

## 완전 용입 십자형 필릿용접부에서 피로파괴특성과 피로수명에 관한 연구

†이용복

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과  
(2012년 4월 23일, 2012년 투고 8월 1일 수정, 2012년 8월 1일 채택)

### **A Study on Characteristics of Fatigue Failure and Fatigue Life in Full Penetrated Cruciform Fillet Weld Zone**

†Yong-Bok Lee

*Dept. of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University, Seoul, Korea*  
(Received April 23, 2012; Revised August 1, 2012; Accepted August 1, 2012)

#### 요 약

용접기술의 발달과 더불어 기계, 교량, 선박 그리고 가스설비 등의 제작공정을 위하여 용접의 이용이 증가하고 있다. 따라서 그들의 용접 구조물 제작을 위하여 높은 생산성과 안전설계를 고려하는 용접 법을 개발하는 것이 요구되고 있다. 본 연구에서는 재료 두께, 용접층수, 하중 방향 그리고 토우부의 노치 반경과 관련하여 완전 용입 십자형 필릿 용접부의 피로강도 및 피로수명의 특성에 대하여 기초적으로 고찰하였다. 대부분의 피로파괴는 십자형 필릿 용접의 토우부에서 발생하였다. 피로강도 및 피로수명은 토우부의 노치 반경과 플랭크 각에 의한 응력집중의 영향을 받고 있다. 토우부의 금속이 다층 용접에 의하여 어닐링 되고 확산 되었으며 그 결과 침상 페라이트 조직이 형성되어 피로강도와 피로수명을 향상시켰다.

**Abstract** - The use of welding process has been increased for manufacture of machine, bridges, ships, gas facilities and so on together with development of welding technique. Accordingly, it has been needed to develop the welding methods considering higher productivity and safety design for manufacture of their welding structures. In this study, it was studied basically on characteristics of fatigue strength and fatigue life in full penetrated cruciform fillet weld zone in relation to material thickness, welding passes, loading direction and notch radius of toe zone. Most of fatigue failure occurred in toe zone of cruciform fillet weld joint. Fatigue strength and fatigue life are under the influence of stress concentration due to notch radius and flank angle of toe zone. The metal of toe zone annealed and diffused by multi-layer welding and acicula ferrite structure formed by the result improved fatigue strength and fatigue life.

**Key words** : welding process, higher productivity, safety design, fatigue strength, fatigue life, multi-layer welding, acicula ferrite structure

#### 1. 서 론

기계, 교량, 선박 그리고 가스설비 등 대부분 강 구조물들에 의한 제작공정에서 구조물의 강도 향상 및 편리성 때문에 용접에 의한 비중이 증대되고 있

다. 그리고 이들 구조물은 대부분 맞대기 및 필릿 용접으로 이루어지고 있다. 그러나 이들 용접부에는 높은 아크열에 의하여 재료의 변형이 생기기 쉽고 이로 인하여 잔류응력이 존재하게 되고, 용접 기능사의 미숙과 열악한 환경조건은 여러 가지 결함을 유발시킬 수도 있다[1-3]. 최근에는 용접기술과 용접 방법의 발전으로 그들과 같은 요인들을 잘 해결하고

†주저자:yblee@hongik.ac.kr

있고 용접부의 강도 향상을 위한 많은 연구가 진행되고 있다[3-5]. 그리고 특히 선박과 같이 제작공정에서 용접에 의한 비중이 큰 구조물들의 경우 생산성 향상을 위해서는 용접부의 강도향상과 더불어 경제성을 고려한 용접법을 개발하는 것이 앞으로의 관심사이다[6-7]. 따라서 본 연구에서는 이와 관련하여 완전 용입에 의한 십자형 필릿 용접 구조물의 안전설계를 위한 가장 기본적인 토우 부 파괴 시 피로강도와 피로수명의 특성을 파악하고 재료두께, 용접층수, 하중방향 그리고 토우부의 노치 곡률반경과의 관련성에 대하여 연구하고자 하였다.

이와 같은 연구를 위하여 교량이나 선박 그리고 가스설비 등 일반 강 구조물 재료로 많이 사용하고 있는 재료를 사용하여 재료두께를 10, 15, 20mm로 구분하고 두께에 따른 적당한 용접 층수와 전압 및 전류 등의 용접조건을 적용하고 완전 용입 되도록 필릿 용접을 수행하였다. 용접 후 재료 두께별로 하중 형 및 비 하중 형으로 구분하여 시험편을 기계 가공하고 피로시험을 수행하였다. 이들 시험에 의한 데이터들로부터 상기한 피로균열 특성과 피로수명에 대하여 고찰해 보았다.

## II. 시험편의 준비 및 실험 방법

본 연구를 위하여 시험편 재료는 교량이나 선박 등 강구조물에 많이 사용하고 있는 SWS 490B강재를 선택하고, 재료두께는 10mm, 15mm, 20mm의 3가지를 사용하였다.

시험편 준비는 우선 재료 두께를 포함하여 가로 및 세로 폭 길이를 260mm~280mm가 되도록 십자형

**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

형상으로 하고 용접 길이 방향을 300mm~ 320mm로 하여 삽입 판 재료의 위아래 판의 양쪽 용접부위를 45° 로 개선(groove)가공 하였다. 그리고 용접 작업은 기계가공 된 재료를 지그로 고정시키고 재료 두께별 적정 용접 조건으로 GMAW법에 의하여 완전 용입 되도록 십자형 필릿 용접하였다. 용접와이어는 모재와 강도가 유사한 SM-70(AWS ER705-6)을 사용하였다. 용접 층수는 재료 두께 및 형상을 고려하여 용접구조물의 강도상 적정 용접 조건을 적용하고 재료 두께 10mm인 경우와 15mm인 경우는 2 pass로 2층 용접하였고, 재료 두께가 20mm인 경우는 3pass로 3층 용접하였다. 용접 후 재료를 용접 길이 방향으로 25mm가 되도록 기계 절단 및 가공하고 십자형 단면을 경면 연마하여 나이탈 용액으로 부식시킨 후 용접부의 용입 상태를 점검하였다. 그리고 하중 형 및 비하중형 시험편으로 구분하여 주판의 길이를 260mm, 삽입 판의 길이를 85mm로 기계 가공하여 피로시험편으로 사용하였다.

피로시험은 25ton 용량의 전기 유압식 피로 시험기 (Instron, Model-1332)를 사용하여 고 사이클( $10^4 \sim 10^6$ ) 범위에서 4~5단계의 작용하중으로 각 3~4편의 시험편을 사용하였고, 하중제어 방식은 응력 비( $R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$ )를

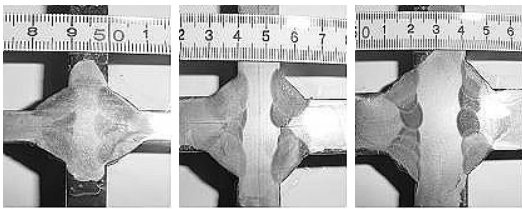
**Table 3.** Welding conditions according to material thickness

Plate Thickness (mm)	Type	Number of pass	Welding current (A)	Voltage (V)
10	N-LC	1	170	25
		2	180	23
	LC	1	180	24
		2	140	20
15	N-LC	1	180	26
		2	180	23
	LC	1	190	26
		2	170	20
20	N-LC	1	200	25
		2	200	25
		3	180	23
	LC	1	190	25
		2	190	25
		3	160	21

LC : load-carrying type, N-LC : non load-carrying type

Table 4. Dimensions of cruciform fillet welded 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



(a) 2-pass( $t_1=10\text{mm}$ ) (b) 2-pass( $t_1=15\text{mm}$ ) (c) 3-pass( $t_1=20\text{mm}$ )

Fig. 1. Cross section of full penetrated cruciform welding joints.

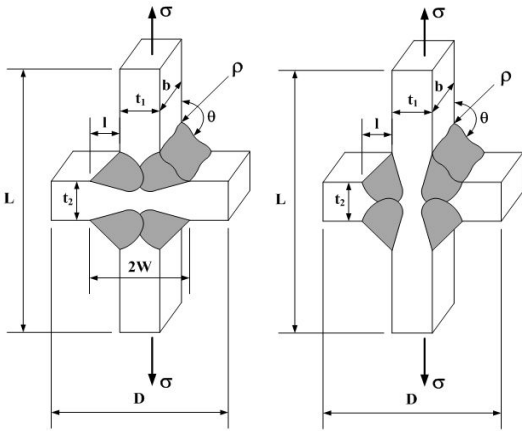


Fig. 2. Configurations of LC type specimen and N-LC type specimen.

“0”으로 하여 10Hz의 정현 파형(Sine wave form) 반복하중으로 수행하였다. 균열길이는 금속 현미경(Unitron Versamet-2)을 사용하여 100배의 배율로 1/100mm 오차 범위 내에서 실험 중 수시로 측정하였다. 시험 후 시험편의 파단면을 기계가공하고 경

면 연마하여 나이탈 용액으로 부식시킨 후 용접 토우 부를 주사전자현미경(SEM)으로 촬영하였다.

시험편의 재료와 용접과이어의 화학적 성분은 Table 1과 같고 기계적 성질은 Table 2와 같다. 그리고 용접 조건은 재료 두께별로 구분하여 Table 3에 나타내고 시험편의 크기는 하중 전달 형 및 비하중 전달 형으로 구분하여 Table 4에 나타냈다. Fig. 1은 재료 두께별 완전 용입 시험편의 단면을 나타내고, Fig. 2는 하중 전달 형 및 비하중전달형의 시험편 형상을 나타낸다.

### III. 실험결과에 대한 고찰

#### 3.1. 용접부의 경도 분포

경도 시험은 경면 연마한 시험편의 토우부로부터 0.2mm 간격으로 모재부의 내부 쪽으로 이동시키며 마이크로 비커스 경도( $H_V$ )를 측정하였다. 십자형 필릿 용접부의 토우부로부터 두께에 따른 경도 분포는 Fig. 3과 같다. 경도 값은 열영향부와 용착금속부에서 모재부보다 상대적으로 높게 나타났다. 경도분포는 판 두께가 두꺼울수록 상대적으로 열영향부 주위의 경도가 전반적으로 더 높게 나타났고 모재 쪽으로 갈수록 모든 재료의 경도가 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 현상은 용접 후 모재가 대기와 직접 접촉하여 급랭되면서 모재의 탄소가 침입 형 고용체로 존재하고 있다가 용접 시 열을 받게 되면 열영향부에 국부적으로 확산되어 밀도가 높아지면서 열처리 효과가 나타나고 경도 값이 높아진 것으로 판단된다. 재료두께가 20mm인 경우 2층 용접된 재료두께 15mm 및 10mm와 비교하여 3층 용접을 하므로 상대적으로 서냉 되고 반복 가열로 인한 합성금속조직의 확산이 잘 이루어져 경도분포가 완만한 감소를 나타내고 있는 것으로 판단된다. 재료두께 10mm인 경우 재료두께 15mm의 경우와 비교하여 열영향부로부터 모재 부 쪽으로 경도가 급격히 떨어지는 것은 급냉으로 열에 의한 합성금속조직의 확산이 상대적으로 원만하게 이루어지지 못한 때문이라고 판단된다. 이와 같은 결과는 토우 부로부터의 파괴 시 기하학적인 요소와 함께 응력범위에 따라 피로수명에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 하중 전달 형 및 비하중 전달 형 시험편에서의 피로수명에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

#### 3.2. 피로파괴 특성 및 피로수명

완전 용입 십자형 필릿 용접 시험편의 하중 전달 형 및 비하중 전달 형에 대한 피로시험 결과를 판 두께에 따라 분류하여 S-N선도로 나타내면 Fig. 4~Fig. 7

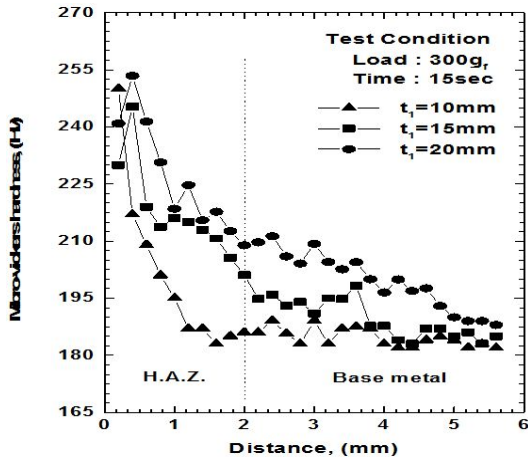


Fig. 3. Micro-hardness distributions from toe zone of cruciform fillet weld joints.

과 같다. Fig. 4~Fig. 6은 판 두께가 10mm, 15mm, 20mm인 시험편의 피로시험 결과를 하중 전달 형 (load carrying)과 비 하중 전달 형(non-load carrying)으로 구분하여 나타낸 것이고, Fig. 7은 이들 3가지의 판 두께별 피로시험 결과를 함께 나타낸 것이다. 모든 두께의 시험편에서 하중 전달형의 경우가 비 하중 전달형의 경우보다 전반적으로 피로강도가 높게 나타났다.

Table 5는 완전 용입된 십자형 시험편을 하중 전달 형 형식에 따라 분류하고 각각의 용접 끝단의 곡률 반경( $\rho$ )과 플랭크 각( $\theta$ ), 응력집중계수, 사용응력, 파단수명을 요약하여 나타낸 것이다. Table 5에서 나타낸바와 같이 용접 끝단의 곡률 반경( $\rho$ )과 플랭크 각( $\theta$ )의 변화에 따라 시험편의 피로수명의 변화를 알 수 있다. 여기서 곡률반경( $\rho$ )의 값과 플랭크 각( $\theta$ )의 값이 작아질수록 피로수명이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 플랭크 각이 크고 저 하중 상태임에도 불구하고 피로수명이 작아지는 것을 알 수 있는데 이것은 곡률 반경의 값이 상대적으로 작고 강한 노치인성으로 인하여 그 부위에 응력집중이 일어나 피로수명에 영향을 미친 것으로 판단된다[8]. 따라서 도우 부 파괴가 일어나는 완전 용입된 용접부에서는 곡률 반경( $\rho$ )과 플랭크 각( $\theta$ )을 완만하게 해 줌으로써 노치부의 응력집중을 작게 하여 피로수명을 연장시키도록 하는 것이 바람직하다. 또한 십자형 필릿 용접 시 삽입판 위아래 판의 45°경사 개선(groove)부에 다층 용접하여 용입을 하므로 저 하중 전달 형 시험편의 균열 진전 방향에 반복적으로 열을 가하게 되어 이때 합성 금속조직 변화가 피로

Table 5. Relationship between geometry factors and fatigue life by fatigue test

Type	Thickness (mm)	$\rho$ (mm)	$\theta$ (°)	Kt	Stress amplitude (MPa)	Number of cycle (Nf)
L-C	10	0.27	150	3.49	96	2,200,000
L-C	10	0.24	145	3.63	138	965,810
L-C	10	0.26	143.5	3.55	127	732,870
L-C	10	0.24	142.5	3.63	155	734,190
L-C	15	0.27	153	3.80	107	2,000,000
L-C	15	0.24	150	3.96	143	392,590
L-C	15	0.23	148	4.09	179	330,650
L-C	15	0.22	142	4.17	201	170,830
L-C	20	0.27	145	3.99	142	859,483
L-C	20	0.23	147.3	4.33	162	330,590
L-C	20	0.22	143.0	4.36	195	166,400
L-C	20	0.23	145.0	4.24	215	286,070
N-L-C	10	0.21	122	3.73	196	198,900
N-L-C	10	0.22	121.5	3.62	166.6	223,590
N-L-C	10	0.18	117.5	3.96	137.2	459,550
N-L-C	10	0.22	121.5	3.62	107.8	1,400,000
N-L-C	10	0.22	120	3.62	78.4	2,030,000
N-L-C	15	0.23	116	4.28	166.6	278,260
N-L-C	15	0.23	124	4.33	137.2	318,960
N-L-C	15	0.24	128.5	4.20	107.8	772,740
N-L-C	15	0.13	126	5.93	78.4	2,080,000
N-L-C	20	0.23	117	5.00	107.8	1,250,000
N-L-C	20	0.23	117	5.93	78.4	2,040,000
N-L-C	20	0.18	112	5.63	196	250,400
N-L-C	20	0.19	113.5	5.52	166.6	261,830
N-L-C	20	0.20	111.5	5.29	137.2	525,510
N-L-C	20	0.18	113.5	5.73	225.4	140,250

강도 향상에 좋은 영향을 준 것으로 판단된다.

Fig. 7은 판 두께별 그리고 하중 전달 형과 비 하중 전달형의 피로특성을 알아보기 위하여 모든 시험 결과를 재료 두께와 시험하중별로 구분하여 나타낸 그림이다. 그림에서 나타나는 바와 같이 하중 전달 형이 비 하중 전달형의 경우보다 전반적으로 피로강도가 높게 나타나고 있음을 알 수 있으나 두 시험하중 형태에서 모두 재료 두께별 피로강도는 별로 차이가 나타나지 않았다.

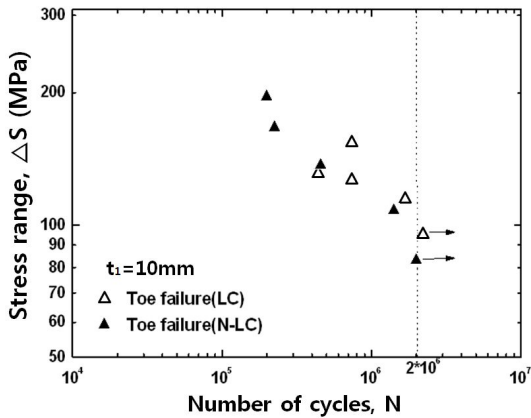


Fig. 4. Fatigue test results of  $t_1=10\text{mm}$  specimens.

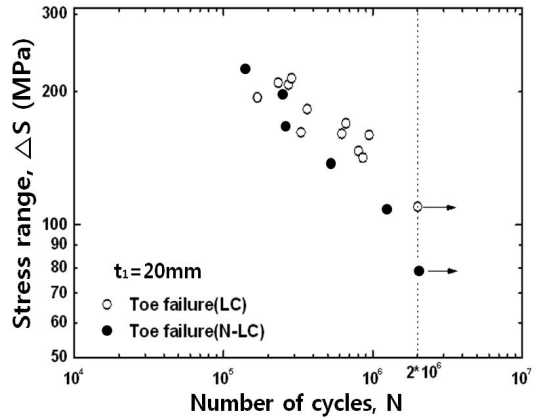


Fig. 6. Fatigue test results of  $t_1=20\text{mm}$  specimens.

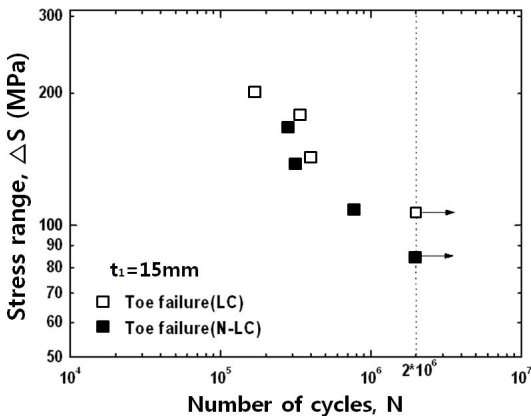


Fig. 5. Fatigue test results of  $t_1=15\text{mm}$  specimens.

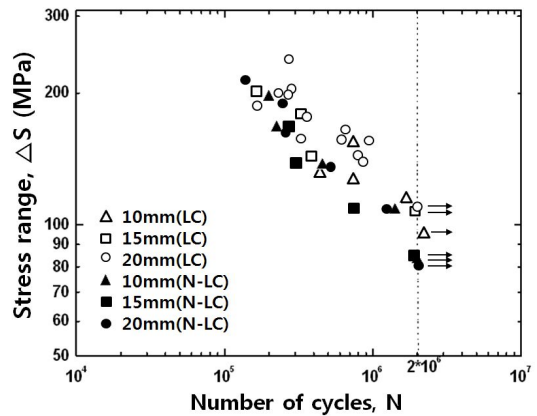
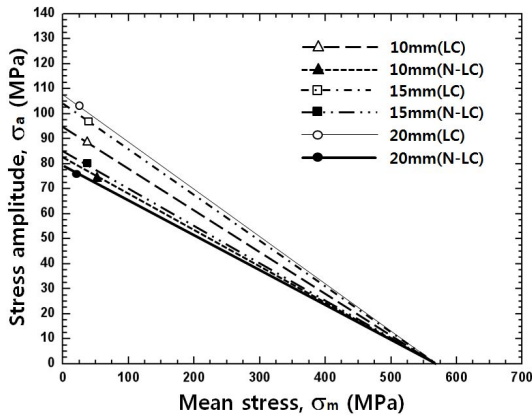


Fig. 7. Fatigue test results of  $t_1=10\text{mm}$ ,  $15\text{mm}$ ,  $20\text{mm}$  specimens.

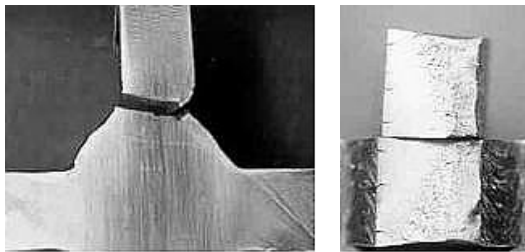
### 3.3 무한 피로수명과 토우부의 금속조직

Fig. 8은 Fig. 7의 S-N곡선 데이터로부터  $2 \times 10^6$ 사이클에서의 피로강도를 내구한도로 하고 완전 용입된 십자형 필릿 용접 시험편 재료를 두께별 하중 전달 형 과 비 하중 전달 형으로 구분하여 Goodman의 식에 의한 무한 수명 영역을 나타낸 Haigh 선도이다[9]. 그림에서 하중전달형의 경우가 비 하중전달형의 경우보다 모든 재료 두께에서 내구한도가 높고 무한수명 영역이 크게 나타났다. 이와 같은 결과는 용접 시 삽입 판을 수평으로 하여 다층 용접하므로써 하중전달형의 경우 비 하중전달형의 경우보다 토우부의 균열진전부에 용접에 의한 열 영향을 더 많이 받게 하여 합성 금속조직의 확산으로 좋은 영

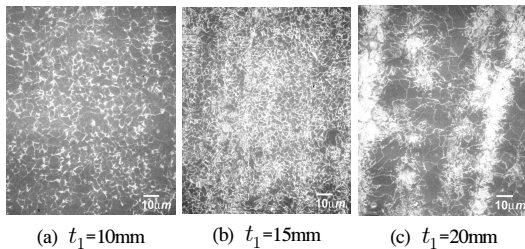
향을 준 때문이라 판단된다. 그리고 하중전달형의 경우 재료 두께에 따라 20mm, 15mm, 10mm의 순으로 내구한도가 높고 무한수명 영역이 크게 나타났다. 이 결과는 재료 두께 20mm의 경우 3패스에 의한 3층 용접을 하였고, 두께 15mm 및 10mm의 경우 2패스에 의한 2층 용접을 하므로써 다층 용접에 의하여 반복적인 용접 열 영향을 받아 합성 금속조직의 확산이 잘 이루어진 재료 두께 20mm의 경우가 가장 우수한 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 또한 재료 두께 15mm인 경우 재료 두께 10mm의 경우와 비교하여 동일하게 2패스에 의한 2층 용접을 하였으나 패스마다 재료 두께에 따른 용입 량을 더 깊고 많이 하므로써 열 영향에 의한 합성 금속 조직 확산의



**Fig. 8.** Haigh Diagrams indicating Infinite fatigue life by Goodman equation.



**Fig. 9.** Toe failure mode in cruciform fillet welded joint.



**Fig. 10.** SEM micrographs of H.A.Z. in toe of cruciform fillet welded joint.

영향을 더 받은 것으로 판단된다[10]. 비 하중전달형의 경우 재료 두께별 내구한도 및 무한수명 영역의 크기 차이는 하중 전달 형과 비교하여 매우 작게 나타났으며 약간의 차이를 보이는 것은 **Table 7**에 나타난 바와 같이 토우부의 곡률반경에 따른 응력집중계수의 영향을 받은 것으로 판단된다. **Fig. 9**는 십자

형 필릿 용접부에서의 토우 부 파괴와 파단면을 나타낸다. 균열은 오른쪽 토우부로부터 발생하여 왼쪽으로 진전되어 최종 파단 되었다. **Fig. 10**은 토우부의 균열 발생 지역인 열 영향부에 대한 재료 두께별 미세조직이다. 재료 두께 20mm의 경우가 재료 두께 15mm 및 10mm 경우보다 미세조직이 크게 나타났다. 2패스로 2층 용접한 두께 10mm 및 15mm의 미세조직에서 주로 오스테나이트로부터 형성된 마르텐사이트와 베이나이트 조직이 관찰되었고 3패스로 3층 용접한 두께 20mm의 미세조직에서 침상 페라이트가 관찰되었다. 다층 용접하여 용접횟수를 증가시키면 용접부에 어닐링 효과를 주어 합금성분을 확산시키고 이로 인하여 노치인성이 우수한 침상 페라이트 조직을 형성시킨 것으로 판단된다.

#### IV. 결론

연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 완전 용입한 십자형 필릿 용접 구조물에서 피로파괴는 토우 부에서 발생하며 피로강도는 토우부의 곡률반경( $\rho$ )과 플랭크 각( $\theta$ )에 따른 응력집중에 의하여 크게 영향을 받는다.
2. 피로강도는 하중 전달형의 경우가 비 하중 전달형의 경우보다 전반적으로 높게 나타나고 있으나 재료 두께별 차이는 별로 나타나지 않는다. 이와 같은 결과는 십자형 필릿 용접 시 삼입 판을 수평으로 하여 위아래 판의 45°경사 개선(groove)부에 용접하므로써 하중 전달 형 시험편이 비 하중 전달 형 시험편 보다 균열 진전 방향에 더 많은 열 영향을 받고 이 때 금속조직 변화가 피로강도 향상에 좋은 영향을 준 때문이라 판단된다.
3. 하중전달형의 경우 재료 두께에 따라 20mm, 15mm, 10mm의 순으로 피로한도가 높고 무한수명 영역이 크게 나타난다. 이 결과는 다층 용접으로 반복적인 용접 열 영향을 받아 합성 금속조직의 확산이 잘 이루어진 재료 두께 20mm의 경우가 가장 우수한 결과를 나타내는 것으로 판단된다.
4. 비 하중전달형의 경우 하중 전달 형과 비교하여 재료 두께별 내구한도 및 무한수명 영역의 높이와 크기 차이는 매우 작게 나타나며 약간의 차이를 보이는 것은 토우부의 곡률반경에 따른 응력집중계수의 크기에 영향을 받은 것으로 판단된다.
5. 2층 용접한 재료두께 10mm 및 15mm의 미세조직에서 주로 오스테나이트로부터 형성된 마르텐사이트와 베이나이트 조직이 관찰되었고, 3층 용접한 재료두께 20mm의 미세조직에서 침상 페라이트가

관찰되었다. 다층 용접하여 용접횟수를 증가시키면 용접부에 어닐링 효과를 주어 합금성분을 확산시키고 이로 인하여 노치인성이 우수한 침상 페라이트 조직을 형성시키는 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2010학년도 홍익대학교 학술 연구 진흥 비에 의하여 지원되었음.

## 참고문헌

- [1] J. R. Garland and P. R. Kirkwood: Toward improved submerged arc weld metal, Metal Construction(Part 1), Metal Construction, Vol. 7, No. 5, 275, (1975)
- [2] J. R. Garland and P. R. Kirkwood: Toward improved submerged arc weld metal, Metal Construction(Part 2), Metal Construction, Vol. 7, No. 6, 320, (1975)
- [3] 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, 565-573, (1998)
- [4] D. Radaj: Review of fatigue strength assessment of non-welded and welded structures based on local parameters, Int. J. Fatigue, Vol. 18, No. 3, 153-170, (1996)
- [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, 74-80, (2005)
- [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, Vol. 150, No. 11, 499, (1981)
- [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, 7-17, (1999)
- [8] J. M. Ferreira and C. M. Branco: Influence of fillet weld joint geometry on the fatigue crack growth, Theor. Appl. Frac. Mech., Vol. 15, 131-142, (1991)
- [9] J. Bannantine, J. Comer and J. Handrock: Fundamentals of metal fatigue analysis, 9-13, (1987)
- [10] Y. B. Lee: Characteristics of fatigue failure according to thickness material and number of passes in cruciform fillet weld zone, Journal of KWJS(in Korean), 28-6, 45-50 (2010)