

십자형 필릿 용접부에서의 피로파괴 형상과 특성

이 용 복^{*,†} · 정 준 기^{*} · 박 상 흡^{**}

^{*}홍익대학교 기계·시스템디자인공학과

^{**}공주대학교 기계자동차공학부

Patterns and Characteristics of Fatigue Failure in Cruciform Fillet Weld Joint

Yong-Bok Lee^{*,†}, Joon-Ki Chung^{*} and Sang-Heup Park^{**}

^{*}Department of Mechanical & system design Engineering, Hongik Univ. Seoul 121-797, Korea

^{**}Mechanical and Automative Engineering, Kongju National Univ. Cheonan 314-701, Korea

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

(Received May 4, 2011, Revised July 1, 2011, Accepted August 16, 2011)

Abstract

The proportion of the welding in the production process of machinery, buildings and marine structures is increasing and the joining are mainly conducted by butt and fillet weld. In the case of fillet weld, the shape of structures is complicated depending on the constraint on the geometry of the structures, therefore, the full penetration is mostly difficult. Accordingly, it is necessary to establish safe and economical criteria of design of the structures through the strength based on the penetration state of the fillet weld. Patterns of fatigue failure in cruciform fillet weld joint appear in the form of the root, toe and mixed failure. In the case of toe and mixed failure, the fatigue strength is higher than root failure. Therefore, we have to make the enough depth of penetration or perform the welding work through improving the fatigue strength of cruciform joints in welded structures. So it is necessary to optimize the penetrated depth in the range of the possible mixed failure and find the way in the cost-effective design to lessen the amount of the welding work.

Key Words : Fillet weld, Fatigue failure, Fatigue strength, Penetrated depth, Toe failure, Root failure, Mixed failure

1. 서 론

기계와 건축 및 교량과 선박 등 대부분의 구조물 제작공정에서 용접에 의한 비중은 증가하고 있고 접합 방법은 주로 맞대기 및 필릿 용접으로 이루어지고 있다. 그러나 이들 용접부에는 높은 아크열에 의하여 재료의 변형과 수축이 생기고 이로 인하여 잔류응력이 존재하게 되고, 용접 기능사의 미숙과 열악한 환경조건은 여러 가지 결함을 유발시킬 수 있다¹⁻²⁾. 이와 같은 요인들은 용접부의 기계적 특성과 피로강도를 크게 저하시킬 수 있으므로 이를 해결하기위한 많은 연구가 진행되어 오고 있다³⁻⁵⁾. 그리고 특히 선박과 같이 제작공정에

서 용접에 의한 비중이 큰 구조물들의 경우 생산성 향상을 위해서는 용접부의 강도향상과 더불어 경제성을 고려한 용접 법을 개발하는 것이 앞으로의 국내외적인 관심사이다⁶⁻⁸⁾. 따라서 본 연구에서는 용접 구조물의 안전설계에 필요한 용접부의 피로강도 향상과 경제성을 고려한 용접방법을 위한 기초연구로서 하중전달 십자형 필릿 용접부에서 용입 깊이에 따른 피로파괴 특성과 형상에 대하여 고찰해 보고자 하였다.

상기와 같은 연구의 목적을 위하여 일반적으로 교량이나 선박 구조물 재료로서 많이 사용하고 있는 재료를 선택하고 재료두께(10, 15, 20mm)를 달리하여 두께에 따른 적정 용접 층수와 적정 용접조건(전압 및 전류 등)을 적용하고 용입 깊이를 4가지로 구분하여 필릿

용접을 수행하였다. 용접 후 적당한 크기로 피로시험편을 기계 가공하고 일부는 십자형 단면을 미세가공 및 부식시켜 용접부가 명확하게 나타나도록 하여 피로 시험 시 균열 진전을 잘 관찰할 수 있도록 하였다. 그리고 피로시험은 고 사이클($10^4 \sim 10^6$)범위에서 4~5단계 작용하중으로 각각 3~4편의 시험편을 사용하여 피로 시험을 수행하였다. 이와 같은 시험으로부터 얻은 데이터들을 S-N 곡선으로 나타내고 용입 깊이에 따른 피로 파괴 특성과 형상에 대하여 고찰해 보았다.

상기의 연구 결과는 각종 필릿 용접 구조물의 피로강도 향상과 더불어 경제적인 용접방법의 기초 자료로서 활용할 수 있다고 생각한다.

2. 시험편 준비 및 실험 방법

본 연구를 위하여 시험편 재료는 일반적으로 교량 및 선박 구조물에 많이 사용하고 있는 SWS 490B강재를 선택하고 재료두께를 10mm, 15mm, 20mm의 3가지로 구분하였다. Table 1에 강재의 화학적 성분과 기계적 특성을 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions & Mechanical properties

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

(a) Chemical compositions

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

(b) Mechanical properties

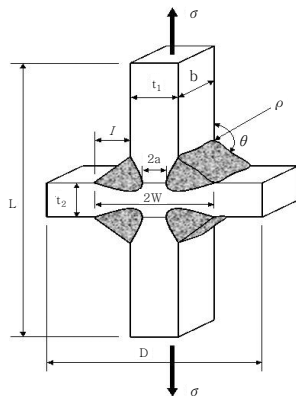


Fig. 1 Configuration of load-carrying cruciform fillet joints

그리고 Fig. 1과 Table 2에 나타낸바와 같이 십자형 단면의 가로방향 삽입 판 길이($D = 85\text{mm}$), 재료 두께를 포함한 세로방향 길이($L = 260\text{mm}$)로 하고 후방향인 용접 방향 길이를 300mm로 하였다. 용접은 Table 3과 같이 재료 두께 별 적정 용접 조건을 적용하여 120~160mm/min의 이송 속도로 GMAW법으로 필릿 용접하였다. 용접에 사용한 용접봉은 모재와 강도가 유사한 AWS ER705-6을 사용하였다. 이때 미 용

Table 2 Dimensions of fillet joint specimens(unit : mm)

Type	t_1	t_2	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	125
	15	15	260	25	125
	20	20	260	25	125

LC: lack of penetration (load-carrying shape)
N-LC: non-lack of penetration(load-carrying shape)

Table 3 Welding conditions for the fillet joints

Plate Thickness (mm)	LOP (mm)	Number of pass	Welding current (A)	Voltage (V)	
10	Non-lack of penetration (N-LC)	1	180	24	
		2	140	20	
	2.4(LC)	1	190	20	
		2	140	20	
	4.8(LC)	1	180	24	
		2	140	20	
	7.2(LC)	1	170	23	
		2	140	20	
	15	Non-lack of penetration (N-LC)	1	190	26
			2	170	20
2.4(LC)		1	190	26	
		2	170	20	
4.8(LC)		1	190	26	
		2	170	20	
7.2(LC)		1	190	25	
		2	170	20	
20		Non-lack of penetration (N-LC)	1	190	25
			2	190	25
	3		160	21	
	2.4(LC)	1	190	25	
		2	180	23	
		3	170	21	
	4.8(LC)	1	170	26	
		2	180	23	
		3	170	21	
	7.2(LC)	1	190	25	
		2	170	20	
		3	170	20	

입(Lack of penetration) 길이(2a)를 2.4mm, 4.8mm, 7.2mm로 구분하고 완전 용입(Non-lack of penetration) 시험편과 함께 상 하판 재료의 필릿 용접 부를 45°의 양면 경사를 갖도록 개선(groove)하여 용접하였다. 용접 층수는 재료 두께 및 형상을 고려해서 용접구조물의 강도상 적당한 용접 조건을 적용하였다. 재료 두께 10mm인 경우와 15mm인 경우는 2 pass로 2층 용접하였고, 재료 두께가 20mm인 경우는 3pass로 3층 용접하였다. 용접 후 용접 길이 방향으로 25mm가 되도록 기계 절단하고 십자형 단면을 경면 연마하여 나이탈 용액으로 부식시킨 후 용접영역의 용입 상태와 미용입 길이를 측정하고 해당 치수에 정확한 시험편만을 선정하여 피로시험편으로 사용하였다.

피로실험은 25ton 용량의 전기 유압식 피로 시험기를 사용하였고 하중제어 방식으로 응력 비($R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$)를 "0"으로 하여 10Hz의 정현파 형(Sine wave form) 반복하중을 사용하였다. 피로 균열길이는 금속 현미경을 사용하여 1/100mm 오차 범위 내에서 실험 중 수시로 측정하였다.

3. 피로파괴 특성 및 형상

3.1 S-N선도에 의한 피로강도

Fig. 2는 재료 두께가 10mm이고 미 용입 길이(2a)가 2.4mm, 4.8mm, 7.2mm 및 완전 용입된 십자형 필릿 용접 시험편의 피로시험 결과를 피로균열 발생 부위 별 3가지 파단형태에 따라서 나타낸 것이다.

Fig. 2에서 보면 토우부로부터의 파괴는 같은 수명 범위에서 루트부로부터의 파괴 경우보다 전반적으로 피로강도가 높게 나타나고 있다. 완전 용입의 경우 모두 토우부로부터 균열이 발생하여 파괴 되었으며 전반적으로 피로강도도 높게 나타나고 있다. 그리고 루트부로부터

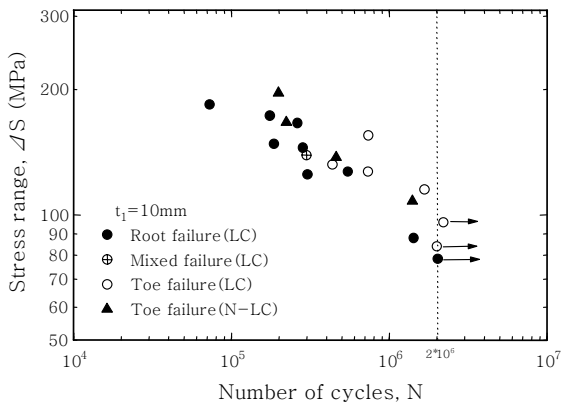


Fig. 2 Fatigue test results of $t_1=10\text{mm}$ specimens containing three failure modes

터의 파괴는 전반적으로 피로강도가 낮게 나타나고 있다. 혼합된 피로파괴형태는 5,000사이클 근방에서 먼저 루트부에서 균열이 발생하여 진전하였으며 2.55×10^5 의 사이클에서 토우부에서 균열이 발생하여 양쪽 균열이 진전하다가 2.974×10^5 사이클 근방에서 두 균열이 합체되는 동시에 분리 파괴 되었다. 이들 결과로부터 완전 용입 되었거나 용입 깊이가 클수록 토우 부 파괴 형상을 보이며 피로강도가 높게 나타남을 알 수 있다. 반면에 용입 깊이가 작을수록 루트 부 파괴 형상을 보이며 피로강도가 낮게 나타나고 있다. 또한 혼합 파괴의 경우 다소 높은 시험하중 범위에서 단 한 번의 경우에만 나타났으며 피로강도는 루트 부 파괴의 경우보다 다소 높게 나타나고 있음을 보인다.

Fig. 3은 재료 두께가 15mm이고 미 용입 길이(2a)가 2.4mm, 4.8mm, 7.2mm 및 0mm(완전 용입)인 십자형 필릿 용접 시험편의 피로시험 결과를 피로균열 발생 부위 별 3가지 파단형태에 따라서 나타낸 것이다.

피로강도는 10mm의 경우에 비하여 구별하기가 다소 어려움이 있으나 마찬가지로 토우 부 파괴의 경우가 루트 부 파괴의 경우보다 높은 경향을 나타낸다고 볼 수 있다. 이와 같은 결과는 재료 두께 15mm의 경우 미용입 길이는 재료 두께 10mm의 경우와 같으나 필릿 폭(2W)이 커서 상대적으로 미 용입 비(2a/2W)가 작기 때문에 루트 부 파괴에서 피로강도는 미 용입 비가 작을수록 높게 나타나고 미 용입 비가 클수록 낮게 나타난다고 볼 수 있다. 혼합파괴는 재료 두께 10mm의 혼합파괴의 경우처럼 다소 높은 하중 범위에서 두 번의 피로파괴를 보이고 있고 같은 수명 범위에서 가장 높은 피로강도를 나타낸다.

Fig. 4는 재료 두께가 20mm이고 미 용입 길이가 2.4mm, 4.8mm, 7.2mm 및 0mm(완전 용입)인 십자형 필릿 용접 시험편의 피로시험 결과를 같은 방법으로 나타낸 것이다.

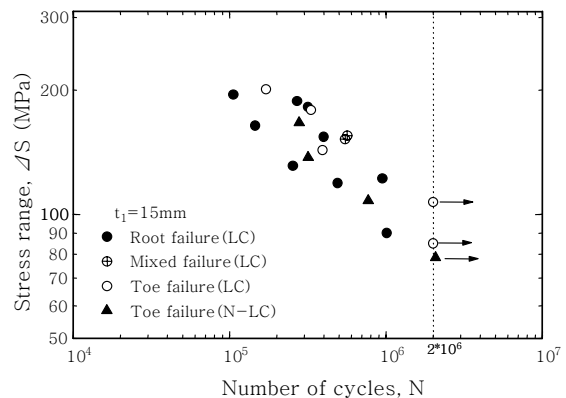


Fig. 3 Fatigue test results of $t_1=15\text{mm}$ specimens containing three failure modes

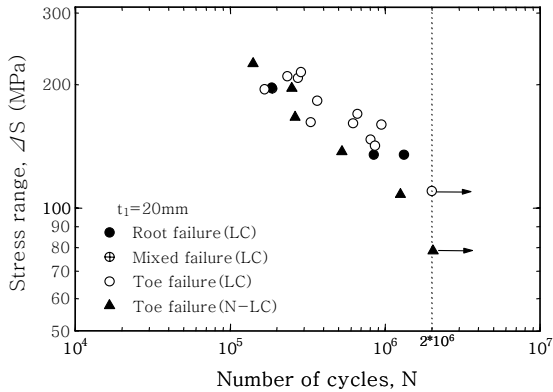


Fig. 4 Fatigue test results of $t_1=20\text{mm}$ specimens containing three failure modes

피로강도는 재료 두께 10mm 및 15mm의 경우와 비교하여 전반적으로 높게 나타났으며 대부분 토우파괴를 보이고 있다. 루트 부 파괴는 3개의 실험 데이터를 보이고 있는데 미 용입 깊이가 가장 큰 7.2mm의 경우이며 피로강도 값도 높게 나타나고 있다. 여기에서는 혼합파괴의 경우는 나타나고 있지 않으나 혼합 파괴 시에도 높은 피로강도를 나타내리라 생각된다.

Fig. 5 & 6은 재료 두께가 10mm, 15mm, 20mm이고 용입 깊이에 따라 미 용입 깊이가 2.4mm, 4.8mm, 7.2mm로 구분된 모든 시험편에 대한 피로시험 결과를 함께 나타낸 것이다.

전체적으로 볼 때 피로강도는 파단 형태가 토우 부 파괴인 경우가 루트 부 파괴의 경우보다 높게 나타나고 있고 같은 용입 깊이를 갖는 시험편에서는 파단 형태별 재료 두께가 클수록 피로 강도가 높게 나타난다. 혼합 파괴는 재료 두께 10mm와 15mm의 경우 미 용입 깊이가 2.4mm일 때 발생하였으며 피로강도 값은 같은 재료 두께에서 토우 부 파괴시의 높은 피로강도 값과 유사하게 나타나고 있다. 따라서 이들 결과로부터 피로 파괴 강도가 취약한 루트 부 파단이 발생되지 않도록

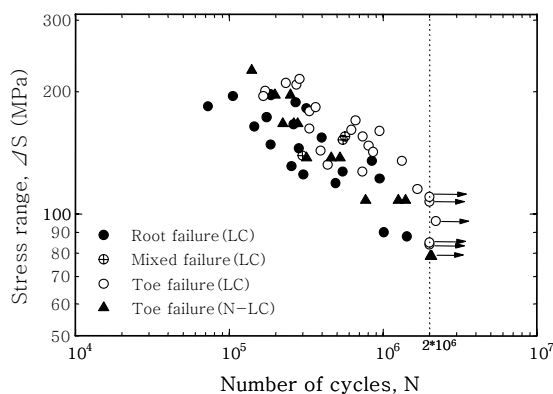


Fig. 5 Fatigue test results of $t_1=10\text{mm}$, $t_1=15\text{mm}$ and $t_1=20\text{mm}$ specimens

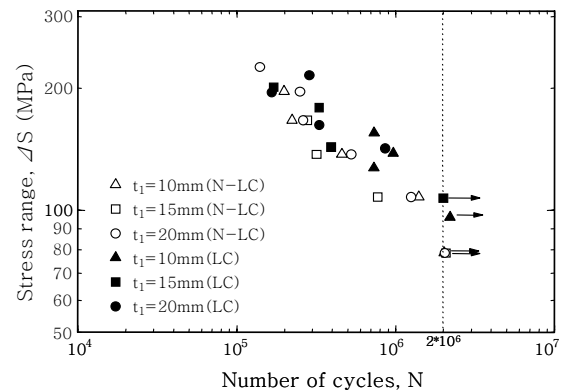


Fig. 6 Fatigue test results of $t_1=10\text{mm}$, $t_1=15\text{mm}$, $t_1=20\text{mm}$ full penetration specimens

하고 가능한 피로강도가 높은 토우 부 파괴가 발생하는 범위에서 또는 혼합 파괴가 발생하는 범위에서 용입 깊이를 조절하고 가능한 용접 량을 줄일 수 있는 방법을 취하므로써 피로강도를 고려하고 경제적인 용접 구조물을 설계할 수 있다고 생각한다. 이와 관련하여 재료 두께 10mm 및 15mm의 경우 재료 두께에 대한 미용입비($2a/t_1$)가 0.48 및 0.32일 때 혼합 파괴 형태를 나타내고 있는데 Fig. 7에서 보면 재료 두께 10mm이고 미 용입 깊이가 2.4mm의 경우 90MPa~195MPa의 일정 응력 범위에서 4,650사이클로부터 루트 부 균열이 발생하여 진전하였고 루트 부 균열이 3.8mm정도 진전된 255,000사이클 때부터 토우 부 균열이 발생하여 동반 진전한 후 297,400사이클에서 두 균열의 합체와 동시에 최종 분리 파손 되었다.

이러한 결과로부터 본 연구에서의 재료 두께 10mm 십자형 필릿 용접부와 관련하여 기하학적 조건 및 용접 조건 그리고 작용하중을 고려할 때 미 용입 깊이를 2.4mm ~ 3.8mm의 범위로 다소 크게 하므로써 용접 량을 줄일 수 있다고 생각된다. 또한 이와 같은 연

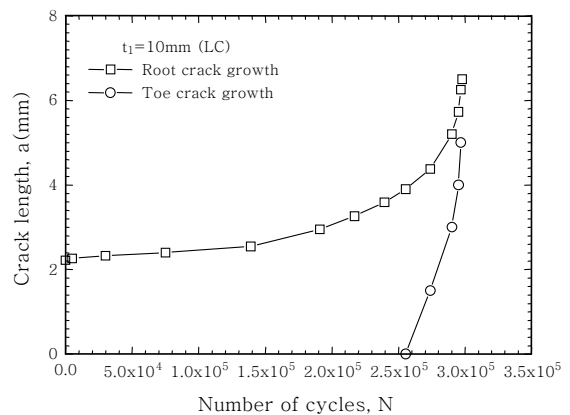


Fig. 7 Typical mixed crack growth curves of cruciform weld specimens

구를 체계적으로 수행하므로써 그 결과 모든 용접 구조물의 피로강도를 고려하고 경제적인 설계를 할 수 있는 자료를 구축할 수 있다고 생각한다.

3.2 피로파괴 형상

앞에서 논의한 십자형 필릿 용접부에서의 파괴형태는 루트 부 파괴, 토우 부 파괴 그리고 혼합 파괴의 3가지 형태로 나타나는데 이들 파괴 형상을 결정하는 요인은 주로 기하학적 조건과 응력 범위의 영향 그리고 용접 조건을 들 수 있고 이와 관련한 많은 연구가 수행되어 왔다⁹⁻¹²⁾. 그러나 이들 모두 일 부 한정된 범위에서의 연구들로서 복합적인 자료를 제공하지 못하고 있다. 따라서 앞으로도 이와 관련한 많은 연구가 요구된다. 실험 결과 피로강도는 토우 부 파괴 시와 혼합 파괴 시에 전반적으로 높게 나타나고 루트 부 파괴 시 낮게 나타나고 있다. 따라서 용접 구조물의 피로강도를 높게 하기 위해서는 용입 깊이를 충분하게 하거나 완전 용입으로 용접 작업을 수행해야 하는데 그러면 용접 작업량이 많아지고 경제적인 면에서 손실이 크므로 혼합 파괴가 가능한 범위에서 용입 깊이를 갖도록 하여 용접 량을 줄이는 방법으로 용접 구조물의 경제적인 설계 방법을 모색하는 것이 필요하다. Fig. 8에 3가지 파괴 형상을 나타냈고 Fig. 7은 혼합 파괴 시 루트 부 균열 및 토우 부 균열의 합체에 의한 피로파괴 현상을 나타내었다.

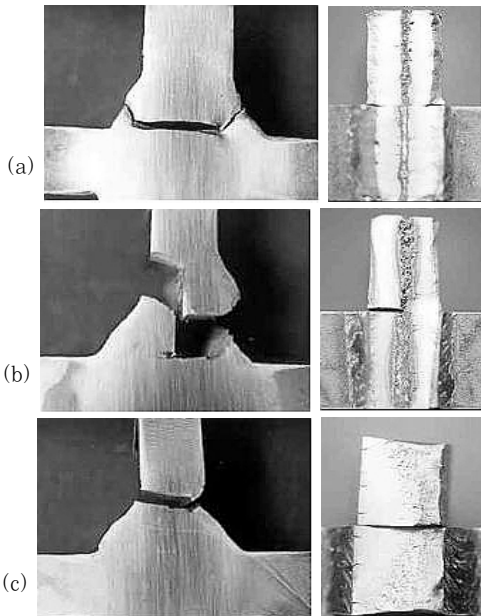


Fig. 8 Typical three failure modes of cruciform joints (a) Typical root failure mode (Front failure section) (b) Typical mixed failure mode (Front failure section) (c) Typical toe failure mode (Front failure section)

Fig. 8의 3가지 파괴 형상을 보면 루트 부 파괴의 경우 균열이 루트부로부터 발생하여 하중방향과 가로 방향으로 직선적으로 진전한 후 최종 파단위치에서 목두께 방향으로 전단파단 형태로 급속 파단 되었다. Pathak¹³⁾에 의하면 초기 루트부에서 균열이 시작되었을 때의 각도는 약 20° 정도였고 급속 파단 되는 최종 지점에 서는 약 70° 정도로 나타남을 보였다. 그러나 본 실험에서는 초기에 균열이 하중 방향과 직각 방향으로 직진한 후 최종 파단 시 약 45° 정도의 경사를 보이고 있다. 혼합 파괴의 경우 앞 절에서 설명한 바와 같이 루트부에서 먼저 시작된 균열과 일정 하중 사이클 후 토우부에서 발생하여 진전된 균열과 연결되면서 동시에 분리 파단 되는 현상을 나타내고 있다. 토우 부 파괴의 경우 토우부에서 균열이 발생하여 초기에 재료 내부 쪽으로 주판(main plate) 표면에 대해서 직각으로 진전하지 않고 약 7°~20° 범위의 경사를 가지며 균열이 진전 되었다. Frank의 실험에 의하면 약13°의 경사를 가지고 진전한다고 밝힌 바 있다. 이와 같은 현상은 필릿 용접 시 개선 각도, 용접 조건, 토우부의 필릿 각도(θ°), 하중 조건 등과 피로 강도가 취약한 열 영향지역 분포에 따른 결과로 생각된다.

4. 결 론

- 1) 필릿 용접부에서의 파괴 형상은 루트 부 파괴, 토우 부 파괴 및 혼합형 파괴의 3가지 형상으로 나타나고 있고 모든 재료 두께에서 피로파괴 강도는 토우 부 파괴의 경우가 루트 부 파괴의 경우보다 높게 나타나고 있고 재료 두께가 클수록 높게 나타난다.
- 2) 혼합형 파괴시의 피로강도는 재료 두께 10mm의 경우 루트 부 파괴 시 보다 높고 토우 부 파괴 시 보다 다소 낮게 나타났으나 재료 두께 15mm의 경우 토우 부 파괴 시와 같은 높은 값을 나타내고 있다. 이와 같은 차이는 재료 두께에 따른 각장(l)을 포함한 미 용입 비($2a/2W$ 또는 $2a/t_1$)와 관련이 있다고 생각된다.
- 3) 피로강도는 토우 부 파괴 시와 혼합 파괴 시에 전반적으로 높게 나타나고 루트 부 파괴 시 낮게 나타나고 있다. 따라서 용접 구조물의 피로강도를 높게 하기 위해서는 용입 깊이를 충분하게 하거나 완전 용입으로 용접 작업을 수행해야 하는데 그러면 용접 작업량이 많아져 경제적인 면에서 손실이 크므로 혼합 파괴가 가능한 범위에서 용입 깊이를 갖도록 하고 용접 량을 줄이는 방법으로 경제적인 용접 구조물의 설계 방법을 모색하는 것이 바람직하다.
- 4) 필릿 용접부의 루트 부 파괴, 토우 부 파괴 및 혼합 파괴 3가지 형상에서 각각의 피로 균열 진전 형태는

개선 각도, 용접 조건, 토우부의 필릿 각도(θ°), 하중 조건 등과 피로 강도가 취약한 열 영향지역 분포도에 따라 영향을 받는다고 생각되며 필릿 용접부의 피로강도를 향상시키기 위해서는 이들 요인에 대하여 체계적인 더 많은 연구가 필요하다고 생각한다.

후 기

이 논문은 2010학년도 홍익대학교 학술 연구진흥비에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

1. J. R. Garland and P. R. Kirkwood: Toward improved submerged arc weld metal, Metal Construction(Part 1), Metal Construction, **7-5** (1975), 275
2. J. R. Garland and P. R. Kirkwood: Toward improved submerged arc weld metal, Metal Construction(Part 2), Metal Construction, **7-6** (1975), 320
3. D. Radaj: Review of fatigue strength assessment of non-welded and welded structures based on local parameters, Int. J. Fatigue, **18-3** (1996), 153~170
4. Yong Bok Lee, Chin Sung Chung, Young Keun Park and Ho Kyung Kim: Effect of Redistributing Residual Stress on the Fatigue Behavior of SS330 Weldment, Int. J. Fatigue, **20-8** (1998), 565-573
5. Yong Bok Lee and Byung Duck Oh: Characteristics of Fatigue Crack Propagations with respect to the Angles between Rolling and Tensile Loading Directions of Steel Plates, J. of KSMTE, **14-3** (2005), 74-80
6. S. W. Kang et al: An improvement of the fatigue strength in fillet welded cruciform joints of mild steel under pulsating tension load, JSNA of Japan, **150-11** (1981), 499
7. V. Balasubramanian and B. Guha: Influence of weld size on fatigue crack growth characteristics of flux cored arc welded cruciform joints, Materials Science and Engineering, **A265** (1999), 7~17
8. Yong Bok Lee, Chin Sung Chung and Nam Ik Cho: A Study on Fatigue Behavior Considering Effects of Redistributing Tensile Residual Stress and Crack Closure in SS330 Weldment, J. of KSME(A), **20-7** (1996) 2234-2245
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
12. Y. B. Lee: Characteristics of Fatigue Failure according to Thickness Material and Number of Passes in Cruciform Fillet Weld Zone, Journal of KWJS, **28-6**(2010), 45-50 (in Korean)
13. S. D. Pathak, V. M. Radhakrishnam and B. Guha: Fatigue crack growth in cruciform welded joints, Joining and Materials December, 1988, 12~16