

선박 구조물의 진동 최적화를 위한 비선형 정수 계획법의 적용

공영모[†]*, 최수현*, 송진대^{**}, 양보석^{**}

대우조선해양(주) 진동소음연구팀*
부경대학교 기계공학부^{**}

Application of Nonlinear Integer Programming for Vibration Optimization of Ship Structure

Young-Mo Kong[†]*, Su-Hyun Choi*, Jin-Dae Song^{**} and Bo-Suk Yang^{**}

DSME Vibration and Noise R&D Team*
School of Mechanical Engineering, Pukyong National University^{**}

Abstract

In this paper, we present a non-linear integer programming by genetic algorithm (GA) for available sizes of stiffener or thickness of plate in a job site. GA can rapidly search for the approximate global optimum under complicated design environment such as ship. Meanwhile it can handle the optimization problem involving discrete design variable. However, there are many parameters have to be set for GA, which greatly affect the accuracy and calculation time of optimum solution. The setting process is hard for users, and there are no rules to decide these parameters. In order to overcome these demerits, the optimization for these parameters has been also conducted using GA itself. Also it is proved that the parameters are optimal values by the trial function. Finally, we applied this method to compass deck of ship where the vibration problem is frequently occurred to verify the validity and usefulness of nonlinear integer programming.

※Keywords: Optship(NASTRAN 기반 외부 호출형 최적화 소프트웨어), Nonlinear integer programming(비선형 정수 계획법), Combinatorial optimization(조합 최적화)

접수일: 2005년 9월 16일, 승인일: 2005년 10월 6일

†주저자, E-mail: ymkong@mail1.pknu.ac.kr

Tel: 051 - 625 - 1604

1. 서론

최적설계는 설계 대상물에 대한 유용성과 안정성을 확보하면서 최소의 재료를 사용하여 최대의

효과를 달성할 수 있도록 그 구조물의 치수와 기하학적 형상 등의 제반 파라미터를 결정하는 것으로, 수학적 관점에서는 각각의 제약조건을 만족하는 설계변수 중에서 목적함수를 최소 혹은 최대화 하는 설계변수 값을 찾는 것이다. 최적설계는 계속적인 반복 작업을 수반하므로, 실제 필요한 정보를 얻기 위하여 많은 시간을 필요로 한다. 그러나 최근 수학적 토대 위에 공학적 설계방법론과 컴퓨터의 처리속도 증가 및 전산해석기술이 접목되면서 비약적으로 발전되어 기계, 항공 및 토목 공학 등 여러 분야에서 구조물 경량설계에 적용되고 있다.

최근 최고의 수준량 및 기술력을 보유하고 있는 조선분야에서도 일부 적용되고 있으나, 그 대상 규모가 작고 또한 구조설계분야가 대부분을 차지하고 있다. (장창두와 나승수 1984, 김기성 등 1992, 양영순 등 1994, Jang et al. 1996, Leheta and Mansour 1997, 신상훈과 남상길 2003, Reyhan 2004, 이재환 등 2004) 그러나 선박의 진동 저감 최적설계에는 아직까지 많은 연구가 이루어지고 있지 않다. 예로 Yang et al.(1999), Kitamura et al.(2000)이 유전 알고리즘(GA)을 이용한 선박 기관실의 최적구조설계를 수행하였다. 정적 및 동적 구속조건을 고려하여 최적설계를 수행하였으나, 구조를 단순화하기 위해 대상 구조물을 이산화 하였다. 또한 양보석 등(2005)은 랜덤 터부 탐색법(R-tabu 법)을 이용하여 컨테이너선의 전선 진동 최적설계를 수행하였고, 공영모 등(2005)이 R-tabu 법을 이용하여 선박의 국부진동에 적용한 예가 있다. 이들은 자체 개발한 NASTRAN 외부 호출형 최적화 소프트웨어(Optship)를 이용하여 대형 선박 구조물 및 국부 구조물에 적용하였다.

그러나 이들 성과는 설계변수가 연속적으로 변할 수 있다는 가정에 기초를 두고 있다. 이와 같은 경우, 현장에서 적용하기 위해서는 안전여유를 고려하여 최적화된 결과 값보다 한 단계 높은 값을 선정하는 것이 일반적이다. 그러나 이 방법은 구조 관점에서는 보다 더 강건한 설계가 가능하지만, 진동 측면에서는 구조물의 고유진동수가 공진점 가까이에 접근하여 오히려 위험을 초래할 수

있다. 선박에 사용되는 강판의 두께나 형강의 크기는 일부 빌드업재를 제외한 대부분은 크기가 제철소에서 표준 규격화하여 생산되는 일정한 규격의 강재 중에서만 선택하여야만 하기 때문에, 실제 설계에 적용하기 위해서는 실수형 최적화 문제를 비선형 정수형 최적화 문제로 확장하여 산업 현장에서 계산결과에 의한 최적값을 직접 사용할 필요성이 있다. (Yokota et al. 1996, Augusto and Kawano 1998, 신영석 1995, 이권희와 주원석 2003, 이권희와 박경진 1998)

따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해, 선박과 같은 대형 구조물의 최적설계에 용이하도록 저자들이 이미 개발한 Optship 을 바탕으로 Optimizer 로 비선형 정수 프로그램을 적용하여 최적설계를 수행하는 방법을 제시한다. 본고에서 적용된 전역최적화 알고리즘인 GA 는 개체 크기 및 돌연변이 확률 등과 같은 파라미터에 따라서 최적해의 정도 및 계산시간에 차이가 발생하므로, 이들 파라미터의 최적화를 우선 수행하였다. 그리고 최적화된 GA 파라미터들을 이용하여 최근 선박진동의 문제가 자주 발생하는 컴퍼스 갑판의 최적화 과정을 통해 Optship 의 유용성과 비선형 정수계획법의 실용성을 확인하였다.

2. 외부 호출형 독립 최적화 기법

저자들에 의해 최근 개발된 NASTRAN 외부 호출형 최적화 기법인 Optship 의 개략적인 흐름도를 Fig. 1 에 나타낸다. 이 기법은 사용자가 정의하는 최적화 과정에서 목적함수의 평가를 위한 해석에 NASTRAN (Moore 1994)을 이용한다. 이를 위해 사용자 정의의 최적화 과정에서 설계변수 및 목적함수의 정보가 필요하며, NASTRAN 실행을 위해 대상 모델 파일이 요구된다.

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

들이 필요하다.

통합 모듈은 다른 4 개의 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 설계변수 및 목적함수 평가에 필요한 특정한 절점에서의 강제응답, 고유진동수와 모드벡터와 같은 NASTRAN 해석결과를 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 알고리즘(GA), R-tabu 법, Simulated Annealing 법 및 인공생명 최적화 알고리즘으로 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 모드벡터의 하나 혹은 그 이상의 함수일 수 있다. NASTRAN 연결모듈은 목적함수 평가모듈로부터 넘겨받은 설계변수를 이용하여 해석모형을 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 Optship 을 기능적으로 구분하여 각 기능을 독립된 모듈로 고려했을 때, 모듈들의

기능을 개괄적으로 서술한 것으로 Optship 의 전체적인 구성을 이해하는데 유용한 서술 방법이다. Optship 의 수행과정을 이해하기 위해서는 다음과 같이 순차적인 관점에서 Optship 을 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.

$$x^* = x^* + \Delta x \quad (1)$$

여기서 Δx 는 최적화방법에 의존하는 시험 설계 변수를 위한 증감을 나타낸다.

14) 통합 모듈: 최적화된 결과를 출력하고 Optship을 종료한다.

3. 유전 알고리즘(GA)

GA는 생물 진화의 원리와 유전학에 바탕을 두고 있다. 우수한 형질을 가진 개체가 자연계에 잘 적응하여 우수한 자손들을 생성한다. 즉, 우수한 적응도(fitness)를 가진 개체가 주위 환경, 즉 최적 설계문제에서 주어진 구속조건하에서 더 큰 생존 확률을 가지고 더 많은 교차 조작에 참가하여 다음 세대에 우수한 개체를 생성한다는 자연계의 법칙과 번식, 교차, 돌연변이의 과정을 수행하는 유전학에 착상을 얻은 최적화 방법이다.

GA의 기본적인 개념은 다음과 같다.

1) GA는 해의 표현 방법으로 생물의 염색체의 개념을 사용한다. 염색체의 유전자로서 흔히 이진수(0, 1)를 이용하고, 이를 이용하여 개체를 표현한다. 이진수를 이용해서 실수영역으로 사상시키는 것을 코딩(coding), 그 반대 과정을 디코딩(decoding)이라고 한다.

2) 위와 같은 방법으로 초기에 지정된 개수만큼 임의로 개체를 만들어서 초기집단을 구성한다. 그리고 초기집단의 각각의 개체에 대해 목적함수를 이용하여 적응도를 계산한다. 적응도는 GA에서 개체의 우수성을 평가하는 척도이며, 다음 세대에 자손을 남길 개체로 선택될 수 있는 기준이 된다.

3)계산된 적응도에 따라 적응도가 높은 개체 2개가 선택되고, 이들을 교차확률(crossover probability)에 따라 일부분을 교차시킨다. 또한 돌연변이확률(mutation probability)에 따라서 임의로운 부분을 바꾸는 돌연변이 조작을 수행한다.

4) 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.

이와 같이 GA는 고전적인 최적화 방법이 기울기(gradient)를 이용하고 한정된 공간에서 모든 점들의 목적함수를 한번에 하나씩 탐색을 하던가, 어떤 임의의 점을 선택하여 탐색을 시작하는 방법과는 달리 기울기 개념을 전혀 사용하지 않고, 방향성 있는 탐색과 확률 탐색을 수행하기 때문에 연속-불연속의 혼합, 불연속, non-convex 영역 등을 포함하는 최적화 문제를 해결할 수 있는 장점이 있다.

3.1 유전자 파라미터 최적화

GA 도 여러 가지 최적 문제를 해결하는데 문제점을 가지고 있고, 이를 보완하기 위해 많은 연구가 이루어져 왔다. 최적화된 결과를 얻기 위해서는 사용자가 결정해야 될 요소가 많이 있다. 특히, 개체 집단의 크기(population size) 및 돌연변이 확률 등은 직접적으로 최적화 결과에 많은 영향을 미친다. GA에서 적당한 돌연변이 확률은 해의 다양성을 높여 전역 최적해를 찾을 확률을 높여주지

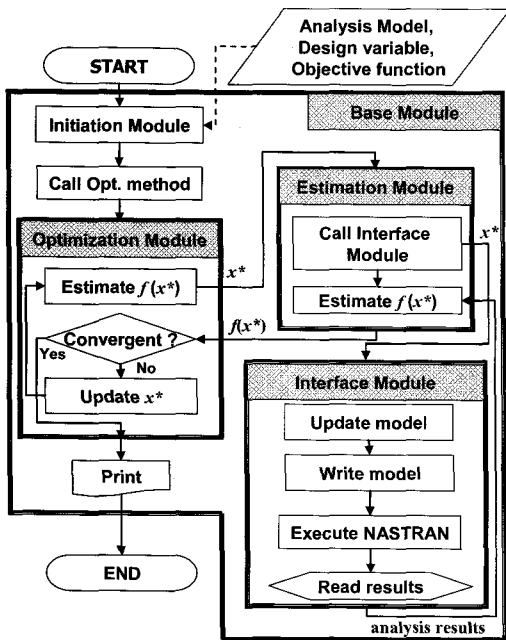


Fig. 1 Flowchart of optship

만, 만약 너무 큰 돌연변이 확률을 사용하는 경우는 해의 수렴속도를 늦추는 원인으로 작용한다. 개체 집단의 크기도 사용자가 결정해야 할 가장 중요한 요소 중 하나이다. 개체 집단의 크기가 너무 작으면 전역 최적해에 도달하지 못할 수 있다. 반면에 크기가 너무 크면, 수렴하는 시간이 필요하므로 효율성의 저하를 초래할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 시험함수(trial function)를 이용하여 GA의 수행을 위한 최적의 파라미터를 결정하는 최적화를 수행하였다. GA 파라미터 최적화에 사용된 최적화

알고리즘으로 GA를 사용하였다. Fig. 2는 전체적인 흐름도를 나타낸다. 그림에서 N_e 는 평가회수, N_{ea} 는 모든 평가회수, A_{ne} 는 평균 평가회수를 의미한다. 편의상 시험함수를 최적화 하는 GA를 GAF(GA for Function optimization)라 하고, GA 파라미터의 최적화를 수행하는 GA를 GAP(GA parameter optimization)로 명명한다. GAP는 설계 변수로 GAF의 파라미터들로 구성되고, 즉 GAF의 개체집단의 크기, 교차확률, 돌연변이 확률, 선택방법 그리고 교차방법 등 5개이며, GAP의 각 개체의 적응도는 GAF가 종료 되었을 때의 목적

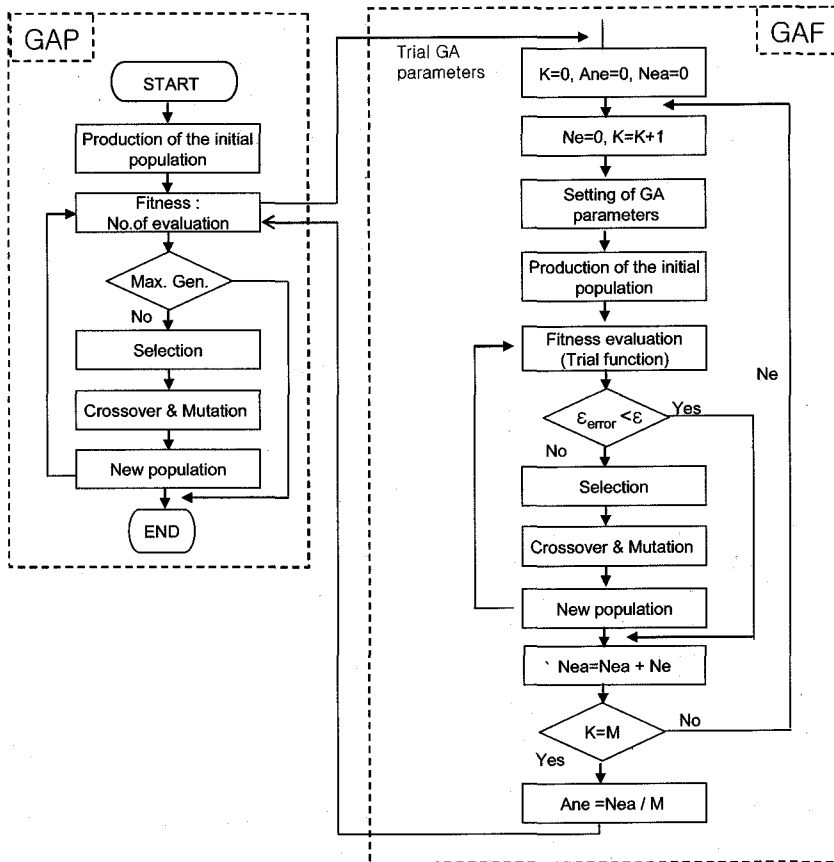


Fig. 2 Flowchart of GA for parameter optimization

함수 평가회수를 근거로 하였다. GAF의 종료조건은 엄밀해가 알려진 시험함수에 대해 각 세대에서 가장 좋은 해의 엄밀해에 대한 오차가 미리 설정된 오차보다 작아지면 종료되는 것으로 하였다. 특히, GA가 확률탐색을 하는 특성을 고려하여 동일한 GA 파라미터에 대해 GAF를 M회 수행하여 평가회수 수를 그 평균으로 고려하였다. GAF의 목적함수로는 식 (5)로 정의되는 시험함수를 사용하였고 GAF의 설계변수 및 구속조건은 식 (6) 및 (7)과 같이 정의하였다. 사용된 시험함수는 하나의 전역해 ($f(x=0) = 0$)와 27^N 개의 국부 최적해를 갖는다. 설계변수는 식 (6)과 같이 $N = 10$ 으로 설정하였다. 이는 적용하고자 하는 구조물의 설계변수의 수와 동일하다.

3.1.1 최적화를 위한 정식화

1) GAP의 정식화

$$\text{Minimize } f(x) = Ane (= Nea / M) \quad (2)$$

여기서 Ane는 GAF에서 시험함수의 평균 평가회수, Nea는 GAF에서 시험함수의 모든 평가회수, M은 동일한 GA 파라미터에 대한 GAF의 수행회수로 본 연구에서는 $M = 5$ 로 설정하였다.

Design variables

$$x = \{P_s, P_c, P_m, M_s, M_c\}^T \quad (3)$$

Subject to :

$$P_s = \{10, 20, 30, \dots, 180, 190\} \quad (4)$$

$$P_c = \{0.1, 0.2, \dots, 0.8, 0.9\}$$

$$P_m = \{0.05, 0.01, \dots, 0.065, 0.9, 0.95\}$$

$$M_s = \{\text{확률바퀴, 서열기반}\}$$

$$M_c = \{\text{단순, 다점, 일정교차}\}$$

여기서, P_s , P_c 및 P_m 은 GAF에서 개체 크기, 교배 확률 및 돌연변이 확률을 의미하고, M_s 와 M_c 는 각각 선택방법 및 교배방법을 나타낸다.

2) GAF의 정식화

Minimize

$$f(x) = \sum_{i=1}^N [x_i^2 - \alpha_i \cos(\frac{2\pi x_i}{\beta_i}) + \alpha_i] \quad (5)$$

Design variables :

$$x = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}^T \quad (6)$$

Subject to

$$-10 \leq x_i \leq 100, \quad i = 1, \dots, N \quad (7)$$

여기서, $\alpha_i = 1$, $\beta_i = 4$, $N = 10$ 이다.

계산의 종결 조건(termination condition)으로는 다음 식을 이용하였다.

$$\varepsilon_{error} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i^{(best)} - x_i^{(opt)}|}{\Delta x_i} \leq \varepsilon \quad (8)$$

여기서, ε 은 사전에 설정된 값으로 0.01로 하였으며 $x_i^{(best)}$ 는 각 세대에서 가장 우수한 해의 i 번째 설계변수 값, $x_i^{(opt)}$ 는 i 번째 설계변수 최적해, Δx_i 는 설계변수 구간이다.

본 연구에서 유전 연산에 크게 영향을 끼치는 개체크기, 교배 확률, 돌연변이 확률, 선택방법, 교배방법을 최적화 하도록 하였다. 선택방법은 크게 확률바퀴 선택, 서열기반 선택으로 구분하였다. 교배방법은 단순 교차, 다점 교차 및 일정 교차로 분류하였다. 본 연구에서는 여기에서 얻어진 GA 파라미터를 이용하여 컴퍼스 갑판의 정수형 최적 설계를 수행하였다.

3.1.2 최적화 결과 및 고찰

본 연구에서는 GA 프로그램의 보안을 위하여 적용에서 많은 문제가 되고 있는 GA 파라미터, 즉 개체 크기, 교배 확률, 돌연변이 확률, 선택방법, 교배방법을 최적화하여 가장 적합한 값을 구하였다. Table 1은 GA 파라미터의 최적화 전후의 결과를 요약하였다.

그리고 본 최적화의 타당성을 확보하기 위해, 본 연구에서 적용할 구조물을 이용하여 파라미터들을 변화시키면서 목적함수 평가 회수에 대한 목적함수 값을 비교하였다. Fig. 3 ~ 5는 GA 파라미터인 개체 크기, 교배 확률, 돌연변이 확률의 최적

Table 1 Comparison of GA's parameter after/ before optimization.

Parameter	Original	Optimum
Population size	100	10
Crossover probability	0.8	0.1
Mutation probability	0.1	0.065
Selection method	Roulette	Ranking
Crossover method	Uniform	Simple

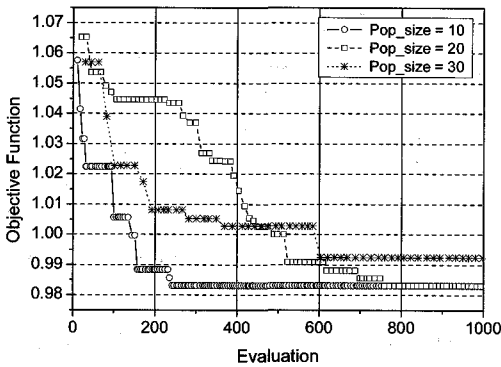


Fig. 3 Comparison of the population size

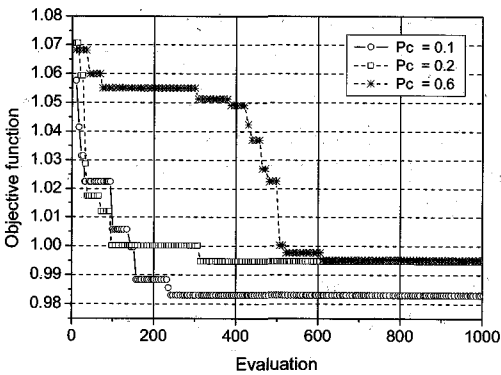


Fig. 4 Comparison of crossover probability

화 된 값을 대상 구조물을 이용하여 검증한 것을 도식화 하였다. 여기서 횡축은 목적함수 평가 회수 그리고 종축은 목적함수 값을 나타낸다. 결과에 의하면, 최적화에 의한 결과 값이 전역해에 수렴하는 속도가 좋을 수 있다. 그러므로 본 최적화 연산을 이용하여 컴퍼스 갑판의 정수형

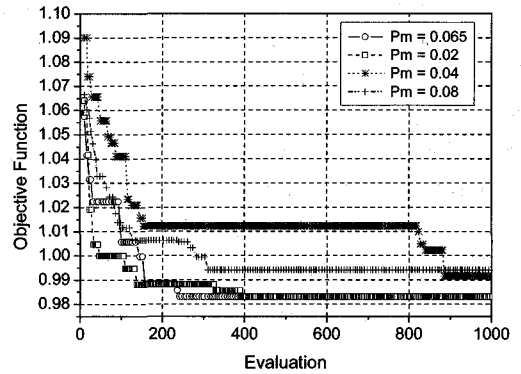


Fig. 5 Comparison of mutation probability

최적설계를 위한 최적 파라미터로 사용함이 상당함을 알 수 있다.

4. 컴퍼스 갑판의 진동 해석

컴퍼스 갑판의 진동해석은 대형 구조물의 해석에 유용한 상용 유한요소 프로그램인 NASTRAN을 이용하였다. 진동해석을 위한 해석대상 컴퍼스 갑판의 기하학적 형상과 부재 배치는 경계조건 등과 함께 Fig. 6에 나타내었다. 본 연구에 적용된 대상선의 주요 제원을 Table 2에 정리하였다.

Table 3은 해석모델의 보강재 크기, 판 두께 및 주요 재료의 데이터를 보여주고 있다. 해석 정도 및 모델링 시간을 고려하여, 조선소의 해석 및 충격시험의 경험을 바탕으로 모델링 범위를 컴퍼스 갑판 부분만 포함하였고, 경계조건은 Fig. 6의 실선부분으로 격벽이 있는 부분은 모두 단순지지, 종 및 횡 격벽이 서로 교차하는 부분은 고정 그리고 컴퍼스 갑판과 항해 갑판 사이에 있는 2개의 기둥은 단순지지로 설정하였다. 그리고 상부에 설치된 레이더 마스트의 중량은 컴퍼스 갑판에 미치는 영향이 크므로, 본래 위치에 임의의 박스를 모델링 하여 질량밀도를 수정하여 중량을 고려하였다.

Table 4는 본 연구에서 적용된 선박의 주요 기진원의 사양을 나타낸다. 공진회피 설계에서는 일반적으로 고유진동수가 최대 엔진 속도에서 최대 기진주파수인 프로펠러의 블레이드 통과 주파수

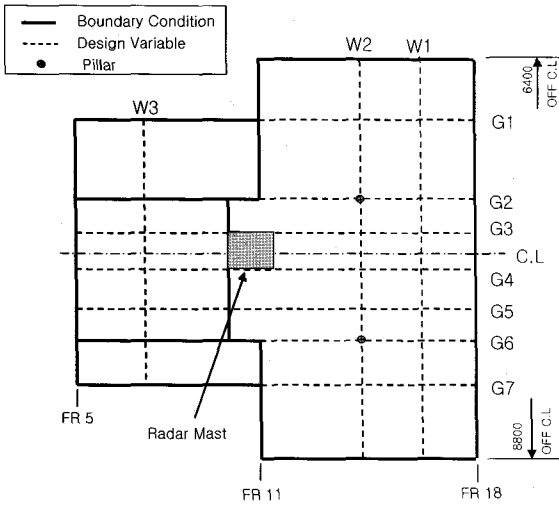


Fig. 6 Model and design variables of compass deck

Table 2 Principal dimensions

Length overall	208 m
Length between perpendiculars	196 m
Breadth moulded	29.8 m
Depth moulded	16.4 m
Draft design	10.2 m

Table 3 Main data of modeling

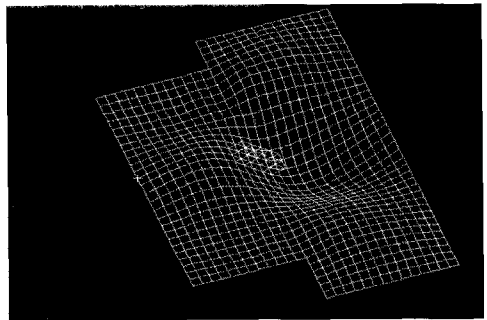
Geometry data		Material data	
Plate Thickness	8.0 m	Elastic Modulus	206 GN/m ²
Web & Girder size	250×90 ×10/15A	Poisson ratio	0.3
Frame/longi. space	800 mm	Mass density	7850 kg/m ³

(블레이드 수×회전주파수)의 2 배를 초과하도록 구조물의 강성을 결정한다.

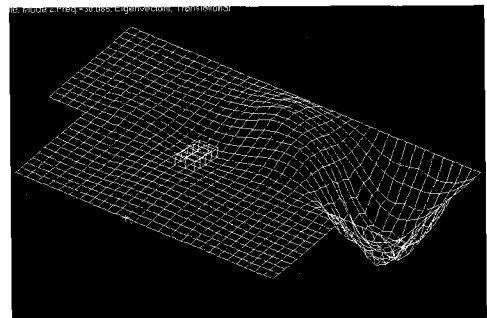
따라서 본 연구에서도 프로펠러의 블레이드 통과 주파수의 2 차 성분인 16.33 Hz 에 안전 여유로 2.54 Hz 를 고려한 18.87 Hz 를 설계목표 주파수로 설정하였고, 국부 구조물의 고유진동수가 이 설계목표 주파수 이상이 되도록 설계하였다.

Table 4 Specification of main excitation sources

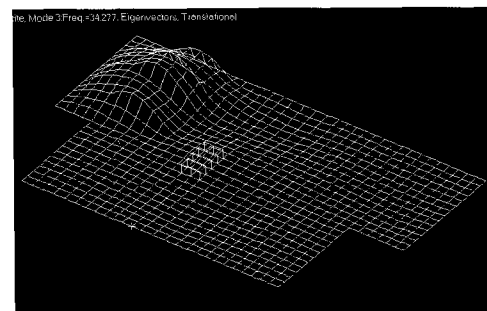
Excitation source	MCR	Excitation	
		Order	Frequency
Main engine (6RTA72U)	98 rpm	3rd	4.90 Hz
		4th	6.53 Hz
		6th	9.80 Hz
Propeller (Blade: 5EA)		1st	8.17 Hz
		2nd	16.33 Hz



(a) 1st mode (16.78 Hz)



(b) 2nd mode (30.09 Hz)



(c) 3rd mode (34.28 Hz)

Fig. 7 Mode shape of compass deck

Fig. 7 은 NASTRAN 을 이용한 대상 모델의 고유진동 해석 결과이다. 컴퍼스 갑판의 주요 저차 진동 모드와 이의 고유진동수를 나타낸다. 16.78 Hz 의 1 차 모드는 컴퍼스 갑판에서 발생하는 전형적인 모드로서, 레이더 마스트 앞쪽 갑판의 수직 진동 모드이다. 현장에서 발생하는 대부분의 진동이 여기에 포함된다. 컴퍼스 갑판의 하부는 조타실로서 작업 공간의 확보를 위하여 다른 갑판과는 달리 격벽을 설치할 수 없으므로, 상대적으로 구조 강성이 취약하여 고유진동수가 감소하고 주로 선박의 주요 기진원과의 공진 발생이 우려되는 모드이다. 본 모델의 경우도 1 차 고유진동수와 프로펠러의 블레이드 통과 주파수의 2 차 성분인 16.33 Hz 가 약 0.45 Hz 떨어져 있고 분리여유(separation margin)가 2.8%로 공진영역에 포함되어 있다. 2 차와 3 차 모드는 갑판의 바깥쪽에서 발생하는 국부 진동모드로 상대적으로 고유진동수가 높은 곳에 있으므로 공진의 가능성은 거의 없다. 그러므로 본 연구에서도 컴퍼스 갑판의 1 차 모드인 수직모드를 관심 모드로 설정하여 공진회피를 통한 안전한 구조를 구현하고자 하였다.

5. 컴퍼스 갑판의 최적설계

5.1 최적설계 정식화

(1) 설계 변수

컴퍼스 갑판의 주된 진동모드는 거더(girder)와 웨브(web)의 수직방향에서의 전체 진동이며, 주된 인자는 거더와 웨브의 강성(stiffness)이다. 그러므로 본 연구에서는 Fig. 6 에 나타낸 컴퍼스 갑판 내의 주요 거더와 웨브 부분을 설계변수로 식 (9)와 같이 선정하였다.

$$x = \{W_1 \ W_2 \ W_3 \ G_1 \ G_2 \ G_3 \ G_4 \ G_5 \ G_6 \ G_7\}^T \quad (9)$$

여기서, W 는 웨브의 크기, G 는 거더의 크기를 의미한다.

(2) 제약 조건

선박 건조 시 건조명세서에 명시되어 있는 갑판에서 천장까지의 거리(ceiling height)를 고려하면, 보강재의 웨브 길이 L_w 는 식 (10)과 같이 제한된다. 이를 만족하고 표준화 된 강재로서 조선소에

서 자주 사용하는 Table 5 의 부재로 제한하였다.

$$200 \leq L_w \leq 550mm \quad (10)$$

또한, 국부 진동설계의 기본개념은 응답의 최소화 에 있으나, 국부 구조에 미치는 기진력을 정확히 평가하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 공진회피 설계를 위하여 대상 구조물의 고유진동수 ω_n 을 설계목표 주파수 18.87Hz 이상이 되도록 아래와 같이 제한하였다.

$$\omega_n \geq 18.87Hz \quad (11)$$

Fig. 8 은 본 연구에서 사용된 유효 폭에 해당하는 판과 보강재의 단면을 나타낸다.

(3) 목적 함수

최적을 나타내는 기준으로서 부재 중량 W_m 과 관심영역의 범위(MCR rpm 이하) 내에서 발생하는 최대진동속도응답의 크기 R 을 선형적으로 합성한 값이 최소가 되도록 식 (12)와 같이 목적함수를 설정하였다.

$$\text{Minimize } f(x) = \alpha (W_m/W_0) + \beta (R/R_0) \quad (12)$$

여기서 α , β 는 가중치, W_0 는 초기 중량(레이더 마스트의 중량 제외), R_0 는 기준 진동속도응답(수직방향, 중앙위치의 최대진폭)을 나타낸다. 가중치의 값에 영향이 거의 없고, $\alpha = 1$, $\beta = 0$ 일 때가 가장 최적의 값을 얻을 수 있음은 이미 검토되었다.(공영모 등 2005) 그러므로 본 연구에서는 가중치가 $\alpha = 1$, $\beta = 0$ 일 때를 고려하여 컴퍼스 갑판의 최적설계를 수행하였다

Table 5 Corresponding cross section of steel members

Stiffener size	$L_w \times L_f \times T_w/T_f$
200A	200 × 90 × 9/14
250A	250 × 90 × 10/15
300A	300 × 90 × 11/16
350A	350 × 100 × 12/17
400A	400 × 100 × 12/18
450A	450 × 125 × 11.5/18
500A	500 × 150 × 11.5/18
550A	550 × 150 × 12/21

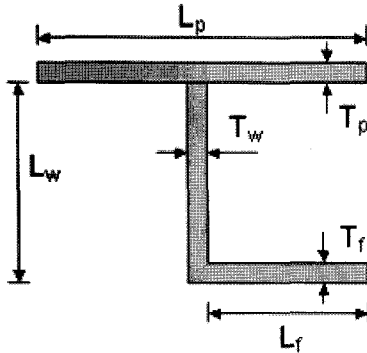


Fig. 8 Section of stiffener

5.2 최적화 결과 및 고찰

본 연구에서는 컴퍼스 갑판의 방진설계를 위하여, 설계변수인 컴퍼스 갑판상의 웨브와 거더의 최적의 크기를 갖도록 Optship 을 이용하여 계산을 수행하였다. 최적화 결과를 실제 설계에 반영 가능하도록 알고리즘은 비선형 정수형 문제를 위한 GA 를 최적화 알고리즘으로 채택한다. 3 절에서 설명한 바와 같이 GA 파라미터를 최적화 하여 본 문제에 적용하였다.

Table 6 는 최적화 전후의 설계변수의 변화를 나타낸다. 구조물의 중앙부 거더인 G_3 가 약 80%, 나머지 부분은 20% 감소하는 것을 보여준다. 이는 특정 범위 이상으로 고유진동수를 증가시키기 위해서는 진동모드에서 변위 폭이 가장 크고 민감한 부분의 강성을 증가시키는 것이 가장 합리적인 보강 방법임을 이 결과에서 보여주고 있다. Table 7 은 초기 구조와 최적화 후의 구조물의 고유진동수, 임의의 기진력에 대한 MCR 에서의 진동응답 및 컴퍼스 갑판 중량의 변화를 보여준다. 1 차 고유진동수가 16.78 Hz 에서 18.91 Hz 로 12.69% 증가함에 따라 프로펠러 기진주파수와와의 분리여유가 2.8%에서 15.8%로 증가하여 공진영역에서 벗어나게 되고 이에 따라 진동속도 응답도 61.24% 감소하게 된다. 고유진동수의 증가와 응답이 감소하였음에도 불구하고, 중량은 오히려 감소한 것을 알 수 있다. 이는 재료비 및 선체 중량 측면에서 추가 부담 없이 고유진동수의 이동을 통한 공진영

역 회피를 통하여 국부 진동문제를 해결할 수 있음을 보여준다.

최적화 후의 1 차 진동모드를 Fig. 9 에 나타낸다. 갑판 전체의 모드이기 때문에, 최적화 전과 후의 진동 모드의 변화는 거의 없고 고유진동수만이 상승하였음을 알 수 있다. 계산 결과에 의하면, 컴퍼스 갑판 구조물의 고유진동수가 설계목표 주파수 이상으로 증가한 것을 알 수 있다. 그리고 최적화 전후의 MCR 회전속도에서의 응답이 상당히 감소되었음을 보여준다.

단, 본 연구에 사용된 기진력은 임의의 값이므로, 절대적인 값보다 감소율에 의미가 있다. 특히, 조선소에서 사용하고 표준 형강을 Table 6 화하여 그 중에서 가장 최적의 부재를 선정하도록 하는 비선형 정수형 알고리즘을 이용한 결과를 이용하여 현장에서 직접 사용이 가능함을 알 수 있다.

Table 6 Comparison of original and optimal design variables

Design variable	Original	Optimum	Remarks
W_1	250	200	-20%
W_2	250	200	-20%
W_3	250	200	-20%
G_1	250	200	-20%
G_2	250	200	-20%
G_3	250	450	80%
G_4	250	200	-20%
G_5	250	200	-20%
G_6	250	200	-20%
G_7	250	200	-20%

Table 7 Comparison of results

Item	Original	Optimum	Remarks
Natural frequency	16.78Hz	18.91Hz	12.69%
Response at MCR	10.50mm/s	4.07mm/s	-61.24%
Weight	2760 kg	2537 kg	-8.08%

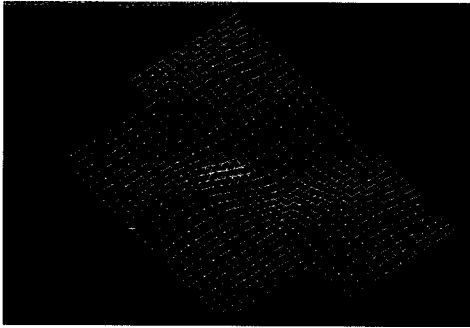


Fig. 9 Mode shape of compass deck after optimization

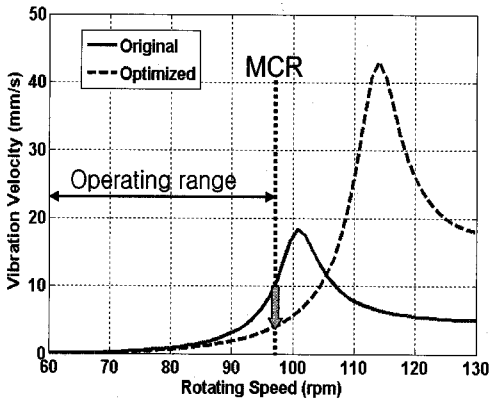


Fig. 10 Comparison of response between original and optimum results

6. 결론

본 연구에서는 조선소에서 사용하고 있는 표준화된 형상을 Table 화 하여 가장 최적인 부재를 선정하도록 하기 위한 최적화 기법으로 비선형 정수 계획법을 제안 하였다. 먼저 비선형 정수형 최적화에 이용된 유전 알고리즘(GA)의 적절한 파라미터를 얻기 위한 최적화 작업을 시험함수를 이용하여 수행하였다. 그리고 얻어진 GA 파라미터 값들이 최적화된 값을 실제 적용된 구조물을 이용하여 검증하였다. 마지막으로 본 연구에서 제안한 GA 파라미터를 최적화한 비선형 정수형 알고리즘을 이용하여 실제 진동발생 우려가 있는 선박의

컴퍼스 갑판 구조물을 대상으로 최적설계를 수행하여 진동문제를 해결함으로써 제안된 방법의 유용성을 검증 하였다.

최적화 결과에 의하면, 추가적인 보강재 무게의 증감 없이 구조물의 국부 공진회피를 위하여 특정 모드의 고유진동수가 적절하게 이동되었으며, 이를 위한 최적의 보강재 크기를 결정할 수 있었다. 이러한 결과를 실제 조선소에서 사용함으로써 설계 초기단계에서 진동 저감을 위해 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 공영모, 최수현, 송진대, 양보석, 2005, “선박 컴퍼스 갑판 구조물의 저진동 최적설계”, 대한조선학회 논문집, 제 42 권, 제 3 호, pp. 249-258.
- 김기성, 김익태, 김윤영, 1992, “고정지지된 Sandwich Panel의 최적설계에 관한 연구”, 대한조선학회 논문집, 제 29 권, 제 2 호, pp. 115-122.
- 신상훈, 남성길, 2003, “상하부 스톨을 고려한 파형 격벽 최적 설계에 관한 연구”, 대한조선학회 논문집, 제 40 권, 제 4 호, pp. 53-58.
- 신영석, 1995, “혼합 이산변수를 가진 보강 평판의 최적설계”, 한국강구조학회 논문집, 제 7 권, 제 4 호, pp. 177-184.
- 양보석, 공영모, 최수현, 채상일, 송진대, 김용한, 2005, “선박 구조물의 진동 최적설계를 위한 NASTRAN 기반 최적화 프레임웍의 제안”, 한국소음진동공학회논문집, 제 15 권, 제 11 호, pp. 1223-1231.
- 양영순, 김기화, 유원선, 1994, “유전자 알고리즘에 의한 선체 구조물의 이산적 최적설계”, 대한조선학회 학회지, 제 31 권, 제 4 호, pp. 147-156.
- 이권희, 박경진, 1998, “제한조건이 있는 문제의 이산설계공간에서의 강건 최적설계”, 대한기계학회 논문집 A 권, 제 22 권, 제 5 호, pp. 728-737.

- 아권희, 주원식, 2003, “ 타부탐색을 이용한 이산설계공간에서의 구조물의 최적설계”, 대한기계학회 논문집 A 권, 제 27 권, 제 5 호, pp. 798-806.
- 이재환, 허유정, 정태환, 이종무, 2004, “ 심해용 무인잠수정 구조의 민감도해석에 의한 최적설계”, 대한조선학회 논문집, 제 41 권, 제 3 호, pp. 28-34.
- 장창두, 나승수, 1984, “ 선체구조의 최적설계 (제 1 보)”, 대한조선학회 학회지, 제 21 권, 제 4 호, pp. 29-39.
- Augusto, O. B. and Kawano, A., 1998, “ A Mixed Continuous and Discrete Nonlinear Constrained Algorithm for Optimizing Ship Hull Structural Design”, Ocean Engineering, Vol. 25, No. 9, pp. 793-811.
- Jang, C.D., Seo, S.I. and Kim, K.K., 1996, "A Study on the Optimum Structural Design of Surface Effect Ships", Marine Structure, Vol. 9, pp. 519-544.
- Kitamura. M, Nobukawa. H and Yang. F, 2000, “ Application of a Genetic Algorithm to the Optimal Structural Design of a Ship’ s Engine Room Taking Dynamic Constraints into Consideration”, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 5, pp. 131-146.
- Leheta, H. W. and Mansour, A. E., 1997, “ Reliability- based Method for Optimal Structural Design of Stiffened Panels”, Marine Structure, Vol. 10, pp. 323-352.
- Moore, G., 1994, MSC.NASTRAN Design Sensitivity and Optimization, User’ s Guide, The MacNeal-Schwendler Corp..
- Reyhan, O., 2004, “ A Review of Recent Ship Vibration Papers”, The Shock and Vibration Digest, Vol. 36, No. 3, pp. 207-214.
- Yang, J. M., Hwang, C. N., Lin, S. F., Wu, C. C., and Chen, C. P., 1999, “ The Application of Genetic Algorithm on Optimization of Ship Structural Elements”, Proc. of the 13th Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures, pp. 431-444.
- Yokota, T., Gen, M. and Li, Y. X., 1996, “ Genetic Algorithm for Non-linear Mixed Integer Programming Problems and Its Applications ”, Computer in Industrial Engineering, Vol. 30, No. 4, pp. 905-917.



< 공 영 모 >



< 최 수 현 >



< 송 진 대 >



< 양 보 석 >