

**FAC 모델해석용 전산코드를 활용하는  
원전 이차계통 감육배관 관리 기술**

**Management Program for Thinned Pipe in NPP Secondary System  
Using Flow-Accelerated Corrosion Model Analysis Computer Code**

이성호, 제갈성, 정한섭, 홍승열

한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요약

원자력발전소 이차계통 증기사이클을 구성하는 배관 컴포넌트에서 발생하는 감육현상에 대하여 효과적으로 감육을 감시하여 배관계통의 건전성을 유지하기 위한 감육배관 관리기술을 개발, 제시하였다. 동 기술은 이차계통 배관에서의 주된 감육 메커니즘인 FAC 관점에서 모델해석을 수행하는 것, 검사 필요 우선순위(예측 감육속도와 잔여수명에 근거)에 따라 검사개소를 선정하는 것, 계획예방정비 기간 중에 신뢰성 있는 두께데이터를 취득하여 검사개소의 실제 감육속도와 잔여수명을 평가한 후 차기 확인검사 주기 또는 보수/교체 시점을 설정하는 것 등의 다양한 요소기술들을 포함한다. FAC(Flow-Accelerated Corrosion) 모델해석에 CHECWORKS 전산코드를 활용하였으며, 본 감육배관 관리기술을 국내 원전에 시범적용하여 유용성을 확인하였다.

Abstract

Integrated management program for thinned pipe in nuclear power plant secondary system is developed and presented. The purpose of this program is to maintain piping system integrity by effective selection the most susceptible wall thinning pipe component; application of appropriate inspection criteria; obtaining credible thickness data during maintenance periods; determination next inspection period of component which is acceptable for continues service; repair or replacement of component which is needed remedy action. FAC is major wall thinning mechanism in NPP secondary piping. CHECWORKS computer code is used as a tool of FAC model analysis. The usefulness of the management program is confirmed by applying to chosen domestic nuclear power plant.

1. 서론

원자력발전소 이차계통 증기사이클 구성 배관 컴포넌트에서의 FAC(Flow-Accelerated Corrosion, 침부식) 손상은 매우 현실적인 건전성 저해 요인이다. 배관두께가 감소되면서 배관의 내압 능력이 저하되어 결국은 배관 파열사고를 유발하기 때문이다[1]. FAC에 대한 관심이 높아지고 FAC 규제와 관리기술 개발의 이정표가 되었던 1986년 미국 Surry 원전 급수계통 배관 파열

사고 이후에도 계속하여 대형 배관 파열사고가 발생하고 있다[2]. 대형 배관 파열사고는 막대한 경제적 손실을 유발하며 인명손상 위험도 크다. 대형 사고까지는 아니더라도 안전사고와 발전정지를 유발할 수 있는 정도의 중소형 배관 파열사고 사례는 수없이 많다. 따라서 배관 파열사고를 예방하기 체계적 배관관리의 적용은 전력회사의 매우 중요한 현안이다[3].

발전소의 가동연수가 증가할수록 감육에 의한 배관 파열사고 위험은 증가(외국사례의 경우, 약 15년 운전 후 교체를 필요로 하는 정도의 감육이 상당히 발견되기 시작)하므로 국내 원전에서도 이차계통 배관에 대한 체계적 관리기술 개발·적용이 절실한 상황이라 하겠다. 이에 본 연구를 통해 FAC 모델해석용 전산코드인 CHECWORKS를 활용하는 원전 이차계통 감육배관 관리기술을 개발하였으며 이를 고리 3,4호기에 적용하여 그 유용성을 확인하였다. 동 기술은 수 천 개에 달하는 감육 예상 배관개소에 대한 FAC 모델해석을 수행하는 것, 검사 필요 우선순위(예측 감육속도와 잔여수명에 근거)에 따라 검사개소를 선정하는 것, 계획예방정비 기간 중에 신뢰성 있는 두께데이터를 취득하여 검사개소의 실제 감육속도와 잔여수명을 평가한 후 차기 확인검사 주기 또는 보수/교체 시점을 설정하는 것 등의 다양한 요소기술들을 포함한다. 또한 매 주기 검사 데이터를 효과적으로 추적관리하며, 실측 데이터와 모델해석 결과를 상호비교 함으로써 감육예측의 신뢰성을 높이기 위한 기술도 중요한 요소로 포함하고 있다.

## 2. 감육배관 관리 관련 연구개발 현황

1986년 Surry 2호기 발전소 급수계통 18 inch 엘보의 파열에 의해서 수명의 인명손상과 경제적인 손실이 발생한 이후 단상 액상 배관의 FAC에 의한 감육이 매우 중요한 문제점으로 부각되었다. 본 파열 사고 이전에도 제한적인 FAC 프로그램이 있었지만, 수명의 인명사고와 막대한 경제적 손실을 발생시킨 동 사고 이후 전 세계적으로 FAC에 대한 관심이 높아지게 되었으며, FAC 관련 규제와 배관관리 기술이 본격적으로 개발되기 시작하였고, 유틸리티들은 단상 배관계통의 FAC에 의한 파열사고 위험을 줄이기 위한 검사 프로그램을 확대하게 되었다.[1]

EPRI 지침에 근거하여 미국내 유틸리티들은 원자력발전소 배관계통에 대한 최초검사를 1987년과 1988년 사이에 수행하였다. US NRC에서는 최초검사 결과를 분석 후 1989년 Generic Letter 89-08[4]를 제시하였으며, 여기에서 원전 운영자는 다음 사항을 수행토록 권고하였다.

- 중장기적 FAC 감시 프로그램 적용
- 모든 FAC 가능 고-에너지 탄소강 배관계통을 포함
- 단상과 이상(single and two phase) 계통 모두를 포함
- NUMARC/EPRI 문서 또는 이와 동등한 효과를 가진 해석기법을 사용

이에 따라 EPRI에서는 단상과 이상 유체 배관에 대한 FAC 감육속도를 예측하기 위한 전산코드인 CHEC와 CHECMATE를 개발하였다. 이들 전산코드는 FAC에 의한 파열을 방지하기 위해 검사 프로그램을 계획하고 있거나 적용하고 있는 유틸리티들에게 두께검사 대상을 선정하는데 있어 활용토록 하기 위해 개발된 것이며, 또한 배관 설계 또는 운전조건 변경이 FAC 감육속도에 미치는 효과를 평가하는데 사용되었다. 검사에서 취득된 NDE(비파괴검사) 데이터를 관리하고 평가하는데 있어서의 필요성에 따라 CHEC-NDE 전산코드를 개발하여 '91년 4월에 배포하였다. 또한 손상 배관기기의 응력해석을 지원하기 위해 CHEC-T를 개발하였는데, 이는 ASME Code Case N-480의 구조건전성 평가기준을 반영한 것이다. 한편 '93년에는 FAC 관리에 필요한 요소에 대한 종합적 권고로써 NSAC-202L을 발표하였는데 이는 동 Code Case의 프로그램적 관리기준을 대체한 것이다. EPRI는 '89년에 CHEC/CHECMATE Users Group을 구성하였고 나중에

CHUG(CHECWORKS Users Group)로 개명하였다. 이 유저그룹은 FAC 문제와 관련된 기술을 교환할 수 있는 장을 제공하며, 전산코드 사용자에게 대한 기술 지원과 CHECWORKS 전산코드를 업그레이드하는 등의 활동을 하고 있다. EPRI는 FAC를 관리하기 위한 기술을 지속적으로 개발하여, '93년 11월에 CHECWORKS 전산코드를 발표하였는데 이는 이전에 개발된 4개 전산코드를 통합하고 각 기능을 업그레이드한 것이며, 관련된 발전소 데이터를 관리하고, 여러 가지 해석과 검사 주기 동안에 수행된 작업의 보고서 작성을 자동화하기 위한 기능들이 추가되었다.

ASME에서는 '90년에 Code Case N-480을 발표하였는데 여기에서 단상 유체 배관의 FAC에 대한 프로그램적 관리기준과 구조건전성 평가기준을 제시하였다. '98년에는 Code Case N-597을 발표하였으며, 이는 Code Case N-480보다 덜 보수적인 구조건전성 평가기준을 제시하고 있다. 그러나 이는 감육이 심각하게 진행된 배관 기기를 다음 주기 교체할 때까지 적용하고자 함이지 중장기적인 가동여유를 확보하기 위한 것은 아니다. 또한 심각한 감육이 발생한 배관기기의 외면을 용접보수 하는데 적용하는 기준으로써 Code Case N-561 및 N-562를 제시하고 있어 감육 배관에 대한 임시조치 기술기준으로 활용할 수 있다.

한편, 국내에서는 '87.2 Surry 원전 사고 사례를 전파하면서 2차계통 배관에 대한 감육검사 및 보수 계획을 수립토록 하였는데, 당시 각 발전소마다 공학적 판단에 의거 약 100여 개소의 검사 대상을 선정하여 매 주기 반복검사를 수행하기 시작하였다. 그러나 수년간의 배관관리 업무 수행에도 불구하고 실지 감육이 발생하고 있는 개소의 선정 및 검사 기술기준 등이 명확히 정립되어 있지 않을 뿐만 아니라 발전소별로 배관관리 방법이 담당자에 따라 상이하며 일관성이 부족한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구를 통하여 기존 감육검사를 수행해 오던 발전소뿐만 아니라 새로이 감육검사를 계획하고 있는 국내 원전 모두에 대해 전산코드를 활용한 과학적 분석을 통하여 감육 발생 가능성이 높은 개소를 우선적으로 검사·관리할 수 있도록 기술기준을 정립코자 하였으며, 고리 3,4호기에 시범적용하여 그 유용성을 확인하였다.

### 3. 원전 이차계통 감육배관 관리체계

원전 이차계통 증기사이클 주 배관은 그림 1에 나타낸 바와 같이 복수기로부터 저압급수가열기, 주급수펌프, 고압급수가열기를 거쳐 증기발생기까지 연결되는 급수배관과 증기발생기로부터 고압터빈, 습분분리재열기 및 저압터빈을 거쳐 복수기로 연결되는 증기배관, 그리고 터빈에서 급수 가열기로의 추기배관 등으로 대별할 수 있다. 또한 증기사이클의 원활한 운전을 위해 연결된 각종 우회배관, 배기배관, 최소유량관, 덤프배관 등도 이차계통을 구성하는 주요 보조배관계통들이다.

시범적용 발전소인 고리 3,4호기의 경우 증기사이클 배관은 약 6,000여 개의 컴포넌트로 구성되어 있으며, 발전소 출력운전중 정상 유량이 흐르는 주 배관과 발전소 비정상시 사용되는 보조 배관이 각각 50% 정도를 차지한다. 이렇게 수많은 컴포넌트 중에서 한 주기 계획예방정비 기간 동안 현실적으로 두계검사 수행 가능한 범위인 200여 개 범위 내에서 감육 발생이 가장 우려되는 컴포넌트를 선정하여 적절한 기술기준 하에 검사하며, 감육배관에 대한 건전성 평가 결과에 따른 조치를 수행하고, 컴포넌트의 두께데이터를 추적관리 하는 등의 체계적 관리를 위한 원전 이차계통 감육배관 관리체계는 그림 2에 나타낸 바와 같다.

감육배관 관리에 있어 가장 먼저 수행해야할 항목은 발전소 2차계통 구성을 면밀히 분석하여 상세한 배관목록을 작성하고, 각각의 배관계통이 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

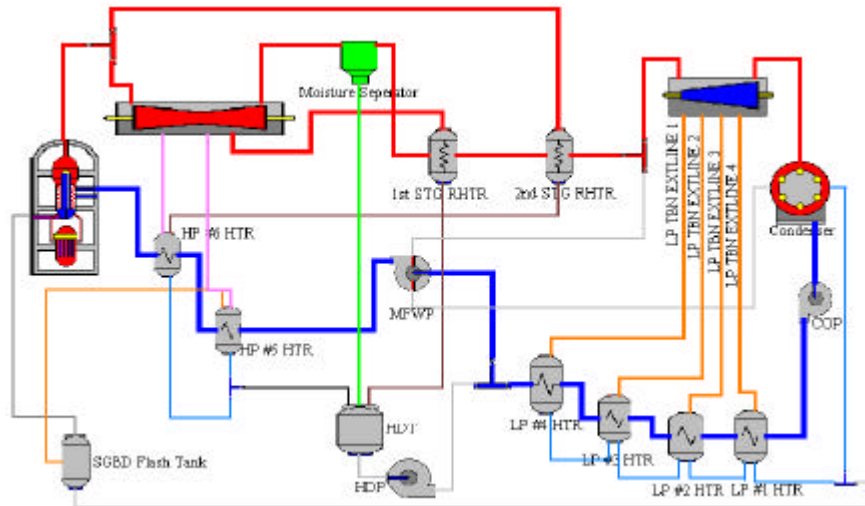


그림 1. 원전 이차계통 증기사이클 구성도

해당 손상경로에 따른 관리대책을 강구하는 것이다. FAC 관리대상으로 분류된 배관은 전산코드를 사용한 FAC 모델해석 또는 기술적 판단과 경험에 의해 검사대상 컴포넌트를 선정하고 계획 예방정비기간 중에 두께를 검사한다. 취득된 두께데이터로부터 컴포넌트별 감육 정도를 평가하며, 감육속도 및 최소요구두께(critical thickness) 도달 시점까지의 잔여수명을 평가한다. 마지막으로 감육과 수명평가 결과에 따라서 향후 지속적인 건전성유지 확인을 위한 검사주기를 설정하거나, 보수 또는 교체필요 여부를 결정하는 등 후속조치를 취하도록 한다.

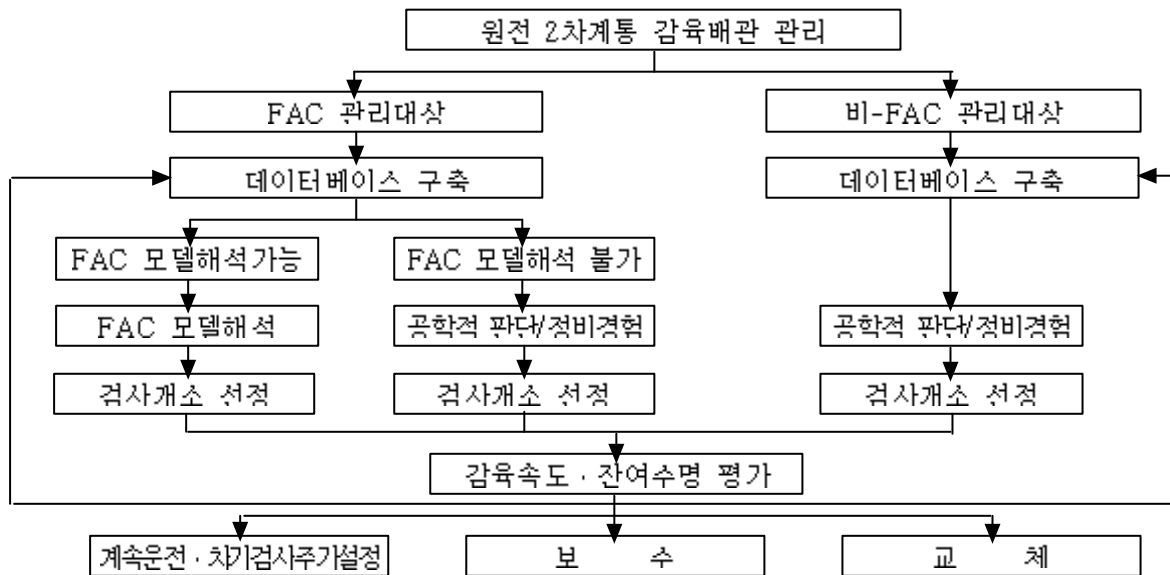


그림 2. 원전 이차계통 감육배관 관리체계

#### 4. 전산코드를 활용한 FAC 모델해석

본 연구에서는 원전 이차계통 주 배관에서의 주된 감육 메커니즘인 FAC에 대한 모델해석을 수행하기 위하여 EPRI CHECWORKS 전산코드를 활용하였으며, 이를 적용하기 위하여 고리 3,4호기에 대해 다음에 기술하는 일련의 과정을 거쳤으며 이를 종합하여 표 1에 나타내었다.

CHECWORKS 전산코드에 적용된 FAC 해석 모델은 컴포넌트별 감육속도를 예측하기 위해

열수력·수화학·재료적 환경 등을 변수로 사용하고 있으며 다음 식으로 표현된다[5].

$$WR = f (T, AC, MT, O_2, pH, G, \alpha, NH_4)$$

여기에서 WR은 감육속도, T는 온도, AC는 재질내 크롬, 몰리브데늄, 구리 함량, MT는 질량 전달률, O<sub>2</sub>는 용존산소농도, pH는 운전온도에서의 pH값, G는 기하학적 형상, α는 2상흐름에서의 기포량, NH<sub>4</sub>는 하이드라진 농도이다.

표 1. FAC 모델해석 항목

항목	데이터베이스 구축		WCA	NFA	WRA
	글로벌 D/B	컴포넌트 D/B			
목적	호기별 운전이력 데이터베이스	컴포넌트 고유 데이터베이스	라민별 · 수화학환경 분석	컴포넌트별 · 열수력환경 분석	컴포넌트별 · 감육속도 · 잔여수명 도출
입력자료	주기별 · 출력준위 · 운전시간 · 수처리 이력	컴포넌트별 · 설계압력/온도 · 재질, 사이즈, 형상 등	램플지점에서의 · Cold pH/용존산소 /암모니아/ 하이드라진 농도	· 라민유량 · 라민 입/출구의 온도/압력/엔탈피	· 글로벌·컴포넌트 데이터, · WCA·NFA 결과
해석결과	-	-	라민별 · Cold pH/Hot pH/ 암모니아·하이 드라진농도 등	컴포넌트별 · 온도/압력/엔탈피 Quality/레이놀드 넘버 등	컴포넌트별 · 감육속도 · 잔여수명 · 최소요구두께 등
용도	WCA·NFA·WRA 기초자료	WCA·NFA·WRA 기초자료	WRA 입력자료	WRA 입력자료	라민별, 컴포넌트별 검사 우선순위 결정

### 가. 발전소 글로벌/컴포넌트 데이터베이스 구축

#### 1) HBD(Heat Balance Diagram)의 구성

대상 원자력 발전소의 이차계통 주 기기와 배관계통의 배열 상황을 CHECWORKS 전산코드의 HBD Editor 기능을 활용하여 모델링 하였다. 그림 1은 고리 3,4호기 이차계통에 대하여 구성한 HBD를 나타낸 것이며, 18개의 주기기와 각 연결 배관으로 모사 하였다. MSR Drain Tank, 1st Stage Reheater Drain Tank, 2nd Stage Reheater Drain Tank 등은 증기사이클 구성상 주기기로 분류되지 않으며, 본 Heat Balance를 적용한 Water Chemistry Analysis(수화학해석)에 영향을 미치지 않으므로 HBD 구성에서 제외하였다. Heater Drain Tank의 배기 라인은 HDT 출구측 총 유량(Heater Drain Pump Suction 유량 + #5 H.P Heater로의 Vent 유량)의 0.9% 정도의 유량이 흐르며 이는 Heat Balance의 질량유량 분포에 미치는 영향이 미미하여 본 HBD 구성에서 제외하였다.

#### 2) 증기사이클 데이터

증기사이클의 출력준위별 열수력 조건을 입력하는데 있어 하나의 운전주기에 대해 하나의 출력준위를 일치시켜야 하는 CHECWORKS 전산코드의 한계와, 국내 원전의 경우 기저부하를 담당하는 관계로 현재까지의 11개 운전주기 모두가 100% 전출력 준위로 운전된 것으로 간주해도 무리가 없다는 판단 하에 고리 3,4호기에 대하여 100% 전출력(1% SG Blowdown, 0.5% Sys. Makeup) 상태에서의 Heat Balance(Plant Drawing No. O-M-X-F021참조)를 증기사이클 데이터로 입력하였다.

### 3) 발전소 운전주기

발전소 운전주기(Plant Period)는 'Operating(Cycle)'과 'Maintenance (RFO)'의 두 가지 형태로 구분하며, 각 주기에 대한 이름(예 : Cycle-? 또는 RFO-?)과 시작·종료일시, 운전시간을 입력하였다. 입력된 운전시간은 향후 컴포넌트 UT 데이터 해석 과정에서 감속속도를 계산할 때 사용된다. 고리 3,4호기 시운전 착수시점에서 제11차 계획예방정비 종료시점(07/02/98, 01/26/99)까지의 전 운전주기에 대해 계통병입 상태에서 정상적인 출력운전이 이루어진 시간을 계산하여 주기별 운전시간으로 입력하였다.

### 4) 수화학 환경

CHECWORKS 전산코드에서 적용하고 있는 수화학적 인자는 pH, 용존산소 농도, pH 조절용 아민의 종류 등이다. 복수에서의 Cold pH와 증기발생기 입구에서의 용존산소 농도를 입력하고 아민의 종류를 선택한 후 WCA(Water Chemistry Analysis)를 수행함으로써 이차계통 증기 사이클내 각 배관 위치에서의 수화학 환경을 분석한다. 표 2에 고리 3,4호기 각 샘플지점에서 실측된 Cold pH와 용존산소 농도를 나타내었다. CHECWORKS 전산코드의 WCA 해석 입력자료로 복수기(Hot Well)에서의 Cold pH 샘플값인 9.4, 고압 급수가열기 출구측에서의 용존산소 농도 샘플값인 0.5 ppb를 활용하였으며, pH조절용 아민은 발전소 수처리절차서를 근거로 하여 Ammonia를 선정하였다.

표 2. 고리 3,4호기 이차계통 샘플지점에서의 실측 수화학 환경

Sample Point	Cold pH	Dissolved Oxygen(ppb)
Hot Well	9.4	1.0
CPP Down Stream	9.2	-
H,P HTR #6 Down Stream	9.4	0.5
SG Blowdown	9.2	N/D

### 5) 발전소 라인 데이터 및 컴포넌트 데이터

라인은 이차계통을 구성하고 있는 주 기기 사이를 연결하는 배관을 의미하며 고리 3,4호기 이차계통 모든 배관을 총 98개 라인그룹과 325개 라인으로 구분하였고 각 라인의 이름은 입·출구 측에 있는 주 기기 명칭을 위주로 부여하였다. 라인그룹은 계통, 라인클래스 등과 함께 라인 데이터베이스의 종합 관리를 용이하게 하기 위하여 부여하였고, 안전등급 입력 난은 향후 현장에서의 배관관리 담당자가 추가로 관리하고자 하는 분류방식을 적용할 수 있도록 공란으로 남겨 두었다. 동일한 기능을 수행하는 다중계열(multi train) 계통인 경우 하나의 라인그룹에 여러 개의 라인(train)이 포함될 수도 있다. 컴포넌트는 증기사이클의 주 기기(main component) 사이를 연결하는 라인을 구성하는 요소들로써 nozzle, elbow, tee, reducer, expander orifice, valve, straight pipe 등이 이에 해당한다. CHECWORKS 전산코드에서의 FAC 해석은 컴포넌트 베이스로 수행되므로 라인을 구성하는 컴포넌트 자체에서의 FAC 환경이 설정되어야 한다. 컴포넌트별로 입력하는 데이터로는 컴포넌트가 속해 있는 라인의 이름, 컴포넌트 이름, 기하학적 형상, 공칭외경과 공칭두께, 스케줄, 재질, 설계압력과 온도, 보온재 종류 및 두께, 운전압력과 온도, 엔탈피, steam quality, 컴포넌트의 섹션별 길이, 최소요구두께, 유량 등이 있으며, 모든 데이터는 FAC 해석과 수명평가에 활용된다. 상기 항목들 중에서 운전압력과 온도, 엔탈피, steam quality, 유량은 NFA(Network Flow Analysis)를 수행하고 그 결과를 활용하여 WRA(Wear Rate Analysis)에 반영되도록 하였다.

고리 3,4호기에 이차계통 배관에 대해 분류한 98개 라인그룹 325개 라인 중에서 89개 라인그룹 280개 라인에 포함되어 있는 6,269개 컴포넌트에 대하여 데이터베이스를 구축하였으며 하나의 라

인그룹 내에 있는 여러 가지 컴포넌트간의 구분은 용접부를 기준 하였다. 나머지 9개 라인그룹 45개 라인은 FAC관리대상 제외기준에 해당하거나, 관련 Isometric Drawing의 양이 방대하여 많은 인력투입이 요구되는 라인이거나, 전산코드에 의한 FAC 해석이 불가하여 기술적 판단과 경험에 의해 관리해야 하는 부류에 속하는 것이어서 금번 컴포넌트 데이터베이스 구축에는 제외하였다.

#### **나. Water Chemistry Analysis 결과 도출**

고리 3,4호기의 이차계통 라인별 수화학 운전 환경을 분석하여 FAC해석에 반영하기 위하여 CHECWORKS 전산코드의 WCA(Water Chemistry Analysis) 기능을 활용하였다. 3호기에 대해서는 WCA 기술기준에 따라 pH 조절제로 Ammonia를, 복수에서의 Cold pH를 9.4로, 증기발생기 입구에서의 용존산소 농도를 0.5ppb로 입력한 후 HBD과 연계하여 WCA를 수행하여 각 라인과 주 기기(main component)에서의 Cold pH, Hot pH 그리고 Ammonia 농도 등의 결과를 얻었으며, 부록에 첨부하였다. WCA 결과는 WRA 수행시 전산코드 내에서 자동으로 반영하였다. 반면 4호기에 대해서는 하이드라진 효과를 반영한 최신모델(FAC Application Version 1.0F)을 이용하여 WCA를 수행하였다.

#### **다. Network Flow Analysis 결과 도출**

컴포넌트별 FAC Wear Rate 해석에 유속 및 quality 등을 전산코드 내에서 자동으로 반영할 수 있도록 하기 위해서는 컴포넌트 데이터를 입력할 때에 유량, 운전온도와 압력, 엔탈피, quality를 수동으로 입력을 하던가, 아니면 라인 네트워크를 정의한 후 입구측과 출구측의 알고 있는 유량, 엔탈피, 압력 등을 이용하여 NFA를 수행하여 반영하도록 하는 두 가지 방법이 있다. 이는 주로 입·출구간에 상당한 압력과 엔탈피의 변화를 나타내는, 이상 유체가 흐를 가능성이 있는 추기계통 라인 및 습분분리기 배수/배기 라인과 1, 2단 재열기 배수/배기 라인에 대해 주로 수행하게 되며, 급수라인의 단상 유체가 흐르는 라인에도 적용할 수 있다. 3호기에 대해서는 컴포넌트 데이터베이스를 구축한 89개 라인그룹 280개 라인 중에서 입·출구 NFA수행에 필요한 데이터를 가진 18개 라인그룹 68개 라인에 대해 NFA를 수행하였으며, 반면 4호기에 대해서는 42개 라인그룹 137개 라인에 대하여 NFA를 수행하였다.

#### **라. Wear Rate Analysis 결과 도출**

고리 3호기에 대해서는 라인 및 컴포넌트 데이터베이스가 구축된 89개 라인 그룹 280개 라인 중에서 우선적 FAC해석과 관리가 필요한 43개 라인그룹 135개 라인에 대하여 18개 라인그룹 68개 라인은 NFA 결과를(NFA Results 1st Priority), 나머지 25개 라인그룹 67개 라인은 컴포넌트 데이터에 수동으로 입력한 열수력 변수를(유량, 엔탈피, 운전온도, 압력, steam quality) 반영하여(User Input 1st Priority) WRA를 수행하였다. 해석 결과로 도출한 항목은 Average Wear Rate, Current Wear Rate, Predicted Thickness, Critical Thickness, Predicted Time to Tcrit 등이며, 이들 도출결과들을 종합적으로 검토 및 활용하여 고리3호기 제11차 계획예방정비 기간 동안 두께 측정을 수행할 대상 컴포넌트를 선정하였다.

반면, 고리 4호기의 경우 42개 라인그룹 123개 라인은 NFA 결과를(NFA Results 1st Priority), 나머지 5개 라인그룹 14개 라인은 컴포넌트 데이터에 수동으로 입력한 열수력변수(유량, 엔탈피, 운전온도, 압력, steam quality) 반영하여(User Input 1st Priority) WRA를 수행하였고 그 결과에 근거하여 제11차 계획예방정비 기간 동안에 두께검사가 필요한 컴포넌트를 선정하였다.

## 5. 감육현황 실측 및 잔여수명 평가, 조치

### 가. Partial Grid에서 Full Grid로 두께검사 기준 변경

현장에서 기존 적용하고 있던, EPRI 가이드라인에 따른 partial grid 방식에서 full grid 방식으로 두께데이터 취득 기준을 변경하였으며, 그림 3에 full grid와 partial grid를 상호 비교하여 나타내었다.

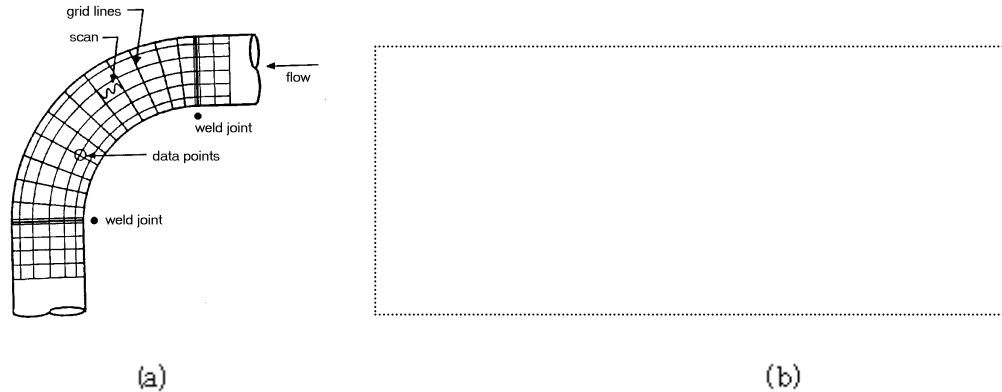


그림 3. (a) full grid와 (b) partial grid 비교

그림 3.(a)에 나타낸 full grid 방식은 검사대상 컴포넌트 전체를 포함할 수 있도록 grid를 일정한 간격으로 조밀하게 설정하는 방법으로, 최대 감육이 발생한 영역이나 감육이 전혀 발생하지 않은 영역을 함께 측정할 수 있고 이에 따라 감육정도 및 초기두께를 보다 정확하게 구할 수 있는 장점이 있다. 반면 그림 3.(b)의 partial grid는 nozzle, tee, reducer/expander 및 straight pipe에 대해서는 배관 크기에 따라 유로 방향으로 3~6개 정도의 간격으로, 유로의 직각방향으로 4개 정도의 간격으로 grid를 정하여 두께값을 취득하는 방식이다. 엘보에 대해서는 배관크기에 따라 약간씩 다른데, 특별히 회전방향의 바깥쪽과 안쪽을 집중적으로 조밀하게 grid를 결정하는 방법이기는 하지만 전체적인 grid의 조밀도는 full grid에 비해 떨어지며 초기두께 결정 및 최소두께 영역을 결정하는데 상당한 약점을 가지고 있다. 검사대상 컴포넌트에서 최대의 감육을 보이는 부분을 찾아내기란 쉽지 않다. 감육은 시간이 지남에 따라 계속 진행되고 범위도 확대될 수 있으므로, 감육이 심하게 발생할 수 있는 부분에 현재 partial grid로 측정하고 있지만 감육부위를 완벽하게 포함하고 있다고 보장할 수 없고 grid 수도 너무 적다. 엘보에 대하여 full grid와 partial grid 방식에 따라 최소두께가 나타나는 위치를 나타내는 그림 4에서 보는바와 같이 그 위치가 꼭관부 extrados 또는 intrados에 한정되지 않고 다양하게 나타나고 있음을 알 수 있으며 따라서 최소두께, 즉 최대감육이 발생한 위치를 검사하였음을 확신할 수 있도록 full grid 방식으로 변경하였다.

Grid의 크기(grid간의 최대거리)는 감육된 영역을 구분할 수 있을 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 3인치 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 측정개소보다 약 2~4배정도 많아진다. 이에 따라 full grid에 의한 측정은 보다 조밀하게 측정하게 되어 전체적인 감육을 해석할 수 있도록 하였다.



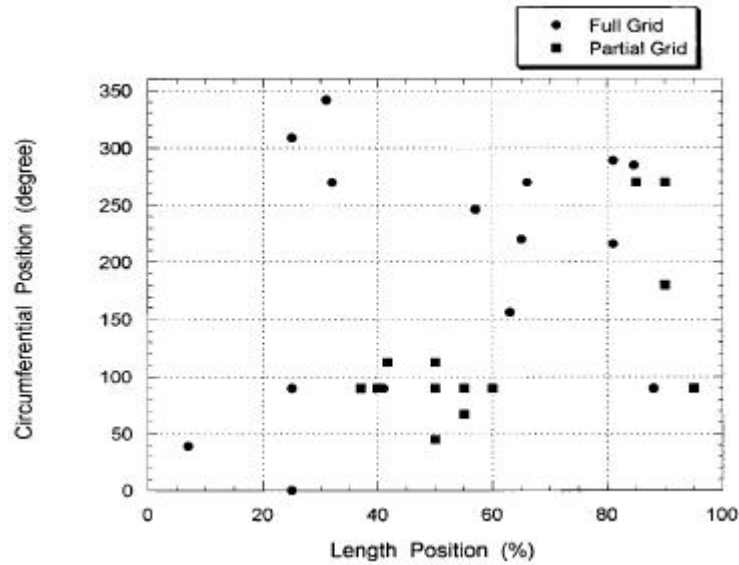


그림 4. 엘보에서의 최소두께 위치 비교

그리고 임의의 컴포넌트가 연결되는 용접부에서 감육이 발생할 가능성이 크므로 full grid에서는 용접부 주변에 대해 측정토록 하였으며, 이는 용접부의 backing ring 및 counter bore의 존재에 따라 후단부의 감육이 심하게 발생할 수 있음을 고려한 것이다. 이에 따라 임의 컴포넌트 상류쪽에 2개 grid를, 하류쪽에는 2D 거리까지 grid를 정하여 측정하도록 하였으며, expander나 expanding elbow는 상류측의 감육이 심하다는 경험에 따라 다른 컴포넌트와는 반대로 상류측에 2D까지 grid를 정하고 하류쪽에는 2개의 grid를 정하여 측정하도록 하였다.

시범적용 발전소인 고리3호기 11주기 검사에서는 전력연구원에서 선정한 75개 배관 컴포넌트 중 현장과의 협의에 의해 최종 선정된 총 24개의 배관에 대해 full grid 측정을 실시하였다. 10주기에 측정되어진 배관 및 11주기에서도 현장에서 선정한 배관에 대해서는 partial grid 측정을 실시하였다. 11 주기에 full grid로 측정하여 데이터를 획득한 엘보에 대해 그 두께분포를 표시한 예를 그림 5에 나타내었는데 동 기준을 정확하게 적용하여 측정한 것으로 두께분포가 확연하게 드러나 보인다.

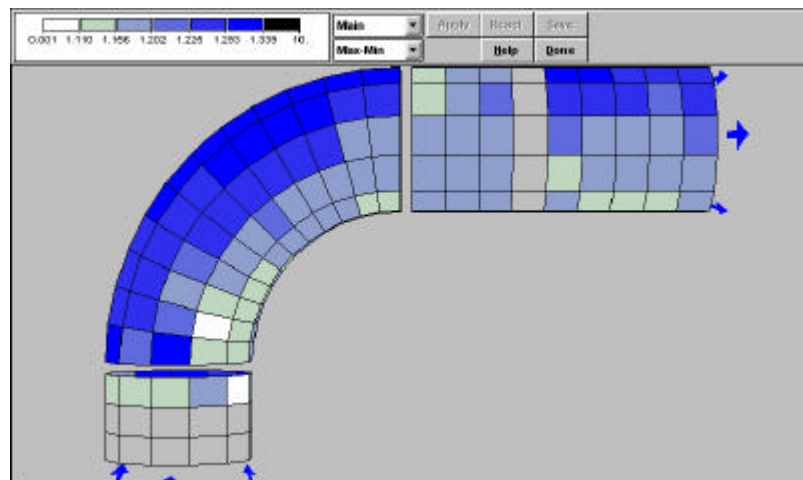


그림 5. 엘보에 대한 Full Grid 적용 및 측정 두께 분포 예

## 나. 두께데이터 분석 및 잔여수명 평가

취득된 두께데이터를 분석하고 잔여수명을 평가하기 위해 먼저 배관기기를 section(Up Stream, Down Stream, Branch 등)으로 세분하였으며, 다음으로 각 section에서의 최대두께(Tmax)를 최초두께(Tinit)로 설정하고, 최소두께(Tmin)와의 차(Tinit-Tmin)를 현재까지의 총 운전시간 동안 section에서 발생한 감육량(Wear)으로 설정하였다.

$$Wear = T_{init} - T_{min}$$

각 section에서의 두께감소량을 총 운전시간으로 나누어 section의 두께감소율(Wear Rate) 계산하였다.

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

ASME Code Sec.Ⅲ에 제시된 아래 공식을 적용, 배관기기의 최소요구두께(Tcrit)를 계산하였다.

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

여기서, Tcrit : 최소요구두께 (inch)

P : 설계압력 (psi)

D : 공칭외경 (inch)

S : 배관재질 최대허용응력 (psi)

y : 온도에 따른 금속조직 계수 (=0.4로 설정)

C : 부식여유 (=0으로 설정)

위에서 계산된 각 section에 대한 두께감소율을 비교하여 최대값을 해당 배관기기의 대표 두께 감소율(Wear Rate)로 설정하였으며, 최소두께(Tmin)로부터 최소요구두께(Tcrit)에 도달하는 잔여수명(Remaining Life) 도출하였다.

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

## 다. 잔여수명 평가 결과에 따른 조치

앞서 언급한 바와 같은 감육배관 관리체계와 EPRI CHECWORKS 전산코드를 활용한 FAC 모델해석 결과에 근거하여 선정된 컴포넌트에 대한 두께검사 및 잔여수명 평가를 적용하여 고리4호기 주급수라인 역지밸브 후단 직관부에서 감육이 발생되어 ASME 기준뿐만 아니라 ASME Code Case N-597 기준에 따른 최소요구두께를 만족하지 못함을 발견하였으며, 차기 계획 예방정비 기간 중에 동 배관의 교체를 전제로 감육부 외부에 0.24inch(6mm)의 덧씌우기 용접을 (overlay weld) 수행한 후 운전중에 있고, 영광 1,2호기의 동일 부위에서도 감육이 발견되어 동일 재질의 배관으로 교체하여 건전성을 확보토록 하였다.

또한 고리 4호기의 경우 1st stage Reheater에서 #5 Feedwater Heater로의 배기배관 내의 엘보, 티 등의 피팅류에서 과도하게 감육이 진행되어 있음을 확인하고 교체토록 하였다.

## 라. 시범적용 발전소 감육 현황 분석

FAC 모델해석에 기초하여 선정 및 UT데이터 취득한 컴포넌트(3호기:57EA, 4호기:156EA) 및 현장관리 개소(3호기:103EA, 4호기:48EA)에 대한 감육 현황 분석 결과, Heater Drain Pump에서 MFWP Suction Header로 연결된 배관라인 전체가 감육을 보이고 있어 집중 관리가 필요할 것으로 판단되며, 다수의 배관 컴포넌트가 초기 과잉 두께에 의해서 잔여수명을 확보하고 있으나 조만간 주요 배관 교체수요가 증가할 것으로 예상된다. 또한 Gland Steam, Steam Line Drain, Dump 또는 Mini Flow Line 등에 해당하는 배관은 현장설정 검사대상 목록을 활용하여 관리하되

평가방법 변경이 필요할 것이며, 본 연구에서 제시한 검사 및 평가체계로 향후 2~3주기의 검사 데이터를 확보하면 중점 관리대상 배관계통 및 배관 컴포넌트를 확정, 장기적 배관관리가 가능해질 것으로 판단된다.

## 6. 결론 및 향후계획

원전 이차계통의 주된 감육 메커니즘인 FAC 측면에서 증기사이클 구성 컴포넌트에 대한 모델해석을 수행하고 그 결과에 근거하여 검사대상 선정하며, 실측 데이터에 근거하여 감육속도, 잔여수명을 평가하여 차기 검사주기 설정 또는 보수, 교체를 수행하는 일련의 감육배관 관리기술을 정립하여 고리 3,4호기에 적용하였고, 그 유용성을 확인하였다. 향후 동 발전소뿐만 아니라 전 원전에 본 관리기술을 적용하여 기존 선정된 검사대상에 대한 반복검사 방법을 위험도에 근거한 대상 선정 및 두계검사(Risk Based Inspection) 방법으로 변경할 예정이다.

FAC 해석대상 배관에 대한 검사 결과만을 분석한 결과 고리3,4호기는 조만간 주요배관에 대한 교체 수요가 발생하기 시작할 것으로 예상되며, 중장기적이고 체계적인 관리 프로그램을 수행함으로써 검사 물량을 최소화하면서도 효과적으로 배관 교체 프로그램을 진행하면 배관 파열을 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Flow-Accelerated Corrosion in Power Plants, EPRI TR-106611, June 1996
2. Plant Experience Database, EPRI TR-102032, December 1995
3. Recommendation for an Effective Flow Accelerated Corrosion Program, NSAC-202L-R1, November 1996
4. Erosion/Corrosion-Induced Pipe Wall Thinning, US NRC Generic Letter 89-08, May 1989
5. CHECWORKS User Guide, EPRI TR-103198, June 1998