(hand analysis), 혹은 간단한 컴퓨터 해석을 통하여, 구조물 거동에 대한 중요한 이해를 도모하는 습관을 가질 필요가 있다.
- 7) 일반적으로 컴퓨터 해석결과는 먼저 변위를 구하고, 미분(수치해석)에 의하여 힘을 구하므로, 변위가 부재의 힘보다 정확도가 좋은 결과가 나온다. 해석결과를 구하는 과정에 대한 충분한 이해가 필요하다.

모델 해석은 완벽하진 않지만 종종 우리가 추구할 수 있는 최선의 방법이며, 해석의 결과는 불완전하지만 유용한 정보를 준다. 사려 깊은 설계자는 그 결과를 완벽히 믿지는 않지만, 구조물을 잘 설계하기 위하여 유익한 도구로 쓴다.

구조 엔지니어링은 창의적인 직관을 요구한다. 구조 지식이 부족했던 시대에 건축되었던 과거의 위대한 건축물로부터 우리는 직관의 힘을 느낄 수

있다. 구조의 직관은 프로젝트 경험을 바탕으로 한 엔지니어링 판단력(Engineering Judgement)이라고 할 수 있다. 엔지니어링 판단력은 실제 프로젝트의 경험을 요구하기 때문에 많은 시간과 지속적 노력이 필요하다. 이를 위한 R.P. Davis²¹의 좋은 충고를 소개한다.

- 1) 모든 업무를 항상 중요하게 생각하라. 설사 기술적인 일이 아닐 지라도 배울 점이 있다.
- 2) 항상 기록하라. 안다고 생각해도 정확히 기억할 수 없는 경우가 매우 많다.
- 3) 부채 크기에 대한 감각을 키워라. 기억할 수 있도록 노력하라.
- 4) 항상 읽고 공부하여, 자기 계발을 위하여 노력하라.
- 5) 좋은 프로젝트 선례를 공부하라.

유명한 지반 엔지니어인 Karl Terzaghi는 하버드 대학의 제자들에게 엔지니어링 능력을 연마하는 자세에 관하여 다음과 같은 지혜로운 금언을 소개하였다.²¹

- 1) 엔지니어링은 훌륭한 스포츠맨십을 요구하는 좋은 게임이다. 실수는 항상 있는 것이며, 자신의 잘못을 먼저 인정하고 발표하라. 남이 먼저 발견하면 감사하게 생각하라.
- 2) 제일 나쁜 자세는 독단적인 자신의 의견 주장과 남에 대한 무조건적인 비판이다.
- 3) 자신의 생각을 기록할 때 모든 가능한 논쟁점을 표현하라. 그러면, 존경을 받고, 그 문제점에 대한 개선책도 가능해 진다. 그렇지 않다면, 당신의 명성과 지적인 활동도 동시에 퇴보해 갈 것이다.
- 4) 어떠한 사람에게도 배울 점이 있다.

기술의 발전은 구조 엔지니어링과 엔지니어의 지속적인 역할의 증대를 요구한다. 건축의 중요한 부분인 구조를 책임지는 구조 엔지니어는 올바른 구조의 구현을 추구해야 한다. 그가 자신의 정당한 위치를 확보하기 위하여 끊임없이 노력해야 할 부분은 지식과 직관이다. 지식은 도구이며, 직관(엔지니어링 판단력)은 경험의 산물이다. 재료와 역학에

대한 역사 공부는 지식의 이해를 심화시키고, 직관의 Potential을 증대시킨다. 시대가 발전함에 따라 더욱 중요해진, 인문적인 건축가와 공학적인 구조기술자 간의 상호 이해와 효율적인 협조를 위해서도 지식과 직관의 배양은 더욱 필요하다.

참고문헌

1. 함인선, "구조의 구조," 도서출판 발언, 2000.
2. 어니스트 볼크만, "전쟁과 과학, 그 야합의 역사," 석기용 역, 이부고, 2003.
3. Alexander Newman, "Structural Renovation of Building," McGraw-Hill, 2001.
4. Robert Mark 외 10인, "서양건축기술사," 김태중과 조형래 공역, 경남대학교 출판부, 1999.
5. Kazuo Ishii, "Membrane Structures in Japan," SPS Publishing Co., 1995.
6. S.P. Timoshenko, "History of Strength of Materials," Dover Ed., General Publishing Co., 1983.
7. James F. Bell, "Mechanics of Solids," Springer-V Berlin, 1973.
8. S.P. Timoshenko and J.N. Goodier, "Theory of Elasticity," 3rd Ed., McGraw-Hill, 1970.
9. R.D. Cook, "Concepts and Applications of Finite Element Analysis," John Wiley & Sons, 1981.
10. NHK 테크노 파워 프로젝트, "길고 큰 다리, 도전과 한계," 세계의 거대건설 2, 최학준 역, 하늘출판사, 1994.
11. 시오노 나나미, "로마인 이야기, 10권," 김석희 역, 한길사, 2001.
12. Bungale S. Taranath, "Steel, Concrete and Composite Design of Tall Buildings," McGraw-Hill, 1998.
13. Glen V. Berg, "Elements of Structural Dynamics," Prentice-Hall, Inc., 1989.
14. 닐 파킨 외 28인, "우리 세계의 경이로운 70가지 건축물," 남경태 역, 2004.
15. Bryan Stafford Smith and Alex Coull, "Tall

- Building Structures: Analysis and Design," John Wiley & Sons, Inc., 1991.
16. John Tauranac, "The Empire State Building," St. Martin's Griffin, 1997.
 17. 시오노 나나미, "로마인 이야기, 7권," 김석희 역, 한길사, 1998.
 18. Mario Salvadori and Matthys Levy, "건축물은 어떻게 해서 무너지는가," 손기상 역, 2002.
 19. M. Salvadori and R. Heller, "건축의 구조," 윤일주와 김용부 공역, 민음사, 1973.
 20. 에두아르도 포로하, "Philosophy of Structures," 김용부 역, 기문당, 1999.
 21. R.P. Davis, "Advice to a Young Engineer," Pub. No. 167, Military Eng., 69:450, July-Aug. 1977.