

소형 연안 어선의 최소 중량 설계에 관한 연구

송하철* · 김용섭** · † 심천식

*, † 목포대학교 기계선박해양공학부, ** 홍익대학교 조선해양공학과

A Study for the Minimum Weight Design of a Coastal Fishing Boat

Ha-Cheol Song* · Yong-Sub Kim** · † Chun-Sik Shim

*, † Dept. of Naval Architecture and Marine Eng. Mokpo National Univ., Jeonnam 534-729, Korea

**Dept. of Naval Architecture and Ocean Eng. Hongik Univ., Chungnam 339-701, Korea

요약 : 한국에서 건조되는 대부분의 소형 연안 어선의 경우 경험에 기초하여 건조되어지기 때문에 구조적 안전성 문제가 발생하곤 했다. 본 논문에서는 이들 어선의 구조강도를 증가시키고 생산 및 운용비를 줄이기 위하여 최적설계를 수행하였다. 어선의 무게와 구조부재의 주요 치수들을 각각 목적함수와 설계변수로 선택하였다. 해석과정 중에 극소점을 피하고 CPU 시간을 줄이고자 전역 탐색법과 지역 탐색법을 결합한 하이브리드 최적화 알고리즘이 개발되었다. 또한 최적화 루프의 각 iteration 단계에서 제한조건을 결정하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 최적화 결과는 초기 어선 모델과 비교하였으며 최적설계의 효과가 구조강도, 재료비 관점에서 검토되었다.

핵심용어 : 최소중량설계, 연안어선, 최적화, 섬유 강화 플라스틱

Abstract : As most of small fishing boats made of FRP have been constructed by experience in Korea, some structural safety problems have been occurred occasionally. To improve the structural strength and reduce the costs for construction and operation, optimum design for small fishing boat was carried out in this study. The weight of fishing boat and the main dimensions of structural members are chosen as objective function and design variables, respectively. By the combination of global and local search methods, a hybrid optimization algorithm was developed to escape the local minima and reduce CPU time in analysis procedure, and finite element analysis was performed to determine the constraint parameters at each iteration step in optimization loop. Optimization results were compared with the real existing fishing boat, and the effects of optimum design were examined from points of view; structural strength, material cost, etc.

Key words : minimum weight design, coastal fishing boats, optimization, FRP(fiber reinforced plastic)

1. 서 론

최근 철강재 가격의 급등과 인건비 상승으로 인하여 조선소에서는 재료비 및 건조비 절감을 위한 노력이 한창이다. 이러한 노력들 중 하나로 선체 구조 설계에 있어 구조 안전성과 신뢰성을 확보하며 재료비 및 건조비를 최소화하려는 연구(Lee, 1988)가 진행되고 있다. 그러나 대부분의 최적설계는 기존 선급의 룰이나 일반적인 수치해석에 의한 대형 선박의 선체 선형, 선체 중앙 횡단면, 선체 격벽(Jang and Na, 1996)과 화물탱크의 배치(Jang and Shin, 1997) 등에 국한되어 있고 연안 어선과 같은 소형 선박에 대해서는 그 응용 예가 드문 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존의 소형 연안 어선을 모델로 유한요소해석을 기반으로 한 최소 중량 설계를 수행하였고, 초기 어선 모델과 그 결과를 비교, 검토하였다.

2. 최적 설계 대상

본 연구의 최적 설계 대상은 1995년도에 표준선형으로 개발된, 전장 15.9m, 수선간장 13.0m, 7.93G/T 규모의 소형 연안 어선으로 주요 요목, 일반 배치도 및 선도는 다음의 Table 1, Fig. 1 및 Fig. 2와 같다(수산청, 1995).

Table 1 Principle dimensions of coastal fishing vessel

Items	Dimensions
Length O.A.	15.90 m
Length B.P.	13.00 m
Breadth mld.	3.20 m
Depth mld.	1.20 m
Draft mld.	0.84 m
Initial trim	0.50 m
G/T	7.93 ton

* 정회원, heshon@mokpo.ac.kr 061)450-2767

** 정회원, yoskim@hongik.ac.kr, 011) 9181-3787

† 교신저자 : 심천식(정회원), csshim@mokpo.ac.kr 061)450-2768

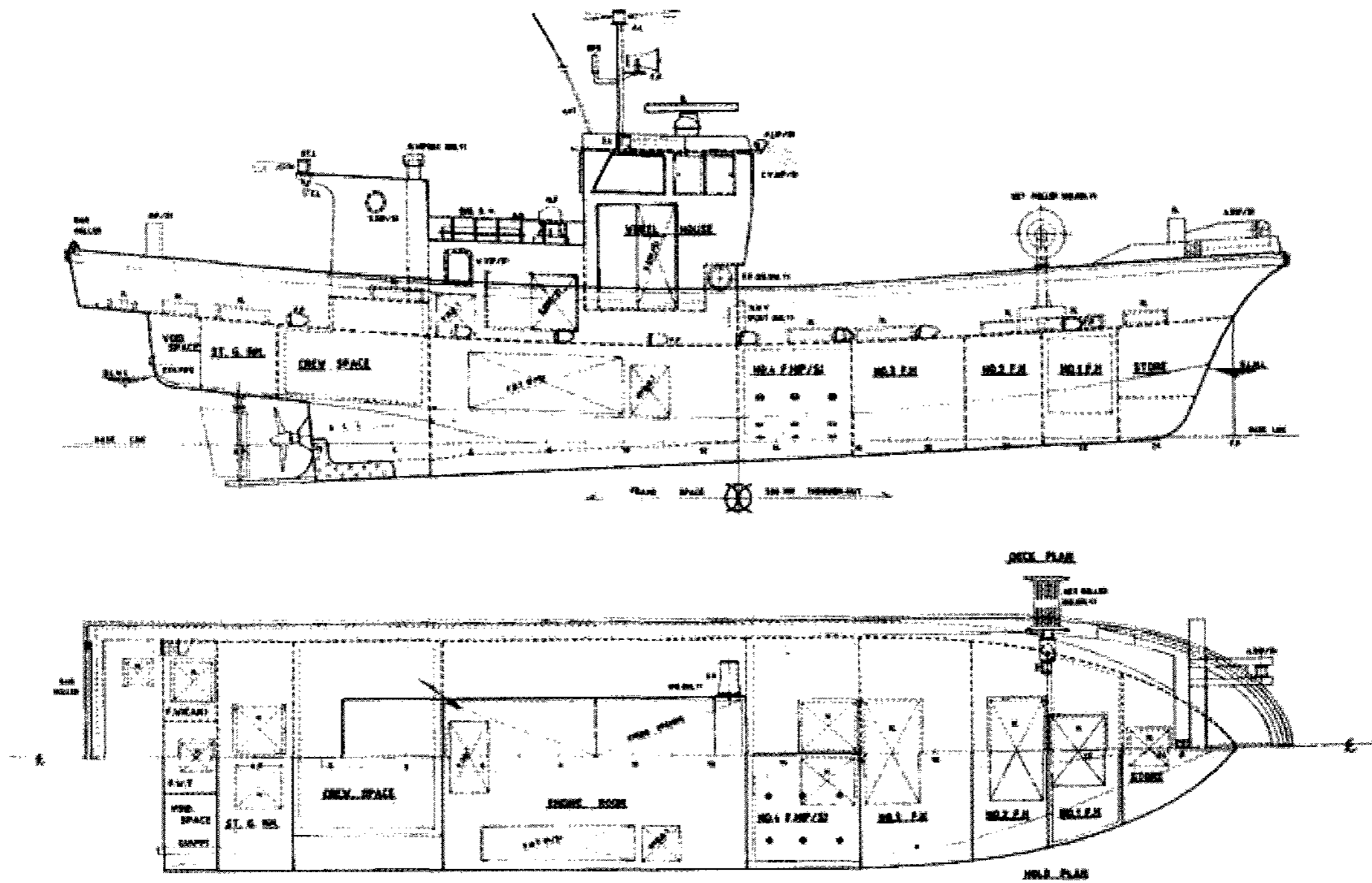


Fig. 1 G/A of coastal fishing vessel for design optimization

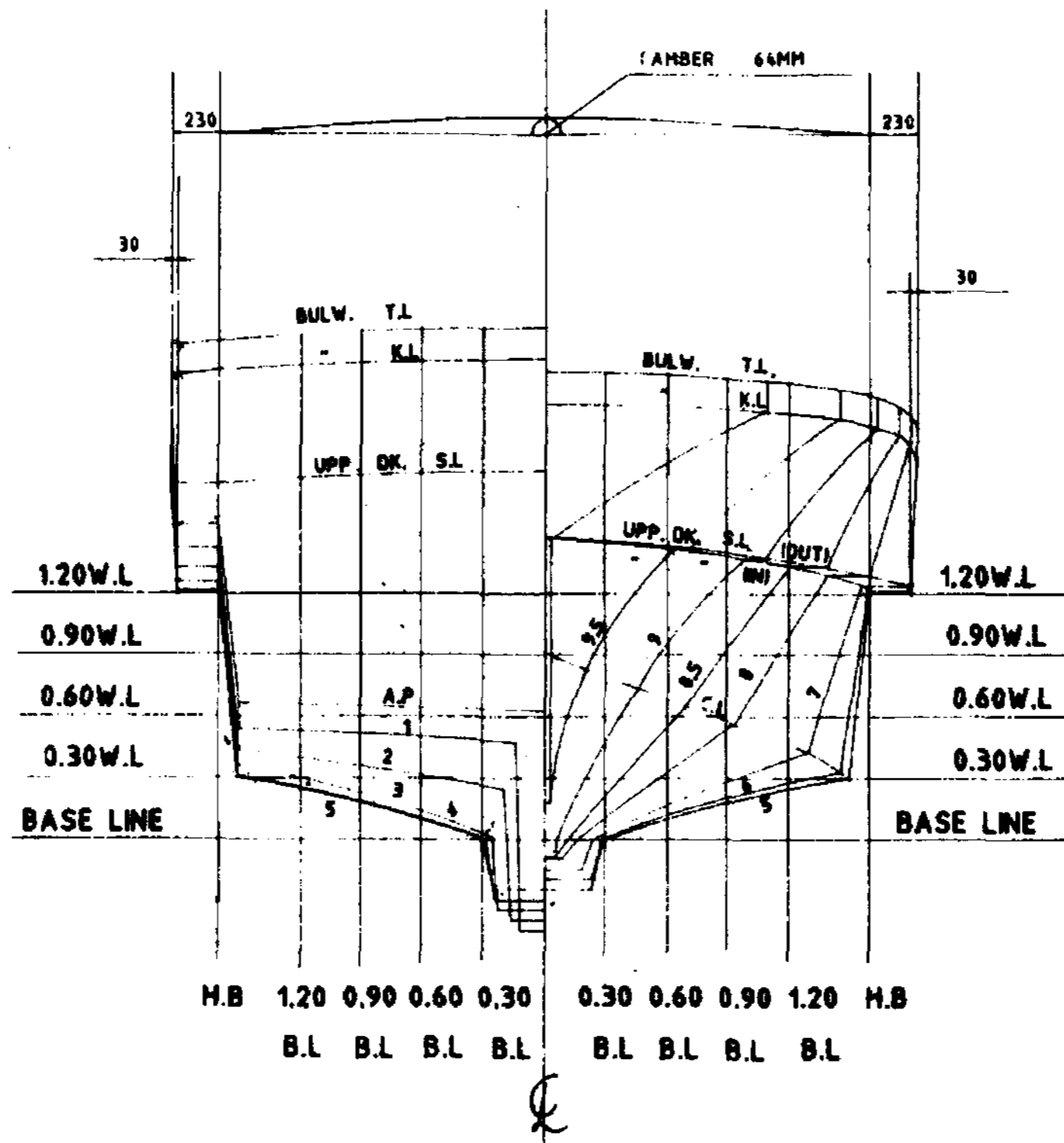


Fig. 2 Lines plan of coastal fishing vessel for design optimization

3. 최적화 알고리즘 및 정식화

본 연구에서는 계산 효율을 높이기 위해 아래와 같은 두가지 단계의 최적화 기법이 사용되었다.

Step 1. 목적함수의 설계변수에 대한 근사

목적함수와 설계변수 간의 관계를 curve fitting에 의해 설정한다. 이 과정에서는 몇 개의 설계변수 세트들에 대한 목적함수의 계산을 수행하고 해석 결과치와의 관계식을 최소자승법을

통해 설정하게 되는데, 이 결과를 curve approximation이라 부른다. 이후 진행되는 각각의 최적화 루프는 새로운 데이터 점들을 생성하고 목적함수와 근사 관계는 매 반복계산(iteration)마다 업데이트되어 새로이 설정되게 된다. 기본적으로는 quadratic+cross term fitting이 목적함수에 대해 사용되게 되고, 아울러 제한조건과 설계변수와의 관계도 동일한 과정을 통해 설정되게 된다(Das and Dennis, 1997).

Step 2. 제약 최적화 문제의 비제약 최적화 문제로의 변환
이 변환은 부과된 제약에 대한 계산을 위해 목적함수의 근사값에 대한 벌칙들을 부가함으로써 수행된다. 비제약 목적함수의 최소값 탐색은 각 반복계산에서 순차적 비제약 최소화 문제(SUMT)의 적용에 의해 수행된다. 현재의 설계 변수의 값들이 유용한 해(feasible)이면, 각 루프의 끝에서 수렴 및 종료 조건에 대한 체크가 수행된 후 최적화 과정이 종료된다.

3.1 목적함수 및 제한조건함수의 가정

다음 식(1)과 같이 설계변수에 대한 반응 함수를 정의 한다.

$$\hat{f}_x = f(x) + error \quad (1)$$

목적함수의 경우, 식(1)을 다음 식(2)와 같은 2차형태로 가정하고 반복계산 결과를 바탕으로 식(2)의 계수 a_i 와 b_{ij} 를 결정하고 재설정한다.

$$\hat{f} = a_0 + \sum_i a_i x_i + \sum_i \sum_j b_{ij} x_i x_j \quad (2)$$

한편, 최소자승법에서의 오차는 다음 식(3)과 같은 형태를 가진다.

$$E^2 = \sum_{j=1}^{n_d} \phi^{(j)} (f^{(j)} - \hat{f}^{(j)})^2 \quad (3)$$

where $\phi^{(j)}$ =weight associated with design set j,
 n_d =current number of design set

3.2 목적함수의 최소화

목적함수식의 가정을 통해 제약 최적화 문제를 재정리하면 다음 식(4)부터 식(8)과 같이 서술할 수 있다.

Minimize

$$\hat{f} = \hat{f}_x \quad (4)$$

subject to

$$\underline{x}_i \leq x_i \leq \bar{x}_i \quad (i=1,2,3,\dots,n) \quad (5)$$

$$\hat{g}_i(x) \leq \bar{g}_i + \alpha_i \quad (i=1,2,3,\dots,m_1) \quad (6)$$

$$\underline{h}_i - \beta_i \leq \hat{h}_i(x) \quad (i=1,2,3,\dots,m_2) \quad (7)$$

$$\underline{w}_i - \gamma_i \leq \hat{w}_i(x) \leq \bar{w}_i + \gamma_i \quad (i=1,2,3,\dots,m_3) \quad (8)$$

식(4)~식(8)은 다시 벌칙함수(penalty function)의 개념을 사용하여 아래 식(9)와 같은 비제약 목적함수(혹은 반응곡면)의 형태로 변환된다.

$$F(x, p_k) = \hat{f} + f_0 p_k \left(\sum_{i=1}^n x(x_i) + \sum_{i=1}^{m_1} G(\hat{g}_i) + \sum_{i=1}^{m_2} H(\hat{h}_i) + \sum_{i=1}^{m_3} W(\hat{w}_i) \right) \quad (9)$$

where $x(x_i)$: penalty function used to enforce design variable constraints,

G, H and W : penalty functions for state variable constraints

f_0 : reference objective function

p_k : reference surface parameter

식(9)의 비제약목적함수 식은 SUMT(Sequential Unconstrained Minimization Technique)를 사용하여 매 반복계산마다 계산되고, 이 값을 바탕으로 목적함수의 최소값이 결정된다.

4. 소형 연안 어선의 유한요소해석 모델

앞서 언급한 최적화 알고리즘을 사용하여 소형 연안 어선의 최소중량설계를 수행하기 위해 Fig. 1의 일반배치도 및 Fig. 2의 선도를 근거로 Fig. 3과 같은 유한요소모델을 제안하였다. 본 연구에서는 반복계산 마다 최적화 알고리즘에 의해 설계변수들이 결정되면 유한요소모델이 자동으로 생성되도록 모델링하였으며, 구조해석을 수행하여 전체 중량과 최대 응력값을 계산하여 이를 반응 곡면의 업데이트에 사용되도록 설정하였다.

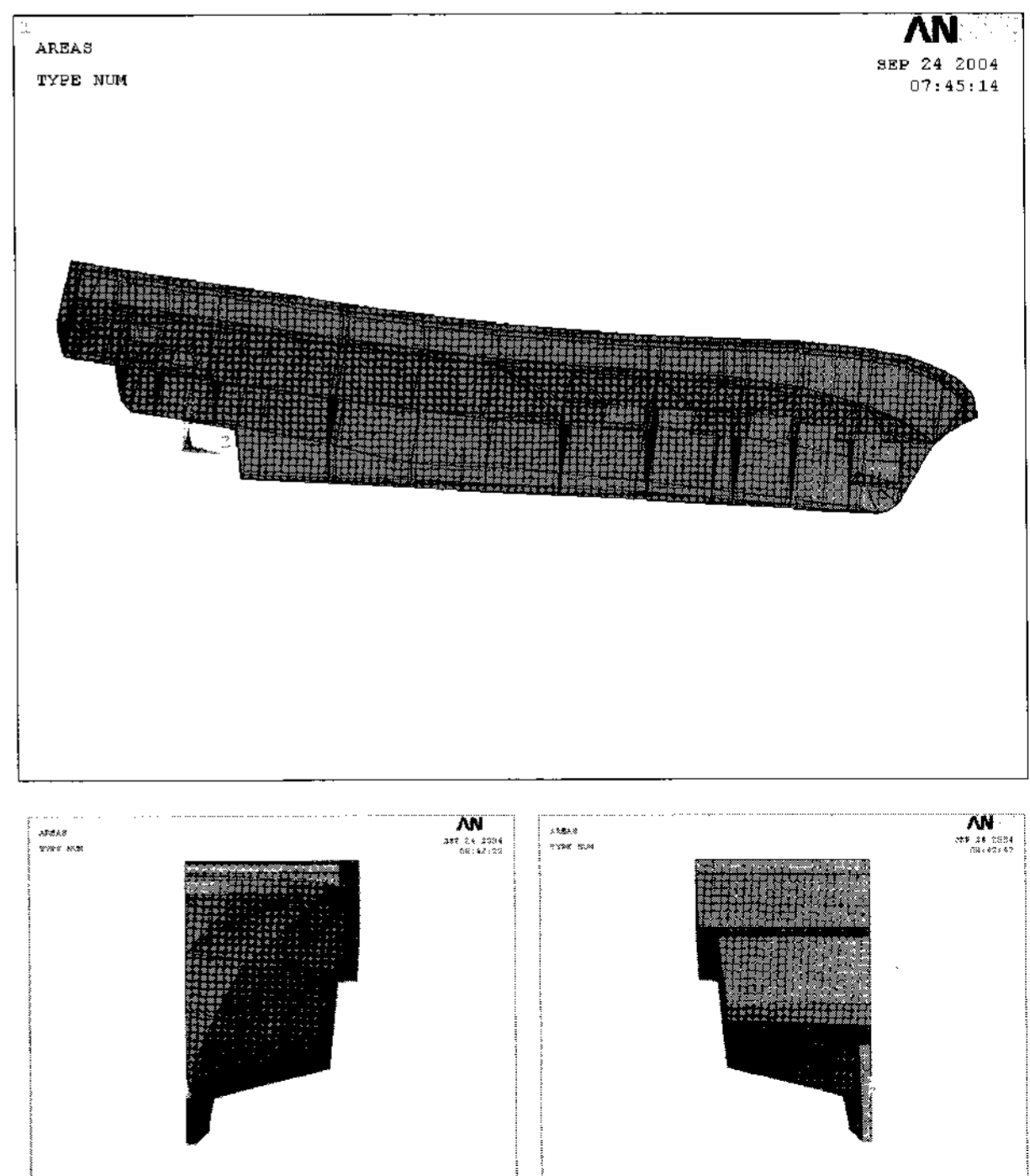


Fig. 3 FE model for the assesment of structural response

구조해석을 위한 하중조건으로 다음 Fig. 4에서 보는 바와 같이 sine curve 형태의 파랑이 배 전체 길이에 걸쳐 호깅 상태를 유발하도록 가정하였으며, 파고 값을 조절하면서 전체 분포하중의 합이 선각 전체 중량에 상응하도록 설정하였다. 한편, 분포 하중은 선저 외판 요소 각각에 해당하는 분포하중 값을 적용하였다. 그리고 대칭 모델과 대칭 경계 조건을 사용하였다. 구조해석에 사용된 FRP(Fiber Reinforced Plastic)의 물성치는 기존의 자료에서 알려진 C.S.M./Polyester의 값을 사용하였고, 이는 Table 2에 정리하였다.

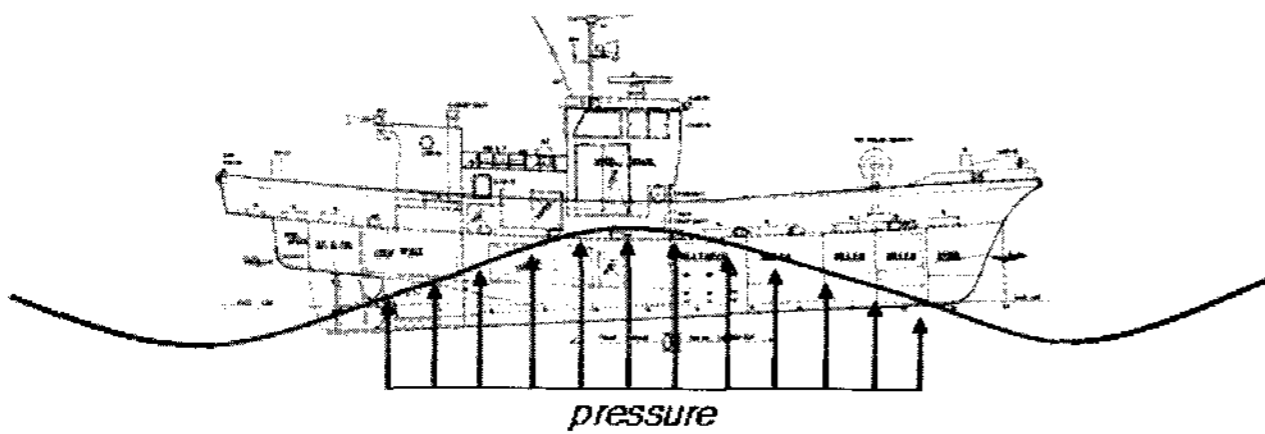


Fig. 4 Loading condition

Table 2 Material properties of FRP laminate

E_b (N/mm ²)	E_c (N/mm ²)	Density (g/cm ³)	ν
5530	6930	1.54	0.32

5. 최소중량설계를 위한 최적화 문제의 정의

소형 연안 어선의 최소중량설계를 위해서 목적함수는 선각 및 선체구조부재의 부피로 하였고, 제한조건은 강화플라스틱(FRP)선의 선체구조기준(해양수산부, 2001)에서 제시하고 있는 굽힘강도 요구 기준값(150MPa)이하로 설정하였다.

한편, 설계변수(DV1~DV8)는 Fig. 5와 Fig. 6에서 보는 바와 같이 각 부재의 두께 및 어창 격벽의 위치로 설정하였다. 각 부재의 두께 설계변수의 값은 강화플라스틱(FRP)선의 선체구조기준에서 제시하고 있는 FRP 적층두께 요구치를 만족하는 범위 내에서 결정되도록 하였고, 어창 격벽 설계변수값은 어창 용

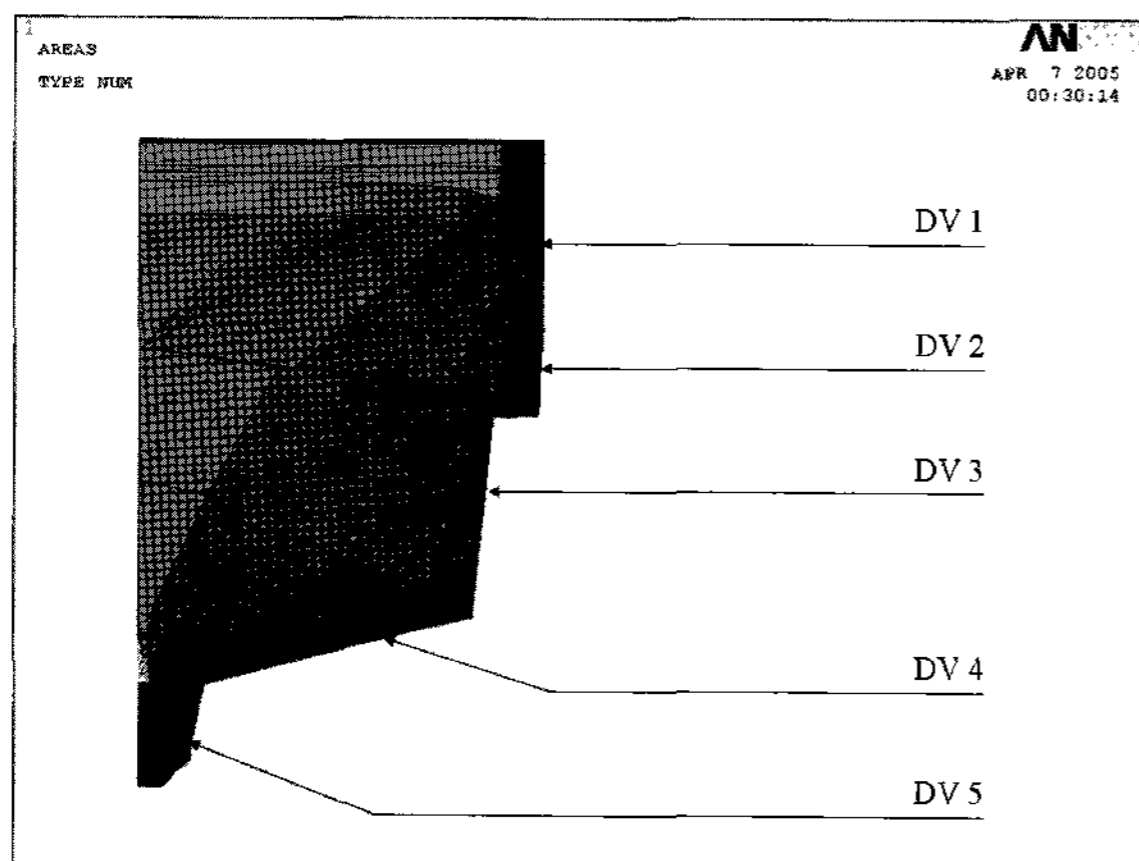


Fig. 5 Definitions of design variables (I)

적 및 배치를 유연성 있게 변경하여 모델링될 수 있도록 그 범위를 결정하였다. 각 설계변수의 범위는 다음 Table 3에 정리하였다.

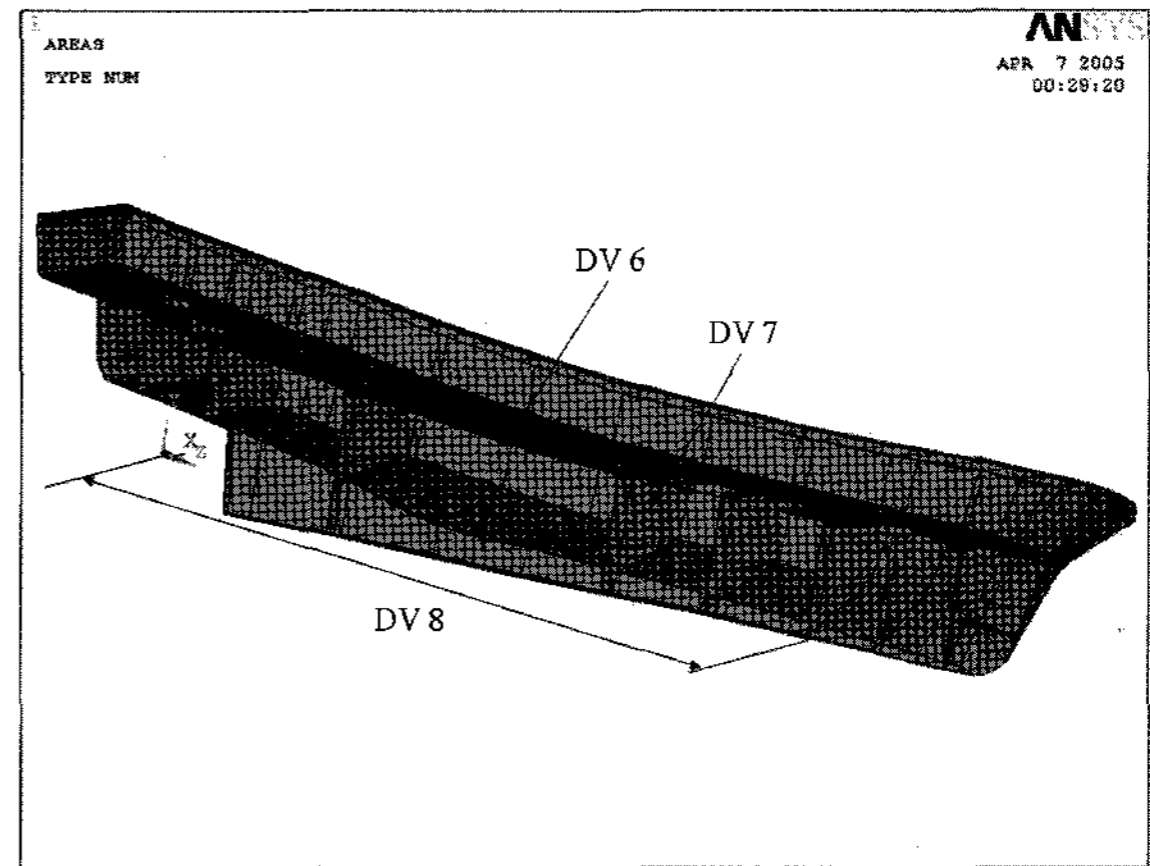


Fig. 6 Definitions of design variables (II)

Table 3 Domain of design variables

No. of DV	Remarks	Domain of DV (cm)
1	Bulltop 두께	1.00 ~ 1.40
2	Bull 두께	0.74 ~ 0.90
3	선측외판 두께	0.74 ~ 0.90
4	선저외판 두께	0.78 ~ 1.00
5	Keel 두께	1.30 ~ 1.60
6	갑판 두께	0.72 ~ 1.20
7	격벽 두께	0.47 ~ 0.70
8	3번 횡격벽 위치	940 ~ 1045

6. 소형 연안 어선의 최소중량설계 결과

다음 Table 4는 소형 연안 어선의 최소중량설계 결과를 초기 설계와 비교, 정리한 것이다. 목적함수는 초기치와 비교하여 약 9%정도 경량화된 것으로 나타났으며, 해석시간은 각 반복계산당 약 1분으로, 총 32 반복계산만에 상당한 수렴성을 보여주고 있다(Fig. 7).

Table 4 Result of minimum weight design

Item	Initial design of existing ship	Result of optimum design
DV 1	1.21 cm	1.00 cm
DV 2	0.81 cm	0.74 cm
DV 3	0.81 cm	0.74 cm
DV 4	0.91 cm	0.78 cm
DV 5	1.44 cm	1.30 cm
DV 6	0.98 cm	1.01 cm
DV 7	0.56 cm	0.47 cm
DV 8	950 cm	943.54 cm
Bending stress	137.61 MPa	149.41 MPa
Total volume of material	811970 cm ³	741500 cm ³

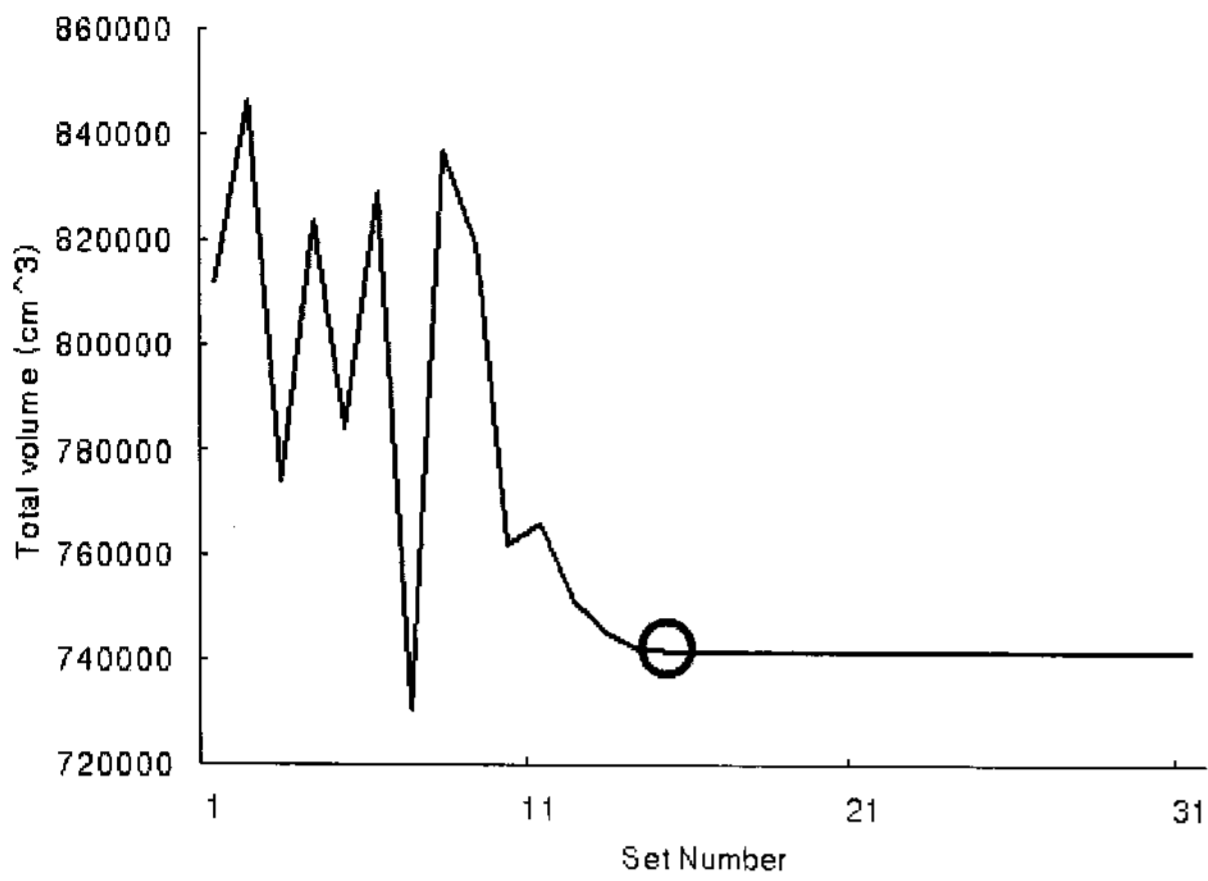


Fig. 7 Convergence of objective function according to iterations during optimization loop

다음 Fig. 8과 Fig. 9는 각 설계변수의 초기값과 최적값을 유한요소모델에 그 변화 양상과 함께 표시한 것이다. 부재 두께의 경우에 갑판을 제외한 나머지 부재의 두께는 모두 거의 하한점으로 감소한 것을 볼 수 있다. 이 결과로부터 갑판의 두께만을 일정량 증가시키고 나머지 부재의 두께는 설계기준 요구치를 만족하는 식의 최소중량설계안을 제안할 수 있다. 한편 격벽부재위치의 경우에는 초기 격벽의 위치와 결과값의 차이가 비교적 작은 것을 볼 수 있다. 이는 어창의 수와 전체 용적을 초기 모델의 것과 동일하도록 제한하였기 때문에 격벽부재위치 변수의 변화가 목적함수에 큰 영향을 주지 못한 것으로 판단된다.

다음 Fig. 10은 소형 연안 어선의 최소중량설계 모델의 굽힘응력 분포를 보여주고 있다. 최대 굽힘응력은 149.41MPa로 선미 갑판부와 선체 외판부의 구조 불연속부에서 발생한 것으로 나타났다. FRP선 제작에 있어서 판재끼리의 접합은 일정 두께로 적층을 하는 방법을 사용하고 있는데, 이러한 접합부의 강성 증가를 모델링에 반영한다면 최대응력을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 전체 중량을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

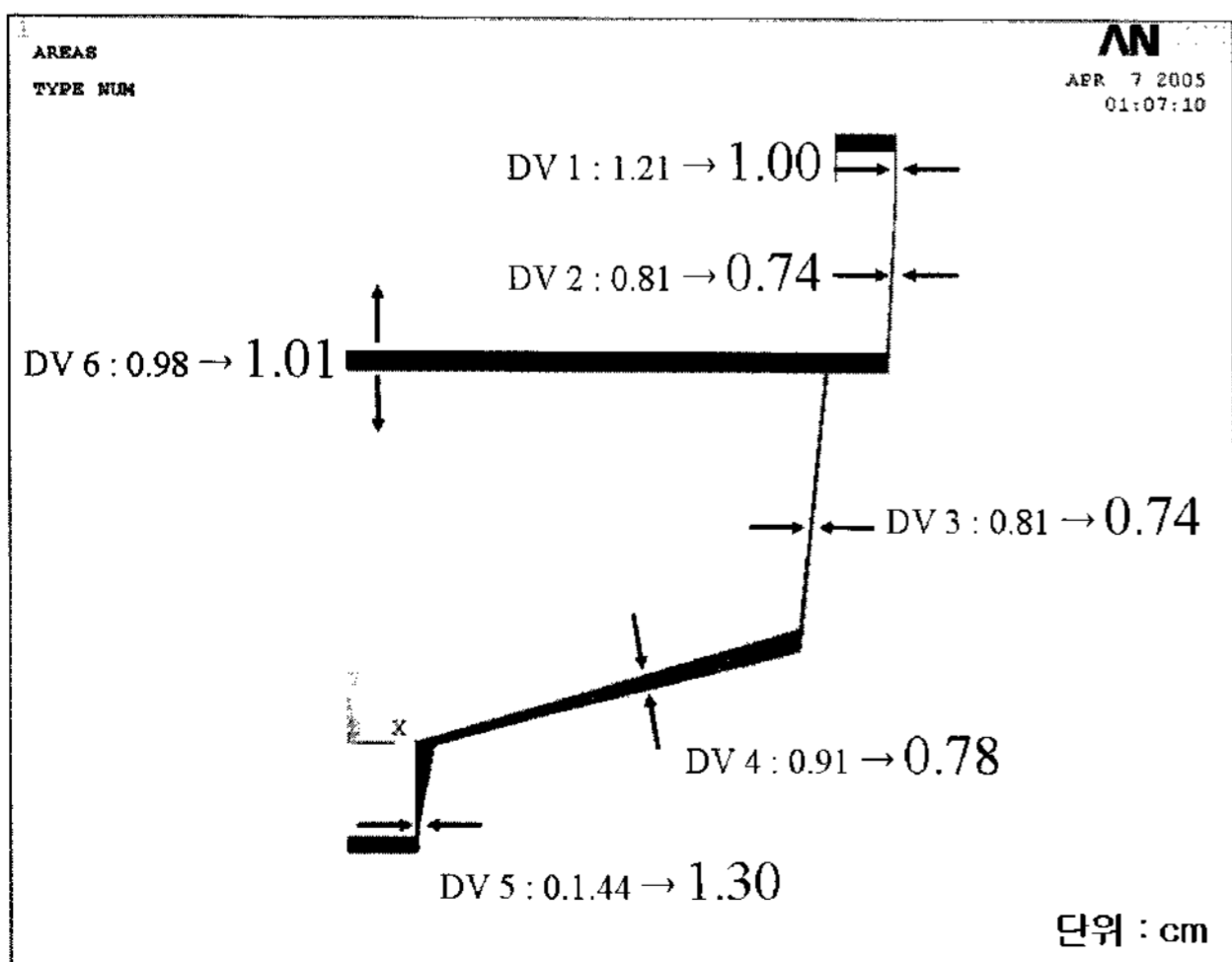


Fig. 8 Result of minimum weight design (I)

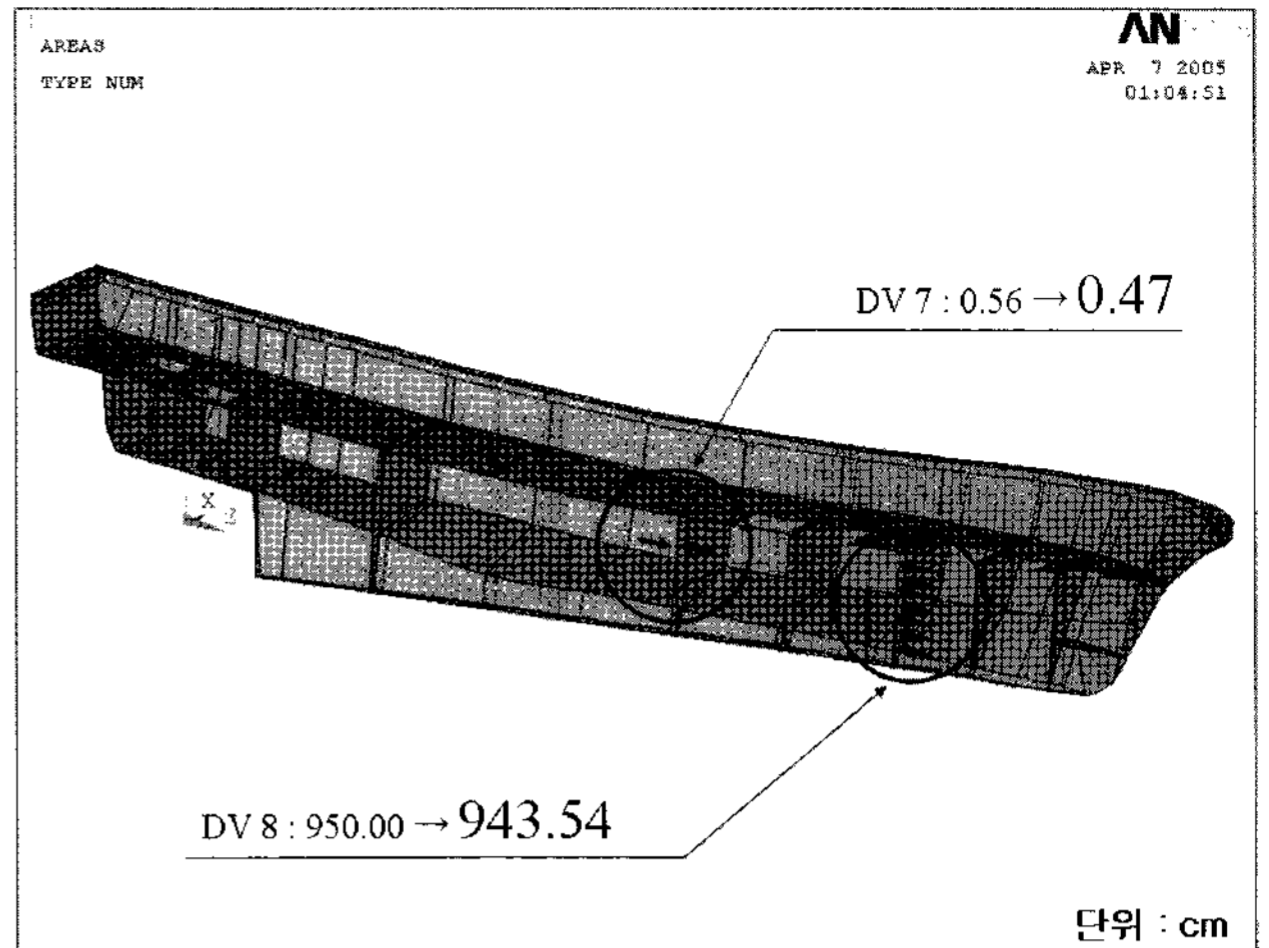


Fig. 9 Result of minimum weight design (II)

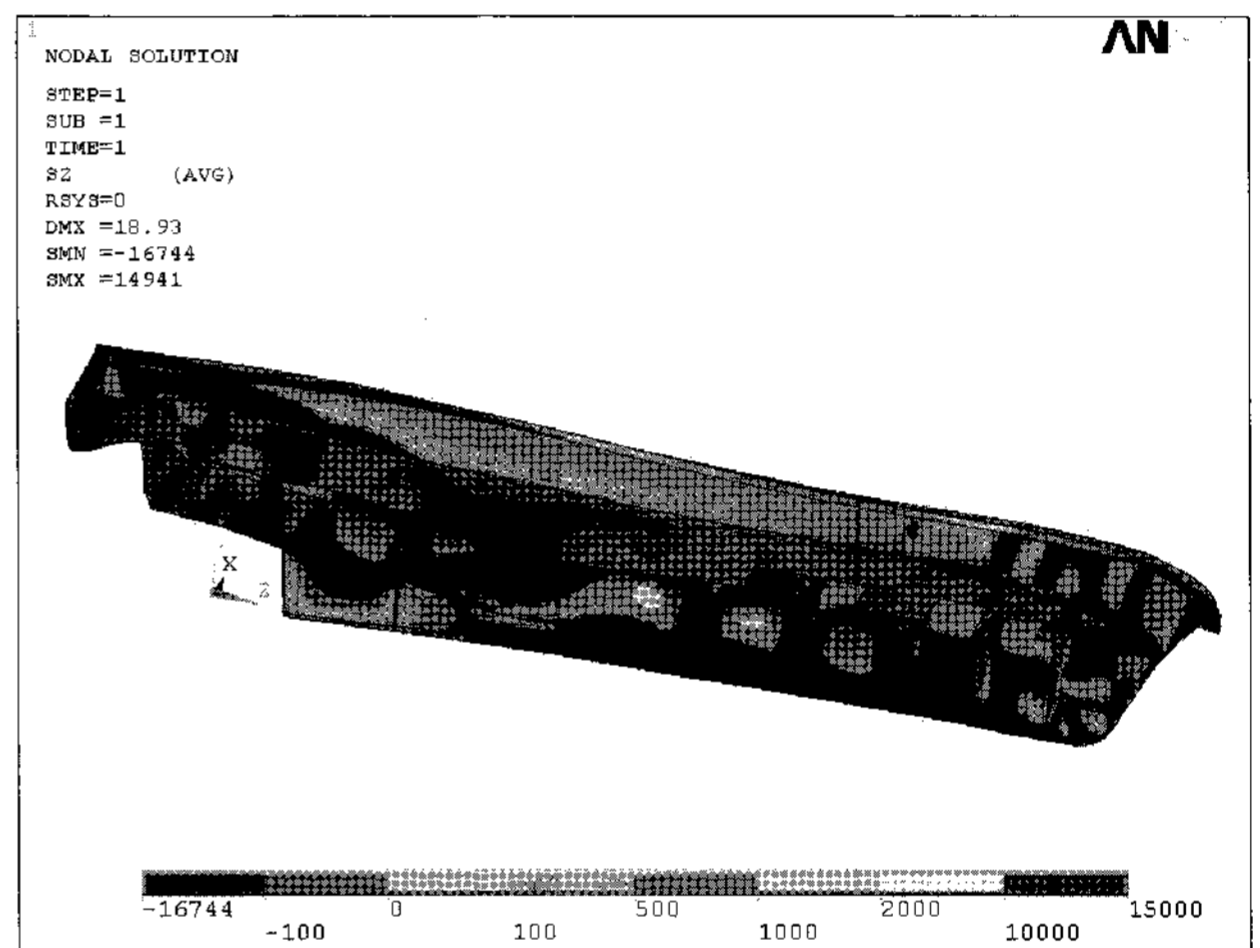


Fig. 10 Bending stress distribution of optimum design

7. 결 론

본 논문에서는 소형 연안 어선을 대상으로 전선 모델의 유한요소해석을 기초로 한 구조 최적화를 실시간의 해석 과정을 통하여 효과적으로 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 최소 중량 설계를 통하여 초기중량보다 9% 정도 경량화시킬 수 있었다.
- (2) 해석적 기법을 토대로 중앙 횡단면의 최적 설계에 국한되어 왔던 조선 분야의 최적 설계 기법을 국부 구조나 소형 선박의 최적화에 확장시킬 수 있는 기초 연구로 활용될 수 있을 것으로 기대되어, 이 분야의 설계 기법 향상에 일조할 것으로 여겨진다.

후 기

본 연구는 해양한국발전프로그램(KSGP) 연구개발사업 및 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- [1] 수산청(1995), "표준어선형 연구개발 (III) FRP 연안어선 5종 개념 및 기본설계", 한국어선협회 최종보고서, pp 21-32.
- [2] 해양수산부(2001), "강화플라스틱(FRP)선의 선체구조기준", pp 9-10.
- [3] Das, I. and Dennis, J.E. (1997), "A Closer Look at Drawbacks of Minimizing Weighted Sums of Objectives for Pareto Set Generation in Multi-criteria Optimization Problems", Structural Optimization, International Society for Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol 14, No 1, pp 63-69.
- [4] Jang, C.D. and Na, S.S. (1996), "Minimum Weight Design of the Transverse Frames of Oil Tankers by Generalized Slope Deflection Method", Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol 33, No 3, pp 103-111.
- [5] Jang, C.D. and Shin, S.H. (1997), "A Study on the Optimum Structural Design for Oil Tankers Using Multi-Objective Optimization", Proceedings of The Sixth International Marine Design Conference, Newcastle upon Tyne, United Kingdom, pp 217-230.
- [6] Lee, H.S. (1988), "Development of Computer Program for Controlling Structural Weight and Construction Cost", Technical Report, Korea Institute of Machinery and Materials, pp 12-23.

원고접수일 : 2007년 11월 19일

원고채택일 : 2008년 3월 10일