

Degradation analysis strategy on Alloy 690 SG tubings of a retired steam generator



Seong Sik Hwang, Sung Hwan Cho, Sung Woo Kim, Dong Jin Kim
Korea Atomic Energy Research Institute

Korean Nuclear Society Autumn Meeting
Changwon/Virtual meeting, Oct. 21-22, 2021



Korea Atomic Energy
Research Institute

Outline

1. 배경
2. K-1 증기발생기 운전이력 분석
3. 국외 증기발생 전열관 손상사례
4. 인출부위 선정기준
5. 전열관 인출방안
6. 전열관 장기 운전 열화기구(LRO/SRO)
7. 요약

1. 배경

- ❖ 고리1호기 폐로, 원전해체 준비(상업운전 1978.04.~ 2017.06.)
- ❖ 2017년 폐로 원전의 부품 인출 → 고온 고압 및 중성자방사선에 노출된 부품의 열화현상을 분석하는 연구를 최근에 국내에서 시작
 - ✓ 1차 계통 관통관 용접부 응력 해석 및 열화 실증 기술 개발
 - ✓ 증기발생기 전열관 열화 해석 및 실증 기술 개발
 - ✓ 방사화 1차 계통 압력경계 부품소재 조직 및 물성 정밀분석 체계 구축
- ❖ 증기발생기 전열관 : 기존 Alloy 600 전열관은 응력부식균열(PWSCC) 등 결함이 지속적으로 발생하고 관막음률(Plugging ratio)이 증가.
- ❖ 관지지판(tube support plate)인접 전열관에 축방향 결함이 확인되거나 또 다른 발전소의 경우 7,000개 이상 전열관에서 결함이 급증 사례 있음.

1. 배경

- ❖ 안전성 개선 위해 응력부식균열에 강한 Alloy 690 전열관을 적용한 증기발생기로 교체되었거나 계획 중.
- ❖ Alloy 690 전열관은 현재까지 전세계적으로 부식균열 사례는 보고된 바 없음 → 불순물이 포함된 2차 계통 모사환경에서 수행된 가속시험 결과에서는 부식균열이 발생.
- ❖ 19년간 장기 가동한 해당원전의 증기발생기 Alloy 690 전열관에서 재료열화 자료를 취득함으로써, 실험실 데이터의 보수성을 평가하고 실제 열화도를 실증할 필요.
 - ✓실증 데이터 : Alloy 690 전열관의 가동중 검사 주기에 대한 추가 완화에 활용.
 - ✓장기가동에 따른 덴팅(Denting) 발생 원인 등을 분석하여 후속 원전 전열관의 덴팅 등 손상 완화에 활용.
 - ✓Alloy 690 전열관의 경년열화에 의한 재료물성값의 변화를 반영하여 건전성 평가 보수성 및 신뢰도 개선에 활용.

2. 운전이력

❖ 운전이력

- ✓ Alloy 690을 사용한 웨스팅하우스형의 delta 60로 교체(1998년)
- ✓ 운전정지(2017)까지 19년 운전이력 보유.

❖ 원전 운전 환경 부식생성물 특성

- ✓ Alloy 690 교체 증기발생기 전열관 내/외면의 부식상태를 실증 평가할 수 있는 주요정보 보유.
- ✓ 전열관 표면피막의 특성 정밀 분석: 실험실 부식시편과 비교를 통해 장기가동에 따른 Alloy 690 전열관의 열화를 예측할 수 있음.

2. 운전이력

❖ Alloy 690 재질의 관마개(tube plug)

- ✓가동 전 검사 시 발견된 결함관의 관막음에는 용접방식 (15개 전열관) 이, 2014년도에 수행된 마모결함 발생 전열관의 관막음에는 기계적 방식 (8개 전열관)이 사용.
- ✓소성 변형률이 높은 Alloy 690 재질의 부품에 대한 PWSCC 발생 가능성 제기. 전열관의 기계적 관막음의 경우 소성 변형률이 50% 수준으로 이런 재료의 PWSCC민감도는 Alloy 600과 유사.
- ✓Alloy 690 재질의 관마개를 인출하여 균열 생성 유무 및 소성 변형률을 평가하여 사전에 검증할 필요 있음.

❖ 마모 손상

- ✓인출대상 증기발생기에는 두께 40%를 초과하는 마모 손상으로 인해 관막음된 전열관 (8개 전열관)이 존재. 마모가 있으나, 관막음 되지 않은 8개 전열관도 존재.

2. 운전이력

❖ 고리 1 교체증기발생기 Alloy 690 전열관 재료정보

Chemical composition of Kori-1 replaced SG tubings(Sandvik steel Alloy 690)

	Element (w/o)	Ni	Cr	Fe	C	Si	Mn	Co	Cu	S
EPRI guide (TR-016743-V2R1)		58.0(min.)	28.5-31.0	9.0-11.0	0.015-0.025	0.50(max.)	0.50(max.)	0.014(ave. no heat >0.020)	0.10(max.)	0.003(max.)
		Cu	S	P	N	Al	B	Ti	Mo	Nb
		0.10(max.)	0.003(max.)	0.015(max.)	0.050(max.)	0.40(max.)	0.005(max.)	0.40(max.)	0.2(max.)	0.1(max.)
Heat/Lot/tube no. 767349/73225/14981	Check Analysis	59.6	29.1	10	0.019	0.26	0.26	0.012	0.01	0.001
		0.01	0.001	0.1	0.029	0.025	0.0004	0.32	0.01	0.01
Heat:767221	Ladle Analysis	59.1	29.53	10	0.019	0.3	0.26	0.012	0.01	0.001
		0.01	0.001	0	0.028	0.021	0.0004	0.29	0.01	0.01

Heat treatment (Quality Assurance Document)

Heat/Lot	767349/73225
Heat treatment(anneal)/date:960618	Furnace min. 1105 C~max. 1115 C, 2 min. holding
Heat treatment(TT)/Tube batch No./Quantity/date.: 1853/86/960625	Tube temp. min. 715 C~ max.732 C for >10 hrs.

Mecahnical properties

Yield strength	Spec. 276~ 380	318
Tensile strength	Spec. 586 Min.	709
Elogation	Spec. 30 Min.	47
Grain size Heat/Lot/tube: 767349/7325/14970	6~8	7

SCC on "wear" SG tube

- ❖ 미국 SONGS 3에서 전열관 누설, 증기발생기 교체후 1년만에 관막음 대상 전열관 129개 발생 (2012)
- ❖ 일정시간이 지나면 마모 손상은 정지. 표면 미세조직이나 응력 상태가 바뀌고 두께가 얇아져 마모로 인해 손상된 영역 내에 균열 발생가능성이 있음.
- ❖ bobbin probe의 경우 마모와 같은 체적 결함 검출에는 적합하나, 마모와 균열 결함이 비슷한 위치에 같이 존재할 때는 균열 결함 분리탐지 어려움.
- ❖ 마모 손상 부위 해당 전열관의 분석을 통해 균열 발생 유무와 가능성을 확인할 필요 있음.[1]

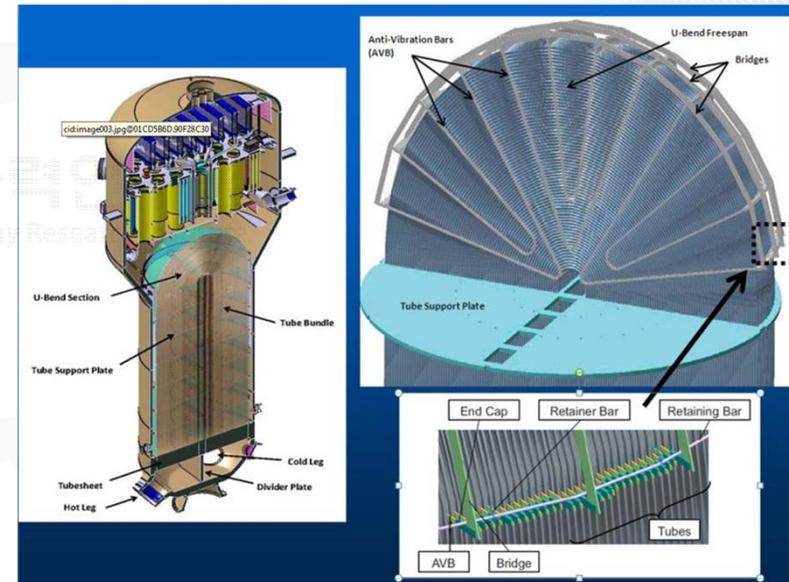


Fig. SONGS-steam-generator-internal-diagram

[1] 김동진, 증기발생기 전열관 및 배관감육 분야 (고리1호기 주기기 재료활용연구), 2016 가을 KNS Workshop-고리1호기 주기기 재료 활용연구

미국 SONGS-2, 3의 마모결함

Table 9-1
Replacement Steam Generator Data Sorted by Plant in the United States

Plant	No. SG	Model	Comm. Op Date	Tube Material	Date Replaced	Op. Years	EFPY	Repl. Duration (days)
SAN ONOFRE 2	2	MHI-116TT1	8/1/1983	I-690 TT	4/11/2010		0.0	
SAN ONOFRE 3	2	MHI-116TT1	4/1/1984	I-690 TT	2/18/2011			

SONGS Unit 2 Steam Generators Wear Depths Summary

Steam Generator SG2E88 (Through- Wall Wear)	Anti-Vibration Bar	Tube Support Plate	Tube-to- Tube Wear	Retainer Bar	Foreign Object	Total Indications	Tubes with Indications (out of 9727 total per SG)
≥ 50%	0	0	0	1	0	1	1
35 - 49%	2	0	0	1	0	3	3
20 - 34%	86	0	0	0	2	86	74
10 - 19%	705	108	0	0	0	813	406
< 10%	964	117	0	0	0	1081	600
TOTAL	1757	225	0	2	2	1984	734*

Steam Generator SG2E89 (Through- Wall Wear)	Anti-Vibration Bar	Tube Support Plate	Tube-to- Tube Wear	Retainer Bar	Foreign Object	Total Indications	Tubes with Indications (out of 9727 total per SG)
≥ 50%	0	0	0	1	0	1	1
35 - 49%	0	0	0	1	0	1	1
20 - 34%	78	1	0	3	0	82	67
10 - 19%	1014	85	2	0	0	1101	496
< 10%	1499	53	0	0	0	1552	768
TOTAL	2591	139	2	5	0	2737	861*

* This value is the number of tubes with wear indications of any depth and at any location. Since many tubes have indications in more than one depth and location, the total number of tubes is less than the total number of indications.

미국 SONGS-2, 3의 마모결함

Table 9-1
Replacement Steam Generator Data Sorted by Plant in the United States

Plant	No. Model SG	Comm. Op Date	Tube Material	Date Replaced	Op. Years	EFPY	Repl. Duration (days)
SAN ONOFRE 2	2 MHI-116TT1	8/1/1983	I-690 TT	4/11/2010		0.0	
SAN ONOFRE 3	2 MHI-116TT1	4/1/1984	I-690 TT	2/18/2011			

SONGS Unit 3 Steam Generators Wear Depths Summary

Steam Generator SG3E88 (Through-Wall Wear)	Anti-Vibration Bar	Tube Support Plate	Tube-to-Tube Wear	Retainer Bar	Foreign Object	Total Indications	Tubes with Indications (out of 9727 total per SG)
≥ 50%	0	117	48	0	0	165	74
35 - 49%	3	217	116	2	0	338	119
20 - 34%	156	506	134	1	0	797	197
10 - 19%	1380	542	98	0	0	2020	554
< 10%	1818	55	11	0	0	1884	817
TOTAL	3357	1437	407	3	0	5204	919*

Steam Generator SG3E89 (Through-Wall Wear)	Anti-Vibration Bar	Tube Support Plate	Tube-to-Tube Wear	Retainer Bar	Foreign Object	Total Indications	Tubes with Indications (out of 9727 total per SG)
≥ 50%	0	91	26	0	0	117	60
35 - 49%	0	252	102	1	0	355	128
20 - 34%	45	487	215	0	0	747	175
10 - 19%	940	590	72	0	0	1602	450
< 10%	2164	94	1	0	0	2259	838
TOTAL	3149	1514	416	1	0	5080	887*

* This value is the number of tubes with wear indications at any depth and at any location. Since many tubes have indications in more than one depth and locations, the total number of tubes is less than the total number of indications.

미국 SONGS-2, 3의 마모결함

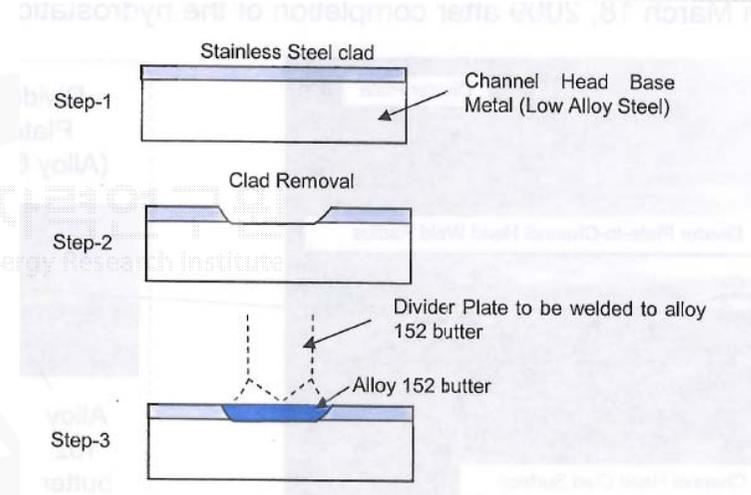
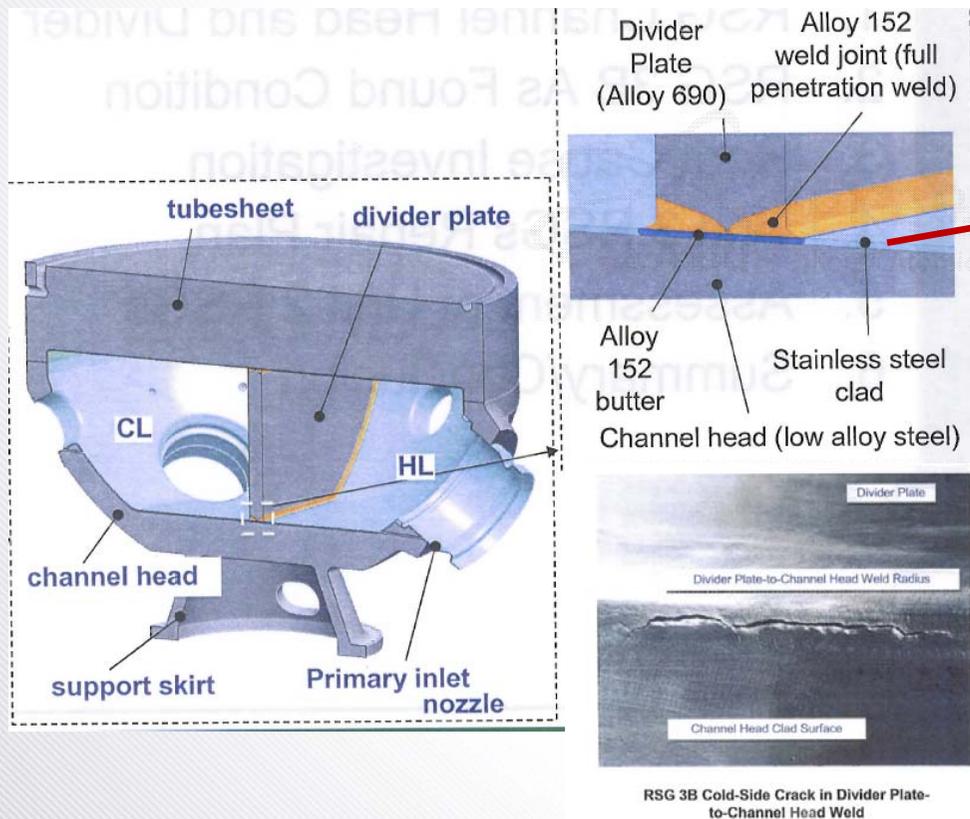
- ❖ Cause of degradation : Tube-to-tube wear caused by in-plane fluid-elastic instability of the tube u bends.
- ❖ A design error resulted in the actual steam generators having more severe thermal hydraulic conditions than expected.



ML15015A419 NRC SONGS Lessons Learned Report-2015

Divider Plate/Channel Head에서의 균열

- ❖ Weld separation and cracking in SONGS 3 (2009) – 교체용 증기발생기
- ❖ Brittle failure mode exhibited in separation region
- ❖ Failure propagated within the channel head base metal along fusion boundary
 - ✓ Higher carbon content and hardness in fusion zone → weak weld bonding
 - ✓ Air carbon-arc gouging removed clad → higher carbon content



- ❖ 고리1호기는 취성균열 방지대책 적용 전 납품. 구조적으로 취약한 부위에서의 잔류응력, 경도, 탄소농도에 관심을 갖고 잠재 균열에 대한 가능성 확인필요 [1]

[1] 김동진, 증기발생기 전열관 및 배관감속 분야 (고리1호기 주기기 재료활용연구), 2016 가을 KNS Workshop-고리1호기 주기기 재료 활용연구

Divider Plate/Channel Head에서의 균열

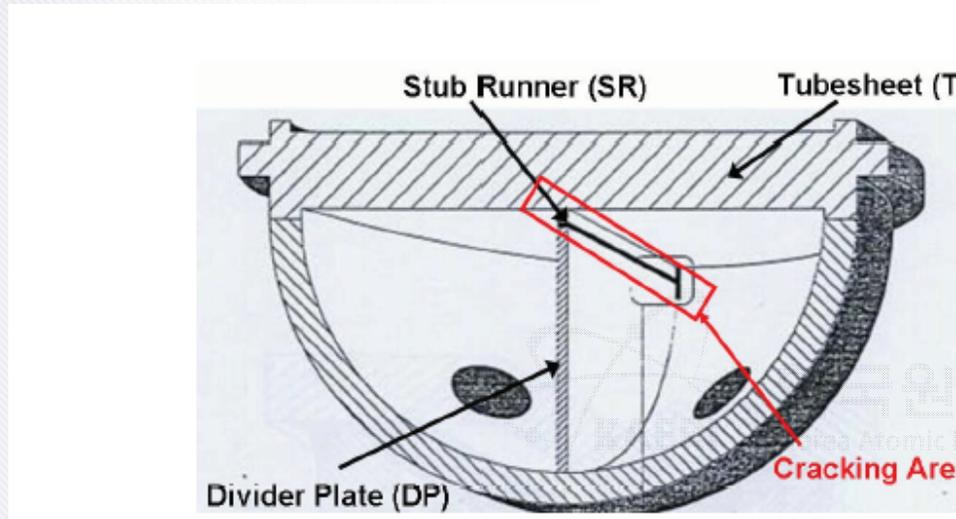


Fig. Sketch of the Tubesheet and Channelhead Complex Highlighting the Stub Runner the Region of Observed Cracking [2]

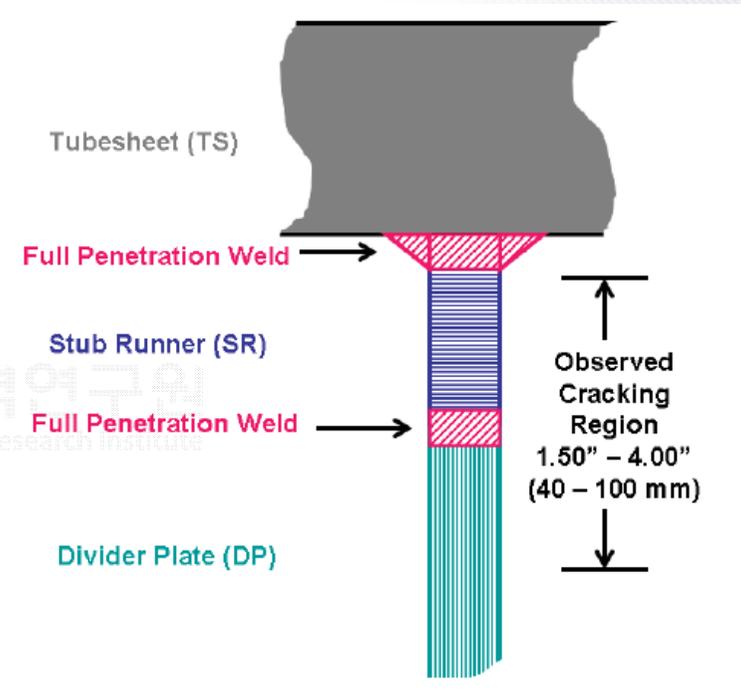
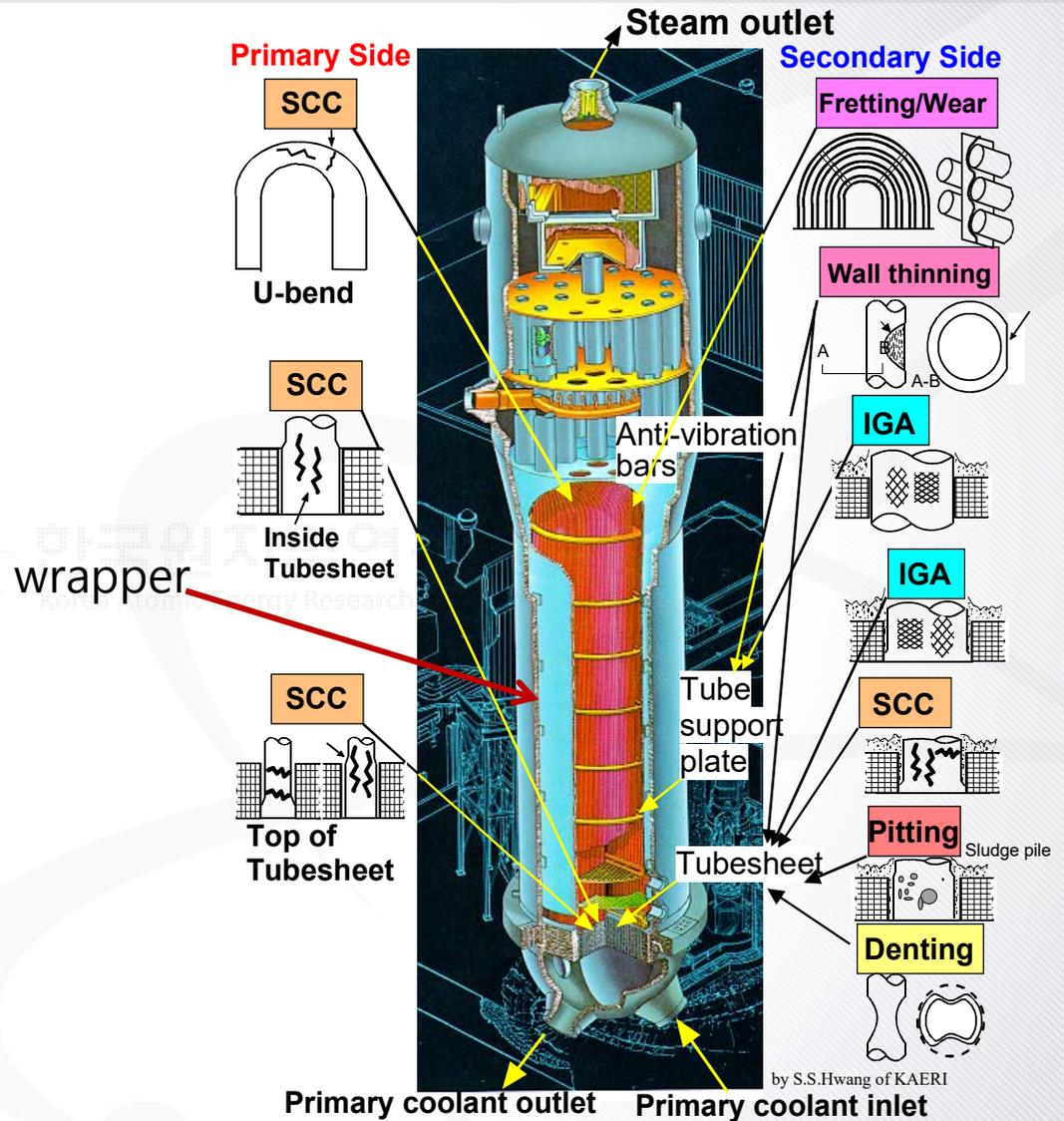


Fig. Sketch of the Affected Cross-section in the Divider Plate and Stub Runner [2]

[2] Divider Plate Cracking in Steam Generators Results of Phase 1: Analysis of Primary Water Stress Corrosion Cracking and mechanical Fatigue in the Alloy 600 Stub Runner to Divider Plate Weld Material EPRI 1014982, 2017

인출부위 선정기준

- ❖ 탄소강 재질의 SG 내부 구조물 존재(Wrapper)
- ❖ 탄소강은 FAC (flow accelerated corrosion)에 내식성 적음
- ❖ 증기발생기 내부구조물의 건전성을 평가하기 위해 인출 및 분석 필요 있음



증기발생기 열화모드와 인출 대상

열화 모드	인출 전열관 갯수	비고
취성층*	<ul style="list-style-type: none"> 슬러지 많은 전열관 관판 포함한 3x3 block (1개소) 슬러지 적은 전열관 관판 포함한 3x3 block (1개소) 저온관 관판 포함한 3x3 block (1개소) 슬러지 많은 관지지대 부위 전열관 (2개소) 	-슬러지, 응력, 온도 영향 분석
덴팅*	<ul style="list-style-type: none"> 가동중 덴팅 의심 전열관 포함한 3x3 block (1개소) 	-취성층 분석용 인출 전열관 block과 병행 가능
관막음 부위 응력부식균열	<ul style="list-style-type: none"> 기계적 관막음 전열관 포함 3x3 block (2개소) 용접 관막음 전열관 포함 3x3 block (2개소) 	-관판 부위 통째로 절취 (3x3), 관판 윗부분은 불필요
마모	<ul style="list-style-type: none"> 관막음 되지 않은 전열관 중 인출 용이한 전열관 2개소 관막음된 전열관 중 인출 용이한 전열관 2개소 	-잠재적 균열로의 발전 검토
채널헤드 분리판 용접부 균열	<ul style="list-style-type: none"> 관판 하단 2개소 채널헤드 2개소 	-잔류응력 측정은 별도
증기발생기 내부구조물 FAC	<ul style="list-style-type: none"> Wrapper 지지구조물 (3개소) Wrapper 상부 내부 부위 (육안 검사 또는 3~6개소) 	-육안 검사가 가능한 부위는 육안 검사후 시편채취 여부 결정

[1] 김동진, 증기발생기 전열관 및 배관감육 분야 (고리1호기 주기기 재료활용연구), 2016 가을 KNS Workshop-고리1호기 주기기 재료 활용연구

전열관 인출방안

- ❖ 가동중인 타 발전소의 Alloy 690재료 증기발생기의 건전성 증진에 활용할 자료를 생산하기 위한 전열관 및 관련부위 인출 전략이 필요.
- ❖ 고온/고압수 환경 실험 시 Alloy 690에는 일반적인 표면피막과 모재 내부로 성장하는 두꺼운 산화층이 존재한다. Alloy 690은 특정 2차측 환경(eg. Lead contaminated water)에서 Alloy 600보다 SCC에 더 민감하다는 보고가 많이 되고 있음.
- ❖ 비파괴 검사기록에 기반하여 덴팅이 의심되는 전열관을 인출하여 덴팅의 발생 원인 및 대책 도출, 균열과의 상관관계 도출 필요.
- ❖ 마모손상된 영역 내에서, 또는 주위에서 균열이 발생할 가능성이 있음. 마모 손상 부위에서 균열 발생을 확인하기 위해 해당 전열관을 인출 대상으로 선정필요 함.
- ❖ 증기발생기 채널 헤드 분리판(2010년 전후 SONGS & Waterford RSG)에서 제작 후 수압시험 시 용접부의 취성균열이 발생한바 있음. 제작 중 cladding 층을 gouging시 탄소 주입과 HIC (hydrogen induced cracking)을 이 취성의 원인으로 보고 있음. 분리판 둘레 중 구조적으로 취약한 부위에서의 잔류응력, 경도, 탄소농도 등에 관심을 갖고 균열발생여부 확인 필요.

전열관 인출방안

❖ 일반사항

✓제염(decontamination)하지 않고 최대한 표면에 부착되어 있는 부식생성물을 훼손하지 않은 상태로 인출함. (화학 제염전 혹은 기계식 관막음 후 화학제염 후 인출)

❖ 인출대상 부위

✓슬러지 퇴적부위: 많은 전열관 관판 포함한 3x3 block (1개소), 슬러지 적은 전열관 관판 포함한 3x3 block (1개소), 저온관 관판 포함한 3x3 block (1개소), 슬러지 많은 관지지대 부위 전열관 (2개소)

✓덴팅가능성 부위: 가동중 덴팅 의심 전열관 포함한 3x3 block (1개소)

✓관막음 부위 : 기계적 관막음 전열관 포함 3x3 block (2개소), 용접 관막음 전열관 포함 3x3 block (2개소)는 관판 부위 통째로 절취 필요 (응력부식균열평가)

✓마모 가능성 부위: 관막음 되지 않은 전열관 중 인출 용이한 전열관 2개소와 관막음된 전열관 중 인출 용이한 전열관 2개소

✓채널헤드 분리판 용접부 균열부위: 관판 하단 2개소와 채널헤드 2개소

전열관 장기 운전 열화기구(LRO/SRO)

- ❖ 부식균열의 관점에서 Alloy 690의 저항성은 이미 검증됨.
- ❖ Alloy 690은 short range ordering/Long range ordering(SRO/LRO)에서 생기는 Ni_2Cr 의 조성과 유사한 Ni-33% Cr 합금이므로 Alloy 690이 원전 가동온도에서 이러한 LRO/SRO가 생겨 재료가 취화되지 않을지 많은 관심을 끌고 있음.
- ❖ 일부의 연구자들은 Alloy 690을 360 - 450°C 온도구간에서 10,000시간~100,000시간 동안 열처리 하면 LRO / SRO가 생길 수 있다는 보고서를 하기도 함.
- ❖ 미국 EPRI, USNRC는 100년 이상 운전을 하더라도 LRO/SRO가 발생하지 않을지에 대한 관심을 기술이고 연구를 수행하고 있음.
- ❖ 19년간 320°C부근에서 운전한 재료에서 LRO/SRO 증거가 있는지 살펴볼 필요가 있을 것이며 이를 위한 재료분석 방안을 강구하고자 함.
- ❖ 그외 연구항목
 - 1) SG 헤드분리판(head divider plate)의 용접건전성확인 평가 연구.
 - 2) 마모손상 부위의 미세조직 정밀 분석 연구(비파괴검사 결과 측정 감도 낮은 부위의 미세조직 평가)

7. 요약

1. 19년간 장기 가동한 해당원전의 증기발생기 Alloy 600 전열관에서 재료 열화 자료를 취득함으로써, 실험실 데이터의 보수성을 평가하고 실제 열화도를 실증할 필요.
2. Alloy 690을 사용한 웨스팅하우스형의 delta 60로 교체(1998년), 운전정지(2017)까지 19년 운전이력 보유.
3. 미국 SONGS-2, 3의 마모결함: U-bend부위의 유체탄성불안정(설계변수 오류)
4. Divider Plate/Channel Head에서의 균열 사례 있음.
5. 증기발생기 열화모드 밝히는 인출 대상부위 선정 필요
6. Alloy 690의 LRO/SRO 발생증거 파악 필요(19년간 320°C부근에서 운전)

감사합니다