

막구조 해석을 위한 비선형 유한요소 프로그램

Introduction to Nonlinear Finite Element Program for Membrane Structures



변 광 욱*
Byun, Gwang-Wook



이 상 주**
Lee, Sang-Ju

1. 개요

2015년에 ‘개폐식 대공간 건축물의 통합설계 엔지니어링 기술 개발’ 연구단이 구성되어 5개년 계획으로 연구를 진행하고 있다. 세부연구과제로서 ‘대공간 건축물 통합설계시스템 구축’에 주력하고 있으며, 특히 개폐식 연성 대공간 구조시스템 설계기술력을 확보하고자 노력하고 있다.

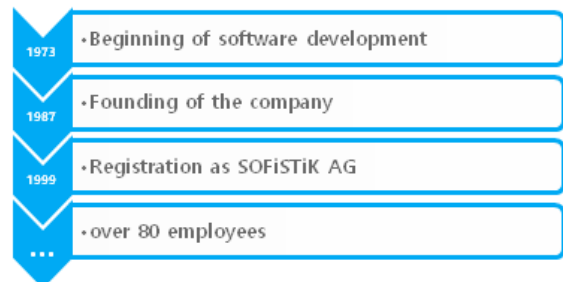
연성 케이블-막구조물은 해석적으로 장력도입에 의해 초기형상을 결정하여야 하며, 대변형에 따른 기하학적 비선형성을 고려한 응력해석 및 시공을 위한 재단도를 작성하여야 한다. 이를 위해 다수의 실적을 가진 SOFiSTiK이라는 프로그램을 적용하고자 한다. 여기에 이 프로그램의 특징 및 적용사례를 소개한다.

* 이지소프트컨설팅 대표이사
EG Soft Consulting, General Director
** (주)아이스트 책임연구원
I'ST Co., Ltd, Structural Engineering Group

2. SOFiSTiK 프로그램 개요

SOFiSTiK AG는 건축분야 해석, 설계 및 캐드 분야에 있어서 유럽에서 선도적인 위치에 있는 소프트웨어 회사이다. 주력 제품인 유한요소해석 프로그램 이름도 회사이름과 같은 SOFiSTiK이며, 건설용 캐드제품인 SOFiCAD, BIM 제품으로는 철근배근도 작성 프로그램인 RCD2016 등이 주력 제품이다.

SOFiSTiK AG의 대표 제품인 SOFiSTiK FEA 프로그램은 뮌헨공대에서 1982년부터 본격적으로 개발되었으며, 회사는 소프트웨어가 완성된 1987년에



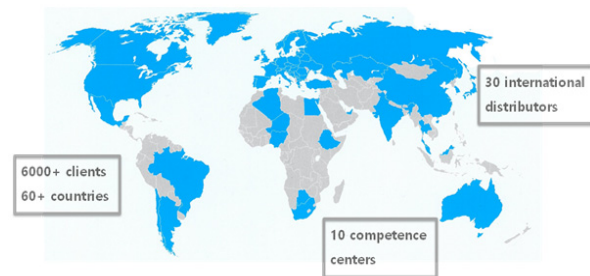
〈Fig. 1〉 History of SOFiSTiK

설립되었다. 현재의 사명인 SOFiSTiK AG는 1999년에 변경된 것이다. 뮌헨과 뉘른베르크에 2개의 본사가 있으며, 유럽과 아프리카에 8개의 지사를 보유하고 있다. 대리점은 30여 곳에 이르고 있다.

유한요소해석 프로그램의 개발은 뮌헨 본사에서 수행하고 있으며, 캐드 및 BiM 프로그램은 뉘른베르크 본사에서 개발하고 있다. 영업 및 기술지원 업무는 오스트리아 그라츠 사무소에서 주로 담당하고 있다.

주요 소프트웨어 파트너사는 Autodesk와 Rhinoceros이며, 파트너 제품인 AutoCAD, Revit 및 Rhinoceros에 설치된 다양한 SOFiSTiK Add-in 전후처리 기능을 메뉴상에서 이용할 수 있다.

SOFiSTiK 유한요소 프로그램인 SOFiSTiK FEA는 범용 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS와 같이 대규모, 다기능 및 고난도의 최신해석 기능을 두루 갖춘 프로그램이다. 구조요소, 유체요소 및 고체요소 등을 대상으로 재료비선형, 기하비선형 및 선형성해석 기능을 수행할 수 있다.



〈Fig. 2〉 Share of SOFiSTiK users



〈Fig. 3〉 SOFiSTiK main Client

3. 프로그램 구성

3.1 전처리

SOFiSTiK FEA의 입력자료를 생성하는 전처리는 SofiPlus이다. AutoCAD Add-in 프로그램으로 AutoCAD 상에서 캐드정보를 이용하여 구조해석을 위한 컨트롤 정보, 물성 및 구조재원 정보, 요소정보, 하중, 시공단계 및 그룹화를 정의할 수 있다. Revit Structure 및 IFC 2x3 인터페이스를 통해 BiM환경에 대응하고 있으며, Rhinoceros와의 인터페이스를 통해 NURBS 곡면(자유형상면)에 대한 유한요소망 생성을 지원한다. 또한 SofiPlus에서는 캐드기능을 이용하여 부재단면을 편집할 수 있으며, 슬래브/보에 대한 포스트텐션도 그래픽으로 입력할 수 있다.

이와는 별도로 통합 전후처리기인 SSD모듈에서는 대화상자 및 스크립트를 이용한 사용자 인터페이스를 제공하고 있다. 스크립트 언어는 파라메트릭 입력 언어인 CADINP를 사용하고 있다. CADINP는 데이터, 변수, 배열, 함수, 조건문 및 반복 등 컴파일러 기능을 갖고 있어, SOFiSTiK 내부 변수를 접근하여 사용자가 원하는 연산을 수행한 후 값을 변경할 수 있다. 또한, CADINP 스크립트는 SOFiSTiK 모듈별 입력파일을 저장하고, 해당모듈을 실행하고 해석결과를 사용자가 원하는 방식으로 저장하게 할 수 있다.

3.2 해석프로그램

SOFiSTiK FEA는 다양한 재료비선형, 기하비선형 및 동해석 기능을 제공하는 범용 프로그램으로 아래와 같은 다양한 해석이 가능하다.

기하학적으로 선형, 2차이론(P-Delta) 및 완전한 3차이론 기하비선형 해석이 가능하다.

병렬처리 분산해석 솔버를 탑재하여(32비트 및 64비트, 윈도우 및 리눅스 지원) 초고속 해석이 가능하다. 분산해석 솔버에는 Direct Skyline Solver

(Gauss/Cholesky), Iterative Solver(Conjugate Gradients), Direct Sparse Solver(DAVIS 및 PARDISO) 등이 갖춰져 있다.

열전달 해석, 시공단계해석, 동해석 및 좌굴 고유치 해석 등이 가능하다.

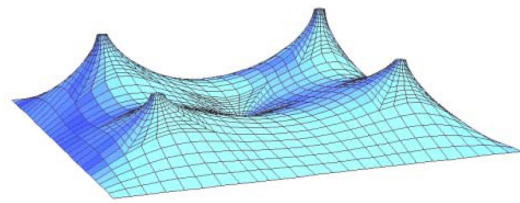
기타 실무적인 기능을 다수 보유하고 있는데, 탄성기초 스프링의 인장파괴 특성, 탄성 반무한체 요소 및 말뚝요소를 이용한 SSI(Soil-Structure Interaction)해석, 비선형 스프링 효과(Crack, Gap, 항복 등), 스프링 및 힌지의 개별 일(Work) 법칙 특성, 보요소 비틀림(Torsion)거동에서 뒤틀림(Warping) 자유도, 보요소의 재료 비선형 특성, Plate 및 Shell 요소의 RC 재료 비선형 특성(실제적인 강성, 균열 예측 기능), 다층 Shell요소의 재료비선형 특성(예, 강재 소성화, 샌드위치 유리, 목재/OSB), 스케일화된 고유형상으로부터 전체적인 결함 분석, 시간의존 효과의 자동 결정(크립, 수축 및 이완), 강재단면 라이브러리 및 단면 그룹 최적화 등을 들 수 있다.

하중/설계 특성도 매우 다양한데, 요소망-독립 하중 재하, 분포하중 재하 곡면 및 평면 정의, 정수 압 및 유체 하중, 풍하중(EN 1991-1-4, SNIP 및 물리적 풍하중 형상 고려) 뿐만 아니라 지진 스펙트럼 라이브러리 제공(EN 1998, SIA, I-DM, UBC/IBC, SNIP 등), 비선형 저항성능 스펙트럼(Push-over)해석, 강재단면에 대한 탄성 응력 설계, 단면 계통화, 비선형 상호작용 및 소성화 검토, 축 좌굴 및 LTB 검토(EN 1993), 강재 및 합성 Class 4 단면에 대한 유효폭 자동 검토(EN 1993-1-5)를 들 수 있다.

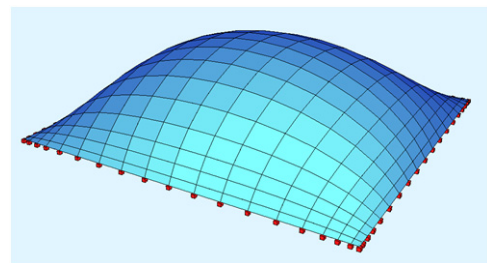
또한, RC 휨 및 전단 설계(다양한 설계 코드 적용), RC 사용성 및 응력 검토, 프리스트레스 콘크리트 설계 및 응력 검토, 펀칭에 대한 자동 검토, Downstand beam에 대한 일체화된 설계, 강재 연결 설계(EN 1993, FIDES SteelCON 모듈) 등을 들 수 있다.

3.3 경량구조 해석

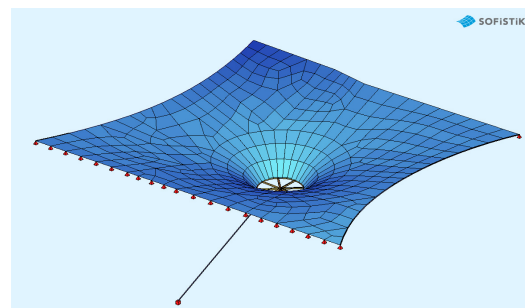
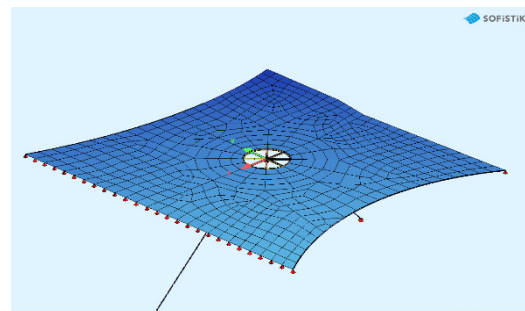
경량구조해석에서는 기하비선형 해석이 일반적으로 적용되는데 이를 위하여, 보, 케이블, 평판, Membrane 및 Shell 등 다양한 요소와 철강, 유리, 콘크리트 및 복합재료 등 다양한 재료의 조합이 가능하며, 사용자정의 재료 및 선형/비선형 스프링 요소의 적용도 가능하다.



〈Fig. 4〉 High point modeling & Form-finding analysis



〈Fig. 5〉 Roof of tennis stadium applied air-volume element



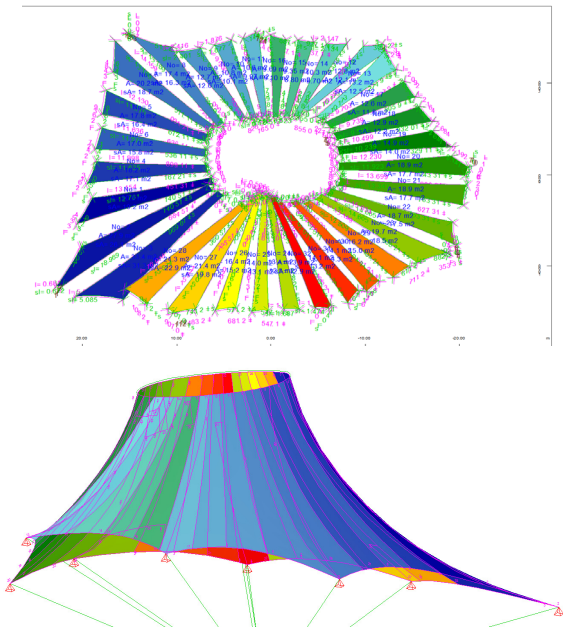
〈Fig. 6〉 High point modeling

Form-finding 해석을 위해 초기상태와 같은 하중 케이스를 포함하는 시공단계해석이 가능하다. 2nd-order 및 리얼리티에 가까운 3rd-order 기하비선형 해석이 가능하다. 기하비선형 해석에서는 최종 하중에 도달하기까지 반복해석이 다양한 알고리즘 옵션을 통해 안정적으로 진행된다. 케이블 요소는 내부 새그(Sag)를 갖는 Catenary effect를 고려할 수 있다. 또한, 소성 힌지 시뮬레이션, 국부 및 전체 안정성 검토(좌굴/세장비/LTB), 뒤틀림(Warping torsion) 등이 가능하다.

요소자동분할에 의해 생성된 자유형상 Shell요소에 대한 프리스트레싱이 가능하며, 압축파괴 및 전단파괴와 같은 비선형 막요소의 모델링이 가능하다.

경량구조에 대한 고유치 및 고유형상해석, 고유형상으로부터 전체 스케일에 있어서의 결함을 분석할 수 있으며, 좌굴에 대한 고유치해석도 가능하다.

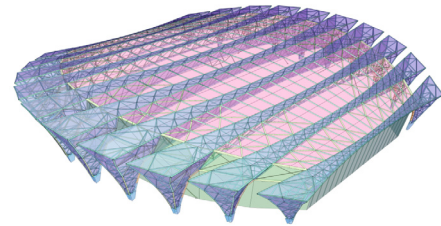
경량구조 해석에서는 3rd-order 기하비선형 및 재료비선형을 조합한 Form-finding 해석기능과, 막구조 해석에서 Cutting Pattern 계산기능(2D/3D)이 있고, 또한 공기팽창에 의한 균등압력하중을 고려할 수 있는 Air-volume요소를 제공하고 있다.



〈Fig. 7〉 Cutting pattern 2D/3D view of membrane structure

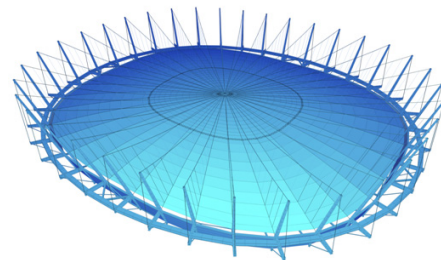
4. 실무사례

4.1 실무사례1: Shanghai Oriental Sport Center



- Owner: Shanghai Administration of Sport
- Engineering: Schlaich Bergermann und partner
- Architect: gmp · Architekten von Gerkan, Marg und Partner

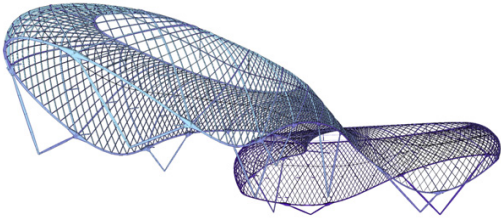
4.2 실무사례2: Rehabilitation Stadium BC Place, Vancouver



- Owner: BC Place, Vancouver
- Conceptual Design, Construction Design: Schlaich Bergermann und partner
- Architect: Stantec, Vancouver

- Contractors: Canam, Freyssinet, Hightex
- Cooperation: David Campbell, engineer of record

4.3 실무사례3: Gridshell, Yas Hotel, Abu Dhabi

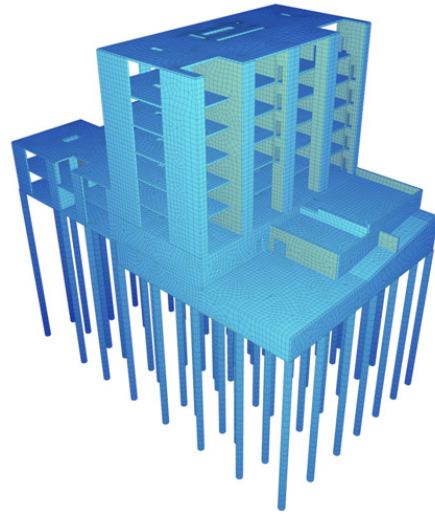


- Owner: ALDAR Properties PJSC, Abu Dhabi
- Structural Design and Engineering of Gridshell: Schlaich Bergermann und partner
- Architect: Asymptote Architecture
- Photo: Björn Moermann

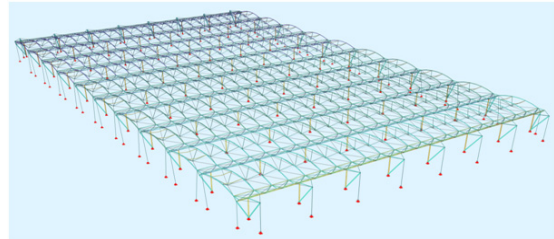
4.4 실무사례4: Think K Stuttgart Killesberg



- Engineering: WSP CBP Tragwerksplanungs GmbH
- Architects: CAP Architects, Baumschlager & Eberle und David Chipperfield Architects



4.5 실무사례5: AWM Carport, Munich



- Contractor: Landeshauptstadt München
- Owner: AWM Munich
- Architect: Ackermann und Partner, Munich
- Engineering: Ackermann Ingenieure, Munich
- Photo: Richie Müller

5. 결론

앞에서 살펴본 바와 같이 SOFiSTiK FEA는 유한요소해석 프로그램으로서 이론적 범용성과 함께 실무적으로 필요한 다수의 세부 기능을 제공하며, 해

외 다수 프로젝트에 활발하게 적용되고 있다. 이 프로그램의 적용을 통하여 연성 케이블-막구조물의 해석 및 설계기술이 한층 발전되기를 기대한다.

References

1. K.J. Bathe and E.N. Dvorkin, A Four-Node Plate Bending Element Based on Mindlin/Reissner Plate Theory and a Mixed Interpolation, *Int.Journal.f.Numerical Meth. Engineering* Vol.21 367-383, 1985.
2. J. Bellmann, Vorgespannte schiefwinklige Plattenbalkenbrücke, 7. SOFiSTiK Seminar, 1994.
3. J. Bellmann and J. Rötzer, Beispiele zur Bemessung nach DIN 1045-1, Müllbunkerwand, DBV: Band2: Ingenieurbau Beispiel 15, 2003.
4. M.A. Crisfield, A Quadratic Mindlin Element Using Shear Constraints, *Computers & Structures*, Vol. 18, 833-852, 1984.
5. Timothy A. Davis, Ldl: a concise sparse cholesky factorization package, <http://www.cise.ufl.edu/research/sparse/ldl>, 2003-2012.
6. P.H. Feenstra and R. De Borst, Aspects of robust computational modeling for plain and reinforced concrete, *Heron* Volume 38 No.4, 1993.
7. T.J.R. Hughes and E. Hinton, *Finite Elements for Plate and Shell Structures*, Pineridge Press International, Swansea, 1986.
8. T.J.R. Hughes and T.E. Tezduyar, Finite Elements Based Upon Mindlin Plate Theory With Particular Reference to the Four-Node Bilinear Isoparametric Element, *Journal of Applied Mechanics*, 48/3, 1981.
9. C. Katz, Berechnung von allgemeinen Pfahlwerken, *Bauingenieur* 61 563-568, 1986.
10. C. Katz, Neues zu Plattenbalken, 7. SOFiSTiK Seminar, 1994.
11. C. Katz and J. Stieda, *Praktische FE-Berechnungen mit Plattenbalken*, Bauinformatik 1, 1992.
12. P. Schiessel, Grundlagen der Neuregelung zur Beschränkung der Rissbreite, Heft 400 DAfStb, 1994.
13. W. Schneider, Zustand II Berechnungen in der Praxis (Beitrag), SOFiSTiK Seminar Leipzig, 2003.
14. Stempniewski and Eibl, Finite Elemente im Stahlbeton, *Betonkalender* 1993-Teil 1 S. 249., 1993.
15. R.L. Taylor, P.J. Beresford, and E.L. Wilson, A Non-Conforming Element for Stress Analysis, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 10:1211-1219, 1976.
16. A. Tessler and T.J.R. Hughes, An improved Treatment of Transverse Shear in the Mindlin-Type Four-Node Quadrilateral Element, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 39, 1983.
17. Timoshenko and Woinowsky-Krieger, *Theory of Plates and Shells*, MacGraw-Hill, New-York, 1959.
18. W. Wunderlich, G. Kiener, and W. Ostermann, Modellierung und Berechnung von Deckenplatten mit Unterzügen, *Bauingenieur*, 1994.
19. O.C. Zienkiewicz, *Methode der finiten Elemente*, 2.Auflage, Hanser Verlag München, 1984.
20. K. Zilch and A. Rogge, Bemessung von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen im Brücken- und Hochbau, *Betonkalender* 2, 2004.