'95 추계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

기기냉각수 최저온도와 정지냉각계통 유량조절밸브 개도에 관한 설계분석

김도현, 이중섭, 오종필, 오광석
한국원자력연구소

요 약

한국형 표준 원자력발전소의 정지냉각운전시 최대냉각율은 75°F/hr(41.7℃/hr)로 기술사양서에 규정되어 있다. 정지냉각운전 냉각율에 가장 큰 영향을 미치는 2가지 중요한 변수는 정지냉각계통 열교환기를 지나는 원자로냉각재 유량과 기기냉각수의 온도다. 이중 열교환기를 지나는 원자로냉각재 유량은 butterfly형 정지냉각계통 유량조절밸브의 개도에 의하여 조절되는데 개도에 따른 throttle 능력이 중요한 인자다. 또 기기냉각수의 온도는 해수온도의 변화에 따라 편차가 발생하므로 유량조절밸브의 개도와 기기냉각수 온도의 상관관계에 따라 냉각능력이 달라진다. 본 논문에서는 현 울진 3&4호기 정지냉각계통 열교환기 및 조절밸브 등의 설비를 기준으로 기술사양서 상의 냉각율 75°F/hr(41.7℃/hr) 유지가 가능한 최저 기기냉각수의 온도를 찾아 보았고, 아울러 기기냉각수의 온도와 조절밸브의 개도 사이의 관계를 조사하였다. 그 결과 현재의 울진 3&4호기 조절밸브를 최저개도로 조절할때 약 57°F(13.9℃)의 기기냉각수가 공급되어도 냉각율 제한치를 넘지않는 것으로 분석되었다. 한편, 최저조절가능 유량이 약 2000 gpm(7570 l/min)일 경우에는 낮은 기기냉각수가 공급될 경우 최대냉각율을 초과하므로 한 train을 정지시키고 한 train만으로 운전할 것을 고려하여야 할 것으로 보인다. 이 경우 최저 약 56.5°F(13.6℃)의 기기냉각수가 공급되어야 한다. 본 논문의 분석결과는 향후 기기설계사양서나 운전지침서 등에 반영되어 실제 발전소 설계 및 운전절차 수립에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

1. 서론

1.1 배경

한국형 표준원자력발전소의 원자로 정지후 3.5시간이 지나 원자로냉각재 온도와 압력이 350°F(177℃), 410 psia(2.8MPa)에 이르면 잔열제거는 통상 정지냉각계통 열교환기를 통하여 기기냉각수로 하게 되는데 이때 냉각율은 울진 3&4호기의 경우 약 75°F/hr(41.7℃/hr) 이하로 유지되도록 기술사양서에 규정하고 있다. 정지냉각계통의 냉각율은 정지냉각계통 열교환기의 열전달면적, 열전달계수, 열교환기 튜브쪽으로의 원자로냉각재 유량 및 온도, 셸쪽으로의 기기냉각수 유량 및 온도 등에 의해 결정되는데 울진 3&4호기의 경우 이 정지냉각계통 열교환기 튜브쪽을 지나는 원자로 냉각재의 유량을 조절하므로써 냉각율을 조절하는 방식을 사용하고 있다. 즉, 정지냉각계통 열교환기를 지나는 유량과 이를 우회하는 유량을 조절함으로써 냉각율을 조절한다. 이때 유량을 조절하는데 사용되는 기기는 butterfly형 유량조절밸브로 그 개도와 throttle 능력에 따라 유량이 조절된다. 셸쪽

에는 일정유량의 기기냉각수가 흐르게 되는데 이 기기냉각수의 공급온도와 튜브쪽을 지나는 원자로냉각재의 유량이 냉각율을 결정짓게 된다.

현 울진 3&4호기 설계문서 상에는 기기냉각수 온도를 65°F~110°F(18.3℃~43.3℃)로 요구하고 있는데 이중 최고온도는 정지냉각 열교환기의 용량결정 기준으로, 최저온도는 정지냉각 열교환기 후단의 조절밸브 개도 설계기준으로 쓰이게 된다. 그런데 최근 영광 4호기의 시운전중 최저 46°F(7.8℃)의 기기냉각수가 공급된 일이 발생하는등[1] 기기냉각수의 공급온도 편차가 발생함에 따라 기기냉각수 최저온도를 얼마까지 내릴 수 있는지에 대한 고려가 필요하게 되었다. 이러한 낮은 온도의 기기냉각수 공급에 대하여 정지냉각계통 설계의 관점에서 가장 문제가 되는 것은 냉각율이 너무 커질 수 있다는 점인데 현 울진 3&4호기 기술사양서는 최대냉각율을 75°F/hr(41.7℃/hr)로 규정하고 있다. 한편 냉각율과 관련하여 중요한 또 하나의 변수는 정지냉각 열교환기 후단 조절밸브의 개도이다. 정지냉각 열교환기는 셸쪽의 기기냉각수 유량을 일정하게 유지하면서 튜브쪽의 원자로 냉각재 유량을 조절함으로써(즉, 열교환기를 지나는 유량과 이를 우회하는 유량의 비율을 바꿈으로써) 냉각율을 조절하고 있으므로 냉각율을 제한하려면 열교환기쪽 조절밸브를 최저개도로 유지하면서 운전하는 것이 필요하게 된다. 현재의 울진 3&4호기에서 이 밸브(SI-657/658)의 조절가능한 최저유량은 850 gpm(3220 l/min)으로 설계되어 있다. 본 논문에서는 기술사양서 상의 최대냉각율 75°F/hr(41.7℃/hr)를 유지하면서 기기냉각수 최저온도와 정지냉각계통 열교환기 유량조절 밸브 개도의 상관관계를 고찰하였다. 참고로 정지냉각계통의 개략도는 그림1과 같다.

1.2 목적

이 분석의 목적은 기술사양서의 최대냉각율을 만족하고 열교환기 유량조절밸브의 개도에 의하여 열교환기를 지나는 원자로냉각재 유량을 조절할 수 있는 범위 내에서 허용되는 최저 기기냉각수 온도를 제시하므로써 한국형 표준원전의 정지냉각계통 운전절차 수립에 필요한 기초자료를 제공하고 필요하다면 후속호기의 정지냉각계통 기기들의 설계에 반영될 수 있는 분석자료를 제시하고자 한다.

2. 본론

본 분석에서는 울진 3&4호기에 대하여 기술사양서 상의 최대냉각율 75°F/hr(41.7℃/hr)를 유지하면서 기기냉각수 온도를 변화시키고, 각 기기냉각수 온도에 대하여 정지냉각계통 열교환기 유량조절 밸브의 개도와의 상관관계를 고려하여 기기냉각수 최저온도를 구하였다. 본 분석을 위해서 한국형 표준원전 원자로 계통설계 업무수행시 사용되는 정지냉각계통의 원자로냉각재 냉각능력을 평가하는 전산코드인 KDSCNT1[2]를 사용하였다. 본 분석에 사용된 KDSCNT1 코드는 튜브측(원자로냉각재계통)에서 셸측(기기냉각수계통)으로의 열전달에 의한 원자로냉각재의 냉각과정을 해석할 수 있도록 고안되었다.

코드에 의한 정지냉각과정의 해석은 다음과 같다. 즉, 정지냉각 운전이 시작되면 저압안전주입펌프의 최대유량으로 인하여 기술사양서가 규정하고 있는 최대냉각률

75°F/hr(41.7℃/hr)를 초과하므로 정지냉각계통 유량의 일부는 정지냉각 열교환기를 우회하게 된다. 냉각이 진행됨에 따라 상기의 최대냉각율을 유지하기 위하여 정지냉각 열교환기로의 유량은 증가하게 된다. 이 유량이 최대 정지냉각계통유량에 도달하면 냉각율은 감소하기 시작할 것이다. KDSCNT1 코드에서 수행되는 기본적인 계산은 각 시간 단계에서 튜브측의 최대방출열(QTRAIN) 과 정지냉각 열교환기의 열제거용량(QHX)을 비교하여 원자로냉각재의 온도를 결정하는 것이며 기본 계산 흐름도는 그림 2에 나타나 있고 다음과 같은 식으로 표시될 수 있다. 즉,

$$QTRAIN = \frac{(Q_{decay} + Q_{water} + Q_{metal} + Q_{pump})}{N_{SDCHX}}$$

$$QHX = U\ A\ F \frac{(TSCS_{inl} - TCCW_{out}) - (TSCS_{out} - TCCW_{inl})}{\ln \frac{TSCS_{inl} - TCCW_{out}}{TSCS_{out} - TCCW_{inl}}}$$

여기서, N_{SDCHX}은 정지냉각계통의 계열수, U 는 정지냉각 열교환기(SDCHX)의 유효열전달계수, A는 SDCHX의 유효열전달면적, F는 대수평균온도차 항에 대한 보정계수, $TSCS_{inl}$와 $TSCS_{out}$는 정지냉각 열교환기의 튜브측(원자로냉각재) 입구와 출구온도, $TCCW_{inl}$과 $TCCW_{out}$는 정지냉각 열교환기의 셸측(기기냉각수) 입구와 출구온도를 나타내고 있다.

분석결과 울진 3&4호기 조절밸브의 최저조절유량 850 gpm(3220 l/min)으로 운전할 경우 약 57°F(13.9℃)의 기기냉각수가 공급되어도 냉각율 제한치 75°F/hr(41.7℃/hr)를 넘지 않는다. 따라서 울진 3&4호기 설계문서상의 최저공급온도 65°F(18.3℃)는 기술사양서의 냉각율 제한치를 만족시키는 적절한 설계로 판단된다(그림 3). 울진 3&4호기의 정지냉각 열교환기 후단 조절밸브(SI-657/658)의 Cv 곡선[3]에 의하면 850 gpm(3220 l/min)의 유량은 밸브 개도 약 7~8%에 해당한다. 만약 55°F(12.8℃)의 기기냉각수가 공급된다면 약 845 gpm(3200 l/min)까지 유량조절이 가능하여야 냉각율 제한치를 만족시킬 수 있다. 또한, 영광 4호기 시운전시처럼 46°F(7.8℃)의 차가운 기기냉각수가 공급될 경우 2-train 운전으로 기술사양서의 냉각율 제한치를 만족시키려면 조절밸브의 최저조절가능유량은 817 gpm(3090 l/min)이 되어야 한다. 그러나 기기냉각수 온도가 46°F(7.8℃)일 경우 정지냉각계통설계 관점에서는 수용할 수 있을 것으로 판단되나, 그외에 RCP high pressure cooler 나 CVCS letdown heat exchanger 관점의 영향을 추가로 고려하여야 할 것이다. 한편, 최저조절가능유량이 약 2000 gpm(7570 l/min)일 경우에는 낮은 온도의 기기냉각수가 공급될 경우 최대냉각율을 초과하므로 한 train을 정지시키고 한 train만으로 운전하는 것을 고려하여야 할 것으로 보이며 이 경우 기기냉각수는 최저 약 56.5°F(13.6℃)로 공급되어야 한다(그림 4).

3. 결론

이상과 같은 분석의 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 즉,

가. 현재의 울진 3&4호기 조절밸브의 최저조절유량 850 gpm(7~8% 개도)으로 운전할 경우 약 57°F(13.9℃)의 기기냉각수가 공급되어도 냉각율 제한치를 넘지않으므로 울진 3&4호기 설계문서상의 최저공급온도 65°F(18.3℃)의 기기냉각수가 공급되면 기술사양서의 냉각율 제한치를 만족시킨다.

나. 영광 4호기 시운전시처럼 46°F(7.8℃)의 기기냉각수가 공급될 경우 2-train 운전으로 기술사양서의 냉각율 제한치를 만족시키려면 조절밸브의 최저조절가능유량은 817 gpm(3090 l/min)이 되어야 한다.

다. 최저조절가능유량이 약 2000 gpm(7570 l/min)일 경우에는 낮은 기기냉각수가 공급될 경우 최대냉각율을 초과하므로 한 train을 정지시키고 한 train만으로 운전하는 것을 고려하여야 할 것으로 보이며 이 경우 기기냉각수는 최저 약 56.5°F(13.6℃)로 공급되어야 한다.

라. 최저 기기냉각수 온도 55°F(12.8℃)가 공급될 경우 정지냉각계통 운전 초기에 정지냉각 열교환기 후단의 조절밸브는 약 845 gpm(3200 l/min)으로 운전되어야 한다. 만약 현재의 butterfly 밸브가 이러한 저유량 운전특성이 좋지 않다면 저유량 운전에 적합한 globe 밸브로의 교체도 고려하여야 할 것이다.

4. 참고문헌

[1] Request for CCW minimum temperature change, FAR 4-177, 1995.4.25
[2] D.H.Kim, Software Verification and Validation Report for KDESCENT Version 00, KAERI, 1991.9.30
[3] 울진 3&4호기 정지냉각 열교환기 후단 조절밸브의 Cv 곡선

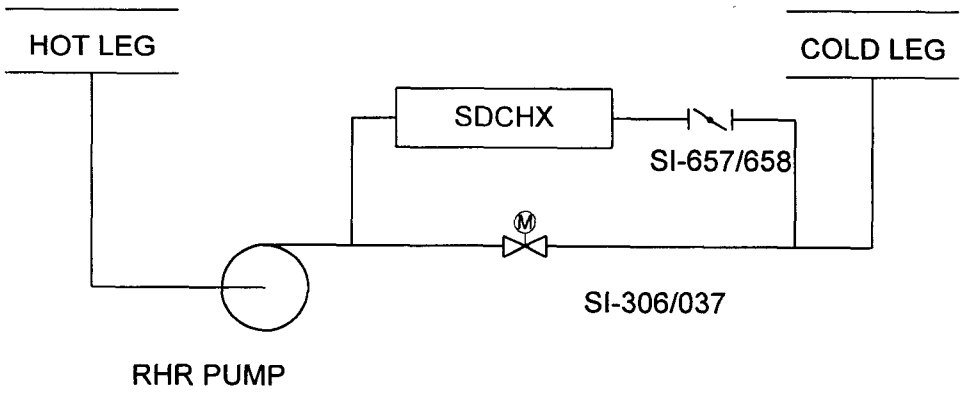

그림 1 정지냉각계통 개략도

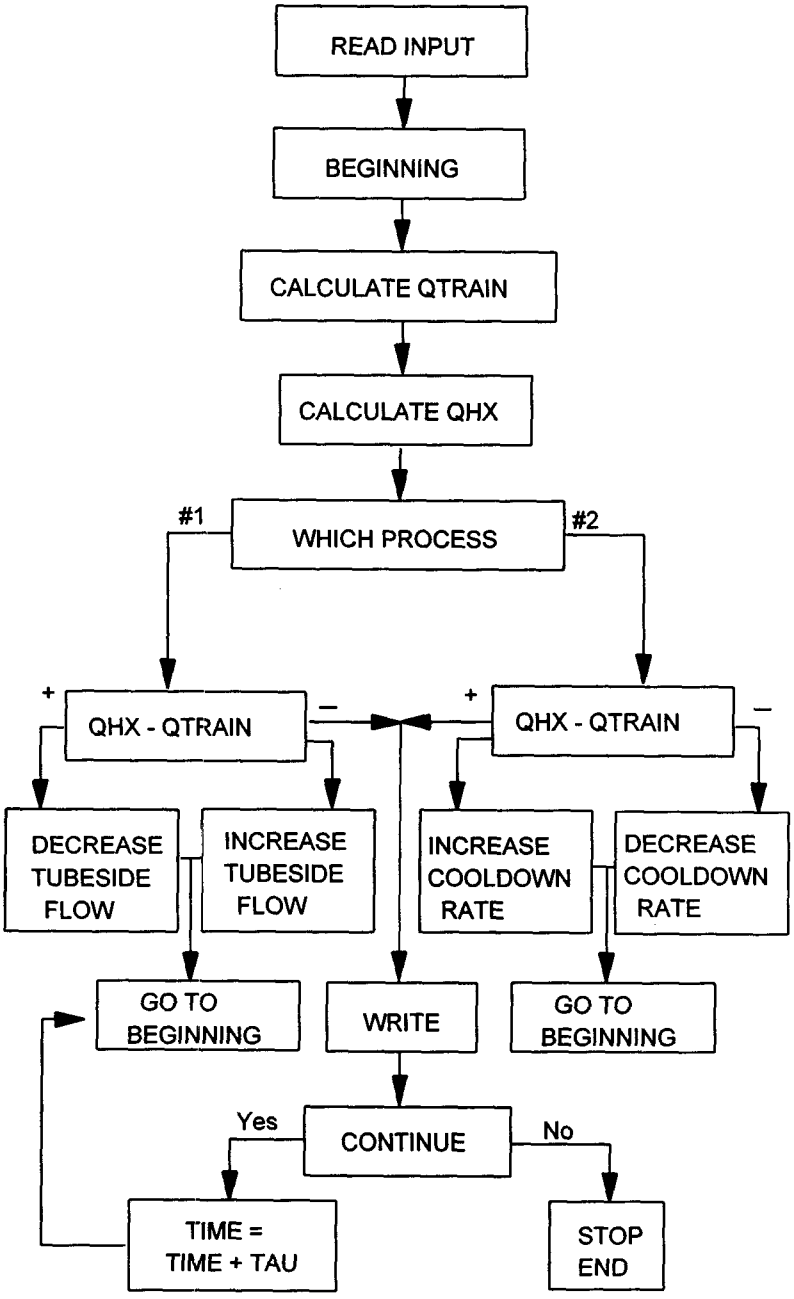

그림 2 Functional Flow Chart for KDSCNT1 Code

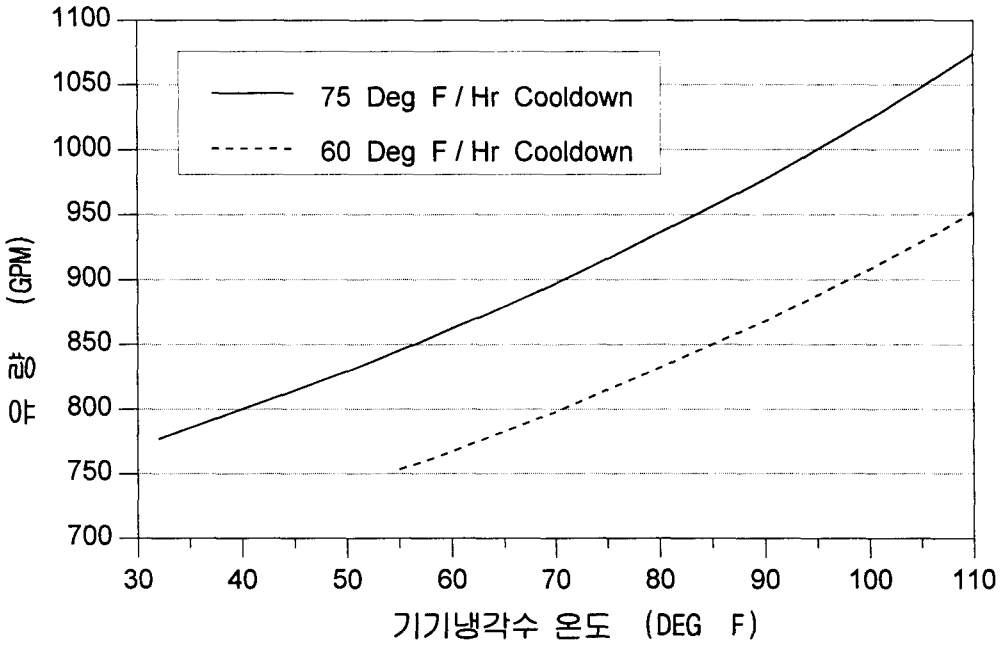

그림3. 정지 냉각 운전 초기 기기 냉각수 온도 vs 조절 밸브 유량

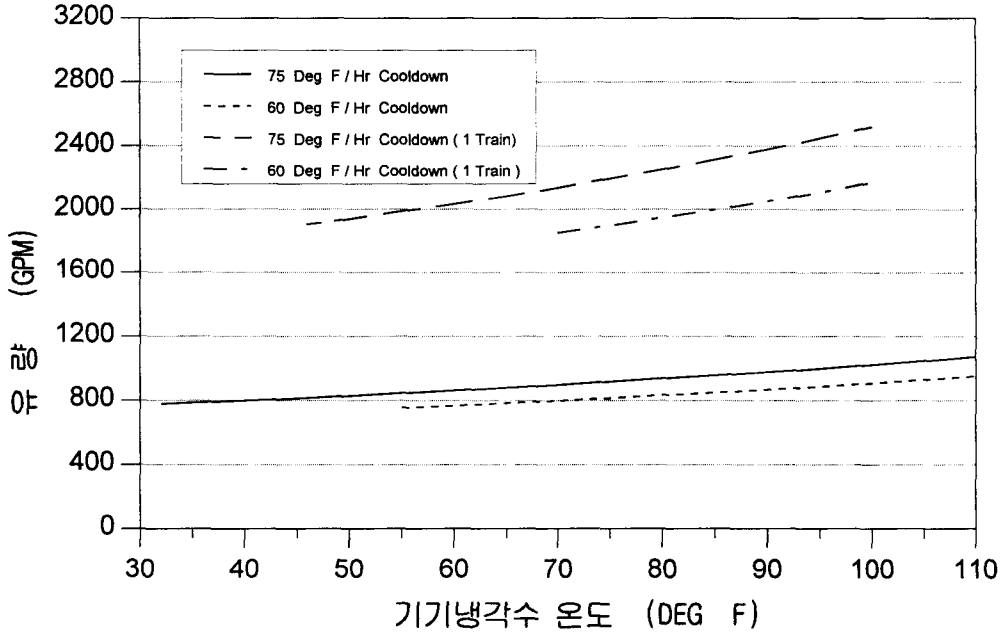

그림 4. 1Train 운전시 기기 냉각수 온도 vs 조절밸브 유량