

Cr-Mo 합금강의 후열처리 균열 감수성 평가

김 상 진* · 김 기 수** · 이 영 호***

<국문초록>

초기 응력부식균열에 대한 감수성 평가 시험법인 C링 시험법(C-ring Test)은 용접부의 후열처리 균열감수성을 평가하는 시험법으로 적합하다고 알려져 있다. C링 시험법은 실제 용접부 열영향부에 노치를 제작하여 잔류응력이 열영향부에 미치는 영향을 평가할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에는 C링 시험법을 이용하여 원자력 발전소 압력용기에 사용되는 Co-Mo강의 용접부 결함 발생 현상을 검토 하고자 Co-Mo강에 대하여 후열처리를 실시하였으며, C링 시험법을 통하여 용접 열영향부의 후열처리 균열을 평가하고자한다. 결론은 다음과 같다.

바나듐 모디파이 합금(AMAX 3Cr-1Mo-0.1V, JSW 3Cr-1Mo-V-Ti-B 및 JSW 2 $\frac{1}{2}$ Cr-1Mo-V-Ti-B강)은 Berkeley 3Cr-1 $\frac{1}{2}$ Mo- $\frac{1}{2}$ Ti 및 2 $\frac{1}{2}$ Cr-1Mo합금강보다 후열처리 균열에 대한 감수성 보다 높게 나타났다.

C-ring 시험에 있어서 바나듐 모디파이 합금은 2종의 후열처리조건과 3종의 응력조건에서 모두 균열을 나타냈으나 Berkeley 3Cr-1 $\frac{1}{2}$ Mo- $\frac{1}{2}$ Ni강과 Luken 2 $\frac{1}{2}$ Cr-1Mo-0.1C재료는 690MPa와 더 이상의 응력조건에서 2종의 후열처리를 실시하는 조건에서도 균열이 발생하지 않았다.

C-ring 시험결과, 균열깊이는 바나듐 모디파이 재료인 경우, 낮은 후열처리온도와 비교해서 높은 후열처리온도인 경우가 감소하고 있다.

C-ring 시험에 대한 SEM분석결과 균열은 오스테나이트 결정 입계를 따라 파괴되는 파괴양상을 나타내고 있으며 연성파면은 나타나지 않았다.

주제어 : C-ring 시험, 균열감수성 평가(Evaluation of cracking susceptibility), 용접열영향부(HAZ), 후열처리(PWHT), Cr-Mo 강

* 충남대학교 대학원 기계공학과

** 교신저자 : 김기수(kksoo@cnu.ac.kr), 충남대학교 공과대학 기술교육과

*** 충남대학교 공과대학 기계공학과(BK21 메카트로닉스 고급인력양성 산학공동사업단)

I. 서론

1. 연구의 필요성

용접시 용접부는 높은 온도의 열이 급격하게 유입되므로, 모재는 급속하게 팽창하게 되며, 이는 용접부가 냉각될 때 조직을 변화시키고, 열응력 발생으로 인한 변형과 균열을 일으키는 원인이 된다. 따라서 용접부의 후열처리 목적은 급격히 온도가 상승한 용접부의 냉각속도를 낮추어 변형과 균열을 방지하고, 기계적 성질을 향상시키며, 기공생성을 억제하는 데 있으며, 후열처리로 인하여 용접부 저온균열의 원인이 되는 수소가 방출된다. 아직까지 합금강에 대한 후열처리(Post-Weld Heat Treatment, PWHT) 균열감수성에 대한 단일 시험법은 없으며, 후열처리 균열감수성에 대하여 효과가 좋다고 알려진 몇 가지 시험법이 이용되고 있을 뿐이다(Dhooge 외3, 1978; Meitzner 외 1, 1975; Vinckier, 1974). 후열처리 균열감수성을 평가하는 이상적인 시험은 반드시 다음과 같은 특성을 가져야 한다. 후 열처리 균열 감수성 시험편은 실제 열영향부의 조직을 잘 나타낼 수 있는 노치(notch) 및 결함을 포함하여야 하며, 실제 용접부에서 나타나는 것과 유사한 응력완화 현상을 나타낼 수 있어야 한다. 또한, 실제 용접에 포함되는 모든 용접 변수들을 포함할 수 있는 단일시험을 실시할 수 있는 소형 시험편을 가지고 평가할 수 있는 시험법이여야 한다. 그러나 이와 같은 시험편을 제작한다는 것은 현실적으로 매우 어려운 실정이다(Wyatt, 1972).

글리블 시험(Gleeble Test)법이 미국용접학회(American Welding Society : AWS)에서 후열처리 균열을 평가하는 새로운 시험법으로 제안되었다(Bodine외 4, 1977). 글리블 시험법은 일정한 하중을 일정시간 용접부에 가함으로써, 열로 인하여 팽창된 재료가 냉각될 때 발생하는 잔류응력을 감소시키는 것이다. 또한 잔류응력 제거 중 시험기가 시험편에 가하는 하중을 조절함으로써 후열처리 과정 중 발생하는 각종 응력 상태에 대한 시뮬레이션(simulation)을 가능하게 하며, 이로 인하여 용접금속(Weld-Metal)을 포함하지 않는 모재 열영향부의 제반현상을 규명할 수 있다(Nicols, 1969). 그러나 이 시험법은 노치가 있거나 재료 내적인 결함을 가진 시험편에 대해서는 시뮬레이션을 할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

초기 응력부식균열에 대한 감수성 평가 시험법인 C링 시험법(C-ring Test)은 용접부의 후열처리 균열감수성을 평가하는 시험법으로 적합하다고 알려져 있다. C링 시험법은 실제 용접부 열영향부에 노치를 제작하여 잔류응력이 열영향부에 미치는 영향을 평가할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 C링 시험법을 이용하여 원자력 발전소 압력용기에 사용되는 Co-Mo강의 용접부 결함 발생 현상을 검토 하고자 Co-Mo강에 대하여 후열처리를 실시하였으며, C링 시험법을 통하여 용접 열영향부의 후열처리 균열을 평가하고, C링 시험법을 통하여 용접부의 결함발생 현상을 검토함으로써 압력용기의 제작 및 안전에 기여하고자 한다.

II. 실험방법

1. 시험편의 제작과 평가방법

본 연구에 사용된 합금강의 시험편은 SMA(Shielded metal arc)용접에 의하여 제작하였으며 시험편 형상과 제작과정은 Fig. 1과 Fig. 2에 각각 나타내었다. 용접시 용접 입열은 2.17KJ/mm ~ 3.31KJ/mm의 범위에 걸쳐 실시하였으며 Table 1에 본 연구에 사용된 시험편의 용접조건을 나타내었다. 또한 후열처리는 5종의 합금강에 대하여 620°C, 680°C의 온도에서 실시하였다.

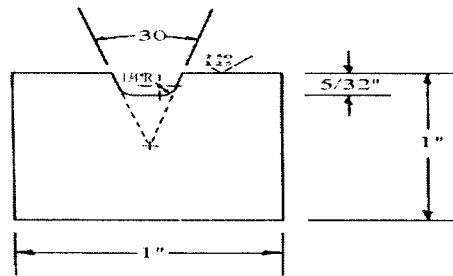


Fig. 1 Groove geometry for 1/8" (3.2mm) shielded metal arc electrodes.

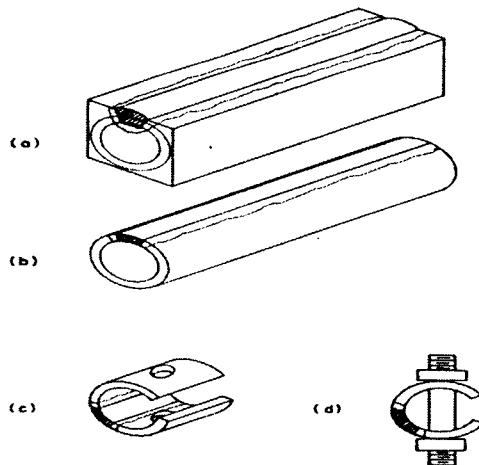


Fig. 2 Successive steps in the making of C-rings specimens. (a) bar with weld filled groove, (b) tube machined from square bar stock, (c) portion of the tube notched in the heat affected zone with hole drilled through ring and back removed, and (d) finished C-ring with loading bolt in place

Table 1 Weld parameters and heat input utilized in C-ring specimen preparation.

material	Volts	Amps	Time (min)	Length of Weld (mm)	Heat input (kJ/mm)
AMAX 3Cr-1½Mo-0.1V (Climax)	23	150	1.13	73	3.2
	23	150	1.30	95	2.8
	29	145	2.43	190	3.2
	30	165	1.07	95	3.3
	30	165	0.95	89	3.2
Berkeley 3Cr-1½Mo-½Ni	30	120	1.50	100	3.2
	30	120	1.38	100	2.9
	30	120	1.45	100	3.1
JSW 3Cr-1Mo-V-Ti-B	25	150	2.38	170	3.2
	30	165	0.83	110	2.3
	30	165	1.02	110	2.8
	30	165	1.00	110	2.8
	30	165	0.88	105	2.5
JSW 2¼Cr-1Mo-V-Ti-B	25	150	2.12	140	3.3
	30	165	1.12	130	2.6
	30	165	0.92	125	2.2
	30	165	0.90	125	2.2
	30	165	1.03	120	2.5
	30	165	1.12	120	2.8
Lukens 2¼Cr-1Mo-0.1C	24	160	1.28	120	2.4
	24	160	1.32	120	2.5

2. C-ring 시험의 평가방법

C-ring 평가는 균열의 최대깊이를 균열 전파의 최대 길이로 하였다. 균열의 최대깊이는 후열처리 방법 및 회수에 의해 결정된다. C-ring은 노치를 따라 6부분으로 절단하였다. 균열길이는 최대균열길이가 비교를 위해 사용되었으며 노치의 6부분을 측정하였다. 나머지 C-ring 시험은 공기와 진공에서 열처리 하였으며, 액체질소에서 냉각한 후 파괴하였다. 결정입계 파괴의 크기는 현미경을 이용하여 관찰하였다.

진공 중에서 후열처리를 실시한 표면은 SEM(Scanning Electron Microscope)에 의하여 파괴특성을 관찰하였다.

Ⅲ. 실험결과 및 검토

1. 3Cr-1Mo 과 2½Cr-1Mo강의 C-ring 시험 결과

Berkeley 3Cr-1½Mo-½Ni강과 Lukens 2½Cr-1Mo-0.10C강은 690MPa의 응력, 후열처리 620°C와 680°C조건에서 균열이 발생치 않았다.

Lukens 2½Cr-1Mo-0.10C와 Berkeley 3Cr-1½Mo-½Ni 강은 C링 시험 결과 680°C에서 감수성이 없으며 620°C에서는 감수성이 나타나는 것이 관찰 되었다. 그러나 바나듐을 첨가한 강은 C링 시험 결과 감수성이 높거나 아주 민감함을 알 수 있었다.

Fig. 3과 Table 2에 C-ring 시험에 대한 각각의 결과를 나타내었다. Fig. 3과 Table 2에 나타낸 바와 같이 바나듐 Modified 합금은 각 시험조건에 대하여 각 부분의 균열 깊이를 평균값으로 나타내었다.

Table 2는 평균값으로 부터 최대편차를 나타내고 있으며, 표준편차는 약±6%이다.

응력이 690MPa인 경우, 후열처리온도 680°C와 620°C를 비교해 보면 3종의 재료 모두 680°C균열깊이가 감소하고 있다. 이 균열깊이의 감소는 높은 후열처리조건에서 균열에 대한 감수성이 낮게 나타나고 있음을 보여주고 있다. C링 시험 결과도 같은 경향을 나타내고 있으며, 이는 높은 후열처리 온도에서는 낮은 감수성을 나타내는 것을 나타내고 있다. 적용하는 응력이 감소함에 따라서 균열이 감소하므로, 이는 응력이 균열전파의 driving-force로 작용하며 균열의 발생을 저감시킨다는 것을 나타낸다. JSW 3Cr-1Mo-V-Ti-B강에 550MPa와 410MPa의 응력을 가한 경우에는 앞서 실험한 재료의 경우와는 다른 경향이 나타나고 있다. 하지만 전체 편차가 ±6%이며, 균열깊이가 1%정도 증가하기 때문에 현저하지는 않다.

응력이 감소함에 따라, 620°C에서 균열깊이가 감소하고 있으며, 410MPa의 응력을 가한 경우 ±6%의 평균편차를 고려한 다면, Fig. 3과 Table 2에 나타난 바와 같이 크지 않다. AMAX와 JSW 2½Cr합금에 대하여 550MPa의 응력, 후열처리 온도 620°C에서 시험을 실시한 경우, 균열 깊이는 3%정도로 나타나고 있으며, AMAX와 JSW 3Cr강의 경우 680°C의 후열처리 온도에서도 그 편차는 ±1%로 크지 않다.

이와 같은 결과로부터 690MPa의 응력, 후열처리 온도가 620°C, 680°C일때 JSW 2½Cr-1Mo-V-Ti-B재료의 경우 균열감수성은 Cr-Mo비율의 결과로 나타나고 있다. JSW 3Cr-1Mo-V-Ti-B 합금은 비교적 높은 Cr함유량으로 인하여 결정입계에서 Cr M₇C₃의 우선석출과 성장이 일어나며, JSW 2½Cr-1Mo-V-Ti-B합금은 결정입계에서 Mo rich M₂₃C₆의 우선 석출과 성장이 반대로 일어난다. 결정입계에서 M₇C₃성장은 용해하는 과정보다 많은 Mo을 떨어져버려 후열처리를 하는 동안 Mo₂C가 빠르게 성장하기 때문이다(이영호, 1984).

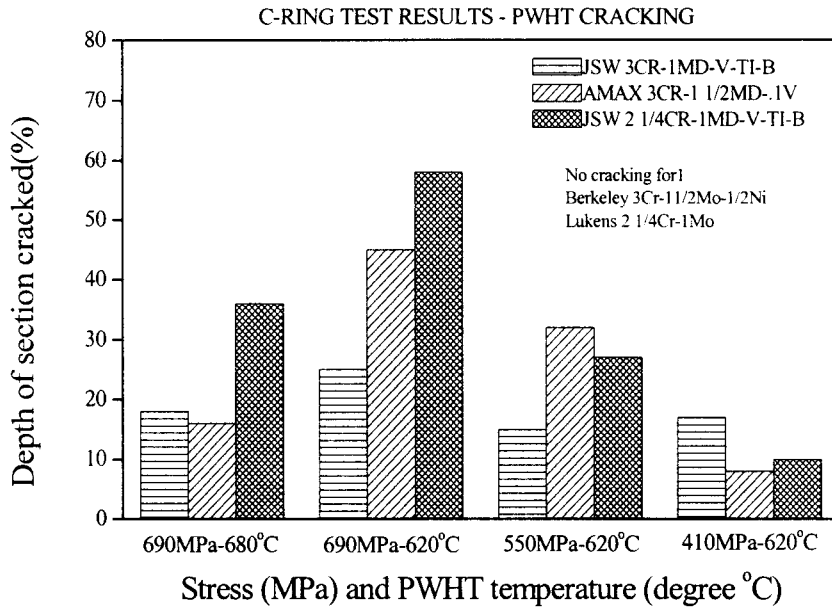


Fig. 3 PWHT cracking results for the C-ring test

Table 2. PWHT cracking results for the C-ring test.

PWHT temperature (°C)	Stress (MPa)	% Depth of section cracked		
		AMAX(climax) 3Cr	JSW 3Cr	JSW 2 1/4 Cr
680	690	17(range +4,-2)	18(±3)	37(±13)
620	690	45(+34,-20)	24(±11)	53(+15, -12)
620	550	30(±1)	14(±1)	27(±12)
620	410	8(±4)	15(±6)	9(±4)

2. 2¼Cr-1Mo강과 3Cr-Mo강의 C-ring 시험에 대한 광학현미경 관찰 및 파면시험 평가

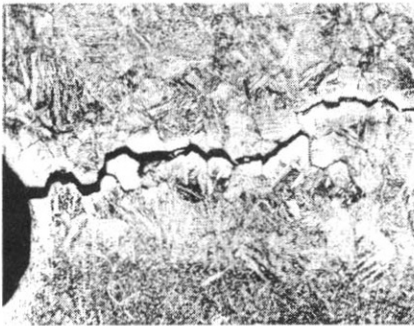
Photo. 1~ Photo. 3에 AMAX(Climax) 3Cr-1½Mo- 0.1V강, JSW3 Cr-1Mo-V-T-Br 강, 그리고 JSW 2¼ Cr-1Mo-V-Ti-B강에 대한 C-ring 시험 횡단면의 광학 현미경 사진과 SEM 사진을 각각 나타내었다. 이 경우의 응력은 690MPa, 후열처리 온도는 620°C이었다.

광학현미경 사진에서 알 수 있는 바와 같이 용접 열영향부(HAZ)의 조립역에 있어서 prior 오스테나이트결정입계를 따라서 균열이 전파하는 전형적인 입계균열이 명확하게 관찰되고 있다.

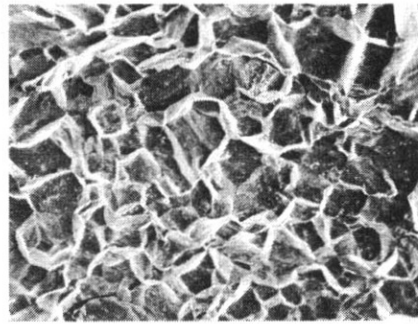
Photo. 1(b) 와 Photo. 2(b) Photo. 3(b)은 3Cr-1½Mo- 0.1V강, JSW3 Cr-1Mo-V-Ti-B강, 그리고 JSW 2¼ Cr- 1Mo-V-Ti-B강에 대한 오스테나이트 결정입계를 따른 파면을 나타내고 있으며, 연성파면은 나타나지 않음을 알 수 있다.

Photo. 4는 JSW 2¼Cr-1Mo-V- Ti-B재료 C-ring 시편의 현미경(X1000)사진이다. 세 종류의 바나듐이 첨가된 재료 모두 평 단면보다 밝은 부분으로 나타나고 있다.

Micro-연성이 결정경계와 벽개파면역(Cleavage fracture regions)의 경계에서 관찰되었다. Photo. 5는 크리프(Creep)조건 하에서 관찰된 전형적인 파단면형상을 나타낸다. 결정경계에 있어서 미립자의 조장에 의해 공동(cavitation)은 나타나지 않았다.



(a) 100X OLM

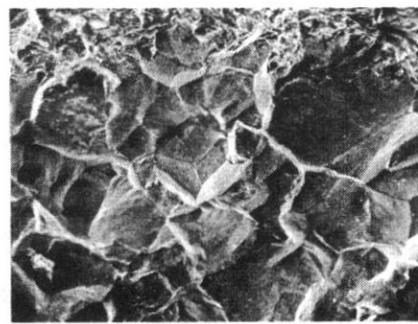


(b) 200X SEM

Photo. 1 AMAX(Climax 3Cr-1½Mo-0.1V C-ring specimen, 620°C PWHT 690MPa)

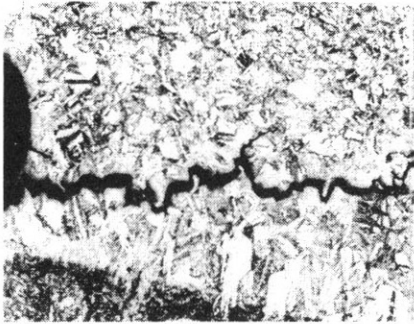


(a) 100X OLM

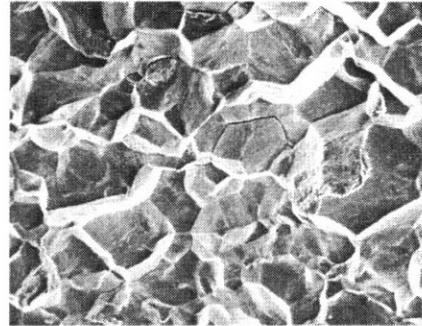


(b) 200X SEM

Photo. 2 JSW 3Cr-1Mo-V-Ti-B Cring Specimen 620°C PWHT, 690MPa



(a) 100X OLM



(b) 200X SEM

Photo. 3 JSW 4Cr-1Mo-V-Ti-B C-ring specimen 620°C PWHT 690MPa

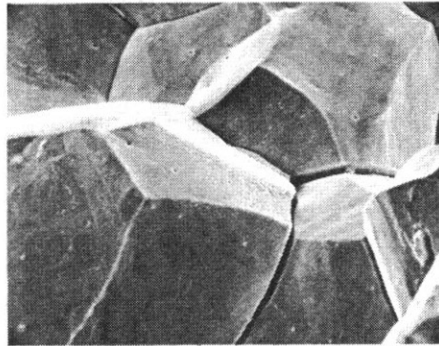


Photo. 4 Higher magnification fractograph of the JSW 24Cr-1Mo-V-Ti-B C-ring specimen. 620°C PWHT, 690MPa, 1000X SEM

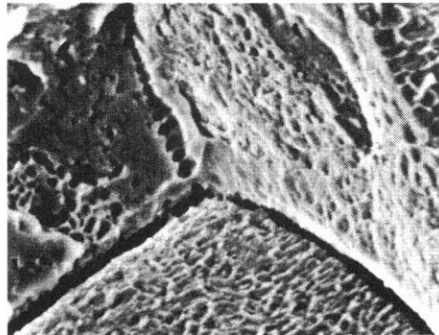


Photo 5 Grain boundary cavitation at the intergranular-cleavage fracture interface in the AMAX (Climax) 3Cr-1.5Mo-0.1V C-ring specimen. 620°C PWHT, 690MPa, 5000X

SEM

IV. 결 론

본 연구는 C링 시험법을 이용하여 원자력 발전소 압력용기에 사용되는 Co-Mo강의 용접부 결함 발생 현상을 검토하기 위하여 실시하였으며, 본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 바나듐 모디파이 합금(AMAX 3Cr-1Mo-0.1V, JSW 3Cr-1Mo-V-Ti-B 및 JSW 2 $\frac{1}{2}$ Cr-1Mo-V-Ti-B강)은 Berkeley 3Cr-1 $\frac{1}{2}$ Mo- $\frac{1}{2}$ Ti 및 2 $\frac{1}{2}$ Cr-1Mo합금강보다 후열처리 균열에 대한 감수성 보다 높게 나타났다.

2) C-ring 시험에 있어서 바나듐 모디파이 합금은 2종의 후열처리조건과 3종의 응력조건에서 모두 균열을 나타냈으나 Berkeley 3Cr-1 $\frac{1}{2}$ Mo- $\frac{1}{2}$ Ni강과 Luken 2 $\frac{1}{2}$ Cr-1Mo-0.1C 재료는 690MPa와 더 이상의 응력조건에서 2종의 후열처리를 실시하는 조건에서도 균열이 발생하지 않았다.

3) C-ring 시험결과, 균열에 대한 낮은 감수성은 보다 높은 후열처리 온도조건(680℃)에서 나타나고 있었다.

4) C-ring 시험결과, 균열깊이는 바나듐 모디파이 재료인 경우, 낮은 후열처리온도(620℃)와 비교해서 높은 후열처리온도(680℃)인 경우가 감소하고 있다.

5) AMAX 3Cr강, JSW 3Cr강, JSW 2 $\frac{1}{2}$ 강의 균열은 용접 열영향부의 조립역에 있어 Prior 오스테나이트 결정입계를 따라 전파하는 전형적 입계균열을 나타내었다.

6) C-ring 시험에 대한 SEM분석결과 균열은 오스테나이트 결정 입계를 따라 파괴되는 파괴양상을 나타내고 있으며 연성파면은 나타나지 않았다.

본 연구는 2004년도 충남대학교 자체연구비 지원과제에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- 이영호(1984). **Stainless steel overlay 용접부의 disbonding에 관한 연구**. 한양대학교 대학원 박사학위논문. 미간행.
- Bodine, G. C., Jr., Chakravarti, B., Owens, C.M., Roberts, B.W., Vandergriff, D.M. and Ward, C.T., "A program for the development of advanced ferritic alloys for LMFBR structural applications," Topical report. ORNL/SUB-4291/1, 1977.
- Dhooge, A., Dolby, R.E., Sebile, J., Steinmetz, R. and Vinckier, A.G., "A review of work related to reheat cracking in nuclear reactor pressure vessel steels" International journal of pressure vessels and piping, 6, 1978.
- Meitzner, C.F., "WRC bulletin 211 - stress relief cracking in steel weldment" Welding research council, 1975.
- Nicols, R.W., "Reheat cracking in welded structures" Welding in the world, 7(4), 1969, pp. 36~44
- Vinckier, A.G. and Pense, A.w., "WRC bulletin 197-Review of underclad cracking in pressure-Vessel components" Weld research council, 1974, pp. 1~35
- Vinckier, A., (chrnm.), " Testing techniques to study the susceptibility to reheat cracking of carbon-manbganese and low alloy steels" Welding in the world, 12, 1974, pp. 1~22
- Wyatt, L.M., (chrnm.) and Edmondson, B., (rapporteur), "Rapporteur's remarks and discussion (discussion of papers 24~31)" Proc. of Conf. Welding research related to power plant, University of Southampton, 17~21 Sept. 1972, Central electric generating board, London, 1972, pp. 435~448

<Abstract>

Evaluation of PWHT cracking susceptibility of the Cr-Mo steel alloys

Sang-Jin Kim* · Ki-Soo Kim** · Young-Ho Lee***

This C-ring test, normally employed for evaluating susceptibility to stress-corrosion cracking, was determined to be a suitable small scale test to evaluate PWHT(Post-Weld Heat Treatment) cracking susceptibility. This test is possible to incorporate an actual weld, to introduce a notch into the coarse grained HAZ(Heat Affected Zone), to load the coarse grained HAZ any level of stress and, most importantly, since the C-ring is an approximately constant strain type test, the stress decreases with time at temperature in a manner similar to that of an actual steel weldment.

The procedure employed in making the C-ring was presented in the experimental procedure section, however, several points deserve further discussion. The walls of the weld groove are made along radial lines from the center of the ring in order to obtain an HAZ which is oriented perpendicular to the walls of the machined C-ring. Therefore, the plane of maximum stress will be aligned through the HAZ and, therefore, crack propagation will not be forced to deviate from the plane of maximum stress in order to remain in the coarse grained HAZ as is the case with the Y groove test.

Key words : C-ring test, Evaluation of cracking susceptibility, HAZ(Heat affected zone), PWHT(Post-Weld Heat Treatment), Cr-Mo steel

* Graduate of ChungNam National University

** Correspondence : Ki-Soo Kim(kksoo@cnu.ac.kr), ChungNam National University

*** ChungNam National University