

2000 추계학술발표대회 논문집  
한국원자력학회

## 영광 3,4호기 울진 3,4호기 증기발생기 전열관 마모 손상에 대한 건전성 평가

## Integrity Assessment on Wear Degradation of YGN 3,4 & UCN 3,4 SG Tubes

김홍덕, 정한섭

한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

### 요 약

영광 3,4호기와 울진 3,4호기 증기발생기 상부지지 구조물에서 발생하는 마모손상 전열관에 대한 구조 건전성을 평가하고 정비기준을 수립하였다. 전열관 파열시험과 ECT 신뢰성 검증시험을 수행하고, 발전소 고유의 설계와 재질, 결함 성장속도를 분석함으로써 마모결함의 대한 정량적인 건전성을 평가하여 55% 정비기준을 도출하였다. 따라서 현재 적용하고 있는 40% 정비기준은 전열관의 파열을 방지하기 위한 보수성을 충분히 확보하고 있으며, 정비기준 완화도 가능성을 입증하였다.

### Abstract

Structural integrity assessment was performed on the wear degradation of YGN Unit 3,4 & UCN Unit 3,4 SG tubes. To establish repair criteria of tube wear, the SG tube burst test and eddy current test were carried out, and the plant specific data such as tube material properties, design parameter, and defect growth behavior were analyzed. The plant-specific repair criteria was obtained as 55%, and the conservatism of current repair criteria could be verified, and further it is expected that the tube plugging limit be raised to the plant-specific repair criteria.

## I. 서론

1997년 영광 4호기 2차 ECT 검사에서 마모 결함이 처음으로 발견되어 3차 검사에서 42개의 전열관을 마모손상으로 관막음하였다. 가동 시작후 짧은 시간에 많은 전열관을 관막음함에 따라 마모손상에 대한 우려가 제기되었으며, KINS에서도 다음과 같은 권고 사항을 제시하였다. [1]

- 마모 손상이 급격히 진행되는 이유를 규명하고,
- 선형호기인 Palo Verde와 비교하여 적절한 관막음 기준과
- 전열관 검사계획을 수립할 것.

이후 동일한 모델인 영광 3호기와 울진 3,4호기에서도 마모손상이 모두 발견되고 있다. 유체 유발 진동(flow induced vibration)에 의한 전열관과 bat wing 또는 vertical strip 사이의 마모손상은 stay cylinder 상부의 중앙 공동(central cavity) 주변에 집중적으로 발생하고 있다. 상부지지 구조물에서 발생하는 마모현상은 Palo Verde 뿐만 아니라 CE 증기발생기의 공통된 현안이다. 설계사인 CE가 제시하는 의견은 다음과 같다. [2]

- Stay cylinder 상부의 중앙공동 부위에 마모손상이 집중되는 원인은 이 부위에서 2차측 유속이 빠르고, 지지구조물의 설계특성상 특정부위(Row 25~40) 전열관의 natural frequency가 낮기 때문임. (Row 41번 이상은 horizontal strip이 지지하고, Row 14번 이하부터는 bat wing 사이 간격이 짧아짐.)
- 따라서 마모 손상은 natural frequency가 낮은 Row 25~40번, Column 64~102번 사이의 167개 전열관에 집중될 것이고, 167개 모두 마모손상이 발생하는 것이 아니라 제작할 때 발생하는 공차 때문에 일부 전열관에서 마모가 발생할 것임. 167개 범위를 벗어나는 위치에서 불규칙적으로 나타나는 마모는 10개 이내로 제한될 것임.
- 마모손상 전파속도는 결함 깊이가 깊어질수록 감소할 것으로 예측되므로 예방 관막음보다는 적절한 정비기준을 설정하여 손상 증가 추세를 관찰하는 것이 바람직함.

그러나 울진 3,4호기에서는 첫 주기부터 마모손상이 발견되었고, 울진 4호기 1차 검사와 영광 4호기 4차 검사에서는 설계사가 예측한 167개 밀집지역을 벗어난 외곽지역에서도 마모손상이 많이 검출되었다.

기존의 기술지침서의 40% 관두께 정비기준 대신에 결함유형별로 건전성을 평가하는 것이 보편화되고 있으므로 이러한 마모결함에 대한 정량적인 건전성 평가를 수행하여 정비기준을 설정할 필요가 있다. 그리고 마모 결함이 외곽지역에서도 추가로 발생하고 있으므로 마모손상 발생은 당분간 계속될 가능성이 크다. 또한 전열관의 부식손상은 관막음하면 정지되지만 마모손상은 2차측에서 진동에 의하여 발생하므로 관막음한 후에도 계속 손상이 진행될 것으로 예상된다. 따라서 정량적인 건전성을 평가하여 적절한 정비기준을 설정한 후에 정비기준에 도달할 때까지 마모손상 성장추세를 관찰하는 것이 안전성 확보 측면에서도 보다 바람직할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 영광 3,4호기, 울진 3,4호기 증기발생기 마모손상 전열관에 대한 구조 건전성을 평가하여 정비기준을 수립하였다. 우선 마모손상 발생 추세 및 위치, 검사 및 정비 이력 등 손상 현황을 종합적으로 검토하였다. 그리고 마모 손상 형상을 분석한 결과를 바탕으로 결함시편을 가공하고, 자체 제작한 전열관 파열시험장치를 이용하여 파열 시험을 수행함으로써 결함 형상과 파열압력의 상관관계를 도출하였다. 모사 결함에 대한 ECT 평가를 영광 3,4호기와 울진 3,4호기 검사를 수행한 한전기공(주)와 (주)카이텍에 의뢰하여 ECT 검사 신뢰성을 검증하였다. 또한 결함형상에 따른 파열압력 상관관계, 설계압력 및 안전계수, 전열관 재질 자료, ECT 신뢰성 검증, 마모손상 성장속도 등 구조 건전성 평가에 필요한 모든 요소를 고려하여 정비기준을 수립하였다.

## II. 마모손상 및 정비 현황 분석

국내에서 가동중인 CE 형 증기발생기에서 마모 결함은 1997년도에 수행된 영광 4호기 제 2차 가동중 검사에서 처음 검출되었다. 영광 3,4호기와 울진 3,4호기에서 마모 결함은 극히 일부를 제외하고는 전열관이 상부지지 구조물인 BW 또는 VS와 교차하는 위치에서 발생하였다. 특히 hotleg 쪽에 위치한 bat wing(BWH), 2번째 VS(2VS), 3번째 VS(3VS), coldleg 쪽에 위치한 bat wing(BWC)이 대부분이고, BWH와 2VS에서 검출된 신호수가 BWC와 2VS에서의 신호수보다 65%나 더 많았다. EPRI의 열수력 해석 코드인 ATHOS 3을 이용하여 증기발생기 2차측 열수력 해석을 수행한 결과, hotleg 유속이 coldleg 유속보다 높았다. 이러한 결과를 통하여 2차측 유속이 마모 결함 발생에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다.

영광 3호기와 울진 3호기에서 마모 손상 전열관은 대부분 증기발생기 중앙 부위에 위치한다. 즉 증기발생기 중앙에 위치한 stay cylinder 상단의 중앙 공동(central cavity) 주변에 있는 전열관이 BW 또는 2VS/3VS와 교차하는 위치에서 마모 신호가 검출되었다. 그러나 영광 4호기 4주기에서는 3주기에 비하여 중앙공동의 마모 손상 밀집지역 밖의 외곽지역에서 마모 손상이 추가로 많이 발생하였다. 더구나 울진 4호기는 1주기임에도 불구하고 외곽지역에서 발생한 마모 손상 전열관 수가 전체의 30% 이상을 차지하고 있다. 설계사인 CE는 영광 3,4호기에서 마모 손상은 중앙공동 주변의 Row 25~40, Column 64~102 사이의 167개 전열관에 집중될 것으로 예측한 바가 있는데 이 영역에 위치한 대부분의 전열관은 다수의 증기발생기에서 마모손상을 공통적으로 경험하였다. 그러나 영광 4호기 4주기와 울진 4호기 주기 검사결과를 분석한 결과로부터 마모 손상은 결함 발생에 민감한 설계특성을 갖고 있는 중앙공동 영역에서 집중적으로 발생하지만, 가동주기가 길어지면서 외곽지역에서 발생빈도와 성장속도는 낮을지라도 마모손상이 추가로 계속 발생할 가능성이 크다고 판단된다.

가동 초기인 울진 3,4호기는 결함깊이가 깊은 전열관 수가 적지만, 영광 3,4호기는 결함깊이가 30% 이상인 전열관 수가 비교적 많다. 영광 3,4호기는 4주기에 ECT 표준시편이 변경되었고, 울진 3,4호기는 가동 초기이기 때문에 발생추세와 성장속도 분석결과에 기초한 정비물량 예측이 현재로서는 불가능하다. 그러나 기존에 검출된 결함관이 계속

성장하고 있고, 새로운 결함 전열관이 계속 검출되고 있으며, 특히 영광 4호기와 울진 4호기에서는 마모손상 발생영역이 설계사인 CE가 예측한 마모손상 밀집영역을 벗어나 외곽에서도 추가로 발생되고 있으므로 마모 전열관 정비물량은 앞으로 상당한 기간동안 계속될 것으로 예상된다.

### III. 전열관 파열시험 결과

#### III-1. 마모결함 형상분석 및 파열시험 가공

마모결함 형상과 파열압력 사이의 상관관계를 구하기 위하여 전열관 파열시험을 수행하였다. 한국중공업(주)로부터 영광 5,6호기 증기발생기 제작후 남은 전열관 잔재를 제공받아 25cm씩 절단한 후에 기계가공 또는 방전가공(electro discharge machining, EDM)으로 시편 중앙에 결함을 제작하였다. 기계가공을 하는 경우에 결함 주변에 소성변형에 의한 가공경화가 일어나므로 한번에 가공하는 양을 줄여 가공경화층 형성이 적도록 하였다. 방전가공은 기계가공에 비하여 가공의 영향이 작으나 두께 0.005~0.008mm 정도가 방전가공중에 녹았다가 재 응고되고, 재 응고층과 비슷한 두께의 열영향부가 형성된다.[3] 기계적인 성질을 방전가공 전의 상태로 회복시키기 위하여 이러한 부위를 미세 연마로 제거하였다.

파열압력은 결함의 깊이 뿐만 아니라 길이와 기울어진 각도에도 의존할 것으로 예측되므로 영광 3,4호기 증기발생기에서 발생하는 결함의 형상을 분석하여 파열시험 제작시 이를 반영하였다. 선형호기에서 UT 또는 radiography 방법으로 분석한 결과에 따르면 bat wing 부분에서 마모결함은 전열관의 길이방향에 대하여 1~2° 기울어져 있고, 길이는 1~2인치 범위였다.[4] 영광/울진 3,4호기에서는 Bobbin 검사로 마모결함의 깊이를 평가하고, 결함깊이가 관두께의 40% 이상인 관막음 대상 전열관에 대하여 MRPC(motorized rotating pancake coil) 검사를 추가로 수행해오고 있다. MRPC 검사번호를 현장으로부터 제공받아 이를 분석하여 결함 깊이를 평가한 결과, 길이는 2인치 미만이고 결함 깊이와 특별한 상관관계를 보이지 않았다. 결함의 깊이와 길이 자료로부터 결함이 기울어진 각도를 계산한 결과, 기울기는 0.5~2.5° 이고 길이가 길수록 기울기가 작아졌다.

파열시험 제작시 결함 깊이는 20%~90% 범위가 되도록 가공하였으며, 이때 결함의 기울기는 0~2.5° 범위에서 0.5° 간격으로 가공하였다. 기울기가 1.0° 이상인 경우에는 그림 1과 같은 W(Wear scar)형으로 가공하였다. 그리고 결함 기울기가 0.5° 인 경우에 W형으로 만들면 결함 길이가 2인치를 초과하므로 결함깊이를 2인치로 제한하였고, 결함길이 효과를 관찰하기 위하여 1인치 시편을 추가로 제작하였다(Inclined, I형). 또 기울기가 0° 인 F(flat)형에서는 결함길이의 영향을 살펴보기 위하여 0.5~2.0 인치 범위로 가공하였다. 준비된 파열시험편은 관두께와 외경, 결함의 깊이와 길이를 측정후, 결함부 사진을 촬영하였다. 파열시험은 자체 제작한 증기발생기 전열관 파열시험 장치를 이용하여 수행되었다.

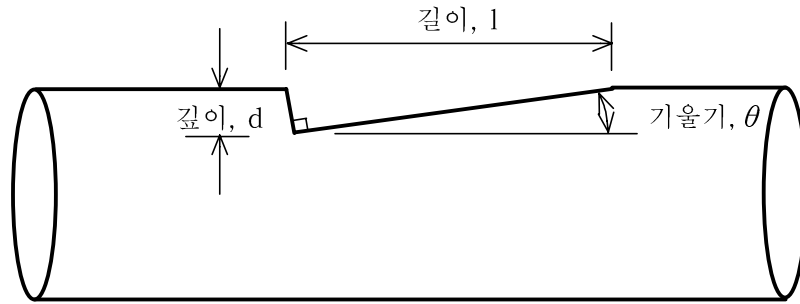


그림 1. W(Wear scar)형 파열시편의 결함 형상

### III-2. 파열시험 결과와 파열 거동

파열시험에 사용된 전열관의 강도차이를 보정하기 위하여 측정된 파열압력을 유동응력(항복강도와 인장강도의 평균)으로 나누어 표준화한 후 그림 2에 정리하였다. 결함 깊이가 깊을수록 파열압력은 급격하게 떨어지고, 결함 기울기가 작을수록 파열 압력은 감소하였다. 균열이 발생한 후 전열관 길이(축) 방향으로 성장하다가 파열이 발생하였다. 결함이 축방향으로 길게 가공되어 있고, 일정 내부압력이 작용할 때 원주방향 응력이 축방향 응력에 비하여 2배 크므로 축방향 균열의 성장에 의한 파열은 당연한 결과이다. 균열은 결함 깊이가 가장 깊은 곳에서 약간 떨어진 부위가 부풀어오르면서 발생하였다. 이는 결함 깊이가 가장 깊은 곳은 인접한, 비 결함부의 구속을 받아 소성변형이 억제되기 때문이고, 이러한 비 결함부의 존재로 인하여 균열은 비결함부 쪽으로 더 이상 성장하지 못하고 상하로 갈라지는 것을 관찰할 수 있었다. 결함 기울기가 작으면 결함부에서 길이 방향 관두께(ligament)가 증가하므로 내압에 의한 소성변형과, 균열 발생과 성장이 보다 용이하기 때문에 파열압력은 떨어진다.

결함 가공방법에 따른 파열압력의 차이를 살펴보기 위하여 기계가공과 방전가공으로 동일한 치수의 I형 결함을 각각 제작한 후 파열시험을 수행하였다. 방전가공한 시편의 파열압력은 기계가공한 시편에 비하여 2~5MPa 크므로 가공방법에 따른 파열압력의 차이는 비교적 작은 것으로 판단된다. I형 결함에서 결함길이가 1인치인 시편과 2인치인 시편의 파열압력은 정확히 일치하므로 결함길이는 시험한 범위에서는 영향이 없는 것으로 판단된다. 또한 F형 결함의 길이가 1.0, 1.5, 2.0 인치인 시편에 대한 파열압력은 0.5인치인 시편의 파열압력에 비하여 낮지만 동일한 선상에 위치하는 것으로 보아 결함 길이가 1인치 이상이면 파열압력에 영향을 미치지 않음을 확인하였다. 균열은 비 결함부의 소성구속이 없는 결함부 중앙에서 발생하여 양끝으로 성장하는데, 가공결함의 길이가 0.5인치인 경우에는 W형에서와 같이 균열이 상하로 갈라지는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 결함길이가 길어지면 균열이 상하로 나뉘는 현상이 사라졌다. 따라서 결함길이에 따른 파열압력의 차이는 결함 양끝의 비 결함부 턱이 중앙에서 생성된 균열의 성장을 억제하여 파열압력을 증가시키는 결과로 나타나며 결함의 길이가 1인치 이상이면 결함 길이 효과는 무시할 수 있을 만큼 작다.

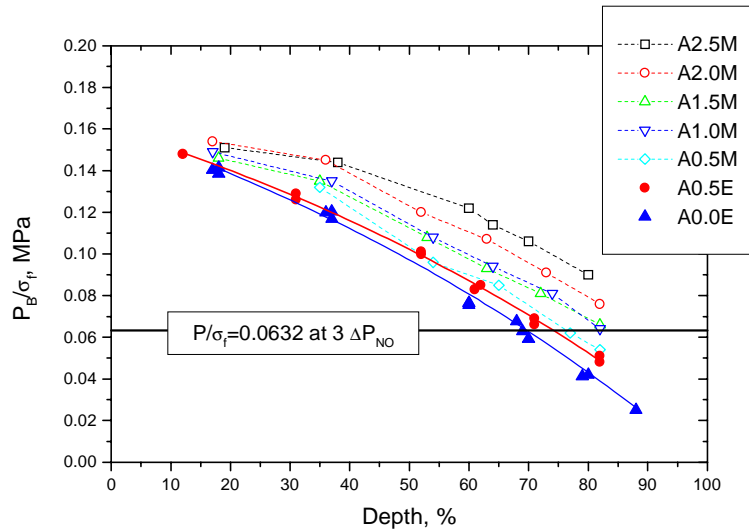


그림 2. 전열관의 강도로 표준화된 파열압력

#### IV. 마모손상 전열관 정비기준 수립

##### IV-1. EPRI 구조 건전성 평가 지침

전열관 정비기준의 목적은 전열관의 건전성을 유지하기 위함이다. 즉 정상가동중 또는 설계기준사고가 발생하였을 때 결함 전열관이 존재하더라도 전열관의 파단사고나 과도한 누설을 방지하기 위함이다. 현재 국내에서 전열관 정비기준은 40% 관두께 기준이다. 즉 결함 깊이가 관두께의 40% 이상이면 결함의 유형이나 발생위치에 관계없이 정비하여야 한다. 그러나 최근 미국에서는 NEI 97-06[5]을 바탕으로 한 성능기준을 적용하고 있다. NDE 검사결과와 발전소 고유의 데이터를 반영하여 결함 유형별로 정량적인 건전성 평가를 수행하여 결함 전열관의 건전성을 입증하고, 건전성 평가결과에 근거한 정비기준을 수립하고 있다. EPRI에서는 건전성 평가에 대한 지침[6]을 최근 제시한 바가 있다.

- EPRI Steam Generator Integrity Assessment G/L, Revision 1 ('00. 3)

EPRI 건전성 평가 지침에서 제시하고 있는 가동평가 방법에 따라 영광 3,4호기, 울진 3,4호기에서 발생하고 있는 마모결함에 대한 구조 건전성을 평가하여 정비기준을 수립하고자 한다. 가동평가는 다음 검사주기까지 결함이 성장하는 것을 고려하여 전열관의 성능기준을 만족하는 상태로 운전할 수 있는 것인가를 평가하는 것이다.

EPRI 지침의 가동 평가 절차를 그림 3에 도식적으로 나타내었다. 구조 건전성을 평가하기 위해서는 우선 파열압력과 구조변수(결함 깊이나 길이) 또는 NDE 측정인자(신호 진폭 등)와의 상관관계식이 필요하다. 이 관계식은 ASME 코드의 식을 이용하거나 파열시험 또는 ISPT(in-situ pressure test)를 수행하여 실험적으로 결정하여야 한다. 그림 3

에서 파열 조건(burst requirement) 선은 정상가동압력의 3배와 설계기준사고압력의 1.4 배중에서 큰 값이 작용하는 경우를 고려한 성능기준(performance criteria)을 나타낸다. 파열 조건 선과 파열압력 상관관계 선이 교차하는 위치로부터 파열이 발생하는 임계 조건, 즉 기준 결함 크기(reference defect size)가 결정된다.

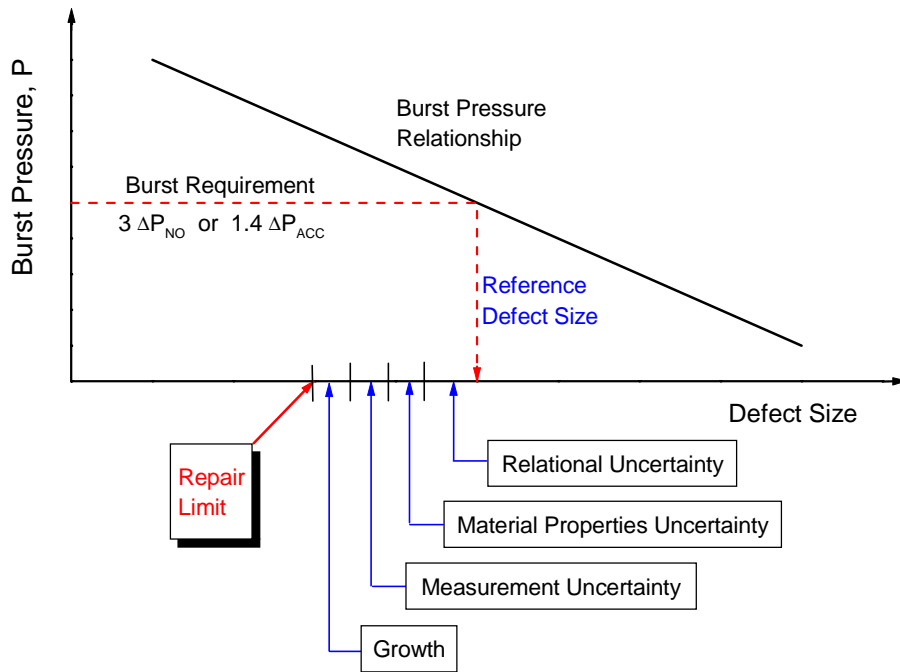


그림 3. 구조 건전성 평가 방법

ASME 코드 식은 식 자체에 상관관계에 대한 불확실성이 포함되어 있지 않지만, 실험적으로 결정된 관계식은 실험 데이터 사이의 편차로 인한 불확실성이 포함되어 있다. 그리고 전열관 재질과 NDE 측정에서도 불확실성이 존재하므로 적절한 수준의 신뢰도를 갖도록 이러한 불확실성을 반영하여야 한다. EPRI 지침에서는 파열압력 상관관계와 재질, NDE 측정에 대하여 90% 신뢰도를 갖도록 규정하고 있다. 즉 데이터를 회귀분석하여 구한 평균값에  $1.28 \times$  표준편차( $\sigma$ )를 반영하면 데이터가 이 범위에 포함될 확률이 90%라는 것을 의미한다. 기준 결함 크기에 관계식과 재질, NDE 측정에 대한 불확실성을 반영한 후에는 다음 검사주기까지의 결함의 성장량을 반영하여야 한다. 즉, 이번 검사주기에서는 구조 건전성을 만족하더라도 다음 검사주기에 성장하여 건전성을 확보하기 못할 가능성이 있기 때문이다.

기준 결함크기를 구한 후에 불확실성을 고려하는 방법에 따라 산술적인 방법, 단순 통계적인 방법, Monte Carlo 방법으로 구별된다. 산술적인 방법에서는 불확실성 인자들을 기준 결함크기에서 직접 빼준다. 단순 통계방법에서는 각 불확실성 인자들의 기하평균

균(제공의 합이 제공근)을 계산하여 반영한다. 그리고 Monte Carlo 방법에서 불확실성은 표본에 의한 불확실성과 Monte Carlo 분석으로 구한 불확실성의 분포를 조합하여 결정한다. 세 방법 중에서 산술적인 방법이 가장 간단하면서도 가장 보수적인 결과를 보이므로 마모 결함에 대한 정비기준 도출에서는 산술적인 절차에 따라 평가를 수행하였다.

## IV-2. 파열압력 상관관계 및 기준 결함 깊이

### (가) 파열압력 상관관계

EPRI 건전성 평가 지침은 파열시험 또는 ISPT(In-situ pressure test) 결과를 파열압력을 결정하는 구조 변수 또는 NDE 측정 인자에 대하여 회귀(regression)분석하여 평균을 파열압력 상관관계로 설정하고 상관관계의 불확실성을 반영하도록 권고하고 있다. ASME code 식을 사용하는 경우에는 불확실성을 고려하지 않는다.

마모결함에 대한 파열시험 결과에서 파열압력은 결함 형상 중에서 깊이의 영향을 가장 많이 받지만 결함의 기울기와 길이에도 의존하였다. 현재 Bobbin 검사로 결함의 깊이를 평가하고 있으나, 결함의 길이 또는 기울기를 평가하려면 MRPC 검사를 많이 추가해야 하는 부담이 있다. 따라서 마모 손상 전열관 정비기준 수립에 필요한 파열압력과 결함크기 상관관계는 그림 1과 같이 결함 깊이의 함수로 도출하되, 결함의 길이와 기울기의 영향은 보수적으로 반영하였다. BW 또는 VS 위치에서 발생하는 마모결함의 기울기는 0.5~2.5° 범위이고, 길이는 2인치 미만이므로 기울기가 0.5° 이고 파열압력이 가장 낮은 I형의 파열시험 결과를 마모결함에 대한 파열압력 상관관계로 선택하되 불확실성은 별도로 반영하지 않았다. I형의 파열압력을 결함깊이에 대하여 지수 증가(exponential growth) 함수로 회귀 분석하여 다음과 같은 상관관계식을 얻었다.

$$\frac{P}{\sigma_f} = A + B e^{\frac{depth}{C}} \quad (1)$$

여기서 A, B, C는 상수

### (나) 기준 압력

EPRI 지침에서 건전성 평가의 기준이 되는 압력은 정상가동압력과 설계기준사고압력에 안전계수 3과 1.4를 각각 곱한  $3\Delta P_{NO}$  와  $1.4\Delta P_{ACC}$  중 큰 값을 선택하도록 규정하고 있다. 영광 3,4호기와 울진 3,4호기의  $\Delta P_{NO}$ 는 8.14MPa이고,  $\Delta P_{ACC}$ 는 MSLB 압력인 15.51MPa이므로 기준압력은  $3\Delta P_{NO}$ 인 24.4MPa이 된다.

### (다) 전열관 재질

전열관의 파열 거동은 재료의 강도에도 의존하므로 전열관 재질을 반영하여야 한다. EPRI 지침에서는 전열관 강도자료를 통계 처리하여 편차를 반영하거나, ASME code의 최소값을 선택하도록 규정되어 있다. 영광 3,4호기와 울진 3,4호기 증기발생기 제조에 사용된 모든 전열관 heat의 재료시험성적서(Certified Material Test Report, CMTR)의 상



온 강도자료를 통계 처리하였다. 영광3,4호기는 전열관 제작사가 동일하여 같이 처리하였으나 울진 3호기와 4호기는 제작사가 다르므로 분리하여 처리하였다. 90% 하한치(lower bound, LB)는 영광 3,4호기에 비하여 울진 3,4호기가 낮고, 그 중에서 울진 4호기가 더 낮으므로 최소값인 872 MPa을 선택하였다. 따라서 90% 하한치 유동응력은 436 MPa이 된다. 이 때 유동응력은 상온강도이므로 이를 설계기준사고 온도인 650° F(343°C)로 환산하기 위하여 온도 환산인자 0.885[7]를 곱해주면 설계기준사고 온도에서 90% 하한치 유동응력, 386 MPa이 얻어진다.

### (라) 파열 조건과 기준 결함 깊이

안전계수를 반영한 기준압력과 전열관 재료의 비로부터 파열조건을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{P}{\sigma_f} = \frac{24.4MPa}{386MPa} = 0.0632 \quad (2)$$

식 (1)에 파열조건을 대입하면 구조 건전성 평가의 기준이 되는 결함깊이 74%가 얻어진다.

### IV-3. NDE 신뢰성 평가

EPRI 지침에서 NDE 신뢰성 평가는 두 가지 항목 즉 NDE 검사기술에 대한 불확실성과 평가자에 대한 불확실성으로 분류된다. 검사기술 불확실성은 NDE 검사기술 자체의 한계로 인하여 결함의 실제 크기와 NDE 측정되는 크기의 차이를 고려하는 항목이고, 평가자에 대한 불확실성은 NDE 신호를 평가하는 사람이 서로 다름으로 인한 측정오차를 고려하는 항목이다.

NDE 검사 신뢰성을 검증하기 위하여 마모결함 형상을 분석한 결과를 토대로 결함을 제작하여 bobbin 검사를 수행하였다. 결함 깊이(10~90%)와 기울기(0.5~2.5°), 모양(W형과 I형), 결함 가공방법(기계가공과 방전가공)을 달리하는 ECT 측정용 시편을 준비하여 영광 3,4호기 검사를 수행한 한전기공(주)와 울진 3,4호기 1,2주기 검사를 수행한 (주)카이텍에 깊이 평가를 의뢰하였다. 그 결과를 그림 4에 정리하였는데 결함 형상이나 가공방법에 관계없이 깊이를 비교적 정확하게 평가할 수 있음을 확인하였다.

검사기술에 대한 불확실성을 도출하기 위하여 선형 회귀분석을 하여 실제 결함 깊이와 ECT 측정깊이 상관관계식과 표준편차  $\sigma_t$ , 3.02를 얻었다. EPRI 지침에서 검사기술 불확실성은  $1.28 \times \sigma_t$  이므로 평균 회귀분석 선에서  $1.28 \times \sigma_t$  를 빼주면 아래와 같이 90% 하한치를 얻을 수 있다.

$$90\% \text{ LB ECT depth (\%)} = \text{True depth (\%)} \times 0.977 - 1.70 \quad (4)$$

따라서 기준 결함깊이가 74%이므로 90% 하한치 ECT 측정 깊이는 71%이다.

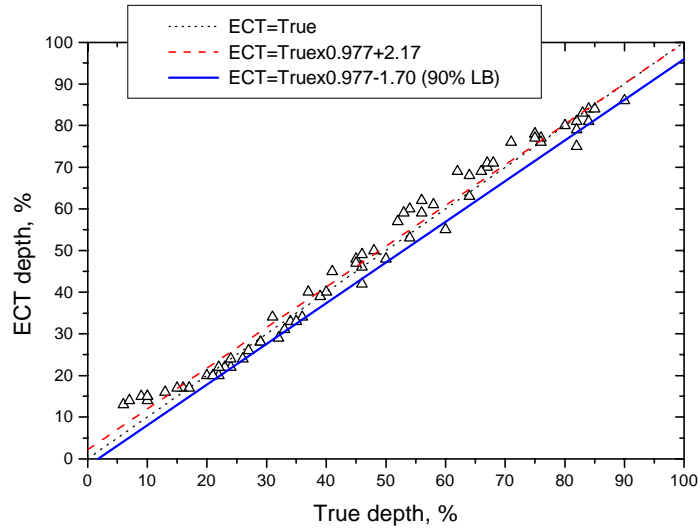


그림 4. 실제 결함 깊이와 ECT 측정 깊이 상관관계

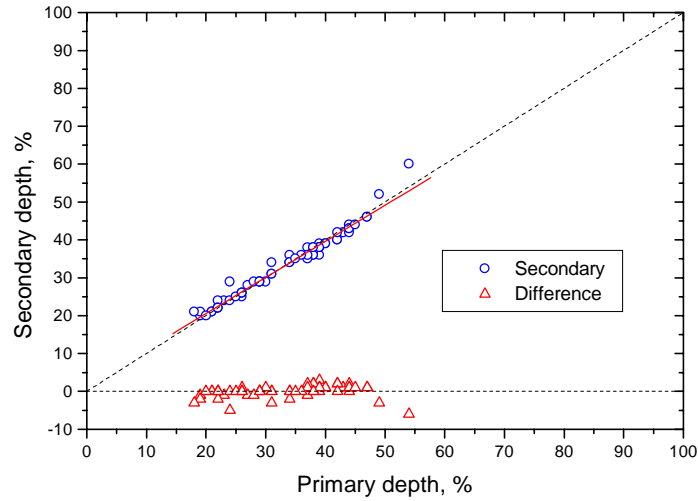


그림 5. ECT 평가자 오차

평가자에 대한 불확실성은 동일한 신호에 대한 평가결과의 차이로써 영광 3호기 4주기와 울진 3호기 1주기 1,2차 검사기관의 평가결과 차이를 통계분석하여 그림 5에 나타내었다. 두 기관의 깊이 평가 차이의 표준편차는 1.56이므로 평가자에 대한 불확실성  $1.28 \times \sigma_a$ 는 2.00%가 된다. 따라서 검사기술 불확실성을 고려한 결함깊이는 71%이므로 평가자에 대한 불확실성 2%를 빼주면 NDE 신뢰성 평가 결과가 반영된 결함 깊이는

69%가 된다.

#### IV-4. 다음 검사주기까지 성장량

EPRI 지침에서는 최근 2,3주기 검사자료를 분석하여 결함성장속도를 구한 후 다음 주기 가동시간을 고려하여 다음 검사주기까지의 결함 성장량을 도출하도록 규정하고 있다. 결함성장 분석시에 데이터가 50개 미만이면 최대 성장속도를, 그리고 데이터가 50개 이상이면 95% 상한치(upper bound, UB)를 적용해야 한다.

영광 3,4호기 4주기 검사에서는 3주기에 사용한 표준시편과 평가방법 대신에 보다 신뢰성이 높은 표준시편과 평가방법을 사용하였기 때문에 3,4주기 검사결과로부터 성장속도를 도출할 수 없었다. 그 대신 1,2주기 검사에서 동일한 표준시편과 평가방법을 사용한 울진 3호기 결과로부터 마모결함의 성장속도를 구하였다. 2주기 검사에서 검출되었던 마모 결함 중에서 1주기에서도 검출되었던 결함 65개의 깊이 성장량을 가동일수로 나눈 후 365일을 곱하여 1년 가동시의 깊이 성장속도,  $\frac{\Delta d}{\Delta t}$  [%/EFPY]를 각각 구하여 그림 6에 나타내었다. 2주기 깊이평가 결과가 1주기에 비하여 오히려 감소한 경우에는 성장속도를 0으로 처리하였다.

$$\left[ \frac{\Delta d}{\Delta t} \right]_{at d_{i-1}} = \frac{d_i - d_{i-1}}{\left( \frac{t_i}{365} \right)} \quad (5)$$

여기서  $d_i$  ; i주기의 결함깊이 [%]

$t_i$  ; i주기의 유효가동일수 [EFPD]

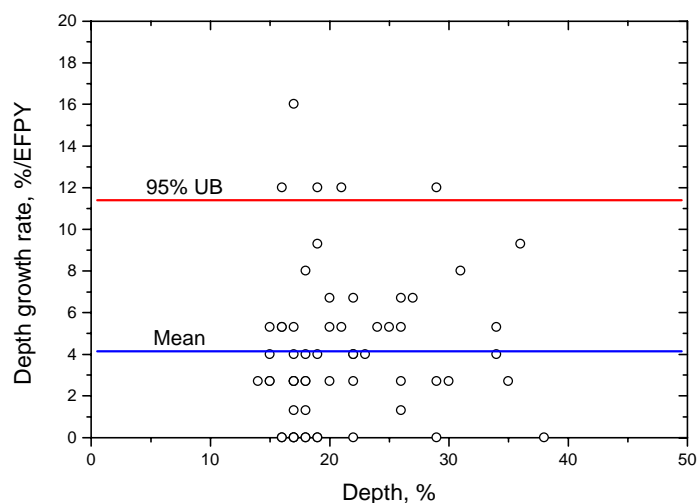


그림 6. 울진 3호기 마모결함의 깊이 성장속도

65개 데이터의 평균 성장속도는 4.15 %/EFPY이고, 표준편차는 3.69 %/EFPY이므로 95% 상한치(Mean+1.96  $\sigma$ )는 11.4 %/EFPY가 된다.

한편 영광 3,4호기는 5주기부터 장주기 원자로 운전(18개월)을 시작하는데 장주기에서 실제 원자로 운전일수는 15개월로 1.25 EFPY에 해당한다. 따라서 다음 검사주기까지의 깊이 성장량의 95% 상한치는 14%가 된다.

#### IV-5. 마모 전열관 정비 기준

결합의 형상을 분석하여 가공된 시편으로 파열시험을 직접 수행하여 얻은 시험결과와 증기발생기 설계압력과 제작에 사용된 재질 자료를 분석하여 결정한 기준 결합깊이는 74%이고, 마모결합을 모사한 시편에 대하여 ECT 검사를 수행하여 신뢰성을 평가한 결과 NDE 기술 불확실성과 평가자 불확실성은 각각 3%와 2%이고, 울진 3호기 1,2호기 검사결과를 분석하여 얻은 다음 검사주기까지의 결합성장량은 14%이다. 따라서 기준결합 깊이에서 ECT 측정오차와 결합 성장량을 뺀 55%가 마모결합에 대한 정비기준이 된다.

$$\begin{aligned} \text{정비기준} &= \text{기준 결합 깊이} - \text{ECT 측정오차} - \text{다음 주기 성장량} \\ &= 74\% - (3+2)\% - 14\% \\ &= 55\% \end{aligned}$$

이는 ECT로 결합의 깊이를 측정하여 55% 미만이면 정상가동압력의 3배 또는 설계 기준사고압력의 1.4배의 압력이 작용하여도 다음 주기 말까지 전열관 파열사고가 발생하지 않고 구조적 건전성이 확보되므로 계속 사용할 수 있다는 의미이다. 따라서 현재 적용되고 있는 40% 정비기준에 비하여 15% 더 보수적인 기준이다. 더구나 55% 기준을 도출하는 과정에서 EPRI 지침에 비하여 다음과 같은 보수적인 방법을 적용하였다.

- EPRI가 제시하는 데이터의 불확실성을 반영하는 방법 세 가지 중에서 가장 보수적인 산술적인 방법을 적용하였다.
- 파열압력 상관관계를 이용하여 기준 결합 깊이를 구할 때, EPRI 지침은 시험결과와의 평균을 선택한 후 표준편차를 고려하도록 권고하고 있으나 본 과정에서는 하한치 파열시험 결과를 활용하였기 때문에 EPRI 지침에 비하여 매우 보수적으로 기준 결합 깊이를 결정하였다.
- 증기발생기 제작에 사용된 전열관의 강도자료는 네 호기중 강도가 가장 낮은 울진 4호기의 하한치를 사용하였기 때문에 영광 3,4호기는 울진 3,4호기에 비하여 결합깊이가 2% 보수적으로 결정되었다.
- 결합성장속도는 울진 3호기 1,2주기 검사결과를 활용하여 구하였다. 주기가 늘어나면 마모결합의 성장속도는 일반적으로 감소하는 경향을 보인다. 결합 깊이가 깊어지면 BW 및 VS과 전열관 사이에 작용하는 힘이 감소하기 때문이다. 또한

마모결함은 유속과 함께 지지구조물과 전열관 사이의 간격에 의존하는데, 유속이 빠른 위치에서 간격이 가까운 경우에는 마모 결함이 일찍 발생하여 빨리 성장하지만 유속이 느리거나 간격이 덜 가까우면 마모 손상이 나중에 발생하여 천천히 성장할 것으로 예측되기 때문이다. 따라서 현재 5주기 운전중인 영광 3,4호기의 결함성장속도는 울진 3호기의 성장속도에 비하여 느릴 것으로 기대되며, 그러한 경우에는 위에서 구한 55% 보다도 더 높아질 것으로 예상된다. 따라서 금년도 10월에 수행되는 영광 3호기 5주기 검사결과는 영광 3호기 고유의 성장속도를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 가동연수의 영향을 확인할 수 있는 기회가 될 것이다.

상부지지 구조물에 발생하는 마모손상에 대하여 적용하고 있는 현행 40% 정비기준은 전열관 파단 사고를 방지하기 위한 구조 건전성을 충분히 확보하는 매우 보수적인 정비기준이며, 정비기준을 55%까지 완화하여도 구조 건전성이 유지됨을 입증하였다. 영광 4호기는 4주기 검사후 42개의 마모손상 전열관을 정비한 바가 있으며 네 개 호기에서의 정비물량은 앞으로 상당한 기간동안 계속될 것으로 예상된다. 현재의 40% 정비기준을 계속 적용하는 경우에는 매주기 수동 관막음에 따른 상당한 공기 소요와 방사선 피폭을 감수하여야 한다. 반면에 전열관 파열시험 결과와 발전소 고유의 자료를 활용하여 정량적인 건전성 평가를 수행하여 도출된 정비기준으로 완화하면 자동 및 예방 관막음을 고려하여 보다 탄력적인 정비일정을 수립할 수 있고, 작업자의 방사선 피폭을 크게 줄일 수 있게 된다. 또한 마모손상은 2차측에서 진동에 의하여 발생하므로 관막음한 후에도 계속 손상이 진행될 것으로 예상되는데, 정비기준을 완화하면 마모손상 성장 추세를 더 관찰할 수 있으므로 안전성 확보 측면에서도 보다 바람직할 것으로 판단된다. 따라서 마모 결함 전열관에 대한 정비기준을 완화하는 방안을 고려할 필요가 있다.

## V. 결 론

1. 영광 3,4호기와 울진 3,4호기 증기발생기 BW 또는 VS과 교차하는 부위에서 발생하는 마모결함은 coldleg보다 유속이 빠른 hotleg 쪽에서 더 많이 발생하였으며, 현재는 마모 손상 발생에 민감한 설계특성을 갖는 중앙공동 주변에서 집중적으로 발생하고 있지만 외곽지역에서도 마모손상이 추가로 발생하고 있다. 가동주기가 길어짐에 따라 마모손상 전열관 정비물량은 앞으로 상당한 기간동안 계속될 것으로 예상된다.
2. 마모결함의 형상을 모사한 시편과 자체 개발한 전열관 파열시험 장치를 활용하여 파열시험을 수행함으로써 결함형상이 파열압력에 미치는 영향을 분석한 결과, 파열압력은 결함깊이의 영향을 가장 많이 받고, 기울기와 길이에도 의존하였다. 파열시험 결과를 바탕으로 마모손상 전열관 정비기준 설정에 필요한 파열압력과 결함크기 상관관계를 도출하였다.
3. 자체적으로 파열시험과 NDE 신뢰성 검증을 수행하고, 영광 3,4호기와 울진 3,4호기 고유의 설계와 재질자료, 마모결함의 성장속도를 분석하여 마모결함의 대한 정량적인 건전성을 평가하여 55% 정비기준을 도출하였다. 따라서 현재 적용하고 있는 40% 정

비기준은 전열관의 파열을 방지하기 위한 구조 건전성을 충분히 확보하고 있는 매우 보수적인 기준이며, 기준 완화도 고려할 필요가 있다.

### 참고문헌

- [1] KINS 권고사항표 99-5-009, “증기발생기 세관 마모 관련 예방 관막음 기준 설정 및 검사범위 확대에 대한 권고”, 1999. 2. 11
- [2] A Letter from Regis A. Matzie (ABB/CE) to Ji Tae Lee (Hanjung) on Steam Generator Design Modification, dated May 7, 1999, with an attached document, “Palo Verde Steam Generator Tube Degradation and YGN 3 and 4 Steam Generator Design”
- [3] M.P. Manahan et al., “Miniaturized Disk Bend Test Technique Development and Application”, The Use of Small-Scale Specimens for Testing Irradiated Materials, ASTM STP 888, W.R Corwin and G.E. Lucas, Eds, ASTM, Philadelphia, 1986, pp. 17-49
- [4] Palo Verde Nuclear Generation Station 2 Operation Assessment - Batwing Support Induced Wear Degradation of Steam Generator Tubing During Cycle 7, May 1997
- [5] NEI 97-06, Steam Generator Program Guidelines (‘97. 08)
- [6] Steam Generator Integrity Assessment Guidelines : Revision 1, EPRI TR-107621 R1, March 2000
- [7] EPRI Report TR-107620-R1, “Steam Generator In Situ Pressure Test Guidelines”, 1999