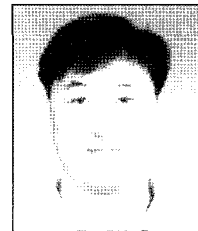


비(非) 상용 구조해석 프로그램

Non-commercial Structural Analysis Programs



이 태 형*



박 재 균**

*건국대학교 토목공학과 조교수

**단국대학교 토목환경공학과 조교수

1. 머리말

이 글을 읽는 독자들 중에서 SAP2000을 모르는 독자는 거의 없을 것이다. 하지만, SAP2000의 전신인 SAP이 전 University of California at Berkeley(UC Berkeley), Department of Civil and Environmental Engineering의 교수였던 Edward L. Wilson박사의 1970년대 연구업적으로부터 시작되었다는 사실을 아는 독자는 그리 많지 않을 것이다. 비슷한 경우로, 독자의 대부분이 알고 있는 ADINA는 현 MIT, Department of Mechanical Engineering의 교수인 Klaus-Jurgen Bathe박사의 연구업적에 기반을 두고 있다. 여기서 예로 들고 있는 두 프로그램은 각각 UC Berkeley와 MIT의 연구실에서 개발된 프로그램을 상용화하여 큰 성공을 거둔 것들이다.

앞에서 이야기 한 두 개의 학교를 포함한 세계 유수 대학의 전산구조공학 관련 연구실에서는 그들 각자의 사용 목적에 맞는 크고 작은 프로그램들을 개발하여 사용하고 있다. 이 중 일부는 SAP과 ADINA처럼 상업적인 목적으로 개발되기 위해서 회사로 옮겨져 화려한 사용자 인터페이스로 포장이 되고, 일부는 소박한 모습 그대로 인터넷을 통해서 다른 사용자들에게 알려지고, 때로는 그런 사용자들에 의해서 발전이 되기도 한다. 이 글에서는 후자의 경우에 해당하는 프로그램들 중 세계적으로 많이 알려져 있

거나, 독자들이 알아두면 유용할만한 프로그램들을 찾아 그들의 개발배경, 사용범위, 및 특징들을 소개한다.

2. 비 상용 구조해석 프로그램

2.1 OpenSees

• 홈페이지: <http://opensees.berkeley.edu>

현재 미국의 토목구조분야에서 가장 많은 관심을 끌고 있는 비 상용 구조해석 프로그램이 바로 OpenSees이다. OpenSees는 UC Berkeley 소재 Pacific Earthquake Engineering Research(PEER)센터에서 개발한 오픈 소스(open-source) 구조해석 프로그램으로, OpenSees라는 이름은 Open System for Earthquake Engineering Simulation의 머리글자를 따서 만들어 졌다. 그 이름에서 알 수 있듯이, OpenSees는 지진하중에 의한 해석을 주목적으로 하는 프로그램으로, 구조공학 뿐만 아니라 지반공학 분야에서도 많이 사용하고 있다. 1990년대 중반부터 UC Berkeley, Department of Civil and Environmental Engineering의 교수인 Gregory L. Fenves박사가 당시 그의 학생들인 Frank McKenna박사와 Michael Scott박사와 함께 개발하기 시작하여, 1990년대 말에 인터넷을 통해서 일반에게 공개되었다.

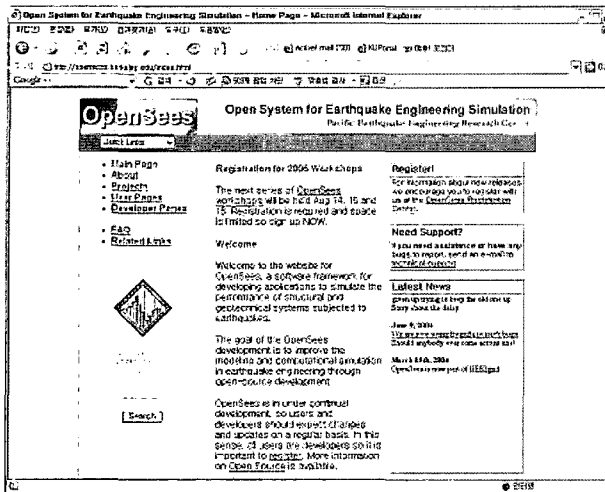


그림 1 OpenSees의 홈페이지

OpenSees는 병렬처리를 쉽게 구현할 수 있는 C++로 쓰여졌고, 일반 사용자는 Tcl이라는 scripting language를 이용하여 입력 값을 지정한다. 앞에서 서술한 바와 같이, OpenSees는 오픈-소스 프로그램이라, 이 프로그램을 구성하고 있는 모든 파일들을 누구나 웹 브라우저를 통해서 다운로드 받을 수 있다. 따라서, 새로 개발한 재료모델이나 유한요소를 사용자 임의로 추가하여 그 사용자 자신만의 프로그램으로 만들 수도 있다. 실제로, 이런 식으로 사용자에게 의해서 개발된 재료모델이나 유한요소들이 관리자의 검증을 거쳐 OpenSees의 공식 라이브러리에 추가되기도 한다. 이렇게, 개발된 프로그램을 절대적으로 사용자들과 공유함으로써 OpenSees는 스스로 성장하고 있는 프로그램이다. 새로운 구성요소를 추가하는 것 이외에도, 사용자들은 OpenSees의 게시판을 통해서 프로그램의 단점을 수정 및 개선해 나가기도 하고, 프로그램의 응용 예를 공유하기도 한다.

이 글에서도 소개될 FEAP의 안정된 솔버(solver)와 비선형해석 알고리즘 등을 근간으로 만들어져 수치해석적인 측면에서 안정성과 효율성을 겸비하고 있고, 부재의 비선형 거동을 잘 표현할 수 있는 파이버모델을 이용하여 철근 콘크리트나 합성형 구조물의 비선형 거동을 평가하는데 매우 적합하다. 이러한 여러 가지 장점들이 있는 반면에, 이렇다 할 그래픽 사용자 인터페이스가 없다는 단점이 있다. 그래픽 인터페이스 대신 Tcl을 입력언어로 사용함으로써 인해 편한 점도 있지만, 특히 처음 OpenSees를 사용해 보려는 사용자들에게 이는 큰 벽이 아닐 수 없다. 공개된 지 이제 10년이 되어가는 이 프로그램의 그래픽 사용자 인터페이스를 만들기 위해서 PEER센터가 지원을 하고 있다는 후문이 있으니, 조만간에 OpenSees의 달라진 모습을 기대해 볼 수도 있겠다.

2.2 IDARC 2D

• 홈페이지: <http://civil.eng.buffalo.edu/idarc2d50>

IDARC2D는 미국의 State University of New York (SUNY) at Buffalo 소재 National Center for Earthquake Engineering Research(NCEER, 현 Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, MCEER)의 지원에 의해서 개발된 프로그램으로, 1987년 NCEER Report를 통해서 처음 소개되었다. 이 프로그램은 고 Y. J. Park박사, 현 SUNY Buffalo의 교수인 A. M. Reinhorn박사, 현 University of California at Davis의 교수인 S. K. Kunnath 박사에 의해서 개발되었고, IDARC란 이름은 Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete frame의 머리글자를 따서 만들었다. 이름에서 볼 수 있듯이, 이 프로그램은 애초에 철근 콘크리트 건물의 내진해석을 위해서 만들어졌고, 그 후로 20여 년간 요소와 재료모델 등을 추가하고 수정, 보완하여, 현재는 상당히 일반적인 토목구조해석 프로그램에 가깝다고 할 수 있다. IDARC 2D를 구성하는 유한요소로는 기둥 요소, 보 요소, 전단 벽 요소, 단부 기둥 요소, 가로 보 요소 등이 있다. 철근 콘크리트 구조물의 비선형 거동을 잘 모사하기 위해서 distributed plasticity model을 이용한 유한요소를 사용하고 있고, 강도 저하와 핀칭(pinching) 등의 특징을 잘 모사하기 위한 재료모델을 사용하고 있는 점은 OpenSees와 같다. 이 프로그램은 MCEER에 속한 미국 동부의 학교를 중심으로 사용되고 있는데, 최근 OpenSees의 확산으로 인해 그 인기가 다소 주춤한 것이 사실이다.

최근에는 IDARC를 기본으로 한 교량전용 해석 프로그램인 IDARC-BRIDGE를 공개하였다. 이 프로그램은 IDARC 2D를 3차원으로 연장하였고, 교량해석에 유용한 특정한 결합 요소 (joint element)를 이용하여 교량 상판

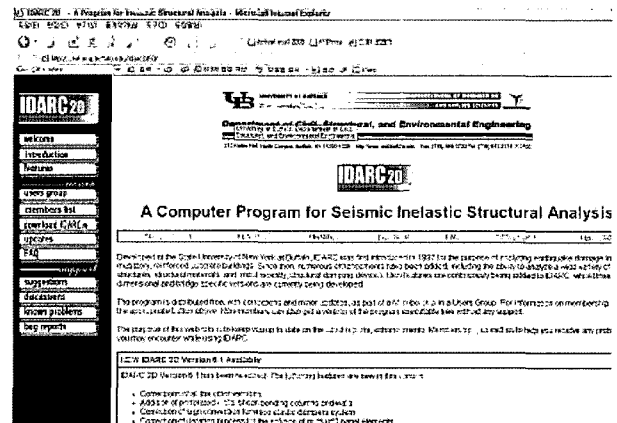


그림 2 IDARC 2D의 홈페이지

의 열에 의한 변형이나 교좌장치를 고려한 해석을 가능하게 하였다. 이 프로그램은 <http://civil.eng.buffalo.edu/idarc-bridge> 에서 다운로드 받을 수 있다.

역시 IDARC를 기본으로 한 변형 프로그램으로, 면진구조물 해석 전용 프로그램인 3D-BASIS가 있다. 구조해석을 위한 기본적인 유한요소와 더불어, 감쇄기가 있는 탄성 받침, 슬라이딩 면진장치, 점탄성 면진장치, 마찰 면진장치 등 다양한 면진장치를 구조해석 시에 고려할 수 있도록 하였다. 이 프로그램은 <http://civil.eng.buffalo.edu/3dbasis> 에서 다운로드 받을 수 있다.

- 참고문헌: Park, Y. J., Reinhorn, A. M., and Kunnath, S. K. (1987), "IDARC 2D: Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Frame - Shear-Wall Structures", Technical Report NCEER-87-0008, State University of New York at Buffalo.

2.3 DRAIN-2D

- 링크: <http://nisee.berkeley.edu/elibrary/getpkg?id=DRAIN2DX>

DRAIN-2D라는 이름은 Dynamic Response Analysis of INelastic 2-Dimensional structures의 머리글자를 딴 것으로, OpenSees나 IDARC가 발표되기 전, 내진구조공학 분야에서 가장 많이 쓰이던 비 상용 프로그램은 단연 이 DRAIN-2D라고 할 수 있다. 소성힌지 모델을 적용한 보-기둥 요소를 이용하여 지진하중에 의한 뼈대 구조물(framed structure)의 비선형 거동 해석을 수행할 수 있는 것이 이 프로그램의 특징으로, 컴퓨터가 구조해석에 사용되기 시작한지 얼마 지나지 않은 1973년에 발표되었으니, 그 당시로서는 상당히 놀라운 프로그램이었음에 의심의 여지가 없다. 이 프로그램은 UC Berkeley 소재 Earthquake Engineering Research Center (EERC)의 지원을 받아, 당시 UC Berkeley, Department of Civil and Environmental Engineering의 교수였던 G. H. Powell 박사가 개발하였다.

개발 당시, DRAIN-2D의 장점은 프로그램 자체가 간단하면서도 내진구조해석에 효과적이라는 데 있는데, 반면에 프로그램의 사용범위가 극히 제한적 이어서, 1987년에 Allahabadadi가 이를 중점적으로 보완한 DRAIN-2DX를 발표하였고, 이 프로그램은 현재까지 소개된 DRAIN의 발전된 버전 중에서 가장 많이 사용된 버전으로 알려져 있

다. DRAIN-2DX와 함께 DRAIN-2D에서 발전된 다른 버전 중 대표적인 프로그램으로는 DRAIN-3DX와 DRAIN-BUILDING이 있다. 이름에서 알 수 있듯이, DRAIN-3DX는 일반적인 3차원 뼈대구조물 해석 프로그램이고, DRAIN-BUILDING은 3차원 건물전용 해석 프로그램이다.

OpenSees나 IDARC와는 달리, 이 프로그램은 현재 정해진 관리자가 없고 EERC 온라인 도서관을 통해서만 다운로드 받을 수 있어서, 공식적으로는 개발이 멈춰진 상태이고, 기존의 사용자들만이 각자의 필요에 의해서 개발 및 사용하고 있다. 미국에서의 지진공학용 전산구조해석 프로그램들의 역사적인 배경과 현재의 개발상황, 사용자들의 선호도 등을 살펴볼 때, OpenSees가 DRAIN계의 프로그램들을 대체하고 있다고 보아도 무방할 것이다.

- 참고문헌: G. H. Powell (1973), DRAIN-2D User's Guide, UCB/EERC-73/22: Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

2.4 FEAP

- 홈페이지: <http://www.ce.berkeley.edu/~rlt/feap/>

지난 수 십 년간 유한요소법은 선형구조해석에서 시작하여 현재는 시간에 의존적인 비선형 편미분 방정식까지 풀어내는 범용 기술이 되었다. 따라서 많은 범용 유한요소 코드들이 개발되었고 상업용 패키지가 나왔다. 한 가지 문제에 적용 가능한 유한요소 프로그램은 그 수가 대단히 많지만, 비상업적으로 개발되어서 계속된 업데이트와 디버깅을 거쳐 많은 연구자들이 자신의 연구에 맞는 고유 코드를 개발하는 용도로 사용할 수 있는 프로그램은 흔하지 않다.

UC Berkeley의 토목환경공학과 교수인 R. L. Taylor 박사가 처음 개발한 범용 유한요소 FORTRAN 77 프로그램인 FEAP(Finite Element Analysis Program)은 중간에 제자¹⁾이면서 Stanford 대학 Mechanics Division교수였던 C. Simo²⁾의 영향을 받아 더욱 발전하였으며, version 7에 이르러서는 FORTRAN 90의 신기능을 이용하여 다시 코딩되었다. 현재 가장 널리 쓰이는 최신버전은 7.5이며, 8.0이 완성단계로 2006년 후반에 나올 예정이다³⁾. FEAP에 들어가 있는 이론은 방대하여, 이를 모두 이해하기 위

- 1) 정확하게는 James Kelly 교수의 지도학생
- 2) 전산역학에 큰 공헌을 하였음. 1994년 사망.
- 3) 이 때문에 7.5 버전의 배포를 당분간 중지한다는 공지가 있다.

해서는 홈페이지에 올라가 있는 Theory Manual 을 비롯한 6가지 매뉴얼을 참고해야 한다. FEAP 은 Windows, LINUX, UNIX, 그리고 MAC OS에서 이용할 수 있으며, personal version인 FEAPpv도 역시 Windows와 LINUX/UNIX에서 이용할 수 있다. 상업용 소프트웨어가 아니기 때문에 타 상업용 프로그램에 비해 입출력이 많이 세련되지는 않지만, Taylor교수의 친구가 만든 상업용 범용 유한요소 프로그램 ABAQUS⁴⁾의 입력방식을 보면 FEAP과 유사한 점을 발견할 수 있다.

FEAP의 강점은 그 범용성과 확장성에 있다. Programmer's Manual을 참고하고, 그 소스코드를 연구하면 각종 구성 법칙(constitutive law)을 새로 집어넣을 수 있으며, 더 깊이 들어가면 없는 기능을 스스로 추가할 수 있다. 세계 각국에서 이러한 방법으로 고유한 FEAP을 이용하는 연구원의 수가 상당하며, 우리나라에서는 성균관대학교 토목공학과와 신현목 교수님이 만드신 RCAHEST⁵⁾가 있으며, 이 외에 단순히 요소를 더하여 해석을 수행한 경우는 더욱 많다.

2.5 Response2000

- 홈페이지: <http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz/r2k.htm>

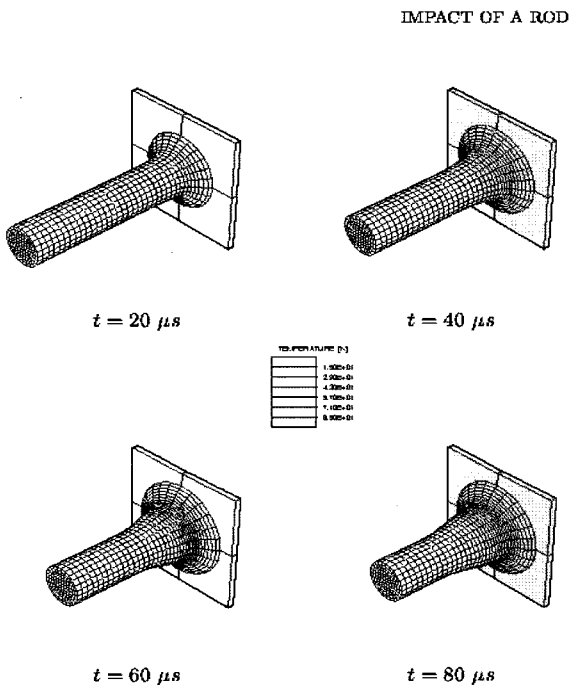


그림 3 F. Armero 교수의 Thermo-Plastic Analysis

4) 본래 ABAQUS 를 만들던 회사는 HKS 사 였는데, 이름을 ABAQUS INC. 로 바꾸었으며, 다시 IBM 사에 팔려서 현재는 ABAQUS-CATIA V5 패키지가 판매되고 있다.
5) 철근 콘크리트 구조물의 비선형 해석에 특화된 프로그램

현 University of Toronto, Department of Civil Engineering의 교수인 E. C. Bentz박사가 같은 학교에서 학생 시절에 만든 단면해석(section analysis) 프로그램으로, 압축력, 전단력, 모멘트를 동시에 받는 철근콘크리트 단면의 강도(strength)와 연성(ductility)을 계산해 준다. 이 프로그램은 철근콘크리트 공학의 권위자이자, 같은 학교의 교수인 F. J. Vecchio박사와 M. P. Collins박사(Bentz박사의 지도교수)의 modified compression field theory (MCFT)를 바탕으로 만들어 졌다. 1986년에 발표된 이 이론은 현재 철근콘크리트 부재의 해석과 설계에 많이 사용되고 있는 이론이다. 이 이론을 바탕으로, 다른 일반적인 프로그램들로 계산할 수 있는 보-기둥의 압축강도나 모멘트강도를 계산할 수 있을 뿐 아니라, 전단강도와 전단연성을 예측할 수 있다는 것이 이 프로그램의 특징이다. 무엇보다도, 이 프로그램의 가장 큰 장점은 뛰어난 그래픽 사용자 인터페이스를 통해서, 원형 단면을 포함한 기하학적으로 복잡한 단면을 쉽게 설정할 수 있고, 출력 값들을 여러 가지 그래프로 나타내어 결과를 분석하기 쉽도록 되어 있는 것이다(그림 5, 6).

Response2000 이외에, Bentz박사는 Membrane2000, Triax2000, Shell2000 등의 프로그램을 만들어 일반 사용자가 사용할 수 있도록 인터넷을 통해서 공유하고 있다. 이들 프로그램들은 모두 MCFT를 바탕으로 만들어진 것들로, 특정한 목적에 맞춰 사용할 수 있도록 분류되어 있다. Membrane2000은 평판구조물, Shell2000은 쉘구조물, Triax2000은 3차원 철근콘크리트 블록의 힘-변형관계를 계산할 수 있다. 이들 프로그램은 Bentz박사의 홈페이지인 <http://www.civil.engineering.utoronto.ca/English/Professor-E.html>를 통해서 다운로드 받을 수 있다.

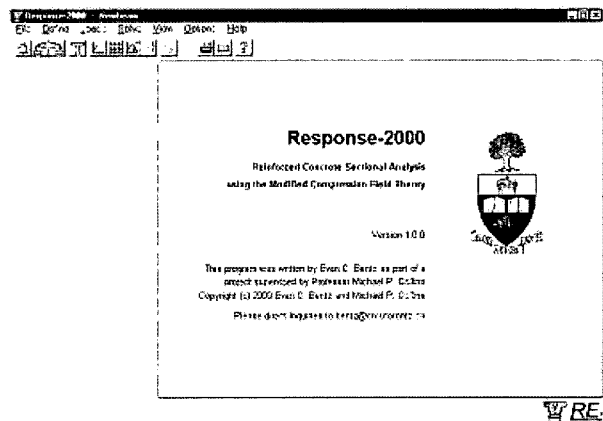


그림 4 Response-2000의 초기화면

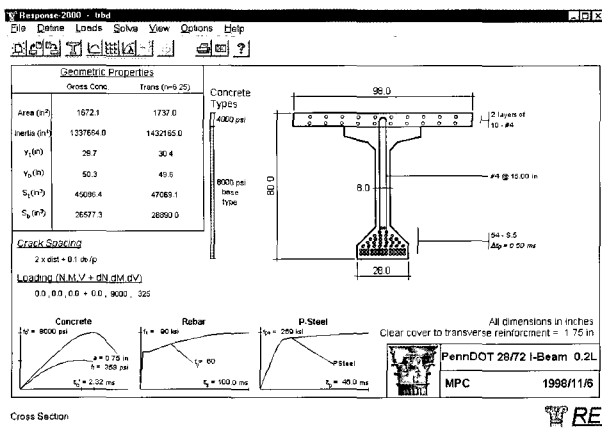


그림 5 Response-2000의 단면설정 화면

2.5 SHAKE-91

- 링크: <http://nisee.berkeley.edu/elibrary/getdoc?id=SHAKE91ZIP>

SHAKE 프로그램은 퇴적지반의 지진 응답 계산을 위해 널리 쓰이는 프로그램으로, half-space위에 놓인 반 무한한 퇴적지반에 수직으로 전달파가 전달될 때 지반의 응답을 계산한다. 주파수 영역에서 등가 선형해석을 수행하도록 프로그램화 되어 있고, 비선형 해석은 iterative process를 통해서 수행한다. 1972년 UC Berkeley의 P. B. Schnabel, J. Lysmer, H. B. Seed가 공동 개발하였고, 크고 작은 수정, 보완 작업을 거쳐서 1992년에 UC Davis의 I. M. Idriss에 의해서 마지막으로 업그레이드된 것이 SHAKE-91이다. 지진파형과 몇 가지 지반 성질을 입력하면 최고 가속도 값, 응답 스펙트럼 등 지반의 거동을 나타내는 결과를 출력해 주는데, 그래픽 사용자 인터페이스가 좋지 않아, 사용하기 불편한 단점이 있다.

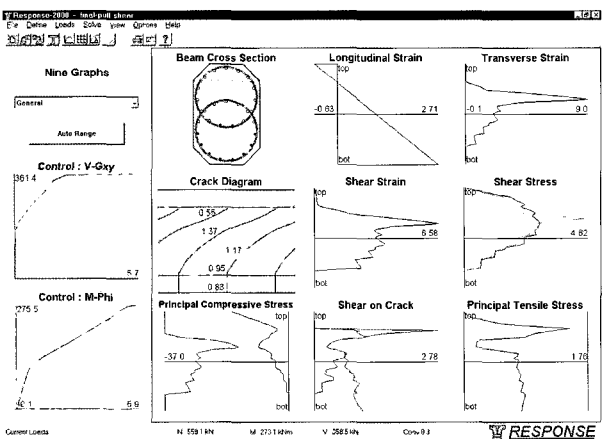


그림 6 Response-2000의 단면해석 결과 화면

- 참고문헌: P. B. Schnabel, J. Lysmer, and H. B. Seed (1972), SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, UCB/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

2.6 BiSpec

- 홈페이지: <http://www.ce.berkeley.edu/~hachem/bispec>

BiSpec은 선형 및 비선형 지진 응답 스펙트럼을 생성해주는 프로그램으로, 그래픽 인터페이스가 좋아 사용하기 아주 편리하다. UC Berkeley의 학생이었던 M. M. Hachem 박사가 학생시절에 만들어 현재까지 관리하고 있는 이 프로그램은, 내진구조공학을 연구하는 교수와 학생은 물론 설계회사에서도 많이 사용하고 있는, 작지만 유용한 프로그램이다. 이 프로그램은 응답 스펙트럼 뿐만 아니라, 특정한 지반가속도에 의한 constant-ductility 스펙트럼이나 constant-strength 스펙트럼을 손쉽게 생성할 수 있고, 일련의 지반가속도에 의한 스펙트럼의 평균과 표준편차 등의 통계 값도 쉽게 생성할 수 있다. 또한 지반가속도에 의한 단자유도계의 변위나 힘을 실시간으로 모니터링할 수 있는 애니메이션 기능도 갖추고 있다. 이 프로그램의 다른 장점 중 하나는, 서로 다른 방향에서 작용하는 두 개의 지반가속도를 동시에 고려할 수 있다는 점이다.

사용자는 단자유도계의 질량, 강성, 주기, 감쇠 등을 자유롭게 바꿔가면서 해석할 수 있고, 비선형 스펙트럼을 위해서 세 가지 비선형 시간이력모델을 갖추고 있다. 이 프로그램의 해석결과는 변위나 힘의 시간이력곡선, 특정 지진에 대한 스펙트럼, 일련의 지진에 대한 스펙트럼의 통

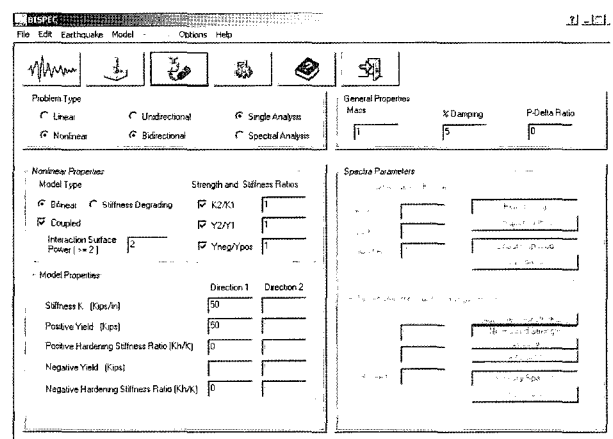


그림 7 BiSpec의 초기화면

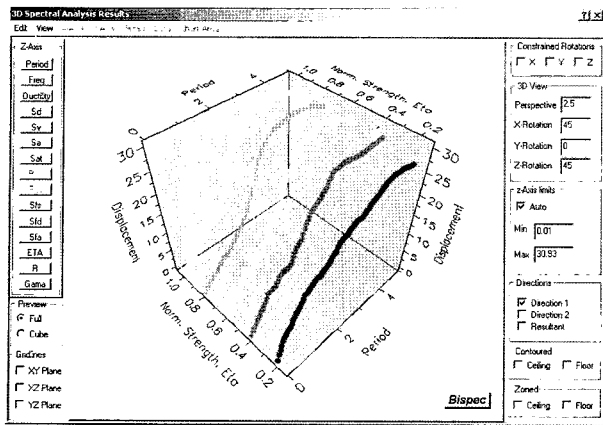


그림 8 3차원 스펙트럼 그래프

계, 각종 3차원 그래프 등으로 볼 수 있다.

3. 맺음말

마이크로소프트사의 Windows[®]가 단연 세계 제일의

PC용 OS이지만, 오픈소스 OS인 Linux의 사용자가 무시하지 못 할 정도로 많아졌고, 마이크로소프트 Office[®]를 대체할 만한 오픈소스 프로그램들이 사용되고 있는 시대에, OpenSees와 같은 비 상용, 오픈소스 프로그램들의 사용자가 점차 늘어가는 것은 어찌 보면 당연한 현상이라고 할 수 있다. 고가의 구조해석 프로그램들처럼 사용하기에 편리하지도 않고, 사용범위도 많이 제한되어 있지만, 이 글에서 소개한 것들처럼, 신뢰성과 안정성이 보장된 비 상용 프로그램들을 잘 알아보고, 익혀 놓으면 사용자의 필요에 따라 요긴하게 쓰일 수도 있을 것이다. 특히, 오픈소스 프로그램의 경우, 사용자의 필요에 정확히 맞는, 이른바 맞춤형 프로그램으로 사용할 수도 있어, 연구나 업무의 효율을 극대화 시킬 수도 있다. 끝으로, 원고를 준비하는 시간과 주어진 지면의 제한으로 인해, 다양한 분야의 프로그램들을 소개하지 못한 점에 대해 독자들의 양해를 구하면서, 이 글을 맺는다. 