
 論 文

大韓造船學會論文集
 第29卷 第2號 1992年 5月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 29, No. 2, May 1992

선체구조의 정적 재설계 기법

김외현*, 박종우**, 조상래***

Static Redesign Techniques for Ship Structures
by

O.-H. Kim*, J.-W. Park** and S.-R. Cho***

요 약

선체구조 설계과정에서, 초기 구조설계를 마치면 구조해석을 하게되고, 그 결과가 설계 기준을 만족시키지 못하면 설계를 수정하고, 다시 구조해석을 행하게 된다. 이때, 구조물의 일부분에만 수정이 가해졌을 경우, 전체 구조물을 다시 구조 해석하는 것은 매우 비효율적이다. 수정하기전 구조물의 구조 해석 과정에서 얻은 값들을 이용하여 수정된 구조물의 해석 효율을 높이는 것을 재해석이라 하는데, 이에는 여러 기법들이 있다.

이 재해석 기법들 중 어느 특정한 기법이 모든 경우에 대해 높은 효율을 보이는 것은 아니므로, 본 논문에서는 먼저 여러 기법의 효율을 비교하였다. 또한 민감도 해석 결과를 이용하여 설계변수의 수정량을 결정하고, 재해석 기법을 사용하여 부재치수를 결정하는 재설계 과정이 선체 횡능골을 예제로 하여 소개된다.

Abstract

In ship structural design procedures structural analyses are performed using the scantlings of structural elements determined at the initial design stage based on relevant rules and previous experiences. Modifications of scantlings will be carried out in case that the analysis results do not satisfy design criteria. Reanalysis methods are efficient to analyse the structures of slightly modified using information obtained from the previous analysis.

In this paper various approximate reanalysis techniques will be compared and their characteristics

발표 : 1991년도 대한조선학회 추계연구발표회('91. 11. 15.)

접수일자 : 1991년 12월 16일, 재접수일자 : 1992년 2월 20일

*정회원, 현대중공업 선박해양연구소

**학생회원, 울산대학교 조선 및 해양공학과

***정회원, 울산대학교 조선 및 해양공학과

大韓造船學會論文集 第29卷 2號 1992年 5月

will be described. Furthermore sensitivity analyses are adapted to provide information from which selection of most influential design variables will be made and amount of modification can be determined. Redesign procedures described herein are demonstrated using examples.

1. 서 론

현재 조선소에서 채택하고 있는 구조설계 과정에서는 각 선급규정 및 이전의 설계경험을 근거로 구조부재의 초기치수를 정하는 초기설계가 이루어지고 다음으로 NASTRAN 등의 범용 구조해석 프로그램을 대형컴퓨터 내에서 사용하여 설계된 선체 구조에 대한 해석과정으로 이어지게 된다. 그리고 해석결과의 평가과정이 다음 단계로 수행되는데 여기에서는 계산된 응력값과 선급규정의 허용치 및 좌굴강도의 비교를 통해 부재치수의 적합여부를 판정하게 된다. 다행히도 판정결과가 만족스러우면 설계를 마무리짓게 되지만 부재치수가 적합치 못하면(즉 허용응력이나 좌굴강도보다 큰 응력이 발생하거나 혹은 계산된 응력값이 지나치게 적은 경우) 부재치수를 수정하지 않을 수 없다. 부재치수가 적합치 못한 경우 이의 수정을 위해 범용프로그램의 기능중 하나인 민감도해석(sensitivity analysis)을 수행하기도 한다. 하지만 아직은 경험에 많이 의존하게 되고 경우에 따라서는 시간 제약으로 인해 응력의 축소작업(즉 부재치수의 증가)만으로 수정작업을 마치고 수정된 구조물에 대해 다시 구조해석을 하여 결과를 확인하는 것으로 전체 구조설계과정을 마감하는 경우가 보통이다.

앞에서 설명한 구조설계 과정중 본 논문에서 다루는 내용은 초기 구조설계가 끝난 후의 구조해석, 결과 검토, 부재치수 수정 및 수정구조물에 대한 해석과정과 관련을 갖는다. 먼저 현재 조선소에서 채택되고 있는 설계 과정중 개선이 필요한 부분을 지적하면 다음과 같다.

- 구조해석 모델작성 및 구조해석 결과 평가는 워크스테이션급 컴퓨터에서 이루어지지만 해석모델의 자유도가 큰 경우 보통은 구조해석을 위해 대형 컴퓨터상에서 범용프로그램을 이용하기 때문에 작업이 번거롭다.

- 범용프로그램의 여러 기능중 일부만을 사용함에도 불구하고 프로그램 전체를 가동하여야 한다.

- 수정된 구조물의 해석에 원래의(수정전의) 구조물 해석 과정에서 계산한 중간결과를 사용(즉 재해석기법 사용)하여 해석소요시간을 단축하지 못하고 구조해석을 다시 수행한다.

위의 세가지 이외에도 해석결과 평가 기준의 개선 및 이를 고려한 최적설계 등도 언급될 수 있겠다. 앞에서

언급한 세가지 사항을 개선하기 위해서는 독자적인 전용 해석 프로그램을 워크 스테이션급 컴퓨터에서 사용하고 재해석 기법을 도입하여 해석과정의 효율을 높이는 작업이 필요하게 된다. 이를 위해서는 2차원 및 3차원 구조해석을 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하여야 하고 적합한 재설계 기법 또는 개발되어야 한다.

선체나 해당구조물의 재해석 또는 재설계와 관련하여 국내에서 발표된 논문으로는 조[1]와 박 등[2]의 것들을 들 수 있다. 조[1]는 구조물의 동적 설계과정에 비선형 섭동법을 도입하여 최소의 수정 또는 최소의 중량을 목표로한 재설계 기법을 제안하고 박 등[2]은 선체의 최소중량 설계과정에 수정축소기법법을 도입하고 콘테이너 선체에 대한 계산 예를 보였다.

본 논문에서는 선체구조설계에 사용할 수 있는 재설계 시스템의 개발과 관련하여 각 재해석 기법들을 살펴보고, 이를 간단한 보강보를 예제로 택해 검증하고 실제선체의 설계에 적용하여 보았다.

2. 재해석 기법

재해석 방법은 크게 정확한 해를 얻을 수 있는 엄밀해법(Exact or Direct Methods)과 근사값을 얻을 수 있는 근사해법(Approximate Methods)으로 나눌 수 있다. 일반적으로 설계변수의 수정범위와 수정량이 작으면 엄밀해법을 사용하는 것이 효과적이고 근사해법은 수정범위와 수정량이 상대적으로 큰 경우에 더 적합한다. 물론 수정된 구조물이 원래의 것과 차이가 많으면 재해석 기법을 사용하는 것보다 구조해석을 처음부터 다시하는 것이 더 효율적이다. 엄밀해법에는 수정역행렬법(Modified Inverse Method), 수정변위벡터법(Modified Displacement Method) 및 구조분할법(Substructuring Method) 등이 있고[3,4], 근사해법[5]으로는 반복법(Iteration Method)[6], 테일러 급수법(Taylor Series Method)[7] 및 축소기법(Reduced Basis Method)[8] 등을 들 수 있다.

여기에서는 설계변수의 변화가 넓은 범위에 이루어지는 경우에 사용할 수 있는 근사해법들의 기본이론식을 살펴본 다음 각 방법의 단점을 개선할 수 있는 복합적인 방법을 다루게 된다.

2.1. 반복법

(1) 단순 반복법(Simple Iteration Method)

원래 구조물, 즉 수정전 구조물의 강성방정식은 식(1)과 같이 표현된다.

$$[K_0] \{d_0\} = \{F\} \quad (1)$$

여기에서 $[K_0]$: 원 구조물의 강성행렬

$\{d_0\}$: 원 구조물의 변위벡터

구조부재의 수정으로 인한 절점하중 $\{F\}$ 의 변화가 없다는 가정(하중이 자중과는 무관하다는 가정인데 선체구조 해석에서는 이 가정이 무방하다)을 도입하면 수정된 구조물에 대한 강성 방정식은 식(2)와 같게 된다.

$$[K_0] \{d_j\} = \{F\} - [\Delta K_1] \{d_j\} \quad (2)$$

여기에서 $[\Delta K_0]$: 구조물의 수정으로 인한 강성행렬의 변화량

$\{d_j\}$: 수정된 구조물의 변위벡터

식(2)를 반복계산형태로 표현하면 식(3)이 된다.

$$[K_0] \{d_1^{(i)}\} = \{F\} - [\Delta K_1] \{d_1^{(i-1)}\} \quad (3)$$

식(3)의 우변 둘째항은 구조물의 변경으로 인해 생긴 값인데 이를 가상의 하중으로 간주하면 순접계 식(3)의 해를 구할 수 있다. 식(3)의 양변에 $[K_0]^{-1}$ 를 곱한 후 정리하면 식(4)가 된다.

$$\{d_1^{(i)}\} = \{d_0\} - [K_0]^{-1} [\Delta K_1] \{d_1^{(i-1)}\} \quad (4)$$

$[B]$ 를 식(5)와 같이 정의한 후 식(4)를 정리하면 식(6)을 얻는다.

$$[B] = [K_0]^{-1} [\Delta K_1] \quad (5)$$

$$\{d_1^{(i)}\} = \{d_0\} - [B] \{d_1^{(i-1)}\} \quad (6)$$

식(6)에 초기조건 $\{d_1^{(0)}\} = \{d_0\}$ 를 대입하면 식(7)이 된다.

$$\{d_1\} = \left[[I] - [B] + [B]^2 - [B]^3 + \dots \right] \{d_0\} \quad (7)$$

이 반복과정에서는 식(7)에 주어진 무한급수가 수렴하여야만, 즉 $[B]$ 가 어떤 범위의 값을 가져야만 수정된 구조물의 절점변위 $\{d_1\}$ 를 구할 수 있다. 이 조건이 전제된다면 식(7)을 사용하여 수정된 구조물의 절점변위를 구할 수 있다.

(2) 개별반복법(Separate Iteration of Components Method)

반복법의 수렴도를 향상시키기 위해 Kirsch와 Rubinstein[6]이 제안한 것이 개별반복법이다. 식(6)을 반복계산형태가 아닌 원래의 아닌 원래의 식으로 다시쓰면 식(6)'과 같다.

$$\{d_1\} = \{d_0\} - [B] \{d_1\} \quad (6)'$$

이 식의 양변에 $\alpha \{d_1\}$ 를 더한 후 정리하고 다시 반복계산형태로 바꾸면 식(8)을 얻는다.

$$\{d_1^{(i)}\} = \frac{1}{1+\alpha} \left[\{d_0\} + [\alpha [I] - [B]] \{d_1^{(i-1)}\} \right] \quad (8)$$

이를 다시 급수형태로 표현하면 식(9)와 같이 된다.

$$\{d_1^{(i)}\} = \frac{1}{1+\alpha} \left[[I] + \frac{[\alpha [I] - [B]]}{1+\alpha} + \frac{([\alpha [I] - [B]])^2}{(1+\alpha)^2} + \frac{([\alpha [I] - [B]])^3}{(1+\alpha)^3} + \dots \right] \{d_0\} \quad (9)$$

$\{T_1\}$, $\{T_2\}$, $\{T_3\}$ 를 식(10)과 같이 정의하고 이를 식(9)에 대입하면 식(11)을 얻고 $\{d_1\}$ 의 j번째 d_{1j} 는 식(12)로 표현된다.

$$\begin{aligned} \{T_1\} &= [B] \{d_0\} \\ \{T_2\} &= [B] \{T_1\} \\ \{T_3\} &= [B] \{T_2\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\{d_1\} = \frac{1}{1+\alpha} \left[\{d_0\} - \frac{\{T_1\} - \alpha \{d_0\}}{[1+\alpha]} + \frac{\{T_2\} - 2\alpha \{T_1\} - \alpha^2 \{d_0\}}{[1+\alpha]^2} \right]$$

$$-\frac{\{T_3\} - 3\alpha\{T_2\} + 3\alpha^2\{T_1\} - \alpha^3\{d_0\}}{[1 + \alpha]^3} + \dots] \quad (11)$$

식(11)의 수렴정도는 α 의 값에 따라 달라지게 된다. 다시 말하면 어떤값의 α 에 대해서는 빨리 수렴을 하고 어떤값의 α 에 대해서는 수렴이 느려지게 된다는 것이다. 효과적으로 $\{d_{1j}\}$ 의 여러 요소를 계산하기 위해 서로다른 α 의 값을 선정하기로하면 $\{d_{1j}\}$ 의 j번째 요소 $d_{1,j}$ 는 식(12)로 표현된다.

$$d_{1,j} = \frac{1}{1 + \alpha_j} \left[d_{0j} - \frac{T_{1j} - \alpha_j d_{0j}}{(1 + \alpha_j)} + \frac{T_{2j} - 2\alpha_j T_{1j} + \alpha_j^2 d_{0j}}{(1 + \alpha_j)^2} - \frac{T_{3j} - 3\alpha_j T_{2j} + 3\alpha_j^2 T_{1j} - \alpha_j^3 d_{0j} + \dots}{(1 + \alpha_j)^3} \right] \quad (12)$$

여기에서 d_{0j} , T_{1j} , T_{2j} , T_{3j} 는 각각 $\{d_0\}$, $\{T_1\}$, $\{T_2\}$, $\{T_3\}$ 의 j번째 요소이고 α_j 는 $d_{1,j}$ 를 계산하기 위해 택한 α 값이다. 만약 식(12)의 우변 둘째항이 소거되도록 α_j 를 택하면 식(12)는 식(13)과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$d_{1,j} = \frac{d_{0j}^2}{(d_{0j} + T_{1j})^2} \left[(d_{0j} + T_{1j})^2 + (T_{2j} d_{0j} - T_{1j}^2) - \left\{ \frac{d_{0j}^2 T_{3j} - 3T_{1j} T_{2j} d_{0j} + 2T_{1j}^3}{T_{1j} + d_{0j}} \right\} + \dots \right] \quad (13)$$

2.2 테일러 급수법

원 구조물의 강성방정식, 식(1)을 설계변수 V_i 에 대해 미분하면 식(14)가 된다.

$$\frac{\partial [K_0]}{\partial V_i} \{d_0\} + [K_0] \frac{\partial \{d_0\}}{\partial V_i} = \frac{\partial \{F\}}{\partial V_i} \quad (14)$$

앞 절에서와 마찬가지로 구조물에 작용하는 하중 $\{F\}$ 는 설계변수 V_i 와 무관하다고 가정(자중의 변화가 하중에 미치는 영향은 무시할 수 있다는 가정)하면 식(14)는 식(15)로 쓸 수 있다.

$$[K_0] \frac{\partial \{d_0\}}{\partial V_i} = -\frac{\partial [K_0]}{\partial V_i} [d_0] \quad (15)$$

식(15)는 식(1)과 형태가 유사하기 때문에 식(15)의 $\frac{\partial \{d_0\}}{\partial V_i}$ 를 손쉽게 구할 수 있다. 수정된 구조물 절점 변위의 1계 테일러 급수전개는 식(16)과 같다.

$$\{d_1\} = \{d_0\} + \left[\frac{\partial \{d_0\}}{\partial V_i} \right] \Delta V_i \quad (16)$$

$\frac{\partial \{d_0\}}{\partial V_i}$ 는 식(15)로부터 구할 수 있으므로 수정된 구조물 절점변위의 근사값은 식(16)으로부터 구할 수 있다. 나중에 언급되겠지만 $\frac{\partial \{d_0\}}{\partial V_i}$ 는 절점변위의 설계변수에 대한 민감도로서 만족시켜야 될 절점변위(여기에서 $\{d_{1j}\}$)를 안다면 설계변수의 수정량 ΔV_i 를 식(16)으로부터 구할 수 있게 된다.

2.3 축소 기저법

수정된 구조물의 절점 변위벡터 $\{d_1\}$ 의 근사값을 r개의 독립벡터 $\{\bar{d}_1, \{\bar{d}_2, \dots, \{\bar{d}_r\}$ 의 선형합으로 표현하면 식(17)과 같이 된다. $\{\bar{d}_i\}$ 는 보통 이전 구조물(수정된 구조물과는 조금다른)의 절점변위벡터를 택하게되나 이에 어려움이 있어 나중에 언급될 수정 축소 기저법을 통해 개선된다.

$$\{d_1\} = [\Psi] \{c\} \quad (17)$$

여기에서

$$[\Psi]_{nr} = \left[\{\bar{d}_1\}_1, \{\bar{d}_2\}_2, \dots, \{\bar{d}_r\}_r \right] \quad (18)$$

그리고 $\{c\}_{r,1}$ 는 미정계수벡터로서 식(19)로부터 결정될 수 있다.

$$[\bar{K}]_{rr} \{c\}_{r,1} = \{\bar{F}\}_{r,1} \quad (19)$$

여기에서

$$[\bar{K}] = [\Psi]^T [K_0] [\Psi] \quad (20)$$

$$\{\bar{F}\} = [\Psi]^T \{F\} \quad (21)$$

이 방법에 있어 관건은 미정계수벡터 $\{c\}$ 를 구하는 것이다. 미지절점변위의 수 n에 비해 미정계수의 수 r이 매우 작기 때문에 수정된 구조물의 강성방정식을 풀 때 필요한 계산양에 비하면 훨씬 수월하게 식(19)로부터 $\{c\}$ 를 구할 수 있고 이 값은 식(17)에 대입하여 수정된 구조물 절점변위의 근사값을 구하게 된다.

2.4 기법의 개선

앞에서 설명한 세가지 기법, 즉 반복법, 테일러 급수법 및 축소기저법은 각각의 단점이 있다. 반복법은 수렴여부 및 수렴속도가 문제이고, 테일러 급수법은 수정범위나 수정량이 조금 큰 경우 해의 정도가 떨어지는 경우가

많다. 그리고 축소기저법은 독립 벡터, 식(18)를 정하는데 어려움이 있다. 이런 단점을 개선하기 위해 이 기법들을 혼합시킨 수정 축소기저법(테일러 급수-축소기저법)과 테일러 급수-반복법이 제안되었다[6].

(1) 수정 축소기저법

수정된 설계변수, V_i 의 수가 r 인 경우 이 방법에서는 수정 구조물의 절점변위 $\{d_i\}$ 의 근사값을 $(r+1)$ 개의 독립 벡터의 선형결합으로 나타낸다. 여기에서 $(r+1)$ 개의 독립 벡터는 식(22)와 (23)으로부터 구할 수 있다.

$$\{\bar{d}\}_1 = \{d_0\} \tag{22}$$

$$\{\bar{d}\}_{i+1} = \left\{ \frac{\partial d_0}{\partial V_i} \right\} \quad (i=1 \rightarrow r) \tag{23}$$

여기에서 $\{d_0\}$ 는 단위화된 원 구조물의 절점변위 벡터이다.

식(23)으로부터 얻어지는 r 개의 독립 벡터는 식(15)를 이용하여 구하게 되는 민감도로서 이미 테일러 급수법에서 설명된 것이다. 따라서 원 구조물의 절점변위와 수정된 설계변수의 민감도 해석결과로부터 독립 벡터를 일의적으로 구할 수 있게 된다.

(2) 테일러 급수-반복법

식(7)에서 알 수 있듯이 수정구조물의 절점변위를 단순 반복법으로 구할 때 원 구조물의 절점변위를 초기값으로 사용하고 있다. 하지만 테일러 급수-반복법에서는 테일러 급수법에 의해 구한 수정구조물 절점변위의 근사값을 반복법의 초기값으로 사용하여 해의 정도와 수렴속도를 높이고 있다. 테일러 급수법과 단순 반복법 그리고 테일러 급수법과 개별 반복법을 조합한 경우 반복회수를 3회로 하면 이들의 식은 각각 식(24)과 (25)로 나타낼 수 있다.

◦ 테일러 급수-단순 반복법

$$\{d_i\} = ([I] - [B] + [B]^2) \{d_0\} - [B]^3 \{d_i\}_{TS} \tag{24}$$

◦ 테일러 급수-개별 반복법

$$\{d_i\} = \frac{1}{1+\alpha} \left[\left([I] + \frac{\alpha [I] - [B]}{1+\alpha} + \left[\frac{\alpha [I] - [B]}{1+\alpha} \right]^2 \right) \{d_0\} + \left[\frac{\alpha [I] - [B]}{1+\alpha} \right]^3 \{d_i\}_{TS} \right] \tag{25}$$

여기에서 $\{d_i\}_{TS}$ 는 테일러 급수법으로 구한 수정 구조물의 절점 변위이다.

3. 민감도 해석

구조부재의 형상과 치수가 정해지고 구조해석을 수행한 후 그 결과가 설계기준을 만족하지 못하면 수정을 하게 된다. 이때 부딪히는 문제는 어떤 설계변수를 변경할 것이며 또한 이의 수정량을 얼마로 할 것이냐이다. 이를 위해 필요한 것이 민감도 해석이다.

3.1 절점 변위 민감도

설계변수 V_i 의 변화에 대한 절점변위의 민감도 계산은 이미 테일러 급수법의 설명과정에서 언급이 되었다. 이 해의 편미분 식(15)을 여기에 다시 옮겨 적는다.

$$[K_0] \frac{\partial \{d_0\}}{\partial V_i} = - \frac{\partial [K_0]}{\partial V_i} \{d_0\} \tag{26}$$

식(26)는 강성방정식과 형태가 유사하다. 따라서 이 식의 우변을 새로운 하중으로 가상하면 이에 대응하는 변위와 절점변위의 민감도가 된다. 이 민감도를 구하는 과정에서의 판건은 $\partial [K_0] / \partial V_i$ 를 구성하는 것인데 각 요소에 대한 값을 요소 강성행렬로부터 식으로 구해 놓고 변경할 설계변수와 관계가 있는 요소만 값을 갖게 하면 된다. 나머지 요소는 이 값이 모두 "0"이 되기 때문에 이 사실을 이용하면 연산의 양을 훨씬 줄일 수 있다.

3.2 등가응력 민감도

구조해석 결과의 평가과정에는 von Mises의 등가응력이 허용범위 내에 있는지의 판정이 포함된다. 따라서 실제의 재해석 과정에서는 절점변위의 민감도 해석도 필요하겠지만 등가응력 민감도 해석이 더 필요한 경우가 많으리라 예상된다. 여기에서는 막요소로 예로 들어 등가응력 민감도 해석에 필요한 식을 설명하기로 한다.

막요소의 경우 von Mises의 등가응력은 식(27)로 표현된다.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau^2} \tag{27}$$

따라서 등가응력 민감도는 식(28)이 된다.

$$\frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial V_i} = \frac{1}{2} \sigma_{eq}^{-1/2} \left[(2\sigma_x - \sigma_y) (2\sigma_y - \sigma_x) 6\tau \right] \cdot \left[\frac{\partial \sigma_x}{\partial V_i} \frac{\partial \sigma_y}{\partial V_i} \frac{\partial \tau}{\partial V_i} \right]^T \tag{28}$$

재질과 형상(요소의 변길이)이 설계변수의 함수가

아닌 경우 응력성분의 민감도는 식(29)로 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma(x,y)}{\partial V_i} = [D] [B] \left\{ \frac{\partial d}{\partial V_i} \right\} \quad (29)$$

여기에서 [D] 응력-변형도 행렬
[B] 변형도-변위 행렬

식(29)에 절점변위 민감도를 대입하면 응력성분의 민감도가 구해지고 또 이값을 식(28)에 대입하면 등가 응력 민감도를 구할 수 있다.

4. 재설계 시스템 : STRESS

본 논문에서 설명한 재해석기법들을 이용하여 선체 구조설계 과정에 필요한 재설계를 위해 개발한 것이 재설계 시스템(STructural REdesign System for Ships : STRESS)이다. 이 시스템에서는 봉 및 막요소를 사용할 수 있고 여러가지 재해석 기법을 선택할 수 있도록 구성하였다. 현재 이 시스템에서 선택할 수 있는 기법은 다음의 여섯가지이다.

- 1) Taylor Series Method
- 2) Modified Reduced Basis Method
- 3) Simple Iteration Method
- 4) Separate Iteration Method

5) Combined Taylor Series and Simple Iteration Method

6) Combined Taylor Series and Separate Iteration Method

어떤 재해석 기법이 우월한가에 대한 답은 경우에 따라 다를 수 있기 때문에 실제 설계하고자 하는 구조물에 대해 비교검증 작업을 할 수 있도록 여러기법을 시스템내에 포함하고 있다. 재해석 과정은 대화식 기법으로 수행할 수 있어 필요한 경우 설계자의 판단결과를 반영시킬 수 있다.

이 시스템에서는 먼저 초기설계된 구조물에 대한 해석을하고 절점변위와 응력의 설계변수에 대한 민감도를 계산한다. 이 결과로부터 수정할 설계변수의 선정과 수정량을 결정하여 대화식 기법으로 입력하고 선택한 재해석 기법으로 절점변위와 응력의 근사값을 계산한다. 이 결과가 만족스러우면 수정된 구조물에 대한 엄밀해를 구해 확인하는 것으로 재설계과정을 마치게된다. 만약 재해석의 근사값이 만족스럽지 못하면 다시 설계변수의 선정과 수정량 입력과정부터 다시 밟게 된다.

4.1 검증예

재설계 시스템 STRESS를 검증하기 위한 계산예로 Fig. 1에 주어진 단순 보로 하였다. 전체요소를 5개의 Material

Table 1 Comparison of various reanalysis techniques

(A) Maximum deflection at neutral axis of midspan

(unit : mm)

Thickness Change	- 50 %	- 30 %	- 10 %	+ 10 %	+ 30 %	+ 50 %	+ 100 %
Direct Analysis	19.528	14.949	10.849	8.876	7.511	6.509	4.882
Taylor Series	14.646	12.693	10.741	8.887	6.835	4.882	1.938
Modified R.B.M.	27.281	14.991	10.974	8.227	7.436	6.452	4.882
Simple Iteration	16.528	13.230	10.765	8.939	7.815	6.674	9.420
Separate Iteration	18.627	13.624	10.775	8.931	7.636	6.674	5.085
T. S. + Simple I.	18.141	13.597	10.775	8.931	7.636	6.673	5.079
T. S. + Separate I.	18.564	13.622	10.775	8.931	7.636	6.673	5.079

(B) Error index

(× 10⁻³)

Thickness Change	- 50 %	- 30 %	- 10 %	+ 10 %	+ 30 %	+ 50 %	+ 100 %
Taylor Series	19.638	7.070	0.786	0.786	7.070	19.638	78.550
Modified R.B.M.	30.322	5.771	0.935	0.555	1.500	1.502	4.882
Simple Iteration	12.524	4.148	0.839	0.758	3.463	10.818	9.420
Separate Iteration	5.1417	2.672	0.792	0.710	2.004	5.780	4.5×10 ³
T. S. + Simple I.	6.670	2.789	0.792	0.711	2.054	14.521	72.548
T. S. + Separate I.	5.335	2.688	0.792	0.710	1.948	3.321	317.99

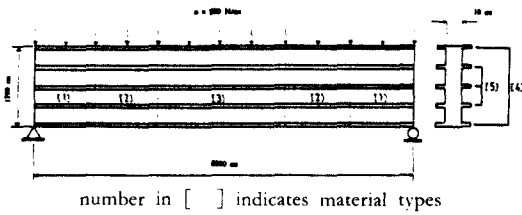


Fig. 1 Sample structure for structural redesign system(stress)

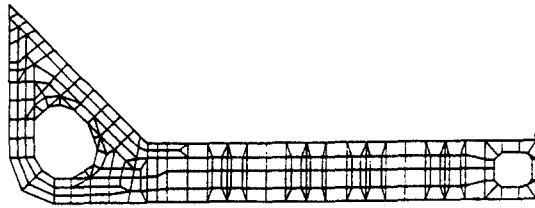


Fig. 2 Meshed design example

Type으로 나누었는데 평판을 3개 그리고 보강재를 2개의 Material Type으로 나누었다. 설계 결과 등에 대한 검토는 다음절에서 다루고 있다.

(1) 재해석 기법 비교

◦ 최대 처짐

설계 예제에 대해 재설계 시스템 내에 포함된 여러 재해석 기법을 사용한 해석 결과중 최대 처짐이 발생하는 중앙부 중립축에서의 연직 방향 변위를 Table 1(A)에 정리하였다.

Table 1(A)를 살펴보면 구조물의 두께를 -50% ~ +100% 사이를 변화시킬 때 수정 축소기저법(Modified Reduced Basis Method)과 개별반복법(Separate Iteration)이 정해에 가장 근접된 결과를 주고 있다. 테일러 급수법을 반복법에 결합시킨 효과는 그리 크지않다. 하지만 다른 연구자들도 밝혔듯이 특정의 재해석 기법이 여러 경우에 우월성을 보이기에는 어려우므로 본 시스템에는 6가지 방법을 필요에 따라 선택할 수 있도록 하였다.

◦ 오차 지수

참고문헌 5에서 제안한 오차 지수는 식(30)과 같다.

$$\epsilon = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{j=1}^n [(d_{j, exact} - d_{j, approx}) / |d_{max, exact}|]^2} \quad (30)$$

여기에서 ϵ : 오차 지수

n : 자유도 수

$d_{j, exact}, d_{j, approx}$: 절점 변위의 정해와 근사해

Table 2 Comparison of equivalent stress sensitivity for membrane elements obtained using different equations unit : N/mm²/mm

Member Type	Member No.	Differential Form,Eqn(28)	Incremental Form,Eqn(31)	Obtained from Exact Analysis
[1]	1	-244.1	-18.0	-16.4
[2]	49	-235.5	-16.8	-15.4
[3]	25	-384.6	-23.8	-21.8

$|d_{max, exact}|$: 절점 변위의 최대값

각 방법에 대해 절점 변위의 오차 지수를 계산하여 Table 1(B)에 정리하였다. Table 1(B)에 의하면 오차 지수의 경우도 최대처짐값을 비교한 경우와 유사한 결과를 보여주고 있다. -50%와 +100%를 제외하면 수정 축소기저법, 개별반복법 그리고 테일러급수-개별반복법이 비교적 양호한 결과를 제공하고 있다.

(2) 민감도

민감도는 절점변위와 응력에 관한 것을 모두 구하였다. 절점변위와 응력성분의 민감도는 오차가 그리 크지않으나 식(28)을 사용한 막요소의 경우 등가응력의 민감도에서 상당히 큰 오차가 발생하였다. 이를 개선하기 위해 미분형태가 아닌 응력성분의 민감도를 이용한 증분형태, 식(31)로 계산한 결과 훨씬 개선된 결과를 얻을 수 있었다.

$$\frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial V_i} = \frac{\Delta \sigma_{eq}}{\Delta V_i} = \frac{\sigma_{eq}' - \sigma_{eq}}{1} = \left[\left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial V_i} \cdot 1 \right)^2 + \left(\sigma_y + \frac{\partial \sigma_y}{\partial V_i} \cdot 1 \right)^2 - \left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial V_i} \cdot 1 \right) \left(\sigma_y + \frac{\partial \sigma_y}{\partial V_i} \cdot 1 \right) + 3 \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial V_i} \cdot 1 \right)^2 \right]^{1/2} \quad (31)$$

Table 2에는 막요소에 대한 민감도 해석 결과가 요약되어 있다. 이 표에서 알 수 있듯이 증분식을 사용한 경우 해석 결과가 현저히 개선되었다. 이 이유는 미분형태인 식(28)은 증분의 2차항 이상은 소거하여 선형화 과정을 거친 식이기 때문이다. 하지만 막요소의 두께와 절점변위의 관계는 선형이 아니고 등가응력의 경우는 이 오차가 증첩이 된 결과로 설명할 수 있다.

(3) 설계 변수의 수정량 결정

원 구조물을 해석한 결과 각 Material Type 별 최대 등가 응력이 발생하는 요소 번호와 등가 응력값은 Table 3에 주어져 있다. 그리고 각 Material Type의 설계변수에

Table 3 Maximum von mises equivalent stress for each material type and corresponding stress sensitivities

Member Type No.	Max.Equiv. Stress(N/mm ²)	Sensitivity to Unit Change				
		MT[1]	MT[2]	MT[3]	MT[4]	MT[5]
[1] 1	183.5	-18.02	0.082	0.001	-0.016	-0.005
[2] 49	195.9	0.128	-16.82	-0.883	-0.080	-0.020
[3] 25	261.1	0.004	-0.129	-23.80	-0.087	-0.022
[4] 80	264.9	-0.118	-23.23	-0.349	-0.116	-0.024
[5] 101	128.5	-0.017	-0.072	-11.58	-0.046	-0.013

Table 4 Maximum von mises equivalent stress for each material type and corresponding stress sensitivities for stiffened beam

Member Type No.	Max.Equiv. Stress(N/mm ²)	Sensitivity to Unit Change				
		MT[1]	MT[2]	MT[3]	MT[4]	MT[5]
[1] 1	183.5	-18.02	0.082	0.001	-0.016	-0.005
[2] 49	195.9	0.128	-16.82	-0.883	-0.080	-0.020
[3] 25	261.1	0.004	-0.129	-23.80	-0.087	-0.022
[4] 80	264.9	-0.118	-23.23	-0.349	-0.116	-0.024
[5] 101	128.5	-0.017	-0.072	-11.58	-0.046	-0.013

대한 민감도도 이 표에 포함되어 있다.

만약 허용응력을 220N/mm²로 가정하는 경우 MT[3]과 MT[4]가 이를 초과하고 있다. MT[3]의 두께와 MT[4]의 면적을 변화시켜 설계 기준을 만족시키고자 한다면 식(32)를 이용하여 수정량을 결정할 수 있다.

$$\frac{\partial \sigma_{eq3}}{\partial t_3} \Delta t_3 + \frac{\partial \sigma_{eq3}}{\partial A_4} \Delta A_4 = \Delta \sigma_{eq3} \tag{32}$$

$$\frac{\partial \sigma_{eq4}}{\partial t_3} \Delta t_3 + \frac{\partial \sigma_{eq4}}{\partial A_4} \Delta A_4 = \Delta \sigma_{eq4}$$

식(32)에

$$\frac{\partial \sigma_{eq3}}{\partial t_3} = -23.8, \frac{\partial \sigma_{eq3}}{\partial A_4} = -0.087, \Delta \sigma_{eq3} = -41$$

$$\frac{\partial \sigma_{eq4}}{\partial t_3} = -0.349, \frac{\partial \sigma_{eq4}}{\partial A_4} = -0.116, \Delta \sigma_{eq4} = -44$$

를 대입하면 $\Delta t_3 \approx 1.0(\text{mm})$, $\Delta A_4 \approx 400(\text{mm}^2)$ 을 얻는다. 이 수정량을 반영하여 엄밀해석을 한 결과 $\sigma_{eq3} = 213.2 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{eq4} = 225.3 \text{ N/mm}^2$ 을 얻었다. 이 값들과 허용응력인 220 N/mm²를 비교하면 상당히 바람직한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다.

Table 5 Material type whose maximum von mises equivalent stress exceeds the allowable value together with corresponding stress sensitivities for the design example

Member Type No.	Max.Equiv. Stress(N/mm ²)	Sensitivity to Unit Change	
		MT[9]	MT[13]
[9] 394	193.8	24.36	1084.2
[13] 146	255.4	25.83	1077.3

5. 설계예

본 연구를 통해 개발한 재설계 시스템을 사용한 설계예로는 $L \times B \times D \times d = 270\text{m} \times 45\text{m} \times 23.8\text{m} \times 17.5\text{m}$ 인 15만톤급 Bulk Carrier의 이중저 구조를 선택하였다. 이 예제에서 총 절점수가 280개 이었으며 봉요소가 260개, 막요소가 242개 사용되었다. 또한 봉요소는 9개의 Material Type 그리고 막요소는 7개의 Material Type로 구분되었다.

허용응력을 180 N/mm²로 가정할 때 원 구조물을 해석한 결과 Material Type의 최대 등가 응력이 허용치를 초과하는 Material Type, 발생하는 요소 번호, 등가 응력 및 민감도가 Table 5에 주어졌다.

$$\frac{\partial \sigma_{eq9}}{\partial A_9} \Delta A_9 + \frac{\partial \sigma_{eq9}}{\partial t_{13}} \Delta t_{13} = \Delta \sigma_{eq9} \tag{33}$$

$$\frac{\partial \sigma_{eq13}}{\partial A_9} \Delta A_9 + \frac{\partial \sigma_{eq13}}{\partial t_{13}} \Delta t_{13} = \Delta \sigma_{eq13}$$

식(32)에

$$\frac{\partial \sigma_{eq9}}{\partial A_9} = 24.36, \quad \frac{\partial \sigma_{eq9}}{\partial t_{13}} = 1084.2,$$

$$\frac{\partial \sigma_{eq13}}{\partial A_9} = -25.83, \quad \frac{\partial \sigma_{eq13}}{\partial t_{13}} = -1077.3,$$

$$\Delta \sigma_{eq9} = 193.8, \quad \Delta \sigma_{eq13} = -255.4$$

를 대입하여 풀면 앞의 검증예와는 달리 비현실적인 값인 $\Delta A_9 \approx 40.6(\text{cm}^2)$, $\Delta t_{13} \approx -0.736(\text{cm})$ 을 얻는다. 단위 부피 변화당 민감도가 큰 Δt_{13} 을 먼저 0.2cm로 정한 다음 식(33)의 두번째식에 대입하여 ΔA_9 의 근사값을 2.0cm²로 정하고 이 수정량을 반영하여 엄밀해석을 하여 $\sigma_{eq9} = 176.2 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{eq13} = 181.6 \text{ N/mm}^2$ 을 얻었다. 이 값들과 허용응력인 180 N/mm²를 비교하면 검증예의 경우와 마찬가지로 상당히 개선된 결과를 보여준다.

6. 결론

본 논문에서는 여러 재해석 기법들을 비교 검토하고

이를 이용하여 개발한 재설계 시스템(STRESS)의 검증 과정 및 설계예를 보여주고 있다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같이 정리될 수 있다.

- 보통의 선체 구조설계 과정에서 예상되는 치수의 수정범위에서는 본 논문에서 언급한 여러 재해석 근사해법이 효과적으로 사용될 수 있다.

- 이중 수정요소 기저법과 테일러급수-개별반복법이 최대치짐으로 비교한 해의 정확도에서 우수하고 오차율도 제일 적었다.

- 등가응력의 민감도 계산에는 식(28)로 주어진 미분식보다 식(31)로 주어진 증분형태가 더 정확한 결과를 제공한다.

- 재설계시스템을 보다 효과적으로 사용하기 위해서는 특히 설계변수 수정량 결정과정에 대한 많은 경험의 축적이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] 조규남 "동적 구조 재설계를 위한 비선형 섭동법", 대한조선학회지 제26권 제11호, pp 39-45, 1989.
[2] 박성환, 백점기, 노인식, 이호섭 "재해석 기법에

의한 선체 최소 중량 설계", 대한조선학회지 제26권 제3호, pp 62-70, 1989.

- [3] Arora, J. S., "Survey of Structural Reanalysis Techniques", *Jour. of the Struc. Div.*, ASCE, Vol. 102, No ST 4, PP 783-802, 1975.
[4] Abu Kassim, A. M. and Topping, B.H.V., "Static Reanalysis: A Review", *Jour. of Struc. Eng.* ASCE, Vol. 113, No. 5, PP 1029-1045, 1987.
[5] Noor, A. K. and Lowder, H. E., "Approximate Techniques of Structural Reanalysis", *Computers & Structures*, Vol. 4, PP 801-812, 1974.
[6] Kirsch, U. and Rubinstein, M. F., "Structural Reanalysis by Iteration", *Computers & Structures*, Vol. 2, pp 497-510, 1972.
[7] Storaasli, O. O. and Sobieszczanski, J., "On the Accuracy of Taylor Approximation", *AIAA Jour.*, Vol. 12, No. 2, PP 231-233, Feb, 1974.
[8] Fox, R. L. and Miura, H., "An Approximate Analysis Technique for Design Calculations", *AIAA Jour.*, Vol. 9, No. 1, PP 188-179, Jan., 1971.