

울진 1,2호기 증기발생기 가동누설 기준에 대한 고찰

Discussion on Operation Leakage Criteria of Ulchin Unit 1&2 Steam Generators

김홍덕, 정한섭, 홍승열

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

균열길이 기준 대체 관막음 기준을 적용하고 있는 울진 1,2호기에 프랑스의 강화된 가동누설 기준을 반영함에 따라 울진 1,2호기 증기발생기에 대한 가동 누설 건전성을 평가하였다. 각국의 가동누설 허용기준의 배경을 정리하고, 울진 1,2호기 고유의 누설 허용치를 계산하였다. EPRI의 누설허용기준 설정절차에 따라 누설시험결과와 발전소 고유자료를 이용하여 도출한 울진 1,2호기의 허용누설치는 개정된 기준의 즉시 정지기준보다 크므로 개정된 누설허용기준은 충분히 보수적이다.

Abstract

Operational leakage integrity assessment on the Ulchin Unit 1&2 steam generators was performed to discuss the conservatism of revised operational leakage criteria which was adopted from France. The background of operational leakage criteria of other countries was reviewed, and the allowable leakage limit of Ulchin Unit was calculated by utilizing EPRI method, leak test data, and plant-specific data such as tube material properties and design parameter. The calculated plant-specific leakage limit was larger than the immediate shutdown criterion, and the conservatism of the revised criteria could be verified.

1. 서론

울진 1,2호기 증기발생기 관판 상단에서 발생하는 축방향 응력부식균열은 기존의 40% 관두께 기준 관막음 기준 대신에 균열길이를 기준으로 관막음 하는 대체 관막음 기준 (Alternative Repair Criteria, ARC)을 적용하고 있다. 이 ARC는 설비공급국가 기준 준용원칙에 따라 프랑스에서 개발된 ARC를 적용하는 것으로 관통균열을 통한 가동중 누설을 허용하고 있다. 울진 1,2호기 기술지침서에는 가동중 누설 기준을 70 l/h로 규정되어 있으나 비상운전 절차서의 10 l/h 기준에 따라 운영되어 왔다.

최근 프랑스에서는 Alloy 600TT 전열관 증기발생기의 가동누설 허용기준을 5 l/h로 강화하고, 이를 1998년 말에 기술지침서에 반영하였다. Alloy 600TT 전열관 증기발생기로 제작된 울진 1,2호기는 프랑스의 ARC를 준용하여 운전하고 있으므로 프랑스의 규제환경 변화를 반영해야 한다는 의견이 제시됨에 따라 1999년 8월말부터 프랑스의 강화된 기준을 비상운전 절차서에 반영하였다.

본 논문에서는 가동중 누설기준의 설정 배경과 각국의 구체적인 적용사례를 정리하였다. 그리고 울진 1,2호기와 프랑스 원전의 가동 특성을 비교하고, 균열길이기준 ARC와 연계하여 EPRI가 제시한 방법론에 따라 울진 1,2호기 고유의 누설허용기준을 계산함으로써 개정된 가동누설기준의 보수성을 검토하였다.

2. 가동중 누설허용기준 설정의 배경

증기발생기 전열관 건전성을 확보하기 위한 기준은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 정상가동 조건과 설계기준사고 조건에서 전열관의 파열을 억제하기 위한 충분한 안전여유를 확보하여야 한다.
- 설계기준사고에 의한 2차측 감압사고가 발생하였을 때 (특히, 주급수관 파단사고) 방사능 누출 허용기준을 만족함을 입증하여야 한다. (off-site dose assessment)

원전의 기술지침서(Tech. Spec.)는 가동중 전열관 누설허용기준을 제시하고 있으나 실제로는 기술지침서 허용치보다 강화된 가동지침서(operational guidelines) 기준을 적용하는 사례가 많다. 그러나 본 논문에서는 기술지침서의 허용기준을 먼저 검토하고자 한다. 미국 원전에서는 증기발생기 당 500 gpd (79 l/h)를, 그리고 프랑스 원전에서는 70 l/h를 기술지침서 기준으로 명시하고 있고, 이를 초과하는 경우에는 가동을 중지하여야 한다. 이들 수치는 전열관 건전성 확보 기준을 만족하기 위하여 원전의 인허가 근거에 반영된 값이다. 프랑스의 기준치는 길이가 15mm 이하인 관통균열은 주급수관 파단사고조건에서 파열이 일어날 가능성이 없다는 판단 하에 동일균열을 통한 가동중 누설률을 72 l/h로 예측한 후 기준치를 70 l/h로 설정한 것이다. 미국의 기준치도 유사한 논리에 의해서 설정된 것으로 판단된다.

국내외 원전의 기술지침서는 결함종류에 관계없이 결함의 깊이가 전열관 두께의 40%를 초과하면 전열관을 보수하도록 규정하고 있다. 그러나, 기존의 40% 관두께

보수기준은 지나치게 보수적이고 경직된 측면이 있기 때문에 최근에는 결함의 유형과 위치에 따라 서로 다른 기준을 적용하는 결함고유관리 (SGDSM ; steam generator degradation specific management) 개념 도입과 대체관막음기준 (ARC ; alternative repair criteria)의 적용이 확산되는 추세이다.

프랑스에서는 파단전 누설 (LBB ; leak before break) 개념을 도입한 ARC를 개발하여 적용하였다. LBB에 근거한 ARC란 전열관이 파단에 도달하기 전에 누설이 증가하므로 가동중 누설률을 감시함으로써 전열관 파단이 발생하기 전에 필요한 조치를 취할 수 있다는 개념으로 전열관 검사 대신 N-16 누설감시를 수행함으로써 파열 조건에 근접한 전열관 결함을 사전 탐지할 수 있다는 판단에 근거한 것이다. 이에 따라, 프랑스에서는 매우 엄격한 가동중 누설허용기준을 적용하고 있다.

그러나 실제로는 관통균열을 통한 누설률이 모델해석을 통한 예측치보다 낮으며 일부 관통 균열은 누설이 발생하지 않는 경우도 있다. 즉, 관통균열을 통한 누설률에 대한 예측이 매우 불확실하다는 것이 최근의 원전 가동 경험으로부터 입증되고 있다. 이는 석출물이나 슬러지, 또는 지지구조물의 보강효과에 기인한 것이다. 따라서, 전열관 결함의 건전성에 대하여 LBB 개념을 적용하는 것은 100% 신뢰성을 확보할 수는 없으므로 전열관 검사에 근거한 관막음기준 적용을 원칙으로 하되 보조적인 조치로서 가동중 누설허용기준을 기존의 기술지침서의 허용치보다 강화하여 적용하는 것이 일반적인 추세이다. 왜냐하면 강화된 가동중 누설허용기준을 보조적인 조치로서 적용함으로써 다음과 같은 효과를 기대할 수 있기 때문이다. [1,2]

- ① LBB 개념에 100% 신뢰성을 부여할 수는 없다고 하더라도 전열관 검사에 의존하는 관막음기준만을 적용하는 경우보다 전열관 파열사고 가능성을 억제하기 위한 보수성을 추가로 확보할 수 있다.
- ② 전열관 검사에 의한 관막음 기준치에는 도달하지 않은 미세한 균열이라도 그 수량이 많으면 설계기준사고 누설률이 방사능 누출 허용 한계를 초과할 가능성이 있다. 개개의 균열을 통한 누설률은 미미하더라도 균열 개수가 매우 많을 경우에는 과도한 누설이 발생할 수 있기 때문이다. 이럴 경우에는 가동중 누설률을 제한함으로써 다수의 균열에 의한 과도한 사고 누설률을 억제할 수가 있다.
- ③ 피로파괴와 같이 매우 빨리 전파하는 균열이 발생하였을 때 신속히 대처함으로써 그 피해를 최소화할 수 있다. (누설률 증가속도 허용기준)

3. 각국의 가동누설 허용기준

(가) 프랑스 사례

프랑스에서 기술지침서의 가동중 누설기준보다 강화된 기준을 적용하게 된 첫 번째 계기는 1984년과 1985년에 수행한 Dampierre 1호기 증기발생기 전열관 (Alloy 600MA) 인출검사에서 미세한 축방향 1차축 균열 군집(cluster)을 발견하면서부터이다. [3] 이

검사에서 길이는 2 mm 이하이고 깊이는 400 μ m 이하인 미세한 축방향 균열이 전열관 와전류 검사에서는 확인되지 않는 채로 확관천이 부위와 kiss roll 부위에 군집형태로 존재함을 확인하였다. 이들 미세한 축방향 균열 군집과 주된 균열의 상호 작용에 의한 건전성 저하 가능성을 고려하기 위하여 파단전 누설 개념을 적용한 모델해석을 수행하여 Dampierre 1호기 원전의 가동중 누설허용기준을 5 l/h로 보다 엄격히 적용하였다.

1989년에 프랑스 Nogent 1호기 전열관 (Alloy 600TT)에서 1차측 관통 원주균열이 발견되면서부터 EdF는 원주균열에 의한 전열관 파단을 막기 위하여 가동중 누설 기준을 강화하는 저누설률 운영 규정 (Low Leak Rate Operation Rule)과 N-16 가동중 누설 감시기술을 전 원전에 적용하기 시작하였다. [4] 발전소를 발전용량에 따라 분류하여 가동누설 허용기준을 설정하고, 누설 증가속도에 관한 기준을 추가하였다. 올진 1,2호기와 같은 900 MWe 발전소의 허용기준은 10 l/h로 강화하고, 3일 동안 누설 증가속도가 3 l/h를 초과하면 즉시 정지하도록 규정하였다.

그후 1995년도에 EdF는 발전용량에 따른 분류 대신에 전열관 재질과 확관방법에 따라 발전소를 다음과 같이 분류하고, 누설 허용기준과 누설 증가속도 기준을 강화하였다. [5]

	분류 1	분류 2
전열관 재질	thermally treated (TT) (Alloy 690TT, 600TT)	non thermally treated (모두 Alloy 600MA)
확관 방법	kiss rolling	plain rolling
누설 허용기준	3 l/h	10 l/h

이에 대하여 프랑스 규제기관인 IPSN (Institut de Protection et de Serete Nucleaire)은 개정된 저누설률 운영규정을 기술지침서에 반영할 것을 권고하여 EdF는 1998년 말에 기술지침서를 개정하였다. 대체적인 내용은 1995년 기준과 동일하지만 분류 1을 Alloy 690 TT와 Alloy 600 TT로 분리하여 Alloy 600 TT 전열관에 대한 누설허용기준을 기존의 3 l/h에서 5 l/h로 상향조정하였다. 다음은 프랑스 원전 기술지침서에 새로 명시된 가동누설기준이다.

- ① Alloy 690TT의 누설 허용 기준 (Q ; 누설률)
 - $Q < 3$ l/h ; 정상 가동
 - 3 l/h $< Q < 20$ l/h ; 1주일 이내에 정지, 누설 감시 강화
 - 20 l/h $< Q$; 즉시 정지 (1시간 이내)
- ② Alloy 600TT의 누설 허용 기준
 - $Q < 3$ l/h ; 정상가동
 - 3 l/h $< Q < 5$ l/h ; 감시 강화
 - 5 l/h $< Q < 20$ l/h ; 1주일 이내에 정지
(누설감시 강화, 출력안정, 누설 수동 측정)
 - 20 l/h $< Q$; 즉시 정지

③ Alloy 600MA의 누설 허용 기준

- $Q < Q_0 + 5 \text{ l/h}$ ($Q_0 < 5 \text{ l/h}$) ; 정상 가동
- $Q_0 + 5 \text{ l/h} < Q < 10 \text{ l/h}$
 - 연료 연소율이 90% 초과 ; 정상 가동
 - 연료 연소율이 90% 이하 ; 기저부하 운전 시에는 정지,
그 외에는 적절한 출력변화
- $10 \text{ l/h} < Q < 20 \text{ l/h}$; 1주일 이내에 정지,
출력증가 불가, 누설 감시 강화
- $20 \text{ l/h} < Q$; 즉시 정지

④ 누설률 증가속도 기준

- 누설률 증가속도가 1일 동안 3 l/h 초과시
- 누설률 증가속도가 3일간 연속적으로 1 l/h 초과시
- 3일 동안 증기발생기 사이의 누설률 차이가 3 l/h 초과시

전열관 재질에 따라 다른 누설허용규정을 적용한 근거는 프랑스의 증기발생기 가동경험에 바탕을 두고 있다. 즉, PWSCC에 예민하지 않은 Alloy 690TT 증기발생기에서 누설이 발생하면 누설의 원인을 조사하기 위한 조치로 가동누설 허용치를 매우 작게 설정하였으며, Alloy 600TT 전열관에서 PWSCC 손상기구는 잘 알려져 있고, 기존의 3 l/h 기준으로는 불시정지 가능성이 있으므로 5 l/h로 상향조정한 것이다. 그리고, Alloy 600MA 전열관은 응력부식균열에 민감하여 PWSCC에 의한 초기 누설이 많음을 고려하여 가동중 누설기준을 10 l/h로 높게 설정하였다.

(나) 미국 사례

미국에서는 Reg. Guide 1.121 [6]을 근거로 SGDSM과 ARC 개발을 수행하였다. Reg. Guide 1.121은 가동중 누설 허용기준에 대하여 허용 가능한 크기의 축방향 균열이 한 개 존재할 때 예측되는 누설률을 이론적으로 또는 실험적으로 구하여 이 값이 기술지침서의 허용기준인 79 l/h를 초과하지 않을 경우 기술지침서 허용치 대신에 이 값을 적용할 것을 요구하고 있다.

다수의 원전을 적용대상으로 하는, SGDSM에 근거한 ARC로서 다음과 같은 기준이 개발되었으며, 이 중 일부는 실제로 적용하고 있다.

- ① P^* , F^* 기준
- ② TSP (tube support plate) ODSCC에 대한 voltage 기준
- ③ 확관부위 축방향 PWSCC에 대한 균열길이 기준

①번의 사례로서 P^* , F^* 기준은 대표적인 결함 위치 ARC이다. 전열관을 확관하여 관판에 밀착시킨 부위에서는 결함이 발생하더라도 관판에 의한 보강효과 때문에 전열관의 파열이나 누설가능성이 없음을 고려한 것이다. 여기서 P^* 기준은 관판 상단으로부터 1.5 inch 아래에 위치한 결함은 정비하지 않고 그대로 사용한다는 것이고, F^* 기준은 관판과 확관천이부위중 낮은 위치를 기준으로 1.5 또는 2.0 inch 아래에

위치한 결함은 보수를 하지 않는 것이다. P*, F* 기준의 적용과 연관해서는 별도의 강화된 누설허용기준을 언급하고 있지 않다. [1]

②번의 사례로서 Westinghouse의 DSP (drilled-hole support plate) 설계를 채택한 증기발생기에서 발생하는 TSP ODSCC에 대해서는 Bobbin coil 검사의 voltage criteria를 적용할 수 있다. [7] TSP ODSCC에 대한 ARC는 voltage 기준을 적용함과 동시에 Monte Carlo 방법에 의한 계산을 수행하여 설계기준사고 누설허용 기준을 만족함을 입증하여야 한다. 또한 누설이 확인된 전열관은 관막음하고 주기적으로 전열관 인출검사를 수행할 것을 요구한다. 가동중 누설허용기준은 기존의 기술지침서 값보다 낮은 150 gpd (23.8 l/h)를 적용한다.

③번 사례로서 핵관부위 축방향 PWSCC에 대해서는 균열길이 관막음기준을 EPRI에서 개발하여 제안한 바가 있으나 아직 전력회사에서 적용한 사례는 없다. [8] 균열길이기준 ARC 적용 대상인 Alloy 600MA 전열관 증기발생기들이 대부분 축방향 PWSCC 보다 훨씬 심각한 손상을 경험하고 있기 때문에 아직 NRC에 균열길이 기준 ARC 적용에 대한 승인을 요청한 전력회사가 없기 때문인 것으로 알려져 있다. 적용대상 증기발생기 전열관에서 축방향 균열뿐만이 아니라 원주방향 균열도 발견되면서 축방향 균열만을 가정한 ARC를 적용하기가 어려운 점도 있었다. 아직 적용 사례는 없으나 EPRI에서 제안한 바는 균열길이 관막음기준과 함께 Monte Carlo 계산에 의한 사고 누설률 허용기준 입증과 0.1 gpm (22.7 l/h) 가동중 누설허용기준 적용 등이다.

TSP ODSCC에 대한 voltage 기준 ARC와 핵관부위 축방향 PWSCC에 대한 균열길이 기준 ARC를 적용할 때 가동중 누설허용기준을 23.7 l/h로 강화함은 Reg. Guide 1.121 요구 사항에 따라 최대 허용 균열의 누설률 예측치를 보수적으로 반영한 것이다.

최근 미국에서는 원전 증기발생기 유지관리와 관련된 규제환경이 변화하고 있다. EPRI의 의견을 대변하는 NEI 97-06 [9]과, NRC의 draft Generic Letter [10]와 draft Reg. Guide DG-1074 [11]는 모두 EPRI의 지침서 [2]를 인용하여 누설관리 프로그램과 허용기준을 제시하고 있다. EPRI 지침서의 가동누설 허용기준은 다음과 같다.

- $Q \leq 5 \text{ gpd (0.8 l/h)}$; 정상 가동
- $5 \text{ gpd} < Q < 30 \text{ gpd (4.7 l/h)}$; 누설감시 강화
- $30 \text{ gpd} \leq Q \leq 150 \text{ gpd (23.7 l/h)}$
and 1일 누설증가속도 $\leq 60 \text{ gpd/h (9.5 l/h)}$; Action level 1
(감시주기 강화, 누설 수동측정)
- $Q > 150 \text{ gpd}$ or 1일 누설증가속도 $> 60 \text{ gpd/h}$; Action level 2
(즉시 가동정지)

최대 허용 누설률 23.7 l/h는 결함 성장속도가 느려서 누설이 급격히 증가하지 않는 손상을 고려한 것으로, 정상가동과 설계기준사고 시에 전열관 파단을 방지하기 위하여

설정된 제한치 이다. 그리고 누설증가속도 기준은 피로균열과 같이 누설률 자체는 작더라도 누설증가속도가 급격히 증가하는 경우에 전열관 파단을 방지하기 위하여 전열관 파단사고 사례를 분석하여 설정하였다. EPRI 지침에서는 누설률 자체보다는 누설 증가속도를 더욱 중요한 기준으로 간주하고 있다.

(다) 기타 국가 사례 [1]

벨기에에서는 핵관부위 축방향 PWSCC, TSP 축방향 IGA/IGSCC, 슬러지 파일에서의 IGA/IGSCC, 관관 상단 핵관부위 원주방향 ODSCC 등에 대해서 ARC를 적용하고 있다. 그러나 기술지침서 이외에 별도의 가동중 누설허용기준을 적용하고 있지 않는 것으로 알려져 있다.

캐나다에서는 가동중 누설허용 기준 15 Kg/h를 초과하면 발전 정지를 실행한다. 그러나 캐나다에서는 누설률과 결함의 상관관계에 대한 신뢰성이 부족한 것으로 판단하고 있으며 가동중 누설허용 기준은 단지 전열관 검사에 의한 관막음기준을 보완하는 부수적인 조치인 것으로 인식하고 있다.

스페인에서는 핵관부위 축방향 PWSCC, 핵관부위 원주방향 PWSCC, TSP OD IGA/IGSCC에 대하여 SGDSM에 근거한 ARC를 적용하고 있으며, 전열관 건전성 평가 기준은 기본적으로 프랑스와 동일한 개념을 적용하고 있다. Alloy 600MA를 지칭하는 것으로 판단되는 '결함이 잘 발생하는 전열관'의 경우에 가동중 누설 허용 기준은 가동 초기 안정된 누설률 (5 l/h 이하)을 기준으로 5 l/h 이상 증가하지 않아야 한다는 것이다. Alloy 600TT와 Alloy 800M은 '결함이 잘 발생하지 않는 전열관'으로 간주하여 72 l/h 기준을 적용하고 있다.

일본에서는 전열관 결함 발생시 모두 보수하는 것을 원칙으로 하고 있다. 단, 관 두께 기준으로 20% 이하의 결함 신호로서 전주기에 비해서 그 크기가 성장하지 않은 경우는 결함이 아닌 것으로 간주하고 있다. 그리고 전열관 누설을 허용하지 않기 때문에 가동중 누설이 탐지되는 대로 즉시 발전정지를 실행하고 있다.

4. 울진 1,2호기 가동누설 허용기준 검토

프랑스에서 개발된 13 mm 균열길이 기준 대체 관막음 기준을 적용하고 있는 울진 1,2호기는 프랑스의 강화된 가동누설기준을 1999년 8월말에 비상운전 절차서에 반영하였다. 즉, Alloy 600TT 전열관으로 제작되었으므로 가동누설률이 3 l/h를 넘으면 누설 감시를 강화하고, 5 l/h를 초과하면 1주일 이내에 발전을 정지하고, 그리고 20 l/h에 이르면 즉시 발전을 정지하여야 한다. 그리고, 전열관 파단사고를 방지하기 위한 추가조치로써 기존 절차서에 명시되어 있지 않던 누설률 증가속도 기준을 추가하였다. 한편, 가동누설기준 개정에 대한 논의과정에서 즉시 발전정지 기준이 기존의 10 l/h에서 20 l/h로 완화되는 것에 대한 우려가 제기된 바 있다. 그러나 5 l/h를 초과하면 1주일 이내에 발전을 정지하여야 하므로 실제로는 즉시 정지기준을 5 l/h로 강화하는 것과 거의 동일한 효과를 미친다. 그리고 후술한 울진 1,2호기 고유의 가동누설기준 계산

결과를 즉시 정지기준 20 W/h의 기술적인 근거로 받아드린 바 있다.

프랑스의 강화된 누설허용기준은 축방향 균열에 의한 누설 자체를 제한하기 위한 것이 아니라 전열관 파단 사고를 예방하기 위한 조치로써, 이론적인 근거보다는 프랑스 고유의 가동경험을 반영하여 설정된 것이다. 본 절에서는 프랑스 원전과 울진 1,2호기의 가동경험을 비교하고, EPRI가 제시한 방법론에 따라 울진 1,2호기 고유의 가동누설 허용기준을 계산함으로써 개정된 기준의 보수성을 검토하였다.

(가) 프랑스 원전과 울진 1,2호기의 가동특성의 차이점

프랑스 원전과 울진 1,2호기의 가동경험을 비교하면 다음과 같은 차이가 있다.

- ① EdF의 Alloy 600TT 원전에서 가동중 누설률이 3 W/h를 초과한 사례가 없으나 울진 1,2호기는 프랑스 원전에 비하여 누설률이 높은 편이다.
- ② 프랑스 원전은 부하추종 운전을 하므로 출력변동에 의하여 가동 누설률이 상당히 변화할 수 있다. 그러나 울진 1,2호기는 전 출력으로 운전하므로 누설률 변화 추이가 매우 안정적이다.
- ③ 프랑스 원전과는 달리 울진 1,2호기는 장주기 운전을 하고 있으며, 가동 후반부에 누설률이 증가하는 추세를 보인다. 가동 후반부 누설 증가의 원인은 균열 path의 화학적인 변화와 축방향 균열의 성장에 있는 것으로 추정된다. 가동 후반부의 누설률 증가속도는 매우 완만하고 안정된 거동을 보이고 있다. 이러한 가동 후반부의 느린 누설률 증가를 전열관 파열과 관련된 징후로 볼 수 있는 근거는 없다.
- ④ 프랑스에서는 슬러지 퇴적 부위의 300개 전열관은 매주기 MRPC 검사, 다른 부위의 전열관은 25% 샘플 검사를 수행하고 있으나[12], 울진 1,2호기는 매주기 100% MRPC 검사를 수행하고 있다. 축방향 균열과 원주 균열 모두를 탐지할 수 있는 MRPC 검사주기를 EdF 원전보다 훨씬 강화하여 수행하고 있다.

따라서 울진 1,2호기 증기발생기는 프랑스 기준과 동일한 가동누설기준에 따라 운영하게 되었으나 상기한 점들을 고려할 때, 결과적으로 프랑스 원전보다 오히려 더 보수적인 기준을 적용하는 것과 같은 효과를 미친다고 판단된다.

(나) 울진 1,2호기 고유 가동누설 기준 도출

EPRI[8]는 핵관부위 축방향 응력부식균열에 대한 ARC를 개발하면서 Reg. Guide 1.121에 제시되어 있는 누설 기준 설정 절차에 근거를 두고 정상가동압력에서 수행한 누설시험 결과를 활용한 가동누설 기준 설정 방법을 제시한 바 있다. 즉, 균열길이와 누설률 상관관계로부터 가동압력에서 전열관 파단이 발생하는 임계 균열길이에 해당하는 누설률을 구하여 이 값의 1/100을 가동 누설기준으로 설정하였다. 정상 가동 조건에서 실제로 측정되는 누설은 다수 균열에서 일어나는 누설의 합이지만 균열 한 개에서 발생한다고 보수적으로 가정하였다. EPRI 방법론을 적용하여 울진 1,2호기 고유의 가동 누설 기준을 다음과 같이 도출하였다.

- ① EPRI의 파열식 (1)에 정상 가동 압력과 전열관의 공칭치수, 95%/95% LB (Lower Bound) 강도를 대입하면 가동 압력에서 전열관 파단이 발생하는 임계 균열길이 25.9 mm가 얻어진다.

$$P_N = 0.44628 - 0.41881 \log_{10} \lambda \quad (1-A)$$

$$\text{또는 } \lambda = 10^{\left(\frac{0.44628 - P_N}{0.41881} \right)} \quad (2-B)$$

여기서 P_N 과 λ 는 각각 다음과 같은 식들로 표준화된(normalized) 값들이다.

$$P_N = \frac{Pr}{(YS+UTS)t} \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{a}{\sqrt{rt}} \quad (4)$$

a 는 균열길이 (mm)이고, 사용한 울진 1,2호기 자료는 다음과 같다. [13]

- 작용압력 $P = 9.73$ MPa
- 두께 $t = 1.27$ mm, 평균반경 $r = 10.475$ mm
- 95%/95% LB (YS+UTS) = 892 MPa

(주) 95%/95% LB는 data의 95%가 95% 신뢰도를 갖고 분포할 것으로 기대되는 하한치

- ② 그림 1은 Westinghouse[14]와 CE[15]가 인공적으로 만든 부식균열에 대하여 누설시험을 수행한 결과이다. 평균곡선(mean curve)은 부식균열의 누설시험

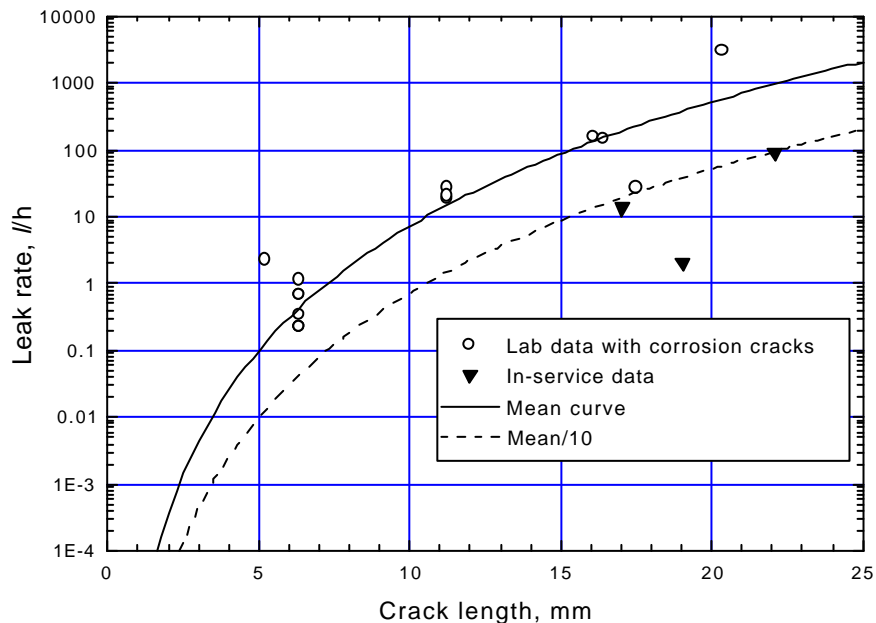


그림 1. WH와 CE의 가동온도에서 부식균열에 대한 누설시험 결과

데이터를 $Q = ka^n$ 형태로 회귀 분석하여 얻은 상관관계를 나타낸 것이다.

$$Q = 4.843 \times 10^{-6} \times a^{6.173} \quad (5)$$

다른 곡선 mean/10은 평균곡선을 10으로 나눈 것으로 in-service 데이터를 포함하며 관판보강효과와 균열의 unbroken ligament, 부식생성물, 슬러지 퇴적 등으로 인한 누설률 감소가 반영되어 증기발생기에서 실제 누설률에 가깝다.

- ③ 임계균열길이에 해당하는 가동중 누설률을 mean/10 곡선으로부터 구하면 255 l/h 이다.
- ④ 가동중에 누설 검출에 여유를 확보하기 위하여 ③에서 구한 누설률의 1/10 인 25.5 l/h 가 허용누설치가 된다.

한편, EdF[16]는 인출 전열관 (pulled out tubes)으로 상온에서 누설시험을 수행하여 균열길이와 누설률의 상관관계를 다음 식으로 제시한 바 있다. (그림 2 참조) 이를 이용하여 위와 동일한 계산을 수행하였다.

$$Q_{RT} = 9.3 \times 10^{-5} \times \exp(0.701 \times a) \quad (6)$$

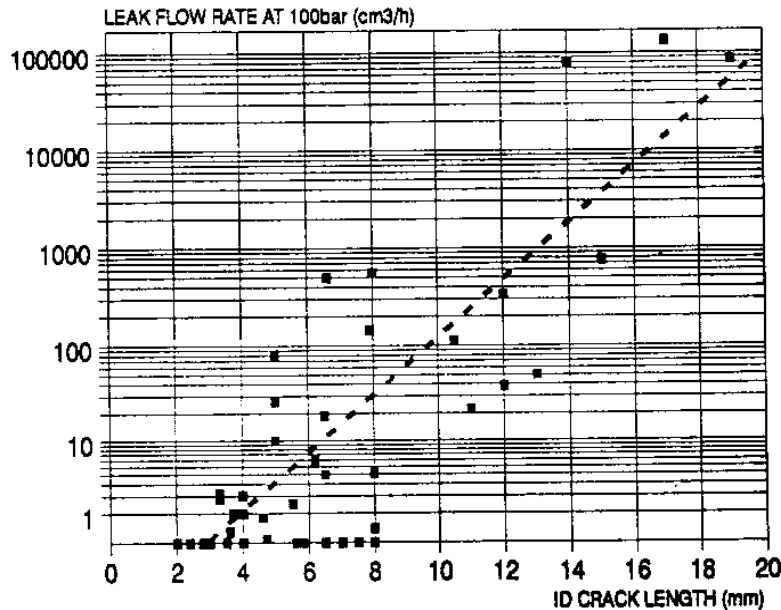


그림 2. EdF의 인출 전열관에 대한 상온 누설 시험 결과

- ②' 평균 상온 누설률 식 (6)에 7/8' 전열관에서 누설시험은도 보정계수 0.473을 곱하여 가동온도에서의 누설식을 얻었다. [17]

$$Q = 4.4 \times 10^{-5} \times \exp(0.701 \times a) \quad (7)$$

- ③' 식 (7)을 10으로 나눈 후에 임계균열길이를 대입하여 가동 누설률을 구하면 338 l/h이다.

④ 위에서 구한 누설률의 1/10 인 33.1 l/h가 허용누설 값이 된다.

EPRI가 제시한 기준 설정절차에 따라 도출한 울진 1,2호기 가동누설 허용치는 25.5 l/h와 33.1 l/h로 개정된 기준 5 l/h보다 훨씬 클 뿐만 아니라 즉시 정지기준 20 l/h보다도 크다. 더욱이 정상 가동 조건에서 실제로 측정되는 누설은 다수 균열에서 일어나는 누설의 합이지만 균열 한 개에서 발생한다고 가정하여 계산하였음을 고려할 때 개정된 가동누설기준은 매우 보수적인 값이다.

5. 결 론

울진 1,2호기 증기발생기 가동누설 기준을 프랑스의 강화된 기준으로 변경함에 따라 울진 1,2호기 가동누설 건전성 평가를 수행하였다. EPRI가 제시한 기준설정 절차에 따라서 균열 한 개에서 누설이 발생한다고 가정하여 도출한 울진 1,2호기 고유의 누설 계산치는 개정된 누설기준의 즉시 정지기준보다 크고, 가동중에 실제로 측정되는 가동 누설은 여러 개의 균열에서 발생한 누설의 합이기 때문에 개정된 누설허용기준은 매우 보수적인 기준이다.

참고문헌

- [1] NUREG/CR-6325, INEL-9510383, "Steam Generator Tube Failures" (1996)
- [2] EPRI TR-104788-Revision 1, "PWR Primary-to-Secondary Leak Guidelines - Revision 1" (1997)
- [3] F. Flesh and F. de Keroulas, "Steam Generator Tube Cracks at Dampierre 1 EdF PWR Plant Impact on Plant Safety", Nuclear Engineering and Design, 113 (1989) 357-368
- [4] Private Letter from Guy Turluer in IPSN to I.S. Whang in SNU, "Technical Questions on SG Leak Limits", October 30, 1997
- [5] G. Sandon, J. Deschamps, P. Chartier, and G. Turluer, "French Regulatory Practice and Experience Feedback on Steam Generator Tube Integrity" NUREG/C-0154, ANL-96/14, NEA/CNRA/R(96)1, Proceedings of the CNRA/CSNI Workshop on Steam Generator Tube Integrity in Nuclear Power Plants, 1997
- [6] USNRC Regulatory Guide 1.121, "Bases for Plugging Degraded PWR Steam Generator Tubes (1976)
- [7] USNRC Generic Letter 95-05, "Voltage Based Repair Criteria for Westinghouse Steam Generator Tubes Affected by Outside Diameter Stress Corrosion Cracking"
- [8] EPRI NP-6864-L Revision 1, "PWR Steam Generator Tube Repair Limits : Technical Support Document for Expansion Zone PWSCC in Roll Transition"

(1991)

- [9] NEI 97-06, "Steam Generator Program Guidelines"
- [10] USNRC draft Generic Letter, "Steam Generator Tube Integrity" (8/8/97)
- [11] USNRC draft Regulatory Guide, DG-1074, "Steam Generator Tube Integrity" (9/5/97)
- [12] EPRI TR-105983, "Proceedings: 1995 EPRI Circumferential Cracking Workshop", 1995
- [13] 전력연구원 TM.96NJ14M1998.781, "증기발생기 전열관 건전성 평가기준 개발 (중간보고서)", 1998
- [14] EPRI NP-6897-L, "Steam Generator Tube Leakage Experiments and PICEP Correlations, July 1990
- [15] EPRI NP-7474, "Evaluation of Leak and Burst Characteristics of Roll Transitions Containing Primary Water Stress Corrosion Cracks", May 1993
- [16] F. Cattant, B. Flesch, L. Mercier, "Leak and Burst Tests Performed on Pulled Tubes", International Symposium Fontevraud III, Sep. 12-16, 1994
- [17] EPRI Draft Report TR-107620, "Steam Generator In Situ Pressure Test Guidelines", 1997