

## 증기발생기 세관 수압확관부 비파괴검사 방법론

김창수<sup>†</sup> · 정남두<sup>\*</sup> · 이상훈<sup>\*</sup>

### Methodology of Non-Destructive Examinations on Hydraulic Expansion Region of Steam Generator Tubes

Chang-Soo Kim<sup>†</sup>, Nam-Du Jung<sup>\*</sup> and Sang-Hoon Lee<sup>\*</sup>

#### ABSTRACT

As the measures of nuclear power plant utilities and manufacturers to reduce the defects of tube expansion region during manufacturing steam generators, many types of NDEs(Non-Destructive Examinations) are conducted to inspect the expansion region. The expansion region of tube is subject to degrade because of stress concentration induced by tube expansion, sludge pile and high temperature. So the inspections for tube expansion region have been reinforced. Liquid penetrant test, helium leak test, Bobbin profile test and hydraulic test are performed to confirm the integrity of tube expanded by hydraulic expansion method.

Liquid penetrant test and helium leak test are used to inspect seal weld region on tubesheet end part. Bobbin Profile test is used to inspect fully the expanded region of steam generator tube. Hydraulic test finally verifies the integrity of seal weld region on tubesheet end part.

**Key Words** : Steam Generator(증기발생기), Bobbin Probe(보빈 탐촉자), Expansion Region(확관부), Bobbin profile(보빈 형상평가), Tubesheet(튜브시트)

#### 1. 서 론

증기발생기는 원자력발전소의 터빈을 구동하는 증기를 발생시키는 역할을 한다. 증기발생기 내부에 설치된 세관은 방사성물질이 외부로 누출되지 않도록 1차계통과 2차계통의 압력경계를 이루는 중요한 부품으로서 OPR-1000 증기발생기의 경우 호기당 2대의 증기발생기가 설치되며 각 증기발생기에는 8,000여개의 세관이 설치되어 있다. 세관 재질은 부식저항성이 높은 인코넬 690TT이다.<sup>1)</sup>

증기발생기 세관을 튜브시트(Tubesheet)에 고정하고, 압력경계를 유지하기 위하여 세관과 튜브시트 끝단에 밀봉용접(Seal Weld)을 수행한 후에 수압

확관 또는 폭발확관 방법 등을 사용하여 세관을 튜브시트에 견고하게 밀착시킨다. 최근 제작되는 OPR-1000 증기발생기는 수압확관(Hydraulic Expansion) 방법을 이용하여 확관작업을 수행하고 있다.<sup>2)</sup>

증기발생기 튜브시트 상단에는 증기발생기 이차측으로 유입된 슬러지가 퇴적되어 세관에 덴트(Dent)를 유발함으로써 응력 집중을 야기한다.

더욱이 슬러지가 침적되어 경화된 구역은 세관을 통한 열전달을 방해하여 고온 환경이 형성된다. 따라서 세관 제작과정의 확관천이 구역에 발생한 응력, Dent 발생으로 인한 응력, 고온환경에 따른 응력 등으로 확관천이 구역은 다른 구역보다 취약하게 되며 이 구역에서 응력부식균열(SCC; Stress Corrosion Cracking)이 발생할 가능성이 높다. 현재 운영 중인 원자력발전소의 증기발생기 세관에 발생하는 대부분의 SCC는 튜브시트 상단의 확관천이 구역에서 발생하고 있다.

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원  
E-mail : kimcs@khnp.co.kr

TEL : (042)870-5641 FAX : (042)870-5649

<sup>\*</sup> 한국수력원자력(주) 원자력발전기술원

따라서 원자력발전소 운영자와 제작자는 증기발생기 제작 중 건전성을 최대한 확보하기 위하여 세관에 대한 소재 검사를 수행하며, 또한 세관의 수압확관부에 대한 검사를 강화하여 수행한다.

수압확관부에 대한 검사는 액체침투탐상검사, 헬륨누설시험, 보빈 프로파일 검사 및 수압시험을 수행하고 있다. 확관부 끝단의 밀봉용접부에 대한 건전성을 평가하기 위하여 액체침투탐상검사, 헬륨누설시험 및 수압시험을 수행하고, 와전류검사를 이용한 보빈 프로파일 검사는 확관부 전체의 건전성을 평가하기 위하여 수행하고 있다.

최근에 제작되는 증기발생기 세관의 수압확관방식은 제작공정의 특성으로 인하여 튜브시트 상단의 확관천이 구역에 Crevice Depth가 반드시 발생하며 여기에 슬러지가 퇴적되어 열화를 발생시킬 수 있다. 따라서 수압확관 제작공정에서 열화 발생 가능성을 사전에 방

지하고자 가능한 Crevice Depth를 작게 유지하려고 노력하고 있다.

## 2. 확관부 비파괴검사 방법

### 2.1 세관 소재 검사

증기발생기 세관 소재 검사는 발주자의 요건에

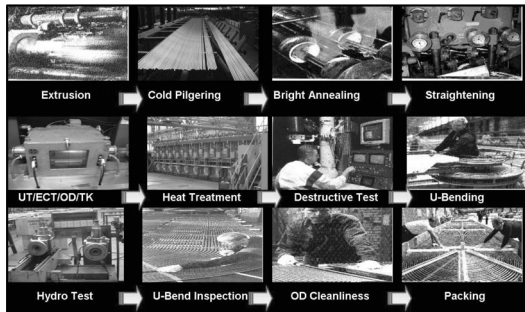


Fig. 1 Tube Manufacturing Process

Table 1 Inspection Items and Acceptance Criteria for Tubes Manufacturing

Inspection Items	Acceptance Criteria
UT	Below Standard Flaw Size
ECT	Below Standard Flaw Size
Signal to Noise Ratio	Over 15:1
Hydraulic Test	No Leakage

따라 세관 제조사에서 초음파검사 및 와전류검사를 수행한다. Fig. 1은 증기발생기 세관의 전형적인 제작공정을 보여준다.

Table 1은 세관의 제작 공정 중에 수행하는 세관에 대한 검사항목과 기준을 나타내었다.

### 2.2 액체침투탐상 검사

액체침투탐상검사는 KEPIC MNB-5000에 따라서 튜브시트 끝단의 밀봉용접부에 대하여 수행한다. Table 2는 액체침투탐상검사에 대한 허용기준을 나타내었다.

Table 2 Acceptance Criteria for Liquid Penetrant Test

Indication Type	Acceptance Criteria
Linear Indication	No Allowable
Round Indication	Below 4.8 mm

### 2.3 헬륨누설시험(Helium Leak Test)

헬륨누설시험은 증기발생기 확관부 끝단부 세관과 튜브시트 밀봉용접부에 대한 기밀성을 확인하기 위하여 수행한다. 헬륨누설시험은 수압시험을 수행하기 이전에 수행하며 증기발생기 2차측에 약 10Psig의 압력으로 가압하여 12시간 이상 경과한 후에 스니퍼를 각각의 밀봉용접부에 3mm 이내 정도로 유지하여 누설여부를 검사한다. Fig. 2는 헬륨누설시험을 수행하는 모습을 보여준다. 헬륨누설 시험은 매우 민감하여 액체침투탐상검사에서 탐지하지 못한 매우 미세한 누설경로도 탐지 가능하다.

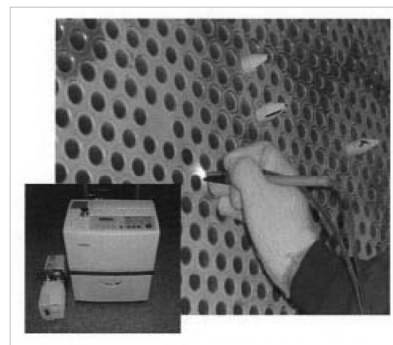


Fig. 2 Helium Leak Test on Tubesheet Seal Weld Region

2.4 보빈 프로파일 검사

보빈 프로파일 와전류검사는 튜브시트 끝단에서 1단 세관 지지판까지 검사를 수행하여 전체 확관부와 튜브시트 상단(Top of Tubesheet)의 건전성을 확인하는 시험이다.

보빈 프로파일 검사는 결함탐지에 사용되는 중간 대역 주파수에 민감한 일반 탐촉자와 달리 고주파에 민감한 탐촉자를 사용하며 고주파 와전류를 이용하여 확관으로 인하여 세관 내면이 팽창된 정도를 정밀하게 측정한다.

Fig. 3은 보빈 프로파일을 수행한 화면을 보여준다. Fig. 3의 상부는 800kHz 와전류신호를 이용하여 검사 대상 세관이 공칭 내경 16.76 mm, 확관된 부분의 세관 내경이 17.11mm 임을 보여준다. 튜브시트의 확관 지역의 중앙부에 상부로 돌출된 신호는 작은 진폭을 갖는 Bulge 신호이다. Fig. 3의 하부는 30kHz 와전류신호를 이용하여 취득한 튜브시트의 정보를 보여주고 있다.

따라서 보빈 프로파일 신호의 800kHz와 30kHz의 와전류신호를 비교하여 Crevice Depth 깊이 측정과 과확관, 미확관 등을 측정함으로써 확관부의 건전성을 평가한다.

Table 3은 증기발생기 세관 재질과 보빈 프로파일검사를 위한 사양을 나타내었다. 보빈 검사에 사

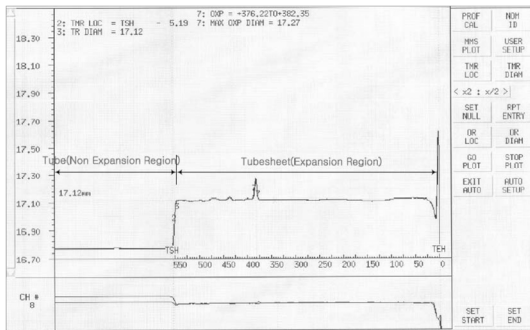


Fig. 3 Bobbin Profile Configuration

Table 3 Data Acquisition Specification

Items	Specification
Material	Inconel 690
Tube Outer Diameter	0.75"
Tube Thickness	0.042"
Resistivity( $\mu\Omega$ -cm)	114.7
Test Frequency(kHz)	800/600/150/30

Table 4 Inspection Item and Criteria for ECT Profile Test

Items	Acceptance Criteria
Crevice Depth	Below 6.35mm
Over Expansion	No Allowable
No Expansion	No Allowable

용되는 주파수는 800kHz, 600kHz, 150kHz, 30kHz의 다중 주파수를 사용하며 800kHz는 프로파일 검사용, 600kHz는 기본주파수로서 결함 탐지에 이용되고, 30kHz는 보조주파수로서 세관 2차측 구조물위치 및 세관 이물질 확인에 사용된다.<sup>3)</sup>

보빈 프로파일 검사는, 과확관<sup>1)</sup>, 미확관<sup>2)</sup> 등을 집중적으로 검사한다. Table 4는 보빈 프로파일 검사에 대한 검사 항목과 허용기준을 나타낸다.

보빈 프로파일 신호수집시에는 일반 ECT 검사시에 사용하는 ASME 교정시편 이외에 Fig. 4의 튜브시트 프로파일 시편을 사용하여 교정을 실시한다. 튜브시트 프로파일 시편에는 증기발생기 확관부를 모사한 확관형상이 가공되어 있어서 비교

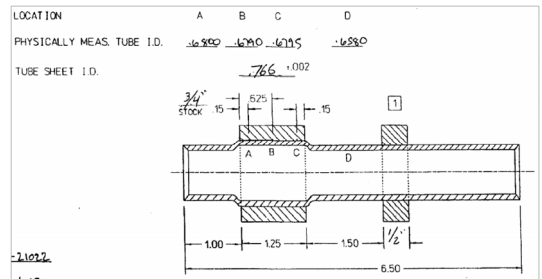


Fig. 4 Tubesheet Profile Standards

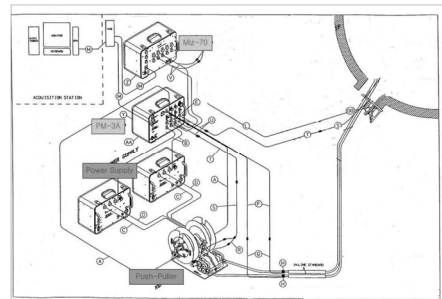


Fig. 5 Equipment Wiring Diagram

- 1) 관관 상단부(Top of Tubesheet)를 초과한 확관
- 2) 확관작업이 수행되지 않은 세관

검사가 가능하도록 하였다.

보빈 프로파일 검사를 수행하기 위하여 주파수 발생기(Miz-70), 탐촉자 조정장치(PM-3A), 탐촉자 공급장치(Probe Push-Puller)가 설치되어 초당 약 24인치 속도로 신호를 수집한다. Fig. 5는 신호수집 장치의 배선 연결도를 보여준다.

### 2.5 수압시험(Hydraulic Test)

증기발생기 수압시험은 세관 내면의 1차측에서 수행하는 방법과 세관 외면의 2차측에서 수행하는 방법으로 구분되며 증기발생기 세관 확관부의 건전성을 평가하는 방법은 2차측 수압시험이 적용된다. 2차측 수압시험은 2차측에 약 90kg/cm<sup>2</sup>의 시험압력으로 가압하여 밀봉 용접부의 누설여부를 확인하는 시험이다.

## 3. 비파괴검사 기법 적용

### 3.1 밀봉 용접부 비파괴검사

밀봉용접부에 대한 건전성 검사는 액체침투탐상검사, 헬륨 누설시험 및 수압시험을 이용하여 확인한다. 밀봉용접부는 증기발생기 1차측과 2차측의 압력경계를 형성하는 중요한 부분이므로 특정 비파괴검사 방법에 의존하기 보다는 다양한 비파괴검사 방법을 적용토록 하여 검사신뢰도를 향상시키고 있다.

### 3.2 튜브시트 확관부 비파괴검사

튜브시트 확관부에 대한 건전성 확인 목적은 미확관 세관이 발생하지 않도록 하고, 과도한 진폭을 갖는 Bulge 등의 발생으로 증기발생기 건전성이 저하되지 않도록 하기 위하여 수행하고 있다.

튜브시트 건전성 확인을 위하여 보빈 프로파일 검사를 수행하고 있으며 정밀검사가 필요한 세관은 Fig. 6과 같이 정밀검사용 회전코일(Rotating Coil)을 이용한 검사를 수행하고 있다. 그림의 하단은 Bulge가 발생한 C-Scan형상을 나타내고 있다.

보빈 프로파일 검사 결과 미확관 세관과 Crevice Depth를 초과한 세관은 재확관을 수행하며, 튜브시트 상단을 초과하여 확관된 과확관 세관은 향후 운전 중 세관의 열화 가능성을 최소화하고자 관막음 정비를 수행한다. 관막음 정비는 과확관으로

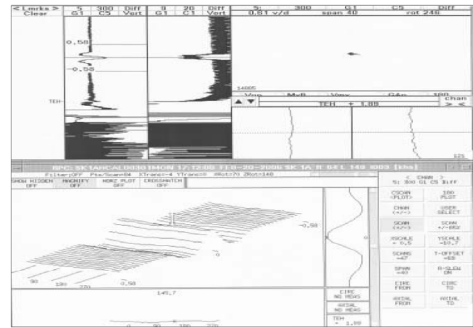


Fig. 6 Rotating Coil Signal

인하여 증기발생기 운전 중에 세관 열화 가능성이 높은 세관은 관막음을 수행한다.

아울러 튜브시트 내부에 큰 진폭의 Bulge 신호 등이 발생하여 운전 중 열화 발생 가능성이 있는 세관은 가동중검사시 추적검사가 필요한 세관으로 선정하여 지속적으로 관리토록 하고 있다.[4]

### 3.3 튜브시트 상단부 비파괴검사

튜브시트 상단부는 확관작업 등의 제작공정 중에 이상신호가 발생할 가능성이 있는 지역이다. 따라서 보빈 프로파일 검사 신호에서 취득되는 기본주파수(600kHz)를 이용하여 튜브시트 상단에서 1단 지지판까지 보빈신호를 평가하여 건전성을 확인한다.

Fig. 7은 보빈신호의 기본주파수(600kHz)를 이용하여 튜브시트 내부의 Bulge 신호 진폭을 측정하고, 튜브시트 상단(TSH; Tubesheet Hotleg)에서 1번 세관 지지대(01H)까지 보빈 신호를 확인하여 튜브시트 상단부의 건전성을 확인한다. 그림에서는 Bulge 신호 형상을 보여주고 있다.

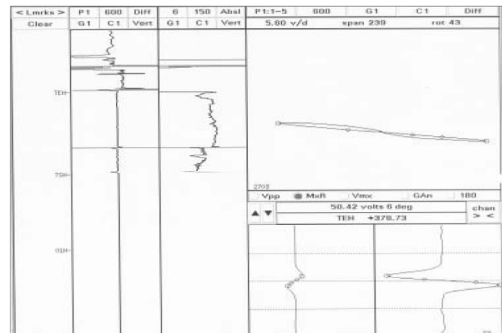


Fig. 7 Bobbin Signal at 600 kHz

#### 4. 결 론

원자력발전소 운영자와 제작자는 증기발생기 제작 중에 주요 부품에 대한 신뢰도를 향상시키기 위하여 제작공정을 개선하고, 비파괴검사를 강화하여 증기발생기 건전성을 향상시키고자 노력하고 있다.

증기발생기 제작 중에는 튜브시트 확관 공정으로 인하여 응력이 발생하고, 운영 중에는 슬러지 퇴적 등으로 인한 응력이 부가되어 가동 중에 열화 가능성이 높다.

따라서 증기발생기 제작 중에는 액체침투탐상검사, 헬륨 누설시험, 보빈 프로파일 검사 및 수압시험을 튜브시트 확관부에 적용하여 검사를 수행하고 있다. 확관부 끝단의 밀봉용접부에 대한 비파괴검사는 액체침투탐상검사, 헬륨누설시험 및 수압시험을 적용하고, 보빈 프로파일 검사는 확관부 전체의 건전성을 평가하고 있다.

#### 참고문헌

1. KHNP “Integrated Guidelines of Steam Generator Management Program”, Vol. 1, Standard Procedure1. SG Inspection, p1~p38
2. Doosan Heavy Industry “Hydraulic Expansion for Steam Generator Procedure”, Rev.4, p1~22
3. Doosan Heavy Industry “Procedure for Eddy Current Testing”, Rev.2, p1~21
4. KHNP “Steam Generator Tube Bobbin Profile Signal Analysis Procedure” Rev.2, p1~19