

# 와전류탐상검사에 의한 튜브엔드 슬리브 건전성 검증

김수진<sup>†</sup> · 권경주\* · 석동화\*\* · 박기태\*\*\*

## The Integrity Verification of Tube-end Sleeve by ECT

Su Jin Kim<sup>†</sup>, Kyung Joo Kwon\*, Dong Hwa Suk\*\* and Ki Tae Park\*\*\*

(Received 4 May 2015, Revised 21 May 2015, Accepted 25 June 2015)

### ABSTRACT

Steam generator(S/G) tubes in pressurized water reactor (PWR's) are subject to several types of degradation. This degradation includes denting, pitting, intergranular attack(IGA), intergranular stress corrosion cracking(IGSCC), fatigue, fretting and wear. Degradation can be derived from either the primary side(inside) or the secondary side(outside) of the tube. Recent issue for tube degradation in domestic steam generator is the tube end cracking on seal weld region. The seal weld region at the tube end and tube itself is regarded as a pressure boundary between the primary side and the secondary side. One of the Westinghouse Model-F S/G has experienced tube end cracking and its number of plugging approximately becomes to the operating limit up to 5% due to tube end cracking which was reported as SAI/MAI(single/multiple axial indication) or SCI/MCI(Single/multiple circumferential indication) from the results of eddy current testing. Eddy current mock-up test was carried out to determine the origin of cracking whether it is from weld zone area or parent tube. This result was helpful to analyze crack location on ECT data. Correct action on this problem was the installation of tube-end sleeve. Last year, after removing 340 installed plugs from tubes, selected 269 tubes took tube-end sleeve installation. Tube-end sleeve brought pressure boundary from parent tube to installed sleeve tube. Tube-end sleeve has the benefit of reducing outage period and increasing more revenue than replacing S/G. This paper is provided to assist interest parties in effectively understanding this issue.

**Key Words :** Tube-end sleeve(관관끝단 관재생), PWR(가압 경수로), ECT(와전류탐상검사), Pressure boundary (압력경계), Operating limit(운전제한), S(M)AI/S(M)CI[단일(다중)축균열/단일(다중)원주균열]

## 1. 서론

원자력발전소 증기발생기는 발전소 운전 중 전열관에 발생할 수 있는 열화로 인해 관막음 등의 정비작업의 결과로 정상운전이 가능한 전열관의 개수가 증기발생기 운전제한 범위에 접근하고 있다. 국내 원전의 경우 1978년에 상업운전을 시작한 고리1호기 이후 경제적인 운전수명을 다하여 교체된 증기발

생기가 현재 12개에 이르고 있으며, 향후 수 개 호기에서 증기발생기의 교체를 계획하고 있다. 증기발생기 교체는 그 제작기간을 제외하고서라도 기존 증기발생기의 철거와 신규 증기발생기를 설치하는 기간이 매우 길고 호기 당 수천억원 이상의 경제적 비용이 수반되는 대규모 작업이다. 증기발생기 교체의 주된 이유는 전열관에 발생하는 열화기구 중 균열결함이 대부분을 차지하며, 이는 와전류탐상검사를 수행하여 균열을 검출하고 그 크기를 평가할 수 있다. 증기발생기 전열관 재질로는 과거에 Alloy 600이 주로 사용되었으나, 최근 교체 증기발생기는 모두 Alloy 690으로 제작되어 균열 발생에 강한 재질로 변경되어 설치되고 있다.

<sup>†</sup> 회원, 한전KPS 원자력정비기술센터

sjkim@kps.co.kr

TEL: (051)726-7731 FAX: (051)726-7799

\* 한전KPS 원자력정비기술센터

\*\* 한전KPS 원자력정비기술센터

\*\*\* 한전KPS 원자력정비기술센터

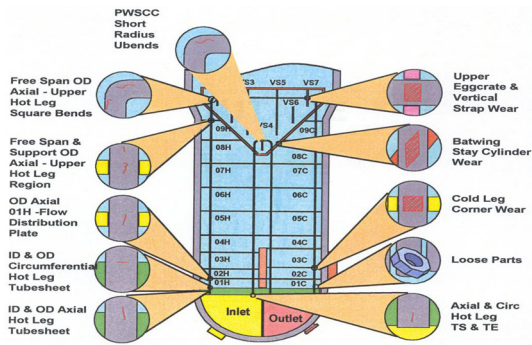


Fig. 1 Degradation of SG tube

증기발생기 전열관의 건전성 유지를 위한 가동중 검사 방법으로 와전류탐상검사를 주기적으로 수행하고 있으며, 와전류탐상검사 기술은 적용을 위해 사전에 해당 기법과 검사원의 신호평가능력을 관련 코드요건과 EPRI PWR Steam Generator Examination Guidelines Rev.7에 따라 기량 검증 후 전열관 검사를 수행하고 있다. 와전류탐상검사의 최종결과에 따라 관막음 등의 정비를 수행하고 있으며, 이와 같은 증기발생기 열화의 증가로 인한 관막음율의 증가로 몇 개 호기의 증기발생기가 운전 제한 수치에 근접하고 있다. 특히 국내에 운전 중인 Westinghouse Model-F형 증기발생기의 경우 관막음으로 인한 운전제한치가 전체 전열관에 대한 5%로 한정되고 있어 튜브엔드 부위의 균열결합의 증가로 인해 그 수치에 접근하고 있다. 국내 해당증기발생기로는 Westinghouse Model-F형 S/G중 한빛2호기 및 고리3호기가 해당되며 증기발생기 전열관의 관막음 정비 대신 관재생을 통해 결합부위의 압력경계를 대신할 수 있는 슬리빙 튜브를 설치하여 열화부위를 제외한 기존의 전열관을 계속 사용하는 정비법의 도입을 통해 증기발생기의 관막음 율을 낮추고 설치된 슬리빙 전열관에 대한 와전류탐상검사를 통해 압력경계가 모재 전열관에서 슬리빙 전열관으로의 변화를 확인해 모재의 건전성을 확인함에 있다.

## 2. 튜브엔드 슬리브

### 2.1 전열관 튜브엔드 슬리브 정비 개요

원자력발전소 증기발생기 전열관의 슬리빙 정비 방법은 1976년 이후 전열관 보수의 한 방법으로 사용되고 있다. 증기발생기 슬리브 설치에 대한 몇 가

지 요인으로써 고려할 사항은 재료 선정, 검증된 설치 절차, 슬리브와 모재 사이의 접합 설계, 슬리브 제조를 들 수 있다. 슬리브는 한 번 설치되면 제거할 수 없어 모재 전열관의 다른 부위에 결함이 발생 시 관막음 조치를 취해야만 한다. 슬리브 재질은 일차 및 이차측에 발생하는 열화기구에 저항성을 가지는 재질로 제작된다. 최근에는 Thermally treated Alloy 690 및 Alloy 800이 사용되고 있다. 전열관 내부 슬리브 설치 위치는 튜브시트, 튜브지지판 및 튜브시트사이이다. 국내에서는 이미 튜브시트 및 튜브지지판 위치에 슬리브를 설치한 많은 경험을 가지고 있다.

슬리브의 접합부 정비는 슬리브 설치 공정에서 매우 중요하다. 국내 설치된 슬리브는 여러 방법 중 유압확관, 롤링확관 및 용접 방법을 슬리브 설치 위치 및 방법에 따라 적절히 사용하고 있다.

국내 가동중인 Westinghouse Model-F 증기발생기 1기에 대한 튜브엔드 슬리브 설치를 2014년 10월에 수행하였다. 튜브엔드 부위의 균열결합으로 인해 관막음 율이 운전 제한 수치인 5%에 접근한 상태에서도 균열이 계속 검출됨에 따라 이에 대한 대처방안으로 전열관을 관막음하는 대신에 튜브엔드 부위에 슬리브를 설치하여 모재의 균열결합에 대한 압력경계를슬리브로 대체하였다. 슬리브설치 정비작업은 기존의

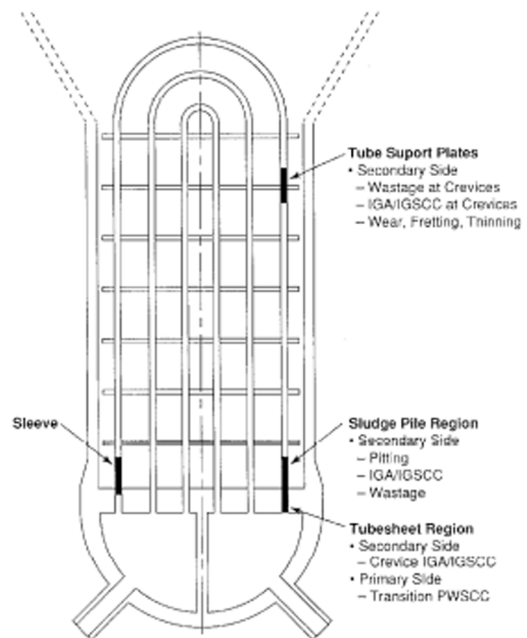


Fig. 2 Typical Sleeve Location in PWR S/G's

관막음된 전열관 중에서 상태를 선별하여 170개의 전열관에 대한 관마개(양단 총 340개)를 제거하고 튜브엔드 슬리브를 설치하였으며, 슬리브 41개 전열관은 관막음 1개 전열관에 해당하는 출력 저하를 동일한 열교환 비율을 나타내므로 증기발생기 교체 연기 및 효율증대의 효과로 인해 증기발생기 전열관 정비법으로 채택되어 슬리브 정비가 수행되었다.

**2.1.1 전열관 정비 프로세스**

증기발생기 관막음 율을 낮추기 위해 기존에 설치되어 있는 관마개중 튜브엔드 균열로 인해 관막음된 전열관을 선정하여 170개의 전열관에 대한 340개(H/L & C/L)의 관마개를 제거한 후 튜브엔드 슬리브를 설치하였다.

**Table 1** Repair process for tube-end sleeve installation

Classification	Process
Plug removal	Cleaning & shrinking
	Pulling
	Tube cleaning
Tube-end sleeve installation	Tube sizing
	Pre & final milling
	Sleeve install & fix. rolling (1 <sup>st</sup> )
	Sleeve end welding
	Sleeve final rolling (2 <sup>nd</sup> )
NDT	ET, VT, & PT for sleeve

**2.1.2 관마개 제거 공정**

전열관 관마개 제거 공정은 관마개 제거 대상으로 선정된 증기발생기 전열관에 대하여 원격장비를 사용하여 플러그 내경 청소, 수축, 인출, 튜브청소 순으로 이루어진다.

세부적인 관마개 제거 공정은 다음과 같다.

- 플러그 내경 청소 : 증기발생기 튜브 플러그T 내면의 봉산등 발전소 계통수에 의한 산화막 등을 제거하여 다음 공정인 수축정비 중에 발생 가능한 위험요소를 제거한다.
- 플러그 내경 수축 : 증기발생기 전열관에 플러그가 설치 되어있는 내면에 텅스텐 전극봉을 사용 열을 가하여 플러그 확관부를 미세하게 수축시킨다.
- 플러그 인출, : 전열관 확관부에 미세하게 수축된 플러그를 추출기를 이용하여 인출한다.
- 튜브청소 : 전열관 내면의 봉산등 가동중 발전소

계통수에 의한 산화막 등을 제거 하여 슬리브 설치를 원활하게 한다.

**2.1.3 튜브엔드 슬리브 설치공정**

설치 프로세스는 튜브치수측정, 전후 밀링, 슬리브 설치 및 고정 롤링, 슬리브 엔드 용접, 슬리브 최종 롤링로 이루어지며 비파괴검사를 통해 설치된 슬리브 전열관의 건전성을 확인한다.

**Table 2** Sleeve Specification

Length	OD	ID	Wall thick.	Material
65mm	15.43mm	13.49mm	0.97mm	Alloy 690

세부적인 설치 프로세스는 다음과 같다.

- 튜브치수측정 : 슬리브 설치전의 전열관 엔드 하부는 밀봉용접에 의하여 튜브시트 내경이 축소되어 있으므로 슬리브 설치에 필요한 전열관 내경 확보를 위해 설치 하기 전 치수측정 공구를 사용하여 치부 보정을 수행하여 설정된 토크값을 만족시키는 공정이다.(적용토크 : 15.5 ±1.5Nm)
- 전후 밀링 : 슬리브 형상에 적합하게 튜브엔드 면을 밀링가공으로 정밀 가공하는 공정이다.
- 슬리브 설치 및 고정 롤링 : 튜브엔드에 슬리브를 설치하여 슬리브가 하부로 이탈되지 않을 정도에서 확관시키며 설정된 토크를 만족시킨다.(적용토크 : 15.5 ±1.5Nm)
- 슬리브 엔드 용접 : 슬리브를 튜브시트에 밀봉을 형성시키기 위한 용접 공정이다.
- 슬리브 최종 롤링 : 슬리브 상부는 최종 롤링으로 밀봉Seal을 형성시키며 설정된 토크값을 만족시키는 공정이다.(적용토크 : 15.5 ±1.5Nm)
- ET, VT, & PT : 슬리브 설치 후 대상 전열관에 대한 기준 데이터 확보 및 전열관 관재생의 정확한 적용 상태 확인을 목적으로 와전류탐상검사를 수행하며, 액체 침투 및 육안 비파괴검사를 수행하여 건전성을 확인한다.

**3. 와전류탐상검사에 의한 건전성 검증**

**3.1 와전류탐상검사**

튜브엔드 슬리브 와전류검사의 목적은 슬리브 설치의 적정성 확인 및 기준 검사의 목적으로 모재 전열관의 건전성을 확인하는데 있다. 슬리브 위치, 확관부의 위치, 확관 부위의 적절성 확인 및 가동전검사

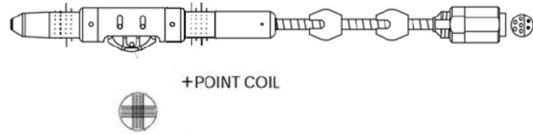
개념으로의 기준 데이터로 간주한다. 슬리브 검사는 EPRI PWR Steam Generator Examination Guidelines Rev.7의 요건에 따라 수행된다. 현재 검사기술은 슬리브 접합부 후면에 위치한 모 전열관의 결함 검출 및 크기측정까지 가능한 검사기술을 적용하고 있다.

**3.1.1 튜브엔드 슬리브 와전류탐상검사 기술**

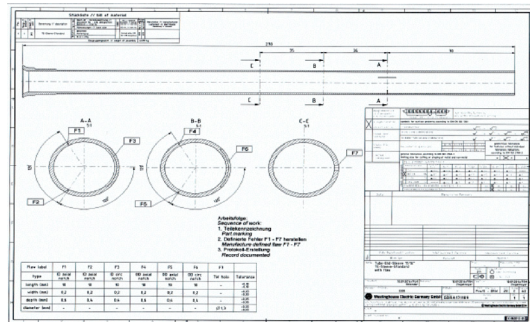
튜브엔드 슬리브 와전류탐상검사 기술은 기존의 튜브지지판 및 튜브시트 슬리브 검사기술과 동일하다. 확관면의 굴곡을 리프트업 효과가 상쇄되어 리프트업 신호가 나타나지 않도록 설계된 +Point MRPC Coil을 사용하여 슬리브 전체 범위를 검사하며, 확관부 및 용접부에 대한 모재와의 접촉면에 설치도중 발생했을 지시를 기록한다. 또한 모재 전열관에 있는 축방향 또는 원주방향 지시를 확인하여 슬리브 설치 위치도 확인해야 한다. 튜브엔드 슬리브의 와전류탐상검사를 통한 건전성 검증 항목은 다음과 같다.

**Table 3** Items for Sleeve Verification

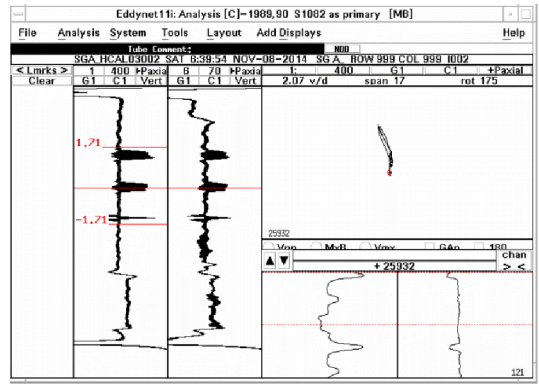
Items for Sleeve Verification	Period
Correct location of the sleeve	Baseline
Completeness of expansion zones	Baseline
Correct location of expansion zones	Baseline
The integrity of the sleeve/tube assembly	ISI
Follow up the behavior of the parent tube behind the sleeve	ISI



**Fig. 3** Tube end Sleeve +Point MRPC Coil



**Fig. 4** Tube End Sleeve Standard Drawing



**Fig. 5** ECT Graphic for Sleeve Standard

튜브엔드 슬리브 와전류탐상검사를 위한 교정 시험편에는 ID/OD Axial/Circ. EDM Notch가 인공적으로 가공되어있고 지침서에 요건에 맞게 위상, 진폭을 설정하여 신호평가를 수행한다.

**3.1.2 튜브엔드 슬리브 와전류탐상검사 결과**

가동중인 Westinghouse Model-F 증기발생기에 대해서 2014년 10월에 국내 최초로 튜브엔드 슬리브가 설치되었고 기준 검사로서 와전류탐상검사를 수행하였다. 총 269개의 튜브엔드 슬리브 설치 대상 전열관을 검사하였다. 검사범위는 65mm 전체 슬리브 전장에 대해서 검사하였고, SSPD\*를 통해 특정발전소 증기발생기 전열관 와전류신호 평가 능력이 검증된 ECT Level II/QDA 이상의 자격 보유자가 신호평가를 수행하였다.

정비작업이 이루어진 모든 튜브엔드 슬리브에 대한 와전류탐상검사 결과 정비 목적에 적합하게 모재 전열관의 결함 부위를 대체하여 슬리브 전열관이 일차와 이차측 사이의 압력경계 기능을 수행할 수 있는 위치에 정확히 위치하고 있는 것을 확인하였다. 또한 확관부 모재 접촉면에도 이상 지시가 없는 것을 확인하였다. 상부 확관부의 위치가 허용치를 벗어나거나 불균일시, 또는 결함지시가 있는 모재 전열관에 확관이 되는 경우 슬리브 및 모 전열관 건전성에 영향을 미치게 되므로 관막음 등의 보수를 수행하게 된다. 이는 슬리브 설치의 중요한 인자이므로 와전류탐상검사 수행시 중요한 고려사항이 된다. 하부 용접부에 대한 육안검사 및 염색 침투비파괴 검사결과도 이상 없음을 확인하였다.

\* SSPD(발전소특정기량검증) : Site Specific Performance Demonstration

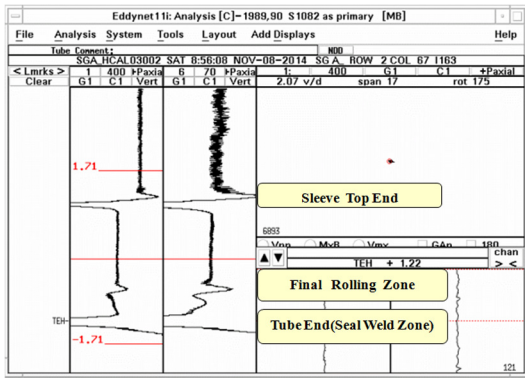


Fig. 6 ECT Graphic for Tube End Sleeve



Fig. 7 Visual inspection for Tube End Sleeved Welding

#### 4. 결론

국내 최초로 수행된 증기발생기 전열관 튜브엔드 슬리브에 대한 와전류검사는 관련요건에 만족하게 수행되었다. 증기발생기 전열관과 같은 관류의 검사는 와전류검사로 건전성을 검증할 수 있으며, 269개의 신규 설치된 슬리브 및 모 전열관의 결함지지도 확인할 수 있었다. 아래 Table 4는 검증 항목과 검사 결과를 나타낸다.

관막음을 제한을 해소할 수 있는 방법으로 제시된 튜브엔드 슬리브 설치 및 와전류검사로의 검증으로 원자력발전소 안전성 확보에 기여 했으며 증기발생기 교체를 지연시킴을 통해 경제적 효과도 확보하였다.

Table 4 ECT Verification Results for Sleeve

Items for Sleeve Verification	Results
Correct location of the sleeve	Satisfied
Completeness of expansion zones	Satisfied
Correct location of expansion zones	Satisfied

#### 참고문헌

- (1) Swilley, S., 2007, “Pressurized Water Reactor Steam Generator Examination Guidelines: Revision 7,” 1013706, pp. 3-2. 6-5~6-6.
- (2) Mclree, A. R., 1997, “PWR Steam Generator Sleeving Assessment Document”, Revision 1, pp. 1-1~1-6,
- (3) Kepco KPS, 2014, “Final Report of Steam Generator De-plugging and Tube End Sleeve Installation at HB Unit2”, pp. 1~29.
- (4) Westinghouse Electric germany GmbH, 2014, “Sleeving of Steam Generator tubes PLUSS Sleeve”