

감육배관의 건전성평가 및 정비 관련 기술기준 고찰

이성호[†]·이요섭^{*}·김홍덕^{*}·이경수^{*}·황경모^{**}

Review on the Integrity Evaluation and Maintenance of Wall-Thinned Pipe

Sung Ho Lee[†], Yo Seob Lee^{*}, Hong Deok Kim^{*}, Kyoung Soo Lee^{*} and Kyeong Mo Hwang^{*}

(Received 22 May 2015, Revised 5 June 2015, Accepted 5 November 2015)

ABSTRACT

Local wall thinning and integrity degradation caused by several mechanisms, such as flow accelerated corrosion, cavitation, flashing and/or liquid droplet impingement, is a main concern in secondary steam cycle piping system of nuclear power plants in terms of safety and operability. Thinned pipe management program (TPMP) has been developed and optimized to reduce the possibility of unplanned shutdown and/or power reduction due to pipe failure caused by wall thinning. In this paper, newest technologies, standards and regulations related to the integrity assessment, repair and replacement of thinned pipe component are reviewed. And technical improvement items in TPMP to secure the reliability and effectiveness are also presented.

Key Words : Flow Accelerated Corrosion(유동가속부식), Pipe Wall Thinning(배관 감육), Integrity Assessment(건전성 평가), Overlay Weld Repair(오버레이 용접보수), Post Weld Heat Treatment(용접후열처리)

기호설명

P	= internal design pressure ($=P_d$)
D_o	= outside diameter of pipe
t_{min}	= required minimum wall thickness
t_{nom}	= nominal wall thickness
t_{mm}	= measured minimum wall thickness
t_p	= predicted minimum wall thickness
B_1, B_2	= primary stress indices
i	= stress intensification factor
M_A	= resultant moment loading on cross section due to weight and other sustained loads
M_B	= resultant moment loading on cross section due to non-reversing dynamic loads
M_C	= range of resultant moments due to thermal

	expansion
Z	= section modulus
S_y	= material yield strength
S_h	= material allowable stress
P_{max}	= peak pressure
S_A	= allowable stress range for expansion stresses
S_L	= sum of the longitudinal stresses due to pressure, weight, and other sustained loads

1. 서론

원자력발전소 증기사이클 구성 배관계통에서 발생하는 유동가속부식(Flow Accelerated Corrosion), 침식(Cavitation, Flashing, Liquid Droplet Impingement, Solid Particle Erosion, etc.) 등에 기인한 감육 현상은 배관계통의 기기건전성을 저하시키는 현실적인 요인이며 원전 설비 안전성 및 신뢰성 확보 측면에서 중요한 관심사항으로 대두되었다⁽¹⁾. 국내 원전에서는 동 배관계통에의 감육 진행에 따른 건전성 저하를 방

[†] 회원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원

sungholee@khnp.co.kr

TEL: (042)870-5533 FAX: (042)870-5549

^{*} 한국수력원자력(주) 중앙연구원

^{**} 한국전력기술(주) 재료기술그룹

지하고자 미국 전력연구원(EPRI)의 유동가속부식 지침서⁽²⁾와 CHECWORKS 전산프로그램⁽³⁾을 기반으로 하는 표준절차를 개발하여 운용함으로써 증기사이클 배관계통 안전성을 확보 및 유지해 오고 있다.

본 논문에서는 국내 원전에서 운용하고 있는 배관감육 관리 프로그램에서의 제작허용공차를 고려한 건조기준 또는 설계압력을 고려한 최소요구두께 이하로 얇아진 배관에 대한 건전성평가 사례와 해외 최신 기술과의 차이점을 비교 검토 하였으며, 보수 및 교체와 관련한 기술기준 및 규제요건의 변화 등을 검토함으로써 동 배관감육 관리 프로그램의 신뢰성과 효율성을 동시에 제고하기 위한 개선 방향을 제시하고자 하였다.

2. 배관감육 관리 프로그램 및 건전성평가

2.1 국내 원전 배관감육 관리 프로그램

국내 원전 배관감육 관리 프로그램의 개략적 구성과 절차는 Fig 1에 제시한 바와 같다. 검사대상 배관에 대해 취득된 현 검사시점에서의 두께 또는 이전 검사시점 두께와의 차이로부터 차기 검사시점까지의 감육량(wear)을 도출한 후 측정 최소두께(t_{min})로부터 차기 검사시점에서의 예상 최소두께(t_p)를 도출한다. 예상 최소두께가 최소요구두께(t_{min})에 도달할 때까지 잔여수명(Remaining Life)이 1주기 이하로 평가된 경우 현 검사시점에서의 보수 또는 교체를 결정하기 전에 ASME CC(Code Case) N-597-2⁽³⁾가 제시하고 있는 해석적 건전성평가를 통해 차기 검사주기까지의 사용가능성을 평가한다.

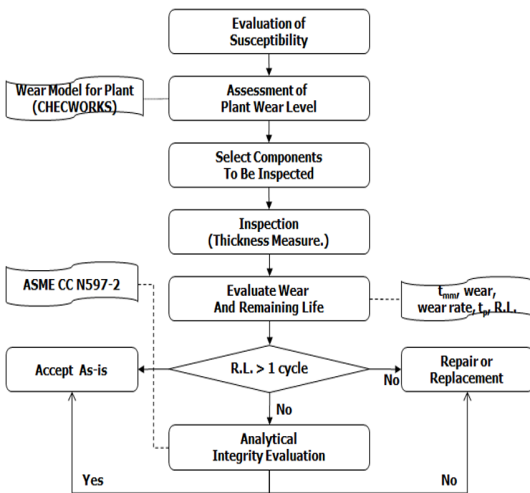
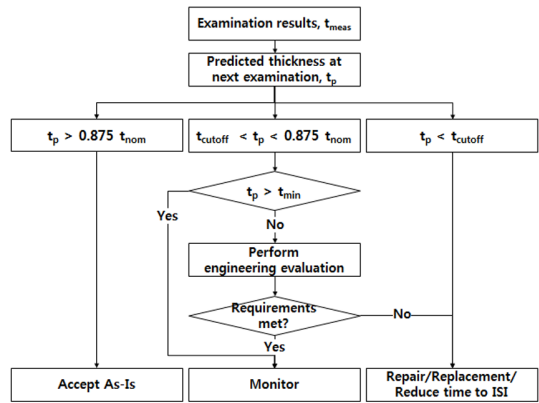


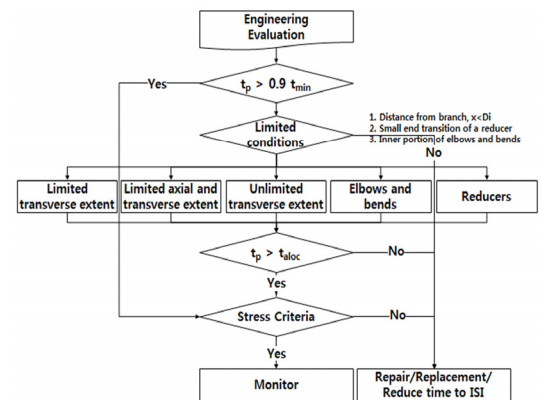
Fig. 1 Scheme of thinned pipe management program

2.2 감육배관 해석적 건전성평가

ASME CC N-597-2는 Class 1,2,3 등급 감육배관에 대한 해석적인 건전성평가 방법을 제시하고 있으며 개략적 구성과 절차는 Fig 2에서와 같다. Fig 2(a) 와 같이, 예상 최소두께가 배관 등급에 따라 제시된 cutoff 두께 (Class1: $0.3t_{nom}$, Class2,3: $0.2t_{nom}$)와 배관 제작허용공차 사이($t_{cutoff} < t_p < 0.875t_{nom}$)에 해당하며 최소요구두께 이하($t_p \leq t_{min}$)로 예상되는 경우 Fig 2(b)에 제시한 공학적 평가를 수행한다. 공학적 평가에서, 예상 최소두께가 $0.9t_{min}$ 이상을 초과하는 경우($t_p > 0.9t_{min}$)에는 응력요건(Stress Criteria) 만족 여부를, 예상 최소두께가 $0.9t_{min}$ 이하인 경우($t_p \leq 0.9t_{min}$)에는 배관 형상과 감육 위치에 따른 국부허용두께 만족($t_p > t_{aloc}$) 여부와 응력요건(Stress Criteria) 만족 여부를 함께 평가하여 차기 검사주기까지의 사용가능성을 확인한다.



(a)



(b)

Fig. 2 (a) Pipe wall thinning evaluation of CC N-597-2; (b) Engineering evaluation of CC N-597-2

2.3 배관계통 응력해석 기술기준

응력 기반 감속배관 건전성평가에서의 응력요건 만족여부와 관련하여 국내 최초 원전 및 최근 상업 운전 시작 원전의 안전등급 및 비안전등급 배관계통에 대한 응력해석 기술기준의 적용 연도별 관련 수식 개정 이력을 검토하였다.

2.3.1 안전등급 배관

완전한 배관계통의 설계는 열팽창, 무게 그리고 불규칙하중의 영향에 대하여 고정점(앵커) 사이 구간에서 해석해야 하며 KEPIC MNC/MND^(4,5) 3650의 한계를 만족해야 한다. KEPIC MNC/MND에 제시된 식과 ASME Sec. III NC/ND에 제시된 식은 동일하다.

• 설계조건(Sustained Loads)

압력, 무게 그리고 기계적 하중의 영향은 식 (1)의 요건을 만족해야 한다.

$$S_{SL} = B_1 \frac{PD_o}{2t_{nom}} + B_2 \frac{M_A}{Z} \leq 1.5S_h \quad (1)$$

• 불규칙하중(Occasional Loads)

- B급 운전한계로 지칭되는 압력, 무게, 기타 지지 하중 그리고 비반복 동하중을 포함한 불규칙하중의 영향은 식 (2)의 요건을 만족해야 한다. 그러나 $1.5S_y$ 를 초과해서는 안 된다.

$$S_{OL} = B_1 \frac{P_{max} D_o}{2t_{nom}} + B_2 \frac{(M_A + M_B)}{Z} \leq 1.8S_h \quad (2)$$

- C급 운전한계를 지정한 운전하중에 대해서는 최대계산응력을 유발하는 압력 P 및 모멘트($M_A + M_B$)를 사용해서 식 (2)를 만족해야 한다. 이 때 허용응력은 $2.25S_h$ 를 적용하며 그 값은 $1.8S_y$ 보다 커서는 안 된다.

- D급 운전한계를 지정한 운전하중에 대해서는 최대계산응력을 유발하는 압력 P 및 모멘트 ($M_A + M_B$)를 사용해서 식 (2)를 만족해야 한다. 이 때 허용응력은 $3.0S_h$ 를 적용하며 그 값은 $2.0S_y$ 보다 커서는 안 된다.

• 열팽창(Thermal Expansion)

A와 B급 운전한계를 지정한 운전 하중은 식 (3) 또는 (4), 그리고 (5)의 요건을 만족해야 한다.

$$S_E = \frac{iM_C}{Z} \leq S_A \quad (3)$$

$$S_{TE} = \frac{PD_o}{4t_{nom}} + 0.75i \left(\frac{M_A}{Z} \right) + i \left(\frac{M_C}{Z} \right) \leq (S_h + S_A) \quad (4)$$

$$S_R = \frac{iM_R}{Z} \leq 2.0S_A \quad (5)$$

2.3.2 비안전등급 배관

배관계통은 KEPIC MGE⁽⁶⁾ 104.8 요건 하에서 설계의 타당성을 위해 열팽창, 무게, 지속하중 및 일시적 하중에 대한 영향을 앵커와 앵커사이에서 해석하여야 한다.

• 지속하중(Sustained Loads)

압력, 무게 및 기타 기계적인 지속하중의 영향은 식(6)의 요건을 만족하여야 한다.

$$S_{SL} = \frac{PD_o}{4t_{nom}} + \frac{0.75iM_A}{Z} \leq 1.0S_h \quad (6)$$

• 불규칙하중(Occasional Loads)

압력, 무게 기타 지속하중 및 지진을 포함한 일시적 하중은 식 (7)의 요건을 만족하여야 한다.

$$S_{OL} = \frac{PD_o}{4t_{nom}} + \frac{0.75iM_A}{Z} + \frac{0.75iM_B}{Z} \leq 1.2S_h \quad (7)$$

• 열팽창(Thermal Expansion)

열팽창 영향은 식 (8)을 만족하여야 한다.

$$S_E = \frac{iM_C}{Z} \leq S_A + f(S_h - S_L) \quad (8)$$

여기서 M_A 는 무게 및 기타 지속하중으로 인해 단면에 걸리는 합성모멘트, M_B 는 압력/안전밸브 하중, 압력 및 유량의 과도현상 때문에 생기는 추력, 그리고 지진과 같은 일시적 하중으로 인해 단면에 걸리는 합성모멘트, M_C 는 열팽창에 의한 합성모멘트이다.

2.3.3 배관 응력해석 기술기준 개정 이력

상기 2.3.1항과 2.3.2항에 기술한 배관계통 응력해석 관련 ASME NB, NC, ND, B31.1 수식의 개정 이력을 요약하여 Table 1에 제시하였다. Table 1에서와 같이 현행 안전등급 배관에 대한 응력지수(B_1, B_2) 개념은 W.1981 edition에 처음 도입되었으며, service level 개념은 W.1972 edition에서 처음 도입되었던 normal, upset, emergency, faulted 개념은 W.1981 edition에서 level A, B, C, D 개념으로 각각 개정되었고,

Table 1. Evolution of design equation indices

Code	α Axial Pressure Stress Index	β Sust.-Occ. Moment Stress Index	k Allowable Stress Multiplier
B31.1 1955 ⇒ 1967	0.5	0.75i Sust. Occ. Not specified	1.0 for Sustained, Occasional not specified
B31.1.0 1967 ⇒ 1969		0.75i	1.2
B31.7 C1.2.3 1969 ⇒ 1971			
III C1.2.3 1971 ⇒ W.1972			
III C1.2.3 W.1972 ⇒ W.1981			
III C1.2.3 W.1981 ⇒ 1999 Add.	B_1	B_2	1.5 design 1.0 level A 1.8 (but not to exceed 1.5S) level A and B 2.25 (but not to exceed 1.8S) level C 3.0 (but not to exceed 2.0S) level D
III C1.2.3 1999 Add. ⇒ to-date	B_1	B_2	1.5 design 1.0 level A 1.8 (but not to exceed 1.5S) level A and B 2.25 (but not to exceed 1.8S) level C 3.0 (but not to exceed 2.0S) level D
III C1.2.3 2004 ⇒ to date Alternative for Reverse Dynamic Loads (seismic)	B_1	B_2'	1.8 (but not to exceed 1.5S) level B 2.1 level C with $C_3M_{SAW}/Z=4.2S$ and $F_{30AW}/A=0.7S$ 3.0 level D with $C_3M_{SAW}/Z=4.2S$ and $F_{30AW}/A=0.7S$

Sust.=sustained loads(pressure, weight); Occ.=occasional loads(seismic); W=winter addendum

allowable stress multiplier(k) 또한 W.1981 edition과 1999 Add. edition에서 개정되어 현재에 이르고 있다. 한편 비안전등급 배관에 대한 응력지수(α , β)는 1967 edition 이후 현재까지 개정되지 않고 유지되고 있다. 이는 국내 원전의 감육배관에 대한 응력요건 만족여부를 평가할 때 해당 호기의 설계기준 edition과 등급에 따라 상이한 수식이 적용되어야 함을 의미한다.

2.4 해석적 건전성평가 사례

2.4.1 CE형 원전, 안전등급 배관

A발전소의 안전등급 배관은 1989 Add. edition ASME NC에 따라 설계되었으며, Sargent & Lundy Engineering사 PIPSYS 프로그램으로 응력해석 되었다.

대상 배관의 예상 최소두께(0.542 in)가 $0.875 \times t_{nom}$ (0.602 in) 이하로 계산되어 Fig 2(a)에 제시된 기준에 따라 Fig. 2(b)에 제시된 공학적 평가에 진입하였다. 예상 최소두께가 $0.9 \times t_{min}$ (0.489 in) 이상의 요건을 만족하고 있어 아래와 같이 ASME NC에 제시된 지속하중, 일시적하중, 열팽창하중 판정기준에 대한 예상 최소두께에서의 응력요건 만족 여부를 평가하였다.

$$S_{SL} = B_1 \frac{PD_o}{2t_p} + B_2 \frac{M_A}{Z} \leq 1.5S_h$$

$$S_{OL} = B_1 \frac{P_{max} D_o}{2t_p} + B_2 \frac{(M_A + M_B)_{Level B}}{Z} \leq 1.8S_h$$

$$S'_{OL} = B_1 \frac{P'_{max} D_o}{2t_p} + B_2 \frac{(M_A + M_B)_{Level D}}{Z} \leq 3.0S_h$$

$$S_E = \frac{iM_C}{Z} \leq S_A$$

Table 2. Moment data for stress criteria evaluation(S&L)

SUMMARY OF INDIVIDUAL LOADS (FT-LBS)									
LOAD TITLE	LOAD ID	FA	FB	FC	MA	MB	MC		
DEAD WEIGHT	WGHT	-165	-1,126	-1	283	69	-2,419	M_A	
THERMAL MODE 1	THR1	448	-10,108	2,284	18,716	7,910	-13,191	M_C	
THERMAL MODE 2	THR2	2,763	-10,551	2,553	28,687	10,082	-21,391		
THERMAL MODE 3	THR3	729	-8,919	1,760	17,075	6,058	-14,912		
COMBINED LOADS FOR SPECIFIED COMBINATIONS (FT-LBS)									
SL	FA	FB	FC	MA	MB	MC	LOAD COMBINATION		
B	13,214	-5,796	6,345	28,240	14,260	12,615	22,201 54,060	WGHT+THR1+OBHD+OBE1+*TR01	
								-12,649-16,674 -1,779 9,758 1,700 -43,836	
B	15,529	-6,238	6,614	38,211	16,431	4,415	24,039 66,617	WGHT+THR2+OBHD+OBE1+*TR01	
								-10,334-17,116 -1,510 19,729 3,871 -52,037	
D	19,195	-4,094	7,961	30,116	15,096	24,663	26,225 68,620	WGHT+THR3+SSHD+SSE1+*JET1	
								-18,068-15,997 -4,441 3,710 -2,842 -59,325	
D	20,968	7,745	6,717	14,654	12,541	42,156	24,469 50,799	WGHT+SSHD+SSE1+ELB1	
								-21,299 -9,998 -6,718 -14,088 -12,403 -46,995	
D	21,416	-2,363	9,001	33,370	20,452	28,965	30,723 71,793	WGHT+THR1+SSHD+SSE1+ELB1	
								-20,851 -20,107 -1,134 4,628 -4492 -60,186	
D	23,731	-2,805	9,269	43,341	22,623	20,765	32,731 84,065	WGHT+THR2+SSHD+SSE1+ELB1	
								-18,536 -20,549 -4,165 14,599 -2321 -68,387	$M_A + M_B$
D	21,697	-1,174	8,477	31,729	18,599	27,245	30,008 72,008	WGHT+THR3+SSHD+SSE1+ELB1	
								-20,570 -18,917 -4,958 2,987 -6345 -61,907	

Table 3. Stress criteria evaluation result(1989 edition)

Stress Criteria 평가시 Moment 입력자료							Stress Criteria 평가시 입력자료		
Design Condition	M_A	M_B	M_C	M_D	M_A [lb-ft]	M_B [lb-in]	Input Items	CF0181PG	
							field	Main	
CF0181PG	$M_A + M_B$	M_C	M_D	M_D	$M_A + M_B$ [lb-ft]	$M_C + M_D$ [lb-in]	P	1,280	
	85	19,729	3,871	-52,037	55,786	669,431	Z	60,865	
	M_C	M_D	M_D	M_D	M_C [lb-ft]	M_D [lb-in]	B ₁	0.5	
	85	28,687	10,082	-21,391	37,177	446,130	B ₂	1	
Service Level A&B	$M_C + M_D$	M_D	M_D	M_D	$M_C + M_D$ [lb-ft]	$M_D + M_D$ [lb-in]	P_{min}	1,408	
	85	14,599	-2,321	-68,387	69,966	839,597	P_{min}'	2,560	
$M = (M_A^2 + M_B^2 + M_C^2)^{1/2}, J = ABC$							$z = \pi(D_o^3 - D_i^3) / (32D_o)$	t_b	0.542
							D ₁	12.750	
평가기준 입력							i	1	
Stress Criteria 평가기준				Stress Criteria 평가결과					
Stress Criteria	CF0181PG			Stress Criteria	CF0181PG				
Design Condition	S_h	21,750			S_h	8,008			
Service Level A&B	S_h	26,100			S_h	19,279			
	S_h	21,750			S_h	7,330			
Service Level D	S_h'	43,500			S_h'	28,850			
평가기준 입력				Stress Criteria 평가판정					
S_h	14,500			Stress Criteria	CF0181PG				
S_h	14,500			S_h	만족				
f	1			S_h	만족				
S_h	21,750			S_h	만족				
Material	SA335 P22			S_h'	만족				

응력요건 관련 M_A , $M_A + M_B$, M_C 는 Table 2에서와 같이 다양한 응력해석 결과로부터 조건별 최대값을 추출하여 활용하였으며, 결과는 Table 3에 제시한 바와 같이 지속하중, 일시적하중, 열팽창하중 판정기준을 모두 만족하는 것으로 평가되었다.

2.4.2 WH형 원전, 안전등급 배관

B발전소의 안전등급 배관은 1978 Winter edition ASME NC에 따라 설계되었으며, Bechtel(BE.)사

ME-101 프로그램과 수기로 응력해석 되었다.

대상 배관의 예상 최소두께(0.655 in)가 $0.875 \times t_{nom}$ (0.820 in) 이하로 계산되어 Fig 2(a)에 제시된 기준에 따라 Fig. 2(b)에 제시된 공학적 평가에 진입하였다. 예상 최소두께가 $0.9 \times t_{min}$ (0.620 in) 이상의 요건을 만족하고 있어 아래와 같이 ASME NC에 제시된 지속하중, 일시적하중, 열팽창하중 판정기준에 대한 예상 최소두께에서의 응력요건 만족 여부를 평가하였다.

$$S_{SL} = \frac{PD_o}{4t_p} + \frac{0.75iM_A}{Z} \leq 1.0S_h$$

$$S_{OL} = \frac{PD_o}{4t_p} + \frac{0.75iM_A}{Z} + \frac{0.75iM_B}{Z} \leq 1.2S_h$$

$$S_E = \frac{iM_C}{Z} \leq S_A + f(S_h - S_L)$$

$$S_{TE} = \frac{PD_o}{4t_p} + 0.75i \left(\frac{M_A}{Z} \right) + i \left(\frac{M_C}{Z} \right) \leq (S_h + S_A)$$

응력요건 관련 M_A , M_B , M_C 는 Table 4에서와 같이 다양한 응력해석 결과로부터 조건별 최대값을 추출하여 활용하였으며, 결과는 Table 5에 제시한 바와 같이 지속하중, 일시적하중, 열팽창하중 판정기준을 모두 만족하는 것으로 평가되었다. 한편, Bechtel(BE.)사는 faulted condition으로 수직현상에 영향을 받는 영역을 대상으로 수기 계산한 최대 압력하중과 자중에 의한 하중 합과 $2.4 \times S_h$ 와의 비를 수기 계산 결과로 제시하고 있는데, 이는 현행 Level D에 대응하는 것이다. 본 과정에 공칭두께(t_{nom})를 예상 최소두께로 치환한 계산 결과 faulted condition의 응력요건이 만족하는 것으로 평가되었다.

Table 4. Moment data for stress criteria evaluation(BE.)

M_A	M_b	M_c	M_c	M_A (FT-LBS)	M_A (IN-LBS)	Load Case
1	-	30	18,242	18,242	218,904	WT01
M_A+M_b	M_b	M_c	M_c	M_A+M_b [FT-LB]	M_A+M_b [IN-LB]	Load Case
1	395	280	4,985	5,008	60,101	SEIS01
2	908	643	11,406	11,520	138,238	SEIS11
3	790	560	9,970	10,017	120,203	SEIS03
4	1,699	1,797	12,206	14,420	173,036	SEIS01
5	1,106	789	14,387	14,451	173,412	SEIS01
6	2,544	1,815	33,090	33,237	398,947	SEIS11
7	2,212	1,578	28,774	28,902	346,824	SEIS03
M_C	M_b	M_c	M_c	M_C [FT-LB]	M_C [IN-LB]	Load Case
1	0	196	-3,141	3,147	37,765	THRM03
2	0	288	-4,563	4,572	54,865	THRM04
3	0	15	0	15	180	THRM07
4	0	288	0	288	3,456	THRM13
5	0	15	-4,563	4,563	54,756	THRM14
6	0	331	0	331	3,972	THRM23
7	0	18	-5,248	5,248	62,976	THRM24
8	0	196	-3,141	3,147	37,765	THRM03
9	0	288	-4,563	4,572	54,665	THRM04
10	0	15	0	15	180	THRM07
11	0	288	0	288	3,456	THRM13

Table 5. Stress criteria evaluation result(W.1978 edition)

Stress Criteria 평가식 Moment 입력자료							Stress Criteria 평가식 입력자료	
	M_A	M_b	M_c	M_c	M_A [lb-ft]	M_b [lb-in]	Input Items	3AE022P01
3AE022P01	300	0	30	18,242	18,242	218,904	field	Main
	M_b	M_c	M_c	M_c	M_b [lb-ft]	M_b [lb-in]	P	1,185
	300	2,544	1,815	33,090	33,237	398,847	M_A	218,904
	M_c	M_b	M_c	M_c	M_c [lb-ft]	M_c [lb-in]	M_b	398,847
85	0	18	-5,248	5,248	62,976	M_c	62,976	
$M_j = (M_e^2 + M_b^2 + M_c^2)^{1/2}, j=A,B,C$					$z = \pi(D_o^3 - D_i^3) / (32D_o)$		Z	149,431
							t_b	0.655
							D_o	18,000
							i	1,900
Stress Criteria 평가결과				Stress Criteria 평가기준				
Stress Criteria	3AE022P01			Stress Criteria	3AE022P01			
S_{SL}	10,224			S_{SL}	15,000			
S_{OL}	14,027			S_{OL}	18,000			
S_E	801			S_E	22,500			
S_{TE}	11,024			S_{TE}	37,500			
							평가기준 입력	3AE022P01
Stress Criteria 평가판정				S_c				15,000
Stress Criteria	3AE022P01			S_b	15,000			
S_{SL}	만족			f	1			
S_{OL}	만족			S_A	22,500			
S_E	만족			계절	SA106 Gr.B			
S_{TE}	만족							

2.4.3 CE형 원전, 비안전등급 배관

C발전소의 비안전등급 배관은 1994 Add. edition ASME B31.1에 따라 설계되었으며, Sargent & Lundy Engineering사 PIPSYS 프로그램으로 응력해석 되었다.

대상 배관의 예상 최소두께(1.214 in)가 $0.875 \times t_{nom}$ (1.313 in) 이하로 계산되어 Fig 2(a)에 제시된 기준에 따라 Fig. 2(b)에 제시된 공학적 평가에 진입하였다. 예상 최소두께가 $0.9 \times t_{min}$ (1.166 in) 이상의 요건을 만족하고 있어 아래와 같이 ASME B31.1에 제시된 지속하중, 일시적하중, 열팽창하중 판정기준에 대한 예상 최소두께에서의 응력요건 만족 여부를 평가하였다.

$$S_{SL} = \frac{PD_o}{4t_p} + \frac{0.75iM_A}{Z} \leq 1.0S_h$$

$$S_{OL} = \frac{PD_o}{4t_p} + \frac{0.75iM_A}{Z} + \frac{0.75iM_B}{Z} \leq 1.2S_h$$

$$S_E = \frac{iM_C}{Z} \leq S_A + f(S_h - S_L)$$

응력요건 관련 M_A , M_B , M_C 는 Table 6에서와 같이 다양한 응력해석 결과로부터 조건별 최대값을 추출하여 활용하였으며, 결과는 Table 7에 제시한 바와 같이 지속하중, 일시적하중, 열팽창하중 판정기준을 모두 만족하는 것으로 평가되었다.

Table 6. Moment data for stress criteria evaluation(S&L)

SUMMARY OF INDIVIDUAL LOADS (FT-LBS)							
LOAD TITLE	LOAD ID	FX	FY	FZ	MX	MY	MZ
DEAD WEIGHT	WG02	13	-9,183	134	38,623	-1,538	5,368
THERMAL	THR1	-4,536	-484	-8,182	2,853	63,308	-3,561
THERMAL	THR2	-7,823	2,473	-17,377	22,232	104,187	-12,566
THERMAL	THR3	-7,931	2,398	-13,770	22,060	108,853	-10,511
THERMAL	THR4	-7,931	2,398	-13,770	22,060	108,852	-10,511
THERMAL	THR5	-7,931	2,398	-13,770	22,061	108,854	-10,511
THERMAL	THR6	-7,950	2,397	-13,647	22,135	109,115	-10,520
THERMAL	THR7	-7,853	2,370	-13,885	21,818	107,767	-10,457
THERMAL	THR8	-8,144	2,273	-15,614	22,548	111,803	-10,601
THERMAL	THR9	-8,806	-1,001	-17,771	7,148	122,488	-6,088
THERMAL	TH10	-7,443	1,834	-12,042	17,000	102,259	-9,180
THERMAL	TH11	-5,686	-800	-12,884	4,081	79,283	-4,239
PUMP TRIP	TR08	5,055	8,991	15,502	49,041	28,414	11,610

Table 7. Stress criteria evaluation result(1994 Add. edition)

Stress Criteria 평가식 Moment 입력자료							Stress Criteria 평가식 입력자료	
FT006P04	M_x	M_y	M_z	M_x	M_y [lb-ft]	M_z [lb-in]	Input Items	FT006P04
	1,187	38,623	-1,538	5,368	39,025	468,295	field	Main
	M_b	M_c	M_d	M_e	M_b [lb-ft]	M_c [lb-in]	P	2,050
	1,187	49,041	28,414	11,610	57,855	694,256	M_x	468,295
	M_c	M_d	M_e	M_c	M_c [lb-ft]	M_c [lb-in]	M_d	694,256
1,187	7,148	122,488	-6,088	122,847	1,474,168	M_z	1,474,168	
$M_j = (M_x^2 + M_y^2 + M_z^2)^{0.5}, j=A,B,C$							Z	317,389
							t_c	1,214
							D_o	20,000
							i	1,900
Stress Criteria 평가기준				Stress Criteria 평가결과				
Stress Criteria	FT006P04			Stress Criteria	FT006P04			
S_{St}	15,000			S_{St}	10,546			
S_{ol}	18,000			S_{ol}	13,663			
S_e	22,500			S_e	8,825			
평가기준 입력	FT006P04			Stress Criteria 평가관정	FT006P04			
S_c	15,000			Stress Criteria	FT006P04			
S_b	15,000			S_{St}	만족			
f	1			S_{ol}	만족			
S_A	22,500			S_e	만족			
재료	A106 Gr.B							

2.5 감육배관 건전성평가 최신 기술 검토

2.5.1 EPRI 제시 사용적합성평가

현재 국내 원전에서는 ASME CC N-597-2에 근거한 배관 건전성평가 방식을 적용하고 있다. 한편 2009년에 발행된 EPRI 보고서(7)에는 기존의 방식을 개선한 새로운 건전성평가 방식을 제시하고 있다. EPRI가 본 보고서를 발간하게 된 배경은 아래와 같으며, 목적은 응력 재해석에 따른 문제점과 불필요한 정비를 예방하기 위함이다. 안전관련 배관에 대하여 설계당시의 수식과 허용응력을 적용하는 것이 외에 NRC가 승인하고 있는 방법이 없으며, 재료에 대한 허용응력이 증가한 것은 비교적 최근(1999 Add.)임에 따라 EPRI는 증가된 신규 허용응력을 적용할 수 있도록 2009년 초에 ASME Code 위원회에 요청하였고 ASME National Board는 이를 승인하였다. EPRI가 보고서에서 제시하고 있는 건전성평가 방식은 Fig. 3에서와 같이 ① ASME FFS-1/API 579 방식, ② Original code equations with reduced wall

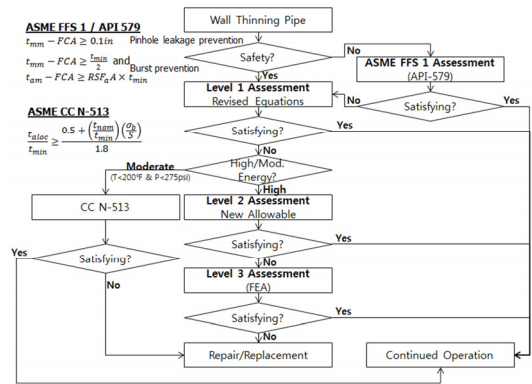


Fig. 3 Fitness-for-service assessment process (EPRI)

thickness 방식(Level 1), ③ ASME XI CC N-513 방식, ④ New Allowable stress application 방식(Level 2) 등을 상황에 따라 적용할 수 있도록 하는 것이다. 상기 방식들 중 감육 부위의 최초 설계식과 최초 허용응력을 기반으로 하는 Original code equations with reduced wall thickness 방식(Level 1 Assessment)의 평가 단계는 다음과 같다.

- 단계 1 : 두께 프로파일링 (Wall Thickness Profile)
 - 감육 위치와 범위를 결정한다.
 - 감육 부위의 벽두께를 측정한다.
 - 감육 부위에서의 최소 측정두께(t_{min})를 기록한다.
 - 현 검사시점으로부터 차기 검사시점까지의 감육량(FCA , future corrosion allowance)을 결정한다.
- 단계 2 : 원 설계해석 (Original Design Analysis)
 - 해당 배관라인의 응력해석보고서를 찾는다.
 - 감육 부위의 최대 응력을 찾는다.
- 단계 3 : 개정 수식(Revised Equations)
 - 원주 방향 전체가 ($t_{min} - FCA$)로 균일하게 감육된 것으로 가정한 stress intensification i , stress indices B_1, B_2 , section modulus Z 를 계산한다.
 - 감육된 상태에서의 i, B_1, B_2, Z 로부터 증가된 corroded code stress(sustained and occasional, design, level A, B, C, D)를 계산한다.
 - 증가된 corroded code stress와 original allowable design stress를 비교한다.
- 단계 4 : 응력 비교(Compare to Allowable Stress)
 - allowable design stresses가 충족되지 않는다면,

최초 설계식과 new increased allowable stress를 비교하는 단계로 진입한다.

- 단계 5 : 추가 점검(Additional Checks)
 - 감육이 기기나 노즐에서 발생하였다면 increased corroded code stress와 nozzle limit stress를 비교한다.
 - 감육이 용접부착 부위(welded attachment)에서 발생하였다면 원주 방향 전체의 두께를 (t_{mm} -FCA)로 가정 한 후 국부 응력을 계산한다.
 - $D/(t_{mm} - FCA)$ 가 100을 초과한다면 배관과 지지대가 접촉하는 부위에서의 buckling을 방지하기 위해 국부 응력을 계산한다.
 - 감육된 배관 상태에 따른 support와 brace에 미치는 하중의 재평가는 필요하지 않다.
 - 감육된 배관 상태에 따른 배관 움직임의 재평가는 필요하지 않다.

2.5.2 비교 검토 및 적용 방안

상기 2.5.1항에 기술한 EPRI 제시 사용적합성평가 방식 중 설계당시 응력해석 기술기준 및 수식에 차기 검사시점 예상 최소두께($t_{mm} - FCA = t_p$)를 가정하여 계산한 증가된 corroded code stress와 original allowable design stress를 비교하는 Level 1 Assessment의 단계 1, 2, 3은 현행 국내 원전에 적용하고 있는 해석적 건전성평가 방법과 동일한 것으로 판단된다. 다만 단계 4에서의 최초 설계식과 new increased allowable stress를 비교하는 단계(Level 2 assessment) 진입의 경우, 현행 배관에의 적용을 위해서는 추가 기술검토가 필요한 것으로 판단되며, 1999 Add. edition 이후의 기술규격에 따라 제작되어 설치되는 배관에는 적용이 가능할 것으로 사료된다. 비안전등급 배관에 대해 제시된 ASME FFS-1/API 579 방식의 경우, 누설방지 위한 $t_{mm} - FCA \geq 0.1in$ 및 파열방지 위한 $t_{mm} - FCA(=t_p) \geq t_{min}/2$ 보다 현행 배관감육 관리 프로그램에서의 절대교체기준($0.2tnom$) 적용과 예상 최소두께가 최소요구두께 이하로 예상시 건전성평가로의 진입이 더욱 보수적인 관리 기준인 것으로 사료된다.

2.6 한계하중법 기반 감육배관 건전성평가

ASME CC N-597-2에서의 공학적 평가는 대상 배관의 응력해석보고서를 기반으로 수행되나 가동 년수가 오래되었거나 비안전등급 배관의 경우 응력해석보고서가 존재하지 않아 CC N-597-2에서의 응력

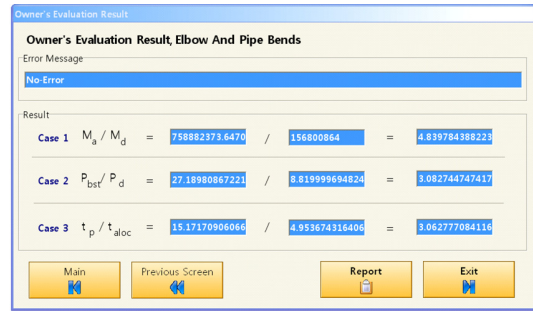


Fig. 4 Result of owner's evaluation based on LLE

요건 만족 여부 평가가 불가능한 경우가 있다. 이러한 경우의 건전성평가를 위하여 국내 원전에서는 CC N-597-2 3223에 기술된 사용자 대체평가(alternative evaluation method specified by the owner)의 일환으로 한계하중법에 기반한 건전성평가⁽⁸⁾(Limit Load Evaluation) 로직과 전산 프로그램을 개발하여 운용하고 있다.

한계하중법 기반 건전성평가(LLE) 전산 프로그램은 Fig. 4에서와 같이 예상 최소두께에서 ①내압과 굽힘모멘트가 배관에 작용하는 경우의 허용모멘트와 설계모멘트의 비(M_a/M_d), ②모멘트가 작용하지 않고 내압만 배관에 작용하는 경우의 과열압력⁽⁹⁾과 설계압력의 비(P_{bst}/P_d), ③ 정해진 설계압력과 설계모멘트에서 파손이 발생하지 않을 최소허용두께와 차주기 예상 최소두께와의 비(t_p/t_{aloc}) 등을 결과로 출력하는데, 각 비가 1 이상이면 차기 검사주기까지 배관파단은 발생하지 않는 것으로 결론 내린다.

3. 감육배관 보수

3.1 감육배관 보수 관련 기술기준

배관에 대해 수행한 상기 건전성평가 결과가 기준을 만족하지 못할 경우, 또는 정상운전 중 누설이 발생한 경우 적용할 수 있는 압력기기 및 배관의 정비와 관련한 기술기준에는 KEPIC MMR⁽¹⁰⁾(ASEM PCC-2)가 있으며 13가지의 용접보수와 12가지의 기계적 정비 방법을 제시하고 있다.

보수용접과 관련된 기술기준에는 KEPIC MMR (ASME PCC-2) 외에 ASME CC N-561-2⁽¹¹⁾, ASME CC N-562-2⁽¹²⁾, ASME CC N-661-2⁽¹³⁾ 등이 있으며, 주요 내용은 다음과 같다.

- KEPIC MMR : 일반감육, 국부감육, 접부식, 흙,

기포, 층상결합, 원주방향 균열, 종방향 균열 등의 8개 손상에 대하여 용접보수에 적용할 수 있는 기술로서 13가지 방법을 제시하고 있다. 그 중 국내 가동원전의 배관감육 손상이 적용해 볼 수 있는 방법은 ①외부 보수용접, ②필릿 용접의 두 가지 방법이다. KEPIC MMR에는 본 방법에 대한 설명과 제한사항, 설계, 제작, 검사, 시험방법을 언급하고 있다.

- ASME PCC-2 : 건설 후 원전 압력기기의 보수와 관련된 기술을 제시한 문서이다. 본 문서에는 배관 내면의 감육 부분을 배관 외면 오버레이 용접에 의해 보수하는 방법이 제시되어 있으며, 상세 설계 및 평가 내용은 기 서술한 Code Case의 내용과 거의 흡사하다.
- ASME CC N-561-2 : Class 2 및 Class 3 고에너지 배관 계통의 탄소강 배관에 대하여 교체 없이 두께를 보상할 수 있는 대체 요건을 제시하고 있다. 균열 부식을 제외한 배관 내부의 국부부식 및 감육이 발생된 부위에 대하여 배관 외벽에 원형 및 타원형 또는 직사각형의 오버레이 용접기법 적용이 가능하며, 설계요건에서부터 검사, 설치 및 제한사항 등에 대한 요건을 제시하고 있다.
- ASME CC N-562-2 : Class 3의 Moderate Energy (최대 운전 조건 200°F, 276 psig 이하) 탄소강 배관에 대하여 교체 없이 두께를 보상할 수 있는 대체 요건을 제시하고 있는 대체 요건을 제시하고 있으며, 내용은 CC N-561-2와 유사하다.
- ASME CC N-661-2 : Class 2 & 3의 원수(raw water) 탄소강 배관에 대하여 교체 없이 두께를 보상할 수 있는 대체 요건을 제시하고 있으며, 내용은 CC N-561-2와 유사하다.

3.2 US NRC의 용접보수 관련 Code Cases 승인

US NRC에서는 그 동안 용접보수와 관련한 CC N-561-1, N-562-1 및 N-661-1을 공식적으로 승인하지 않았으나 미국의 일부 발전소에서는 규제기관 승인 하에 용접보수를 한시적으로 적용해 온 사례가 있다. 그러나 2014년에 발행된 RG 1.147 Rev.17⁽¹⁴⁾을 통하여 CC N-561-2, N-562-2 및 N-661-2를 모두 조건부 승인하였고, 손상원인이 확인되었다면 영구사용도 가능한 것으로 명시하고 있다. 세 가지 Code Case에 대한 조건부 내용은 동일하며, 주요 내용은

다음과 같다.

- Paragraph 5(b) : Wet surface repair인 경우, 오버레이는 차기 계획예방정비 시점까지만 허용함
- Paragraph 7(c) : 손상원인이 확인되지 않을 경우, 정비는 차기 계획예방정비 시점까지만 허용함. 역으로 손상원인이 확인되었다면 영구사용 가능
- 오버레이 용접이 적용된 부위는 초음파검사로 Crack-like Defects가 없다는 것을 입증해야 함
- Electrode 직경보다 작은 두께를 가진 배관은 용접 전 감압 필요

3.3 용접보수에 따른 열영향 시험 및 해석

ASME CC N-561-2, N-562-2, N-661-2에 기준한 용접보수에 따른 열영향을 검토하기 위하여 국내 원전 2차계통에 가장 많이 사용되고 있는 SA 106 Gr. B와 SA335 P22 배관을 대상으로 Fig. 5에서와 같이 맞대기용접과 오버레이용접을 적용한 기계적 시험과 이를 모사한 유한요소해석 결과, 두 재료 모두 ASME Sec. II에 제시된 최소 항복강도 및 인장강도를 만족하고 있음을 확인하였다.



Fig. 5 Butt and overlay welding specimen

3.4 국내 원전 적용 방안

ASME CC N-561-2, N-562-2, N-661-2 등의 용접보수 관련 기준들에 대한 US NRC RG 1.147 Rev.17에서의 조건부 승인 내용과 용접보수에 따른 열영향 시험 및 해석 결과에 기반하여 국내 원전에서도 손상 원인이 충분히 파악된 배관에 대해 용접 절차의 신뢰성을 확보한다는 전제하에 용접보수를 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 감육배관의 유동가속부식 저항성 재질로의 교체

4.1 재질변경 타당성 및 용접후열처리

유동가속부식에 의해 감육이 발생하고 있는 탄소강

배관은 중장기적 감육관리 측면에서 탄소강으로의 교체보다는 유동가속부식에 저항성을 가진 저합금강으로 변경하는 것이 타당하다. 감육된 엘보우 등 단품 또는 배관라인 전체의 교체를 고려할 수 있는데 이때 수행되는 맞대기 용접 형태는 Fig. 6에 제시한 바와 같으며, 해당 배관이 안전등급 배관인 경우 용접후열처리(PWHT)와 모의-용접후열처리(S-PWHT) 기술기준을, 비안전등급 배관인 경우 용접후열처리 기술기준을 각각 준수해야 한다.

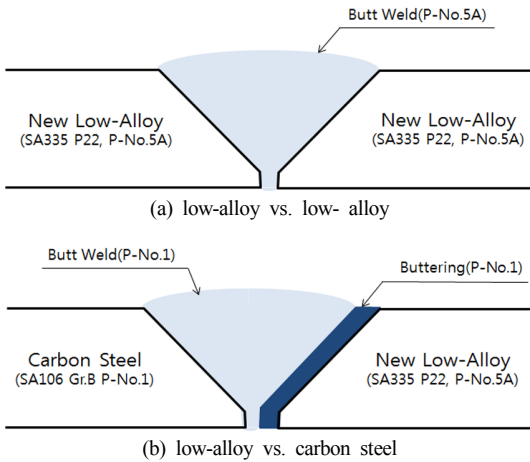


Fig. 6 Scheme of pipe butt weld

4.2 안전등급 배관

Fig. 6(a)에서와 같이 신규 저합금강 배관 간의 용접시 저합금강 모재(P-5A)에 대해서는 KEPIC MNC/MND 2211에 따라 용접부와 동일한 방법으로 모의-후열처리 된 시험쿠폰으로부터 인장 및 충격 시험되고 재료시험성적서(CMTR)에 기록되어야 하며, 시공용접부 용접재료(P-5A)에 대해서는 MNC/MND 2431.1(3)에 따라 용접부와 동일한 방법으로 모의-후열처리 된 용접 시험쿠폰으로부터 인장 및 충격 시험되고 재료시험성적서에 기록되어야 한다. 저합금강과 저합금강 간의 용접이음부에 대해 MNC/MND 4622.1에 규정된 P-5A 온도범위(677~760°C)에서 규정된 시간(1hr/in) 동안 용접후열처리 되어야 한다.

Fig. 6(b)에서와 같이 기존 탄소강 배관과 신규 저합금강 배관 간의 용접시 buttering용 용접재료(P-1)에 대해서는 MNC/MND 4622.5 및 MNC/MND 2431.1(3)에 따라 P-5A 온도범위에서 모의-후열처리 된 용접 시험쿠폰으로부터 인장 및 충격 시험되고

재료시험성적서에 기록되어야 한다. 반면 시공용 용접재료(P-1)에 대해서는 MNC/ MND 2211에 따라 호칭두께가 2in 이하인 경우 모의-용접후열처리는 면제된다. 저합금강 모재와 buttering간 용접부(P-5A/P-1)에 대해서는 MNC/MND 4622.5에 따라 P-5A 온도범위에서 규정된 시간(1hr/in) 동안 용접후열처리 되어야 한다. 반면 buttering과 기존 탄소강 배관과의 시공 용접부(P-1/P-1)는 MNC/MND 4622.1에 규정된 P-1 온도범위(593~677°C)에서 규정된 시간 동안 용접후열처리 되어야 하나 MNC/ MND 4622.7에 따라 용접후열처리가 면제될 수 있다.

4.3 비안전등급 배관

비안전등급 배관에 대해서는 KEPIC MGE 132.1 규정에 따라 P-5A 온도범위(700~760°C) 및 P-1 온도범위(600~650°C) 내에서 용접후열처리 되어야 하며, P-번호가 다른 두 부품을 용접으로 이음 할 때 용접후열처리는 두 부품 중 더 높은 쪽의 용접후열처리 온도를 따라야 한다. 비안전 등급 재료에 대한 모의-용접후열처리 기술기준은 제시되어 있지 않다.

5. 결론

본 논문에서는 감육배관 건전성평가에 관련한 EPRI 최신 기술에 대한 비교 검토를 통해 국내 원전 배관감육 관리 프로그램에서 운용중인 ASME CC N-597-2 기반 해석적 건전성평가 방법의 보수성과 타당성을 확인하였다.

US NRC의 감육배관 용접보수에 관한 기술기준에 대한 승인 내용에 대한 검토와 용접보수에 따른 열영향 분석 시험 및 해석을 통해 용접 절차의 신뢰성 확보를 전제로 용접보수를 적용할 수 있음도 확인하였다.

또한, 탄소강과 저합금강 배관 간의 용접시 적용되어야 할 배관 등급별 모의-용접후열처리 및 용접후열처리와 관련한 기술기준에 대한 검토를 통해 유동가속부식에 의해 과도하게 감육된 배관을 저합금강으로 변경할 수 있는 기술적 기반을 확보하였다.

상기의 건전성평가, 보수, 재질변경 등과 관련한 최신 기술 및 기술기준과 규제요건의 검토 결과를 적절히 활용하면 감육이 거의 없는 배관에 대한 불필요한 반복검사를 줄이고 실질적으로 감육이 발생할 가능성이 있는 배관을 신규로 검사할 수 있도록

하는 등 현행 감육배관 관리 프로그램의 신뢰성과 효율성이 크게 제고될 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) EPRI, 1996, "Flow Accelerated Corrosion in Power Plants," *TR-106611-R1*
- (2) EPRI, 2006, "Recommendations for an Effective FAC Program," *NSAC-202L-R3*
- (3) ASME, 2003, "Requirements for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning," *ASME B&PV CC N597-2*
- (4) KEPIC, 2007, "General Mechanical Components – Piping," MNC(ASME NC 2005 Addenda), Korea Electric Association
- (5) KEPIC, 2007, "General Mechanical Components – Piping," MND(ASME NC 2004 Edition), Korea Electric Association
- (6) KEPIC, 2007, "General Mechanical Components – Piping," MGE(ASME B31.1 2004 Edition), Korea Electric Association
- (7) EPRI, 2009, "Application of the New ASME Design Margin to the Assessment of FAC-Induced Wall Thinning in Piping Systems," *TR-1018467*
- (8) Lee, S. H., Lee, J. K and Park, C. Y., 2010, "Behavior of Elastic and Plastic Limit Load of Thinned Elbow in Real Scale Failure Test under Combined Load," *Trans. of KSME(A)*, Vol. 34, No. 9, pp. 1293~1298.
- (9) Kim, J. W., Lee, S. H. and Park, C. Y., 2009, "Experimental evaluation of the effect of local wall thinning on the failure pressure of elbows," *Nucl. Eng. & Design*, 239, pp. 2737~2746
- (10) KEPIC, 2011, "Repair of Pressure Equipment and Piping," MMR (ASME PCC-2-2008 Edition), Korea Electric Association
- (11) ASME, 2007, "Alternative Requirements for WallThickness Restoration of Class 2 and High EnergyClass 3 Carbon Steel Piping," *ASME B&PV CC N561-1*
- (12) ASME, 2007, "Alternative Requirements for WallThickness Restoration of Class 3 Moderate CarbonSteel Piping," *ASME B&PV CC N561-2*
- (13) ASME, 2007, "Alternative Requirements for WallThickness Restoration of Class 2 and 3 Carbon SteelPiping for Raw Water Service," *CC N-661-2*
- (14) USNRC, 2014, "Inservice Inspection Code CaseAcceptability, ASME B&PV Sec. XI, Div.1," *Reg. Guide 1.147*