

원전 증기발생기 전열관 와전류검사 보빈탐촉자의 특성 시험

Characteristics Testing of the ECT Bobbin Probe for Steam Generator Tube Inspection of Nuclear Power Plant

남민우*[†], 이희종*, 조찬희*, 유현주*

Minwoo Nam*[†], Heejong Lee*, Chanhee Cho* and Hyunjoo Yoo*

초 록 국내 원자력 증기발생기 관리프로그램 통합지침서는 와전류검사 장비 및 기법에 대한 자격인정 절차를 규정하고 있다. 이러한 자격인정 절차에는 두 가지 방법이 있다. 첫 번째는 열교환기에서 인출된 튜브 혹은 인공결함에 의한 결함 발생기구 및 기법을 사용하여 장비 혹은 탐촉자를 인정한다. 두 번째는 이미 인정된 장비 혹은 탐촉자 특성과 동등함을 입증할 경우, 즉 검사기술사양서에 기술된 필수변수 범위가 만족된다면 인정절차 없이 이미 인정된 장비 혹은 탐촉자를 대체하여 사용할 수 있다. 본 논문은 국산화 개발된 보빈탐촉자와 이미 해외에서 인정된 보빈탐촉자의 특성을 비교 수행한 결과를 수록하였다. 탐촉자의 전기적 특성평가를 위해 임피던스 및 공진주파수를 측정하였으며, 자기장 특성평가를 위해 유효주사 자기장 폭 측정, 충전율 계수 측정, 깊이계수 측정, 축방향 길이계수 측정, 횡방향 폭계수 측정, 위상각 대 깊이곡선 측정 및 직류포화세기를 측정하였다. 본 특성시험 결과 두 종류의 탐촉자 특성이 거의 동등한 것으로 평가됨에 따라 향후 현장 적용을 위한 기반을 구축한 것으로 판단된다.

주요용어: 증기발생기, 와전류검사, 보빈탐촉자, 충전율, 위상각

Abstract The steam generator management program(SGMP) has recently defined the procedures for the qualification of eddy current hardware and technique. These procedures provide two basic methods for qualification. The first way is to qualify the equipment or the probe by using the flaw mechanism and method of the pulled tubes from the heat exchangers or the artificial flawed tubes. The second way is to verify the equivalency with the characteristics of the qualified equipment or probe. In this case, the qualified equipment or probe may be modified to substitute or replace instruments or probes without re-qualification provided that the range of essential variables defined in the examination technique specification sheet are met. This study is to describe the result of the comparative performance evaluation of bobbin coil eddy current probes manufactured by KEPCO Research Institute and probes manufactured by a foreign manufacturer. As a result of this study, although there were minor differences between the two kinds of probes, it was evaluated that the two kinds of probes were almost identical in the significant performance characteristics described in the KEPCO Research Institute guideline.

Keywords: Steam Generator, Eddy Current Testing, Bobbin Probe, Fill-Factor, Phase Angle

1. 서 론

원전 1차계통과 2차계통의 압력경계중 가장 취약한 부분인 증기발생기 전열관은 계획예방정비기간

에 건전성을 확인하기 위해 와전류검사를 수행하고 있으며, 이 증기발생기 전열관 와전류검사에 적용되고 있는 보빈탐촉자 검사는 매 계획예방정비기간에 기본검사로 수행한다. 와전류탐촉자는 검사 계

통의 핵심적인 부분으로서 특정 절차서에 따라 평가가 이루어질 때 대상 시험체의 합부를 결정하는 자료를 제공하게 된다. 또한 수집된 와전류신호의 품질은 사용되는 탐촉자의 설계특성(권선수, 동선 직경 등), 기하학적 형태(충전율, 코일간극 등), 운전주파수에 따라 결정되고, 검사결과에 미치는 영향이 크기 때문에 와전류검사 탐촉자의 선정은 특히 중요하다[1]. 국내 원자력 증기발생기 관리프로그램 통합지침서[2]는 와전류검사 장비 및 기법에 대한 자격인정을 위한 절차를 규정하고 있다. 이러한 자격인정 절차는 두 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 인출 튜브 혹은 인공결함에 의한 결함기구 및 기법을 사용하여 장비 혹은 탐촉자를 인정한다. 다른 방법은 기 인정된 장비 혹은 탐촉자와 특성이 동등함을 입증하면 재 인정절차 없이 이미 인정된 장비 혹은 탐촉자를 대체하여 사용할 수 있다. 본 논문은 국산화 개발된 보빈탐촉자와 이미 인정된 해외의 보빈탐촉자와 특성을 비교 수행한 결과를 수록하였다. 탐촉자의 전기적 특성평가를 위해 임피던스 및 공진주파수를 측정하였으며, 자기장 특성평가를 위해 유효수사 자기장 폭 측정, 충전율 계수 측정, 깊이계수 측정, 축방향 길이계수 측정, 횡방향 폭계수 측정, 위상각 대 깊이곡선 측정 및 직류포화세기를 측정하였다[3]. 본 측정 시험 결과 두 종류의 탐촉자 특성이 거의 동등한 것으로 평가됨에 따라 현장 적용을 위한 기반을 구축한 것으로 판단된다.

2. 실험 준비

2.1. 시험 장비

Fig. 1은 탐촉자의 전기적 특성을 측정을 위한 장치도를 나타냈다. 탐촉자의 전기적 특성시험에서는 Labview 프로그램을 사용하여 임피던스 분석장치(model: HP-4194A)와 GPIB board (model: NI PCI-GPIB)를 이용하여 탐촉자의 임피던스, 위상각 및 공진주파수를 분석하였다. 와전류신호 특성시험은 주파수를 발생시키는 주파수 발생장치로 320채널 용량으로 주파수 대역이 10 kHz~10 MHz인 미국 Zetec사의 Miz-70을, 신호수집 및 분석장치로는 Zetec사의 EddyNet11i 프로그램을 사용하였고 Fig. 2와 같은 검사 시스템을 구성하여 시험을 수행하였다. 직류포화세기 측정을 제외한 시험에 대

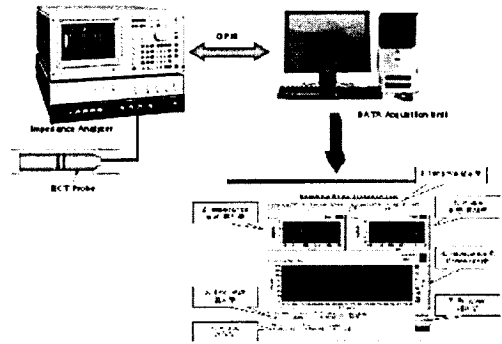


Fig. 1 Test system configuration for electric characteristic measurement of bobbin probe

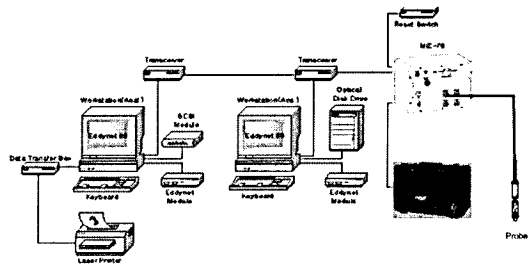


Fig. 2 Test system configuration for eddy current characteristic measurement of bobbin probe

해서는 증기발생기 전열관 와전류검사에 적용하고 있는 장비를 사용하였다.

2.2. 시험 적용 튜브 및 탐촉자 사양

시험에 적용된 증기발생기 튜브 및 탐촉자 사양을 Table 1에 나타냈으며, 튜브는 한국형 증기발생기 튜브를 사용하였고, 탐촉자는 충전율 86%의 보빈탐촉자를 사용하여 실험하였다.

Table 1 Specification for the test tube and the probe

튜브 사양 (mm)			
재질	튜브외경	튜브내경	튜브두께
Inconel 600	19.05	16.92	1.066
보빈탐촉자 사양			
형태	외경	충전율	케이블 길이
MULC	15.5	86%	100ft

2.3. 시험편 설계 제작

특성검사에 적용된 시험편의 가공 결함에 대한 내역을 Table 2에 나타냈으며, 본 시험을 위해 5가지의 서로 다른 시험편을 설계 가공하였다.

Table 2 Test specimens for characteristics testing of bobbin probe

시험편명	가공결함 형태
유효주사자기장 폭/충전율 계수	- 3개 Axial Notch(W:0.2, L:30, TW) - 튜브 ID : 16.92, 17.1, 17.3
깊이계수 (외부결함)	- 5개 Axial OD Notch(W:0.2, L:30) - Depth : 100%, 80%, 60%, 40%, 20%
깊이계수 (내부결함)	- 4개 Axial ID Notch(W:0.2, L:30) - Depth : 80%, 60%, 40%, 20%
축방향길이계수	- 6개 Axial Notch(W:0.2, TW) - L : 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0
횡방향폭계수	- 5개 Axial Notch(L:5.0, TW) - W : 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6

3. 보빈탐촉자 특성시험 결과 및 고찰[2]

3.1. 임피던스 및 위상각 측정 시험

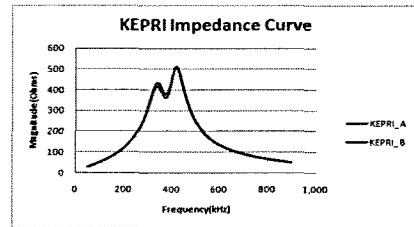
탐촉자의 임피던스 및 위상각은 50 kHz~900 kHz의 주파수 범위에 대해 agilent 4294A, precision impedance analyzer를 사용하여 측정하였으며, KEPRI에서 제작한 4개와 외국사 제작 4개 보빈탐촉자의 특성을 비교 측정하였다. 그리고 탐촉자의 현장 적용시 정확도를 높이기 위해 길이가 약 30 m인 케이블(100ft)을 연결한 상태에서 측정하였다.

3.1.1. 임피던스 측정 시험

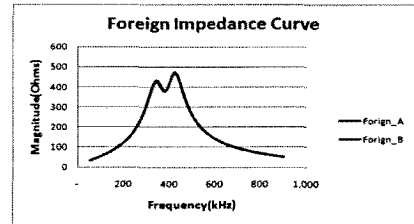
시험에서 측정된 KEPRI 및 외국사 보빈탐촉자의 임피던스 선도를 Fig. 3에 나타냈으며, 보빈코일 2개에 대하여 각각 코일 "A"와 "B"를 측정하여 비교하였다. 양 탐촉자 모두 두개의 코일 값에서 거의 차이가 없었으며, KEPRI 제작 탐촉자의 최대 임피던스 값은 510 Ω이고 외국사 제작 탐촉자는 447 Ω이었다. 탐촉자 연결케이블 저항의 차이에 기인하여 이러한 미소한 차이가 발생하였다. 이러한 작은 차이는 신호평가를 위한 신호보정에 의해 와전류검사 결과 값에는 영향을 미치지 않는다고 판단된다.

3.1.2. 위상각 측정 시험

국산 및 외국사 보빈탐촉자의 위상각 선도를 Fig. 4에 나타냈으며, 2개의 코일 각각에 대하여 코일 "A"와 "B"를 측정하여 비교하였다. 양 탐촉자 모두 두개의 코일에 대한 위상각 차이가 발생하지 않았다. Fig. 4에서와 같이 양 사의 측정결과에서 저주파와 고주파에서 약간의 미소한 차이가 발생하였으나, 신호평가에 주로 사용되는 주파수 범위에서는 차이가 발생하지 않았다.

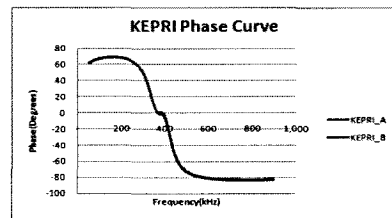


(a) KEPRI

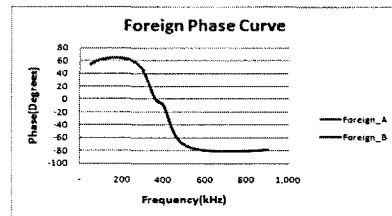


(b) Foreign

Fig. 3 Impedance curves of a KEPRI and a foreign probe



(a) KEPRI



(b) Foreign

Fig. 4 Phase curves of a KEPRI and a foreign probe

3.2. 공진주파수 측정 시험

공진주파수 측정은 임피던스 곡선에서 1차 peak 점을 나타낸 주파수를 측정하였으며 결과는 아래 Table 3에 나타났다. Table 3에서 알 수 있듯이 두 가지 탐촉자의 공진주파수 측정 결과에서 차이가 3 kHz가 발생하였으며, 거의 동등한 공진주파수로 설계되었음을 알 수 있다. 국내 증기발생기 관리 통합지침서의 공진주파수 허용값은 설계치의 10% 이내로 규정하고 있다.

Table 3 Resonance frequency comparison of a KEPRI and a foreign probe

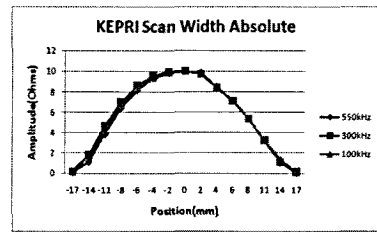
Manufacturer	Type	Resonance Frequency(kHz)
KEPRI	MULC	337
Foreign	MULC	340

3.3. 보빈코일 자기장 특성 측정 시험

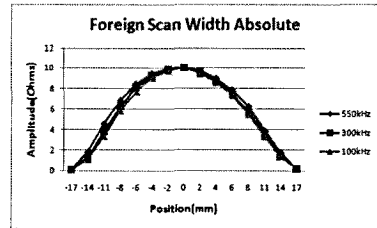
3.3.1. 유효주사 자기장 폭(Effective Scan Field Width) 측정 결과

보빈코일 탐촉자에 대한 유효주사 자기장 폭은 축방향으로 자장 범위를 측정하는 것을 의미한다. 와전류 신호 형성의 특성상 차동 모드에서는 적절한 신호 범위의 설정이 불가능하여 본 측정이 불가능하므로 절대형 모드에 대하여 수행하였다. 시편은 30 mm 축방향으로 방전가공(EDM) 노치를 가공하였으며, 각 채널에 대하여 최대 진폭을 10 volts로 설정하여 각 채널별 정규화 하였다. 시험편의 인입신호와 출구신호를 이용하여 수동으로 거리 보정하였다. KEPRI 및 외국산 탐촉자의 절대형 주사폭을 주파수별로 측정하여 Fig. 5에 그래프로 나타냈다. 두 가지 탐촉자 모두 각 주파수와 각 결합 위치에서 진폭 차이가 없음을 알 수 있다.

각각의 주파수에 대하여 KEPRI 및 외국사 탐촉자의 유효주사 자기장 폭 값을 비교한 그래프를 Fig. 6에 나타냈다. 그림에서와 같이 양사의 그래프가 거의 차이가 없는 것으로 평가되었으며, 정확하게 일치하지 않은 것은 수동 신호 취득에 의해 발생한 거리보정의 차이인 것으로 판단된다. 이 신호는 절대형이므로 신호의 중앙에서 최대 진폭 값을 나타내고 양끝에서 최소값을 나타냈다.

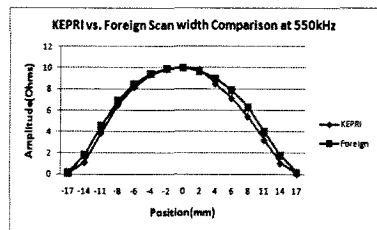


(a) KEPRI

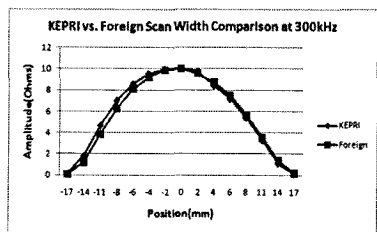


(b) Foreign

Fig. 5 Amplitude vs. axial position of a KEPRI and a foreign probe



(a) 550 kHz



(a) 300 kHz

Fig. 6 Scan width comparison of a KEPRI and a foreign probe at 550 kHz and 300 kHz

본 측정 지표는 최고값으로부터 진폭 하락을 데시벨(dB)로 나타내며, 유효주사 자기장 폭이라 한다. 데시벨은 식(1)을 사용하여 계산하였다.

$$\text{Decibel} = 20 \log(\text{voltage measured/peak}) \quad (1)$$

Table 4 Decibel voltage value

dB	V	Position(mm) at 550 kHz		Position(mm) at 300 kHz		Position(mm) at 100 kHz	
		KEPRI	Foreign	KEPRI	Foreign	KEPRI	Foreign
-2	7.9	-6.32	-6.32	-6.25	-6.25	-6.6	-5.71
-4	6.3	-8.2	-8.72	-8.93	-7.96	-8.47	-7.52
-8	4.0	-10.84	-11.6	-11.7	-10.79	-11.25	-10.23
-12	2.5	-13.25	-13.25	-13.28	-12.52	-13.02	-12.13

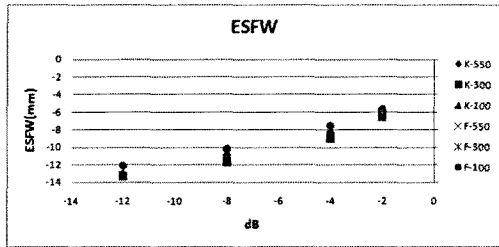


Fig. 7 ESFW comparison of a KEPRI and a foreign probe for frequency changes

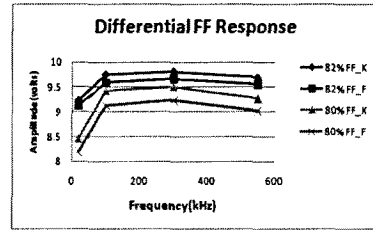
양 사의 주파수별 유효주사 자기장 폭 값을 Fig. 7에 그래프로 나타내었다. 4개의 데시벨 영역은 모두 실제 결함길이(30 mm의 절반인 15 mm) 내에 있음을 알 수 있다. 그리고 두 가지 탐촉자의 유효주사 자기장 폭 값이 거의 일치함을 알 수 있다. 결과적으로 연속으로 근접된 결함의 구분, 즉 분해능이 양호한 것으로 판단된다.

보빈 코일에 의한 튜브의 건전성 평가시 결함의 깊이평가는 사용되지만, 결함의 길이 측정은 평가에 적용되지 않기 때문에 길이 평가는 중요한 변수는 아니다. 하지만 본 측정은 연속된 결함을 구분할 수 있는 분별력 측정에 중요한 변수로 작용한다고 판단된다. 양 사 모두 유효주사 자기장 폭의 하한 값이 실제 결함 길이 내에 있으므로 연속된 결함의 구분이 우수한 것으로 판단된다.

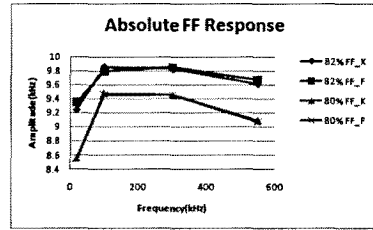
3.3.2. 충전율 계수(Fill Factor Coefficient) 측정 결과

충전율 계수는 튜브 내경 변화에 대한 결함 신호 진폭의 영향을 측정하는 것이다. 충전율은 식(2)로 정의한다.

$$\text{Fill factor} = (\text{probe OD})^2 / (\text{tube ID})^2 \quad (2)$$



(a) Differential mode



(b) Absolute mode

Fig. 8 Fill factor response with variation of frequency at differential and absolute mode

정상 튜브의 결함 신호를 10 volts로 설정하였고 차동 및 절대형 모드에서 각 주파수별로 측정하였다. 충전율 계수 측정 시험을 위해 정상 튜브 내경보다 크게 가공한 두 가지 내경의 시편에 결함을 가공하였다. Fig. 8에 KEPRI와 외국산 탐촉자의 주파수에 따른 차동형 및 절대형 모드에서 충전율 변화에 대한 결함신호의 진폭을 나타냈다. 이 그림에서 차동형 모드의 충전율 변화에 따른 진폭의 변화는 KEPRI 탐촉자에서 영향을 작게 나타났으며, 절대형 모드는 거의 일치하였다.

충전율계수(FFC)는 아래 Table 5에 나타냈듯이 3 가지 다른 범위에 대하여 충전율을 계산하였다.

Table 6에 충전율계수 평가를 위한 충전율 범위를 나타냈다.

Table 5 Fill factor calculations

Tube ID(mm)	Probe OD(mm)	Probe Fill Factor
16.92	15.5	0.86
17.1	15.5	0.82
17.3	15.5	0.80

Table 6 Fill factor ranges

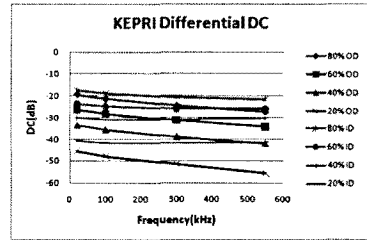
충전율 범위	Tube ID 범위	Fill Factor 범위
범위 1	16.92~17.1	0.86~0.82
범위 2	17.1~17.3	0.82~0.80
범위 3	16.92~17.3	0.86~0.80

충전율계수는 두 개의 다른 충전율에서 측정된 결합 진폭을 비교하여 데시벨로 명시하였다. Fig. 9 에 두 가지 탐촉자의 차동형 및 절대형 모드의 충전율계수를 비교하는 그래프를 나타냈다. 두 가지 형태의 탐촉자에 대한 충전율계수 측정결과 차동형 모드에서 0.86~0.80 범위 충전율계수에 약간의 차이가 발생하였으나 그 외의 데이터는 모두 일치하였다. 증기발생기 전열관의 확관영역에서 충전율의 변화가 발생하지만 이러한 근소한 차이는 확관영역에 발생한 결합의 검출에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

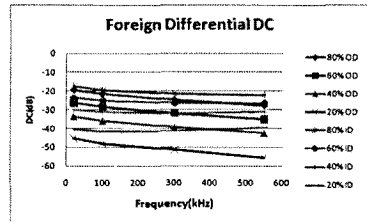
3.3.3. 깊이계수(Depth Coefficient) 측정 결과

깊이계수(DC) 측정은 결합깊이의 변화에 따른 와전류 신호 응답의 변화를 측정하는 시험이다. 시험에 사용된 시편은 30 mm 길이의 축방향 노치를 100%, 80%, 60%, 40%, 20%의 내경 및 외경에 가공하여 수행하였다. 차동형과 절대형 모드 및 적용 주파수에 대한 내경 및 외경 결합의 깊이를 진폭으로 측정하여 비교하였다. 깊이계수 값은 100% 관통 노치를 10 volts로 설정하여 데시벨로 계산하였다. Fig. 10에 두 가지 탐촉자의 차동형 모드에 대한 깊이계수에 대한 그래프를 나타냈고, Fig. 11에 절대형 모드에 대한 깊이 계수의 그래프를 나타냈다. 두 가지 탐촉자의 깊이계수 측정결과 차동형

및 절대형 모드 모두 차이가 없이 일치하였다. 증기발생기 전열관 와전류검사시 체적형 결합(마모 등)의 크기 평가시 결합 크기를 진폭을 기준으로 평가하므로 깊이계수는 중요한 인자라고 판단되며, 양 사의 결과가 거의 동등하게 나타났으므로 현장 적용시 결과는 동일하게 나타날 것으로 판단된다.

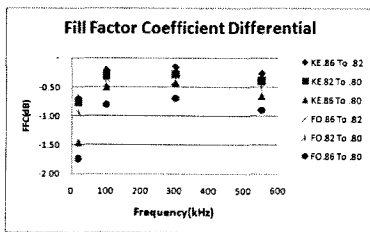


(a) KEPRI

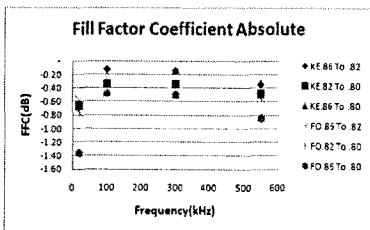


(b) Foreign

Fig. 10 Depth coefficient for differential mode of a KEPRI and a foreign probe for OD and ID flaws

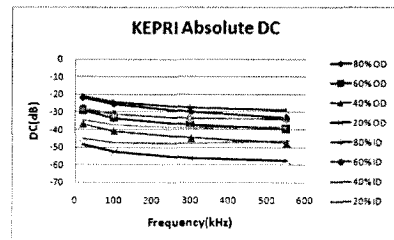


(a) Differential mode

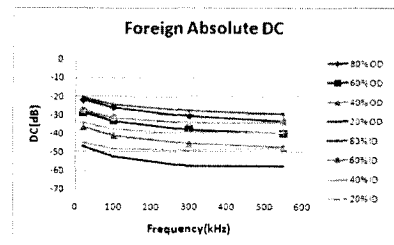


(b) Absolute mode

Fig. 9 Fill factor coefficient vs. frequency of a KEPRI and a foreign probe at differential absolute mode



(a) KEPRI

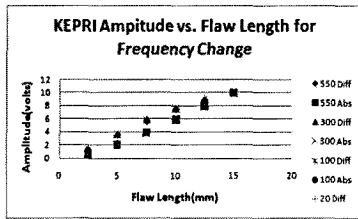


(b) Foreign

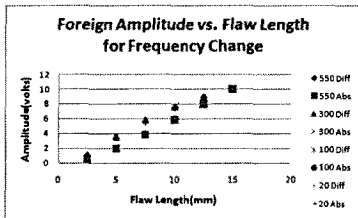
Fig. 11 Depth coefficient for absolute mode of a KEPRI and a foreign probe for OD and ID flaws

3.3.4. 축방향 길이계수(Axial Length Coefficient) 측정 결과

축방향 길이계수는 결함길이에 따른 진폭의 변화를 측정하기 위하여 수행하였다. 시험 시편은 100% 관통 축방향 노치를 길이방향으로 2.5 mm씩 증가시켜 6개 결함을 가공하여 시험을 수행하였다. Fig. 12에 두 가지 탐촉자의 주파수 및 모드에 대

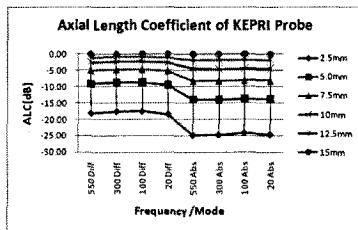


(a) KEPRI

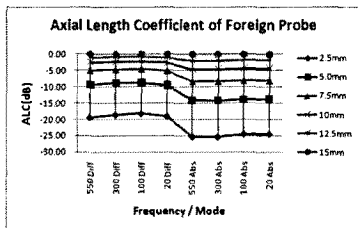


(b) Foreign

Fig. 12 Amplitude response for flaw length changes of a KEPRI and a foreign probe for frequency and mode



(a) KEPRI



(b) Foreign

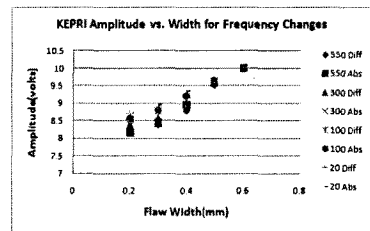
Fig. 13 Axial length coefficient of a KEPRI and a foreign probe for frequency and mode

한 결함길이에 따른 진폭의 크기를 그래프로 나타냈다. 시험결과 두 가지 탐촉자의 특성이 거의 동일하게 측정되었다.

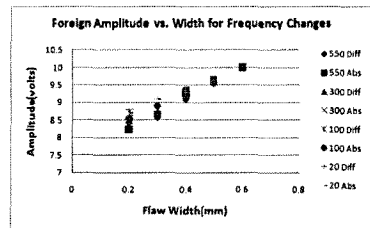
Fig. 13은 두 가지 탐촉자의 결함길이별 주파수 및 모드에 따른 축방향 길이계수를 나타냈다. 본 측정도 다른 계수처럼 가장 큰 진폭에 대한 데시벨의 단위로 축방향 길이계수를 분석하였다. 분석결과 두 가지 탐촉자의 축방향 길이계수는 거의 동일한 결과를 나타냈다. 축방향 길이가 다른 결함들의 평가에서 와전류 이론에 따라 결함 체적의 크기는 결함 진폭의 크기로 나타내므로 코일간 임피던스가 일치하면 차이가 발생하지 않을 것으로 판단된다.

3.3.5. 횡방향 폭계수(Transverse Width Coefficient) 측정 결과

횡방향 폭계수(TWC)는 결함폭의 변화에 따른 와전류응답의 영향을 측정하기 위하여 수행하였다. 시험 시편은 100% 관통 5 mm 길이의 노치를 횡방향으로 0.1 mm씩 증가시켜 5개의 결함을 가공하여 수행하였다. Fig. 14는 두 가지 탐촉자의 여러 주파수 및 모드에서 결함폭의 변화에 따른 진폭의 크기를 그래프로 나타냈다. 본 측정시험 결과 0.3 mm 와 0.4 mm 폭의 신호에서 근소한 차이가 나타났지만 신호취득시 발생한 차이로 판단된다.



(a) KEPRI



(b) Foreign

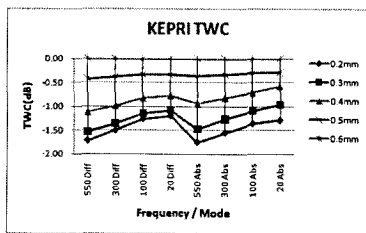
Fig. 14 Amplitude response for flaw width changes of a KEPRI and a foreign probe for frequency and mode

횡방향 폭계수는 최대 응답신호(0.6 mm 폭 결합)의 진폭으로 데시벨 변환하여 계산하였다. Fig. 15는 각 주파수 및 운전모드에서 두 가지 탐촉자의 횡방향 폭계수를 나타냈다. 그림에 나타난 것처럼 국산화 탐촉자의 TWC 값이 다소 낮은 경향을 보였다. 이러한 차이는 0.3 mm와 0.4 mm 사이의 근소한 신호 차이에 의해 발생하였지만 신호평가 오차의 범주에서 벗어나지 않는다고 판단된다.

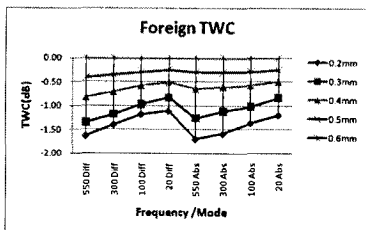
3.3.6. 위상각 대 깊이곡선(Phase-to-Depth Curve) 측정 결과

위상각 대 깊이곡선(PDC)은 결합 깊이에 따른 와전류신호 위상각의 연관성을 측정한다. 본 시험에 사용된 시편은 깊이계수 측정에 사용된 시편을 사용하여 수행하였다. 100% 노치의 위상각을 40°로 설정하여 정규화하여 각 결합별로 위상각을 측정하였다[4]. Fig. 16에 각 주파수 및 모드 변화에 대한 위상각 대 결합 깊이 그래프를 나타냈다.

위상각 대 깊이곡선 값은 두 개의 근접 결합 깊이 사이의 위상각 차이로 계산하였다. Fig. 17에 국산화 탐촉자의 차동형 및 절대형 모드에서 주파수에 따른 위상각 대 깊이곡선을 나타냈고, Fig. 18에 외국산 탐촉자의 차동형 및 절대형 모드에서 주파수에 따른 위상각 대 깊이곡선을 나타냈다.



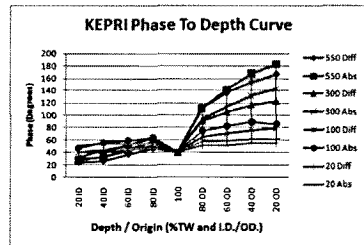
(a) KEPRI



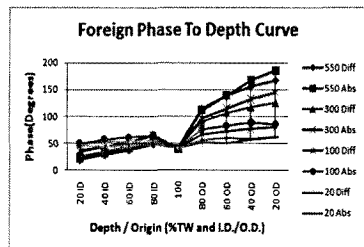
(b) Foreign

Fig. 15 Transverse width coefficient of a KEPRI and a foreign probe for frequency and mode

측정 결과 두 가지 탐촉자의 특성이 본 시험에서도 거의 차이가 없음을 알 수 있었다. 본 위상각 대 깊이 커브 측정은 현장 검사이 결합 깊이 평가의 가장 중요한 기능으로서 작용되므로 정확도가 높게 나타나야 한다고 생각한다. 본 측정 결과를 고려할 때 두 가지 탐촉자의 위상각 결합 평가시 평가결과는 동일한 결과가 나타날 것으로 판단된다.

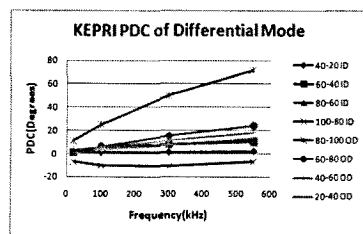


(a) KEPRI

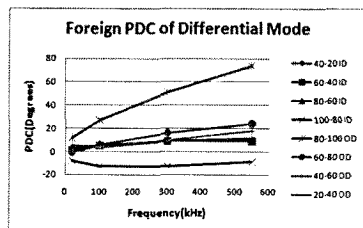


(b) Foreign

Fig. 16 Phase vs. depth curve of a KEPRI and a foreign probe for frequency and mode



(a) KEPRI

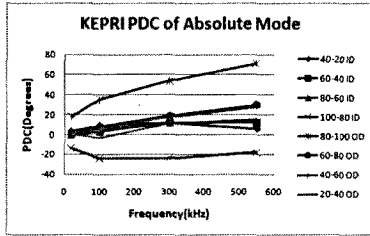


(b) Foreign

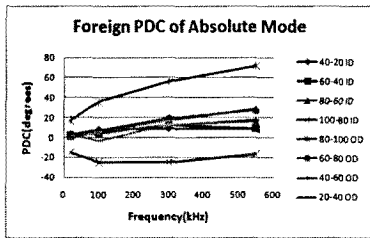
Fig. 17 Phase to depth curve of a KEPRI and a foreign probe at differential mode

3.3.7. 직류포화세기(Direct Current Saturation Strength) 측정

직류포화세기는 시험체에 자기변화를 억제하기 위하여 사용된 코일 혹은 영구자석의 자장세기를

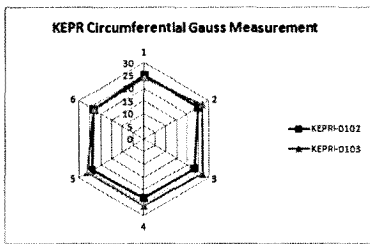


(a) KEPRI

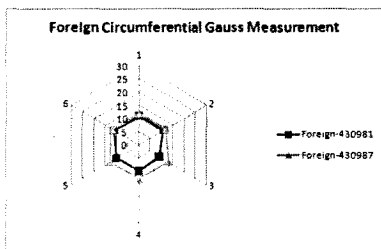


(b) Foreign

Fig. 18 Phase to depth curve of a KEPRI and a foreign probe at absolute mode



(a) KEPRI



(b) Foreign

Fig. 19 Circumferential direct current saturation strength plot of KEPRI and foreign probes

측정하여 나타내며, 일반적으로 자기편향이라고 말한다. 자기편향은 시험체를 포화하기에 충분한 수준이 되어야한다. 측정된 양 사의 탐촉자는 자기편향을 위하여 코일의 양측면에 영구자석을 설치하였다. 국내 원전 증기발생기 튜브의 재질은 인코넬 600, 690 혹은 인콜로이 800으로 설치되었으며, 제작시 혹은 운전중에 재질의 변화에 의해서 투자율변화가 편중되어 발생할 수 있다. 이러한 투자율 신호는 결합신호와 유사하게 나타나므로 코일 양 측면에 원형으로 가공한 영구자석을 설치한다. 이 시험의 목적은 자기편향자장이 일정한 정도와 세기를 측정하기 위함이다. 측정은 보빈코일의 원주방향으로 가우스미터의 탐촉자를 고정 설치하고 보빈코일을 원주방향으로 60°씩 회전하면서 6개 포인트를 수행하였다. Fig. 19에 양 사 보빈탐촉자의 원주방향 직류포화세기에 대한 그래프를 나타냈다. 측정결과 측정에 사용된 2개의 탐촉자가 양사 모두 거의 동일하게 측정되었지만, 외국사 탐촉자보다 KEPRI 탐촉자의 자장세기가 약 2배정도 높게 나타났다.

4. 결론

본 논문은 원자력발전소 증기발생기 전열관 와전류검사용 국산화 개발 보빈탐촉자의 특성 검증 결과를 기술하였으며, 국내 증기발생기 관리프로그램 통합지침서 및 미국 전력연구원의 가압경수로 증기발생기 전열관 검사 지침서에서 제시한 기준에 따른 시험을 수행한 결과는 다음과 같다.

KEPRI 설계 보빈탐촉자의 특성검증 시험 결과 전반적으로 미국 전력연구원에 의해 특성이 인정된 외국사 보빈탐촉자와 거의 동등한 결과를 나타냈다.

임피던스 및 공명주파수의 근소한 차이는 현장 검사시 표준시험편의 와전류신호 보정으로 실제 와전류 신호 응답 결과에 전혀 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 충전율계수 시험에서 KEPRI 탐촉자가 충전율 변화에 신호의 진폭이 적게 영향을 나타냈다. 이러한 현상은 KEPRI 탐촉자의 임피던스가 약간 크게 설계되어 차이가 발생한 것으로 판단된다. 깊이계수, 축방향 길이계수, 횡방향 폭계수 및 위상각 대 깊이계수는 거의 차이가 없이 동일한 결과를 나타냈다. 직류포화세기 측정결과 측정에 사용된 2개의 탐촉자가 양사 모두 거의 동일하게 측정되었지만, 외국사 탐촉자보다 KEPRI 탐촉자의

자장세기가 약 2배정도 높게 나타났다.

본 연구 결과 두 종류의 탐촉자 특성이 거의 동등하게 나타났으며, 현장 적용을 위한 기반을 구축한 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] ASNT, Nondestructive Testing Handbook, Vol. 4, Part 4, pp. 62 (1986)
- [2] 증기발생기 관리프로그램 통합지침서, 한국수력 원자력(주) (2009)
- [3] EPRI, Pressurized Water Reactor Steam Generator Examination Guidelines: Revision 7, pp H1-15 (2007)
- [4] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. V, Article 8, pp. 165-169 (1995)