

선체곡판의 압축최종강도 설계식의 개발

The Development of Ultimate Compressive Strength for Ship Curved Plates

박영일*, 권용우**, 백점기***, 이제명****, 고재용*****
Y.I. Park*, Y.W. Kwen**, J.K. Paik***, J.M. Lee**** and J.Y. Ko*****

ABSTRACT

Ship structures is thin-walled structures and she has lots of curved platings. In these days, lots different kinds of closed-formulas are development for ultimate strength of flat plate but for curved panels, there are not enough study or papers for this field.

In this study, the ultimate strength characteristics for ship curved plates are studied. The ship plating is generally subjected to combined in-plane and lateral pressure loads. In-plane loads included biaxial compression/tension and edge shear. This is first report about the developing of ultimate compressive strength for ship curved plating.

A closed-form formula for predicting the ultimate compressive strength of curved plates are empirically derived by curve fitting based on the computed results. The results and insights developed in the present study will be useful for damage tolerant design of curved plated structures.

1. 서 론

선박의 구조강도 부재에 작용하는 하중특성은 종굽힘 모멘트와 비틀림모멘트에 의한 2축의 인장/압축력과 전단력 등의 면내하중과 수압 및 적재하물의 무게로 인한 면외하중의 조합하중을 받는다. 이들 하중성분들은 항상 동시에 작용하는 것은 아니지만, 일반적으로 한가지 이상의 성분들이 상호작용을 한다. 이들 여러가지 이종의 하중 성분은 선박의 운항조건 및 해당 환경에 따라 어느 한 하중이 선박의 최종한계상태에 미치는 영향이 커지기도 하고 작아지기도 한다. 따라서, 보다 합리적이고 안전한 선체구조설계를 위해서는 이들 하중 성분에 대한 각각의 설계식의 개발이 요구된다.

선박 곡판부의 최종강도에 영향을 미치는 변수들을 정의하고, 운항중인 선박의 곡판부의 주요 치수를 조사하여 이를 최종강도 시리즈 해석시 매개변수의 범위로 설정하였다.

* 부산대학교 조선해양공학과 박사후과정 연구원 (Email: parkyi@pusan.ac.kr)

** 부산대학교 조선해양공학과 대학원 (Email: ywkwen@pusan.ac.kr)

*** 부산대학교 조선해양공학과 교수 (Email: jeompaik@pusan.ac.kr)

**** 부산대학교 조선해양공학과 조교수 (Email: jeamlee@pusan.ac.kr)

***** 부산대학교 조선해양공학과 부교수 (Email: kojy@mmu.ac.kr)

2. 곡판부의 주요 치수의 조사

평판의 붕괴거동에 영향을 미치는 주요 변수로는 일반적으로 세장비 및 종횡비를 들 수 있으나, 곡판의 형상적 특징으로부터 곡률반경이 추가적인 중요 인자가 될 것이다. 실제로 각국선급협회에서도 곡판에 관한 규정에 곡률반경에 관한 치수를 포함하고 있다.

본 연구에서는 운항중인 서로 다른 종류의 선종 약 200척을 대상으로 곡판부의 주요 치수들을 조사하였다.

다양한 해석을 통하여 곡판부의 최종강도 거동에 영향을 미치는 요소로는 곡판부의 곡률반경 ($=R$), 곡판의 종횡비 ($=a/b$), 및 세장비 ($=\beta$)임을 알 수 있었으며, 이에 관한 값을 그림 1~3에 나타내었다.

그림 1은 운항중인 실제 선박의 곡판부재에 대한 곡률반경을 조사한 결과를 보여주고 있다. 이 그림으로부터 실제 곡판부재의 곡률반경은 대략 1000~6000 (mm)의 범위에 있으며, 본 연구에서는 시리즈 해석을 위해서 곡률반경의 범위를 1000부터 10000 (mm)까지를 변화시켰다. 그림 2는 종횡비를 같은 방법으로 도식화 시켰다. 그림으로부터 종횡비는 약 1~6의 범위에 있다는 것을 알 수 있으며, 본 연구에서는 시리즈 해석용으로 종횡비를 1부터 6까지를 변화시켜 이에 관한 영향을 조사 분석 하였다. 그림 3은 세장비를 나타내었다. 세장비는 약 1.5~3 사이의 값으로 분포하고 있음을 알 수 있다.

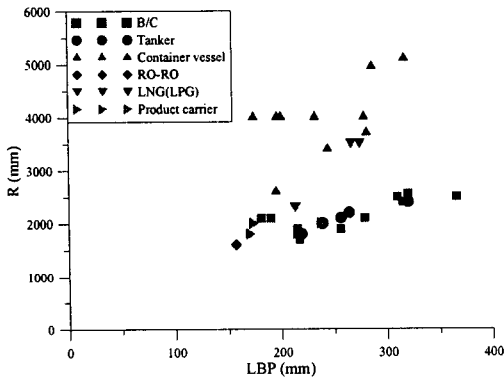


Fig.1 Radius for the ship platings

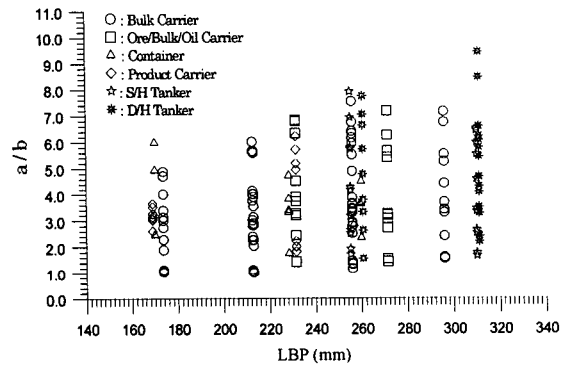


Fig.2 Aspect ratio for the ship platings

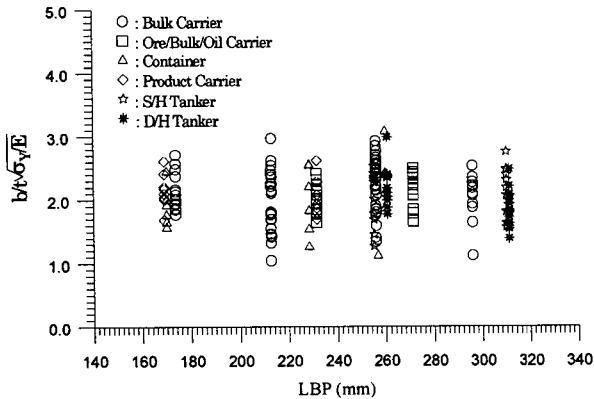


Fig.3 Slenderness ratio for the ship platings

3. 곡판의 유한요소 해석 모델링

그림 4는 본 연구에서 해석 대상으로 하고 있는 일축압축하중이 작용하는 선체 곡판에 관한 개략적인 형상을 나타내고 있다. 선체판부재는 연속적인 보강판 구조를 이루고 있으므로, 곡판 주위는 다양한 종류의 주변부재 (보강재, 대형 거더 등)로 지지되어 있다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 곡판의 주변경계조건을 단순지지로 취하였으며, 압축하중에 의해서 판재가 좌굴되는 동안 하중변 및 비하중변이 면내방향으로 직선을 유지하도록 하였다. 곡판의 초기처짐 형상 및 크기를 정하기 위하여, 고유모드 해석을 수행하였으며, 최대처짐량은 Smith [1]등에 의하여 제안된 평균값을 취하였다.

$$w_{opl} = 0.1\beta^2 t \quad (1)$$

여기서, $\beta = (b/t)\sqrt{\sigma_Y/E}$

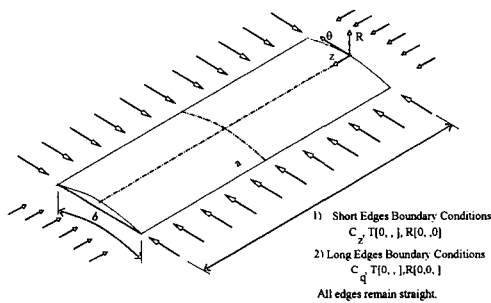


Fig.4 A simply supported curved plate under axial compressive loads

그림 4에서 a는 곡판의 길이, b는 곡판의 폭이다. 본 연구에서는 해석대상 곡판부에 관한 압축 최종강도 해석을 위해서 비선형 상용유한요소해석 프로그램인 ANSYS [2]를 사용했으며, 해석시 사용된 요소는 곡판의 휨 변형을 잘 묘사할 수 있는 8절점 shell요소를 설정하였다.

4. 시리즈 해석

본 연구에서는 전장에서 조사한 실제 선박의 곡판을 조사하고 관련 치수 및 재료에 관한 시리즈 해석을 수행하였다. 전술한 바와 같이 설계변수로는 곡판의 곡률 반경, 곡판의 세장비 및 종횡비이다. 이때, 곡률반경이 무한한 값에 접근하게 되면 평판과 같은 거동을 보이게 되며, 이 경우는 기존의 평판의 설계식을 그대로 적용시키는 것이 가능할 것이다. Paik등 [3]은 주변이 보강재 및 대형 부재로 지지되어 있는 판 부재의 최종 휨 압축력에 관한 설계식을 다음과 같이 세장비의 함수로 나타내었으며 (식 2), 이를 유한요소법을 사용하여 그 정도를 검증한 바 있다. 본 연구에서는 기존의 평판에 관한 최종강도식과 곡률반지름이 유한한 값을 가지는 곡판에 관한 최종강도를 비교함으로써, 곡률반경 및 세장비를 변수로 하는 최종강도 간이식을 도출하였다.

$$\frac{\sigma_{xu}}{\sigma_Y} = \begin{cases} -0.032\beta^4 + 0.002\beta^2 + 1.0 & \text{for } \beta < 1.5 \\ 1.274/\beta & \text{for } 1.5 \leq \beta < 3.0 \\ 1.248/\beta^2 + 0.283 & \text{for } 3.0 \leq \beta \end{cases} \quad (2)$$

본 시리즈 해석에서 사용한 곡판의 주요 치수 및 변수는 아래와 같다.

$$b = 800 \text{ (mm)}, a/b = 1 \sim 5$$

$$\beta = \frac{b}{t} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_Y}{E}} = 0.5 \sim 5.0$$

$R = 1,000 \sim 10,000 \text{ (mm)}$ (10,000을 넘는 경우는 평판의 설계식을 그대로 적용함)

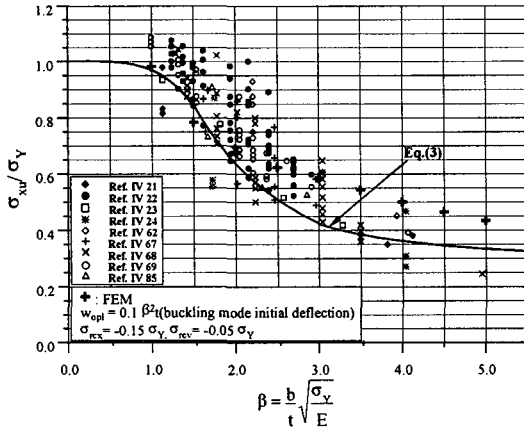


Fig.5 Variation of the ultimate strength of steel plates under axial compression as a function of the plate slenderness ratio (reference numbers for test data are extracted from Ref. [4])

5. 유한요소해석

5.1 종방향 압축력이 작용하는 경우

선박은 항해시 끊임없이 중급힘 모멘트를 받게 되며, 특히 호깅 (hogging)의 경우 곡판에 종방향의 압축력이 작용하게 될 것이다. 본 절에서는 이에 관한 연구로써 전술한 매개변수들이 곡판의 최종강도에 미치는 영향을 조사하였다.

5.1.1 종횡비 (aspect ratio, a/b)의 영향

그림 6는 세장비 및 곡률반경을 고정시키고 종횡비를 변화시켜가면서 곡판의 최종강도 거동을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 곡판에 종방향 압축력이 작용하는 경우는 종횡비의 영향이 매우 작았으며, 해당 설계식의 개발에서는 종횡비의 영향을 제외시켰다.

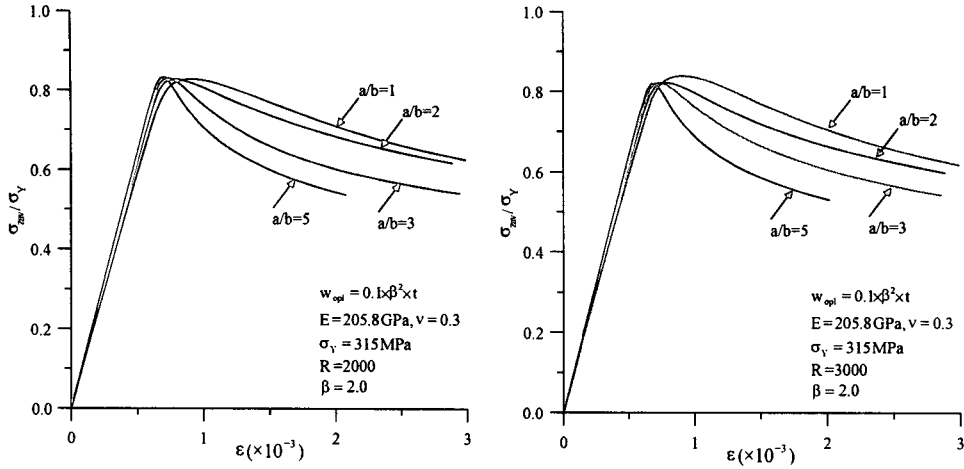


Fig.6 Average stress versus average strain curves for a curved plate under axial compressive loads, varying the slenderness ratio, for $R = 2000$ and 3000 , $\beta = 2.0$

5.1.2 세장비 (slenderness ratio, β)의 영향

본 절에서는 곡판의 곡률반경 및 중평비를 고정시키고, 해당곡판재의 세장비를 변화시켜가면서 중평의 붕괴거동을 조사하였다. 곡률반경이 무한한 즉, 평판에서 잘 알려진 바와 같이 세장비의 변화는 최종강도 거동에 매우 큰 영향을 끼침을 알 수 있었다 (그림 7).

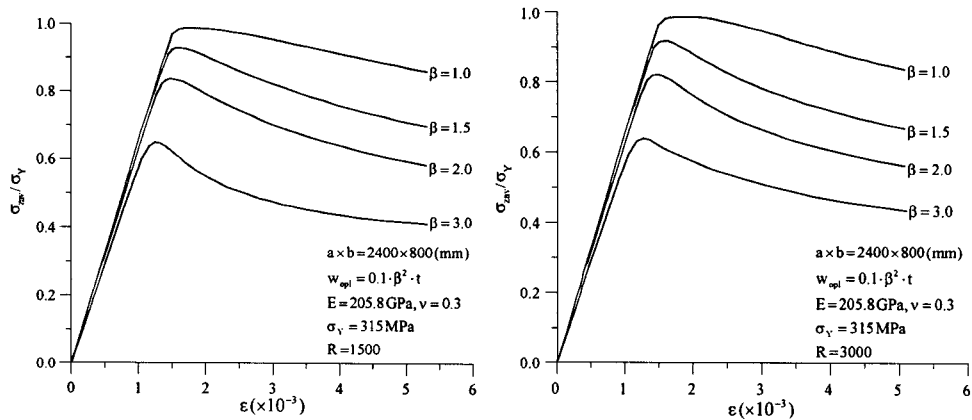


Fig.7 Average stress versus average strain curves for a curved plate under axial compressive loads, varying the slenderness ratio, for $R = 1500$ and 3000 , $a/b = 3$

5.1.3 곡률반경 (radius, R)의 영향

마지막으로, 선박 곡판재의 곡률반경에 관한 영향을 조사하였다. 그림 8에는 곡률반경을 1000부터 10000까지 변화시켜가면서 최종강도 거동을 조사하였으며, 곡률반경이 작을 수록 최종강도가 다소 높아짐을 알 수 있었다.

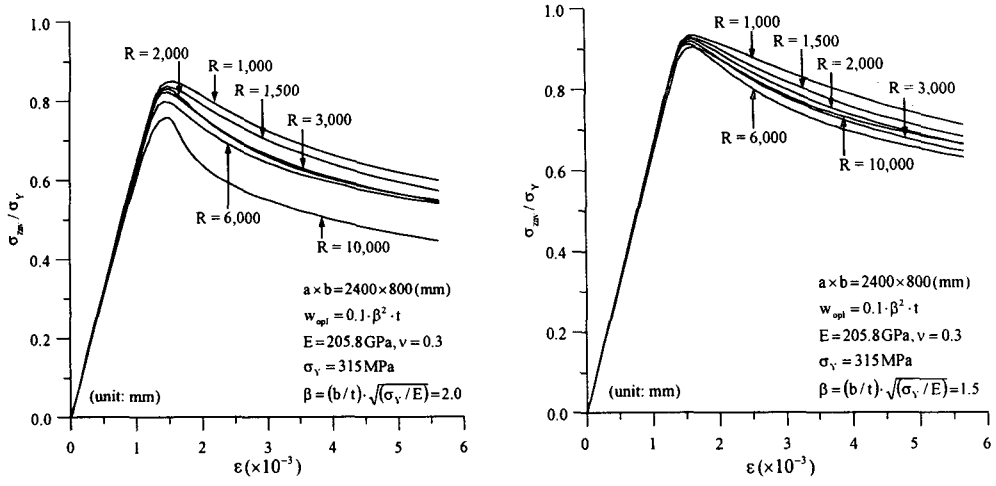


Fig.8 Average stress versus average strain curves for a curved plate under axial compressive loads, varying the radius of curvature, for $\beta = 1.5$ and 2.0

6. 선체 곡판의 압축력에 관한 최종강도 간이식의 개발

전술한 시리즈 해석의 결과를 바탕으로 곡판의 주요 치수를 입력으로 하는 최종강도 간이식 (식 3)을 개발하였다. 곡판의 중횡비가 3.0일때를 기본으로 설계식을 도출하였으며, 중횡비를 1~5까지 변화시켜가면서 그 영향을 조사하였다. 유한요소해석을 통하여 조사한 결과, 중횡비의 영향은 거의 없음을 알 수 있었다

$$\frac{\sigma_{zu}}{\sigma_y} = C_1 \times \beta^3 + C_2 \times \beta^2 + 1 \tag{3}$$

여기서,

$$C_1 = 0.0194 \times \left(\frac{R}{R_0}\right)^3 - 0.0256 \times \left(\frac{R}{R_0}\right) + 0.0047$$

$$C_2 = -0.1303 \times \left(\frac{R}{R_0}\right)^3 + 0.0845 \times \left(\frac{R}{R_0}\right) - 0.0460$$

$R_0 = 10000$ (곡률반경의 영향을 무시할 수 있는 최소 곡률반경의 값, 단위 = mm)

7. 곡판의 최종강도 간이식의 정도검증

전절에서 제안된 곡판의 최종강도 간이식의 적용성을 검토하기 위하여 그림 10과 같이 각 변수를 변화시켜가면서 실제 비선형 유한요소해석을 수행한 결과와, 제안 이론식 (식 3)을 비교하였다.

그림 11은 본 연구에서 시리즈 해석 대상으로 한 설계변수를 변화시킨 각 경우를 모아, 도출된 간이설계식 및 유한요소법을 통하여 얻은 결과값을 비교하여 나타내고 있다. 곡판의 최종강도 간이식에 대한 탄소성 대변형 해석의 결과의 변동계수 (COV)는 약 3%였으며, 그 적용성이 충분히 검증되었다고 판단된다.

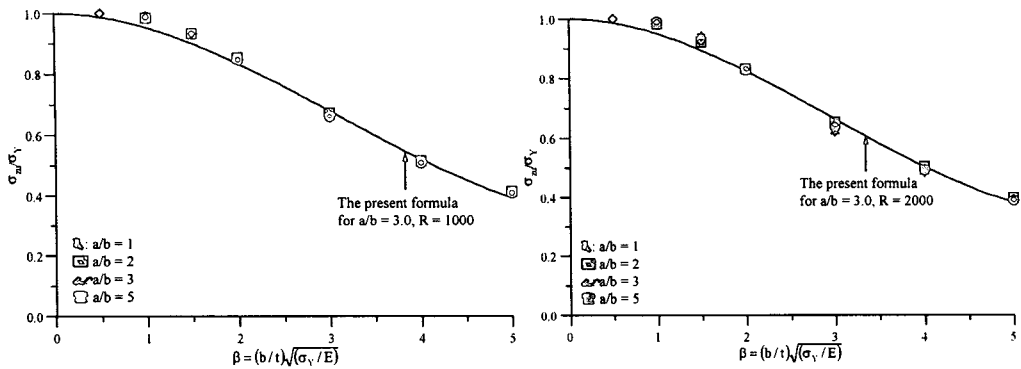


Fig.10 Accuracy of Equation (3) for longitudinal axial compressive loading, for radius of curvature = 1000 and 2000, (symbols: finite element analysis)

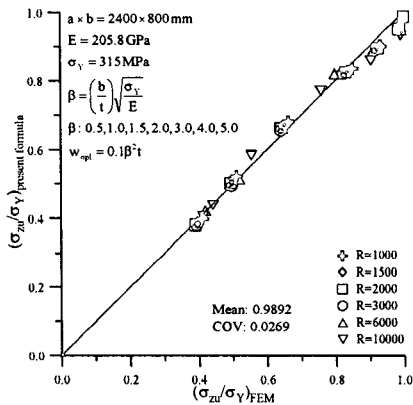


Fig.11 Comparison of the present formula (Eq.3) with the numerical results

8. 곡판의 최종강도 간이식과 임계좌굴강도와의 비교

일반적인 강판 재료는 기하학적, 재료적 비선형 문제로서 다루어야 하고, 이 문제는 해석적인 방법으로 풀기가 어렵기 때문에 수치해석과 같은 기법을 사용하는 것이 일반적이나 매 설계단계마다 이러한 방법을 쓰는 것이 계산시간 및 비용측면에서 실용적이지 못하다. 이 문제에 대한 대책으로 탄성좌굴강도를 구한 뒤 소성수정식을 이용하여 탄소성 좌굴효과를 근사적으로 고려해 주는 방법이며, 각 선급 등은 이러한 방법을 널리 사용하고 있다. 이 방법은 극히 간편하면서도 합리적인 결과를 주는 것으로 알려져서 지금까지 대부분의 설계공식에서 이 방법을 채용해오고 있다.

본 연구에서는 곡판의 탄성좌굴강도 (식 4) [5]를 소성수정식 (식 5) [6]을 통해 얻은 임계좌굴강도값을 곡판의 최종강도식과 비교하여, 그 적용성을 검토하였다.

$$\sigma_E = \frac{N_x}{t} = \frac{R \times E}{S \times (1 - \nu^2)} \quad (4)$$

여기서,

$$R = (1 - \nu^2)\lambda^4 + \alpha \left[\left(\frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} + \lambda^2 \right)^4 - (1 + \nu)(3 - \nu)\lambda^4 \frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} + 2\lambda^4(1 - \nu^2) - \lambda^2 \left(\frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} \right)^4 (7 + \nu) \right]$$

$$+ \lambda^2 \left(\frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} \right)^2 (3 + \nu) + \left(\frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} \right)^4 - 2 \left(\frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} \right)^6$$

$$S = \lambda^2 \left[\left\{ \left(\frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} \right)^2 + \lambda^2 \right\}^2 + \frac{2}{1 - \nu} \left\{ \lambda^2 + \frac{1 - \nu}{2} \left(\frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} \right)^2 \right\} \left[1 + \alpha \left\{ \left(\frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} \right)^2 + \lambda^2 \right\}^2 \right] \right]$$

$$- \frac{2\nu^2 \lambda^2}{1 - \nu} + \frac{2\alpha}{1 - \nu} \left\{ \lambda^2 + \frac{1 - \nu}{2} \left(\frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} \right)^2 \right\} \left\{ \left(\frac{m^2 \pi^2}{\beta^2} \right)^2 + (1 - \nu)\lambda^2 \right\}$$

$$\lambda = \frac{m\pi a}{l}$$

$$\sigma_{cr} = \begin{cases} \sigma_E & \text{for } \sigma_E \leq 0.5\sigma_Y \\ \sigma_Y [1 - \sigma_Y / (4\sigma_E)] & \text{for } \sigma_E > 0.5\sigma_Y \end{cases} \quad (5)$$

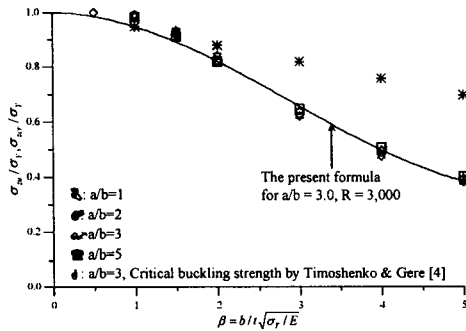


Fig.16 Comparison of the present formula (Eq.3), the numerical results with critical buckling strength (eq.4 and 5)

Figure 16은 본 연구에서 개발된 곡판의 최종강도 간이식, 유한요소해석 결과와 이론적으로 도출한 임계 좌굴강도를 비교하고 있으며, 임계좌굴강도가 실제 곡판의 강도를 상당히 과대 평가하고 있음을 확인할 수 있었다. 따라서, 곡판의 임계강도 설계시에는 최종강도의 검토가 필요하다는 것을 본 연구를 통하여 알 수 있다.

9. 결 론

선체구조의 강도는 구성 판부재의 종류, 강성, 및 강도에 크게 좌우되며, 특히 좌굴, 최종강도는 선박의 구조설계시 검토해야할 가장 중요한 설계기준중의 하나이다. 지금까지 각국선급에서는 선체판부재에 대한 좌굴설계공식 및 최종강도 설계식을 독자적으로 제안하고 있으나, 이들은 각종 문제점과 불합리성을 내포하고 있으며, 특히 곡판에 관한 좌굴 및 최종강도 설계식의 개발에 관한 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는, 곡판의 최종한계상태를 유한요소법을 적용하여 분석하고, 설계식을 도출하였으며, 그 결과 아래의 결론을 얻었다.

- 곡판의 최종강도에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 평판과 유사하게 세장비였음을 알 수 있었다.
- 일축 압축력이 작용하는 곡판의 곡률반경이 작아질수록 최종강도는 증가하는 경향을 알 수 있었다.
- 곡판의 종횡비는 최종강도에 영향을 거의 미치지 않는다는 사실을 알 수 있었으며, 이를 기초로 곡판의 최종강도 간이식에는 종횡비의 영향을 포함시키지 않았다.
- 일축압축력이 작용하는 곡판의 곡률반경이 약 10,000mm이상이면, 평판의 최종강도 거동과 매우 유사하게 되며, 이 이상의 곡률 반경값을 가지는 곡판의 설계식은 평판의 최종강도 식을 사용할 수 있다고 판단된다.
- 선박의 초기설계시 빈번하게 사용되고 있는 이론적인 임계좌굴강도값은 실제 곡판의 최종강도를 과대평가 할 수 있다. 따라서, 곡판의 초기설계시 최종강도를 기준으로 한 설계를 반드시 고려해 줄 필요가 있다.

본 연구에서 개발된 곡판의 좌굴 및 최종강도 설계식은 선박의 초기설계시 유용하게 사용될 것이며, 노후 선박의 잔류강도 및 신뢰성 평가시도 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] C.S. Smith, P.C. Davidson, J.C. Chapman and P.J. Dowling, "Strength and stiffness of ships' plating under in-plane compression and tension", Trans. RINA, Vol.130, pp.277-296, 1988
- [2] ANSYS, User's manual (version 8.0), ANSYS Inc., Canonsburg, PA, 2004
- [3] J.K. Paik, J.M. Lee and D.H. Lee, "Ultimate strength of dented steel plates under axial compressive loads", International Journal of Mechanical Sciences, Vol.45, pp.433-448, 2003
- [4] C.P. Ellinas, W.J. Supple and A.C. Walker, "Buckling of offshore structures: A state-of-art review", Gulf Publishing Company, Houston, 1984
- [5] S.P. Timoshenko and J.M. Gere, "Theory of elastic stability", McGraw-Hill book co., New York, 1963
- [6] J.K. Paik and A.K. Thayamballi, "Ultimate limit state design of steel-plated structures", John Wiley & Sons, LTD, 2003