대 한 조 선 학 회 논 문 집
제 47 권 제 3 호 2010 년 6 월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 47, No. 3, pp. 430-437, June 2010
DOI: 10.3744/SNAK.2010.47.3.430

열 변형과 목적형상을 고려한 선체구조의 형상 최적설계

박성호*, 최재연**, 김민근*, 조선호†*

서울대학교 조선해양공학과
서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학연구소*
삼성중공업 조선해양연구소**

Shape Design Optimization of Ship Structures Considering Thermal Deformation and Target Shape

Sungho Park*, Jae-yeon Choi**, Min-Geun Kim* and Seonho Cho†*

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering
And Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University*
Marine Research Institute, Samsung Heavy Industries Co., Ltd**

Abstract

In this paper, we develop a shape design optimization method for thermo-elasto-plasticity problems that is applicable to the welding or thermal deformation problems of ship structures. Shell elements and a programming language APDL in a commercial finite element analysis code, ANSYS, are employed in the shape optimization. The point of developed method is to determine the design parameters such that the deformed shape after welding fits very well to a desired design. The geometric parameters of surfaces are selected as the design parameters. The modified method of feasible direction (MMFD) and finite difference sensitivity are used for the optimization algorithm. Two numerical examples demonstrate that the developed shape design method is applicable to existing hull structures and effective for the structural design of ships.

※Keywords: Thermo-elastic-plastic analysis (열탄소성 해석), Welding deformation (용접 변형), Shape design optimization (형상 최적설계), Finite difference sensitivity (유한차분 민감도), Method of feasible direction (유용 방향법)

1. 서론

조선소에서 건조되는 선박은 일반적으로 용접을 이용한 블록 가공 공법을 이용한다. 그러나 국부적인 열 하중에 의해서 예상하지 않은 소성 변형

접수일: 2009 년 8 월 13 일, 승인일: 2010 년 4 월 22 일
†교신저자: secho@snu.ac.kr, 02-880-7322

이 불가피하게 발생하게 된다. 여러 블록이 합쳐져 더 큰 블록을 형성해 나감에 따라, 블록에서 발생된 열 변형은 더욱 증가하게 된다. 열 변형이 허용 설계의 범위보다 더 커지면 변형에 의한 오차를 수정할 필요가 있다(송하철 등 2004). 이러한 별도의 과정은 선박의 생산과정에서 비용의 증가를 초래한다. 블록의 조립과정 이전에 이러한 열 변형을 고려하여 설계안을 마련한다면 선박 생산과정에서의 공수와 추가적인 비용 증가를 줄일 수 있을 것이다.

본 연구에서는 실제 선체구조에 발생할 수 있는 열변형 문제에 대하여 ANSYS 를 이용한 열 변형 해석을 수행하였다. 또한 형상 최적설계를 통하여 열에 의한 선체 구조의 변형을 설계안과 비교하여 차이를 줄여 나가도록 하였다. 이렇게 구한 최적 설계안을 초기설계안의 결과와 비교하여 제안된 최적설계 기법의 적용성을 검토하였다.

2. 열 변형 문제의 구성

열에 의한 변형은 3 차원 열 탄소성 변형으로 정식화 될 수 있으며, 열 탄소성 변형 형상을 유한요소해석을 이용하여 다양한 가열 조건에 대한 수치해석을 수행할 수 있다. 그러나 용접 변형과 같은 열 변형 문제를 3 차원 과도 열 탄소성 해석(Transient thermo-elastic-plastic analysis)을 할 경우, 해석에 따른 비용의 문제 때문에 최적화 수행에 어려움이 있다(최재연 등 2003). 해석에 따른 비용을 줄이기 위해서 솔리드 요소 대신에 쉘 요소를 사용하여 정상상태 해석(Steady state analysis)을 수행하였다. Fig. 1 과 같이 조립 구조물을 용접하는 경우, 두 부재가 용접되는 부분에 열을 가하여 Fig 2. (a)와 같이 최고 온도에 도달하였을 때와 냉각 후 평형 상태의 온도분포를 구한다. 온도분포 해석에는 ANSYS 의 shell57 요소를 사용하였다. 최고점에 도달하였을 때의 온도분포를 열 하중으로 사용하여 Fig. 2. (b)와 같은 변형 형상을 구한다. 여기서 Fig. 2. (b)를 초기 온도로 하고, 냉각 후 평형 상태의 온도 분포와의 차이를 열 하중으로 이용하면 Fig. 2. (c)와 같이

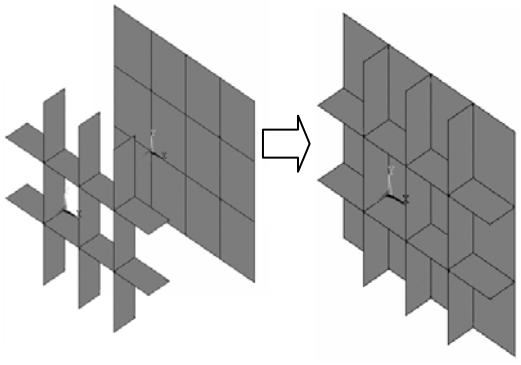
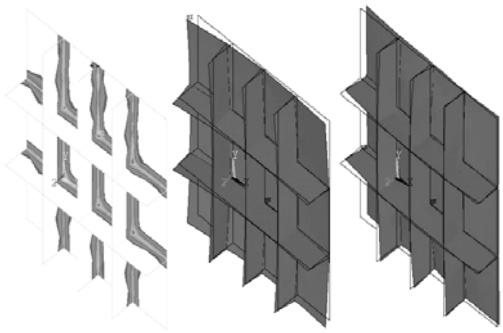


Fig. 1 Built-up structure



(a) Temperature (b) After welding (c) After cooling

Fig. 2 Temperature distribution and deformed shapes

냉각 후의 변형 형상을 구할 수 있다. 열 하중을 가하여 변형 해석을 할 때에는 shell43 요소를 사용하였다(ANSYS user manual 2004).

3. 형상 최적설계 문제의 정식화

형상 최적 설계 문제에서 설계변수는 해석할 모델을 구성하는데 필요한 기하학적 인자(Geometric parameter)들이다. 즉, 모델을 구성하는 각 절점의 좌표, 곡면의 기울기 등이 설계변수가 된다(Anand 1993). 따라서 본 연구에서는 해석하고자 하는 모델의 형상을 부드럽게 유지하기 위해서 각각의 곡면을 Fig. 3 과 같이 설계 변수로 구성하였다. 여기서 점선은 곡면의 경계(경계곡선)를 나

타내고, 각 점의 x, y, z 좌표 (a_x, a_y, a_z) 와 양쪽 경계곡선으로의 두 접선 벡터 (a_{nx}, a_{ny}, a_{nz}) , (a_{mx}, a_{my}, a_{mz}) 를 설계변수로 하였다. 일반적으로 4 개의 꼭지점을 가진 하나의 곡면을 만들기 위해서는 각 꼭지점에서 9 개의 설계변수를 가지므로 총 36 개의 설계변수가 필요하게 된다. 그러나, 모든 점의 좌표를 설계변수로 지정하여 최적설계를 수행한다면 최적의 설계안을 얻는다고 하더라도 현실적으로 구현할 수 없는 설계안을 얻을 수도 있을 것이다. 또한 실제 선체구조를 이용하여 모델링을 할 때에는 곡면의 수가 많아서 설계변수가 많아지게 되어 해석에 따른 비용이 매우 커지게 된다(최재연 등 2003). 따라서 예제에서는 실현 가능한 설계안을 얻을 수 있으면서 설계변수의 수를 최대한 줄일 수 있도록 제약 조건을 가하여 모델링 하였다.

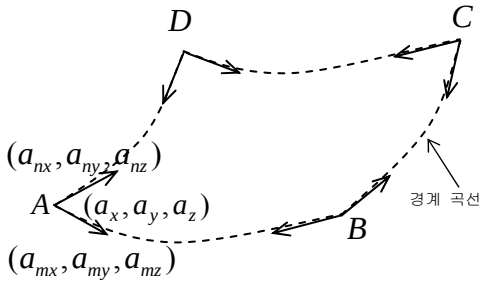


Fig. 3 Geometric parameters in surface patch

Fig. 4 와 같이 초기 $\mathbf{X}_0$ 의 위치에 있던 점이 열변형 후 $\mathbf{x}$ 로 변형이 발생한다면 초기 목적으로 하는 형상은 $\hat{\mathbf{x}}$ 이므로 $\|\mathbf{x}-\hat{\mathbf{x}}\|$ 가 목적함수이고 이를 최소화하는 최적화를 수행하여 설계변수를 결정하면 $\mathbf{X}_0$ 는 용접 후에 목적하는 위치로 변형되게 될 것이다. 여기서 가중함수 $\mathbf{W(x)}$를 도입하여 전체 모델 영역 Ω 에서 형상오차의 가중 최소자승식(Weighted least square equation)을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$f(\mathbf{x}) = \int_{\Omega} (\mathbf{x}-\hat{\mathbf{x}})^T \mathbf{W}(\mathbf{x}-\hat{\mathbf{x}}) d\Omega \quad (1)$$

목적 함수에 대한 설계 민감도 값은 유한차분법을 이용하여 구하였으며, 최적화 알고리즘은 설계구배에 기초한 방법인 MMFD (Modified Method of Feasible Direction)를 사용하였다. 특히 MMFD는 최우선적으로 제한조건을 만족시킨 후 목적함수의 최소값을 찾는 알고리듬이므로 제한조건을 가지는 최적화 문제에서 신뢰도가 높은 결과를 제시한다(DOT user manual 1999). SLP(Sequential Linear Programming), SQP(Sequential Quadratic Programming), 최적 조건법(Optimality criteria), MMA(Method of Moving Asymptote) 등 그 밖의 설계구배에 기초한(Gradient-based) 다른 기법들은 뉴튼 방식의 반복기법을 사용하여 최적해를 구하므로 초기 설계치가 동일하고 제한조건이 없는 경우(Unconstrained Optimization), 거의 유사한 국부 최적해(Local Optimum)를 제시한다.

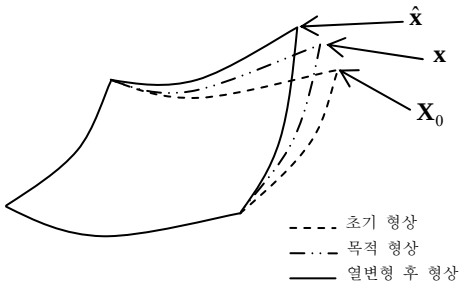


Fig. 4 Position vectors in various geometries

4. 최적화 기법

일반적으로 제한조건 g 를 갖는 최적화 문제는 Eq. (2)와 같이 정식화 된다(Belegundu and Chandrupatla 1999).

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} \quad \mathbf{F}(\mathbf{u}) \\ &\text{Subject to} \quad g_j(\mathbf{u}) \le 0, j \in J \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 J 는 제한조건의 수를 나타내며 설계변수 $\mathbf{u}$ 는 최적화가 진행됨에 따라 현재 설계 $\mathbf{u}^q$ 에서 다음과 같이 수정된다.

$$\mathbf{u}^{q+1} = \mathbf{u}^q + \alpha^* \mathbf{S} \tag{3}$$

또한 α^* 는 탐색 크기를 나타내며 $\mathbf{S}$ 는 탐색 방향을 나타내는데 현재 설계 $\mathbf{u}^q$ 에서 설계 민감도 해석을 통해 결정된다. Eq. (3)에서 $\mathbf{S}$ 는 다음 두 가지 조건을 만족하는 방향이어야 한다.

$$\begin{aligned} &\nabla \mathbf{F}(\mathbf{u}^q)^T \mathbf{S} \le 0 : \text{(Usable)} \\ &\nabla g_j(\mathbf{u}^q)^T \mathbf{S} \le 0 : \text{(Feasible)} \end{aligned} \tag{4}$$

Eq. (4)의 값을 만족하는 $\mathbf{S}$ 를 찾았을 때, 목적함수를 가장 큰 폭으로 감소시킬 수 있을 것이다. 그러나 Eq. (4)의 조건은 $\mathbf{S}$ 가 제약조건의 경계에 가까워질 경우에 쉽게 제약조건을 위반할 수 있으므로 다음과 같이 양수 θ (Push-off factor)를 도입하여 Eq. (4)의 제약조건을 더 엄격하게 할 필요가 있다(Vanderplaats 1984).

$$\nabla g_j(\mathbf{u}^q)^T \mathbf{S} + \theta \le 0 \tag{5}$$

θ 가 $\nabla \mathbf{F}(\mathbf{u}^q)^T \mathbf{S}$ 의 크기에 영향을 받도록 고려하면 Eq. (5)는 다음으로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\nabla g_j(\mathbf{u}^q)^T \mathbf{S} - \left[\nabla \mathbf{F}(\mathbf{u}^q)^T \mathbf{S}\right] \theta \le 0 \tag{6}$$

Eq. (4)에서 $\nabla \mathbf{F}(\mathbf{u}^q)^T \mathbf{S}$ 를 최소화 하는 문제는 다음 식과 같이 β 를 최대화하는 문제로 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\nabla \mathbf{F}(\mathbf{u}^q)^T \mathbf{S} + \beta \le 0 \tag{7}$$

Eq. (7)을 만족하는 β 의 최대값을 구하게 될 경우 다음 식이 성립한다.

$$\beta = -\nabla \mathbf{F}(\mathbf{u}^q)^T \mathbf{S} \tag{8}$$

Eq. (8)을 Eq. (6)에 대입하면 다음을 얻는다.

$$\nabla g_j(\mathbf{u}^q)^T \mathbf{S} + \beta\theta \le 0 \tag{9}$$

Eq. (7)과 Eq. (9)를 이용하면, Eq. (2)에서 제한조건 g 를 만족하며 목적함수를 최소화하는 $\mathbf{u}$ 를 찾는 문제에서 β 를 최대화 하는 방향 $\mathbf{S}$ 와 θ 를 찾는 문제로 바꾸어 쓸 수 있다. 일반적으로 $\mathbf{S}$ 의 제약 조건으로는 $\mathbf{S}^T\mathbf{S} \le 1$ 를 사용한다.

$$\begin{aligned} &\text{Maximize} : \beta \\ &\text{Subject to} : \quad \nabla \mathbf{F}(\mathbf{u}^q)^T \mathbf{S} + \beta \le 0 \\ &\qquad\qquad \nabla g_j(\mathbf{u}^q)^T \mathbf{S} + \beta\theta \le 0, j \in J \end{aligned} \tag{10}$$

탐색의 크기 α 는 Eq. (11)과 같이 각각의 제한조건을 만족시키는 α 의 최대값으로 구성되는 집합에서 원소의 최소값으로 결정된다.

$$\bar{\alpha} = \min\left\{\alpha \,|\, \mathbf{g}_j\left(\mathbf{u}^q + \alpha \mathbf{S}^q\right) = 0, j \in J, \alpha \ge 0\right\} \tag{11}$$

그리고 다음의 Eq. (12)를 이용하여 목적함수를 최소화하는 $\mathbf{u}^{q+1}$ 을 구한다. 이와 같은 과정을 반복하면서 목적함수를 최소화하는 설계변수 값을 찾아가게 된다.

$$\mathbf{F}(\mathbf{u}^{q+1}) = \min_{0 \le \alpha \le \bar{\alpha}} \mathbf{F}(\mathbf{u}^q + \alpha \mathbf{S}^q) \tag{12}$$

5. 선체 구조 모델에의 적용

선체의 선수부에서 떼어낸 Fig. 5 와 같은 보강판 모델은 가로, 세로의 길이가 9 m, 9.5 m 이고 밑면은 곡면, 나머지 면은 평면으로 구성되었다.

밑면의 경우에는 각 꼭지점에서 x, y, z 좌표와 접선 벡터의 x, y, z 성분들을 36 개의 설계변수로 선정하였고, 공간 상에서 4 개의 보강 판 위치를 표현하는 x, y, z 좌표를 12 개의 설계변수로 선정하였다. ○로 표시한 점에서는 강체 운동을 방지하기 위한 최소한의 자유도를 구속하였으며, 총 48 개의 설계변수를 이용하여 모델을 구성하였다. 표시한 12 개의 점에서 최적화 과정을 위한 목적함수식을 구성하였다. 열탄소성 해석을 위한 입열량, 가열 및 냉각조건 등은 관련문헌에서 제시된 통상적인 값을 사용하였으며 충분한 변형을 발생시킬 수 있도록 해석조건을 설정하였다.

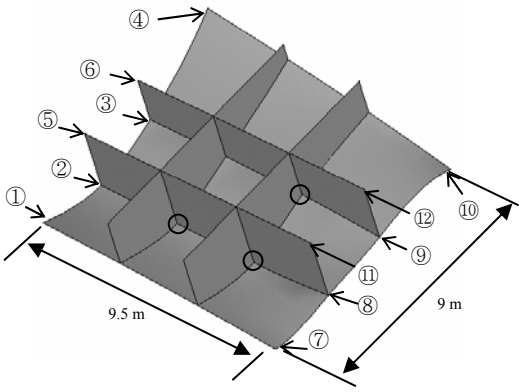


Fig. 5 Stiffened plate model

최적화 수행 결과, 초기 설계안에 비해서 전반적으로 매우 개선되었음을 Table 1 에서 확인할 수 있다. 최적 설계안 A 의 경우는 모든 점에서 가중치를 1 로 하여 얻어진 설계안이고, 최적 설계안 B 는 일부 점들에 큰 가중치를 주는 가중함수를 사용하여 얻은 결과이다. Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 평균 값에서는 점차 개선되어가는 경향을 보이나 2, 11 번 점에서는 최적화 후 약간 악화되는 경향을 보인다. 이는 최적화가 2, 11 번 같은 변형이 적게 일어나는 점들에서 약간 악화되는 경향을 갖더라도 1, 4, 6, 10, 12 번 같은 비교적 큰 변형이 일어나는 점들을 개선시키는 것이 목적함수 값을 최소화하는 방향이므로, 이러한 경향으로 최적설계가 이루어졌음을 나타낸다.

Table 1 Comparison after deformation (cm)

	초기설계안	최적설계안 A	최적설계안 B
1	15.0680	4.7533	4.3244
2	0.9201	1.0730	0.5215
3	6.9322	1.1495	3.7103
4	16.4445	3.7485	1.0702
5	5.5586	3.5281	2.5757
6	15.1904	10.3042	8.3631
7	1.6625	0.8145	1.2640
8	0.9598	0.8555	1.0157
9	5.2765	0.7444	1.3866
10	16.2591	3.6178	1.4773
11	1.0626	1.2231	1.2392
12	13.6089	8.6718	6.4797
평균	8.2453	3.3736	2.7856

가중치 값을 바꾸어준 최적 설계안 B 에서도 초기설계안과 비교할 때 동일한 경향으로 최적설계가 수행되었음을 알 수 있다. 최적 설계안 A 와 비교하였을 때 3, 7, 8, 9 번에서 약간 악화 되었지만 가중치를 크게 한 4, 6, 10, 12 번에서 상대적으로 개선되어가는 경향을 보인다. 3 가지 설계안에 대하여 용접 변형 후에 발생한 목적 형상과의 편차를 Fig. 6 에서 도표로 비교하였다.

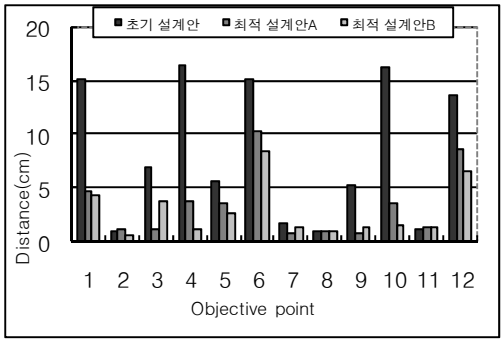
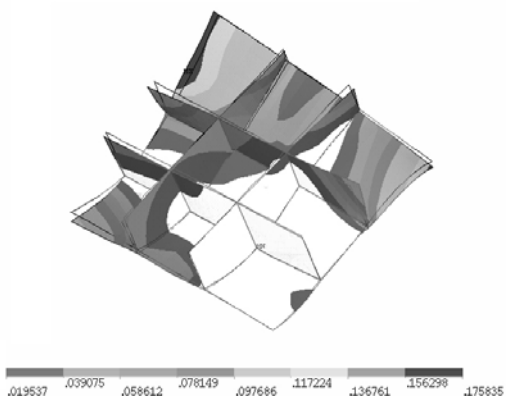
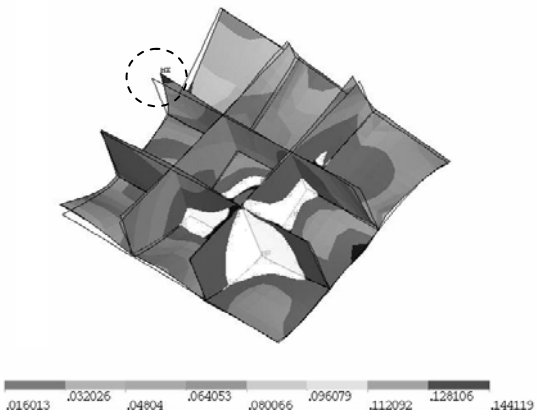


Fig. 6 Comparison after deformation

Fig. 7 은 열 변형 해석을 통하여 얻은 최종 변형 형상을 5 배 확대하여 나타낸 그림이다. Fig. 7 의 (a)는 초기 설계안 결과이고, (b)는 최적 설계안 B 를 이용한 결과이다.



(a) Initial design



(b) Optimal design

Fig. 7 Comparison of deformed shapes

초기 설계안의 경우 경계조건에서 먼 지점에 큰 변형이 발생되는 것을 알 수 있으며 최적 설계안의 경우 최대 변위량이 초기 설계안에 비해 작고 구조물 전체적으로 고른 변형 양상을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 7. (b)에서 점선으로 표시한 부분과 같이 예상하지 않았던 부분에서 최대 변위가 발생할 수도 있다. 이러한 점에 대해서는 설계변수를 추가하여 목적함수를 재구성한 후 동일한 과정으로 최적설계를 수행한다면 더 나은 설계안을 얻을 수 있을 것이다.

Fig. 8 의 구상선수 모델에 대해서 열 탄소성 해석을 이용한 형상 최적설계를 수행하였다. 곡면의 경우에는 각 꼭지점에서 x, y, z 좌표와 접선 벡터의 x, y, z 성분들을 설계 변수로 선정하여 모델을 구성하였고, 평면의 경우에는 x, y, z 좌표만을 설계 변수로 선정하여 모델을 구성하였다. 강체 운동을 방지하기 위한 최소한의 자유도를 ○ 표시한 점에서 구속하였으며, 초기설계안과 최적설계안 A 에서는 총 39 개의 설계변수를 이용하여 곡면을 구성하였다. 표시한 1~5 번 지점에서 Eq. (1)을 이용하여 목적함수를 구성하였다.

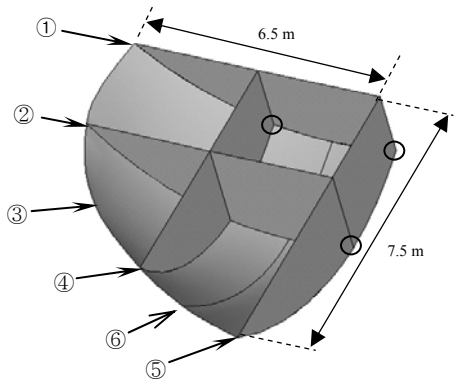
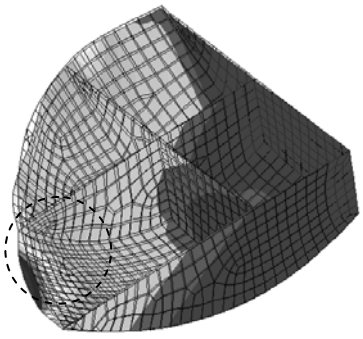
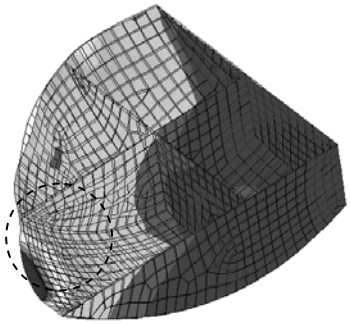


Fig. 8 Hull structure model

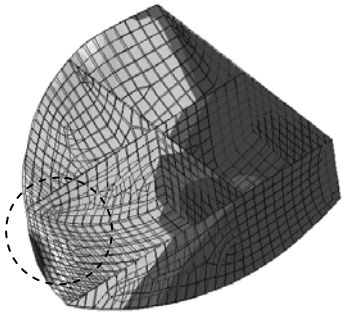
Fig. 9 의 (b), (c)와 같이 최적설계의 결과로서 초기 설계안 (a)와 비교하였을 때, 상당히 개선된 설계안을 얻을 수 있었다. 여기서 Fig. 9. (c)는 최적 설계안 A 에서 개선 효과가 적었던 지점을 고려하여 최적설계를 재 수행한 결과를 나타낸다. 최적 설계안 A 에 비해서 점선으로 표시한 원 안의 영역에서 더 나은 개선이 이루어졌음을 알 수 있다. 초기 설계안에 비하여 최적 설계안 A 는 부분적으로 개선된 설계안을 나타낸다. 그러나 목적함수를 구성하는데 포함되지 않은 6 번 점에서는 개선의 정도가 매우 작다. 이를 개선하기 위해서 곡면으로 구성되어 있는 밑판에 2 개의 곡면을 추가하여 더 많은 자유도를 가지는 모델을 구성하였다. 또한 추가된 꼭지점에 대해서 설계변수를 더 추가하여 총 45 개의 설계변수로 모델을 재구성하였으며, 목적 함수를 구성할 때 Fig. 8 의 6 번 점을 추가하였다.



(a) Initial design



(b) Optimal design A



(c) Optimal design B

Fig. 9 Comparison of deformed shapes

Fig. 10 에서 최적 설계안 B 의 경우 2 번과 3 번 지점에서 약간 악화되더라도 목적으로 하는 형상에서 크게 벗어나 있는 6 번 지점에서 매우 크게 개선이 되었음을 확인할 수 있다. 따라서 최적설계 모델에 대해서 수행할 경우, 목적 설계안과 벗어나는 부분의 추가적인 고려를 통하여 최적 설계안을 개선해 나갈 수 있음을 위 결과를 토대로 알 수 있다.

Table 2 Comparison after deformation (cm)

	초기설계안	최적설계안 A	최적설계안 B
1	1.2389	0.5111	0.4399
2	3.3167	0.4996	0.6404
3	2.7662	0.3221	0.7329
4	4.2180	0.6385	0.5616
5	2.2545	0.5347	0.5380
6	6.7100	6.4740	3.6620
평균	3.4191	1.4967	1.0958

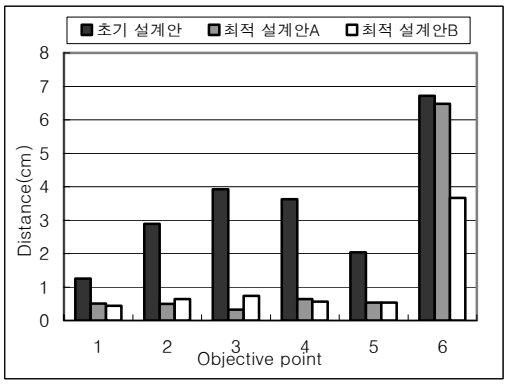


Fig. 10 Comparison after deformation

6. 결론

본 연구에서는 ANSYS 프로그램과 APDL 프로그래밍 언어, 설계 구배에 기초한 최적설계 기법인 MMFD(Modified Method of Feasible Direction)를 이용하여 형상 최적설계 기법을 개발하였다. 열 변형이 일어난 후의 형상을 목적하는 형상과 근접하는 결과를 도출하기 위해서는 선체 구조에서 설계변수를 결정하는 과정이 중요하다. 설계변수의 선정과 이에 따른 가중치 부여는 설계와 변형의 차이가 크게 일어나는 지점을 기준으로 결정한다. 수치적 예제 결과를 살펴보면 최적설계 수행 전과 비교해 보았을 때 개선된 설계안을 얻을

수 있었다. 본 연구에서는 3 차원 솔리드 요소를 사용할 경우 드는 비용을 줄이기 위하여 ANSYS의 열탄소성 해석을 위한 쉘 요소를 사용하였다. 과도 해석에 필요한 많은 비용을 줄이기 위하여 용접 현상을 간략화 한 후 유한요소 모델을 이용하여 해석을 수행하였다. 열 탄소성 변형 해석의 정확도를 높이기 위해서는 더 많은 연구와 실험을 통해 보다 정확하게 변형량을 예측할 수 있도록 열 유입량, 가열 시간 등 용접과 관련된 인자들에 대한 분석이 이루어져야 할 것이다. 또한 설계민감도 해석을 위한 많은 시간적 부담을 줄이기 위해서는 더 효율적으로 설계 민감도를 얻을 수 있는 방법에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다. 본 연구에서는 유한차분 설계 민감도를 얻기 위해 소요되는 시간이 전체의 약 90%를 차지하였으므로, 해석적 설계민감도(Analytical Design Sensitivity)를 사용한다면 계산 시간의 부담을 줄일 수 있을 것으로 생각된다 (하윤도, 조선호 2004).

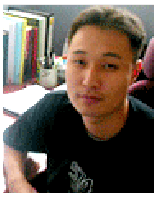
후 기

이 논문은 2009 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. R32-2008-000-10161-0)

참 고 문 헌

- Choi, Jae-yeon, Ha, Yoondo, and Cho, Seonho, 2003, "Shape Design Optimization of Ship Structures Considering Thermal Deformation," Proceedings of the annual Autumn Meeting of The Society of Naval Architects of Korea, pp.514-519.
- Ha, Yoondo and Cho, Seonho, 2004, "Design Sensitivity Analysis and Topology Optimization of Nonlinear Heat Conduction Problems," Proceedings of the annual Autumn Meeting of The Society of Naval Architects of Korea, pp.1119-1124.
- Ha, Cheol Song, Ryu, Hyun Su, and Jang, Chang Doo,"Analysis of Correction of Welding Deformation of Stiffened Plate by Heating Using Equivalent Loading Method based on Inherent Strain," Journal of SNAK, Vol. 41, No. 4, pp.85-91.
- ANSYS version 9.0 User Manual, 2004, ANSYS Inc.
- Belegundu, A. D. Chandrupatla, T. R. 1999, Optimization Concepts and Applications in Engineering, Prentice Hall, Inc.
- DOT version 5.0 User Manual, 1999, Vanderplaats Research & Development, Inc.
- Vanderplaats, G. N. 1984, Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications, McGraw-Hill Book Company.
- Vera B. Anand, 1993, Computer Graphics & Geometric Modeling for Engineers, John Wiley & Sons, Inc.

< 박 성 호 >


< 최 재 연 >

< 김 민 근 >

< 조 선 호 >