

HR Coil재 Box형 용접구조물의 피로강도평가에 관한 연구

강성원* · 김명현* · 장용원* · 이진우**

*부산대학교 조선해양공학과

**볼보건설기계코리아(주) 연구소

Fatigue Strength Evaluation of Welded Box Type with HR Coil

Sung-Won Kang*, Myung-Hyun Kim*, Yong-Won Jang* and Jin-Woo Lee**

*Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

**R&D team, Volvo Construction Equipment Korea Ltd., Changwon 641-430, Korea

Abstract

Due to the difficulties associated with the supply of steel plates, hot rolled coil (Steel grade: SM490A) is considered for structural materials in replace of the existing SWS50A-M1. However, it is found that SM490A exhibits a significant anisotropy in terms of impact energy with respect to transverse and longitudinal directions. In this study, an experimental investigation is carried out to examine the relationship between the anisotropy in impact values and the fatigue strengths of SM490A with respect to the rolling direction of test specimens. All test specimens failed around 1,500,000 cycles regardless of the test specimen direction. Therefore, it is found that the anisotropy in impact energy is not related to the fatigue strength of the materials considered in this study. However, the transverse direction specimen showed more rapid brittle fracture mode compared to that of longitudinal direction specimen, and this appears to be related to the lower impact values in transverse direction.

* Corresponding author : swkang@pusan.ac.kr

(Received March 30, 2005)

Key Words : Steel plates, Hot rolled coil, Impact values, Transverse, Longitudinal, Anisotropy, Fatigue strength

1. 서 론

건설기계 장비를 비롯한 각종 강구조물은 대부분 용접구조물이며, 구조물 대형화 추세와 함께 다양한 사용조건 하에서도 구조물의 충분한 내구성 및 신뢰성 확보를 필요로 하고 있다. 동시에 작업능률 및 경제성의 향상을 위해서는 구조경량화가 필수적으로 요구되고 있다. 특히 파손이 일어나기 쉬운 용접부에 대하여 파손을 방지하기 위한 합리적인 구조설계 및 용접 기술의 개발과 함께 보다 정밀한 용접부 응력해석 및 강도 평가법의 개발과 용접결함이 발생하지 않는 정밀 용접시공법의 확립이 필요하다.

본 연구에서는 굴삭기의 주요 구조물 등에서 보이는 Box형 용접 판구조물을 대상으로 국내외적으로 심각한 강재의 자재수급 난 발생으로 인하여 기존의 소재(SWS50A-M1)를 대체하여 열연 코일재(SM490A)로 사용하

기 위한 피로강도평가 및 압연방향에 따른 Transverse(횡)/Longitudinal(종)방향 충격치의 차이로 나타난 이방성(Fig. 1)과 피로수명 사이의 연관성을 규명하기 위한 실험적 연구를 수행하였다.

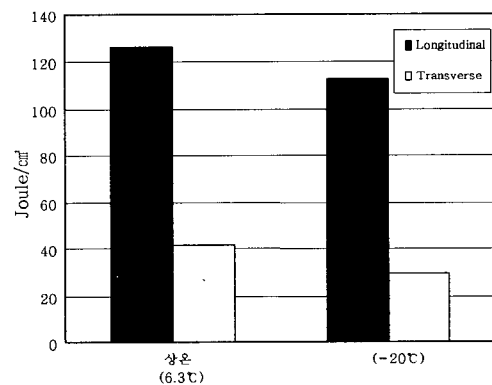


Fig. 1 Impact value of HR coil(SM490A)

2. 사용재료 및 실험방법

본 시험에 사용된 시험재의 종류는 열연 코일재(SM490A)와 판재(SWS50A-M1)이고, 시험편 채취 방향에 따라 횡방향은 각각 2개의 시험편, 종방향은 각각 1개의 시험편으로 총 6개의 시험편에 대하여 4점 굽힘 피로시험을 실시하였다. Table 1에 본 연구에 사용된 열연코일재(SM490A)의 화학조성 및 기계적 성질을 나타내었으며, 용접조건은 Table 2에 나타내었다.

시험편 형상은 Fig. 2와 같이 box형 구조이며, 전체 길이 1200mm, 높이 95mm, 폭 85mm, 두께 10mm이며, 각장은 8mm로 측면 필릿 용접 이음을 적용하여 제작하였다. 또한, 4점 굽힘 피로시험으로 윗지그 사이 간격은 시험편 중앙에서 양방향으로 125mm, 아래지그 사이 간격은 시험편 중앙에서 1000mm로 피로시험을 수행하였다.

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of the material(SM490A)

Mechanical Properties	Value	Remarks	Checked Value		
Yield Strength(MPa)	Min.315	For thickness 15~40mm	424.5		
Tensile Strength(MPa)	490~610	For thickness less than 100mm	526.3		
Elongation(%), (G.L.: 50mm)	Min.22	For thickness 6~15mm	30		
Impact strength(J)	Min.27	at -20℃	30		
Chemical Composition(%)					
Thickness range(mm)	C	Si	Mn	P	S
t≤50	≤0.20	≤0.55	≤1.60	≤0.035	≤0.035
50<t≤200	≤0.22	≤0.55	≤1.60	≤0.035	≤0.035

Table 2 Weld conditions

Run	Process	Filler metal	Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (CPM)	Heat input (KJ/cm)
1	GMAW	AWS A5.18 ER70S-G	350	36	25	30

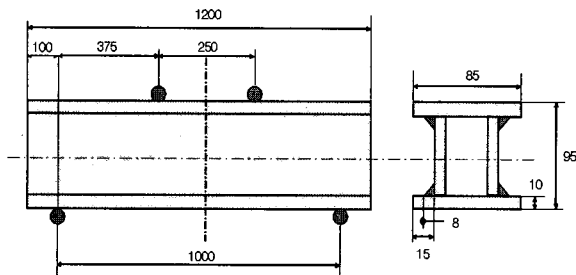


Fig. 2 Dimensions and shape of test specimen [unit:(mm)]

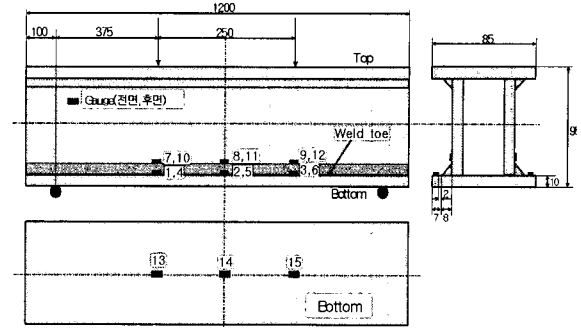


Fig. 3 Schematic for strain gauge placements [unit:(mm)]

피로시험은 하중제어 방식으로 최대하중은 17tonf으로 동일하게 하였고, 응력비(R)는 0.1, 반복하중 파형은 정현파, 반복속도는 3Hz로 실시하였다. 피로시험에 앞서 시험편 제작 시 변형으로 인하여 시험편에 편심하중이 작용하는 것을 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 시험편에 1축 5mm 스트레인 게이지 총 15개를 부착하여 2tonf에서 17tonf까지 단계적으로 정적하중을 부하하면서 변형률을 측정하였다. 좌, 우 및 폭방향 대칭점의 변형률값이 평형을 유지하도록 시험편과 보조판 사이에 liner를 삽입하여 시험부에 순수 굽힘모우멘트가 작용하도록 조정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 파단수명 및 파단위치

Fig. 4는 피로시험 후 시험편 종류별 파단수명 및 파단위치를 나타내었다. 파단위치는 순수 굽힘모멘트가 걸리는 중심에서 양방향으로 125mm 지점 안에서 모두 파단되어 유한요소해석결과로 예측한 파단위치와 동일한 피로시험결과를 나타내었다. 한편, 피로수명은 아래쪽 인장측 필릿 용접부에서 web측으로 10mm 균열진전을 기준으로 판단할 때, 판재(SWS50A-M1)와 열연 코일재(SM490A)의 횡방향과 종방향에 따른 각 시험편에 대한 피로수명은 모두 약 1,500,000cycle에서 파단되어 충격치로 나타난 이방성에 대비하여 피로수명은 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

시험편에서 발생한 피로균열은 모두 시험편 아래쪽 인장측 필릿 이음 용접부에서 발생하였고, 피로균열은 수직으로 전파하여 web과 flange를 관통하여 인장응력 방향과 직각방향으로 전파하는 양상을 보였다.

Fig. 5에서는 시험편 아래쪽 인장측 용접 토우부 응력범위를 이용한 S-N 선도를 나타내었다. 피로시험 시 균열 발생 위치에 해당하는 시험편 중앙에서 폭 방향으

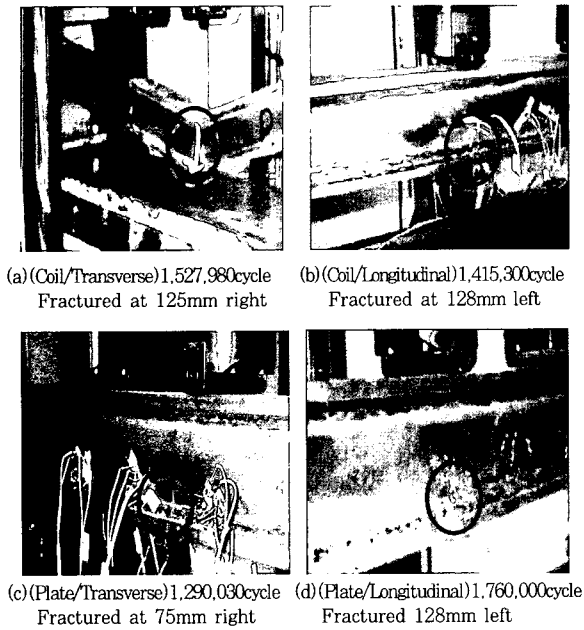


Fig. 4 Final failure life and fracture location of each specimen

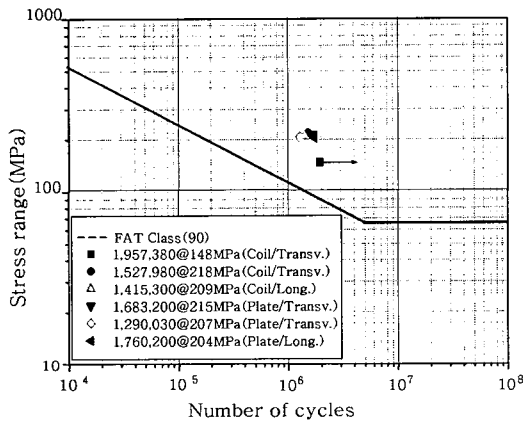


Fig. 5 S-N curve of test specimens

로 아래쪽 인장측 플랜지 토우부 표면에 Fig. 3에서 보 인바와 같이 두 군데 부착한 스트레인 게이지 2, 5번을 통해 측정된 응력의 평균값으로 응력 범위를 결정하였다.

피로수명은 IIW(International Institute of Welding)의 FAT 90 Class에 모두 만족하는 결과를 보여 피로 강도 측면에서 판재(SWS50A-M1)를 대체하여 열연 코일재(SM490A)가 적합하다고 사료되어진다.

3.2 피로균열진전

Fig. 6에서는 판재(SWS50A-M1)와 열연 코일재(SM490A)에 대한 횡방향과 종방향의 피로균열진전을 비교하여 나타내었다. 열연 코일재(SM490A) 횡방향의 경우 초기크랙발생부에서 web방향으로 약 5mm 피

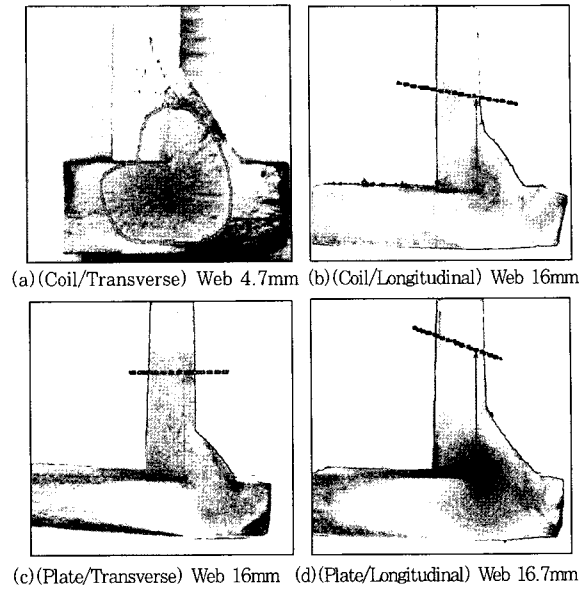


Fig. 6 Comparison between transverse and longitudinal fatigue crack propagation

로균열진전 후 급속한 파단에 이르렀고, 종방향은 약 16mm 피로균열진전 후 급속한 파단에 이르렀다. 이는 횡방향에 비해 종방향의 충격치가 20~30% 밖에 되지 않는 것을 감안할 때 균열진전과 연관성이 있는 것으로 사료되어지며, 판재(SWS50A-M1)의 경우 종방향과 횡방향 모두 유사한 균열진전양상을 보였다.

시험편에서 발생한 초기 피로크랙은 모두 인장측 필릿 이음 용접루트부에서 발생하였다. Fig. 7에서는 전자주사현미경을 이용한 초기 파단면 분석 사진을 나타내었으며, 분석결과 초기 크랙의 발생원인은 필릿용접 시 포함된 슬래그 개재물(slag inclusion)과 기공(porosity)으로 나타났다.

Fig. 8에는 열연 코일재(SM490A) 횡방향 시험편에 대한 전자주사현미경 사진을 나타내었으며, 분석결과 파면상에 비금속 개재물(Non-metallic inclusion)이

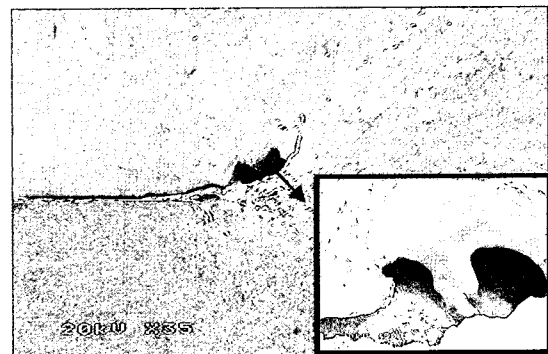


Fig. 7 SEM observation of a typical fatigue crack source

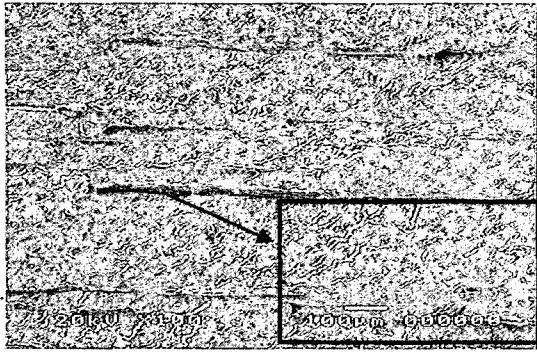


Fig. 8 SEM observation the fracture surface of on the transverse HR coil(SM490A)

선상으로 분포되어 있는 것으로 나타났다. 이는 열연 코일재(SM490A)에 있어 균열이 발생한 이후, 판재(SWS50A -M1)와 달리 급격한 파단이 일어나는 원인으로 판단된다.

3.3 구조응력을 이용한 피로통합선도

최근 제안되고 있는 기하학적 불연속부에 응력을 산출하는 방법인 구조응력(structural stress)³⁻⁷⁾은 기본적인 구조 역학적 평형조건을 바탕으로 용접부에서 일정 거리 떨어진 부분에서의 응력을 구한 후 이를 이용하여 용접부 선단에서의 응력을 추정하는 방법이다. 또한, 다양한 용접부 형상의 S-N곡선을 단일 곡선으로 나타낼 수 있는 것으로 알려져 있다.

Fig. 9는 기존 해석절차에 따른 구조응력의 정적 평형분포를 나타낸 것으로 식 (1)과 같이 구조응력(structural stress, σ_s)은 막응력(membrane stress, σ_m)과 굽힘응력(bending stress, σ_b)으로 구분된다.

$$\sigma_s^{A-A} = \sigma_m^{A-A} + \sigma_b^{A-A} \tag{1}$$

Fig. 9의 단면 A-A에 평형조건을 부여하면 구조응

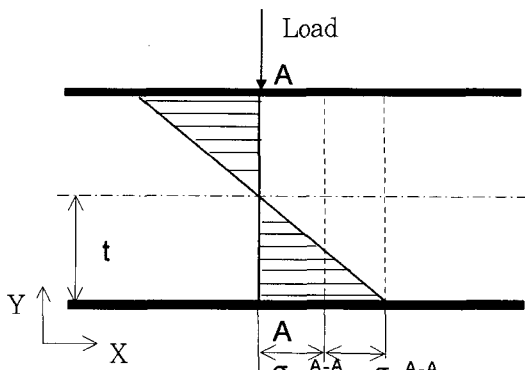


Fig. 9 Illustration of structural stress definition

력인 σ_s 및 σ_m 는 각각 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$\sigma_m^{A-A} = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma_x^{A-A}(y) dy \tag{2}$$

$$\sigma_b^{A-A} = \frac{t^2}{6} \int_0^t \sigma_x^{A-A}(y) \cdot (y - \frac{t}{2}) dy \tag{3}$$

여기서 t는 web 길이의 절반에 해당하며, 식(2)는 x 방향으로의 힘의 평형, 식(3)은 모멘트 평형을 각각 의미한다.

식(2)와 (3)을 이용한 구조응력 해석절차를 사용하여 Fig. 10와 같이 본 시험에 사용된 시험편 형상을 상용 프로그램인 Ansys를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소 해석시 사용된 요소는 20node solid요소로 감소 적분법(reduced integration method)을 사용하여 계산하였다.

Fig. 11은 본 시험편 형상에 대한 유한요소 망 크기에 따라 수행한 응력해석결과를 응력집중계수(Stress Concentration Factors)로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 구조응력 값이 유한요소 망 크기에 민감하게 변하지 않고 일관성 있게 구해짐을 알 수 있다.

한편, 서로 다른 하중 조건하에서 다양한 연결부 형상, 용접 형상, 두께에 대하여 구해진 다수의 S-N 데

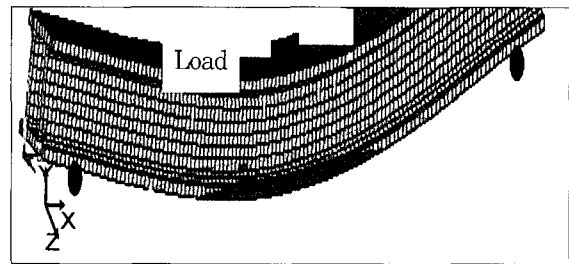


Fig. 10 FEA results(direction stress distribution and deformation)

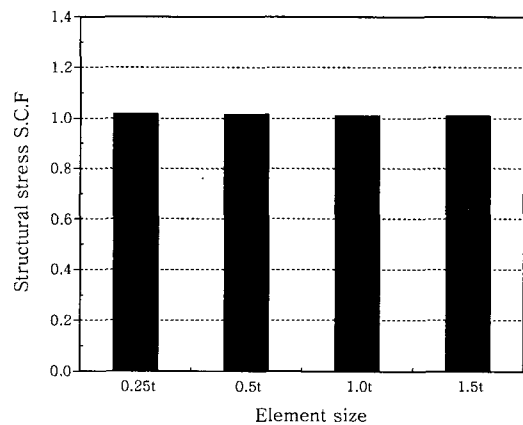


Fig. 11 Calculated structural stress with respect to different mesh size

이터를 바탕으로 구조응력 해석절차를 이용하여 통합선도가 최근 Dong등³⁻⁶⁾에 의하여 발표되었다. Fig. 12에서는 통합선도에 본 시험편 형상에 대하여 유한요소 해석을 통하여 식(1)에 의해 구한 구조응력 결과를 식(4)에 나타낸 방법을 이용하여 통합피로선도 상에 나타내었다. 식(4)는 용접부 형상, 두께 및 하중조건 등을 고려하여 통합피로선도를 도출하기 위한 식⁷⁾이다.

$$\Delta S_s = \frac{SCF_{ss} \Delta \sigma_n}{t \frac{2-m}{2m} I(r) \frac{1}{m}} \quad (4)$$

여기서 t=부재두께, m=3.6, I(r)= $\Delta\sigma_b/\Delta\sigma_s$ (구조응력 진폭에 대한 굽힘응력 진폭의 비), $\Delta\sigma_n$ 은 공칭응력진폭, SCF_{ss} 는 구조응력에 근거한 응력집중계수이다.

Fig. 12에 나타낸 바와 같이 본 연구에서 고려한 시험편에 대하여 구한 구조응력 및 피로수명은 통합피로선도와 잘 일치하는 결과를 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 판재(SWS50A-M1)와 열연 코일재(SM490A)를 사용하여 제작한 box형 용접구조물의 피로수명평가를 실험적으로 규명하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 기존 판재(SWS50A-M1)를 열연 코일재(SM490A)로 대체하고자 하는 경우, 대등한 피로수명을 가지는 것으로 나타났다.
- 2) 판재(SWS50A-M1)와 열연 코일재(SM490A)의 횡방향과 종방향에 따른 각 시험편에 대한 피로수명은 web측으로 10mm 균열진전을 기준으로 약 1,500,000 cycle에서 파단되어 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

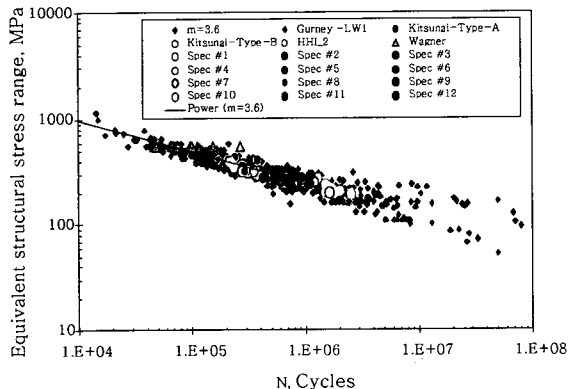


Fig. 12 Correlation of all edge details with other small details using the equivalent structural stress range parameter

3) 피로수명을 web측으로 10mm 균열진전을 기준으로 판단할 때, 횡방향과 종방향의 충격치 차이로 나타난 이방성과 피로수명은 거의 연관성이 없는 것으로 판단된다.

4) 열연 코일재(SM490A)의 횡방향과 종방향 이방성과 균열전파속도를 고려할 때, 횡방향 시험편이 종방향 시험편에 비해 균열이 발생한 이후 보다 급격히 파단에 이르렀으며 이는 약 30% 낮은 충격인성치와 연관이 있는 것으로 사료된다.

5) 유한요소해석을 이용하여 구한 구조응력(structural stress) 계산치는 요소 크기에 큰 영향을 받지 않고 일정한 값을 나타내었으며, 구조응력(structural stress)을 이용한 피로수명선도 작성 시 통합피로선도와 일치하였다.

후 기

본 연구의 일부는 불보건설기계코리아(주) 산학협동 연구비에 의하여 수행되었으며, 일부는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. D. S. UM, S. W. kang, T. H. Lee, H. W. Lee, S. H. Choi, : A Study on Bending Fatigue Strength of One Side Fillet Welded T-joint by SM490A steel, Journal of the Korean Welding Society, **16-5**, October, 1998
2. Jong Rak Kim, Yang Hee, : A Study on Structural Characteristics of SM490A TMC Thick Steel Plates, Journal of the KSSC, **Vol 15-3, No. 64**, June 2003
3. Jong Sung Kim, Tae Eun Jin, Jeong Kyun Hong, Dong, P., : Finite Element Analysis and Development of Interim Consolidated S-N curve for Fatigue Design of Weld Structure, Journal of the KSME, **27-5** (2003), 724-733 (in Korean)
4. Dong, P., 2001, "A Structural Stress Definition and Numerical Implementation for Fatigue Evaluation of Welded Joints", International Journal of Fatigue, **Vol. 23/10**, 865-876
5. Dong, P., Hong, J.K., Cao, Z., 2001, "A New Mesh-insensitive Procedure for Characterizing Stress Concentration at Welds," Proceedings of ASME PVP Conference, Service Experience, Fabrication, Residual Stress and Performance, PVP **Vol. 427**, Atlanta, Georgia, July 22-26, 2001
6. Dong, P., Hong, J.K., Cao, Z., 2001, A Mesh Insensitive Stress Procedure for Fatigue Evaluation of Welded Structures, IIW Doc. No. XIII-1902-01/XV-1089-01, International Institute of Welding
7. Dong, P., 2003, Battelle Structural stress JIP Final Report, No. N004431-01