

# 횡압력을 받는 실선 보강판의 평균압축강도

정준모<sup>1,†</sup> · 전상익<sup>1</sup> · 이민성<sup>1</sup> · 남지명<sup>1</sup> · 하태범<sup>2</sup>  
인하대학교 조선해양공학과<sup>1</sup>  
한국선급 기술연구원<sup>2</sup>

## Average Compressive Strengths of Stiffened Plates for In-Service Vessels Under Lateral Pressure

Joonmo Choung<sup>1,†</sup> · Sang-Ik Jeon<sup>1</sup> · Min-Seong Lee<sup>1</sup> · Ji-Myung Nam<sup>1</sup> · Tae-Bum Ha<sup>2</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University<sup>1</sup>  
Research and Development Center, Korean Register of Shipping<sup>2</sup>

### Abstract

This paper presents estimation of average compressive strengths of three types of stiffened panels under lateral pressure and axial compression based on simplified formulas from CSRs and nonlinear FEAs. FEA scenarios are prepared based on the slenderness ratios of the stiffened panels used for in-service vessels. The seven step lateral pressures by 1bar increment are imposed on FE models assuming maximum 30m water height. The number of FEAs for FB-, AB-, and TB-stiffened panels is totally 189 times. FEA results show that existence of pressure can evolve significant reduction of ultimate strengths, meanwhile CSR formulas do not take into account the lateral pressure effect. Lateral pressure acting on the stiffened panel with higher column slenderness ratio more reduces the ultimate strengths than those with smaller column slenderness ratio. A new concept of relative average compressive strain energy instead of the ultimate strength is introduced in order to rationally compare the average compressive strength through complete compressive straining regime. The differences of the ultimate strengths between CSR formulas and FEA results are relatively small for FB- and AB-stiffened panels, but larger discrepancies of relative average compressive strain energies are shown.

**Keywords** : Stiffened panel(보강판), Average compressive strength(평균압축강도), Ultimate strength(최종강도), Slenderness ratio(세장비), Relative average compressive strain energy(상대평균압축변형률 에너지), Lateral pressure(횡압력)

## 1. 서론

보강판(stiffened plate 또는 stiffened panel)에 대한 압축강도(compressive strength)를 예측하는 목적은 첫째, 국부 구조(local structure)의 관점에서 보강판에 작용하는 조합 하중(압축하중, 이축하중, 횡압력, 전단하중 등)의 효과로 인한 보강판 자체의 최대 강도(ultimate strength)를 예측하기 위함이고 둘째, 전체 구조(hull structure)의 관점에서 선체의 최대 굽힘모멘트(ultimate hull girder bending moment)를 추정코자 선체를 이루는 보강판 요소의 평균압축강도를(average compressive strength) 예측하기 위함이다.

보강판의 압축강도에 대한 전세계적인 연구 동향을 살펴보면, 평균압축강도에 대한 연구보다는 최종강도에 대한 연구가 상당히 많이 수행되었으며, Lin (1985), Paik and Thayamballi (2002), Lee (1989), Cho, et al. (1998), Paik and Kim (2002) 등은 보강판의 최종강도를 예측하기 위한 간이식을 제안하기도 하였다. 반면 보강판의 평균압축강도에 대한 연구는 Cho, et al. (1998),

Paik and Kim (2002), Paik and Thayamballi (2002), Gordo, et al. (1996) 등에 의하여 수행된바 있다. PMA(permanent mean of access)의 강제 설치로 인하여, 최근에는 유공판 또는 유공 보강판에 대한 연구도 많이 진행되고 있다 (Lee, et al., 2010; Ahn, et al., 2010). IACS(2010a, b)는 비손상 선체의 굽힘모멘트-곡률 선도 추정을 위하여 증분-반복법 (incremental-iterative approach)의 사용을 권장하며, 보강판 요소의 평균압축강도 간 이식 (이하 CSR 간이식으로 통칭)을 붕괴 모드별로 제시하고 있다.

국제해사기구(IMO, international maritime organization)를 통하여 제안된 신개념 선박 건조 기준(GBS, goal based standard)에서는 모든 선박에 있어서 선체의 중대 손상(major damage) 시 잔류 종강도(residual ultimate strength)와 경미 손상(minor damage)에 의한 주변 보강판 구조의 건전성(잉여 강도, structural redundancy)이 기능적 요건(functional requirement)으로 만족되어야 한다고 명시하고 있다. 경미 손상에 의한 잉여 강도의 경우 손상 보강판의 최종강도 감소량을 예측해야 하고, 중대 손상에

의한 잔류 종강도의 경우 보강판 요소의 평균압축강도의 예측이 중요하다.

따라서 본 논문은 손상 선박의 선체 굽힘모멘트를 증분-반복법을 적용하여 예측하기 위하여 많이 사용되고 있는 CSR 간이식의 정확도를 제시하고자 한다. 이를 위하여 횡압력을 받는 보강판의 유한요소해석을 실시하여 CSR 간이식과 비교하고, 간이식의 유효성에 대하여 검증한다.

## 2. CSR 간이식

IACS CSRs(2010a, b)는 선체의 최종 굽힘모멘트를 예측하기 위하여 증분-반복법을 이용할 것을 추천하고 있으며, 보강판 요소의 압축 최종강도를 예측하기 위한 간이식도 변형 모드별로 제공하고 있다.

식 (1)의 경우, 양변이 단순 지지된 기둥이 압축하중에 의하여 기동형 붕괴 모드를 나타낼 경우 적용 가능한 간이식으로서 보강재의 종류에 관계없이 적용이 가능하다. 식 (2)의 경우에는 양변이 단순 지지된 기둥이 양단 모멘트 하중에 의하여 횡비틀림 붕괴 모드를 나타낼 때 적용이 가능하다. 식 (4)의 경우, FB-보강판(flat bar stiffened panel) 웨브의 국부 붕괴 모드(통상 트리핑(tripping) 모드라 불림)를 나타내며, 동일 모드라 할지라도 AB-보강판(angle bar stiffened panel) 및 TB-보강판(tee bar stiffened panel)의 경우에는 식 (3)을 적용해야 한다. 식 (5)의 경우, 보강재로 구획된 판부재의 붕괴 모드를 나타내므로 보강판에 적용할 수 없다. 마지막으로, 식 (6)은 인장 변형률 또는 압축 변형률에 따라 결정되는 계수를 의미한다.

주어진 보강판에 적용이 가능한 간이식을 결정하기 위해서는, 평균압축강도 이력을 관찰하여 최종강도의 최소치가 발생하는 모드를 적용하는 것이 일반적이다.

$$\sigma_c = \Phi \sigma_{c1} \frac{A_s + A_{pc}}{A_s + A_p} \quad (1)$$

$$\sigma_c = \Phi \frac{A_s \sigma_{c2} + A_p \sigma_{ep}}{A_s + A_p} \quad (2)$$

$$\sigma_c = \Phi \sigma_0 \frac{b_e t_p + b_{we} t_w + b_f t_f}{b t_p + b_w t_w + b_f t_f} \quad (3)$$

$$\sigma_c = \Phi \frac{A_p \sigma_{ep} + A_s \sigma_{c4}}{A_p + A_s} \quad (4)$$

$$\sigma_c = \text{MIN} \left( \Phi \sigma_0 \left[ \frac{b \left( \frac{2.25}{\beta_c} - \frac{1.25}{\beta_c^2} \right)}{+ 0.1 \left( 1 - \frac{b}{a} \right) \left( 1 + \frac{1}{\beta_c^2} \right)^2} \right], \Phi \sigma_0 \right) \quad (5)$$

$$\Phi = \begin{cases} \varepsilon & \text{for } 0.0 \leq \varepsilon \leq 1.0 \\ 1.0 & \text{for } \varepsilon > 1.0 \end{cases} \quad (6)$$

- $\sigma_c$  : 보강판의 평균압축강도
- $\sigma_{c1}$  : 기동형 붕괴 모드의 탄성 좌굴 강도(판재 유효폭 기준)
- $\sigma_{c2}$  : 횡비틀림 붕괴 모드의 탄성 좌굴 강도(판재 전폭 기준)
- $\sigma_{c4}$  : 보강재 웨브 국부 붕괴 모드의 탄성 좌굴 강도(보강재 전높이 기준)
- $\sigma_{ep}$  : 사변 단순 지지된 판재의 탄성 좌굴 강도(판재 유효폭 기준)
- $\Phi$  : 변형률의 크기를 나타내는 계수
- $\varepsilon$  : 항복 변형률로 무차원화된 상대평균압축변형률 (relative average compressive strain),  $= \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}$
- $\varepsilon_c$  : 평균압축변형률
- $\varepsilon_0$  : 초기 항복 강도에 상응하는 항복 변형률
- $A_s$  : 보강재의 단면적
- $A_{pc}$  : 판재의 유효 단면적
- $A_p$  : 판재의 단면적
- $a$  : 보강판의 길이(프레임 간격)
- $b$  : 판재의 전폭
- $b_e$  : 판재의 유효폭
- $t_p$  : 판재의 두께
- $b_w$  : 보강재 웨브의 높이
- $b_{we}$  : 보강재 웨브의 유효 높이
- $t_w$  : 보강재 웨브의 두께
- $b_f$  : 보강재 플랜지의 높이
- $t_f$  : 보강재 플랜지의 두께
- $\beta_c$  : 상대평균압축변형률항을 포함하는 판재의 세장비 (판재 전폭 기준)

## 3. 유한요소해석

횡압력을 제외한 유한요소해석 과정은 Nam, et al. (2010)에서 적용한 방법과 동일하며, 해석 모델에는 Smith, et al. (1988)의 평균 수준(average level)을 적용하였다. 용접 초기 변형의 경우에도 Nam, et al. (2010)이 적용하였던 공식을 사용하였다. 여기서 압축 용접 잔류응력을 초기 항복 강도의 15%로 가정하였다.

본 연구에서는 경계 조건의 영향을 최소화시키기 위하여 Nam, et al. (2010)에서 사용된 모델링 방법과 동일하게 모델의 범위를 4개의 횡베이와 7개의 종베이로 구성하였다. 판부재의 기본 치수, 두께, 재료 물성치(탄성 계수, 항복 강도, 경화), 요소의 크기 및 경계 조건 등도 Nam, et al. (2010)이 적용하였던 값을 사용하였다.

Table 1 Applied loading conditions

Load step	Applied load
Step 1	-3 bar ~ +3 bar on plate face
Step 2	$T_x = 100\text{mm}$ on longitudinal foremost and aftermost edges

Table 2 Applied loading conditions

Case	$\beta$	$\lambda$	Pressure
F1-1	LL	LL	-3 ~ +3 bar by 1bar
F1-3	LL	AVG	-3 ~ +3 bar by 1bar
F1-5	LL	UL	-3 ~ +3 bar by 1bar
F3-1	AVG	LL	-3 ~ +3 bar by 1bar
F3-3	AVG	AVG	-3 ~ +3 bar by 1bar
F3-5	AVG	UL	-3 ~ +3 bar by 1bar
F5-1	UL	LL	-3 ~ +3 bar by 1bar
F5-3	UL	AVG	-3 ~ +3 bar by 1bar
F5-5	UL	UL	-3 ~ +3 bar by 1bar
A1-1	LL	LL	-3 ~ +3 bar by 1bar
A1-3	LL	AVG	-3 ~ +3 bar by 1bar
A1-5	LL	UL	-3 ~ +3 bar by 1bar
A3-1	AVG	LL	-3 ~ +3 bar by 1bar
A3-3	AVG	AVG	-3 ~ +3 bar by 1bar
A3-5	AVG	UL	-3 ~ +3 bar by 1bar
A5-1	UL	LL	-3 ~ +3 bar by 1bar
A5-3	UL	AVG	-3 ~ +3 bar by 1bar
A5-5	UL	UL	-3 ~ +3 bar by 1bar
T1-1	LL	LL	-3 ~ +3 bar by 1bar
T1-3	LL	AVG	-3 ~ +3 bar by 1bar
T1-5	LL	UL	-3 ~ +3 bar by 1bar
T3-1	AVG	LL	-3 ~ +3 bar by 1bar
T3-3	AVG	AVG	-3 ~ +3 bar by 1bar
T3-5	AVG	UL	-3 ~ +3 bar by 1bar
T5-1	UL	LL	-3 ~ +3 bar by 1bar
T5-3	UL	AVG	-3 ~ +3 bar by 1bar
T5-5	UL	UL	-3 ~ +3 bar by 1bar

횡압력과 압축하중은 Table 1에 나타난 바와 같이 2단계의 하중 스텝으로 나누어 부여하였다.

하중1단계 : 선측 외판 또는 주요 격벽에 사용되는 보강판은 해수 또는 액체 화물로 인하여 횡수압을 경험한다. 액체의 동적인 압력 효과를 무시할만하다고 가정한 후, VLCC급 선박의 최대 수두를 약 30m정도로 가정할 때 약 횡수압은 최대  $\pm 3$  bar내외 일 것이다. 따라서 본 연구에서는  $\pm 3$  bar의 압력을 1 bar 단위로 순차적으로 적용하였다. 여기서 양압은 판부재에서 보강재 방향으로, 음압은 보강재에서 판부재로의 압력을 의미한다.

하중2단계 : 압축 하중으로 인한 1번 및 4번 횡베이에 소속된 부재의 붕괴를 방지하기 위하여 하중면에 강체 요소를 배치한 후 하중 방향을 제외한 모든 자유도를 구속하였다. 좌우측 변에 강제변위  $\pm 100\text{mm}$ 를 압축하중으로 구현하였다.

압력을 7단계로 분류한 결과, Table 2에 나타난 각각의 해석 경우와 같이 총 189회의 비선형 해석이 실시되었다. LL, AVG, UL은 세장비의 하한, 평균, 상한을 의미하며 Nam, et al. (2010)이 제시한 통계적 특성치를 의미한다.

압축하중과 횡압력의 상호작용 효과를 배제하기 위하여, 첫 번째 하중 단계에서는 횡수압만 작용시키고, 두 번째 하중 단계에서는 횡수압이 유지된 상태에서 압축하중을 작용시켰다.

### 4. 압축강도비교

Fig. 10에 유한요소해석 및 간이식을 이용하여 도출된 최종강도를 비교하여 나타내었다. 일부 해석 모델 (F5-5 및 A5-5)에 압력이 심하게 작용할 경우( $\pm 3$  bar), 압력에 의한 보강판의 붕괴가 우선 발생하여 압축하중에 대한 최종강도를 나타내지 못하였다. CSR의 경우 판부재 붕괴를 제외한 나머지 모드 중에서 최소의 최종강도를 나타내는 모드를 기준으로 최종강도를 제시하였다.

CSR의 경우 압력에 따른 공식을 제공하지 않으므로, 압력에 따른 최종강도의 변화가 없지만, 유한요소해석의 경우 압력의 증감에 따라 최종강도의 변화가 있음을 확인할 수 있다. 특히, FB와 AB의 경우 세장비의 범위가 넓게 사용되므로, 압력의 증감에 따른 최종강도의 변동성이 크게 나타난 반면 TB의 경우 최종강도의 변동성이 크지 않았다.

기동형 붕괴에 대한 세장비  $\lambda_c$ 가 작은 경우, 예를 들어 F1-1, F3-1, F5-1을 비교하거나 A1-1, A3-1, A5-1을 비교하면 압력의 변동성이 최종강도의 감소에 미치는 영향이 크지 않다. 반면 세장해지는 경우 압력 증가는 최종강도의 감소율을 상당히 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서 횡수압의 영향을 받는 선저 보강판 및 액체 화물의 수두가 큰 이중저 보강판의 경우  $\lambda_c$ 를 감소시킨 보강판을 사용할 필요가 있다.

CSR의 최종강도 예측치를 유한요소해석에 의한 예측치와 비교하였을 경우 최종강도를 비교적 크게 평가하는 경향을 보이며, 특히 압력이 작용하는 경우에 예측치 간의 차이는 커지게 된다. 해석 결과를 전반적으로 살펴보면, 음압이 작용하는 경우 양압이 작용할 때보다 최종강도가 약간 작게 평가되는 경우도 있지만, 전체적으로 대칭적인 최종강도를 보인다고 볼 수 있다.

중분-반복법을 이용한 선체의 최종 중강도 도출을 위해 보강판의 평균압축강도가 필요하며, 보강판의 압축최종강도보다는 모든 압축변형을 구간에서 압축강도의 거동이 중요하다. 즉 CSR에서 제시하는 보강판의 압축강도 공식을 이용하고자 할 때에는 최소 최종강도를 나타내는 모드를 선택하기 보다는, 상대평균압축 변형을 에너지  $E_c$ (relative average compressive strain energy)가 최소가 되는 모드를 선택하는 것이 훨씬 합리적이다. 여기서 상대평균압축변형을 에너지는 식 (7)과 같이 정의될 수 있다.

$$E_r = \int_{0.0}^{3.0} \frac{\sigma_c}{\sigma_0} d \frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \quad (7)$$

만약 유한요소해석 결과를 가지고 있다면, 유한요소해석 및 CSR에 의한 상대평균압축변형률 에너지의 편차가 최소화 되는 모드로부터  $E_r$ 을 도출하는 것이 바람직하지만, 유한요소해석 결과가 없다면 보수적 차원에서 최소의  $E_r$ 을 제공하는 모드로 결정할 필요가 있다.

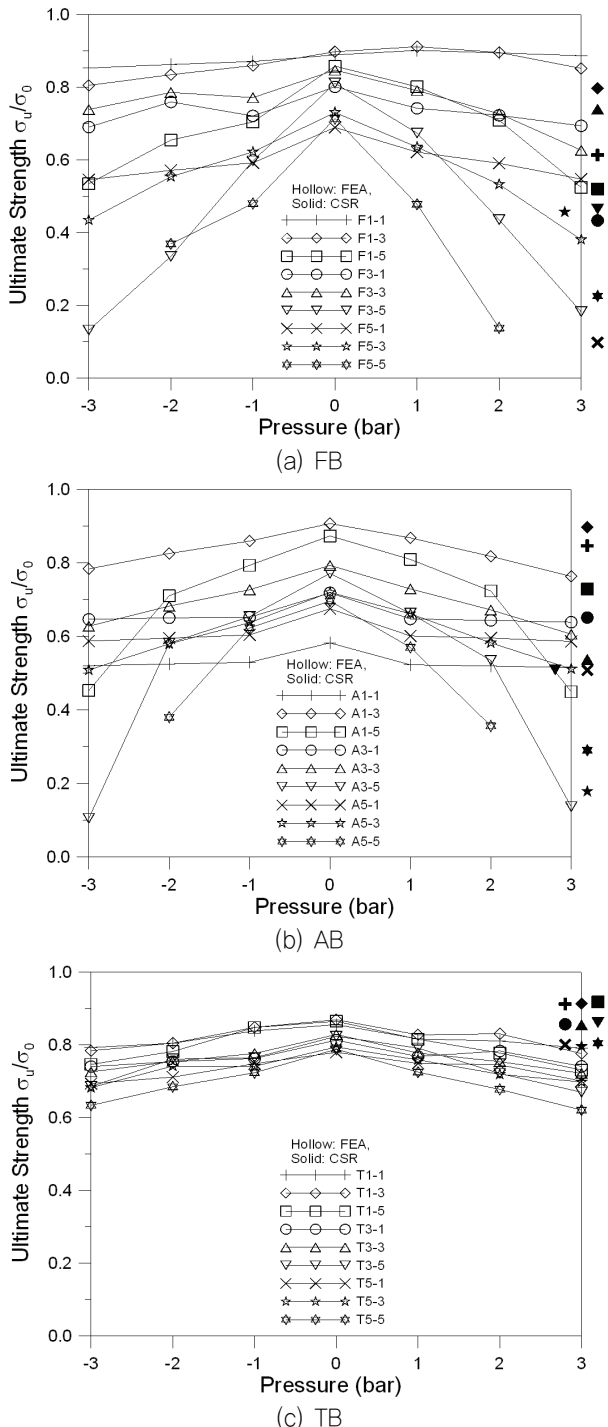


Fig. 1 Comparison of ultimate strengths

Table 3 ~ Table 5은 각각 FB-, AB-, TB-보강판의 최종강도와 상대평균압축변형률 에너지를 비교하여 나타내었다. 여기서 오차(error)는 유한요소해석 결과 대비 CSR 예측치의 오차를 의미한다. 횡압력이 있는 경우는 CSR과 FEA의 차이가 너무 현저하여, 압력이 없는 경우에만 비교하여 나타내었다.

FB-보강판의 경우 최종강도 오차(error of  $\sigma_u/\sigma_0$ )의 평균(Mean)은 약 4.8%로서 CSR과 FEA는 비교적 일치하는 결과를 나타내고 있으며, 표준편차(Stdev)와 변동계수(COV, coefficient of variation)도 비교적 작은 편이다. 그러나 상대평균압축변형률 에너지 오차 (error of  $E_r$ )의 평균은 약 27.6%로서 상당히 큰 편이며, 변동계수도 상당히 큼을 알 수 있다. CSR간이식을 FB-보강판에 적용할 경우 최종강도 측면에서는 상당히 잘 일치하지만 평균압축강도 측면에서는 비교적 일치하지 않음을 의미한다.

AB-보강판의 경우에도 CSR간이식은 FEA에 비하여 최종강도의 오차는 작지만 상대평균압축변형률 오차는 상당히 증가하는 양상을 보인다. 다만 CSR간이식에 의한 변동계수는 FEA에 의한 변동계수보다 약간 작은 것으로 나타났다.

TB-보강판의 경우 CSR간이식과 FEA는 최종강도의 오차 및 상대평균압축변형률 에너지의 오차가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 또한 표준편차도 상당히 작게 나타났다. 이는 TB-보강판의 경우 세장비의 분포가 집중되었기 때문으로 추정된다.

결론적으로 FB-보강판과 AB-보강판의 경우 CSR간이식을 이용하여 예측한 최종강도는 비교적 합리적이지만, 평균압축강도를 과대평가하는 경향을 보였다.

Table 3 Comparison of ultimate compressive strength and relative average compressive strain energy from CSR and FEA for FB-stiffened panels

Case	$\sigma_u/\sigma_0$ (FEA)	$\sigma_u/\sigma_0$ (CSR)	Error of $\sigma_u/\sigma_0$	$E_r$ (FEA)	$E_r$ (CSR)	Error of $E_r$
F1-1	0.8890	0.8455	0.0489	2.4939	2.0900	0.1620
F1-3	0.8977	0.9188	0.0236	1.6307	2.3900	0.4656
F1-5	0.8580	0.8082	0.0580	1.3169	2.4700	0.8756
F3-1	0.8011	0.7734	0.0346	1.9049	1.6900	0.1128
F3-3	0.8472	0.8960	0.0576	1.5421	2.0900	0.3553
F3-5	0.8112	0.7860	0.0312	1.2039	2.1800	0.8108
F5-1	0.6894	0.6394	0.0726	1.7190	1.3300	0.2263
F5-3	0.7307	0.7828	0.0713	1.5558	1.7600	0.1313
F5-5	0.7140	0.6905	0.0329	1.1307	1.8200	0.6096
Mean	0.8043	0.7934	0.0478	1.6109	1.9800	0.4166
Stdev	0.0726	0.0844	0.0171	0.3900	0.3421	0.2757
COV	0.0903	0.1063	0.3571	0.2421	0.1728	0.6619

Table 4 Comparison of ultimate compressive strength and relative average compressive strain energy from CSR and FEA for AB-stiffened panels

Case	$\sigma_u / \sigma_0$ (FEA)	$\sigma_u / \sigma_0$ (CSR)	Error of $\sigma_u / \sigma_0$	$E_r$ (FEA)	$E_r$ (CSR)	Error of $E_r$
A1-1	0,5823	0,9387	0,6121	1,3164	2,1900	0,6636
A1-3	0,9071	0,9589	0,0571	2,2193	2,2400	0,0093
A1-5	0,8733	0,8915	0,0208	1,4481	2,2100	0,5261
A3-1	0,7185	0,8605	0,1976	1,6449	1,9700	0,1976
A3-3	0,7931	0,8151	0,0277	1,8919	1,8300	0,0327
A3-5	0,7715	0,8038	0,0418	1,4102	1,8200	0,2906
A5-1	0,6753	0,8033	0,1895	1,5338	1,8400	0,1997
A5-3	0,7198	0,6714	0,0672	1,6918	1,4600	0,1370
A5-5	0,6962	0,7162	0,0287	1,4142	1,5300	0,0819
Mean	0,7486	0,8288	0,1380	1,6190	1,8989	0,2376
Stdev	0,0947	0,0900	0,1794	0,2696	0,2679	0,2105
COV	0,1265	0,1085	1,2994	0,1665	0,1411	0,8861

Table 5 Comparison of ultimate compressive strength and relative average compressive strain energy from CSR and FEA for TB-stiffened panels

Case	$\sigma_u / \sigma_0$ (FEA)	$\sigma_u / \sigma_0$ (CSR)	Error of $\sigma_u / \sigma_0$	$E_r$ (FEA)	$E_r$ (CSR)	Error of $E_r$
T1-1	0,8557	0,9124	0,0663	1,9898	2,0900	0,0503
T1-3	0,8691	0,9135	0,0511	2,0400	2,1200	0,0392
T1-5	0,8648	0,9182	0,0617	2,0411	2,1200	0,0387
T3-1	0,8129	0,8566	0,0538	1,8208	1,9900	0,0929
T3-3	0,8285	0,8549	0,0319	1,9497	1,9700	0,0104
T3-5	0,8235	0,8613	0,0459	1,9673	1,9700	0,0014
T5-1	0,7796	0,8008	0,0272	1,7794	1,8700	0,0509
T5-3	0,7942	0,7957	0,0018	1,8845	1,8300	0,0289
T5-5	0,7881	0,8049	0,0213	1,9451	1,8300	0,0592
Mean	0,8240	0,8576	0,0401	1,9353	1,9767	0,0413
Stdev	0,0316	0,0467	0,0198	0,0859	0,1098	0,0255
COV	0,0384	0,0545	0,4945	0,0444	0,0556	0,6181

## 5. 결론

보강판에 대한 최종강도를 예측하는 목적은 국부적 관점에서 보강판에 작용하는 조합 하중 (압축하중, 이축하중, 횡압력, 전단하중 등)하에서 보강판의 붕괴 하중을 예측하기 위함이고,

전체적 관점에서 선체의 최종 굽힘모멘트를 증분-반복법을 이용하여 추정코자 보강판 요소의 평균압축강도를 예측하기 위함이다. 본 연구는 전체적 관점을 목표로, 비선형 유한요소해석 및 CSR 간이식을 이용하여 횡압력과 압축하중을 동시에 경험하는 보강판 요소의 평균압축강도를 예측하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) Nam, et al. (2010)에 의하여 제안된 실선 보강판의 세장비의 분포를 근간으로 비선형 유한요소해석의 시나리오를 작성하였다. 횡압력이 보강판의 압축강도에 미치는 영향을 확인하기 위하여 30m 수두를 가정하여 7단계의 압력을 부여하였다. 따라서 FB, AB, TB 3가지 보강재 유형에 대하여 총 189회의 비선형 유한요소해석이 실시되었다.
- (2) CSR 간이식은 압력에 따른 공식을 제공하지 않으므로, 압력에 따른 최종강도의 변화가 없지만, 유한요소해석의 경우 압력의 증감에 따라 최종강도의 변화가 크게 발생할 수 있음을 확인하였다. 특히 실선에 사용되는 FB-, AB-보강판의 경우 세장비의 범위가 넓으므로 압력의 증감에 따른 최종강도의 변동성도 크게 나타났다.
- (3) 세장비  $\lambda_c$ 가 작을 경우 압력의 변동성이 최종강도의 감소에 미치는 영향이 크지 않았지만,  $\lambda_c$ 가 세장해지는 경우 압력 증가는 최종강도의 감소율을 상당히 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 따라서 선저부 및 이중저에 사용되는 보강판의 경우  $\lambda_c$ 의 선택을 유의할 필요가 있다.
- (4) 증분-반복법을 이용하여 최종 강도를 산정하려면 최종강도 관점보다는 평균압축강도의 관점에서 보강판의 압축강도를 판정하는 것이 타당하며, 본 논문에서는 이를 위하여 상대평균압축변형률 에너지  $E_r$ 의 개념을 도입하였다.
- (5) FB-보강판의 경우 CSR과 FEA에 의한 최종강도의 오차는 비교적 작은 편이지만, 상대평균압축변형률 에너지 오차는 비교적 크게 산정되었다. FEA결과가 신뢰할만하다고 가정하면, CSR 간이식에 의한 평균압축강도는 비교적 정확성이 결여된다고 볼 수 있다. AB-보강판의 경우에도 FB-보강판의 경우와 유사한 양상을 나타내었다. 반면 TB-보강판의 경우 CSR 간이식과 FEA는 유사한 최종강도와 상대평균압축변형률을 제시하였다. 이는 TB-보강판의 경우 세장비의 분포가 넓지 않기 때문으로 추정된다.
- (6) 보강판 요소의 평균압축강도는 선체의 최종 굽힘모멘트에 상당한 영향을 미칠 것으로 예측되며, 따라서 평균압축강도의 변동성이 최종 굽힘모멘트에 미치는 영향에 대한 연구가 향후 필요로 된다. 또한 횡수압의 영향을 고려한 평균압축강도의 감소계수에 대한 정식화도 필요할 것으로 사료된다.

## 후 기

본 논문은 한국선급의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 또한 인하대학교 연구비지원에도 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- Ahn, J.W. et al., 2010. Buckling / Ultimate Strength of Perforated Plate according to Reinforcement Method around the Cutout. *Proc. of the Annual Autumn Meeting of SNAK*, 21–22 October, Changwon Korean, pp.1223–1231.
- Cho, S.R. Choi, B.W. & Song, I.C., 1998. Post-Ultimate Behaviour of Stiffened Panels subjected to Axial Compression. *2nd International Conference on Thin-Walled Structures*, pp.433–440.
- Gordo, J.M. Guedes Soares, C. & Faulkner, D., 1996. Approximate Assessment of the Ultimate Longitudinal Strength of the Hull Girder, *Journal of Ship Research*, 40(1), pp.60–69.
- International Association of Classification Societies (IACS), 2010a. *Common Structural Rules for Bulk Carriers*. [Online] (Updated July 2010) Available at: <http://www.iacs-data.org.uk/> [Accessed August 2010].
- International Association of Classification Societies (IACS), 2010b. *Common Structural Rules for Double Hull Oil Tankers*. [Online] (Updated July 2010) Available at: <http://www.iacs-data.org.uk/> [Accessed August 2010].
- Lee, J.S., 1989. *Reliability Analysis of Continuous Structural System*. Ph.D Dissertation, University of Glasgow, Scotland.
- Lee, J.W. et al., 2010. Buckling / Ultimate Strength of steel-plated structure according to Initial Deflection Shape. *Proc. of the Annual Autumn Meeting of SNAK*, 21–22 October, Changwon Korean, pp.1232–1238.
- Lin, Y.T., 1985. *Ship Longitudinal Strength*. Ph.D. Dissertation, University of Glasgow, Scotland.
- Nam, J.M. et al., 2010. Slenderness Ratio Distributions and Average Compressive Strengths of Stiffened Plates Used for In-Service Vessels. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(5), pp.709–718.
- Paik, J.K. & Kim, B.J., 2002. Ultimate Strength Formulations for Stiffened Panels under Combined Axial Load, In-Plane Bending and Lateral Pressure: a Benchmark Study. *Thin-Walled Structures*, 40(1), pp.45–83.
- Paik, J.K. & Thayamballi, A.K., 2002. *Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures*. Wiley, Chichester, UK.
- Smith, C.S. Davidson, P.C. Chapman, J.C. & Dowling, P.J., 1988. Strength and Stiffness of Ships' Plating under In-plane Compression and Tension. *RINA Transactions*, 130, pp.277–296.



정준모

전상익

이민성

남지명



하태범