한국압력기기공학회 논문집
제7권 제4호 2011년 12월 pp. 19－25

증기발생기 전열관 와전류검사용 국내 개발 보빈탐촉자 적용성 분석

김인철† · 주경문* · 문용식*

Determination of Availability of Domestic Developed Bobbin Probe for Steam Generator Tube Inspection

In-Chul Kim†, Kyung-Mun Joo* and Yong-Sig Moon*

(Received 29 OCT 2011, Accepted 6 NOV 2011)

ABSTRACT

Steam Generator(SG) tube is an important component of Nuclear Power Plant(NPP), which is the pressure boundary between the primary and secondary systems. The integrity of SG tube has been confirmed by the eddy current test every outage. The eddy current technique adopting bobbin probe is currently the primary technique for the steam generator tubing integrity assesment. The bobbin probe is one of the essential components which consist of the whole ECT examination system and provides us a decisive data for the evaluation of tube integrity. Until now, all of the ECT bobbin probes in Korea which is necessary to carry out inspection are imported from overseas. However, KHNP has recently developed the bobbin probe design technology and transferred it to domestic manufacturers to fabricate the probes. This study has been conducted to establish technical requirements applicable to the steam generator tube inspection using the bobbin probes fabricated by the domestic manufactures. The results have been compared with the results obtained by using foreign probe to identify the availability to the steam generator tube inspection. As a result, it is confirmed that the domestic bobbin probe is generally applicable to SG tube inspection in the NPPs.

Key Words : Bobbin Probe(보빈 탐촉자), Eddy Current Test(와전류검사), Steam Generator(증기발생기)

1. 서 론

원자력발전소 증기발생기(Steam Generator) 전열관은 원자로 1차계통의 압력경계를 이루는 중요한 부품이다. 따라서 원전 운영자는 증기발생기 전열관의 건전성 확보를 위해 매주기 계획예방정비 기간에 와전류 검사를 수행한다.

증기발생기 와전류검사에 사용되는 보빈탐촉자는 와전류검사 결과에 중대한 영향을 미치는 핵심 부품으로 그동안 전량 수입에 의존하고 있었다. 한수원㈜은 핵심 기술의 국산화를 목적으로 연구과제를 수행하여 2007년 보빈탐촉자 설계기술을 확보하였으며, 국내 업체에 기술이전을 완료하였다[1].

본 연구는 기술이전을 받은 두개의 국내업체(A사, B사)에서 제작된 보빈탐촉자에 대해서 현장 적용을 위한 기술요건을 확립하고 해외사 제품과 비교, 실제 검사에 적용 가능 여부를 분석하고자 수행하였다.

2. 보빈탐촉자 적용 기술요건

2.1 보빈탐촉자 개요

보빈탐촉자는 와전류검사에 가장 널리 사용되며 검사 속도는 40 inches/sec로서 빠르다. 또한 코일이 탐

† 책임저자, 회원, 한국수력원자력(주) 한수원중앙연구원
E-mail : inchul@khnp.co.kr
TEL : (042)870-5629 FAX : (042)870-5639
* 한국수력원자력(주) 한수원중앙연구원

촉자에 원주방향으로 감겨져 있어 체적성 결함의 신뢰성 있는 검출 및 크기 측정이 용이하여 증기발생기 전열관의 모든 부위를 검사하는데 사용된다. Fig. 1은 보빈탐촉자의 형상을 보여주고 있다.

보빈탐촉자에 적용되는 기술요건은 ASME Code 요건과 EPRI(미국전력연구소)의 SGMP 요건으로 분류되며, 두 요건을 동시에 만족하는 경우 검사에 적용할 수 있다. 그 외에 현장경험 및 EPRI 보고서 등을 참조하여 현장적용을 위한 기술요건을 확립하였다[2].

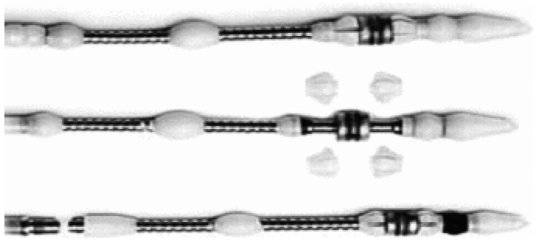

Fig. 1 Typical Shapes of Bobbin Probes

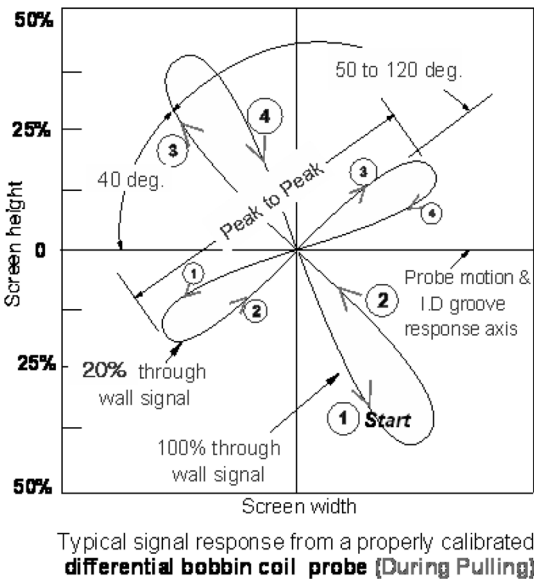

Fig. 2 Phase Angle Response Criteria(ASME)

2.2 ASME 코드 요건

보빈탐촉자 신호의 위상각 퍼짐은 ASME 표준시험편(Standard specimen)에서 취득된 와전류신호가 기본주파수(Basis Frequency)에서 관통공(TWH ; Through Wall Hole) 신호와 20% 평저공(FBH ; Flat Bottom Hole)의 위상각(Phase Angle) 차이가 50°와 120° 사이에 위치해야 한다[3].

2.3 EPRI SGMP 요건

국내 증기발생기 전열관 와전류검사는 EPRI의 SGMP (Steam Generator Management Program ; 증기발생기 관리프로그램)를 근간으로 국내 SGMP 요건에 따라 수행되고 있으며 SGMP에서는 EPRI 검사지침을 반영한 탐촉자 제작 품질요건 및 특성시험을 만족하도록 요구하고 있다[4,5].

2.3.1 제작품질 요건

보빈탐촉자에 해당되는 제작 품질요건은 중심주파수(Center Frequency), 비대칭성(Dissymmetry), 탐촉자 플럭스(Probe Flux) 3가지이며 각각의 요건을Table 1에 나타내었다[4].

2.3.2 특성시험

EPRI 지침서에서는 EPRI 지침서는 품질인정에 대한 기본적인 두 가지 방법을 제공한다. 첫 번째 방법은 전열관을 직접 인출 혹은 인공 결함에 의한 검출능력을 비교하여 인정된(Qualified) ETSS(Examination Technique Specification Sheet ; 검사기술사양서)를 승인한 탐촉자를 사용하거나, 다른 방법은 인정된 탐촉자와 특성이 동등함을 사업자가 인정하는 방법이다.

본 논문에서는 두 번째 제시한 방법인 기 인정된 탐촉자와 비교하여 요건을 만족하는지 확인하였다. 국내에 사용하는 보빈탐촉자는 EPRI에서 인증된 Zetec사 탐촉자이다. 따라서 국산 탐촉자를 사용하기 위해서는 9개 항목의 특성시험을 Zetec사 탐촉자와 아래 요

Table 1 Probe Manufacturing Quality Parameters

Quality Parameter	Coil Type	Acceptance Criteria
Center Frequency	All coils	The center frequency is within 10% of design
Dissymmetry (Ds)	Differential coils	Within ±10% amplitude difference between the average of the two lobes of the 100% TW hole
Probe flux (Rs)	Bobbin (non-external reference)	Main lobe ≥90% of total amplitude

Table 2 Probe Characterization Test Items

No.	Items
1	Impedance
2	Center Frequency
3	Effective Scan Field Width(ESFW)
4	Fill Factor Coefficient(FFC)
5	Depth Coefficient(DC)
6	Axial Length Coefficient(ALC)
7	Transverse Width Coefficient(TWC)
8	Phase-to-Depth Curve(PDC)
9	Direct Current Saturation Strength(DCSS)

건을 비교하여 동등이상 임을 입증하여야 한다[5].

2.4 기타요건

국내 증기발생기 전열관 와전류검사 경험을 바탕으로 추가요건을 개발하였고 합격기준은 EPRI 보고서를 참조하였다[7].

2.4.1 내구성

내구성 시험은 신호의 재현성을 시험하고 검사 중 탐촉자 교체 주기를 확인하기 위함이다. 신호취득 데이터를 검토하여 위상각의 ±5° 변화 및 ±20% 진폭 변화 시점 전까지의 신호취득 전열관 수를 해당 탐촉자의 내구성 한도로 규정하고, 한도는 Zetec사 탐촉자 1개당 평균 신호수집 횟수인 300회를 합격기준으로 설정하였다.

2.4.2 마모(Wear) 검출 능력

Model-F형, OPR-1000형 증기발생기 공통으로 검출되는 마모신호의 검출 능력을 확인하기 위해 10개 이상의 마모결함을 대상으로 크기 측정 오차는 ±20% 이내이어야 한다.

2.4.3 축방향 균열(Axial Crack) 검출 능력

OPR-1000 증기발생기 전열관지지판에서 발생하는 축방향 균열 검출능력을 확인하기 위하여 10개 이상의 축방향 균열 신호에 대해 신호크기(Amplitude)는 ±40% 이내이고, 위상각은 ±20° 이어야 한다.

2.4.4 감도(Sensitivity)

ASME 표준시험편 20% 평저공 신호의 스팬(Span) 크기가 Zetec사 탐촉자 기준 80% 이상이어야 한다.

3. 국산탐촉자 적용성 시험 및 검증결과

3.1 ASME 코드 요건

2.2항의 ASME 코드 요건에 따른 위상각 퍼짐 측

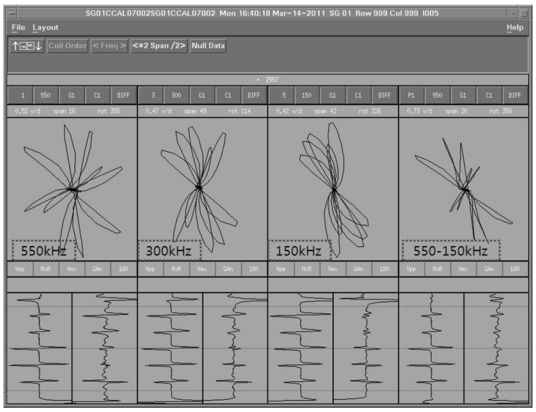

Fig. 3 Spread of Differential Signals(Zetec)

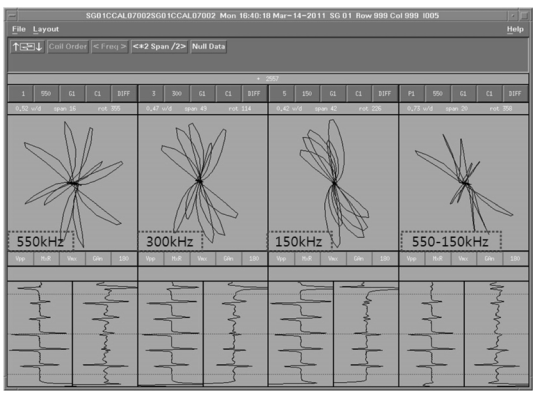

Fig. 4 Spread of Differential Signals(A)

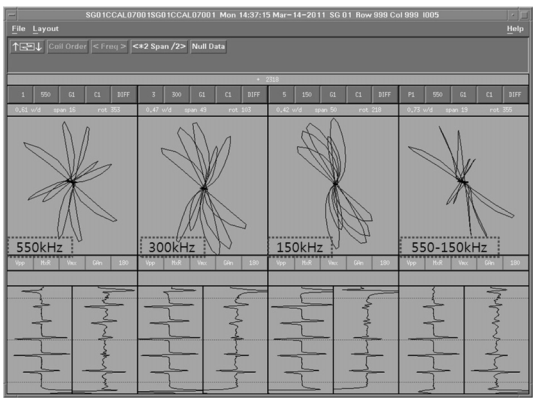

Fig. 5 Spread of Differential Signals(B)

정값은 A,B사 제품 모두 만족하였다. 아래 Fig. 2～4에 Zetec, 국산A, 국산B의 100%, 80%, 60%, 20% 평저공 차동형신호(Differential Signal)의 위상각 퍼짐을 나타내었다. 검사주파수는 현장에 적용되는 550, 300, 150, 20kHz를 사용하였으며 Figs. 3～5에는 20kHz를 제외한 3개 주파수와 혼합채널(Mixing Channel)을 나타냈다. 혼합채널은 현장에서 수행하는 것과 같이 550kHz와 150kHz를 합성하였다.

ASME 코드요건인 관통공(TWH) 신호와 20% 평저공(FBH)의 위상각(Phase Angle) 차이가 50°와 120° 사이에 위치함을 확인하였고 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

3.2 SGMP 요건

탐촉자 제작 품질요건 및 특성시험을 수행하여 기술요건에 만족이 되는지 확인하였다.

3.2.1 제작품질 요건

2.3.1항의 요건에 따라 수행한 결과 Zetec사 대비 A,B사 제품 모두 만족하였고 그 결과를 Table 4에 나타내었다.

3.2.2 특성시험

2.3.2항에 따라 국내 개발 보빈탐촉자의 특성시험

Table 3 Phase Angle Response results

Company	Phase (100% TWH-20% FBH)	ASME Criteria	Results
A	110	50～120	Accept
B	112		"
Zetec	112		"

Table 4 Probe Manufacturing Quality

	Company A	Company B	Criteria	Results
Center Frequency	0.6%	0.1%	±10%	Accept
Dissymmetry	5.3%	2.8%	±10%	
Probe flux	100%	100%	≥90%	

Table 5 Impedance & Center Frequency Test results

	Zetec probe	Domestic Probe
Impedance	434 Ohms	435 Ohms
Center Frequency	343 kHz	339 kHz

Table 6 DCSS Test results

	Zetec probe	Domestic Probe
DCSS	13 milsTesla	26 milsTesla

을 수행한 결과 Zetec사 보빈탐촉자와 동등한 결과를 나타냈다[6,8].

임피던스(Impedance) 및 중심주파수(Center Frequency)의 근소한 차이가 있었으나 현장 검사시 표준시험편의 와전류신호 보정으로 실제 와전류 신호 응답 결과에 영향을 주지 않으며 충진율계수(Fill Factor Coefficient) 시험에서 충진율 변화에 신호의 진폭 영향이 적어 동등이상의 결과를 나타냈다.

깊이계수(Depth Coefficient), 축방향 길이계수(Axial Length Coefficient), 횡방향 폭계수(Transverse Width Coefficient) 및 위상각대 깊이계수(Phase-to-Depth Curve)는 차이가 없이 동일한 결과를 나타냈다.

직류포화세기(Direct Current Saturation Strength) 측정결과 동일한 결과를 나타내었으며 자장세기는 Zetec 탐촉자보다 2배 높게 나타나 동등이상의 결과를 나타냈다.

3.3 기타요건

2.3항의 기타 요건 중 내구성시험은 실제 증기발생기 전열관과 동일하게 제작한 목업(Mock-up)에서 수행하였으며 나머지 요건은 실험실에서 표준시험편(Standard)을 활용하거나 실제 증기발생기 시범적용을 통하여 Zetec사 탐촉자 검사결과와 비교하였다.

3.3.1 내구성

실제 증기발생기와 동일한 길이로 제작된 목업을 활용하였으며 목업의 구성은 Fig. 6에 나타내었다.

탐촉자 1개에 대하여 내구성한도 이상인 500회씩 회사별 2회 시험을 수행하였으며 A,B사 모두 만족하였다.

Table 7에 나타나 있는 수용기준은 100% 관통공 위상각 40°를 기준으로 ±5° 변화 및 20% 평저공 진폭 4 Volts 기준의 ±20% 진폭 변화이다.

3.3.2 마모(Wear) 검출

80개 마모 전열관에 대한 검출 실험 결과, Zetec사 탐촉자와 동일하게 모두 검출되었으며 마모의 깊이 측정값은 20～30% 이하 마모의 경우 상대적으로 Zetec

사 탐촉자 결과보다 약 1% 깊게 측정되었으며 30% 이상은 동일한 측정결과를 나타내었다. Figs. 7~9는 두께대비 40% 마모신호를 나타내었다.

3.3.3 축균열(Axial Crack) 검출

12개 축균열 전열관에 대한 검출 실험 결과, Zetec 사 탐촉자와 동일하게 모두 검출되었으며 Zetec 탐촉자 결과를 기준으로 위상각 및 진폭값의 평균 편차를 Table 8에 나타내었다.

Figs. 10,11,12에 국내 증기발생기에서 관찰된 축균열 신호에 대하여 Zetec, 국산A, 국산B사의 탐촉자 검사결과를 나타내었다.

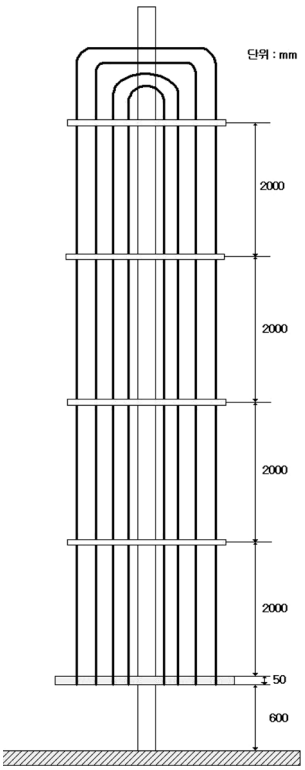

Fig. 6 Mock-up for Probe Durability

Table 7 Probe Durability Test(500times/1probe)

Company		Phase (degree)	Amplitude (Volts)	Criteria	Results
A	1	39	4.41	Phase : 35~45 Amplitude : 3.2~4.8	Accept
	2	39	4.28		
B	1	38	3.91		
	2	41	4.04		

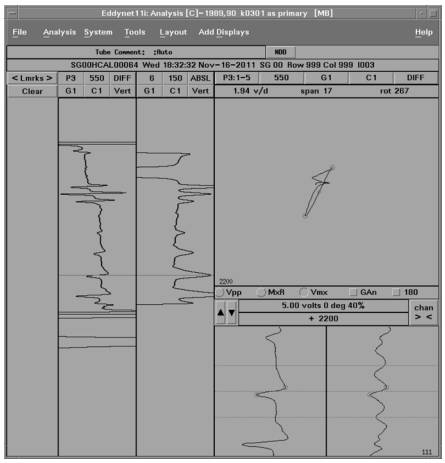

Fig. 7 Wear(40%) Signal(Zetec)

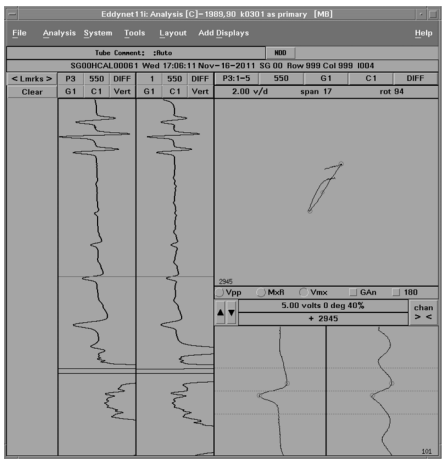

Fig. 8 Wear(40%) Signal(A)

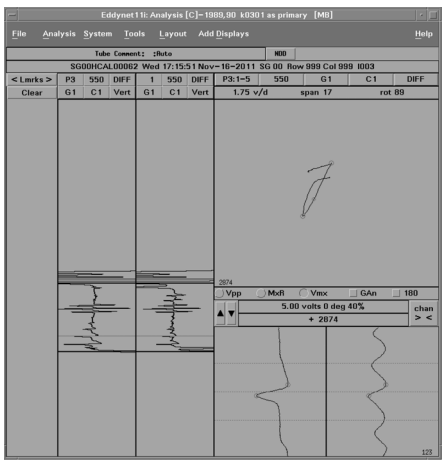

Fig. 9 Wear(40%) Signal(B)

Table 8 Detection Ability of Axial Crack

Company	Avg. Deviation		Criteria	Results
	Phase (degree)	Amplitude (Volts)		
A	11.9	12.9	Phase : ± 20 Amplitude : ± 40	Accept
B	13.6	11.6		

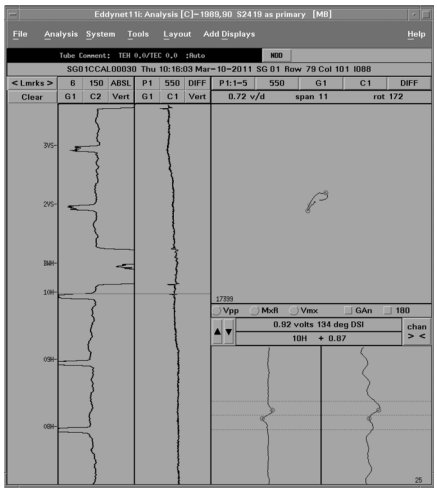

Fig. 10 Axial Crack Signal(Zetec)

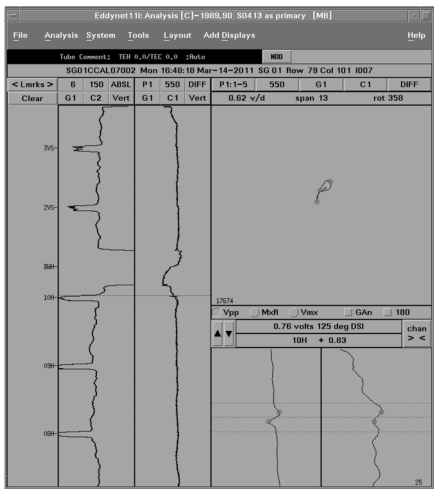

Fig. 11 Axial Crack Signal(A)

3.3.4 감도(Sensitivity)

초기 제작한 국산 B사의 탐촉자는 고주파수 채널에서 노이즈가 관찰되었고 감도의 경우 국산 A사는 2.3.4항의 기준은 만족하였으나 Zetec사 보빈탐촉자의

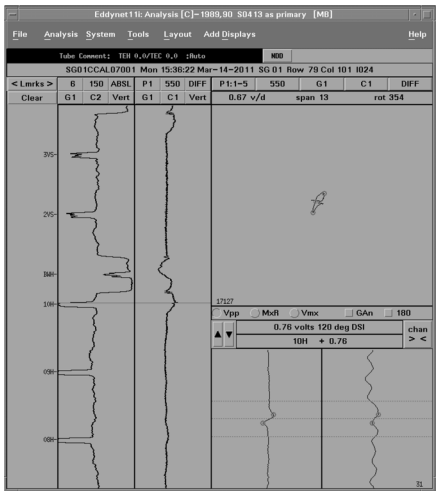

Fig. 12 Axial Crack Signal(B)

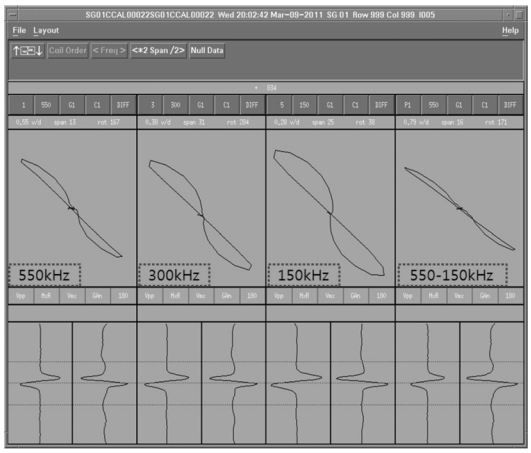

Fig. 13 Probe Sensitivity(Zetec)

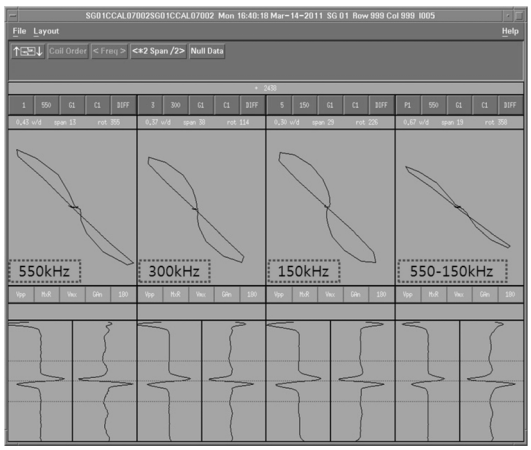

Fig. 14 Probe Sensitivity(A)

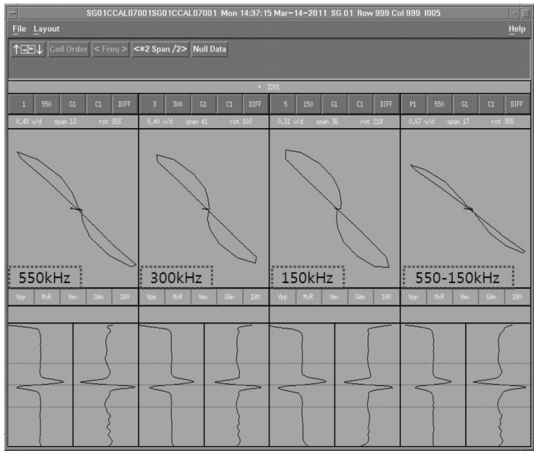

Fig. 15 Probe Sensitivity(B)

검사 결과와 비교하였을 때 감도가 약 5% 낮은 결과로 나타났다.

이후 탐촉자 제작 및 중심화 장치(Centering Device)의 개선 등을 통하여 국산 A사, B사 모두 Zetec사 탐촉자와 동등이상으로 개선되었으며 Figs. 13,14,15는 100%, 관통공 신호의 감도를 검사 채널별로 비교하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 현재 전량 해외사에 의존하고 있는 증기발생기 와전류검사 보빈탐촉자의 국내 제품에 대하여 현장 적용전에 검증할 수 있는 기술요건을 확립하고 해외사 제품과 비교한 시험 결과를 제시하였다.

가. 국내 개발 보빈탐촉자 A, B에 대하여 ASME, SGMP, EPRI 지침의 탐촉자 품질 요건에 대한 시험결과 만족하였다.

나. 탐촉자 내구성, 마모 및 축방향 균열 검출능력 등 추가로 현장경험을 반영한 시험 결과도 만족하였다.

다. 국내에서 개발된 보빈탐촉자의 성능은 기존 해외사 제품과 비교 동등 이상으로 현장 적용이 가능하다고 판단된다.

라. 아울러 본 논문에서 제시한 보빈탐촉자의 성능검증 요건은 다른 국내 및 해외제품의 현장 적용 가능 여부의 기술적 판단 근거로 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. KEPRI, KHNP 2007.02, “Development of Eddy Current Testing Bobbin Probe for Steam Generator Tubes in NPPs”, Final Report.
2. KHNP 2011.05, “Guideline for SG ECT Bobbin Probe Performance Verification”, pp. 1-12.
3. ASME, 1995.07, Sec. Ⅴ Article 8 Appendix Ⅰ “Eddy Current Examination Method for Installed Nonferromagnetic Heat Exchanger Tubing”, pp. 166-167.
4. EPRI, 2007.10, “Pressurized Water Reactor Steam Generator Examination Guidelines. Rev7”, pp. H1-H15.
5. KHNP, 2009.7, “Integrated Guidelines of Steam Generator Management Program. Rev1”, Standard Procedure1. SG Inspection, pp. 33-38.
6. KHNP, 2010.04 “Bobbin Probe Characterization verification Report”, pp. 1-16.
7. EPRI 2010.09, “Documentation for examination technique equivalencies” Chaper6 pp. 1-2.
8. 남민우, 2010.08, “원전증기발생기 전열관 와전류검사 보빈탐촉자의 특성시험”, KSNT 논문집, Vol. 30.