작은 構造

李 昌 男 — 센 구조 연구소

"지극히 작은 것에 충성된 자는 큰 것에도 충성되고 지극히 작은 것에 불의한 자는 큰 것에도 불의하니라."
(누가복음 16장 10절)

나 어렸을 때는 모두가 "큰 것" 을 좋아했읍니다.

약소민족이 작은 집에서 적게 먹고 조금씩 살다가 키큰, 코큰 사람들 앞에서니 자신이 너무나 초라해 보였고, 키가 160㎝ 이상만 되면 미스 코리아 선발대회에 응모해 놓고 보는 식의 웃지못할 풍조까지 있었읍니다.

돈 생기면 작은집 팔아 큰 평수의 아파트로 이사 갔고 꼬부랑 골목길이 8차선 신작로로 변했읍니다. 그 덕택에 큰집, 높은집이 설계되었고 건축사지도 그래서 페이지수가 늘어나게 되어 이같은 잡문도 실어주기에 이르렀읍니다.

우리가 설계·감리하는 집은 왜 필요 합니까? 우선 추위, 더위, 눈, 비, 바람, 소리, 시선 등 대체로 외부로 부터의 각종 침해를 막기 위해서입니다.

그 다음으로는 자고, 먹고, 배설하고, 쉬고, 놀기에 알맞는 장소확보를 위함입니다.

마지막으로 그 집을 아름답게 꾸며 자기와 남의 눈을 즐겁게도 하기 위함입니다.

그런데 돌붙인 집 안방 벽지가 썩어 곰팡이 냄새가 나고, 네발 달린 가구 치고 고이지 않고도 수평을 이루는 방바닥이 없는 지경이니 웬 조화입니까?

큰 사람만 큰일 하고 작은 사람은 작은 일만 하라는 법 있다더냐? 하면서 어디에선가 설계나 시공 한두번 해본 사람이면 용기있게 설계사무소를 차리고 중동에도 나가 일을 합니다. **남의 돈으로 연습 잘들 합니다.** 어느 면으로는 불안하고 또 한편으로는 기특합니다. 누가 이런 기회를 주겠읍니까?

어느 현장이거나를 막론하고 집은 "일꾼" 들이 짓습니다.

땟국 흐르는 얼굴의 주인공들 말입니다. 그분들은 무엇을 보고 일을 합니까? 바로 크고 작은 건축설계 사무소에서 그린 도면입니다. 도면 중에서도 가장 많이 보는 것이 각종 상세도입니다. 문제는 여기에 있읍니다.

건물의 기본설계, 평면계획 등은 그래도 경험있다는 건축사들에 의해서 이루어지나 상세도 작성은 보조원들에게 미루는 경우가 많습니다. 더구나 구조 도면을 그리는 보조원은 숙련도가 낮은 신입사원인 것이 보통입니다. 규모가 큰 설계사무실에서는 아예 처음 입사한 보조원에게 구조도면 작성부터 시키는 것을 보았읍니다. 슬래브배근 요령, 각종 단면 LIST, 라멘도 등은 조금도 그 질이 향상되지 않습 니다.

이제 그 책임의 일부가 필자에게도 있음을 깨닫고 가장 쉽고 기본적인 "작은 구조"로 부터 풀어 나가려 합니다.

따라서 이 글은 2,000여명이나 된다는 등록 건축사들을 위한 것이 아니라 그들을 도와 일하는 보조원들을 위한 것임을 밝혀두는 바입니다.

지금은 개성을 중요시하는 시대입니다. 이목구비 반듯한 팔방미인도 좋겠지만 어느 부분 Detail 하나, 다시 말하면 눈이 예뻐 결혼했다든가 아니면 종아리가 탐이 나서 연애했다는 등의 얘기가 심심치 않게 나오는 때입니다. 보조원들이 하는 일의 대부분은 입술이나 목덜미에 해당하는 부분상세도를 작성하는 것입니다. 그러니 이것을 어떻게 소홀히 하겠읍니까? 입술상세도 하나를 잘못 그리면 물마실 때 턱으로 줄줄 흘러내리는 사람이 되는 것처럼 창문틀 Detail작성을 잘못하면 빗물이 방안으로 들어오게 되는 부실한 집이 생겨나는 것입니다.

구조상세도 작성 담당보조원 여러분!!

내가 지금부터 늘어 놓는 잔소리를 하나하나 이해하기만 하면 앞으로 작성하는 모든 구조 상세는 그 건물의 매력의 point가 될 것입니다.

나무는 가로 세로 각각 1㎝, 즉 1㎠만한 단면에 사람 하나(70kg) 정도의 무게를 올려 놓거나 매달아도 찌그러지거나 끊어지지 않습니다. 즉 허용 압축응력도와 허용 인장 응력도가 70kg/cm² 이라는 뜻입니다.

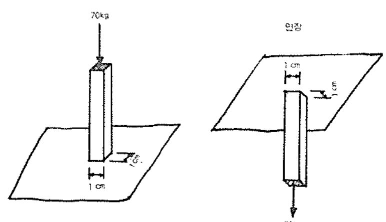

그림 1

콘크리트도 허용 압축응력도는 나무와 같이 70kg/cm² 정도이나 허용 인장응력도는 그 1/10 정도 밖에 안됩니다. 그것도 믿을 수가 없어 아예 인장응력도는 무시하기까지 합니다.

쇠는 허용 압축응력도와 허용 인장응력도가 무려 1,600kg/cm² 이나 됩니다. 나무의 약 23배입니다. 이렇게 누르고 당기는 목적에만 사용되는 구조재료를 압축재·인장재라고 합니다. 기둥은 압축재이고 천장 틀을 매달고 있는 철사는 인장재입니다.

그런데 세상 만물이 누르면 그 길이가 줄어들고 당기면 늘어나게 마련입니다. 여기까지의 설명을 알아 듣지 못한다면 책장을 덮어 버리고 건축을 때려 치워야 합니다.

다음은 구부림(Bending)에 대한 설명입니다. 외나무다리를 건너 가려면 휘청거립니다. 사람이 올라가면 구부

러집니다. 구부러진 외나무다리를 자세히 살펴보면 그림 2와 같습니다.

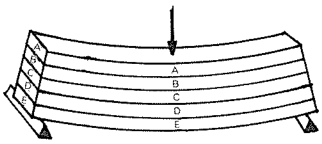

그림 2

Ⓐ는 길이가 많이 줄었고 Ⓔ는 반대로 많이 늘어났읍니다. Ⓑ는 적게 줄고 Ⓓ는 적게 늘어났읍니다. 그러나 Ⓒ는 줄지도 늘지도 않았읍니다.

앞에서 누르면 그 길이가 줄어들고 당기면 늘어난다고 했읍니다. 다시 말을 바꿔서 길이가 준 것은 눌렸기 때문(압축력)이고 늘어난 것은 당겼기 때문(인장력)입니다. 많이 준 것은 압축력을 많이 받았기 때문이고 많이 늘어난 것은 인장력을 많이 받은 이유입니다.

여기서 재미있는 것은 Ⓒ입니다. Ⓒ는 줄자도 늘지도 않았다고 했으니까 눌리지도 당겨지지도 않았다는 뜻입니다. 즉 놀고 먹었다는 얘기입니다. 이 Ⓒ를 우리는 중립축이라 부릅니다. 다만 Ⓐ～Ⓔ까지는 편의상 그렇게 나누어진 것처럼 그렸을 따름이고 실제로는 하나의 각재(角材)입니다. 만약 그들 각기가 서로 미끄러져서 따로따로 논다면 그림 3과 같이 구부러지며 한데 붙어 협력했을 때(그림 2)보다는 훨씬 적은 내력을 갖게 됩니다.

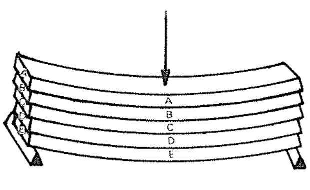

그림 3

합판 한겹한겹 사이의 풀이 약해 다 떨어진다면 무슨 힘을 받겠읍니까?

뭉치면 살고 흩어지면 죽는다!!

Ⓐ에서 Ⓔ까지는 다 같은 나무이니 값도 같고 무게도 또한 같습니다. 그러니 꾀많은 건축사 양반들이 그냥 둘리 있겠읍니까? 가장 힘을 많이 쓰는 Ⓐ와 Ⓔ는 놓아 두고 놀고 먹는 Ⓒ나 힘을 적게 쓰는 Ⓑ Ⓓ를 깎아 내려고 여러가지 방법을 생각하게 되었읍니다. 나무는 깎아내기가 힘이드니 못하더라도 쇠는 아예 공장에서 그렇게 뽑아 냅니다. (그림 4)

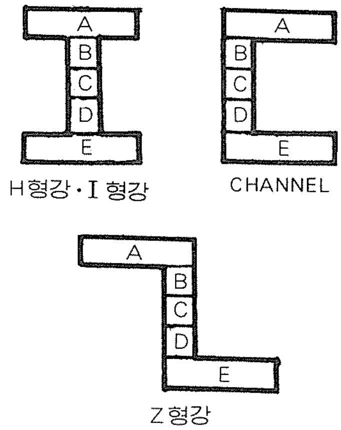

그림 4

그림 4에서 Ⓐ나 Ⓔ부위를 FLANGE라 부르고 Ⓑ Ⓒ Ⓓ부위는 WEB라고 합니다. 구부림 MOMENT에 저항하는 부위는 주로 FLANGE이고 WEB는 전단력을 지탱하는 역할을 합니다.

본론으로 돌아가서 외나무다리의 구부림 MOMENT를 계산하겠읍니다. 그림 5와 같이 길이 4m의 외나무다리 중앙에 70kg짜리 청년이 서 있다고 합시다.

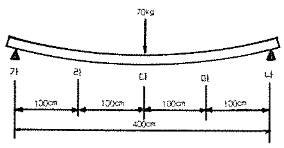

그림 5

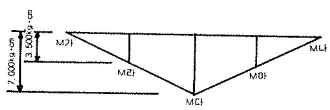

그림 6

청년이 다리 중간에 있으므로 ㉮와 ㉯는 각각 35kg씩 받들고 있으면 될 것입니다. (설명을 간단히 하기 위하여 다리 자중은 무시함) 이런 단순보(SIMPLE BEAM)의 구부림 모멘트(BENDING MOMENT)는 다음과 같이 계산합니다. 먼저 ㉮에서의 BENDING MOMENT인 M가는 ㉮의 반력 35kg에다 ㉮에서 ㉮까지의 거리, 즉 0을 곱한 값입니다.

$M_{\text{가}} = 35^{kg} \times 0^{cm} = 0^{kg \cdot cm}$

㉱점에서는

$M_{\text{라}} = 35^{kg} \times 100^{cm} = 3,500^{kg \cdot cm}$,

같은 요령으로

$M_{\text{다}} = 35^{kg} \times 200^{cm} - 70^{kg} \times 0^{cm} = 7000^{kg \cdot cm}$ 입니다.

㉲에서의 BENDING MOMENT는 ㉮의 반력(35kg)에다 ㉮에서 ㉲까지의 거리 300cm를 곱하고 ㉰의 무게(70kg)에다 ㉰에서 ㉲까지의 거리(100cm)를 곱한 값을 빼면 됩니다. 이 더하고 빼는 것은 반력이나 하중의 방향만 조심하면 됩니다.

$M_{\text{마}} = 35^{kg} \times 300^{cm} - 70^{kg} \times 100^{cm} = 3,500^{kg \cdot cm}$

이렇게 해서 계산된 값을 축척에 맞추어 그려 놓으면 그림 6과 같은 BENDING MOMENT가 됩니다. 편의상 구부러질 때 배가 나오는 쪽에 그리기로 약속하겠읍니다. 구조는 필자와 같이 정직하고 고지식한 사람이라야 이해하기 쉽습니다. 요령 부리고 자꾸만 예외를 찾다 보면 헛갈려서 답이 틀립니다.

이 청년이 ㉲까지 걸어 갔다면 어떻게 될까요? 그림 7, 그림 8과 같아 질 것입니다.

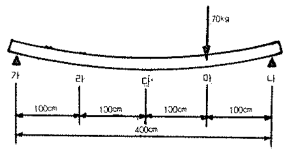

그림 7

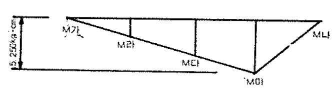

그림 8

앞 문제에서 처음으로 계산한 것은 ㉮와 ㉯에서의 반력이었읍니다. 어떤 구조에서나 하중이 작용하면 그 하중은 그 구조물을 지지하는 지점으로 전달되어야 합니다. 이 보에는 지점이 ㉮와 ㉯밖에 없으니 70kg의 하중은 ㉮와 ㉯가 나누어 분담하여야 합니

다. 하중은 아주 공평하게 움직입니다. 가까운 지점에 많이 전달되고 먼 지점으로는 조금만 전달됩니다. 그 크기는 거리에 반비례 합니다.

㉲에서 ㉮까지는 300cm이고 ㉯까지는 100cm이니 ㉮에는 $\frac{100}{400}$ ㉯에는 $\frac{300}{400}$의 비율로 전달됩니다.

㉮의 반력 $= 70^{kg} \times \frac{1}{4} = 17.5^{kg}$

㉯의 반력 $= 70^{kg} \times \frac{3}{4} = 52.5^{kg}$ 70^{kg}

따라서 ㉲에서의 BENDING MOMENT M마는

$$M_{마} = 17.5^{kg} \times 300^{cm} - 70^{kg} \times 0 = 5,250^{kg \cdot cm}$$

이렇게 같은 외나무다리라도 사람이 건너가는 도중에 BENDING MOMENT는 수시로 변하게 되는데 그 값이 제일 큰 경우는 역시 청년이 다리 중앙에 왔을 때 입니다. 막대기에 물건을 끼워 두 사람이 들고 갈 때 그 물건의 위치를 수시로 바꿔가며 막대기의 휘는 모양과 들고 가는 두 사람에게 전달되는 무게를 상상해 보면 이런 문제는 쉽게 이해하게 될 것입니다.

이런 하중을 집중하중이라 부르며 집중하중이 몇개가 되더라도 하나하나 조합해·나가면 어느 위치에서도 BENDING MOMENT의 크기를 계산해 낼 수 있게 됩니다.

그러면 이 배운 것을 응용하여 등분포하중을 받는 단순보의 BENDING MOMENT를 계산해 보기로 하겠읍니다. 등분포하중이란 보의 전 길이에 걸쳐서 고르게 하중이 작용하는 것을 뜻합니다.

그림 7과 같이 외나무다리에 70kg짜리 청년들이 1m 간격으로 서 있다고 합시다.

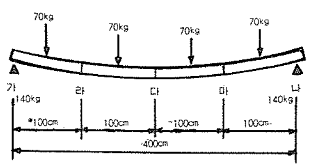

그림 9

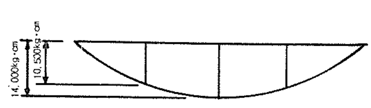

그림 10

㉮, ㉯ 두 지점은 역시 전체 무게인 $4 \times 70^{kg} = 280^{kg}$의 절반인 140^{kg}씩 지지하게 됩니다.

$$M_{라} = 140^{kg} \times 100^{cm} - 70^{kg} \times 50^{cm} = 10,500^{kg \cdot cm}$$

$$M_{다} = 140^{kg} \times 200^{cm} - 70^{kg} \times 150^{cm} - 70 \times 50 = 14,000^{kg \cdot cm}$$

이들을 서로 연결하여 그린 그림이 그림 10입니다. 70kg나가는 청년이 100cm 간격으로 서있으니까 $70^{kg} \div 100^{cm} = 0.7$kg/cm라는 등분포하중이라고 할 수 있읍니다. 사람 대신 모래주머니를 연속해서 깔아 놓는다면 완전한 등분포하중이라고 할 수 있읍니다. 반력은 역시 140kg인데 계산식은 앞에 적힌 바대로이며 그 값을 W라고 놓겠읍니다. W＝0.7kg/cm라는 거지요. 그러면 ㉮에서 임의의 위치 X에서의 BENDING MOMENT MX은 다음과 같이 계산됩니다.

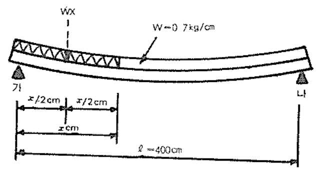

그림 11

지점 ㉮에서의 반력은 $\frac{W \times \ell}{2} = \frac{0.7^{kg/cm} \times 400^{cm}}{2} = \frac{280kg}{2} = 140kg$

지점 ㉮에서 임의의 위치까지의 하중은 $W \times X = WX^{kg}$, 이 WX라는 무게의 중심은 X/2의 위치에 있게 됩니다. 그러면 앞에서 배운대로

$$MX = \frac{W\ell}{2}X - WX \times \frac{X}{2} = \frac{WX}{2}(\ell - X)^{kg \cdot cm}$$

보의 중앙점(다점)은 $\frac{\ell}{2}$이며

$$M_{다} = \frac{W\ell}{2} \times \frac{\ell}{2} - \frac{W\ell}{2} \times \frac{\ell}{4} = \frac{W\ell^2}{8}$$

이라는 공식이 생겨나게 됩니다. 말로 풀어 쓰면 다 알아듣는데 꼬부랑 글씨로 써 놓으니 골치가 아파지고 "구조"라는 말만 들어도 어려워지는 것입니다.

그림 10과 같이 등분포하중을 받는 단순보의 BENDING MOMENT도는 중앙이 가장 크고 지점이 0인 포물선형입니다. 그리고 그림 2에서 우리는 각재의 변형과 각 부위의 응력상태를 배웠읍니다. 집중하중에 의한 부재응력은 더 먼저 배웠으니 이제는 이 실력을 응용해서 외나무다리 구조계산을 해보겠읍니다.

외나무다리는 가운데가 가장 잘 부러집니다. 그것은 사람이 외나무다리의 중앙에 갔을 때 BENDING MOMENT가 가장 크며 제일 많이 구부러지는 것이 이유입니다.

BENDING MOMENT라는 것이 무엇인가를 가장 쉽게 설명하면 아래와 같습니다. BENDING MOMENT의, 단위는 kg·cm, t·m 등 무게의 단위에다 길이의 단위를 곱한 것입니다.

예를 들어 시계 태엽을 돌릴 때를 상상해 보겠읍니다. (그림 12)

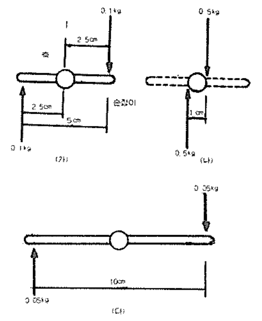

그림 12

두 손가락 사이의 거리를 5cm라고 할 때 손가락 힘이 0.1kg씩 필요했다면 그때의 MOMENT는 $M = 0.1^{kg} \times 2.5^{cm} + 0.1^{kg} \times 2.5^{cm} = 0.5^{kg \cdot cm}$입니다. 간단히 두 손가락의 힘 0.1^{kg}에다 손가락 거리 5cm를 곱해서 $0.1 \times 5 = 0.5^{kg \cdot cm}$라고 표시됩니다. 이 경우를 COUPLING MOMENT라고 부릅니다. 두 손가락의 힘은 COUPLING FORCE 라고 하고 손가락 사이의 거리를 ARM이라고 합니다.(가)

만약 이 손잡이가 부러져서 축을 두 손가락으로 마주 잡고 태엽을 감아야 한다면 그 힘은 얼마나 될까요?

$M = P^{kg} \times 1^{cm}$에서 $0.5^{kg \cdot cm} = P^{kg} \times 1^{cm}$ P＝0.5kg, 즉 다섯배의 힘이 필요합니다.(나)

새로 10cm짜리 손잡이를 용접해 붙였다면 $0.5^{kg \cdot cm} = P^{kg} \times 10^{cm}$

P＝0.05kg이 됩니다.

(다)

위 시계태엽 감는 원리를 외나무다리에서 배운 BENDING MOMENT에 적용하면 다음과 같습니다. 그림 10에서 최대 BENDING MOMENT는 14,000kg·cm였읍니다. 이것을 그림 4의 H형강 같은 모양의 조립형 목재로 설계

한다고 하면 어떻게 될까요?

$P = 14,000 \div 20 = 700$kg

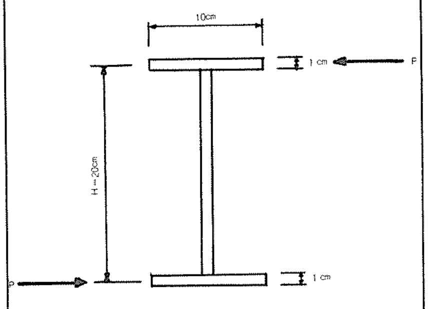

그림 13

나무의 허용압축 및 허용 인장응력도를 70kg/cm² 라고 한다면 필요한 단면적은 $A = 700 \div 70 = 10^{cm^2} \rightarrow 10^{cm} \times 1^{cm}$ 입니다. 이는 WEB의 BENDING MOMENT에 대한 내력을 무시한 경우입니다.

이제 이런 모양의 목제 H형강을 만들어서 여기 저기 사용한다고 하면 이 단면의 특성을 알고 있는게 좋습니다. 그래서 단면적에다 단면적간의 중심거리 20cm를 곱한 값, 즉 $10^{cm^2} \times 20^{cm} = 200cm^3$ 를 기억하고 있겠읍니다. (이 값을 Z라고 이름 붙이겠읍니다)

다음에 BENDING MOMENT를 받는 어떤 부재로 이것을 사용할 수 있는가를 검토해야 한다면 단순히 $M \div Z$의 값을 계산해서 그것이 이 나무의 허용응력도(σ)보다 적으면 안전하다는 결론을 얻게됩니다.

위에서 Z의 값은 단면계수에 해당합니다. 구조시험에서 항상 출제되는 공식 $\sigma = \frac{M}{Z}$이 이것입니다. σ는 목재·콘크리트·강재 등 재료에 따라 다르며 Z는 위에서 공부한대로 단면의 크기 형태에 의해서 계산되는 단면성상입니다.

M은 외나무다리에서 계산한 것같은 BENDING MOMENT이니 이들의 단위만 맞추면 국민학교 산수실력으로도 계산할 수 있읍니다.

외나무다리나 시계태엽 다 잊어버려도 좋습니다. 그러나 $\sigma = \frac{M}{Z}$만은 자다 깨어서도 외워야 합니다. 위의 식에서 BENDING MOMENT(M)가 크면 응력도(σ)도 커지며 단면계수(Z)가 작으면 σ가 커집니다.

위의 식은 다시 $Z = \frac{M}{\sigma}$으로 변형됩니다. σ가 같을 때, 즉 구조 재료가 같으면 M의 크기에 따라서 Z의 크기가 변합니다. 즉 BENDING MOMENT가 크면 단면계수가 큰 단면을 사용하여야 합니다.

단면계수가 크게 하려면 그림 13에서 A를 크게 하거나 H를 크게 하면 좋습니다. A를 크게하기 싫으면 H를 키워서 해결할 수 있으니까 보의 높이를 키우자고 주장하는 것입니다. H를 키우면 A가 줄고 H를 줄이면 A가 커야하니 그것 가지고 구조설계 하는 사람과 건물의 층고 낮추려는 설계자와의 싱갱이가 있는 것입니다.

σ가 크면 M이 같아도 Z가 작아집니다. 즉 재질이 나무나 콘크리트가 아닌 강재라면 Z가 작아도 됩니다. 그래서 철골로 설계하면 단면을 줄일 수 있다는 얘기가 성립됩니다.