

건설분야의 구조최적설계



조 효 남

1. 서 론

60년대이래 지난 70년대까지 무수하게 쏟아져 나온 연구결과와 문헌에 힘입어 구조최적화(Structural Optimization)는 이론적으로는 상당히 발전되었지만 제3세대 컴퓨터의 H/W와 S/W의 한계성으로 인하여 실제적인 초대형 구조시스템의 최적설계가 어려웠다. 반면에, 지난 80년대 이래로 제4세대 컴퓨터시스템의 고성능 H/W 및 S/W가 발전되었고, 90년대에 와서도 H/W와 S/W도 586고성능 PC등의 발전으로 더욱더 고도화되고, OS도 Windows, N/T 등으로 전환되어 MPC와 함께 초심자들이 더욱 더 사용하기 쉽게 고성능화 됨으로써 이제는 구조최적화도 모든 건설구조분야의 구조설계에서 아직 완전한 수준은 아니지만 점점 더 고도의 CAE/CAD시스템의 설계최적화부분의 필수적인 설계도로 그 위상을 확대해 가고 있다.

현실적으로 최적설계법이 구조물의 설계에 매우 유용하다는 사실이 증명되고 있긴 하지만, 아직도 실무 설계자들은 최적설계의 의미를 제대로 이해하지 못하고 있는 실정이다. 그 주된 이유는 설계 실무자는 어디까지나 사용자이기 때문에 수리적

최적화기법에 친숙할 필요는 없는데, 모든 최적화 연구나 문헌, 자료가 수리최적화기법 위주로 되어 있고, 실제 구조물의 최적화를 위한 문제의 도출과 이에 대한 정식화, 모델링, 최적설계지침 관련 문헌이 극소한 형편이기 때문이다. 뿐만 아니라, 초대형 복합구조물을 효과적으로 최적화할 수 있는 시스템 최적설계 프로그램의 사용에 미숙하고, 때로는 설계효율성면에서 재래의 설계방법보다 사용하기 불편하고 실무설계에 맞지 않거나 비용이 많이 드는 경우 등이 있기 때문에, 아직도 토목, 건축 분야에서는 우주항공, 조선, 기계분야에 비하여 구조설계 전 분야에 걸쳐 최적설계가 CAE/CAD의 설계수단으로서 제대로 도입정착되지 못한 단계에 있다. 그러나 앞으로 이상과 같은 문제들만 보완되면 광범위한 응용이 곧 실현 될 것으로 기대된다.

어느 분야보다도 그 이론이 다양하고 광범위한 구조최적화 이론이 유한요소법의 경우와 같이 이론적으로 완전한 체계가 확립된 시기는 60년대 후반이라 할 수 있다. 1938년의 Galileo이후 40년대 말에 이르기까지 많은 연구자들의 관심의 대상이었던 균일 강도설계(uniform strength design)와 같은 고전적 최적설계이론 시대를 제외하고, 최적

* 본 학회 전 회장 · 한양대학교 토목 · 환경공학과, 교수

설계의 발전과정은 최소중량설계(minimum weight design)의 형태로 선형최적화이론 중심으로 발전된 초기의 이론적 태동시기인 50년대, 각종 비선형 최적화이론의 발전과 더불어 최적설계이론이 체계화된 시기인 구조최적화 이론의 성장기에 해당하는 60년대, 그리고 최적화 설계이론들이 보다 세련화될 뿐만 아니라 수리적 계획법 외에 최적성기준(optimality criteria)이론이나 기타 근사화 기법, 다단계, 다수준 최적화 모델링이나 알고리즘 등과 같이 보다 다양한 최적화 이론들이 발표되기도 하면서 최적설계가 이론적으로 고도화되고 실제 구조시스템의 설계에 적용되기 시작한 초기응용시기에 해당하는 70년대, 구조최적화 기법이 초대형 구조시스템의 실제적인 최적설계 수단으로서 제4세대 CAE/CAD시스템의 일부로 활용되고 있는 초기 실용화 시기인 80년대 및 90년대로 크게 구분할 수 있다. 대부분의 이론이 80년도 이전에 발전되어 구조최적화는 최소한 이론적으로는 수리적 최적화 기법으로서 고도화된 제4세대 컴퓨터를 이용한 설계법으로 면모를 갖추었다. 80년대로 와서는 제4세대 PC 및 슈퍼컴퓨터 시대의 고성능 컴퓨터에 맞는 더욱 더 세련된 최적화 이론이 발전되고 응용S/W패키지도 쏟아져 나왔지만 실무설계에서의 설계도구로서의 응용은 아직도 우주항공, 선박, 자동차 등의 일부를 제외하고는 특히 건설 분야에서는 정착되지 못하고 있는 실정이다. 그러나, 최적설계는 이제 유한 요소법과 마찬가지로 구조공학에서 주요연구 및 응용분야의 하나로 확고한 위치를 갖고 있으며, 현재 선진국에서는 각종 구조시스템의 최적화를 위한 범용 프로그램이나 각분야별, 구조형식별 구조시스템의 최적화 프로그램들이 개발되어 응용되고 있다. 특히 앞으로 우리 나라에서도 최적설계는 현재의 제4세대컴퓨터의 Interactive Graphical I/O시스템을 이용하는 Computer Aided Design System과 Knowledge-Based Expert System의 "최적화 code"로 활용될 것이 전망된다.

2. 구조최적설계의 발전현황

전산화 설계의 핵심인 최적설계 이론은, 60년대

이래 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 비선형문제이기 때문에 비선형 최적설계문제를 풀기 위한 연구가 활발하였는데, 이중에 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 최적화 문제에 대한 다양한 근사 최적화기법의 응용, 설계민감도해석, 구조시스템최적화에 필수적인 DOSA(Design Oriented Structural Analysis)기법의 발전 등과 같은 효율적인 시스템 최적화기법의 발전을 빼놓을 수 없다. 그러다가 최적설계는 80년대로 들어와 고성능 제4세대 컴퓨터시대가 시작되면서 FEM 패키지와 함께 건설분야에서도 최적설계시스템이 크게 발전하였다. 80년대의 최적화 알고리즘은 60년대와 70년대의 알고리즘을 바탕으로 성능이 더욱 향상되었는데, 이로써 ALM, OCM(Optimality Criteria Method), GPM, SUMT를 비롯한 다양한 FDM알고리즘과 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 구조설계분야에서도 많은 적용이 시도되었으며 1990년, J. Koza에 의한 유전자 프로그래밍(Genetic Programming, GP)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.

다른 한편으로, 80년대이래 오늘에 이르기까지 구조최적화 이론 및 기법의 연구개발에 관련된 또 하나의 발전추세를 개관해 보면, 지난 70년대까지 약 30년간 주로 OR분야에서 연구 개발된 결과로 당시 고도로 성숙한 단계에 있는 수리계획법(MP)의 각종 최적화 알고리즘을 구조최적화에서 보다 효율적이고 신뢰할만한 기법이 되도록 만들기 위하여, 최적화 기법의 기계적인 단순한 적용보다는 상당한 수정을 가하여 응용하는 방향으로 연구 개발되고 있었음을 알 수 있다.

이와 같이 수정이 필요한 이유로는 크게 두 가지를 들 수 있는데, 첫째로는, 수학적으로 수렴에 대한 효율성이 증명된 수리적 알고리즘의 개발과 실제 설계문제를 전산화하는데 이 알고리즘을 적용할 수 있도록 개발하는 것과는 기본적으로 상당한 차이가 있다는 것이다. 흔히 이론적으로 훨씬 더 매력있는 방법도 실제 문제를 다룰 때는 그렇지 못한 경우가 많다. 또한 실제 문제에서 사용 가능한 알고리즘이 되기 위해서는 수학적으로 엄격한 알고리즘보다는 근사적이며 융통성 있는 기법을 허용하는 것이 바람직하다. 결과적으로, 공학적 관점에서는 수학적으로 엄격한 최적해는 거의 의미가 없다는 점이다.

둘째로는, 최적설계 과정에서 주어진 하나의 설계에 대하여 1회의 설계비용이 많이 들기 때문에 최적화 알고리즘의 수렴속도가 특히 중요하다. 고로 근접해(near-optimum)로 신속히 수렴하는 알고리즘이 엄밀해로 느리게 수렴하는 것보다 더 바람직하다.

한편, 80년대에 MP기법의 수준은 고도로 발전되었기 때문에 현대적인 최적화 알고리즘이 사용되는 한 최적화 알고리즘 자체는 이미 큰 문제가 되지 못한다고 볼 수 있다. 이들 알고리즘의 효율성은 CPU시간이나, 함수나 도함수의 계산횟수, 준비시간, 사용의 난이도 등으로 쉽게 비교할 수는 없지만, 실제 설계문제에서는 다음과 같은 두 가지 기준이 프로그램의 효율성에 관한 척도가 될 수 있다.

첫째 근접최적해는 신뢰도가 높아야 하고, 둘째, 주어진 설계과업을 수행하는데, 몇 회 이내의

함수(및 도함수) 계산만으로도 충분하여야 한다. 그러나 무엇보다도 최적화 및 해석프로그램이 최적설계를 창출하는데 어떤 방식으로 결합되어 있는지가 이들 최적화 기법의 궁극적 효율성을 결정한다. 그리고 특정 최적설계문제에다 효율적인 최적화 알고리즘을 결부시키는 개발자의 능력도 전반적인 결과에 매우 중요한 영향을 미친다. 대개 대규모 컴퓨터 시스템은 여러개의 NLP코드를 갖추고 있다. 설계자가 알아야 할 점은 동일한 알고리즘을 사용하여 서로 다른 두 사람이 만든 프로그램도 신뢰도와 계산의 효율성면에서 큰 차이가 있는데, 이는 좋은 설계를 위하여 필요한 판단, 경험과 직관적 능력의 대부분은 도외시키고 단순히 수치적으로만 컴퓨터 프로그래밍하려 들기 때문이다. 고로, 수치최적화 코드는 이런 특정한 알고리즘에 바탕을 두고 있기는 하지만 이와 같이 고도로 복잡한 설계과정을 모형화 하기 위하여 프로그램을 개발한 개개인의 능력을 그대로 반영하고 있다. 만일 국부적으로 사용 가능한 MP 코드가 만족스럽지 않은 경우 오늘날 여러 최적화 문헌에 소개된 최적화 코드에 대한 풍부한 정보를 활용할 수 있다. 특정한 최적화 코드의 구입비는 특정 최적화 코드의 개발비에 비하면 거의 무시할 정도이다.

요약하자면, 첫째로 80년대이래 오늘날까지 MP코드의 개발 수준은 엔지니어들이 자신의 프로그램을 개발할 필요성이 전혀 없다는 것이다. 그러나, 특정한 설계문제를 해결하기 위하여 경험에 바탕을 두고 기존의 코드를 보다 효율적으로 개조하기를 원할 수도 있다. 오늘날 구조최적화 프로그램이 갖추어야 할 두번째 필수적인 요건은 구조해석 능력이다. 대개의 엔지니어는 설계시에 FEM프로그램의 사용에 친숙하며, 오늘날 FEM 해석프로그램은 PC나 Main Frame용으로 널리 사용되고 있다. SAP, ADINA, GT-STRUDL, NASTRAN같이 고도로 발전된 범용 패키지들이 사용되고 있다.

그러나, 구조최적화와 관련하여 이들 프로그램들이 빠뜨리고 있는 해석요소의 일부분으로 설계민감도(design sensitivity)정보의 처리능력을 들 수 있다. 물론, 이러한 능력이 없는 FEM패키지를

이용한 재해석이나 설계민감도 분석기법이 고도로 발전되어 있다. 이러한 능력을 갖추고 있는 대개 해석 및 설계 종합코드로 개발되어 최적화 능력을 갖춘 학술적이거나 범용의 최적화 코드로는 IDESIGN, CONMIN, OPTDYN, ACCESS, ASOP, EAL, PARS, SAVES, SPAR, STARS, TSO등을 들 수 있다. 그러나, 이들 프로그램이 갖는 대단히 탁월한 설계능력에도 불구하고 이들은 대개 우주, 항공, 기계, 조선분야의 설계문제를 다루도록 개발되었기 때문에 토목, 건축 분야의 설계문제를 위하여 수정되어 사용되어야 하므로, 상기한 프로그램들이 광범위하게 활용되기도 못하는 실정에 있다.

마지막으로 구조최적화 프로그램이 갖추어야 할 가장 중요한 기능적 요소는 해석 및 최적화프로그램사이의 커뮤니케이션 메커니즘이다. 가장 직접적인 접근방법은 최적설계코드를 해석코드에 단순하게 연결시켜 설계자들에 의해 최초로 주어진 형태로 설계문제를 취급하는 방식이다. 설계민감도 정보는 유한 차분식으로 계산하고 최적화프로그램에서 요구하는 각 함수의 계산은 완전히 새로운 구조해석이 된다. 이와 같은 "Black Box" 적 접근방법은 실제 설계문제를 다루는데 매우 타당한 방법이다. 만일 구조요소를 설계하는 경우에는 해석은 전혀 문제가 되지 않을 뿐 아니라 요소별로 여러 설계변수가 사용되며 여러 재하조건 및 제약조건이 부여될 수 있고 이 경우 이러한 직접적인 방법은 매우 단순하며 실용적인 방법이 된다. 보다 더 복잡한 구조시스템의 설계를 위해서는 반복해석의 내용이 엄청나므로 Black Box적 접근방법은 통상 사용이 불가능하다. 이때는 먼저 FEM해석 코드에 설계민감도 계산능력을 포함시켜야 하는데 응력, 변위, 고유진동수, 좌굴 제약조건에 대한 정보를 제공하는 것은 상당한 계산능력이 필요하나 개념적으로는 매우 쉽다.

일단 이와 같은 능력을 갖추고 난 후에도 효율적이고 신뢰도 높은 설계프로그램을 개발하는데는 상당한 노력이 필요하다. 이때 앞에서 언급한 각종 근사화 개념이 매우 중요한 역할을 한다. 결국, Substructure최적화 기법, 효율적인 재해석 및 DOSA기법 그리고 근사적인 문제로의 변환기법 등을 효과적으로 사용함으로써, 해를 구하기 위한

계산과정을 엄청나게 줄일 수 있다. 더구나, 쌍대방법(dual method)을 사용하므로써 이제는 자동화 설계과정에서 복합재료의 적용의 수, 가용한 표준 단면 치수같은 이산형 설계변수까지도 취급 가능하게 되었다. 그러나, 이러한 근사화 기법이 완전히 모든 실제적인 설계문제를 완전한 수준에서 효율적으로 다룰 수는 없고, 아직도 해결해야 될 한계점을 일부 지니고 있다. 이러한 최적화기법의 한계성은 많은 설계문제에 대해 이들의 직접적인 응용을 어렵게 만든다. 그러나 최근에는 다수준(multi-level), 다목적(multi-objective) 최적화방법에 의해 이들 기법을 효과적으로 활용할 수 있는 기법이 발전되고 있다.

3. 최적설계시스템의 개발 및 응용

구조해석과 구조설계분야의 이론은 60년대이래 지난 40년간 비약적으로 발전을 해왔으며, 그 결과 최근에는 고도의 해석과 설계기능을 갖는 응용소프트웨어의 개발이 이루어졌다. 또한 첨단 구조공학이론을 적용하는 완벽한 사용자 위주의 자동화 해석 및 설계를 포함하는 시스템의 구현을 하기 위하여 연구개발이 계속 진행 중에 있다. 본 절에서는 건설분야 구조해석과 구조최적설계분야에서 활용되고 있는 패키지들의 특성과 앞으로의 발전방향에 대하여 개략적으로 살펴보도록 한다.

3.1 구조해석 시스템

유한요소법의 초기부터 선진국의 대학 및 연구기관을 중심으로 구조해석프로그램이 개발되어 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 M.I.T에서 개발되었고 국내에서도 실무에 널리 적용되고 있는 SAP Series의 모체는 1970년 UCLA의 Wilson등에 의하여 개발되었고 건물해석전용 프로그램인 ETABS도 1975년에 개발되었다. 그 후 이러한 프로그램들은 수십년 동안 사용자에게 의해 검증을 거쳐왔으며 많은 기능

이 계속 추가 보완되어 현재에 이르고 있다. 현재에도 건설분야에서 널리 적용할 수 있는 새로운 버전의 기존 패키지와 새롭게 개발된 유한요소해석 패키지들이 나오고 있다. 본 글에서는 이러한 다양한 유한요소해석 패키지 중 현재 가장 일반적으로 사용되고 있는 유한요소 패키지를 중심으로 그 성능 및 활용 그리고 발전방향에 대하여 기술하고자 한다. 표 1은 이러한 패키지를 나타내고 있으며 이 중에 ADINA, MARC, ABAQUS, ANSYS, NASSTRAN같은 일반 범용 패키지는 건설분야뿐만 아니라 기계, 항공, 해양, 조선 구조분야에서도 널리 사용되고 있는 일반유한요소해석 패키지들이다. 이러한 소프트웨어는 단순한 정·동적해석은 물론 재료의 비선형, 기하학적 비선형 거동에 대하여도 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 있는 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 Adaptive해석 및 최적설계기능과 요소와 재료에 대한 데이터베이스의 기능 등이 추가되었으며 비선형 혹은 동적 해석을 할 수 있는 모듈이 추가되어 막강한 해석

기능을 갖추게 되었다.

현재에는 표 1에 언급한 범용 패키지 이외에도 그래픽 모델링, CAD 데이터 입력기능, 절점과 요소의 자동발생 및 복제기능, 기둥/보 접합부 강역대(Rigid Panel Zone)의 자동고려기능 및 각국 지방 규준에 따른 풍하중 및 지진하중 자동 입력기능 등의 뛰어난 전처리 기능과 다양한 요소를 사용하고 정적/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.

3.2 최적설계시스템

대부분의 건설구조물은 규모가 거대할 뿐만 아니라 자연환경에 노출되어 있으며 작용하중의 정확한 측정이 어렵다는 특징을 갖고 있다. 또한 건설구조물에 대한 설계는 그 대상 구조물의 대부분이 사회기반, 공공시설물로 사용되고 있기 때문에 안전성과 경제성이 매우 중요하다. 그러나 설계측면에서 본다면 안정성과 경제성은 매우 상반된 개념이다. 이러한 상반된 개념을 적절하게 조절하여 안전하면서도 가장 경제적인 구조물을 설계하는 것이 구조설계의 궁극적인 목적이며, 바로 이러한 목적을 실현하기 위하여 최적설계가 발전하게 되었다. 따라서 여기서는 최적설계를 이용한 자동화 설계시스템의 발전현황을 알아보도록 할 것이다.

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 단위프로그램

표 1 건설분야 구조해석 패키지의 주요기능

Software	주요기능	개발사	비고
ADINA	<ul style="list-style-type: none"> · 2차원, 3차원 선형, 비선형 해석, 접촉문제 해석, Buckling해석 · 균열 진행을 수반한 파괴해석 · Small & large Deformation, Large Strain · 온도를 고려한 탄·소성 및 Creep해석 	미국 ADINA R & D, Inc.	범용
MARC	<ul style="list-style-type: none"> · 비선형 접촉해석, Material Library(소성재료, 비금속재료, polymer 등) · 열응력해석, 진동해석(고유치해석, 비선형해석), 콘크리트의 균열해석 	미국 MARC사	범용
GT STRUDEL	<ul style="list-style-type: none"> · 선형동적해석, 비선형정적해석 · 철골 및 콘크리트 구조설계(부재최적설계, 물량산출) 	미국 GTRC사	범용
LUSAS	<ul style="list-style-type: none"> · 선형, 비선형 해석 · 시간에 따른 응력 및 변위해석, 비선형-동적해석 · Eigen 해석(좌굴해석, 내진·내풍해석), 파괴해석(S-N Curve) 	영국 FEA사	범용
ABAQUS	<ul style="list-style-type: none"> · 선형·비선형 정적 해석, 동적해석(고유치, 응답스펙트럼, 시간이력) · Transient nonlinear dynamic analysis · Creep & Shrinkage 해석, 구조진동해석, Fracture mechanics 	Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.	범용 설계지원
ANSYS	<ul style="list-style-type: none"> · 콘크리트 재료 및 요소의 비선형 해석 · 동적해석, 좌굴해석 및 최적설계 모듈 포함 	미국 ANSYS사	범용 설계지원
DIANA	<ul style="list-style-type: none"> · 콘크리트 및 암반의 균열해석, RC 및 PC구조물의 파괴거동 해석 · 장대교량의 동적 비선형해석, 교량의 시공단계별 해석 · 항만구조물의 내진 해석 · 콘크리트 수화열에 의한 온도 및 균열분포 해석 · Creep 및 Shrinkage 해석, 부착 거동을 고려한 철근 및 텐던모델링 	네덜란드 TNO사 미국REI사	범용 설계지원
ETABS	<ul style="list-style-type: none"> · 아파트 전용 정해석, 동해석, 철골단면설계, 이동하중하의 교량해석 	미국 CSI사	범용 설계지원
NISA	<ul style="list-style-type: none"> · 선형·비선형 정적 해석, 동적해석(고유치, 응답스펙트럼, 시간이력) · 구조최적설계 	미국 EMRC사	범용 설계지원
MIDAS	<ul style="list-style-type: none"> · 정동적해석(고유치, 응답스펙트럼, 시간이력), P-Delata 해석 · 한국강구조기준과 AISC(ASD, LRFD)기준에 대한 설계기능 	한국 (주)포스코개발	범용 설계지원
NASTRAN	<ul style="list-style-type: none"> · 선형정적해석(응력해석, 탄성좌굴해석), 진동해석, 비선형해석 · 공탄성해석(static aeroelastic, dynamic aeroelastic, flutter 해석) · Adaptive 해석, 설계최적화 · 대형구조물 해석 	미국 MACRO industries, Inc.	범용 설계지원
SAP2000	<ul style="list-style-type: none"> · 하중조합, 이동하중(DB, DL, 철도)에 의한 교량해석 · 비선형 해석(Isoater, Demper, Gap, Hook요소) · 미국, 영국, 캐나다, 유럽기준에 따른 RC 및 철골부재 설계 	미국 CSI사	범용 설계지원
RM	<ul style="list-style-type: none"> · PC-BOX교량 (FCM, MSS, ILM, FSM공법 등)해석 · 장대교량 해석 및 Steel Box 교량해석, 시공 단계별 해석 · 단면 물성치 자동계산, Creep & Shrinkage 해석 · 동적해석(고유치, 응답스펙트럼, 시간이력), 좌굴해석 	오스트리아 TDV사	교량전용 설계지원
TANGO	<ul style="list-style-type: none"> · 강교량, 콘크리트교량, 강합성교, 사장교 해석 · AASHTO, OHBDC 이동하중 산정, ACI-209, CEB-FIP 기준고려 	미국 DRC Consultant	교량전용
SFRAME	<ul style="list-style-type: none"> · 시공단계별 PC segment 해석 		교량전용

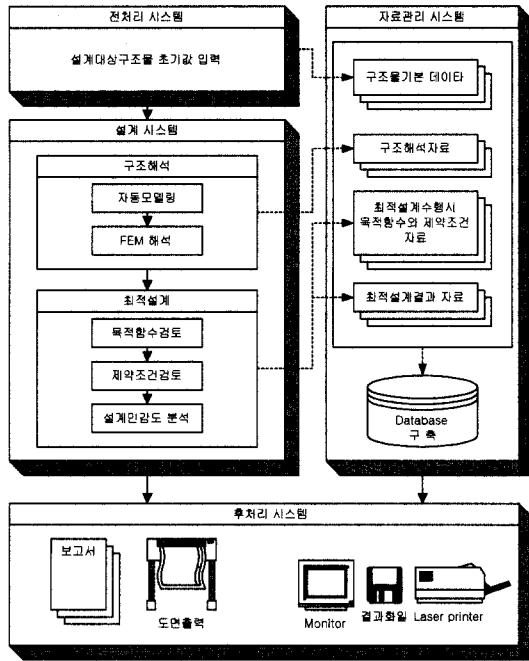


그림 1 자동화 최적설계시스템의 개념도

의 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 1은 자동화 최적설계시스템의 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 상업용 자동화설계 프로그램들이 개발되어 있다. 앞 절에서 살펴본 최적화 이론의 발전과 함께 개발된 건설 구조물의 최적설계에 이용 가능한 자동화 최적설계 프로그램들 중 주요 프로그램의 일부를 표 2에

표 2 주요 최적설계 프로그램

프로그램	특 징	주요응용분야	개발자
OPTSYS	ASKA와 ABAQUS 기초	범용구조설계	Brama, J
ASTROS	NASTRAN 기초	범용구조설계	Neill, D.J
NISAOPT	NISAII 기초	범용구조설계	Atrek, E., Hariran, M
NASTRAN, I-DEAS	민감도와 최적화 수행	범용구조설계	Vanderplaats, G.V Miura, H
ADS / DOT, DOC	FORTTRAN subroutines의 모음	범용구조설계	Vanderplaats, G.V / VMA Eng. Inc.
NEWSUMT	penalty function procedure	범용구조설계	Miura, H
NEWSUMT-A	NEWSUMT에 근사제약 혼입	범용구조설계	Grandhi, R.V
IDESIGN	Sequential Quadratic Programing	범용구조설계	Arora, J. S Univ. of Iowa
GENESIS	민감도, 근사화, 최적화 수행	범용구조설계	VMA Eng. Inc.
ANSYS	최적설계 모듈포함	범용구조설계	ANSYS Inc.
MIDAS의 O.D.S	AISC-ASD89 시방서규준	건설분야설계	(주)포스코개발
GT-STRUDL	철골 및 콘크리트 구조설계(물량산출)	건설분야설계	GTRC Inc.
SAP2000	미국, 영국, 캐나다 기준에 따른 RC 및 철공부재 설계	건설분야설계	CSI Inc.
MicasPlus	AISC 및 ACI시방서규정에 따른 설계지원	건설분야설계	Intergraph Inc.
SODA	AISC-ASD89, AISC-LRFD86, LSD, 2D, 3D, P-Δ 해석, 자동최소중량설계	건축구조설계	Acronym Inc.
RM	교량의 최적 부재설계	교량전용설계	TDV Inc.

나타내었다. 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 통합 구조최적화 패키지는 70년대 초반에 개발된 TSO이며 항공기날개와 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 구조해석프로그램과의 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. 앞 절에서 살펴본 표 1에 나타난 범용구조해석 패키지들중 ANSYS, GT-STRUDL, NASTRAN, RM 및 SAP2000과 같은 패키지는 구조해석과 함께 구조설계기능을 제공한다. 그리고 표 2에 나타난 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 구조

최적설계를 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 통합자동화 시스템인 MicasPlus Structural Products는 MicasPlus Model Draft, MicasPlus Analysis 그리고 MicasPlus Design 이라고 하는 3개의 주요 모듈로 구성되어있어 구조모델링, 해석 및 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 개발된 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. 이러한 사례중 하나인 '강상자형교의 최적설계 프로그램[조효남, 2000]'은 최적설계를 기반으로 한 전산화 자동화 설계프로그램으로써 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하여 구조해석을 하기 위한 입력화일 자동생성과 결과화일 자동탐색 기능이 포함된 구조해석모듈과 강상자형교의 바닥판과 주형에 대한 최적설계모듈 그리고 강상자형교의 상세설계모듈과 전후처리 기능의 통합모듈로 구성되어 있다.

이와 같이 최적설계는 70년대 최적화 이론정립 시기를 지나 유한요소법의 발전과 함께 80년대의 제4세대 고성능 컴퓨터에 의한 CAD/CAE시스템의 발전으로 실무설계 방법과 과정에 적합한 실질적인 구조설계가 가능하게 되었으며 과학적이고 경제적인 설계를 가능하게 하는 강력한 방법으로 자리를 잡게 되었다. 그리고 반복작업의 자

동화, 설계시간의 단축과 설계품질의 향상 등을 목적으로 모든 구조거동을 만족시키는 오류가 없고 신뢰도가 높은 효율적인 자동화 설계의 실무 적용은 계속 증가하고 있다.

또한 종래에는 교량에 대한 건설계획을 세울 때 일반적으로 건설이후에 수반되는 중·장기적인 추가비용보다는 설계 및 건설 등의 초기비용에 국한해서 고려하는 경우가 많았으나, 최근에는 초기비용 이외에도 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 연구도 추진중에 있다. 따라서 앞으로 최적설계는 초기 공비만이 아닌 LCC(Life Cycle Cost)를 최소화하는 설계에 대하여 고려해야 하며 이와 함께 다음세대의 구조설계의 필수도구 내지 설계언어와 같은 더욱 중요한 자리를 차지하게 될 것이다.

4. 실무설계에의 응용을 위한 현안문제 및 발전방향

지금까지 위에서 누차 언급한 바와 같이, 구조최적화는 컴퓨터의 급격한 변화 발전에 따라 이론도 고도로 발전되었으나 실무설계에의 응용은 일부 첨단 구조설계가 요구되는 항공, 우주, 선박, 기계, 자동차, 플랜트 부분을 제외하고는 특히, 토목, 건축분야에서의 실무응용은 지지부진한 상태를 면치 못하고 있다. 이와 같은 실무설계에서 응용을 제대로 유도하지 못한 책임의 대부분은 구조최적화 분야의 전문가들의 연구개발의 방법, 내용, 방향면에서 근본적으로 문제가 있기 때문임은 틀림없지만, 실무설계자들과 구조최적화의 잠재적인 위력과 가치를 모르는 구조전문가들의 몰이해와 외면뿐 아니라 심지어 최적설계는 실무설계와 동떨어진 이론적인 방법에 불과하다는 식으로 매도되는 분위기들에서 그 원인을 찾을 수 있다. 그렇지만, 구조최적화가 오늘날 고도의 전산이용 설계시대에도 실무설계에서의 설계도구가 되지 못한 주원인은 그간 최적화의 대부분의 문헌자료들

이 지나치게 “해알고리즘(solution algorithm)” 연구위주의 이론적 연구에 치우쳐 왔고 적용예의 제시도 실무문제와는 거리가 멀거나 너무 단순한 교과서적인 문제에만 그쳤기 때문이다. 즉, 이는 실무에서의 실무설계자들이 실제로 매일 취급하고 있는 실제규모 구조물들의 모든 주요 설계단계에서의 실무자들이 원하는 주요한 최적화 문제를 효율적으로 다룰 수 있는 문제의 정식화, 모델링에 대해서는 등한히 해온 결과 초래된 문제라 볼 수 있다. 따라서 구조최적화는 앞으로 “수치적 해법”보다는 최적화가 필요한 문제의 발굴 및 도출과 적절한 모델링과 단면의 선정같은 설계문제의 정식화기법과 관련되는 실제적으로 의미가 있는 최적화의 “문제 발굴/도출”(Problem Identification) 위주로 발전되어야 한다. 즉, 실제구조물의 의미 있고 중요한 최적화 문제를 찾아내고 가장 효율적으로 모델링하고 이를 실무사용자 중심으로 실무설계 관행대로 쉽게 접근하여 대화식으로 사용할 수 있는 형태로 CAE/CAD 시스템의 구조형식·종류별 최적설계 루틴이나 최적화 코드로 개발되어야 할 것이다.

컴퓨터를 사용하는 실무설계자라면 누구나 현재의 최적설계에 대하여 최소한 몇 가지 의문은 없을 수 없다. 자기가 취급하는 구조물과 관련되는 최적화의 실제응용 예나 사례는 무엇이 있고 이와 관련된 범용 패키지 또는 특수한 최적화 코드가 있는가? 이러한 구조최적화를 도입하면 무엇을 얻을 수 있고 어떤 이점이 있는가? 등등 수많은 의문이 꼬리를 물은 것이다. 반면에, 실무에서 설계자들이 컴퓨터 이용 설계 보조용 프로그램에 대해 설계자들이 원하는 몇 가지 요구사항을 나열하면 다음과 같다.

- (1) 컴퓨터를 이용한 설계에 최적설계의 도입시 설계자의 전반적인 업무수행에 도움을 줄 수 있어야 한다.
- (2) 최적설계 프로그램은 무엇보다도 사용하기 쉽고 실무설계과정을 신속하게 수행할 수 있어야 한다.
- (3) 구조최적화는 최적화가 꼭 필요하고 중요한 실제 설계문제를 다룰 수 있어야 한다.

(4) 구조최적화의 결과는 경제적인 설계는 물론 신뢰도가 높고 실제적이고 유용한 설계결과로 되어야 하고 쉽게 점검할 수 있어야 한다.

아무리 최적설계에 의해 자동화설계가 이루어진다고 해도 설계자는 궁극적으로 자신의 설계의 모든 결과에 책임을 져야하기 때문에 그는 설계의 전개과정 전반에 걸쳐 완전한 이해와 제어능력을 갖고 있어야 한다. 그러나 설계의 전 과정에 걸쳐 방대한 수치계산이 요구되는 순간이 많이 있고 설계자는 무엇이 효율적이고 경제적인 설계를 구성하는지 알 수 없는 경우가 많기 때문에 이러한 상황에 대비하여 최적설계 프로그램이 진가를 발휘하도록 해야 할 것이다. 결과적으로 실무설계의 관점에서는 “최적설계”라는 용어보다는 “최적설계 보조물”(Optimum Design Aids)이라는 말이 더 적절하다고 본다. 즉 최적설계프로그램은 설계과정 전반에 걸쳐 설계자를 대치하기보다는 대화식으로 설계자를 보조하는 최적의 설계수단이라는 의미를 내포하고 있다.

이상의 관점에 비추어 볼 때, 현재 구조최적화 연구개발 분야의 발전은 올바른 방향으로 진행되지 못하고 있는 실정임을 인정하지 않을 수 없다. 대부분의 구조최적화 관련 문헌과 자료가 학술적인 문제접근방식 즉 “해알고리즘→연구→문제응용”방식으로 되어 있는데 반하여 실제 엔지니어링에서는 “실제문제→연구→해알고리즘”방식을 필요로 하고 있음을 유의해야 할 것이다. 위에서 언급한 실무자들의 의문과 요구를 충족시킬수 있는 구조최적화 프로그램이나 문헌자료는 극소수를 제외하고는 거의 찾아 볼 수 없는 것이 사실이다. 즉, 현재로는 실제 구조물의 최적화를 다룰 수 있는 공공 출판자료는 매우 제한된 범위만 있고 그것조차도 대부분 실무 엔지니어들보다는 전문가들을 위한 학술적인 자료에 불과하다고 본다. 대개의 경우 실제적인 최적화 문제의 예를 다룬 구조물에는 대부분 트러스와 라멘구조 정도이다. 위에서 언급한 바와 같이 앞으로 구조 최적화의 연구 발전이 실무설계에서 응용위주로 설계자들이 원하고 쉽게 접근 사용할 수 있는 실제규모 구조물의 “문제 발굴/도출”을 위주로 하는 최적설계코

드의 개발 형태로 발전된다면 구조최적화는 실무설계자들에게 “실무설계 보조물”로서 매우 위력적이며 매력적인 도구가 될 수 있을 것이다.

5. 구조최적설계의 전망

구조최적화 분야의 미래의 형태에 대한 정확한 예측은 불합리하고 이러한 예측 역시 논란의 여지가 있고 불완전하다는 것을 알기 때문에 여기서는 다만 정보화시대, 완전 전산이용 설계시대에 맞는 구조최적화의 몇 가지 바람직한 발전방향을 언급하고자 한다. 먼저, 구조최적화 분야에서는 세 가지 면의 보완이 꼭 필요하다고 본다. 그 첫째는, 앞에서 강조한 바와 같이 실제 실무설계에서 다루는 다양한 구조물의 실제적인 최적화를 중심으로 최적화 문제의 발굴/도출과 관련되는 실무응용 연구에 더욱 박차를 가해야 할 것이다. 둘째로는, 현재수준의 다양한 주요 알고리즘을 모두 포함하는 잘 개발되고 보급된 컴퓨터 Code가 순식간에 막대한 정보 및 자료의 처리능력을 갖춘 제4세대 후반 또는 앞으로 제5세대의 초고성능 H/W, S/W특성의 맞는 공용의 응용S/W로 되어 누구나 쉽게 이용할 수 있도록 할 필요가 있다. 셋째는, 앞으로 차세대컴퓨터의 초고성능 정보 및 데이터처리 환경내에서 대규모 최적화문제의 체계적인 정식화 및 해를 위한 보다 효율적인 최적화기법 및 알고리즘 개발의 필요성이다. 그 외에도 최적화 분야에서 중점적인 발전이 기대되는 여러 분야가 많이 있는데 그 중에 한 두가지만 구체적으로 언급하면 다음과 같다. 첫째는, 현재 연구진행중인 여러 수준의 요소설계변수와 시스템설계변수를 갖는 설계문제에 대한 다단계, 다목적 최적설계방법이나 직접적인 종합 최적화방법을 사용하여 효과적으로 이러한 문제를 취급하는 수단의 보다 고도화된 수준으로의 연구개발이 필요하다. 이러한 설계문제의 획기적인 해결은 형상 최적화 문제와 같은 복잡한 최적화 문제의 효과적인 최적화 수단을 제공하게 될 것이다. 또한 부재치수와 구조물의 절점좌표를 변수로 취급하는 외에 실제 요소-절점간에 연결성을 결정하기 위한 Topology최적화 문제도 보다 더 고도화된 연

구개발이 필요한 분야이다. 물론 구조물의 신뢰성 최적화(Reliability-Based Optimization) 및 총기대 비용 최적설계도 아직 실용적인 수준에 이르지 못하고 있는 분야로 해결해야 할 과제가 많은 계속적인 발전이 기대되는 분야이다. 이외에도 여러 가지 실제적인 설계문제에서 구조최적화에 의해 해결되어야 할 문제가 많이 있지만 이러한 분야의 나열이 여기서 의도하는 바가 아니므로 더 이상 언급하지 않기로 한다.

이제는 이미 이론적으로는 체계적이며 고도의 수준으로 발전된 구조최적화 분야에서 2000년대의 발전은 컴퓨터 산업 기술의 발전과 직결되어 있는데 현재의 초고성능 마이크로칩을 기초로 하는 전자식 제4세대 컴퓨터가 차세대인 2000년대에는 광소자를 활용하는 마이크로프로세서로 이루어진 광컴퓨터로 바뀌게 되고 데이터의 입력, 처리속도가 지금보다 수 백배 빨라지면 그때의 PC가 지금의 Main Frame이상으로 막대한 정보 및 자료를 순식간에 처리할 수 있으며 지능형, 사고형 컴퓨터로 발전될 것이 틀림없다. 따라서, 누구나 쉽게 사용할 수 있고 용량, 처리속도에 제한이 없으며 고도의 지능을 갖춘 컴퓨터시대가 되는 그때가 오면 최적설계가 더욱더 진가를 발휘하여 모든 재래적 구조설계를 대체하고 구조설계분야에서 유한/경제요소법, 한계상태 설계법과 함께 핵심기술로서의 위상을 차지하게 될 것으로 전망된다. 그때가 되면 모든 구조설계자들은 Routine한 설계업무로부터 벗어나서 그들이 의도하는 창의적인 설계에만 전념하게 되고 원하는 설계의 개념과 조건만 입력하면 최적의 모든 설계결과를 순식간에 얻을 수 있는 시대가 될 것이 틀림없다고 전망할 수 있다.

6. 맺는말

현재 구조최적화는 아직도 실무설계에서 제 위상을 찾지 못하고 있다. 그 원인은 위에서 언급한 것같이 주로 지금까지의 대부분의 연구가 알고리즘 위주의 교과서적 예제로 치달았기 때문이며

따라서 오늘날과 같은 고도의 전산화시대에도 실무설계자들에게 외면당하고 있는 실정이다. 앞으로 구조최적화분야의 전문가들이 실무설계문제 응용 위주의 연구개발에 주력함으로써 이러한 문제는 쉽게 극복될 것이며, 실무설계자들도 최적설계가 무엇인지 제대로 알지도 못하면서 외면만 하고 매도만 할 것이 아니라, 오늘날 멀티미디어 초고성능 PC시대에 막대한 정보 및 자료의 처리능력을 갖춘 차세대 OS체계하에서 고도의CAE/CAD Expert시스템이 실용화되려면 최적설계는 재래적인 설계방법을 대체하는 시스템내의 핵심설계 코드가 되지 않을 수 없다는 점을 인식해야 할 것이다. 그리고 최적설계는 현재 뿐만아니라 인공지능형, 사고형 차세대 컴퓨터 시대에 적합한 현대적인 구조설계법이 될 것임을 확신하는 바이다.

참 고 문 헌

1. Cohn, M. Z. and Dinovitzer, A. S., "Application of Structural Optimization", *J. of Structural Engineering*, Vol. 120, No. 2, 1994, pp.617~631
2. 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
3. Frangopol, D. M., Proceedings of the International Workshop on Optimal Performance of Civil Infrastructure Systems, 1997
4. Haftka, R. T., Gürdal, Z., *Elements of Structural Optimization*, 1992, pp.242~243
5. Vanderplants, G. N., "Structural Optimization Past, Presen, and Future", *AIAA Journal*, Vol. 20, No. 7, 1982, pp.992~1000
6. Vanderplants, G. N., "Structural Design Optimization Status and Direction", *Journal of Aircraft*, Vol. 36, No. 1, 1999, pp.11~20
7. 조효남, "강상자형교의 최적설계 프로그램(CAOD-sb)개발" 최종 보고서, 2000 