

해석프로그램 사용시 구조물이 불안정하게 되는 원인과 대책

정 성 진*
Jung, Sung-Jin

1. 개 요

일반적으로 구조설계 실무자들은 컴퓨터 프로그램을 통한 구조물 해석시, 구조물의 안정성 여부를 인하여 한두번썸은 고민을 하였을 것이라 생각된다. 필자 또한 현대건설 정보시스템부 기술과에서 구조해석에 관한 업무를 맡고 있으면서 구조설계 실무자들로부터 이러한 문제에 관하여 수없이 많은 질문을 받아왔다. 따라서 본문을 해석프로그램이 언제 “구조물이 불안정하다.”는 메시지를 출력하게 되는지, 왜 이런 문제가 발생하게 되는지와 함께 어떻게 이러한 문제에 대처해야 하는지에 대하여 설명하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 불안정의 요인들

해석시 구조물이 불안정하게 되는 원인으로는 크게 다음과 같은 것들이 있다.

- A) 지점조건에 의한 불안정
- B) 임의의 절점에 연결된 부재의 조건에 따른 특정 절점에서의 불안정 또는 부재의 단부 조건 해체에 따른 특정 부재에서의 불안정
- C) 구조재의 재료적 특성이 물리적으로 불합리할 경우 발생하게 되는 불안정, 즉 재료의 탄성계수가 0 이하로 입력되었거나 또는 포

아송비(Poisson's Ratio)가 0.5 이상으로 입력된 경우 등

D) 실무적으로 많이 이용되고 있지는 않지만 만일 비선형해석을 수행할 경우 발생하게 되는 불안정, 즉 이 경우는 구조물이 해석적으로 파괴에 이르게 되었을 경우에 발생하게 된다. 전술된 경우 이외에 구조물을 불안정하게 만들 수 있는 요인들은 여러가지가 있을 수 있으나, 예를 들어 유한요소의 강성행렬 계산시 잘못된 적분차수(Integration Order)를 사용함으로써 발생하게 되는 불안정 등[1][2], 이들에 의한 불안정은 일반적으로 만나기 어려운 경우이므로 여기에서는 고려하지 않기로 한다.

여기서 전술된 4가지의 불안정 요인중 C) 및 D)에 해당하는 경우는, 물론 D)의 경우는 좀 더 심오한 해석적 지식을 요구하게 되지만, 입력데이터의 검증 및 출력되는 메시지들로부터 구조설계 실무자들이 “왜 불안정하게 되었는지?”, “어떻게 대처해야 하는지?”를 쉽게 알 수 있다. 따라서 본문에서는 A) 및 B)의 경우에 의한 불안정의 원인 및 대책에 관하여만 살펴보기로 한다.

3. 지점조건에 의한 불안정

우리가 사용하고 있는 대부분의 해석프로그램들은 대략 강체운동모드(Rigid body mode)를 갖는 단위부재(또는 요소)의 강성행렬(Element

* 정회원, 현대건설 정보시스템부 기술과, 공학박사

stiffness matrix)을 취합(Assemble)하여 전체구조물의 강성행렬(Structure or Global stiffness matrix)을 만들고, 여기에 적절한 지점조건(Boundary Condition)을 고려한 다음, 주어진 하중조건에 대하여 구조물의 거동을 계산해내는 구조를 택하고 있다.

우리는 여기서 한가지 사실에 주목할 필요가 있다. 즉 해석프로그램에서 사용하는 요소들(트러스요소, 보요소, 평면응력요소 또는 판요소 등)의 강성행렬에는 강제운동모드가 포함된다는 사실이다. 여기서 강제운동모드란 무엇인가를 알아보기 위하여 다음 그림 1을 살펴보기로 하자.

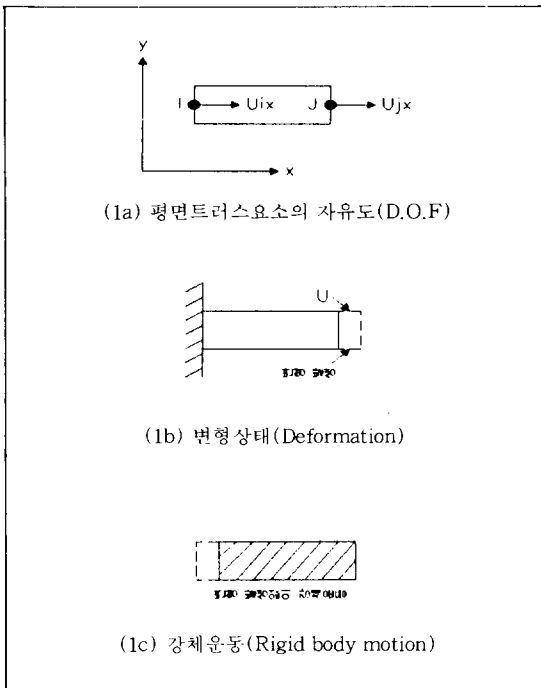


그림 1. 평면트러스요소

그림 1.에서 보여지는 바와같이 트러스요소는 축력에 대한 강성만을 갖게 되므로, 이들의 운동상태는 평면상에서 두개의 자유도만을 가지고 표현될 수 있다(δ_{ix} , δ_{jx}). 이와같이 두개의 자유도를 가지고 표현되는 트러스요소의 내부에서는 그림(1b)에서 보여지는 바와 같은 변형이 발생되게 되거나, 또는 (1c)에서 보여지는 것과 같이 변형이

발생하지 않고 단지 강체로서 운동하게 되는 두가지 모드가 존재하게 된다. 여기서 “강체운동을 한다.”는 말의 의미를 생각해보면, 이는 물체가 공간상에서 자유롭게 운동할 수 있다는 의미와 뜻이 통한다고 볼 수 있다. 이와같이 공간상에서 자유롭게 운동할 수 있는 물체에 힘이 가해진다면, 뉴턴 역학 제1법칙(관성의 법칙)에 의하여 이 물체는 공간상에서 힘이 가해지는 방향으로 끝없이 운동하는 상태를 유지하게 될 것이다. 이 말을 구조해석적 의미로 재해석하면, 만일 구조물의 강성행렬식에 강제운동모드가 포함된다면 그 구조물은 강제운동모드가 허용된 방향으로 영구히 운동하게 되는 상태로 될 것이다. 즉 “이 구조물은 불안정한 상태에 놓이게 될 것이다.”라는 말과 의미가 같아질 것이다. 따라서 이와같이 강제운동모드를 포함하고 있는 각 부재(또는 요소)의 강성행렬을 취합하여 만들어지는 구조물의 전체강성행렬 또한 강제운동모드를 갖게된다. 실제로 구조물에는 수많은 강제운동모드가 존재하고 있지만, 평면구조물의 경우 선형-독립인 강제운동모드를 3개 갖게 된다. 실례로 다음 그림 2와 같은 평면트러스 구조물은 식(1)과 같은 강제운동모드를 갖게된다 [3].

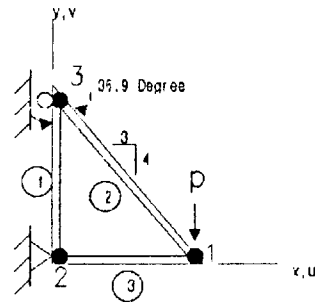


그림 2. 평면트러스 구조물

$$\begin{aligned} \{D\}_1 &= \{u \quad 0 \quad u \quad 0 \quad u \quad 0\} \\ \{D\}_2 &= \{0 \quad v \quad 0 \quad v \quad 0 \quad v\} \\ \{D\}_3 &= \{u \quad v/2 \quad u \quad v/2 \quad u \quad v/2\} \\ \{D\}_4 &= \{4\theta \quad 3\theta \quad 4\theta \quad 0 \quad 0 \quad 0\} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 θ 는 작은 회전각을 나타내고 있다.

그러면 이와같은 강제운동모드는 어떻게 제거될 수 있는가?. 그것은 바로 구조물에 지지조건(Boundary condition)이 부여됨으로서 이루어질 수 있다. 즉 구조물에 지지조건이 부여되면, 지지되는 방향으로의 강제운동이 소멸되게 된다고 말할 수 있다. 해석시 구조물의 안정성을 확보하기 위해 필요한 지지조건은 개수로는 구조물의 종류(트러스구조인가 골조구조인가 등)에 따라 다르나, 해석시 우리가 자주 접하게 되는 구조물의 경우에 필요한 최소한의 지지조건수를 써보면, 평면 구조물의 경우 3개($\delta_x = \delta_y = \theta_z = 0$), 공간구조물의 경우 6개(즉 $\delta_x = \delta_y = \delta_z = \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$)가 구조물을 구성하고 있는 임의의 절점에서 표현될 수 있어야 한다. 이상과 같은 지지조건에 의한 불안정 문제를 좀 더 쉽게 이해하기 위하여 다음 그림 3을 잘 관찰하여보기 바란다[4].

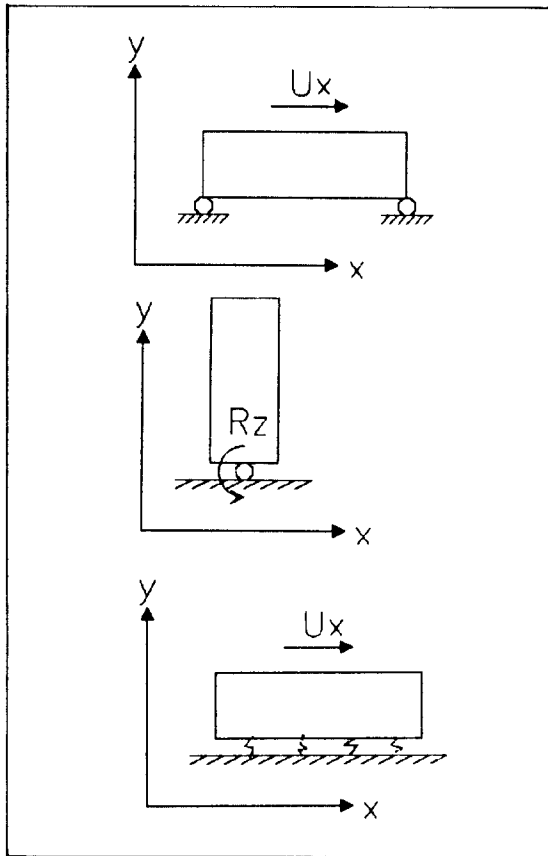


그림 3. 지지조건에 의해 불안정하게된 구조물들

4. 특정 절점 또는 특정 부재에서의 불안정

이 경우는 지점조건에 의한 불안정의 경우와는 달리 실무자들이 자주 접하게 되면서도 쉽게 불안정의 원인을 눈치채지 못하는 경향이 있다. 따라서 이러한 류의 불안정문제에 접해본 경험이 있는 구조설계 실무자들은 본문의 내용을 주의깊게 읽어보기 바라며, 만일 본문의 내용이 부족하다면 다른 자료를 구해서 연구를 해보기 바란다.

먼저 특정 절점에서 나타나게 되는 불안정의 원인을 찾아내기 위하여 다음 그림 4를 관찰하여 보자.

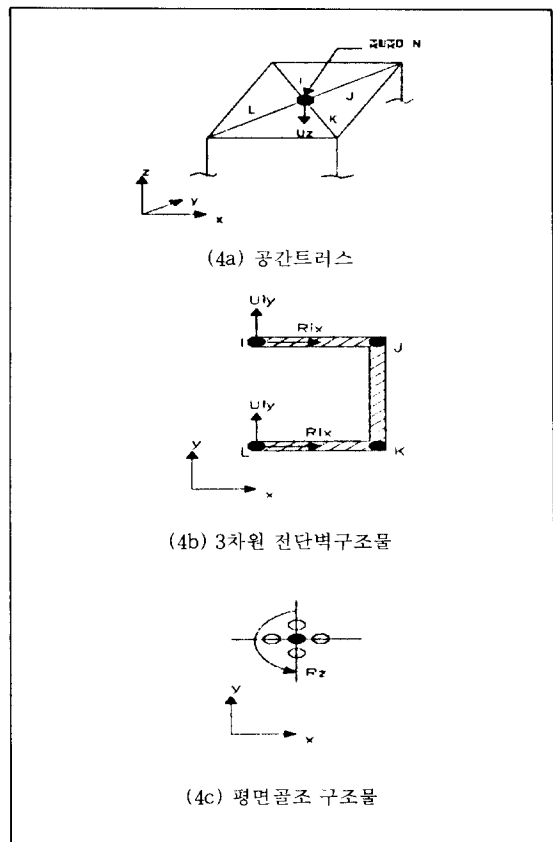


그림 4. 특정 절점에서 불안정하게 되는 구조물

그림을 보고 짐작할 수 있는 바와 같이 (4a)의 경우 절점 N은 부재 I, J, K, L에 의해 구성되는 평면에 수직인 방향으로 강성을 갖을 수 없으므로,

이 절점은 평면에 수직한 방향(z-방향)으로 강제 운동을 하게 된다. 이를 해석프로그램의 관점에서 살펴보면 구조물의 강성행렬식에서 절점 N의 z-방향 자유도를 표현하기 위한 강성치, $K(\delta_z)$ 값이 0이 되어 수학적으로 풀 수 없는 식으로 된다는 의미를 갖게 된다. 그림 (4b)의 경우는 (4a)의 경우와 같은 개념으로 설명될 수 있으며, 이때는 절점 I, L에서 δ_y 및 θ_x 방향의 자유도에 대하여 국부적으로 불안정하게 된다. 이와같이 특정 절점에서 불안정하게 되는 실제의 구조물이 많이 존재하고 있으므로, 대부분의 해석프로그램들은 이러한 경우를 고려하기 위하여 Planar node의 개념을 사용하고 있으나, 그렇지 않은 경우도 있으므로 주의할 필요가 있다. 만일 Planar node의 개념이 없는 해석프로그램을 사용하고자 한다면, 절점에서의 불안정을 방지하기 위하여 (3a)의 경우는 평면 내에 존재하지 않는 새로운 부재를 절점 N에 추가 하든지, (3b)의 경우는 절점 I, L 사이에 삼차원 보를 넣는다든지 하여 불안정하게 되는 절점에서 강성을 갖을 수 있도록 만들어야 한다. (3c)의 경우는 특정 절점에 연결된 모든 골조부재(Frame member)의 단부조건이 해제(Member release)된 경우로서, 이 절점이 z축에 대한 회전강성을 갖을 수 없는 경우이다. 이러한 경우에 대한 해결책으로는 적어도 한 부재의 단부조건이 해제되지 않아야 한다.

다음은 특정 부재에서 발생하게 되는 불안정의 경우로, 이는 구조설계 실무자들이 삼차원 골조구조물 해석시 부재의 단부조건을 모멘트에 대해 풀어주는 문제(Member release)에서 자주 접하게 된다. 이를 좀 더 심도있게 고려하기 위하여 다음 그림 5를 살펴보기로 하자.

그림 5에서 보여주는 바와같이 부재의 단부조건을 해제하게 되면 이 부재 내부에서는 어떠한 일이 발생하게 될까?. 이 경우는 부재의 중심축(x-축)에 대한 회전(Torsion)에 대하여 부재가 강제운동을 하게 된다. 즉 이 부재는 비틀림운동에 대한 강성을 갖지 못하게 되어 불안정하게 된다. 따라서 삼차원 골조구조물 해석시 부재의 단부조건을 해제할 필요가 있다면, 비틀림 모멘트 해체에 대하여 특히 주의해야 한다. 그러나 대부분의 삼차원

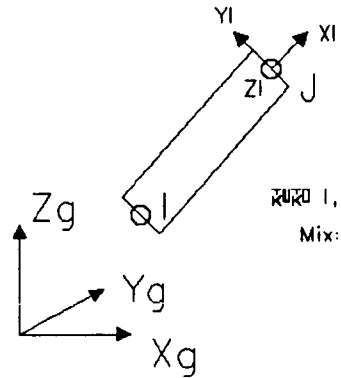


그림 5. 특정 부재에서의 불안정

골조구조물 해석시 부재의 단부가 정첩(Hinge)으로 되어있다는 의미는 국부좌표계에서 보았을 때 y 및 z 방향의 회전이 해제되어 있다($M_y = M_z = 0$)는 의미만을 내포하고 있으므로 이에 해당하는 자유도만을 풀어주어야 할 것이다. 즉 비틀림은 구속된채로 놓으면 무방할 것이다.

5. 결 론

이상으로 우리는 구조설계 실무자들이 해석프로그램을 이용할 경우 종종 만나게 되는 불안정의 문제에 대하여 고찰해 보았다. 만일 해석시 불안정 문제에 부딪히게 되면, 본문에서 언급한 과정을 따라 구조물을 분석하여 보기 바란다. 그러면 대부분의 경우 불안정의 원인을 쉽게 찾아낼 수 있을 것이다. 본문에서는 불안정 문제를 쉽게 설명하기 위하여 가능한한 해석이론 및 수치를 사용하지 않았다. 후에 다시 기회가 주어진다면 전술된 제문제를 해석이론 및 수치로서 전개할 예정이며, 본문의 내용이 구조설계 실무자들에게 다소나마 도움이 되었으면 하는 바람이다.

참 고 문 헌

1. ADINA-Theory and Modeling Guide, Report AE 84-4, December, 1984.
2. K.J. BATHE, "FINITE ELEMENT PROCEDURES IN ENGINEERING ANALYSIS", PRENTICE-HALL, 1982.