

원자력 발전 산업에 적용되는 누설시험 해설(I)

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



朱 昇 煥*
Choo, Seung Hwan

* 방사선관리기술사, 공학 박사,
세안기술(주) 연구소장, 본회 홍보위원.

이 글은 원자력 발전 산업에 적용되는 누설시험에 관한 절차서들과 요구 조건 들을 해설한 것입니다. 독자께서도 잘 알고 계시는 바와 같이, 지금 가동 중인 원자력 발전소의 시설들에서는 다른 곳과는 달리 방사선과 방사성 물질들이 대량으로 만들어지고 있습니다. 그런 물질들은 지구의 모든 생물에게 이롭지 않으므로, 우리는 원자로 건물에서 보통 때나 중대 사고가 났을 때, 이들이 외부로 새어나가는 것을 막아야 하므로 엄격한 시험 요구 조건들을 적용시켜 누설시험을 하게 됩니다.

여기에서 다룬 내용들(앞으로 계속 투고할 내용도 포함)은 미국 비파괴학회에서 발간한 『비파괴핸드북: 누설시험』, 제1권, 제13장의 내용들입니다. 그들의 대부분은 '미국 국가 표준 격납 용기 시스템 누출량 시험 요구 조건(ANSI/ANS-56.8-1981)'에서 규정된 것들로서, 전문가들이 누설시험에 관한 기본적인 원칙들을 발췌하여 해설한 것입니다. 필자는 독자가 누설시험 현장뿐만 아니라 자신의 산업 활동에서 부딪힐 어려운 문제들을 기본적인 원리에 따라 해결하는 데, 이 글이 큰 도움이 될 것으로 판단하여 본 회지에 그 해설을 기획하였습니다.

<제1부>

발전 원자로 격납 용기 시스템의 누설시험

1.1 원자력 격납 용기 시스템의 기능들

독자께서도 이미 잘 아시는 바와 같이, 원자력 발전은 한 '화로'의 기능을 가진 '원자로(nuclear reactor)'에서 핵연료를 태워 생기는 열을 이용하여 발전기를 돌려 전기를 얻는 산업 활동이다. 원자로에서는 핵연료가 탈 때, 필연적으로 높은 열과 많은 방사선이 생겨나고 그리고 방사능(방사선을 튀겨낼 능력) 물질들이 만들어진다. 대규모로 건설된 발전용 원자로에서는 당연히 그 규모에 따라 엄청난 세기의 방사선과 방사능 물질들이 생겨나

게 된다. 그런 방사선과 방사능 물질들은 원자로에서 우리의 생활 공간인 대기, 지상 또는 지하로 새어나가지 못하도록 격리시켜야 하므로 특수하게 만든 방벽을 써서 원자로의 건물 안에 안전하게 가둬 놓게 된다. 특수한 방벽으로 만들어진 큰 규모의 용기는 '격납 용기(containment vessel 또는 containment)'이다. 비슷한 낱말은 비행기를 넣어 두는 창고가 '격납고(containment)'인 점을 기억하면 이해하기 쉽다. 전시에 비행기를 격납고에 넣어 둔 것처럼, 핵폭탄을 처음 핵 병기로 개발하여 엄격한 통제, 마치 비행기를 격납고에 넣어둔 것처럼, 보 관한 이후부터 '격납 용기'란 단어가 생겨났던 것 인지도 모른다.

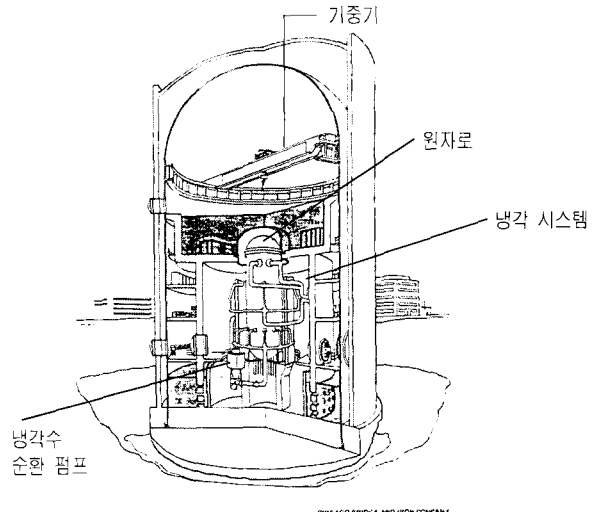
아무튼 원자로에서 격납 용기의 설계 기준은

까다롭다. 원자로의 속은 겉보기에는 아주 단순한 한 화로의 구조로 보인다. 하지만 거기에서 핵연료가 탈 때, 필연적으로 생겨나는 가공할만한 높은 열, 높은 방사선, 그리고 수없이 많은 종류의 '방사 물질'(방사성동위원소가 포함된 물질)들이 쏟아져 나온다. 그러므로 원자로는 안전한 가동을 보장하기 위하여 모든 첨단 기술들을 총동원하여 설계된다. 격납 용기 속에 가둬진 원자로의 속은 대체로:

- 발생하는 열을 식혀 줄 냉각수의 흐름 설비 (배관, 여러 종류의 밸브들, 조정기들),
- 원자로의 핵연료 다발,
- 생겨나는 중성자들을 조절할 제어봉
- 중성자의 감속재(주로 물을 사용하여 빠른 중성자의 이동 속도를 감속시키는 재료)

등의 기능들로 구성된다. 이들 기능들이 정상적인 설계 기준 대로 움직이게 하기 위하여 부수되는 복잡한 장치들이 따라붙는다.

원자로 속에 든 위와 같은 여러 고유한 기능들은 독립적으로 각자의 역할을 하게 된다. 대체로 각각의 기능들은 독립된 폐쇄 계통으로 이뤄진다. 그러므로 원자로 속은 도시의 지하 배관 시설(전기, 도시가스, 상하수도), 지하철, 지하 상가 등처럼, 복잡한 구조로 뒤엉켜서 각자의 기능을 발휘한다(〈그림 1.1〉). 개별 기능은 폐쇄된 계통으로 유지되고 있다. 그들 중, 어떤 것들은 배관설비로 된 부분이 중요한 기능을 하게 된다. 그런 배관들의 속은 유체(주로 냉각수와 공기)가 흐르게 되므로 그런 설비에서 결함(틈)이 생길 경우, 유체가 누출한다. 각 계통별로 배관의 결함인 어떤 누설이 생길 경우, 원자로의 정상 기능을 유지할 수 없게 되므로 원자로의 '중대사고'(노심이 녹는 사고)의 원인이 된다.



(그림 1.1) 원자력 발전소의 격납용기 구조의 그림. 비등수형 원자로의 다중벽 격납용기의 구조를 보여줌 (McMaster, 1981, P. 736)

'원자력 발전용 원자로'(단순히 '발전로')의 누설시험은 '발전로'의 중대사고를 방지하는 데 아주 주요한 항목으로 지정되어 있다. 따라서 엄격한 누설시험의 절차서에 따라 시험이 이뤄지게 된다. 그런 절차서들은 미국 핵규제위원회(Nuclear Regulation Commission: NRC)가 승인한 방사선의 누출률에 대한 '안전 한계(safe limits: 뒤에 설명)'에 바탕을 두고 있다. 발전로 안에 있는 어떤 부품이나 방사선과 방사 물질 등을 누출시킬 큰 사건과 사고가 일어날 경우라도 그들이 우리가 살고 있는 환경으로 빠져나감을 '안전 한계 값' 이하로 막아야 한다는 원칙을 적용하여 만든 절차서라고 할 수 있다.

발전로에서 이뤄지는 누설시험들을 크게 나누면, 원자로 속의 방사선과 방사 물질이 대기 환경으로 새어나가지 못하게 격납 용기 건물에서 대기로 새는 것을 시험하는 쪽(출입구, 문짝, 개방된 부분, 관통부)과, 원자로의 건전성과 관련된 격납 용기 속에 들어있는 여러 가지 기능들을 정상으로 유지시켜 주는 배관 계통들에 나 있는 누설을 사전에 발견하여 원자로의 정상 운영을 보증 시험하는 경우 등으로 나뉜다.



1.2 원자로 격납 용기 시스템에 들어 있는 설비들

원자로 격납 용기 시스템은 대개 (1) 콘크리트 사일로(concrete silo)의 자유 압력 용기 내부, (2) 보강된 콘크리트, 강철 내장 용기, 또는 (3) 이들 양쪽 구조물들의 혼합으로 구성된다. 격납 용기 구조물들은 원자로, 증기 발생기, 열 교환기, 내부 연결 배관과 밸브들, 전자 시스템들, 공기 순환과 냉각 시스템들, 연료 운반 기중기 그리고 기타 부품들을 수용한다. 격납 용기 시스템은:

- 격납 용기 구조물, 접근할 트인 통로, 관통부, 그리고 부속 구조물
- 밸브들, 파이프들, 폐쇄 시스템, 기타 외기 환경으로 방출할 방사선의 효과적인 격리용 부품들
- 이들과 연결된 여러 시스템들과의 경계들과 연결되는 부분 등이 여기에 포함된다. "2차 격납 용기", "격납 용기 둘러막이 건물" 또는 다른 격납 용기 시스템들을 감싼 원자로 건물 등은 여기에 포함되지 않는다.

1.3 격납 용기 시스템들의 누설시험에 적용되는 시방서들, 코드들, 그리고 표준들

필자가 여기에서 소개하는 내용들은 미국에서 법으로 정한 요구 조건들로서, 발전로의 누설시험에 적용된다. 전문가들도 일반적인 법조문이나 요구 조건들 등을 쉽고 부담 없이 읽기는 어려울 것이다. 발전로의 격납 용기와 그 부품들의 기술 시방서에 들어 있는 누출량의 요구 조건들은 규정된 안전성 보고서에 요약된다. 그 보고서는 다음과 같이 미국 당국자들의 검토와 승인을 받은 것이다. 즉, 미국의 핵규제위원회(Nuclear Regulatory Commission, NRC), NRC의 원자로 사전 허가부(Division of Reactor Licencing), NRC의 원자로

안전 장치 자문위원회(Advisory Committee for Reactor Safeguards), 그리고 이들의 고문들이 참여한다. 1981년 기준(독자는 최근의 규정들을 참고 바람), 원자력 발전소 격납 용기 시스템의 누출량 요구 조건들, 누설시험 코드들과 표준들은 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. "원자로, 격납 용기 그리고 부품들 등의 기술 시방서(Technical Specification)", 미국 연방 법률(CFR)의 코드인 Title 10, Part 50, Chapter 1, Appendix J, NRC의 "냉각수 발전로 일차 격납 용기 누출시험"
2. 미국 국립 표준협회(American National Standards Institute), ANSI/ASME NQA-1, "원자력 발전소 적격 평가 프로그램 요구 조건, 중간 25-1과 부록 2A-1의 검사와 시험자의 자격"
3. 미국 원자력학회(American Nuclear Society, ANS), ANSI/ANS-568.1981의 "미국 국가 표준 격납 용기 시스템 누출량 시험 요구 조건"
4. 미국 국가 표준협회, ANSI/FCI 70-2인 "조절 밸브 자리 누출량의 미국 국가 표준"
5. 미국 기계공학회(American Society of Mechanical Engineers, ASME), ASME Section III Code, Division 1, "원자력 발전소 부품들(Nuclear Power Plant Components)"
6. 미국 기계공학회, ASME Section III Code, Division 2, Subsection CC, "콘크리트 격납 용기들(Concrete Containments)"
7. 미국 기계공학회, ASME Section V Code의 "비파괴 실험(Nondestructive Examination)", Article 10의 "누설 시험(Leak Testing)"
8. 미국 기계공학회, ASME Section XI Code의 "발전로 가동 중 검사(Inservice

Inspection of Nuclear Power Plant)”, Article IWV-3000인 “시험 요구 조건들 (Test Requirement)”

9. 미국 표준 ANSI N14.5의 “방사성 물질 운송의 포장에 관한 누설시험 미국 국가 표준”
10. 전기 전자 공업 협회(Institute of Electrical and Electronic Engineer, Inc., IEEE), IEEE 317의 “원자력 발전소 격납 용기 구조에 관한 전기 관통부 조립.”
11. 제조품 표준화 학회 (Manufactures Standardization Society), 표준 사례 (Standard Practice) SP-61의 “강철 벨브의 수압시험”
12. 핵 시스템과 부품들의 누설시험에 관한 추가 안내는 미국 NRC에서 간행하는 관리지침들로 규정한다.

적용 관리지침들 :

1. 관리지침 1.45, “원자로 냉각재 경계의 누출량 검출 시스템”
2. 관리지침 1.18, “일차 원자로 격납 용기의 구조 합격 판정시험”
3. 관리지침 1.19, “일차 격납 용기 라이너 용접의 비파괴시험”
4. 관리지침 7.4, “방사성 물질 운송 포장에 관한 누설시험”

1.4 발전로 격납 용기 시스템에 대한 예비 누설시험 방법들의 선택

갖춰진 발전로의 격납 용기 구조물에 대한 누설시험을 하기 전에 예비 누설시험을 먼저 하게 된다. 그 시험은 (1) 격납 구조물이 완성된 후에 누설시험을 쉽게 할 수 없는 부품들, (2) 격납

용기의 압력 경계에서 공기식 출입구와 플랜즈 관통부인 경우 등이다. 예컨대, 콘크리트 구조물에서 강철 라이너는 콘크리트 격납 용기를 완성한 후에는 누설시험을 하기가 곤란하다. 그리고 내부와 연결된 공기식 출입구와 이중 밀폐로 접속된 경우도 예비 누설시험을 해야할 대상이다.

이런 누설들은 격납 용기가 완성되기 전에 예비 누설 시험으로 각 부품들에서 새는 취약점들을 미리 찾아내어 수리하는 과정이므로 당연히 시간과 비용을 크게 줄일 수 있다. 예비 누설 시험들은 당연히 시험 시방서의 요구 조건들과 적용 코드에 따라 꼭 해야할 구조물과 조건들에 적합해야 가능할 것이다. 예컨대 기포 발생 시험, 할로겐 추적자 시험, 그리고 헬륨 프롭브 또는 추적자 시험 등과 같은 단순한 국부 누설 위치 시험들은 때로는 편리하고 경제적인 때가 있을 것이다. 이들 시험들은 검출 가능한 누설들의 사전 보증 절차 없이 이뤄진 것임으로 때로는 갖춰진 격납 용기에 허용될 수 없는 누출률이 사후에 발견될 가능성이 있으므로 되풀이하여 시험을 해야 한다.

1.5 콘크리트 격납 용기들의 강철 라이너 누설시험 방법 선택

1981년의 ASME Section III, Division 2 코드는 강철 라이너의 용융 맞대기 용접(fusion butt weld)들의 시험 요구 조건으로서 다음 방식들 중의 한 가지로 시험하여야 함을 규정한다. (a) 진공 박스 기포 방출시험, (b) 할로겐 추적자 누설시험 또는 (c) 헬륨 질량 분석계 누설시험 등이다. 그 기술 시방서는 대체로 진공 박스 방식을 요구한다. 이 방법의 감도는 가동중 누출률 요구 조건들(in-service leakage rate requirements)에 적절하기 때문이다. 기술 시방서들이 ‘누설 홈 채널(leak



chase channel system)'의 누설시험을 규정할 때, 라이너 맞대기 용접의 기포 누설은 라이너 용접의 안쪽 채널을 설치하기 이전과 설치한 다음에 각각 이뤄진다. 첫 순서는 라이너 맞대기 용접의 뒤쪽이 라이너의 보강 콘크리트가 있어 접근이 불가능할 때 이용된다. 정식으로 이 기포누설 시험은 누설 홈 채널의 설치 이전에 실시된다. 대개 라이너 맞대기 용접의 누설시험은 특정한 요구 조건들과 어울리기 때문에, 대개 다른 누설시험법을 찾을 필요가 없다.

1.6 격납 용기 라이너의 누설 홈 시스템들에 알맞은 누설시험 방법 선택

1981년의 'ASME Section III, Division 2 코드'는 콘크리트 격납 용기 라이너들의 누설 홈 시스템들의 채널들에 대한 누설시험도 규정한다. 이들 누설 홈 채널들은 전형적으로 구간 또는 구역으로 분리된 채널들은 divider bar들을 설치한다. 각 구역에서 개별적으로 된 강철 파이프 또는 배관들은 발전로 시스템의 가동 중에 각 구역으로부터 전개되는 누출률 감시용의 원격 장소까지 연결된다.

기술 시방서들은 대개 전체의 격납 시스템에 수용 가능한 승인된 총 누출률에 바탕을 두고 추가 누출시험을 규정한다. 이들은 대개 압력 감쇠 누설 시험에 따른 압력 감쇠 시험 또는 할로젠 누설시험 등이다.

1.7 갖춰진 격납 용기 구조의 누출률 시험 방법 선택

원자로 격납 용기 구조물들의 기술 시방서들은 (a) 실시할 용기의 누출률 시험 또는 전체 격납 용기 시스템의 종합 누출률 시험(Integrated Leakage

Rate Test, ILRT)은 절대 시험 방법 또는 표준 용기 시험 방법인 지를 지정하고, (b) 데이터 분석에 쓰일 질량 단위 또는 누출률 단위인 지를 지정한다. 가장 좋은 시험 방법과 분석 기술의 선정은 적용 시방서에 적합토록 하되, 격납 용기 구조물을 수용할 책임자들이 동의하여 이뤄진다.

격납 용기 시스템의 절대 누출률 시험법:

누출률 시험의 절대법은 누설시험을 할 때 시험 초기와 보통 시간 간격에서 격납 용기 구조물 안의 공기 질량을 측정한다. 격납 용기의 구조물 안에서 공기의 질량은 시험기간 중에 시험할 내부 체적, 공기 압력, 그리고 온도와 수증기 압력에 달려있다. 적정한 센서들은 격납 용기 구조물 안의 적정 위치에 놓여져 평균 공기 압력, 온도, 그리고 수분의 증기압을 원격으로 측정해야 한다. 압력, 온도, 그리고 이슬점으로부터 필요한 자료들의 계측, 그리고 질량 분석에 대한 자세한 설명은 앞으로 따로 하게 될 것이다. 절대법은 발전로 격납 용기 시스템과 공기식 출입구의 시험에서는 우선하여 쓰이고 있다.

격납 용기 시스템에 대한 누출률 시험의 기준 용기법:

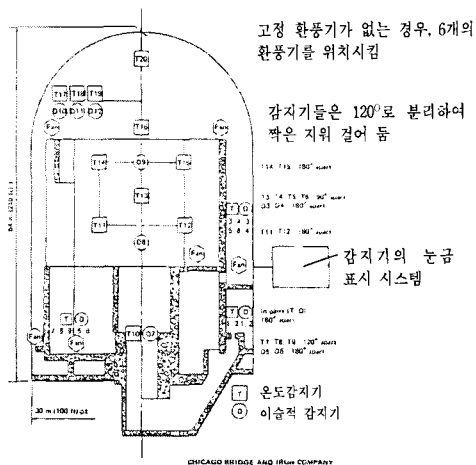
누출률 결정에서 '기준 용기법(reference vessel method)'은 격납 용기 구조물과 가스 밀착 기준 용기 사이에 압력 차이의 관찰에 의하여 공기 감소의 측정에 달려있다. 기준 용기는 반드시 앞뒤의 측정에서 서로 다른 측정들의 것과 정확히 일관성 있게 위치시켜 조정을 하여 전체 격납 용기 공기의 온도를 두 번 측정하여 그 평균 온도를 취한다. 센서들은 격납 용기 내부의 수증기 압력에 대한 교정을 해야 하나, 대개는 기준 용기에 건조한 기체를 채워 압력을 올려줌으로 용기 속에 있는 수증기의 압력 교정을 할 필요가 없다.

기준 용기법의 시험 결과들은 '절대법'의 시험

결과들보다 측정 온도와 이슬점 센서들을 위치시키고 가중시키는데 부정확성의 영향을 적게 받는다. 그러나 이 장점은 대형 격납 용기 시스템들의 누설시험에 필요한 대형 기준 시스템들을 설치하여 누설시험을 적합하게 하는데 시간이 많이 소요되므로 크게 이롭지는 않을 것이다. 덧붙인다면, 기준 용기법은 이슬점 측정량의 정확성과 재현성에 달려있다. 하지만 이슬점의 측정 설비는 누출물 시험 시스템에서는 가장 낮은 정확도와 재현성의 부품들이 쓰인다. 그러므로 설비 오차의 분석, 달리 말한다면, 누출물 시험 결과에 역효과를 준다. 이 점에서 앞쪽의 절대법이 발전로 격납 용기 시스템의 누설시험에서 기준 용기법 보다는 이롭다.

1.8 격납 용기 누설시험에서 온도와 이슬점 센서들의 배치

격납 용기 시스템들에서 전면적인 누출물 측정 실험은 온도와 이슬점 센서들의 수효, 격납 용기 시스템의 체적, 배치, 그리고 콘크리트와 같은 내



〈그림 1.2〉 원자력 발전용 원자로 격납 용기 구조의 누출물시험을 위한 온도와 이슬점 감지기들의 설치 위치(McMaster, 1982, P. 740)

부 물질의 위치에 바탕을 둔다. 〈그림 1.2〉는 격납 용기 시스템 내에서 온도와 이슬점 센서들이 놓여진 전형적인 그림이다. 규정된 기구의 정확도와 재현성 오차의 분석은 센서들의 수효에도 영향을 받게 된다. 분석할 때, 누설시험 설비의 모든 정확도와 재현성은 그 설비의 총 이론 오차 값이다. 이 값은 측정될 누출물의 허용 편차와 반드시 같은 정도의 크기여야 한다.

1.9 A형 누출량 측정 시험에 앞서 해야 할 조작과 요구 조건들

발전로 격납 용기 구조물의 누출량 측정을 시작하기에 앞서 다음의 예비시험(pretest) 요구 조건들을 충족시켜야 한다.

1. 격납 용기 구조물의 일반 육안 검사
2. 격납 용기의 격리 기능 시험과 관통부, 접속, 또는 밸브 등에서 누출량에 대한 개별 국부 시험들을 포함한 격납 용기들과 부품들에 대한 건전성 시험
3. 격납 용기 격리 밸브들의 폐쇄
4. 격납 용기 경계에서 유체 시스템들의 배기와 배출하기(안전 조작 조건에서 발전소를 유지하는 데 필요한 시스템들 이외, 또는 정상적으로 물로 채워진 시스템 등)
5. 격납 용기 시스템에 격납 용기의 설계 압력을 초과하지 않게 지정 압력 시험으로 압력을 올려 주기.

이들의 예비시험 요구 조건들에 대한 더 자세한 취급 설명들은 미국 국가 표준 격납 용기 시스템 누출량 시험 요구 조건인 ANSI/ANS-56.8-1981에서 설명된다.

1) McMaster, Ro, 1982, "Nondestructive Testing Handbook, 2nd ed. Vol.1 : Leak Testing" ANST.



1.10 대형 발전로 격납 용기들에 대한 시험 절차서의 차례

다음에서 설명한 일반 절차서들은 발전로의 격납 용기 구조물들에 관한 전체의 누출률을 측정하는 기간 동안에 쓰일 시험 작업의 전형적인 차례이다. 대형 발전로들은 자체에 지정된 세부 사항들이 많다. 이 글에서는 기초 절차서들에 관한 내용들을 주로 다루게 될 것이다.

1. 공기식 출입구, 밸브, 폐쇄 개스킷 접속부, 그리고 전기 관통부 등과 같은, 격납 시스템을 구성하는 품목들에 대하여 모두 B형과 C형 누설시험들을 실시할 것(다음의 용어 해설에서 B형과 C형 누설시험의 설명 참고).
2. 격납 용기에 교정된 누출률 시험 계측기들을 설치하고 모든 기구들에 대한 최종 검증을 수행할 것.(<그림 1.2>에서 설비 센서들의 전형적인 위치들을 참고.)
3. 구조적 건전성 시험과 기포 방출 누설 위치 시험 쪽에 공기 라인, 계기 라인, 다이얼 계기 그리고 기록계들을 연결할 것.
4. 기술 시방서들 또는 적용할 표준들에 일반적으로 지정된 구조 건전성 시험을 실시할 것.
5. 기포 방출 누설 위치 시험들과 누출률 시험들에 쓰인 압력을 줄일 것.
6. 모든 공기식 출입구의 기포 방출 누설시험을 실시하고 동시에 격납 용기에 관한 기포 방출 누설시험을 실시할 것. 직원용 공기식 출입구의 기포 방출 시험을 마친 후에 그들의 외부 문짝들을 열어 놓을 것.
7. 공기와 계기 라인 등을 분리시키고 용기 부근의 압축식 공기 시험용 밸브의 공기를 뺄 것. 이들 밸브들을 누설시험 할 것.
8. 격납 용기에 관한 기포 방출 시험을 수행하

는 동안 그리고 모든 공기식 출입구의 기포 방출 시험을 마친 후에, 규정된 데이터 안정 기간에 뒤이어 누출률 시험을 시작할 것.

9. 적어도 최소 특정한 누출률 시험 기간 동안은 주기적인 간격으로 압력, 공기의 건구 온도, 이슬점 온도, 그리고 시간 등을 기록 하면서 용기 누출시험을 실시할 것
10. 누진 분석(progressive analysis: 최소 평균 제곱 통계적 평가)으로 누설 데이터를 분석할 것. 누출률 시험 결과들과 이들 결과들로부터 편차들이 허용 값 이내이고 모든 부분에서 그 요구 조건들에 맞게 일치되는 경우, 그 시험은 검증시험이 필요 없음을 추정하여 결론을 내리게 될 것이다. 검증시험이 요구될 경우, 이 절차서 순서의 다음 단계로 진행시킬 것.
11. 알려진 검증 누출 근원 쪽에 밸브를 열고 누출률 데이터와 이들 데이터의 분석을 계속하면서 기록할 것. 누설 오리피스(orifice)를 선택하여 격납 용기 시스템에 알맞게 특정한 누출률의 75-125 %에 해당하는 시험 압력 조건으로 흐르게 할 것. 이 눈금 질량 변화는 시험 계기로 표시된 이전과 뒤이은 눈금의 질량 변화와 견줄 것. 시험 계측으로부터 샘플한 질량의 그 변화는 반드시 눈금 질량 변화의 25 % 이내로 일치시켜야 한다.
12. 시험들을 완성시킨 바로 직후에 격납 용기의 압력을 빼고, 진공이 되지 않게 즉시 큰 관통부를 열어 놓을 것.

1.11 미국 국가 표준 격납 시스템 누출 시험 요구 조건들(ANSI/ANS-56.8-1981)

다음에 해설할 제1부의 나머지 부분들은 핸드북의 원저자가 미국 원자력학회의 허가를 얻어

미국 국가 표준 격납 용기 시스템 누출량 시험 요구 조건(ANSI/ANS-56.8-1981)으로부터 간추려 작성된 내용이다.

이 표준은, 555 North Kensington Avenue, La Grange Park, Illinois 60525에 주소를 둔 미국 원자력학회의 표준 위원회 ANS-56.8 운영 그룹에서 작성된 것이다. 이 자료는 미국 원자력학회로부터 직접 구할 수 있다. 이 표준은 1981. 2. 19. 미국 국가 표준협회에서 승인을 받아 미국 원자력학회가 판권을 소유하고 있다.

유의 사항 :

이 표준은 어느 때나 개정되고 철회될 수 있다. 미국 표준협회는 이 표준을 5 년 안에 다시 인지, 개정, 철회하지 못하게 규정한다. 원저자는 그의 핸드북에 기술된 내용들이 교육과 정보의 목적으로 기획된 것이므로 그 형식, 배열, 또는 표준 자체의 목표들에 따르지 않았다고 설명한다. 비록 실제의 내용이 여기에 소개된 표준들과 그들의 개념상에 다소의 의문이 있다한들, 규정된 인가 절차에 따라 실제로 승인이 이뤄지므로 크게 문제가 되지 않을 것이다.

이 글에서 소개된 문단들, 공식들, 표들 그리고 그림들 등을 포함한 많은 절차서의 차례들은 ANSI/ANS-56.8-1981에서 매겨 놓은 번호들과는 일치하지 않는다. ANSI/ANS-56.8-1981의 정보는 이 글의 제1부와 2부 양쪽에서 해설될 것이다. 원저자의 핸드북은 위의 규격 부록에 인용된 다른 자료를 찾아내어 거기에서 관련 자료들을 발췌하여 인용한 내용들도 포함된다. 그 요구 조건의 기타 변경 사항들은 SI(국제 단위 계) 단위의 환산에 대한 값들을 추가로 삽입시켜 서로 견주어 쉽게 이해할 수 있도록 하였다.

필자는 여기에 소개된 그리고 앞으로 소개할 내용들에 대하여 미국 원자력학회 그리고 미국

비파괴학회와 사전 협의 없이 국문으로 번역한 점에 대하여 죄송스럽게 생각한다. 필자는 최근 『누설 현장』이란 이름의 책을 탈고하였다. 필자는 그 원고를 쓰면서 산업 시설에서 일어날 가능성이 있는 안전 사고의 주범인 유체의 누출 사고에 대한 여러 가지 문제들을 깊이 생각하여 본격적이 있었다. 특히, 그 책에서는 원자력 발전소의 중대 사고의 사례들(영국 윈드스케일, 미국 드리마일 아일랜드, 그리고 옛 소련 체르노빌 사고들)의 얘기들을 실고 있다. 그 책을 쓰면서 여기에 해설하는 '발전로 격납 용기의 누설시험'에 대한 얘기들이 우리에게 필요하다는 판단을 하게 됐다. 발전로의 격납 용기에 대하여 실제로 실시되는 누설시험에 대한 보다 자세한 기술적인 내용들과 시험 과정들은 교육과 정보의 목적으로 이용할 충분한 가치가 있을 것이란 판단에 따라, 비록 15 년 전에 작성된 그 핸드북의 내용들이긴 하지만, 본회 회지의 '기술해설' 난에 이를 소개한다.

1.12 미국 국가 표준 격납 용기 시스템 누출량 시험 요구 조건들(ANSI/ANS-56.8-1981)에 쓰인 기술 용어들의 정의

'미국 국가 표준 격납 시스템 누출량 시험 요구 조건(ANSI/ANS-56.8-1981)'에서 보통 쓰인 용어들의 정의는 미국 원자력학회의 승인을 받아 『핸드북』(이 글의 원본)에 전제된 내용들이다. (필자는 독자가 이 글을 읽을 때, 도움이 될 그 용어들을 조심스럽게 한글로 번역한다. 필자가 이 글에서 번역한 표현들이 한국원자력학회에서 인정하는 그런 용어들에 대한 '한글 표현과 의미' 등에서 다소 다르게 표현될 수도 있을 것임을 미리 밝혀둔다. 용어들의 해설 순서는 영문 표기의 어순에 따랐다.)



허용 기준(acceptance criteria) : 누출량의 경계로서 시험 결과들이 일차 원자로 격납 용기 시스템의 기능상의 허용도를 확립하기 위하여 견주게 될 그 표준.

정확도(accuracy) : 한 표준 또는 참값에 대한 측정의 일치 정도.

신뢰도(confidence level) : 참 누출이 '위 신뢰 한계(upper confidence limit)'를 넘지 아니한 확률.

격납 용기 격리 시스템 기능 시험(containment isolation system functional test) : 격납 용기의 격리 차단 신호의 작동으로 이뤄지는 자동 격리 시스템의 시험.

격납 용기 격리 밸브(containment isolation valve) : 격납 용기의 환경과 그 격납 용기의 건전성에 영향을 줄 한 폐쇄 조건이 꼭 돼야할 밖의 환경 사이에 한 벽을 이룬 밸브.

누출량 설계 기준 사고(leakage design basis accident, LDBA) : 설계 기준 사고와 관계된 선택한 피크 격납 용기 내부 압력.

종합 누출률 시험(integrated leakage rate test, ILRT) : 일차 원자로 격납 용기 시스템에서 실시된 누출률 시험(A형 시험)이며, 그 시스템은 P_{ac} 까지 압력을 올려 전체의 종합 누출률을 결정한다.

L_a (%/24 시간) : P_{ac} 압력에서 무방한 최대 누출률이다. 대개 예비 운전 시험과 주기적 시험에서 지정되며, 관련 기준에 기술 시방서들이 설명된다.

L_m (%/24 시간) : 압력 P_{ac} 에서 측정된 격납 용기 누출률이다. P_{ac} (예컨대 배기, 배출, 넘침, 또는 작동) 결과인 누출량 설계 기준 사고(LDBA)에 따라 다니는 그런 폐쇄된 실제 상황에서 일차 원자로 격납 용기 시스템을 측정하여 얻게 된다.

L_o (%/24 시간) : L_o 가 걸친 ILRT 기구들을 이용하여 측정된 혼합 누출률.

L_o (%/24 시간) : 검증 시험기간 중에 격납 용기들에 걸쳐 있는 알고 있는 누출률.

누설(leak) : ANSI/ANS-56.8-1981에서 말한 누설은 잠시 유체의 통과를 허용할 열린 부분이 어야 한다.

누출량(Leakage) : 누설(leak)을 꿰뚫는 그 유체의 양이며, 측정할 수 있어야 한다.

측정 시스템(measurement system) : 센서에서 표시까지 전체의 시스템.

전체 종합 누출률(overall integrated leakage rate) : 일차 원자로 격납 용기 시스템을 일일(%/24 시간) 가둔 공기 질량의 무게 100 분 비로 표시된 격납 용기 용접부들, 밸브들, 이음매들 그리고 부품들을 포함한 모든 누출 경로들을 꿰뚫는 총 누출량.

L_{ac} : 누출량 설계 기준 사고(LDBA)와 관련된 선택한 피크 격납 용기 내부의 압력 일반적으로 관계 기준에 관한 기술 시방서들에 지정된다.

일차 원자로 격납 용기 시스템(primary reactor containment system) : 원자로의 설계 모습이다. 주된 누출량의 벽으로서 원자로 냉각재 압력 경계 후에, 보통 사람의 건강에 과도한 방사선의 영향을 줄 방사성 물질의 양을 넘지 않게 방지하는 역할을 한다. 거기에 들어가는 것은 (a) 격납 용기 구조, 열린 부분, 관통부, 그리고 부속물 ; (b) 외부의 둘러막이로부터 격납 분위기의 격리에 쓰인 이들 밸브들, 배관들, 폐쇄계 그리고 기타 부품들 ; 그리고 (c) 그들의 시스템들 또는 부속물들을 포함한다. 여기서 말하는 것은 격납 용기를 둘러싼 "일차 격납 용기", "격납 용기 둘러막이 건물" 또는 '원자로 건물' 등은 제외한다. 그 기능은 격납 용기 시스템의 누출량을 제어하는 것이다.

반복성(repeatability) : 일정한 근원에서 주어진 눈금을 반복적으로 재현하는 측정 시스템의 가능

한 출력(capacity).

분해능(resolution ; 또는 해상력) : 표시 메커니즘에 관한 식별할 수 있는 최소 단위.

감도(sensitivity) : 변화에 반응하는 센서의 가 능 출력.

표준 조건들(standard conditions) : 다음에 표 로 된 이 표준들에 의하여 정의한 표준 대기들이다.

압력 : 101,325 kPa 또는 $kN \cdot m^{-2}$ (14,6959 psia)

온도 : 20°C, 293,15K(68°F, 527,67°R)

위의 조건에서 공기의 밀도는 $1.2041 kg \cdot m^{-3}$ ($0.07517 lb \cdot m^{-3}$)이다.

구조 건전성 시험(structural integrity test, SIT) : 특정한 내부 압력의 힘을 견디 내기 위한 일차 원자로 격납 용기의 성능을 나타내는 시험.

A형 시험(Type A test) : 일차 원자로 격납 용기 시스템의 전체 종합 누출률을 측정하는 시험으로서, (1) 일차 원자로 격납 용기 시험이 완성 된 후에 운전이 준비된 시점과, (2) 그 이후에 정기적 시험이 있다.

B형 시험(Type B) : 국부적 누설들을 검출하여 다른 밸브들과는 다른 압력이 걸린 또는 누출량 한계를 이룬 경계부들을 가로지른 누출량을 결정 하려는 시험이다. 그러한 밸브들은:

(a) 탄성 밀봉(resilient seal)들, 개스켓들, 밀 폐제 화합물(sealant compound)들, 신축 벨로즈(expansion bellows)들, 또는 유연성 조립체들과 연결된 격납 용기 관통부들,

(b) 격납 용기 시스템의 한 부분인 문짝 작동 메커니즘 관통부를 포함한 밀봉들, 그리고 (c) 밀봉 용접 문짝을 제외한 탄성 밀봉들 또는 개스 켈들로 된 문짝들과 출입구들 등이다.

C형 시험(Type C test) : 일차 원자로 격납 용기 시스템 격리 밸브 누출률을 결정하려는 시험 들이다. 그러한 밸브들은 (a) 격납 용기 격리 밸브들 ; 그런 밸브들은 폐쇄 또는 격납 용기 격리 에 영향을 줄 계획된 제어 장치 응답 신호를 받 아 자동 폐쇄 또는 사고 후에 격납 용기 격리에 작동하는 밸브들, 그리고 (b) 한 설계 기준 사고 에 따라 작동하도록 설계된 밸브 시스템들. 이들 은 사고 후 작동 때문에 격납 용기 격리 시스템 벽의 한 부분일 수 있다(예컨대, 가지 라인(branch line)들은 외부 대기로부터 시스템을 격 리시킨다).

위 신뢰 한계(upper confidence limit, UCL) : 참 누출률에 관한 한 통계적 위 경계에 들게 하기 위 하여 샘플 데이터로부터 구성된 썸한 값이다. 이 표준에서 UCL은 95 % 확률로 썸이 된다.

검증 시험(verification test) : A형 방식과 설비 의 성능을 확인하려고 격납 용기 누출률(L_{am})을 결정하려는 시험.

가중 평균(weighted average, 공기 또는 이슬점) : 썸한 체적을 각 감시 장치 감시계들에 가중치 를 더하여 유도시킨 평균 온도.

〈다음 호에 계속〉

(원고 접수일 1999. 4. 15)