

대형 컨테이너선 상갑판 해치코너부 보강판의 설계에 관한 연구

박성구^{†*}, 이주성^{**}

현대중공업(주) 조선사업부 구조설계부*
울산대학교 수송시스템공학부**

Study on the Design of Upper Deck Hatch Corner Insert Plates of Large Container Carriers

Sung-Gu Park^{†*} and Joo-Sung Lee^{**}

Hull Initial Design Dept., Shipbuilding Div., Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.*
School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan**

Abstract

The objective of this paper is to calculate the fatigue strength for upper deck hatch corner insert plate of large container carriers without wave load analysis and global finite element analysis at the initial design stage. Wave load analysis and global F.E. analysis for three container carriers have been performed by GL(Germanischer Lloyd) procedure to propose the equation for hatch corner stress range which is the important factor in fatigue strength calculation. Considering the restraining effect of bulkhead, three types of equation, that is, single tight bulkhead, double tight bulkhead and support bulkhead have been proposed. Using the proposed equations, a simplified fatigue analysis based on GL rules has been performed for two container carriers of which fatigue strength analysis was carried out by GL. From the comparison between fatigue strength result of using the proposed equations and that of GL, it has been found that proposed stress range equations are useful for scantling of upper deck hatch corner insert plates for over 8,000 TEU class container carriers.

※Keywords: Large container carrier(대형컨테이너 운반선), Upper deck hatch corner insert plate(상갑판 해치코너 보강판), Germanischer Lloyd(독일선급), Torsional moment(비틀림모멘트), Simplified fatigue analysis(간략화된 피로해석)

1. 서론

최근 컨테이너 운반선의 대형화는 다른 어떤 선종들의 경우보다 급속하게 진행되고 있다. 초기 컨테이너 운반선의 발전은 파나마 운하의 통과와 관련하여 길이, 폭, 흘수 등에서 제한을 받아왔으나 1988년에 포스트 파나마스 컨테이너 운반선의 등장 이후 2000년대에 들어 컨테이너선의 대형화가 급격히 진행되면서 현재 컨테이너 해운시장의 많은 부분을 포스트 파나마스 컨테이너 운반선이 차지하고 있으며 2005년도에는 10,000 TEU 급 컨테이너 운반선이 계약되기에 이르렀다. 포스트 파나마스 컨테이너선의 등장 이후 불과 20년도 되기 전에 컨테이너 운반선의 적재 능력이 2 배가 될 만큼 컨테이너 운반선의 대형화는 빠르게 진행되어 왔다. 이런 추세는 앞으로 계속 진행될 것으로 예상됨에 따라, 대형 컨테이너 운반선에서의 비틀림 하중에 대한 응답에 주의를 기울일 필요가 있고 특히 국부적으로 심한 응력집중이 발생하는 상갑판 해치코너부에 대한 상세한 연구가 필요하다.

컨테이너 운반선은 컨테이너의 상하역을 쉽고 빠르게 하기 위해 큰 개구부를 가지고 있어 선박의 단면이 개단면(open section)과 폐단면(closed section)으로 이루어져 있다. 각 단면의 전단중심(shear center)은 서로 위치가 다르므로 연결부에서 불연속점이 생기는데 이를 해결하기 위한 연결부의 적합조건(compatibility condition)이 연구되었다(Haslum and Tonnessen 1972). 또한 컨테이너 운반선의 구조적 특성을 파악하기 위하여 화물창의 일부 모델을 가지고 수직굽힘모멘트, 수평굽힘모멘트 및 비틀림모멘트를 가하여 뒤틀림 응력(warping stress)과 해치 개구부의 변형에 대하여 유한요소해석 결과와 실험 결과를 비교하고(Elbatouti 1976), 뒤틀림 강성(warping rigidity)을 증가시키기 위한 보강방법이 연구되었다(Yong 1983). 컨테이너 운반선 설계시 설계자들이 주의를 기울이는 비틀림모멘트에 대한 응답은 해치 개구부의 변형량과 해치 코너부의 응력집중이다. 이러한 응답은 파랑하중해석을 수행하여 선체에 작

용하는 하중을 구한 후, 이를 외부하중으로 선체 구조에 작용시키는 전선구조해석을 수행하여야 얻을 수 있는 것이다. Pedersen(1985)은 이러한 구조적 응답을 추정할 수 있도록 박판보 이론을 응용한 프로그램을 개발하였고 최근에는 기본 구조 설계 단계에서의 정보만을 가지고 컨테이너 운반선의 비틀림 강도를 해석할 수 있는 프로그램을 개발한 바 있다(박성환 2001).

본 논문에서는 여러 가지 복잡한 하중의 작용으로 응력집중이 발생하는 해치 코너부의 응력집중을 고려한 응력범위를 규명하기 위해, 독일 선급의 규정과 해석절차에 따라 대형 컨테이너 운반선에 대한 파랑하중해석 및 전선구조해석을 수행하였다. 또한 그 해석 결과를 이용하여 기본구조 설계 단계에서 많은 시간과 인력이 요구되는 파랑하중해석 및 전선구조해석 절차 없이, 응력 집중으로 인하여 피로강도 부족으로 간혹 손상이 발생하는 상갑판 해치코너 보강판(insert plate)의 치수 결정(scantling)이 가능하도록, 피로 강도 계산에 필요한 횡부재의 구속에 의한 해치 코너부의 응력 범위 변화를 수식으로 제안하였고, 선급에서 설계한 선박을 대상으로 타당성을 검증하였다.

2. 대상선박과 검토부위

본 논문의 대상호선은 Table 1 과 같다. 파랑하중해석과 전선구조해석은 #1~#3 호선에 대해 수행하여 상갑판 해치코너 보강판의 피로강도 계산에 필요한 응력범위의 경향에 대한 수식을 도출하고, 선급에서 해석을 수행한 #4, #5 호선을 대상으로 도출한 수식을 이용하여 피로강도 계산을 수행, 그 결과에 대한 타당성을 검증하였다.

본 논문에서 검토하고자 하는 상갑판 해치코너 보강판은 Fig. 1 과 같다. 컨테이너 운반선이 비틀림 하중을 받게 되면 좌현과 우현 사이에서 큰 상대변위가 발생한다. 이러한 변형 양상은 상갑판 해치코너에 국부적인 응력집중을 유발하게 되는데 이러한 응력집중부에 설치되는 보강판은 선급에서 규정한 피로강도를 만족시켜야 한다. 해치코너의 피로강도를 평가하기 위하여 파랑하중해석 및 전

Table 1 Principal dimension of the present container ship models

NO	TEU	L _{pp} [m]	B [m]	D [m]	T _{scant} [m]
#1	8,200	319.0	42.8	24.5	14.5
#2	9,100	333.4	42.8	27.2	14.5
#3	8,100	321.0	45.6	24.6	14.5
#4	7,800	319.0	42.8	24.6	14.5
#5	9,400	333.4	42.8	27.3	14.5

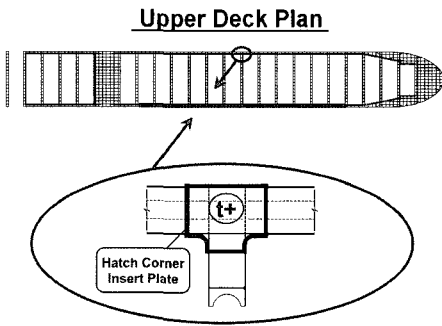


Fig. 1 Upper deck hatch corner insert plate

선구조해석을 수행하고, 상세모델을 만들어 전선에서부터 얻은 변위를 상세모델의 끝단부에 작용시켜 응력범위를 추출한 후 선급규정에 의한 허용응력범위의 값과 비교하여 피로강도를 평가하게 된다.

3. 비틀림모멘트에 대한 선급 규정

각 선급마다 비틀림모멘트에 대한 규정을 하고 있는데 Fig. 2 에서 보는 바와 같이 분포형태와 크기가 선급마다 차이가 있다. 비틀림모멘트 분포의 특성을 살펴보면 미국선급(ABS 2005)은 L/4, 2L/4 그리고 3L/4 에서 최대값을 나타내는 3 개의 곡선으로 이루어져 있고, 노르웨이선급(DNV 2005)과 독일선급(GL 2004)은 두개의 곡선으로 이루어져 있는데 두 곡선을 더하거나 빼면 L/4 와 3L/4 부근에서 최대값을 나타내는 분포로 서로 비슷하며, 한국선급(KR 2005)과 영국선급(LR 2004)이 중앙부에서 최대값을 나타내는 분포로 비슷하다.

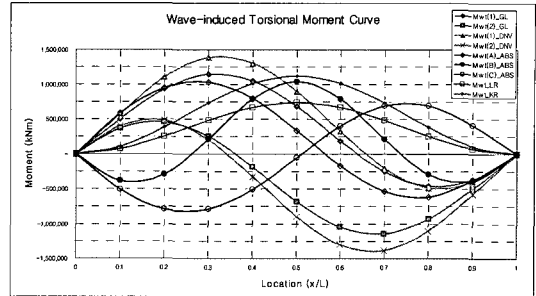


Fig. 2 Wave-induced torsional moment curves

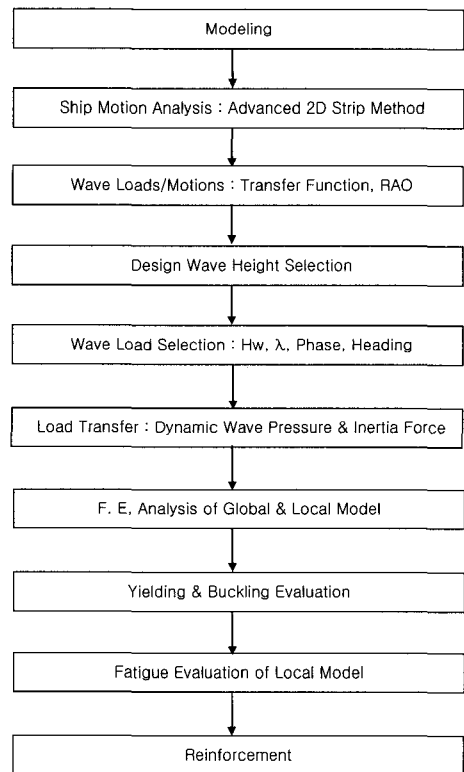


Fig. 3 Flow chart of analysis

4. 파랑하중해석 및 전선구조해석

파랑하중해석 절차는 해석을 위한 모델링을 하고 선박운동해석과 파랑하중해석을 수행한 후 그 결과를 바탕으로 설계파고와 파랑하중을 선택한 다음 전선구조해석을 위한 하중전달을 하게 된다. 전선구조해석 과정은 파랑하중해석으로부터 넘겨

받은 하중을 전선구조해석 모델에 구현하여 전선 해석과 상세해석을 수행하고 그 결과를 가지고 항복강도 및 좌굴강도를 평가한 다음 상세모델의 피로강도를 평가하고 선급 규정보다 부족한 부분이 있으면 보강하는 순서로 진행된다. 파랑하중해석 및 전선구조해석의 순서도는 Fig. 3 과 같다.

5. 해치코너부 피로강도 평가

5.1 개요

선급 규정에 따른 해치 코너부의 피로강도를 계산하기 위해서 우선 해석하고자 하는 부분의 상세 구조를 모델링하고, 전선구조해석 결과의 변위를 상세구조 모델의 경계에 강제변위로 적용하여 해석을 수행한다. 상세구조해석 결과를 바탕으로 관심부위의 응력범위를 추출하여 얻은 값과 선급 규정에 의해서 계산된 허용응력범위와 비교하여 피로강도를 판단하게 된다. Fig. 4 는 해치 코너부의 피로계산을 위하여 해당 부분을 작은 요소로 모델링하고 전선구조해석의 변위를 받아와 상세모델 경계에 적용하기 위한 상세모델을 나타내었다.

5.2 선급규정

독일선급의 피로 강도에 대한 규정은 다음과 같다.

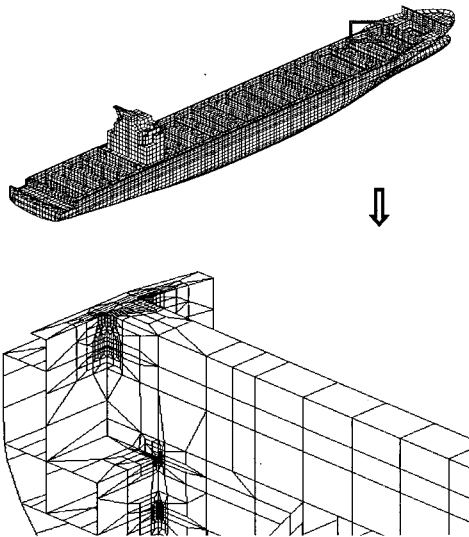


Fig. 4 Local fine mesh model of fore hold

아래의 선급식에서 $\Delta\sigma$ 는 상세구조해석으로부터 구한 응력범위이고, $\Delta\sigma_p$ 는 선급규정에 의해서 계산된 허용응력범위이다. 그러므로 국부구조의 피로강도가 만족되기 위해서는 $\Delta\sigma$ 가 $\Delta\sigma_p$ 보다 작으면 된다.

$$\Delta\sigma = (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) [N/mm^2] \quad (1)$$

σ_{\max} : 상세해석으로부터 얻은 최대응력

σ_{\min} : 상세해석으로부터 얻은 최소응력

$$\Delta\sigma_p = (f_n \Delta\sigma_{rc}) f_{FEM} [N/mm^2] \quad (2)$$

f_n : 응력 스펙트럼과 피로 횟수를 고려한 계수

f_{FEM} : 유한요소해석을 고려하는 계수

: S-N curve of the 2×10^6 횟수에서 교정된 피로강

$\Delta\sigma_{rc} = f_m \cdot f_R \cdot f_w \cdot f_i \cdot \Delta\sigma_R$ 도 값

$\Delta\sigma_R =$ S-N curve of the 2×10^6 횟수에서 피로강도 참고 값

$f_m =$ 강(steel)의 종류를 고려하는 계수

$f_R =$ 평균응력(mean stress)의 효과를 고려하는 계수

$f_w =$ 용접부의 상태를 고려하는 계수

$f_i =$ 부재의 중요도를 고려하는 계수

5.3 피로강도 계산결과

선급 규정에 따라 계산한 허용응력범위와 상세 모델에서 추출한 응력범위의 비(usage factor)가 1 보다 크면 보강이 필요함을 나타낸다. 선급 규정에 따른 #1 호선의 상갑판 해치 코너에 대한 계산결과를 Table 2 에 나타내었고, 대상호선 중 3 척에(#1~#3) 대한 선박 길이 방향의 응력범위의 비를 Fig. 5 ~ 7 에 나타내었다.

Fig. 5 ~ 7 을 살펴보면 선미에서부터 0.6L까지는 추가적인 보강 없이 피로 강도를 만족하지만, 0.6L 이상에는 일부 보강이 필요하다. 그러므로 상갑판 해치 코너 보강판의 설계를 위해서는 0.6L 이상에 위치한 상갑판 해치 코너의 응력범위 분포를 규명해야 한다.

5.4 상갑판 해치코너부의 응력범위 분포

해치 코너부의 응력범위를 알아내기 위해서

Table 2 Fatigue strength analysis example for insert plate

Dist.	Dimension		Fatigue Input Data		Max. Stress Range		Usage factor
	From		(DSR=Detail Cat.)		(Max Hogging)		
A.P.	R	t_b	R_{eH}	DSR	FE-Calc.	Allow.	factor
(x/L)	[mm]	[mm]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	
0.406	500	74	390	140	407	620	0.56
0.446	500	74	390	140	312	592	0.53
0.452	500	74	390	140	514	654	0.79
0.492	500	74	390	140	359	611	0.59
0.498	500	74	390	140	458	653	0.70
0.538	500	74	390	140	445	763	0.58
0.544	500	74	390	140	607	689	0.88
0.584	500	74	390	140	523	722	0.72
0.590	500	74	390	140	546	731	0.75
0.630	500	74	390	140	569	734	0.78
0.636	500	74	390	140	758	740	1.02
0.676	500	72	355	140	673	716	0.94
0.681	500	72	355	140	655	726	0.90
0.722	500	64	355	140	646	714	0.91
0.727	500	64	355	140	817	743	1.10
0.768	500	56	355	140	743	725	1.02
0.773	500	56	355	140	540	751	0.72

R : corner radius, t_b : plate thickness as built, R_{eH} : nominal yield point.
 DSR : detail category, FE-Calc.(= $\Delta\sigma$) : stress range from FE analysis.
 Allow.(= $\Delta\sigma_p$) : allowable stress range, Usage factor : FE-Calc / Allow.

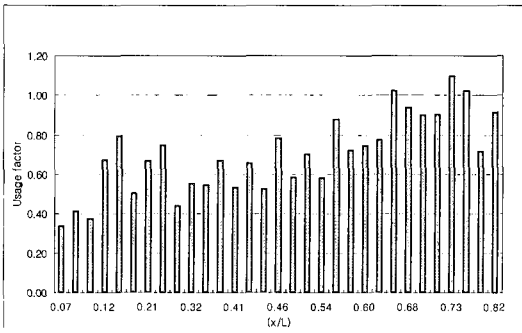


Fig. 5 Usage factor distribution for #1 container carrier

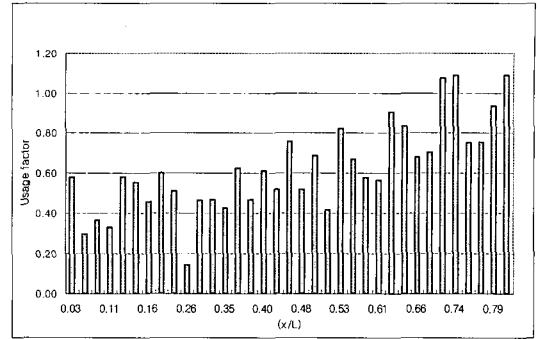


Fig. 6 Usage factor distribution for #2 container carrier

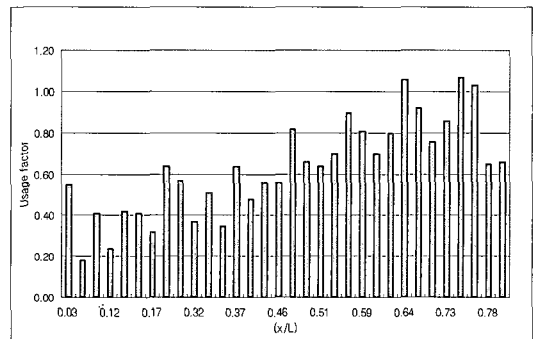


Fig. 7 Usage factor distribution for #3 container carrier

해치코너부를 Fig. 8 과 같이 10 등분하여 응력을 추출하게 되는데 일반적으로 선수부 화물창의 상 갑판 해치코너부 보강판의 응력분포는 Fig. 9 와 같다. Fig. 9 를 살펴보면 Fig. 10 에서 나타난 바와 같이 수직굽힘모멘트만 작용하는 LC102 의 하중조건에서는 1 번 요소의 응력은 0 인 반면에 Fig. 11 과 Fig. 12 에서와 같이 수직굽힘모멘트, 수평 굽힘모멘트 및 비틀림모멘트가 조합된 하중상태 (combined load case)인 LC120 과 LC124 의 하중조건에서는 1 번 요소의 응력 범위가 10 번 요소의 응력 범위보다 큼을 알 수 있는데 이는 수직 굽힘모멘트, 수평굽힘모멘트 및 비틀림모멘트가 조합된 하중상태에서는 선박의 길이 방향의 응력만을 가지고 해치 코너부의 응력을 추정하기에 한계가 있고, 횡부재의 응력분포 및 강성에 의한 구속효과까지 고려되어야만 한다는 것을 말한다.

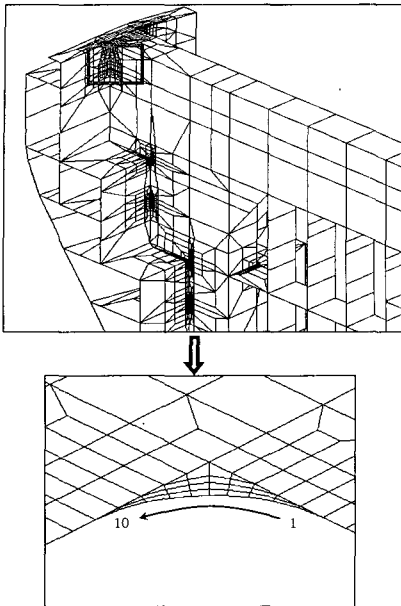


Fig. 8 Elements numbering of insert plate

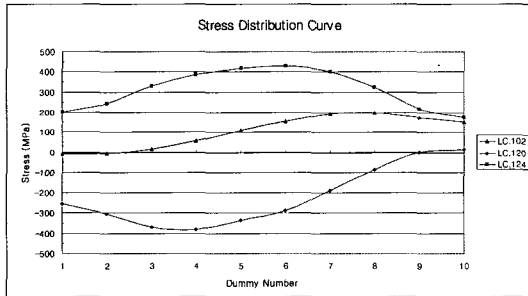


Fig. 9 Stress distribution of insert plate

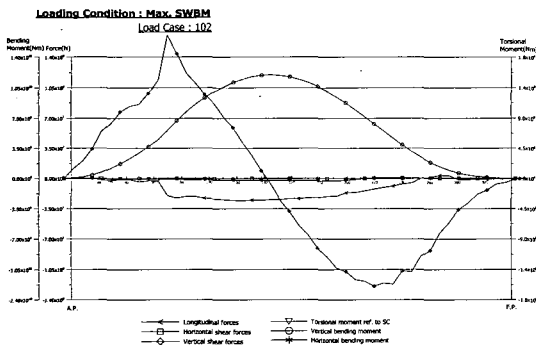


Fig. 10 Load distribution of load case 102

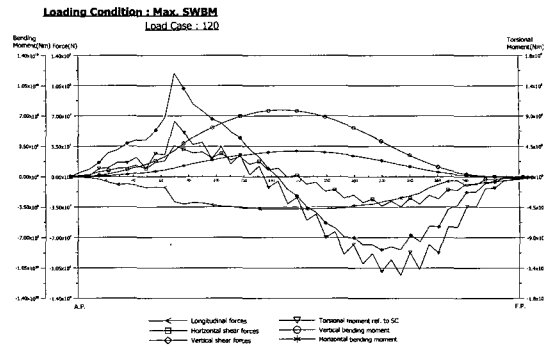


Fig. 11 Load distribution of load case 120

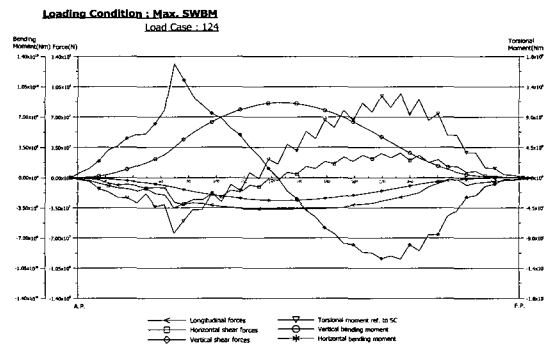


Fig. 12 Load distribution of load case 124

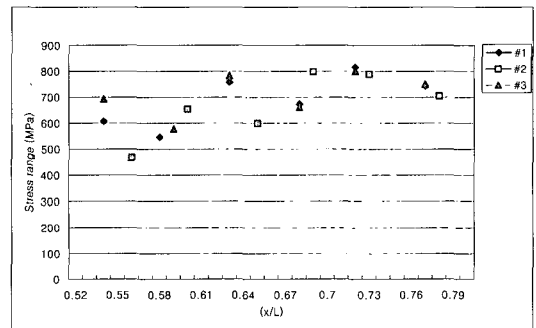


Fig. 13 Stress range distribution for insert plate of #1~#3 container carriers

선박의 중앙부에서 선수쪽으로 상갑판 해치코너부의 응력범위 경향을 파악하기 위하여 대상호선의 응력 범위를 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 13을

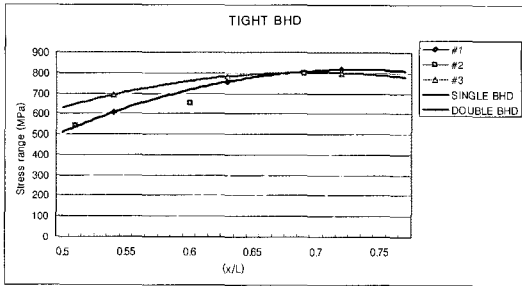


Fig. 14 Stress range distribution for insert plate of tight bulkhead

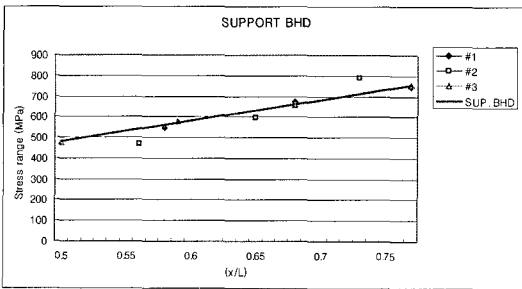


Fig. 15 Stress range distribution for insert plate of support bulkhead

보면 응력 범위가 불규칙한 것처럼 보여지지만, 앞에서 언급한 바와 같이 횡부재의 강성을 고려해서 수밀격벽(tight bulkhead)과 지지격벽(support bulkhead)으로 나누어 보면 Fig. 14, Fig. 15와 같이 응력범위의 경향을 알아낼 수 있다.

Fig. 14 에서 단일 수밀격벽(single tight bulkhead)는 일반적인 수밀격벽을 나타내는 것이고, 이중 수밀격벽(double tight bulkhead)는 최근 몇몇 선주들의 요구로 연료탱크(fuel oil tank)를 이중선체 안으로 설치하기 위하여 수밀격벽에 탱크를 설치함으로써 생겨난 구조이다. 단일격벽과 이중격벽은 서로 강성이 틀리기 때문에 Fig. 14에서 보는 바와 같이 응력범위의 경향이 차이가 난다. Fig. 14, 15에서 얻은 추세선의 방정식은 식(3) ~ (5)와 같다.

- 단일 수밀격벽의 응력범위 (stress range of single tight bulkhead, $\Delta\sigma_1$) :

$$\Delta\sigma_1 = \{4.444(x/L)^2 + 6.2(x/L) - 1.359\} \cdot 10^3 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (3)$$

- 이중 수밀격벽의 응력범위 (stress range of double tight bulkhead, $\Delta\sigma_2$) :

$$\Delta\sigma_2 = \{5.679(x/L)^2 + 8.322(x/L) - 2.231\} \cdot 10^3 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (4)$$

- 지지 격벽의 응력범위 (stress range of support bulkhead, $\Delta\sigma_3$) :

$$\Delta\sigma_3 = \{1.015(x/L) - 0.03\} \cdot 10^3 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (5)$$

이와 같은 추세를 나타내는 이유는 상세구조해석의 하중은 전선구조해석 결과의 변위를 상세모델의 경계에 강제변위로 적용하기 때문에 전선해석 결과 중 해치 개구부의 변형과 밀접한 관계가 있는데 Fig. 16 에서와 같이 해치 개구부의 변형이 대체로 기관실 격벽(NO8A Hatch)에서부터 선수부 화물창 개구부 크기 변화 전(NO2A Hatch)까지 대체로 증가하는 것에 영향을 받는 것으로 사료된다. Fig. 16 에서 볼 수 있듯이 해치 개구부 변형량은 선수로 가면선 전반적으로 증가하지만 격벽(Bulkhead)의 강성 차이로 인해 불규칙적인 양상이 나타난다.

#4, #5 호선에 대해 선급에서 파랑하중해석 및 전선구조해석을 수행하여 구한 Usage factor 와 Fig. 14 와 Fig. 15 에서 구한 응력 분포 추세선을 가지고 피로강도 계산을 수행하여 얻은 응력범위의 비(usage factor)를 Fig. 17 과 Fig. 18 에 나타내었다. 비교 결과를 보면 #4 호선은 추세선으로 구한 응력범위의 비가 크데 비하여 #5 호선은 #4 호선과 반대의 결과가 나타나지만 중앙부의 해치 코너 보강판의 치수는 중앙부(0.3L~0.7L) 중

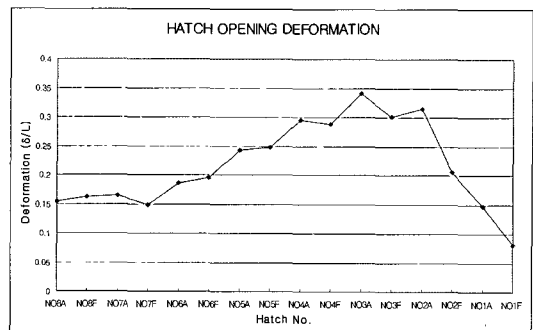


Fig. 16 Hatch opening deformation .

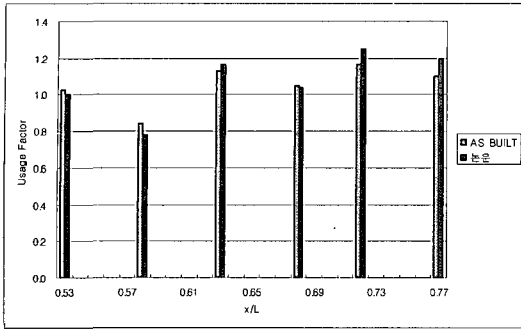


Fig. 17 Usage factor comparison for #4 container carrier

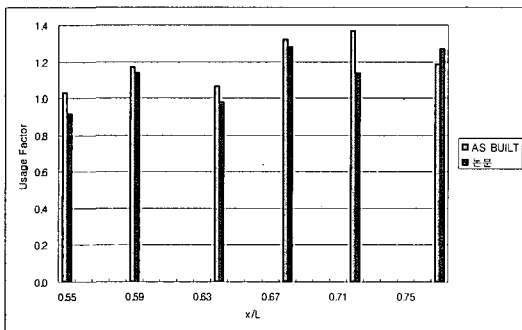


Fig. 18 Usage factor comparison for #5 container carrier

Scantling 이 가장 큰 것을 기준으로 설계하기 때문에 #5 호선의 경우 0.67L 의 Scantling 이 기준이 되므로, 중앙부의 Scantling 을 결정하는 데에는 영향이 작을 것으로 판단된다. 또한 많은 양의 Data 가 축적되면 보다 정확한 응력분포를 추정 가능할 것으로 사료된다.

6. 결론

본 연구에서는 많은 시간과 인력을 들여 파랑하중해석 및 전선구조해석을 수행해야만 계산할 수 있었던 상갑판 해치코너 보강판의 피로강도를 간략화된 방법으로 계산하기 위하여 5 척의 대상선 중 3 척의 선박에 대한 해석을 수행하고 응력범위를 추정할 수 있는 설계식을 제안하여 나머지 2 척을 대상으로 타당성을 검증하였다.

지금까지 대형컨테이너 운반선의 실선 설계시 상갑판 해치코너 보강판에 대한 설계기준은 선급 규칙에 있으나, 과거 소형 컨테이너 운반선을 기준으로 만든 규정이므로 많은 시간과 인력을 들여 파랑하중해석 및 전선구조해석을 수행하여 보강판에 대한 치수결정을 하거나 해석을 수행하지 않고 설계한 후 선급 승인시 추가적인 요구로 보강판의 치수가 결정되었지만, 제안된 응력범위 추정식을 이용하면 보강판의 피로강도 계산이 파랑하중해석 및 전선구조해석을 수행하지 않고 가능해지므로 초기 설계단계에서 상갑판 해치코너 보강판의 치수 결정을 할 수 있을 것으로 사료된다.

해치코너 보강판의 응력분포는 수직굽힘모멘트, 수평굽힘모멘트 및 비틀림 모멘트가 조합된 하중 상태에서는 선박의 길이 방향의 응력만을 가지고 해치 코너부의 응력을 추정하기에 한계가 있고, 횡부재의 응력분포 및 강성에 의한 구속효과까지 고려해야 하므로 응력범위 추정식은 단일 수밀격벽, 이중 수밀격벽 그리고 지지 격벽으로 나누어 제안하였다.

컨테이너 운반선의 대형화는 급격하게 진행되고 있기 때문에 현재까지 설계된 8,000 TEU 급 이상의 컨테이너 운반선이 많지 않으므로 향후 설계될 대형 컨테이너 운반선에 대한 추가적인 검증 및 10,000 TEU 급 이상의 대형 컨테이너 운반선의 적용 가능성에 대한 검토가 요구된다.

참 고 문 헌

- 박성환, 이탁기, 이영만, 우제혁, 이희중, 2001, " 컨테이너선의 비틀림 강도 해석에 관한 연구," 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 327-333.
- 정병훈, 류홍렬, 최병기, 2005, " 초대형 컨테이너선의 구조 설계를 위한 비선형 파랑하중 생성 및 적용," 대한조선학회 특별논문집, pp. 15-21
- 한국선급, 2005, 선급 및 강선규칙 적용지침 7 편 4 장 2 절 202.
- American Bureau of Shipping, 2005, Rules for Building and Classing Steel Vessels. Part 5

Chapter 5 Section 3 5.1.5.

- Det Norske Veritas, 2005, Rules for Ships. Part 5 Chapter 1 Section5 B206.
- Elbatouti, A.M.T., Jan, H.Y. and Stiansen, S.G., 1976, Structural Analysis of a Containership Steel Model and Comparison with Test Results. Trans. SNAME, Vol.84.
- Germanischer Lloyd, 2004, Rule for Classification and Construction, I Ship Technology, Part 1 Seagoing Ship, Chapter 1 Hull Structures.
- Lloyd's Register of Shipping, 2004, Rules and Regulation for the Classification of Ships. Part3 Chapter8 Section15.
- Pedersen P.T., 1985, Torsional Response of Container Ships. Journal of Ship Research, pp. 194-205.
- Yong Han Pan and Sung Y. Lu, 1983, Increase of Warping Rigidity in Open Sections of a Containership by Stiffening Plates. Journal of Ship Research, pp. 265-270.



< 박 성 구 >



< 이 주 성 >