



원자력 발전 산업에 적용할 누설시험 해설(II)

An Interpretation on Leak Testing Applications in the Nuclear Power Industry(II)

이 글은 원자력 발전소의 누설시험에 관한 제반 절차들의 해설 중에서 기술사 회지(주승환, 1998; 기술사 vol.32, No.3, P.62)에 이어지는 내용입니다. 영문으로 된 관련 자료(McMaster, 1982)를 국문으로 옮기면서 필자의 해설을 곁들여 독자가 쉽게 읽고 이해할 수 있도록 하려는 것입니다. 원어로 표기된 누설시험 용어들을 국문으로 옮겨놓는 일에 많은 어려움이 있습니다. 앞으로 계속 관련 용어들을 다듬어 가면서 독자에게 그것들의 뜻이 쉽게 전달될 수 있도록 바로잡는 노력을 계속할 것입니다.



朱 昇 煥*
Choo, Seung Hwan

* 방사선관리기술사, 공학 박사, 고려 공업
검사(주) 연구소장, 본회 홍보위원.

1.13 격납 용기들의 A형 누출률 시험에 대한 ANSI/ANS-56.8-1981 요건들

'미국 국가 표준 격납 시스템 누출률 시험 요구 조건(요건)들'인 ANSI/ANS-56.8-1981의 내용들은 냉각수 발전 원자로의 일차 원자로 격납 용기 시스템을 거쳐서 누출할 누출률을 결정할 한 근거를 규정한다. 이 표준 규정(provision)들은 일차 원자로 격납 용기 시스템의 최소 허용 누출률의 요건들을 지정하여, 유효한 시험(valid testing)을 보증한다. A, B 그리고 C형 시험들을 수행함에 있어 시험 일정을 포함한 프로그램은 당연히 일차 원자로 격납 용기 경계들의 누출량 시험에 알맞게 발전시켜야 된다. 국부 또는 종합 누출률 시험(ILRT)은 적절히 실시되어야 한다. 운영 기술 지침서(technical specification)에서 정의된 바처럼, 격납 시스템의 건전성에 영향을 미칠 수 있는 어떠한 변경이나 부품 교체는 당연히 한 시험을 규정하여 적용 가능한 누출량 요건들을 충족시킬 변경이나 교체된 부품이라는 점을 논증해야 할 것이다. 확정된 시험 계획은

ANSI/ANS-56.8-1981의 요건들에 따라 수행되어야 한다. ANSI/ANS-56.8-1981에서 취합된 다음 이야기식 검토의 내용들은:

1. 종합 누출률 시험에 앞서 격납 시스템들의 준비와 예비 시험
2. 격납 용기들의 A형 누출률 시험을 위한 계측 요건들
3. 핵 격납 용기 시스템들의 A형 시험 절차서들
4. A형 누출률 시험 데이터 분석 기법들
5. A형 누출률 시험 결과들의 보고서 작성 요건들.

이들 제목들은 ANSI/ANS-56.8-1981에 기술된 것과 일치시킨 순서가 아니라는 점에 유의할 것.

1.14 종합 누출률 시험 전에 격납 시스템 들의 준비와 예비 시험에 대한 ANSI/ANS-56.8-1981 요건들

'미국 국가 표준 격납 용기 시스템 누출 시험



요건들(ANSI/ANS-56.8-1981)'은 A형 누출률 시험들을 실시하기 전에 격납 용기 시스템에 규정된 조건들을 명기한다. 포함하는 것은:

1. 예비시험(pretest) 격납 용기 점검 (inspection)과 손질(repair)
2. 가동전 구조 건전성 시험(pre-operational structural integrity test)들
3. 격납 용기 격리 밸브들의 폐쇄
4. 격납 용기 시스템의 배기하기(venting)와 배수하기(drainng)
5. 격납 용기 시스템에서 액체의 레벨 감시
6. 종합 누출률 시험의 격납 용기 구조물 압력 올리기

가동전 시험(pre-operational test) 기간 중에 격납 용기와 관련 시스템들의 상태는 당연히 정기 시험(periodic test)들이 이뤄지는 기간 동안 예상되는 실제적 조건들 범위에 접근시켜야 한다. 예외적인 것들은 문서로 작성해야 한다. 정기적인 A형 시험들은 첫 연료교체 가동 중단(refueling shutdown) 때 수행되어야 하지만 가동전 시험 후, 그때부터 3년 이내이어야 하고, 띄엄띄엄 시험은 5년을 넘지 말아야 한다. 아래에 위의 각 항목들을 차례로 설명한다.

예비시험 격납 용기 점검(inspection)과 손질(repair):

격납 용기 구조물과 부품들인 접근 가능한 내·외부 표면들의 일반 육안 검사는 당연히 격납 용기 구조 건전성 또는 그것의 누설 내밀성(leak tightness) 둘 다에 영향을 미칠 구조적 약화 부분(structural deterioration)을 찾아내기 위하여 A형 시험에 앞서 실시되어야 한다. 만일 구조적

약화 부분이 있을 경우, A형 시험은 당연히 수용 가능한 절차서(acceptable procedure)들, 비파괴 시험(nondestructive test)들과 점검들로서 한 고장 수리(corrective action)가 취해지기 전까지는 당연히 실시되지 말아야 한다. 그러한 구조적 약화와 고장 수리를 한 내용들은 A형 시험 기록의 한 부분으로 기술해야 한다. 누설시험 전에 육안 실험(visual examination)을 한 것은 당연히 문서로 작성되어야 한다.

가동전 구조의 건전성 시험들:

가동전 A형 시험은 당연히 바로 앞의 육안 구조 건전성 시험과 고장 수리에 뒤따라 실시해야 한다. 격납 용기 격리 시스템 기능 시험과 B형, C형 누출량 시험들은 가동전 A형 시험을 하기에 앞서 이뤄져야 한다. A형 시험에 들지 아니한 B형과 C형 누출량 시험들은 당연히 격납 용기의 전체 종합 누출률을 추정하기 위하여 쓰인 '위 신뢰 한계(UCL)'에 가산되어야 한다. ('위 신뢰한계, UCL'을 셈하는 등식들은 자료 McMaster(1982) 제 5절에 설명된 등식 38~40 : 표 7를 참고할 것.)

격납 용기 격리 밸브들의 폐쇄:

A형 시험에서 격납 용기 격리 밸브들의 폐쇄는 정상 가동으로 이뤄져야지 조절 등(예컨대 폐쇄 후, 원격으로 작동 밸브들을 죄는 것은 안됨)을 하지 말아야 한다. 누출량의 성능을 제고시킬 목적으로 밸브들을 조절하는 것은 허용되지 않는다. 한 밸브가 정상 방법으로 폐쇄될 수 없을 경우, 쓰인 그 방법은 당연히 문서로 작성하고, 정상적인 수단으로 설치 또는 폐쇄, 또는 양쪽으로 이뤄진 국부 누출률 시험들도 문서로 작성해야 한다. A형 시험을 성공적으로 완성하기 위하여

한 누출량 경로를 꼭 격리시켜야 되는 경우, 손질한 후에 결정된 B형 또는 C형 시험들의 누출률은 '신뢰 한계(UCL)'에 더해져야 한다.

격납 용기 시스템의 배기하기와 배수하기:

원자로 일차 격납 용기 시스템이 사고 후의 조건들에 가능하면 접근케 하기 위하여, 원자로 격납 용기 경계의 한 부분인 유체 시스템의 그것들의 일부들은 사고 후 조건 아래에서 격납 용기 또는 외부 대기 쪽으로 바로 연결될 수 있으므로 시험 중에는 당연히 특유한 대기(appropriate atmosphere) 쪽으로 개방 또는 배기를 시켜야 한다.

대체로 유체로 채워진 이들 라인들은 사고에 의하여 그 유체가 배기 또는 빠져나갈 수 있는 라인들이며, 격납 용기를 관통하는 격납 용기의 내-외부 시스템의 부분들 또는 냉각제 사고의 손실 결과로 파열될 수도 있을 부분들이 포함된다. 아래에 지적된 부분을 빼고는 격납 용기 환경 쪽에 격납 용기 격리 밸브 자리들이 노출될 범위까지는 배수되게 해야 한다. 시험기간 중에 발전소를 안전하게 유지 또는 적절한 시험 수행이 요구되는 시스템은 그들의 정상 방식에서 가동될 수 있어야 하지만 배기 또는 배수의 필요는 없다. 추가로 격납 용기의 열 제거 시스템(냉각 시스템)과 같이 사고 후 조건들 아래에서 정상적인 물로 채워져 가동되는 시스템들은 배기나 배수는 필요가 없다. 한 LDBA(Leakage Design Basis Accident, 설계 기준 사고 누출량 또는 최고봉 압력) 기간 중에 격납 용기 분위기에 노출될 수 있는 A형 시험 중에 배기 또는 배수되지 않는 시스템들은 C형 시험으로 이뤄지며, 관통부의 경로에 관한 C형 누출률 시험 결과도 UCL에 더해져야 한다.

격납 용기들의 압력 올리기에서 특별한 고려

사항들:

탱크들과 같이 압력을 받고 있는 부품들은 분리 또는 압력을 풀고 공기를 뺀다. A형 시험 전 후에 측정된 압력은 격납 용기 쪽으로 누출량이 없음을 확인되어야 한다. 격납 용기 안으로 계속기 공기 또는 이용 공기의 근원은 A형 시험기간 중에 격리 또는 단절시켜야 한다. 시험 압력에 견뎌내지 못하는 설계에 포함되지 아니한 연료 교체 설비 또는 계측기들은 격리 또는 다른 방법으로 보호되어야 한다.

종합 누출률 시험에서 격납 용기 구조물에 압력 올리기:

격납 용기는 당연히 깨끗하고, 상대적으로 건조하며, 격납 용기를 손상시키지 않는 매질(medium)을 이용하여 압력을 올려야 한다. 시험 압력을 견뎌 낼 내부 공기 순환 시스템과 냉각 시스템은 격납 공기를 안정화시킬 목적에 쓰여야 한다. 압력을 올릴 시설물은 당연히 시험 중에 격리되어 배기 또는 떼어놓아야 한다.

A형 시험 압력은 P_{ac} (선택한 격납 용기 피크 압력)과 같거나 또는 그것보다 커야 시험을 시작한다. 하지만 격납 용기 설계 압력을 초과해서는 안 된다. 시험기간 동안 P_{ac} 아래인 7 kPa(1 psi)보다 더 떨어지게 해서는 안 된다. 시험 압력은 격납 용기의 외부 압력과 비례하여 결정해야 한다. 이것은 대기 아니면 이차 격납 용기의 압력일 것이다.

1.15 격납 용기들의 A형 누출률 시험의 계속 요건들

압력 변화와 흐름률 누설시험에 대한 전형적인 계속(instrumentation)과 격납 용기에 적용 가능



한 예제들은 McMaster(1982) 책의 제 5장 제1, 3, 5부에서 설명된다. 여기에서 설명하는 것은 ANSI/ANS-56.8-1981 계측기 선정 기준(instrument selection criteria)에 바탕을 둔 것이다.

그 기준은 다음과 같이 A형 시험을 실시하기 위하여 규정된 측정의 각 유형에 대한 최소 요건들을 지정한다:

건구식 격납 용기(dry bulb)의 공기 온도

권고된 교정 작업 범위

---- ILRT 기간 중에 격납 용기 건구식 대기 온도,
±11°C(±20°F)

정확도 ----- ±0.3°C(±0.5°F)

감도 ----- ±0.06°C(±0.1°F)

<주>: 개별 저항 온도 검출기(RTD)에 대한 저항 대 온도에 대한 제작사의 데이터는 제작사의 시방서(승낙 인정서)와 일치함을 나타낼 증명서를 반드시 포함시킨다.

건구식 센서들의 충분한 수효를 설치해야 하므로 실험 기간 중에 격납 용기 체적의 10% 체적 비율을 초과하지 말아야 한다.

<주>: 센서들은 열의 근원 또는 흡열부(heat sink)에 접근해서는 안 된다. 만일 센서들이 그렇게 위치될 경우, 방사열 차폐 불체를 써야 한다. 건구식 온도 지시의 표시들은 ±0.006°C(±0.01°F)의 분해능(resolution)이어야 한다. 반복성(repeatability)은 ±0.006°C(±0.01°F)이어야 한다.

격납 용기 공기의 이슬점 온도

권고된 교정 작업 범위

-- ILRT 기간 중에 격납 용기 공기 이슬점 온도, ±11°C(±20°F)

정확도 ----- ±1.1°C(±2°F)

감도 ----- ±0.3°C(±0.5°F)

<주>: 상대 습도는 ILRT 기간 중에 대개 높게 포함된다.

격납 용기 A형 시험기간 중에는 적어도 3 개의 이슬점 온도 센서들을 설치되어야 한다. 이슬점 온도 표시들은 분해능 ±0.06°C(±0.1°F)이어야 하고, 재현성은 ±0.06°C(±0.1°F)이어야 한다.

격납 용기 공기의 절대 압력

범위 : 격납 용기 시험 압력에 달려 있다. ISG 공식의 값은 압력 게이지 실제 눈금 범위의 함수이다. 그래서 초과된 범위는 당연히 최소화되어야 한다.

정확도 ----- 눈금의 ±0.02 %

감도 ----- 전체눈금의 ±0.001 %

적어도 한 개의 압력 센서는 A형 누출률 시험기간 도중에 가동 중이어야 한다. (이차 압력 센서의 사용은 시험기간 중에 압력 센서의 고장일 경우 설명 가능할 예비 조치이다.) 압력을 나타낼 표시는 7 Pa(0.001 psi)의 분해능, 반복성은 실제 눈금의 0.001%이어야 한다.

흐름	흐름 미터	흐름 적분기
동작 범위	2 L _a ±2%까지	적용되지 않음
정확도	흐름 용량 실제 눈금의 ±2%까지	±2%흐름 용량
감도	실제 눈금의 ±1%	적용되지 않음

흐름률 계측

누출률 검증 시험기간 중에 적어도 한 개의 흐름 측정 장치는 가동 중이어야 한다. 흐름 미터의 지시는 9.5 Pa·m³·s⁻¹(0.2 sdt ft³·min⁻¹) 그리고 원격 표시의 반복성 4.8 Pa·m³·s⁻¹(0.1 sdt ft³·min⁻¹) 흐름 적산기의 표시는 분해능 1 % L_a 이어야 한다.

시간 계측

A형 시험기간 중에 쓰이는 시간 측정 시스템들은 24 시간에 ± 1 min의 정확도, 분해능 $\pm 1s$ 이어야 한다.

1.16 격납 용기들의 A형 누설 시험기간 중에 대기 조건들의 효과

환경 대기 변화의 측정량은 누출률 교정에는 쓰이지 않으므로 측정 설비의 정확도는 대기 변화가 시험 데이터와 상관되게 기록될 수 있어야 한다. 시간적으로 대기 온도 $0.6^{\circ}C(1^{\circ}F)$ 와 3 kPa인 대기 압력이면 충분하다. NBS 표준으로 추적할 필요는 없다.

1.17 종합 누출률 시험(ILRT)에 쓰일 계측 교정

ANSI/ANS-56.8-1981은 계측 교정 요건들을 지정하여 A형 시험 계측 센서들에 규정된 초기 데이터가 감도와 관련한 정보를 포함토록 조건을 지정한다. 표시 눈금 장치들은 계측기구의 반복성에 대하여 인증을 받아야 한다.

A형 격납 용기 종합 누출률 시험(ILRT)에 쓰인 계측은 A형 시험 시작 전 6개월을 넘지 않도록 개별적으로 교정 점검되어야 한다. 정확도에 관한 일차 시험 기구의 교정은 국가 표준으로 확인되어야 한다. 계측(센서) 감도와 표시 눈금 장치 반복성은 당연히 검증을 받아야 할 것이다.

(주): ISG 공식에서 누출률을 셈하는데 계측(센서) 감도 값(변화에 응답할 한 기구의 기능)들을 쓴다. 그 까닭은 격납 용기에서 공기 질량은 공기의 변화이지 그 질량의 절대값의 변화는 아니기 때문이다. 반복성(동등한 입력 값을 표시하는 한 기구의 성능)값들은 센서에 지정된 것이 아니라 기구의 표시 눈금 장치에 쓰인다.

A형 시험을 시작하기 이전에 규정된 계측 교정 점검들

가동전 ILRT를 실시하기 위하여 설치 (installation) 후 그리고 개별 정기 ILRT를 실시하기 이전에 ILRT 측정 시스템은 "원 위치에 (in suit)" 국가 표준(NRS)이 인정한 표준을 이용하여 각 센서의 하나 또는 여러 개에 대하여 점검해야 한다.

교정 점검(calibration check)은 각 센서에서 이뤄져야 되고 잡힌 눈금(표준으로 추적한 값과 견준 것)은 ILRT에서 쓴 같은 눈금 표시로 읽어야 한다. 그 점검은 ILRT 6개월 전에 해야 한다.

교정 점검은 ILRT 센서 눈금 표시와 추적 가능한 표준(NBS)과의 정확도와 일치에 관한 다음 기준들을 당연히 충족시켜야 한다.

건구식 온도	$\pm 0.6^{\circ}C (\pm 1^{\circ}F)$
(저항 온도 검출기들)	
이슬점 온도	$\pm 3^{\circ}C (\pm 5^{\circ}F)$
절대 압력	실제 눈금의 $\pm 0.05\%$
흐름 미터기들	실제 눈금의 $\pm 5\%$
흐름 적산기들	실제 눈금의 $\pm 5\%$

1.18 격납 용기들의 A형 시험에 알맞은 계측 선정 지침(ISG)

다음 '계측 선정 지침(Instrumentation Selection Guid, ISG)' 공식은 일차 원자로 격납 시스템의 종합 누출률을 결정하기 위한 계량 시스템의 기능을 결정하는데 써야 한다. ISG 공식은 누출률 셈의 통계 분석 기법들에 바탕을 둔 것이 아니라 계측 선정 (instrumentation selection)에 쓰려고 개발된 것이다. 계측 오차들은 '제공-합근-등식' (root-sum-square-formula)



을 이용하여 합쳐진다. 섀한 ISG는 섀한 누출률의 값에 합산되지 않고 기구 선정과 센서 기준의

$$ISG = \pm \frac{2400}{t} \left[2 \left(\frac{e_p}{p} \right)^2 + 2 \left(\frac{e_T}{T} \right)^2 + 2 \left(\frac{e_{P_i}}{p} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{식 1}$$

상실(loss of sensor criteria)에만 쓰인다.

여기에서 :

ISG는 계측 선정 지침

t는 최소 희망 시험기간, 시간

P는 격납 용기 공기 총 절대 압력

Pv는 격납 용기 공기의 수증기 분압

T는 격납 용기 공기의 평균 절대 건구식 온도 가중치

e는 주어진 파라미터 변화의 측정에 관계된 오차

(주): 주어진 파라미터들의 다중 측정량이 주어진 곳에 총 측정 시스템 오차 e는 주어진 파라미터를 결정하는데 쓰인 센서들 수효의 제곱근으로 나눈다. ISG는 계측 선정의 목적 시험 전 또는 센서 상실 기준을 충족시키기 위하여 시험 종료 시간에 0.25 La(La는 Pa에서 최대 허용 가능한 누출률)를 초과해서는 안 된다. 계측의 상실은 시험기간 연장을 필요로 한다. (위에 주어진 계측 선정 지침 공식의 유도는 ANSI/ANS-56.8-1981에 설명되어 있으므로 여기에서 반복하지 않는다. McMaster(1981) 제 5장에 있는 등식 4701 한 예가 된다.)

1.19 기구 선정 지침에 바탕을 둔 A형 시험 계측 손실 기준

기구 선정 지침을 시험 시작과 시험 종료 때 0.25 La를 초과하지 못한다. ISG는 센서의 감도, 기구의 수효 그리고 시험의 경과 기간 등의 함수이다. 그래서 한 개의 센서 손실은 ISG를 증가시킨다. 그러한 증가가 ISG 0.25 La 초과 원인일 경우, 그때 시험의 경과 기간을 증가시켜 ISG를 0.25 La까지 또는 더 낮게 줄인다. (센서 기능 장애로 교정되어 센서를 도로 쓰는 경우는 예외임)

ISG 값과 관계없이 A형 누출률 시험을 위하여 미리 표로된 센서의 최소 수효는 충족되어야 한다.

1.20 핵 격납 용기 시스템의 A형 시험 절차들

'미국 국가 표준 격납 시스템 누출량 시험 요건들', ANSI/ANS-56.8-1981은 '절대법(absolute method)'으로 데이터를 수집해야 하고 '공기 질량 지점 기법(mass point technique)'으로 원자로의 격납 용기 A형 누출률을 섀하기 위하여 써야 함을 조건으로 지정한다. 기타 방법들과 기법들은 격납 용기 누출률 섀에 이용된 적이 있었다.

ANSI/ANS-56.8-1981의 부록 A는 이들 기법들을 설명하고 있다. 데이터의 취합과 분석에 대하여 승인된 방법은 이 표준의 주된 부분으로 나타나 있다. 그리고 이 부록에서 기타 방법들에 대한 설명은 앞으로 이들 방법을 적용할 수 없도록 하였다.

두 기초 방법들은 A형 시험의 수행에 쓰인 적이 있었다. 이것들은 '절대법'과 '기준 체적법(reference volume method)'이다. 덧붙여 데이터 분석이 가능한 이들 두 기초 기법들은 '공기 질량 점(mass point) 분석', 그리고 '누출률 지점 분석'이 있다. (McMaster, 1982, 제 5장은 이들 여러 가지 방법들을 설명한다.)

격납 시스템들에 대한 절대 기준 용기 누설 시험

절대법은 이상 기체 법칙 PV=WRT의 직접 적용이다. 시험은 수행 기간 중에 온도와 압력 변화가 격납 용기의 '자유 공기량(free air volume)'을 많이 변화시키기에는 충분하지 않

다. (McMaster, 1982, 제 5장에서 등식 10에서 20까지, 그리고 표 8과 9를 참고할 것.) 기준 용기법(reference vessel method)은 격납 용기 안에 위치한 용접 밀봉된 기준 체적의 것과 견준 일정 격납 용기 체적의 변화에 달려 있다. 격납 용기 누출량은 격납 용기의 체적과 기준 체적 사이에 차압의 변화로 표시된다.

기준 용기 압력은 시험기간 동안 격납 용기의 압력 아래로 유지하는 것을 보증하기 위하여 충

분한 양에 의하여 시험 개시 때 격납 용기 시험 압력보다는 낮아야 한다. 기준 용기들은 그러한 기하학적인 장소에 놓여야 하며 데이터 취득의 주기로 양립할 수 있는 시간 지연(time lag) 안에 격납 용기 공기의 온도를 가정한다. 기준 체적 시스템은 이 표준의 적용 가능한 절차들에 따라 격납 용기 누출량 시험에 쓰일 전후에 누출물을 결정할 대상이 되어야 한다. <다음 호에 계속>

(원고 접수일 1999. 7. 13)