십자형 필릿 용접부에서의 무한 피로수명 평가에 관한 연구

[†]이용복

홍익대학교 기계·시스템디자인공학과
(2013년 1월 7일 접수, 2013년 2월 13일 수정, 2013년 2월 13일 채택)

A Study on Estimation of Infinite Fatigue Life in Cruciform Fillet Welded Joint

[†]Yong-Bok Lee

**Dept. of Mechanical & System Design Engineering, Hongik University, Seoul, Korea
(Received January 7, 2013; Revised February 13, 2013; Accepted February 13, 2013)*

요약

용접에 의한 가스설비, 교량, 선박 등 강 구조물의 접합 방법은 대부분 십자형이나 T형의 필릿 용접으로 이루어지며 구조물의 형상과 용도에 따라 완전 용입 또는 불완전 용입 상태로 이루어진다. 본 연구에서는 십자형 필릿용접 구조물에 대하여 재료 두께별 용입 깊이에 따른 피로 균열 특성을 파악하였고, 그 결과로부터 무한수명 영역 내에서의 안전 설계응력에 대하여 고찰하였다. 미 용입 길이가 길면 루트 부 파괴가 되어 무한 수명 영역은 작고 미 용입 길이가 짧으면 토우부 파괴가 되어 무한 수명 영역은 크게 나타났다. 3층 용접한 재료 두께 20mm의 경우가 2층 용접한 재료 두께 10mm, 15mm의 경우보다 미세한 페라이트 침상 조직을 더 많이 형성시켜 노치 인성을 증가시키므로 서 피로강도와 무한 수명을 더 향상시킨 것으로 나타났다.

Abstract - The joining methods of steel structures of gas facilities, bridges, ships etc. by welding are composed mostly of T-type or cruciform fillet welding and full penetration or partial penetration according to the uses and the shape of the structures. In this study, it was examined the characteristics of fatigue crack according to penetration depth in relation to material thickness in the cruciform fillet welded joints. From the results, it was investigated the safe design stresses within the range of infinite life. When the LOP length is long the range of infinite life is small with root failure and when the LOP length is short the range of infinite life is large with toe failure. For the specimen of material thickness, 20mm welded by 3 pass compared with 10mm, 15mm welded by 2 pass, the fatigue strength and the range of infinite life was more improved by increasing of notch toughness from formation of micro-ferrite acicular structure.

Key words : cruciform fillet welding, safe design stress, fatigue life, penetration depth, fatigue strength, infinite life, notch toughness, acicular structure

1. 서론

최근 용접은 편리성, 경제성 그리고 안전성의 향상과 더불어 기계, 선박, 교량, 가스설비 그리고 모든 플랜트 제작공정에 널리 활용되고 있다[1]. 이와 같이 용접의 이용이 증가함에 따라 용접 구조물의

안전 사용 및 안전 설계를 위한 자료의 구축이 필요하다. 그리고 산업의 발전과 더불어 더욱 가혹한 환경에서 사용되고 있으므로 사용 조건에 따른 구체적인 안전 설계 자료가 필요하다. 용접에 의한 접합 방법은 대부분 십자형이나 T형의 필릿 용접으로 이루어지고 있고 구조물의 형상이나 용도에 따라 완전 용입 또는 불완전 용입 상태로 이루어지고 있다. 본 연구와 관련하여 완전 용입 및 불완전 용입 상태에 따른 십자형 필릿 용접부에 대한 피로 특성 및 피로

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

Copyright © 2013 by The Korean Institute of Gas

수명에 관한 연구는 계속적으로 진행되어 왔다[2-5]. 본 연구에서는 십자형 필릿 용접 구조물에 대한 시험 자료들을 참조하고 재료 두께별 용입 깊이에 따라 피로 균열 진전 특성 및 피로 수명에 대하여 더 심도 있게 고찰하고 용접부의 피로강도와 관련하여 경제성을 고려한 안전설계 자료를 얻고자 하였다. 그리고 Goodman의 식[6]에 의한 Haigh 선도로부터 무한 수명 영역의 안전 설계응력 범위에 대하여 고찰해 보았다. 또한 파단면의 합금성분조직을 관찰하여 이들 결과와의 관련성을 고찰해 보았다.

II. 시험편의 준비 및 실험방법

시험편 재료는 용접 구조물 재료로 많이 사용하는 SWS490B 판재를 선택하여 재료 두께를 10mm, 15mm, 20mm의 3가지로 구분하고 십자형 필릿 용접 시 용입 깊이를 조절하기 위하여 삽입 판 상하 주판의 한 쪽 끝 양면에 45°경사의 그루브를 기계 가공하였다. 용접은 SM-70의 용접와이어를 사용하여 GMAW법으로 수행하였다. 시험편은 하중 전달형의 경우 45°경사의 그루브 크기에 따라 삽입 판(insert plate) 상하 주판(main plate)의 접합부 양 끝을 미 용입 길이(LOP; lack of penetration) 7.2mm, 4.8mm, 2.4mm 및 완전 용입으로 대칭 용접하였고, 비 하중 전달 형의 경우 모두 완전 용입하여 용접하였다. 또한 재료 두께를 고려하여 재료 두께 10mm 및 15mm인 경우 2패스로 2층 용접하고 재료 두께 20mm인 경우 3패스로 3층 용접을 하였다. 그리고 용접한 재료를 25mm의 길이로 0.1mm이내의 오차 범위로 정밀하게 기계 절단 및 가공하고 측면의 십자형 용접 단면을 경면 연마하여 나이탈 용액으로 부식시킨 후 미 용입 길이를

측정하여 재료 두께 및 미 용입 길이별로 구분하여 시험편을 준비하였다.

Table 1. Chemical compositions of weld materials

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 materials

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

Table 3. Dimensions of 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	250
	15	15	260	25	255
	20	20	260	25	260

Table 4. Geometry factors and stress concentration factors (K_t) of specimens

Type	Thickness(mm)	ρ (mm)	θ°	K_t
LC	10	0.25	145.25	3.52
LC	15	0.24	148.25	4.01
LC	20	0.24	145.07	4.23
N-LC	10	0.21	120.50	3.71
N-LC	15	0.21	123.62	4.69
N-LC	20	0.20	114.08	5.52

Fig. 1. Configurations of specimen types.

Table 5. Welding conditions for the cruciform fillet joints

Plate Thickness (mm)	LOP (mm)	Number of pass	Welding current (A)	Voltage (V)
10	Pull penetration (N-LC)	1	170	25
		2	180	23
	Pull penetration (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	Pull penetration (N-LC)	1	180	26
		2	180	23
	Pull penetration (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	Pull penetration (N-LC)	1	200	25
		2	200	25
		3	180	23
	Pull penetration (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

LOP: Lack of penetration

실험은 25ton 용량의 전기 유압식 피로 시험기(Instron, Model 1332)를 사용하여 응력 비“0”으로 10Hz의 정현파 형(sine wave form) 반복하중으로 수행하였다. 균열길이는 균열 면을 산화크롬(Cr_2O_3)으로 연마한 후 금속 현미경을 사용하여 1/100mm 오차 범위 내에서 실험 중 수시로 측정하였다. 시험 후 파단면을 경면 연마하고 나이트 용액으로 부식시킨 후 주사 전자현미경으로 합금성분 조직을 관찰하였다.

시험편 재료와 용접와이어의 화학적 성분은 Table 1과 같고 기계적 성질은 Table 2와 같다. 시험편의 크기는 하중 전달 형(LC; load-carrying type)과 비 하중 전달 형(N-LC; non load-carrying type)으로 구분하여 Table 3과 같고 기하학적 요소 및 응력집중계수는 Table 4와 같다. 용접조건은 Table 5와 같고 시험편의 형상은 Fig. 1과 같다.

III. 실험 결과에 대한 고찰

3.1. S-N 선도에 의한 피로 특성

피로균열실험 결과 하중 전달형에서 미 용입 길이가 7.2mm, 4.8mm, 2.4mm, 0.0mm의 경우와 비 하중 전달형에서 완전 용입의 경우 재료 두께별 S-N선도는 Fig. 2~Fig. 4와 같다. 시험응력은 시험편재료의 최대 정적 응력을 기준으로 하였고, 목두께는 AWS 규정에 의한 유효 목두께로 하였다[7].

피로강도는 재료 두께 10mm의 경우 하중 전달형에서 미 용입 길이가 작을수록 높게 나타났으며 완전 용입 시험편의 피로 강도는 완전 용입 비 하중 전달형의 피로강도와 유사하게 가장 높은 값을 나타냈다. 파괴형태는 미 용입 길이 7.2mm에서 모두 루트 부 파괴, 4.8mm에서는 2개의 시험편에서 혼합파괴가 나타났고 나머지 시험편은 루트 부 파괴를 나타냈다. 이 때 피로강도는 루트 부 파괴 때보다 혼합파괴의 경우가 높게 나타났다. 재료 두께 15mm의 경우 미 용입 길이가 7.2mm의 시험편에서 모두 루트 부 파괴를 나타냈고 피로강도는 가장 낮게 나타났다. 4.8mm의 시험편에서 루트 부 파괴, 혼합파괴 및 토우 부 파괴 형태가 모두 나타났으며 피로강도는 토우 부 파괴, 혼합파괴, 루트 부 파괴의 순으로 높게 나타났다. 그리고 미 용입 길이 2.4mm, 0mm의 하중 전달 형 및 완전 용입된 비 하중 전달 형 시험편은 모두 토우 부 파괴 형태를 나타냈으며 피로강도가 전반적으로 높게 나타났고 이들 중 완전 용입된 비 하중 전달형의 피로강도가 가장 높게 나타났다. 재료 두께 20mm의 경우 미 용입 길이 7.2mm 시험편에서 루트 부 파괴 및 토우 부 파괴형태가 나타났는데 토우 부 파괴 때가 루트 부 파괴 때 보다 피로강

Fig. 2. S-N curves of $t_1=10\text{mm}$ specimens.

Fig. 3. S-N curves of $t_1=15\text{mm}$ specimens.

Fig. 4. S-N curves of $t_1=20\text{mm}$ specimens.

도가 높게 나타났다. 그 외의 미 용입 시험편에서 토우 부 파괴되었으며 재료 두께 10mm, 15mm의 경

우보다 피로강도가 전반적으로 높고 미 용입 길이에 의한 피로강도의 차이가 작게 나타났다. 또한 완전 용입된 비 하중 전달 형 시험편은 토우 부 파괴되었고 피로강도는 미 용입 길이 7.2mm 시험편의 루트 부 파괴 때와 유사한 가장 낮은 값을 나타냈다. 이와 같은 결과는 재료 두께 20mm의 경우 3층 용접을 하므로서 2층 용접한 재료 두께 10mm, 15mm인 시험편에 비하여 용접 열에 의한 어닐링(annealing) 효과를 더 받아 피로강도가 전반적으로 향상된 것으로 판단된다. 또한 미 용입 길이 7.2mm의 경우 루트 부 파괴와 토우 부 파괴 형태를 보이고 루트 부 파괴 시 피로강도는 낮게 나타났으며 토우 부 파괴 시 피로강도가 높게 나타났는데 그 원인은 루트 부 및 토우 부의 노치 반경에 따른 응력집중과 십자형 용접부의 기하학적 관계와 연관이 있는 것으로 판단된다[8].

3.2. 무한 피로수명 평가

무한 피로 수명을 갖는 영역을 알아보기 위하여 Fig. 2~Fig. 4의 S-N선도로부터 2×10^6 사이클에 해당하는 피로강도를 최소 자승법(least squares fit line)에 의하여 구하고 이들 값을 내구한도로 하여 Goodman식에 의한 Haigh 선도를 나타내면 Fig. 5~Fig. 7과 같다. 재료 두께 10mm인 경우 무한 수명 영역은 하중 전달형의 미 용입 길이가 0mm, 2.4mm, 4.8mm, 7.2mm의 순으로 미 용입 길이가 작을수록 크게 나타났다. 완전 용입한 비 하중 전달형의 무한 수명 영역은 완전 용입한 하중 전달형의 무한 수명 영역과 유사하게 가장 크게 나타났다. 하중 전달형의 재료 두께 15mm인 경우 무한 수명 영역은 재료 두께 10mm의 경우와 유사하게 미 용입 길이가 작을수록 크게 나타났다. 완전 용입한 비 하중 전달형의 무한 수명 영역은 가장 크게 나타났고 하중 전달형의 미 용입 길이가 2.4mm 및 0mm의 경우와 유사한 크기로 나타났다. 재료 두께 20mm인 경우 무한 수명 영역은 미 용입 길이의 영향을 다소 받고 있는 것 같으나 그 차이는 재료 두께 10mm 및 15mm의 경우와 비교하여 매우 작고 전반적으로 크게 나타났다. 그리고 완전 용입한 비 하중 전달형의 무한 수명 영역은 가장 작게 나타났다.

Fig. 8은 하중 전달 형 시험편에서 재료 두께별 최소 무한 피로수명 영역을 나타내는 미 용입 길이 7.2mm일 때의 Haigh 선도를 나타낸 것이다. 재료 두께가 클수록 무한수명 영역은 크게 나타났으며 재료 두께가 10mm, 15mm의 경우 그 차이는 작고 재료 두께 20mm의 경우 재료 두께 10mm, 15mm보다 매우 크게 나타났다. 이와 같은 결과로부터 무한수명

Fig. 5. Haigh diagrams of $t_1=10\text{mm}$ specimens.

Fig. 7. Haigh diagrams of $t_1=20\text{mm}$ specimens.

Fig. 6. Haigh diagrams of $t_1=15\text{mm}$ specimens.

Fig. 8. Haigh diagrams of LC specimens with LOP-length of $2a=7.2\text{mm}$.

영역은 동일 결함 길이에서 재료 두께의 영향을 받아 재료 두께가 클수록 크게 나타나며 재료 두께 20mm의 경우 3층 용접하므로 2층 용접한 재료 두께 10mm 및 15mm의 경우 보다 용접 열에 의한 어닐링(annealing)효과를 더 많이 받아 피로강도가 향상되었고 더불어 재료 두께의 영향이 중복되어 무한 수명 영역이 상대적으로 크게 나타났다고 판단된다[9].

Fig. 9는 완전 용입한 비 하중 전달 형 시험편에서 재료 두께별 무한 수명 영역을 나타낸 Haigh선도이다. 이들 시험편은 모두 토우부로부터 파괴되었고 재료 두께 10mm, 15mm의 경우 무한 수명 영역은 거의 같은 크기를 나타내고 있다. 그러나 재료 두께 20mm의 경우 재료 두께 10mm, 15mm의 경우와 비교하여 오히려 작은 크기의 무한 수명 영역을 나타내고 있다. 그 원인은 재료 두께의 영향 보다 Table 4에 나

Fig. 9. Haigh diagrams of full-penetrated N-LC specimens.

타낸 바와 같이 재료 두께 20mm의 경우 재료 두께 10mm 및 15mm의 경우와 비교하여 상대적으로 용접 토우부의 작은 곡률 반경(ρ)과 플랭크 각(θ)에 의한 높은 응력집중계수(K_t)의 영향을 더 많이 받은 것으로 판단된다[10].

3.3. 파단면의 금속학적 고찰

피로균열 시험을 통하여 나타난 시험편의 파단 형상은 Fig. 10에 나타난 바와 같이 루트 부 파괴, 혼합 파괴 및 토우 부 파괴 형태의 3가지 형상으로 나타났다. 이들 시험편의 파단면에 대한 금속학적 고찰을 위하여 주사 전자 현미경으로 피로 균열 발생 지역인 열영향부(토우 부)와 용착 금속 부(루트 부)를 촬영하여 재료 두께별로 나타내면 Fig. 11 및 Fig. 12와 같다.

Fig. 11의 열 영향부에서 2 pass로 용접한 재료 두께 10mm, 15mm인 경우 다소 급 냉으로 인하여 결정립이 미세화 되어 있고, 3 pass로 용접한 재료 두께 20mm인 경우 다층 용접에 의한 반복적인 가열과 서 냉으로 풀림과 확산에 의하여 결정립이 조대화 된 현상이 나타났다. 일반적으로 용접 시 열영향부와 용착 금속 부는 A_1 변태점 이상으로 가열되고 고열과 냉각의 열 사이클을 받기 때문에 모재와 다른 미세 조직을 갖고 있으며 조립 역, 혼입 역, 세입 역, 구상 펄라이트 역, 취성화영역 등으로 구성되어 있다. 그리고 이들 부위에는 용접 입 열, 이음형상, 판 두께, 예열 조건, 용접횟수에 따라 여러 가지 냉각속도로 냉각되기 때문에 여러 가지 변태조직이 나타나게 된다.

Fig. 12의 용착금속부에서 2 pass로 2층 용접한 재료 두께 10mm, 15mm의 경우 베이나이트를 주체로 한 중간 단계 조직과 전형적인 마르텐사이트 조직이 나타났고, 3pass로 3층 용접한 재료 두께 20mm인 경우 재 가열로 인한 어닐링(annealing) 효과를 주어 미세한 침상조직 페라이트가 많이 나타났다. 침상 페라이트 조직은 용착금속부의 강도와 인성을 동시에 향상시키며 전체 조직에서 침상형 페라이트가 차지하는 비율이 증가할수록 인성이 향상

Fig. 10. Typical three failure modes of cruciform fillet welded joints.

Fig. 11. SEM micrographs of H. A. Z. in toe zone

Fig. 12. SEM micrographs of weld metal zone in root zone.

된다는 사실은 여러 연구자에 의해 확인되고 있다 [11,12]. 따라서 2pass 용접한 경우보다 3pass 용접한 경우가 노치인성이 우수한 미세한 침상조직인 페라이트조직에 의해 균열전파에 대한 저항력이 증가하여 피로강도가 전반적으로 높게 나타난 것으로 판단된다.

V. 결 론

1. 하중 전달 형의 경우 재료 두께 10mm, 15mm의 미 용입 길이 7.2mm, 4.8mm인 시험편에서 루트부가 파괴되었고 2.4mm, 0mm의 시험편에서 토우부가 파괴되었다. 그리고 미 용입 길이 4.8mm의 시험편에서 각 각 2편의 혼합 파괴가 나타났다. 피로강도는 토우 부 파괴, 혼합 파괴, 루트 부 파괴의 순으로 높게 나타났다.

2. 재료 두께 10mm, 15mm의 경우 미 용입 길이가 클수록 루트 부 파괴 형태가 나타났고 무한 수명 영역은 작으며 미 용입 길이가 작을수록 토우 부 파괴 형태가 나타났고 무한 수명 영역은 크게 나타났다. 재료 두께 20mm의 경우 유사한 경향이 나타났으나 그 차이는 작고 완전 용입한 비 하중 전달형의 무한 수명 영역보다 크게 나타났다.

3. 무한수명영역은 동일한 미 용입 길이에서 재료 두께가 클수록 크게 나타났으며 재료 두께 20mm의 경우 재료 두께 10mm 및 15mm의 경우와 비교하여 용접 열에 의한 어닐링(annealing)효과와 재료 두께의 영향이 중첩되어 상대적으로 피로강도가 높고 무한 수명 영역이 크게 나타났다고 판단된다.

4. 완전 용입된 비 하중 전달 형 시험편에서의 토우 부 파괴 시 무한 수명 영역은 재료 두께 20mm의 경우 재료 두께 10mm, 15mm와 비교하여 오히려 작게 나타났다. 이와 같은 결과는 상대적으로 토우 부의 열 영향에 의한 합금성분의 확산 효과보다 기하학적 요소인 곡률 반경(ρ)과 플랭크 각(θ)에 의한 높은 응력집중계수(K_t)의 영향을 더 많이 받은 것으로 판단된다.

5. 2층 용접한 재료두께 10mm, 15mm인 용착금속부에서 베이나이트를 주체로 한 중간 단계 조직과 전형적인 마르텐사이트 조직이 관찰되었고 3층 용접한 재료두께 20mm인 경우 반복된 가열로 인하여 용착 금속부에 어닐링(annealing) 효과를 주어 미세한 페라이트침상조직이 많이 관찰되었다. 따라서 재료 두께 20mm의 경우가 재료 두께 10mm, 15mm의 경우보다 노치인성이 우수한 미세한 페라이트 침상조직에 의해 전반적으로 피로강도를 향상시켰고 무한 수명 영역을 증가시킨 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2012학년도 홍익대학교 학술연구 진흥비에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- [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] 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
- [3] 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
- [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] J. Bannantine, J. Comer and J. Handrock: Fundamentals of metal fatigue analysis, (1987), 9-13
- [7] ANSI/AWS, "Structural Welding Code- Steel," DI. 1-86, 1986.
- [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, (1991), 131-142
- [9] 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(2010), 45-50
- [10] R. E. Peterson, 1974, "Stress Concentration Factor", John Wiley & Sons Inc.
- [11] ASM International, 1993, "Welding Brazing and Soldering," ASM Handbook, Vol. 6, pp.75-79.
- [12] D. J. Abson and R. J. Pargeter, International Metals Reviews, Vol. 31, No. 4, 1986, p.141.