

구조물의 비선형 동적 및 지진 해석/설계 시스템: XFINAS

Nonlinear Dynamic and Seismic Analysis/Design
System of Structures (www.xfinas.com)



김기두*



구자갑**



변윤주***

*건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수
**코아 이엔씨 대표이사 전무
***(주)동호부사장

1. 서론

선진국의 대학, 연구소 및 회사에서 많은 NASTRAN, ABAQUS, LS-DYNA, ANSYS, LUSAS 등의 유한요소 프로그램이 개발되어 상용화하고 있다. 이러한 상업용 소프트웨어는 이미 오래 전에 개발되어 왔으며, 너무나 방대하고 복잡하여 많은 연구원이 전공 분야별로 기술 및 연구 개발에 투입되고 있다.

유한 요소법은 기존에 해결되지 않은 공학적인 문제를 보다 정확하고 더욱 빠른 연산속도로 해결할 수 있도록 계속 새로운 이론이 개발되고 있다. 그러나 기존의 상업용 소프트웨어는 새로운 이론에 의한 메인 프로그램의 성능 및 오류를 효율적으로 개선시키지 못하고 있는 경우가 있다. 실무에 종사하고 있는 설계 기술자들 가운데 유한요소

법의 이론을 숙지한 기술자들은 기존의 상업용 소프트웨어의 오류를 판단할 능력이 있으나 그렇지 않은 일반 기술자들은 정확도 및 연산속도 등에 의한 오류를 판단하지 못하고 그래픽의 개선에만 관심을 가지게 되었다. 그 결과 이러한 메인 프로그램에서 발생한 오류로 인하여 설계한 구조물의 안정성에 영향을 줄 수가 있으며, 또한 느린 연산속도는 업무의 비효율화를 초래하고 있다.

기존의 소프트웨어 회사는 요소 및 솔루션의 성능은 개선시키지 않고 이미 오래 전에 개발되어 있는 프로그램 및 이론을 계속 사용하고 있으며, 세계 여러 대학의 연구실에서 전용으로는 좋은 프로그램이 개발되고 있으나 범용목적으로 개발되는 경우는 드물다. 그 이유는

첫째 범용 유한요소 프로그램이 너무나 방대하고 전문적이어서 연구원조차 자기가 전공하지 않았던 분야의 프

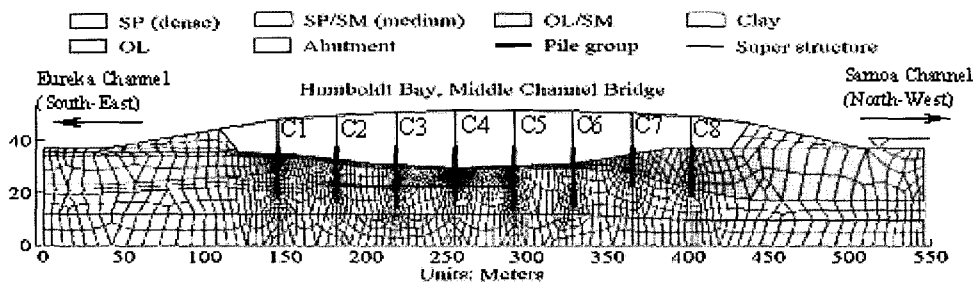


그림 1 지반-파일-교량의 상호 작용(S.S.I)을 고려한 유한 요소 모델링

로그를 손댈 수가 없고,

둘째 다른 사람에 의해서 만들어진 기존 프로그램을 이해하기 위해서는 프로그램과 관련된 유한요소 이론을 먼저 이해하여야 프로그래밍할 수 있으므로 새로운 성능 개선은 상당히 어려운 작업이며,

셋째 일부 개선이 이루어지더라도 기존의 다른 부분과의 호환성을 가지지 못하여 또 다른 오류를 만들어 내고 있으며,

넷째 직업 자체가 고도의 전문성을 요구하고 있으나 소프트웨어 개발에 관련된 연구원들의 빈번한 직장 이동으로 유한요소 프로그램에 대한 체계화 및 전문화가 이루어지지 않고 있기 때문으로 생각된다.

최근 OPENGL 등의 그래픽 도구가 개발되어 유한요소법을 위한 전·후처리 시스템(Pre & Postprocessor)이 어렵지 않게 개발될 수 있어서 많은 소프트웨어 회사에서 그래픽 처리의 개선에 관한 기술개발에 집중하고 있다. 그 결과 소프트웨어의 전·후처리 시스템의 사용방법은 대부분 쉽고 비슷하여 한 프로그램만 익숙하면 다른 프로그램도 쉽게 사용할 수 있게 개발되고 있다. 소프트웨어마다 솔루션의 성능 및 기능의 차이는 불가피한 문제로 향후 유한요소 소프트웨어 평가시 그래픽 위주의 평가보다는 유한요소 솔루션이 소프트웨어 평가 기준이 될 것으로 판단된다.

기존의 상업용 프로그램의 솔루션이 개선된 유한요소 이론을 사용하지 않고, 아직 오래된 이론에 근거로 하는 경우가 많아서 성능, 정확도 및 안전성 등을 더욱 개선시키고, 유용한 설계 기법을 고려한 효율적인 새로운 프로그램 개발이 필요하게 되었다. 다음에 소개될 XFINAS(eXtended Finite Element Analysis System)는 가장 최신의 유한요소 이론에 의하여 개발되어 왔으며, 각 요소마다 기존의 문제점을 해결하여 SCI저널에 발표하여 그 결과를 이미 검증하였다. XFINAS는 개발된 모든 프로그램에 대한 독창적이고 독자적인 이론 메뉴얼을 보유하고 있다. 프로그램은 solution method와 element library를 모듈 별로 정리하여 프로그램에 군더더기가 없어서 새로 접하는 연구원도 이해가 쉽게 정리하였다.

2. XFINAS 개요

XFINAS는 구조물의 선형 및 비선형 동적 해석을 수행하기 위하여 개발된 범용 유한요소 해석 시스템으로 지금까지 개발된 다른 시스템보다도 더욱 빠르고 정확하며 안전성을 가지고 있는 강력한 시스템이다. 초기 버전 FINAS는 영국

런던의 임페리얼공대(Imperial College, London)에서 대형 컴퓨터 전용의 강구조물의 비선형 해석을 위하여 개발되었으며, AIT 및 건국대학교와 설계자들에 의하여 개인용 컴퓨터 전용으로 선형 및 비선형 동적 해석 버전인 XFINAS(eXtended FINAS)로 확장되어 토목, 건축, 기계 및 항공기 등의 구조 해석 및 설계의 범용 목적으로 재개발되었다.

3. GID를 이용한 전후처리 시스템 (<http://gid.cimne.upc.es/>)

전후처리 기법(Pre & Post Processor)은 스페인 CIMNE의 Onate교수의 연구그룹에서 개발된 GID의 그래픽 기법을 이용하였다. Automatic Mesh Generation에 의해서 복잡한 대형 구조물도 쉽게 모델링(그림 1, 그림 2)될 뿐만 아니라 뛰어난 후처리 과정(그림 3)을 이용하여 결과의 시각화를 더욱 쉽고 편리하게 하였다. 현재의 XFINAS버전은 기업체의 실무 적용뿐만 아니라 대학 및 연구소에서 전문적인 연구를 할 수 있게 개발되었다.

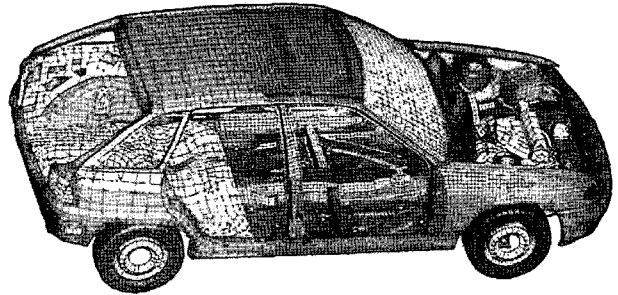


그림 2 쉘 요소를 이용한 자동차의 자동 요소 생성 (Auto-Mesh Generation)

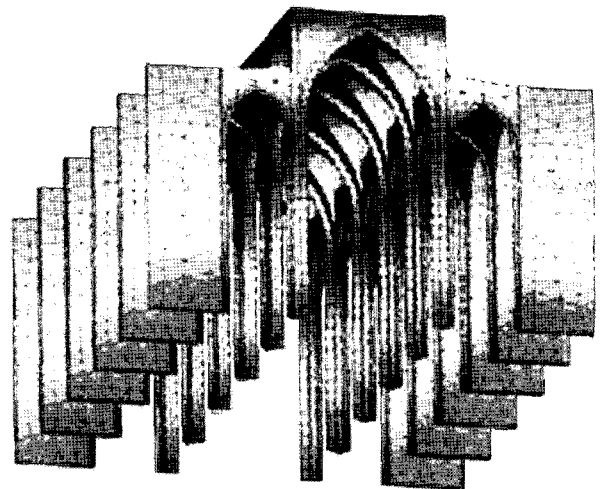


그림 3 3차원 입체 요소를 이용한 성당 모델의 후처리 예제

4. XFINAS 해석 기능

MS 윈도우 시스템에서 개발된 XFINAS는 인코어 메모리를 시스템을 보유하고 있으며, 모든 계산이 램에서 계산이 되므로 연산 속도가 빠를 뿐만 아니라, 램만 추가하면

표 1 XFINAS 해석 기능

1	시간 적분 법에 의한 동적 해석 기법 Explicit method: Central difference method Implicit methods: Newmark, Wilson-theta HHT
2	감쇠 및 비 감쇠 경우의 모드 중첩 법 Eigen vector, Ritz vector
3	지진 해석 Time integration Mode superposition method Response spectrum (CQC, SRSS method)
4	보 및 쉘의 순수 좌표계 이용법
5	비선형 해석 기법 Load control Displacement control Constrained Arc-length control Arc-length control for high nonlinearity
6	기하학적 비선형 Updated Lagrangian Method
7	탄소성 재료 Von-Mises with strain hardening Ilyushin-Ivanov with strain hardening Mohr-Coulomb Drucker-Prager Tresca
8	복합재료의 파괴 기준을 이용한 점진적인 파괴 해석 Maximum stress Tsai-Wu Tsai-Hill Modified Puck Criterion Theory
9	보, 판, 쉘의 후좌굴 해석
10	고유치 해석 Inverse Iteration Subspace iteration method Lanczos vector
11	랑조스 벡터를 이용한 복소 고유치 해석
12	좌굴 및 고유치해석
13	점탄성 댐퍼를 이용한 진동제어
14	면진 장치 제어
15	스프링 요소
16	Offset, semi-rigid and pin connection in the frame element
17	변위 하중
18	철도교의 교량/트랙/열차의 상호 작용 (Moving force, Moving mass)
19	차량 하중의 자동제어
20	파이버 모델에 의한 비선형 보요소
21	비선형 콘크리트 쉘 요소
22	PC 텐던의 긴장력 손실량 계산 즉각 손실: 탄성 수축, 마찰, 앵커슬립 시간의존 손실: 크립, 건조 수축 및 릴렉세이션
23	PC 교량의 시공중 해석
24	한국 및 유럽의 스틸 코드
25	Biot 압밀

무제한의 자유도를 가진 구조물도 계산이 가능하다. XFINAS의 해석기능(Analysis Option)은 선형, 비선형 해석, 고유진동수, 좌굴, 선형 동적, 비선형 동적, 지진해석, 차량 이동 하중에 의한 교량해석, 철도교/차량 등의 동적 해석, 압밀 해석 등이 있으며, 그림 4에 나타나 있다.

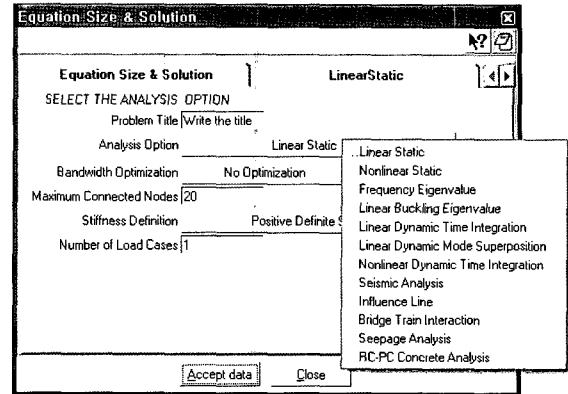


그림 4 해석 방법 종류

4.1 비선형해석

대부분의 구조물은 큰 하중을 받을 경우나 재료의 특성에 의하여 비선형 거동을 가지고 있다. XFINAS는 뉴턴 램슨법 및 수정된 뉴턴 램슨법 등 다양한 비선형 해석 기법을 가지고 이를 이용하여 비선형 경로를 추적하기 위한 하중 제어법, 변위 제어법, 호장 제어법(Arc-length control), 경사 비를 이용한 호장 제어법 등이 개발되어, 복잡한 비선형 경로를 가진 구조물의 해석에 적합하도록 되어 있다.

4.2 동적해석

구조물의 동적 해석은 시간 적분법 및 모드 중첩을 이용하여 수행할 수 있다. 시간 적분법은 중앙 차분법, 뉴마크베타법, 윌슨 쉘타법, HHT(Hilber, Hughes, Taylor) 법 등이 있다. 모드 중첩법은 직교 벡터를 이용하여 구조물의 모드를 축소시켜 연산시간을 단축시키는 잇점을 가지고 있다. 직교벡터는 고유벡터와 리즈벡터가 이용되고 있으며, 특히 리즈벡터는 고유벡터를 이용하는 것 보다 더 적은 모드 수를 사용하고 더욱 정확하여 효율적인 해석에 사용될 수 있다. 모드 중첩법을 이용하여 비례 감쇠 및 비비례 감쇠 진동 해석 수행이 가능하다. 비-비례 감쇠의 경우 선형 점탄성 댐핑을 이용한 댐핑의 제작시 이에 대한 해석이 가능하다.

4.3 비선형 동적해석

지진해석 혹은 구조물의 비선형 동적해석을 위하여

HHT법에 의한 시간적분법이 적용되었다.

4.4 고유치 해석

몇 개의 지배적인 고유 벡터를 효율적으로 구하기 위하여 랑조스 벡터, 부분구조법(subspace iteration method) 및 역반복법(inverse iteration method)이 개발되었다. 복소 고유치 해석을 위하여 랑조스벡터에 의한 고유치 계산을 할 수 있다.

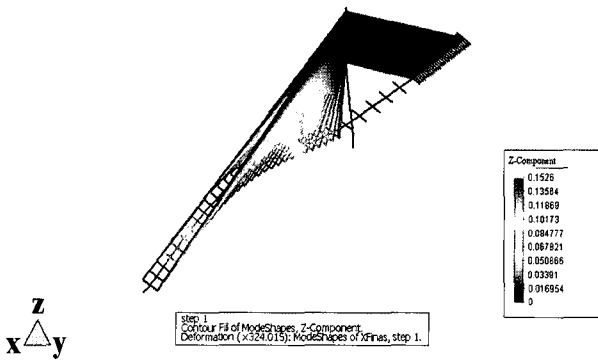


그림 5 RAMA-8 태국, 방콕소재 사장교의 진동모드

4.5 지진해석

선형 해석(Central Difference Method, Wilson-Theta Method, Newmark Linear Acceleration Method and HHT Method)

모드 중첩법(Eigenvector base, LD Ritz vector)

응답 스펙트럼 CQC법 SRSS법

여러 방향의 지진 가속도 재하

고에베 엘센트로등 지진데이터 입력 가능

기록시간이 큰 지진데이터의 보간

4.6 재료 모델

폰미스, 드래그 프래그, 트레스카, 모아쿨롱 탄소성 모델
 파이버 요소를 이용한 콘크리트 비선형 보모델
 탄소성 및 탄소성 파괴 이론에 의한 콘크리트 비선형 쉘요소
 복합재료 모델

4.7 교량해석

(1) 도로교

XFINAS는 일반교량과 현수교 및 사장교 등의 특수교량의 모델링이 가능한 요소를 보유하고 있으며, 이동하중

을 포함한 다양하고 편리한 차량하중이 개발되어 교량의 해석 및 설계가 가능하도록 개발되었다.

- 프레임 및 쉘 요소를 이용한 곡선교 해석
- ASSHTO 및 한국 시방서 및 사용자에 의한 차량하중 재하 가능
- 교량의 DL하중
- 집중하중
- 분포하중
- 쉘요소에 작용하는 차량하중의 자동 분배
- 교량의 임의의 위치에 작용하는 DB 및 DL하중을 절점에 자동분배
- DB 및 DL하중에 의한 하중 경우 (LOAD CASE)를 자동생성하여 최대모멘트 및 단력을 소팅하는 기능 제공
- 여러 이동 하중에 의한 3차원 시뮬레이션 제공
- 하중 조합에 의한 응력분배 제공

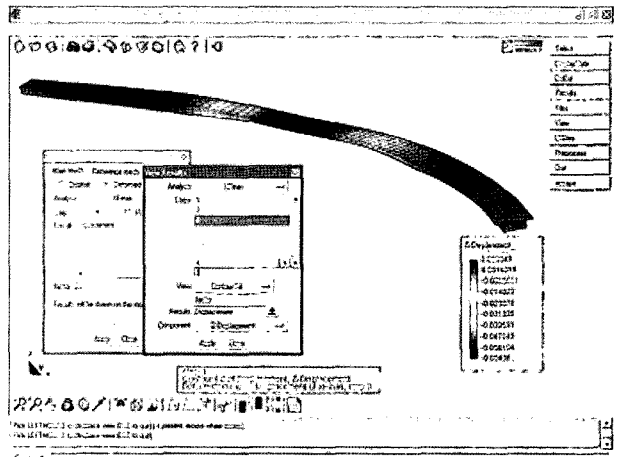


그림 6 쉘 요소를 이용한 3차원 곡선교의 변형된 형상

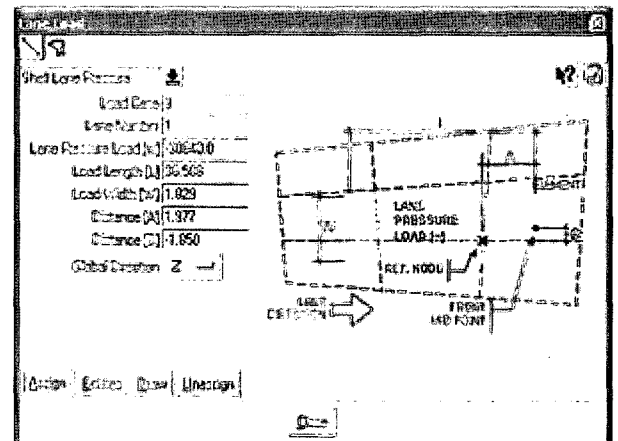


그림 7 쉘요소로 모델링된 교량에 작용하는 차량하중의 자동분배

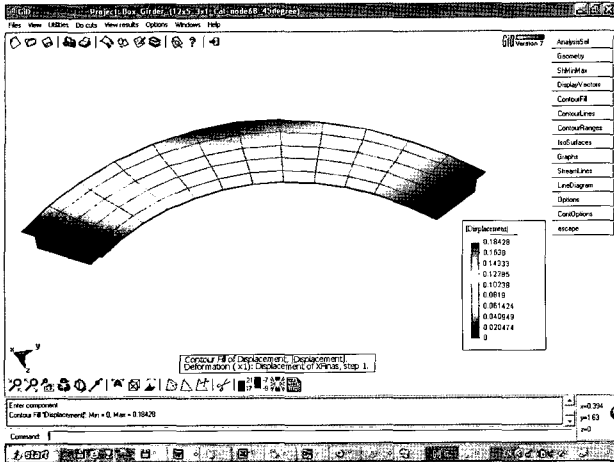


그림 8 차량 하중에 의한 곡선교의 변형된 형상

(2) 철도교

KTX 및 새마을 열차 등의 주행에 따른 차량의 구조적 안전성, 주행 안전성 및 승차감 측면에서 평가할 수 있는 차량/궤도/교량 상호작용을 고려한 교량의 동적 해석을 할 수 있도록 개발되었다. 차량/궤도/교량의 실질적인 모델링을 위하여 차량/레일 접촉 모델링을 위한 헤르쯔안 스프링 및 도상에 대한 원클러 요소를 적용하였다. 현재의 해석 방법은 준 3차원 해석으로 차량의 복선궤도 주행에 따른 3차원 편심 효과를 고려하기 위하여 비틀 자유도를 고려하였으며, 현재의 개념을 바탕으로 완전한 3차원 모델의 개발을 진행중에 있다.

- 정적인 철도 하중
- 한국 고속철도 (KTX) 및 새마을 열차 철도 하중 모델
- 교량/궤도 철도 상호작용을 고려한 동적해석

예제 : 본 해석프로그램을 검증하기 위하여 고속철도 교량(연체교)의 대표적인 상부형식인 PC박스 교량을 대상 구조물로 하여, 본 해석프로그램의 수치해석결과와 계측 결과를 비교하였다. 대상 교량은 2경간 연속교로 각 경간 길이는 40m이고, 총 교량길이는 80m이다.

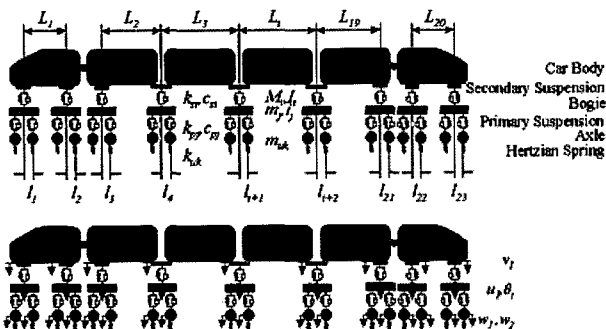


그림 9 철도교/궤도/열차의 상호 작용을 고려한 동적해석 가능

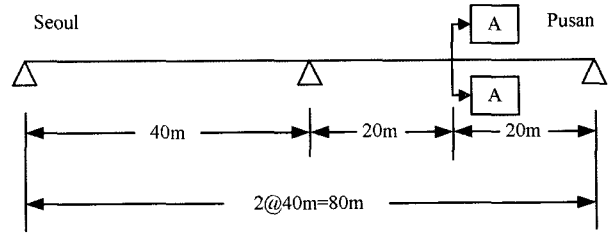


그림 10 연체교 제한

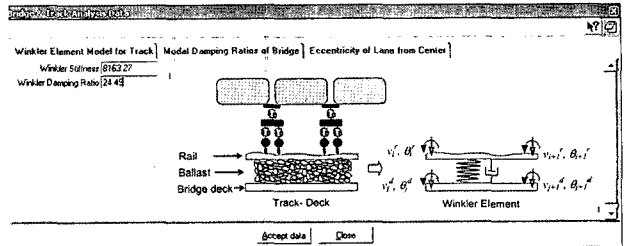


그림 11 교량 및 트랙 해석 데이터 입력 윈도우 메뉴

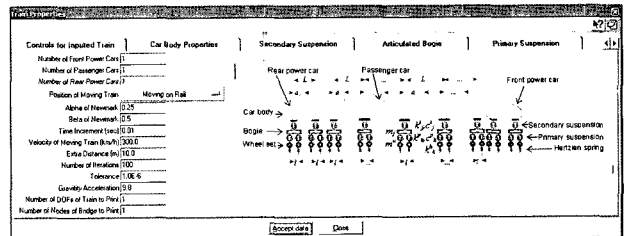


그림 12 열차 특성 입력 장치

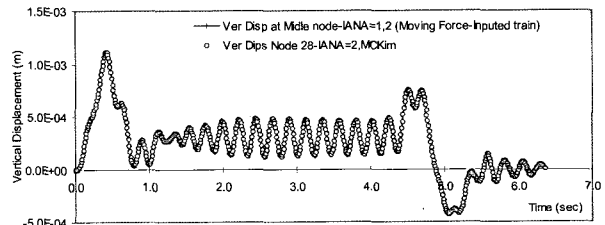


그림 13 교량의 동적 이동 하중에 의한 수직 변위

(3) PSC 박스 교

프리스트레스 콘크리트교의 캔틸레버 시공 방법은 시공 단계에서 자중 및 트레블러와 같은 건설하중에 따른 구조계의 변화, 경계 조건의 변화 및 시간의존 효과를 모두 포함한 긴장력의 손실을 고려하면서 설계해야 한다. XFINAS는 다음과 같은 항목을 고려하면서 시공단계 설계를 할 수 있다.

- PC 교량의 시공중 텐던의 긴장력 손실량 계산 및 손실량 계산 및 절점으로 자동 분배
- 포물선 및 2차 방정식을 이용한 텐던 형상의 자동 생성
- 부재, 하중, 텐던 및 이동 기계장치의 제거 및 추가기능
- 긴장력 손실 계산
 - 즉각 손실: 탄성 수축, 마찰, 앵커슬립

- 시간의존 손실: 크리프, 건조수축 및 릴랙세이션 (ACI, CEB/FIP)
- 시공단계 해석(Traveler 하중, 하중의 추가 및 제거기능)
- 교량의 하중경우(load case)를 자동 재하하고 결과를 애니메이션할 수 있는 기능

다음 예제는 XFINAS에 있는 PSC교량의 ACI 209R-92와 CEB-FIP 1990 크리프 모델을 비교 검증을 위하여 제시하였다.

예제 : ACI 209R-92와 CEB-FIP 1990에 의한 크립 모델을 검증하기 위하여 Kechum(1986)에 의해 제시된 결과를 테스트하였다. 보의 길이는 120인치이고, 높이가 22인치 폭이 9인치이다. 콘크리트 28일 강도가 5000psi이고, 단위 무게가 150pcf이고, 습도가 70%이다. ACI 모델을 위한 극한 크리프 계수는 2.35, 경계 조건은 일단 고정이고, 다른 단은 자유단 인 보에 하중 $F=1000.0\text{lbs}$ 을 재하하였다. 하중은 30일 후 재하하고, 630일 후에 제거하였다. ACI시방서와 CEB/FIP시방서와 비교하였으며, 하중이 재하하고 있는 동안 보의 변위와 시간과의 관계를 그린 그래프를 다음에 나타내었다.

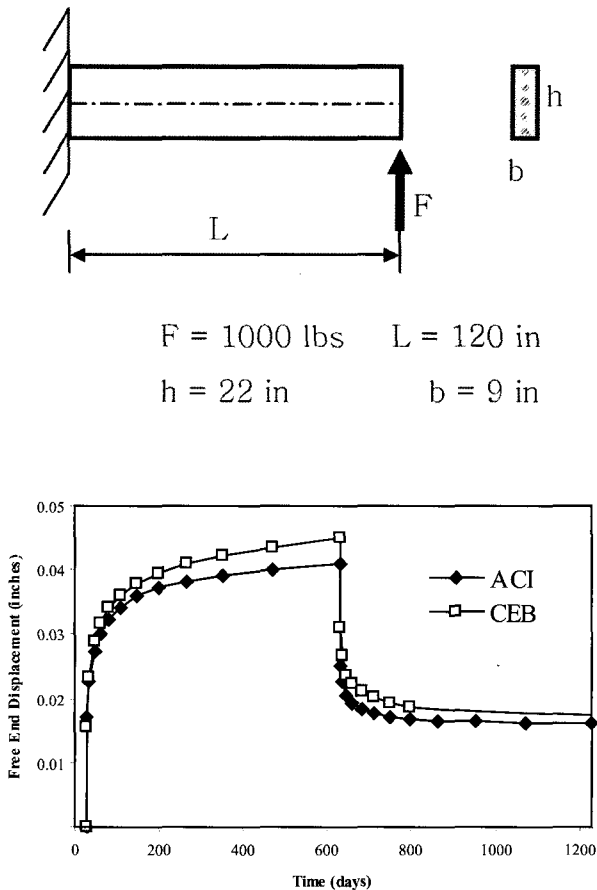


그림 14 콘크리트 크리프를 고려한 보의 변위 및 시간곡선

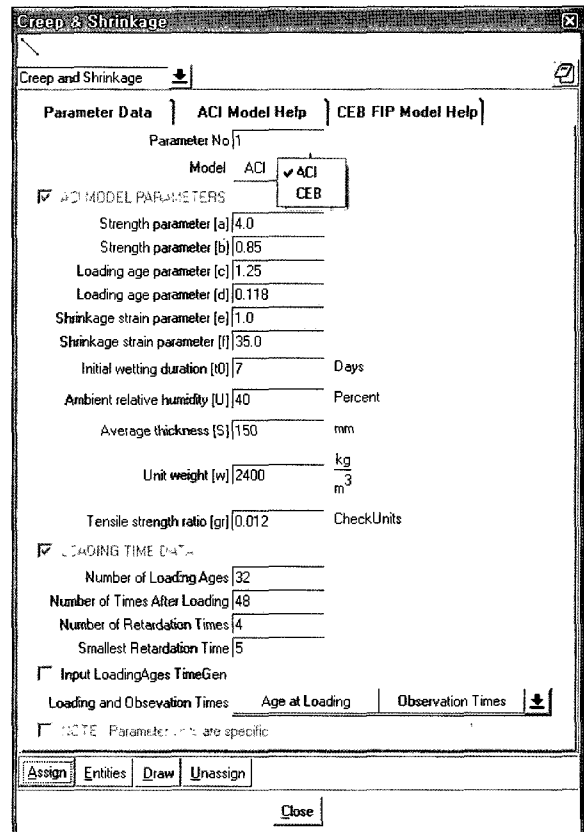


그림 15 크리프 및 건조수축 데이터 입력을 위한 윈도우 메뉴

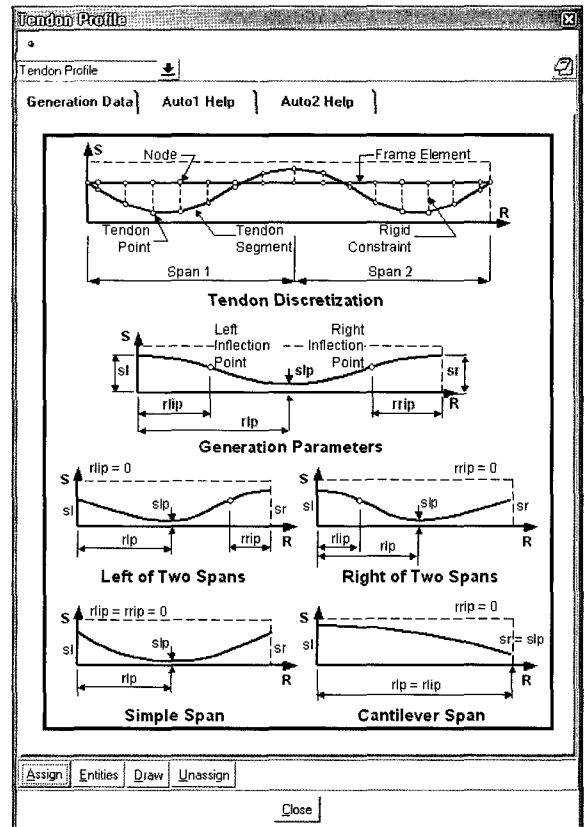


그림 16 텐던 형상의 자동 생성을 위한 Help 메뉴(4) 콘크리트 사장교

(4) 콘크리트 사장교

PSC 박스거더 사장교의 순간 손실과 장기 시간 의존적 손실을 고려하여 시공 중 해석한 예를 다음에서 제시하였다.

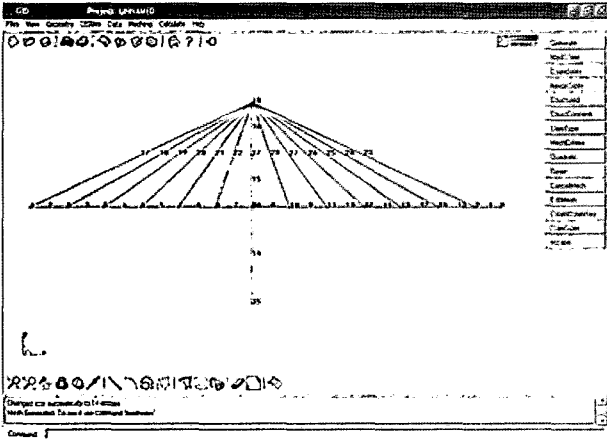


그림 17 PSC 박스 사장교의 모델링

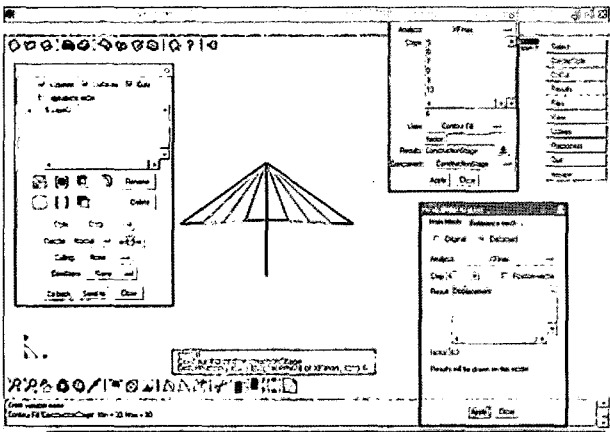


그림 18 PSC 박스 사장교의 시공 중 해석 예

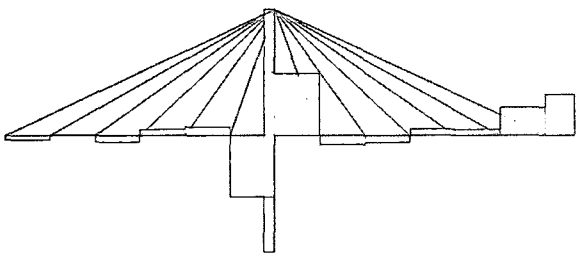


그림 19 PSC 박스 사장교의 시공 단계별 전단력도

5. XFINAS 요소의 정식화

제4절에서는 XFINAS의 해석 기능에 대하여 설명하였다. 제2편에서는 솔루션 성능 및 정확도 개선의 핵심이 되

는 새로운 요소의 종류 및 성능에 대하여 소개하고자 한다. XFINAS의 요소는 최근의 SCI저널에 이미 검증에 받은 새로운 이론에 의하여 개발 되었으며, 고차요소를 사용하지 않고 저차 요소를 사용하여도 안전성, 정확성 및 효율성을 가지고 있도록 가장 최신 수학 이론에 의하여 요소를 정식화하였다. 즉, 쉘 요소는 4절점의 문제를 극복한 준적합이론 및 가정된 변형률 방법, 8절점 입체 요소는 보강 변형률에 의한 방법, 그리고 4절점 평면 요소 역시 보강 변형률 방법을 이용하여 저차 요소를 사용하더라도 고차 요소와 같거나 더욱 뛰어난 성능을 가지고 있다.

5.1 쉘 요소(Shell Element)

축퇴(degenerate)이론에 근거한 많은 쉘 요소 정식들이 Ahmad 등(1970)에 의해 소개되었다. 이러한 요소들은 두께가 두꺼운 경우에는 급속하게 수렴도가 떨어지게 되어 전단 잠금 현상이 발생한다. 이러한 전단 및 면내 잠금 현상을 극복하기 위하여 XFINAS는 가정된 변형률을 이용한 4절점(XFINAS42) 및 8절점(XFINAS83) 쉘요소, 절점 준적합 요소를 이용하여 잠금 문제를 해결한 4절점 쉘 요소(XSHELL41), 가우스 포인트에서 결정되는 공변(covariant) 기저벡터를 이용한 에너지 조절 정식화에 의해서 얻어지는 전단 잠금과 면내 잠금 현상을 극복한 8절점 쉘 요소(XSHELL82)를 제안하여 SCI 논문에 발표하여 그 정확성을 검증하였다.

XFINAS 쉘요소는 잠금을 완전히 제거한 4절점 및 8절점 쉘요소를 이용하여 대변형 탄소성 해석을 수행할 수 있을 뿐만 아니라 복합재료 적층쉘의 대변형 해석 및 점진적인 파괴 형상을 고려한 해석을 수행할 수 있다. 대 변형과 가정된 변형률을 사용한 기하학적 비선형 쉘요소의 정식화를 위해 Updated Lagrangian방법을 사용하였으며, 강체회전을 제거하기 위하여 순수 좌표계 방법을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 쉘요소는 절점당 6개의 자유도를 사용하여 보강된 적층 복합판 및 쉘의 해석 시에도 사용할 수 있다.

국부좌표계(r,s,t)와 자연 기저 벡터에 의한 자연 좌표계(x,h,z)의 관계로 표시된 8절점 쉘요소는 그림 2와 같다. 중립면에서 두 개의 무차원 좌표계 ζ, η 로 표시되었으며, z 축은 쉘의 중립면에 수직한 축이다. 곡선좌표계의 원점은 각 요소의 중앙점에 위치하고 있으나, 일반적으로 이 좌표계는 직교하지는 않는다. 그러므로 각 요소의 중앙점에서의 국부 직교좌표계 (r,s,t)를 세운다. (x,h) 평면은 동일평면상에 존재한다.

표 2 XFINAS 요소 종류

요소 종류 (대변형 모델)	재료 모델
셸 요소 XSHELL41 : 4절점 준적합 셸 요소 XSHELL82 : 8절점 셸 요소(페달타 함수) XSHELL83 : 8절점 셸 요소 (가정변형률) XSHELL4Q : 4절점 준적합 셸 요소	laminated composites Von-Mises Ivanov Strain-hardening concrete 탄소성 모델 concrete 탄소성파괴 모델 (Maekawa)
프레임 요소 & 빔 요소 XFRAME : 2절점 프레임 요소 XBEAM2Q : 2절점 빔 요소 XBEAM31 : 3절점 빔 요소	Von-Mises 스프링 요소 offset 콘크리트 파이버 모델
입체 요소 XSOLID81 : 국부 좌표계 XSOLID82 : EAS 및 가정변형률 XSOLID83 : EAS XSOLID84 : 합응력 입체요소	Von-Mises Mohre-Coloumb Modified cam-clay
평면 변형률/평면 응력 XMEMB4Q : 4절점 준적합요소 XMEMB4E : 4절점 EAS 모델 XMEMB8 : 8절점 요소	Von-Mises Mohr-Coulomb Drucker-Prager Tresca
트러스/케이블 요소 XTRUSS2 : 3차원 트러스 요소 XCABLE : 3차원 케이블 요소	
스프링 요소 XSPRING : 3차원 스프링 요소	

(1) 가정된 자연 변형률 셸요소(Assumed natural strain shell element)

4절점 셸요소(XSHELL42) 8절점 셸요소(XSHELL83)는 두께가 얇은 판과 셸에서 잠김현상을 해결한 가정된 변형률 방법을 이용하였으며, 비선형 셸 요소로 확장하였다.

(2) 준적합 셸요소(quasi-conforming shell element)

대체 변형률 4절점 준적합 셸요소가 개발되어(XSHELL41) 대변형 탄소성 해석을 수행할 수 있게 하였다. 얇은 판 및 셸구조에서 발생하는 잠김 현상은 준적합 기법을 이용하여 해결하였다. 강성 행렬은 가우스 적분을 사용하지 않고 해석적인 방법을 사용하여 계산 속도를 향상시켰다. 가우스 적분법을 사용하는 대체 변형률 셸요소는 절점에서 응력을 계산하기 위한 추가적인 보간방법이 필요하나 준적

합 셸요소는 모든 응력이 자동적으로 절점에서 계산이 되어 연산속도를 개선시켰다.

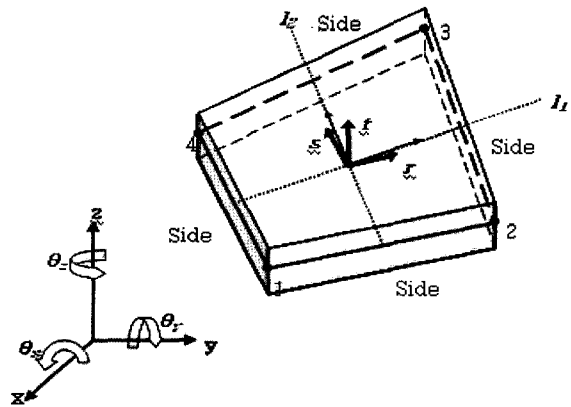


그림 21 4절점 셸 요소의 기하학적 형상 및 좌표계

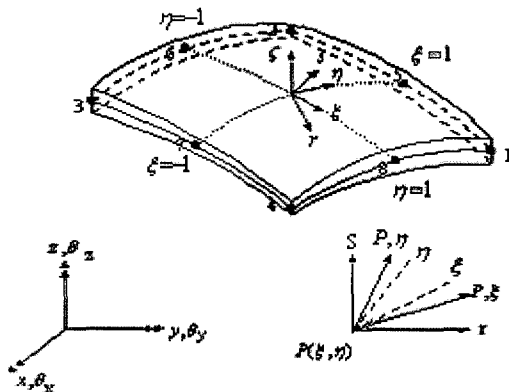


그림 20 8절점 셸 요소의 기하학적 형상 및 좌표계

표 3 집중하중을 받는 원통형 실린더의 무차원 해

Mesh	S4R5 (ABAQUS)	MITC4 (ADINA)	QPH (DYNA3D)	XSHELL41 (XFINAS)
4x4	-	0.37	0.37	0.629
6x6	0.602	-	-	-
8x8	-	0.74	0.74	0.929
11x11	0.875	-	-	-
16x16	-	0.93	0.93	0.997
21x21	0.974	-	-	-

예제 : 집중하중을 받는 원통형 실린더의 선형 및 비선형 해석을 4절점 준축합 쉘요소를 이용하여 수행하였다. 이 예제는 4절점 요소의 성능을 테스트하기 위한 가장 적합한 예제로 표에 있는 것처럼 ABAQUS, ADINA, DYNA3D 등 대부분의 쉘 요소는 만족하지 못한 결과를 제공하고 있지만 XFINAS 쉘 요소는 우수한 결과를 제공하고 있다. 그 결과를 이용하여 대변형 탄소성 해석을 수행하였으며 변형된 형상을 그림 5에 나타내었다.

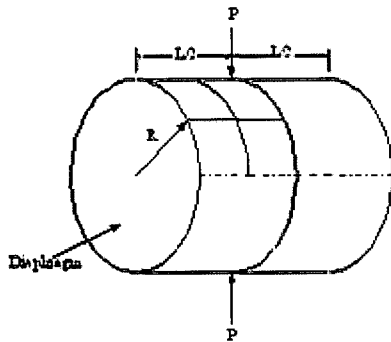


그림 22 집중하중을 받는 원통형 실린더의 기하학적 형상

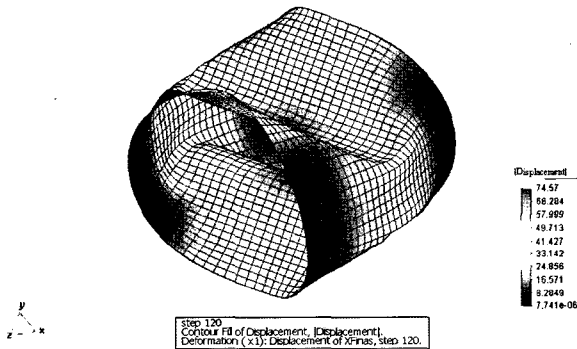


그림 23 대변형 탄소성 해석시 변형된 형상

예제 : 8절점 쉘요소를 이용하여 Agelidis의 기하학적 불완전성을 가진 보강된 원통형 쉘이 압축력을 받을 때 대변형 탄소성 해석을 수행하였다.

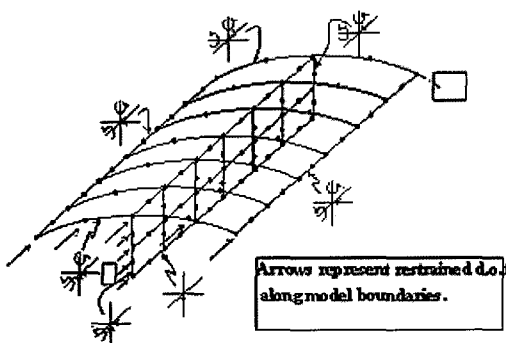


그림 24 보강된 원통형 쉘의 대칭모델

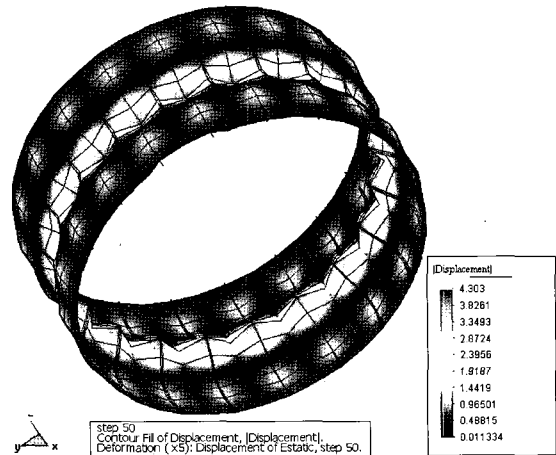
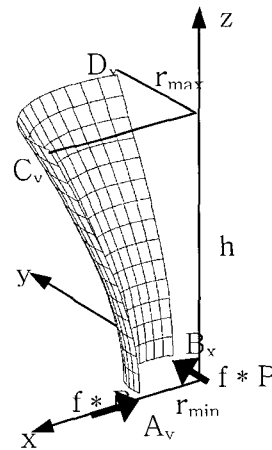


그림 25 극한하중에서 변형된 형상

(3) 적층 복합재료 쉘요소(Laminated composite shell element)

적층 복합재료의 특성을 가진 4절점, 8절점 쉘요소가 개발되었으며, 파괴 기준을 고려하여 정적 선형에서 비선형 동적 해석까지 가능하도록 개발되었다. 복합재료의 전단 거동을 정확하게 고려하기 위해 임의의 전단 보정 계수를 사용하는 대신 평형방정식으로부터 유도된 개선된 일차 전단 변형이론을 사용하여 전단 변형효과를 개선하였다.



$$r(z) = \frac{r_{\min}}{b} \sqrt{b^2 + z^2}$$

$$r_{\max} = 15.0m \quad r_{\min} = 7.5m$$

$$ht = 20.0m$$

$$thk = 0.04m$$

$$layer \ thk = 0.0133m$$

$$E_L = 40.0e6 \ kN/m^2$$

$$E_T = 1.0e6 \ kN/m^2$$

$$\nu_{LT} = 0.25$$

$$G_{LT} = 0.6e6 \ kN/m^2$$

그림 26 기하학적 형상 및 재료 특성

재하 하중에 의하여 적층사이가 분리가 될 때의 하중 즉 극한하중을 구하기 위한 방법으로 점진적인 파괴 형상 해석법(Progressive failure analysis)을 개발하였으며, 4가지 파괴이론을 (Maximum stress, Tsai-Wu, Tsai-Hill and Modified Puck Criterion Theory)을 고려하였다.

예제 : 복합재료 쉘의 대변형 거동을 검증하기 위하여 집중하중을 받는 복합 재료로 된 하이퍼블릭 쉘의 비선형 해석을 수행하였다. 쉘의 기하학적 특성 및 재료 특성은 다음에 나타나 있으며, 3개의 적층으로 (0°/90°/0°) 구성되었다.

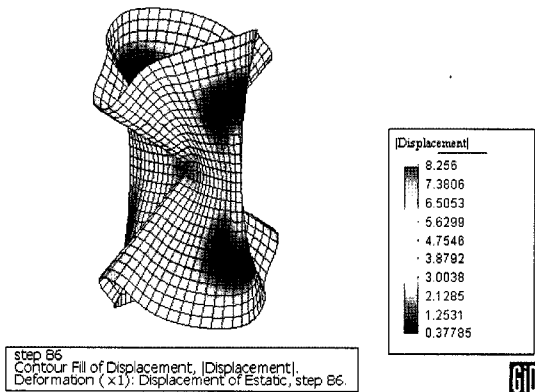


그림 27 변형된 형상 (2)

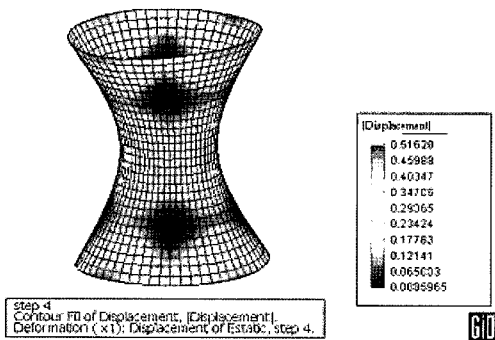


그림 28 변형된 형상 (1)

(4) 콘크리트 쉘 요소

콘크리트 쉘요소의 재료 비선형성 모델은 Hinton 및 Owen에 의한 소성 모델과 Maekawa에 의한 탄소성 파괴 모델이 있다.

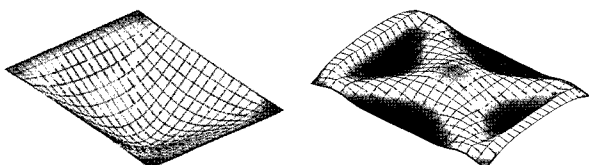


그림 29 Sharpe's 슬래브에서 변형 형상

예제 : Sharpe's 철근 콘크리트 슬래브
Maekawa의 재료 탄소성 파괴 모델을 이용하여 극한점에서 변형된 형상을 보여 주고 있다.

5.2 3차원 프레임 및 빔 요소

2절점, 3차원 프레임 및 빔 요소가 선형 및 비선형 동적 해석을 위하여 개발되었다. 프레임 요소(XFRAME)는 6개의 자유도를 가지며, 스프링 및 offset 기능이 있어서 구조물을 다양한 용도로 모델링이 가능하도록 개발되었다. 직선 및 곡선보의 모델링이 가능한 빔요소(XBEAM2Q and XBEAM3)는 Vlasov의 와핑을 고려하여 7개의 자유도를 가지도록 개발되었으며, 전단 변형을 고려하여 얇은 보 및 두꺼운 보의 해석이 가능하도록 하였다. 프레임 및 빔 요소는 쉘요소와 같은점에서 절점이 공유된 보강재로 사용하여 보강관 및 쉘 해석이 가능하며, Von-Mises 소성이론이 포함되어 대변위 탄소성 해석을 수행할 수 있게 하였다.

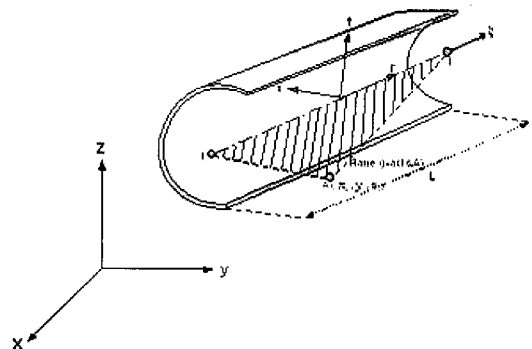


그림 30 2 & 3-nodes beam element

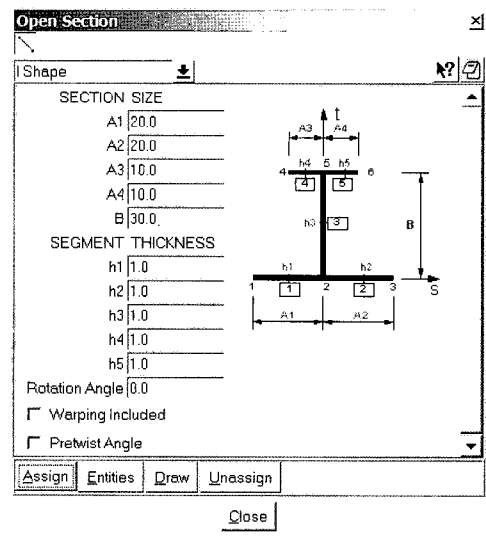


그림 31 와핑을 포함한 보 요소의 단면 계수를 계산하기 위한 윈도우 메뉴

예제 : 빔요소의 대변형 탄소성 해석의 결과를 검증하기 위하여 Lee's frame이 이용되었으며, 그림에서처럼 우수한 결과를 보여주고 있다.

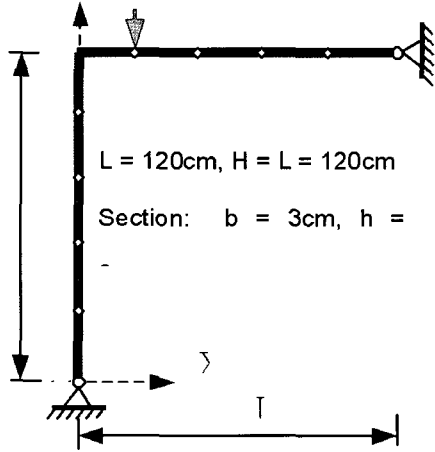


그림 32a Lee's frame의 변형된 형상

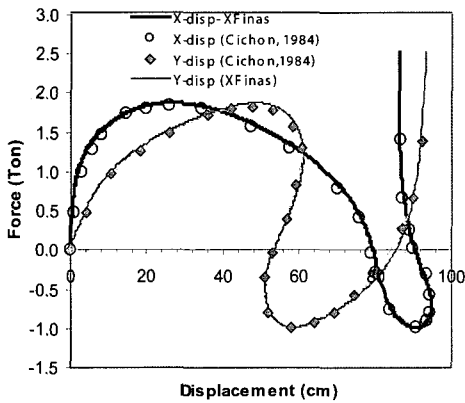


그림 32b 하중 및 처짐 곡선

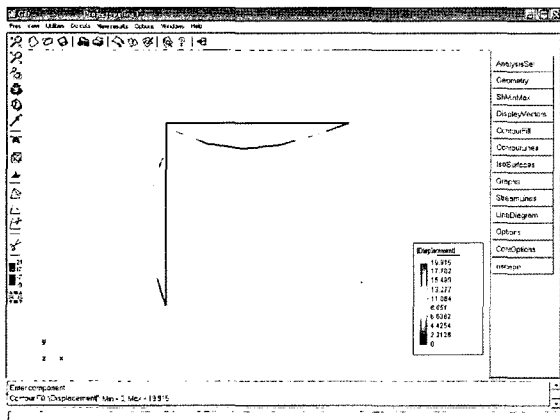


그림 32c Lee's frame의 변형된 형상

5.3 8절점 입체 요소(8-node Solid element)

XFINAS의 8절점 3차원 입체 요소는 임의의 불규칙 형상을 가진 구조물의 3차원 선형해석을 위한 보강변형률

정식화를 이용하였다. 대부분의 경우에 임의하중상태에서 일반적인 8절점 고체 요소는 전단잠김 및 체적 잠김 현상이 발생하여 부정확한 해를 나타내게 된다. 이러한 잠김 현상으로 인한 상대적으로 수렴도가 떨어지는 요소의 거동을 극복하기 위해서 보강변형률 방법을 사용하여, 8절점 3차원 솔리드 요소(XSOLID81, 82, 83, 84) 및 XSOLID85 (Incompatible mode)를 개발하였다. 2차원 및 3차원 얇은 보나 쉘 구조물을 아주 적은 숫자의 3차원 입체 요소를 이용하여 계산한 결과들은 쉘 요소(Shell Element)를 이용한 결과들과 잘 일치하여 쉘 구조의 해석에 용이한 것으로 나타났으며, 그 결과를 SCI논문에 발표하여 정확하고 우수함을 검증받았다. XFINAS의 솔리드 요소를 이용하여 3차원 콘크리트 아치댐의 구조해석을 수행하여 제시된 결과들은 적은 요소를 사용하여도 참고문헌과 잘 일치함으로서 XFINAS의 3차원 입체 요소가 우수함을 검증하였다.

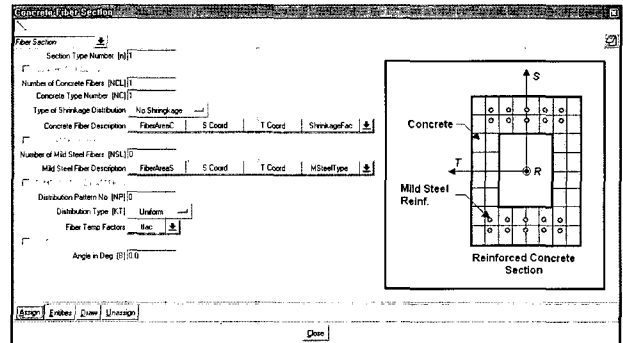


그림 33 철근 콘크리트 프레임의 재료 비선형해석을 위한 하이버 모델 요소 데이터 입력 윈도우 메뉴

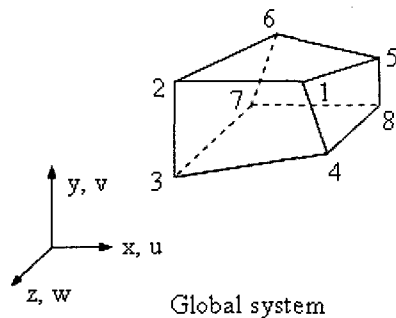


그림 34 8실점 고체 요소

예제 : 쉘 상부의 중심축에서 18도의 구멍을 가진 헤미스페리컬 쉘이 압축과 인장을 받을 때 선형 해석을 수행하였다. 이 쉘은 면내 및 휨거동의 영향을 동시에 받는 예제로 8절점 입체요소에 의하여 쉘 요소의 거동도 묘사할 수 있다는 검증할 수 있는 좋은 예제 중의 하나이다.

표 4 상부의 중심축에서 18도의 구멍을 가진 헤미스페리칼 셸 (정확한 해 = 0.094)

요소 수	무차원 해					
	XSOLID81	XSOLID82	XSOLID83	XSOLID84	XSOLID85	XSOLID8F
4*4*1	0.0922	0.0409	0.0897	1.0587	0.0123	0.0007
8*8*1	0.8698	0.7446	0.8626	1.0051	0.1838	0.0027
10*10*1	0.9533	0.9071	0.9495	0.9993	0.3536	0.0041

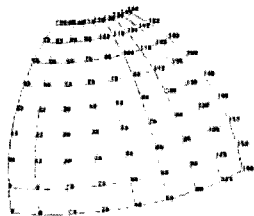
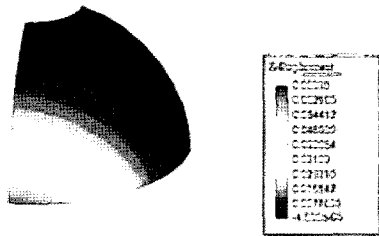


그림 35a 요소의 자동 생성에 의한 전처리 과정



Center Hill of Displacement, Plot/Intercept

그림 35b 후처리 결과

예제 : 균일한 분포하중을 받는 단순 지지된 마름모 형의 판의 선형 해석을 수행하였다. 판의 중심에서 처짐을 정확해 ($W_c=0.04455$)와 비교하였으며, 그 결과를 다음 표에 비교하였다. 이 예제는 불규칙한 요소망을 갖는 판의 모델링에 적용할 수 있는지를 검증하는 예제로서 XFINAS 입체요소로도 판의 휨 거동을 정확하게 계산할 수 있어서 입체요소가 여러 분야에 적용 가능성을 보여주고 있다.

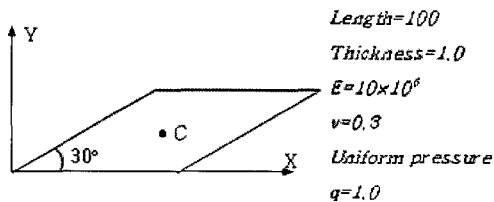


그림 36 마름모 형의 판(Rhombic plate)의 기하학적 형상

표 5 마름모형 판의 처짐($W=0.04455$)

요소 수	무차원 해					
	XSOLID81	XSOLID82	XSOLID83	XSOLID84	XSOLID85	XSOLID8F
4*4*1	0.8790	0.9464	0.8745	0.8790	0.3203	0.0215
8*8*1	0.8705	0.9535	0.8649	0.8705	0.6763	0.0715
16*16*1	0.9273	0.9856	0.9246	0.9273	0.8889	0.1832
20*20*1	0.9475	0.9960	0.9452	0.9475	0.9299	0.2325
32*32*1	0.9852	1.0146	0.9832	0.9852	0.9868	0.3528

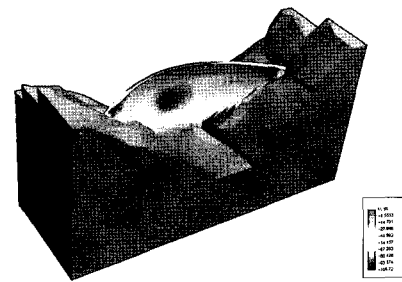
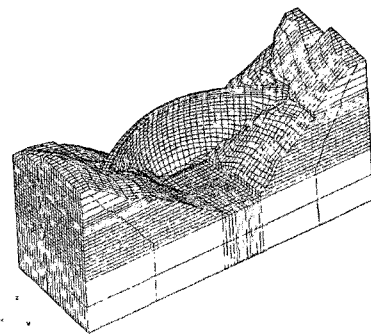


그림 37 요소의 자동 생성에 의한 3차원 콘크리트 아치 댐의 전처리 및 해석 결과에 대한 후처리 형상

5.4 평면 요소 (4절점 보강변형률 및 8절점 요소)

XFINAS의 평면 요소는 8절점 및 4절점 요소를 가지고 있다. 4절점 보강변형률(XPLANE) 요소는 8절점 요소에 비하여 강성행렬 시스템 크기를 감소시켜 연산시간과 효율이 크게 개선됨을 확인하였다. Patch Test를 통과 했으며 기존의 8절점 수준이상으로 정확도가 높아짐도 확인하였다. 4절점 보강변형률 요소는 특히 불규칙한 형상의 요소가 모델링 될 때 문제의 해소에 유용함을 보였다.

개발된 요소의 검증을 위하여 다양한 테스트가 실행되었으며, 그 중에서 Cook에 의해서 제안된 문제(Cook's membrane problem)로 사다리꼴 같은 불규칙한 형상을 갖는 고정된 보에 수직 단위 하중이 작용할 때 그 면내 변위를 비교하는 문제를 다음과 같이 비교 검토하였다. 비교가 된 값은 C점에서 변위로 Heuck와 Wrigger에 의해서 제안된 값이며 4절점 평면 요소를 정확성 및 안전성을 검증하기 위하여 이용되고 있는 가장 어려운 문제이다. 해석 결과 XPLANE요소의 결과치가 다른 어떤 요소의 결과보다도 더욱 우수함을 알 수 있다.

- Q4 - 일적인 4절점 요소
- 5β - I - Pian과 Sumihara에 의해서 제안된 4절점 응력요소
- QM6 - Taylor에 의해서 제안된 비적합 요소
- QS6 - Hueck와 Wriggers에 의해서 제안된 보강변형률 요소

- 8β - 회전 자유도를 고려하여 Geyer와 Greenwood에 의해서 제안된 응력법 요소
- QI - 회전 자유도를 고려하여 Ibrahimbegovic에 의해서 개발된
- XPLANE - 본연구에서 제안한 요소

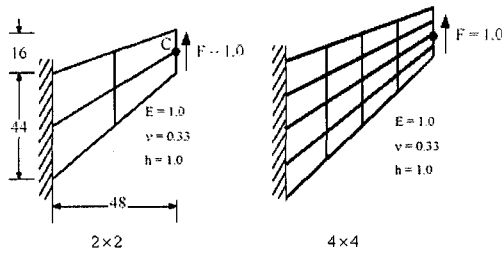


그림 38 Cook의 고정정보에 대한 기하학적 형상 및 재료 특성

표 6 C 점에서 변위

요소 종류	$2 \times 2 \nu_c$	$4 \times 4 \nu_c$
$Q4$	11.85	18.30
$5\beta-I$	21.13	23.02
$QM6$	21.05	23.02
$QS6$	21.06	23.02
8β	19.60	22.65
QI	19.27	22.61
XPLANE	21.43	23.40
정확해	23.96	23.96

5.5 축 대칭 요소

비선형 8절점 축대칭 요소가 XFINAS에 개발되었으며 폰미스의 항복조건을 이용한 재료 모델이 결합되었다. 다음 예제는 스페리칼 셸의 비선형 동적 해석 예제를 테스트 하여 수록하였다. 결과는 참고문헌과 잘 일치하였다.

예제 : 스페리칼 셸의 비선형 동적 해석

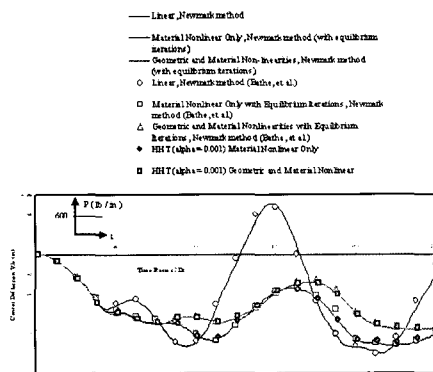


그림 39 스페리칼 셸의 대변형 탄소성 동적 해석 결과

5.6 트러스 및 케이블 요소

3차원 비선형 트러스 및 케이블 요소가 개발되었으며, 그 결과를 검증하기 위하여 호장 잔차법을 이용하여 3차원 입체 트러스의 비선형 해석을 수행하였다.

현수곡선(Catenary element)에 의한 3차원 케이블 요소가 개발되었으며, 이 요소를 이용하면 케이블 모델링시 하나의 요소를 사용하여도 수렴치에 근접하는 우수한 요소로 판명되었다.

예제 : 호장 제어법을 검증하기 위하여 그물형 공간 트러스의 비선형 해석을 수행하였다. 이 예제의 비선형성은 복잡한 형상을 나타내고 있으며, 트러스의 비선형을 검증할 수 있는 적합한 예제이다.

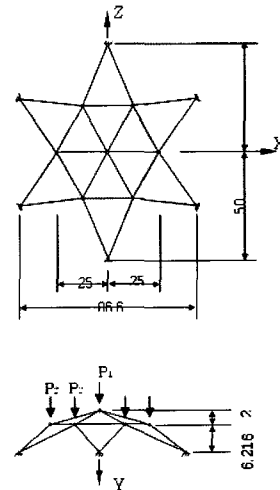


그림 40a 그물망 형상의 입체 트러스

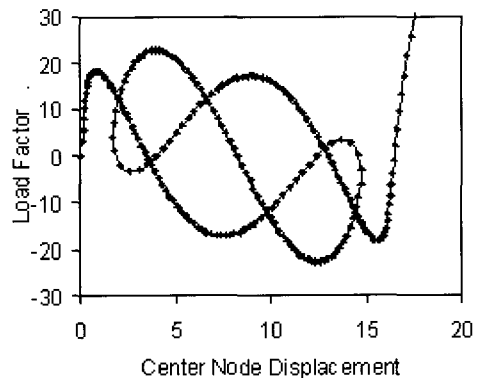


그림 40b 비선형 경로

8. 결 언

1. XFINAS는 최근의 유한요소 이론에 의하여 개발되어 왔으며 기존 요소의 문제점을 해결한 후 SCI 저널

에 발표하여 그 결과를 이미 검증하였다. XFINAS의 모든 요소를 테스트한 결과는 참고문헌과 잘 일치하였으며 검증 예제 매뉴얼에 수록하였다.

2. XFINAS 프로그램은 solution method 와 element library를 모듈 별로 정리하여 프로그램에 군더더기가 없어서 새로 접하는 연구원도 프로그램을 쉽게 할 수 있도록 구성하였다.
3. XFINAS는 대학 및 연구소에서 고급 유한요소 해석을 위한 참고문헌으로 활용하기 위하여 XFINAS에서 개발된 모든 프로그램에 대한 독자적인 이론 매뉴얼을 보유하고 있을 뿐만 아니라 설계 회사에서 사용할 수 있도록 많은 예제를 수록하였다.
4. 지속적인 전산구조 및 재료분야의 연구 개발로 XFINAS가 실험을 대체할 수 있는 시뮬레이션 도구로 개발하고자 한다. 특히 XFINAS를 이용하여 지진분야의 해석을 위한 강구조 및 철근 콘크리트 재료 손상 모델 개발, 지반의 소성모델 개발, 장대 교량 적용을 위한 Computational Fluid Dynamic분야 및 Bio-Mechanics 분야의 연구를 하고자 한다.

참 고 문 헌

1. XFINAS Theory Manual, Konkuk University, 2005
2. XFINAS Validation Manual, Konkuk University, 2005
3. XFINAS Example Manual, Konkuk University, 2005
4. XFINAS User Manual, Konkuk University, 2005
5. Urs Trueb, Stability Problems of Elasto-plastic Plates and shells by Finite Elements, Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Imperial College, London, 1983
6. D.N.Bates, The Mechanics of Thin Walled Structures with Special Reference to Finite Rotations? Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Imperial College, London, 1987
7. K.D. Kim Non-linear Analysis of Fibre-Reinforced Composite Structures Using Finite Elements', Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, Imperial College, London, 1992
8. K.D.Kim, Buckling Behaviour of Composite Panels using Finite Element Method, 1996, Sep.33-43, COMPOSITES STRUCTURES, AN INTERNATIONAL JOURNAL, Vol. 36, No 1/2.
9. K.D. Kim, T.H. Park and George Z. Voyiadjis, Postbuckling Analysis of Composite Panels with Imperfection Damage, Computational Mechanics, 1998, 22 (5), 368-375
10. K.D. Kim and George Z. Voyiadjis, Buckling Strength Prediction of CFRP Cylindrical Panels Using Finite Element Method, 1999. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol.30, Iss 9, pp1105-1121
11. K.D. Kim, George Z. Voyiadjis, Non-linear Finite Element Analysis of Composite Panels, 1999, Composites Part B: Engineering, Vol. 30, Iss 4, PP 383-394
12. K.D. Kim and T.H. Park, An 8-Node Assumed Strain Element with Explicit Integration for Isotropic and Laminated Composite Shells, Structural Engineering and Mechanics, An International Journal, Vol. 13. NO.4 2002,1-18
13. K.D. Kim, G. R. Lomboy and S.C.Han. A Co-rotational 8-Node Assumed Strain Shell Element for Postbuckling Analysis of Laminated Composite Plates and Shells" Computational Mechanics? Volume 30 Issue 4 (2003), pp 330-342.
14. K.D. Kim, Large Displacement of Elasto-Plastic Analysis of Stiffened Plates and Shells using Co-rotational 8-Node Assumed Strain Element, Structural Engineering and Mechanics, An International Journal, Vol. 15, No.2, 2003 (199-223)
15. K.D. Kim, G.R. Lomboy and G.Z. Voyiadjis, A 4-Node Assumed Strain Quasi-Conforming Shell Element with 6 D.O.F., International Journal for Numerical Methods in Engineering, Volume 58, Issue 14, p2177-2200, December 2003
16. S.C. Han, K.D.Kim, W. Kanok-Nukulchai, An Element-Based 9-node Resultant Shell Element for Large Deformation Analysis of Laminated Composite Plates and Shells, Structural Engineering and Mechanics, An International Journal, Vol.18, No. 6, December, 2004, 807-829

17. K. D. Kim, G. Z. Liu and S.C. Han, A resultant 8-node solid-shell element for geometrically nonlinear analysis, *Computational Mechanics*, 35, no5, 2005, April, 315-331
18. T. H. Park, K. D. Kim and S. C. Han, .Linear Static and Dynamic Analysis of Laminated Composite Plates and Shells using a 4-node Quasi-Conforming Shell Element, *Composites Part B: Engineering*, In printing
19. G.R. lomboy, K.D.Kim, Eugenio Onate "A co-rotational 8-node resultant shell element for progressive nonlinear dynamic failure analysis of laminated composite structures" accepted for publication. "International Journal of Computational Engineering Science (IJCES)" edited by Prof. J. N. Reddy
20. Co-rotational Quasi-Conforming 4-Node Assumed Strain Shell Element for Large Displacement of Elasto-plastic Analysis, submitted for publication
21. K.D.Kim,G.R. Lomboy, Y.J.Byun, J.H.Choi, Nonlinear Structural/Mechanical dynamic analysis using XFINAS with GiD, *Gid Conference*, Spain, Barcelona, 2004,February , pp 171-175
22. Kidu Kim, H.M. Sunil Munasinghe, W. Kanok-Nukulchai, "Buckling Behaviour of Cylindrical shells under axial compression", *EASEC conference*, Nanyang Technological university, Singapore Paper No 1474,2002 