한국소음진동공학회논문집 제 15 권 제 11 호, pp. 1223~1231, 2005.

선박 구조물의 진동 최적설계를 위한 NASTRAN 기반 최적화 프레임웍의 제안

Development of NASTRAN-based Optimization Framework for Vibration Optimum Design of Ship Structure

양 보 석† · 공 영 모* · 최 수 현* · 채 상 일** · 송 진 대*** · 김 용 한**

B. S. Yang, Y. M. Kong, S. H. Choi, S. I. Chae, J. D. Song and Y. H. Kim

(2004년 9월 15일 접수 ; 2005년 10월 31일 심사완료)

Key Words : Optimum Design(최적설계), Ship(선박), Vibration(진동), NASTRAN(나스트란), Random Tabu Search(랜덤터부탐색), Genetic Algorithm(유전 알고리듬)

ABSTRACT

Recently, the issue of ship vibration due to the large scale, high speed and lightweight of ship is emerging. For pleasantness in the cabin, shipbuilders are asked for strict vibration criteria and the degree of vibration level at a deckhouse became an important condition for taking order from customers. This study proposes a new optimization framework that is NASTRAN external call type optimization method (OptShip) and applies to an optimum design to decrease the vibration level of a deckhouse. The merits of this method are capable of using of global searching method and selecting of various objective function and design variables. The global optimization algorithms used here are random tabu search method which has fast converging speed and searches various size domains and genetic algorithm which searches multi-point solutions and has a good search capability in a complex space. By adapting OptShip to full-scale model, the validity of the suggested method was investigated.

1. 서 론

최근 선박의 대형화, 고속화 및 경량화로 인하여 진동문제의 중요성이 대두되고 있으며, 특히, 선원 근무환경의 고급화에 따른 선실의 쾌적성을 위해 선주가 엄격한 진동허용치 적용을 요구함에 따라, 선원 거주구역의 진동문제가 선박 수주의 중요한 조건이 되고 있다. 거주구역의 진동저감을 위한 구조 보강은 국부진동문제와 달리 직관적으로 보강위치를 추적하기는 어렵다. 또한 보강에 따른 구조 변경으로 동특성은 달라지게 된다. 또한 구조보강은 비용상승과 직결되는 문제로 요구되는 동특성을 획득하면서 비용을 최소화 할 필요가 있으며 이는 최적화문제로 귀결된다.

최적화는 설계 대상물에 유용성과 안전성을 확보하면서 최소의 재료를 사용하여 최대의 효과를 달성할 수 있도록 그 구조물의 치수와 기하학적 형상 등의 제반 파라미터를 결정하는 것으로, 수학적인 관점에서는 각각의 제약조건을 만족하는 설계변수 중에서 목적함수를 최소 또는 최대화 하는 설계변수 값을 찾는 것이다[1]. 위의 개념을 근거로 최적설계를 위한

† 책임저자 : 정회원, 부경대학교 기계공학부
E-mail : bsyang@pknu.ac.kr
Tel : (051) 620-1604, Fax : (051) 620-1405
* 정회원, (주) 대우조선해양 진동소음 R&D팀
** 부경대학교 대학원 기계공학부
*** 정회원, 부경대학교 대학원 기계공학부

여러 가지 방법을 검토하였다.

먼저, NASTRAN[2,3,13] 내부의 최적화 모듈은 감도해석을 기반으로 하는 최적화기법으로서[2], 목적함수와 설계변수를 설정하는데 많은 제약조건이 있고, 국부탐색 기법으로 전역적인 최적화를 수행하기 어려우며, 또한 복잡한 사용자 정의의 최적화기법을 결합하여 사용할 수 없는 단점이 있다. 다음으로는 NASTRAN/DMAP을 이용한 최적화 기법이 있다. 이는 해석과정상의 유용한 정보를 추출할 수는 있으나, DMAP은 일반 사용자가 사용하기에는 상당한 전문지식이 요구되고, NASTRAN 실행 시 외부 프로그램과 상호 정보교환을 반복 수행하는데 많은 어려움이 있다.

따라서 이 연구에서는 진동 해석을 위해 NASTRAN을 이용하고, 국부 수렴을 방지하기 위한 전역최적화 알고리듬을 최적화 기법으로 사용하는 NASTRAN 외부 호출형 독립 최적화 프레임웍을 제안한다. 이 기법은 유전 알고리듬(genetic algorithm, GA)[4~6], Random Tabu 탐색법(R-tabu법)[7~9], 모사 어닐링(simulated annealing)[10], 인공생명(artificial life) 알고리듬[11,12] 등과 같은 전역 최적화기법을 최적화 기법으로 이용할 수 있고, 기본적인 목적함수뿐만 아니라, 사용자 정의의 복잡한 형태의 목적함수도 설정할 수 있으며, 다양한 설계변수를 선택할 수 있다. 다양한 최적화 알고리듬들이 제안되어 있지만, 이 연구에서는 최적해 수렴속도가 빠른 R-Tabu법과 방대한 해공간에서도 강인한 탐색능력을 가지는 GA를 이용하였다.

제안된 기법의 유용성을 검토하기 위해 실제 컨테이너선을 유한요소 모델링하여 강제진동응답 최소화를 수행하였다. 최적화는 NASTRAN 최적화모듈, R-tabu법과 GA를 최적화 기법으로 채택한 OptShip에 의해 수행되었다.

2. 외부 호출형 독립 최적화 기법

2.1 NASTRAN의 최적화 모듈

NASTRAN 최적화 모듈은 현재의 해석 모델로부터 제한조건을 만족시키면서 목적함수를 최소(또는 최대)로 하는 새로운 모델을 찾는 기능이다. 그 속성상 해석이라기보다는 합성으로, NASTRAN에서의 설계변수는 형상 최적화와 관련된 형상변수와 치수 최적화와 관련된 치수 변수로 대별된다. 선형 정적해석, 고유진동해석, 주파수응답해석 등에 설계 최적화 및 민감도해석을 제공한다. 제한조건식이나 목적함수로 사용되는 해석응답으로는 해당 해석에서 출력되는 일반적 해석 결과뿐만 아니라, 사용자 정의의 간단한 수식도 함수로 사용할 수 있다. 구조해석, 민감도해석 및 수치 최적화 과정을 반복하여 최적화를 수행한다. 민감도 기반 최적화를 수행하므로, 사용자 정의의 복잡한 수식을 목적함수로 설정하지 못하는 단점과 수치 최적화방법으로 가능방향법(modified feasible directions method), 순차선형계획법(sequential linear programming) 및 순차2차계획법(sequential quadratic programming)을 채택하고 있어, 기본적으로 국부탐색을 수행한다[2].

NASTRAN/DMAP은 해석과정에서 유용한 정보를 추출하여 목적함수를 구성할 수 있고, 해석 절차를 수정하거나, 특수한 기능을 수행하는 사용자 정의의 프로그램을 작성할 수 있다. 그러나 최적화 문제에서 최적해로 수렴하는데 계산의 반복이 필요하고, 대형 구조물을 해석하기 위해서는 NASTRAN의 해석결과가 필요하다. 이처럼, 사용자가 구성한 프로그램에 얻은 정보와 NASTRAN의 해석정보를 상호 교환하는 작업을 반복적으로 수행해야 한다. Tool kit이라는 전문 프로그램이 필요하고, 일반 사용자가 프로그램을 구성하고 사용하기에는 상당한 전문지식이 필요하다.

따라서, 이 연구에서는 보다 사용자가 편리하게 프로그래밍하고 최적화를 수행하도록 하기 위해, NASTRAN 외부 호출형 독립 최적화 프레임웍을 제안하고, 이를 "OptShip"이라 명명하였다.

2.2 NASTRAN 외부 호출형 독립 최적화 기법

이 연구에서 제안하는 OptShip의 개략적인 흐름도를 Fig. 1에 나타낸다. 이 기법은 사용자가 정의하는 최적화 과정에서 목적함수 평가를 위한 해석에 NASTRAN을 이용한다. 이를 위해 사용자 정의의 최적화 과정에서 설계변수 및 목적함수의 정보가 필요하며, NASTRAN 실행을 위해 대상 모델 파일이 요구된다.

일반적으로 모델링은 크게 CAD 프로그램을 이용하여 제작된 형상데이터를 넘겨받는 방법과 유한요소 모델링 프로그램을 이용하여 모델링 하는 방법[13]이

있다. 전자는 형상 제작까지는 쉽게 할 수 있으나, 요소 생성시 타 유한요소 프로그램을 사용해야 하는 단점이 있고, 후자는 형상 제작은 전자보다 어려우나, 요소 생성과 구속, 하중 조건을 부과하기 용이한 장점이 있다. 설계자의 형편에 따라 선택 및 사용될 수 있는 부분이다. 모델링 후 설계자가 최적화 하고자 하는 요소들 즉, 판 요소의 두께, 보 요소의 크기 등을 설계변수로 지정한다.

설계변수의 선정과 최적화 수행에 있어서 몇 가지 주의가 필요하다. 첫째, 설계 변수의 변경이 다른 요소의 정보를 변경해야 하는 문제일 경우는 특별한 주의를 요한다. 예를 들어 요소들의 위치를 설계변수로 고려한다면, 요소의 위치는 "GRID"의 ID번호에 의해 정의되는데 설계변수로 고려되는 요소의 위치를 이동시키기 위해서는 해당 요소의 위치를 정의하는 GRID ID를 확인해서 그 GRID의 위치정보를 변경해야 한다. 이 작업은 수정된 GRID ID에 의해 정의되는 다른 요소들의 위치를 함께 이동시키는 효과를 낳게 된다. 따라서 이를 방지하기 위해서는 새로운 GRID ID를 생성하여 설계변수를 고려하는 요소의 위치에 할당하면 된다. 이 작업은 물리적 공간상의 겹침이나 혹은 공백을 생성하게 되고 이를 회피하기 위해 또 다른 작업을 필요로 한다. 현실적으로 요소의 위치를 변경하는 것은 고려하지 못하고 있다.

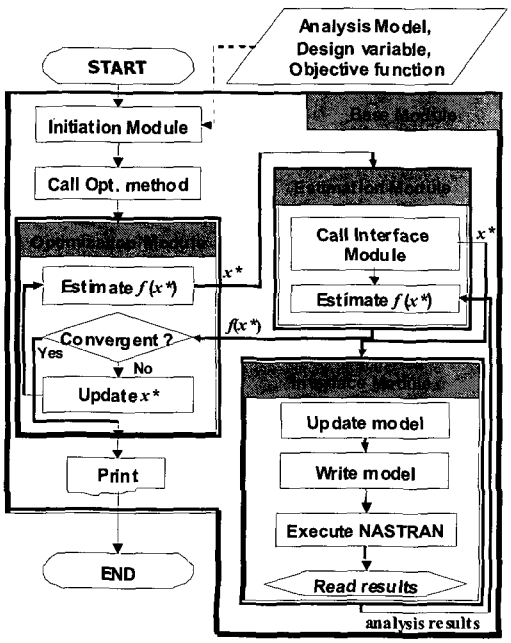


Fig. 1 Flow chart of proposed algorithm "OptShip"

둘째로 설계 변수가 직접적으로 모델링 데이터에 포함되지 않는 경우를 고려할 수 있다. 이 경우는 모델 데이터의 수정 전에 최적화 프로그램의 내부에서 필요한 계산을 먼저 수행하고 이 결과를 모델 데이터에 반영해야 하므로 최적화 프로그램 자체에 적절한 보완을 할 필요가 있다.

목적함수로는 해석 툴에서 제공하는 무게, 부피, 고유진동수, 소음레벨 등과 같은 간단한 것부터 해석 툴의 결과(응답, 고유진동수 등)를 독립변수로 하여 그들의 함수로 정의되는 임의의 목적함수까지 다양하게 선정할 수 있다. 그리고 대상 구조물의 구조적인 안정성 등을 고려한 구속조건을 정의하여 비현실적인 설계를 방지하도록 할 수 있다. 구속조건의 선정 역시 목적함수의 선정과 유사하게 다양한 기능을 제공한다.

OptShip은 기능적으로 크게 통합 모듈, 초기화 모듈, 최적화 모듈, 목적함수 평가모듈 및 NASTRAN 연결(interface) 모듈로 구성된다. 여기서 모듈이라는 용어는 상호독립적으로 실행 가능함을 의미하는 것이 아니고, 단지 기능적으로 분화되어 있음을 나타낸다. 각 모듈은 기능적으로 연결되어 있으며 최적화를 수행하기 위해서 모든 모듈이 필요하다.

통합 모듈은 다른 4개의 모듈을 진행과정에 따라 적절하게 사용하여 최적화 진행과정과 전체 데이터를 관리한다. 초기화 모듈은 최초 초기화 과정에서 모델 파일과 설계변수 및 목적함수에 대한 정보를 읽어 들인다. 그리고 특정한 절점에서의 강제응답, 고유진동수와 모드벡터 등의 NASTRAN 해석결과 중 설계변수 및 목적함수 평가에 필요한 정보가 무엇인지를 NASTRAN 연결 모듈에 넘겨준다. 초기화 모듈은 어떠한 최적화 기법이 최적화 모듈에 사용되는가를 알려주고, 목적함수 평가 모듈에 어떤 종류의 목적함수가 사용되는가를 알려준다. 최적화 모듈은 논리적으로 대부분의 최적화 기법이 구성 가능하다. 그러나 현재의 상태에서 최적화 모듈은 유전 알고리듬(GA), R-tabu법, Simulated annealing법 및 인공생명 최적화 알고리듬으로 구성되어 있다. 최적화 모듈은 선택 가능한 최적화 기법 중에서 선택된 최적화기법에 의해 최적화를 수행한다. 후보설계변수 x*가 목적함수 평가모듈에 넘겨지고 목적함수 평가모듈로부터 갱신된 목적함수 값을 넘겨받는다. 갱신된 목적함수 값과 후보설계변수를 이용해서 수렴판정을 하며, 수렴이

이루어질 때까지 이 과정이 반복된다. 수렴이 된 것으로 판정되면, 최적화 모듈은 그 결과를 통합모듈에 넘겨준다. 목적함수 평가모듈은 최적화 모듈로부터 새로운 설계변수를 넘겨받으면, 이를 NASTRAN 연결모듈에 넘기고 NASTRAN 연결모듈로부터 NASTRAN 해석결과 중 목적함수 평가에 필요한 결과를 넘겨받는다. 해석결과로부터 목적함수를 평가하여 그 결과를 최적화 모듈에 넘겨준다. 목적함수 값은 특정한 절점에서 강제응답, 고유진동수, 중량 및 모드벡터 등의 직접적인 해석결과 하나 혹은 그 이상의 함수일 수 있다. NASTRAN 연결모듈은 목적함수 평가모듈로부터 넘겨받은 설계변수를 이용하여 해석모델을 갱신하고, NASTRAN 해석을 위한 입력파일을 갱신한 후에 NASTRAN 해석을 수행한다. 초기화 모듈에 의해 설정된 조건에 따라 NASTRAN 해석 결과 중 목적함수 평가에 필요한 결과만을 목적함수 평가모듈에 넘겨준다.

위의 설명은 OptShip을 기능적으로 구분하여 각 기능을 독립된 모듈로 고려했을 때, 모듈들의 기능을 개괄적으로 서술한 것으로 OptShip의 전체적인 구성을 이해하는데 유용한 서술 방법이다. OptShip의 수행과정을 이해하기 위해서는 다음과 같이 순차적인 관점에서 OptShip을 서술하는 것이 유용하다.

(0) OptShip의 실행 전 단계로 PATRAN 또는 CAD등을 이용하여 고려하는 모델파일을 작성하고, 설계변수 및 목적함수의 정보를 각각의 파일로 작성한다.

(1) 통합 모듈 : 초기화 모듈을 실행한다.

(2) 초기화 모듈 : OptShip의 실행을 하면 최초로 초기화 모듈에 의해 모델파일, 설계변수 및 목적함수의 정보를 입력파일로부터 획득한다. NASTRAN 연결모듈에 목적함수 평가에 필요한 해석결과가 무엇인지에 대한 정보와 대상 모델 자체를 제공하여 NASTRAN 연결모듈을 초기화한다.

(3) 통합 모듈 : 최적화 모듈을 호출한다.

(4) 최적화 모듈 : 설계변수 x*를 목적함수 평가모듈에 제공하면서 목적함수 평가모듈을 호출한다.

(5) 목적함수 평가모듈 : x*를 NASTRAN 연결모듈에 넘겨주면서 NASTRAN 연결모듈을 호출한다.

(6) NASTRAN 연결모듈 : x*를 반영하여 대상 모델을 갱신한다.

(7) NASTRAN 연결모듈 : 갱신된 모델을 NASTRAN 입력파일로 작성한다.

(8) NASTRAN 연결모듈 : NASTRAN을 실행한다.

(9) NASTRAN 연결모듈 : NASTRAN 결과파일로부터 해석결과를 읽는다.

(10) NASTRAN 연결모듈 : 해석결과를 목적함수 평가모듈에 반환한다.

(11) 목적함수 평가모듈 : 해석결과를 이용해서 목적함수를 평가하고, 그 결과인 목적함수 값, $f(x^*)$, 을 최적화 모듈에 넘겨준다.

(12) 최적화 모듈 : 수렴조건에 의해 수렴판정을 한다.

(13) 최적화 모듈 : 수렴조건을 만족하면, 최적화된 결과를 통합 모듈에 넘겨주고 최적화 모듈은 종료된다. 만약 수렴조건을 만족하지 못하면, 설계변수를 최적화 방법에 따라 갱신하고 (4)로 되돌아가서 과정을 반복한다. 설계변수의 갱신 방법은 선택된 최적화 기법에 따라 다르다. 설계변수의 갱신을 일반화하여 표현하면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$x^* = x^* + \Delta x \tag{1}$$

여기서 Δx는 최적화방법에 의존하는 시험 설계변수를 위한 증감을 나타낸다.

(14) 통합 모듈 : 최적화된 결과를 출력하고 OptShip을 종료한다.

2.3 사용된 최적화 기법

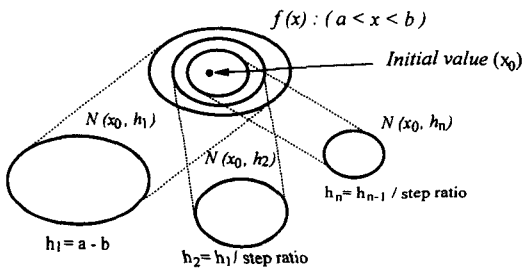
(1) Random tabu 탐색법

Hu는 Glover가 고안한 Tabu 탐색법을 개량하여 Random tabu 탐색법(R-tabu법)을 제안하고, 일반 구속조건이 있는 최적화 문제에 적용하여 유용성을 확인하였다[7]. R-tabu법에서는 step수와 count수를 정의한다. Step 수는 탐색하고자 하는 근방 영역의 개수이고, count 수는 하나의 근방 영역을 탐색하는 회수의 상한치를 나타낸다. 알고리듬의 개념도는 Fig. 2에 나타내었다.

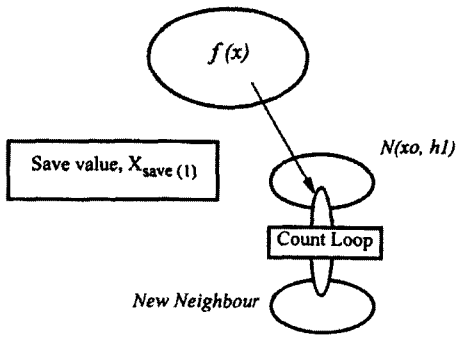
R-tabu법은 제약조건을 만족하는 해의 제1 근사해(초기치)를 $\mathbf{x}_0$로 하고, $\mathbf{x}_0$ 주위에 근방영역 $N(\mathbf{x}_0, h_i)$을 Fig. 2(a)와 같이 설정한다. 각각의 근방영역 중에서 탐색을 시작할 초기치 $\mathbf{x}$를 임의로 발생시키고, 그것에 의한 목적함수 $f(\mathbf{x})$가 $f(\mathbf{x}_0)$보다 작으면, 그 점을 영역내의 최소점으로 기억한다. 이 과정을

반복해서 전체 근방영역에서 선택된 최소점들 중에서 가장 작은 x를 제2 근사해 x_1으로 하고, x_1 주위에 다시 근방영역을 설정하여 앞의 탐색과정을 반복한다. 이 방법의 기본적인 개념은 Hooke-Jeeves가 제안한 직접탐색법의 패턴탐색법과 격자탐색법을 조합한 방법에 가깝지만, 개량 step폭 대신에 근방영역을 설정하는 것과 그 크기가 다른 것을 복수 개 설정하는 점이 다르고, 그 특징은 다음과 같다[8].

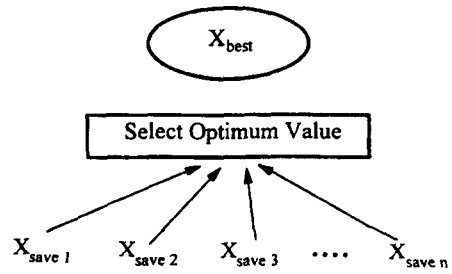
- 탐색영역을 크기가 다른 여러 영역으로 분할하여 탐색하므로 맹목적인 탐색을 피할 수 있고, 따라서 탐색에 필요한 회수를 줄일 수 있다.
- 랜덤 탐색을 하기 때문에 국소적 최적해에 빠지는 것을 막을 수 있고, 전역적 최적해를 구하는 것이 가능하다.



(a) Initialization of neighbor



(b) Comparison of variables



(c) Selection and setting of new values

Fig. 2 Flowchart of random tabu search method

- 다른 최적화 방법과 조합하여 사용함으로써 정도가 보다 좋고, 최적해에 도달하는 수렴속도를 더욱 향상시킬 수 있다.

(2) 유전 알고리듬(genetic algorithm)

유전 알고리듬은 우수한 적응도(fitness)를 가진 개체가 주위 환경, 즉 최적설계문제에서 주어진 구속조건 하에서 더 큰 생존확률을 가지고 더 많은 교차 조작에 참가하여 다음 세대에 우수한 개체를 생성한다는 자연계의 법칙과 번식, 교차, 돌연변이의 과정을 수행하는 유전학에 착상을 얻은 최적화 방법이다. 유전 알고리듬의 기본적인 개념은 다음과 같다[4].

(1) 해를 표현하는 방법으로서 생물의 염색체의 개념을 사용한다. 염색체의 유전자로서 이진수(0, 1)를 이용하고, 이를 이용하여 개체를 표현한다. 이진수를 이용해서 실수영역으로 사상시키는 것을 코딩(coding)이라고 하고 그 반대의 과정을 디코딩(decoding)이라고 한다.

(2) 위와 같은 방법으로 초기에 지정된 개수만큼 임의로 개체를 만들어서 초기집단을 만들어 낸다. 초기집단 개체 각각의 목적함수를 이용하여 적응도를 계산한다. 적응도는 유전 알고리듬에서 개체의 우수성을 평가하는 척도이며, 다음 세대에 자손을 남길 개체로 선택될 수 있는 기준이 된다.

(3) 계산된 적응도에 따라서 적응도가 높은 개체 2개가 선택되고, 이들을 교차확률에 따라서 일부분을

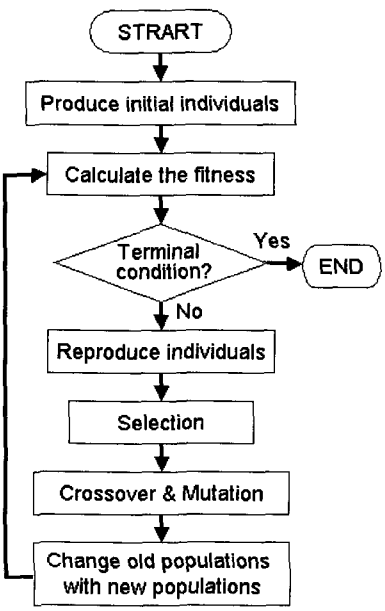


Fig. 3 Flowchart of genetic algorithm

교차시킨다. 또한 돌연변이 확률에 따라서 임의로 한 부분을 바꾸는 돌연변이조작을 수행한다.

(3)의 조작을 통해서 다시 지정된 개수만큼의 개체를 만들어 내고 다시 적응도를 계산하여 (3)의 계산을 반복한다. 이 과정을 가장 우수한 최적해를 찾아낼 때까지 반복한다. 이 과정을 Fig. 3에 나타내었다.

3. 전선모델의 최적설계

OptShip의 유용성을 검증하고자, 컨테이너선의 전선모델을 유한요소모델링하여 NASTRAN 최적화 모듈과 R-tabu법 및 GA를 최적화 기법으로 사용한 OptShip의 최적화 결과와 비교, 검토하였다.

3.1 해석모델

해석 대상 모델은 2400 TEU급의 컨테이너선(Fig. 5)으로 주기관의 NCR(normal continuous rating)과 MCR(maximum continuous rating)은 각각 93 rpm, 97 rpm이고 프로펠러 날개 수는 5개이며, 주요 기진력은 엔진에서 발생하는 H-모멘트 6차, X-모멘트 3차 및 4차 그리고 프로펠러 1차 성분이다. 엔진에서 발생하는 기진력은 엔진 제조사로부터 모멘트의 형태로 주어지며 프로펠러 기진력 모형시험의 결과로부터 제공된다. 이들 중 엔진에서 발생하는 H-모멘트 6차 성분을 고려하였다. 이는 여러 기진력 중 거주구의 진동응답에 가장 큰 영향을 끼치는 기진력으로 알려져 있기 때문이다.

H-모멘트 성분은 Fig. 4의 화살표 모양처럼 기관 전체가 횡방향으로 같은 위상을 갖고 진동하는 H형 기진력으로 Wältsilä NSD Switzerland사의 엔진 6RT72U 모델에 근거해 그 크기를 고려하였다. 모멘트는 식 (2)를 이용해 짝힘($F_{H\text{-}moment}$)으로 환산하여 114,700 N으로 부가하였다.

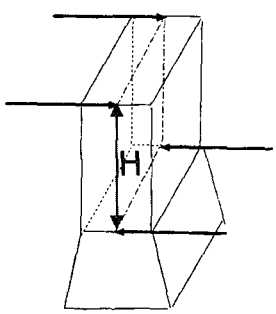


Fig. 4 Exciting force of main engine : H-moment

$$F_{H-moment}=\frac{M_{H-moment}}{2H} \tag{2}$$

여기서 $M_{H\text{-}moment}$는 H-모멘트이고, H는 엔진의 높이를 의미한다. 응답 위치는 Fig. 5에 나타내는 항해갑판의 좌현측(port side) 끝점이다.

3.2 문제의 정식화

(1) 설계변수

전역최적화 기법들은 통상 국부 최적화 기법들에 비해 많은 계산시간을 요하며, 설계변수가 많아지면 수렴에 소요되는 시간이 더욱 증가한다. 따라서 최적화에 소요되는 계산시간을 줄이기 위해서 설계변수를 가능한 줄이는 것이 요구된다. 이 연구에서는 설계변수를 줄이기 위해 설계변수를 2단계로 나누어 선정하였다. 1단계에서 진동에 직접적인 영향을 주는 범위내의 설계변수들을 지정한다. 2단계는 1단계에서 설정된 설계변수에 대해 NASTRAN에 의한 감도해석을 수행한다. 여기서 감도 값이 높은 설계변수를 최종 설계변수로 선정한다. 2단계 작업을 통해 결정된 설계변수로 최적화를 수행한다.

선미에서 화물창까지의 범위에서 shell요소의 두께를 대상으로 하여 1단계에서 319개의 설계변수를 선정하였고, 감도해석을 통해 2단계에서 64개의 최종 설계변수가 사용되었다. 설계변수의 상한과 하한은 구조적인 안정성을 고려하여 초기 모델(X_{ori})의 90 ~140 % 범위로 하였다. 엄밀하게는 구조 해석 및 총중량에 대한 평가가 수행되면서 설계변수 폭이 넓혀져야 하지만, 문제를 단순화하기 위해 추가적인 구속조건은 고려하지 않았다.

(2) 목적함수

강제진동응답의 최소화는 두 종류의 목적함수 형태를 고려한다.

첫째는 고려하는 응답위치에서 고려하는 방향과 주파수 중에서 가장 큰 진동속도 값 V를 취하는 것으

Fig. 5 Full model of container ship

로 편의상 "최대값(peak value)"이라 한다.

$$f_{peak} = \max[V(\text{frequency, direction})] \tag{3}$$

두 번째 목적함수는 ISO 6954(2000 edition)에서 선박진동의 평가에 적용 및 권장되는 형태로 고려하는 응답위치에서 고려하는 3 방향에 대해 관심주파수 범위 내에서 속도응답의 제곱에 ISO 6954(2000 edition)에서 설정한 가중치 w_q를 곱한 값을 평균하여, 제곱근을 취한 값들 중 가장 큰 값을 가지는 방향의 값을 목적함수로 취하는 것으로 본고에서는 편의상 "실효값(rms value)"이라 한다.

$$f_{rms} = \max\left[\begin{array}{l}\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{q=1}^{N} w_q \cdot V_{q,Longi}^2}, \\ \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{q=1}^{N} w_q \cdot V_{q,Trans}^2}, \\ \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{q=1}^{N} w_q \cdot V_{q,Verti}^2}\end{array}\right] \tag{4}$$

여기서, $V_{q,Longi}$는 q번째 주파수의 종방향(longi) 속도응답, $V_{q,Trans}$는 q번째 주파수의 횡방향(trans) 속도응답, $V_{q,Verti}$는 q번째 주파수의 수직방향(verti) 속도응답, N은 고려하는 응답주파수의 수를 나타낸다.

강제응답의 관심주파수는 주기관의 R차 주파수 성분의 기진력에 대하여 식 (5)와 같이 상한 및 하한 주파수를 설정한다.

$$\text{상한 주파수} : \omega_{\max} = R \times (\text{MCR} \times 1.07)$$
$$\text{하한 주파수} : \omega_{\min} = R \times \left(\frac{\text{MCR} \times 1.07}{2}\right) \tag{5}$$

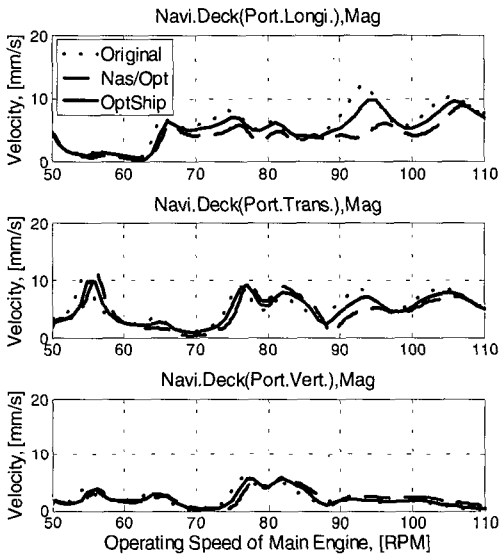
여기서 MCR은 최대운전속도로 발생할 수 있는 최대 기진력 주파수에 7 %의 여유(margin)를 고려한다.

이 중 최대값의 형태는 기존 상선에 적용되고 있는 평가방법이며, 실효값 형태는 ISO 6954:2000 edition에서 권장하는 방법으로 일부 적용되고 있다. 따라서 위 두 가지 방법을 고려하고자 한다.

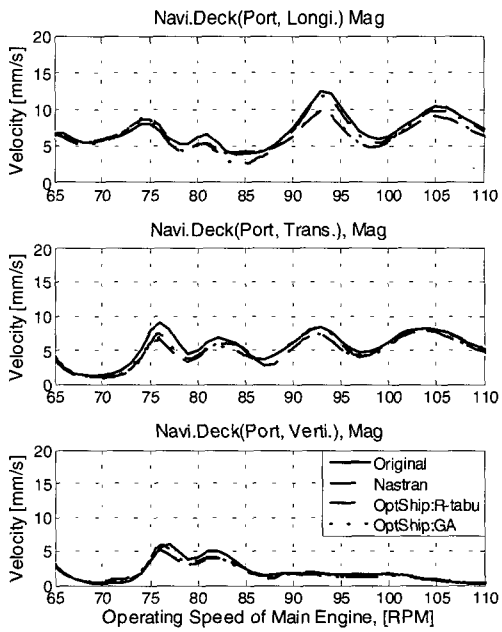
3.3 최적화 결과 및 고찰

최적화과정은 목적함수가 최대값인 경우에 대해서 NASTRAN 최적화 모듈과 R-tabu 법을 최적화알고리듬으로 사용한 OptShip으로 수행하여 그 결과를 Fig. 6(a)에 나타내었다. 목적함수가 실효값에 대해서는 NASTRAN 최적화 모듈, R-tabu와 GA를 사용한 OptShip으로 수행하여 Fig. 6(b)에 최적화된 모델의 강제응답해석결과를 같이 나타내었다.

최적화 수행에 사용된 주요 최적화 조건을 Table 1에 제시하였다. 종료조건으로는 최대 세대수(GA) 혹은 최대 반복수(R-tabu)에 도달하거나 혹은 최대



(a) Peak value



(b) Rms value

Fig. 6 Optimization results for 6th component of H-moment

목적함수 평가회수에 도달하면 종료하게 하였다. 최대목적함수 평가회수를 제한한 것은 계산시간이 과도하게 길어지는 것을 방지하기 위해서이다. 사용한 컴퓨터는 IBM PC로 cpu의 동작속도는 3.0 GHz, 주메모리 1.0 GByte를 사용하였다. 이 모델의 NASTRAN 강제응답해석에 소요되는 시간은 평균적으로 200초이며, 1회의 목적함수평가는 1회의 강제응답해석을 의미하므로 최대목적함수평가회수를 2000회로 제한한 것은 최대 5일 이내에 계산이 종료되도록 하기 위해서이다.

목적함수로 최대값을 채택한 경우(Fig. 6(a)), NASTRAN 최적화 모듈은 55rpm 부근에서, 초기모델과 OptShip은 93 rpm 부근에서 각각 가장 큰 응답값을 보이고 있다. 각각의 크기는 초기모델 12.4 mm/s, NASTRAN 최적화 모듈 11.5 mm/s 그리고 R-tabu법을 이용한 OptShip 9.8 mm/s로 OptShip이 NASTRAN 최적화 모듈보다 양호한 값을 구하는 것을 알 수 있다.

Table 1 Parameters used in optimization

GA		R-tabu	
Pop size	20	Step size	3
Probability of cross-over	0.8	Count number	3
Probability of mutation	0.1		
Maximum generation	500	Maximum Iteration	500
Maximum evaluation	3000	Maximum evaluation	3000

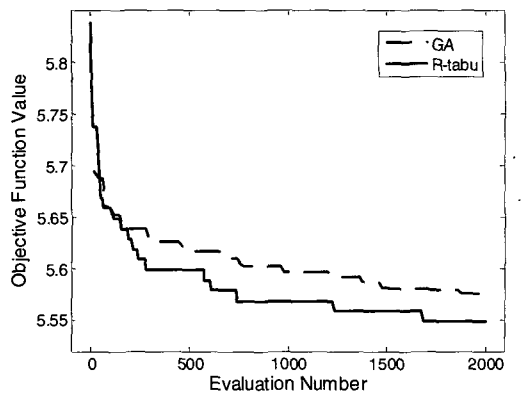


Fig. 7 Comparison of evaluation number between R-Tabu and GA

실효값의 경우 최종 목적함수 값은 각각 초기모델 6.1846, NASTRAN 최적화 모듈 5.93로, GA를 사용한 OptShip 5.57 그리고 R-tabu법을 사용한 OptShip 5.54 등이었다. 이 결과로부터 GA 및 R-tabu법에 의한 최적화가 이 문제에 있어 더 좋을 결과를 제공하고 있는 것을 확인할 수 있다. GA와 R-tabu법의 비교에 있어서는 R-tabu법이 이 예제에서 우수한 결과를 제공하고 있으나 단 한번의 비교로 일반화하기에는 무리가 있다.

그리고 Fig. 7을 통해서 목적함수 평가회수가 2000회에서도 목적함수 값이 계속 낮아지는 것을 확인 할 수 있다. 이는 2000회 이상에서도 지속적인 수렴이 이루어 질 것으로 예상이 된다. 따라서 충분한 계산시간이 주어진다면 더 좋은 해를 찾을 것으로 기대할 수 있다. 실효값에 대한 목적함수의 비교를 통해 계산시간이 충분히 주어지면 R-tabu법이나 GA 등을 이용한 OptShip에 의해 우수한 최적해를 얻을 수 있음을 확인하였다.

단, NASTRAN 최적화 모듈은 이 문제에 대해 단 4시간 만에 최적화 연산을 종료했으며, 단시간에 최적화 과정을 완료해야 한다면, NASTRAN 최적화 모듈을 사용하는 것이 유용할 것이다.

4. 결 론

대형 선박구조물의 전역 최적해를 구하기 위한 NASTRAN 외부 호출형 독립 최적화 기법(OptShip)을 제안하였고, 유용성을 검증하기 위해 선박의 전선 모델을 구성하여 강제진동응답 최소화 문제를 수행하였다. 강제진동응답 최소화에는 NASTRAN최적화 모듈, R-tabu법을 최적화 기법으로 채택한 OptShip 그리고 GA를 사용한 OptShip 등이 사용되었으며, 각 방법에 의한 최적화 결과를 비교하였다.

목적함수 최대값 문제에서는 전역최적화 기법인 R-tabu 법을 도입한 OptShip의 결과가 국부탐색기법을 사용하는 NASTRAN 최적화 모듈의 결과보다 우수함을 보임으로서 OptShip의 유용성을 예증하였다.

목적함수 실효값 문제에 대해서는 위 3방법이 모두 비교되었으며, GA와 R-tabu법 등의 전역최적화 방법을 사용하는 OptShip이 충분한 시간이 주어질 때 우수한 해를 제공함을 확인하였다.

참 고 문 헌

(1) 류연선, 임오강, 박경진, 2001, "최적설계입문", 인터비젼.

(2) Moore, Greg, 1994, MSC.NASTRAN Design Sensitivity and Optimization, User's Guide, The MacNeal Schwendler Corporation.

(3) Sitton, G., 1993, MSC.NASTRAN Basic Dynamic Analysis User's Guide, The MacNeal Schwendler Corporation.

(4) Goldberg, D. E., 1989, Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning, Addison-Wesley Pub.

(5) Choi, B. G. and Yang, B. S., 2000, "Optimum Shape Design of Rotor Shafts Using Genetic Algorithm," Journal of Vibration and Control, Vol. 6, No. 2, pp. 207~222.

(6) Choi, B. G. and Yang, B. S., 2001, "Optimal Design of Rotor-Bearing Systems Using Immune-genetic Algorithm," Trans. ASME, Journal of Vibration and Acoustics, Vol. 123, No. 3, pp. 398~401.

(7) Hu, N., 1992, "Tabu Search Method with Random Moves for Globally Optimal Design," International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 10, pp. 299~310.

(8) 양보석, 전상범, 최병근, 유영훈, 1998, "유전알고리즘과 Random Tabu 탐색법을 조합한 최적화 알고리즘에 의한 제진판의 최적설계," 대한기계학회 논문집(A), 제 22 권, 제 7 호, pp. 1258~1266.

(9) 양보석, 최병근, 전상범, 김동조, 1998, "유전알고리즘과 Random Tabu 탐색법을 조합한 최적화 알고리즘에 의한 배관지지대의 최적배치," 한국퍼지 및 지능시스템학회논문지, 제 8 권, 제 3 호, pp. 71~79.

(10) Kirkpatrick, S., C. D. Gelatt Jr. and M. P. Vecchi, 1982, Optimization by Simulated Annealing, IBM Research Report RC 9355.

(11) Yang, B. S. and Lee, Y. H., 2000, Artificial Life Algorithm for Function Optimization, Proceedings of ASME Design Automation Conference, Baltimore, USA, DETC2000/DAC-14524.

(12) Ahn, Y. K., Song, J. D. and Yang, B. S., 2003, "Optimal Design of Engine Mount Using an Artificial Life Algorithm," Journal of Sound and Vibration, Vol. 261, No. 1, pp. 309~328.

(13) MSC.PATRAN User's Guide Ver. 8, The MacNealSchwendler Corporation, 1998.

(14) 신찬호 외 5인, 1997, "선박진동/소음제어지침", 한국선급.