

압력격리밸브 누설시험 절차 및 방법 개선 방안

조종철, 조두연
한국원자력안전기술원
대전시 유성구 구성동 19

요 약

가동중 원자력 발전소들에서는 압력격리밸브들에 대한 기술지침서 감시시험요건과 가동중 시험 규제요건을 충족시키기 위하여 누설시험을 일정 주기로 수행하고 있다. 동 주기시험은 ASME B&PV Code Sec. XI IWV-3420 또는 ASME OM Code ISTC(Part 10) 4.2.2 절의 운전에 부합되는 방법과 절차에 따라 이루어지도록 규정되어 있다. 이러한 주기시험의 근본 목적과 시험방법 및 절차요건에 대한 기술적 근거의 이해는 동 시험활동의 성과를 높이는데 큰 도움이 될 것임에 틀림없다. 따라서, 본 논문에서는 압력격리 밸브들에 대한 누설 시험 목적 및 시험요건의 기술적 근거를 소개하였으며, 잠재적 문제점들을 도출하여 분석 검토하고 적절한 대처방안을 제시하였다.

1. 서 론

원자력발전소의 압력격리밸브(Pressure Isolation Valves : PIVs)는 고압의 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System : RCS)을 동 계통에 연결되어 있는 저압계통으로부터 격리시키기 위하여 설치되는 두개의 직렬 밸브들(출력운전 중에 정상적으로 닫힘상태 유지)로 정의된다. 동 PIVs 는 모든 RCS 저압계통 경계부들에 위치하여 원자로냉각재 압력경계(Reactor Coolant Pressure Boundary: RCPB) 내에 들어간다. RCPB 의 비정상 누설, 급속전파 파손 및 대형 파열에 대비한 독립적인 방어벽들인 이러한 압력격리 밸브들의 누설-기밀 건전성을 확인 유지 보장하는 것은 원자력발전소 안전 운영상 매우 중요한 일이므로 동 밸브들에 대한 주기적인 가동중 누설시험 활동이 필수적으로 요구된다. 캐나다 중수형(Canadian Deuterium Uranium : CANDU) 원자로를 채용하는 월성 원자력 발전소를 제외하고는 국내 모든 가압수형 경수로들(Pressurized Light Water Reactors : PWRs)에 대해서는 해당 발전소 운영기술지침서(Technical Specifications)에 누설시험요건, 운전제한조건(Limiting Conditions for Operation)과 함께 PIVs 의 전체 목록이 제시되어 있다. 그리고, 1995년에 발행된 과학기술처 고시 제 95-1 호 [1]에서 ASME OM Code 의 기준 및 지침[2-4]에 따라서 안전관련 펌프 및 밸브에 대한 가동중 시험을 실시하도록 요구하고 있다. 따라서, 현재 CANDU 원자로를 운영하는 월성 원자력 발전소들을 포함한 모든 국내 가동 원전들의 PIVs 에 대한 가동중 누설시험 활동이 시행되고 있다[5]. 그런데 비교적 긴 가동이력을 가진 원전들에서는 축적된 경험과 정보를 기초로 비교적 만족스러운 누설시험 절차를 수립하여 적용해 오고 있으나, 신규 도입 원전 및 CANDU 원전에 대해서는 경험의 부족과 관련 시험요건에 대한 명확한 이해의 부족으로 인하여 아직까지는 동 시험활동이 전반적으로 정상 궤도에 도달해 있지 않은 실정이다.

이러한 배경하에서 동 누설시험 활동의 성과를 보장하기 위해서는 시험 관계자들이 주기시험 이행의 기본 취지와 시험요건의 기술적 근거를 명확히 이해하는 것이 필수적인 것으로 사료되어 본 논문에서는 PIVs 에 대한 누설시험 목적 및 시험요건의 기술적 근거를 소개하고 잠재적 문제점들을 도출하여 분석 검토하였으며, 동 문제점들에 대한 적절한 대처방안을 제시하였다.

2. 누설허용기준 설정의 근거

원자로 일차냉각재의 고압안전주입, 저압안전주입, 잔열제거 및 축압기 계통들로의 과다누설은 다음과 같

은 안전성 문제들을 야기시킬 수 있기 때문에 누설이 제한되어야 한다.

- RCS로부터 저압계통으로의 누설이 감압계통의 유량방출 용량을 초과하게 되면 동 저압계통의 과압을 유발시킬 수 있음.
 - 감압밸브와 같은 장치들의 유량방출 용량이 보호계통으로의 유동 및 에너지의 예상유입근원들에 기초를 두고 있지만 고압과 저압 계통들을 분리하는 밸브들을 통한 과다누설이 과압의 원인이 될 수 있음. 따라서, 연결계통 (interfacing system)의 누설이 동 계통의 누설용량을 초과하여 증가하기 전에 밸브 열화를 확인하기 위한 누설시험의 시행은 필수적임.
 - 과압방지 누설제한을 위해서는 (1) 최대허용누설율이 감압밸브의 설계기준인 과압보호 계통 요건의 분석에서 밸브에 대하여 허용된 값을 초과해서는 안되며, (2) 누설원이 과압보호 분석에서 포함되지 않은 경우에는 허용누설율이 감압밸브의 용량초과 방지에 거의 영향을 주지 않을 정도로 미소하여야 함.
- PIV를 통한 확인누설의 허용치를 높이면 미소하지만 중요한 미확인 누설의 증가를 누설탐지 계통들로서 확인하는 것이 더욱 어려워 짐[6].
- 방사성 물질로 오염된 원자로냉각재의 누설이 폐기물정화계통의 처리용량을 초과할 수 있음.
- 사고조건 하에서는 미통제 핵분열 생성물 누출의 확률이 증가될 수 있음.

원전 정상운전 중의 PIV 누설허용치는 상기 안전성 문제들 중에서 맨 마지막을 제외한 처음 세 가지 안전성 문제점들을 감안하여 결정되었다 (현재 적용되고 있는 누설율과 관련한 잠재적 방사선 누출 평가를 위해서는 발전소 공정들과 격납 기구들의 고장 확률에 대한 해석이 필요함). 그러한 세가지 안전성 문제점들이 해소되는 범위에서 미국 원자력 사업자들의 오랜 원전운영경험과 축적된 관련 기술지식을 바탕으로 하여 초창기 기술지침서들에 명시되었던 1 gpm의 누설제한치의 적용성을 심층 조사 분석한 결과, 실제 적용상 어려움이 있을 뿐만 아니라 실효성이 그다지 크지 않다는 결론에 도달하게 됨에 따라 최근에 그 제한치가 완화되어 ASME OM Code Part 10(ISTC), 4.2.2.3의 규정과 같이 상향 조정되었으며, 현재 우리나라 및 미국 등의 국가들에서 적용되고 있다. 동 누설을 제한치 관련 규정(ASME OM Code ISTC, 4.2.2.3(e))은 다음과 같다.

특정밸브 또는 밸브조합에 대한 누설율 측정치를 사업자가 정한 허용가능 누설율과 비교해야 한다. 사업자가 허용누설율을 명시하지 않는 경우에는 다음 값들을 허용가능 최대누설율로 정한다.

(1) 물의 경우, 실제운전차압(기능차압)에서 $0.5D$ gpm 및 5 pgm 중에서 작은 값

(2) 공기의 경우, 실제운전차압에서 $7.5D$ Standard ft³/day

여기서, D =밸브 공칭 크기, in.

앞에서 거론된 안전성 문제들에 대한 분석결과는 다음과 같다.

- 5 gpm 이하의 누설율 범위에서는 연결계통들의 감압용량이 위협 받지 않는 것으로 입증되었음.
- 누설허용치는 밸브 크기에 비례하는 값으로 설정하든지 또는 실제운전차압 Δp 에서 모든 공칭 크기의 밸브들에 대하여 밸브 크기에 관계없이 최대 5 gpm으로 동일하게 설정되는 것이 타당함.
 - 누설 잠재성이 밸브 사이즈 (밀봉표면원주영역 면적)에 비례하기 때문에 누설허용치도 밸브 사이즈에 비례하여야 함.
 - 5 gpm의 최대누설허용치는 통상적으로 발전소 보수요원이 밸브 재생(재가공)을 위해 특별히 고안된 래핑 (lapping) 장비를 사용하면 달성될 수 있는 정도임.
 - 5 gpm 이상의 누설허용치가 과압방지 해석에서 고려되지 않은 경우에 5 gpm 이상의 과다 누설을 허용하게 되면, 저압 연결계통의 감압밸브가 동 계통의 압력한계를 벗어나지 않고 증가된 유량을 감당할 수 없을 뿐만 아니라, 현재 대부분의 기술지침서들[7-9]에서 1 gpm으로 제한되고 있는 일차계통으로부터의 미확인 누설탐지가 어려워지게 됨[6]. 또한, 이러한 과다누설은 일차냉각재로부터 비교적 오염 가능성이 적은 격납용기 외부의 발전소 계통들로의 핵분열 생성물 확산 제한에 제약요인이 될 수 있음.
- 특정 밸브들에 대한 누설율허용치의 상향조정은 과압방지 및 방사선처리용량에 대한 서류분석을 통하여 더 높은 누설율 제한치를 허용하여도 ASME B&PV Code Section III [2] 및 최종안전분석보고서 결론에 위배되지 않는다는 사실을 입증함으로써 정당화시킬 수 있는 경우에만 허용됨.
- PIV 누설 관련 방사선재해 문제는 방사선원으로부터 환경으로의 누출 잠재성에 대한 예비조사해석을 통하

여 다루어져야 함. 사고조건 하에서는 냉각재의 비방사능 값이 기술지침서 제한치를 크게 벗어날 수 있음.

3. 누설유동해석 모형

ASME OM ISTC (Part 10) 4.3.3 은 실제운전(기능) 압력이 작용할 때 시험시 보다 더 큰 힘으로 밸브 디스크를 시트면에 압착시켜 전체 누설채널개도를 감소시키게 되는 밸브 형식들에 대해서는 실제운전차압 보다 낮은 차압에서의 누설시험을 허용하고 있다. 시트 면 전체에 걸쳐 실제운전차압이 작용되는 게이트 밸브, 체크 밸브 및 글로브 밸브가 이러한 요건을 만족시키는 밸브 응용의 예들이다. 누설시험이 최대실제운전차압 보다 낮은 압력을 사용하여 이루어지는 경우에는 시험 누설치를 최대실제운전차압에 대하여 수정하여야 한다. 그러한 수정은 누설이 차압의 제곱근에 비례한다는 가정하에 시험차압과 실제운전차압간의 비와 시험매체에 적절한 계산에 의해 이루어진다[2-5]. 허용판정기준은 앞에서도 언급한 바 있듯이 ISTC 4.3.3(e) 규정에 의거하여 사업자가 명시하는 최대 누설율과 동 규정에 명시된 값들 중에서 선택될 수 있다. 본 논문에서는 물 또는 공기를 시험매체로 사용하는 두가지 경우들에 대하여 그러한 수정을 위한 해석 모형들의 적용성에 대하여 분석 검토하기로 한다.

• 가 정

해석을 용이하게 하기 위하여 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) 공기를 매체로 한 밸브누설 시험 시에 공기유동은 단열이다.
- (2) 밸브누설 유동면적과 압력손실 형상계수 K 는 일정하며 차압 ΔP 및 시험매체와 독립이다.
- (3) 역 유동누설시험이 허용되는 밸브들(ISTC 4.3.3 (b))에 대해서는 밸브누설 유동면적 및 역 유동방향으로의 K 값들이 실제운전유동방향에서의 값들 보다 크지 않다.
- (4) 물을 매체로 한 밸브누설시험에서는 하류압력이 하류 최고 온도에서의 포화압력 보다 충분히 높아 하류에서 순간증발(flashing)의 발생 가능성이 없다.

상기 가정들 중에서 마지막 4 번째 가정은 실제로 정당화되기 어렵다. 왜냐하면 실제 조건하에서는 누설 경로(유로)가 압력회복을 수반하는 경우에는 최소영역에서 국소 순간증발이 발생하기 때문이다. 실제로 그러한 순간증발로 인한 증기발생은 이상(two-phase) 유동손실로 인하여 누설율 측정을 방해하게 되며 증기상태로 이탈하게 되면 하류 누설유동측정을 부정확하게 만드는 주요인이 된다. 따라서, 순간증발이 누설유량에 미치는 영향이 무시될 정도라고 하는 가정이 더 현실적일 것이다. 그러나, 이러한 문제점은 실제 시험 시 반드시 확인 검토되어야 할 것이다.

• 층류유동 모형

밸브시트 원주면 둘레 전체에 걸쳐 분포된 미소한 환상의 틈새를 통하여 물이 누설되는 경우를 고려하면, 0.01mm 이하의 틈새를 갖는 크기 2"이상의 밸브들(시트너비는 제작자 규격)의 틈새 누설유동은 실제운전차압 $\Delta p=155.0$ bar에서 층류이다. 반면에 뒤에서 다시 상세히 논의되겠지만 시험매체가 증기인 경우의 누설공기유동은 실제로 적용되는 시험범위 전체에 걸쳐 난류 상태를 유지하게 된다. 그러므로 여기서는 시험매체가 물인 경우에 대해서만 층류누설유동 모형을 고려하여 누설유량을 계산해 보기로 한다. 층류에 대하여 레이놀즈 수 Re_{d_h} 및 수두 손실 h_f 와 관련 지운 마찰계수 f 의 정의식들을 다음과 같이 나타낼 수 있다[11].

$$f = \frac{64}{Re_{d_h}} = h_f \frac{d_h}{L} \frac{2g}{V^2} \quad (1)$$

여기서 d_h , L , g 및 V 는 각각 환형의 수력직경, 유로 길이, 중력가속도 및 유속을 나타낸다. 식 (1)의 Re_{d_h} , h_f 및 d_h 는 다음과 같이 표시된다[11].

$$Re_{d_h} = \frac{\rho V d_h}{\mu}, \quad h_f = \frac{\Delta p}{\rho g}, \quad d_h = 2\ell, \quad \ell = r_o - r_i \quad (2)$$

여기서, ρ , μ , Δp 및 ℓ 은 각각 유체밀도, 유체점성계수, 차압(압력강하) 및 틈새간격을 나타내며 r_o 와 r_i 는

판형 틈새의 외반경과 내반경을 각각 표시한다. 식 (1)~(2)를 정리하여 틈새유속 V 를 구하면 다음과 같다.

$$V = \frac{\ell^2}{16\mu L} \Delta P \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 미소 틈새유로 단면적 $A(=\pi(r_o^2 - r_i^2))$ 를 통한 유량 Q 를 구하면 다음과 같다.

$$Q = \pi(r_o^2 - r_i^2) \cdot V = \frac{\pi(r_o + r_i)\ell^3}{16L} \frac{\Delta P}{\mu} \quad (4)$$

따라서 틈새유동이 층류인 경우에는 그 누설율이 차압 Δp 에 비례하고 점성계수 μ 에 반비례하게 된다. 식 (4)로부터 알 수 있듯이 누설유로의 기하학적 특성과 유체의 μ 값이 변하지 않는다면 시험조건에서 측정된 누설유량 Q_i 와 실제운전조건(기능조건)에서의 수정 누설유량 Q_f 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$Q_f = Q_i \frac{\Delta P_f}{\Delta P_i} \quad (5)$$

여기서, 하첨자 f 와 i 는 각각 실제운전조건과 시험조건을 표시한다. 식 (5)로부터 기능조건에 대한 수정유량 Q_f 는 시험조건에서의 차압에 대한 실제운전조건하에서의 차압의 비에 단순 비례함을 알 수 있다.

• 난류유동 모형

앞에서 토의한 층류유동 모형과는 달리 누설이 스크래치(긁힌 홈집)를 통하여 발생하는 경우의 누설유량을 계산하기 위해서 누설경로인 스크래치를 밸브 시트를 횡단하는 미소 원관으로 모형화하기로 한다. 이러한 경우에는 넓은 차압(또는 유량) 범위에 걸쳐 누설유동이 난류일 가능성이 크다. 왜냐하면, 155.0 bar의 차압에서 1.0 gpm의 물이 누설되는데 필요한 스크래치의 단면 직경(홈집을 미소한 원관으로 가정)이 0.74 mm 정도이고 이때의 레이놀즈 수가 약 2×10^5 이 되며, 동일한 홈집크기와 누설유량 조건에서 누설유동이 층류가 되기 위해서는 차압이 약 0.07 bar 이하가 되어야 하기 때문이다.

시험매체가 물인 경우

누설유로의 형상을 직경이 d 인 미소 원관으로 모형화하면, 틈새유량 Q 는 다음과 같이 표시된다[11].

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2g\Delta p}{Kr_w}} = \frac{\sqrt{2g}}{4} \pi d^2 \sqrt{\frac{\Delta p}{Kr_w}} \quad (6)$$

여기서, r_w 은 물의 비중량, 하첨자 w 는 물을 나타낸다.

식 (6)으로부터 알 수 있듯이 누설유로의 기하학적 특성이 변하지 않고 압력손실계수 K 값이 시험 전후에 동일하게 유지된다면 시험조건에서 측정된 누설유량 Q_i 와 실제운전조건에서의 수정 누설유량 Q_f 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$Q_f = Q_i \sqrt{\frac{\Delta p_f}{\Delta p_i} \cdot \frac{\rho_{wf}}{\rho_{wf}}} \quad (7)$$

여기서, ρ_w 는 물의 밀도이다. 식 (7)로부터 수정유량 Q_f 는 시험조건에서의 차압에 대한 실제운전조건하에서의 차압의 비와 실제운전조건하에서의 유체밀도에 대한 시험조건에서의 유체밀도에 대한 비를 곱한 값의 제곱근에 비례하며, 유체밀도의 변동이 무시될 수 있는 경우에는 ASME OM Code ISTC 4.3.3에서 규정하는 시험 누설율의 실제운전누설율로의 수정요건과 일치하게 됨을 알 수 있다.

공기를 매체로 하는 경우

물 대신 공기를 매체로 사용하여 누설시험을 하는 경우, 밸브 상류의 공기압력 P_1 에 대한 하류의 공기압력 P_2 의 비 P_2/P_1 의 값이 0.5283 이상인 영역에서는 누설경로(일종의 노즐)를 통한 누설유동이 임계상태를

유지하게 된다. 임계유량은 상류유동 조건에 의해서만 결정되므로 하류압력을 조절하거나 측정시 정확도 확보를 위한 수고를 할 필요가 없어서 시험절차 뿐만 아니라 유량계산이 간단해지는 이점이 있다. 또한, 밸브 상류에서 유량측정을 하게 되면 하류에서의 유량측정시, 미지 유로를 통한 공기누출 때문에 발생할 수 있는 비보수적인 오차가 배제된다. 누설이 등엔트로피 노즐을 통과한다는 가정 하에, 유로(노즐 목) 면적 A 를 통한 공기의 체적 임계유량은 다음과 같이 표시될 수 있다[11].

$$Q_c = \frac{A P_1}{\rho_1 \sqrt{T_1}} \sqrt{\frac{k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (8)$$

여기서, 하첨자 c 는 임계를 나타내며, R, k, P_1, ρ_1, T_1 은 각각 공기의 비기체상수, 비열비, 상류공기의 압력, 밀도 및 온도이다. 이상기체 법칙 ($P_1 = \rho_1 R T_1$) 을 식 (8)에 적용하고, 누설유로 단면적 A , 중력가속도 g , 공기의 비열비 k 및 비기체상수 R 값을 대입하면 다음과 같은 간단한 관계가 도출된다.

$$Q_c = C_a \sqrt{\frac{T_1}{K}} \quad (9)$$

여기서, $C_a = A \sqrt{g k R \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}$ (10)

따라서, 공기의 체적누설유량 Q_c 는 상류온도 T_1 의 제곱근에 비례하므로 상류온도만 측정하면 공기누설유량 값을 얻을 수 있게 된다.

한편, 실제운전매체가 물인 경우에 공기를 시험매체로 하여 측정한 누설을 시험치로부터 실제운전조건에서의 물의 누설율을 구하기 위해서는 식 (6)과 식 (9)의 관계로부터 유도되는 다음 수정식을 이용하면 된다.

$$\frac{Q_w}{Q_a} = 3.4 \sqrt{\frac{\Delta p_f}{\rho_w T_w}} \quad (11)$$

여기서, 첨자 w, ta 및 la 는 각각 실제운전조건에서의 물, 시험조건에서의 공기 및 시험조건에서의 상류공기를 나타낸다. 상기 식 (11)의 우변 항은 실제 적용의 경우 대략 1.0 보다 약간 작은 값을 가지므로 공기를 매체로 한 누설시험 결과(임계유량)를 그대로 실제운전조건에서의 물의 누설율로 대치하는 것은 보수적이다.

4. 누설시험의 문제점 및 해결방안

앞의 3. 누설유동해석에서 언급된 바 있듯이 실제운전차압보다 낮은 압력차에서 실제운전조건에서의 유체와 동일하거나 다른 매체를 사용하는 누설시험에서 측정된 누설율은 적절한 관계식의 적용으로 실제운전조건에서의 누설율로 수정하게 된다. 이러한 과정을 거쳐 얻게 되는 밸브 누설율에는 몇 가지 문제점들로 인하여 오차가 발생할 수 있다. 여기서는 그러한 문제점들을 종합적으로 분석 검토하고 해결 또는 대처를 위한 적절한 방안을 다음과 같이 제시하였다.

- 실제운전차압 보다 낮은 압력차의 조건에서 물을 매체로 한 밸브 누설시험에서는 밸브 하류에서 누설수 일부가 순간증발(flashing) 또는 비등증발(boiling evaporation)될 수 있으므로 누설유량측정이 부정확해질 소지가 있다. 이러한 문제점으로 인한 측정오차 발생의 소지를 줄이기 위해서는 대기압 하에서 비이커 등 눈금을 매긴 용기에 누설수를 배수(drainage)시켜 누설율을 측정하는 방식의 시험절차는 밸브 하류의 배관과 유체의 온도가 비등점 미만인 경우로 국한되어야 한다. 그런데, 하류조건이 증기를 재응축시킬 정도로 충분히 아냉각 상태로 유지된다고 하더라도 밸브 시트에서의 국소 순간증발로 인하여 측정 누설율의 비보수적인 오차의 발생은 피하기 어렵다. 또한, 최소 누설영역 하류의 압력회복 현상으로 순간증발이 일어나게 되어 2상 유동 손실로 인한 유량감소도 초래된다. 따라서, 그러한 누설수의 비등증발 및 순간증발로 인한 오차발생 잠재성을 최소화시키기 위해서는 하류유체 및 기기온도가 밸브 하류의 압력에 비하여 충분한 여유를 가지고 아냉각된 상태로 유지되어야 한다. 그러나, 현실적으로는 국소 순간증발 억제에 요구되는 여유

도가 밸브 누설유로내의 압력회복의 함수이므로 임의로 명시하여 조절하는 것은 쉽지 않은 실정이다. 실제로 누설이 아냉각 상태로 일어나는 경우와 포화상태로의 방출로 일어나는 경우를 비교하여 순간증발에 의한 물의 누설유량의 감소를 계산한 결과, 최대 60% 이상의 오차가 발생하는 점을 고려할 때, 이러한 순간 증발로 인한 예상 측정오차가 상당히 심각할 수 있음을 알 수 있다.

- 누설이 벨브시트 원주면 둘레 전체에 걸쳐 분포되는 미소 환상 틈새를 통하여 총류를 이루는 경우에는 누설유량이 차압 ΔP 에 비례하게 되므로 ASME OM ISTC 4.3.3에서 규정하는 시험누설율의 실제운전누설율로의 수정 관계식(식(7) 참조)을 사용하게 되면 오차가 발생하게 된다. 그 오차는 시험차압 ΔP_t 에 대한 실제 운전차압 ΔP_f 의 비 $R_p (= \Delta P_f / \Delta P_t)$ 가 커질수록 그 상대오차는 $(1.0 - R_p^{-1/2}) \times 100(\%)$ 로 증가하게 될 것이다. 실제 시험[10]시 R_p 의 값이 8.0 정도까지 적용되고 있으므로 그 예상오차는 대단히 심각할 수 있다. ASME OM ISTC 4.3.3의 시험요건 적용대상 벨브들의 특성상 차압이 증가할수록 누설유량이 감소하게 되는 관계로 누설유동을 난류로 가정하여 동 요건에 따라 실제운전누설율을 구하여도 보수성이 확보될 수 있을 것으로 예상되지만, 가능한 비보수적 오차발생 요인을 제거하기 위해서는 시험 대 기능 차압의 비 R_p 가 1.0에 가까운 조건에서 누설시험을 수행하는 절차를 채용해야 할 것으로 판단된다.
- 실제운전매체인 물 대신 공기를 매체로 하여 시험하는 경우에는 시험 누설율치를 실제운전 누설율치로 수정하기 위하여 식 (11)을 적용하여야 하는데 식 (11)의 우변항이 실제의 조건에서 1.0보다 작은 값을 나타내게 되므로 시험치를 수정하지 않고 공기를 매체한 시험결과를 그대로 물을 매체로 한 실제운전조건에서의 누설율로 나타내는 것은 보수적이다. 그러나, 우변항의 크기가 1.0보다 훨씬 작은 값을 나타내게 되는 조건에서는 시험누설율을 실제운전누설율로 대체하게 되면 불필요한 벨브 보수 및 재시험의 부담이 가중될 수 있기 때문에 식 (11)의 적용이 바람직 할 수도 있다.
- 연속되는 가동중 누설시험들 사이에 열화되는 벨브가 누설제한치를 크게 초과할 수 있는 소지를 줄이기 위하여 최근의 계획누설시험 이후 측정누설율과 최대허용누설율 간의 여유가 급격히 감소되어서는 안된다 는 기준이 유지되는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 원자력발전소 압력격리벨브 누설시험 활동의 성과를 높이기 위한 최적의 누설시험 방법 채용과 절차 수립에 참고가 되도록 누설시험의 근본목적과 규제요건에 관한 기술적 근거를 소개하였으며, 누설유동의 해석모형들과 그 모형들의 누설시험에의 적용성을 분석 검토하고 누설시험 관련 잠재적 문제점을 도출하여 그 해결방안을 제시하였다. 본 논문에서 토의한 내용들을 기초로 하여 가동중인 발전소들에서 적용해 오고 있는 현행 누설시험 절차서들을 상세히 재검토한 후 미비점이 드러날 경우, 적절히 수정 보완하고 신규 발전소들에 대해서는 사전에 철저히 준비함으로써 충실한 내용의 절차서를 수립하는 것이 발전소 안전 운영에 큰 도움이 되리라고 사료된다.

6. 참고문헌

- [1] 과학기술처고시 제 95-1 호, 원자로시설의 가동중 검사 및 가동중 시험에 관한 규정
- [2] ASME B&PV (Boiler and Pressure Vessel) Code Section XI, IWV, 1986
- [3] ASME Operation and Maintenance Code ISTC (Part 10), 1990, 1994
- [4] NUREG-1482, Guidelines for Inservice Testing at Nuclear Power Plants, April 1995.
- [5] 고리 원전 1,2,3,4, 영광 원전 1,2,3,4, 월성 원전 1,2,3,4 및 월성 원전 1,2 호기 가동중 시험계획서
- [6] Regulatory Guide 1.45, Reactor Coolant Pressure Boundary Leakage Detection System, May 1973.
- [7] NUREG-1431, Standard Technical Specifications for Westinghouse Plants, US NRC, September 1992.
- [8] NUREG-1432, Standard Technical Specifications for Combustion Engineering Plants, US NRC, April 1995.
- [9] 고리 원전 1,2,3,4, 영광 원전 1,2,3,4, 월성 원전 1,2,3,4 및 월성 원전 1,2,3,4 호기 운영기술지침서
- [10] 고리 원전 1,2,3,4 및 월성 원전 1 호기 범주 A 및 A/C 안전등급 벨브 누설시험절차서
- [11] F. M. White, Fluid Mechanics, 2nd ed., McGRAW-HILL Book Company, 1986