
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 31 卷 第 3 號 1994年 8月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 31, No. 3, August 1994

건조중인 선박에서의 기관실 상갑판 판부재의 처짐 예측

함주혁*, 김을년*

An Estimation of Panel Deflection at Engine Room Upper Deck for the Ship Under Construction

by

Juh H. Ham* and Ul N. Kim*

요 약

기관실 상갑판 특히 거주구 외부의 상갑판 판부재는 외적인 수직하중이 거의 작용하지 않음에도 불구하고 건조중인 대형선박에서 갑판에 널리 대처짐 현상이 발생할 때가 있는 반면에 수직하중이 작용하는 거주구 내부의 기관실 상갑판은 처짐발생 크기 및 분포정도가 미미한, 규명하기 어려운 현상들이 나타나고 있다.

따라서, 본 연구에서는 3차원 구조해석으로 부터 얻은 거주구 및 자중에 의한 정적하중의 영향, 손상보고에 따라 계측된 처짐량 자료 및 분포상황, 초기처짐의 크기 및 형상, 용접잔류응력, 면내하중 성분들을 대상으로 비선형 시리즈 해석을 수행하고, 이로 부터 판부재에 발생하는 최대처짐 추정식을 제시하였다.

또한, 본 연구를 통하여 개발된 추정식을 이용하여 기존 손상선박의 처짐원인 분석, 거주구 탑재 및 진수 전후의 기관실 상갑판의 처짐거동 그리고 기존의 선각품질관리기준이 기관실 상갑판의 처짐에 미치는 영향을 살펴보고, 마지막으로 건조예정에 있는 기관실의 처짐현상을 예측하여 보았다.

Abstract

Deflection estimation at engine room upper deck panel is performed for the actual ship structure.

These deflection behaviours are basically investigated from not only the data based on the full series results of nonlinear analysis using Incremental Galerkin's Method but also actual deflection data measured from damaged ship under construction in dry dock.

발표일자 : 1993년도 대한조선학회 추계연구발표회('93.11.13)

접수일자 : 1993년 12월 10일, 재접수일자: 1994년 5월 12일

* 정회원, 현대중공업(주) 선박해양연구소

The effects of residual stress, initial deflection and static loading are also included.

The computed estimation results of upper deck plate panel including these effects are shown that upper deck platings of new ship expected less deflection magnitude than damaged ship.

1. 서 언

최근 선박 판구조물의 건조경향이 경량화 추세로 되어 감에따라, 건조 과정에서 예기치 못한 선각 품질관리상의 기준치를 초과하는 현상들이 하나 둘씩 나타나고 있다. 그들 중의 한가지가 판부재의 과대처짐이다. 이 과대처짐현상은 선박의 운항 상태뿐만 아니라 선박의 건조단계에서도 종종 발생하고 있다[1].

선미 기관실부, 특히 거주구 외곽의 상갑판부재는 외적인 수직하중이 거의 작용하지 않음에도 불구하고 건조중인 대형선박에서 널리 대처짐 현상이 발생할 때가 있는 반면, 수직하중이 상대적으로 크게 작용하는 거주구 내부의 기관실 상갑판은 처짐 발생크기 및 분포정도가 미미한, 규명하기 어려운 현상들이 나타나고 있다. 그러나, 이러한 처짐에 대한 검토 및 연구결과는 아직 미흡한 실정이다.

본 논문에서는 처짐현상을 유발하는 모든 인자들은 그 처짐이 발생되는 판에 대하여 면내하중성분으로 작용한다는 대 전제하에 초기설계 단계에서 보다 쉽고 간편하게 처짐량을 사전에 예측하기 위하여 기관실 상갑판을 중심으로 처짐의 원인을 분석하여 보았다.

이를 위하여 우선 기본적으로 판에 존재하는 초기처짐과 용접잔류응력 그리고 작용하는 면내하중을 대상으로 비선형 시리즈 해석을 수행하였고, 이로부터 판부재에 발생하는 최대처짐 추정식을 제시하였다.

또한 선미 기관실부위의 3차원 구조해석으로 부터 얻은 거주구 및 기관실의 자중에 의한 정적하중의 영향, 손상보고에 따라 계측된 처짐량 자료 및 분포상황, 기존 손상선박인 86,000 TDW 원유운반선의 처짐원인 분석, 그리고 기존의 선각품질관리 기준들이 기관실 상갑판의 처짐에 미치는 영향을 살펴보았다.

마지막으로 앞선 연구항목을 기반으로하여 건조예정에 있는 94,000 TDW 원유운반선의 기관실 처짐현상을 예측하여 보았다.

2. 선체판부재의 처짐거동해석

2. 1 판부재의 비선형 시리즈해석

선체 판요소의 전반적인 비선형 거동분석을 위하여

각종 영향인자를 변화시켜가면서 시리즈해석을 하는 경우 유한요소법과 같은 수치적 방법의 적용은 비합리적이므로, 본 연구에서는 이미 선체와 같은 판구조물의 탄성대처짐 거동을 높은 정도의 결과를 준다고 알려져있는, 일종의 준해석적 방법(semi-analytical method)인 증분 Galerkin법[2]을 적용하여 판의 대 처짐거동을 파악하여 보았다.

판의 대변형을 지배하는 다음의 미분방정식을 풀므로써 판의 좌굴거동을 파악할 수 있다.

$$\nabla^4 w = \frac{t}{D} \left(\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \tag{1}$$

$$\nabla^4 F = E \left(\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \tag{2}$$

- 여기서, w : 판의 처짐
- F : Airy의 응력함수
- E : 탄성계수
- D : 판의 굽힘강성

이의 한 예로서, 일축압축력을 받은 직사각형판의 좌굴후 거동을 살펴본다. 실제로 단순지지된 직사각형판의 일축방향 압축력에 의한 좌굴후 거동을 일축압축력을 받는 정사각형 판의 좌굴후 거동의 연속으로 생각할 때 판의 처짐형상은 종방향과 횡방향으로 정현(正弦) 1반파로 가정할 수 있으며, 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$w = A_1 \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} \tag{3}$$

- 여기서, A₁ = 처짐의 진폭을 나타내는 미지상수
- a = 판의 길이
- b = 판의 폭

이 처짐식을 적합조건식에 넣어 응력함수 F를 구한 후, 판의 평형방정식에 Galerkin법을 적용하여 구성된 다음 식에 대입하여 판의 전 체적에 걸친 적분을 수행하면 미지계수들이 결정된다.

$$\int_0^a \int_0^b \left\{ \nabla^4 w - \frac{t}{D} \left(\frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) \right\} \sin \frac{\pi x}{a} \sin \frac{\pi y}{b} dx dy = 0 \quad (4)$$

이의 원리에 따라 임의의 초기처짐을 갖는 판부재에 대한 지배방정식을 증분형으로 나타내어 최종적으로 상기 기술된 방법과 같이 Galerkin법을 적용하면 다음 식이 얻어진다(보다 자세한 도출과정은 참고문헌 [2]를 참조바람).

$$\iint \{ DV^4(\Delta w) - t(F_{i-1,yy} \cdot \Delta w_{,xx} + \Delta F_{,yy} \cdot w_{i-1,xx} + F_{i-1,xx} \cdot \Delta w_{,yy} + \Delta F_{,xx} \cdot w_{i-1,yy} - 2F_{i-1,xy} \cdot \Delta w_{,xy} - 2\Delta F_{,xy} \cdot w_{i-1,xy}) + \Delta q \} f_r(x) g_s(y) dx dy = 0 \quad (5)$$

(r = 1, 2, ..., s = 1, 2, ...)

여기서

- w_{i-1} : 판부재의 전체처짐량
= $w_0 + w_{i-1}$
- w_0 : 초기처짐
- w_{i-1} : 부가처짐
- q : 단위면적당의 횡하중
- v : Poisson 비
- Δ : 증분기호
- $f_r(x), g_s(y)$: 경계조건을 만족하는 함수

여기서의 x와 y로 나타낸 아래첨자는 x와 y에 대한 편미분을 간략화 목적으로 표기한 것이다.

식(5)를 판요소 전체에 대해 적분하면 미지수에 대한 연립 일차방정식이 얻어지고 이를 풀면 임의 하중 상태에서의 판요소의 대처짐 응답이 얻어진다. 면내응력의 변화에 따른 판부재의 면외처짐거동을 보다 정량적인 입장에서 다루기 위해 상기 이론의 비선형해석을 수행하였다. 즉, 초기처짐을 가진 단순지지 사각형판을 면내압축력 성분을 점차 증가시키고 판의 처수와 초기처짐크기를 변화시키는 시리즈해석을 통하여 하

중과 처짐간의 관계를 고찰 하였다[15].

2.2 새로운 판의 최대처짐 추정식의 도출

판의 최대처짐을 추정하기 위해서 많은 노력과 시간이 필요한 유한요소법등의 비선형 수치해석은 개별 하중 및 초기처짐의 크기와 양상 그리고 잔류응력특성등을 고려하는데는 많은 어려운 점들이 있으므로 본절에서는 보다 간편한 방법으로 초기설계단계에서 최대처짐량을 비교적 안전측에서 평가할 수 있는 방법을 제시한다.

이를 위한 기본적인 가정으로 대상 판부재의 초기처짐은 초기처짐이 없는 판부재가 면내력에 의해 생기는 고유의 처짐과 유사하다고 가정한다. 이와 같은 가정이 비교적 간편화된 최대처짐 평가식을 도출할 수 있는 배경은 다음과 같다.

첫째, 판의 초기처짐양상은 매우 복잡하며 판의 초기처짐의 설정에 따라 최종 최대처짐값은 판의 처수, 초기처짐의 크기 변화에 따라 현격한 변화를 보여주나, 작용하중에 의한 고유의 처짐파형을 초기처짐형상으로 가정하므로써 비교적 안전측의 평가가 가능하므로 설계목적에 큰 무리가 없다.

두번째로, 이와 같은 가정하에서는 단일 및 복합 면내하중의 작용에 따른 처짐증가 현상이 좌굴점까지에 비교적 유사한 무차원화된 하중-처짐상관곡선이 제시될 수 있으며 그 현상을 앞절의 판부재 비선형 시리즈 해석을 통해 확인 하였고[15] 이러한 가정하에 2축 면내응력에 대한 최대처짐 추정식을 다음과 같이 제시한다.

$$W_t = (a_1 f(\sigma_x, \sigma_y) + a_2 \sqrt{f(\sigma_x, \sigma_y)} + a_3) t_s \quad (6)$$

여기서,

$f(\sigma_x, \sigma_y) \leq f_i$ 인 경우,

$$a_1 = -135.4(w_0/t)^2 + 14.3(w_0/t) + 0.1$$

$$a_2 = 89.4(w_0/t)^2 - 6.3(w_0/t) - 0.1$$

$$a_3 = -7.5(w_0/t)^2 + 1.5(w_0/t) \quad \text{-----}(w_0/t \leq 0.05)$$

$$a_1 = 4.1(w_0/t)^2 + 2.0(w_0/t) + 0.3$$

$$a_2 = -3.9(w_0/t)^2 + 1.6(w_0/t) - 0.2$$

$$a_3 = 0.4(w_0/t)^2 + 0.9(w_0/t) \quad \text{-----}(0.05 < w_0/t \leq 0.2)$$

$$a_1 = 2.6(w_0/t)^2 - 1.0(w_0/t) + 1.0$$

$$a_2 = -2.2(w_0/t)^2 + 2.9(w_0/t) - 0.5$$

$$a_3 = 0.2(w_0/t)^2 + 0.8(w_0/t) \quad \text{-----}(0.2 < w_0/t \leq 0.4)$$

$f(\sigma_x, \sigma_y) > f_i$ 인 경우,

$$a1 = 249720(w_0/t)^2 - 24055(w_0/t) + 648$$

$$a2 = -491234(w_0/t)^2 + 46944(w_0/t) - 1237$$

$$a3 = 240936(w_0/t)^2 - 22836(w_0/t) + 589$$

-----($w_0/t \leq 0.05$)

$$a1 = 4045(w_0/t)^2 - 1344(w_0/t) + 127$$

$$a2 = -7327(w_0/t)^2 + 2441(w_0/t) - 222$$

$$a3 = 3297(w_0/t)^2 - 1095(w_0/t) + 97$$

-----($0.05 < w_0/t \leq 0.2$)

$$a1 = 360(w_0/t)^2 - 269(w_0/t) + 59$$

$$a2 = -587(w_0/t)^2 + 442(w_0/t) - 91$$

$$a3 = 235(w_0/t)^2 - 174(w_0/t) + 35$$

-----($0.2 < w_0/t \leq 0.4$)

$$f_i = 1.85(w_0/t)^2 - 1.81(w_0/t) + 0.92$$

$f(\sigma_x, \sigma_y)$: 좌굴안전계수(S.F)의 역수의 제곱치
 $= (1/S.F)^2$

S.F : 좌굴안전계수로, 좌굴평가이론(참고 논문 [3][4])의 상관곡선에서 등가작용응력의 증분에 의한 좌굴임계치와 등가작용응력치와의 비

t : 판두께

wt : 초기처짐을 포함한 판의 최대처짐량

w₀ : 판의 초기처짐량

참고문헌[3][4][5]에서 개발된 좌굴평가식을 이용하여 도출된 안전계수(S.F)를 상기의 최대처짐식에 적용하여 프로그램하였고 이에는 초기처짐과 잔류응력의 효과를 고려할 수 있게 되어 있다.

식(6)의 적합성과 정도를 조사하기 위하여 기존의 처짐손상선박에 적용하였으며, 그 타당성을 확인하였다[5].

3. 대처짐 발생 선박의 면내하중추정을 위한 구조해석

앞서 개발된 최대처짐추정식은 증분 Galerkin법에 의한 비선형해석의 시리즈해석을 통하여 제시하였으며, 이 추정식을 실제 적용하기위하여 대처짐 손상경험이 있는 86,000 TDW급 원유운반선의 기관실 전체를 구조해석 대상으로 삼고 기관실 내부의 기기류등 모든 하중과 상갑판 거주구 중량등을 작용시켜 각 갑판상에 거주구 및 기관실의 자중 그리고 설치의장품의 중량등에 의한 정적 탄성면내응력만을 추정하고자 판 및 보요소의 3차원 유한요소해석을 수행하였다.

본 해석에 사용된 구조해석 모델을 Fig. 1에 제시하였으며, 기관실 좌우측이 정확한 대칭은 아니지만 해석모델의 절점과 요소수를 본 해석의 컴퓨터 용량문제로 5000개 이내의 범위에 국한시키기 위해, 선폭의 중앙을 대칭으로 간주하여 간략화시켰고 길이방향도 기관실 부위 만에 한정하였다.

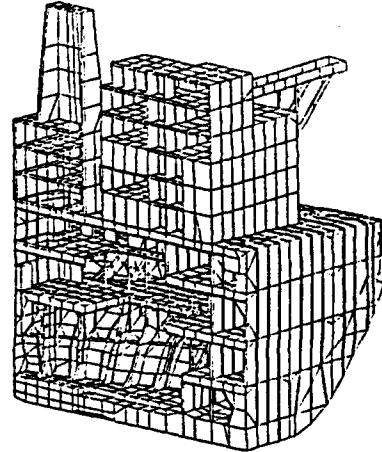


Fig. 1 Ship structural model for finite element analysis

기관실 전방벽의 중통부재의 길이방향 자유도를 구속하고 기관실 후방벽에는 모델 내에 고려하지 못한 선미구조부의 도크내 반목지지조건에 대한 기관실 후방벽의 전단 및 굽힘모우먼트는 외부수압이 작용하지 않는 상태로 선미부 중량이 전단력으로, 그리고 선미부 중량 중심에서 기관실 후방벽까지의 거리에 선미부 중량이 곱해진 단순한 굽힘 모우먼트를 기관실 후방벽에 작용시켰다.

이들 하중은 실제 항해시의 값들에 비해 미미한 값으로 전체거동에 큰 영향이 없으며 특히 전단의 경우는 기관실 후방벽이 모델링 되어 있어 후방벽의 수직부재를 중심으로 수직하방향으로 균일 분포시켰다.

선저부는 도크내에 반목으로 지지된 조건을 부여하기 위해 선저 평탄부의 모든 절점의 선체높이방향의 자유도를 구속하였다. 관심의 대상인 각 갑판부의 종 및 횡방향 거어더의 웨브는 실제형상대로 모델링하였고 길이방향 보강재(Longi.)는 한 두개씩 묶어서 구성하였다. 거주구의 중량은 개략적인 거주구형상을 구성하여 이 거주구모델의 중량을 조절하여 실제중량에 맞추었다.

이들 구조해석 결과, 처짐을 야기시킬 만한 큰 면내 압축응력성분이 존재하지 않으며 구조물 자중에 의해 갑판이 선박의 폭방향으로 펼쳐지려는 경향과 선미부

증량에 의한 호강모멘트의 작용으로 판폭방향 및 판길이 방향 공히 미약한 면내응력이 작용함을 알 수 있었다.

또한 거주구 하부 기관실 구조의 경량화에 따라 대형개구 및 감소된 구조부재에 의해 초기 우려되었던 거주구 하중에 의한 거주구 주변에서의 회전성분이 거의 없는 수직처짐에 의한 갑판의 면내압축응력의 증가 현상도 거주구를 실제 지지하는 기관실 구조의 강성이 높아 판처짐에 크게 기여하지 못하고 있었다.

4. 초기처짐 및 잔류응력

4.1 초기처짐의 크기 및 형상

면내작용응력에 의한 처짐이 유발되기 전에 조립 및 용접에 의한 실제 선박판구조 부재에 발생하는 초기처짐은 분포형상자체가 일반적으로 매우 복잡한 형상을 하고 있으나 전반적으로 1반파가 지배적인 아원말잔등 형상에 가까운 것으로 알려져 있다[8].

또한 이를 근거로 보다 간편하게 초기처짐의 효과를 고려하기 위해 판 길이방향의 양단부에서 폭의 절반길이에 해당하는 부분에서는 sine곡선으로 표시하고 내부를 평평한 것으로 보며, 판의 폭방향으로는 sine반파로 정의하여 이들 성분에서 면내작용응력에 따른 고유의 좌굴처짐형상을 추출하여 거동을 해석해가는 경우도 있다[11].

그러나, 본 해석에서는 판넬조립 이전의 공정단계에서 발생한 대처짐이 일단 조선소의 처짐한계를 벗어난 경우 작업자의 수작업에 의한 화기작업을 통하여 허용치 안으로 들어오게 강제적 펼침이 국부적으로 가해짐에 따라 박판의 경우 특히, 이러한 처짐의 가정이 매우 곤란하다.

따라서 본 논문에서는 기관실 갑판등 거의 대부분의 판들이 같은 치수로 구성되어 있으나, 각 판들은 각각 각색의 초기처짐형상을 보일 것으로 생각되어 가장 가혹한 조건이라 볼 수 있는 각 판부재 자체의 면내응력 성분에 의한 고유의 좌굴형상과 유사한 초기처짐형상을 유지하면서 처짐허용치내에 있다고 본다.

4.2 용접잔류응력의 영향

선체구조를 구성하는 보강판은 보강재가 길이 및 폭 방향으로 용접에 의해 판부재에 부착된다. 이때 보강재의 접합 부위에는 인장응력이, 보강재간의 판중양부에는 압축응력이 생기며, 이들은 서로 평형을 유지한다. 연강재의 경우, 인장잔류응력의 크기는 대개 항복응력치에 도달하는 경우가 많다(Fig. 2 참조).

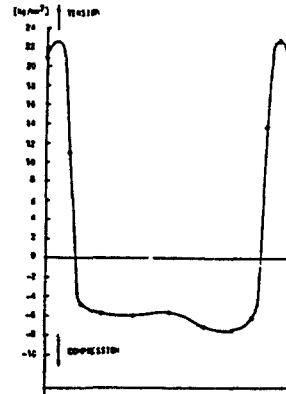


Fig. 2 Distribution of welding residual stress on the ship platings

선박에서와 같이 구조물이 외하중을 반복적으로 받으면 판부재에는 인장응력과 압축응력이 반복적으로 작용하여 잔류응력이 상당부분 감소한다. 그러나, 본 연구에서는 초기의 잔류응력상태가 그대로 유지된다고 가정하여 판의 좌굴강도를 평가한다.

잔류응력을 가진 판부재에 압축력을 가하면 인장잔류응력은 감소하고, 압축잔류응력은 증가하게 된다. 하중을 더욱 증가시키면 판은 좌굴하게 되는데, 이 경우의 좌굴에 대한 잔류응력의 영향은 주로 판의 중앙부에 존재하는 압축잔류응력에 기인되며, 주변의 인장잔류응력은 판의 좌굴강도에 거의 영향을 미치지 않는다는 것이 알려져 있다[12].

이상의 관점에서 본 연구에서는 전체 잔류응력분포 중에서 인장잔류응력 부분은 소거시키고 압축잔류응력만 존재한다고 가정하여 다룬다. 이때 압축잔류응력을 인장잔류응력부분을 소거시킨 영역에까지 분배시켜 판의 폭 또는 길이에 걸쳐 균일하게 분포하는 유효 압축 잔류응력을 계산하면 다음과 같이 된다(Fig. 3 참조).

$$\sigma_{rex} = \sigma_{rx} \left[1 - \frac{\sigma_{rx}}{\sigma_0 + \sigma_{rx}} \right] \tag{7}$$

$$\sigma_{rey} = \sigma_{ry} \left[1 - \frac{\sigma_{ry}}{\sigma_0 + \sigma_{ry}} \right] \tag{8}$$

여기서, σ_{rx}, σ_{ry} = 각각 길이 및 폭방향의 실제 압축잔류응력

$\sigma_{rex}, \sigma_{rey}$ = 각각 길이 및 폭방향의 유효 압축잔류응력

σ_0 = 항복응력

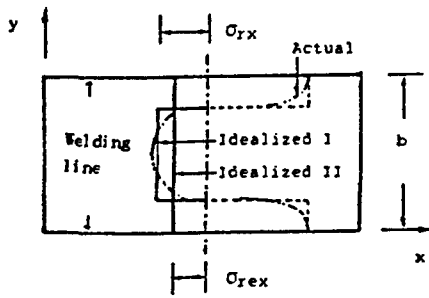


Fig. 3 Idealization of welding residual stress distribution on the ship platings

따라서, 판의 좌굴강도는 이상의 유효압축 잔류응력이 초기응력으로서 판부재에 존재한다고 가정하여 평가한다. 이때, 유효압축 잔류응력을 일종의 외하중으로 생각할 수 있기 때문에 σ_{rex} 및 σ_{rey} 를 각각 외부 면 내작용응력에 추가하면 용접잔류응력의 영향을 고려할 수 있다고 본다.

5. 블록 및 시임(Seam)라인의 잔류응력 추가고려

판부재를 살펴보면 보강재와의 용접 뿐만 아니라 건조블록과 블록이 만나는 블록연결부의 맞대기 용접부와 보강판을 만들기 전 판자체의 이음부인 시임라인부는 용접에 의한 복잡한 잔류응력이 분포된 채 선박구조가 구성되어진다. 따라서 본 논문에서는 이들 용접상황이 거의 같은 열영향에 의한 것으로 단순화시켜 4.2절에서 언급한 판주변의 보강재에 존재하는 잔류응력에 의해 야기되는 면내응력 계산방법과 같이 블록 및 시임의 용접선 효과를 판부재의 가로 및 세로방향의 평균 면내응력으로 치환하여 고려하는 판부재의 작용응력으로 간주하였다. 따라서 잔류응력계산에서 블록 및 시임라인의 용접효과도 판주변의 보강재의 용접에 의해 유발되는 용접잔류응력에 의한 면내압축응력과 같은 정도의 면내압축응력이 유발되는 것으로 보고 판주변의 보강재에 균일 배분시켜 평가하였다.

6. 유사 건조특성의 선체 상갑판부재의 등가 잔류응력 계산

건조예정인 94,000 TDW 원유운반선의 기관실갑판의 처짐을 예측하기 위해 건조방법 및 크기가 유사한 처짐손상을 이미 경험한 86,000 TDW 원유운반선

에 대하여 구조해석을 통한 정적면내응력 성분, 통상적인 잔류응력량, 초기처짐치등, 기본적인 계산이 가능한 것을 제외한 공작오차, 블록조립 오차등의 불확실한 건조상의 부분별 구조특성치를 본 추정식과 실제 측치의 평가를 통해 통상적인 잔류응력량에 산입하여 구조 부분별 공법 및 건조특성이 고려된 등가의 잔류응력 정도를 얻었다.

이의 등가잔류응력치를 근거로 건조예정선박의 처짐예측을 수행하여, 이에 따른 도크내의 선박 초조립 후 거주구가 탑재한 상태에서 대치침이 발생한 선박의 위치별 등가잔류응력의 영향을 계산하였다.

기관실 상갑판구조의 특징은 중심부에 거주구가 설치되므로 갑판에 큰 하중이 작용하는 듯이 보이나 실제 거주구 하부인 기관실 내에서 큰 종 및 횡격벽이 거주구벽과 이어져 기관실구조와 연결되어 있다.

그런데 발생한 대부분의 과대 처짐은 상갑판에서도 거주구외곽에 널리 분포하고 있으나 상갑판의 거주구 외곽부위는 기관실 3차원 구조해석으로부터 처짐을 야기시킬만한 면내 압축력성분이 존재하지도 않는다는 것을 알았다. 오히려 전체적인 자중에 의해 갑판이 선평방향으로 펼쳐지려는 경향과 선미부 중량에 의한 호깅모우먼트의 작용으로 판폭 및 길이방향 모두 미약한 인장 면내응력이 작용함을 알 수 있었다.

또한 거주구하부 기관실구조의 경량화에 따라 대형 개구 및 감소된 구조부재에 의해 초기 우려되었던 거주구 하중에 의한 거주구 주변에서의 수직처짐에 의한 갑판의 면내 압축하중 성분의 증가도 거주구를 지지하는 기관실구조의 강성이 높아 판처짐에 크게 기여하지 못한다.

게다가 제2 및 제3갑판보다 평균적인 두께가 1mm 이상 두꺼울 뿐아니라 대치침이 발생한 거주구 외곽의 판부재는 기기류나 장치등에 의한 직접적인 횡하중이 작용하지 않은 상황에서 거주구 주변에 널리 대치침현상이 발생하였다.

이에따라 거주구 주변의 처짐발생부 중 Fig. 4 같이 거주구 앞, 중앙, 그리고 뒷부분의 세영역에서 예측된 판부재 최대처짐량을 중심으로 등가잔류응력의 양을 추정하여 보았다.

먼저, 거주구 뒷쪽인 늑골번호17에서 25사이의 두께 10mm, 판길이 3200mm 그리고 판폭 835mm인 86,000TDW 원유운반선의 상갑판부(Fig. 4의 A부분)를 중심으로 조사하여 보았다. 먼저 한 판내의 최대처짐의 평균치는 7.17mm, 3차원 기관실 구조해석을 통한 판폭방향의 면내력은 거의 없으며, 판길이방향의 면내력은 18.57kgf/cm²으로 블록 및 시임용접까지 포함한 용

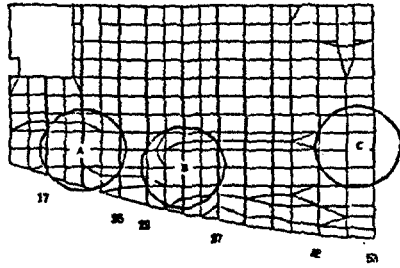


Fig. 4 Deflection estimated zone of the plate members on the upper deck of 86,000 TDW Crude Oil Carrier

접잔류응력을 고려하여 개발된 최대 처짐추정식(6)을 사용하여 계산한 결과 Fig. 5에서 알 수 있듯이 항복응력의 17.43%의 등가잔류응력치를 얻었다.

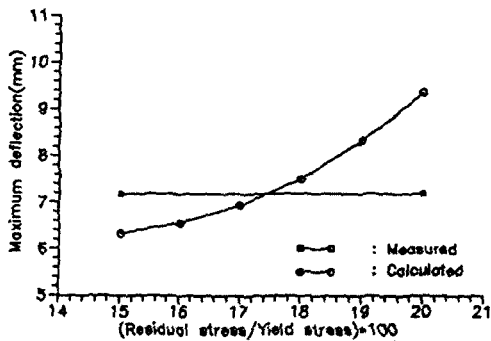


Fig. 5 Maximum deflection and residual stress relation curves for the upper deck plate panels of 86,000 TDW Crude Oil Carrier (Frame No. 17-25)

두번째로 갑판 중앙쪽인 늑골번호 29에서 37사이의 두께 11.5mm, 판길이 3200mm 그리고 판폭의 평균이 약 828mm 정도인 갑판부(Fig. 4의 B부분)는 최대처짐의 평균치가 7.00mm로 구조해석의 면내응력은 판폭방향은 거의 없으며, 길이방향으로는 19.4kgf/cm² 정도이다. 한편 이를 이용해 잔류응력을 고려하여 처짐계측치에 대응하는 등가 잔류응력치는 Fig. 6과 같이 항복응력의 약 21.16%의 값을 가진다.

마지막으로 거주구 앞쪽 부위인 늑골번호 48에서 53사이의 영역은 7.5mm의 최대치 평균값을 보이고 있으며 12.0mm의 두께, 4000mm의 판길이와 835mm의 판폭을 가진 갑판부(Fig. 4의 C부분)는 폭과 길이의 면내응력 각각 20kgf/cm²와 44.23kgf/cm²의 면내응력 성분을 3차원 유한요소해석에

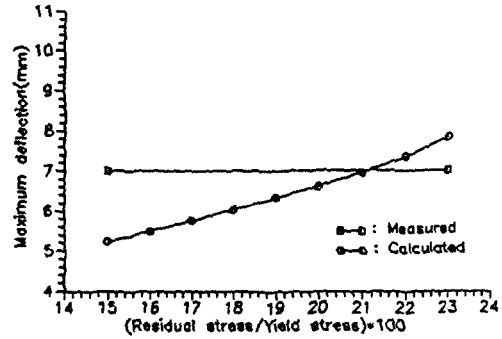


Fig. 6 Maximum deflection and residual stress relation curves for the upper deck plate panels of 86,000 TDW Crude Oil Carrier (Frame No. 29-37)

서 얻었다. 등가잔류응력은 Fig. 7와 같이 항복응력의 약 30.05% 정도로 극심한 조건하에 있음이 판명되었다.

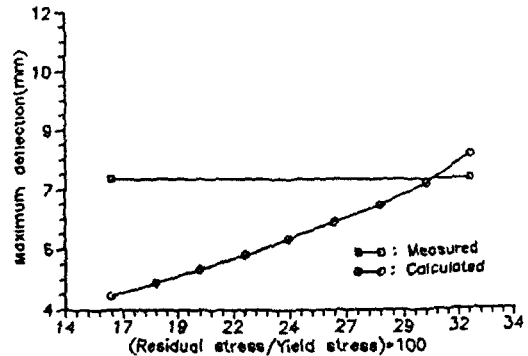


Fig. 7 Maximum deflection and residual stress relation curves for the upper deck plate panels of 86,000 TDW Crude Oil Carrier (Frame No. 48-53)

이들 상갑판의 등가잔류응력비(σ_r/σ_0 또는 σ_n/σ_0)를 살펴보면 상갑판의 후방과 중앙 그리고 전방부에서 각각 17.43%, 21.16% 그리고 30.05%로 제2 및 3갑판의 평균치 16%에 비해서 과대한 면내응력이 작용되고 있다. 제2, 3갑판보다 두꺼운 판이 사용된 상갑판의 처짐이 주로 거주구 주변에서만 발생하는 현상은 크게 다음 3가지 이유로 구분될 수 있겠다.

그 첫째이자 가장 주요한 원인으로 추정되는 것은 상갑판에 취부되는 거주구 하단부의 이완된 구조에 기인하는 것으로 생각된다. 거주구는 통상 거주구 조립장에서 조립되어 각종 의장품이 선행의장되는데 거주구는 여러 층으로 이루어지나 최하단의 바닥은 열려진

상태를 유지한 채 상부층의 층식 용접구조가 구성되어 지면서 용접에 의한 코킹업(cocking up)현상과 유사하게 최상층이 약간 좁아지고 거주구 맨 아랫단이 눈에 보이지는 않으나 벌어지는 현상으로 선측부에서 약간 기울어지는 경향을 보이게 된다. 거주구가 완성되어 기관실 상갑판 위로 이송되어 기관실 하부의 종 및 횡격벽과 정렬되기 위해서는 거주구의 최하단을 안쪽으로 약간씩 밀어주며 취부되는 경향이 있어 용접에 의한 완전 연결작업이 종료되면 거주구의 하단부가 상갑판을 밖으로 밀어내는 힘이 발생하게 된다. 이것이 거주구 주변의 상갑판에 압축면내력으로 작용하게 되며 이로 인해 대처짐의 원인이 유발된다고 추정된다.

반면에 거주구 내부는 거주구 하단이 상갑판을 펼치려는 경향을 보임에 따라 이에따른 인장면내응력에 의해 처짐발생을 방해하게 되므로 내부에서의 판부재처짐은 극히 희박하다(Fig. 8 참조).

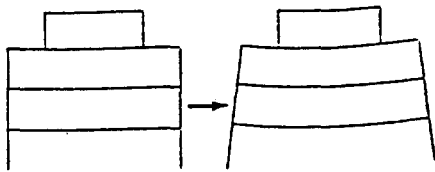


Fig. 8 Deckhouse deformation pattern under construction

두번째로 들 수 있는 원인은 기관실이 통상 3층의 갑판으로 이루어져 있으며 맨 아래의 제3갑판부터 조립되어진다고 볼 때 이들 갑판에 횡방향으로 설치되는 트랜스가 갑판과의 연결작업에 의한 용접부의 수축에 의해 트랜스에 새김형상의 굽힘이 발생한다.

또한, 선측부의 트랜스웨브와 브라켓 또는 브라켓형상의 연속이음부와는 강하게 연결되어 있어 갑판트랜스의 새김거동에 의해 선측부가 상부쪽은 약간 수축되고 아랫쪽은 약간 열리는 형태를 유지하게 됨에 따라 이 제2 또는 제3갑판과의 조립에 의해 야기되는 이러한 상부 수축력이 유발되어 상갑판부에 선평방향의 면내 압축력이 주어지게 되어 보다 큰 판부재의 처짐을 야기시킬 수 있다(Fig. 9 참조).

마지막 영향인자로는 미소한 것으로 생각되나, 거주구 주변의 상갑판부에 내려 쬐이는 강렬한 태양열에 기인한다고 본다. 이는 용접 및 건조과정에 의해 비록 큰 처짐이 발생하지 않는 경우에도 내부적으로 어느 정도의 잔류응력이 존재하고 있으므로 강렬한 태양광선에 의해 판부재는 처짐이 증가될 수 있기 때문이다.

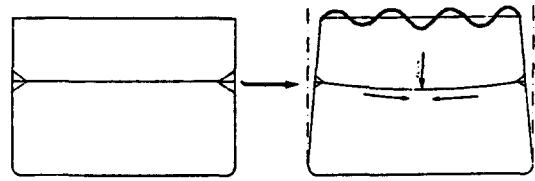


Fig. 9 Deflection of engine room upper deck when all members are assembled

이러한 상갑판의 처짐에 대한 주 원인들을 분석하여 보았고 이를 근거로 제2갑판과 제3갑판이 순수한 정적 하중 및 자중과 용접만에 의해 처짐이 야기되었다고 볼 때 상갑판의 이러한 처짐을 유발시키는, 앞서 제시된 세가지 원인에 기인한 상갑판부의 처짐효과 정도는 제2, 3갑판부의 평균잔류응력치가 항복응력의 16%로 예측되었기 때문에 갑판의 후방부(Fig. 4의 A부분)에서는 거의 없으나 중앙부(Fig. 4의 B부분)에서는 항복응력의 약 5%정도, 전방부(Fig. 4의 C부분)는 약 14%만큼 추가의 잔류응력이 등가잔류응력에 고려되었다.

이러한 방법으로 구조 및 건조특성이 다른 부재들에 대한 등가잔류응력치를 얻어두면 유사건조선에 대한 처짐의 추정이 어느정도 손쉽게 이루어질 수 있다고 본다.

7. 건조예정 선박의 처짐평가와 분석

과대처짐이 발생한 86,000 TDW 원유운반선의 기관실 갑판의 대처짐에 대한 계측자료 및 최대처짐 추정식을 이용하여 각 갑판부의 건조 및 용접의 영향을 고려한 부분별 등가잔류응력의 형태로 대처짐을 평가하여 보았다. 따라서 본 절에서는 당사에서 건조 예정인 94,000 TDW 원유운반선 기관실상갑판에 대하여 앞서 검토된 경험을 바탕으로 처짐에 취약한 판부재를 중심으로 개략적인 판부재의 처짐평가를 실시하였다.

상갑판의 경우는 갑판내에서도 위치에 따라 현격한 등가잔류응력의 차이를 보이므로 위치별의 추정이 필요함에 따라 앞서 처짐발생부위에 대한 평가결과를 사용하였다. 그런데 가장 등가잔류응력이 높았던 판부재군의 부재로 항복응력의 30.06%와 21.16%인 두 부분에 대해 수행하였다. 이들 계산에 대한 내용은 상세를 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 86,000 TDW 유조선의 같은 위치에서 측정된 처짐실측치와 처짐추정치로부터 도출된 등가잔류응력치를 사용하여 Table 2의 94,000 TDW 유조선의 기관실 상갑판의 최대 처짐추정을 실시한 것이다.

Table 1에서 시임과 블록용접에 따른 추가 응력계산을 위해 5/4가 사용되었는데 이는 횡 및 종부재의 정규용접에 25%의 영향을 고려한 것이다.

Table 1 Deflection estimation at the upper deck of 94,000 TDW crude oil carrier

(unit : kg, cm)

Position	B	C
Applied stress in x-direction	23.16	23.09
Applied stress in y-direction	0	20
plate dimension	240×80×1.3	240×80×1.3
Equ. residual stress in x-direction	392.98	519.98
Equ. residual stress in y-direction	137.94	190.73
Additional factor due to seam line	5/4	5/4
Additional factor due to block line	5/4	5/4
Total in-plane stress in x-direction	491.22	626.89
Total in-plane stress in y-direction	172.43	218.42
Estimated defection	0.672	0.613

이로부터 기관실 상갑판의 주 판부재군들에 대해 각각 6.13mm와 6.72mm의 예상처짐 결과가 얻어졌다. 86,000 TDW 유조선의 같은 위치에서 측정된 처짐실측치와 처짐추정치로부터 도출된 등가잔류응력치를 사용하여 Table 2의 94,000 TDW 유조선의 기관실 상갑판의 최대처짐추정을 실시한 것이다.

Table 2 Comparison of the measured deflection for 86,000 TDW crude oil carrier and the estimated deflection for 94,000 TDW crude oil carrier at the upper deck plate

(unit : mm)

Position of the upper deck	A	B	C
86,000 TDW Crude Oil Carrier	0.717	0.700	0.750
94,000 TDW Crude Oil Carrier		0.672	0.613

이들 값들은 상갑판부위 중에서도 앞서 제시한 이론 및 방법에 따라 계산이 가능하다고 볼 수 있는 부분으

로 처짐에 취약한 부위를 중심으로 평가한 것이다.

8. 기존 선각품질관리의 처짐방지기준

품질관리부의 선각 품질관리 기준에 따라, 건조중인 선박블록의 치수검사는 항목별로 관리기준 및 허용기준에 의해 검사되어지고 있다. 그러나, 선각 품질관리 기준에 따라 엄격히 건조되더라도, 본 논문에서 다루고 있는 판의 과대처짐현상을 방지할 수 없을 것으로 생각된다.

예를 들면, 기관실 블록의 검토항목에 제시된 갑판 수준에서의 높이, 길이, 폭 그리고 늑골수직도의 관리기준이 국내 대형조선소의 경우 3mm ~ 5mm 이며, 허용기준은 7mm ~ 10mm정도이다. 이 정도의 오차범위내에서는 선박블록 건조상에서의 정확도는 가능할 수 있을지는 모르나 허용오차가 선체에 작용되는 건조 조립상의 무리한 힘으로 작용되거나 큰 처짐을 야기시킬 수 있는 초기응력의 형태로 작용한다. 따라서 기존의 선각품질관리의 관리기준 및 허용기준에 따른 건조단계를 거처도 박판부재의 처짐에 대한 방지책과는 거리가 멀다고 할 수 있으므로 판처짐 방지에 대한 새로운 기준이 설계자와 생산자들 간의 협의를 거쳐 마련되거나 깊은 토의가 필요하다고 본다.

9. 결 언

- 선박구조 설계상의 구성부재로서의 최대처짐을 정확히 평가하는데는 건조공법 및 잔류응력등 다양한 영향인자들이 존재하고, 각종 하중성분과의 관계규명도 유한요소법등의 비선형해석을 통한 수치해석작업을 해야하므로 이들 모든 영향인자들을 고려한 처짐의 평가에는 상당한 제약이 따른다. 그러나, 초기설계단계에서 과대처짐방지를 위해 우선, 복잡한 처짐거동을 보이는 기관실 상갑판의 판부재에 대한 처짐현상을 분석해보았다.
- 이를 위해 실제 대처짐이 발생하여 건조상 문제가 되었던 선박구조를 대상으로 3차원 구조해석을 통하여 해당판부재의 면내응력성분을 도출하고 초기처짐, 잔류응력등의 영향도 고려하여 개발된 추정식을 이용하여 예측되는 최대처짐량을 제시하여 보았다.
- 처짐예측 대상선박인 94,000 TDW 원유운반선이 처짐손상을 입은 86,000 TDW 원유운반선과

건조방법 및 크기가 유사하므로 기관실 상갑판구조 고유의 정적하중, 치수 및 블록라인과 시임라인 등 고유의 특성을 제외한 측량불가한 건조 상의 부분별 구조특성치를 잔류응력에 산입하여 건조예정선의 기관실 상갑판실의 처짐을 예측하였다. 또한, 상갑판의 등가잔류응력치를 구조 및 건조특성별로 처짐손상선에 대하여 얻어 두면 유사선 건조시 처짐추정이 어느 정도 손쉽게 얻어질 수 있으리라 예상된다.

- 상갑판의 거주구 주변에 집중된 판부재처짐현상을 크게 3가지로 구분하여 살펴보고 선각 품질관리 기준에 의해 건조중의 선박블록이 치수검사를 항목별로 관리기준 및 허용기준에 의해 검사되어지고 있으나 현 검토기준에 따라 엄격히 건조관리기준이 지켜지더라도 과대처짐의 방지효과를 기대되지 않으므로 처짐방지를 위한 보다 엄격한 관리기준 또는 처짐방지를 위한 건조기준이 설계실과 생산부와의 협의를 거쳐 제시될 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] 김춘호 외 8명, "선체 횡격벽의 변형발생원인과 그 대책에 관하여", *기술현대*, Vol.11, No.1, 1991.
- [2] J.K. Paik, "Analysis for large deflection behaviour of plate elements-development and application of incremental galerkin method", *J. of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 24, No. 4, December 1987.
- [3] J.K. Paik, J.H. Ham and U.N. Kim, "A New Plate Buckling Design Formula", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.171, 1992.
- [4] J.K. Paik, J.H. Ham and J.H. Ko, "A New Plate Buckling Design Formula (2nd Report) - On the Plasticity Correction -", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.172, 1992
- [5] 백접기, 함주혁, 고재현, "板의 좌굴설계공식에서의 소성 수정에 관하여", 선박구조연구회, Sep., 1992.
- [6] Y. Ueda, T. Yamakawa and N. Mori, "Analysis on Nonlinear Behaviour of Plates", *J. of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.126, 1969 (in Japanese).
- [7] D. Faulkner, "A Review of Effective Plating for Use in the Analysis of Stiffened Plating in Bending and Compression", *J. Ship Research*, Vol.19, No.1, 1975.
- [8] O.F. Hughes, "Ship Structural Design : A Rationally-Based, Computer-Aided, Optimization Approach", *John Wiley & Sons*, 1983.
- [9] C.S. Smith, et. al., "Strength and Stiffness of Ships' Plating under In-plane Compression and Tension", *The Royal Institution of Naval Architects*, 1987.
- [10] C.A. Carlsen, J. Czujko, "The Specification of Post-Welding Distortion Tolerances for Stiffened Plates in Compression", *The Structural Engineer*, Vol. 56A, No. 5, pp.33-46, 1978.
- [11] J.K. Paik, J.Y. Ko, "Ultimate Compressive Strength Analysis of TMCP High Tensile Steel Plates with HAZ Softening(2nd Report) - Rectangular Plate -", *J. of the Korean Welding Society*, Vol. 9, No.2, Jun, 1991.
- [12] ISSC, "Fabrication and Service Factors", Report of Committee III.3, 9th ISSC, Genova, 1985.
- [13] Y.Ueda, Sherif M.H. Rashed, J.K.Paik, "Plate and Stiffened Plate Units of the Idealized Structural Unit Method(2nd Report) - Under In-plane and Lateral Loading Considering Initial Deflection and Residual Stress -", *J. of Naval Architecture of Japan*, 1986,11.
- [14] 함주혁, "선체블록 탑재후 기관실 갑판의 처짐발생에 대한 원인규명 및 대처방안 연구", 현대선박해양연구소 기술보고서, Dec., 1992.
- [15] 함주혁, 김재현, 김을년, "선박 판부재의 최대처짐량 예측을 위한 간이 추정법", 선박구조연구회, Aug., 1993.