

'98 추계학술발표회 논문집

한국원자력학회

증기발생기 전열관의 1차측 응력부식균열 결함깊이 평가

Flaw Depth Evaluation of Primary Water Stress Corrosion Cracking in Steam Generator Tubing

박인규

선문대학교

충남 아산시 탕정면 갈산리 100

요 약

본 연구에서는 신호진폭 및 위상각 등의 ECT 결과를 이용한 PWSCC 결함의 깊이 예측에 대한 가능성과 이에 대한 신뢰도를 분석하였으며, 인출 전열관에 대한 현미경검사를 통한 균열길이와 깊이 사이의 상관관계를 분석하였다. 분석결과에 의하면 PWSCC 결함 길이와 결함깊이 사이에는 절대적 상관관계가 존재하지 않으며, ECT 결과에 따른 매개변수(신호진폭, 위상각)와 PWSCC 결함깊이 사이에도 정확한 상관관계는 존재하지 않는다. ECT 신호진폭의 증가에 따라 결함깊이는 증가하지만, 데이터의 분산이 크므로 1:1 대응 관계를 지을 수는 없다. 한편 발전소 데이터 분석 자료와 인출 전열관 시험결과에 따르면, 균열길이가 6 mm 이상이면 관통균열일 가능성이 매우 높다. 그러므로 누설방지를 위해서는 균열길이가 6 mm 이상일 경우에는 관막음을 할 필요가 있다.

Abstract

Flaw depth evaluation was performed on the primary water stress corrosion cracking in steam generator tubing, with the eddy current test results such as signal amplitude and phase angle. The relationship between crack length and crack depth was also investigated, based on the metallographic results of pulled-out tubings. This study yields the following

results and conclusions: (1) there is no correlation between crack length and crack depth. (2) it is not easy to correlate the crack depth with phase angle. (3) although signal amplitude appears to be related with crack length, the latter cannot exactly be obtained from the former value. (4) since most cracks with the length above 6 mm could be a through-crack, it would be helpful to plug that tubing in order to prevent tube-leaking.

1. 서론

전 세계적으로 원자력 발전소 증기발생기 전열관에 발생한 PWSCC 결함에 대해서는 종래의 40% 관막음 기준을 적용하는 것은 너무 보수적인 것으로 밝혀졌으며, PWSCC에 대한 대체 관막음기준(ARC: Alternate Plugging Criteria)으로 균열길이 기준을 적용하고 있다 [1, 2]. 즉, 균열길이가 최대 허용균열길이를 초과하지 않는 한 정비없이 계속 운전이 가능하다. 파단전누설(LBB: Leak Before Break) 개념을 적용하여 결함 전열관의 건전성을 확보할 수 있다. 즉, 균열에 의해 전열관이 파열되기 전에 충분한 누설이 발생하므로 사전에 정비가 가능하다. 한편 균열이 관통균열일 경우에는 누설이 발생하므로, 기준치를 초과하지 않는 누설은 허용되고 있다. 즉 LBB 개념을 바탕으로 하는 균열길이 기준을 적용할 경우에는 소량의 누설을 허용하여야 한다. 국내 J-발전소에서도 잠정적으로 균열길이 기준을 적용하고 있다. 현재 관막음 기준으로는 축방향 결함의 경우에는 균열길이 13mm를 적용하고 있으며, 원주방향 결함은 모두 관막음 조치한다. 그러나 국내에서는 균열길이 기준을 적용하더라도 누설은 허용할 수 없다는 정서가 지배적이다. 그러므로 와류탐상검사(ECT: Eddy Current Test) 결과를 토대로 균열깊이를 예측하여 관통균열이 되기 전에 정비를 하는 것이 요구되고 있는 실정이다. 이는 증기발생기의 건전성 및 안전성 측면에서 너무 보수적인 면이 있으나 PA(Public Acceptance) 측면에서는 중요한 관리전략으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 ECT 결과를 이용한 균열깊이의 예측 가능성과 이에 대한 신뢰도를 분석하였다.

2. 결함깊이 예측의 이론적 배경

일반적으로 MRPC(Motorized Rotating Pancake Coil)를 이용한 ECT의 신호 진폭은 균열 깊이를, 위상각은 균열깊이를 나타내며 재료의 특성 및 탐촉자의 성질에 따른 이론적 상관관계는 다음과 같다[3].

임피던스(Impedance), Z 의 크기와 위상각(Phase angle), θ 는 각각 식(1) 및 식(2)로 표현된

다.

$$Z = (R^2 + X_L^2)^{1/2} \text{ ----- (1)}$$

$$\theta = \text{Tan}^{-1} (X_L / R) \text{ ----- (2)}$$

여기서 R은 탐촉자의 저항치(Resistance of the Wire), X_L 은 Inductive Reactance를 나타낸다.

한편 위상각, θ 와 결함깊이 사이의 관계는 다음 식(3)과 같다.

$$\theta(\text{radians}) = X / \delta \text{ ----- (3)}$$

$$\delta = 1.98 (\rho / f \mu_{rel}) \text{ ----- (4)}$$

여기서 X는 결함깊이이며, ρ 는 재료저항($\mu\text{ohm-cm}$), f는 시험주파수(hertz), μ_{rel} 은 상대투자율(Relative Permeability)이다.

식(3)에 나타난 바와 같이 ECT 결과에서 균열깊이를 나타내는 매개변수는 위상각 θ 이다. 즉, θ 값이 증가할수록 균열의 깊이가 깊은 것을 나타낸다. 관통결함(즉, $X = \delta$)일 때의 위상각은 $\theta = 57^\circ$ 이다. 그러나 θ 의 측정오차는 매우 커서, θ 데이터에 대한 신뢰도가 매우 낮으므로 위상각 θ 를 사용하여 균열깊이를 예측하는 것은 거의 불가능한 것으로 알려져 있다. 이와 같이 신호크기 또는 위상각으로 누설예방 관막음기준을 설정하는 데에는 어려움이 있다.

3. PWSCC 길이와 깊이의 상관관계 분석

3.1 발전소 데이터 분석

3.1.1 Dampierre 발전소 데이터 분석

그림 1은 Dampierre 발전소로 부터 취득한 데이터를 분석한 결과이다[4]. 균열크기와 균열깊이 사이의 직접적인 상관관계가 없음을 나타내고 있다. 이 데이터로 부터 얻을 수 있는 균열길이와 균열깊이의 상관관계는 다음과 같다.

- (i) 균열길이가 2 mm 미만일 경우에는 모두 관통균열이 아니다.
- (ii) 균열길이가 2 mm 이상일 경우에는 관통균열일 확률이 있다.
- (iii) 균열길이가 7 mm 이상일 경우에는 모두 관통균열이다.

3.1.2 J-발전소 데이터 분석

국내 J-발전소로 부터 취득한 데이터는 그림 2, 3, 4에 나타나 있다. 그림 2는 위상각 θ 와 신호진폭 사이의 상관관계를 나타내며, θ 의 범위는 신호진폭에 관계없이 $5^\circ < \theta < 40^\circ$ 로 나타난다. 즉, 결함의 종류가 1차측 결함인 것을 나타낼 뿐이며, 결함깊이를 나타내는 신호진폭과 결함깊이를 나타내는 위상각 사이에는 아무런 상관관계가 없다. 신호진폭의 증가에 따라 위상각의 폭이 감소하는 것은 단지 신호진폭이 큰 데이터의 수가 작기 때문인 것으로 사료된다. 그림 3은 위상각 θ 와 균열길이 사이의 관계를 나타내고 있으나, 두 매개변수 사이의 상관관계는 나타나지 않는다.

그림 4는 균열길기와 신호진폭 사이의 상관관계를 나타낸다. 데이터의 분산 정도는 매우 크지만, 균열길기가 증가할수록 신호진폭이 증가하는 경향은 뚜렷하다. Daampierre 데이터 분석에 따르면, 균열길기가 7mm 이상이면 관통 균열일 가능성이 있음을 보인다. 국내 J-발전소의 경우에는 신호진폭이 4 volts 이상이면 균열길기가 7 mm 이상일 확률이 있음을 나타내고 있다. 또한 데이터의 하한치를 기준으로 예측하면 신호진폭이 16 volts 이상이면 균열길기는 7 mm 이상인 것으로 분석된다.

3.2 Metallography vs MRPC

1994년 2월에 J-1호기 S/G-C로 부터 2개의 전열관(R2C45, R4C33)을 인출하였다. 인출 전열관에 대한 현미경 검사로 부터 얻은 결과는 표 1과 같다. 인출 전열관에는 모두 다중 결함이 발생한 것으로 밝혀졌으며, R2C45 전열관에는 2개, R4C33 전열관에서는 3개의 PWSCC 결함이 발견되었다. 그림 5는 현미경검사에 의한 실제 균열길이에 따른 균열깊이의 비를 나타내며, 선회귀(Linear Regression) 분석 결과에 의하면 관통균열의 최저 길이는 6.6 mm로 산출된다.

4. 결 론

ECT 결과를 이용한 PWSCC 균열깊이의 예측 가능성과 이에 대한 신뢰도 분석 및 국내외 발전소의 현미경검사를 통한 균열길기와 깊이 사이의 상관관계를 분석하였다. 이에 따르면, ECT 결과의 매개변수인 신호진폭과 위상각에 대한 데이터의 분산 정도가 너무 크므로 이 데이터를 기초로하여 PWSCC 결함의 깊이를 예측하는 데에는 큰 어려움이 있으며 상세내용은 다음과 같다.

- 1) PWSCC 결함의 길이와 깊이 사이에는 절대적 상관관계가 존재하지 않는다.
- 2) ECT 결과에 따른 매개변수(신호진폭, 위상각)와 PWSCC 결함깊이 사이의 정확한 상관관계는 존재하지 않는다.
- 3) ECT 신호진폭의 증가에 따라 결함깊이는 증가하지만, 데이터의 분산이 크므로 1:1 대응관계를 지을 수는 없다.
- 4) 발전소 데이터 분석 자료와 인출 전열관 시험결과에 따르면, 균열길이가 6 mm 이상이면 관통균열일 가능성이 매우 높다.
- 5) 누설방지를 위해서는 균열길이가 6 mm 이상일 경우에는 관막음을 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 한국전력(공)의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다. 또한 자료수집에 적극적으로 협조해 주신 J-1, 2호기 관계자 여러분에게도 감사드립니다.

참고문헌

1. 박인규, “증기발생기 튜브의 1차수 응력부식균열 손상과 관막음 기준 평가”, 전력기술 제 3권 제 3집, pp. 59-66 (1992)
2. V.N. Shah et al, “Assessment of primary water stress corrosion cracking of PWR steam generator tubes,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 134, pp. 199-215 (1992)
3. P.E. MacDonald et al., “Steam Generator Tube Failures,” NUREG/CR-6365, pp. 204-207 (1996)
4. B. Cochet, “Steam Generator Tube Integrity Vol. 2: Leak-Before-Break Analysis for Primary Water Stress Corrosion Cracking Near the Tubesheet(Framatome Data), EPRI NP-6865-L, p.4-23 (1991)

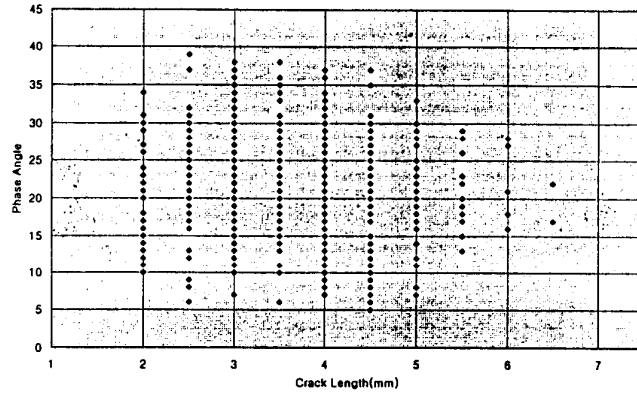


그림 3. 국내 J-발전소의 PWSCC 결함길이와 위상각 사이의 상관관계

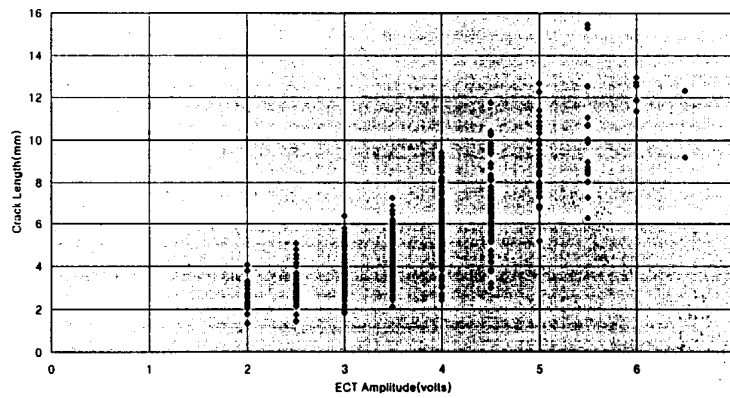


그림 4. 국내 J-발전소의 ECT 신호진폭과 PWSCC 결함길이 사이의 상관관계

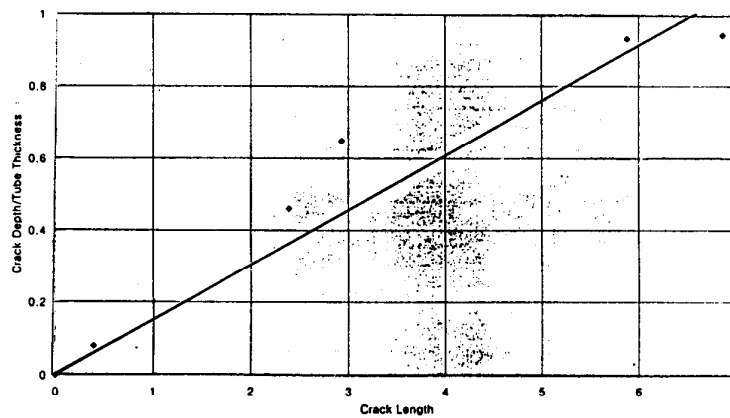


그림 5. 인출전열관의 현미경검사를 통한 PWSCC 결함길이와 (결함깊이/전열관 두께) 사이의 상관관계

표 1. 인출전열관에 대한 현미경검사결과와 MRPC 결과 비교 (단위: mm)

Pulled Tube	Crack No.	Crack Length	Max. Depth	Ligament	MRPC max.
R2C45	1	6.86	1.26	0.075	7.0
	2	0.39	0.11	1.25	
R4C33	1	5.88	1.18	0.09	7.1
	2	2.93	0.82	0.45	
	3	2.39	0.58	0.69	

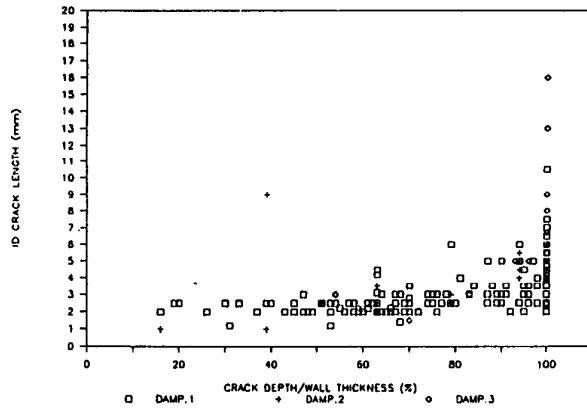


그림 1. Dampierre 발전소의 PWSCC 결함길이와 깊이사이의 상관관계

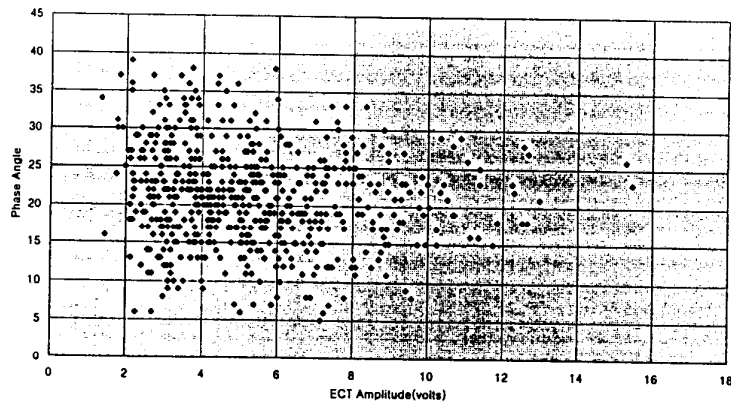


그림 2. 국내 J-발전소의 ECT 신호진폭과 위상각 사이의 상관관계