

십자형 필릿 용접부에서 재료 두께 및 용접 층수에 따른 피로파괴 특성

이 용 복*[†]

*홍익대학교 기계.시스템디자인공학과

Characteristics of Fatigue Failure according to Thickness of Material and Number of Passes in Cruciform Fillet Weld Zone

Yong Bok Lee*[†]

*Dept. of Mechanical and System Design Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

[†]Corresponding author : yblee@wow.hongik.ac.kr

Received April 21, 2010 ; Revised June 30, 2010 ; Accepted November 19, 2010)

Abstract

Most of joining processes for machine and steel structure are performed by butt and fillet welding. The mechanical properties and fatigue strength of their welding zone can be effected largely by the differentia of generated heat and changes of grain size according to thickness of material and number of passes in welding process. In this study, it was investigated about characteristics of fatigue failure according to thickness of material and number of passes in cruciform fillet weld zone as the basic study for safe and economic design of welding structures. Fracture modes in cruciform fillet weld zone are classified into toe failure and root failure according to non-penetrated depth. It can be accomplished economic design of welding structures considering fatigue strength when the penetrated depth in fillet weld zone is controled properly.

Key Words : Fillet welding, Fatigue strength, Characteristics of fatigue failure, Cruciform fillet weld zone, Toe failure, Root failure, Penetrated depth

1. 서 론

대부분의 기계나 건축 구조물, 그리고 교량과선박 등의 제작 공정에서 용접에 의한 비중은 증가하고 있고, 접합 방법은 주로 맞대기 및 필릿용접으로 이루어지고 있다. 용접부에는 고열에 의한 재료의 변형과 수축으로 높게 분포하는 잔류응력, 재료 두께와 용접 층수를 고려하지 않을 때 용접 입열과 금속 조직 확산의 불 균일 등이 존재하게 된다¹⁻²⁾. 이와 같은 요인들은 용접부의 기계적 특성을 변화시키고 피로강도를 크게 저하시킬 수 있다³⁻⁵⁾. 따라서 본 연구에서는 용접 구조물의 안전설계에 필요한 용접부의 피로강도 향상을 위한 기초연구로서 필릿 용접부에서의 재료 두께와 용접 층수에 따른 피로파괴 특성에 대하여 고찰해 보고자 하였

다. 상기와 같은 연구의 목적을 위하여 일반적으로 교량이나 선박 구조물 재료로서 많이 사용하고 있는 재료를 선택하고 재료 두께(10, 15, 20mm)를 달리하여 두께 따른 적정 용접 층수와 적정 용접 조건을 적용하여 하중 전달 형과 비 하중 전달 형으로 구분하여 용접을 수행하였다. 용접 후 적당한 크기로 피로시험편을 기계 가공하고 일부는 십자형 단면을 미세가공 및 부식시켜 용접 부를 용착금속부, 열영향부, 모재부가 명확하게 나타나도록 하고 마이크로 비커스 경도를 측정하였다. 그리고 나머지 시험편들은 고 사이클($10^4 \sim 10^6$) 범위에서 4~5단계 작용하중으로 각각 3~4편을 사용하여 피로시험을 수행하였다. 이와 같은 시험으로 얻은 데이터들을 S-N 곡선으로 나타내어 재료 두께와 용접 층수에 따른 피로파괴 특성에 대하여 고찰해 보고자 하였다. 상기의 연구 결과로부터 각종 용접 구조물의 안

전 및 경제적인 설계를 위한 기초 자료를 얻을 수 있다고 생각한다.

2. 시험편의 준비 및 실험 방법

사용 재료는 교량 및 선박 등의 구조물에 많이 사용되고 있는 용접구조용 강재인 SWS 490B를 사용하였고, 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1 및 Table 2와 같다. 시험편의 용접은 십자형 시험편 접합재의 양면 끝 부분을 기계 가공하여 45°개선(groove)한 후 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 판 두께 10mm와 15mm인 경우는 2 pass, 판 두께가 20mm인 경우는 3pass로 GMAW법에 의하여 수행하였다. 이때 십자형 필릿 용접부의 플랭크 각(θ°)은 2개의 강판 두께에 따라 비 하중 전달형은 135°, 하중 전달형은 142°~150° 범위로 하고 각장(l)은 재료 두께와 같도록 하였다. 용접 조건은 재료 두께와 층수에 따라 140~200암페어의 전류와 20~26볼트의 전압을 사용하였고, 지름 1mm의 AWS ER705-6(SM-70)용접봉을 사용하여 12l/min의 CO₂가스 송출 분위기 속에서 40cm/min

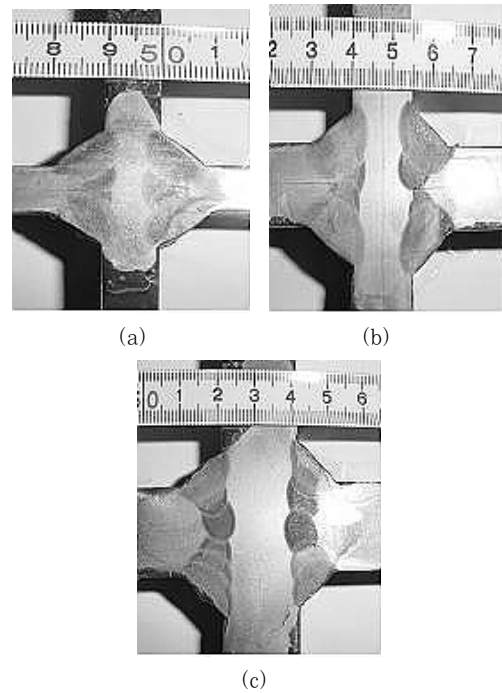


Fig. 1 Cross sections of cruciform fillet welded joints : (a) 2-pass($t_1=10\text{mm}$), (b) 2-pass($t_1=15\text{mm}$), (c) 3-pass($t_1=20\text{mm}$)

Table 1 Chemical compositions of the material

Material (wt.%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SWS 490B	0.14	0.36	1.55	0.14	0.02	0.22	0.21	0.02

Table 2 Mechanical properties of the material

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SWS 490B	400	572	26

Table 3 Chemical compositions of the weld metal for fillet joints

Material (wt.%)	C	Si	Mn	P	S
SM-70	0.09	0.41	1.10	0.12	0.11

Table 4 Mechanical properties of the weld metal for fillet joints

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SM-70	430	540	30

의 속도로 용접하였다. 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 3과 Table 4와 같다. 시험편의 크기는 Fig. 2(a),(b)에 나타낸 바와 같이 하중 전달형과 비 하중 전달형으로 구분하여 Table 5의 규격으로 기계가공 하였다. 그림에서 L : 삽입 판의 두께를 포함하는 주판의 길이, t_1, t_2 : 주판 및 삽입 판의 두께, $2a$: 루트부의 미 용입 길이, $2W$: 필릿 폭, θ : 필릿 각도, ρ : 토우부의 곡률 반경, l : 다리 길이, b : 비드 길이, D : 삽입 판의 길이를 나타낸다. 용접부의 경도는 시험편의 십자형 단면을 기계가공 및 경 연마한 후 십자형 단면에서 토우부와 루트부를 기준으로 하여 두께 방향 0.2mm간격으로 마이크로 비커스 경도를 측정하였다. 그 결과는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다.

피로실험은 25ton 용량의 전기 유압식 피로 시험기 (Instron, Model 1332)를 사용하여 하중제어 방식으로 응력 비($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$)를 "0"으로 하고 10Hz의 정현 파형(sine wave form) 반복하중으로 수행하였다. 균열길이 측정은 십자형 단면의 측정부위를 산화크롬(Cr₂O₃) 등으로 미세 연마(mirror polishing)한 후 나이탈 용액으로 적당하게 부식시켜 용접부의 금속 조직이 잘 나타나도록 하고 피로시험 중 금속현미경(Unitron Versamet-2)을 사용하여 100배의 배율로 1/100mm 오차 범위 내에서 수시로 측정하였다.

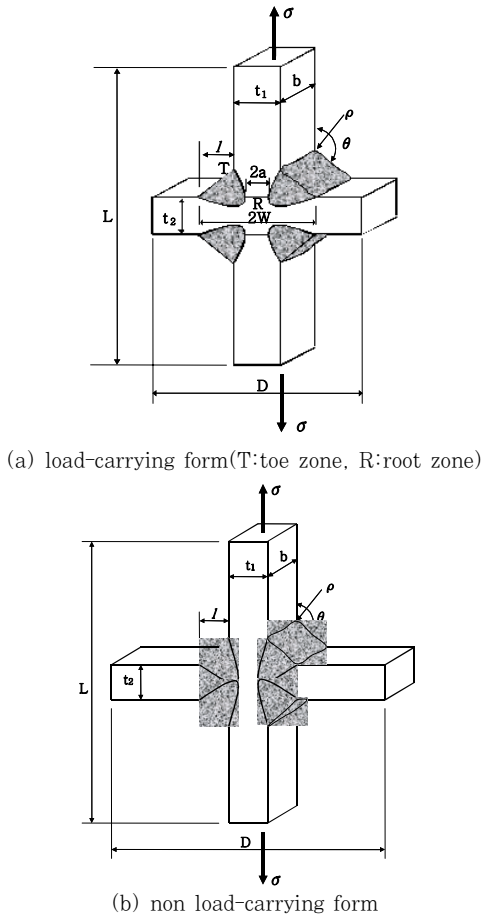


Fig. 2 Configuration of cruciform fillet joints

Table 5 Dimensions of fillet joint specimens (unit : mm)

Type	t1	t2	L	b	D
LC	10	12	260	25	85
	15	12	260	25	85
	20	12	260	25	85
N-LC	10	10	260	25	250
	15	15	260	25	255
	20	20	260	25	260

LC : load-carrying cruciform joint
 N-LC: : non load-carrying cruciform joint

3. 실험결과에 대한 고찰

3.1 용접부의 경도 분포

하중 전달형 십자형 필릿 용접부의 토우부 및 루트부의 재료두께별 경도 분포는 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. 토우부, Fig. 2(a)의 T위치로 부터 경도 분포는 재료 두께 20mm의 경우 용접 외부(boundary between

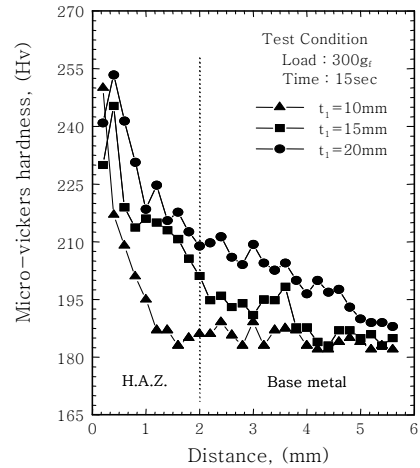


Fig. 3 Hardness distribution in toe zone of load-carrying cruciform welded joints

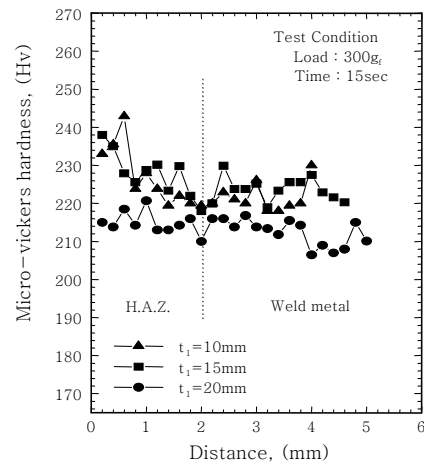


Fig. 4 Hardness distribution in root zone of load-carrying cruciform welded joints

HAZ and deposited metal zone)에서 254Hv로 가장 높게 나타나고 재료 두께 내부 쪽으로 갈수록 현저히 떨어져 외부로부터 거리 6mm인 내부에서 188Hv로 가장 낮게 나타나고 있다. 외부의 경도 값이 내부의 경도 값보다 66Hv가 더 높게 나타난다. 그리고 재료 두께 15mm의 경우 외부에서 246Hv, 외부로부터 6mm 떨어진 내부에서 185Hv로 외부의 경도 값이 내부의 경도 값보다 61Hv가 더 높게 나타나고 있다. 또한 재료 두께 10mm의 경우 외부에서 250Hv, 외부로부터 6mm 떨어진 내부에서 182Hv로 외부의 경도 값이 내부의 경도 값보다 68Hv가 더 높게 나타난다. 이와 같은 현상은 토우부 위치의 외부에서 용착금속과 열영향부가 급 냉 시 수축으로 인하여 금속 조직이 응집된 결과로 생각되며 또한 용접 후 표면으로부터 급 냉 하여 표면이 내부의 모재부보다 경화의 영향을 크게 받았기

때문이라고 생각 된다⁶⁾. 재료 두께가 클수록 경도는 외부로부터 내부 쪽으로 서서히 감소하며 전반적으로 다소 높은 분포를 나타내고 있다. 재료 두께가 작을수록 외부로부터 내부 쪽으로 급강하 하며 전반적으로 낮게 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 재료 두께가 10mm, 15mm의 경우 2패스(2층)용접 하였고, 20mm의 경우 3패스(3층) 용접하였는데 2층 용접 시 용접부가 급 냉하여 용접 열이 내부로 충분히 못 미쳐 용접 금속의 확산이 충분하게 이루어지지 못하였고, 3층 용접 시 더 반복된 용접 열이 내부 쪽으로 용접 금속의 확산을 도모한 결과라 생각 된다⁷⁾.

루트부, Fig. 2(b)의 R로부터 경도 분포는 재료 두께 20mm의 경우 220-206Hv 범위의 분포를 보이며 재료 두께 10mm, 15mm의 경우 243-218Hv 범위의 분포를 보이고 있다. 경도는 전반적으로 열영향부에서 높게 나타나고 용착 금속부에서 낮게 나타나고 있다. 그리고 경도 차이는 토우부(61-68Hv)보다 훨씬 작게 14-25Hv를 보이고 있다. 이와 같은 현상은 재료 두께가 10mm, 15mm의 경우 2패스에 의하여 용접하므로서 냉각이 빨리 이루어져 전반적으로 경도가 낮게 나타났고, 재료 두께가 20mm의 경우 3패스에 의한 용접 횟수의 증가에 따라 반복된 재 가열로 인하여 냉각속도가 지연되므로서 경도 값이 상대적으로 낮아진 것으로 판단된다.

3.2 S-N 선도에 의한 피로파괴 특성

피로실험에 사용된 시험편은 하중 전달 형 십자형 필릿 용접부의 경우 미 용입 길이를 7.2mm, 4.8mm, 2.4mm 및 완전 용입(0.0mm)으로 구분하였고, 비 하중 전달 형 십자형 필릿 용접부의 경우 완전 용입하여 Fig. 2(a),(b)의 형상으로 시험하도록 하였다. 피로시

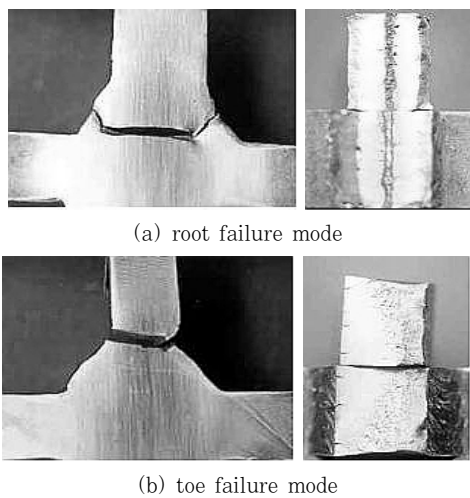


Fig. 5 Failure modes of cruciform joint

험은 사용 재료(SWS 490B)의 인장 강도와 재료 두께를 고려하여 고 사이클 범위($10^4 \sim 10^6$)의 4단계 하중 하에서 수행하였다. 피로시험 후의 파단 형태를 Fig. 5에 나타 내었다. 피로시험 결과는 재료 두께에 따라 분류하여 S-N선도 상에 나타내었고 Fig. 6~ Fig. 9와 같다.

Fig. 6은 재료 두께 10mm의 하중 전달 및 비 하중 전달 십자형 필릿 용접 시험편의 피로시험 결과로서 미 용입 길이가 7.2mm의 경우 전 구간에서 피로강도가 가장 낮은 분포를 나타내고 있고, 다음으로 미 용입 길이 4.8mm, 2.4mm, 0mm(완전 용입)의 순으로 낮게 나타난다. 비 하중 전달 형 시험편의 경우가 가장 높은 피로강도 분포를 나타낸다. 이와 같은 결과는 미 용입 길이가 긴 경우(7.2mm 및 4.8mm) 루트부에서 긴 균열처럼 작용하여 높은 응력 집중을 받아 루트부로부터 균열이 쉽게 진전되어 피로강도가 낮게 나타나는 결과라고 생각 된다⁸⁾. 그리고 2.4mm, 0mm 및 비 하중 전달형의 경우 다소 차이는 있으나 비슷한 피로강도를 보이고 있는 데 이 결과는 미 용입 길이가 작아지므로서 루트부와 토우부에 작용하는 하중 영향이 비슷하여 루트부보다 토우부로부터 초기 균열이 쉽게 진전되는 것으로 생각된다.

Fig. 7은 재료 두께 15mm의 경우로서 재료 두께 10mm의 경우와 같은 경향을 보이고 있고, 미 용입 길

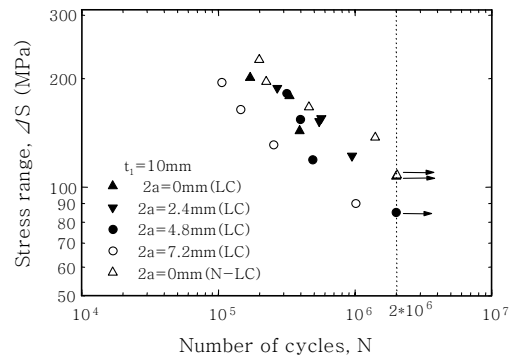


Fig. 6 S-N curves of $t_1=10\text{mm}$ specimens

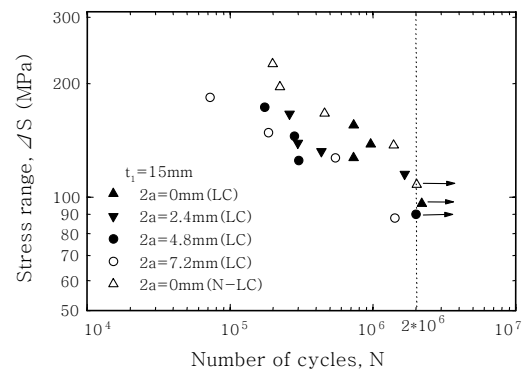


Fig. 7 S-N curves of $t_1=15\text{mm}$ specimens

이 7.2mm, 4.8mm의 순으로 피로강도가 낮게 나타나며 루트부로부터 균열이 발생하여 파단 된다. 그리고 미 용입 길이가 2.4mm, 0mm 및 비 하중 전달형 시험편의 경우 다소 차이는 있으나 비슷한 피로강도를 보이고 있다.

Fig. 8은 재료 두께 20mm의 경우로서 비 하중 전달형 시험편이 전반적으로 가장 낮은 피로강도 분포를 보이고 있다. 하중 전달형의 미 용입 길이 7.2mm, 4.8mm, 2.4mm, 및 0mm인 모든 시험편에서 대부분 토우부로부터 균열이 진전되어 파괴되었고 비슷한 피로강도 값들을 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 하중 전달형의 경우 재료 두께에 따른 하중 면적이 넓어지므로서 주어진 모든 미 용입 길이의 영향을 덜 받아 루트부 파괴가 일어나지 않고 토우부 파괴가 일어난 결과로 생각 된다⁹⁾. 그리고 비 하중 전달형의 경우가 가장 낮은 피로강도를 보이는 것은 재료의 전 처리 가공 이력과 언더컷 등 용접 결함의 영향도 있겠으나 용접부의 개선 (groove) 형상과 용접 열 영향의 차이에 의한 금속 조직 및 잔류응력 분포의 불균일성에 의한 것으로 생각된다. Fig. 9는 완전 용입 된 하중 전달형 및 비 하중 전달형 시험편의 재료 두께별 피로강도를 나타낸 것으로 하중 전달형 및 비 하중 전달형 모두 전반적으로 재료

두께가 클수록 피로강도가 다소 높게 나타나고 재료 두께가 작을수록 피로강도가 다소 낮게 나타나는 경향이 있다. 루트부로부터의 파괴 시에는 재료 두께가 클수록 명확하게 피로강도가 높게 나타나며 토우부로부터의 파괴 시에는 토우부의 유사한 기하학적 영향을 받아 재료 두께에 따른 피로강도의 차이가 별로 나타나지 않는다¹⁰⁻¹¹⁾. 또한 각 두께별로 하중 전달형의 경우가 비 하중 전달형의 경우보다 피로강도가 전반적으로 높게 나타나고 있다. 이와 같은 현상은 하중 전달형의 경우 루트 중앙부까지 양쪽으로 깊게 용접하므로서 균열 진전부에 많은 열 영향을 주어 비 하중 전달형의 경우보다 금속 조직의 확산이 잘 이루어진 결과라 생각된다.

4. 결 론

연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 하중 전달형 십자형 필릿 용접부에서 피로강도는 토우부로부터 균열이 진전될 때가 루트부로부터 진전될 때보다 높게 나타나는 경향을 보인다. 이러한 경향은 토우부의 경도가 루트부의 경도보다 높게 나타나는 경향과 같다.
- 2) 하중 전달 형에서 재료 두께가 작고 미 용입 길이가 클수록 루트부에서 피로균열이 잘 발생하고 재료 두께가 크고 미 용입 길이가 작을수록 토우부에서 피로균열이 잘 발생하였다. 그리고 재료 두께 20mm인 3층 용접 시험편에서는 모든 미 용입 길이에서 토우부로부터 균열이 발생하였다.
- 3) 피로강도는 하중 전달형이 비 하중 전달형보다 전반적으로 다소 높게 나타나며 토우부로부터 피로파괴되었고, 3층 용접한 20mm두께의 시험편이 2층 용접한 10mm 및 15mm두께의 경우보다 높게 나타나는 경향을 보였다.
- 4) 이상의 결론으로부터 십자형 필릿 용접부에서 미 용입 길이에 따라 토우부 파괴나 루트부 파괴가 구별되는데 재료 두께 및 용접 층수와 연계하여 토우 파괴가 되는 범위내로 용접 량을 줄인다면 경제적인 용접 구조물을 설계할 수 있다고 생각된다.

후 기

이 논문은 2009년도 홍익대학교 교내연구비에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

1. ANSI/AWS: Structural welding code- Steel, DI. 1-86

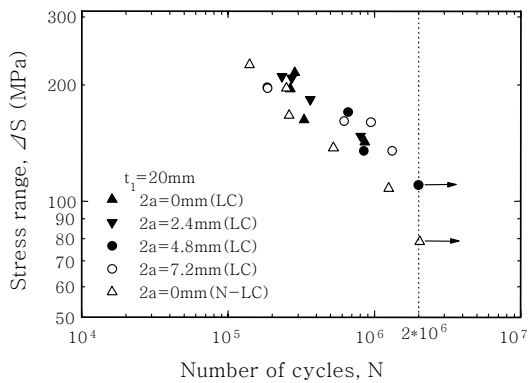


Fig. 8 S-N curves of $t_1=20\text{mm}$ specimens

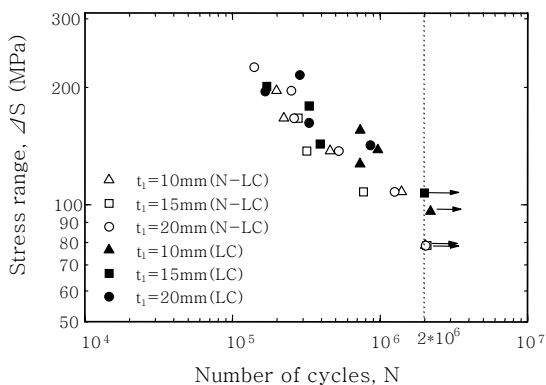


Fig. 9 S-N curves of full penetrated specimens

- (1986)
2. S. D. Pathak, V. M. Radhakrishnam and B. Guha: Fatigue crack growth in cruciform welded joints, *Joining and Materials*, December, 1988, 12-16
 3. G. M. Boyd: Brittle behavior of engineering structures, John Wiley & Sons Inc., New York, 1957
 4. H. Ikawa, H. Oshige, O. Noi, H. Date and K. Uchikawa: Relation between welding conditions and grain size in weld-heat affected zone, *Transactions of the Japan Welding Society*, **9-1**(1978), 47-51
 5. T. Sato: The effect of microstructure on the Table 5.3 Welding conditions for the fillet joints fatigue and impact properties of welded zone in high carbon steels, *Research Article, Trans. ISII.*, **21**(1980), 260-269
 6. Byung-Duck Oh and Yong-Bok Lee: Estimation of fatigue life in butt-welded zone of SM45C steel rod, *Journal of KWJS*, **26-3** (2008), 45-50 (in Korean)
 7. Yong-Bok Lee: Characteristics of fatigue behavior and fracture surfaces by rotary bending test in SM45C welding zone, *Journal of KSMTE*, **19-1**(2010), 26-32(in Korean)
 8. V. Balasubramanian and B. Guha: Influence of weld size fatigue crack growth characteristics of flux cored arc welded cruciform joints, *Materials Science and Engineering A265*, 1999, 7-17
 9. V. Balasubramanian and B. Guha: Influence of flux cored arc welded cruciform joint dimensions on fatigue life of ASTM 517 'F' grade steels, *Int. J. Pres. Ves. & Pip.*, **75** (1998), 765-772
 10. J. M. Ferreira and C. M. Branco: Influence of weld and plate geometry on the fatigue strength of cruciform joints, *Theor. Appl. Frac. Mech.*, (1988), 23-32
 11. J. M. Ferreira and C. M. Branco: Influence of fillet weld joint geometry on the fatigue crack growth, *Theor. Appl. Frac. Mech.*, **15** (1991), 131-142