선체의 Stiffened Plate 구조물의 모우드해석과 최적변경법에 관한 연구

박성현* · 박석주** · 고재용***

Study on the Optimum Modification and Modal Analysis of Stiffened Plate of Ship Hull Structure

Sung-Hyeon Park · Sok-Chu Park · Jae-Yong Ko

〈목 차〉

Abstract
1. 서론
2. Stiffened Plate Model의 제원
3. 유한요소법에 의한 보강판구조물의 모우드해석
4. 감도해석법을 이용한 보강판 구조물의 최적화
5. 결론
참고문헌

Abstract

The purpose of this study is the optimum modification of dynamic characteristics of stiffened plate structure. In the method of the optimization, finite element method(FEM), sensitivity analysis and optimum structural modification method are used.

To begin with, using FEM, the dynamic characteristics of stiffened plate structure is analyzed. Next, rate of change of dynamic characteristics by the change of design variable is calculated using the sensitivity analysis. Then, amount of change of design variable is calculated using this sensitivity value and optimum structural modification method.

The change of natural frequency is made to be an objective function. Thickness of plate and cross section moment become a design variable.

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

* 정회원, 목포해양대학교 해상운송시스템학부 교수
** 정회원, 한국해양대학교 해양시스템공학부 교수
*** 정회원, 목포해양대학교 해양시스템공학부 교수

1. 서 론

선박, 항공기. 자동차, 우주구조시스템, 해양구조물, 일반 토목·건축 구조물 등의 계획·설계단계에 있어서 ①경제성:최대한 경제적 효과를 올릴 수 있는, ②안전성:손상 또는 파괴되지 않도록, ③미적 감각:가능하면 아름답게, ④기능성:사용하기 편리하게, ⑤내구성:오랜 기간 동안 사용 가능하도록, ⑥환경성:사회적 조건이나 환경적 조건을 만족하도록 만들고자하는 노력이 계속되고 있다. 이러한 희망조건들을 동시에 만족하도록 설계하기 위해서는 최적화의 과정이 필요하다.

이들 조건들은 매우 복잡하며 밀접한 관계를 가지고 있다. 이들 조건의 균형을 유지하면서, 얼마나 우수한 구조물을 만들것인가가 최적화 개념의 출발점이라 할 수 있다.[1]

최근, 컴퓨터의 급속한 발전과 수치계산법의 발전에 따라 선박, 해양구조물, 항공기, 자동차 등의 설계 자동화에 관한 연구가 진행되고, 많은 분야에서 최적설계의 실용화가 요망되고 있다.

특히 정적인 문제에 관한 최적 설계분야는 이미 실용화 단계에 도달 해 있다고 볼 수 있다. 한편 선박이나 해양구조물의 대형화, 경량화, 고속화의 추세에 따라 구조물의 동적 특성을 고려한 동적 최적 설계에 관한 문제도 중요한 연구 대상이 되어 동적인 문제에 관한 최적 설계의 실용화의 필요성이 높아지고 있다.[2],[3]

구조물의 동적 특성에 대한 최적 구조변경의 문제는 설계변수와 구조물의 거동에 관한 많은 제약조건 속에서 목적함수를 만족하는 설계변수를 결정하는 것으로 선박이나 해양 구조물과 같이 대형이며 복잡한 구조물의 동적 최적화 문제에는 설계변수와 제약조건의 증대에 따라 구조물 해석과 최적화 계산에 걸리는 시간과 용량 등의 문제가 대두된다.

본 연구에서는 구조물에 발생하는 동적인 문제에 대한 동적 최적 변경문제를 대상으로 하여 유한요소법, 감도해석법, 최적구조 변경법에 대하여 검토하였다.

선체 구조의 격벽판, 갑판, 측외판, 선저판등 많은 부재들은 Stiffener와 Plate로 이루어진 Stiffened Plate Structure(이하:보강판 구조물)의 조합으로 구성되어 있다.

선체 구조에 많이 이용되고 있는 이 보강판 구조물의 설계에 있어서 보강재의 배치, 단면 형상 등을 결정하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 선체 구조의 기초 구조라고도 말할 수 있을 정도로 선체 구조에 많이 이용되고 있는 보강판 구조물을 해석 모델로 하여, 보강재의 배치와 보강재의 단면형상에 따른 보강판 구조물의 동특성을 조사하고, 그 동특성을 목표치 만큼 변경하기 위하여 어떠한 단면 형상을 가진 보강재를 설치 할 것인가, 등의 문제들을 결정하는 동적 최적 구조변경법에 대하여 검토하였다.

또한 동특성의 해석, 감도해석, 최적화 계산 등에 소요되는 시간과 용량을 줄이기 위해서 보강재를 Beam 요소로 치환한 평면 모델을 대상으로 동특성의 최적화를 실행하였다.

동특성의 최적화에 있어서 목적함수로는 보강판 구조물의 모우드의 변경이고, 설계변수로는 보강판의 두께, Beam으로 치환한 보강재의 단면2차모우멘트를 채택하였다.

보강판 구조물의 동특성을 목표치만큼 변경하기 위해서는 어떠한 형상을 가진 보강재를 설치 할 것인가에 대하여 검토하여 본 연구에서 이용한 최적 구조변경법의 유효성과 타당성에 대하여 검토하였다.

2. Stiffened Plate Model의 제원

선체구조의 단면은, 갑판, 선측, 선저 등 각각의 종통재 부재로 보강한 보강판으로 간주할 수 있다. 본 연구에서는 Fig.1과 같이 Flat-Bar Type의 Stiffener를 Plate에 등간격으로 설치한 보강판 구조물을 해석 모델로 채택하였다.

해석 구조물의 제원은 1997년도판 일본해사협회의 강선규칙[4]을 참고로 결정하였으며, 그 제원들을 Table1, Table2에 나타낸다. Table에서 N은 보강재의 개수, Wp는 Panel의 중량, Ws는 보강재의

중량, W는 보강판 구조물의 총중량, S는 보강재 사이의 거리, R은 보강재의 깊이와 두께의 비 (R=hs/ts), As는 보강재의 단면적을 각각 나타낸다.

Table 1 : Dimensions of stiffened plate N4 model

Model	NR45	NR410	NR415	NR420
a (m)	3.0			
b (m)	4.2			
N	4			
R	5	10	15	20
S (m)	0.840			
tp (mm)	9.2			
ts (mm)	33.5	21.25	16.20	13.38
hs (mm)	167.5	212.5	243.0	267.2
As E-3(m²)	5.6113	4.5156	3.9366	3.5698
Wp (kgf)	911.13	911.13	911.13	911.13
Ws (kgf)	529.25	425.91	371.30	336.70
W (kgf	1440.38	1337.05	1282.43	1247.83

Table 2 : Dimensions of stiffened plate N5 model

Model	NR55	NR510	NR515	NR520
a (m)	3.0			
b (m)	4.2			
N	5			
R	5	10	15	20
S (m)	0.700			
tp (mm)	8.3			
ts (mm)	31.70	19.90	15.25	12.60
hs (mm)	158.50	199.00	228.75	252.00
As(E-3m²)	5.0245	3.9601	3.4294	3.1752
Wp (kgf)	821.0	821.0	821.0	821.0
Ws (kgf)	592.38	466.90	411.29	374.38
W (kgf)	1414.38	1288.90	1233.29	1196.38

또한 NR45는 보강재의 수 N이 4개이며 보강재의 비 R이 5인 모델을 나타내며 , NR510은N이5, R이 10인 모델을 나타내고 있다.

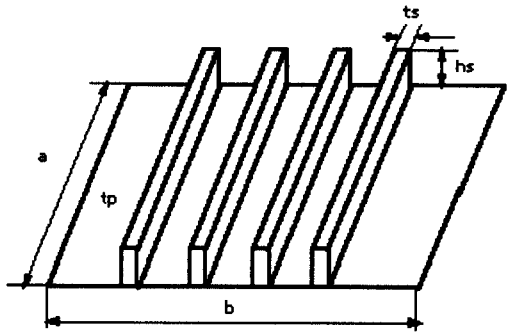

Fig. 1 : Stiffened plate model for analysis

Table에 의하여 보강재의 수 N이 증가하면 Panel의 두께 tp가 얇게 되어 중량이 감소하고, 보강재의 비 R이 커지면 보강재의 단면적 As가 적어져서 보강재의 중량이 감소한다. 따라서 보강재의 수가 많아지고 R이 커질수록 보강판의 총중량 W는 감소함을 알 수 있다.

3. 유한요소법에 의한 보강판 구조물의 모우드해석

3.1 입체 해석 Model의 동특성 해석

보강판 구조물이 어떠한 동특성을 가지고 있는가를 파악하기 위하여 Table1과 Table2의 모델 중에서 NR45 모델과 NR510모델에 대하여 해석을 하였다.

Fig.1과 같은 해석 모델을 Fig.2(a),(b)와 같이 사각형 유한요소 모델로 모델링하여 유한요소법 (FEM : Finite Element Method)을 이용하여 모우드해석을 하였다.

Panel의 경계조건으로서는 단순지지의 경계조건을 주었고, 보강재는 X축의 병진과 Y축 회전을 구속하고 나머지는 자유의 경계조건을 주어서 해석하였다.

NR45모델의 유한요소법에 의한 모우드해석 결

과를 Fig.3, 여러 가지 복잡한 모우드 중에서 주목해야하는 주요 모우드를 Fig.4에 나타내며, NR510 모델의 모우드와 주요 모우드는 Fig.5,6에 나타낸다. Fig.4와 Fig.6에서 (N+1,1)모우드는 횡방향의 파의 수 N+1(N=보강재의 수), 종 방향의 파의 수 1를 가진 모우드를 의미하며, (1.1)모우드는 종횡방향의 파가 모두 1인 모우드를 의미한다.

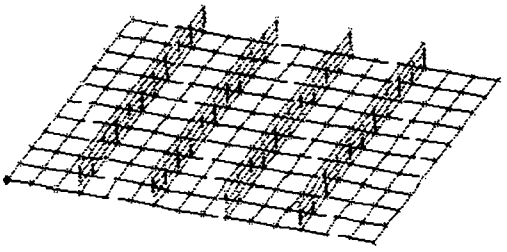

Fig. 2(a) : Stiffened plate NR45 model for FEM analysis

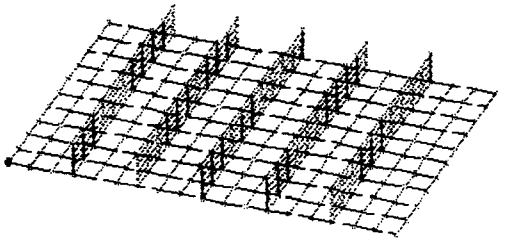

Fig. 2(b) : Stiffened plate NR510 model for FEM analysis

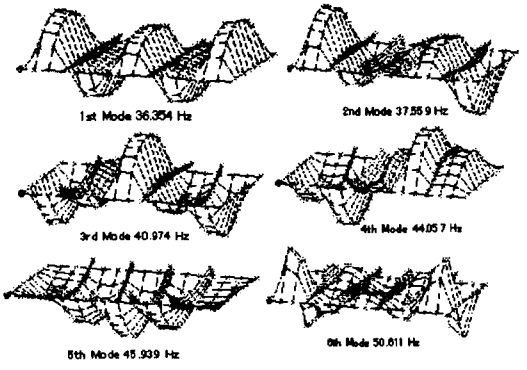

Fig. 3 : The natural mode of NR45 model (1 st~6th)

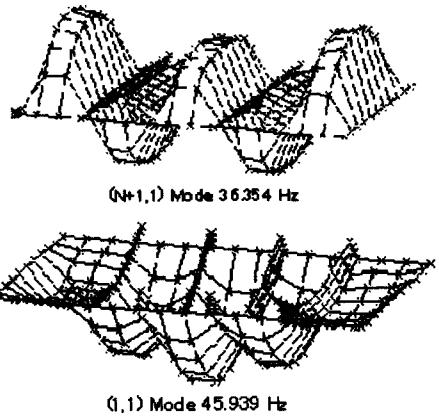

Fig. 4 : The main mode of NR45 model

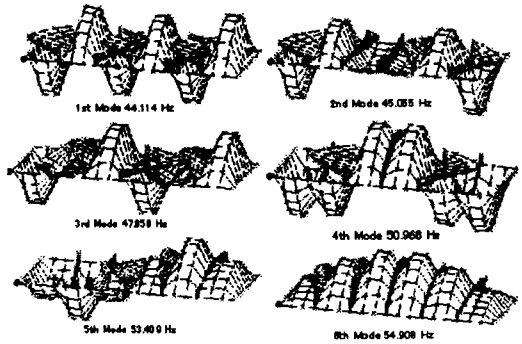

Fig. 5 : The natural mode of NR510 model (1 st~6th)

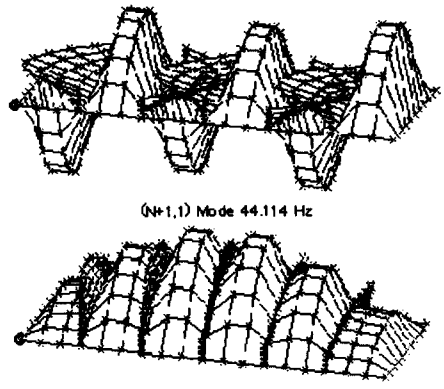

Fig. 6 : The main mode of NR510 model

Fig.1과 같은 보강판 구조물의 주요 모우드는 보강재 사이의 Panel이 운동하는 (N+1,1)모우드와 보강재가 운동하는 (1,1)모우드이다.

보강판 모델의 최저차 모우드는 보강재 사이의 Panel이 운동하는 (N+1,1) 모우드이다. 이것은 보강재의 강성이 비교적 크기 때문에 보강재에 대하여 Panel의 고유진동수가 상대적으로 낮게 되어 최저차에 Panel의 운동 모우드가 지배적으로 나타나기 때문으로 사료된다.

3.2 평면 해석 Model의 동특성 해석

보강판 구조물의 동특성 해석, 감도해석, 최적화 계산에 소요되는 시간과 용량을 줄이기 위하여 Fig.1과 같은 입체 모델을 Fig,7과 같이 평면 보강판 모델로 모델링하여 유한요소법[5]으로 모우드해석을 하였다.

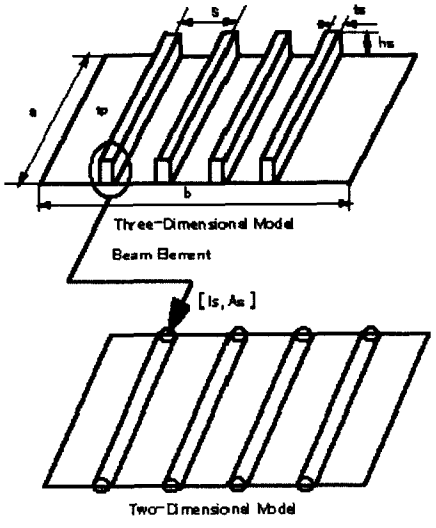

Fig. 7 : Two-Dimensional model for analysis

NR45모델의 평면 모델을 NR45B, NR510모델의 평면 모델을 NR510B로 표시하였다.

Fig.1의 입체모델을 Panel의 부분과 Stiffener 부분으로 분할하고 Stiffener 부분을 단면적 As, 단면2차모우멘트 Is를 가지는 Beam 요소로 치환하여 평면 모델링하였다.

NR45B 모델에서 Stiffener를 Beam 요소로 치환하였을 때 단면적 As=5.61125E-3(㎡), 단면2차모우멘트 Is=3.3723E-5(m^4)이고, NR510 모델에서 As=3.96010E-3(㎡), Is=3.5682E-5(m^4)이다. NR45B 모델의 유한요소법에 의한 모우드해석 결과를 Fig.8, NR510B모델의 모우드를 Fig.9에 나타내며, 평면 모델의 주요 모우드는 Fig.10에 나타낸다.

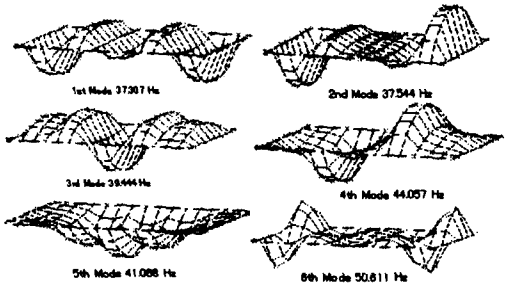

Fig. 8 : The natural mode of NR45B model (1st-6th)

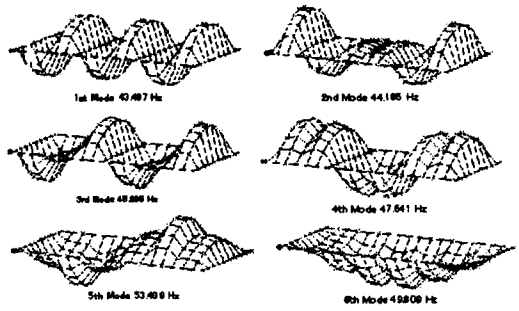

Fig. 9 : The natural mode of NR510B model (1st-6th)

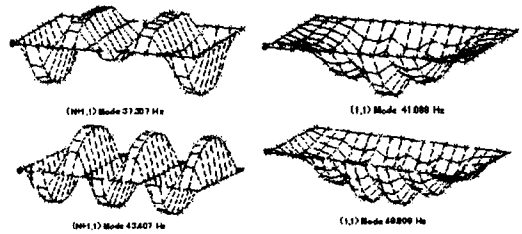

Fig. 10 : The main mode of NR45B & NR510B model

평면 모델에서도 입체 모델과 같이 주요 모우드는 보강재 사이의 Panel이 운동하는 (N+1,1)모우드

와 보강재가 운동하는 (1,1)모우드이다.

4. 감도해석법을 이용한 보강판 구조물의 최적화

4.1 감도해석법

감도해석은 구조물의 형상, 치수, 재료 등의 설계변수의 변경에 의한 구조물의 정적, 동적 특성의 변화율을 구하는 것이다. 감도분포를 계산하면, 고유진동수나 특정 점에 대한 고유모우드의 크기를 가장 효율적으로 변경하기 위해서는 어느 부분을 수정하면 좋을지를 알 수 있다. 또한, 설계변수가 동특성에 어떤 영향을 미치는지를 알 수 있어서 초기 설계시의 기초자료로 이용할 수 있다.[6]

비감쇠계의 고유치 문제는 설계변수의 변경전후에 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(\lambda_{o\gamma}[M_o]-[K_o])\{\Phi_{o\gamma}\}=\{0\} \quad (1)$$

$$(\lambda_r[M]-[K])\{\Phi_r\}=\{0\} \quad (2)$$

여기서, [M] : 질량행렬, [K] : 강성행렬, λ_r, $\{\Phi_r\}$: γ 차의 고유치와 고유Mode이다. 설계변수 γ 가 γ_o 로부터 미소량 ε 만큼 변화했을 경우, [M], [K], λ_r ,$\{\Phi_r\}$ 를 γ 의 미소변화량 ε 에 관해서 Taylor 전개하고 (2) 식에 대입하면,

$$([K_o]-\lambda_{o\gamma}[M_o])\{\Phi_r'\}=(\lambda_{o\gamma}[M']+\lambda_r'[M_o]-[K'])\{\Phi_{o\gamma}\} \quad (3)$$

위의 (3) 식에 $\{\Phi_{o\gamma}\}^T$ 를 곱하면, (4) 식과 같이 된다.

$$\{\Phi_{o\gamma}\}^T(\lambda_{o\gamma}[M']+\lambda_r'[M_o]-[K'])\{\Phi_{o\gamma}\}=\{0\} \quad (4)$$

여기에, 모우드 질량행렬을 정규화 하여 대입하면, 다음과 같이 고유치의 감도를 구할 수 있다.

$$\lambda_r' =\{\Phi_{o\gamma}\}^T([K']-\lambda_{o\gamma}[M'])\{\Phi_{o\gamma}\} \quad (5)$$

4.2 최적구조변경법

감도행렬을[A], 설계변수의 변경 량을{χ}, 변경하려는 목표치와 현재치와의 차를{y}, 로 하는 경우의 최적구조변경 문제는, 다음과 같이 연립1차 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$[A]\{x\} = \{y\} \quad (6)$$

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

1. 감도행렬 [A]의 행의 크기가 열의 크기보다 클 경우

변경 파라메터의 수가 변경하는 동특성의 수보다 적은 경우에는.

$$S = |[A]\{x\} - \{y\}| \quad (7)$$

과 같은 S를 최소로 하는 미지수를 결정하는 일반적인 최소자승법을 이용한다[7].

위의 경우에 설계변수의 변경량은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\{x\} = ([A]^T[A])^{-1}[A]^T\{y\} \quad (8)$$

2. 감도행렬 [A]의 열의 크기가 행의 크기보다 클 경우

일반적으로 구조변경의 문제에는, 변경 파라메타의 수가 목적함수의 수보다 많으므로, 해를 쉽게 구할 수 없는 경우가 많다. 이 경우에는 행렬 [A]의 일반 역행렬 $[A]^{+1}$ 로, 설계변수의 변경 량을 계산하는 의사최소자승법을 이용한다.[8]

이 경우에 있어서 설계변수의 변경량은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\{x\} = [A]^+\{y\} \quad (9)$$

4.3 보강판 구조물의 동특성의 최적화

선체구조설계에서는, 파도 바람, 엔진, 프로펠러 등의 외력을 고려한 동적 설계가 중요하다.[9] 그러므로, 본 연구에서는 보강판의 동특성의 해석결과를 고려하고, 감도해석법을 이용하여 동특성을 변경하는 동적 최적화에 대하여 검토한다.

(1) 대상 Model : NR45B Model

(2) 제약조건 : tp>tpreq., Z>Zreq. Z = 단면계수

(3) 설계변수 : Panel 두께 tp, Beam요소로 치환한 Stiffener의 단면2차모우멘트 Is

(4) 목적함수

① Case1 : 1차부터 5차까지의 5개의 모우드를 변경하여 전체의 모우드를 45.0 Hz 이상으로 변경하는 것을 목적 함수로 한다.

② Case2 : 주요 모우드인 (N+1,1) 모우드와 (1,1) 모우드 2개만을 변경하여 전체의 모우드를 45.0 Hz 이상으로 변경하는 것을 목적 함수로 한다.

(5) 최적화 계산의 Flow

① 목적함수 f(N+1,1), f(1,1)에 대한 설계변수 tp, Is, 의 동적 감도해석을 하여 설계변수의 변화에 따라 목적함수인 모우드의 고유진동수가 얼마나 변화 할 것인가, 어느 설계변수에 고유진동수가 가장 민감한가를 파악한다.

② 동적 감도해석 결과의 감도행렬을 [A]를 이용하여 구조변경 방정식(6)을 세운다.

③ 최적구조변경법을 이용하여 목적 함수를 목표치만큼 변경하기 위하여는 설계변수를 얼마만큼 변경해야 하는가를 계산한다. 즉 설계변수의 변경량 △tp, △Is을 계산한다.

④ ③의 단계에서 얻어진 설계변수의 변경량을 초기 설계변수에 합하여 제약조건을 만족하는지 확인하여 조정한다.

⑤ 새로운 설계변수를 초기치로 동특성 해석을 하여 만족하는 결과가 얻어질 때까지 ①~⑤의 계산 단계를 반복한다.[10]

해석 결과를 Table3에, 구조변경 전후의 목적함수의 변화를 Fig.11에 나타낸다.

Panel이 운동하는 (N+1,1)모우드에 대한 감도해석은 설계변수 Panel의 두께 tp의 영향이 크기 때문에 (N+1,1)모우드의 진동수를 37.31 Hz에서 45.0 Hz로 높게 변경하기 위하여 tp가 9.2mm에서 11.528mm로 두껍게 되었다.

또한 (1,1) 모우드에 대해서는 Is의 영향이 크기 때문에 (1,1)모우드의 진동수를 높게 하기 위하여

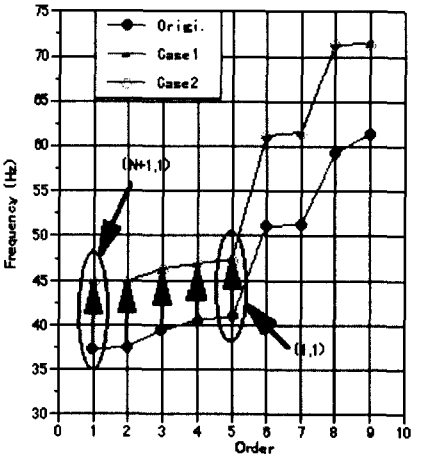

Fig. 11 : Comparison of natural frequency Case1 & Case2

Table 3 : Comparison of design I & optimum value

Case1 Modify f(1,1)							
	tp (mm)	Is (m⁴)	Ig (m⁴)	W (kgf)	f(1,1) (Hz)	f(N+1,2) (Hz)	f(N+1,1) (Hz)
Origi.	9.2	7.2727 E-6	2.1047 E-4	1651.87	38.658	47.459	47.639
Sense	Sensi. to tp				-0.583		
	Sensi. to Is				0.504		
	Sensi. to Ig				5.899		
Target					47.30		
Optim.	9.2	7.4092 E-6	3.7270 E-4	1651.87	47.299	47.452	48.015
Case 2 Modify f(1,1) f(N+1,2) f(N+1,1)							
Sense	Sensi. to tp				-0.583	4.048	4.082
	Sensi. to Is				0.504	-0.012	-0.004
	Sensi. to Ig				5.899	-0.032	-0.003
Target					34.50	50.50	50.50
Optim	9.931	1.5622 E-5	1.0154 E-5	1724.29	34.610	50.189	50.281

Is가 5.0649E-5(m^4)로 크게 되어졌다. 1차부터 5차까지의 5개의 모우드에 변경하여 전체 모우드를 변경하는 Case1과 주요 모우드 2개만을 변경하여 전체 모우드를 변경하는 Case2는 동일한 결과가 얻어졌다.

이 결과로부터 동적 감도해석과 최적화 계산에

소요되는 시간을 줄이기 위해서는 5개의 목적함수를 변경하는 Case1보다 주요모우드 2개만을 변경하는 Case2가 보다 효율적임을 알 수 있다. 또한 설계변수가 많은 입체 모델보다 평면 모델로 모델링하여 설계변수를 줄여서 최적화하는 것이 보다 효율적임을 알 수 있다.

5. 결 론

유한요소법을 이용한 모우드해석과 구조물의 동적 문제에 대한 최적화의 방법을 선박의 보강판 구조물에 적용하여, 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 선체 구조의 기초 구조라고도 말 할 수 있을 정도로 선체 구조에 많이 이용되고 있는 보강판 구조물을 해석 모델로 하여, 보강재의 배치와 보강재의 단면형상에 따른 보강판 구조물의 동특성을 유한요소법으로 해석하여, 어떠한 동특성을 가지고 있는지 파악이 가능하였다.

(2) 보강재가 등간격으로 배치되어진 평면 보강판 모델의 Panel의 두께, 보강재의 단면2차 모우멘트를 설계변수로 하여, 제약조건을 만족하는 동특성의 변경이 가능하였다.

(3) 보강판 구조물에서 중요한 모우드인, 보강재 사이의 Panel이 운동하는 (N+1,1)모우드 와 보강재가 운동하는(1,1)모우드 두개를 주목하여 변경함으로써 다른 모우드들도 변경할 수 있다는 것을 알 수 있게 되었다.

(4) 동적 감도해석과 최적화 계산에 소요되는 시간과 용량을 줄이기 위해서는 보강판 구조물의 주요 모우드를 변경하는 것과 설계변수가 많은 입체 모델보다 평면 모델로 모델링하여 설계변수를 줄여서 최적화하는 것이 보다 효율적임을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] 土木學會, "構造システムの最適化 -理論と應用-",1988, pp.140-159.

[2] Kavlie D. and Moe J. : Automated Design of Frame Structures, ASCEJ., Struct. Div., Vol.97, No.St1, 1978, pp.33-62.

[3] William H. Greene and Raphae T. Haftka : Computational Aspects of Sensitivity Calculations on Transient Structural Analysis, Computers & Structures Vol.32, No.2, 1989, pp.433-443.

[4] 日本海事協會 : 鋼船規則, C編, 1997, pp.78-81.

[5] Maurice Petyt : Introduction to finite element vibration analysis, Cambridge University Press, 1990, pp.141-290.

[6] 長松昭男 : モード 解析 入門, 培風館, 1993, pp.79-142.

[7] 中川撤, 小柳義夫: 最小二乘法のよる實驗データ解析, 東京大學出版會, 1986, pp.55-120

[8] 戶川集人 : マトリクスの數値計算, オーム社, 1971, pp.46-52.

[9] 朴成鉉, 香川, 安澤 : 構造物의動特性의 最適變更法에 관한 硏究, 日本西部造船學會 論文集, 第96号, 1998, pp.193-206.

[10] 朴成鉉, 香川, 安澤 : 多段階最適化手法에의한 防撓板構造物의動特性의 最適變更法에 관한 硏究, 日本造船學會論文集, 第186号, 1999, pp.431-443.