



원자력 발전소의 격납 용기 시스템에 딸린 압력 받는 구성 부품들의 누설시험(VIII)

Leak Testing of Pressurized Components of Nuclear Power Containment System(VIII)

본 원고는 지난 1999년 6월호
(VOL.32 NO.3) 기술사지부터 연재
되어 온 원고입니다.

글 | 朱昇煥
(Choo, Seung Hwan)
방사선관리기술사, 공학 박사,
고려공업검사(주) 연구소장,
SRI, 본회 홍보위원.
E-mail: shchoo@unitel.co.kr



4.15 원자로 냉각재 계통에서 시스템 사이의 누출량 통계

원자로 냉각재 압력 경계에서 쉽게 움직이지 않는 벽들 또는 밸브들을 가로지른 격납 용기 그리고 다른 시스템들에 이르기까지는 대개 누출이 없는 것이 보통이다. 그러한 누출량은 앞서 설명한 배수통 또는 탱크 감시 시스템들을 통하여 검출되지 않는다. 그래서 그러한 구간의 필요한 곳에는 다른 검출 시스템과 알람을 쓴다. 예컨대, 가압 경수로에서 증기 발전기로 새는 누출량은 당연히 열교환기들의 튜브들과 튜브 날개들에서 누설들을 검출할 감시가 필요하다.

시스템사이(intersystem)의 누출량은 격납 용기의 공기 속으로 냉각재를 방출시키지 않으므로 대체할 검출 시스템들은 (1) 격납 용기 경계를 관통하는 시스템 흐름이 연결된 시스템 속의 물에서 방사능을 감시하기와 (2) 격납 용기 경계 밖으로 내보내는 시스템 공기 속의 방사능을 감시한

다. 통제할 수 없고, 바람직하지 않는 시스템사이의 흐름을 표시할 중요한 방법은 쌓여있는 물의 양의 균형을 이용할 수 있다. 예컨대, 탱크 속에서 비정상적인 물 높이 또는 비정상적인 물의 흐름을 표시할 수 있게 설계한다. 기타 보조적인 검출법들은 음파 또는 초음파 표시기의 이용과 원자로 냉각재 압력 경계의 부품들에 적용할 수 있는 습기 감지 테이프들을 이용한다. 당연히 누설 검출법을 신중히 선택하여 충분한 시스템들과 지원 시스템들 중, 일부 검출 시스템들이 비효율적이거나 작동되지 않을 기간 동안일지라도 유효한 감시를 할 수 있게 설계해야 한다.

4.16 원자로 냉각재 압력 경계에서 누출 량의 경보와 표시 계기들

시스템사이 누출량의 표시를 하기 위하여 원자로 냉각재 압력 경계(RCPB) 쪽에 연결된 감시 시스템에 대하여 당연히 규정을 정해야 한다. 방

법들은 방사능 감시와 영향 받고 있는 부위에서 비정상적인 수위나 흐름 속도를 보여줄 지시계들을 포함한다.

누출량 감시 시스템의 기술적 사양들은 당연히 확인된 그리고 미확인된 누출량의 한계 조건들을 포함해서 항상 적절한 적용 범위를 유지시킬 수 있게 다양한 계기 유형들의 가용도(availability)를 표시해야 한다. 누출량 검출 시스템들은 당연히 발전소 중지를 요하지 않는 지진과 지진사건들에 따라서 그들의 기능을 지탱할 성능을 갖춰야 한다. 공중 부유 입자 방사능 감시 시스템은 안전 가동중지 지진(Safe Shutdown Earthquake, SSE)의 상황에서도 성능을 유지시켜야 한다. 누출량 검출 시스템들은 발전소 가동 기간 중에 그들의 운전 가능성과 검증 시험을 쉽게 할 수 있게 규정돼야 한다. 표시계들의 교정은 필요한 독립 변수들에서 밝혀지게 해야 한다.

각 누출량 검출 시스템의 독립적인 지원 시스템들과 함께 하는 표시계들과 경보기들은 원자력 발전소의 주 제어실에 놓여있어야 한다. 공통 누출량 값의 다양한 표시량을 환산할 절차들은 제어실 운전자들이 쉽게 다룰 수 있게 해야 한다. 적어도 4 가지 분리 측정법들을 이용하게 된다:

1. 배수통의 기름 높이와 흐름 감시
2. 부유물 입자의 방사능 감시
3. 공기 냉각기들에서 응축물 흐름의 감시
4. 부유 가스의 방사능 감시

격납 용기 공기의 습기, 온도, 또는 압력 감시는 격납 용기에 대한 누출량의 경고 또는 직접 지시로서 고려돼야 하므로 원자로 시설을 개인 운전으로 적당히 감시가 될 수 있게 해야 한다.

4.17 폐쇄된 안전 밸브들과 감압 밸브들의 누출량 검출

폐쇄된 안전 감압 밸브에서 잠재적인 배수량은 대체로 탱크들이나 물통에 파이프로 연결된다. 이들 흐름들은 밝혀진 누출량의 일부일 수 있다. 안전과 감압 밸브들의 배수 경로 또는 누출량 흐름 미터기들에서 온도 감지기들은 이들 밸브들에서 사소한 누출률의 신호를 낼 한 수단이 될 것이다.

4.18 원자로 냉각재 압력 경계(RCPB)에서 누출량 검출기의 응답 속도

기본적으로 누출량의 검출 시스템들은 실제로 원자로 냉각재 압력 경계의 중대한 압력 강하(degradation)가 일어나는 즉시 검출할 수 있는 기능을 갖는다. 신속한 경고는 운전자가 압력 경계의 총체적 고장에 대한 잠재성을 최소화하는데 도움을 줄 것이다. 어떤 미세한 균열들이 커져서 RCPB를 관통할 가능성을 보인다면, 아주 느리게 노출되므로 누출이 검출된 이후, 발전소의 정기 정지 기간동안까지 안전하게 충분한 시간 여유를 가질 수 있을 것이다. 다른 한편으로 스테인리스 또는 다른 재질에서 응력 부식 또는 RCPB의 높은 피로(high fatigue)점에서 균열로 생긴 누출이 있다면, 신속하게 검출해서 결과에 따라, 아마도, 발전소 정지를 요구할 수도 있게 될 것이다. 그래서 조기 경고 신호는 모든 미확인 누출량의 적정 평가에 필요하다.

누출량의 경보나 표시를 엄격하게 평가해야 할 필요는 원자력 발전소 운전자들에게는 중요하다. 그리고 다른 시스템으로부터 지시된 누출량 신호들과 견줄 능력도 평가할 필요가 있다. 시스템 응답 시간은 누출량 검출 시스템의 기능적 요건들에 당연히 포함시켜야 할 것이다. 원자력 발전소 첫 가동의 수주일 동안 제한적인 것들을 제외하고는 모든 누설 검출기 시스템들은 0.1 L/s(4 L/분 또는 1 가론/분) 보다 낮은 누출률의 변화량 또는 1

시간 내외의 기간 동안에도 그 같은 누출량의 변화에 당연히 응답해야 할 것이다.

감시된 영역들에서 다중 누설 검출 계측기의 감지 위치들은 필요할 경우 당연히 누출 물의 근원에서 검출기까지, 또는 계측기 위치가 수용 가능한 전체 응답시간에 이르기까지 이용 가능해야 할 것이다. 총괄적인 한 누출량 위치를 확인하기 위한 한 실용적인 기법은 격납 용기 내부의 어떤 위치에 몇몇 감지기들을 임의로 설치하고 나서 그런 위치들에서 감지기들의 응답 차이들을 관찰하는 일이다.

4.19 냉각재 압력 경계에서 누출량 검출기의 감도

미확인 근원들로부터 나오는 일차측 원자로 격납 용기 쪽의 누출량은 당연히 포집돼야 하며, 그의 흐름 속도는 4 L/분(1 가론/분)의 정확도로 감시돼야 한다. 확인된 근원들에서 일차측 원자로 격납 용기 쪽의 누출량은 포집되거나 아니면 분리시켜 (1) 흐름 속도는 미확인된 누출량과 분리하여 감시하고, (2) 총-누출량의 흐름 속도를 확정지어 감시할 수 있다. 원자로 냉각재 누출량의 근원은 실용적인 정도로 검출하기 위하여 포집 시스템들은 당연히 누출량 신호 또는 정상 운전 조건들의 변화 표시가 정량적인 누출량 흐름 속도와 연결되게 설계돼야 한다.

탱크들에서 흐름 속도 또는 액체의 높이 측정을 제외하면 제공되는 다른 많은 누출량 검출 시스템들은 공통 인수로 쉽게 변환시키지는 못한다. 이들 신호들을 물 흐름 속도와 같은 단위로 변환시킬 개략적인 상호관계들은 운전자들이 쉽게 누출량 신호들을 해석할 수 있게 공식을 만들어야 한다. 발전소의 운전 조건들은 일부 개정 절차서들에 따라 영향을 받게 되므로 개정된 절차서들은

그러한 조건의 운전 기간에 적용되게 개정해야 한다. 누출량 검출 시스템들의 신뢰를 계속 보장하기 위하여 설비는 IEEE표준 279-1971의 4.10 절, 시험과 교정을 위한 “핵발전소의 보호 시스템 기준”에 따라야 한다.

산업적 관례에서 확인된 바로는 물 흐름의 변화율 2~4 L/분(0.5~1 가론/분)은 격납 용기 배수통들에서 배수통 수위의 변화에 의한 흐름 속도 아니면 배수통 펌프들의 작동 빈도수로 쉽게 검출될 수 있다. 미확인 누출량, 그리고 공기 냉각 응축물 포집용 배수통과 탱크들은 정상 흐름 속도가 2~4 L/분까지 올라갈 때 알람을 작동시킬 수 있게 해야 한다. 이런 방법으로 미확인 액체 누출 증가량을 검출할 허용 가능한 동작 기능은 알람 작동의 감도로 정해진다.

4.20 격납 용기 속의 공기 변화량을 측정하기 위한 계기의 감도

원자로 냉각재 압력 경계 누출량을 추리하는데 격납 용기의 공기 온도와 압력 감시 방법들도 이용된다. 격납 용기 공기의 온도와 압력은 정상적인 가동 중에 약간 변동(요동)하긴 한다. 하지만, 보통 표시 값의 범위를 넘어서는 것은 격납 용기 안으로 RCPB 누출량의 표시 일 것이다. 누출량을 검출함에 있어 온도와 압력 결정의 신뢰성과 관련성은 격납 용기 내부의 자유 체적, 검출기의 위치들 그리고 검출기의 정확도 등과의 함수 관계이다. 이들 계측기들이 내는 신호들은 운전자들이 격납 용기의 공기 쪽으로 신속하고 꽤 큰 규모의 에너지 방출이 있음을 이는데 도움이 된다.

격납 용기의 공기 속 습기가 올라가는 것은 격납 용기의 공기 쪽으로 수증기가 방출하는 것일 수도 있을 것이다. 이슬점 온도의 측정량은 격납 용기 공기의 습도 레벨 감시용으로 쓰일 수 있다.

이슬점 온도 1 도 상승은 손쉽게 이용할 수 있는 이슬점 기구들의 성능 감도 범위로서 이슬점 온도 1 도 상승을 알 수 있다. 격납 용기의 습도 레벨이 몇몇 요소들의 함수이기 때문에 표시된 누출률로 환산하는 데 문제가 있을 수도 있을 것이다. 이슬점 또는 습도 레벨의 변화들은 가능하다면 배수통들로부터 관측된 액체 흐름의 증가와 공기 냉각기들로부터 응축된 물 흐름의 결과와 견주면서 상관성을 구별해야 한다. 습도 레벨을 감시하는 것은 발전소 운전자들이 운전 중에 잠재성 문제를 경보하는데 하나의 간접적인 알람이나 표시 장치로서 가장 실용적이라고 생각된다.

4.21 격납 용기 공기 중에서 방사능 측정 을 하기 위한 계측 감도

원자로 냉각재는 대개 방사선의 원천들이 들어 있다. 이들은 격납 용기 공기 속으로 빠져 나올 때 방사선 감시 시스템들에 의하여 측정될 것이다. 하지만 원자로 냉각재 방사능은 대개 처음 운전 수주일 동안은 낮다. 이 기간 중에 방사능 감시 계기들은 원자로 냉각재 압력 경계 안에서 소규모 누출량에 대한 아주 제한된 초기 경고일 수밖에 없을 것이다. 방사능을 띤 부식 생성 물질들이 생겨난 후에야 핵분열 생성물들은 고장난 핵연료 봉들에서 나와 냉각재의 누출량으로서 격납 용기 공기 중에 측정 가능한 방사능의 원천이 될 것이다. 공기 미립자 감시의 실제 방사선 계측기 감도는 10^{-9} Ci/cm³, 0.37 Bq/m³에 상당하는 범위이다. 방사능 기체 감시의 계측기 감도는 10^{-6} Ci/cm³, 370 Bq/m³ 상당의 범위이다. 방사능 감시 시스템들은 그들의 감도가 RCPB로부터 빠져 나온 냉각재의 누출량에 신속하게 반응하기 때문에 각 원자력 발전소에서 채용되고 있다.

공기 미립자 또는 기체 방사능을 이용한 누설

검출 시스템들의 감도 분석에서 실제적인 일차 냉각재 방사능 농도의 가정(assumption)을 이용해야 한다. 발전소 환경 보고서에 쓰인 기대값들은 규제 당국 쪽에 허용될 것이다.

4.22 원자력 발전소 누설 검출 시스템들의 지진 제한

원자력 발전소들은 지진 발생 시점에서도 가동될 것이며, 지진 후에도 계속 가동될 것이므로 그와 같은 상황 조건들 아래서 기능할 누출량 검출 시스템의 요건들은 빈틈없이 갖춰져야 한다. 안전 가동 정지 지진(safe shutdown earthquake: SSE) 발생에 견줄 만한 지진 사건인 경우, 발전소 운전자는 격납 용기 안의 조건들에 쉽게 접근할 수 있게 하는 일은 중요할 것이다. 적어도 하나의 누설 검출 시스템의 적절한 기능은 발전소 운전자들이 RCPB에 누출량이 퍼지는 경우에 격납 용기 안의 심각성을 평가하는데 도움을 줄 것이다. 공기 미립자 방사능 감시 장비는 RCPB 누출량을 지시하는 바람직한 감도를 가지고 모든 원자력 발전소들에 갖춰야 한다. 공기 미립자 방사능 감시 장비의 구성 품들은 안전 정지 지진 사건과 그 이후에도 기능할 품질이어야 한다.

<주의>: 계측 감도에 관련 사항이 계측기들을 선택하여 업무의 낮은 범위에 적용하는 한 계측 범위의 한계들은 당연히 높게 결정되어야 한다. 계측기들은 격납 용기 조건들의 지시처럼 이용되지 않는 계측기 포화 한계를 초과하여 방어되게 설계해야 한다. 이 경고는 쓰고 있는 모든 유형의 누출량 측정 또는 감시 시스템들에 적용한다.

(원고 접수일 2000. 5. 10)