

다단계 최적변경법에 관한 연구

박성현* · 박석주**

A study on the Optimum Modification Method by Multi-level Opimization

S. H. Park · S. C. Park

ABSTRACT

This paper discusses the multi-level optimization method in dynamic optimization problems, through stiffened plate of ship structures.

In structural optimization, the computational cost increases rapidly as the number of design variables increases. And we need a great amount of calculation and time on problems of modified dynamic characteristics of large and complicated structures.

In this paper, the multi-level optimization is proposed, which decreases computational time and cost. The dynamic optimum designs of stiffened plate that control the natural frequency and minimize weight subjected to constraints condition are derived.

It is shown that the results are effective in the optimum modification for dynamic characteristics of the stiffened plate.

1. 서론

선박구조해석의 기술과 능력은, 대형 고속전자계산기의 보급에 의해 급격하게 발전하였고, 더욱이 현재에도 보다 복잡하고 큰 구조물의 정밀한 해석을 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 구조물의 최적설계의 분야에도, 계산기에 의한 최적화수법을 이용하는 연구가 이루어지고 있다[1]. 그러나, 선박구조물의 최적설계에는, 선체구조의 복잡성, 대형화, 요구성능의 다양성, 수많은 제약조건 등으로 인해 많은 어려운 문제들이 수반되고 있다.

또한, 선체구조설계에 유한요소법등의 구조해석법을 이용하려고 하는 경우, 1회의 해석 만에도 많은 계산을 필요로 하는 구조해석을 몇 번이고 반복계산을 해야 되기 때문에, 상당히 많은 계산시간과 용량이 필요하게 된다. 이 때문에, 단순화한 구조요소별의 최적화, 요구성능별의 최적화 등이 필요하다[2].

또한, 설계변수나 제약조건이 많은 대규모의 복잡한 구조물의 최적설계의 경우에는, 그 구조물을 몇 개의 부분구조로 분할하여 최적화 하는 방법을 생각할 수가 있다[3].

본 연구에는, 감도해석법, 최적구조변경법을 이용한 다단계 최적화 방법을 선박구조의 동적 최적설계에 적용한다.

선체구조는 격벽판, 갑판, 측외판, 선저판 등의

* 목포해양대학교

** 한국해양대학교

판과 보강재로 이루어진 보강판 구조의 조합으로 구성되어 있다.

그러므로 본 연구에서는 선박의 보강판 구조물을 해석 모델로 채택하고, 보강판 구조물의 동특성의 변경과 중량을 줄이기 위한 최적설계에 다단계 최적화 방법을 적용하여, 그 방법의 유효성에 대하여 검토한다.

2. 다단계 최적변경법

설계 대상의 구조물이 많은 부재를 가지는 경우에, 설계변수와 제약조건의 증대, 구조해석과 감도해석에 따르는 계산량의 증대를 해결하기 위하여, 몇 개의 단계로 나누어서 최적화 하는 방법을 생각할 수 있다.

본 연구에서 이용하는 다단계 최적화 방법은 3개의 단계로 나누어서 해석 모델을 최적화 하는 방법이다.

첫 번째 단계에서는, 구조물을 몇 개의 부분 구조로 분할하고, 각 부분에 포함되어 있는 설계변수의 관계를 조사하여 대표적인 변수를 설계변수로 설정한다. 즉, 구조물 전체의 설계변수를 줄여서 최적화를 실행한다.

두 번째 단계에서는, 첫 번째 단계의 최적화에서 얻어진 최적해에 대하여 각 부분 구조의 최적해를 구한다.

세 번째 단계에서는, 구조물 전체를 재해석하여 최종적인 최적화를 실행한다.

본 연구에서 이용하는 다단계 최적화 방법의 흐름도를 Fig.1에 나타낸다.

먼저, 보강재를 보요소로 바꾸어서 평면 구조 모델을 작성하고, 그에 대한 동특성의 최적화를 실행한다. 다음으로, 보강재의 중량을 최소로 하는 보강재의 단면형상을 결정한다. 마지막으로, 입체 모델을 작성한 후 확인계산을 하여, 목표치에 달성될 때까지 미세조종을 실행한다.

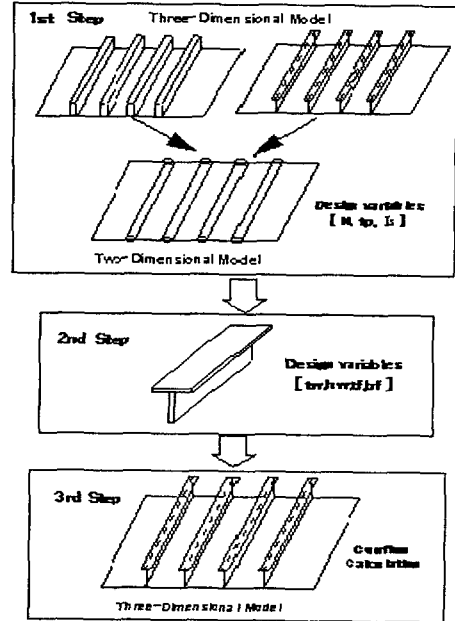


Fig.1 :Multi-level Optimum design process

2.1 첫 번째 단계

첫 번째 단계에서는 입체 보강판 구조물을 평면 구조로 모델화하여, 동특성의 최적화를 실시한다. 보강판을 판부와 보강재부로 분할하고, 보강재를 보요소로 취환한다. Panel 부의 설계변수는 판의 두께, 보강재부의 설계변수는 보강재부의 단면2차 모우멘트로 한다. 이 2개의 설계변수에 대하여 동특성의 해석과 감도해석을 하여, 최적구조변경법으로 설계변수의 변경량을 계산한다. 얻어진 변경량을 초기 치에 합하여 평면 모델의 동특성을 재해석하고, 결과를 검토한 후, 만족스런 결과가 얻어질 때까지 계산과정을 반복한다. 첫 번째 단계의 최적화 계산과정을 Fig.2에 나타낸다.

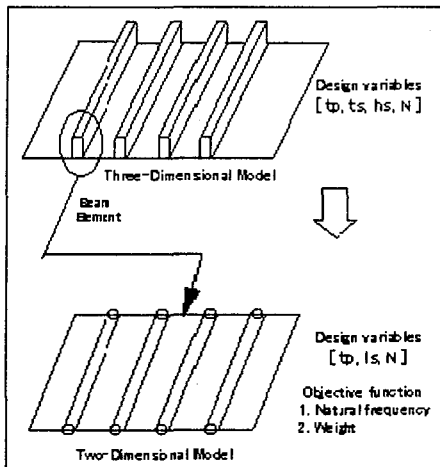


Fig.2 : Flow Chart of 1st step

2.2 최적구조변경법

감도행렬을 $[A]$, 설계변수의 변경량을 $\{x\}$, 변경하려는 목표치와 현재치와의 차를 $\{y\}$, 로 하는 경우의 최적구조변경 문제는, 다음과 같이 연립1차방정식으로 나타낼 수 있다.

$$[A]\{x\} = \{y\} \quad (1)$$

(1)식에서 행렬 $[A]$ 가 보통 정방행렬이 아니므로, 최소자승해를 구하는 문제가 된다.

감도행렬 $[A]$ 의 행의 크기가 열의 크기보다 클 경우 즉, 변경 파라미터의 수가 변경하는 동특성의 수보다 적은 경우에는,

$$S = |[A]\{x\} - \{y\}| \quad (2)$$

과 같은 S 를 최소로 하는 미지수를 결정하는 일반적인 최소자승법을 이용한다[4].

위의 경우에 설계변수의 변경량은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\{x\} = ([A]^T[A])^{-1}[A]^T\{y\} \quad (3)$$

일반적으로 구조변경의 문제에는, 변경 파라미터의 수가 목적함수의 수보다 많으므로, 해를 쉽게 구할 수 없는 경우가 많다. 이 경우에는 행렬 $[A]$ 의 일반 역행렬 $[A]^+$ 로, 설계변수의 변경량을 계산하는 최소자승법을 이용한다[5].

이 경우 설계변수의 변경량은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\{x\} = [A]^+\{y\} \quad (4)$$

2.3 두 번째 단계

두 번째 단계에서는, 첫 번째 단계에서 구한 최적해에 대하여, 보강재의 중량을 최소로 하는 보강재의 단면형상을 결정한다. 보강재는 T자형 보강재로 한다.

T자형 보강재의, Web의 두께 t_w 와 깊이 h_w , Flange의 두께 t_f 와 폭 b_f 의 4개를 설계변수로 한다. 목적함수는 보강재 한 개의 중량 w_s 를 최소화하는 것으로 하고, 제약조건으로는, 첫 번째 단계에서 구한 보의 단면 2차 모우멘트, 규정에 의거한 단면계수의 최소치와 보강재의 응력을 고려한 Web과 Flange의 최소두께로 한다.

두 번째 단계의 최적화 계산과정을 Fig.3에 나타낸다.

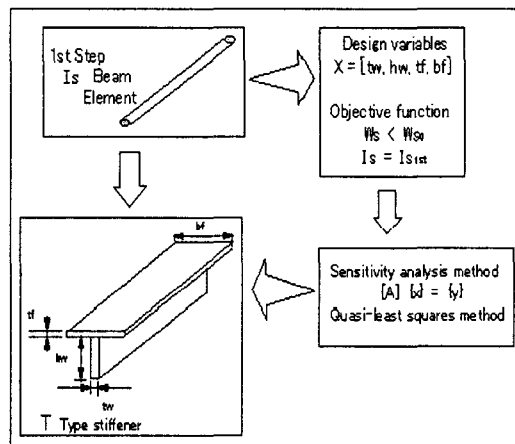


Fig.3 : Flow Chart of 2nd step

2.4 세 번째 단계

세 번째 단계에서는 첫 번째, 두 번째 단계의 최적해를 바탕으로 입체구조 모델을 작성하고, 동특성을 재해석한다. 목적함수가 목표치에 도달되지 않은 경우에는 첫 번째, 두 번째 단계에서 얻어진 값을 초기치로 하여 구조변경을 하여, 만족스런 결과가 얻어질 때까지 반복계산을 한다. 세 번째 단계의 최적화 계산과정을 Fig.4에 나타낸다.

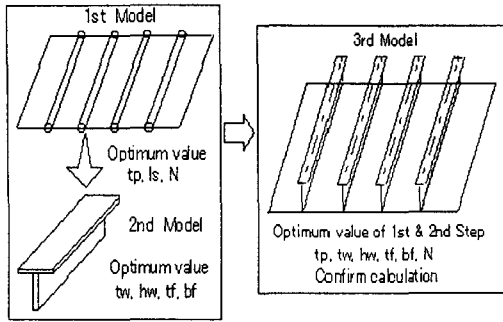


Fig.3 : Flow Chart of 3rd step

3. 보강판의 동특성의 최적변경

3.1 해석모델

본 연구에서는 보강판 구조를 해석모델로 하고, 보강판의 동특성의 최적변경에 다단계최적화 방법을 적용한다. 해석대상인 보강판 모델을 Fig.5에 나타낸다. 폭 a , 길이 b , 두께 t 의 판에, 높이 h_s , 두께 t_s 의 Flat-Bar Type의 보강재가 등간격으로 배치되어 있는 보강판을 해석 모델로 한다.

보강판의 제원은 일본해사협회의 강선규칙을 참고로 하여 결정했다[6].

그 제원을 Table 1에 나타낸다. N 는 보강재의 수, W_p , W_s 는 Panel의 중량과 보강재의 중량이고, W 는 보강판의 총중량이다. S 는 보강재 중심간의 거리이며, R 은 보강재의 치수비 h_s/t_s 이다. Table 1를 보면 보강재의 수가 증가하면 Panel의 두께가 얇게 되어 보강판의 중량이 감소하는 것을 알 수 있다.

또한 R 이 크게 되면 보강재의 단면적이 작게 되어 보강판의 중량이 감소한다. 따라서, 보강재의 수가 많아지고, R 이 크게 되면 보강판의 총 중량은 가벼워 짐을 알 수 있다.

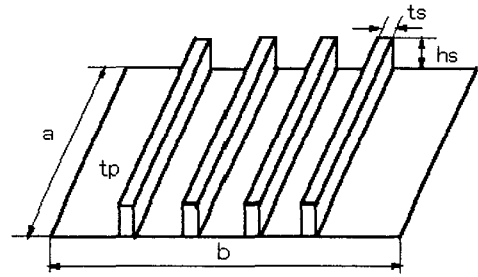


Fig.5 : Stiffened plate model for analysis.

Table1 : Dimensions of stiffened plate model for analysis.

Model	NR45 NR45B	NR510 NR510B	NR615 NR615B	NR720 NR720B
a (m)	3.0			
b (m)	4.2			
N	4	5	6	7
R(h_s/t_s)	5	10	15	20
S (m)	0.840	0.700	0.525	0.525
tp(mm)	9.2	8.3	7.6	7.1
ts(mm)	33.5	19.9	14.4	11.4
hs(mm)	167.5	199.0	216.0	228.0
Is(m^4)	3.3723E-5	3.5682E-5	3.4229E-5	3.2681E-5
W(kgf)	1440.39	1288.90	1192.73	1132.18

3.2 보강판의 동특성의 해석

Fig.2와 같이 설계변수를 줄여서 구조해석이나 감도해석에 따른 해석시간과 계산 용량을 줄이기 위하여 입체 보강판 구조물을 평면 보강판 구조물로 모델링하여 해석한다.

평면 보강판 모델을 해석 모델로 하여 보강판 구조물이 어떠한 동적 특성을 가지고 있는가를 파악하기 위하여 FEM 해석을 하였다.

Fig.6은 NR45B, NR510B, NR615B, NR720B Model의 고유치 해석 결과의 고유진동수를 나타내고 있다. Fig.6에서 해석 보강판 모델의 최저차 고유진동수는 보강재 사이의 판이 진동하는 $(N+1,1)$

모우드의 진동수 $f(N+1,1)$ 이다.

이것은 보강재의 강성이 상대적으로 커서, 보강재에 비하여 판의 진동수가 저차에 나타나기 때문이다. 또한 보강재가 진동하는 (1,1)모우드의 고유진동수 $f(1,1)$ 는 보강재 수가 증가하고 R이 커질수록 고차에 나타나고 있다. 이것은 R이 커질수록 경량화 되고 보강재가 증가함으로써 전체적으로 강성이 커지기 때문으로 사료된다.

Fig.6에서 $(N+1,1)$ Mode는 종방향의 파(보강판의 길이 방향)의 수 $N+1$ (N =보강재의 수), 횡방향(보강판의 폭 방향)의 파의 수 1를 가진 모우드를 의미하며, (1,1)Mode는 종·횡방향의 파가 모두 1인 모우드를 의미한다.

Fig.7은 NR45B 모델의 1차~6차의 고유 모우드를 나타내고 있다.

보강판은 판과 보강재로 이루어진 구조물이므로 주목해야 할 주요 모우드로는 보강재 사이의 Panel이 진동하는 $(N+1,1)$ 모우드와 보강재가 진동하는 (1,1)모우드를 선택하였다[5].

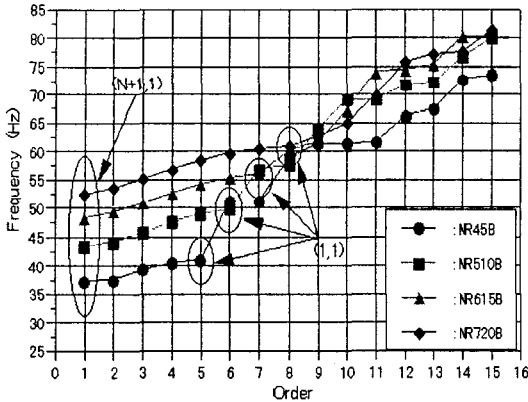


Fig.6 : Natural frequency of stiffened plate.

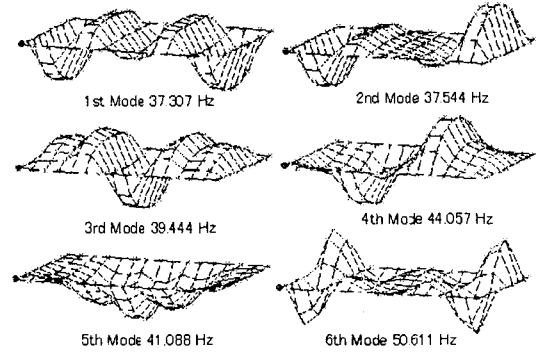


Fig.7 : Natural mode of NR45B model.

3.3 보강판의 동특성의 최적화

3.3.1 1단계 최적화

보강판을 평면구조로 모델화하고, 판넬의 두께 t 와 보강재 보의 단면2차모우먼트 I 를 설계변수로 한다. 해석 모델로는 NR45B, 제약조건으로는 $t \geq t_{req}$ 로 하고, 목적함수는 Case1의 경우에는 전체의 고유진동수를 45.0Hz 이상으로 변경하는 것을 목표로하여 1차에서 5차까지의 고유진동수를 변경한다. Case2의 경우에는 전체의 고유진동수를 45.0Hz 이상으로 변경하는 것을 목표로하여 $f(N+1)$, $f(1,1)$ 2개의 고유진동수를 변경한다. 해석결과를 Fig.8에 나타낸다.

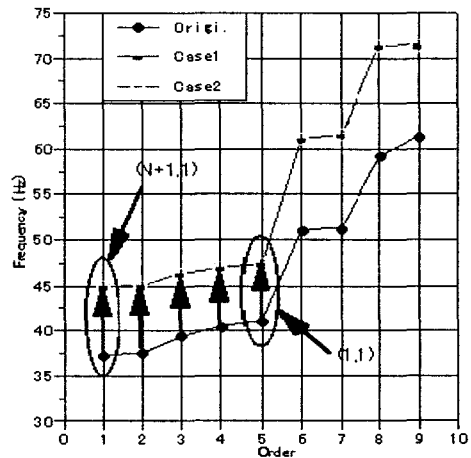


Fig.8 : Result of 1st step.

3.3.2 2단계 최적화

보강재의 중량을 최소로 하는 보강재의 단면 형상을 계산한다. 보강재의 중량은 (5)식으로 주어지며

$$W_s = \rho_s b (t_w h_w + t_f b_f) \quad (5)$$

ρ_s : 보강재의 밀도

설계변수에 대한 중량의 감도는 다음 식으로 얻어진다.

$$\frac{\partial W_s}{\partial x_i} = \rho_s b (t_w h_w + t_f b_f) \quad (6)$$

여기에서, 설계변수 $x_i = [t_w, h_w, t_f, b_f]$ 이다.

중량 w_s 를 최소화하는 것으로 하고, 제약조건으로는, 첫번째 단계에서 구한 보의 단면 2차 모우먼트, 규정에 의거한 단면계수의 최소화와 보강재의 응력을 고려한 Web 와 Flange 의 최소 두께로 한다.

2단계에서 얻어진 보강재의 최적 단면형상을 Fig.9에 나타낸다.

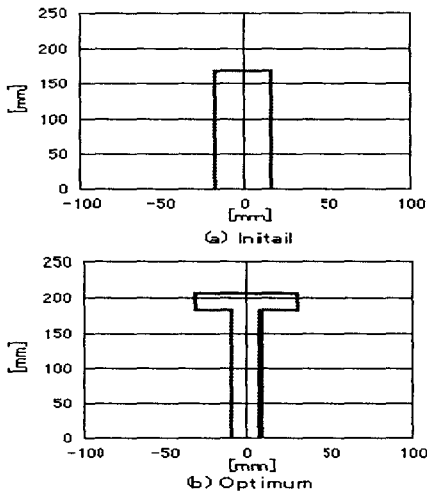


Fig.9 : Result of 2nd step.

3.3.3 3단계 최적화

3단계에서는 첫 번째, 두 번째 단계에서 얻어진 최적해를 토대로 하여 입체구조 모델을 작성한 후, 동특성을 재해석한다.

3단계에서 얻어진 해석결과를 Fig.10에 나타낸다.

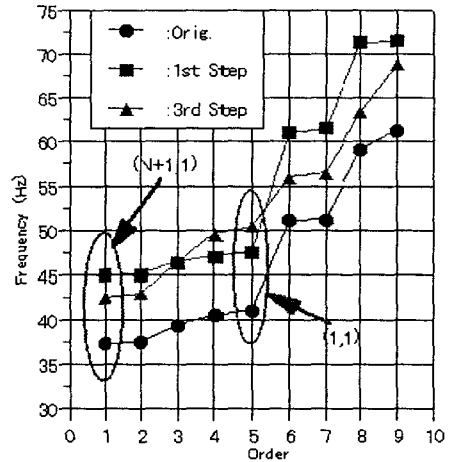


Fig.10 : Result of 3rd step.

4. 결론

구조물의 동적 문제에 대한 최적설계의 방법으로 다단계최적화수법을 선박의 보강판 구조물의 동적 최적설계에 적용하여, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 1단계의 최적화에서, 보강재가 등간격으로 배치되어진 평면 보강판 모델의 Panel 의 두께, 보강재의 단면2차 모우먼트를 설계변수로 하여, 제약조건을 만족하는 동특성의 변경이 가능하였다.
- (2) 2단계의 최적화에서, 보강재의 중량을 최소로 하는 보강재의 단면형상을 결정하는 최적화가 가능하였다.
- (3) 보강판 구조물에서 중요한 모드인, 보강재간 판넬이 진동하는 (N+1,1)모드와 보강재가 진동하는 (1,1)모드 두개를 주목하여 변경함으로써 보다 효율적으로 최적변경이 가능하게 되었다.
- (4) 격벽판, 갑판, 측외판, 선저판 등 많은 보강판과 보강재로 이루어진 선박구조물의 동적 최적설계에는 구조물 전체를 몇 개의 부분구조로 분할하여 최적화하는 다단계 최적화수법이 유용할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] Hughes, O.F., "A Practical Method for the Rational Design of Ship Structures", J. of Ship Research, Vol.24, No.2, 1980.
- [2] Evans, J.H., "Optimizing Ship Structural Design Through the Choice of Materials", J. of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 128, 1970.
- [3] 土木学会, "構造システムの最適化 -理論と應用-",1988.
- [4] 中川 徹, 小柳義夫, "最小二乗法による実験データ解析", 東京大學出版会, 1986.
- [5] 戸川集人, "マトリクスの數値計算", オーム社, 1971.
- [6] 日本海事協會, "鋼船規則", C編, 1997.