

하나로에서의 원자로 열출력 이상 상승 방지에 대한 연구

Research on Prevention of the Abnormal Increase of Thermal Power In HANARO

최호영, 이 문, 김영기, 임인철, 황승렬, 전병진

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

하나로의 출력 운전을 시작한 이래 지금까지 원자로 기동 시나 운전 중에 열출력의 이상 상승에 의한 원자로 불시 정지가 여러 차례 발생하였다. 이에 따라 원자로 열출력이 이상 상승하여 원자로가 정지된 사례를 분석하고, 재발 방지를 위한 대책을 수립하여 실행하였다. 그 결과, 열출력 이상에 의한 원자로 정지의 횟수는 현저하게 줄어들었다.

Abstract

Since the power operation of the HANARO started in 1995, the reactor trip occurred many times during startup and power operation due to abnormal increase of thermal power. For the resolution of this problem, the reactor trip records were analyzed and, several countermeasures were taken. As result, the number of reactor trip due to N/T mismatch decreased remarkably.

1.0 서 론

하나로의 원자로 제어계통에는 원자로 중성자 출력과 열출력의 차이가 3 MW 이상이 되는 경우에 원자로가 정지되도록 중성자출력/열출력 불일치(Neutron/Thermal Power Mismatch, N/T Mismatch)를 정지 변수로 사용하고 있다. 이 정지 변수는 원래 출력 운전 중에 원자로 2차 계통이나 반사체 계통의 이상에 의해 열출력이 비정상적으로 변동하거나 원자로 출력 상승 과정에서 중성자 출력이 비정상적으로 상승하는 경우에 원자로를 정지시

키기 위해 마련되었다. 또한, 열출력이 고출력 제한치 이상으로 상승하면 원자로가 정지되도록 되어있다. 그런데, 1995년 하나로의 출력 운전이 시작된 이후 지금까지, 원자로 기동 시나 운전 중에 열출력의 일시적인 비정상적 상승으로 원자로가 N/T 불일치에 의해 불시 정지되는 사례가 여러 차례 발생하였다. 또한, 열출력이 고출력 정지 제한치 이상으로 상승하여 원자로가 불시 정지되기도 하였다. 이에 따라 원자로 열출력이 이상 상승하여 원자로가 정지된 사례를 분석하고, 재발 방지를 위한 대책을 수립하여 실행하였다. 본 논문에서는 열출력 이상 상승에 따른 원자로 정지 사례를 분석한 결과와 이상 상황의 재발 방지를 위해 수행한 일들을 기술한다.

2.0 본 론

2.1 하나로 개요

하나로의 설계 출력은 30 MW이다. 노심에서 나오는 열을 제거하기 위해 1차 및 2차 냉각계통이 있다. 1차 냉각계통은 노심을 항상 안전하게 유지하기 위해 핵연료에서 발생하는 핵분열 에너지를 제거할 수 있도록 노심의 냉각수를 순환시키는 계통이다. 이 계통은 원자로가 100% 출력으로 운전할 때에 노심에서 발생하는 핵분열 에너지 27.5 MW, 냉각수 순환 펌프에서 나오는 열 0.4 MW, 수조 내 임시 저장 핵연료와 각종 시험 등에서 발생하는 열 0.1 MW를 합한 28 MW의 열량을 제거할 수 있도록 설계되었다. 그리고 나머지 2MW는 반사체 냉각 계통에서 제거한다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 1차 계통은 예비 루프가 없는 단일 루프로서 침니에는 2개의 유출관이 있어 2개의 관로를 형성하고 각각의 관로마다 1대의 펌프와 1대의 열교환기가 설치되어 있다. 이들 각 관로는 정상 운전 시에 50%의 유량과 열하중을 감당한다. 펌프와 열교환기를 거친 냉각수는 다시 1개의 유입관으로 모인다. 유입관으로 흐르는 냉각수는 노심 유입 관로와 우회 관로의 2개 관로로 나뉘어 흐르게 된다. 1차 냉각수의 설계유량은 780 kg/sec이며, 이중 703 kg/sec는 노심을 통하여 흐르며, 77 kg/sec는 우회 관로를 통하여 흐른다. 냉각수의 입출구 설계 온도는 각각 35°C와 43.6°C이다[1,2].

그림 2는 2차 냉각계통의 개략도이다. 이 계통은 용량이 50%인 펌프 3대, 냉각탑 1기, 냉각탑 저장조 및 관련 기기들로 구성되어 있는 개방 회로이다. 2대의 펌프를 이용하여 냉각수를 순환시키면서 원자로에서 발생한 열을 열교환기에서 흡수하여 냉각팬의 강제 통풍 방식으로 열을 제거한다. 냉각탑은 입구의 외기 습구 온도가 28°C일 때에 3600 m³/hr의 유량에 대해 입출구 온도는 32°C와 40°C로 설계되어 33 MW의 부하를 감당한다[1,2].

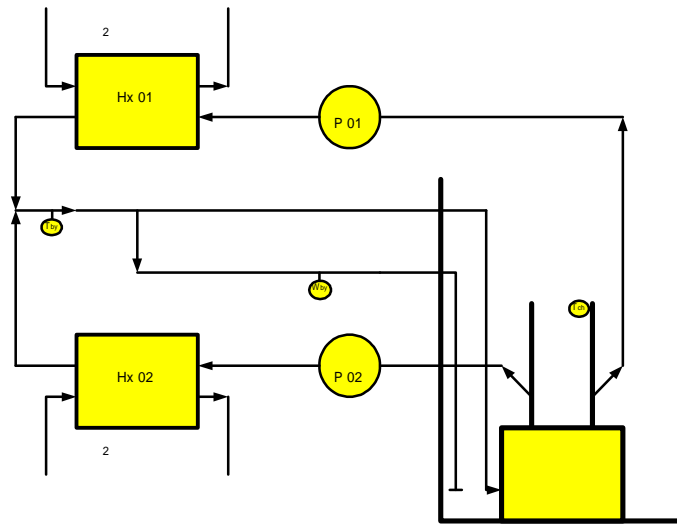


그림 1. 1차 냉각 계통 개략도

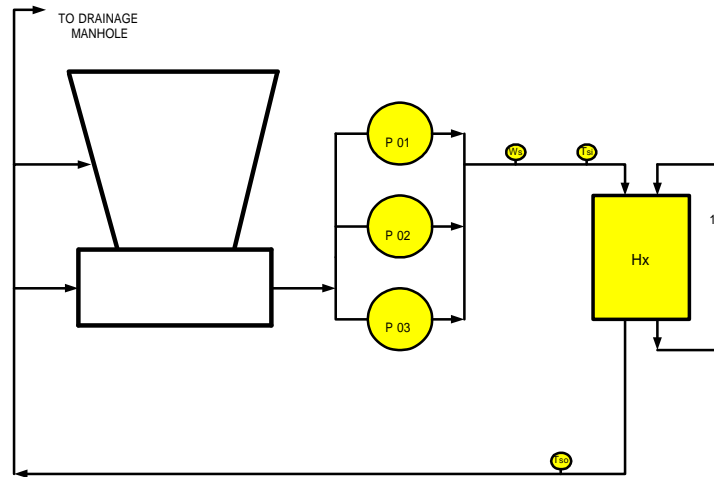


그림 2. 2차 냉각 계통 개략도

2.2 하나로에서 열출력 계산 방법

하나로에서 원자로 열출력(Q_{th})은 2차계통에서 측정된 열출력(Q_s)에서 우회 유동에 의한 열출력(Q_{by})과 1차 펌프 열출력(Q_p)을 뺀 것인데, 계산식은 아래의 식 (1)과 같다[3].

$$Q_{th}(MW) = Q_s - Q_{by} - Q_p \quad (1)$$

2차 계통 열출력(Q_s), 우회 유동 열출력(Q_{by}) 및 펌프 열출력(Q_p) 계산식은 식 (2), (3) 및 (4)와 같다.

$$Q_s = W_s * C_p * (T_{so} - T_{si}) \quad (2)$$

$$Q_{by} = W_{by} * C * (T_{ch} - T_{by}) \quad (3)$$

$$Q_d = 1차 냉각펌프 열출력(0.2MW) * 2 \quad (4)$$

이들 식에 사용된 변수의 정의는 아래와 같다.

W_s : 2차 계통 유량

T_{si} : 2차 계통 열교환기 입구 온도

T_{so} : 2차 계통 열교환기 출구 온도

W_{by} : 우회 유량

T_{ch} : 침니 상부에서의 1차 계통 냉각수 온도

T_{by} : 우회 관로로 들어오는 1차 냉각수 온도

출력이 안정된 상태에서 유량과 온도 신호의 흔들림(fluctuation)으로 인한 열출력의 변동폭은 최대 0.5 ~ 0.6 MW에 이르고 있다. 이러한 신호의 흔들림 현상은 계측기의 오차 또는 응답 특성에 따른 것이다. 유량 신호의 경우는 이미 약 16초의 damping 회로를 거쳐 제어컴퓨터로 입력되고 있기 때문에 고주파수 성격의 흔들림 현상은 없다고 할 수 있다. 그러나, 약 10kg/s 정도의 완만한 흔들림 현상은 지금도 남아 있고 이를 완전히 제거할 수는 없다. 열교환기 양단의 온도차 신호를 얻기 위하여 2차 배관에 설치한 온도신호감지기(RTD)의 경우는 damping 회로 없이 직접 제어컴퓨터로 입력되기 때문에 신호의 흔들림 현상이 상대적으로 심하고 약 0.1℃ 정도의 편차를 가지고 있다[3].

2.3 원자로 운전 경험

1997년부터 2001년까지의 원자로 불시 정지 횟수와 열출력 이상에 의한 원자로 정지 횟수에 대한 통계는 그림 3과 같다. 열출력 이상에 의한 정지를 크게 ‘고열출력에 의한 원자로 정지’, ‘중성자출력/열출력 불일치 정지 변수에 의한 원자로 정지’, ‘온도 신호 비정상에 의한 원자로 정지’ 등 3가지로 구분하고 각 경우에 대한 분석을 수행하였다.

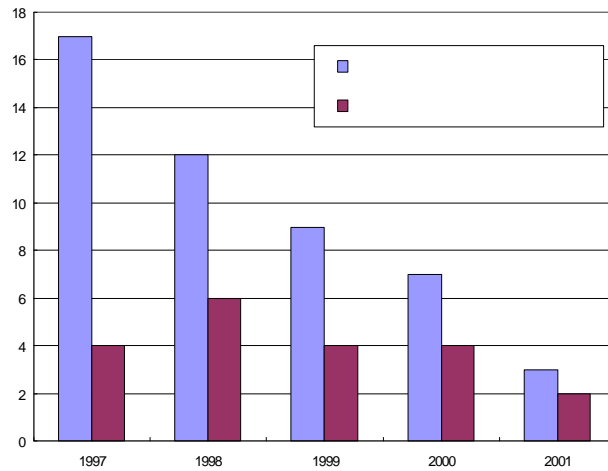


그림 3. 열출력 이상에 의한 원자로 정지 횟수

가. 고열출력에 의한 원자로 정지

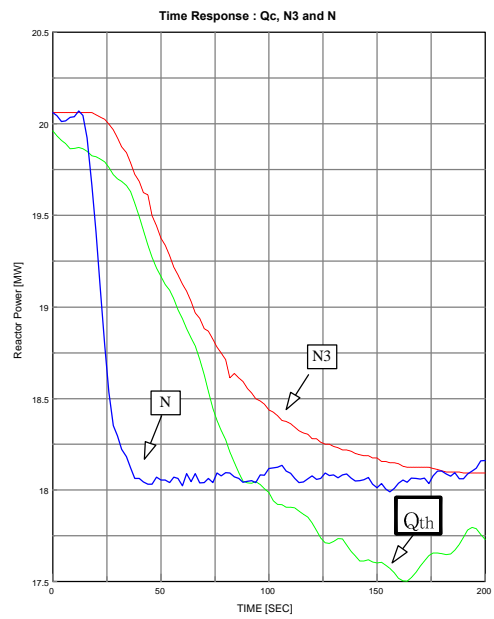
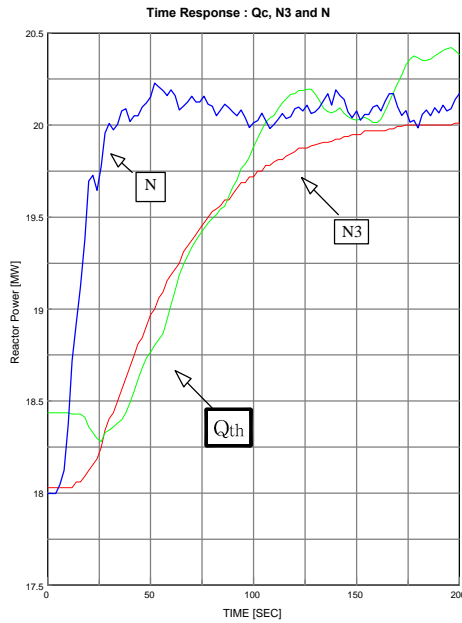
고열출력에 의한 원자로 정지는 해당 기간 중 총 6회로 모두 2차 냉각수 저장조(basin)에 2차 냉각수를 충수하거나 또는 냉각팬의 속도를 바꾸는 것과 관련된 것으로 판단되었다. 대부분의 원자로 정지는 열출력이 중성자출력보다 약 1.5 ~ 2.0 MW 정도 높은 상태에서 냉각수를 충수하거나 냉각팬 속도를 저속에서 고속으로 바꾼 후 원자로 일시 정지가 발생하였다. 냉각수를 충수하거나 냉각팬의 속도를 높이면 식 (2)에 따라 계산되는 Q_s 가 순간적으로 높아져 이에 따라 열출력 계산값이 비정상적으로 상승하여 원자로가 정지된 것이다.

그리고 원자로가 목표 출력에 임계된 후 약 3시간 이상 기다려야만 열출력이 평형 상태에 도달함을 확인하였다[4]. 원자로가 목표 출력에 안정되어 있는 상태에서 충수 밸브를 완전히 열어 저장조 충수를 실시하였을 경우 약 1.5 MW 정도의 열출력 상승이 발생하였다.

나. 중성자출력/열출력 불일치 정지 변수에 의한 원자로 정지

중성자출력/열출력 불일치에 의한 원자로 정지는 총 9회로 원자로 기동 후 출력 상승 중에 대부분 발생하였다. 이는 원자로 출력 상승 중에 중성자출력과 열출력이 충분히 안정될 때까지 기다리지 않고 급하게 출력을 상승하였기 때문에 발생하였다.

중성자 출력(N)의 변화에 따른 열출력(Q_{th})과 지연된 중성자 출력(N3)의 응답 특성은 그림 4와 같다. 이 특성 곡선은 출력을 18 MW와 20 MW 사이에서 상승 또는 하강시키며 측정된 것이다. 이 그림에서 보면 목표 출력 근처에서 N3가 Q_{th} 에 비하여 응답 특성이 느려지고 있다. N3와 Q_{th} 의 응답 특성을 일치시키는 것도 중성자 출력과 열출력의 차이를 줄이는데 기여할 것으로 판단되었다[4].



18MW → 20MW

20MW → 18MW

그림 4. N3와 Q_{th}의 응답 특성

다. 온도 신호 비정상에 의한 원자로정지

원자로 정지 시 경보 프린터 출력을 검토한 결과, 원자로 열출력 계산에 사용되는 온도 신호의 out-of-scale 비정상에 의한 원자로 정지가 총 5회 발생하였다. 원자로 열출력 계산에 사용되는 온도 신호의 구성은 그림 5와 같다. 열출력 계산에 사용되는 온도 신호는 현장의 온도신호감지기, 제어실 패널의 신호변환기 그리고 제어컴퓨터 입력 카드 등으로 구성되어 있다. 온도 신호가 순간적으로 out-of-scale 되는 것은 여러 가지 원인이 있을 수 있으나 저항 측정회로의 단선이 대체적이다. 온도신호 처리와 관계있는 신호변환기 및 제어컴퓨터 입력카드에 대한 점검을 실시하였으나 별 다른 이상 현상은 발견되지 않았다. 현장의 저항온도감지기 단자 결합상태를 확인하는 과정에서 설치 상의 문제점을 발견하였다. 저항온도감지기는 배관에 용접으로 설치되어 있는 보호관(thermowell) 속에 설치되는데 감지기에 비하여 보호관의 길이가 짧아 감지기 끝 부분이 보호관에 밀착된 상태로 유지되고 있었다. 감지기가 설치된 배관은 냉각수가 흐를 경우 자체 진동이 있고 이러한 유체유발진동은 보호관에 밀착되어 있는 감지기 끝 부분으로 전달되어 순간적으로 접촉 불량에 일어나게 되고 그 순간 온도신호의 out-of-scale 비정상이 발생된 것으로 판단되었다.

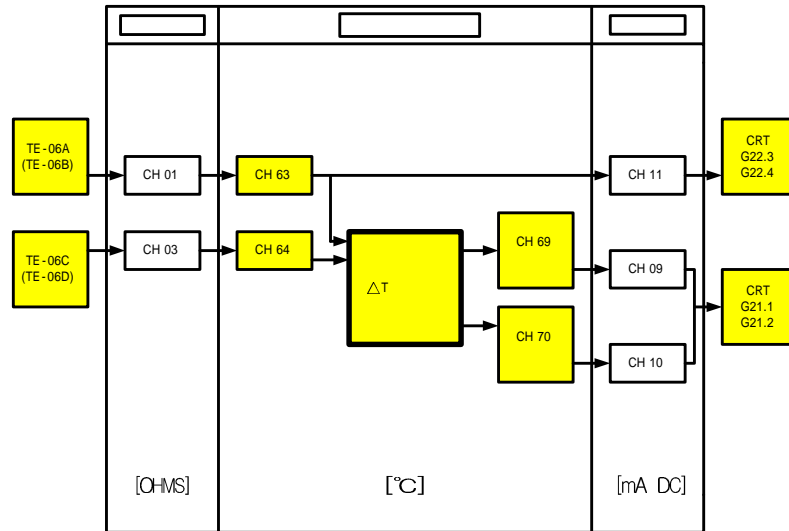


그림 5. 원자로 열출력 계산에 사용되는 온도 신호의 구성

3.0 열출력 이상에 의한 원자로 정지 방지 대책

3.1. 2차 냉각수 저장조 충수 밸브 설계 변경

건설 시에 설치된 충수 밸브는 열림/단힘 기능만 있는 모터구동밸브(MOV) 형식이므로 완전 열림 또는 완전 단힘의 동작만 가능하였다. 따라서, 밸브를 열 경우 한꺼번에 많은 용수가 저장조로 유입되는데 이와 같은 순간적인 용수의 공급은 저장조 냉각수 온도를 급격하게 변화시키고, 냉각수 온도의 급격한 변화는 원자로 열출력의 비정상화를 야기하여 N/T 불일치에 의한 원자로 정지를 수 차례 발생시킨 바 있다. 이러한 비정상적인 현상은 냉각수 온도가 낮은 겨울철에 집중적으로 발생하였다. 겨울철 원자로 운전중 충수 밸브를 열어 충수를 하게 되면 약 30°C 정도인 저장조 냉각수에 10°C의 찬 용수가 갑자기 공급됨으로써, 전체적인 냉각수 온도가 낮아지고 열교환기 입구에서의 냉각수 온도도 급격하게 떨어지면서 열출력이 짧은 시간 내에 증가하여 중성자 출력과의 불일치가 발생하였던 것이다. 갑작스런 냉각수의 공급을 방지하기 위해서 기존의 열림/단힘 형식의 액츄에이터(actuator)를 제거하고, 비례 제어가 가능한 새로운 액츄에이터를 교체 설치함으로써 제어실에서 운전원들이 효과적으로 저장조 충수 및 수위 조절을 실시할 수 있도록 하였다.

3.2 저장조 충수 위치 개선

기존의 저장조 충수 위치는 2차 냉각수 펌프 흡입구에 인접하고 있어 저장조 냉각수의 평균 온도보다 낮은 냉각수가 직접 열교환기로 유입되어 N/T 불일치를 유발하는 원인이 되었다[5]. 이를 방지하기 위해서 충수 배관의 길이를 연장하여 저장조 충수 위치를 펌프 흡입구에서 멀리하여 충수된 냉각수가 기존의 냉각수와 섞여 서서히 열교환기로 유입되도록 하였다.

3.3 원자로 기동 방법 개선

그간의 원자로 출력 교정 결과를 보면 N/T 불일치의 양은 원자로 출력이 8 MW에서 10 MW 사이일 때에 제일 크게 나타났다[4]. 이 구간에서 N/T 불일치 양을 최소화하기 위하여 원자로 기동 중 출력 증분을 조절하였고, 필요시에는 기동 중에도 출력 교정을 실시하고 있다. 확립된 출력 상승 절차는 아래와 같다.

- 1~8 MW 구간에서는 N/T 출력 차이를 1.5 MW 이내로 유지하면서 0.5 MW씩 출력을 상승시킨다.
- 8~13 MW 구간에서는 N/T 출력 차이를 1.2 MW 이내로 유지하면서 1 MW씩 출력 상승시킨다. 충분한 시간이 지나도 N/T 출력 차이가 줄어들지 않으면 출력 상승 도중 출력 교정을 실시하여 N/T 출력의 차이를 1 MW 정도로 줄인다.
- 13~24 MW 구간에서는 N/T 출력 차이를 1.5 MW 이내로 유지하면서 1 MW씩 출력 상승한다. 이 구간에서 N/T 출력 차이가 역전되어 커지면 다시 출력 교정을 하여야 한다.
- 최종 출력 교정은 24 MW 도달 후 5 ~ 6시간 정도 지난 후 N/T 출력 차이를 관찰하여 실시 여부를 결정한다.
- 모든 출력 변동 조작은 원자로 출력이 매우 안정된 뒤에 실시하며 여유를 가지고 수행한다.
- 기동 중 냉각팬의 부하를 갑자기 증가시키지 않는다.

3.4 저항온도계측기 설치상태 변경

저항온도감지기의 끝단이 보호관에 접촉되는 것을 피하기 위하여 보호관의 상단부에 약 5cm 길이의 커플링을 추가하여 보호관의 길이를 연장하였다. 보호관의 길이를 연장하여 감지기의 끝단이 더 이상 접촉되지 않게 함으로써 순간적인 접촉불량 현상을 제거하였다. 설치상태 변경 후에는 더 이상 온도신호의 out-of-scale 비정상 현상은 발생하지 않고 있다.

4.0 결 론

1995년 하나로의 출력 운전이 시작된 이후 지금까지, 원자로 기동 시나 운전 중에 열출력 비정상으로 인하여 발생되었던 원자로 불시정지 원인을 체계적으로 분석하고 여러 가지 재발 방지 대책을 수립하여 실행한 결과, 원자로의 불시정지 횟수가 약 50% 정도 감소하였다. 앞으로 남은 과제는 정상상태에서의 열출력 신호 변동폭을 최소화할 수 방안을 모색하여야 하고 궁극적으로는 열출력 신호 대신 원자로 출력을 대표할 수 있는 신호를 찾아내어 야만 원자로 불시 정지 횟수를 근본적으로 줄일 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 정부의 출연금에 의한 기관고유사업으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고 문헌

- [1]. 하나로 운영기술지침서, 한국원자력연구소, KAERI/TR-707/96.
- [2]. 하나로 안전성분석보고서, 한국원자력연구소, KAERI/TR-710/96.
- [3]. 김영기, 한국원자력연구소, 내부 문서, 2000. 02. 23.
- [4]. 김헌일, 한국원자력연구소, 내부 문서, 2000. 01. 05.
- [5]. 임인철, 한국원자력연구소, 내부 문서, 2000. 03. 07.