

대형 Tubular K-Joint의 피로수명에 관한 연구

임성우* · 장인화*

*포항산업과학연구원

A Study on the Fatigue Life of Large-Scale Tubular K-joints

SUNG-WOO IM* AND IN-HWA CHANG*

*Research Industrial Science and Technology, Gyunggi, Korea

KEY WORDS: Fatigue life 피로수명, Weld improvement 용접부 개선, Toe grinding 토어 그라인딩, Weld profiling 웰드 프로파일링, Chord wall thickness 코드 두께, API 2W Gr.50&60 steel plate API 2W Gr.50&60 후판

ABSTRACT: Large-scale tests of welded tubular K-joint under balanced in-plane bending braces were carried out to observe the fatigue behavior of the API 2W Gr.60 steel plate produced by POSCO. Toe grinding and weld profiling were used to improve the fatigue life of a tubular K-joint. The effects of the steel grade and chord wall thickness on the fatigue life were also investigated. The present results were compared with the UK DEn design curve.

1. 서 론

해양구조물은 특성상 파랑하중 등을 견디기 위해서는 피로 특성이 매우 중요하다. 해양구조물의 피로균열은 응력 집중이 높은 용접부에서 종종 발생된다. 해양구조물의 피로성능을 향상시키기 위해서 부재 단면의 크기를 키우거나 또는 피로성능이 우수한 상재로 설계해야 한다. 그러나 이미 제작된 해양구조물에서는 기술적 측면에서나 시간적 측면에서 상기 방법을 적용할 수 없는 경우가 발생한다. 이러한 경우에는 용접 지단부에 Toe grinding, Hammer peening, Weld profiling 등을 적용함으로써 피로성능을 향상시킬 수 있다(Kirhope et al., 1999).

Tubular joint는 모든 해양구조물의 기본이 되는 구조물이다. Tubular joint에 대해서는 일본 Mill사의 경우 1970년대부터 1980년대까지 많은 연구가 진행되어 왔다(Kato, 1974; Takizawa et al., 1979; Ohta et al., 1987). 실구조물 크기의 Tubular joint의 피로실험에 관한 연구는 최근까지 이뤄지고 있다(Amiot et al., 1982). 특히 Tubular joint에서도 피로수명을 향상시키기 위해서 응력 집중부에 고강도 Cast iron을 삽입하는 등 다양한 연구가 진행되고 있다(Sonsino and Umbach, 2003). 최근 Tubular joint의 경우에도 Burr grinding, Hammer peening, Weld profiling에 대한 검토가 API에서 이뤄지고 있다(Marshall et al., 2005). 한편 강재에 대한 연구도 진행되고 있다. 고강도 강재 적용을 위한 810MPa급 Weldox 700에 관한 연구(Agerskov et al., 1998)와 자국내 해양산업육성을 위한

중국산 E36-Z35에 대한 연구(Guanghai and Bozhen, 1992)가 대표적이다. POSCO에서도 API 2W GR50 강재로 제작된 대형 Tubular joint 구조에 대한 피로성능에 관한 연구가 진행되었다(임성우 등, 2005).

본 연구에서는 API 2W GR60 강재로 실구조물 크기의 K형식의 Tubular joint를 제작하여 Balanced in-plane bending 하에서의 피로실험을 수행하였다. Weld improvement 효과를 보기 위해서 As-welded한 것과 용접 지단부를 Toe-grinding과 Weld-profiling한 것의 피로수명을 비교하였다. 또한 강재의 영향을 검토하기 위해서 API 2W GR60 강재와 API 2W GR50 강재로 제작된 Tubular joint의 As-welded 상태에서의 피로수명을 비교하였다. 한편 As-welded 상태에서 API 2W GR60 강재의 Chord wall thickness의 효과를 검토하였다. 피로실험 결과는 Hot spot 응력을 바탕으로 UK DEn SN 선도를 중심으로 정리하였다. 이상의 실험을 통해서 POSCO에서 최근 개발한 API 2W GR60 강재가 해양구조물에 적용시 충분한 피로강도를 보유하고 있는지 구조물 차원에서 검증하고자 하였다. 또한 Tubular joint에서 Weld improvement가 피로수명에 미치는 효과에 대한 실험적 연구가 매우 부족하기 때문에 이에 대한 실험적 데이터를 확보하고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 시험체 제작

실험에 사용된 Tubular K joint 시험체는 DnV RP-C203과 API RP 2W-WSD에 의거해서 980kN dynamic actuator 용량을 감안하여 Fig. 1과 같이 제작하였다. 이때 강관 제작에 사용된 강재는 420MPa급의 API 2W GR60이다. 강관은 국내 후육

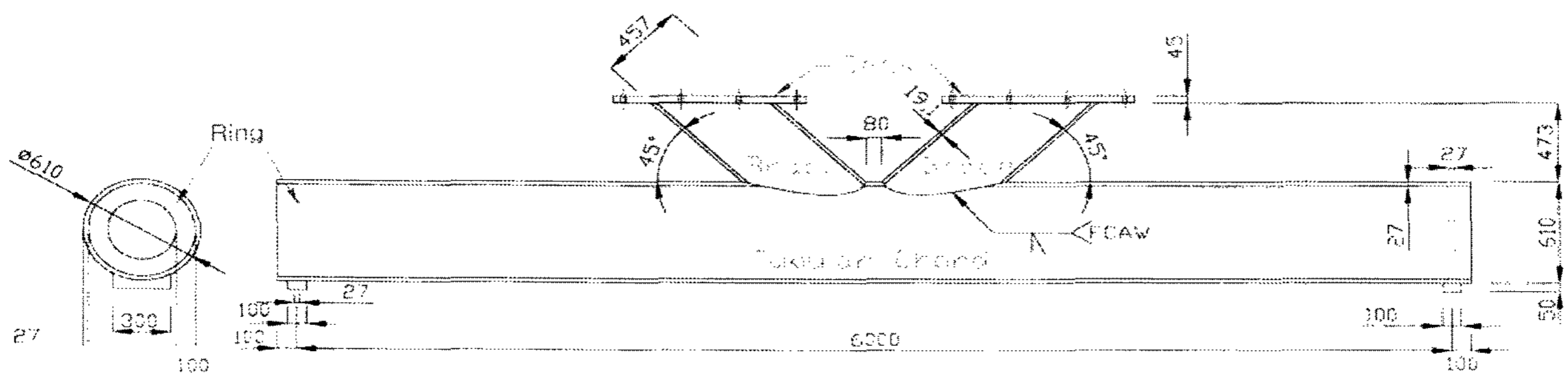


Fig. 1 Test specimen

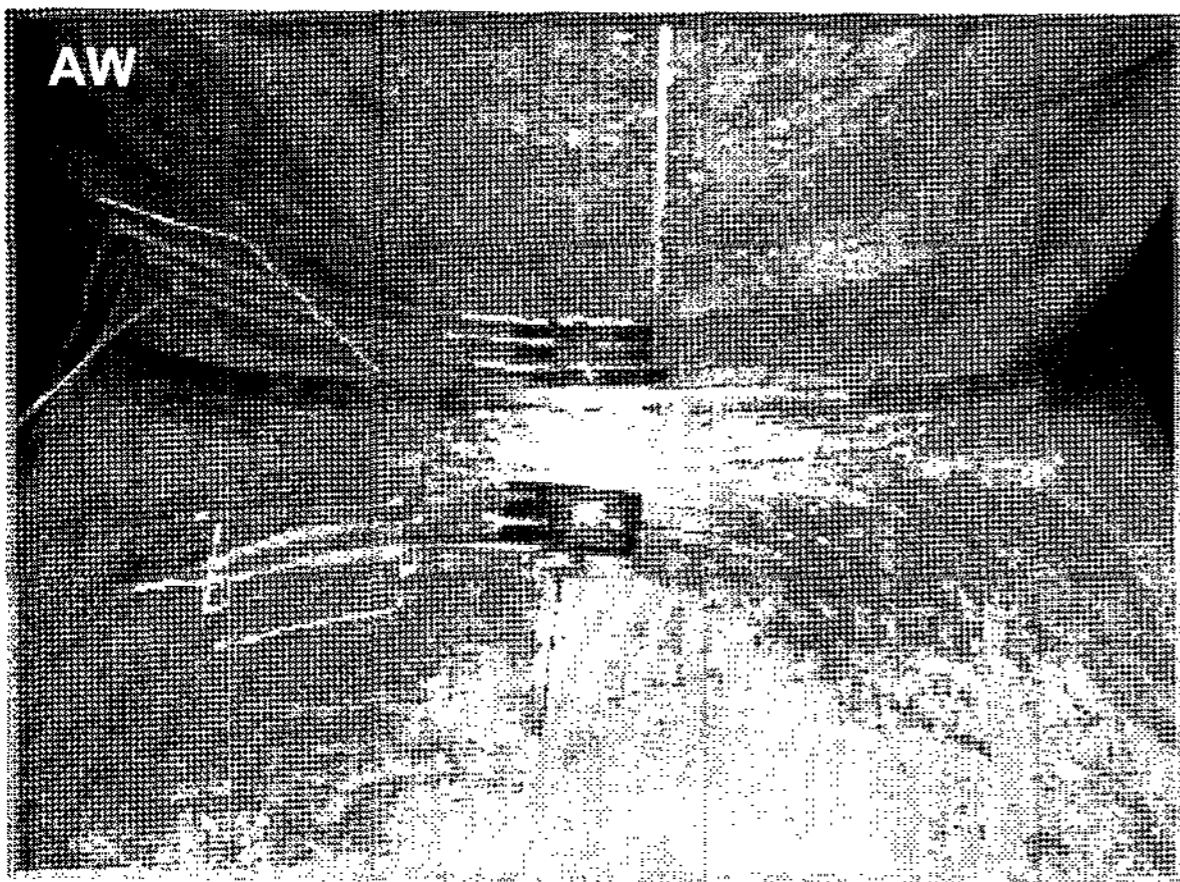


Fig. 2 As-welded specimen

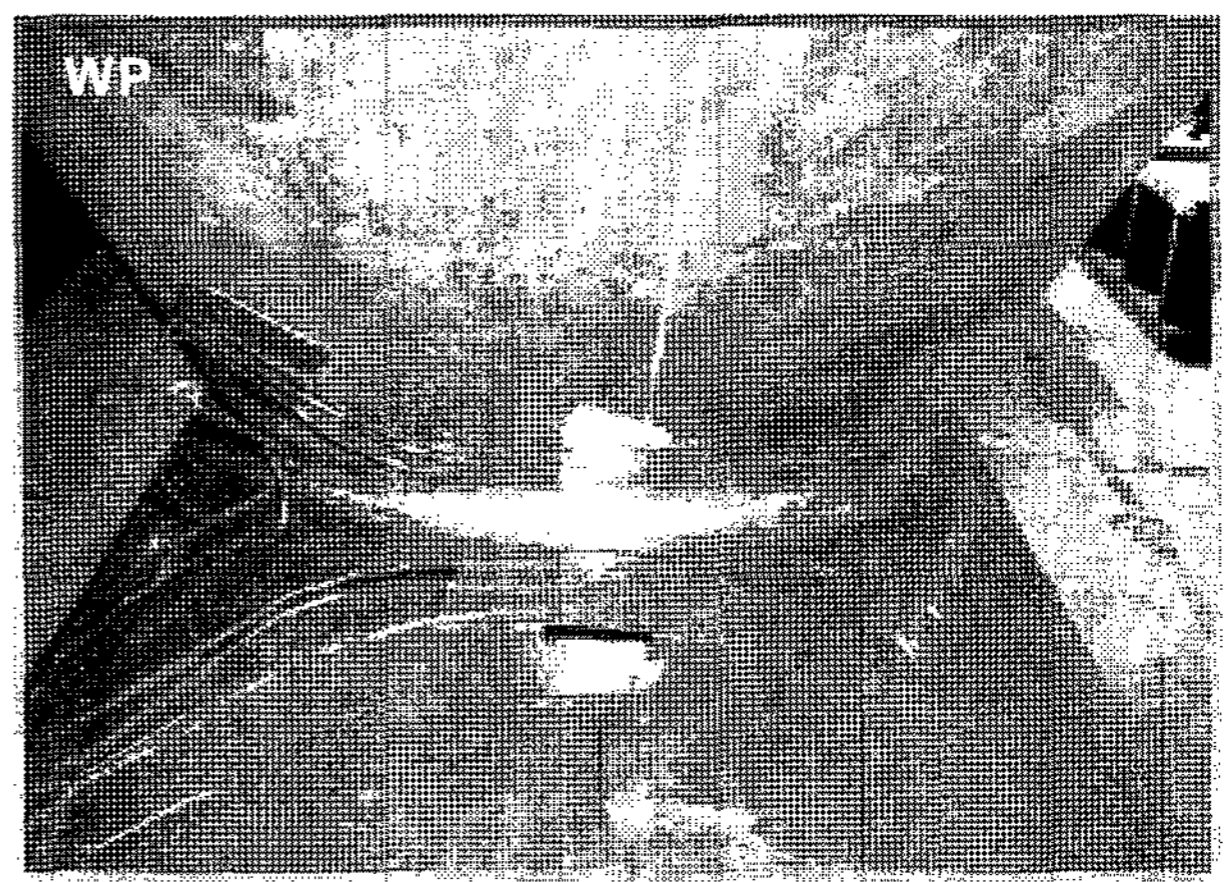


Fig. 4 Weld profiled specimen

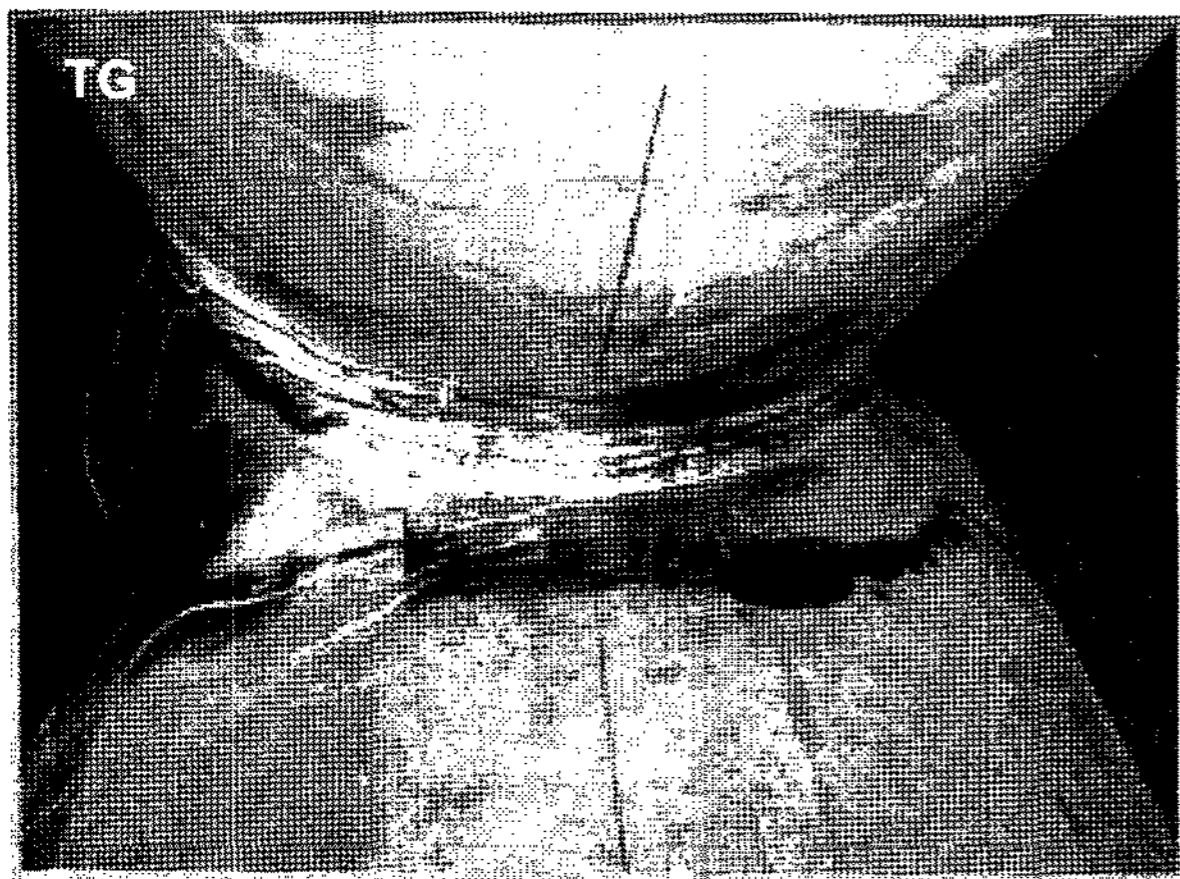


Fig. 3 Toe grind specimen

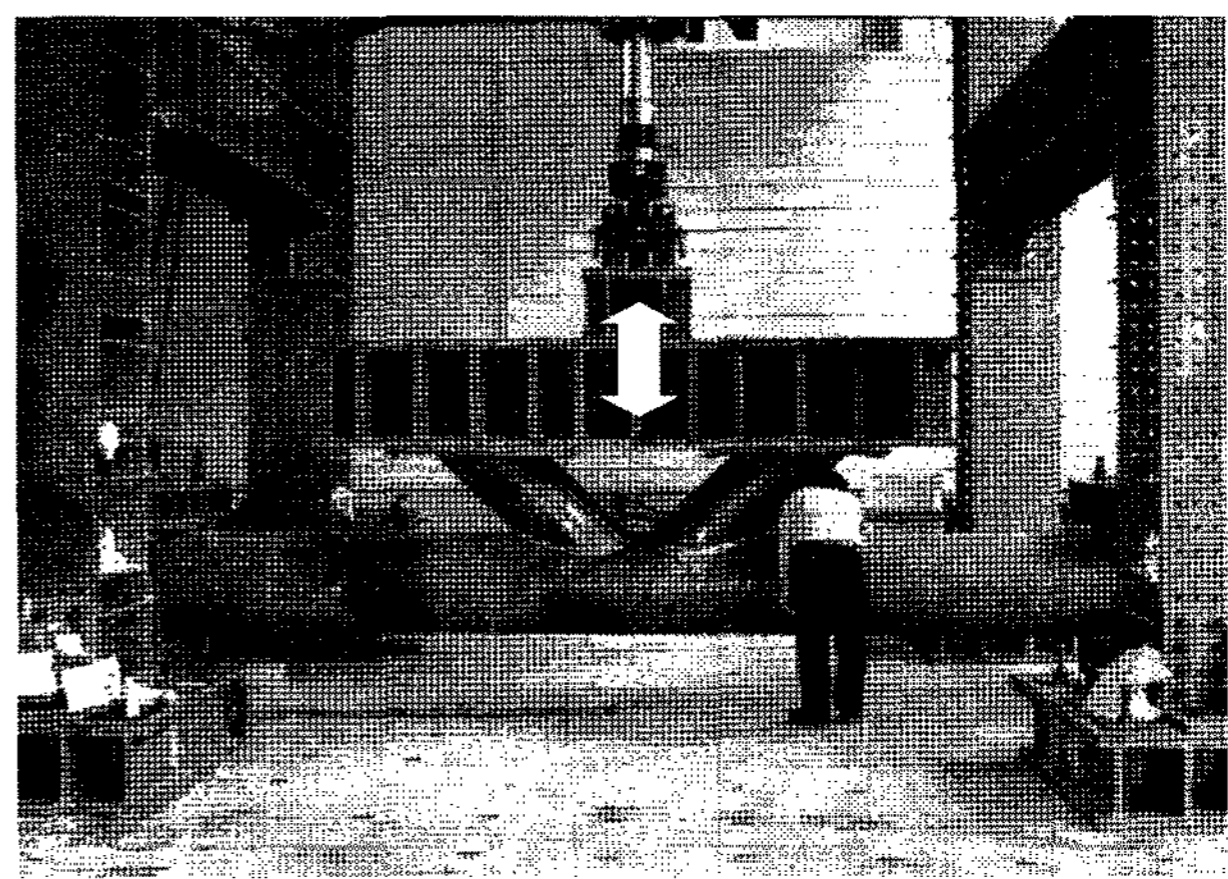


Fig. 5 Test setup

강관사인 삼강특수공업에서 Forming sword를 이용한 Press bending으로 제관하였다. Chord와 용접되는 Brace의 단부는 Computer guided cutting technology를 이용하여 Chord 외형에 맞게 절단하였다. Chord와 Brace 사이는 대우조선해양에서 실구조물 제작조건으로 용접하였다.

강관의 Seam은 AWS F7A8*EH14 용접재료로 SA 용접 하였으며, Chord와 Brace는 AWS E81T1-K2 용접재료로 FCA 용접 하였다.

FCA 용접된 지단부를 Fig. 2, 3, 4에 나타내었다. 여기서

AW는 As-welded, TG는 Toe grinding, WP는 Weld profiling을 의미한다.

2.2 실험장치

Fig. 5는 시험체 Setup 상황을 나타낸다. Brace 양쪽 상단을 Stiff한 girder로 연결한 다음 대형 프레임에 연결된 980kN dynamic actuator를 그 위에 설치하였다. 시험체 양단은 볼트로 Clamping하여 Chord 길이 방향으로만 자유롭게 움직일 수 있도록 하였다. 이때 양단부의 볼트는 유압으로 체결하여 시험

도중에 풀리지 않도록 하였다. Fig. 5에서 화살표는 하중이 작용하는 방향을 의미한다.

2.3 실험조건

As-welded, Toe grinding, Weld profiling한 각각의 시험체 1개씩을 Fig. 5의 화살표 방향으로 인장/인장 피로하중을 가력하여 In-plane bending 조건이 작용하도록 피로실험을 하였다. 이때 최대하중은 784kN, 최소하중은 78.4kN으로 하였다. 주파수는 1.5Hz에서 2.0Hz 사이로 하였다. 피로수명에 미치는 잔류응력의 영향을 배제하기 위해서 국부적으로 압축력을 가하거나, 가력 하중의 반대 방향으로 하중을 가하거나, 또는 점차적으로 하중비를 높인다(BS 7448 Part2, 1997). 본 연구에서는 피로실험에 앞서 가력 방향의 반대 방향으로 784kN으로 압축하여 시험체에 잔류해 있는 잔류응력의 영향을 제거하였다. 시험 종료 시점은 Chord에 관통균열이 발생하는 시점으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 유한요소해석

피로실험을 수행하기 전에 MSC의 Patran을 이용하여 Tubular joint 시험체를 Shell 요소로 모델링하여 피로균열 발생위치를 예측하였다. Fig. 6에 Nastran으로 해석한 결과를 나타내었다. Chord heel 부위의 Chord 표면(Fig. 6의 Top surface)에 응력이 집중됨을 알 수 있다. 유한요소 해석 결과를 이용하여 피로실험 시 응력 집중부위를 집중적으로 관찰하였다.

3.2 용접부 후처리의 영향

3.2.1 균열 발생

As-welded 시험체와 Toe grinding 시험체 및 Weld profiling 시험체에서 Hot spot 응력을 구하기 위해서 Fig. 2에서 Fig. 4까지 보는 것처럼 각각 Chord heel 부위에 3개의 As-

welded 시험체와 Toe grinding 시험체 및 Weld profiling 시험체에서 Hot spot 응력을 구하기 위해서 Fig. 2에서 Fig. 4까지 보는 것처럼 각각 Chord heel 부위에 3개의 Strain gage를 부착하였다. 이때 3개의 Strain gage는 Zhao et al. (2000)이 제안한 Hot spot 응력 측정위치를 근거로 해서 Weld toe로부터 10mm, 22.5mm, 35mm 떨어진 부위에 부착하였다. Fig. 7에서 Fig. 12는 반복횟수에 따른 chord heel에 부착된 Strain gage로부터 측정한 응력범위를 나타낸다. 여기서 ○는 Weld toe에서 10mm, △는 Weld toe에서 22.5mm, ▽는 Weld toe에서 35mm 떨어진 위치에 있는 Strain gage로부터 측정한 값이다.

Fig. 7과 Fig. 8은 As-welded 시험체의 좌우 Chord heel에서의 측정한 응력범위의 변화를 각각 나타낸다. 여기서 화살표는 표면균열과 내부 관통균열의 관찰시점 및 크기를 나타낸다. Chord heel에서 가장 가까이 있는 동그라미로 나타낸 초기 응력범위의 값이 좌우 대칭을 보이고 있지 않다. 또한 Fig. 7에서 보는 것처럼 좌측 Chord heel에서 측정한 응력범위의 변화가 우측 Chord heel에서 측정한 응력범위 변화와 양상이 상이하

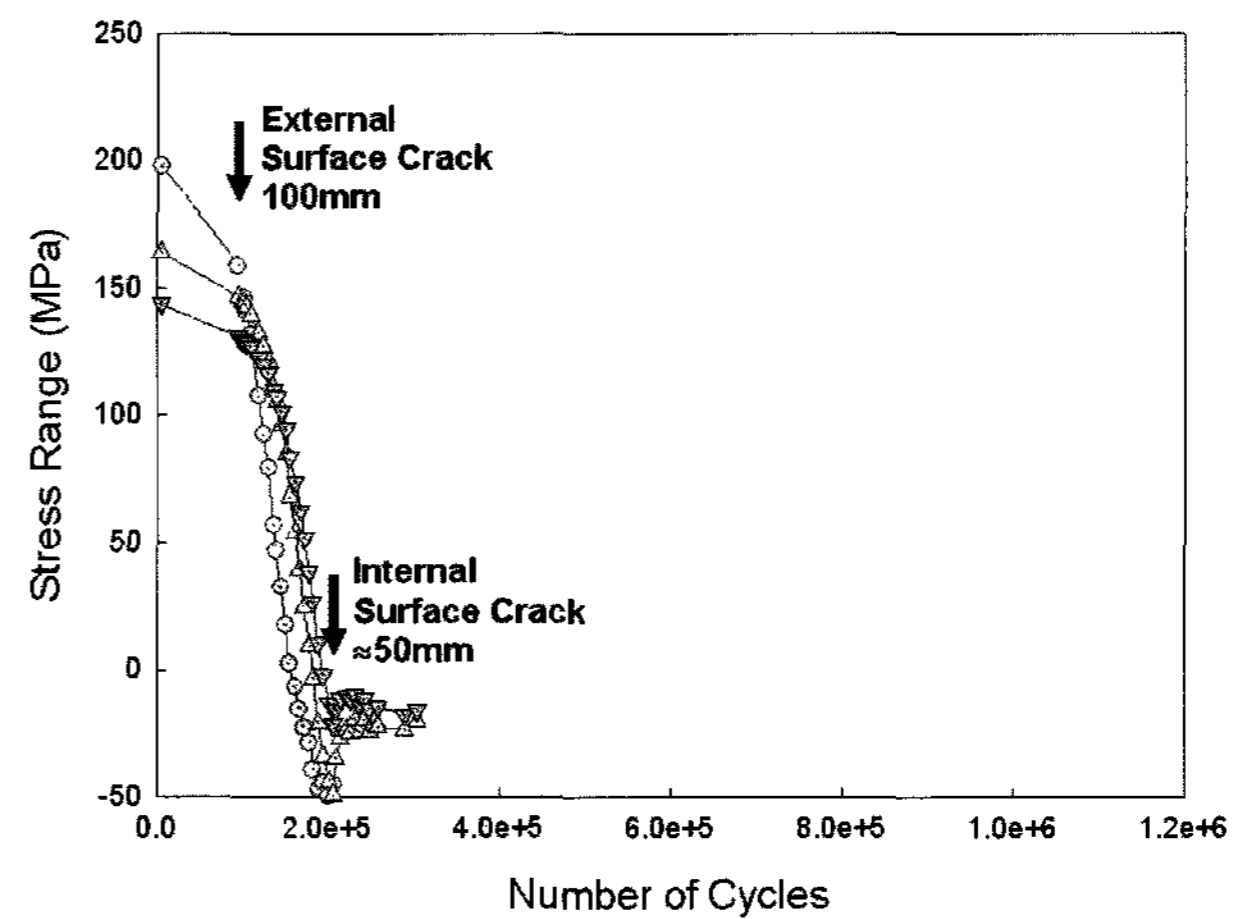


Fig. 7 Fatigue crack initiation at left chord heel of as-welded specimen

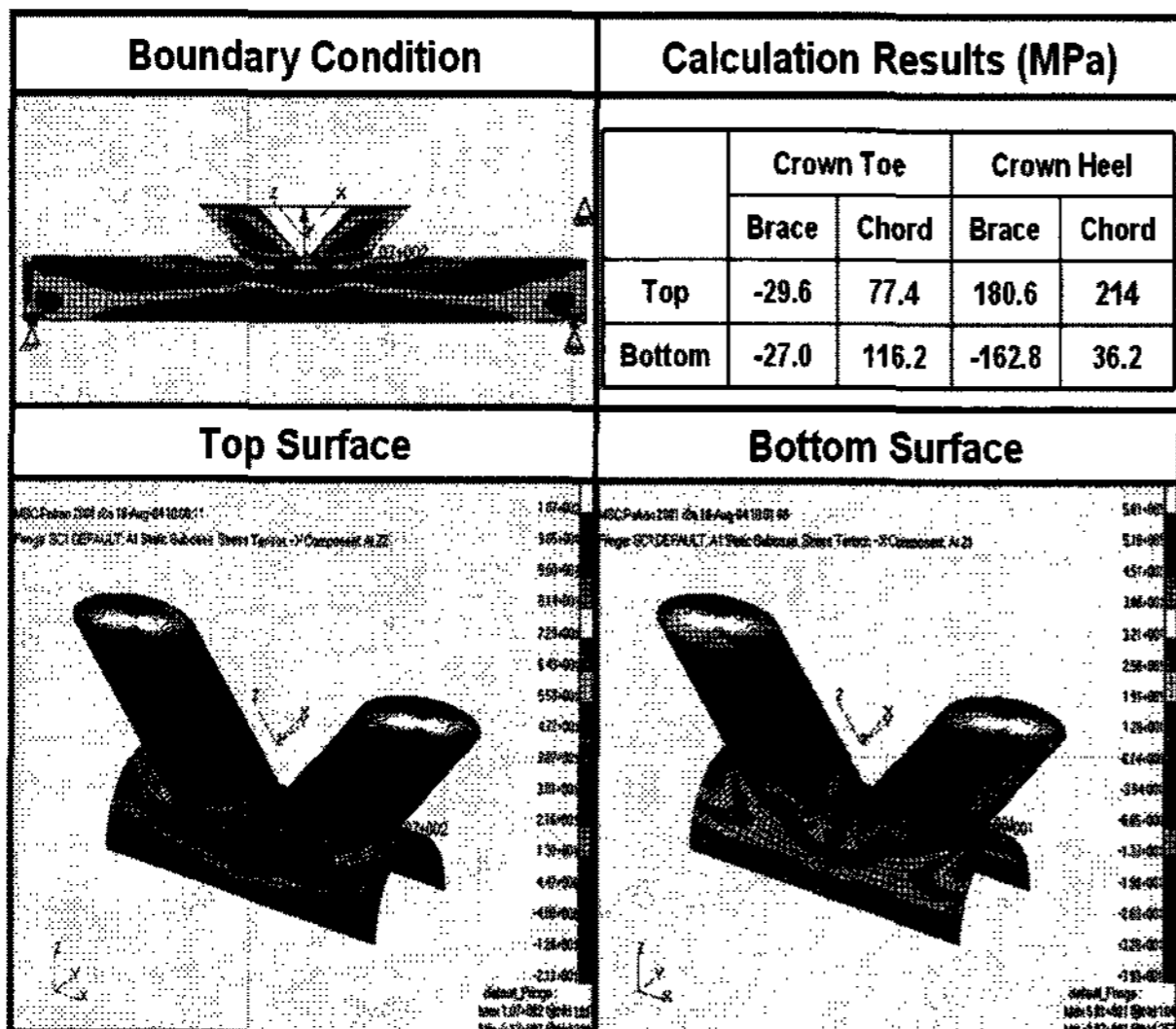


Fig. 6 Numerical test results (Concentrated load: 784kN)

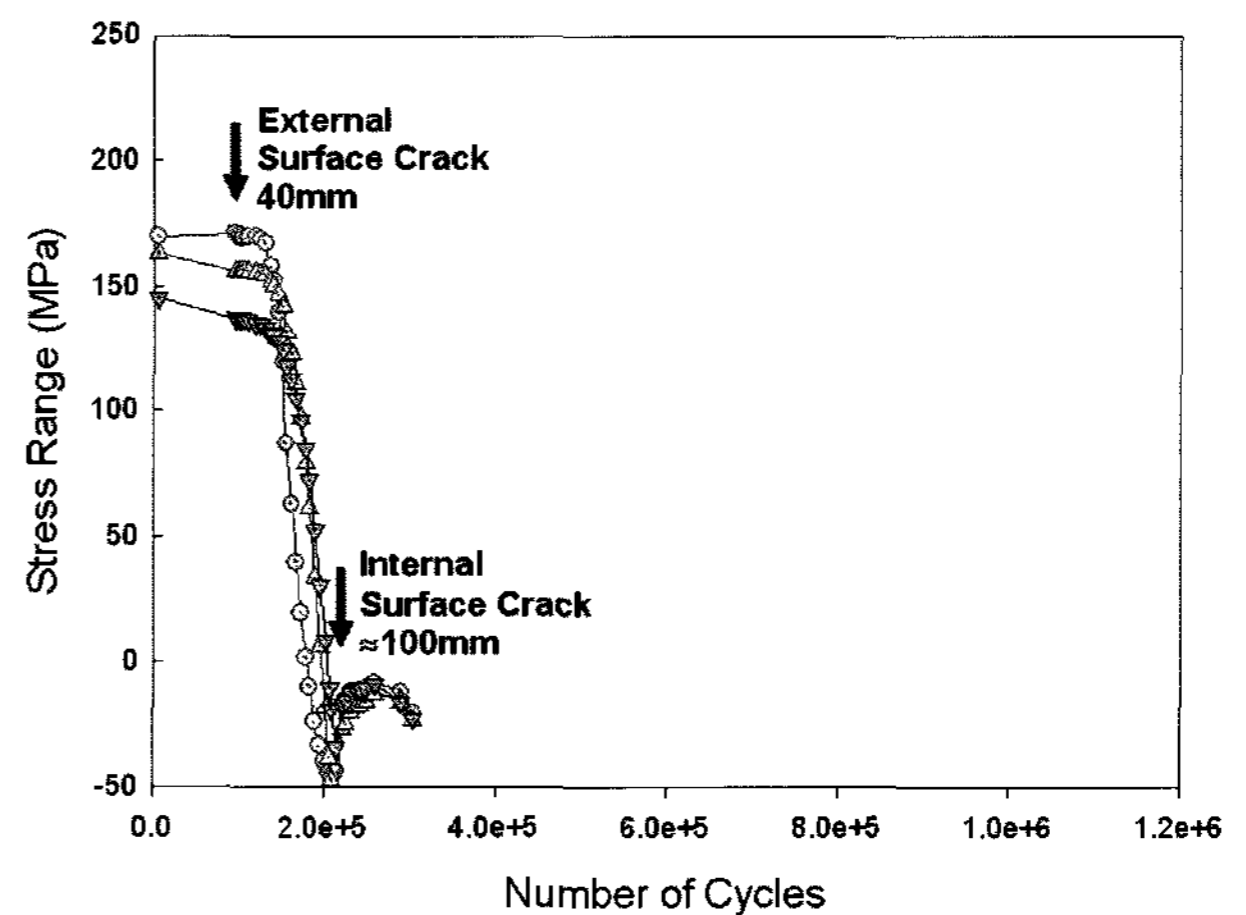


Fig. 8 Fatigue crack initiation at right chord heel of as-welded specimen

다. 일반적으로 피로균열이 발생하기 전에, Fig 8에서 보는 것처럼 일차적으로 소성변형이 발생하기 때문에 응력범위가 증가한다. 그 후 피로균열이 발생하면 응력범위가 급속히 감소한다. 표면에 발생된 피로균열이 Chord wall을 관통하면, 응력범위는 음으로 변화한다. Chord heel 좌우에서 계측된 응력범위의 크기 및 경향이 차이를 보이는 것은 양쪽 Brace의 용접상태가 서로 상이해서 발생하는 것으로 사료된다.

Fig. 9와 Fig. 10은 Toe grinding 시험체의 좌우 Chord heel에서 계측한 응력범위의 변화를 각각 나타낸다. 좌측 Chord heel에서 계측된 응력범위는 Fig. 9에서 보듯이 전형적인 피로균열 성장에 따른 응력범위의 변화를 보여준다. 피로균열이 발생하기 전에는 소성변형으로 인해서 응력범위가 증가하다가, 피로균열이 발생하면 응력범위가 급속히 감소하며, 피로균열이 Chord wall을 관통하면 응력범위는 음으로 변화하고 있다. 우측 Chord heel에서 계측된 응력범위도 피크 값에서만 차이를 보이고 있으나, 응력범위의 크기 및 균열발생 시점 등 전체적

인 경향은 좌측 Chord heel에서 계측된 응력 범위의 변화와 동일하다.

Fig. 11과 Fig. 12는 Weld profiling 시험체의 좌우 Chord heel에서 계측한 응력범위의 변화를 각각 나타낸다. 좌측 Chord heel에서 계측된 응력범위는 전형적인 피로균열 성장에 따른 응력범위의 변화를 보여주고 있으나, 우측 Chord heel에서 계측된 응력범위는 소성변형으로 인한 응력범위의 피크 값을 보이지 않고 있다.

3.2.2 균열 전파

Fig. 13은 사이클 수에 따른 표면 균열길이의 변화를 나타낸다. 화살표로 표시된 위치가 관통균열을 관측한 시점이다. 여기서 관통균열의 발생시점은 Chord 표면으로부터 액상의 침투액 시험체에서 가장 먼저 발생되었고, Weld profiling, Toe grinding 시험체 순으로 발생하였다. 동일 시험체의 경우에는 관통균열 발생시점이 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 균열이

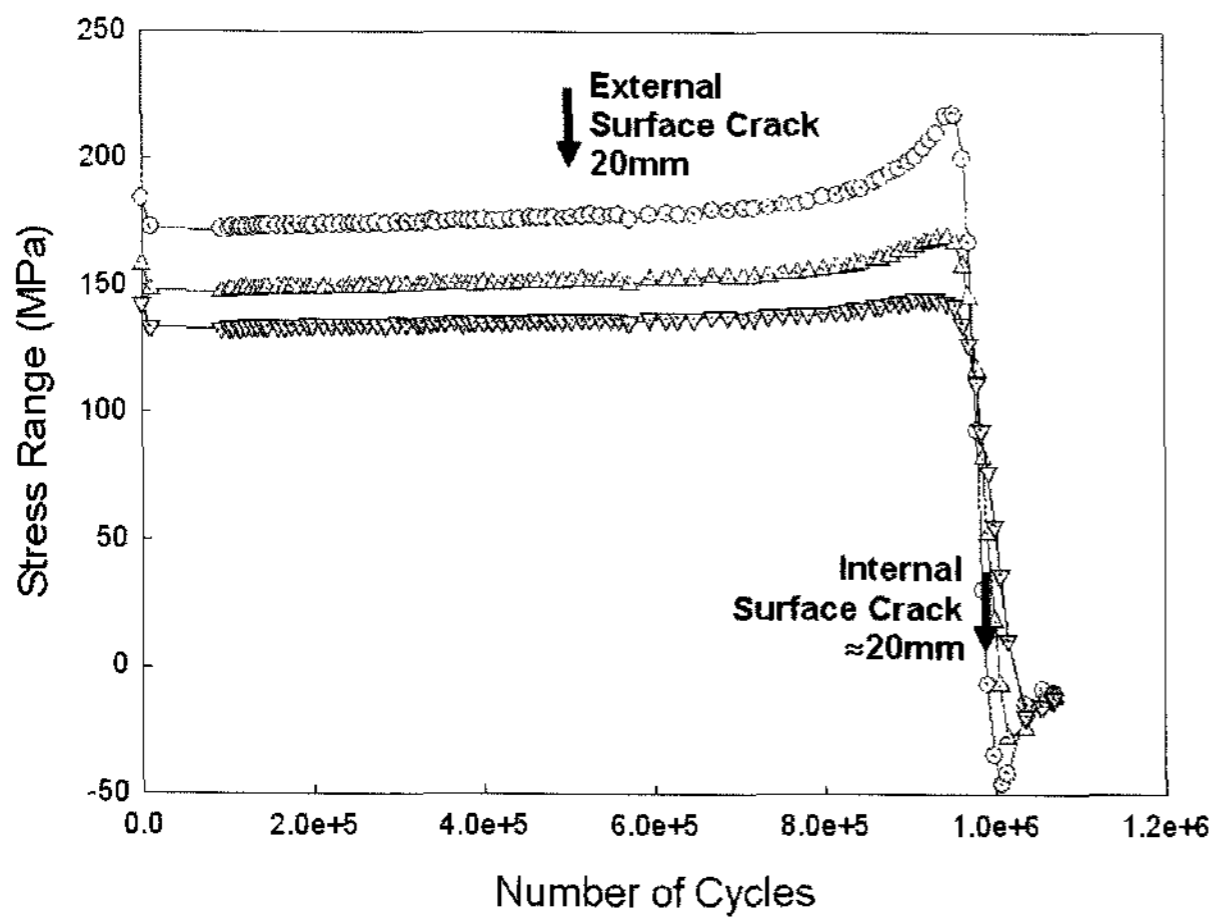


Fig. 9 Fatigue crack initiation at left chord heel of toe grind specimen

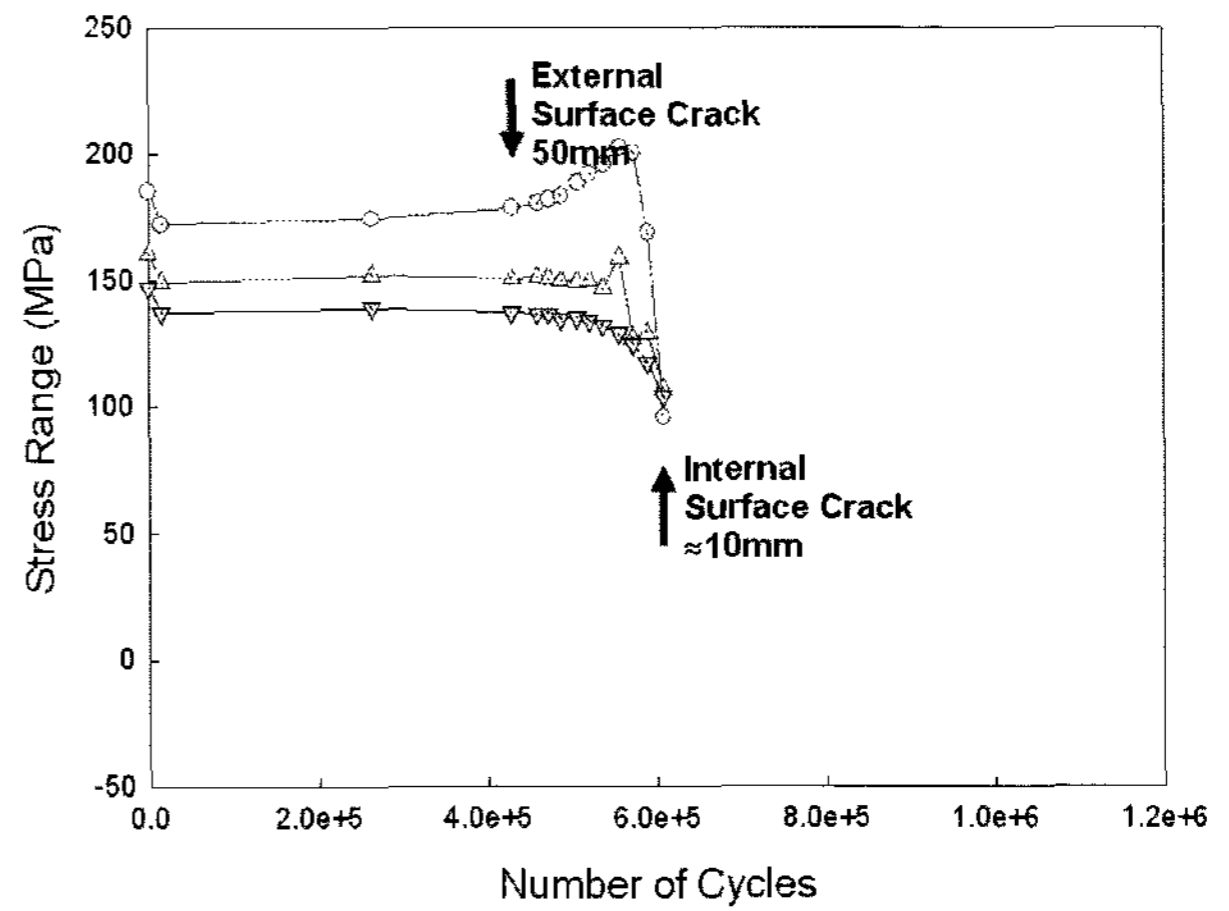


Fig. 11 Fatigue crack initiation at left chord heel of weld profiled specimen

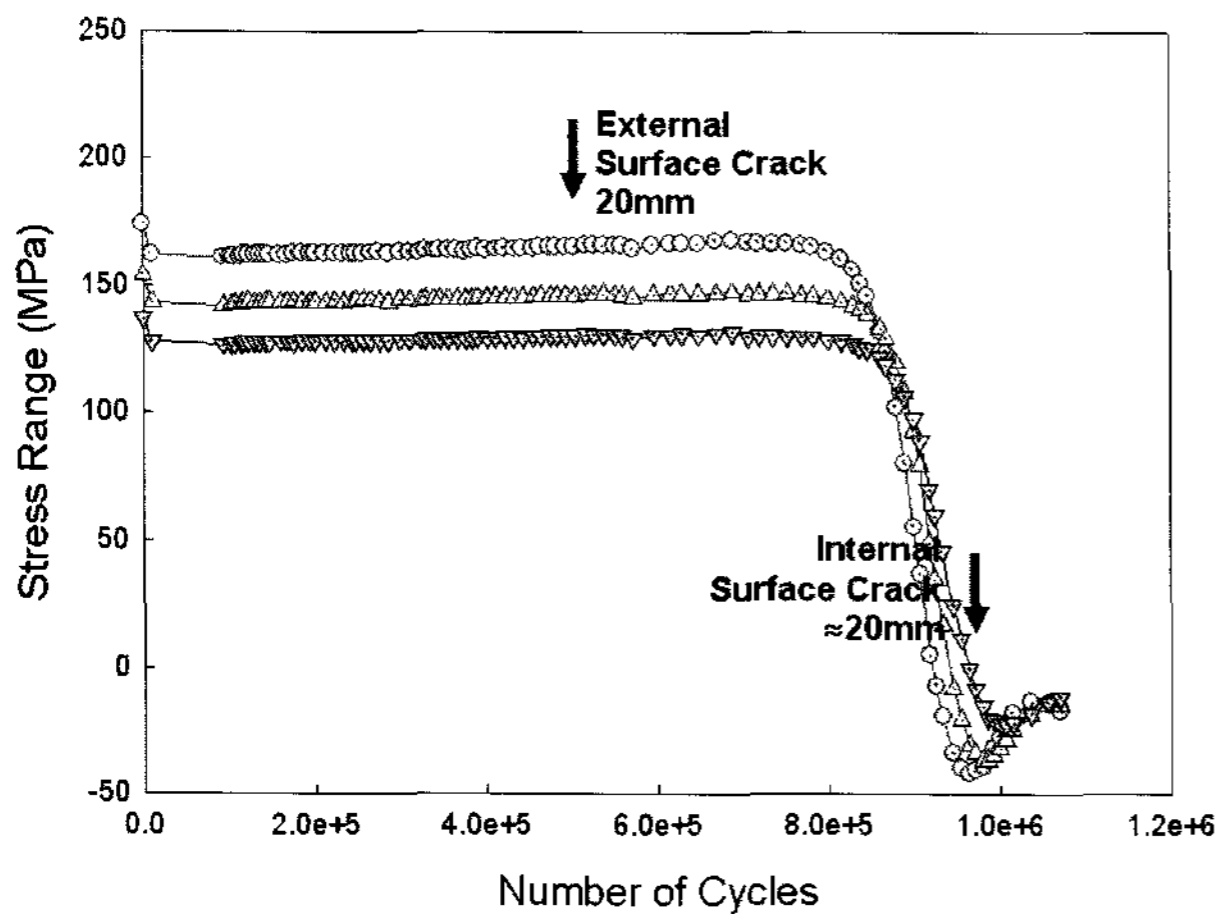


Fig. 10 Fatigue crack initiation at right chord heel of toe grind specimen

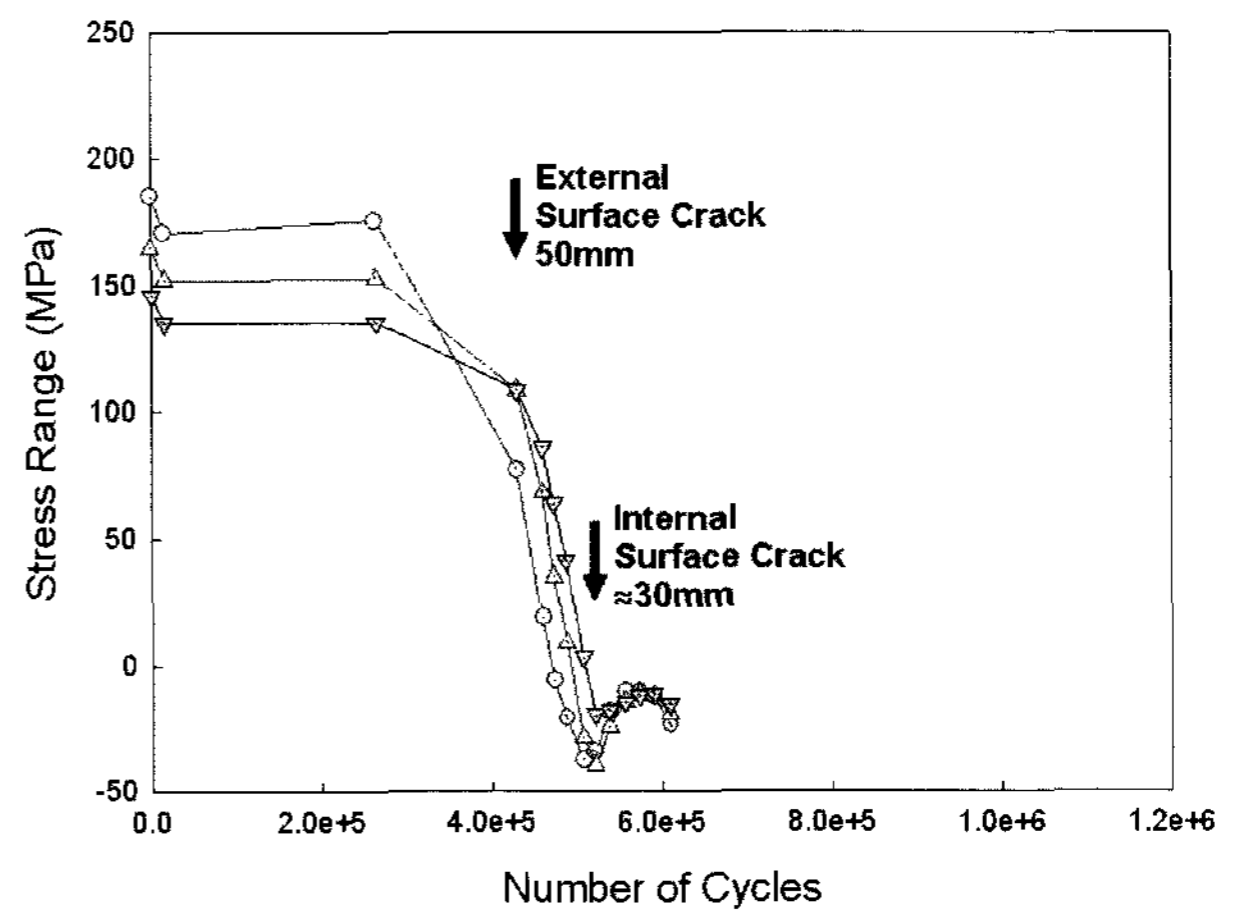


Fig. 12 Fatigue crack initiation at right chord heel of weld profiled specimen

Chord wall을 관통한 다음에는 성장속도에도 차이를 보이지 않았다. 따라서 Weld improvement는 균열 발생시점에만 영향을 미치며, 균열 성장속도에는 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

3.2.3 시험체 파단

Fig. 14는 As-welded 시험체의 피로실험 종료 후의 상태를 나타낸다. 좌측 상단은 피로균열 전과 상태를 보여주고 있다. 여기서 직선은 Chord 표면에서 피로균열이 성장한 상태를 나타내고, 점선은 Chord 내부에서 피로균열이 성장한 상태를 나타낸다. 피로균열 발생시점은 Fig. 7과 Fig. 8에서 보듯이 비슷하지만, 최종 피로균열 길이에 상당한 차이를 보이고 있다. 우측 하단은 파단면을 나타낸다. 주 균열은 Chord heel 중앙에서 발생 하였지만, 작은 균열들이 Brace 하단 용접선을 따라 발생하였음을 보여주고 있다.

Fig. 15는 Toe grinding 시험체의 피로실험 종료 후의 상태를 나타낸다. 피로균열이 Toe grinding된 홈에서 발생하고 있다. As-welded 시험체와 달리 피로균열이 Brace 하단 용접선

을 따라 여러 군데에서 비슷한 크기로 발생되어 합체되었음을 알 수 있다.

Fig. 16은 Weld profiling 시험체의 피로실험 종료 후의 상태를 나타낸다. 좌측 Chord heel에서 피로균열 성장이 매우 늦게 진행되고 있음을 보여주고 있다. 우측 Chord heel의 경우 중앙과 좌측에서 각각 성장한 피로균열이 합체되고 있음을 알 수 있다.

3.2.4 피로수명

Table 1은 각각의 시험체의 관통균열 발생시점과 관통균열 크기 및 피로실험 종료시점에서의 표면균열의 크기를 나타낸다. 참고로 구조물이 성능을 전혀 발휘하지 못할 때까지의 사이클 수인 N_4 는 Wingerde et al.(1992)의 식을 이용하여 관통균열 발생 사이클 수인 N_3 로부터 구하였다. 피로실험 종료시점이 N_4 에 미치지 못함을 알 수 있다. Table 1에서 응력범위인 219.85MPa는 Hot spot 응력범위이다. Hot spot 응력은 용접부 형상 등 국부적인 형상은 고려하지 않고, Joint의 형상과 하중 상태만 고려한 응력이다. 따라서 Hot spot 응력범위는 모든

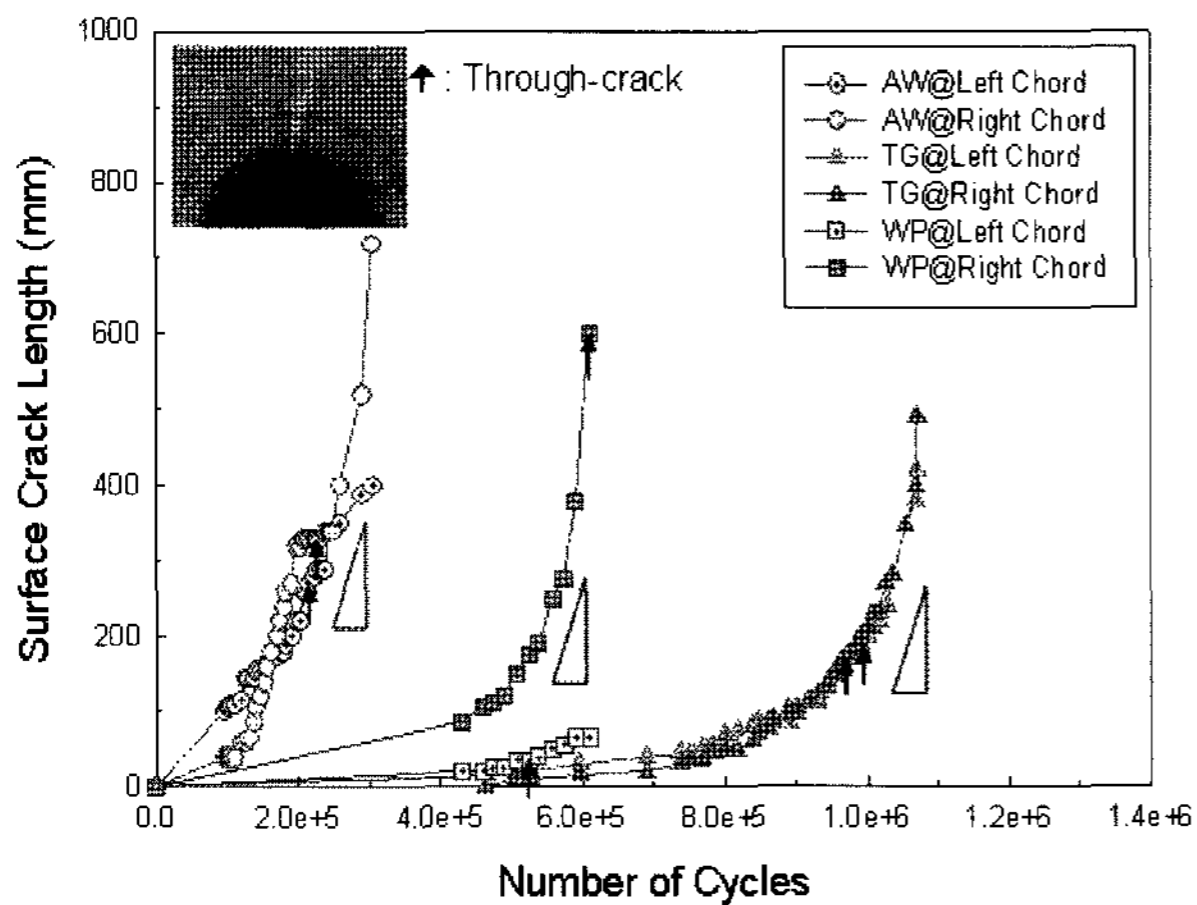


Fig. 13 Fatigue crack propagation rate

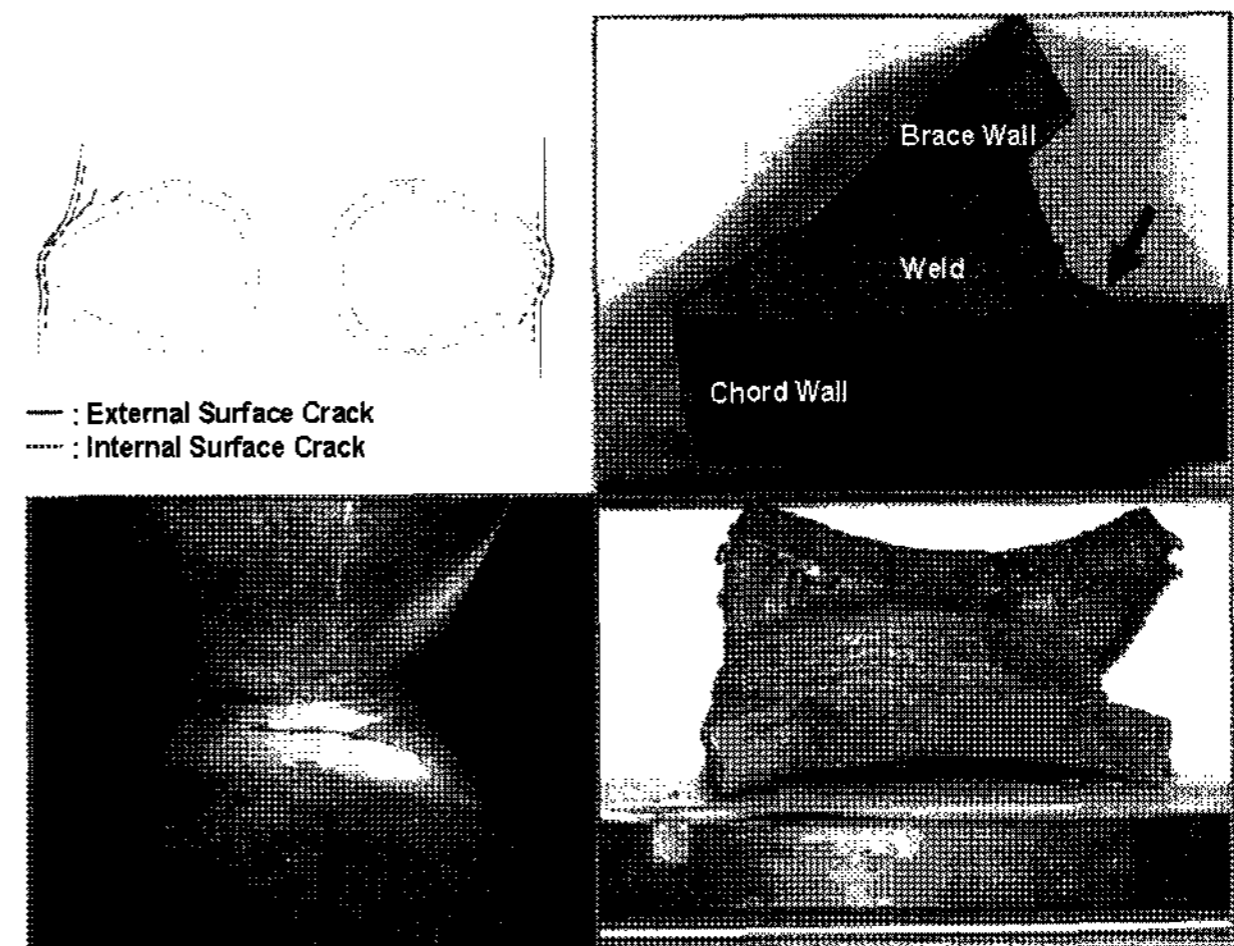


Fig. 15 Fracture appearance of toe grind specimen

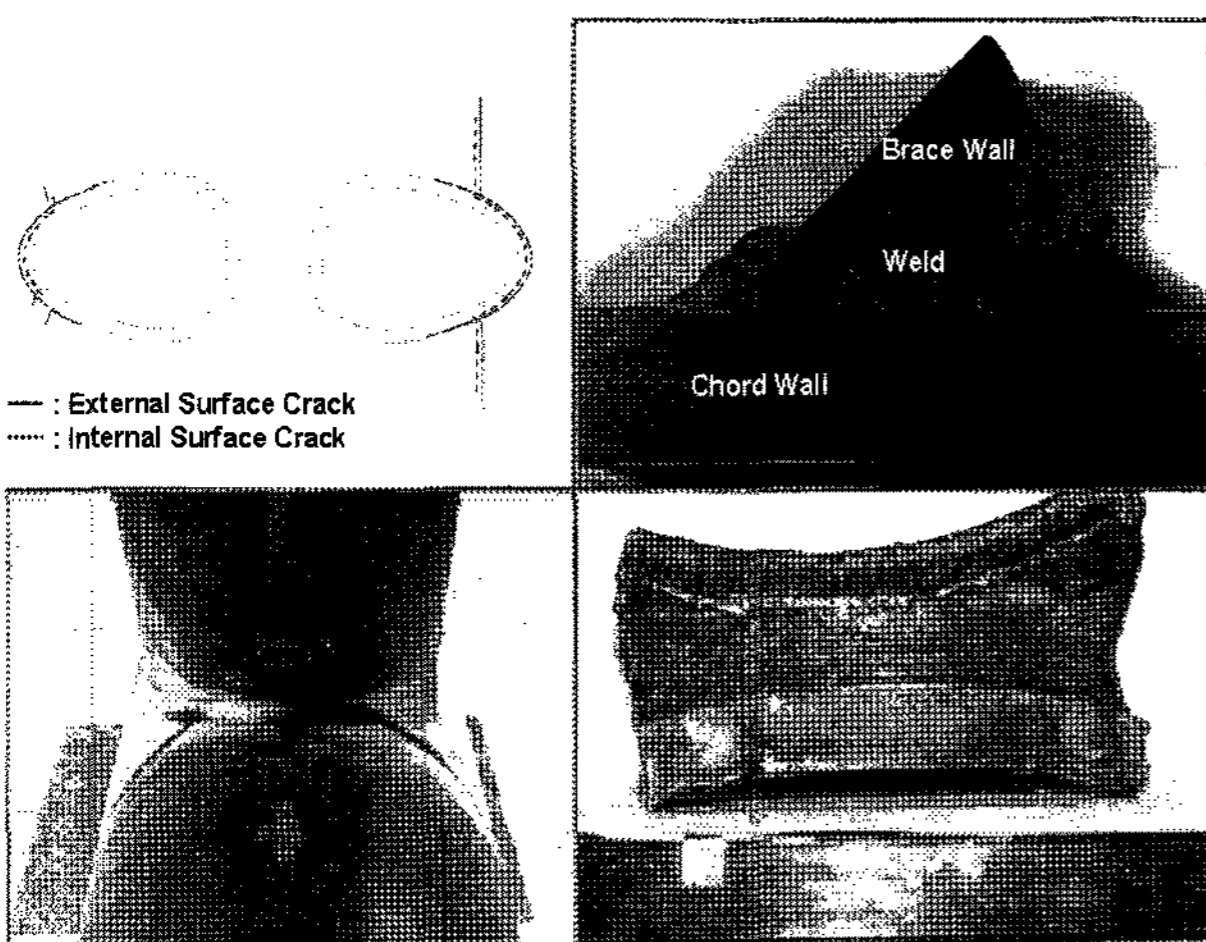


Fig. 14 Fracture appearance of as-welded specimen

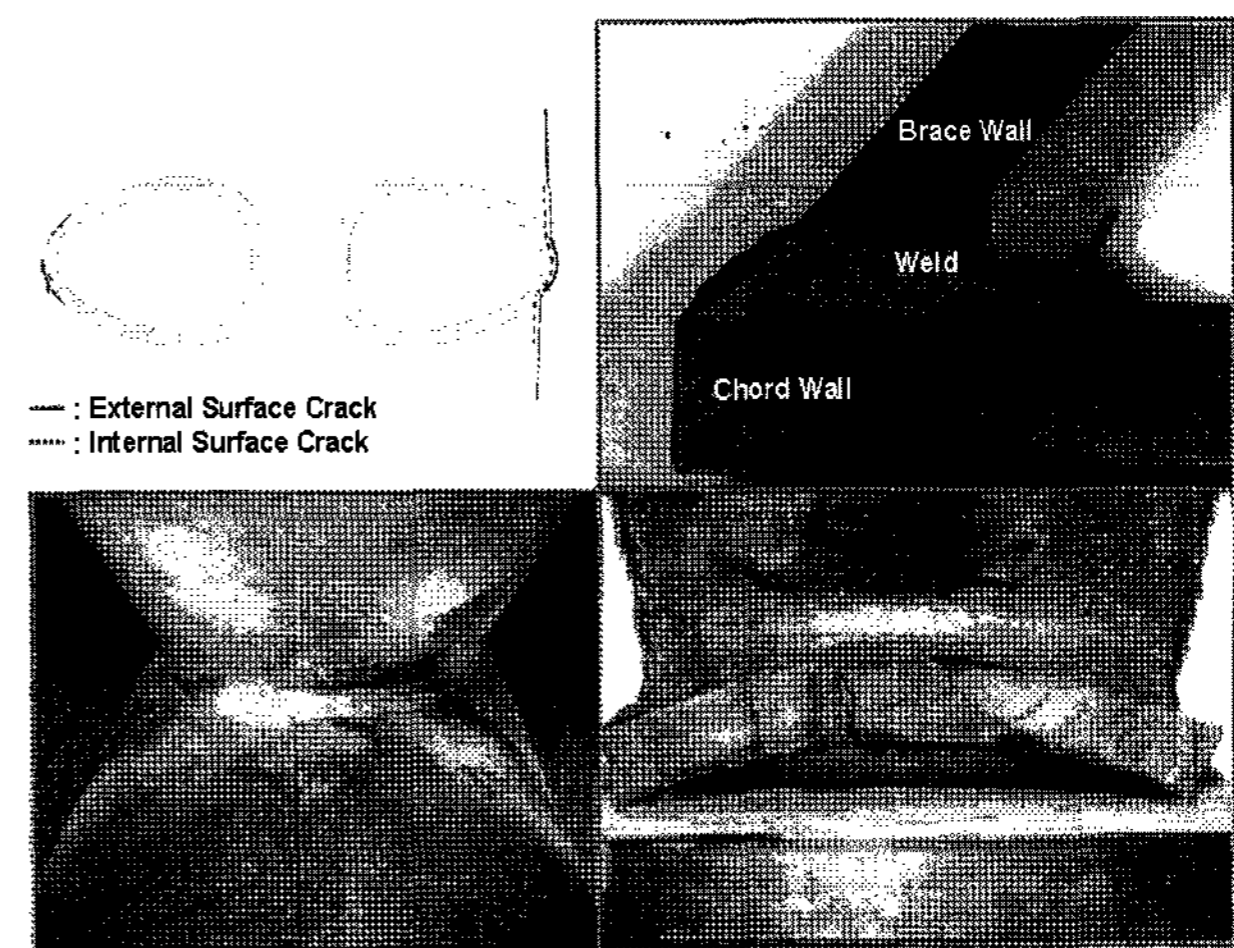


Fig. 16 Fracture appearance of weld profiled specimen

시험체에서 동일 하중범위로 피로실험을 수행하였기 때문에 Weld improvement 여부에 관계없이 동일하다고 간주하였다.

Fig. 17은 관통 발생시점에서의 피로강도와 UK DEn design curve와의 관계를 나타낸다. As-welded 시험체의 경우 97.6% Probability of survival을 갖는 Mean-2s 곡선을 만족하고 있다. Weld improvement를 할 경우에는 Mean curve를 상회한다.

3.3 강종의 영향

Fig. 18은 동일한 Tubular joint 시험체에서 강종에 따른 피로강도의 관계를 나타낸다. 여기서 API 2W GR50 강재의 실험 결과는 기존 논문(임성우 등, 2005)을 이용하였다. 동일 용접상태인 As-welded 시험체에서 강종에 무관하게 97.6% Probability of survival을 갖는 Mean-2s 곡선을 만족하고 있다.

3.4 Chord Wall 두께의 영향

Fig. 19는 Chord wall 두께와 피로강도의 관계를 나타낸다. Chord wall 두께는 27.0mm인 것과 15.9mm인 것을 비교하였다. 여기서 Chord wall 두께가 15.9mm인 것의 피로실험 결과는 기존 실험결과 (임성우 등, 2006)를 이용하였다. Chord wall 두께에 무관하게 UK DEn design curve를 만족하고 있다.

Table 1 Fatigue life

Specimen	Fatigue life @ Hot spot stress range of 219.85MPa						
	N_3 ¹⁾ / Through-crack length		N_3 ²⁾ / Surface-crack length		N_4 ³⁾		
	Left side	Right side	Left side	Right side	Left side	Right side	
AW	Cycle	210,000	222,400	305,000	305,000	312,900	331,376
	mm	50	100	400	720	-	-
TG	Cycle	992,000	964,000	1,071,000	1,071,000	1,478,080	1,436,360
	mm	20	20	420	490	-	-
WP	Cycle	610,000	522,000	610,000	610,000	908,900	777,780
	mm	10	30	65	600	-	-

- 1) # of cycles to through-thickness cracking of fatigue damaged member
- 2) # of cycles to termination of test
- 3) # of cycles to complete loss of static joint strength ($N_4/N_3 = 1.49$, van Wingerde)

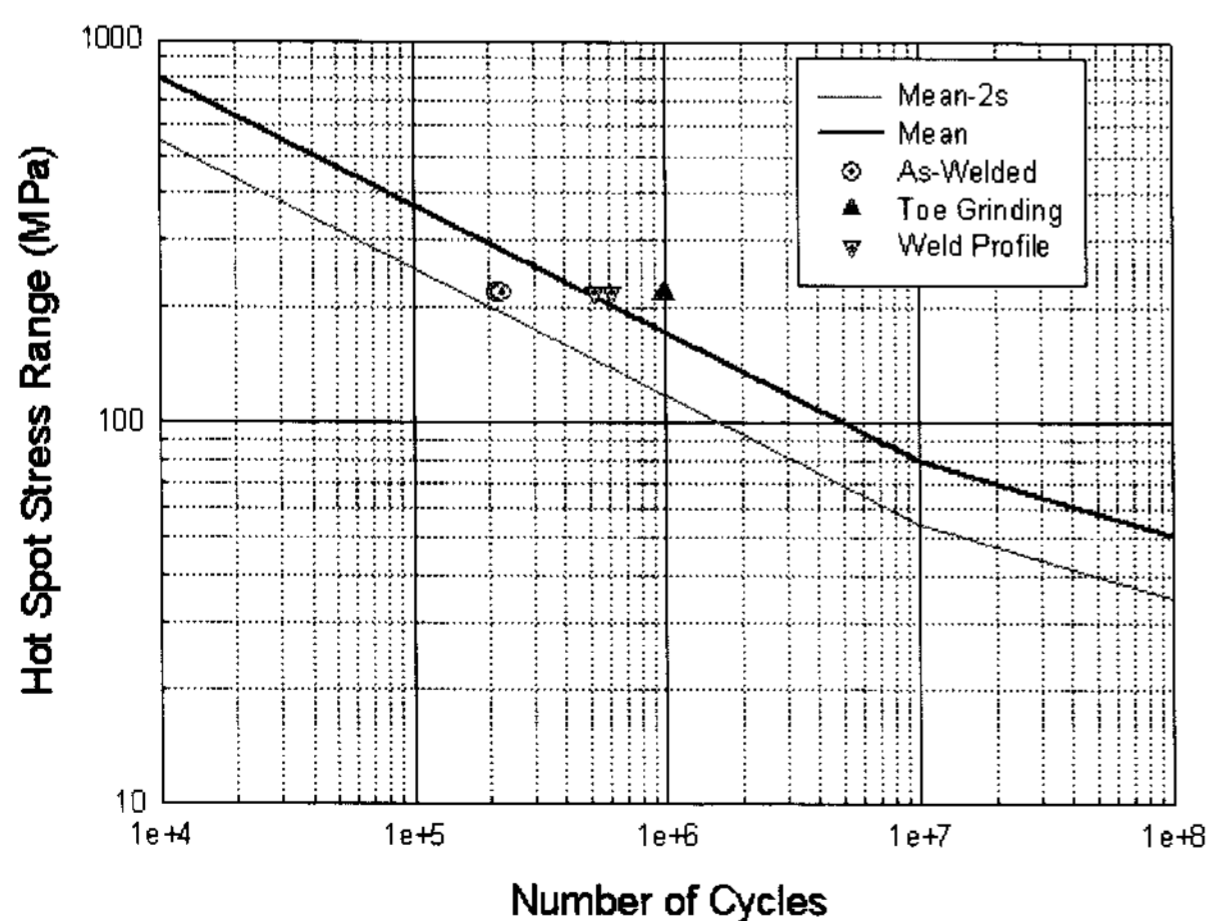


Fig. 17 Effect of weld improvements on the fatigue life based on N_3 of API 2W GR60 steel plate

Chord wall 두께가 15.9mm인 것의 피로강도가 우수한 것처럼 보이나, 이것은 두께 효과에 기인한 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 API에서 최근 이슈화되고 있는 Tubular joint의 피로수명에 미치는 Weld improvement 효과에 대해서 실험적 평가를 수행하였다. 특히 Weld improvement는 처리수준에 따라 효과의 차이가 날 수 있기 때문에, Joint부의 용접과 Weld improvement는 국내 조선사에서 수행하였다. 특히 POSCO에서 최근 개발한 API 2W GR60 강재를 사용함으로써 국산 강재도 Tubular joint에 적용할 경우 충분한 피로강도를 보유하고 있는지 확인하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) API 2W GR60 강재로 제작된 Tubular joint 용접 지단부를 Weld improvement한 다음 피로실험을 한 결과, Weld improvement는 균열 발생시점에만 영향을 미치며 균열 성장

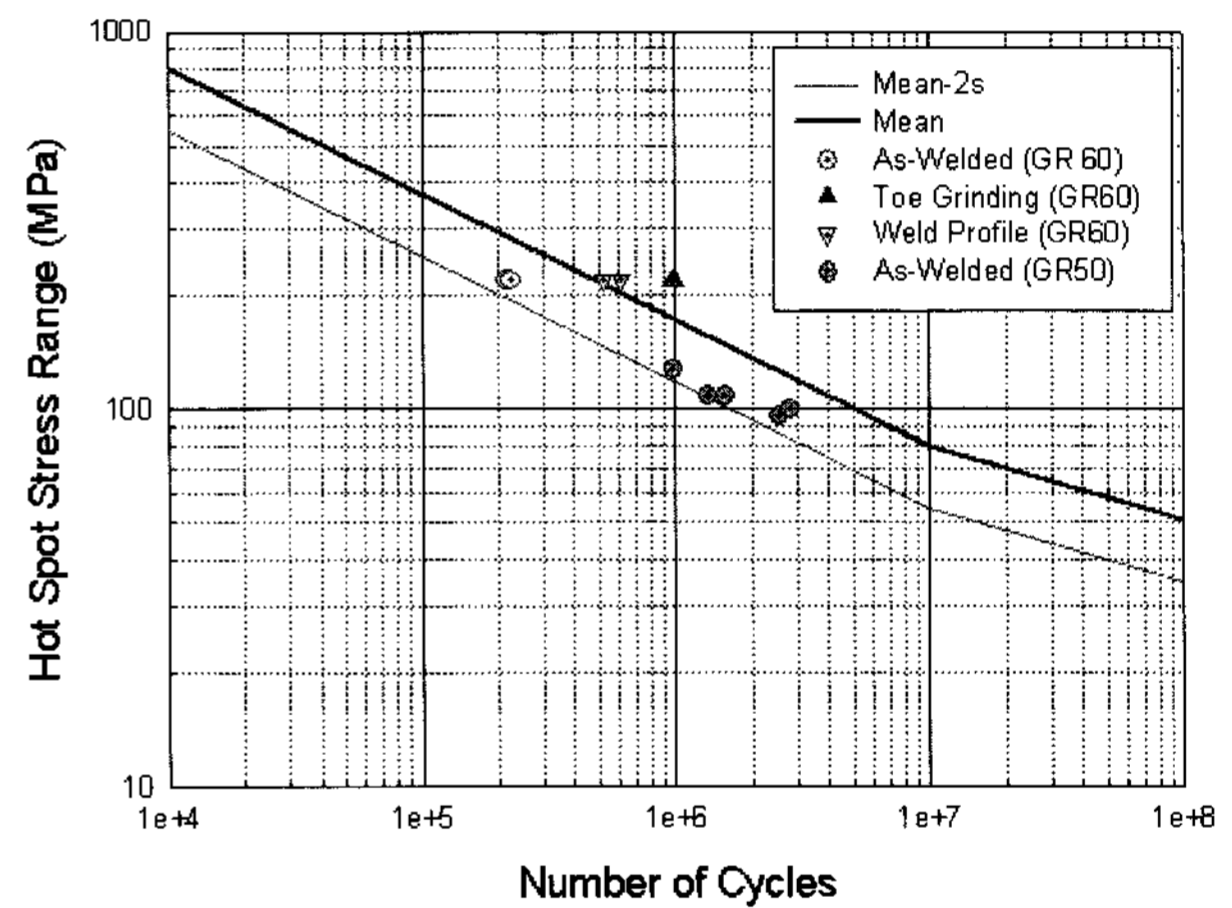


Fig. 18 Effect of steel plates on the fatigue life based on N_3 of 27.0 mm thickness plate

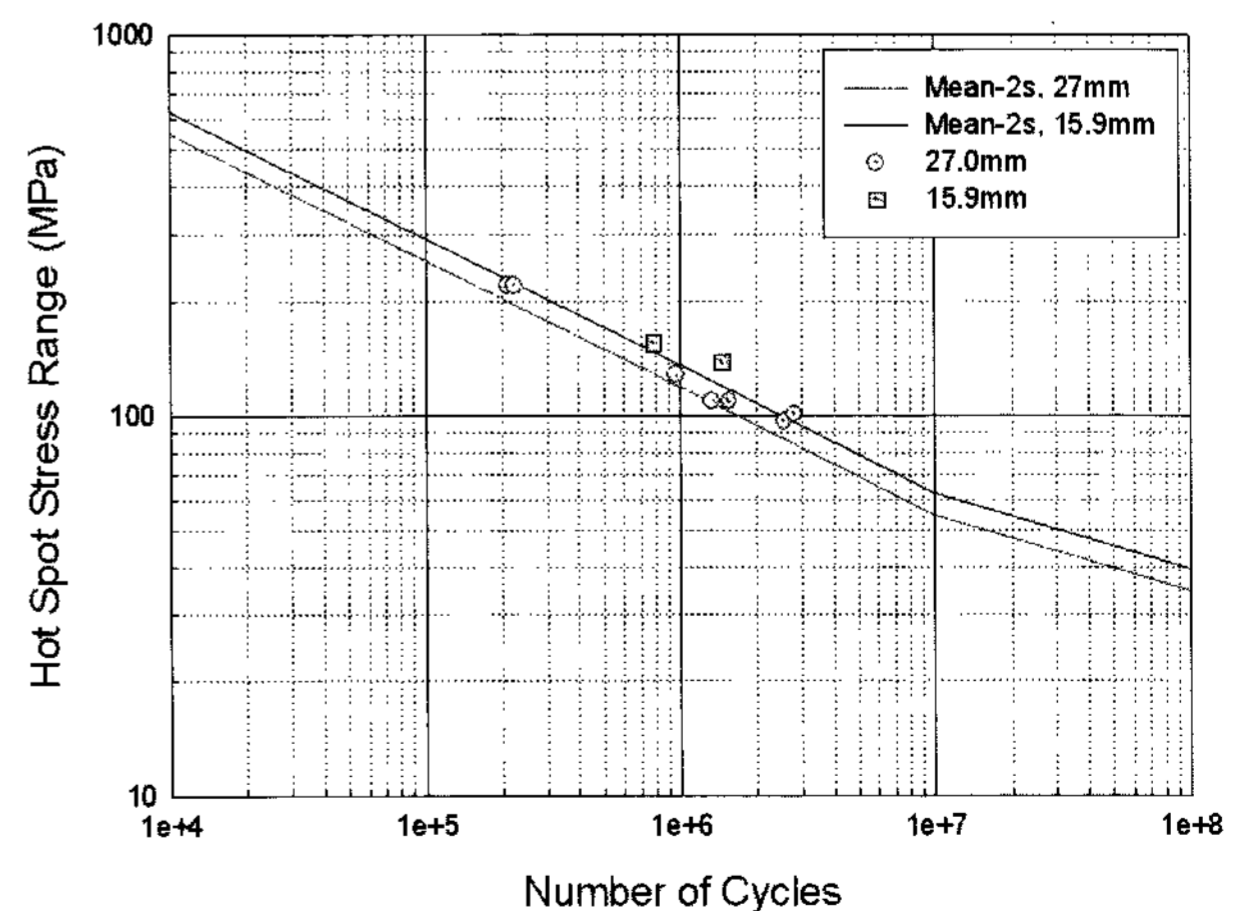


Fig. 19 Effect of chord wall thicknesses on the fatigue life based on N_3 of API 2W GR60 steel plate

속도에는 큰 영향을 미치지 않았다. 피로균열 발생시점을 기준으로 As-welded 시험체의 피로강도는 UK DEn Mean-2s 곡선을 만족하고 있다. Weld improvement를 할 경우에는 Mean curve를 상회하였다.

(2) API 2W GR50 및 API 2W GR60 강재로 제작된 As-welded 시험체의 경우 강종에 무관하게 피로강도는 UK DEn design curve를 만족하고 있다.

(3) Chord wall 두께가 27.0mm인 것과 15.9mm인 As-welded 시험체의 피로강도는 Chord wall 두께에 무관하게 UK DEn design curve를 만족하고 있다.

참 고 문 헌

- 임성우, 장인화, 조철희, 박관규 (2005). "API 2W GR50 강재를 이용한 대형 Tubular Joint 피로성능평가", 한국해양공학회지, 제19권, 제3호, pp 54-58.
- 임성우, 장인화 (2006). "API 2W GR60 대형 구조물 피로성능평가", RIST 2005A218.
- 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, pp 339-344.
- BS 7448 Part (1997). *Fracture Mechanics Toughness*, pp22.
- 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.
- Kato, T. (1974). "Design Strength of Tubular Joints", *Nippon Steel Technical Report*, No 6, pp 61-74.
- Kirhope, K.J., Bell, R., Caron, L., Basu, R.I. and Ma, K.T. (1999). "Weld Detail Fatigue Life Improvement Techniques", *Marine Structure*, pp 447-474.
- Marshall, P.W., Bucknell, J. and Mohr, W.C. (2005). *Background to New API Fatigue Provisions*, OTC 17295.
- Ohta, T., Onogi, H., Ishikawa, K., Kataoka, F., Yamauchi, H. and Toyofuku, M. (1987). "Fatigue Strength of Welded Tubular Joints of Offshore Structures", *Nippon Kokan Technical Report*, No 48, pp 85-94.
- Sonsino, C.M. and Umbach, R. (2003). "Hybrid Design Concept Using High-Strength Cast Steel Inserts for Tubular Joints of Offshore Structures", *Fatigue*, Vol 2, pp 1225-1230.
- Takizawa, S., Yamamoto, N., Mihara, J. and Okata, S. (1979). "Full Scale Experiments of Tee and Cross Type Tubular Joints under Static and Cyclic Loadings", *Kawasaki Steel Technical Report*, Vol 11, No 2, pp 115-125.
- 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.
- Zhao, X.L., Herion, S., Packer, J.A., Puthli, R.S., Sedlack, G., Wardenier, J., Weynand, K., van Wingerde, A.M. and Yeomans, N.F. (2000). "Design Guide for Circular and Rectangular Hollow Section Welded Joints under Fatigue Loading", CIDET, TUEV-Verlag GmbH

2007년 11월 20일 원고 접수

2008년 3월 26일 최종 수정본 채택