

증기발생기 전열관 와전류 검사의 신뢰성 향상을 위한 부식결함 시편의 제작 및 활용

Fabrication and Use of Corrosion Defect Specimens for Enhancement of ECT Reliability for Nuclear Steam Generator Tubing

허도행*, 최명식*, 이덕현*, 박중암**, 한정호*

Do-Haeng Hur*, Myung-Sik Choi*, Doek-Hyun Lee*, Jung-Am Park** and Jung-Ho Han*

초 록 원전 증기발생기 전열관에 대한 가동중 와전류 검사의 신뢰성을 높이기 위해서는 전열관에서 발생하는 실제와 동일한 부식결함을 제작한 다음 모의과정을 통하여 얻어지는 신호를 해석, 평가하여 장비 및 검사자의 기량을 검증하고 향상시킬 수 있는 기술개발이 이루어져야 한다. 본 논문에서는 가동안전성의 측면, 모의시편의 관점, 인출 전열관의 파괴검사로부터 도출된 관점 그리고 규제기준 및 외국의 사례를 통하여 부식결함을 이용한 증기발생기 전열관에 대한 와전류 검사 신뢰성 향상 연구의 필요성을 고찰하고, 실험실적인 부식결함 제작 모형을 소개하며 그 활용방안을 제시하였다.

주요용어: 부식결함, 와전류검사, 전열관, 응력부식균열

Abstract The development of an integrated technology including fabrication of corrosion defect specimens and their practical use is needed to enhance the reliability of eddy current test for nuclear steam generator tubing. In this paper, the necessity and importance are presented from the viewpoint of the structural integrity, simulation specimens for real defects, and experiences from the destructive examination of pulled tubes. The models for several corrosion defects are also briefly introduced, with the scheme for their practical use.

Keywords: corrosion defect, eddy current test, steam generator tube, stress corrosion cracking

1. 서 론

원자력발전소의 구조재는 가동중 여러 유형의 부식 및 기계적 손상을 겪고 있으므로 구조재의 건전성 확보를 통한 안전성 제고가 원전 수명관리 측면에서 최우선적으로 요구되고 있다. 따라서 매주기마다 가동중 검사(in-service inspection, ISD)를 실시하고 있으며 이를 근거로 예방대책 수립 및 보수관리를 수행하고 있다.

주요 구조재에 대한 가동중 검사는 증기발생기 전열관에 대한 ECT(eddy current test) 검사와 배관, 볼트/스터드, 압력용기 등에 대한 UT(ultrasonic test) 검사로 크게

분류할 수 있다. 이와 같은 비파괴 검사의 신뢰성은 재료 내에 생성된 균열 등의 결함을 정확히 검출하고 그 크기를 정밀하게 측정, 평가할 수 있는 탐지능과 정밀도에 따라 크게 좌우된다. 그러나 방전가공(electric discharge machining, EDM)에 의한 기계적 노치(notch) 또는 드릴홀(drill hole)을 재료에 가공하여 사용하는 현재의 표준 결함 시편으로서 실제 결함을 정확히 모사할 수 없기 때문에 손상평가의 신뢰성을 고도화하는데 한계점을 갖고 있다. 따라서 검사결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 구조재에서 발생하는 실제와 동일한 부식결함을 제작한 다음 모의과정을 통하여 얻어지는 신호를 해석, 평가하여

장비 및 검사자의 기량을 검증하고, 부식결함 표준시편을 이용한 자료를 생산할 수 있는 기술개발이 이루어져야 한다.

본 논문에서는 가동안전성의 측면, 모의시편의 관점, 인출 전열관의 파괴검사로부터 도출된 관점 그리고 규제 기준 및 외국의 사례를 통하여 부식결함을 이용한 증기 발생기 전열관에 대한 외전류 검사 신뢰성 향상 연구의 필요성을 고찰하였다. 또한 실험실적인 부식결함 제작 모형을 소개하며 그 활용방안을 제시하였다.

2. 부식결함 제작 및 활용의 필요성

2.1. 가동 안정성 관점

원자력발전소 증기발생기 전열관은 가동중에 1차측 응력부식균열(primary water stress corrosion cracking, PWSCC), 2차측 응력부식균열(outer diameter stress corrosion cracking, ODSCC), 입계부식(intergranular attack, IGA), 핏팅(pitting), 덴팅(denting), 두께감소, 마모 등의 매우 다양한 부식 및 기계적 손상을 겪고 있다. 이러한 손상은 1차측 냉각재가 2차측으로 누설되어 계통을 오염시키는 사고의 원인이 되며, 심한 경우 전열관 파열사고[1]를 유발하게 된다. 이는 곧 발전소의 불시정지 또는 1차측 냉각재의 급격한 손실에 의한 core melting 사고로 이어질 수 있기 때문에 발전소의 가동 안전성을 크게 위협하는 인자로 작용하고 있다.

따라서 각 발전소에서는 매 주기마다 ECT 검사를 실시하고 있으며, 이 자료를 근거로 손상된 전열관을 sleeving 하여 보수하거나 plugging 하여 가동에서 제외시키고 있다. 일정 기준의 관막음률을 초과할 경우에는 증기발생기 자체를 교체하고 있으므로 막대한 경제적 손실을 초래하고 있다.

증기발생기의 가동중 검사의 신뢰성은 전열관의 결함을 탐지하고 그 크기를 정확히 측정하는데 달려 있으며, 이는 곧 결함의 길이 및 깊이 제한치 등의 보수기준과 직결되기 때문에 가동 안전성을 좌우하는 핵심 사안임을 알 수 있다. 즉, 결함의 크기를 실제보다 과소평가할 경우 관막음 기준을 넘는 균열이 발생한 전열관이 가동중에 있게 되므로 다량의 1차 냉각재 누설 사고나 가동중 전열관 파열사고의 위험이 우려된다. 또한 결함의 크기를 실제보다 과대평가할 경우 더 가동해도 무방한 전열관을 관막음해야 하기 때문에 가동을 저하에 의한 경제적 손실을 야기하게 된다.

2.2. 규제기준 및 외국사례의 관점

외국의 원전 규제기관에서는 ISI에도 불구하고 원전 부품의 손상사고가 계속됨에 따라 부식결함 시편을 이용한 기량검증(performance demonstration) 시험을 통과한 검사자에게만 원전 기기의 UT 검사자격을 주는 규제요건을 1999년 9월 22일자로 ASME Sec. XI에 명시하기에 이르렀다. 전열관에 대한 ECT 검사의 경우 자격인증 제도를 법제화하지는 않았으나 제 3차 평가제도를 도입함으로써 규제를 강화하고 있는 추세이다.

미국의 NRC에서는 1977년부터 증기발생기 전열관 건전성 프로그램을 수행하여오고 있으며, 새로운 형태의 결함들이 발견되고 비파괴 검사 기술의 발전, 그리고 결함 형태에 따른 새로운 관막음 기준을 적용하는 추세를 반영하기 위하여 1995년부터 제 2단계 연구를 시작하였다 [2]. 여기에는 손상 전열관에 대한 파열압력과 누설률의 예측 및 검증 그리고 손상 결함에 대한 비파괴 검사 방법 및 신뢰성에 관한 실험적 연구가 포함되어 있다. 또한 일본의 Nuclear Fuel Industries사에서는 1991년부터 10여년간 해마다 100개 이상의 부식결함 시편을 제작하여 ECT 신뢰성 향상 및 건전성 평가에 활용하고 있다.

2.3. 모의 시편의 관점

현재 ECT 장비의 민감도 측정 및 교정을 위하여 상용전열관 표면에 EDM 가공으로 모의 결함을 만든 calibration standard tube를 사용하고 있다. 그러나 기계적 가공에 의한 모의 결함은 Table 1에 제시한 바와 같이 발전소에서 발생하는 부식결함과는 근본적으로 차이가 있다. 그 예로서 Fig. 1은 EDM notch와 실험실적으로 제작한 부식결함을 비교하여 나타낸 것이다. EDM notch는 폭이 최소 $150\mu\text{m}$ 이상이므로 탐지가 용이하다. 그러나 실제 균열은 균열의 틈(opening)이 $10\mu\text{m}$ 이하로 매우 작으며 입계를 따라 전파한다. 결과적으로 EDM notch의 경우 결함의 존재를 쉽게 검출할 수는 있으나 실제 결함의 신호를 정확히 모사할 수 없는 단점을 갖기 때문에 비파괴 검사 신뢰성을 고도화하는데 한계점을 갖고 있음을 명확히 알 수 있다.

검사의 신뢰성을 극대화하기 위하여는 발전소에서 발생하는 결함과 동일한 부식기구에 의하여 형성된 부식결함을 이용하여 각 탐촉자에 대한 탐지능 및 정확도를 평가하고 ECT의 평가기준 및 모의시편으로 사용하는 것이 중요하다. 가장 바람직한 방안은 결함이 발생한 가동 전열관을 인출한 다음 파괴검사를 실시하여 비파괴 검사 결

Table 1 Comparison of EDM notch and hole with corrosion defect specimens

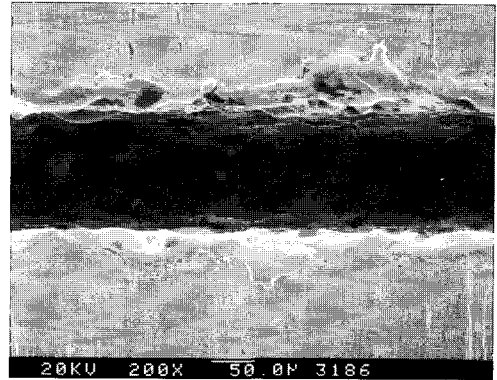
	EDM notch and hole	corrosion defect specimen
defect fabrication	mechanical machining	the similar mechanism by which the defects are formed in plants
SCC	wide notch opening (> 150 μm)	- small crack opening (<10 μm) - intergranular crack path
Pit	empty drill hole	just like the pits in plants, filled with corrosion product
IGA	impossible to simulate	possible to simulate
effect of sludge	impossible to simulate	possible to simulate
cost	low	high
reliability	low	very high

과와 직접 비교하는 것이지만 이는 막대한 전열관 인출 비용은 물론 방사능 오염 및 제염에 따른 활용상의 한계가 있다. 또한 인출 전열관 개수의 제한으로 파괴 및 비파괴 검사 결과의 상호 비교를 통한 통계의 신뢰성이 부족하다.

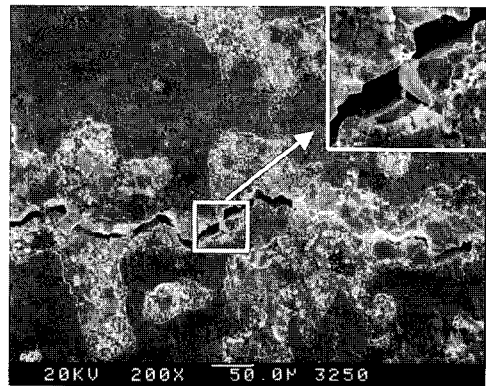
따라서 다양한 형태의 부식결함을 전열관에 형성시키고 이에 대한 비파괴 및 금속학적 파괴 검사를 동시에 수행한 다음 두 결과를 비교함으로써 보다 신뢰성 있는 교정 인자를 구할 수 있게 된다. 또한 부식결함 시편을 이용한 모의훈련을 통하여 평가자의 기량 향상 및 검증이 가능하다. 현재 각국에서는 결함 형태에 따른 별도의 보수기준을 적용하고 있으며, 발전소별로 결함의 유형도 달리 나타나고 있다. 국내의 경우도 2.1절에서 기술한 모든 형태의 부식 및 기계적 손상이 발생하고 있으므로 이에 대응하는 결함의 제작기술 확보와 이를 이용한 모의 절차의 중요성이 증대되고 있음을 알 수 있다.

2.4. 파괴검사에서 도출된 관점

가동중 결함이 발견된 전열관의 손상원인을 규명하고 ECT의 신뢰성을 평가하기 위하여 손상 전열관을 인출하여 금속학적인 파괴검사를 실시하고 있다. 국내의 경우 고리 1, 2호기 및 울진 1호기 전열관에 대하여 총 6회의 인출검사를 수행한 바 있다[2~7]. 다음은 이 자료를 근



(a)



(b)

Fig. 1 Comparison of EDM notch with corrosion crack;

(a) EDM notch and (b) corrosion crack

거로 결함 유형별 ECT의 신뢰성을 분석한 것이다.

2.4.1. Pitting

1988년과 1992년에 고리 1호기에서 인출한 핏팅 손상 전열관에 대한 금속학적 파괴검사 결과와 인출 직전 수행된 ECT 검사자료를 분석하였다. 증기발생기 A의 cold leg R26C38 전열관에서는 인출 전 ECT에서 37%(#1)와 64%(#2) 깊이의 핏트(pit) 신호가 검출되었다. 파괴검사에서는 #1의 깊이는 조사하지 않았으며 #2의 깊이는 약 46%로 평가되었다. 증기발생기 B의 hot leg R36C45에서는 인출 전 ECT에서 94% 깊이의 핏트가 예측되었으나 파괴검사 결과 전혀 결함이 존재하지 않았다. 1992년에 인출한 증기발생기 B의 hot leg R25C29 전열관의 경우

ECT 검사시 tube sheet 상단 198mm에서 최대 44% 깊이의 다중 결함신호가 나타났다. 실제로 최대 2mm 직경의 핏트가 3~4개 관찰되었고, 정확한 깊이 평가는 수행되지 않았으나 대략 40% 깊이로 추정된다. 또한 환관 천이 영역에서는 핏트 바닥에 IGSCC가 발생한 핏트를 포함하여 여러 개의 핏트가 발견되었다. 이곳은 ECT에 의한 결함신호가 없던 부위였는데 핏트와 IGSCC 깊이의 합이 전열관 두께의 12% 이하로 작으며, 슬러지가 존재하는 환관 천이지역이기 때문에 탐지되지 않았을 것이다.

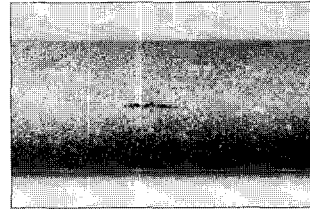
비교자료 개수가 적은 점은 있으나 이상의 결과는 핏트에 대한 ECT 결과가 일관되지 않음을 보여준다. 특히 94%로 예측된 결함이 실제 인출검사에서는 발견되지 않은 사례와 같이 결함평가의 신뢰성 향상이 필수적임을 알 수 있다.

2.4.2. 응력부식균열

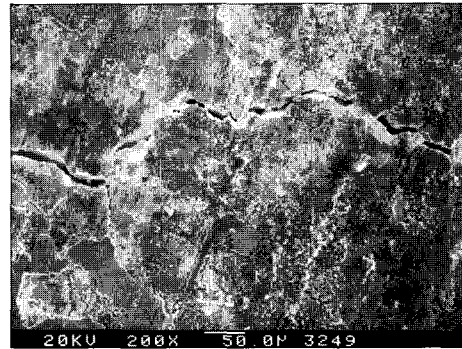
1989년 고리 2호기 증기발생기 B의 hot leg에서 R17C64와 R16C61 전열관을 인출 검사하였다. R17C64의 경우 TTS(top of the tube sheet)에서 깊이가 15mm이고 깊이가 60%인 축방향 균열 3개가 존재할 것으로 예측되었으나, 파괴검사 결과 TTS-12mm 위치의 2차측에서 6개의 원주방향 균열이 발견되었으며 최대깊이는 100 μ m였다. 또한 TTS+1~2mm 위치에서는 ECT에서 탐지되지 않은 120 μ m 깊이의 원주방향 PWSCC가 6개 추가 발견되었다. R16C61에서는 TTS 위치에 깊이가 80% 이상의 최대깊이 19mm인 축방향 균열 4개가 탐지되었으나 파괴검사에서는 TTS+10~30mm 위치에 최대깊이 23%인 14개의 축방향 균열이 발견되었다. 결함의 분포위치는 원주방향으로 270도 범위에 산재하는 것으로 예측되었으나 실제로는 45도의 좁은 범위내에 집중되어 존재하였다. 1999년의 울진 1호기 인출검사에서는 깊이가 2mm이고 깊이가 89%인 축방향 균열이 탐지되지 않은 바 있다. 이상의 결과는 균열형태의 결함에 대한 ECT 검사 역시 일관성 있는 신뢰도를 보이지 않음을 명백히 보여준다.

3. 부식결함 제작 모형

한국원자력연구소 재료기술개발팀에서 현재까지 제작한 부식결함은 ODSCC, pitting, IGA의 3가지이며 PWSCC 시편을 제작 중에 있다. 이에 대하여 간략히 소개하고자 한다.



(a)



(b)

Fig. 2 ODSCC morphology ; (a) penetration test and (b) SEM image

3.1. 2차측 응력부식균열

전열관에 균열을 생성시키고자 하는 부위를 제외한 지역을 masking한 다음 응력을 가한 상태로 상온 부근에서 환원성 황화물을 함유한 부식용액에 노출시켜 균열이 생성되도록 한다. 이때 가하는 응력의 형태에 따라서 축방향 또는 원주방향의 균열을 생성시킬 수 있게 된다. 시험 중간에 ECT로 균열성장 정도를 미리 측정할 수 있다. Fig. 2는 비확관부 전열관의 표면에 형성된 축방향 균열에 대한 PT 시험 결과와 SEM으로 관찰한 균열 형상 및 관련된 ECT 자료를 보여주고 있다. 균열이 입계를 따라서 성장하였으며 표면에 부식생성물도 발달하였음을 알 수 있다. 이는 실제 증기발생기에서 관찰되는 결함과 매우 유사한 형태이다. 현재는 온도 변화에 따른 균열생성에 관한 연구가 진행 중에 있다.

3.2. Pitting

전열관에 핏트를 생성시키고자 하는 부위를 제외한 지역을 masking한 다음 염화물을 함유한 280 $^{\circ}$ C의 부식용액

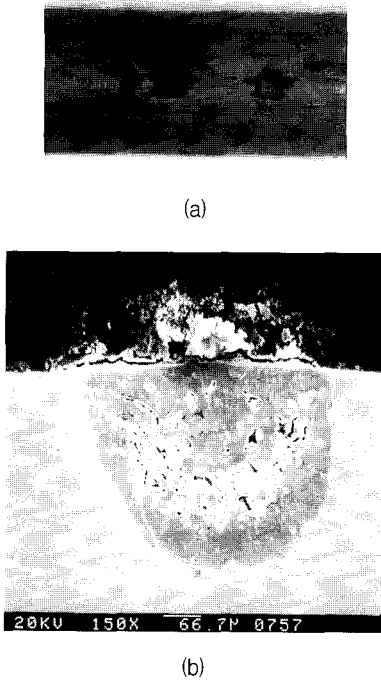


Fig. 3 Pit morphology ; (a) OD surface and (b) cross section

에 침지하여 핏트가 생성되도록 한다. Fig. 3에 그 예를 나타내었다. 전열관 표면에 독립적으로 핏트가 형성되었으며, 핏트의 단면에 대한 관찰로부터 핏트의 내부에는 부식생성물로 채워져 있음을 알 수 있다. 이때 핏트 내부 부식생성물의 성분은 부식용액의 조성에 따라 달라지게 된다. 이는 발전소에서 관찰되는 핏트의 형태와 일치하며, drill hole을 이용한 표준시편과는 근본적으로 차이가 있음을 보여준다.

3.3. 입계부식

전열관에 결함을 생성시키고자 하는 부위를 제외한 지역을 masking한 다음 상온 부근의 환원성 황화물을 함유한 부식용액에 노출시켜 결함이 생성되도록 한다. 전열관 표면과 단면에서의 IGA 시험 결과 및 관련된 ECT 자료를 Fig. 4에 제시하였다. IGA는 입계만이 부식되는 현상이므로 기계적 가공에 의하여 모사할 수 없음을 명백히 알 수 있다. 현재 고온의 부식용액에서 IGA를 형성하기 위한 연구도 진행되고 있다.

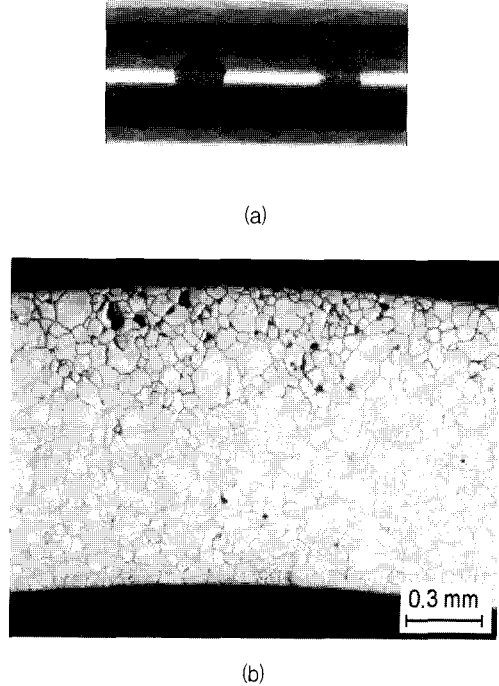


Fig. 4 IGA morphology ; (a) OD surface and (b) cross section

4. 활용방안

본 연구팀은 결함의 발생 기구별 (ODSCC, PWSCC, IGA, pitting), 균열의 방향별 (축방향, 원주방향), 결함의 발생 위치별 (확관부, 비확관부)로 결함제작 및 제어기술을 확보하고자 한다. 또한 결함형태, 위치, 방향 및 ECT 장비와 탐촉자에 따른 탐지한도, 탐지확률, 측정오차 등을 정량화하며 이를 data base화 할 것이다.

이러한 연구를 통하여 결함의 종류, 결함의 발생 위치, 탐촉자 및 검사장비의 종류에 따른 검출한도, 탐지확률, 측정오차 등을 정량적으로 평가하고 교정 인자를 도출함으로써 정확성을 크게 향상시킬 수 있다. 또한 다양한 부식결함들을 제작하고 이에 대한 파괴 및 비파괴 신호의 data base를 구축함으로써 유사신호 탐지시 판단자료로 활용할 수 있다. 다양한 부식결함을 이용한 모의훈련과 round robin 시험은 검사자의 기량을 검증하고 향상시킬 수 있는 획기적인 방법이 될 것이다.

또한 건전성 평가, 수명예측, 전열관의 보수 및 대체관 막음 기준 설정시 핵심자료인 파열압력, 누설률 등을 정

확히 평가하기 위해서는 결함의 형태 및 크기에 따른 부식결합 시편의 제작기술 확보가 필수적이다. 장기적으로는 고리 1호기 퇴역 증기발생기의 활용연구를 위한 사전 연구 측면에서의 활용 가치도 매우 크다고 판단된다.

5. 결 론

부식결합을 이용한 증기발생기 전열관에 대한 와전류 검사 신뢰성 향상 연구의 필요성을 종합적으로 고찰하고, 실험실적인 부식결합 제작 모형을 소개하며 그 활용방안을 제시하였다. 현재 상업운전중인 국내 원전의 개수가 16기 (증기발생기 46기)에 이르고 해마다 손상 전열관의 수가 증가하는 추세에 있으며, 결함 유형도 다양해지고 있다. 또한 인출 전열관에 대한 검사결과로부터 ECT가 일관성 있는 신뢰도를 보이지 않음을 알 수 있었다. 따라서 가동중 비파괴 검사의 정확성에 대한 필요성이 더욱 높아질 것이며, 검사 신뢰도에 대한 정량적 기준이 요구 될 것으로 판단된다. 이에 대비하기 위하여 부식결합의 제작기술 확보와 이를 이용한 비파괴 검사의 신뢰성 향상기술 개발이 시급히 요청된다. 이를 위해서는 발전소 운영자, 비파괴 검사기관, 규제기관의 통합적 참여가 필요하다.

후 기

본 연구는 한국원자력연구소의 자체연구개발사업비의 지원으로 수행된 것입니다.

참고문헌

- [1] P.E. MacDonald, V.N. Shah, L.W. Ward, P.G. Ellison, Steam Generator Tube Failures, NUREG/CR-6365, (1996)
- [2] D.R. Diercks et al, Steam Generator Tube Integrity Program, NUREG/CR-6511, (1999)
- [3] KAERI, Examination of Steam Generator Tubes Pulled from Kori 1, (1989)
- [4] KAERI, Examination of Steam Generator Tubes Pulled from Kori 2, (1990)
- [5] KAERI, Examination of Steam Generator Tubes Pulled from Kori 1, (1992)
- [6] KAERI, Examination of Steam Generator Tubes Pulled from Kori 1, (1995)
- [7] P.M. Scott, B. Cochet, Ulchin 1 Steam Generators, Presentation of the Framatome Study, Seoul (1995)
- [8] KAERI, Examination of Steam Generator Tubes Pulled from Ulchin 1, (1999)