

구조의 숲과 나무

Wholeness and Fragmentation in Structural Engineering



조한욱*
Cho, Han-Wook

1. 서 언

"Structural engineering is the art of modeling materials we do not fully understand, into shapes we cannot precisely analyze, so as to withstand forces we cannot properly assess, in such a way that the public has no reason to suspect the extent of our ignorance."

"구조공학이란 우리가 완전히 알지 못하는 재료를 사용하여, 우리가 완벽하게 해석할 수 없는 모델링으로, 우리가 적절히 평가할 수 없는 하중에 대하여 저항하도록 설계하되, 다른 사람들이 우리의 이러한 무지를 전혀 눈치 채지 못하게 하는 기술이다."

여러 해 전에 우연히 마주친 위의 글처럼, 구조 엔지니어들에게 자신의 업무에 대하여 이처럼 심금을 울리는 표현은 없다고 생각된다. 간단하면서도 정곡을 찌르는 이 글이 재미있어, 책상 앞에 붙여 놓은 것이 벌써 한참이 되었다.

* 정회원, 한미파슨스, 공학박사

건설 프로젝트는 일반적으로 기획에서부터 설계, 시공에 이르기까지 오랜 시간이 걸린다. 그동안 수많은 직종의 전문가들은 발주자의 요구 안에서 스스로 창조하는 작업을 수행하고 부문간에 서로 협조하여 프로젝트의 완성을 추구한다. 건물이나 토목 구조물의 뼈대를 다루는 구조공학은 구조물의 안전을 담당하는데, 그 중요성은 아무리 강조해도 지나치지 않다. 구조의 기획, 설계, 시공, 진단 및 유지관리, 보수 등의 각 단계에서 필요한 지식과 기능은 매우 다양한데, 훌륭한 구조 엔지니어가 되기 위해서는 모든 단계에 대한 전반적인 이해가 필요하다. 갈릴레오와 뉴턴으로부터 시작한 구조공학은 벌써 수백 년 동안 이론과 경험을 축적하였고, 최근에는 수치해석 및 컴퓨터 기술이 발전하여 구조설계의 좋은 도구로 자리를 잡았다. 빠르게 발전하는 구조 재료 및 공학의 기술과 더불어 구조부재의 절감 요구는 구조 엔지니어에게 끊임없이 자기 노력과 부담감을 동시에 요구하고 있다.

기원전 18세기의 함무라비 법전에서는 설계한 구조물이 붕괴되었을 경우의 벌칙에 대해 언급하고 있는데, 현대의 구조 엔지니어도 이러한 걱정으로부터 자유롭지 못하다. 수많은 정보의 홍수 속에서

상황에 따라 어떠한 것이 필요한 지, 분별하고 판단하는 능력을 갖추기는 매우 힘들다. 기술의 발전은 구조 엔지니어에게 도움을 주기도 하지만 실패의 확률을 감소시키는 지는 의문이다. Salvadori와 Levy¹는 "건축물은 어떻게 해서 무너지는가" 라는 저서에서 구조분야의 발전이 실패의 감소로 이어지는가 라는 질문에 대하여 기술의 발전이 오히려 실패를 증가시킨다고 생각하면서, 인간과 사회의 깊은 책임 의식만이 더욱 안전한 건물시공을 하는 확실한 길이라고 결론을 짓는다. 구조의 실패는 인간, 곧 설계자 및 시공자의 실수이며 발전하는 기술의 장점을 정확히 이해하지 못하거나 오용하는 것이 주요한 원인이 된다.

구조 엔지니어는 구조물에 작용되는 하중과 변위를 다루게 되는데, 설계과정에서는 최악의 하중 상황을 고려하지만 구조해석 자체는 일반적으로 탄성해석 내에서 수행한다. 구조설계의 과정을 통해서 엔지니어는 구조물의 수명을 결정하지만, 시공 엔지니어의 작업 품질도 큰 영향을 미친다. 구조 엔지니어는 골조의 시공에 참여하거나 감독할 수 있는 능력을 갖고 있어야 한다. 완공된 구조물에 대해서는 바른 진단 및 처방을 할 수 있어야 하고, 경우에 따라서는 설계도서나 현장만을 보고 위험을 감지할 수 있어야 한다. 구조 엔지니어는 구조의 넓은 세계에서 나무만 보지 말고 숲을 같이 생각해 보는 여유가 필요하다. 이러한 맥락에서, 구조공학의 틀 안에서 우리가 간과하고 지나가는 가정이나 가정 혹은 단상들을 같이 생각해 본다.

구조역학 안에서

구조 엔지니어가 일반적으로 다루는 재료역학과 탄성론은 정역학 분야인데 이는 동역학의 한 줄기라고 할 수 있다. 여기서 생각하는 탄성론은 고전 탄성론으로 소변위와 소변형(Small Displacement and Small Deformation)의 한계 내에서 취급된다. 고전 탄성론이 아닌 역학분야에 대해서도 많은 발전이 있었지만, 일반적인 구조해석은 탄성론(Cauchy Elasticity, Classical)의 범위 내에서 해결되며, 에너지 개념(Green Elasticity, Hyper-elasticity)을 도입

하여 설명되기도 한다.

탄성론은 힘과 변위를 체계적으로 분석할 수 있는 도구인데, 정적 상태에서의 힘(Forces)간의 평형방정식(Equilibrium Equations), 변위와 변형도의 적합방정식(Compatibility Equations), 힘과 변위를 연결하는 구성방정식(Constitutive Equations)으로 구성되어 있다. 이에 경계조건(Boundary Conditions)을 추가하여 미지의 힘이나 변위를 구하게 되는데, 방정식의 미지수 개수만큼 식이 존재한다면 모든 힘과 변위를 알 수 있다.

우리는 종종 동적인 외력에 대해서도 구조물이 정적인 평형상태를 유지한다고 가정하여 해석을 수행한다. 물론 그러한 관행의 배경에는 하중의 특성 및 구조물의 반응이 정적으로 해석되어도 문제가 없는지 이론적인 연구나 경험으로 검토되었을 것이다. 임의적이며 동적인 성격이 강한 지진이나 바람에 대해서 과연 정적 해석은 어느 정도 타당성이 있고 한계가 무엇인지는 결국 구조물 거동의 동적 성향과 밀접한 관계가 있다. 동하중의 특성을 감안하여 설계과정에서 단기하중에 대한 허용응력도를 증가시키는데, 미국 AISC(American Institute of Steel Construction)와 국내의 강구조설계규준은 각각 33%와 50%의 추가 응력을 인정하고 있다. 각 기준은 허용응력도의 증가를 왜 다르게 채택하게 되었을까?

동적해석에서 필요한 질량의 의미에 대해 가끔 혼동하기도 한다. 우리 몸무게가 70 kg 이라고 할 때 정확히 이야기한다면 70 kg 중 = 70 kg x 9.8 m/sec² ≃ 700 Newton 이 된다. 즉, 70 이라는 숫자는 질량을 의미하게 된다. 그렇다면 동적해석에서 필요한 질량을 구하기 위하여 구조물의 무게를 9.8로 나누는 작업이 옳은지 그른지 생각해 볼 필요가 있다.

구조부재의 힘과 변위는 다시 응력과 변형도로 치환되어 분석된다. 응력에 대해 생각해 보기 위해 간단한 예를 들어 보자. 단면적 A를 갖고 있는 봉에 P라는 인장력이 작용되고 있다면 응력은 $\sigma = P/A$ 가 된다. 응력은 여러 단위로 표현될 수 있지만(예: 100 N/m² 혹은 1 N/cm²) 그 의미는 어느 한 점의 단위 면적당 작용되는 힘을 뜻하며, 단위

면적이 m^2 혹은 cm^2 로 달리 표현되어도 상관없다. 면적이 없는 한 점이라는 의미는 단면적이 0(Zero)으로 수렴되는 상황을 이야기하지만 원자나 분자 상태를 뜻하는 것은 아니기 때문에, 응력의 정의에는 가정이 포함되어 있다고 할 수 있다. 이 개념은 탄성론에서 매우 중요한 개념으로 전단응력이 대칭이라는 $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ 를 유도하기 위한 전제 조건이기도 하다.

고전 탄성론의 전제인 소변위 소변형의 의미를 살펴보기 위하여 예를 들어보자. 원 길이 $l_0=1m$, $A=10 \times 10 cm^2$ (단면적)의 봉이 $P=100t$ (인장력)을 받고 있고 재료상수는 $E=2,100 t/cm^2$, $\nu=0.3$ (포송비)이라고 가정하면,

$$\sigma = 100/(10 \times 10) = 1 t/cm^2 \quad (1)$$

$$\epsilon = \sigma / E = 1/2100 = 0.0004762 \quad (2)$$

$$l = l_0(1 + \epsilon) = 1.0004762 m \quad (3)$$

가 된다. 이 값들은 탄성론 내에서의 결과이며 정확히 이야기하면 근사치이다. 가로, 세로의 두께 방향의 변형도는 $\nu\epsilon=0.3 \times 0.0004762=0.0001429$ 이므로 각 변의 길이는 $10 \times (1 - \nu\epsilon)=9.998571cm$ 가 된다. 그러므로 $\sigma=100/9.998571^2=1.000285776 t/cm^2$ 가 되며 식(1)의 결과와 약 0.03%의 차이를 보인다. 탄성론에서 이 정도의 오차는 무시된다.

변형도의 정의는 여러 가지가 있을 수 있다. 일반적으로 많이 사용되는 $\Delta l/l_0=(\text{변위})/(\text{원 길이})$ 는 공학적 변형도(Engineering Strain)이며, $\int dl/l=\ln(l/l_0)$ 로 정의되는 자연 변형도 혹은 로그 변형도(Natural Strain or Logarithmic Strain)도 생각할 수 있다. 3차원 대변형의 문제로 들어가게 되면 변형도의 정의(Green, Almansi Strain Tensors)에 변위량의 2계 도함수 부분을 포함하기 때문에 좀더 체계적인 접근이 필요하다.

상기의 소변형 문제에서 공학적 변형도는 식(2)의 0.0004762 이며, 자연 변형도와 Green 변형도는 각각

$$\ln(1.0004762/1) = 0.0004761 \quad (4)$$

$$E_{11} = [(1+0.0004762)^2-1]/2 = 0.0004763 \quad (5)$$

으로 약 0.02%의 오차를 갖기 때문에 어느 값을

사용해도 큰 차이는 없다. 그러나 원 길이 1m의 봉이 1.5m로 변하는 대변형의 경우를 가정한다면, 공학적 변형도는 1.5가 되며 식(4), (5)의 변형도는 각각 0.405465, 0.625라는 아주 판이한 결과치를 보인다. 탄성론의 범위를 초월하는 경우에는 변형도의 정의를 잘 이해하고 사용하여야 한다.

보의 해석에서 사용되는 식 $EI \frac{dy^2}{dx^2}=M$ 은 보의 변형된 형상이 원형이며 전단변형을 무시하는 Euler Beam 식이며, 일반 보의 정확한 해를 위해서는 더 복잡한 식이 유도되어야 한다. 판 해석에서도 보의 경우와 비슷하게, 전단변형을 고려하지 않은 Kirchhoff의 4계 도함수 판 이론이 있으며, 두꺼운 판의 해석으로는 6계 Mindlin 해석이나 더 고계(高界)의 방정식이 존재한다. 요즘은 상용되는 구조 해석 프로그램에서는 대부분 전단변형을 고려하기 때문에 이러한 문제로 큰 고민을 할 필요는 없다. 하지만 구조역학의 가정과 해석방법은 항상 일관성이 유지되어야 한다는 것을 유념해야 한다.

컴퓨터 해석과 관련하여

구조 엔지니어는 건설 분야의 다른 직종과 비교하여 수학을 많이 사용하며, 해석을 위해서 컴퓨터를 자주 접한다. 약 20년 전의 중형 컴퓨터가 처리하기 힘든 규모를 지금은 개인 PC내에서 해결할 수 있으며, 사소한 부분까지도 컴퓨터로 처리가 되어 수 계산하는 행위가 낯설기조차 하다. 이러한 환경의 변화는 컴퓨터 결과물에 대한 맹신하는 경향을 초래하게 하는데, 이런 현상은 기술 발전의 자연스런 결과일지도 모른다.

컴퓨터 해석 과정은 구조설계의 긴 프로세스 중에서도 단지 하나의 중간단계일 뿐이나, 구조 엔지니어에게 복잡한 방정식에 대한 해를 쉽게 구할 수 있는 도구로 사용된다. 컴퓨터 해석 전의 초기 이상화 단계는 대상 구조물과 주위 환경에 대한 모델링 과정을 필요로 하는데, 얼마나 실제 상황과 가깝게 구조물과 하중을 가정하느냐가 주요 관건이다. 이상적인 초기 모델링을 위해서는 구조에 대한 충분한 기본 지식과 경험이 바탕이 되어야 하며 각 단계별로 공학적인 판단력은 매우 중요하게 된다.

수학적 해가 존재하는 해석 문제는 그리 많지 않다. 건축물의 구조는 일반적으로 고차 부정정 구조이기 때문에 근사해석을 동반하게 된다. 요즘은 유한요소법이 발달하고 이를 수용할 수 있는 컴퓨터가 발전하여 그리 어렵지 않게 해석적으로 접근할 수 있다. 그러나 프레임으로만 구성된 단순한 구조물이 아닌 한 유한요소해석은 오차를 필히 수반하게 된다. 그러므로 해석과정에서 적절한 유한요소의 선택과 Mesh의 크기가 중요해진다. 예를 들면, 벽체에 내민 보가 있을 때 면응력 요소(Plane Stress Element) 벽체와 보 요소(Beam Element)를 사용한다면, 연결부에 자유도(Degree of Freedom)가 공유되지 않기 때문에 해석 중에 여러 메시지가 발생하거나 엉뚱한 답이 생성될 것이다. 정확한 해석을 위해서 적절한 요소의 선정은 필수조건이다. 수치해석에서 피할 수 없는 에러의 발생은 Mesh를 어떻게 구성하느냐와 결과치가 정확해에 수렴하느냐에 대한 의문이다. 가능한 정방형의 유한요소가 유리하며, Mesh 크기를 줄이면서 수치해석을 반복하면 해석결과의 수렴을 분석해 볼 수 있다.

모델링의 가정에 대하여

구조해석의 모델링 과정에는 의식적으로 혹은 무의식적으로 많은 가정이 포함된다. 적용하는 가정이 합리적이기 위해서는 사전에 그에 대한 타당성을 충분히 검토하여야 한다. 통상적으로 사용되는 가정도 상황에 따라서 이상한 결과를 도출하기도 한다. 한 예로 고층건물의 해석을 생각해 보자. 고층건물에서는 20~30층 간격으로 기체실이 위치하는 경우가 많은데, 구조 엔지니어들은 보통 이 층을 횡 변위를 제어하기 위한 아웃리저(Outrigger)라는 구조시스템을 설치하기 위한 위치로 이용한다. 중앙의 코어 벽체와 외부 기둥을 서로 연결하여 지진 혹은 바람에 효과적으로 저항하는 구조시스템을 구성하며, 바닥 슬라브는 횡력을 분배하는 횡격막(Diaphragm)으로 강체로 가정된다. 이런 경우, 어떤 초고층 건물의 구조해석 결과에서는 Outrigger층을 포함한 주위 층에서 벽체에 그 층의 총 전단력보다 훨씬 큰 부전단력(Negative Shear)이 발생하여 벽체 설계가 불가능한

경우를 초래한다. 큰 부전단력에 대해 설계될 수 있도록 벽체의 단면을 키워서 구조해석을 다시 수행하면, 부전단력이 더 커져 설계가 불가능한 악순환이 반복된다. 먼저, 이러한 거동이 과연 실제로 발생할 수 있는지 숙고할 필요가 있다. 이런 결과가 도출되는 이유는 무엇일까? 슬라브가 강체 거동한다는 가정이 그 원인이 될 수 있다. 탄성해석의 범위 내에서 강체 가정은 주어진 방정식의 개수는 줄여주지만 이는 적합조건(Compatibility Conditions)을 강제로 제한하여 사실과는 다른 해로 유도할 수 있다. 아우트리저(Outrigger) 층 주위에서는 슬라브를 유연판(Flexible Diaphragm)으로 가정하는 것이 실제 상황에 가깝다고 할 수 있으며, 슬라브의 강성을 직접 반영해서 해석하면 부전단력이 줄어드는 것을 알 수 있다. 물론 이러한 조건을 수용할 수 있는 컴퓨터 해석 소프트웨어의 능력이 필요하다. 구조해석의 중간과정에서 방정식의 개수를 줄이는 가정은, 그렇지 않았을 때의 해석 결과와 비교, 검토하여 큰 차이(엔지니어링 오차 범위 내)가 없다는 것을 확신할 때 적용되어야 한다.

하나의 예를 더 들어 보자. 지반 엔지니어가 평가하는 지내력이란 지반상수와 처짐을 고려한, 지반이 지지할 수 있는 힘을 나타낸다. 구조 엔지니어는 허용지내력 내에서 기초를 설계하게 되는데, 일반적으로 지반의 변형은 고려하지 않는다. 지반 상부에 설치된 구조물의 기초와 지반은 같이 변형하지만, 기초의 변형은 보통 크지 않다고 가정된다. 그러나 이런 가정이 적용되지 않는 경우가 있다. 초고층 건물의 매트(Mat)기초가 그 예인데, 변형은 무시할 수 없을 정도로 커지며 이에 따라 기초의 부재력도 상당히 달라질 수 있다. 초고층의 Mat 설계에서는 지반 엔지니어로부터 지반해석을 통한 지반상수를 얻어 기초해석이 수행되고, 그 결과는 다시 지반해석의 변위와 비교하여 수렴 여부가 검토되어야 한다. 이와 같이 구조와 지질 엔지니어의 경계분야(Interface Discipline)에서는 상호 이해와 협력이 절대적으로 필요하다.

여기서 지반 상수에 대해 좀 더 검토해 보자. 대칭인 고층건물이 균질한(Homogeneous) 등방성(Isotropic)의 지질 상부에 Mat 기초로 세워졌을 때, 기초 평면의 정 중앙 점에서 제일 큰 처짐을 보이고 외부 모서리에

서는 상대적으로 작은 처짐이 발생된다고 예상할 수 있다. 지반의 강성을 지반 스프링(Winkler Spring)으로 치환한다면 정 중앙은 작고 가장자리는 큰 스프링 상수를 갖는다는 것을 의미한다. 이와 같이 똑같은 재질을 가진 지반이라도 상부의 하중 형태와 기초 크기 등으로 지반상수는 위치에 따라 달라질 수 있다.

상기의 사례는 일반적인 경우에 타당한 가정이 초고층의 경우에는 적절하지 않았던 경우이다. 부재의 강성을 실제 상황과는 달리 가정함으로써 해석 방법과 결과가 달라질 수도 있는 가능성을 보여 준다. 모델링에서의 가정은 다양하게 제기될 수 있다. 구조해석 모델링에서의 가정은 충분한 논리가 뒷받침되어야 한다.

구조의 설계에 대하여

구조 엔지니어는 설계 초기에 하중을 생각한다. 기준에서 언급되는 하중에 대해서는 별 이견이 없겠지만, 그렇지 못한 경우에는 하중의 채택과 해석방법에 대해 논리적이어야 할 필요가 있다. 먼저, 온도하중을 생각해 보자. 지역이나 상황마다 다를 수 있지만, 이에 대해 합리적으로 설계에 반영하는 사례가 많지 않은 것 같다. 온도해석을 통해 발생한 힘은 하중 조합에 반영되고 필요시 철근이 추가로 배근될 수도 있다. 온도로 인한 구조물의 팽창과 수축에 대한 하나의 대안인 Expansion Joint의 설치는 이러한 해석과 병행하여 분석되어야 한다. 가끔 발견되는 사례로, 건물의 길이가 길어서 E.J.를 설치하자고 제안하지만 설치에 따른 이점이 무엇인지 전혀 분석하지 않는 자세는 바람직하지 못하다.

바람의 경우를 생각해 보자. 구조 엔지니어는 일반적으로 크고 안전한 값을 요구하는 기준의 풍하중을 사용하지만, 고층건물 구조의 유연성이나 단순하지 않은 평면으로 인한 풍하중의 복잡한 특성에 적용하기는 쉽지 않다. 이러한 경우에 보통 풍동실험을 수행하는데, 이를 통하여 얻은 횡력은 기준의 풍하중 대신 사용될 수 있다. 하지만 구조설계자는 추후 심의과정에서 통과된다고 자신하기는 쉽지 않다. 풍력 외에도 풍압, 풍환경 실험과 거주성 평가 등이 풍동 전문가가 수행하는 업무인데,

구조 엔지니어는 이러한 과정에 대하여 전반적으로 이해할 필요가 있다.

내진설계의 규정은 최근에 강화되고 있는 추세이다. 내진설계의 개념은 세계적으로 계속 발전하고 있으며 국내기준도 꾸준히 변화하고 있다. 구조 엔지니어는 응답 및 설계 스펙트럼의 개념의 정확한 이해는 물론, 구조물의 동적해석을 수행할 수 있어야 한다. 추후 내진설계 기준에서는 중요한 구조물에 대하여 비탄성해석이 필수과정으로 포함될 지도 모를 일이다.

초고층의 구조설계가 많이 진행되면서 댐퍼(Damper), 기둥 축소(Column Shortening) 등의 낯설은 용어들이 소개되고 있다. 댐퍼는 바람에 대한 건물의 진동을 저감시켜 거주성을 제고시키는 시스템이다. 구조해석 과정에서는 운동방정식에 댐핑(Damping) 항목이 추가되어 구조물의 해석이 어려워지며, 이에 대한 전문 능력이 요구되어 구조 엔지니어는 일반적으로 이를 해석할 능력이 없다. 더구나 직접 댐퍼의 설계 및 제작을 생각한다면 더욱 어려운 일이 될 것이다. 즉, 전문가의 도움을 필요로 하는 상황인데, 구조 엔지니어는 이 때 어떤 Outsourcing으로 언제 어떻게 활용할 지 잘 대처할 필요가 있다. 기둥축소란 철근콘크리트 고층건물의 경우에 하중 및 콘크리트의 크랄(Creep)과 건조수축 등의 성질로 인하여 기둥부재가 줄어드는 현상을 말한다. 사전에 충분히 검토하여 조치를 취하지 않으면 추후 건물에 큰 손상을 끼칠 수도 있다. 이에 대한 정확한 예측은 매우 어려우며 실제 예측자료도 사전 해석과 다른 경우가 많이 있다. 많은 설계보고서에 기둥축소량에 대한 보정방법이 언급되고 있지만, 실제 현장에서 가능한 방법인지에 대한 고려가 미흡한 경우(예를 들면, 매 층 몇 mm 거푸집 보정같은 비현실적인 조치)가 많으며 실제 적용되었는지도 의심스러운 경우가 대부분이다. 그러나 고층 건물의 구조설계에서 반드시 고민해야 할 분야이다.

각 부재의 설계는 구조설계의 과정을 마무리하는 단계이다. 설계가 완료되면 골조공사비의 70~90%가 이미 결정되었다고 할 수 있다. 구조설계의 결과물은 구조도면에서 부재로 구현되는데, 시공의 품질

은 잘 구성된 도면으로부터 시작된다.

구조의 시공에 대하여

철근콘크리트 및 철골구조의 골조 시공에 대해 생각해 보자. 일반적으로 설계는 구조 엔지니어가 담당하며, 시공은 현장 엔지니어가 책임을 지게 된다. 현장의 시공 엔지니어가 설계의 의미를 충분히 이해하지 못하거나 관련 지식이 부족할 때는 구조하자가 발생할 가능성이 크다. 구조설계는 도면으로 잘 형상화되고 부족한 부분은 시방서로 보완이 되어야 하며, 시공자는 이를 충분히 숙지하여야 한다.

일반적으로 시방서 내용 중에서 특히 무시되는 부분은 품질 분야이다. 예를 들면, 콘크리트의 다짐(Vibration)과 양생(Curing)이 그러한 부분인데, 콘크리트 표준시방서는 “콘크리트를 친 직후 충분히 다지고, 양생은 보통콘크리트의 경우 5일 이상”이라는 정도로 언급하고 있다. 과연 이 문장을 가지고 현장에서 어떻게 해석하여 작업할 것인가? 다짐과 양생은 콘크리트의 강도 및 품질에 직접적인 영향을 미치는 중요한 과정이므로, 구조 및 시공 엔지니어는 그 목적과 방법에 대해 충분히 숙지해야 하며, 현장 상황에 따라 융통성을 발휘할 수 있어야 한다. 그러나 많은 현장의 경우에 이에 대한 관심이 소홀하거나 무시되기 일쑤이다. 콘크리트는 현장 작업의 품질과 사후 조치는 바로 구조물의 품질로 이어진다.

철골부재는 공장에서 제작되어 현장에서 조립된다. 부재의 올바른 제작을 위해서는 공장 생산과정에 대한 사전 검수가 필요하며, 구조 엔지니어는 공장 프로세스의 검수 과정에서 무엇을 어떻게 할 것인가에 대해 숙지하고 있어야 한다. 현장에서의 부재 조립은 구조물의 안전성과 직결이 되므로, 구조물의 올바른 제작에 못지않게 중요한 부분이다. 그러나 설계자의 의도가 잘 반영되지 않거나 기본 원칙이 적용되지 않고 시공되는 사례는 아주 많다. 예를 들면, 현장에서 흔히 많이 사용되는 고력볼트 연결은 마찰접합이기 때문에 표면처리가 매우 중요한데, 접합부 주위에 페인트로 도포되어 있던가, 아니면 용융아연도금 처리로 설계되어 있다면, 설계/

시공 과정에서 부재의 연결만을 생각하고 전체를 파악하지 못하는 경우라고 할 수 있다. 철골공사의 하자 발생은 공기와 공사비의 지연을 크게 초래하는 경향이 있으므로, 구조 엔지니어는 공장 생산에서부터 세심한 관심을 가져야 한다.

최근 건설되었던 고층 주상복합 프로젝트에서는 공기 단축에 대한 연구가 많이 진행되었다. 고층건물의 골조공사 기간은 전체 공기에서 매우 중요한(Critical) 요소이므로 단축을 위해 노력해야 하는데, 설계단계에서 시공의 용이성과 재료/공법의 검토를 통해 공기의 단축을 상당히 도모할 수 있다. 시공성을 고려하는 구조설계는 고층뿐만이 아니고 일반 구조물의 공사에서도 필요하며, 구조 설계자에게는 시공에 대한 충분한 이해와 협의가 요구된다.

구조의 경제성에 대하여

구조의 경제성은 모든 구조부재 및 시스템에서 고려되어야 한다. 요즘은 가치공학(Value Engineering)이라는 이름으로 공사비 절감을 위하여 많이 노력한다. 이러한 활동은 설계 초기부터 모든 설계자들에 의해 시작되는데, 구조 엔지니어도 구조설계의 과정을 통해 지속적인 관심을 가질 필요가 있다. 콘크리트 강도는 왜 240 kg/cm²이어야 하는지, 철근은 SD 500W이어야 하는지, 구조는 전단벽 시스템이어야 하는지, 작계는 재료의 선정에서부터 부재 및 구조시스템까지 모든 항목에서 경제적 논리가 적용되어야 한다. 항목별로 독립적으로 결정될 수 있지만, 여러 부분이 서로 상호 연계되어 있어 추론하기가 매우 어렵고, 경우에 따라서는 생산 가능성에 대한 조사나 공기 분석까지 필요할 때가 있다. 물론, 모든 부분에 대한 체계적인 근거가 미흡할지라도, 최소한 구조 엔지니어는 자신에게 어느 정도 답할 수 있는 논리를 발견하여야 한다. 구조 엔지니어는 내키지 않더라도, 구조의 효율성은 공사비의 관점에서 논의될 수밖에 없으며, 때로는 전혀 생각하지 못했던 방향으로 결론을 도출하기도 한다. 불행하게도 대부분의 발주자가 제일 선호하는 원칙은 경제성의 논리일 것이다.

기술의 습득과 관련하여

복잡하고 광범위한 기술 전체를 체계적으로 분석하기 위하여 여러 전문분야로 나누고, 필요에 따라 각 분야는 하부항목으로 더 세분화 된다. 세부 영역에서의 독립 및 전문화는 활성화되지만, 전체를 보는 시각은 미흡하게 되어 각 분야의 연결을 조정하는 새로운 전문영역까지 출현한다. 세부항목의 전문가는 최초의 목표를 잊고 자기 자신만의 목표에 안주하게 되는 경향이 있으며, 경우에 따라서는 전체의 흐름과는 동떨어진 시각을 가질 수도 있다. 건설이라는 커다란 숲에서 구조는 하나의 나무이며, 구조 엔지니어는 숲에서의 조화를 항상 염두에 두고 있어야 한다.

구조기술의 전문화 및 발전은 구조 엔지니어에게 기술의 습득에 대해 새로운 도전을 요구한다. 지식의 넓은 바다에서 어떻게 자신의 위상을 설정하고 자신을 키워야 하는지 쉽지 않은 과제가 되어 버렸다. 너무나 많은 정보와 지식은 구조 엔지니어에게 끊임없는 노력을 요구하지만, 실제 엔지니어들이 접하는 직업 환경은 너무 분업화되어 열악해지는 경향이 있다. 이러한 상황에서 구조 엔지니어는 기술의 습득을 위하여 긴 안목으로 체계적인 접근을 할 필요가 있다.

건설 프로젝트의 완료 후에 무엇이 결과로 남는지 생각해 보자. 완공된 구조물과 프로젝트 관련 설계도서를 생각할 수 있으며, 추가로 참여 기술자들의 체험을 들 수 있다. 앞의 두 가지는 형상화 내지 문서화한 형식지(形式知)인 반면에, 기술자들의 머리 속에 남아있는 기술은 암묵지(暗黙知)라고 할 수 있다. 이 지식은 기술요소 뿐만이 아니라 시행착오의 과정도 포함한다. 진정한 기술이며 새로움을 창출할 수 있는 능력이지만 문서화하기 힘들다는 속성이 있다. 암묵지는 경험이라는 이름으로 남게 되며, 설계과정에서 필요한 기술적 판단력(Engineering Judgement)의 근거가 된다.

장자(莊子)에 나오는 재미있는 이야기가 있다. 기원전 7세기에 춘추5패 중의 선두 주자인 제나라 환공과 목수 윤편의 대화이다. 일흔 살 먹은 노인 목수는, 책을 읽고 있는 제 환공에게 책은 옛사람

의 찌꺼기라면서 하면서, 자기 자신이 수레바퀴를 정확하게 깎을 수 있음은 더도 덜도 아닌 손짐작으로 터득하고 마음으로 느낄 뿐, 입으로 말할 수 없으며 말로 깨우쳐 줄 수가 없고 가장 핵심적인 것은 전하지 못 한다고 이야기한다.² 암묵지에 대한 장자의 뜻있는 은유라고 생각한다.

일본의 건설공학에 대한 자부심은 대단하다. 장대교량의 건설을 통한 기술의 발전은 그 중의 하나인데, 19세기에 미국에 비해 약 100년 뒤졌다는 기술을 20세기 말에 아카시 대교의 건설을 정점으로 드디어 추월하였다는 자체 평가를 내린다.³ 그러나 최근 30년 동안 미국이 장대교량을 건설하지 않았던 사실이 추월할 수 있었던 큰 이유이었으며, 일본도 더 이상 대형 프로젝트가 존재하지 않다는 사실을 깨닫게 된다. 그래서 엔지니어들은 기술의 전승에 대하여 모색하기 시작했고 목표를 설정하고 실질적인 계승 노력을 이미 착수하였다. 기술의 본질은 암묵지이며 실프로젝트의 경험과 같이 병행하여 발전한다는 사실을 그들은 잘 이해하고 있는 것이다. 우리 국내기술의 현 주소는 과연 어디일까?

구조 엔지니어는 정보와 지식을 응용하고, 여러 지식을 연결하여 새로운 지식으로 발전시키며, 어떠한 정보가 필요한 지를 분별하고 판단하는 능력을 키워야 한다. 그는 왜곡된 정보와 개념을 바로 잡는 일도 할 수 있어야 하며, 구조만이 아닌 외부와의 대화 기술에 대해서도 관심을 가져야 한다. 즉, 지식을 소비만 하지 않는 지식 생산자로서의 역할을 할 수 있어야 한다. 구조 엔지니어는 전문기술의 깊이를 심화하고 폭넓은 연계 지식, 기술 판단력, 전문가 기질(Professionalism), 사회에 대한 사명감을 갖춰야 한다.⁴

결언

구조공학은 건설공학이라는 숲의 한 그루 나무이며, 구조공학 자체는 다시 여러 갈래의 줄기를 거느린 나무가 된다. 건설이라는 숲에서 활동하는 구조 엔지니어는 자신의 나무가 어떠한 존재인지 그 위상을 조명해 볼 필요가 있다. 모든 줄기가 골고루 자랄 수 있도록 끊임없이 지식과 경험이라는 자양분을 제공

하고, 나무에 대한 미래의 비전을 제시할 수 있어야 한다. 그리하면 나무는 잘 육성되고 숲 속에서 자신의 존재에 대한 보람을 찾을 것이다.

참고문헌

1. Mario Salvadori 와 Matthys Levy, 건축물은 어떻게 해서 무너지는가, 손기상 역, 2002, p.331
2. 신영복, 강의 나의 동양고전 독법, 돌베개, 2005, p.515
3. NHK 테크노 파워 프로젝트, 길고 큰 다리, 도전과 한계, 세계의 거대건설 2, 최학준 역, 하늘출판사, 1994, p.316
4. 조한욱, “구조의 역사와 철학,” 한국셀·공간구조학회, Vol.4, No.2, 2004, pp.17~25