

大韓造船學會誌  
第26卷 第3號 1989年 9月  
Journal of the Society of  
Naval Architects of Korea  
Vol. 26, No. 3, September 1989

## 재해석기법에 의한 선체 최소중량설계

박성환\*, 백점기\*\*, 노인식\*, 이호섭\*

### Minimum Weight Design of Ship Structure by Reanalysis Technique

by

S.W. Park\*, J.K. Paik\*\*, I.S. Nho\* and H.S. Lee\*

#### 요 약

선체와 같이 복잡·대형 구조물에 대하여 유한요소법 등의 직접구조해석을 통한 최적설계를 수행하는 데에는 반복적인 구조해석으로 인한 막대한 계산량의 처리가 매우 심각한 문제로 대두된다. 본 연구에서는 이러한 반복구조해석에 소요되는 계산시간을 절감하기 위하여 최적구조설계 과정에 기저축소에 의한 재해석기법을 적용하여 보았고, 또한 본 설계기법을 간단한 격자구조물과 실제적인 선체의 최소중량 설계 문제에 적용함으로써 그 유용성과 정도를 확인하였다.

#### Abstract

For the conduct of optimum design for such complicated and large structures as ship structure by direct structural analysis such as finite element method, it is very important problem that the process needs much computational efforts due to the repeated structural analysis. In this study, the reanalysis technique based on the modified reduced basis method is applied in the process to reduce the computing time required in repeated structural analysis. Numerical examples to simple grillage and actual ship structure are performed and applicability of reanalysis technique to structural optimization process is discussed.

#### 1. 서 론

최근, 선체구조설계 분야에서는 보다 합리적으로 선체의 구조중량 또는 건조비에 관한 최적설계를 도출하기 위하여 선급규칙을 바탕으로 한 설계법과 병행하여 유한요소법에 의한 직접구조해석을 통한 최적설계기법이 적용되고 있으며, 그 연구사례 또한 많다[1~6]. 그러나, 직접구조해석을 통한 최적설계점을 도출하기 위

하여 설계변수의 점진적인 변경에 따른 반복적인 구조해석이 필수적으로 동반되고, 따라서 이 방법을 선체와 같이 복잡·대형 구조물에 적용할 시에는 막대한 계산시간의 소요가 설계효율면에서 심각한 문제로 나타난다.

본 연구에서는 이러한 문제를 개선하는 한 방법으로 선체구조설계에 관한 구조해석 결과로부터 설계가 변경된 구조물의 구조해석을 효율적으로 수행하는 방법인 재해석기법을 활용하여, 이를 기존의 구조해석 프로그램과 각종 최적화 알고리즘에 연결함으로써 반복적

접수일자 : 1989년 1월 4일, 재접수일자 : 1989년 3월 27일

\* 정회원, 한국기계연구소 대덕선박분소

\*\* 정회원, 부산대학교 공과대학 조선공학과

인 구조해석에 소요되는 계산시간을 절감토록 하였다. 원래 1940년대부터 있어온 재해석기법에 대한 연구는, 1960년대 이후 전자계산기 및 구조최적화 기법의 발달과 더불어 그 효율성과 유용성이 더욱 증대하게 되었으며, 최근에 이르기까지 이에 관한 연구는 활발하게 진행되고 있다[7~10]. 일반적으로 재해석기법은 구조해석법의 큰 범주인 변위법(displacement method)과 응력법(flexibility method) 모두에 적용될 수 있는 방법이며, 또한 정적구조해석분야 뿐만 아니라 구조물의 고유진동치를 계산하는 동적 구조해석 분야에도 활용되고 있는 실정이다.

현재까지 개발된 재해석 기법은 크게 직접법, 근사법의 두 가지 범주로 나눌 수 있는데 적용하는 문제의 성격에 따라 그 유용성이 달리 나타나는 것으로 알려져 있다. 먼저, 직접법은 변경된 구조물의 역변환 강성행렬을 역학적 개념이나 혹은 해석적 방법으로 처리하는 기법으로써 정해를 도출할 수 있다는 장점은 있으나 그 연산과정이 복잡할 뿐만 아니라, 설계변경부위가 비교적 좁은 부분에 한정되어 있는 경우에만 그 적용이 유효하다는 한계를 가지고 있다. 이에 비해 근사법으로는 Taylor 급수전개법(Taylor's series expansion method), 반복법(iteration method), 기저 축소법(reduced basis method) 등이 있으며, 이들은 모두 구조물의 넓은 부위에 걸쳐 비교적 미소한 설계 변화가 있을 때에는 만족할만한 근사해를 제공하고, 또한 그 연산과정이 비교적 단순하다는 장점을 지니고 있다.

본 연구에서는 기존의 각종 최적화 알고리즘과 구조해석 프로그램에 쉽게 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 설계변화량이 큰 경우에도 그 정도가 좋은 것으로 알려진 기저축소에 의한 재해석기법을 적용하여 최적구조설계 문제를 정식화하고, 또한 이것을 바탕으로 범용구조해석 프로그램[11, 12]과의 결합에 의한 종합전산프로그램을 개발한 후, 이를 실제적인 선체의 최소중량설계 문제에 적용함으로써 본 연구에서 정식화한 설계기법 및 전산 프로그램의 정도와 유용성을 검토하고자 한다.

## 2. 최소구조 중량설계의 정식화

최적화기법을 이용한 구조물의 최적설계는 대상 구조물에 대한 설계의 최적성 기준(목적함수)을 수학적 으로 정식화하고, 다양한 설계 제한조건하에서 이 목적함수가 최적화되도록 하는 최적설계 변수치를 일정한 최적화 알고리즘을 이용하여 도출하는 과정이다.

따라서, 최적구조설계 문제는 적절한 설계변수의 선택과 함께 목적함수, 제한조건식의 정식화와 구체적인 최적화 알고리즘등을 필요로 하는데, 특히 제한조건식의 정식화는 적용되는 구조해석기법에 따라 그 구체적인 형태를 달리한다.

여기서는 목적함수로 구조물의 전체중량, 설계변수로는 각 부재의 치수 및 재료특성치를, 제한조건으로는 일정한 설계하중에 대한 유한요소 구조해석 결과로 나타나는 각 요소응력 및 질점변위가 그 허용량을 초과하지 않는 경우로 하여 최소 구조중량설계 문제를 다음의 식 (1)과 같이 정식화하였다.

$$\begin{aligned}
 &\text{Find} && d_i \\
 &\text{Minimize} && W=W(d_i) \\
 &\text{Subject to} && r_k - \bar{r}_k \leq 0 \quad k=1, \dots, l \\
 &&& \sigma_j - \bar{\sigma}_j \leq 0 \quad j=1, \dots, m \\
 &&& d_i - \bar{d}_i \geq 0 \quad i=1, \dots, n
 \end{aligned} \tag{1}$$

- 여기서,  $d_i$ : 설계변수
- $\bar{d}_i$ : 설계변수의 허용치
- $W$ : 목적함수(구조중량)
- $r_k$ : 질점 변위
- $\bar{r}_k$ : 허용질점변위
- $\sigma_j$ : 요소응력
- $\bar{\sigma}_j$ : 요소허용응력
- $l$ : 구조물 전체자유도
- $m$ : 총 요소의 수
- $n$ : 총 설계변수의 수

식 (1)에 나타난 설계변수와 요소응력 형태는 유한요소구조해석 프로그램의 특성과 관련되는 사항으로, 본 연구에서는 Table 1에서 나타난 바와 같이 적용한 구조해석 프로그램[11]의 범용성을 살려 설계변수와 요소응력 형태를 결정하였다. 먼저, 설계변수로는 각

**Table 1** Design variables and stresses for each finite element type

요소 형태	설 계 변 수	응 력 형 태
봉 요소	봉의 단면적	축 응 력( $\sigma_x$ )
보요소	'H'형상	양절점에서의 $\sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \sigma_b, \sigma_{eff}$
	임의형상	측면적, 전단면적, 굽힘관성 모멘트, 비틀림관성모멘트 $\sigma_x, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \sigma_b, \sigma_{eff}$
막(판) 요소	판두께	$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \sigma_{eff}$

요소에 대한 재료 특성치를 포함하여 봉요소에 대해서는 요소단면적용, 보요소에 대해서는 각 단면 특성치를, 판요소와 막요소에 대해서는 판두께를 설정하였고, 또한 제한조건으로서의 요소응력 형태는 봉요소에 대해서는 요소양단의 축응력을, 보요소에 대해서는 요소양단의 굽힘응력, 전단응력 및 조합응력등을, 판요소와 막요소에 대해서는 요소중앙의 굽힘응력, 전단응력 및 조합응력 등을 채용하였다.

또한, 본 연구에서는 적점탐사법, 도함수법 등의 일반적인 수학적 최적화 알고리즘을 이용하여 최적설계점을 찾게 되는데, 이들 알고리즘은 그 특성상 많은 회수의 탐색과정을 동반한다. 이들 모든 탐색과정에서 식(1)의 제한조건으로 나타난 요소응력 및 절점 변위를 계산하기 위해서는 반복적인 구조해석이 필요하며, 재해석기법은 이러한 반복구조해석을 보다 효과적으로 수행하기 위한 방법으로 나타난다. 이하, 구체적인 재해석기법의 적용은 다음 절에서 서술하기로 한다.

### 3. 기저축소에 의한 재해석기법

먼저, 일반적인 탄성범위내 구조해석과정을 행렬식으로 전개함에 있어서,  $n$ 개의 설계변수를 가진 대상구조물에 대하여 초기설계와 설계변경후 해석 단계를 구분하여, 초기설계변수  $d_i$  및 변경된 설계변수  $d_i^*$ 에 대한 전체강성행렬이 각각  $[K]$ ,  $[K^*]$ 이라 하고, 외력  $\{R\}$ 에 대한 각각의 절점변위벡터를  $\{r\}$ ,  $\{r^*\}$ 이라 하면, 초기구조 평형방식과 설계변경 후 평형방식은 식 (2)와 식 (3)으로 나타난다. 단, 여기서 외력  $\{R\}$ 은 설계변경과정에서 변화되지 않는 것으로 가정한다.

$$[K]\{r\} = \{R\} \tag{2}$$

$$[K^*]\{r^*\} = \{R\} \tag{3}$$

여기서,  $[K]$  : 초기강성행렬

$[K^*]$  : 설계변경 후의 강성행렬

$\{r\}$  : 초기구조에 대한 절점변위벡터

$\{r^*\}$  : 설계변경된 구조에 대한 절점변위벡터

$\{R\}$  : 설계하중벡터

한편, 해석과정에서 대부분의 계산시간은 식 (2)와 식 (3)내의 각 절점변위벡터를 구하기 위한 행렬연산에 소요되고 있다. 따라서, 다른 모든 재해석기법과 마찬가지로 본 기저축소법도 식 (3)에 나타난 설계변경된 구조에 대한 변위벡터  $\{r^*\}$ 를 보다 효과적으로 구하기 위한 방법의 하나로 나타난다. 먼저, 이 방법에서는 식 (3)의 설계변경된 구조물의 변위벡터  $\{r^*\}$ 을

선형독립인  $s$ 개의 기저벡터  $\{\bar{r}_1\}, \{\bar{r}_2\}, \dots, \{\bar{r}_s\}$ 의 1차식으로 나타낼 수 있다고 가정한다. 즉,

$$\{r^*\} = [\Psi]\{C\} = c_1\{\bar{r}_1\} + c_2\{\bar{r}_2\} + \dots + c_s\{\bar{r}_s\} \tag{4}$$

여기서,  $[\Psi] = [\{\bar{r}_1\}, \{\bar{r}_2\}, \dots, \{\bar{r}_s\}]$  : 기저벡터행렬

$\{C\} = \{c_1, c_2, \dots, c_s\}^T$  : 미지계수벡터

식 (4)의  $s$ 는 설계변수의 수 ( $n$ )와 비슷한 크기의 수로서 절점변위 전 자유도 ( $l$ )에 비해 매우 작은 수이다 ( $s \ll l$ ). 따라서, 식 (4)를 식 (3)에 대입하면,

$$[K^*][\Psi]\{C\} = \{R\} \tag{5}$$

$$[Kr]\{C\} = \{Rr\} \tag{6}$$

여기서,  $[Kr] = [\Psi]^T [K^*] [\Psi]$  : 기저축소 강성행렬

$\{Rr\} = [\Psi]^T \{R\}$  : 기저축소 하중벡터

식 (6)과 같이 전체 자유도가  $l$ 개에서  $s$ 개로 축소된 행렬식을 얻을 수 있다. 결과적으로 이 방법은 큰 자유도  $l$ 을 가진 식 (3)의 행렬식을 직접 계산하는 대신에 자유도가 크게 축소된 식 (6)의 행렬식으로 부터 미지계수벡터  $\{C\}$ 를 구하고, 이를 다시 식 (4)에 대입하여 설계변경후 절점변위벡터에 대한 근사해를 구함으로써 전체계산시간을 줄일 수 있게 된다.

한편, 이 방법의 정도는 식 (4)에서 나타난 기저벡터의 도출에 크게 의존하므로, 이들 기저벡터를 선형 독립인 동시에 식 (4)의  $\{r^*\}$ 을 잘 근사할 수 있도록 선택하여야 한다. 이와 관련하여 Melosh와 Luik 등 [13]은 변위법과 응력법 각각에 적용할 수 있는 기저벡터로서 자체변형률 벡터(self-straining vector)와 자체평형 내력벡터(self-equilibrating force vector)를 사용한 바 있으며 또한, Fenves와 Ertas 등 [14]은  $n$ 개의 설계변수를 가지는 구조물에서 설계변수의 변화에 따른 구조응답 변화량은 초기상태의 구조응답과  $n$ 개의 자체평형벡터로 충분히 표현될 수 있음을 증명한 바 있다. 여기에 최근 Noor와 Lowder [15] 등은 초기설계 상태의 절점변위벡터와 이 절점변위벡터의 각 설계변수에 대한 1차변분량을 기저벡터로 사용하는 다음 식 (7)의 신기저축소법이 해의 정도면에서 매우 뛰어난을 다른 여러 근사법의 사용 결과와 비교하여 증명하고 있다.

$$\{\bar{r}_i\} = \{r\}_{a_i a_i} : \text{초기설계변수치에 대한 변위 벡터} \tag{7}$$

$$\{\bar{r}_{i+1}\} = \frac{\partial \{r\}}{\partial d_i}, \quad (i=1, 2, \dots, n) : i\text{번째 설계변수만의 변화에 따른 변위벡터의 1차변분량 벡터}$$

따라서, 본 연구에서도 이러한 신기저축소법을 활용하였는데 식 (7)에서 나타난 각각의 기저벡터는 다음과 같이 구하였다. 먼저 초기설계 변수치에 대한 변위벡터는 초기설계상태에 대한 완전한 구조해석 과정



치를 Optimizer에 제공하고, 또한 일정단계에서 필요한 기저벡타, 초기강성행렬 및 각종 시스템 정보를 계산하여 이를 File B에 저장한다. 따라서, 사용자는 구조해석용 입력자료와 함께 최적화 입력자료 및 각종 정보 제어 입력치를 제공하면 최적설계점에 대한 각종 구조해석결과를 자동적으로 얻게 된다.

또한, Fig. 2의 프로그램 구조해석 유통도는 구조해석과정상 완전구조해석과정과 재해석과정의 차이를 나타내는 것으로 전항에서 기술한 재해석기법이 적용되는 위치를 나타내고 있다. 한편, Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 재해석과정에서는 계산효율을 보다 증대하기 위하여 부분구조해석기법을 일부 활용하였다. 즉, 전체 구조물의 구조강성행렬을 설계변수와 관련된 부재와 설계변수와는 독립된 부재로 구분하여 식 (9)와 같이 정식화할 때,

$$[K] = [K_0] + [K_s] \quad (9)$$

여기서,  $[K_0]$ : 설계변수와 독립된 부재의 강성행렬

$[K_s]$ : 설계변수와 관련된 부재의 강성행렬

설계변수와 독립된 부재의 강성행렬은 최초해석단계에서만 계산하고, 이후 매 재해석단계에서는 설계변수와 관련된 부재의 강성행렬만을 재계산하여 전체 강성행렬을 구성함으로써 각 해석단계에서 설계변수와 독립된 부재의 요소강성행렬 구성에 소요되는 계산시간을 절감토록 하였다.

### 5. 수치계산에 및 고찰

여기서는 본 연구에서 개발된 최적구조설계 프로그램을 간단한 격자구조물의 최소중량설계 문제에 다양하게 적용해 봄으로써 본 프로그램의 유용성과 함께 재해석기법의 적용에 따른 최적해의 정도 등을 미리 검토하고, 이후 실제 container선의 중앙부 구조를 대상으로 한 최소중량설계 문제에 적용하여 봄으로써, 대형·복잡 구조물의 유한요소 구조해석을 통한 최적구조설계에서 본 재해석기법의 유용성을 확인하기로 한다.

#### 5.1. 1×2 격자형 구조물(1×2 Grillage)의 최소중량설계

Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 본 설계문제는 횡방향의 1개 girder와 종방향의 2개 stiffener로 이루어진 격자구조물에 일정 분포하중이 작용할 때의 전체 구조중량을 최소화하는 문제로서 [16], 부재양단의 경계조건은 girder의 경우에는 양쪽 고정단, stiffener의 경우에는 단순지지이다. 여기서, 각 부재의 단면적을 설

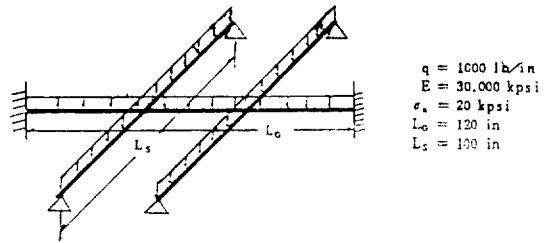


Fig. 3 1×2 Grillage: configuration and design condition

계변수로 하고, 각 부재의 양단 혹은 중앙부에 나타나는 이 허용응력에 도달하는 상태를 제한조건으로 하면 이 설계문제는 다음 식 (10)과 같이 정식화된다.

$$\begin{aligned} & \text{Find } d_1 \text{ and } d_2 \\ & \text{Minimize Weight} = c_1 \times d_1 + c_2 \times d_2 \\ & \text{Subject to } \sigma_j \leq \sigma_a \end{aligned} \quad (10)$$

여기서,  $d_1$ : Girder의 단면적

$d_2$ : Stiffener의 단면적

$c_1$ : Girder 길이×Girder 수

$$= 120 \text{ in} \times 1$$

$c_2$ : Stiffener 길이×Stiffener 수

$$= 100 \text{ in} \times 2$$

$\sigma_j$ : 각 부재의 최대 굽힘 응력

$\sigma_a$ : 각 부재의 허용 응력

한편, 구조해석에 필요한 각 부재의 관성모멘트와 단면계수는 식 (11)과 같이 설계변수인 부재단면적의 함수로 가정하였다.

$$\begin{aligned} I &= 1.007[A/1.480]^{2.65} : \text{관성모멘트} \\ Z &= [A/1.480]^{1.82} : \text{단면계수} \end{aligned} \quad (11)$$

Table 2에서는 이 설계문제에 Nelder & Mead's Simplex Search 법, Hooke & Jeev's Direct Search 법 및 Improved Direct Search and Fesible Direction 법등의 3가지 최적화 알고리즘을 통해 나타난 최적설계결과를 재해석기법을 적용한 경우와 재해석기법을 적용하지 않은 경우로 나누어 비교해 보았다. Table 2에서 보는 바와 같이 본 재해석기법은 적용되는 최적화 알고리즘의 특성에 관계없이 그 기능을 잘 수행하고 있음을 알 수 있고 또한, 각 경우에서 재해석기법의 적용에 따른 최적해의 정도는 매우 높을 뿐만 아니라, 본계산에서 선택한 기저벡타 재계산 기준치 0.5는 적절한 크기임을 확인할 수 있었다. 한편, 본 계산 예제는 전체자유도가 작은 구조해석 모델임으로 재해석기법의 적용에 따른 계산시간의 절감 효과는 무시할만한 것이었다.

Table 2 Optimal design results of 1×2 grillage

Optimizer		Direct Search & Feasible Direction Method			N-M Method		H-J Method
		Full Analysis	0.5	1.0	Full Analysis	0.5	0.5
Reanalysis							
Convergence							
Criteria ( $\epsilon$ )							
Initial	$d_1$	50.0	50.0	50.0	50.0	30.0	30.0
Point	$d_2$	50.0	50.0	50.0	50.0	10.0	10.0
Weight		3,930	3,930	3,930	3,980	3,960	3,914
Optimal	$d_1$	22.49	22.49	22.49	22.50	22.50	22.45
Point	$d_2$	6.157	6.157	6.115	6.407	6.299	6.187
Constr. Value (Kpi)	$g_1$	11.44	11.44	11.44	11.56	11.54	11.41
	$g_2$	0.06	0.06	0.06	0.35	0.29	0.01
	$g_3$	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
	$g_4$	-0.23	-0.23	-0.23	0.8	0.6	0.00
No. of Iter.		90	90	90	103	65	57

- $g_1$  : Girder의 교차부단
- $g_2$  : Girder의 경계단
- $g_3$  : Stiffener의 경계단
- $g_4$  : Stiffener의 교차부단

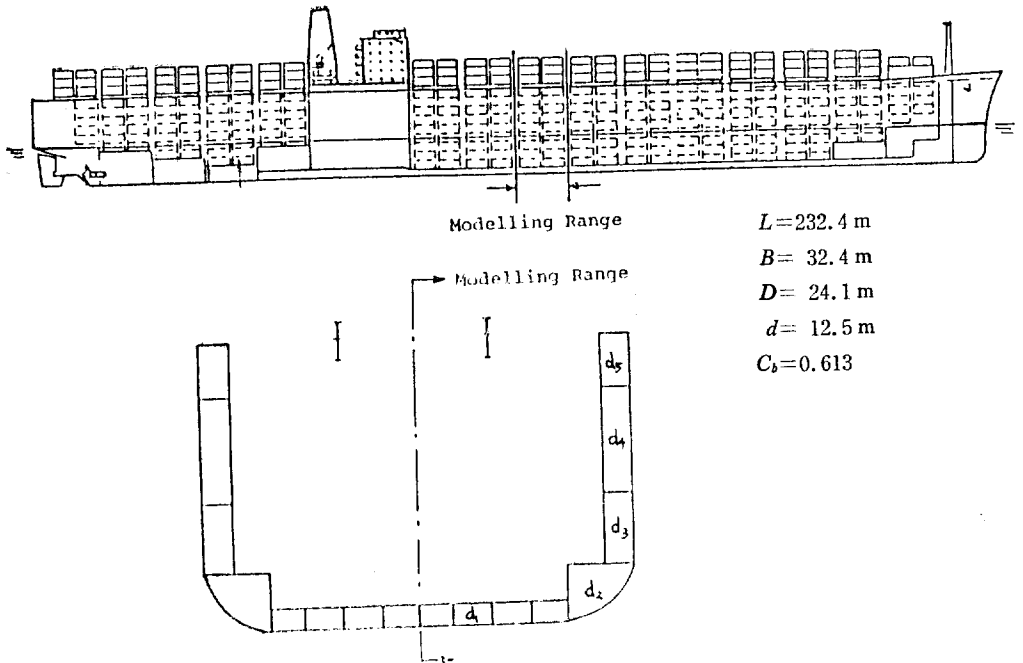


Fig. 4 Modelling range in transverse strength analysis of an example container ship

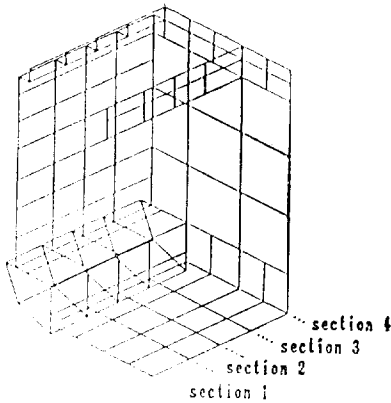


Fig. 5 (a) F.E.M. model of transverse strength analysis

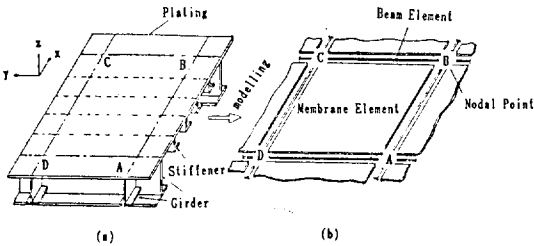
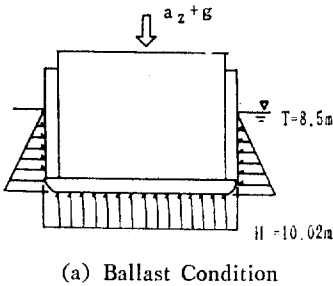
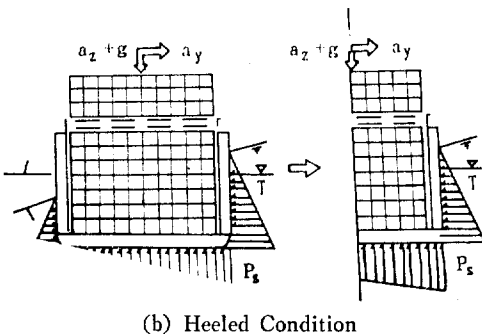


Fig. 5 (b) Structural idealization of girder system



(a) Ballast Condition



(b) Heeled Condition

Fig. 6 Loading condition of transverse strength analysis

5.2. Container선 중양부의 최소중량설계

Fig. 4와 같은 container 운반선에 대하여 운항중에 최대하중이 작용하는 선체 중양부 부근의 한 화물창고를 설계범위로 하여 최소중량설계를 수행하였다. 이 범위내의 중양도부재는 먼저 container선 전용 rule scantling program[11]에 의하여 최적설계를 수행하였으며, 본 예제에서는 횡강도부재 즉, web frame, bidge부 및 bottom floor 등의 판두께를 설계변수로 하여 횡강도를 기준으로 최소 중량설계를 수행하였다. 구조해석 모델링은 대칭성을 고려하여 Fig. 5(a)와 같이 전체 구조의 1/4을 대상으로 하였으며, 선체 구조의 대부분을 이루는 보·판각 혼합구조물은 Fig. 5 (b)와 같은 등가의 보요소와 막요소로 치환하여 전체 구조모델이 최소한의 절점을 갖도록 하였다.

일반적으로, 횡강도해석에 있어서 설계 하중조건은 새김시 만재상태, 호강시 ballast 상태 및 rolling 경사시 만재상태등을 고려할 수 있으나, 새김시 만재상태는 횡강도에 미치는 영향이 상대적으로 작기 때문에 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 호강시 ballast 상태와 rolling 경사시 만재상태만을 고려하였다. 한편, rolling 경사시 만재 하중조건을 화물창의 1/4인 본 계산 모델에 적용하기 위해서는 하중성분을 대칭성분과 비대칭성분으로 구분하여야 하고, 비대칭 하중상태하에서는 경계조건 또한 대칭 경계조건과 비대칭 경계조건으로 분리하여야 한다. 그러나 위 두 설계하중조건을 동시에 고려한 최적 구조설계 결과를 얻기 위해서는 두 하중조건을 동시에 만족하는 일정한 경계 조건의 설정이 반드시 필요하다. 따라서 본 계산에서는 경사상태의 하중조건에서 강도상 가장 문제시되는 부분이 선측구조이고, 또한 선저 경계조건의 변화가 선측구조에 미치는 영향은 미소할것이라는 가정하에, Fig. 6(b)에서 보이는 바와 같이 경사상태의 하중·경계 조건을 선체 동요가속도 및 물수되는 우현의 수압등이 대칭으로 작용하는 경우로 모델링하였다.

제한조건으로서의 각 하중조건하에서의 모든 강도부재요소내의 전단응력이 전단좌굴응력을 초과하지 않는 것과 요소내 축응력, 굽힘응력, 전단응력등에 의한 조합응력이 항복응력을 초과하지 않는 두가지 경우로 하여, 본 설계문제를 식 (12)와 같이 정식화하였다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Find } d_i \quad (i=1,5) \\
 & \text{Minimize Weight} \\
 & \text{Subject to } \tau_j \leq \tau_{cr} \\
 & \sigma_{c_j} \leq \sigma_c
 \end{aligned} \tag{12}$$

여기서,  $d_i$  : Bottom floor의 판두께

**Table 3** Optimal design results of transverse strength member

	Initial Design	Optimal Reanalysis Design	Optimal Complete Analysis Design
Design Variable	$d_1$	15.0mm	10.0mm
	$d_2$	15.0	10.0
	$d_3$	11.0	9.5
	$d_4$	11.0	7.5
	$d_5$	11.0	7.5
Total Weight	0.948115 m <sup>3</sup> /section	0.67058 m <sup>3</sup> /section	0.67058 m <sup>3</sup> /section
Total C.P.U. Time (PRIME 6350)		2,346 sec	6,100 sec

$d_2$ : Bildge 부의 판두께  
 $d_3, d_4, d_5$ : 각 web frame의 판두께  
 Weight: 횡강도부재의 구조중량  
 $\tau_j$ : 횡단면부재 요소의 전단응력  
 $\tau_{cr}$ : 전단 좌굴응력 (=  $CE(t/b)^2$ )  
 $\sigma_{ej}$ : 횡단면부재 요소의 조합응력  
 $\sigma_c$ : 조합항복응력  
 $t$ : 판두께  
 $C$ : 전단 좌굴계수  
 $E$ : 탄성계수  
 $b$ : Web Plate의 보강재 간격

Table 3에서는 각 설계변수의 초기치로서 rule scantling program을 적용하여 얻어진 값을 채용하여, 전체 구조해석을 수행한 경우와 재해석기법을 적용한 경우의 최적설계 결과와 계산시간을 각각 비교하였는데, 최적설계치는 두 경우에서 일치하고 있으며 또한, 소요된 계산시간은 재해석기법을 적용한 경우가 전체 구조해석을 수행한 경우의 약 1/3로써 그 효과가 지대함을 알 수 있다.

한편, 최적설계치는 초기설계 중량에 비하여 약 30%의 중량감소를 얻을 수 있었으나, 이 값은 판 두께 결정과정에서 corrosion margin을 고려하지 않은 값이므로 실선 적용시는 그 효과가 감소하리라 판단된다.

### 6. 결 론

본 연구에서는 유한요소법을 통한 최적 구조설계 과정에서 반복적인 구조해석에 소요되는 방대한 계산시간을 단축하기 위하여 기저축소에 의한 재해석기법을 개발하였고, 또한 이를 실제 구조설계 문제에 적용함

으로써 그 유용성을 확인하였다. 또한, 본 연구로부터 개발된 최적 구조설계 프로그램은 선체와 같은 복잡·대형구조물의 설계문제에도 짧은 계산시간내에 높은 정도의 최적 결과를 준다는 사실을 확인하였다.

### 후 기

본 논문은 한국기계연구소에서 과학기술처의 1987~1988년 국가특정연구사업의 일환으로 수행된 "선체 구조중량 및 건조비 제어프로그램 (I), (II) [11, 12]"과제의 일부임을 밝혀둔다.

### 참 고 문 헌

- [1] 신중계, "최적화기법을 이용한 선체중량단면의 최소중량설계", 대한조선학회지, 제17권, 제 4 호 1980.
- [2] 나승수, 민계식, 엄항섭, 신동희, "유한요소법에 의한 횡강도부재의 최소중량설계", 대한조선학회지, 제22권, 제 3 호, 1985.
- [3] 임상진, 양영순, "다목적 최적화기법에 의한 적자형구조물의 최소중량설계", 대한조선학회지, 제25권, 제 1 호, 1988.
- [4] M. Chowdhury and J.B. Caldwell, "An Automated Design Scheme: Weight Minimization of Single Hulled Ship Compartment", *International J. for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 20, pp.1763-1790, 1984.
- [5] O.F. Hughes, "Ship Structural Design: A Rationally Based, Computer Aided, Optimization Approach", John Willey & Sons, Inc., 1983.
- [6] Haftka, R.T., and Prasad, B., "Programs for Analysis and Resizing of Complex Structures", *Computers and Structures*, Vol. 10, 1979.
- [7] 백정기, "골조 파이프 구조물의 최적선형성 설계", 한국해양공학학회지 제 2권 제 1 호, 1988.
- [8] Jasbir S. Arora, "Survey of Structural Reanalysis Techniques", *J. of the Structural Div., ASCE*, Vol. 102, No. ST4, 1976.
- [9] Kirsh U., "Optimum Structural Design Concepts, Methods and Application", McGraw-Hill Co., 1983.
- [10] Abu Kassim, A.M., and Topping, B.H.V., "Static Reanalysis: A Review", *J. of Structural*



- Engineering*, Vol. 113, No. 5, 1987.
- [11] 한국기계연구소, "선체 구조중량 및 건조비 제어 프로그램 (I)", UCN072-895.D, 1987.
- [12] 한국기계연구소, "선체 구조중량 및 건조비 제어 프로그램 (II)", UCN136-1215.D, 1988.
- [13] Melosh, R.J., and Luik, R., "Multiple Configuration Analysis of Structures", *J. of the Structural Div.*, ASCE, Vol. 94, No. ST9, 1968.
- [14] Fenves, S.J., and Ertas, R., "Discussion of Multiple Configuration Analysis of Structures", *J. of the Structural Div.*, ASCE, Vol. 95, No. ST7, 1969.
- [15] Ahmed K. Noor and Harold E. Lowder, "Approximate Techniques of Structural Reanalysis", *Computers & Structures*, Vol. 4, 1974.
- [16] Fred Moses and Susumu Onoda, "Minimum Weight Design of Structures with Application to Elastic Grillage", *International J. for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 1, 1969.