

격납건물 국부누설률시험 표준절차 개발

문용식[†] · 김창수^{*}

Development of Standard Procedures for Local Leakage Rate Testing of Containment Vessel

Yong-Sig Moon[†] and Chang-Soo Kim^{*}

(Received 4 August 2012, Revised 17 August 2012, Accepted 24 August 2012)

ABSTRACT

The containment local leakage rate testing in nuclear power plants is performed in accordance with ANSI/ANS 56.8-1994 in Korea. Two methods, the make-up flow rate and the pressure decay, are used for local leakage rate testing. Though ANSI/ANS 56.8-1994 does not define clearly the minimum test duration for the make-up flow rate method, it requires obtaining the data after reaching the stable condition. Thus the prerequisite stable condition for data acquisition and the testing time is differently applied to each NPPs. Therefore, this study presents a standardized test procedure for data stabilization and testing time through experiments to improve the test reliability.

Key Words : Local Leakage Rate Testing(국부누설률시험), Make-up flow rate method(유량보충법), Type B test, Type C test

1. 서론

격납건물 국부누설률시험(LLRT; Local Leakage Rate Testing)은 설계기준사고를 근거로 계산된 격납건물 내부 최대압력으로 시험구간을 가압한 후 격납건물 내·외부를 통과하는 관통부의 누설률을 측정하여 격납건물의 건전성을 확인하는 시험이다¹⁾.

시험기준은 원안위고시 2012-16호와 미국 국립표준협회 ANSI/ANS 56.8-1994를 적용한다.

LLRT시험은 시험대상에 따라서 격납건물 격리밸브에 대한 누설률을 측정하는 격리밸브 누설률시험(Type “C”)과 전기관통부, 격납건물 출입구, 핵연료 이송관 등의 누설률을 측정하는 관통부 누설률시험(Type “B”)으로 구분한다²⁾.

시험방법은 시험구간을 가압한 상태에서 시험체의 누설개소에서 누설되는 양만큼 보충하여 시험압력을 일정하게 유지하고 보충된 유체의 양을 누설량으로 측정하는 유량보충법과 시험구간을 가압한 상태에서 압력과 온도의 변화율을 측정하여 누설률을 계산하는 압력감소법이 있다. LLRT시험은 대부분 유량보충법을 적용하여 시험을 수행하고 있으며, 압력감소법은 보완적으로 적용하고 있다.

ANSI/ANS 56.8-1994에서 요구하는 시험시간은 압력감소법의 경우는 안정상태 도달 후 15분 이상 시험을 수행하도록 요구하고 있다. 반면에 유량보충법에서는 시험 시간에 대한 요건은 없으며 시험데이터가 안정된 후에 누설률을 측정하도록 요구하고 있다¹⁾.

따라서, 유량보충법을 적용하는 국내 원전의 경우에는 시운전 절차서와 시험 수행경험 등을 바탕으로 시험시간을 15분~1시간까지 다양하게 설정하고 있으며, 안정화요건도 구체적이지 않다.

[†] 문용식, 회원, 한국수력원자력 중앙연구원
E-mail : moonys@khnp.co.kr
TEL : (042)870-5030 FAX : (042)870-5658

^{*} 김창수, 회원, 한국수력원자력 중앙연구원

2. 격납건물 LLRT 수행현황

2.1 대기안정화 요건

유량보충법에서는 시험압력으로 가압한 후 누설률을 측정하기 이전에 시험구간의 대기가 안정화 되었는지를 확인하여야 한다. 대기안정화가 충분하지 않으면 측정누설률의 오차가 크게 발생할 수 있으므로 대기안정화 요건이 충족된 상태에서 누설률을 측정하도록 하여 시험의 신뢰도를 유지하기 위한 것이다. 일반적으로 시험구간의 체적이 크고 누설률이 클수록 안정화에 소요되는 시간이 많이 걸리는 것으로 알려져 있다.

국내원전의 대기안정화 요건은 발전소별로 상이하며 일부는 10분 이상하도록 하거나, 일부는 시험자가 대기안정화 여부를 판단하여 수행하도록 절차서에 기술하고 있다.

2.2 시험 시간

Table 1은 시험압력으로 가압하여 대기안정화 요건을 충족한 후에 시험항목별로 적용하고 있는 시험시간을 나타내고 있다. 발전소별로 시험체적 등 조건이 유사한 시험항목에 대해서 15분~60분까지 다양하게 적용하고 있는 것으로 확인되었다.

또한, 시험체적의 크기를 고려하지 않고 시험시간을 일률적으로 동일하게 적용하고 있는 것으로 나타났다.

Table 1 LLRT testing time

Items	Units	A	B	C
Electrical Penetration		60 Min.	15 Min.	15 Min.
CV Hatch		60 Min.	15 Min.	45 Min.
Tank		60 Min.	15 Min.	-
Valve		60 Min.	15 Min.	15 Min.

3. 실증실험 수행

3.1 시험구간 체적계산

발전소 LLRT시험 대상부의 체적을 파악하여 실증실험용 모형을 제작하고자 OPR-1000형, 웨스팅하우스형 및 중수로형 원전으로 구분하여 시험체적을 계산하였다.

Table 2 Test section volume

Item	Test Volume (ℓ)	Quantity			
		OPR-1000	WH	CANDU	Total
(*)	~2.0	110	118	12	240
Valve	~100	16	10	20	126
	101~200	4	4	0	109
	201~300	0	2	0	203
	301~400	2	2	1	305
	401~1,000	5	7	8	413
	1,001~2,000	0	6	0	1,007
	2,001~4,000	1	5	1	2,007

(*) Elec. & Mech. Penetration, etc.

시험대상 구간의 체적은 두 개의 밀봉체 사이의 체적 또는 격납건물 내·외부 격리밸브 사이 배관의 직경 및 길이를 파악하여 계산하였으며, 밸브 관통관의 경우 견본검사에서 시험체적이 작은 것으로 확인된 3인치 미만의 배관은 조사대상에서 제외하였다.

Table 2는 원전 모형별로 시험체적을 계산한 것이다.

3.1.1 OPR-1000형 원전

OPR-1000형 원전에 설치된 격리밸브 관통부의 시험체적은 대부분이 100리터 이하인 것으로 확인되었고, 1,000리터까지 간헐적으로 분포하며 환기차단밸브는 약 3,300리터이고 최대체적을 갖는 것으로 계산되었다.

3.1.2 웨스팅하우스형 원전

웨스팅하우스형 원전의 격리밸브 관통부에 대한 시험체적은 OPR-1000형 원전과 마찬가지로 대부분이 100 리터 이하로 계산되었고, 400리터 이상인 시험체적도 다수인 것으로 확인되었다. 격납건물 환기차단밸브는 3,800리터로 계산되었다.

3.1.3 중수로형 원전

중수로형 원전의 격리밸브 관통부에 대한 시험체적은 대부분이 100리터 이하인 것으로 계산되었고, 그 외는 1,000리터까지 간헐적으로 분포하는 것으로 계산되었다.

3.2 실험장치 구성

실증실험을 수행하기 위하여 Fig. 1과 같이 실험장

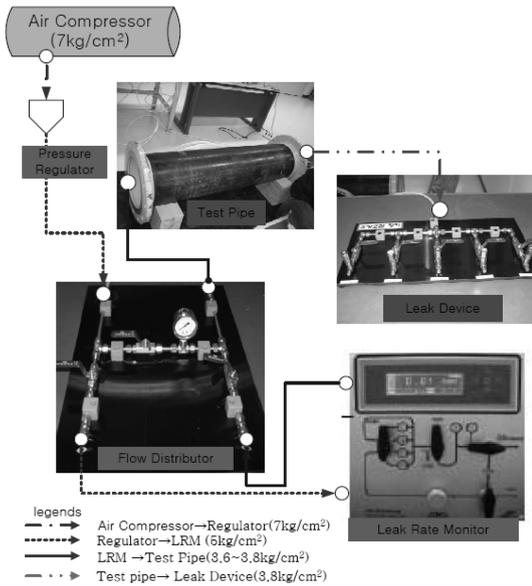


Fig. 1 Test device configuration

치를 구성하였다. 공기압축기에서 생성된 압축공기는 압력조절기를 거쳐 압력을 7kg/cm²로 조정하였다.

시험체의 누설개소를 통한 누설의 영향을 반영하기 위하여 일정량의 누설을 부여하기 위한 임의누설장치를 고안하여 설치하였다. 임의누설장치는 발전소 시험조건과 유사하게 0~7,140scm(standard cubic centimeter) 범위까지 누설률을 조절하면서 부여할 수 있도록 구성하였다.

관통부의 시험체적 계산결과를 바탕으로 배관모형을 구성하였다. 배관모형은 14인치 직경의 배관으로 길이가 서로 다른 3종을 제작한 후 조합하여 시험체적이 125, 250, 375, 500, 625, 750, 875리터가 되도록 구성하였다.

3.3 실험 조건

대기안정화 요건과 최적의 시험시간을 도출하기 위한 데이터를 수집하기 위하여 Table 3과 같이 경수로형(PWR)과 중수로형(PHWR)로 구분하여 시험압력 및 임의누설률을 부과하여 실험을 수행하였으며, 전기 및 기계적관통관의 경우에는 시험체적이 2.0 리터 이하로 매우 적어 별도의 대기안정화 시간이 필요하지 않으므로 실험을 생략하였다.

실험조건은 가능한 발전소에서 수행하는 LLRT시험의 관통부 체적, 시험압력 및 누설량과 유사하게 적

Table 3 Testing condition

Item	LLRT Pr. (kg/cm ²)	Testing Condition	
		Pr. (kg/cm ²)	Leakage Rate (sccm)
PWR	2.5~3.9	3.6	0 ~ 7,140
PHWR	1.26	1.26	1,600 / 2,660

용하여, 실제 시험조건과 유사하게 실험을 수행하였다. 이 실험결과를 바탕으로 시험 데이터 안정화 요건 및 최적 시험시간을 산출하였다.

3.4 누설률 측정

Fig. 2는 125리터 시험체적 및 3.6kg/cm² 시험압력에서 0~2,000scm의 임의 누설률을 부과하여 누설률을 측정하는 것이다. 주어진 시험조건에서 6분이 경과하면 측정누설률 데이터 값이 약 10% 이내로 안정되게 나타나고 있다.

Fig. 3은 250리터 시험체적 및 3.6kg/cm² 시험압력에

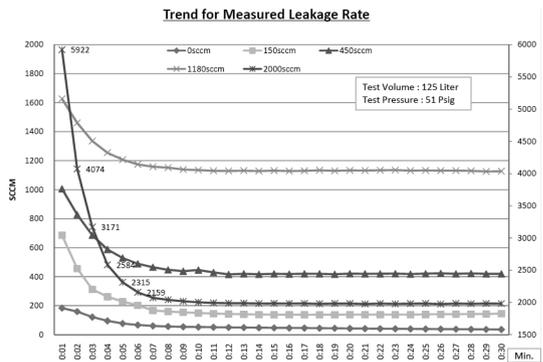


Fig. 2 Comprehensive measured leakage rate at 125 liters test volume and 3.6 kg/cm²

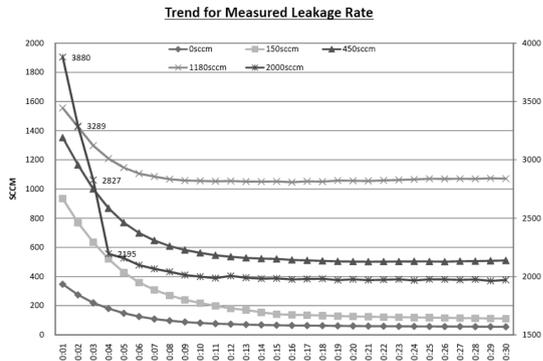


Fig. 3 Comprehensive measured leakage rate at 250 liters test volume and 3.6kg/cm²

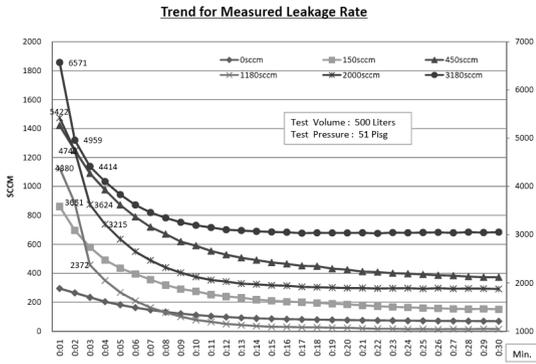


Fig. 4 Comprehensive measured leakage rate at 500 liters test volume and 3.6kg/cm²

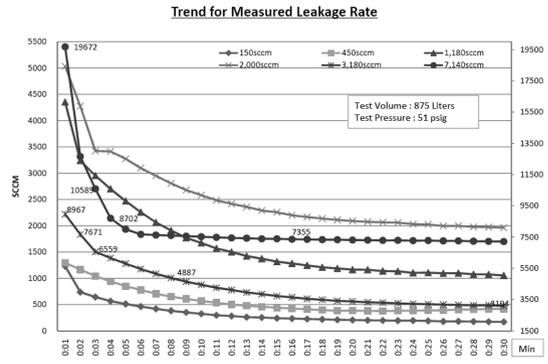


Fig. 6 Comprehensive measured leakage rate at 875 liters test volume and 3.6 kg/cm²

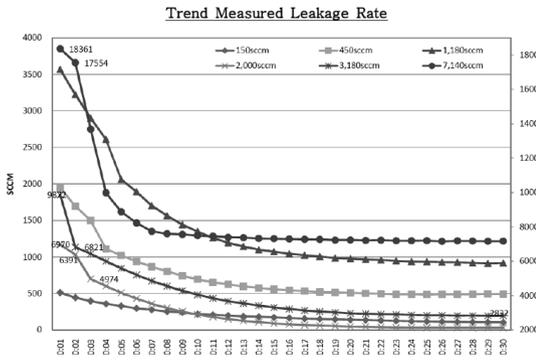


Fig. 5 Comprehensive measured leakage rate at 750 liters test volume and 3.6kg/cm²

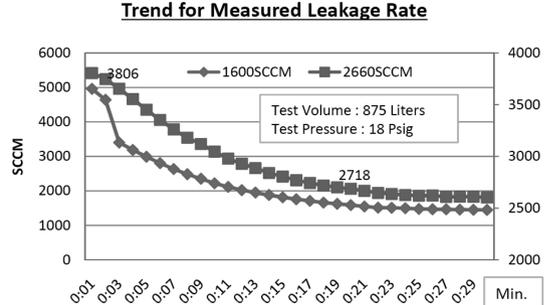


Fig. 7 Comprehensive measured leakage rate at 875 liters test volume and 1.26 kg/cm²

서 0~2,000sccm까지 임의누설률을 부여한 시험조건에서 측정누설률을 취득한 그래프이다. 주어진 조건에서 7분이 경과한 후의 데이터는 측정 누설률이 10% 이내로 안정되는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 4는 500리터 시험체적 및 3.6kg/cm² 시험압력에서 0~3,180sccm까지 임의누설률을 부과하여 측정누설률의 데이터를 취득한 것이다. 주어진 시험조건에서 약 7분이 경과하면 측정누설률이 10% 이내로 안정되게 나타나고 있다.

Fig. 5는 750리터 시험체적 및 3.6kg/cm² 시험압력에서 150~7,140sccm까지 임의누설률을 부여한 후에 누설률을 측정하는 그래프이다. 시험조건에서 7분이 경과한 후의 데이터는 측정 누설률이 10% 이내로 안정되는 것으로 나타나고 있다.

Fig. 6은 875리터 시험체적 및 3.6kg/cm² 시험압력에서 150~7,140sccm의 임의누설률을 부과하여 측정누설률을 취득한 것이다. 주어진 시험조건에서 약 9분

Table 4 Test results under test condition

Pr. (kg/cm ²)	Test Vol. (l)	Leakage Rate (sccm)	Stable Time (Min.)
3.6	125	0~2,000	6
	250	0~2,000	8
	500	0~3180	7
	750	150~7,140	6
	875	150~7,140	9
1.26	500	1,600/2,660	4
	875	1,600/2,660	5

이 경과하면 측정누설률 데이터 값이 10% 이내로 안정되게 나타나고 있다.

Fig. 7은 중수로형 원전의 시험조건인 875리터 시험체적 및 1.26 kg/cm² 시험압력에서 1,600 및 2,660sccm의 임의누설률을 부과하여 측정누설률 데이터를 취득한 것이다. 주어진 시험조건에서 5분 정도 경과하면 측정누설률 데이터 값이 10% 이내로 안정되게 나타나고 있다.

Table 4는 주어진 실험조건의 시험압력, 시험체적 및 누설률에서 대기가 안정된 상태로 변할 때까지 필요한 시간을 나타낸 것이다. 시험압력으로 가압 후 10분이 경과하면 LLRT시험에서 요구하는 대기안정화가 이루어지는 것으로 확인되었다.

4. 시험절차 표준화

실증실험으로 확인된 안정화특성과 측정누설률 데이터를 바탕으로 Table 5와 같이 대기안정화 및 시험시간 요건에 대한 기준을 개발하였다. 여기서 제시된 표준절차는 시험체적을 고려한 시험항목에 따라 그룹핑하고 표준화한 것이다.

Table 5 The Standardization for stabilization and test time

Test Method	Test Items	Stabilization Time (Min.)		Test Time (Min.)
		1st	2nd	
Type "B"	Elec. & Mech. Penetration	N/A	N/A	3
	Equip. Hatch	10	N/A	15
	CV Chamber	10	15	15
Type "C"	Valve	10	N/A	15
	Hi-Volume Purge Valve	10	15	15

4.1 안정화 요건

누설량이 커지면, 시험구간의 대기는 시험압력을 유지시키기 위해 더 많은 양의 유체가 필요하게 되어 대기안정화에 많은 시간이 소요된다.

일반적으로 시험체적은 시험구간의 직경에 비례하여 커지며, 허용누설률은 시험구간의 직경에 비례하여 커지는 특징이 있다. 따라서, 시험체적이 작은 시험대상은 허용누설률이 작게되며 측정누설률이 허용치 이내이면 안정화요건을 충족하는 것으로 분석되었다.

실증실험 결과를 바탕으로 시험체적이 3,000리터 미만인 밸브 등은 데이터 취득 이전에 안정화요건을 만족하도록 하였으며, 시험체적이 3,000리터 이상인 환기차단밸브와 출입문챔버는 데이터 취득 이전과 이후에 안정화요건을 만족하도록 하였다. 전기관통부 등과 같이 시험체적이 2.0 리터 이하인 시험구간은 안

정화요건 없이 누설률을 측정하도록 하였다.

4.1.1 대기안정화 1단계(데이터 취득이전)

데이터 취득 이전의 안정화요건은 누설률을 측정하기 이전에 10분 동안에 취득한 3회의 개별측정치가 평균값의 $\pm 10\%$ 이내이고, 측정된 누설률 추이가 시간경과에 따라 하향 추세이면 안정화 요건을 만족하는 것으로 수립하였다.

4.1.2 대기안정화 2단계(데이터 취득이후)

데이터 취득 이후의 안정화요건은 누설률 측정값을 취득하여 개별측정치가 평균값의 $\pm 10\%$ 이내이고, 측정된 누설률 추이가 시간경과에 따라 하향 추세이면 안정화요건을 만족하는 것으로 수립하였다.

4.2 시험시간

일반적으로 시험체적 및 누설량이 클수록 더 많은 LLRT시험 시간이 필요하게 된다. 실증실험 결과 누설률이 작을수록 안정화가 빨리 되어 본래 시험체가 갖고 있는 누설률 값에 빠르게 수렴하는 특징을 보이며, 누설량이 클수록 시험압력으로 도달한 후에 누설률 변화 추이가 큰 것으로 확인되었다.

따라서, 시험체적이 매우 작은 2.0 리터 이하의 전기관통부와 기계관통부 등은 별도의 대기안정화 시간 없이 1분 간격으로 3회의 데이터를 취득하도록 시험시간을 3분으로 적용하며, 이외의 시험대상은 5분 간격으로 3회의 데이터를 취득을 위해 15분을 적용하도록 요건을 수립하였다.

5. 결론

ANSI/ANS 56.8-1994 기술기준에서 구체화되지 않은 국부누설률시험의 유량보충법에 대한 대기안정화 및 시험 적용시간에 대한 요건을 정량적이고 표준화하기 위한 시험기준을 수립하고자 발전소 시험조건과 유사하게 실증실험을 수행하였다.

실증실험을 위하여 일정량의 누설량을 부여할 수 있는 임의누설장치를 개발함으로써 발전소 LLRT시험 조건과 유사하게 실험을 수행하였다.

실증실험은 시험체적과 누설량에 따른 대기안정화 거동과 누설률 변화추이를 분석하여 대기안정화와 시험시간 요건을 정량적으로 수립하였다.

대기안정화는 누설률의 크기에 비례하여 소요시간이 더 요구되는 것으로 분석되었다. 여기서, 누설량이 7,140sccm으로 큰 경우에도 10분 이내에 대기안정화가 이루어지는 것으로 확인되었다.

대기안정화가 이루어진 이후 측정데이터는 매우 안정된 값을 보이는 것으로 분석되었다. 따라서, 측정누설률에 필요한 시험시간은 15분을 적용하도록 하였고, 시험체적이 2.0 리터 이하인 전기관통부와 기계관통부는 시험시간을 3분간 적용하도록 시험요건을 수립하였다.

참고문헌

1. American Nuclear Society, ANSI/ANS56.8-1994 “Containment System Leakage Testing Requirements”, pp. 13-14
2. Nuclear Safety and Security Commission Code 2012-16, “Standards for Containment System Leakage Rate Testing”.