

Proceedings of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting
Seoul, Korea, October 1999

울진 원전 1,2호기 증기발생기 전열관 균열의 특성
Characteristics of Cracks in Steam Generator Tubes
of Ulchin Unit One & Two

정 한섭, 김 기태, 김 홍덕

전력연구원

대전시 유성구 문지동 103-16 (우 305-380)

요 약

울진 1,2호기 증기발생기 전열관 균열에 대한 가동 중 검사 DB (Data Base)를 분석함으로써 균열의 특성을 규명하였다. 새로 발생한 균열의 길이 분포를 분석한 결과 MRPC (Motorized Rotating Pancake Coil) 검사의 탐지한계는 약 2mm 균열 길이임을 알 수 있었다. 균열길이 성장속도는 균열길이가 증가하면서 감소하다가 다시 증가하는 추세를 보인다. 그러나 현행 정비기준 범위 이내에서는 균열길이가 증가하면서 성장속도가 다시 증가하는 거동이 나타나지는 않을 것으로 예상된다. 균열 생성과 성장 거동이 증기발생기별로 매우 불균일한 거동을 나타낸다. 이는 전열관 제조 heat별 특성차이에 기인하는 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 heat별 특성차이를 고려한다면 고려하지 않는 경우보다 증장기적으로 결함의 생성과 성장 추세가 완화될 것으로 예측된다. 증기발생기별 결함발생 추세와 균열 성장속도를 근거로 정비기준 길이별로 향후 관막음 개수 증가 추세를 예측하였다. 균열 길이 10mm 이상의 비교적 덜 보수적인 정비기준을 적용한다면 대규모 관재생을 수행하지 않고도 증기발생기 설계수명 운전이 가능하다. 그러나 누설을 억제하기 위하여 보수적인 정비기준을 적용할 경우 설계수명 이전에 대규모 관재생 정비가 불가피하다.

Abstracts

Characteristics of cracks in steam generator tubes of Ulchin Unit One and Two nuclear power plants were evaluated by analysing In Service Inspection

Data Bases. The detection limit of the current inspection technique is determined to be about 2mm in length from the distribution of length of new cracks. The growth rate of a crack decreases and then increases again as the crack grows. It is anticipated, however, that the increasing trend will appear only when the crack is longer than the limit of current repair criteria. The crack initiation and growth trends are not homogeneous among steam generators, which is believed to be caused by different susceptibilities to stress corrosion cracking of different heats of tubes. Long term projection of crack initiation and growth is expected to be slowed down when the effect of different heats is taken into account. The increasing trends of cumulative fraction of repaired tubes are calculated by using steam generator specific crack initiation and growth rate data. More conservative repair criteria than the current 13mm criteria is required in order to control operational leakage. If relatively less conservative criteria like above 10mm is taken, the steam generators are operable until the end of design life. When conservative criteria are required, however, major sleeve campaigns are unavoidable.

I. 서 론

울진 원전 1,2호기 증기발생기 관판 상단 (TTS ; Top of Tube Sheet) 전열관의 축방향 (axial) 일차측 균열 (PWSCC ; Primary Water Stress Corrosion Cracking) 이 중요한 현안이다. 균열의 개수와 개별균열의 크기가 계속 증가하는 추세를 보임에 따라서 이를 어떻게 관리할 것인가 하는 정비전략 수립이 필요한 것이다. 그런데 정비전략을 수립하기 위해서는 균열의 특성을 파악할 필요가 있다. 즉, 균열 생성 추세, 균열 크기의 분포와 성장 속도에 대한 정량적인 규명이 필요한 것이다.

본 논문은 현장의 전열관 검사 DB (Data Base)를 분석함으로써 앞서 언급한 균열의 제반 특성에 대한 정량적인 데이터를 제시하고자 한다.

II. 본 론

1. 균열 생성 거동 분석

(1) 균열 생성 거동

Weibull 확률분포함수를 이용한 균열생성 추세 예측을 위하여 다음 식을 활용하였다. [1,2]

$$y = A + B \text{Ln } t \quad (1)$$

t ; 가동시간, 단위 : EFPY (Effective Full Power Year)

$$y = \text{Ln Ln} \left(\frac{1}{1-F(t)} \right),$$

F : 총 전열관 개수 대비 균열이 발생한 전열관의 누적 비율

올진 1,2호기에는 호기당 세 개의 증기발생기가 있으며 증기발생기별로 3,330개의 전열관이 있다. 가동 중 검사 DB로부터 매주기 탐지된 결함관의 비율을 (1)식에 대입하여 구한 Weibull 추세를 그림 1로서 나타내었다. 2호기 증기발생기 C (SG2C) 에서는 아직 균열이 발생하지 않았으므로 그림 1 에는 다섯 개의 증기발생기에 대한 균열생성 추세를 나타내고 있다. 동일한 증기발생기임에도 불구하고 유독 SG2C에서만 단 한 개의 균열도 발생하지 않았음은 특이하다. SG2C를 별도로 하고도 나머지 다섯 개 증기발생기별로도 균열생성 추세가 매우 큰 차이를 보인다.

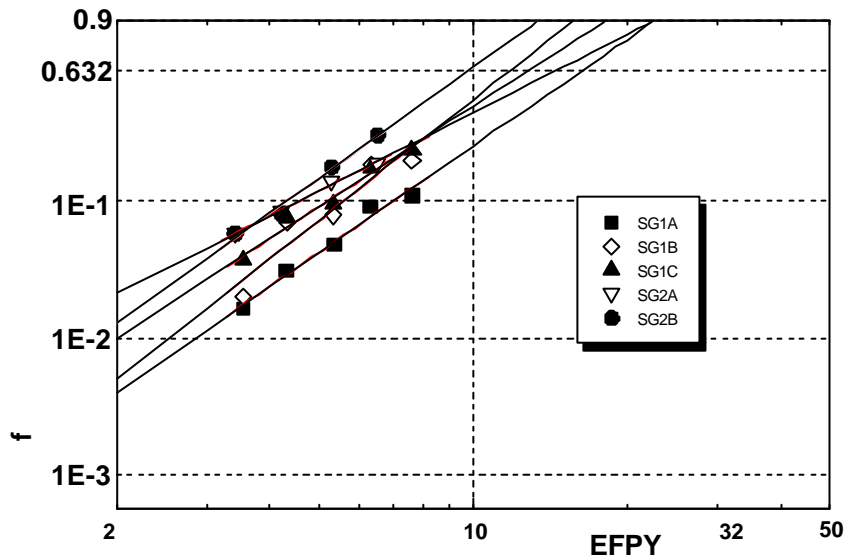


그림 1. 증기발생기별 균열 생성 Weibull 추세선

가장 균열 생성이 빠른 것은 SG2B이고 가장 느린 것은 SG1A이며 나머지는 모두 이 두 증기발생기 범위 사이에 위치하고 있다. Weibull 함수에서 특성시간 (characteristic time) 으로 정의되는 총 전열관 중에서 63.2%에서 결함이 발생할 때까지 소요되는 시간은 SG1A와 SG2B가 각각 16.4, 9.9 EFPY이다.

이와 같이 증기발생기별로 균열생성추세가 서로 큰 차이를 나타내는 이유는 전열관 재질 특성의 차이에 의한 영향이 가장 큰 이유일 것으로 추정된다. 표 1은 증기발생기별로 제작에 사용된 전열관의 heat 분포를 나타내고 있다. 전열관 제조 공정은 일단 합금을 용해하여 주괴 (ingot)를 만든 후 이를 전열관으로 가공하는

절차를 거친다. Heat 번호가 같은 전열관은 동일한 용해공정에서 제작한 주괴로 제작하였음을 의미한다. SG 1A, 1B, 1C, 2A, 2B의 전열관은 여러 개의 heat가 서로 섞여서 사용된 반면, SG2C에서는 다른 증기발생기와는 완전히 분리된 heat의 전열관이 사용되었음을 알 수 있다. Heat 번호로부터 SG 1A~2B의 전열관은 프랑스 IMPHY 사에서 제작한 주괴이고 SG 2C 전열관은 미국의 INCO 사에서 제작한 주괴를 사용하였음을 알 수 있다. 따라서 SG2C에서 아직 단 한 개의 균열도 나타나지 않고 있는 이유는 전열관 재질이 다른 증기발생기 전열관보다 응력부식균열에 대한 저항성이 우수하기 때문이라는 추론이 가능하다. 전열관을 관판에 고정시키기 위한 확관 공정에서 유발된 잔류응력이 전열관의 응력부식균열을 유발하는 매우 중요한 요인이기는 하지만 모든 전열관이 동일한 공정으로 가공되었음을 감안할 때 증기발생기별로 전열관의 잔류응력이 크게 차이날 수 있는 가능성은 없을 것이기 때문이다.

SG2C에서 균열이 없는 것뿐만이 아니라 다른 증기발생기에서도 증기발생기별로 균열생성 추세가 크게 차이나는 이유도 전열관 재질특성의 차이 때문일 가능성이 크다. 즉, 증기발생기 1A, 1B, 1C, 2A, 2B 등 다섯 개의 증기발생기에서는 여러 종류의 heat를 혼합하여 사용하였다. 모두 IMPHY 사에서 공급한 주괴로 가공하였지만 heat 별로 특성이 다를 수 있다. 예를 들어 일부 heat가 특히 응력부식균열에 대한 저항성이 매우 약한 재질이라면, 증기발생기별로 특정 heat의 혼합비율이 다를 때 증기발생기별로 응력부식균열 생성 추세가 서로 다를 수 있다. 증기발생기 제작에 다양한 heat의 전열관을 사용하였던 바, heat 별 응력부식균열 특성이 서로 다름에 따른 heat별 영향이 증기발생기별 거동의 차이로 나타나는 것이다.

표 1 증기발생기별 전열관 heat 분포

	heats	Average YS/UTS [MPa]	remarks
Unit 1 SG A, B, C	WD 007 ~ 954 WB 811 ~ 988 ZA 715	284/672 at 343°C 348/743 at RT	slower crack initiation and growth
Unit 2 SG A, B	WE 002 ~ 159 WD 051 ~ 999 WB 811, 988	281/657 at 343°C 336/729 at RT	faster crack initiation and growth
Unit 2 SG C	NX 0942 ~ 6608 totally isolated heats	264/643 at 343°C 315/720 at RT	no crack indication

(2) 새로운 균열의 크기 분포

그림 2는 새로운 균열 (new crack)의 길이 분포를 나타내고 있다. 새로운 균열이라 함은 바로 전 주기 가동 중 검사에서는 균열이 탐지되지 않았던 전열관에서 다음 주기 검사에서는 균열이 탐지된 경우를 의미한다. 그림 2는 1호기와 2호기 두 경우에 대해서 새로운 균열의 길이 분포를 보이고 있다. 균열 길이는 1mm 범위로 나타내었다. 균열 길이가 1.5mm보다 짧은 경우는 단 한 것도 없었다. 이는 현장의 MRPC (Motorized Rotating Pancake coil) 검사기술이 1.5mm보다 짧은 균열은 탐지하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 길이가 1.5~2.5mm 범위의 균열도 대부분 길이가 2mm 이상이었다. 균열길이가 매우 짧은 경우에는 균열이 확관 부위의 kiss roll에 의한 심한 냉간가공과 잔류응력 영역을 미처 벗어나지 못한 상태이므로 균열전파속도가 매우 빠를 것으로 예상되는 바, 1.5~2mm 범위의 균열 길이를 나타내는 데이터가 적음은 MRPC 탐지 한계에 가깝기 때문이기도 하거니와, 실제로 균열길이가 짧은 균열 개수가 적기 때문일 수도 있을 것이다.

1,2호기를 서로 비교하면 2호기의 새로운 균열의 평균적인 길이가 1호기보다 길다. 2호기가 1호기보다 균열생성 추세가 가파름을 그림 1로부터 알 수 있다. 즉 2호기의 전열관이 평균적으로 1호기보다 응력부식균열에 대한 저항성이 약한 재질인 것으로 보면 균열성장속도도 빠를 것이라는 추론이 가능하며 따라서 새로운 균열의 평균적인 길이도 더욱 길어지는 것이다.

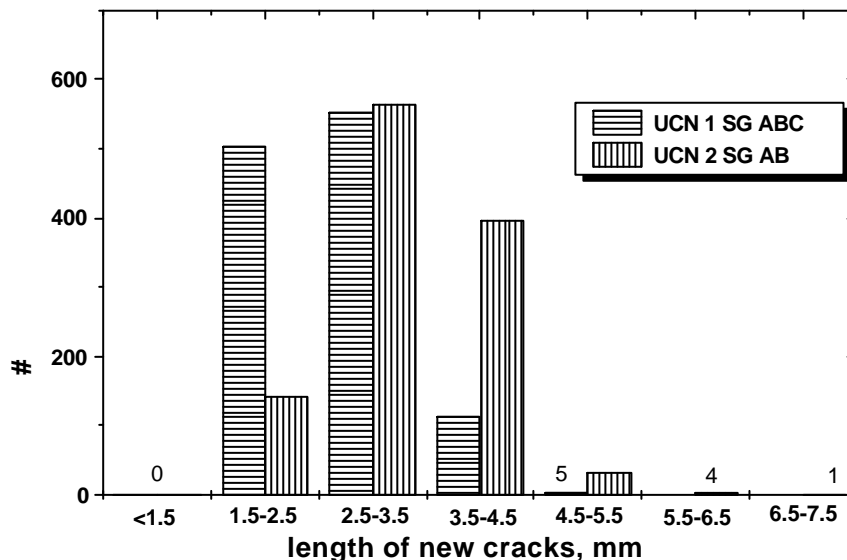


그림 2 새로운 균열의 길이 분포

2. 균열 성장 속도 분석

그림 3은 울진 1,2호기 고유역 응력부식균열 성장속도를 보이고 있다.

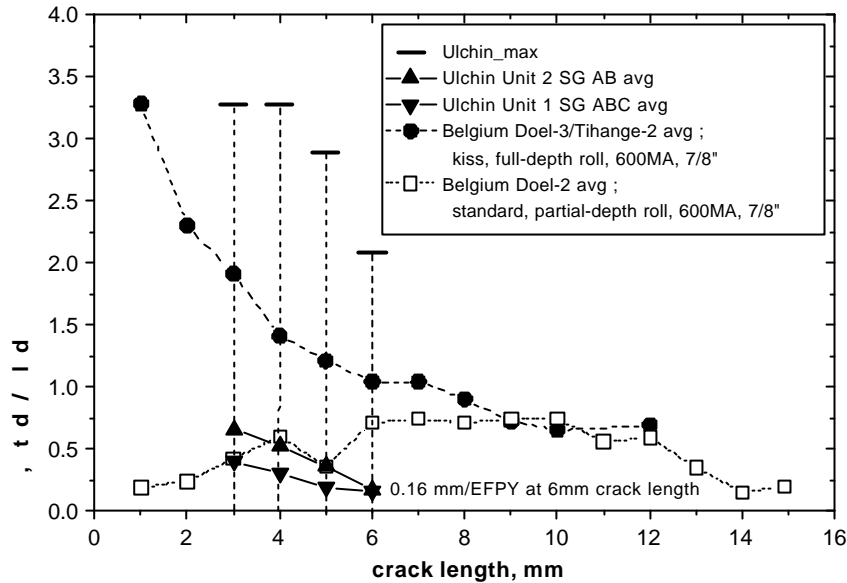


그림 3. 울진 1,2호기 전열관 균열 성장 속도

벨기에의 Doel 2와 Doel 3 / Tihange 2 발전소의 평균 균열성장속도를 비교를 위한 데이터로서 함께 제시하였다.[3] Doel 2 발전소는 부분길이 롤(roll) 확장 후 kiss roll을 적용하지 않은 경우이고 Doel 3과 Tihange 2는 울진 1,2호기와 동일하게 kiss roll을 적용한 발전소이다. 각 균열 길이는 균열길이 범위를 나타낸다. 즉, 균열길이가 5mm라 함은 4.5-5.5 mm 범위의 균열길이에 해당하는 균열성장속도 데이터의 평균값을 의미한다. 균열길이와 균열성장속도는 다음과 같이 구하였다.

$$\frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{l_i - l_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} ; \quad l = \frac{l_i + l_{(i-1)}}{2} \quad (2)$$

l_i : i 차 가동 중 검사에서 측정된 균열길이

t_i : i 차 가동 중 검사시점에서의 EPFY

균열성장속도를 균열길이의 함수로 나타낸 이유는 균열성장속도가 균열길이에 영향을 받기 때문이다. 균열이 발생하는 위치는 인장 잔류응력과 냉간가공에 의한 복합적인 응력부식균열 유발 효과가 가장 큰 곳일 것이며 따라서 균열 길이가 짧을 때 균열성장속도가 높을 것임은 쉽게 예측할 수 있다. 균열이 성장해 감에 따라서 kiss roll에 의한 심한 냉간가공과 잔류응력이 감소하면서 균열성장속도도 줄어들

것이다. 반면 균열길이가 길어지면 다음 식에 의해서 응력집중계수 (stress intensity factor) 값은 점차 증가해 갈 것이다. [4]

$$K_I = \sigma_b \sqrt{\pi a} \sqrt{1 + 0.52\lambda + 1.29\lambda^2 - 0.074\lambda^3} \quad (3)$$

$$\sigma_b = \frac{\Delta P r}{t} + \sigma_{residual}, \quad \lambda = \frac{a}{\sqrt{r t}}$$

K : 응력집중계수, $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

ΔP : 전열관 1,2차축 압력차

r, t : 전열관의 반경과 두께

$a = l/2$, l : 균열길이

다음에 나타낸 (4)식은 PWSCC 균열성장속도의 응력집중계수 의존성을 나타내는 Peter Scott 모델로서 냉간가공되지 않은 Alloy 600 MA 재질의 PWSCC 균열 성장 속도에 대한 보수적인 기준 곡선으로서 널리 인용되고 있다. [5]

$$\frac{dl}{dt} = 2.8 \times 10^{-12} (K - 9)^{1.16} \text{ m/sec} \quad (4)$$

(3), (4)식이 의미하는 바는, 균열이 길어질수록 1,2차축 압력차에 의한 균열 끝단의 응력집중계수가 증가하고 따라서 균열성장속도도 증가하는 것이다. 요약하면, 균열이 생성된 후 아직 그 길이가 짧을 때에는 kiss roll의 심한 가공경화와 잔류응력 때문에 균열성장속도가 빠르고 균열이 성장할수록 성장속도가 둔화되지만 균열이 어느 이상 성장하면 응력집중계수가 증가하면서 균열성장속도도 다시 증가하는 것이다.

그림 3에서 벨기에 발전소의 kiss roll 과 일반 roll 두 경우를 비교하면 균열 길이가 짧은 경우에는 kiss roll 발전소가 월등히 높은 균열성장속도를 나타내다가 균열길이가 8mm이상 성장하면 두 경우의 균열성장속도가 동일한 값을 보인다. 즉, kiss roll에 의한 균열성장속도 가속효과가 균열길이 8mm까지 지속됨을 알 수 있다. 벨기에 발전소의 거동에서 확인할 수 있는 것은 균열길이가 12 또는 15 mm 까지 성장하여도 응력집중계수 증가에 의한 균열성장속도 증가 현상이 관찰되지 않는다는 점이다.

동일한 kiss roll을 적용한 벨기에 발전소와 울진 1,2호기 데이터를 비교하면 일단 울진 1,2호기 균열성장속도가 월등히 낮음을 알 수 있다. 이는 울진 1,2호기의 전열관이 Alloy 600 TT로서 Alloy 600 MA 전열관보다 응력부식균열에 대한 저항성이 우수하기 때문인 것으로 판단된다. 또 다른 한편으로는 1994년도에 시행한 shot peening에 의해서 균열성장 속도가 저하되었을 가능성도 있다.

그림 3에서 또 한가지 주목할 점은 울진의 각 균열길이대별 최고 성장속도 값이

평균치보다 매우 높다는 점이다. 최고 성장속도란 통계 분석에 사용된 모든 ISI 데이터에서 균열길이대별로 가장 큰 성장속도 측정치를 의미한다. 최대치가 평균치보다 월등히 높은 이유에 대해서는 다음과 같은 추론이 가능하다.

- 검사 오차 : 신호 판독 과정에서 오차에 의해서 일부 데이터가 매우 높은 값을 나타낼 수도 있을 것이다.
- heat별 영향 : 일부 소수의 전열관이 다른 전열관 재질보다 응력부식균열에 매우 취약하다면 이들 전열관은 일찍 균열이 발생하여 빠르게 균열이 성장할 것이다. 따라서 전체 전열관에 대한 평균값을 구하면 매우 낮은 균열 성장속도가 얻어지나 수 천개의 데이터 중에서 가장 높은 값을 선택하면 이는 매우 높은 값일 수가 있다.

그림 4는 각 증기발생기 별로 균열성장속도를 보이고 있다. 증기발생기 별로 균열생성 추세가 불균일함은 이미 언급하였는 바, 균열성장속도도 역시 증기발생기 별로 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. SG 2A와 2B가 가장 높은 속도를, SG 1B와 1A가 가장 낮은 속도를 보이고 있는데, 이는 균열 생성이 빠른 경우에 균열성장속도도 빠른 것으로 어느 정도 경향이 일치하는 것으로 볼 수 있다.

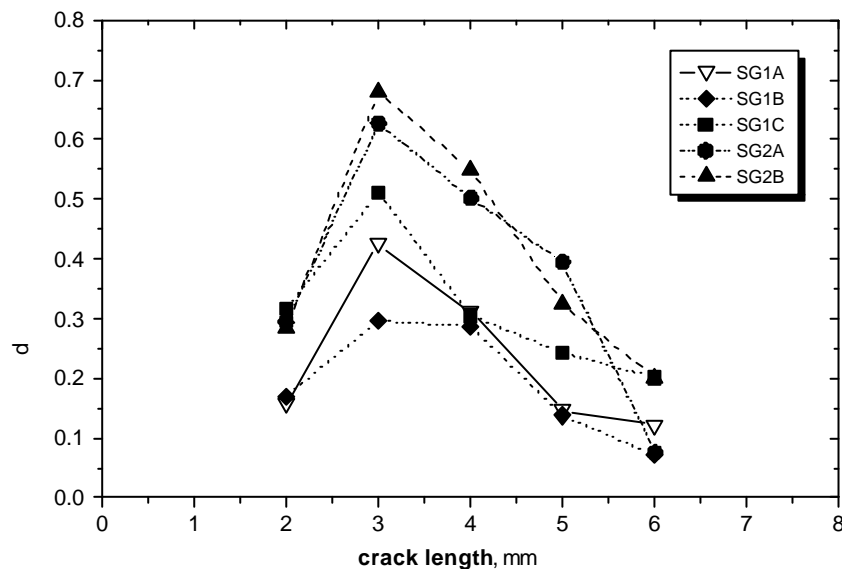


그림 4. 증기발생기별 균열성장속도

균열 성장속도 차이를 유발하는 주된 요인도 균열 생성과 마찬가지로 전열관 heat별 특성 차이일 것으로 판단된다. 즉, 응력부식균열에 대한 저항성이 낮은 전열

관은 균열생성이 빠를 뿐만이 아니라 균열성장속도도 빠를 것이라는 예상과 일치한다. 그림 3에서는 표시하지 않았으나 그림 4를 보면 균열길이가 2mm일 때 성장속도가 3mm 보다 작은 것으로 나타난다. 이는 다른 kiss roll 발전소와는 상반되는 결과인데 그 이유는 균열 성장속도 계산방법 때문일 것으로 판단된다. 식 (2)에 나타난 계산 방법은 (i-1)-th ISI와 i-th ISI 사이에 균열성장을 $l_i - l_{i-1}$ 로 계산하여 성장속도를 구하고 이 때 균열길이를 $\frac{l_{i-1} + l_i}{2}$ 로 정의한 것으로 일단 타당한 것으로 볼 수 있다. 그리고 균열성장속도를 정의하기 위해서는 두 번의 연속된 ISI에 의해서 결함 길이가 측정된 경우만을 고려하였다. 즉, 균열이 처음 발견된 경우에는 지난 주기에서의 균열 길이 데이터가 없으므로 성장속도를 구할 수 없는 것으로 간주하여 균열성장속도를 계산하지 않았다. 그런데 MRPC 검사에 의해서 탐지되는 균열이 대부분 2mm 이상이므로 균열 길이가 1.5~2.5 mm 범위일 때 균열길이 데이터 자체는 아무래도 정량적인 신뢰성이 부족할 것으로 예상된다. 정량적인 신뢰성이 있다고 하더라도 다음과 같은 이유에 의해서 균열성장속도를 평가하기가 어렵다. l_{i-1} 이 2mm라고 가정하면 1 EPPY 만큼 운전한 후에 l_i 로 성장하였다면 성장속도가 높은 경우에는 l 이 높은 값을, 낮은 경우에는 l 이 낮은 값을 나타내게 된다. 따라서 균열길이가 1.5~2.5 mm 인 경우의 균열전파속도는 원천적으로 균열성장속도가 낮은 데이터만을 포함하게 된다.

3. 관막음을 증가 추세 예측

그림1의 균열생성 Weibull 추세선에서 균열이 탐지된 시점부터 일정 길이로 성장할 때까지 소요되는 시간을 반영하면 일정길이 이상 성장한 균열 개수의 증가 추세를 예측할 수 있다. MRPC에 의해서 탐지가 가능한 균열 길이를 2mm 라고 가정하면 균열 생성 후 정비기준 길이 l_c 까지 성장하는데 소요되는 시간 Δt 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta t = \int_{2\text{mm}}^{l_c} \left(\frac{dt}{dl} \right) dl \quad (4)$$

l_c : 정비기준 균열길이

Δt : 균열이 2mm에서 l_c 까지 성장하는데 소요되는 시간

전열관 정비수량 증가추세를 예측하기 위하여 그림 4에 소개한 균열길이 데이터로부터 (4)식을 계산하였다. 단, 3~6 mm 균열길이 범위에서만 균열성장속도 데이터가 신뢰성이 있는 것으로 판단하여 2~3 mm 에서는 3 mm의 균열 성장속도를, 6mm 이상에서는 6mm에서의 균열성장속도를 가정하였다. 가장 관막음을 증가

추세가 가파를 것으로 예상되는 SG2A에서 정비기준 길이별로 관막음을 증가추세를 그림 5에 나타내었다.

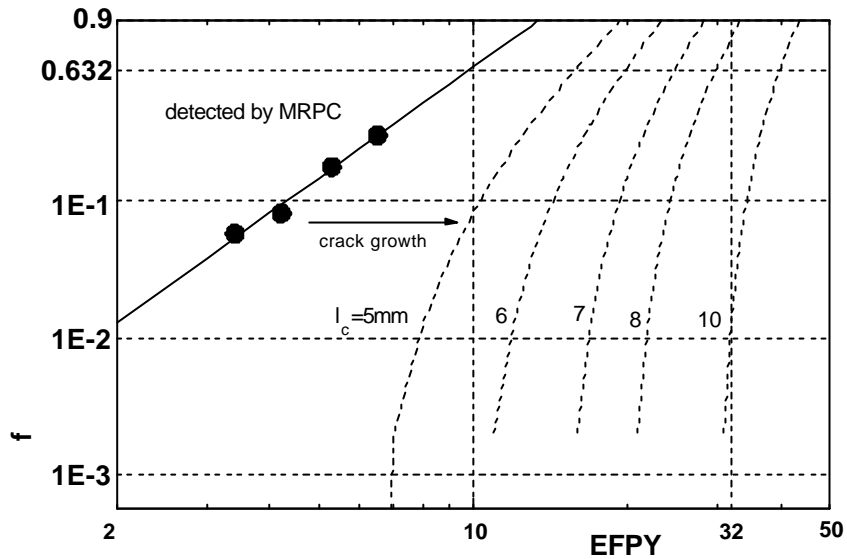


그림 5. SG2B 관막음을 증가 추세선

올진 1,2호기의 현행 관막음을 제한치는 10% 이다. SG1A에서는 정비기준 길이가 7 mm 이상이면 설계수명 이상 운전이 가능할 것으로 판단되는 반면 SG2B는 정비기준 길이가 10 mm 이상은 되어야 설계수명 이상 운전이 가능할 것으로 판단된다. 전열관 파열을 막기 위한 측면에서 13mm 균열길이 정비기준을 적용하고 있다. 그러나 가동 중 누설 때문에 이보다는 훨씬 앞서 전열관을 정비하는 것이 불가피하다. 향후 어느 정도 보수적으로 정비를 해야할 지에 대해서는 아직 불확실하다. 게다가 균열길이만을 기준으로 정비 대상관을 선정하지는 않는다. 그러나 그림 5에 나타낸 가상적인 정비기준 길이는 어느 정도 보수적인 정비기준을 적용할 것인가를 반영한다. 가동 중 누설 관리를 위한 정비기준 적용 방침이 불확실함에도 불구하고 그림 5와 같이 관막음을 증가 추세를 예측해 보는 것은 현재 확보되어 있는 데이터를 활용하여 미래의 추세를 예측함으로써 향후 유지보수 전략수립의 참고자료로 활용하고자 함이다. 누설관리가 용이하다면 덜 보수적인 정비기준을 적용할 수 있으나 누설관리가 어려울 경우에는 매우 보수적인 정비기준 적용이 불가피하다. 그리고 보수적인 정비기준을 적용할 경우에는 많은 개수의 전열관 정비가 불가피하다.

관막음을 증가 추세 예측에서 가장 중요한 변수는 정비기준과 균열성장속도이다. 정비기준은 누설관리가 용이할수록 덜 보수적인 기준 적용이 가능할 것이나 누설 관리가 어려울 경우에는 매우 보수적인 기준을 적용해야 할 것이다. 본 계산에서 사용한 증기발생기별 균열성장속도 특성에는 다음과 같은 가정이 포함되어 있다.

- ① 균열길이가 3mm 이하인 균열은 성장속도가 3mm인 경우와 동일하다.
- ② 균열길이가 6mm 이상인 균열은 성장속도가 6mm인 경우와 동일하다.
- ③ MRPC에 의해서 처음으로 탐지된 균열의 길이는 2 mm 이다.
- ④ 각각의 증기발생기별로 모든 전열관의 균열성장속도는 지금까지 탐지된 균열에 대한 데이터베이스로부터 계산한 증기발생기 고유의 평균 균열 성장속도와 동일하다.

① 가정은 2에서 3mm로 성장할 때까지 소요되는 시간을 구할 때 적용되는 것으로서 이는 균열성장속도가 빠른 구간이므로 성장속도의 오차가 Δt 값에 미치는 영향이 작다. ② 가정은 다소 보수적인 (성장속도가 빠른) 가정일 것으로 예상된다. 벨기에 데이터는 균열길이가 길수록 성장속도가 감소하는 추세를 보이며 울진 1,2호기에서도 이러한 경향은 동일할 것이다. ③ 가정은 일견 타당한 것으로 보인다. 소수의 데이터가 1.5~2 mm의 균열길이를 나타내는 반면 대부분 처음 발견된 균열은 2 mm 이상이다. 그리고 3mm 이하의 균열길이에서는 성장속도가 빠르므로 처음 발견된 균열의 길이에 대한 차이가 t_b 에 미치는 영향은 상대적으로 작다.

④ 가정은 보수적인 영향을 미칠 것으로 예상된다. 균열이 이미 발생하였으나 아직 짧은 경우와 아직 균열이 발생하지 않았으나 향후 발생하여 성장할 경우에도 이미 성장한 균열에 대한 데이터로부터 구한 평균성장속도와 동일한 속도로 성장할 것임을 의미한다. 이는 전열관 heat별 재질특성 차이를 무시한 결과로서 상당한 오차를 유발할 수 있는 소지가 있다. 즉, heat별 재질특성 차이를 고려한다면 이미 성장한 균열은 응력부식균열 저항성이 낮은 재질이고 새롭게 생성되었거나 또는 생성될 균열은 응력부식균열에 대한 저항성이 상대적으로 높은 재질임을 감안하여야 한다. 따라서 이미 성장한 균열의 과거 성장 속도로부터 미래의 균열성장속도를 예측한다면 매우 큰 오차를 유발할 가능성이 있다.

III. 결 론

1. 울진 1,2호기 증기발생기 전열관 균열에 대한 현행 MRPC 검사의 탐지한계는 약 2mm 균열 길이이다.
2. 균열길이 성장속도는 균열길이가 증가하면서 감소하다가 다시 증가하는 추세를

보인다. 그러나 현행 정비기준 범위 이내에서는 균열길이 증가하면서 성장 속도가 다시 증가하는 거동이 나타나지는 않을 것으로 예상된다.

3. 균열 생성과 성장 거동이 증기발생기별로 매우 불균일한 거동을 나타낸다. 이는 전열관 제조 heat별 특성차이에 기인하는 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 heat별 특성차이를 고려한다면 고려하지 않는 경우보다 증장기적으로 결함의 생성과 성장 추세가 완화될 것으로 예측할 수 있다.
4. 13mm 균열 길이 정비기준을 적용하거나 또는 10mm 이상의 덜 보수적인 정비 기준을 적용한다면 대규모 관재생을 수행하지 않고도 증기발생기 설계수명 운전이 가능하다. 그러나 누설을 억제하기 위하여 보수적인 정비기준을 적용할 경우 설계수명 이전에 대규모 관재생 정비가 불가피하다.

참 고 문 헌

- [1] EPRI NP-7493, "Statistical Analysis of Steam Generator Tube Degradation" (1991)
- [2] EPRI TR-103566, "Statistical Analysis of Steam Generator Tube Degradation : Additional Topics" (1994)
- [3] EPRI NP-6864-L Revision 1, "PWR Steam Generator Tube Repair Limits: Technical Support Document for Expansion Zone PWSCC in Roll Transitions (Revision 1)" (1991)
- [4] T.L. Anderson, "Fracture Mechanics Fundamentals and Applications", 2nd Ed., CRC Press, (1995) p.636
- [5] EPRI TR-105958, "Crack Growth and Microstructural Characterization of Alloy 600 Head Penetration Materials" (1995)