

폴리에틸렌 보트의 열피로 손상의 실험적 평가

조석수^{1*}

¹강원대학교 자동차공학과

A Experimental Estimation of Thermal Fatigue at Polyethylene Boat

Seok Swoo Cho^{1*}

¹Department of Vehicle Engineering, Kangwon National University

요 약 2000년 이후 FRP 보트 선체 제작에 대한 국제적 법적 규제가 강화되고 있다. 본 연구에서는 보트 선체 재료로 폴리에틸렌을 제안하였다. 폴리에틸렌은 저융점 재료로서 보트가 야외에 장기간 노출되는 경우 심각한 열피로를 받을 수 있다. 고밀도 폴리에틸렌 보트 선체에 대한 열적 내구성을 실험적으로 평가하기 위하여 삼점굽힘하중조건하에서 변형률 게이지를 이용하여 열응력을 측정된 뒤 열응력 데이터를 기초로 통계학적으로 열피로 손상을 분석하였다.

Abstract Material of boat hull has been used mainly with FRP composite materials until now. FRP boat hull manufacturing began to be restricted after the 2000's under international regulation on ocean environment safety. Shipyard on a small scale has manufactured polyethylene canoe and kayak hulls. Polyethylene has the melting point lower than the existing hull materials. Thermal stress occurs on outer hull surface when the polyethylene boat hull is exposed to sunlight. If it happens everyday, boat hull undergoes fatigue damage due to thermal fatigue. Therefore, this study presents the statistical fatigue life estimation on the HDPE boat hull subject to repeated thermal stress under three point bending condition.

Key Words : HDPE(High Density Polyethylene), S-N Curve, Fatigue Life, Hazard Function, Reliability Function, Weibull Probabilistic Distribution, Kaplan-Meier Method

1. 서론

플레저 보트나 요트 제작업체는 2012년 현재까지 선체 재료로 부피에 비해 강도가 큰 FRP를 이용하고 있으나 2000년대에 들어오면서 FRP 선체에 대한 환경오염 및 해양안전에 관한 법적 규제가 강화되고 있다. 따라서 세계 각국에서는 FRP 선체의 대체 재료로서 다양한 재료를 제안하고 있다. 그 중 가장 대표적인 재료가 알루미늄으로 국내의 경우 규격화까지 진행되었다. 그러나 알루미늄을 플레저 선박 선체 재료로 사용하기에는 알루미늄 가격이 너무 비싸 대중화하기에는 아직 이르다[1].

선체 전장이 긴 상업용 선박의 경우 거친 사용 환경에 노출되므로 연성 재료인 폴리에틸렌으로 선체를 제작하

기에는 부적합하나 플레저 보트의 경우 선체 전장이 짧아 폴리에틸렌으로 선체를 제작하기에는 매우 적합한 장점을 가지고 있다. 그러나 폴리에틸렌은 용융점이 190℃로서 기존의 선체 재료인 FRP와 강 및 알루미늄에비하여 매우 낮다.

일반 강선은 외부선체표면과 내부선체표면사이 온도 차이가 생기더라도 열팽창계수가 적어 매우 적은 열응력이 발생되므로 이에 대한 연구는 거의 없으며 단지 LNG 선박과 같이 선박에 선적되는 제품이 유체인 경우 선체 온도 상승으로 인한 내부 유체 온도가 증가함으로서 선체에 탑재된 압력용기의 안전성에 영향을 미치는 경우 선체 온도 분포와 이에 따른 선체 단열에 관심을 가지는 경우가 대부분이다[2-5]. 그러나 폴리에틸렌 보트는

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

Tel: +82-33-570-6394 email: sscho394@kangwon.ac.kr

Received July 23, 2012

Revised (1st May 13, 2013, 2nd May 23, 2013)

Accepted June 7, 2013

해상 및 육상에서 보관 중 일 때 선체가 태양에 의한 복사열에 의하여 외부 선체 온도는 녹는점에 비하여 매우 높은 온도가 형성되나 내부 선체 온도는 대기온도를 유지하고 있어 매우 높은 열응력을 발생시킬 수 있다. 이러한 열응력이 반복적으로 보트 선체에서 발생하게 되면 보트 선체는 열피로를 발생시켜 극단적인 경우 열피로에 의하여 선체가 피로 파손될 수 있어 선체가 설계 수명을 다하지 못할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 고밀도 폴리에틸렌 (HDPE : High-density polyethylene) 보트에 대한 열적 내구성을 실험적으로 평가하기 위하여 야외에서 보트의 가장 극악한 하중조건인 삼점굽힘하중조건하에서 변형률 게이지를 이용하여 열응력을 측정 한 뒤 열응력 데이터를 기초로 통계학적으로 열피로 손상을 분석하였다.

2. 본론

2.1 재료 시험

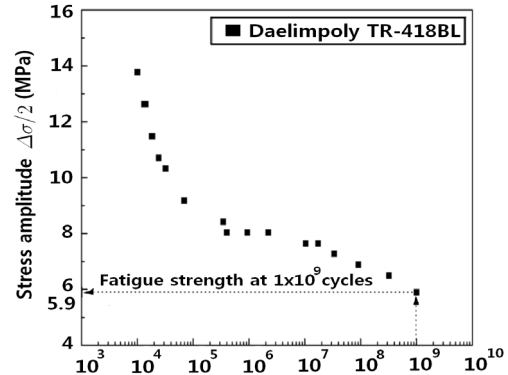
2.1.1 인장시험

Table 1은 고밀도 폴리에틸(DaelimpolyTR-418BL)의 인장시험결과를 정리한 것이다. ISO 12215-5[6]에서는 플레저 보트의 재료설계강도로 FRP를 기준으로 인장강도의 1/2로 설정하고 있다. 그러나 폴리에틸렌 보트의 경우 선체 재료가 고밀도 폴리에틸렌으로 고연성 재료이므로 재료설계강도를 항복응력의 90%로 설정하여야 하나 재료의 불확실성을 더 고려하여 항복응력의 27%로 설정한다. Table 1에서 고밀도 폴리에틸렌의 항복응력이 27MPa이므로 보트의 설계응력은 7.3MPa이다.

2.1.2 피로시험

[Fig. 1]은 고밀도 폴리에틸렌의 응력비 -1의 회전굽힘 피로시험 결과를 나타낸 것이다. 일반 플라스틱 재료와 동일하게 반복수가 10^7 사이클을 초과하더라도 피로한도는 나타나지 않고 있다. 그로 인하여 구조설계를 위한 피로강도를 시간강도개념으로 정의할 필요가 있으며 비철 금속의 경우 보통 5×10^7 에서의 피로 강도를 설계기준

강도로 사용하고 있으나[7] 본 연구에서는 피로 한도 근방에서 발생할 수 있는 리버 패턴(River pattern)파단면을 형성하기 시작하는 1×10^9 파단 사이클에서의 피로강도를 Daelimpoly TR-418BL의 피로한도로 정의하였다. 그러므로 Daelimpoly TR-418BL의 피로한도는 5.9MPa이다.



[Fig. 1] S-N curve of Daelimpoly TR-418BL

2.2 선체 온도 측정 시험

선체표면 온도측정 시험 시 대기 온도는 평균기온 18.9℃, 최고기온 25.4℃, 최저기온 14.1℃이고 평균 풍속은 2%이다. [Fig. 2]는 폴리에틸렌 보트가 육상에서 외부에 보관될 때 대기 온도 변화에 따른 선체 온도 변화를 측정하기 위한 선체온도측정전경과 K-type 열전대 (Kyowa, 직경 0.32mm) 측정 위치를 각각 나타낸 것이다. 팔호는 선체 내부에 부착한 열전대의 번호이다.

[Fig. 3]은 선체 온도 측정 결과를 나타낸 선수, 중앙, 선미별로 나누어 최소, 평균, 최대온도를 각각 나타낸 것이다. 건현 최대온도는 55℃로서 선저 최대온도 52℃보다 3℃ 높게 나타났고 최소 온도도 위치에 따른 온도 차이가 3℃정도이다. 또한 선체외부최대온도와 선체내부최대온도사이의 차이는 5℃로서 선체 내측과 외측의 온도 기울기가 녹는점의 1/2인 105℃의 5%나 되고 있어 선체 내 외측에 걸리는 열응력도 상당한 수준일 것으로 예상된다. 한편 일몰 이전과 일몰 이후의 온도 차이는 5배 정도이므로 선체표면온도상승은 태양에 의한 복사에너지에

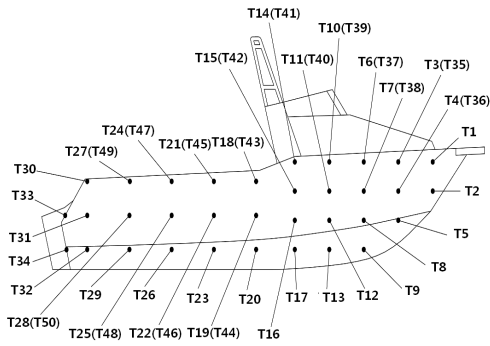
[Table 1] Mechanical properties of Daelimpoly TR-418BL

	Density (kg/m ³)	Melting point (°C)	Low temperature brittle point (°C)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Yielding strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Braking strength (MPa)	Elongation (%)
$\sigma_t - \epsilon_t$	950	190	-110	1.1	0.42	38	91	94	810
$\sigma_n - \epsilon_n$	950	190	-110	1.1	0.42	27	27	21	810

의한 것으로 생각된다. 따라서 선체 보관 시 외부 보다 내부에 보관하는 것이 과대한 선체 온도기울기를 방지할 것으로 보인다.

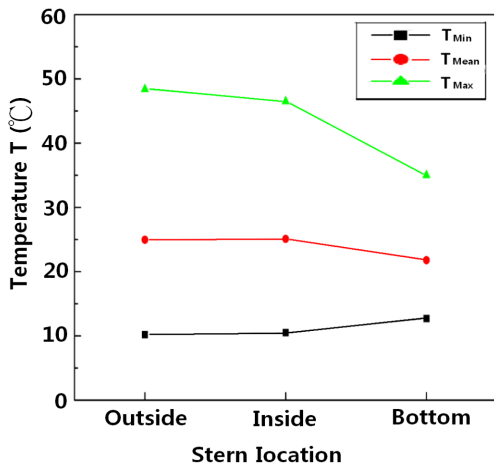


(a) Overview

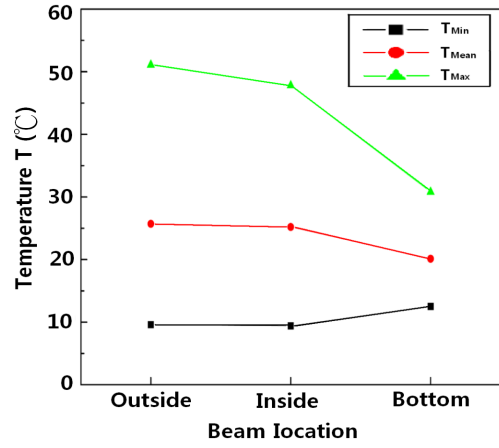


(b) Thermocouple position

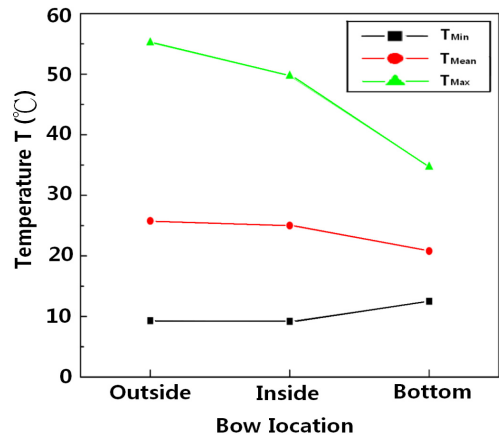
[Fig. 2] Temperature measurement in boat hull



(a) Stern



(b) Beam

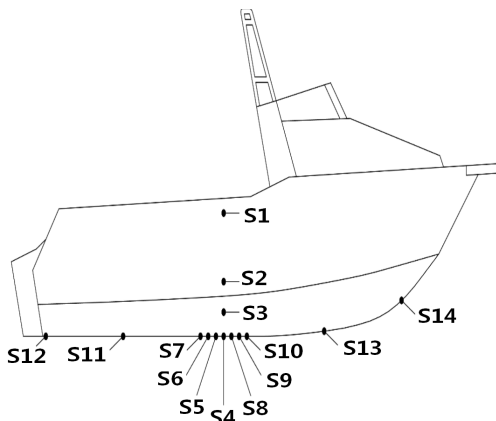


(c) Bow

[Fig. 3] Temperature measurement results in boat hull

2.3 선체 열응력 측정 시험

[Fig. 4]는 온도 변화에 따른 열응력을 측정하기 위한 3축 로젯 변형률 게이지의 선체 부착 위치를 나타낸 것이다. 열응력측정시험에 사용한 3축 로젯 변형률 게이지 (3-axis rosette strain gag: GFRA-3-50 (Korean measuring technology laboratory Co.))수는 총 14개이며 시간에 따른 정적 변형률은 정적변형률측정장치 (KYOWA PCD-300A)를 이용하여 측정하였으며 데이터 샘플링 속도는 1Hz이고 데이터 측정 시간은 24시간이다.



[Fig. 4] 3-axis rosette strain gage position in boat hull

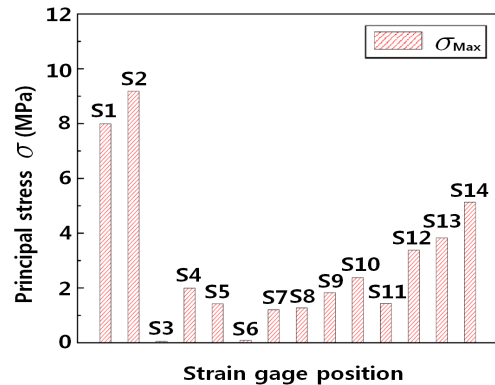
3. 열피로 손상 평가

폴리에틸렌 보트 선체는 외부에 노출되는 경우 태양 복사 에너지에 의하여 높은 온도 변화를 겪는다. 따라서 온도 변화에 따른 열응력은 3축 로젯 변형률 값과 Table 1의 탄성계수 E 및 프와송 비 μ 를 이용하여 평면 주응력 $\sigma_{1,2}$ 으로 구하였으며 다음 식 (1)과 (2)와 같이 계산하였다[8].

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\epsilon_a - \epsilon_c}{2}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_a + \epsilon_c}{2} - \epsilon_b\right)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_1 = \frac{(\epsilon_1 + \mu\epsilon_2)E}{1 - \mu^2}, \quad \sigma_2 = \frac{(\epsilon_2 + \mu\epsilon_1)E}{1 - \mu^2} \quad (2)$$

[Fig. 5]는 선체 표면에서 측정된 최대 주응력을 모두 나타낸 것이다. 최대 주응력은 보트 선체 중앙에 해당하는 건현 아래 S2에서 발생되고 있으며 최소주응력은 지점 부근인 S3에서 발생되고 있다. 따라서 열응력에 의한 선체의 구조적 위험 영역은 건현 부근에서 발생되고 있으며 항복 응력의 34%에 있고 설계응력 7.3MPa의 127%에 있어 열피로 파손의 위험성이 존재하고 있다. 한편, 선체 보관 방법이 본 연구에서 제시하는 방법보다 안정적 방법이더라도 본 연구에서 제시하는 선체 지지조건과 실제 운전 중에 선체가 받는 지지조건은 구속 조건 정도의 차이는 있지만 서로 비슷하므로 만약 열하중과 운전하중이 중첩되어 발생 응력이 커지는 경우 심각한 피로손상을 유발할 수 있다.



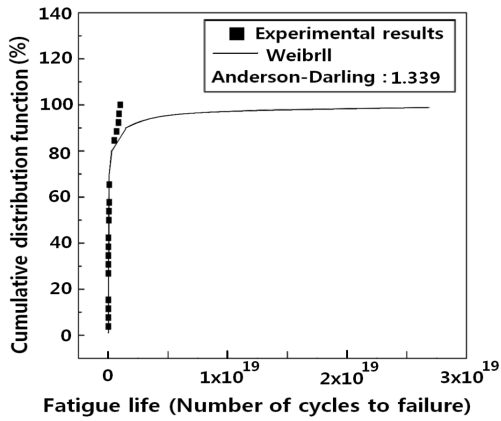
[Fig. 5] Maximum principle stress in polyethylene boat hull position

[Fig. 6]은 Fig. 5의 주응력 데이터와 Fig. 1의 S-N선도 데이터를 사용하여 피로 수명을 평가한 결과이다. 특정 지점에서의 주응력을 기초로 보트 선체의 피로수명에 대한 확률적 분포를 구하기 위하여 Minitab R14[9]를 이용하였다.

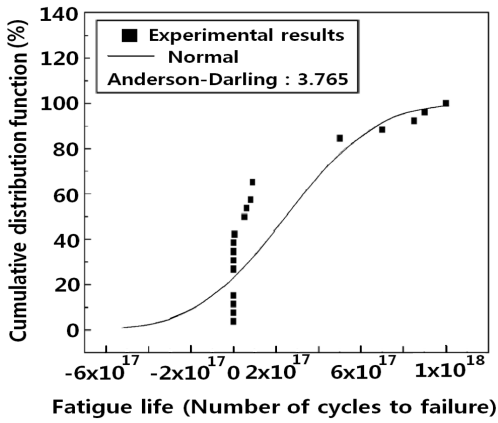
[Fig. 6]은 실제 측정된 응력진폭 데이터를 바탕으로 예측된 피로수명자료에 대한 적합도 검정을 나타낸 것이다. 데이터의 확률분포는 피로수명분포에 많이 쓰이는 3모수 와이블 분포, 정규분포 및 대수정규분포를 적용하였다. 검정통계량은 데이터와 적합한 직선의 대응점과의 차이를 측정하는 Anderson-Darling 값을 사용하였다[9]. 통계 데이터의 A-D값이 작다는 것은 실제 데이터 값과 확률분포 데이터 값 사이의 차이가 적게 나타난다는 것을 의미한다. [Fig. 6]의 폴리에틸렌 선체의 수명 자료의 확률분포들 중에서 3모수 와이블 분포가 Anderson-Darling 값이 가장 적게 나타나 열피로 수명 분포를 가장 잘 나타낸다고 볼 수 있어 본 연구에서는 수명 자료의 모수적 분포로 3모수 와이블 분포를 사용하기로 한다.

[Fig. 7]과 [Fig. 8]은 적합된 와이블 분포의 신뢰도함수와 고장률 함수를 나타낸 것이다. 고장률 함수는 1.3×10^{17} 사이클 영역에서 1.5×10^{-10} 정도의 값을 보여 시간에 따른 고장률이 매우 낮으며 거의 0에 값에 수렴하고 있으므로 과도한 응력이나 초기고장기간에 발견되지 못한

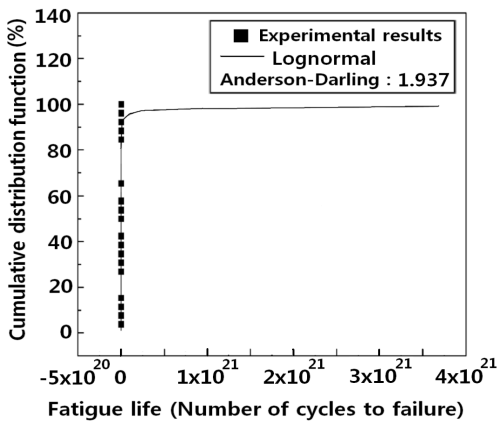
원인들에 의하여 발생하는 우발형 고장률(Constant Failure Rate, CFR)을 잘 표현하고 있다. 그러나 선체와 같은 구조 부재는 반복 하중 사이클수가 증가하면 고장률이 증가하는 증가형 고장률을 나타내는 것이 일반적이다. 따라서 폴리에틸렌 보트 선체의 수명 자료에 대한 3모수 와이블 확률분포는 실제 선체 내구성 모델로서는 부적합하다.



(a) 3-parameter Weibull

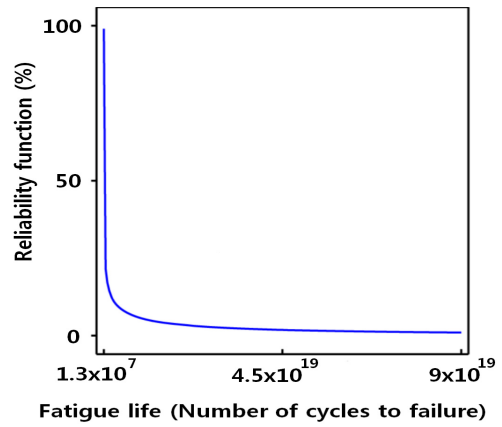


(b) Normal

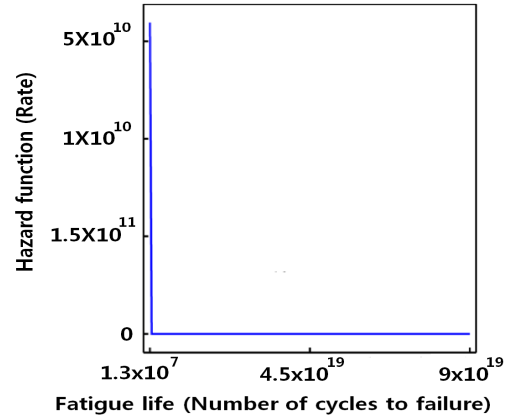


(c) Lognormal

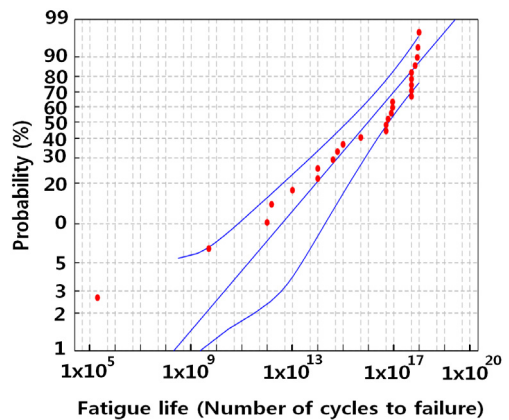
[Fig. 6] Result of goodness of fit test



[Fig. 7] Reliability function for thermal fatigue life using distribution analysis



[Fig. 8] Hazard function for thermal fatigue life using distribution analysis



[Fig. 9] 3 parameter Weibull Probability distribution using distribution analysis

[Fig. 9]는 열피로수명자료의 누적분포함수를 와이블 분포 확률지에 나타낸 것이며 신뢰구간은 95%의 범위를 나타낸다. 그림에서 모든 점이 95% 신뢰구간 안에 위치하고 있어 수명자료가 와이블 분포에 잘 적합되는 것을 알 수 있다. 적합된 와이블 분포의 형상모수는 0.21이고 척도모수는 5.7×10^{16} , 위치모수는 1,041이며 중앙값은 9.7×10^{15} 사이클로 평가되었으며 평가된 분포의 특징을 [Table 2]에 정리하였다.

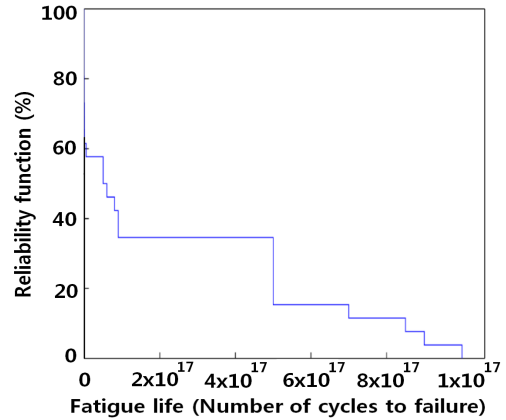
[Table 2] Characteristics of distribution using parametric distribution analysis

Item	Estimation
Shape parameter	0.21
Scale parameter	5.67×10^{16}
Threshold parameter	1040.7
Mean(MTTF)	5.05×10^{18}
Standard deviation	7.14×10^{19}
Median	9.67×10^{15}
Interquartile range(IQR)	2.74×10^{17}

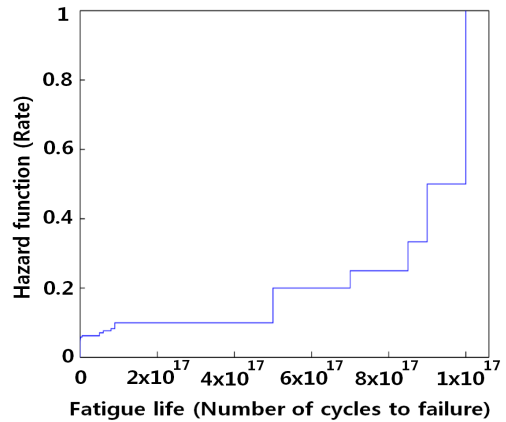
수명자료에 대한 모수적 방법의 결과를 비교하기 위해 비모수적 방법인 Kaplan-Meier 추정법[10]을 이용한 신뢰성 해석을 수행하였다. [Fig. 10]과 [Fig. 11]은 신뢰도 함수와 고장률 함수를 나타내는데 고장률이 증가할수록 신뢰도는 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 Kaplan-Meier 추정법을 이용한 고장률 함수는 시간에 따라 증가하고 있어 시스템의 마모 및 피로 등으로 인한 폴리에틸렌 보트에 발생하는 규칙적 열피로 하중과 같은 경우 피로하중사이클수가 증가할수록 보통 제품의 고장율은 급격히 증가되어 제품의 신뢰도는 급격히 감소한다. 이러한 일반적 물리 현상을 본 경우에 적용하여 보면 비모수적 분포해석을 통한 수명 해석이 모수적 분포에 의한 수명 해석보다 물리적 수명 감소 현상을 잘 설명하고 있다. 따라서 폴리에틸렌 보트에서 발생하는 열피로 고장률 패턴은 증가형 고장율을 따르므로 Kaplan-Meier 추정법을 이용하는 비모수적 방법이 폴리에틸렌 선체의 통계학적 내구성 모델로 적합하다.

[Fig. 12]는 Kaplan-Meier 추정법을 이용한 수명자료의 누적분포함수를 나타낸 것이다. 대략 4%(3.846%) 누적파손확률을 나타내는 파손 사이클 수는 2×10^9 사이클로 5.5×10^6 년을 나타내고 있으며 폴리에틸렌 보트의 하루 열피로손상은 5×10^{-10} 이다. 즉, 폴리에틸렌 보트의 사용기간이 15년이내라는 것을 고려하면 플레저 보트에서

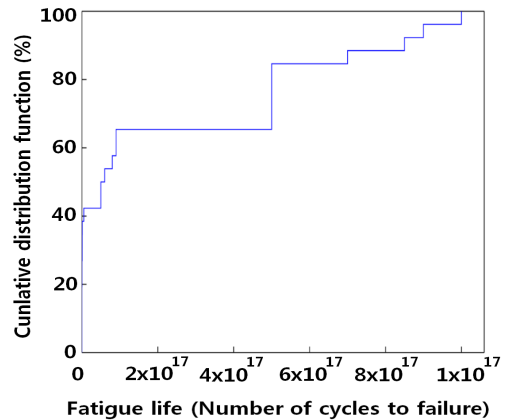
발생되는 열피로 손상은 극히 적어 내구 설계시 열피로 손상을 무시해도 상관없을 것으로 생각된다.



[Fig. 10] Reliability function for thermal fatigue life using Kaplan-Meier method



[Fig. 11] Hazard function for thermal fatigue life using Kaplan-Meier method



[Fig. 12] Cumulative distribution function for thermal fatigue life using Kaplan-Meier method

4. 결론

본 연구는 폴리에틸렌 보트에 대한 열피로손상을 통계학적 확률분포를 이용하여 평가한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모수적 방법을 이용하여 열피로수명자료를 확률분포에 적합시키면 3모수 와이블 확률분포가 보트 선체 열피로수명을 가장 잘 나타낸다.
2. 열피로수명자료에 대하여 적합된 3모수 와이블 분포의 고장률 함수는 시간에 따른 고장률이 매우 낮으면서 일정하여 폴리에틸렌 보트 선체의 고장형 모드를 우발형 고장 모드로 추정하고 있어 선체의 통계학적 내구성 모델로서는 적합하지 않다.
3. Kaplan-Meier 추정법으로 열피로수명자료에 대한 고장률 함수를 구하여 보면 시간에 따라 증가하고 있어 Kaplan-Meier 추정법이 폴리에틸렌 보트 선체에 대한 통계학적 내구성 모델로 적합하다.
4. Kaplan-Meier 추정법을 이용하여 열피로수명자료의 누적분포함수를 구하여 보면 대략 4%(3.846%) 누적 파손확률을 나타내는 파손 사이클 수는 2×10^9 사이클로 5.5×10^6 년을 나타내고 있어 플레저 보트의 사용기간이 15년이내라는 것을 고려하면 폴리에틸렌 보트에서 발생하는 열피로손상은 매우 적다.

References

[1] H.B.Moraes, J.M.Vasconcellos and P.M.Almeida, "Multiple Criteria Optimization applied to High Speed Catamaran Preliminary Design", Ocean Engineering, Vol. 34, pp. 133-147, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2005.12.009>

[2] J.H.Lee, B.I.Chun, S.O.Song, K.K.Kim, "A Study on the Three-Dimensional Steady State Temperature Distribution and BOR Calculation Program", Proc. of the SREK 1998 Summer Annual Meeting, pp. 1224-1228, 1998.

[3] B.I.Chun, Y.M.Kim, K.K.Kim, "A Study on the Computation of Hull Temperature Distribution and Boil Off Ratio of MRV Type LNG carrier", Trans. of the KSME(A), Vol. 18, No. 4, pp. 986 - 996, 1994.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2012.13.4.1480>

[4] D.W.Lee, S.S.Cho, "Failure Load Prediction of

Tunnel Support using DOE and Optimization Algorithm", JKAICS, Vol.13, No.4, pp.1480-1487, 2012.

[5] D.W.Lee, J.N.Kim, S.S.Cho, "A Study on Safety Estimation of Railroad Wheel", JKAICS, Vol.11 No.4, pp.1178-1185, 2010.

[6] ISO 12215-5, "Small Craft-Hull Construction and Scantlings-Part 5: Design Pressures for Monohulls, Design Stresses, Scantlings Determination", ISO, pp.1-107, 2008.

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

[8] J.P.Holman, "Experimental Method for Engineers", pp. 397-413, McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1989.

[9] S.G.Seo, "Reliability Analysis using MINITAB R14.2", pp. 142-153, Eretech Co., Gunpo city in South Korea, 2006.

[10] S.G.Seo, "Reliability Analysis using MINITAB R14.2", pp. 207-213, Eretech Co., Gunpo city in South Korea, 2006.

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