

구조 응력 기법을 적용한 필릿 용접부 두께 지수 산정에 관한 연구

신 문 걸* · 오 동 진* · 김 명 현*·†

*부산대학교 공과대학 조선해양공학과

A Study of the Thickness Effect using Structural Stress Approach
for Fillet Welded Joints

Wen-Jie Xin*, Dong-Jin Oh* and Myung-Hyun Kim*·†

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan University, Busan 609-735, Korea

†Corresponding author : kimm@pusan.ac.kr

(Received January 3, 2014 ; Revised February 24, 2014 ; Accepted February 28)

Abstract

In this study, non-load-carrying fillet welded joints fabricated using EH grade-steel are evaluated with the structural stress approach. The thickness effect was investigated by a study on welded steel joints with thickness ranging from 25 to 80mm. As-welded joint for main plate thickness of 25 to 80mm, the fatigue strength is reduced gradually. On the other hand, in case of main plate thickness of 25 to 80mm, the structural stress concentration factor increases gradually. As a result, for structural stress approach, thickness effect is not required for correction. Based on these results, a new evaluation fillet welded joint for fatigue design purposes has been proposed FAT 125.

Key Words : Thickness effects, Fatigue strength, Structural stress approach, Fillet joint

1. 서 론

국제 유가의 상승 및 심해 자원 개발, 해상 통로 설치 등으로 인한 선박 및 해양 구조물, 교량 등 대형화가 되고 강도 등 원인으로 인해 후판 사용이 증가되고 있다. 이러한 대형 구조물은 과량이나 차량 통행 등에 의한 반복 하중을 받게 되고 특히 용접부는 지속적인 피로 하중 누적으로 피로 균열이 발생 및 진전하여 파괴가 발생된다. 선박 및 해양구조물, 교량 등 피로 파괴 안전 사고 발생 가능성이 점점 높아지고 발생시 경제적 손실이 막대하다. 2007년에는 북아메리카 중부 I-35W 교량 피로 붕괴로 인한 사망자 6명, 부상 100여명에 달하는 사고가 발생하였다.

현재 구조물의 피로 수명 평가 기법 중에서 구조적 응력 집중에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 해석 기법에는 유한 요소해석을 이용한 핫스팟 응력 (Hot-spot stress)^{1,2)}, 구조 응력 (Structural stress)³⁾, 1mm 응

력(1mm stress)⁴⁾ 기법 등이 있다.

용접부는 두께가 증가할수록 높은 응력을 받는 영역이 얇은 판에 비해 넓어지게 된다. 두께가 증가할수록 피로 강도는 작아지게 되고 피로 강도 설계 할 경우 두께 효과 보정 지수를 적용하게 된다. 두께 지수는 수명에 따라 다르다는 기존 연구도 있었다⁵⁾. IIW¹⁾에서 제시한 두께 보정 수식(1)과 DNV⁶⁾ 선급에서 제시한 수식 (2)는 아래와 같다.

$$S_t = S_{ref} \cdot (t_{ref}/t_{eff})^n \quad (1)$$

S_{ref} : Fatigue strength of t_{ref}

t_{ref} : Reference thickness

S_t : Plate fatigue strength

t_{eff} : Plate thickness

n : Thickness exponent factor

$$\log N = \log a_1 - m_1 k \log(t/t_{ref}) - m_1 \log \Delta \sigma \quad (2)$$

※ 각 변수는 선급 피로 설계 기준선을 따름.

IIW 또는 JSSC⁷⁾에서 제시한 피로 설계에서 기준 두께는 25mm이고 두께 지수 n은 이음부 형상 및 용접 토우부 상태에 따라 0.1~0.4 등 다양하게 적용한다. 한편 BS 7608(1993)⁸⁾ 제시한 피로 설계에서 기준 두께는 16mm이고 두께 지수 n 값은 이음부 형상에 관계 없이 0.25를 적용하는 등 다소 상이한 부분이 있다.

본 연구에서는 1mm 응력 기법을 적용하여 EH Grade 강재에 대한 피로 평가를 수행하였고 공칭 응력 기준과 1mm 응력 기법을 적용한 두께 효과를 고찰하였으며 시험 결과 분석에 의거하여 두께 지수 n에 대하여 검토하였다.

2. EH 강재 피로 시험

2.1 피로 시험편

본 연구에서는 두께가 48mm, 55mm, 64mm인 조선훈 강재 EH40과 EH36 필릿 용접 이음부에 대하여 3점 굽힘 시험을 진행하였고 시험편 형상은 Fig. 1에 나타내었다. 주판 두께 T2와 보강판 두께 T1, 폭 W는 동일하게 제작되었고 치수는 Table 1에 나타내었다. 피로 시험은 하중 비 전달형 3점 굽힘 시험으로 실시하였으며 피로 시험기는 ±20톤 축 인장/압축 유압 서보 피로 시험기를 사용하였다. 응력비 R은 0.1로 시험하였고 피로 시험 사진은 Fig. 2와 같이 나타내었다.

본 시험을 진행하기 전에 시험편에 작용하는 하중이 적절하게 부여되는지 확인하기 위해 스트레인 게이지를

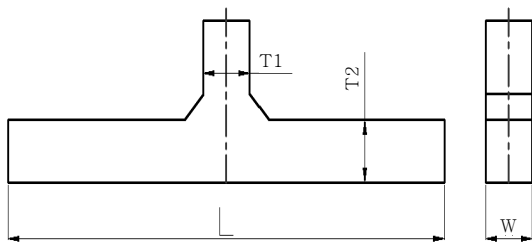


Fig. 1 Fatigue test specimen

Table 1 Fatigue test specimen dimension

Specimen	Grade	T1	T2	W	L
FB40-48	EH40	48mm	48mm	48mm	600mm
FB40-64	EH40	64mm	64mm	64mm	600mm
FB36-55	EH36	55mm	55mm	55mm	600mm
FB36-64	EH36	64mm	64mm	64mm	600mm

F: Fillet joint B: Bending test
 40: EH grade 48: Main plate thickness (mm)



Fig. 2 Fatigue test

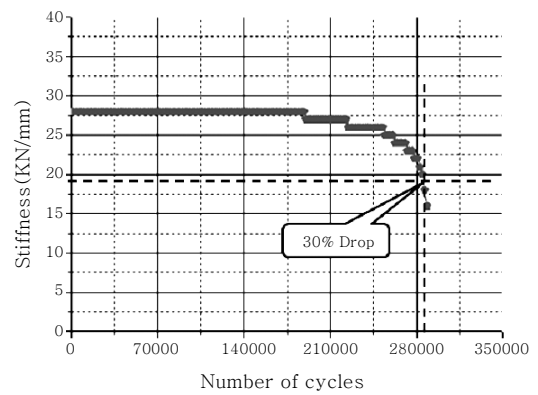


Fig. 3 Stiffness drop curve

부착하여 정하중 시험을 실시하였다. 정하중 시험 결과는 하중 입력 값과 시험편에 작용하는 하중이 일치함을 확인하였다.

모든 피로 균열은 용접 토우부에서 발생하였고 균열 진전에 따라 Fig. 3와 같이 강성이 하강되었다. 또한 균열 길이 진전 속도가 점차 증가하였고 강성 하강이 급격하게 증가되는 것을 확인할수 있었다. 그리하여 최종 파단 수명은 균열 진전이 급격히 진행된 수명 즉 강성이 30% 하강 된 수명을 파단 수명으로 정의하였다.

3. 시험 결과

3.1 피로 시험 결과

EH40 강재의 주판 두께는 48mm, 64mm이며, EH36 강재의 주판 두께는 55mm, 64mm이며 이에 대한 피로 시험 결과인 S-N 선도는 Fig. 4에 나타내었다. 또한 Fig. 4에서 보는 바와 같이 주판 두께가 증가할수록 동일한 공칭 응력 기준에서 피로 수명은 짧아지는 것을 확인하였다.

IIW에서 제시하는 설계 기준선과 비교하기 위하여

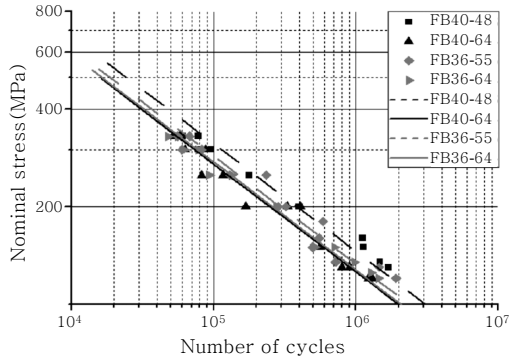


Fig. 4 Nominal stress based on S-N curve(toe ground)

Table 2 Nominal stress based fatigue strength for slope m=3

Specimen	Toe ground fatigue strength	According to DNV (1995) calculated as-welded fatigue strength
FB40-48	115 MPa	92 MPa
FB40-64	100 MPa	78 MPa
FB36-55	105 MPa	84 MPa
FB36-64	101 MPa	80 MPa

공칭 응력 기준으로 기울기를 3으로 고정 후 200만 사이클에서의 피로 강도를 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서 사용한 피로 시험편은 현장 작업 조건에 맞추어 토우부 Ground 작업을 실시하였다. 토우부 As-welded 상태 일 경우 피로 강도를 산출하기 위하여 DNV Rule Classification note No. 30.7⁵⁾에서 제시하는 Grinding effect 을 역으로 보정하여 산정한 200만 사이클에서의 피로 강도를 Table 2에 나타내었다.

3.2 두께 효과 및 두께 지수

피로 강도 설계 할 경우 하중모드, 부식 환경, 표면 상태 등 각종 피로에 영향 주는 다양한 요소를 고려하여야 한다. 이에 두께 효과도 포함되는데 후판 사용 증가로 이에 대한 중요성이 점차 증가되고 있다⁶⁾. 두께 효과의 용접부 피로 설계에서의 중요성은 유럽에서부터 시작되었고 1984년에 처음으로 Department of Energy⁹⁾와 DNV¹⁰⁾ 설계 Rule에 도입하게 되었다.

두께 효과는 서론에서 언급한 수식 (1)을 적용하여 고려할수 있다. 특정 사이클에서의 피로 강도와 두께의 관계를 log-log Scale 으로 표현하고 선형 외삽 후 기울기를 두께 지수 n으로 나타내고 적용한다. 서론에서 언급한 각종 Rule에 따라 적용하는 n값과 기준 두께가 다양하게 적용된다.

Table 3 Fatigue strength of reference thickness

Stress	Main plate thickness (mm)			As-welded
	25	40	80	
Nominal	132MPa	93MPa	82MPa	

Table 4 Nominal stress based thickness exponents

Standard / Paper	Welded joint	Weld toe condition	Thickness exponents
IIW	Fillet welded	As-welded	0.30
JSSC			0.25
XIN			0.44

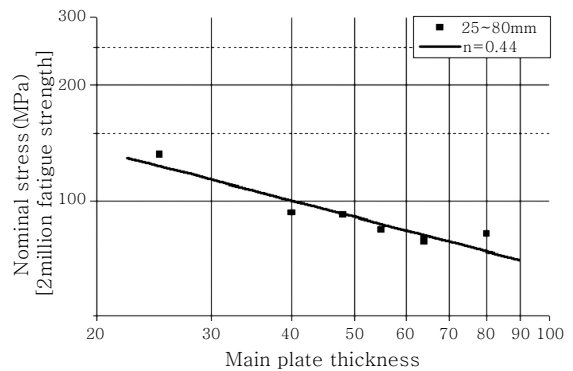


Fig. 5 Nominal based on thickness exponent(As-welded)

주판 두께가 25mm¹¹⁾, 40mm, 80mm¹²⁾, 피로 시험을 참고로 공칭 응력을 기준으로 평가한 200만 사이클에서의 피로 한도를 Table 3에 나타내었다. Table 2 시험 결과와 동일하게 기울기를 3으로 고정하였고 공칭 응력 기준으로 주판 두께가 25~80mm까지의 두께지수 n은 0.44으로 나타났으며 이를 Fig. 5에 나타내었다.

본 연구에서 계산된 두께 지수와 IIW 및 JSSC에서 제시하는 두께 지수를 Table 4에 비교하여 나타내었다. 본 시험 및 IIW와 JSSC에서 제시하는 두께 지수 n 값은 서로 다르고 필릿 용접부 피로 강도 설계 할 경우 설계 기준의 수정이 필요한 것으로 판단된다.

4. 유한 요소 해석

4.1 1mm 응력 기법

Xiao and Yamada(2004)는 Fig. 6와 같이 용접 토우부 피로 파괴일 경우 유한 요소 해석을 이용하여 균열 진전 방향, 즉 두께 방향으로 토우부 1mm 아래

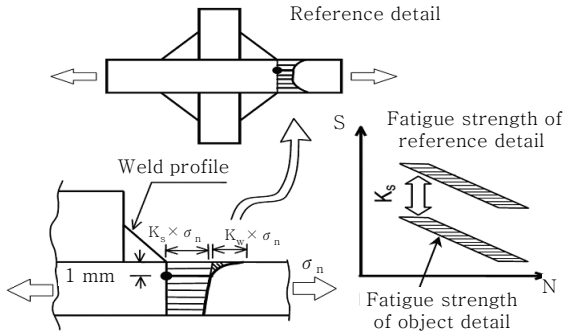


Fig. 6 Conceptual of 1mm stress method(Xiao and Yamada, 2004)

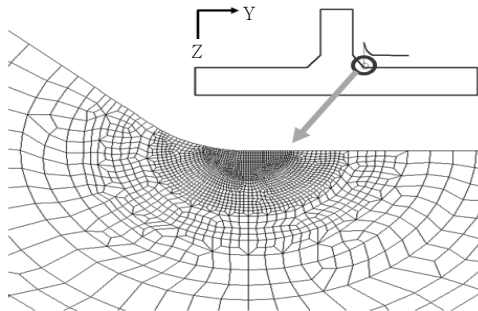


Fig. 7 Weld toe detail

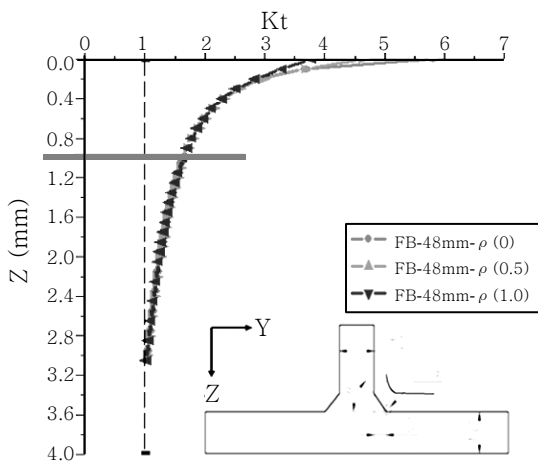


Fig. 8 Along z-direction stress distribution

의 절점에서의 응력은 국부적 응력 집중 계수의 영향을 받지 않고 구조적 응력 집중 계수 영향만 받는다고 정의하였다. 상용 유한 요소 해석 프로그램은 PATRAN을 사용하였고 하중 조건은 3점 굽힘을 적용하였다. 또한 용접 이음부 Toe 위치의 최소 요소 크기는 0.05mm로 모델링 하였고 Fig. 7에 나타내었다. 프랭크 각은 시험편 전체 평균 값에 가까운 45도를 적용하였고 곡률 반경은 0mm, 0.5mm, 1.0mm 를 적용하여 계산된 두께 방향 응력 분포는 Fig. 8에 나타내었다. 곡률 반경에 따라 용접 Toe부 응력은 큰 차이가 발생하였지만

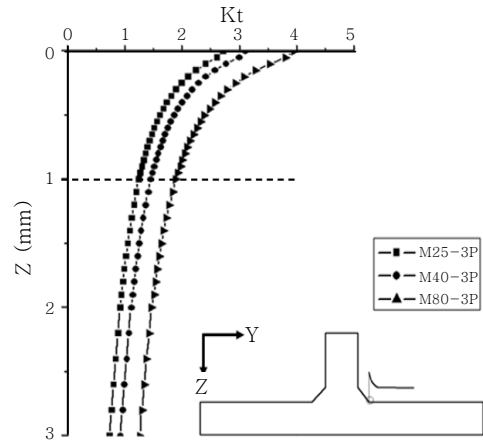


Fig. 9 Along z-direction stress distribution(Main plate thickness: 25, 40, 80mm)

구조 응력 집중 계수가 반영된 1mm 위치 응력은 거의 동일한 양상을 보인다. 따라서 본 연구에서는 곡률 반경은 0.5mm 적용하였다.

주판 두께가 25mm¹¹⁾, 40mm, 80mm¹²⁾ 인 균열 발생된 용접 Toe부 두께 방향 응력 분포를 Fig. 9에 나타내었고 응력 집중 계수 (K_t)는 최대 응력(σ_{max})와 공칭 응력($\sigma_{nominal}$)의 비로 정의 하였다. 시험편 토우부에서 두께 방향 1mm 지점에서의 구조적 응력 집중 계수(K_s)는 두께 증가에 따라 증가 하는 것을 확인하였다.

4.2 1mm 응력 기법을 적용한 두께 지수 산정

주판 두께가 25mm¹¹⁾, 40mm~80mm¹²⁾, 그리고 본 시험 주판 두께가 48mm, 55mm, 64mm As-welded 상태 필릿 용접부 피로 시험을 데이터를 구조 응력 집중 계수를 적용하여 1mm 응력 기준으로 평가한 S-N 선도를 Fig. 10에 나타내었다. 추가로 주판 두께가 24mm, 34mm, 50mm¹³⁾ 4점 굽힘 시험 데이터를 함께 나타내었다. 구조 응력 집중을 고려한 1mm 응력 기준으로 평가한 S-N 선도에서는 두께 증가에 따라 피로 강도가 감소 되는 효과를 별도로 고려하지 않고 일관성 있게

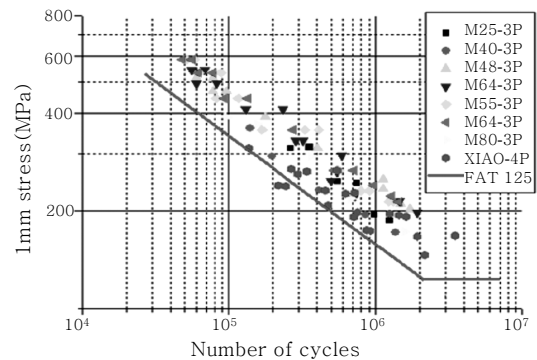


Fig. 10 1mm stress based on S-N curve

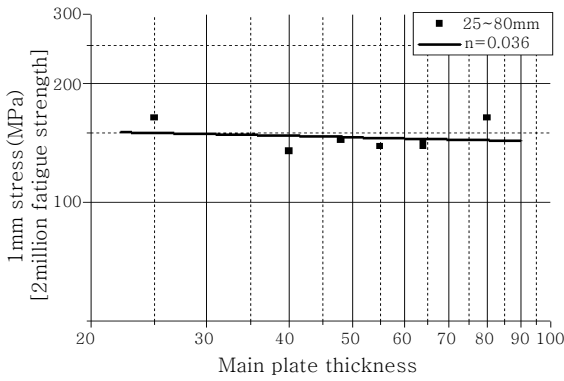


Fig. 11 1mm stress based on thickness exponents

Table 5 Structural stress based thickness exponents

Standard / Paper	Welded joint	Weld toe condition	Thickness exponents
IIW (HSS)	Fillet welded	As-welded	0.30
JSSC (HSS)			0.25
XIN (1mm)			0.036

하나의 피로 선도 상에 표현되는 것을 확인 할수 있다.

두께 효과를 검토하기 위하여 1mm 응력과 주판 두께 관계를 Fig. 11에 나타내었다. 1mm 응력 기준으로 평가한 두께 지수 n 값은 0.036이고 공칭 응력 기준과 비교하였을 대략 0.08%로 작아지게 되었고 두께의 영향을 받지 않게 된다는 것을 알 수 있다. 또한 구조 응력 집중 계수를 반영 하였을 경우 IIW 와 JSSC 에서 제시하는 두께 지수 n 값을 Table 5에 나타내었다.

필릿 용접부 3점 굽힘 하중에서 주판 두께가 25~80mm 시험과 4점 굽힘 하중에서 주판 두께가 24~50mm 시험 결과는 모두 FAT 125 위에 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 굽힘 하중을 받는 주판 두께가 24~80mm 일 경우 1mm 응력 기법을 적용하여 피로 평가 할 경우 두께 효과로 인한 두께 보정을 하지 않고 FAT 125 피로 설계 기준선을 적용하여 피로 평가를 실시하여도 적합하다는 것을 Fig. 10에서 확인 할수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 EH 강제 필릿 용접 이음에 대한 새로운 구조적 응력 기법을 적용하여 피로 강도를 평가, 분석하였고 두께 지수를 고찰하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) EH40 강제 두께 48mm, 64mm, EH36 강제

두께 55mm, 64mm 필릿 용접부 굽힘 피로 시험 결과로부터 공칭 응력을 기준으로 두께가 증가할수록 피로 수명은 낮아지는 것으로 판단된다.

2) As-welded 필릿 용접 이음부 굽힘 하중이 작용할 경우 주판 두께가 25~80mm까지는 두께가 증가할수록 200만 사이클에서의 피로 한도는 감소하게 되고 두께 지수 n 값은 0.44이므로 피로 설계 할 경우 두께 효과를 고려한 설계 기준선 수정이 필요 하다.

3) 구조 응력 집중을 반영한 1mm 응력 기법을 적용하여 굽힘 하중을 받는 필릿 용접 이음부 As-welded 상태 피로 평가를 진행하였다. 또한 주판 두께가 두께 위 질수록 구조 응력 집중 계수(K_s) 값은 증가하게 되었고 25~80mm 일 경우 두께 지수 n 값은 0.036이며 두께 효과를 보정하는 수식을 적용하지 않아도 된다.

4) 1mm 응력 기법을 적용하여 굽힘 하중을 받는 필릿 용접 이음부 As-welded 상태 피로 평가를 진행할 경우 주판 두께에 관계 없이 두께 효과를 고려한 기준선 수정을 생략하고 FAT 125 설계 기준선을 적용하여 피로 평가하는 것을 제시한다. 그리고 향후 두께 효과를 고려하지 않는 인장 하중을 받는 필릿 용접부 피로 설계 연구를 진행할 계획이다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(No.2011-0030664, No.2011-0016804).

Reference

- Hobbacher: Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW document XIII-2151-07/XV-1254-07. WRC bulletin 520, The welding Research Council, New York, (2007)
- Welding Strength Committee : General Guide for Hot spot Stress Analysis, Journal of KWJS, **23-6** (2005), 18-28 (in Korean)
- Dong, P: A Structural Stress Definition and Numerical Implementation for fatigue Evaluation of Welded Joints. International Journal of Fatigue, **23** (2001), 865-876
- Xiao, Z.G, Yamada, K: A method of determining geometric stress for fatigue strength evaluation of steel welded joints. International Journal of Fatigue, **23** (2001), 865-876
- Seong-Min Kim, Min-Sik Kang, Seung-Hyun Lee, Myung-Hyun Kim : Thickness effect of fatigue strength in T-joint fillet welds, Abstract of Autumn Annual Meeting of KWJS, **57**, 2012, 18-18 (in Korean)

6. Det Norske Veritas, "Fatigue assessment of ship structures", Classification Notes, Note **30-7**, Oslo (1995)
7. Japanese Society of Steel Construction (JSSC). Fatigue design recommendations for steel structures (English version). JSSC Technical Report **No.32**, Tokyo, (1995)
8. British Standards Institution. Code of practice for fatigue design and assessment of steel structures BS7608, (1993)
9. Department of Energy, UK, "Background to New Fatigue Design Guidance for Steel Welded Joints in Offshore Structures", (1984)
10. Det Norske Veritas, Norway, "Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Units", Classification Notes, Note **32-2**, 1984
11. Miki, C, Mori, T, Hiroyuki, S, Kashiwagi, H : Size effect on the fatigue strength of transverse fillet welded joints. Japan society of civil engineers, **33** (1987), 393-402 (in Japanese)
12. Yagi, J, Machida, S, Tomita, Y, Matoba, S, Soya, I : Thickness effect criterion for fatigue strength evaluation of welded steel structures. Journal of offshore Mechanics and Arctic Engineering, **115** (1993), 58-65 (in Japanese)
13. Xiao, Z.G, Chen, T, Zhao, X.L : Fatigue strength evaluation of transverse fillet welded joints subjected to bending loads. International Journal of Fatigue, **38** (2012), 57-64