

경수로 원전 1차계통의 PWSCC 억제에 미치는 아연주입 효과

강덕원, 이두호, 양필현*, 채경선,** 전상환**

한전전력연구원, 대전광역시 유성구 문지로 65

*영광원자력 제1발전소, 전남 영광군 홍농읍 계마리 514

**세안기술(주), 서울시 금천구 가산동 481-10

dwkang@kepri.re.kr

1. 서론

원자로 1차계통에 소량의 아연을 주입함으로써 계통의 방사선량 저감효과와 일차계통 Alloy 600 재질의 PWSCC 개시율 저하효과를 얻는 것으로 확인됨에 따라, 현재 전 세계적으로 54기의 원전에서 아연주입 운전 행해오고 있으며 금년 말까지는 5기의 원전에서 추가 주입 준비를 계획하고 있다. 그러나 이러한 효과를 얻기 위한 아연주입 운전에는 대규모의 투자가 수반되어야만 하므로, 발전소 계통에 아연을 주입하기 위한 최종적인 의사 결정에 앞서 아연주입에 따른 긍정적인 효과와 소요되는 비용에 비해 어느 정도의 추가적인 경제적 이득을 가져다 줄 수 있을 것인지에 대한 정량적인 평가가 수행될 필요가 있다. 경수로 원자력발전소에 아연주입 운전을 수행함으로써 얻을 수 있는 경제적 이득으로는 부식을 저하에 따른 Alloy 600 구성품의 PWSCC와 관련된 비용의 감소를 들 수 있다. Alloy 600 재질과 Alloy 600 type의 용접용 합금(즉, Alloy 82, 132, 182 등)이 고온(280 °C 이상)의 일차 냉각재 환경에서 운전되는 경우 PWSCC에 민감하게 된다. 본 논문에서는 PWSCC 균열의 발생과 관련하여 주요 구성품별로 아연이 주입된 경우와 그렇지 않은 경우를 구분하여 예측한 결과를 다루었다

2. Alloy 600 구성품의 PWSCC에 미치는 아연의 영향

Alloy 600 재질과 Alloy 600 type의 용접용 합금(즉, Alloy 82, 132, 182 등)이 고온(280°C 이상)의 일차 냉각재 환경에서 운전되는 경우 PWSCC에 민감하게 된다. 웨스팅하우스형 원전의 일반적인 자료에 근거하여 국내 W 노형의 PWSCC 취약지점을 선정하였다.

가. W 노형의 PWSCC에 민감한 부분

- 증기발생기 전열관 (Alloy 600TT 재질, 관관 상단(TTS)의 수력학적 천이구역)
- 3개의 온도 구배를 갖는 배관의 맞대기 용접부(Butt welds)
- J형 그루브 용접(J-groove weld) 부위를 갖는 약 65개의 CRDM 하우징
- J형 그루브 용접 부위를 갖는 약 50개의 BMI(Bottom Mounted Instrument) 노즐
- 노심 지지패드(Core support pads).
- 증기발생기 관관 피복재, 증기발생기 수실 분리판(divider plate), 관관과 분리판의 용접 부위.

나. PWSCC 모델링을 위한 Weibull 통계함수

PWSCC와 관련된 경제성 평가를 위해서는 아연주입 적용 전에 PWSCC에 민감한 부위별로 균열 개시율을 산출하여 기준점으로 삼고, 아연주입 적용 후의 새로운 균열 개시율을 구하여 이득을 계산한다. 아연주입에 의한 효과 역시 EDY라는 개념을 도입하여 효과적인 예측이 가능하며, 아연 주입시 PWSCC 개시율을 낮출 수 있을 것으로 기대되며 지연 효과는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$t_{EDY} = t_{zn} + (1 - f_{zn})(t_{EFPY} - t_{zn}) + f_{zn} \times \left(\frac{t_{EFPY} - t_{zn}}{1 + m_z \left(\frac{C_{zn}}{20} \right)} \right) \dots\dots\dots(1)$$

t_{EDY} : 기준 온도로 환산된 가동 기간(EDY), t_{EFPY} : EFPY로 표현된 가동 기간

t_{zn} : 아연주입 운전이 시작된 시점(EFPY), f_{zn} : 아연주입 운전 개시후 아연주입 운전 기간의 비율

C_{zn} : 주입된 아연의 농도(ppb),

m_z : 아연주입에 의한 PWSCC 이득을 나타내는 인자

3. 아연주입 운전을 하지 않는 경우의 W노형의 PWSCC 발생 예측값

W 노형의 설계 수명이 40년이고, 18개월 주기의 운전이 실시되고 있으며, 주기당 1.4 EFPY가 운전된다고 한다면, 유효 가동시간은 $14.4 + (1.4/1.5) \times (40 - 16) = 36.8$ EFPY가 된다. 원전 가동시간이 완료되는 시점에서는 증기발생기 전열관에서 다음과 같이 PWSCC 균열이 발생할 것으로 예상된다.

- 축방향 PWSCC : $F(t) = 1 - \exp(-t/\theta_{ax<0.1\%})^{\beta_{ax<0.1\%}} = 1 - \exp(-(36.8/105.9)^7) = 0.061 \%$.
3대의 증기발생기에, 각 증기발생기당 5,626개의 전열관이 있으므로, 발전소 설계수명(40년)이 다하는 시점에서 $0.061\% \times 3 \times 5,626 = 10$ 개의 전열관에서 균열이 발생할 것으로 예상됨.
 - 원주방향 PWSCC : $F(t) = 1 - \exp(-t/\theta_{circ<0.1\%})^{\beta_{circ<0.1\%}} = 1 - \exp(-(36.8/106.1)^7) = 0.061 \%$.
3대의 증기발생기에, 각 증기발생기당 5,626개의 전열관이 있으므로, 발전소 설계수명(40년)이 다하는 시점에서 $0.061\% \times 3 \times 5,626 = 10$ 개의 전열관에서 균열이 발생할 것으로 예상됨
4. 아연주입 운전시의 W노형의 PWSCC 발생 예측값
20 ppb의 농도로 아연을 주입하는 경우 아연이 주입되는 기간 동안에는 PWSCC 개시율이 2배 감소하게 될 것으로 예상되므로 아연주입 운전 시에 0.1 % 전열관에서 PWSCC 균열이 발생한다는 가정 하에 PWSCC 균열이 처음으로 발생하는 데 소요되는 가동 시간은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$t_{Zn - Ax - PWSCC = 1st - occur} = \frac{5}{3} \times 26.4 - 11.47 = 32.5 \text{ EFPY} \dots\dots\dots (2)$$

17.2 EFPY부터 아연주입 운전을 시작하는 경우, 40년의 설계 가동기간이 완료되는 시점에서의 W노형의 증기발생기(총 16,878개의 전열관)의 PWSCC 결함 발생율을 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$F_{circ}(t_{EOL}) = 1 - \exp[-(t_{EOL}/\theta_{circ<0.1\%})^{\beta_{circ<0.1\%}}] = 1 - \exp[-(29/106.1)^7] \dots\dots\dots (3)$$

$$= 0.011 \% \equiv 2 \text{ tubes}$$

결 론

20 ppb의 농도로 17.2 EFPY부터 아연주입 운전이 시작되어 발전소 잔여 설계수명의 80 % 동안 아연이 주입된다고 가정하였을 때, PWSCC 측면에서 다음의 효과가 예상된다:

- Steam Generators
 - 발전소 수명을 40년(36.8 EFPY)이라고 가정한다면, 증기발생기 전열관 축방향 또는 원주방향의 PWSCC 균열이 발생할 비율은 0.12 % (20개 전열관)에서 아연 주입 운전 시에는 0.02 % (4개 전열관)로 감소될 것으로 예상된다.
 - PWSCC 균열이 최초로 발생하는 시기가 26.4 EFPY에서 32.5 EFPY로 늦춰질 것으로 예상된다.
- Piping Butt Welds
 - 아연이 주입되는 경우 PWSCC 균열이 최초로 발생하는 시기는 22.9 EFPY로 예상된다. 이는 아연이 주입되지 않은 경우의 발생 예상시기(20.6 EFPY)보다 2.3 EFPY 정도 늦춰진 것으로 평가된다.
- Control Rod Drive Mechanism (CRDM) Nozzles
 - 아연이 주입되지 않은 경우 40년의 가동 기간 내에 0.3개의 CRDM 노즐에서 PWSCC로 인한 균열이 나타나는 반면, 아연이 주입되는 경우 이 확률을 2배 정도 낮추는 효과(즉, 0.16개)를 나타낼 것으로 예상된다.
- Bottom Mounted Instrument (BMI) Nozzles
 - 아연이 주입되는 경우 40년의 가동 기간 중에 PWSCC 균열이 발생하는 BMI 노즐의 수가 0.25개에서 0.12개로 감소할 것으로 예상된다.

참고문헌

○ 강덕원, 이두호 “국내 경수로형 원전내 아연주입 기술적용 및 평가를 위한 국제 공동연구사업에 관한 보고서”, 2005.5 -한전전력연구원 최종보고서