

CF8M과 SA508 용접재의 열화거동과 기계적특성 평가

권재도* · 우승원* · 최영환**
(2004년 7월 27일 접수, 2004년 10월 13일 심사완료)

Evaluation of Mechanical Properties with Thermal Aging in CF8M/SA508 Welds

Jae Do Kwon, Seung Wan Woo and Young Hwan Choi

Key Words: Cast Stainless Steel(주조 스테인리스강), Low Alloy Steel(저합금강), Dissimilar Weld
(이종용접), Thermal Aging(열화), Artificially Accelerated Aging(모의가속열화)

Abstract

Structural degradations are often experienced on the components of nuclear power plants in reactor pressure vessels (RPV) and steam generators (SG) when these components are exposed to high temperature and high pressure for a long period of time. Such conditions result in the change of microstructures and of mechanical properties of materials, which requires an evaluation of the safeguards related to structural integrity. In a primary reactor cooling system (RCS), a dissimilar weld zone exists between cast stainless steel (CF8M) in a pipe and low-alloy steel (SA508 cl.3) in a nozzle. Thermal aging is observed in CF8M as the RCS is exposed for a long period of time under the operating temperature between 290 and 330°C. Under the same conditions, it is well known that degradation is not observed in low alloy steel. An investigation of the effect of thermal aging on the various mechanical properties of the dissimilar weld zone is required. The purpose of the present investigation is to find the effect of thermal aging on the dissimilar weld zone. The specimens are prepared by an artificially accelerated aging technique maintained for various times at 430°C, respectively. Then, The various mechanical test for the dissimilar welds are performed.

1. 서론

원자력 발전설비와 같은 고압, 고압의 특수환경 하에서 재료가 장기간 사용될 때에는 금속조직의 변화가 생기고, 각종 기계적 특성의 변화가 일어나는 열화(degradation) 현상이 발생한다. 이러한 경년열화현상은 원자로 냉각계통인 원자로(reactor pressure vessel, RPV), 증기발생기(steam generator, SG) 및 배관재료 등에서 다수 발생되고

있으며, 구조건전성 평가의 주요한 원인이 되고 있다.^(1,2)

원자력 발전소의 수명을 좌우하는 부위중 하나인 RPV Primary nozzle에서의 경년열화 현상에 대한 연구의 필요성은 이미 IAEA-TECDOC-670 "Pilot studies on management of aging of nuclear power plant components-Result of phase I" 에서도 지적한 바 있다. 특히 원전 1차계통의 원자로(RPV), 증기발생기(SG) 등의 nozzle부로부터 1차 냉각 계통(reactor coolant system, RCS) 배관들을 용접하며, 용접부 nozzle은 대개 저합금강이며 배관은 주조 스테인리스강으로 이종재료 용접부가 존재하여 결함발생확률이 크다.

원전 1차 배관계통의 사용온도범위는 290~330°C이지만, 이 온도에서도 장기간 사용될 때에는 주조 스테인리스강(CF8M)은 475°C 취성이 발

† 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부
E-mail : jdkwon@yu.ac.kr
TEL : (053)810-2462 FAX : (053)810-4627

* 영남대학교 대학원
** 한국원자력안전기술원

생하여, 재료의 인성이 급속히 저하하는 것으로 알려져 있다.⁽³⁾ 그러나, 상대 용접모재인 ASME SA508 class 3은 Mn-Ni-Mo계의 저합금강으로써 열화의 영향을 별로 받지 않는 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁾ 그러므로 주조 스테인리스강과 저합금강의 용접부에는 열화가 일어난 부분(주조 스테인리스강, CF8M)과 열화가 일어나지 않은 부분(저합금강)의 중간 영역이 있으므로 두 재료가 받는 열화에 관한 영향은 서로 다를 것이다.

따라서, 원전의 안전성 등을 고려할 때 압력용기의 nozzle와 배관재료 사이의 이종재료 용접부의 건전성 평가를 위해서는 장기사용으로 인한 경년열화 특성을 고려한 건전성평가 방법의 개발이 필수적이라고 생각된다.

본 연구에서는 원전 1차 배관계통에서의 이종재료인 주조 스테인리스강(CF8M)과 저합금강(SA508 cl.3)을 용접하여 모의가속열화처리를 한 후, 조직, 경도, 인장 및 충격 시험을 수행하여 이종재 용접부의 재질열화가 건전성에 미치는 기초 영향을 파악하고자 한다.

2. 시험용 용접재 및 열화재의 제작

본 연구에 사용되는 두 모재는 원전 1차 냉각계통 배관부에 사용되는 주조 스테인리스강인 ASTM A351 G, CF8M 및 노즐부에 사용되는 Mn-Ni-Mo계 저합금강인 ASME SA508 cl.3이다. 본 연구에서 사용된 CF8M 모재 및 SA508 cl.3 모재와 용가재로 사용된 ER308L 및 ER309L의

화학적 성분을 Table 1에 나타내었다.

RPV 노즐부의 이종재 용접부 형상을 참고로 하여⁽⁵⁾ 본 연구에서는 두께 32 mm 및 16 mm인 재료를 사용하였으며, 이 때 두께 32 mm의 용접은 Fig. 1과 같이 루트길이 5 mm, 용접각도 60°인 X형으로 용접하였다. 또한 두께 16 mm의 용접은 루트길이 5 mm, 용접각도 60°인 V형으로 용접하였다. 용접작업은 SA508 cl.3에 ER309L을 가스-텅스텐 아크용접법(GTAW)으로 버터링(buttering) 작업을 한 후, ER308L을 사용하여 버터링된 SA508 cl.3와 CF8M을 피복아크용접법(SMAW)으로 용접하였다. CF8M과 SA508 cl.3의 용접조건을 Table 2에 나타내었다. 용접후열처리(post-weld heat treatment, PWHT)는 Fig. 2와 같은 cycle에 따라 614°C에서 6.5시간 실시하여 용접부의 잔류응력을 최소화하였다.

한편, 모의열화재 제작온도는 CF8M의 열화거동에 주안점을 두어 475°C 취성이 발생할 수 있고, 원전 사용조건을 고려하여 가능한 한 낮은 온도인 430°C를 선택하였다.⁽⁶⁾ 각 단계별 모의열화재의 제작은 Fig. 3과 같이 본 연구실에서 개발

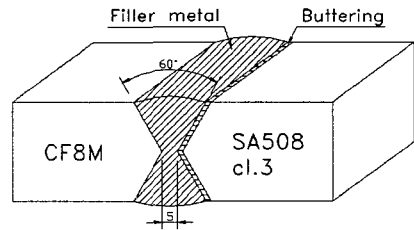


Fig. 1 Shape of dissimilar welding

Table 1 Chemical compositions of CF8M, SA508 cl.3, ER308L and ER309L

Material	Element spec.													
	C	Si	Mn	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	V	Ti	Cb+Ta	N	Fe
ER309L	0.019	0.38	2.25	0.017	0.001	0.11	13.67	23.50	0.14	0.07	0.008	0.008	0.060	Rem
ER308L	0.014	0.36	2.02	0.022	0.015	0.21	9.68	19.70	0.42	0.07	0.008	0.010	0.015	Rem
CF8M	0.057	1.28	0.906	0.032	0.019	2.17	9.360	18.46	-	-	-	-	-	Rem
SA508 cl.3	0.19	0.08	1.35	0.006	0.002	0.51	0.082	0.17	-	-	-	-	-	Rem

Table 2 Welding conditions for dissimilar materials(CF8M and SA508 cl.3)

Filler metal	Process	Current (A)	Arc voltage(V)	Preheat temp.(°C)	Interpass temp.(°C)	Travel speed (cm/min)	Heat input (KJ/cm)
ER309L	GTAW	DC-210	13	123.9	126.7-164.4	13.65	20
ER308L	SMAW	DC-210	13	123.9	126.1-162.2	13.65	20

한 430°C에서 300, 1800 및 3600시간 유지 후 수냉하는 방법을 사용하였다.⁽⁷⁾ 본 연구에서는 열화되지 않은 용접재를 건전재(virgin), 각 단계별 열화재를 각각 430°C 300시간, 1800시간 및 3600시간 열화재(degraded material)라 명하였다.

3. 시험결과

3.1 조직관찰

먼저 SA508 cl.3은 3%의 니탈(nital; HNO₃ (3mL)+ethanol(97mL)) 용액에서 5초간 에칭⁽⁸⁾ 후

조직을 관찰하였으며, CF8M 및 용가재 부분은 HCl(15mL)+HNO₃(5mL) 용액에서 약 10초간 에칭 후 조직관찰을 수행하였다.

건전재 및 대표적으로 430°C 900시간 및 3600시간 열화재의 모재, 용착부 및 열영향부 조직을 Fig. 4에 나타내었다.

CF8M 모재 및 열영향부는 오스테나이트 기지(흰부분) 내에 페라이트상(검은부분)이 내재하는 2상을 볼 수 있으며, 열화가 진행됨에 따라 페라이트상이 조대해져 그 양이 증가함을 알 수 있다. 또한 페라이트상과 구별되는 탄화물의 흔적

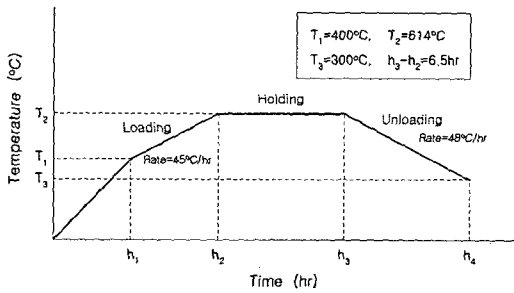


Fig. 2 Condition of post-welding heat treatment

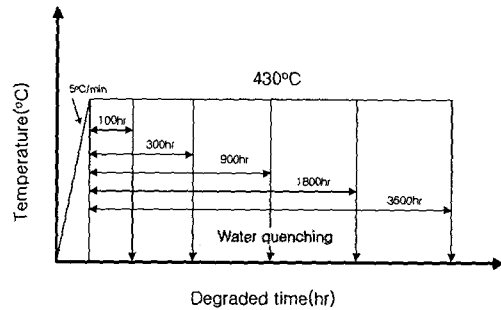


Fig. 3 Manufacture of 430°C degraded materials

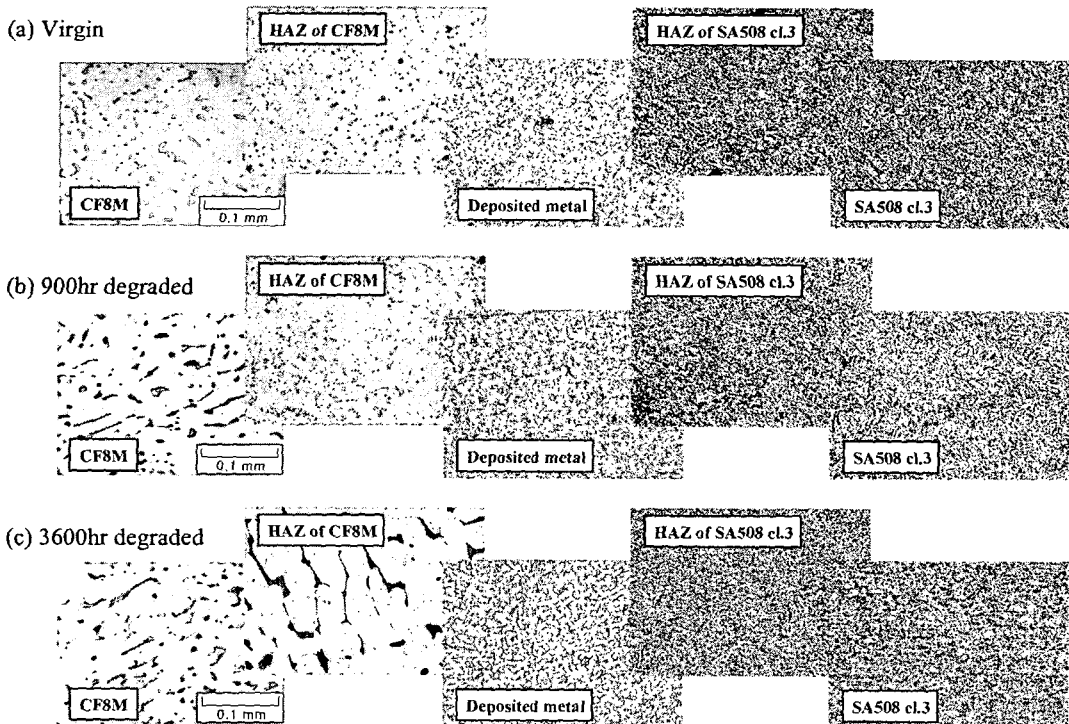


Fig. 4 Microstructures by thermal aging on the various welded materials

도 관찰되고 있다. CF8M의 열영향부에 존재하는 페라이트상은 모재에 비해 그 양이 많으며, 이러한 현상이 기계적 성질에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

ER308L의 경우, CF8M과 동일한 2상이 보이고 있으며, 용융됨으로 인하여 조직이 CF8M에 비해 매우 미세하다. CF8M의 거동과 마찬가지로 열화가 진행함에 따라 오스테나이트의 양이 상대적으로 감소하였다. SA508 cl.3의 열영향부 및 모재의 경우, 페라이트 래스(lath) 내에 미세한 탄화물이 방향성을 가지고 배열된 베이나이트 조직을 이루고 있으며, 조대한 탄화물들이 결정립과 래스 경계를 따라 석출되어 있으나, 열화시간에 따른 조직의 차이가 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

3.2 인장시험

인장시험은 CF8M 및 SA508 cl.3 모재와 이중용접재 중 건전재 및 430°C 3600시간 열화재, 총 4종류에 대하여 ASTM E 8M-95a⁽⁹⁾에 따라 소형 인장시험편을 가공하여 인장시험을 수행하였다. 이 때 하중부하속도는 1 mm/min, 연신률을 구하기 위한 표점거리는 10 mm로 선정하였다.

Table 3은 인장시험 결과를 나타낸 것으로, SA508 cl.3 모재의 인장강도는 640 MPa로, 604 MPa의 CF8M 모재보다 더 높으며, 건전재는 597 MPa로 CF8M 모재에 비해 다소 낮아지지만, 열화가 진행되어 430°C 3600시간 열화재의 경우는 646 MPa로써 오히려 SA508 cl.3 모재에 비해 더 높아짐을 알 수 있다. 또한 연신률의 경우 CF8M 모재가 71.4%로 가장 높게 나타났으며, 상대적으로 SA508 cl.3 모재는 9.6%를 나타내었다. 그러나, 용접재의 경우 열화가 진행됨에 따라 건전재가 45.0%, 430°C 3600시간 열화재의 경우는 57.1%로 증가함을 알 수 있다.

저자들이 선행 연구한 430°C 열화에 따른 CF8M 모재의 인장강도는 열화가 진행함에 따라 근소하게 감소하였다.⁽¹⁰⁾ 그러나, 본 연구에서 수행한 용접재에서는 열화에 따른 인장강도 저하의

차이가 CF8M 모재의 열화 영향보다 더 커짐을 알 수 있다. 또한 인장시험에서 파단이 CF8M 열영향부에서 발생하는 것으로 보아, 열화에 따른 재료의 건전성은 CF8M의 열영향부에 대해서도 규명해 보는 것이 바람직하다고 사료된다.

3.3 경도시험

경도시험은 CCD 카메라가 부착된 마이크로 비커스 경도시험기(Micro-Vickers hardness tester)를 사용하였다. 용접부의 위치에 따른 경도변화를 관찰하기 위하여 건전재 및 각 단계별 열화재에 대하여 용접선 방향에서 1 mm씩 따라가며 시험하중 500g, 하중유지시간은 15초로 하여 경도시험을 수행하였다. 측정결과, 용접재 시험편의 열화가 진행됨에 따른 각 위치별 경도분포를 Fig. 5에 나타내었다. 여기서 I 표시는 각각의 시험편에 있어서 경도치의 분산범위를 나타낸 것이고, ● 표시는 경도치의 평균값을 나타낸 것이다.

여기서, CF8M 방향으로 용접선 약 3 mm 부근을 기준으로 경도값의 큰 차이를 나타내고 있으며, 430°C에서 열화가 진행됨에 따라 전반적으로 상승하였다. 또한, 최고경도값을 가지는 위치도 열화가 진행됨에 따라 용접선으로부터 CF8M 방향으로 다소 증가함을 알 수 있다.

반면, SA508 cl.3 방향으로 건전재의 경우 경도값이 가장 낮게 나타났으나, 각 단계별 열화재의 경도값은 그리 큰 차이를 보이지 않고 있으

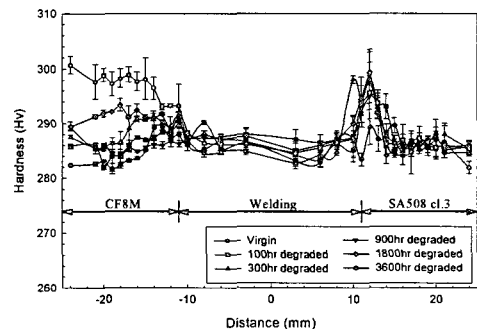


Fig. 5 Results of hardness tests

Table 3 Results after tensile tests for base metals(CF8M, SA508 cl.3) and welded materials

Specimen type	Base metal		Welded materials	
	CF8M	SA508 cl.3	Virgin	3600hr degraded
Tensile strength (MPa)	604	640	597	646
Elongation (%)	71.4	9.6	45.0	57.1
Reduction of area (%)	66.9	64.9	58.9	63.4

며, 경도분포의 양상은 모의열화처리를 하여도 모두 비슷한 양상을 띄고 있다. 즉 SA508 cl.3의 용접부에서는 열화에 따른 경도값의 변화를 뚜렷이 관찰할 수 없으며, 용접선 기준으로 1 mm 사이에서 최고경도값을 나타냄을 관찰할 수 있다.

이종재 접합부에서 경도의 불연속이 있으면 최고경도가 발생하는데, 일반적으로 최고경도가 클수록 열영향부가 취약하게 되므로 최고경도가 낮은 것이 좋기 때문에,⁽¹¹⁾ 본 연구에서는 최고경도가 나타나는 지점에 노치를 가공하여 충격시험을 수행하였다.

3.4 충격시험

살피(Charpy) 충격시험편은 ASTM E 23-94b⁽¹²⁾에 따라 제작하였으며, 본 실험에 사용된 재료는 CF8M 및 SA508 cl.3 모재와 용접된 각 단계별 열화재를 사용하였다.

충격시험편은 총 3가지로 형태로 가공하였다. 즉, CF8M과 SA508 cl.3 사이의 용착부에 노치를 가공한 충격시험편(As welded), CF8M 열영향부에 노치를 가공한 충격시험편(HAZ of CF8M), SA508 cl.3 열영향부에 노치를 가공한 충격시험편(HAZ of SA508 cl.3)의 3종류이다. 이상과 같이 제작된 살피 충격시험편으로 -173℃, -70℃, -32℃, 상온(18℃), 100℃ 및 200℃에서 충격시험을 수행하였다.

Fig. 6(a)의 CF8M 열영향부에 노치를 가공한 충격시험편에 대하여 Charpy 충격시험결과 얻은 열화정도에 따른 충격흡수에너지와 온도와의 관계를 나타낸 것이다. 건전재의 경우가 동일 온도에서 가장 높은 충격흡수에너지 값을 나타내고

있으며, 430℃에서 열화가 진행할수록 동일 온도에서 충격흡수에너지가 감소하고 있음을 알 수 있다. CF8M 모재에서의 열화정도에 따른 충격특성 거동⁽¹³⁾과는 달리 열영향부에 노치를 가공한 시험편의 경우는, 상·하부단 충격흡수에너지의 거동을 명확히 구별할 수 없으며, 따라서 FATT의 영역 또한 본 연구에서 수행한 온도 범위 내에서는 뚜렷이 구별하기가 힘들었다. 그러나 동일 온도에서의 충격에너지 값이 열화가 진행됨에 따라 감소하는 경향으로부터 CF8M 열영향부의 FATT 또한 열화가 진행되면 점차 상위온도로 천이할 것임을 예측할 수 있다.

Fig. 6(b)의 용착부에 노치를 낸 충격시험편의 경우, 3가지 타입의 충격시험편 중 상온 이상의 온도범위에서 가장 낮은 충격흡수에너지를 나타내고 있다. 또한 각 단계별 열화재들의 충격흡수에너지가 건전재에 비해 다소 감소하는 경향을 보이고 있으나, 그 차이는 충격치의 분산범위 내라고도 볼 수 있어 열화에 따른 충격특성의 저하는 뚜렷이 관찰되지 않고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6(c)의 SA508 cl.3 열영향부에 노치를 가공한 충격시험편의 경우, 상온 이하의 온도범위에서는 3종류의 충격시험편 중 가장 낮은 하부단 충격흡수에너지를 나타내고 있다. SA508 cl.3 열영향부의 충격흡수에너지 역시 건전재가 가장 높게 나타났으나, (a)의 CF8M 열영향부와 마찬가지로 열화의 영향은 일반 충격에서 나타나는 분산 범위 내에 데이터가 존재한다고 볼 수 있다.

충격시험결과, 상온 이상의 온도범위에서는 용착부의 충격흡수에너지가 가장 작게 나타났다. 용착부 및 SA508 cl.3 열영향부에서는 열화에 따

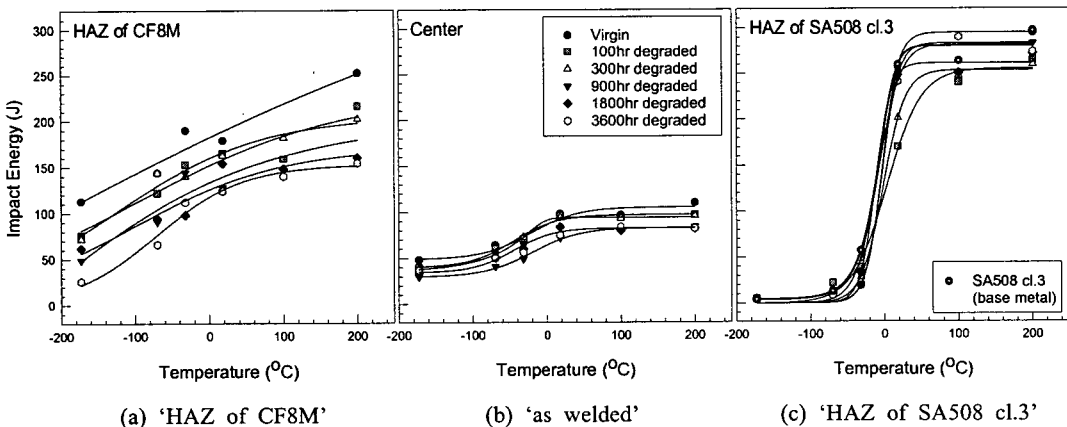


Fig. 6 Change of Charpy impact energy curves

큰 충격흡수에너지의 변화가 크게 나타나지 않았다. 따라서, 열화 관점에서는 CF8M 열영향부에서 열화정도에 따른 충격흡수에너지의 큰 저하가 나타나므로 이 부분도 건전성 평가에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

4. 결 론

CF8M과 SA508 cl.3 이중용접재의 열화에 따른 조직관찰, 경도, 인장, 충격시험 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 조직관찰결과, CF8M은 오스테나이트 기지 내에 페라이트상을 내재하고 있으며, 열화가 진행할수록 존재하는 페라이트상이 조대해져 그 양이 증가하지만, SA508 cl.3의 열영향부 및 모재의 경우, 열화에 따른 조직의 변화의 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

(2) 경도시험결과, CF8M 부분은 열화에 따른 경도값의 큰 차이가 나타났다. 또한, SA508 cl.3 부분은 용접선을 기준으로 1 mm 사이에서 최고 경도값을 나타내며, 열화에 따른 경도값의 변화가 뚜렷이 관찰되지 않음을 알 수 있다.

(3) 충격시험결과, 상온 이상의 온도범위에서는 용착부의 충격흡수에너지가 가장 작게 나타났다. 또한, 열화 관점에서는 CF8M 열영향부에서 열화정도에 따른 충격흡수에너지의 큰 저하가 나타나 이 부분이 건전성 평가에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 연구센터의 연구비 지원으로

이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Robert, G. K. and Andre, G. R., 1985, "A Component Wear-out Analysis on Control Rod Drive Mechanisms," Westinghouse, Pittsburgh
- (2) Ware, A. G., 1982, *ASTM STP 756*, pp. 165~189
- (3) Trautwein, A. and Gysel, W., 1982, "Stainless Steel Casting," *ASTM STP 756*, pp. 165~189
- (4) Atkison, J. D. and Yu, J., 1997, *Fatigue Fract Eng. Mater. Struct.*, 20, p. 1
- (5) Hale, D. A. et al., 1978, Report GEAP 24098/NUREG CR-0390
- (6) Byrnes, M. L. G., Grujicic, M. and Owen, W. S., 1987, *Acta Metal.* 35(1853)
- (7) Kwon, J. D., Park, J. C., Lee, Y. S., Lee, W. H. and Park, Y. W., 2000, *Nucl. Eng. Des.* 198, pp. 227~240
- (8) Etchants, *Metallography*, Appendix- I, pp. 632~645
- (9) ASTM E 8M-95a, 1995
- (10) Kwon, J. D., Park, J. C., Lee, Y. S., Lee, W. H. and Park, Y. W., 2000, *Trans Tech Pub.*, Part 1, pp. 577~582
- (11) Lee, Y. H., 1984, "Study for Disbonding of Stainless Steel Overlay Welding"
- (12) ASTM E 23-94b, 1995
- (13) Kwon, J. D., Park, J. C., Lee, Y. S., Lee, W. H. and Park, Y. W., 2000, "Effect of Temperature and Time on Microstructure, Hardness and Impact Energy of CF8M", *Metal and materials*, Vol.6, No.6, pp. 559~563