

Longi-web 연결부의 피로강도 평가에 관한 실험적 연구

강성원*, 김정환**, 김광석**, 강종규**, 허주호**, 김명현†*

부산대학교 조선해양공학과*
대우조선해양(주) 구조R&D**

An Experimental Study for the Fatigue Strength Assessment of Longi-web Connections

Sung Won Kang*, Jeong Hwan Kim**, Kwang Seok Kim**, Joong Kyoo Kang**,
Joo Ho Heo** and Myung Hyun Kim†*

Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University*
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co. Ltd., Ship and Marine Structure R&D Team**

Abstract

In the load-carrying fillet weldments, which are common in ship structures, fatigue cracks can occur at the weld root, in addition to the weld toe. In particular, fatigue cracks originating from the weld root are difficult to detect and cause a significant reduction in the fatigue strength of a weldment. Therefore, it is important to note the fatigue failure mode of load-carrying fillet weldment. In this study, a series of fatigue test was carried out for the fatigue strength evaluation of longi-web connections that are typical kinds of the load-carrying fillet weldment.

※Keywords: Fatigue failure mode(피로 파손모드), Load-carrying fillet weldment(하중전달형 필릿 용접부), Fatigue strength(피로강도), Longi-web connections(중형부재 연결부)

1. 서 론

선박 구조물은 대표적인 대형 용접 구조물이며, 오랜 기간 동안 파랑 등에 기인한 반복 하중을 받게 된다. 하지만 이러한 반복 하중을 받는 용접

구조물에서 피로파괴가 발생하는 곳은 일반적으로 응력 집중이 발생하는 용접 연결부이며 따라서 선박 구조물의 설계에서 피로강도의 평가는 매우 중요한 요소로 작용한다. 한편, 선박에서는 작업 공정상의 이유로 필릿 용접이 많이 사용되고 있는데 하중 전달형 필릿 용접이음부의 경우 반복 하중을 받을 시 용접 토우부 뿐만 아니라 용입 부족부 선단에서도 응력집중이 발생하여 피로균열이 발생전

접수일: 2007년 7월 11일, 승인일 2007년 12월 23일

† 교신저자: kimm@pusan.ac.kr, 051-510-2486

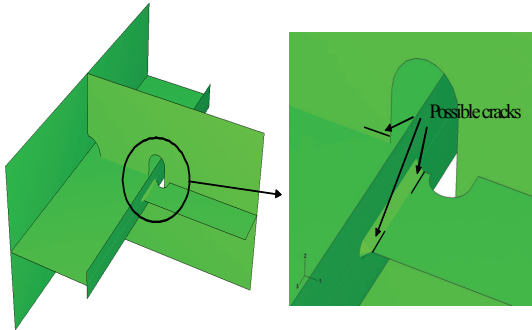


Fig. 1 Longi-web connection found in ship structures

파하는 경우가 있다(Kang et al. 2003). 이곳에서 발생한 균열은 육안관찰이 불가능하고 초음파 탐상등에 의한 비파괴 검사에 의해서도 검출이 곤란한 경우가 많으며, 심각한 손상을 일으킬 때 까지 방치될 위험성이 있다(Um et al. 1983). 이러한 용접 루트부에서 발생하는 균열을 연구하기 위하여 흔히 사용되는 형상으로는 용입 부족부를 가지는 십자형 필릿 용접부가 있다(Ha et al. 2006). 하지만 실제 구조물에서 발생하는 문제는 2차원으로 해석이 가능한 십자형 필릿 용접부에 대한 연구만으로는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 용접 토우부와 용접 루트부에서 발생하는 균열이 고려 될 뿐만 아니라 그 형상 및 작용 하중이 복잡한 선체 중형부재 연결부의 피로강도를 평가하였다.

2. 시험 절차

2.1 시험편 형상

본 연구에 사용된 시험편은 Fig. 2과 같이 선박 구조물에 사용되는 longi-web 연결부의 대표적인 두가지 형태의 시험편으로 각각의 모델에 대하여 용접 방식에 따라 완전 용입한 것과 부분 용입한 것으로 나누어 총 4가지 형태로 분류하였다. Table 1에서는 용접조건을 나타내었으며, 연구의 효율성을 위하여 시험에 사용된 4종류의 시험편을 Table 2와 같이 정의하여 사용하였다.

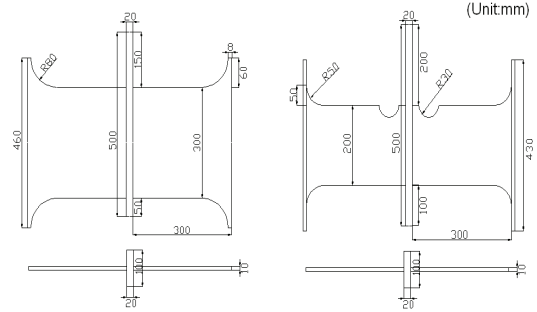


Fig. 2 Dimensions of specimens

Table 1 Welding condition

Electric current	270 ~ 280A
Voltage	30 ~ 31V
Speed	30 ~ 50 (cm / min)
The amount of heat input	1.00 ~ 1.74 (KJ / mm)

Table 2 Test models

Spec.	Explanation	Full name
KH	keyhole이 있는 시험편	Key Hole
NH	keyhole이 없는 시험편	No Hole
FP	완전용입으로 용접된 시험편	Full Penetration
PP	부분용입으로 용접된 시험편	Partial Penetration

2.2 정하중 시험

실험에 앞서 각 시험편에 대하여 작용응력의 정확도를 확인하기 위하여 적절한 위치에 스트레인 게이지를 부착하여 응력을 측정하였다. NH시험편의 경우 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 용접부의 핫스팟 응력을 측정하기 위해 각각의 용접부로부터 5mm, 15mm 떨어진 곳에 총 10개의 1축 5mm 스트레인 게이지를 부착하였으며 주응력을 측정하기 위해 3축 스트레인 로제트 게이지를 부착하였다.

KH시험편은 Fig. 3(b)에서 나타난 바와 같다.

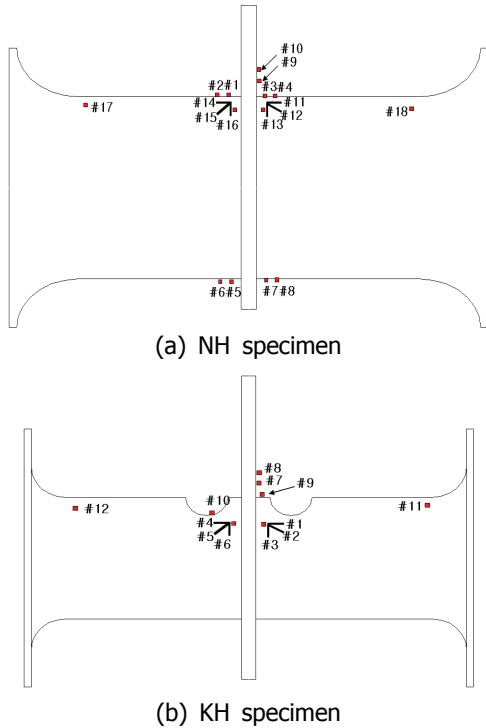
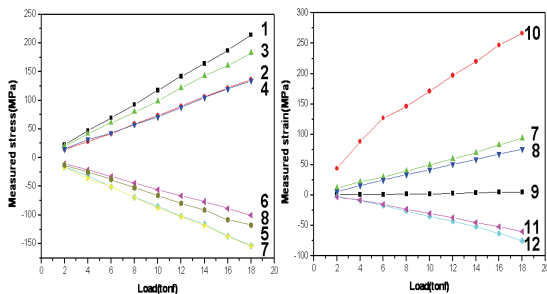


Fig. 3 Location for strain gauges



(a) NH specimen (b) KH specimen
Fig. 4 Static test results

NH과 KH시험편 모두 설치 시 비틀림의 정도를 확인하기 위해 시험편 양 끝단에 1축 스트레인 게이지를 부착하였다. 부착된 스트레인 게이지를 이용한 정하중 시험결과를 Fig. 4에 나타내었다. 정하중 시험은 최대 하중 18ton을 기준으로 2ton부터 단계적으로 하중을 증가시켜 시험편에 작용하는 응력값을 데이터 메모리 수집 장치를 이용하여 계측하였다. Fig. 4에 보는 바와 같이 NH 시험편



Fig. 5 Fatigue test machine

에서는 용접부에서의 응력 집중을 확인할 수 있으며 특히, KH 시험편에서는 key hole에서 가장 큰 응력이 작용함을 발견하였다.

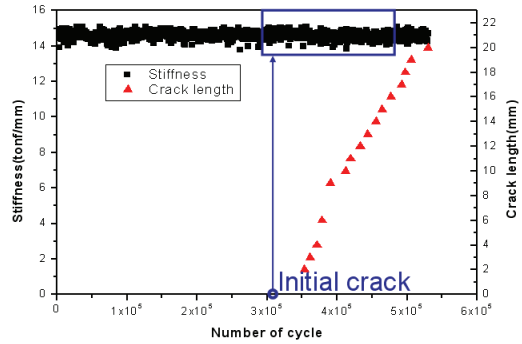
3. 피로시험

3.1 피로시험 장치 및 방법

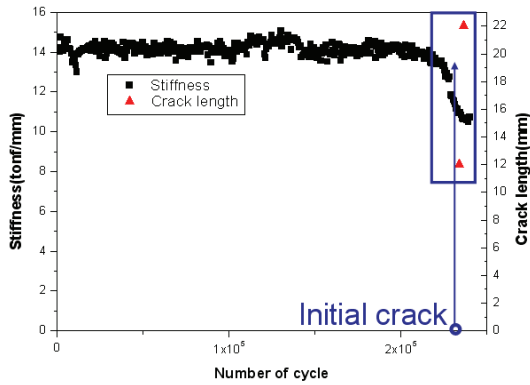
본 연구에 사용된 피로시험 장치는 Fig. 5에서와 같이 최대용량 ±20 ton인 축인장 압축 유압서브 피로시험기(SAGINOMIYA, Japan)를 사용하였고, 피로하중의 파형은 정현파를 사용하였다. 하중 제어 방식은 응력비 R=0에서 실험을 수행하였으며, 하중반복속도는 하중을 고려하여 2~3Hz에서 실시하였다. 또한 하중, 변위 및 변형률 값을 데이터 메모리 수집 장치를 이용하여 관찰하였다. 피로시험은 시험편의 균열이 20mm까지 진전될 때까지 실시하였으며 PPKH시험편의 경우는 완전 파단될 때를 기준으로 하였다.

3.2 Stiffness 측정

피로시험이 실시되는 동안 최대하중과 최소하중의 차와 최대변위와 최소변위의 차의 비로 정의되는 stiffness를 지속적으로 측정하였다. PPNH시험편에 해당하는 stiffness를 예로들어 Fig. 6(a)에 나타내었으며, 보는 바와 같이 크랙이 20mm까지 진전되기까지는 stiffness의 감소를 발견할 수 없었다. 단 PPKH시험편은 완전파단 시까지 실험을 수행하였으므로 stiffness의 감소를 나타낼 수 있으며 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 약 20%의 감소가 있는 후에 크랙을 발견할 수 있었다. 이는



(a) NH specimen



(b) KH specimen

Fig. 6 Stiffness curve

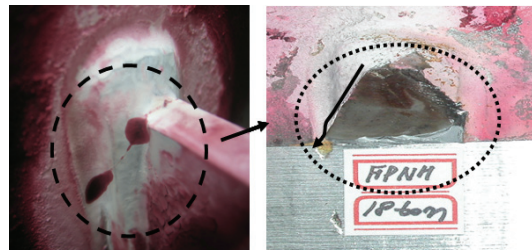
용입 부족부에서 발생한 균열에 의한 영향으로 사료되어진다.

3.3 균열 진전 특성

본 연구에 사용된 시험편에 대하여 피로시험을 실시한 결과로 얻어진 대표적인 파손위치를 Table 3에 각 시험편의 종류별로 정리하였다. 여기서 mid-web에서의 파손 모양은 Fig. 7(c)에서 보는 바와 같다. 4가지 종류의 시험편 모두 발견된 균열의 위치는 상이하였으며 특히 용입 부족부를 가지는 PP시험편의 경우 예상대로 대부분 시험편의 균열이 용접 루트부에서 발견되었다. 각 시험편별 파단 사진은 Fig. 7에 나타내었다.

Table 3 Failed locations

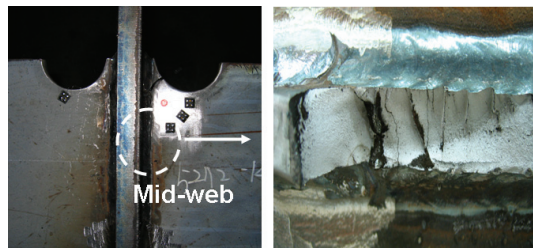
Type	Location of failure
FPNH	Weld toe
PPNH	Weld root
FPKH	Mid-web toe, keyhole
PPKH	Mid-web root



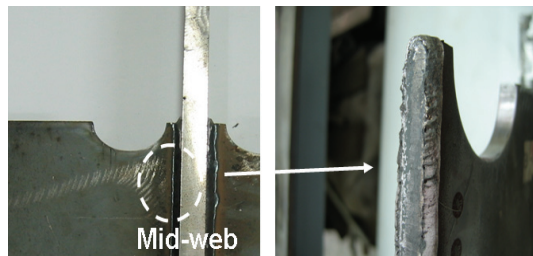
(a) FPNH specimen



(b) PPNH specimen

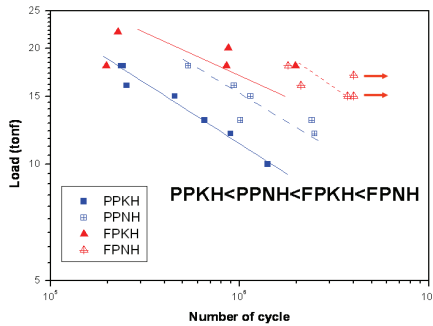


(c) FPKH specimen

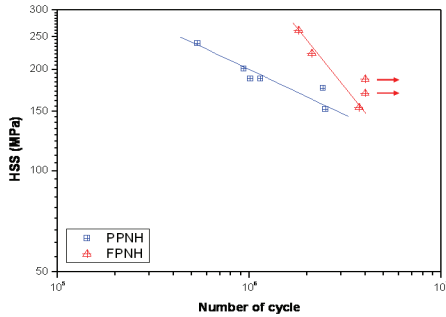


(d) PPKH specimen

Fig. 7 Pictures of failed specimens



(a) Load-based



(b) HSS-based

Fig. 8 Fatigue test results

는 하중과 파단수명과의 관계를, 그리고 Fig. 8(b)에서는 핫스팟 응력(Hot spot stress, HSS)과 파단수명과의 관계를 각각 선도로 나타내었다. 본 연구에서는 Fig. 3의 정하중 시험 결과를 바탕으로 각 선급에서 사용하고 있는 방식을 적용하여 핫스팟 응력을 계산하였다(DNV 2001). 하지만 key hole 시험편의 특성상 스트레인 게이지를 이용해서는 핫스팟 응력을 계산할 수 없기 때문에 Fig. 8(b)에서는 NH 시험편에 대한 핫스팟 응력 결과만을 나타내었다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 각 시험편의 피로강도를 비교한 결과, 완전용입 용접된 FP 시험편이 불완전용입 용접되어 루트부에서 파손을 일으킨 PP 시험편에 비하여 상대적으로 피로강도가 높은 것을 확인할 수 있다. 한편, 각 선급에서 사용되는 방식인 0.5t와 1.5t에서 외삽된 핫스팟 응력을 바탕으로 용접부의 피로수명을 산정할 경우 FAT90 디자인 선도와 비교할 것이 추천되고 있다(ISSC 2003). 따라서 본 연구에서는 계산된 핫스팟 응력을 바탕으로 그에 해당되는 피로수명을 FAT90 디자인 선도에 나타내었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 완전 용입된 시험편의 경우 FAT90 디자인 선도에 비교하였을 때 피로강도가 상대적으로 높은 것을 관찰할 수 있다.

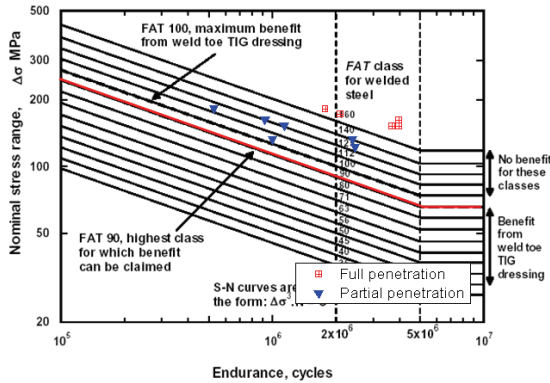


Fig. 9 Comparison of HSS and FAT class

4. 피로시험 결과

FPNH 시험편 5개, FPKH 시험편 5개, PPNH 시험편 6개, PPKH 시험편 7개, 총 23개의 시험편에 대하여 피로시험을 실시하였으며 Fig. 8(a)에서

5. 결론

본 연구에서는 선박에서 주로 사용되고 있는 4 가지 종류의 Longi-web 연결부에 대하여 일련의 피로시험을 실시하고 각 시험편의 파손 형태 및 피로강도를 평가하였다.

1) Key hole이 없는 시험편(NH)의 경우 파단수명을 균열이 20mm까지 진전 시로 보았기 때문에 현저한 강성의 변화를 확인 할 수 없었지만 Hole이 있는 시험편(KH)의 경우는 완전 파단시까지 실험을 진행하였기 때문에 강성의 변화를 관찰할 수 있었다. 하지만 불완전용입 용접된 PPKH 시험편의 경우는 강성이 20% 감소한 후에 초기 균열을 발견하였는데 이는 루트부에서 균열이 발생하였기 때문으로 사료된다.

2) 피로시험 결과 완전용입 용접된 FP 시험편의

경우는 대부분 토우부에서 균열이 발생하였지만 용입부족부를 가지는 PP시험편의 경우는 용접 루트부에서 초기 균열이 발생하여 진전한 것으로 판단된다.

3) 각 시험편의 피로강도 평가결과 완전용입 용접된 시험편이 불완전용입 용접된 시험편보다 피로강도가 높은 것으로 관찰되었다.

4) 핫스팟 응력 기법을 사용하는 경우, 부분용입 용접 시험편에서 실제 파괴가 주로 발생하는 용접 루트부에서의 응력 추정치 불가능하므로 용접 토우부에서 구해진 응력값을 바탕으로 피로강도를 평가하였다. 이렇게 구해진 S-N선도를 FAT90 디자인 선도에 비교하였을 때 완전용입 용접된 시험편의 경우 피로수명이 상대적으로 높게 평가되는 경향을 보였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 첨단조선공학연구센터와 대우조선해양(주)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- DNV, 2001, Classification Note No. 30.7, "Fatigue Assessment of Ship Structures," pp 42-44.
- Ha, C.I., Kang, S.W., Kim, M.H., Kim, M.S., Sohn, S.Y. and Heo, J.H., 2006, "A Comparative Study for the Fatigue Assessment of Fillet Weldments Using Structural Stress and Hot Spot Stress," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 4, pp. 476-483.

- ISSC, 2003, "Fatigue Strength Assessment," Proceedings of the 15th ISSC, Vol. 2, pp 293.
- Kang, S.W., Han, S.H., Kim, W.S. and Paik, Y. M., 2003, "Fatigue Strength of Fillet Weldment under Out-of-plane Bending Load," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 40, No. 1, pp. 28-35.
- Um, D.S., Kang, S.W. and Kim, Y.K., 1985, "Fracture Mechanics Approach to Bending Fatigue Behavior of Cruciform Fillet Welded Joint," Journal of the Korean Welding Society, Vol. 3, No. 2, pp. 52-63.



< 강 성 원 > < 김 정 환 > < 김 광 석 >



< 강 중 규 > < 허 주 호 > < 김 명 현 >