

구조응력 및 핫스팟응력을 이용한 피로수명 평가에 관한 실험적 연구

강성원^{†*}, 김영현*, 김석훈*, 하우일^{**}

부산대학교 조선해양공학과*
현대중공업 선박해양연구소^{**}

An Experimental Study of Fatigue Strength of Welded Structures Using Structural Stress and Hot Spot Stress

Sung-Won Kang^{†*}, Myung-Hyn Kim*, Seok-Hun Kim* and Woo-Il Ha^{**}

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University*
Hyundai Heavy Industry, HMRI^{**}

Abstract

At present, fatigue design of welded structures is primarily based on a nominal stress or hot spot stress approach with a series of classified weld S-N curves. Although well accepted by major industries, the nominal stress based fatigue design approach is cumbersome in terms of securing a series of S-N curves corresponding to each class of joint types and loading modes. The hot spot stress based fatigue design has a difficulty of finding a proper stress through the global model, the midium size model, and the detail model of ship structure. Also, it is difficult to link proper displacements within three different mesh size models. Recently, the structural stress is proposed as a mesh-size insensitive structural stress definition that gives a stress state at weld toe with relatively large mesh size. However, this method requires an experimental validation in obtaining the fatigue strength of weldments. Therefore, in this study, a series of experiment is performed for various sizes of weldments.

※Keywords: Fatigue Design(피로설계), Finite Element Analysis(유한요소해석), Structural Stress(구조응력), Hot Spot Stress(핫스팟 응력), S-N Curve(피로수명선도)

접수일: 2004년 8월 20일, 승인일: 2005년 1월 17일

† 주저자, E-mail: swkang@pusan.ac.kr

Tel: 051-510-2345

1. 서론

선박, 교량, 압력용기 등 구조물의 피로수명을
고려한 설계는 주로 시험편에 대하여 실험실에서

수행한 피로시험에서 구해진 피로수명(S-N)곡선을 바탕으로 수행되어 오고 있다(강성원 등 2001, 김석훈 등 2004). 이때 사용되는 응력은 공칭응력(nominal stress)이나 핫스팟응력(hot spot stress, HSS)을 주로 사용하고 있다. 종래에 사용되는 공칭응력을 바탕으로 구조물에 대한 피로설계를 할 경우에는 각 부재에 사용되는 각각의 용접부 형상에 대한 피로시험을 따로 수행하여 S-N곡선을 구해야 하는 번거로움이 있다(전유철 등 2001). 특히 선박과 같은 복잡한 형상의 부재들로 이루어진 구조물인 경우 각각의 용접부 형상들에 대한 공칭응력을 구하는 것은 매우 번거롭거나 때로는 불가능한 작업이다. 한편, 핫스팟응력의 경우 구조물에 있어서 균열이 주로 불연속부나 용접부에서 발생하는 것에 기인하여 이러한 응력집중부(hot spot)로부터 일정 거리 떨어진 부분에서의 응력을 외삽법(extrapolation)을 이용하여 핫스팟응력을 구하고 이를 바탕으로 피로수명을 산정하는 것이다. 이때 구해진 핫스팟응력을 바탕으로 한 S-N곡선을 통해 피로수명을 구하도록 정하고 있으며 이 방법은 피로해석을 수행할 때 통상적으로 이용하여 왔고, 선급들의 규정을 통해 그 사용법이 명시되어 있다. 그러나 기존의 이 방법은 거대 구조물인 선박에서 어느 한 부위에 대한 피로수명을 구할 때 전체 구조 모델, 중간 모델 및 해당부 상세 모델의 세 가지 모델을 작성하여야 하고, 변위의 올바른 전달을 위해 세세한 주의를 기울여야 하는 어려움이 있다.

이러한 번거로움을 피하기 위해 유한요소해석에 있어 요소크기에 민감하지 않고 상대적으로 요소크기가 크면서도 응력 계산의 정도를 높이는 구조응력(structural stress, SS)방법이 최근 제안되었다(Dong 2001, 김종성 등 2003). 이 방법은 기본적인 구조역학의 평형조건을 바탕으로 용접부에서 일정 거리 떨어진 부분에서의 응력을 구한 후 이를 이용하여 용접부 선단에서의 응력을 추정하는 방법이며, 다양한 용접부 형상의 S-N곡선을 단일 곡선으로 나타낼 수 있는 것으로 알려져 있다. 이는 유한요소법을 이용한 수치해석을 통하여 증명된 바 있으나, 구조응력을 이용하여 피로수명을 구하는 방법에 대한 실제 피로시험에 의한 검증이

필요하다. 본 연구에서는 응력집중부를 가지는 일련의 모델에 대하여 실제 피로시험을 실시, 구조응력 및 핫스팟응력을 이용하여 피로수명평가에 대한 추정치와 실험에 의한 피로수명을 비교·검토하였다.

2. 실험 절차

2.1 시험편 형상

Fig. 1과 같은 형상의 시험편을 준비하여 실험을 수행하였다. 시험편 치수는 $L_{all}=600mm$, $W_{all}=100mm$, $d_g=85mm$, $d_r=40mm$ 로 일정하며, 보강판(L_2)의 길이를 Table 1에 표시한 바와 같이 변화시켜 제작하였다. 보강판은 Groove angle=35°, Root gap=5mm로 홀 가공한 후 FCAW(Flux Cord Arc Welding)로 필릿 용접부 다리길이(L_w)가 5mm정도로 용접하여 부착하였다. 총 12종류의 시험편을 제작하여 각각 두 개의 시험편에 대하여 총 24회의 실험을 실시하였다. Table 1은 시험편의 상세 치수를 나타내었다.

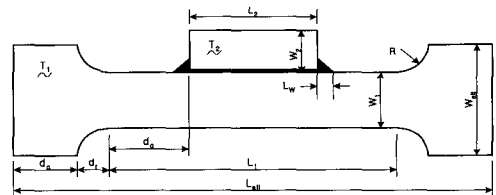


Fig. 1 Dimension of test specimen

Table 1 Matrix of specimens size (unit: mm)

No.	T ₁	T ₂	L ₁	L ₂	W ₁	W ₂	R	d ₀
1	10	10	350	50	50	25	45	145
2	10	10	350	100	50	25	45	120
3	10	10	350	200	50	25	45	70
4	10	10	350	250	50	25	45	50
5	10	10	350	50	90	25	145	145
6	10	10	350	100	90	25	145	120
7	10	10	350	200	90	25	145	70
8	10	10	350	250	90	25	145	50
9	15	10	350	50	50	25	45	145
10	15	10	350	100	50	25	45	120
11	15	10	350	200	50	25	45	70
12	15	10	350	250	50	25	45	50

2.2 스트레인 게이지 부착

실험에 앞서 각 시험편 보강판의 용접 토우부 끝단으로부터 일정거리에 걸쳐서 1축 2mm 스트레인 게이지를 Fig. 2에 나타난 것과 같은 위치에 부착하였다. 또한, 주판의 면 부위 상하에 두 개의 스트레인 게이지를 부착하여 시험편의 장착 시 굽힘 모멘트 등에 의한 시험편의 변형 등이 발생하지 않도록 주의하며 시험편을 장착하였다. Fig. 3은 실제 부착된 스트레인 게이지 위치를 나타내었다.

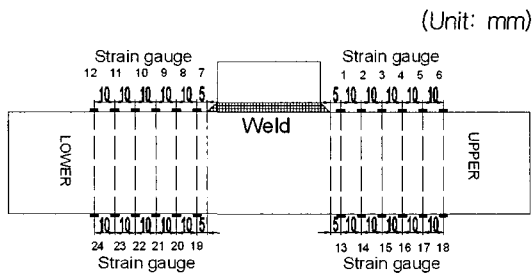


Fig. 2 Strain gauge locations



Fig. 3 Picture of a typical strain gauge placement

2.3 토우부의 응력 측정

각 시험편의 용접 토우부 끝단으로부터 일정간격으로 부착된 스트레인 게이지를 통해 모재의 항복응력(235MPa)의 20%(47MPa), 50%(117.5MPa)에 해당하는 하중을 적용시켜 응력값을 측정하였다. 보강판의 길이가 100mm인 시험편에 대해 대표적인 응력분포를 Fig. 4에 나타내었다. 용접 토우부 끝단으로부터 떨어진 거리에 따라 스트레인 게이지가 부착된 각각의 위치에서 시험편의 종류에 따라 2개씩의 실험을 실시하여 그 응력값을 나타내었다. 측정 결과는 예상한 바와 같이 용접 토우부 끝단에서 응력집중이 관찰되었다. 또한, 일반적으로 보강판의 길이가 길어질수록 용접 토우부 끝단에서의 응력집중이 커짐이 확인되었다.

3. 핫스팟응력(HSS)과 구조응력(SS)의 비교

핫스팟응력(hot spot stress, HSS)은 구조물에 있어서 균열이 주로 불연속부나 용접부에서 발생하는 것에 기인하여 이러한 응력집중부(hot spot)로부터 일정 거리 떨어진 부분에서의 응력을 외삽법(extrapolation)을 이용하여 구하고 이를 바탕으로

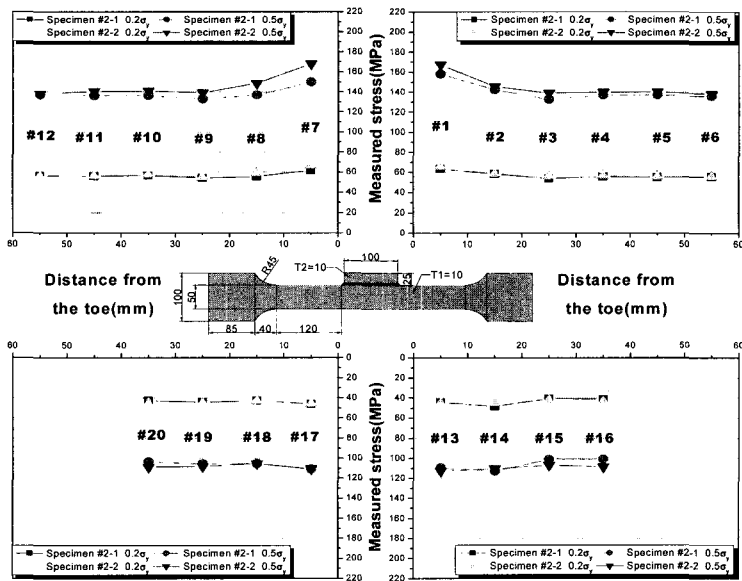


Fig. 4 Stress distribution of specimens 2-1 & 2-2

로 피로수명을 산정하는 것이다. 핫스팟응력을 구하는 방법에는 부재두께(t)의 0.4t 및 1t에 해당하는 위치에서의 응력을 외삽하는 방법, 부재두께(t)의 0.5t 및 1.5t에서의 응력을 외삽하는 방법, 부재두께(t)의 0.5t에서의 응력값을 사용하는 방법 등이 있으며 본 연구에서는 Niemi(1999)의 방법을 적용하여 식(1)을 이용하여 핫스팟응력을 구하였다.

$$\sigma_{HS} = 1.5\sigma_1 - 0.5\sigma_2 \quad (1)$$

여기서, $\sigma_1=0.5t$ 에서의 응력 및 $\sigma_2=1.5t$ 에서의 응력을 나타낸다. Fig. 5에서는 실험에 적용된 모재의 항복응력(design yield stress, $\sigma_y=235\text{MPa}$)의 20% 및 50%의 하중조건에서 strain gauge 측정값을 통해 구한 핫스팟응력을 비교·분석하였다. 그림에서 보는바와 같이 보강판(L_2)의 길이가 길어질수록 응력집중 증가에 의해 핫스팟응력 값이 커지며, 시험편의 폭이 크고 두께가 작을수록 큰 값을 나타내었다.

구조응력(structural stress, σ_s)은 막응력(membrane stress, σ_m)과 굽힘응력(bending stress, σ_b)으로 구성된다. Fig. 6과 같은 필릿 용접 토우부에서의 응력분포는 용접 토우부 끝단에서 최대이며 두께방향으로 단순 감소하는 분포를 보인다. Fig. 6에서 용접 토우부 끝단(A-A)의 구조응력(σ_s)은 스트레인 게이지가 부착된 단면(B-B, C-C)의 측정값을 이용하여 식(2), (3)을 통해서 B-B단면 및 C-C단면의 막응력과 굽힘응력을 계산하여 구할 수 있다.

$$\sigma_m^B = \frac{1}{2}(\sigma_{Top}^B + \sigma_{Bot}^B), \sigma_m^C = \frac{1}{2}(\sigma_{Top}^C + \sigma_{Bot}^C) \quad (2)$$

$$\sigma_b^B = \frac{1}{2}(\sigma_{Top}^B - \sigma_{Bot}^B), \sigma_b^C = \frac{1}{2}(\sigma_{Top}^C - \sigma_{Bot}^C) \quad (3)$$

여기서, $\sigma_{Top}^B, \sigma_{Bot}^B, \sigma_{Top}^C, \sigma_{Bot}^C$ 는 각각 B-B, C-C단면에서의 상·하 응력 측정값을 나타낸다. 각각의 단면에서 계산된 막응력 및 굽힘응력과 용접 토우부 끝단에서의 거리를 바탕으로 비례식을 적용하여 용접부 끝단(A-A)의 막응력 및 굽힘응력을 식(4), (5)를 통해 구할 수 있다.

$$\sigma_m^A = \sigma_m^B + \frac{L}{l}(\sigma_m^C - \sigma_m^B) \quad (4)$$

$$\sigma_b^A = \sigma_b^B + \frac{L}{l}(\sigma_b^C - \sigma_b^B) \quad (5)$$

한편, 용접 토우부 끝단(A-A)에서의 구조응력은 다음과 같이 막응력 및 굽힘응력의 합으로 추정할 수 있다.

$$\sigma_s^A = \sigma_m^A + \sigma_b^A \quad (6)$$

용접 토우부로부터 15mm, 25mm, 35mm (스트레인 게이지 No. 2, 3, 4)떨어진 거리에서의 응력값 중 스트레인 게이지 No. 2&3, 3&4, 2&4의 조합을 이용하여 식(2)~(6)을 통하여 구조응력을 추정하였다. Fig. 7에서는 응력측정 결과로부터 구한 각 시험편별 용접 토우부 끝단에서의 구조응력 값을 나타내었다.

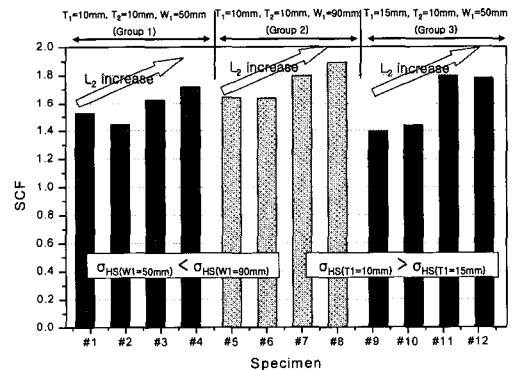
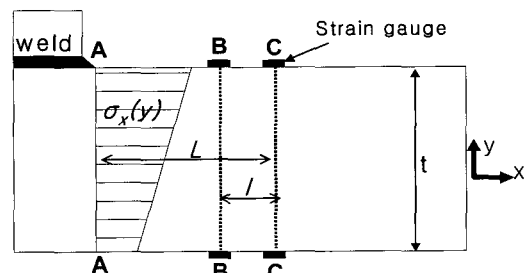


Fig. 5 HSS of each specimen from measurements



$\sigma_x(y)$: Local stress distribution along A-A

Fig. 6 Illustration of structural stress measurement

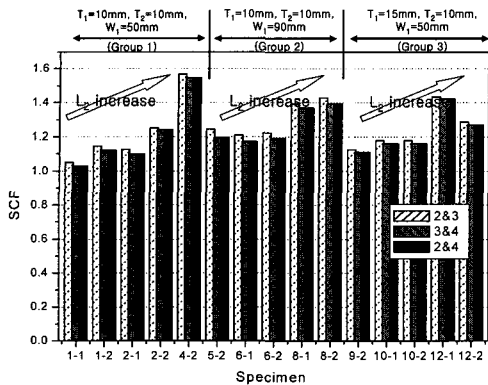


Fig. 7 SS of each specimen from measurements

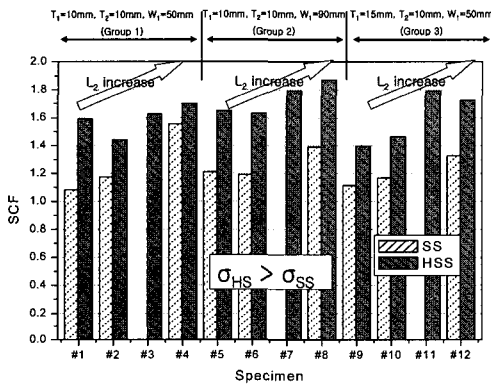


Fig. 8 Comparison of structure stress and hot spot stress

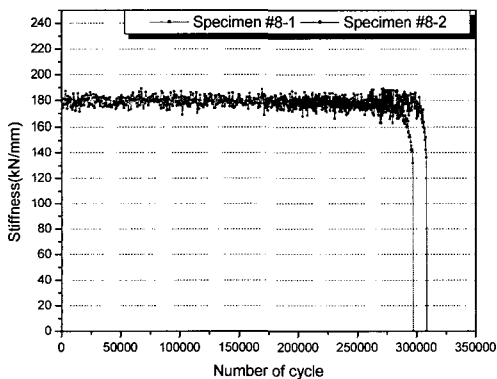


Fig. 9 Stiffness curve for specimen #8-1 & #8-2

그림에서 보는 바와 같이 보강판의 길이가 길어질 수록 응력집중 증가에 의해 구조응력 값이 커지

며, 각각의 조합의 응력값을 통하여 구조응력을 측정하더라도 용접두로부터의 거리에 큰 영향을 받지 않고 일정한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한, 각각의 시험편에 대해 실험 측정결과에 따른 구조응력과 핫스팟응력을 비교하여 Fig. 8과 같이 나타내었다.

구조응력의 경우 핫스팟응력보다 낮은 응력집중 값을 보였으며, 보강판의 길이가 길어짐에 따라 비교적 일정한 응력집중 증가를 보였다.

4. 피로시험

4.1 피로시험

피로시험은 정현파를 이용하여 응력진폭 =120MPa, 응력비=0.4 및 주파수=3Hz등의 조건으로 피로시험을 수행하였다(단, Specimen1-1=100MPa, Specimen9-1=110MPa 조건으로 피로 시험 수행). 피로시험 중에는 EDX-1500A Memory Recorder를 이용하여 하중, 변위 등을 990cycle마다 측정하여 하중/변위의 비로 구현되는 stiffness를 구하였다. Fig. 9에서는 대표적인 시험편 #8-1과 #8-2에 대한 stiffness curve를 나타내었다. 시험편 #8-1과 #8-2 모두 피로시험 동안 일정한 값을 유지하다가 최종파단 전에는 급격한 stiffness 감소를 보였다. 균열이 발견된 후로는 5000cycle (30min)마다 균열진전을 측정하였으며 Fig.10에서는 시험편 #5~#8에 대한 균열 발생위치 및 균열진전곡선을 나타내었다.

균열진전은 시험편의 앞면(F)과 뒷면(B)을 각각 측정하였으며, 응력집중이 크게 나타났던 보강판의 길이가 긴 시험편의 순서대로 파단이 되었다. 이러한 stiffness의 감소 및 균열전파곡선을 통하여 stiffness가 10%감소되었을 때 시험편 폭에 대한 균열비 $a/W=0.35\sim 0.4$ (a =균열길이, W =시험편 폭)임을 알 수 있었고 이를 통한 피로수명 기준으로서의 가능성을 검증하였다.

4.2 핫스팟응력 및 구조응력을 이용한 피로수명 곡선(S-N curve) 비교

Fig. 11에서는 공칭응력을 이용한 피로수명 (S-N)곡선을 나타내었다.

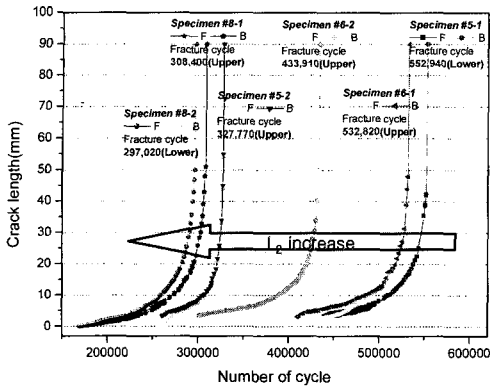


Fig. 10 Crack propagation measurement with respect to fatigue cycle for specimen #5 ~ #8

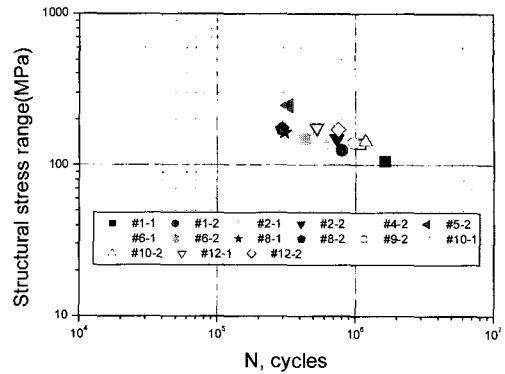


Fig. 13 S-N curve using structural stress vs. life

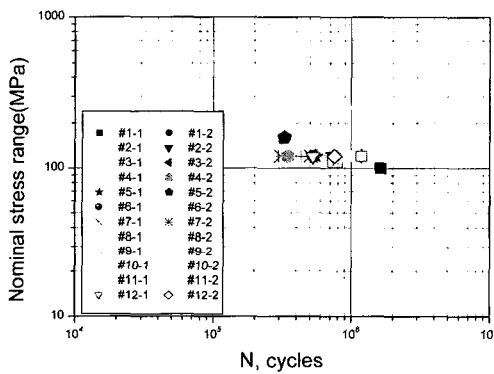


Fig. 11 S-N curve using nominal stress vs. life

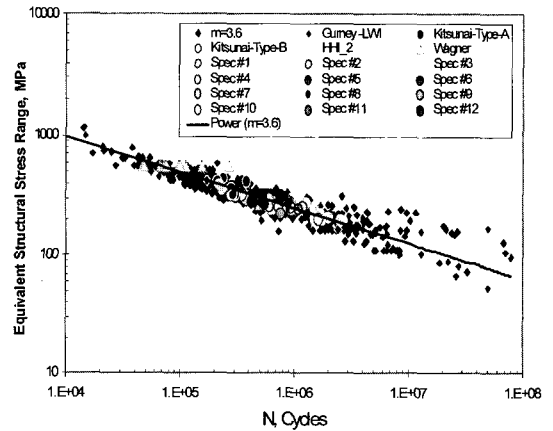


Fig. 14 Correlation of all edge details with other small details using the equivalent structural stress range parameter

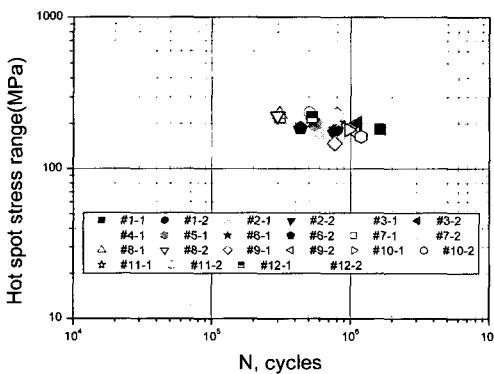


Fig. 12 S-N curve using hot spot stress vs. life

피로시험을 통해 측정된 응력으로 계산된 핫스팟 응력 및 구조응력을 이용하여 Fig. 12 및 Fig. 13 과 같이 S-N곡선을 작성하였다. 작성 결과 구조 응력을 이용한 경우 상대적으로 핫스팟응력을 이용한 경우의 S-N곡선보다 시험편 형상에 따른, 즉 보강판의 길이 변화에 따른 응력집중 효과를 보다 명확하게 나타났다.

또한, 2000여 개 이상의 피로수명 자료를 토대로 작성된 Fig. 14의 통합피로수명(master S-N)곡선 (Dong 2003)과 본 실험에서 얻어진 피로시험 결과가 일치함을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 최근에 제안되고 있는 구조응력에 대한 피로설계방법을 실험을 통해 검증하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 보강판의 길이가 길어지고, 판 폭이 넓어짐에 따라 응력집중 증가에 의해 피로수명이 단축되는 결과를 보였다.
- 2) 최근 제안된 구조응력을 실험적으로 측정하여 검증하였다.
- 3) 구조응력은 응력값의 측정 위치에 크게 영향을 받지 않고 핫스팟응력과 비교하여 상대적으로 일정한 값을 나타내었다.
- 4) Stiffness의 감소 및 균열진전곡선을 통하여 stiffness가 10%감소되었을 때 $a/W=0.35\sim 0.4$ 임을 알 수 있었고, 이를 통한 피로수명 기준으로서의 가능성을 검증하였다.
- 5) 구조응력을 이용한 피로수명선도 작성 시 핫스팟응력에 비하여 보강판의 길이변화에 따른 응력집중 효과를 보다 명확하게 나타냈으며 통합피로(master S-N)선도와 일치하였다.

후 기

본 연구는 2003년도 현대중공업(주)의 산학협동과제로서 수행된 연구이며, 현대중공업(주)에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 강성원, 김영욱, 김화수, 김도현, 2001, "Padding plate 용접구조의 인장 정하중 이력에 의한 용접잔류응력 변화 및 피로강도에의 영향," 대한조선학회 논문집, 제 38권, 제 4호, pp. 75-82.
- 김석훈, 강성원, 김명현, 장용원, 하우일, 박진수, 2004, "구조응력 및 핫스팟 응력을 이용한 용접구조물 피로수명 평가에 관한 연구," 선박해양 구조연구회 연구발표 논문집, pp. 59-72.
- 김종성, 진태은, 홍정균, Dong, P., 2003, "용접 구조물의 피로설계를 위한 유한요소 해석 및 통

합 피로선도 초안 개발", 대한기계학회논문집 A 권, 제27권 제5호, pp. 724-733.

- 전유철, 김유일, 강중규, 한종만, 2001, "피로시험 및 균열진전 해석을 통한 용접부의 피로수명 예측에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 38권, 제 3호, pp. 93-106.
- Dong, P., 2001, "A Structural Stress Definition and Numerical Implementation for Fatigue Evaluation of Welded Joints", International Journal of Fatigue, Vol. 23/10, pp. 865-876.
- Dong, P., 2003, Battelle Structural stress JIP Final Report, No. N004431-01.
- Niemi, E., 1999, "Structural Hot-Spot Stress Approachs to Fatigue Analysis of Welded Components-Designer's Guide", III Doc. X III-1817-00, X V-1090-01, X III-WG3-06-99.



< 강 성 원 >



< 김 명 현 >



< 김 석 훈 >



< 하 우 일 >