

월성3,4호기 증기발생기 전열관 검사

장경식, 손태봉*, 권동기, 최진혁(한국수력원자력)

Wolsong 3&4 Steam Generator Tube Inspection

Kyoung-Sik Jang, Tai-Bong Son, Dong-ki Kwon,
Jin-Hyuk Choi(Korea Hydro & Nuclear Power co. Ltd)

Key Words: Pre-service Inspection(가동전 검사), Periodic Inspection(주기 검사), Steam Generators(증기발생기), Tube Plugging(전열관 관막음)

Abstract

During the Pre-service Inspection for Wolsong Unit 3&4 in 1997/1998 respectively, 17 Distorted Roll Transition indications(over expanded beyond tubesheet secondary face) were identified at the Unit 4 (S/G B, D). Six(6) tubes out of these tubes were plugged in 1998. However the first Periodic Inspection identified additional 110 indications in 1999 and 2000. The additionally identified 110 indication call, not reported at the Pre-service Inspection, are;

2 Not-Finally-Expanded-Tubes and
108 Distorted Roll Transition tubes.

Design limit of each Steam Generator tube Plugging is 6.4%. Plugging was performed by the Steam Generator manufacturer under the warranty. When Distorted Roll Transition indications were first identified on the Unit 4 in 1998 the degree of Over-expansion was measured using an inner dial-gage to make the disposition of Nonconformance report.

2 Not-Finally-Expanded-Tubes were plugged and 10 tubes out of 108 Distorted Roll Transition Tubes were also plugged as a preventive measure.

기호설명

Distorted Dent Signal	DDS
Distorted Expansion Signal	DES
Distorted Support Signal	DSS

Distorted Tubesheet Signal	DTS
Loose Part Signal	LPS
Non Quantifiable Signal	NQS
Plate Ligament Signal	PLS
Weld Zone Signal	WZS
Over Expansion	EXP
Partial Tubesheet Expansion	PTE
Permeability Variation	PVN
Possible Loose Part	PLP
Skip Rolled	SKR
Volumetric	VOL

† 책임저자의 소속 : 한국수력원자력(주)

E-mail : sontbn@khnp.co.kr

TEL : (054)779-3450 FAX : (054)779-3469

1. 서 론

원자력발전소에서 1차측과 2차측의 경계가 되는 증기발생기의 전열관 건전성을 확인하기 위해 가동전검사 및 가동중검사를 수행한다. 가동전검사는 원자력발전소 가동전에 증기발생기 전열관의 건전성을 확인하고 가동중의 변화와 비교할 수 있는 기준 기록을 제공할 수 있도록 하기 위해 수행하며, 가동중검사는 다음 검사까지 원자력 발전소 가동의 안전성과 신뢰성을 보증하기 위한 전열관 열화과정 검출 및 감시를 위해 수행한다.

월성 3,4호기 증기발생기 전열관에 대한 가동전검사는 모든 증기발생기에 대해 범용 보빈(Bobbin) 탐촉자를 사용하여 100% 전장검사를 수행하였다. 그 결과, 월성4호기 증기발생기 B, D에서 17개의 제작결함이 발견되어 부적합사항보고서를 발행하고, 실측을 수행후 실측자료를 바탕으로 제작사의 기술검토 결과 6개의 전열관을 판막음 하였다.

그러나, 월성3호기 제1차 가동중검사와 월성4호기 제1차 가동중검사 결과, 가동전검사에서 미처 발견하지 못한 제작결함이 추가로 발견되었다. 가동전 검사에서 발견하지 못한 경위와 정비현황, 결함원인, 문제점 검토 등을 통한 증기발생기 관리방안을 수립하여 향후 증기발생기 신뢰성 지속유지에 대해 기술하고자 한다.

2. 증기발생기 검사

2.1 적용규격

중수로형 원자력발전소 증기발생기 전열관 가동중검사는 캐나다 표준규격 CAN/CSA N285.4에 따라 수행된다. 동 규격에 의한 검사요건은 1주기¹⁾에 최소 2%의 전열관을 검사하도록 되어있다. 월성 3,4호기에서 실제 수행하고 있는 검사수량은 매년 50%씩 수행하고 있어서, 1주기 동안에

1) 첫 주기는 5년이며, 2차 주기 부터는 10년 주기임

는 대략 200% 정도 검사를 수행하는 셈이다. 참고로 증기발생기 전열관 검사관련 국내의 규정은 다음과 같은 것이 있다.

- 원자력법 시행령 67조 (가동중점검)
- 과학기술부 고시 제98-15호
(원자로시설의 가동중점검 및 가동중시험에 관한 규정)
- 최종안전성 분석 보고서 (가동중점검)
- CAN/CSA N285.4-M94
- 86-03640-PIP-001(가동중검사프로그램, Periodic Inspection Program for Pressure Retaining Component)
- US NRC Regulatory Guide 1.83 "Inservice Inspection of Pressurized Water Reactor Steam Generator Tubes" 1975년판
- US NRC Regulatory Guide 1.121 "Bases for Plugging Degraded PWR Steam Generator Tubes" 1976년판
- ASME Section XI "Rule for Inservice Inspection of Nuclear Power Plants Components 1989년판
- ASME Section V "Nondestructive Examination" 1989년판
- SNT-TC-1A, 1984년판

2.1.1 원전증기발생기 전열관 결함 원인

증기발생기 전열관에서 주로 발생하는 결함발생의 원인은 다음과 같은 것들이 있으며, 월성 3,4호기에서는 아직 이러한 원인으로 인한 결함이 발생한 일이 없다.

- 기계적 마모 : 2차측 지지물과 접촉과 진동으로 인한 마모
- 부식 및 침식 : 응력이나 화학적 물질에 의한 부식 및 침식
- 진동 : 유체흐름에 의한 기계적 진동으로 인한 마모
- 피로 : 유체 진동으로인한 금속피로
- 틈새부식 : 2차측 지지물과 튜브 사이의 틈새에 부식기구 형성
- 응력 : 냉간가공이나 운전열에 의한 응력으로 인한 균열

2.1.2 원전증기발생기 전열관 결함 유형

원자력발전소 증기발생기에서 주로 발생하는 전형적인 결함의 유형은 다음과 같은 것들이 있다.

- 응력부식균열(SCC, Stress Corrosion Cracking)
: 주로 냉간가공된 곡선부나 전열관 상부의 슬러지 침적부위에서 발생하며, 화학적 환경과 응력집중부위에 발생하는 응력부식균열
- 마모(Wear) : 2차측 지지물과 접촉부위의 진동에 의한 마모로 튜브가 감육되는 현상
- 피로(Fatigue) : 유체탄성 진동에 의한 금속 피로 현상
- 찌그러짐(Denting) : 튜브와 튜브지지판 사이의 틈에 이물질 퇴적에 의해 튜브 내경이 감소하는 현상
- 점식(Pitting) : 전열관 상부의 침적 불순물이나 슬러지가 부식환경을 조성하여 튜브에 핀홀이 발생하는 현상
- 1차수응력부식균열(PWSSC, Primary Water Stress Corrosion Cracking) : 핵관시 잔류응력과 운전 열응력으로 인한 부식균열
- 입계부식균열(IGSCC, Intergranular Stress Corrosion Cracking) : 부식환경에서 응력이 발생하여 재질 입계내부로 균열이 발생하는 현상

한편, 미국 전력연구소(EPRI)²⁾에서는 필요한 조치 내용에 따라 결함유형을 7 가지 범주로 분류하고 각 범주별로 세부적으로 결함의 종류를 분류하고 있다.(Table 1 참조)

2.2 월성3,4호기 과학관 발생경위 및 정비현황

2.2.1 발생경위

1997년과 1998년에 월성3,4호기 가동전검사 결과, 월성4호기 증기발생기 B, D에서 17개의 왜곡된 핵관(DRT, Distorted RollTransition) 신호가 발견되어, 해당 전열관을 다이얼 게이지로 내경

Table 1 The category of deteriorations by the action to be taken and its detail classification(The Source : EPRI Guideline TR-107569-V1R5)

Category I : 처리 불필요	
Copper	CUD
Deposit	DEP
No Detectable Degradation	NDD
Plugged	PLG
Positive Identification	PID
Sleeved	SLV
Sludge	SLG
Category II : 재검사 필요	
Retest Analyst Discretion	RAD
Retest Bad Data	RBD
Retest Fixture	RFX
Retest Identification	RID
Retest Incomplete	RIC
Retest No Data	RND
Retest Restricted Tube	RRT
Category III : 진단시험 필요	
Absolute Drift Indication	ADI
Differential Freespan Indication	DFI
Distorted Dent Indication	DDI
Distorted Expansion Indication	DEI
Distorted Support Indication	DSI
Distorted Tubesheet Indication	DTI
Loose Part With Indication	LPI
Non-quantifiable Indication	NQI
Plate Ligament Indication	PLI
Category IV : 후 진단 시험 필요	
Absolute Drift Signal	ADS
Differential Freespan Signal	DFS
Category V : 정비, 기술자 평가 필요	
Ligament Crack Indication	LCI
Mixed Mode Indication	MMI
Multiple Axial Indication	MAI
Multiple Circumferential Indication	MCI
Multiple Volumetric Indication	MVI
Obstructed	OBS
Single Axial Indication	SAI
Single Circumferential Indication	SCI
Single Volumetric Indication	SVI
To Be Plugged	TBP
Category VI : 재 보수 필요	
No Heat Treatment	NHT
No Hydraulic Expansion	NHE
No Roll Expansion	NRE
No Support Expansion	NSE
No Weld Signal	NWS
Category VII : 신호 재검토, 이력 재검토, 진단이나 기술자 평가	
Bulge	BLG
Ding	DNG
Dent	DNT
Indication Not Found	INF
Indication Not Reportable	INR
Inside Diameter Chatter	IDC
Lead Analyst Review	LAR
Lift-Off Signal	LOS
Manufacturing Burmish Mark	MBM
No Tubesheet Expansion	NTE
Noisy Tube	NSY

2) EPRI : Electric Power Research Institute

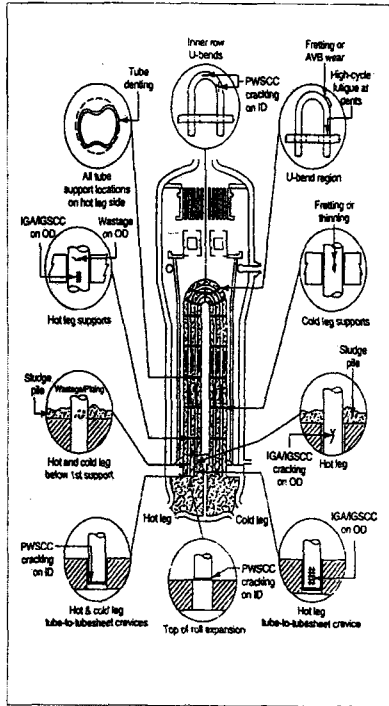


Fig. 1 The diagram of the deterioration mechanism and its position in steam generator tube

및 깊이를 측정하여 제작사에 건전성여부를 검토요청하였다. (실측값은 Table 2 참조) 이를 근거로한 제작사 검토결과 보고서에 따라 6개 전열관을 관막을 하였으며, 나머지 전열관은 현상대로 사용하되 계속 감시대상 전열관으로 설정하였다. (내경 측정 위치는 Fig. 2 참조)

그러나, 1999년과 2000년에 월성 3,4호기 첫번째 가동중검사 수행한 결과, 가동전검사에서 보고되지 않았던 신호가 110개가 추가로 발견되었다. 이 중에서 108개는 왜곡된 확관(DRT) 신호이고, 2개는 최종확관이 되지 않은 전열관이었다.

과확관 결함은 미국전기협회가 분류한 범주 VII에 해당하며, 신호재검토, 이력재검토, 또는 진단이나 기술자의 평가가 필요한 것이다.

2.2.2 검토내용

제작기술진은 가압경수로형의 Alloy 690 TT 튜브에서의 2차측 으로의 과도한 확관(OSF,

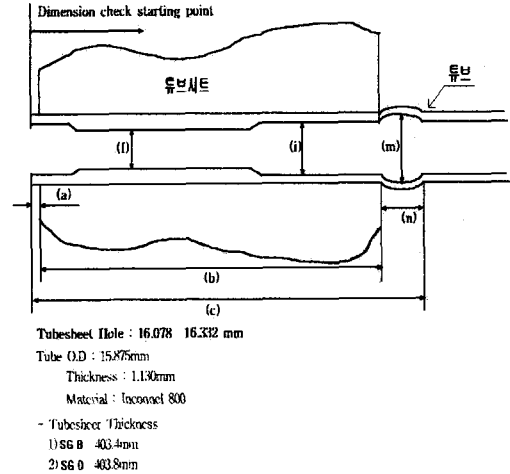


Fig. 2 Dimension check point

Over-Secondary-Face)에 대해 수행된 연구결과를 검토하였고, 월성 3,4호기 증기발생기 튜브 재질인 Alloy 800의 잔류 응력측정 결과를 검토하였다.

OSF에 관한 인장잔류응력 최고치는 확관 압력에 의해서 튜브시트 홀의 모서리 주위로 튜브가 찌그러진 변형부(kink)에서 형성된다. Alloy 690 튜브 연구결과, 응력부식균열의 원인으로 여겨지는 잔류응력은 냉간가공 형상에 크게 의존한다. 연구에 사용된 Alloy 690과 Alloy 800은 유사한 냉간가공표피층을 가지는 것으로 알려졌다. OSF 팽창의 정도에 따른 잔류응력 증가 경향은 유사하게 나타날 것이다. Alloy 690 튜브 연구에 근거하면, 내부식성 재질은 수압확관으로 인한 내경 증가 0.05 mm 이하의 OSF Buldge 들은 보수적으로 응력부식균열 발단응력 값 이하이다.

사실상 Alloy 800은 다른 재질보다 응력부식균열 저항성이 우수한 것으로 나타났다. Alloy 690은 변형부의 표피층에는 인장응력만 나타나고, 그 하부는 응력균열부식에는 저항이 있는 압축응력을 나타낸다. 이 점에서 수압확관 Alloy 800도 Alloy 690과 동일한 현상을 보인다. 아울러, 수압확관에 의한 OSF 형상에서는 인장응력은 얇은 층에서만 나타나고 그 이후는 압축응력이 생기는 것이 나타났다. 응력부식균열은 압축응력에서는 일어나지 않는다.

Table 2 Dimensional inspection record summary sheet

(Unit : mm)

Tube ID No	ROW	COL	Tube Stick Out(a)	Tubesheet Thick (b)	Dim from Tube end (c)	Unexpanded Zone Tube ID		Expanded Zone Tube ID		Expanded Beyond T/S			Diametral Bulge		Extension Beyond T/S(n)		
						(d)	(e)	(g)	(h)	Average(i)	(j)	(k)	Max(m)	(m)-(i)		(m)-(f)	
R55/L5	33	5	4.85	403.4	419	13.67	13.67	13.91	13.94	13.925	13.94	13.78	13.94	0.01	0.27	10.75	
R83/L11	5	11	5.20	403.4	415	13.68	13.68	13.93	13.92	13.925	13.94	13.94	13.94	0.01	0.26	6.40	
R24/L22	64	22	5.10	403.4	415	13.67	13.67	13.92	13.91	13.915	13.91	13.74	13.91	0.00	0.24	7.50	
R45/L59	43	59	4.50	403.4	419	13.71	13.72	13.97	-	13.970	13.97	13.96	13.97	0.00	0.26	11.10	
R37/L63	51	63	4.85	403.4	414	13.68	13.68	13.93	13.95	13.940	13.90	13.70	13.90	-0.04	0.22	5.75	
R67/L59	21	99	4.50	403.4	418	13.65	13.65	13.85	13.84	13.845	13.83	13.71	13.83	-0.01	0.18	10.10	
R82/L102	6	102	5.00	403.4	414	13.68	13.68	13.92	13.96	13.940	13.96	13.96	13.96	0.02	0.28	5.60	
R70/L102	18	102	4.40	403.4	415	13.70	13.70	13.94	13.94	13.940	13.98	13.98	13.98	0.04	0.28	7.20	
R67/L103	21	103	4.85	403.4	416	13.70	13.70	13.89	13.89	13.890	13.93	13.92	13.93	0.04	0.23	7.65	
R65/L103	23	103	4.85	403.4	418	13.70	13.70	13.92	13.92	13.920	13.97	14.01	14.01	0.09	0.31	9.85	
R63/L103	25	103	4.65	403.4	414	13.70	13.70	13.92	13.92	13.920	13.97	13.77	13.97	0.05	0.27	5.95	
R32/L15	45	15	5.30	403.4	420	13.66	13.66	13.94	13.93	13.935	14.08	14.38	14.38	0.46	0.73	11.30	
R107/L16	20	16	5.00	403.4	419	13.70	13.70	13.94	13.94	13.940	14.15	14.35	14.35	0.41	0.65	10.60	
R139/L16	22	16	5.00	403.4	420	13.68	13.67	13.85	13.85	13.850	14.31	14.56	14.56	0.61	0.89	11.60	
R115/L16	23	16	5.00	403.4	420	13.66	13.66	13.86	13.86	13.860	14.06	14.18	14.18	0.25	0.50	11.60	
R117/L16	30	16	5.00	403.4	419	13.66	13.66	13.86	13.86	13.910	14.25	14.45	14.45	0.64	0.79	10.64	
S/G No. SG B											Maximum			0.61	0.89	11.60	
R33/L45	35	45	4.30	403.3	418	13.70	13.66	13.86	14.22	14.33	14.585	13.7	13.60	1.87	0.865	0.01	11.20
SG No. SG D											Over Sized Hole						

Table 3 The tabulation of plugged tubes in Wolsong unit 3&4 steam generators

구분	관막음 수	감시 전열관 수	결함 내용
월성 3 호기	S/G A	0	21 왜곡된 확관
	S/G B	2	4 왜곡된 확관
	S/G C	2 (미확관)	13 왜곡된 확관
	S/G D	5	9 왜곡된 확관
월성 4 호기	S/G A	0	15 왜곡된 확관 주1)
	S/G B	8	32 왜곡된 확관
	S/G C	0	15 왜곡된 확관
	S/G D	1	0 왜곡된 확관
합 계	18	109	

주1) 6개 전열관 관막음 예정(2002)

따라서, 직경증가가 0.05mm 이하인 OSF 조건 튜브들은 "현상태 사용"으로 결정했다.

직경증가가 0.24 mm 이상인 것은 부식의 경향이 있고 직경증가가 0.08~0.24 mm인 Alloy 690 은 매우 높은 잔류표면인장응력 때문에 관막음 되어야 한다.

플러그 재질로는 Alloy 600은 사용불가이며, Alloy 690 또한 재질상의 차이, 다른 열팽창, 전지화학 반응, 등에 의해 나타나는 튜브 플러그의 민감도 때문에 추천하지 않는다. 플러그는 모재와 가능한 가까운 재질로 선정하여야 한다.

SB408 Type, UNS NO. 8800(Incoloy 800)이 가장 좋으나, UNS NO. 8810 또한 적용 가능하다. 월성 3, 4호기 플러그의 재질은 UNS NO. 8810을 사용하였다.

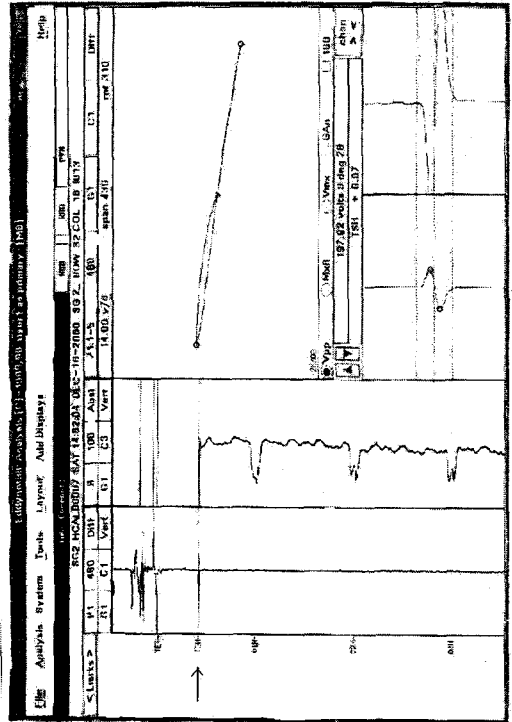


Fig. 3 An example of the typical DRT signal

2.2.3 정비현황

2개의 최종확관이 이루어지지 않은 전열관은 1999년 확관후 관막음 하였고, 108개의 왜곡된 확관 신호 전열관중 10개 전열관 또한 예방적 차원에서 2000년에 관막음 하였다. 나머지 전열관에 대해서는 가동중 열화 여부를 감시하기 위해 회전형 탐촉자(MRPC : Motorized Rotate Pancake Coil) 검사법으로 계속 검사할 계획이다. 관막음 기준은 1.3항의 설계검토 결과와 같이 0.05mm 이상 내경이 증가된 전열관은 응력부식 균열 발생 가능성이 있다는 견해이고, 와전류탐상검사 신호가 150 Volts 이상인 신호는 0.05 mm 이상의 직경증가가 있는 것으로 측정되었으므로 결함신호 진폭값이 150 Volts 이상인 전열관을 관막음 대상으로 결정하였다. Fig. 3을 보면 P2(480kHz-240kHz Mix) 채널에서의 진폭(Volts)이

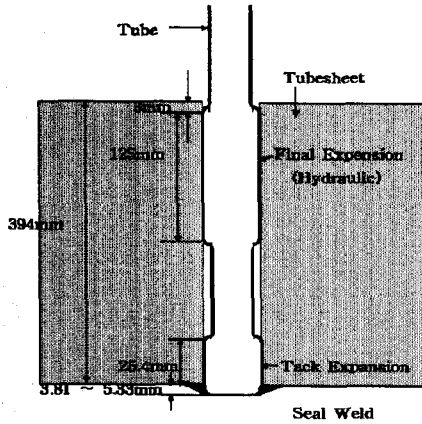


Fig. 4 Normally expanded tube cross-section

150 Volts 이상이며, 위상각이 약 5-35도로 명확한 내면 결함신호를 나타낸다. 관막음 현상은 Table 3과 같다.

2.2.4 결함원인

월성 3,4호기 관막음 전열관의 결함원인 분석 결과 전열관 내부에 다이알 게이지를 삽입하여 실측한 결과 다음 2가지 종류의 결함으로 판명됨.

첫째는, 전열관(Tubesheet) 상단 10mm 정도 위치에서 전열관 두께 변화가 상당량 발생할 정도의 과도한 확관이 이루어졌다. (Fig. 5 참조)

둘째는, 정상확관은 초기확관과 최종확관으로 이루어지지만 월성3호기 증기발생기 3번의 전열관 2개에서는 초기확관만 되었고 최종확관이 이루어지지 않았다. (Fig. 6 참조)

3. 문제점 및 해결방안

3.1 문제점

방대한 량의 와전류탐상 신호를 일일이 수동으로 평가함에 따라 결함신호를 하나도 빠뜨리지 않고 검출하기는 상당히 힘든 일이며 한계가 있다.

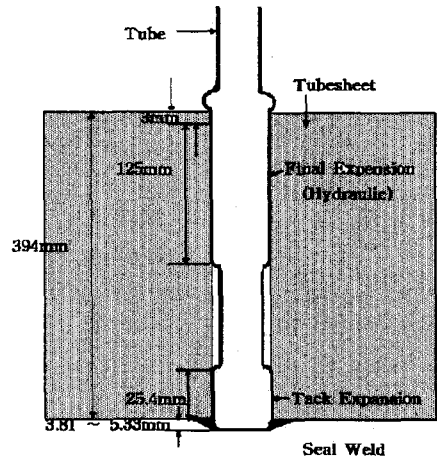


Fig. 5 Distorted roll transition tube cross-section

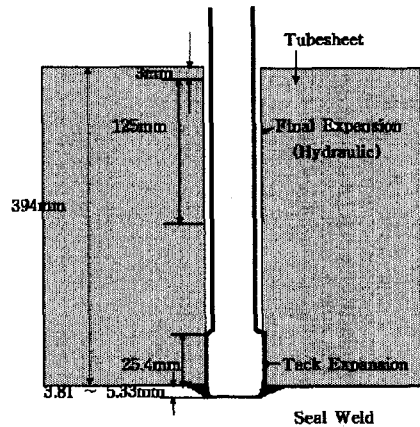


Fig. 6 Not-finally-expanded tube cross-section

3.2 해결방안

3.2.1 평가자동화

많은 량의 와전류탐상 신호를 신속히 평가할 수 있는 자동평가프로그램을 도입하여 1차적으로 컴퓨터에 의한 평가를 수행하고, 2차적으로 사람이 평가를 수행하여, 누락을 방지

3.2.2 검사 체계화

해당 발전소 증기발생기의 구조 및 결함 사례 연구 등을 철저히 수행하며, 검사전 해당 발전소 결함을 검토(또는 시험)한 후에 실제 평가를 수행.

4. 결 론

와전류탐상검사의 신뢰도 향상과 증기발생기 관리를 더 잘하기 위해서 아래와 같은 사항을 검토하여 적용함이 타당하다고 판단한다.

- 신호평가의 자동화 프로그램 도입
- 검사전 해당 발전소의 증기발생기 특성을 이해하고, 기 검출된 결함사례들을 연구하여 검사자의 이해 증진
- 새로운 결함의 분석결과와 교육, 사례 연구 및 전파를 위한 전문가 그룹활동 활성화
- 각종 결함자료의 수집, Data-Base화, 자료분석을 위한 자료관리 체계를 수립
- 평가자 교육훈련을 지속적으로 실시하고 해당 자격관리