원전 배관용 SA 106 Gr.C의 협개자동용접 적용에 관한 연구

우승완† ·권재도*·이춘열*·강석철**·신호상**

The Application of Narrow-Gap Welding Process for SA 106 Gr.C in Nuclear Power Plant

Seung Wan Woo, Jae Do Kwon, Choon Yeol Lee, Suk Chull Kang and Ho Sang Shin

Key Words: Narrow-Gap Weld(협개자동용접), Carbon Steel(탄소강), General Weld(정상용접), Repair Weld(보수용접), Residual Stress(잔류응력)

Abstract

Conventionally, SMAW process was applied to join pipes of RCL, which caused lot of loss in time and cost due to excessive heat input and defects in joining section. Recently, narrow-gap welding(NGW) process was introduced to overcome the disadvantages of SMAW. However, the application of NGW to nuclear power plant is not yet common because safety of NGW process is not proven. In present paper, the welded coupons are made of carbon steel. They are manufactured under different processes; general welding(GW), post-weld heat treatment(PWHT) after GW, repair welding after GW and PWHT with repair welding after GW in carbon steel. Performed are various mechanical tests investigation of microstructure, hardness test, tensile test at room and high temperature, bending test, impact test and J-R test. It is verified that the mechanical properties of carbon steel are greatly changed after repair welding process due to applied heat flux, and that the effect of PWHT is beneficial.

1. 서 론

원자력 발전소에 있어 생성된 열의 전달과 냉각재 순환을 안내하는 RCL(Reactor Coolant Loop) 배관은 대구경 배관으로서 원전의 설치공사에 있어 가장 중요한 작업공정 중 하나이다. 현재 원전건설 중 RCL 배관 용접은 수동용접(shield metal arc welding, SMAW)을 하고 있어 용접작업시 과다한 입열과 잦은 불량발생으로 인해 28개소 연결부에서 발생되는 배관의 심한 열변형을 야기하여 주기기의 위치가 변경되는 등 여러 가지 문제점을 유발하고, 설치공사 기간 또한 7개월 이상 소요되어 원전 건설의 직접적인 공사기간 증가의 주요원인이 되고 있으며,[1] 그 대체방안으로 용접작업의 자동화가 요구되어, 신원전 건설시 협개자동용접법의 적용여부를 검토하는 단계에 있다.[2]

그러나, 협개자동용접법이 실제 국내 원전 건설단계에서 RCL 배관용접에 적용된 경험이 없어 용접부의 건전성이 충분히 검증이 되지 않은 상황이며, NRC에서도 명확한 규정없이 narrow gap 이라는 전문화된 용접기법에 대해서는 고품질의 확실성을 갖기 위한 추가검사 정도를 언급하고 있을 뿐이다.[3] 따라서 협개자동용접법의 문제점을 사전에 파악하고, 협개자동용접부의 건전성을 확인하기 위한 연구가 수행된다면, 결과적으로

† 영남대학교 대학원
E-mail : lagmisia@yumail.ac.kr
TEL : (053)810-3822 FAX : (053)810-4627
* 영남대학교 기계공학부
** 한국원자력안전기술원

건설단계의 시행착오 및 운전중 배관파손사고 가능성을 감소시켜 잠재적인 경제적 부담을 줄일 수 있을 것이다. 더불어 용접부의 잔류응력은 균열발생에 취약하며 피로강도의 저하를 가져오기 때문에 후열처리 과정을 거치게 되지만, 보수용접을 하는 경우에는 일반적으로 재후열처리 과정을 거치지 않으므로, 보수용접을 하는 경우에 있어서의 후열처리 영향을 평가할 필요성도 대두된다.

본 연구에서는 원전 배관에 사용되는 탄소강에 대하여, 정상용접후 후열처리, 정상용접후 보수용접, 보수용접후 후열처리를 한 각 재료에 대하여 조직관찰, 경도시험, 인장시험(상온 및 고온), 굽힘시험, 충격시험 및 탄소성 파괴인성시험 등을 수행을 통하여 원전 협개자동용접법의 건전성에 대한 기초데이터를 제공하고자 한다.

2. 협개자동용접 시료제작

본 연구에 사용된 자동용접의 모재로는 원전 주증기 배관 등에 사용되는 탄소강(SA 106 Gr.C, 내경 500 mm, 두께 91 mm) 재료가 사용되었다. 이는 ASME 코드 Sec. IX에 따른 재료분류상 P-1(Gr-2)에 해당한다.[4] 용접봉으로는 ASME code Sec. II SFA-5.18에 해당하는 ER70S-6을 사용하였다.[5]

협개자동용접에 사용된 탄소강(SA106 Gr.C) 및 용접봉(ER70S-6)의 화학성분을 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서는 정상용접재(CAW), 정상용접 후 후열처리재(CAWH), 정상용접후 보수용접재(CRW), 정상용접과 보수용접후 후열처리재(CRWH)로 구분하였다. 이 때 탄소강의 경우 정상용접시 일반적으로 후열처리 과정을 거치므로 정상용접재(CAW)는 본 시험에서 생략하였다.

협개자동용접장치는 Fig. 1과 같으며, 크게 전원공급장치(power source), 컨트롤러(controller), 펜던트(remote pendant), 용접헤드(welding head), 가이드 링(guide ring), 냉각기기(water coolers), TV-모니터 장치(TV-monitor)로 구성되어 있다.

탄소강 용접에 사용된 협개자동용접조건을 Table 2에 나타내었다.

Fig. 2는 탄소강의 정상용접 및 보수용접시

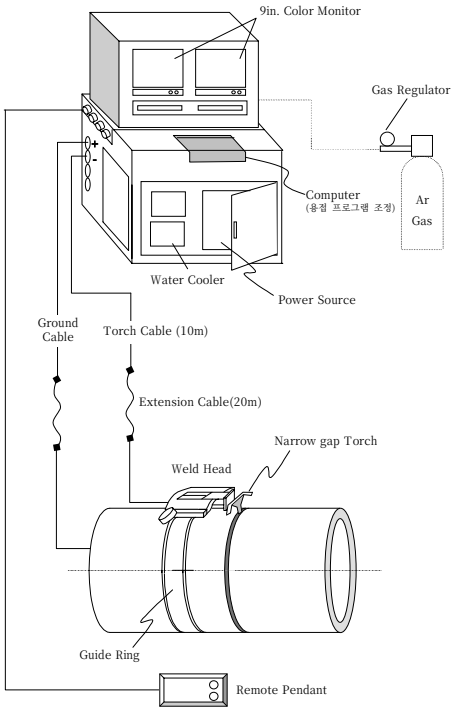


Fig. 1 Schematic of narrow-gap welding

Table 1 Chemical compositions of base and filler metals for narrow-gap welding

Material	Element spec.													
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	V	Ti	Cb+Ta	N	Fe
SA106 Gr.C	0.35	0.10	0.29 -1.06	0.025	0.025	0.15	0.40	0.40	0.40	0.08	-	-	-	Rem
ER70S-6	0.07 -0.15	0.80 -1.15	1.40 -1.85	0.025	0.035	-	-	-	0.50	-	-	-	-	Rem

Table 2 Welding parameters and heat inputs(ave.) for narrow-gap welding

Kind	No. of pass	Current (A)		Voltage (V)		Travel speed (IPM)	Heat input (KJ/in.)
		Pri	Back	Pri	Back		
CAW	84	255.2	201.6	10.6	10.6	3.02	47.83
CRW	70	234.3	193.9	9.9	10.1	2.72	50.38

groove 형상을 나타낸 것이다. 정상용접(Fig. 2a)은 track 외경 763 mm, 내경 753 mm, 총 82 pass의 자동용접을, 보수용접시(Fig. 2b) 보수깊이는 모재 표면으로부터 30 mm, 폭은 최대 13.2 mm로 가공하여 총 70 pass의 자동용접을 수행하였다. 용접후열처리(Post-weld heat treatment, PWHT)는 620℃±20℃에서 2.5시간 수행하였다.

3. 시험결과

3.1 조직관찰

조직관찰을 수행하기 위하여 우선 탄소강 및 스테인리스강 용접재의 시험편 표면을 #200~#2000까지의 에머리 페이퍼를 사용하여 순차적으로 연마하였고, 마무리 연마로 0.3㎛의 알루미나를 사용하였다.

SA 106 Gr.C의 조직관찰은 3%의 나이탈(nital; HNO_3(3mL)+ethanol(97mL)) 용액에서 에칭[6] 후 수행하였다. Fig. 3은 탄소강의 열영향부 조직을 400배의 배율로 관찰한 대표적인 예를 나타낸 것이다.

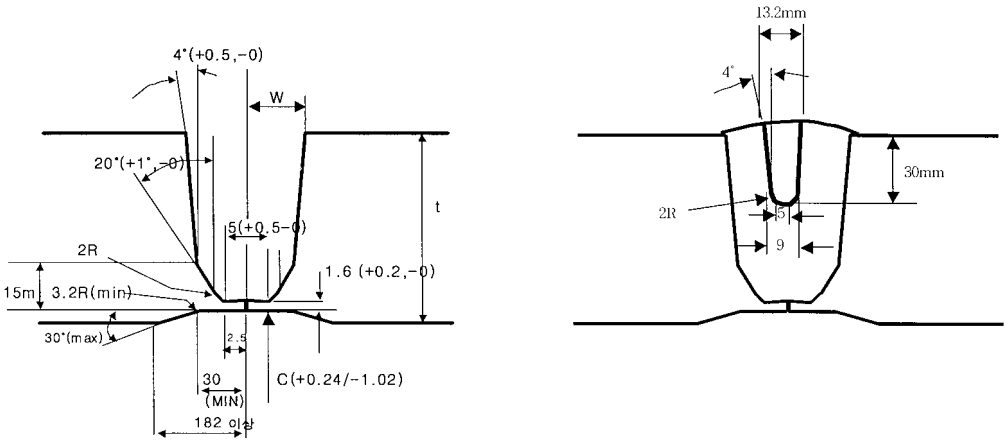
SA 106 Cr.C의 경우 페라이트-펄라이트 층상조직을 지니고 있으며, 후열처리를 한 CAWH와 CRWH는 결정립의 크기에서 조금의 차이가 보이기는 하지만 형태학적으로 큰 차이는 보이지 않으며, 펄라이트의 면적율이 두 재료 모두 비슷한 양상을 보이고 있는 반면, 보수용접 후 후열처리를 하지 않은 CRW의 경우는 후열처리를 한 CRWH에 비해 미세한 조직을 보이고 있다. 이러한 결과로 인해 조직 변화가 여러 가지 기계적 물성치에 큰 영향을 미칠 것으로 사료된다.

3.2 경도시험

3종의 탄소강 용접재에 대하여 CCD 카메라가 부착된 마이크로 비커스 경도시험기(Micro-vickers hardness tester)를 이용하여 시험하중 200g, 하중 유지시간은 15초로 하여 경도시험을 수행하였다.

Fig. 4는 각 시험편의 모재, 열영향부 및 용착부의 위치에 따른 경도분포를 나타낸 것으로, I 표시는 각 시험편 경도값의 분산범위를, symbol 표시는 경도치의 평균값을 나타낸 것이다.

정상용접재후 후열처리재(CAWH)에 비해 보수



(a) CAW (b) CRW

Fig. 2 Groove shape

(a) CAWH (b) CRW (c) CRWH

Fig. 3 Microstructures of HAZ

용접재(CRW), 보수용접후 후열처리재(CRWH)의 경도값이 상대적으로 높게 나타났다. 이 때, 후열처리를 하지 않은 CRW는 용융선 근처에서 높은 경도분포를 나타내고 있으며, 후열처리를 통하여 CRWH에서 나타나듯이 경도값이 확연하게 줄어드는 결과를 나타내었다. 전반적으로 용융선으로부터 모재 방향으로 10 mm 내에서 경도값이 높게 나타났으며, 후열처리를 함으로써 이 부분의 경도값이 낮아짐을 알 수 있다.

3.3 인장시험

인장시험은 ASTM E 8M-95a[7]의 규격에 따라 상온 및 고온에서 수행하였다. 상온인장시험편은 평행부 폭은 19.05 mm, 평행부 길이는 용착금속부가 포함된 상태에서 양 방향으로 6.35 mm를 추가하여 각각 2개씩 제작하였다. 또한 고온인장시험은 316℃에서 각각 1개씩 수행하였으며, 시험편의 표점거리(gage length)는 25 mm로 하였다.

ASME code에서 규정하는 SA 106 Gr.C의 인장강도 최소 요구치는 482 MPa로써[8] 본 실험에서 행해진 인장시험 결과, 모든 시험재의 인장강도가 code를 만족하고 있었다.

Fig. 5는 상온인장시험 결과를 나타낸 것으로, 보수용접재(CRW) 및 보수용접후 후열처리재(CRWH)의 인장강도는 각각 627 MPa, 559 MPa로, 정상용접후 후열처리재(CAWH)의 542 MPa보다 더 높게 나타났으며, CRW의 인장강도가 CAWH에 비해 약 15.9% 증가하였던 것이 후열처리를 함으로써 CRWH에서 보이듯이 그 차이가 3.2%로 12.7%나 줄어들어 보수용접에 있어 후열처리 효과는 매우 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 6은 고온인장시험 결과를 나타낸 것으로 상온인장시험 결과와 비슷한 경향을 보이고 있으며, 고온항복강도 및 고온인장강도는 보수용접을 함으로써 증가하였다가 재후열처리를 통하여 현저히 그 값들의 차이가 줄어들고 있어, 탄소강 보수용접시 후열처리를 해 주는 것이 재료의 건전성 확보에 더 좋은 영향을 미침을 알 수 있다.

3.4 굽힘시험

굽힘시험은 ASTM E 190-92[9]에 따른 굽힘시험편을 가공하여 상온에서 수행하였다. 굽힘시험편의 가공은 용착금속부를 중심 시편두께에 맞추었으며, 마무리로 표면가공을 하여 정도를 유지하였다.

각 용접재에 대하여 180°의 각도로 측면굽힘시험을 수행한 후 1/10 mm 단위로 균열을 검출한 결과를 Table 3에 나타내었다. 그 결과, 굽힘시험에서 균열이 발생된 시험편은 보수용접재(CRW) 및 보수용접후 후열처리재(CRWH) 모두 4개의 시험편 중 각각 2개의 시험편에서 균열이 검출되었다. 검출된 균열길이는 굽힘시험에서의 안전기준

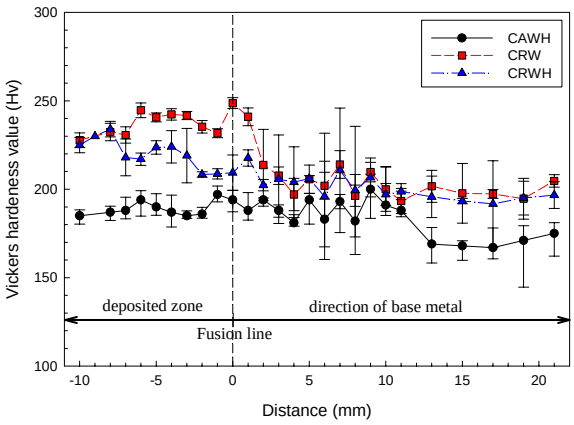


Fig. 4 Hardness distributions

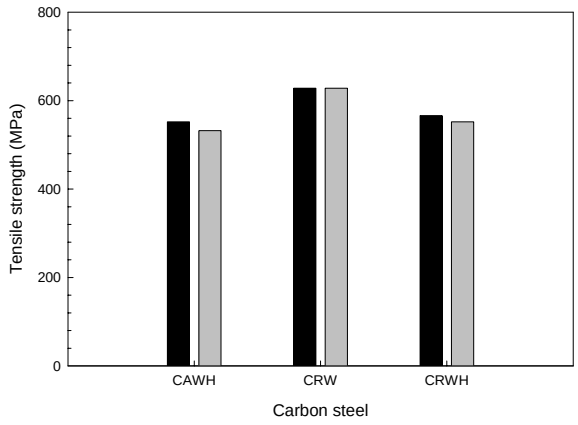


Fig. 5 Results after tensile test at room temp.

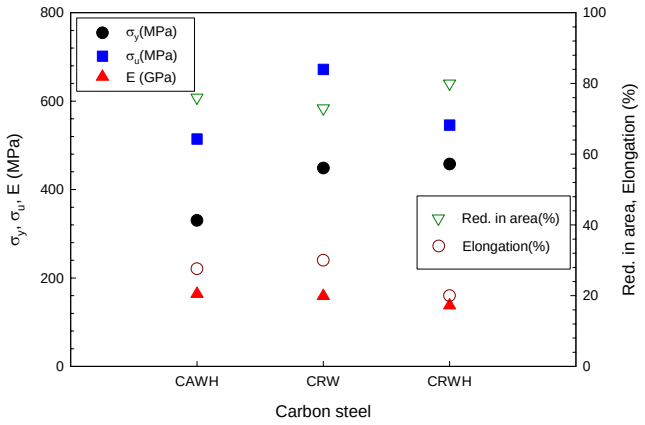


Fig. 6 Results after tensile test at high temp.

을 만족하고 있으나, 보수용접을 하게 되면 그 만큼 굽힘특성에서 균열발생의 가능성이 증가함을 알 수 있다. 또한 정상용접후 후열처리재(CAWH)에서 균열이 검출되지 않는 것으로 보아 잔류응력이 굽힘특성에 미치는 영향보다는 오히려 보수용접시 들어가는 입열량과 조직불균일 등이 더 크게 작용되는 것으로 생각된다.

3.5 충격시험

충격시험은 ASTM E 23-94b[10]에 따라 10×10×55 mm의 샬피(Charpy) 충격시험편을 제작하였으며, 정상용접후 후열처리재(CAWH), 보수용접재(CRW) 및 보수용접후 후열처리재(CRWH) 3종에 대하여 상온에서 각각 6개씩 수행하였다. 여기서, 노치의 형상은 충격시험에 매우 큰 영향을 미치기 때문에 그 형상을 일정하게 가공하기 위하여 방전 가공하여, 노치선단 곡률반경, ρ=0.25 mm로 일정하게 하였다.

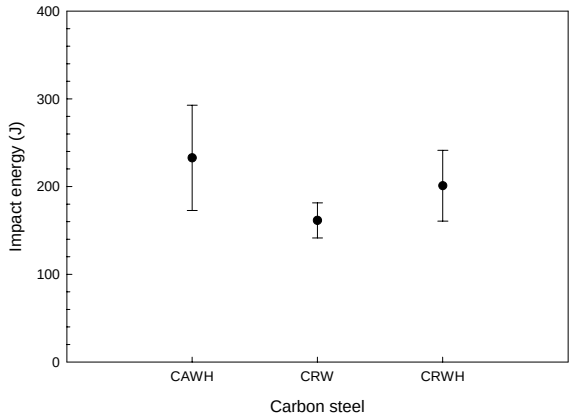


Fig. 7 Results after impact tests at room temp.

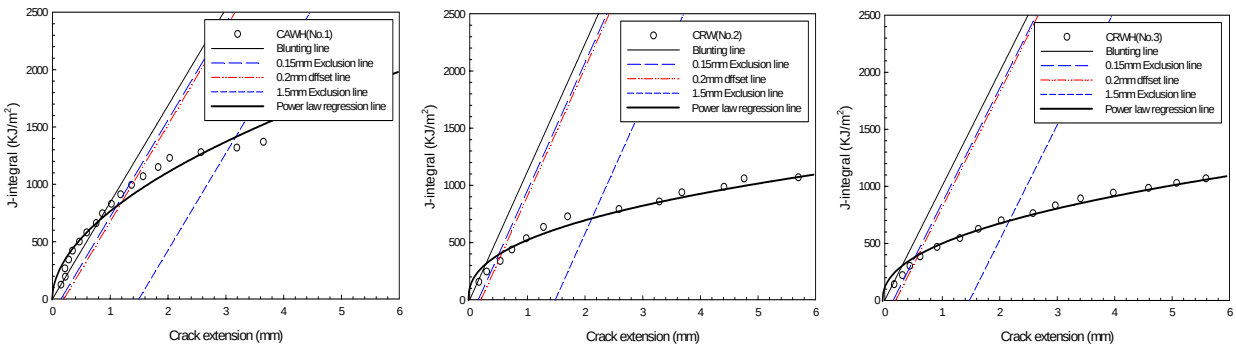
Fig. 7은 충격시험을 수행한 결과 나타난 충격흡수에너지를 나타낸 것이다. 보수용접을 한 두 용접재의 경우 정상용접에 비해 상온에서의 충격흡수에너지가 낮게 나타났으며, 이것은 보수용접시 들어간 추가적인 입열로 인해 인장시험에서 나타난 재료의 현상과 동일한 이유 때문으로 생각되어진다. 보수용접을 한 경우에는 후열처리를 함으로써 충격흡수에너지가 161.3 J에서 200.8 J로 증가하여, 보수용접시 가열에 의해 발생된 열응력이 후열처리 작업을 통해 열영향부에 존재하고 있던 압축잔류응력의 해소를 가져와 충격치가 증가한 것으로 생각된다.

3.6 탄소성 파괴인성시험

탄소성 파괴인성시험은 ASTM E813-87[11]에 따라 두께(B) 25 mm를 기준으로 하는 CT 시험편(compact tension specimen)을 제작하여, 316℃의 고온 환경하에서 수행하였다. 또한 제하 컴플라이언스법(unloading compliance method) 및 power-law regression법을 이용하여 J-R곡선 및 탄소성

Table 3 Results of bending tests

Specimen No.	Crack length (mm)		
	CAWH	CRW	CRWH
No.1	No open detect	No open detect	No open detect
No.2	No open detect	No open detect	No open detect
No.3	No open detect	0.4(1ea)	0.2(2ea)
No.4	No open detect	0.2(2ea)	0.4(1ea), 0.2(2ea)



(a) CAWH (b) CRW (c) CRWH

Fig. 8 Determination of J_{IC} from J-R tests

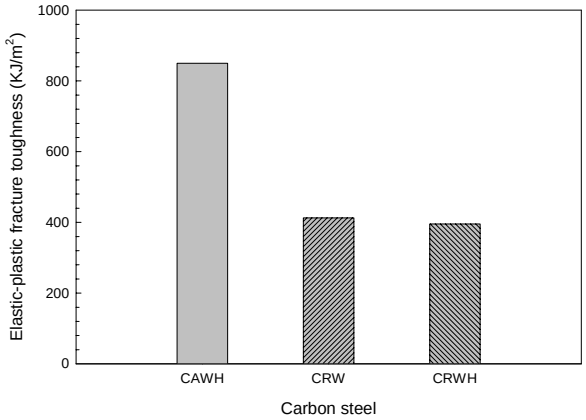


Fig. 9 J_{IC}-values in various welded carbon steels

파괴인성치, J_{IC}의 값을 구하여 평가하였다.

Fig. 8은 정상용접후 후열처리재(CAWH), 보수용접재(CRW) 및 보수용접후 후열처리재(CRWH)에 대하여 탄소성 파괴인성시험으로 얻은 J-R 곡선으로부터 J_{IC}값을 결정한 것 중 재료의 안전성 및 건전성을 고려하여 작은 값을 나타낸 것으로, J_{IC} 값은 (a) CWAH는 849.8 KJ/m^2, (b) CRW는 412.8 KJ/m^2, (c) CRWH는 395.5 KJ/m^{2}로 나타났다.

Fig. 9는 Fig. 8로부터 얻은 각 재료별 탄소성 파괴인성치를 나타낸 것으로, CRWH에 비해 보수용접을 함으로 인하여 CRW의 J_{IC}값이 크게 감소함을 알 수 있다. 또한 보수용접후 후열처리를 한 CRWH의 J_{IC}값이 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나, 그 차이는 미비하였다. 따라서, 보수용접시 후열처리가 탄소성 파괴인성치에는 크게 작용되지 않는 것으로 생각된다.

4. 결 론

원전 배관용 정상용접후 후열처리재(CAWH), 후열처리를 하지 않은 보수용접재(CRW), 보수용접후 후열처리재(CRWH)에 대하여 각각 협개자동용접을 수행한 후, 각종 기계적 특성시험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 경도시험 결과, 보수용접시 경도값이 상대적으로 높게 나타났으며, 보수용접후 후열처리를 통하여 용접선 근처에서 그 경도값의 차이가 확연하게 줄어드는 결과를 나타내었다.

2) 상온 및 고온인장시험 결과, 보수용접재(CRW, CRWH)의 인장강도가 정상용접후 후열처리재(CAWH)보다 더 높게 나타났으며, 보수용접시 후열처리를 함으로써 인장강도가 감소하였다.

3) 측면굽힘시험 결과, 균열은 보수용접을 한 두 재료(CRW, CRWH)에서 검출되었다.

4) 충격시험 결과, 보수용접을 한 두 용접재의 충격흡수에너지가 정상용접재에 비해 낮게 나타났으며, 이 때 보수용접시 후열처리를 해 줌으로써 충격흡수에너지는 증가하였다.

5) 고온 탄소성 파괴인성시험 결과, 보수용접을 수행함으로 인해 J_{IC} 값이 크게 감소하였다.

이러한 결과를 종합해 볼 때, 탄소강의 경우 보수용접시 재료 물성치의 큰 변화가 나타났으며, 추가적인 후열처리를 해 줌으로써 재료 건전성에 좋은 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

후 기

본 논문은 한국원자력안전기술원 및 BK21 사업단의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) Amos, D. R., 1991, AWS, *Welding Handbook*, Vol. 2, Welding Process, pp.44-71
(2) Jang, J. S. and Lee, B. W., 1984, "Application of GMAW Narrow Gap Welding," Journal of the Korean Welding Society, Vol.2, No.1, pp.58-65
(3) NRC Inspection manual, 2000, Inspection Procedure 50001-03
(4) ASME, 2000, "ASME Boiler & Pressure Vessel Code," Part C
(5) John, C. Lippold, 2000, *ASM Handbook*, Vol. 6, Welding, Brazing, and Soldering, pp.431-506
(6) Etchants, 1998, Metallography, Appendix I, Etchants for Revealing Microstructure, pp.610-711
(7) ASTM E 8M-95a, 1995, pp.77-97
(8) ASME Boiler & Pressure Vessel Code, 2001, Sec.IX, QW/QB-422
(9) ASTM E 190-92, 1997, pp.295-297
(10) ASTM E 23-94b, 1995, pp.137-157
(11) ASTM E 813-89, 1991, pp.646-660