

API 2W Gr.50 강재를 이용한 해양구조물 Tendon Porch의 피로성능 평가

임성우* · 이주성**

*포항산업과학연구원

**울산대학교 조선해양공학부

Assessment of Fatigue Strength Characteristics of Tendon Porch in Offshore Platforms for API 2W Gr. 50 Steel

SUNG-WOO IM* AND JOO-SUNG LEE**

*Research Institute of Industrial Science and Technology, Gyunggi, Korea

**School of Naval Architecture & Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

KEY WORDS: Fatigue damage ratio 피로손상률, Fatigue strength 피로강도, Tendon porch 텐덤 포치, Tension Leg Platform (TLP) 인장식 해양구조물, S-N curves S-N 곡선, Through-thickness crack 관통 균열

ABSTRACT: This assessment is concerned with the fatigue strength of the tendon porch found in TLP. Large-scale fatigue tests with models constructed at 30% the size of the real structures have been carried out to investigate the fatigue behavior of the API 2W Grade 50 steel recently produced by POSCO. The fatigue life for the present test models was obtained based on the concept of nominal stress. A comparison of the present test results with those obtained by a numerical approach based on the structural analysis results has shown good agreement. The present results were also compared with the design curves in DnV RP-C203.

1. 서 론

TLP (Tension leg platform)는 그 우수한 운동특성, 운용에의 유연성 등 때문에 심해에서 해양자원 개발에 적합한 해양구조물로서 잘 알려져 있다. TLP를 구성하는 구조부재들 중 Tendon이 부착되는 Tendon porch는 이의 파괴가 구조물 전체의 구조적 안전성에 치명적인 영향을 주기 때문에 'Special category'로 분류되는 가장 중요한 구조부재 중 하나이다. 전형적인 TLP의 예로서 Ponton이 Column에서 돌출된 'Pontoon extension Type'을 Fig. 1에 보였다. Tendon porch는 Tendon에 부력과 중량의 차이에 해당되는 인장력이 이미 작용하는 상태에서 파도, 조류 및 바람 등에 의한 변동하중을 받게 된다. 이러한 하중상태에서 발생할 수 있는 구조적 파괴형태는

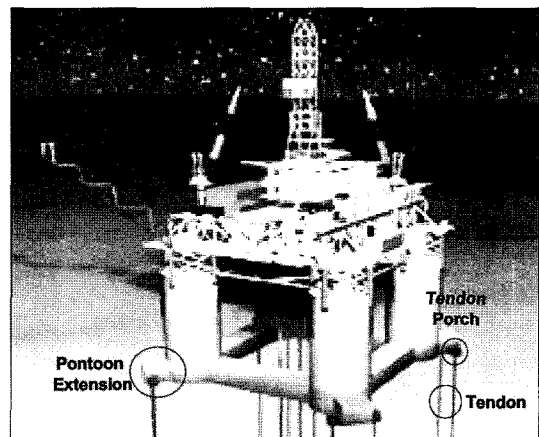


Fig. 1 Example of TLP

- 국부적 소성 (Local plastification)
- 좌굴파괴 (Failure due to buckling)
- 변동하중에 의한 피로파괴 (Fatigue failure)

를 들 수 있다. 이들 중 피로파괴가 가장 중요한 형태이고 따라서 설계단계에서 충분한 피로강도를 갖고 있음을 입증해야 한다. 해양구조물의 구조설계규정인 DnV OS-C103 (DnV, 2001)

교신저자 이주성: 울산광역시 남구 무거2동 산 29
052-259-2162 jslee2@mail.ulsan.ac.kr

에 따르면 Tendon porch는 Fig. 2에 보인바와 같이 API 2W 강재로 제작되어야 한다.

POSCO에서는 최근 API 2W Gr. 50 강재를 개발한 바 있고 새로운 재료가 개발되면 API RP 2Z에서 기술된 시험항목들에 의거하여 기본적인 기계적 성질과 용접성에 대한 시험을 하게 된다. 그러나 이러한 시험에는 그 재료로 제작된 구조물에 대한 피로시험이나 취성파괴가 포함되어 있지 않다. 따라서 새로이 개발된 재료의 실제 구조물에의 적용성을 입증하기 위해 피로성능에 대한 시험평가가 대단히 중요한 의미를 갖는다.

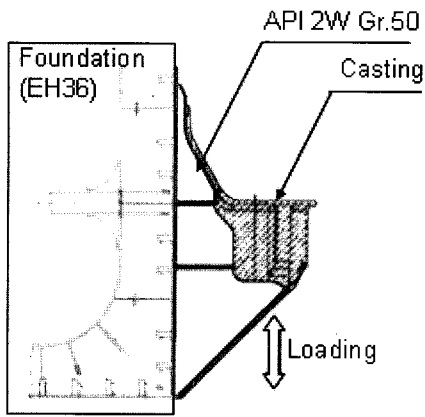


Fig. 2 Steel grade used in tendon porch and loading

POSCO에서 개발한 API 2W 강재의 해양구조물에서의 적용성에 대해서는 대형 Tubular joint 구조(Im et al., 2005; 임성우 등, 2005)와 대형 Topsides joint 구조(Im, 2005; 임성우 등, 2006)의 피로성능시험을 통해 1차적으로 검증한 바 있다.

본 연구에서는 API 2W Gr. 50을 사용하여 실제 Tendon porch를 30%로 축소된 실험체를 제작하여 여러 하중 수준에 대한 피로시험을 수행하여 Tendon porch의 설계결과, 모재로서의 재료 그리고 용접성에 대한 피로성능을 평가하였다.

본 연구의 피로시험을 수행하기 전에 Tendon porch에 대한 구조해석결과로부터 균열이 시작되는 중요 위치를 예측하였다. 본 피로시험의 결과로서 균열발생의 위치, 균열의 진행방향과 피로수명을 구조해석결과로부터 예측한 결과와 비교하였는데, 예측된 결과가 실험결과와 좋은 일치를 보임을 확인할 수 있었다. 또한, 피로시험결과를 DnV RP-C203 (DnV, 2001)의 피로설계곡선과 비교한 결과 우수한 피로성능을 갖고 있음을 입증하였다.

2. Tendon Porch 실험체의 구조설계

피로시험을 위한 Tendon porch 실험체는 실제 모델을 가능한 그대로 반영할 수 있도록 설계하였다. 그러나 피로성능에 영향을 주지 않는다고 판단되는 부재들에 대해서는 제작상의 부정확성을 감소시키기 위해 가능한 단순한 형태로 설계하였다. 실험체의 각부 명칭을 Fig. 3에 보였다. Fig. 2와 같은 하중 상태에서 Bracket 부분에서 좌굴이 발생할 가능성이 있기 때문에 피로시험 중 좌굴이 발생하지 않도록 설계하였다. 게다가 실제의 Porch 구조에서는 각 부재들의 두께가 다르나 제작의 효율성을 위해 Casting 부(Casting part)를 제외한 모든 부재들의 두께를 같게 설계하였다. Casting 부는 강체에 가까운 거동을 하도록 충분한 두께로 설계하였다. 구조해석을 위한 유한요소모델링을 Fig. 4에 보였는데, 기하학적 형상과 하중의 대칭성을 이용하여 1/2만 모델링하였다. 유한요소로서는 4절점 사면형과 3절점 삼각형 쉘 요소를 사용하였고, Porch foundation에 부착되는 위치들에서 고정 지지조건을 부여하였고 좌우 대칭평면에서는 대칭 경계조건을 부여하였다. 하중은 Loading jig

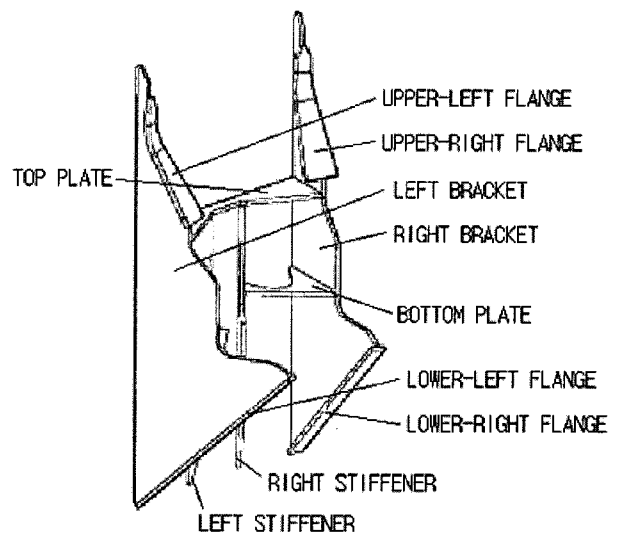


Fig. 3 Structure of tendon porch for the present study

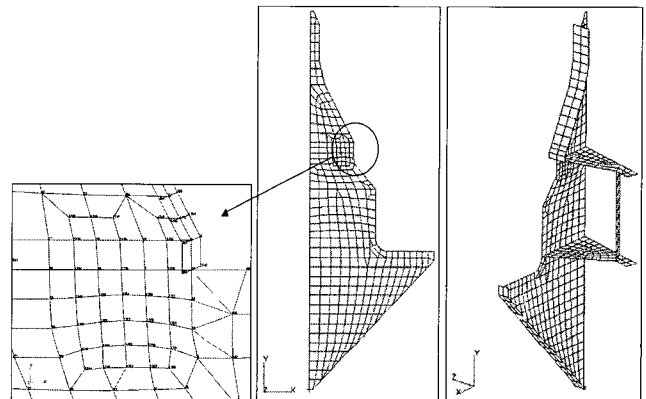


Fig. 4 Finite element modeling of tendon porch

와 접촉하는 요소에 분포하중을 주었다. 균열발생이 예상되는 위치에서의 요소의 크기는 균일하지는 않지만 판 두께의 1.0~1.2배로 모델링하였다.

총하중 529.7kN에 대한 응력분포를 Fig. 5에 보였다. 예상할 수 있는 바와 같이 Upper flange와 Casting 부가 만나는 위치에서 높은 응력이 발생하였다. 구조해석결과를 토대로 피로시험시 Bracket 부분에서 좌굴이 발생하지 않아야 한다는 점과 본 피로시험에서 사용하는 Dynamic actuator의 용량 (980 kN)을 고려하여 부재들의 두께를 최종적으로 16.0mm로 결정하였다. 이러한 결정단계에서 DnV RP-C203 (2001)의 Class D에 해당되는 S-N 곡선에 의거하여 피로강도를 평가하였다.

3. Tendon Porch 실험체의 제작

전절의 구조설계결과에 따라 피로시험을 위한 세 개의 실험체를 Fig. 6에 보인 바와 같이 제작하였다. 용접조건들은 Table 1에 열거하였다. 제작 후 실험체의 용접결함에 대한 검사는 초음파 시험기로 확인하였다. Fig. 6에서 맨 밑에 있는 수평 부재

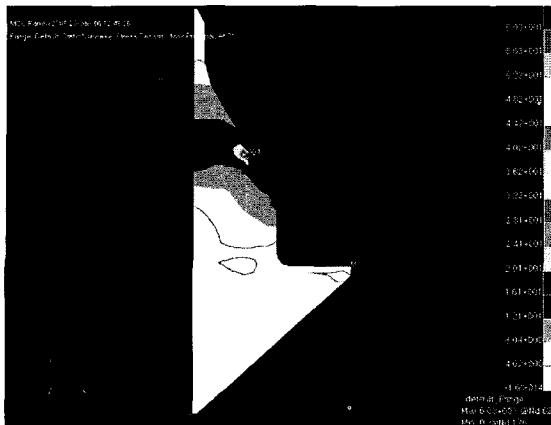


Fig. 5 Stress distribution at bracket (major stress)

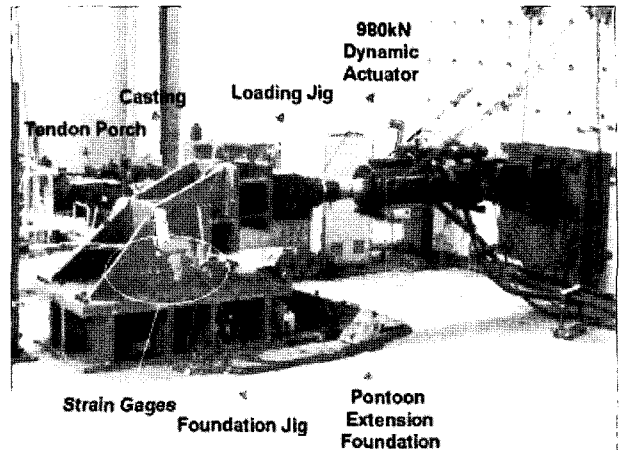


Fig. 7 Test setup for specimen

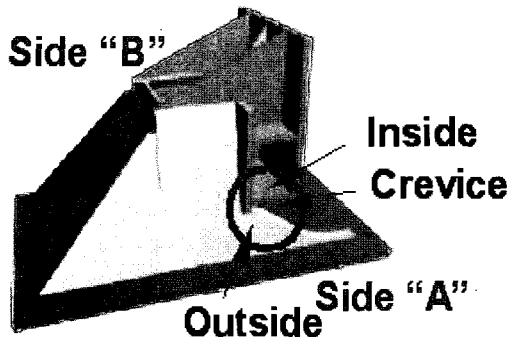


Fig. 6 Shape of the present porch specimen

Table 1 Welding condition

Welding process	Welding consumable	Heat input [kJ/mm]	Interpass temp. [°C]	Polarity
FCAW	E81T1-K2	16.4	88	DCRP

는 Porch가 부착되는 Porch foundation으로서 피로시험 시 실험실 바닥에 고정된다. Porch의 Bracket 바로 윗부분은 Casting 부이고, Casting 부에 상부와 측면에 부착되는 부재는 가력장치(Loading jig)와 연결되는 부착되는 부분이다.

4. 피로시험

4.1 실험방법

Fig. 7에는 실험체의 실험준비 상태를 보여준다. Fig. 6의 Porch foundation은 실험실 바닥에 고정되며, Casting 부는 가력장치와 980kN Dynamic actuator와 연결된다. 피로시험 전에 여러 수준의 정적 하중을 가하여 용접잔류응력을 제거하였다. Tendon porch는 초기 인장상태에서 변동하중이 작용하므로 이를 피로시험에 반영하기 위하여 Load ratio, $R=0.1$ 인 상태에서 주파수 5~6Hz의 하중을 작용시켜서 피로시험을 수행하였다. 세 개의 실험체를 각각 P1, P2와 P3라 하였으며, 하중조

Table 2 Loading conditions

Specimen	Load range, ΔQ	Load ratio
P1	1st: 441.5kN centre	0.1
	2nd: 618.0kN 100mm up	
	3rd: 706.3kN 300mm up	
P2	529.7kN 300mm up	0.1
P3	618.0kN 300mm up	0.1

건을 Table 2에 열거하였다. Table 2의 두 번째 열에서 '441.5kN centre'는 Casting 부 중심에 하중을 작용시킨 것을 의미하며, '100mm up' 등은 하중의 작용점을 Casting 부 중심에서 위쪽으로 100mm 이동시킨 상태에서 실험을 수행한 것을 의미한다. 피로시험에서 두께 관통 균열이 발생하고 균열이 진전되어 예측된 응력 값이 급변하는 시점을 파괴가 발생한 시점으로 간주하였다.

4.2 피로시험 결과

4.2.1 실험체 P1

Table 2에 보인 바와 같이 실험체 P1에 대해서 Load ratio를 $R=0.1$ 을 유지하면서 하중범위의 크기를 변화시킨 3단계의 형태로 파괴가 발생할 때까지 하중을 작용시켰다. 여기에서 하중상태는 '최소 값/최대 값'으로 표시하였다. 실험체 P1의 하중이력은 다음과 같다.

- 하중단계 1 : 하중 49.1/491.0kN를 1,149,335cycle 동안 작용시킴.
- 하중단계 2 : 하중점을 100mm 이동시킨 상태에서 하중 68.7/686.7kN을 1,112,873cycle 동안 작용시킴.
- 하중단계 3 : 하중점을 300mm 이동시킨 상태에서 하중 78.5/784.8kN를 파괴가 발생할 때까지 작용시킴.

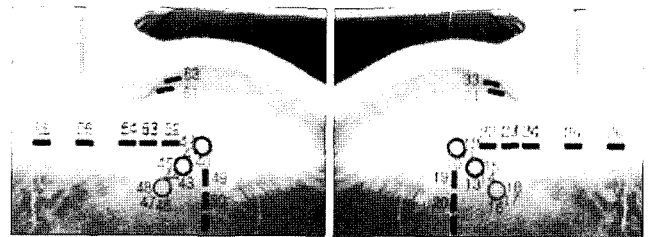
본 실험체에 대한 실험결과 Fig. 6의 Side A에서는 균열이

발생하였는데, Side B에서는 균열이 발생하지 않았다. 이는 실험시 하중이 Side A 쪽으로 편심되었음을 의미한다. 한편, 균열은 구조해석결과인 Fig. 5에 보인 응력분포에서 예상할 수 있는 바와 같이 Upper flange의 하부와 Bracket이 만나는 위치에서 발생하여 Bracket 안쪽 방향으로 진전되었다. 실험체 P1은 하중단계 3에서 227,596cycle 후 파괴된 것으로 간주하여 실험을 종료하였다. Fig. 8은 균열발생 및 진전 예상위치 즉, Fig. 6에서 높은 응력이 작용하는 Upper flange와 Bracket이 만나는 위치 근처에 부착된 Strain gage로 측정된 응력 값의 변화를 보여준다. Fig. 8에서 파괴된 것으로 간주되는 시점 전후에서 응력 값이 급변하는 것을 볼 수 있다. 파괴된 것으로 간주되는 시점까지 작용시킨 누적 Cycle 수는 2,489,804이었다. 균열이 진전되어 파괴로 간주된 모습을 Fig. 9에 보였다. Fig. 9에서 좌측상단의 그림은 Fig. 5에 보인 응력의 분포 중 중요 위치에서의 응력의 분포를 보여주는 것으로서 실험시 균열의 발생 및 진전 된 양상과 비교가 될 수 있도록 회전시켜서 표시한 것이다. Fig. 9에서 ○와 □로 표시한 것은 각각 Strain rosette과 단축 스트레인 게이지의 부착 위치와 Channel 번호들이다. 보는 바와 같이 구조해석 결과로 예상된 위치에서 균열이 발생한 것을 볼 수 있다.

4.2.2 실험체 P2와 P3

Table 2에 보인 바와 같이 실험체 P2와 P3에 대해서는 일정 하중범위 하에서 피로시험을 수행하였다. 최소/최대 하중은 실험체 P2와 P3에 대해서 각각 58.8/588.6kN과 68.7/686.7kN이고 Load ratio는 실험체 P1의 경우와 마찬가지로 $R=0.1$ 이 유지되도록 하였다. 실험체 P2와 P3 실험시 균열발생 예상 위치에 부착된 Strain gage의 배치도와 번호를 Fig. 10에 보였다.

실험체 P2에 대한 피로실험 결과로서 균열발생 예상위치 근처에 부착된 Strain gage에서 측정한 응력의 변화를 Fig. 11에 예시하였다. Strain gage의 배치도인 Fig. 10에서 보인 바와 같이 Side A에 부착된 Strain gage #54, #55, #56, #61, #63는 Side B에 부착된 Strain gage #24, #25, #26, #31, #33 과 대칭적으로 대응된다. Fig. 11에서 볼 수 있듯이 피로실험시 작용시키는 하중이 완전히 좌우대칭이 되도록 작용시키는 것은 실질



(a) side A (b) side B

Fig. 10 Location of strain gauges at the critical location for porch specimens P2 and P3

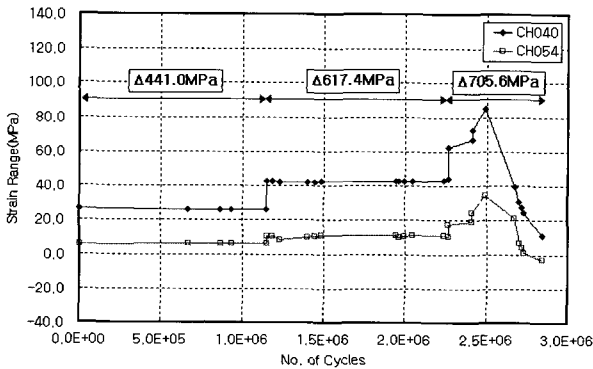


Fig. 8 Variation of stress range to the cumulated loading cycle of specimen P1 (side A)

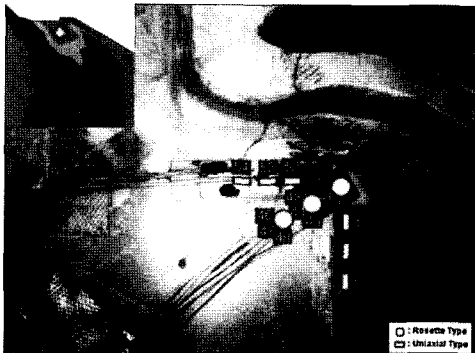
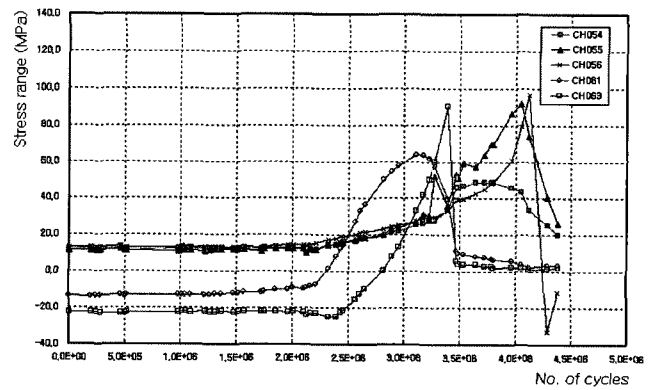
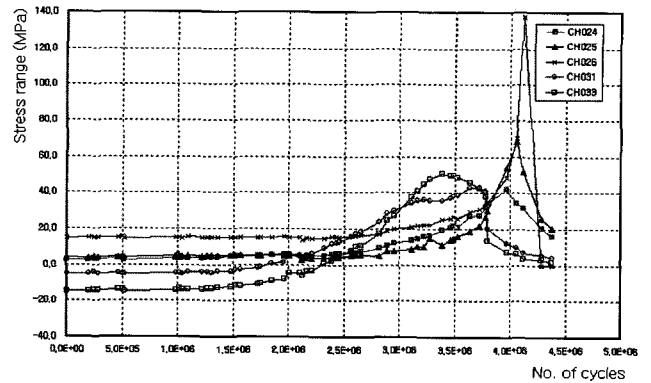


Fig. 9 Crack at the critical location for specimen P1



(a) side A



(b) side B

Fig. 11 Variation of stress range to the cumulated loading cycle of specimen P2

적으로 어려움이 있고 따라서 편심될 수밖에 없는데, 이 때문에 Side A와 B에서 계측된 응력의 변화가 완전히 대칭적으로 얻어지지 않았다. 그러나 Side A에서만 균열이 발생되고 진전된 실험체 P1의 경우보다는 하중의 편심량이 적었던 것으로 보인다. 본 논문에 포함시키지는 않았지만 실험체 P3에 대해서도 비슷한 응력의 변화가 계측되었다.

5. 결과의 비교 및 검토

본 절에서는 실험결과를 우선 주응력을 기준으로 구조해석 결과와 비교하였다. 평면응력상태에서 Strain rosette를 이용하여 계측된 변형률성분으로부터 응력을 계산하는 것은 대부분의 재료역학에 관한 교과서에서 다루고 있다 (Pytel and Kiusalaas, 2003). 본 연구의 실험에서는 45° Strain Rosette을 변형률 계측을 위해 사용되었다. 계측된 결과를 이용하여 평면 응력상태에 대한 세 응력 성분 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 가 구해지고 이로부터 주응력과 그 방향들이 용이하게 구해진다. 구조해석결과를 이용하여 Strain rosette이 부착된 위치에서의 응력을 추정하기 위해 4절점 사변형 요소의 형상함수를 이용하였다. 잘 알려진 바와 같이 유한요소법에서 형상함수는 어느 물리량의 요소 내에서 임의의 위치에서의 값과 그 물리량의 절점에서의 값 사이의 관계를 나타낸다(Cook et al., 2002). 따라서 응력성분들의 절점에서의 값을 이용하여 요소 내 임의의 위치에서의 응력을 추정할 수 있다.

Fig. 12에 보인 4절점 사변형 요소의 형상함수는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 N_1 &= -\frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta)(\xi+\eta+1) & N_5 &= \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1-\eta) \\
 N_2 &= +\frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)(\xi-\eta-1) & N_6 &= \frac{1}{2}(1+\xi)(1-\eta^2) \\
 N_3 &= +\frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)(\xi+\eta-1) & N_7 &= \frac{1}{2}(1-\xi^2)(1+\eta) \\
 N_4 &= -\frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)(\xi-\eta+1) & N_8 &= \frac{1}{2}(1-\xi)(1-\eta^2)
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기에서 ξ 와 η 는 무차원화 된 좌표(Normalized

coordinates)이다. 요소 내 임의의 점에서의 응력 $\sigma(x, y)$ 는 아래의 식 (2)에서 계산된다.

$$\sigma(x, y) = [N_1 \ N_2 \ N_3 \ N_4] \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \end{Bmatrix} \tag{2}$$

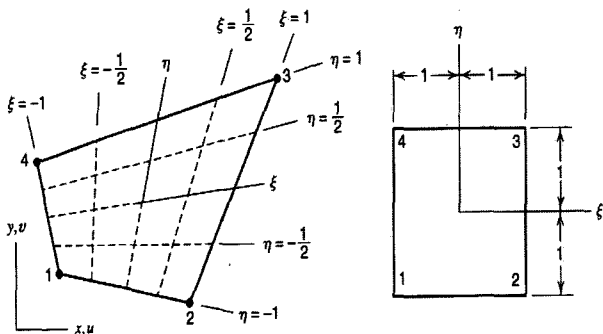
식 (2)에서 $\sigma(x, y)$ 는 요소 내 주어진 위치 x 와 y 에 대응되는 ξ 와 η 에서 계산될 응력이고, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 와 σ_4 는 Fig. 12에서 4 절점에서의 응력으로 σ_x, σ_y 또는 τ_{xy} 가 될 수 있다.

이상에서 기술한 방법에 의하여 응력성분들이 계산되고 이어서 주응력과 그 방향들이 계산된다. 실험체 P1에 대해 균열 발생이 예상되는 중요 위치에서 수치해석결과를 실험결과와 비교해서 Table 3에 정리하였다. Table 3에서 θ_c 는 균열이 진전되는 방향이다. 보는 바와 같이 구조해석 결과에서 예상된 균열진전 방향이 피로실험 결과와 좋은 일치를 보이는 것을 볼 수 있다.

6. Porch 실험체에 대한 피로강도 평가

6.1 실험체 P1

실험체 P1은 3개의 하중단계에 걸쳐서 실험이 되었기 때문에 S-N 곡선과 직접적으로 피로강도를 비교하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 S-N 곡선을 이용한 누적 피로손상률을 기준으로 평가하였다. Table 4에 각 하중단계에 따른 응력과 파괴에 이르는 Cycle 수 (No. of cycles to failure)를 정리하였다. 균열의 발생이 용착부 끝단 (Weld toe)에서 발생한다고 가정하는 것이 합리적이므로 그 위치에서의 응력을 갖고 피로수명을 계산하였다. Table 4에서 Gage #40 (Fig. 9 참고)에서의 응력은 계측된 변형률로부터 계산하였고, Weld toe에서의 응력은 전 절에서 기술한 식 (2)를 이용하여 추정하였다. 하중단계 3에서의 하중 Cycle 수는 최소/최대 하중 78.5/784.8kN를 파괴가 발생할 때까지 작용시킨 것이다. 좌측에서 다섯 번째 열의 피로수명은 DnV RP-C203의 Class D S-N 곡선으로 구한 파괴에



(a) In x-y coordinate system (b) In ξ - η coordinate system

Fig. 12 Four node quadrilateral element

Table 3 Comparison of principal stresses around the critical location and crack propagation direction for specimen P1

Position	Test result		Analysis result	
	Max. stress [MPa]	θ_c [deg.]	Max. stress [MPa]	θ_c [deg.]
Critical location	-	≈ 33	68.6	40.3
Gage #40~42	30.8	20.4	23.9	47.4
Gage #43~45	27.0	31.6	27.8	55.0
Gage #46~48	22.8	48.4	23.1	68.7

Table 4 Cumulative damage at each loading stage for specimen P1

Loading stage	Stress at gage #40 [MPa]	Stress at weld toe [MPa]	No. of loading cycles	Fatigue life [class D]	Fatigue damage ratio
			①	②	$\Delta=①/②$
Stage 1:	26.2	55.6	1,149,335	7.32E+06	0.1366
Stage 2:	42.8	95.4	1,112,873	1.68E+06	0.6621
Stage 3:	62.5	139.3	227,596	0.54E+06	0.4217

Table 5 Stress at weld toe and fatigue lives

Specimen	Stress at weld toe [MPa]	No. of cycles at fracture in test	Theoretical fatigue life	
		P2	side A	78.2
	side B	76.8	4,053,863	3.221E+06
P3	side A	84.7	2,861,911	2.401E+06
	side B	88.7	2,417,735	2.088E+06

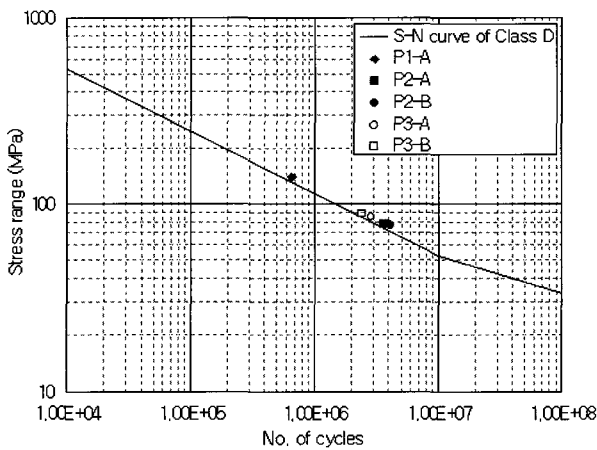


Fig. 13 Comparison of the present fatigue test result with S-N curve (class D)

이르는 Cycle 수이다. 만일, 하중단계 3에서 Weld toe의 응력범위인 139.3MPa를 처음부터 일정 응력범위로 작용시켰다고 가정한다면, 이 응력범위에 대응되는 피로수명은 이론적으로 0.54E+06cycle이다. 본 실험의 경우 하중단계 1에서부터 하중단계 3까지 누적된 피로손상률은 1.2194이므로, 이 손상률에 대응되는 파괴 Cycle 수는 $0.540E+06 \times 1.2194 = 0.658E+06$ cycle이다. 따라서 실험 초기부터 139.3MPa 크기의 응력범위를 일정하게 작용시켰다고 가정한다면, 0.658E+06cycle을 본 실험체의 피로수명을 간주할 수 있겠다. 이를 S-N 곡선 상에 표시하면 Fig. 13에서 \blacklozenge 로 표시된 점이다.

6.2 실험체 P2와 P3

실험체 P2와 P3에 대해서는 Table 2에서 보는 바와 같이 파괴가 발생할 때까지 일정 하중범위에서 실험이 수행되었고, 따라서 이 모델들에 대한 피로수명은 S-N 곡선으로 구한 결과와 직접적으로 비교할 수 있다. Weld toe에서의 응력은 실험체 P1의 경우와 마찬가지로 식 (2)를 이용하여 추정하여 Table 5에 DnV RP-C203의 Class D S-N 곡선으로 구한 피로수명의 이론 값과 함께 정리하였다. 모든 경우에 대해서 본 실험체들의 피로수명은 이론 값 보다 16%이상 초과하는 것을 볼 수 있다. 이 결과들을 S-N 곡선과 비교하기 위해 Fig. 13에 실험체

P1의 결과와 함께 표시하였다. Fig. 13에서 \blacksquare (P2-A)와 \bullet (P2-B)는 실험체 P2의 Side A와 Side B에 해당되는 점이고, \circ (P3-A)와 \square (P3-B)는 실험체 P3의 Side A와 Side B에 해당되는 점이다.

Fig. 13에서 볼 수 있듯이 본 연구의 피로실험에서 수행한 실험체의 결과들은 S-N 곡선 상부에 놓인다. 실험방법 부분에서 언급한 바와 같이 본 연구의 피로실험은 Road ratio 즉, 응력비 (Stress ratio)가 $R=0.1$ 인 상태에서 수행되었다. 양의 응력비인 경우에 피로수명은 $R=0$ 인 경우보다 감소하는 것으로 알려져 있다. 이러한 점을 고려한다면 POSCO에서 개발되어 생산되는 API 2W Gr.50 강재는 충분한 피로강도를 보유하고 있다고 말할 수 있겠다.

7. 결 론

본 논문은 TLP에서 ‘Special category’로 분류되는 Tendon porch에 대한 피로시험을 수행한 연구결과이다. 실제 Tendon porch를 30%로 축소한 세 개의 실험체를 POSCO에서 개발한 API 2W Gr. 50 강재로 제작하여 피로시험을 수행하였다. 본 논문의 실험 및 수치해석 결과로부터 양의 Load ratio ($R=0.1$)인 상태에서도 피로설계규정을 만족한다는 것을 확인하였다. 따라서 POSCO에서 생산하는 API 2W Gr. 50 강재는 해양구조물 제작에 적용하기에 충분한 피로강도를 갖고 있다고 말할 수 있겠다.

후 기

본 연구는 POSCO의 연구비 지원으로 이루어졌음을 밝히며 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

임성우, 장인화, 조철희, 박관규 (2005). "API 2W Gr.50 강재를 이용한 대형 Tubular Joint 피로성능평가", 한국해양공학회지, 제19권, 제3호, pp 54-58.
 임성우, 장인화, 조철희, 박관규 (2006). "API 2W Gr.50 강재를 이용한 대형 Topside Joint 피로성능평가", 2006년도 한국해양과학기술협의회 공동학술대회, 한국해양공학회, pp 1752-1756.

- Cook, R.D., Malkus, D.S., Plesha, M.E. and Witt, R.J. (2002). "Concepts and Applications of Finite Element Analysis", 4th edition, John Wiley & Sons, Inc. pp 221-232.
- DnV(2001). "DnV OS-C103 : Structural Design of TLPs" Im, S.W., Chang, I.H., Park, K.K., Jo, C.H. and Kim, K.Y. (2005). "A Study on the Fatigue Crack in Large-Scale Tubular Joints for Offshore Structures", Proceedings of 5th ISOPE Conference, pp 341-345.
- DnV(2001). "DnV RP-C203 : Fatigue Strength Analysis of Offshore Steel Structures" Pytel, A. and Kiusalaas, J. (2003). "Mechanics of Materials", Brooks/Cole-Thomson Learning, Inc.
- Im, S.W. (2005). "A Prospective of Offshore Structure and Fatigue Tests of Large-Scale Structures ", Proceedings of 14th Steel Usage Technology Conference, POSCO, 2006년 6월 1일 원고 접수
- 2006년 9월 1일 최종 수정본 채택