

고리 1,2 호기 부분충수운전 중  
잔열제거 유량 감량 분석

Flowrate Reduction Analysis of Residual Heat Removal System  
during Midloop Operation for Kori Units 1&2

김도현, 박태철, 오광석, 오종필, 이광원, 노태선

한국전력기술(주)

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

고리 1,2 호기의 부분충수운전 시 운전 여유도를 증가하기 위하여 잔열제거계통 유량감량에 관한 분석을 수행하였다. 가압경수로 발전소에서는 잔열제거 운전 중 유지보수시간 단축을 위한 증기발생기 노즐담 설치 및 제거 목적으로 원자로냉각재의 수위를 고온관의 상부 이하로 배수하여 운전한다. 이때 발생하는 노심의 잔열은 잔열제거계통을 이용하여 제거하는데 이러한 운전을 부분충수운전이라 한다. Westinghouse 형 가압경수로인 고리 1,2 호기에 대하여 발전소 안전성이나 관련 기기의 건전성 확보 관점에서 필요한 잔열제거계통 최소유량을 분석한 결과 1410 gpm(고리 1 호기)과 1420 gpm(고리 2 호기)으로 각각 유량 감량이 가능하였다. 이 결과는 고리 1,2 호기 운영 기술지침서 최소유량요건 개정 및 관련 운전 절차서 개정을 위한 자료로 활용될 수 있다.

Abstract

A flowrate reduction analysis of Residual Heat Removal System (RHRS) has been performed to increase operational margin during Mid-loop operation for KORI units 1 & 2. The reactor coolant level should be reduced below top of the hot leg for Steam Generator (S/G) nozzle dam installation/removal to reduce maintenance interval. The decay heat generated during this operation is removed by RHRS, and this special operating mode is called Mid-loop operation. Through the performance analysis to investigate a minimum RHRS flowrate for decay heat removal and reliable RHRS operation, the flowrate can decrease to 1410 gpm(Kori 1) and 1420 gpm(Kori 2), respectively. The analysis results can be used for the revisions of Technical Specification and operation procedure.

1. 서론

가압경수로형 원자력발전소에서 잔열제거 운전 시 증기발생기의 세관 검사 및 보수작업의 수

행이나 원자로냉각재펌프의 밀봉장치(seal) 교체 등을 목적으로 증기발생기의 노즐댐을 설치 및 제거하기 위하여 원자로냉각재계통의 수위를 고온관 상부 이하로 배수하여 운전한다. 이는 노즐댐 설치로 핵연료 장전과 원자로 및 증기발생기 관련 유지 보수 및 시험을 동시에 수행하여 유지 보수 시간을 단축하기 위함이고 이런 운전을 부분충수운전(Mid-loop operation)이라고 한다. 이러한 부분충수운전은 발전소 가동을 향상을 위하여 필수적인 운전모드이나 원자로 냉각재 수위가 높으면 증기발생기 하단부의 고온관과 저온관에 노즐댐을 설치할 수 없고 원자로 냉각재 수위가 임계 수위 이하로 되면 자유표면에서 발생하는 와동에 의해 잔열제거계통(Residual Heat Removal System; RHRS) 내로 공기가 유입되어 잔열제거계통의 기능이 상실되는 사고가 발생[1]할 가능성이 있다. 잔열제거계통의 유량이 감소하면 공기가 유입되기 시작하는 임계수위가 낮아지므로 가능한 한 유량을 감소시켜 운전을 하여야만 부분충수운전 시 적절한 운전 여유를 확보할 수 있다.

본 분석에서는 고리 1,2호기 부분충수운전 중 잔열제거계통(RHRS)의 유량감량 관련 분석 기준 및 방법을 설명하고, 이를 바탕으로 고리 1,2호기 잔열제거계통 유량 감량 운전을 위한 성능해석 결과를 제시하고자 한다. 자료 수집과정에서부터 유량감량분석과 관련하여 고려하여야 하는 잔열제거능력 분석, 봉산희석 사고에 관한 평가, 펌프 성능 평가, 관련 밸브 및 배관의 영향 평가 등을 논의한 후 수집한 자료를 바탕으로 수행한 성능해석 결과를 제시할 것이다. 또한 유량감량으로 얻어지는 부분충수운전 시 고온관 임계 수위 관점에서의 이득을 평가하였다.

## 2. 잔열제거계통 유량감량 분석 기준 및 방법

### 2.1 유량감량 분석 기준

가장 기본적으로 고려하여야 하는 사항은 잔열제거 능력이며, 감량된 최소유량은 유량 감량 분석에서 노심의 잔열을 충분히 제거할 수 있어야 한다. 또한 봉산희석 사고나 봉산 성층화 영향에 관한 평가, 잔열제거펌프 성능 평가, 관련 밸브 및 배관의 영향 평가 등을 고려하여 최소유량을 결정하여야 한다.

#### 1. 잔열제거 능력 분석

잔열제거계통의 최소 유량은 발전소 정지 후 노심의 잔열을 충분히 제거하고 또한 충분한 순환으로 봉산희석사고에도 대처할 수 있는 유량이어야 한다. 그리고 부분충수운전을 위한 유량 감량 시 원자로냉각재의 최고 허용온도는 충분한 과냉각여유(subcooled margin)를 가져 노심에서 비등이 일어나지 않도록 결정되어야 한다. 이때 사용되는 유량 및 온도는 잔열제거계통 유량을 지시하는 유량계의 계측기 오차와 원자로냉각재계통 온도 지시계의 오차를 포함하여야 한다.

#### 2. 잔열제거펌프 성능평가

일반적으로 잔열제거운전 정상유량 범위보다 낮은 유량으로 잔열제거펌프를 운전할 경우 진동과 추력(thrust) 하중 증가로 잔열제거펌프의 성능에 나쁜 영향을 줄 수 있다[2]. 안전관련 펌프가 설계 운전범위 이외에서 운전될 때 받을 수 있는 손상에 관하여 언급한 U.S.NRC Bulletin 88-04[3]에 의하면 잔열제거펌프는 시험 등으로 단시간 운전하는 경우를 제외하고는 최대 효율점(Best Efficiency Point ; BEP) 유량의 약 25% 이하에서 운전하는 것을 피하고 최대 효율점 유량의 50% 이하에서 장기간 운전하는 것도 가급적 피하도록 권고하고 있으므로 이에 적절한지를 검토하여 판단한다.

### 3. 봉산희석사고의 영향검토

최종안전성분석보고서에 제시된 봉산희석사고 시 책임계에 도달하는 시간이 잔열제거계통 유량감량의 경우에도 운전원 조치 시간을 고려할 때 충분히 보수적임을 확인하고, 봉산의 농도를 측정하기 위한 sampling point가 잔열제거펌프 토출측 배관의 적절한 위치에 있는지를 확인한다.

### 4. 봉산 성층화 영향 검토

낮은 유량에서도 봉산의 성층현상 없이 균일혼합(homogeneous mixing) 된 원자로냉각재 상태를 유지할 수 있는 지를 확인한다. 봉산 성층화에 대한 영향평가 인자는 원자로냉각재가 노심 및 잔열제거계통을 한번 순환하는데 소요되는 시간(RCS turnover time)이다. 잔열제거계통의 유량감량에 의한 RCS turnover time의 증가에 따른 봉산 성층화의 영향을 검토한다.

### 5. 관련 밸브 및 배관의 영향 검토

배관계 내에서 일정한 유량으로 펌프를 운전하다가 이 보다 작은 유량으로 줄어서 운전할 경우 캐비테이션 현상이나 수격현상(Water hammer)이 발생하여 관련 배관계나 밸브 등 기기의 성능에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 잔열제거펌프의 유량을 감량하여 운전할 때 잔열제거계통 배관계나 유량조절밸브 및 체크밸브 등에서 이러한 과도현상이 발생하지 않는 적절한 최소유량을 확인한다.

## 2.2 잔열제거계통 성능 분석방법

고리 1,2호기 잔열제거계통은 고온정지는 물론 상온정지(cold shutdown)와 재장전운전(refueling) 시 잔열제거 및 원자로 냉각재의 정화, 재장전운전 시 재장전수탱크(Refueling Water Storage Tank; RWST)와 재장전수조 사이에 재장전수를 이동(transfer)하는 기능 등을 수행하며 비상노심냉각계통(Emergency Core Cooling System; ECCS)의 일부분으로 노심에 냉각수를 공급하는 기능도 수행한다[4, 5]. 잔열제거계통은 두 개의 독립적인 유로로 구성되어 있으며, 각 유로는 한 대의 잔열제거펌프, 잔열제거 열교환기 및 관련 배관, 밸브, 계기를 포함하고 있다. 잔열제거운전 시 원자로냉각재는 고온관으로부터 잔열제거펌프와 잔열제거 열교환기를 거쳐 저온관으로 귀환한다. 이때 열은 잔열제거 열교환기의 쉘측을 흐르는 기기냉각수로 전달된다. 냉각수는 잔열제거 열교환기를 통과하는 유량을 수동으로 조절하여 제어한다. 이때 원자로냉각재계통으로 귀환하는 총 유량은 잔열제거 열교환기 우회유로에 설치되어 있는 유량조절밸브에 의하여 일정하게 유지된다. 고리 1호기의 잔열제거계통의 개략도(schematic drawing)는 그림 1에 나타나 있으며 고리 2호기 잔열제거계통의 개략도는 그림 2에 나타나 있다.

## 2.3 분석 Code (KDSCNT1 코드)의 구조

본 분석에 사용된 KDSCNT1 코드[6]는 일차측(원자로냉각재)에서 이차측(기기냉각수)으로의 열전달에 의한 원자로냉각재계통의 냉각과정을 해석할 수 있도록 모델링되었다. 잔열제거 과정의 해석은 다음의 두 과정으로 나누어진다. 잔열제거를 시작하면 잔열제거펌프의 최대유량으로 인하여 행정적으로 제한하는 최대 냉각수를 초과하지 않도록 잔열제거계통 유량의 일부는 잔열제거 열교환기를 우회하게 된다. 냉각이 진행됨에 따라 상기의 최대 냉각수를 유지하기 위하여 잔열제거 열교환기로의 유량은 증가하게 된다. 이 유량이 최대 잔열제거계통 유량에 도달하면 냉각수는

감소하기 시작할 것이다. KDSCNT1 코드에서 수행되는 기본적인 계산은 각 시간 단계에서 일차측의 최대 발생열과 잔열제거 열교환기의 열제거 용량을 비교하여 원자로냉각재의 온도를 결정하는 것이며 기본 계산 흐름도는 그림 3에 나타나 있다.

원자로 정지 운전 중에도 노심에서는 잔열이 지속적으로 발생되며, 이 잔열은 잔열제거시스템의 운전으로 제거되어야 한다. 잔열의 양은 핵연료의 구성 및 용도에 따라 몇 가지의 붕괴열곡선으로 나뉘어 진다. ANS-5(1971)는 무한 원자로운전을 가정한 붕괴열곡선으로서 10CFR50 등에서 사고해석 등의 경우에 이용하도록 요구하고 있는 곡선이다. 이 붕괴열곡선은 U-235와 U-238로 구성된 노심의 잔열을 보여주고 있으며, Pu-239에 의한 잔열은 고려하고 있지 않다. WEC(구 CENP)에서 개발한 ORIGEN Code를 이용한 붕괴열곡선의 경우 2년 연소를 기준으로 작성된 붕괴열곡선으로서  $\gamma$  source에 의한 잔열을 고려한다. KLOTZ 붕괴열곡선도 또한 WEC에서 개발한 붕괴열곡선으로서, 원래 목적은 사고 시 격납건물로의 질량/에너지 방출을 모사하기 위한 분석에 사용하기 위함이었다. ANS 5-1(1979)은 핵분열생성물의 붕괴열과 핵분열생성물의 중성자 포획, Actinide의 영향 등을 고려한 붕괴열 곡선이다. Westinghouse사에서는 1979년 ANS 5-1 붕괴열 곡선을 사용하여 분석을 수행하였고, 이때 heavy element의 붕괴열과 핵분열생성물의 흡수에 관해서도 고려하였으며, 2 sigma의 불확실도에 대해서도 고려하였다. Westinghouse사에서는 1988년에 부분충수운전 중의 잔열제거기능 상실에 대한 분석보고서를 WCAP-11916을 통하여 발간한 바 있다[7].

따라서 고리 1,2호기의 경우 Westinghouse 형 발전소이므로 WEC에서 개발한 붕괴열곡선을 사용하는 것보다는 Westinghouse에서 개발한 붕괴열 곡선을 사용하는 것이 적합한 것으로 보이며, 특히 부분충수운전과 관련하여 분석이 수행된 WCAP-11916 붕괴열곡선을 사용하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 이를 ANS 5(1971)와의 비교를 한 결과는 그림 4에 나타나 있다. 비교 결과 WCAP-11916에서 제공하는 붕괴열 곡선은 충분히 보수적인 결과를 가지고 있는 것으로 판단된다. 또한 고리 1,2호기의 최종안전성분석보고서 상의 자료를 검토한 결과, 고리 1,2호기에서는 ANS-5의 붕괴열곡선을 사용한 것으로 되어있다. 따라서 WCAP-11916의 붕괴열 곡선을 사용하는 것은 충분히 보수적이므로 이를 고리 1,2호기의 잔열제거시스템 유량감량해석을 위한 용도로 사용하였다.

### 3. 분석 결과

#### 3.1 고리 1호기 분석 내용

##### 가. 잔열제거시스템 성능 분석

잔열제거시스템 성능에 대한 분석결과는 그림 5와 같다. 그림 5의 경우는 기기냉각수의 공급 유량을 3135 gpm(712 m<sup>3</sup>/hr), 기기냉각수의 온도를 원자로 정지 후 6시간까지 120. F(48.9. C), 6시간 이후 95. F(35. C)로 공급된다고 가정하고 두 계열의 잔열제거시스템을 운전하였을 경우의 냉각성능을 분석한 경우이다. 분석에 의하면 원자로 정지 후 약 23시간에 RCS 온도가 140. F(60. C) 이하로 낮추어지므로 기기냉각수가 원자로 정지 후 6시간까지는 120. F로 공급되고, 그 이후는 95. F로 공급된다고 가정하더라도 잔열제거시스템의 설계요건 측면에서 불

때 문제가 없을 것으로 판단된다. 한국형 표준원전(Korean Standard Nuclear Power Plant; KSNP)의 경우도 기기냉각수의 온도는 잔열제거시스템의 초기 운전 시에는 많은 부하로 인하여 온도가 약간 높게 형성되지만 곧 온도가 떨어지는 현상을 보인다. 고리 1호기의 1년 동안의 운전 이력에도 기기냉각수 온도가 95. F를 초과하는 경우는 없는 것으로 조사되었으므로 잔열제거 유량 감량계산 시 기기냉각수의 시간별 공급 온도는 원자로 정지 후 6시간까지 120. F로 공급되고 그 이후는 95. F로 공급되는 것으로 가정하는 것은 보수성 관점에서 적절하다고 판단된다.

#### 나. 부분충수운전을 위한 잔열제거시스템 유량감량 분석

붕괴열곡선은 WCAP-11916의 자료를 사용하였으며 기기냉각수의 온도는 원자로 정지 후 6시간까지는 120. F로 공급되고 6시간 이후는 95. F로 공급되는 것으로 가정하였다. 잔열제거시스템의 유량은 초기에는 1920 gpm으로 순환하다가 각각 1000 gpm, 1100 gpm, 1200 gpm, 1300 gpm, 1400 gpm, 1500 gpm으로 감량하는 경우에 대하여 분석을 수행하였다. 또한 고리 1,2호기의 운전 경험에 의하면 부분충수운전을 위한 조건은 원자로 정지 후 96시간 이후에 만족 되므로 잔열제거시스템의 유량을 감량하는 시점은 원자로 정지 후 96시간 이후로 가정 사용하여도 충분히 보수적이라고 판단된다. 그림 6은 잔열제거시스템 두 계열을 이용하여 잔열제거를 수행하다가 원자로 정지 후 96시간에서 잔열제거시스템 유량을 감량하는 경우이고, 그림 7은 잔열제거시스템 한 계열을 이용하여 잔열제거를 수행하다가 원자로 정지 후 108시간에서 유량을 감량하는 경우이다. 그림 8의 경우는 잔열제거시스템 한 계열을 이용하여 잔열제거를 수행하다가 원자로 정지 후 96시간에 유량을 감량하는 경우에 대한 분석이다. 그림 6과 7을 비교하면 잔열제거시스템의 운전을 두 계열로 시작하느냐 한 계열로 시작하느냐에 따라 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 고리 1호기 운영기술지침서[8]에 의하면 Mode 4에서 잔열제거시스템의 한 계열이 ECCS를 위하여 대기상태이어야 하므로 잔열제거를 위해서는 한 계열만 사용된다고 가정하는 것이 적절하다고 판단된다. 위의 계산 결과 및 가정에 의거할 때 그림 8의 조건 즉, 원자로 정지 후 잔열제거시스템을 한 계열로 운전을 시작하여 원자로냉각재시스템을 냉각하다가 원자로 정지 후 96시간에 잔열제거시스템의 유량을 줄여서 운전하고 붕괴열 곡선은 WCAP-11916을 사용하여 계산하는 것이 가장 적절한 평가라고 판단된다. 분석 결과 유량 감량 후 원자로냉각재시스템의 제한 온도를 140. F로 설정한다면 잔열제거시스템의 유량을 1920 gpm에서 1300 gpm까지 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 원자로냉각재시스템의 허용 평균 온도를 140 °F로 선정한 것은 부분충수운전에서 운전모드 6에 해당하는 온도 범위를 초과하지 않고 충분한 과냉각여유를 확보하여 안전하게 운전하기 위해서이다. 다음으로 고려해야 할 중요한 요소는 각종 계측기의 오차이다. 고리 1호기 잔열제거시스템의 유량을 지시하는 유량계의 오차는 1300 gpm에서  $\pm 110$  gpm을 초과하지 않는다. 따라서 본 연구에서 결론적으로 제시하는 최소유량은 위에서 도출한 실제유량 1300 gpm에 계측기 오차 110 gpm을 고려한 1410 gpm이 된다. 이러한 유량은 운영기술지침서의 운전모드 5 및 6과 배수 및 부분충수운전 절차서 등에 적용되어 부분충수운전이 적절히 수행되도록 할 수 있다.

### 3.2 고리 2호기 분석 내용

#### 가. 잔열제거시스템 성능해석을 위한 평가

고리 2호기의 잔열제거시스템 성능은 고리 1호기와 유사하다. 따라서 이를 바탕으로 성능

을 평가해보면, 14.76 시간에 원자로냉각재의 온도는 140. F에 이르며 이는 잔열제거계통이 노심의 잔열을 충분히 제거하고 있음을 그림 9를 통하여 알 수 있었다.

#### 나. 부분충수운전을 위한 잔열제거계통 유량감량 분석

잔열제거계통은 두 계열로 구성되어 있으므로, 두 계열로 운전 후 부분충수운전 시에 유량을 감소할 경우에 대한 분석을 먼저 수행하였다. 분석은 96 시간을 부분충수운전의 개시 시점으로 가정하고, 이 시점에서 유량이 감소되는 것을 가정하여 분석을 수행하였다. 분석 결과는 그림 10과 같다. 그러나 실제 고리 2호기의 운전은 운영기술지침서[9]의 제한에 따르면 한 계열의 잔열제거계통은 안전주입 기능을 위하여 대기 중이어야 한다. 따라서 본 운전은 운영기술지침서의 분석이 선행되어야 가능하다. 한 계열을 이용한 잔열제거계통 유량감량 분석은 유량 감소를 96 시간(4일)에서의 감소를 기준으로 하여 84 시간 및 108 시간을 각각 비교하여 검토하였다. 그림 11은 96 시간에서의 유량 감소를 보이며, 그림 12는 108 시간에서의 유량 감량 결과를 보여주고 있다. 위의 계산 결과에 의거할 때 그림 11의 조건 즉, 원자로 정지 후 잔열제거계통을 한 계열로 운전을 시작하여 RCS를 냉각하다가 원자로 정지 후 96시간에 잔열제거계통의 유량을 줄여서 운전하고 붕괴열 곡선은 WCAP-11916을 사용하여 계산하는 것이 가장 적절한 평가라고 판단된다. 분석 결과 유량 감량 후 RCS의 제한 온도를 140. F로 설정한다면 잔열제거계통의 유량을 2160 gpm에서 1300 gpm까지 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 다음으로 고려해야 할 중요한 요소는 각종 계측기의 오차이다. 고리 2호기 잔열제거계통의 유량을 지시하는 유량계의 오차는 1300 gpm에서  $\pm 120$  gpm을 초과하지 않는다. 따라서 본 보고서에서 결론적으로 제시하는 최소유량은 위에서 도출한 실제유량 1300 gpm에 계측기 오차 120 gpm을 가산한 1420 gpm이 된다.

이러한 유량은 운영기술지침서의 운전모드 5 및 6과 배수 및 부분충수운전 절차서에 적용되어 부분충수운전이 적절히 수행되도록 할 수 있다.

### 3.3 잔열제거계통 유량감량에 대한 기기건전성 영향 분석

잔열제거계통의 기기건전성 관점에서 Palo Verde 발전소의 정지냉각펌프 저유량 운전 시(2800 gpm - 3400 gpm) 발생한 acoustic rumble 현상과 U.S.NRC Information Notice 93-08에 언급된 저유량 운전 시 과도한 축방향 하중으로 인한 잔열제거펌프 베어링 파손 가능성 등도 최소 유량 선정에 고려되어야 한다. 또한 안전관련 펌프가 설계 운전범위 이외에서 운전될 때 받을 수 있는 손상에 관하여 언급한 U.S.NRC Bulletin 88-04의 권고 사항도 고려하여야 한다. 고리 1,2호기에서 선정된 최소유량은 관련 펌프 성능 자료를 통하여 확인한 결과 만족하는 것으로 판단되었다.

일반적으로 잔열제거운전 정상유량 범위보다 낮은 유량으로 잔열제거펌프를 운전할 경우 공동현상(cavitation)과 재순환(recirculation) 등에 의한 진동과 추력(thrust) 하중 증가로 잔열제거펌프의 성능에 나쁜 영향을 줄 수 있다고 알려져 있다. 펌프의 수명은 통상적으로 밀봉장치(mechanical seal)와 베어링의 수명에 따라 결정되므로 베어링의 추력하중이 가능하더라도 설계값 이하로 유지될 수 있도록 운전함이 바람직하다.

고리1호기의 경우 정상적인 잔열제거운전 시는 잔열제거펌프의 설계유량이 2000 gpm으로 설계되어 있다. 또 고리2호기의 경우 정상적인 잔열제거운전 시는 잔열제거펌프의 설계유량이 2250 gpm이고 전구간의 유량에서 운전상 문제점이 없도록 설계되어 있으며, 최소우회유량 125 gpm으

로 연속운전이 가능하도록 설계되어 있다.

일반적으로 잔열제거펌프는 시험을 위한 단기간 운전을 제외하고는 최대 효율점(BEP) 유량의 25% 이하에서의 운전은 피하는 것이 바람직하며, 장기간의 운전을 위해서는 최대 효율점 유량의 50% 이상의 운전범위에서 운전함이 바람직하다. 고리1호기 잔열제거펌프의 성능곡선에 의하면 최대 효율점에서의 유량은 2250 gpm이므로 이 값의 50%는 1125 gpm이 된다. 따라서 고리 1호기는 1125 gpm 이상의 잔열제거계통 유량을 유지한다면 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

한편 고리2호기 잔열제거펌프의 성능곡선에 의하면 최대 효율점에서의 유량은 2600 gpm 이며 이 값의 50%인 1300 gpm 이상의 잔열제거계통 유량을 유지한다면 큰 문제가 없을 것으로 판단된다.

### 3.4 봉산 희석 및 성층화

봉산희석사고 분석의 목적은 봉산희석에 의해 임계에 도달할 때까지 요구되는 최소시간을 결정하여 정지여유도가 소멸되기 전에 운전원이 사고를 감지하고 조치를 취하는데 충분한 시간이 있음을 확인하는 것이다. RCS 재고량이 최소인 부분충수운전 중의 봉산희석사고가 가장 제한적인 결과를 보인다. 그러나 고리 1,2호기 최종안전성분석보고서의 봉산희석사고 해석에 사용된 방법론에 의하면 잔열제거계통의 유량은 재임계 도달시간 계산에 고려되지 않고 있기 때문에 잔열제거계통 유량감량은 부분충수운전 중 봉산희석사고 발생시 운전원이 사고를 감지하고 조치하는 시간에 영향을 미치지 않는다.

봉산의 성층화는 원자로냉각재계통에 비등이 발생하거나 노심 내에서 상당한 온도구배가 형성되지 않는 한 발생하지 않는다. 부분충수운전은 운전모드 5와 운전모드 6에서 가능하며 이 두 가지의 운전모드에서 최소 요구 유량이 제공되면 노심에서 비등이 일어나지 않으므로 비등에 의한 봉산 성층화는 일어나지 않는다. 또한 냉각수의 혼합은 최소 요구 유량이 잔열제거펌프를 통해 원자로냉각재계통 및 노심으로 지속적으로 순환되므로 봉산 성층화를 방지할 수 있다. 잔열제거계통의 유량을 줄일 경우 봉산 성층화에 영향을 미치는 인자로서 원자로냉각재가 노심 및 잔열제거계통을 한번 순환하는데 소요되는 시간의 증가를 들 수 있다. 이러한 순환 소요시간은 부분충수운전 시 냉각재 총 체적을 잔열제거계통 유량으로 나눔으로써 계산할 수 있다.

고리1호기의 부분충수운전 시 냉각재 총 체적은 잔열제거계통 한 계열을 포함하여 2224 ft<sup>3</sup>이므로 1920 gpm으로 운전될 때 순환 소요시간은 8.7분 정도이며, 1300 gpm으로 유량을 감량하여 운전하더라도 12.8분 정도가 소요된다. 또한 고리2호기의 부분충수운전 시 냉각재 총 체적은 잔열제거계통 한 계열을 포함하여 2542.7 ft<sup>3</sup>이므로 2160 gpm으로 운전될 때 순환 소요시간은 8.8분 정도이며, 1300 gpm으로 감량 운전하더라도 14.6분 정도가 소요된다. 이러한 시간 증가는 잔열제거계통 운전을 고려하지 않은 봉산희석사고에 의한 재임계 도달시간에 비하여 충분히 작으므로 혼합된 냉각수의 지속적인 순환을 통해 봉산 성층화를 방지할 수 있다고 판단된다.

따라서 부분충수운전을 위한 유량 감량이 이루어 지더라도 노심 내 비등이 발생하지 않고 또한 충분히 혼합된 냉각수가 노심을 순환하므로 봉산의 성층화는 일어나지 않을 것으로 판단된다.

### 3.5 잔열제거계통 배관 및 밸브 영향평가

잔열제거운전 정상유량으로 운전하다가 비교적 짧은 시간 내에 그보다 낮은 유량으로 줄여서

운전할 경우 잔열제거계통의 배관에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 이때 고려하여야 할 사항은 배관에서 캐비테이션(Cavitation) 발생여부와 체크밸브에 의한 수격현상(Water hammer)이 발생하는 지 여부이다.

잔열제거계통 유량 조절밸브는 주입 유로 상에 위치한 밸브로서 이 밸브는 유량 조절 기능을 가지고 있는 글로브형 공기압구동밸브(Air Operated Valve; AOV)이다. 일반적으로 글로브형 유량 조절밸브의 경우 15% - 85% 범위 내에서 유량제어가 가능하며, 이는 유량을 미세한 범위까지 제어할 수 있다는 의미이다. 일반적인 산업계 표준과 설계관행에 따르면 부분충수운전을 위해 유량을 정격 유량의 50% 이하로 줄이지 않는 한에는 유량조절밸브에서 캐비테이션 이 발생할 가능성은 없다고 판단된다.

또한 펌프가 요구하는 필요 흡입수두(Net Positive Suction Head Required; NPSHr)보다 유효 흡입수두(NPSH Available; NPSHa)가 작으면 펌프에서 캐비테이션이 발생한다. 유효 흡입수두는 주로 펌프가 운전되고 있는 배관계통의 함수로서, 펌프의 유량이 감소하는 것은 배관 압력 손실이 줄어든다는 점에서 유효 흡입수두가 증가하므로 펌프에서의 캐비테이션 발생가능성은 없다고 판단된다. 또한 고리1호기의 경우 정상적인 잔열제거운전 시는 잔열제거펌프를 1920 gpm으로 운전하다가 부분충수운전 시 제한된 시간동안 1300 gpm(계측기 오차 제외)으로 감량운전을 하고, 고리2호기의 경우 정상적인 잔열제거운전 시는 2160 gpm으로 운전하다가 1300 gpm(계측기 오차 제외)으로 감량하여 운전하게 된다. 즉 부분충수운전 시 유량감량운전은 잔열제거펌프를 정지하거나 시동하는 운전이 아니고, 정상유량으로 장시간 안정적인 운전을 하다가 절차에 따라 서서히 유량을 감량하여 운전하는 것이므로 수격현상의 발생가능성이 없다고 판단된다.

### 3.6 임계수위 분석

부분충수운전 시 고온관 수위의 허용 운전범위를 산정하기 위해서는 임계수위에 대한 고려가 필요하다. 부분충수운전 시 원자로냉각재계통의 고온관과 잔열제거계통의 흡입관 연결부에서 발생하는 와류으로 인한 잔열제거계통 내로의 공기 흡입현상을 분석하기 위하여 여러 기관들이 모형 실험을 수행하였다. Westinghouse사에서도 자유수면의 와류가 형성됨으로 인한 잔열제거계통 내로의 공기 흡입현상을 분석하기 위하여 모형실험을 수행하고, 그 결과를 1988년 7월 WCAP-11916으로 발표한 바 있다.

WCAP-11916에 의하면 고리1,2호기와 같이 잔열제거계통의 흡입배관이 고온관과 45°를 이루고 8인치 배관을 가진 경우 잔열제거 유량과 고온관 임계수위와의 관계는 그림 13과 같다. 이 그림에 의하면 2000 gpm의 잔열제거 유량에 대한 임계수위는 대략 고온관 중심선 부근이다. 한편 고리 1,2호기 부분충수운전 절차서에 따르면 고온관 수위가 고온관 중심선의 상부 10 cm(약 4 인치)일 때 노즐댐을 설치하므로 고리1호기의 잔열제거 유량 1920 gpm이나 고리2호기의 2160 gpm으로 운전하더라도 임계수위에서 어느 정도 여유가 확보되었다.

한편 잔열제거계통 유량이 1500 gpm 이하로 감량하게 되면 임계깊이는 고온관 중심선보다 1 인치(2.54 cm) 정도 낮아진다. 따라서 고리1호기의 경우 잔열제거계통의 최소유량이 1920 gpm에서 1410 gpm으로 감량될 경우 임계수위 측면에서 약 1인치 정도의 운전여유도가 증가한다. 고리 2호기에서도 2160 gpm에서 1420 gpm으로 유량이 감량되면 약 1인치 정도의 운전여유도가 추가로 발생한다. 즉 잔열제거계통의 최소유량을 감량할 경우 임계수위관점에서 고온관 수위의 운전

여유도는 현재보다 1인치(2.54 cm) 정도 증가할 것으로 나타났다.

#### 4.0 결론

고리 1,2호기 부분충수운전 시 잔열제거계통의 유량 감량에 따른 잔열제거 능력에 대한 성능 분석이 수행되었다. 아울러 유량감량과 관련한 제반 고려 사항, 즉, 봉산 희석 사고에 대한 고려, 저유량에서 펌프 성능평가, 계기오차에 대한 고려, 계통 기기에 대한 건전성 평가 등이 검토되었고 이를 바탕으로 잔열제거계통 유량감량과 관련한 운영기술지침서 및 운전절차서 개정에 필요한 최소유량이 산정되었다.

고리 1호기의 경우 부분충수운전을 위한 유량 감량 후 원자로냉각재의 허용 평균온도를 140. F로 제한한다면 최소유량은 유량계 계기오차를 고려하여 1920 gpm(436 m<sup>3</sup>/hr)에서 1410 gpm(320.2 m<sup>3</sup>/hr)까지 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 고리 2호기의 경우 최소유량은 2160 gpm(490.6 m<sup>3</sup>/hr)에서 1420 gpm(322.5 m<sup>3</sup>/hr)까지 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 최소유량으로 감량하여 운전할 경우 임계수위 관점에서는 현재보다 약 1인치(2.54 cm) 정도의 추가 운전여유도가 확보되는 것으로 평가 되었다.

#### 후 기

본 연구는 전력연구원과 한국전력기술(주) 간의 “고리 1,2호기 부분충수 운전 중 RHR 유량 감량 분석” 연구 과제의 일환으로 수행되었음.

#### 5.0 참고문헌

- [1] U.S.NRC Generic Letter 88-17, Loss of Decay Heat Removal, Oct. 1988.
- [2] U.S.NRC IN 93-08, Failure of RHR Pump Bearings Due To High Thrust Loading, 2/1/93
- [3] U.S.NRC Bulletin 88-04, Potential Safety-Related Pump Loss, 5/5/88
- [4] 고리 1호기 최종안전성분석보고서, Section 5.5.7 RHR System
- [5] 고리 2호기 최종안전성분석보고서, Section 5.5.7 RHR System
- [6] S. K. Kim, Software Verification and Validation Report for KDSCNT1 Version 00, 0000-SP-VV-001, 6/28/94
- [7] WCAP-11916, Loss of RHRS Cooling while the RCS is Partially filled, July 1988
- [8] 고리 1호기 최종안전성분석보고서, 운영기술지침서
- [9] 고리 2호기 최종안전성분석보고서, 운영기술지침서

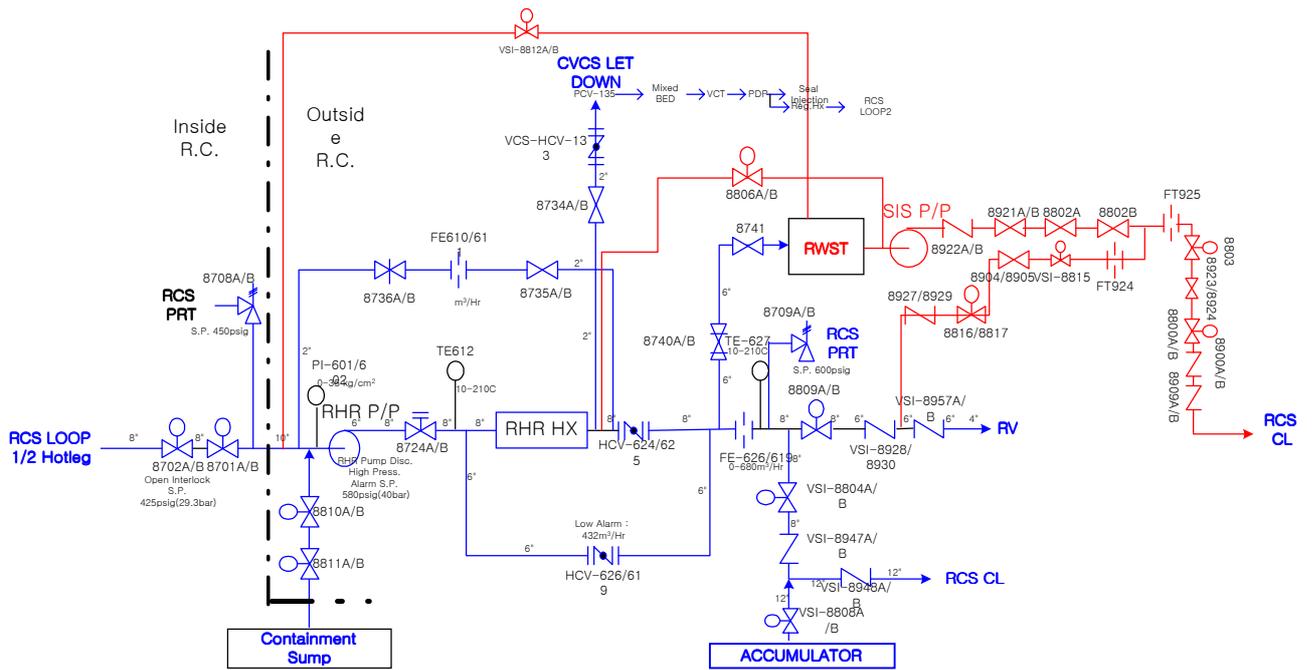


그림 1 고리 1호기 잔열제거계통 구성도

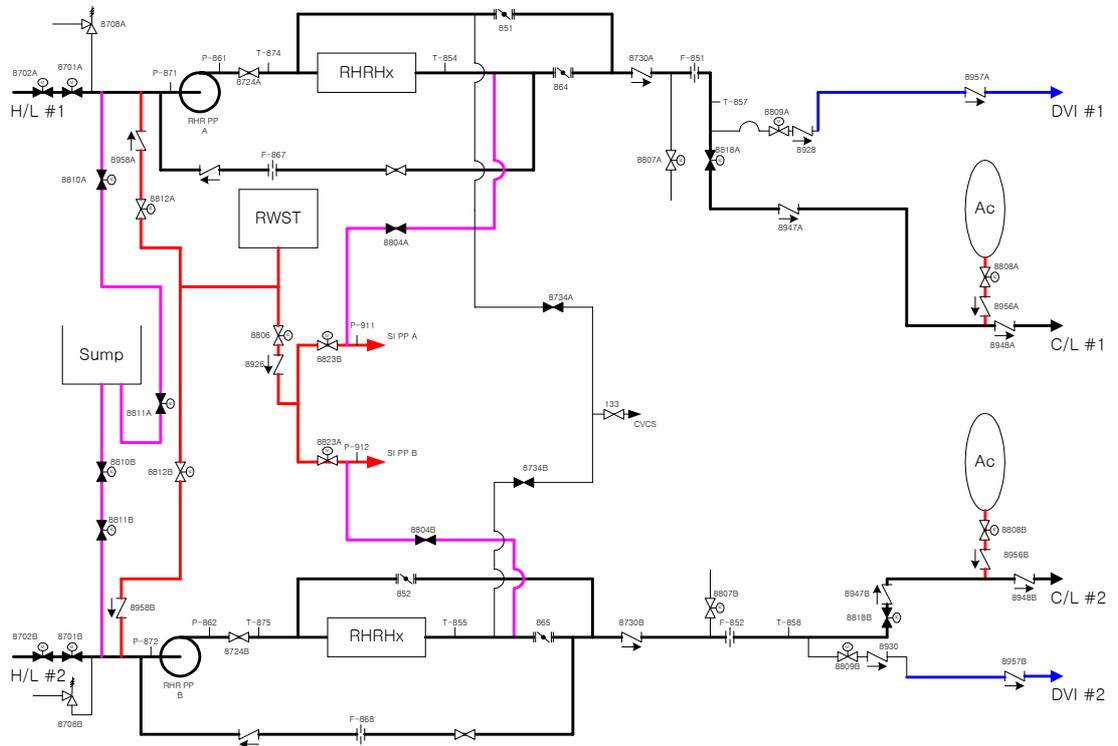


그림 2 고리 2호기 잔열제거계통 구성도

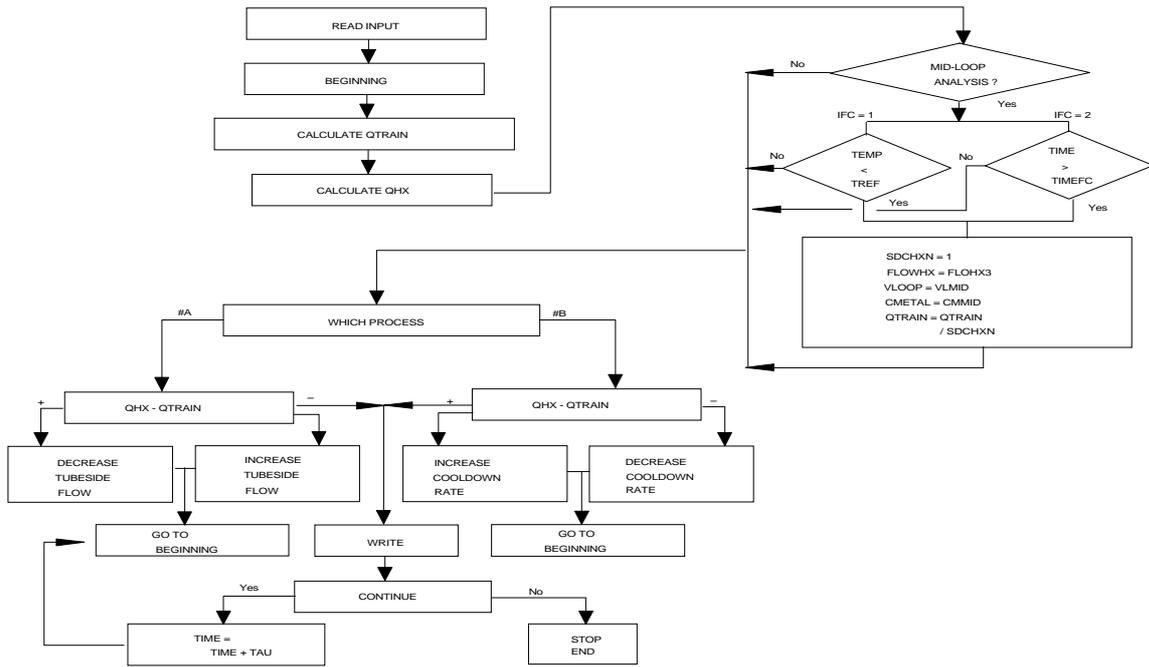


그림 3 KDCSNT1 Code 기본계산 흐름도

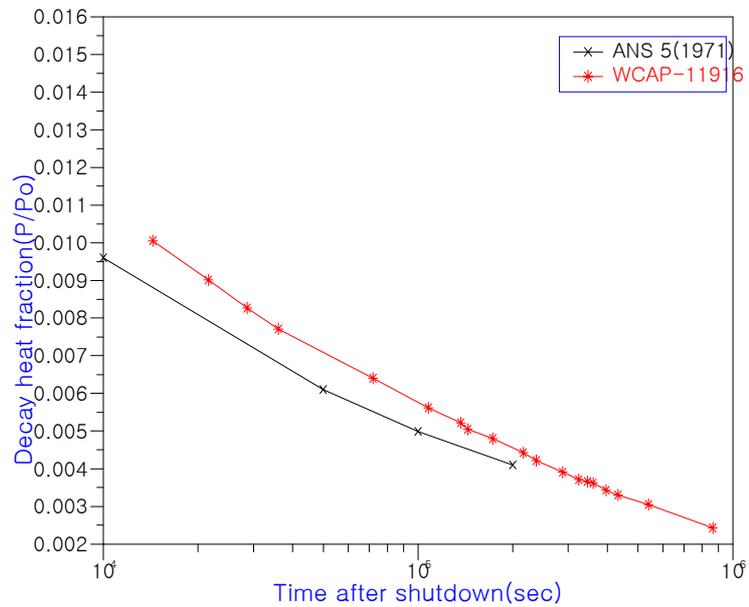


그림 4 KDCSNT1 Code에서 사용되는 붕괴열곡선 비교

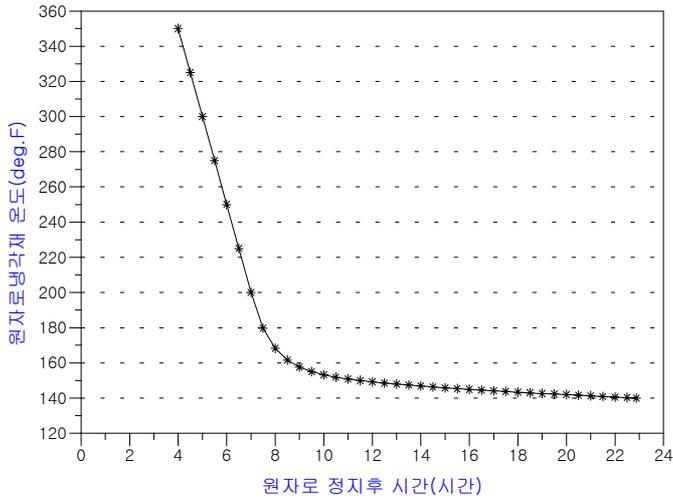


그림 5 고리 1호기 잔열제거계통 성능 분석

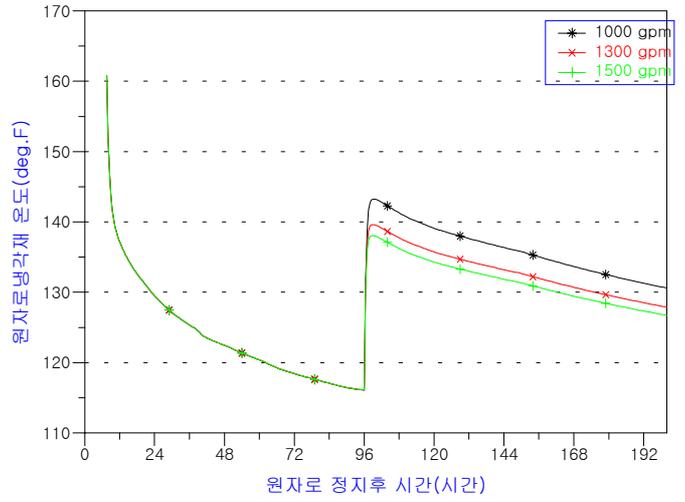


그림 6 고리 1호기 유량 감량  
(2 계열 냉각, 96 시간 유량 감량)

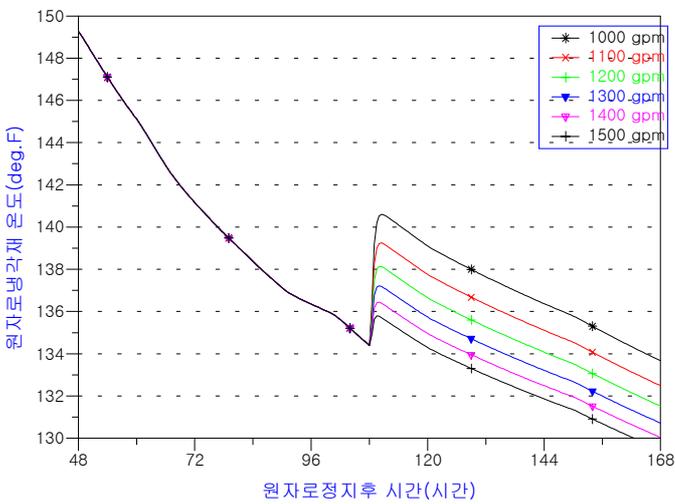


그림 7 고리 1호기 유량 감량  
(한 계열 냉각, 108 시간 유량 감량)

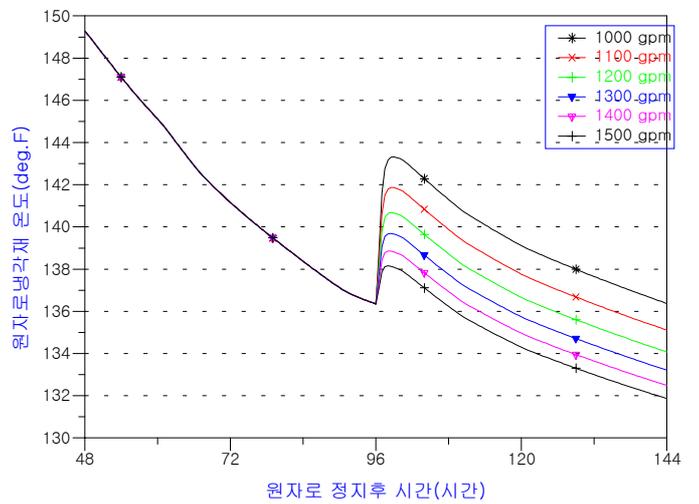


그림 8 고리 1호기 유량 감량  
(한 계열 냉각, 96 시간 유량 감량)

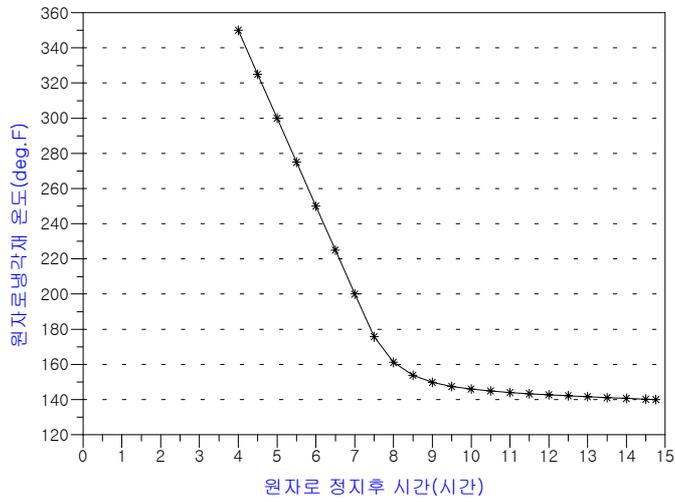


그림 9 고리 2호기 잔열제거계통 성능분석

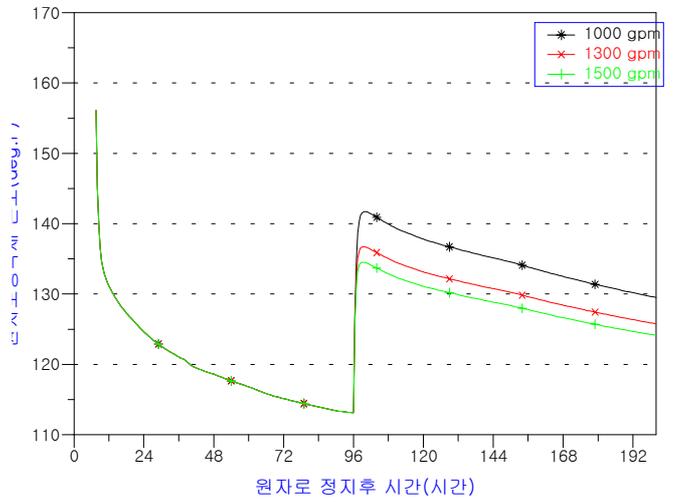


그림 10 고리 2호기 유량 감량  
(두 계열 냉각, 96 시간 유량 감량)

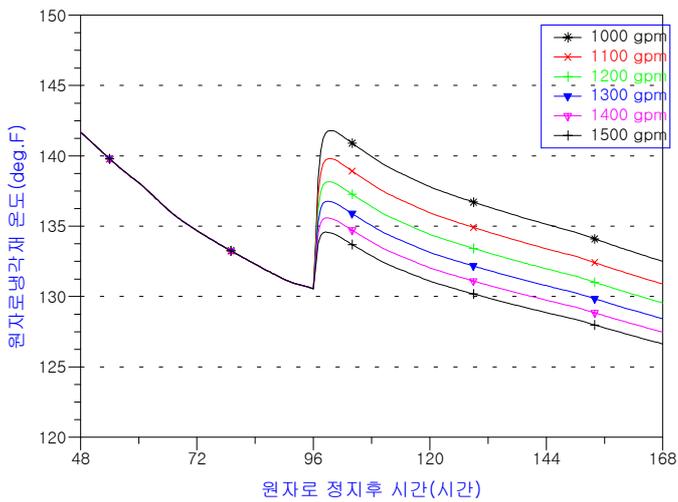


그림 11 고리 2호기 유량 감량  
(한 계열 냉각, 96 시간 유량 감량)

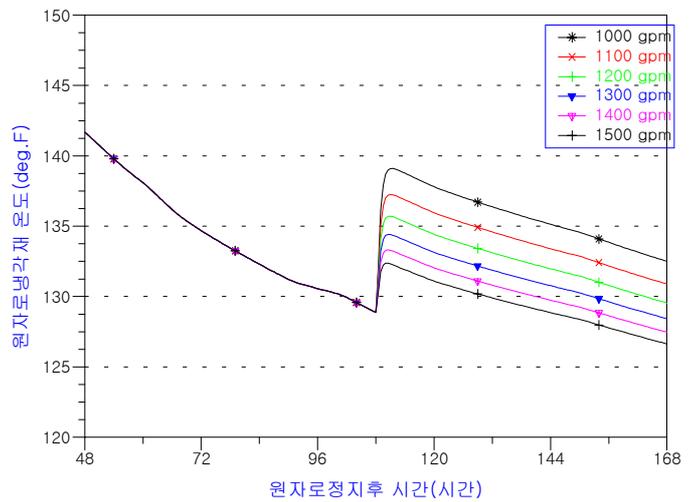


그림 12 고리 2호기 유량 감량  
(한 계열 냉각, 108 시간 유량 감량)

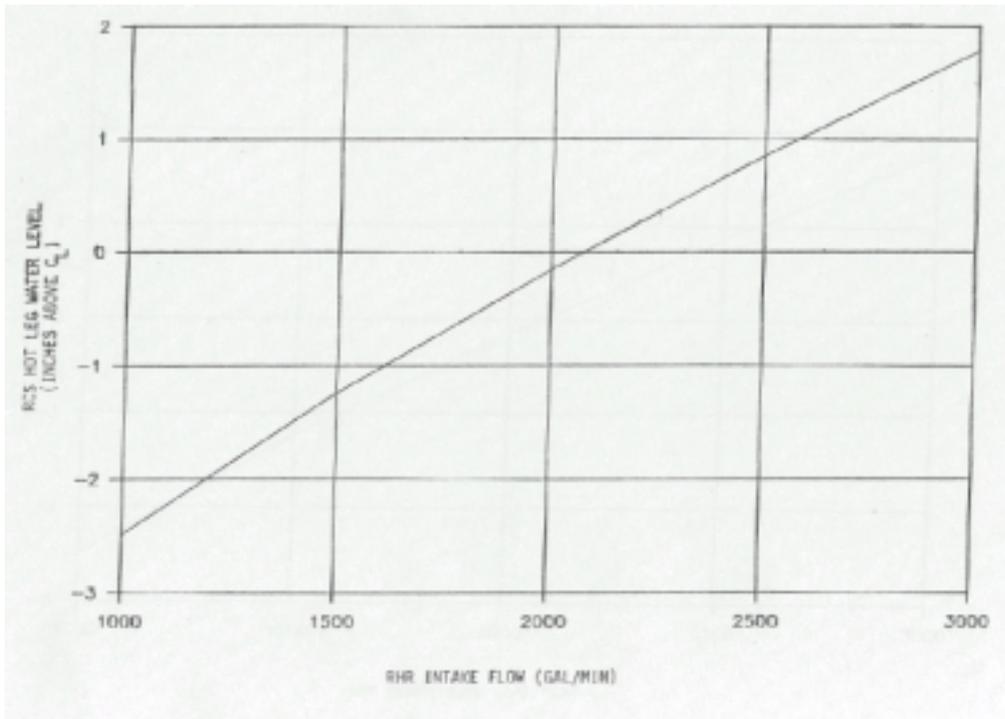


그림 13 잔열제거 유량 대비 임계수위