

저사이클 피로해석을 위한 용접 토우부 노치 응력-변형을 해석 Notch Strain Analysis for Low Cycle Fatigue of Welded Joint

김유일, 강중규, 심천식, 이성근
대우조선해양(주) 선박해양기술연구소

ABSTRACT Direct nonlinear finite element analysis was carried out using nonlinear kinematic hardening model which was calibrated based on the experimentally determined material properties to obtain notch stress-strain state under cyclic load. By comparing numerical results and experimental data, conclusion was made on how well analysis results match physical phenomenon. Also, suggestion was made on what material curve should be used in conjunction with traditional Neuber/Glinka's rule to take into account the effect of material heterogeneity in its application to welded joint.

1. Introduction

최근 선박의 대형화, 경량화에 따라 부재 치수의 경감 및 보강재의 감소에 따라 다양한 형태의 피로 균열 사례가 보고되고 있다. 보고된 대부분의 균열은 선박이 운항 중에 노출되는 파랑하중에 기인하는 고사이클 피로현상으로 이해되었으며, 선급의 규정 및 해석 절차 또한 이에 맞추어 발전되어 왔다. 그러나, 근래에 들어 종래의 파랑하중 기인 고사이클 피로로는 설명이 힘든 균열들이 점차 보고되기 시작하였으며 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 대부분의 선급이 저사이클 피로의 rule화에 박차를 가하고 있으며 이를 위한 기초연구가 활발한 상황이다.

2. Theoretical Background

선박이 일생동안 겪게되는 반복하중은 크게 파랑하중과 화물을 적재하고 부리는 동안 발생하는 하중이 있다. 대부분의 경우 후자에 의해 선체에 발생하는 응력은 상대적으로 고응력 영역에 위치하게 되며, 이는 저사이클 피로의 직접적인 원인이 된다. 저사이클 피로는 전통적으로 변형율-수명 선도로 설명되어져 왔으며, 현재에 많은 code나 standard들이 변형율-수명 선도를 이용하고 있다.

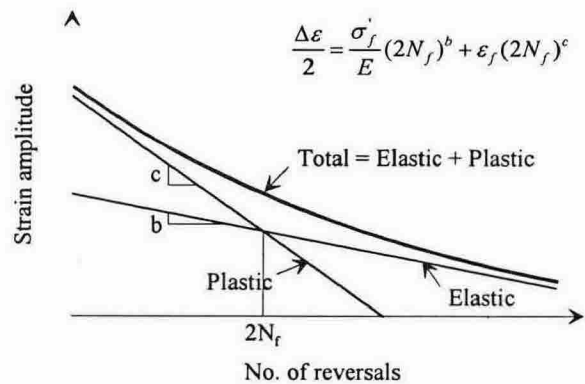


Fig.1 변형율-수명 곡선

3. Experiment

3.1 Material test

저사이클 피로해석에 필요한 물성치를 구하기 위하여 ASTM의 절차에 따라 재료 물성 실험을 수행하였다. 실험을 통하여 구한 물성치는 모재 및 용착금속에 대한 monotonic stress-strain 선도와 cyclic stress-strain 선도이다. Fig.2는 재료물성 시험을 수행하고 있는 사진을 나타낸다.

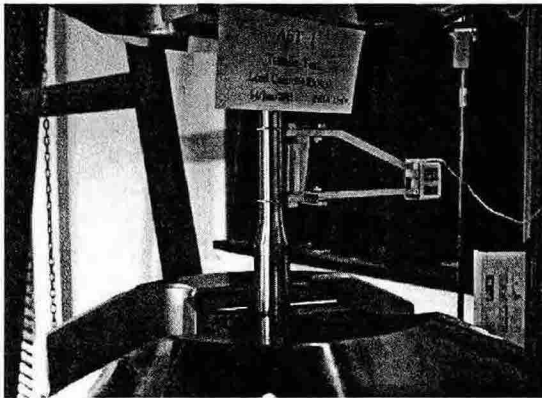


Fig.2 재료물성시험

3.2 Fatigue test

저사이클 영역에서의 용접 이음부 및 모재의 거동을 알아보기 위하여 피로시험을 수행하였다. 피로시험은 변형을 제어 상태에서 수행하였으며 시험에 적용된 하중은 시험편의 단면이 전면항복을 일으키는 높은 영역에서 수행되었다.



Fig.3 피로시험

Fig.3은 시험기에 부착된 상태의 용접 이음부 피로시험편의 형상을 나타낸다. 피로시험에 사용된 시험편은 부분 용입된 비하중 전달형 십자 용접 이음부이다. 시험편의 일정영역에 걸쳐 변위계를 설치하여 시험편의 공칭변형을 값을 실시간으로 얻었으며, 이를 제어기로 보내어 변형을 제어를 구현하였다. 또한, 변형을 비의 영향을 알아보기 위하여 R=0, -1에 걸쳐 시험을 수행하였다.

4. Analysis

시험편의 거동을 수치해석 하기 위하여 Fig.4

에 보인 바와 같은 유한요소 모델을 만들었다.

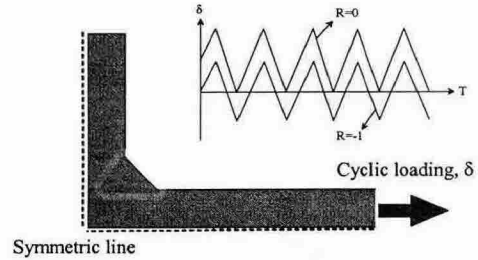


Fig.4 해석 모델

전체 시험편의 1/4을 모델링 하였으며, IIW의 방식에 따라 가상 노치 반경(1mm)을 이용하여 용접토우부의 형상을 이상화하여 모델링하였다. 용접토우부 근방에서 해의 요소의존성을 배제하기 위하여 convergence study를 통하여 최적의 요소크기를 결정하였으며, 해석에 사용된 요소는 8절점 평면 변형을 요소이었다. 열영향부의 재료물성치는 그 위치에 따라 변하므로 재료경도시험을 통해 얻어진 경도값을 토대로 재료의 물성치를 추정하였다. 실험을 통하여 얻어진 재료의 반복 응력-변형을 선도와 재료의 파단 응력과의 관계를 도출하였으며, 두 파라미터간의 연관성을 통하여 예측된 경도값과 반복 하중 하에서의 재료의 거동을 추정하였다. 추정된 물성치를 위치에 따라 다르게 부여하여 보다 정확한 예측을 도모하였다. 재료의 경화거동은 nonlinear kinematic hardening model을 이용하였으며, 실험을 통해 결정되어진 데이터를 바탕으로 재료물성 파라미터를 결정하였다.

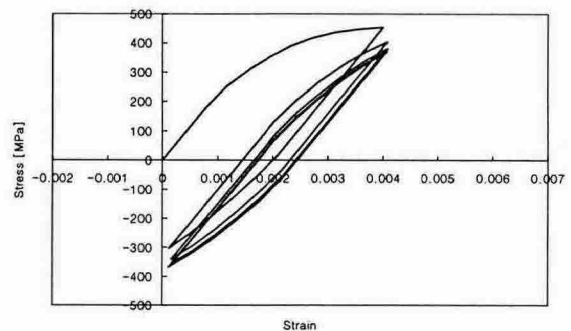


Fig.5 과도 응력-변형을 응답

Fig.5는 해석 결과로 얻어진 용접 토우부에서의 응력-변형율의 과도 응답이다. 그림에서 알 수 있듯이 하중이 계속되는 동안 mean stress

가 0으로 수렴하는 relaxation효과와 Bauschinger 효과가 정확히 구현되는 것을 확인할 수 있다.

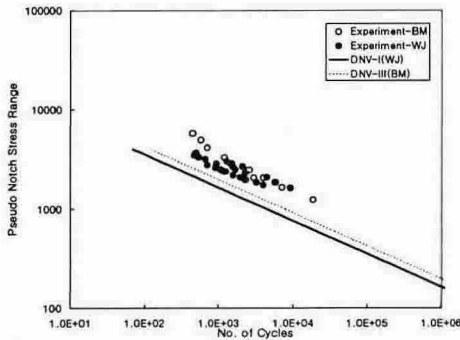


Fig.6 노치응력 기반 피로선도

Fig.6은 피로실험을 통하여 구해진 공칭응력 기반의 피로선도를 해석을 통해 구한 노치응력을 이용하여 노치응력기반의 피로선도로 바꾼 결과이다. 그림에서 보듯이 선급의 선도를 저사이클 영역으로 단순 확장한 설계선도와 같은 추세를 보이는 것을 확인할 수 있다. 선급의 선도를 저사이클 영역으로 단순 확장한 선도는 SN 선도의 수직축이 pseudo stress(Strain×Young’s modulus)인 경우에 유효한 설계 선도가 된다.

5. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 재료시험을 통하여 조선산업에 광범위하게 적용되는 재료에 대한 반복 응력-변형률 선도를 구하였으며, 이를 토대로 nonlinear kinematic hardening model을 구축하였다. 실험에 사용된 모든 재료에 대해, 루더스 밴드효과가 나타나는 첫 번째 사이클을 제외하면 반복 경화 현상은 미미함을 확인하였다.

2) 계산을 통해 얻어진 노치응력을 바탕으로 실험데이터를 재정리한 결과 선급에서 제시한 피로선도가 저사이클 영역에서도 유효함을 입증하였다. 이는 현재 고사이클영역에서 사용되고 있는 선급의 피로선도를 저사이클 영역으로 단순 확장한 후, 피로수명 평가에 사용되는 응력을 pseudo stress로 변환하면 신뢰성 있는 피로수명 예측 결과를 얻을 수 있음을 의미한다.

3) 유한요소해석 결과를 토대로 용접부와 같

이 재료 불균일성이 존재하는 경우에 Neuber rule의 적용에 대한 기준을 확립하였다. 설계시에 적용되는 hot spot stress를 기준으로 보았을 경우, 용착금속의 물성치를 이용하여 노치응력을 추정하는 것이 보다 정확한 결과를 주는 것으로 확인되었다.

참고문헌

1. Joo-Ho Heo, Joong-Kyou Kang, Yooil Kim, In-Sang Yoo, Kyung-Su Kim, Hang-Sub Urm : A Study on the Design Guidance for Low Cycle Fatigue in Ship Structure, Proceedings of PRADS(2004), Germany
2. W.Fricke, H.Paetzold : Application of Cyclic Strain Approach to the Fatigue Failure of Ship Structural Details, Journal of Ship Research, 1987, Vol.31, No.3, pp177-185
3. J.D.Harrison : Fatigue Performance of Welded High Strength Steels, 1974, TWI Report
4. F.V.Lawrence, N.J.Ho, P.K.Mazumdar : Predicting the Fatigue Resistance of ASTM A36 and A514 Grade F Steels and 5083-0 Aluminium Weld Materials, 1978, Welding Research Supplement, pp334-344
5. T.D.Rosenberg, R.M.Andres, T.R.Gurney : A Compilation of Fatigue Test Results for Welded Joints Subject to High Stress/Low Cycle Conditions, 1991, Department of Energy-Offshore Technology Information, HMSO
5. ABAQUS User’s manual, 2004, ABAQUS Inc.