

선체구조물의 피로강도 해석기법



송재영*



신찬호**

1. 서론

1980년대 중반부터 건조된 제2세대 대형유조선의 선측 중늑골은 80년대 후반에 이르러 횡벽 및 트랜스버스 관통부에 균열이 발생하기 시작하였다¹⁾. 이러한 균열은 중늑골 면재의 용접결합부에서 시작하며 웨브를 관통하여 외판에 전파되면 선박에 치명적인 손상을 가할 수 있는 피로파괴의 대표적인 경우이다. 특히 고장력강이 사용된 선박은 부재치수경감에 의한 국부응력의 증가로 파랑변동하중에 대한 피로강도가 부족하여 용접결합부의 피로균열 발생 가능성이 증가된다. 이러한 피로손상은 산적화물선의 선측 중늑골에서도 발견되어 선체손상의 대표적인 원인이 되고 있다. 따라서 설계자는 설계시 선체구조에 대한 피로강도해석을 수행하고 피로수명을 미리 예측하여 선박의 수명동안 피로강도를 보장할 필요가 있다.

선체구조의 피로강도를 평가하기 위하여는 구조부재의 장기응력분포(long term stress distribution)와 S-N 선도에 대한 정확한 정보가 필요하다. 장기응력분포에는 선박이 일생동안 받는 모든 변동응력이 포함되어야 하며 이 응력분포를 산정하는 방법에 따라 피로해석은 스펙트럴 피로해석(spectral fatigue analysis)과 간이 피로해석(simplified fatigue analysis)로 나누어진다.

여기서는 선체구조의 피로강도를 평가하기 위하여 설계자가 초기 설계시 적용할 수 있는 간이 해석방법(그림 1)에 대하여 기술한다.

2. 피로설계하중

선체구조의 피로설계를 위하여는 다음과 같은 하중을 고려할 수 있다.

1) 정하중(static load) :

정수압(hydrostatic pressure)

* 한국선급 기술연구소 소장
** 한국선급 기술연구소 연구팀장

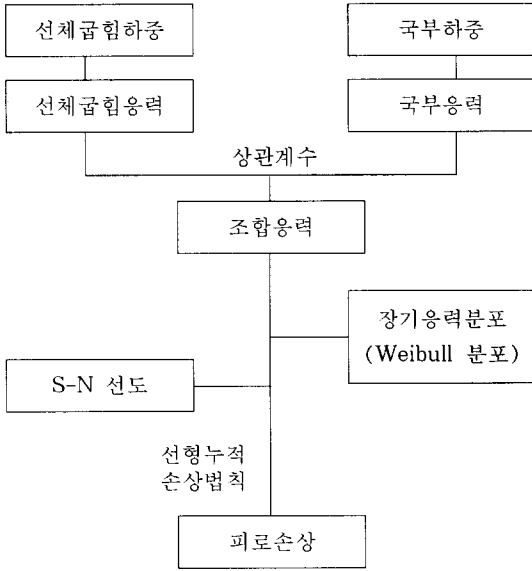


그림 1 간이해석방법

정수굽힘하중(still water bending loads)
용접잔류응력

- 2) 선체파랑굽힘하중(hull girder wave bending loads)
- 3) 국부파랑하중(local hydrodynamic loads)
- 4) 내압변동하중(internal fluctuating loads)
- 5) 충격하중:

선저슬래밍(bottom slamming)
휘핑(whipping)
슬로싱(sloshing)

상기 하중에서 변동하중들은 각각 극한하중(most probable extreme loads)일 필요는 없지만 조합응력(combined stress)은 극한응력(most probable extreme stress)을 나타내어야 한다. 그러므로 조합응력을 계산할 때는 구조부재의 위치에 따라 서로 다른 위상차를 고려하여야 하며, 변동하중은 피로수명 계산을 위하여 일관성 있는 확률(probability level)에서 고려되어야 한다.

3. 응력해석

일반적으로 피로강도해석에 사용하는 응력은

공칭응력(nominal stress), 집중응력(geometric stress, hot spot stress), 노치응력(notch stress) 등이며, 사용응력의 선택은 피로강도평가에 적용되는 S-N 선도의 응력과 일관성을 유지하도록 결정하여야 한다.

3.1 응력의 정의

3.1.1 공칭응력

공칭응력은 고려하는 위치에서 단면형상으로부터 계산되는 전체응력(global stress)이며 용접구조상세에 의한 국부응력의 증가 즉 구조의 기하학적 불연속 및 용접비드(weld bead) 형상에 의한 응력집중은 포함하지 않는다.

3.1.1.1 횡하중에 의한 공칭응력

일반적으로 트랜스버스(transverse) 고착부에서 종늑골 면재(flange)의 공칭응력은 보이론(beam theory)을 이용하여 균일분포 하중을 받는 양단 고정정보로 이상화하여 계산할 수 있다. 이 경우 보에는 판의 유효폭(effective breadth)이 고려되어야 하며 여기서 유효폭은 종늑골 간격으로 한다. 또한, 종늑골 단면의 비대칭형상에 의한 응력의 증가(warping effect)도 공칭응력에 포함되어야 한다.

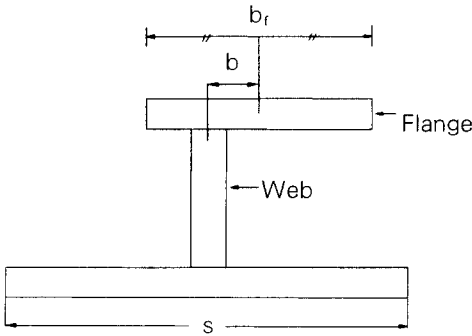
$$\sigma_{nom, l} = (1 + C_l) \frac{p_d s l^2}{12 Z_f}$$

- $\sigma_{nom, l}$: 공칭응력
- p_d : 파랑변동압력
- s : 종늑골 간격
- l : 트랜스버스 간격
- Z_f : 종늑골 면재에서의 단면계수

윗식에서 C_l 는 종늑골 단면의 비대칭 형상에 의한 응력증가 계수로서 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C_l = 1.68(0.38 + A_f/A_w)(e^2 + 0.28e)$$

$$e = \frac{b}{b_f}$$



A_w : 종늑골 웨브의 단면적

b : 종늑골 면재폭의 중심에서 웨브 중심까지의 거리

b_f : 종늑골 면재의 폭

3. 1. 1.2 축하중에 의한 공칭응력

축하중(axial load)은 선체굽힘(hull girder bending)거동에 의하여 발생하며, 여기서는 축하중에 의한 응력집중계수를 계산하기 위하여 종늑골의 공칭응력을 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma_{nom, a} = E \frac{\delta}{l}$$

E : 재료의 탄성계수

δ : 종늑골 길이 방향의 강제변위

l : 트랜스버스 간격

3. 1. 1.3 상대변위에 의한 공칭응력

고려하는 종늑골이 횡격벽에 고착된 경우 국부응력의 계산에는 횡격벽과 인접하는 트랜스버스 사이의 상대변위(relative deflection)가 고려되어야 한다. 여기서 상대변위에 의한 공칭응력은 부가적인 굽힘응력으로서 다음과 같이 정의한다.

$$\sigma_{nom, r} = \frac{6EI\delta}{Zl^2}$$

δ : 횡격벽과 트랜스버스 사이의 상대변위

EI : 종늑골의 굽힘강성(bending rigidity)

Z : 종늑골의 단면계수

l : 트랜스버스 간격

일반적으로 횡격벽과 트랜스버스 사이의 상대변위는 선창해석(hold analysis)을 통하여 계산할 수 있지만, 상대변위가 계산되지 않은 경우에는 횡하중에 의한 공칭응력의 50%를 상대변위에 의한 공칭응력으로 고려할 수 있다¹⁾.

$$\sigma_{nom, r} = 0.5 \sigma_{nom, l}$$

그러나 횡격벽 전후의 종늑골의 완만한 브래킷(soft nose bracket)으로 횡격벽에 결합된 경우에는 상대변위를 고려하지 않아도 좋다.

3. 1. 2 집중응력

집중응력은 공칭응력과 부재의 구조적 불연속에 의한 응력의 증가를 포함하는 응력으로 용접비드 형상 등 국부노치에 의한 응력집중 효과는 고려하지 않는다. 판구조에서 집중응력은 판두께 방향으로 선형 분포하며 막응력(membrane stress)과 셸 굽힘응력(shell bending stress)으로 구분된다²⁾. 일반적으로 집중응력은 공칭응력보다 크지만 구조의 불연속 지점으로부터 충분히 떨어진 위치에서는 공칭응력과 동일하다.

용접구조에서 응력집중부(hot spot region)는 피로균열이 발생하는 위치 즉 용접토우(weld toe)이며 이 지점에서의 총응력은 노치응력으로 정의한다. 노치응력은 판두께 방향으로 비선형 분포하며 여기서 용접비드와 같은 노치효과에 기인하는 응력증가를 제외하면 집중응력을 구할 수 있다.

집중응력을 구하기 위하여는 유한요소법을 사용하여 구조해석을 수행하며 노치효과를 제거하기 위하여 용접토우에서 충분히 떨어진 위치의 응력을 이용하여 선형외삽법(linear extrapolation)으로 구한다. 또한, 용접토우 근처의 응력분포는 사용된 유한요소의 크기와 종류에 따라 영향이 매우 크므로 일관성 있게 사용되어야 한다.

3. 2 유한요소해석

일반적으로 대형 유조선에서 종늑골의 구조해석을 위한 유한요소 모델(그림 2)의 범위는 다

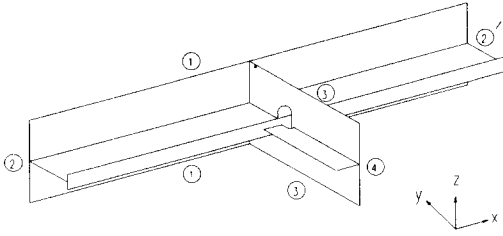


그림 2 종늑골의 구조해석 모델

음과 같다.

- 길이 방향으로서는 트랜스버스 전후에 각각 트랜스버스 간격의 1/2
- 폭 방향으로서는 트랜스버스 단부까지
- 깊이 방향으로서는 상하 각각 종늑골 간격의 1/2

구조부재는 4절점 쉘요소로 모델링하며, 응력 집중부에서는 종늑골 면재 두께 t 정도의 사각형 요소($t \times t$)를 사용한다. 용접비드는 유한요소 모델에 포함하지 않으며 구속되는 경계조건은 선중 및 하중조건에 따라 표 1 및 표 2와 같이 적

표 1 횡하중에 의한 종늑골의 경계조건

	①	② & ②'	③	④
단일선각 (Single hull)	Dz Rx, Ry	Dx Ry, Rz	Dy, Dz Rx, Ry	Ry
이중선각 (Double hull)	Dz Rx, Ry	Dx Ry, Rz	Dx, Dy, Dz Rx, Ry, Rz	Ry

D : 변위(Displacement), R : 회전(Rotation)

표 2 축하중에 의한 종늑골의 경계조건

	①	②	②'	③	④
단일선각 (Single hull)	Dz Rx, Ry	Ry, Rz	Dx Ry, Rz	Dy, Dz Rx, Ry	Ry
이중선각 (Double hull)	Dz Rx, Ry	Ry, Rz	Dx Ry, Rz	Dy, Dz Rx, Ry, Rz	Ry

D : 변위(Displacement), R : 회전(Rotation)

용한다.

종늑골 면재와 트랜스버스 보강재의 용접 결합부에서 집중응력을 구하기 위하여는 종늑골 웨브와 면재의 연결부에 따라 길이 방향의 표면응력 (surface stress) 분포가 필요하다. 이 응력분포를 구하기 위하여 여기서는 구조적 불연속 지점인 종늑골 웨브와 면재의 연결부에 강성이 거의 없는 가상의 보(fictitious beam)를 길이 방향으로 부착하고 구조 해석을 수행하여 보요소 응력 (beam element stress)을 계산한다. 이 경우 구조해석에서는 전단강성(shear flexibility)을 고려한다.

용접토우에서의 집중응력을 구하기 위하여는 그림 3과 같이 유한요소 모델에 용접 각장(weld leg length)의 약 6mm인 용접비드를 가정하고 노치영향을 제거하기 위하여 이 용접토우에서 $t/2$ 와 $3t/2$ 떨어진 위치의 응력을 사용하여 선형외삽법으로 계산한다. 따라서 집중응력은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_{hot} = \frac{3\sigma(t/2) - \sigma(3t/2)}{2}$$

여기서 용접토우로부터 x 떨어진 지점의 응력은 다음과 같이 lagrange 보간법을 이용하여 계산한다.

$$\sigma(x) = c_1(x)\sigma_1 + c_2(x)\sigma_2 + c_3(x)\sigma_3 + c_4(x)\sigma_4$$

$$c_1(x) = \frac{(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)}$$

$$c_2(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)}$$

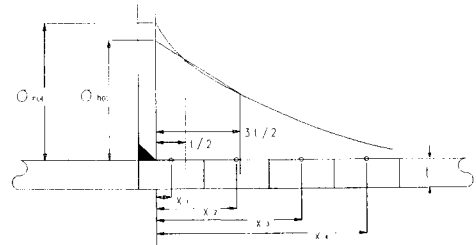


그림 3 집중응력의 산정

$$c_3(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)}$$

$$c_4(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)}$$

윗식에서 $\sigma_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ 는 각각 용접토우로부터 x_1, x_2, x_3, x_4 떨어진 지점의 보요소 응력이다.

3.3 응력집중계수

일반적으로 기하학적 응력집중계수(geometric stress concentration factor) K_s 는 다음과 같이 집중 응력 σ_{hot} 과 공칭응력 σ_{nom} 의 비로 정의하며

$$K_s = \frac{\sigma_{hot}}{\sigma_{nom}}$$

하중방향에 따라 서로 다른 응력집중계수를 적용하여야 한다. 따라서 선체구조부재에 대한 응력집중계수로는 축하중에 의한 응력집중계수 $K_{s,a}$, 횡하중에 의한 응력집중계수 $K_{s,l}$, 상대변위에 의한 응력집중계수 $K_{s,r}$ 등을 정의할 수 있다. 그러나 여기서 상대변위에 의한 응력집중계수는 횡하중에 의한 응력집중계수와 동일한 것으로 간주한다.

$$K_{s,r} = K_{s,l}$$

그러므로 고려하는 선체구조부재에 대한 공칭 응력을 구하면 해당 구조상세에 대하여 산정된 응력집중계수를 이용하여 다음과 같이 집중응력을 계산할 수 있다.

$$\sigma_{hot, l} = K_{s, l} \sigma_{nom, l}$$

$$\sigma_{hot, g} = K_{s, a} \sigma_{nom, g}$$

$$\sigma_{hot, r} = K_{s, l} \sigma_{nom, r}$$

여기서 $\sigma_{nom, g}$ 는 선체굽힘하중에 의한 선체길이 방향의 공칭응력으로 수직파랑굽힘모멘트(vertical wave bending moment)와 수평파랑굽힘모멘트(horizontal wave bending moment)를 고려하여 계산한다.

3.4 변동응력의 장기분포

피로수명을 계산하기 위하여는 선박의 수명 20년에 대하여 선체구조부재에 대한 총 변동응력의 장기분포(long term distribution of stress range)를 결정하여야 한다. 총 변동응력은 파랑 하중, 선체굽힘거동, 상대변위 등에 의한 변동응력의 조합으로 다음과 같이 계산한다.

$$\sigma_0 = \sigma_{hot, l} + \sigma_{hot, r} + \phi \sigma_{hot, g}$$

여기서 ϕ 는 국부응력과 선체굽힘응력의 상관 계수(correlation factor)로서 $\phi = 0.6$ 으로 하며, 총 변동응력 σ_0 은 확률 10^{-4} 에서 산정한다.

선체구조부재에 대한 변동응력의 장기분포는 2계수 Weibull분포에 의하여 나타낼 수 있으며, 이 경우 피로수명은 Weibull형상계수(shape parameter)의 변화에 대단히 민감하다. Weibull 형상계수는 선종, 구조부재의 위치, 해상환경 등에 따라 다르므로 스펙트랄 해석(spectral analysis) 또는 실선계측에 의하여 정확하게 계산할 수 있지만 여기서는 종늑골에 대한 Weibull 형상계수 ξ 를 다음과 같이 선박의 길이의 함수로 나타낸다³⁾.

$$\xi = 1.1 - 0.35 \frac{L-100}{300}$$

또한, 선체굽힘응력과 국부응력이 조합된 총 응력의 장기분포는 국부응력의 장기분포에 따른다고 가정한다.

4. 피로해석

4.1 집중응력방법

일반적으로 S-N 선도에 사용되는 응력은 작용 하중과 시험편의 단면형상에 의하여 결정되는 공칭응력이다. 따라서 공칭응력방법에서는 이에 적합한 공칭응력을 계산하고 구조상세에 해당하는 S-N 선도를 선정하여야 한다.

그러나 선체구조와 같은 복잡한 구조물에서 공칭응력을 산정하고 구조상세에 적합한 S-N 선도

를 적용하는 것은 용이하지 않을 수 있다. 따라서 이 경우에는 계측 또는 유한요소법을 이용하여 구조의 기하학적 불연속에 의한 집중응력을 계산하고, S-N 선도는 이 응력집중효과를 포함하지 않는 선도를 적용하는 집중응력방법(hot spot stress approach)이 유리하다. 그러나 이 경우 용접비드 형상 등 국부노치에 의한 응력집중효과는 적용하는 S-N 선도에 포함되어 있다고 간주한다.

집중응력방법을 이용하면 모든 구조상세에 대하여 1개의 S-N 선도를 적용할 수 있으므로 산정된 응력집중계수를 이용하여 집중응력을 계산하면 피로해석을 체계적으로 수행할 수 있다.

4.2 설계 S-N 선도

피로강도 해석에는 영국 에너지성(U.K. DE)에서 발행한 "Offshore Installations : Guidance on Design, Construction and Certification"⁴⁾에 주어진 "Basic Design S-N Curves for Non-nodal Joints"에서 집중응력방법에 적합한 D 선도를 적용한다.

여기서 설계 S-N 선도는 공기중에서 결정된 S-N 선도로 평균값에서 2배의 표준편차를 감한 선도, 즉 97.6%의 생존확률을 갖는 선도로 정의하며 Haibach 효과를 고려하여 $N=10^7$ 에서 기울기를 수정한다.

$$\log N = \log c - m \log \sigma \quad \text{for } N \leq 10^7$$

$$\log N = \log c' - m' \log \sigma \quad \text{for } N > 10^7$$

윗식에서 $\log c$ 와 $\log c'$ 은 각각 S-N 선도의 수명축 절편(life intercept), m 과 m' 은 S-N 선도

표 3 $\log c$, $\log c'$ 및 m m' 의 값

$N \leq 10^7$		$N > 10^7$	
$\log c$	m	$\log c'$	m'
12.182	3.0	15.627	5.0

의 음의 역기울기(negative inverse slope)이며 표 3과 같이 적용한다.

4.2.1 부식효과

밸러스트 탱크에서와 같이 해수에 노출되는 부재가 부식에 대하여 보호되지 않은 경우에는 공기중의 S-N 선도에서 수명을 1/2로 감소하여 사용하며, 이 경우 선도는 10^7 사이클에서 기울기를 수정하지 않는다.

$$\log N = \log c_i - m \log \sigma$$

여기서

$$\log c_i = \log c - \log 2$$

이며 $\log c$ 와 m 은 표 3을 따른다. 그러나 밸러스트 탱크 내부의 부재가 부식에 대하여 유효하게 보호된 경우 처음 10년은 공기중의 S-N 선도를 적용하고, 다음 10년은 부식을 고려한 S-N 선도를 적용할 수 있다. 이 경우 응력계산은 부식여유치(corrosion margin)를 포함한 치수 (As-built scantlings)로 수행한다.

4.2.2 두께효과

용접구조의 피로강도는 판 두께가 증가할 수록 감소하므로, S-N 선도는 판 두께가 22mm 이상인 경우 다음과 같이 수정한다.

$$\log N = \log c - \frac{m}{4} \log \left(\frac{t}{22} \right) - m \log \sigma$$

$$\text{for } N \leq 10^7$$

$$\log N = \log c' - \frac{m'}{4} \log \left(\frac{t}{22} \right) - m' \log \sigma$$

$$\text{for } N > 10^7$$

여기서 $\log c$, $\log c'$ 및 m , m' 은 표 3을 따른다.

4.2.3 평균응력효과

대부분의 피로시험은 응력비 $R \geq 0$ 인 인장응력

상태에서 실시되므로 피로수명을 감소시키는 인장평균응력의 영향이 S-N 선도에 포함되어 있다고 간주한다. 따라서 선체구조의 피로강도평가에 이러한 S-N 선도를 사용하는 경우에는 피로강도에 유리하게 작용하는 압축평균응력만을 고려한다. 이 지침에서는 평균응력의 유리한 점만 고려하여 평균응력이 압축인 경우에는 계산된 변동응력을 수정하여 $0.9\sigma_0$ 을 피로수명계산에 적용한다.

일반적으로 평균응력계산에는 선체굽힘하중과 국부하중을 고려하며, 이 경우 평균응력은 3.4에 따라 조합하여 총 평균응력을 구한다. 여기서 선체굽힘하중에는 정수굽힘모멘트와 수직과랑굽힘모멘트를 고려하고, 국부하중에는 정수압과 국부과랑하중을 고려한다.

4.3 피로손상계산

피로손상계산은 선형누적손상법칙(Miner-Palmgren rule)을 적용하며 누적피로손상도(cumulative fatigue damage ration) D 는 다음과 같이 계산한다.

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i}$$

여기서 n_i 는 i 번째 변동응력 사이클 수이며, N_i i 번째 변동응력에서 파단까지의 응력 사이클 수이다. 변동응력의 장기분포가 Weibull 분포에 따른다면 공기중에서의 누적피로손상도 D_{air} 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$D_{air} = \frac{N_i}{c'} \frac{\sigma_0^{m'}}{(lnN_0)^{m'/\xi}} \gamma\left(1 + \frac{m'}{\xi}, t_7\right) + \frac{N_i}{c} \frac{\sigma_0^m}{(lnN_0)^{m/\xi}} \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right) - \frac{N_i}{c} \frac{\sigma_0^m}{(lnN_0)^{m/\xi}} \gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}, t_7\right)$$

여기서 ξ 는 Weibull 형상계수이고, Γ 와 γ 는 각각 완전 감마함수(complete gamma function)와 불완전한 감마함수(incomplete gamma function)로 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt$$

$$\gamma(z, x) = \int_0^x t^{z-1} e^{-t} dt$$

또한, c , c' 및 m , m' 은 표 3을 따르며 t_7 은 다음과 같이 정의한다.

$$t_7 = \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_0}\right)^\xi lnN_0$$

윗식에서 σ_7 은 $N = 10^7$ 에서 공기중 S-N 선도의 변동응력을 나타낸다.

N_i 는 선박이 일생동안 받는 총 하중 사이클 수이며 보통 평균 주파수와 수명의 곱으로 나타낸다. 선박의 수명 20년에 대한 총 하중 사이클 수는 $0.5 \times 10^8 \sim 10^8$ 범위이며 여기서는 총 운항일수의 85%를 고려하여 다음과 같이 정의한다³⁾.

$$N_i = \frac{5.35 \times 10^8}{4logL}$$

또한, 변동응력 σ_0 은 확률 10^{-4} 에서 산정되었으며 이에 해당하는 응력 사이클 수는 $N_0 = 10^4$ 이다. 일반적으로 동일한 확률에서 결정된 σ_0 과 N_0 으로부터는 동일한 누적피로 손상도를 얻게 된다. 아울러 계산된 누적피로손상도는 D_{air} 를 이용하면 공기중에서의 피로수명은 $20/D_{air}(\text{years})$ 이 된다.

여기서 부식을 고려한 경우에 대한 피로손상은 다음과 같이 계산한다.

$$D_{cor} = \frac{N_i}{c_1} \frac{\sigma_0^m}{(lnN_0)^{m/\xi}} \Gamma\left(1 + \frac{m}{\xi}\right)$$

그러나 밸러스트 탱크 내부의 부재가 부식에 대하여 유효하게 보호되어 있는 경우에는 다음과 같이 누적피로손상도를 계산할 수 있다.

$$D = 0.5D_{air} + 0.5D_{cor}$$

4.4 허용변동응력

확률 10^{-4} 에서의 허용변동응력(allowable stress range) σ_{air} 은 누적피로손상도 $D=1$ 을 만족하

는 변동응력 σ_0 과 동일하며 이 경우 종극골의 소요단면계수(required section modulus)는 다음과 같이 계산한다.

$$Z_{req} = K_{s,i}(1+C_i) \frac{p_d S l^2}{12(\sigma_{all} - \phi \sigma_{hot,g} - \sigma_{hot,r})}$$

또한, 선박의 수명 20년(N_t)에 해당하는 허용 변동응력 σ_{20} 은 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$\sigma_{20} = \sigma_{all} \left(\frac{\ln N_t}{\ln N_0} \right)^{1/2}$$

5. 결 론

여기서는 설계자가 초기 설계시 적용할 수 있는 간이피로해석방법에 대하여 기술하였으며, 특히 선체의 각 구조상세에 대하여 산정된 응력집중계수를 이용하여 피로수명을 쉽게 평가할 수 있는 집중응력방법을 정립하였다. 이 집중응력방법을 사용하면 모든 구조상세에 대하여 한개의 S-N 선도를 적용하게 되므로 일관성 있는 피로상도해석을 수행할 수 있다. 또한, 피로수명에 큰 영향을 미치는 과량하중은 설계조건에 주어진 선급규칙에 따라 계산되어 진다.

선체구조의 피로강도평가 기술은 계측, 실험, 해석 및 경험을 포함하는 광범위하고 포괄적이면서 정밀함을 요구하는 종합기술이지만 여기에는

많은 불확실성이 내포되어 있다. 따라서 이를 규명하고 모든 선체구조에 적용할 수 있는 신뢰성 있는 피로강도 평가기술을 개발하기 위하여는 실선계측을 통한 피로하중규명 선체구조에 적용할 있는 피로강도 Data base개발, 균열진전해석 등 많은 과제에 대한 집중적인 연구가 계속 수행되어야 한다.

참 고 문 헌

1. Nippon kaijī Kyokai, "Cracking of HTS Longitudinals of VLCC", NK Report, 1991
2. International Institute of Welding, "Recommendations Concerning Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Components", IIW Document X III-1458-92/ X V-797-92, August 1994.
3. IACS, "Report on the Deveopment of a Unified Procedure for Fatigue Design of Ship Structures", February 1997.
4. U.K. Department of Energy, "Offshore Installations : Guidance on Design, Construcion and Certification ; Section 21 : Steet", fourth edition, London, January 1990.
5. Almar-Naess, A., "Fatigue Handbook", Tapir, 1985
6. 한국선급, "선급 및 강선규칙 적용지침", 1997 한국선급 