

2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

영광5호기 안전주입탱크 배기시험 결과 평가

Evaluation of Safety Injection Tank Vent Tests for Yonggwang Nuclear Power Plant
Unit 5

박태철, 김길곤, 최해윤, 이광원, 노태선
한국전력기술(주)
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

발전소 정지운전시 안전주입탱크는 원자로냉각재계통으로 불필요한 냉각수 방출을 방지하기 위하여 질소가스를 수동으로 배기한다. 안전주입탱크의 배기능력 및 배기 유로 확보를 검증하기 위하여 안전주입탱크 배기시험을 수행하며 영광5호기의 경우 주어진 허용기준을 만족하지 못하였다. 이에 대한 원인 분석을 위하여 참조 발전소와의 설계변경사항을 검토하였고, 아울러 탱크로부터의 배기 임계유량, 교축직경 및 배기시간에 근거한 간단한 배기시험 평가모델을 도입하여 배기시험 결과를 분석하여 불만족의 주요 원인을 도출하였다. 또한, 탱크로부터의 배기과정뿐만 아니라 연결된 배기계통 내에서의 배기과정도 모사 가능한 SITVENT 코드를 이용하여 안전주입탱크에 연결된 배기계통을 통한 배기과정을 실제적으로 평가하였고 배기시험 평가모델의 계산결과와 비교 평가하여 배기과정의 주요 영향인자를 도출하였다. 운전상의 절차 및 배기시험 현상에 대한 평가 결과를 근거로 하여 허용기준을 개정하였고 이에 대한 적절성을 확인하였다.

Abstract

N_2 gas is vented from the safety injection tanks (SITs) manually to prevent an unnecessary discharge of SIT inventory into the reactor coolant system (RCS) during plant shutdown. The SIT vent test is performed to verify the vent flow path of N_2 gas and vent capability of SITs during plant start-up tests. In Yonggwang Nuclear Power Plant Unit 5, the test results did not meet the acceptance criteria. In order to find out the reason, the test results are evaluated using a simple vent test evaluation model based on critical flow rate, throat diameter and vent duration for venting

process from a tank. In addition, the venting process from the specific vent system connected to SIT is evaluated using the SITVENT code and the evaluation results are compared with those of the simple vent test evaluation model. From this comparison, the dominant factors of venting process are identified. The acceptance criteria are revised, and the adequacy of the revised acceptance criteria is confirmed based on the procedures of plant operations and the test evaluations.

1. 서론

안전주입탱크는 자체의 방출배관이 안전주입배관에 연결되어 원자로냉각재 계통 저온관을 통해 대형냉각재사고시 원자로냉각재계통에 냉각수를 주입하는 역할을 하며 하부는 냉각수로, 상부는 질소가스로 가압되어 있다. 정상 운전 중 각각의 안전주입탱크는 직렬로 연결된 두개의 역류방지밸브에 의해 원자로냉각재계통과 격리되어 있다(그림 1 참조). 발전소 정지운전시 안전주입탱크는 원자로냉각재계통으로 불필요한 냉각수 방출을 방지하기 위하여 질소가스를 수동으로 배기한다. 따라서 안전주입탱크의 배기계통은 원자로냉각재계통의 압력에 따라 적절히 감압 할 수 있도록 질소가스를 42.9 kg/cm^2 (610 psig)에서 28.1 kg/cm^2 (400 psig)까지 배기시킬 수 있도록 배기밸브의 용량을 300 scfm으로 결정하였으며 배관의 크기는 Crane Technical Report^[1]를 참조하여 1 인치 배관으로 결정하였다.

안전주입탱크는 현장 설치 후 시운전기간 동안에 배기유로의 형성을 확인하기 위하여 안전주입탱크의 배기 시험을 수행한다. 안전주입탱크 배기 시험의 허용기준은 초기압력 14.1 kg/cm^2 (200 psig)에서 5분 내에 10.5 kg/cm^2 (150 psig)로 감압이 가능해야 하며 이 허용기준은 안전성 관점보다는 배기운전의 운전성을 고려하여 선행호기부터 사용되고 있는 것이다.

참조발전소인 울진3,4호기의 안전주입탱크 배기시험에서 초기압력 14.1 kg/cm^2 (200 psig)에서 5분 동안 감압시킨 결과 허용기준인 10.5 kg/cm^2 (150 psig)를 초과하여 8.55 kg/cm^2 (121.6 psig) 까지 도달하여 허용기준을 충분히 만족하였으나 영광 5호기 안전주입탱크 배기시험에서는 네 개의 탱크가 모두 초기압력 14.1 kg/cm^2 (200 psig)에서 5분 동안 감압시킨 결과 12.75 kg/cm^2 (181.3 psig)에 도달하여 허용기준을 만족하지 못하는 현상이 발생하였다. 울진3,4호기 대비 주요 차이점은 배기밸브 전단에 배기밸브의 보수를 위하여 팩크리스(Packless) 밸브가 추가된 것과 배기밸브의 공급자가 변경된 것이었다. 각 밸브 공급자 도면을 조사한 결과, 팩크리스 밸브의 유로 제한은 아주 미미하나(최소직경=0.9 인치 정도) 영광5호기 배기밸브의 유로제한은 아주 큰 것(최소직경 = 0.6 인치 정도)으로 나타나 감압율이 낮은 이유가 배기밸브의 공급자 변경에 기인한 것으로 추정되었다.

본 논문에서는 상기의 현안사항에 대한 기술적 평가를 위해 간단한 배기시험 평가모델을 도입하여 주요 배기시험 결과를 분석하고 실제 배기시스템의 질소가스 배기율 및 감압시간을 정량적으로 평가하기 위해 SITVENT 코드를 이용한 계산 결과와 비교 분석하고자 한다. 이러한 배기시험 결과에 대한 비교 평가를 통해 기존의 허용조건을 완화한 새로운 허용기준을 제안하고 이에 대한 타당성을 입증하고자 한다.

2. 본 론

영광5호기 안전주입탱크의 배기시험 결과를 평가하기 위하여 간단한 질소가스 배기율 및 감압시간 평가모델을 도입하여 안전주입탱크 배기시험의 주요 영향인자를 평가하고 실제 배기시스템의 질소가스 배기율 및 감압시간을 정량적으로 평가하기 위하여 SITVENT 코드를 이용한 비교 평가를 수행한다.

2.1. 배기율 및 감압시간 평가모델^{[2],[3]}

안전주입탱크를 통한 질소가스 배기를 이론적으로 다루기 위해 단순한 탱크의 물리적 모델(그림 2 참조)을 도입하였다. 기본적인 가정사항으로 탱크 배기 노즐과 탱크내 정체상태량 위치까지 높이 차는 무시할 정도이고 감압과정은 단열/가역과정 또는 등온과정이 라고 가정하고 질소가스는 이상기체 법칙을 따른다고 가정한다.

베르누이 방정식으로부터 노즐을 통한 배기유량은 다음과 같다. 즉,

$$W_o^2 = 2\rho_o^2 A_o^2 \int_{p_i}^{p_o} \frac{dp}{\rho(p)} \quad (1)$$

이고, 단열가역과정을 따르는 이상기체는 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\frac{T}{T_i} = \left(\frac{p}{p_i} \right)^{\left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)} \quad (2)$$

$$\frac{\rho_i}{\rho} = \left(\frac{p_i}{p} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (3)$$

또한, 등온과정을 따르는 이상기체는 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$\frac{\rho_i}{\rho} = \frac{p_i}{p} \quad (4)$$

배기 유량을 식 (1)에서 우변의 적분항을 전개하여 구한 후, 단열 가역 과정 및 등온과정의 노즐을 통과하는 이상기체 모델에서 아래의 임계유속 조건을 적용하여 임계 유량을 구한다.

단열과정 :

$$\frac{p_o}{p_i} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (5)$$

등온과정 :

$$\frac{p_o}{p_i} = e^{-\frac{1}{2}}$$

따라서 임계 유량은

$$W_o = A_o \sqrt{2 \rho_i p_i g_c} \psi_{\max} \quad (6)$$

$$\text{여기서, 단열과정의 경우 } \psi_{\max} = \sqrt{\frac{\gamma}{2} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}}} \text{ 이고} \quad (7)$$

$$\text{등온과정의 경우 } \psi_{\max} = e^{-\frac{1}{2}} \sqrt{|\ln(e^{-\frac{1}{2}})|} \text{ 이다.}$$

식 (6)을 식 (2), (3) 을 이용하여 체적유량, Q_o , 으로 변환하면 다음과 같은 식이 된다.^{[3] [4]}

$$Q_o = \frac{W_o}{\rho_o} = A_o v_o = A_o \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma+1} R T_i g_c} \quad (8)$$

질량보존 방정식을 이용하여 감압율을 구하면,

$$\frac{d}{dt}(\rho_i V_i) = -W_o \quad (9)$$

이 되고 이것을 이상기체 법칙을 이용하여 압력에 대한 미분방정식으로 고치고 이를 단열과정보다 방출유량이 많이 나오는 등온과정을 가정하여 정리하면,

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{p}{\tau^*} \quad (10)$$

$$\text{여기서 } \tau^* = \frac{V_i}{A_o \sqrt{2 R T_i g_c} \psi_{\max}} \text{ 이다.}$$

식 (10)을 적분하면,

$$p(t) = p(0) e^{-t/\tau^*} \quad (11)$$

을 얻는다.

만약 초기압력과 최종압력, 그리고 감압시간을 알 때 임계유속이 형성되는 교축면적 (throat area), A_o 는,

$$A_o = \frac{V_i \ln\left(\frac{p_o}{p_i}\right)}{\sqrt{2 R T_i g_c} \psi_{\max} \Delta t} \quad (12)$$

이다. 한편, 식(12)로 부터 주어진 교축면적을 통해 배기되는 감압시간은,

$$\Delta t = \frac{V_i \ln\left(\frac{p_0}{p_t}\right)}{\sqrt{2RT_i g_c \phi_{\max}} A_o} \quad (13)$$

으로 구해진다.

2.2 SITVENT코드의 배기모델

가. 배기 모델 개요

SITVENT 코드는 안전주입탱크 배기능력을 평가하고 배기관 크기를 평가하기 위한 코드이며 발전소 건설 후 시운전시험의 일부인 안전주입탱크 배기시험 허용기준을 산정하기 위해서도 사용된다. SITVENT 코드는 배기관을 통한 탱크내 질소가스 질량이 감소됨으로써 배기가 이루어지는 것으로 해석하며, 배기관 직경, 배기관 저항, 탱크내 질소가스 체적과 열전달 면적 등의 자료를 입력하여 과도현상을 분석하며 각 계산시간 구간에서 질소가스 방출량과 새로운 과도상태 변수 (압력과 온도)를 계산하기 위하여 일련의 방정식들이 사용된다.

SITVENT 코드는 질소가스를 포함하는 부피가 일정한 탱크의 배기에 필요한 시간을 계산하며 계산 구간에서 배기관을 통하여 배기되는 질량을 계산함으로써 배기과정이 이루어진다. 배기관에서의 배기과정은 단열마찰저항과 등엔트로피과정으로 묘사되며 이것은 탱크내의 과도상태를 기술하는 세 가지 과정 즉, 등온, 단열, 열전달과정과 함께 조합을 이루어 배기관 단열마찰저항을 갖는 탱크 등온과정(Process 1), 배기관 단열마찰저항을 갖는 탱크 단열과정(Process 2), 배기관 등엔트로피과정을 갖는 탱크 등온과정(Process 3), 배기관 등엔트로피과정을 갖는 탱크 단열과정(Process 4), 배기관 단열마찰저항을 갖는 탱크와 질소가스간 열전달과정(Process 5) 및 배기관 등엔트로피과정을 갖는 탱크와 질소가스간 열전달과정(Process 6)의 여섯 가지 배기과정으로 구성되어있다.

배기과정 중 배기관 단열마찰저항을 갖는 탱크 등온과정과 배기관 등엔트로피과정을 갖는 탱크 등온과정은 완전 열전달을 가정하며, 배기관 단열마찰저항을 갖는 탱크 단열과정과 배기관 등엔트로피과정을 갖는 탱크 단열과정은 주위 환경으로부터 탱크내 질소가스로 열전달을 가정하지 않는다. 배기과정 배기관 단열마찰저항을 갖는 탱크와 질소가스간 열전달과정 및 배기관 등엔트로피과정을 갖는 탱크와 질소가스간 열전달과정에서 주위 환경으로부터 열전달을 계산하여 각 계산구간에서 탱크내 질소가스 압력과 온도를 계산한다.

나. 계산 방정식^[4]

초기 조건에서 가스 질량은 다음 식에 의하여 계산된다.

$$m = \frac{P \times V \times 144}{R \times T} \quad (14)$$

m (lbm) = 탱크 내 가스 질량
R = 이상기체상수/분자량 (lbf-ft/lbm- R)
P = 가스 압력 (psia)
T = 가스 온도 (R)
144 = 변환 상수 (144 in²/ft²)
V = 가스체적 (ft³)

배기 시작 전에 온도 변화로 인한 탱크내 가스 압력은 다음 식에 의하여 계산된다.

$$P_1 = \frac{P \times T_1}{T} \quad (15)$$

P₁ = 새로운 온도 조건(T₁)에서 가스 압력 (psia)
P = 초기 가스 압력 (psia)
T₁ = 변경된 가스 온도 (R)
T = 초기 가스 온도 (R)

만약 P₁이 탱크 가스 방출 밸브 설정치 이상이면, 탱크내 질량은 방출되고 가스 방출밸브 설정치가 새로운 압력 P로 되며 이를 근거로 새로운 가스 질량이 식 (14)에 의해 계산된다. 또한, 가스 비체적은 다음 식으로 계산된다.

$$\bar{v} \left(\frac{ft^3}{lbm} \right) = \frac{R \times T}{P \times 144} \quad (16)$$

단열 마찰 배기 경로를 통한 가스 유량은 다음 방정식으로 계산된다.

$$w \text{ (lbm/ sec)} = 0.525 \times Y \times d^2 \times \sqrt{\frac{\Delta P \times P_1}{K \times \bar{v}}} \quad (17)$$

Y = Net Expansion Factor
d = 배기관 내경 (inches)
ΔP = 임계 압력비
K = 배기 경로의 저항계수

계산 시간 구간 중에 탱크내에 남아 있는 가스 량은 총 탱크내 가스 질량에서 계산 시간 구간에서 방출된 가스 량을 빼면 얻어진다.

$$m_1 = m - (w \times Time) \quad (18)$$

새로 계산된 탱크내 가스 질량에 근거한 탱크내 압력은 등온과정의 경우

$$P_1 = \frac{m_1 \times R \times T_1}{V \times 144} \quad (19-1)$$

로 주어지고 T₁은 일정하다.

단열과정의 경우 탱크내 압력은

$$P_1 = P \times \left(\frac{m_1}{m}\right)^\gamma \quad (19-2)$$

로 계산되고, 새로운 압력에서 온도는 다음 식과 같이 계산된다.

$$T_1 = T \left(\frac{P_1}{P}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (20)$$

- T_1 = 배기후 탱크내 가스 온도 (R)
- T = 배기전 탱크내 가스 온도 (R)
- P_1 = 배기후 탱크내 가스 압력 (psia)
- P = 방출전 탱크내 가스 압력 (psia)
- γ = 가스 비열비 (C_p/C_v)

주위 환경으로부터 탱크내로 열이 전달되는 배기과정에 대하여 압력과 온도는 다음과 같이 계산된다. 탱크의 열용량은 가스의 열용량보다 훨씬 크다. 가스 배기 중에는 탱크 벽 온도는 일정하다고 가정한다. 탱크 벽으로부터 가스로의 전달량은

$$q = h \times A \times (T_A - T_G) \quad (21)$$

- h = 열전달계수 (BTU/sec-ft²- R)
- A = 가스와 접촉되는 탱크 표면적 (ft²)
- T_A = 탱크 내벽 온도 (R) (배기 시작점에서 대기 온도와 동일하게 가정됨)
- T_G = 열전달 시작점에서 가스 온도 (R)

이며 가스 내에서의 열 전송량은

$$\text{또한, } q = \frac{m \times c_p \times (T_{GF} - T_G)}{\text{TIME}} \quad (22)$$

- m = 탱크내 가스 질량 (lbm)
- c_p = 가스의 비열 (BTU/lbm- R)
- TIME = 계산구간 (seconds)
- T_G = 열전달 계산 구간 시작점에서 가스 온도 (R)
- T_{GF} = 열전달 계산 구간 종점에서 가스 온도 (R)

로 주어진다.

상기의 두 식을 사용하여 T_{GF} 을 계산하면 다음과 같다.

$$T_{GF} = T_G + \frac{\text{TIME} \times h \times A \times (T_A - T_G)}{m \times c_p} \quad (23)$$

새로운 가스 온도 (T_{GF})에 대응하는 새로운 탱크 가스 압력은 식 (15)에 의하여 계산된다. 다음 계산 구간을 위하여 T_1 과 P_1 값이 재설정된다. 각 계산 구간에서 압력비 (P_1/P_B) / P_1 이 계산되고 이것이 주어진 임계압력비(ΔP) 보다 작으면 Net Expansion Factor Y 및 임계압력비를 다시 계산한다. 만약 기울기(SLOPE)가 0.0 과 같거나 크면 기울기를 아래와 같이 계산하고 0.0 보다 작으면 바로 Y 및 ΔP 값을 계산한다.

$$\text{SLOPE} = (Y-1)/\Delta P \quad (24)$$

새로 계산되는 Y 값은

$$Y = \text{SLOPE} \times \Delta P + 1.0 \quad (25)$$

이며 새로 결정되는 임계압력비 ΔP 는

$$\Delta P = (P_1 - P_B) / P_1 \quad (26)$$

으로 정해진다.

식 (17)에 의하여 배기되는 가스 질량이 계산되고 다음 계산구간에서 재 계산된다. 다음 시간 구간으로 시간을 증가시키고 계산하고자 하는 압력까지 식 (16)부터 위의 계산 과정이 반복된다.

배기과정 Process (3), (4), 와 (6)에 대한 배기식은 다음과 같다. 등엔트로피 배기과정에 배기가스 유량은 다음 방정식으로부터 계산된다.

$$w = \frac{3.1416 \times \left(\frac{d}{24}\right)^2 \times P \times 144 \times M}{\left(1 + \frac{(\gamma-1) \times M^2}{2}\right)^{\frac{(\gamma+1)}{(2\gamma-2)}}} \times \left(\frac{\gamma \times 32.174}{R \times T}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

$$\text{여기서 } M = \sqrt{\left(\left(\frac{P}{P_B}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1\right) \times \frac{2}{\gamma-1}}$$

M의 계산 결과 $M > 1$ 이면 최대 유속으로 임계 유속인 $M=1$ 로 가정한다. 여기서 M은 가스의 Mach Number이다.

현재 시간구간의 탱크 가스 질량은 식 (18)에 의하여 계산되며 현재 시간구간의 탱크 가스 압력은 식 (19-1)과 (19-2)에 의하여 계산된다. 배기과정 Process (4)와 (5)에 대한 현재 시간구간의 탱크 가스 온도는 식 (19)에 의하여 계산되고 배기과정 (6)에서는 주위 환경으로부터 열이 탱크내로 전달되고 온도와 압력은 식 (23)과 (15)에 의하여 계산된다. 시간 구간만큼 시간을 증가시키고 원하는 탱크가스 압력에 도달할 때까지 식 (27)으로부터 상기 계산과정을 반복한다. 이 계산과정의 개략적인 계산 흐름도는 그림 3과 같다.

배기관의 마찰저항으로 인하여 비가역성을 무시할 수 없으므로 등엔트로피과정으로 가정하는 것은 비현실적으로 판단되므로 제외시키고 또한, 배기시험 조건이 탱크내의 온도와 탱크 외부의 온도가 거의 동일하게 유지되므로 외부공기와 탱크 내부 가스와의 열전달과정은 무시할 정도라고 판단되어 본 논문에서는 SITVENT가 수행할 수 있는 6가지 과정중 배기관 단열마찰저항을 갖는 탱크 등온과정(Process 1), 배기관 단열마찰저항을 갖는 탱크 단열과정(Process 2)에 대해서만 평가하도록 한다.

2.3 시험결과 평가

울진3,4호기 및 영광5,6호기의 안전주입탱크 배기시험 허용기준은 초기압력 14.1 kg/cm² (200 psig)에서 5분 후에 10.5 kg/cm² (150 psig) 까지 감압되어야 하는 것으로

동일하나 안전주입탱크 배기시험 결과는 영광5호기의 경우 초기압력 14.1 kg/cm² (200 psig)에서 5분 후에 12.75 kg/cm² (181.3 psig) 까지 감압되었고, 울진3,4호기의 경우 초기압력 14.1 kg/cm² (200 psig)에서 5분 후에 8.55 kg/cm² (121.6 psig) 까지 감압되었다. 상기 두 시험의 경우 공통되는 조건으로 시험온도는 15°C(59°F, 519°R), 질소체적은 3694 gallon (493.8 ft³), 질소에 대한 R은 55.2 ft-lbf/lbm-°R, γ 는 1.4, g_c 는 32.174 ft-lbm/lbf-sec²를 사용하였다.

상기 시험조건 및 결과를 토대로 먼저 배기밸브의 교축면적을 간단한 배기시험 평가모델로부터 구한 식 (12)을 이용하여 구한 뒤 이를 교축직경으로 환산한 결과는 아래 표와 같다.

표 1. 간단한 배기시험 평가모델에 근거한 교축면적 및 직경

	교축 면적 (in ²)	교축 직경(in)
영광5호기	0.04019	0.22621
울진3호기	0.16652	0.46046
허용 기준	0.13182	0.40968

이러한 계산결과로부터 영광5호기에 공급된 배기밸브의 유로 제한이 허용기준 산출 시에 고려된 유로 제한보다 심하여 감압율이 허용기준을 만족하지 못한 것을 알 수 있다. 또한, 발전소 정지시 배기운전에서 42.9 kg/cm² (610 psig)에서 28.1 kg/cm²(400 psig) 까지 감압시키는 데 소요되는 시간은 식 (13)을 사용하여 구할 수 있으며 계산 결과는 질소체적이 493.8 ft³ 인 경우 감압소요시간은 약 18분으로 계산되었다.

상기의 배기시험 평가모델은 탱크로부터의 배기과정만을 모사하기 때문에 탱크에 연결된 배기유로와 각종 밸브로 구성된 배기계통을 통한 배기과정을 모사할 수 없다. 따라서, 배기계통을 통한 배기과정을 모사할 수 있는 SITVENT 코드를 통해 실제적인 배기능력을 평가하였다. 먼저 영광 5호기 시험조건 및 결과를 토대로 다양한 민감도 분석을 통해 배기밸브의 적절한 교축 직경 및 배기 경로의 저항 계수(K)를 찾은 결과 교축 직경은 0.55 인치, 배기경로의 저항 계수를 40 으로 산정하는 것이 가장 적절한 것으로 평가되었다. 이를 이용하여 영광5호기 배기시험 결과 및 정상 배기운전시의 실제 압력강하 값을 대상으로 다음 표와 같은 결과를 얻었다.

표 2. SITVENT 코드를 이용하여 산정한 압력강하시 필요한 시간

압력강하 목표치	교축 직경	등온과정(초)	단열과정(초)
14.1 kg/cm ² →12.75 kg/cm ² (200psig→181.3psig)	0.55 inch	300	220
42.9 kg/cm ² →28.1 kg/cm ² (610psig→400psig)	0.55 inch	963	730

배기시험 조건은 주변온도와 탱크 내부온도가 거의 같은 온도로 유지되기 때문에 탱크 내 배기과정은 열전달과정보다는 등온과정과 단열과정에 가깝고 실제로는 이 두 과정 사이에 존재할 것으로 예상된다. 단순한 배기시험 평가모델 계산 결과와 SITVENT 코드 계산 결과 중 단열과정과 등온과정으로 나누어 비교한 결과가 그림 4에 나타나 있다. 그림 4에 의하면 SITVENT 코드의 결과와 평가모델에 의한 방법이 많은 감압율의 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 SITVENT 코드의 경우 탱크내 배기과정 뿐만 아니라 배기계통을 통한 배기과정을 고려하여 배관의 저항계수를 40으로 산정하였는데 반해 간단한 배기시험 평가모델의 경우에는 이를 무시하였기 때문에 상당히 빠른 감압율이 나타난 것으로 판단된다. 실제 배기계통을 통한 배기과정은 SITVENT 코드로 평가되어야 실제에 가깝게 평가됨을 알 수 있다.

상기한 계산결과로부터 영광5호기 배기시험 허용기준 불만족의 주요원인은 배기밸브 공급자가 주어진 최대차압 설계요건을 만족시키면서 상당한 여유를 가지고 만족시킬 경우에는 주어진 유량조건을 상대적으로 큰 밸브계수(Cv) 값으로 만족시키게 되고 여유 없이 만족시키는 경우에는 상대적으로 작은 밸브계수로 만족시키게 된다. 이에 따라 같은 밸브설계 요건을 만족시켜도 밸브공급자에 따라 교축직경이 서로 다른 값을 가지게 된다.

따라서 영광5,6호기 밸브공급자는 울진3,4호기 밸브공급자보다 작은 교축직경을 가지는 배기밸브를 공급하여서 배기밸브 허용기준을 만족하지 못한 것으로 판단된다.

현재 영광5호기에 공급된 배기 밸브 특성에 맞는 배기밸브 허용기준을 도출하기 위하여 실제 배기 운전시 안전주입탱크의 압력을 30분 이내에 42.9 kg/cm² (610 psig)에서 28.1 kg/cm²(400 psig)까지 감압할 수 있고 일반적인 배기밸브 공급자도 공급 가능한 배기밸브를 위한 배기시험 허용기준으로 일반화하여 시험압력 14.1 kg/cm² (200 psig)에서 5분 이내에 13.0 kg/cm² (185 psig)까지 감압하는 것으로 수정하였다. 영광6호기 배기시험에서는 개정된 허용기준을 만족함으로써 새로운 허용기준의 적합성은 입증되었다고 판단된다.

3. 결론

영광5호기 안전주입탱크 질소가스 배기시험에서 네 개 탱크 모두 배기시험 허용기준

을 만족하지 못하여 이에 대한 원인분석을 위해 참조발전소 대비 배기계통의 설계차이점을 검토하였고 아울러 계산상 보수성을 위해 탱크로부터 배기과정을 모사할 수 있는 간단한 배기시험 평가모델을 개발하여 배기시험 결과로부터 불만족 원인을 규명하였다. 아울러 실제 배기계통을 통한 배기과정을 SITVENT 코드로 모사하여 간단한 배기시험 평가모델의 계산결과와 비교하여 안전주입탱크 배기과정의 주요 영향인자를 도출하였다.

이러한 비교평가를 통해 영광5호기 배기시험 허용기준의 불만족 원인은 배기밸브 공급자의 변경으로 배기밸브의 교축직경이 참조발전소 대비 줄어들게 되어 허용기준을 불만족하게 된 것으로 판명되었다. 따라서 실제 배기운전시 목표 감압시간을 고려하고 다양한 배기밸브 공급자 사양에서도 적합한 배기시험 허용기준을 새로 설정하였고 영광6호기 배기시험에서는 모두 허용기준을 만족하여 새로운 허용기준의 적합성이 입증되었다.

참고문헌

- 1] Flow of Fluids through Valves, Fittings, and Pipe, Crane Technical Paper No. 410, 1988.
- 2] E. E. Lewis, "Nuclear Power Reactor Safety", A Wiley-Interscience Publication, 1982.
- 3] Gordon J. Van Wylen, Richard E. Sonntag, "Fundamentals of Thermodynamics", 1985.
- 4] G.G.Kim, "Software Verification and Validation Report, 00000-SP-VV-510-02", February 2001.

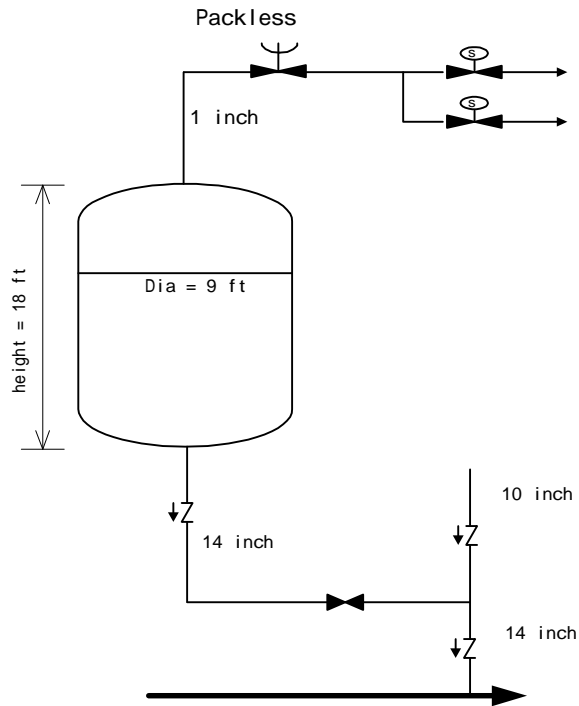


그림 1. 안전주입탱크 부계통 개략도

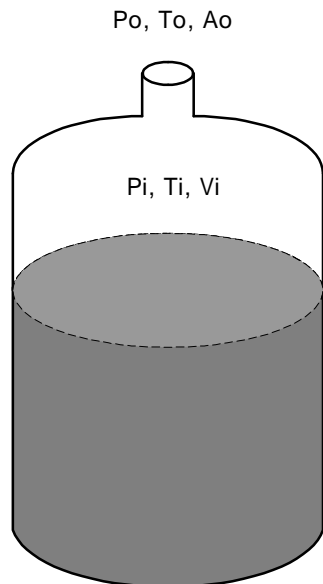


그림 2 안전주입탱크 배기시험 평가 모델

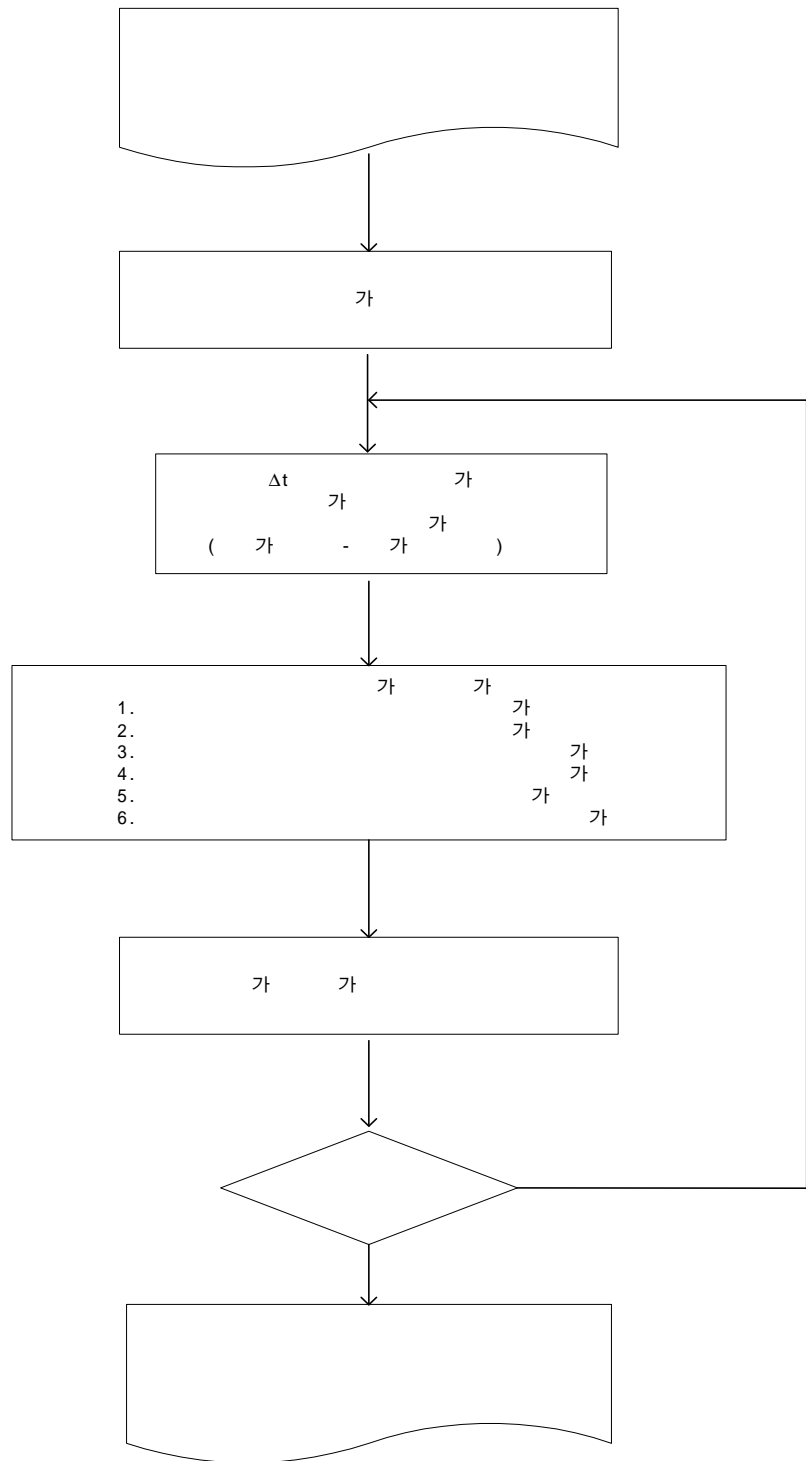


그림 3. SITVENT 코드 개발 흐름도

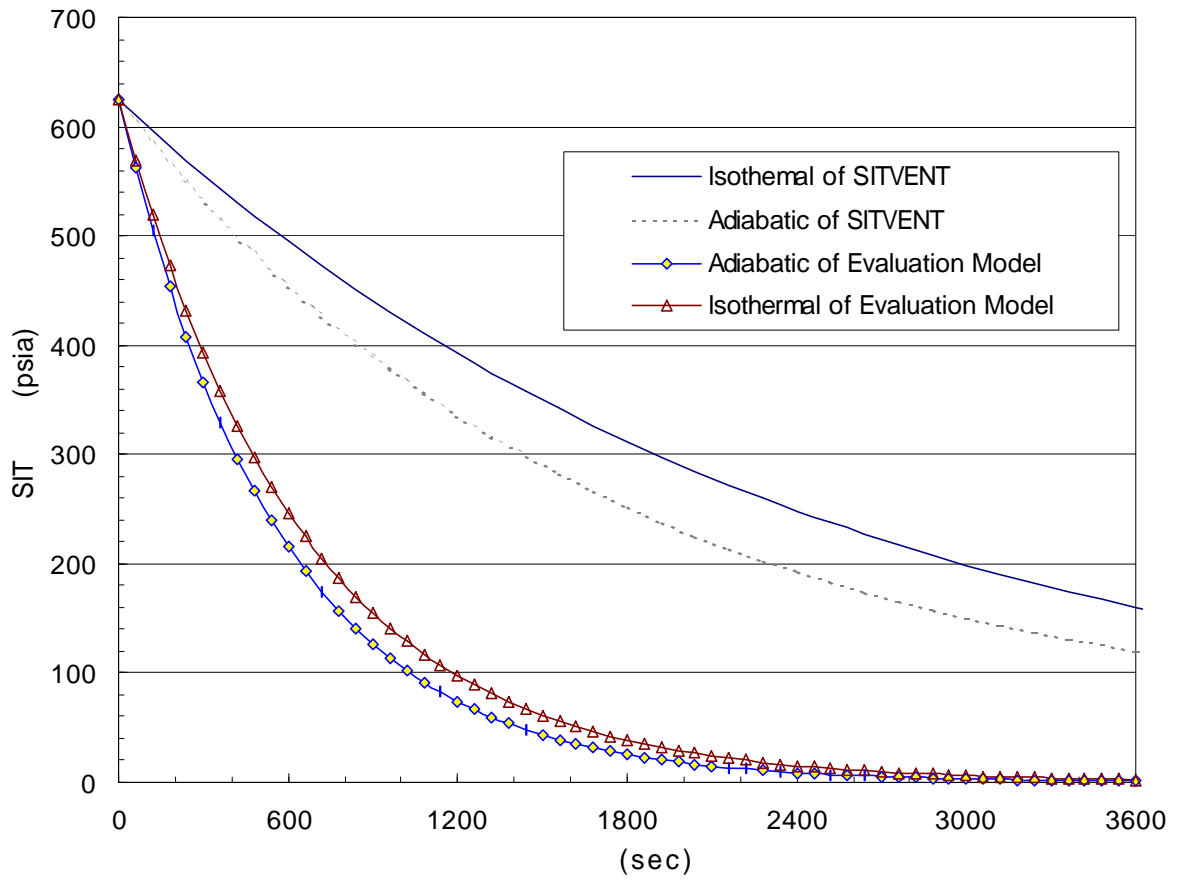


그림 4. SITVENT 코드와 평가모델의 시간별 압력 강하