

고속 모터보트의 재료 특성 평가 및 선체 구조 해석

유현수*

*국립창원대학교 스마트오션모빌리티공학과

e-mail: hsryu@changwon.ac.kr

Material Characteristics Evaluation and Hull Structural Analysis of High-Speed Motorboat

Hyun-Su Ryu*

*Dept. of Smart Ocean Mobility Engineering, Changwon National University

요약

해양레저 산업의 활성화를 위해 국내에서는 다양한 레저 선박에 대한 연구가 널리 진행되고 있다. 특히, 레저스포츠 분야에서는 고속 모터보트의 성능 향상을 위한 연구개발 활동이 활발히 진행되고 있다. 고속 모터보트 선체는 경량화를 위해 다양한 복합 소재가 적용되고 있으며 이러한 복합 소재는 반드시 구조 안전성을 확보해야만 한다. 본 연구에서는 OSY(Outboard Stock Yamato)-400 경주에서 사용되는 터널형 모터보트에 적용된 복합 소재의 재료 특성을 평가하고 이를 토대로 모터보트 선체에 대한 구조 해석을 수행하여 안전성을 검토하였다. 한국공업규격에 따라 재료 특성 평가 시험을 수행하였고, 모터보트 선체를 유한요소로 모델링하여 중급힘 하중과 비틀림 하중 조건에서의 구조 해석을 각각 수행하였다. 구조 해석 결과와 재료 특성 시험 결과를 비교하여 적용된 복합 소재가 요구 강도를 충족함을 확인하였다.

1. 서론

해양레저 산업의 활성화를 위해 국내에서는 다양한 레저선박에 대한 연구가 널리 진행되고 있다. 레저선박은 크게 레저형, 관광형, 스포츠형으로 분류할 수 있는데, 레저형은 주로 낚시와 해상 체험 등을 위한 피싱 보트(Fishing boat), 파워 보트(Power boat), 파티 보트(Party boat) 등이 있다[1]. 관광형은 유람선, 요트(Yacht), 크루즈 보트(Cruise boat) 등이 있으며 스포츠형으로는 세일링 요트(Sailing yacht), 모터보트(Motorboat), 카누(Canoe), 카약(Kayak) 등이 있다[2]. 레저 및 관광형 선박에 관한 연구는 주로 기본 설계, 선형 개발, 구조 안전성 평가, 모형 시험 등 다양한 주제에 대해 수행된 바 있다. Kang 등[3]은 쌍동형 파워 보트의 독자적인 선형 모델을 개발하고 모형시험을 수행하여 안정성 및 설계 속도를 검증하였고, Oh 등[4]은 50피트급 크루즈 보트의 선형을 제안하고 이를 기반으로 상부구조물 및 일반배치 설계를 수행하여 유사 레저선박 개발에 유용한 자료를 제공하였다. Cho[5]는 폴리에틸렌 보트에 대한 열피로손상을 통계학적 확률 분포를 이용하여 평가한 바 있으며, Oh 등[6]은 폴리에틸렌 보트의 선체 내구성을 평가하기 위해 선형누적손상법칙을 이용

하여 피로 수명을 예측하고 안전율을 계산하여 내구 수명을 제시하였다. 본 연구에서는 복합 소재로 구성된 터널형 모터보트의 구조 안전성을 검토하기 위해 복합 소재의 재료 특성 평가 시험을 실시하고, 유한요소법을 활용한 선체 구조 해석을 수행하였다. 재료 시험을 통해 적층 방법에 따른 각 복합재들의 탄성 계수와 인장 강도 결과를 각각 도출하였으며 구조 해석을 통해 각 구조 부재에 발생하는 최대 응력값이 해당 재료의 허용 응력값 이하임을 확인함과 동시에 안전율을 계산하여 구조 안전성을 최종 검토하였다.

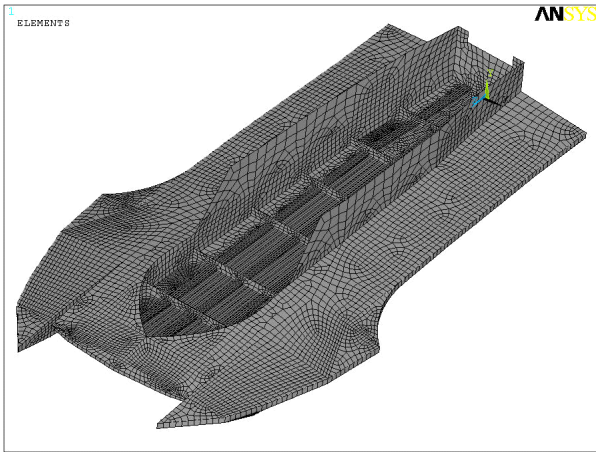
2. 모터 보트 선체의 구성

다음 [그림 1]은 OSY 터널형 보트의 형상 및 주행 모습을 보인 것으로 전체 길이는 약 3,000mm, 최대 폭 1,600mm, 코밍 플레이트를 포함한 최대 높이는 약 460mm이다.



[그림 1] OSY 터널형 보트 형상 및 주행 모습

이와 같은 OSY 터널형 보트의 유한 요소 모델은 2차원 도면 및 CAD 설계 정보를 분석하여 3차원 형상으로 구현하였으며 이를 통해 OSY 터널형 보트의 구조 특성을 파악하였다. 다음 [그림 2]는 OSY 터널형 보트의 3차원 유한 요소 모델 형상이다. Hull과 Deck는 물론 선체 내부의 중-횡강도를 보강해 주는 내부재를 모두 고려하였다. Deck Edge 보강부를 제외한 모든 부재는 shell element를 사용하였고, Deck Edge 보강부는 beam element를 사용하였다.



[그림 2] OSY 터널형 보트의 3차원 유한 요소 모델

다음 [표 1]은 OSY 터널형 보트의 부위 별 보강 형태 및 적층 재료 구성을 보인 것이다. 목재(SPRUS)를 비롯하여 경량화 신소재로써 적층한 형태의 소재를 사용하고 있음을 볼 수 있다.

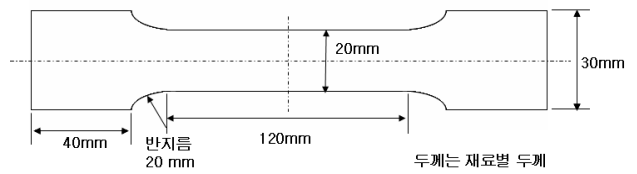
[표 1] OSY 터널형 보트 보강 형태 및 적층 재료 구성

번호	명칭	재료 구성
1	선체(HULL)	M+KEVLAR+M (8~FP), M+KEVLAR+M+R+M (AP~8)
2	데크(DECK)	M+R+M
3	LONGI	40 x 12 PVC FOAM + 2M
4	TRANSOM	9t BIRCH 합판
5	킬보강 (선미)	2M
6	킬보강 (선수)	13t Balsa + 2M
7	CHIN L. 보강	2(40x12 PVC FOAM) + 2M
8	COAMING	KEVLAR+R+Balsa(13t)+R+KEVLAR
9	DECK EDGE	20 x 20 SPRUS 각재
10	TRANS	40 x 20 SPRUS 각재
11	FRAME	14t SPRUS PLATE

3. 적층 복합재의 재료 특성 평가

OSY 터널형 보트에 사용되는 적층 신소재 재료의 특성을 파악하기 위하여 다음과 같이 인장 시험을 수행하였다. 시편은 KS 인장 시험편의 하나인 13호 시험편을 사용하였고, 시험기는 SHIMADZU 사의 UH-1000kNI 만능시험기를 이용하였다. [그림 3]은 사용된 시험편 형상이며 [그림 4]는 시험기

모습이다.



[그림 3] KS 13호 시험편 형상



[그림 4] SHIMADZU사의 만능 시험기 (UH-1000kNI)

본 인장 시험에 사용된 재료는 선체(HULL)를 구성하고 M+KEVLAR+M 과 M+KEVLAR+M+R+M 적층 소재이며, 목재 및 FRP 시편의 재료 특성은 한국화학시험연구원에서 수행한 시험 결과를 참고로 하여 정리하였다. 한편, 언급한 두 적층 소재는 재료 시험을 위해 실선 건조 시 사용되고 있는 적층판 부재에서 그 시편을 직접 채취하여 평가하였다. 시편은 각 재료 별로 5개씩을 준비하였고, 적층 시 방향성을 고려하지 않기 때문에 적층 각도와 상관없이 랜덤하게 시편을 추출하였다. 인장 시험은 양 끝단을 고정하고 파단이 발생할 때까지 인장력을 서서히 증가시키면서 진행하였고, 시간대 별로 지지점의 반력을 인장 길이로 환산함으로써 궁극적으로 응력 변형률 선도를 확보하였다. 인장 시험으로부터 확보한 응력-변형률 선도로부터 탄성 영역이라 생각할 수 있는 선형 부분을 추출하여 각 시편의 탄성계수를 평가하였고, 인장강도는 시험 중 파단이 발생하기 시작하는 지점을 포착하여 평가하였다.

4. 모터 보트 선체구조해석

4.1 재료 특성

OSY 터널형 보트를 구성하고 있는 각 부재들은 MAT와 KEVLAR의 적층 재료를 비롯하여 MAT+ROVING+MAT, SPRUS(각재, 플레이트), BIRCH, PVC FOAM, Balsa 등의 다양한 재료 특성을 지니고 있다. 보트 구조에서 주요한 하중

을 받는 부재는 M+KEVLAR+M, M+KEVLAR+M+R+M, SPRUS, FRP 적층판이다. 본 연구에서는 유한요소해석에 사용되는 재료 특성을 다음 [표 2]와 같이 정리하였다.

[표 2] OSY 터널형 보트 주요 부재의 재료 특성

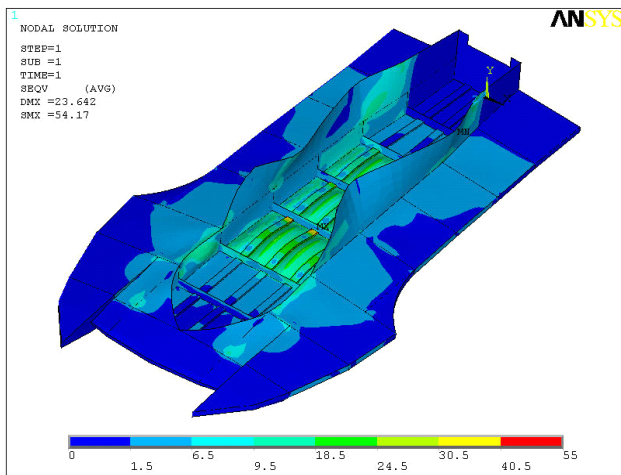
재 료	탄성 계수 [kN/mm ²]	항복 응력 [kN/mm ²]	포와송 비
M+KEVLAR+M	6.46	0.38	0.3
M+KEVLAR+M+R+M	6.89	0.45	0.3
SPRUS	12.0	0.04	0.4
FRP 적층판	5.53	0.16	0.32

4.2 하중 조건

OSY 터널형 보트는 운항 중에 다양한 종류의 하중을 경험하게 된다. 예를 들면 자중을 비롯하여, 슬레밍 하중, 파랑에 의한 충격 하중 등을 들 수 있는데, 중력 하중 조건은 정수 중의 부력과 상쇄된다고 생각하면 어느 정도 무시할 만하다. 슬레밍 하중이나 파랑에 의한 충격 하중의 경우에는 정량적으로 파악하기 매우 힘들다. 따라서 본 연구에서는 위와 같은 복합 하중이 작용하는 경우 상대적으로 적용하기 수월한 정적 하중 조건을 이용하되, 안전율을 이용하여 실제 현상의 하중 상태를 만족시킬 수 있도록 하중 조건을 산정하였다. 또한, 하중의 방향성을 고려하여 종굽힘 하중과 비틀림 하중이 작용하는 상태의 강도 해석을 각각 수행하였다.

4.3 구조 해석 결과

전체적인 응력 분포는 [그림 5]에 보인 바와 같다.



[그림 5] Von-Misses 응력 분포 [응력 단위:MPa]

이는 Von-Misses 응력 분포로 4번 FRAME이 위치한 중앙 선저킬 보강부 영역에서 최대 응력 약 54.2 (MPa)이 발생하였다. 최대 응력값은 해당 재료의 항복 응력과 비교하여 구조 안전성을 검토해야 하는데, 최대 응력 발생부에는 세 가지

서로 다른 물성을 가지는 재료가 위치하기 때문에 재료별 응력 분포를 살펴보고 구조 안전성을 평가하였다. 재료별 최대 응력 해석 값을 재료별 항복 응력과 비교하여 [표 3]에 정리하였다.

[표 3] 재료별 최대 응력과 항복 응력의 비교

재 료	A. 최대응력 [MPa]	B. 항복응력 [MPa]	(A/B)x100 [%]
M+KEVLAR+M	42.3	380	11.1
M+KEVLAR+M+R+M	19.9	450	4.4
SPRUS	19.7	40	49.2
FRP 적층판	54.2	160	33.9

5. 결론

- (1) 본 연구에서는 OSY 터널형 보트 제작에 사용된 신소재 적층 복합 소재에 대한 재료 평가를 수행하였으며, OSY 터널형 보트의 선체 구조 분석 및 강도 평가를 수행하였다.
- (2) 재료 평가는 한국 표준 재료 시험법을 참고로 하였으며 실선 재료에서 직접 채취한 적층 시편을 사용하였다. 재료 시험 결과로부터 각 적층 재료에 대한 응력-변형률 선도를 확보하였고, 이를 정리하여 선체 구조 강도 평가 시 필요한 재료 물성값으로 사용하였다.
- (3) 종굽힘 하중 조건과 비틀림 하중 조건을 적용한 구조 해석을 통해 선체 구조 강도 평가가 수행되었다. 구조 해석 결과로 변위, 응력 및 변형률을 도출하였고, 부재 별 최대 응력과 항복 응력의 비교를 통해 OSY 터널형 보트의 구조 안전성에 대한 검토가 이루어졌다.
- (4) 검토 결과, 안전율 3.0의 하중 조건에서도 각 부재에 발생하는 최대 응력이 각각의 항복 응력에 미치지 못하는 것을 확인하였다.
- (5) 아울러 각 FRAME 별로 발생하는 최대 변형과 최대 응력을 정리하였고, 이는 추후 유사 보트 선체의 구조 설계 시 참고자료로 활용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] S. S. Cho, "A Study on Hull Form Development of Polyethylene Boat", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.14, No.10, pp. 4726-4732, 2013.

[2] B. H. Ahn, J. H. Hwang, K. W. Kang, S. C. Lee, The analysis of marine leisure sports industry, Analysis Report, Korea Institutes of Sports Science, Korea, pp. 10-19, 2004.

[3] S. W. Kang, Y. B. Lim, U. C. Jeong, C. W. Park, "A

- Development of Catamaran type Powerboat Applicable to Leisure and Transportation for a Short Distance in the Sea”, Proceedings of The Korean Society of Ocean Engineers Spring Conference, KSOE, Ulsan, Korea, pp. 60-64, May 2001.
- [4] D. K. Oh, C. W. Lee, U. C. Jeong, C. H. Ryu, “A Study on the Basic Design and its Characteristics of 50ft-class CFRP Cruise Boat”, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol.19, No.6, pp. 674-680, 2013.
- [5] S. S. Cho, “A Experimental Estimation of Thermal Fatigue at Polyethylene Boat”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.14, No.6, pp. 2559-2565, 2013.
- [6] J. S. Oh, S. S. Cho, “A Study on Estimation of Fatigue Performance of Polyethylene Boat”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.15, No.1, pp. 47-54, 2014.