

## 원전 증기발생기 세관 검사를 위한

## 와전류 탐상 프로브의 현황 및 전망

### Present Condition and View of Eddy Current Testing Probe for Nuclear Power Plant Steam Generator Tube Examination

김 지 호\*, 이 향 범

(Ji-Ho Kim and Hyang-Beom Lee)

**Abstract:** In the examination of Steam Generator (SG) tube in Nuclear Power Plant (NPP) Eddy Current Testing (ECT) probes play an important role in detecting the defects. Bobbin probe and Rotating Pancake Coil (RPC) probe is usually used for the inspection of SG tube. Bobbin probe is good at high speed inspection, but ability of detection of circumferential defect is very weak. On the contrary RPC probe, which moves for inspection in the direction of axial and circumferential simultaneously, has very slow inspection speed, but it was excellent detection capability for small cracks, which is hardly detected by bobbin probe. Many examinations of SG tube examination of NPP are achieved during short period. Therefore, solution about this must develop probe of new form for examination performance and examination time shortening of other probe. In this paper, analyzed technological present condition of Bobbin probe and RPC probe been using in Nondestructive Testing (NDT) for SG tube defect detection and Appeared about background theory and view of developed probe newly.

**Keywords:** Nuclear Power Plant, Steam generator, Bobbin Probe, Rotating Pancake Probe, Array Probe, Eddy Current Testing,

#### I. 서론

원자력발전소의 원전 증기발생기(SG: Steam Generator) 세관은 1차 측과 2차 측의 압력 경계를 이루는 기기로서, 결함이 발생하여 성장할 경우 방사성 물질이 포함되어 있는 1차 측의 냉각수가 누설되는 사고로 이어지기 때문에 원전의 안전성과 경제성에 매우 큰 영향을 미치는 핵심 기기 중의 하나이다. 국내에는 총 20기의 원자력발전소가 있으며, 여기에 증기발생기는 총 50기가 있다. 이 중 절반 이상이 10년 이상 운전된 상태이므로 증기발생기의 수요 증가와 함께 노후화가 계속 진행되어 있어 증기발생기 세관의 결함 발생 가능성이 점증되고 있는 실정이다. [1]

원전 증기발생기 세관에 발생하는 결함의 검출과 크기 산정을 위해 현재 와전류탐상시험(ECT: Eddy Current Testing)이 가동 전 점검(PSI: Pre-Service Inspection), 가동 중 점검(ISI: In-Service Inspection)에 적용되고 있다. [2] 와전류탐상시험은 센서가 피검사체에 직접 접촉을 하지 않아도 검사체의 정보를 줄 수 있기 때문에 빠른 검사속도와 다른 검사기법에 비해 간략한 구조를 이루고 있다.

현재 원전 증기발생기 세관의 결함 검출을 위해 보빈프로브(Bobbin Probe)와 RPC(Rotating Pancake Coil) 프로브를 사용한 와전류탐상시험이 널리 사용되고 있다. 2002년 울진 4호기의 세관 파단 사고 이후, 증기발생기 세관 검사용량을 보빈프로브의 경우 50~100% 검사에서 100% 검사로 증가시켰으며, RPC프로브의 경우 관 상판 3"에서 5"까지로 검사영역

을 확대하였다. 이러한 결정으로 인하여 정해진 기간에 수행하여야 할 검사물량이 대폭 증대되었으며, 이를 해결할 수 있는 방안은 검사기간 확대 또는 다른 검사방법을 채용하는 것이다. 기술적으로 다른 프로브의 검사 성능 및 검사 시간을 단축하기 위하여 미국, 일본, 캐나다 등은 새로운 형태의 프로브를 개발하고 있다. 현재 전 세계적으로 T/R (Transmit/Receive)방식의 배열와전류프로브들이 개발되기 시작하였으며, 빠른 검사속도와 정밀검사로 증기발생기 세관 검사에서는 배열와전류프로브로 대체될 것으로 예상된다.

아직까지 전 세계적으로 보빈프로브 및 RPC프로브를 주로 사용하고 있다. 더구나 미국에서도 2000년 4월 APS사의 Palo Verde 원전에서 처음으로 배열와전류프로브에 대한 실증실험을 실시하였을 정도의 신기술이다. 이에 본 논문에서는 현재 사용되고 있는 보빈프로브 및 RPC 프로브의 사용 특성 및 현황을 분석하고 나아가 배열와전류프로브의 특성이론 및 앞으로의 전망에 대하여 기술하였다.

#### II. 와전류 탐상 프로브

와전류 탐상 프로브는 증기발생기 세관에 와전류를 발생시키고 재료의 물리적 특성에 의한 전류 흐름의 변화를 감지하는 역할을 한다.

증기발생기 세관 검사에 사용되는 탐촉자의 종류는 보빈형, non-surface riding pancake형, axial/circumferential coil형, surface riding pancake형, plus point coil형, array coil형 등이 있고, 모두 내삽형이다. 다양한 종류의 프로브가 필요한 것은 결함의 종류와 검사 부위의 다양성에 부합해야 하기 때문이다. 표 1에 증기발생기 검사에 적용되는 각 탐촉자의 사양, 용도와 형태를 나타내었다.

김지호, 이향범: 숭실대학교 전기공학부

(magnetic1@ssu.ac.kr, hyang@ssu.ac.kr)

※ 본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-073) 주관으로 수행된 과제임.

1. 보빈프로브 (Bobbin Probe)

그림 1에서 보여지는 보빈 프로브는 가장 보편적으로 사용되며, 세관 전체 또는 부분의 길이를 주사한다. 신호수집은 absolute와 differential mode로 동시에 수행된다. 차동 코일 (differential coil)의 경우 동일 시편의 두 부분을 서로 비교하여 와전류 신호에 영향을 주는 여러 인자 중 결함과 같은 불연속적인 변화만을 추출하여 신호로 나타낸다. 또한 투자율 변화를 억제하기 위하여 코일 주변에 영구자석을 부착 (magnetic biased coil)하여 사용하며, 가동 중 검사에서는 처음부터 투자율 변화 신호 억제 탐촉자를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 보빈프로브는 원주방향 균열성 결함을 검출할 수 없고, 세관 형상 변화에 의한 영향을 크게 받으므로 그러한 지역에 결함이 발생하면 검출능력이 저하되는 단점이 있다. 코일의 길이와 깊이는 전열관 두께와 비슷한 1.5mm의 표준형을 사용하고, 결함의 종류에 따라 wide groove 또는 narrow groove코일을 사용할 수 있으나 국내에서는 사용된 경험이 없다.

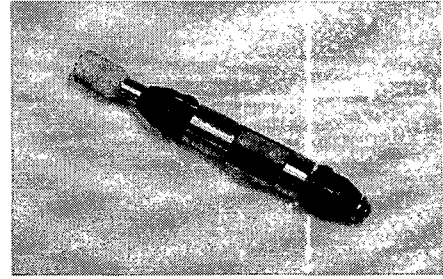


그림 2 +Point RPC 프로브  
Fig. 1. +Point RPC Probe

표 1 증기발생기 검사에 적용되는 각 프로브의 사양과 용도  
Table.1 Specification and usage of each probe applied in SG examination

종류	동작 모드	검사 부위	코일주파수 주파수	결함기구	CAL. STD	주사속도 (in/sec)	비고
Bobbin	Diff. Abs	전체 길이	MR*	채취결함 Axial SCC	ASME WEAR Thinning	12-24	Mag-bias 극관부검출
Non-surface riding	Abs	지시 부위	MR	형상검사	Dent Expansion	12	직관/극관부 구분사용
Surface riding	Diff. Abs	지시 부위	MR	SCC검출 마모평가	Notch WEAR	12	RPC로 대체
Axial/Circ coil	Abs	확관 천이	MR	SCC	Notch	0.2	SM-15 전용
Plus point 3 coil	Diff. Abs	지시 부위	MR	SCC	Notch	0.2-0.6	Pancake+shielded Pancake+plus 코일
Array coil	Send Receive	전체 길이	MR	오른결함	Array Setup	12-24	R/D tech : X Zetec : I

\*MR: Mid-Range frequency

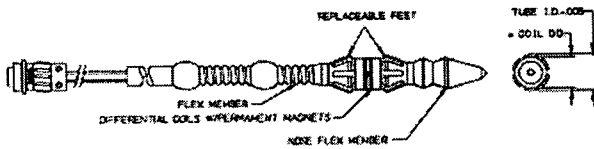


그림 1 보빈(Bobbin) 프로브  
Fig. 1. Bobbin Probe

2. RPC(Rotating Pancake Coil) 프로브

RPC(Rotating Pancake Coil) 프로브는 전진과 회전을 동시에 수행하며 검사하는 탐촉자로, 검사의 용도는 보빈프로브로 검사할 수 없는 작은 균열성 결함이나 들레방향의 결함 위치를 탐지하거나 보빈 검사에서 검출된 신호의 분석 및 확인을 하기 위해 보다 정밀한 평가를 위해 사용된다. RPC 탐촉자는 검사환경과 사용조건에 따라 쓰이는 종류가 다양한데 U-bend용 RPC 프로브, +Point RPC 프로브, 3-Coil RPC 프로브 등 그 종류가 현재 수십 가지로 개발되어 있다. 그림 2에서와 같이 현재 주로 사용되고 있는 탐촉자는 +Point 코일 1개와 Pancake 코일 2개를 포함한 +Point RPC 프로브가 사용되고 있다.

2.1 +Point RPC 프로브의 검사 특징

+Point RPC 프로브의 검사특징은 튜브시트상단(TTS) 확관 부위 검사, Axial 및 Circumferential 균열결함 검출, 지지물 (TSP ; Tube Support Plate)같은 반진동봉에 의한 전열관 마모검출, 잔류 응력부위의 응력부식균열검출, 이물질 검출, 슬리빙 (Sleeving)지역검사, 기하학적 영향 최소화 및 결함 외적인 신호를 최소화하는데 사용되며, 특히 균열성 결함(Crack Indication)과 감육성 결함(Volumetric Indication)을 구분하는데 효과적이다. 또한 RPC의 C-scan 이미지는 미소결함을 3차원적으로 나타낼 수 있어 작업자들로 하여금 결함지시 신호를 보다 뚜렷이 확인할 수 있게 해 준다.

2.2 +Point RPC 프로브의 제원

+Point RPC 프로브에는 모두 3개의 코일이 존재하는데, Probe head의 동일 원주상에 코일이 120° 간격으로 위치해 있으며, Pancake coil(#1 primary pancake coil, #3 high frequency shielded pancake coil) 2종류와 +point coil로 구성되어 있다. 이 각각의 코일은 특정 주파수 대역을 가지고 관의 내부를 고속으로 회전하며 검사한다.

그림 3은 각 코일의 주파수 특성을 나타내고 있다. 코일마다 사용되는 주파수 대역은 서로 다르지만 전체적으로 볼 때 10kHz~800kHz 정도이며, 현장에서는 주로 20kHz, 100kHz, 300kHz, 400kHz, 700kHz의 주파수를 사용하고 있다. 고주파수는 튜브시트나 이물질을 검사하기 위해 사용되고 저주파수는 구조물의 상태를 확인하기 위해 사용된다.

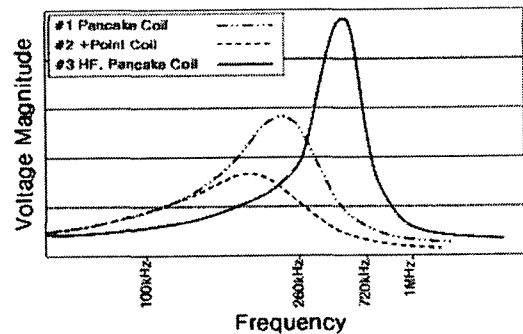


그림 3 각 코일 별 주파수 대역  
Fig. 3. Frequency range of each coil

### 2.3 +Point RPC Coil의 특성

RPC프로브는 하나의 Probe head에 3개의 독립적인 코일을 가지고 있고 전진과 회전을 동시에 하며 검사를 한다. 그러므로 프로브가 관내를 한번 회전하여 검사하면 3개의 데이터를 획득할 수 있고 각 코일 당 보통 3~4개의 주파수(20kHz~700kHz)를 사용하기 때문에 실질적으로 한번의 증기발생기 세관 검사를 수행하면 10개의 채널 이상의 데이터를 획득할 수 있게 된다. 이는 신호평가 시 반지름이 있는 복합구조물 지역이나 튜브시트와 같은 지역에서 형성된 복잡한 신호의 경우 주파수나 프로브에 따라 다양한 위상각과 진폭의 크기를 이용할 수 있고 프로브 회전에 의한 C-scan 이미지의 풍부한 정보에 의해 보다 쉽고 효율적인 결함 판정을 가능하게 해 준다.

#### 2.3.1 Primary Pancake Coil

그림 4는 Primary Pancake Coil의 작동특성을 나타내고 있다. Primary Pancake Coil은 도넛 모양의 코일 형상을 하고 있고 시편과 평행하게 위치하고 있다. 따라서 코일과 평행한 원형의 와전류가 시편에 형성된다. 그렇게 때문에 Primary Pancake Coil은 튜브축에 수직이거나 수평인 결함에 좋은 감도를 나타낼 뿐만 아니라 관내의 체적성 결함에 대해 효과적으로 검출하고 결함의 형상을 결정짓기 위해 사용되기도 한다. 특히 결함을 포함한 주변의 모든 신호에 대해 우선적으로 반응하여 결함 존재여부를 판단할 수 있도록 해준다.

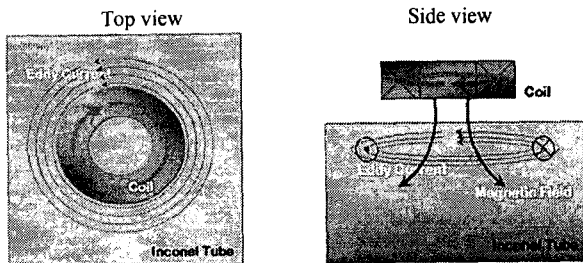
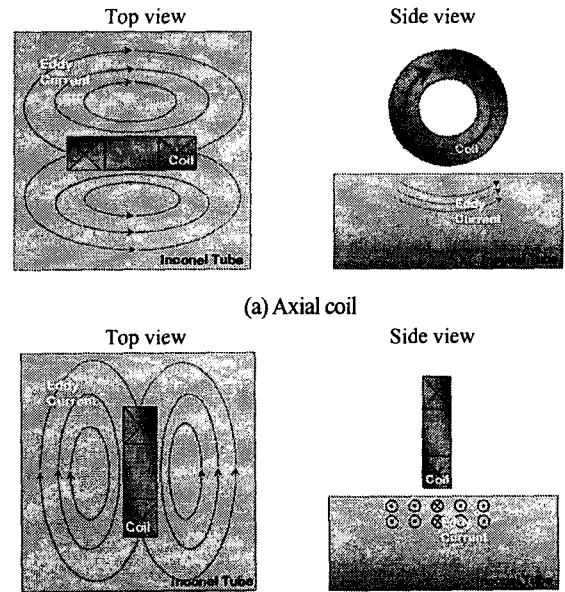


그림 4 Primary Pancake Coil의 동작 특성  
Fig. 4. Operating characteristics of a primary pancake coil

#### 2.3.2 +Point Coil

+point Coil은 증기발생기 세관의 결함 검사에서 +point RPC 프로브의 코일 중 가장 주된 역할을 한다. 그림 5 (a)에 나타난 축방향 코일은 관의 종축을 따라 와전류를 발생시켜 원주 방향으로 형성된 결함에 민감하며, 그림 5 (b)에 나타난 원주 방향 코일은 관의 원주주위로 와전류를 발생시켜 축방향으로 형성된 결함에 대해 민감하도록 제작되었다. 이 두 코일의 장점을 모두 살린 +point coil은 종축과 횡축 와전류 신호의 선형적인 차를 이용하여 와전류 방향에 대한 결함 민감도를 극대화하였다. 또한 신호의 차에 의해 관의 형상변화, lift-off 및 sludge 신호 등 결함 위적인 신호를 최소화할 수 있고 균열성 결함과 관의 손상에 대한 검출에 탁월한 성능을 발휘하고 있다.



(a) Axial coil

(b) Circumferential coil

그림 5 +Point Coil의 동작특성

Fig. 5. Operating characteristics of a +Point coil

#### 2.3.3 High Frequency Shielded Pancake Coil

그림 6에 나타난 High Frequency Shielded Pancake Coil은 원형코일의 외경에 강자성 금속이 둘러싸여 있어 자기장을 시험편에 접속할 수 있다. 또한 주로 고주파를 사용하므로 시험편 표면에는 고주파의 원형 와전류가 잘 형성되기 때문에 표면 결함을 검출하는데 매우 유리하게 된다. 실제 결함검사 시 주로 보조 수단으로 사용되고 있다.

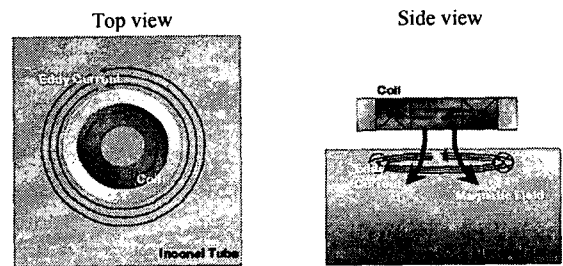


그림 6 High Frequency Shielded Pancake Coil의 동작 특성

Fig. 6. Operating characteristics of a high frequency shielded pancake coil

### 3. 배열와전류프로브 (Array Probe)

2002년 울진 4호기의 세관 파단 사고 이후, 증기발생기관 검사용량을 보빈프로브의 경우 50~100% 검사에서 100%검사로 증가시켰으며, RPC프로브의 경우 관상관 3"에서 5"까지로 검사영역을 확대하였다. 이러한 결정으로 인하여 정해진 기간에 수행하여야 할 검사물량의 대폭 증가로 이를 해결할 수 있는 방안은 검사기간의 확대 또는 새로운 검사방법을 채용하는 것이다. 대부분의 와전류탐상시험의 적용은 임피던스 프로브를 이용하여 이루어지며, 그것은 한계가 있는 것으로 알려져 있다.

기술적으로 다른 프로브의 검사 성능 및 검사 시간을 단축하기 위하여 캐나다, 미국, 일본에서 새로운 형태의 프로브를 개발하고 있다. 캐나다의 경우, 보빈프로브와 RPC프로브를 이용한 검사에도 불구하고 1991년 캐나다의 Bruce원전 2호기에서 원주방향의 ODSCC에 의한 누수 사고가 발생하였다. 이에 캐나다에서는 사고 이후 T/R(Transmit/Receive)방식의 배열와전류프로브들이 개발되기 시작하였으며, 현재 전 세계적으로 Cecco-3, Cecco-4, X-probe, Intelligent probe 등이 개발되었다. 특히 X-probe의 경우 48개의 PC(Pancake Coil)프로브를 가지고 초당 약 0.6인치씩 검사하는 RPC에 비하여 약 40배정도인 초당 20인치이상의 속도로 검사를 수행할 수 있다.

3.1 배열와전류프로브의 특징

Transmit와 Receive coil이 측면으로 놓여있는 T/R 와전류 프로브는 임피던스 프로브에 비하여 많은 유용한 점을 나타낸다. 임피던스 프로브와 비교하여 다양한 lift-off의 존재에서 신호 대 잡음비를 향상시켰다. 방향성의 특성이 있으며, 표면 결함에 대하여 우수한 위상 식별 능력을 소유하고 있고 circumferential이나 axial crack 방향에 대하여 프로브 최적화를 가능하게 하였다. 강자성체와 비자성체의 용접부뿐만 아니라 열교환기 튜브의 균열 sizing 및 신뢰할 수 있는 검출능을 가능하게 하여 와전류 시험의 영역을 증가시킬 수 있도록 하였다. 이에 보빈프로브와 RPC프로브와 다르게 빠른 검사속도로 검사가 가능하고 정밀검사를 할 수 있으며 한정된 지역이 아닌 전 영역을 검사하는 것이 가능해졌다.

3.2 T/R(Transmit/Receive) 프로브의 작동원리

그림 7은 T/R 프로브의 실제 구조를 나타낸 것이다. Transmit coil은 코일의 근처에 자기장을 발생하는 교류에 의해서 인가된다. 이 자기장은 Faraday의 전자기 유도법칙에 따라 전도체에서 와전류를 유도하고, 권선된 Receive coil에서는 자기밀도를 검출하는데 쓰인다. 일반적으로 와전류 프로브는 "임피던스 프로브"로 일컬어지는 transmitter와 receiver로써 동일한 코일을 이용한다. 왜냐하면, 일정한 전류의 인가에 의한 그 코일들에서 유도된 전압을 모니터링 하는 것은 그 코일 임피던스를 모니터링 하는 것과 일치하기 때문이다. 하지만 T/R 프로브는 transmit coil과 receive coil을 분리시켜 이용한다.

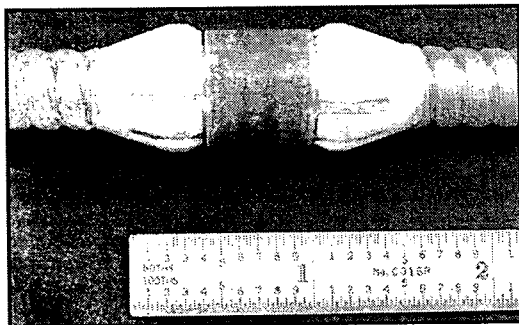


그림 7. T/R 프로브의 구조 및 크기  
Fig. 7. Structure and size of T/R probe

3.2.1 Lift-off response

임피던스 프로브와 비교하여 T/R 프로브의 가장 중요한 장점 중의 하나는 lift-off의 존재 하에서 S/N 비를 10배로 향상시켰다는 점이다. T/R 프로브의 상대적인 lift-off에 대한 둔감도는 Transmit와 receive coils 사이의 국부적인 결함에 의해 발생된 신호는 비슷한 크기로 제작된 impedance pancake coil probe의 진폭과 유사한 진폭을 갖는다. 하지만 transmit와 receive coils 사이의 flux linkage는 10%도 안 된다. 따라서 tube deformation, U-bend transition 혹은 sleeve-to-parent tube gap 변화와 같은 global effects는 단지 10%에 해당한다. 결과로서 T/R 프로브의 S/N비는 임피던스 코일에 비하여 5~10배 정도가 된다.

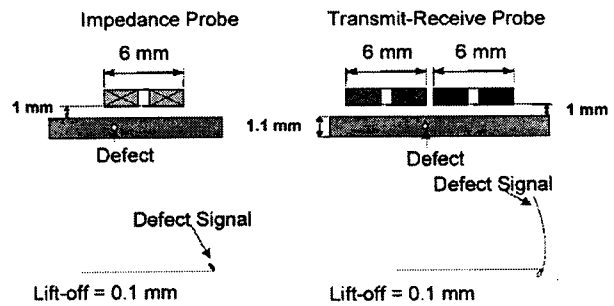


그림 8. lift-off 에 대한 둔감도  
Fig. 8. Lift-off response

3.2.2 T/R 프로브의 방향성 특성

T/R 프로브의 최대 응답은 transmit와 receive coil 사이의 영역에서 유도된 자기장의 변화량에 상응한다. T/R 코일은 결함에 대하여 민감한 방향성의 특성을 보인다. 그림 9는 얇은 튜브 벽의 원주형 결함(circumferential cracks)들을 검출하는데 최적화된 프로브의 응답을 설명한 것으로 Inconel 600 calibration tube에 길이 10mm, 깊이 100%인 electric discharge machined (EDM)으로 가공된 것을 250kHz의 시험주파수를 적용하여 결함방향에 대한 신호 진폭의 결과를 도표화한 것이다.

튜브 축에 대하여 45°로 기울어진 결함에 대한 신호 진폭 값은 원주형 결함의 진폭값의 1/3정도의 값을 나타낸다. 따라서 프로브 설계로 결함 방향에 따라서 최적화시킬 수 있다.

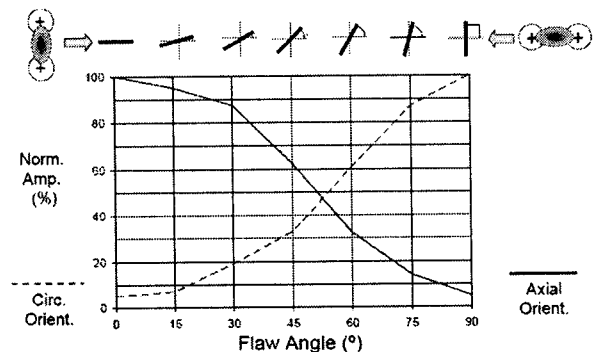


그림 9. T/R 프로브의 방향성 민감도  
Fig. 9. Directional Sensitivity of T/R probe

### III. 결론

다른 에너지원과는 달리 원자력 발전의 경우 사용 가능한 시설을 100% 운전하면서 사용하고 있는 실정이다. 에너지의 특성상 순간적인 부하에 대응하기 어려운 점도 있지만, 반가까이나 되는 에너지를 담당하고 있기에 그 산업적, 경제적 영향은 아주 크다. 이를 위해서 원자력발전의 안정성을 지속적으로 유지할 필요가 있기 때문에 와전류탐상과 같은 안전진단기술이 뒷받침이 필요하다. 원전증기발생기 세관의 경우 다른 부분들과는 달리 와전류탐상이 검사의 주를 이루고 있다. 이에 와전류 탐상 프로브는 증기발생기 세관에 와전류를 발생시키고 재료의 물리적 특성에 의한 전류 흐름의 변화를 통해 결함을 감지하는 역할을 한다.

현재 원자력발전소의 증기발생기 세관 검사의 경우 보빈프로브와 RPC프로브를 주로 사용하고 있다. 하지만 원자력발전소 1기당 10,000개에서 16,000개 정도의 세관을 정해진 기간 동안 정밀검사를 통해 결함을 판별하기에는 미약하다. 이에 고속검사와 정밀검사가 가능한 차세대 배열와전류프로브에 대한 연구가 국내에서도 진행되어야 할 것이다.

보빈프로브 및 RPC프로브의 경우에는 현장에서 사용되고 있기 때문에 상당한 기술력을 보유하고 있지만, 배열와전류프로브의 경우 아직 사용하고 있지 않으며, 탐상장비도 국내에 거의 없기 때문에 배열와전류프로브의 탐상신호에 대한 분석과 신호취득 등에 대한 연구와 실제 데이터와 비교할 수 있는 3차원 수치해석기법의 개발 등의 지속적인 연구가 필요하다. 이는 새로운 기술의 신뢰도를 증가시키고 순수한 국내 기술을 개발함에 따라 기술중속을 탈피할 수 있는 기반을 만들 것이다.

### 참고문헌

- [1] 원전 증기발생기의 안전규제 기술 보고서, KINS
- [2] 원전안전 규제 현황 (관리자 과정 교육), 간부(관리자) 과정 교육
- [3] 원전 증기발생기 지능형 ECT 신호 분석 시스템 개발, 산업자원부
- [4] 특수 와전류 검사 기술 현황, 한국원자력연구소
- [5] 증기발생기 전열관 기술 현황 분석보고서, 증기발생기 연구협의회 한국원자력안전기술원, 2004
- [6] Toshiyuki Takagi, Haoyu Huang, Hiroyuki Fukutomi and Junji Tani, "Numerical Evaluation of Correlation between Crack Size and Eddy Current Testing Signal by a Very Fast Simulator" *IEEE Transaction on Magnetism*, vol. 34, no. 5, pp. 2581-2584, September., 1998.
- [7] Charles J. Hellier, HANDBOOK OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION, McGraw-HILL, Ch 8, 8.1~8.70
- [8] Automated Analysis of Array Probe Eddy Current Data, EPRI, December 2003

### Biography



#### 김지호

2004년 숭실대학교 전기공학부 졸업.  
 2006년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사)  
 2006년~숭실대학교 대학원 전기공학과 재학 (박사과정)  
 <관심분야> 전기기기, 비파괴검사  
 <E-mail> magnetic1@ssu.ac.kr



#### 이향빈

1989년 서울대학교 전기공학과 졸업.  
 1991년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사)  
 1995년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사)  
 1995년 기초전력공학공동연구소 선임연구원  
 1998년~현재 숭실대학교 전기공학부 교수  
 <관심분야> 전기기기, 비파괴검사, 전자장 수치해석 및 설계, 전자기 센서 설계 및 개발  
 <E-mail> hyang@ssu.ac.kr