

구조설계에서 수치최적화 기법 및 연구방향

한 상 훈*

1. 서 론

최적화(optimization)의 개념은 본질적으로 보다 나은 삶을 위한 인간의 욕망 뿐만 아니라 모든 자연현상과도 연결되어 있다. 아마도 구조최적화에 관한 최초의 해석적 연구는 1869년 Maxwell의 연구이었으며, 1904년에 잘 알려진 Michell의 트러스구조의 연구로 이어졌다. 그들은 중량에 대한 이론적인 하한치를 제공했으며 매우 이상적인 내용이었지만 구조 최적화문제와 구조설계과정에서 고려될 수 있는 많은 식견을 제공하였다.

1950년대 말에는 구조설계에 중대한 발전을 위한 여러가지 이상적인 방법들이 있었다. 우주개발의 경쟁이 순조롭게 진행되면서 경량 구조물의 필요성이 강하게 대두되었고 새로운 설계기법을 개발하기 위한 필요한 연구자금이 제공되었다. 디지털 컴퓨터가 사용되었으며 증가하는 복합구조물의 해석을 위한 해석도구로서 유한요소법이 제공되었다. 1960년 Schmit의 획기적인 논문은 컴퓨터에 근거를 둔 설계로서 구조설계의 획을 긋는 연구의 시작이었다. 그의 연구는 두가지 면에서 특별한 중요성을 갖는다. 첫째 최소중량설계가 전응력개념이 아닐 수도 있다는 것이다. 이 결과는 직관적이지 않았으며, 그 당시 일반적으로 통용되어온 동시 파괴모드에 따른 접근방법으로부터 이탈되는 출발이었다. 둘째로는 비선형 계획기법을

이용하고 컴퓨터를 통해서 최적해를 얻을 수 있는 수단을 제공하였다.

1960년대에는 축차무제약최소화기법(sequential unconstrained minimization techniques)이 주로 사용되었다. 이 기법들은 잘 개발된 무제약최소화알고리즘을 이용하였고, 임계 혹은 위배되는 제약조건식에 적절한 형태의 벌칙(penalty)을 가한 제약조건식을 고려하였다. 또 축차선형계획법(sequential linear programming methods)이 대중화되었는데, 이 방법은 우선 목적함수와 제약조건식을 선형화하고 잘 알려진 선형계획기법(Linear Programming Methods)을 이용하여 근사화된 문제의 해를 구하였다.

1970년대에는 Feasible Directions, SUMT를 개선한 Augmented Lagrange Multiplier Method 그리고 Reduced gradient method 등과 같은 방법들이 최적화과정의 효율성 및 신뢰성을 증진시켰고, 전반적으로 비선형 제약최적화문제를 위한 수학적계획기법의 분야가 발전되었다.

1980년대에 일반적인 최적화알고리즘들이 계속 발전되었다. 아마 현재 보편적으로 사용되고 있는 알고리즘은 Lgrangian함수를 2차형 함수로 근사화시키고 제약조건식은 선형함수로 근사화시키되 1차 민감도 정보만을 이용하는 축차이차형계획법(Sequential Quadratic Programming)일 것이다. 또한 쌍대이론(duality theory)이 비선형제약최적화에 중요한 도구가 되었고, SLP, FDM, SUMT와 같은 초기방법들이 일반적인 비선형 제

* 정희원, 충북대학교 공과대학 토목공학과 부교수

약최적화문제들에 많은 알고리즘들이 유용하도록 계속발전되었으며, 이 과정은 앞으로도 계속될 것이다.

그동안 비선형계획방법들이 발전한 것처럼 CONMIN, NEWSUMT, NEWSUMT A, GRG2, OPT, OPDES, BYU, IDESIGN, ADS, DOT와 같은 많은 최적화 소프트웨어가 실제 사용자들이 용이하게 사용할 수 있도록 개발되었다.

2. 최적화를 위한 기본 구성요소

최근에 구조최적화는 많은 발전을 하여왔고 오늘날 설계를 위한 실제도구로서 간주되고 있다. 이것은 최적화알고리즘, 정식화된 근사화기법들 그리고 유한 요소해석의 동시적인 발전의 결과로서 이루어진 것이며 또한 컴퓨터의 초고속, 대용량이 극적인 발전을 가능케 하였던 것이다.

구조최적화문제의 기본구성요소로서는 구조해석, 민감도정보 그리고 최적화를 들 수 있다.

본 기사에서는 구조최적화를 위한 유한요소 해석 및 민감도 정보의 이용 방법 그리고 앞으로의 최적화 연구방향에 대해서만 다루어 보고자 한다.

2.1 유한요소 해석

유한요소 해석방법의 가장 일반적인 형태는 변위법(displacement method)이며, 이것은 먼저 변위 u 를 계산하고 전체 시스템방정식을 해석하는 것이다.

$$K\bar{u} + C\dot{\bar{u}} + M\ddot{\bar{u}} = F(t)$$

여기서 \bar{u} 는 시간의 함수로 가정한다문제의 성격에 따라 이 일반적인 형태는 부분적으로 더해질 수도 있고, 제거될 수도 있다. 예를 들어 선형적탄성해석인 경우 윗식은 다음과 같은 형태로 축소된다.

$$K\bar{u} = P$$

최적화기법과 비교해서 유한요소해석법은 거의 유일하며 변위법은 오늘날 널리 쓰이는 방법이다.

응력법(force method)은 통상 저차의 부정정 트러스와 같은 구조물설계에는 유용하지만 실제

응용면, 즉 연립방정식의 비상사행렬과 전체행렬식의 해가 요구 되기 때문에 일반화되지 못하고 있다. 반면 변위법은 sparse, banded symmetric 매트릭스를 이용하여 일련의 식의 해를 구하게 되며 이 형태는 컴퓨터 이용에 적합하게 된다.

이 기본적인 식은 이제껏 잘 이해되어져 왔기 때문에 몇가지 주목할 만한 점을 제외한다면 더 이상의 논의는 필요없을 것이며, 현재의 구조최적화에서는 설계알고리즘을 개발하기 위한 기본도구로써 유한요소법의 사용이 필수적인 것으로 되고 있다.

2.2 민감도 해석

구조최적화분야에서 민감도해석은 독립설계변수에 대한 구조응답들(응력, 변위 등)의 변화율을 해석하는 것을 의미한다. 민감도 정보는 최적화를 사용하든 사용하지 않던간에 설계를 결정하는데 매우 중요하다. 현재 대부분의 최적화알고리즘은 설계과정상 효율성을 증진시키기 위해 민감도 정보를 요구하고 있다.

아마도 근대에 이루어진 중요한 발전은 수학적 최적문제로 형성한 정식적인 최적화문제를 풀이기 위한 새로운 알고리즘 개발이 아니고 구조설계와 관계된 고유의 수학적문제를 형성하는 것이다. 그래서 많은 연구자들이 많은 노력을 들여 왔다. 여기서는 이러한 근사화를 개선하기 위해 유한요소해석과 관련된 두가지 접근방법에 대한 논의로 국한하였다.

2.2.1 민감도 정보를 이용하는 방법

이 방법은 설계변수에 대한 응답성분들의 민감도정보를 제공하기 위하여 유한요소해석 프로그램을 수정하는 것이다. 이것이 이루어진다면 다양한 근사화기법들이 유용하게 되고, 이 민감도정보는 효율성을 증진시키기 위해 최적설계과정에서 직접적으로 사용되어질 수 있다.

이 방법의 기본적인 프로그램 흐름은 다음과 같다.

① 유한요소해석을 이용, 초기 설계치에 대한 구조해석을 수행한다.

② 모든 제약조건식의 값을 계산하고 중요도에 따라 순서를 준다. 설계주기 동안에는 더 낮은 설

계를 위해 임계제약조건식만을 이용한다.

③ 유지된 일련의 제약조건식의 경사를 계산하기 위해 구조해석을 다시 수행한다.

④ 이러한 선형근사화를 이용하여 일반적인 목적의 최적화코드에 의해 풀이될 수 있도록 최적화문제를 생성하고 그 해를 구한다. 이 근사화된 최적화동안에 근사화의 신뢰성을 확실하게 하기 위해 이동한계(move limit)가 설계변수들에 포함된다.

⑤ 구조해석 데이터를 개선하고, 제안된 설계의 질을 평가하기 위해 구조해석 프로그램을 다시 수행한다. 만일 해가 받아들일 수 있는 최적해라면 종료되고 아니면, ② 단계로 돌아가 반복된다.

이 방법은 큰 문제에 있어서 설계변수의 선택에 대한 제한을 받고 설계과정에 설계자의 판단과 경험이 직접적으로 첨가되는 것이 제약을 받게 된다. 그러나 상대적인 보편성의 결점에도 불구하고 이 방법은 효율성면에서 또한 많은 수의 설계변수를 다룰 수 있다는 능력면에서 매우 매력적인 방법이다.

기술적인 관점에서 볼 때 구조해석과 최적화는 매우 밀접하게 연결되어 있고 일반적인 설계문제들의 대부분이 유한요소 프로그램을 포함하고 있다. 그러나 해석의 능력면에서는 단면치수에 관한 변수만을 포함시키고 있기 때문에 앞으로 형상변수까지도 포함시키는 연구로 확장되어야 할 것이다. 그래서 이러한 코드가 많은 범위의 문제들에 대해 강력하고 효율적인 설계도구로 제공되어야 할 것이다.

2.2.2 민감도해석을 사용하지 않은 방법

이 방법은 해석적인 민감도 정보를 이용하지 않고 기존의 유한요소해석 코드와 최적화코드를 직접 연결하므로써 여러가지 매력적인 잇점을 주는 방법이다.

첫째로 양쪽 코드의 수정이 거의 필요없고, 있더라도 신속하게 수정될 수 있다는 점이다. 둘째 최근에 최적화에 대한 기술상황이 극적으로 진전되었기 때문에 충분한 효율성을 갖게 되었다. 마지막으로 아마도 가장 중요한 것으로서 설계 변수와 목적함수 그리고 제약조건식 선택에 많은 융통성을 제공한다는 점이다.

또한 이 방법을 이용하게 되면 최적화프로그램에서 필요한 모든 민감도 정보가 유한차분법에 의해 간단하게 계산될 수 있고 근사화된 최적화문제를 생성하기 위하여 통계적 혹은 curve fitting법을 적용할 수 있게 된다.

그러나 경사(gradient)계산이 명목상 설계를 위한 구조해석에 덧붙여서 설계 변수의 수와 똑같은 수의 구조해석이 필요하기 때문에 경비가 많이 소요될 수 있다. 만일 해석모델이 수천개의 자유도를 갖는 모델이거나 비선형해석을 요하는 경우에는 아마도 문제가 될 것이다.

3. 앞으로의 연구방향

모든 경우에 대한 최적화에서 가장 좋은 접근방법은 존재하지 않는다는 것이 명백하다. 유한요소 코드에 의해 생성된 민감도 정보를 이용하는 것이 보다 높은 효율성을 제공하지만 설계변수, 목적함수 및 제약조건식 선택에 제한을 받게 되고, 그러한 민감도 정보를 사용하지 않은 경우, 요구되는 고도의 보편성을 갖게 되지만 효율성에 관련된 면에서는 손실이 있게 된다. 이러한 점에서 볼 때 상기 두 접근방법의 적절한 조합을 통해서 가장 좋은 최적화기법이 제공될 수 있다는 것을 알 수 있다. 현재 조합된 접근방법에 대한 연구가 거의 없는 실정이기 때문에 이 분야에 대한 연구가 요구된다. 또한 점점 더 분명해지는 연구의 필요성으로서 "설계모델"의 생성을 편리하게 하기 위한 방법이나 소프트웨어를 개발하는 것이 되겠다. 많고도 다양한 소프트웨어가 자동적으로 그리고 상호작용적으로 해석 모델을 생성하는 데 유용하게 되고 있다. 그러나 설계문제를 정의하는 수학적 모델의 완전한 가능성에 도달하기 위한 전자동화설계와는 차이가 있기 때문에 실제 설계실무자에 의해 쉽게 사용될 수 있도록 하는 많은 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 학술기사의 목적은 구조설계를 위한 강력하고도 유용한 도구로서의 최적화기법을 소개하는

것이고 현재의 기술현황을 보여 주는 것이다. 최적화의 발전은 유한요소법과 컴퓨터기법 그리고 최적화알고리즘 및 소프트웨어의 동시적인 발전으로부터 이루어진다. 이렇게 되므로써 사용자까지 최적화 이론가가 될 필요성은 없어질 것이고 모든 공학자는 설계의 질과 생산성을 증진시키기 위해 최적화(optimization)를 훌륭한 설계기술로서 이용할 수가 있게 될 것이다.

최적화를 위한 두가지 접근방법이 제안되었다. 하나는 최적화 과정에서 직접적으로 사용되는 민감도 정보를 제공하기 위해 유한요소해석 프로그램을 수정하는 것이고 다른 하나는 설계변수와 구조 응답들로 구성된 목적함수, 제약조건식으로 된 최적화문제에 최적화기법을 연결하는 것이다. 가장 좋은 방법은 이 두 접근방법의 조합된 방법인 것 같지만 서로 모순된 것 같기 때문에 분명하지 않다. 따라서 이 부분은 앞으로 주목을 받을 충분한 가치가 있는 내용이 될 것이다.

원료 부족에 대한 인식의 증대와 부존에너지자원의 빠른 고갈은 경량이면서 효율적이고 경제적인 구조물에 대한 욕구를 증폭 시켰다. 따라서 오늘날의 유용하고, 거대한 계산능력을 고려한다면, 최적화기법을 사용하고자 하는 동기는 충분한 것이고 숙련된 공학설계자들에 의해 응용되므로써 최적화는 경쟁적인 우위를 제공하는 강력한 도구가 될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

1. Schmit, L. A., "Structural Design by

Systemmatic Synthesis", Proc. 2nd Conference o Electronic Coputation, ASCE, New York, 1960, pp.105-122

2. Vanderplaats, G. N., "Structural Optimization-Past, Present and Future," AIA Journal, Vol. 20, No. 7, July 1982, pp.992-1000

3. Vanderplaats, G. N., "CONMIN-A FORTRAN Program for Constrained Function Minimization:User's Manual", NASA TM X-62, 282, August, 1973.

4. Lasdon, L., "GRG2 User's Manual", University of Texas, Austin, Texas.

5) OPT Library User's Manuals, K. Ragsdall, University of Missouri, Columbia, Missouri.

6) OPTDES.BYU User's Manual, Design Optimization Laboratory, Brigham Young University, Provo, Utah.

7) Arora, J. S., Thanedar, P. B. and Tseng, C. H., " User's Manual for Program IDESIGN, Version 3.4, Technical Report No. ODL-85-10.

8) Vanderplaats, G. N., Sugimoto, H. and Sprague, C. M., "ADS-1: A New General-Purpose Optimization Program", AIAA Journal, Vol. 22, No. 10, Oct. 1984.

9) Schmit, L. A and Miura, H., "Approximation Concepts for Effient Structural Synthesis", NASA CR-2552, 1975.

10) Vanderplaats, G. N. and Salajegheh, E., "A New Approximation Method for Strees Constraints in Structural Synthesis", Proceedings AIAA / ASME / ASCE / AHS 28th Structures, Structural Dynamics and Material Conference, Monterey, California, 1987.