

SG전열관 2차측 이물질 검출 및 특성분석을 위한 ETSS 개발

신기석[†] · 문용식* · 민경만**

Development of ETSS for the SG Secondary Side Loose Part Signal Detection and Characterization

Ki Seok Shin[†], Yong Sig Moon* and Kyong Mahn Min**

(Received 5 AUG 2011, Accepted 14 AUG 2011)

ABSTRACT

The integrity of the SG(Steam Generator) tubes has been challenged by numerous factors such as flaws, operation, atmosphere, inherently degraded materials, loose parts and even human errors. Of the factors, loose parts(or foreign materials) on the secondary side of the tubes can bring about volumetric defects and even leakage from the primary to the secondary side in a short period of time. More serious concerns about the loose parts are their unknown influx path and rapid growth rate of the defects affected by the loose parts. Therefore it is imperative to detect and characterize the foreign materials and the defects. As a part of the measures for loose part detection, TTS(Top of Tubesheet) MRPC(Motorized Rotating Pancake Coils) ECT has been carried out especially to the restricted high probability area of the loose part. However, in the presence of loose parts in the other areas, wide range loose part detection techniques are required. In this study, loose part standard tube was presented as a way to accurately detect and characterize loose part signals. And the SG tube ECT bobbin coil and MRPC ISI(In-service Inspection) data of domestic OPR-1000 and Westinghouse Model F(W_F) were reviewed and consequently, comprehensive loose part detection technique is derived especially by applying bobbin coil signals

Key Words : Steam Generator(증기발생기), Eddy Current Testing(와전류검사), Loose Part(이물질), Bobbin Coils(보빈 탐촉자), MRPC(회전형 탐촉자), ETSS(검사기술시방서)

1. 서 론

원자력발전소 1차 계통설비 중 증기발생기(Steam Generator, SG) 전열관은 1차측 및 2차측 냉각재의 장벽역할을 하며 이의 구조적 건전성은 원전의 안전성 및 효율적인 발전용량을 유지하는데 있어 매우 핵심적인 요소가 된다. SG 전열관의 건전성에 영향을 미치는 요소는 SG 운전조건, 전열관 재료특성, 잠재된

결함발생 요인 및 기타 인적 실수 등 여러 가지를 들 수 있다. 이 중 2차측으로 유입되는 이물질은 유입경로를 사전에 완벽히 차단하기 어려울 뿐 아니라 유입된 경우 운전 중 전열관 외면에 전열관과 이물질 간 상호마찰 및 진동에 의해 마모결함을 발생시킬 수 있으며 이 경우 정상적인 구조물과 전열관 간의 마모결함 성장률 보다 상대적으로 높은 경향을 보이게 된다. 특히 미국의 Palo Verde 2호기, Byron, H. B. Robinson 및 Sharon Harris 등의 발전소에서 이물질로 인한 누설 및 전열관 파단 등의 사례¹⁾가 보고되고 있다. 이러한 경향을 반영하여 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서는 2007년 10월에 발행된 “SGMP: PWR SG Examination Guidelines, Rev. 7”을 통해 전열관 2

[†] 책임저자, 회원, 한국수력원자력(주) 중앙연구원

E-mail : shinsks@khnp.co.kr

TEL : (042)870-5624 FAX : (042)870-5639

* 한국수력원자력(주) 중앙연구원

** ㈜유엠아이

차측 이물질의 존재 및 이로 인한 영향 없이 SG 전열관의 성능향상을 유도하고 있으며 구체적으로 이물질 신호검출 가능지역에 대한 샘플링과 Buffer Zone 등의 설정을 요건으로 제시²⁾하고 있다. 본 연구에서는 새로운 교과부고시 제 2009-37호, “원자로 시설의 가동중검사에 관한 규정” 및 “증기발생기 관리프로그램(SGMP) 통합지침서, Rev. 1”을 적용하여 검사범위를 선정함에 있어 이물질 유입가능 지역 전열관의 자유단(Free Span) 및 관지지 구조물 위치의 예측치 못한 이물질 유입감시와 아울러 이물질에 의한 전열관 손상가능성을 진단하기 위해 보빈코일 및 회전형탐촉자를 적용한 이물질신호검출 검사기술시방서(Examination Technique Specification Sheet, ETSS) 개발의 기초자료를 제시하였다.

2. 실험방법

SG 전열관 2차측 이물질 추정신호인 PLP(Possible Loose Part) 및 이로 인한 전열관 마모지시인 LPI(Loose Part Indication) 등의 신호특성을 이해하기 위해 국내 가동원전 모델 중 가장 많은 부분을 차지하고 있는 한국표준형 원전(OPR-1000) 및 웨스팅하우스 모델(W_F) SG 전열관의 ECT 검사데이터 중 과거에 이물질 또는 이와 유사한 신호가 검출된 전열관을 선정하여 신호를 검토하였다. 그리고 신호검증과 표준화된 이물질 신호검출 및 재질분류를 위해 이물질의 신호특성을 잘 묘사할 수 있는 정량화된 이물질을 전열관 외면에 부착한 형태의 이물질 표준시험관을 제작하였고 이에 대해 신호수집 및 평가를 수행하였다. 신호수집장비는 ZETEC사의 MIZ-80iD를 적용하였다. 이물질 표준시험관의 재질은 OPR-1000로형 SG 전열관과 동일한 Inconel 600 HTMA이며 이물질 시편은 자성 및 비자성체 재질로 나누어 가공하여 전열관 외면에 부착하였다. 비자성체 재질은 구리(Cu), 티타늄(Ti), 304 스테인레스강(304SS)이며 자성체는 탄소강(CS), 430 스테인레스강(430SS) 및 연(Soft)·경(Hard)성 슬러지 등으로 구분하여 재료를 선정하였다. 이 중 경성 슬러지는 현장에서 슬러지 세정결과 얻어진 실제 현장재료이며 연성슬러지는 시중의 산화철 분말을 굳혀서 덩어리형태로 만들었다. 각 이물질 시편은 원형으로 제작되었으며 0.5mm두께와 5mm직경을 가지며 동일원주평면상 90° 간격으로 4개의 동일 시편을 밀접하게 부착시킴으로써 탐촉자 편향으로 인한 신호크기의 변위를 최소화하였다.

다음 Fig. 1은 본 실험에 적용한 이물질 표준시험관을 나타낸 사진이다.

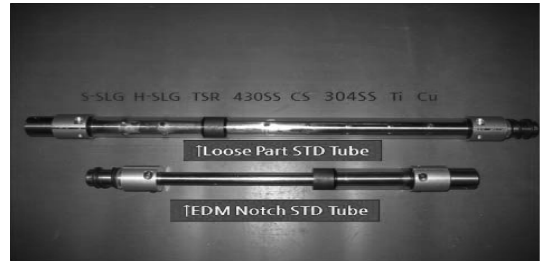


Fig. 1 Loose part & EDM notch STD tubes

3. 결과 및 고찰

국내 가동중인 원전의 운전 중 유입되는 대부분의 이물질은 외곽열지역(Annulus Zone)에 위치한 전열관의 관관상단과 유입된 2차수의 흐름을 원활하게 분배하기 위한 2차수흐름분배관(FDB)위치에서 검출되고 있다. 그리고 본 OPR-1000로형 및 W_F SG 와전류검사 데이터 분석결과에서도 이를 확인하였으며 해당위치의 결합유형의 대부분은 운전 중 전열관과 유입된 이물질간의 상호 마찰 및 진동에 의해 형성되는 마모결함으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 표준화된 이물질 표준시험관의 재료별 데이터 분석결과를 바탕으로 OPR-1000로형 및 W_F SG 전열관 와전류 검사데이터 신호평가를 통해 주요 PLP신호 및 이로 인한 결함신호가 검출되는 관관상단과 FDB위치 보빈 코일 및 MRPC데이터를 검증하였으며 그 결과 모두 5개의 범주로 분류하여 나타내었다.

3.1 재료별(자성/비자성) 임피던스 평면 신호특성

일반적으로 자성재료 및 비자성재료는 실제 ECT 데이터를 통해 신호특성이 확연하게 구분되며 이는 미세구조적으로 각 재료를 구성하고 있는 전자들의 전자기적 특성에서 비롯되는 것으로 알려져 있다³⁾. 다음 Fig. 2는 임피던스 평면상에서 자성 및 비자성재료의 Lift-off(LO) 현상과 전도도 및 주파수변화에 따른 비자성재료의 LO를 나타낸 그림⁴⁾이다. 이를 통해 보편 비자성 재료인 경우 검사주파수가 증가할수록 임피던스 평면상에서 작동점(Operating Point, OP)이 아랫방향으로 향하는 특성을 지님을 알 수 있으며, 이러한 주파수별 자성, 비자성재료의 LO 곡선의 변화는 이를 검출하는 적정 주파수 기준으로 적용된다.

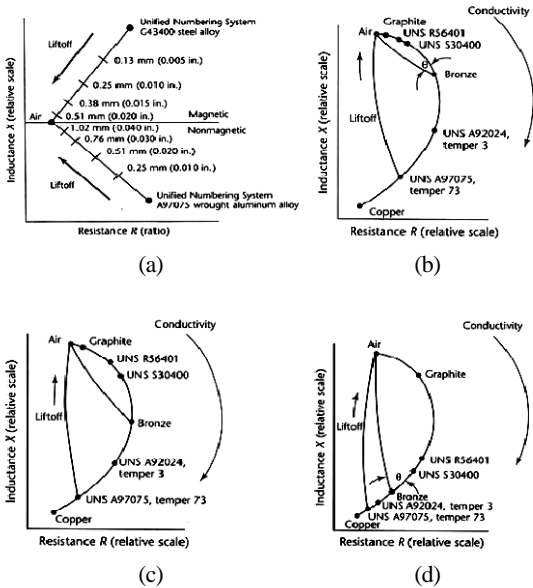


Fig. 2 LO loci of mag. & non-mag. materials (a) and OP variation of non-mag. materials by freq. change (b:20kHz, c:100kHz, d:1MHz)

3.2 이물질 표준시험관 신호특성 고찰

다음 Table 1은 이물질 표준 시험관에 대해 보빈 코일 및 MRPC 별로 신호진폭 및 위상각 등을 측정된 결과이며 검사주파수는 보빈 코일 및 MRPC 각각 실제 검사주파수인 150 및 20kHz 차동채널과 100 및 20kHz 팬케익 코일 신호평가결과로써 분류하여 나타내었다. 그리고 Fig. 3은 재료별로 보빈 코일 및 MRPC의 수직 성분 와전류 스트립 차트를 나타낸 것이다. 측정된 각각의 이물질 신호는 검사대상 전열관 재질 및 이물질 접촉정도, 탐촉자 특성 및 탐촉자와 전열관 간 Coupling 등 다양한 검사조건 및 시험변수에 의해 신호의 진폭 및 위상각 등 시험결과가 달리 나타날 수 있으며⁹⁾, 이를 기준으로 실제 현장검사에 표준화된 이물질 표준 시험관을 적용하여 이물질 신호를 분석, 평가함으로써 신호평가자의 경험에 의존한 신호평가를 지양하고 일관된 이물질 관련 신호평가결과를 도출할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3의 각 검사코일 신호의 왼쪽차트(a, c) 및 오른쪽 차트(b, d)는 각각 300kHz 및 20kHz 신호를 나타낸 것인데 20kHz의 경우 자성재료는 비자성재료에 비해 비교적 큰 신호진폭을 보여준다. 특히 Table 1의 MRPC 팬케익코일에서 측정된 결과를 보면 주파수 별로 자성재료와 비자성재료 간 약 90°정도의 위상각 차이를

Table 1 Phase angle & amplitude of LP materials by the bobbin coil & MRPC

| Test Coil & Freq. | Bobbin Coil | | MRPC | | |
|-------------------|--------------------|-------|-------------------|-------|-----|
| | Diff. (Freq., kHz) | | Panc (Freq., kHz) | | |
| Loose Part Mat'l | 150 | 20 | 100 | 20 | |
| | Phase Angle (Deg.) | Cu | 293 | 234 | 310 |
| | | Ti | 247 | 193 | 260 |
| | | 304SS | 248 | 177 | 255 |
| | | CS | 183 | 144 | 167 |
| | | 430SS | 182 | 138 | 166 |
| | | S-SLG | 153 | 131 | 150 |
| H-SLG | | 159 | 133 | 152 | |
| Amp. (Voltage) | Cu | 5.87 | 0.71 | 10.43 | |
| | Ti | 1.74 | 0.06 | 2.99 | |
| | 304SS | 1.90 | 0.12 | 2.20 | |
| | CS | 13.73 | 10.01 | 6.01 | |
| | 430SS | 16.56 | 11.15 | 6.78 | |
| | S-SLG | 1.18 | 0.64 | 2.28 | |
| | H-SLG | 4.75 | 2.34 | 4.09 | |

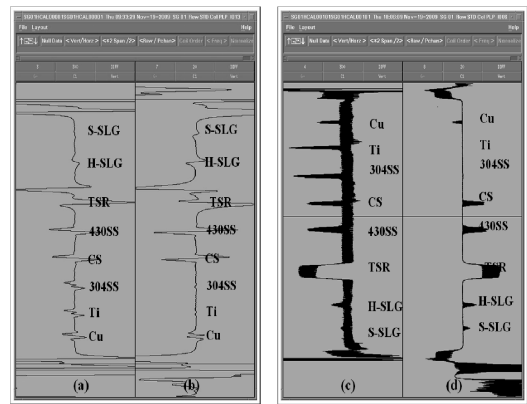


Fig. 3 Strip chart of the LP STD tubes EC signals (a, b: bobbin coil, c, d: MRPC)

나타내었다. 신호진폭의 경우 위에 설명한 바와 같이 비자성 재료의 값이 상대적으로 작게 측정되었으며 Table 1의 실제 값을 비교해 보면 CS는 100 및 20kHz에서 각각 6.01 및 2.00Volts를 나타낸 반면 304SS의 경우 각 주파수에서 2.20 및 0.14Volts로써 감소폭이 자성재료인 CS에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 따라서 비자성 PLP의 적정 검출주파수 대역은 약 100kHz가 적합할 것으로 판단된다. 이러한 신호특성은 보빈 코일에서도 유사한 경향을 나타내었다. 특히 전열관

전장길이에 대한 보빈 코일 데이터를 평가하는데 있어 현재 와전류신호평가 중 CS 재질의 관지모사링 (TSR)을 20kHz 차동채널에서 90°에 설정하는 대신 약 120°에 설정함으로써 스트립차트상에 자성 및 비자성 재료의 PLP 신호의 수직성분이 모두 나타나도록 설정하는 것이 적합할 것으로 사료되며 이를 통해 보빈 코일 데이터 중 자성 및 비자성 이물질 감시채널을 저주파수인 20kHz 차동 채널로 통일함으로써 효율적인 신호평가가 이루어 지도록 유도하였다. 실제 비자성 재료 이물질에 대한 검출능이 우수한 보빈 코일 150kHz는 비자성 이물질 이외에도 전열관 외면 버펄마크신호(MBM), 전열관 근접신호(BOW), 전도도 변화신호(CON) 등 다양한 신호가 복합적으로 검출되는 주파수이므로 보조적으로 비자성 이물질신호의 확인목적으로 적용하는 것이 보다 유용할 것으로 판단된다.

3.3 SG 전열관 이물질신호 분석 및 고찰결과

W_F 및 OPR-1000 모델에 대한 이물질관련 보빈 코일 및 MRPC 데이터를 분석하였으며 분석결과, 이물질재료 및 신호특성 별로 5개의 범주로 분류하였다.

첫 번째 및 두 번째 범주는 각각 SG 전열관 외면에 자성 및 비자성 이물질신호가 있으며 이로 인한 마모결함 등 결함지시가 없는 경우이다. 자성재료의 PLP는 MRPC 검사에서 전열관 외면의 구조물 등을 확인하기 위해 설정된 최저 주파수인 20kHz에서 신호의 위상이 약 90°로써 뚜렷하게 구분되었다. 그러나 비자성 재료의 PLP는 20kHz 대역에서 위상각이 170° 근처이며 신호의 진폭 또한 작게 나타났다. 일반적으로 전열관 2차측에 존재하는 PLP는 이물질과 전열관간 접촉도가 클수록 신호의 진폭이 크게 측정된다. 그러나 재료별로 전열관과 이물질간 접촉정도에 따른 진폭 변화경향은 재료를 보다 명확히 잘 검출할 수 있는 검사주파수에서 이해되어야 한다. 즉 저주파수에서 낮은 비자성 이물질의 신호진폭 값이 전열관과 비자성 이물질간 접촉도가 낮음을 의미하지는 않는다. 한편 이물질이 검출된 위치에 대한 보빈 코일 데이터를 분석한 결과 자성재료 이물질 신호는 저주파수인 20kHz 차동채널에서 이물질로 추정되는 신호를 검출할 수 있었다. 그러나 비자성체인 경우는 150kHz 차동채널에서 PLP검출이 용이하지만 위 3.2항에서 확인한 바와 같이 본 주파수는 다양한 지시가 형성되는 특성이 있으므로 20kHz 차동채널의 위상각을 조정하여 공히

자성 및 비자성 PLP신호검출에 적용하는 것이 보다 효율적일 것으로 판단된다.

세 번째 및 네 번째 범주에 해당되는 신호는 다음 Fig. 4에 나타난 바와 같으며 이는 OPR-1000로형 SG의 FDB에서 검출된 것이다. 이들 범주의 특징은 모두 자성재료 이물질 신호(c, f) 및 이로 인한 마모결함 등의 지시(b, e)가 검출되었지만 세 번째 범주는 20kHz 보빈 차동채널(a)에서 검출이 가능한 경우이며, 네 번째는 같은 자성재료 이물질임에도 불구하고 동일채널(d)에서 검출이 불가능한 경우이다. 이처럼 자성재료 이물질임에도 불구하고 20kHz 차동채널에서 검출이 어려운 이유는 전열관 2차측에 존재하는 이물질이 전열관의 축방향으로 구조물과 밀접하게 접하고 있기 때문이며, 이 경우 보빈코일에 의해 형성되는 전열관 외면의 원주방향 보빈코일 와전류밀도 분포는 이물질과 구조물신호를 독립적으로 나타내는데 제한이 있다. 한편 이물질로 인한 마모결함은 전열관과 이물질간의 접촉면에서 형성되며 대부분 체적성 결함의 형태를 띄는데 이는 균열성 결함과는 달리 지배적인 방향성을 가지지 않으며 결함의 중심부에서 +Point 코일이 위치함으로 인해 Null 포인트가 형성되는 등의 신호 특성을 보여준다.

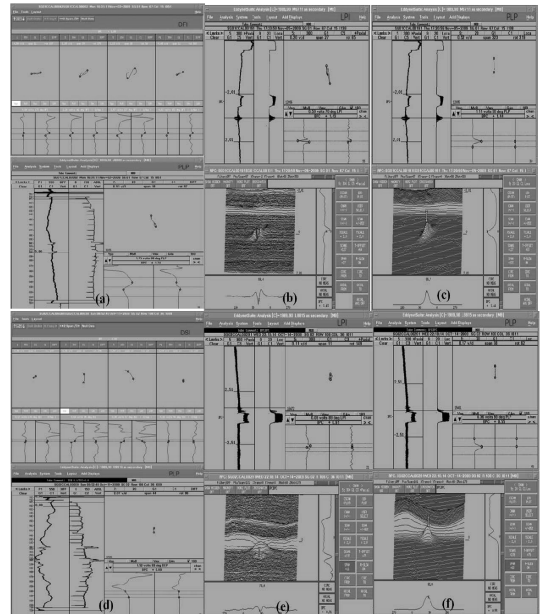


Fig. 4 EC liz signals of ferro magnetic LP materials, containing wear defect (upper: 3rd, lower: 4th cat.)

다섯 번째 범주는 비자성 이물질 재료에 의해서 전열관 외면에 마모결함이 검출된 경우이며 다음 Fig. 5에 나타내었다. 본 범주는 W_F모델의 FDB위치에서 검출된 신호이다. MRPC 검사결과 PLP신호는 20kHz(b)보다는 100kHz(a) 대역에서 이물질 신호의 검출이 용이함으로 인해 자성재료 PLP임을 확인했으며 보빈 코일에서 전열관 외면 지시(c)로 판단되는 신호에 대해서 MRPC 검사를 수행한 결과 이물질로 인한 체적성 마모결함신호(d)로 확인되었다. 한편 Fig. 5(c)에서 알 수 있는 바와 같이 보빈 코일에서 이물질로 인한 전열관 외면 이상지시는 전열관 2차측 구조물을 소거하기 위한 주파수 혼합채널보다는 Mid Range 주파수인 300kHz 차동Raw 채널에서 신호가 명확히 나타났으며 이는 이물질로 인한 마모결함이 검출된 3가지 범주를 통해 확인하였다. 일반적으로 정상적인 2차측 구조물과 접한 위치에서 구조물과 전열관간 마모결함은 주파수 혼합채널에서 신호를 검출하고 그 크기를 기록한다.

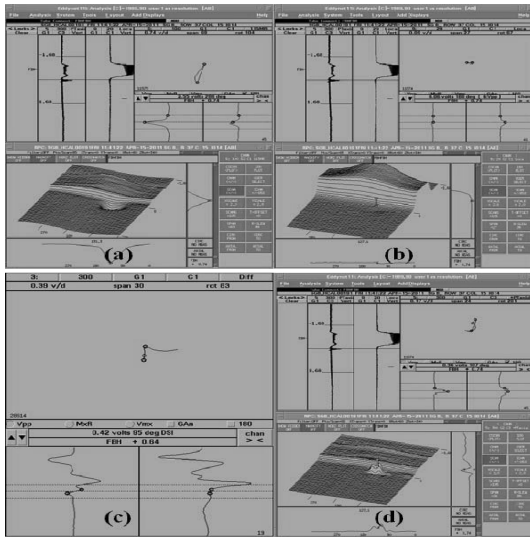


Fig. 5 EC liz signals of non-ferro magnetic LP materials containing wear defect

3.4 이물질 신호검출을 위한 ETSS개발

앞서 나타난 이물질 표준시험관에 제작된 각각의 이물질별 신호특성분석결과 및 W_F, OPR-1000로형 검사데이터를 고찰한 결과 전열관 2차측에 존재하는 이물질의 종류 및 위치에 따라서 보빈 코일 및 MRPC를 적용한 이물질 신호검출에 다소 제한이 있음이 확

인되었으나 현재 적용되고 있는 MRPC를 통한 이물질 감시 및 검출기법은 한계가 있으므로 이를 위해 보조적이고 광범위한 전열관 외면 이물질신호 감시수단으로써 보빈 코일 전장검사 데이터를 적용하기 위한 이물질검출 ETSS 개발을 위해 신호검출 및 기록을 위한 흐름도를 다음 Fig. 6에 제시하였다. 그리고 이에 대해 간단히 요약하면 다음과 같다.

- 1) 이물질 검출가능 지역은 구조물을 포함한 전장 전열관 지역으로 설정한다.
- 2) 스트립차트를 20kHz 차동채널에서 스크리닝한다.
- 3) 신호가 왜곡된 경우 결합신호인지를 300kHz 차동 채널에서 확인하며 결합지시인 경우 평가이력을 확인한다.
- 4) 결합지시가 아닌 경우 PLP를 의심하며 전열관 위치 등을 확인한 후 MRPC 등의 추가검사를 통해 최종 결정한다.
- 5) 신호기록이력 및 데이터 확인결과 과거검출이력이 있는 경우 구조물 및 자유단 각각 DSS 및 DFS로, 당 차수에 신규로 기록되었거나 신호의 크기 등이 변한 경우 DSI 또는 DFI로써 기록한다. 이후 MRPC 검사결과 이물질에 의한 마모결함인 경우 LPI 및 PLP로 기록하고 이물질에 의한 마모결함이 아니고 이물질 신호만 나타날 경우 PLP만 기록한다.

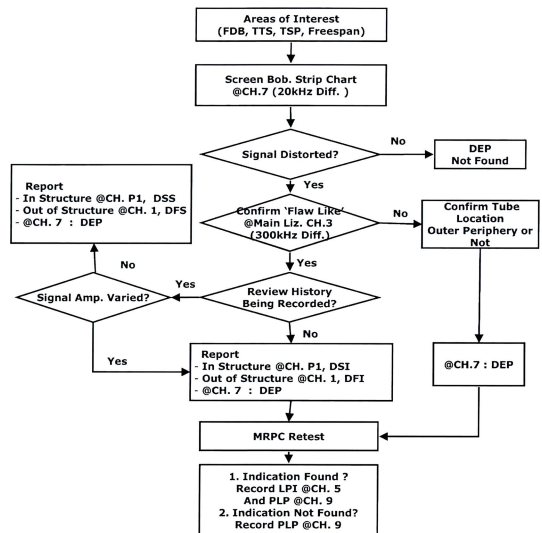


Fig. 6 Flow chart for the EC data analysis of LP detection and characterization

4. 결 론

국내 가동중인 W_F 및 OPR-1000로형 SG 전열관의 2차측 이물질과 이로 인한 결함신호의 검출을 위한 평가기법을 보빈 코일 및 MRPC 데이터를 활용하여 제시하였다.

1. SG 전열관의 건전성에 영향을 미칠 수 있는 2차측 이물질신호 검출과 이물질에 대한 보다 정확한 정보 및 신호특성 파악을 위해 이물질 표준시험관을 제작, 신호분석을 수행하였으며 이를 기반으로 실제 SG 전열관 이물질 신호에 대한 신호특성을 확인할 수 있었다.

2. SG 전열관 외면의 이물질은 재질, 접촉면적, 접촉 거리, 접촉위치 등에 따라 신호검출에 일부 제한을 받으나 전열관 2차측 관관상단 및 FDB위치를 포함한 전열관 전 영역에서 보빈 코일신호를 통해 포괄적으로 이물질 감시 및 결함검출의 스크리닝이 가능함을 확인하였다.

3. 이물질은 자성 및 비자성 재료로 구분할 수 있으며 자성재료인 경우 보빈 코일을 적용하여 저주파수인 20kHz 차동채널에서 검출이 가능하였으나 비자성 재료인 경우 20kHz에서 신호의 진폭이 작고 위상각 또한 수평성분이 지배적으로 나타남으로 인해 이물질 신호의 검출이 다소 용이하지 않음을 확인하였다. 따라서 자성 및 비자성 재료의 PLP 신호 수직성분이 모두 나타나도록 20kHz 차동채널에서 TSR의 위상각을 현행 90°에서 120°로 변경하여 적용하는 것이 필요하며 이를 통해 비자성 이물질에 대한 감시가 저주파수 채널에서 가능할 것으로 판단된다.

4. 전열관과 이물질간의 상호진동 및 마찰로 인한 마모결함 검출을 위한 최적 보빈 코일채널은 전열관 2차측 구조물을 소거하기 위한 주파수 혼합 채널보다 Mid Range 주파수인 300kHz 차동채널이 더 적합함을 본 연구를 통해 확인하였다.

참고문헌

1. Steve Swilley, 2004, "Steam Generators-Year in Review for 2003/2004", Proceedings of 23rd Annual EPRI SG NDE Workshop, EPRI.
2. EPRI, 2007, "SGMP: PWR SG Examination Guidelines: Rev. 7", EPRI, p. v.
3. Hugo L Libby, 1971 "Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods", John Wiley & Sons, Inc., pp. 169-178.
4. ASNT, 2004, "Nondestructive Testing Handbook, 3rd Ed.", pp. 324-325, ASNT Inc.
5. S. Y. Kim, J. A. Park, K. M. Min, H. S. Han, K. S. Shin, 2008, "EC Signal Analysis and Review of Foreign Materials on Inconel Alloy Tubes", Proceedings of KSNT 2008 Annual Fall Conference, pp. 299-306, KSNT.