

## 論 文

大韓造船學會論文集  
第 31 卷 第 4 號 1994年 11月  
Transactions of the Society of  
Naval Architecture of Korea  
Vol. 31, No. 4, November 1994

### 선급 및 강선 규칙의 설계 파랑 하중 산식 개발 (II)

송재영\*, 전영기\*, 하태범\*

#### On the Development of Design Wave Loads in Classification Rules (II)

by

J. Y. Song\*, Y. K. Chon\* and T. B. Ha\*

#### 요 약

본 논문은 1993년 대한조선학회 논문집(제30권 제4호)에 제출했던 논문인 “선급 강선규칙의 설계 파랑하중 산식 개발 (I)” 에 이은 후속편이다.

한국 선급에 입급된 다양한 선종의 17척 선박을 선정하여 잘 알려진 Strip Theory를 이용한 선박의 내항 성능을 계산하고 단기예측과 장기예측의 통계해석을 수행하였다. 이의 결과들을 가지고 선박의 초기설계시 이용 가능한 주요 요목들(선박의 길이, 폭, 깊이, 흘수 등)만을 이용하여 선형 회귀 분석법을 통하여 설계자들이 이용 가능하도록 파랑하중에 관한 설계산식을 개발하였다. (I)편에 이어 본 논문에서는 첫째, 만재흘수선 상부 및 노출 갑판에 작용하는 파랑 압력에 관한 설계 산식을 제안하였으며 둘째, 선체 임의의 위치에서 사용할 병진운동 가속도와 회전 운동 가속도의 설계 산식을 제안하고 다른 선급 규칙과 비교하였으며, 마지막으로 선체 탱크내에 액체화물이나 건화물이 적재되었을 경우 요구되는 국부구조 설계 하중에 대한 산식을 제안하였다.

#### Abstract

As a subsequent work presented in Ref.[1] which deals with the global dynamic wave loads in the classification rules, further studies on such as the dynamic pressures above load waterline, motions and accelerations and other local design loads were carried out.

Frequency domain 2D linear strip theory is employed and statistical analyses for

발 표 : 1994년도 대한조선학회 춘계연구발표회 ('94. 4. 22.)

접수일자 : 1994년 5월 11일, 재접수일자 : 1994년 9월 12일

\* 정회원, 한국선급

the concerned ship responses were carried out for the 17 existing ships to derive simple and descriptive formula which can be used as a guidelines at preliminary design stage as well as a part of classification rules. The calculated results and thereby proposed formula are compared with those of other available data, and will be incorporated in the rules for steel ships of Korean Register of Shipping.

## 1. 서 론

참고 문헌 [1]에는 선급 강선 규칙에 있어서의 비선형 선체 종강도 하중, 외판의 파랑 하중, 비틀림에 의한 warping 용력 등에 대한 이론적인 배경을 조사하고 실선 계산을 통하여 이를 검증하였으며 선체 구조에 작용하는 용력의 선형 조합을 고려한 해당 파랑 하중 계산 산식들이 제안되었다. 또한 이들을 반영하여 한국 선급의 강선 규칙중 파랑 하중의 주요 부분에 대한 개정 작업 결과를 설명하였다.

본 논문에서는 위에서 다루어지지 않았던 국부 구조 설계를 위한 하중의 산정을 위하여 실선 17척에 대한 선체 운동, 가속도를 계산하였으며, 이 값들을 이용하여 해당 산식을 도출하고 동적 국부 하중을 정의하였다. 또한 수선 상부의 외판에 작용하는 파랑 하중 산식을 결정함으로써 선체 구조 설계에 반영하여야 할 대부분의 설계 하중들을 정의하였다.

위와 같은 설계 하중의 산식들은 결국 구조 부재의 치수 결정에 가장 큰 영향을 미치므로 선박의 수명과 용도에 따라 구조 부재의 안전성을 평가함에 있어 선결되어야 할 과제이다. 그러나, 설계 초기 단계에서는 선박의 주요 요목들만으로 이들 파랑 하중을 결정해야 하는 현실적인 어려움이 있게 되므로 경제적인 구조 설계를 위하여는 결국 규칙 산식에 의한 구조 부재들의 치수를 가지고 직접 계산법에 의한 구조 해석을 수행하는 과정도 필요하게 된다.

## 2. 노출 갑판 및 수선 상부 외판에 작용하는 파랑 수압

수선하 선체 외판에 작용하는 파랑 수압은 국부 외판 구조가 선박의 수명동안 겪을 수 있는 동압력의 최대값으로서 결정되어야 하며 이러한 사실에 기초하여 외판 부재의 각 위치에서  $10^{-8}$ 의 초과 확률 분포를 갖는 파랑 압력을 산정하는 방법이 있다. 그러나 이러한 방법은 결국 각 위치에서 동시에 최대 동압력이 작용하는 경우를 가정함으로써 국부 하중

이 과도하게 산출된다. 이를 고려하기 위하여 선급에서는 전통적으로 국부하중을 위한 설계파의 높이를 global하중을 위한 설계파 높이의 1/2로 사용하여 왔다. 최근에는 확률론적 설계 방법에 의하여 외판상의 각 위치에 따른 위상차를 고려하여 각 위치에서의 파랑 수압의  $10^{-4}$ 의 초과 확률 수준의 장기 예측값을 사용하는 방법[2]과 선체 Girder의  $10^{-8}$ 의 초과 확률 수준의 수직 굽힘 모멘트를 주는 설계파에 의한 외판 파랑 수압을 결정하는 두가지 방법을 사용하고 있다. 한국 선급에서는 Global 하중과 국부 하중의 위상차에 대한 불확실성을 배제하기 위하여 후자의 방법을 택하였음은 참고 문헌[1]에서 기술한 바와 같다.

한편 수선 상부의 경우에는 선체 양현의 흘수선에서의 파랑 수압은 입사파, 방사파, 산란파에 의한 압력의 총합이므로 이 값을 해수의 밀도와 중력의 곱인  $\rho \cdot g$ 로 나누어 주면 결국 선체와 파랑의 상대 높이, 즉 자유 수면의 상대적 상승 높이가 되며, 이 수두에 해당하는 파랑 정수압이 수선 상부의 외판 및 상갑판상의 green water 로서 작용하게 된다. 주의할 점은 이러한 자유 수면 상승 높이가 건현보다 커서 green water 효과가 생길 경우 수면 상부의 외판에서 건현 보다 큰 수두의 압력은 무의미하다는 것이다.

위와 같은 정적 수두의 개념으로 표현될 수 있는 수선 상부 외판 또는 상갑판상의 정압력은 동적인 상태에서 위상차를 고려하여  $10^{-4}$ 의 초과 확률을 가지는 장기 예측값을 사용하여 결정한 수면하 외판 압력과는 달리 수면상에서 선박의 수명을 고려한 정적 수두의 개념에서 설계 기준을 결정하는 것이 타당하며 이는 상갑판상의 green water에 의한 충격력의 영향을 정확히 산출하는 데 따른 어려움을 고려하여 안전한 설계를 하기 위한 방안이 될 것이다. 따라서 상갑판에서의 설계 파랑 하중은 흘수선에서의 국부 동압력의  $10^{-8}$ 의 초과 확률 분포를 갖는 장기 예측 수두값을 기준으로 이 값이 수면하 외판 파랑 압력의 흘수선에서의 값까지 높이에 따라 선형

변화하도록 하여, 수면 상부 외판 및 상갑판상에서의 압력으로 정의하였다. 즉 참고 문헌[1]로부터 중앙 단면의 흘수선에서의 압력은

$$P_f = 0.095L + 33.4 \quad (kN/m^2) \quad (1)$$

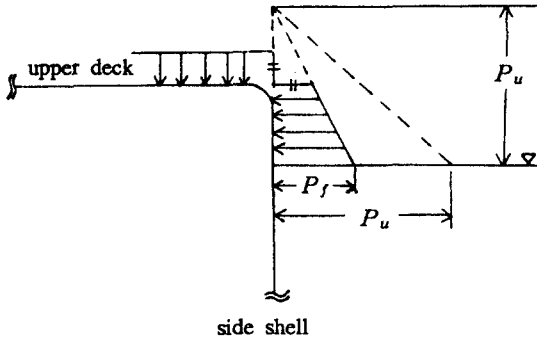


Fig.1 The pressure acting on upper deck and side shell above waterline

로 주어지며, 흘수선에서  $10^{-8}$ 의 초과 확률 분포를 갖는 장기 예측값은 17척에 대한 계산 결과를 선형 회귀 분석하면

$$P_u = 0.098L + 83.7 \quad (kN/m^2) \quad (2)$$

으로 나타낼 수 있게 된다. 이를 그림으로 도시하면 Fig.1과 같다. 위의 식에서  $L$ 은 선박의 길이를 나타낸다. 따라서 수선 상부 외판에 대한 파랑 압력은 선체 길이 방향에 대한 분포 계수  $K_1$  [1]을 고려하면

$$P = P_f \cdot K_1 (1 - 10h/P_u) \quad (kN/m^2) \quad (3)$$

로 나타내어진다. 여기서 상갑판의 경우  $h = D - d$  ( $D$ 는 선체 깊이,  $d$ 는 만재 흘수)의 값을 갖는다. 또한  $K_1$ 은 중앙부 0.4  $L$ 에서는 2.0, A.P.로부터 후부에서는 1.5, F.P.로부터 앞쪽으로는  $C_b$ 에 따라

$$K_1 = \frac{5.5 \cdot (0.85 - C_b)}{(1 - C_b^2)} + 2.0 \text{의 값을 갖는다[1].}$$

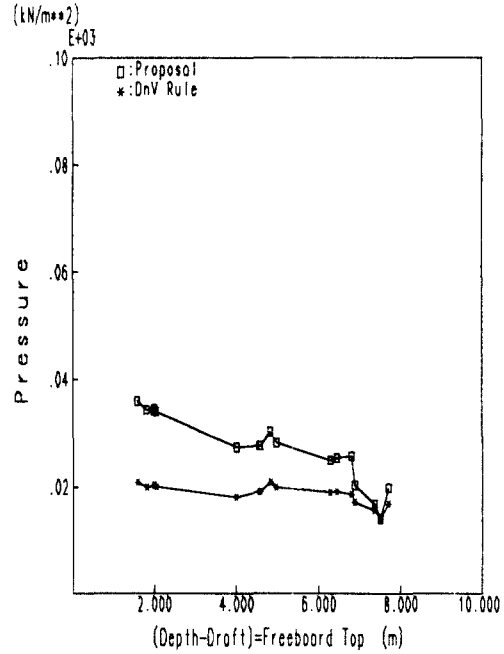


Fig. 2 The comparison of the pressure of freeboard top

위와 같은 결과를 실선에 대하여 DnV Rule [2]과 비교하여 Fig.2에 표시하였다. Fig.2에는  $h = D - d$  일 때, 즉, 상갑판에서의 외판 파랑 정수압을 보여주고 있는 데 건현이 작을 경우 제안식이 DnV값 보다 큰 값을 보이고 있으나 건현이 클수록 비슷한 경향을 보인다. Fig.3에는 선박의 길이에 따른 상갑판에서의 외판 파랑 정수압을 보여주고 있으며 선박 길이가 길수록 [2]의 결과와 좀 더 일치하는 경향을 보인다. 이는 선박 길이가 길수록 건현은 커지므로 Fig.2의 결과와도 일치함을 알 수 있다.

### 3. 파랑중에서 운동 및 가속도

이상과 같은 파랑에 의한 선체 외력외에도 국부구조 설계에서는 선체 내부의 화물에 의한 하중을 고려하여야 하며, 따라서 선체 운동 및 가속도의 산정이 필요하다. 이들은 모든 자료가 마련되는 설계 완성 단계에서는 이론적으로 정확히 추정할 수 있겠으나 설계 초기 단계에서 설계의 지침으로 사용하기 위하여는 기본 요목에 의한 근사 추정값을 산출하여야 하며 따라서 실선에 의한 계산치로부터 추정식을 도출하기 위한 작업이 필요하게 된다.

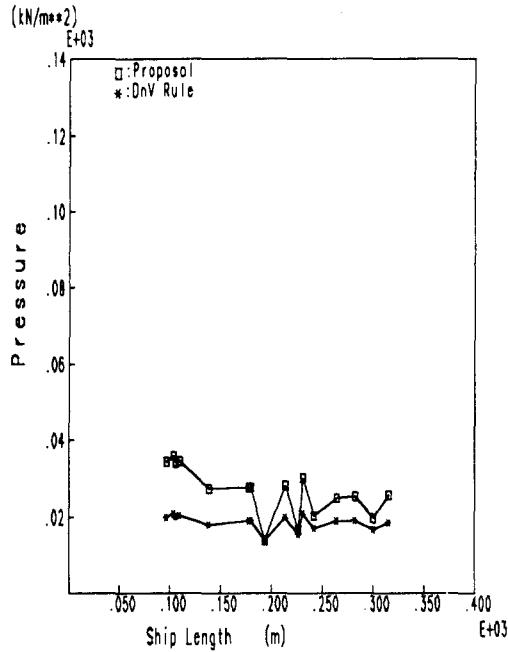


Fig. 3 Pressure vs. ship length

3.1 연직면 운동 및 가속도

Fig.4에는 실선들에 대한 LCG에서 연직 가속도의 장기 예측값을 선박의 길이에 따른 각 선속에서 계산한 결과를 보여주고 있으며(0Kts, 10Kts, 20Kts) 길이가 길수록 속도의 영향이 작아짐을 알 수 있는 데 이러한 사실을 감안하여  $1/L$  및  $1/\sqrt{L}$ 로 선형 회귀 분석하여 선속의 영향을 고려하면 연직 가속도를 다음과 같이 정의할 수 있다. 즉,

$$a_z = \frac{V^{1.2}}{2\sqrt{L}} + \frac{361}{L} + 0.49 \quad (m/sec^2) \quad (4)$$

Fig.4에는 실선에 대한 계산값과 식 (4)에 의한 계산값을 보여주고 있다. 한편 중동요 운동의 경우 상하 운동과는 달리 선속에 의한 영향이 크지 않음을 알 수 있어서 Froude No. 0.1을 기준으로 ( $1/L$ )에 대하여 선형 회귀 분석을 하면

$$\theta = \frac{19.62}{L} + 0.022 \quad (rad) \quad (5)$$

로 정의할 수 있는 데 Fig. 5에는 위와 같은 결과와 참고 문헌[3]의 비교 결과를 보여주고 있다. 또한

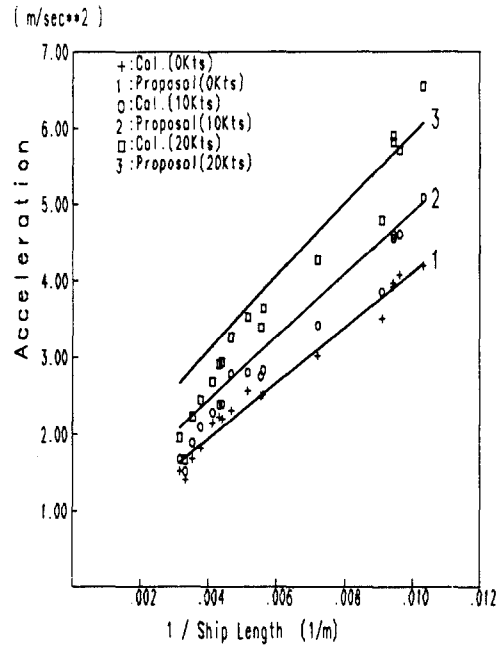


Fig. 4 Heave acceleration

중동요 주기의 경우에는 중동요 운동 방정식으로부터 주기를 선박의 주요 형상 계수들로 표현하고 이들에 대한 근사값[4]을 사용하여 산식을 결정하였다. 즉,

$$T_\theta = 2\pi \left( \frac{I_{\theta\theta} + A_{\theta\theta}}{C_{\theta\theta}} \right)^{1/2} \approx 1.86 \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (sec) \quad (6)$$

여기서  $I_{\theta\theta}, A_{\theta\theta}, C_{\theta\theta}$ 는 각각 중방향의 관성 모멘트, 부가 관성 모멘트 및 복원 모멘트를 나타내며, 실선 자료들로부터 식 (6)을 유도하는 과정에서 실선들의 형상 자료들을 이용하여  $\sqrt{dC_b/C_{LL}} \approx 1.0$ 을 사용하였다. ( $d$ 는 흘수,  $C_b$ 는 방형 비척 계수,  $C_{LL} = I_L/L^3 B I_L = \nabla \overline{BM}_L$ 로서 수선면의 중방향 관성 모멘트) 식 (5),(6)으로부터 중동요에 의한 설계가속도는

$$a_\theta = \theta \cdot \left( \frac{2\pi}{T_\theta} \right)^2 \cdot l_\theta \quad (m/sec^2) \quad (7)$$

로 표현될 수 있다. 여기서  $l_\theta$ 는 무게 중심으로부터 선체의 고려하는 위치까지의 거리이다.

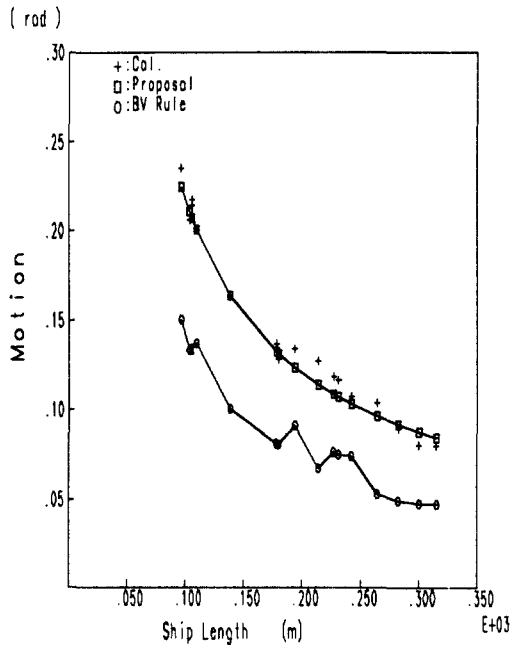


Fig. 5 Pitch motion

3.2 수평면 운동 및 가속도

Sway 및 yaw에 의한 가속도는 pitch에 의한 가속도와 마찬가지로 선속의 영향이 거의 없으며 실선에 대한 계산 결과를 (1/L)로 선형 회귀 분석하면 각각

$$a_y = \frac{178}{L} + 0.36 \quad (m/sec^2) \quad (8)$$

$$a_\psi = \left(\frac{6.95}{L} - 0.017\right) \cdot l_\psi \quad (m/sec^2) \quad (9)$$

이 되며 실선에 대한 계산값, 식 (8),(9)에 의한 값 및 참고 문헌 [2]의 결과를 Fig.6,7에 표시하였다. Fig.7의 경우 가속도는 LCG에서의 값을 나타낸다.

3.3 횡동요 운동 및 가속도

횡동요 운동의 경우에는 조파 감쇄력 뿐 아니라 점성 감쇄력의 영향을 고려하여야 함은 잘 알려진 사실이며 이에 대하여는 실험 결과에 근거한 실용적인 방법들[5]을 사용하고 있다.

여기서는 IMO Res. A.562 [6]가  $10^{-8}$ 의 초과 확률 분포를 갖는 횡동요 운동을  $C_b, L, B, d$  및 기타 형상 계수들을 사용하여 정의하고 있어 이들 형상계수들을 실선 data로 근사시켜서 식을 유도하였다.

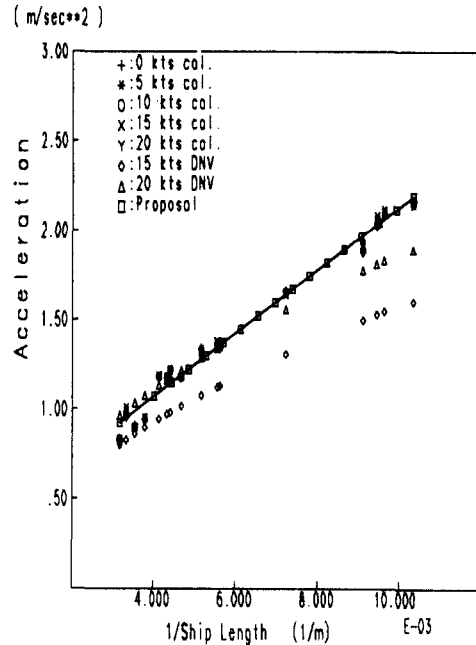


Fig. 6 Sway acceleration

횡동요 주기와 횡동요 운동은 각각

$$T_\phi = \frac{2C_f \cdot B}{\sqrt{GM_T}} \quad (sec) \quad (10)$$

$$\phi = k \cdot C_s \cdot f \cdot \sqrt{0.131 - 0.005 T_\phi} \quad (rad) \quad (11)$$

으로 나타내지고, 횡동요에 의한 설계 가속도는

$$a_\phi = \phi \cdot \left(\frac{2\pi}{T_\phi}\right)^2 \cdot l_\phi \quad (m/sec^2) \quad (12)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 위 식들의 각 계수들은

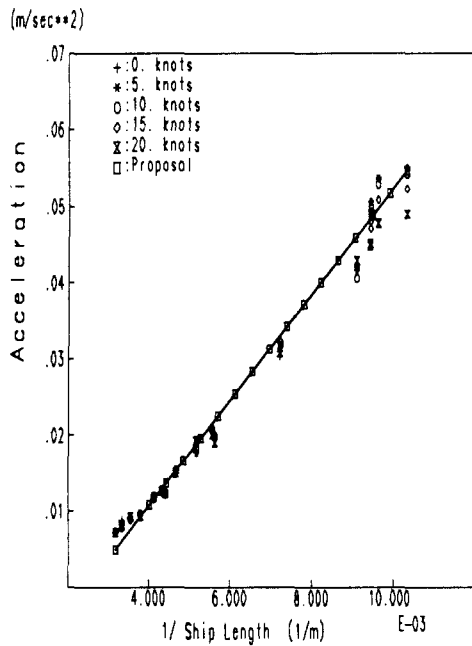


Fig. 7 Yaw acceleration

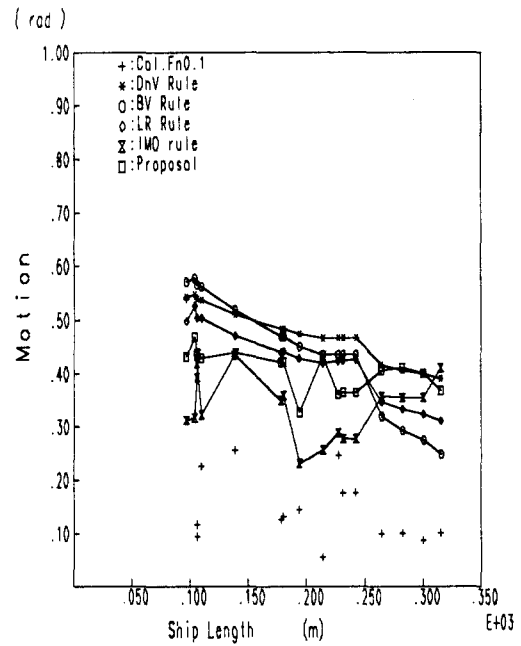


Fig. 8 Roll motion

$$C_f = 0.373 + 0.023 \left( \frac{B}{d} \right) - 0.043 \left( \frac{L}{100} \right)$$

$\overline{GM}_T$  = 횡메타 센터 높이로서

$$= 0.12 B (\text{유조선 및 산적화물선})$$

$$= 0.07 B (\text{기타 선박})$$

$$k = 1.0 (\text{빌지킬이 없는 선박})$$

$$= 0.8 (\text{빌지킬이 있는 선박})$$

$$C_s = 0.82 (\text{산적화물선 및 유조선})$$

$$= 0.96 (\text{기타 선박})$$

$$f = 0.86 + 2.72 \cdot C_b - \left( \frac{B}{d} \right) (0.11 + 0.34 C_b)$$

과 같이 정의되고  $l_\phi$ 는 횡동요 회전 중심으로 부터 고려하는 위치까지의 거리이다. 또한  $6 \leq T_\phi \leq 20$ ,  $0.45 \leq C_b \leq 0.7$ ,  $2.4 \leq \left( \frac{B}{d} \right) \leq 3.0$ 로 하여 범위를 벗어날 경우에는 한계값으로 한다. 위의 계산 결과를 IMO Res.A.562 와 타 선급 규칙과 비교하여 Fig.8 에 보였는데 IMO Res.A.562 의 값보다는 크며 타 선급 규칙보다는 작은 값을 보여준다.

### 3.4 선급 규칙에의 반영

이상과 같은 가속도 및 선체 운동 변위에 의하여 유발되는 하중은 결국 파랑 하중과 같이 구조 부재에 작용하게 되는 데, 이들을 압력 형태로 나타내면 다음과 같다. 즉 고려하는 위치에서의 조합 연직 가속도는 식 (4),(7),(12)로 부터

$$a_v = \sqrt{a_z^2 + (a_\phi \cos \phi)^2 + (a_\theta \cos \theta)^2} \quad (m/sec^2) \quad (13)$$

이 되며 액체 화물 탱크의 바닥 하중의 경우 중력 가속도 및 식 (13)에 의한 연직 가속도에 의하여

$$P = \rho_c (g + 0.5 a_v) \cdot h \quad (kN/m^2) \quad (14)$$

으로 표현될 수 있다. 식(14)에서  $a_v$ 의 factor 0.5 는 앞에서 구한  $a_v$ 가  $10^{-8}$ 의 초과 확률 분포를 갖는 가속도이므로 참고 문헌[1]에서 논의된 바와 같이 국부 하중의 확률 수준은 선체 거어더에 작용하는 하중 확률 수준의 1/2을 사용하였기 때문에 이 경우에도  $10^{-4}$ 의 초과 확률 분포의 값으로 낮춰주기 위함이다. 또한  $h$  는 액체 화물의 수두 그리고  $\rho_c$

는 액체화물의 밀도이다.

한편 종 또는 횡격벽의 경우 횡요 또는 종요 운동에 의하여 유기되는 압력은

$$P = \rho_a g (h_s \cos \frac{\phi}{2} + b \sin \frac{\phi}{2}) \quad (kN/m^2) \quad (15)$$

$$P = \rho_a g (h_s \cos \frac{\theta}{2} + b \sin \frac{\theta}{2}) \quad (kN/m^2) \quad (16)$$

으로 표현될 수 있다. 여기서  $h_s$ 는 하중점으로 부터 고려하는 탱크 정판까지의 거리이며,  $b \sin \frac{\phi}{2}$ ,

$h_s \sin \frac{\theta}{2}$ 는 각각 횡, 종동요 운동  $\frac{\phi}{2}$ ,  $\frac{\theta}{2}$ 에

의하여 유기되는 액체화물의 부가 수두를 나타낸다.

한편 건화물에 의한 탱크 바닥 또는 경사면에 작용하는 하중은

$$P = \rho_a (g + 0.5 a_v) \cdot K_R \cdot h_b \quad (kN/m^2) \quad (17)$$

가 된다. 여기서  $h_b$ 는 건화물의 높이,  $K_R$ 은 경사면에 수직으로 작용하는 압력과 수평면에 연직으로 작용하는 압력의 비로서

$$K_R = \cos^2 \alpha + \tan^2 (\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}) \sin^2 \alpha \quad (18)$$

가 된다. 위 식에서  $\alpha$ 는 경사면과 수평면이 이루는 각도이다.

#### 4. 결 론

참고 문헌 [1] 및 전술한 바대로 선체 구조 부재에 걸리는 대부분의 내, 외측 하중을 등가 정하중으로 정의하여 선급 강선 규칙에 반영하고자 하였다.

이는 또한 초기 설계 단계에서 설계 지침으로도 유용할 것으로 생각된다. 한편 slamming 또는 sloshing에 의한 충격력에 대하여는 현재 연구가 진행중이며 다만 sloshing의 경우 탱크내의 sloshing 주기와 선체 운동의 고유 주기가 일치하지 않도록 tank size의 한계를 주어 이를 잠정적으로 반영할 예정이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 송재영, 전영기, 하태범, "선급 및 강선 규칙의 설계 파랑 하중 산식 개발 (I)," 대한조선학회 논문집 Vol.30, No.4, 1993
- [2] Det Norske Veritas, "Rules for Classification of Steel Ships, Part 3, Hull Structural Design," DnV, Jan., 1991
- [3] Bureau Veritas, "Rules for Ships, Hull Structure Part II-A," BV, 1990
- [4] E.V.Lewis, "Principles of Naval Architectures," 2nd Revision, SNAME
- [5] Y.Himeno, "Prediction of Ship Roll Damping, - State of the Art," Univ. of Michigan, Report 239, 1981
- [6] IMO, "해상 인명 안전 협약 관련 결의집", 한국 선급, 1987