

전산구조공학의 미래 : 21세기 전망



조 호 남*

1. 들어가는 말

전산구조공학이란 여러 수많은 분야의 모든 종류의 엔지니어링 구조물의 계획·설계·제작·가설·모니터링·운용·유지관리 전단계에 걸친 제반 구조공학 문제를 해결하기 위한 컴퓨터에 의한 전산소프트기술을 다루는 구조공학의 첨단분야이다. 따라서 전산구조공학은 컴퓨터의 H/W와 S/W 기술의 발달과 첨단구조공학이론과 전산기술의 발전에 의존하는 학문이다.

이제 20세기가 끝나고 대망의 21세기가 시작되면서 인터넷을 중심으로 하는 멀티미디어 디지털 정보통신의 혁명이 가속화되고, 컴퓨터 산업도 제4세대 후반에서, 머지 않아 슈퍼칩 수준의 PC가 실용화되고 분자칩이나 DNA 칩의 개발에 박차를 가하고 있어 10년 이내에 현재의 슈퍼컴퓨터 수준의 PC가 사용되면서, 제5세대 지능형 컴퓨터 시대가 도래할 전망이다. 그러므로 이와 같은 전산기술의 급격한 발달에 보조를 맞추어 전산구조공학도 비약적인 발전을 하게 됨으로써, 선진국에서는 앞으로 수년 이내에 모든 구조엔지니어링 업무가 자동화되고 통합 전산화되는 지식기반 통합전산화시스템이 사용될 전망이며,

10년 후 제5세대 컴퓨터 시대에서는 구조엔지니어들의 모든 설계·분석·해석 안전 기술 업무를 초고성능 지능형 전산시스템내에 흡수하여 모든 엔지니어링 문제를 자동으로 해결하게 될 날이 도래할 것이다.

물론 오늘날도 고도의 현대 구조공학이론에 따른 해석, 설계 및 건조방법에 따라 만들어지는 구조물에는 건설분야의 구조물 뿐만 아니라 자동차, 선박, 항공, 우주구조물에 이르기까지 모든 초대형, 최첨단 산업구조물을 모두 망라하고 있다. 이와 같은 구조물들의 최적 설계 및 성공적인 건조는 오늘날 제4세대 후반의 슈퍼컴퓨터에서 고성능 PC에 이르기까지 고성능 H/W와 고도의 S/W 기술을 이용하는 전산구조공학의 첨단설계 및 분석기술의 뒷받침이 있어야만 가능하다. 더구나 자동차, 선박, 항공기는 물론 장대교량, 고층건물과 같은 거대 건설구조물의 수만, 수십만 가지 이상 되는 부재나 그 구성요소들은 복잡한 회로시스템과 같이 상호 연결되어 있어, 이와 같이 복잡한 구조시스템을 그 구조적 기능을 제대로 발휘하고 안전하면서 사용성이 있고 내구성을 갖도록 계획, 설계, 건조/시공, 유지관리하기 위해서는 구조전문가의 전문가적 사명감, 자질, 경험이 필요할 뿐만 아니라 설계·시공·유지관리 전 과정에

* 본학회 회장·한양대 토목·환경공학과, 교수
(ryfid@email.hanyang.ac.kr)

결친 현대 전산구조공학의 전문지식과 CAE/CAD 시스템의 활용이 필수적이다.

60년대 이후 지난 30년간의 유한요소법과 최적화이론의 급속한 발전에 힘입어, 오늘날 구조물의 해석에서 컴퓨터를 이용한 범용 유한요소 패키지의 사용은 거의 일반화되어 있으며, 또한 최근 컴퓨터산업의 급속한 발전으로 자동화 해석 및 최적설계 시스템, 지식베이스 전문가시스템 등이 속속 개발되면서 과학적이고 합리적인 구조물의 설계와 더불어 GUI 환경에서 구조해석 및 설계문제의 자동생성과 데이터의 입출력을 효율적으로 할 수 있는 사용자 위주의 시스템을 편리하게 사용하는 단계에까지 이르게 되었다. 이와 같이 고도로 발전된 H/W와 S/W의 보급으로 건설구조분야에서 전산화시스템을 구축하여 활용하는 부문은 구조물의 해석 및 자동화설계 시스템 이외에도 구조물의 시공·가설간 위험도분석시스템, 기존구조물의 안전도/건전도평가시스템, 구조물의 계측·모니터링·유지관리시스템으로 구분할 수 있다. 이러한 전산화시스템은 고도로 발전된 개별적인 첨단분석도들이 통합된 형태이며 각각의 개별적인 모듈은 유한요소법, 경계요소법, 최적화이론, 전문가시스템이론, 신경망이론, 확률통계이론, 구조신뢰성이론, 신호처리기술, 데이터베이스이론 등과 같은 현재 공학에서 사용하고 있는 첨단해석, 예측, 평가, 분석이론을 포괄적으로 사용하고 있다. 하지만 매우 정밀한 기계나 복잡한 전자회로와 같이 상호연관성을 가지면서도 거대하고 복잡하며 정밀한 구조물의 특성상 전산화시스템으로 개발하기가 매우 어렵다는 특징도 가지고 있다. 따라서 공학에서 사용되는 모든 최첨단이론을 종합하여 해당 구조물의 특성에 적합하게 적용하여야만 효과적인 통합전산구조 시스템을 구현할 수가 있다. 따라서 전산구조공학 전반을 이 글에서 다루기에는 필자의 전공분야의 한계도 있고 너무나 광범위하므로 여기서는 구조건설분야 구조물의 전산구조공학의 현재의 추세 및 향후 전망을 중심으로 고찰하고자 한다.

이 글에서는 그림 1에 보인 바와 같은 건설분야 전산구조공학에서 구조물의 해석 및 설계시스템, 시공/공용간 구조물의 계측모니터링 및 유지관리시스템, 열화손상된 구조물의 안전도/건전도

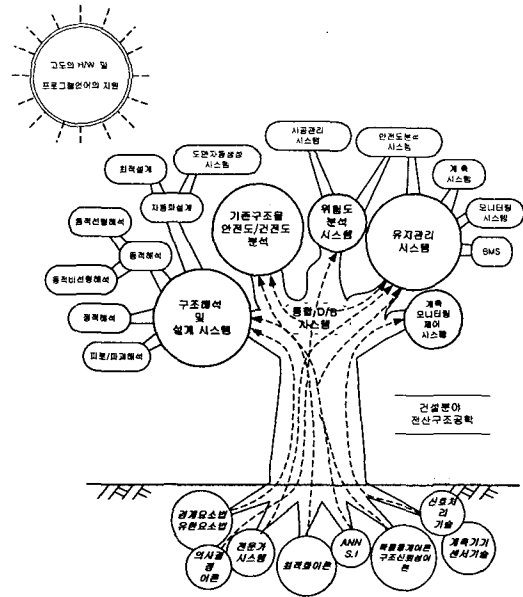


그림 1 건설분야의 전산구조공학

의 전산화기술을 중심으로, S/W의 이용 및 전산시스템의 개발추세와 더불어 현재 건설분야에서 주력하고 있는 전산구조공학의 통합화 및 자동화의 개발 동향을 살펴보고, 앞으로 21세기의 발전 전망에 대하여 개괄적으로 기술하고자 한다.

그러나 전산구조공학의 현재의 발전 동향이나 향후 가까운 장래의 발전전망을 고찰하는 것은 그리 어렵지 않으나 하루하루가 변하는 그리고 앞으로 광속의 디지털 정보혁명·과학기술 시대에 현재의 전산 기술의 발전 속도로 볼 때 몇십년 뒤의 미래를 정확하게 예측한다는 것은 지극히 어렵고 거의 무모한 짓일 수도 있다. 따라서 이 글에서는 건설분야 전산구조공학의 지난 몇십 년간의 발전사에 비추어 본 현황 및 현재의 발전 동향을 간략하게 살펴 본 뒤에 향후 21세기 초 10년 내의 단기발전전망을 위주로 하여 고찰하고, 향후 10~30년 후의 중기 전망이나 21세기 중반 이후의 장기 전망에 대해서는 개괄적인 예측만 간략하게 기술하고자 한다.

2. 전산구조해석 및 설계의 현황 및 향후 전망

2.1 개설

지난 60년대이래 컴퓨터의 급격한 발전과 그

응용기술이 보편화되면서 구조해석은 수계산 중심으로부터 매트릭스구조해석에 의한 전산화 해석법 중심으로 바뀌게 되었고 70년대 이후 오늘날까지 컴퓨터의 발전과 더불어 이러한 매트릭스 구조해석 보다 일반적이고 위력적인 수치해석법인 유한요소법(FEM ; Finite Element Method)이 종래의 구조해석법을 대체하게 되었다. 그 결과 이제는 건설분야구조물에 대한 정·동적 기본해석뿐만 아니라 구조물에 발생할 수 있는 거의 모든 구조문제에 대한 엄밀해석이 가능하게 되었다. 또한 최근의 구조해석 패키지들은 고도의 구조해석기능 뿐만 아니라 사용자 편의 위주(user friendly)의 강력한 전처리와 후처리 기능을 탑재하여 보다 효율적이며 정밀한 구조해석을 가능하게 하고 있다. 구조해석이 고도로 전산화되어 감에 따라 구조설계에도 CAD/CAE의 개념이 도입되어 복잡한 구조물의 interactive 전산화 설계를 가능하게 하였다. 이러한 고도의 자동화 최적설계가 가능한 설계환경에서는 예전보다 훨씬 더 편리해지고 신뢰도가 높고, 경제적인 구조설계와, 종래에는 상상도 못하던 복잡한 정·동적 구조해석이 가능한 고도의 전산화 해석 및 설계가 가능하게 되었다.

여기에서는 우선, 전산화 구조해석과 설계분야의 발전 현황과 추세에 대하여 간략히 개관한 후에, 건설분야에서 전산화구조해석에 가장 널리 사용되고 있는 유한요소법과 전산화 구조설계 부분에서의 자동화 최적설계를 위주로 건설분야에서 실제로 실용화되고 있는 전산화 시스템의 개발현황 및 향후 발전전망을 살펴보기로 한다.

2.2 전산구조해석

2.2.1 전산구조해석의 발전현황

오늘날 건설분야에서의 전산구조 해석이론은 유한요소법(FEM ; Finite Element Method), 경계요소법(BEM ; Boundary Element Method), 유한대판법(FSM ; Finite Strip Method), 이산요소법(DEM ; Discrete Element Method), 전달행렬법(TMM ; Transfer Matrix Method) 등 특수한 구조물의 해석을 위한 다양한 해석이론 등이 연구 발전되어 왔다. 이중 건설분야에서 가장 널리 사용되고 있는 방법이 유한요소법이다. 여기서는 건

설구조분야에서 보편적으로 사용되는 유한요소법에 국한하여 개괄하였다.

항공분야에서는 50년대에도 전산구조해석인 매트릭스구조해석법이 주로 항공기의 구조해석을 위해 사용되었지만 건설구조공학분야에서는 1950년대 후반까지 수계산에 의한 구조해석에 의존하여 왔다. 그러다가 60년대가 시작되면서 컴퓨터도 제3세대의 대형컴퓨터로 급속히 발전함으로써 time sharing, batch processing H/W에 고급언어 사용 S/W에 의해 컴퓨터의 활용이 보편화하게 되었고 이에 때맞추어 1960년대 Clough, Martin, Turner에 의한 평면응력문제의 유한요소해석법이 최초로 '유한요소법'이란 명칭으로 발표되자마자 유한요소법은 구조분야의 전산화 구조해석 도구로 각광을 받기 시작하였다. 곧 구조분야에서 유한요소 구조해석이론의 연구가 봇물처럼 쏟아져 나왔고, 항공, 기계, 조선 등 다른 분야에서도 유한요소법을 받아들여 더욱 일반적인 수치해석법으로 발전시키고, 다른 모든 공학의 field 문제, 열, 유체같은 연속체 문제의 가장 위력적인 수치해석도구로서 인정받게 되었다. 60년대의 10년 사이에 오늘날 유한요소 해석이론의 대부분의 발전이 이루어져 70년대 중반에는 이미 현대 유한요소해석의 주요 이론인 Galerkin 가중잔차법, 변분법 같은 일반정식화 이론과, isoparametric 유한요소정식화, 판·셀 구조물의 해석을 위한 Mindlin 이론에 바탕을 둔 감절점 셀이론 등이 모두 발전되었고, 이와 더불어 효율적인 수치해석 알고리즘인 frontal 알고리즘, skyline 알고리즘들이 범용 S/W 패키지에 이용되면서 뒤에 설명하겠지만 항공, 기계, 조선, 건설 모든 분야에 적용할 수 있는 범용 패키지들이 속속 개발되었다.

50년대까지 구조해석의 기본적인 이론은 변형이 안된 구조형상에 대하여 균질하고 등방성인 재료는 외력의 작용하에서 응력과 변형이 선형탄성거동을 한다는 미소변형-선형탄성해석이었다. 그러나 지진이나 태풍과 같은 과도한 하중을 받게 되는 경우나, 현수교와 사장교와 같은 유연한 케이블로 지지된 장대교량, sway에 대한 P- Δ 효과를 고려해야 되는 고층건물의 경우는 Hooke의 법칙이 성립하는 탄성영역을 넘어 과도한 응력을

받게 되어 탄소성 및 기하적 비선형문제의 해석이 필요하게 되었고 60년대 이후 재료적/기하적 비선형해석분야의 엄청난 발전이 있었다.

컴퓨터의 H/W와 S/W의 제약이 사라진 고도의 전산화시대인 80년대 이후 건설구조공학 분야에서 발전된 유한요소 해석이론 중에 가장 괄목할 만한 것은 70년대까지는 엄두도 못 내던 강구조물의 균열성장에 따른 피로파괴 해석에 적합한 적응적 체는 세분화기법, 균열진전해석을 위한 균열선단에서의 특수유한요소 등의 개발과, 대규모 콘크리트 구조물의 해석에서 엄밀해석이 거의 불가능했던 시간의존성 변형인 크리프와 건조수축의 해석, massive 콘크리트 타설시 균열발생 원인인 콘크리트의 수화열 해석을 위한 유한요소해석법도 개발되어 유한요소해석 패키지에 포함되게 되었다. 물론 그 외에도 soil-structure interaction 문제에서의 구조물과 지반 경계면의 특수경계요소, 터널, 암반, 지반구조해석에서의 무한요소의 개발 등과 같이 수치해석에서의 어려운 과제들이 해결되었다. 또한 그 외에도 감절점 판·셀구조 해석의 shear locking 결점 극복을 위한 감차적분, 비적합변위모드의 추가, 대체전단변형도 등의 다양한 수치해석 기법과 이들을 효과적으로 조합한 “defect free” 요소의 개발을 위한 노력도 유한요소해석기법을 더욱더 발전시킬 수 있게 하였다. 90년대에 이르러 장대교량, 고층건물 등 초대형 건설구조물의 설계에 필수적인 내진해석에 실용적인 응답 스펙트럼 해석 외에 보다 엄밀하게 추계적 인공지진이나 기록지진파를 사용하는 탄소성 비선형 내진해석과 돌풍, 충격 하중같은 transient 하중에 대한 응답해석과 같은 동적해석이 한층 더 발전하였고 대표적인 건설재료인 콘크리트에 대한 비선형탄성, 탄소성, 등방성경화나 운동성경화 등의 소성법칙과 연계된 해석이나, 균열해석과 강도손실에 대한 해석도 가능하게 되었으며 이러한 고도의 엄밀해석기법들이 오늘날 설계실무에서 적용되어지고 있다.

2.2.2 구조해석 전산시스템의 발전동향

유한요소법 발전의 초기부터 선진국의 대학 및 연구기관을 중심으로 구조해석프로그램이 개발되

어 왔다. 이와 같은 프로그램 중에는 1966년 미국 NASA에서 우주항공분야에 이용할 목적으로 MacNeal-Schwendler社에서 개발한 NASTRAN을 시작으로 현재 GT-STRUDL의 모체인 ICES-STRUDL이 1966년 미국 MIT에서 개발되었고 국내에서도 실무에 널리 적용되고 있는 SAP series의 모체는 1970년 UCLA의 Wilson 교수 등에 의하여 개발되었고 건물해석전용 프로그램인 ETABS도 1975년에 개발되었다. 그후 이러한 프로그램들은 수십년 동안 사용자에 의해 검증을 거쳐왔으며 많은 기능이 계속 추가 보완되어 현재에 이르고 있다. 현재에도 건설분야에서 널리 적용할 수 있는 새로운 버전의 기존 패키지와 새롭게 개발된 유한요소해석 패키지들이 쏟아져 나오고 있다. 본 글에서는 이러한 다양한 유한요소해석 패키지 중 현재 국내에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 주요 유한요소 패키지를 중심으로 그 성능 및 활용 그리고 발전방향에 대하여 개략적으로 기술하고자 한다. 대표적인 유한요소 패키지들 중 ADINA, MARC, ABAQUS, ANSYS, NASTRAN같은 일반 범용 패키지는 건설분야뿐만 아니라 기계, 항공, 해양, 조선 구조분야에서도 널리 사용되고 있는 일반유한요소해석 패키지들이다. 이러한 소프트웨어는 단순한 정·동적해석은 물론 재료의 비선형, 기하학적 비선형거동에 대해서도 해석을 기본적으로 할 수 있게 되어있다. 그밖에 RM과 DIANA 등과 같은 패키지는 교량구조의 시공단계별 변화하는 외력조건에 따른 구조물의 응답해석 및 콘크리트의 시간에 따른 재료특성인 크리프, 건조수축 등을 고려할 수 있고 ADINA, DIANA, MARC 등과 같은 강력한 구조해석 패키지들은 구조물의 균열을 고려한 파괴거동을 해석할 수 있으며 사장교나 현수교 같은 장대교량을 효율적으로 해석할 수 있는 기능을 가진다. 대부분의 범용 유한요소 패키지들은 각종 요소와 다양한 재료특성에 대한 라이브러리를 제공하여 사용자가 원하는 정확한 해석을 지원하고 있다. 그리고 LUSAS와 NISA 등과 같은 구조해석 패키지는 그 자체에서 지원하는 parametric language를 이용하여 사용자 interface 프로그램을 작성함으로써 사용자가 필요한 메뉴를 구성하여 패키지가 가지고 있

는 강력한 구조해석기능을 사용자가 원하는 전용해석 프로그램으로 개발할 수 있게 구성되어 있다.

특히 최근에 새로운 기능이 추가되고 향상된 프로그램인 ABAQUS, LUSAS, SAP2000, DIANA 등은 강력한 전·후처리 기능과 adaptive 해석 및 최적설계기능과 요소와 재료에 대한 데이터베이스의 기능 등이 추가되었으며 비선형 혹은 동적 해석을 할 수 있는 모듈이 추가되어 막강한 해석 기능을 갖추게 되었다. 현재 위에서 언급한 범용 패키지 이외에도 그래픽 모델링, CAD 데이터 입력기능, 절점과 요소의 자동발생 및 복제기능, 기동/보 접합부 강역대의 자동고려기능 및 각국 시방 규준에 따른 풍하중 및 지진하중 자동 입력기능 등의 뛰어난 전처리 기능과 다양한 요소를 사용하고 정/동적 해석이 가능한 점과 여러 가지의 해석결과를 효과적으로 파악할 수 있도록 하는 뛰어난 후처리 기능을 갖춘 시스템이 속속 개발되고 있다. 또한 RM, TANGO, SFRAME 등 교량구조해석만을 위주로 하는 프로그램이 교량 구조물의 설계분야에서 점차 실용화되고 있다.

2.2.3 전산구조해석 기술의 향후 전망

위에서 고찰한 바와 같이 전산화구조해석 기술은 이미 오늘날 제 4세대 후반의 고성능 컴퓨터와 FEM을 비롯한 첨단 구조해석이론의 발전에 힘입어 수십 종의 고도의 고성능 범용S/W가 일반구조물에서 초대형 구조물의 정/동적, 선형/비선형, 충격/좌굴파괴/국부좌굴/열·유체·지반·상호해석 등 거의 모든 구조해석 문제의 엄밀한 수치를 구할 수 있는 수준으로 발전되었다. 앞으로의 전산구조해석 기술의 발달은 전산 기술 자체의 신기술의 발달에 크게 의존될 것임이 분명하다. 특히 곧 등장하게 될 고성능 PC수준의 지능형 마이크로 프로세서 칩을 바탕으로 하는 제 5세대의 새로운 전산 패러다임과 더불어 10년 이내에 정보통신 기술의 전스펙트럼에서의 지속적인 진보를 가져오는 전산환경에서의 구조해석은 구조 기술자가 구조물의 계획·설계·제작·시공·유지관리의 전단계에 걸쳐 필요한 재환경에서의 여하한 구조응답거동의 해석도 복잡한 모

델링의 수고가 없이 가능한 수준으로 발전될 전망이다. 오늘날 아직도 전산화 구조해석은 범용 패키지 S/W인 경우 현장구조엔지니어들이 사용하기가 쉽지 않을 뿐만 아니라 구조물 모델링 입력도 interface program이 없이는 여전히 어렵고 구조물이 초대형 구조물이나 특수구조물인 경우 모델링이나 해석 S/W가 슈퍼컴퓨터를 사용하지 않는 한 현재의 PC수준으로는 수행하기가 어려운 것이 현실이다. 따라서 앞으로 구조해석분야의 S/W는 knowledge-based intelligent database를 중심으로 하는 병렬·분산·통합형 고성능 S/W로 발전되어 전형적 구조물에 대한 기본 모델링은 모두 D/B에 내장되어 있고, 사용자는 제원이나 형상경계조건 등을 일부 변경 입력하면 될 수 있는 수준으로 발전될 전망이다. 뿐만 아니라 지능형 통합 전산환경하에서 지리적으로 떨어져 있는 host 컴퓨터들이 고속 고용량 광학 회로로 상호 연결되어 가상 통합 전산 환경을 만들어 고도의 병렬 통합 계산의 메타(meta) 컴퓨터 시스템이 실용화되어 병렬·분산·협동·중점 지원처리 형태의 새 전산패러다임이 출현될 것으로 전망된다. 나아가서, 앞으로 10년 뒤에 제5세대 지능형 컴퓨터가 실용화될 때의 전산구조해석은 모든 구조해석 문제가 완벽하게 자동으로 모델링되고 해석되는 dream S/W가 실용화될 것으로 전망되고 구조해석이 더 이상 실무 구조엔지니어들에게 문제가 되지 않는 시대가 도래할 것이다.

2.3 전산구조설계

2.3.1 전산구조설계의 발전현황

60년대 이전까지의 건설분야의 구조설계는 설계규준이나 시방에 규정한 설계이론 자체가 탄성 구조해석에 따른 허용응력설계(WSD ; Working Stress Design) 위주로 되어 있었고 해석 및 설계 모두 경험과 수계산에 의존하였다. 60년대로 넘어 오면서, 제 3세대 컴퓨터의 발전에 따라, 비록 구조해석 위주이긴 하지만 전산화 설계가 태동하기 시작하였고, 구조설계 이론도 허용응력설계 외에 강도설계, 소성설계, 극한설계 등으로 점차 발전하게 되었다. 70년대가 되면서 선진국에서 콘크리

트구조는 점차 강도설계 위주로 되고 강구조물은 강구조의 특성상 특수한 경우의 소성설계를 제외하면 허용응력 설계가 주설계법으로 되어있었다. 그러나 70년대 후반에 와서는 신뢰성에 기초한 시방서 안전계수의 보정기법이 개발되어 재래적인 허용응력 시방서의 안전율과 하중효과, 거동에 측의 모순을 극복하게 되었고, 이에 따라 최근 구조거동중심의 각종 한계상태(limit state)에 기초한 한계상태설계법(LSD ; Limit State Design)과 LRFD(Load and Resistant Factor Design)설계법이 개발되어 합리적인 전산화 설계의 길을 열었다. 80년대로 넘어오면서 유럽을 중심으로 한 선진국에서는 LSD를 설계기준으로 채택하고 실무에 적용하게 되었고, 보수적인 나라인 미국조차도 80년대 중반이 지나서 강구조물의 LRFD설계를 채택하였고, 90년대로 들어오면서 교량설계도 LRFD설계로 전환케 되었고, 이러한 현대적인 설계법에 의한 설계 S/W도 속속 개발되어 실무설계에서 활용하고 있다.

한편, 전산화 설계의 핵심인 최적설계 이론은, 60년대이래 OR(Operations Research)의 최적화 이론의 발전과 병행하여 FEM과 함께 급속하게 발전하였다. 최적설계는 60년대의 이론정립시기와 70년대의 이론발전의 황금기를 지나면서 MP(Mathematical Programming)와 OC(Optimality Criteria) 최적화 위주로 급속도로 발전되었다. 또한 대부분의 구조설계문제가 비선형문제가기 때문에 비선형 최적설계문제를 풀기 위한 연구가 활발하였는데, 이 중에 GPM(Gradient Projection Method), FDM(Feasible Direction Method), 그리고 SUMT(Sequential Unconstrained Minimization Technique)와 같은 알고리즘이 다양한 건설분야 구조물의 구조최적화에 응용되었고, 그 외에도 동적계획(dynamic programming), 이산형 최적화에 대한 연구도 나왔으나, 70년대에 가장 괄목할 만한 구조최적화 기법으로는 Schmidt와 Farshi 등에 의해 MP와 OC의 이론적인 관계를 밝힌 Primal/Dual MP기법과 이에 따른 ALM(Augmented Lagrange Multiplier Method) 알고리즘의 발전, 또한 구조시스템 최적화문제에 대한 다양한 근사 최적화기법의 응용, 설계민감도해석, 구조시스템최적화에 필수

적인 DOSA(Design Oriented Structural Analysis) 기법의 발전 등과 같은 효율적인 시스템 최적화 기법의 발전을 빼놓을 수 없다. 그러다가 최적설계는 80년대로 들어와 고성능 제 4세대 컴퓨터시대가 시작되면서 FEM 패키지와 함께 건설분야에서도 최적설계시스템이 크게 발전하였다. 80년대의 최적화 알고리즘은 60년대와 70년대의 알고리즘을 바탕으로 성능이 더욱 향상되었는데, 이로써 ALM, OCM, GPM, SUMT를 비롯한 다양한 FDM 알고리즘과 SQP(Sequential Quadratic Programming)알고리즘 등이 최적설계 패키지의 주요 Optimizer Routine으로 사용되었다. 90년대에는 J. H. Holland에 의해 1975년에 처음 제안된 Genetic Algorithm이 다른 분야에서뿐만 아니라 구조설계 분야에서도 많은 적용이 시도되었으며 1990년, J. Koza에 의한 유전자 프로그래밍(GP ; Genetic Programming)을 이용하는 많은 응용연구가 진행중이다. 그밖에도 SA(Simulated Annealing)와 ANN(Artificial Neural Network) 등과 같은 알고리즘을 이용한 건설분야 구조설계문제를 해결하려는 연구가 끊임없는 노력 중에 있다.

80년대 이후 전산화설계의 급속한 발전과 함께 구조설계도 비약적인 발전을 하게 되었다. 전산구조설계 초기단계에서는 구조해석부분에서만 전산처리의 도움을 받는 단방향의 단순 전산화에 불과하였다. 하지만 프로그램 개발환경과 기술이 발전함에 따라 구조해석뿐만 아니라 설계부분까지 양방향의 전산화처리로 발전되었고 설계시간을 단축할 수 있게 되어 경제적이고 효율적인 설계를 가능하게 되었다. 최근의 통합구조설계 시스템은 구조해석과 설계프로그램, CADD (Computer Aided Draft Drawing)시스템 그리고 이른바 지능형 데이터베이스라 불리는 자료관리 시스템과의 연계된 시스템을 구축한 통합환경에서 자동화설계를 제공하고 있다. 설계에 필요한 재료의 특성과 물성치를 데이터베이스화하여 실질적인 설계를 가능하게 하는데, 단지 구조물의 설계에서 그치는 것이 아니라 설계된 구조물에 대한 물량산출과 설계도면의 작성이 자동으로 수행되는 것이다. 그리고 무엇보다도 설계단계에서 최적화 기법을 활용함으로써 모든 설계하중이 작용하여 구조물의

설계에 요구되는 모든 제반사항을 만족한 상태에서 설계자가 지향하는 목적에 부합되는 최적의 구조물을 얻게되는 최적설계가 가능하게 되었다. 또한, 데이터베이스와 연결되어 설계자료를 보관함으로써 재설계와 유사설계가 있을 경우 중요한 자료로 활용될 수 있다. 그리고 최근의 경향은 통합시스템에 전문가 시스템을 추가하여 설계초기인 입력단계에서 오류를 범할 경우 설계자에게 수정할 수 있는 기회를 주어 실무자의 판단착오에 의한 설계오류를 사전에 방지할 수 있도록 하고 있다.

2.3.2 구조설계 자동화/최적화/전산화 시스템의 발전동향

건설구조물의 설계에서 초기의 전산화설계는 전체의 설계단계 중에서 특별한 하나의 업무단위에 대한 자동화만을 의미하는 부분적 도구로서의 컴퓨터의 활용에 지나지 않았다. 즉 구조해석, 주단면설계, 상세거동해석, 상세설계 등과 같은 하나의 업무단위만을 전산화하기 위한 단위프로그램만을 말하며 전체설계단계에서 부분적 자동화(islands of automation)만을 의미하였다. 그러나 점차적으로 구조해석 패키지와 단위설계프로그램 그리고 CAD그래픽 기구와 같은 부분적 도구들이 증가하면서 그들의 영역이 중복됨에 따라 하나의 단위프로그램으로부터의 결과를 다른 단위프로그램의 입력데이터로 전환하는 작업이 증가하게 되었고 데이터처리의 통합이 절실하게 되었다. 그리고 정보기술의 가속화와 DBMS기술의 급속한 발전으로 말미암아 단위프로그램의 통합이 가능하게 되어 부분적 자동화에서 구조설계 전과정에 걸친 user interface기능의 고도화된 통합 자동화 시스템의 개발이 가능하게 되었다. 그림 2는 자동화설계시스템의 개념도를 나타낸 것으로 현재 이와 같이 구조설계 과정을 일괄적으로 처리할 수 있는 통합 구조설계 시스템을 구축하려는 많은 연구가 진행되고 있다.

현재의 통합자동화 시스템의 개발은 많은 진보를 하여 하나의 통합된 환경에서 설계과정에 필요한 모든 과정 즉 모델링, 구조해석, 설계, 도면출력 및 보고서 작성 등의 과정을 제공하는 상업

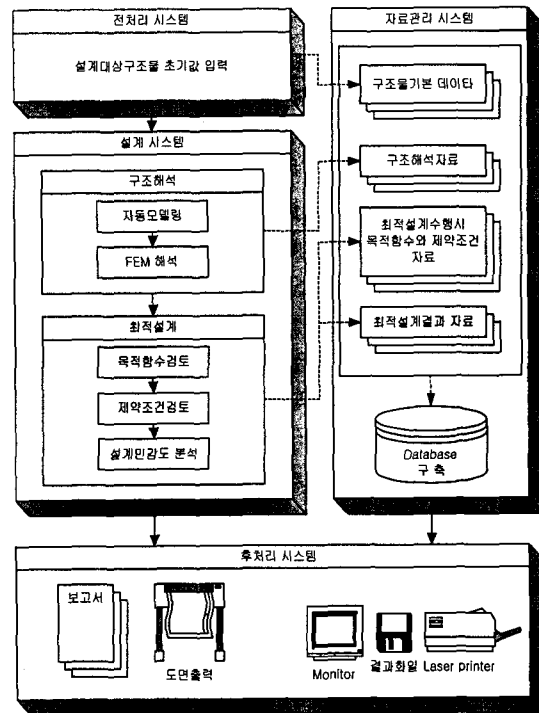


그림 2 통합 자동화설계시스템의 개념도

용 자동화설계 프로그램들이 개발되어 있다. 구조전산화 초기단계의 프로그램들은 GT-STRUDL, ANSYS 등과 같은 유한요소 프로그램 안에 최적화 루틴이 포함된 제한된 구성이었기 때문에 최적화 프로그램을 다른 사용자가 사용할 때 내용이 충분하지 않고 수정하기 어려웠다. 하지만 최근의 프로그램은 GENESIS, MicasPlus와 같이 범용 최적화 패키지와 범용 구조해석 패키지가 결합된 형태의 통합환경의 프로그램이 개발되었고 사용자위주의 interface기능이 포함되어 실무자의 편의를 도모하였다. 초기단계의 통합구조최적화 패키지는 70년대 초반에 개발된 TSO이며 항공기 날개와 꼬리구조의 기본설계를 수행할 수 있다. 70년대 중반에는 주로 항공구조설계 분야에서 특별한 목적을 위한 유한요소 프로그램과 함께 최적설계프로그램이 개발되었는데, ACCESS, FASTOP, OPSTAT, OPTCOMP, ASOP, STARS, DESAP 등과 같은 프로그램이 이런 종류에 속한다. 이러한 프로그램은 구조해석프로그램의 일반성의 부족 때문에 활용범위에 제한을 받았고 범용 구조

해석프로그램과의 연계에 대한 개발을 촉진시켰다. 80년대초에 들어서 Haftka에 의해 개발된 PARS와 Sobieszczanski-Sobieski에 의해 개발된 PROSS는 상용프로그램 SPAR, EAL에 기초를 두고 있으며, 구조최적화 패키지인 OPTSYS는 유한요소 프로그램인 ASKA와 ABAQUS에 바탕을 두고 있다. 범용구조해석 패키지들 중 ANSYS, GT-STRUDL, NASTRAN, RM 및 SAP2000과 같은 패키지들은 구조해석과 함께 구조설계기능을 제공한다. 그리고 NASTRAN과 I-DEAS 프로그램은 민감도(sensitivity)분석과 최적화 기능을 갖추고 있으며 ANSYS는 기본적인 구조최적화를 수행할 수 있는 optimizer가 포함되어 있다. IDESIGN 프로그램은 컴퓨터의 장점과 엔지니어의 경험을 적절하게 결합하여 설계결과를 향상시키는 interactive optimization 프로그램이며 선형문제는 물론 다년간 테스트로 검증된 네가지 비선형 최적화 알고리즘을 포함하고 있다. 또한 최근에 개발된 GENESIS는 한 단계 진보한 프로그램으로써 설계민감도분석, 근사화기법과 같은 최적화 기능을 갖추고 있는 범용 유한요소해석 프로그램이다. 그리고 구조최적설계를 위하여 통합환경을 제공하는 많은 프로그램이 개발되었는데, 그중 최적화엔진인 OASIS와 전·후처리기인 ALADIN으로 구성된 OCTOPUS와 사용자 위주의 GUI 환경으로 개발된 CAMOS라는 프로그램이 있다. 이외에도 Intergraph사에서 개발한 구조설계를 위한 보다 진보적인 통합 자동화 시스템인 MicasPlus Structural Products는 MicasPlus Model Draft, MicasPlus Analysis 그리고 MicasPlus Design 이라고 하는 3개의 주요 모듈로 구성되어있어 구조모델링 및 해석, AISC 및 ACI시방서규정에 따라 설계지원 기능까지 갖는 프로그램이 개발되었다.

MicasPlus와 같은 자동화 설계프로그램은 전산화 단계의 초기단계에서는 오직 구조해석만을 수행하던 프로그램들이 기능과 성능이 향상되어 구조설계도 함께 수행할 수 있도록 통합 자동화설계 시스템으로 발전하였다. 멀지 않은 미래에 대부분의 상업용 구조해석 패키지들은 프로그램 내부에 대부분 설계최적화 모듈이 탑재될 것으로 예상된다. 그밖에도 구조전산화 초기단계에 개발

된 특정한 구조물에 대해서만 설계하도록 만들어진 자동화 설계프로그램들도 그 영역을 넓혀가고 있다. 국내에서도 구조설계분야의 많은 기업들은 자사의 업무자동화를 위하여 특수자동화 설계프로그램의 개발에 힘을 기울이고 있으며 대부분 산·학 협력으로 이루어지고 있다.

이와 같이 최적설계는 70년대 최적화 이론정립 시기를 지나 유한요소법의 발전과 함께 80년대이래 제 4세대 고성능 컴퓨터에 의한 CAE/CAD시스템의 발전으로 실무설계 방법과 과정에 적합한 실질적인 구조설계가 가능하게 되었으며 과학적이고 경제적인 설계를 가능하게 하는 강력한 방법으로 자리를 잡게 되었다. 그리고 지난 90년대 이래 일부 선진국에서는 반복설계작업의 자동화, 설계시간의 단축과 설계품질의 향상 등을 목적으로 모든 구조거동을 만족시키는 오류없고 신뢰도가 높은 효율적인 자동화 설계S/W의 실무적용은 계속 증가하고 있다.

2.3.3 전산화 구조설계기술의 향후 전망

앞에서도 언급하였지만 현재 전산구조공학에서 건설구조물의 전산화해석 및 설계는 이론적으로 거의 완전한 수준에 있고 전산화를 위한 이론적 발전은 GA/SA같은 global 최적화이론, 신뢰성이론, SI이론, 퍼지이론, 인공신경망이론, 신뢰성최적화이론을 비롯한 다양한 첨단이론 및 알고리즘의 개발이 거의 실용화 수준으로 연구 개발되어 있다고 해도 과언이 아니다. 문제는 앞으로 이와 같이 개별적인 첨단 분석 및 설계 모듈이 통합됨으로써 고도의 통합 자동화된 전산구조시스템으로 발전시키려는가 하는 것이다. 그러나 최근과 같이 컴퓨터 H/W, S/W, 계측제어, 정보처리, 전기·전자 관련기술은 급속하게 발전되고 있으며 소형컴퓨터의 고성능화·저가격화가 이루어지고 있는 현실을 감안해 보면 기본설계에서 실시설계에 이르는, 그리고 구조계산 도면·적산 자동화까지 가능한 완전한 통합 및 자동화 구조 설계 시스템의 구현은 머지 않은 수년 내에 이루어 질 전망이다.

보다 미래인 10년 뒤에는 제 5세대 지능형 컴퓨터가 보편화되고 고도의 멀티미디어 정보통신 기술, 가상현실의 사이버 기술이 새로운 전산패러

다임으로 등장하면서 전산구조기술의 환경을 혁신하게 되면, 현재와 다른 초고도의 수행능력을 가진 메타컴퓨터 시스템에 의한 분산, 통합, 협동 구조설계 시스템들이 실용화될 것이다. 즉 미래 고성능 구조설계 시스템이 요구하고 있는 것들 중 하나는 가상현실로 향하는 경향이 될 것이며 또 하나는 각 시스템이 네트워크를 이용하여 분산, 통합 형식으로 자동화되며, 또한 고성능 최적화 S/W에 의해 구조형식에서 상세설계에 이르기까지 완벽한 고도의 최적설계가 가능하게되는 방향으로 발전해 나아갈 것이다.

3. 구조물 시공단계의 전산구조공학

시공단계의 전산구조공학은 상세히 다루어야 할 분야중의 하나이지만 지면관계상 위험도분석 평가시스템과 계측·모니터링시스템의 향후 발전 전망만을 간단히 요약하였다.

3.1 확률적 위험도분석평가 시스템의 향후 발전전망

확률적 위험도분석평가 기법은 지난 20년간 확률통계적 분석기법과 PRA기법의 고도의 발전으로 인하여 이론적으로는 방대한 분량의 논리적, 정성적, 정량적 자료에 기초를 두고 복잡한 시스템의 위험도분석과 위험도관리 문제에 적용될 수 있는 수준으로 발전되었다. 따라서 최근 컴퓨터의 급속한 발달에 힘입어 전산화 시스템을 이용한 종합적인 위험도분석 S/W를 구축한다면 다양한 불확실성과 복잡성을 수반한 건설공사의 위험도 분석 관리에 효과적으로 수행할 수 있다.

현재 과학적인 확률적 기법을 도입한 실질적인 확률적 위험도분석평가는 다양한 분야에 걸쳐 미국과 유럽을 중심으로 비교적 높은 수준으로 이루어지고 있지만 앞으로 10여년 후의 확률적 위험도분석평가 시스템의 발전방향을 살펴보면 실시간 네트워크 시스템과 연계한 가상현실을 이용하는 소프트웨어 기술이 실용화될 전망이다. 즉 각 시공단계별로 공정의 진척도를 가시화한 3차원 화면으로 구성하며 각 공정단계에서 설정된 제반사

항, 위험사건 등의 데이터를 이용하여 위험요인을 가상 시뮬레이션을 통하여 분석한 후 실제 현장에서는 분석된 위험요인을 미리 제거할 것이며 또한 시공단계별 진척사항과 제반여건을 확인하여 공정의 타당성 검토 및 장비, 인력의 투입여부와 효율적인 이용을 위한 방법을 모색하는 방향으로 발전할 것으로 전망된다.

뒤에서 언급하겠지만 한편 30년에서 50년 정도 후의 보다 장기적인 전망을 살펴보면 이 시기쯤 실용화될 것으로 보이는 제 6세대 생체bio(혹은 neuro) 컴퓨터의 발전에 힘입어 이전에 인간이 담당했던 많은 분야가 소수의 risk manager와 지능화된 로봇에게 상당부분이 전가될 것으로 예상된다.

3.2 계측·모니터링 시스템의 향후 발전전망

최근에 와서 계측센서(fiber optic sensor)와 같은 스마트, 고성능 계측기기 및 계측기술의 진보가 뚜렷하게 나타나고 있으며, 유한요소구조해석, SI, ANN, Fuzzy이론 같은 분석기법의 발달과 더불어 구조물에 관한 여러 가지 계측 결과는 새롭고 많은 정량적인 분석 정보를 제공하게 되었다. 국내에서도 토목구조물의 유지관리에 각종계측에 의한 유지관리기법이 적용되고 있으나 현재까지는 짧은 경험과 분석기술의 부족으로 많은 경우 효과적인 손상파악을 달성하지 못하고 이상거동의 조기파악 및 정량적인 데이터의 획득에 그치는 경우가 많은 것이 현실이다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 새로운 계측기와 효과적인 분석기술의 개발을 위한 활발한 연구가 전세계적으로 수행되고 있으며, 향후에는 보다 적은 수의 계측항목으로도 효과적인 계측과 분석이 가능할 것으로 보인다. 특히 대형교량과 같은 중요시설물의 경우 현재의 정기적인 재하시험 대신에 향후에는 공용상태에서 상시진동을 이용하여 광섬유나 AE 계측센서에 의해 실시간으로 획득된 데이터를 이용하는 SI기법에 의해 건전도를 검사하는 자동 계측·모니터링 시스템이 설치된 스마트구조물(smart structure)이 수년 내에 구현될 것으로 예견된다. 앞으로 10년 이내에

현재 급격하게 발전하고 있는 계측·제어기술이 주요 건설구조물에 적용되어 지진, 바람과 차량하중 등 환경적인 변화를 계측·제어함으로써 구조물이 스스로 위험/재해 환경에 적응하게 되며, 지진발생과 같은 정보를 네트워크를 통하여 사전에 인지하여 대비할 수 있는 고도의 지능적인 구조물이 출현하여 실용화될 것으로 전망된다.

4. 구조물 유지관리단계의 전산구조기술

사회기반시설중 대형 토목, 건축구조물과 같이 공용중 안전성이 최우선으로 고려되어야 하는 구조물은 정확하고 정밀한 설계, 시공과 함께 안전한 사용성확보를 위해 지속적이고 세심한 유지관리가 반드시 필요하다. 하지만 최근까지 국내 건설정책은 구조물의 완공자체에만 치중하여 유지관리에 대해서는 상당히 소홀하였던 것이 사실이었다. 그러나 지난 몇 년간 발생한 일련의 교량, 건물, 지반 등의 붕괴사고는 설계 및 시공상의 문제뿐만 아니라 유지관리에 대한 인식을 제고시켰고 관련분야의 토목기술인 뿐만 아니라 범국민적인 관심을 고조시켰다. 이러한 결과로 인해 1995년에 "시설물 유지관리에 관한 특별법"이 제정되고 주요구조물에 대한 유지관리시스템이 구축되는 등 유지관리에 대한 다양한 연구와 시스템구축을 위한 실제적인 노력이 계속되고 있다.

이제 토목건축분야는 건설의 시대에서 유지관리의 시대로 바뀌어 가는 전환점에 서있다. 이미 1990년 세계 주요국가의 건설시장규모 중 유지보수가 차지하는 비중은 프랑스 35.5%, 영국 37.2%, 미국 16%, 일본 24.3%이며 그 비중은 계속 증가하는 추세이다. 국내의 유지보수시장규모는 수년 내에 전체 건설시장규모의 약 8%에 이를 것으로 예상되고 있다. 유지관리는 구조물에 관한 전문적인 이해를 필요로 하며 그 자체가 건설산업분야의 하부구조로서 중요한 전문분야로 개별적인 유지보수의 차원이 아닌 체계화된 유지관리방식이 필요한 실정이다. 그 중에서도 교량의 상태등급, 손상평가 및 건전도평가는 토목분야 사회기반시설물 시스템의 연구 및 개발에 있어 매우 중요한 과제로 대두되고 있다.

토목구조뿐만 아니라 건축구조물에서도 계측, 모니터링과 유지관리가 필요하지만 구조물마다 고유의 특성을 반영하기 위해서는 실제시스템의 구축에서는 상당한 차이가 있을 수 있다. 따라서 모든 구조물에 대한 자세한 언급대신 다양한 연구와 시스템구축이 진행중인 사회기반시설로서 현대문명의 생명선(lifeline)이라고 일컬어지는 교량에 대한 유지관리가 국내뿐 아니라 세계 각국의 관심사이므로 여기서는 교량의 유지관리를 중심으로 서술하고자 한다.

4.1 구조물의 전산유지관리 시스템의 발전동향

건설분야에서 말하는 구조물의 유지관리시스템(management system)이란 유지관리 활동과 업무를 위한 제반 수단, 방법, 방침에 관한 의사결정을 체계적이며 경제적인 방법에 의해 지원하는 자료처리, 저장, 분석, 평가 및 통신업무, 관리사무전반에 걸친 통합된 미래지향적 기술정보시스템이라 할 수 있다. 따라서 유지관리시스템 개발은 유지관리 의사결정을 위한 분석, 평가 및 이에 따른 의사결정을 수행하는 지시, 통제, 보고, 통신 등 제반 업무를 체계화하고, 종합통제 관리기능을 갖춘 전산화 시스템을 이용하여 구조물의 유지관리체계를 완성하는데 목적이 있다. 이러한 유지관리시스템은 개별구조물에 대한 점검, 계측, 진단, 모니터링 등을 통한 일반적인 유지관리와는 다른 의미이다.

일반적으로 유지관리를 수행하는 방식에는 사후유지관리(breakdown maintenance) 방식과 예방유지관리(preventive maintenance) 방식이 있다. 구조물은 일반적으로 시간의 경과와 함께 구조손상이 누적되어 노후화가 진행되지만 그 이외에도 설계결함, 부실시공에 의한 결함이라든지 외력, 환경의 변화 등에 의한 문제점이 발생하여 건전성의 저하가 가속될 수 있는데, 이에 대하여 사후관리나 예방관리와 같은 대응방법에 따라 건전성의 저감속도는 크게 달라질 수 있다.

현재 국내외적으로 교량 구조물에 대한 일체의 유지관리 의사결정과정을 전산화하는 연구가 활발하게 이루어지고 있고, 그 결과 여러 선진국에서

고도의 전산화시스템을 구축하는 과정에 있다. 이러한 교량유지관리시스템(BMS ; Bridge Management System)은 국내에서도 지난 90년대초 이래로 정부기관을 중심으로 연구가 비교적 활발하게 진행되고 있으며 선진 외국에서는 이미 상당한 수준까지 실용화 단계에 들어선 곳도 있다.

교량유지관리시스템은 자료수집, 데이터베이스 구축, 데이터 분석을 통한 시설물의 상태분석, 보수·보강의 우선순위 결정, 예산할당 및 분배, 보수·보강 시행 등의 과정을 포함하고 있다. 각 단계마다 고도의 기술적, 이론적인 발전이 있었으며 그 이론을 바탕으로 전산화가 이루어지고 있다. 특히 수집된 데이터를 바탕으로 노후등급을 판정하고 최적의 보수·보강 공법을 선정하기 위한 의사결정을 전산화하는데 많은 연구들이 이루어지고 있다. 교량 이외에도 원자력발전소, 댐 등 대형토목구조물의 유지관리를 위한 연구가 진행 중이다. 한편 건축분야에서도 국내에서는 건설기술연구원을 중심으로 대단위 공동주택을 비롯한 공공건축물의 유지관리방법과 건축물의 최적유지관리모형개발을 통한 노후도평가 및 보수시기선정 등에 관한 연구가 계속되고 있다.

이러한 유지관리를 위한 자료의 효율적 관리와 시설물관리 의사결정을 위해서는 합리적인 데이터베이스시스템의 구축이 필수적인데, 이러한 데이터베이스시스템은 지난 80년대이래 많은 발전을 거듭해 오고 있으며 그 결과, 데이터베이스 구축을 위한 언어도 다양해 졌다. 현재 데이터베이스 설계에 가장 많이 사용되는 모델인 관계형 모델이론은 1970년 Codd에 의해 소개된 것으로서 단순하고 균일한 데이터 구조를 가지고 있어 각광을 받아왔다. 관계형 모델에 근거한 관계형 DBMS는 현재 상용 데이터 처리 분야에서 광범위하게 사용되는 시스템이다. 관계형 모델은 업무에서 사용되는 데이터를 데이터 특성별로 분류하여 실체(entity)를 선정하고, 해당 실체를 포함되는 속성들을 선정한 후, 각 실체들 상호간에 어떠한 관계가 성립하는지를 조사하여 정의된 모델링 방법에 맞추어 작성해 나가지만 하면 데이터 구축이 성공적으로 완료되는 효과적인 모델이다. 또한 관계형 모델의 약점을 보다 개선시킬 목적으

로 현재 많은 연구가 진행되고 있는 객체지향 데이터 모델(object-oriented data model)은 1980년대부터 연구가 시작되어 우리나라에서도 1990년대 들어서 활발한 연구가 이루어지고 있다. 객체지향 모델은 객체, 클래스, 속성상속 등의 우리의 일상생활에서 보통사람들이 대하고 생각하는 방식을 그대로 표현해주는 모델링 파워를 갖는다. 즉 자연적 모델링이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 또한 객체들간의 관련성을 나타내는 정적 모델링뿐만 아니라 객체의 상태가 변환되어 가는 과정도 나타내는 동적 모델링도 지원할 수 있다. 그러나 객체지향 모델은 아직 강력한 수학적 이론에 기초하고 있지 않고 그 표준도 정해져 있지 않기 때문에 연구자별로 서로 다른 정의를 내려 사용하고 있는 실정이기 때문에 향후 지속적인 연구가 필요한 분야이다.

4.2 전산구조물의 유지관리 시스템의 향후 발전 전망

미래에는 교량의 유지관리를 위해 수집된 데이터를 바탕으로 객체지향 데이터베이스를 구축한 후 이를 이용한 자동화·최적화된 지식기반 시스템으로 현재의 노후화 상태를 판단하고 최적의 보수·보강 공법을 선정하기 위한 의사결정을 전산화하며 미래의 구조물의 상태를 예측하여 적절한 대응을 하는 방법이 보편화될 것이다. 현재 이를 위하여 다양한 접근법이 시도되고 있는데 회귀분석모델은 사회기반시설물 유지관리의 많은 영역에서 적용되고 있다. 회귀분석모델의 방정식은 그 중 현재상태에 대한 기능, 요소의 재령, 재료유형, 유지관리 실행정도, 환경적 요인 그리고 기존의 보수·보강실행의 함수로서 각각의 교량 요소에 대한 상태예측을 포함한다. 이렇게 예측된 상태들은 미래의 유지관리 비용을 평가하고, 보수·보강 공법의 비교선택, 예산 및 기타의 제한 조건하에서의 적절한 방법의 선택 및 증기 혹은 장기적인 계획을 가능하게 한다.

한편 종래에는 교량에 대한 건설계획을 세울 때 일반적으로 건설이후에 수반되는 중·장기적인 추가비용보다는 설계 및 건설 등의 초기비용

에 국한해서 고려하는 경우가 많았으나, 최근에는 초기비용이외에도 교량의 유지관리, 교통의 원활한 소통 또는 적체 등에 따른 비용, 교량의 손상에 따른 보수보강 및 궁극적인 교량의 해체·재건설 등 추가적인 비용에 대한 이해가 날로 커지고 있으며 이러한 일련의 공용간 총기대비용(life cycle cost)을 설계단계에서부터 체계적이고 합리적으로 고려하는 연구가 활발히 되고 있다. 따라서 앞으로 10년뒤 제 5세대 전산환경에서는 가상현실에서 모든 부분을 고려하여 LCC산출을 위한 가상현실시뮬레이션(VRS ; Virtual Reality Simulation) 시스템을 활용하여 초기 공비만이 아닌 LCC를 최소화하는 방향으로 될 것이다. 물론 이와 같은 VRS시스템은 고도의 intelligent 지식기반시스템과 네트워크가 결합되어 지식기반 네트워크 VRS 시스템으로 발전되어 이용될 것으로 전망된다.

5. 미래의 구조공학

건설분야의 전산구조공학과 같이 역동적으로 발전하는 분야의 앞날을 예측한다는 것은 쉬운 일은 아니다. 전산구조공학은 현재 제4세대 후반의 고성능 H/W와 S/W시스템 하에서도 구조물의 실제적인 건설에서 설계, 시공 및 유지관리의 도구로 사용될 수 있는 수준으로 발전되어 있기 때문에 최소한 가까운 장래에 고도의 multi-media 디지털 정보기술과 고성능 전산기술의 이용시대에 더욱 더 건설분야의 모든 구조 기술업무의 자동화 실무도구로서 핵심역할을 수행하게 될 전망이 확실하다. 다만 현재까지의 모든 상황을 종합하여 조심스럽게 예측한다면 앞으로 건설분야에서 전산구조공학은 통합 및 자동화의 두 가지 기본방향을 지향하여 기술적인 발전을 이룩해 나갈 것으로 전망된다. 즉 공학에서 사용하는 수치해석 및 첨단이론은 이미 고도로 발전되었고 지금도 빠른 속도로 발전하고 있으며 제 4세대 후반의 초고성능 컴퓨터에 의한 종합적 CAE/CAD시스템 개발도 동시에 고도로 성숙된 발전단계에 이르고 있는 결과에 연유한다. 따라서 이미 이론적으로는 체계적이며 고도의 수준으로 발전된 전산구조공학 분야에서 21세기의 발전은 컴퓨터 산업 기술

의 발전과 직결되어 있는데 향후 10년 정도의 단기적인 전망으로는 현재 제 4세대 후반 컴퓨터의 고성능화에 의한 디지털 multimedia 환경 구축, 인공지능·지식기반 컴퓨터의 발전과 같은 고도화된 H/W, S/W로 인하여 구조해석·설계 소프트웨어시스템, 그리고 도면 작성을 위한 CAD그래픽 소프트웨어와 지능형 구조 데이터베이스(intelligent structural database), 구조 모델링을 위한 소프트웨어 등으로 구성되어 있는 통합 자동화시스템을 통하여 구조물 설계분야에 보다 효율적인 시스템을 구축해 나가게 될 것이다. 그리고 시공과 유지관리에 있어서도 계측/모니터링, 통제시스템이 통합 및 자동화될 것이며 나아가서 유지관리 종합 통제 시스템에 의해 유지관리 또한 자동화가 될 것이다.

이런 통합자동화시스템이 개발되어 실용화되는 10여년 후부터 약 30년 정도까지의 중기적인 전망으로는 완전자동화 및 가상현실(virtual reality)을 이용한 프로젝트의 계획·설계·시공 시뮬레이션의 실용화가 실현된다고 예측할 수 있다. 즉 단순한 해석·설계시스템의 자동화를 넘어서서 계획부터 설계·시공·유지관리에 이르기까지 건설프로젝트를 수행하는데 필요한 거의 모든 단계가 완전 시뮬레이션되고 자동화될 것이며 모든 엔지니어링업무 또한 자동화가 될 것이다. 또한 가상현실을 이용한 시공이 이루어 질 것이며, 모든 건설분야를 하나의 network로 연결하는 병렬·분산·협동·집중 처리방식의 메타컴퓨터 시스템을 보편화한 글로벌한 건설공사의 설계·시공·유지관리가 이루어질 것이다. 이는 현재 개발되고 있는 제 5세대 지능형, 사고형 컴퓨터의 실용화가 이때쯤부터 이루어질 것이라고 가정된 상태에서 가능할 것이다. 현재 컴퓨터 전문가들에 의하면 연산속도 10테라플롭스급 이상의 초고속 컴퓨터의 실용화가 10년 뒤에는 가능한 것으로 예상하고 있어 중앙처리장치와 메모리의 고집적화기술 같은 기술상의 문제는 거의 없어 보이며 인공지능의 알고리즘 또한 향후 10년간 많은 발전을 이룰 것으로 보여 제 5세대 지능형 컴퓨터의 실용화는 충분히 가능할 것으로 예상된다.

한편, 중기적인 전망을 지나 30년 정도 이후부

터의 장기적인 전망을 살펴보면 이 시기부터는 구조분야 뿐만 아니라 사회 전반적으로 획기적인 변화가 예상된다. 이는 인간의 감성을 인지하고 반응하는 감성컴퓨터, 인간의 시선이나 뇌파, 인간의 생각이나 심리작용만으로 컴퓨터를 작동시키는 BCI(Brain Computer Interface), 생물학적 촉매인 효소를 만들어내는 DNA를 이용하여 효소를 컴퓨터의 S/W처럼 사용하여 연산작용을 하는 DNA컴퓨터, 사람이 갖는 우수한 정보처리기능과 지식의 축적·분석·판단기능을 모방해 만들어 학습기능을 가지며 병렬연산방식이 기본인 신경·생체 컴퓨터와 같은 제 6세대 bio 혹은 생물 컴퓨터의 실용화가 가능할 것으로 예상되기 때문이다. 이와 같은 컴퓨터의 발달에 힘입어 전산구조공학 분야의 엔지니어는 엔지니어의 개념보다는 아티스트같이 미관이나 창의적 아이디어, 건설 프로젝트나 구조물이 사회, 경제, 정치, 문화, 환경과 조화될 수 있는 interface/interactive 부분만 주력하면 될 것이며 그 이외의 모든 구조엔지니어링 업무는 사이버 인간이나 bio-robot이 전담하는 시대가 도래할 것이다.

6. 맺는 말

건설분야에서의 전자계산기술은 지난 30년간 국내외적으로 눈부시게 발전해왔다. 건설분야에서 사용되는 전산구조시스템은 건설구조물의 거대함과 복잡성으로 인하여 전산화시스템으로 개발하기가 매우 어렵다는 특수성에도 불구하고 현재 공학에서 사용하고 있는 다양한 첨단분석·예측 이론을 종합하여 건설구조물에 적합하고 효과적인 전산구조 시스템을 구축하고 있다. 이러한 발전은 어느 정도는 80년대 이후 제4세대 컴퓨터 H/W와 S/W 기능의 급속한 발전으로 인하여 비롯된 것이지만, 대부분은 새로운 첨단 기술을 개발하고 적용하고자하는 연구자, 기술자들의 노력으로부터 이루어진 것들이라 할 수 있다.

오늘날 멀티미디어 초고성능 PC시대에 막대한 정보 및 자료의 처리능력을 갖춘 CD롬과 고성능 통신기능, 고도의 음성, 문자, 영상인식 input media, 그리고 윈도우즈2000, 윈도우즈NT와 차세대

OS체계하에서 고도의 CAE/CAD expert시스템이 실용화되면 향후 건설분야에서 전산구조공학은 구조물의 계획·설계·시공·운용·유지관리 전반에 걸친 통합화(cradle-to-grave) 및 자동화를 기본방향으로 하여 지향하면서 기술적인 발전을 이룩해 나갈 것으로 전망된다. 즉 기본적으로 구조해석, 설계, 소프트웨어시스템 그리고 도면 작성을 위한 CAD그래픽 소프트웨어와 지능형 구조 데이터베이스(intelligent structural database) 등은 개별적으로 이미 상당한 발전을 이룩하였다. 하지만 이를 더욱 발전시키고 한발 더 나아가 자동화설계시스템의 통합을 통하여 구조물 설계분야에 보다 효율적인 시스템을 구축해 나갈 것이다. 그리고 시공과 유지관리면에 있어서도 계속·모니터링 및 유지관리시스템의 통합 및 자동화를 통하여 21세기초에는 앞에서 자세히 설명한 바와 같이 완전한 전산화, 자동화 건설기술의 발전을 이룩할 것이다.

앞으로 10년이 지나서 제 5세대 지능형 컴퓨터가 실용화되는 시대가 오면 인터넷·정보통신 기술의 고도화와 함께 오늘날 우리가 추구하는 구조물의 계획단계에서 설계·제작·시공·유지관리 전단계에 걸친 완전한 통합·자동화 전산시스템의 구현은 물론이고 메타컴퓨터 시스템의 실용화로 글로벌한 병렬·분산·협동·중점 전산시스템이 고도의 사이버 환경하에 모든 건설프로젝트의 지역성을 초월하는 고도 전산시스템이 구현될 것이다. 더 나아가서 구조엔지니어들의 모든 구조엔지니어링 업무는 지능형 컴퓨터가 수행하고 엔지니어는 보다 창의적이고 타분야와의 상호 상관적인 문제의 해결에만 주력하게 될 것이다. 더 나아가서 30~50년 뒤 21세기 중반이 지날 때가 오면 제 6세대 DNA 생물컴퓨터가 실용화되어 오늘날의 전산구조기술을 이용한 구조전문가의 구조설계·시공·유지관리 업무의 개념은 사라지고 지금의 슈퍼컴퓨터의 수천만배 이상의 성능과 지능을 갖춘 인간과 같은 사고인지를 하는 사이버 인간이나 bio-robot이 모든 전산구조 업무를 담당하게 되고, 보통 구조 기술자들은 오히려 엔지니어링 경영 관리 업무와 프로젝트에 영향을 미치는 비구조적인 정치·사회·문화·예술 분야의

상관업무의 처리에만 주력하고, 고도의 구조전문가 집단만이 고도의 구조공학과 전산공학 기술의 결합에 의한 선도적 기술 창출 및 보급에 주력하게 될 날이 올 것이라고 상상하며 이 글을 맺는다.

참 고 문 헌

1. 조효남, “강구조물의 LRFD 설계법”, 강구조학회지, 제2권 제3호, 1990, pp.98~114
2. 조효남, “대형교량의 유지관리를 위한 계측, 모니터링, 통제시스템 개발”, 한국과학재단 핵심연구과제 최종보고서, 1998a
3. 조효남, “강상형교의 최적설계 프로그램(CAOD-sb)개발” 차년도 보고서, 1998b
4. Ayyub, M. M. and Mccuen. R. H., *Simulation-Based Reliability Methods*, Probabilistic Structural Mechanics Handbook, Chapman & Hall. 1995, pp.53~69
5. Esping, B., Holm, D., Campion, F., Clarin, P., “Intergrated Modular Software for Design Optimization with Structural and Multidisciplinary Objectives”, *Optimization of Structural Systems and Applications*, 1993, pp.445~476
6. Ahmed K. Noor, “Computational structures technology: leap frogging into the twenty- first century”, *Computers & Structures*, Vol. 73, 1999, pp.1~31 