PWR 원전 주조 스테인리스강 배관의 열취화 평가

김 철† · 진태은*

Evaluation of Thermal Embrittlement for Cast Austenitic Stainless Steel Piping in PWR Nuclear Power Plants

Cheol Kim, Tae-Eun Jin

Key Words : Thermal Embrittlement(열취화), Cast Austenitic Stainless Steel(주조 스테인리스강), Ferrite Content(페라이트 함량), Charpy Impact Energy(샤피 충격에너지), J-R Curve (파괴저항선도), Thermal Embrittlement Susceptibility(열취화 민감도)

Abstract

Cast austenitic stainless steel is used for several components, such as primary coolant piping, elbow, pump casing and valve bodies in light water reactors. These components are subject to thermal embrittlement at the reactor operating temperature. The objective of this study is to summarize the method of estimating ferrite content, Charpy impact energy and J-R curve and to evaluate the thermal embrittlement of the cast austenitic stainless steel piping used in the domestic nuclear power plants. The result of evaluation, two domestic nuclear power plants used CF-8M and CF-8A material has adequate fracture toughness after saturation.

1. 서 론

원자로에서 가열된 고온의 1차냉각수는 고온관(hot leg)을 따라 증기발생기로 들어가서 2차냉각수에 열을 전달하고 중간냉각재관(crossover leg)과 저온관(cold leg)을 거쳐 원자로로 되돌아간다. 이와 같이 1차냉각수가 순환되는 고온관, 중간냉각재관, 저온관 등을 원자로냉각재 주배관이라 하며 여기에는 부식저항성과 기계적 성질이 우수한 주조 스테인리스강 재료가 많이 사용되었다.

주조 스테인리스강(cast austenitic stainless steel)은 페라이트와 오스테나이트가 함께 존재하는 2상(duplex)으로 구성되어 있으며 그 비율은 화학조성에 의해 결정된다. 이러한 주조 스테인리스강의 등급은 CF-3, CF-8, CF-3M, CF-8M, CF-3A, CF-8A 등으로 나뉘는데 등급 기호의 첫 번째 문자 C는 부식저항성(corrosion resistance)을 의미하며, 두 번째 문자 F는 니켈과 크롬의 비율을 A부터 Z까지 나타내었을 때 F번째에 해당된다는 것을 의미한다. 또한 숫자 3과 8은 최대 탄소 함유량이 0.03wt%, 0.08wt%임을 뜻하며 문자 M은 몰리브덴이 포함되어 있다는 것을, A는 기계적성질이 우수하다는 것을 뜻한다.(1)

주조 스테인리스강은 부식저항성이 뛰어나다는 장점이 있는 반면 고온에서 장시간 사용될 경우 열취화(thermal embrittlement)가 발생하는 단점이 있다. 열취화는 주조 스테인리스강이 고온에 장시간 노출되었을 때 페라이트 상에서 복잡한 상변화가 발생하여 재료가 취화되는 현상으로서 일반적으로 인장강도는 약간 증가하며 충격강도와 파괴인성은 상당한 수준으로 저하된다.(2) 이러한 열취화는 페라이트 상에서 발생하기 때문에 페라이트 함량이 많을수록 열취화는 더 심하게

† 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹
E-mail : chlkim@kopec.co.kr
TEL : (031)289-4682 FAX : (031)289-3189
* 한국전력기술(주) 재료기술연구그룹

발생한다.

열취화 평가는 크게 페라이트 함량을 이용한 열취화 민감도 평가와 열취화에 따른 재료물성치 평가로 구분되며, 시편 제작 등의 어려움으로 인하여 실험적인 방법보다는 기존 연구자들이 제안한 예측식과 평가기준을 이용하여 평가를 수행한다. 현재 페라이트 함량 평가에 있어서는 Aubrey[3]나 Schoefer[4] 등이 제안한 예측식을 이용하며 열취화 민감도 평가는 미국 원자력규제위원회(USNRC)에서 발행한 GALL(generic aging lessons learned) 보고서[6]의 기준을 따르고 있다. 또한 열취화에 따른 재료물성치는 Chopra가 제안한 예측식[5]을 이용하고 있다.

본 연구에서는 주조 스테인리스강 재료의 열취화 민감도 및 열취화에 따른 재료물성치 평가방법을 고찰하고 국내 원전 원자로냉각재 주배관에 대하여 평가를 수행하였다. 또한 모의 열화재를 이용한 파괴저항시험 결과와 예측값을 비교하고 예측식의 보수성을 확인하였다.

2. 페라이트 함량 평가

열취화는 페라이트 상에서의 상변화에 기인하기 때문에 페라이트 함량을 정확히 평가하는 것은 매우 중요하다. 실험적으로 페라이트 함량을 측정하는 방법도 있으나 페라이트 상은 재료 내에서 균일하게 분포하고 있지 않으며 측정시 방사능 오염 등의 문제점도 있기 때문에 화학조성을 이용한 예측방법이 편리하고 정확하다고 알려져 있다.

Aubrey는 round-robin 방식의 금속조직시험을 통하여 43개 주조 스테인리스강 시편의 페라이트 함량을 측정하고 각 화학조성과 페라이트 함량과의 상관관계를 분석하여 식 (1)과 같은 페라이트 함량(δ_c) 예측식을 제시하였다.

$$\delta_c = 100.3(Cr_{eq}/Ni_{eq})^2 - 170.72(Cr_{eq}/Ni_{eq}) + 74.22 \quad (1)$$

여기서,

$$Cr_{eq} = Cr + 1.21Mo + 0.48Si - 4.99$$
$$Ni_{eq} = Ni + 0.11Mn - 0.0086Mn^2 + 18.4N + 24.5C + 2.77$$

식 (1)에서 Cr_{eq}와 Ni_{eq}는 각각 Cr당량(Cr equivalent factor)과 Ni당량을 의미한다. 한편 화학조성 중 질소(N)는 측정이 어려워 제시되지 않은 경우가 많은데 이러한 경우 질소는 0.04wt%를 적용한다.[5]

Table 1 Chemical composition of CF-8M piping in a domestic power plant A

Component	Chemical composition (wt%)							Ferrite content (%)
	Cr	Mo	Si	Ni	Mn	C	N	
Hot leg	19.7	2.73	0.71	9.38	0.99	0.05	0.04	21.03
Cold leg	19.8	2.42	0.73	9.19	1.09	0.06	0.04	18.94
Crossover leg	19.6	2.48	0.64	9.53	0.8	0.05	0.04	17.48
Hot leg elbow	19.2	2.2	1.0	9.55	0.44	0.05	0.04	14.58
Cold leg elbow	19.4	2.4	1.35	9.42	0.51	0.06	0.04	16.99
Crossover leg elbow	19.0	2.52	1.12	9.45	0.62	0.06	0.04	14.81

Table 2 Chemical composition of CF-8A piping in a domestic power plant B

Component	Chemical composition (wt%)							Ferrite content (%)
	Cr	Mo	Si	Ni	Mn	C	N	
Hot leg	20.6	0.0	1.22	8.6	0.78	0.05	0.04	14.32
Cold leg	20.5	0.0	1.40	8.6	0.72	0.06	0.04	12.79
Crossover leg	20.3	0.0	1.36	8.6	0.69	0.06	0.04	11.75
Hot leg elbow	19.64	0.0	1.13	8.48	0.68	0.02	0.04	14.56
Cold leg elbow	20.89	0.0	1.2	8.91	0.98	0.05	0.04	13.72
Crossover leg elbow2	20.31	0.0	1.56	8.51	0.78	0.04	0.04	15.89

Table 1과 Table 2는 각각 CF-8M과 CF-8A 주조 스테인리스강으로 제작된 국내 원전 원자로냉각재 주배관의 화학조성과 Aubrey 식을 이용하여 구한 페라이트 함량을 정리한 것이다. 평가한 2개 원전 배관의 페라이트 함량은 10~20% 정도 포함되어 있으며 CF-8M으로 제작된 배관의 페라이트 함량이 상대적으로 더 높았다.

3. 열취화 민감도 평가

주조 스테인리스강 배관의 열취화 민감도에 대해서는 일반적으로 미국 원자력규제위원회에서 발행한 GALL 보고서[6]의 기준을 따르고 있다. 주조

Table 3 Screening criteria thermal embrittlement susceptibility in GALL report

Mo content	Casting method	Ferrite content, δ_c(%)	Susceptibility
High Mo (2~3wt%)	Static	δ_c > 14	Potentially susceptible
	Centrifugal	δ_c > 20	Potentially susceptible
Low Mo (max 0.5wt%)	Static	δ_c > 20	Potentially susceptible
	Centrifugal	All	Not susceptible

방식, 몰리브덴 함량 및 페라이트 함량에 기초하여 주조 스테인리스강 배관의 열취화에 대한 민감도를 결정하고 잠재적으로 열취화에 민감하다고 판정된 기기에 대해서는 파괴역학적 결함평가(flaw evaluation)를 수행해야 한다. 그러나 열취화에 민감하지 않다고 판명된 기기에 대해서는 추가적인 검사나 평가가 필요하지 않다.

Table 3은 GALL 보고서에서 제시한 열취화 민감도 평가기준을 정리한 것으로서 주조방법 및 몰리브덴 함량에 따라 구분하고, 페라이트 함량에 의해 주조 스테인리스강의 열취화 민감도를 결정할 수 있다. 몰리브덴 함량이 낮은 경우(최대 0.5wt%)에는 정적주조(static casting)품이고 페라이트 함량이 20%를 초과할 때 열취화에 민감하며, 몰리브덴 함량이 높은 경우(2.0~3.0 wt%)에는 정적주조품이고 페라이트 함량이 14%를 초과하는 경우와, 원심주조(centrifugal casting)품이고 페라이트 함량이 20%를 초과할 때 열취화에 민감하다. 이와 같은 기준을 적용하였을 때 열취화에 민감한 것으로 평가된 기기에 대해서는 ASME Sec. XI에 제시된 방법에 따라 파괴역학적 결함평가를 수행해야 한다.

Table 4와 Table 5는 앞선 2절에서 평가한 페라이트 함량을 이용하여 열취화 민감도 평가를 수행한 결과이다. 평가결과 Table 4의 A원전은 고온관 직관과 엘보우 전체가 열취화에 민감한 것으로 평가되었으며, Table 5의 B원전에서는 열취화 민감도 기준을 초과하는 배관이 없었다. 같은 조건에서는 몰리브덴이 많을수록 열취화가 심하게 발생하므로 B원전에서 열취화에 덜 민감한 CF-8A 재료를 사용한 것이 열취화의 영향을 감소시켰다고 할 수 있다.

Table 4 Susceptibility evaluation of thermal embrittlement in a domestic power plant A

Component	Casting method	Ferrite content(%)		Susceptibility
		GALL	Aubrey eq.	
Hot leg straight	Centrifugal		21.03	Potentially susceptible
Cold leg straight	Centrifugal	δ_c >20	18.94	Not susceptible
Crossover leg straight	Centrifugal		17.48	Not susceptible
Hot leg elbow	Static		14.58	Potentially susceptible
Cold leg elbow	Static	δ_c >14	16.99	Potentially susceptible
Crossover leg elbow	Static		14.81	Potentially susceptible

Table 5 Susceptibility evaluation of thermal embrittlement in a domestic power plant B

Component	Casting method	Ferrite content(%)		Susceptibility
		GALL	Aubrey eq.	
Hot leg straight	Centrifugal		14.32	Not susceptible
Cold leg straight	Centrifugal	All	12.79	Not susceptible
Crossover leg straight	Centrifugal		11.75	Not susceptible
Hot leg elbow	Static		14.56	Not susceptible
Cold leg elbow	Static	δ_c >20	13.72	Not susceptible
Crossover leg elbow	Static		15.89	Not susceptible

4. 샤피 충격에너지

Chopra는 97개 재료에 대하여 58,000시간까지 다양한 조건으로 모의 열화시킨 후 충격시험을 수행하고 이 결과로부터 열취화에 따른 충격에너지 예측식을 제시하였다.[5] Chopra의 예측식은 재료의 화학조성과 페라이트 함량을 이용하여 열취화에 따른 상온 포화 충격에너지($C_{V_{sat}}$)와 임의의 운전온도 및 운전시간에 따른 상온 충격에너지(C_V)를 구할 수 있다.

CF-8M 주조 스테인리스강의 상온 포화 충격에너지는 식 (2)와 니켈의 함량에 따라 구분되는 식

(3)~(4)로 구한 값 중에서 작은 값을 선택한다.

$$\log_{10} C_{V_{sat}} = 7.28 - 0.011\delta_c - 0.185Cr - 0.369Mo - 0.451Si - 0.007Ni - 4.71(C+0.4N) \quad (2)$$

Ni ≤10wt% 인 경우

$$\log_{10} C_{V_{sat}} = 1.10 + 2.12\exp(-0.041\Phi) \quad (3)$$

Ni > 10wt% 인 경우

$$\log_{10} C_{V_{sat}} = 1.10 + 2.64\exp(-0.064\Phi) \quad (4)$$

여기서, $\Phi = \delta_c(Ni+Si+Mn)^2(C+0.4N)/5$

CF-3과 CF-8 주조 스테인리스강의 상온 포화 충격에너지는 식 (5)와 식(6)으로 구한 값 중에서 작은 값을 선택한다.

$$\log_{10} C_{V_{sat}} = 5.64 - 0.006\delta_c - 0.185Cr + 0.273Mo - 0.204Si + 0.044Ni - 2.12(C+0.4N) \quad (5)$$

$$\log_{10} C_{V_{sat}} = 1.15 + 1.36\exp(-0.035\Phi) \quad (6)$$

여기서, $\Phi = \delta_c(Cr+Si)(C+0.4N)$

또한 임의의 운전온도 및 운전시간에 따른 상온 충격에너지는 화학조성, 상온 포화 충격에너지, 취화 속도론 등을 통해 식 (7)과 같이 예측할 수 있다.

$$\log_{10} C_V = \log_{10} C_{V_{sat}} + \beta[1 - \tanh\{(P-\theta)/\alpha\}] \quad (7)$$

여기서,

$$P = \log_{10}(t_{ser}) - \frac{1000Q}{19.143}\left(\frac{1}{T_{ser}} - \frac{1}{673}\right)$$

$$\alpha = -0.585 + 0.795\log_{10} C_{V_{sat}}$$

$$\beta = (\log_{10} C_{V_{int}} - \log_{10} C_{V_{sat}})/2$$

식 (7)에서 β계산에 필요한 $C_{V_{int}}$는 재료의 초기 샤피 충격에너지로서 이 값을 알 수 없는 경우에는 대표적인 값인 200J/cm^{2}을 적용한다. 한편 열화계수(aging parameter) P의 계산에 필요한 활성화에너지(Q)는 재료의 자기확산(self diffusion)에 필요한 에너지로서 화학조성과 운전조건을 이용하여 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$Q = 10(74.52 - 7.20\theta - 3.46Si - 1.78Cr - 4.35I_1Mn + (148-125I_1)N - 61I_2C) \quad (8)$$

식 (8)에서 θ는 운전온도에 따라 달라지는 값으로서 원전 운전온도인 280~330℃에서의 θ는 2.9이다. 또한 CF-3과 CF-8에서는 $I_1=0, I_2=1$을 적용하고 CF-8M에서는 $I_1=1, I_2=0$을 적용한다. 한편 CF-8A 재료의 예측식은 직접 제시되어 있지 않지만 Chopra의 자문결과[9]에 따라 화학성분이 같은 CF-8 재료의 예측식을 사용하였다.

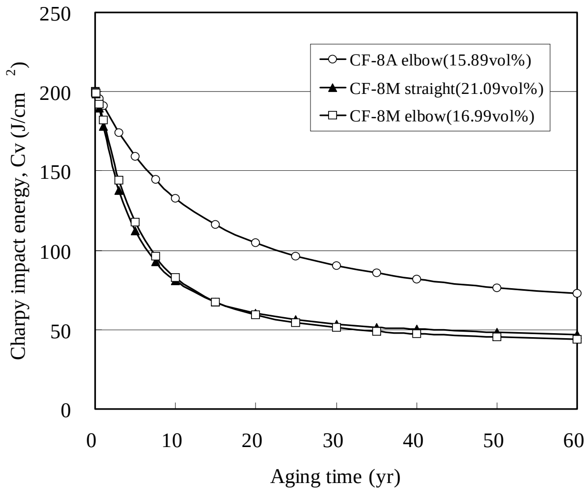

Fig. 1 Charpy impact energy according to aging time in plant A and B

Fig. 1은 식 (2)~(8)을 이용하여 A원전과 B원전에서 페라이트 함량이 가장 높은 기기에 대하여, 원전 운전온도에서 샤피 충격에너지 예측값을 나타낸 것이다. 그림에서 충격에너지는 열화 초기에 급격히 감소한 후 일정해지는 경향을 보이며 40년 이상 경과된 후에는 충격에너지가 포화되는 것을 알 수 있다. 또한 CF-8M은 CF-8A에 비하여 열취화가 더 빨리 그리고 더 크게 일어나며, 포화시 충격에너지는 초기값의 1/4 수준까지 감소되는 것을 알 수 있다.

5. 파괴저항선도 평가

5.1 파괴저항선도 예측

Chopra는 충격에너지와 파괴인성 사이의 상관관계를 구하고 포화 충격에너지를 이용하여 주조 스테인리스강의 열취화에 따른 하한계 J-R선도(lower bound J-R curve) 예측식을 식 (9)와 같이 제시하였다.[5] 예측식은 재료와 주조방법을 고려하고 상온과 운전온도에서 각각의 J-R 선도를 구할 수 있으며 식 (9)에서 사용되는 상수들은 Table 6에 정리하였다.

$$J = a(C_{V_{sat}})^b(\Delta a)^n \quad (9)$$

여기서, $n = c + d(\log_{10} C_{V_{sat}})$

Fig. 2는 CF-8M 주조 스테인리스강 배관이 사용된 A원전에서 페라이트 함량이 가장 높은 직관과 엘보우의 초기 및 하한계 J-R 선도를 나타낸 것이다. GALL 보고서에서는 열취화된 이후에

Table 6 Constants for predicting the J-R curve

Index	Static Cast				Centrifugal Cast			
	R/T		290℃		R/T		290℃	
	a	b	a	b	a	b	a	b
CF-3 CF-8	49	0.52	102	0.28	57	0.52	134	0.28
CF-8M	16	0.67	49	0.41	20	0.67	57	0.41

Index	R/T		290℃	
	c	d	c	d
CF-3	0.15	0.16	0.17	0.12
CF-8	0.20	0.12	0.21	0.09
CF8M	0.23	0.08	0.23	0.06

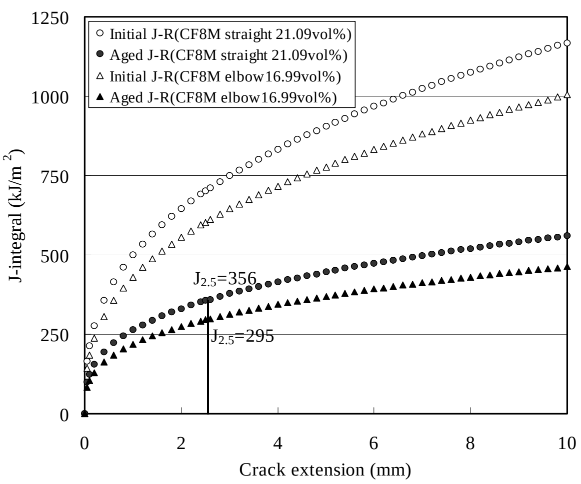

Fig. 2 Initial and aged J-R curve in plant A

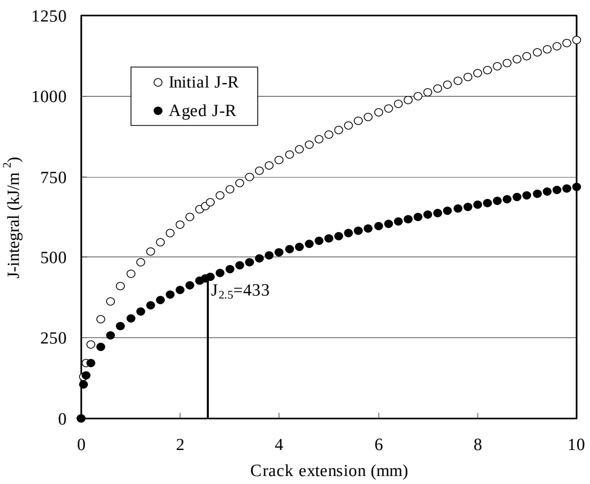

Fig. 3 Initial and aged J-R curve in plant B

균열진전량 2.5mm일 때의 파괴인성이 255kJ/m^2 이상 되도록 제시하고 있는데, Fig. 2에서 $J_{2.5}$일 때의 값은 직관에서 356kJ/m^2, 엘보우에서 295kJ/m^{2}으로서 직관과 엘보우 모두 열취화된 이후에도 미국 원자력규제위원회에서 제시한 기준 이상의 파괴인성을 보유하고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 3은 CF-8A 주조 스테인리스강 배관이 사용된 B원전에서 페라이트 함량이 가장 높은 엘보우의 초기 및 하한계 J-R 선도를 나타낸 것이다. 그림에서 $J_{2.5}$는 433kJ/m^{2}로서 기준치인 255kJ/m^{2}에 비하여 충분한 안전여유가 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 4 J-R test specimen of CF-8A

5.2 파괴저항선도의 보수성 검토

국내 원전 사용 재료인 CF-8M 및 CF-8A 재료의 파괴저항시험 결과[7,8]와 Chopra 예측식의 결과를 비교하고 예측식의 보수성을 검토하였다. Fig. 4는 모의 열화시킨 CF-8M 및 CF-8A 재료의 J-R 시편을 보인 것이다. CF-8M 재료의 경우 페라이트 함량 10.3%인 재료의 예측선도는 측정값에 비하여 보수적으로 예측되었으나, 페라이트 함량 28%인 경우에는 예측선도가 모의 열화재의 시험결과보다 높아 비보수적으로 예측되었다. Chopra의 예측식은 페라이트 함량이 25% 이내인 경우에 적절한 예측이 가능한 바,[9] 이와 같은 차이는 CF-8M 시편의 페라이트 함량이 28%로서 예측식의 적용범위를 벗어났기 때문으로 판단된다.

CF-8A는 페라이트 함량 16%인 재료의 J-R시험을 수행하였는데, 예측선도는 측정치에 비하여 보수적으로 예측되었으며 파괴인성 기준치인 $J_{2.5}$ 값도 예측값에 30% 정도의 보수성이 포함되어 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 주조 스테인리스강의 열취화 민감도 평가와 재료물성치 예측 방법을 고찰하고 국내 2개 원전의 원자로냉각재주배관을 대상으로

열취화 평가를 수행하였다. 또한 예측값과 모의 열화재의 파괴저항시험 결과를 비교하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 평가대상 2개 원전 중 CF-8M 재료가 사용된 원전에서는 열취화에 민감한 직관과 엘보우가 존재하며, CF-8A 재료가 사용된 원전은 열취화에 민감하지 않다.

(2) Chopra의 예측식에 의한 하한계 J-R 선도 예측결과 평가대상 2개 원전 원자로냉각재 주배관은 미국원자력규제위원회에서 제시한 기준치 이상의 파괴인성을 보유하고 있다.

참고문헌

(1) Lietzan, L. M., Mathew, M. D., Murty, K. L., and Shah, V. N., 1999, "*Low Temperature Aging Embrittlement of CF-8 Stainless Steel*," TMS, pp. 1~10.

(2) Shah, V. N. and Macdonald, P. E., 1993, "*Aging and Life Extension of Major Light Water Reactor Components*", ELSEVIER, pp. 146~186.

(3) Aubrey, L. S., Weiser, P. F., Pollard, W. J. and Schoefer, E. A., 1982, "*Ferrite Measurement and Control in Cast Duplex Stainless Steels*", ASTM STP 756, pp. 126~164.

(4) ASTM, 2001, "*Standard Practice for Steel Casting, Austenitic Alloy, Estimating Ferrite Content Thereof*" ASTM A800/A 800M-01.

(5) USNRC, 1994, "*Estimation of Fracture Toughness of CASS during Thermal Aging in LWR Systems*," NUREG/CR-4513, Rev. 1.

(6) USNRC, 2001, "*Generic Aging Lessons Learned (GALL) Report*," NUREG-1801 Vol. 2, pp. 44~46.

(7) 전력연구원-한국전력기술(주), 2003, “열취화 손상관리 적용기술 개발”.

(8) Tanaka, T., Kawaguchi, S. 1995, "Thermal Aging of Cast Duplex Stainless Steels", ASME PVP, Vol. 308, pp. 141~146.

(9) 한국전력기술(주), 2003, “열취화 해외자문 결과보고서(자문자 O.K. Chopra, ANL)”.