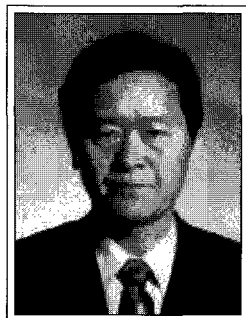


국내 원전 안전 정비 현황과 대책

-일본 미하마 3호기 증기 누출 사고 분석 비교-

김태현

한국수력원자력(주) 정비기획처 처장



2004년 8월 9일 일본 관서 전력 소유 미하마 원전 3호기(826MWe급, 3 Loop-PWR, 후쿠이현 소재, 1976.12. 상업 운전 시작)가 정격-출력 운전 중 복수 계통 배관 파열(유량 측정용 오리피스 후위 직관부)로 고온·고압의 응축수가 분출되면서 인명 피해(사망 5명, 부상 6명)를 주는 사고가 발생하였다.

한수원(주)는 국내 원전에서 유사 사고를 방지하기 위해 미하마 3호

기 사고 유사 부위에 대해 우선 발전소 운전중에 점검하여 건전성을 확인하였고, 현재 운영중인 2차 계통 탄소강 배관 감육 관리 프로그램 완벽성 재검토, 신규 원전 DB 구축, 장기 가동 원전의 유량 제한기 후위 주요 배관 발전소 운전중 점검, 차기 정지시 전 원전의 미점검 유사 배관 전량 확대 검사 등을 주요 골자로 하는 자체 점검 계획을 수립하여 시행중에 있다.

현재까지 알려진 미하마 원전 3호기 사고 내용, 사고 원인 분석 및 후속 조치 사항들을 먼저 기술하고, 국내 원전의 유사 부위 점검 결과, 감육 이론, 국내 원전 2차 계통 탄소강 배관 감육 관리 체계 등에 대해 기술하고자 한다.

사고 개요

2004년 8월 9일(월) 15:28분경 정격 출력 운전중이던 미하마 원전

3호기의 복수 계통 배관(4번 저압 급수 가열기와 탈기기 사이의 22inch 탄소강 배관)이 파열되는 사고가 발생하였다.

사고 당일 오후 3시 28분 경, 증기발생기 A의 '급수-증기 유량 불일치'로 원자로 및 터빈이 정지되었으나 방사능 누출 및 주변 환경으로의 방사능 영향은 없었다.

그러나 1MPa, 140~150℃의 물이 파열 배관을 통해 고온의 증기 형태로 분출되는 과정에서 배관 바로 밑에서 작업중이던 작업자 11명의 사상자(5명 사망, 6명 부상)가 발생하였다.

동 원전은 8월 14일부터 계획 예방 정비를 시행할 예정이었으므로 사전 계획 예방 정비 준비를 위해 많은 작업자들이 터빈 건물내에서 작업중(비계 설치, 공구 반입 등)이었다.

당시 터빈 건물 1~3층에서는 총 221명의 작업자들이 작업중이었으



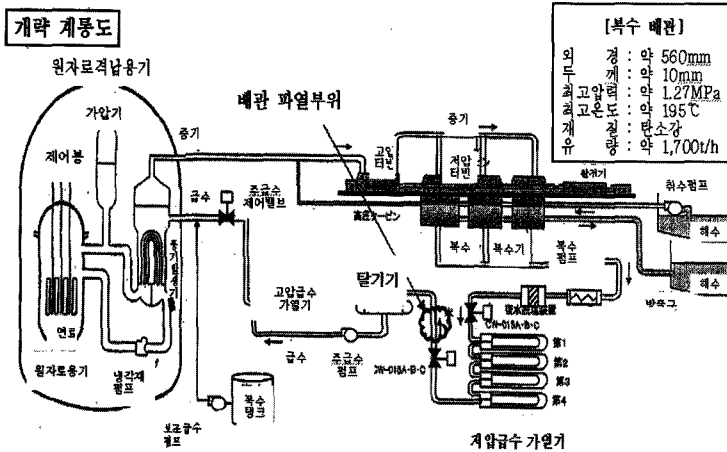
〈그림 1〉 사고 당일 미하마 3호기 전경

전력은 사고 당일 오후 4시 15분 비상대책본부를 설치하였다.

원자력안전·보안원(NISA)과 경제산업성은 사고조사위원회를 설치(2004.8.10)하고 전문가 2명을 현장 파견하였으며 관서전력 이외 가압경수로 원전 보유 4개 전력 회사에 유사 부위의 기 점검 여부를 파악하도록 지시하였다.

관서전력 소속 11개 호기 중 8개 호기(나머지 3개 호기 중 2개 호기는 정기 검사중이었으며, 1개 호기는 미하마 3호기임)를 추가 정지하여 유사 부위 점검에 착수(2004.8.14) 하였다.

본 사건은 방사능 누출 및 주변 환경으로의 방사능 영향은 없었으나 일본 내 상업용 원전 운영중 발생한 최초의 인원 사망 사고로 사고 이후 지방 정부, 규제 기관, 경찰 등에서 정기 검사 기간을 단축시키기 위해 무리하게 작업자 투입 등 안전 관리에 문제가 없었는지, 업무상 과실 치사 용의선상에서 수사중에 있다.



〈그림 2〉 미하마 3호기 발전소 개략도

나 피해를 입은 직원은 모두 2층 작업자들로 관서전력의 협력 업체인 키우치 계측사 소속 직원이었다.

일본의 사고 후속 조치

일본 경제산업성(METI)과 관서

사고 원인 분석¹⁾

사고 부위는 유량 측정용 오리피스 후위 직선 배관으로 난류 발생에 의한 침부식 현상(Erosion Corrosion or Flow Accelerated

1) 미하마 3호기는 사고 발생 이후 외부 접근을 허용하지 않고 있으며 사고 내용은 공식적인 발표 결과에 따라 달라질 수 있다.

Corrosion)이 심하게 발생하는 부위이나 1976년 12월 상업 운전 이후 검사를 시행하지 않았다.

사고 부위(22"탄소강 재질)는 당초 배관 두께 10mm에서 최소 요구 두께 4.7mm 이하로 감육되어 배관 내압을 견디지 못하고 파열되었다. 현장 조사 결과 0.4mm까지 감육되었던 것으로 측정되었다.

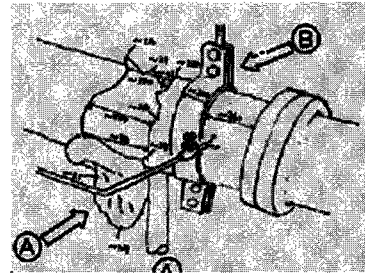
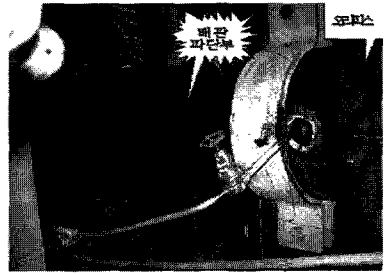
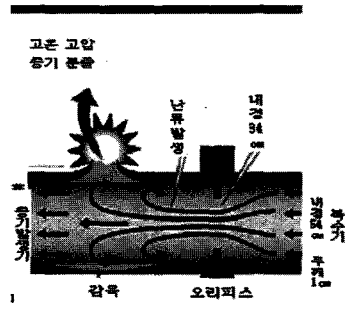
또한 사고 부위(Line A)는 감육이 고르게 진행되었으며, Line B의 경우도 비슷하게 감육된 것으로 알려지고 있다.

동 파열 부위는 2003년 4월 도급 업체에서 배관 안전 점검시 점검에서 누락되었음을 확인하여 배관 교체를 권고하였고 관서전력은 다음 주기에 점검할 계획이었다.

국내 원전 유사 부위 점검 결과

일본 관서전력 미하마 원전 3호기에서 발생한 배관 파손 사고와 유사한 부위를 발전소 운전중 점검하였다.

국내 원전은 저압 급수 가열기 #4가 설치된 발전소가 없으므로 미하마 3호기 사고 부위와 동일하게 설계된 부위가 없고 유사 부위인 저압 급수 가열기 #3과 탈기기에 유량 측정용 오리피스 또는 벤츄리가 설치된 발전소(6개 호기)를 점검 대상으로 선정하여 유량 측정 장치 후위 직선 배관의 두께 검사를



〈그림 3〉 미하마 3호기 복수 배관 파열 부위

하였다.

점검 결과 미하마 3호기와 가장 유사한 배관 부위에 유량 측정용 오리피스가 설치된 고리 2호기뿐만 아니라 유량 측정용 벤츄리가 설치된 나머지 발전소(고리 1, 영광 3,4 및 울진 3,4호기)의 배관도 모두 최소 요구 두께 이상을 유지하고 있어 배관의 건전성에 문제가 없음을 확인하였다.

또한 운전 연수 10년 이상의 장기간 가동 원전(고리 1,2,3,4, 울진 1,2, 영광 1,2, 월성 1호기)의 유량 제한기(오리피스 및 벤츄리) 후위 배관(총 411개소 중 97개소)을 발전소 운전중 점검한 결과 최소 요구 두께 대비 충분한 여유도가 있음이 확인되었으며, 고리 4호기의 경우 제15차 계획 예방 정비 기간 중 총 검사 대상 50개소 중 기 점검 부위

7개소를 제외한 43개소에 대한 점검 결과도 모두 최소 요구 두께 이상이 유지되고 있음을 확인하였다.

고리 2호기와 미하마 3호기 비교 분석

국내 원전중 미하마 3호기 배관 사고 부위와 가장 유사한 고리 2호기 복수 계통 유량 측정용 오리피스 후위 직선 배관을 점검한 결과, 18.5주기 운전 기간 동안 0.4mm (=9.2-8.8) 정도 배관 감육이 진행되었으나 측정된 배관 최소 두께(8.8 mm)는 최소 요구 두께(5.9mm)를 만족하고 있으며 149%의 두께 기준 여유도를 확보하고 있음이 확인되었다.

고리 2호기는 미하마 3호기 배관 파손 부위에 비하여 운전 온도와 압

〈표 1〉 사고 당시 발전소 상황 전개 내용

15:22	화재 경보기 동작 경보
15:23	A-트레인 직류 접지 경보
15:25	운전원이 터빈 건물 확인 결과 증기가 총만
15:26	긴급 수동 부하 감발 개시
15:28	증기발생기 A 급수/증기 유량 불일치로 원자로 정지
15:30	터빈 건물로부터의 대피 방송 1분마다 10회 실시
15:35	발전소 고온 정지 상태 안정 확인
15:45	탈기기 수위가 저하하고 있는 것 확인
15:58	원자로 냉각재 계통 봉산수 주입 실시
16:05	주증기관 격리(터빈 바이패스 밸브로부터 주증기 덤프 밸브로 전환)
16:26	주급수 격리 밸브 차단
16:55	증기발생기 수위 각각 약 33% 유지(터빈/모터 구동 보조 급수 펌프 운전중)
17:12	터빈 구동 보조 급수 펌프 정지(출구 유량 조절 밸브 수동 차단)
18:04	저압 급수 가열기 4출구 밸브(CW 016 A,B,C) 차단
18:05	저압 급수 가열기 1출구 밸브(CW 015 A,B,C) 차단

〈표 2〉 국내 원전 유사 부위 두께 검사 데이터

호기	크기 (in)	유량 측정 장치 종류	배관 공정 두께 (mm)	최소 요구 두께 (mm)	실측 두께 (mm)
고리 1	20	벤츄리	9.5	5.1	만족(9.6~10.7)
고리 2	22	오리피스	8.8	5.9	만족(8.8~9.2)
영광 3	24	벤츄리	9.5	2.54	만족(10.01~11.24)
영광 4	24	"	9.5	2.54	만족(9.33~10.68)
울진 3	24	"	17.4	12.97	만족(17.90~19.88)
울진 4	24	"	17.4	12.97	만족(17.24~18.99)
미하마 3	22	오리피스	10	4.7	불만족(0.4, 최소)

력이 낮아 배관 감육이 적은 것으로 판단된다.

국내외 원전의 2차측 탄소강 배관 사고 및 조치 주요 이력

1986년 9월 미국 Surry 2호기에 서 주급수 배관이 파단되어 4명이 사망하는 사고가 발생하였으며 파 단 원인이 유체 가속 부식(FAC, Flow-Accelerated Corrosion)에 의한 배관 감육임이 최초로 밝혀졌

다. 상기 사고와 관련 국내 원전 탄소 강 배관 감육 관리 및 유사 부위 감 육 상태 추적 관리를 시작하였다.

1987년 12월에서 1988년 8월까지 는 한국전력기술(주)에 의뢰하여 고리 1호기 및 월성 1호기 2차 계통 배관 감육 현상 검토 용역을 시행하 였다.

한편 미국 NRC에서는 1989년 5 월 NRC GL 89-08을 발행하여 운 영중인 원전에 대해 FAC에 의한

감육 대책 수립 이행을 요구하였고 미국 전력 연구원(EPRI)에서는 1993년에 FAC 관리 기술 전산 코 드인 EPRI CHECWORKS (Ch exal Horowitz Engineering Corrosion WORKStation, EPRI 에서 개발한 FAC 관리 프로그램) 를 발표하였다.

국내에서는 1993년 한국원자력 안전기술원(KINS)에서 전 원전에 대한 탄소강 배관 두께 검사를 시행 하도록 하는 권고 사항을 발행하였 으며 각 원전에서는 발전소별 자체 계획을 수립하여 배관 감육 관리를 시행하여 왔다.

1996년에는 FAC 모델 해석용 전산 코드인 CHECWORKS를 도 입하여 원전 2차 계통 감육 관리 기 술을 개발하였으며 고리 3,4호기에 시범 적용하여 그 유용성을 확인하 였다.

배관 감육 관리를 시행하던 중 1999년 고리 3·4호기 및 영광 1· 2호기 주급수 배관에 감육 부위(최 소 요구 두께 대비 약 10% 감육)가 발견되어 순차적으로 감육 배관을 교체하는 등 지속적으로 배관 감육 추적 관리 및 배관 건전성 관리를 시행하였다.

2000년 4월에서 2003년 4월 기 간중에는 2차 계통 감육 배관 관리 표준 기술 체계 개발을 완료하였으며, 2002년 9월 표준 기술 행정 절 차서 정비-10 「탄소강 배관 감육

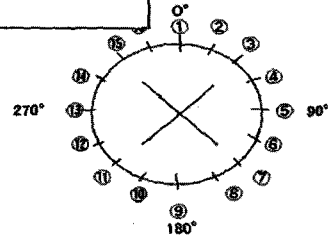
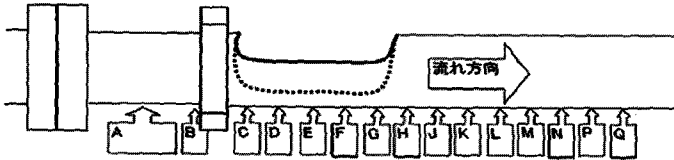


(단위: mm)

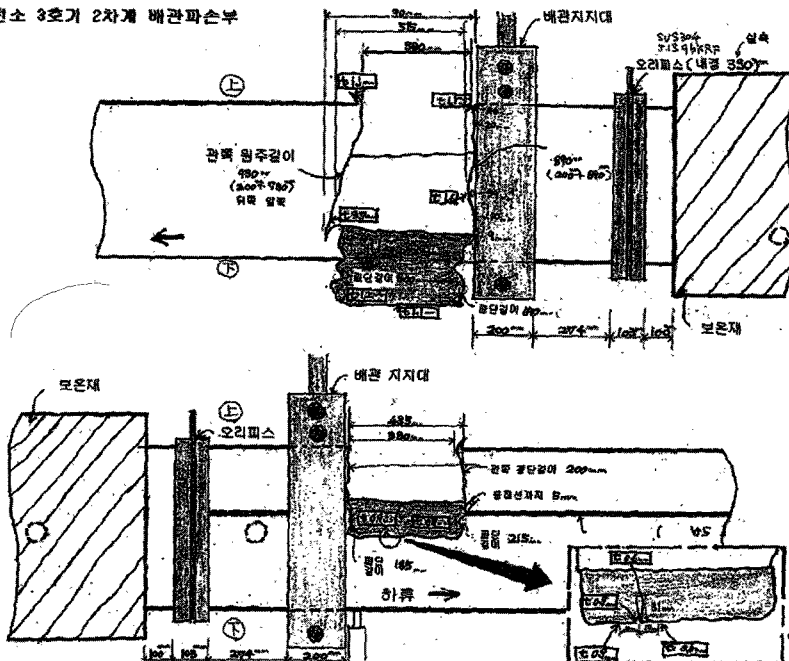
測定箇所	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	M	N	P	Q
(クボートからの位置)	-125	-10	150	250	350	450	550	650	750	850	950	1050	1150	1250	1350
(オリフィス中心からの距離)	201	316	676	776	876	976	1076	1176	1276	1376	1476	1576	1676	1776	1876
①0°	5.4	5.9	-	-	-	-	-	1.9	2.2	2.8	2.9	3.1	3.5	3.7	4.1
②22.5°	5.0	4.8	-	-	-	-	1.8	2.1	2.2	2.8	2.9	3.1	3.5	3.7	4.1
③45°	6.0	5.6	1.0	1.0	1.9	2.1	2.5	2.7	-	-	-	-	-	-	-
④67.5°	6.5	6.0	1.8	1.9	2.1	2.5	2.8	3.0	-	-	-	-	-	-	-
⑤90°	6.8	-	2.6	2.3	2.4	2.8	2.9	3.4	-	-	-	-	-	-	-
⑥112.5°	7.2	7.1	3.3	3.2	3.2	3.6	3.7	4.0	-	-	-	-	-	-	-
⑦135°	8.0	7.8	5.1	5.0	4.9	5.1	4.9	4.8	-	-	-	-	-	-	-
⑧157.5°	10.4	9.7	8.5	8.2	8.1	8.3	7.8	7.5	-	-	-	-	-	-	-
⑨180°	10.4	10.6	3.8	5.3	9.0	10.4	10.5	10.5	-	-	-	-	-	-	-
⑩202.5°	10.3	10.9	-	-	-	-	-	7.0	-	-	-	-	-	-	-
⑪225°	8.1	7.8	-	-	-	-	-	4.0	-	-	-	-	-	-	-
⑫247.5°	7.1	6.6	-	-	-	-	-	3.0	-	-	-	-	-	-	-
⑬270°	8.0	-	-	-	-	-	-	2.1	-	-	-	-	-	-	-
⑭292.5°	5.7	5.4	-	-	-	-	-	1.9	-	-	-	-	-	-	-
⑮315°	5.7	5.1	-	-	-	-	-	1.8	-	-	-	-	-	-	-
⑯337.5°	5.5	5.3	-	-	-	-	-	1.7	-	-	-	-	-	-	-

配管仕様
 ・材質 炭素鋼
 ・外径 約560mm
 ・厚さ 約10mm

주1: 현장에서 두께측정에 대해서는 A-Q의 측정면만 마다 대피시험편을 사용하여, 표준계 표시값을 교정한 후 두께 측정하였다.
 주2: 두께측정에서 바닥계 및 현상상측유지의 관경에서 최소부를 직접 손대지 않고 측정가능한 장소로서 최소부 기가이 원주방향에 16등분 되는 곳(H부)을 선택하여 그곳으로부터 길이방향으로 100mm 위치를 측정하였다.
 주3: (-)는 유량계인을 노를 파손부위 및 변형이 크기 때문에 측정이 불가
 주4: J-Q의 측정값소(0°)는 바닥이 없기 때문에 관경부를 측정하였다. (경양은 두께가 없다고 생각되는 곳)
 주5: C의 측정값소(180°)는 트레인 노를 근거



이하마 발전소 3호기 2차계 배관 파손부

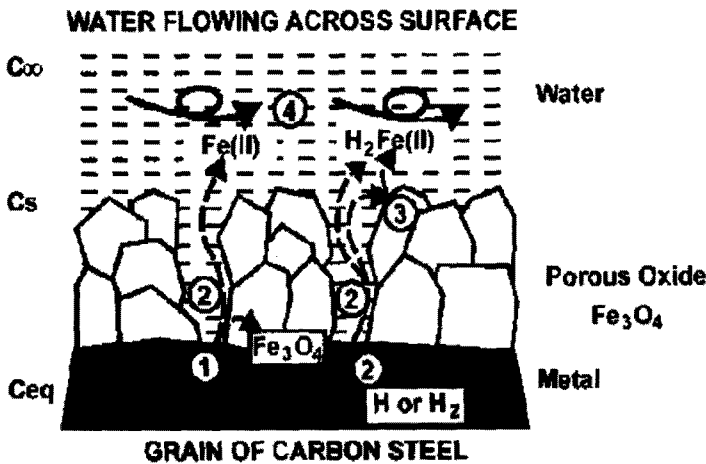


〈그림 4〉 이하마 3호기 배관 파손 부위 두께 측정 결과

〈표 3〉 고리 2호기와 미하마 3호기 비교

항목	호기	미하마 3호기	고리 2호기	비고
위치		#4 HTR와 탈기기 사이	#3 HTR와 탈기기 사이	
유체	운전 압력(설계 압력)	10bar(12.7bar)	4.1bar(22bar) ^{※2)}	
	운전 온도(설계 온도)	142℃(195℃)	107℃(149℃)	
배관 재질		탄소강	탄소강(A 106 Gr.B)	
배관 구경		55.8cm(22")	55.8cm(22")	
배관 두께	초기(공칭) ^{※1)}	10mm	8.8mm	
	현재(최소)	0.4mm	8.8mm(최대 9.2mm)	
	최소 요구 두께	4.7mm	5.9mm	
유량 측정 장치		오리피스	오리피스	

주) 1. 공칭 두께 하한치 기준 : -12.5%(상한 제한치는 없음)
 2. 미하마 3호기보다 고리 2호기가 설계 압력을 보수적으로 높게 설계하여 최소 요구 두께가 고리 2호기가 미하마 3호기보다 두꺼움



〈그림 5〉 FAC 메커니즘 개념도

관리」를 개발하여 FAC 모델 해석 용 전산 코드인 CHECWORKS를 기반으로 과학적이고 체계적으로 전원원이 통일된 기준으로 적용중에 있다.

탄소강 배관 유체 가속 부식(FAC) 메커니즘

전기 화학적인 부식 과정과 이로 인해 용해된 금속 이온이 유체 유동에 의한 이동으로 부식 환경이 반복되면서 감육 현상이 지속되는 과정이다.

가. 1단계(수용성 제1철 생성)

① 금속 산화

산화 피막을 통과한 물과 철 금속이 반응하여 금속 산화

② 산화 피막 용해

· 산화 과정에서 생성된 수소로 인해 환원 분위기 증가

· 표면의 Magnetite 산화피막층이 환원 과정을 통해 용해

③ 농도차에 의한 확산

수용성 철 이온이 유체 측으로 농도차로 인해 확산 진행

나. 2단계(수용성 이온의 이탈 확산 ⇒ 침부식)

수용성 제1철 이온을 포함한 수용성 이온이 유체의 본류(本流)로 확산되는 과정으로 수용성 이온 농도와 산화 피막층·유체 접촉부에서의 농도 차에 의해 부식 속도가 결정된다.

FAC에 의한 감육 요소 및 영향

배관 감육을 유발하는 FAC 변수는 수화학, 수리학, 재료적인 것으로 대별되며 그 안에 포함되는 7가지 요소 효과에 대해 기술한다.

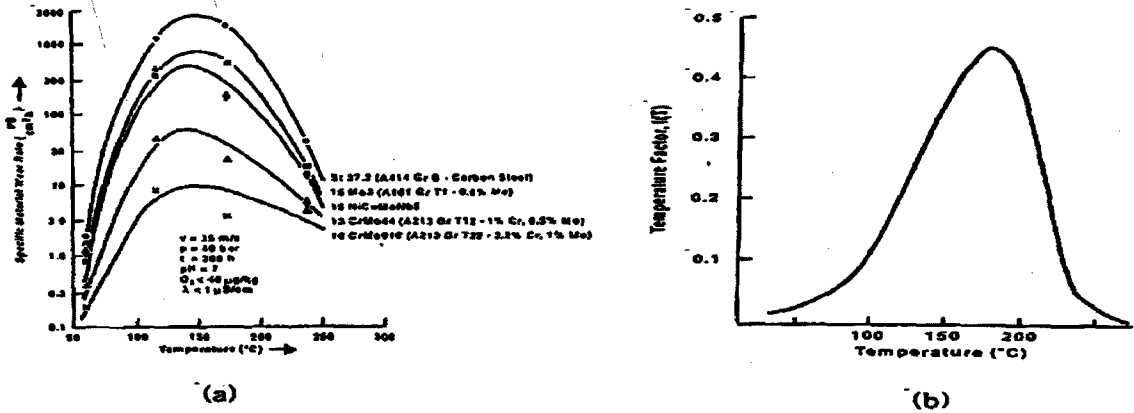
▶ 수화학적 변수 : pH, 용존 산소 농도

▶ 수력학적 변수 : 유속, 온도, 건도, 배관 크기 및 형상

▶ 재료적 변수 : 배관 재료의 Cr, Mo 및 Cu 함유율

▶ FAC 일반식 (Chexal-Horowitz Model)

$$-CR = F_1(T) \cdot F_2(AC) \cdot F_3(MT) \cdot F_4(O_2) \cdot F_5(pH) \cdot F_6(G) \cdot F_7(\alpha)$$



(그림 6) FAC에의 온도의 영향

- CR : FAC 부식률
 - $F_1(T)$: 온도 효과 Factor
 - $F_2(AC)$: 합금 원소 함량 Factor
 - $F_3(MT)$: 질량 전달 Factor
 - $F_4(O_2)$: 용존 산소 농도 Factor
 - $F_5(pH)$: 운전 온도에서의 pH 영향 Factor
 - $F_6(G)$: Pipe Geometry Factor
 - $F_7(\alpha)$: 유 체 내 의 Void Fraction Factor
- 가. 온도 효과

온도에 의한 FAC rate 변화 효과는 150°C에서 최고점을 보이는 종 모양의 분포를 보이며 150°C 이상에서는 온도의 증가에 따라 산화층의 용해도가 감소하여 FAC는 질량 전달 과정에 영향을 받는다.

150°C 이하에서는 온도 증가에 따라 용해율이 증가하여 FAC는 증가하게 된다. pH 제어 물질이 포함되어 있는 수용액의 pH가 온도 증

가에 따라 감소하게 되어 부식을 증가시키는 역할을 한다.

나. 합금 원소 함량 효과

FAC rate는 크롬, 몰리브덴 및 구리 원소 함량에 큰 영향을 받는다.

특히 아주 적은 크롬 함량으로도 산화 피막층의 안정성이 크게 증가하여 0.5w/o 이상의 크롬 농도에서 FAC는 거의 무시할 정도이다.

다. 유속 효과

부식이 발생하는 국소적 부분에서의 Local Velocity에 영향을 주는 배관 표면 거칠기, 유로 형태 및 단면의 크기 등에 따라 영향을 받는다.

저유속에서 부식은 산화층과 유체 본류간의 이온 전달 과정에 의하므로 부식률이 크지 않다.

하지만 고유속에서는 유체 본류에서의 물질 전달이 유속에 달려 있으므로 유속이 반응의 활성 에너지 원으로 작용하여 부식이 유속 증가에 비례하여 증가하게 된다.

보다 큰 유속에서는 오히려 반응의 기회 상실 및 시간의 감소에 따라 부식률이 둔감하기도 하다.

임계 속도 이상의 유속에서는 금속 표면에서의 전단 응력이 커져 표면의 산화 피막층을 깎아 내는 침식 과정이 발생하여 마모율은 급격히 증가한다.

배관의 직경이 작아지면 접촉면에 작용하는 국부 유속은 증가하여 부식이 증가하게 된다.

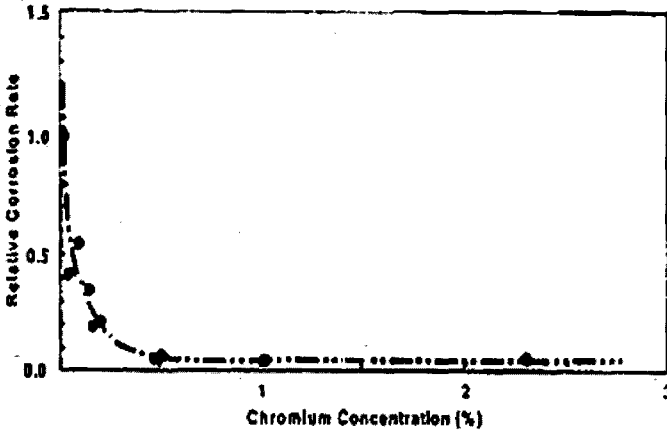
라. 용존 산소 효과

용존 산소 농도가 1ppb에서 200ppb로 증가하면 탄소강에서의 FAC 발생이 1/100로 감소한다는 연구 결과가 있다.

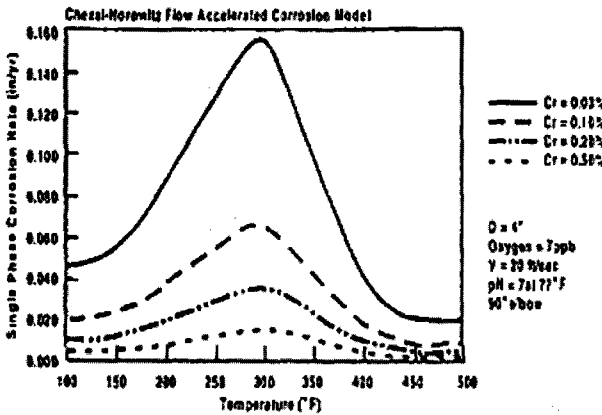
용존 산소에 의해 제1철 이온이 제2철 이온으로 변하게 되어 적철 광이 생성, 이로 인해 산화층과 유체 접촉부에서 용용도가 적은 적철 광으로 인해 FAC 발생률이 감소하는 효과를 나타낸다.

마. pH와 hydrazine 효과

부식률은 금속 표면에서의 수용

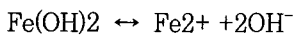


〈그림 7〉 크롬 원소 함량비에 따른 FAC 발생 비율



〈그림 8〉 크롬 함량에 의한 온도별 영향

성 이온의 용해 정도에 달려 있기에 금속 이온의 용해도를 좌우하는 중요한 요소인 pH가 증가하게 되면 OH⁻ 이온의 농도가 증가되어 아래의 부식 반응을 역으로(왼쪽으로) 반응하게 만들어 부식을 저지하는 효과가 있다.



운전 온도에서의 pH는 pH 조절 물질에도 영향을 받게 되는데, 이 의미는 FAC율은 pH와 관련된 요

소, 즉 온도, amine의 종류 및 농도 등에 영향을 받게 된다는 것이다.

특히 hydrazine은 열분해에 의해 수소와 암모니아를 만들어내는데, 이 때문에 급수 계통이나 증기 발생기 내에서 잔여 용존 산소를 제거하고 환원성 분위기를 만들며, 생성된 암모니아에 의한 pH 조절용으로 사용된다.

대개 20ppb 정도의 hydrazine

이 사용되는데, 최근의 추세는 원자력발전소 증기발생기내의 용존 산소 제거를 위해 200ppb 정도를 사용하고 있고, 특히 일본에서는 500ppb 이상의 하이드라진이 사용되고 있는 상황이다.

Hydrazine 농도 증가는 용존 산소 감소와 pH 감소를 유발해 FAC를 증가시키는 결과를 가져오게 된다.

바. 배관의 기하학적 형상 효과

FAC가 임의의 산화층/유체 접촉 부에서 유동류 발생과 관련이 있기 때문에 유동류가 발생한 부분에서는 FAC가 일어나게 된다.

그러므로 배관의 기하학적 형태에 의해 유동류가 발생하는 경우에는 FAC가 더욱 심하게 된다.

Elbow, Bend, Reducer, Tee, Pipe 입구부, Orifice 후단부 및 밸브류 등에서 유체의 유동이 심해지는데, 각 부위의 형태에 따른 효과는 서로 차이가 있어 이를 실험 및 경험적인 결과를 이용한 Geometry Factor로 고려해야 한다.

사. 기포 분율 및 건도 효과

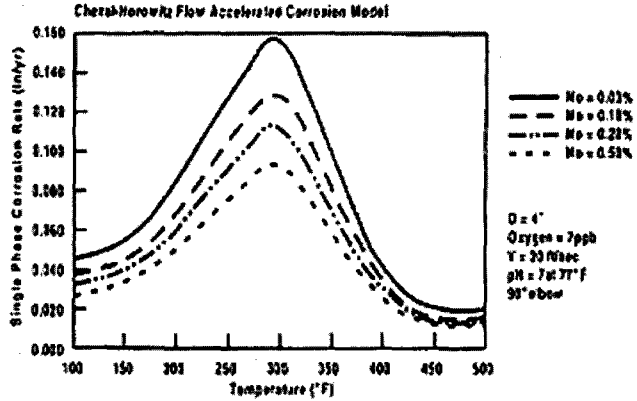
발전소에서 발생하는 FAC는 주로 급수 계통 및 추기 계통 등 1상류(相流) 및 2상류가 흐르는 부위에서 주로 발생되며, 건도가 높은 증기 계통에서는 거의 발생하지 않는다.

일반적으로 습분이 높은 유체가



흐르는 배관에서의 배관 마모율이 훨씬 크다. 이는 2상류가 흐르는 경우에는 습증기와 건증기의 속도가 서로 달라 이에 따른 유동이 증가하기 때문이다.

Void fraction도 이와 유사하여 void 비율이 높을수록 마모율이 증가하게 된다.



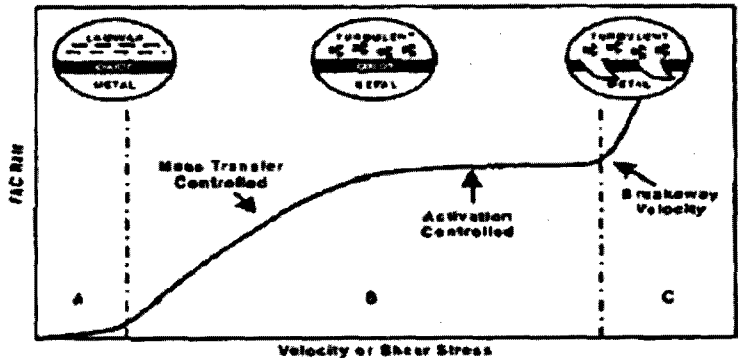
〈그림 9〉 모리브데늄 함량에 의한 온도별 영향

국내 원전 2차 계통 배관 감속 관리 체계

원전 2차 계통 증기 사이클 주배관은 복수기로부터 저압 급수 가열기, 주급수 펌프, 고압 급수 가열기를 거쳐 증기발생기까지 연결되는 급수 배관과 증기발생기로부터 고압 터빈, 습분 분리 재열기 및 저압 터빈을 거쳐 복수기로 연결되는 증기 배관, 그리고 터빈에서 급수 가열기로의 추기 배관 등으로 대별할 수 있다.

또한 증기 사이클의 원활한 운영을 위해 연결된 각종 우회 배관, 배기 배관, 최소 유량관, 덤프 배관 등도 2차 계통을 구성하는 주요 보조 배관 계통들이다.

발전소 호기별로 차이가 있지만 대략 국내 원전의 경우 증기 사이클 배관은 약 4,000~6,000여개의 컴포넌트로 구성되어 있으며, 발전소 출력 운전중 정상 유량이 흐르는 주 배관과 발전소 비정상시 사용되는 보조 배관이 각각 50% 정도를 차



〈그림 10〉 유체의 속도에 따른 FAC 발생 메커니즘 변화

지한다. 이렇게 수많은 컴포넌트 중에서 실제 배관 두께 감사가 필요한 검사 대상을 결정하게 되는데 그 수량은 호기 당 약 2,600여개소가 된다. 이 중 배관 감속 발생이 가장 우려되는 부위를 선정하여 호기별로 계획 예방 정비시마다 약 150~200개소에 대해 검사를 시행하고 있다. 적절한 기술 기준하에 검사하며, 감속 배관에 대한 건전성 평가 결과에 따른 조치를 수행하고, 컴포넌트

의 두께 데이터를 추적 관리하는 등의 체계적 관리를 수행하고 있다. 감속 배관 관리에 있어 가장 먼저 수행해야 할 항목은 발전소 2차 계통 구성을 면밀히 분석하여 상세한 배관 목록을 작성하고, 각각의 배관 계통이 어떠한 메커니즘(FAC, Cavitation, Liquid Impingement Erosion, Inter Granular Stress Corrosion Cracking-IGSCC), Microbiologically Influenced Corrosion (MIC),

Solid Particle Erosion 등)에 의해 손상을 받을 것인지를 분석하여 해당 손상 경로에 따른 관리 대책을 강구하는 것이다.

FAC 관리 대상으로 분류된 배관은 전산 코드를 사용한 FAC 모델 해석 또는 기술적 판단과 경험에 의해 검사 대상 컴포넌트를 선정하고 계획 예방 정비 기간 중에 두께를 검사한다.

취득된 두께 데이터로부터 컴포넌트별 감육 정도를 평가하며, 감육 속도 및 최소 요구 두께(critical thickness) 도달 시점까지의 잔여 수명을 평가한다.

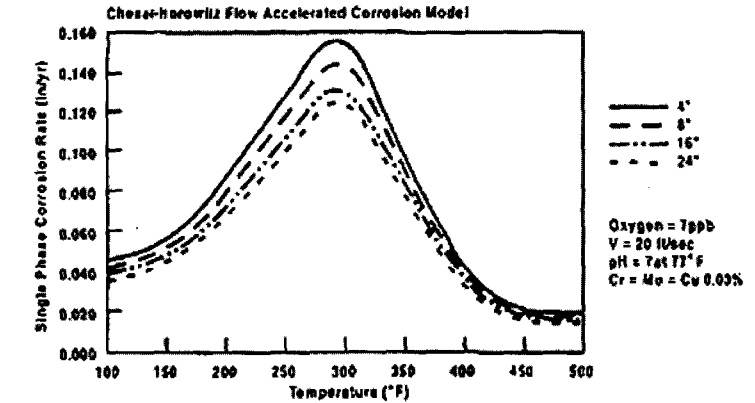
마지막으로 감육과 수명 평가 결과에 따라서 향후 지속적인 건전성 유지 확인을 위한 검사 주기를 설정하거나, 보수 또는 교체 필요 여부를 결정하는 등 후속 조치를 취하도록 한다.

국내 원전 배관 감육 관리 세부 절차

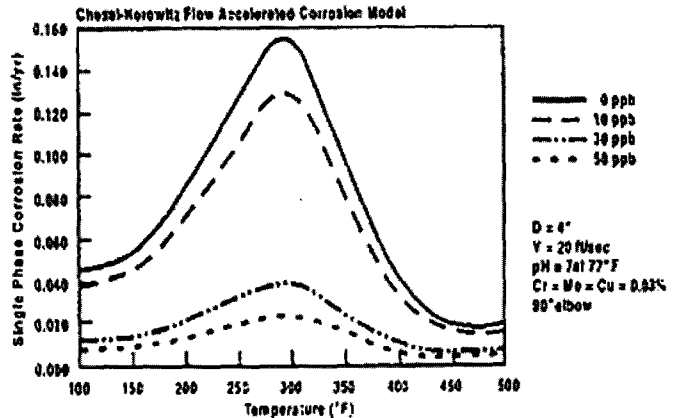
가. 발전소 감육 현황 해석

① 데이터 베이스 구축

원자력발전소 2차측 증기 사이클을 구성하는 배관 계통중에서 유체 가속 부식(FAC)에 의해 감육이 발생할 가능성이 있는 계통과 파단 또는 누설 발생시 발전소 출력 운전에 영향을 미칠 수 있는 계통의 배관 기기를 감육 관리 대상(약 4,000~6,000개소)으로 선정한다.



〈그림 11〉 Pipe 직경차에 따른 FAC 영향



〈그림 12〉 FAC에의 용존 산소 농도 효과

감육 관리 대상으로 선정된 계통에 대해 3"이상 주배관 및 보조 배관의 배관 기기를 CHECWORKS 전산 코드에 DB를 구축하였다. 열수력 설계 조건, 열수력 운전 조건, 발전소 운전 이력, 수처리 이력 등에 대한 DB를 구축하였다.

② 전산 코드를 활용한 FAC 모델 해석

원전 2차 계통 주배관에서의 주된 감육 메커니즘인 FAC에 대한 모델 해석을 수행하기 위하여

EPRI CHECWORKS 전산 코드를 활용하였으며, 이를 적용하기 위하여 다음에 기술하는 일련의 과정을 거쳤다.

CHECWORKS 전산 코드에 적용된 FAC 해석 모델은 컴포넌트별 감육 속도(Wear Rate)를 예측하기 위해 열수력(Network Flow Analysis)·수화학(Water Chemistry Analysis)·재료적 환경 등을 변수로 사용하고 있으며 다음 식으로 표현된다.

$WR = f(T, AC, MT, O_2, pH, G, \alpha, N_2H_4)$

여기에서 WR은 감속 속도, T는 온도, AC는 재질내 크롬, 몰리브데늄, 구리 함량, MT는 질량 전달률, O_2 는 용존 산소 농도, pH는 운전 온도에서의 pH값, G는 기하학적 형상, α 는 2상 흐름에서의 기포량, N_2H_4 는 하이드라진 농도이다.

구축된 데이터 베이스에 근거하여 각 배관 기기의 수화학 해석, 열수력 해석을 수행하고 최종적으로 감속 해석(Wear Rate Analysis)을 수행하여 감속 속도와 잔여 수명을 예측한다.

③ 감속 관리 우선 순위 결정

FAC 모델 해석으로 도출된 배관 기기별 잔여 수명 및 감속 속도에 기초하여 감속 관리 우선 순위를 결정한다. 배관을 5개 관리 그룹으로 구분하여 관리한다.

④ 두께 검사 대상 부위 선정 기준

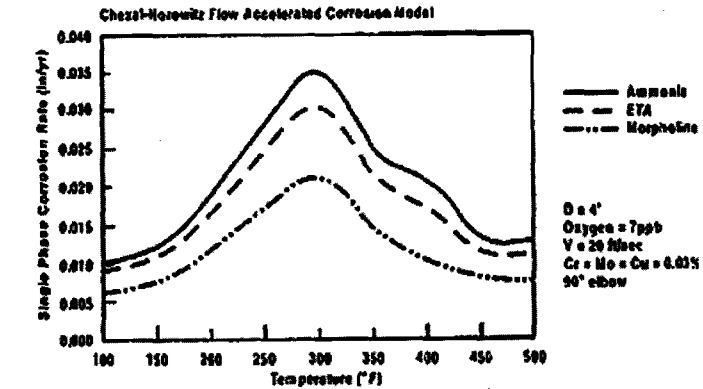
○ 안전 등급 배관 : 4~5주기에 100% 검사

○ 라인 그룹별 대상 : Level 1(5~6개소), Level 2(4~5개소), Level 3(2~3개소), Level 4(1~2개소)

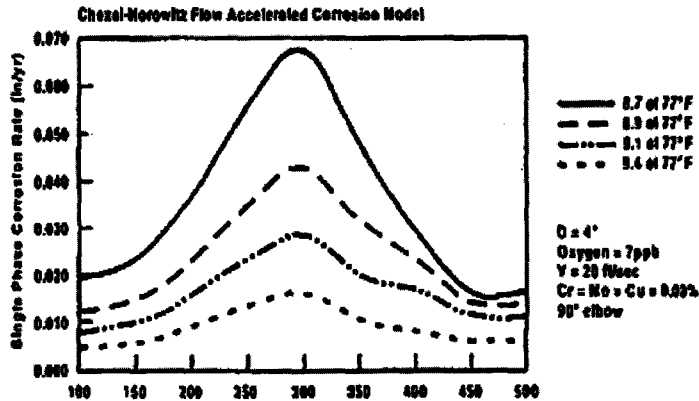
○ 당해 계획 예방 정비 주기에 재확인 검사 대상

○ 운전 경험 및 국내외 정비 사례 반영 대상

⑤ 두께 검사 우선 대상으로 선정되는 배관 또는 부위



〈그림 12〉 pH 조절 물질 차이에 따른 FAC의 영향



〈그림 13〉 pH 변화에 따른 FAC의 영향

○ 정상 운전시 감속이 심한 주배관의 분기관 (Branch line)

○ 단상 유체 배관에서 용존 산소 농도가 낮은 배관

○ 2상 유체 배관에서 응축수가 고이는 습증기 배관

○ 오리피스, 밸브 등 유량 제어기의 직후위 및 이형 배관(엘보, 티, 레듀서, 익스팬더 등) 설치 부위

○ 온도, 유량 측정공 등이 배관 내부에 설치되어 국부 유속의 증가

가 예상되는 부위

○ 유체의 공동 현상(Cavitation) 및 기화 현상(Flashing)이 발생하는 부위 등

나. 배관 두께 검사

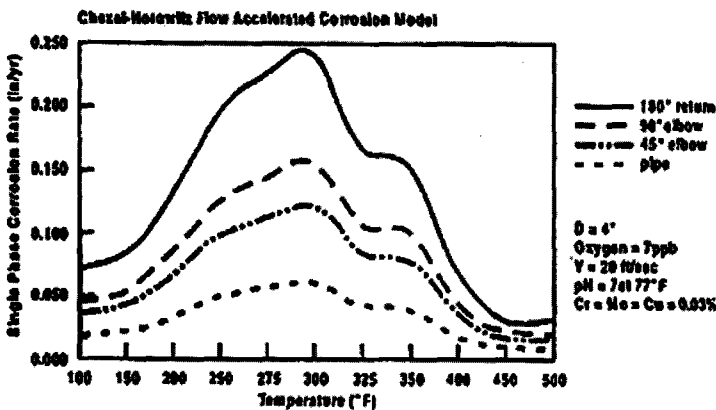
(초음파 탐상 검사)

두께 측정은 초음파 검사법으로 수행하며 기존 적용하던 partial grid 방식 대신 full grid 방식을 적용하고 있다.

full grid 방식은 검사 대상 컴포넌트 전체를 포함할 수 있도록

〈표 4〉 FAC 모델 해석 항목

항목	데이터 베이스 구축		WCA	NFA	WRA
	글로벌 D/B	컴포넌트 D/B			
목적	호기별 운전 이력 데이터 베이스	컴포넌트 고유 데이터 베이스	라인별 · 수화학 환경 분석	컴포넌트 · 열수력 환경 분석	컴포넌트별 · 감속 속도 · 잔여 수명 도출
입력 자료	주기별 · 출력 준위 · 운전 시간 · 수처리 이력	컴포넌트별 · 설계 압력/온도 · 재질, 사이즈, 형상 등	샘플 지점에서의 · Cold pH/용존 산소 /암모니아/ 하이드라진 농도	· 라인유량 · 라인 입/출구의 온도/압력/엔탈피	· 글로벌 · 컴포넌트 데이터 · WCA · NFA 결과
해석 결과	-	-	라인별 · Cold pH/Hot pH/ 암모니아 · 하이드라진 농도 등	컴포넌트별 · 온도/압력/엔탈피 Quality/레이놀드 넘버 등	컴포넌트별 · 감속 속도 · 잔여 수명 · 최소 요구 두께 등
용도	WCA · NFA · WRA 기초 자료	WCA · NFA · WRA 기초 자료	WRA 입력 자료	WRA 입력 자료	라인별, 컴포넌트별 검사 우선 순위 결정



〈그림 14〉 배관의 기하학적 형상에 따른 FAC의 영향

grid를 일정한 간격으로 조밀하게 설정하는 방법으로, 최대 감속이 발생한 영역이나 감속이 전혀 발생하지 않은 영역을 함께 측정할 수 있고 이에 따라 감속 정도 및 초기 두께를 보다 정확하게 구할 수 있는 장점이 있다.

grid의 크기(grid간의 최대 거리는 감속된 영역을 구분할 수 있

을 정도로 충분히 좁아야 하는데, grid 크기를 $\pi D/12$ (D는 배관의 외경)보다 크지 않아야 하고, 1 inch 이상, 6 inch 이하로 하도록 기준을 설정하였으며, 이 기준에 따르면 직경 3 inch 배관은 최대 1 inch 간격의 grid를 정하고, 직경 20 inch의 배관은 최대 6 inch 간격의 grid를 정하게 하였다.

그러면 full grid에 의한 측정 개소는 partial grid에 의한 측정 개소보다 약 2~4배 정도 많아진다. 이에 따라 full grid에 의한 측정은 보다 조밀하게 측정하게 되어 전체적인 감속을 해석할 수 있다.

임의의 컴포넌트가 연결되는 용접부에서 감속이 발생할 가능성이 크므로 full grid에서는 용접부 주변에 대해 측정하고 있으며, 이는 용접부의 backing ring 및 counter bore의 존재에 따라 후단부의 감속이 심하게 발생할 수 있음을 고려한 것이다.

이에 따라 임의 컴포넌트 상류 쪽에 3개 grid를, 하류 쪽에는 2D 거리까지 grid를 정하여 측정하고 있으며, expander나 expanding elbow는 상류측의 감속이 심하다는 경험에 따라 다른 컴포넌트와는 반대로 상류 측에 2D까지 grid를 정하고 하류쪽에는 3개의 grid를

〈표 5〉 배관 관리 등급과 보류 기준

관리 등급	분류 기준
Safety	안전 등급 배관 및 기기
Level I	잔여 수명이 짧으며 감속 속도가 빠른 배관 및 기기
Level II	잔여 수명이 짧으며 감속 속도가 완만한 배관 및 기기
Level III	잔여 수명이 길고 감속 속도가 빠른 배관 및 기기
Level IV	잔여 수명이 길고 감속 속도가 완만한 배관 및 기기

정하여 측정하고 있다.

〈그림 20〉은 고리 3호기 11주기에 full grid로 측정하여 데이터를 획득한 엘보에 대해 그 두께 분포를 표시한 것이다.

다. 두께 데이터 분석 및 잔여 수명 평가

취득된 두께 데이터를 분석하고 잔여 수명을 평가하기 위해 먼저 배관 기기를 section(Up Stream, Down Stream, Branch 등)으로 세분하였으며, 다음으로 각 section에서의 최대 두께(Tmax)를 최초 두께(Tinit)로 설정하고, 최소 두께(Tmin)와의 차(Tinit-Tmin)를 현재까지의 총 운전 시간 동안 section에서 발생한 감육량(Wear)으로 설정한다.

$$Wear = T_{init}(T_{max}) - T_{min}$$

각 section에서의 두께 감소량을 총 운전 시간으로 나누어 section의 두께 감소율(Wear Rate)을 계산한다.

$$Wear Rate = \frac{T_{init} - T_{min}}{Total Operating Time}$$

ASME Code Sec. III에 제시된 아래 공식을 적용, 배관 기기의 최소 요구 두께(Tcrit)를 계산한다.

$$T_{crit} = \frac{P \cdot D}{2(S + y \cdot P)} + C$$

Tcrit : 최소 요구 두께 (inch)

P : 설계 압력 (psi)

D : 공칭 외경 (inch)

S : 배관 재질 최대 허용 응력

(psi)

y : 온도에 따른 금속 조직 계수 (=0.4로 설정)

C : 부식 여유 (=0으로 설정)

위에서 계산된 각 section에 대한 두께 감소율을 비교하여 최대값을 해당 배관 기기의 대표 두께 감소율(Wear Rate)로 설정하였으며, 최소 두께(Tmin)로부터 최소 요구 두께(Tcrit)에 도달하는 잔여 수명(Remaining Life)을 도출한다.

$$Remaining Life = \frac{T_{min} - T_{crit}}{Wear Rate}$$

라. 잔여 수명 평가 결과에 따른 조치

취득한 두께 데이터 및 관련 자료를 참조하여 감육량, 감속 속도, 잔여 수명 등을 평가하고 결과에 따라

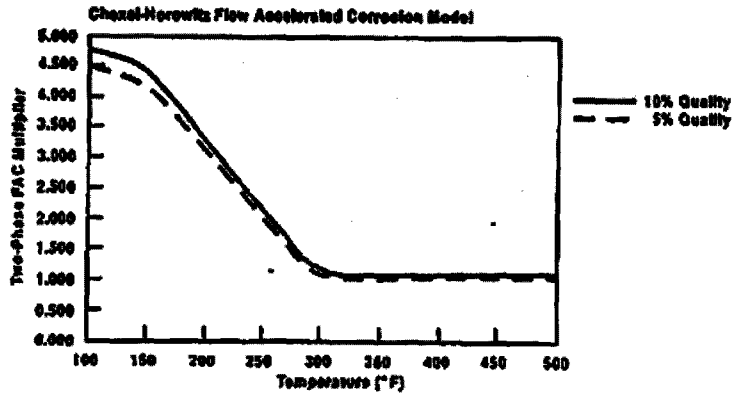
확인 검사 시점을 결정하거나 교체·용접 보수 등의 후속 조치를 한다.

측정값이 최소 요구 두께 이상인 배관에 대해서는 잔여 수명의 1/2에 해당하는 기간이 경과하기 전에 최소 1회 이상 두께 검사를 수행하여 감육을 재평가한다.

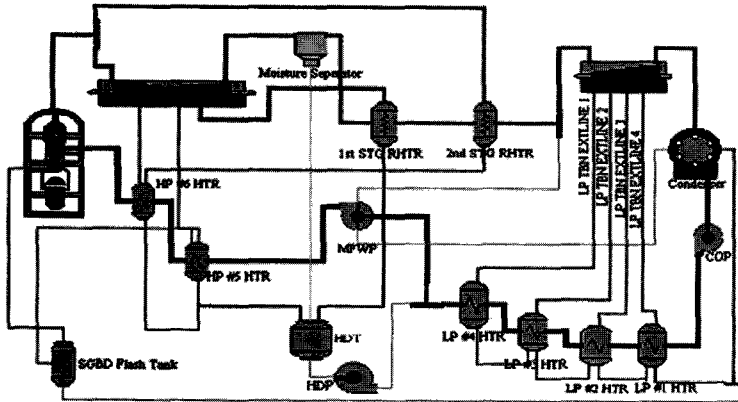
두께 검사 신규 대상 물량 및 검사결과 평가에 따른 재검사 대상 물량 등을 지속적으로 검사, 평가 및 관리한다.

측정 두께가 최소 요구 두께(Tcrit)에 미달된 경우, 또는 잔여 수명 평가 결과 향후 1주기 이내에 최소 요구 두께에 도달할 것으로 평가된 경우는 배관을 교체한다.

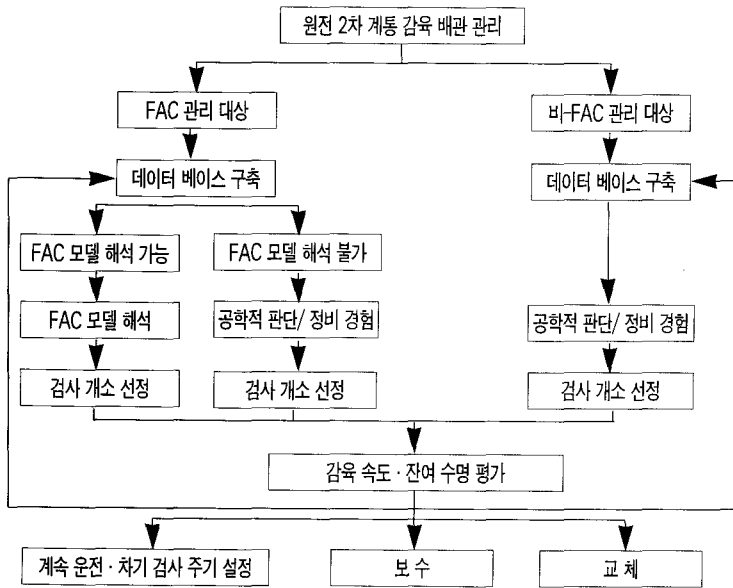
즉시 교체가 불가능할 경우 ASME Code Case N-597에 따른



〈그림 15〉 건도에 따른 FAC의 영향



〈그림 16〉 원전 2차 계통 증기 사이클 구성도



〈그림 17〉 원전 2차 계통 감육 배관 관리 체계

해석적 평가를 수행하여 평가 결과가 한 주기 이상 건전성 유지가 가능함을 입증 또는 ASME Code Case N-561에 따라 감육 부위를 용접 보수하여 최소 요구 두께를 만족시킨 경우 한 주기 운전이 가능하다.

마. 배관 감육 관리 요건(ASME Code Code Case N-597)

① 용어 정의
 ㉠ 공칭 두께($t = \text{nominal thickness}$) : 산업 기준(ANSI B36.1)에 규정된 배관 및 피팅류의 두께. 배관 부식 여유를 고려한 설계 두께(design thickness)와 같은 개념으로 제작 편차는 불포함한다.

배관 실 제작시는 배관 종류에 따

라 아래와 같이 공칭 두께 하한 제한치를 고려하여 제작된다(ASME Sec. III).

○ Seamless & Welded 배관 : - 12.5%

○ Forged & Bored 배관 : - 1/8"

○ Cast 배관 - 1/16"

※ 두께 상한 제한치는 없음

㉡ 최소 요구 두께($T_{crit} = \text{critical thickness}$) : 배관 설계 압력을 유지하기 위해 건설 코드에서 요구하는 최소 두께, 제작 편차 및 부식 영향 고려되지 않음

※ 최소 요구 두께 계산 근거(ASME Sec. III, ASME B31.1)

$$T_{crit} = \frac{P \cdot D}{2(S + y \cdot P)}$$

T_{crit} : 최소 요구 두께 (inch)

P : 설계 압력 (psi)

D : 공칭 외경 (inch)

S : 배관 재료 최대 허용 응력 (psi),

y : 온도도와 재질에 따른 계수

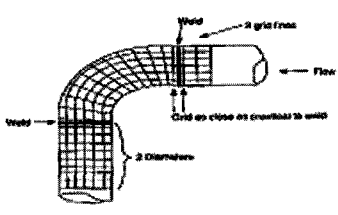
㉢ 예측 두께(t_p) : 다음 계획된 검사 시점에서의 예상되는 두께

㉣ 절대 교체 요구 두께 : ASME Code Case N-597에 제시된 절대 교체 요구 두께(공칭 두께 $\times 0.3$ 적용, class 1 배관의 경우)

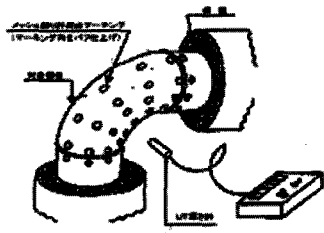
② 적용 요건

○ 두께 측정값이 절대 교체 요구 두께 이하이면 무조건 교체

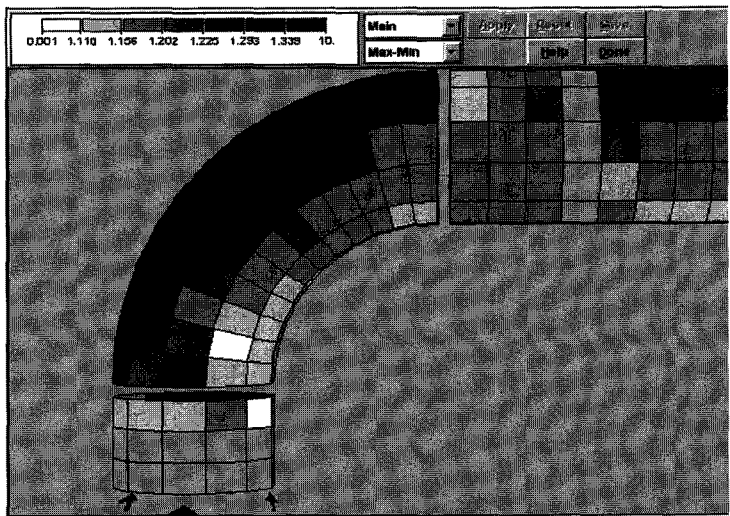
○ 감육 속도를 계산하여 다음 주



〈그림 18〉 full grid



〈그림 19〉 partial grid



〈그림 20〉 엘보에 대한 Full Grid 적용 및 측정 두께 분포 예

을 기하기 위해 국내외의 기술 자문을 시행하여 지속적인 보관을 시행할 예정이며, 현재 운영중인 전산 프로그램 업그레이드, 사내의 탄소강 배관 감육 관리 기술 교류회 활성화, 사내 탄소강 배관 감육 관리 과정 개설 등의 추가적인 조치를 시행하여 배관 감육 관리 업무를 강화해 나갈 예정이다.

결론

미하마 3호기 증기 누설 사고는 배관 파열후 원자로 안전 정지로 외부 환경으로의 환경 방사능 영향은 없었으나 인명 피해가 발생하여 국내외 언론 기관, 정부 기관, 시민단체 등으로부터 원전의 안전성 관리 체계에 대한 질타와 우려의 목소리가 컸다.

국내 원전의 경우 선진 관리 기법에 따라 체계적으로 배관 감육 관리를 수행하고 있으나 일본 원전 사고 이후 자체 점검 계획을 수립하여 우선 유사 부위에 대해 점검한 결과 배관의 건전성이 유지되고 있음을 확인하였다.

앞으로도 금번 사례의 교훈을 통하여 유사 사례의 국내 발생을 예방하고 국내 원전의 배관 건전성을 확보하기 위해 현재 운영중인 탄소강 배관 감육 관리 프로그램의 철저한 이행과 지속적인 보관을 할 계획이다. ☹

기 예측 두께가 최소 요구 두께의 90% 이상이면 만족
 ○ 두께 측정값이 최소 요구 두께의 90% 이하이면 해석적 평가를 수행하여 다음 측정 주기 및 교체 시점 결정

국내 원전 후속 조치 계획

발전소 운전중 접근 또는 측정이 곤란하여 점검하지 못한 장기 가동

원전과 나머지 원전의 미점검 유량 제한기 후위 배관에 대해 계획 예방 정비시 기존의 검사 대상에 추가하여 우선 점검함으로써 배관 건전성을 확인할 예정이다.

울진 5·6호기 등 신규 원전에 대해서도 향후 배관 감육 관리를 위한 기초 자료를 확보하기 위한 데이터 베이스 구축을 추진중에 있다.

또한 국내 원전 2차 계통 탄소강 배관 감육 관리 프로그램의 완벽성