

알루미늄합금 선체의 최종 종강도에 대한 해석

Longitudinal Ultimate Strength Analysis of Aluminum Alloy Ship Structures

백 점 기** 이 제 명** 박 철 민* 박 영 일*** 고 재 용****
Paik, Jeom-Kee, Lee, Jae-Myung, Park, Chuel-Min, Park, Young-Il, Ko, Jae Yong

ABSTRACT

Until now, there are different kinds of design and evaluation method criteria for ship hulls and ship strength based on allowable stress design using past experiences. But for many sinking accidents of large ships in operation, it has also a doubt about allowable stress design. It is recognized that structural plastic collapse caused by large external force is a main cause of that accidents. Therefore, there is the need for new design criteria based on ultimate limit state with a consideration about progressive collapse behavior as a safety assessment of ship hulls. Also many aluminum alloy ships is built for the purposes of lightweight of ship hulls, with that, a developing of criteria based on ultimate limit state should be made. In this study, the ultimate strength characteristics of aluminum ship hull are investigated by the ALPS/USAS program using already developed design formula for aluminum plate and stiffened panel.

1. 서 론

선박이 운항 중 큰 외력을 받으면 구조부재에 좌굴/소성붕괴가 발생하여 강도와 강성이 저하되고 결국에는 전체적으로 붕괴하게 될 것이다. 이러한 점진적 붕괴를 방지하기 위해서는 과거에 적용해왔던 허용응력 기준의 안정성 및 신뢰성 평가방법보다 최종한계상태를 기준으로 한 평가방법이 보다 합리적인 방법이 될 것이다. 특히 최근 대형화와 고속화의 경향하에 신조되는 선박의 경우 선체구조의 안정성과 신뢰성을 평가하기 위한 경험적 데이터가 부족하므로 이러한 평가방법의 확립은 더욱 의미가 있다.

또한 최근 경량화를 목적으로 알루미늄합금을 사용한 대형 경량구조 고속선이 많이 건조되고 있는데, 선박용으로 사용되는 알루미늄 합금의 경우, 기존의 강재와 재료적 특성에서 차이를 보이므로 강재에 적용하는 기준을 알루미늄합금에 적용하기가 쉽지 않다.

* 부산대학교 조선해양공학과 대학원
** 부산대학교 조선해양공학과 교수
*** 부산대학교 조선해양공학과 대학원 박사 후 과정
**** 목포해양대학교 해양시스템공학부 교수

따라서 본 연구에서는 알루미늄 합금의 특성을 고려하여 전체 선박의 최종 종강도에 대한 해석 및 선체의 최종한계상태 설계법의 기준에 대한 조사를 수행하였으며, 경량구조 고속선 설계 및 안전성 평가에 적용할 수 있는 기초를 확립하였다.

2. 알루미늄 합금선박 구조 부재의 특성

2.1. 종강도 해석 대상선박

본 연구에서 해석대상으로 삼은 여객선의 특징을 Fig.1에 나타내었다. 최대속도 43노트, 순항속도 41노트의 고속 쌍동선으로서 800여명의 승객과 250여대의 차량을 운송할 수 있는 알루미늄 합금으로 이루어진 선박이다. 이 선박의 상세치수는 Table 1에서 보는 바와 같다.

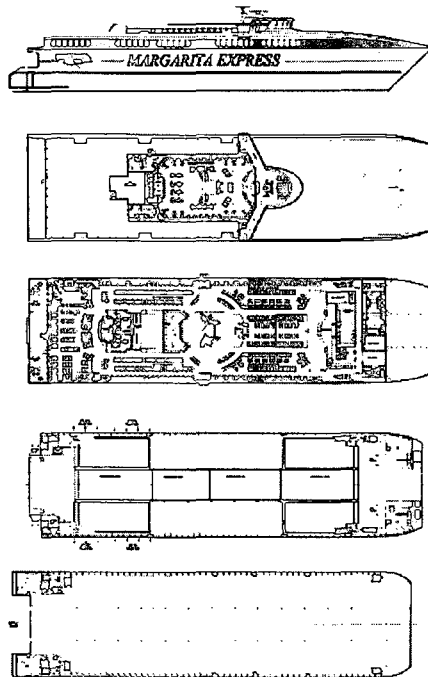


Fig.1 General arrangement of the case study aluminum catamaran passenger ship

Table 1 Hull sectional properties

Particulars	Value	Particulars	Value	Particulars	Value
Length overall	86.6 m	Demi-hull breadth	4.3 m	Displacement	960 tonnes
Length Waterline	74.2 m	Depth	7.6 m	Maximum speed	43.0 knots
Breadth overall	24.0 m	Hull Draft	3.2 m	C_b	0.45

2.2. 해석 대상 국부 부재에 대한 정의 및 설계식

선체를 구성하는 국부 부재들은 대부분 보강판 구조로 이루어져 있으며, 이러한 각각의 부재들에 대해서 최종 강도 해석이 이루어지면 이를 토대로 전체 선박의 최종 종강도에 대해 알아낼 수 있다. 복잡한 형태를 갖는 선체 보강판 구조를 최종강도해석에 고려하기 위해서 일반적으로 Fig.2 (b), (c)와 같은 두 종류를 고려할 수 있다.

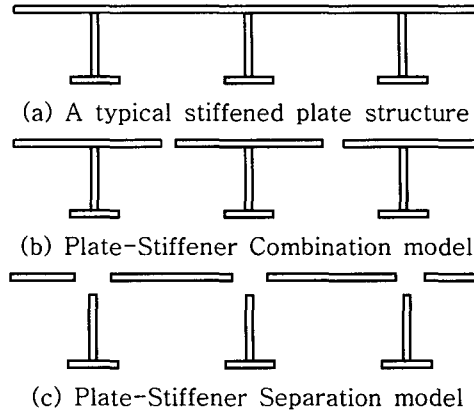


Fig.2 Three types of structural idealization for a stiffened panel[1]

즉, Fig.2(a)와 같은 전형적인 선체 보강판 구조를 판 및 보강재의 조합모델(Plate-Stiffener Combination model)과 판 및 보강재의 분리 모델(Plate-Stiffener Separation model)로 이상화시킨다. 선체는 이들 모델들의 반복적 구성에 의해 표현되어지며, 각각의 모델들에 대한 설계식은 다양한 실험 및 시리즈 유한요소해석을 통해 상당부분 개발이 이루어져 있다.[2]

한편, 알루미늄 합금 보강판의 경우, 용접부에 필연적으로 발생하는 연화현상의 고려가 무엇보다도 중요하기 때문에 일반강재를 대상으로 개발한 설계식의 개선이 필수 불가결하다. 따라서 연화현상등과 같은 알루미늄 합금 보강판의 특성을 고려할 수 있는 설계식의 개발이 수행되었고, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_{xu}}{\sigma_{Ypeq}} = \begin{cases} 1.0 & \text{for } \beta' \leq 0.46 \\ -0.215\beta' + 1.1 & \text{for } 0.46 < \beta' \leq 2.2 \\ -0.083\beta' + 0.81 & \text{for } \beta' > 2.2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_{xu} = \frac{\sigma_{Yseq}}{\sqrt{0.878 + 0.191(\lambda')^2 + 0.106(\beta')^2 - 0.017(\lambda'\beta')^2 + 1.3(\lambda')^4}} \leq \frac{\sigma_{Yseq}}{\lambda^2} \quad (2)$$

$$\sigma_{xu} = \frac{\sigma_{Yseq}}{\sqrt{1.038 + 1.099(\lambda')^2 + 0.093(\beta')^2 - 0.047(\lambda'\beta')^2 + 1.648(\lambda')^4}} \leq \frac{\sigma_{Yseq}}{\lambda^2} \quad (3)$$

$$\sigma_{xu} = \frac{\sigma_{Yseq}}{\sqrt{1.157 + 2.297(\lambda')^2 + 0.152(\beta')^2 - 0.138(\lambda'\beta')^2 + 3.684(\lambda')^4}} \leq \frac{\sigma_{Yseq}}{\lambda^2} \quad (4)$$

여기서, 등가응력 σ_{Yseq}' 는 모재부분의 항복응력 σ_Y 와 열영향부의 항복응력 σ_{YHAZ} 을 서로 등가시켜 전체 보강판 부분이 등가된 하나의 항복응력으로 나타낸 것이다.

$$\beta' = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{Ypeq}'}{E}}, \quad \lambda' = \frac{a}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{Yseq}'}{E}}$$

$$\sigma_{Yseq}' = \frac{P_s}{bt + h_w t_w + b_f t_f}, \quad \sigma_{Ypeq}' = \frac{(b - 2b_{pHAZ})\sigma_{Yp} + 2b_{pHAZ}\sigma_{YpHAZ}}{bt + h_w t_w + b_f t_f}$$

$$P_s = (b - 2b_{pHAZ})t\sigma_{Yp} + 2b_{pHAZ}\sigma_{YpHAZ} \\ + (h_w - b_{sHAZ})t_w\sigma_{Ys} + b_{sHAZ}t_w\sigma_{YsHAZ} + b_f t_f\sigma_{Ys}$$

Fig.3에 상기식에 사용된 주요치수를 나타낸다.

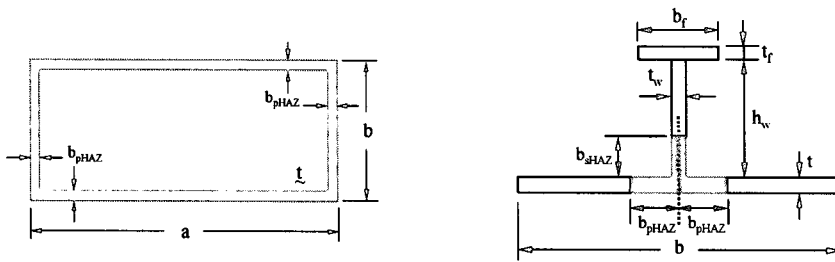


Fig.3 Softening zones inside the aluminum plate and Plate-Stiffener Combination model considered for the study

(1)식은 알루미늄 판재를, (2), (3), (4)식은 알루미늄 보강판 최종강도 설계식이다. Plate-stiffener Combination 모델을 위한 보강판의 설계식(2), (3), (4)식은 다음과 같은 세 종류의 초기처짐에 대한 고려하에 개발된 식이다.

Slight level

$$w_{opl}=0.003b, w_{os}=0.001a, w_{ot}=0.001a$$

Average level

$$w_{opl}=0.009b, w_{os}=0.0025a, w_{ot}=0.0025a$$

Severe level

$$w_{opl}=0.015b, w_{os}=0.005a, w_{ot}=0.008a$$

여기서 w_{opi} 은 보강재 사이의 판재에 대한 초기처짐량, w_{os} 는 보강판 모델의 global 초기처짐량, w_{ot} 는 보강재의 사이드쪽 처짐을 나타낸 것이다.

3. 선체 종강도 해석

선체구조가 적재한 화물이나 과량 등에 의해서 하중을 받으면 전체 선박 구조가 마치 보와 같은 거동을 하면서 선체 중앙 횡단면에 있어서 선저부분이 압축하중을 받는 하중상태인 Hogging 상태와 선체 윗부분의 상갑판부분이 압축하중을 받는 Sagging상태로서 나눌 수가 있게 된다. 그리고 이러한 선체구조의 보 거동은 선체의 단면에 굽힘 모멘트를 일어나게 하고, 선박의 길이방향으로 발생하는 종 굽힘 모멘트에 대한 해석을 통해 해당선박에 대한 안전성을 알 수 있게 된다.

종 굽힘 모멘트를 받는 선체구조의 최종강도 계산식은 해석적 방법, 경험적 방법 및 선형 근사법으로 여러 연구자에 의해 제안되었다. Paik & Mansour[3]는 선체구조의 전체 붕괴상태에서 종 방향 응력분포를 Fig.4와 같이 가정했다. 식 (5)와 (6)은 선체를 이루는 각각의 구조부재들에 대한 단면적 및 선체 중앙 횡단면의 중립축으로부터의 거리, 최종강도등을 이용해 전체 선박의 종굽힘 모멘트를 구하는 식이다.

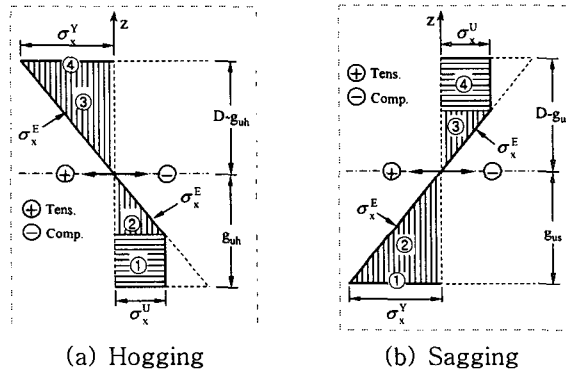


Fig.4 Longitudinal stress distribution over the hull ships cross-section at the overall collapse state as suggested by Paik & Mansour(1995)

Sagging

$$M_{us} = -\sum_1 \sigma_{xi}^Y A_i (g_{us} - z_i) - \sum_2 \sigma_{xj}^E A_j (g_{us} - z_j) + \sum_3 \sigma_{xk}^E A_k (z_k - g_{us}) + \sum_4 \sigma_{xl}^Y A_l (z_l - g_{us}) \quad (5)$$

Hogging

$$M_{uh} = -\sum_1 \sigma_{xi}^U A_{ci} (g_{uh} - z_i) - \sum_2 \sigma_{xj}^E A_{ej} (g_{uh} - z_j) + \sum_3 \sigma_{xk}^E A_k (z_k - g_{uh}) + \sum_4 \sigma_{xl}^Y A_l (z_l - g_{uh}) \quad (6)$$

여기에서

$$g_{us} = \frac{\Sigma_1 \sigma_{xi}^Y A_i z_i + \Sigma_2 \sigma_{xj}^E A_j z_j + \Sigma_3 \sigma_{xk}^E A_{ek} z_k + \Sigma_4 \sigma_{xl}^U A_{el} z_l}{\Sigma_1 \sigma_{xi}^Y A_i + \Sigma_2 \sigma_{xj}^E A_j + \Sigma_3 \sigma_{xk}^E A_{ek} + \Sigma_4 \sigma_{xl}^U A_{el}} \quad (7)$$

$$g_{uh} = \frac{\Sigma_1 \sigma_{xi}^U A_{ei} z_i + \Sigma_2 \sigma_{xj}^E A_{ej} z_j + \Sigma_3 \sigma_{xk}^E A_{ek} z_k + \Sigma_4 \sigma_{xl}^Y A_{li} z_l}{\Sigma_1 \sigma_{xi}^U A_{ei} + \Sigma_2 \sigma_{xj}^E A_{ej} + \Sigma_3 \sigma_{xk}^E A_{ek} + \Sigma_4 \sigma_{xl}^Y A_{li}} \quad (8)$$

$$\epsilon_{xi} = \frac{\sigma_B}{E_i} (1 - \frac{z_i}{g_e}), \quad \epsilon_{xi} = \frac{\sigma_D}{E_i (D - g_e)} (z_i - g_e) \quad (9)$$

$\sigma_{xi} = E_i \epsilon_{xi}$, $\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \Sigma_4$ 는 Fig.4 에서 각 구간에서의 합, σ_B = 최종강도 이전에서의 선저부분 응력, σ_D = 최종강도 이전에서의 갑판부분 응력을 나타낸다.

이상의 설계식들을 이용한 선박의 최종 중강도를 평가하기 위한 유한요소 해석코드 ALPS/USAS가 개발되어 설계지원 목적으로 유용하게 활용되고 있다. Fig.5는 ALPS/USAS를 이용하여 해석대상 선박의 중앙 횡단면을 모델링한 결과이다. 전술한 바와 같이 두 종류의 모델들을 이용하여 상세모델링이 이루어 졌다.

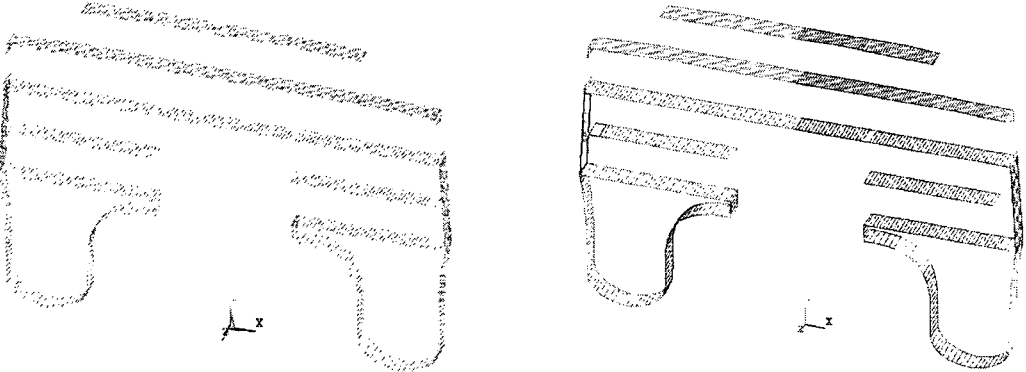


Fig.5 ALPS/USAS model for Aluminum catamaran passenger ship (Plate-Stiffener Combination model and Separation model)

식(5)~(9)를 바탕으로 선박 최종 중강도 평가용 비선형 유한요소 해석 프로그램 ALPS/USAS를 이용하여 알루미늄 합금 선박의 최종 중강도에 대한 해석을 수행하였고, 선박의 안전성 평가를 위해 결과값들을 IACS(국제선급협회)규정에 의해 계산된 중 굽힘 모멘트에 대한 결과값과 비교하였다. 선박의 안전하기 위해서는 선박의 중 굽힘 모멘트의 값이 작용하는 외하중보다 더 크게 나와야 하는데 본 연구에서는 IACS규정으로서 선박에 작용하는 외하중 값을 구해내었고, ALPS/USAS를 통해 얻어진 중 굽힘 모멘트와 비교하였다. IACS규정에 의한 외하중 경험식은 선박이 정수중에 작용하는 정수 중 굽힘 모멘트(M_w)값과 선박이 파랑 중에 있을 때 선박에 가해지는 파랑중 굽힘 모멘트(M_{sw})값으로 이루어져 있고, 이들의 합(M_t)보다 선체의 최종 중강도 굽힘

모멘트보다 크다면 선박은 안전하다고 할 수 있다. 외하중 경험식을 식(10)~(14)에 나타내었고, ALPS/USAS을 이용해 도출된 최종 종강도 종 굽힘 모멘트를 Table 2에 나타내었고, 외하중 경험식에 의한 하중값의 결과비교를 Table 3에 나타내었다.

$$M_t = M_{sw} + M_w \quad (10)$$

$$M_{sw} = \begin{cases} +0.015C_1L^2B(8.167 - C_b) & \text{(kNm)} \\ -0.065C_1L^2B(C_b + 0.7) & \text{(kNm)} \end{cases} \quad (11)$$

$$M_w = \begin{cases} +0.19C_1C_2L^2BC_b & \text{(kNm)} \\ -0.11C_1C_2L^2B(C_b + 0.7) & \text{(kNm)} \end{cases} \quad (12)$$

$$C_1 = \begin{cases} 10.75 - [(300 - L)/100]^{1.5} & \text{for } 90 \leq L \leq 300 \\ 10.75 & \text{for } 300 < L \leq 350 \\ 10.75 - [(L - 350)/150]^{1.5} & \text{for } 350 < L \leq 500 \end{cases} \quad (13)$$

$$C_2 = 1.0 - \text{선체 중앙 횡단면} \quad (14)$$

Table 2 Ultimate strength of aluminum passenger ship hull under longitudinal compressive load- results

Plate-Stiffener Combination model		
For Hogging (MNm)	slight level	427.87
	average level	405.21
	severe level	366.7
For Sagging (MNm)	slight level	-352.7
	average level	-324.56
	severe level	-275.33
Plate-Stiffener Separation model		
For Hogging (MNm)	387.47	
For Sagging (MNm)	-379.31	

Table 3 Comparisons of total vertical bending moment and ultimate strength of aluminum passenger ship hull

	For hogging (MNm)	For sagging (MNm)
$M_{L,IACS}^*$	276.46	-276.45
$M_{L,USAS-PSC}^*$	405.21	-324.56
$M_{L,USAS-PSS}^*$	387.47	-379.31
$M_{L,USAS-PSC} / M_{L,IACS}$	1.46	1.17
$M_{L,USAS-PSC} / M_{L,IACS}$	1.40	1.37

※ $M_{L,IACS}$: IACS 규정

$M_{L,USAS-PSC}$: result of Plate-Stiffener Combination model

$M_{L,USAS-PSS}$: result of Plate-Stiffener Separation model

Table 3에서 나타냈듯이, 계산에 의해 도출된 최종 강도값은 IACS rule에 의해 도출된 선박에 작용하는 하중값에 비해 hogging상태에서 대략 1.4의 안전율을, sagging 상태에서 1.2정도의 안전율을 나타내는 것으로 계산되었다. 특히 본 평가에 사용된 rule의 하중식에서 정수중과 파랑중에서의 상관관계에 의한 계수값을 고려하지 않아, 오히려 더 높은 하중을 제시함에도 불구하고 계산된 최종 강도값을 만족하는 것으로 나타났다.

4. 결 언

본 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 본 연구에서는 알루미늄 구조물이 강구조물과 최종한계상태 거동이 판이하게 다르다는 점에 착안하여, 국부구조의 강도 평가법을 알루미늄 구조재료에 적합한 설계식을 새로 개발하였다. 즉, 알루미늄 용접시 발생하는 열영향부 (HAZ)를 고려한 알루미늄 구조 전용 최종강도 설계식을 개발하였다.
2. 개발된 알루미늄구조 전용 최종강도식을 바탕으로 강판구조의 전용해석 소프트웨어인 ALPS/USAS를 확장하고, 본 프로그램의 적용성을 검증하기 위하여, 알루미늄 합금 고속 쌍동선을 대상으로 종굽힘모멘트가 작용할 때의 최종 종강도에 대한 조사를 수행하였다.
3. 해석시 적용된 두 가지 모델(Plate-Stiffener Combination모델, Plate-Stiffener Separation모델)에 관한 각각의 최종강도 설계식을 적용하여, 해당결과값을 비교 및 분석하고, IACS rule이 제시하는 외하중 경험식과 비교하여 해당 선박의 안전성을 평가하였으며, 해당 선박은 전체종굽힘모멘트에 관하여 충분한 안전성을 확보하고 있다고 판단된다.

참고문헌

- [1] J. K. Paik and A. K. Thayamballi, "Ultimate Limit State Design of Steel-Plated Structures", 2003, John Wiley & Sons.
- [2] J. K. Paik and A. Duran "Ultimate Strength of Aluminum Plates and Stiffened Panels for Marine Applications ", Marine Technology, Vol.41, No.3, 2004, pp.108-121
- [3] J. K. Paik and A. E. Mansour, "A simple formulation for predicting the ultimate strength of ships", Journal of Marine Science and Technology, The Society of Naval Architects of Japan, Vol.1, No.1, 1995, pp.52-62