

계속운전시 냉각재환경을 고려한 환경기인피로 감시

- EAF Monitoring Considering the Coolant Environment for the Continued operation -

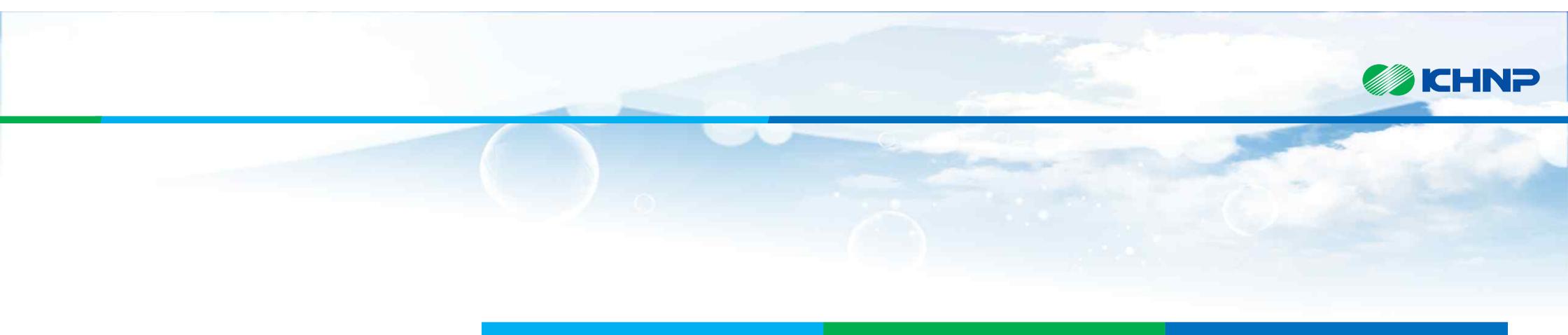
2024. 5. 8.

한국수력원자력(주) 중앙연구원
기계연구소 재료기술그룹 이종훈



Contents

- 1 개요
- 2 피로감시시스템 구축 현황
- 3 환경피로감시 방법
- 4 향후 계획



1

개 요



1. 개요

● 금속피로

- 재료에 항복강도 이하의 하중이 반복적으로 작용하여 금속의 재료특성이 저하되고 파손에 이르는 경년열화(Aging) 현상

● 환경피로

- 경수로형 원전 냉각재 환경 영향을 고려한 금속 피로로 금속피로수명에 환경영향인자(F_{en})를 곱하여 적용

● 피로감시시스템(NuFMS: Nuclear Fatigue Monitoring System)

- 원자력발전소 운영기간 동안 안전등급 1 기기 및 배관의 피로 수명 및 건전성을 체계적으로 관리하는 프로그램/종합 체계

1. 개요

● 피로감시 관련 지침

- USNRC Regulatory Guide 1.207, 2007(R.0) / 2018(R.1)
- USNRC NUREG/CR-6909, 2007(R.0) / 2018(R.1)
- KINS 규제지침 5.4 “환경영향에 의한 금속기기의 수명감소 관련 신규 원전 피로해석 평가,” KINS, 2011

● 계속운전 원전 환경피로 적용 근거

- NUREG-1800 R2(2010), ‘4.3 Metal Fatigue’
- NUREG-1801 R2(2010), ‘Chap. X. Time-Limited Aging Analyses’
- KINS-GE-N008 ‘가압경수로형 원전 계속운전 심사지침서’
- KINS/RG-N05.04 ‘금속기기의 피로평가를 위한 경수로 냉각재 환경의 영향 평가’

 2

피로감시시스템 구축 현황

2. 피로감시시스템 구축 현황

● 피로감시(국내)

■ 근거

- **가동원전** : 원자력안전법 시행령 제37조(주기적 안전성평가의 내용), 제38조(주기적 안전성평가의 방법 및 기준), 원자력안전법 시행규칙 제20조(주기적 안전성평가의 세부내용) ①항
- **계속운전** : 원자력안전위원회 고시 제2017-29호 제4조(계속운전 평가에 적용되는 기술 기준), "1. 최신 운전경험 및 연구결과 반영사항" , "다. 계속운전을 위한 수명평가"

■ 적용원전

- 계속운전 요건 : 고리#1 ('08), 월성#1 ('11)
- PSR 안전성 증진사항 이행 : 고리#2 ('11)
- 후쿠시마 후속조치 이행 : 고리#3,4 ('16) / 한빛#1,2 ('16) / 한울#1,2 ('16)
- 경년열화 관리 : 한울#3,4,5,6 ('21) / 한빛#3,4,5,6 ('21)
 - **구축 중** : 월성#2,3,4 ('25) / 신고리#1,2 ('24) / 신월성#1,2 ('24)
- 신규원전(60년 설계, **환경피로**) : 새울#1,2 ('14) / 신한울#1,2 ('17) / 새울#3,4 (건설중)

2. 피로감시시스템 구축 현황

● 프로그램 적용 현황

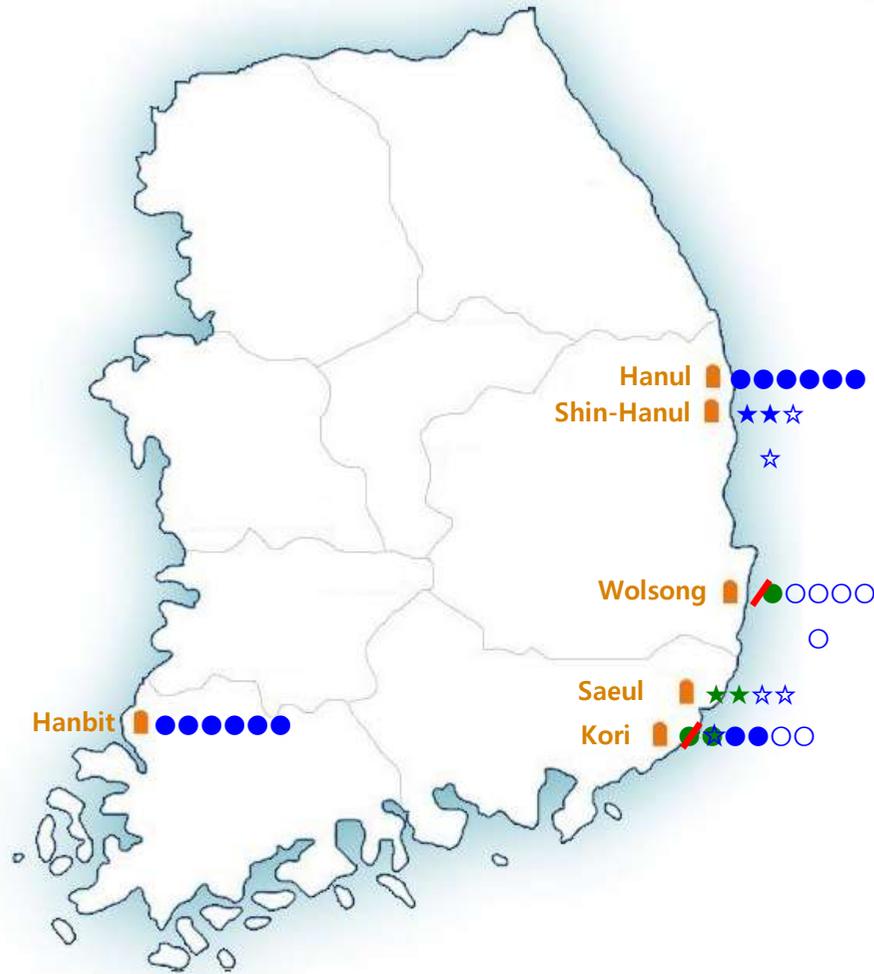
■ 국내

- NuFMS(Nuclear Fatigue Monitoring System) : '11 한수원 CRI 개발
 - 공기환경 피로감시방법('14, TR-KHNP-0028)
 - 냉각재환경 피로감시방법('19, TR-KHNP-0039)
 - 고리#3,4 / 한빛#1~6 / 한울#1~6 / 신한울#1~4 / 새울#3,4 / 월성#2~6
 - UAE BNPP 1,2('18) / 3,4 ('21)

■ 국외

- Fatigue-Pro 3 (EPRI/SI) : 공기환경 피로감시시스템
 - ~~고리#1,2/월성#1~~
- Fatigue-Pro 4 (SI) : 냉각재환경 피로감시시스템
 - 새울#1,2
- WESTEM (WEC) : WEC 피로설계 코드와 연계된 시스템 (공기환경 피로감시)
- FAMOS (Siemens) : 독일내 일부 원전 (공기환경 피로감시)

2. 피로감시시스템 구축 현황



- : Fatigue Pro(SI)
- : NuFMS(KHNP)
- : NuFMS(Developing)
- ★ : NuFMS(EAF)

- ▶ Fatigue Pro(SI) : 3기 (고리#2 / 새울#1,2)
 - 고리#2 : 환경피로감시시스템 전환 중(~5.31.)
 - 새울#1,2 : NuFMS로 전환 예정(~2028)
- ▶ NuFMS : 27기 (구축 완료: 18기 / 구축 중: 9기)
- ▶ 환경피로 적용(구축 중)
 - APR1400(신한울#1~4 / 새울#1~4)
 - 계속운전(고리#2~4 / 한빛#1,2 / 한울#1,2)

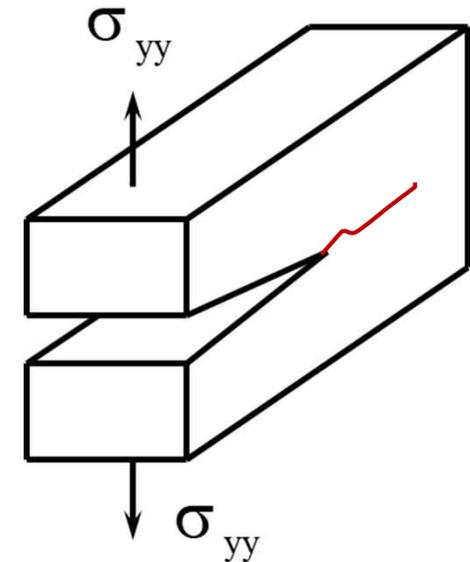
 3

환경피로감시 방법

3. 환경피로평가 방법

● 피로거동

- 동적인 변동응력하에 나타나는 손상의 일종
- 항복강도나 인장강도보다 매우 낮은 응력 상태에서 발생 가능한 손상
- 장시간 응력 및 변형률 사이클 반복 후 발생하는 손상으로 금속파손의 80~90%가 피로에 의해 발생
- 피로손상의 과정은 크게 균열 생성 및 균열 전파로 구성되며, 균열은 작용하는 인장응력의 수직방향으로 전파(Mode I)



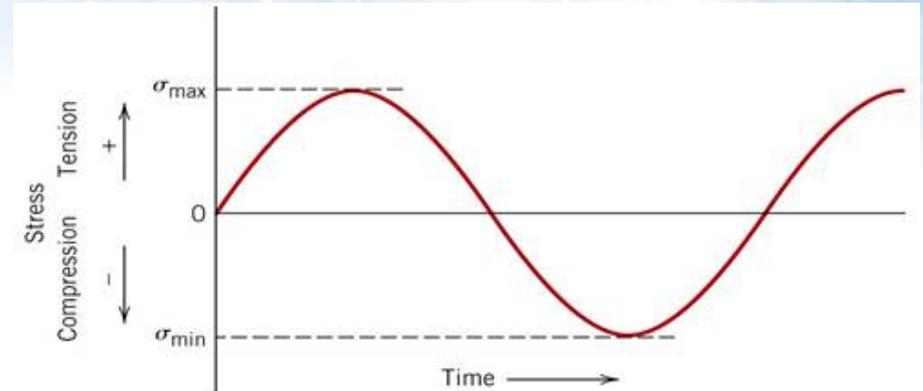
3. 환경피로평가 방법

● Stress Cycle

교번응력사이클

(Reversed Stress Cycle)

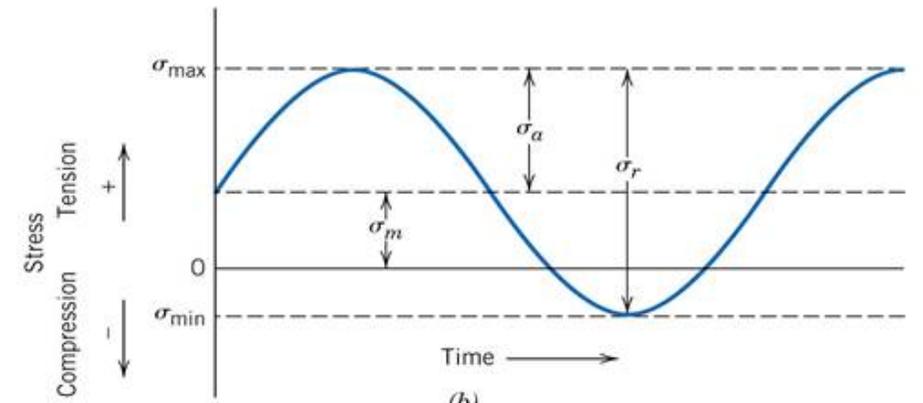
- 시간에 따라 규칙적인 사인 곡선의 형태
- 응력비 = -1 (S_{max}/S_{min})



반복응력사이클

(Repeated Stress Cycle)

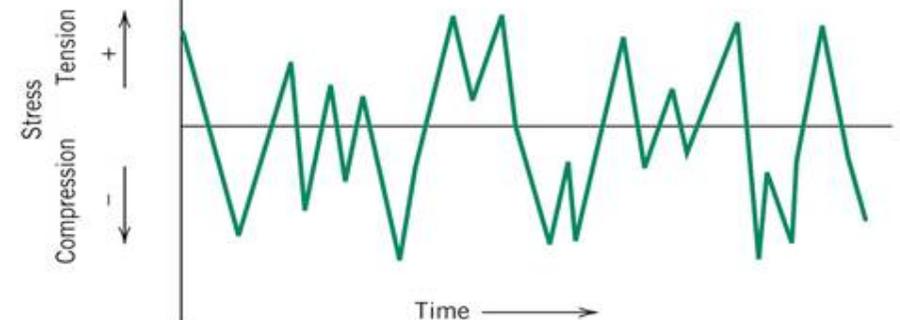
- S_{max} 와 S_{min} 비대칭적



무질서한 응력사이클

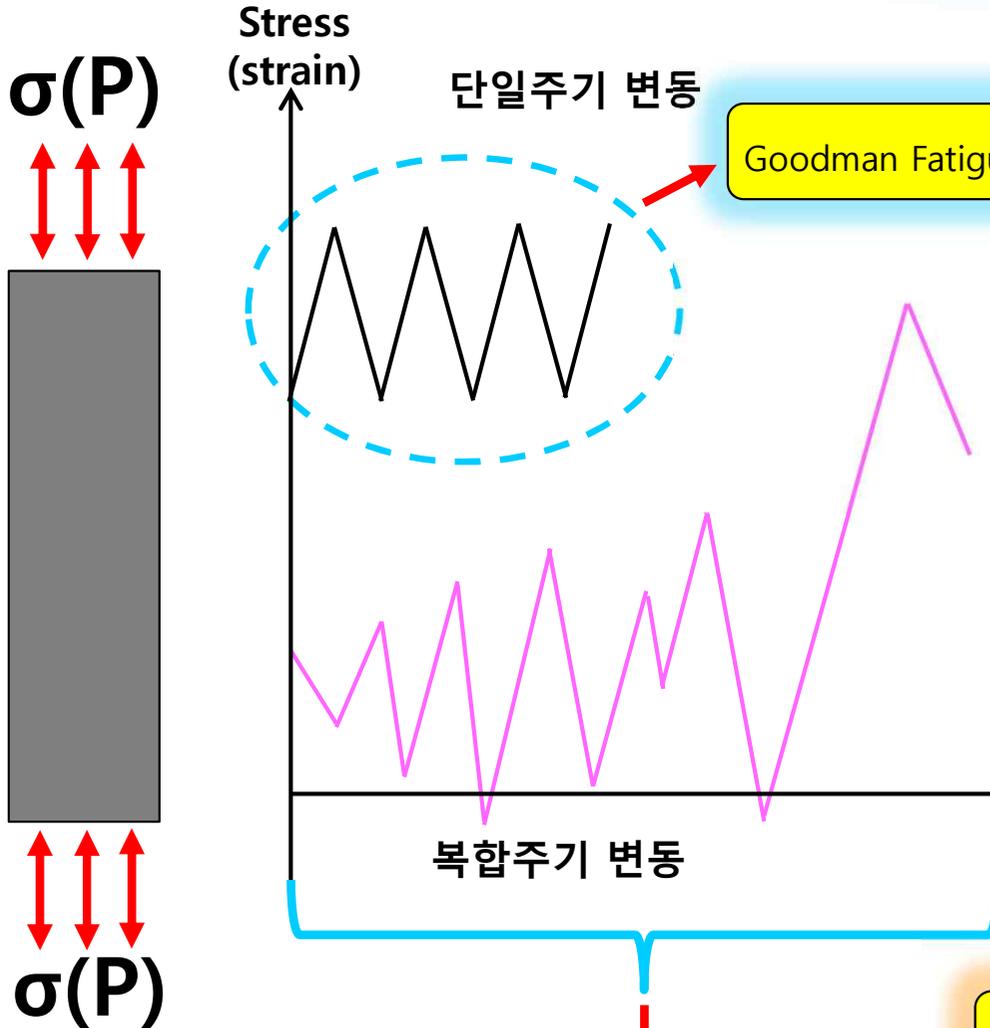
(Complex Stress Cycle)

- 응력진폭 및 주파수가 무질서



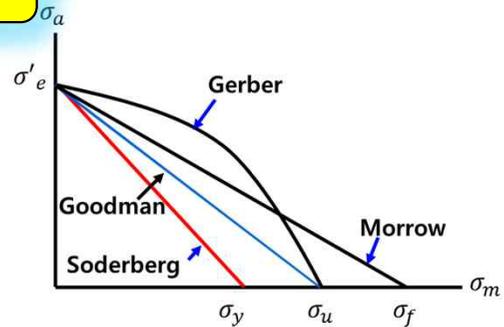
3. 환경피로평가 방법

● 피로수명 예측



Goodman Fatigue Equation

Gerber (Germany, 1874)	Goodman (England, 1899)	Soderberg (USA, 1930)	Morrow (USA, 1960s)
$\frac{\sigma_a}{\sigma'_e} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right)^2 \leq 1$	$\frac{\sigma_a + \sigma_m}{\sigma'_e \sigma_u} \leq 1$	$\frac{\sigma_a + \sigma_m}{\sigma'_e \sigma_y} \leq 1$	$\frac{\sigma_a + \sigma_m}{\sigma'_e \sigma_f} \leq 1$



- σ_a : 응력진폭
- σ_m : 평균응력
- σ_y : 항복강도
- σ_u : 인장강도
- σ_f : 진파괴응력
- σ'_e : 유효변동응력

$$\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots = \sum \frac{n_n}{N_n} \leq 1$$

Miner's Cumulative Damage Rule

3. 환경피로평가 방법

● 공기환경 피로실험 기반

- ASME 코드 Sec. III 요건에 따라 피로평가가 수행된 모든 안전등급 1 기기 및 배관에 적용 가능

● 원자로냉각재환경 피로실험 기반

- ASME 코드 Sec. III 요건 + 원자로냉각재환경에 따라 피로평가가 수행된 모든 안전등급 1 기기 및 배관에 적용 가능
- 재료 : 탄소강(Carbon Steel), 저합금강(Low Alloy Steel), 스테인리스강(Stainless Steel) 및 Alloy 600/690과 같은 니켈계 합금(Nickel-Based Alloy) 등의 금속 재료

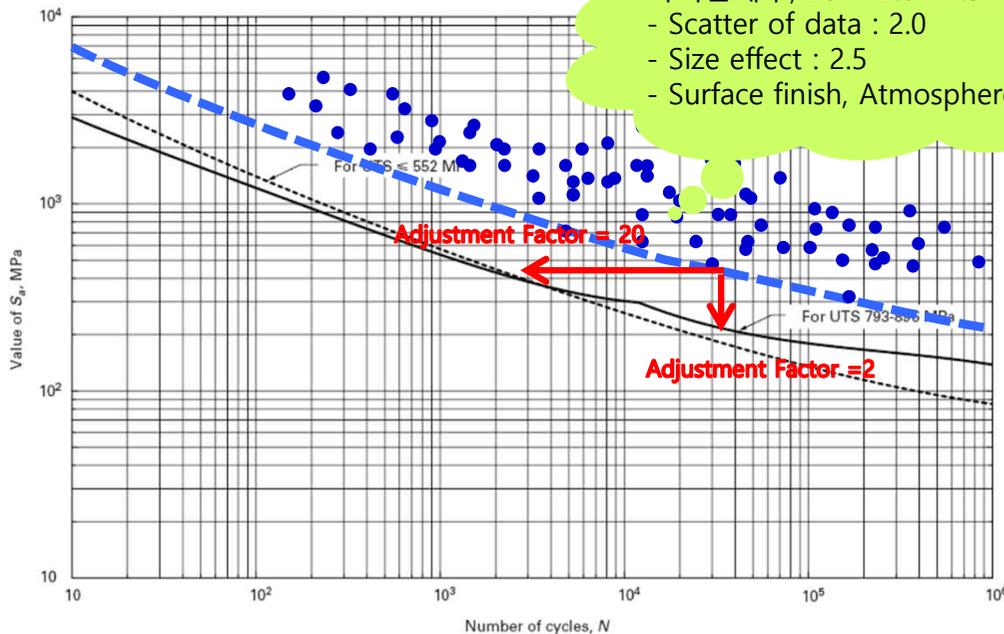
3. 환경피로평가 방법 - 공기환경 피로실험 기반

ASME Sec. III NB 설계피로선도(Div. 1 App. I)

설계피로선도 결정(여유도)

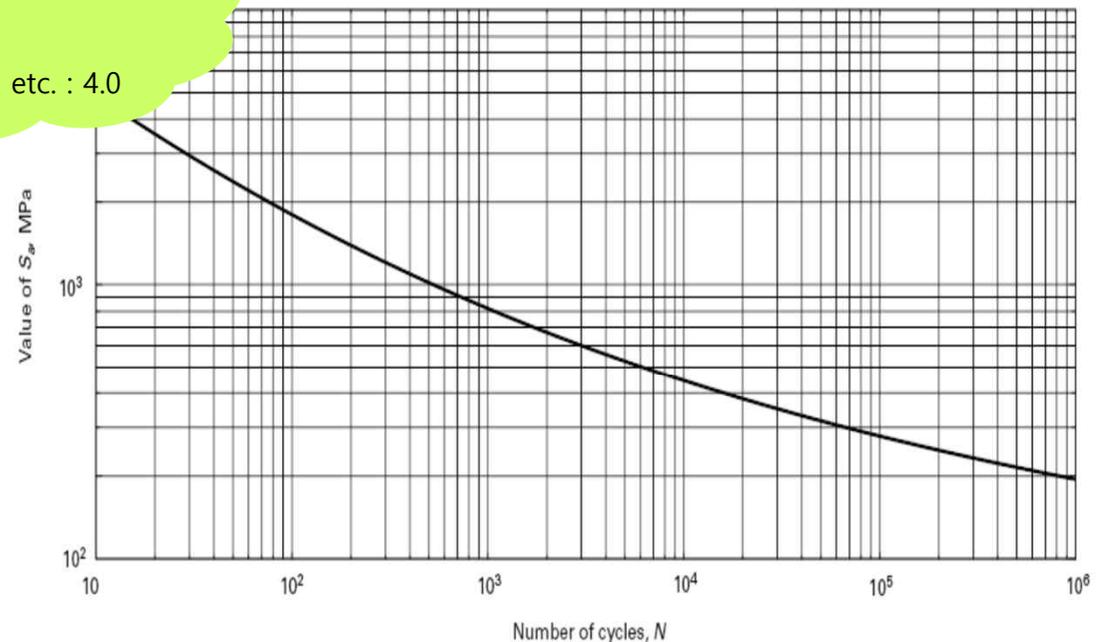
- Strain(Stress) 2 : 재질의 다양성에 기초한 변형 시작시 기기/시험시편 불확실성 반영
- Cycles 20 : 재질, 시편기공, 표면처리, 환경 등 수명 불확실성 반영

사이클계수, 20 = 2.0 x 2.5 x 4.0
 - Scatter of data : 2.0
 - Size effect : 2.5
 - Surface finish, Atmosphere etc. : 4.0



GENERAL NOTES:
 (a) $E = 207 \times 10^3$ MPa
 (b) Interpolate for UTS 552-793 MPa
 (c) Table I-9.1M contains tabulated values and a formula for an accurate interpolation of these curves.

탄소강 및 저합금강



GENERAL NOTES:
 (a) $E = 195 \times 10^3$ MPa
 (b) Table I-9.1M contains tabulated values and a formula for an accurate interpolation of this curve.

스테인리스강

3. 환경피로감시 방법 - 대상선정

- 피로감시 대상부위 선정 : (기준 1 or 기준 2) and 기준 3 and 기준 4
 - 기준 1 : 누적피로사용계수 기준 위험도(임계값 0.25 기준)
 - 기준 2 : 환경피로평가 불만족 부위 NUREG/CR-6260 권고 부위
 - 기준 3 : 운전 및 정비경험(국내외 사례 및 심사기관 권고사항 포함)
 - 기준 4 : 기기 및 계통별 안배
- 계속운전 원전 환경피로감시 대상부위 선정
 - 시간제한 경년열화 분석법(TLAA: Time-Limited Aging Analyses)
 - TLAA-1 : 시간제한 경년열화 분석이 계속운전 기간 동안 유효
 - TLAA-2 : 시간제한 경년열화 분석이 계속운전 기간 종료시점까지 예측됨
 - TLAA-3 : 의도된 기능에 대한 경년열화의 영향이 계속운전 기간동안 관리됨
 - TLAA -2에 따라 환경피로평가 수행
 - 환경피로평가 불만족 부위에 대해 TLAA-3 방법론을 적용하여 환경피로 감시

3. 환경피로감시 방법 - 피로평가

● 응력 기반 피로평가(Stress-Based Evaluation, SBE)

발전소의 실제 운전 데이터를 이용하여 작용 응력과 해당 발생 횟수를 재평가하고 이를 통해 피로를 평가하는 방법

● 피로평가 방법

- 공기환경 누적피로사용계수(CUF_{air}) : 자동계수화 로직을 통해 계수된 과도 조건 횟수를 이용하여 각 **과도조건** **쌍**별로 피로계수를 구한 후 합계

$$CUF = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_m}{N_m}$$

- 원자로냉각재환경 누적피로사용계수(CUF_{en}) : 공기환경 **하중조합쌍** 별 피로계수에 **환경보정계수(F_{en})**값을 곱한 후 합계

$$CUF_{en} = \left(\frac{n_1}{N_1} \times F_{en_1} \right) + \left(\frac{n_2}{N_2} \times F_{en_2} \right) + \left(\frac{n_3}{N_3} \times F_{en_3} \right) + \dots + \left(\frac{n_n}{N_n} \times F_{en_n} \right)$$

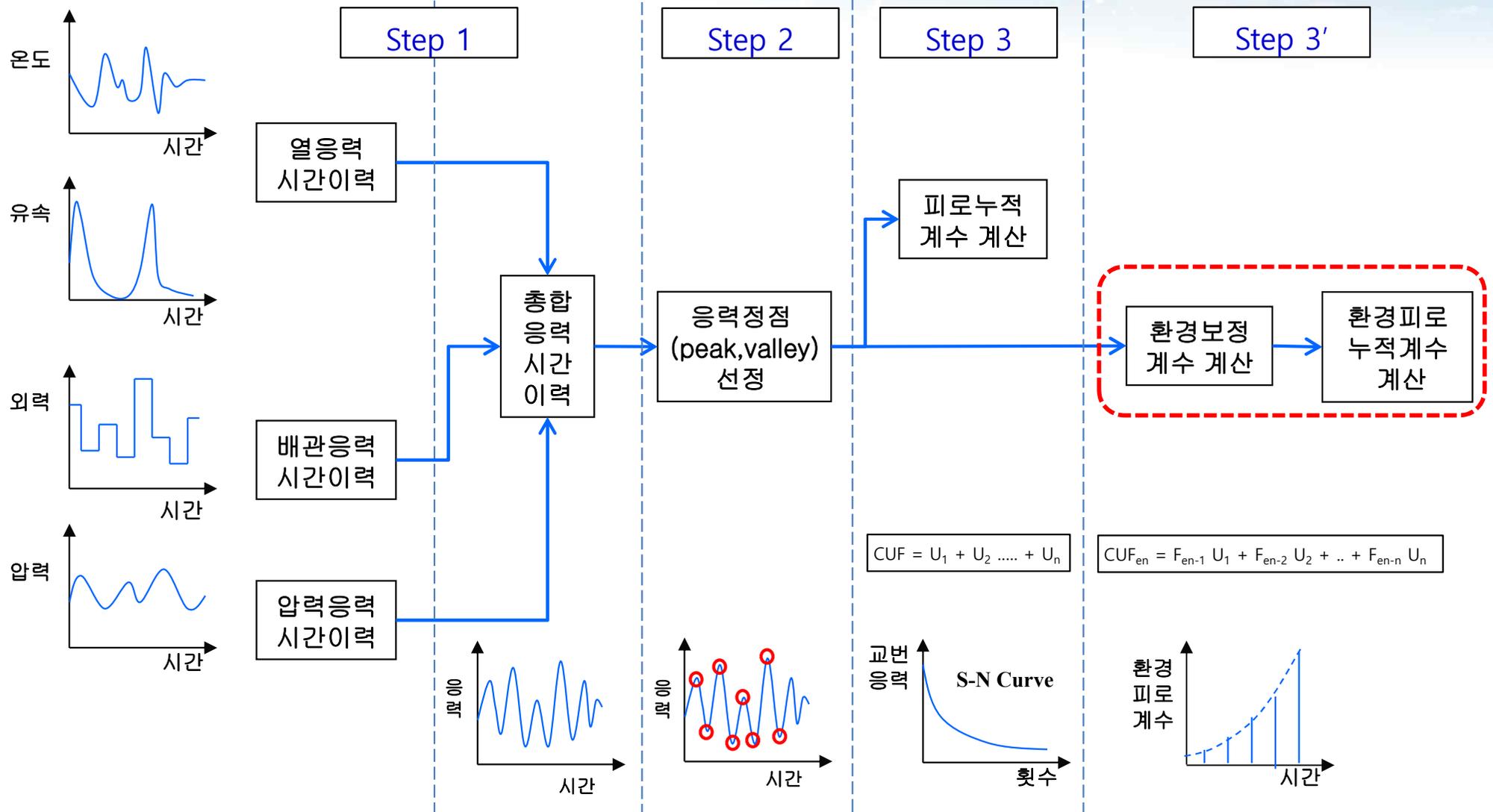
3. 환경피로감시 방법 - 피로평가

● 환경보정계수(F_{en}) 계산방법 : NUREG/CR-6909 R.0 적용

재질	F_{en} Value	Variables (T^* , O^* , $\dot{\epsilon}^*$)	
탄소강, 저합금강	<ul style="list-style-type: none"> ○ 탄소강 : $F_{en} = \exp(0.632 - 0.101 \times S^* \times T^* \times O^* \times \dot{\epsilon}^*)$ 최대값 : 6.76, 최소값 : 1.88 (DO=0.1ppm, S=0.01 wt.%) ○ 저합금강 : $F_{en} = \exp(0.702 - 0.101 \times S^* \times T^* \times O^* \times \dot{\epsilon}^*)$ 최대값 : 7.25, 최소값 : 2.02 (DO=0.1ppm, S=0.01 wt.%) 	$S^*=0.001$ $S^*=S$ $S^*=0.015$	$S \leq 0.001$ wt.% $S \leq 0.015$ wt.% $S > 0.015$ wt.%
		$T^*=0$ $T^*=T - 150$	$T < 150^\circ\text{C}$ $150 \leq T < 350^\circ\text{C}$
		$O^*=0$ $O^* = \ln(\text{DO}/0.04)$ $O^* = \ln(12.5)$	$\text{DO} < 0.04\text{ppm}$ $0.04 \leq \text{DO} < 0.5\text{ppm}$ $\text{DO} \geq 0.5\text{ppm}$
		$\dot{\epsilon}^*=0$ $\dot{\epsilon}^* = \ln(\dot{\epsilon})$ $\dot{\epsilon}^* = \ln(0.001)$	$\dot{\epsilon} > 1\%/s$ $0.001 \leq \dot{\epsilon} \leq 1\%/s$ $\dot{\epsilon} < 0.001\%/s$
스테인리스강	$F_{en} = \exp(0.734 - T^* \times \dot{\epsilon}^* \times O^*)$ 최대값 : 14.51, 최소값 : 2.08	$T^*=0$ $T^* = (T-150)/175$ $T^*=1$	$T < 150^\circ\text{C}$ $150^\circ\text{C} \leq T < 325^\circ\text{C}$ $T \geq 325^\circ\text{C}$
		$\dot{\epsilon}^*=0$ $\dot{\epsilon}^* = \ln(\dot{\epsilon}^*/0.4)$ $\dot{\epsilon}^* = \ln(0.0004/0.4)$	$\dot{\epsilon} > 0.4\%/s$ $0.0004\%/s \leq \dot{\epsilon} \leq 0.4\%/s$ $\dot{\epsilon} < 0.0004\%/s$
		$O^*=0.281$	all DO levels
Ni-Cr-Fe 합금	$F_{en} = \exp(- T^* \times \dot{\epsilon}^* \times O^*)$ 최대값 : 4.52, 최소값 : 1.0	$T^*=T/325$ $T^*=1$	$T < 325^\circ\text{C}$ $T \geq 325^\circ\text{C}$
		$\dot{\epsilon}^*=0$ $\dot{\epsilon}^* = \ln(\dot{\epsilon}^*/5.0)$ $\dot{\epsilon}^* = \ln(0.0004/5.0)$	$\dot{\epsilon} > 5.0\%/s$ $0.0004\%/s \leq \dot{\epsilon} \leq 5.0\%/s$ $\dot{\epsilon} < 0.0004\%/s$
		$O^*=0.16$	all DO levels

3. 환경피로감시 방법 - 피로평가(SBE & SBE_{en})

● 피로평가 절차



3. 환경피로감시 방법 - 피로평가(SBE & SBE_{en})

- Step 1 : 평가 기간에 대한 개별 및 종합 응력-시간이력 계산
 - 온도/유속/유량 등의 변화를 응력으로 계산 : 그린함수(비선형)

$$\sigma_{Thermal} = \int Green's\ Function \times (T_{Loc}) dt = G_o(P)\phi(t) + \sum_{t-t_d}^t \hat{G}(P, t-\gamma)\Delta\phi(\gamma)$$

- 압력/외력 등의 변화를 응력으로 변환 : 전달함수(선형)

$$\sigma_{Pressure} = K_1 \times A \times (Pressure) \quad \sigma_{Mechanical} = K_2 C_2 \times D / 2I \times M(Temperature)$$



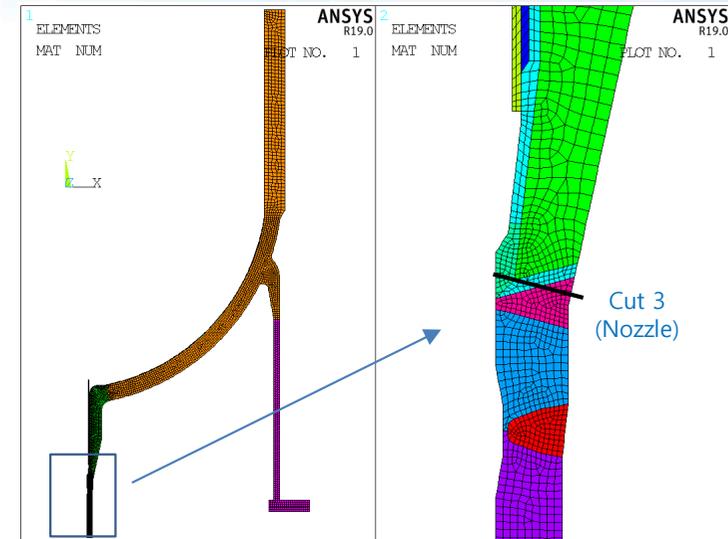
$$\sigma_{Total} = \sigma_{Thermal} + \sigma_{Pressure} + \sigma_{Mechanical}$$

3. 환경피로감시 방법 - 피로평가(SBE & SBE_{en})

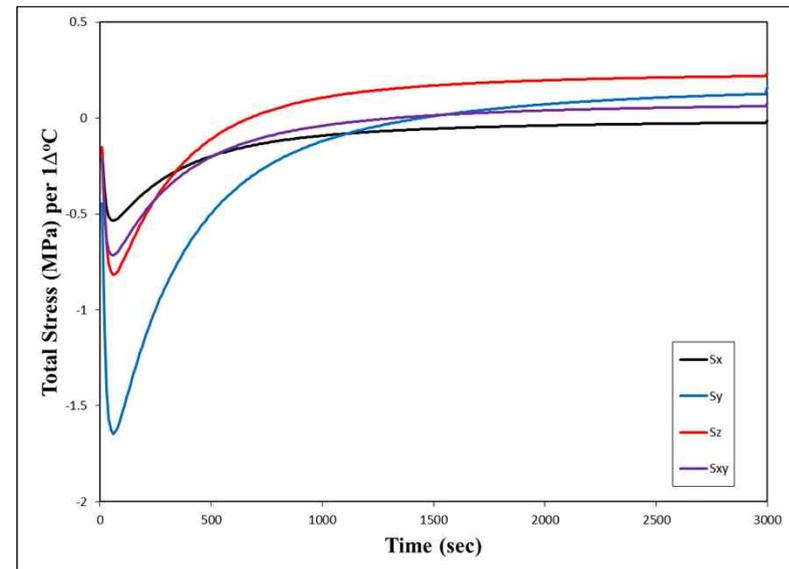
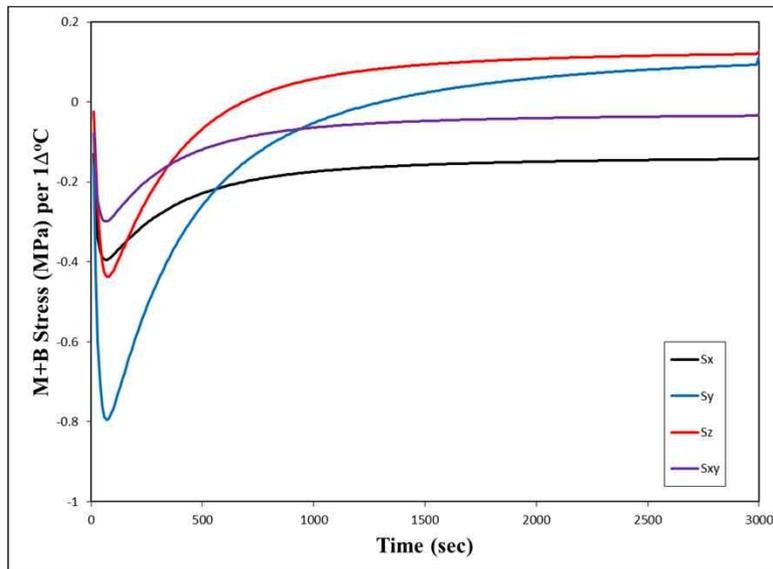
● Step 1 : 그린함수(예)

PZR Surge Nozzle

Sub-component	Material		Reference
1	Surge Line	SA-312 TP347 / 18Cr-10Ni-Cb	SR, UE-221CN-202, Page 10
2	Safe End to Piping Weld	Stainless Steel / -	Note 1
3	Safe End	SA-182 F347 / 18Cr-10Ni-Cb	SR, UE-221CN-202, Page 10
4	Safe End to Nozzle Weld	SB-168 (Alloy 690) / 58Ni-29Cr-9Fe	SR, UE-221CN-202, Page 53/A2
5	Nozzle	SA-541 Gr. 3 Cl. 1 / 1/2Ni-1/2Mo-V	SR, UE-221CN-202, Page 10
6	PZR Lower Head/Shell	SA-508 Gr. 3 Cl. 1 / 3/4Ni-1/2Mo-Cr-V	SR, UE-221CN-202, Page 10
7	Support Skirt	SA-516 Gr. 70 / Carbon Steel	SR, UE-221CN-102, Page 4
8	Cladding	SA-240 TP304 / 18Cr-8Ni	SR, UE-221CN-512, Page 6/A2
9	Thermal Sleeve	SB-167 (Alloy 690) / 58Ni-29Cr-9Fe	SR, UE-221CN-512, Page 6/A2
10	Water Gap	Note 2 / -	



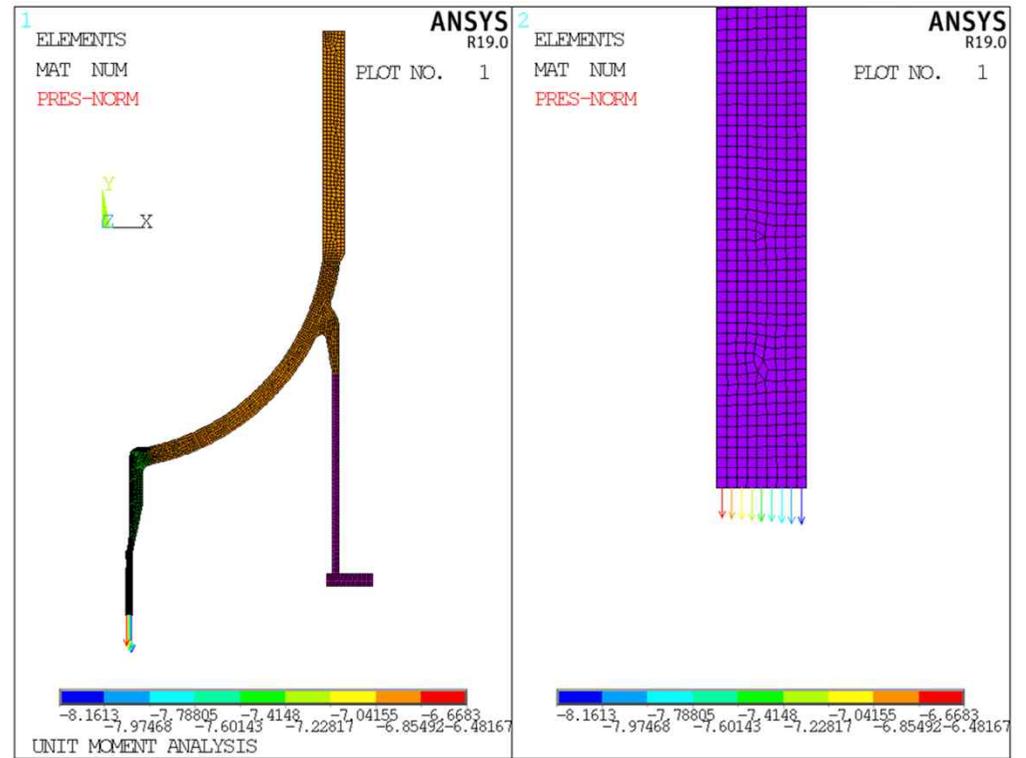
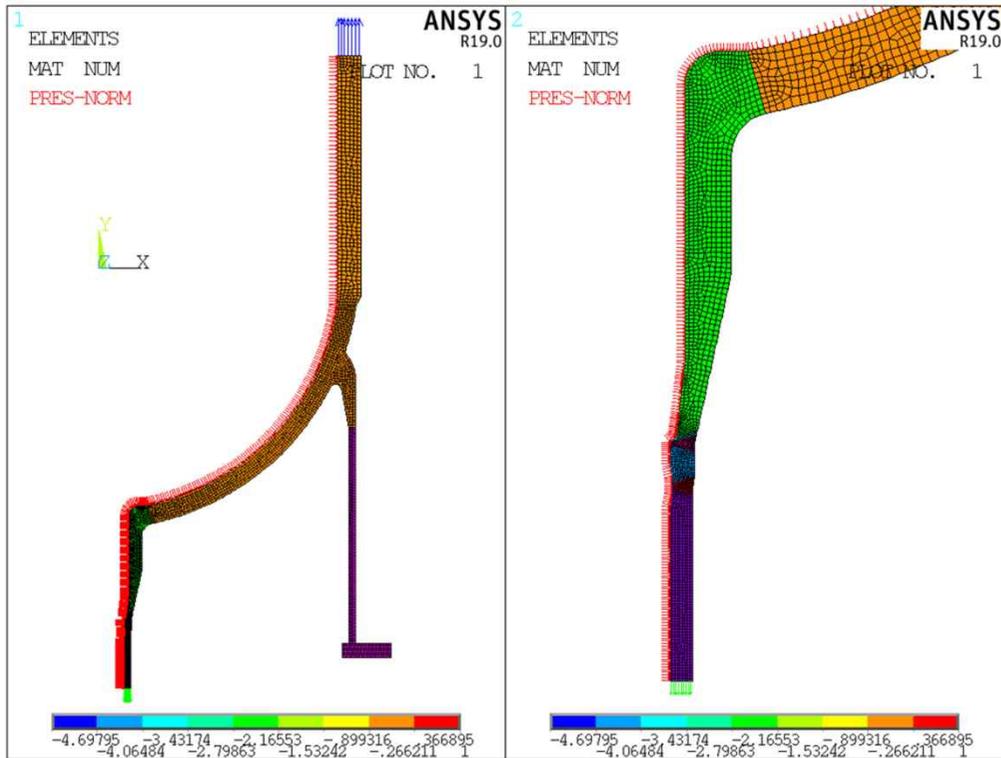
GF1_Q1
Low flow rate
(Q≤100gpm)



3. 환경피로감시 방법 - 피로평가(SBE & SBE_{en})

● Step 1 : 전달함수(예)

PZR Surge Nozzle



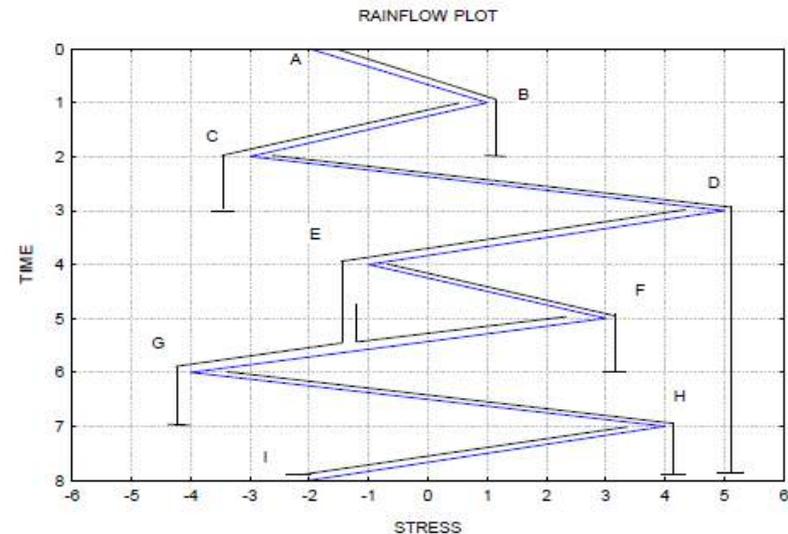
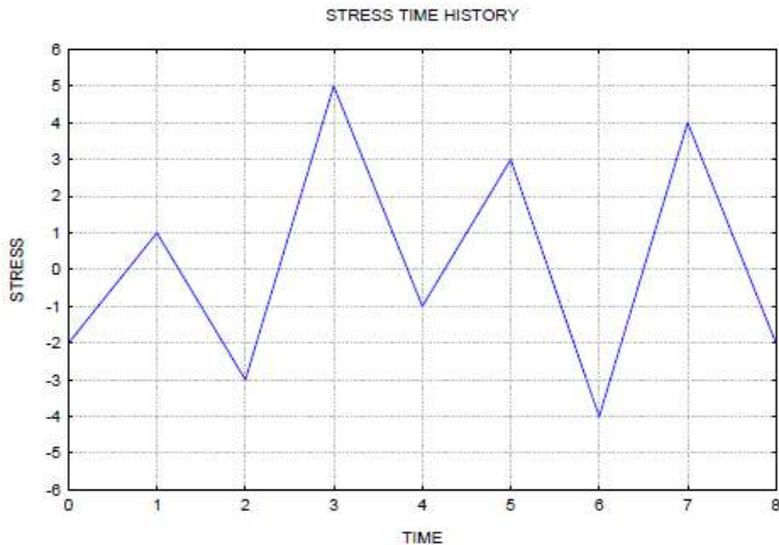
Pressure Stresses (MPa) per 1 kg/cm ²					
UNIT_PR_MB_1	UNIT_PR_MB_2	UNIT_PR_MB_3	UNIT_PR_MB_4	UNIT_PR_MB_5	UNIT_PR_MB_6
-0.017847	0.189006	0.529772	0.067919	0.000000	0.000000
UNIT_PR_TOT_1	UNIT_PR_TOT_2	UNIT_PR_TOT_3	UNIT_PR_TOT_4	UNIT_PR_TOT_5	UNIT_PR_TOT_6
0.026257	0.355785	0.586824	0.184286	0.000000	0.000000

Moment Stresses (MPa) per 1 in-kips					
UNIT_MO_MB_1	UNIT_MO_MB_2	UNIT_MO_MB_3	UNIT_MO_MB_4	UNIT_MO_MB_5	UNIT_MO_MB_6
0.006313	0.037163	0.006603	0.004466	0.000000	0.000000
UNIT_MO_TOT_1	UNIT_MO_TOT_2	UNIT_MO_TOT_3	UNIT_MO_TOT_4	UNIT_MO_TOT_5	UNIT_MO_TOT_6
0.013380	0.054230	0.013455	0.020607	0.000000	0.000000

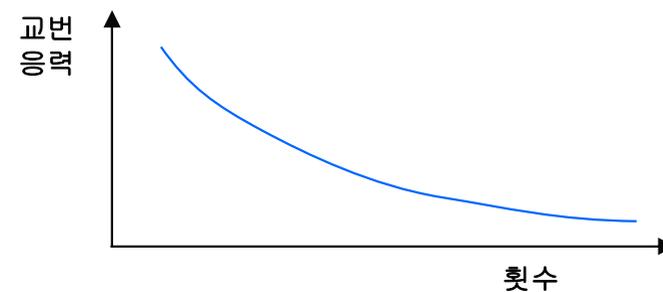
3. 환경피로감시 방법 - 피로평가(SBE & SBE_{en})

● Step 2 : 응력정점(peak,valley) 선정

■ Rainflow Cycle Counting

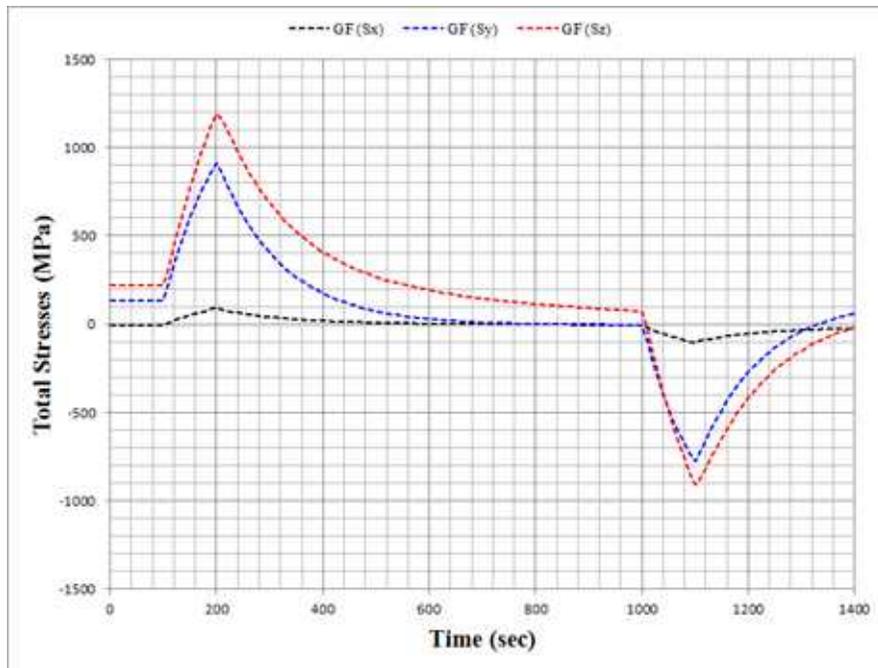


Rainflow Cycles by Path		
Path	Cycles	Stress Ranges
A-B	0.5	3
B-C	0.5	4
C-D	0.5	8
D-G	0.5	9
E-F	1.0	4
G-H	0.5	8
H-I	0.5	6



3. 환경피로감시 방법 - 피로평가(SBE & SBE_{en})

- Step 2 : 응력정점(peak,valley) 선정
 - 응력크기 계산



Peak/Valley 선정		
Range(Sec)		Salt(Mpa)
0	200	442.8692
200	1100	3207.792

$$S_{12} = \sigma_1 - \sigma_2, \quad S_{23} = \sigma_2 - \sigma_3, \quad S_{31} = \sigma_3 - \sigma_1$$

$$S_p = \max. | S_{12}, S_{23}, S_{31} | - \min. | S_{12}, S_{23}, S_{31} |$$

$$S_{at} = k \cdot \frac{S_p}{2}$$

3. 환경피로감시 방법 - 피로평가(SBE & SBE_{en})

● Step 3' : 환경보정계수 및 환경피로누적계수 계산

변수	결정방법
변형률 속도계산시 Ke 포함여부	포함
변형률 속도계산을 위한 탄성계수 적용 온도	평균온도
온도	평균온도
용존산소	별도 입력값
황함량	별도 입력값
변형률 속도	미소구간 응력차 방법

재질	F _{en} Value	Variables (T*, O*, ε*)	
탄소강, 저합금강	○ 탄소강 : $F_{en} = \exp(0.632 - 0.101 \times S^* \times T^* \times O^* \times \epsilon^*)$ 최대값 : 6.76, 최소값 : 1.88 (DO=0.1ppm, S=0.01 wt.%) ○ 저합금강 : $F_{en} = \exp(0.702 - 0.101 \times S^* \times T^* \times O^* \times \epsilon^*)$ 최대값 : 7.25, 최소값 : 2.02 (DO=0.1ppm, S=0.01 wt.%)	S*=0.001 S*=S S*=0.015	S≤0.001 wt.% S≤0.015 wt.% S>0.015 wt.%
		T*=0 T*=T - 150	T<150°C 150≤T<350°C
		O*=0 O*=ln(DO/0.04) O*=ln(12.5)	DO<0.04ppm 0.04≤DO<0.5ppm DO≥0.5ppm
		ε*=0 ε*=ln(ε) ε*=ln(0.001)	ε>1%/s 0.001≤ε≤1%/s ε<0.001%/s
스테인리스강	$F_{en} = \exp(0.734 - T^* \times \epsilon^* \times O^*)$ 최대값 : 14.51, 최소값 : 2.08	T*=0 T*=(T-150)/175 T*=1	T<150°C 150°C≤T<325°C T≥325°C
		ε*=0 ε*=ln(ε*/0.4) ε*=ln(0.0004/0.4)	ε>0.4%/s 0.0004%/s≤ε≤0.4%/s ε<0.0004%/s
		O*=0.281	all DO levels
Ni-Cr-Fe 합금	$F_{en} = \exp(-T^* \times \epsilon^* \times O^*)$ 최대값 : 4.52, 최소값 : 1.0	T*=T/325 T*=1	T<325°C T≥325°C
		ε*=0 ε*=ln(ε*/5.0) ε*=ln(0.0004/5.0)	ε>5.0%/s 0.0004%/s≤ε≤5.0%/s ε<0.0004%/s
		O*=0.16	all DO levels



Time	S*	DO*	TEMP*	strain rate *	F _{en,k}	strain
2081	0.01	0.916	140.277	-6.908	4.947	0.000119
2082	0.01	0.916	140.305	-6.908	4.948	0.000276
2083	0.01	0.916	140.333	-6.908	4.949	0.000379
2084	0.01	0.916	140.361	-6.908	4.95	0.00054
2085	0.01	0.916	140.389	-6.908	4.95	0.000697

3. 환경피로감시 방법 - 피로평가(SBE & SBE_{en})

- Step 3' : 환경보정계수 및 환경피로누적계수 계산

Time	Temp.(°F)	SI(ksi)	strain (%)	E(ksi)	S (%)	DO (ppm)
2081	554.5	0.03	0.00012	25528	0.01	0.1
2082	554.5	0.04	0.00016	25527	0.01	0.1
2083	554.6	0.026	0.0001	25527	0.01	0.1
2084	554.7	0.041	0.00016	25527	0.01	0.1
2085	554.7	0.04	0.00016	25526	0.01	0.1



응력사이클		$F_{en, 구간-1}$	$F_{en, 구간-2}$	Strain 구간-1	Strain 구간-2	U_n	F_{en-n}	CUF_{en-n}
1i	1j	2.1888	2.4102	0.6018	0.5631	0.0003	2.2958	0.0006
2i	2j	2.0856	2.1888	0.06678	0.06678	0.0016	2.4781	0.0039
TOTAL							CUF_{en}	0.0045



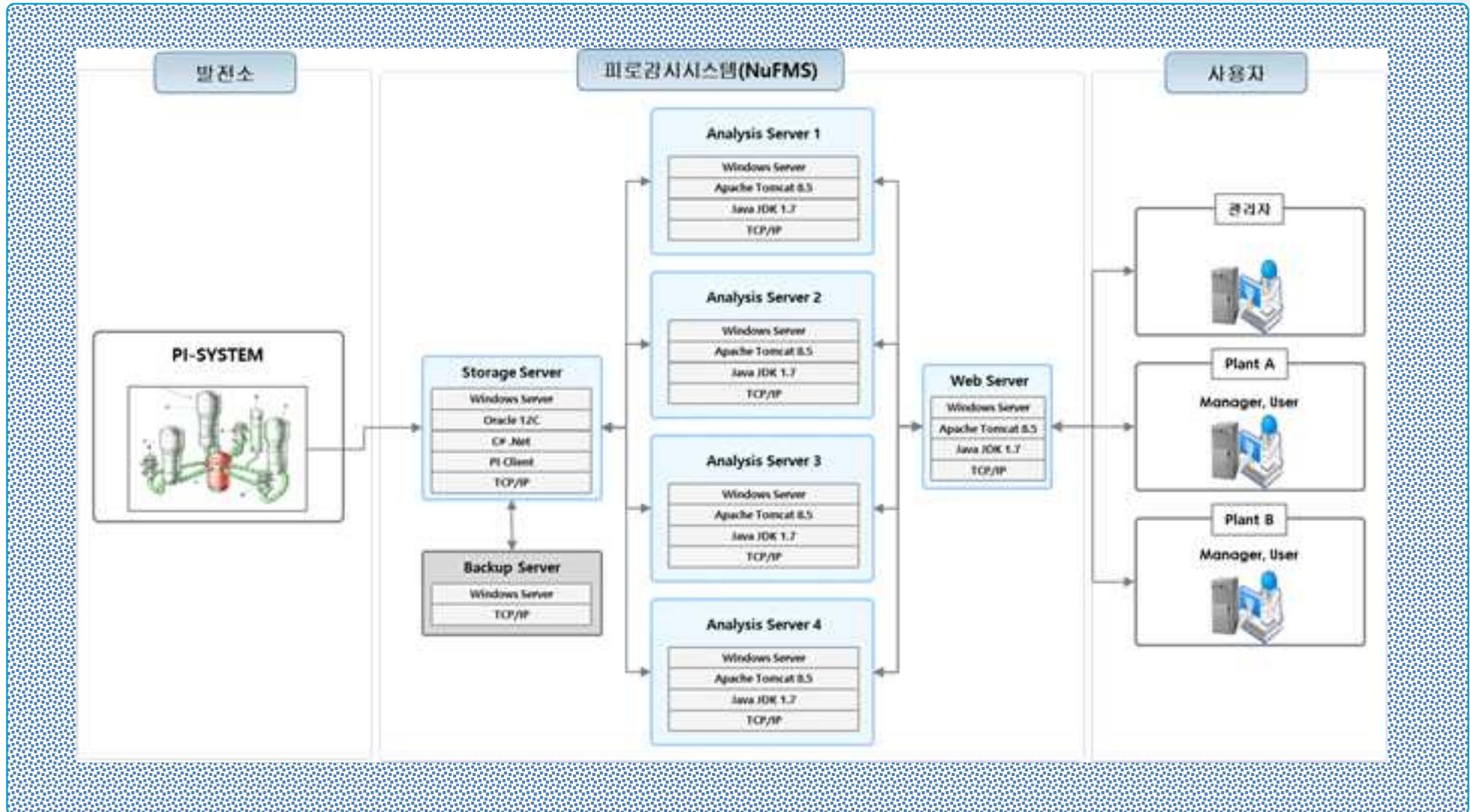


4

피로감시시스템

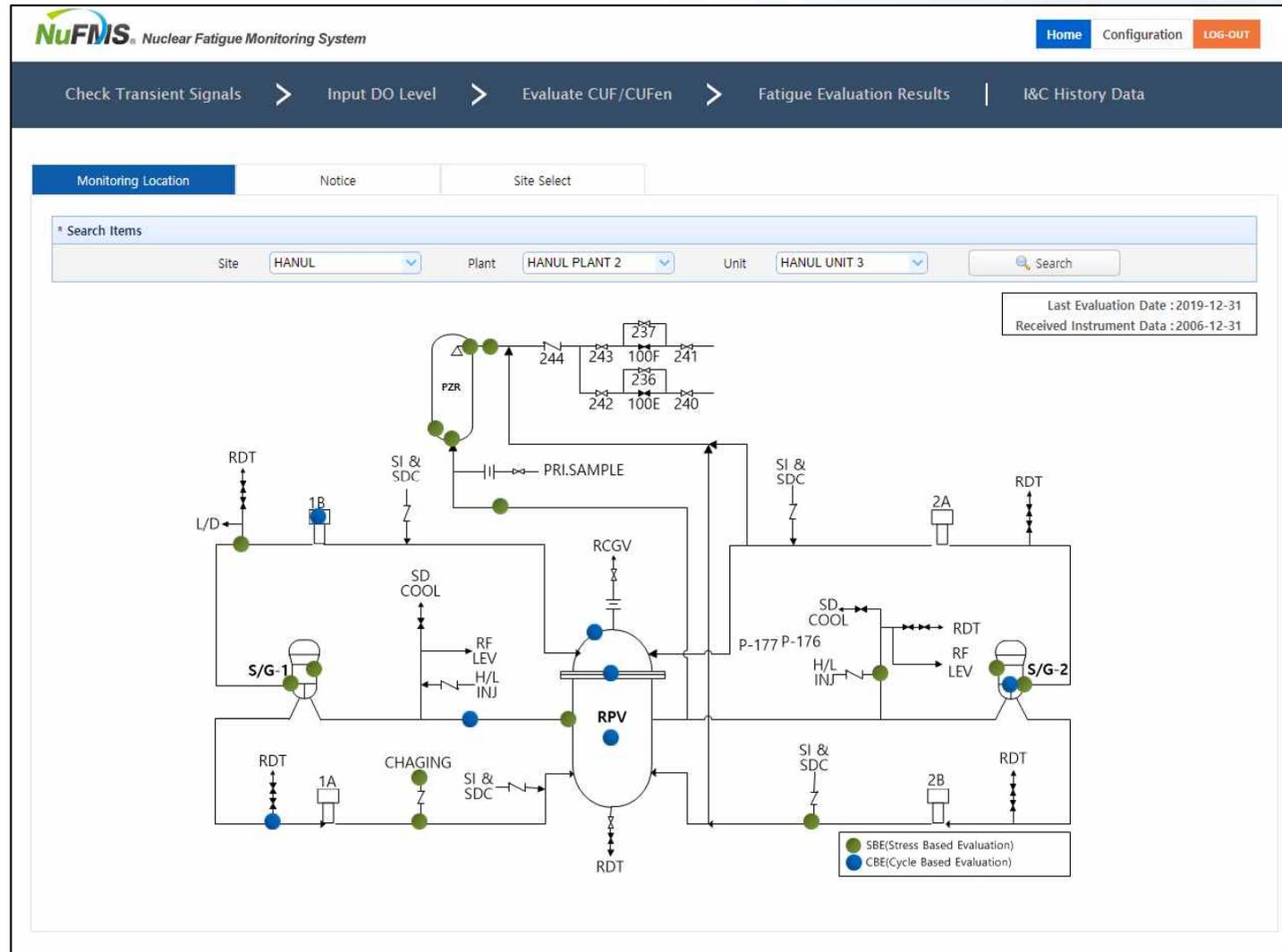
4. 피로감시시스템

● 피로감시시스템(NuFMS) 서버 구성



4. 피로감시시스템

● 피로감시시스템(NuFMS) GUI



4. 피로감시시스템

● Check Transient Signals

NuFMS Nuclear Fatigue Monitoring System

Home Configuration LOG-OUT

Check Transient Signals > Input DO Level > Evaluate CUF/CUFen > Fatigue Evaluation Results | I&C History Data

Check Transient Signals Edit Abnormal Transient Signals Simulate Partial CUF/CUFen

* Search Items

Site HANBIT Plant HANBIT PLANT 2 Unit HANBIT UNIT 3 Search

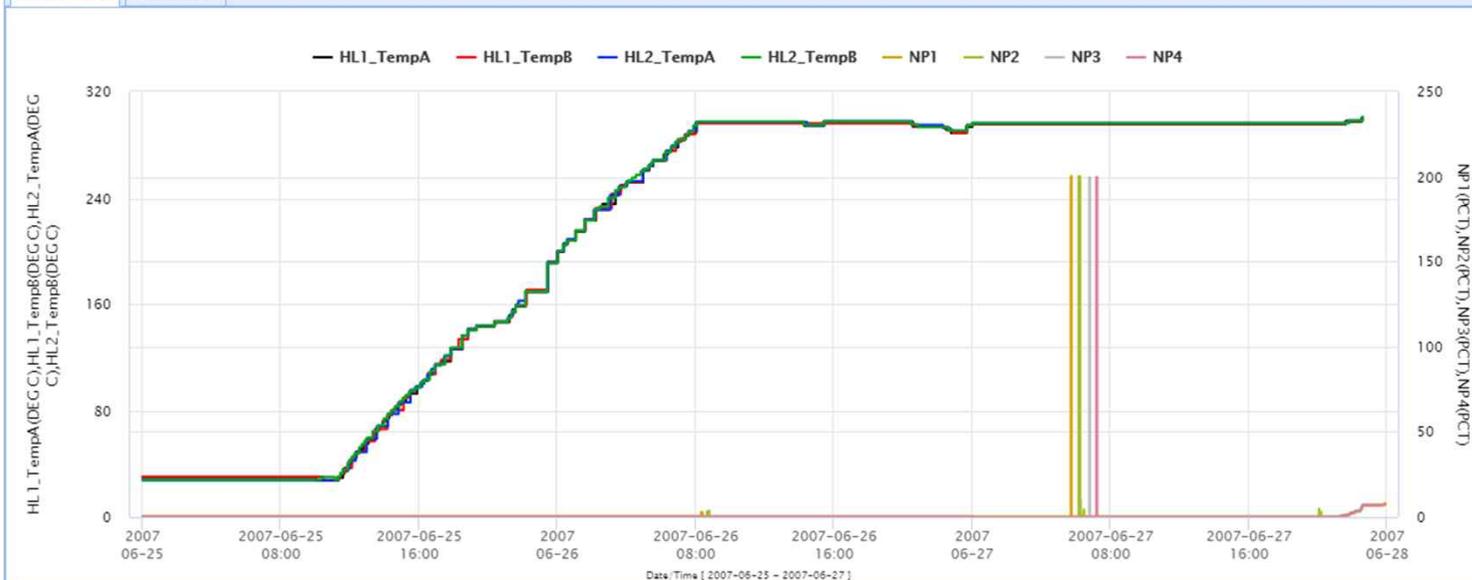
Date From 2007-06-25 To 2007-06-27

Y-Axis1 HL1_TempA(RCT112HA) HL1_TempB(RCT112HB) HL2_TempA(RCT122HA) HL2_TempB(RCT122HB)

Y-Axis2 NP1(CTN1A) NP2(CTN1B) NP3(CTN1C) NP4(CTN1D)

Time Interval ALL Line Color Y-Axis2 (Original)

Graph View Table View



4. 피로감시시스템

● Input DO Level (환경피로감시 한정)

The screenshot shows the NuFMS Nuclear Fatigue Monitoring System interface. The main navigation bar includes 'Home', 'Configuration', and 'LOG-OUT'. The breadcrumb trail is: Confirm I&C Signals > **Input DO Level** > Evaluate CUF/CUFen > Fatigue Evaluation Results | I&C History Data.

The 'Input DO Level' screen features a search bar and filters for Site (SHIN-HANUL), Plant (SHIN-HANUL PLANT 1), and Unit (SHIN-HANUL UNIT 1). Below is a table of components with columns for Name, Description, and Evaluation Method. A 'Component Info' dialog box is open, showing the following details:

Field	Value
Location ID	RPV Outlet Nozzle
Location Description	RPV Outlet Nozzle
Material	SA508_G3C1
Fatigue Curve	LAS_6909
Monitoring Type	SBE
Green Function ID	GF_RPV Outlet Nozzle
%wt Sulfur in Metal	0.01
Dissolved Oxygen	Designed Value
Dissolved Oxygen_Designed Value [ppm]	0.1

At the bottom of the dialog are 'SAVE' and 'Cancel' buttons. The main table shows 17 items, with the first item highlighted. The status bar at the bottom indicates 'Displaying 1 to 17 of 17 items'.

4. 피로감시시스템

Evaluate CUF/CUFen

The screenshot displays the NuFMS Nuclear Fatigue Monitoring System interface. The top navigation bar includes 'Home', 'Configuration', and 'LOG-OUT'. The main breadcrumb trail is 'Confirm I&C Signals > Input DO Level > Evaluate CUF/CUFen > Fatigue Evaluation Results | I&C History Data'. The 'Evaluate CUF/CUFen' section is active, showing search filters for Site (HANBIT), Plant (HANBIT PLANT 1), Unit (HANBIT UNIT 1), and Last Evaluation Date (2022-08-31). A red dashed box highlights the 'Start', 'Suspend', 'Resume', and 'Complete' buttons. Below the filters, a progress bar indicates 100.0% completion. An 'Information' dialog box is open, displaying 'Evaluation completed.' with an 'Ok' button. The background shows a list of completion messages for various components, such as 'Primary Chamber Drain Nozzle Complete' and 'Pressurizer Spray Nozzle Complete'.

4. 피로감시시스템

Fatigue Evaluation Results

NuFMS Nuclear Fatigue Monitoring System

Home Configuration LOG-OUT

Confirm I&C Signals > Input DO Level > Evaluate CUF/CUFen > **Fatigue Evaluation Results** | I&C History Data

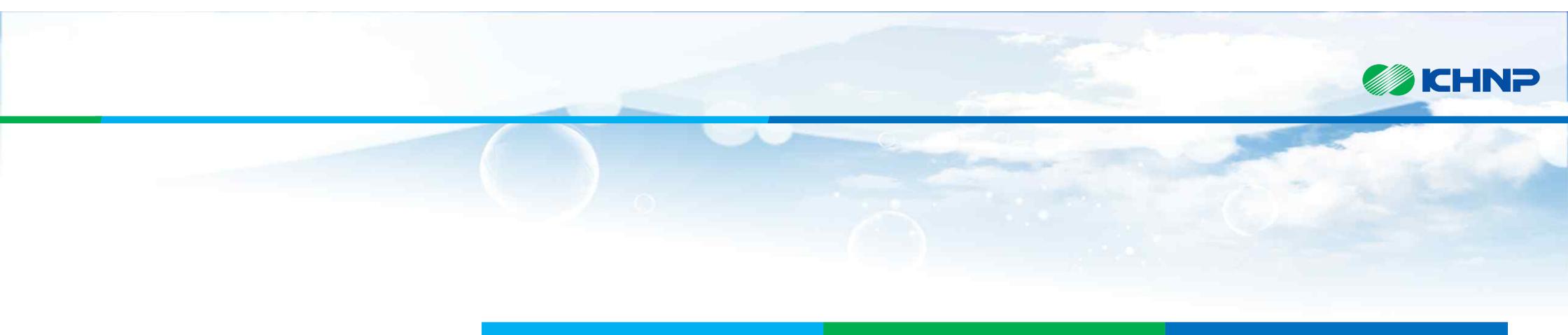
Operation Transients CUF/CUFen Reports

* Search Items

Site HANBIT Plant HANBIT PLANT 1 Unit HANBIT UNIT 1 Last Evaluation Date 2022-08-31 Search Delete CBE ReCalculation

	Component Name ↕	Evaluation Method ↕	Air Environment CUF ↕
1	PZR Safety and Relief Line	CBE	0.3499
2	RVI Core Barrel Nozzle	CBE	0.0607
3	PZR Upper Shell	CBE	0.4941
4	SIS Piping	CBE	0.2060
5	RPV Outlet Nozzle(CBE)	CBE	0.0496
6	RPV BMI Tube	CBE	0.1142
7	SG Tubesheet & Shell Junction	CBE	0.4866
8	Accumulator SI Nozzle	SBE	0.0912
9	RCL Hot Leg	SBE	0.1485
10	Normal Letdown Line	SBE	0.1280
11	Auxiliary Spray Line Tee	SBE	0.0968
12	RHR Line Tee	SBE	0.2743
13	Charging Nozzle	SBE	0.2198
14	Hot Leg Surge Nozzle	SBE	0.3122
15	Pressurizer Surge Line	SBE	0.1230
16	Pressurizer Spray Nozzle	SBE	0.0721
17	Pressurizer Surge Nozzle	SBE	0.0544
18	Pressurizer Heater Penetration	SBE	0.1002
19	Primary Chamber Drain	SBE	0.0268
20	SG Feedwater Nozzle	SBE	0.0647

20 Page 1 of 2 Displaying 1 to 20 of 21 items



5

향후 계획



5. 향후 계획

● 국내 전 원전 NuFMS 구축

- 경년열화관리를 위한 전 원전 피로감시시스템 운영
 - 전 가동원전 피로감시시스템 구축 완료(~'25)
 - Fatigue Pro → NuFMS 전환(~'27)
- 건설원전 환경피로감시시스템 구축
 - 신규 건설원전에 건설 패키지로 포함하여 환경피로감시시스템 설치
- 계속운전 원전 환경피로감시시스템 구축
 - 장기가동원전 계속운전 인허가 심사를 위한 환경피로감시시스템 구축

5. 향후 계획

● 프로그램 성능 향상

■ 평가 속도 개선

- 피로감시시스템에서 활용하는 계측기 데이터가 매우 많고 계산 과정이 복잡함
 - 평가 결과에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 연산 Skip 구간 설정 및 빈도 조절

■ 평가 정확도 향상

- 오신호나 데이터 누락에 의해 사용자가 수작업으로 데이터 수정이 필요함
 - 사용자 숙련도에 영향을 받지 않고 사용 편의성 향상을 위해 AI 기능 도입 검토 중

■ 설비 건전성 관리 프로그램 성능 향상을 통한 국산 원전 경쟁력 향상

- 타 프로그램 대비 우수한 성능의 시스템을 장착하여 원전 수출 경쟁력 강화
- SMR 용 피로감시시스템 개발 및 설치 예정

Q & A

