

증기발생기 전열관의 1차측 응력부식균열에 대한 Shot-Peening 효과

박 인 규

선문대학교 공과대학 재료금속공학부

The Effect of Shot-Peening on Primary Water Stress Corrosion Cracking of Steam Generator Tubings

In-Gyu Park

Division of Materials Engineering and Science, Sun-Moon University

Most Alloy 600 steam generator tubings are affected by Primary Water Stress Corrosion Cracking(PWSCC) mainly in the roll transition of tubes expanded in the tube sheet. In 1994 shot peening had been employed in order to mitigate the PWSCC damage in Alloy 600 TT steam generator tubing of J-1 nuclear power plant. The following analyses have been performed to clarify the effects of shot peening on steam generator tubing degradation in J-1 nuclear power plant : (i) Weibull slope; (ii) Crack growth rate; (iii) Crack length distribution; (iv) Average crack length. Crack initiation and growth have been retarded since shot-peening application. Whether the 'new' cracks were initiated after the peening is an unresolved issue. The beneficial effect of shot-peening on crack growth suppression was obvious and greater for the shorter cracks. The fluctuation of crack growth rate after the peening appeared to be related with the frequency of forced outages.

Keywords : steam generator, PWSCC, shot peening, Alloy 600, crack growth.

1. 서 론

가압경수로형 원자력 발전소의 증기발생기 전열관에 나타나는 주요 손상기구로는 1차측 응력부식균열(PWSCC : Primary Water Stress Corrosion Cracking), 2차측 응력부식균열(ODSCC : Outside Diameter Stress Corrosion Cracking), 점부식(Pitting), 덴팅(Denting) 등이 있다. PWSCC는 주로 Alloy 600 재료에서 항복응력 정도의 고 인장 응력하에서 발생하며, 열적으로 활

성화되는, 입계균열기구(Intergranular Cracking Mechanism)로서, ① 민감한 전열관 재질, ② 높은 인장응력, ③ 높은 운전온도의 3가지 조건에서 발생한다.¹⁾ 종래의 증기발생기 재료인 Alloy 600 MA는 PWSCC에 가장 민감하며, 열처리를 통해 PWSCC에 대한 저항성을 향상시킨 Alloy 600 TT 재료에서도 PWSCC는 지속적으로 발생하고 있다. PWSCC는 잔류응력이 높은 확관부와 Row 1 U-Bend에서 주로 발생한다. 이와 같은 잔류응력은 전열관 제작 및 설치과정에서

유발되어 진다. 이와 같이 PWSCC의 생성 및 성장은 전열관 재질 뿐만 아니라 제작 및 설치와 관련된 잔류응력에 크게 영향을 받는다. 또한 발전소의 운전조건(수처리, 운전온도 등)에 따라 큰 차이를 보인다. 그러므로 PWSCC 발생 내력은 발전소에 따라 큰 차이를 나타내고 있으며, 동일 발전소의 경우에도 증기발생기별로 손상정도가 다르다. 그러므로 PWSCC에 대한 분석은 각 발전소의 증기발생기별로 수행되어야 한다.

PWSCC의 발생을 억제하는 수단으로는 전열관 재질의 교체, Shot-Peening에 의한 잔류인장응력의 감소, 운전온도 감소(ORT: Operation at Reduced Temperature), Nickel Plating, Sleaving 등이 있다. PWSCC에 민감한 기존의 Alloy 600 전열관 재질을 PWSCC에 대한 저항성이 우수한 Alloy 690으로 교체하는 것은 신설발전소나 증기발생기 교체의 경우에만 가능하다. 가동중인 원자력발전소에 적용가능한 방안의 하나인 Shot-Peening은 전열관 내부표면에 압축응력 부위를 형성시키므로써 PWSCC에 대한 저항성을 향상시키는 것이다. 지금까지의 연구결과에 의하면, Shot-Peening에 의해 PWSCC의 발생을 억제할 수는 있으나 이미 존재하고 있는 기존 결함의 성장에 대한 효과는 거의 없는 것으로 알려져 있다.²⁾ 또한 Shot-Peening 적용시기가 빠를수록 PWSCC에 대한 억제효과가 크며, 가동중인 원자력 발전소의 경우에는 Shot-Peening 전에 이미 PWSCC 결함이 생성되었으므로, Shot-Peening에 의한 PWSCC 억제 효과는 크게 기대하기 힘든 것으로 보고되고 있다.³⁾ 한편 현재까지 Shot-Peening 효과에 대한 연구의 문제점은 Shot-Peening 전의 결함 데이터를 확보할 수 없다는 것이 가장 큰 어려움이었다.^{2,3)} 본 연구에서는 Shot-Peening 전의 전열관 손상데이터가 수집가능한 국내 원자력 발전소 J-1호기의 현장 데이터를 근간으로 증기발생기 전열관의 1차측 응력부식균열에 대한 Shot-

Peening 효과를 분석하였다.

2. 증기발생기 전열관 손상이력

2.1 증기발생기 개요

국내 원자력 발전소인 J-1호기는 950 MWe급 가압경수로형이며, 1988년 9월에 상업운전을 시작하였다. 증기발생기는 FRAMATOME에서 공급한 51B형으로, 전열관 재질은 Alloy 600 TT로 되어 있다. 전열관의 환관은 전장 기계식 환관법을 도입하고, Kiss Roll을 적용하였다. 전열관의 외경은 22.22mm, 두께는 1.27mm이다. 증기발생기별 전열관 수는 3330개 이며, 고온온도는 323℃이다. 증기발생기 전열관의 결함여부를 확인하기 위하여 매 주기 MRPC(Motorized Rotating Pancake Coil)를 이용한 와전류 탐상검사(ECT: Eddy Current Test)를 실시하고 있다. MRPC 검사는 4주기부터 적용하고 있으며, 4주기 검사는 전체 전열관의 약 24%에 대하여 부분검사를 하였다. 5주기이후 부터는 MRPC 100% 검사를 수행하고 있다. J-1호기 증기발생기 전열관의 PWSCC 손상을 억제하기 위하여, 지난 1994년 2월, 제 5차 계획정비 기간중에 증기발생기 고온관측 전체 전열관에 대해 Shot Peening을 실시하였다.

2.2 PWSCC 발생 현황

Table 1은 J-1호기의 증기발생기별 PWSCC 결함 발생 전열관의 주기별 누적수를 나타낸다. 발생한 PWSCC 결함은 모두 축방향 결함으로 환관 상부 환관천이 영역에서 발생하였다. Shot-Peening 전인 5주기까지의 결함 발생률은 약 6%이었으나, PWSCC 결함이 지속적으로 검출되어, 현재 J-1호기 증기발생기의 전열관 결함율은 약 18%이다. 증기발생기별 결함율은 S/G-A가 약 11%, S/G-B가 약 20%이며, S/G-C의 결함율이 약 23%로 가장 손상이 심한 것으로 나타났다.

Table 1. Cumulative number of S/G tubes affected by PWSCC

CYCLE	S/G-A	S/G-B	S/G-C	SUM
4th	27	41	63	131
5th	106	236	247	589
6th	163	264	319	746
7th	306	593	571	1470
8th	365	639	757	1761
Percentage of cracked tubes	11.0%	19.2%	22.7%	17.6%

Table 2-1. Number of S/G tubes affected by PWSCC for each cycle

CYCLE	S/G-A	S/G-B	S/G-C	SUM
5th	79	195	184	458
6th	57	28	72	157
7th	143	329	252	724
8th	59	46	186	291

Table 2-1은 J-1호기의 주기별 PWSCC 결함 생성 전열관 수를 나타낸다. 즉 지난 주기에 검출된 결함을 제외한 주기별로 새로이 검출된 결함 전열관 수를 나타낸다. 주기별로 유효 전출력 가동일(EFPD: Effective Full Power Day)은 차이가 있으므로, 모든 데이터는 EFPD를 기준으로 분석하였다. Table 2-2는 EFPD를 기준으로 산출한 PWSCC의 생성률을 나타낸다. Shot-Peening 전인 4주기 동안에 발생하여 5주기 검사에서 검출된 PWSCC 결함의 발생률은 1.64 tubes/day 이었으나, Shot-Peening 직후인 6주기에는 결함발생률이 0.42 tubes/day로 급격히 감소하였다. 그후 7주기에는 다시 2.06 tubes/day로 급격히 증가하였으나 8주기에는 다시 감소하였다. 즉 Shot-Peening 직후에 결함발생률이 감소한 후 2, 3주기 동안 오르내림 현상을 보이고 있다. 이 결과는 Cox의 모델을 적용한 Shot-Peening 효과에 대한 통계 분석 결과와 상이하다.⁴⁾ Cox 모델의 통계분석 결과에 따르면, Shot-Peening 효과는 Shot-Peening 실시후 2번째 주기에서 가장 크게 나타나며, 3주기부터는 안정화 단계에 접어드는 것으로 예측하였다.

Table 2-2. PWSCC evolution rate for each cycle

CYCLE	5th	6th	7th	8th
Evolution Rate (No. of tubes/day)	1.64	0.42	2.06	0.62

Table 3. Average PWSCC Growth Rate ($\times 10^{-3}$ mm/day)

CYCLE	S/G-A	S/G-B	S/G-C	Average
5th	1.43	1.25	3.48	2.05
6th	0.19	0.27	0.34	0.27
7th	2.14	1.60	0.37	1.37
8th	0.30	0.47	0.32	0.36

2.3 PWSCC 성장률 현황

Table 3은 J-1호기 증기발생기 전열관의 전체 PWSCC 결함에 대한 주기별 평균 성장속도를 나타낸다. 전반적으로 Shot-Peening 후에 PWSCC 성장률은 감소하고 있는 것으로 나타났다. Shot-Peening 전에 평균 약 2×10^{-3} mm/day (0.7 mm/year)이던 성장속도가 Shot-Peening 직후인 6주기에는 모든 증기발생기에서 성장속도가 1/10 정도로 급격히 감소하였다. 증기발생기별로 성장속도의 감소경향은 다소 상이하며, S/G-A와 S/G-B는 7주기에 성장속도가 다시 약 5배 증가한 후 8주기에는 다시 감소하였다. 반면에 S/G-C의 성장속도는 Shot-Peening 후 약 3×10^{-4} mm/day를 계속 유지하고 있다. 현재 J-1호기 증기발생기 전열관의 PWSCC 평균 성장속도는 3.6×10^{-4} mm/day (0.13 mm/year)로서 PWSCC의 평균 성장속도인 1mm/cycle³⁾보다 매우 낮다

2.4 균열길이에 따른 성장속도 변화

Fig. 1은 J-1호기 S/G-A의 균열길이에 따른 성장률을 나타낸다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 균열측정에 사용한 MRPC의 검출 한도는 2mm 이상이다. 또한 Fig. 1의 (-) 성장률 데이터 및 급작스런 성장을 나타낸 데이터는 MRPC의 결함 검출 오차 (± 1.5 mm) 및 검출 민감도에 기인한 것으로 사료된다. 균열길이가 짧을수록 데이

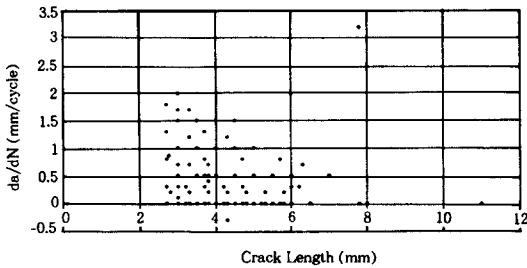


Fig. 1. Influence of crack length on crack growth.

터의 산란이 크지만, 전반적으로 균열길이의 증가에 따라 균열 성장속도가 감소하고 있음을 나타내고 있다. 이와 같이 균열길이가 증가함에 따라 균열 성장속도가 감소하는 이유는 다음과 같다.⁵⁾ 첫째, 균열성장 초기에는 전열관 축방향의 상하 양쪽 방향으로 성장하던 균열의 아래쪽 균열끝단이 압축응력 상태에 있는 관판부위와 접촉하게 되면 성장을 멈추게 된다. 둘째, 윗쪽 균열끝단은 성장함에 따라 초기의 높은 잔류응력 부위에서 벗어나게 된다. 또한 하나의 전열관에 기존의 균열 이외에 다른 새로운 균열이 발생함에 따라 기존 균열에 미치는 응력이 완화될 수도 있다.⁶⁾

3. Shot-Peening 효과 분석

3.1 Weibull 기율기

증기발생기 전열관의 PWSCC 발생률을 통계학적으로 분석하기 위하여 전열관 손상이력을 토대로 Weibull 함수를 적용하였다.^{6,7)} Weibull 분포에 대한 확률밀도함수를 시간에 대하여 적분하면 누적 확률밀도함수, $F(t)$ 를 구할 수 있다. 이를 선형화시키면 다음과 같이 표현된다.

$$\ln \ln \frac{1}{1-F(t)} = -b \ln (\theta - t_0) + b \ln (t - t_0)$$

여기서 b 는 Weibull 기율기, t 는 시간, t_0 는 결합 시작시간, θ 는 시간에 대한 특성값으로 모집

Table 4. Weibull Slope, b for PWSCC Degradation

No.	Cycles	S/G-A	S/G-B	S/G-C	Average
1	5,6,7	2.91	2.47	2.29	2.46
2	5,6,7,8	2.45	2.14	2.25	2.22

단(전체 전열관 수)의 63.2% [$F(t) = 1 - 1/e = 0.63212$]가 손상되는 시간을 나타내며, $F(t)$ 는 누적 전열관 결함율을 나타낸다.

Table 4은 Fig. 1의 PWSCC 발생 누적 전열관 수를 토대로 Weibull 기율기의 변화를 산출한 결과이다. 제 4주기의 ECT 검사는 부분적으로 행하여졌으므로, 데이터의 신뢰성을 고려하여 포함시키지 않았다. Weibull 기율기 산출결과에 따르면, 5, 6, 7주기에 대한 Weibull 기율기는 $b=2.46$ 이며, 5, 6, 7, 8주기의 평균 Weibull 기율기는 $b=2.22$ 이다. 즉 J-1호기 증기발생기의 Weibull 기율기는 가동시간이 증가함에 따라 전반적으로 감소 추세를 나타내고 있다. 증기발생기별로 Weibull 기율기의 변화는 다소 차이를 보인다. S/G-A와 S/G-B의 Weibull 기율기 변화율은 약 -15% 정도이지만, S/G-C는 거의 변화가 없다. Table 1에 나타난 바와 같이, S/G-A의 전열관 손상 절대치는 S/G-C에 비해 적지만, Weibull 기율기로 나타나는 결함발생 증가율은 S/G-C에 비해 더 크다.

3.2 주기별 균열길이 분포 변화

일반적인 PWSCC 결함의 균열길이 빈도 분포는 전형적인 종(bell) 모양 형태로 나타난다. 또한 Fig. 1에서와 같이 PWSCC 결함은 균열길이가 짧을수록 균열성장속도가 빠르므로, 주기에 따른 균열빈도분포는 Fig. 2과 같은 형태를 따른다.^{5,8)} 즉 최대 빈도의 균열길이는 점차 증가하는 반면에 최대 빈도수는 감소하며, 분포곡선은 길이가 긴 오른쪽으로 이동하게 된다.

Fig. 3-1은 J-1호기 증기발생기 전열관에 발생한 전체 PWSCC 결함길이의 빈도를 주기별로 나타낸 것이다. 5주기와 6주기 사이에는 균열

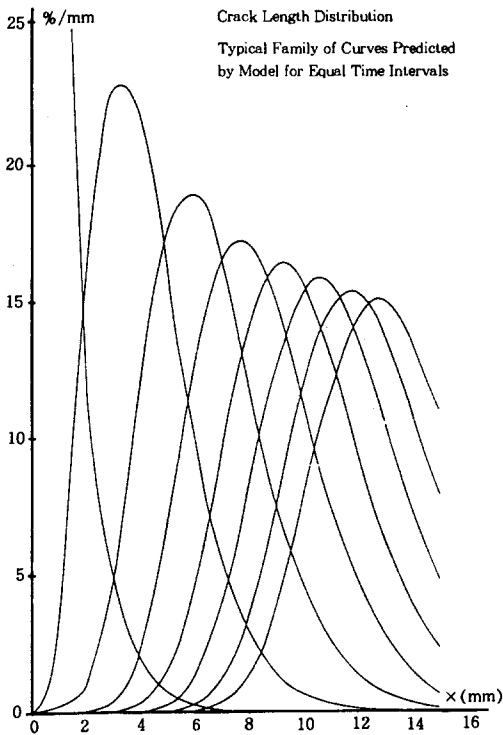


Fig. 2. Crack growth prediction model.⁵

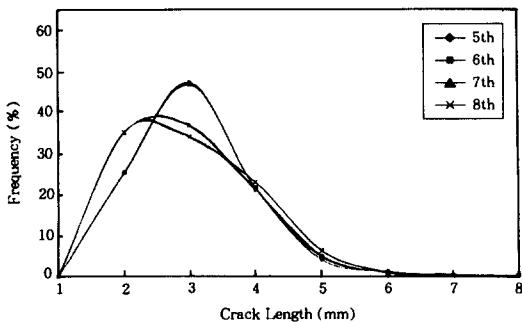


Fig. 3-1. Time history of the distribution of crack length.

분포의 차이가 거의 없다는 것은 Shot-Peening 후에 균열 성장이 억제되었다는 것을 나타낸다. 균열성장 억제 효과는 7, 8주기에 더욱 뚜렷이 나타난다. 정상적인 균열성장에서는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 주기 증가에 따라 균열분포는

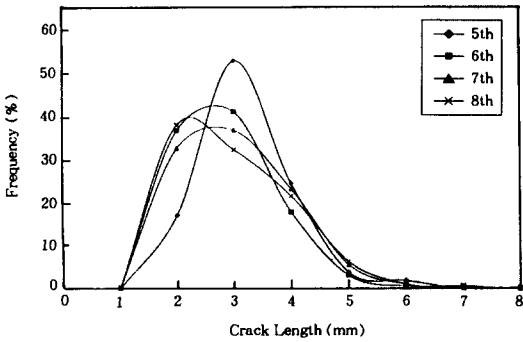
오른편으로 이동하게 되지만 7, 8주기에는 역으로 왼쪽으로 편향되어 나타난다. Fig. 3-2에는 증기발생기별 주기에 따른 균열분포 곡선이 나타나 있다. S/G-B는 일반적인 결합분포 형태를 나타내는 반면에, S/G-A와 S/G-C는 전혀 다른 양상을 보인다. S/G-A는 Shot-Peening 직후(6주기)부터 현재까지 균열길이가 짧은 쪽으로 편향되어 있다. S/G-C는 Shot-Peening 직후에는 거의 분포의 변화가 없었으나, 7주기부터 균열빈도 분포가 왼편으로 편향되어, 짧은 결합길이의 분포가 증가한 양상을 보인다. S/G-B는 균열빈도 분포가 약간 오른편으로 이동하였으나, 전반적인 변화량은 매우 작다. 즉 S/G-B도 균열성장 효과를 보이고 있지만 S/G-A 및 S/G-C에 비해 억제효과가 작다는 것을 뜻한다.

최대 분포 균열길이의 변화를 살펴보면, S/G-A는 5주기의 3.0mm에서 6, 7주기에는 2.6mm로 8주기에는 2.1mm까지 감소하였다. S/G-C도 5주기의 3.0mm에서 6주기에는 변화를 보이지 않으나 7주기에는 2.1mm로 감소한 후 8주기에 거의 변화를 보이지 않고 있다. 반면에 S/G-B의 경우에는 5주기의 2.3mm에서 6주기에는 변화를 보이지 않다가 7주기에 2.9mm로 증가한 후 8주기에는 거의 변화를 보이지 않는다.

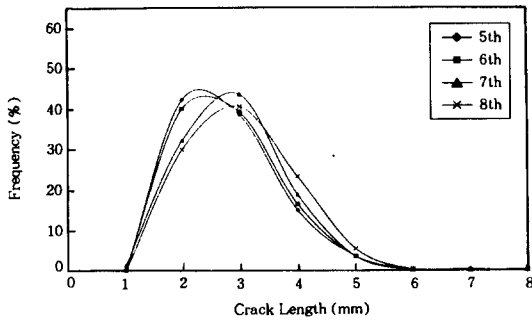
이와 같이 증기발생기별로 균열성장의 경향은 차이를 보이지만, Fig. 3-1과 Fig. 3-2의 주기별 균열길이 분포의 변화는 대체적으로 Shot-Peening 후에 길이가 짧은 균열의 생성이 증가하였으며, 균열성장이 억제되었음을 나타내고 있다.

3.3 주기별 PWSCC 성장률 분석

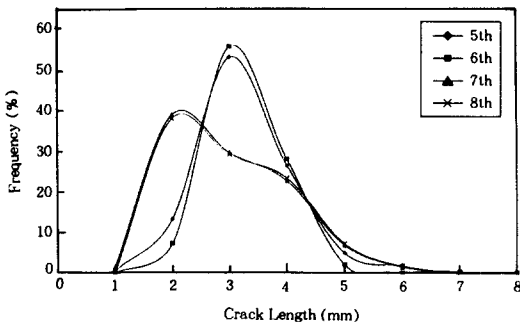
Table 5-1은 J-1호기 증기발생기에 발생한 전체 PWSCC 결합의 주기별 평균길이를 나타내고 있으며, Table 5-2는 Shot-Peening 전후의 평균길이를 비교한 것이다. Shot-Peening 전인 4주기에 5주기 사이에는 PWSCC 평균길이가 3.38mm에서 3.44mm로 증가하는 추세를 보이지만 Shot-Peening 후에 PWSCC 평균길이는 3.41mm



(a) S/G-A



(b) S/G-B



(c) S/G-C

Fig. 3-2. Time history of the distribution of crack length.

에서 3.30mm로 오히려 약 3% 감소한 것으로 나타났다. 즉 Shot-Peening에 의해 PWSCC 결함의 성장이 억제된 것을 나타낸다. 일반적으로 가동시간의 증가에 따라 결함의 길이가 증가하므로, 이와 같은 정상적인 결함 성장률을 고려하면 Shot-Peening에 의한 PWSCC 결함성장

Table 5-1. Average crack length of existing cracks(mm)

CYCLE	S/G-A	S/G-B	S/G-C	Average
4th	3.67	3.67	2.79	3.38
5th	3.58	3.21	3.53	3.44
6th	3.24	3.21	3.64	3.36
7th	3.32	3.17	3.25	3.25
8th	3.26	3.31	3.28	3.28

Table 5-2. Shot-Peening effect on existing crack

Shot Peening	S/G-A	S/G-B	S/G-C	Average
Before	3.63mm	3.44mm	3.16mm	3.41mm
After	3.27mm	3.23mm	3.39mm	3.30mm

억제효과는 매우 크다고 볼 수 있다.

3.4 결함길이에 따른 성장률 분석

결함길이에 따른 Shot-Peening의 결함성장 억제효과를 분석하기 위하여, 지난 주기에 검출된 기존 결함과 주기별로 새로이 검출된 결함을 구분하여 결함크기를 분석하였다.

Table 6-1은 지난 주기에서 검출된 기존 PWSCC 결함의 평균길이를 주기별로 나타낸 것이다. 4주기에 검출된 결함은 5주기까지 평균 3.38mm에서 4.07mm로 약 20% 성장하였다. 그러나 Shot-Peening 후 6주기에는 결함의 평균길이는 3.60mm로 약 12% 감소하였다. 그후 7주기에는 다시 증가한 후 8주기에는 다시 감소하였다. 이와같이 오르내림 현상을 나타내지만 Table 6-2에 나타난 바와 같이 Shot-Peening 후 기존 PWSCC 결함의 평균길이는 전반적으로 감소하고 있는 것으로 나타났다.

Table 7-1은 주기별로 새로이 검출된 PWSCC 결함의 길이 변화를 나타낸다. 기존결함의 길이가 주기별로 오르내림 현상을 보이는 반면에 주기별로 새로이 검출된 결함크기는 Shot-Peening 후에 지속적으로 감소하고 있다. Table 7-2에 나타난 바와 같이 주기별로 새로이 검출된 결함의 평균길이는 5주기의 3.31mm에서 Shot-Peening 후에 평균 2.47mm로 약 25% 감소한 것으로

Table 6-1. Average crack length of new cracks (mm)

CYCLE	S/G-A	S/G-B	S/G-C	Average
5th	4.07	4.12	4.03	4.07
6th	3.66	3.31	3.84	3.60
7th	3.99	3.76	3.95	3.90
8th	3.47	3.39	3.65	3.50

Table 6-2. Shot-Peening effect on new cracks

Shot Peening	S/G-A	S/G-B	S/G-C	Average
Before	4.07mm	4.12mm	4.03mm	4.07mm
After	3.71mm	3.49mm	3.81mm	3.67mm

Table 7-1. Average crack length of new cracks (mm)

CYCLE	S/G-A	S/G-B	S/G-C	Average
5th	3.43	3.04	3.45	3.31
6th	2.46	2.35	2.94	2.58
7th	2.55	2.69	2.39	2.54
8th	2.29	2.38	2.20	2.29

Table 7-2. Shot-Peening effect on new cracks

Shot Peening	S/G-A	S/G-B	S/G-C	Average
Before	3.43mm	3.04mm	3.45mm	3.31mm
After	2.43mm	2.47mm	3.51mm	2.47mm

로 나타났다.

4. 고 찰

4.1 PWSCC 생성억제 효과

Shot-Peening에 의한 PWSCC 생성에 대한 억제효과를 분석하기 위하여 누적 결함 전열관 수를 바탕으로 Weibull 함수 분포를 적용하였다. Table 4에 나타난 바와 같이 주기에 따른 전반적인 Weibull 기울기는 감소하고 있으며, 이는 Shot-Peening에 의해 PWSCC 결함 발생률이 감소하고 있음을 나타내고 있다. 이와 같이 결함 발생률은 감소하는 것으로 나타나고 있지만, Shot-Peening에 의한 PWSCC의 생성 억제 효과는 확실하지 않다. Table 1에 나타난 바와 같이 Shot-Peening 후에도 ECT 검사에 의해

새로운 PWSCC 결함이 지속적으로 검출되고 있다. 그러나 ECT의 결함 검출한도를 고려하면, 주기별 결함 발생률은 실제적인 결함 생성률을 나타내는 것으로 볼 수 없다. 왜냐하면 Shot-Peening 전에 이미 생성된 결함이 성장하여 ECT 검출한도를 넘어서야 결함으로 검출될 수 있기 때문이다. 즉 새로이 검출된 결함이란 ECT(MRPC)에 의해 검출된 결함이므로 꼭 새로이 생성된 결함을 의미하지는 않는다. 따라서 Shot-Peening에 의해 PWSCC 결함의 생성이 완전히 억제되었어도 결함은 지속적으로 검출되게 된다. 이와 같이 ECT에 의한 결함의 검출에는 결함의 생성 뿐만 아니라 결함의 성장이 포함되므로 결함생성에 대한 Shot-Peening의 효과를 구분지어 분석하는 데에는 어려움이 있으며, Shot-Peening 후에도 새로운 PWSCC 결함이 생성되는지에 대한 여부는 확실하지 않다.

MRPC에 의해 검출되는 결함 크기의 한도는 최소 약 2mm이므로,^{3,9)} 이미 Shot-Peening 전에 생성된 결함도 적어도 2mm 이상까지 성장하여야 검출이 가능하다. 예를 들어, Shot-Peening 전의 균열길이가 0.5mm, 평균성장률이 0.5mm/cycle라고 가정하면 ECT에 의해 검출되기 위해서는 최소 3주기가 경과해야 한다. 즉, 생성된 결함이 ECT에 의해 검출되기 위해서는 생성 후 충분한 성장이 진행되어야 한다. 그러므로 주기별로 검출되는 결함이 모두 Shot-Peening 후에 새로이 생성된 결함으로 볼 수는 없으며, Shot-Peening에 의해 PWSCC 결함 생성이 완전히 억제되었다 하더라도 Shot-Peening 전에 생성된 결함의 성장으로 인한 결함검출은 지속적으로 나타나게 된다.

또한 Shot-Peening 후에 PWSCC 결함이 생성되었다 하더라도 ECT에 의해 검출되기 위해서는 ECT 검출한도를 초과하는데 까지 성장할 시간이 필요하므로 Shot-Peening 직후에 검출된 결함은 Shot-Peening 전에 이미 생성된 결함일 확률이 매우 높다.

4.2 PWSCC 성장억제 효과

Shot-Peening에 의한 PWSCC 성장 억제 효과는 Table 3의 주기별 성장률의 감소 및 Table 5-1 및 Table 5-2의 결함 평균길이의 감소에서 잘 나타나고 있다. 또한 Fig. 4의 주기별 결함길이 분포의 변화도 이를 뒷받침하고 있으며, 주기에 따른 결함길이의 분포가 짧은 쪽으로 편향되어 나타난다는 사실은 Shot-Peening에 의한 결함성장 억제 효과가 매우 크다는 것을 반영하고 있다. 또한 Table 6-2와 Table 7-2에 나타난 바와 같이 Shot-Peening에 의한 PWSCC 결함 성장 억제 효과는 결함이 어느 정도 성장한 기존 결함길이에 대해서 보다 주기별로 최초로 검출되는 짧은 균열에 대한 성장억제 효과가 더 크다는 것을 알 수 있다.

Shot-Peening에 의해 형성되는 잔류 압축응력 부위의 깊이는 약 0.1mm이며, 일반적으로 균열의 길이가 증가함에 따라 균열의 깊이도 증가한다. 그러므로 균열의 깊이가 짧을수록 균열의 두께방향 깊이를 포함한 많은 부분이 Shot-Peening에 의한 잔류 압축응력 부위에 놓이게 되지만 균열의 길이가 길수록 균열깊이의 증가로 잔류압축응력의 범위를 벗어나게 된다. 그러므로 Shot-Peening은 초기 균열 성장 억제에 큰 영향을 미칠 것으로 기대된다.

가동년수의 증가에 따라 균열들은 성장하게 되므로, 주기에 따른 평균 균열길이는 증가하게 된다. 그럼에도 불구하고 Shot-Peening 후에 주기별 평균 균열길이가 감소한 이유는 Shot-Peening에 의하여 새로이 검출되는 많은 균열의 장이 억제되었기 때문이다.

4.3 주기별 PWSCC 발생 및 성장률 변화

J-1호기 증기발생기 전열관의 주기별 PWSCC 결함발생 경향 분석에 의하면, Table 2-1에 나타난 바와 같이 Shot-Peening 직후인 6주기에는 급격히 감소한 후에 7주기에는 다시 증가하였으

Table 8. Frequency of forced outage for each cycle

Cycle	4th	5th	6th	7th	8th
Frequency	0	1	0	2	1

며, 8주기에는 다시 감소하고 있다. PWSCC 성장속도의 주기별 변화도 이와 같은 오르내림 현상을 보인다. 즉 결함 전열관 수의 주기별 변화와 결함 성장률의 주기별 변화 경향이 일치한다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 ECT에 의한 PWSCC 결함의 검출에는 결함의 성장이 포함되어 있음을 뒷받침하고 있으며, 이와 같은 오르내림 현상은 PWSCC의 성장에 영향을 주는 외적 요인으로 인하여 발생할 수 있다.⁵⁾ 증기발생기 전열관의 PWSCC 성장에 영향을 주는 운전 요인으로는 불시정지를 들 수 있으며, J-1호기는 Table 8에 나타난 바와 같이 7주기에 2차례의 불시정지를 경험하였다. 즉, 불시정지에 따른 발전소의 가열 및 냉각의 영향으로 PWSCC의 성장이 급격히 증가한 것으로 보인다.

5. 결 론

J-1호기 증기발생기 전열관에 발생한 PWSCC 결함 데이터를 기초로 하여, PWSCC 생성률 및 성장률에 대한 Shot-Peening 효과를 조사하였다. 이를 위하여, (i) Weibull 기율기, (ii) 균열 성장률, (iii) 균열길이 분포 및 (iv) 평균 균열길이 등을 주기별로 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) Shot-Peening에 의해 J-1호기의 PWSCC 결함 생성률 및 성장률은 전반적으로 감소하고 있는 것으로 나타났다.

(2) ECT의 결함검출 한도로 인하여 PWSCC 결함의 생성억제에 대한 Shot-Peening 효과는 확실하지 않다.

(3) Shot-Peening에 의한 PWSCC 결함 성장 억제 효과는 매우 크며, 결함의 길이가 짧을수

특 큰 것으로 나타났다.

(4) J-1호기의 PWSCC 결함 생성률 및 성장률은 Shot-Peening 직후에 급격히 감소한 후 오르내림 현상을 나타내고 있으며, 이는 불시정지 횟수와 관계가 있는 것으로 보인다.

후 기

본 연구는 한국전력(공)의 후원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

References

1. In-Gyu Park, "Assessments of Primary Water Stress Corrosion Cracking and Plugging Bases of PWR Steam Generator", *Power Engineering*, vol. 3, No. 3, 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*, **134**, p. 199 (1992).
3. P. Hernalsteen, "PWSCC in the tube expansion zone-an overview", *Nuclear Engineering and Design*, **143**, p. 131 (1993).
4. P. Pinter and T. Riffard, "Statistical Evaluation of the Effects of Shot-Peening on Stress Corrosion of Alloy 600 in PWR Steam Generators", in Proceedings of the International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems - Water Reactors, The Minerals, Metals & Materials Society, pp. 707-712 (1993).
5. P. Hernalsteen, "A Predictive Model for Crack Growth in Roll Transitions, Subsequent to Peening", Proceedings : Primary Water Stress Corrosion Cracking, 1989 EPRI Remedial Measures Workshop, EPRI NP6791-SD, pp. C3-1~C3-20, April (1990).
6. J. A. Gorman, R. W. Staehl, and K. D. Stavropoulos, "Statistical Analysis of Steam Generator Tube Degradation", EPRI NP-7493, September (1991).
7. P. M. Scott, "An analysis of primary water stress corrosion cracking in PWR steam generators", Paper 5.66, Proceedings of NEA/CSNI-UNIPED Specialist Meeting on Operating Experience with Steam Generators, Brussels, Belgium, 16-22, September (1991).
8. P. Hernalsteen, "Steam generator Tube Behavior Prediction Tools", Engineering Support to Nuclear Power Plant, 1st International Conference Transactions, Brussels, paper 3-3, November (1990).
9. P. E. MacDonald et al, "Steam Generator Tube Failures", p. 231, NUREG/CR-6365, U.S. Nuclear Regulatory Commission, p. 231, April (1996).