한국압력기기공학회 논문집
제6권 제2호 2010년 12월 pp. 16－19

OPR 1000 증기발생기 전열관의 ODSCC 고찰

석동화† · 오창하* · 이재욱*

A Study on ODSCC of OPR 1000 Steam Generator Tube

Dong Hwa Suk†, Chang Ha Oh* and Jae Woog Lee*

ABSTRACT

In this study, the axial ODSCC occurrence of domestic OPR 1000 steam generator tube was caused by the tube weakness and the sludge accumulation in the secondary side of steam generator. Inconel 600 HTMA used as tube material is related to most of tube leakage accidents in the world and also these ODSCCs were detected mainly at the 5th TSP(Tube Support Plate) to the 8th TSP of hot leg side. These elevations(5th TSP to 8th TSP) pave the way for the sludge accumulation. As a result of EC(Eddy Current) Bobbin and RPC data analysis, ODSCCs were occurred at contact points of tube and tube support plate. The more accumulated sludge, the higher occurrence frequency of ODSCC.

Key Words : ODSCC(2차측 응력부식균열), DSI(관지지판에서의 이상 지시), DSS(관지지판에서의 이상 신호), TSP(관지지판)

1. 서 론

울진 4호기는 우리나라 표준형인 OPR 1000 원전으로 2대의 증기발생기가 설치되어 있으며, 증기발생기 전열관 재질은 Inconel 600 HTMA이며, 관지지판(TSP)은 Eggcrate Type으로 11개가 설치되어 있고, 그 구조는 Fig. 1과 같다.

이 발전소는 1999년 12월 상업운전을 시작한 후 2년 5개월만인 2002년 4월 증기발생기 파단사고를 경험하였고, 최근 2009년 2월 8차 와전류탐상에서 관지지판 지역에서 다량의 전열관 외면 축방향 2차측 응력부식균열(Axial ODSCC)이 검출되었다. 이러한 균열발생은 취약한 전열관 재질 및 전열관 외면 슬러지 축적이 주원인으로 파악되며, 근거로는 증기발생기 전열관 재질로 사용된 Inconel 600MA는 1980년대부터 미국 등 여러 나라에서 많은 균열을 발생하고 있으며, 전열관 외면의 슬러지 축적으로 인해 열전달 능력이 감소되어 전열관 2차측 표면온도의 상승과 함께 불순물 농축에 따른 응력부식균열 환경을 조성하기 때문이다.

† 책임저자, 회원, 한전KPS(주) 원정센터
E-mail : dhsuk@kps.co.kr
TEL :(051)726-7734 FAX :(051)726-7799
* 한전KPS(주) 원정센터

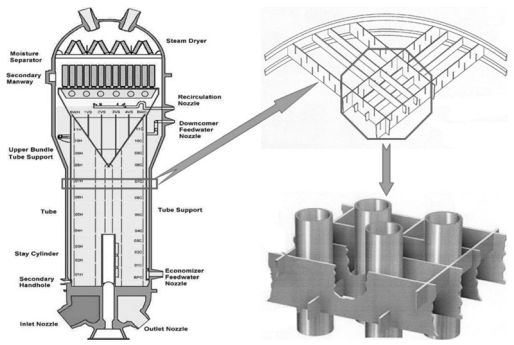

Fig. 1 Eggcrate TSP Configuration of OPR 1000 S/G

2. 관지지판 축방향 2차측 응력부식균열 발생 현황

OPR 1000 증기발생기 관지지판 지역의 축방향 2차측 응력부식균열 검출은 Fig. 2 및 Fig. 3과 같이

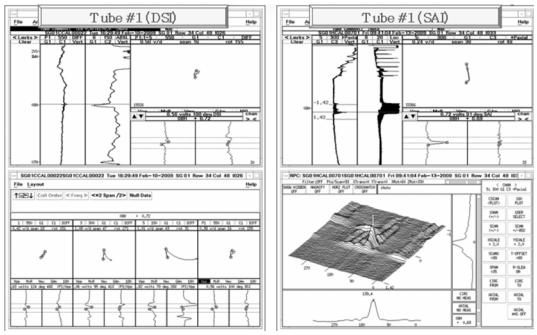

Fig. 2 Bob. & RPC Graphic for SCC Indication of Tube #1

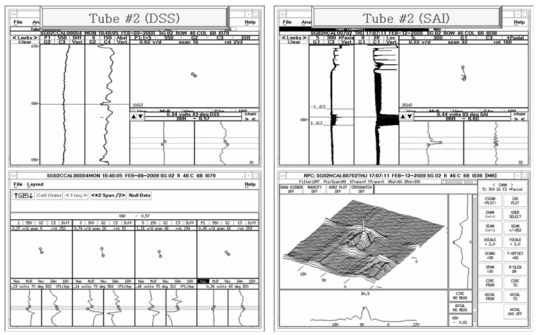

Fig. 3 Bob. & RPC Graphic for SCC Indication of Tube #2

Table 1 Distribution of Axial ODSCC at TSP

Ele.	S/G 01			S/G 02		
	지시수	깊이(%)	길이(In)	지시수	깊이(%)	길이(In)
01H	-	-	-	3	42	0.25
02H	1	39	0.12	-	-	-
03H	-	-	-	-	-	-
04H	1	42	0.59	2	37	0.24
05H	9	44	0.37	6	39	0.26
06H	21	42	0.39	10	38	0.33
07H	12	41	0.29	2	45	0.39
08H	5	45	0.36	5	40	0.25
09H	-	-	-	1	30	0.23
計	49	43	0.36	29	39	0.29

전통적인 와전류탐상시험 방법인 Bobbin 탐촉자 검사를 통해 QDA(Qualified Data Analyst)가 관지지판 지역에서의 전열관 이상신호를 나타내는 코드인 DSI (Distorted Support Indication) 또는 DSS(Distorted Support Signal)로 평가한 신호에 대해 균열 검출능

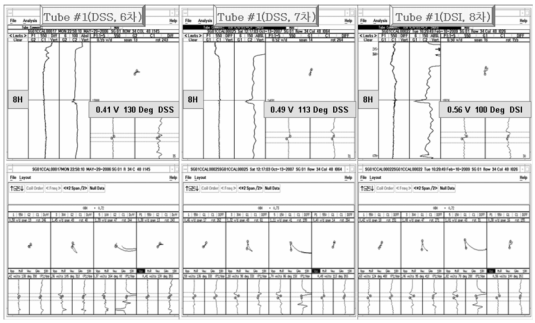

Fig. 4 History Bobbin Data Graphic for Tube #1

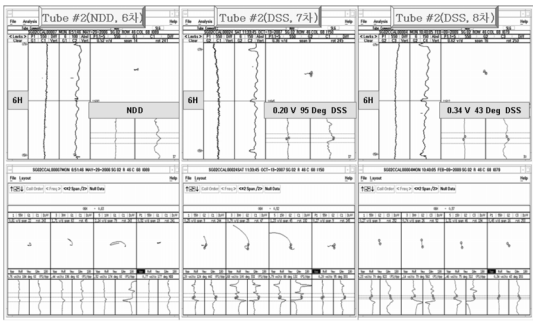

Fig. 5 History Bobbin Data Graphic for Tube #2

및 방향성 분석에 탁월한 RPC 탐촉자를 이용한 국부 정밀검사를 수행하여 이루어 졌으며, 관지지판별 균열 발생분포는 Table 1과 같다[1]. 아울러 균열로 최종 평가된 전열관에 대해서는 Fig. 4, Fig. 5 및 Table 2에서와 같이 과년도 Bobbin 데이터의 검토를 통해 성장성도 확인하였다.

Fig. 2와 3에서의 좌측은 Bobbin, 우측은 RPC에 의해 검출된 2차측 응력부식균열 지시 모양으로, 발생 균열이 축방향 지시 이므로 Bobbin 검사에서도 어느 정도 검출이 가능함을 알 수 있다.

또한 Bobbin 검사로 평가된 DSI 신호 및 그 보다 신호 크기가 작거나 지시가 명확하지 않을 경우 사용하는 코드인 DSS 신호에서도 RPC 검사결과 응력부식균열이 발생하고 있었다.

해외에서도 관지지판 지역에서의 축방향 2차측 응력부식균열 발생사례가 미국 Palo Verde 및 Seabrook 발전소에서 있었다. Palo Verde 발전소는 우리나라 OPR 1000과 유사한 모델로 전열관 재질은 Inconel 600HTMA이며 전열관 외면의 침적물/슬러지(Sludge) 부착에 의해 관지지판 및 Free Span 위치에서 2차측 응력부식균열이 발생되었고, Seabrook 발전소는 F형

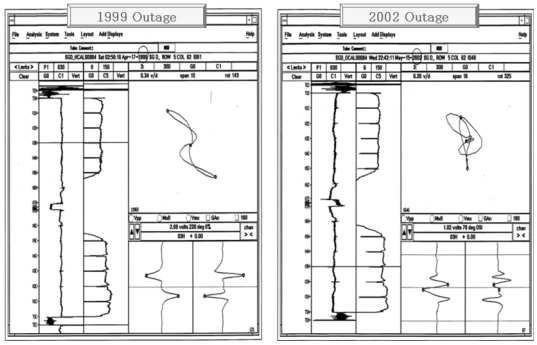

Fig. 6 Axial ODSCC Graphic at TSP of Seabrook S/G

증기발생기로 2002년 5월(8차) 와전류탐상시험 시 15개 전열관에서 Fig. 6에서와 같이 관지지판 부위 축방향 2차측 응력부식균열이 검출되었다.

Table 1에서와 같이 2차측 응력부식균열의 발생은 고온관측 관지지판 5단부터 8단에서 주로 분포되어 있으며, 이것은 슬러지 및 관지지판 유량구멍막힘 발생분포와 일치하고 있다. 이러한 5단에서 8단 사이의 위치는 증기발생기 2차측으로 유입된 급수가 증기로 변하여 높은 건도를 유지하는 지역으로, 급수가 증기로 변하면서, 급수 속에 녹아 있던 불순물이 분리, 농축되어 슬러지로 축적되는 구역이기도 하다.

또한 Table 1에서의 또 하나의 특징은 와전류탐상 신호로 측정한 2차측 응력부식균열의 평균 깊이 및 길이가 전 위치에서 큰 차이가 없음을 알 수 있는데 이러한 이유는 축방향 응력부식균열의 최초 검출은 Bobbin 탐촉자로 검출하며, 이 방법은 축방향 균열에 대해서 어느 정도 검출능을 가지나, 축방향 균열일지라도 체적이 작은 미세균열은 어느 정도 깊이나 길이가 있을 경우에만 평가가 가능한 특징이 있기 때문이다.

Fig. 4는 8차 와전류탐상 시 DSI라고 평가된 것, Fig. 5는 DSS라고 평가된 것에 대해 각각 7차 및 6차 Bobbin 데이터를 검토한 결과로 그림에서와 같이 검사 차수가 증가할수록 신호 진폭(Voltage) 값이 증가하고 신호 각도가 줄어들고 있는데 이것은 와전류탐상 평가 측면에서 지시가 점차 성장하고 있음을 의미한다. Fig. 6도 역시 해외 원전 증기발생기 전열관에서의 균열신호의 진폭값 증가를 보여준다.

Table 2는 8차 와전류탐상에서 DSI 및 DSS 코드로 평가된 신호에 대해 실제로 균열지시가 있는지,

Table 2 Current & History Bobbin Data Review

S/G No.		8th	7th	6th	비고
01	Bob.	68	36	5	
	RPC	49	-	-	
02	Bob.	48	10	3	
	RPC	29	-	-	
計	Bob.	116	46	8	
	RPC	78	-	-	

있다면 언제부터 균열이 생성되기 시작되었는지를 파악하기 위해 과년도 Bobbin 데이터를 검토해 본 결과이며, S/G No.1을 예를 들어 설명하면, 8차 와전류탐상 시 평가자들이 1차 Bobbin 평가에서 68개에 대해 관지지판 이상신호, 즉 DSI 또는 DSS로 평가한 것을 2차 RPC 검사를 통해 49개 위치에서 실제 축방향 2차측 응력부식균열이 존재함을 확인하였고, 확인된 지시에 대한 과년도 Bobbin 데이터를 검토해 본 결과 7차에 36개가 존재하고 있었고, 6차에도 5개가 존재하고 있었음을 알 수 있다. 즉 이러한 응력부식균열은 한 주기 동안 어느 특정요인에 의해 갑자기 많이 생긴 것이 아니라 시간을 두고 점차적으로 생성, 성장하고 있었음을 알 수 있다.

3. 응력부식균열 발생과 슬러지와의 관계

Eggcrate 관지지판에서의 슬러지 축적은 Fig. 7의 우측 그림과 같이 전열관 외면과 관지지판 구조물 사이의 미세한 틈새 지역에서부터 시작하여 외부로 확장해 나가는데, 이 지역에서 불순물 농축과정은 전열관과 관지지판 4곳에 접촉되어 구조적으로 생성된 틈새 지역에서 국부적인 비등(Boiling)이 일어나 급수가 수증기로 변하면서 그 속에 함유되어 있던 불순물이 분리, 농축되어 생성되고, 심할 경우 전열관 외면과 관지지판 사이의 공간이 모두 막혀있는 100% 유량구멍막힘 현상이 일어날 때도 있다. 이러한 슬러지에 의한 유량구멍막힘 현상은 증기발생기 수위 불안정 현상인 수위 요동(Water Level Oscillation) 현상을 유발하기도 한다[2].

Table 3은 슬러지에 의한 유량구멍막힘과 2차측 응력부식균열 발생과의 상관관계를 나타낸 것으로, 여기서의 슬러지에 의한 유량구멍막힘 분석은 RPC 데이터의 C-scan을 이용하였고, UBIB(Upper Bundle

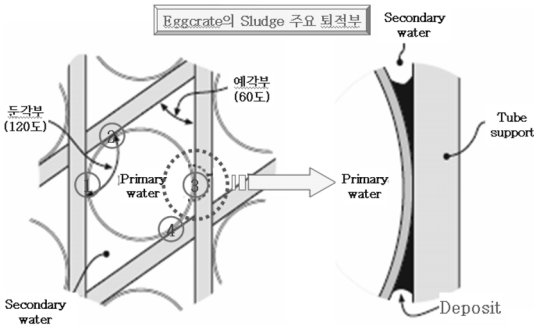

Fig. 7 Main Sludge Accumulation Zone at TSP

Table 3 Correlation of Axial ODSCC & Sludge Blockage

Elevation	S/G 01		S/G 02	
	지시수	Block. 수	지시수	Block. 수
01H	-	-	3	1.0
02H	1	1.0	-	-
03H	-	-	-	-
04H	1	2.0	2	1.5
05H	9	2.9	6	3.2
06H	21	3.8	10	2.9
07H	12	3.2	2	4.0
08H	5	2.2	5	3.2
09H	-	-	1	4.0
計	49	3.2	29	2.8

In Bundle) 육안검사 및 열수력학적 분석 자료와 유사한 결과를 나타내었다.

이 표에서의 유량구멍막힘 수는 Fig. 7의 ①에서 ④까지의 위치에서 슬러지 막힘을 나타낸 것으로 1군데가 막혀있는 경우를 1.0, 4군데 모두 막혀있는 경우를 4.0으로 나타내었고, 고온관측 5단에서 8단 범위에서와 같이 슬러지에 의한 유량구멍막힘이 심할수록 2차측 응력부식균열의 발생이 현저함을 알 수 있다.

이러한 응력부식균열의 관지지판 내에서 발생 위치는 Fig. 8에서와 같이 전열관과 관지지판이 접촉하는 부위에서 축방향으로 발생함을 알 수 있다.

Fig. 8의 상부 그림은 RPC+Point 코일에 의한 응력부식균열 지시를 나타내며, 하부 그림은 저주파수 RPC 팬케익 코일에 의한 관지지판 구조물 신호를 나타내고 있는데 화살표로 표시된 바와 같이 응력부식균열 지시와 관지지판 구조물 위치가 중첩되어 접촉되어 있음을 알 수 있다.

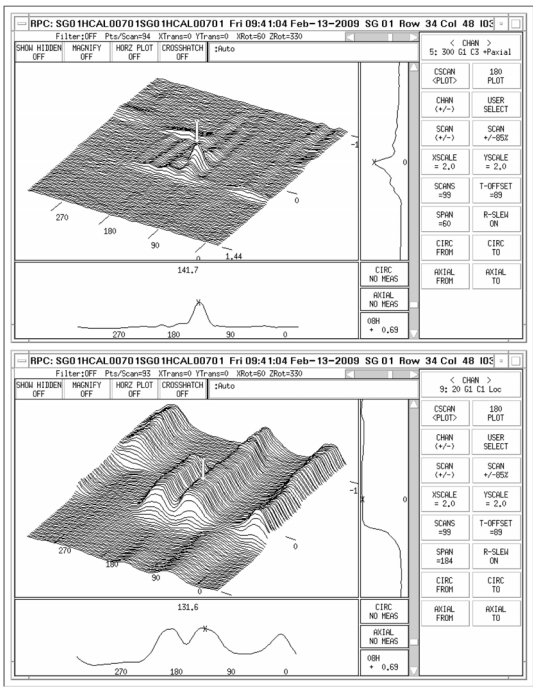

Fig. 8 ODSCC Location in TSP Region

4. 결 론

OPR 1000 원전의 증기발생기 관지지판에서 발생한 축방향 2차측 응력부식균열은 Inconel 600MA라는 취약한 전열관 재질과 더불어 2차측 슬러지의 축적이 주원인으로 분석되었다. 이러한 2차측 응력부식균열 발생을 방지하기 위해서 전열관을 교체하는 것은 현실적으로 불가능하므로 전열관 외면의 슬러지 축적을 방지하기 위한 노력이 필요하다. 따라서 2차측 수질관리 향상 및 전체 전열관 다발에 대한 정기적인 화학세정 또는 ASCA 등이 요구되며, 슬러지 평가기술로 와전류 Bobbin 데이터를 이용한 슬러지 분포 시각화 및 정량화 기술개발도 필요하다.

참고문헌

1. Kwon, K. J., Ko, J. I. and Oh, C. H., 2009, “Final Report of 8th Eddy Current Testing for Ulchin Unit 4”, KPS/NTSC-ECTR 009/09 UC4/Ⅱ-1-S/G ECT, Vol. 1, pp. 51~65
2. Kim, H. D. Jeong, H. S. and Kim, K. T., 2008, “Development of Technologies for Improving Integrity of Nuclear Steam Generators”, 중장기 연구과제 최종보고서, pp. 327~336