

용접방법에 따른 하중전달 십자형 필렛 용접부의 피로특성

李 龍 福[†] · 吳 炳 德^{*}

Fatigue Characteristics of Load Carrying Cruciform Fillet Welded Joints According to Welding Methods

Lee, Yong-Bok[†] · Oh, Byung Duck^{*}

Abstract

In this study, it was investigated about endurance limit and fatigue behavior of load carrying fillet welded cruciform joints according to welding methods of SMAW, SAW, MIG and FCAW commonly using for welding structures in present. Endurance limit carried out highly in the order of SMAW, MIG, SAW, FCAW and fatigue crack propagation ratio carried out lowly in the order of SMAW, MIG, FCAW, SAW. By these results, it is needed to use SMAW or MIG welding methods for welding structures with small welding capacity and SAW or FCAW methods for large welding structures after due consideration about economic gains and operation efficiency of welding. Fatigue crack propagation ratio is more effected by strength of welding materials than endurance limit of welding materials according to welding methods.

Keywords : Fatigue Characteristics(피로특성), load carrying cruciform fillet welded joints(하중 전달형 십자형 필렛 용접부), Endurance limit(내구한도), Fatigue crack propagation ratio(피로균열전진속도)

1. 서론

필렛 용접은 교량, 선박 등의 다양한 구조물과 기계장치의 접합과정 중 가장 일반적인 용접 작업으로 기계장치 및 구조물에 있어서의 점유율은 80%에 이르고 있다.¹⁾ 최근 강 구조물의 대형화 추세로 인하여 두꺼운 강판을 사용한 T형 및 십자형 필렛용접 이음이 많이 사용되고 있다.

용접은 높은 온도에서 수행되므로 국부적으로 금속조직의 변화 및 열응력 영향을 받게 되고, 용착금속부 안에 기포나 불순물 혼입의 가능성이

높으며, 용접 비드의 표면에 피트(pit)나 언더컷(undercut) 등이 생기기 쉬워 구조물의 강도를 크게 저하시키는 요인이 된다. 이상과 같이 용접부에도 강도를 저하시키는 요인이 많으므로 이들을 개선하고자 하는 많은 연구 등이 계속되어 최근에는 어느 정도 용접부의 기포나 침전물 혼입 그리고 표면에 언더컷 등의 발생을 방지하여 용접부의 강도 향상에 많은 진전을 가져오고 있다. 그러나 용접기술의 발전에도 불구하고 강 구조물의 경우 미숙련 용접사에 의한 용입불량이나, 복잡한 구조물로 인한 불완전 용입, 그리고 공정의

감소에 따른 미용입이 존재하고 있는 용접구조물의 연결부와 같은 불연속부에서 반복하중에 의한 피로균열이 발생 성장되어 파손되는 사고가 발생하고 있다. 일반적으로 용접구조물에서 피로균열의 70% 이상이 용접 이음부에서 발생하며 많은 종류의 용접부중 피로균열의 80%는 비교적 이음 형식이 복잡한 필렛용접부에서 대부분 발생한다고 보고된 바 있다.²⁾ 전형적인 필렛용접 이음에서 균열의 2가지 유형은 루트균열(root cracking)과 토우균열(toe cracking)이 있으며, 루트부에서 발생하는 파단은 판두께를 비롯한 용접 형상을 적절하게 조절하면 방지할 수 있다.³⁾ 그리고 부분적인 용접이음에서 하중을 전달하는 용접부의 면적은 용입 깊이에 의존하기 때문에 그 상태는 매우 복잡하다고 보고되고 있다.⁴⁾ 필렛용접부에서 피로파괴는 토우부와 루트부에서 발생한 피로균열의 발생 및 전파의 특성에 지배되며 이런 피로균열의 특성은 필렛의 형상과 응력범위에 따라 큰 영향을 받고,⁵⁾ 용접토우부의 응력 집중계수는 토우부의 각도 및 곡률반경, 용입부죽부의 길이에 영향을 받으며, 또한 토우부의 피로균열 발생 수명은 응력집중계수와 작용응력을 통하여 추정할 수 있다고 제시되었다.⁶⁾ 십자형 이음에 대한 기존의 연구들로부터 피로수명은 판의 두께에 대한 다리길이의 비(l/t_1), 필렛폭에 대한 초기 미용입 크기의 비($2a/2W$), 필렛 각 또는 용접윤곽(측면도)의 3가지 기하학적 파라미터에 의해 영향을 받는다고 보고되었다.⁷⁾ 이러한 연구의 대부분은 피로균열 성장 거동에 대한 용접 측단면(weld profile)영향에 중점을 두고 있고 불완전 용입 용접재의 용입 깊이에 따른 피로강도 및 균열 전진 거동에 대한 자료는 매우 미흡한 실정이며 구조물의 안전성을 평가함에 있어 많은 어려움이 있다.⁸⁾ 따라서, 용접구조물의 안전사용 및 설계를 위하여 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있으나 기하학적인 조건과 하중형태 등의 복합적인 영향으로 인하여 아직 해결해야 할 문제

가 많이 남아있다. 또한 완전용입 및 불완전용입시의 하중전달 십자형 필렛 용접부의 정확한 피로강도 평가가 절실히 요구되고 있는 실정이다.

모든 구조물의 안전설계를 위해서는 강도상 가장 취약한 접합부의 강도 평가가 요구되며 그중 이용도가 높은 용접부의 최적 용접방법과 피로강도 평가를 체계적으로 연구 고찰함으로써 구조물의 강도 향상 및 경제적이고 능률적인 구조물 제작 기술을 구축하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 용접방법에 따른 루트부 파괴특성을 각 논문 자료에서 데이터를 발췌하여 그 데이터들을 도식적으로 표현하여 비교함으로써 용접방법중 최적의 용접방법을 찾고자 하였다. 그리고, 각각의 용접은 십자형이고 실험방법은 동일하나 기하학적인 요소는 동일하지 않기 때문에 응력과 수명으로는 비교 판단이 불가능하다고 생각하여 본 연구에서는 특성비교가 가능한 응력확대계수(ΔK), 피로균열전진속도(da/dN), 루트부의 초기응력확대계수(ΔK_0) 및 균열초기수명 관계를 고찰해보고자 한다. 실제 용접에 있어서 경제성과 편리함은 배제하고 단순히 용접방법에 따른 해석이므로 어떤 용접 방법이 더 좋다고는 말할 수 없지만, 각각의 용접방법이 그 경제성과 편리성이 어느 정도 같다고 생각한다면 이 연구로 진정 효율적인 용접 방법을 채택할 수 있을 것이라 생각한다.

2. 실험방법

2-1. 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 교량 및 선박 등의 구조물에 많이 사용되고 있는 용접구조용 강재로써 화학적 성분과 기계적성질은 각각 Table2.1과 Table2.2에 나타낸바와 같다.

시험편의 형상은 7.0mm~7.5mm의 용입 결함을 갖는 시험편과 완전 용입된 시험편으로 판두께를 8.0~12.5mm로 선택하여 용접후 Table2.3의 치수

로 기계절단하고 측면을 경면 연마하여 나이탈 용액으로 부식시킨 후 용접 영역의 치수를 측정하였다.

Fig2.1은 본 실험에 사용된 미용입 하중 전달형 십자형 필렛용접 시험편 형상을 나타낸 것이고, Photo1은 시험편 사진을 나타낸다.

Table2.1 모재 및 용접성분의 화학성분(wt. %)

구분	material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	V	Mo	Co
series 1 (SAW)	base	0.14	0.36	1.55	0.14	0.02	0.22	0.21	0.02			
series 2 (FCAW)	base	0.19	0.72	0.95	0.01	0.002	0.03	0.07		0.0002	0.35	0.004
	weld	0.08	0.40	1.50	0.02	0.01	0.20	2.25		0.002	0.44	0.002
series 3 (MIG)	base	0.18	0.14	0.70	0.05	0.05						
	weld	0.11	0.88	1.21	0.05	0.05						
series 4 (SMAW)	base	0.18	0.14	0.70	0.05	0.05						
	weld	0.12	0.24	1.10	0.05	0.05						

Table2.2 모재의 기계적 특성

구분	material	Yield strength (Mpa)	Tensile strength (Mpa)	Vickers hardness number(30kg)	Impact value(J)	Elongation (%)
series 1 (SAW)	base	400	572	230	110	26
series 2 (FCAW)	base	690	790	210	110	19
	weld	720	830	280	150	26
series 3 (MIG)	base	280	480	150	80	24
	weld	470	550	260	120	21
series 4 (SMAW)	base	280	480	150	80	24
	weld	420	550	223	108	22

Table2.3 용접시험편의 규격

구분	t_1	t_2	L	b	l	a	l/t_1
series 1 (SAW)	10	12	260	25	7	7.2	0.7
series 2 (FCAW)	8	8	208	16	4.8	7	0.6
					6.4	7.5	0.8
series 3 (MIG)	12.5	12.5	312.5	25	9	7.5	0.7
series 4 (SMAW)	12.5	12.5	312.5	25	7.5	7.5	0.6

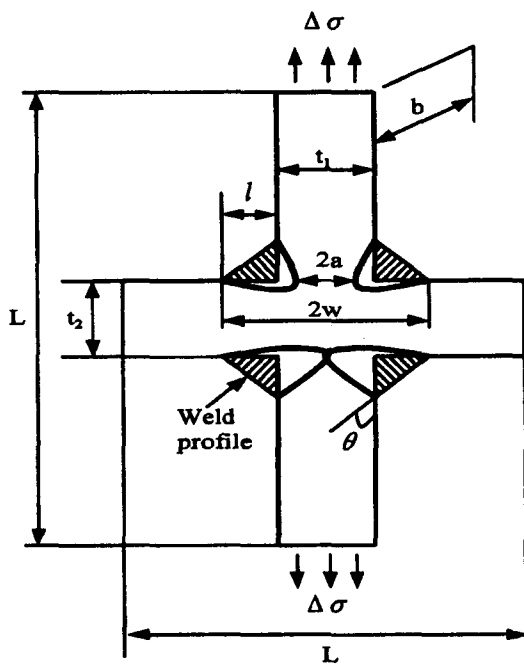


Fig.2.1 미 용입 하중 전달 십자형
필렛 용접 시험편의 형상

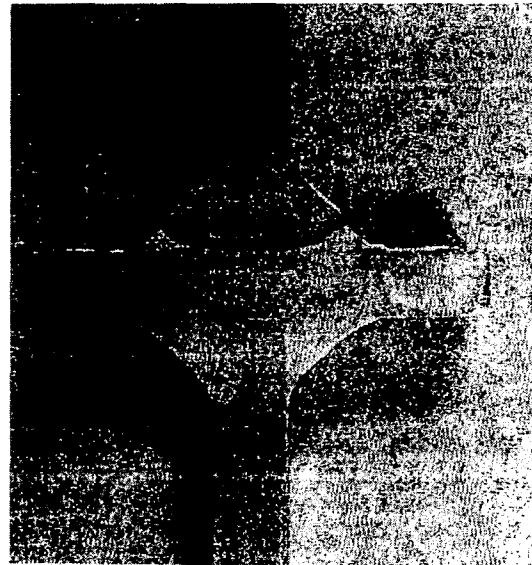


Photo2.1 피로파괴 시험편

2-2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 피로 강도를 평가하기 위한 실험 series 1⁹⁾은 Instron에서 제작한 25ton 용량의 전기 유압식 피로시험기(Model 1332)를 사용하여 하중제어방식으로 응력비($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$)가 0인 10Hz인 정형파형(sine wave form) 반복하중을 일정하게 가하여 수행하였다.

균열의 길이는 금속현미경(Unitron Versamet-2)을 사용하여 100배의 배율로 1/100mm 오차 범위 내에서 실험 중 수시로 측정하였으며, 측정을 용이하게 하기 위하여 산화크롬(Cr_2O_3)등으로 연마하였다. 미세조직은 시편 파단 후 파단면 부근을 경면 연마하고 나이탈 용액으로 부식 시킨 후 주사전자현미경(scanning electron microscope)으로 촬영하였다.

응력집중이 크고 균열이 발생하기 쉬운 수직판 토우부 및 수평판 루트부에서의 용접부 각부위(weld metal zone, H.A.Z, base metal zone)를 300gf(Diamond cone force)의 하중을 15초동안 작용시켜 0.2mm 간격으로 측정하였다.

series 2¹⁰⁾, 3¹¹⁾, 4¹²⁾는 각각의 데이터를 이용한 것이나 실험방법은 series 1과 동일하다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 내구응력확대계수 폭

Fig3.1은 각 용접법에 따른 응력확대계수 폭과 파단수명을 나타낸다. 여기서 루트부의 초기결함(LOP)으로부터 균열이 1mm 진전되었을 때를 초기 응력확대계수 폭(ΔK_0)으로 하고, 그때의 수명을 초기수명으로 가정하여 균열의 초기 수명과 균열의 진전 수명으로 구분하였으며, 내구 응력확대계수 폭(ΔK_e)을 추정할 수 있다.

용접법에 따른 내구응력확대계수를 Table 3.1에 나타내었다.

Table 3.1 내구수명 피로 1×10^6 (cycles)에 대응한 내구응력 확대계수 폭(ΔK_e)

series	1($l/t_1=0.7$)	2($l/t_1=0.6$)	2($l/t_1=0.8$)	3($l/t_1=0.7$)	4($l/t_1=0.6$)
ΔK_e (MP $\cdot\sqrt{m}$)	9.75	9.25	9.12	11.91	15.32

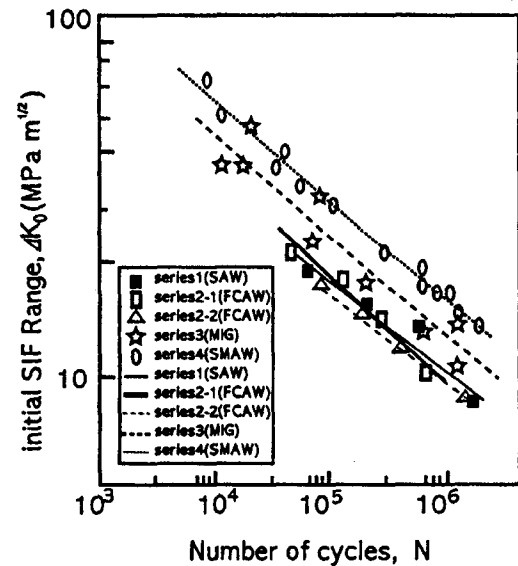


Fig 3.1 용접방법에 따른 피로수명

이들 데이터 값의 관계로 미루어 보아 SMAW 용접재가 가장 내구 응력확대계수의 폭이 크게 나타나고, 그 다음 MIG 용접재가 크게 나타나며, 상대적으로 SAW 용접재와 FCAW 용접재가 낮게 나타나고 있다. 이들 결과를 피용접재료와 용접봉 그리고 용접조건 등의 특성이 다른 영향이 있겠으나 이들 값들은 각 용접법의 최적 용접

조건하에서 얻어졌고 동일한 시험 방법으로 수행되었기 때문에 각 용접재료가 다르더라도 어느 정도 각각의 용접법에 의한 용접부의 피로특성에 대한 비교가 가능하리라 생각된다.

SAW 용접재와 FCAW 용접재가 MIG 및 SMAW 용접재보다 인장강도가 높아 내구응력 확대계수 폭이 높게 나타나리라 예상되나 오히려 낮게 나타나고 있는 것으로 보아 용접법에 기인하는 것으로 보인다. 따라서, 용접부의 내구성면에서 SMAW, MIG, SAW, FCAW 순으로 높게 나타나므로 가능한 용접량이 작은 소형 용접 구조물은 SMAW 나 MIG로 용접하고, 용접량이 많고 대형 용접구조물인 경우에는 경제적인 측면과 작업의 능률성을 고려하여 SAW 나 FCAW을 선택하는 것이 타당성이 있다고 사료된다.

3-2. 피로균열 진전속도

Fig 3.2 ~ Fig 3.6 은 각 용접 재료에 대한 균열 성장속도와 응력확대계수 폭과의 관계를 나타내며, Paris의 식¹³⁾ $\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$ 으로부터 얻은 각 경우의 재료 상수 C 와 m의 값을 Table 3.2에 나타내었다. 그리고 각 용접방법의 피로특성을 비교 고찰해 보고자 Fig 3.7 에 함께 나타내었다.

그림에서 SAW용접재의 균열 진전속도가 가장 높게 나타나고 있고, 그 다음 FCAW, MIG, SMAW 순서로 높게 나타나고 있다. 내구성 면에서는 FCAW 용접재가 SAW 용접재보다 다소 낮게 나타나나, 균열진전속도는 SAW 용접재가 FCAW 용접재보다 뚜렷하게 높게 나타나는 경향을 알 수 있다. 그리고 같은 재료인 MIG용접

재와 SMAW용접재의 경우 MIG용접재가 SMAW용접재에 비하여 재료 두께에 대한 가장 비(1/t₁)가 큰데도 불구하고, 피로균열진전속도가 다소 높게 나타나고 있는데 이 결과는 MIG 용접재가 SMAW 용접재보다 크게 낮은 내구응력확대계수 폭을 갖고 있기 때문이라 생각된다. 또한 MIG 및 SMAW 용접재가 SAW 및 FCAW용접재에 비하여 큰 차이로 피로균열진전속도가 낮게 나타나고 있는데 이는 용접법에 따른 내구성의 영향도 있겠으나 용접재료의 강도 차의 영향을 크게 받는 것으로 사료된다.

Table 3.2 series별 C와 m의 값

series	1(1/t ₁ =0.7)	2(1/t ₁ =0.6)	2(1/t ₁ =0.8)	3(1/t ₁ =0.7)	4(1/t ₁ =0.6)
m	4.52	4.78	4.28	5.65	5.81
C	1.20×10 ⁻¹³	2.69×10 ⁻¹⁴	9.77×10 ⁻¹⁴	3.80×10 ⁻¹⁶	1.55×10 ⁻¹⁶

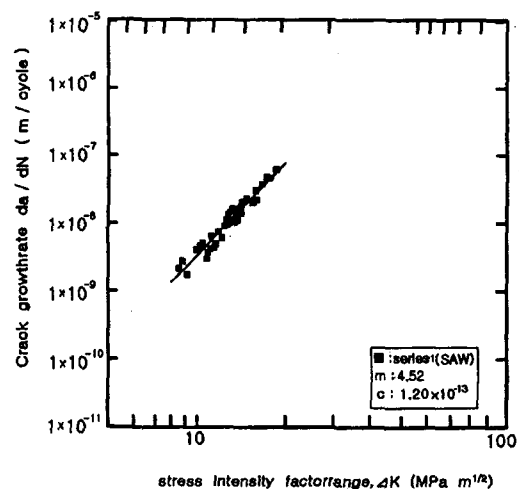


Fig 3.2 균열성장 속도와 응력확대 계수 폭의 관계(SAW)

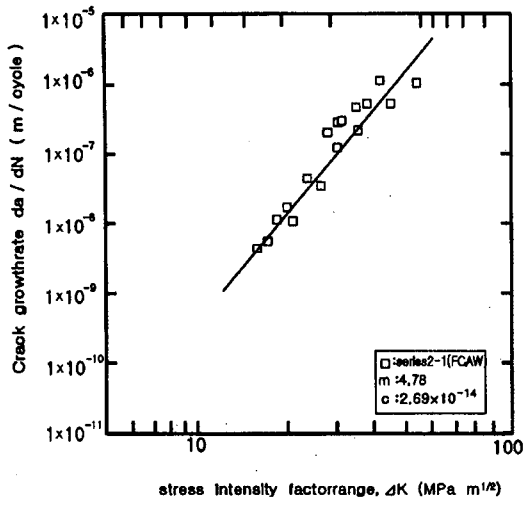


Fig 3.3 균열성장 속도와 응력확대계수
폭의 관계(FCAW)

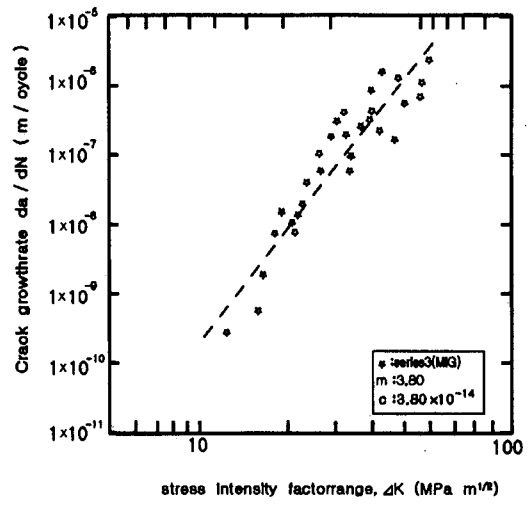


Fig 3.5 균열성장 속도와 응력확대계수
폭의 관계(MIG)

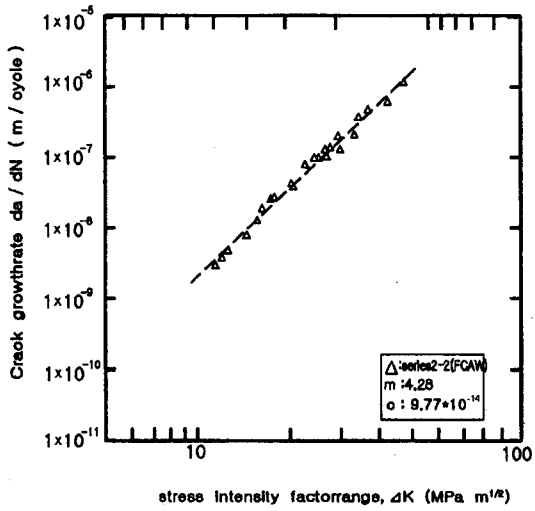


Fig 3.4 균열성장 속도와 응력확대계수
폭의 관계(FCAW)

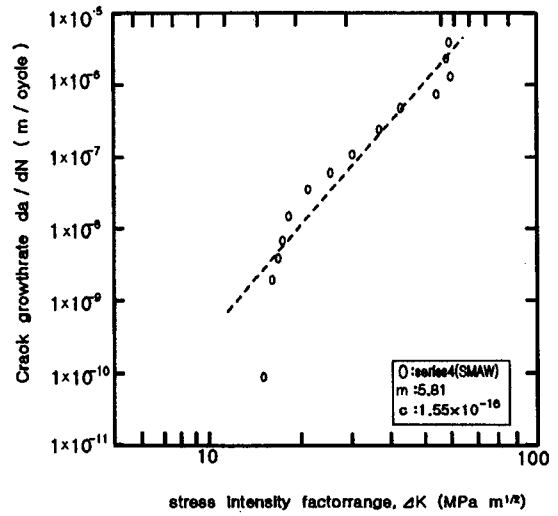


Fig 3.6 균열성장 속도와 응력확대계수
폭의 관계(SMAW)

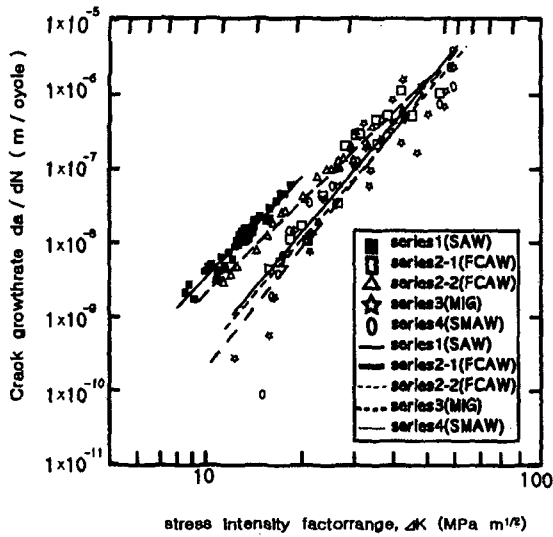


Fig 3.7 균열성장 속도와 응력확대계수
폭의 관계

4. 결 론

본 연구에서는 용접방법에 따른 불완전 용입 결함을 포함하는 하중전달 십자형 필렛 용접부의 내구성 및 피로특성을 비교 평가하였고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 용접부의 내구성 면에서는 SMAW, MIG, SAW, FCAW 순으로 높게 나타났다. 따라서 가능한 용접량이 작은 소형 용접구조물은 SMAW 나 MIG로 용접하도록 하고, 용접량이 많고 대형 용접구조물인 경우에는 경제적인 측면과 작업능률성을 고려하여 SAW, FCAW를 선택하는 것이 타당성이 있다고 사료된다.

(2) 내구성 면에서는 SAW용접재가 FCAW용접재보다 다소 높게 나타나 양호하나 균열진전속도는 SAW용접재가 FCAW용접재보다 상당히 높게 나타나 불리한 것으로 나타났다

(3) 동일한 재료인 MIG용접재와 SMAW용접재의 경우 MIG용접재가 SMAW용접재에 비하여 재료 두께에 대한 각장비(l/t_1)가 큰 데도 불구하고 피로균열진전속도가 다소 높게 나타나고 있는데 이 결과는 MIG용접재가 SMAW용접재보다 크게 낮은 내구응력확대계수 폭을 갖고 있기 때문이라 사료된다.

(4) MIG 및 SMAW용접재가 SAW 및 FCAW 용접재에 비하여 큰 차이로 피로균열 진전속도가 낮게 나타나는데 이는 용접법에 따른 내구성의 영향도 있겠으나 용접재료의 강도 영향을 더 크게 받는 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) V. Balasubramanian and B. Guha, 1998, "Influence of Flux Cored Arc Welded Cruciform Joint Dimensions on Fatigue Life of ASTM 517 'F' Grade Steels," Int. J. Pres. ves. & Pip., 75, pp. 765-772.
- 2) C. Miki and M. Sakano, 1990, "A Survey of Fatigue Cracking Experience in Steel Bridges," IIW Doc. XII-1383-90
- 3) T. R. Gurney, "An Analysis of Some Fatigue Crack Propagation Data for Steels Subjected to Pulsating Tension Loading," Weld. Res. Int., Vol. 9, No. 4, pp.45~52..
- 4) A. Hobbacher, 1988, "Recommendations for assessment of weld imperfections in respect to fatigue" IIW Doc. IIW-XII-1366-88.
- 5) 강성원, 하우일, 신종석, 장태원, 제정신, 1996, "필렛 용접이음부의 피로파괴특성에 관한 연구," 대한조선학회논문집, 제33권, 제4호, pp. 133~141
- 6) S. W. Kang et al, 1981, "An improment of the Fatigue Strenth in Fillet Welded Cruciform Joints of Mild Steel under Pulsating Tension Load," JSNA of Japan, Vol. 150, No. 11, pp. 499

- 7) J. M. Ferreira and C. M. Branco, 1988," Influence of Weld and Plate Geometry on the Fatigue Strength of Cruciform Joints," Theo. Appl. Frac. Mech., pp. 23-32.
- 8) V. Balasubramanian and B. Guha, 1999, "Influence of Weld Size Fatigue Crack Growth Characteristics of Flux Cored Arc Welded Cruciform Joints," Manterials Science and Engineering A265, pp. 7~17
- 9) 남병찬, 홍익대학교 대학원 2000, " 하중전달 십자형 필렛용접부의 피로강도 평가에 관한 실험적 연구,
- 10) V. Balasubramanian and B. Guha, 1999, "Influence of Weld Size on Fatigue Crack Growth Characteristics of Flux Cored Arc Welded Cruciform Joints," Manterials Science and Engineering A265(1999) 7~17
- 11) V. Balasubramanian and B. Guha, 1999,"Fatigue Crack Growth in Cruciform Welded Joints", Joining & Materials December 1988, pp.12~16
- 12) V. Balasubramanian and B. Guha, 1993,"Effect of Specimen Geometry on Fatigue of Welded Joints"
- 13) P. C. Paris and F. Erdogan, 1963 "A Critical Analysis of Crack Propagation Law," Journal of Basic Engineering ASME Transaction, Ser. D85, pp. 528