

월성 1호기 계속운전을 위한 증기발생기 열화관리

송명호[†] · 김홍기* · 이정민**

Wolsong Unit 1 Steam Generator Aging Management for Continued Operation

Myung Ho Song[†], Hong Key Kim* and Jung Min Lee**

ABSTRACT

As a part of license renewal for the continued operation of Wolsong unit 1, the periodic safety review report was submitted near the end of design lifetime, 2012, and now is under reviewing. Major components of primary system such as pressure tubes, feeder pipes and so on are being replaced and many components of secondary system are also being repaired. So the license renewal of Wolsong unit 1 is expected to be acquired without significant issues. But on the other hand, steam generators of Wolsong unit 1 had the good performance and therefore the replacement and repair for the steam generator are not needed. Recently it is reported that some cracks were detected in a few of european steam generator with Alloy 800 tubes and the cause of cracks was the outer diameter stress corrosion cracking(ODSCC) due to the concentration of chemical impurities on the outer surface of tube. Accordingly the overall review on this issue was performed. The long-term operation is likely to results to form the concentration mechanism for the tube corrosion as the sludge build-up in the secondary side of steam generator and the crack in the crevice between tube and tube-sheet and expansion transitions is apt to be occurred. In this paper, the history of steam generator inspection and operation of Wolsong unit 1 are reviewed and the reliability of steam generator tube is evaluated and the steam generator aging management program for Wolsong unit 1 is introduced.

Key Words : Aging Management(열화관리), Outer Diameter Stress Corrosion Crack(2차측 응력부식균열), Steam Generator(증기발생기), Tube(세관), Wolsong Unit 1(월성1호기)

1. 서론

국내 중수로 원전의 효시인 월성1호기는 680 MWe 급의 CANDU형 발전소로 1983년 4월 상업운전을 시작한 이래 약 28년간 가동 중에 있으며 2012년에는 30년 설계수명에 도달한다. 월성1호기는 계속운전을 위한 인허가 갱신을 목적으로 주기적안전성평가(PSR)보고서 및 관련 서류를 제출하였으며 현재 계속운전을 위한 인허가 심사 중에 있다. 또한 2009

년 4월부터 시작된 핵연료압력관 및 공급자관을 비롯하여 1,2차 계통의 주요 노후 기기들의 교체 가 진행 중에 있으며, 안전성 증진을 위해 다양한 설비개선작업이 추진되고 있다. 한편 중수로 원전 주요 기기들의 열화관리를 위한 경년열화 감시시스템이 규제기관에 의해 독립적으로 개발되어 열화평가에 이용되고 있다¹⁾.

계속운전 시 평가 및 관리되어야 할 주요 기기 중의 하나인 증기발생기는 캐나다의 포스터 휠러(Foster Wheeler)사에서 설계, 제작하였으며 Alloy 800으로 제작된 세관(전열관)은 상업운전 이래 우수한 성능을 나타내고 있다. 가동중검사 결과 부식이나 마모에 의한 결함발생은 없었으며 따라서 증기발생기 세관의 가동중 관막음 사례도 거의 없는 상태이다.

[†] 책임저자, 회원, 한국원자력안전기술원

E-mail : k084smh@kins.re.kr

TEL : (042)868-0191 FAX : (042)868-0168

* 한국원자력안전기술원

** 성균관대학교

부식에 의한 결함발생이 없는 이유로는 중수로 원전의 낮은 1,2차측 가동온도의 영향과 Alloy 800 재료가 2차측 수질 분위기에서 좋은 내식성을 나타내기 때문이다. 또한 증기발생기 2차측 환경에서 적절한 수질관리 등의 효과라고 판단된다. 그러나 최근 동일 재질의 세관을 가진 유럽형 증기발생기들에서 축방향 및 원주방향 균열의 발생 사례가 있어 장기가동에 따른 증기발생기 세관의 균열 발생이 우려된다.

본 연구에서는 월성1호기 증기발생기 세관의 검사이력, 열화기구평가, 해외 균열발생사례, 수질관리 등을 검토하여 증기발생기 세관의 상태를 평가하였고, 장기가동을 고려한 증기발생기 세관의 열화관리 방안으로서 웹기반으로 구축한 세관 관리 프로그램에 대해 소개하였다.

2. 월성1호기 증기발생기 설계사양 및 운전환경

2.1 설계 사양

월성1호기 증기발생기는 Table 1에서와 같이 3,558개의 Alloy 800M 재질로 된 세관을 가지며 관지지판은 Lattice Grid 형태이고 탄소강으로 된 6조의 반진동봉을 가진다^{2,3)}.

2.2 운전 환경

월성1호기는 1차측 냉각제로 중수(D₂O)를 사용하는 반면에 한국표준형 원전은 경수(H₂O)를 사용한다. 특히 1차측 가동온도는 312.6°C로써 표준형원전

에 비해 15°C 정도가 낮으며, 2차측 가동온도차는 이보다 더욱 커 표준형 원전이 296°C 입에 비해 266.3°C로 약 30°C가 차이가 난다. 1차측 압력과 증기압도 표준형 원전이 각각 2,250 psi 및 75.35 bar 인데 월성1호기는 1,421 psi와 45 bar이다. 2차측 수 처리는 표준형원전이 NH₄OH와 N₂H₄를 사용하여 전회발성처리를 하는데 비해 월성1호기는 모폴린(Morpholine)을 사용하는 수처리법을 이용한다.

3. 월성1호기 증기발생기 세관 건전성 평가

3.1 세관 검사이력

월성1호기의 증기발생기 세관은 1981년 가동전검사를 수행한 이래 2007년 12월의 제17차 가동중검사까지 총 18회에 걸쳐 현장검사가 수행되었다. 가동전검사에서 내면결함 신호로 4개의 세관이 관막음 되었으며, 1996년 제8차 가동중검사에서 세관 내부의 이물질에 의한 내면 손상이 우려되어 1개 세관이 관막음되었고, 1998년 제9차 가동중검사에서 관관 상단에 균열 유사신호가 검출되어 1개 세관이 관막음되었다.

세관 관막음이력을 살펴보면 Table 2에서와 같이 현재까지 공장에서 제작검사 시 관막음된 3개의 세관을 포함하여 총 9개의 세관이 관막음된 것을 알 수 있다.

3.2 열화기구 평가

월성1호기와 같은 중수로형 원전의 증기발생기 세관은 아래와 같은 주요 열화기구들을 갖는다⁴⁾.

Table 1 The Design Specifications of Wolsong Unit 1 Steam Generator

항목		내용	비고
세관(Tube)	- 재질 - 외경 - 내경 - 세관 두께 - 세관 수	Incoloy 800(SB-163) 0.625 Inch 0.536 Inch 0.0445 Inch 3,558개	Triangular Pitch
세관(Tube)	- 두께 - 확관방법	15.75 Inch 기계식 확관(Mechanical Expansion)	3구역으로 부분확관
관지지판(Tube Support Plate, Baffle Plate)	- 형태 - Lattice Bar - Preheater Baffle Plate	Lattice Bars(Grid Type) 14개(H/L: 9개, C/L:5개) 10개(A형: 5개, B형: 5개)	
반진동봉(Anti-Vibration Bar)	- Row16~Row37 - Row38~Row61 - Row62~Row88	1조(2개) 2조(4개) 3조(6개)	

Table 2 The Status of Tube Plugging of Wolsong Unit 1 Steam Generator

증기 발생기	Tube		비고
	Row	Col.	
1번	72	68	30% ID
2번	37	59	30% ID 1981년 가동전점검 결과 내면결함 검출 ⇒ Seal Weld Plugging
4번	41	9	- Y129 X9 ... 30% ID
	80	62	- Y168 X62 ... 50% ID
	88	54	- Y176 X54 ... PIPD 전열관
	88	56	가) - Y176 X56
	88	58	나) - Y176 X58
	34	84	'96 제 2주기 4차 가동중점검 결과 전열관 내의 이물질로 검사불가 ⇒ 이물질 제거 후 Mechanical Plugging
3번	42	40	'96 제 2주기 5차 가동중점검 결과 TSH 부위에서 결합성 신호 검출 ⇒ Mechanical Plugging

• 마모 : 세관을 지지해 주는 구조물이나 이물질과 세관이 접촉하여 마찰함으로써 발생하는 체적성 결함으로 발생 초기에는 성장속도가 빠르나 시간이 경과할수록 안정화되어 가는 경향을 보인다. 접촉하는 두 재질의 영향을 가장 많이 받는 열화기구로 월성1호기에서는 마모현상이 관찰되지 않았다.

• 관관상단 응력부식균열(Stress Corrosion Cracking) : 응력부식균열은 균열에 민감한 재질, 잔류응력과 가동인가용력의 복합응력 그리고 불순물 농축과 같은 수질환경의 세 가지 인자가 작용하여 발생하는 균열현상이다. 특히 관관 상단부위는 확관에 의한 잔류응력이 많이 남아 있는 부위이며, 세관과 관관 사이의 틈새가 비등/건조 반응을 반복하여 불순물이 농축되는 환경을 제공하고, 때때로 덴트(Dent)를 수반할 경우 철산화물의 부피팽창으로 인한 축방향 응력의 부가로 원주방향균열이 발생하기 쉬운 장소이다. 근래에 스페인의 한 원전에서 상단 확관부의 위쪽 천이구역에 원주방향 균열이 발생하여 Alloy 800 재질 세관의 건전성을 위협한 바 있다. 월성1호기는 아직 관관상단 응력부식균열을 경험한 바 없으며, 덴트 발생도 보고되지 않았다.

• 관관내부 응력부식균열 : 월성1호기와 같은 중수로형 원전 증기발생기는 표준형 원전의 세관 전장 확관과는 달리 관관 내부에 상·하단을 부분 확관함으로써 세관을 고정시키는 확관 방법이 적용되어 왔다. 이 경우 상·하단 사이의 미확관 부위는 세관과 관관 사이에 틈새가 형성된다. 최근에 이 틈새에 불

순물이 농축되어 세관 외면으로부터 축방향 균열이 발생하는 사례가 독일의 일부 원전에서 발생하였다. 월성1호기는 관관 내부에 대한 정밀검사(와전류탐상검사 + 부분 초음파탐상검사) 결과 균열신호는 검출되지 않았다.

• U-bend 응력부식균열 : U-bend의 정점과 양쪽 귀부분은 잔류응력이 많이 남는 부위로서 가동중 균열이 자주 발생하는 장소이다. 이 부위의 균열은 경험 상 관관 상단 또는 내부에 균열이 발생한 이후 발견되는 경향이 있다. 월성1호기는 아직 균열 발생이 우려되지 않는다.

• 덴트(Dent)/딩(Ding) : 덴트와 딩은 그 자체가 결함이라고 평가되지 않는다. 그러나 발생하면 재료에 국부적인 응력을 부과하기 때문에 균열발생을 촉진시키며, 응력분포를 변화시켜 원주방향 균열을 발생시켜 세관파단사고로까지 이어질 수 있으므로 구조적 건전성 측면에서 균열 발생과 연계한 별도의 평가가 요구된다.

3.3 원주방향균열 발생사례 분석

해외 원전의 Alloy 800 증기발생기 세관의 균열 발생 사례를 분석한 결과, 결함 발생위치는 Fig. 1 과 같이 축방향 균열의 경우 관관내부 양쪽 확관부위 사이였고, 원주방향 균열은 Fig. 2에서처럼 상부 확관부위의 위쪽 천이구역이었다^{5,6)}.

균열의 직접적인 발생원인은 불순물의 과다농축이었고, 따라서 장기 가동 또는 비정상 운전 때 따른

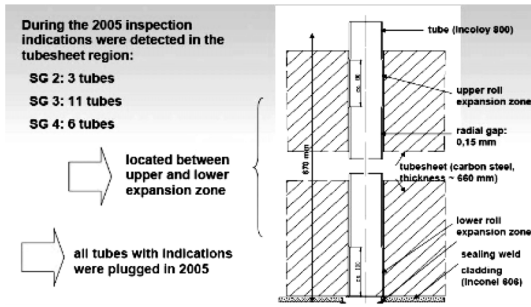


Fig. 1 The Location of Axial Crack of German Biblis A Steam Generator Tube

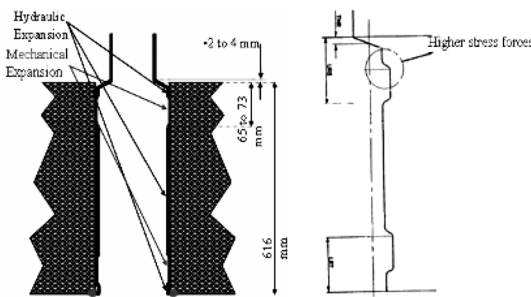


Fig. 2 The Location of Circumferential Crack of Spain Almaraz-2 Steam Generator Tube

세관과 구조물 틈새의 불순물 농축 시는 언제든지 균열이 발생할 가능성이 있다.

Alloy 800 재료의 2차측 응력부식균열에 대한 균열성장속도 및 결함 최대허용깊이를 살펴보면, 축방향 균열의 경우 성장속도는 비파괴검사(ECT) 결과에 근거하여 약 50%/핵연료주기로 평가되었으며 최대허용깊이는 72%로 확인되었고, 원주방향 균열 성장속도도 비파괴검사(UT) 결과에 근거하여 약 30~50%/핵연료주기로 평가되었다.

상기 균열성장속도를 고려할 때, 축방향 균열이든 원주방향 균열이든 균열 발생 시에는 단지 2핵연료주기 만에 증기발생기 세관이 관통될 가능성이 있다. 따라서 균열발생에 대비한 월성1호기의 균열 최대허용깊이와 균열성장속도를 고려한 세관건전성 평가가 독립적으로 수행될 필요가 있다.

3.4 월성1호기 증기발생기 수화학 환경 검토

월성1호기 증기발생기의 수질관리 상태를 살펴보면 제21주기(2008년 1월부터 2009년 1월까지)의 증기발생기 취출수 Na, Cl, SO₄의 평균농도는 각각 0.46

Table 3 The Periodic Molar Ratio Index of Wolsong Unit 1

주기	증기발생기				비고
	SG 1	SG 2	SG 3	SG 4	
17	8.76	6.33	39.50	3.21	산성: MRI < 0.5 중성: 0.5 ≤ MRI < 2.0 중성: 2.0 ≤ MRI
18	1.49	2.41	1.41	5.88	
19	2.46	2.25	2.43	3.72	
3020	2.45	2.78	1.98	2.96	

ppb, 1.17 ppb, 2.37 ppb로 나타나 수질기준치 이내에서 수화학이 잘 관리되고 있음을 알 수 있고 급수의 수질 역시 제21주기 기동 시 철농도가 2.21 ppb로 측정되어 증기발생기로의 철성분 유입이 낮게 관리되고 있는 것으로 평가하였다. 2차계통 산화환원환경을 평가하면, 주급수의 용존산소농도는 20주기의 2.16 ppb를 제외하면 17~19주기 동안 1.0 ppb 미만을 유지하였고, 복수펌프 후단 용존산소농도는 20주기 동안 2.0 ppb 이상을 유지하였다. 또한 주급수 N₂H₄/복수 DO의 비는 8 이상을 유지하고 있어 충분한 환원성 환경을 유지함을 알 수 있다. 증기발생기 세관 틈새의 부식환경을 평가하는 잠복불순물 방출시험 결과가 Table 3에 나타나 있다. 제17주기의 잠복방출시험 결과는 심한 염기성으로 나타났으나 그 이후 제20주기까지 틈새 조건이 상당히 개선되었음을 알 수 있다⁷⁾.

월성1호기 증기발생기의 슬러지 성분을 분석한 결과 슬러지의 대부분은 철산화물(Magnetite)이었고 Pb 성분이 미량 검출된 바 있다.

관관상단의 슬러지 퇴적현황을 보면, 와전류탐상 시험 결과로서 나타난 슬러지 최대높이는 약 7 inch 이었고, 평균높이는 2.1~3.0 inch로 측정되었다. 월성1호기의 슬러지 퇴적형태는 경수로형 원전과는 달리 세관표면에 침적물이 부착된 형상이어서 부식성 불순물의 농축기구 형성이 용이하지는 않은 것으로 판단되나 운전년수가 증가함에 따라 최고 높이와 평균 높이가 점진적으로 증가하는 추세에 있어 적극적인 슬러지 관리가 요망된다.

4. 월성1호기 증기발생기 세관 열화관리 프로그램

월성1호기 계속운전 시 증기발생기의 효과적이고

체계적인 관리를 위해 관리 프로그램을 개발하였다. 이 관리프로그램은 웹기반(Web-based)으로 구축되었는데 HTML, Javascript, CSS(Cascading Style Sheets), AJAX(Asynchronous javascript and XML) 등을 사용하여 GUI(Graphic User Interface)환경을 작성하였으며 사용자로부터 받은 입력을 처리하기 위하여 PHP를 사용하였다. PHP는 HTML의 정적인 측면을 보완할 수 있고 데이터베이스와의 연동 및 수학 계산이 용이하므로 개발 목적에 적합하다. 그리고 데이터베이스는 개방 소스의 관계형 데이터베이스

스 시스템인 MySQL을 사용하였으며 여기에 증기발생기의 검사 이력들이 저장된다. 관리 프로그램의 구성은 입력창, 상태정보창 및 열화 map 으로 나뉘어져 있다. Fig. 3은 프로그램의 초기화면을 보여주고 있다. 여기에서 입력 화면으로의 이동이나 상태정보창, 열화 map으로 이동할 수 있다.

Fig. 4는 데이터 입력창이며 여기에는 검사차수 및 열화에 대한 기본 데이터를 입력토록 구성되어 있다. 본 입력창을 통해 현재까지 가동중 검사에서 수행한 월성1호기 증기발생기 세관에 대한 열화 관

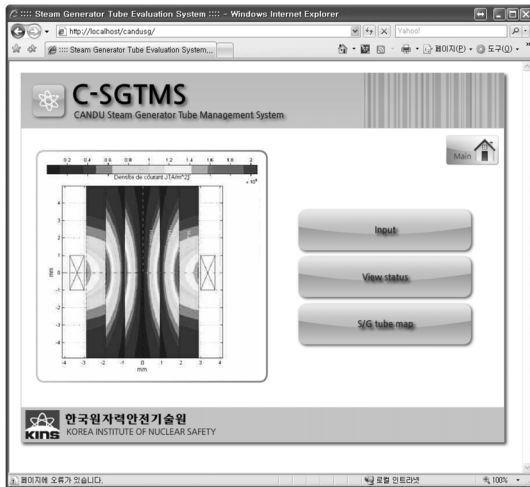


Fig. 3 The Initial Screen of Wolsong Unit 1 S/G Tube Aging Management Program



Fig. 5 The Status of S/G Tube Aging



Fig. 4 The Data Input Window

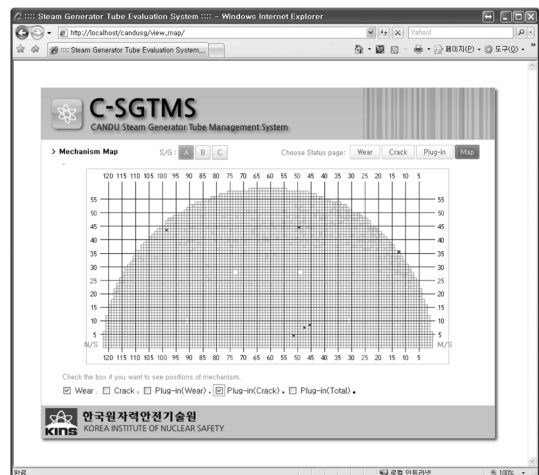


Fig. 6 The Map of S/G Tube Aging

런 DB가 구축되어 있다.

Fig. 5는 증기발생기별 세관에 대한 열화 상태를 확인할 수 있는 창이며 여기에서 열화에 대한 향후 경향을 파악할 수 있어 효과적인 열화관리를 수행할 수 있다.

Fig. 6은 열화상태를 위치별로 파악할 수 있는 map을 보여주고 있으며 이를 활용하여 각 열화별 발생 위치 및 부위를 파악할 수 있어 열화 관리를 효율적으로 수행할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 월성1호기의 운전이력, 수질관리 등을 검토하여 증기발생기의 상태를 평가하였으며, 장기가동 시 월성 1호기 증기발생기 세관의 열화관리방안을 강구하였다.

1) 월성1호기 증기발생기 검사 및 운전이력을 검토한 결과 증기발생기의 성능이 잘 유지되고 있음을 확인하였다.

2) Alloy 800 재질의 세관에서도 불순물농축기구가 형성되면 균열이 발생하며, 월성1호기의 세관확관형상 및 증기발생기 2차측 침적물의 증가추세를 고려할 때 발생가능성을 배제할 수 없으므로 구조적 건전성평가가 요구된다.

3) 증기발생기 세관의 경년열화를 효율적이고 체계적으로 관리하기 위해 웹기반으로 구축한 세관관리 프로그램에 대해 소개하였다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 원자력 연구개발사업의 “월성1호기 계속운전 경년열화관리계획 및 시간제한수명평가 규제기술개발”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김홍기, 최영환 등, 2009, “CANDU형 원전 경년 열화 감시시스템(Aging Monitor)개발”, Trans. of the KPVP, Vol. 5, No. 2, pp. 13-19
2. 송명호, 김홍기, 2010, “월성1호기 증기발생기 세관의 건전성평가 연구”, KINS/RR-766.
3. 송명호, 강석철 등, 2004, “원전 증기발생기의 안전규제 기술보고서(II) -규제기술보고서-”, KINS/AR-669, Vol. 2.
4. J. Gorman, V. Moroney and G. White, 2009, “Alloy 800 Steam Generator Tube Performance”, 6th CNS International Steam Generator Conference, Toronto, Canada.
5. Steve Timm, 2007, “X-Probe Update”, Zetec Customer Workshop.
6. J.R. Fernandez, J.J. Jimenez, 2009, “Almaraz 2 N.P.P. Incoloy 800 Update”, 28th Steam Generator NDE Workshop.
7. 엄기수, 임재수 등, 2009, “증기발생기 열화평가 보고서”, KHNP-SGMP-DA-2009W1-21. Rev. 0.