

하나로 원자로건물 누설률 시험에 대한 고찰

Study on the Leak Rate Test for HANARO Reactor Building

최영산, 김영기, 김민진, 박주문, 우종섭

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

하나로의 원자로건물은 일정량의 공기 누설을 허용하는 준격납계통(Confinement)개념을 채택하고 있다. 준격납계통의 경계를 통한 공기의 누설을 제한하기 위하여, 정상 운전 시에는 원자로건물을 2.5 mmWG 이상의 부압으로 유지시키고, 비정상 시에는 25 mmWG의 부압을 유지하면서 원자로 건물 내 공기를 비상환기계통의 활성화 여과기와 굴뚝을 통해서 대기로 배출시킨다. 비정상 상황에서 비상환기계통이 작동불능인 상태가 발생되면, 원자로건물은 외부와 격리되고 건물 내에 갇힌 오염된 공기는 건물 누설률에 의한 지표면 방출(Ground Release) 개념이 적용된다. 이때 원자로 건물을 통한 공기의 누설량은 건물 주변의 바람의 영향으로 증가될 수 있는데, 이 양을 허용누설률 이하가 되도록 건물의 기밀을 유지하여야 한다.

누설률 시험은 시운전 초기부터 '99년 7월까지 국부누설률 방법을 적용하였으나 온도 및 대기압의 변화에 민감하다는 것이 단점으로 지적되었다. 보다 정확한 누설률 측정을 위해 새로운 방법을 도입하여 정기적으로 측정을 실시하였다. 측정 결과를 분석한 결과 기존의 측정법에 비해 새로운 방법을 적용할 경우 온도 및 대기압의 영향이 현저하게 줄어들어 훨씬 안정적인 누설률 측정값을 얻을 수 있음을 확인하였다.

Abstract

The reactor building of HANARO adopts the confinement concept, which allows a certain amount of air leakage. In order to restrict the air leakage through the confinement boundary, negative pressure of at least 2.5 mmWG is maintained in normal operating condition while maintaining 25 mmWG of negative pressure in abnormal

condition, the inside air filtered by a train of charcoal filter is released to the atmosphere through the stack. In this situation, if the emergency ventilation system is not operable, the reactor building is isolated from the outside then the trapped air inside will be leaked out through the building by ground release concept. As the leak rate may be affected by an effect of wind velocity outside the reactor building, the air tightness of confinement should be maintained to limit the leak rate below the allowable value.

The local leak rate test method was used since the beginning of the commissioning until July 1999. However it has been pointed out as a defect that the method is so susceptible to the change of temperature and atmospheric pressure during testing. For more accurate leak rate testing, we have introduced a new test method. We have periodically carried out the new leak rate testing and the results indicate that the bad effect by the temperature and atmospheric pressure change is considerably reduced, which gives more stable leak rate measurement.

1.0 서론

하나로의 준격납 개념은 방사선 사고 시 방출될 수 있는 오염된 공기를 제한치 이하로 제한하면서 비상환기팬을 가동하여 굴뚝을 통해 방출하는 것이다. 정전으로 인해 비상환기팬의 가동이 불가능한 경우에는 건물내부를 부압 조건으로 유지시키지 못하는 상태를 가정할 수가 있고 건물을 외부와 차단시켜 내부의 오염된 공기를 가두고 건물 밖으로의 공기 누설을 억제하는데, 이때에 적용되는 개념이 누설률이다.[2]

누설률 시험은 원자로 시운전부터 '99년 7월까지 국부누설률 계산방법을 사용하였다. 공기조화계통 공급 팬을 이용하여 원자로건물을 가압한 후 압력이 일정구간에서 떨어지는데 걸리는 시간, 온도, 대기압 등을 측정하여 계산하는 방식 이었다. 그러나 측정 중 대기압의 미세한 변화가 측정 시간에 영향을 주고, 온도 또한 계측기 교정 오차 보다 작은 값이 변화해도 누설률 측정값이 영향을 받는 문제점이 제기되었다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해 '98년부터 새로운 개념의 측정 방법을 검토하게 되었다. 기존의 시설과는 독립적으로 풍량조절장치를 개발하여 원자로건물 내부를 기준 압력(25 mmWG) 으로 유지시키고 이때 풍량조절장치를 통해 원자로 실내로 유입되는 주입 공기 량이 허용기준치(570 m³/hr) 이하가 되는지를 확인하는 방법을 사용하였다. 기존의 시험과 병행하면서 약 2년 동안 예비시험을 시행한 결과, 송풍기 주파수 설정에 대한 원자로실 압력과 누설률의 변화, 원자로건물 압력과 대기압의 관계, 누설로 인한 원자로건물 압력과 누설률의 관계를 분석하였다. 풍량조절장치를 사용한 새로운 시험 방법이 대기압의 영향이 작고 온도변화의 대한 영향이 거의 없어 보다 실질적인 누설률 측정 방법임을 확인하였으며 '99년 이후 현재까지 실제 시험에 적용하여 사용하고 있다.

2.0 풍량조절장치의 구성 및 시험 방법

2.1 풍량조절장치

새로운 개념의 누설률 측정시험에 사용되는 풍량조절장치는 원자로실 트럭 출입구에 위치하고 있다. 원자로실 주입 풍량을 제어하기 위한 팬과 인버터, 덕트를 통하여 실제 원자로 실로 주입되는 공기의 속도를 측정하기 위한 풍속측정계(SPT) 등으로 구성되고 외형은 그림 1과 같다. 그 외, 대기압과 원자로실간의 차압과 온도를 측정하기 위한 압력계측장비와 저항온도측정기(RTD) 그리고 시험 진행 동안 대기압의 변화를 측정하는 대기압 측정기도 누설률 시험에 사용된다.

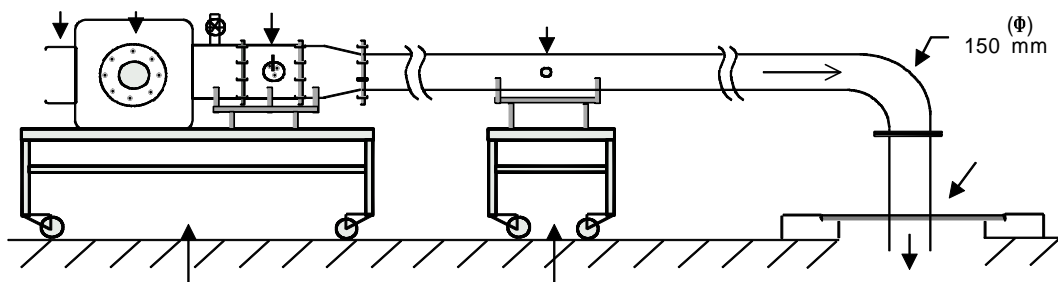


그림 1. 풍량조절장치의 구성도

송풍기는 건물의 누설률이 $600 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이하인 점을 감안하여 용량을 결정하였고, 정확한 풍속 측정을 위해서는 최소한 지름의 10 배 이상의 직선 덕트가 필요하므로 지름이 작고 길이를 길게 제작하였다. 원자로건물 압력이 기준압력으로 안정되어 있는 상태에서 누설량은 곧 주입풍량을 의미하므로 주입풍량을 측정하여 이를 원자로건물의 누설량으로 사용한다. 주입되는 풍량은 풍속을 측정하여 이를 덕트 단면적을 곱함으로써 쉽게 계산할 수 있다. 누설률 측정에서 가장 중요한 것은 풍속의 측정이므로 환기계통의 점검에 널리 사용되는 Standard Pitot Tube(SPT)를 마노메타에 연결하여 사용하였다.

차압과 온도는 기존 누설률 측정에 사용하던 2 세트의 차압계측기와 4 세트의 온도측정기를 그대로 사용하였다. 대기압측정기는 측정 범위가 $500 \sim 1060 \text{ mbar}$ 이고 지시값의 해상도는 0.1 mbar 이며 계기의 총 오차가 0.2 mbar 를 넘지 않는 계기를 사용하였다.

2.2 시험 방법

새로운 누설률 시험 방법은, 원자로실 압력이 설계기준압력인 25 mmWG 이상으로 충분히 안정되었을 때 주입되는 공기량은 원자로실 경계면을 통한 누설량이고 허용기준 이하임을 확인하는 것이다. 원자로실 경계 면의 출입구 및 격리댐퍼를 모두 닫은 후 트럭 출입구에 설치된 풍량조절장치로 일정량의 바람을 원자로건물로 공급한다. 처음 가압을 할 때는 인버터의 주파수를 65 Hz 근처로 설정하여 원자로실 압력이 $25.5 \sim 26 \text{ mmWG}$ 에 도달하면 인버터 주파수를 $53 \sim 54 \text{ Hz}$ 근처로 조정한다. 여기서, 원자로실은 약 39000 m^3 의 큰 체적

이므로 주입풍량의 조건 변화에 민감하게 반응할 수 없기 때문에, 인버터의 주파수를 바꾸게 되면 최소 10분 이상 기다려야만 새로운 조건에 안정된다. 원자로실의 압력이 25 ± 0.5 mmWG로 안정되면 그림 2 에서와 같이, 덕트 직경의 0.9D, 0.7D, 0.5D, 0.3D, 0.1D의 5개 지점에서 SPT로 풍속을 측정하고 식 1에 따라 평균한 풍속값을 덕트 단면적으로 곱하여 주입 풍량을 계산한다.

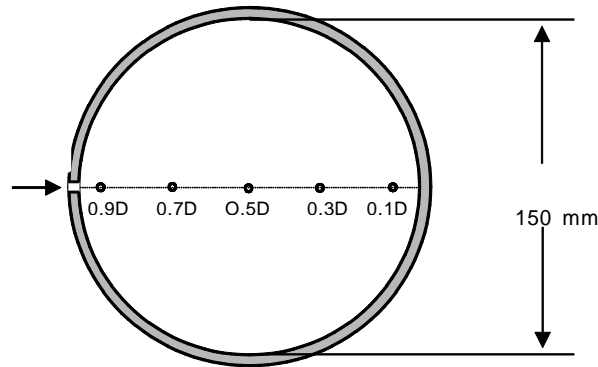


그림 2. 덕트내 풍속 측정

$$L = V_a \times A_d \times 3600 \text{ -----식 1.}$$

여기서 L = 주입 풍량, 누설률 (m³/hr)

V_a = 평균 풍속 (m/sec)

A_d = 덕트 단면적 (m²)

3.0 누설률 측정 결과 분석

3.1 인위적 누설로 인한 원자로실 압력과 누설률 변화

본 실험에 들어가기에 앞서, 이 실험 방법의 정당성을 검증하는 것이 우선이었다. 원자로 건물 압력을 기준 압력 이상으로 가압시킨 상태에서, 원자로실 경계면에 있는 3개의(45 mm 1개, 55 mm 2개) 전선관 구멍의 플러그를 순차적으로 개봉하면서 주입 풍량을 측정하고, 3개의 플러그를 원상복구 시킨 후 압력과 누설률 변화 값을 다시 측정하였다. 그림 3은 원자로실을 가압한 후 인위적 누설에 따른 원자로건물 압력과 누설률 변화의 관계를 나타낸 것이다. 압력은 27 - 27.5 mmWG 정도, 누설률은 460 - 465 m³/hr 정도이지만 내경 45 mm 전선관 1 개를 개방하면 압력은 24 - 25 mmWG 정도로 떨어지고 누설률은 480 - 490 m³/hr로 증가한다. 내경 55 mm 전선관 1개를 추가하여 개방하면 압력은 22 - 22.5 mmWG로 누설률은 520 - 530 m³/hr정도가 되고 1개를 더 개방하면 16.5 - 17 mmWG, 560 - 565 m³/hr 정도로 변화하고 있다. 즉, 전선관 구멍을 1 개씩 열 때마다 원자로실 압력은 약 4-5 mmWG 정도 떨어지고, 누설률은 약 40 - 45 m³/hr 정도 증가하고 있음을 확인하였다. 누설 면적과 누설량의 일정한 비례 관계가 있는 것으로 보아 새로운 개념의 누설률 측정 방법

은 타당하다고 판단하였다.

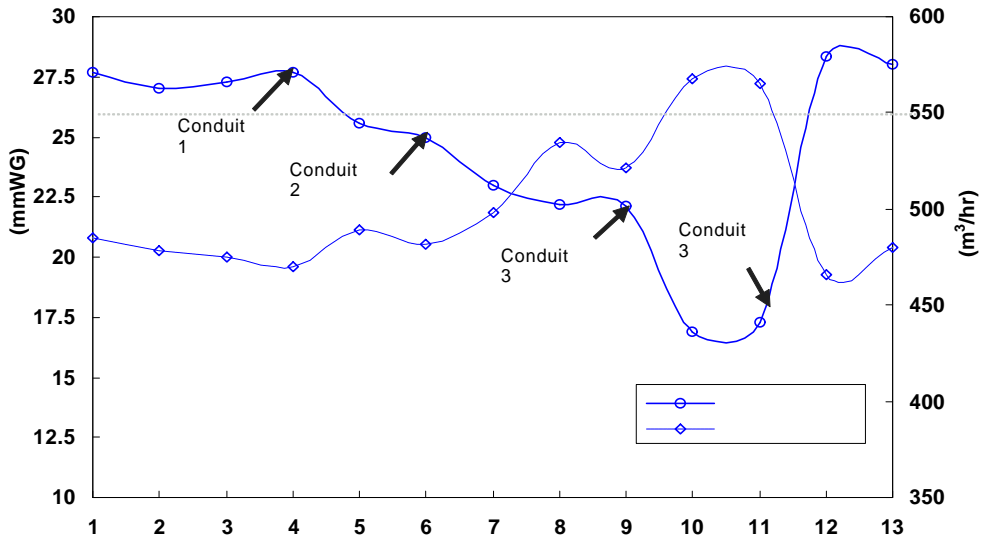


그림 3. 인위적 누설로 인한 원자로실 압력과 누설률 변화

3.2 대기압 변화에 따른 누설률 경향

누설률 시험에서 가장 중요하게 영향을 미치는 요소가 측정 중에 변하는 대기압이었다. 실제 실시한 측정기록을 바탕으로, 측정 중 대기압의 상승 시와 하강 시의 누설률 경향을 과거방법으로 측정했을 때와 비교하여 그림 4에 나타내었다.

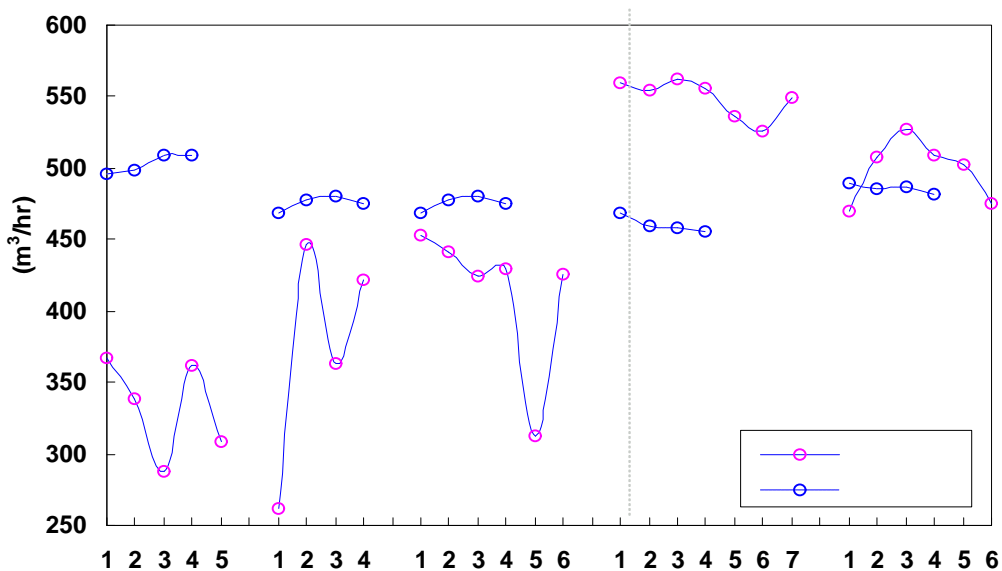


그림 4. 대기압 변화 시 누설률 경향

과거방법의 경우, 대기압이 계속 상승할 때는 실제 측정구간인(30 → 20 mmWG) 10 mmWG 보다 작게되어 측정시간의 감소로 누설률이 상대적으로 적은 280 - 450 m³/hr 정도로 분포한다. 반대로 대기압이 계속 하강하는 경우에는 실제 측정구간이 10 mmWG 보다 크게되어 측정시간의 증가로 인해 누설률은 470 - 570 m³/hr로 상대적으로 높게 분포하고 있다. 측정값의 변화폭 또한 50 - 290 m³/hr로 큰 값을 얻을 수 밖에 없었다. 이처럼 대기압은 실제 측정시간에 직접적인 영향을 주어서 측정기간 중 0.1 mbar 만 변화여도 측정압력구간의 약 1/10 을 좌우할 정도로 의존도가 매우 컸다.

반면에 새로운 방법에서의 측정 결과는 대기압이 상승 시에는 470 - 510 m³/hr 정도에 분포하고, 반대로 대기압이 하강 시에는 460 - 480 m³/hr 정도로 분포하고 있다. 즉, 이 방법으로 측정 시에는 대기압이 0.1 mbar가 변화해도 기준압력의 1/25을 좌우하기 때문에 누설률의 변화폭도 최대 50 m³/hr 로 상대적으로 매우 작고, 두 구간 모두 대기압의 영향을 크게 받지 않는 것을 볼 수 있어서 대기압의 의존도를 많이 줄일 수 있었다.

3.2 온도 변화에 따른 누설률 경향

기존의 측정방법에서는 온도값의 변화 또한 누설률 측정에 직접적으로 영향을 미치는 요소 중에 하나였다. 측정 중에 온도변화가 0.01 °C 만 변화여도 누설률은 약 20 m³/hr 가 변해 온도차가 심한 경우에는 측정에 어려움이 많았다.

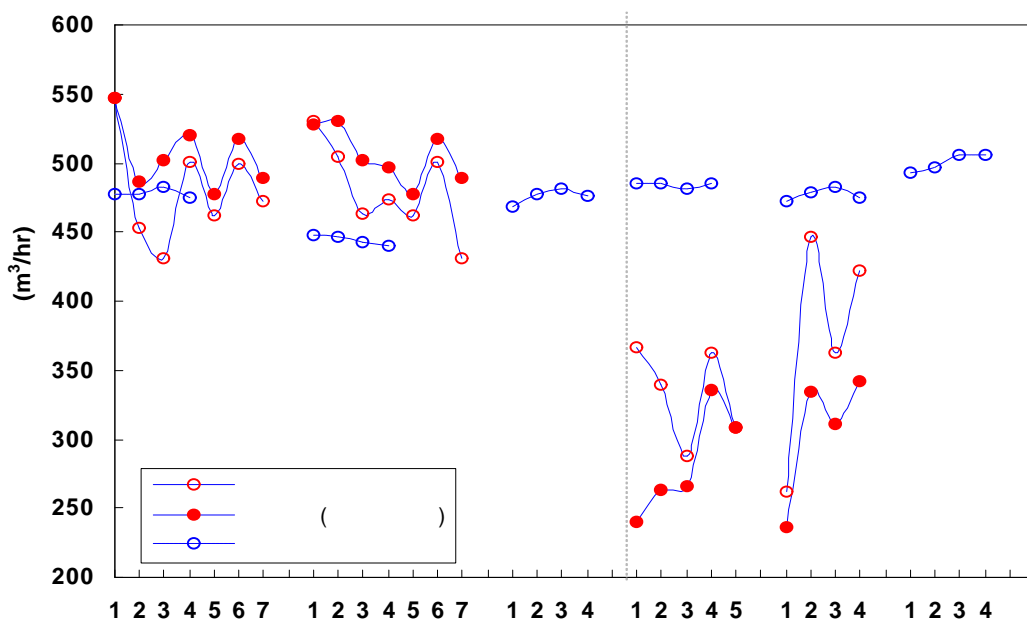


그림 5. 온도 변화 시 누설률 경향

시기별로 난방이 공급되는 겨울에는 측정 중 최종 온도가 초기 온도 보다 낮아져 누설률이 작아지는 현상을 보였고, 반대로 냉방이 공급되는 여름에는 최종 온도가 초기 온도 보다 높아져 누설률이 증가하는 영향을 보였다. 누설률 결과는 전반적으로 여름철에는 430 - 550 m³/hr 정도로 분포하고 겨울철에는 상대적으로 낮은 250 - 350 m³/hr 정도로 분포하고 있다. 측정 중 온도의 영향을 고려치 않았을 경우와 비교하여 작게는 0 m³/hr 부터 많게는 100 m³/hr 까지 큰 영향을 주고 있다. 반면에 새로운 방법으로 측정한 결과는 전반적으로 여름철이나 겨울철 모두 440 - 490 m³/hr 정도로 일정한 분포를 하고 있으며, 측정당 4 회씩 실시한 누설률의 변화폭도 5 -10 m³/hr 정도로 매우 안정적인 것을 알 수 있다. 온도 변화에 대한 의존도는 완전히 배제할 수 있는 수준으로 낮출 수 있었다.

3.4 전반적인 누설률 경향

전반적인 누설률의 경향은 과거 방법이 평균 478.6 m³/hr 이고 300 - 560 m³/hr 정도로 분포하고 있으며, 새로운 방법은 평균 461.9 m³/hr 이고 400 - 500 m³/hr 정도로 분포하고 있다.

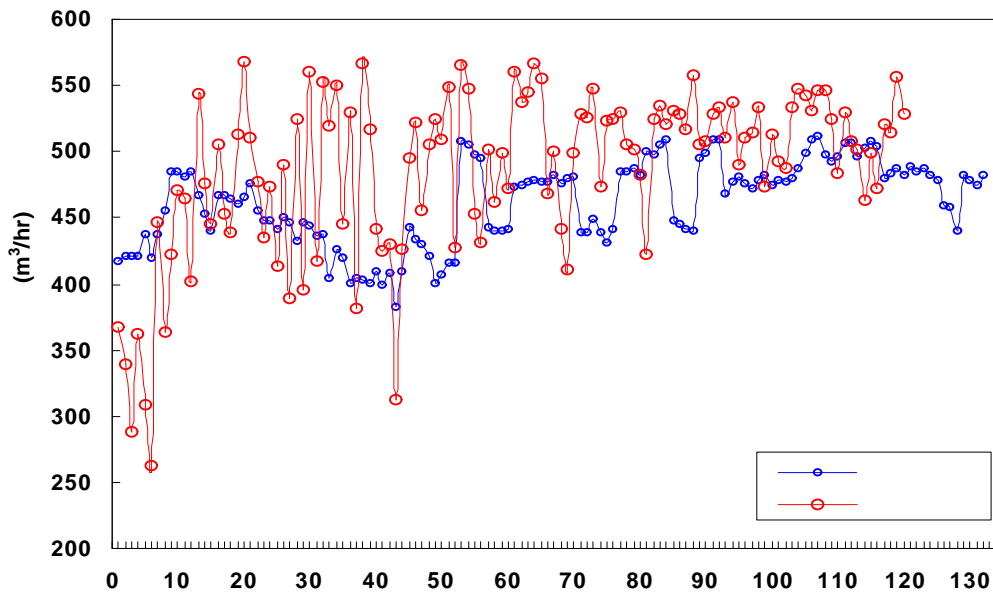


그림 6. 전반적인 누설률 경향

그림 6에서 보면, 기존의 방법에서는 측정 중에 대기압이 상승하거나 겨울철과 같이 외기의 낮은 온도의 공기유입으로 인해 누설률이 평균값 보다 높은 530 - 550 m³/hr 정도에 분포하고 있다. 반대로 대기압이 하강하거나 여름철과 같이 외기로부터 높은 온도의 공기가 유입될 경우는 평균값 보다 낮은 300 - 400 m³/hr 정도에 분포하고 있다. 이런 문제점 때문에 누설률 측정값의 분포영역이 넓고 불안정한 측정 결과를 얻을 수밖에 없었다. 새로운 방법

으로 측정하여 얻은 결과는, 측정 당시 건물의 기밀 여부에 따라 측정치의 평균값에 차이만 있을 뿐, 대기압의 의존도를 측정구간의 10 %에서 4 %로 줄였고, 온도에 영향 또한 0.01 °C 변화가 20 m³/hr를 변화시키던 것을 10 °C가 변해야 20 m³/hr 가 변하는 정도로 이 영향은 완전히 배제됐다고 할 수 있다. 이러한 문제점들을 해결하여서 전체적인 변화폭도 100 m³/hr 이내로 기존 측정값에 비해 상대적으로 매우 안정적이고, 측정 당 4회씩 실시한 누설률 또한 변화폭이 10 m³/hr 이하로 안정적인 결과를 얻을 수 있었다.

4.0 결론

원자로건물 누설률시험은 시운전 초기부터 '99년 7월까지 기존의 국부누설률 계산방법으로 실시를 했고, 그 이후로 현재까지는 독립 풍량조절장치를 사용하는 새로운 방법으로 시행해 오고 있다. 약 50여 차례에 걸쳐 누설률 시험을 수행한 결과, 기존 방법에 비하여 대기압 변동에 따른 측정값의 불확실성을 확실히 줄였고, 온도 영향의 의존도가 컸던 국부 누설률 계산식 대신 풍속 측정에 의한 누설률 계산 방식을 사용함으로써 여름, 겨울철 온도차에 따른 측정상의 문제점을 해결하였다. 앞으로 시험에 사용되는 대기압, 원자로실 압력, 온도 및 주입 풍량 등을 모두 자동계측 및 계산 방식으로 개선하여 시험의 신뢰성을 향상시킬 계획이다.

참고문헌

- [1] E.Simiu and R.H Scanlan, "Wind Effects on Structures", John Wiley & Sons, 1986.
- [2] "ASHRAE Fundamental-1981", chapter 14.
- [3] "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures", ANSI/ANS-A58.1, American National Standard Institute, 1982.
- [4] "Containment System Leakage Testing Requirements", ANSI/ANS-56.8, 1995.
- [5] 최영산, 김영기, 박승일, "하나로 원자로실의 누설률 측정방법에 관한 연구", KAERI-TR-1335/99