

영광 5,6호기 정지냉각계통 흡입격리밸브의
압력잠김 및 열적고착 설계현안 고찰

Identification of Pressure Locking and Thermal Binding Design
Issues on Shutdown Cooling System Suction Isolation Valves
for Yonggwang Nuclear Units 5&6

오종필, 김태한, 이중섭, 이광원, 노태선
한국전력기술(주)
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

영광 5,6호기 정지냉각계통 흡입배관 격리밸브들은 정상운전시 밸브의 허용누설을 고려하여 압력잠김(pressure locking) 및 열적고착(thermal binding) 발생가능 대상밸브로 분류되었고 이에 따라 열적고착 방지를 위해 이중 디스크형(double disk type) 밸브가 선택되었고 압력잠김 방지를 위해 전단 디스크에 압력해소용 구멍이 가공되어 공급되었다. 발전소 시운전중 가공된 구멍 때문에 발생한 문제점으로 인해 압력잠김 대상밸브 선정기준에 대한 의문이 제기되어 밸브의 허용누설과 난류관입(turbulent penetration)이 압력잠김 발생 가능성에 미치는 영향을 간단한 수계산과 FLUENT 전산코드로 모사하여 검토하였다. 검토결과 난류관입과 밸브의 허용누설이 모두 압력잠김 및 열적고착을 발생시킬 수 있는 주요인자가 된다는 것을 알 수 있었고, 따라서 이 밸브들을 압력잠김 및 열적고착 발생가능 대상밸브로 선정한 것이 타당함을 알 수 있었다.

Abstract

Shutdown Cooling System(SCS) suction isolation valves for Yonggwang Nuclear Units 5&6 have been selected as the valves susceptible to pressure locking and thermal binding due to valves' allowable leakage during normal operation. So, double disk type valves were introduced to avoid thermal binding and holes were drilled on upstream disks of valves to release the potential bonnet overpressurization. During plant pre-operational tests, the adequacy of selection criteria for pressure locking was

in doubt since the pre-operational test problems were caused by the drilled hole. The effects of turbulent penetration and valve leakage on the pressure locking phenomena are identified by a comparison between brief hand calculation and FLUENT computer code simulation. Both of valve leakage and turbulent penetration are found to be dominant influencing factors which cause pressure locking and thermal binding on motor operated valves, thus the adequacy of selection criteria is demonstrated.

1. 서론

미국 등 일부 원전에서 안전관련 동력구동 게이트(gate) 밸브가 본넷(bonnet) 과압과 열적고착에 의하여 밸브가 개방되지 않는 고장이 표 1, 2에서와 같이 자주 발생하여 발전소의 안전성 및 신뢰성이 저하되는 문제점이 대두되었다. 미국 원자력규제기관인 NRC는 GL89-10[1]과 GL95-07[2]로, 그리고 과기부는 과기부 원검71233-205[3]로 모든 안전관련 모터구동 및 동력구동 게이트 밸브에 대해 각 밸브의 설계기준을 검토하고, 설계기준 조

표 1. 해외발전소 압력잠김 발생사례

기 능	발생날짜	발전소	디스크 형태*	밸브 크기
잔열제거 격납용기 배수조 흡입격리밸브	1969.12.06	Ginna	DD	10"
안전주입밸브	1981.09.03	San Onofre Unit-1	DD	14"
잔열제거 열교환기 출구밸브	1983.09.20	LaSalle Unit-1	FW	-
잔열제거고온관 교차격리밸브	1988.01.28	Vogtle Unit-1	DD	8"
고압냉각재주입 증기흡입밸브	1988.05.28	Brunswick Unit-1	FW	-
격납용기 살수밸브	1988.11.17	Fitz Patrick	DD	-
잔열제거 유입격리밸브	1989.05.23	Turkey Point-4	DD	-
저압냉각재주입/저압노심살수 주입밸브	1991.05.07	Fitz Patrick	FW	24"
잔열제거수조 흡입밸브	1992.01.08	Grand Gulf	FW	10"
격납용기 배수조 순환밸브	-	Arkansas Nuclear	-	-

* DD : Double Disk, FW : Flexible Wedge

표 2. 해외발전소 열적고착 발생사례

기 능	발생날짜	발전소	디스크 형태*
잔열제거 경계내 흡입격리밸브	1983.11.04	LaSalle Unit-1	FW
원자로 감압계통 격리밸브	1984.02.22	Big Rock Point	FW
고압냉각재주입 증기흡입밸브	1988.07.01	Brunswick Unit-1	FW
원자로냉각재계통 유출수냉각기 격리밸브	1990.01.26	Davis-Besse	SW
잔열제거수조 유입밸브	1991.01.28	-	FW

* SW : Solid Wedge

건에서 시험을 수행하여 각 밸브가 요구되는 성능을 발휘할 수 있는지 입증하며, 압력잡김 및 열적고착 가능성에 대해 검토하여 검토결과에 따라 해석, 시험, 설비개선, 운전절차서 개정 등을 포함한 적절한 시정조치를 취할 것을 요구하였다. 이를 계기로 미국 및 국내에서는 관련 연구와 시정조치가 활발하게 진행되어 왔다.

안전관련 동력구동 게이트 밸브의 압력잡김 및 열적고착 현상은 주로 계통내 유체의 압력, 온도의 영향에 의해 발생하는데, 분석이 매우 복잡하고 밸브의 가동전 및 가동중 시험들은 일반적으로 압력잡김이나 열적고착 현상을 감지할 수 없는 조건에서 수행되므로 이들 현상의 정확한 진단은 매우 어렵다. 여러 발전소의 운전경험을 조사한 바에 따르면, 이런 현상들이 밸브의 설계 기준으로 고려되지 않았음을 보여주고 있다. 따라서 사고를 포함하는 발전소의 모든 운전의 공학적 분석을 통하여 압력잡김이나 열적고착 현상이 발생할 수 있는 안전관련 게이트 밸브를 선정하고 선정된 밸브들에 대하여 적절한 수정 및 보완작업이 수행되어야 한다.

이러한 요건 및 관점에 따라 영광 5,6호기 설계시 각 밸브들에 대한 운전 및 시험조건들이 종합적으로 검토되었으며, 그 결과 정지냉각계통 흡입배관 격리밸브들은 압력잡김 및 열적고착 발생가능 대상밸브로 선정되었다. 그러나 영광 5,6호기의 시운전 시험중 정지냉각계통 배관에 대한 수압시험시 밸브 전단 디스크에 가공된 구멍 때문에 역방향 가압시 격리기능이 상실되는 문제점이 발생되었고 이에 대한 논의과정에서 이 밸브들이 압력잡김 대상밸브로 선정된 근거에 대한 의문이 제기되었다. 또한 압력잡김과 열적고착 대상밸브 선정기준 정립을 위한 용역[4] 수행 과정에서도 같은 의문이 제기되었다. 따라서 본 논문은 이러한 설계현안을 해결하기 위해 간단한 수계산과 FLUENT 전산코드를 통해 밸브의 허용누설과 난류관입이 정지냉각계통 흡입배관 격리밸브의 압력잡김 및 열적고착 발생 가능성에 미치는 영향을 평가하여 이에 대한 선정기준의 타당성을 입증하고자 한다.

2. 본론

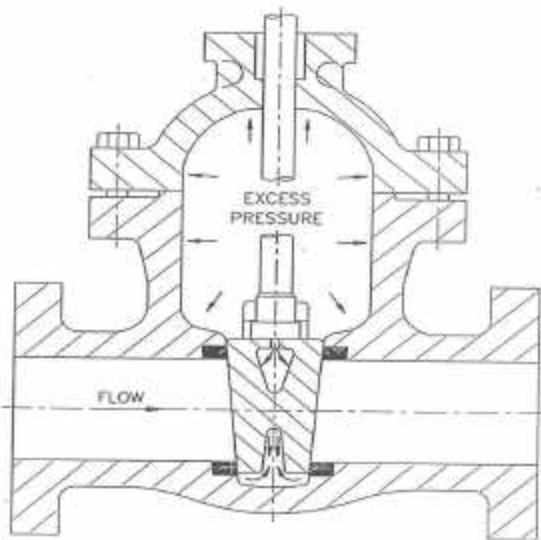
2.1 압력잡김 및 열적고착 현상

압력잡김 현상은 동력구동(모터, 공기압, 유압 등) 게이트 밸브중 플렉시블 웨지(flexible wedge) 형태 또는 이중 디스크 형태의 밸브에서 그림 1에서와 같이 본넷 내에 가득 고인 물이 열전달에 의한 온도상승으로 가압되거나, 밸브 본넷 내의 압력이 계통 배관압력보다 순간적으로 높아져 밸브 본넷 내에 압력고립(pressure trapping) 현상이 발생되어 밸브 구동기가 밸브 디스크 사이의 차압을 이겨내지 못하여 밸브가 열리지 않는 현상을 말한다.

압력잠김 현상이 발생되기 위한 기본적인 조건은 밸브 디스크 영역을 포함하여 밸브 본넷 내에 유체가 충전상태로 되는 것이다. 이러한 일은 밸브를 열거나 닫는 과정에서 압력이 걸리는 어느 위치의 배관에서 일어날 수 있으며 밸브가 닫혀 있는 경우에도 디스크 양단간의 압력 차이에 의해서 디스크가 시트로부터 약간 밀림으로써 유로가 형성되어 본넷 영역이 고압의 유체로 충전될 수 있다.

밸브 본넷 영역의 초기 유체 압력 및 온도상태에서 밸브 본체로의 열전달에 의해 본넷 내 물의 온도가 서서히 상승하여 유체가 열팽창됨으로써 본넷 내의 압력이 상승하게 된다. 이러한 온도 상승의 요인으로는 발전소 운전모드의 변화나 발전소 운전에 의한 주변 온도의 변화, 밸브나 펌프의 누설, 고온관 파열 사고 등에 의한 디스크 양측 중 어느 한 쪽의 가열 등이 있다. 또한 밸브가 닫히는 과정 또는 닫혀있는 상태에서 밸브 본넷이 계통압력으로 가압된 후 밸브 전단 및 후단의 계통압력이 운전 또는 설계기준사고로 인해 급격히 감소하여 본넷 압력이 계통압력보다 높아지는 압력고립 현상이 발생하여 밸브 디스크가 시트(seat)를 압박하여 밸브의 개방이 어렵거나 불가능하게 된다.

일단 압력잠김 현상이 발생되면 본넷 내의 증가된 압력이 디스크를 통한 누수를 감소시키기 때문에 본넷 내의 압력이 감소될 가능성은 희박해진다. 압력잠김 현상은 시트로부터 디스크의 분리를 방해하여 매우 높은 전류가 걸린 채로 모터의 회전자가 고착(locked-rotor condition)되게 된다. 이 상태에서는 10~15초 이내에 모터 내부가 가열되어 모터가 손상되거나, 모터 토크(torque) 성능이 감소되어 설계기준 조건에서 밸브의 기능을 발휘할 수 없게 된다.



열적고착 현상은 플렉시블 웨지 또는 솔리드 웨지(solid wedge) 형태의 게이트 밸브가 고온상태에서 닫힌 후 밸브가 열리기 전에 충분히 냉각되는 경우 밸브 몸체가 밸브 디스크보다 상대적으로 더 많이 열수축되어 밸브 시트가 밸브 디스크를 단단히 조임으로써 기계적인 접촉이 일어나 밸브가 잘 열리지 않는 현상을 말한다. 이 현상이 발생하면 밸브를 재가열할 때까지 밸브를 개방하기가 어렵거나 개방할 수 없게 된다.

그림 1. 게이트밸브의 압력잠김현상

2.2 압력잠김 및 열적고착 발생가능 밸브의 선정기준

압력잠김 현상이 발생하는 것은 다음과 같은 사항들이 모두 전제되었을 경우이다.

본넷은 밸브가 닫힌 상태에서 충분히 물로 채워져 있다.

본넷으로부터 패킹(packings) 및 밸브 몸체 밀봉(seal) 면으로의 누설이 없거나 매우 작다.

디스크와 시트의 접촉면을 통한 배관에서 본넷으로의 누설은 고려하지만, 그 역은 고려하지 않는다.

압력잠김과 열적고착 발생가능 대상밸브 선정기준 정립을 위한 용역 수행[4] 과정에서 도출된 압력잠김 발생가능 밸브 선정기준은 다음과 같다.

- (1) 안전관련 동력구동 게이트 밸브를 선정한다.
- (2) 계통의 유체가 기체인 경우의 밸브를 제외한다.
- (3) 솔리드 웨지(solid wedge) 밸브를 제외한다.
- (4) 발전소 운전모드의 변화, 발전소 운전에 의한 주변온도의 변화, 밸브나 펌프의 누설, 고온관 파열사고 등을 포함한 정상 및 비정상 운전, 유지보수, 사고, 각종 시험 조건에서 밸브가 닫힌 상태에서 안전 기능상 열려야 하는 밸브를 선정한다.
- (5) (4)항에 나열된 조건에서 밸브 본넷이 가열될 가능성이 있는 밸브를 선정한다. 이 때 특히 아래의 열원으로부터의 가열 가능성을 포함한다. 그러나 밸브가 설치된 배관이 열을 전달받는 고온 배관으로부터의 거리가 10 ft 이상이고 난류관입이나 누설량이 무시할 정도인 밸브는 열전달 효과가 작으므로 대상에서 제외한다.
 - 밸브에 인접한 고온배관의 파열사고로 인한 열전달
 - 고온 배관의 분기관에서 발전소 기동시와 같이 유체의 온도가 낮고 분기관의 밸브가 닫혀 있는 상태에서 주관로에 고온수가 유동하는 경우 분기관으로의 열전달
 - 계통 유체로부터의 전도열전달
 - 주변 배관으로부터의 전도 및 복사열전달
 - 본넷 주변으로부터의 대류 및 복사열전달
 - 밸브의 누설로 인한 계통유체의 열전달
- (6) (4)항에 나열된 운전조건과 계통의 특성에 따라 특히 아래의 조건과 같은 압력 고립 현상에 의해 압력잠김이 발생할 가능성이 있는 밸브를 선정한다. 압력고립 현상은 운전중 밸브가 닫힌 후 또는 설계기준사고에 의해 밸브 전단 및 후단의 압력이 감소하여 계통압력이 본넷압력보다 작아지는 경우 발생한다.
 - 냉각재상실사고나 배관압력을 저하시키는 기타 사고로 인하여 계통에 가압되어 있던 압력이 급격히 강하되어 본넷 내에 압력고립 현상이 발생

- 두 개의 밸브가 직렬로 연결된 계통에서 닫힌 밸브 사이의 배관에 유체가 고립된 후, 두 밸브 바깥쪽 배관의 압력이 방출되는 경우에 밸브 본넷 내부가 물로 충전되고 계통에 가압되어 있던 압력이 급격히 강하되어 본넷 내에 압력고립 현상이 발생

열적고착 현상발생 기본조건은 웨지형 게이트 밸브가 고온에서 닫히고 충분히 냉각된 후 열리는 경우이고 밸브 몸체의 열수축이 디스크의 열수축보다 큰 경우이다. 이러한 열적고착 현상 발생조건에 해당되는 밸브를 선정하되, 이중 디스크 평행시트 형태의 밸브들은 디스크가 웨지 형태가 아니고 두 개의 디스크로 구성되어 있으므로 두 디스크의 접촉 부위가 고정되어 있지 않아서 밸브 몸체가 온도변화에 의해 수축 또는 팽창할 경우에도 고착되는 것을 방지하여 열적고착 현상이 발생되지 않으므로 열적고착 발생가능대상 밸브에서 제외된다.

열적고착 발생가능 밸브의 선정기준은 다음과 같다.

- (1) 안전관련 동력구동 게이트 밸브를 선정한다.
- (2) 계통의 유체가 기체인 경우의 밸브를 제외한다.
- (3) 이중 디스크 평행시트 게이트 밸브를 제외한다.
- (4) 웨지 디스크 형태의 밸브를 선정한다.
- (5) 발전소 운전모드의 변화, 발전소 운전에 의한 주변온도의 변화, 밸브나 펌프의 누설, 고온관 파열사고 등을 포함한 정상 및 비정상 운전, 유지보수, 사고조건, 각종 시험 등의 조건에서 밸브가 닫힌 상태에서 안전 기능상 열려야 하는 밸브를 선정한다.
- (6) (5)항에 나열된 조건에서 계통 내의 유체온도가 높은 상태에서 닫히고, 계통이 충분히 냉각된 후 열림이 요구되는 위치에 설치된 밸브를 선정한다.

2.3 정지냉각계통 흡입배관 격리밸브의 압력잠김 및 열적고착 대상밸브 선정기준

영광 5,6호기의 정지냉각계통 흡입배관에는 그림 2와 같이 세 개의 격리밸브가 직렬로 설치되어 있어 정상운전시 정지냉각계통을 고온고압의 원자로냉각계통으로부터 격리시키는 역할을 하고 있다.

이 밸브들은 원자로냉각계통 설계압력의 경계조건에 설치되어 계통 배관에 물이 차 있는 상태로 닫힌 후 밸브 디스크와 시트 사이의 누설 등으로 인하여 밸브 본넷 내부가 물로 충전되고 주변 배관으로부터의 전도 및 복사열, 고온의 계통유체의 전도열 등으로 인하여 본넷 내의 물의 온도가 상승하여 압력이 증가할 가능성이 있다. 특히 고온관으로부터의 난류관입과 밸브의 허용누설 등을 감안하면 압력잠김 및 열적고착 발생가능성은

훨씬 클 것으로 예상된다. 따라서 이 밸브들은 압력잠김 및 열적고착 발생 대상 밸브로 선정되었다. 이 밸브들은 전동기 구동 게이트 밸브들이며 열적고착 발생가능성을 고려하여 이중 디스크 평행시트 형식의 밸브가 선정되었고, 압력잠김 방지를 위해 전단 디스크에 구멍을 가공하였다.

그러나 이 밸브들은 고온관으로부터 각각 약 4.2 m, 30 m, 42 m 거리에 위치하므로 난류관입과 밸브누설이 없다면 압력잠김 대상밸브 선정기준에 의하면 대상에서 제외될 수 있다.

따라서 압력잠김 대상밸브 선정기준의 타당성을 입증하기 위하여 이 밸브들의 설치위치와 난류관입, 밸브 누설 등에 따른 압력잠김 현상 발생가능성을 다음에서 체계적으로 평가해 보았다.

2.4 정지냉각계통 흡입배관의 온도분포에 대한 밸브누설 영향

2.4.1 초기조건 및 가정(그림 3 참조)

배관크기 : 16 inch, schedule 160

보온재 : 두께 3.5 inch

고온관 온도 : 621 °F

격납건물 내부온도 : 110 °F

반경방향 대류열손실 : $dq_{conv.} = U(\pi D_i dx)(T - T_\infty)$

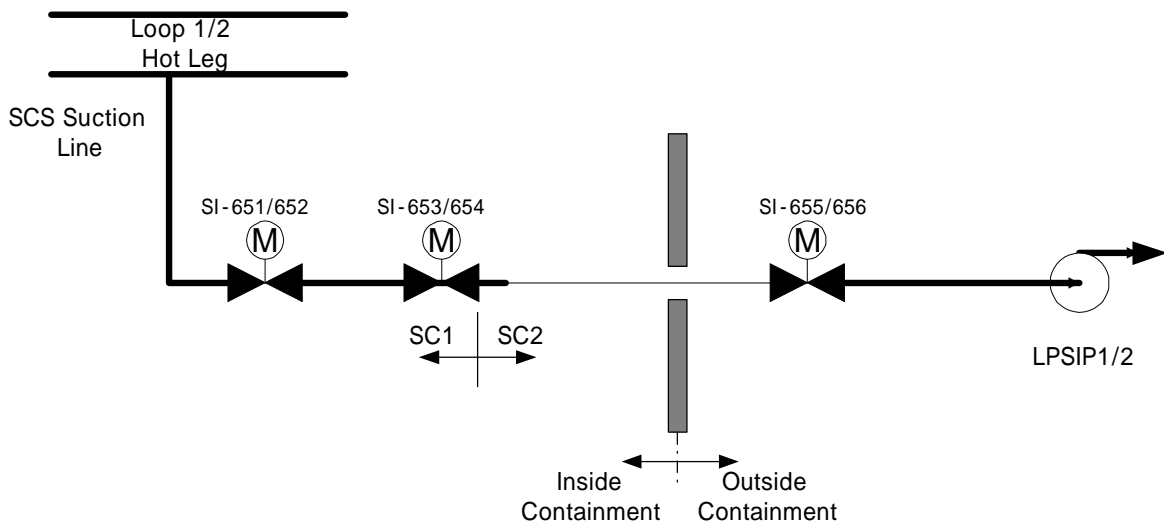


그림 2. 정지냉각계통 흡입배관 격리밸브 배치도

2.4.2 밸브 누설이 없을 경우 배관온도 분포

그림 3에서 반경방향 열전도는 무시하고 축방향 열전도와 반경방향 대류 열손실을 고려하여 에너지 평형방정식으로부터 다음의 관계식을 얻을 수 있다. 이때 밸브를 통한 누설은 없다고 가정하고 물과 배관의 열전도계수(thermal conductivity)는 110 °F 기준으로 선정하였다.

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0 \dots\dots\dots (1)$$

여기서 $\theta = T - T_\infty$ $m^2 = \left(\frac{U\pi D_i}{K_i A_i + K_p A_p + K_w A_w} \right)$ 이다.

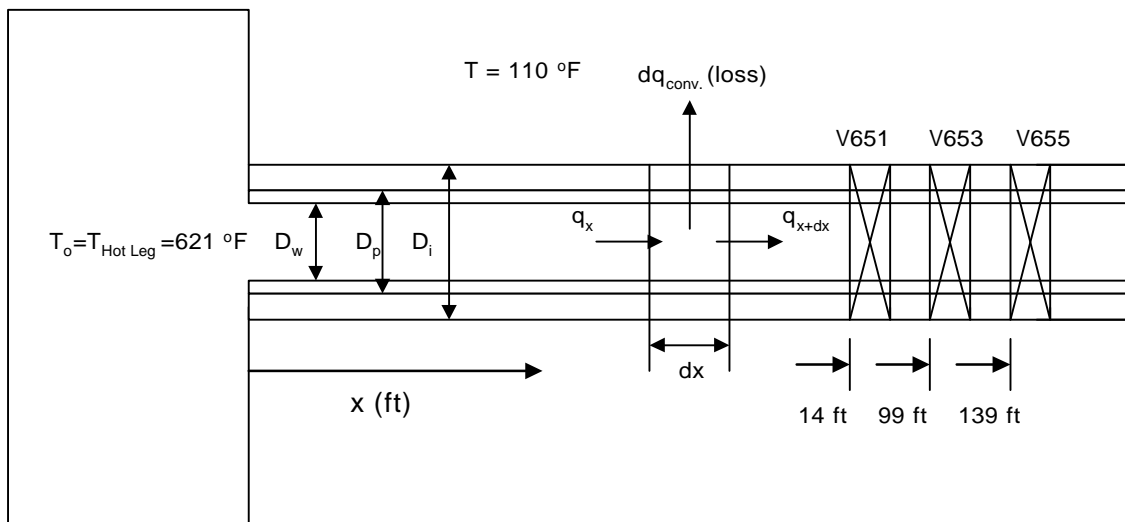
식(1)의 일반해는 다음과 같다.

$$\theta = C_1 e^{-mx} + C_2 e^{mx} \dots\dots\dots (2)$$

식(2)에 다음과 같은 경계조건을 적용하고 특수해를 구한다.

$$\theta = \theta_o = T_o - T_\infty \quad \text{at } x = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\theta = 0 \quad \text{at } x = \infty \dots\dots\dots (4)$$



범례 D_w : 배관 내경 D_p : 배관 외경
 D_i : 보온재 외경 q_x : 축방향 열전도량
 q_{conv} : 반경방향 열전달량

그림 3. 온도분포 수계산을 위한 정지냉각계통 흡입배관 및 격리밸브 배치도

식(3),(4)로부터 특수해를 구하면 다음과 같다.

$$T_x = T_\infty + (T_o - T_\infty) e^{-mx} \dots\dots\dots (5)$$

아래 표의 자료를 이용하여 m 값을 구하면

	Diameter (ft)	Area (ft ²)	Conductivity(Btu/hr-ft-°F)
Water	D _w = 1.068	A _w = 0.896	K _w = 0.368
Pipe	D _p = 1.333	A _p = 0.500	K _p = 7.630
Insulation	D _i = 1.917	A _i = 1.491	K _i = 0.135
Overall Heat Transfer Coefficient (Btu/hr-ft ² -°F)	U = 0.14		

$$m = \left(\frac{U\pi D_i}{K_i A_i + K_p A_p + K_w A_w} \right)^{1/2}$$

$$= \left(\frac{0.14 \times \pi \times 1.917}{0.135 \times 1.491 + 7.63 \times 0.500 + 0.368 \times 0.896} \right)^{1/2} = 0.4405 \dots\dots (6)$$

축방향의 온도분포는 다음의 식에서 구할 수 있다.

$$T = 110 + (621 - 110) e^{-0.4405x} \dots\dots\dots (7)$$

2.4.3 벨브 누설이 있을 경우 축방향 배관온도 분포

벨브를 통한 누설을 고려하면 축방향 열전달에서 계통유체의 열전송이 지배적이므로 축방향의 열전도는 무시하고 반경방향의 대류 열손실을 고려하여 에너지 평형방정식을 적용하면 다음의 관계식을 구할 수 있다.

$$\frac{d\theta}{dx} + m\theta = 0 \dots\dots\dots (8)$$

여기서 $\theta = T - T_\infty$ $m = \left(\frac{U\pi D_i}{WC_p} \right)$ 이다.

위 식(8)의 일반해는 $\theta = Ce^{-mx} \dots\dots\dots (9)$

다음과 같은 경계조건을 적용하여 특수해를 구한다.

$$\theta = \theta_o = T_o - T_\infty \quad \text{at } x = 0 \dots\dots\dots (10)$$

식(10)으로부터 다음과 같은 특수해를 구할 수 있다.

$$T_x = T_\infty + (T_o - T_\infty) e^{-mx} \dots\dots\dots (11)$$

유체가 고온관 온도, 압력인 621 °F, 2250 psia일 때의 m 값은 다음과 같은 설계자료와 관계식으로부터 구할 수 있다.

누설량이 발전소 운영기술지침서 최소허용 누설값[5]인 1 gpm일 때

체적유량은 $Q = 1 \frac{\text{gallon}}{\text{min}} \times \frac{1 \text{ ft}^3}{7.481 \text{ gallon}} \times \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} = \frac{8.02 \text{ ft}^3}{\text{hr}}$ 이며

질량유량은 $W = \rho \times Q = 40.55 \times 8.02 = 325.2$ 이다.

따라서 m 값은

$$m = \frac{U\pi D_i}{WC_p} = \frac{0.14 \times \pi \times 1.917}{40.55 \times 1 \times 8.02 \times 1.574} = 0.00165$$

축방향의 온도분포는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$T_x = 110 + (621 - 110) e^{-0.00165x} \dots\dots\dots (12)$$

누설량이 발전소 운영기술지침서 최대허용 누설값[5]인 5 gpm일 때 m 값은

$$m = \frac{0.14 \times \pi \times 1.917}{40.55 \times 5 \times 8.02 \times 1.574} = 0.00033 \text{ 이며}$$

온도분포는 다음과 같다.

$$T_x = 110 + (621 - 110) e^{-0.00033x} \dots\dots\dots (13)$$

누설량이 밸브 설계사양서의 설계값인 160 cc/hr일 때

$$Q = 160 \frac{\text{cc}}{\text{hr}} \times \frac{1 \text{ ft}^3}{28320 \text{ cc}} = \frac{0.00565 \text{ ft}^3}{\text{hr}} \text{ 이고}$$

$$m = \frac{0.14 \times \pi \times 1.917}{40.55 \times 0.00565 \times 1.574} = 2.33806 \text{ 이며}$$

온도분포는 다음과 같다.

$$T_x = 110 + (621 - 110) e^{-2.33806x} \dots\dots\dots (14)$$

위 각각의 누설량에 따른 고온관으로부터의 거리별 유체온도는 아래 표와 같다.

표 3. 누설량에 따른 고온관으로부터의 거리별 유체온도

밸브 누설량	SI-651/652 (x=14 ft)	SI-653/654 (x=99 ft)	SI-655/656 (x=139 ft)
없음	111 °F	110 °F	110 °F
1 gpm*	609 °F	544 °F	516 °F
5 gpm**	619 °F	605 °F	598 °F
160 cc/hr***	110 °F	110 °F	110 °F

* 발전소 운영기술지침서 최소허용 누설값 기준[5]

** 발전소 운영기술지침서 최대허용 누설값 기준[5]

*** 밸브 설계사양서 설계누설량 기준

2.4.4 밸브누설이 배관 온도분포에 미치는 영향

SI-651/652 밸브의 누설이 없을 경우에는 SI-653/654/655/656 밸브에 접한 유체온도는 고온관 온도가 621 °F일 경우에도 주변온도(격납건물 대기온도)와 거의 같게 유지되지만, 1 gpm의 누설만 허용되어도 고온관에서 약 42 m 정도 떨어진 SI-655/656 밸브는 위 표 3에서 보는 바와 같이 고온관 온도(621 °F) 대비 105 °F 정도 밖에 온도가 떨어지지 않는다. 밸브의 누설량이 많을수록 밸브에 접하는 유체의 온도는 높게 유지되고 발전소 운영기술지침서는 최대 5 gpm까지 밸브의 누설을 허용하므로 이러한 밸브의 누설을 고려한다면 SI-653/654/655/656 밸브의 압력잠김 발생가능성은 설계에 고려되어야 한다.

2.5 정지냉각계통 흡입배관의 온도분포에 대한 난류관입의 영향

정상운전중 원자로냉각재계통 고온관에는 항상 고속의 유동이 있으므로 이에 의한 난류관입 현상이 정지냉각계통 흡입배관의 온도 분포에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 난류관입의 영향을 확인하고자 FLUENT Code를 이용하여 원자로냉각재계통으로부터의 첫 번째 격리밸브까지의 배관 온도분포에 미치는 난류관입의 영향을 계산하였다. 두 번째 및 세 번째 격리밸브들은 전단의 밸브가 정상운전중 닫혀 있으므로 고온관 유동으로 인한 난류관입의 영향을 받을 수 없다. 따라서 첫 번째 밸브 이후의 후단 부분은 FLUENT Code 해석에서 제외하였다.

해석사례는 표 4에서와 같이 고온관에 정상유동이 흐르고 격리밸브에 누설이 없는 경우와 고온관에 정체된 유동이 있고 격리밸브에 누설이 없는 경우 및 고온관에 정상유동이 흐르고 격리밸브에 누설이 있는 세 가지의 경우에 대한 해석을 수행하였다. 해석모델은 일부 고온관과 고온관에서 분기되는 정지냉각계통 흡입노즐에서 첫 번째 격리밸브까지의 정지냉각계통 배관을 포함하는 이차원 모델을 사용하였으며 격자는 사각격자로 약 4000여 개로 구성하였다. 해석에 사용된 경계조건은 표 4와 같다.

FLUENT 코드는 난류유동 해석에 있어서 $k-\epsilon$ 모델을 기본적으로 사용하고 RSM (Reynolds Stress Model)과 RNG(ReNormalization Group) $k-\epsilon$ 모델을 선택적으로 사용할 수 있다[6]. 본 해석에서는 대표적 난류모델인 Standard $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다.

아래의 그림은 위의 세 가지 해석결과를 온도로 나타낸 것이다. 그림 4와 5는 해석사례 1의 결과로서 그림에서 보는 바와 같이 고온관내의 고속유동으로 인하여 분기된 정지냉각계통 수직배관 하단부까지 고온관 온도가 유지되고 있으며 격리밸브까지 열이 전달되어 상당한 고온이 유지되고 있음을 관찰할 수 있다. 그림 5는 배관길이에 따른 온도를 나타낸 것이다. 그림 6과 7은 해석사례 2의 결과로서 정체된 유동을 모사한 것으로 분기된 정지냉각계통 수직배관에서의 유체온도가 상당히 낮아져 격리밸브 주위의 유체온도는 대기온도와 유사한 정도로 감소됨을 관찰할 수 있다. 그림 8과 9는 해석사례 3의 결과로서 분기된 정지냉각계통 수직배관의 온도 분포가 그림 4의 경우와 유사하게 분기된 정지냉각계통 수직배관 하단부까지 고온관 온도가 거의 감소하지 않고 유지되고 있으며 격리밸브까지 상당한 열이 전달되고 있음을 관찰할 수 있다. 그러나 사례 3의 결과가 사례 1의 결과와 유사하게 나타나는 것은 사례 1의 결과에서 보는 바와 같이 난류관입에 의한 효과가 상당하여 고온관의 온도와 유사한 온도 분포가 격리밸브 전단까지 나타나므로 누설의 효과가 크게 나타나지 않음을 알 수 있다. 그러나 정체된 유동에서는 아주 미세한 누설이라도 이로 인한 열전달의 영향이 상당함을 관찰할 수 있었다. 그림 10은 고온관의 정체된 유동을 가정하여 2.4.2절에서 수계산한 결과를 그래프로 나타낸 것으로 FLUENT 코드에 의해 해석된 결과인 그림 6, 7보다 상당히 급격하게 온도가 감소함을 알 수 있다. 이는 수치해석의 경우에는 모사를 위하여 완전히 정체된 유동이 아니라 느리지만 일정한 입구속도를 가정하여 해석한 것이 그 이유라고 판단된다.

이러한 해석의 결과 분기된 배관에서의 온도분포는 주배관인 고온관의 고속유동에 의한 난류관입의 영향이 상당함을 확인할 수 있었다. 즉, 난류관입을 고려할 경우 밸브에 접촉하는 유체의 온도는 고온관 온도에서 별로 낮아지지 않으므로 압력잠김 발생가능성이 매우 높음을 알 수 있다. 따라서 원자로냉각계통으로부터의 첫 번째 격리밸브는 반드시 압력잠김 발생대비 설계가 필요하며 이 밸브의 누설을 고려하면 두 번째 및 세 번째 밸브들도 압력잠김 발생의 가능성은 한결 높음을 알 수 있다.

표 4. FLUENT Code 해석사례 및 조건

해석사례	고온관 유동조건	격리밸브 누설량	고온관 외벽조건	격리밸브 온도조건	정지냉각계통배관 외벽조건(Btu/hr-ft ² -°F)
1. 고온관 정상유동	57.54 ft/s	0 gpm	단열	120 °F	U = 0.14
2. 고온관 정체유동	0.0032 ft/s	0 gpm	단열	120 °F	U = 0.14
3. 격리밸브 누설	57.54 ft/s	1 gpm	단열	120 °F	U = 0.14

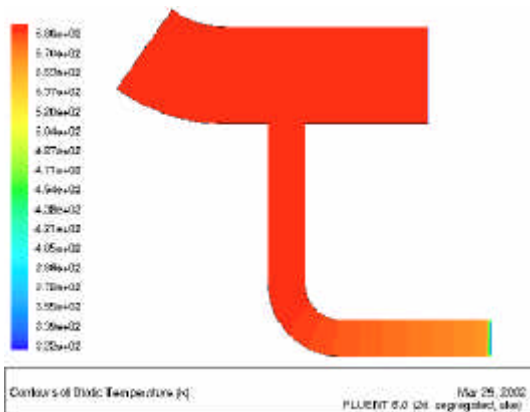


그림 4. 고온관내 정상유동시 온도분포

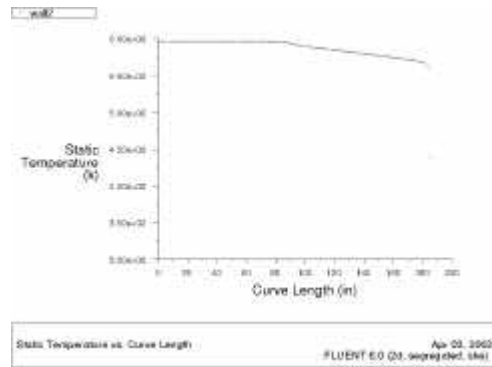


그림 5. 고온관내 정상유동시 정지냉각배관 온도분포

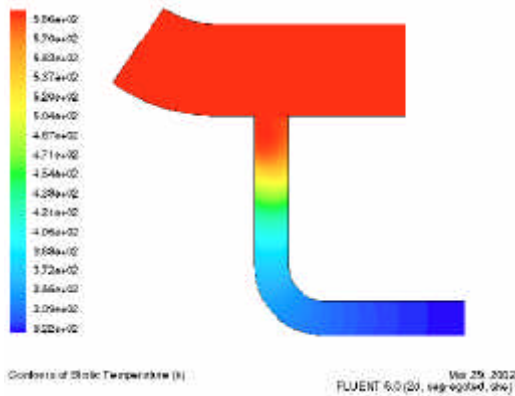


그림 6. 고온관내 정체유동시 온도분포

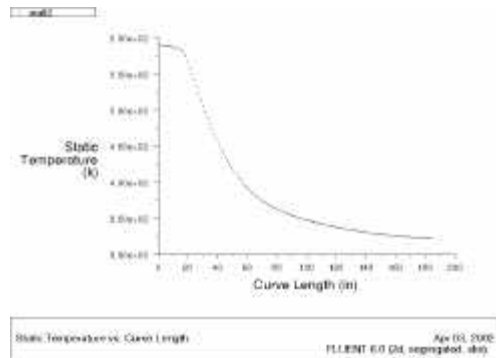


그림 7. 고온관내 정체유동시 정지냉각배관 온도분포

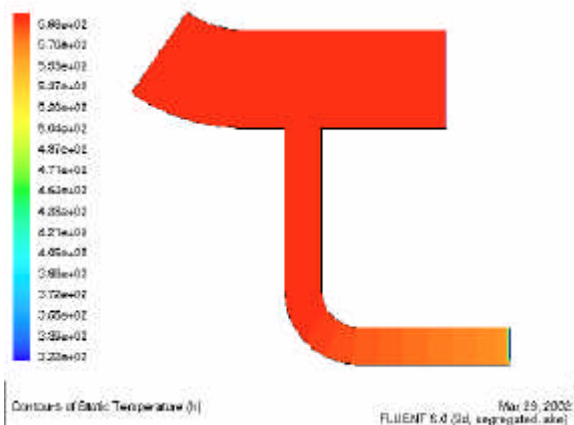


그림 8. 고온관내 정상유동 및 격리밸브 누설시 온도분포

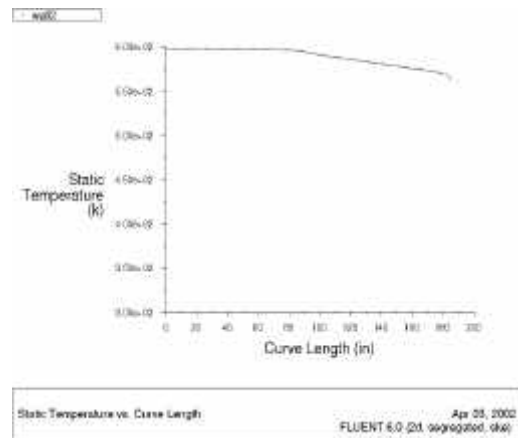


그림 9. 고온관내 정상유동 및 격리밸브 누설시 정지냉각배관 온도분포

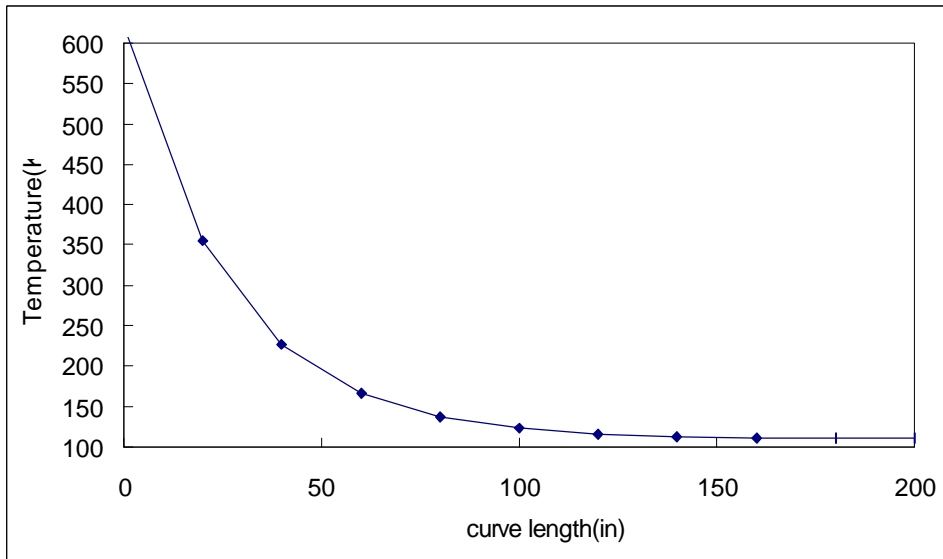


그림 10. 고온관내 정체유동시 정지냉각배관 온도분포

3. 결론

영광 5,6호기의 설계시 정지냉각계통 흡입배관 격리밸브들의 압력잠김 및 열적고착 발생 가능성을 판단하기 위하여 각 밸브들에 대한 운전 및 시험조건들이 종합적으로 검토되었으며 그 결과 이 밸브들은 압력잠김 및 열적고착 발생가능 대상밸브로 선정되었다. 그러나 영광 5,6호기의 시운전 시험중 밸브 전단 디스크에 가공된 구멍 때문에 역방향 가압시 격리기능이 상실되는 문제점이 발생되어 이 밸브들이 압력잠김 및 열적고착 대상밸브로 선정된 근거에 대한 의문이 제기되었고, 이러한 설계현안을 해결하기 위해 간단한 수계산과 FLUENT 전산코드를 통해 밸브의 허용누설과 난류관입이 정지냉각계통 흡입배관 격리밸브의 압력잠김 및 열적고착 발생 가능성에 미치는 영향을 평가하여 이에 대한 선정 기준의 타당성을 입증하였다.

해석결과 고온관으로부터 분기된 배관인 정지냉각계통 흡입배관의 온도분포는 주배관인 고온관의 고속유동에 의한 난류관입의 영향이 상당함을 확인할 수 있었다. 즉, 난류관입을 고려할 경우 밸브에 접촉하는 유체의 온도는 고온관 온도에서 별로 낮아지지 않으므로 압력잠김 발생가능성이 매우 높음을 알 수 있다. 따라서 원자로냉각재계통으로부터의 첫 번째 격리밸브는 반드시 압력잠김 발생대비 설계가 필요하다.

또한 원자로냉각재계통으로부터 두 번째와 세 번째 밸브는 첫 번째 밸브의 누설이 없을 경우 물로 충전된 밸브 본넷 부위로의 열전달로 인한 압력잠김 발생의 가능성은 매우 적다. 그러나 밸브의 허용누설을 감안하면 원자로냉각재계통 고온관으로부터 가장 멀리 떨어진

어진 세 번째 밸브까지도 매우 높은 온도의 냉각재와 접촉하게 되므로 압력잠김 발생에 대비한 설계가 필요하다. 따라서 정지냉각계통 흡입배관 격리밸브들을 압력잠김 발생대상 밸브로 선정하여 설계한 것은 타당한 설계로 판단된다.

그러나 영광 5,6호기에서는 발전소 운영자의 운전 편의성, 진단에 두개의 격리밸브가 설치된 점 등이 고려되어 세번째 밸브의 압력잠김대비 설비는 채택되지 않았다.

참고문헌

1. NRC GL89-10 Safety-Related Motor-Operated Valve Testing and Surveillance, 1989.6
2. NRC GL95-07 Pressure Locking and Thermal Binding of Safety-Related Power-Operated Gate Valves, 1995.8
3. 과기부 원검71233-205 모터구동밸브 및 동력구동 게이트 밸브의 안전성 확인을 위한 권고사항, 1997.6
4. MOV 안전성 평가 용역, 2000.12
5. 영광 5,6호기 운영기술지침서 표3.4.13-1 원자로냉각재계통 압력격리밸브
6. FLUENT User's Guide, 1998