

원전 격납건물 국부누설률시험에서의 압력감소법을 이용한 과다누설 측정 방법

Excessive Leakage Measurement Using Pressure Decay Method in Containment Building Local Leakage Rate Test at Nuclear Power Plant

이원규*†, 김창수*, 김왕배*

Won Kyu Lee*†, Chang Soo Kim** and Wang Bae Kim***

초 록 원자력발전소에서 격납건물 국부누설률시험(LLRT)에 사용되는 누설률 측정 방법에는 유량보충법과 압력감소법이 있으며, 대부분의 발전소에서는 유량보충법을 우선 적용하고 있다. 유량보충법은 누설되는 양만큼 보충되는 유량을 측정하여 누설률을 계산하는 방식이다. 그러나 과도한 누설이 발생하여 시험압력 유지가 어려울 경우 압력감소법이 보완적으로 사용될 수 있다. 압력감소법은 시험압력보다 낮은 압력을 적용하여 누설률을 측정할 수 있기 때문이다. 본 논문에서는 원자력발전소 격납건물 국부누설률시험에서 압력감소법을 이용한 과다누설 측정 방안을 연구하고자 하였다. 이에 따라 현장에서의 누설시험 조건과 유사하게 실험장치를 구성하여 실증실험을 수행하였다. 실험 결과 압력감소법에서의 누설률 변화 특성을 확인하였으며, 여러 조건에서 측정된 누설량을 바탕으로 실제 누설률 계산에 필요한 보상비를 산출하였다.

주요용어: 국부누설률시험, 압력감소법

Abstract There are two methods for conducting the containment local leakage rate test (LLRT) in nuclear power plants: the make-up flow rate method and the pressure decay method. The make-up flow rate method is applied first in most power plants. In this method, the leakage rate is measured by checking the flow rate of the make-up flow. However, when it is difficult to maintain the test pressure because of excessive leakage, the pressure decay method can be used as a complementary method, as the leakage rates at pressures lower than normal can be measured using this method. We studied the method of measuring over leakage using the pressure decay method for conducting the LLRT for the containment building at a nuclear power plant. We performed experiments under conditions similar to those during an LLRT conducted on-site. We measured the characteristics of the leakage rate under varies pressure decay conditions, and calculated the compensation ratio based on these data.

Keywords: Local Leak Rate Testing (LLRT), Pressure Decay Method

1. 서 론

원자력발전소 격납건물 국부누설률시험(LLRT)은 원자력안전위원회 고시 2014-22호와 미국국립표준협회(ANSI)의 ANSI/ANS-56.8-1994 기술기준에 따라 설계기준사고 조건을 모의한 시험 조건에서의 원자로 격납건물의 전체 누설률을 측정하

는 “종합누설률시험” 시험과 격납건물 관통부들의 누설률을 측정하는 “국부누설률시험”으로 구분되어 수행된다.[1]

여기서, 종합누설률시험(ILRT; integrated leakage rate test)은 격납건물의 누설 건전성을 확인하기 위하여 격납건물 내부를 설계기준사고 시 압력으로 가압하여 격납건물을 통한 외부로의 방사성물

[Received: May 3, 2016, Revised: June 15, 2016, Accepted: June 20, 2016] *한국수력원자력(주) 중앙연구원,

† Corresponding Author: KHNP Central Research Institute, Daejeon 34101, Korea (E-mail: wonkyu.lee@khnp.co.kr)

© 2016, Korean Society for Nondestructive Testing

질 누출이 허용치 이내임을 입증하여 공공의 안전을 도모하고 격납건물의 기밀성을 확인하는 시험으로 “유형 A시험“이라 한다[2].

격납건물 국부누설률시험(LLRT)은 설계기준사고에 대해 계산된 격납건물 내부 최대압력으로 시험 구간을 가압하여 해당 관통부의 누설률을 측정하며, 격납건물 격리밸브에 대한 누설률을 측정하는 격리밸브 누설률시험(유형 C시험)과 전기관통부, 격납건물 출입구, 핵연료이송관 등의 누설률을 측정하는 관통부 누설률시험(유형 B시험)으로 구분한다[2].

LLRT 시험 방법으로는 유량보충법과 압력감소법 2가지가 있으며, 대부분의 원자력발전소에서는 유량보충법을 우선 적용하고 압력감소법은 보완적으로 사용하고 있다. 유량보충법은 누설 부위를 통해 누설되는 양만큼 보충되는 유량을 유량계로 측정하여 누설률을 계산하는 방식이다. 하지만 시험체에 과도한 누설로 인해 시험체를 기준시험압력 이상으로 유지하기 곤란하거나 유량계의 측정 범위를 초과하는 경우 유량측정법을 적용하여 누설률 시험을 수행할 수 없다.

본 연구에서는 시험체에 과다누설이 발생하여 유량측정법의 적용이 불가능한 경우 대체시험 방법으로 압력감소법을 적용하고자 실증실험을 수행하였고, 이를 통해 누설률 변화특성 등 실제 누설률 측정을 위한 의미있는 결과들을 확인하였다.

2. 압력감소법 적용

2.1. 압력감소법 개요

누설률시험에서 압력감소법은 시험체를 공기나 질소로 가압한 후 시험 초기 및 종료 시 시험 공간의 압력과 온도의 변화율을 확인하여 누설률을 측정하는 방법으로서, 누설률은 다음 식(1)을 적용하여 계산된다[2].

$$L_L = \left(\frac{P_1}{T_1} - \frac{P_2}{T_2} \right) \left(\frac{VT_s}{tP_s} \right) \quad (1)$$

여기서,

L_L : 누설률 (scfh: standard cubic feet per hour)

P_1, P_2 : 시험 시작 및 종료시 절대압력 (psia)

T_1, T_2 : 시험 시작 및 종료시 절대온도 (°R)

V : 총 시험체적 (ft³)

t : 시험시간 (h)

T_s : 표준(대기)온도 (527.67 °R)

P_s : 표준(대기)압력 (14.6959 psia)

2.2. 시험압력 및 체적

기준시험압력이 낮을수록 시험체 내부와 외부의 압력차가 줄어들어 측정누설률은 작아지게 된다. 또한 동일 누설 크기에서 시험체적이 작을수록 시간 경과에 따른 시험체의 압력이 더 크게 감소되고, 시험체 내부와 외부의 압력차는 작게 되어 측정누설률은 작아지게 된다.

따라서 시험체에 적용하는 시험압력 및 체적은 동 실제 시험 대상과 동일한 조건으로 실증실험 장치를 구성할 필요가 있다.

2.3. 시험시간, 온도 및 압력변화

시험체가 가압이 완료된 후 시험체 내부의 기체 온도는 지속적으로 감소하는 경향을 보이지만, 기체의 온도 변화가 측정누설률에 미치는 영향은 미미하며, 누설로 인한 압력 변화가 측정누설률에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

압력감소법에 적용되는 시험시간은 모든 시험 조건에서 15분으로 동일하므로 측정누설률에 영향을 미치지 않는다.

3. 실험방법

3.1. 실험장치 구성

압력감소법을 이용한 실험을 수행하기 위하여 발전소에서 수행되는 실제 시험 조건과 유사한 시험압력과 시험체적을 적용한다. 실험장치 구성은 Fig. 1과 같다.

먼저 시험체 전단에서 압력조절기가 일정한 압력(7 kg/cm²)을 시험체에 가압하도록 하였다. 압력조절기 후단에는 압력계, 온도계를 장착하여 압력감소법을 이용한 누설률 측정에 필요한 데이터를 취득할 수 있도록 하였고, 시험의 편의를 위하여 누설률 측정장치(leak rate monitor)를 추가적으로 설치하였다.

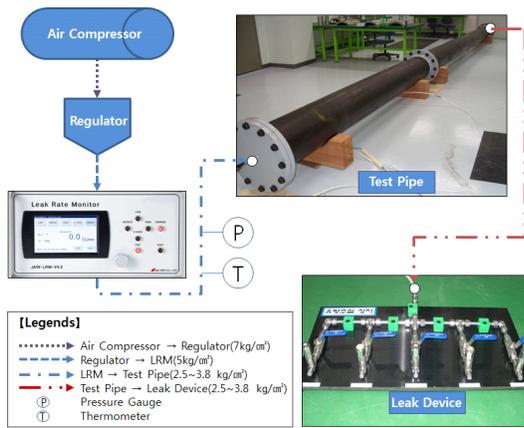


Fig. 1 Test device configuration

Table 1 Testing condition

Item	Testing Condition
Test Pr.(psig)	53.6(Pt)
	26.8(½Pt)
	17.9(⅓Pt)
Test Vol(ft³)	30.9
Intentional Leakage Rate(L/min)	≒ 20, 40, 60, 80, 100
Test Duration(min)	15
Test Fluid	air

실제 시험 대상의 시험체적과 동일한 시험체적을 구성하기 위하여 직경 14 inch 배관을 연결하여 사용하였고, 임의부여누설률을 정확하게 부여하기 위하여 20 L/min의 5개 유량조절밸브를 갖춘 누설장치(leak device)를 설치하였다. Table 1은 시험 조건을 나타낸 것으로, 유량조절밸브의 임의부여누설률 설정은 동일 시험 조건에서 유량계를 이용하여 측정하였다.

3.2. 실험 조건

압력감소법을 이용한 누설률시험에서 과다 누설로 인해 시험압력 유지가 어려운 경우를 감안하여 시험체에 가압하는 압력을 기준시험압력(Pt) 외에 기준시험압력의 1/2(½Pt), 1/3(⅓Pt) 등 총 3개의 시험압력 조건으로 구분하였다. 본 실험을 위한 시험체적은 발전소 대용량 환기차단밸브 관통부 체적과 유사한 조건을 적용하였고, 임의부여누설률은 실증실험에 사용된 누설률 측정장치

(leak rate monitor)의 측정 제한 범위(20 L/min이내)를 최소기준으로 하여 5단계로 설정하였다. 시험시간은 ANSI/ANS-56.8-1994에서 규정된대로 안정상태 도달 이후 15분을 부여하였다[2].

3.3. 실험 절차

실험장치 구성 및 실험조건 설정 후 다음과 같은 절차에 따라 실증실험을 수행하였다.

먼저 압력계를 확인하면서 압축공기 공급 밸브를 천천히 개방하여 시험체를 가압하였다. 시험체가 시험목표압력 이상으로 가압 되었을 때 압축공기 차단 밸브를 닫고 10분 이상 시험체 내부 공기를 안정화 시키고 안정화가 종료된 후 시작 시간과 함께 시험체 압력(P_1), 온도(T_1)를 측정하고 기록하였다. 마지막으로 정확하게 15분이 경과된 이후 시험 종료시간, 시험체 압력(P_2), 온도(T_2)를 측정하고 기록하였다.

3.4. 실험 결과 및 분석

압력감소법의 누설률 계산식에 따라 측정된 데이터를 가지고 각각 시험압력에 따른 누설률을 확인하였으며, 누설률 변화 특성은 다음과 같이 분석되었다.

3.4.1. 누설률 변화량

기준시험압력(Pt) 및 ½Pt, ⅓Pt에서 임의부여누설률에 따른 측정누설률은 Table 2와 같다. [] 내 수치는 임의부여누설률 대비 측정누설률을 백분율(%)로 표기한 것이다.

Table 2 Comprehensive measured leakage rate compared with intentional leakage

Intentional Leakage Rate	Measured Leakage Rate		
	Pt	½Pt	⅓Pt
19.8	19.3[97.2]	11.1[55.9]	8.7[44.0]
39.6	37.9[95.7]	21.3[53.8]	16.8[42.5]
59.4	53.4[90.0]	31.2[52.6]	24.0[40.4]
79.2	68.1[86.0]	40.1[50.7]	30.6[38.6]
99.0	81.8[82.7]	48.0[48.5]	34.9[35.3]

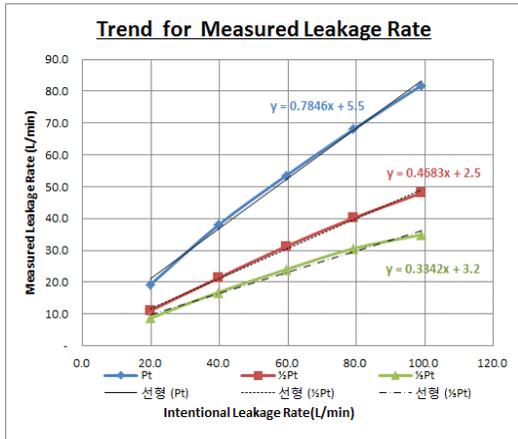


Fig. 2 Measured leakage rate variation characteristic

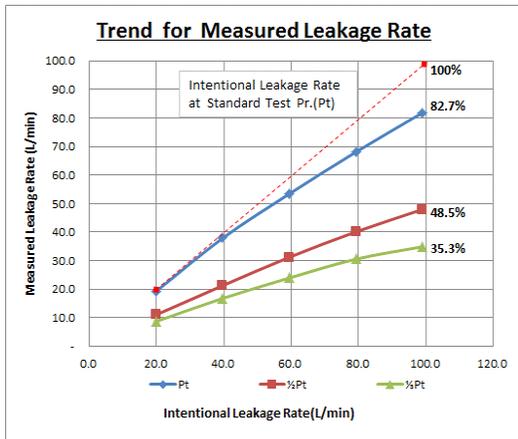


Fig. 3 Comprehensive measured leakage rate compared with intentional leakage

3.4.2. 누설률 변화 특성

Fig. 2는 임의의 3가지 시험압력 조건을 부여하여 측정된 누설률을 보여준다. 각 압력 조건에 따른 측정누설률 추세는 모두 일차함수로 표현되고, 측정누설률이 임의부여누설률에 비례하여 변하고 있음을 보여준다.

Fig. 3은 임의부여누설률(점선)을 기준으로 임의의 3가지 압력 조건에 따른 측정누설률의 비를 보여준다.

임의부여누설률 100 L/min 기준으로 임의부여누설률 대비 기준시험압력(Pt)에서의 누설률은 82.7%, 1/2Pt에서의 누설률은 48.5%, 1/3Pt에서의 누설률은 35.3% 등 모든 시험압력 조건에서 측정누설률은 임의부여누설률 보다 작게 측정되었다.

Table 3 Leakage rate formular

Test Pr.	Compensation Ratio	Leakage Rate Formular
Standard Test Pr. (Pt)	121%	Measured Leakage × 1.21
1/2 of Standard Test Pr.(1/2Pt)	206%	Measured Leakage × 2.06
1/3 of Standard Test Pr.(1/3Pt)	283%	Measured Leakage × 2.83

또한 동일한 시험압력 조건에서 임의부여누설률이 클수록 임의부여누설률 대비 측정누설률 값의 비는 감소하는데 이는 시험압력이 낮을수록 시험체의 내·외부 압력차(ΔP)가 작게 되어 누설량이 줄어들었기 때문이다.

따라서 기준시험압력을 유지하기 어려워 기준 시험압력보다 감소된 압력을 적용하여 누설률을 측정할 경우, 압력감소법을 이용한 측정누설률에 적절한 보상비 반영이 필요함을 알 수 있다.

3.4.3. 실제 누설률 계산

기준시험압력보다 낮게 시험압력을 설정하여 누설률을 측정할 경우 감소된 압력만큼 실제 누설률은 줄어들게 된다. 시험압력을 낮출 경우 시험체 내·외부 압력차(ΔP) 감소로 누설량이 줄어들기 때문이다. 이때 감소된 누설률은 실험을 통해 측정이 가능한데 이때 측정된 값을 바탕으로 실제 누설률 계산에 필요한 보상비를 산출한다.

예를 들어 기준시험압력의 절반(1/2Pt)인 조건에서 측정누설률은 임의부여누설률의 48.5%이다. 따라서 실제 누설률을 얻기 위해서는 측정누설률에 2.06배를 해줘야 한다. Table 3은 위의 실증실험을 통해 얻은 실제 누설률 계산식이다.

4. 결론

원전 격납건물 국부누설률시험(LLRT) 수행시 과다누설로 인해 시험체를 기준시험압력 이상으로 유지시키기 힘들거나, 유량계의 측정 범위를 초과하는 경우에는 유량측정법을 적용할 수 없게 된다. 이러한 경우 압력감소법을 적용할 수 있다.

압력감소법을 이용한 실험 결과를 바탕으로 도출한 결론은 다음과 같다.

첫째, 측정누설률은 임의부여누설률에 비례하여 변하는 특성을 갖는다. 즉 임의부여누설률이 클수록 동일한 비율로 측정누설률도 커지고 있음을 확인할 수 있었다.

둘째, 기준시험압력보다 낮은 압력으로 가압하여 시험하는 경우 측정누설률은 임의부여누설률보다 작게 측정되며, 적용 시험압력이 낮을수록 비례적으로 작게 측정된다.

셋째, 임의부여누설률이 클수록 임의부여누설률 대비 측정누설률 값의 비는 감소한다.

넷째, 기준시험압력보다 낮은 압력으로 가압하

여 시험하는 경우에는 보상비를 적용하여 실제 누설률의 측정이 가능한 것으로 확인되었다.

References

- [1] Nuclear Safety And Security Commission, "Containment System Leakage Testing Requirements," NSSC Notice 2014-22
- [2] American Nuclear Society, "Containment System Leakage Testing Requirements," ANSI/ANS56.8-1994, pp. 18-19