

20피트급 파워보트의 구조강도 평가 및 최적화

염재선·유재훈[†]
목포대학교 조선해양공학과

Structural Strength Assessment and Optimization for 20 Feet Class Power Boat

Jae-Seon Yum·Jaehoon Yoo,[†]
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Recently, there has been a growing interest in marine leisure sports and high speed power boat for fishing. The prototype of 20 feet class power boat was developed and authors are joined in this government-led project. The research was performed to evaluate the optimal structure and design of the structural strength necessary to ensure the structural safety of the power boat. A new material ROCICORE fiber added to the mat and roving was adopted for high-power tenacity. ANSYS Workbench has been used to make the structural model, evaluate the strength and optimize the structural design. The response of the structure to quasi-static slamming loads according to the rules and regulations of ISO 12215-5, Lloyd's Register of Shipping and Korean Register has been implemented and studied. An optimization study for the structural response is carried out by changing the plate thickness and section modulus of stiffeners. The power boat structure derived fuel efficiency is optimized by performing the best possible structural design to minimize the hull weight.

Keywords : Power boat(파워보트), Design pressure(설계압력), Structural analysis(구조해석), Structural optimization(구조최적화)

1. 서론

1.1 연구배경

최근 정부에서는 국내 레저선박산업의 활성화와 세계 레저선박시장 진출을 위해 FRP 재료를 사용한 20피트급 파워보트에 대한 시제선을 개발하였다. 이러한 연구개발 가운데 보트의 구조안전성을 확보하기 위한 방안이 필요하게 되었고, 이를 만족시키기 위해 단위밀도당 강도인 비강도(Specific strength)가 우수하고 효과적인 적층구성으로 된 재료를 사용한 파워보트에 대한 구조강도 평가를 수행하게 되었다.

본 연구에서는 국제표준규정(ISO 12215-5, 2008)과 로이드선급(LR, 2015)의 special service craft, 한국선급(KR, 2015)의 고속경구조선규칙에서 제시한 동적효과를 고려한 설계하중을 각각 산출하여 비교 검토하였다. 그리고 기존 FRP(Fiber reinforced plastic)선박의 적층구성인 칩스트랜드매트(Chopped strand mat)와 로빙클로스(Roving cloth)의 MR 적층에 ROCICORE 섬유를 추가한 우수한 비강도를 가진 재료를 선체 재료로 사용하였

다. 또한 상용 구조해석 프로그램인 ANSYS Workbench를 이용한 선형 및 구조부재에 대한 모델링 및 동적효과를 고려한 준정적해석을 통하여 구조강도를 평가하였다.

그리고 구조강도를 확보하며 동시에 선체 중량 최소화를 위해 허용응력을 제한조건으로 하고 판재 두께와 보강재의 단면계수를 설계변수로 하는 구조부재 최적화를 수행하여 효율적 연료 사용이 가능한 최적화된 파워보트 구조를 제안하였다.

1.2 관련연구

소형레저선박에 대한 구조강도 평가는 FRP재료를 사용한 단동선 및 쌍동선을 대상으로 연구되어 왔다. 55피트급 복합재료 카터미란에 대해 DNV HSLC 규칙을 적용하여 준정적 슬래밍하중이 선체에 작용할 때의 구조응답에 대한 연구(Ojeda, Prusty & Salas, 2004)를 시작으로 2006년에는 샌드위치형 FRP 재료를 사용한 소형 요트에 대해 기본 구조설계 및 구조해석을 위한 절차적 기법을 제시하고 ISO 설계하중 적용, ABS 규정에 의한 scantling, ANSYS를 사용한 모델링 및 구조해석을 수행하여 소형요트에 대한 구조설계해석 기법을 국내에 처음으로 소개한 논

문이 발표되었다(Shin, et al., 2006). 이후 38피트급 카타마란 요트에 대한 구조해석(Park, 2009), LR과 KR 규정의 하중조건을 적용, MSC. Patran/Nastran의 Shell element로 모델링하여 40피트급 세일링요트에 대한 구조안전성을 평가(Ji, 2010)한 연구가 진행되었다.

그리고 쌍동선의 설계규정 검토를 위해 ISO, LR, KR 규정을 비교 검토하여 쌍동선 설계를 위한 기준을 자체적으로 제시한 연구도 있었다(Kim, et al., 2011). 이처럼 소형요트 또는 쌍동선에 대한 구조평가 연구가 대부분이었고 소형 파워보트에 대한 중량 절감 및 구조강도평가에 대한 연구(Yum, et al., 2012)는 기초적인 최적화 연구만 수행된 바 있다.

2. 파워보트의 구조해석

일반적으로 선박에 대한 구조해석 방법으로는 각 선급협회에서 요구하는 선급규정식에 의해 구조강도를 평가하는 방법이 있고, 또한 새로운 형식의 선박에 대한 구조강도 평가나 국부적인 상세해석이 필요한 경우 유한요소법에 의한 직접강도해석을 통하여 구조안전성을 검토할 수 있다.

선급 규정식에 의한 방법은 선체 중앙단면의 단면계수(section modulus)를 계산하여 선급에서 요구하는 값 이상의 단면계수를 갖는 경우 구조적으로 안전하다고 평가할 수 있다.

유한요소법에 의한 직접강도해석은 전선해석이나 화물창부 일부에 대한 해석으로 진행된다. 파워보트와 같은 소형 선박의 경우 전체 강도해석이 수행되는데, 일반적으로 고속경구조선의 전체 강도해석은 길이 50 m 이상의 선박에 대해 적용한다. 즉, 선박의 길이 $L < 50m$, 그리고 $L/D < 12$ 인 선박으로서 일반적인 고속경구조선 및 경구조선에 대하여는 국부강도를 만족하면 중첩, 전단 및 축하중을 만족하는 것으로 간주할 수 있다(KR, 2015).

따라서 본 연구에서는 기존에 많이 사용되고 있는 매트와 로빙의 조합에 ROCICORE 섬유를 포함한 FRP로 제작되는 20피트급 파워보트에 대하여 재료시험을 통해 물성치를 확보하고, 세 가지 규정에 의해 선저슬래밍이나 선측충격하중과 같은 국부하중을 적용, 구조해석을 수행하여 파워보트의 구조강도 만족여부를 검토하였다.

2.1 재료물성치

20피트급 파워보트에 사용할 재료는 MAT450, ROVING570, ROCICORE300 섬유와 G-613BT 수지를 사용한 재료이며, RTM (Resin Transfer Molding)방식으로 ROCICORE+R.M.R.M의 5개 층으로 적층한 시편에 대한 재료시험 결과 재료물성치는 Table 1 과 같다.

본래 FRP는 등방성재료인 매트와 이방성재료인 로빙이 적층된 복합제이지만, 폴리아우레탄폼과 같은 내진재가 없는 판재의 경우 진공적층방법으로 제작한 시편에 대해 직접 재료시험 결과를 이용하였기에 등가의 균일판재로 가정하였다.

Table 1 Material properties

Material	structural steel	general FRP	2Mat+2Rov+ ROCICORE
Density [kg/m ³]	7,850	2,080	1,494.4
Tensile yield strength [MPa]	250	115	170.46
Young's modulus [GPa]	200	8.770	8.408
Poisson's ratio	0.3	0.23	0.23

2.2 구조해석모델

외부 CAD 프로그램에서 작성한 보트의 선형 CAD 데이터를 기반으로 하고, Fig. 1과 Fig. 2에 보인 파워보트의 일반배치도와 중앙횡단면도를 참조하여 ANSYS Workbench v.16.2에서 구조해석 모델을 작성하였다. 선박의 주요치수를 Table 2에, 구조부재의 두께와 단면계수는 Table 3에 나타낸 바와 같다.

판부재는 SHELL181 요소, 보강재는 단면의 특성이 반영된 BEAM188 요소가 사용되었고, element 5,173개, node 5,071개가 사용되었다(Fig. 3 참조).

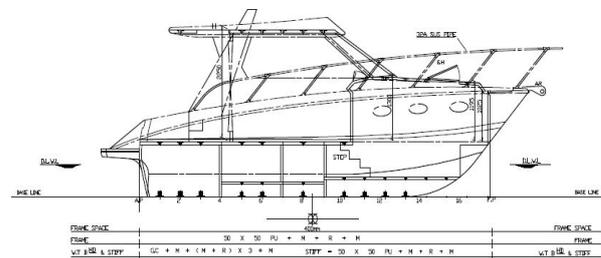


Fig. 1 28 feet power boat

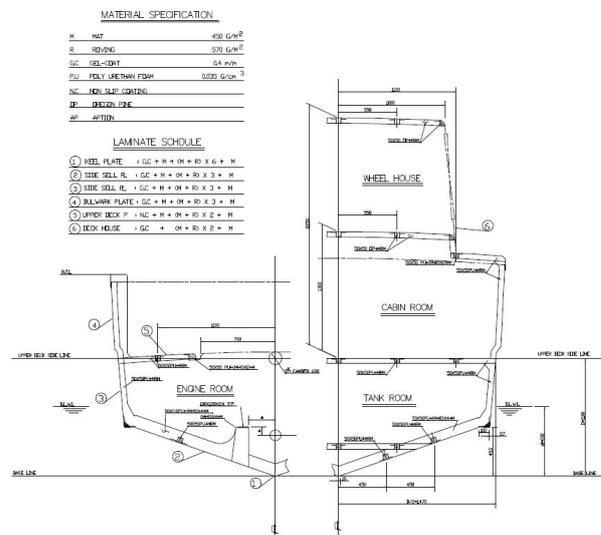


Fig. 2 Midship section of power boat

Table 2 Principal dimensions

Length Overall (LOA)	10.135 m
Length Between Perpendicular (LBP)	7.700 m
Length of Waterline (LWL)	7.323 m
Moulded Breadth (Bmax)	2.940 m
Moulded Depth (D)	1.100 m
Moulded Draft (T)	0.650 m
Design Speed (Vs)	25 knots
Displacement Volume	7.168 m ³
Displacement (1.025 ton/m ³)	7.347 ton

Table 3 Materials and dimensions

Structural member	dimension (mm, cm ³)
Keel Plate	13.71 mm
Center Side and Bottom Plate	8.44 mm
Stem, Bottom reinforced plate	10.20 mm
Deck Plate	7.38 mm
Floor	101.5 cm ³
Floor (below main engine)	150.2 cm ³
Side shell web frame	13.5 cm ³
Deck trans. beam	13.3 cm ³
Deck longi. girder	21.9 cm ³
Bulkhead stiffener	12.9 cm ³

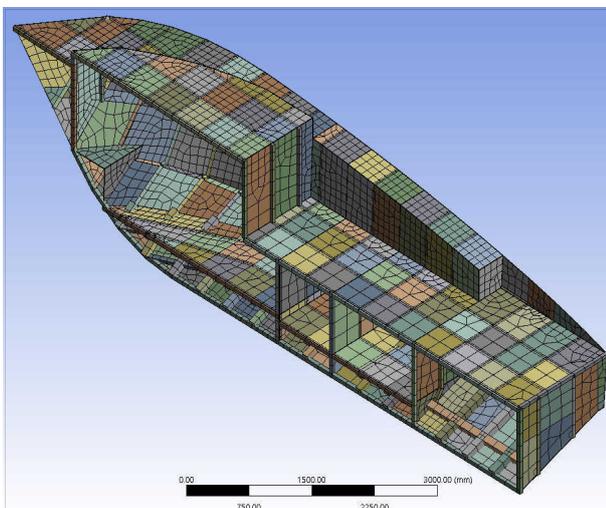


Fig. 3 Finite element model of power boat

2.3 하중조건

국제표준규정 (ISO 12215-5, 2008), 로이드선급 (Special service craft, 2015), 한국선급 (고속경구조선 규칙, 2015)의 규정에서 제시한 설계압력(Table 5)을 선체에 작용하는 하중으로 적용하였다. ISO와 LR의 경우 슬래밍을 포함한 충격하중을 고려하기 위해 displacement mode와 planing mode(또는 non-displacement mode)로 구분하여 설계하중이 제시되었고, 이에 보다 심각한 경우인 planing mode의 설계압력을 선택하였다.

위 세 가지 규정에서의 최대 선저슬래밍 설계압력을 계산하면 Table 4와 같이 ISO > LR > KR 순서로 크기가 얻어졌다. 그리고 각 규정에서의 압력 성분을 본 연구의 20피트급 파워보트에 적용하여 Fig. 4 ~ Fig. 6의 설계압력을 산출하였고, 이를 선체에 적용할 때 선체구간별 변동압력은 함수로 지정하여 적용하였다.

Table 4 Maximum bottom slamming pressures (kN/m²)

ISO	LR	KR
69.08	64.27	52.01

Table 5 Design pressures

Regulation	Pressure	
ISO	Bottom pressure	
	Side pressure	
	Deck pressure	
	Pressure for superstructure and deckhouses	
LR	Loads on shell envelope	Hydrostatic pressure
		Hydrodynamic wave pressure
		Pressure on weather and interior decks
	Impact loads	Bottom slamming pressure
		Side shell slamming pressure
		Forebody impact pressure
Component design loads	Deckhouse, bulkhead, pillars, cargo deck	
KR	Bottom slamming pressure	
	Bottom pitch slamming pressure	
	Forebody side and bow impact pressure	
	Sea pressure	

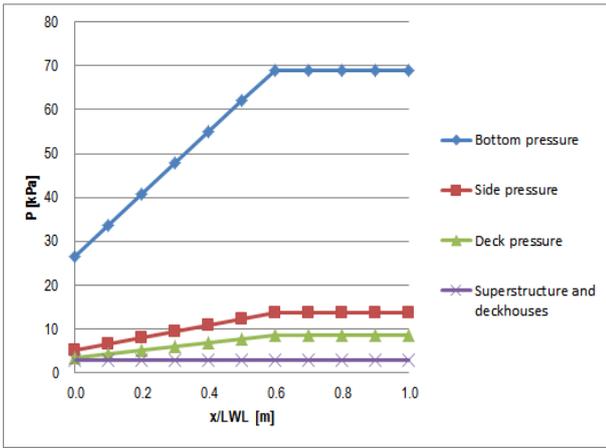


Fig. 4 ISO design pressure

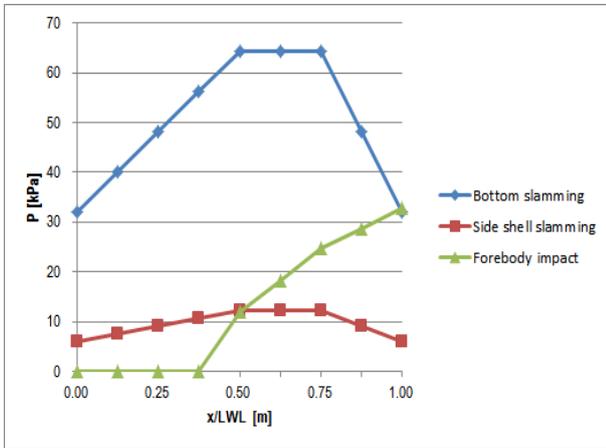


Fig. 5 LR design pressure

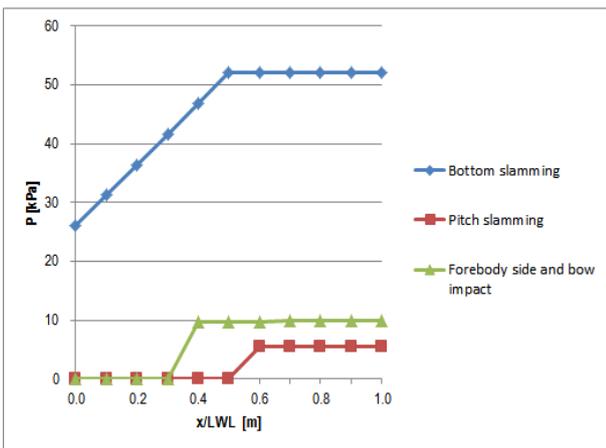


Fig. 6 KR design pressure

2.4 경계조건

일반적으로 선박에 대한 전선구조해석을 수행하기 위해서는 구조 모델링 정보에 자유도에 대한 구속여부를 지정하고, 외부에서 가해지는 하중을 적용한다. 경계조건은 구속에 의한 응력이

발생되지 않도록 단순지지 형태를 반영하고, 구속점은 가능한 응력 관심부에서 떨어져 있도록 배치하여 적용된 경계조건은 Table 6, Fig. 7과 같다.

Table 6 Boundary condition (o : fixed)

location	Dx	Dy	Dz	Rx	Ry	Rz
edge A	-	o	-	-	-	-
point B	o	o	o	o	o	o
point C	-	o	o	-	-	-

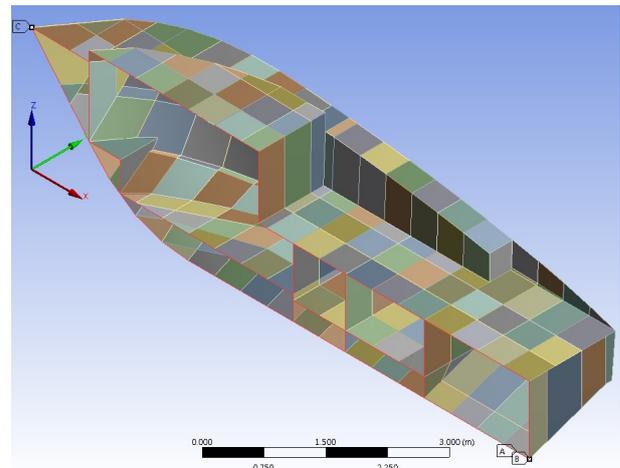


Fig. 7 Boundary condition

그리고 경계조건에 의한 해석모델의 불평형력을 제거하기 위해 ANSYS에서 제공하는 Inertia Relief(강체거동제거) 기능을 사용하였다. 이것은 선형정적해석에서만 적용가능하고, 외부에서 가해진 힘과 토크가 가속도장에서 유도된 관성력과 균형을 이루어야 하는 원리로 ANSYS에서는 3차원 해석의 경우 inertia relief 외의 추가적인 경계조건은 6개 이하로 제한 사용되고 있다.

2.5 구조해석 결과

세 가지 규정에서 산출한 설계하중을 적용하여 해석을 수행한 결과를 Table 7과 Fig. 8에 나타내었다. 최대응력과 최대변형량의 경우 ISO > LR > KR의 순서인 결과를 얻었고, ISO 설계압력을 적용할 때 von Mises 등가응력(요소평균)값의 경우 선저판과 선체내부 늑골이 만나는 곳에서 42.4MPa의 최대값을 나타냈다. 재료의 인장강도인 170MPa의 약 25%에 불과해 구조적으로 안전하다고 평가할 수 있다. 또한 변위의 최대값은 26.14mm로 cabin room의 지붕에서 크게 발생하였는데 이는 cabin을 지지하는 기둥이 반영되지 않은 결과로 판단된다.

또한 세 가지 규정에 의한 충격하중의 적용결과 발생한 최대 응력, 최대변형량, 보강재의 축력, 전단력, 굽힘모멘트의 크기는 Table 7에 나타낸 바와 같이 ISO > LR > KR의 순서로 나타났다.

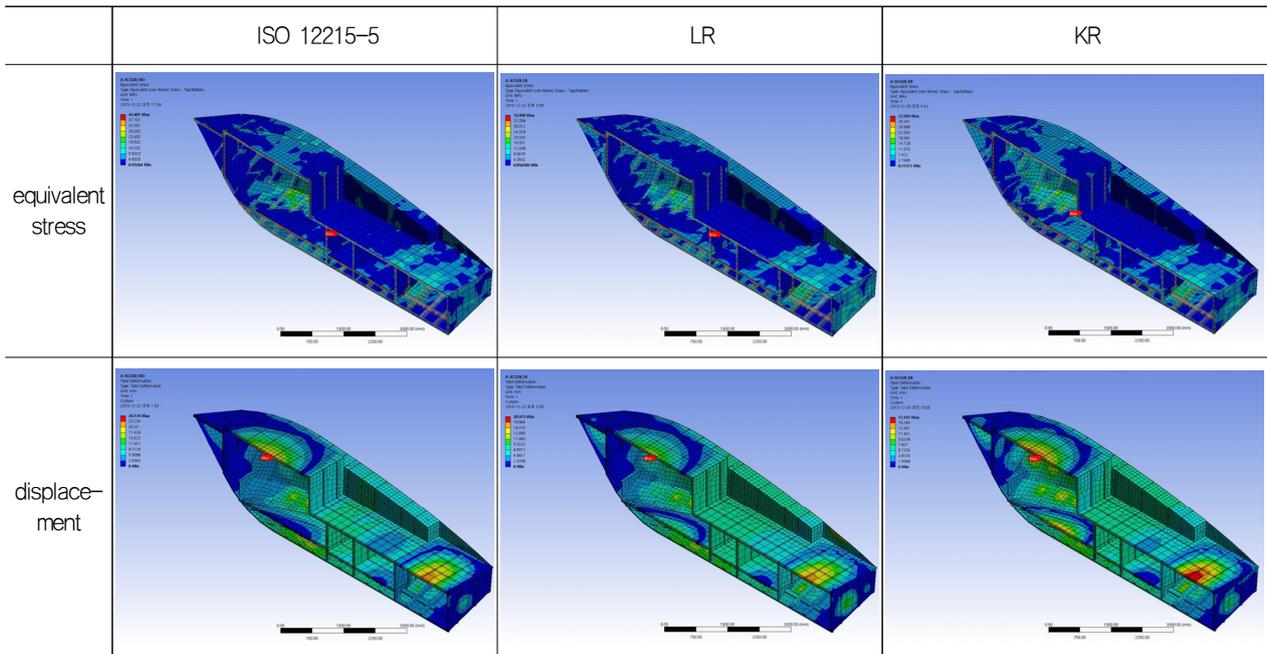


Fig. 8 Results of structural analysis depending on three different regulations

Table 7 Comparison of the analysis results

Classification \ output	$(\sigma_{eq})_{max}$ [MPa]	δ_{max} [mm]	Max. Axial Force [kN]	Max. Shear Force [kN]	Max. Bending Moment [kNm]
ISO	42.40	26.14	-31.14	10.75	2.36
LR	36.00	20.98	-27.39	9.04	2.43
KR	32.99	17.16	-24.88	7.74	2.38

ISO 규정에 의한 보강재에 걸리는 축력, 전단력, 굽힘모멘트를 Fig. 9 ~ Fig. 11에 나타내었다.

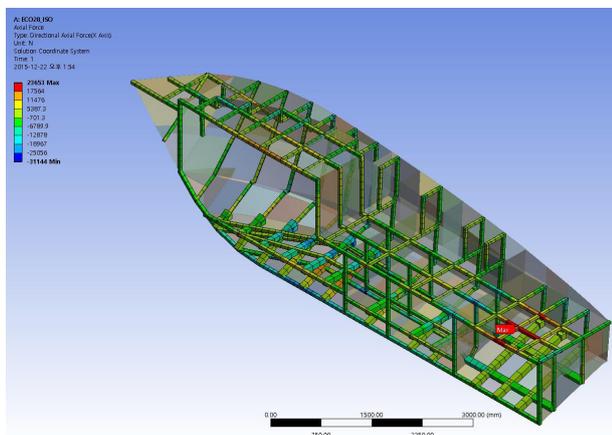


Fig. 9 Axial force

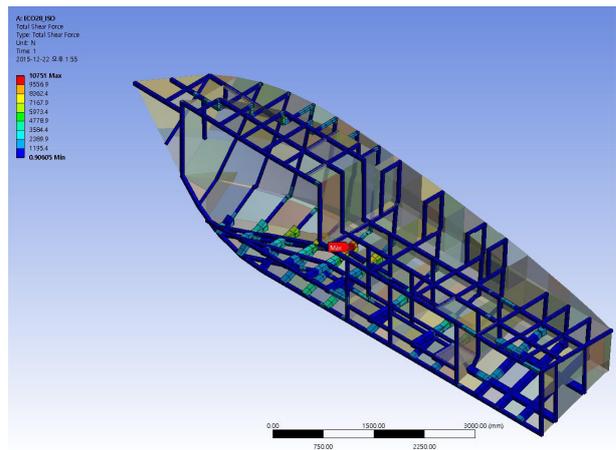


Fig. 10 Shear force

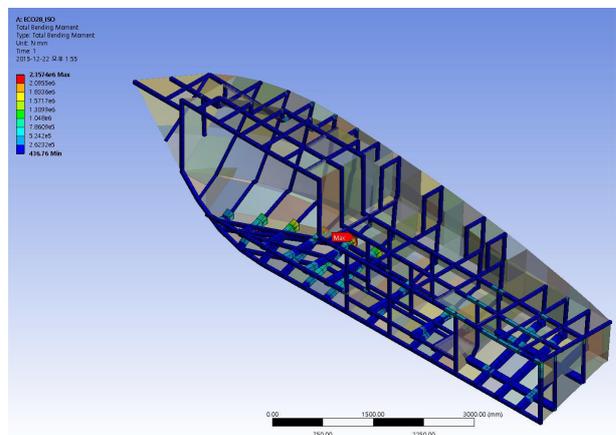


Fig. 11 Bending moment

3. 구조최적화

본 연구에서는 파워보트의 중량 최소화를 위한 최적설계를 위해 ANSYS Workbench에서 제공하는 Design Exploration 기능을 사용하였고, 최적화 방법은 gradient 기반 알고리즘으로 global search가 우수한 ASO(Adaptive Single-objective Optimization)를 사용하였다.

목적함수는 파워보트의 전체 중량이고, 설계변수로는 판재의 두께와 보강재의 단면계수를 선택하였으며, 제한조건으로 항복응력에 ISO가 제안한 안전계수 2를 적용한 사용응력을 이용하였다.

Table 8 Optimization result with ISO design pressure

Item		initial value	optimum value	change [%]
Plate Thickness [mm]	Keel Plate	13.71	5.94	-56.67
	Fore Btm Plate	10.20	8.91	-12.65
	Bottom Plate	8.44	4.41	-47.75
	Side Shell Plate	8.44	4.13	-51.07
	Deck Plate	7.38	3.06	-58.54
Section Modulus [cm ³]	Floor below main engine	150.2	0.32	-99.79
	Floor	101.5	0.32	-99.68
	Web frame	13.5	1.73	-87.19
	Deck girder	21.9	3.77	-82.79
max. deformation [mm]		26.14	99.72	281.48
boat mass [kg]		1,245.80	514.56	-58.70
max. equivalent stress [MPa]		42.40	84.68	99.72

국토해양부고시 FRP선의 구조기준(MLTM, 2011)에 의해 초기 설계된 부재치수는 기존 매트와 로빙의 조합으로 된 재료를 사용했을 때의 치수이므로 구조적으로 매우 안전한 것으로 판명되었고, 더 나아가 매우 보수적으로 설계되어 있음을 확인하였다. 보강재 단면계수에 대한 최소값 기준을 따르지 않는다면 Table 8의 결과와 같이 인장강도가 우수한 새로운 적층에 대해 판재의 두께나 보강재의 단면계수를 크게 줄일 수 있어 최적설계를 통해 선체중량을 거의 절반이하로 줄일 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

20피트급 파워보트에 대한 구조강도 평가 및 구조최적화를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) FRP 파워보트에 대한 구조강도 평가방법을 정립하였다. 국제표준규정(ISO 12215-5, 2008), 로이드선급(Special service craft, 2015), 한국선급(고속경구조선 규칙, 2015) 규정에서의 설계압력을 산출한 결과 선저슬래밍 입력의 최대값은 ISO > LR > KR의 순서로 나타났고, 예상한 바와 같이 응력과 변형량은 동일한 순서로 계산되었다. 따라서 앞으로 적용할 규정으로는 국제표준이 된 ISO 규정을 사용하는 것이 적합하다고 판단된다.

2) 구조최적화의 결과는 다음과 같다. 판재의 경우 기존 설계값보다 평균 45% 정도 치수를 줄일 수 있었고, 보강재의 경우 기존 단면계수의 90%를 줄이더라도 구조강도상 문제가 없었으며, 그 결과 선체중량은 약 59%를 줄일 수 있었다.

일반적으로 FRP 선박에 대한 구조부재 치수의 경우 선급요구치수보다 많은 여유를 두어 판재두께나 보강재의 단면계수를 선택하므로, 본 연구에서와 같이 최적화 결과를 기준으로 보트 제작 작업의 효율성 등을 고려한 현실적인 설계를 통해 선체중량을 줄여 속도개선 및 연료비 절감에 도움이 되리라 기대한다.

후기

본 연구는 2015년도 목포대학교 중형조선산업 지역혁신센터(RIC)사업과 산업통상자원부의 출연금으로 수행한 대불산학융합 지구조성사업의 연구결과이며 지원에 감사드립니다.

References

International Standard, 2008. *ISO 12215-5 Small craft - Hull construction and scantlings - Part 5: Design pressures for monohulls, design stresses, scantlings determination.*

Ji, S.H. Roh, J.S. Kang, S.W. Kim, H.W. & Kim, M.H., 2010. Structural Safety Evaluation of 40 Feet Sailing Yacht by Computational Structure Analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(5), pp.703-708.

Kim, B.J. Kwon, S.Y. Kim, S.C. & Lee, J.H., 2011. Comparison Study and Structural Analysis to Investigate the Design Rule and Criteria of Catamaran. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(6), pp.479-489.

Korean Register, 2015. *Rules for the classification of high speed light craft.*

Lloyd's Register, 2015. *Rules and regulations for the classification of special service craft.*

MLTM, 2011. *Structure standard for fiber reinforced plastic(FRP) vessels.*

Ojeda, R. Prusty, B.G. & Salas, M., 2004. Finite element investigation on the static response of a composite catamaran under slamming loads. *Ocean Engineering*, 31, pp.901-929.

Park, J.S. Ko, J.Y. Lee, K.W. & Oh, W.J., 2009. Structural analysis of an 38 feet diffusion style for high-speed catamaran yacht. *Journal of navigation and Port Research*, 33(3), pp.167-174.

Shin, J.G. Lee, J.Y. Lee, J.H. Van, S.H. Lee, S.H. & Yoo, J.H, 2006. A Study on the Structural Design and Structural Analysis for Small Yacht. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 43(1), pp.75-86.

Yum, J.S. Kim, K.J. & Yoo, J., 2012. Structural strength assessment for 20 feet class power boat. *Proceedings of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies(KAOSTS) 2012 Conference*, Daegu, Republic of Korea, 801-806, 31 May-1 June 2012.

