2001 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

노심 출력 제어를 위한 냉각재 온도 운전 영역 설정에 관한 연구

A Study on the Coolant Temperature Operation Range for Reactor Core Power Control

이정찬, 조병오, 지성균, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

무붕산 원자로의 특성인 강한 음의 감속재 온도 계수 (MTC)를 이용하여 일체형 가압 경수로인 SMART 원자로의 2번째 반응도 제어 계통으로 냉각재 온도를 이용하는 방안에 대하여 연구하였다. 원자로의 출력 변동에 따른 반응도 구성 요소 중 핵연료 온도 변화에 의한 도플러 반응도와 냉각재 온도 변화에 따른 반응도는 출력 변화에 따라 즉각적으로 반응하나, 생성과 소멸의 과도 현상을 보이는 제논은 수시간의 과도 기간을 갖는다. 따라서, 출력에 따른 냉각재 기준 온도는 제어봉을 고정시킨 후 평형 제논 상태에서 결정되는 냉각재 온도로 설정하였다. 원자로의 안전성과 효율에 큰 영향을 주지 않기 위하여 50% 출력 이상에서 냉각재 온도 변화를 이용한 자동 출력제어가 가능하도록 하였다. 또한, 제논 과도 현상을 보상하기 위하여 냉각재 온도 운전 영역을 확장, 설정하였다. 확장된 냉각재 온도 영역에서는 최소한의 제어봉 동작으로 출력 제어가 가능하며 특히 25% 이내의 출력 변동은 냉각재 온도 변화만으로 노심 출력 제어가 가능함을 확인하였다.

Abstract

SMART is a soluble boron-free integral type pressurized water reactor. Its moderator temperature coefficient (MTC) is strongly negative throughout the cycle. The purpose of this study is how to utilize the primary coolant temperature variation as a second reactivity control mechanism. Among the reactivity components associated with reactor power change, Doppler reactivity and moderator temperature reactivity take effects almost as soon as reactor power changes. On the other hand, xenon reactivity change takes more than several hours to reach an equilibrium state. Therefore, coolant temperature at equilibrium state is chosen as the reference temperature. The power dependent reference temperature line is limited above 50% power not to affect adversely in reactor safety. To compensate transient xenon

reactivity, coolant temperature operating range is expanded. The suggested coolant temperature operation range requires minimum control rod motion and especially for smaller than 25% power change, it is not necessary to move control rods to assure that fuel design limits are not exceeded.

1. 서론

10CFR50 Appendix A에서 규정하는 일반 설계 기준 26에는 반응도 제어 계통의 다중성과 제어 능력에 대하여 정의하고 있다.[1] 즉, 원자로는 제어봉과 기타 반응도 제어가 가능한 계통이 있어야 한다는 것이다. 이 중 2 번째 제어 계통은 제논 소멸을 포함한 정상 운전 중 계획된 출력 변화에 기인한 반응도 변화율을 제어할 수 있는 능력이 구비되어야 한다. 상용 가압 경수로에서는 1차 냉각재에 수용성 붕소 농도를 조절하여 반응도 제어를 수행하고 있으며, 비등형 경수로에서는 냉각수 유량을 조절하여 일부 출력 변경을 수행할 수 있다. 열출력 330MW 일체형 무붕산 원자로인 SMART는 강한 음의 MTC를 이용한 자동 출력 제어 능력을 확보하기 위한 방안이 원자로 개념설계단계에서부터 연구되어 왔다. 최근 프랑스에서도 자국의 900 MWe 급 PWR에 대한 무붕산 운전 타당성 연구에서[2] 감속재 온도 계수 (MTC)가 운전 주기 동안 약 -50pcm/ ° C 의 대단히 음의 값을 나타내는 특성을 이용하여 제어봉 외에 1 차 냉각수의 유량을 조절하는 방안과 출력 증가에 따른 냉각재 온도를 감소시키는 방안을 연구하고, 이 중 냉각재 온도 운전 범위 내에서 출력이나 xenon 수준에 따라 평균 냉각재 온도를 변화시키는 방안과 축방향 출력 편차 (Axial Offset: AO)를 조절하기 위하여 DMAX -프랑스 N4 원자로 제어 모드인 "Dispositif de Manoeuvrabilité Accrue: X (DMAX)"- 에 따라 제어봉을 사용하는 복합적인 방안을 제안하였다.

SMART에서도 음의 MTC를 이용하여 제어봉 움직임 없이 냉각재 온도에 따라 노심 출력이 어느 정도 자동 제어가 가능하므로, 출력에 따른 냉각재 온도 운전 영역과 기준을 재설정할 필요가 있다. 따라서, 본 연구에서는 출력 변화에 의한 노심 반응도 변화를 보상하기 위한 냉각재 온도 변화 범위를 조사하고, 현재 SMART의 출력별 냉각수 온도 영역을 고려하여 냉각수 온도 변화를 이용한 노심 반응도 제어가 가능하도록 냉각재 온도 운전 영역을 확장 제안하였다. 또한, 이 영역에서 제논 반응도 변화량까지 보상 가능한 출력 변화량을 조사하였다. 이와 같은 노심 해석을 위하여 CASMO-3/MASTER 핵설계 체계[3,4]의 제논 동특성 계산 기능과 냉각재 입구 온도 탐색 기능[5]을 사용하였다.

2. SMART 노심 특성 및 냉각수 운전 영역 설정

SMART 노심은 57개의 17x17 핵연료 집합체로 구성되어 있으며, 초장주기 운전을 위하여 U-235 농축도 4.95 wt%의 UO_2 연료를 사용한다.[6,7] 무붕산 운전을 위하여 다량의 Al_2O_3-B_4C와 Gd_2O_3-UO_2 가연성 독봉을 사용하고 있으며 최 외곽을 제외하고 모든 핵연료 집합체에 제어봉을 설치하고 있다. 무붕산 원자로에서 제어봉 이탈사고를 완화하기 위하여 설정된 제어봉 배열은 그림 1과 같으며, 동작 순서는 그림 2와 같다.[8] 모든 제어봉이 20cm 까지 인출된 후 R1부터 40cm까지 차례

로 인출되며 임계를 맞추며 노심 기동이 된다. 모든 제어봉이 40 cm까지 인출된 후에는 다시 R1 부터 제어봉이 인출되는데 이 때 각 제어군 사이의 간격은 60cm를 유지하게 된다. SMART 노심은 무붕산 원자로의 특징인 약 -50 pcm/ ° C이상의 강한 음의 반응도 계수 (MTC)를 나타낸다. 반면 도플러 계수는 저농축 UO_2를 사용하는 원자로의 일반적인 값인 -3 ~ -8 pcm/ ° C 나타내고 있다.

SMART 원자로의 제어는 그림 3과 같이 출력별 노심 출구 온도를 제어함으로써 이루어진다.[9] 이 연구에서는 정상 출력 운전 모드인 4 MCP 고속운전만을 고려하였다. 이 경우 냉각수 온도 곡선을 영출력까지 연장하는 경우 0% 출력에서 입출구 온도 295 ° C,전출력에서 평균 290 ° C 이며, 입구 270° C, 출구 310° C로 온도 상승은 40 ° C이다. 따라서, 노심의 반응도에 영향을 미치는 냉각재 평균 온도는 영출력에서 전출력으로 출력이 100% 증가할 때 오히려 5 ° C 감소하도록 설정하여 출력 변화에 따른 제어봉 부담을 경감하도록 하였다. 제어봉 조작은 냉각재 출구 온도가 출력에 따른 기준 값보다 ±3° C를 벗어나는 경우에만 수행하며, 목표 온도에 도달하면 제어봉이 정지하도록 되어 있다. 이와 같은 냉각재 온도 제어 논리는 제어봉 동작을 최소화하며 순간적인 원자로 출력 변동에 대응하나, 제논 반응도까지 고려한 노심 반응도를 조절하기에는 부족하다. 따라서, 냉각수 온도만으로 출력 변동에 대응하기 위하여는 보다 확대된 냉각수 운전 범위와 기준 온도를 보완하여야 한다.

SMART는 관류형 증기발생기를 채택함으로써 영출력에서 전출력 사이의 냉각재 평균 온도 차이가 5° C가 되도록 설계되어 있다. 냉각재 평균 온도가 가능한 일정하게 유지함으로써, 출력 변화에 따른 1차 계통 냉각수 부피의 변화를 최소화하며, 자기 압력 제어도 가능하게 한다. 그러나, 핵설계 관점에서 출력 변화에 대하여 제어봉 움직임이 최소화하기 위하여는 냉각재 평균 온도가 출력 상승시 감소하는 방향으로 설정하면 더욱 효과적이다. 냉각재 온도의 기울기는 제논의 생성과 소멸을 고려하는 경우 더욱 크게 설정되어야 할 것이다.

따라서, 출력에 따른 냉각재 기준 온도를 결정하기 위하여는 다양한 출력 변화와 이에 수반되는 제논 조건을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 출력 변화 하한을 50%로 설정하고 출력 변화에 따른 냉각재 기준 온도를 결정하기 위하여 100% 출력 평형 제논 조건에서 출력이 50%로 감소한 경우와 제논까지 평형 상태가 된 경우를 조사하고 그림 4에 나타내었다. 도플러 온도 결손을 보상하기 위한 냉각재 온도 변화량은 7° C이며, 평형 제논 수밀도 차이에 의한 반응도 결손을 보상하기 위하여 냉각재 온도는 약 8° C의 추가 상승이 필요하여 총 냉각재 평균 온도 상승량은 15 ° C로 나타났다. 반면 냉각재 출구 온도는 제논 수밀도 변화가 없을 짧은 시간에서는 평균 냉각재 온도가 상승하더라도 출력 감소에 따라 냉각재 온도 상승 폭의 감소로 3 ° C감소되나, 제논이 평형 상태에 도달하게 되면 제논 반응도 결손을 보상하기 위하여 5 ° C증가한다. 그림 4에서 제안한 기준은 100% 출력에서 기준 온도를 305° C로 설정하여 50%로 운전시 도달하는 출구 온도를 310 ° C가 초과되지 않도록 하였으며 50%이하의 출력에서는 현재 설계값과 동일하도록 영출력 기준 온도를 295 ° C가 되도록 연장하였다. 이 냉각재 온도 기준을 사용할 때 필요한 운전 영역을 설정하기 위하여, 제어봉을 고정하고 출력 변경시 나타나는 냉각재 온도 변화를 조사 하였다.

주기초, 주기중, 주기말에서 100% 출력 평형 제논 상태에서 50% 출력으로 30분만에 출력이 감소되어 50% 출력이 지속되는 경우, 제어봉 위치 고정 상태에서 노심 출력이 50%를 유지하기 위한 냉

각재 온도를 그림 5에 나타내었다. 연소도가 증가할수록 출력 변동 초기에 제논 축적에 의한 반응도 감소를 보상하기 위한 냉각재 온도 강하량이 큰 것을 알 수 있다. 평형 상태에 접근하면 연소도에 의한 차이는 나타나지 않는다. 30시간 이후 평형 상태로 접근하면서 필요한 냉각재 온도는 제안된 load diagram 보다 2°C 높게 나타났다.

50%에서 100%로 출력 상승을 시킬 때와 100%에서 25%로 출력이 감소할 때의 감속재 온도의 변화를 그림 6과 그림 7에 수록하였다. 출력 증가 초기에 제논 수밀도가 감소할 때 냉각재 온도는 최대값을 나타내는데, 주기초에는 3시간 45분에 313.67 ° C의 최대 출구 온도를 나타내고 이 후 제논 수밀도의 증가에 따라 냉각재 온도는 감소하여 정상 상태 전출력 기준 온도 305 ° C에 접근한다. 주기말에는 냉각재 온도 변화 폭이 증가하여 최대 출구 온도는 3시간 45분에 315.82 ° C를 나타낸 후 서서히 감소한다.

그림 7에는 100%에서 25%로 출력을 감소시키는 경우 냉각재 출구 온도를 나타내었다. 특히 주기말에서는 출력 감소 초기에 많은 냉각재 온도 감소 현상이 나타나며 평형 제논 상태에 접근하면 목표 온도에 비하여 약 10°C 높은 온도를 나타내고 있다. 따라서, 50% 이하의 저출력에서는 제어봉을 이용한 냉각재 온도 제어가 필요한 범위다.

출력 변경 후 제논 과도 현상을 보상하기 위한 노심 출구에서의 냉각재 온도 변화를 출력에 대하여 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 보는 바와 같이 25% 출력에서는 상당히 큰 폭의 출구 온도 변화가 필요한 것으로 나타났으며 출력이 상승함에 따라 그 폭이 감소되는 경향을 보인다. 특히 100% 출력에서는 출력 변동 전 출력이 항상 100% 이하이므로 출구 온도는 평형 상태 기준 온도보다 항상 높게 나타나고 있다. 50% 출력에서 항상 출구 온도가 target 온도보다 낮게 나타난 것은 50% 미만의 출력에서 출력 상승되는 경우를 고려하지 않았기 때문이다. 즉, 50% 출력의 점들은 75% 또는 100% 등 높은 출력 상태에서 출력 변동시 생성된 점이다. 그림 8과 같이 냉각재 출구 온도는 제어봉 고정 운전 시 출력에 대하여 범위를 갖게 되며, 여기에서는 운전 범위를 제안하고자 한다. 기존의 운전 제어 방법은 기준 냉각재 출구 온도 ± 3 ° C 의 운전 허용 범위를 갖고 있다. 즉, 전출력 최대 허용 출구 온도는 313 ° C이며 최소 출구 온도는 최소 출력 운전 조건인 25%에서는 295.75°C로 이는 영출력에서 292 ° C에 해당된다. 이에 따라 최고 온도는 현 SMART 와 동일하게 313°C로 제한하였으며, 앞에서 제안된 최대 기준 출구 온도가 50% 출력 값이므로, 50% 이상에서는 100%사이는 동일한 상한값을 사용하였다. 영출력 상한은 현 SMART와 동일한 298 ° C로 정하고 50% 출력의 상한값과 출력에 대하여 직선으로 연장하였다. 하한은 자유로운 운전을 위하여 운전 범위를 넓혔으나, 1차 계통 압력 제어, 2차 계통 성능 등을 고려하여 임의로 낮출 수 없다. 따라서, 영출력 하한은 평형 상태 기준 온도 보다 3 ° C낮은 292 ° C를 사용하여 기존 설정과 동일하게 하였으며 출력이 50% 출력에서 295 ° C, 전출력에서 302 ° C를 있는 선을 하한치로 정하여 확장된 출구 온도 운전 영역을 갖도록 설정하면서 가능한 계통에 미치는 영향을 최소화하였다.

3. 부하 추종 운전

SMART 원자로의 출력은 급수 유량으로 설정되며 제어봉 운전 논리에 의하여 냉각수 출구 온도

가 설정된 온도 범위를 벗어나는 경우 제어봉이 자동으로 동작하여 출구 온도가 설정된 기준 값에 맞게 된다. 주기 전체에 걸쳐 강한 음의 MTC를 나타내는 노심은 적절히 설정된 냉각수 온도 제어 논리와 함께 제어봉 동작 없이 노심 출력을 자동 제어할 수 있게 된다. 10CFR50 Appendix A에서 요구하는 2번째 반응도 제어 계통은 제논 소멸을 포함한 계획된 정상 출력 변동시 핵연료 건전성을 보장할 수 있는 능력을 보여야 하므로, 부하 추종 운전을 모사하여 냉각수 온도로써 반응도 제어가 가능함을 보였다.

참고 문헌 [5]에는 12-3-6-3, 14-2-6-2, 16-1-6-1 등의 운전 시나리오로 일일 부하 추종 운전이 가능함을 보였으며, 특히 1 일 평균 제어봉 이동 거리는 출력 증감발 시간이 적을수록 증가하는 경향을 나타냄을 보였다. 따라서, 이 연구에서는 완만한 출력 증감발 운전 모드인 12-3-6-3과 상대적으로 급격한 출력 변동 시나리오인 16-1-6-1 모드에 대하여 제어봉을 고정한 상태에서 2 장에서 제안한 냉각수 온도 제어가 유효한 출력 변동 범위를 조사하였다. 냉각재 출구 온도가 운전 제한 영역을 벗어나 제어봉 삽입 또는 인출이 필요한 경우 기존 논리와 동일한 크기인 상한치 -3 ° C 또는 하한치 +3° C에 도달하면 제어봉 움직임을 멈추도록 하였다.

표 1과 2에 두 가지 운전 시나리오에 따라 50%와 25%까지의 부하추종운전에 대한 해석 결과를 요약하였다. 3시간에 걸친 출력 변경 시간을 갖는 12-3-6-3 부하추종운전의 경우 주기초에는 25%까지 제어봉 이동 없이 AO, Fq, 냉각재 출구 온도 등이 운전 허용 범위 내에 있으며, 50% 출력으로는 주기말까지도 제어봉 이동이 필요 없음을 보인다. 주기초 25% 출력으로 부하 추종 운전 해석 결과를 그림 9에 수록하였다. 출력이 감소함에 따라 원자로 내에서 냉각재 온도 상승량이 작아져 AO가 노심 상부로 이동하는 현상을 보인다.

1시간에 출력 변경이 되는 상대적으로 급격한 출력 변경을 하는 16-1-6-1 시나리오에서는 주기초 50% 출력에서만 제어봉 움직임 없이 제시된 온도 범위 내에서 운전이 가능하며, 주기중이나 주기말에서는 출력 증가 중에 출구 온도가 운전 영역을 초과한다. 표 1 및 2에 정리한 것과 같이 출력 변화가 큰 25% 출력과 주기말에서는 일일 평균 4.5회의 제어봉 이동을 필요로 하며, 이동 거리도 34 cm에 달하고 있다. 냉각재 출구 온도 기준 및 영역이 50% 이상 출력에 맞추어 제안된 것이므로, 50% 출력의 부하 추종 운전만을 살펴보면 하루 평균 1 회, 8.4cm의 제어봉 움직임이 필요한 것으로 나타났다. 그러나, 기존의 냉각재 운전 영역을 기준으로 한 경우 필요한 제어봉 이동 회수 및 거리인 4.5회/일, 34.6cm/일에 비하면[5] 확장된 냉각재 운전 영역이 반응도 제어에 기여하는 영향을 알 수 있으며, 냉각재 출구 온도 하한치를 100% 출력에서 3°C 더 낮게 설정하는 경우에는 제어봉 동작이 전혀 필요 없을 수 있다. 그림 10에 주기말 부하추종운전 때 냉각재 출구 온도와 이를 만족하기 위한 제어봉 움직임을 보이고 있으며, AO와 P*Fq 등이 제한치 내에 있음을 나타내고 있다.

표 1, 2의 결과로부터 주기말 16-1-6-1 시나리오가 냉각재 온도 변화만을 이용하여 제어할 수 있는 출력 변화량이 작음을 알 수 있다. 따라서, 이 조건에서 제어 가능한 출력 변화 폭을 조사한 결과 그림 11과 같이 100-75-100% 부하 추종은 냉각재 온도 변화만으로 가능함을 보였다. 동일한 출력 변화량을 낮은 출력 조건에서도 조사한 결과 AO나 P*Fq 등이 충분히 운전 조건을 만족할 수 있음도 확인하였다. 또한, 50% 이하의 출력에서도 초기 냉각재 온도를 조절하면, 추가의 제어봉 동작 없이 확장된 냉각재 온도 범위 내에서 운전이 가능하였다.

SMART 원자로는 그림 3을 보면 20% 출력부터 출력 운전 영역임을 나타내고 있다. 따라서, 20% 출력 평형 제논 상태에서 5%/min 의 속도로 출력을 증가한 경우 그림 12에 나타내었다. 첨두 출력이 높이 증가하였으나 제한치 2.5를 초과하지는 않았으며, AO도 운전 범위 내에 존재하고 있다. 그러나, 냉각수 온도는 100% 도달 후 증가하는 제논을 보상하기 위하여 계속 감소하며, 이에 따라 xenon 평형 상태에 이를 때까지 제어봉을 반복적으로 인출해야 함을 보인다. 그림 13은 50% 출력에서 전출력까지 5%/min 의 속도로 출력을 증가시킨 경우다. 첨두 출력과 AO 등은 제한치를 만족시키나 출구 온도가 상한치를 초과하여 약 5cm 제어봉을 삽입 후 제논 평형이 이루어짐에 따라 다시 약 5cm 인출한 모습이다. 그림 14는 100%에서 50%로 10분만에 출력을 감소시킨 경우이며, 출력을 감소시키는 경우 출력 변경 초기에 제논 과도현상에 의하여 냉각재 온도 변화가 평형 상태와 반대 방향으로 움직이므로, 냉각재 온도 영역 확장 폭이 큰 저온 쪽으로 냉각수 온도 과도 현상이 나타나므로 이 때에는 제어봉이 동작할 필요가 없었다. 즉, 100% 출력에 대응하는 충분한 제논이 확보된 경우, 100%에서 50% 까지의 출력 감소는 냉각수 온도 제어 논리의 목적대로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

3. 결론

10CFR50 Appendix A의 일반 설계 기준(GDC) 26에서 요구하고 있는 "제논 소멸을 포함한 계획된 출력 증가 또는 감소 운전 때에 핵연료의 건전성을 보장할 수 있도록 신뢰성 있게 반응도 변화율을 제어할 수 있는 두 번째 반응도 제어 계통"을 요구하고 있는데 무붕산 운전 개념을 채택하고 있는 일체형 원자로 SMART에서는 강한 음의 반응도 온도 계수 (MTC)를 이용하여 GDC 26을 만족시키도록 일차 냉각재 출구 온도 제어 논리를 기존 제어 논리를 확장하여 제안하였다. 즉, 출력 100%와 50% 사이에서 제논 평형 상태를 고려한 평형 상태 기준 출구 온도를 지정하고 제논 과도 현상과 기존 냉각수 온도 제어 논리를 고려하여 저출력까지 온도 범위를 설정하였다.

출력 50% 이상에서 확장된 냉각수 출구 온도 제어 논리를 이용하면 25% 출력 변화에 대하여 제어봉 동작 없이 AO, 첨두 출력 등을 운전 허용 범위 내에서 유지할 수 있으며, 50% 이하의 출력 조건에서도 출력 변동 전에 미리 적절한 냉각수 온도를 유지하면 제어봉 동작 없이 출력 변경이 가능함을 보였다. 또한, 출력 변동율이 비교적 완만한 12-3-6-3 형태에서는 100%에서 50%까지 제어봉 동작 없이 부하추종운전이 가능하였으며, 보다 급격한 부하추종운전에서도 냉각재 운전 영역 추가 확장에 따라 냉각재 온도 제어만으로 출력 제어가 가능하였다. 또한, 단순 출력 상승 운전이나 감소 운전에서도 AO나, 첨두 출력을 운전 제한치 내에 유지하면서 노심 반응도를 충분히 제어할 수 있음을 보였다. 따라서, 확장 제안된 냉각수 온도 제어 논리는 25% 이내의 출력 변동 구간에서 충분히 2번째 반응도 제어 계통의 요건을 만족하고 있음을 보였다.

확장된 출구 온도 제어 논리를 적용하기 위하여 핵적 관점 외에 2차 계통을 포함한 원자로 출력 변동 운전에 대한 다양한 해석을 통하여 냉각재 평균 온도의 변화에 의한 가압기 과도 현상 평가, 1차 냉각수의 증기 발생기 입/출구 온도 변화에 따라 2차 계통에 미치는 영향 등을 평가하여 계통 성능을 고려한 냉각재 온도 범위 결정이 필요하며 이에 따른 안전성 검토 등이 종합적으로

이루어져야 할 것이다.

후기

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기연구개발사업의 일환으로 수행되었다 .

참고 문헌

[1] 10CFR50 Appendix A, http://www.nrc.gov/NRC/CFR/PART050/part050-appa.html

[2] Jean-Paul Deffain et al, "Feasibility Studies of a Soluble Boron-Free 900 MW PWR, Core Physics-II: Control Rod Follow, Load Follow, and Reactivity-Initiated Accident Linked to RCCAs," Nuclear Technology 127, 267(1999)

[3] M. Adenius et al, "CASMO-3. A Fuel Assembly Burnup Program User's Manual Version 4.4," STUDSVIK/NFA-89/3, Studsvik, 1991.

[4] 조병오 외, "MASTER 2.1 User's Manual," KAERI/UM-06/2000, 한국원자력연구소, 2000.

[5] 송재승 외, "냉각재 출구온도 제어방식의 SMART 노심 일일부하추종운전 능력 평가," 2001 춘계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.

[6] 지성균 외, "신형원자로기술개발 , 일체형원자로노심설계기술개발," KAERI/RR-1885/98, 한국원자력연구소, 1998.

[7] 이정찬, "SMART 기본설계 예비노심장전모형," SMART-CA-CA110-071 Rev. 00, 한국원자력연구소, 2000/04/09.

[8] 이정찬 외, "제어봉 이탈사고 완화를 위한 무붕산 원자로 노심 설계 연구," 1999 추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회.

[9] 최병선, "SMART 과도기 및 제한사고 해석을 위한 유체계통설계자료," SMART-FS-DD012 Rev.01, 한국원자력연구소, 2000/12/05.

표 1. 50% 저출력 일일부하추종운전 분석 결과

운전 시나리오	연소도	Fq 증가율 (%)	최대 AO (%)	일 평균 제어봉 이동	
				횟수 (회/일)	거리 (cm/일)
12-3-6-3	주기초	2.80	7.01	0	0
	주기중	1.88	7.49	0	0
	주기말	4.01	7.75	0	0
16-1-6-1	주기초	2.23	7.08	0	0
	주기중	1.75	5.69	1	6.6
	주기말	4.31	7.87	1	8.4

표 2. 25% 저출력 일일부하추종운전 분석 결과

운전 시나리오	연소도	Fq 증가율 (%)	최대 AO (%)	일 평균 제어봉 이동	
				횟수 (회/일)	거리 (cm/일)
12-3-6-3	주기초	3.24	16.42	0	0
	주기중	2.99	3.13	1	5.9
	주기말	4.71	19.29	3	22.1
16-1-6-1	주기초	1.82	16.50	1.5	7.7
	주기말	4.56	18.22	4.5	33.6

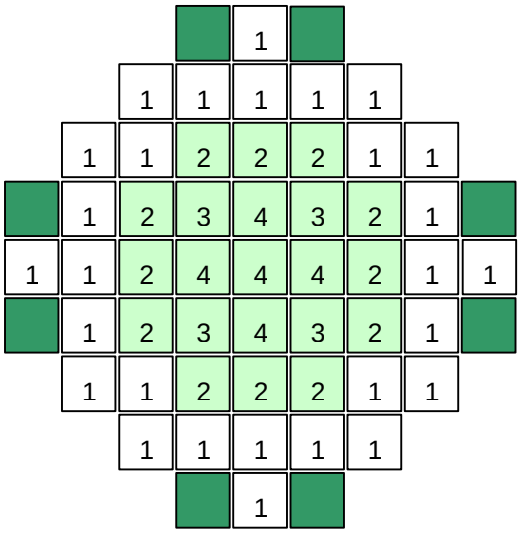

그림 1. SMART 노심 제어봉 배치도

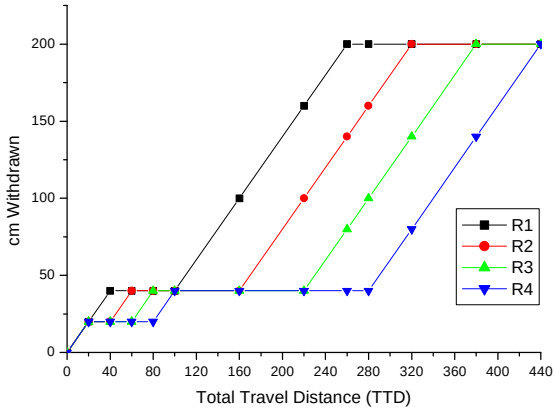

그림 2. 제어봉 운전 전략

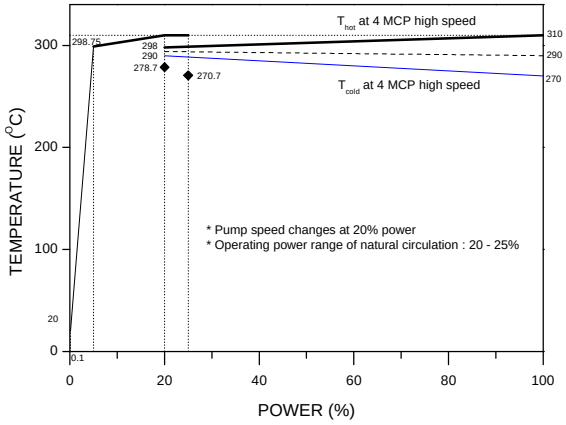

그림 3. SMART 출력 별 냉각수 온도

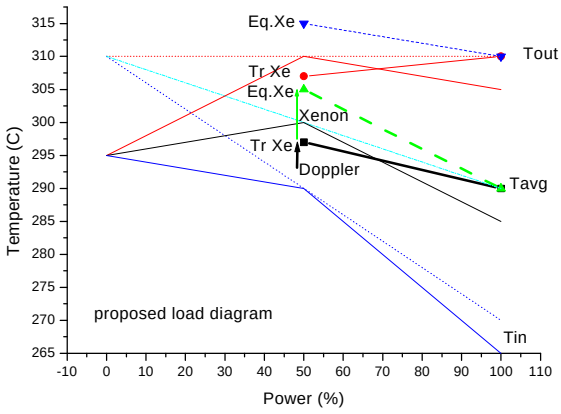

그림 4. 출력 별 냉각수 온도 기준 제안

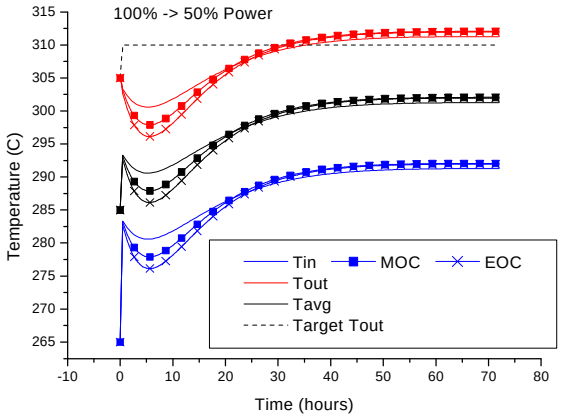

그림 5. 100%에서 50% 출력 변경시 온도 변화

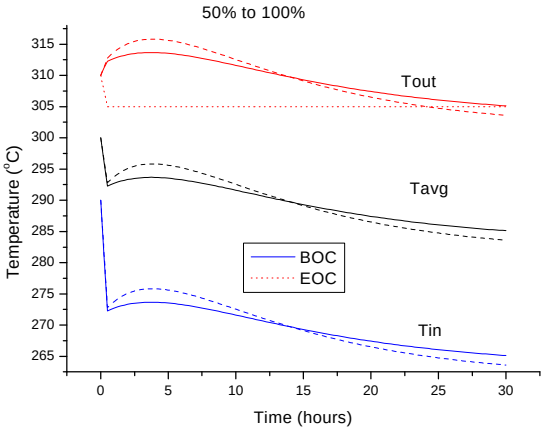

그림 6. 50%에서 100% 출력 변경시 온도 변화

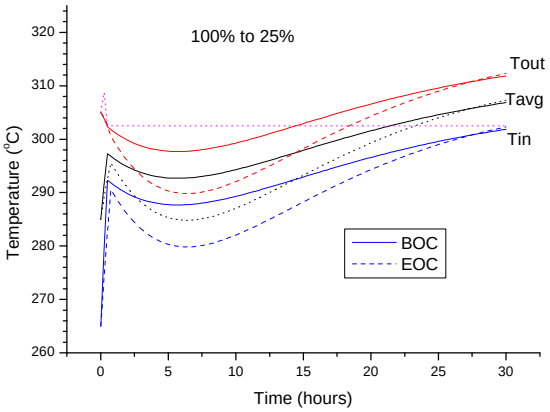

그림 7. 램프 부하 변동 (100% → 25%)

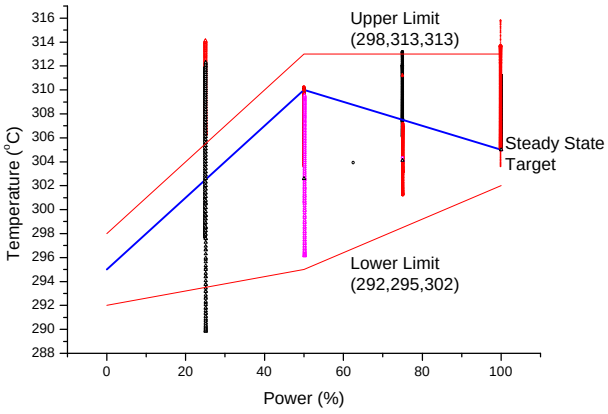

그림 8. 냉각재 출구 온도 기준과 운전 범위

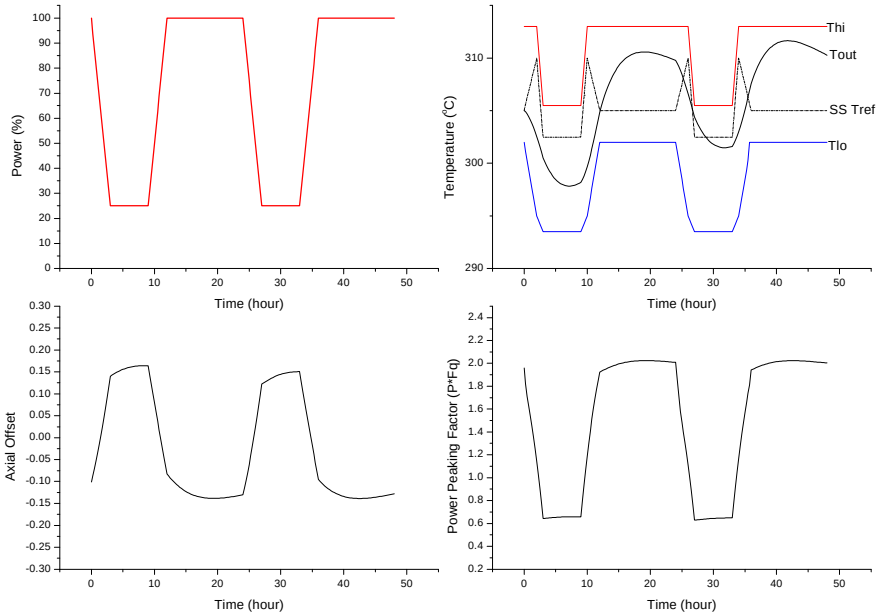

그림 9. 주기초 25% 출력 12-3-6-3 부하추종운전 분석 결과

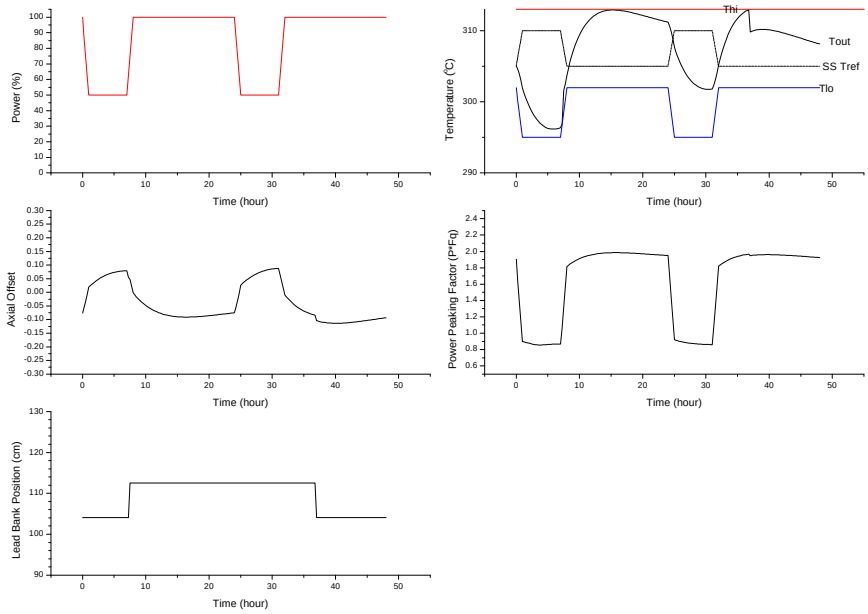

그림 10. 주기말 50% 출력 16-1-6-1 부하 추종 운전 분석 결과

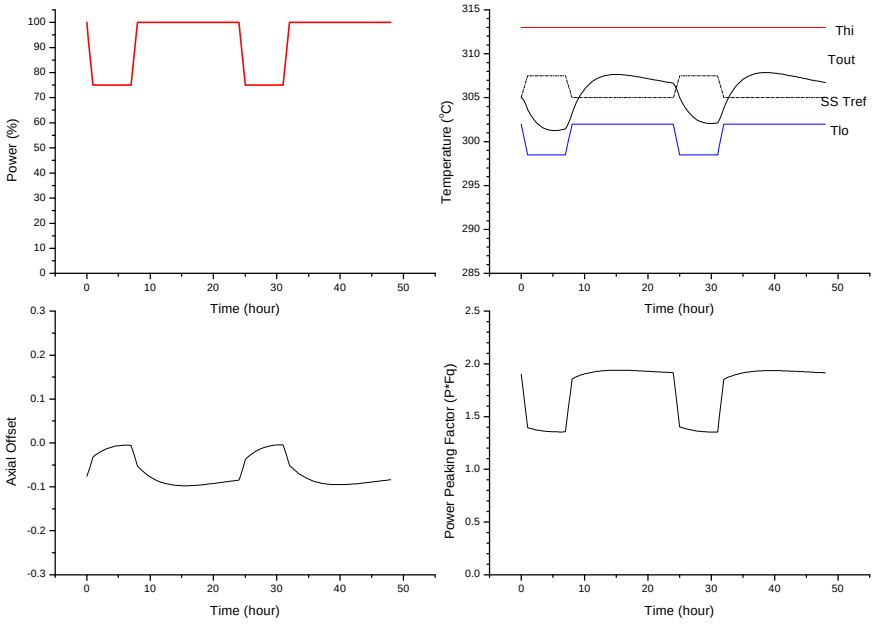

그림 11. 주기말 75% 출력 16-1-6-1 부하추종운전 분석 결과

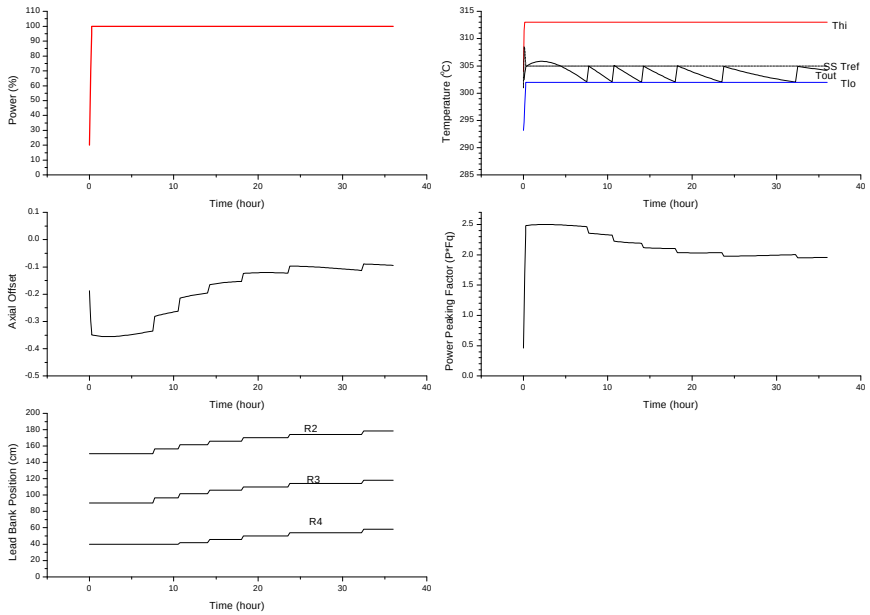

그림 12. 출력 상승 운전 시 냉각재 출구온도 및 AO, 첨두 출력 (주기초, 20 - 100%)

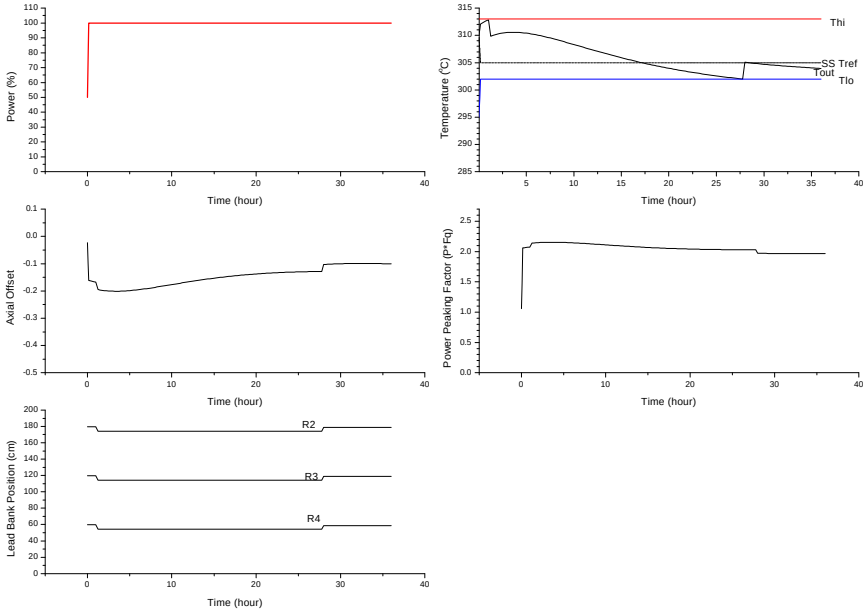

그림 13. 출력 상승 운전 시 냉각재 출구온도 및 AO, 첨두 출력 (주기초, 50 - 100%)

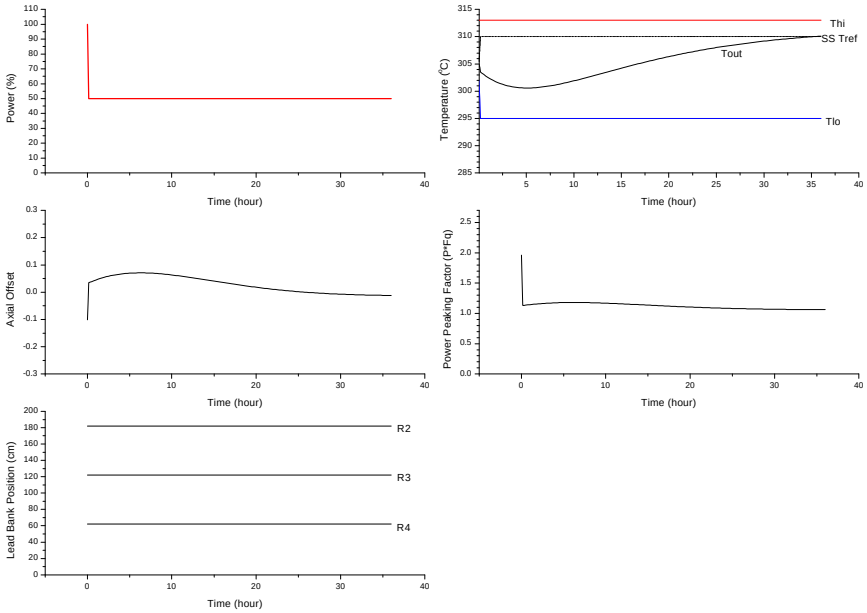

그림 14. 출력 감소 운전 시 냉각재 출구온도 및 AO, 첨두 출력 (주기초, 100 - 50%)