

성능기준 격납건물 누설률 시험요건의 적용 타당성

Applicability of Performance Based Containment Leakage Test Requirements

최종수, 김한철, 김인구, 박상렬, 류용호

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19

요 약

원자로 격납건물의 주요 기능은 원자로냉각재계통에서 누출될 수 있는 방사성물질들을 가두어 환경 방출을 막아주는 필수 안전방벽을 제공한다. 이 기능을 수행하기 위해 격납건물은 가상사고의 압력에서도 적은 누설률로 견딜 수 있어야 한다. 국내에서는 격납건물 누설률 시험을 개별 원전의 기술지침서에 따라 주기적으로 실시하고 있다. 해당 시험에 대한 규정을 성능기준 개념을 적용하여 개선하고자 하는 요건개발이 진행되고 있다. 이 논문에서는 요건개발 현황 및 미국 NRC가 개발한 성능기준 격납건물 누설률 시험 요건의 적용 타당성에 대한 규제적 평가결과를 제시하고 있다.

Abstract

The primary function of the reactor containment is to serve as an essentially leaktight barrier that will trap any radioactive materials that may leak from the primary system and prevent their release to the atmosphere. To accomplish this task, the containment must be capable of withstanding the pressurization of a hypothesized accident with a quite small leak rate. In Korea, the containment leakage tests are periodically conducted in compliance with the technical specification of each nuclear power plant. Now, the development of domestic testing requirements is in progress to improve the relevant regulations by adopting performance-oriented approaches. This paper summarizes the development status and the regulatory assessments focused on applicability of the performance based containment leakage test requirement developed by US NRC.

1. 서 론

원자로 격납건물은 정상 및 사고 상태에서 생물학적 차폐를 제공하며, 원자로와 원자로 냉각재 계통을 완전히 둘러싸서 사고시 환경으로의 방사성 물질 누출을 허용치 이내로의 제한하고 주요 안전기기를 보호하는 역할을 한다. 또한 격납건물의 건전성은 안전성 확보를 위해 매우 중요하므로 격납건물과 관련된 많은 규제요건이 부과되고 있다.

격납건물의 기밀성 확인을 위한 주기점검 사항으로 종합누설률시험과 국부누설률시험이 수행되고 있으나 원전 운영자에게 큰 부담이 되는 시험으로 알려져 있고 10 CFR 50 App.J의 개정판('95.10.26)에서 발전소 성능에 따라 시험주기를 연장할 수도 있는 성능기준 요건을 제시하고 있다는 점에서 관련 외국사례의 이점을 반영할 필요성이 제기되어 해당 시험에 대한 국내 요건개발이 시작되었다.

격납건물 누설률 시험에 대한 구체적 규정은 기술지침서 및 안전성분석보고서에 명시되어 있으며 도입국 기준의 적용에 따른 발전소별로 상이점이 있다. 또한 새롭게 논의되고 있는 성능기준 규제개념의 적용을 위한 준비가 부족한 것이 현실이다. 따라서 이와 관련한 많은 평가를 진행되고 있다.

2. 국내 시험기준의 현황

국내 원전에서의 격납건물 누설률시험도 도입국 설계기준에 따른 발전소별 다양성을 갖고 있고 일부 시험기준은 변경되는 등 고유한 기준체계를 갖고 있다. 국내 원전에 적용되고 있는 해당 시험기준으로는 원자력법 시행령 92조 및 100조와 10 CFR 50 App.A 및 App.J와 ANSI/ANS-56.8 이 주로 공통적으로 적용되고 있으며, 캐나다 기준인 R-7, CAN3-N287.7-MB0, CAN3-N287.6-1975 등과 프랑스 기준인 RCC 규정 등도 별도 적용되고 있다.

종합누설률시험과 국부누설률시험으로 구분되는 격납건물 누설률시험은 모든 발전소에서 동일한 목적의 유사한 절차와 기준을 적용하고 있다. 특히 종합누설률시험은 동일한 시험주기 및 방법이 적용되고 있다.

3. 미국의 성능기준 시험요건

미국 NRC는 규제개선 프로그램을 통해 규제요건 중에서 안전 여유도 큰 항목들을 도출하여 요건 개선을 추진해 왔다. 예로서 격납건물 누설률시험 규정, 수소제어 규정, 화재방호 규정 등에 대해 성능기준 및 위험도 기준 규제개념을 적용하고자 노력해 왔으며 그 결과로 1995년 9월에 10 CFR 50 App.J를 개정하여 기존 격납건물 누설률시험 규정을 Opt. A로 새로운 성능기준 규정을 Opt. B로 제시되었다.

NRC의 성능기준 규제개념은 안전목표와 허용기준 만을 제시하고 사업자가 비용-편익을 고려하여 이에 대한 이행방법을 원전 운영자가 선택할 수 있도록 하고 있어 구체적 방법 및 설비 등에 대한 구체적 규정이 없다. 따라서 10 CFR 50 App.J Opt.B의 구체적인 이행방안은 NEI 94-01에서 확인되며, 그림 1과 같은 이행체계를 갖고 있다.

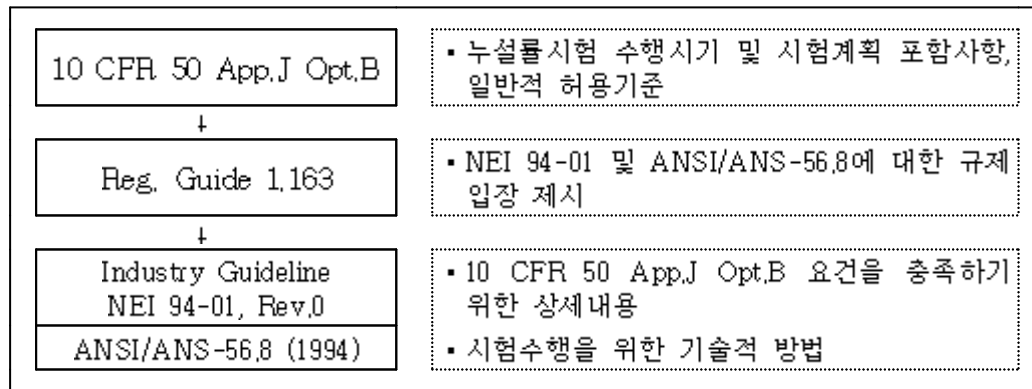


그림 1. 10 CFR 50 App.J Opt.B의 이행체계

10 CFR 50 App.J Opt.A에 기술된 기존 요건과 NEI 94-01로서 정리되는 성능기준 요건의 차이점으로 다음 사항을 예로서 들 수 있다.

- 1) 종합누설률 시험주기 : 연속 2회 성공시 10년 1회 (기존 : 10년 3회)
- 2) 국부누설률 시험주기 : 개별 시험결과에 따라 점검 대상별 주기설정
(기존 : 대상별로 주기를 요건에 규정함.)
- 3) 시험방법 : ANSI/ANS-56.8 (1994) 적용 (기존 : '87년도판을 주로 적용함.)

4 NRC의 규제분석 (NUREG-1493)

10 CFR 50 App.J 개정과 관련한 NRC의 규제분석 결과인 NUREG-1493에서는 다음과 같은 평가결과를 제시하고 있다.

- 종합누설률시험의 총비용은 \$1,890,000 (24억 57만원 : 1300원/\$ 적용시)으로 전력대체비용이 대부분을 차지하며, 국부누설률시험의 비용은 \$165,000 정도임.
- 격납건물 누설 가능성은 대부분 국부누설률시험을 통해 탐지되며, 종합누설률시험을 통해 확인되는 경우는 매우 적음.
- 표 1은 NRC의 규제분석 결과로서 WASH-1400과 NUREG-1150 자료를 적용한 누설률의 변화에 따른 위험도 평가결과로서 허용누설률의 100 ~ 200배까지의 누설률 증가가 0.2 ~ 1%의 위험도 증가만으로 나타남. 즉, 요건 완화에 따라 누설률 증가된다고 하더라도 위험도 증가 가능성은 매우 미미함.
- 요건완화 방안 중에서 주기연장 방안이 가장 비용 효과적이며, 종합누설률시험 주기를 10년 3회에서 1회로 변경할 경우에도 0.02 ~ 0.14% 정도의 위험도 증가로 평가됨.
- 현재의 Level III PSA분석 결과는 5% 및 95% 값의 차이가 100배 정도인 불확실성을 갖고 있음.

표 1. 격납건물 누설률에 따른 위험도 변화 (NUREG-1493)

누설률 (%/일)	주민선량 (person-rem/reactor-year)					
	Surry 1		Peach Bottom 2		Grand Gulf 1	
	WASH-1400	NUREG-1150	WASH-1400	NUREG-1150	WASH-1400	NUREG-1150
0.5			151	28.3	250	5.66
1.0	71	31.0				
5.0			153	28.3	254	5.67
10.0	72	31.3				
50.0			174	28.4	288	5.81
100.0	82	48.4				

5. 국내 원전에 대한 시험요건 완화 타당성 평가

고리 1호기의 '98년도 종합누설률시험에서는 약 18억원이 소요된 것으로 평가되고 있어 종합누설률시험 주기연장은 상당한 비용절감 효과가 있다고 확인된다. 또한 한전 전력연구원이 수행한 위험도 분석은 NUREG-1493의 분석방법론을 올진 3,4호기에 적용한 분석으로서 Level II PSA 결과와 MACCS 코드를 사용한 소외결말분석 결과이다. 본 분석은 올진원전의 실측 기상자료 및 80 km 이내의 인구밀도를 반영한 올진 3,4호기 고유한 분석으로서 누설률 변화에 따른 위험도분석 결과는 표 2와 같다.

표 2. 올진 3,4호기 위험도 분석결과

측정인자	설계기준누설률 (0.2 %/일)	기본경우 (2.0 %/일)	고누설률 (20 %/일)
총 잠재적 암치사(/RY)	1.90E-4	2.11E-4	4.24E-4
주민선량 (person-rem/Ry)	4.04E-1	4.49E-1	8.97E-1
개별 잠재적 암위험도(/RY)	6.75E-10	7.32E-10	1.28E-9

올진 3,4호기 위험도 평가결과에 대한 평가 결과는 다음과 같다.

- 종합누설률시험의 주기를 5년에서 10년으로 연장에 따른 위험도 증가율은 0.67%로 평가됨. (NRC 분석 : 0.02~0.14%)
- 허용누설률의 100배 누설을 가정하면 위험도 증가율은 100% 정도임. (NRC 분석 : 1% 미만)
- 올진 3,4호기의 분석결과는 위험도가 누설률 변화에 매우 민감한 것으로 나타나고 있으므로 요건완화의 영향이 미미하다는 NRC 규제분석 결론과는 불일치함.
- 올진 3,4호기는 타 원전에 비해 중대사고의 발생 가능성이 낮고 기상조건 및 인구분포 측면에서도 위험요소가 낮다고 판단된다. 또한 분석결과에서 낮은 위험도 수준임을 보여주고 있음.
- 위험도 수준은 발전소별로 많은 차이가 있고 불확실성이 크다는 점을 고려할 때 국내 전체 원전에서 NRC 규제분석의 결론을 적용할 수 있다고 볼 수 없음.

6. ANSI/ANS-56.8 (1994)의 적용 타당성 평가

미국에서는 성능기준 시험요건의 이행 방안에서는 ANSI/ANS-56.8 1994년도판의 내용을 적용

하고 있다. 이런 점에서 현재 적용 중인 ANSI/ANS-56.8 (1987)과는 다음과 같은 주요 차이점이 있다.

1) 대기안정 기준

- 시험압력 도달하고도 충분한 대기안정 기간을 갖고서 시험자료를 취득토록 함.
- 온도변화율에 근거한 현행 판정기준을 측정 누설률에 근거한 판정기준으로 변경함.

2) 시험종료 기준

- 현행 기준은 24시간 이상의 자료취득을 요구하고 있음.
- 8시간 이상의 자료취득과 자료의 신빙성 관련 통계적 기준이 새로 부과됨.

3) 국부누설률시험 방법의 제한

- 다양한 측정방법을 인정하고 있으나 단지 공기가압 방법만을 규정함.

ANSI/ANS-56.8 1994년도판은 '87년도판에 비해 시험결과의 신빙성을 높일 수 있도록 개선되었다고 판단되나, 현재 사용중인 소프트웨어 및 하드웨어의 변경이 필요할 수 있다. 또한 국부누설률 시험 설비로서는 어려움이 발생할 수 있다.

7. 국내 시험이력 평가

국내 격납건물 누설률시험 결과로 다음과 같은 사항들이 확인되고 있다.

- 주요 누설경로는 격리밸브와 출입구들로 파악되며 격리밸브의 경우 대형이거나 나비형 밸브일 수록 누설 경향이 높음.
- 과거의 종합누설률시험 결과 중에는 측정 자료가 불안정하여 신뢰성이 부족한 경우도 많이 발견된다. 이런 경우에는 ANSI/ANS-56.8 (1994)의 시험종료 기준을 적용한다면 시험시간의 연장 또는 시험 실패의 가능성이 있음.
- 종합누설률시험의 재시험 사례는 있으나 과도한 누설이 확인된 사례는 없다. 따라서 적절한 격납건물의 기밀 성능을 유지하고 있다고 판단됨.

8. 결 론

외국사례 및 국내 현실을 반영한 격납건물 누설률시험의 기준정립이 추진되고 있으며, 주로 현재의 규정에 미국의 성능기준 시험요건을 반영하는 작업이 진행되고 있다. 발전소 성능에 따라 시험주기를 조정할 수 있도록 하는 성능기준 규제개념은 국내에서는 적용사례가 없어 신중한 검토와 이행방안이 마련되어야 할 것이다. 종합누설률시험의 경우는 막대한 비용이 소요되는 시험이고 시험이력 평가결과에서 나타난 바와 같이 국부누설률시험 결과로 대부분의 누설 가능성을 확인되고 있고 누설 증가의 안전성 영향이 경제적 비용에 비해 크지 않다는 NRC 규제분석을 인용하면 국내에서도 관련 요건완화가 가능할 것으로 예상된다. 그러나 다양한 형태의 발전소에 적용한 구체적 요건 제시 및 국내 원전에 대한 안전성 평가를 통한 주기완화의 기술적 타당성 확보에 보다 많은 노력이 필요하다는 점에서 많은 규제연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] 10 CFR 50, Appendix J, "Primary Reactor Containment Leakage testing for Water-Cooled Power Reactors", Oct, 26, 1995
- [2] ANSI/ANS 56.8, "American National Standard for Containment System Leakage Testing Requirements"
- [3] "원전 정지기준개선 및 운전신뢰성 제고," 제1권 제3부 "격납용기 종합누설시험 기준평가," 1990
- [4] NUREG/CR-4330 "Review of LWR Regulatory Requirements", Vol.1, Apr, 1996
- [5] NUREG/CP-0129 "Workshop on Program for Elimination of Requirements Marginal to Safety", Apr, 27-28, 1993
- [6] NEI 94-01 Rev.0 "Industry Guideline for Implementing Performance-Based Option of 10 CFR Part 50, Appendix J", July 26, 1995
- [7] Reg. Guide 1.163 "Performance-Based Containment Leak-Test Program", Sep, 1995
- [8] NUREG-1493 "Performance-Based Containment Leak-Test Program", Sep, 1995
- [9] "격납건물 종합누설 시험 주기연장에 따른 위험도 분석", '98 추계 학회