

감육배관의 구조건전성 및 안전여유도 평가 기술

이성호[†]·김태룡^{*}·김범년^{**}

Structural Integrity and Safety Margin Evaluation for Thinned Pipe Component

Sung-Ho Lee, Tae-Ryong Kim and Bum-Nyun Kim

Key Words: FAC(유체가속부식), Structural Integrity(구조건전성), TPMP(감육배관관리프로그램)

Abstract

Wall thinning of carbon steel pipe components due to Flow-Accelerated Corrosion (FAC) is one of the most serious threats to the integrity of steam cycle piping systems in Nuclear Power Plants (NPP). Since the mid-1990s, secondary side piping systems in Korean NPPs have experienced wall thinning, leakages and ruptures caused by FAC. Korea Electric power Research Institute (KEPRI) and Korea Hydro & Nuclear Power Co., LTD. (KHNP) have conducted a study to develop the methodology for systematic pipe management and established the Korean Thinned Pipe Management Program (TPMP). To effectively maintain the integrity of piping system, FAC engineer should understand the criterions of the structural integrity evaluation and the safety margin assessment for the thinned pipe component. This paper describes the technical items of TPMP, and shows the example of the integrity evaluation and safety margin assessment for three thinned pipe component of a NPP.

기호설명

t_{nom}	: 공칭두께
t_{min}	: 설계기준 최소요구두께
t_{meas}	: 현 검사에서의 측정두께
σ_y	: 항복강도
σ_u	: 극한인장강도
M_d	: 최대 설계 굽힘 모멘트
M_a	: 감육배관 최대 허용 굽힘 모멘트
P_d	: 설계압력
P_{bst}	: 감육배관 파열압력
t_p	: 차기 검사에서의 예상 최소두께
t_{aloc}	: 국부허용두께

$L_m(a)$: t_{min} 이하로 감육된 축방향 길이
$L_m(t)$: t_{min} 이하로 감육된 원주방향 길이
L_m	: t_{min} 이하로 감육된 최대 길이

1. 서 론

원전 2차측 탄소강배관 계통에서의 FAC에 기인한 감육 손상은 1980년대 이래 전 세계적으로 광범위하게 보고 되고 있다^{[1][2]}.

국내 원전의 경우 1999년 고리3,4호기 및 영광 1,2호기의 주급수 배관계통에서의 감육 사례를 대표로 원전 전반에 걸쳐 발생하고 있으며 이러한 감육 손상은 가동연수 증가에 따라 점차 증가할 것으로 예상된다. 이러한 시점에서 원전 2차측 배관계통에 대한 감육 대처 방안 확보는 안정적인 전력 공급 차원에서 중대한 사안이다. 이에 감육배관을 효과적으로 관리하고 건전성을 확보하기 위한 프로그램을 개발하여 전 원전에 적용하고 있다^[3].

[†] 한전전력연구원

E-mail : sungho@kepri.re.kr

TEL : (042)865-5919 FAX : (042)865-5504

^{*} 한전전력연구원

^{**}한전전력연구원

본고에서 감육배관 관리 프로그램의 개요를 제시하였으며, 모 원전의 두께검사에서 관측된 감육배관에 대하여 공학적 평가 기법을 적용한 구조건전성 및 안전여유도에 대한 상세 평가 결과를 제시하였다.

2. 감육배관 관리 프로그램

2.1 감육배관 관리 프로그램의 요소 기술

국내 원전에서 활용하고 있는 감육배관 관리 프로그램은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 크게 다섯 가지의 기본 요소 기술들로 구성된다.

첫째 대상호기 배관계통의 설계자료와 열수력·수화학 운전이력 등의 데이터베이스를 구축하고 이를 기반으로 FAC 측면에서의 모델해석을 수행한 후 감육관리 단위인 컴포넌트별 감육속도와 잔여수명을 도출하는 것이다.

둘째는 감육속도와 잔여수명에 근거하여 감육감시 우선순위를 설정함으로써 두께 실측과 건전성 확인이 필요한 검사대상을 결정하는 것이다.

셋째는 검사 재현성을 확보할 수 있는 수준의 기술기준에 따라 두께데이터를 확보하는 것이다.

넷째는 측정된 두께데이터에 근거하여 컴포넌트의 감육정도와 잔여수명을 평가하는 것이다.

다섯째는 건전성 및 안전여유도를 평가하여 교체·보수 또는 차기 검사주기설정 등의 후속관리 방안을 결정하는 것이다.

2.2 감육배관 관리 기술의 표준화

'96년 8월부터 '99년 8월까지 고리 3,4호기 2차측 복수계통, 주급수계통, 주증기계통, 터빈추기계통, 증기발생기취출수계통 등을 대상으로 호기별 6,300여 개의 배관 컴포넌트(직관, 엘보, 티, 리듀서 등)에 대한 설계 및 운전 자료를 데이터베이스화한 후 감육정도를 예측하였으며 현재까지 각 4회의 계획예방정비에 걸쳐 두께데이터를 취득하여 건전성 확보 여부를 평가하였다. 동 과정에서 설계기준 최소요구두께를 만족하지 못하는 주급수계통과 터빈추기계통 배관기기를 찾아내어 교체함으로써 배관계통 건전성과 발전소 안전성을 확보한 바 있다. 고리 제2발전소에의 적용에 이어 '00년 4월부터 '03년 4월까지 호기별, 발전소별 다양한 계통 구성과 설계기준들을 망라하는 '국내 원전 감육배관 관리 기술체계 및 기

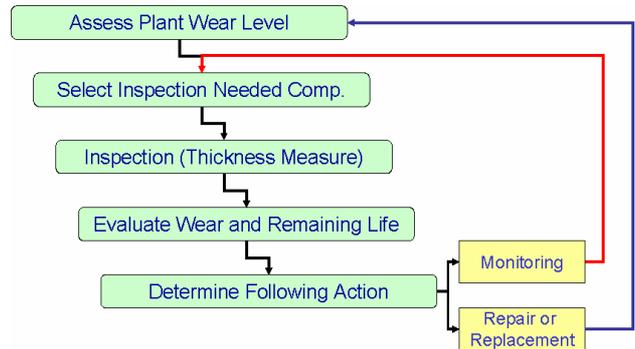


Fig. 1 Technical activities of TPMP

술기준'을 표준화하고 이를 14개 원전에 확대 적용 하였다. 동 과정에서 원전 탄소강배관 감육관리 지침을 포함한 4건의 배관관리 관련 지침서를 작성하여 활용하였으며 '02년 9월에는 이를 표준기술행정절차서로 제정·공포함으로써 일관된 기술기준 하에서 감육배관을 관리토록 하였다.

2.3 Chexal-Horowitz FAC 모델 활용

국내 원전 2차계통의 경우 원자로형·용량·설계자 등에 따라 증기사이클을 이루는 주요기기의 구성뿐만 아니라 배관재의 재질, 열수력·수화학 운전환경 등이 매우 다양하므로 실제 감육이 발생하여 감육관리를 필요로 하는 위치가 호기별로 상이할 수밖에 없으며 그 위치를 관리경험과 공학적 판단에 따라 선정하기에는 한계가 있다. 따라서 본 감육배관 관리 프로그램에서는 Chexal-Horowitz FAC 모델을 활용하여 16개 원전에 대한 감육해석을 수행하였고 이로부터 감육 발생 가능한 위치와 집중 감육관리 필요 정도가 증기사이클 구성 형태에 따라 또한 수처리 방식에 따라 다양하게 나타나고 있음을 확인하였다

3. 구조건전성 및 안전여유도 평가

3.1 배경

모 원전 2차측 탄소강배관에 대한 최근 두께검사 및 감육평가에서의 설계기준 최소요구두께를 만족하지 못하는 배관 컴포넌트 3개소에 대해 ASME Code Case N-597^[4]을 적용한 공학적 평가를 수행함으로써 감육배관의 구조건전성 및 안전여유도를 확인하고자 하였다.

3.2 감육배관 평가 기준

두께에 기준한 감육배관 건전성 평가는 다음의 순서를 따랐다.

첫째 현 검사에서의 측정두께(t_{meas})가 설계기준 최소요구두께(t_{min})를 만족하고 있는지 확인한다 (Fig. 2).

둘째 이를 만족하지 못할 경우 감육속도와 차기 검사에서의 예상 두께(t_p)를 계산한 후 이것이 설계기준 최소요구두께의 90% ($0.9t_{min}$) 이상을 만족하는지 확인한다(Fig. 3).

셋째 이를 만족하지 못할 경우 감육부의 크기 및 형상을 고려한 공학적 평가를 통해 구조건전성 및 안전여유도를 확인한다(Fig. 3).

3.2 구조건전성 및 안전여유도 평가

평가대상 3개 배관 컴포넌트에 대해 ASME CC N-597에서 제시하고 있는 방법과 공학적 평가 방법을 활용하여 해당 배관 컴포넌트의 건전성과 안전여유도를 평가하였다. 3개 배관 컴포넌트 모두 최소측정두께를 나타내는 영역이 직관부이므로 'Straight Pipe'에 대해 평가하였으며 각 배관 컴포넌트의 현재상태에 대한 평가에서 Table 2에 제시한 값을 입력변수로 활용하였다.

현재 주기의 두께데이터에 기초한 평가대상 배관 컴포넌트 3개소에 대한 건전성 및 안전여유도 평가 결과를 종합하여 Table 2에 나타내었으며 배관 컴포넌트별 평가결과에 다음과 같다.

3.2.1 Case 1(Tee)

본 배관 컴포넌트의 D/S Ext. 영역에서는 실지 감육이 진행 중인 것으로 판단되며, Table 2에 나타난 바와 같이 차기 검사에서의 예상 최소두께 (t_p)가 $0.875t_{nom}$ 미만으로 평가되어 공학적 평가를 수행하였다. 공학적 평가에서 두께측면에서의 안전여유도(t_p/t_{aloc})가 1.99로 평가되어 차기 검사 시점에도 충분히 안전성을 확보할 것으로 평가되었다. 동 영역에서 최소측정두께를 나타내는 그리드는 감육이 진행 중인 영역에 속해있기는 하지만 주변 그리드에서의 감육 경향을 고려할 때 동 지점에서 특히 심각한 감육이 발생했다고 보기 어려웠다. 따라서 최소측정두께를 나타내는 지점을 보수하였을 경우의 안전여유도를 평가하였는데 두께측면에서의 안전여유도(t_p/t_{aloc})가 3.12로 평가되어 보수 전에 비하여 약 1.6배의 추가 안전여유도를 확보할 수 있는 것으로 평가되었다.

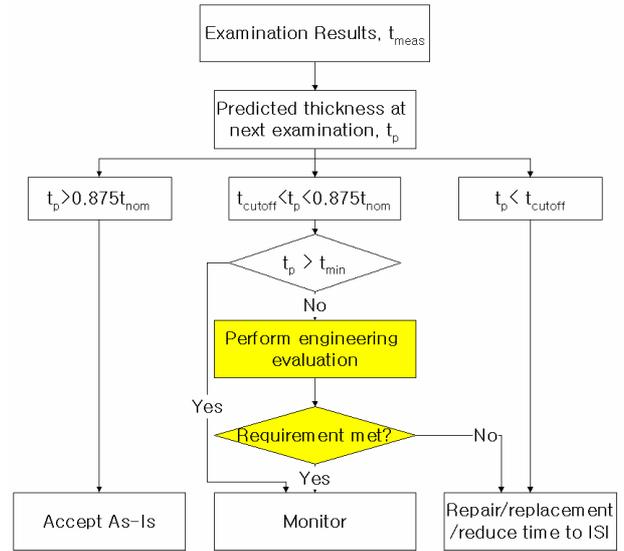


Fig. 2 Scheme of thinned pipe assessment in ASME Code Case N-577

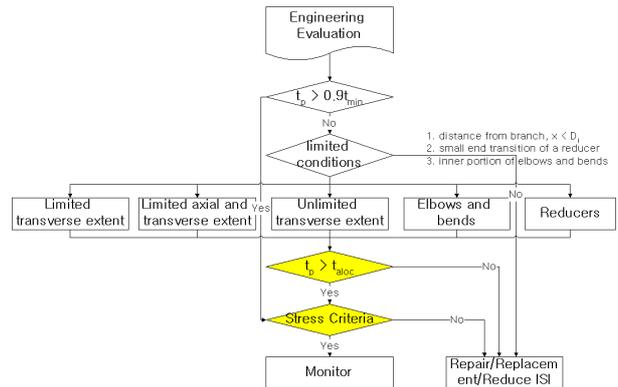


Fig. 3 Scheme of engineering evaluation in ASME Code Case N-597

3.2.2 Case 2(Elbow)

본 배관 컴포넌트의 D/S Ext. 영역에서는 실지 감육이 진행 중인 것으로 판단되며, Table 2에 나타난 바와 같이 차기 검사에서의 예상 최소두께 (t_p)가 $0.875t_{nom}$ 미만으로 평가되어 공학적 평가를 수행하였다. 공학적 평가에서 두께측면에서의 안전여유도(t_p/t_{aloc})가 1.86으로 평가되어 차기 검사 시점에서도 충분히 안전성을 확보할 것으로 평가되었다. 최소측정두께 지점에 대한 보수를 수행할 경우라도 두께측면에서의 안전여유도가 2.22로 미약한 증가를 보일 것이므로 보수의 의미는 없을 것으로 평가되었다.

Table 1 Input data for thinned pipe evaluation

Items	Case 1(Tee)		Case 2(Elbow)		Case 3(Expander)	
	English	SI	English	SI	English	SI
1) ASME Code Case N-597						
Nominal Thickness [inch/mm]	1.125	28.5750	0.874	22.1996	0.874	22.1996
Out Diameter [inch/mm]	22.000	558.80	18.000	457.20	18.000	457.20
Design Pressure [psi/MPa]	1,800	12.410	1,800	12.410	1,800	12.410
Allowable Stress [psi/MPa]	15,000	103.420	17,500	120.660	17,500	120.660
Measured Thickness [inch/mm]	0.763	19.3802	0.716	18.1864	0.789	20.0406
Initial Thickness [inch/mm]	1.352	34.3408	0.895	22.4790	0.875	22.2250
Total OP Time [hr]	153,542	153,542	153,542	153,542	153,542	153,542
Time to Next O/H [hr]	9,384	9,384	9,384	9,384	9,384	9,384
2) Engineering Evaluation						
Yield Stress (σ_y) [psi/MPa]	35,000	240	40,000	275	40,000	275
Ulti. Tensile Stress (σ_u) [psi/MPa]	60,000	415	70,000	485	70,000	485
$L_m(a)$ [inch/mm]	47.077	1195.8	5.712	145.1	5.712	145.1
L_m [inch/mm]	48.872	1241.3	43.500	1104.9	56.746	1441.3
$L_m(t)$ [inch/mm]	28.798	731.5	42.408	1077.6	56.549	1436.3

Table 2 Result of engineering evaluation

Items	Case 1(Tee)		Case 2(Elbow)		Case 3(Expander)	
	1) ASME Code Case N-597					
Result Status	$t_{cutoff} < t_p < 0.875t_{nom}$	$t_{cutoff} < t_p < 0.875t_{nom}$	$t_p > 0.875t_{nom}$			
Evaluation Result	Additional Evaluation to determine the local allowable thickness t_{aloc}	Additional Evaluation to determine the local allowable thickness t_{aloc}	Accept-As is Evaluation Completed			
2) Engineering Evaluation						
t_p [mm]	18.47	29.95	17.93	21.42	19.91	20.55
t_{min} [mm]	31.99	31.99	22.58	22.58	22.58	22.58
t_{cutoff} [mm]	8.57	8.57	6.66	6.66	6.66	6.66
Case 1 M_a/M_d	1.62	1.85	1.58	1.46	1.33	1.27
Case 2 P_{bst}/P_d	2.56	3.85	3.96	4.16	4.08	4.12
Case 3 t_p/t_{aloc}	1.99	3.12	1.86	2.22	1.68	1.73

3.2.3 Case 3(Expander)

동 배관 컴포넌트의 U/S Ext. 영역에서는 실지 감육이 진행 중인 것으로 판단되며, Table 2에 나타낸 바와 같이 차기 검사에서의 예상되는 최소 두께(t_p)가 $0.875t_{nom}$ 이상인 것으로 평가되어 공학적 평가는 불필요했다. 그러나 해당 배관 컴포넌트의 안전여유도를 확인하기 위하여 공학적 평가를 수행하였으며 두께측면에서의 안전여유도(t_p/t_{aloc})가 1.68로 평가되어 차기 검사 시점에서도 충분히 안전성을 확보할 것으로 판단되었다. 최소측정두께 지점에 대한 보수를 수행할 경우라도 두께측면에서의 안전여유도가 1.73으로 미약한

증가를 보일 것이므로 보수의 의미는 없을 것으로 평가되었다.

3.2.4 평가결과 종합

평가 대상인 3개 배관 컴포넌트 모두가 현재 주기의 두께는 설계기준 최소요구두께를 만족하지는 못하나 차기 검사에서 예상되는 두께에서도 감육배관에 대한 굽힘 모멘트 측면(M_a/M_d), 내압 측면(P_{bst}/P_d) 및 두께 측면(t_p/t_{aloc})에서의 안전여유도를 확보하고 있는 것으로 평가되었으므로 현재 주기에서의 교체 또는 보수는 불요한 것으로 평가되었다.

4. 결 론

원전 2차측 탄소강배관 계통에서의 감육 현상에 대해 발생 정도를 파악하고 그에 따른 감육배관의 건전성을 확인 및 평가한 후 적절한 후속 조치를 취하는 일련의 과정은 배관계통의 건전성을 확보함으로써 안정적 전력 공급을 달성하는데 필수적인 사항이다. 본고에 제시한 공학적 평가 기술은 가동중인 원전에서의 감육배관에 대한 구조건전성 및 안전여유도를 확인하기 위한 것이며, 본 평가 기술의 적용을 위해서는 대상 배관 컴포넌트가 Class 1에 속하거나 감육의 원인이 FAC가 아닌 경우에는 규제기관으로부터의 검토 및 승인이 필요한 것으로 사료된다^[5].

참고문헌

- (1) B. Chexal et al., 1998, Flow-Accelerated Corrosion in Power Plant, EPRI TR-106611-R1
- (2) R. Dooley and B. Chexal, 1999, Flow Accelerated Corrosion, NACE International Paper No. 347
- (3) S. H. Lee et al., 2003, Management Program for Thinned Pipe in NPP Secondary System, KHNP 00NJ12
- (4) ASME, 1998, Requirements for Analytical Evaluation of Pipe Wall Thinning Section, Code Case N-597
- (5) US NRC, 2003, Inservice Inspection Code Case Acceptability, ASME Section XI, Division 1, Regulatory Guide 1.147, Table 2