

증기발생기 전열관 1차측 응력부식균열 형상 분석

Crack Shape Analysis of PWSCC in S/G Tubings

박인규

선문대학교
충남 아산시 탕정면 갈산리 100

Abstract

Crack shape of PWSCC was analyzed, based on the fractured pulled-out S/G tubings of Ulchin-1 steam generator. The shape of the cracks in kiss roll transitions was elliptical shape for short cracks, and car shape for long cracks with flat crack front. The bulging was observed under the inner wall after shot-peening. Crack shape change after shot-peening was resulted from the crack growth restraint in axial direction due to compressive residual stresses on the primary side surface.

1. 서론

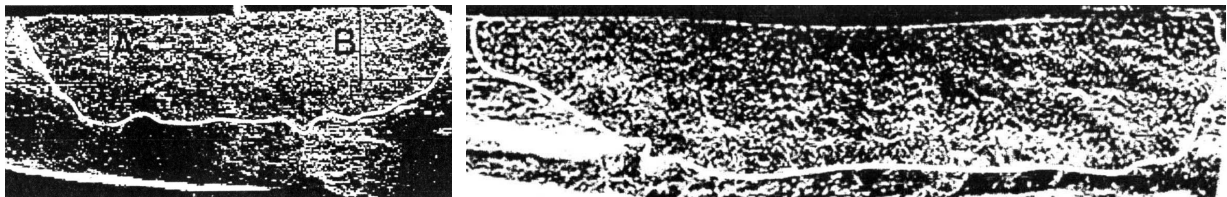
원자력 발전소 증기발생기 전열관에 발생하는 균열성 결함으로는 1차측 응력부식균열(PWSCC: Primary Water Stress Corrosion Cracking) 결함과 2차측 응력부식균열(ODSCC: Outside Diameter Stress Corrosion Cracking) 결함을 들 수 있다. 이와 같은 균열성 결함은 증기발생기 전열관의 누설을 야기시키므로 원자력 발전소의 운전성 및 건전성에 지대한 영향을 미친다.

현재 울진 1, 2 호기의 관막음 기준으로는 파단전 누설(LBB: Leak before Break) 개념을 바탕으로 하여, 축방향 결함의 경우에는 균열길이 13mm를 적용하고 있으며, 원주방향 결함은 모두 관막음 조치한다. 그러나 국내에서는 LBB 균열길이 기준을 적용하더라도 누설은 허용할 수 없다는 정서가 지배적이므로, 와류 탐상검사(ECT: Eddy Current Test) 결과를 토대로 균열깊이를 예측하여 관통균열로 성장하기 전에 누설방지를 위한 예방정비를 실시하고 있다.

균열성 결함의 생성에 따른 증기발생기 전열관의 건전성에 대해서는 많은 연구가 이루어지고 있으나,⁽¹⁻⁴⁾ 누설에 직접적으로 연관되는 균열 성장에 따른 균열형상의 변화에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 전열관의 누설 가능성은 균열의 관통 가능성과 밀접하게 관련되며, 균열의 관통여부는 균열형상에 따라 결정된다. 본 연구에서는 PWSCC 결함의 성장에 따른 균열형상의 변화와, 균열형상의 변화에 미치는 Shot-Peening 효과를 분석하였다.

2. PWSCC 균열 형상 비교

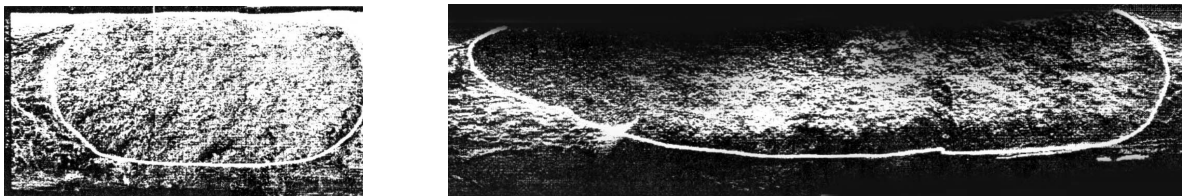
기존의 균열 형상에 관한 연구에 의하면,⁽⁵⁾ kiss-roll을 하지 않은 확관 천이 부위에서 발견되는 PWSCC 결함은 균열길이에 관계없이 반타원형(semi-elliptical) 형상을 나타내는 반면에 kiss-roll 확관부위에서는 균열길이가 짧을 경우에는 타원형(elliptical), 긴 균열일 경우에는 차모양(car shape)으로 나타난다고 보고되고 있다.



(a) R4C33(Crack length: 2.39 mm,
Max. depth: 0.58 mm)

(b) R4C33(Crack length: 5.88 mm,
Max. depth: 1.18 mm)

Fig. 1 Crack morphologies before shot-peening⁽⁶⁾



(a) R4C39(Crack length: 2.1 mm,
Max. depth: 1.07 mm)

(b) R4C30(Crack length: 6.15 mm,
Max. depth: 1.09 mm)

Fig. 2 Crack morphologies after shot-peening⁽⁶⁾

울진 1호기의 전열관은 kiss-roll 환관 전열관이며, 1994년에 shot-peening을 실시하였다. Fig.1과 Fig.2는 울진 1호기 증기발생기-C에서 인출한 전열관에서 관찰한 shot-peening 전과 후의 PWSCC 결함형상을 각각 나타내고 있다.⁽⁶⁾ 특이할 만한 현상은 모든 PWSCC 결함의 선단이 곡면을 이루고 있는 것이 아니라 거의 편평하다는 것이다.

Table 1. Metallographic results on pulled-out S/G tubings

Shot-Peening	Pulled-Tubing	Crack No.	Crack Length (mm)	Max. Depth (mm)	Ligament (mm)	MRPC max. (mm)
Before S/P	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	
	After S/P	R13C34	1	3.86	1.02	0.25
2			2.51	1.09	0.18	
3			2.45	1.02	0.25	
4			4.84	1.13	0.14	
5			3.45	1.27	0.00	
6			3.34	1.14	0.13	
7			2.25	1.10	0.17	
R4C30		1	4.56	1.14	0.13	4.83
		2	3.67	1.07	0.20	
		3	5.59	1.09	0.18	
		4	3.86	1.16	0.11	
		5	4.48	0.91	0.36	
R2C39		1	1.7	1.07	0.20	S/N

Table 1은 인출 전열관에서 관찰된 PWSCC 결함에 대한 파괴검사 결과와 ECT 결과를 비교한 것이다. 결함 형상의 변화 분석을 위하여, shot-peening 전과 후로 구분하여 나타내었다. 파괴검사에서 다수의 결함이 관찰되지만 ECT 검사에서는 균열이 축방향으로 평행하게 존재할 경우 균열 위치에 따라 모든 균열의 끝단 길이 사이의 결과를 검출하게 되므로, ECT 결과에서 1개의 결함으로 나타난다.

2.1 Shot-Peening 전의 균열형상

Fig. 1은 shot-peening 전인 1994년에 인출한 전열관에서 관찰된 PWSCC 결함형상이다. 균열의 길이가 짧은 경우에는 표준 확관부위에서 관찰되는 반타원형을 나타내며, 균열길이가 긴 경우에는 kiss-rolling의 효과로 차모양의 형상을 보이고 있다.

2.2 Shot-Peening 후의 균열형상

Fig. 2는 shot-peening 후인 1999년에 인출한 전열관의 PWSCC 결함형상으로, bulging 현상이 나타나 있다. 균열길이가 짧은 경우에는 내부 타원 형상이며, 긴 균열의 경우에는 축방향 길이가 늘어난 형상을 보인다.

Table 2. Quantitative evaluations of crack shape observed after shot-peening

Crack Length (Mouth): CL_M (mm)	Crack Length (Inside): CL_I (mm)	Δa (= $CL_I - CL_M$) (mm)	$\Delta a / CL_M$	$\Delta a / CL_I$
1.70	2.10	0.40	0.24	0.19
2.25	2.59	0.34	0.15	0.13
2.45	2.77	0.32	0.13	0.12
2.51	2.98	0.47	0.19	0.16
3.34	3.89	0.55	0.16	0.14
3.45	4.00	0.55	0.16	0.14
3.67	4.09	0.42	0.11	0.10
3.86	3.95	0.09	0.02	0.02
3.86	4.56	0.70	0.18	0.15
4.48	4.95	0.47	0.10	0.09
4.56	4.92	0.36	0.08	0.07
4.84	5.28	0.44	0.09	0.08
5.59	6.15	0.56	0.10	0.09

Table 2는 울진 1호기 전열관에서 관찰된 PWSCC 결함 형상을 shot-peening 전과 후로 구분하여 정량적으로 상세 분석한 결과를 나타낸다. Table 2에 나타난 바와 같이 균열 길이에 관계없이 모든 균열깊이는 약 1 mm이며, 거의 벽두께를 관통하고 있다. 표면 입구에서의 균열길이가와 내부에서의 최대 균열길이 사이의 차이(Δa)도 균열길이에 상관없이 약 0.5 mm로 나타났다. 축방향으로의 균열 끝단은 1차측으로 부터 약 0.4 mm - 0.65 mm 사이에 존재하며, 균열길이가 증가함에 따라 점차 2차측으로 이동하고 있는 경향을 보인다.

3. Shot-peening 효과 분석

울진 1호기 전열관의 shot-peening 후에 관찰된 PWSCC 결함형상은 반타원 표면 균열이 아니라 내부 타원 균열의 형태를 나타내고 있다. 균열의 성장은 피로균열의 성장과 유사하게 진행되고 있음을 보여준다. 초기의 표면 반타원 균열이 내부 타원형 균열로 바뀔으로써, 기하학적 형상에 따른 응력상태의 변환이 나타나게 된다. 즉 균열선단은 반타원 형태를 유지하면서 깊이 방향으로 성장은 거의 일어나지 않고 주로 축방향으로의 성장만이 계속된다. 균열길이가 증가함에 따라 균열끝단의 위치가 2차측으로 이동한다는 사실은 균열길이의 증가에 따라 균열깊이 방향으로의 $K_{I(DEPTH)}$ 값이 점차 증가한다는 것을 보여준다. 또한 1차측 표면에서의 균열성장 억제 효과가 균열길이의 증가에 따라 감소한다는 것을 나타낸다고 볼 수 있다.

균열의 형상이 균열길이에 관계없이 내부 타원 형태를 갖는다는 사실은 초기의 표면 균열이 1차측 표면 잔류압축응력의 영향으로 주로 깊이 방향으로만 진행되어 내부 타원형 균열로 된 후 축방향 응력세기계수, $K_{I(AXIAL)}$ 에 의하여 균열이 성장하는 것으로 분석된다.

초기균열 성장에 미치는 효과로는 표면 잔류압축응력에 의해 유발될 수 있는 깊이방향으로의 인장응력을 들 수 있다. 그러나 x-ray 측정결과에 의하면,⁽⁷⁾ 확관에 의한 인장응력의 크기는 shot-peening에 의하여 거의 증가하지 않는 것으로 나타났다. 그러므로 초기의 깊이방향으로의 성장은 주로 표면 압축잔류응력에 의한 축방향으로의 성장 억제로 인하여 나타난 것으로 판단하는 것이 타당하다고 볼 수 있다. 즉 깊이 방향으로의 성장이 촉진된 것이 아니라, 축방향으로의 성장이 억제되므로서 나타난 2차적인 결과이다. 표면 압축응력이 존재하지 않을 경우에는 축방향으로의 성장이 억제되지 않으므로 표면 반타원 균열을 유지하여, 짧은 균열일지라도 현 ECT에 의해 검출이 가능하다. 그러나 표면 압축 잔류응력이 존재할 경우에는 균열이 충분히 성장하여 ECT에 의해 검출될 정도에 이르게 되면, 이미 깊이 방향으로의 성장은 충분히 진행된 상태가 된다. 그러므로 Fig. 2에 나타난 바와 같이, ECT에 의해 검출되지 않은 짧은 균열도 파괴검사 결과 이미 벽두께를 거의 관통하고 있다는 것이 관찰되었다.

내부 bulging 부분의 최장 균열길이(CL_{inside})를 shot-peening후의 균열길이를 기준으로 하여도 shot-peening 후의 균열성장은 shot-peening 전에 비하여 현저히 감소하였다. 이 결과도 shot-peening 효과는 깊이 방향으로의 성장 촉진이 아니라 길이방향으로의 성장 억제라는 것을 나타낸다.

울진 1호기 파괴검사용 인출 전열관(R13C34, R4C30)에서 관찰된 PWSCC 결함의 생성시기를 파악하기 위하여, 인출 전열관의 ECT 기록을 조사한 결과는 Table 3과 같다.

Table 3. ECT records of Ulchin-1 S/G-C tubings (R13C34 & R4C30)

CYCLE	4 th	5 th	6 th	7 th	8 th	9 th
R13C34	3.8 mm	4.0 mm	4.0 mm	5.0 mm	5.0 mm	5.43 mm
R 4C30	4.0 mm	4.0 mm	5.0 mm	5.5 mm	5.5 mm	4.83 mm

Table 2에 나타난 바와 같이, 2개의 인출 전열관에는 모두 shot-peening 전에 이미 균열이 존재하고 있음을 알 수 있다. 그러나 현 ECT 방법으로는 전열관에 존재하는 균열들의 축방향 최장길이를 측정하고, 측정오차가 약 1mm이므로, 초기 균열의 개수와 균열길이는 정확하지 않다. 잔류압축응력 상태에서는 균열의 생성 및 성장이 억제된다는 가정을 토대로 모든 균열은 shot-peening 전에 생성되었다고 볼 수 있다. 그러므로 초기의 균열 형상은 shot-peening 전의 kiss-roll 부위에서 나타나는 균열 형상을 갖고 있었다고 볼 수 있다. 최단 균열의 초기 균열깊이는 shot-peening에 의한 잔류압축응력의 깊이인 0.1 mm 이상이었을 것이므로, 초기 균열의 형상은 Fig. 1의 균열길이에 따른 (균열깊이/벽두께)의 관계를 토대로 추정할 수 있다. 균열깊이를 0.15 mm로 가정하면 균열길이는 약 0.9 mm가 된다.

파괴검사에서 나타난 최단 균열의 형상은 균열길이 1.7 mm, 균열깊이 1.07 mm이다. 균열길이의 성장 비는 약 2이며, 균열깊이의 성장 비는 약 7이다. 그러므로 초기의 균열 성장은 깊이방향으로 집중된 것을 알 수 있다. 잔류압축응력에 의한 균열길이의 성장 억제는 균열길이에 반비례하여, 초기의 균열성장은 벽두께 방향으로 침투되는 형식으로 진행된다는 것을 나타낸다.

4. 결 론

울진 1호기 증기발생기 전열관에 발생한 PWSCC 결함에 대한 파괴검사 결과를 바탕으로 한 결함 형상 분석 결과는 다음과 같다.

1. 균열길이가 짧을 경우에는 반타원형(semi-elliptical)으로 표준 환관부위에서의 균열형상과 유사하며, kiss-rolling의 효과는 나타나지 않는다.

2. 긴 균열의 경우에는 kiss-rolling의 효과로, 차의 모양(car shape)을 나타낸다.
3. shot-peening 후의 균열형상은 내부 타원형으로 내부 bulging 현상이 관찰된다.
4. shot-peening에 의한 PWSCC 결함 형상의 변화는 1차측 표면의 잔류압축응력에 의한 축방향으로의 균열 성장 억제에 따른 것으로 분석된다.

후 기

자료수집에 적극적으로 협조해 주신 울진 발전소와 한국 원자력 연구소 관계자 여러분
께 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)
5. J. Stubbe, "Alloy 600 Primary Water SCC A User's (Belgian Electricity Board) Point of
View," Alloy 600 PWSCC Experts Meeting, Airlie Virginia, pp. 22-1 - 22-30, April 6-9,
1993
6. 김정수 외, “울진 1호기 증기발생기 전열관 인출검사,” 한국원자력연구소 (1999)
7. G. Frederick, P. Hernalteen, and J. Stubbe, "Qualification of Remedial Methods to
Prevent Primary-Side Stress Corrosion Cracking of Steam Generator Tubing," EPRI
NP-5249, Vol. 1: Shot peening (1987)