

# CHECWORKS 코드를 이용한 국내 원전 2차계통 배관감육 해석

## Wall Thinning Analyses for Secondary Side Piping of a Domestic NPP Using CHECWORKS Code

황경모, 진태은

한국전력기술주식회사  
경기도 용인시 구성읍 마북리 360-9

이성호, 김위수

한국전력공사, 전력연구원  
대전시 유성구 문지동 103-16

### 요 약

본 고는 국내 모든 발전소에 공통적으로 적용이 가능한 감육배관 관리 표준기술체계 개발을 위하여 '원전 2차계통 배관 데이터베이스 구축 및 감육해석 연구'에서 수행하고 있는 방법 및 절차와 해석결과를 소개한다. 배관감육 해석에는 현재 전세계적으로 가장 널리 사용되며 신뢰성이 입증된 CHECWORKS 코드를 활용하였다. 본 코드를 이용하여 해석한 결과는 국내 1개 호기의 3개 계통 배관을 대상으로 측정된 실측 데이터와 비교하였다. 비교결과 본 연구의 최종 목표인 2차측 감육배관 관리 표준기술체계 확립을 위하여 CHECWORKS 코드의 결과를 충분히 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

### ABSTRACT

This paper represents the wall thinning analysis results for secondary side piping of a domestic nuclear power plant based on the DB establishment and FAC analysis study for NPP secondary system piping. CHECWORKS code utilized in this study has been applied world widely to wall thinning analyses for secondary side piping and its reliability has also been proved. The predicted wear rates of several piping systems are compared with the measured wear rates. On the basis of comparison results for both wear rates, the analysis results can be effectively applied to the development of a standard thinned pipe management program targeted all domestic nuclear power plants.

### 1. 서 론

원전 2차측 배관의 감육(Wall Thinning)으로 인한 손상 및 사고사례는 국내외를 망라하여 1980년 대 이후 상당수 보고되고 있으며, 원전 수명증가에 비례하여 발생횟수도 점차 증가하고 있는 추세이다. 이러한 경향에 따라 국내 원전 현장에서는 발전소별로 자체 관리기준에 따라 감육배관에 대한 관리를 하고 있으나 검사주기, 검사대상 배관부위 선정방법, 감육배관 측정, 평가 등에 있어서 일관된 기준이 적용되지 않고 있는 실정이다. 이에 따라 국내 모든 발전소에 공통적으로 적용이 가능한 감육배관 관리 표준기술체계 개발의 일환으로 '국내 원전 2차계통 배관 데이터베이스 구축 및 감육해석' 연구를 수행하고 있다. 본 고는 상기 연구 수행 중 국내 1개 호기를 대상으로 데이터베이스를 구축하고 감육해석을 수행한 결과를 소개하는데 중점을 두었다. 감육해석은 현재 전세계적으로 가장 널리 활용되고 있으며, 신뢰성도 충분히 입증된 CHECWORKS 코드를 활용하였다.

본 고의 서두에서는 상기 코드를 간단히 소개하고 이를 활용하여 데이터베이스를 구축하고 감육해석을 수행하는 방법 및 절차를 간단하게 소개한다. 그리고 본 절차에 따라 실제 1개 호기를 대상으로 데이터베이스를 구축한 결과와 감육해석 수행사례를 소개한다. 최종적으로는 코드로 예측한 결과를 실측치와 비교함으로써 CHECWORKS 코드의 해석결과를 본 연구의 최종목표인 2차측 감육배관 관리 표준기술체계 확립에 반영할 수 있을지의 여부를 검토한다.

## 2. CHECWORKS 전산코드 주요기능

EPRI에서 개발한 CHECWORKS 전산코드는 전세계적으로 원전 2차계통 배관감육 예측에 가장 널리 사용되고 있다. 본 코드는 원전 2차측 배관의 온도, 압력, 엔탈피, Steam Quality, pH, 유속 등의 운전 환경을 반영하여 배관 컴포넌트별 감육률과 잔여수명 예측, 발전소 데이터베이스 역할 등을 수행할 수 있으며, 이를 기초로 하여 검사대상 배관 우선순위 결정, 감육에 영향을 미치는 수화학 조건 및 재료 비교, 배관설계 기술 개선 등에도 활용할 수 있다.

CHECWORKS 전산코드는 그림 1에서 볼 수 있듯이 크게 해석(Analysis) 기능과 지원(Support) 기능으로 구분할 수 있다. 해석기능에는 WCA(Water Chemistry Analysis), NFA(Network Flow Analysis), WRA(Wear Rate Analysis), UT Analysis, CAE(Component Acceptance Evaluation)가 있으며, 지원기능에는 Plant Data Management, Isometric Viewer, HBD(Heat Balance Diagram), FACTRAK, Import Utility가 있다[1]. 이들 각각의 주요 기능은 표 1과 같다.

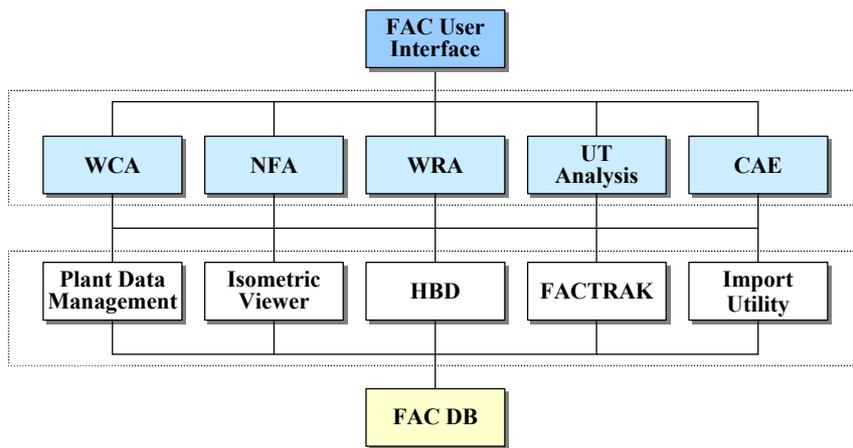


그림 1. CHECWORKS 전산코드 구성

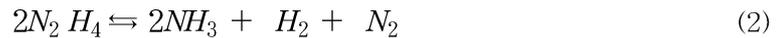
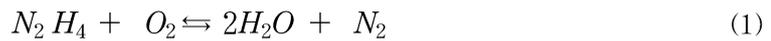
표 1. CHECWORKS 전산코드의 주요기능

구분		주요 기능
해석	WCA	2차계통 배관 라인의 아민, 용존산소, pH 등 수화학 분포 해석
	NFA	배관 내부의 압력변화와 열수력 조건 변화 해석
	WRA	데이터베이스로 구축된 배관 컴포넌트별 감육률 해석
	UT Analysis	UT 데이터 분석, 평가 및 손상여부 확인
	CAE	ASME Code Case N-480에 따른 컴포넌트 건전성 평가
지원	Plant Data Management	해당 발전소의 글로벌/컴포넌트 데이터베이스 및 라이브러리 구축과 편집
	Isometric Viewer	데이터베이스 내 컴포넌트 배열을 그래픽으로 표현
	HBD Editor	발전소 증기사이클에 대한 HBD 구성 및 편집 ▶ HBD : 수화학 분석에 사용, FAC DB로 접근 지원
	FACTRAK	정비기간 중에 수행할 두께검사 목록작성 및 관리에 활용
	Import Utility	CHECMATE와 CHEC-NDE 파일을 FAC DB로 변환

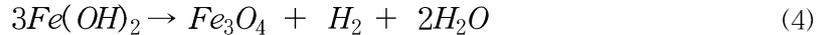
CHECWORKS 전산코드를 이용하여 원전 2차측 배관의 감육해석을 수행하기 위해서는 크게 세 가지 단계, 즉 배관을 체계적으로 분류하는 기초작업(Basic Work)과 배관 개개의 정보를 DB화하는 작업, 그리고 구축된 DB를 기초로 감육해석을 수행하는 세 단계를 거쳐야 한다. 그림 2는 CHECWORKS 전산코드를 이용하여 배관감육 해석을 수행하는 절차를 제시한 것이다. 실제 현장에서 관리되고 있는 원전 2차측 배관은 10여 개 계통 정도이지만 이를 코드에 입력해야 하는 개개의 배관 컴포넌트로 구분할 경우에는 원전 출력규모에 따라 4,000~6,000개에 달하므로 이를 체계적으로 분류하여 각 컴포넌트명이 중복되지 않도록 해야 한다. 그리고 2차측의 열평형도(Heat Balance Diagram)를 작성하여 배관 라인의 위치를 열평형도에 지정해 줌으로써 조건에 맞는 데이터를 코드에서 인식하여 배관감육 해석에 반영할 수 있도록 해야 한다. 이러한 작업이 완료되면 설계압력, 설계온도, 사용재료, 치수 등의 개별 배관정보와 실제 운전시점부터 현재까지의 수처리 이력, 운전이력 등을 DB화하여 배관감육 해석에 반영될 수 있도록 해야 한다.

배관의 기초정보가 CHECWORKS 전산코드에 DB로 구축되면 2차계통 주요 배관부위에서 취득된 수화학 데이터를 이용하여 개별 배관의 감육해석에 운전환경이 반영될 수 있도록 수화학 해석을 수행한다. 배관감육 현상에 영향을 미치는 수화학 변수는 pH와 용존산소농도로서 2차계통에 주입되는 pH 조절용 아민(암모니아;  $NH_3$ )과 하이드라진( $N_2H_4$ ), 용존산소, 철 등의 상호 화학반응 메카니즘은 다음과 같다.

- 하이드라진 산화/환원 반응



- 철 용해반응



상기와 같은 반응조건은 운전온도에 밀접한 연관성이 있기 때문에 수화학 해석에서는 개별 컴포넌트에서의 Hot pH, 암모니아, 하이드라진 농도 등이 계산된다.

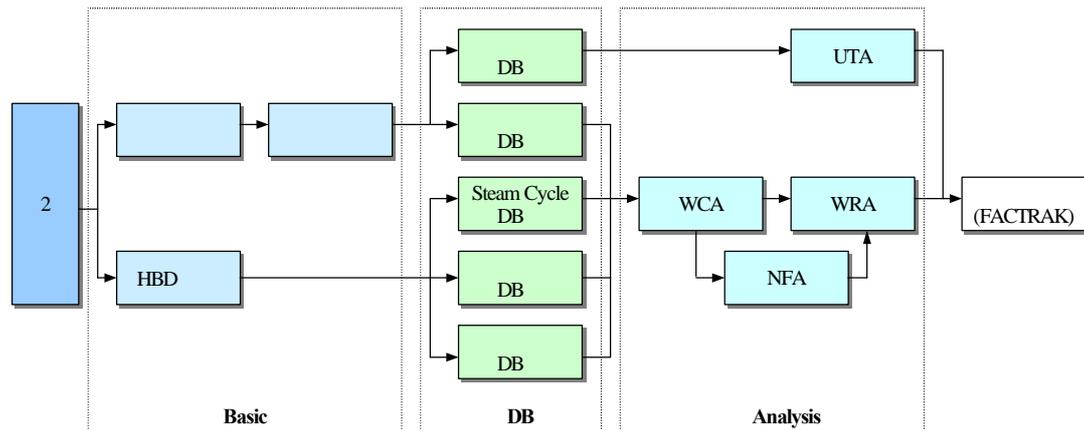


그림 2. 배관감육 해석절차

수화학 해석이 완료되면 배관라인 입출구 사이에서 압력과 엔탈피의 변화가 크게 나타날 수 있고 2상(Two Phase) 유체가 흐를 가능성이 있는 추기계통 라인 및 습분분리기 배수/배기 라인과 1, 2단 재열기 배수/배기 라인 등에서 입구측과 출구측의 알고 있는 유량, 엔탈피, 압력 등을 이용하여 네트워크 해석(Network Flow Analysis)을 수행한다. 네트워크 해석을

수행하지 않더라도 CHECWORKS 전산코드에서는 수동으로 입력된 데이터를 이용하여 감육해석을 수행하지만 이는 보다 정확한 해석결과를 얻기 위함이다. 네트워크 해석 결과는 컴포넌트별 Steam Quality, 압력, 온도, 엔탈피, 손실계수(Loss Coefficient) 등이며, 이는 배관 감육 해석시 CHECWORKS 전산코드 내에서 자동적으로 반영된다.

수화학 해석과 네트워크 해석이 완료되면 최종적으로 배관 컴포넌트의 감육해석을 수행한다. 감육해석에는 지금까지 입력된 모든 설계정보 및 운전이력과 수화학 해석, 네트워크 해석 결과가 반영되어 개별 컴포넌트별 평균 감육률, 현재 감육률, 현재두께, 최소요구두께, 최소요구두께까지의 잔여수명 등이 계산된다. CHECWORKS 전산코드 내에서 감육해석을 수행하는 기초이론은 Chexal-Horowitz Erosion-Corrosion 모델이며, 기본 수식은 다음과 같다.

$$W = F_1(T) * F_2(AC) * F_3(MT) * F_4(O_2) * F_5(pH) * F_6(G) * F_7(a) * F_8(N_2H_4) \quad (5)$$

여기서,  $W$  : Wear Rate

$F_1(T)$  : Factor for Temperature Effect

$F_2(AC)$  : Factor for Alloy Content Effect

$F_3(MT)$  : Factor for Mass Transfer Effect

$F_4(O_2)$  : Factor for Dissolved Oxygen Effect

$F_5(pH)$  : Factor for pH Effect

$F_6(G)$  : Factor for Geometry Effect

$F_7(a)$  : Factor for Void Fraction Effect

$F_8(N_2H_4)$  : Factor for Hydrazine Effect

감육률에 영향을 미치는 상기 인자들 대부분은 많은 실험과 운전경험 데이터에 근거하여 각 인자들 간의 상관관계가 결정되고 보정되었으며, 이러한 상관관계가 Chexal-Horowitz 모델에 반영되었다. 상기 인자들 중 단상 및 2상 유체 감육률에 모두 영향을 미치는 인자는 물질전달 인자로서 물질전달계수(Mass Transfer Coefficient :  $K$ )는 수리학 조건에 의존하며, 이는 식 (6)과 같이 무차원 Sh수(Sherwood Number)로 표현된다. Sh수는 일반적으로 식 (7)의 Re수(Reynolds Number)와 식 (8)의 Sc수(Schmidt Number)의 상관 관계식으로 나타낼 수 있다. 따라서 물질전달계수는 식 (9)와 같은 형태로 CHECWORKS 코드에 반영된다. 상수  $a, b, c$ 는 실험실이나 실제 운전 데이터로부터 구할 수 있다.

$$Sh = \frac{K d}{D} \quad (6)$$

$$Re = \frac{V d}{\nu} \quad (7)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (8)$$

$$Sh = a Re^b Sc^c \quad (9)$$

여기서,  $d$ 는 배관 직경,  $D$ 는 유체 속 철이온의 확산계수(Diffusion Coefficient),  $V$ 는 액상 유속,  $\nu$ 는 동점도를 각각 나타낸다. 2상 유체인 경우 Re수는 유체 흐름 중에 포함된 액상의 유속에 의존한다. 식 (10)은 2상 유체에서 액상의 유속을 나타낸 것이다.

$$V = \frac{W(1-x)}{A \rho_f(1-a)} \quad (10)$$

여기서,  $W$ 는 전체 질량유속,  $A$ 는 배관 단면적,  $x$ 는 건도(Steam Quality),  $\rho_f$ 는 액상 밀도,  $a$ 는 공극률(Void Fraction)을 나타낸다.

### 3. DB 구축

#### 3.1 글로벌 DB 구축

발전소 글로벌 DB란 CHECWORKS 전산코드를 활용한 감육해석 수행시 개별적으로 반영되는 데이터가 아니라 원전 2차측 배관에 전반적으로 적용되는 기초정보로서 상호 연계성을 가진다. 코드에 반영되는 글로벌 데이터로는 HBD와 증기사이클 데이터, 발전소 운전주기(이력), 수화학 환경 등이 있다.

HBD는 원자력 발전소 2차계통 주기기와 배관계통의 배열 상황을 보여주는 것으로서

CHECWORKS 전산코드의 Heat Balance Editor 기능을 이용하여 고리 1호기 HBD를 모델링 하였다. HBD는 해석이 수행되는 배관을 가지적으로 나타내어 줌으로써 배관감육 해석 및 관리를 용이하게 할 수 있도록 도와준다. 그림 3은 감육해석을 위하여 CHECWORKS 코드 내에 구성한 해당 원전 2차계통의 HBD를 제시한 것이다.

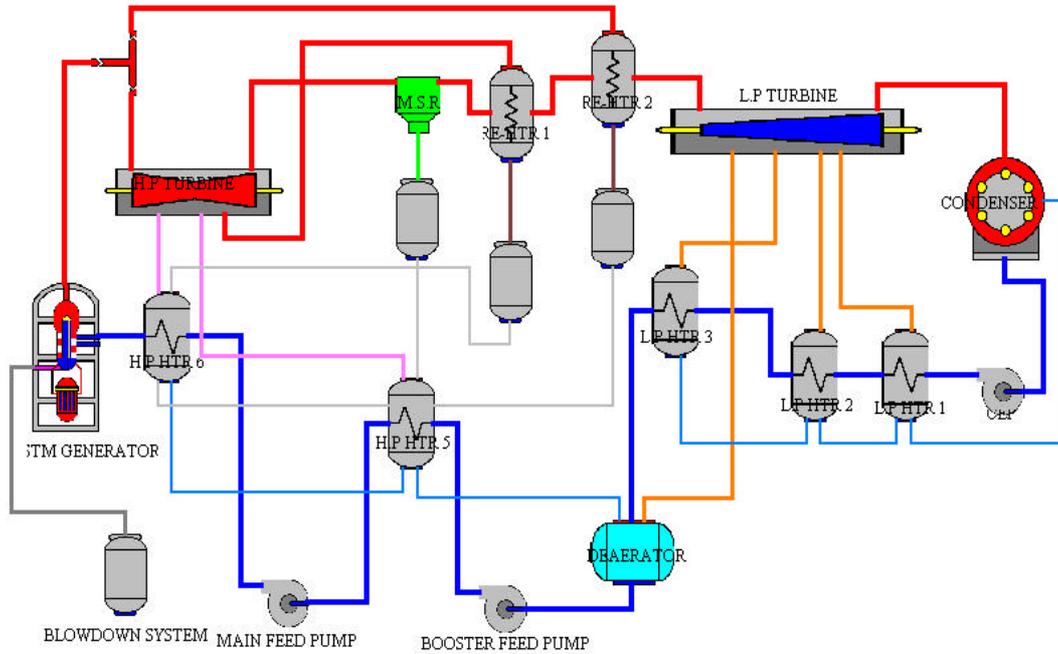


그림 3. Heat Balance Diagram

증기사이클 데이터는 100% 전출력에서의 Heat Balance를 기준으로 하였다. 이는 국내 원전이 기저부하를 담당하므로 본 고의 대상 원전 역시 100% 전출력으로 운전된 것으로 간주해도 무리가 없는 것으로 판단되기 때문이다. 또한 CHECWORKS 전산코드는 하나의 운전주기에 대해 하나의 출력준위를 일치시켜야 하는 코드상의 한계도 존재한다. 표 2는 코드에 입력한 해당 원전 HBD의 항목별 증기사이클 데이터를 나타낸 것이다. 표 2에서 HBD 항목은 CHECWORKS 전산코드에 내재된 고유명이며, 기기명은 실제 원전 2차측의 주요기기 명칭을 제시한 것이다.

CHECWORKS 코드에서 운전주기는 배관감육 해석과 UT 데이터 해석 과정에서 배관 감육률을 계산할 때 실제 운전시간을 반영하기 위하여 사용되며, 코드에는 운전기간(Cycle)과 계획예방정비기간(RFO : Refueling Outage)으로 입력된다. 운전기간 입력시에는 운전시작 및 종료시점과 실제 운전시간, 해당 운전주기에 대한 수처리 방식이 동시에 고려된다. 표 3은 해당 원전 운전주기별 수화학 환경, 출력준위 및 운전시간을 나타낸 것이다. 여기서 각 주기에 대한 운전시간은 발전기 계통병입 상태에서 정상적인 출력운전이 이루어진 시간을 합산하여 입력한 것이다.

CHECWORKS 전산코드에 반영되는 수화학 인자는 pH, 용존산소농도, pH 조절용 아민농도, 하이드라진 농도 등이다. 복수계통에서의 Cold pH와 증기발생기 입구에서의 용존산소농도를 입력하고 아민의 종류를 선택한 후 수화학 해석을 수행함으로써 2차계통 증기사이클 내 전체 배관에서의 수화학 조건이 결정되고 결과가 각 배관 컴포넌트의 감육해석에 반영된다. 표 4는 각 샘플지점에서 실측된 수화학 데이터를 평균하여 나타낸 것이다. 본 고에서 대상으로 하는 원전은 제17차 계획예방정비 기간 이후 2차계통 수처리 방식을 기존의 암모니아 수처리에서 에탄올아민 수처리 방식으로 변경하였다. 이는 2상 유체 계통 배관에서의 pH 값을 높게 유지함으로써 FAC(Flow Accelerated Corrosion)로 인한 감육속도를 저감시키기 위함이었다.

표 2. HBD 항목별 증기사이클 데이터

HBD 항목	기기명	매개변수	단위	값	Reference
FWHTR 6	L.P Heater #1	Temperature	°F	131.300	Tube Side Outlet
FWHTR 5	L.P Heater #2			158.400	
FWHTR 4	L.P Heater #3			221.300	
FWHTR 2	H.P Heater #5			363.400	
FWHTR 1	H.P Heater #6			433.900	
MSEP 1	Moisture Separator	Drain flow rate	Mlb/hr	0.596383	Drain
		Enthalpy	Btu/lb	944.500	Drain
		Pressure	psia	177.700	Drain
TANK 1	SG Blowdown Tank	Enthalpy	Btu/lb	1,197.600	Steam Outlet
		Pressure	psia	764.000	
TANK 2	MSR Drain Tank	Enthalpy	Btu/lb	944.500	Steam Outlet
		Pressure	psia	170.100	
TANK 3	1st STG ReHeater D.T	Enthalpy	Btu/lb	421.700	Steam Outlet
		Pressure	psia	397.000	
TANK 4	2nd STG ReHeater D.T	Enthalpy	Btu/lb	501.400	Steam Outlet
		Pressure	psia	764.000	
RHTR 1	1st STG ReHeater	STM flow rate	Mlb/hr	0.241805	Heating STM
		Enthalpy	Btu/lb	1,158.3	Drain
		Pressure	psia	397.000	Drain
RHTR 2	2nd STG ReHeater	STM flow rate	Mlb/hr	0.295059	Heating STM
		Enthalpy	Btu/lb	1,197.600	Drain
		Pressure	psia	764.000	Drain
DEAER 1	Deaerator	Enthalpy	Btu/lb	261.7	Drain Outlet
		Temperature	°F	292.2	Drain Outlet
HPEXTLINE 1	HP TBN Extraction STM to H.P Heater #6	STM flow rate	Mlb/hr	0.610721	Itself
		Enthalpy	Btu/lb	1,158.300	
		Temperature	°F	438.900	
		Pressure	psia	377.200	
HP EXTLINE 2	Cold Reheat STM to H.P Heater #5	STM flow rate	Mlb/hr	0.511350	Itself
		Enthalpy	Btu/lb	1,104.500	
		Temperature	°F	368.400	
		Pressure	psia	170.100	
LP EXTLINE 1	LP TBN Extraction STM to Deaerator	STM flow rate	Mlb/hr	0.346551	Itself
		Enthalpy	Btu/lb	1,191.000	
		Temperature	°F	292.200	
		Pressure	psia	59.600	
LP EXTLINE 2	LP TBN Extraction STM to L.P HTR #3	STM flow rate	Mlb/hr	0.305657	Itself
		Enthalpy	Btu/lb	1,116.000	
		Temperature	°F	226.300	
		Pressure	psia	19.400	
LP EXTLINE 3	LP TBN Extraction STM to L.P HTR #2	STM flow rate	Mlb/hr	0.203040	Itself
		Enthalpy	Btu/lb	684.500	
		Temperature	°F	163.400	
		Pressure	psia	5.150	
LP EXTLINE 4	LP TBN Extraction STM to L.P HTR #1	STM flow rate	Mlb/hr	0.253216	Itself
		Enthalpy	Btu/lb	732.200	
		Temperature	°F	136.300	
		Pressure	psia	2.6300	

표 3. 운전주기별 수화학 환경, 출력준위 및 운전시간

주기명	주기형태	수화학 환경*	출력준위	운전시간
시운전	Operating	Hydrazine	100.00	3,953.58
Cycle-1	Operating	Hydrazine	100.00	3,856.50
Cycle-2	Operating	Hydrazine	100.00	6,556.25
Cycle-3	Operating	Hydrazine	100.00	7,683.57
Cycle-4	Operating	Hydrazine	100.00	7,941.62
Cycle-5	Operating	Hydrazine	100.00	6,610.17
Cycle-6	Operating	Hydrazine	100.00	8,175.42
Cycle-7	Operating	Hydrazine	100.00	7,164.43
Cycle-8	Operating	Hydrazine	100.00	7,241.57
Cycle-9	Operating	Hydrazine	100.00	9,396.97
Cycle-10	Operating	Hydrazine	100.00	6,191.57
Cycle-11	Operating	Hydrazine	100.00	9,712.03
Cycle-12	Operating	Hydrazine	100.00	8,173.65
Cycle-13	Operating	Hydrazine	100.00	9,642.97
Cycle-14	Operating	Hydrazine	100.00	8,896.45
Cycle-15	Operating	Hydrazine	100.00	10,362.73
Cycle-16	Operating	Hydrazine	100.00	8,714.03
Cycle-17	Operating	Hydrazine	100.00	9,084.32
Cycle-18	Operating	Ethanolamine	100.00	8,507.57
Cycle-19	Operating	Ethanolamine	100.00	8,400.00

표 4. 수화학 변수 실측 데이터

(’97. 9 Monthly Average)

System	Analysis Item	pH at 25°C	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	DO	Remark
			ppb	ppb	ppb	
Steam Generator Blowdown "A"		9.20	837	74	N/D	
Steam Generator Blowdown "B"		9.20	837	74	N/D	
Condensate Water		9.61	1,340	-	0.8	
Feed Water		9.61	1,311	139	1.3	
HP Heater Drain		9.60	1,343	-	-	
Main Steam "A"		9.63	1,326	N/D	-	
Main Steam "B"		9.63	1,329	N/D	-	
Hotwell "A1"		9.65	1,334	19	1.5	
Hotwell "A2"		9.65	1,331	20	1.5	
Hotwell "B1"		9.65	1,330	18	1.5	
Hotwell "B2"		9.65	1,332	19	1.5	
Condensate Storage Tank		9.18	914	15.4	100	
Aux. Feed Water Storage Tank		6.40	-	-	150	
Condensate Polishing Plant Outlet		6.40	N/D	N/D	-	

### 3.2 개별 배관 데이터베이스 구축

CHECWORKS 전산코드를 활용한 배관감육 해석은 전체 8개 계통을 대상으로 하였다. DB화 한 8개 계통은 다음과 같다.

- Condensate System
- Main Feedwater System
- Main Steam System
- Extraction Steam System
- MSR & FW HTR Drains System
- Gland Sealing System
- LP & HP HTR Vents & Reliefs System
- Aux. Steam Heating & Venting System

감육해석 수행이 필요한 계통이 결정되면 원전 2차측의 배관관리를 용이하게 하기 위하여 배관 라인을 체계적으로 분류한다. 라인은 2차계통을 구성하고 있는 주기기 사이를 연결하는 배관을 의미하며, 코드에는 각 라인명, 계통, 상(Phase)의 형태, 라인그룹, 라인 클래스, 안전등급을 입력한다. 해당 원전의 라인 데이터베이스는 2차측 8개 계통 배관을 41개 라인 그룹(소분류 : 86개 라인그룹)과 194개의 라인으로 구분하였다. 그림 4는 해당 원전 2차측의 전체 배관 라인을 그룹화한 방법과 적용례를 제시한 것이다.

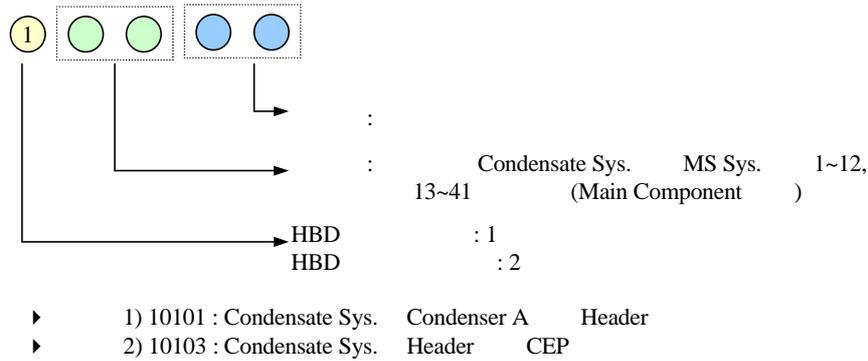


그림 4. 라인 그룹화 방법 및 적용례

배관 라인을 체계적으로 분류하여 DB화 한 후에는 개별 배관 컴포넌트에 대한 각종 설계 정보를 입력한다. 여기서 컴포넌트란 증기사이클의 주기기 사이를 연결하는 배관의 구성요소로서 노즐, 엘보우, 티, 리듀서, 익스펜더, 오리피스, 밸브, 직배관 등이 이에 해당된다. 컴포넌트 데이터에는 컴포넌트가 속해 있는 라인명, 컴포넌트명, 기하학적 형상, 공칭외경과 공칭두께, 스케줄, 재질, 설계압력과 온도, 보온재 종류 및 두께, 운전압력과 온도, 엔탈피, Steam Quality, 컴포넌트의 부위별 길이, 최소요구두께, 유량 등이 있으며, 모든 데이터는 배관감육 해석에 활용된다. 컴포넌트에 대한 데이터베이스 구축시 중요한 요소 중의 하나는 수 천 개에 달하는 컴포넌트를 서로 중복되지 않게 명칭을 부여해야 하며, 컴포넌트 명칭에 따라 해당 발전소의 계통과 Iso-drawing과의 관련성을 쉽게 파악할 수 있어야 한다. 이에 따라 배관 컴포넌트의 명칭은 다음과 같은 원칙에 따라 부여하였다.

- 계통 : 발전소 Iso-drawing과 연관성이 있어야 함
- 형상 : 컴포넌트의 기하학적 형상이 반영되어야 함
- 순서 : 유체흐름 방향에 따라 부여해야 함

#### 4. 배관 감육해석 및 결과분석

CHECWORKS 전산코드를 활용하여 배관감육 해석을 수행하기 위해서는 단락 2.에서 언급한 바와 같이 수화학 해석과 네트워크 해석이 선행되어야 한다. 수화학 해석은 2차계통 수화학 운전 데이터를 각 배관 컴포넌트의 감육해석에 반영될 수 있도록 하기 위하여 CHECWORKS 전산코드에 내재된 Water Chemistry Analysis 기능을 활용하여 수행하였다. 본 고의 대상 원전은 제17차 계획예방정비 이후 2차계통 수처리 방식을 기존의 암모니아 수처리에서 에탄올아민 수처리 방식으로 변경하였기 때문에 2회에 걸쳐 수화학 해석을 수행하였다. 네트워크 해석은 알고 있는 배관 라인의 입출구 유량, 압력, 엔탈피 등을 이용하여 유속, Steam Quality, 압력, 엔탈피 등을 계산하기 위하여 수행하는 것으로서 본 연구에서는 추가 라인, 습분분리 배수/배기 라인, 1, 2단 재열기 배수/배기 라인 등을 대상으로 38개 그룹의 40개 라인에 대해 수행하였다. 최종적으로 배관 감육해석은 상기에서 수행한 수화학 해석과 네트워크 해석을 기초로 하여 8개계통 144개 라인(35개 그룹)에 대하여 수행하였다.

그림 5는 감육해석을 수행한 8개 계통 중 원전 2차측의 주배관을 구성하고 있는 5개 계통

에 대한 감육률을 비교한 것으로서 감육률이 큰 순서대로 1번부터 100번까지를 정렬한 것이다. 이는 감육이 심하게 발생하는 배관계통을 확인해 보기 위함이다. 비교 결과 Moisture Separator & Feedwater Heater Drains System의 배관 컴포넌트들이 가장 감육에 민감한 것으로 확인되었으며, 다음으로 Main Feedwater System, Extraction Steam System, Main Steam System, Condensate System 순으로 감육정도가 심한 것으로 확인되었다. 그러나 Main Steam System의 배관들은 60번 이후부터는 감육률이 거의 0인 것으로 계산되었다. 이는 습분분리 재열기부터 저압터빈까지의 배관이 과열증기 상태를 유지하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

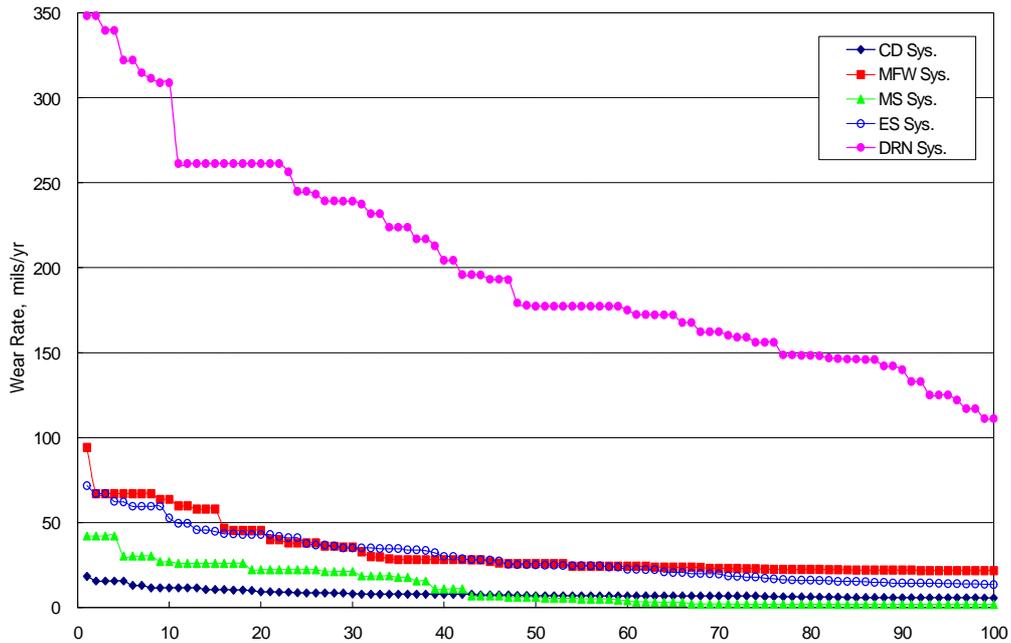


그림 5. 감육률 순위에 따른 계통별 감육률 비교

표 5는 계통별 주요 컴포넌트의 감육률을 비교한 것으로서 각 계통별로 감육률이 큰 상위 6개 컴포넌트를 제시한 것이다. 표 5에서 볼 수 있듯이 Condensate System에서는 주로 저압가열기 3번에서 탈기기로 가는 배관라인에서 그리고 Main Feedwater System에서는 고압가열기 5번 우회라인에서 감육률이 큰 것으로 계산되었다. Main Steam System에서는 습분을 상대적으로 많이 함유하고 있는 고압터빈과 습분분리재열기 사이의 배관라인에서 감육률이 큰 것으로 계산되었다. Extraction Steam System과 MSR & FW HTR Drains System에서는 각각 고압터빈에서 고압가열기 5번으로 가는 추기라인과 습분분리재열기 배수탱크에서 고압가열기 5번으로 가는 배관라인에서 감육률이 큰 것으로 계산되었다. 한편 각 계통에서 컴포넌트 형상에 따른 감육률은 일정한 경향을 보이지 않고 있었다.

그림 6은 해당 원전에서 확보한 3개 계통(Main Feedwater System, Extraction Steam System, Moisture Separator & Heater Drain System) 66개 컴포넌트의 실측 데이터를 이용하여 구한 감육률과 CHECWORKS 코드의 결과물인 배관 컴포넌트별 감육률을 비교하여 제시한 것이다. 그림 6에서 +50% 선과 -50% 선은 EPRI에서 제시한 코드 해석결과의 유효범위를 제시한 것으로서 EPRI에서 많은 실험과 실제 데이터를 코드해석 결과와 비교해 본 결과 대부분 상기  $\pm 50\%$  범위 내에 포함된다는 것을 의미한다. 본 연구의 비교 결과는 코드 예측값이 약간 위쪽으로 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 CHECWORKS 코드가 상기 3개 계통에서는 약간 보수적으로 예측하고 있음을 의미한다.

표 5. 계통별 주요 컴포넌트의 감육률 비교

계통	부위(라인명)	컴포넌트 코드	기기명	감육률, mils/yr
Condensate Sys.	LP HTR 3 to D/A	TLB06T01(BR.)	Tee	18.353
	LP HTR 3 to D/A	TLB06N01	Nozzle	15.572
	LP HTR 3 to D/A	TLB06V01	Valve	15.572
	COND to CEP	TLA06V02	Valve	13.071
	LP HTR 3 to D/A	TLB06E01	Elbow	11.523
	LP HTR 3 to D/A	TLB06E09	Elbow	10.612
Main Feedwater Sys.	HP HTR 5 BYPASS LINE	TDB01V04	Valve	94.143
	HP HTR 5 BYPASS LINE	TDA02E23	Elbow	66.985
	HP HTR HDR TOWARD SG	TDD01V06	Valve	63.673
	HP HTR 5 BYPASS LINE	TDA02E25	Elbow	59.744
	HP HTR 5 BYPASS LINE	TDA02P36	Straight Pipe	57.933
	HP HTR 5 BYPASS LINE	TDB01P22	Straight Pipe	46.615
Main Steam Sys.	HP TBN to MSR	TAA01N01	Nozzle	42.125
	HP TBN to MSR	TAA01P01	Straight Pipe	30.319
	HP TBN to MSR	TAA01P07	Straight Pipe	27.094
	HP TBN to MSR	TAA01E02	Elbow	25.991
	HP TBN to MSR	TAA01E06	Elbow	25.990
	HP TBN to MSR	TAA01E03	Elbow	25.981
Extraction Steam Sys.	HP EXT. to HTR 5	TGA02T02(U/S)	Tee	71.696
	HP EXT. to HTR 5	TGA01T01(D/S)	Tee	67.003
	HP EXT. to HTR 5	TGA01T02(D/S)	Tee	67.003
	HP EXT. to HTR 5	TGA01T03(D/S)	Tee	62.419
	HP EXT. to HTR 5	TGA01T03(BR.)	Tee	62.156
	HP EXT. to HTR 5	TGA01N01	Nozzle	59.510
MSR & FW HTR Drains Sys.	MSR DT to HTR 5	TKA03T01(U/S)	Tee	348.225
	MSR DT to HTR 5	TKC02T01(U/S)	Tee	348.225
	MSR DT to HTR 5	TKA03V02	Valve	339.631
	MSR DT to HTR 5	TKC02V02	Valve	339.631
	MSR DT to HTR 5	TKA03N01	Nozzle	322.158
	MSR DT to HTR 5	TKC02N01	Nozzle	322.158

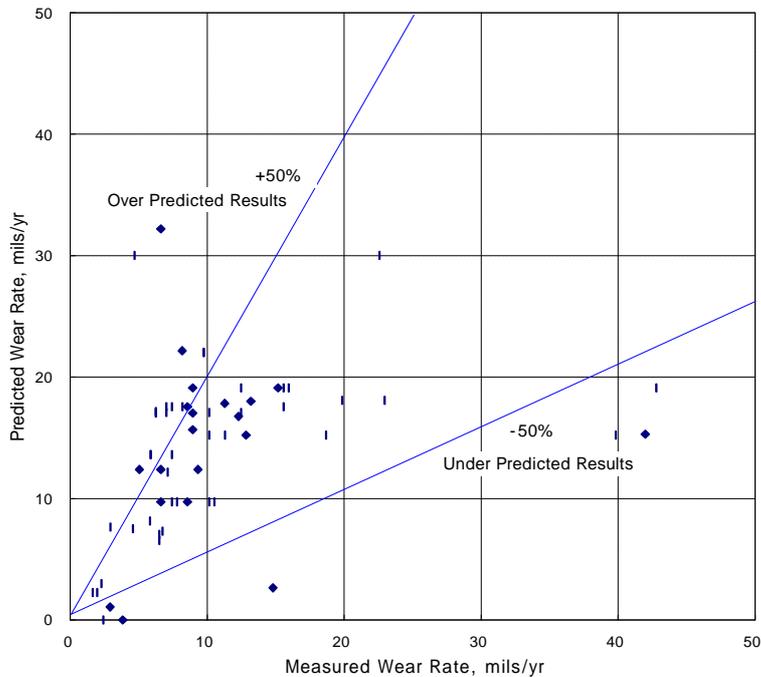


그림 6. 실측 및 예측 감육률 비교

그림 7은 그림 6의 비교 결과를 감육률 순위에 따라 재정렬하여 도시한 것이다. 이는 CHECWORKS 코드를 이용하여 배관감육 현상을 해석한 결과가 최종적으로는 현장의 감육 배관 관리에 반영되기 때문에 본 결과를 이용하여 정립할 감육배관 관리체계가 적절한지의 여부를 확인해 보기 위함이었다. 그림에서 볼 수 있듯이 코드예측 결과는 몇 개 부위를 제외하고는 대부분 실측결과 보다 약간 보수적으로 계산되었으며, 배관라인 부위별 감육률도 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 여기서 예측치와 현저한 차이를 보이는 부위는 UT 측정여러, 제작공차, 다른 손상원인에 의한 두께감육 등으로 인한 오차인 것으로 추정된다. 상기 결과들로 미루어 볼 때 본 연구의 최종 결과물인 코드해석 결과와 과거 실측이력을 적절하게 반영하여 실제 원전 2차측의 감육배관 관리체계 정립에 활용할 경우 기존의 비효율적인 배관관리 방식보다 많은 시간과 소요인력을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

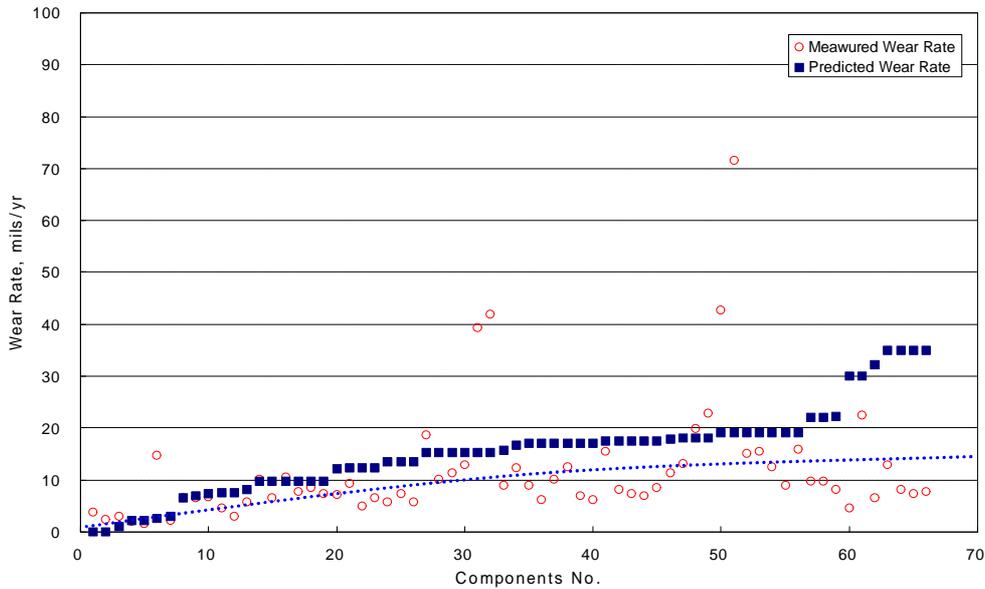


그림 7. 감육률 순위에 따른 실측 및 예측값 비교

### 5. 결론

본 고는 CHECWORKS 전산코드를 활용하여 국내 특정 원전 2차측 주요 배관의 감육해석 수행 결과를 수록한 것으로서 감육해석 결과는 국내 원전 2차측 배관의 효율적인 관리방안 수립에 활용되기 때문에 결과의 유용성과 감육경향 분석에 중점을 두었다.

본 고의 서두에는 CHECWORKS 코드의 기능 및 역할을 간단히 소개하고 이를 활용하여 원전 2차측 배관감육 해석을 수행하는 방법과 절차를 제시하였다. 그리고 국내 특정 원전 8개 계통을 대상으로 실제 구축한 데이터베이스와 이를 기반으로 수화학 해석, 네트워크 해석 및 감육해석을 수행한 방법과 결과를 제시하였다.

8개 계통을 대상으로 한 감육해석 결과, 해당 원전 2차측에서는 Moisture Separator & Feedwater Heater Drains System이 가장 감육이 심한 것으로 예측되었으며, 이 중에서도 습분분리 재열기 배수탱크와 급수가열기 5번 사이의 배관라인에서 감육률이 가장 큰 것으로 예측되었다. 그리고 해석결과를 실측 데이터에 근거한 감육률과 비교한 결과 전반적으로 실측치 보다 30% 정도 보수적으로 예측하고 있는 것을 확인하였으며, 컴포넌트 부위별 감육경향도 유사한 분포를 보이고 있었다. 이러한 결과에 미루어 볼 때 본 연구의 최종 목표인 2차측 감육배관 관리 표준기술체계 확립을 위하여 CHECWORKS 코드의 결과를 충분히 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. B. Chexal, 1998, CHECWORKS Application Manager, Version 1.0D, TR- 103198-P3.