



미 용입 십자형 필릿 용접부에서의 피로 수명 특성에 관한 연구

†이용복

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과
(2012년 4월 23일 투고, 2012년 6월 21일 수정, 2012년 6월 21일 채택)

A Study on Characteristics of Fatigue Life in LOP Cruciform Fillet Welding Zone

†Yong-Bok Lee

Dept. of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University, Seoul, Korea
(Received April 23, 2012; Revised June 21, 2012; Accepted June 21, 2012)

요약

모든 구조물의 붕괴 사고로부터 인명과 재산의 손실을 방지하기 위하여 안전 설계 및 안전사용 방법을 찾는 것은 필요하며 피로해석으로부터 피로균열의 초기수명 및 전파수명과 함께 전 피로수명을 평가하는 것은 매우 중요하다. 본 연구의 목적은 교량, 선박, 가스 저장 시설을 포함하여 완전 용입이 어렵고 최종 파괴될 때까지 피로 수명 비를 계산하기 어려운 미 용입 십자형 필릿 용접 구조물에서 잘 나타나는 피로균열이 루트 부로부터 발생할 때 초기수명과 전파수명을 파악하는 것이다. 그 결과 피로파괴에 대한 각 피로수명 비는 재료 두께에 따라 5% 범위의 차이가 있으나 전반적으로 초기수명 비는 34~39% 범위이고 전파수명 비는 61~66% 범위로 나타났다.

Abstract - Investigating safer ways to design and use to prevent a loss of life and property by failure of the structures are necessary and assessing total fatigue life with initiation and propagation of fatigue crack accurately through fatigue analysis is very important. The object of this study is to examine the initial life and propagation life when the fatigue crack is introduced from the root which is likely to appear in LOP(Lack of Penetration) cruciform fillet welded structure including bridges, ships and gas storage facilities which are impossible to be fully penetrated and to measure the rate of fatigue life until the final cleavage failure. As the result, each rate of fatigue life for fatigue failure is somewhat different in the range of 5% according to the thickness of material, however, the overall rate of initial life is in the range of 34~39% and propagation life showed the range of 61~66%.

Key words : cruciform fillet welding zone, structural failure, LOP(Lack of Penetration), fatigue crack, root failure, the rate of fatigue life, initial life, propagation life

1. 서론

구조물의 파괴는 대부분 반복적인 하중에 의하여 취약부에서 균열이 발생하고 진전되어 최종 파단에 이르게 된다. 이와 같이 균열이 발생하여 최종 파단에 이르기까지의 전 피로수명은 초기영역과 전파영

역으로 구성된다. 초기영역에서 전파영역으로 천이하는 균열의 크기는 일반적으로 규정되어 있지 않고 보통 연구자의 관점이나 해석상 부재의 크기에 의존하고 있다. 현미경을 다루는 연구자들은 결정상의 결함과 전위 또는 미세한 크기를 기준으로 할 것이고 현장에서 비파괴 장비를 다루는 연구자들은 검사 장비에 의하여 측정 가능한 가장 작은 균열 크기가 될 것이다. 모든 구조물의 파괴사고로 인한 인적 물

†주저자:yblee@hongik.ac.kr

적 사고를 미연에 방지하기 위하여 안전 설계 및 안전사용 방법을 파악하는 것은 중요하며 파괴 역학적 해석으로부터 전체 수명을 정확하게 평가하고 초기 수명과 전파 수명을 파악하는 것이 필요하다. 일반적으로 변형률 진폭이 낮은 경우 초기 수명이 전체 수명의 90%까지 차지하기도 하고 변형률 진폭이 높은 경우에는 균열 전파 영역이 전 피로 수명의 대부분을 차지하기도 한다[1-2]. 따라서 부재의 수명을 파악하기 위해서는 초기 균열 크기를 알거나 가정하는 것이 필요하다. 용접에 의한 기공이나 불순물의 혼입 등 결함이 있는 부재의 초기균열 길이는 알 수 있으나 균열이 없는 재료의 전 피로수명을 평가하기 위해서는 변형률-수명 방법으로 초기수명을 평가하고 파괴 역학적 방법으로 전파수명을 평가하여 전 피로수명을 결정할 수 있다[3-4].

본 연구에서는 교량이나 선박 그리고 가스 저장 설비 등 완전 용입이 어려운 십자형 필릿 용접구조물에서 발생하기 쉬운 루트 부 파괴의 경우 피로균열이 진전할 때 0.25mm (0.01 inch)까지를 초기 피로수명으로 하고 최종 분리 파단 시 까지를 전 피로수명으로 하여 이들에 대한 수명 비를 구해보기로 하였다. 그 결과로부터 미 용입된 십자형 필릿 용접 구조물에서의 안전설계와 안전 사용 조건에 대하여 고찰해 보았다.

II. 시험편의 준비 및 실험 방법

시험편 재료는 선박이나 교량 및 가스 저장 설비 등의 용접구조물에 많이 사용하는 SWS 490B를 선택하고 재료 두께는 이들 구조물에 많이 사용하는 10mm, 15mm, 20mm의 3가지를 선택하였다. 시험편의 재료와 용접와이어의 화학적 성분은 **Table 1**과 같고 기계적 특성은 **Table 2**와 같다. 시험편 재료는 용접하기 전에 기계 가공하여 **Fig. 1**에 나타난 바와 같이 대칭적인 십자형 형상으로 루트 부 파괴를 유발하도록 미 용입량 2a를 7mm로 하였고[5] 주판(main plate)의 재료 두께에 따라 적당하게 양면 45° 경사 및 깊이를 갖도록 개선(groove)하여 필릿 용접하도록 준비하였다. 용접은 모재의 강도 특성을 고

려하여 SM-70의 용접와이어를 사용하였고 **Table 3**의 용접 조건하에서 GMAW(Gas Metal Arc Welding) 법으로 하였다. 시험편은 용접 후 용접비드 방향 길이(b)를 25mm로 하고 **Table 4**의 치수로 기계 가공하였다. 그리고 전·후면을 경면 연마하여 나이탈 용액으로 부식시킨 후 루트 부의 미 용입량(2a)이 7mm에 해당되는 시험편을 사용하였다. 경도 측정은 두께별로 시험편을 선택하여 먼저 마운팅 시킨 후 경면 연마하고 마이크로 비커스 경도계 (Matsuzawa Mxt-a7e Digital Microhardness Tester)를 사용하여 루트 부로부터 균열 진전 방향으로 0.2mm 간

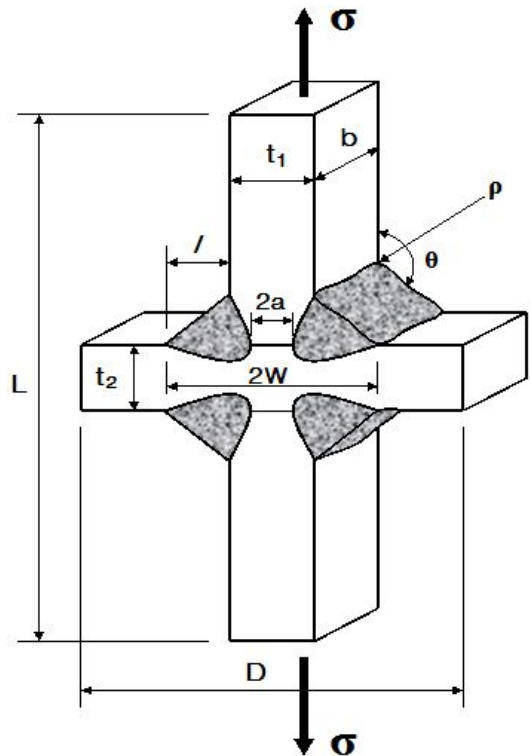


Fig. 1. Configuration of cruciform fillet weld joint.

Table 1. Chemical compositions of weld material

Material (wt.%)	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Fe
SWS 490B	.14	.36	1.55	.14	.02	.22	.21	.02	Rem.
SM-70	.09	.41	1.10	.12	.11	-	-	-	Rem.

Table 2. Mechanical properties of weld material

Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
SWS 490B	400	572	26
SM-70	430	540	30

Table 3. Welding conditions for the fillet joints

Plate Thickness (mm)	LOP (mm)	Number of pass	Welding current (A)	Voltage (V)
10	7.0	1	170	23
		2	140	20
15	7.0	1	190	25
		2	170	20
20	7.0	1	190	25
		2	170	20
		3	170	20

Table 4 Dimensions of 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

LC : load-carrying cruciform joint

격으로 측정하였다. 본 시험편의 형상 및 각 주요 인자의 기호 설명은 사용기호에 표시하였다.

실험은 25ton 용량의 전기 유압식 피로 시험기 (Instron Model 1332)를 사용하였고, 실험 하중 제어 방식은 응력 비($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$)를 "0"으로 하여 정현파 형(Sine wave form)의 반복하중 10Hz 로 수행하였다. 또한 실험 하중은 4단계로 구별하여 고 사이클($10^4 \sim 10^6$) 범위에서 수행하였다. 균열길이는 산화크롬(Cr_2O_3)으로 균열 면을 경면 연마하고 금속현미경(Unitron Versamet-2)을 사용하여 1/100mm 오차 이내에서 수시로 측정하였다.

III. 용접부의 경도 분포 및 피로균열 특성

경도 분포는 두께별로 십자형 필릿 용접부의 루트 부로부터 나타내면 Fig. 2와 같다. 그림에서 루트 부에서의 경도 측정 지역은 주로 용착금속부이고 초기 일부는 열영향부가 된다. 경도는 재료두께 10mm 와 15mm의 경우 초기 열영향부에서 233-243Hv 범위의 다소 높은 경도 값을 나타냈으며 그 후 용착금속부에서 220-230Hv 범위의 경도 값을 일정하게 나타냈다. 재료 두께 20mm의 경우 경도 분포는 초

기 열영향부에서 약간 높게 나타나나 전반적으로 207-221Hv 범위로 나타나고 있다. 재료 두께에 따른 경도 분포는 재료 두께 10mm 및 15mm의 경우가 재료 두께 20mm의 경우보다 전반적으로 높게 나타나고 있다. 이와 같은 결과는 재료 두께 10mm, 15mm의 경우 2패스에 의한 2층 용접을 하므로 서 용접부가 다소 급 냉하여 높은 경도를 보이고 20mm의 경우 3패스에 의한 3층 용접을 하므로 서 상대적으로 어닐링(annealing)효과를 더 받아 합금 성분의 확산과 인성의 향상으로 경도가 다소 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

응력확대계수 폭 ΔK 는 시험편의 형상과 균열 방향에 따라 결정되며, 미 용입 십자형 용접부에서는 l/t_1 및 a/W 의 값에 따라 결정된다. 또한 $\Delta K / \Delta \sigma \sqrt{W}$ 와 l/t_1 이 다른 a/W 의 관계는 Fig. 3과 같으며 응력확대계수 폭 ΔK 의 측정곡선을 얻을 수 있다. 대칭적인 미 용입 필릿 용접 루트 부의 응력확대계수 폭은 다음과 같다[6].

$$\Delta K = \frac{\Delta \sigma}{1 + 2(l/t_1)} [A_1 + A_2 \cdot a/W] \left[\pi a \cdot \sec\left(\frac{\pi \cdot a/W}{2}\right) \right]^{1/2}$$

여기에서

$$A_1 = 0.528 + 3.287(l/t_1) - 4.361(l/t_1)^2 + 3.696(l/t_1)^3 - 1.874(l/t_1)^4 + 0.415(l/t_1)^5$$

$$A_2 = 0.218 + 2.7717(l/t_1) - 10.171(l/t_1)^2 + 13.122(l/t_1)^3 - 7.775(l/t_1)^4 + 1.785(l/t_1)^5$$

Fig. 4~Fig. 6은 루트 부 균열에서 시험편의 두께별 초기수명 및 파단수명을 나타낸 것이다. 여기에서 시험편 폭($b=25\text{mm}$) 내의 용입 량 차이에 의한 초기 균열 선단의 불일치를 고려하여 루트부의 균열이 1mm 진전 되었을 때를 초기수명으로 가정하였다. 그리고 그로부터 최종 파단까지의 수명을 균열진전 수명으로 하여 응력확대계수 폭과 사이클 수와의 관계를 나타내었다. 내구 응력확대계수 폭(ΔK_c)은 2×10^6 (cycles)에 상응하는 피로 수명을 기준으로 판 두께가 10mm인 경우 $8.4 \text{MPa} \cdot \sqrt{m}$, 판 두께가 15mm인 경우 $7.2 \text{MPa} \cdot \sqrt{m}$, 판 두께 20mm인 경우 $13.5 \text{MPa} \cdot \sqrt{m}$ 로 나타났다. 재료 두께 20mm의 경우 내구 응력확대계수 폭이 상대적으로 매우 높게 나타나는 것은 두께 10mm 및 15mm의 경우 2패스에 의한 2층 용접을 한 것과 비교하여 3패스에 의한

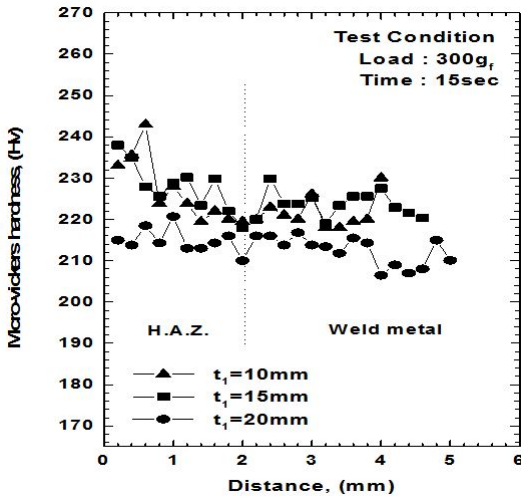


Fig. 2. Micro-hardness distributions from root zone.

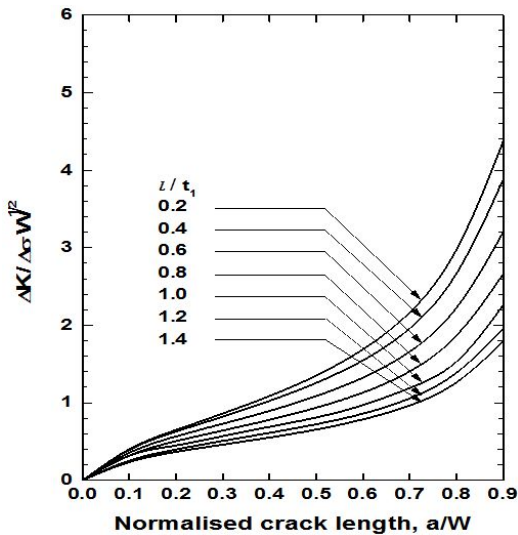


Fig. 3. Relation between normalized crack length and $\Delta K/\Delta\sigma\sqrt{W}$.

3층 용접을 하므로써 반복적인 용접 열에 의한 어닐링 효과와 합금 성분의 확산이 잘 이루어지고 열응력 집중이 완화된 때문이라고 판단된다[7]. 재료 두께 10mm와 15mm의 경우 같은 2패스로 2층 용접을 하였는데 재료 두께 10mm의 경우가 15mm의 경우보다 내구 응력확대계수 폭이 다소 높게 나타났다. 이것은 용접전류의 차이(Table 5)에 의하여 균열이 시작하는 루트 부 1mm 이후의 경도 분포(Fig. 2)

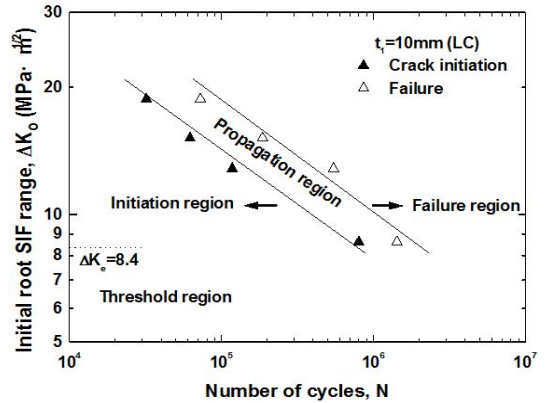


Fig. 4. Crack initiation and propagation related to initial stress intensity factor range ($t_1=10\text{mm}$).

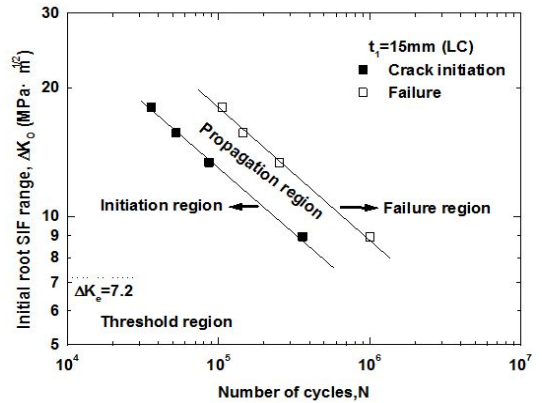


Fig. 5. Crack initiation and propagation related to initial stress intensity factor range ($t_1=15\text{mm}$).

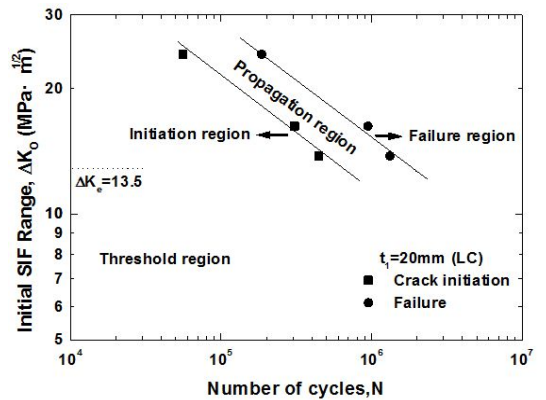


Fig. 6. Crack initiation and propagation related to initial stress intensity factor range ($t_1=20\text{mm}$).

에서 나타나는 바와 같이 재료 두께 10mm보다 15mm의 경도가 전반적으로 높게 나타나는데 상대적으로 취성이 높아져서 균열 진전 시 내구 응력확대계수의 폭이 낮아진 것으로 판단된다.

IV. 피로수명 비에 관한 고찰

사용 중인 구조물에서 균열 같은 결함을 발견하였을 때 잔여 수명을 예측할 수 있다면 사고를 미연에 방지할 수 있고 보수 및 안전 대책을 수립하기가 용이할 것이다. Fig. 4~Fig. 6의 응력확대계수 폭과 하중 사이클 관계에서 초기 수명과 파단 수명은 일정한 비율의 관계를 나타내고 있다. 이들 결과로부터 파단까지의 전 수명(N_t)에 대한 초기수명(N_i)과 균열 전파수명(N_p) 비를 알아보면 Table 5와 같다. 재료 두께가 두꺼울수록 피로균열의 초기 수명 비는 낮게 나타나고 상대적으로 균열 전파 수명 비는 높게 나타나는 경향을 보이고 있다. 본 연구와 유사한 많은 연구 자료들에 의하면 균열 초기수명 비는 재료의 종류, 하중 조건, 환경 등에 따라 20%부터 90%의 범위에서 나타나는 것으로 알려지고 있다. 본 연구결과 재료 두께에 따라 초기 수명과 전파 수명은 5% 범위의 차이가 있고 최종 파단 수명에 대한 초기 수명 비는 34~39%, 균열 전파 수명 비는 61~66%의 범위로 나타났다.

본 연구와 관련된 미 용입 십자형 필릿 용접구조물의 안전설계를 위하여 초기 수명은 매우 중요하므로 상기의 결과로부터 재료 두께별 초기 수명을 알아보면 Fig. 7과 같다. 그림에서 나타나는 바와 같이

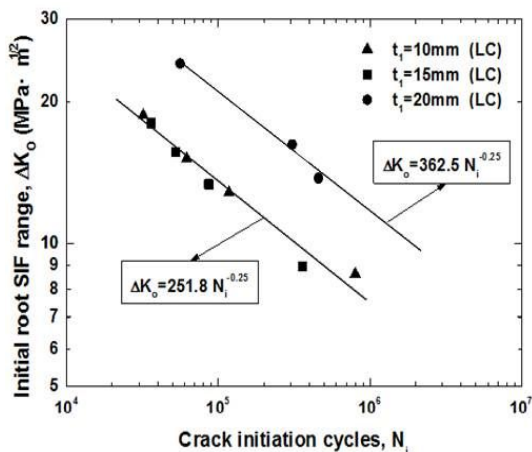


Fig. 7. Initial root SIF range to crack initiation cycles.

재료 두께 20 mm인 경우가 재료 두께 10mm 및 15mm의 경우보다 동일 응력확대계수 폭에서 초기 수명이 장 수명으로 나타나고 우수한 균열 발생 저항특성을 갖고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 경도에서도 나타나는 바와 같이 재료 두께 10mm 및 15mm의 경우 용접된 루트부에 2패스에 의한 2층 용접을 하면서 급 냉으로 인한 합금 성분의 확산이 충분히 이루어지지 않았고 용접 잔류응력이 크게 분포한 원인으로 판단되며 상대적으로 재료 두께 20mm의 경우 3패스에 의한 3층 용접을 하므로 서 반복된 가열에 의하여 루트 부에 합금 성분의 확산이 어느 정도 이루어지고 잔류응력이 다소 완화되어 루트 부의 피로강도가 향상된 결과라고 판단된다.

Fig. 8은 루트 부의 파단 형상과 파단면을 나타낸다. 십자형 형상의 용접부에서 삽입 판 중앙부의 미용입 길이 7mm를 갖는 루트 부로부터 양쪽으로 균열이 진전하여 최종 파단 시 45°의 전단 파단 형태를 보이고 있다.

Table 5. The rate of initiation and propagation life to total fatigue life

The rate of fatigue life (%)	Material thickness (mm)		
	10	15	20
$\frac{N_i}{N_t}$	39	35	34
$\frac{N_p}{N_t}$	61	65	66

N_i : Initiation life, N_p : Propagation life
 N_t : Total fatigue life

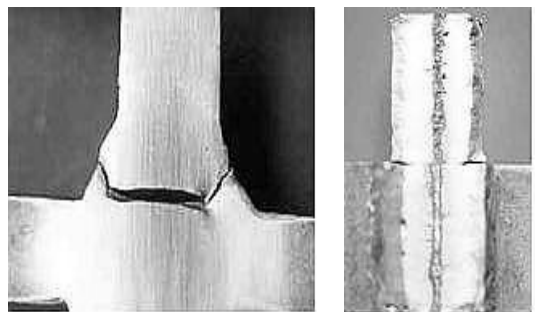


Fig. 8. Root failure mode in cruciform fillet weld joint.

V. 결 론

1. 내구 응력확대계수 폭 (ΔK_e)은 2×10^6 사이클의 피로 수명을 기준으로 할 때 재료두께 10mm인 경우 $8.4 MPa \cdot \sqrt{m}$, 재료두께 15mm인 경우 $7.2 MPa \cdot \sqrt{m}$, 재료두께 20mm인 경우 $13.5 MPa \cdot \sqrt{m}$ 로 나타났다. 이들 값은 용접 조건에 따라 크게 영향을 받은 것으로 판단된다.

2. 전 피로수명에 대한 수명 비는 재료 두께에 따라 초기수명 및 전과수명이 5% 범위로 다소 차이가 있으나 전반적으로 초기수명 비는 34~39%, 균열전과수명 비는 61~66%의 범위로 나타났다.

3. 동일 응력확대계수 폭에서 초기 수명은 재료두께 20mm인 경우가 재료두께 10mm 및 15mm의 경우보다 장 수명으로 나타났고 우수한 균열 발생 저항 특성을 나타냈다. 이와 같은 결과는 재료 두께 20mm의 경우 재료 두께 10mm, 15mm의 경우보다 더 반복된 용접에 의한 어닐링(annealing) 효과를 더 받아 상대적으로 경도는 낮으나 합금 성분의 확산과 인성의 향상에 따른 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2011학년도 홍익대학교 학술 연구 진흥 비에 의하여 지원되었음.

사용기호

- L : main plate length containing insert plate thickness, 삽입 판의 두께를 포함한 주판의 길이
- t_1 : main plate thickness, 주판의 두께
- t_2 : insert plate thickness, 삽입 판의 두께
- $2a$: crack length at root of fillet, 필릿 루트부에서의 균열길이
- $2W$: fillet width, 필릿 폭

- θ : fillet angle, 필릿 각도
- ρ : fillet radius of toe, 토우 부의 곡률 반경
- l : leg length, 다리 길이(각장)
- b : bead length, 비드 길이
- D : insert plate length, 삽입 판의 길이
- $\Delta\sigma$: stress range, 응력 폭

참고문헌

- [1] Bannantine, J., Comer, J. and Handrock, J., 1987, "Fracture Mechanics" Fundamental of Metal Fatigue Analysis, First Edition, p. 87.
- [2] Lee, Y. B., Siljander, A. and Lawrence Jr., F. V., 1992, "The Role of Casting Porosity in Fatigue Properties of AL-Si 319 Lost Foam Cast Alloy," KSME Journal, Vol.6, No.2, pp.81-87.
- [3] Smith, K. N., Watson, P. and Topper, T. H., 1970, "A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals," J. of Materials, Vol. 5, No. 4, pp. 767-778.
- [4] Bannantine, J., Comer, J. and Handrock, J., 1987, "Cyclic Stress-Strain Curve Determination," Fundamental of Metal Fatigue Analysis, First Edition, pp.55-79.
- [5] Lee, Y. B., Chung, J. K. and Park, S. H., 2011, "Patterns and Characteristics of Fatigue Failure in Cruciform Fillet Weld Joint," Journal of KWJS, Vol.29, No.9, pp. 429-434.
- [6] Frank, K. H. and Fisher, J. W., 1979, "Fatigue Strength of Fillet Welded Cruciform Joints," J. Struct. Div., ASCE, 105, pp. 1727-1740.
- [7] Lee, Y. B., Chung, C. S., Park, Y. K. and Kim, H. K., 1998, "Effects of Redistributing Residual Stresses on the Fatigue Behavior of SS330 Weldments," Int. J. Fatigue, Vol.20, No.8, pp.565-573.