

研究論文

FCAW 50t 후판용접에 있어 예열 및 층간온도 변화에 따른 횡크랙 발생과 피로특성에 관한 연구

이 해 우* · 강 성 원**

A Study on Transverse Cracking and Fatigue Properties of 50mm Thick FCAW Weld Metal ; Effects of Preheating and Interpass Temperature

H. W. LEE* and S. W. KANG**

Key Words : FCAW(후락스 코어드 아아크 용접), Transverse Crack(횡크랙), M.P.I(자분 탐상시험), Ultrasonic Test(초음파검사), Interpass Temperature(층간온도), Preheating(예열)

Abstract

Macrostructural characteristic of the transverse cracks and fatigue behavior were studied for EH 32 TMCP 50mm thick plate welded with FCAW under the variation in preheat and interpass temperatures.

Transverse cracks were detected in specimen welded with preheat and interpass temperature below 30℃, but cracks were not detected in the specimens welded with preheat and interpass temperatures at the range of 100~120℃.

The location of crack formation was found to strongly depend upon the thickness of weld layers as regard to the plate thickness.

1. 서 론

산업의 발전과 더불어 용접 구조물이 대형화 됨에 따라 사용강재도 점점 후판화 되는 추세이며 후

판은 박판에 비해 상대적으로 냉각 속도가 빠르고 작용하는 구속응력이 크기 때문에 용접부에 크랙 발생이 쉬워진다.^{1,2)}

크랙은 발생 온도에 따라 크게 고온크랙과 저온 크랙으로 구분되는데 액화크랙이나 응고크랙과 같

* 정희원, 삼성중공업(주) 용접연구팀

** 정희원, 부산대학교 조선해양공학과

이 고온크랙은 FeS 같은 저용점 개재물의 영향으로 발생하는 크랙으로 주로 용접부 초층에서 흔히 발생하는 크랙이다.

반면 저온크랙의 대표적인 횡크랙은 용접선에 수직인 방향으로 용접직후 또는 일정 시간이 지난 뒤에 발생되는데, 이와같이 저온크랙은 용접부에 수소가 유입되어 응력집중부나 비금속 개재물 주위에 집중되어 재료의 연성이 극히 낮아져 발생하는 지연균열이다.^{3~5)}

저온균열의 기본적인 발생 요인으로는 용접부에 나타나는 경화조직과 용접시 유입되는 확산성 수소량 및 용접부가 냉각되는 동안 발생하는 구속응력에 영향을 받는다.

즉 저온균열은 용접부에 발생되는 구속응력이 경화조직 및 확산성 수소량의 상관 관계에 의해 결정되는 재료의 저항력 즉 균열발생 한계응력보다 클때 발생된다고 볼 수 있다.⁶⁾

저온균열은 발생위치에 따라 용착금속 크랙과 열영향부 크랙으로 대별 되는데 상대적으로 경도값이 높은 열영향부에서 발생 가능성이 높다고 알려져 있지만 최근에는 TMCP(Thermo Mechanical Controlled Process) 같은 저합금 고장력강의 개발로 인해 열영향부 보다는 오히려 용착금속내에서 저온 크랙이 더 쉽게 발생된다고 보고되고 있다.⁷⁾

횡크랙 발생과 관련하여 지금까지 발표된 대부분 문헌들은 용착금속의 경도값이 Hv 250 이상의 고장력강을 이용한 실험실 규모의 시험편에 한정되어 연구되었기 때문에 선박 플랜트등 실 구조물에서의 냉각속도 및 응력상태와는 서로 차이가 나며 특히 Hv 220 미만의 저합금 고장력강에서 발생하는 크랙과는 서로 다른 양상을 보였다. 즉 용접부위가 두껍고 큰 구조물일수록 냉각속도가 빠르고 용접부에 높은 응력상태가 된다.

따라서 본 연구에서는 실 구조물과 유사한 응력상태가 되도록 시험편을 제작하여 용접조건에 따른 크랙발생과 크랙위치에 따른 피로특성등을 평가하였다.

2.1 시험준비

본 연구에 사용된 강재는 두께 50mm의 선급용 EH32-TMCP(Thermo Mechanical Controlled

Process) steel를 사용하였으며, 가능한 실 구조물과 비슷한 조건으로 시험하기 위하여 Fig. 1과 같이 용접선 길이 2,000mm 폭 1,800mm로 시험편을 제작하였고 구속응력을 크게하기 위해 용접정반과 Fillet 용접을 하였다.

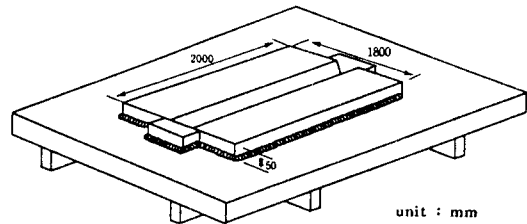
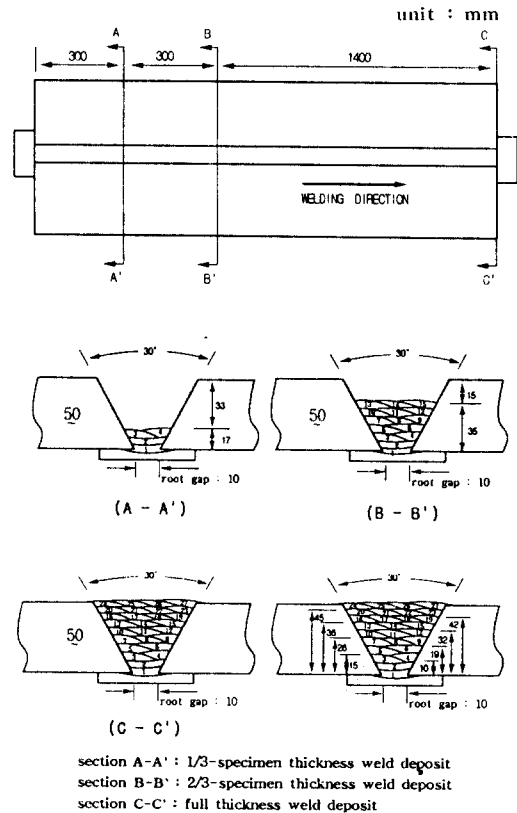


Fig. 1 Schematic diagram of weld specimen



section A-A' : 1/3-specimen thickness weld deposit
 section B-B' : 2/3-specimen thickness weld deposit
 section C-C' : full thickness weld deposit

Fig. 2 Schematic diagram of weld deposit

2.2 용접방법

용착금속 두께에 따른 크랙발생과 크랙발생 위치를 상호 비교하기 위하여 Fig.2에 나타낸 바와 같이 용접층수를 각각 달리하여 2가지 용접조건 (A:예열/층간온도 100~120℃, B:예열/층간온도 30℃미만)에 대해 플럭스 코어드 와이어 아크 용접 (CO₂ GAS 100%)을 실시하였다.

2.3 용접조건

본 실험에 사용된 용접와이어는 AWS A5.29 E 80T1-K2 (와이어경 1.2φ)에 해당하는 재료를 사용하였고 용접조건은 Table 1에 나타내었다. 예열 및 층간온도 설정은 모재의 화학조성으로 부터 구해진 탄소당량(Ceq) 및 Fig.3의 Urioka Report[®]를 인용하여 강재두께 50mm, Ceq 0.34일때 예열온도가 100℃로 나타났으나 대기온도를 감안하여 예열 및 층간온도를 100~120℃로 결정하였으며 탄소당량식은 식(1)의 J. Dearden[®]이 제안한 국제용접학회 (IIW) 식을 이용하였다.

$$Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \dots\dots\dots (1)$$

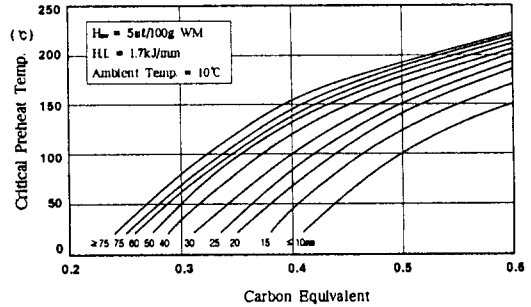


Fig. 3 Diagram of preheating temperature for Ceq and steel plate thickness[®]

2.4 모재/용접부의 화학조성

모재 및 용접부의 화학조성을 조사하기 위하여 건식분석 방법인 스펙트로 분석기 (Spectrovac-2000, U. S. A)로 3회 분석하여 평균값을 기록하였으며 그 결과는 Table 2에 나타내었다.

2.5 크랙발생 위치조사

용접부에 존재하는 횡크랙의 위치 및 길이를

Table 1 Welding schedules

Identification	welding condition	pass	current (A)	voltage (V)	speed (cm/min.)	heat input (KJ/cm)
		2~27	340~350	35	48~42	25
B	preheating / interpass temperature below 30℃	1	240~250	30	16	28
		2~27	340~350	35	37~41	26

Table 2 Chemical Composition of base/weld metal

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Ti	TS (kgf/mm ²)	YS (kgf/mm ²)	EI (%)	
														(%)
EH32 TMCP (spec.)	0.18	0.10 ~0.50	0.90 ~1.60	0.040 max.	0.040 max.	0.40 max.	0.20 max.	0.08 max.	0.10 max.	0.02 max.	45~60	32.0 min.	20.0	
Base metal (experi.)	0.09	0.38	1.35	0.015	0.005	0.03	0.03	0.02	0.002	0.02	52.8	38.0	31.0	
Weld metal	A	0.04	0.29	1.03	0.013	0.016	1.31	0.03	0.02	0.018	0.01	66.3	61.4	23.4
	B	0.04	0.29	1.05	0.012	0.017	1.32	0.03	0.02	0.017	0.01	69.4	63.7	22.8

check하기 위하여 초음파 검사(ultrasonic test)를 실시하여 개략적인 위치를 파악한 후 용접비드 표면에서 매 0.5mm 깊이마다 기계가공(milling) 및 MPI(Magnetic particle Inspection)로써 크랙 깊이 및 길이를 check하였다.

2.6 피로시험

본 연구에 사용된 피로시험기는 ±20 ton 용량의 축인장 압축피로시험기를 사용하여 용력비 R=0인 하중제어 편진법으로 피로시험을 실시하였으며 하중파형은 정현파이고 반복속도는 3 Hz로 하였다. 용접선 방향과 수직으로 위치한 횡크랙의 피로특성을 규명하기 위하여 용접선 방향으로 인장 반복하중이 작용되도록 순수 용착금속에서 Fig. 4와 같이 시험편을 제작하였다. 또한 크랙 위치에 따른 피로특성을 평가하고자 횡크랙이 시험편 내부와 표면에 있을 때 피로수명을 상호 비교 분석하였다.

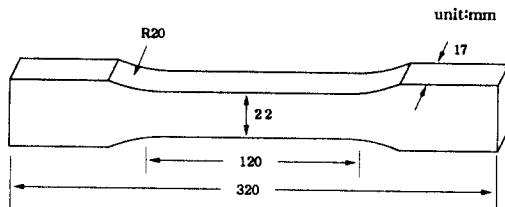


Fig. 4 Shape and size of the fatigue test specimen.

3. 결과 및 고찰

3.1 횡크랙 발생과 위치

예열 및 층간온도를 100~120℃로 유지한 시험편에서는 어떠한 크랙도 발견되지 않았으나 예열 및 층간온도를 30℃미만으로 유지한 시험편에서는 용착금속에 내재된 횡크랙을 발견하였다. 초음파 검사시 용착금속내에 존재하는 횡크랙은 반드시 표면 비드위에서 탐촉자를 스캐닝 해야만 발견되어지는 특성을 가지므로 본 실험에서는 비드 표면에서 스캐닝하여 개략적인 크랙길이 및 길이를 측정후 크랙을 가시적으로 나타내기 위해 기계가공 및 자분탐상시험법으로 시험하였다.

예열 및 층간온도를 30℃미만으로 유지한 시험

편중 Section A-A' (용착금속두께 17mm)에서는 크랙이 발생되지 않았으나 용착금속의 두께를 35mm 및 50mm로 용접한 시험편에서는 횡크랙이 발생하였다. 이와같은 이유는 다층 용접시 용접층수가 증가될수록 용접부에 잔류응력 및 확산성 수소량이 증가되어 크랙이 발생되었다고 생각된다.

Photo 1은 강제두께 50 mm 전체를 용접했을 때 발생한 크랙의 양상을 보여주고 있다.

(A)는 50mm용접부중 처음 크랙이 발견된 부위로 크랙은 비드표면 9.0mm깊이에 위치하였으며 비드표면 9.5mm 깊이인 (B)에서는 (A)에서 나타나지 않았던 새로운 크랙이 발견되었다. (C)는 표면에서 11.0mm, (D)는 11.5mm 깊이에서의 크랙으로 (A) 및 (B)에 나타났던 크랙들은 사라지고 새로운 크랙이 생성되었음을 확인할 수 있다.

이와같은 크랙들이 (E)와같이 비드표면 23.5mm까지는 생성 및 소멸을 반복하다가 비드 표면 28mm인 (G)에서 크랙이 완전히 사라졌으며 6~7mm 길이의 비교적 큰 크랙주위에 1mm 미만의 미세한 크랙이 함께 분포하고 있음을 확인하였다. 이와같은 실험을 통하여 35mm 용접한 시험편(A)과 50mm를 용접한 시험편(B)에서 용착금속 두께에 따른 크랙분포를 알 수 있었으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

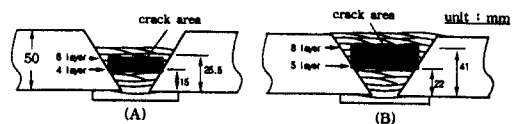


Fig. 5 The transverse crack area depending on weld thickness

Takahashi의 연구 논문¹⁰⁾에 의하면 횡크랙은 잔류응력 및 수소 농도가 가장 높은 용접부 최외층 바로 아래층의 용착금속에서 크랙이 생성되어 용접부 top surface나 bottom surface로 점차 전파한다고 발표하였다. 그러나 본 연구에서는 용접층수 변화에 따라 크랙 발생위치가 달랐으며 총 7 Layer용접한 35mm 시험편의 경우 4~6 Layer에서 크랙이 발생되었고 10 Layer 용접한 50mm 시험편의 경우 5~8 Layer에 크랙이 분포하였다.

이와같이 크랙은 특정 Layer에서 발생되기 보다는 용접비드 표면 일정깊이에서 발생됨을 알 수 있

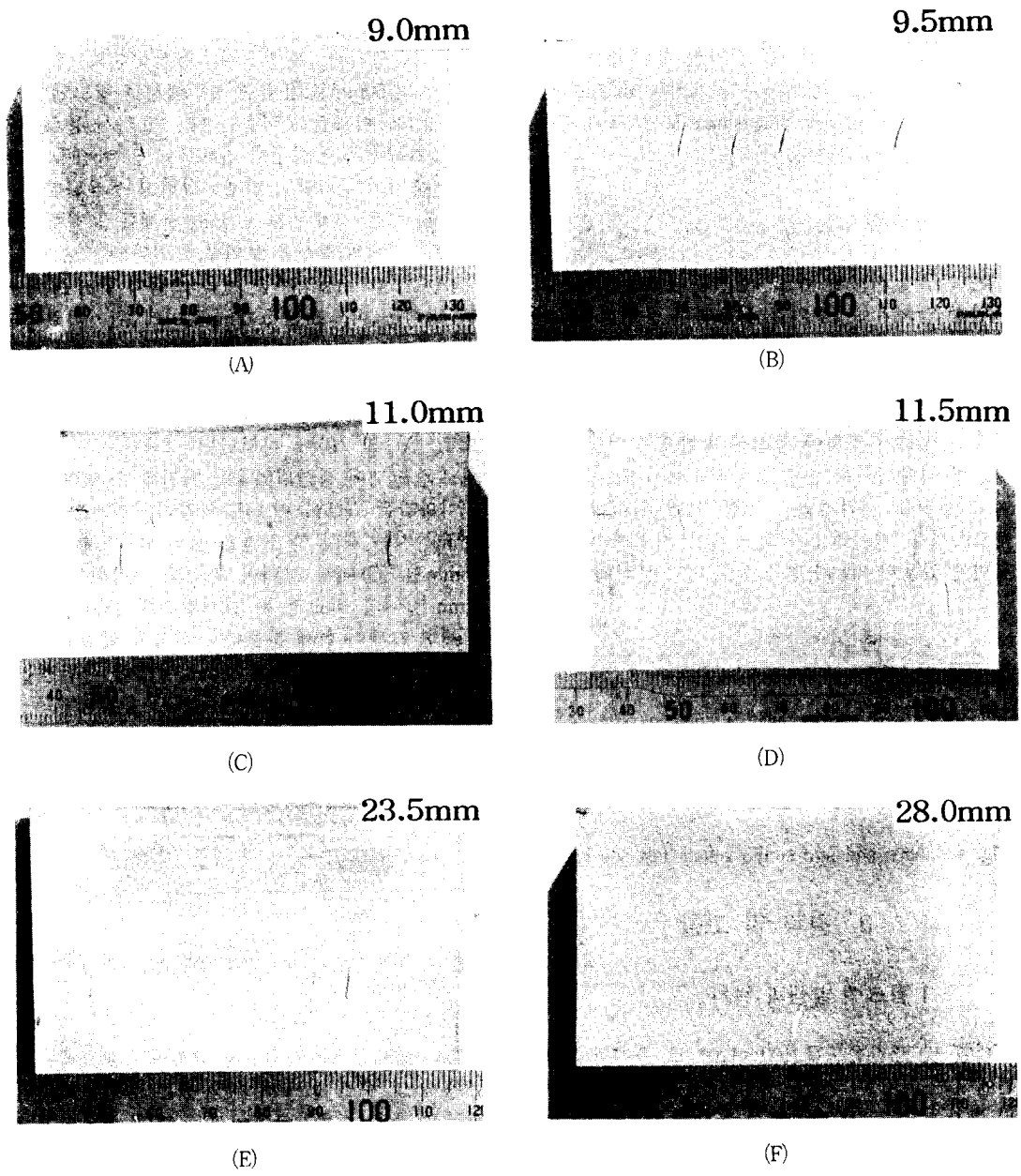


Photo 1 MPI results of transverse crack for 50mm weld joint
 (Depth below weld top surface is shown at right hand top corner)

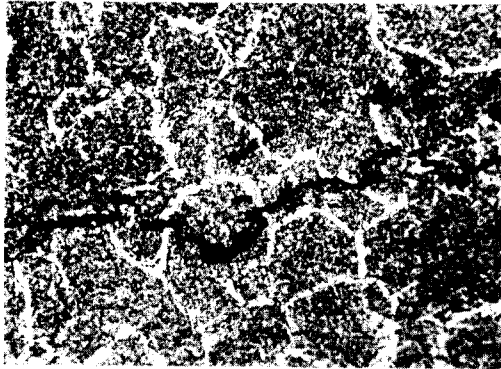
었다. 이와같은 이유는 Takahashi가 연구한 작은 시험편의 경우 구속응력 상태가 적는데 비해 실구조물에서는 큰 구속응력이 발생되기 때문으로 생

각된다.

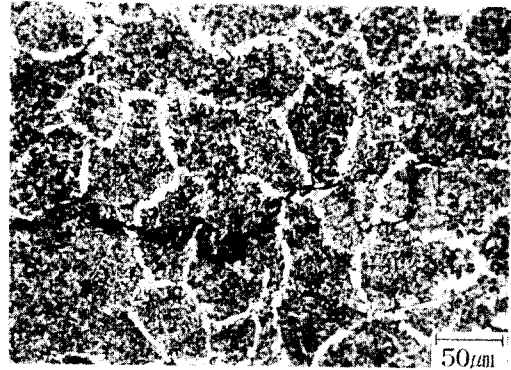
본 실험에 앞서 여러번의 예비실험을 실시한 결과 동일한 용접조건에서도 구속응력상태가 낮은

상태인 즉, 시험편과 용접정반을 서로 용접하지 않은 시험편에서는 어떠한 횡크랙도 발견되지 않았다. Photo 2는 횡크랙의 미세조직으로 (A)는 크랙중간 부위이고 (B)는 크랙 끝단부의 양상을 보여주고 있다. 즉 결정입계페라이트(grain boundary ferrite)를 따라 크랙이 발생되지 않고 Fig. 6¹¹⁾에서와 같이 일정응력 이상의 높은 응력이

작용할때 나타나는 결정입내 파괴를 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 응력에 따라 파괴모드가 변화하는데 낮은 응력상태에서는 Fig. 6의 (C)와 같이 결정입계 파괴를 나타내며 일정응력 이상에서는 Fig. 6의 (A) 및 (B)에서처럼 미세공공합체(microvoid coalescence) 또는 결정입내 파괴로 변화함을 알 수 있다.



(A)



(B)

Photo 2. Optical microstructure of transverse cracks

3.2 피로특성

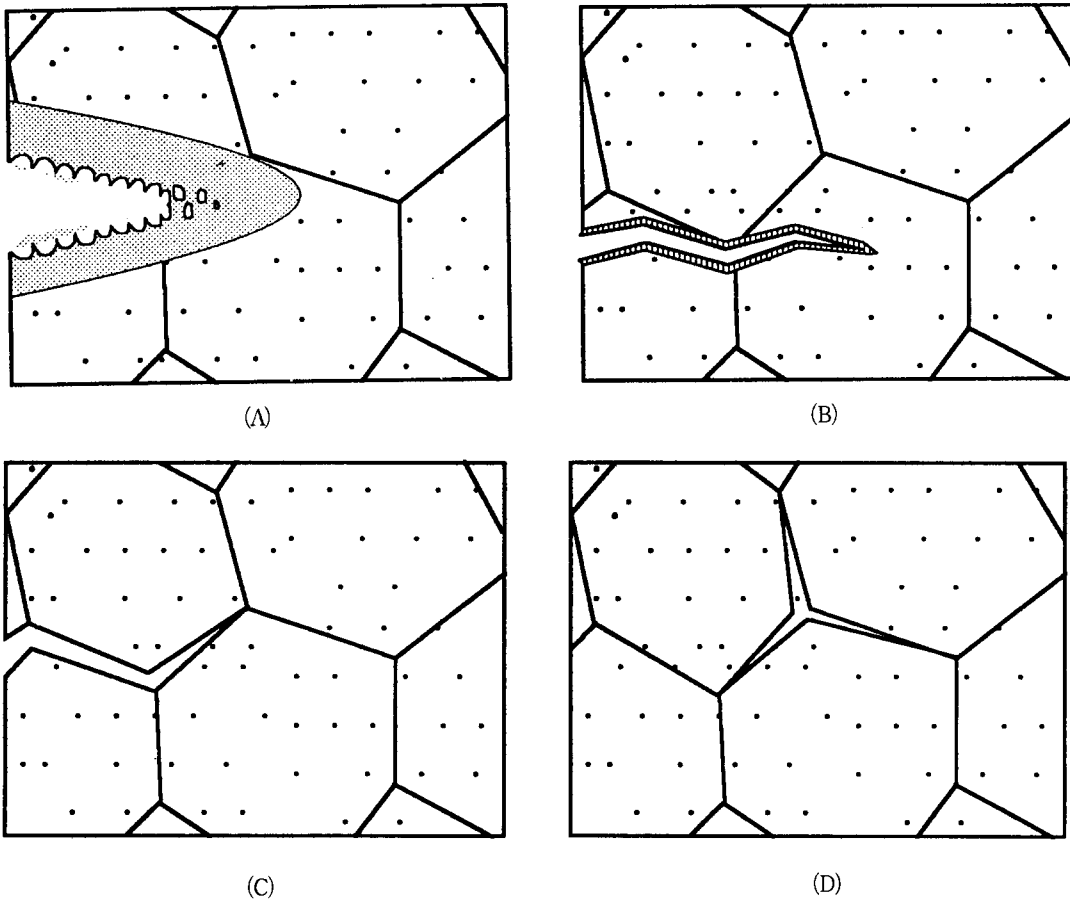
시험편 표면에 위치한 횡크랙의 자분탐상 시험 후 크랙분포를 Photo 3에 나타내었으며 Fig. 7은 Photo 3에 나타난 시험편의 피로시험 결과이다. Photo 3의 (A) 시험편의 경우 33Kg/mm² 하중조건에서 피로수명은 1.4×10^5 이었으며 (A-1)의 크랙 길이가 긴 것에서 파단이 일어나지 않고 오히려 크랙 길이가 짧은 (A-2)에서 크랙이 전파하여 파단이 일어났다. 피로시험 후 파면을 분석해본 결과 표면 크랙 길이가 긴 (A-1)의 경우 1mm 미만의 깊이를 가진 크랙인 반면 (A-2)에서는 2~3mm의 깊이를 가진 횡크랙이 존재하였음을 확인하였다.

25Kg/mm² 하중으로 피로시험을 실시한 (B) 시험편의 경우 (B-1)에서 크랙이 전파하여 (B-2) 크랙과 서로 연결되어 4.1×10^5 에서 파단이 일어났다.

(C) 시험편은 22Kg/mm² 하중조건으로 피로시험을 실시하였는데 2.7×10^5 의 반복후 (C-1)에서 파단이 일어났으며 (B) 시험편보다 낮은 하중 조건임

에도 피로수명은 오히려 감소하였다. 이와같은 이유는 파단된 위치의 크랙이 시험편 모서리에 위치하여 높은 응력집중이 일어난 것으로 판단된다. 20Kg/mm² 하중으로 피로시험한 (D) 시험편은 (D-1)에서 파단되었고 6.8×10^5 의 피로수명을 보였으며 하중이 증가할수록 피로수명은 감소하는 경향을 보이고 있다. Fig. 8은 횡크랙이 시험편 내부에 존재할때의 피로특성을 도식화한 것으로 크랙의 크기 및 위치는 초음파탐상법으로 확인한 것이다. 크랙은 5~6mm 및 3~4mm의 길이를 가진 2개의 횡크랙이 존재함을 확인할 수 있었으며 크랙 위치를 Fig. 8 내부에 개략적으로 나타내었다.

먼저 25Kg/mm² 하중으로 피로시험을 실시한 결과 피로한도인 2.0×10^6 에서 크랙이 발생되지 않아 이 재료의 설계응력을 만족할 수 있는 30Kg/mm² 하중으로 증가시켜 시험하였지만 크랙이 시험편 표면에 있는 경우와는 달리 두조건 모두에서 피로한도인 2.0×10^6 에서 파단이 일어나지 않았다.



(A) : Microvoid coalescence with high stress intensity factor
 (B) : Quasicleavage with intermediate stress intensity factor
 (C) : Intergranular cracking with low stress intensity factor
 (D) : Intergranular cracking with assisted hydrogen pressure

Fig. 6 Sketches of microscopic fracture modes

4. 결 론

EH 32 TMCP강재 50t에 대한 Flux Cored Arc 용접시 예열 및 층간온도 변화에 대한 횡크랙 발생양상과 피로시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 예열 및 층간온도를 100~120℃로 유지한 용접 시험편에서는 횡크랙이 발생하지 않았으나 예

열 및 층간온도를 30℃미만으로 유지한 시험편에서는 횡크랙이 발생하였다.

2. 횡크랙은 용접층수에 따라 발생 양상이 다르게 나타났으며 50 mm 두께중 35mm 를 용접한 시험편의 경우 7 layer 용접중 4~6 layer에서, 50mm full 용접한 시험편의 경우 10 layer 용접중 5~8 layer에서 크랙이 발생하였다.

3. 횡크랙은 미세조직 관찰결과 비교적 높은 용

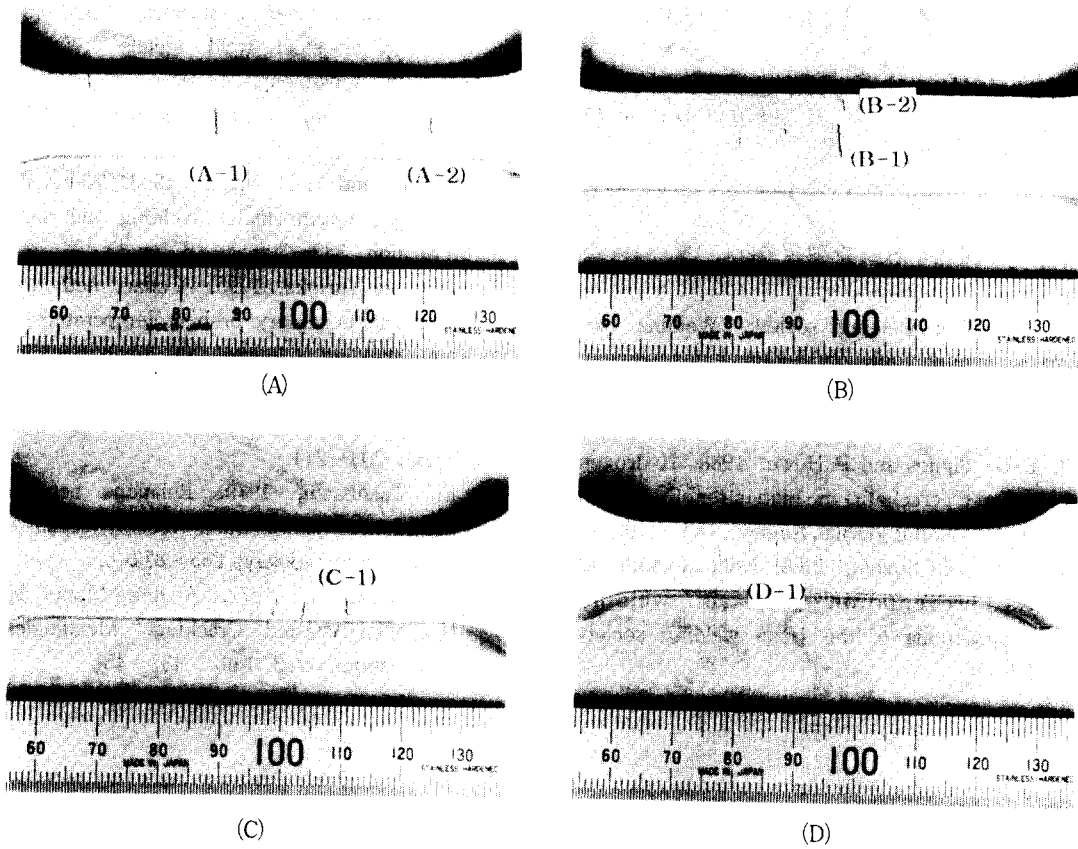


Photo 3 The fatigue specimens with various surface crack

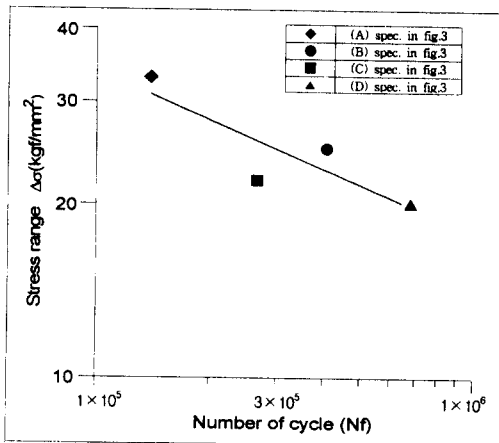


Fig. 7 Results of the fatigue test for surface crack

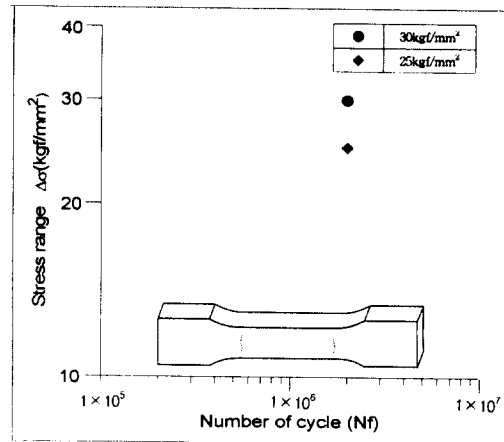


Fig. 8 Results of the fatigue test for inside crack

력상태에서 발생하는 결정입내 크랙이었다.

4. 피로시험 결과 횡크랙이 내부에 위치한 시험편이 시험편 표면에 위치한 경우보다 높은 피로특성을 나타내었다.

5. 참고문헌

1. American welding society, Welding hand book, Vol. 1 8th, 230~231.
2. ASM handbook committee, 1973, Metal handbook ninth edition (vol. 6), 129~130
3. E. G. Signes and P. Howe, 1988, Hydrogen-assisted cracking in high-strength pipeline steel, Welding journal, August, 163~170.
4. Haruyoshi Suzuki, 1978, Cold cracking and its prevention in steel welding, Transactions of the japan welding society, 82~86.
5. P. H. M. Hart, 1986, Resistance to hydrogen cracking in steel weld metals, Welding research supplement, 14~22.
6. Sindo Kou, 1987, Welding metallurgy, 249, 326.
7. N bailey and M D Wright, 1993, Weldability of high strength steels, Welding and metal fabrication, 389~396.
8. Nobutaka Yurioka, 1995, A chart method to determine necessary preheat temperature in steel welding, Journal of japan welding society, 347~350.
9. J. Dearden and H. o. nell, 1940, Trans. Inst. Weld., 203~214
10. Eiji Takahashi, 1979, Relations between occurrence of the transverse... Journal of japan welding society, 855~872
11. C. D Beachem, 1972, A new Model for Hydrogen-Assisted Cracking, Metallurgical Transactions vol. 3, Feb., 437~451.