

폴리에틸렌 보트의 내구성 평가에 관한 연구

오정석¹, 조석수^{2*}

¹군산대학교 도시형풍력발전원천기술연구센터, ²강원대학교 자동차공학과

A Study on Estimation of Fatigue Performance of Polyethylene Boat

Jeong-Seok Oh¹ and Seok-Swoo Cho^{2*}

¹Break-through Technology Center for Urban Wind Energy Systems, Kunsan National University

²Department of Vehicle Engineering, Kangwon National University

요 약 선체 내구성은 기존 선급 규격에 의하여 구조 치수를 결정한 후 이러한 치수의 선체구조에 대하여 스펙트랄과 결정론적 및 간이 방법에 의하여 평가되고 있다. 이러한 방법은 선체재료를 선급 규격에서 제안하고 있는 재료로 구성하는 경우에는 적용할 수 있으나 선체 재료를 신소재로 구성하는 경우에는 적용할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 폴리에틸렌 보트 선체에 대한 피로 손상을 평가하기 위하여 선체에 부하되는 단기간 선체 가속도를 직접 측정하고 이러한 데이터를 기초로 구조설계와 피로수명평가방법이 확립되지 못한 소형 선박의 선체 내구성을 선형누적손상법칙으로 평가하는 방법을 제안하였다. 개발된 폴리에틸렌 보트의 경우 최대 가속도 상태에서 보트에 부하되는 최대 Von-Mises 응력은 1.8MPa로서 1×10^9 사이클 피로강도 5.9MPa 아래에 있고 유한피로수명개념을 적용한 폴리에틸렌 보트의 내구수명은 415년으로 평가되어져 거의 무한수명을 가지고 있다.

Abstract Endurance of ship hull can be estimated by existing regulations and fatigue estimation methods. These can be applied to the hull materials that are recommended by ship regulations but can't be applied to new materials. In this study, structural force in the worst sailing condition is obtained by the acceleration measurement test of small polyethylene boat and the endurance of small polyethylene hull is estimated by rainflow cycle counting method and linear cumulative damage rule. Maximum Von-Mises stress on the polyethylene boat is 1.8MPa and much lower than the fatigue strength of at least 5.9MPa for the fatigue life of 1×10^9 cycles. Fatigue life of the polyethylene boat hull is estimated to be 6,229 years.

Key Words : Acceleration Measurement Test, Endurance, Hull, Linear Cumulative Damage Rule, Polyethylene Boat, Rainflow Cycle Counting Method, Ship Regulation.

1. 서론

중·대형 선박의 경우 선체 구조 치수는 각국의 선급 규격에 의하여 결정되고 있다. 그러나 선체구조 설계 기술의 발전과 경량화에 따른 신소재의 사용으로 인하여 선체의 피로 손상 발생 빈도수는 급격히 증가되고 있다. 실선운항실적에 의하면 선박 수명중 선체 구조가 피로손상을 입을 확률이 1/100로 예측되며 일본해사협회(NK)는 HT32 및 HT 36을 사용한 48척의 제2세대 초대형 유조선

(VLCC)에서 손상 선박당 10개이상의 피로균열이 발생하였음을 보고하였다. 이것을 계기로 세계 주요 선급협회는 선체구조 피로평가지침을 제정하였다[1]. 그러나 상술의 피로손상평가방법은 장기간의 원양 해상 파도에 대한 물리적 특성치를 사용하고 있어 현장 적용에 있어 선체의 사용영역에 큰 제한을 받게 된다.

한편, 선체 전장 24m이하의 소형 선박의 경우 선체의 건조 비용 감소와 연비 향상 및 해양환경오염방지를 위하여 선체를 신소재로 제작하려는 시도가 빈번히 발생되

*Corresponding Author : Seok-Swoo Cho(Kangwon National Univ.)

Tel: +033-570-6394 email: sscho394@kangwon.ac.kr

Received November 25, 2013

Revised January 8, 2014

Accepted January 9, 2014

고 있다. 이러한 경우 선체 치수는 ISO 12215-6[2]에서 제안하는 방법으로 결정할 수 없으며 특히, 결정된 구조 치수가 장기 피로 내구성을 보장할 수 없다. 따라서 소형 선박의 신소재 사용에 대한 구조 신뢰성을 확보하기 위하여 소형 선체에 대한 피로손상평가방법개발은 매우 시급하다. 이하에 선체 구조의 피로손상평가방법에 대한 연구결과를 나타내었다.

박등[2]은 강선 요트의 종강도, 횡강도 부재에 대하여 LR(Lloyd's Register) 규격을 적용하여 충분히 안정된 구조 치수를 구하였으나 선체국부강도에 대한 평가방법은 제안되지 않아 이러한 문제점을 해결하기 위하여 국부 선체 영역에 대하여 LR 규격에 의한 설계하중을 적용함으로써 국부선체에 부하되는 응력을 구하여 허용응력 아래에 존재도록 선체치수를 결정하였다.

노등[3]은 영향계수법과 스펙트럼 해석법을 이용하여 선체의 피로강도를 평가하였으나 파랑응력과 재료의 통계적 자료 등 많은 입력 파라미터에 대한 정보를 가지고 있어야 한다.

엄등[4]은 선체 구조의 용접 이음부에 대한 피로강도 평가를 실험적으로 평가한 결과 용접 토우부의 형상을 제어하는 것이 피로강도를 향상시키는 데 중요한 인자임을 제안하고 있다.

이상의 연구결과에서 선체에 대한 구조 치수를 결정하기 위한 방법으로 기존 선급 규격에 의하여 치수를 결정 한 후 이러한 치수의 선체구조가 피로내구성을 가지고 있음을 평가하였다. 이러한 방법은 선체재료를 선급 규격에서 제안하고 있는 재료로 구성하는 경우에는 적용할 수 있으나 선체 재료를 신소재로 구성하는 경우에는 적용할 수 없다. 특히, 이상의 방법을 적용하여 소형선박을 설계하게 되면 사용 해석이 연안이하의 해석이기 때문에 구조설계에 있어 매우 과도한 안전율을 가질 확률이 있다.

따라서 본 연구에서는 폴리에틸렌 보트 선체에 대한 피로 손상을 평가하기 위하여 선체에 부하되는 단기간 선체 가속도를 직접 측정하고 이러한 데이터를 기초로 구조설계와 피로수명평가방법이 확립되지 못한 소형 선박의 선체 내구성을 선형누적손상법칙으로 평가하는 방법을 제안하였다.

2. 보트 개요와 재료 및 구조시험

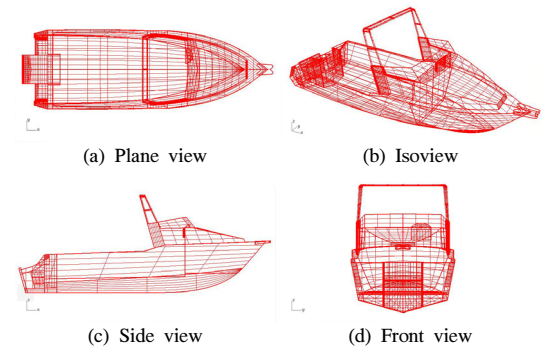
2.1 보트 선형과 구조 치수

Table 1은 실적선 치수를 기준으로 제작하고자 하는

보트의 시제품 치수를 나타낸 것이다.

[Table 1] Dimension of polyethylene boat

Overall length (m)	Overall width (m)	Aspect ratio	Engine horsepower (ps)	Number of crew (Person)
6.5	2.1	0.35	139	6



[Fig. 1] Line drawings of polyethylene pleasure boat

이상의 Table 1에서 나온 치수를 기초로 보트 선형설계프로그램인 Rhino 3D 4.0[5]를 이용하여 폴리에틸렌 보트 선체를 설계하였다. Fig. 1은 선체의 정면도, 평면도, 측면도, 등각도를 각각 나타낸 것이다.

선체 재료로 각국의 선급규격에서 추천하는 재료를 사용하는 경우 선체 두께는 선급규격을 적용하면 결정될 수 있으나 폴리에틸렌 보트와 같이 비추천재료가 선체 재료로 사용되는 경우 구조해석이나 충돌해석등을 이용하여 결정할 수 있다. 본 연구에서는 폴리에틸렌 보트의 선체 두께를 조등[6]이 동일 선형과 재료에 대하여 ISO 12215-5[7]를 기초로 하는 구조해석을 이용하여 구한 12mm로 결정한다.

2.2 재료시험

2.2.1 인장시험

고밀도 폴리에틸렌 인장 시험편은 KS M 3022[8]에 규정된 형상과 치수를 이용하여 제작하였고 해당 재료는 대림산업(주)에서 생산하는 두께 12mm인 고밀도 폴리에틸렌 시트(Daelimpoly TR-418BL)에서 채취하였다.[9] 인장시험은 유압식 만능 재료시험기(INSTRON, Fast Track 8801)를 사용하여 상온에서 변위 속도 50mm/min하에서 수행하였다. Table 2는 고밀도 폴리에틸렌 Daelimpoly TR-418BL의 인장시험결과를 정리한 것이다. 회복강도에 비하여 최대인장강도가 상당히 커 많은 변형을 경화가 진행되었음을 알 수 있다.

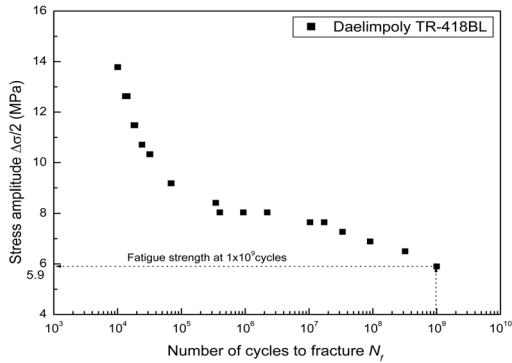
[Table 2] Mechanical properties of Daelimpoly TR-418BL

	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yielding strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)
$\sigma_t - \epsilon_t$	1.1	0.42	38	91	810
$\sigma_n - \epsilon_n$	1.1	0.42	27	27	810

2.2.2 피로시험

피로시험편은 KS B ISO 1143[10]에서 제안하고 있는 회전굽힘 피로시험편으로 제작하였고 시험편 그림부의 응력집중계수는 1.05정도가 되도록 하여 기계적 응력 집중을 최소화시켰다[11]. 시험편 표면은 1200번 사포로 연마하여 표면 영향에 의한 피로 강도 감소를 최소화하였다. 피로시험기는 용량이 1kg·m인 Ono식 회전굽힘피로시험기(Daeyoung precision DYD-105A)이고 시험속도는 3500rpm이며 응력비는 -1이다.

Fig. 2는 고밀도 폴리에틸렌의 굽힘피로시험결과를 나타낸 것이다. 일반 플라스틱 재료와 동일하게 반복수가 10^7 사이클을 초과하더라도 피로한도는 나타나지 않으며 1×10^9 사이클에서의 피로강도는 5.9MPa이다[12].



[Fig. 2] S-N curve of Daelimpoly TR-418BL

2.2 가속도 측정 시험



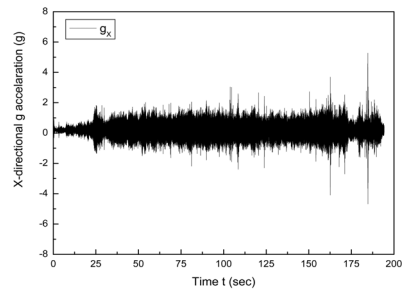
[Fig. 3] Overview of sailing test

해상에서 선체에 부하되는 하중을 측정하기 위하여 선체가 해상에서 정상적으로 운항될 때의 선체 가속도를 측정하였다. Fig. 3은 폴리에틸렌 보트의 가속도를 측정하기 위한 해상시험전경을 나타낸 것이다. 해상 시험은 온도 18℃, 풍속 3~5m/s, 파도 높이 2~3m가 되는 풍력계급(Beaufort wind force scale) 4이하에서 강원도 삼척시 대진항에서 실시하였다. 가속도시험시간은 항구에서 출발하여 외항에서 194초간 측정하였으며 가속도 측정 위치는 각 방향 가속도가 가장 크게 발생되리라고 생각되는 보트 선수 상부이다.

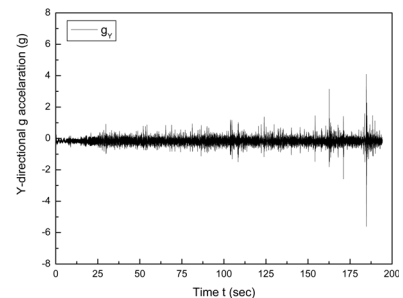
Fig. 4는 선체에 부하되는 하중 패턴을 찾아 내기 위하여 선수부에 부착한 3축 가속도계를 이용하여 각 방향의 가속도를 측정한 결과이다. 선수에 입력되는 가속도 중 대체적으로 큰 가속도 성분은 Surge와 Heave 운동을 나타내는 성분이다. 즉, 선체에 입력되는 하중 패턴은 선수 표면에 수직으로 입력되는 압력 성분임을 알 수있다. 또한, 보트의 Sway 운동은 선수에 입력되는 가속도중 가장 작은 가속도 성분을 나타내며 선체의 회전운동 및 조류와 선체 측면이 만나는 방향에 따라 하중 부호의 방향이 변한다.

3. 선체의 내구성 평가

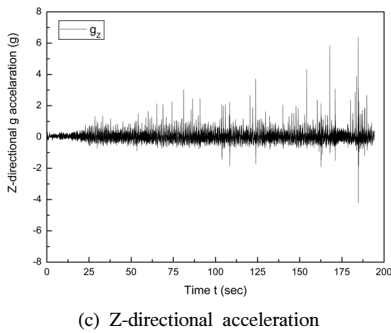
3.1 구조해석



(a) X-directional acceleration

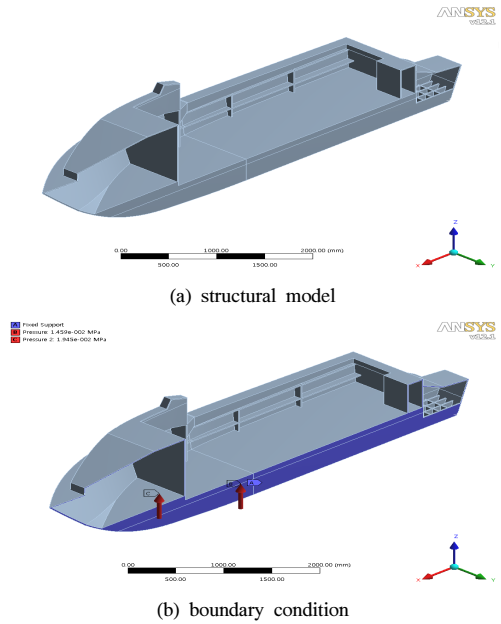


(b) Y-directional acceleration

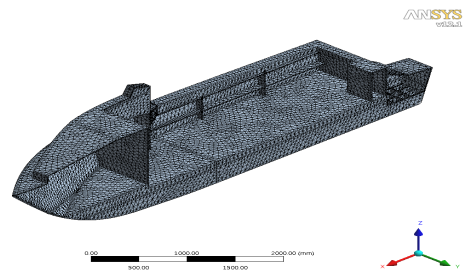


[Fig. 4] Acceleration measurement in sailing test

Fig. 4의 결과를 기초로 보트에 입력되는 하중 이력으로 x, y, z축에 부하되는 하중을 모두 고려하기로 한다. 각 방향 하중은 각 속도 크기에 보트 자중을 곱한 값으로 각 방향에 따른 최대하중은 z축 방향 하중으로 31,972N이고 최소하중은 y축 방향 하중으로 20,448N이다. 또한, 각 방향에 따른 최대평균하중은 x축 방향 하중으로 1,006N이고 최소평균하중은 z축 방향 하중으로 286N이다. 따라서 z축방향 하중은 평균하중은 적으나 하중진폭은 상대적으로 커 z축방향 하중이 각 하중성분 중에서 가장 큰 하중 값을 보인다. 폴리에틸렌 보트의 구조 해석모델은 Fig. 5에서 보는 것처럼 보트 선체는 단일 선체이며 단일 선체를 보강하기 위하여 종방향 중심선에 종통 용골을 설치하고 선체에 종방향 보강재인 거더를 구성하였다. 또한, 선체의 횡방향을 보강하기 위하여 갑판 하부에 늑골 및 격벽을 설치하였다. 그림에서 보트에 부하되는 구속조건은 종방향 대칭면에 대하여 x, y, z 축 방향의 변위와 회전자유도를 고정시켜서 설정되며 하중 조건은 설계 흡수선 하부 영역에 선체 가속도 측정시험에서 구한 하중의 절반을 부하하였다. 구조설계에서 사용한 유한요소해석프로그램은 상용해석프로그램인 ANSYS Workbench R12를 이용하였으며 선형 해석만 수행하였다. 유한요소모델은 ANSYS Workbench R12의 Design Modeler를 이용하여 구축하였으며 메쉬는 보트 선형의 복잡성으로 인하여 Triangle 메쉬를 주로 부여하였다. Mesh method는 Tetrahedrons로 설정하고 Mesh Sizing은 24mm로 설정하였다. Fig. 6은 선체 구조 해석모델의 메쉬를 나타낸 것으로 859,605개의 노드와 438,545개의 요소를 사용하였다.



[Fig. 5] Boat structural model for bottom pressure

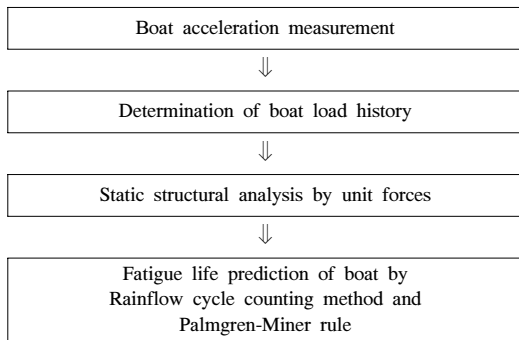


[Fig. 6] Meshing for the boat subjected to bottom pressure

3.2 내구해석

선체 구조의 피로수명평가절차는 선체에 작용하는 장기응력분포의 산출방법에 따라 스펙트럴법(Spectral method)과 결정론적 방법(Deterministic method) 및 간이법(Simplified method)으로 구분할 수 있으며 선체 구조 재료의 S-N 곡선과 응력 분포 자료를 이용하여 Palmgren-Miner의 선형누적손상법칙에 따라 선체 가해지는 피로수명을 예측한다. 스펙트럴 방법은 각 파도의 입사각별 집중응력범위 전달함수와 해상태자로 및 구조 재료의 S-N곡선이 필요하나 응력에 대한 전달함수를 구하는 과정이 방대하여 실제 선박설계에 어려움이 있다. 결정론적 방법은 블록별 불규칙파 상태에서의 구조 해석결과를 요구하며 간이법은 응력 범위의 장기 분포를 Weibull 분포로 가정하여 선체의 피로손상을 계산한다.

이상의 방법은 화물선이나 이중 선체 유조선등과 같은 중대형선에 적용되는 방법으로 본 연구 대상인 폴리에틸렌 보트에 적용하기에는 산업계 및 학계에서 충분한 데이터를 확보하지 못하고 있다[1]. 따라서 본 연구에서는 폴리에틸렌 보트에 투입되는 하중 분포를 최악의 기상 상태에서 직접 구하여 선체의 피로손상을 평가하고자 한다.

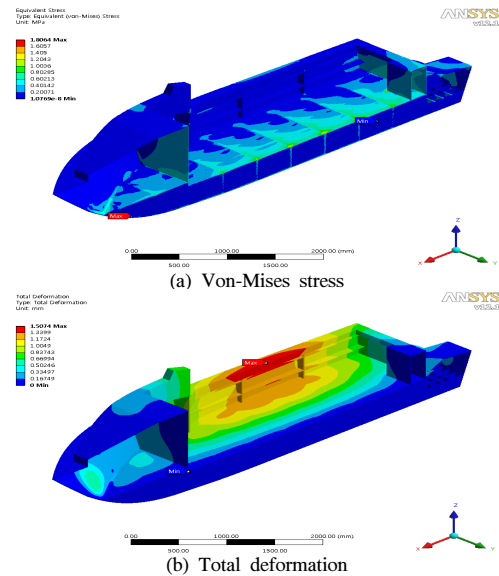


[Fig. 7] Estimation procedure for fatigue life of polyethylene boat

Fig. 7은 폴리에틸렌 보트 선체에 부하되는 불규칙 반복 하중에 의한 내구성을 평가하기 위한 절차를 나타낸 것이다. 우선 보트의 가속도 측정을 통하여 보트에 입력되는 하중 이력을 찾아낸다. ANSYS Workbench V12.1에서 랜덤하중에 대한 피로해석은 우선 정적구조해석을 수행한 뒤 응력 해석 값과 S-N선도를 이용하여 선체의 피로수명을 계산한다. 특히, 하중조건은 정적구조해석에서 단위 값을 입력하고 ANSYS Workbench V12.1의 Fatigue tool[13]에서 랜덤하중이력을 대입한다. Fatigue tool의 stress correction method는 mean stress curve를 적용하고 Infinite life는 폴리에틸렌 보트의 계산피로수명이 수렴되는 1×10^{15} 로 설정하였다. 이하에 하중이력과 ANSYS Workbench V12.1에서 제공하는 Fatigue tool의 Rainflow cycle counting method 및 Palmgren-Miner 법칙을 이용하여 본 개발 보트가 충분한 내구성을 가지는 지에 대한 검토를 수행한다.

Fig. 8은 Fig. 4에서 각 가속도 방향에서 가장 큰 값을 보이는 185s일 때의 하중조건에 대한 정적구조해석을 나타낸 것이다. 최대 Von-Mises 응력이 1.8MPa로서 피로강도 5.9MPa아래에 있어 철강재료와 같이 피로한도가 존재하는 재료라면 충분한 내구성을 가진다고 생각할 수 있다. 따라서 폴리에틸렌 보트에 입력되는 최대 Von-Mises 응력을 기초로 1×10^7 사이클 피로강도에 대한 단순 안전율을 계산하면 3.3정도이고 ISO 12215-5에

서 제안하고 있는 설계강도(=항복응력×0.9) 24.3MPa를 이용한 단순 안전율을 계산하면 15.5정도이다. 그러나 폴리에틸렌은 플라스틱 재료로서 Fig. 2의 S-N선도에서 보는 것처럼 부하 응력이 저하하면 피로수명도 증가하고 있지만 무한수명은 보장할 수 없으므로 이러한 안전율은 실제적 안전율로서 고려할 수 없다. 따라서 무한수명개념의 안전율보다 유한수명개념의 피로손상개념을 이용하여 폴리에틸렌 보트 선체의 기계적 내구성을 평가하고자 한다.

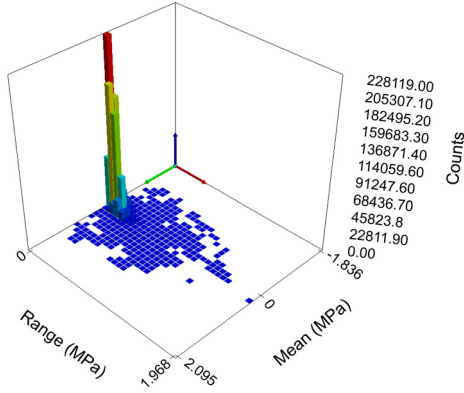


[Fig. 8] Maximum Von-Mises stress and total deformation in sailing test

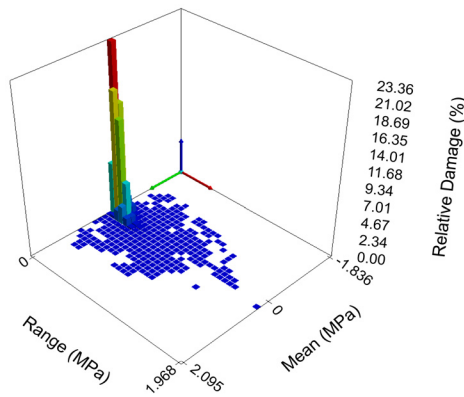
Fig. 4를 이용하여 예측된 랜덤하중이력에 대한 피로손상과 피로수명은 ANSYS Workbench V12.1에 탑재되어 있는 Fatigue tool[13]을 이용하여 계산하였다. 적용한 피로손상법칙으로는 Palmgren-Miner 법칙[14]을 선택하였고 변동하중에 대하여 일정시간의 피로강도이하의 응력을 고려하기 위하여 일반적으로 S-N 곡선의 수정방법[15]이라고 불리는 응력 레벨 값의 시작점을 S-N곡선에서 결정하였다. 또한, 피로손상 평가법으로 평균응력효과를 채택하여 고평균응력에 의한 수명감소효과를 고려하였다.

Fig. 9는 폴리에틸렌 보트의 운항중에 발생한 응력 이력을 레인플로집계법에 의해 계산한 결과이다. 최대 압력 발생지점에서의 평균응력과 응력범위에 대한 발생빈도를 나타낸 것이다. 응력 사이클에서 평균응력은 대부분 0 MPa에 가깝고 응력범위는 대부분 2MPa이하에 존재하며 가속도가 증가하는 영역에서는 평균응력은 큰 증가가

없으나 응력범위가 크게 증가한다. 최대 사이클 수의 값을 보이는 응력 조건은 대략 평균응력이 0MPa 응력범위가 0.06MPa정도이다.



[Fig. 9] Result of a rainflow cycle counting histogram

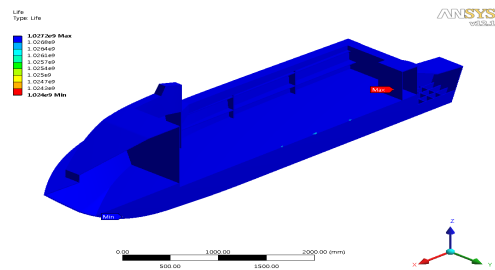


[Fig. 10] Result of cumulative fatigue damage histogram

Fig. 10은 수정 Miner 법칙을 이용한 상대적 피로손상의 결과를 3차원 막대 그래프로 나타낸 것이다. 상대적 피로손상의 값이 100%가 된다는 것은 최소피로손상에 비하여 2배 정도의 피로손상이 생긴다는 것을 의미하며 상대적 피로손상이 0%가 된다는 것은 피로 손상이 전혀 진행되지 않는다는 것을 표시한다. Fig. 9를 Fig. 10과 비교하면 빈도수가 많은 응력조건이 피로손상도 많아 높은 응력범위를 보이는 하중조건에 의한 피로손상이 그다지 많이 존재하지 않음을 알 수 있다. 즉, 랜덤응력파형에서 가장 열악한 하중 조건은 평균응력이 0MPa이고 최대응력범위가 2MPa이며 응력 사이클 수도 1사이클이다. Fig. 2의 S-N선도를 이용하여 이러한 조건의 피로손상을 구하

면 3.7×10^{-19} 정도이므로 거의 피로손상이 존재하지 않는다고 볼 수 있다. 한편, 폴리에틸렌 보트에 입력되는 하중조건 중에서 가장 많은 사이클을 보이는 하중 조건은 평균응력이 0MPa이고 최대응력범위가 0.06MPa이며 응력 사이클 수도 228,119사이클이다. Fig. 2의 S-N선도를 이용하여 이러한 조건의 피로손상을 구하면 7.1×10^{-16} 정도이므로 거의 피로손상이 존재하지 않는다고 볼 수 있다. 따라서 폴리에틸렌 보트에 입력되는 랜덤하중파형에 의한 피로손상은 열악한 하중조건이나 최대 사이클 수를 보이는 하중조건에 의해서도 피로손상은 그다지 축적되지 못하고 있다.

조등[15]이 수행한 화차용 제동 프레임의 파손사고원인 분석에 의하면 피로손상에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 평균응력은 낮아도 응력범위가 큰 하중조건이라고 제시하고 있다. 그러나 폴리에틸렌 보트의 경우 평균응력이 낮고 응력범위가 큰 하중조건에서도 피로손상은 매우 적다. 이러한 결과는 폴리에틸렌 보트 선체에 입력되는 최대 가속도에 의한 피로손상이 매우 적기 때문에 폴리에틸렌 보트에 가해지는 높은 가속도 성분에 의한 피로손상도 매우 적기 때문이다. 즉, 폴리에틸렌 보트에 입력되는 하중조건은 평균응력이 거의 0MPa이고 응력범위도 매우 낮은 상태에서 운항되고 있음을 알 수 있다.



[Fig. 11] Fatigue life of polyethylene boat by rainflow cycle counting method

Fig. 11은 194초 동안의 실제선저압력을 기초로 rainflow cycle 집계법에 의하여 폴리에틸렌 보트의 피로손상을 평가한 것이다. 194초를 기준으로 피로 파손까지 부하 가능 사이클 수는 1.0×10^9 사이클이므로 실제 파손 시까지의 시간은 2.0×10^{11} 초이다. 즉, 본 연구에서 개발한 폴리에틸렌 보트의 내구수명은 5.5×10^7 시간이고 6,299년의 내구 수명을 가진다. 따라서 통상 산업계에서의 플레저 보트 수명을 15년으로 고려하면 개발한 폴리에틸렌 보트는 사용수명에 대한 설계수명의 비인 안전율이 415가 되어 높은 내구수명을 가진다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 폴리에틸렌 보트의 선체 내구성을 평가하기 위하여 선체에 부하되는 불규칙하중을 구한 후 이것을 기초로 보트의 피로손상을 선형누적손상법칙을 이용하여 구한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 선체에 입력되는 가속도 중 대체적으로 큰 가속도 성분은 Surge와 Heave 운동을 나타내는 성분이고 가장 작은 가속도 성분은 Sway 운동을 나타내는 성분이다.
2. 최대 가속도 상태에서 보트에 부하되는 최대 Von-Mises 응력은 1.8MPa로서 1×10^9 사이클 피로강도 5.9MPa 아래에 있다.
3. 수정 Miner 법칙을 이용하여 피로손상을 평가한 결과 빈도수가 많은 응력조건이 피로손상도 많아 높은 응력범위를 보이는 하중조건에 의한 피로손상은 많이 존재하지 않고 있다.
4. 폴리에틸렌 보트의 피로 수명은 6,229년의 수명을 보이고 있으므로 통상 산업계에서의 플래저 보트 수명을 15년으로 고려하면 개발한 폴리에틸렌 보트는 사용수명에 대한 설계수명의 비인 안전율이 415가 되어 높은 내구수명을 가지고 있다.

References

[1] J. D. Kim, "Fatigue Assessment of Ship Structures : Recent State of the Art", Journal of KWJS, Vol.16, No.5, pp. 1-10, October, 1998.

[2] J. S. Park and J. Y. Ko, "Estimation about Local Strength using FE-Analysis for Steel Yacht", Journal of KSMES, Vol.11, No.2, pp.77-82, December, 2005.

[3] I. S. Nho, J. K. Kim and J. H. Yoo, "Fatigue Strength Assessment of a Ship Structures using the Influence Coefficient Concept and Spectral Analysis Technique", Journal of SNAK, Vol.34, No.2, pp.75-84, May, 1997.

[4] D. S. Um, S. W. Kang, S. G. Lee and W. B. Kim, "A Study on the Fatigue Strength Analysis of the Welded Joints in Ship Hull Construction", Journal of KWJS, Vol.10, No.4, pp. 259-267, December, 1992.

[5] Rhino, *Rhino 3D 4.0 Manual*, Rhino, 2010.

[6] S. S. Cho, "Study of Structural Design of Polyethylene Pleasure Boat", Trans. of Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol.36, No.12, pp.1551-1561, December, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2012.36.12.1551>

[7] ISO 12215-5, *Small Craft-Hull Construction and*

Scantlings - Part 5 : Design Pressures for Monohulls, Design Stresses, Scantlings Determination, ISO, 2008.

[8] KS M 3022, "Testing Method for Tensile Creep of Plastics", KS, 2008.

[9] B. K. Hong, "A Study on the Standard of Ship Hull Construction for Aluminium Alloys Fishing Boats", The Korean Society for Fisheries and Marine Sciences Education, Vol.12, No.1, pp.22-82, January, 2000.

[10] KS B ISO 1143, *Metals -Rotating Bar Bending Fatigue Testing*, KS, 2008.

[11] R. E. Peterson, *Stress Concentration Design Factors*, P.75, Wiley & Sons Inc., New York, 1954.

[12] Y. H. Yeom, *Material Test Method*, Dong Myeong Press, Seoul, pp.243-248, 1989.

[13] ANSYS Workbench V12.1, *ANSYS Workbench, V12.1, Fatigue Module Manual*, ANSYS, 2010.

[14] J. A. Collins, *Failure of Materials in Mechanical Design*, John Wiley & Sons Inc., New York, pp.256-258, 1993.

[15] S. H. Baek, J. H. Jeon, K. Y. Lee, S. S. Cho and W. S. Joo, "Reliability Analysis and Preventive Maintenance for Fatigue Life of End Beam for Uncovered Freight Car", Trans. of Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol.29, No.3, pp.495-502, March, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2005.29.3.495>

[16] S. S. Cho, "A Experimental Estimation of Thermal Fatigue at Polyethylene Boat", Journal of KAIS, Vol.14, No.6, pp.2559-2565, June, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.6.2559>

[17] S. S. Cho, "A Study on Hull Form Development of Polyethylene Boat", Journal of KAIS, Vol.14, No.10, pp.4726-4732, October, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.10.4726>

오 정 석(Jeong-Seok Oh)

[정회원]



- 1993년 2월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2001년 3월 : 일본 게이오대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2009년 4월 ~ 2012년 6월 : 한국기계연구원 연구원
- 2013년 10월 ~ 현재 : 국립군산대학교 풍력기술연구센터 책임연구원

<관심분야>

피로파괴, 파괴역학

조 석 수(Seok-Swoo Cho)

[정회원]



- 1993년 2월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 동아대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1997년 3월 ~ 1997년 8월 : 창원문성대학교 기계과 전임강사
- 1997년 8월 ~ 현재 : 강원대 자동차공학과 교수

<관심분야>

재료강도학, 구조최적설계