

CAE와 최적화의 결합 사례 - Genesis의 최적화 기능 소개

A Case Study Combination of CAE and Optimization
Optimization Technique of Genesis



서 정 범*



이 장 현**

* ATES(주) MBU사업부 CAE Consultant
** 인하대학교 선박해양공학과 조교수

본 기사에서는 CAE와 최적화 기법을 통합하는 기능을 제공하는 Genesis를 살펴보고 CAE/최적화의 통합 환경에 대해서 소개하고자 한다.

최적설계 기법과 발전 과정

제품 개발에 있어서 설계는 특정한 요구 조건을 만족하도록 제품의 속성과 형상을 정의하는 과정이다. 최적화는 제품을 정의하는 가장 중요한 설계 변수를 변화시키면서 최적의 설계 변수를 찾아가는 과정이다. 이 과정에서 최적화는 최소 중량, 최대 강성, 그리고 최소 비용과 같은 목적을 대상으로 삼지만, 제품에 만족시켜야 할 제약 조건 (또는 설계 요구 조건)을 동시에 만족시켜야만 한다. 이는 마치 아래의 그림에서 표현하는 것처럼 최고점을 주어진 범위에서 가장 빨리 찾아가야 하는 것과 같다.

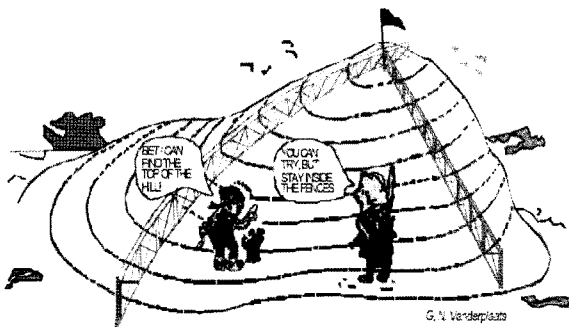


그림 1 최적화와 제약 조건, 그리고 목적

최적화는 제품 개발뿐만 아니라 시스템 설계, 경제학의 의사 결정, 경영학 등 다양한 분야에서 활용하는 기법이다. 다수의 해가 존재하는 문제에 있어서 제약 조건과 목적 함수를 만족하는 최소 또는 최대 효과를 갖는 해를 찾아가는 과정이다. 따라서 최적화 문제는 목적함수, 제약 조건과 최적화 변수를 수학적인 모델로 표현할 수 있다. 주어진 목적함수를 제약조건을 만족시키는 최적 변수를 찾아가는 것이 최적화 기법의 기본과정이다.

최적화 기법은 1948년 SIMPLEX 방법을 시초로 다분야 통합(MDO: Multidisciplinary Optimization) 등 최신의 기법으로 발전하였다. 수학적/해석적인 최적화 이론은 아래와 같은 순서로 발전 과정을 요약할 수 있다.

For Design variable $X_i, i=1, N$

Objective Function
Minimize $F(X)$

Subject to

$g_j(X) \leq 0 \quad i=1, M$	Inequality Constraints
$h_k(X) = 0 \quad k=1, L$	Equality Constraints
$X_i^{L_i} \leq X_i \leq X_i^{U_i} \quad i=1, N$	Side Constraints

- 1940년대: SIMPLEX Method for Linear Programming
- 1950년대: Various Random Methods, Gradient Based Methods
- 1960년대: Sequential Unconstrained Minimization Techniques, Sequential Linear Programming, Feasible Directions Methods
- 1970년대: Enhanced Feasible Directions Methods, Multiplier Methods, Reduced Gradient Methods
- 1980년대: Variable Metric Methods, Sequential Quadratic Programming Methods
- 1990년대: Genetic Algorithms, Simulated Annealing, New Interest in Sequential Unconstrained Minimization Techniques
- 2000년대: Particle Swarming, Advanced Sequential Unconstrained Minimization Techniques

특히, 항공기, 선박, 자동차등의 구조물 설계에 있어서 최적화된 구조 강도설계는 매우 중요하다. 구조적 안정성은 제품의 경제성뿐만 아니라, 파손 또는 파괴가 가져올 손실과 직접 연관이 있기 때문이다. 그러나 안전성을 확보하기 위해서 강도가 높은 구조 재료나 비용을 무한정 제품에 투입하기는 어렵다. 또한 제품 경쟁력(품질 및 성능, 원가 및 유지 보수 비용) 향상이라는 제조 산업의 과제는 항공기나 자동차, 선박에서는 구조 재료의 안정성 확보와 경량화가 중요한 이슈가 되고 있다. 이를 위해서는 안전성 및 제작비용에 관한 제약조건을 만족하면서 설계목적을 달성할 수 있는 구조 최적 설계가 필요하다. 재료비를 줄이는 것 못지 않게 설계 및 생산시간을 단축하는 일도 중요하다. 최적설계를 도입하기 전에 개발 과정은 해석을 마친 몇 개의 시작품을 만들어 시험 및 평가를 통하여 다음 단계로 진행되므로 제품 개발 기간 단축에 어려움이 있었다. 그러나 최적 설계 기법을 도입하면 제품의 시험 및 평가가 여러 과정에 걸쳐 동시에 이루어지므로 시작품의 제작 및 시험에 소요되는 시간이 단축될 수 있다.

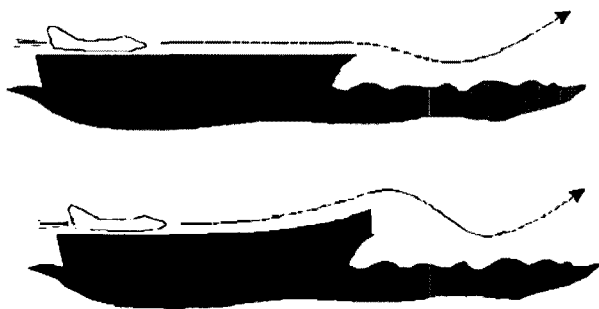


그림 2 최적화 과정을 거쳐 설계 변경된 항공모함 갑판의 형상 사례

대부분의 구조물은 수백 개 이상의 설계 변수에 의하여 속성이 결정되는 매우 복잡한 시스템이다. 제품 설계 업무(CAD)와 해석(CAE) 업무는 개발 중인 단위 부품뿐만 아니라 제품 전체 시스템에 동시에 적용되어야 한다. 그러나 구조물의 구조 강도 설계에서 지향하는 목적함수는 다양한 물리적 현상을 포함하고 있다. 예를 들어 3차원 탄소성 변형, 점성 유체의 유동, 보와 판이 결합된 비선형 복합 구조, 충격을 받는 탄소성 변형 등의 물리적 현상을 포함하는 모델이 목적함수가 될 수 있다. 따라서 목적함수의 해를 구하는 과정이 최적화 기법과 결합되지 않으면 최적해를 구하는 것은 불가능하다. 최근들어 물리 기반 모델링(PBM: Physics Based Modeling) 과 시뮬레이션 (CAE, 유한요소해석, 유한차분법 등) 기법의 정확성과 효율성이 매우 향상되었다. 따라서 최적화 기법과 CAE와 같은 시뮬레이션 기법의 통합을 통해 다양한 제품 설계의 목적을 만족시킬 수 있다. 즉, 엔지니어가 사용하고 있는 개개의 해석프로그램을 하나의 모듈로 도구화시키고 여러 종류의 응용프로그램을 모두 연계시켜 엔지니어링 프로세스를 최적화할 수 있는 도구를 사용해야만 최적 설계가 가능하다.

Genesis 기능

구성 요소의 특성

비선형 최적화 기법과 유한요소해석을 통합한 연구는 1960년대의 Schmit¹⁾ 등의 연구로부터 시작되었다. 1970년 대에 Schmit and Farshi²⁾, Schmit and Miura³⁾ 가 구조 최적화 문제를 "Approximation" 개념을 이용하여 발전시켰다. 이 개념은 1980년대에 많은 유한요소해석 프로그램이 최적화 기법을 결합하였다. 이후 하중 근사법(Force approximation method)⁴⁾ 과 Rayleigh quotient 방법⁵⁾ 등이 사용되었다.

Genesis도 유한요소해석과 최적화기능이 통합된 구조설계 및 최적화 프로그램이다. 유한요소해석 프로그램은 Linear Static, Inertia Relief, Normal Modes, Frequency Response, Heat Transfer, Buckling등의 해석기능을 가지고 있다. 그리고 최적화 대상으로는 Topology, Sizing, Shape, Topometry, Topography등의 최적화 기능을 함께 가지고 있다. Genesis의 기본적인 구성은 그림 3에 보인 구성 요소로 이루어져 있다.

Control module은 프로그램 전체를 통합하며, 입력 정보를 처리한다. Genesis의 입력데이터는 MSC.NASTRAN과 유사하며 대부분의 정보가 상호 호환된다. FEM 해석 모듈이 해석을 수행하고, 설계 변수에 의한 응답을 구한다. 그 후에

설계 제약 조건을 정렬한 후 민감도 해석(Sensitivity analysis)을 수행한다. FEM Sensitivity 모듈은 설계 변수에 대한 Gradients를 계산한 후에 근사화 문제 (Approximate Problem)로 치환하여 최적화를 수행한다. 최적화는 아래와 같은 방법을 적용하고 있다.

- ✓ Modified Method of Feasible Directions
- ✓ Sequential Linear Programming
- ✓ Sequential Quadratic Programming
- ✓ Sequential Unconstrained Minimization Techniques (SUMT)

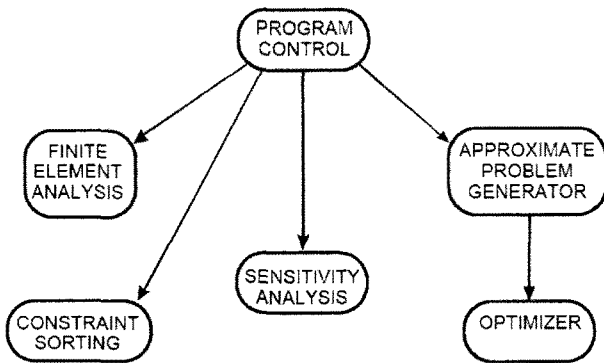


그림 3 Genesis의 구성 요소

Approximation Concepts(근사화 개념)

근사화 개념은 최적화 문제를 아래와 같이 목적 함수와 제약 조건을 선형 근사화(Linear approximation) 하는 방법이다.

$$\hat{F}(\mathbf{X}) = F(\mathbf{X}^0) + \nabla F(\mathbf{X}^0) \cdot \{\mathbf{X} - \mathbf{X}^0\}$$

$$\hat{g}_j(\mathbf{X}) = g_j(\mathbf{X}^0) + \nabla g_j(\mathbf{X}^0) \cdot (\mathbf{X} - \mathbf{X}^0) \quad j = 1, M$$

그림 4와 같이 DOT와 BIGDOT(최적화 모듈)를 이용하여 설계변수가 10만개 이상의 복잡한 대형 최적화 문제일 지라도 Approximation concept을 이용하면 통상 약 10번 정도의 유한요소해석만으로 최적화된 결과를 얻을 수 있다.

Topology Optimization(위상최적화)

Topology Optimization은 제품 개발 초기 단계에서 디자인의 초안을 결정할 때 사용된다. 이 방법은 설계영역 안에 있는 재료를 최적의 분포를 갖도록 해주는 방법으로 재료가

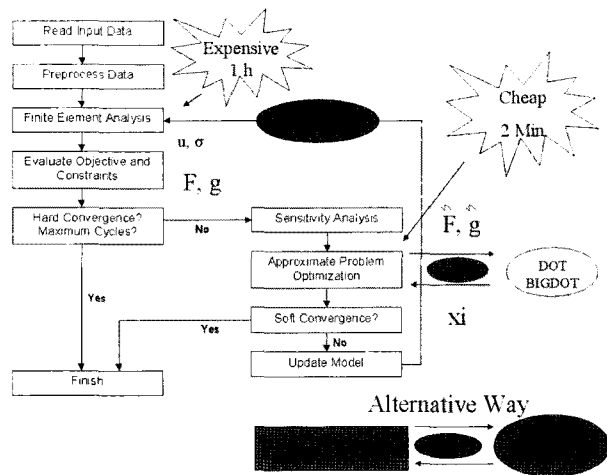


그림 4 Genesis Process Chart

필요하지 않는 부분을 빈 공간으로 만들어 필요하지 않은 요소들을 제거시킨다. 일반적으로 shape 최적화, sizing 최적화는 달리 초기 형상이 필요 없는 점이 topology 최적화의 특징이다. 좋은 강성을 갖거나 중량이 적은 구조물을 설계할 때 많이 사용한다. Topology Optimization이 끝난 후에는 Shape/Size Optimization를 통하여 세부적인 취약점등을 보완하여야 한다.

그림 5와 같이 Topology Optimization를 통하여 디자인의 초안을 결정한다. 그 다음 최적화한 결과를 토대로 새로운 유한요소모델을 만든다. 그리고 마지막으로 유한요소모델의 절점의 위치를 이동하여 형상을 최적화하는 Shape Optimization 과정을 거쳐 최종적인 디자인을 얻게 된다.

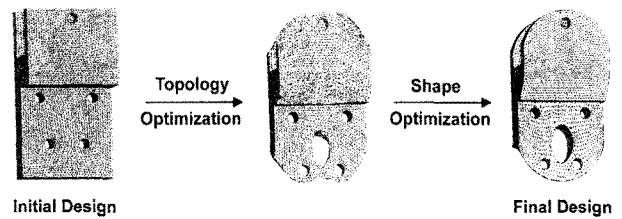


그림 5 Design Process

그림6은 Hinge를 Topology Optimization를 이용하여 최적화한 결과를 Shape Optimization으로 최종형상까지 최적화한 과정을 보여주고 있다. 초기모델에서 하중조건과 구속조건을 설정해주면 Topology Optimization를 통하여 목적함수와 구속조건을 만족시키는 형상을 얻을 수 있게 된다.

Topology Optimization은 실제 제작을 고려하지 않기 때문에 제작이 불가능한 경우도 있다. 이러한 제작상의 문제를 미연에 방지하고자 다양한 제작상의 구속조건이나 대칭 형상

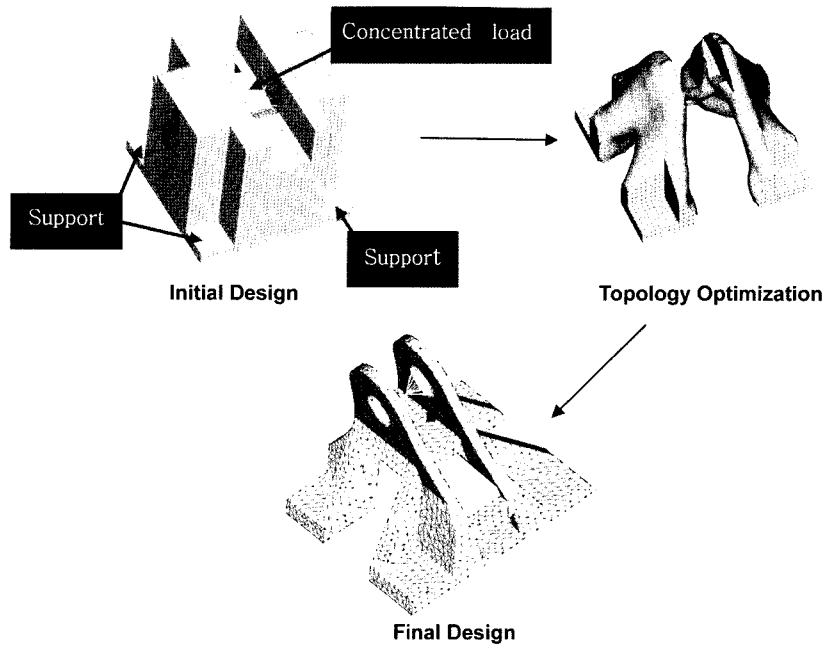


그림 6 Hinge Design 예제

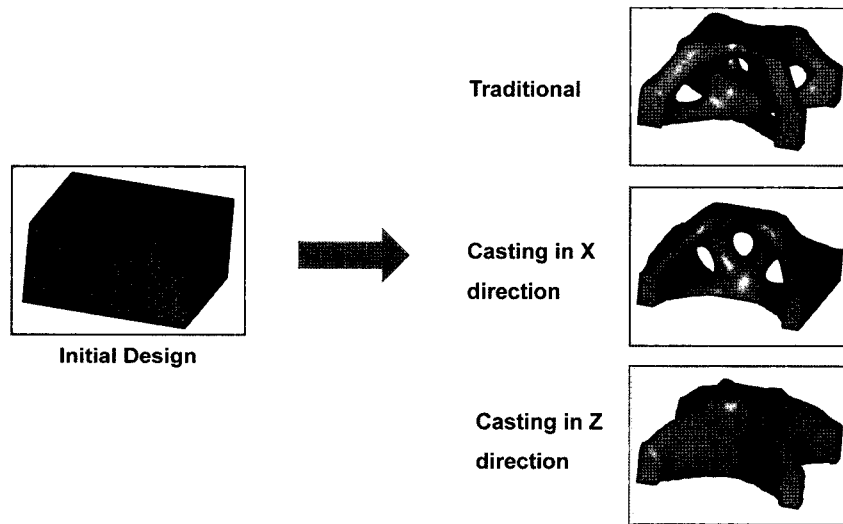


그림 7 Topology Optimization with Manufacturing Constraints

에 따른 구속조건을 최적화 과정에 적용할 수 있다. 그림7은 제작상의 구속조건에 따라 Topology Optimization 결과가 어떻게 바뀌는지 보여주고 있다.

CAE와 Optimization 예제

Sizing Optimization 예제

그림 8은 8개의 두께를 가진 Side Mirror 이며, 목적 함수는 1차 고유 진동수를 최대 값으로 설계하는 것이다. 제약 조건은 최초 설계시의 중량을 초과하지 않는 것이다.

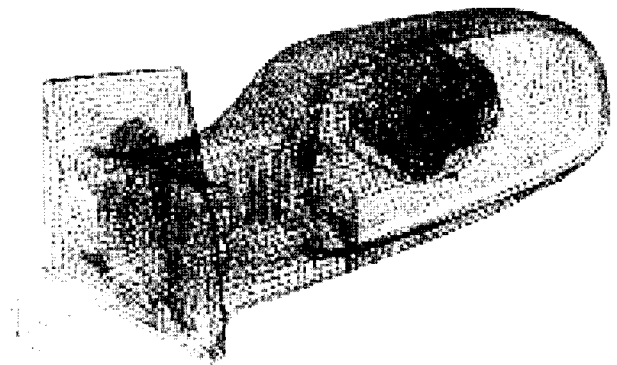


그림 8 Sizing 최적화 대상 문제

Shape Optimization 예제

그림 9는 설계 대상의 형상으로 중량 최소화가 목적 함수이다. 허용 응력의 최대값, 고유 진동수의 허용 최대값을 만족하여야만 한다. 설계 변수는 Stiffener의 치수와 Panel, Stiffener의 두께이다. 약 10회 이내의 iteration을 통해 중량 최소화 설계를 실시할 수 있다.

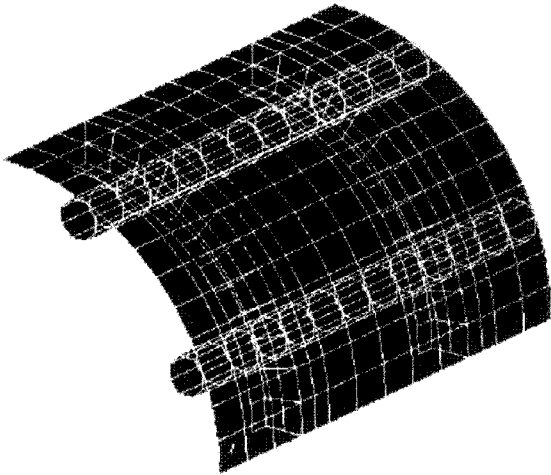
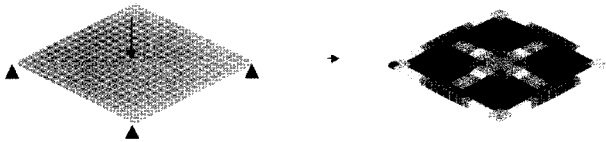


그림 9 Sizing 및 Shape 최적화 예제

Topometry Optimization 예제

다음의 그림 10은 topometry 최적화 예제로 Strain Energy가 최대가 되는 각 요소의 두께를 찾는 예제이다. 제약 조건은 주어진 최대 중량 한계 값이다.



맺음말

본 기사에는 Vanderplaats R&D사의 최적화 솔루션인 Genesis의 기능과 개념을 소개함으로써 CAE와 최적화의 통합 기법의 특성을 보였다.

Acknowledgement

본 기사는 ATES(주)와 VR&D(<http://www.vrand.com>)의 자료와 Vanderplaats⁸⁾의 내용을 바탕으로 작성하였습니다.

VR&D사는 1984년 설립되었으며, 최적화 솔루션 개발과 유한요소해석 프로그램 개발, 그리고 최적 설계 분야의 기술 자문을 전문으로 수행하는 회사이며, 한국의 파트너로서 (주)ATES (<http://www.ates.co.kr>)가 있습니다.

참고 문헌

1. Schmit, L. A., "Structural Design by Systematic Synthesis," Proc. 2nd Conference on Electronic Computation, American Society of Civil Engineers, New York, 1960, pp. 105-132.
2. Schmit, L. A. and Farshi, B., "Some Approximations Concepts for Structural Synthesis," AIAA Journal, Vol. 12, May 1974, pp. 692-699.
3. Schmit, L. A. and Miura, H., "Approximation Concepts for Efficient Structural Synthesis," NASA CR-2552, 1976.
4. Vanderplaats, G. N. and Salajegheh, E., "A New Approximation Method for Stress Constraints in Structural Synthesis," AIAA Journal, Vol. 27, No. 3, March 1989, pp. 352-358.
5. Canfield, R. A., "High-Quality Approximation of Eigenvalues in Structural Optimization," AIAA Journal, Vol. 28, No. 6, June 1990, pp. 1116-1122.
6. NASTRAN User's Manual, NASA SP-222(08), Volume 1, National Aeronautics & Space Administration, June 1986.
7. DOT User's Manual, VR&D, 1767 South Eight Street, Suite 100, Colorado Springs, CO 80906.
8. Vanderplaats, G. N., Numerical Optimization Techniques for Engineering Design: with Applications, 3rd Ed., Vanderplaats Research & Development, 1999. 