인터넷 기반 근사 형상최적설계의 분산처리

Distributed Process of Approximate Shape Optimization Based on the Internet

임 오 강† 최 은 호* 김 우 현**
Lim, O-Kaung Choi, Eun-Ho Kim, Woo-Hyun
(논문접수일 : 2007년 12월 10일 ; 심사종료일 : 2008년 6월 4일)

요 지

대형 구조물에 대한 최적설계를 고려할 때 구조해석에 많은 시간과 노력이 소비된다. 한대의 개인용 컴퓨터에 의한 대형 구조물의 구조해석은 대용량의 기억장치와 많은 계산시간이 요구되므로 반복적 해석이 필요한 대형 구조물의 설계에 효율적으로 이용되기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제의 대안으로 인터넷이 연결된 다수의 개인용 컴퓨터들로 고성능 병렬연산시스템을 구성하여 구조해석을 분산 처리하여 계산시간을 절감하였다. 아울러 반응표면의 근사를 위해 요구되는 구조해석을 상용 구조해석 어플리케이션으로 해결할 수 있다면 상용성이 확보되어 일반 구조물에 대하여도 반응표면법을 이용한 최적설계를 수행할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 분산처리, 형상최적설계, 순차 근사최적화

Abstract

Optimum design for general or complex structures are required to the need of many numbers of structural analyses. However, current computational environment with single processor is not capable of generating a high-level efficiency in structural analysis and design process for complex structures. In this paper, a virtual parallel computing system communicated by an internet of personal computers and workstation is constructed. In addition, a routine executing Pro/E, ANSYS and optimization algorithm automatically are adopted in the distributed process technique of sequential approximate optimization for the purpose of enhancing the flexibility of application to general structures. By employing the distributed processing technique during structural analysis using commercial application, total calculation time could be reduced, which will enhance the applicability of the proposed technique to the general complex structures.

Keywords : *distributed process, shape optimization, sequential approximate optimization*

1. 서 론

대형 구조물의 3차원 구조최적설계, 다분야통합최적설계(Multidisciplinary design optimization)등과 같은 많은 계산시간과 대용량의 기억장치를 필요로 하는 최적설계는 이론적으로 상당히 발전되었지만, 현실적으로는 하드웨어의 한계성과 소프트웨어간의 이식성으로 인하여 효율적 해석 및 설계가 어렵다.

전산 공학 분야의 연구 결과 및 발달 중 공학 분야에 큰 영향을 미치고 있는 것 중의 하나가 여러 개의 프로세서 또는 컴퓨터를 동일한 설계에 동시에 효율적으로 이용할 수 있는 분산 컴퓨팅 시스템의 개발 및 보급이다.

1980년대 후반부터 구조공학 분야에서는 한 개의 프로세서를 이용한 기존의 중앙집중 방식이 적절하게 작업을 분배하여 협동하는 시스템 모델인 분산 컴퓨팅 시스템으로 전환 개발되고 있다(박효선 등, 1999). 대형 고성능 전산기를 사용하는 중앙집중 방식의 경우 고가의 장비가 필요하고 대형 전산기의 도입에 관련한 초기 비용 및 유지·관리비용이 많이 소요되며 특정한 사양으로 도입된 전산기는 다양한 사용자들의 요구에 따라 적절하게 이용되기 어렵다. 분산 컴퓨팅

† 책임저자, 정회원·부산대학교 기계공학부 교수
Tel: 051-510-2306 ; Fax: 051-582-9164
E-mail: oklim@pusan.ac.kr
* 부산대학교 기계설계공학과
** 볼보건설기계 코리아

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 10월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

시스템은 대형 고성능 전산기를 이용하지 않고 다수의 기존 개인용 컴퓨터나 워크스테이션을 이용하여 효율적으로 대상물의 최적설계를 적용할 수 있다.

분산 컴퓨팅 환경을 구성하는 대표적인 기술적 방법은 서버/클라이언트 모델이다. 서버/클라이언트를 이용한 분산처리 방식은 크게 CORBA와 JAVA를 이용한 방법과 PVM, MPI를 이용한 방법으로 나누어진다.

CORBA(Common object request broker architecture)와 JAVA는 서버/클라이언트 방식의 이기종간의 인터페이스 문제를 해결하기 위해 등장한 것으로 이기종의 분산된 환경 하에서 응용 프로그램들을 서로 통합할 수 있는 표준기술을 말한다. CORBA와 JAVA를 이용한 분산화는 운영체제에 상관없이 상호간의 데이터 전달이 가능하므로 범용성이 크다고 할 수 있으나, CORBA의 경우 지원하는 소프트웨어를 추가로 구입하여 사용자가 시스템을 구성하거나 상용화된 고가의 프로그램을 구입해야 하므로 많은 비용의 투자가 이루어져야 하는 문제가 있고, JAVA의 경우 수행 속도가 느리고 개발 모듈의 재사용이 까다롭다는 단점이 있다.

PVM(parallel virtual machine)과 MPI(message passing interface)를 이용한 분산처리는 병렬 컴퓨터에서 효율적으로 수행되는 응용프로그램을 작성하기 위한 도구이다(한국과학기술원, 2000). 그러나 PVM과 MPI는 네트워크로 연결된 다른 컴퓨터의 메모리와 CPU를 가상으로 공유하는 방법으로 상용소프트웨어를 사용하여 해석을 하려고 할 경우에는 적용이 불가능하다(최주호 등, 2000).

위의 여러 기법과는 달리 네트워크 프로그래밍기법 중 하나인 TCP/IP(Transmission control protocol/Internet protocol)에 기반 한 네트워크 인터페이스인 소켓(Socket) API(Application programming interface)를 이용하는 방법이 있는데, 이는 동일한 운영체제를 사용할 경우 최적화 코드에 기본적인 네트워크 기능을 수행할 수 있는 코드만 추가하면 문제에 따라 사용자가 필요한 부분을 수정하거나 사용자에게 입력받아서 결과를 유도해 낼 수 있으므로 CORBA, JAVA를 이용한 분산객체 프로그래밍이나 PVM, MPI를 이용한 메시지 패싱 기법보다 개발시간, 비용, 정확도면에서 더욱 효과적이라 할 수 있다.

본 연구에서는 각각 분산되어 있는 컴퓨터들을 인터넷상으로 분산 컴퓨팅을 구현하여 특별히 구축된 하드웨어를 필요로 하지 않고 주어진 자원을 최대한 활용할 수 있는 가상의 병렬연산 시스템을 구축하여 구조물에 대하여 최적설계를 적용하였다.

2. 분산처리와 상용프로그램 인터페이스

2.1 소켓 프로그래밍

다른 컴퓨터와 송·수신하는 통신 프로그램인 네트워크 프로그램은 Fig. 1과 같이 통신장비를 직접 구동하는 디바이스 드라이버형 프로그램, TCP/IP와 같이 호스트 사이의 연결관리와 패킷 단위의 데이터 송수신을 다루는 트랜스포트 계층 그리고 유닉스의 rsh(Remote shell), RPC(Remote procedure call) 프로그래밍과 같이 연결 설정, 패킷 송수신, 흐름제어 등을 직접 제어하지 않고 응용 계층 서비스 프로그램을 활용하는 응용 계층 등 크게 세 가지로 분류된다.

소켓 API는 소프트웨어로 작성된 통신 접속점이라고 할 수 있는데, Fig. 2와 같이 네트워크 응용프로그램은 IP주소와 포트(port)번호만 있으면 소켓을 통하여 인터넷으로 데이터를 송수신 하게 된다.

일반적인 서버/클라이언트의 소켓의 작동방식은 서버의 경우 소켓을 생성하고, 그 소켓에 IP주소와 포트번호를 설정한 후 클라이언트의 연결 요청을 기다리며 대기한다. 클라이언트가 연결을 시도하여 그 연결이 허용되면 새로운 소켓을 생성하여 클라이언트의 연결요청을 받아들이고 데이터 송수신이 이루어진다. 데이터의 송수신이 완료되면 소켓을 닫는다. 그러나 본 연구에서는 프로그램의 자동화를 위해 Fig. 3과 같이 서버와 클라이언트가 역할을 바꾸어 서버가 파일 전송 및 응용프로그램 실행을 위하여 클라이언트에 접속을 시도하게 하였다.

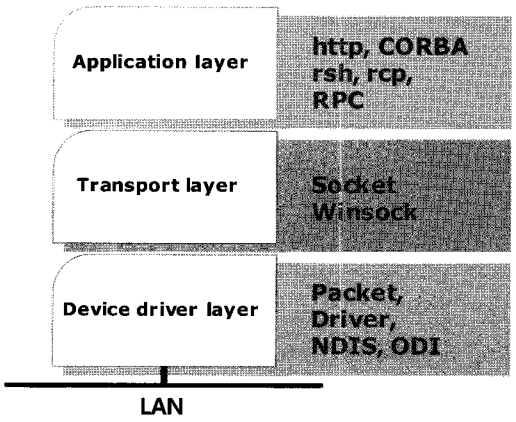

Fig. 1 Layer classification of network programming

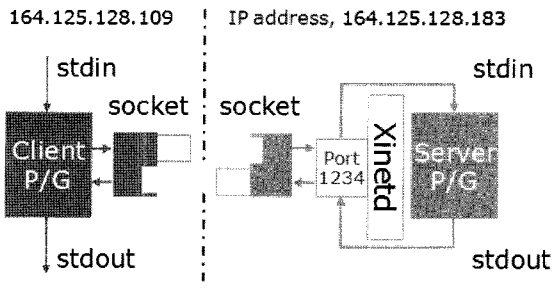

Fig. 2 Socket API

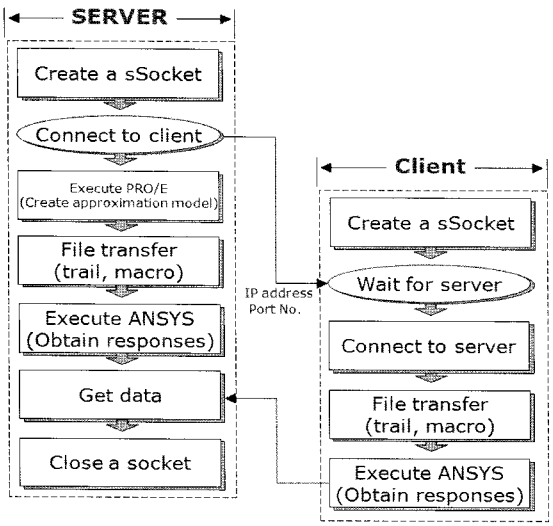

Fig. 3 Operating sequence of socket at this paper

2.2 분산처리 기법

근사 최적설계는 해석시간이 긴 정확한 해석방법(Exact analysis method)대신에 해석시간이 상대적으로 짧은 근사해석 모델로써 최적화하는 것이다. 순차 근사최적화(Sequential approximate optimization)는 이 근사해석 모델로써 최적설계를 수행하는 과정을 반복하여 설계결과를 얻는 것이다(최동훈, 2002). 순차 근사최적화의 수행에 소요되는 시간을 살펴보면 실험점 선정, 반응표면 근사와 최적화기법에 의한 최적해 도출 과정에 소요되는 시간은 구조해석에 할당되는 시간에 비해 매우 짧다. 그러므로 대형구조물에 대한 최적설계를 고려할 때 구조해석에 많은 시간과 노력이 소비되므로 소요되는 시간을 줄이기 위한 분산처리가 요구된다.

본 연구에서는 인터넷을 통하여 다른 컴퓨터에 있는 어플리케이션 프로그램과 접속을 가능케 하고, 파일 입출력 및 응용프로그램을 원격으로 실행하여 다수의 연산장치에 분리하여 처리하고, 또한 윈도우 환경 컴퓨터와 유닉스 환경의 워크스테이션을 혼합하여 활용하여 이 기종체제에 대해 분산처리가 가능하게 하여 분리된 설계공간에 효과적으로 처리하도록 하였다. 하나의 큰 해석문제를 독립적으로 실행 가능한 여러 잡(job)으로 분리, 이들을 다수의 연산장치를 써서 동시에 병렬로 처리하도록 하여 효율적 해석 및 설계가 가능하게 하였다. 또한 구조해석의 도구로 상용 어플리케이션을 이용하면서 이 과정을 반응표면법에 의한 근사 최적설계 프로그램과 자동적으로 연결하도록 하여 해석과정을 단순 • 일관화 시켜 개별적으로 일일이 실행되는 기존 프로세스에 비해 개발기간 단축과 경비 절감이 가능하다. 아울러 반응표면의 근사를 위해 요구되는 구조해석을 상용 구조해석 어플리케이션으로 해결할 수 있다면 상용성이 확보되어 일반 구조물에 대하여도 반응표면법을 이용한 최적설계를 수행할 수 있을 것이다.

최적화를 위한 전 과정을 살펴보면 다음과 같다. 우선 서버측에서는 최적설계 알고리즘과 모델러가 설치된 모체가 되는 컴퓨터로써 설계를 위한 대상물을 Pro/Engineer의 파라메트릭기법에 맞게 모델링한다. 다음은 컴퓨터에서 전체 설계영역에서의 정확도를 유지할 수 있는 근사식의 형태를 결정하고 근사식이 만들어지는 영역인 초기 순차 설계영역을 지정한다. 그리고, 분산처리에 사용될 컴퓨터 대수와 정보를 입력한다. 이 후 설계변수의 개수에 맞는 가장 적은 실험횟수를 가지는 직교배열표를 구성한다. 실험계획법의 장점 중 하나는 실험순서에 관계가 없다는 것으로 전체 실험을 분산처리할 컴퓨터의 대수로 나누어 소켓 API를 이용하여 원격지의 각 클라이언트에 실험을 전달한다. 예를 들어 설계변수 5개에 3수준 직교배열표로 실험할 경우 27번의 실험을 수행하는데 서버 1대와 클라이언트 2대, 총 3대를 사용할 경우 각각 9개의 실험을 나눠가지고, Fig. 4와 같이 서버 1대와 클라이언트 3대일 경우, 서버는 6개의 실험을 수행하고 클라이언트는 각각 7개의 실험을 수행한다. 클라이언트 측은 반응표면법에서 상태 방정식의 근사에 필요한 구조해석부분만을 해석한 후 근사식 생성에 필요한 시스템 응답량인 응력이나 변위에 대한 정보를 인터넷을 통하여 서버에 전송한다. 이때 모체가 되는 컴퓨터는 할당된 구조해석이 모두 끝났을지라도 원격 컴퓨터로 부터의 결과파일이 전송될 때까지 대기한다.

그러나 본 연구에서 구현한 분산시스템은 두 가지의 개선할 점을 가진다. 첫째는 상용 s/w를 통합함으로써 고가의 소프트웨어를 이용해야 하므로 비용측면에서 불리함이 있다. 둘째는 원격 컴퓨터의 부하가 클 경우 또는 시스템의 성능이 다른 컴퓨터보다 떨어질 경우 모체가 되는 컴퓨터가 원격 컴

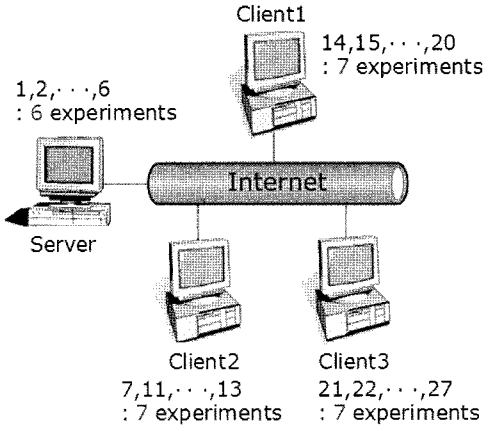

Fig. 4 Operating sequence of socket

퓨터를 대기하는 시간이 길어지기 때문에 이들에 기인하는 시간 및 효율의 손실이 적지 않다. 이에 대한 앞으로의 효율 개선이 필요할 것이라고 생각된다.

분산처리의 성능을 평가하는 분산처리의 효율, E_p는 식 (1)로부터 계산되어지는 값으로 분산처리의 정도를 나타내며 이상적인 분산처리가 구현되면 1, 즉 100%가 된다.

$$E_p = \frac{T_1}{pT_p} \tag{1}$$

여기서 T_1은 분산처리를 하지 않은 경우에 걸린 시간, T_p는 분산처리를 한 경우에 걸린 시간 그리고 P는 분산처리에 사용된 컴퓨터의 수를 의미한다(양영순 등, 1996).

2.3 상용 프로그램 인터페이스

형상 최적설계에서의 특징은 최적화 과정에서 구조물의 형상이 변하기 때문에 역학모델을 설정하는 영역과 유한요소법 등의 이산화모델의 기하학적 부분이 변수가 된다. 따라서 구조물의 영역이 설계대상이 되므로 유한요소모델이 설계변경에 따라 변하지 않으면 안된다. 그러므로 형상 최적설계의 문제를 범용적으로 해결하려면 이산화모델의 기하형상을 최적화 과정에서 자동적으로 설정할 수 있는 능력, 즉 설계경계를 적은 수의 매개변수로 표시하여 유한요소모델 등의 이산화모델의 자동생성이 가능한 자동그물망생성법(automatic mesh generation)이 최적화과정에서 포함되어야 하며, 단순한 응력해석, 감도해석 및 최적화방법만으로는 부족하고 이산화 기하모델을 자동 생성하는 기능을 첨가시키지 않으면 안되는 점이 형상 최적설계의 특징이다(송영준 등, 1999). 형상 최적화과정에서 대상물의 형상이 변경되는 설계변수를 선정하는 방법은 유한요소모델의 절점의 좌표를 직접 설계변수로 취하는 방법과 설계대상물의 형상을 스플라인 함수로 나타내어 설계변수로 선정하는 방법(Yao 등, 1989 ; 조맹효 등, 2004)등이 있다. 전자의 경우 사용하는 유한요소법에 따라 설계경계상의 응력값에 차이가 생겨 이것이 절점이동을 불안정하게 만들기 때문에 불규칙적인 형상을 얻는다. 그리고 경계의 절점 수가 많으면 설계변수의 수도 늘어나서 계산의 비용과 소요시간이 늘어난다.

그러므로 본 연구에서는 후자의 방법인 모델의 형상을 변화시키기 위해서 Pro/Engineer의 매개변수방법을 택하였다. 매개변수를 스플라인 곡선의 컨트롤 포인트를 설계변수 겸 매개변수로 선정함으로서 형상 설계에서 효과적으로 모델의 형상

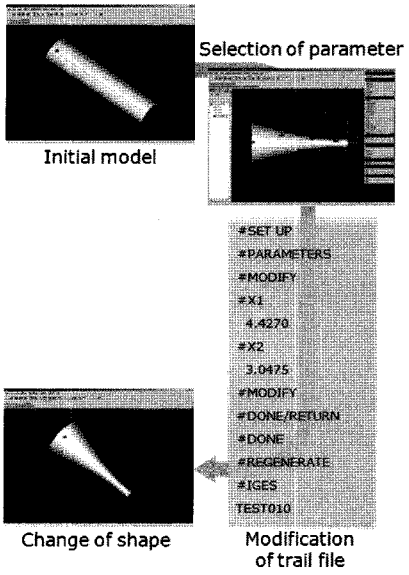

Fig. 5 Parametric design using Pro/E

을 표현하도록 한다. Pro/Engineer의 trail.txt 파일을 수정하여 근사 해석모델을 Fig. 5와 같이 효과적으로 변경할 수가 있다. 또한 변경되어진 근사 해석모델은 IGES등 중간파일 형식으로 변환시켜 ANSYS와 인터페이스 한다. ANSYS는 메크로 파일이라는 텍스트형태의 프로그래밍언어로 ANSYS 데이터베이스에 직접 접근하지 않고도 일괄처리(batch processing) 방식으로 근사 해석모델에 물성치, 자동그물망 생성, 경계조건 및 하중조건 등을 부여할 수 있고, 해석방법 등의 명령을 취급할 수 있다.

본 연구에서는 반응표면법에서 근사 해석모델을 생성시키는 CAD 프로그램인 Pro/Engineer와 실험계획법에 따른 목적값과 제약조건인 응력과 변위를 구하는 해석과정을 FEM 프로그램인 ANSYS를 상호 연결하여 최적화기법 수행과정을 자동화시켰다.

3. 순차 근사 형상 최적화

상한과 하한의 변동이 큰 최적설계 문제에서는 정확도가 높은 근사식의 형태를 사용하더라도 전체 설계 영역에서 만들어진 근사식은 정확도가 떨어지게 된다. 즉 근사식이 지니는 정확도의 한계성 때문에 근사최적 문제는 한번의 스텝으로 최적해에 수렴하기 어렵다(임오강 등, 2001).

순차 설계개념을 형상 최적화에 적용하기 위해서는 두 가지의 어려움을 갖는다. 첫 번째는 순차 설계영역의 설정이고 두 번째는 각 스텝에서 이동량 선정이다(임오강 등, 2004).

본 연구에서는 설계변수 값의 10%를 옵셋량으로 정하고, 각 설계변수들 간의 크기차이에 의한 옵셋량 차이를 줄이기

위하여 식 (2)와 같이 자연로그함수를 사용하였다. 차수가 낮은 설계변수는 변화량을 크게 하여 범위를 넓게 잡아도 근사식의 정확도가 유지되기 때문이다.

$$offset_i = \pm \frac{0.1}{\ln\left(X_i^{design} + e\right)} X_i^{design} \tag{2}$$

여기서, i는 설계변수의 수를 나타내고, X_i^{design}은 각 설계변수의 크기라고 할 때, $\ln(X_i^{design} + e)$에서 무리수 e=2.718를 사용하여 항상 1보다 큰 값을 유지하게 하였다. 각 설계변수들의 크기를 1, 10, 100이라고 할 경우, 각 설계변수는 약 14%, 4%, 2%의 변화량을 가진다. 1의 경우는 절대값 ±0.1의 폭을 가지고, 10의 경우는 ±0.3, 100의 경우는 ±1.78의 폭을 가진다. 또한 식 (3)과 같이 이동량을 제안하는 식을 적용하였다.

$$X_{(i)}^{new} = X_{(i)}^{old} + \left(X_{(i)}^{opt} - X_{(i)}^{old}\right)\left(1 - \frac{\left|X_{(i)}^{oldopt} - X_{(i)}^{opt}\right|}{X_{(i)}^{old}}\right) \tag{3}$$

여기서 i는 설계변수의 수를 나타내고, $X_{(i)}^{new}$는 새로운 실험 중심점을 의미하고, $X_{(i)}^{old}$는 근사식 생성에 이용된 중심점, $X_{(i)}^{oldopt}$는 이전단계의 최적해이며, 첫 번째 스텝일 경우 초기값이 된다. $X_{(i)}^{opt}$는 각 단계에서의 최적해이다. 전체적인 흐름도는 Fig. 6에 나타내었다. 각 스텝의 최적해는 순차이차계획법인 PLBA알고리즘(Lim 등, 1986)을 사용하여 구하고, 수렴조건은 각 스텝에서 얻어지는 근사최적해가 제한된 순차 설계영역 내에 두 번 연속으로 존재하면 수렴하는 것으로 하였다.

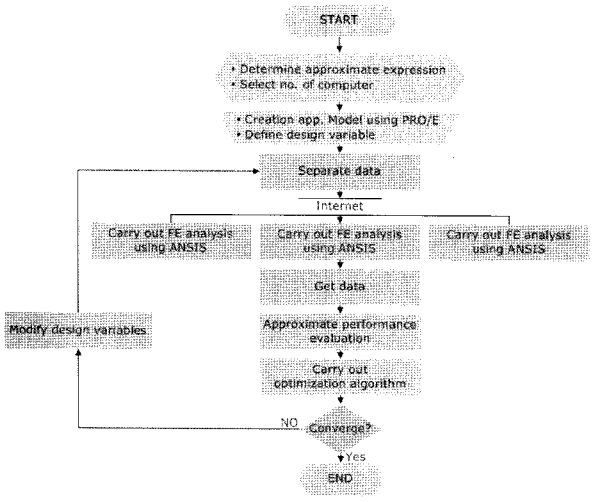

Fig. 6 Flowchart of sequential approximate shape optimization

3.1 반응표면법

반응표면법은 관심있는 반응이 여러 설계변수들에 의해 영향을 받을 때 설계변수에 대하여 반응표면을 근사 모델링하고 해석하기 위한 유용한 수학적, 통계적 기술들의 집합을 말한다. 이러한 반응표면법은 비교적 넓은 범위의 설계영역에 적용될 수 있는 전역 근사화 기법이고, 모델링 및 해석오차의 누적으로 인한 불안정한 해석결과를 매끄럽게 함으로써 전체적인 해석결과의 형태를 잘 표현하는 장점을 가지고 있다. 이 방법을 이용하여 근사 함수 모델의 계수들을 최소자승법에 의해 근사식을 구하는 이유는 적은 노력과 비용으로 정확한 근사식을 얻는데 있다. 그러므로 설계자는 반응표면법을 이용하여 복잡하고, 실제적인 시스템의 응답량에 대한 간단한 근사식을 얻을 수가 있다.

3.2 실험계획법

실험계획법은 설계영역 내에서 근사식을 구성하는데 필요한 실험점의 위치와 실험점의 개수를 결정하는 체계적인 방법으로 반응표면법에서 실험점들의 선택은 반응표면의 근사화의 정확도와 비용에 중요한 영향을 준다. 그러므로 최소의 점을 선택하여 가장 정확한 근사 반응함수를 생성할 수 있는 실험점들을 선택하는 것이 실험계획법의 가장 중요한 부분이다.

본 연구에서는 설계변수가 많을 경우에 장점을 지니며 각 설계변수에 대한 동일한 영향력을 가지는 3수준의 직교배열표를 사용하였다(박성현, 2003).

4. 수치예제

개발된 가상의 분산처리 시스템으로 근사 형상최적화 문제에 적용하였다. 수치예제로는 3차원 형상 최적설계로 외팔보와 토크암에 대해 최적해를 도출하고 분산처리를 하지 않았을 경우와 3, 9대를 사용하여 분산처리한 후 결과와 효율을 비교하였다.

4.1 외팔보

외팔보에 자중을 고려하고 자유단에 집중하중이 가해졌을 때의 형상을 Fig. 7에 도시하였고, 외팔보의 폭은 1m이다. Table 1에 설계에 필요한 데이터를 제시하였다. Table 2와 같이 5개의 설계변수를 선정하고, 초기값을 설계변수의 하한과 상한 사이의 중간 값으로 하였다.

부피 최소화를 목적함수로 하고, 제약조건은 응력을 기준으

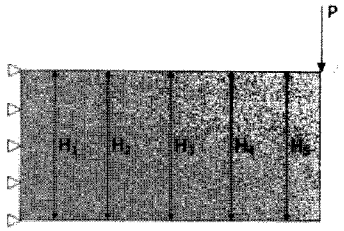

Fig. 7 Cantilever

Table 1 Design data for cantilever

Design data	Value
Length L	20m
Young's modulus E	21MPa
Poisson's ratio ν	0.15
Load P	1,000kN
Density ρ	24kN/m^3
Allowable stress σ_a	34MPa

Table 2 Design variables(Unit: m)

Design variable	Initial	Lower	Upper
H_1	10	1	20
H_2	10	1	20
H_3	10	1	20
H_4	10	1	20
H_5	10	1	20

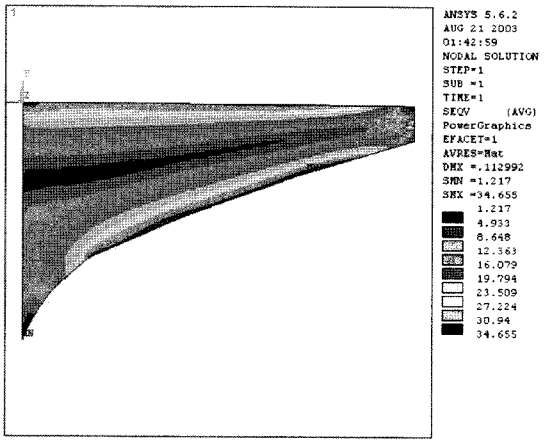

Fig. 8 Stress distribution of optimum model

로 하였다. 유한요소 모델은 ANSYS의 육면체 솔리드 185요소를 사용하였고, 5166개의 요소가 사용되었다. 경계면만을 제약조건으로 사용함으로써 제약 조건수를 감소시킬 수 있었다. 사용된 제약조건의 수는 97개이다. 10회의 반복을 거쳐 수렴하고 최적해를 도출하였다. 설계변수 H_1은 11.973m로 초기치 보다 1.973m 증가하였고, H_2는 6.925m, H_3는 5.110m, H_4는 3.241m, H_5는 1.575m로 감소하였다. 최대응력은 집중하중이 가해지는 부분에서 발생하였고, 최대응력값은 34.61MPa로 나타났다. 초기형상에서는 지지부에서 최대응력값이 발생하였다. 부피는 초기값 200m^{3}에서 107.2m^{3}으로 46.4%의 부피 감소를 보였다. 응력의 분포와 최적해의 형상을 Fig. 8에 나타내었다.

분산처리의 성능을 실험하기 위해 분산처리를 하지 않았을 경우와 3대, 9대를 사용하여 분산처리 결과를 비교해 보았다. 여기서 9대 실험 시 6대는 윈도우 운영체제이고, 나머지 3대는 유닉스 운영체제로 이 기종간의 분산처리에 대해서도 실험하였다. 식 (1)을 사용하여 분산처리의 효율을 구하였다. 그때의 효율은 1대 즉, 분산처리를 하지 않았을 경우에는 9826초, 약 2시간 44분이고 3대일 경우에는 3342초이고 이때의 효율은 0.98, 9대일 경우에는 1126초, 효율은 0.97로 이상적인 분산처리가 되었음을 알 수 있다.

4.2 토크암

대단부의 원형 내부를 고정하고 소단부의 끝단에서 횡하중을 받는 토크암의 형상과 설계변수가 Fig. 9에 나타나 있다. 목적함수는 부피로 설정하였으며 제약조건은 응력값으로 하였다. Table 3에는 해석에 필요한 물성치를 나타내었다. Table 4에 설계변수의 초기치와 한계값을 나타내었다. 형상최적화 결과, 7회의 반복 후 수렴하였다. 근사식의 정확도를

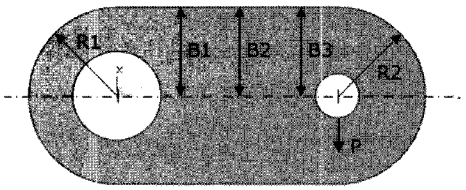

Fig. 9 Torque arm

Table 3 Design data for torque arm

Design data	Value
Young's modulus E	200GPa
Poisson's ratio ν	0.3
Load P	200 N
Density ρ	77kN/m^3
Allowable stress σ_a	120MPa

Table 4 Design variables (Unit: mm)

Design variables	Initial	Lower limits	Upper limits
R_1	40.0	30.0	60.0
R_2	40.0	15.0	40.0
B_1	40.0	22.5	40.0
B_2	40.0	17.5	40.0
B_3	40.0	15.0	40.0

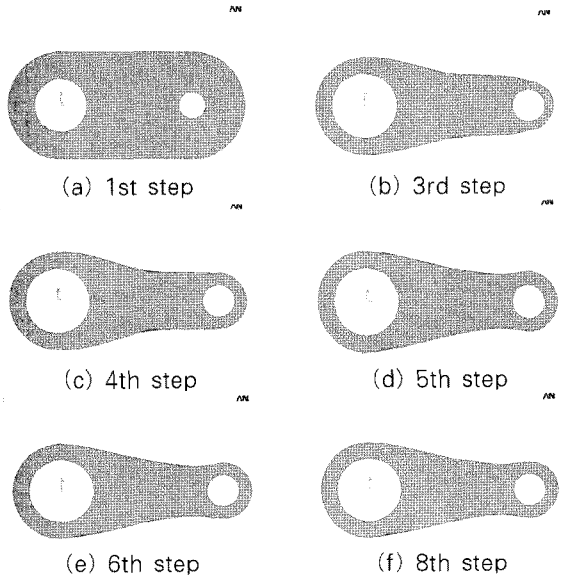

Fig. 10 Optimum shape after each step

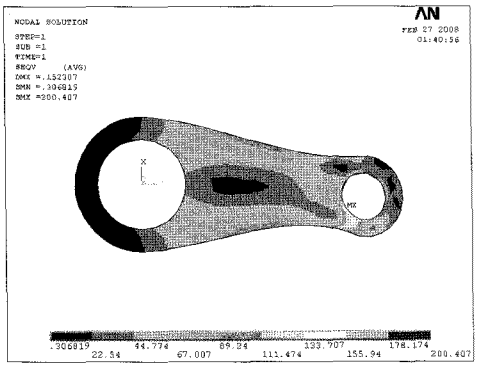

Fig. 11 Stress distribution of optimum model

Table 5 Result of distributed process of torque arm

No. of computer	1	3	9
Process runtime(min)	163.8	55.7	18.8
FEfficiency(E_p)	~	0.98	0.97

알아보기 위하여 근사식의 추정목적함수값과 각 단계에서 수렴한 설계변수의 값을 대입시켰을 때의 값을 비교하였다. 3번째 스텝에서 근사목적함수값과 실제값과 차이가 난다. 최적해에서 설계변수 R_1은 30.0mm, R_2는 17.67mm, B_1은 22.5mm, B_2는 17.93mm, B_3는 15.73mm였다.

초기값이 229,189mm^{3}에서 92559.21mm^{3}으로 59.6%의 부피감소를 나타내었다. 각 스텝에서 형상의 변화과정을 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 11은 최적해 수렴 후 응력분포를 나타내었다. 최대응력은 200.407MPa이고, 하중이 가해지는 부분에서 발생하였다. 경계면의 최대응력값은 118.94MPa로 유용해에 존재하였으며 허용응력과는 1.06MPa의 오차를 가진다. 전체적으로 설계변수는 치수는 감소하였고, 하중이 가해지는 부분의 설계변수인 R_2의 치수가 B_3에 비해 커졌다.

분산처리의 성능을 실험하기 위해 분산처리를 하지 않았을 경우와 3대, 9대를 사용하여 분산처리 결과를 비교해 보았다. 여기서 9대 실험 시 6대는 윈도우 운영체제이고, 나머지 3대는 유닉스 운영체제로 이 기종간의 분산처리에 대해서도 실험하였다. 그 결과는 Table 5에 나타내었다.

식 (1)을 사용하여 분산처리의 효율을 구하였다. 그때의 효율은 1대 즉, 분산처리를 하지 않았을 경우에는 3842초, 약 1시간 4분이고 3대일 경우에는 1294초이고 이때의 효율은 0.99, 9대일 경우에는 436초, 효율은 0.98로 이상적인 분산처리가 되었음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 반응표면의 근사를 위해 요구되는 근사 해석모델 생성과 구조해석을 상용 구조해석 패키지로 해결하고 근사 형상최적설계 프로그램과 자동적으로 연결하여 과정을 단순・일관화시키고, 다수의 개인용 컴퓨터들을 동일한 구조물의 구조해석에 동시에 사용할 수 있는 가상병렬연산시스템을 개발하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있다.

1) 개발한 가상병렬연산시스템은 반응표면법에서 상태 방정식의 근사에 필요한 구조해석부분을 독립적인 모듈로 구성하고, 또한 분산처리 기법을 이용하여 구조해석에 필요한 부하를 다수의 중앙처리장치에 분산시켜 해석한 후 모체가 되는 컴퓨터로 그 결과들을 통합하여 처리하여 해석과정을 단순・일관화시켰다.
2) 인터넷을 기반으로 통신하기 때문에 분리된 설계 공간의 처리에 효과적이고, 주어진 하드웨어 자원을 최대한 활용할 수 있다는 점에서 효율손실을 감수할만하다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

박성현 (2003) 현대실험계획법, 민영사, 서울, p.612.

박효선, 권윤한 (1999) 대형구조물의 분산구조해석을 위한 PCG 알고리즘, 한국전산구조공학회 논문집, 12(3), pp.385 ~ 396.

송영준, 민승재, 기구찌 노보루 (1999) 유한요소법과 최적구

조설계 CAE, 성안당, 고양, p.421.

양영순, 이재옥 (1996) 응답면 기법을 이용한 구조 신뢰성 해석, 대한조선학회 논문집, 33(1), pp.1909~1928.

임오강, 김우현 (2004) 순차설계영역을 이용한 근사 형상최적에 관한 연구, 한국전산구조공학회 논문집, 17(1), pp.31~38.

임오강, 김정진, 이진식 (2001) 근사 최적설계를 위한 순차설계영역에 관한 연구, 한국전산구조공학회 논문집, 14(3), pp.339~348.

조맹효, 노희열, 김현철 (2004) 쉘의 기하하적 모델링과 유한요소 해석 및 형상 최적설계, 한국전산구조공학회 논문집, 17(1), pp.25~33.

최동훈 (2002) 순차적 근사최적화(SAO)기법을 이용한 최적설계, 월간기계설계, pp.67~75.

최주호, 김지훈 (2000) 윈도우즈 소켓 기반 분산처리 기술을 이용한 항공기 엔진마운트의 최적설계, 한국항공대학교 논문집, 38, pp.29~38.

한국과학기술원 (1999) 초고속 병렬 진화 연산 S/W 및 응용기술 개발, 99-N-NS-05-A-03, 과학기술부, 대한민국, p.84.

Lim, O. K., Arora, J. S. (1986) An Active Set RQP Algorithm for Engineering Design Optimization, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 57, pp.51~61.

Yao, T. M., Choi, K. K. (1989) 3-D Shape Optimal Design and Automatic Finite Element Regridding, *Int. Journal for Numerical Methods in Engineering*, 39, pp.369~384.