

표준형 증기발생기 전열관에 발생한 결함 특성 분석

Characteristics for Flaws at Steam Generator Tubes of Korean Standard Nuclear Power Plants

조찬희, 남민우, 정지홍, 이희중, 김세경
전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

국내 가동중인 원전 중 표준경수로 증기발생기 전열관에 발생한 결함을 분석해 보면 반진동봉에 위치한 마모결함과 튜브시트 상단에 발생한 원주균열이 대표적이다. 반진동봉 위치에서 검출되는 마모결함은 웨스팅하우스 모델 등에서도 흔히 검출되는 결함으로 검출확률도 비교적 높을 뿐만 아니라 크기 측정기법도 비교적 잘 정립되어 있는 결함이다. 그러나 균열결함의 경우 크기 측정에 따른 오차 범위가 비교적 크고, 성장률 예측이 어려워 일단 검출되면 전열관의 관막음 조치로 증기발생기 전열관의 안전성을 확보하고 있다. 증기발생기 전열관의 경우 비파괴검사 방법 중 와전류탐상검사를 이용하여 결함을 검출하고 있다. 증기발생기 전열관에서 검출되고 있는 원주균열의 경우 와전류탐상검사에 흔히 사용되는 보빈탐촉자로 검출이 어려워 모터구동 팬케익 탐촉자로 검출하고 있다. 표준형 증기발생기 전열관에서 검출되고 있는 원주균열의 특성을 분석한 결과, 원주균열이 검출된 전열관은 대부분 덴트가 발생한 사실은 확인할 수 있었다.

Abstract

The flaws detected at the steam generator tube of the Korean Standard Nuclear Power Plant are the wear indications by anti-vibration bars and circumferential cracks at the top of the tubesheet. It is easy to detect and size wear indications. Also the wear indications are commonly found at the other types of steam generator including Westinghouse model. However, the steam generator tube which includes crack indications is plugged because it is very difficult to predict the growth rate of

the crack and the sizing error is high. The motorized rotating pancake coil has been used for the detection of circumferential crack because it is not possible to be detected by the conventional bobbin probe. This paper describes the characteristics for the circumferential crack at the steam generator tubes of the Korean Standard Nuclear Power Plants. The result shows that the steam generator tube with circumferential cracks contains the dent.

1. 서론

현재 가동중인 한국 표준경수로형 원전은 영광 3, 4, 5, 6호기 울진 3, 4호기 등이다. 표준경수로의 증기발생기는 CE(Combustion Engineering) System 80 모델로 호기 당 2대의 증기발생기가 설치되어 있고, 전열관의 재질은 Inconel 600 HTMA이며 튜브시트 내면에서 폭발확관법으로 전장확관(Full Depth Expansion) 되어 있다.

증기발생기 전열관은 1차측과 2차측의 압력경계를 이루고 있으며 얇은 관으로 이루어져 있어 매우 중요하게 취급되고 있다. 증기발생기 전열관에 관통결함이 발생하게 되면 냉각재 유실 사고까지 발생할 수 있기 때문에 증기발생기 전열관의 건전성확보는 아무리 강조하여도 지나치지 않는다. 미국 등의 선진국에서는 증기발생기 전열관 같이 매우 중요한 기기에 대한 건전성검사 결과의 해석은 매우 엄격한 자격을 소유한 평가자에 의해서만 평가하도록 규정하고 있으며[1], 국내에서도 이를 반영하여 과학기술부 고시에 이와 같은 내용이 명시되도록 추진 중에 있다.

가동중 원전의 증기발생기 전열관에 대한 건전성을 확인하는 검사로는 비접촉식이면서 비교적 검사속도가 빠른 와전류탐상검사가 유용한 것으로 제안되고 있다[2]. 따라서 국내 원전의 경우 매 가동중점검 기간마다 와전류검사를 수행하여 증기발생기 전열관의 건전성을 평가하고 있다. 가동중점검 중 증기발생기 전열관에서 검출되고 있는 결함으로는 반진동봉 위치에서의 마모결함과 튜브시트 상단면에서의 균열결함이 대표적이다. 일반적으로 웨스팅하우스 모델 증기발생기의 경우 균열결함은 거의 검출되고 있지 않으나, 표준경수로형 증기발생기 전열관의 경우에는 비교적 가동년수가 짧은 경우에도 균열결함이 검출되고 있다. 균열결함은 일단 발생하면 파단에 이르기 쉽기 때문에 철저히 관리되어야 한다. 따라서 국내 표준경수로 증기발생기 전열관에서 검출되고 있는 균열결함의 특성을 분석하여 균열발생 원인을 파악하는 것은 매우 유용하다.

2. 증기발생기 전열관 균열발생 현황

증기발생기 전열관에 발생하는 균열결함은 균열의 방향에 따라 축방향 균열과 원주방향 균열로 분류할 수 있으며, 균열의 발생위치에 따라 전열관 내면에 발생한 1차측 응력

부식균열(IDSCC or PWSCC)과 2차측 응력부식균열(ODSCC)로 분류할 수 있다. 표준경수로 증기발생기 전열관의 튜브시트 상단에서 검출된 균열결함은 대부분 원주방향 균열 결함이며, 현재 가동 중인 원전에서 발생한 원주균열의 현황은 표 1과 같다.

표 1. 표준경수로 증기발생기의 튜브시트 상단에 발생한 원주균열 현황

발전소	Outage	일 자	IDSCC		ODSCC		ID/ODSCC	
			SG01	SG02	SG01	SG02	SG01	SG02
영광 3	7	2003. 06	3	18	5	5		3
	6	2002. 03	2	9	10	23		2
영광 4	6	2002. 10	4	3	23	19		
	5	2001. 05			31	4		
울진 3	4	2002. 11						
	3	2001. 06			3	3		
울진 4	4	2003. 09	7	1				
	3	2002. 04	4					

표 1에 나타난 바와 같이 영광 3호기의 경우 제6차 계획예방정비공사(O/H)부터 원주균열이 나타나기 시작하였으며 결함의 발생 위치에 따라서 전열관 내면에 발생하는 1차측 응력부식결함(IDSCC or PWSCC)과 전열관 외면에 발생하는 2차측 응력부식결함(ODSCC)이 혼재되어 나타나며, 일부 전열관의 경우에는 동일 전열관에 IDSCC와 ODSCC가 같이 발생하기도 하였다. 영광 4호기의 경우 5차 O/H부터 원주균열이 발생하기 시작하였으며 5차 O/H 시는 ODSCC만이 검출되었으나, 6차 O/H 시 일부 전열관에 IDSCC도 함께 검출되었다. 울진 3호기의 경우 3차 O/H 시 ODSCC가 6개의 전열관에서 검출되었으나 4차 O/H 시는 균열결함이 검출되지 않았다. 울진 4호기의 경우에는 3차 O/H 시 4개의 전열관에서 IDSCC가, 4차 O/H 시 8개의 전열관에서 역시 IDSCC가 검출되었다. 이상의 결과를 종합하여 보면 표준경수로 증기발생기 전열관의 경우에는 원주방향의 1차측 응력부식균열과 2차측 응력부식균열이 동시에 발생하고 있음을 알 수 있다.

3. 표준경수로 증기발생기 전열관의 확관 특성

표준경수로 증기발생기 전열관은 튜브시트 내면에서 폭발확관법을 사용하여 전열관을 확관하였다. 표준경수로 증기발생기 전열관의 경우 튜브시트 상단부분에 미세한 돌출(Protrusion) 현상을 관찰할 수 있는데, 가동전검사(PSI: Pre-Service Inspection)의 와전류검사(ECT: Eddy Current Test)의 보빈(Bobbin) 형상검사 결과를 분석해 보면 이러한

현상은 가동 중에 형성된 것이 아니라 제작 당시부터 존재한 것으로 판단된다. 보빈 형상 검사 결과로서 그림 1에 정상확관의 경우를, 그림 2에는 Protrusion이 있는 전열관의 신호를 나타냈다.

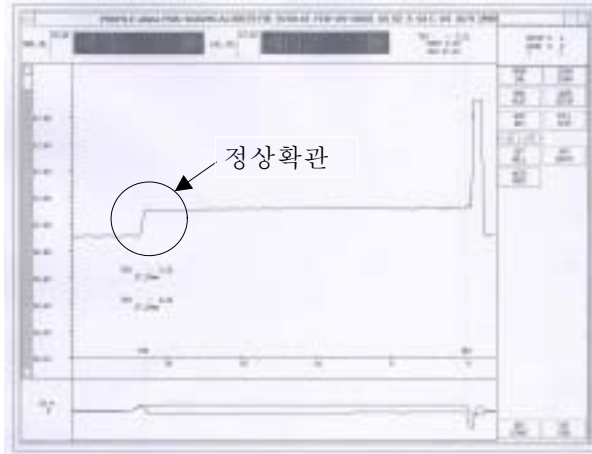


그림 1. 정상확관 전열관의 형상검사 신호

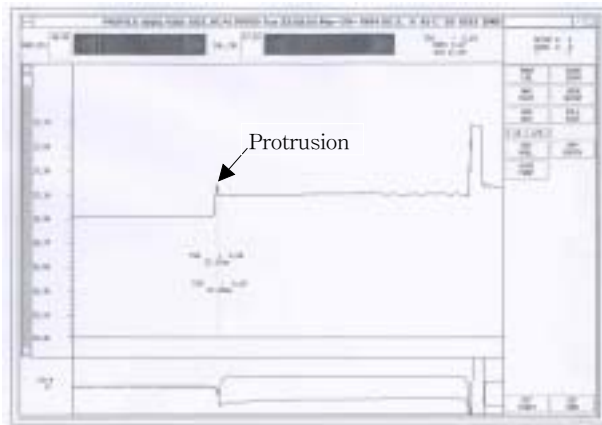


그림 2. Protrusion이 존재하는 전열관의 형상검사 신호

가동전검사의 데이터로부터 추정하여 보면 영광 3, 4호기, 울진 3호기의 경우 약 90% 이상의 전열관에서 Protrusion이 나타나고 있으나, 울진 4호기의 경우는 약 10% 이하의 전열관에서 나타나며 돌출된 정도도 울진 4호기의 경우 영광 3, 4호기와 울진 3호기에 비해 비교적 미세한 것으로 추정된다.

또한 표준경수로 증기발생기 전열관의 특징 중의 하나는 튜브시트 상단의 확관천이 영역에서 텐트(전열관의 내경이 감소하는 현상)가 검출되고 있는 것이다. 이러한 텐트 현상은 Protrusion이 존재하는 전열관의 경우는 Protrusion 바로 하단 부위에 대부분 발생하

며(그림 3참조), Protrusion이 존재하지 않는 전열관의 경우에는 튜브시트 상단의 확관천이(Expansion Transition)가 시작되는 부분(그림 4참조) 혹은 확관천이가 끝나기 전의 위치(그림 5참조)에서 덴트 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 덴트 현상은 가동전 검사에서는 나타나지 않았으나, 원전이 가동됨에 따라 발생하여 가동년수가 증가함에 따라 덴트의 크기가 성장하는 경향을 보여주고 있다. 그리고 Protrusion 하단부의 덴트가 성장함에 따라 Protrusion이 전열관 안쪽으로 밀려 들어가 Protrusion의 높이는 감소하는 현상을 보이고 있다.

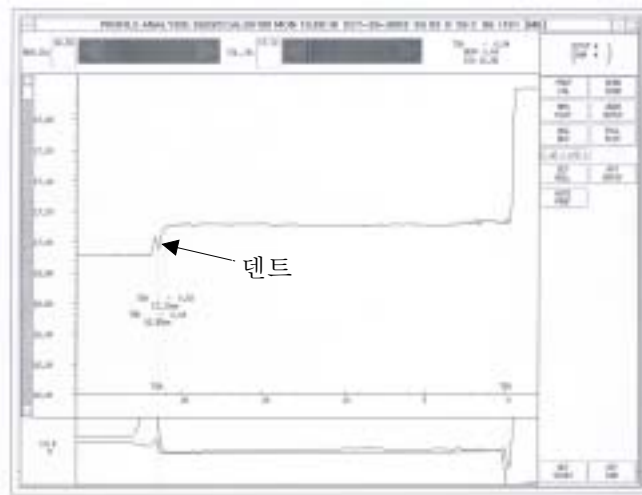


그림 3. Protrusion 하단 부위에 덴트가 존재하는 전열관의 형상검사 신호

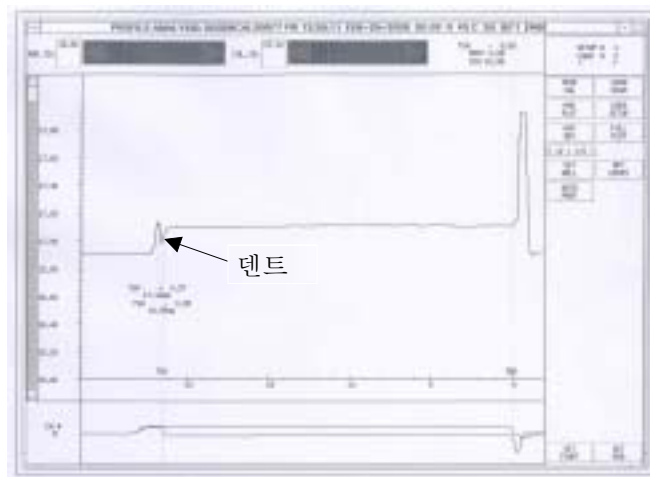


그림 4. Protrusion이 존재하지 않는 전열관에 덴트가 발생한 예
(Transition 시작 부위에 덴트 발생한 경우)

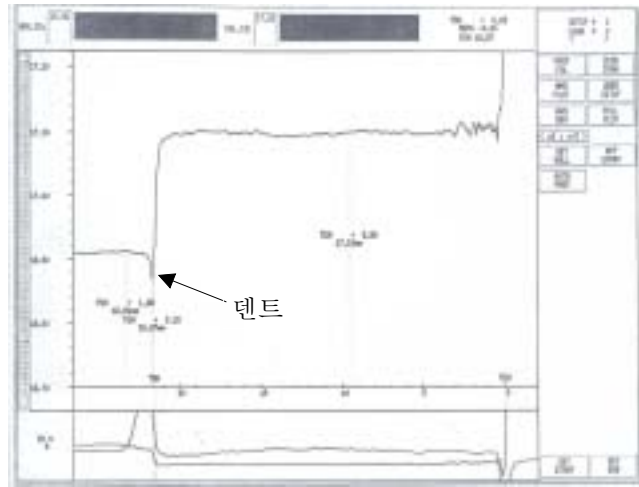


그림 5. Protrusion이 존재하지 않는 전열관에 덴트가 발생한 예
(Transition이 끝나기 전의 위치에 덴트 발생한 경우)

4. 원주균열 발생 전열관과 덴트, Protrusion과의 관계

영광 3, 4호기, 울진 3, 4호기의 증기발생기에서 원주균열이 발생한 전열관들이 Protrusion 및 덴트와 어떤 관계가 있는지를 분석하였다. 원주균열과 Protrusion 및 덴트와의 상호관계를 검토하기 위하여 원주균열이 검출된 전열관의 가동전검사(PSI) 데이터로부터 Protrusion이 존재하였는지를 조사하였고, 또한 해당 전열관의 균열이 검출된 시점에 덴트가 수반되었는지를 검토하였다.

영광 3호기의 경우 원주균열은 6차 O/H 시 11개 전열관에서 IDSCC, 33개 전열관에서 ODSCC, 그리고 2개의 전열관에서 IDSCC 및 ODSCC가 동시에 검출되었다. 원주균열이 검출된 이들 전열관들이 Protrusion과 덴트를 수반하였는지를 표 2에 나타냈다. 그리고 7차 O/H 시에는 21개 전열관에서 IDSCC, 10개 전열관에서 ODSCC, 그리고 3개 전열관에서 IDSCC 및 ODSCC가 동시에 검출되었으며, 표 3에 이들 전열관들과 Protrusion, 덴트 사이의 관계를 나타냈다. 분석에 사용된 Protrusion 여부는 가동전 검사(PSI) 데이터를 기준으로 하였으며, 덴트는 원주균열이 검출된 시점에서의 덴트 유무를 나타낸 것이다.

영광 4호기의 경우 원주균열은 5차 O/H 시 35개 전열관에서 ODSCC가 검출되었다. 원주균열이 검출된 이들 전열관들이 Protrusion과 덴트를 수반하였는지를 표 4에 나타냈다. 그리고 6차 O/H 시 검출된 원주균열 중 7개 전열관은 IDSCC, 42개 전열관은 ODSCC이었으며, 표 5에 이들 전열관들과 Protrusion, 덴트 사이의 관계를 나타냈다.

표 2. 영광 3호기 6차 O/H 시 검출된 원주균열 검출 전열관

P: Protrusion, D: 덴트

SG	전열관번호		Code	P (PSI)	D (6th)	SG	전열관번호		Code	P (PSI)	D (6th)
	R	C					R	C			
01	43	53	SCI	○	○	01	49	105	MCI	×	○
	47	55	SCI(ID)	×	○		45	107	MCI	○	○
	49	57	SCI	○	○		51	107	SCI(ID)	×	○
	47	59	SCI	○	○		53	107	SCI	○	○
	46	60	SCI	×	○		44	108	SCI	○	○
	75	89	SCI	○	○		44	110	MCI	×	○
02	43	53	SCI	○	○	02	52	62	SCI	○	○
	44	54	MCI	○	○		53	63	MCI	○	○
	41	55	SCI	○	○		54	64	SCI	○	○
	43	55	SCI(ID)	○	○		57	67	SCI	○	○
			MCI(OD)				66	82	SCI	○	○
	42	56	MCI	○	○		49	103	MCI	○	○
	44	56	MCI	○	○		51	103	SCI(ID)	○	○
	39	57	SCI	○	○		48	104	MCI	○	○
	46	58	MCI	○	○		50	104	MCI	○	○
	48	58	MCI	○	○		54	104	SCI(ID)	○	○
	50	58	SCI(ID)	○	○		47	105	MCI(ID)	○	○
	49	59	MCI	○	○		51	105	SCI(ID/OD)	○	○
	51	59	MCI	○	○		50	106	SCI(ID)	○	○
	48	60	MCI	○	○		54	106	MCI(ID)	○	○
	50	60	MCI	○	○		49	107	MCI(ID)	○	○
	52	60	SCI	○	○		51	107	MCI(ID)	○	○
	49	61	SCI	○	○		48	108	MCI(ID)	○	○
	51	61	MCI	○	○						

※ ID 표기가 없는 전열관의 Code는 OD를 나타냄.

표 3. 영광 3호기 7차 O/H 시 검출된 원주균열 검출 전열관

P: Protrusion, D: 덴트

SG	전열관번호		Code	P (PSI)	D (7th)	SG	전열관번호		Code	P (PSI)	D (7th)
	R	C					R	C			
01	47	57	SCI(ID)	○	○	01	48	106	MCI	○	○
	50	58	SCI(ID)	○	○		43	107	MCI	○	○
	45	59	SCI	○	○		45	109	SCI	○	○
	52	102	MCI	×	○		40	110	SCI(ID)	×	○
02	44	52	SCI	○	○	02	53	65	MCI(ID)	○	○
	46	56	SCI(ID)	○	○		55	65	SCI	○	○
	43	57	SCI	○	○		53	101	SCI(ID)	○	○
	53	57	SCI	○	○		55	101	SCI(ID)	○	○
	44	58	SCI(ID)	○	○		48	102	SCI(ID)	○	○
	52	58	MCI(ID)	○	○		52	102	SCI(ID)	○	○
	54	60	SCI(ID)	○	○		53	103	SCI(ID)	○	○
	47	61	SCI(ID)	○	○		53	105	SCI(ID)	○	○
	50	62	SCI(ID)	○	○		46	106	MCI(ID)	○	○
	55	63	SCI(ID)	○	○				SCI(OD)	○	○
	52	64	SCI(ID)	○	○		48	106	MCI(ID)	○	○
	56	64	MCI(ID)	○	○		45	107	SCI(ID)	○	○
	49	105	MCI(ID)	○	○		47	107	SCI(ID/OD)	○	○
			SCI(OD)	○	○		37	111	MCI	○	○

※ ID 표기가 없는 전열관의 Code는 OD를 나타냄.

울진 3호기의 경우 원주균열은 3차 O/H 시 6개 전열관에서 ODSCC가 검출되었다. 원주균열이 검출된 이들 전열관들이 Protrusion과 덴트를 수반하였는지를 표 6에 나타냈다. 그리고 4차 O/H 시에는 균열 결함이 검출되지 않았다. 울진 4호기의 경우 원주균열은 3차 O/H 시 4개 전열관에서 IDSCC가 검출되었다. 원주균열이 검출된 이들 전열관들이 Protrusion과 덴트를 수반하였는지를 표 7에 나타냈다. 그리고 4차 O/H 시 원주균열은 8개 전열관에서 IDSCC가 검출되었으며, 표 8에 이들 전열관들과 Protrusion, 덴트 사이의 관계를 나타냈다.

표 4. 영광 4호기 5차 O/H 시 검출된 원주균열 검출 전열관

P: Protrusion, D: 덴트

SG	전열관번호		Code	P (PSI)	D (5th)	SG	전열관번호		Code	P (PSI)	D (5th)
	R	C					R	C			
01	37	51	SCI	○	○	01	47	109	SCI	○	○
	39	53	SCI	○	○		49	109	SCI	○	○
	38	54	MCI	○	○		42	110	SCI	○	○
	40	54	SCI	○	○		44	110	MCI	○	○
	39	55	MCI	○	○		46	110	MCI	○	○
	41	55	SCI	○	○		48	110	MCI	○	○
	43	55	MCI	○	○		43	111	MCI	○	○
	42	56	SCI	○	○		40	112	MCI	○	○
	44	56	SCI	○	○		42	112	SCI	○	○
	48	56	SCI	○	○		37	113	SCI	○	○
	45	57	SCI	○	○		39	113	MCI	○	○
	47	57	SCI	○	○		41	113	MCI	○	○
	69	83	MCI	○	○		40	114	MCI	○	○
	71	83	MCI	○	○		42	114	SCI	○	○
	68	84	SCI	○	○		41	115	MCI	○	○
70	84	SCI	○	○					○		
02	35	55	SCI	○	○	02	49	63	SCI	×	○
	50	62	SCI	○	○		36	114	MCI	○	○

※ 모든 전열관의 균열결함이 OD임.

영광 3, 4호기, 울진 3, 4호기 증기발생기에서 원주균열이 발생한 182개 전열관을 분석해 본 결과 2개의 전열관을 제외한 180개 전열관은 덴트가 발생한 사실을 확인할 수 있었다. 울진 4호기 4차 O/H 시 원주균열로 판정하였지만 덴트가 발견되지 않은 2개의 전열관(SG01의 R42C108, R71C93)은 균열신호를 면밀히 분석해 보면 완전한 균열로 판정하기에는 약간 미흡한 점이 있으며, 신호형상이 작은 점을 고려해 볼 때 원주균열 전열관의 특성 분석용 자료에서는 제외하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 이러한 점을 감안하면 표준경수로의 경우 원주균열이 발생한 모든 전열관은 덴트를 수반하고 있음을 알 수 있다. 그러나 원주균열이 검출되지 않은 전열관에서도 덴트는 검출되고 있으며, 보빈 형상 검사만으로 판단할 때 원주균열이 발생하지 않은 일부 전열관의 경우 원주균열이 발생한 전열관에서 검출된 덴트의 깊이보다 더 깊은 덴트가 검출된 경우도 있다. 그러나 보빈 형

상검사는 원주 방향의 비정상 현상에 대한 평균값이 신호로 표현되기 때문에, 텐트의 원주방향 길이 또는 동일 원주상에 텐트의 개수 등을 종합적으로 비교하기 위해서는 Multi Coil 형상검사 등의 추가 검사가 필요하다.

표 5. 영광 4호기 6차 O/H 시 검출된 원주균열 검출 전열관

P: Protrusion, D: 텐트

SG	전열관번호		Code	P (PSI)	D (6th)	SG	전열관번호		Code	P (PSI)	D (6th)
	R	C					R	C			
01	39	51	MCI(ID)	○	○	01	56	102	SCI	○	○
	40	52	SCI	○	○		55	103	SCI	○	○
	42	52	SCI	○	○		52	104	MCI	○	○
	41	53	MCI	○	○		54	104	MCI	○	○
	42	54	SCI	○	○		55	105	SCI	○	○
	44	54	MCI	○	○		52	106	MCI	○	○
	37	55	SCI(ID)	○	○		51	107	SCI	○	○
	45	55	MCI	○	○		52	108	SCI(ID)	○	○
	42	58	SCI	○	○		39	111	SCI(ID)	○	○
	50	58	SCI	○	○		45	113	SCI	○	○
	51	59	SCI	○	○		47	113	SCI	○	○
	52	60	MCI	○	○		36	114	SCI	○	○
	52	62	SCI	○	○		38	114	SCI	○	○
67	73	SCI	○	○							
02	45	59	MCI	○	○	02	57	65	MCI	×	○
	46	60	MCI	○	○		54	66	MCI	○	○
	45	61	SCI	○	○		56	66	MCI	×	○
	47	61	SCI	○	○		51	105	MCI	○	○
	46	62	SCI	×	○		41	107	SCI	○	○
	47	63	SCI	○	○		47	107	SCI	○	○
	51	63	SCI	○	○		40	108	SCI(ID)	○	○
	52	64	MCI	○	○		46	108	MCI	○	○
	54	64	MCI	○	○		52	108	SCI(ID)	○	○
	53	65	MCI	×	○		43	109	MCI	○	○
	55	65	MCI	○	○		39	111	MCI(ID)	○	○

※ ID 표기가 없는 전열관의 Code는 OD를 나타냄.

표 6. 울진 3호기 3차 O/H 시 검출된 원주균열 검출 전열관

P: Protrusion, D: 덴트

SG	전열관번호		Code	P (PSI)	D (3th)	SG	전열관번호		Code	P (PSI)	D (3th)
	R	C					R	C			
01	72	80	SCI	○	○	02	69	83	SCI	○	○
	74	84	SCI	○	○		71	83	SCI	○	○
	74	86	SCI	○	○		68	84	MCI	○	○

※ 모든 전열관의 균열결함이 OD임.

표 7. 울진 4호기 3차 O/H 시 검출된 원주균열 검출 전열관

P: Protrusion, D: 덴트

SG	전열관번호		Code	P (PSI)	D (5th)	SG	전열관번호		Code	P (PSI)	D (5th)
	R	C					R	C			
01	70	88	MCI	×	○	01	71	95	SCI	×	○
	67	95	SCI	×	○		72	96	MCI	×	○

※ 모든 전열관의 균열결함이 ID임.

표 8. 울진 4호기 4차 O/H 시 검출된 원주균열 검출 전열관

P: Protrusion, D: 덴트

SG	세관번호		Code	P (PSI)	D (6th)	SG	세관번호		Code	P (PSI)	D (6th)	
	R	C					R	C				
01	71	93	SCI	×	×	02	71	87	SCI	×	○	
	72	94	MCI	×	○							
	69	95	MCI	×	○							
	69	97	MCI	×	○							
	71	97	SCI	×	○							
	73	97	SCI	×	○							
	42	108	SCI	×	×							

※ 모든 전열관의 균열결함이 ID임.

원주균열 전열관과 Protrusion과의 상관관계를 살펴보면 영광 3, 4호기 울진 3호기의 경우 원주균열이 검출된 170개의 전열관 중 가동전검사 데이터를 기준으로 Protrusion이 존재한 전열관은 158개, Protrusion이 존재하지 않은 전열관은 12개로 나타났다. 울진 4호기의 경우는 원주균열이 발생한 10개 전열관(신호 형상이 미약한 2개 전열관 제외) 중

가동전검사 데이터를 기준으로 10개 전열관 모두 Protrusion이 존재하지 않았다. 이와 같은 현상은 표준경수로 전체 전열관의 Protrusion 비율과 관련이 있으며, Protrusion이 없는 전열관에서도 덴트가 유발될 수 있다는 점에서 Protrusion이 반드시 덴트를 유발시키는 요인이라고 설명하기는 어렵다.

5. 표준경수로 원주균열의 특징

표준경수로 증기발생기 전열관에서 검출된 원주균열은 IDSCC와 ODSCC가 혼재하는 것으로 분석되었다. 울진 원전의 경우 3호기는 ODSCC만이, 4호기의 경우는 IDSCC만이 검출되었지만 영광 3, 4호기는 IDSCC와 ODSCC가 함께 검출되고 있다. 또한 단일원주균열(SCI: Single Circumferential Indication)과 다중원주균열(MCI: Multiple Circumferential Indication)도 함께 검출되고 있다. 따라서 1차측응력부식균열(IDSCC)과 2차측응력부식균열(ODSCC), 단일원주균열(SCI)과 다중원주균열(MCI)은 표준경수로 증기발생기에서 일반적으로 발생할 수 있는 균열결함으로 고려되어야 할 것으로 판단된다.

다만 IDSCC와 ODSCC가 발생하는 위치는 약간의 차이를 보이고 있는데, IDSCC의 발생위치가 ODSCC의 발생위치에 비해 일반적으로 약간 낮은 위치에서 검출된다. Protrusion과 덴트가 존재하는 전열관에 응력부식균열이 발생하는 위치를 개략적으로 그림 6에 나타냈다.

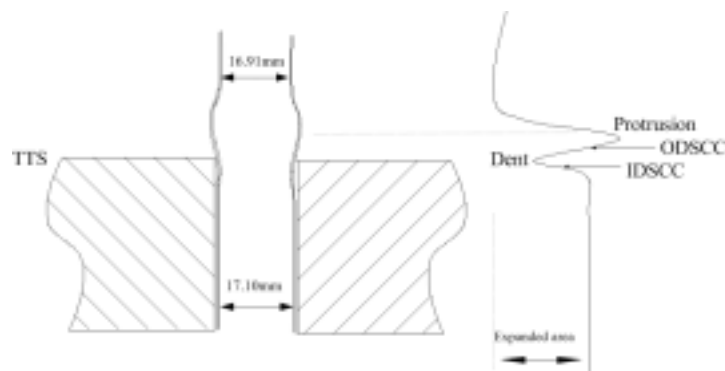


그림 6. 원주균열의 발생위치

그림 6은 이해를 돕기 위해 과장해서 그린 그림으로서 실제 Protrusion과 덴트는 그림 6보다는 상당히 미세하게 나타날 것이다. 또한 원주균열의 위치는 보빈 형상검사와 모터 구동 팬케익 코일의 균열 신호 등을 종합적으로 분석하여 볼 때 미세 덴트가 Protrusion의 하단면에 존재할 경우 그림 6과 같이 ODSCC가 상단면에 IDSCC가 하단면에서 검출되는 것으로 나타났다.

6. 결 론

국내에서 가동중인 표준경수로 증기발생기 전열관에 발생한 결함을 분석해 보면 반진동봉과의 마찰에 의한 마모결함과 튜브시트 상단에 발생한 균열결함이 대부분이다. 와전류검사에 의한 균열결함을 면밀히 관찰해 보면 대부분이 원주균열임을 알 수 있으며, 원주균열이 발생한 전열관의 특징은 다음과 같다.

표준경수로 증기발생기 전열관에는 일부 호기에서 제작 당시부터 튜브시트 상단면에 돌출부위인 Protrusion이 형성되어 있다. 그러나 원주균열이 발생한 전열관을 면밀히 검토해 보면 Protrusion이 균열을 발생시킨 요인으로 단정하기는 어려운 점이 있다. 원주균열이 검출된 거의 모든 전열관에서 덴트 현상이 발견된 것으로 보아 덴트는 표준형 증기발생기의 원주균열을 발생시킨 필요조건임을 확인할 수 있다. 그러나 원주균열을 발생시킨 덴트의 형성 원인에 대해서는 슬러지 및 그 밖의 여러 요인을 종합적으로 검토하여야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Electric Power Research Institute, "Pressurized Water Reactor Steam Generator Examination Guidelines: Revision 6" (2002).
2. American Society of Mechanical Engineer, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. V, "Non-Destructive Examination" (1995).