

필릿 용접부의 면외굽힘하중에 대한 피로강도

강성원 †*, 한상혁*, 김화수**, 백영민**

부산대학교 조선해양공학과*, 현대중공업(주) 구조설계부**

Fatigue Strength of Fillet Weldment under Out-of-plane Bending Load

S. W. Kang*, S. H. Han*, W. S. Kim** and Y. M. Paik**

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University*
Hull Initial Design Department, Shipbuilding Division, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd**

Abstract

Fatigue tests of transverse fillet weldment were performed under out-of-plane bending loads. Significant increase of the fatigue strength was observed under out-of-plane bending loads, compared to the one under in-plane loads (axial loads). Applicability of the crack propagation analysis using LEFM for the surface crack of fillet weldment were investigated as well, in parallel with the fatigue tests. For the rational assessment of the fatigue strength of welded ship structures where combined stresses of the in-plane axial stress and the out-of-plane bending stress are induced simultaneously due to complexity of applied load and structural geometry, further investigation is recommended for the effect of the out-of-plane bending stress on the fatigue strength of weldment.

※Keywords: Fillet weldment(필릿용접부), Out-of-plane bending load(면외굽힘하중), Fatigue strength(피로강도), Crack growth analysis(균열진전해석)

1. 서언

주로 판부재로 이루어진 선체 용접 구조물의 경우, 용접 결함부의 기하학적 형상 및 작용 하중의 다양성으로 인해, 일반적으로 면내응력 및 면외굽힘응력이 복합적으로 발생한다. 이러한 선체구조

물의 피로강도는 면내응력 및 면외굽힘응력을 단순 조합한 응력값과 축인장하중 실험결과로부터 도출된 피로선도를 이용하여 평가하는 것이 지금까지의 관례이었다. 즉, 판부재의 표면에서의 응력값이 같다면, 면내하중이든 면외굽힘하중이든 이에 대한 구분 없이 피로강도는 같다고 가정하는 것이다. 그러나, 선체구조와 같이 대규모 용접구조물의 경우, 피로강도는 미세균열의 발생수명 보다는 어느 정도 진전된 균열의 상태를 기준으로 평가한다(Lotsberg 2001). 따라서, 면내하중 상태에

접수일: 2002년 2월 20일, 승인일: 2003년 1월 3일

† 주저자, E-mail : swkang@pusan.ac.kr,

Tel: 051-510-2345

서의 피로강도와 면외굽힘하중 상태에서의 피로강도는, 판두께 방향으로의 응력구배 차이로 인한 균열진전속도의 영향으로 인하여, 분명한 차이가 있으리라 판단된다.

본 연구에서는 면외굽힘응력 상태에서의 필릿용접부의 피로실험을 수행, 이에 따른 결과와 축인장하중 피로실험결과로부터 도출된 피로선도의 비교를 통하여, 보다 합리적인 선체용접구조물의 피로강도 평가방법 연구의 나아갈 길을 제시하고자 한다.

2. 시험편 및 지그

실험에 사용된 시험편 및 실험용 지그는 선박구조용 연강으로 형상 및 치수는 Fig.1과 같으며, 시험편의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1에 나타내었다. 시험편의 주판 및 부착판의 두께는 10 mm로 동일하고, 치과용 실리콘 고무를 이용하여 측정된 주판측 용접 다리길이의 평균값은 6.5 mm이었다.

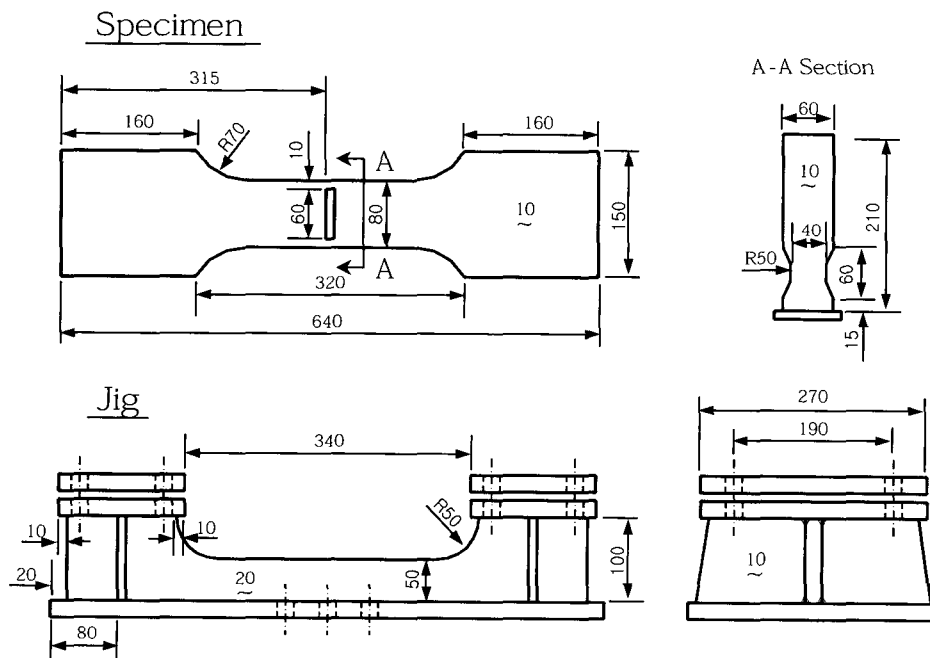


Fig. 1 Dimension of specimen and jig

Table 1 Chemical composition(%) and mechanical properties of mild steel grade A

Material	C	Si	Mn	P	S	Ceq
Mild steel	0.13~0.2	0.1~0.19	0.51~0.79	0.008~0.025	0.003~0.007	0.25~0.29
	Yield strength(MPa)		Tensile strength(MPa)		Elongation(%)	
	Design	Actual				
	235	290~333	427~457		26~34	

3. 시험편의 응력계측 및 해석

시험편에 작용하는 응력분포를 파악하기 위하여 응력계측 및 구조해석을 수행하였다. 시험편의 토우부로부터 5 mm, 15 mm, 25 mm 및 35 mm 떨어진 위치에 게이지 길이 2 mm인 1축 게이지를 부착하여 굽힘응력분포를 계측하였으며, 이로부터 지그 연결부에서의 회전지지 강성을 보요소를 이용한 구조해석 및 회귀분석법을 통하여 계산하였다. 각 보요소의 길이는 판 두께의 절반인 5 mm로 하였으며, 각 절점에서 시험편의 단면 형상에 등가한 굽힘강성을 가지도록 하였다. 또한, 모델의 중앙에는 대칭조건을 적용하였으며, 지그에 체결된 경계조건은 상하의 변위를 고정시키며 회전지지 강성을 갖는 스프링요소를 부착하였다(Fig. 2 참조). 부착 판에 하중을 가할 경우 용접비드를 통하여 주판에 전달되므로, 용접비드에 해당하는 요소에 분포하중을 가하였다.

응력 계측결과 및 회귀분석법으로 구하여진 지그 연결부에서의 회전지지강성은 9.0×10^7 N·mm/rad이며, 이때 보요소를 이용한 구조해석 모델에서 1N의 단위하중을 가하였을 경우 시험편의 작용하는 굽힘모멘트 분포를 Fig. 3에 나타내었다.

1 N의 단위하중이 작용할 때 용접도우부 위치에서의 작용모멘트는 40.0 N·mm이므로, 토우부에서의 보이론에 따른 공칭굽힘응력은 식(1)에 의하여 0.03 MPa임을 알 수 있다.

$$\sigma = M/Z \tag{1}$$

여기서,

σ : 보요소로부터 구한 공칭응력 (N/mm²)

M : 굽힘모멘트 (N·mm)

Z : 단면계수 (= $\frac{80 \times 10^2}{6}$ mm³)

실질적으로 시험편에 작용하는 응력분포는, 관심부인 토우부 근처에서는 용접결함으로 인한 응력 집중 등으로 보해석으로부터 구한 응력분포와는 차이가 있을 것으로 예상된다. 실질적인 응력분포를 파악하기 위하여, 판요소 및 입체요소를 사용하여 구조해석을 수행하였다.

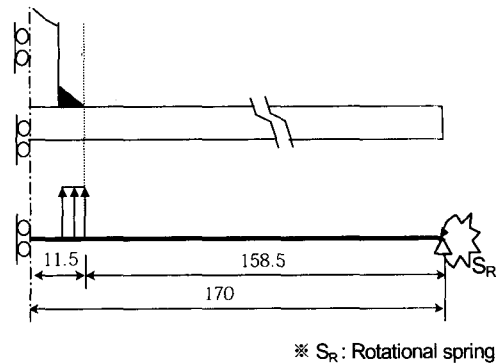


Fig. 2 Boundary and loading condition of beam analysis (Unit: mm)

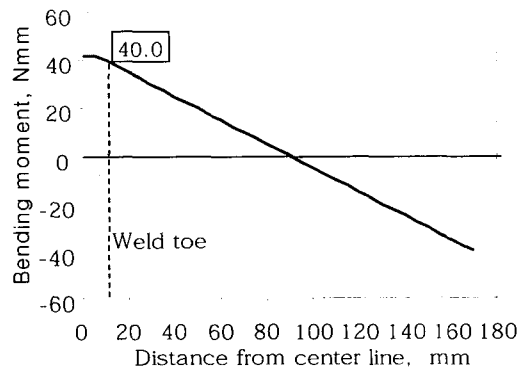


Fig. 3 Bending moment distribution

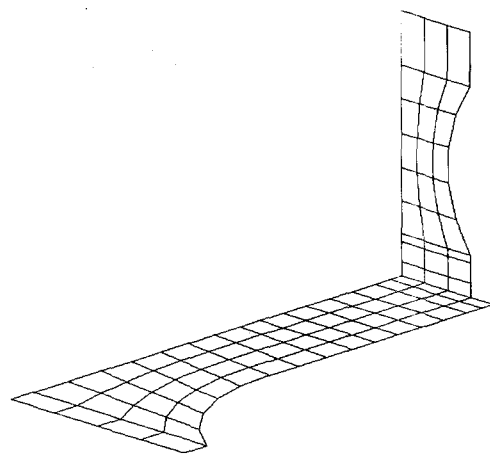


Fig. 4 Analysis model with shell element

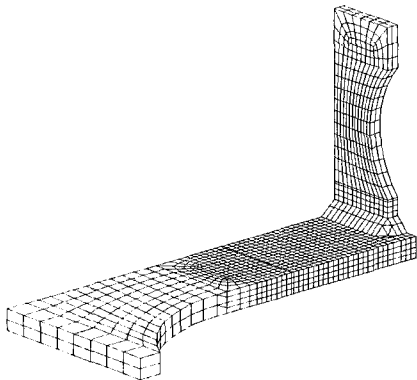


Fig. 5 Analysis model with solid element

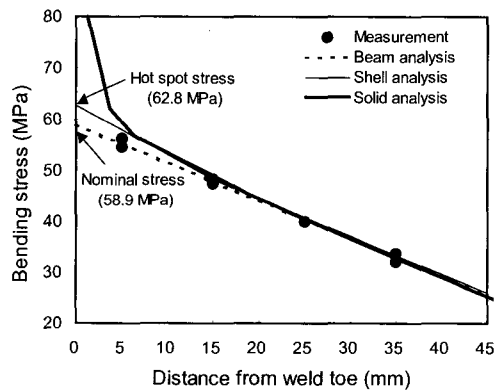


Fig. 6 Comparison of stress distribution (Applied load = 1,962 N)

Fig. 4 및 Fig. 5에 판요소 및 입체요소의 해석 모델을 각각 나타내었으며, 시험편의 대칭성을 고려하여 전체의 1/4만 모델화 하였다. 입체요소의 해석모델의 경우 관심부인 용접결합부 근처에서는 판 두께의 1/4 크기로 요소화 하였으며, 부착판과 주판은 용접비드를 통하여 결합되어 있다.

판요소 해석모델의 경우 판두께 크기로 요소화 하였으며, 용접부에 해당하는 요소는 용접비드의 영향을 고려하였다(Machida 등 1992). 판요소 해석 및 입체요소해석의 경계조건 및 하중조건은 보 요소 해석의 경우와 동일하게 하였다.

Fig. 6에 보요소, 판요소, 입체요소를 사용한 구조해석 결과 및 계측결과를 비교하였다. 토우부 근처에서는 보해석 결과에 비해 입체요소를 사용

한 구조해석 결과가 다소 높게 나타나는 응력집중 현상을 보이고 있다. 또한 계측 결과는 해석 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 구조 및 하중상태가 복잡한 선체용 접구조물의 피로강도는 판두께 크기의 판요소를 사용한 구조해석으로부터 계산된 집중응력(Hot spot stress)을 기준으로 평가하는 것이 용접결합 형태의 구분없이 하나의 S-N선도로 평가할 수 있어 보다 합리적인 것으로 연구되고 있다(Fricke 2001). 피로시험편의 경우, 판요소를 이용한 해석 결과로부터 판두께의 1/2 및 3/2 위치에서 용접토우부 위치로 선형 외삽한 값을 집중응력으로 정의할 경우, 집중응력은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 공칭응력의 1.07배임을 알 수 있다.

4. 피로실험

용량 ±20 Ton의 축인장압축 유압서브 피로시험기를 사용하여 3점 굽힘 방법으로 완전 양진하중진폭 피로실험을 수행하였다. 하중 반복속도는 2~5 Hz의 범위 내에서 작용하중의 크기에 따라 조절하였다. 피로실험은 시험편이 완전 파단될 때까지 실시하였고, 파단되지 않는 시험편에 대해서는 1.0×10^7 의 하중 반복 수에서 중단하였다.

Fig. 7에 판요소 해석으로 구해진(Fig. 4, 6 참조) 집중응력 범위에 대한 피로실험 결과를 나타내었다. 여기에서 N_f 는 피로시험편이 완전파단에 이른 하중 반복수를 나타내며, N_b 는 시험편의 토우부로부터 5 mm 떨어진 위치에 부착된 게이지의 변형률 값이 균열 발생으로 인하여 초기치에 비하여 5% 하락한 시점을 나타낸다. 피로시험중 게이지가 부착된 시험편의 중앙부에서 상당히 측면쪽에서 균열이 발생 진전된 경우의 결과에 대한 N_f 는 제외하였다. 또한, 축인장하중 피로실험 결과와의 비교를 위하여, DnV 주관하에 부유식 석유생산비축설비(FPSO)의 피로강도에 대한 국제공동연구(Lotsberg 2001)에서 수행한 3가지 소형 용접 시험편(Fig. 8 참조)의 피로실험 결과를 동시에 나타내었다. 국제 공동연구에서의 실험 결과는 완전 양진진폭의 축하중 상태에서의 파단수명 N_f 이며, 각 시험편의 집중응력 기준으로 나타내었다.

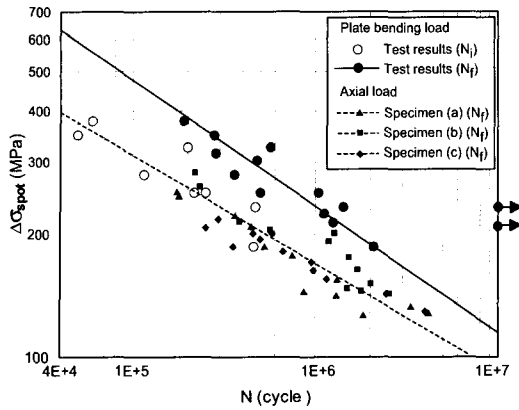
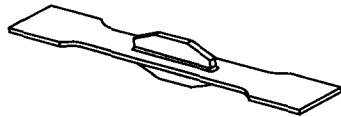
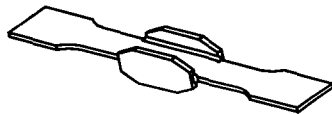


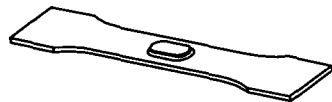
Fig. 7 Comparison of fatigue test results



(a) Non-load carrying box fillet weldment



(b) Weldment with gussets on plate edge



(c) Weldment with padding plate on both sides

Fig. 8 Shape of specimens for fatigue test under axial load

축인장하중 상태에서의 피로실험과 면외굽힘하중 상태에서의 피로실험 결과 비교에 의하면, 시험편의 면외굽힘하중에 대한 피로강도가 파단수명 N_f 를 기준으로 할 경우 축인장하중에 대한 피로강도에 비하여 상당히 높음을 알 수 있다.

이는, 용접도우부 표면에서의 작용변동응력의 크기는 같다고 할지라도, 판 두께 방향으로의 응

력구배의 차이로 인해, 균열진전속도 차이에 따른 피로강도 증가 때문으로 여겨진다.

피로실험 결과로부터 도출된 면외굽힘하중에 대한 피로선도식 및 축하중에 대한 피로선도식은 각각 식(2) 및 (3)과 같다.

$$\log N_{f, bend} = 13.655 - 3.234 \log \Delta\sigma_b \quad (2)$$

$$\log N_{f, axial} = 14.415 - 3.766 \log \Delta\sigma_a \quad (3)$$

여기서,

$N_{f, bend}$: 면외굽힘하중에 대한 파단수명 (cycle)

$N_{f, axial}$: 축하중에 대한 파단수명 (cycle)

$\Delta\sigma_b$: 집중 굽힘응력범위 (MPa)

$\Delta\sigma_a$: 집중 축응력범위 (MPa)

식(2) 및 (3)에 의하면 2.0×10^6 하중횟수에 대한 면외굽힘하중에서의 피로강도는 187.9 MPa이며, 이는 축하중하에서의 피로강도 140.9 MPa에 비하여 약 1.33배 높음을 알 수 있다.

5. 균열진전해석

Fig. 9에 시험편의 파단면 사진과 균열발생 및 진전의 양상을 나타내었다. 시험편의 균열은 동시다발적으로 발생되어 진전향과 동시에 함체되는 양상을 나타내며, 시험편 두께 방향으로 약 70% 까지 진전되었을 때 급격히 불안정 파괴를 일으켜 파단에 도달함을 알 수 있다.

피로실험결과에서 나타난 파단수명에 대한 축하중에서의 피로강도와 면외굽힘하중에서의 피로강도의 차이를 파악하기 위하여 균열진전해석을 수행하였다. 피로실험중 N_f 시점에서 발생한 크랙의 형상은 폭이 10~16 mm, 깊이가 0.6~0.7 mm 이었다. 따라서, 시험편의 용접도우부에서의 집중 변동응력의 크기가 같을 경우 초기 균열발생수명 N_i 는 축하중상태이든 면외굽힘하중상태이든 차이가 없다고 가정할 경우, Fig. 9에 나타난 바와 같은 초기 균열을 Fig. 10과 같이 가정할 수 있다.

Fig. 10에 나타난 초기균열과 식(4)에 나타난 유탄평판에서의 표면균열에 대한 Newman-Raju의 식 (Newman/Raju 1981) 및 용접 도우부에서

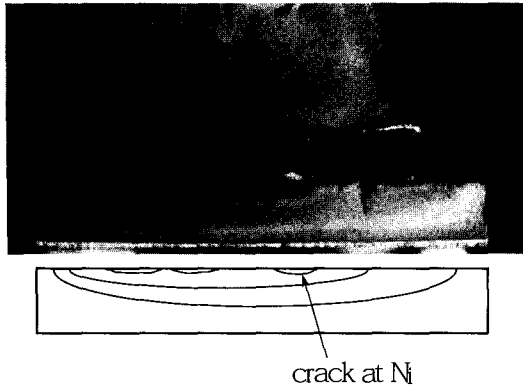


Fig. 9 Picture of cracked section

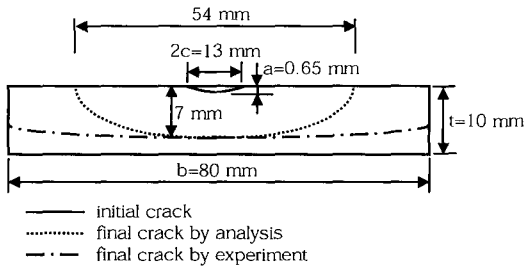


Fig. 10 Shape of initial and final crack

의 집중응력값을 적용하여, 완전양진하중(응력비 R= -1)이 작용할 때 판두께의 70%까지의 균열진전해석을 식(5)를 이용하여 수행하였다. 그리고, 집중 변동응력 267.5 MPa가 작용하는 면외굽힘하중 상태에서의 해석에 의한 최종 균열형상 및 피로실험에 의한 균열형상의 비교를 Fig. 10에 동시에 나타내었다.

$$K = (\sigma_t + H\sigma_b) \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \phi\right) \quad (4)$$

여기서,

- σ_t : 인장응력
- σ_b : 굽힘응력
- H : 굽힘을 고려한 수정계수
- Q : 타원균열에 대한 형상계수
- F : 응력확대 경계수정계수

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (5)$$

균열진전해석을 위한 재료 상수 C, m의 값은 선박구조용 연강(Grade'A')에 대하여 피로실험과 같은 조건인 응력비 R=-1조건에서의 CT실험으로부터 구한 값을 사용하였다(Fig. 11 참조).

Fig. 12에 완전양진 상태에서의 집중 변동응력 267.5 MPa가 작용할 때의 축하중 상태 및 면외굽힘하중 상태에서의 두께방향으로의 균열진전량을 비교하였다. 그림에서 나타난 바와 같이, 균열의 초기에는 진전 속도의 차이가 그다지 없으나 균열이 진전함에 따라 응력구배의 차이로 인한 진전 속도의 차이가 현저함을 알 수 있다. Fig. 10에 나타난 초기 균열로부터 두께방향의 70%까지

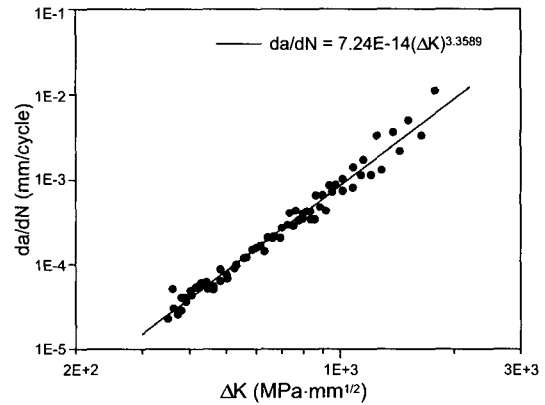


Fig. 11 Result of crack growth test of mild steel at R=-1

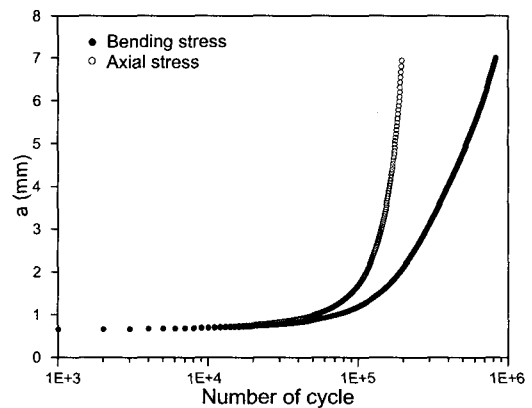


Fig. 12 Crack growth under bending stress and axial stress(Hot spot stress range = 267.5 MPa)

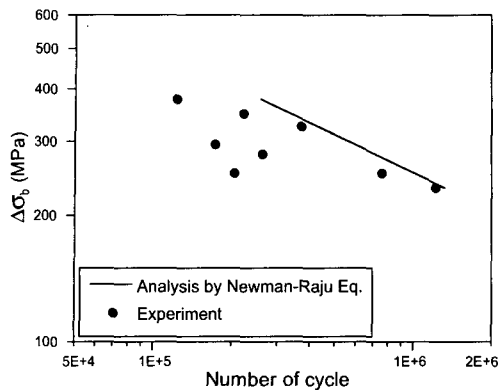


Fig. 13 Comparison of fatigue strength between analysis and experiment

진전되는 하중반복수를 N_p 로 나타내면, 파단수명은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$N_f = N_i + N_p \quad (6)$$

Fig. 13에 Newman-Raju의 식을 이용하여 구한 완전 양진 상태의 면외굽힘 상태에서의 진전수명 $N_{p, cal}$ 및 실험에서 구한 진전수명 $N_{p, exp}$ 의 비교를 집중응력 기준으로 나타내었다. 피로실험결과에 의한 균열진전수명이 Newman-Raju의 식을 이용한 계산 결과에 비해 다소 낮은 값을 보이고 있으며, 이는 Fig. 9에 나타낸 복수균열의 진전에 따른 합체 현상의 영향 및 시험편의 초기 용접변형의 영향 등으로 분석되며(한문식 등 1991, 김재동 등 1996), 결과적으로 Fig. 10에 나타낸 바와 같이 최종 균열 형상에 다소 차이를 보이고 있다. 하지만, 전체적으로 응력 변동에 따른 피로수명 증가의 경향은 두 결과가 비교적 잘 일치하고 있다.

6. 결론

지금까지의 선체구조물의 피로강도 평가는 면내 응력 및 면외응력을 단순 조합한 응력값과 축인장 하중 피로실험 결과로부터 도출된 피로선도를 이용하여 평가하여 왔다. 즉, 용접구조물이 토우부에서의 응력값이 같다면, 면내하중이든 면외하중이든 이에 대한 피로강도는 같다고 평가하는 것이

다. 그러나, 본 연구에서의 필릿 용접부의 면외굽힘응력에 대한 피로강도는 축인장응력에 대한 피로강도에 비해 상당히 높음이 피로실험 및 선형파괴역학을 이용한 균열진전 해석으로부터 증명되었다. 따라서 선체구조의 보다 합리적인 피로강도 평가를 위해서는 면외굽힘하중에 대한 피로강도 연구를 보다 체계적으로 수행 할 필요가 있으며, 다음 내용에 대한 추가연구를 제안한다.

- 1) 용접잔류응력 및 정하중 이력에 따른 잔류응력 재분포의 피로강도에 미치는 영향(강성원 등 1999)
- 2) 선체구조에 작용하는 정하중에 의한 평균응력의 영향
- 3) 다양한 용접결합부 및 응력집중 영향을 고려한 피로강도
- 4) 복수 균열의 진전에 따른 합체현상 및 이에 따른 균열진전 속도의 평가

참 고 문 헌

- 강성원, 김영욱, 김화수, 김도현 1999 "용접잔류응력이 Padding plate 용접구조의 피로강도에 미치는 영향", 대한조선학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 422-425.
- 김재동, 이종원, 홍창호 1996 "복수표면균열을 갖는 구조요소의 피로수명 예측", 대한조선학회 논문집, 제33권 제4호, pp. 75-86.
- 한문식, 김재동, 이호섭 1991 "유한평판 및 T-joint 필릿 용접부에 있어서 3차원 표면 균열의 피로 파괴 거동에 관한 실험적 연구", 대한조선학회 논문집, 제28권 제2호, pp. 275-284.
- Fricke, W. 2001 "Recommended Hot Spot Analysis Procedure for Structural Details of FPSOs and Ships Based on Round-Robin FE Analysis", Proceeding of the Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference, Stavanger Norway, June 17-22, pp. 89-96.
- Lotsberg, I. 2001 "Overview of the FPSO - Fatigue Capacity JIP", Proceeding of the 18th International Conference on Offshore

Mechanics and Arctic Engineering, MAE01/
MAT-3010, Rio de Janeiro Brazil, June 3-8.

- Machida, S., Yoshinari, H., Matoba, M., Nishimura, R., 1992 "Definition of Hot Spot Stress in Welded Structure for Fatigue Assessment (3rd Report FEM)", J. of SNAJ, Vol. 171, pp. 477-484.
- Newman, J. C., Raju, I. S. 1981 "An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, No. 1-2, pp. 185-192.



< 강 성 원 >



< 한 상 혁 >



< 김 화 수 >



< 백 영 민 >