

회전형 탐촉자의 다중균열 분해능이 증기발생기 전열관의 구조건전성 평가에 미치는 영향

An Effect on the Structural Integrity Assessment of Steam Generator Tubes with Resolution of Rotating Pancake Coils for Multiple Cracks

강용석*[†], 천근영*, 남민우*, 박재학**

Yong-Seok Kang*[†], Keun-Young Cheon*, Min-Woo Nam* and Jai-Hak Park**

초 록 회전형 탐촉자(RPC)는 증기발생기 전열관의 결함 탐지 및 크기 측정 목적으로 널리 사용되고 있다. 손상이 탐지된 전열관에 대한 건전성 평가는 비파괴검사서 얻어진 열화의 크기 정보를 바탕으로 수행되기 때문에 검사기술의 성능은 전열관의 건전성 평가에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 동일 전열관의 인접한 거리에 다중균열이 존재할 경우 검사 기술의 결함 분해능에 제약이 따를 수 있으며 그 영향이 클 경우 근접한 다중균열이 상대적으로 큰 단일균열로 평가될 수 있으므로 전열관의 구조건전성 평가에 오류를 유발할 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서는 방전가공으로 균열을 모사한 인공결함에 대한 RPC 탐촉자의 결함 분해능을 관찰하고 전열관의 구조건전성 평가에 미치는 영향을 살펴보았다. 동일 직선상에 놓인 다중균열은 매우 근접한 거리까지 개별균열 식별이 가능하여 건전성 평가에 미치는 영향이 없는 반면, 인접한 거리에 평행하게 놓인 균열의 경우는 RPC 탐촉자의 분해능이 낮아서 부정확한 결함 크기 정보가 얻어지므로 결함관의 과열압력 예측에 영향을 미칠 수 있다.

주요용어: 증기발생기 전열관, 다중균열, 회전형 탐촉자, 전열관 건전성 평가

Abstract The eddy current testing performance directly affects the results of a steam generator tube integrity assessment because the integrity assessment of defected tubes is conducted based on eddy current testing results. This means that it may not be possible to accurately discriminate between adjacent flaws. This paper presents an investigation on the resolution of rotating pancake coils with multiple cracks and the effects on the structural integrity assessment of steam generator tubes.

Keywords: Steam Generators Tubes, Multiple Cracks, Rotating Pancake Coils, Tube Integrity Assessment

1. 서 론

1.1. 증기발생기 전열관의 건전성

1.1.1. 구조건전성 기준

원자력발전소의 안전성에 대한 관심이 높아짐에 따라 증기발생기 전열관에 대한 가동중검사가 강화되고 있다. 현재 국내외에서 적용되고 있는 증

기발생기 관리프로그램(SGMP: steam generator management program)은 증기발생기 전열관의 건전성을 입증하기 위해 발전소별로 정해진 성능기준을 제시하고 가동중검사서 탐지된 결함이 성능기준을 만족하고 있는지를 확인하도록 요구하고 있다[1]. 특히 전열관의 구조건전성 성능 요건으로 발전소 정상출력운전 중 전열관 내외벽 차압의 3배 그리고 설계기준사고 시에는 전열관 내외벽 차압의 1.4배의 안전 여유도를 제시하고 있다[2,3].

[접수일: 2014. 7. 9, 수정일: (1차: 2014. 8. 21, 2차: 2014. 10. 4), 게재확정일: 2014. 10. 21] *한국수력원자력(주) 중앙연구원, **충북대학교 공과대학 안전공학과, [†]Corresponding Author: Korea Hydro & Nuclear Power Company Ltd., Central Research Institute, Daejeon 305-343, Korea (E-mail: kysme@khnp.co.kr)

1.1.2. 축방향 외면균열 구조건전성 평가

국내 증기발생기에서는 주로 관관상단 확관천이 부위에서 균열결함이 검출되어 왔으나 최근에는 전열관 지지대 부위에서의 축방향 외면균열 수량이 증가하고 있다[4,5]. 검사의 효율성과 신뢰도 제고를 위하여 Bobbin 탐촉자 검사에서 이상신호가 검출되면 회전형 탐촉자(RPC: rotating pancake coils)로 확인검사를 수행하여 결함여부를 결정하고 크기를 평가하고 있다.

결함관에 대한 구조건전성 평가는 결함 크기 정밀평가 정보를 바탕으로 산출된 예상 파열압력을 각 발전소별 제시된 성능 요건과 비교하여 결함관의 안전 여유도를 평가하고 있다. 미국 전력 연구원(EPRI: electric power research institute)에서는 전열관에 존재하는 축방향 부분관통균열에 대한 구조한계 관점에서의 파열압력 예측 모델을 아래와 같이 제시하고 있다[6].

$$P_B = 0.58(\sigma_y + \sigma_u) \frac{t}{R_i} \left[1.104 - \frac{L}{L+2t} h \right] \quad (1)$$

여기서, P_B : 예측된 파열압력, MPa

σ_y : 항복강도, MPa

σ_u : 인장강도, MPa

t : 전열관 두께, mm

R_i : 전열관 내측 반경, mm

L : 균열 유효길이, mm

h : 전열관 두께 대비 균열 깊이 비

축방향 균열의 경우는 결함의 길이와 깊이 분포에 따라 전열관의 파열압력이 상이하므로 해당 결함 형상에서 가장 취약한 부분을 찾아내는 weak link(or structural minimum) 모델 계산을 수행하여 결함의 유효깊이와 유효길이(effective depth & length)를 산출하여 전열관의 파열압력을 예측하고 있다. Fig. 1의 상단 그림은 RPC 검사에서 얻어진 축방향 부분관통균열에 대한 길이 대비 깊이 분포(crack profile)를 제시한 것으로 음영된 영역이 손상된 부분의 형상을 보여주고 있는 것이다. Fig. 1의 하단 그림은 weak link 모델 해석을 통해 유효깊이와 유효길이를 가지는 일정 깊이(사각형) 결함으로 이상화시킨 결과이다[7,8]. 여기에서 구한 균열의 유효 크기 데이터를 식(1)에 대입하면 구조한계(structural limit) 측면에서의

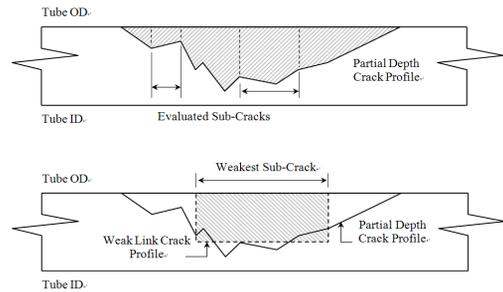


Fig. 1 Representative part-throughwall axial crack profile (upper) and weak link profile (lower)

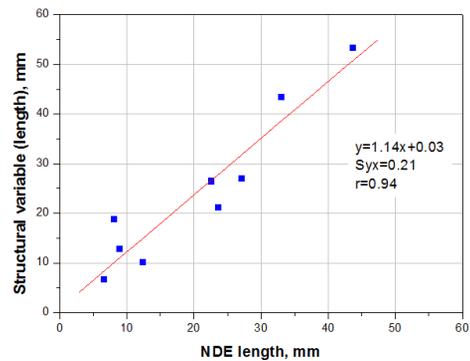


Fig. 2 NDE length measurement performance curve (EPRI ETSS 21409.1)

파열압력을 예측할 수 있다.

1.2. 전열관 비파괴검사 기술 성능

검사기술과 평가자를 통합하여 지칭하고 있는 검사체계성능(NDE system performance)은 열화기구에 대한 탐지확률과 크기평가가 오차로 정량화되므로 전열관 검사를 위해서는 인정된 기술을 적용해야 한다[9]. 현재 국내에서는 EPRI에서 개발한 검사기술 사양서(ETSS: eddy current examination technical specification sheet)에 제시된 기술기준을 인정된 검사기술로 간주하여 적용하고 있다[10].

Fig. 2는 EPRI의 축방향 균열검사를 위한 와전류검사 성능곡선[11]을 제시한 것으로 비파괴검사서에서 평가된 결함의 크기가 파괴검사 결과와 유사함을 알 수 있다. 그러나 근접한 거리에 존재하는 다중균열에 대한 분해능에 제약이 있을 경우는 크기가 작은 여러 개의 균열들이 상대적으로 큰 단일균열로 평가될 수 있으므로 결함의 크기 평가나 수량 산출시 오류를 유발할 수 있게 된다.

2. 실험

2.1. 시험 재료 및 결함 가공

RPC 탐촉자의 인접균열 분해능을 확인하기 위하여 증기발생기 전열관 재료로 널리 사용되고 있는 니켈-합금 계열의 Alloy 690TT 전열관에 결함간 거리를 일정하게 변화시킨 다중균열을 가공한 후 RPC 탐촉자로 검사 신호를 수집하였다.

실제 균열은 형상이 복잡하여 모사시편 제작과 분석에 어려움이 있으므로 본 연구에서는 사각형으로 단순화시킨 결함 형상을 모사하여 적용하였다. 인공균열은 외경이 19.05 mm이고 두께가 1.07 mm인 전열관에 방전가공(EDM: electro discharge machining)으로 일정한 형태로 가공하였으며, 균열의 폭은 가공 가능한 최소 폭인 0.13 mm로 설계하였다. 균열의 형태는 모두 축방향 외면 부분관통균열이며 동일 직선상에 일직선으로 있는 균열(collinear crack)과 원주방향으로 평행하게 있는 균열(parallel crack)로 가공하였다. 결함의 크기는 길이 12.7 mm 그리고 깊이는 전열관 두께의 50%로 일정하게 고정하였다(Table 1). 결함간 거리는 동일 축 선상에 일직선으로 있는 경우와 평행하게 나란히 있는 경우 모두 최소 1 mm에서부터 최대 6 mm까지 1 mm씩 등간격으로 증가시켜 가공하였다(Fig. 3~5 참조).

전열관에서의 실제 균열결함은 관관상단 확관천이 부위나 전열관지지대 또는 곡관부 등 다양한 위치에서 발생할 수 있으며, 결함부위에 덴트(dent)나 지지구조물 신호가 혼재하거나 지지구조물에 퇴적된 슬러지 성분 등으로 인한 잡음(noise) 성분이 존재할 수 있지만 본 실험에서는 실험조건을 단순화하기 위하여 슬러지 퇴적이나 구조물 신호가 없는 직관부를 모사하여 검사 신호를 취득하였다.

2.2. 신호 취득 및 평가

와전류검사에 적용된 검사 장비 사양을 Table 2에 요약하였다. 검사 신호 취득 장비는 다중주파수 디지털 장비인 Zetec사의 eddynet data acquisition system과 MIZ-70 remote data acquisition unit(ZAC)를 사용하였다(Fig. 6 참조). 탐촉자는 +point coil, 중간주파수 영역의 pancake

Table 1 Dimension of test specimens

Flaw Type	Depth (%TW)	Length (mm)	Distance (mm)
Parallel crack	50	12.7	1~6
Collinear crack	50	12.7	1~6

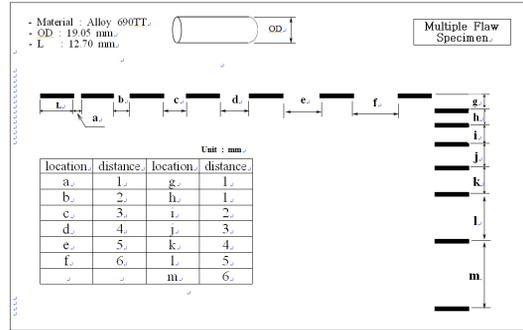


Fig. 3 Layout of the EDM notch flaws in a steam generator tubes for inspection



Fig. 4 EDM notch specimen containing parallel cracks



Fig. 5 EDM notch specimen containing collinear cracks

coil 그리고 고주파수 영역의 pancake coil로 구성된 3코일을 이용하였으며 +point coil 채널에서 평가하였다. 탐촉자 이송장비는 10D dual push-puller system을 사용하였다. 검사 주파수는 400/300/100/20 kHz 등 4가지를 적용하였으며 결함 크기 평가 주파수인 300 kHz에서 데이터를 기록하였다.

Table 2 Test facilities

Frequency Generator	MIZ-70
Probe Head	ZRPC-DH3-E00.610-C01
Motor unit	ZMUS-9D-E00.560-0
Frequency configuration	400/300/100/20 kHz
Probe Motor Controller	PM-3A
Push Puller	10D



Fig. 6 Layout of the eddy current testing equipments for inspection

검사 신호는 다중균열이 가공된 시편 내부에서 RPC 탐촉자를 전열관 축방향으로 일정한 속도로 인출하면서 취득하였다. 탐촉자 인출 속도는 실제 가동중검사에서 적용하고 있는 조건과 동일하게 12.7 mm/sec (0.5"/sec)와 5.1 mm/sec (0.2"/sec)로 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 근접 균열결함신호 평가 결과

동일한 축 선상에 연속적으로 생성된 결함(collinear cracks)의 검사 신호를 제시한 Fig. 7을 보면, 결함간 거리가 가장 가까운 1 mm 부터 가장 먼 6 mm 까지 검사 신호가 모두 선명하게 형성되어 있음을 알 수 있다. 따라서 현재 적용되고 있는 RPC 탐촉자 검사를 이용하면 동일한 축 선상에 축방향으로 형성된 근접한 다중균열은 균열간

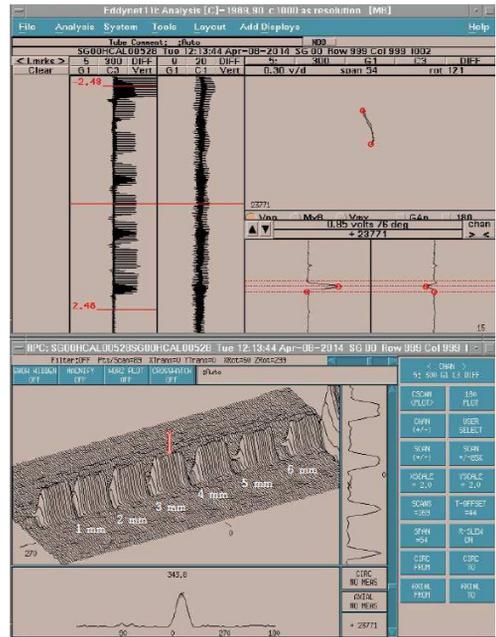


Fig. 7 RPC graphics on collinear cracks (12.7 mm/sec)

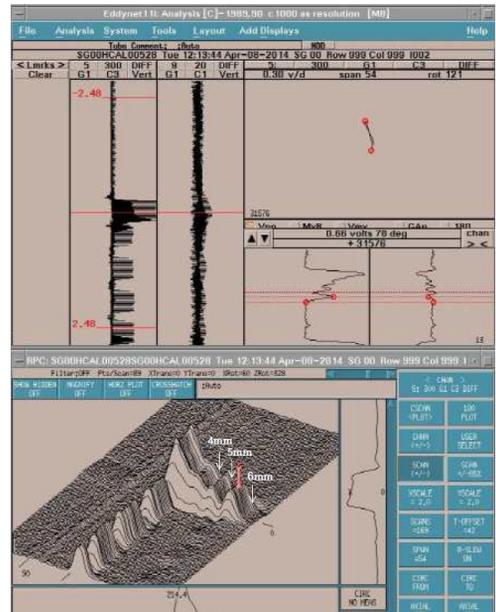


Fig. 8 RPC graphics on parallel cracks (12.7mm/sec)

거리가 최소 1 mm 까지도 단일균열인지 다중균열인지 명확하게 식별이 가능하다고 볼 수 있다.

이와는 달리 원주방향으로 평행하게 형성된 균열(parallel cracks)의 경우는 Fig. 8에서 보여주고 있는 바와 같이 결함간 거리가 근접할수록 결함

신호 식별이 곤란함을 알 수 있다. 균열간 거리가 5 mm 이상인 경우는 신호 식별이 용이한 반면 4 mm인 경우는 명확한 식별이 어렵고 이보다 더 가까운 경우는 신호가 혼재되어 개별균열의 식별이 불가능하였다.

3.2. 인접한 다중균열 분해능이 전열관의 구조건전성 평가에 미치는 영향

3.2.1. 동일 직선상의 다중균열

Fig. 9는 일직선상에 동일한 형상의 서로 다른 두개의 축균열이 1 mm 간격으로 생성되었을 경우의 균열 형상을 가정하여 제시한 것이다. 균열간 거리 1 mm는 EDM 노치 가공이 가능한 최소 거리이다. 만일 결함간 거리 1 mm의 결함을 식별할 수 있다면 이보다 원거리 균열은 충분히 식별 가능할 것이다.

Table 3은 일직선상에 길이 12.7 mm, 깊이 50%TW인 두개의 균열이 놓여 있는 상태에서 결함간 거리가 변화될 때 결함의 유효크기 평가 결과를 제시한 것이며, 결함간 거리가 0 mm인 경우를 제외하면 모두 유효길이 12.7 mm, 유효깊이 50%TW로 평가되었다. 여기서 결함간 거리가 0 mm인 경우는 개별균열 식별이 곤란하여 두개의 균열이 한 개의 균열로 평가되었을 때를 가정한 것이며, Fig. 10에 제시한 바와 같이 유효깊이 50%TW, 유효길이 26.4 mm로 평가된다. 그러나 일직선상에 놓인 다중균열의 경우는 Fig. 7에서와 같이 균열간 거리가 1 mm까지 근접했을 경우에도 개별균열을 명확하게 식별 가능하였으므로 결함의 크기는 Fig. 11에서 보여주는 바와 같이 유효길이 12.7 mm, 유효깊이 50%TW로 평가되었다.

따라서 동일 축 선상에 생성된 다중균열은 근접한 균열에 대한 RPC의 분해능이 우수하여 정확한 결함 크기 데이터를 구할 수 있으므로 전열관의 구조건전성 평가에 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다.

3.2.2. 평행하게 생성된 다중균열

원주방향으로 평행하게 생성된 다중균열의 경우, 결함간 거리가 4 mm 이상일 때는 개별균열의 명확한 식별이 가능하므로 결함의 유효크기

Table 3 Calculated effective crack size with multiple collinear cracks

Crack Distance(mm)	Effective Depth (%TW)	Effective Length (mm)
0	50	26.4
1	50	25.4
2	50	25.4
3	50	25.4
4	50	25.4
5	50	25.4
6	50	25.4

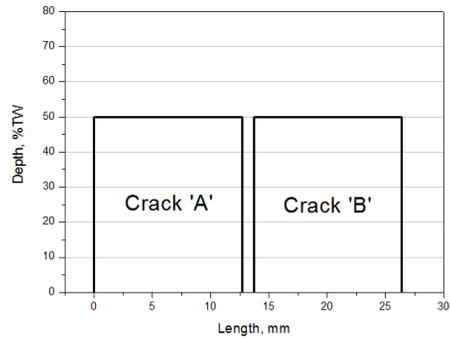


Fig. 9 Assumed crack profile with two sing crack

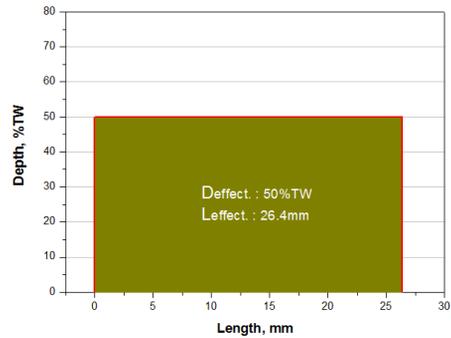


Fig. 10 Calculated crack profile with weak link (crack distance 0 mm)

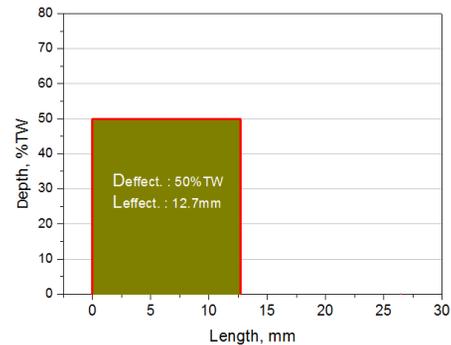


Fig. 11 Calculated crack profile with weak link (crack distance 1~6 mm)

평가에 영향을 미치지 않는다. 그러나 이보다 가까운 경우는 개별균열 식별이 불가능하므로 길이와 깊이가 서로 다른 두개의 균열이 있을 경우 두개의 균열이 겹쳐져서(over lap) 보다 큰 단일 균열로 과대평가되기 때문에 예상 파열압력은 실제보다 낮게 평가되게 된다.

4. 결 론

EDM으로 다중균열을 모사한 인공결함에 대한 RPC 탐촉자의 결함 분해능을 관찰하고 전열관의 구조건전성에 미치는 영향을 살펴본 결과는 다음과 같다.

- 1) 동일 직선상에 존재하는 다중균열은 균열간 거리가 1 mm까지 근접한 경우에도 개별균열의 식별이 가능하였다.
- 2) 동일 직선상에 생성된 다중균열은 RPC 분해능이 우수하므로 건전성 평가를 위한 결함의 유효크기 평가에 영향을 미치지 않는다.
- 3) 평행하게 생성된 다중균열은 균열간 거리가 4 mm 이상일 경우 개별 균열 식별이 가능하였으나 이보다 가까운 경우는 개별 균열의 식별이 곤란하였다.
- 4) 평행하게 생성된 다중균열은 균열간 거리가 4 mm 이내일 경우 개별균열 식별이 불가능하기 때문에 결함의 크기가 과대평가되어 실제보다 낮은 파열압력이 산출될 수 있다.

참고문헌

[1] H. Cothron, "Steam Generator Integrity Assessment Guidelines, Revision 3" 1019038,

- EPRI, pp. 2-1 ~ 2-4 (2009)
- [2] "NEI 97-06 Steam Generator Program Guidelines, Revision 3", Nuclear Energy Institute, p. 7 (2011)
- [3] H. Cothron, "Steam Generator Integrity Assessment Guidelines, Revision 3", 1019038, EPRI, p. 2-1 (2009)
- [4] Y. S. Kang and D. M. Shin, "증기발생기 열화평가 보고서(한빛4호기 제14차 계획예방정비)", KHNP-SGMP-DA-2013HB4-14 Revision 0, KHNP, pp. 8-11 (2013)
- [5] Y. S. Kang, "증기발생기 상태 감시 평가 보고서 (한빛4호기 제14차 계획예방정비)", KHNP-SGMP-CM-2013HB4-14 Revision 0, KHNP, pp. 5-6 (2014)
- [6] H. Cothron, "Steam Generator Degradation Specific Management Flaw Handbook, Revision 1", 1019037, EPRI, pp. 5-15 (2009)
- [7] H. Cothron, "Steam Generator Degradation Specific Management Flaw Handbook, Revision 1", 1019037, EPRI, pp. 5-21 (2009)
- [8] EPRI Eddy Current Examination Technique Specification Sheet Appendix I ETSS #I-28432, p. 14 (2011)
- [9] S. Swilley, "Pressurized Water Reactor Steam Generator Examination Guidelines Revision 7", 1013706, EPRI, p. 6-1 (2007)
- [10] "Integrated Guidelines of Steam Generator Management Program Revision 3, Inspection", KHNP, p. 19 (2014)
- [11] EPRI Eddy Current Examination Technique Specification Sheet ETSS #21409.1 Rev.7, pp. A-255 (2010)