'02 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

주조 오스테나이틱 스테인리스강 배관 열취화 평가
Thermal aging evaluation of cast austenitic stainless steel pipe

송택호, 정일석

한국전력공사 전력 연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

요 약

고리 원자력 1호기는 1978년 상업운전을 시작한지 24년이 지나고 있고, 고리 2호기는 1983년 상업운전을 시작한지 19년이 지나고 있다. 가동원전의 가동년수가 증가함에 따라 원전 수명관리 연구와 원전 주기적 안전성 평가 연구가 관심을 더해가고 있다. 본 논문에서는 고리 1,2호기에서 사용되는 주조 오스테나이틱 스텐리스강 배관의 열취화 손상평가를 가동년수 10년부터 60년에 대하여 그리고 가동온도 280℃~320℃에 대하여 각각 평가하였으며, 열취화 현상에 대한 메카니즘(thermal aging mechanism), 평가 방법, 평가 결과 및 향후 연구계획을 제시하였다. 열취화 여유도는 가동년수가 경과 할수록, 그리고 배관의 온도가 증가할 수록 감소하는 것으로 나타났다. 배관의 온도가 280℃ 일경우에는 샤피 최소 충격에너지 관점에서 60년 가동운전까지 상당히 여유가 있는 것으로 나타났으나, 300℃ 이상에서 가동년수 30년 이상에 도달하면 상온 최소 샤피 충격에너지 값에 대한 여유도는 존재하나 그 여유도 값이 작으므로 상세한 파괴역학 해석을 수행해야 하는 것으로 나타났다.

Abstract

24 years have been passed since Kori Unit 1 began its commercial operation, and 19 years have been passed since Kori Unit 2 began its commercial operation. As the end point of design life become closer, plant life extension and periodic safety assessment is paid more and more attention to by the utility company. In this paper, the methodologies and results of cast austenitic stainless steel pipe thermal aging evaluations of both units have been presented in association with aging time of 10, 20, and 30 years and operating temperature, respectively. life extension cases respectively. As a result of this, at the operating temperature of 280℃, thermal aging was not a problem as long as Charpy V-notch room temperature minimum impact energy is concerned. However, more than 300℃ and 30 years of operating condition, we should perform detailed fracture mechanics analysis with CMTR of NPP pipe.

1. 서론

전력연구원에서는 "원전 수명관리 연구(I)"('93.11-'96.11), "원전 수명관리 연구(II)"('98. 7-'01. 6)를 수행하여 계속운전기간 동안의 노화관리 방안을 수립하는 것을 목적으로 장기 사용 경수로형 원전의 피동형 기기/구조물의 노화관리 및 수명관리 기술개발을 수행하였다. 이를 활용하여 가동원전 안전성 향상을 위한 "고리 1호기 주기적안전성 평가"('00.05-'02.11)를 수행하고 있다. 월성 1호기의 계속운전 타당성을 평가하고 중수로형 원전의 수명관리 기술개발을 위한 "월성 1호기 수명관리연구(I)"('00.07-'03.01)를 수행 중에 있으며, 동시에 "월성 1호기 주기적안전성 평가"('01.5-'03.6)를 수행하고 있다. 과학기술부 정부 중장기 과제(대과제명: 원전 주기적 안전성 평가, 세부과제명:경년열화 손상평가 적용기술 개발)의 주관기관으로 선정되어 1,2차년도 연구를 수행하였으며 2002년 3월 현재 2단계 연구를 수행 중에 있다[1,2].

PSR 제도는 1970년대 후반 유럽국가들로부터 시작하여 본격적으로 도입되었으며, 현재 영국, 스웨덴, 프랑스, 일본, 독일, 미국등 대부분 원자력선진국들이 PSR을 채택하고 있거나 이에 상응하는 제도를 시행 중에 있다. PSR을 수행함으로써 가동중 원전의 효율적 수명관리 또는 운영허가갱신의 근거로 활용됨으로써 원전소유자에게 실질적인 도움을 주는 경우도 많다는 점이 확인되었다. 스웨덴은 가장 오래된 원전인 Oskarshamn 1호기에 대해 최초로 1981년에 착수한 PSR를 1983년에 완료하고 ASAR (As-Operated Safety Review)의 결과를 정부에 제출한 이래 단계적으로 전 발전소가 PSR에 대한 ASAR을 주기적으로 제출하고 있다. 일본은 1994년도에 3기(쓰리가1호기, 미하마 1호기, 후쿠시마 1-1호기), 1995년에 4기 (미하마 2호기, 시마네 1호기, 후쿠시마 1-2호기, 겐카이 1호기) 그리고 1997년에 4기 (다카하마 1호기, 2호기, 후쿠시마 1-3호기, 하마호까 1호기) 등을 수행하였다.

원전 주기적 안전성 평가 기술 중 핵심기술은 경년열화 손상평가 기술이다. 수명관리 연구와 주기적 안전성 평가의 핵심변수는 시간이다. 원전 가동년수가 경과함에 따른 발전소 안전성 변화를 검토하는 것이 경년열화 평가 기술이다. 경년열화 평가 기술은 크게 정량적 평가 기술과 정성적 평가 기술이 있다. Westinghouse 원전의 경우 Westinghouse 원전의 경년열화를 평가할 수 있는 일반 기술 지침서(Generic Technical Report)가 발행되어 있다[3]. Generic Technical Report에 의하면 1차 압력계통 기기의 정량적 평가 방법은 원자로 압력용기를 제외하고는 피로평가와 열취화 평가 두가지이다. 피로평가는 반복하중을 수명기간 동안 받을 경우 균열 생성확률과 균열 진전 확률이 증가하여 건전성을 위협하는 피로현상에 대한 정량적 평가이며, 설계시에 이를 예측하여 반영하였으나, 설계 때 예상한 과도상태 횟수 범위내에서 발전소가 운전되고 있는가를 증명하여야 한다. 열취화 평가의 경우에는 주조 오스테나이틱 스텐리스 강 배관에서 발생하며, 가동년수 기간동안 배관의 취성이 증가하지 않았으며, 균열이 발생하지 않았음을 증명하여야 하며, 허용 가능한 크기의 균열이 존재하였을 경우 이 균열이 진전하지 않음을 증명하여야 한다.

본 논문에서는 고리 1,2호기에서 사용되는 주조 오스테나이틱 스텐리스강 배관의 열취화 손상평가를 가동년수 10년부터 60년에 대하여 그리고 가동온도 280℃~320℃에 대하여 각각

평가하였으며, 열취화 현상에 대한 메카니즘(thermal aging mechanism), 평가 방법, 평가 결과 및 향후 연구계획을 제시하였다.

2. 열취화 현상 메카니즘

열취화는 장기간의 열원 노출에 따른 금속의 미세조직 및 물성치의 점진적인 변화로 정의될 수 있다. 열취화에는 여러 기구가 있으며, 이러한 변화는 재료에 다양한 영향을 줄 수 있다. 특히 주조 스테인레스강 조직은 오스테나이트와 페라이트로 구성되어 있으며, 고온에서 페라이트는 심각한 경화를 유발하는 상 변화를 일으킨다. 따라서 상당한 양의 δ-페라이트를 함유한 주조 스테인레스강이 고온에서 장기간 사용되면 파괴 인성(Fracture Toughness)의 감소가 일어난다. 그 결과, 연성-취성 천이온도(Ductile-Brittle Transition Temperature)가 높아지고 상온과 운전온도에서의 인성치가 낮아진다. 이러한 효과는 일반적으로 885°F(475°C)의 고온에서 최대로 발생한다. 주조 스테인레스강으로 제작된 Class 1 배관 및 기기의 경우 가압경수로 조건에서 최대 운전 온도가 885°F보다 낮기는 하지만 열취화를 고려하여야 하며 단조 배관의 경우는 큰 문제는 없는 것으로 알려져 있다[3].

단련(Wrought) 스테인레스강은 보통 오스테나이트 미세조직를 가지고 있으며, 주조 스테인레스강은 전형적으로 체적비 5%~25%의 페라이트상이 오스테나이트와 혼재된 미세조직을 가지고 있다. 상태도에서 이러한 페라이트 영역은 α상이라 부르는 저온에서의 페라이트와 구별하기 위해 δ상으로 불리운다. 오스테나이트-페라이트(듀플렉스) 균형을 조절하는 가장 중요한 요소는 전체적인 화학조성이다. 크롬, 실리콘, 몰리브덴, 그리고 니오비움은 페라이트의 형성을 촉진하는 반면, 니켈, 탄소, 망간, 그리고 질소는 오스테나이트의 생성을 촉진한다. 질소는 주조 과정 중 함유되나 그 비율은 규정되어 있지 않으며 주조 스테인레스강의 질소 함량은 0.03~0.08%까지 변할 수 있다.

오스테나이트 조직 내의 페라이트의 크기, 분포, 형태는 주조과정에서의 응고 조건에 좌우된다. 주조 스테인레스강은 주상(Columnar)의 결정격자가 등축방향 또는 혼합된 결정립 구조로 응고될 수 있으며, 두꺼운 단면의 주조품에서는 미세조직이 위치에 따라 상당한 변화가 있을 수 있다. 엘보우 등의 복잡한 형상을 가진 주조품에서도 단면에 걸쳐 미세조직 분포상의 상당한 변이가 발생할 수 있다.

고온 운전조건(280°C~400°C) 하에서 주조 스테인레스강 CF8, CF8M의 열취화와 관련된 일반적인 금속학적 반응은 다음과 같은 원인에서 발생된다[10].

- ○ 페라이트에서의 반응 : 스피노달 분해, 구형, 판형 α′상의 핵생성 및 성장 (Nucleation/Growth), G상, 니오비움 탄화물(Carbide), 구형 $M_{23}C_6$의 석출
- ○ 오스테나이트에서의 반응 : 유사 스피노달 분해, 슬립 띠와 적층결함에서 σ상의 석출
- ○ 오스테나이트-페라이트상 경계 고질소강에서의 $M_{23}C_6$ 탄화물 또는 Cr_2N 질화물 (Nitride) 형성

위의 3 가지 반응중 페라이트에서의 스피노달 분해과정이 열취화의 주요 기구로 확인되었다[4]. 여기서 스피노달 분해는 단일상을 가지는 조직이 동일한 격자구조를 가지는 두 상으로 분해되는 반응을 의미한다. 페라이트에서의 α′상 형성은 가압경수로 원전 운전온도에서 주조 스테인레스강의 열취화 원인이 된다.

3. 평가 방법

본 연구에서 사용된 방법은 재료의 화학조성을 이용하여 기존에 제시된 실험식으로부터

활성화 에너지와 재료의 기준 재료인성을 예측하는 것이다. 결과는 실제 열취화 실험에서 구한 결과와 유사한 것으로 보고하고 있다[10].

본 연구는 주조 오스테 나이틱 스텐리스강에 대한 개괄적 열취화 평가로 샤피 충격에너지의 최소값(포화값)에 경년열화 시간에 따라 배관의 샤피 충격에너지값이 이 최소 기준치에 얼마나 근접하는가를 평가하였다.

3.1. 최소 기준치 값(Cvsat value)

C_{vsat}은 장기 열취화 후에 상온에서 샤피 충격에너지시험으로 얻을 수 있는 충격에너지 값의 최소치이다. 단위는 J이며 다음의 실험식에 의해 계산할 수 있다[5, 6].

CF 8A의 C_{vsat}은 다음 식 (8-1)에 의해 구할 수 있다.

$$\log_{10} C_{vsat} = 1.15 + 1.364 \exp(-0.035\Phi) \quad \text{여기서 } \Phi = \delta_c (Cr + Si)(C + 0.4N) \tag{1}$$

식 (1)에서 화학조성의 단위는 wt%이고 δ_c는 Hull의 등가계수로 Cr_{eq}과 Ni_{eq}의 함수로 표현되는 페라이트 함량을 의미한다. 즉,

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

$$\text{여기서 } Cr_{eq} = Cr + 1.21(Mo) + 0.48(Si) - 4.99$$

$$Ni_{eq} = Ni + 0.11(Mn) - 0.0086(Mn)^2 + 18.4(N) + 24.5(C) + 2.77 \tag{2}$$

이다. 한편 C_{vsat}은 다음 식에 의해서도 구하여질 수 있다.

$$\log_{10} C_{vsat} = 5.64 - 0.006\delta_c - 0.185Cr + 0.273Mo - 0.204Si + 0.044Ni - 2.12(C + 0.4N) \tag{3}$$

이 때 질소함량이 알려지지 않은 경우에는 0.04wt%로 가정한다.

CF8M재료의 C_{vsat}은 다음 식 (8-4)에 의해 구할 수 있다.

$$\log_{10} C_{vsat} = 1.10 + 2.12 \exp(-0.041\Phi) \text{ for } Ni < 10wt\%$$

$$\log_{10} C_{vsat} = 1.10 + 2.64 \exp(-0.064\Phi) \text{ for } Ni > 10wt\% \tag{4}$$

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

δ_c는 식 (2)에서 정의된 Hull의 등가계수이며 C_{vsat}은 다음 식에 의해서도 계산할 수 있다.

$$\log_{10} C_{vsat} = 7.28 - 0.011\delta_c - 0.185Cr - 0.369Mo - 0.451Si - 0.007Ni - 4.71(C + 0.4N) \tag{5}$$

결국 C_{vsat} 값은 CF8의 경우 식(1)과 식(2) 그리고 CF8M의 경우 식(4)와 식(5)에 의해 계산된 값 중 보수적인 관점에서 적은 값이 선정된다.

3. 2. 원자로 냉각재배관에 대한 샤피 충격에너지 계산

주조 스테인레스강의 상온과 운전온도에서 특정 열취화온도 및 시간에서의 샤피 충격에너지인 C_v 값은 Chopra[5]에 의해 제시된 다음 관계식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\log_{10} C_v = \log_{10} C_{vsat} + \beta\{1-\tanh[(P-\theta)/\alpha]\}$$

여기서 $\beta = (\log_{10} C_{vint} - \log_{10} C_{vsat})/2$

C_{vint} = 초기 샤피 충격에너지

θ = 400°C에서 샤피 충격에너지가 β까지 감소되는 시간의 로그값 (6)

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

식 (6)에서 P는 다음과 같이 계산된다.

$$P = \log_{10}(t) - \frac{1000Q}{19.143}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{673}\right) \quad (7)$$

여기서 t는 시간(hour), T는 °K 단위의 운전온도, 그리고 Q(KJ/mole)는 CF8과 CF8M에 대해 다음 식으로 정의되는 활성화 에너지로서, CF8 및 CF8M에 대하여는 각각 식 (8) 및 식 (9)로 나타낼 수 있다.

○ CF8A

$$Q = 10[74.52 - 7.20\theta - 3.46Si - 1.78Cr + 148N - 61C] \quad (8)$$

○ CF8M

$$Q = 10[74.52 - 7.20\theta - 3.46Si - 1.78Cr - 4.35Mn + 23N] \quad (9)$$

4. 계산결과

계산에 사용한 시편은 미국 Argone Nation Lab(ANL)과 시편 분석 데이터를 사용하였으며 그 데이터는 아래표4-0-1과 같다.

표 4-0-1. 시편 종류 및 구성 성분

시편번호	구분	Cr	Mo	Si	Ni	Mn	C	N
1	CF8A	20.13	0.32	0.86	9.06	0.63	0.01	0.058
2	CF8A	19.81	0.59	1.06	10.63	0.6	0.018	0.028
3	CF8A	20.2	0.16	0.94	9.38	0.74	0.019	0.04
4	CF8A	20.2	0.45	0.83	8.7	0.47	0.019	0.032
5	CF8A	20.18	0.34	1.13	8.59	0.63	0.023	0.028
6	CF8A	20.49	0.04	1.12	8.1	0.59	0.036	0.057
7	CF8A	20.65	0.32	1.01	8.86	0.65	0.054	0.08
8	CF8A	20.33	0.32	1.08	9.34	0.6	0.062	0.045
9	CF8A	20.64	0.31	1.07	8.08	0.64	0.063	0.062
10	CF8A	21.05	0.31	0.95	8.34	0.67	0.064	0.058
11	CF8M	19.11	2.51	0.73	9.03	0.54	0.064	0.048
12	CF8M	20.86	2.58	0.67	9.12	0.53	0.065	0.052
13	CF8M	19.45	2.39	0.49	9.28	0.6	0.047	0.029
14	CF8M	20.76	2.46	0.63	9.4	0.6	0.038	0.038
15	CF8M	70.78	2.57	0.48	9.63	0.5	0.049	0.064
16	CF8M	19.64	2.05	1.02	10	1.07	0.04	0.151
17	CF8M	19.37	2.57	0.58	11.85	0.61	0.055	0.031

4.1. 이용율 80%, 배관온도 280℃의 경우

운전 초기 상태는 아래표 4-1-1과 같다.

표 4-1-1. 이용율 80%, 배관온도 280℃, 초기 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	-3.448	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	219.8	103.9	90	1	280
2	-3.284	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	224.9	61.2	37	1	280
3	-3.682	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	463.6	322.3	228	1	280
4	-4.211	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	207.1	72.8	54	1	280
5	-2.963	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	205.5	128.8	168	1	280
6	-4.256	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	218.8	165.1	307	1	280
7	-3.332	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	250.0	156.7	168	1	280
8	-4.201	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	220.7	131.6	148	1	280
9	-2.713	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	188.4	141.3	300	1	280
10	-3.552	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	171.1	126.3	282	1	280
11	-1.600	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	217.8	154.7	245	1	280
12	-2.341	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	239.1	207.0	645	1	280
13	-2.761	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	229.0	141.1	160	1	280
14	-2.481	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	194.9	153.8	374	1	280
15	-2.591	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	197.7	138.0	231	1	280
16	-2.673	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	237.3	174.6	278	1	280
17	-2.619	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	218.8	92.3	73	1	280

10년간 운전했을 경우 표 4-1-2에서 볼 수 있듯이 시편에 따라 달라지긴 해도 안전 여유도는 약간 감소하나, 실험실 상온에서 얻어지는 최소 샤피 충격에너지(Cvsat)값보단 상당히 여유가 있다.

표 4-1-2. 이용율 80%, 배관온도 280℃, 10년간 운전 하였을 경우 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	1.398	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	216.5	100.6	87	70080	280
2	1.561	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	209.2	45.5	28	70080	280
3	1.164	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	439.5	298.2	211	70080	280
4	0.635	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	202.6	68.3	51	70080	280
5	1.883	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	190.4	113.7	148	70080	280
6	0.589	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	217.2	163.5	304	70080	280
7	1.514	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	241.2	147.9	158	70080	280
8	0.645	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	217.7	128.6	144	70080	280
9	2.132	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	164.0	116.9	248	70080	280
10	1.293	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	165.3	120.5	269	70080	280
11	3.245	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	138.6	75.5	120	70080	280
12	2.504	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	152.2	120.1	374	70080	280
13	2.085	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	188.7	100.8	115	70080	280
14	2.365	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	146.2	105.1	256	70080	280
15	2.255	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	180.4	120.7	202	70080	280
16	2.173	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	193.2	130.5	208	70080	280
17	2.226	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	190.6	64.1	51	70080	280

30년간 운전 하였을 경우 표 4-1-3에서 볼 수 있듯이, 상온 최소 샤피 충격에너지 관점에서 본 열취화 안전 여유도는 역시 존재한다.

표 4-1-3. 이용율 80%, 배관온도 280℃, 30년간 운전 하였을 경우 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	1.875	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	212.5	96.6	83	210240	280
2	2.038	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	198.3	34.6	21	210240	280
3	1.641	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	411.0	269.7	191	210240	280
4	1.112	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	196.4	62.1	46	210240	280
5	2.360	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	173.9	97.2	127	210240	280
6	1.066	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	213.4	159.7	297	210240	280
7	1.991	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	231.7	138.4	148	210240	280
8	1.122	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	214.1	125.0	140	210240	280
9	2.609	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	122.4	75.3	160	210240	280
10	1.770	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	155.2	110.4	246	210240	280
11	3.723	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	92.5	29.4	47	210240	280
12	2.981	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	64.4	32.3	101	210240	280
13	2.562	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	168.9	81.0	92	210240	280
14	2.842	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	85.9	44.8	109	210240	280
15	2.732	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	139.0	79.3	133	210240	280
16	2.650	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	128.7	66.0	105	210240	280
17	2.704	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	171.6	45.1	36	210240	280

60년간 운전하였을 경우 표 4-1-4에 나타내었듯이 샤피 충격에너지 관점에서 본 안전 여유도는 존재하나 여유도 값이 30년에 비하여 훨씬 작다.

표 4-1-4. 이용율 80%, 배관온도 280℃, 60년간 운전 하였을 경우 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	2.176	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	208.0	92.1	79	420480	280
2	2.339	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	190.6	26.9	16	420480	280
3	1.942	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	381.6	240.3	170	420480	280
4	1.413	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	189.7	55.4	41	420480	280
5	2.661	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	158.4	81.7	107	420480	280
6	1.367	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	207.1	153.4	286	420480	280
7	2.292	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	221.8	128.5	138	420480	280
8	1.423	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	210.2	121.1	136	420480	280
9	2.910	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	91.3	44.2	94	420480	280
10	2.071	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	142.9	98.1	219	420480	280
11	4.024	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	76.8	13.7	22	420480	280
12	3.283	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	42.5	10.4	33	420480	280
13	2.863	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	155.2	67.3	77	420480	280
14	3.143	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	60.5	19.4	47	420480	280
15	3.033	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	104.0	44.3	74	420480	280
16	2.951	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	94.5	31.8	51	420480	280
17	3.005	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	159.4	32.9	26	420480	280

4.2. 이용율 80%, 배관온도 배관온도 300℃의 경우

초기값은 아래표 4-2-1과 같다.

표 4-2-1. 이용율 80%, 배관온도 300℃, 초기 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	-2.773	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	219.8	103.9	90	1	300
2	-2.642	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	224.9	61.2	37	1	300
3	-2.961	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	463.6	322.3	228	1	300
4	-3.387	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	207.0	72.7	54	1	300
5	-2.383	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	205.5	128.8	168	1	300
6	-3.423	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	218.8	165.1	307	1	300
7	-2.679	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	250.0	156.7	168	1	300
8	-3.378	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	220.7	131.6	148	1	300
9	-2.182	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	188.4	141.3	300	1	300
10	-2.857	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	171.1	126.3	282	1	300
11	-1.287	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	217.8	154.7	245	1	300
12	-1.883	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	239.1	207.0	645	1	300
13	-2.220	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	228.8	140.9	160	1	300
14	-1.995	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	194.9	153.8	374	1	300
15	-2.083	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	197.7	138.0	231	1	300
16	-2.150	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	237.3	174.6	278	1	300
17	-2.106	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	218.8	92.3	73	1	300

30년간 운전 하였을 경우에 여유도는 역시 줄어들긴 해도 샤피 최소 충격에너지 값에 기준한 열취화 여유도는 존재한다.

표 4-2-2. 이용율 80%, 배관온도 300℃, 30년간 운전 하였을 경우 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	2.550	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	199.2	83.3	72	210240	300
2	2.681	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	182.5	18.8	11	210240	300
3	2.361	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	325.6	184.3	130	210240	300
4	1.936	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	172.7	38.4	29	210240	300
5	2.940	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	141.8	65.1	85	210240	300
6	1.900	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	178.9	125.2	233	210240	300
7	2.643	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	205.5	112.2	120	210240	300
8	1.944	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	198.0	108.9	122	210240	300
9	3.140	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	73.1	26.0	55	210240	300
10	2.466	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	118.2	73.4	164	210240	300
11	4.036	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	76.4	13.3	21	210240	300
12	3.440	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	37.8	5.7	18	210240	300
13	3.102	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	144.4	56.5	64	210240	300
14	3.327	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	52.0	10.9	27	210240	300
15	3.239	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	85.5	25.8	43	210240	300
16	3.173	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	79.5	16.8	27	210240	300
17	3.216	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	151.8	25.3	20	210240	300

40년간 운전하였을 경우 안전여유도가 감소하여 시편번호 2번의 경우에는 파괴역학 해석이 필요하다.

표 4-2-3. 이용율 80%, 배관온도 300℃, 40년간 운전 하였을 경우 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	2.675	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	195.4	79.5	69	280320	300
2	2.806	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	179.9	16.2	10	280320	300
3	2.486	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	306.8	165.5	117	280320	300
4	2.061	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	168.2	33.9	25	280320	300
5	3.065	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	134.2	57.5	75	280320	300
6	2.025	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	167.7	114.0	212	280320	300
7	2.768	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	198.5	105.2	113	280320	300
8	2.069	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	193.8	104.7	117	280320	300
9	3.265	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	66.0	18.9	40	280320	300
10	2.591	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	109.0	64.2	143	280320	300
11	4.161	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	72.6	9.5	15	280320	300
12	3.565	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	35.6	3.5	11	280320	300
13	3.227	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	139.0	51.1	58	280320	300
14	3.452	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	48.4	7.3	18	280320	300
15	3.364	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	77.6	17.9	30	280320	300
16	3.298	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	74.2	11.5	18	280320	300
17	3.341	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	147.9	21.4	17	280320	300

50년간 운전 하였을 경우에는 그러한 시편이 증가하여 시편번호 2, 12번이 파괴역학 분석을 수행하여야 한다.

표 4-2-4. 이용율 80%, 배관온도 300℃, 50년간 운전 하였을 경우 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	2.772	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	192.1	76.2	66	350400	300
2	2.903	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	178.1	14.4	9	350400	300
3	2.583	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	292.1	150.8	107	350400	300
4	2.158	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	164.7	30.4	23	350400	300
5	3.162	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	128.4	51.7	67	350400	300
6	2.121	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	157.9	104.2	194	350400	300
7	2.865	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	192.7	99.4	107	350400	300
8	2.166	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	190.1	101.0	113	350400	300
9	3.362	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	61.7	14.6	31	350400	300
10	2.688	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	101.9	57.1	127	350400	300
11	4.258	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	70.4	7.3	12	350400	300
12	3.662	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	34.5	2.4	7	350400	300
13	3.324	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	135.0	47.1	54	350400	300
14	3.549	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	46.4	5.3	13	350400	300
15	3.461	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	73.0	13.3	22	350400	300
16	3.395	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	71.3	8.6	14	350400	300
17	3.438	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	145.1	18.6	15	350400	300

60년간 운전하였을 경우에도 역시 안전 여유도는 있으나, 몇 개의 시편의 경우 안전 여유도가 상당히 감소하여 실험실상의 오차를 감안하면 시편번호 2,11,12의 경우에는 안전하다고 볼 수 없다. 이들 시편이 배관재료로 사용된 경우 열취화 영향에 대한 파괴역학 분석을 수행하여야 한다.

표 4-2-5. 이용율 80%, 배관온도 300℃, 60년간 운전 하였을 경우 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	2.851	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	189.1	73.2	63	420480	300
2	2.982	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	176.7	13.0	8	420480	300
3	2.663	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	280.2	138.9	98	420480	300
4	2.237	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	161.9	27.6	21	420480	300
5	3.241	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	123.8	47.1	61	420480	300
6	2.201	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	149.3	95.6	178	420480	300
7	2.944	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	187.7	94.4	101	420480	300
8	2.245	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	186.8	97.7	110	420480	300
9	3.441	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	58.9	11.8	25	420480	300
10	2.767	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	96.1	51.3	115	420480	300
11	4.337	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	69.0	5.9	9	420480	300
12	3.741	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	33.8	1.7	5	420480	300
13	3.404	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	131.8	43.9	50	420480	300
14	3.628	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	45.2	4.1	10	420480	300
15	3.540	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	70.1	10.4	17	420480	300
16	3.474	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	69.4	6.7	11	420480	300
17	3.517	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	143.1	16.6	13	420480	300

4.3. 이용율 80%, 배관온도 320℃의 경우

배관온도 320℃의 경우 초기값은 아래표 4-3-1과 같다.

표 4-3-1. 이용율 80%, 배관온도 320℃, 초기 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	-2.144	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	219.8	103.9	90	1	320
2	-2.042	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	224.9	61.2	37	1	320
3	-2.289	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	463.6	322.3	228	1	320
4	-2.618	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	207.0	72.7	54	1	320
5	-1.842	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	205.5	128.8	168	1	320
6	-2.646	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	218.8	165.1	307	1	320
7	-2.071	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	249.9	156.6	168	1	320
8	-2.612	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	220.7	131.6	148	1	320
9	-1.687	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	188.4	141.3	300	1	320
10	-2.208	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	171.1	126.3	282	1	320
11	-0.995	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	217.8	154.7	245	1	320
12	-1.456	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	239.1	207.0	645	1	320
13	-1.716	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	228.6	140.7	160	1	320
14	-1.542	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	194.9	153.8	374	1	320
15	-1.611	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	197.7	138.0	231	1	320
16	-1.662	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	237.3	174.6	278	1	320
17	-1.628	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	218.8	92.3	73	1	320

10년간 운전하였을 경우에는 아래표 4-3-2와 같이 안전여유도가 감소하나 이 경우 열취화 파괴역학 해석을 수행할 필요는 없다.

표 4-3-2. 이용율 80%, 배관온도 320℃, 10년간 운전하였을 경우 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	2.702	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	194.5	78.6	68	70080	320
2	2.804	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	180.0	16.3	10	70080	320
3	2.557	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	296.2	154.9	110	70080	320
4	2.228	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	162.2	27.9	21	70080	320
5	3.004	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	137.9	61.2	80	70080	320
6	2.199	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	149.5	95.8	178	70080	320
7	2.774	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	198.1	104.8	112	70080	320
8	2.234	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	187.3	98.2	110	70080	320
9	3.159	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	72.0	24.9	53	70080	320
10	2.637	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	105.6	60.8	136	70080	320
11	3.851	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	84.5	21.4	34	70080	320
12	3.390	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	39.0	6.9	21	70080	320
13	3.129	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	143.2	55.3	63	70080	320
14	3.303	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	52.9	11.8	29	70080	320
15	3.235	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	85.9	26.2	44	70080	320
16	3.184	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	79.0	16.3	26	70080	320
17	3.217	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	151.8	25.3	20	70080	320

20년간 운전하였을경우에는 시편번호 2, 12번의 경우 열취화 파괴역학 해석을 수행하여야 한다.

표 4-3-3. 이용율 80%, 배관온도 320℃, 20년간 운전하였을 경우 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	3.003	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	183.1	67.2	58	140160	320
2	3.105	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	174.7	11.0	7	140160	320
3	2.858	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	252.1	110.8	78	140160	320
4	2.529	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	152.8	18.5	14	140160	320
5	3.305	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	120.2	43.5	57	140160	320
6	2.500	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	115.7	62.0	115	140160	320
7	3.075	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	179.2	85.9	92	140160	320
8	2.535	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	173.2	84.1	94	140160	320
9	3.460	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	58.3	11.2	24	140160	320
10	2.938	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	84.4	39.6	88	140160	320
11	4.152	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	72.8	9.7	15	140160	320
12	3.691	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	34.2	2.1	7	140160	320
13	3.430	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	130.8	42.9	49	140160	320
14	3.604	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	45.6	4.5	11	140160	320
15	3.536	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	70.2	10.5	18	140160	320
16	3.485	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	69.2	6.5	10	140160	320
17	3.518	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	143.1	16.6	13	140160	320

30년간 운전하였을경우에는 시편번호 2, 12, 16번의 경우 열취화 파괴역학 해석을 수행하여야 한다.

표 4-3-4. 이용율 80%, 배관온도 320℃, 30년간 운전하였을 경우 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	3.179	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	175.5	59.6	51	210240	320
2	3.281	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	172.3	8.6	5	210240	320
3	3.034	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	229.3	88.0	62	210240	320
4	2.705	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	148.3	14.0	10	210240	320
5	3.481	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	111.1	34.4	45	210240	320
6	2.677	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	98.2	44.5	83	210240	320
7	3.251	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	167.6	74.3	80	210240	320
8	2.711	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	163.8	74.7	84	210240	320
9	3.636	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	53.9	6.8	15	210240	320
10	3.114	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	74.1	29.3	65	210240	320
11	4.328	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	69.1	6.0	10	210240	320
12	3.867	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	33.2	1.1	3	210240	320
13	3.606	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	124.3	36.4	41	210240	320
14	3.780	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	43.6	2.5	6	210240	320
15	3.712	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	65.7	6.0	10	210240	320
16	3.661	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	66.4	3.7	6	210240	320
17	3.694	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	139.2	12.7	10	210240	320

40년간 운전하였을경우에는 시편번호 2, 4, 11, 12, 14, 15, 16,17번의 경우 열취화 파괴역학 해석을 수행하여야 한다.

표 4-3-5. 이용율 80%, 배관온도 320℃, 40년간 운전하였을 경우 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	3.304	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	169.8	53.9	47	280320	320
2	3.406	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	170.9	7.2	4	280320	320
3	3.159	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	215.1	73.8	52	280320	320
4	2.830	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	145.7	11.4	9	280320	320
5	3.606	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	105.5	28.8	37	280320	320
6	2.801	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	87.8	34.1	64	280320	320
7	3.376	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	159.3	66.0	71	280320	320
8	2.836	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	156.9	67.8	76	280320	320
9	3.761	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	51.9	4.8	10	280320	320
10	3.239	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	68.0	23.2	52	280320	320
11	4.453	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	67.3	4.2	7	280320	320
12	3.992	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	32.8	0.7	2	280320	320
13	3.731	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	120.1	32.2	37	280320	320
14	3.905	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	42.8	1.7	4	280320	320
15	3.837	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	63.7	4.0	7	280320	320
16	3.786	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	65.2	2.5	4	280320	320
17	3.819	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	136.9	10.4	8	280320	320

50년간 운전하였을경우에는 시편번호 2, 4, 9, 11, 12, 14, 15, 16,17번의 경우 열취화 파괴역학 해석을 수행하여야 한다.

표 4-3-6. 이용율 80%, 배관온도 320℃, 50년간 운전하였을 경우 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	3.401	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	165.4	49.5	43	350400	320
2	3.503	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	169.9	6.2	4	350400	320
3	3.255	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	205.2	63.9	45	350400	320
4	2.927	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	144.0	9.7	7	350400	320
5	3.703	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	101.6	24.9	32	350400	320
6	2.898	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	81.2	27.5	51	350400	320
7	3.473	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	153.1	59.8	64	350400	320
8	2.933	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	151.5	62.4	70	350400	320
9	3.858	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	50.7	3.6	8	350400	320
10	3.336	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	64.0	19.2	43	350400	320
11	4.550	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	66.3	3.2	5	350400	320
12	4.089	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	32.5	0.4	1	350400	320
13	3.828	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	117.1	29.2	33	350400	320
14	4.002	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	42.3	1.2	3	350400	320
15	3.934	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	62.6	2.9	5	350400	320
16	3.883	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	64.5	1.8	3	350400	320
17	3.916	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	135.4	8.9	7	350400	320

60년간 운전하였을 경우에는 아래표 4-3-7에 나타내었듯이, 시편번호 2, 4, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 17번의 경우 열취화 파괴역학 해석을 수행하여야 한다.

표 4-3-7. 이용율 80%, 배관온도 320℃, 60년간 운전하였을 경우 열취화 안전 여유도

시편번호	P	Ferrite(%)	Cv sat	beta	theta	alpha	Q	Cv	여유량	여유도(%)	EFPH	Temp
1	3.480	14.3	115.9	0.139	3.53	1.15	204.7	161.8	45.9	40	420480	320
2	3.582	8.4	163.7	0.069	2.29	1.2	195	169.2	5.5	3	420480	320
3	3.335	12.5	141.3	0.258	2.83	1.09	218.6	197.9	56.6	40	420480	320
4	3.006	20.4	134.3	0.094	2.1	1	250	142.7	8.4	6	420480	320
5	3.782	21	76.7	0.214	3.21	1.07	175.9	98.7	22.0	29	420480	320
6	2.978	17.6	53.7	0.305	2.57	0.75	252.7	76.5	22.8	43	420480	320
7	3.552	10	93.3	0.214	3.48	1.2	197.8	148.2	54.9	59	420480	320
8	3.012	8.8	89.1	0.197	3.14	1.2	249.4	147.2	58.1	65	420480	320
9	3.937	14.9	47.1	0.301	2.88	0.68	161.1	50.0	2.9	6	420480	320
10	3.415	15.4	44.8	0.291	2.89	0.88	210.9	61.2	16.4	37	420480	320
11	4.629	15.5	63.1	0.269	3.44	0.7	95	65.7	2.6	4	420480	320
12	4.168	24.8	32.1	0.436	2.82	0.51	139	32.4	0.3	1	420480	320
13	3.907	19.6	87.9	0.208	3.16	1.57	163.9	114.8	26.9	31	420480	320
14	4.081	29	41.1	0.338	2.81	0.6	147.3	42.0	0.9	2	420480	320
15	4.013	20.9	59.7	0.26	2.99	0.59	153.8	61.9	2.2	4	420480	320
16	3.962	5.9	62.7	0.289	2.7	0.62	158.7	64.1	1.4	2	420480	320
17	3.995	6.4	126.5	0.119	2.83	1.11	155.5	134.3	7.8	6	420480	320

5. 결론 및 향후 연구계획

앞서 나타낸 표에서 볼 수 있듯이 열취화 여유도는 가동년수가 경과 할수록, 그리고 배관의 온도가 증가할 수록 감소한다. 배관의 온도가 280℃ 일경우에는 샤피 최소 충격에너지 관점에서 상당히 여유가 있는 것으로 나타났으나, 300℃ 이상에서 가동년수 30년 이상에 도달하면 상온 최소 샤피 충격에너지 값에 대한 여유도는 존재하나 그 여유도 값이 작으므로 상세한 파괴역학 해석을 수행해야 하는 것으로 나타났다. 우선 시급한 것이 배관에 사용된 CMTR(Certified Material Test Report)를 구하여야 하나, 고리 1,2 호기의 경우 turn-key 방식으로 발전소를 인수하여, 이들 자료를 구하는 것이 어려운 실정이다. 고리 1발 자료실 및 한수원 본사 자료실에 확인한 결과 1호기의 경우 배관의 일부분에 대한 CMTR이 micro-fishe로 존재한 것을 확인하였으나, 2호기의 경우에는 micro-fishe가 존재하는지 확인이 안되고 있다.

상기의 활성화 에너지는 재료 화학조성의 함수이고 재료의 초기 열처리 방식에 따라 영향을 받는다. 따라서 그 관계식인 식(8)과 식(9)는 290℃~400℃의 온도범위에서 50,000시간까지 열취화된 약 50개의 여러 가지 열처리 재료에 대한 샤피 V-노치 충격시험 결과에 의해 도출된 식이다. 또한 J-R 곡선은 다음 식에 의해 계산된다[7].

$$J = A\,(C_v)^n\,(a)^m$$

여기서 J의 단위는(KJ/m^2)이다. C_v는 샤피 충격에너지이고 a는 mm 단위의 균열진전(Crack Extension)을 나타낸다.

재료시험보고서(CMTR)로부터 고리 2호기 원자로 냉각재배관 각 부분에 대한 재료물성치와 화학조성을 조사하고 식(2)로부터 페라이트 함량을 구하고 파괴역학 해석을 향후 수행할 계획이다.

참고문헌

1. 전력연구원, “원전 수명관리 연구 (I)” 최종보고서, 1996
2. 전력연구원, “원전 수명관리 연구 (II)” 최종보고서, 2001
3. Westinghouse, 1995, "Generic Technical Report of Aging Management Evaluation for Class 1 Piping".
4. Chopra, O. K., and Chung, H. M., 1986, "Investigation of the Mechanisms of Thermal Aging of Cast Stainless Steels," Presented at the Advisory Committee on Reactor Safeguards Meeting, Columbus, Ohio.
5. Chopra O. K., 1992a, "Estimation of Mechanical Properties of Cast Stainless Steel during Thermal Aging in LWR Systems", Proceedings of the U.S. NRC 19th Water Reactor Safety Information Meeting, NUREG/CP-0119, Vol.1,. pp151-178.
6. Chopra O. K., 1992b, "Thermal Aging of Cast Stainless Steels in LWR systems Estimation of Mechanical Properties,"Nuclear Plant Systems/Components Aging Management and Life Extension, ASME PVP Vol.228, pp.79-92.
7. NUREG/CR-4513, Estimation of Fracture Toughness of Cast Stainless Steels During thermal aging in LWR System