

API 2W Gr.60 강재적용 K-Joint 구조의 피로성능평가

임성우* · 장인화* · 조철희** · 박관규***

* 포항산업과학연구원(RIST)

** 인하대학교 선박해양공학전공

*** 인하대학교 대학원 선박공학과

Fatigue Behavior of K-Joint Structure for API 2W Gr.60 Steel

SUNG-WOO IM*, IN-HWA CHANG*, CHUL-HEE JO** and KWAN-KYU PARK***

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

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

*** In-Ha University Graduate School, Incheon, Korea

KEY WORDS: K-Joint K형 조인트, Fatigue behavior 피로 성능, Through-crack 관통크랙, API 2W Gr.60

ABSTRACT: Large-scale model tests of welded tubular K-joints were carried out to observe the fatigue behavior of API 2W Gr.60 steel produced by POSCO. The fatigue crack behaviors for various loading conditions were measured and investigated around the critical joint sections. The experimental results have been verified with numerical approaches and also compared with the IIW, DnV RP-C203 and API RP 2A-WSD design curves. The hot spot stress method was applied in the study. The SCF factor for tubular K-joint was also obtained.

1. 서 론

최초 해양구조물은 멕시코만 및 해류가 잔잔한 몇몇 해역에 설치되어 운용되다가 1970년대 오일의 수요가 증가됨에 따라 해상 조건이 더욱 가혹한 북해 등지에 설치되어 왔다. 최근엔 유전 개발을 위한 시설이 수심 1500m가 넘는 심해까지 설치되어 운용되고 있다. 유전 개발을 위한 구조물을 비롯한 TLP, FPSO, FPU 등 부유식 해양구조물은 심해 유전 개발 요구 증가와 함께 유가가 사상 최대치를 기록하며 그 건조 및 설치는 증가하고 있다.

해상에 있는 부유식 구조물이나 해저면에 고정되어 있는 고정식 구조물은 각기 용도가 다르기 때문에 필요로 하는 강재의 요구 성능과 강종도 상이하다. 해양구조물에 사용되는 강종은 DnV, ABS, BV, KR, GL, LR, NK, RINA 등의 선급제에서부터 API 강재에 이르기까지 매우 다양하다.

API는 American Petroleum Institute의 약어로 석유/가스 시추설비 및 석유 화학 관련 분야에 대한 관련 규격을 정하고 인정, 관리 감독하는 미국석유회이다. API에서 보증하는 API 해양강재에는

API 2Y(해상 구조용 조질 고강도 강판), API 2H(해상 플랫폼 원통형 조인트용 탄소 망간 강판), API 2W(열가공제어공정에 의해 생산된 해양구조물용 강판) 등 여러 가지가 있다. 이중 API 2W 강재는 TMCP(열가공제어공정) 제조 방식에 의해 제조된 고강도 강으로서 용접시 예열이 필요없고 인성이 매우 우수하여 1990년대부터 해양구조물 제작에 사용되어왔다.

실구조물 크기의 Joint에 관해서는, 피로성능에 대한 기본 자료 확보를 위한 X Joint의 평가(Amiot et al., 1982)에서부터 피로성능에 미치는 후열처리의 영향(Lourenssen and Dijkstra, 1982), Parametric Equation에 포함되어 있지 않은 면외하중을 받는 T Joint에 대한 피로실험(Wylde, 1983), 자국내 해양산업을 육성하기 위한 중국산 E36-Z35 강재로 된 T Joint의 피로실험(Guanghai and Bozhen, 1992), 고강도 강재적용을 위한 YS 810MPa급 Weldom 700으로 제작된 T Joint의 피로실험(Agerskov et al., 1998), 용접부 응력집중을 피하기 위한 고강도 Cast Steel Insert에 대한 평가(Sonsino and Umbach, 1996), 490MPa급 TMC 강재로 제작된 T Joint에 대한 부식피로 성능평가(Matsumoto et al., 1986), 실제하중 상태를 평가하기 위한 불규칙한 면내 또는 면외 하중을 받는 T 및 Y Joint에 관한 피로실험(Dover and Dharmavasan, 1982) 등 많은 연구가 수행되었다.

이상의 연구는 대기 중이나 또는 해수 중이나 하는 환경에 관한

교신저자 임성우 연락처: 경기도 화성시 동탄면 영천리 79-5

031-370-9545 swim@rist.re.kr

것, 후열처리에 관한 것, 신 강중에 관한 것, Joint 형상 및 Stiffened Joint에 관한 것, 용접 지단부 형상에 관한 것, 강관 크기에 관한 것, 하중조건에 관한 것 등으로 요약할 수 있다.

국내에서는 POSCO에서 해양구조물 적용을 위한 CTOD 보증 API 2W Gr.60 강재를 개발하였다. 개발된 API 2W Gr.60 강재의 기본 물성에 관해서는 이미 Shell사 등 Oil Major의 Vendor 등록을 완료하였다.

Tubular 구조는 wave, current, wind 등의 불규칙 외부 하중에 의한 압축, 인장, 비틀림 등의 영향을 적게 받기 때문에 해양구조물의 가장 기본적인 구조이다. 해양구조물의 주요 Joint 부위는 불규칙 반복 하중을 받으면서 응력집중이 발생하기 때문에 설계시 welded tubular joint에 대한 피로 강도 평가는 수행되어야 한다. 본 연구에서는 국내에서 개발된 강재를 사용하여 해양구조물의 대표 구조인 K-Joint를 제작하여 피로실험을 수행하였다. 피로실험 결과는 DnV, API, IIW 등의 주요 국제 코드의 S-N 선도와 비교하였다.

2. 실험방법

2.1 시험체 제작

Table 1은 국내 중공업사가 제작한 해양구조물에 사용된 강관의 예이다. 이 중에서 시험기의 용량을 감안하여, 표에서 음영으로 표시된 강관 크기와 유사하게 Fig. 1과 같이 K-Joint를 제작하였다. Table 2는 K-Joint의 주요 변수를 나타낸다. 여기서 주요변수는 Table 3과 같이 정의된다. 강관의 크기는 Kuang et al. (1975)과 DnV RP-C203의 Non-dimensional Parameter 및 API RP 2A-WSD(2002)의 Design Specification을 고려하여 결정하였다.(Fig. 2)

강관은 국내 후속강관사인 EEW KOREA에서 제작하였다. Chord와 용접되는 Brace의 단부는 Computer Guided Cutting Technology를 사용해서 Chord의 외형에 맞게 절단하였다. Chord와 Brace 사이는 대우조선해양에서 실구조물 제작조건으로 용접하였다. 용접조건은 Table 4와 같다.

Table 1 해양구조물에 사용된 강관 크기의 예

unit : mm	Type	Chord		Brace(L)		Brace(R)		Brace(M)		Angle
		D	T	d	t	d	t	d	t	
Total	T-Joint	610	25	-	-	-	-	324	9.1	90.0
E&P		610	25	-	-	-	-	457	19	90.0
Angola		914	50.8	-	-	-	-	457	19	90.0
DALLA	K-Joint	914	50.8	-	-	-	-	610	25	90.0
Project		610	19	457	19	457	19	-	-	40.6
(ABB)		610	25	457	19	457	19	-	-	37.8
KSLO	T-Joint	2375	80	-	-	-	-	700	25	90.0
		2415	100	-	-	-	-	800	25	90.0
		700	25	700	25	700	25	-	-	40.4
Sable	K-Joint	800	35	600	25	600	25	-	-	30.5
Tier II		800	35	600	25	600	25	-	-	37.7
Project		800	35	700	25	700	25	-	-	44.1
(Exxon	K-Joint	800	35	700	25	700	25	-	-	53.8
-Mobil)		800	35	800	25	800	25	-	-	49.6
800		45	600	25	600	25	700	25	44.0	
2415	100	900	25	1000	35	800	25	50.0		

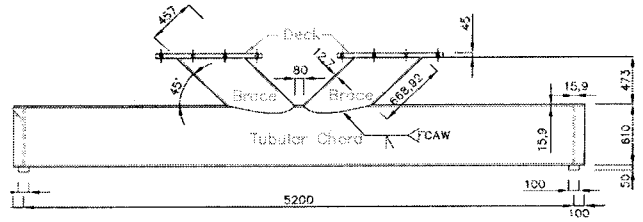


Fig. 1 K-Joint model

Table 2 Parameters of K-Joint

	α	β	ν	τ	ξ	e/D	θ
K-Joint	17.05	0.75	19.18	0.79	0.13	0.11	45°

Table 3 Definition of K-Joint parameters

$\alpha=2Lch/D$	Chord length slenderness
$\beta=d/D$	Brace-to-chord diameter ratio
$\nu=D/2T$	Chord slenderness
$\tau=t/T$	Brace-to-chord wall thickness ratio
$\xi=g/D$	Normalized gap parameter
e/D	Normalized eccentricity
θ	Brace angle

d : outside brace diameter e : eccentricity
 D : outside chord diameter Lch : chord length
 t : brace wall thickness g : gap distance
 T : chord wall thickness

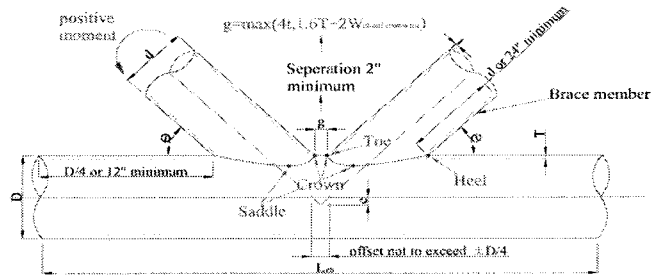


Fig. 2 Detail of K-joint

Table 4 Welding conditions

Welding Process	Welding consumable		Heat Input (kJ/mm)	Interpass Temperature (°C)	Note
	AWS spec.	Trade Designation			
FCAW	EB1T1-K2	Dual Shield I181-K2	1.38	81	Joint
SAW	F7A8*EH12K	OP121TT*OE-SD3	2.65	148	Pipe

2.2 실험장치

Fig. 3에 시험체 Setup 상황을 나타내었다. Brace 양쪽 상단을 Stiff한 Girder로 연결한 다음 대형 프레임에 연결된 980kN Dynamic Actuator를 그 위에 설치하였다. 또한 시험체의 양단 지그는 볼트로 Clamping하여 Chord 길이 방향으로 비교적 자유롭게 움직일 수 있도록 하였다. 이때 양단부의 볼트는 유압으로 체결하여 시험 도중에 풀리지 않도록 하였다.

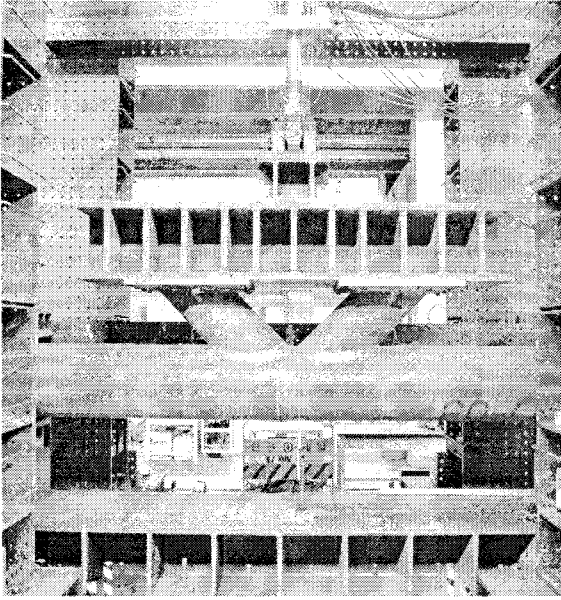


Fig. 3 Test setting

2.3 가력조건

강구조물의 피로한으로 알려진 2×10^6 cycles에서의 피로 수명을 평가하기 위해서 Table 5와 같이 ΔQ 값을 각각 $K1=308.7\text{kN}$, $K2=352.8\text{kN}$, $K3=396.9\text{kN}$ 로 하여 피로실험을 수행하였다. 이때 피로실험에 앞서 최대 하중에서 최소 하중까지를 약 50kN 간격으로 20차례 정적으로 가력하고, 10,000cycles 정도를 진행하여 시험체에 있는 잔류응력을 제거하고 실험체가 제대로 자리를 잡게한 후 피로 실험을 실시하였다. 피로하중은 주파수 3Hz에 하중비 $R=0.1$ 로 Sine 파형으로 가력하여, Balanced in-plane Bending 조건 하에서 실험하였다. 시험 종료 시점은 Chord에 관통균열이 발생하는 시점으로 하였다.

Table 5 Loading conditions

Specimen	ΔQ (kN)	Load ratio	Load type
K 1	308.7	0.1	Balanced
K 2	352.8		In-plane Bending
K 3	396.9		Brace

3. 결과 및 고찰

3.1 유한요소 해석

피로실험을 수행하기 전에 MSC의 PATRAN 을 이용해서 약 12,000개의 Shell 요소로 모델링하여 피로균열 발생위치를 예측하였다. 이때 Chord 단부는 Fig. 4에서 경계조건에서 볼 수 있듯이 단순지지 조건으로 하였으며, Brace 상단은 Rigid 요소로 연결한 다음 중앙에 245kN의 집중하중을 가하였다. NASTRAN으로 해석한 결과를 보면 Chord Heel 부위의 Chord 표면에 95.3MPa의 응력이 집중함을 알 수 있다.

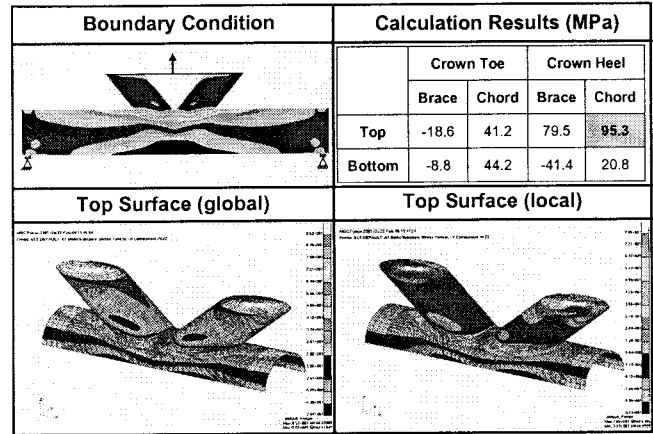


Fig. 4 Numerical Model (245kN)

3.2 피로 실험결과

Fig. 5에 액상 침투액(Dye Penetrant)을 이용해서 피로균열의 발생 위치를 나타내었다. 유한 요소 해석에서 예측한 것처럼 최대 공칭 응력이 작용하는 Chord Heel에서 피로균열이 발생함을 알 수 있다. 그러나 이것은 Balanced Axial Load를 받는 시험체의 경우 Chord Toe에서 피로균열이 발생한다는 연구 결과(Udomworarat et al., 2002)와는 정반대의 결과이다. Balanced Axial Load의 경우 Brace의 수평방향으로 하중이 작용하기 때문에 Brace 사이의 Gap 크기와 각도 등에 의해서 Chord toe 부에 응력이 발생하지만, Balanced in-plane bending의 경우에는 응력 집중이 Chord heel에 발생되기 때문에 이러한 결과가 나온 것으로 사료된다.

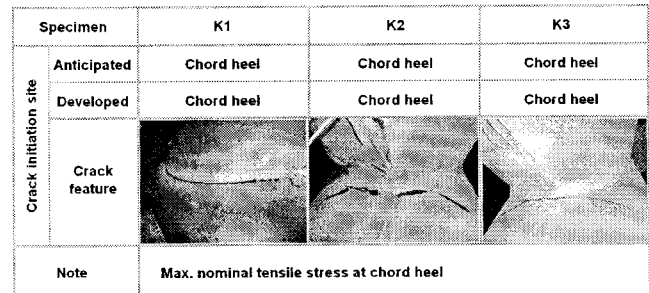


Fig. 5 Fatigue failure

Fig. 6은 Chord Heel에서 발생한 피로균열의 전파상태를 나타낸다. K1 시험체의 경우 오른쪽 Chord Heel에서 먼저 피로균열이 발생되었고, 그 후 왼쪽 Chord Heel에서도 피로균열이 발생되었다. 2,557,882 cycles에서는 오른쪽 Chord Heel에서 몇몇 작은 균열들이 발생되었으며, 3,165,000 cycles에 이르게 되면 작은 균열들의 합체가 이루어졌다. 피로균열은 더욱 성장해서 3,310,000 cycles에서 왼쪽 Chord는 관통을 시작하였고(N3), 오른쪽 Chord는 이미 관통이 진행 후 구조물로서 역할을 하지 못하는 시점(N4)이 되었다. K2, K3의 시험체도 K1의 경우와 유사한 거동을 보였다. 특히 Fusion Line을 따라 진행하던 표면균열의 전파방향이 Chord 길이방향의 수직으로 변화되는 시점에서 관통됨을 알 수 있다. K2, K3 시험체의 경우 오른쪽 Chord부분이 관통이 되어 상당한 시간이 흘렀음에도 불구하고, 왼쪽 Chord부에는 크랙이 전혀 발생하지 않아 시험을 종료하게 되었다.

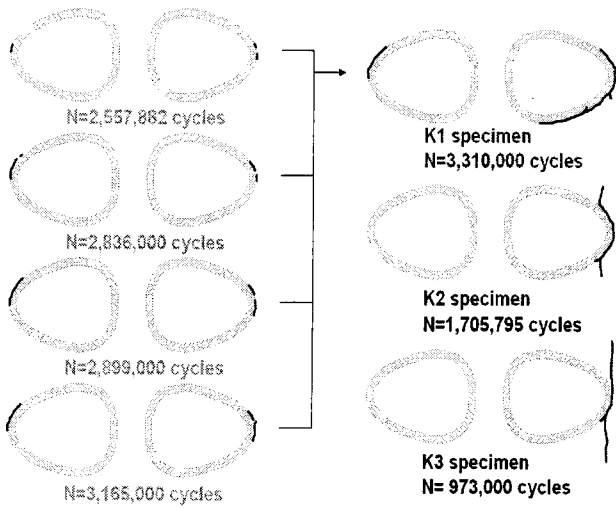


Fig. 6 Crack propagation

Fig. 7은 Cycle 수에 따른 표면균열길이와의 관계를 나타낸다. 화살표로 표시한 위치가 관통균열이 발생한 시점이다. 이때 관통균열의 발생시점은 Chord 내부로 액상 침투액이 흘러나오는 순간으로 정의하였다. 표면균열 길이가 약 150mm가 되면 관통균열이 발생됨을 알 수 있다.

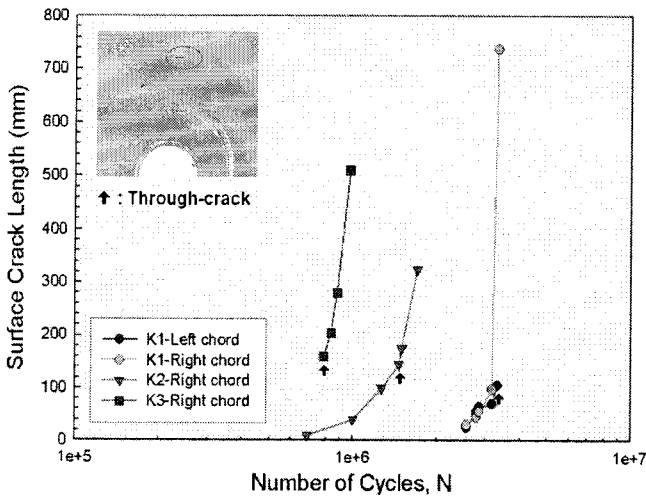


Fig. 7 cycle 수에 따른 균열 성장

3.3 Hot Spot Stress

Tubular Joint의 ΔS_{hs} -N 선도를 구하는데 필요한 Hot Spot Stress란 용접부 형상 등 국부적인 형상은 고려하지 않고, Joint의 형상과 하중상태만 고려한 응력을 의미한다. Hot Spot Stress를 구하는 방법으로는 Weld Toe 인접지역에서 Weld Toe까지 Strain gage 또는 유한 요소 해석으로 구한 응력을 외삽해서 구하거나(Zhao et al., 2000), 기존의 Parametric Equation을 사용해서 구한다. Tubular Joint의 응력집중계수(SCF)를 구하는데 사용되는 기존의 Parametric Equation에서는 Balanced in-plane Bending에 대해서 정의를 하지 못하고 있기 때문에, 본 연구에서는 Strain gage 및 유한 요소 해석으로 구한 응력을 이용해서 Hot Spot Stress를 구하였다.

다. 이때 계산에 사용된 응력은 AWS와 API에서 사용하는 Weld Toe에 수직인 공칭응력이다(Wingerde et al., 1992).

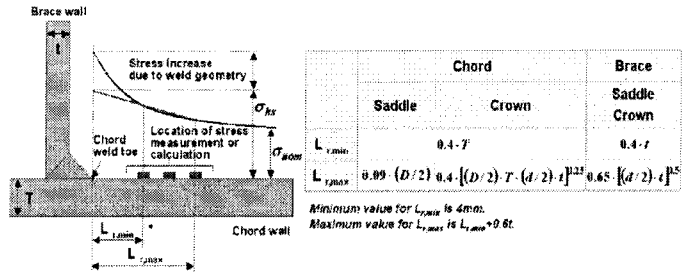


Fig. 8 Definition of hot spot stress

Fig. 9는 Strain Gage 계측 및 유한 요소 해석으로 구한 Hot Spot Stress를 나타낸다. 붉은색의 작은 Symbol은 Weld Toe 근방에서 Strain Gage로부터 계측한 값이다. 3개의 Strain Gage 계측 값으로부터 최소자승법을 이용해서 Hot Spot Stress를 구하였다. 한편 초록색 선은 유한 요소 해석으로 구한 값으로, Fig. 8에서 정의된 $L_{r,min}$ 과 $L_{r,max}$ 로부터 외삽하여 Hot Spot Stress를 구하였다.

Table 6에 K-Joint의 응력 집중 계수를 정리하였다. 여기서 calculated와 measured는 각각 유한 요소 해석과 Strain Gage 계측 값으로부터 구한 값을 의미한다. Balanced in-plane Bending 하중을 받는 K-Joint의 응력 집중 계수는 1.87임을 알 수 있다.

Table 6 Stress Concentration Factor

Specimen	Hot Spot Stress(MPa)		Calculated Nominal Stress (MPa)	S.C.F			
	Calculated	Measured		Calculated	Measured		
		Left	Right		Left	Right	
K 1	130.2	142.5	146.9	71.4	1.82	1.99	2.05
K 2	148.8	152.5	153.8	81.6	1.82	1.87	1.88
K 3	167.4	161.9	164.2	95.6	1.82	1.69	1.72

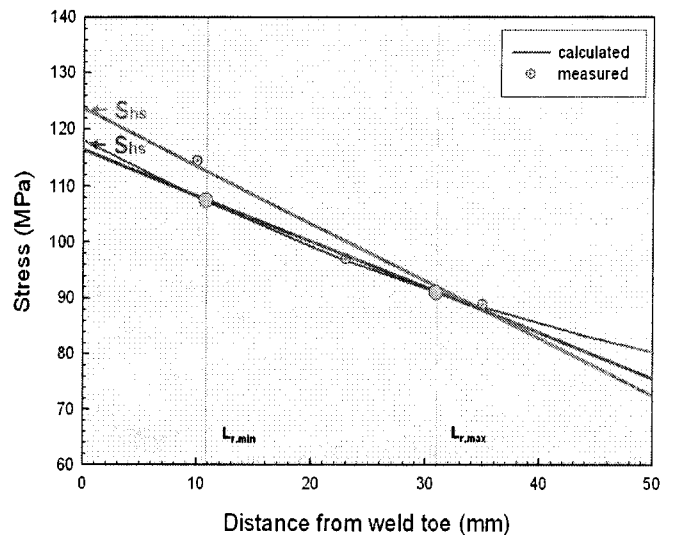


Fig. 9 Hot Spot Stress

Table 7 Fatigue results

Specimen	Hot Spot Stress range (MPa)			Fatigue life cycles			
	Calculated	Measured		N3 ¹⁾		N4 ²⁾	
		Left	Right	Left	Right	Left	Right
K 1	△120.1	△132.4	△135.3	3,310,000	-	4,931,900 ³⁾	3,310,000
K 2	△137.3	△141.5	△144.7	1,705,800 ⁴⁾	1,464,000	-	2,181,360 ³⁾
K 3	△154.4	△150.6	△153.0	973,000 ⁴⁾	785,000	-	1,169,650 ³⁾

1) # of cycles to through-thickness cracking of fatigue damaged member (N4/N3=1.49, van Wingerde)

2) # of cycles to complete loss of static joint strength

3) calculated

4) no through-crack

3.4 피로수명

Table 7에 피로실험결과를 요약하였다. 표에서 보듯 유한요소 해석을 통한 Hot Spot Stress와 Strain 게이지를 통해 구한 Hot Spot Stress는 거의 일치하며, 게이지로 측정된 좌,우의 값 역시 일치하게 된다. 여기서 N3는 관통균열이 발생할 때까지의 cycle 수이며, N4는 시험체가 Joint로써의 기능을 발휘하지 못할 때까지의 cycle 수이다. K1 시험체의 경우 3,310,000 cycles 에서 왼쪽 chord 부의 관통(N3)이 확인된 시점에 오른쪽 chord 부는 이미 관통이 상당히 진행되어 N4시점으로 판단하였다. K2, K3 시험체는 왼쪽 chord 부의 관통이 진행되어 상당한 시간이 흘렀는데도 불구하고, 오른쪽 chord 부에는 크랙이 진행되지 않아 왼쪽 chord 부의 N3시점으로만 피로강도를 평가하였다.

Fig. 10은Balanced in-plane Bending 하중을 받는 K Joint의 ΔShs-N4 선도이다. 원형 symbol은 관통 크랙이 발생한 순간(N3)을 통한 계산값이고, 삼각형 symbol은 계측한 값이다. 모든 값들이 IIW, DnV RP-C203, API RP 2A-WSD의 ΔShs-N 선도를 만족하고 있다. 따라서 API 2W Gr.60 강재의 피로성능은 IIW, DnV RP-C203, API RP 2A-WSD의 ΔShs-N 선도 대비 충분히 안정적인 것을 알 수 있다.

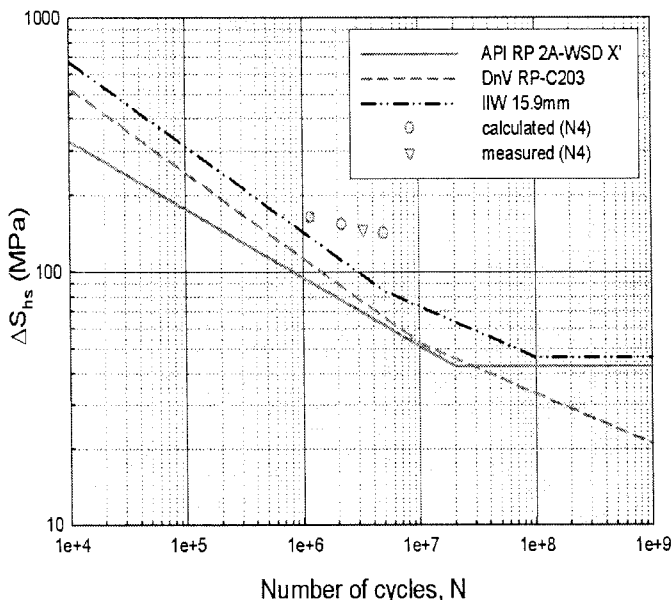


Fig. 10 ΔShs-N4 curve

4. 결 론

- 1) Balanced in-plane Bending 하중을 받는 K-Joint의 균열은 최대 인장응력을 받는 chord heel에서 시작된다.
- 2) Balanced in-plane Bending 하중을 받는 K-Joint의 응력 집중 계수는 1.87이다.
- 3) API 2W Gr.60 강재의 피로성능은 IIW, DnV RP-C203, API RP 2A-WSD의 ΔShs-N 선도를 충분히 만족한다.
- 4) 개발된 API 2W Gr.60 강재는 해양 강재로서 충분한 피로 성능을 갖는다.

참 고 문 헌

Agerskov, H., Pertersen, R.I. and Martinez, L.L.(1998). "An Investigation on Fatigue in High-Strength Steel Offshore Structures", *Welding in the World*, pp 328-342.

Amiot, P., Radenkovic, D., Sanz, G. and Willm, P.(1982). "Life Prediction for Tubular Joints in Offshore Structures", 4th International Symposium of Japan Welding Society, Nov., Osaka, pp 339-344.

Dover, W.D. and Dharmavasan, S.(1982) "Fatigue Fracture Mechanics Analysis of T and Y Joints", OTC (Offshore Technology Conference) 4404, pp 315-326.

Guanghai, W. and Bozhen, C.(1992). "Fatigue Behaviour of Tubular Joints Made of China-Made Platform Steel", *China Ocean Engineering*, Vol 6, No 1, pp 103-110.

Kuang, J.G., Potvin, A.B. and Leick, R.D.(1975). "Stress Concentration in Tubular Joints", OTC(Offshore Technology)2205, pp.593-612.

Matsumoto, S., Narumoto, A., Shiga, C. and Ueda, S.(1986). "Fatigue Properties of 50-kgf/mm² High-Strength Hull Structural Steels Manufactured by Thermomechanical Control Process", *Kawasaki Steel Technical Report*, No 13, pp 83-96.

- Lourenssen, A.A. and Dijkstra, O.D.(1982). "Fatigue Tests on Large Post Weld Heat Treated and As Welded Tubular T-Joints", Offshore Technology Conference, pp 327-334.
- Sonsino, C.M. and Umbach, R.(1996). "Hybrid Design Concept Using High-Strength Cast Steel Inserts for Tubular Joints of Offshore Structures", Fatigue, Vol 2, pp 1225-1230.
- Udomworarat, P., Miki, C., Ichikawa, 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 9-23.
- Wingerde, N.F., Puthli, R.S., Wardenier, J., Dutta, D., and Packer, J.A.(1992). "Design Recommendations and Commentary Regarding the Fatigue Behaviour of Hollow Section Joints", Proceedings of the 2nd International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, USA, 14-19, pp 288-295.
- Wylde, J.G.(1983). "Fatigue Tests on Welded Tubular T-Joints with Equal Brace and Chord Diameters", OTC(Offshore Technology Conference) 4527, pp 133-142.
- Zhao, X.L., Herion, S., Packer, J.A., Puthli, R.S., Sedlack, G., Wardenier, J., Weynand, K., Wingerde, A.M. van and Yeomans, N.F.(2000). "Design Guide for Circular and Hollow section Welded Joints under Fatigue Loading", CIDET, TV-Verlag GmbH