

해양 구조물의 K-Joint 피로연구

임성우* · 박노식** · 조철희*** · 박관규***

* 포항산업과학연구원(RIST)

** 울산대학교 수송시스템 공학부

*** 인하대학교 선박해양공학전공

Fatigue Study of K-Joints for Offshore Structures

SUNG-WOO IM*, RO-SIK PARK**, CHUL-HEE JO*** and KWAN-KYU PARK***

* Research Institute of Industrial Science and Technology

** School of Transportation Systems Engineering, Ul-San University

*** Naval Architecture and Ocean Engineering Major, In-Ha University

KEY WORDS: K-Joint K조인트, Fatigue Test 피로시험, Circular Hollow Section(CHS) 원형강관, Offshore Structures 해양구조물
S-N Curve S-N 선도, Hot-Spot Stress

ABSTRACT: The paper describes a test program on welded K-joints fabricated from circular hollow section brace members and chords made with API 2W 50 grade steel produced by POSCO. The K-joints were tested for three loading conditions at RIST. The specimens were tested in reaction frame that allowed vertical uniform loading to the structure. From the test, the crack initiation and development were observed and the fatigue failure could be predicted. The results were also compared with the provided S-N curves by DnV.

1. 서 론

세계적으로 에너지 수요가 증가함에 따라 해양 에너지 개발 요구도 및 이에 따라 해양 자원 개발을 위한 각종 해양구조물(FPSO, SPAR, FPU, TLP 등)의 건조가 증가하고 있다. 특히 Truss 구조의 경우 토목건축이나 해양공학 분야에서 널리 응용되고 있는 가운데 토목건축분야의 경우 지금까지 교량에 사용되는 K-Joint에 대한 연구를 포함하여 truss 구조에 대한 다양한 연구가 있어왔다.(Udomworrarat et al.,2002; Schumacher, 2003) 해양구조물의 경우 해양의 불규칙적인 반복하중에 의한 피로문제가 상당히 심각하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 해양 구조물에서 많이 사용되는 Tubular K-Joint의 응력집중에 대한 연구를 수행하였고 K-Joint의 피로성능을 Hot-Spot Stress 방법을 적용하여 평가하였다.

Hot-Spot Point는 응력의 집중이 나타나는 곳으로, 보통

용접부의 toe나 heel부분에서 발생하며, 피로 균열의 주요 시작점으로 볼 수 있다.(Karamanos et al., 2000)

최근 POSCO의 API 2W Gr.50 강재의 개발을 통해 지금까지 수입에 의존하고 있는 해양강재의 국내 수급 가능성이 열리게 되었고 본 연구에서는 이 강재를 이용하여 K-Joint 모델을 제작하여, 해양 불규칙 반복하중에 따른 모델의 응력 집중 및 피로성능을 연구하여 API 2W Gr.50의 안정성 및 피로수명을 분석 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 시험편

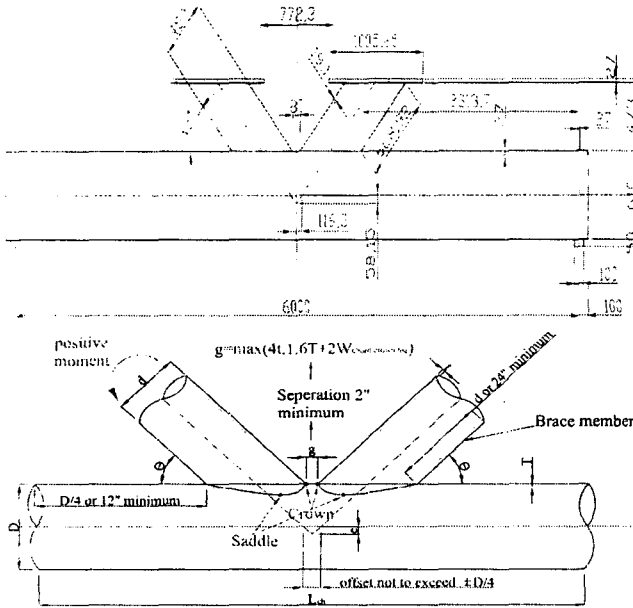
K-Joint의 모델 제작은 국내 중공업사에서 제작중인 대표적인 K-Joint의 제원을 조사하여, POSCO에서 개발한 API 2W Gr.50 강재를 사용해 실제 구조물에 사용되는 제원과 유사하게 제작하였다. Brace의 끝부분은 computer guided cutting technology를 사용하여 chord 외형에 맞도록 cutting하였다. 용접 재료 및 조건은 Table 1에 나타내었다.

제1저자 임성우 연락처: 경기도 화성시 동탄면 영천리 79-5
031-370-9545 swim@rist.re.kr

Table 1. 용접 제원

	AWS Spec.	Trade Designation	Dimension (mm)	Heat Input (kJ/mm)	Interpass Temp.(°C)	Note
FCAW	E81T1-K2	Dual Shield II81-K2	1.2mm	1.64	156	Joint
SAW	F7A8*EH14	S-787B*H-14	4.0	1.93	-	Pipe

Fig 1은 K-Joint 모델의 주요사항을 Table 2는 주요 변수를 나타낸다.



d : outside brace diameter e : eccentricity
 D : outside chord diameter g : gap distance
 t : brace wall thickness L_{ch} : chord length
 T : chord wall thickness

Fig 1. K-Joint 모델

Table 2. 주요 변수

a	β	γ	τ	ζ	e/D	θ
19.67	0.75	11.29	0.71	0.13	0.11	45°

$a=2L_{ch}/D$: chord length slenderness
 $\beta=d/D$: brace-to-chord diameter ratio
 $\gamma=D/2T$: chord slenderness
 $\tau=t/T$: brace-to-chord wall thickness ratio
 $\zeta=g/D$: normalized gap parameter
 e/D : normalized eccentricity
 θ : brace angle

2.2 실험장치

피로 시험은 포항산업과학연구원 강구조연구소의 100톤 Dynamic Actuator(용량 ±100톤)를 이용하여 수행 하였으며, 길이 5mm의 1축 Strain gages를 사용하여 주요 80 Points 부분의 응력값을 측정/분석하였다. Fig 2는 양단의 고정 지그를 나타낸다.

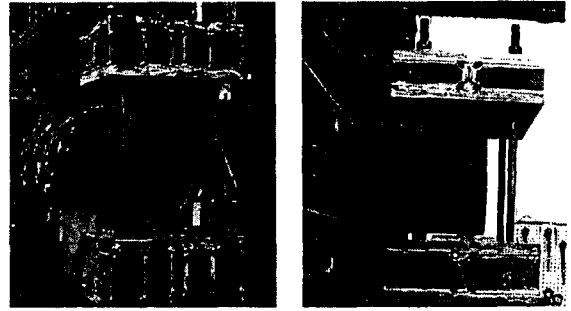


Fig 2 양단 고정 지그(강구조연구소, RIST)

Strain gages의 위치는 Fig 3에 보여주고, Joint 부위의 gages는 IIW Doc. XIII-1804-99, XV-1035-99, XV-E-99-251 (International Institute of Welding, 1999)에 의하여 Table 3과 같이 결정되었다. 그러나 Chord joint부분에서 gages의 부착 공간이 협소하여 chord부분만 용접부로부터 10mm, 23mm, 35mm인 지점에 gages를 부착하여 측정하였다.

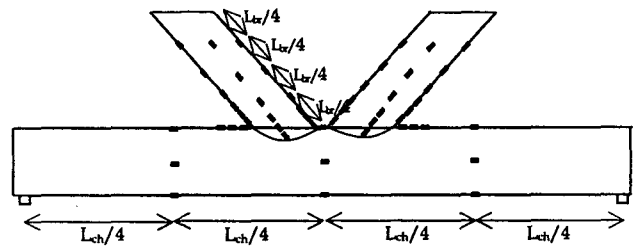


Fig 3. Strain gages 위치

Table 3. 응력측정 위치

	Chord		Brace
	Saddle	Crown	Saddle&Crown
L _{r,min}	0.4×T = 10mm		0.4×t = 7mm
L _{r,max}	0.09×(D/2) = 26mm	0.4×[(D/2)×T×(d/2)×t] ^{0.25} = 30mm	0.65×[(d/2)×t] ^{0.5} = 41mm

L_{r,min} = 4 mm
 L_{r,max} = L_{r,min} + 0.6t

2.3 실험방법

3개 모델을 대상으로 하중을 달리하며 인장피로시험을 수행 하였다. 하중은 -100톤~+100톤 하중범위에서 테스트 결과를 바탕으로 Table 4와 같이 실험에 적합한 하중 조건을 선택하였다.

Table 4. 실험별 하중범위

	하 중 범 위
K - 1	+3.5톤 ~ +35톤 (+34.3KN ~ 343KN)
K - 2	+4톤 ~ +40톤 (+39.2KN ~ 392KN)
K - 3	+4.5톤 ~ +45톤 (+44.1KN ~ 441KN)

하중 조건에 따라 Dynamic Actuator의 주파수를 3Hz로 하여 크랙의 발생을 관찰하였다. 크랙의 확인은 액상 침투법으로 실시간 확인하여 크랙의 길이 및 형상을 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 피로 파괴 예상

실험 K-2(392KN)의 경우를 적용하여 FEM 해석결과(Fig 4,5)를 정리하면 Table 5와 같다. 수치 해석은 MSC의 Patran과 Nastran을 사용하였다. 양쪽 지지점은 각각 fix, simple 지지조건을 적용했으며, Brace 윗부분을 Rigid 연결하여 중앙에 392KN의 인장력을 주었다.

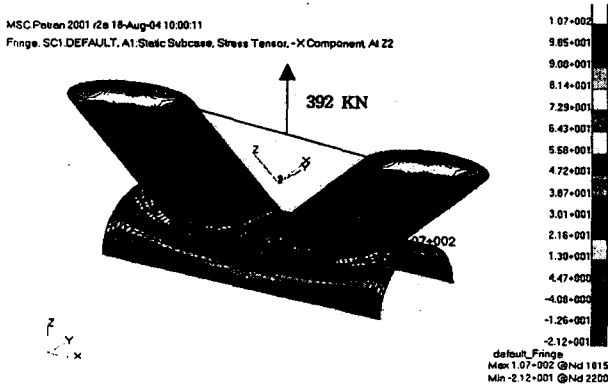


Fig 4. Top Surface

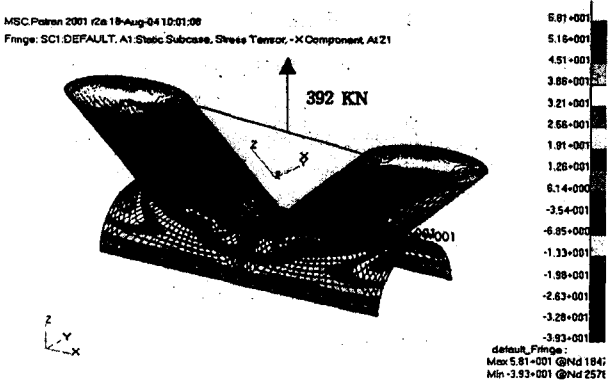


Fig 5. Bottom Surface

Table 5. FEM 해석 결과(MPa)

	Crown toe		Crown heel	
	Brace	Chord	Brace	Chord
Top Surface	-14.8	38.7	90.3	107
Bottom Surface	-13.5	58.1	-81.4	19.1

Table 5에서와 같이 FEM 해석결과, Joint에서 응력 집중이 나타났다. Chord부의 Crown heel에서 107MPa의 큰 응력값이 작용하여 이 부분에서 인장에 의한 균열 및 피로 파괴를 예상할 수 있다.

3.2 크랙의 발생

3.2.1 K-1 모델

초기 크랙 발생 후 크랙이 진전되다가 1,542,000cycles에서 오른쪽 Chord부에서 연결되지 않은 크랙이 발생되었고, 점차 발전되어 1,979,500cycles에서 모두 연결되었다. 2,524,620cycles에서 표면의 크랙은 용접부를 벗어났고, 점차 Chord의 관통 내부로 진전되다 2,549,600cycles에서 왼쪽 Chord의 관통에 이르렀고, 결국 2,788,400cycles에서 오른쪽 Chord의 관통으로 실험이 종료 되었다.(Fig 6)

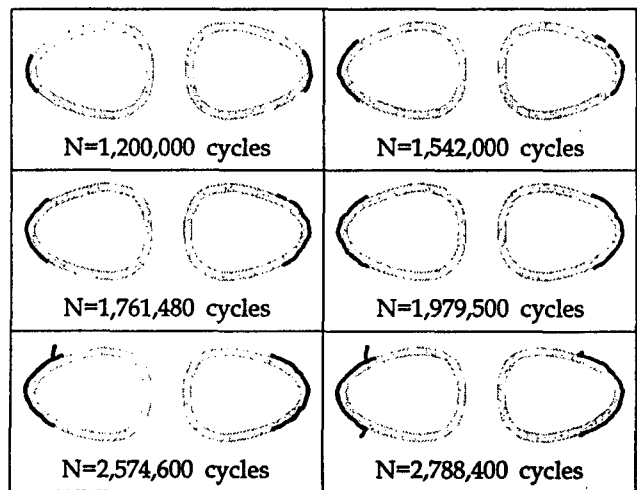


Fig 6. K-1 (343KN)

3.2.2 K-2 모델

K-2모델의 경우도 1,024,200cycles에서 크랙의 발생되어, 1,333,900cycles에서 왼쪽 Chord부의 관통으로 발전하였다. 결국, 1,549,900cycles에서 오른쪽 Chord부의 관통으로 실험이 종료 되었다.(Fig 7)

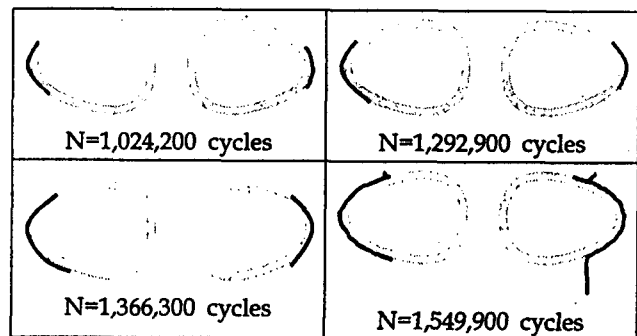


Fig 7. K-2 (392KN)

3.2.3 K-3 모델

K-3모델에서 506,800cycles일 때, 왼쪽 Chord 부의 크랙을 시작으로, 967,000cycles에 결국 관통크랙으로 이르게 되었지만, 오른쪽 Chord는 초기 크랙의 발생과 진전 속도도 느리게 되어 관통의 크랙을 확인하지 못한채 실험이 종료 되었다.(Fig 8)

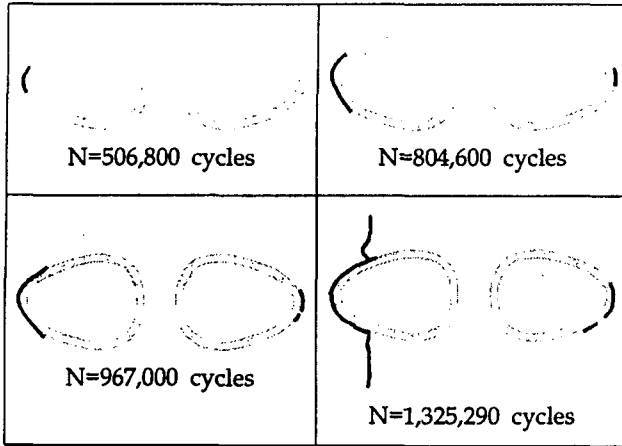


Fig 8. K-3 (441KN)

세 가지 하중 조건에서 모두 크랙의 발생은 최대 인장 응력을 받는 Chord부의 Crown heel에서 시작되어 용접부를 따라 Saddle 부분으로 발전되다가 결국 Joint chord부의 관통으로 이르게 되었다. 양쪽 관통 크랙 발생을 시험의 종료 시점으로 하였으며, 관통의 크랙 시점을 통하여 구조물의 최종 수명을 구할 수 있다.

3.3 Hot-Spot Stress

Hot-Spot stress는 응력의 집중은 용접부의 결함 등 microscopic 요인과 joint의 기하학적 형상으로부터 발생하는데, 전자의 영향은 적절한 S-N curve를 선택함으로써 처리되고, 후자의 영향은 실험이나 FEM을 사용하여 구한 응력 집중 계수(SCF)를 공칭응력(nominal stress)에 곱함으로써 고려된다. 이것이 S-N curve에 적용하는 joint부의 최대응력인 Hot-Spot stress가 된다.

Fig 9에서 K-3의 모델의 계측값과 계산값으로 각각의 Hot-Spot stress를 구하였다. 계측값의 Hot-Spot stress는 Table 3에서 계산한 위치에서(10, 23, 35mm) 계측값을 의사법으로

나타내었고, FEM 해석결과의 Hot-Spot stress는 $L_{r,min}=10mm$, $L_{r,max}=30mm$ 인 위치로 나타내었다. 두 값의 비교 및 K-1, K-2 모델에 대한 Hot-Spot stress는 Table 6에 나타내었다

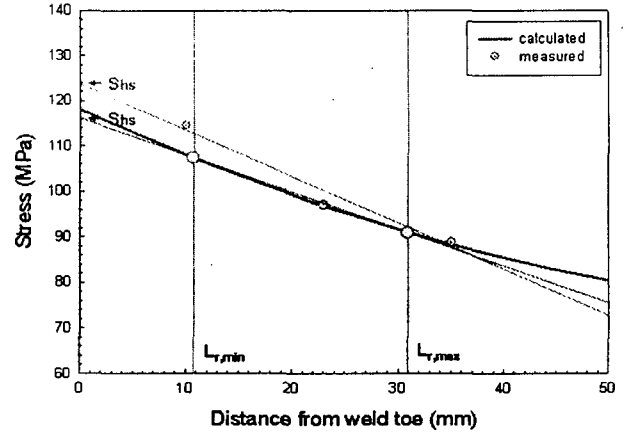


Fig 9. Determination of Hot Spot Stress at Weld Toe

Fig 10에서 관통 크랙의 cycles수와 Hot-spot stress를 구하여 S-N 선도에 적용시켰다. 계산치와 측정값은 거의 일치 하였으며, 이러한 결과가 기준에 만족함을 알 수 있다. 특히, K-3의 경우 기준치에 만족되는 최소값에서도 관통 크랙이 발생하지 않아 더 안정적이라 할 수 있다.

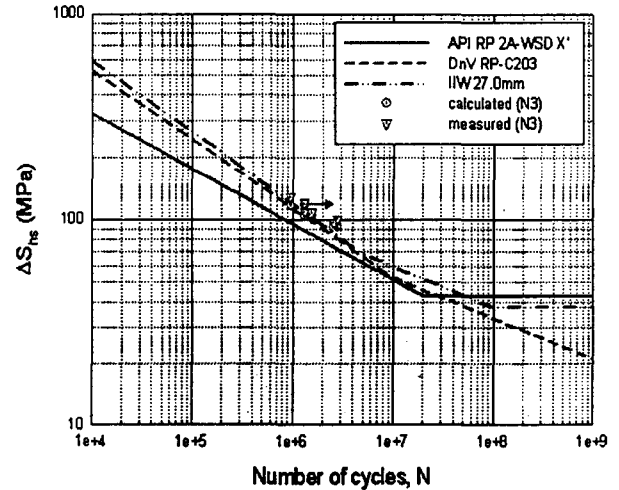


Fig 10. ΔS_{hs} -N Design Curves for Tubular K-joints Based on N3

Table 6. Hot-spot stress와 피로 수명

Specimen	Stress range (MPa)			Fatigue life cycles			
	Calculated	Measured		N3 ²⁾		N4 ³⁾	
		Left side	Right side	Left chord	Right side	Left chord	Right side
K-1 ¹⁾	△91.5	△96.5	△100.8	2,549,600	2,788,400	3,798,900 ⁴⁾	4,154,700 ⁴⁾
K-2 ¹⁾	△104.6	△109.1	△108.7	1,333,900	1,549,900	1,987,500 ⁴⁾	2,309,350 ⁴⁾
K-3 ¹⁾	△117.6	△127.8	△119.6	967,000	1,325,290 ⁵⁾	1,440,830 ⁴⁾	-

1) Hot spot stress range 2) # of cycles to through-thickness cracking of fatigue damaged member (N4/N3=1.49, van Wingerde)
3) # of cycles to complete loss of static joint strength 4) calculated 5) no through-crack

관통크랙의 발생 시점(N3)을 통해 구조물의 최종 수명(구조물로서 역할이 불충분한 시점, $N4/N3=1.49$) $N4$ 를 구하여 S-N 선도에 적용시켜보면 기준치의 $10^6 \sim 3 \times 10^6$ cycles 이상의 안정성을 갖는다.(Fig 11)

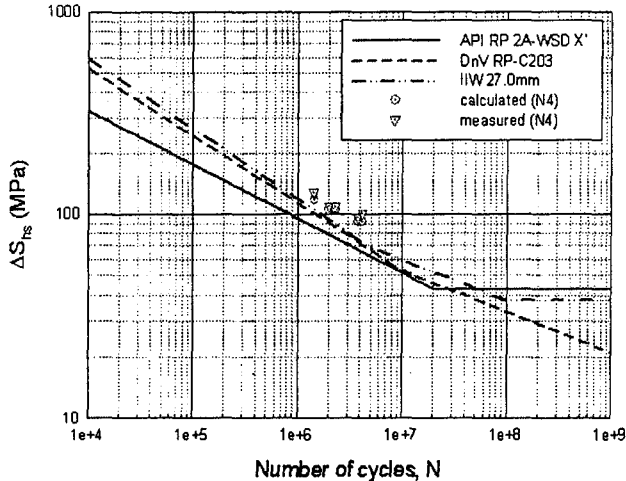


Fig 11. ΔS_{rs} -N Design Curves for Tubular K-joints Based on N4

4. 결 론

POSCO의 API 2W Gr.50 강재를 사용하여 현재 국내 중공업사에서 제작하고있는 실제와 유사한 크기의 해양 구조물의 K-Joint를 제작하여 응력 집중 및 피로수명을 연구 한 결과는 다음과 같다.

- (1) 크랙의 발생은 최대 인장 응력을 받는 Crown heel 부분에서 시작되어 용접부를 따라 Saddle 부분까지 발전되다가 결국 chord부의 관통으로 이르게 되었다.
- (2) 구조물에 작용하는 응력분포를 통하여 정확한 피로 파괴를 예측할 수 있다.
- (3) 이러한 실험 방법과 결과를 통하여 유사 해양구조물의 해석 및 설계시에 좋은 참고 자료가 될 수 있다.
- (4) POSCO에서 개발한 API 2W Gr.50 해양 강재는 API, DnV와 IWW의 기준을 넘는 충분한 피로 수명(기준치의 $10^6 \sim 3 \times 10^6$ cycles 이상)과 안정성을 확보함으로써, 불규칙 하중이 작용하는 해양에서의 해양 강재로 적용이 가능성이 입증되었다.

후 기

본 연구 과제를 수행함에 있어 POSCO와 K-Joint 모델을 제작해 주신 대우조선해양 주식회사, 상부구조인 Topside 모델을 제작해 주신 삼성중공업의 아낌없는 지원에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- Undomworarat, P., Miki, C., Chikawa, A., Komechi, M., Mitsuki, K., and Hosaka, T.(2002) "Fatigue Performance of Composite Tubular K-Joints for Truss Type Bridge", Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, Vol. 19, No. 2, pp 65~79.
- Schumacher, A.(2003) "Fatigue Behaviour of Welded Circular Hollow Section Joints in Bridges", M.Sc. University of Alberta, B. Eng. Dalhousie University, Canada
- Karamanos, S. A., Romeijn, A., and Wardenier, J.(2000) "On the Fatigue Design of K-Joint Tubular Girders", International Journal of Offshore and Polar Engineering, Vol. 10, No. 1, pp 50~56