

영광 3&4호기 부분충수운전시
정지냉각계통 최소유량 감소에 대한 영향분석

오광석, 오종필, 김도현, 이중섭
한국원자력연구소

유병철
한국전력공사

요 약

영광 3&4호기의 부분충수운전시 정지냉각계통 최소유량의 감소에 따른 영향을 노심의 잔열제거 능력 및 저압안전주입펌프의 성능 측면에서 분석하였다. 정지냉각계통 성능해석용 전산코드인 KDESCENT를 수정하여 사용하였으며 보수적인 초기조건 및 가정을 사용하였다. 분석결과 부분충수운전동안 원자로냉각재의 최고 허용온도를 작업자의 접근을 위한 설계온도인 140 °F로 설정할 경우 원자로 정지후 4일 시점에서 이를 만족할 수 있는 정지냉각계통의 최소유량은 실제값으로 3000 gpm(계측기의 오차포함 3440 gpm)임을 알 수가 있었다. 이 유량은 봉산희석이나 성층화, 저압안전주입펌프의 성능 측면에서도 허용가능한 값이다.

1. 서론

가압경수로형 원자력발전소에서 핵연료 재장전운전시 또는 증기발생기 세관 파단사고시 증기발생기의 세관 검사 및 보수작업의 수행이나 원자로냉각재펌프의 밀봉장치(seal) 교체 등을 목적으로 원자로냉각재계통의 수위를 고온관 중심 부근까지 배수하여 노즐담을 설치 및 제거하는 부분충수운전(Mid-loop operation)을 수행하게 된다. 이러한 부분충수운전은 발전소 가동률 향상을 위하여 필수적인 운전모드이나 원자로 냉각재 수위가 높으면 증기발생기 하단부의 고온관과 저온관에 노즐담을 설치할 수 없고 원자로 냉각재 수위가 임계수위 이하로 되면 자유표면에서 발생하는 와동에 의한 정지냉각계통내로의 공기유입으로 정지냉각계통의 기능이 상실되는 사고가 발생할 가능성이 있다.

정지냉각계통(혹은 잔열제거계통)의 기능 상실로 원자로내 냉각재가 비등하여 격납건물로 증기가 방출된 사례는 다수 발전소에서 보고되었고 특히 1987년 4월에 발생한 Diablo Canyon 발전소의 사고에 대한 분석결과 미국원자력규제위원회(U.S.NRC)는 동 사고의 중요성에 주목하여 Generic Letter 88-17을 발행하여 동 사고의 방지 및 사고후 조치사항을 요구한 바 있다[참고문헌 1]. 또한 국내 규제기관에서도 올진 3&4호기에 대한 건설허가 조건사항의 한 항목으로서 부분충수운전의 안전성을 입증할 것을 요구하였다[참고문헌 2].

발전소 재장전운전중 증기발생기 노즐담 설치시 저압안전주입펌프 흡입측으로의 공기유입을 막기 위하여는 저압안전주입펌프의 유량을 현재의 기술지침서 최소유량요건인 4000 gpm 이하로 감소시킬 필요가 있다. 본 분석에서는 영광 3&4호기 부분충수운전시 정지냉각계통 최소유량 감소 가능성을 검토하기 위하여 정지냉각계통 최소유량요건의 결정과 관련하여 고려해야 할 사항을 도출하고 허용가능한 최소유량을 분석하여 추후 필요시 기술지침서 최소유량요건 개정의 기초자료를 제공하고자 한다.

노심의 잔열 및 원자로냉각재계통의 현열을 제거하는데 필요한 정지냉각계통의 최소유량을 계산하기 위하여 정지냉각계통 성능해석용 전산코드인 KDESCENT를 사용하였다[참고문헌 3]. 부분충수운전을 모사하기 위하여 KDESCENT 코드를 수정하였으며 보수적인 초기조건 및 가정을 사용하여 최소유량을 계산하였다.

2. 본론

2.1 부분충수운전 기술현황

2.1.1 국내외 기술동향

Palo Verde 발전소에서는 잔열제거능력, 봉산회석 및 펌프의 진동 등을 고려하여 1990년 기술지침서 정지냉각계통 최소유량요건을 4000 gpm 으로부터 3780 gpm(실제값 3400 gpm)으로 개정하였으며 미국원자력규제위원회(U.S.NRC)는 이를 승인하였다. 또한, SONGS-2 발전소에서는 Mode 6에서 최소유량을 2200 gpm까지 낮추었다.

한편, 일부 외국에서는 정지냉각계통 최소유량 요건을 없애고 대신 그 운전모드 제한온도 내의 어떤 온도를 정하여 노심출구온도가 그 온도이내로 유지되도록 요건화하는 방안도 제시하고 있다. 또한 노심에서 비등이 발생하지 않는 한 봉산 성층화의 우려는 없으며 봉산회석의 관점에서는 약 1000 gpm의 유량이면 충분하다고 기술하고 있다.

2.1.2 부분충수운전시 정지냉각계통 유량관련 고려사항

현재의 영광 3&4호기 기술지침서에는 정지냉각계통 유량을 최소 4000 gpm 이상으로 유지하도록 되어있다. 부분충수운전시 저압안전주입펌프 흡입부로의 공기유입 여부는 임계수위에 의하여 결정되며 정지냉각계통 유량이 클수록 이 임계수위는 증가하는 경향을 보인다. 따라서 잔열제거 기능 수행에 필요한 최소유량을 재계산하고 여기에 계기오차를 고려한 새로운 최소유량 요건을 기술지침서에 반영함으로써 임계수위를 낮추어 부분충수운전시 운전 범위를 증가시킬 수 있다.

정지냉각계통의 기능중의 하나는 원자로냉각재를 순환시켜 혼합이 잘 유지되도록 함으로써 가장할 수 있는 봉산회석사고의 영향을 최소화하고 봉산 성층화를 방지하는 것이다. 정지냉각운전중의 봉산회석사고는 충전펌프로부터의 부적절한 순수한 물의 유입으로 발생된다. 정지냉각계통 유량감소시 봉산회석사고와 관련하여 고려하여야 할 사항은 봉산회석사고의 안전 기준으로 요구되는 충분한 운전원 조치시간을 확보하고 있는지를 확인하는 것이고, 봉산 성층화와 관련하여 고려하여야 할 사항은 낮은 유량에서도 봉산의 성층현상 없이 균일혼합(homogeneous mixing)된 원자로냉각재 상태를 유지할 수 있는지를 확인하는 것이다.

한편, Palo Verde 발전소의 저압안전주입펌프 운전시 유량 2800 ~ 3400 gpm 범위에서 발생된 acoustic rumble 현상과 U.S.NRC Information Notice 93-08[참고문헌 4]에 언급된 저유량 운전시 과도한 축방향 하중으로 인한 저압안전주입펌프 베어링 파손 가능성 등도 고려되어야 할 것이다. 또한 안전관련 펌프가 설계 운전범위 이외에서 운전될 때 받을 수 있는 손상에 관하여 언급한 U.S.NRC Bulletin 88-04[참고문헌 5]에 의하면 저압안전주입펌프는 시험등으로 단시간 운전하는 경우를 제외하고는 runout 유량의 약 25% 이하에서 운전해서는 안되며 설계 유량의 50% 이하에서 장기간 운전하는 것도 피하도록 권고하고 있으므로 이러한 관점의 고려도 필요하리라고 생각된다.

2.2 잔열제거능력 해석

2.2.1 KDESCENT 코드의 구조

본 분석에 사용된 KDESCENT 코드 [참고문헌 3]는 일차측(원자로냉각재)에서 이차측(기기냉각수)으로의 열전달에 의한 원자로냉각재계통의 냉각과정을 해석할 수 있도록 고안되었다. 정지냉각이 시작되면 저압안전주입펌프의 최대유량으로 인하여 행정적으로 제한하는 최대 냉각률 75 °F/hr를 초과하지 않도록 정지냉각계통 유량의 일부는 정지냉각열교환기를 우회하게 된다. 냉각이 진행됨에 따라 상기의 최대냉각률을 유지하기 위하여 정지냉각열교환기로의 유량은 증가하게 된다. 이 유량이 정지냉각계통 최대유량에 도달하면 냉각률은 감소하기 시작할 것이다. KDESCENT 코드에서

수행되는 기본적인 계산은 각 시간 단계에서 일차측의 최대방출열과 정지냉각열교환기의 열제거용량을 비교하여 원자로냉각재의 온도를 결정하는 것이다.

2.2.2 KDESCENT 코드의 수정

원래 KDESCENT 코드는 주어진 초기 유량을 가지고 기술지침서가 규정하고 있는 최대냉각를 범위 내에서 정지냉각 진입조건에서 핵연료재장전온도까지 원자로냉각재계통의 온도와 정지냉각열교환기의 성능을 해석하도록 설계된 코드이다. 본 분석의 목적인 부분충수운전시 정지냉각계통의 유량 해석을 위해서 KDESCENT 코드를 수정하였다[참고문헌 6].

2.2.2.1 열용량과 유량조절

정지냉각과정의 입력으로 사용되는 전체 일차측 냉각재 체적과 금속 열용량은 기존의 KDESCENT 코드의 목적인 정지냉각 진입조건부터 핵연료재장전온도까지의 냉각과정해석에서 온도의 감소율을 완화시킨다는 관점에서 보수적인 초기조건으로 사용된다. 그러나 부분충수운전시 이러한 조건은 덜 보수적으로 작용하여 동 운전중 원자로냉각재의 최대 온도상승값을 제한하게 된다. 따라서 정지냉각 진입조건부터 전체 일차측 냉각재 체적과 금속 열용량을 사용하여 냉각과정을 수행하다가 부분충수운전이 시작되면 실제로 줄어든 일차측 냉각재 체적과 금속 열용량을 사용하게 코드를 수정함으로써 냉각재의 최대온도를 상승시키고 최대온도까지의 상승시간을 최소화하였다. 기존의 KDESCENT 코드는 일정한 정지냉각유량으로 냉각과정을 수행한다. 본 분석을 위해서 핵연료재장전 온도시점 혹은 원하는 운전시점에서 정지냉각유량 (정지냉각열교환기의 튜브측을 지나는 유량)을 변화시킬 수 있도록 하였다.

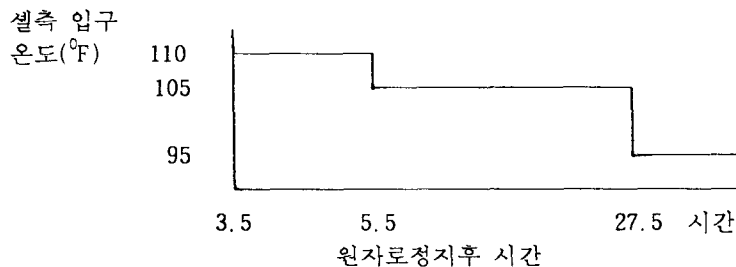
2.2.2.2 노심의 잔열곡선 (Decay Heat Curve)

노심의 잔열은 일차측 방출열량의 상당부분을 차지하는 열원으로서 본 분석의 결과에 크게 영향을 주게 된다. 기존의 KDESCENT 코드가 사용하고 있는 ORIGEN 잔열곡선 [참고문헌 7]은 원자로 정지후 최고 55 시간까지의 잔열 곡선만 수록하고 있다. 그러므로 본 분석을 위하여 격납건물로의 질량/에너지 방출해석용으로 사용되는 KLOTZ 잔열곡선 [참고문헌 8]을 본 코드에 추가하여 사용함으로써 분석시간과 보수성을 증가하였다.

2.2.3 초기조건 및 가정

가. 원자로 냉각재 계통의 초기상태는 발전소 정지후 3.5시간에 RCS 고온관온도 350 °F, RCS 압력 410 psia라고 가정한다.

나. 정지냉각열교환기 셀측 (기기냉각수)의 유량은 8000 gpm 이고 셀측 입구온도는 설계요건에 제시된 최고 허용온도로서 다음과 같이 계단식으로 변화한다고 가정한다.



다. 정지냉각 진입시점에서 핵연료재장전 평균온도인 125 °F 까지 사용되는 정지냉각계통의 유량은 저압안전주입펌프의 최대설계유량 5000 gpm에 계측기 불확실도를 고려하여 4800 gpm을

사용한다. 그러나 보수적인 최소유량의 산정을 위해서는 기술지침서 상에 규정된 최소유량인 4000gpm을 사용한다.

2.2.4 정지냉각시스템의 최소유량해석

서론에서 기술한 바와 같이 정지냉각시스템의 최소유량은 발전소 정지후 노심의 잔열을 충분히 제거하고 또한 충분한 순환으로 봉산희석사고에도 대처할 수 있는 유량이다. 본 분석에서는 노심의 잔열제거관점에서 분석을 수행하였으며 초기 냉각과정은 원자로 정지후 3.5시간 (냉각재 고온관 온도 350 °F) 부터 4800 gpm 유량을 가진 두 계열의 정지냉각시스템으로 냉각을 시작한다고 가정하였다. 그러나 최소유량 산정시에는 보수적 분석을 위해 정지냉각 진입시 부터 4000 gpm 유량으로 한 계열의 정지냉각시스템만을 이용하여 냉각을 한다고 가정하여 분석하였다.

2.2.4.1 노심의 잔열영향

그림 1은 원자로 정지후 각각 1일, 2일, 3일과 4일에서 한 계열의 정지냉각시스템을 가동중지한 상태에서 정지냉각유량(정지냉각열교환기 튜브측)을 3500 gpm으로 감소하였을 때 원자로 냉각재의 온도 변화를 보여주고 있다. 원자로 정지후 시간이 경과함에 따라 잔열이 감소함으로써 유량 감소로 인한 온도 상승도 둔화되고 있음을 알 수 있다(정지냉각열교환기의 셀측을 지나는 기기냉각수 온도는 95 °F 임).

2.2.4.2 기기냉각수의 온도영향

그림 2는 원자로 정지후 4일에서 한 계열의 정지냉각시스템을 가동중지한 상태에서 정지냉각유량(정지냉각열교환기 튜브측)을 감소하였을 때 냉각재의 온도변화를 보여주고 있다. 이 때의 기기냉각수 온도는 설계 최고 허용온도인 95 °F를 사용하였다.

그림 3은 정지냉각열교환기의 셀측을 지나는 기기냉각수 온도를 60 °F로 가정하였을 때의 유량 감소(정지냉각열교환기 튜브측)에 따른 온도변화를 보여주고 있다. 그림 2와 3으로부터 원자로 냉각재의 온도는 기기냉각수의 온도가 감소됨에 따라 감소됨을 알 수 있다.

2.2.4.3 최소유량해석

그림 4는 한 계열의 정지냉각시스템만을 이용하여 기술지침서가 규정하는 최소유량인 4000 gpm으로 정지냉각운전을 수행하다가 원자로 정지후 4일 시점에서 부분충수운전을 위하여 정지냉각시스템 유량(정지냉각열교환기 튜브측)을 감소할 경우의 원자로냉각재 온도 변화를 보여주고 있다. 이러한 운전은 가상적으로 생각할 수 있는 가장 느린 냉각과정이므로 그림 4의 결과는 유량감소로 인한 원자로 냉각재 온도 상승을 평가하는데 가장 제한적인 경우로 판단된다.

부분충수운전동안 원자로냉각재의 최고 허용온도를 작업자의 접근을 위한 설계온도인 140 °F로 설정할 경우 원자로 정지후 4일 시점에서 이를 만족할 수 있는 정지냉각시스템의 실제 유량(정지냉각열교환기 튜브측)은 그림 4로부터 3000 gpm임을 알 수 있다.

다음으로 고려해야 할 중요한 요소는 각종 계측기의 오차이다. 정지냉각시스템 유량을 지시하는 유량계의 계측기 오차는 2000 gpm에서 ±434 gpm 정도이다. 따라서 본 분석에서 결론적으로 제시하는 최소유량은 위에서 도출한 실제유량에 440 gpm의 계측기 오차를 가산한 유량이 된다.

2.3 저압안전주입펌프 성능평가

본 절에서는 영광 3&4호기 부분충수운전시 정지냉각시스템 최소유량 감소로 인해 저압안전주입펌프의 성능에 미치는 영향을 고찰하였다. 일반적으로 정지냉각운전 정상유량 범위보다 낮은 유량

으로 저압안전주입펌프를 운전할 경우 진동과 추력(thrust) 하중 증가로 저압안전주입펌프의 성능에 나쁜 영향을 줄 수 있다[참고문헌 4, 5]. 펌프의 수명은 통상적으로 미캐니컬 씨일과 베어링의 수명에 따라 결정되므로 베어링의 추력하중은 가능하면 설계값 이하로 유지될 수 있도록 운전합이 바람직하다.

영광 3&4호기의 경우 정상적인 정지냉각운전시는 저압안전주입펌프의 설계유량이 4300 gpm이고 전구간의 유량에서 운전상 문제점이 없도록 설계되어 있으며, 최소우회유량 100 gpm으로 최소한 36시간 연속운전이 가능하도록 설계되어 있다.

일반적으로 저압안전주입펌프는 시험을 위한 단기간 운전을 제외하고는 최대(runout) 유량의 25% 이하에서의 운전은 피하여야 하며, 장기간의 운전을 위해서는 설계유량의 50% 이상의 운전범위에서 운전합이 바람직하다. 따라서 저압안전주입펌프의 성능 측면에서는 2150 gpm 이상의 정지냉각계통 유량을 유지한다면 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

3. 결론

본 분석에서는 영광 3&4호기 부분충수운전시 정지냉각계통 최소유량의 감소에 따른 영향을 분석하였다. 분석시 고려된 주요사항은 노심의 잔열 및 원자로 냉각재계통의 현열의 제거능력, 봉산 희석사고의 영향과 봉산 성층화를 방지할 수 있는 충분한 순환의 확인, 저압안전주입펌프의 성능에 미치는 영향 등 세가지 사항이다.

잔열 및 현열 제거능력을 해석하기 위하여 수정된 KDESCENT 코드를 사용하였으며, 열용량, 기기 냉각수 온도 및 노심잔열곡선 등의 보수적인 가정 및 초기조건을 사용하여 분석하였다.

부분충수운전동안 원자로냉각재의 최고 허용온도를 작업자가 접근할 수 있는 설계온도인 140 °F로 설정하면 잔열제거능력 관점에서 원자로정지후 4일 이후 시점에서 정지냉각계통 최소유량은 실제유량으로 3000 gpm이며 계측기의 오차를 포함하면 3440 gpm이다. 이 값은 원자로 정지후 부분충수운전시까지 한 계열의 정지냉각계통만을 기술지침서 최소유량 요건인 4000 gpm으로 운전한 경우를 가정한 것으로 만일 2 계열의 정지냉각계통을 정격유량으로 운전하여 원자로 정지 4일후 부분충수운전 시작 시점의 원자로냉각재 온도가 115 °F에 도달한 상태에서 부분충수운전을 시작한다면 최소 유량요건은 실제유량으로 2850 gpm, 계측기 오차를 포함하면 3290 gpm이 된다.

봉산희석사고 및 봉산 성층화 측면에서는 상기한 정지냉각계통 유량으로 운전하더라도 충분한 냉각수의 순환을 보여주며 비등을 방지할 수 있으므로 영향이 없을 것으로 판단된다. 또한 저압안전주입펌프의 성능에 미치는 영향도 설계유량의 50% 이상이므로 문제가 없을 것으로 판단된다.

4. 참고문헌

- [1] Loss of Decay Heat Removal, U.S.NRC Generic Letter 88-17, Oct. 1988
- [2] 한국원자력안전기술원, 울진 3&4호기 예비안전성분석보고서 심사보고서, Jun, 1993
- [3] D.H.Kim, Software Verification and Validation Report for KDESCENT, Version 00, 00000-FS-VV-01
- [4] U.S.NRC IN 93-08 "Failure of RHR Pump Bearings Due to High Thrust Loading", 2/1/93
- [5] U.S.NRC Bulletin 88-04, "Potential Safety-Related Pump Loss", 5/5/88
- [6] S.K.Kim, Software Verification and Validation Report, 6/28/94
- [7] System 80 Decay Heat Fraction, PHD-77-153, 11/30/77
- [8] R.J.KLOTZ, Standard for Fission Product Decay Energy, PH-68-118, 5/29/68.

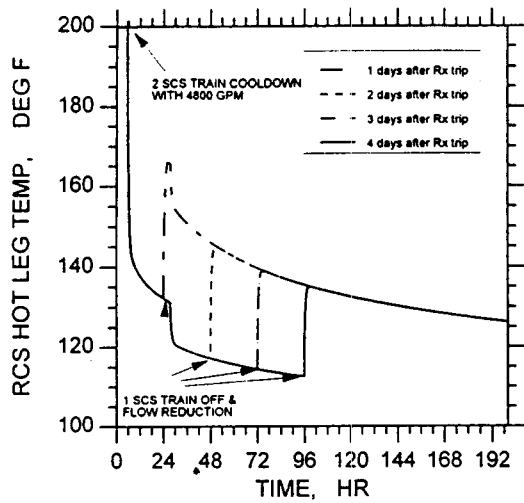


그림 1. 3500 gpm으로의 유량감소 시점에 따른 RCS 온도변화

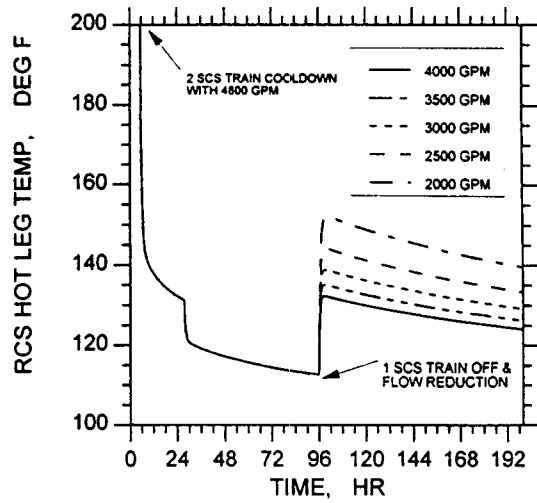


그림 2. 원자로 정지후 4일 시점에서 SCS 유량감소에 따른 RCS 온도변화(CCW 온도 95 °F)

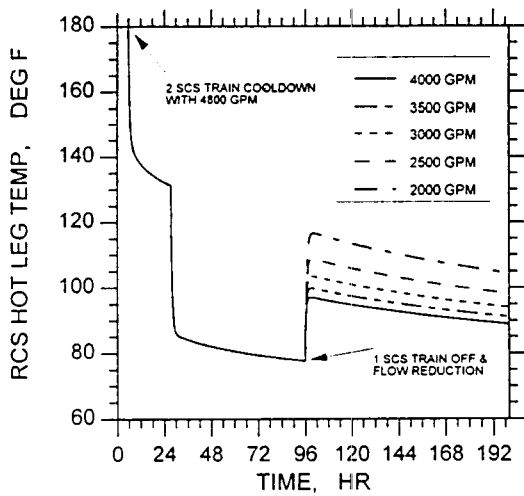


그림 3. 원자로 정지후 4일 시점에서 SCS 유량감소에 따른 RCS 온도변화(CCW 온도 60 °F)

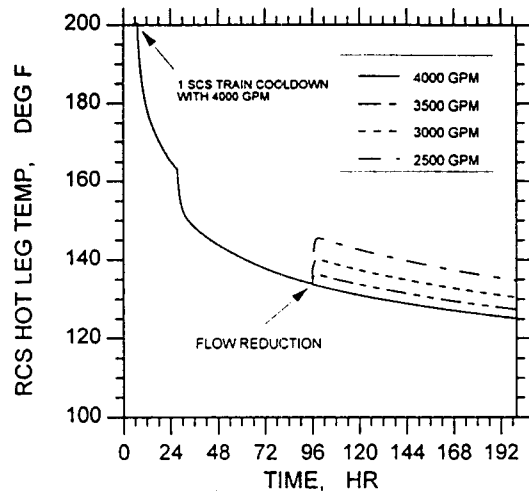


그림 4. 원자로 정지후 4일 시점에서 SCS 유량감소에 따른 RCS 온도변화(CCW 온도 95 °F)