

## 최신 비선형 유한요소해석 S/W들의 토목공학분야 적용사례

김 소 운\*

### ■ 머리말

유한요소 해석법이 개발된 이래 현재까지 수많은 상용 유한요소해석 프로그램이 개발되어 각종 공학분야에 널리 사용되어 오고 있다. 토목공학분야에서도 각종 토목 구조물의 해석에 이러한 유한요소 해석이 광범위하게 사용되고 있다.

본고에서는 현재 상용화되어 있는 비선형 유한요소해석 S/W들의 주요기능들을 살펴보고 이를 토목공학분야에 적용한 몇몇 대표적 사례들을 소개하고자 한다.

그 기본이론에 있어서는 매우 유사하나 각각의 적용목적에 따라 그 기능이 매우 다변화되어 발달되고 있다. 따라서 본 고에서 토목공학분야에서 요구되는 기능들을 중심으로 하거나 이를 포함하여 개발되어 상용화되어 있는 DIANA, MARC, ABAQUS 등의 대형 비선형 전용 S/W들을 중심으로 알아보기도 한다.

비선형 유한요소해석 S/W들은 철근 콘크리트 부재 및 토질 문제등의 비선형 거동을 해석하는데에 유용한 골격을 갖추고 있다. 또한 이와 더불어 실제 복잡한 형상의 전후처리를 원활하게 하기 위한 다양한 전후처리 S/W가 필수적인 요소의 하나이다. 따라서 현재 상용화된 유한요소해석

S/W들의 발전추세는 solver의 기능보강 뿐만 아니라 전후처리 S/W의 기능보강에 많은 노력이 기울여 지고 있다.

### ■ 주요해석기능

현재 상용화 되어 있는 비선형 S/W들의 토목공학 관련 부분의 기능을 간추려 보면 아래와 같이 요약할 수 있다. 편의상 주요 기능들을 콘크리트구조 및 토질 문제해석 관련분야와 지하수 문제해석 관련분야로 나누어 분류하여 보았다.

#### 1) 콘크리트구조 및 토질문제해석 관련분야 (Nonlinear structural analysis)

##### \* Smeared cracking for tensile regime

- tension cut-off conditions
- tensile softening diagrams:  
linear, multilinear and nonlinear
- constant and crack-width dependent shear retention models
- non-orthogonal, multi-directional smeared cracking

##### \* Plasticity for compressive regime

- associated and non-associated plasticity
- friction hardening and cohesion

\* 정회원, 다진기술(주) 기술지원부 과장

- softening
- yield criteria:
  - Tresca, Von Mises, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Cam-Clay
- anisotropic plastic yield criteria:
  - Hill, Tasi-Hill, Tsai-Wu, Hoffmann
- nonlinear elastic models of Boyce for granular materials
- drained/undrained elastic and plastic material property
- \* Visco-elasticity/plasticity for time-dependent (creep) behavior
  - Kelvin-Voigt model
  - Maxwell chain model (including aging and temperature dependence)
  - double power law
- \* Temperature dependence of material properties
  - Young’s modulus, Poisson contraction, coefficient of thermal expansion and yield properties can be temperature dependent (for concrete and reinforcement)
- \* Incremental and iterative scheme
  - load control, displacement control, arc length control
  - linear stiffness, constant stiffness, Regular Newton, Modified Newton, Quasi Newton, secant, strain correction direct substitution, and line search method
  - non-symmetric solvers for non-associated plasticity
  - plasticity with second-order tangent stiffness for fast convergence
- \* Geometrical nonlinearity
  - Total Lagrangian
- Updated Lagrangian
- \* Combinations of above phenomena (via strain-decomposition)
  - temperature dependence, transient creep, cracking and plasticity
  - visco-elasticity, cracking and temperature dependence
  - physical and geometrical nonlinear
- \* Embedded reinforcing bars and grids
  - plasticity including hardening
  - temperature dependence
  - prestress
  - automatic embedment procedure in mother elements
- \* Interface elements with models for discrete cracking:
  - a) linear, multi-linear and nonlinear tensile softening
  - b) shear reduction models
  - c) various crack dilatancy models including the contact density model by Li, Maekawa and Okamura
  - d) cyclic model by Hordijk and Reinhardt for seismic analysis
  - discrete plasticity:
    - associated and non-associated Coulomb friction law
  - bond-slip:
    - linear, multilinear and nonlinear bond traction-slip curves (interface elements between concrete elements and steel truss elements)
  - nonlinear elastic beddings.
- \* Potential flow
  - steady-state and transient analysis of young massive concrete

- \* Initial conditions
  - prestress
  - initial stress as input or a result of linear analysis(optionally with over-consolidation ratio)
  - initial vertical stress in combination with the lateral pressure ratio( $K_0$ )

- \* Parameter estimation
  - for the identification of a model from experimental data

- \* Phased analysis
  - change, add or remove elements, reinforcement, supports or tyings during the analysis
  - application in concrete mechanics to phased construction of e.g. prestressed bridges, and geo-mechanics to e.g. excavation, digging and cutting

2) 지하수 문제해석 관련분야  
(Potential flow analysis)

- \* Steady state and/or transient potential flow calculations with possible nonlinearity
  - linear/nonlinear steady state
  - transient:
    - a) direct time integration
    - b) lumped or consistent capacity
    - c) linear or nonlinear
  - nonlinear:
    - Newton/Secans iteration

- \* Heat transfer analysis applications
  - temperature calculations in general 2D/3D constructions
  - radiation/convection boundaries
  - heat production from young

- hydratating concrete
  - the cooling of concrete by water flow through pipes

- \* Ground water flow applications
  - steady state/transient linear/nonlinear
  - regional analysis:
    - a) horizontal 2.5D multi-layer ground water flow
    - b) multi layer meshes with inter-jacing interfaces
  - detailed analysis:
    - a) saturated/unsaturated 2D/3D horizontal and vertical ground waterflow
    - b) nonlinear permeability and capacity for points above water
    - c) special seepage boundaries
    - d) turbulence according to Forchheimer

- \* Lubrication(Reynolds) application
  - thin(2D) films of incompressible viscous fluid with moving boundaries

- \* Potential flow combined with structural analysis (flow stress)
  - heat or ground water flow coupled with structural analysis
  - fluid-structure interaction with interjacing interface elements

■ 적용 사례

앞에서 열거한 바와 같이 비선형 유한요소해석 S/W들은 토목공학분야에 매우 광범위하게 적용되고 있다. 이들 중 본 고에서는 비선형 전용 S/W들만이 그해를 얻을 수 있는 대표적인 몇가지 사례들만을 간략하게 소개하기로 한다. 아래의 사례들은 토목공학전용 비선형 해석 S/W인 DIANA를 이용하여 얻어진 결과들이다. 지면관계상 부연설명이 충

분치 못한 점에 대하여 독자들의 양해를 바란다.

▣ 사례 1:

철근 및 프리스트레스트 콘크리트 부재의 균열해석

\* 사례 개요:

본 사례는 네덜란드의 로테르담시에 있는 고가도로를 실험 및 해석한 예이다. 이 사례는 네덜란드 교통부와 주요 연구소 및 대학이 참가하여 현재까지 10년 이상 지속되어 오고있는 'Concrete Mechanics Project'의 한 예이다. 당시 이부재에는 검증을 위한 대단위 실험이 이루어졌다.

\* 해석방법:

본 사례는 아래와 같은 세단계로 나누어 해석되었다.

- 1) Plane stress 상태에서 prestressed anchor의 모델링이 적절한가를 판단하기 위한 선형해석
- 2) 부재의 휨거동에 대한 비선형 해석
- 3) 부재단부의 균열거동에 대한 비선형 해석  
(두가지 tension stiffening 값에 대하여)

전체 콘크리트 부재에는 plane stress 요소가, 철근과 prestressing strand에는 rebar 요소가, 철근과 콘크리트 사이의 부착에는 bond-slip interface

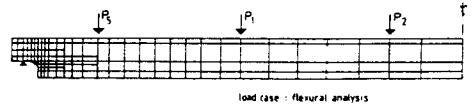


그림 2. 콘크리트 부재의 요소망

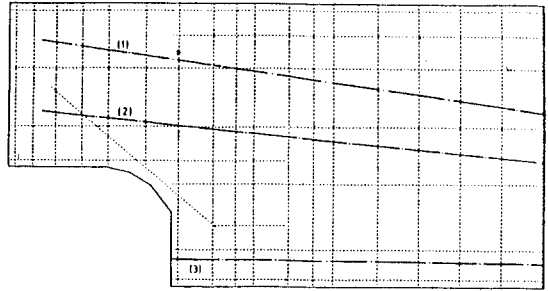


그림 3. 철근(점선) 및 prestressing stand(일점쇄선)의 요소망

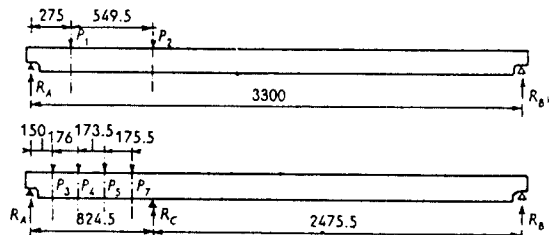


그림 4. 하중 상태(3단계)

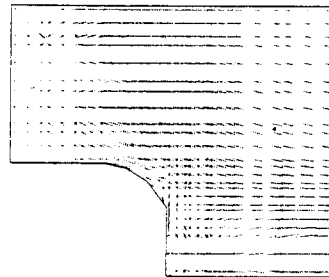


그림 5. 3개의 prestressing strand에 의한 부재단부의 주응력도

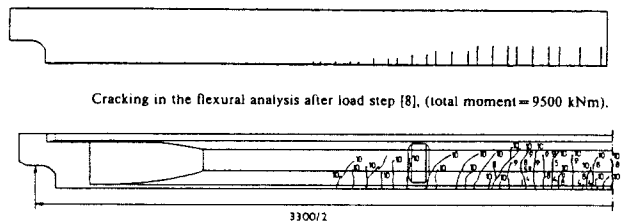


그림 6. 휨거동에 대한 비선형 해석에 의한 균열상상 및 실험치

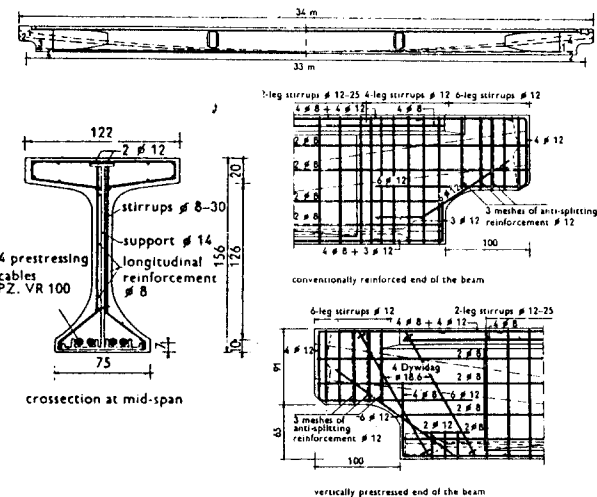


그림 1. 전체 부재도

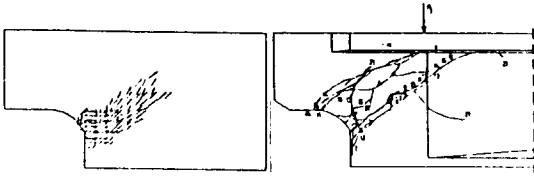


그림 7. 부재단부에 대한 비선형 해석에 의한 균열양상 및 실험치(tension stiffening=0.08, shear retention factor=0.2)

요소가 각각 사용되었다.(그림 2,3)하중은 그림 4와 같이 단계별로 재하되었으며 비선형 해석시 이와 동일한 증분하중이 가해졌다.

▣ 사례 2:

케이슨 기초의 비선형 해석

\* 사례개요:

본 사례는 스칸디나비아 반도를 교량과 터널로 연결하고 있는 대형 프로젝트의 한 부분으로, 덴마크 동부의 섬쪽과 서부의 육지쪽을 잇는 총연장 6.6km의 장대교량의 케이슨 기초를 해석한 예이다. Storebelt West Bridge라는 이름의 이교량은 80년 대말에 고속전철(TGV)철로 및 차량 도로용으로 건설되었다.

\* 해석방법:

본 사례는 아래와 같은 두가지 단계로 해석되었다.

- 1) 세가지 하중상태에 대한 전체 케이슨의 선형정적 해석
  - Service Limit State (SLS)
  - Ultimate Limit State (ULS)
  - Accidental Limit State (ALS)
- 2) 위의 해석결과 일부분이 ALS 상태에 대하여 취약함이 판명된 cross-wall의 보강된 모델에 대한 선형해석
- 3) 2단계 모델에 대한 비선형해석.
  - 항복조건: Mohr-Coulomb
  - 항복면: cohesion, friction 및 dilatancy angle의 함수로 정의
  - 균열해석조건: tension cut-off, linear

tension softening and constant shear retention factor

전체 케이슨의 모델링에는 20절점의 고체요소가 사용되었으며, 두께가 얇아지는 곳에서는 쉘요소로 degeneration되었다.(그림 8) 2단계에서는 요소망이 더욱 세분화되었으며(그림 11), 3단계에서는 콘크리트의 균열 및 콘크리트와 철근의 항복 여부가 검토되었다.(그림 13) 이때, 철근보강은 요소당 x, y 또는 z축방향의 single bar로서 모델링 되었다.(그림 12)

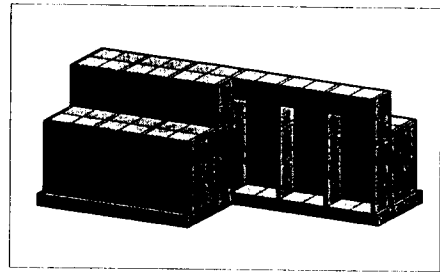


그림 8. 케이슨 기초의 3/4부분 모델

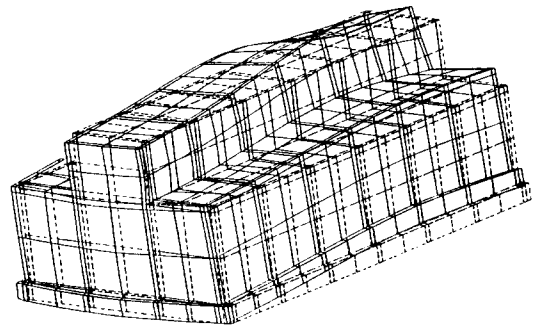


그림 9. 선박충격하중(ALS)에 의한 케이슨의 변형도

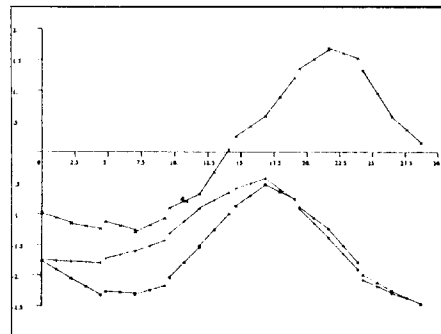


그림 10. 케이슨 길이방향에 따른 모멘트도

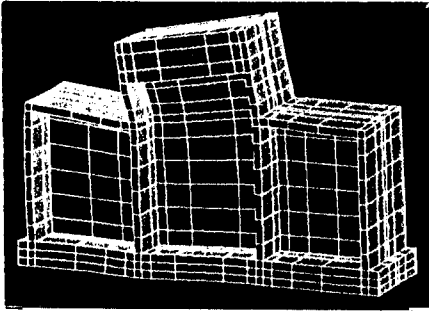


그림 11. 2단계 해석에 의한 케이슨의 변형

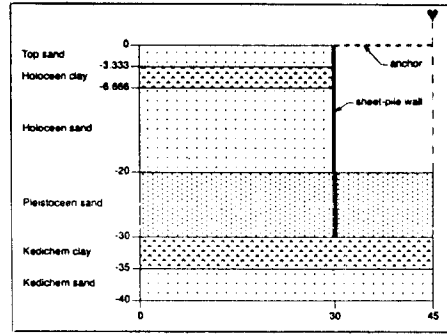


그림 14. anchor된 sheet-pile wall 모델

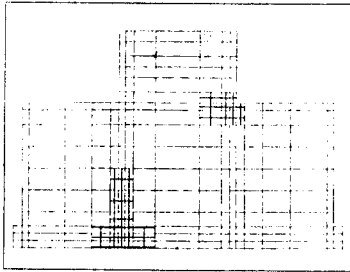


그림 12. 보강된 철근요소망

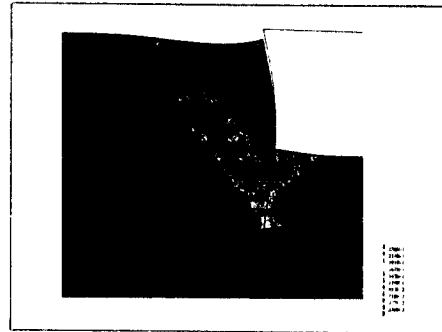


그림 15. 변형된 모델 및 소성변형률도

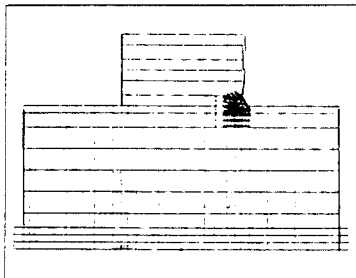


그림 13. 균열에 의한 변형률도

기타사례:

□ Sheet-Pile wall의 안정 해석

\* 해석방법:

Mohr-Coulomb의 소성조건을 사용하여 anchor된 sheet-pile wall의 안정상태를 해석한 예이다. 이때 여러층의 토질과 sheet-pile wall사이의 마찰 및 미끄러짐을 검토하기 위하여 매층마다 interface요소가 사용되었다.

□ Cofferdam 건설시의 시공단계별 해석

\* 해석방법:

비선형 S/W들은 댐, 교량, 터널등의 건설시 요구되는 시공 각 단계의 검토를 위한 Phased analysis기능을 갖추고 있다. 본 사례는 이를 이용하여 댐의 건설시 각 단계별 배수조건에의한 공극수압 및 자중에 따른 처짐양상을 해석한 예이다.

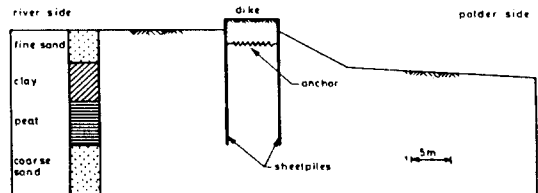


그림 16. Cofferdam 건설 개요

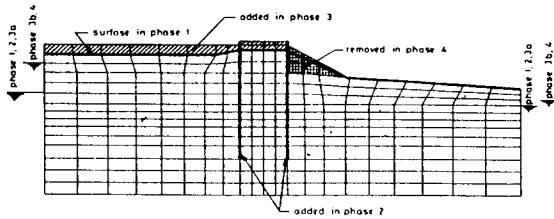


그림 17. 시공단계별 해석 개요

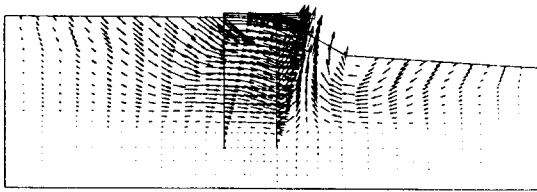


그림 18. 홀의 제거에 의한 처짐증분도

□ 해일에 의한 방파제의 potential-flow 해석

\* 해석방법:

지하수 해석, 열해석등에 이용되는 potential flow 해석을 적용하여 태풍에 의하여 불규칙적인 potential height를 갖는 하중에 대한 방파제의 거동을 분석한 예이다. 방파제의 앞단에는 sheet-pile wall이, 바닥에는 불투수층이 모델링 되었으며, 특수율과 포화율은 압력수두에 종속된다고 가정하였다.

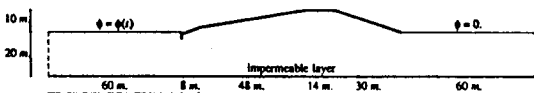


그림 19. 방파제모델의 재원 및 경계조건

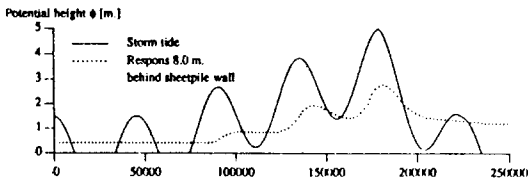


그림 20. 하중상태 및 이에따른 거동



그림 21.  $t=22000$ 초일때의 potential height

■ 맺음말

최근에는 컴퓨터 H/W의 발달에 힘입어 과거에는 초대형 컴퓨터에서나 작업이 가능하였던 각종 비선형 유한요소해석 S/W들이 점차 EWS 및 PC 환경으로 down-sizing되는 경향이 뚜렷하여지고 있다. 그러나 비선형해석 solver의 특성상 수많은 반복해법과정이 요구되므로 계산과정에 상당한 시간을 요하게 된다. 따라서 H/W의 운영체제로서 DOS환경보다는 Unix환경을 적극적으로 채택하고 있는 추세이다. 또한 이러한 S/W들의 CAD S/W들과의 통합도 중요한 흐름의 하나라고 볼 수 있다.

현재까지 국내에서는 건설사들의 일선업무에 이러한 S/W들이 활발하게 이용되어 오지 못하고 있는 실정이다. 이는 컴퓨터 H/W의 취약함의 예도 비선형 유한요소해석 S/W가 기본적인 이론의 습득이 없이는 사용하기가 용이치 않으며, 또한 결과의 신빙성을 보장할 수 없음에 그 주원인이 있다고 볼 수 있다. 그러나 최근에 이를 극복하기 위하여 이용자의 편의성에 역점을 두고 개발되고 있는 최첨단 전후처리 S/W들의 도움으로 날로 그 사용성이 개선되어 가고있는 것이 사실이다. 앞으로 이러한 첨단 해석방법들이 일선 실무자들의 고충을 한층 덜어 줄 수 있기를 기대하며 본고를 맺고자 한다.