

전역탐색법을 이용한 선박 국부구조물의 최적설계

Optimum Design of Local Structure in Ship Based on Global Search Method

공 영 모[†] · 최 수 현* · 송 진 대** · 양 보 석***
Y. M. Kong, S. H. Choi, J. D. Song and B.S. Yang

Key Words : Optimum Design (최적설계), Local Vibration(국부진동), External Call Type (외부호출형)

ABSTRACT

Recently, the importance of vibration reduction at the local structure such as tank, deck which attached machinery and compass deck, has continuously increased by owner and shipbuilder. Because crews are afflicted with them and severe vibration problems affect on the crack of structure. This study conducted optimum design to get a stiffener size of local structure to reducing the vibration level and decreasing the weight of structure in ship. Random tabu search method (R-Tabu) has fast converging time and can search variables size domains for nonlinear problems. This paper used Nastran external call type independence optimization method which makes using a solver module from Nastran.

1. 서론

최근의 선박 진동문제는 과대진동에 의한 구조물의 피로파괴뿐만 아니라, 선원의 근무환경조건의 고급화 추세에 따라 선실의 쾌적함을 위하여 선주가 요구하는 허용 진동치가 지속적으로 엄격해지고 있다. 특히, 최근 선박은 고회전 엔진의 채용과 구조의 최적화에 따른 경량화 등으로 인하여 선체 국부진동의 발생이 증가되고 있는 경향이 다. 국부진동은 선박진동의 90% 이상을 차지하고 있으며, 설계단계에서의 방진설계가 가장 효과적이다. 본질적으로, 선박의 기진원이 주 기관, 보조기관, 프로펠러, 파도, 유체운동 등 다양하고, 또 구조계 및 선내 기계장치 등이 복잡, 다양하기 때문에 진동이 없는 선박을 건조한다는 것은 거의 불가능하다. 그러나 진동문제가 자주 발생하는 부분 등의 경험적인 정리 및 최적화 작업 등을 이용한 방진 표준화 작업등을 통하여 조금이나마 항해 중에 발생하는 진동발생에 대한 비용을 줄일 수 있다.

최적화(Optimization)는 설계대상물에 유용성과 안정성을 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 혹은 최대화 하는 설계변수 값을 찾는 것이다. 대형 구조물의 진동 및 구조특성을 파악하기 위하여 일반적으로 상용 Software인 Nastran 혹은 Ansys를 사용한다. 특히, Nastran에서는 최적화 모듈을 공급하

고 있으나, 감도해석을 기반으로 하는 최적화 기법으로서, 목적함수와 설계변수를 설정하는데 많은 제약이 있고, 국부탐색기법으로 전역적인 최적해를 구하는 것이 어렵다. 또한 복잡한 사용자 정의의 최적화 기법을 결합하여 사용할 수 없는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 일반 최적화 알고리즘의 국부 수렴을 방지하기 위하여, 전역최적화 알고리즘인 Random tabu탐색법을 이용하고 대형 구조물 해석을 위한 상용프로그램인 Nastran을 이용한 Nastran 외부호출형 최적화 기법을 이용한다. 본 기법은 기본적인 목적함수 뿐만 아니라, 사용자가 정의하는 복잡한 형태의 목적함수도 설정할 수 있으며, 다양한 설계변수를 선택할 수 있는 장점이 있다. 그리고 본 연구에서 사용된 Random tabu 탐색법은 비선형 및 비볼록다각형 형태의 문제를 해결하는데 매우 성공적이고 최적해 수렴속도가 빠른 것으로 이미 입증되었다.

설계대상은 국부진동문제로 자주 발생하고 있는 Compass Deck (Wheel House Top Deck)를 선정하였다. 특히, Compass Deck는 하부에 선박을 운항하는 조타실이 위치하고, 작업특성상 넓은 공간을 요구함에 따라 다른 선실과 달리 실내에 격벽을 설치할 수 없다. 그리고 항해를 위한 Radar 설치용 Mast가 이곳에 위치하고 있으므로 Compass Deck는 진동관점에서 매우 불리한 구조를 갖고 있다.

Compass Deck의 방진설계를 위하여, 주요 기진원과의 공진회피를 위한 설계목표주파수(design target frequency)이상의 고유진동수를 갖도록 구속하였고, 조타실의 Ceiling Height등을 고려하여 설계변수의 변화 량을 구속하였다. 최종적으로 무게의 증가에 따른 무게 및 Compass Deck 중앙에서의 수직방향의 진동응답을 최소화하도록 구성하여, 설계변수인 Compass Deck상의 Web와 Girder가 최적의 size를 갖도록 계산하였다.

† 정회원, ㈜대우조선해양 선박해양연구소
E-mail : ymkong@mail1.pknu.ac.kr
Tel : (051) 625-1604, Fax : (051) 620-1405
* 정회원, ㈜대우조선해양 선박해양연구소
.. 정회원, 부경대학교 대학원
... 정회원, 부경대학교 기계공학부

2. 외부 호출형 독립 최적화 기법

본 연구에서 사용하는 Nastran 외부호출형 독립 최적화 기법은 사용자가 정의하는 최적화 과정에서 그 목적함수의 평가를 위해 Nastran을 사용하는 것이다. 이를 위해 사용자 정의 최적화 과정에서 설계변수 및 목적함수 정보가 필요하며, Nastran 실행을 위해 대상 모델파일이 요구된다.

일반적으로 모델은 크게 CAD 프로그램을 이용하여 제작된 형상을 넘겨받는 방법과 유한요소모델링 프로그램을 이용하여 모델링하는 방법이 있다. 전자는 형상제작까지는 쉽게 할 수 있으나, 요소 생성시 타 유한요소 프로그램을 사용해야 하는 단점이 있고, 후자는 형상제작은 전자보다 어려우나, 요소생성과 구속, 하중조건을 부과하기 용이한 장점이 있다. 설계자의 취향에 맞게 사용될 수 있는 부분이다. 모델링 후 설계자가 최적화 하고자 하는 요소들 즉, 판 요소의 두께, 보 요소의 크기나 단면적 등을 설계변수로 지정하고, 대상물이 보다 나은 설계가 되도록 하는 목적함수를 선정한다.

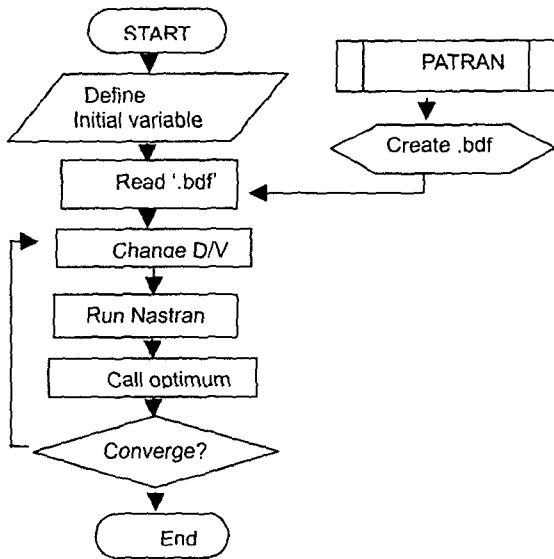


Fig. 1 Flow chart of optimization algorithm

목적함수로는 해석 틀에서 제공하는 무게, 부피, 고유진동수, 소음레벨과 같은 간단한 것부터 해석틀의 결과물(응답, 고유진동수 등)을 독립변수로 그들의 함수로 정의되는 임의의 목적함수까지 다양하게 선정할 수 있다. 그리고 대상구조물의 구조적 안정성 등을 고려한 구속조건을 정의해서 비현실적인 설계를 방지하도록 하였다. 구속조건은

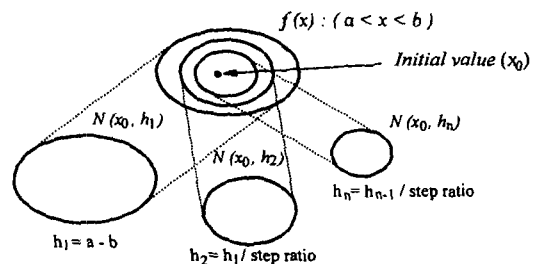
선정 역시 목적함수의 선정과 유사하게 다양한 가능성을 제공한다. 본 연구에서 사용한 기법의 흐름도는 Fig. 1와 같다.

3. R-Tabu 최적화 방법

Hu는 Glover가 고안한 tabu탐색법을 개량하여 Random Tabu 탐색법(R-Tabu법)을 제안하고, 그 방법을 일반적인 구속조건이 있는 최적화 문제에 적용했다. R-Tabu 법에서는 새로운 step수, count수의 2개의 정수를 정의한다. Step수는 탐색하고자 하는 근방영역의 개수이고, count 수는 하나의 근방영역을 탐색하는 횟수의 상한치를 나타낸다. 알고리즘의 순서도는 Fig. 2와 같다.

R-tabu법은 각각의 근방영역 중에서 탐색을 시작할 초기치 x 를 임의로 발생시키고, 그것에 의한 $f(x)$ 가 $f(x_0)$ 보다 적으면, 그 점을 영역내의 최소점으로 기억한다. 이 과정을 반복해서 전체 근방영역에서 선택된 최소점들 중에서 가장 작은 x 를 2차 근사해 x_1 으로 하고, x_1 주위에 다시 근방영역을 설정하여 앞의 탐색과정을 다시 반복한다. 이 방법의 특징은 다음과 같다.

- 1) 탐색영역을 크기가 다른 여러 영역으로 분할해서 탐색을 하기 때문에 맹목적인 탐색을 피할 수 있고, 따라서 탐색에 필요한 횟수를 줄일 수 있다.
- 2) Random 탐색을 하기 때문에 국소적 최적해에 빠지는 것을 막을 수 있고, 전역적 최적해를 구하는 것이 가능하다.
- 3) 다른 최적화 방법과 조합하여 사용함으로써 정도가 보다 좋고, 최적해에 도달하는 수렴속도를 더욱 향상시킬 수 있다.



1) Initialization of neighbor

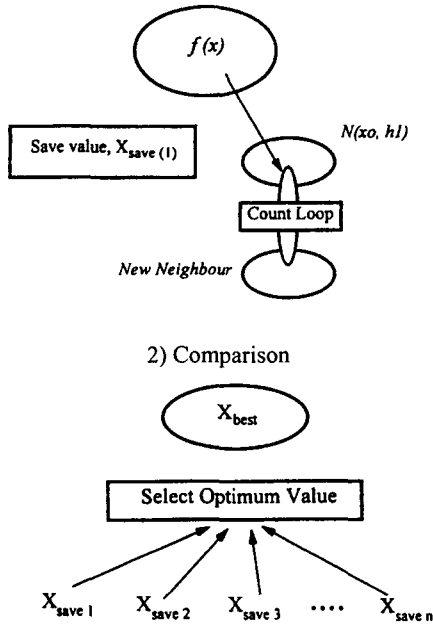


Fig. 2 Flowchart of random tabu search method

4. Compass Deck 최적설계

4.1 대상 선정

국부진동문제의 주요 원인 및 문제영역은

1) 조선소에서 설계하고 있는 선박들의 대부분이 선형, 크기 별로 구조중심의 표준화 작업이 이루어져 있고, 선주의 요구조건에 따라 변경하고 있는 추세이다.

2) 최근의 선박은 고출력 엔진을 사용하고, 고속화 영향 등으로 선박의 국부진동측면에서 매우 불리한 조건을 갖게 된다.

3) 국부진동의 경우, 운전상태에 따라 진동양상이 많이 변경함으로써, 정확한 기준을 정립하지 못한다. 또한 문제발생시 보강방법이 전선진동에 비하여 쉽기 때문에 설계단계에서 간과하는 경향이 있다.

4) 국부진동의 다발지역으로는 각종 유류탱크, 청수탱크, 장비하부 Deck, Compass Deck, Radar Mast, Bridge Wing 등이 있다.

본 연구에서는 상기 문제 영역 중 Compass Deck를 선정하였다. 이는 하부에 선박을 운항하는 조타실이 위치하고, 작업특성상 넓은 공간을 요구함에 따라 다른 선실과 달리 실내에 격벽을 설치할 수 없기 때문이다. 그리고 항해를 위한 Radar 설

치를 위한 Mast가 이곳에 위치하고 있으므로 구조물이 진동관점에서 매우 불리한 구조를 갖고 있다.

4.2 해석모델

Compass Deck의 진동해석은 대형구조물의 해석에 유용한 상용 유한요소프로그램인 Nastran을 사용하였다. 해석을 위한 모델은 Fig. 3과 같다. 해석 정도의 향상을 위하여 당사에서의 경험(해석 및 Impact Test)을 기반으로 모델링 범위 및 경계조건을 설정하였다. 그리고 상부에 설치된 Radar Mast는 중량을 고려하여 이산화하여 모델링 하였다. Table 1은 본 연구에서 적용된 선박의 주요 기진원을 나타낸다.

Table 1 The Main Excitation Frequency

Main Engine			Propeller		
RPM (MCR)	Frequency (Hz)		No. of Blade	Frequency (Hz)	
97 RPM	6th	9.7	5 EA	1st	8.08
				2nd	16.2

4.3 최적설계 정식화

(1) 설계변수

Compass Deck의 주된 진동모드는 Girder와 Web의 수직방향의 전체 진동으로서 주된 인자는 Girder와 Web의 강성이다. 그러므로 본 연구에서는 Fig. 3와 같이 Compass Deck 내 주요 Girder와 Web를 설계변수로 선정하였다.

설계변수는 10개이고 변수 범위는 Web 길이 (WL)를 구조 및 Ceiling Height등을 고려하여 아래와 같이 제한하였다.

$$200 \leq WL \leq 550 \text{ [mm]}$$

(2) 목적함수

관심영역 범위(MCR RPM 이하) 내에서 발생한 최고응답의 크기 및 부재 무게를 선형적으로 합성한 값이 최소가 되도록 목적함수를 아래와 같이 설정하였다. 그리고 보다 효율적인 값을 얻기 위하여 가중치(weighting factor)에 따라 설계변수의 변화 양을 검토하였다.

구속조건으로는 설계변수인 보강재의 Web Length를 제한하였으며, 대상 구조물의 고유진동수를 설계목표주파수(design target frequency) 이상이 되도록 아래와 같이 구속하였다.

$$\text{Minimize } f(\mathbf{X}) = \alpha \left(\frac{M_1}{M_0} \right) + \beta \left(\frac{R}{0.01} \right)$$

$$\text{Subject to : } g_1(\mathbf{X}) : 200 \leq WL \leq 550 \text{ [mm]}$$

$$g_2(\mathbf{X}) : \omega_n \geq 18.67$$

여기서, α, β : 가중치, M_0 : Original Mass (Radar Mast)

Weight 제외), M_1 : Last Mass (Radar Mast Weight 제외), R : 진동응답 (Velocity, Vertical Center), ω_n : 구조물의 고유진동수, WL : Web Length of Stiffener

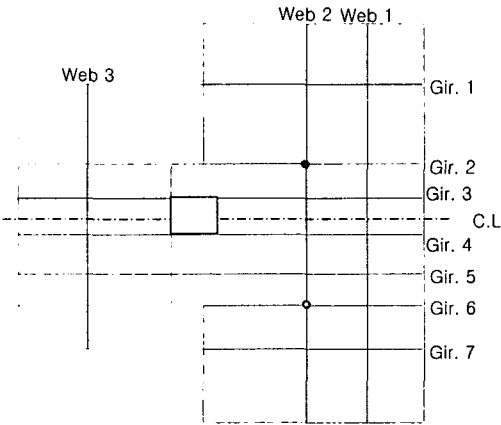


Fig. 3 Model and Design Variable of Compass Deck

4.4 최적화 결과 및 고찰

Compass Deck의 방진설계를 위하여, 주요 기진 원과의 공진회피를 위한 조건으로 설계목표주파수 이상의 고유진동수를 갖도록 구속하였고, 조타실의 Ceiling Height등을 고려하여 설계변수의 변화량을 구속하였다. 최종적으로 부재의 증가에 따른 무게 및 Compass Deck 중앙에서의 수직 항의 진동 응답(Velocity, mm/s)을 최소화 하도록 구성하여, 설계변수인 Compass Deck상의 Web와 Girder가 최적의 Web Length를 갖도록 계산하였다.

Table 2는 보다 효율적인 값을 구하기 위하여 가중치에 따라 설계변수의 변화 양을 보여주고 있다. 구속조건을 고려할 때, 응답 최소화의 경우에는 상한에 수렴하는 의미 없는 해가 되므로 부재 증가의 중량을 최소화하는 방법이 정확한 해를 구할 수 있음을 알 수 있다. 가중치에 무관하게 최적화된 결과값이 유사한 양상을 갖게 됨을 알 수 있다.

Table 3는 최적화 후의 설계변수의 변화를 나타낸다. 구조물의 중앙부 Girder (Gir.3)가 설계변수의 변화 양이 많음을 보여준다. 이는 특정 범위 이상의 고유진동수 증가를 위하여는 모드에서 변위 폭이 가장 크고 민감한 부분의 강성을 키우는 것이 가장 합리적인 보강방법이고, 본 결과에서는 그 크기를 보여주고 있다. Table 4은 초기구조와 최적화 후의 구조물의 고유진동수 변화 및 Compass Deck의 중량 변화를 보여준다. 고유진동수 이동 및 응답의 변화폭에 비하여 중량증가는 거의 없음을 보여준다. Fig. 4는 Main Engine RPM에 따라 Compass Deck 중앙의 수직응답을 보여준다. 계산 결과에 의하면, Compass Deck 구조의 고유진동수가

설계목표주파수 이상으로 증가한 것을 알 수 있다. 그리고 최적화 전후의 MCR RPM에서의 응답이 상당히 감소되었음을 보여준다. 단, 본 연구에 사용된 기진력은 임의의 값이므로 절대적인 값보다 감소율에 의미가 있다. 본 연구의 결과를 이용하여 설계 초기단계에서 최적설계를 이용할 경우, 매우 유효한 결과를 얻을 수 있을 것이다. 그러나 설계에서 보다 쉽게 적용을 하기 위하여 표준 형상을 Table화하여 그 중에서 가장 최적인 값을 갖도록 하는 조합최적설계로 확장이 필요하다.

Table 2 The Comparison of Results according to waiting factor (α & β)

	$\alpha = 1.0$ $\beta = 0.0$	$\alpha = 0.48$ $\beta = 0.52$	$\alpha = 0.1$ $\beta = 0.9$
Natural Frequency	18.950	18.927	18.932
Response (at MCR)	14.49	14.81	14.74
Weight (Ton)	13.482	13.492	13.493

Table 3 The Comparison of Results between original and optimal design variables ($\alpha=1.0, \beta=0.0$)

Design Variable	Original (WL)	Optimum (WL)	Variation (%)
Web 1	250	259.49	3.80
Web 2	250	204.85	-18.06
Web 3	250	205.40	-17.84
Gir.1	250	219.29	-12.28
Gir. 2	250	333.70	33.48
Gir.3	250	448.13	79.25
Gir.4	250	231.07	-7.57
Gir. 5	250	204.15	-18.34
Gir. 6	250	315.57	26.23
Gir. 7	250	223.10	-10.76

Table 4 The Comparison of Results ($\alpha=1.0, \beta=0.0$)

	Original	Optimum	Variation (%)
Objective Function	1.02785	1.00502	
Natural Frequency (Hz)	16.78	18.95	12.93
Response at MCR(mm/s)	20.17	14.49	-28.26
Weight (Ton)	13.415	13.482	0.5

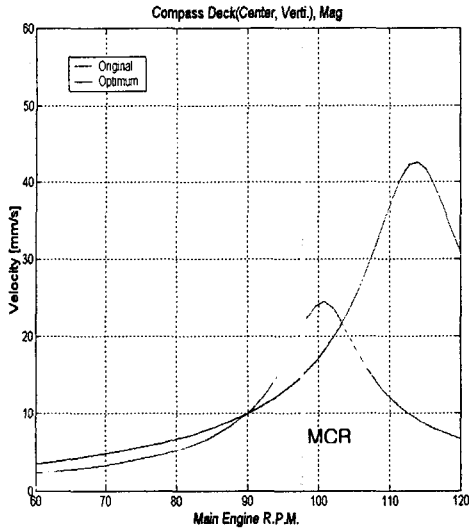


Fig. 4 The Comparison of Response between original and optimum results

5. 결론

본 연구에서는 대형구조물의 최적설계를 수행하는데 있어서 상용프로그램의 불편함과 한계성, 그리고 국소해에 수렴하는 것을 방지하기 위하여 Nastran 기반 외부호출형 프로그램을 사용하여 실제 선박의 국부지역을 대상으로 최적설계를 수행

하였다. 계산결과에 의하면, 구조물의 공진회피를 위하여 고유진동수의 이동이 이루어졌으며, 이를 위한 최적 보강재 크기를 결정할 수 있었다. 이와 같은 결과를 실제 조선소에서 사용 가능한 부재로 대체함으로써 설계초기단계에서 유용하게 사용할 수 있다.

향후에, 설계에서 보다 쉽게 적용을 하기 위하여 표준 형강을 Table화하여 그 중에서 가장 최적인 값을 갖도록 하는 조합최적설계로 확장할 예정이다.

참고문헌

- (1) 채상일, 송진대, 김용한, 양보석, 공영모, 최수현, 2003, "Nastran 기반 R-Tabu 탐색법을 이용한 선박 구조물의 진동최적설계", 추계학술대회논문집, 한국소음진동공학회, pp.672-676.
- (2) 양보석, 최병근, 전상범, 김동조, 1998, "유전알고리즘과 Random Tabu 탐색법을 조합한 최적화 알고리즘에 의한 배관지지대의 최적배치", 한국퍼지 및 지능 시스템학회 논문지, Vol.8, No.3, (1998)71-79.
- (3) N.Hu, 1992, "Tabu Search Method with Random Moves for Globally Optimal Design", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.35, pp.1055-1070.
- (4) F.Glover, 1989, "Tabu Search-Part I", ORSA Journal on Computing 1, pp.190-206.
- (5) M.Kitamura, H.Nobukawa, F.Yang, 2000, "Application of a genetic algorithm to the optimal Structural design of a ship's engine room taking dynamic constraints into consideration", J Mar Sci Technol 5, pp.131-146.