

쌍동형 카페리 구조설계용 프로그램 개발

이정호* · 오정모** · 서광철***†

* 목포해양대학교 대학원, ** 목포해양대학교 기관시스템공학과, *** 목포해양대학교 조선해양공학과

Development of Structural Design Program to apply the Twin-Hull Car-ferry

Jung-Ho Lee* · Jung-Mo Oh** · Kwang-Cheol Seo***†

* Graduate School of Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

** Department of Marine Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

*** Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

요 약 : 쌍동선의 경우 선미의 형상적인 특이성으로 인하여, 두 개의 선체를 연결하는 부위는 선박의 항해 시 발생하는 피칭운동에 의한 손상이 자주 발생하고 있으며, 이로 인하여 주변부에 대한 구조보강 설계가 필요하다. 이러한 국부 보강에 대한 구조설계 지침이 명확하지 않기 때문에, 엔지니어는 판 두께, 보강재 변경 및 프레임 간격을 줄이는 방법으로 대응을 하고 있다. 그러나 이러한 부위는 선박의 길이방향으로 약 85% 이상 위치하고 있기 때문에, 최소 구조부재를 국부 보강하여 중량 증가를 최소화하고, 이에 따른 건조비 증가 및 견인확보의 문제를 해결해야 한다. 따라서 본 연구에서는 KR(한국선급)의 고속경구조선 규칙을 바탕으로, 쌍동형 카페리 구조설계 절차를 분석하고 추가로 필요한 항목을 발굴하여 쌍동형 구조설계 프로그램을 개발하였다. 좌굴강도 평가 절차서 및 프로그램에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여, 타 선급의 기준과 비교 검토를 수행하여 6%내 차이가 발생함을 확인하였다.

핵심용어 : 쌍동선, 카페리, 구조설계, 국부보강, 구조설계 프로그램

Abstract : Twin-hulls frequently incur structural damage at connecting members between the hull and deck induced by pitching motions during voyages. so, reasonable reinforcement is necessary around vulnerable spots such as corner knuckle, the chine bottom and inner hull. Since guidelines for structural design are not clear, engineers often respond by reinforcing plate thickness, changing stiffener sizes and reducing frame spacing, etc. These members constitute about 85% of the longitudinal dimensions of the ship, so it is necessary to locally reinforce certain points to minimize weight stress, and also solve construction cost problems while securing the freeboard margin. Therefore, we developed a new program by analyzing the structural design procedures for the twin car-ferrys based on Korean Register of Shipping (KR) High Speed Craft Rules, identifying items that need to be added. In order to ensure the reliability of buckling estimations for procedures and design programs, we conducted a comparative study with other standards and confirmed that differences were minimal.

Key Words : Twin-hull, Car ferry, Structural design, Local reinforcement, Structure Design program

1. 서 론

쌍동형 선형은 두 개의 선체를 가진 선박을 말하며, 물에 잠기는 선체를 서로 연결하는 갑판을 두고 이 위에 구조물을 설치한 선형을 말한다. 두 개의 선체는 일부 혹은 전부가 수면아래 잠수하거나(Swath), 수면 상에 부양하거나(Planing), 파

도를 뚫으며(Wave-piercing) 항해한다. 이러한 선형의 선박은 선체중량의 대부분을 정적 주력으로 지탱하고 있는 쌍동형 선박을 가리키며 쌍동선은 크게 단순한 보통형 쌍동선과 파랑관통형(Wave-piercing) 쌍동선으로 나눌 수 있다(Kim et al., 2011). 쌍동선의 경우 선미의 형상적인 특이성으로 인하여, 두 개의 선체를 연결하는 부위에 선박의 항해 시 발생하는 중동요(Pitching) 운동으로 잦은 응력 집중이 발생되며, 구조강도가 취약하다(Park et al., 2009). 이러한 현상으로 인하여, 주변부에 대한 국부보강 설계가 필요하다. 이러한 이유로

* First Author : lljh4760@naver.com, 061-240-7476

† Corresponding Author : kcseo@mmu.ac.kr, 061-240-7303

국부 보강에 대한 구조설계 시, 평가 지침이 명확하지 않기 때문에, 엔지니어는 판 두께, 보강재 변경 및 프레임 간격을 줄이는 방법을 활용하여 설계를 진행하고 있다. 그러나 이러한 부위는 선박의 길이방향으로 약 85% 이상 위치하고 있기 때문에, 최소 구조부재를 선택적으로 국부 보강하여 중량 증가를 최소화하고, 이에 따른 건조비 증가 및 건현 확보의 문제를 해결해야 한다.

Park and Ko(2005)는 강선요트의 설계에 사용된 시제선에 관한 구조강도 평가를 수행하기 위해 영국선급(LR)에서 제시하는 해석 절차서를 이용한 구조강도 평가를 수행하였다.

Park et al.(2009)은 38피트 보급형 쌍동형 요트의 구조설계 및 구조 안정성 평가를 위해 해석적 방법을 이용하여 기술하였으며, 구조설계 과정에서는 노르웨이 선급(DNV-GL), 한국선급(KR), 미국선급(ABS)에서 제시하고 있는 평가항목에 대한 검토를 하였다.

따라서 본 연구에서는 KR(한국선급)의 기준(2017a; 2017b)을 바탕으로, 쌍동형 카페리 구조설계 절차를 분석하고 추가로 필요한 항목을 발굴하여 프로그램을 개발하였다. KR(한국선급)의 규칙은 DNV-GL(노르웨이선급)의 구조기준을 바탕으로 제정되어 있으며, 절차서 및 프로그램에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여, 타 선급의 기준과 비교 검토를 수행하였다.

본 연구의 결과물은 조선공학적 검증을 통한 기본 자료로 활용할 수 있으며, 쌍동형 여객 및 차도선의 구조최적화를 통해 경량화 및 안전성 평가 기술을 확보할 수 있다. 중, 저속형 쌍동형 여객 및 차도선 개발을 통해 기존 단동형 여객 및 차도선 대비 복원성능을 향상시키고 중, 저속형 선체에 대한 최적 구조설계를 통해 쌍동형 여객 및 차도선의 경량화, 안전성을 확보하는 것이 가능할 것으로 예상된다.

2. 쌍동형 카페리 구조설계

2.1 설계기준 검토

국내기준의 적용을 받는 쌍동선의 경우, 선체와 연결되는 데크에 대한 구조강도 확인을 위해서는 재질에 관계없이 “알루미늄선의 구조설계기준”에 언급되어 있는 쌍동선 연결부 관련 규정을 적용하도록 되어 있다. 앞서 언급한 알루미늄선의 구조설계기준은 KR(한국선급)의 “고속경구조선 규칙”을 그대로 받아들여서 내용은 거의 같다. Table 1은 단동선과 다동선의 설계 기준에 대해서 국내 및 국제 기준으로 분류하여 정리하였다(KR, 2017a).

Table 1. Design criteria of twin-hull vessel

Category	Design Criteria	Mono-hull	Multi-hull
Domestic	Structural design for steel craft	○	×
	Structural design for FRP craft	○	×
	Structural design for aluminium craft	○	○
International	ISO 12215-5,7	○	○
Classification of Societies	High speed craft by KR	○	○

Table 2는 본 연구에서 개발하고자 하는 쌍동형 카페리의 주요치수를 나타내고 있다.

Table 2. Principal of dimension

LOA	60.00 m
L-scantling	58.00 m
Breath	19.80 m
Depth	4.20 m
Draft	2.50 m
C _b	0.52
Speed	15.00 knots
Displacement	1,121.00 ton

KR(한국선급)의 고속경구조선 규칙에서는 경구조선과 고속경구조선으로 구분하고 있으며, 선속이 25노트 이상인 경우에 한해서만 고속경구조선으로 분류하며, 주로 파워요트나 순찰용 관공선이 해당된다. 경구조선의 경우 만재배수량이 아래 식(1) 이하인 선박에 해당되도록 규정하고 있으며, 개발선의 주요 제원은 Table 2를 참고한다.

$$(0.135 \times L \times B)^{1.5} \text{ (ton)} \quad (1)$$

L : 선박 길이, B : 선박 폭

따라서 본 연구에서 대상으로 하고 있는 쌍동형 카페리의 경우 경구조선에 해당된다.

2.2 선급 주요 하중

2.2.1 호킹 및 새깅 굽힘 모멘트

호킹 굽힘 모멘트로 최대 하중조건에서의 정수 중 모멘트 추정치에 관한 호킹은 $0.5\Delta L$ 로 계산을 하고 새깅은 “0”으로

계산을 하도록 KR(한국선급) 기준에 명시되어 있다. 용골상면으로부터 쌍동선 연결구조 하단까지의 높이를 이용하여 호깅과 새깅 시 쌍동선연결부의 잠수에 의한 영향 계수(k_2, k_3)를 구한다. 최종적으로 모든 계수를 이용하여 휨모멘트를 계산하며, 구조설계한 단면계수와와의 비교를 통하여 구조안전성을 평가한다.

$$M_{Hog} = M_{SW} + 0.19C_W L^2 (B_{WL} + k_2 B_{tn}) C_b \quad (2)$$

$$M_{Sag} = M_{SW} + 0.14C_W L^2 (B_{WL} + k_3 B_{tn}) (C_b + 0.7) \quad (3)$$

M_{SW} : 최대하중 조건에서의 정수 중 모멘트

L : 선박 길이

C_W : 파랑계수 (0.08 L)

C_b : 방형계수

B_{tn} : 쌍동선 연결부의 너비(m)

B_{WL} : 중앙부의 수선면적

k_2, k_3 : 호깅 및 새깅 시의 쌍동선 연결부의 잠수에 의한 영향 계수

2.2.2 쌍동선 연결구조의 작용하는 횡방향 굽힘 모멘트

항해 범위에 따라 쌍동선 선체 중심 간의 길이(b)와 항해 범위에 따른 계수(s)에 의하여 횡방향 굽힘 모멘트를 식(4)와 같이 계산을 하며, Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_s = \frac{\Delta a_{cy} b}{s} \quad (4)$$

M_s : 횡방향 굽힘 모멘트, Δ : 선박의 배수량

a_{cy} : 설계 수직 가속도, s : 항해범위에 따른 계수 (Table 3)

b : 쌍동형 선체 중심 간의 길이

Table 3에서는 KR(2017a)에서 분류한 항해범위에 따른 두 가지 계수 값의 정의에 대해서 나타내고 있다.

Table 3. Coefficients according to voyage range

Category of voyage range	s	q
SA4	8.0	6.0
SA3	7.5	5.5
SA2	6.5	5.0
SA1	5.5	4.0
SA0	4.0	3.0

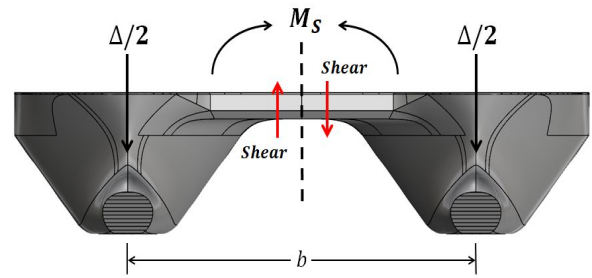


Fig. 1. Bending moment of connection structure.

2.2.3 쌍동선 종·횡 비틀림 모멘트

쌍동선 길이와 폭을 이용하여 종 비틀림 모멘트(M_p)와 횡 비틀림 모멘트(M_t)를 식(5)와 (6)을 이용하여 계산하며, Fig. 2와 같이 표현할 수 있다.

$$M_p = \frac{\Delta a_{cg} L}{8} \quad (5)$$

$$M_t = \frac{\Delta a_{cg} b}{4} \quad (6)$$

M_p : 종 비틀림 모멘트, M_t : 횡 비틀림 모멘트

a_{cg} : 설계 수직 가속도, L : 선박 길이

b : 쌍동형 선체 중심 간의 길이

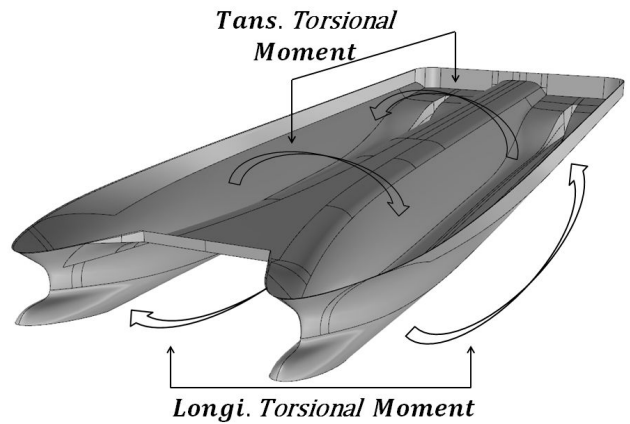


Fig. 2. Torsional moment of connection structure.

2.3 구조강도 검토 절차

본 연구에서 다루고 있는 쌍동형 카페리에 대한 구조강도 계산은 KR(한국선급)의 “고속경구조선 규칙” 기준을 바탕으로 사용자 편의 설계프로그램을 구성하여, 스텝별로 결과 값을 도출하도록 하였다. 구조설계 시에 상세 검토가 필요한 항목이지만, 평가 기준이 미흡한 좌굴강도 검토 및 용접 강도에 대해서 신규 개발하여 적용성을 검증하였다.

KR(한국선급)의 “고속경구조선 규칙”에 의한 주요 하중 및 두께 계산에 대한 주요 프로세스는 아래 Fig. 3과 같다. 프로젝트의 선주 요구사항 및 조선공학적 주요 특성치에 대한 검토결과를 바탕으로 하여, 주요 제원을 결정한다. 이 과정 이후에 선급기준에 의해 하중에 대해서 개별 계산을 하고, 각 부재의 두께 및 크기를 산정하며, 필러 부재에 대해서는 유일하게 Euler 탄성좌굴 응력식을 이용하여 좌굴검토를 하도록 되어 있다. 개별 부재의 검토가 완료되면, 선체 거더 하중과의 응답을 통해 단면을 확정하여 도면 작업을 진행한다. 선급에서 제시하는 기준은 일반적으로 정해진 하중에 의한 최소 판 두께 정의, 보강재의 최소단면계수로 분류할 수 있다. 그러나 이러한 방법은 선박의 크기 및 종류에 따라 명확하게 분류가 되지 않는 영역에서는 상당히 많은 유용영역의 값들을 도출할 수 있기 때문에, 구조설계 시 경험치 적거나, 합리적인 증빙에 의한 피드백이 부족한 경우라면 상당한 시간을 시행착오 해야만 최종적인 부재 치수를 결정할 수 있다는 단점을 지니고 있다. 따라서 중/소형 조선소 및 설계 엔지니어링 업체 입장에서는 쉽게 접근하면서 신뢰할 수 있는 수준의 결과를 빠른 시간 내에 제공해줄 수 있는 프로그램이 절실하게 필요 시 되고 있다.

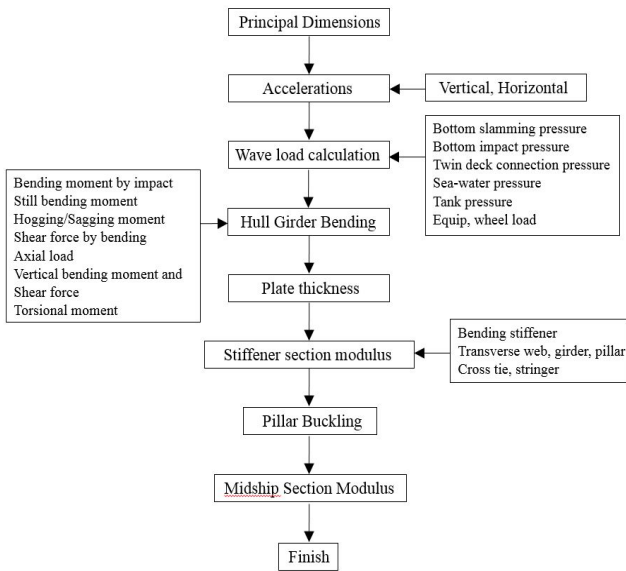


Fig. 3. Flow-chart of structural design by KR.

Table 4는 KR(한국선급) 기준에 의한 최소 판 두께 기준과 초기 확정된 판 두께 결과를 비교하고 있다. 선측외판의 경우 기준의 최소 요구치는 6.16 mm이지만, 생산 시 발생하는 열 변형 및 제작 시 공차 문제 등을 고려하여, 두께를 반영한 결과이며, 추후 개발한 구조설계 프로그램을 통하여, 추정치에 대한 검증을 추가로 실시하였다.

Table 4. A comparison of minimum requirement value by KR and results from engineering decision

Member Name	KR (mm)	Initial Design (mm)
Deck plate	9.52	13.50
Keel plate	8.33	12.00
Side shell	6.16	12.00
FWD plate	11.00	13.00
Strength deck	6.50	15.00
BHD	5.41	9.00
Deck BHD	3.68	8.00
Bulwark	4.50	7.00
E.R plate	4.25	8.00

*** Deck Plate calculation of Car-ferry**

Input: MEGA Truck(5ton) 245/70R19.5-18PR

Category	Value	Unit	note
Deck beam spacing	0.5	(M)	Longitudinal space
Weight of vehicle	10	(TON)	Loading weight 5ton / Vehicle weigh 5ton
Tire width	245	(mm)	
Width between tires	1	(M)	Distance between center of wheel grand plane
Exclusive use	etc		Unloading only or Etc
Single tire / Double tire	Single tire		Single tire or Double tire

2) Calculated variable

Category	Value	Unit	note
Wheel load	24.525	(KN)	4POINT (Even division)
Tire grounding length	a	0.247614	(M)
	b	0.245	(M)
	a	0.178282	(M)
	b	0.49	(M)
2S+a	1.247614	(M)	The main factor to be compared with T

3) Formula

Category	C	K	a	b'	e	n	t _{req}	Grade	t _{act}	JUDGE
Value	5.1768091	1	0.247614	0.245	2	3	9.526	MILD	12	OK

*** Hull structure of ship building with steel**

*** MAIN DIMENSION**

Category	Value	Unit
Length over all	60	m
Breadth	19.8	m
Draft	4.25	m
Span of stiffeners	0.5	m

501. Standard spacing of stiffeners

Formula	S _{r-req}	S	JUDGE
S _r = 0.002(240+L)	0.6	0.5	OK

602. Longitudinal stiffener

$$Z_1 = \frac{k(P_{\text{또는}} P_{st})S^2}{\sigma} \quad (\text{cm}^3)$$

Section	k	m	σ	K	Z _{req}	P(KN/m ²)	S	I(SPAN)	GRADE
UPP. DK	83	#REF!	160	1	117.2375	113	0.5	2	MILD
BTM LONGL	83	#REF!	160	1	68.475	66	0.5	2	MILD
S.S.LONGL	83	#REF!	160	1	68.475	66	0.5	2	MILD

Fig. 4. Structural design both plate and stiffener.

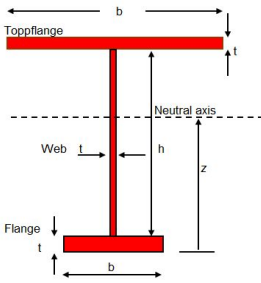
Fig. 4는 선급기준에 언급된 절차서를 근간으로 하여, 구조설계 시 사용할 수 있도록 부재두께 계산 및 구조강도 평가를 위해 엑셀 기반으로 개발한 프로그램을 사용하여 계산

된 일례를 나타내고 있다. 사용자가 주요 매개변수(길이, 폭, 하중, 특징계수)만 입력을 하면 단계별로 부재의 치수가 자동으로 계산되도록 되어 있으며, 계산과정을 이해할 수 있도록 계산에 대한 설명을 추가하였다. 만약 잘못된 값을 입력 할 경우에 대비해, 하중 값이 잘못 링크가 되거나 입력한 값이 한계 범위를 넘은 경우에는 모든 결과 값을 "0"로 나타내게 되어 있어서 사용자의 실수를 인지하도록 설정하였다.

Fig. 5는 보강재의 치수 설계 및 구조강도 만족 여부를 확인하기 위한 계산 과정으로서, Flat-bar, angle-bar, T-bar 보강재에 대한 검토가 가능하다. 개별 부재에 대한 구조강도 검토가 1차적으로 완료된 후, 단면에 대한 구조안전성 계산을 위해서 Fig. 6과 같은 단면계수 계산을 위한 단면정의가 필요하다. 본 개발 프로그램에는 이 기능까지 완성하지 못하여, 기존 상용프로그램인 Nauticus Hull(DNV-GL software, 2015)을 이용하여 단면계수 값을 산정하였다. 향후, 이 기능까지도 손쉽게 사용자가 정의하고 결과를 예측할 수 있도록 업데이트 할 예정이다.

Section modulus calculations for stiffeners and girders

Requirements are based on the class rules from Det Norske Veritas



Original design	Input
Longitudinal stiffeners	
Topflange eff breadth b_e	150 cm
Topflange thickness t	9 cm
Web height h	35 cm
Web thickness t	9 cm
Bottom flange breadth b	22.5 cm
Bottom flange thickness t	2.5 cm

$\Sigma x_i A_i$	63070 cm ³
ΣA_i	1721.3 cm ²
Neutral axis z	36.6 cm
Moment of inertia	223723 cm ⁴
Section Modulus Z	6106 cm ³
	623

Effective flange of the girder: $b_e = 0.84 b$
(DnV Part 3, Ch 7 Sec 3 C400)
Effective flange of the stiffeners: $b_e = 60 * t$ (web)

Design rules	
Span l	3.68 m
Spacing b	0.994 m
Design pressure	17.17 kN/m ²
Required Z	204 cm ³

Fig. 5. Section modulus calculation of stiffeners and girders.

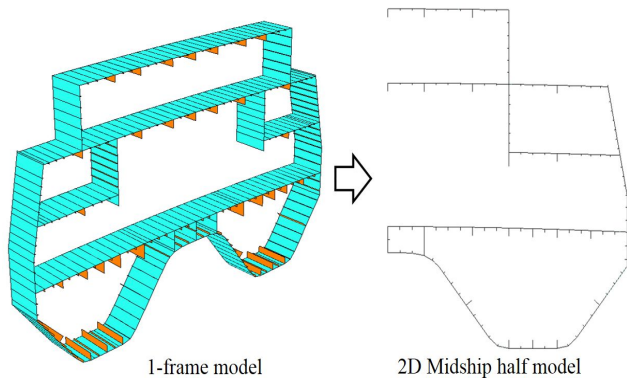


Fig. 6. Analysis model for mid-ship section.

3. 구조설계 및 평가 모듈 개발

3.1 좌굴평가 모듈

선급기준에서 상세 평가를 하고 있지 않는 유효 판넬에 대한 좌굴 검토를 효율적으로 수행하기 위해서, 본 연구에서는 노르웨이 선급 기준(DNV-RP-C201, 2010)을 이용하여 Fig. 7 같은 그래픽 인터페이스 창으로 구성된 모듈을 프로그램 내 추가하였다.

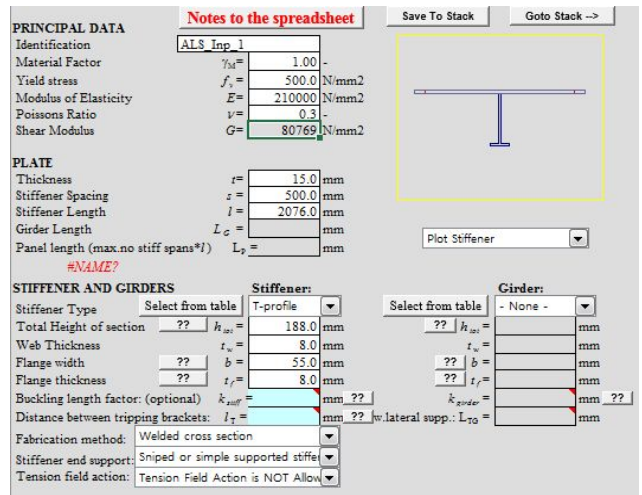


Fig. 7. Buckling Module Input.

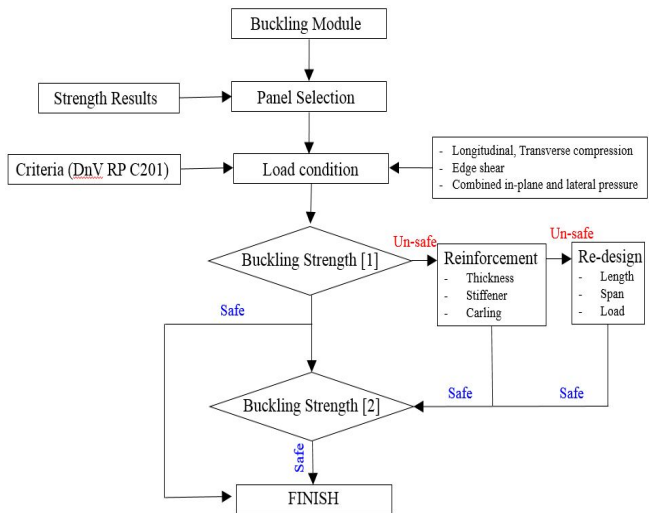


Fig. 8. Buckling check flow-chart in buckling module.

Fig. 8에서는 유효 판넬에 대한 좌굴강도 검토를 손쉽게 하도록 본 연구를 통해서 개발한 좌굴모듈 계산 프로세스의 구성도를 나타내고 있다. 앞 장에서 언급한 여러 가지 하중

계산 및 부재에 대한 구조강도 검토를 수행 한 후, 중앙부 단면 부재에 가장 큰 압축응력이 발생하는 단계에서의 응력 분포를 Fig. 9의 결과로부터 확인하였다.

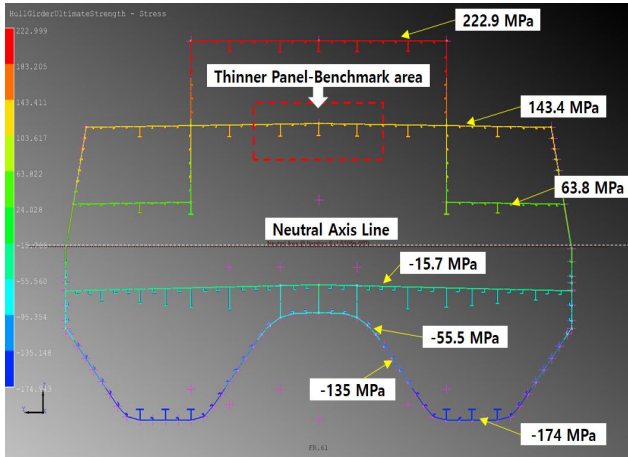


Fig. 9. Hull girder ultimate strength.

이 과정은 수 계산을 통해서도 가능하지만 위치별로 부재의 두께, 보강재 치수, 하중 성분비가 다르기 때문에 결과의 정확도는 떨어진다. 이를 보완하기 위하여 본 연구에서는 KR(한국선급)에서 개발한 “Sea Trust - Hull Scan V.1.1”(KR software, 2015)을 이용하여, 별도의 좌굴강도 평가 및 응력 성분을 추출하였다. 이 프로그램은 카페리 전용선박 기준 (KR, 2017b)에 제시된 하중 및 평가 기준에 따른다.

선택된 유효 판넬에 대해서, 치수 및 강재 정보를 입력하고, 강도해석에서 추출한 응력성분(길이 방향, 폭 방향 압축 응력 및 전단응력)을 넣으면 6가지 하중조건별로 검토를 수행하며, 가장 안전율이 적게 나오는 값을 사용자에게 알려 준다. 이때 최대허용응력 비율은 1.0이며, 이를 상회하는 값은 추가 보강을 통해서 검토가 이뤄져야 한다. 보강하는 방법은 두께증가, 보강재 사이즈 증가, Carling 보강재 추가를 고려할 수 있으며 사용자는 Fig. 7의 입력창에서 수정이 가능하다. 만약 이러한 보강조치를 하였음에도 불구하고 좌굴강도가 만족되지 않는다면, 구조설계 단계로 되돌아가서 구조배치를 변경하고, 하중분석을 통하여 만족하는 안이 도출 될 때까지 반복하여야 한다.

본 개발된 모듈에서는 자동으로 최적의 해를 찾는 기능은 제공하지 않는다. 일반적으로는 보강 단계에서 해결될 수 있기 때문에 그 부분에 한해서만 지원하는 것으로 하였다. 초기 설계안 대해서 좌굴강도를 만족하지 않는 경우에 대한 재평가 후 만족이 되면, 좌굴강도에 대한 구조 안전성은 충분히 검증되었다라고 확신할 수 있다. 개발된 모듈의 신뢰

성을 확인하기 위하여, 타 선급에서 채용하고 있는 좌굴평가 프로그램의 결과와 비교를 수행하였다. 비교를 수행한 유효 판넬 정보는 아래와 같으며, Fig. 9의 결과로부터 보강재로 둘러싸인 유효 판넬 영역을 Fig. 10과 같이 간략화 하였다. 계산모델의 경계부 주변으로는 다양한 하중성분(중/횡방향 압축하중, 면내전단하중)이 존재하지만, 종방향 압축성분이 대부분을 차지하고 있으므로, 단일 압축하중 조건에 대해서 이상화하여, 타 기준과의 결과와 비교를 수행하였다.

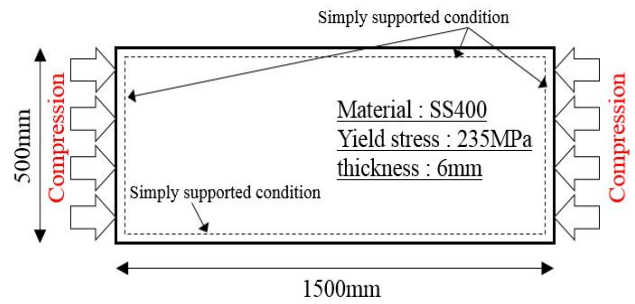


Fig. 10. Rectangular model for benchmark calculation.

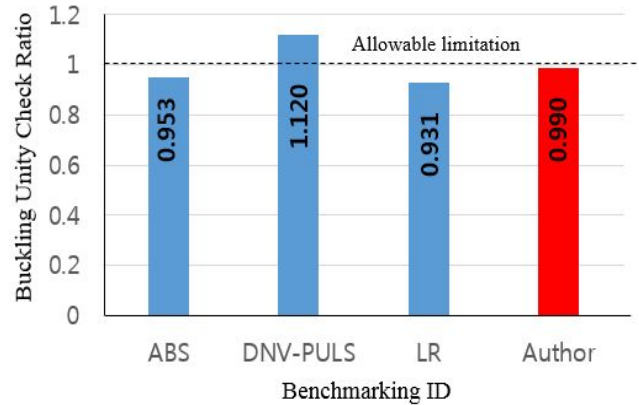


Fig. 11. A comparative results for buckling strength according to different criteria from classification of societies.

선급기준 별 좌굴강도 검토 결과를 Fig. 11에서 나타내고 있으며, 개발된 좌굴모듈은 미국선급(ABS, 2017), 로이드선급(Ship Right LR, 2004)보다 큰 값을 도출하였으며, 노르웨이 선급(DNV RP C201, 2010)보다는 작은 값을 계산하였다. 이는 선급별로 주변보강재의 효과 및 자체적인 안전계수가 조금씩 상이하기 때문으로 사료된다. DNV-PULS는 좌굴강도 계산 시 판의 초기 처짐을 필수적으로 고려하도록 프로그램화 되어 있다. 일반적으로 용접작업에 의해 발생하는 초기 처짐의 영향은 좌굴강도 및 최종강도를 고려하지 않았을 때에 비해서 낮게 평가한다. 타 선급프로그램 및 좌굴모듈을 이

러한 영향을 고려하지 못하기 때문에, 위 프로그램을 통한 계산 결과가 다소 보수적인 값을 제시한 것으로 판단된다.

3.2 용접각장 평가

카페리 구조설계가 완료되면, 용접부에 대한 강도 검토가 필수적으로 수행되어야 한다. 지금까지의 용접부 강도에 대한 평가는 상세히 검토되지 않고, 모재와 붙는 판중에서 큰 두께의 50% 혹은 70%만큼의 각장을 반영하고 있다. 그러나 선체 구조에 따라서 용접부에 작용하는 하중성분 및 크기는 아주 다양하게 존재하며, 이러한 영향을 무시한 채 일괄되게 적용하는 방법은 중량증가 및 입열량 과다로 인한 변형이 문제가 된다. 따라서 본 구조설계 프로그램에서는 DNV OS C201(2011) 기준을 도입하여 구조설계 단계에서 용접부 강도 평가 및 최소각장을 엔지니어가 결정할 수 있도록 개발하였다.

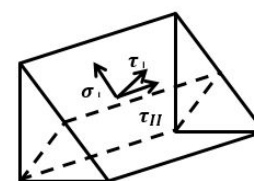
개발된 프로그램 내에 수록된 계산시트를 Fig. 12에서 나타내고 있다. 초기에 엔지니어가 임의의 각장 혹은 각목 수치를 기입하고, 용접부에 작용되는 응력성분(전단, 수직, 수평)을 입력한 후, 허용응력과 비교하여 평가한다. 허용응력은 2가지로 분류하여 가장 작은 값을 우선적으로 만족하도록 코딩되어 있기 때문에, 설계자가 그 결과를 확인하여, 최소 용접량을 결정하면 된다.

개발된 프로그램은 KR(한국선급)의 “고속경구조선 규칙”에 언급된 계산 절차를 근간으로 하여, 판넬의 좌굴강도 평가 및 모든 용접조인트에 대한 강도평가를 수행할 수 있도록 구조설계 프로그램을 구성하였으며, Fig. 13와 같이 표현할 수 있다.

제안된 절차 및 프로그램을 이용하여, 경험적으로 결정된 설계안에 대한 구조안전성을 검증하였으며, 그 결과를 Table 5에 정리하였다. 주로 판 두께는 추정치에 비해서 작은 수치를 결정할 수 있었으며, 벌크헤드의 경우 추정치보다 보강을 해야 하는 결과를 도출하였다. 제안된 프로그램을 이용하여, 사용자는 빠른 시간 내에 안정된 해를 도출할 수 있음을 확인 하였다.

WELDING CONNECTION CALCULATION

** This calculation sheet is based on DNV-OS-C101 Sec.9-Page55.
The design resistance of the fillet weld will be sufficient if both the following conditions are satisfied



$$\sqrt{\sigma_{\perp d}^2 + 3(\tau_{\parallel d}^2 + \tau_{\perp d}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}}$$

and

$$\sigma_{\perp d} \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}}$$

$\sigma_{\perp d}$ = normal design stress perpendicular to the throat (including load factors)
 $\tau_{\perp d}$ = shear design stress (in-plane of the throat) perpendicular to the axis of the weld
 $\tau_{\parallel d}$ = shear design stress (in-plane of the throat) parallel to the axis of the weld
 f_u = nominal lowest ultimate tensile strength of the weaker part joined
 γ_{Mw} = material factor for welds
 β_w = appropriate correlation factor, see below table

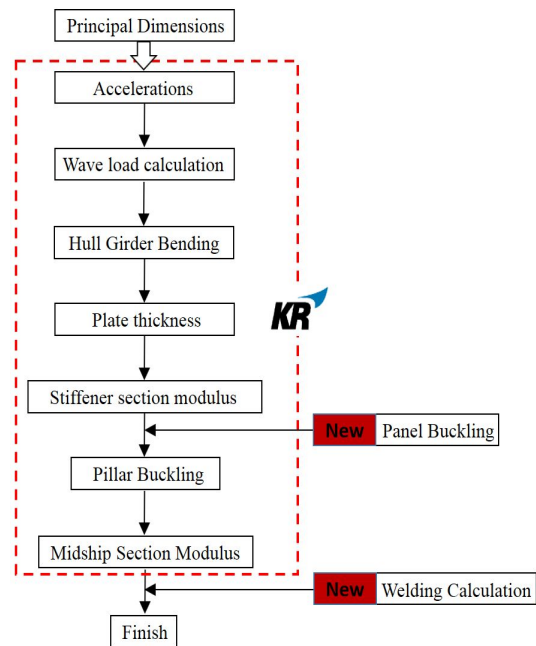


Fig. 13. Flow-chart of newly developed program.

WELDING CONNECTION CALCULATION

** This calculation sheet is based on DNV-OS-C101 Sec.9-Page55.
The design resistance of the fillet weld will be sufficient if both the following conditions are satisfied

	$\sigma_{\perp d}$	$\tau_{\perp d}$	$\tau_{\parallel d}$	f_u	γ_{Mw}	β_w
Joint 1	173.81	173.81	4.37	400	1.3	0.83
Joint 2	173.81	173.81	4.37	400	1.3	0.83
Joint 3	173.81	173.81	4.37	400	1.3	0.83
Joint 4	173.81	173.81	4.37	400	1.3	0.83

$$\sqrt{\sigma_{\perp d}^2 + 3(\tau_{\parallel d}^2 + \tau_{\perp d}^2)} = \begin{matrix} \text{Joint 1} & \mathbf{347.70} \\ \text{Joint 2} & \mathbf{347.70} \\ \text{Joint 3} & \mathbf{347.70} \\ \text{Joint 4} & \mathbf{347.70} \end{matrix} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{Mw}} = \begin{matrix} \text{Joint 1} & \mathbf{370.71} & \text{OK} \\ \text{Joint 2} & \mathbf{370.71} & \text{OK} \\ \text{Joint 3} & \mathbf{370.71} & \text{OK} \\ \text{Joint 4} & \mathbf{370.71} & \text{OK} \end{matrix}$$

$$\sigma_{\perp d} = \begin{matrix} \text{Joint 1} & \mathbf{173.81} \\ \text{Joint 2} & \mathbf{173.81} \\ \text{Joint 3} & \mathbf{173.81} \\ \text{Joint 4} & \mathbf{173.81} \end{matrix} \leq \frac{f_u}{\gamma_{Mw}} = \begin{matrix} \text{Joint 1} & \mathbf{307.69} & \text{OK} \\ \text{Joint 2} & \mathbf{307.69} & \text{OK} \\ \text{Joint 3} & \mathbf{307.69} & \text{OK} \\ \text{Joint 4} & \mathbf{307.69} & \text{OK} \end{matrix}$$

Fig. 12. Module of welding strength calculation.

Table 5. A comparison of minimum requirement value by KR and final results according to design tool

Member Name	KR (mm)	Initial (mm)	Final (mm)
Deck plate	9.52	13.50	12.00
Keel plate	8.33	12.00	9.50
Side shell	6.16	12.00	9.50
FWD plate	11.00	13.00	12.00
Strength deck	6.50	15.00	12.00
BHD	5.41	9.00	10.00
Deck BHD	3.68	8.00	9.00
Bulwark	4.50	7.00	7.50
E.R plate	4.25	8.00	8.00

4. 결론 및 향후 연구과제

본 연구 논문에서는 쌍동형 카페리의 합리적이고 안전한 구조설계를 빠른 시간 내에 할 수 있도록, 기존 선급기준에 의한 구조설계를 수행하였으며, 판넬의 좌굴 및 용접강도 평가 모듈을 추가한 설계 프로그램을 개발하였다.

개발 프로그램은 쌍동형 카페리 뿐 만 아니라, 소형강구조선에 해당되는 모든 선박에 적용 가능하도록 구성되어 있어서, 관련 분야에 종사하는 구조설계 엔지니어에게 빠른 솔루션을 제공해줄 것으로 사료된다.

본 연구를 통한 주요 결론은 아래와 같다.

- (1) 선급기준에 의한 설계 시, 개별 구조 부재에 대한 지침은 잘 정리되어 있으나, 보강판넬을 포함하는 연속 구조 단면의 구조 안전성 평가에 대한 평가는 보완이 필요하다.
- (2) 개발 프로그램은 기본 입력 정보만 입력되면, 선급기준에 의한 부재 계산이 자동으로 활성화됨으로서 빠른 시간에 구조설계가 가능하다.
- (3) 유효 판넬의 좌굴강도 평가 모듈을 추가 개발하였으며, 타 선급과의 검증을 통하여 유효성을 입증하였다. DNV PULS의 결과가 보수적인 이유는 좌굴강도 계산 시 초기 처짐의 영향을 고려하기 때문이다.
- (4) 용접부에 대한 강도 평가 및 합리적인 각장 설계가 가능하여 선각중량의 최소화가 가능하도록 하였다.
- (5) 개발 프로그램을 이용하여, 초기 추정된 구조 설계안을 비교하여, 종강도를 구성하는 판부재의 두께를 감소하는 것으로 결정할 수 있었으며, 횡방향 벌크헤드 두께는 증가 시켰다.
- (6) 향후 연속부재단면을 자동으로 모델링 및 자동으로 구조강도 평가를 할 수 있는 모듈을 개발 할 예정이다.

후 기

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2015년도 산학협력력기술개발사업(기업부설연구소 신규설치, No.C032694)으로 수행된 연구결과이며, 위 기관의 지원에 감사를 표합니다.

References

[1] Kim, B. J., S. Y. Kwon, S. C. Kim and J. H. Lee(2011), Comparison study and structure analysis to investigate the

design rule and criteria of catamaran, Journal of the Society of Naval Architectures of Korea. Vol. 48, No. 6, pp. 479-489.

[2] Park, J. S., J. Y. Ko, K. W. Lee and W. J. Oh(2009), Structural analysis of an 38 feet diffusion style for high-speed catamaran yacht, Journal of Navigation and Port Research, Vol. 33, No. 3, pp. 167-174.

[3] Park, J. S. and J. Y. Ko(2005), Estimation about Local Strength using FE-Analysis for Steel Yacht, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 11, No. 2, pp. 77-82.

[4] KR(2017a), Rules for the Classification of High Speed and Light Craft, Vol. 3, pp. 9-47.

[5] DNV-GL software(2015), Rule strength analysis of hull structures, Section scantlings.

[6] DNV OS C201(2011), Structural Design of Offshore Units (WSD Method) Sec 9 : Weld connections, pp. 53-59.

[7] DNV RP C201(2010), Buckling Strength of Plated Structures, pp. 1-33.

[8] KR Software(2015), SeaTrust HullScan, Section longitudinal member calculation.

[9] KR(2017b), Guidance Relating to the Rules for the Classification of Steel Ships Pt 7: Ships of special service, Annex. 7-3, pp. 124-134.

[10] ABS Guide(2017), Buckling and ultimate strength assessment for offshore structures, Section 3, Plates, stiffened panels and corrugated panels, pp. 23-46.

[11] Ship Right-Lloyd's Register(2004), Structural design assessment, primary structures of tankers, Chapter 2 : Primary Structure of Tankers, Section 6 : Buckling acceptance criteria, pp. 40-42.

Received : 2017. 07. 18.

Revised : 2017. 08. 29. (1st)

: 2017. 09. 13. (2nd)

Accepted : 2017. 10. 28.