

토륨 장전 SMART 노심에서의 제어봉 이탈사고 평가

Evaluation of Control Rod Ejection Accident for Thorium Loaded SMART Core

조진영, 이정찬, 박상윤, 지성균, 장문희
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

토륨 장전 SMART 노심에 대한 안전성 평가의 일환으로 제어봉 이탈 사고를 평가하였다. 제어봉 이탈 사고에 사용될 초기 제어봉 위치는 최대 이탈 제어봉가를 나타내는 위치로 정하였으며, 동특성 인자는 주기초와 주기말에 대해 최소 지말 중성자 분률 (β_{eff})을 보이는 경우를 찾아 과도 계산시 적용하였다. 토륨 장전 노심의 제어봉 이탈 사고에 따른 과도 출력은 그 최대값이나 시간에 따른 변화 양상에서 우라늄 장전 노심과 비슷하였다. 다만, 전출력 상태에서의 토륨 장전 노심의 최대 출력이 주기초에는 우라늄 장전 노심과 거의 같으나 주기말에서는 약 4% 높게 나타나고, 우라늄 장전 노심에 비해 큰 토륨 장전 노심의 Doppler 궤환효과의 영향으로, 핵연료 온도 상승에 따른 토륨 장전 노심의 출력감소 속도가 다소 빠르게 나타난 것이 다른 점이다. 영출력 상태에서는 토륨 장전 노심의 과도출력이 우라늄 장전 노심에 비해 천천히 증가하고, 최대 값에서도 낮게 나타났다. 이러한 결과로 판단할 때 토륨 장전 노심의 안전성은 우라늄 장전 노심에 비해 약간 우위에 있다고 판단된다.

Abstract

The core safety is examined by simulating the control rod ejection accident(REA). The initial rod positions for the REA simulations are determined by searching the maximum ejected rod worth case in the various rod position combinations. The kinetics parameters are also determined by searching the minimum delayed neutron fraction (β_{eff}) in the various power levels and control rod positions at BOC and EOC, respectively. The transient power behavior during the REA is very similar to that of the uranium loaded core. However, the thorium loaded core shows that the peak

power in the EOC full power case is about 4 % higher than that of the uranium loaded core, but due to the larger Doppler negative feedback effect, the power decrease after the peak power is faster than that of the uranium loaded core. In the zero power case, the thorium loaded core shows slower power increase behavior and lower saturated power than the uranium loaded core. Therefore, it is concluded that the thorium loaded core is a little bit safer than the uranium loaded core in reactivity insertion accidents.

1. 서론

토륨^{1,2,3)}은 열중성자 흡수 단면적이 ^{238}U 에 비해 약 2.5배 높아 연소초기에는 중성자 흡수물질로서의 작용을 하여 노심의 반응도를 낮추어 주며 노심의 잉여 반응도 제어를 위한 독봉의 요구량을 줄여준다. 또한 토륨은 중성자를 흡수하여 핵분열성 물질인 ^{233}U 으로 전환하는 전환률이 ^{238}U 의 ^{239}Pu 로의 전환률에 비해 높아 토륨 장전 노심의 연소에 따른 반응도 감소율을 우라늄 장전노심에 비해 낮추는 역할도 한다. 이러한 토륨의 초기 잉여 반응도 억제효과 및 높은 전환성은 우라늄 핵연료에 비해 장주기 노심설계를 용이하게 하며 SMART 원자로와 같이 매우 긴 주기길이를 요하는 노심에는 특히 장점으로 부각된다. 그러나 이러한 토륨의 높은 열중성자 흡수 단면적과 높은 전환성 특성은 토륨 장전 노심의 안전성 측면에서는 단점으로 작용할 수 있다. 즉, 토륨의 핵변환 물질인 ^{233}U 의 β 값이 ^{239}Pu 에 비해서는 약간 크나 ^{235}U 에 비해서는 약 1/2 정도밖에 되지 않는다는 점을 고려하면²⁾, 토륨 장전 노심의 높은 전환성은 오히려 노심의 β 값을 떨어뜨려 안전성을 떨어뜨리는 결과를 가져올 수 있다. 따라서 이 연구에서는 이러한 관점에서 토륨 장전 노심의 안전성을 평가한다.

참고문헌 3에서는 장주기 노심설계에 장점으로 작용하는 토륨의 핵적 특성을 이용하여 현재 우라늄 핵연료를 사용하여 3년 주기길이를 설계된 SMART 노심을 주기길이 5년으로 설계하는 것이 가능한지를 검토하였다. 이 연구에서는 이러한 토륨 장전 노심에 대해 제어봉 이탈 사고를 계산하여 안전성 측면을 평가하며 이를 우라늄 장전 노심과 비교한다. 이러한 비교 평가에는 토륨 장전 노심의 경우에는 HELIOS⁴⁾/MASTER⁵⁾ 코드체계가, 우라늄 장전 노심의 경우에는 CASMO/MASTER 설계체계가 사용되었다.

이 논문의 2장에서는 이 연구에서 사용될 3년 주기길이의 우라늄 장전 SMART 노심과 5년 주기길이의 토륨 장전 노심의 주요 설계인자 및 특성들을 비교 정리한다. 그리고 제 3장에서는 이들 노심에 대해 제어봉 이탈 사고를 모사하기 위한 초기 조건들, 즉 초기 제어봉 위치 및 동특성 인자를 사고시 가장 심각한 결과를 초래하도록 설정하며, 제 4장에서는 실제 제어봉 이탈사고를 모사하여 그 결과를 우라늄 장전 노심과 비교 평가한다.

2. SMART 기준 노심

참고 문헌 3에서는 우라늄 장전 SMART 노심을 기준 모델로 하여 주기길이 5년의 토륨 장전 노심을 설계하였다. 즉, 우라늄 핵연료와 토륨 핵연료를 균일하게 섞은 (U, Th)O₂ 핵연료를 우라늄 장전 노심의 우라늄 핵연료에 대체 장전하여 토륨 장전 SMART 노심을 설계하였다. 따라서 핵연료, 집합체내 독봉 위치 및 개수 등을 제외하면 토륨 장전 노심의 핵연료 봉, 집합체, 노심의 제원 뿐만 아니라 제어봉 및 제어봉 운전전략, 노심 출력 제어방식, 사용된 독물질 등 다른 사양들은 우라늄 장전 SMART노심과 동일하다. 따라서 이 장에서는 토륨 장전 노심에 장전되는 핵연료집합체에 대해서만 요약하기로 한다.

그림 1은 이 연구의 제어봉 인출 사고 해석에 사용될 우라늄 및 토륨 장전 SMART 노심의 노심내 핵연료 장전 모형과 핵연료 집합체들의 축방향 Cutback을 나타낸 것이다. 노심내에는 총 57개의 핵연료집합체가 장전되며 집합체의 유효높이는 200 cm 이다. 이들 핵연료집합체는 17x17 핵연료봉 배열구조를 가지며, 핵연료집합체에는 24개의 안내관과 1개의 계측관이 있다. 그림 1에서 알 수 있듯이 SMART 노심에는 세 종류의 핵연료집합체, A, B 그리고 C가 장전된다. A 핵연료집합체는 총 8개가 노심의 최외각에 장전되며 B 핵연료집합체는 총 28개가 노심 외각에 장전된다. 그리고 C는 총 20개가 노심중앙부분에 장전된다. SMART 노심은 노심의 운전중 잉여반응도 제어를 전적으로 제어봉에만 의존하므로 SMART 노심에는 제어봉이 항상 삽입되어 있으며 이에 따라 축방향 출력분포는 노심 하부로 치우치게 된다. 이를 제어하기 위해 SMART 노심에 장전되는 핵연료집합체는 그림 1에서 알 수 있듯이 A를 제외하면 모두가 축방향으로 Cutback이 있다.

표 1은 우라늄 및 토륨 장전 SMART 노심의 주요 설계사양을 비교하여 나타낸 것이다. 독봉으로는 Gadolinia를 4% 사용한 Gd봉 외에 ¹⁰B 함량을 0.0111 g/cm, 0.01588 g/cm 및 0.029 g/cm 등으로 달리한 Al₂O₃-B₄C 독봉 등 모두 4종류의 독봉이 사용된다. 그리고 이들 가연성 독봉들은 집합체내 안내관이 제어봉 삽입을 위해 사용되므로 핵연료봉 위치에 핵연료봉을 교체하여 장전된다. A 핵연료집합체는 노심 최외각에 장전하기 위해 설계된 것이므로, 우라늄 및 토륨 장전 노심 모두 독봉가가 작은 ¹⁰B 함량 0.0111 g/cm 인 Al₂O₃-B₄C 독봉과 Gd 봉이 각각 12개 및 28개가 장전되어 있다. C 핵연료집합체는 노심 내부에 장전하기 위해 설계된 것이므로, 독봉가가 높은 ¹⁰B 함량 0.029 g/cm 인 Al₂O₃-B₄C 독봉이 다량 사용된다. 즉, 토륨 장전 노심은 ¹⁰B 함량이 0.029 g/cm 인 Al₂O₃-B₄C 독봉만 28개 장전되어 있으며, 우라늄 장전 노심에는 ¹⁰B 함량 0.029 g/cm 인 Al₂O₃-B₄C 독봉 16개 외에도, Gd 독봉 및 ¹⁰B 함량이 0.01588 g/cm 인 Al₂O₃-B₄C 독봉이 각각 4개 및 8개가 장전되어 있다. 그리고 B 핵연료집합체는 노심외곽에 장전하기 위해 설계된 것으로 우라늄 장전 노심은 Gd 독봉이 4개, ¹⁰B 함량이 0.01588 g/cm 인 Al₂O₃-B₄C 독봉이 20개가 장전되어 있으며, 토륨 장전 노심은 ¹⁰B 함량이 0.01588 및 0.029 g/cm 인 Al₂O₃-B₄C 독봉이 각각 12개씩 장전되어 있다. SMART 노심의 노심 열

출력은 330 MWth이며 주기길이는 우라늄 장전 노심은 3년(990 EFPD)이며 토륨 장전 노심은 5년(1680 EFPD)이다. 우라늄 장전 노심은 농축도 4.95 % 인 우라늄 핵연료를 사용하며 토륨 장전 노심은 농축도 20%인 우라늄 핵연료와 토륨 핵연료를 혼합비 40:60으로 균일하게 섞은 혼합 핵연료를 사용한다.

3. 제어봉 이탈 사고 계산을 위한 초기치 설정

이 논문에서는 토륨 장전노심의 안전성 평가의 일환으로 노심에서 제어봉이 급속히 방출되는 제어봉 이탈사고를 분석하며 우라늄 장전 노심의 제어봉 이탈사고와 비교 평가한다. 이러한 제어봉 이탈 사고 계산을 위해서는 제어봉이 방출되는 시점에서의 초기 제어봉 위치, 제어봉 이탈 사고 계산에 사용될 동특성 인자 설정 등과 같은 초기치 설정이 필수적이며, 또한 두 개의 서로 다른 핵연료를 사용하는 노심에 대한 제어봉 이탈 사고를 비교하므로 공정성이 요구된다. 따라서 이 연구에서는 아래와 같은 사항들을 적용하여 초기치 설정 및 공정성을 제고하였다.

- (1) 먼저 제어봉 이탈 사고에 사용될 초기 제어봉 위치는 최대 과도 출력을 보이는 위치로 설정하기 위해 우라늄 장전 노심 및 토륨 장전 노심에 대해 각각 최대 이탈 제어봉가를 나타내는 위치로 한다.
- (2) 동특성 인자는 노심의 제어봉 위치, 출력 상태 등에 따라 다르게 나타난다. 그러나 이 연구에서는 제어봉 이탈 사고와 같은 과도 계산시, 제어봉의 위치나 출력변화에 따른 동특성 인자를 매번 계산하는 대신, 보수적인 결과 해석을 위해 주기초와 주기말에 대해 최소 지발 중성자 분률 (β_{eff})을 보이는 경우를 찾아 이때의 값을 과도 계산시 적용한다.
- (3) 제어봉 이탈은 현 제어봉 위치에서 0.05 초 내에 완전히 방출된다고 가정한다.
- (4) 원자로 트립은 노심 출력이 115%를 초과하는 경우 1.65초의 지연 시간을 갖고 트립 되는 것으로 한다.

3.1 제어봉 이탈 사고 초기 제어봉 위치 설정

제어봉 이탈 사고에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 이탈 제어봉가이며, 이탈 제어봉가에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 제어봉 삽입 위치, 축방향 출력분포, 동특성 인자 등이다. 이 중 동특성인자는 보수적 계산을 위해 주기초와 주기말에서의 최소 β_{eff} 를 적용하기로 하였으므로 제어봉 이탈 사고 중 가장 심각한 경우를 모사하기 위해서는 제어봉 삽입 위치에 대한 이탈 제어봉가가 가장 큰 경우를 설정하면 된다. 따라서 이 연구에서는 계산 불확실도 및 제어봉 이탈 사고 시점에서의 제어 양 및 분포를 고려하여 설계코드가 계산한 임계 제어봉 위치 근처에서 제어봉의 위치를 변화시켜 가며 최대 이탈 제어봉가를 보

이는 위치를 추적하였다.

그림 2는 제어봉 이탈 사고를 모사하기 위한 제어봉 위치를 나타낸 것이다. SMART 노심의 제어봉들은 미리 설계된 제어봉 운전전략에 의해 구동되므로, 그림 2에서 나타낸 제어봉군 R1은 거의 빠진 상태이거나 다른 제어봉군에 비해 상당히 적게 삽입되어 있다. 따라서 최대 이탈제어봉가를 보이는 제어봉 위치 추적에서 R1에 대한 추적은 제외하였다. 표 2는 우라늄 및 토륨 장전노심에 대해 앞서 설명한 최대 이탈 제어봉가 추적법에 의해 찾아진 초기 제어봉 위치들을 정리한 것이다. 주기초 및 주기말 전출력의 상태에서는 최대 이탈 제어봉가를 보이는 경우가 우라늄 장전 노심 및 토륨 장전 노심 모두 제어봉군 R4/R3/R2/R1 가 40/100/160/200 의 위치에서 R42가 인출되는 경우로 나타났다. 그리고 주기초 영출력 상태에서는 우라늄 장전 노심은 제어봉군이 80/140/200/200 의 위치에서 R42 가, 토륨 장전 노심은 제어봉군이 60/120/180/200 의 위치에서 R31이 인출되는 경우로 나타났으며, 주기말 영출력 상태에서는 우라늄 장전노심은 제어봉군이 120/180/200/200 위치에서 R42가, 토륨 장전 노심은 40/100/160/200 에서 R42 가 인출되는 경우로 나타났다. 따라서 이 연구에서는 이들 제어봉군의 위치를 우라늄 및 토륨 장전 노심의 제어봉 이탈 사고 중 최대 과도 출력을 보일 것으로 예상되는 초기 제어봉 위치로 설정하였다.

3.2 동특성 인자

과도 계산에 사용될 동특성 인자는 제어봉 위치 및 출력 변화에 따라 다른 값을 가진다. 따라서 과도 계산을 정확히 하기 위해서는 시간에 따른 제어봉의 위치 및 출력의 변화에 따라 β_{eff} 를 계산하여 적용하여야 한다. 그러나 이 연구에서는 보수적인 계산을 위해 제어봉 위치 및 출력 변화에 따른 β_{eff} 의 변화를 살펴보고 그중 최소 β_{eff} 를 추적하였으며 그때의 동특성 인자들을 과도 계산에 적용하였다.

표 3은 이와 같은 추적법에 의해 찾아진 최소 β_{eff} 가 나타나는 노심 조건에서의 동특성 인자들을 정리하여 나타낸 것이다. 토륨 장전 노심의 β_{eff} 는 우라늄 장전 노심에 비해 약 5% 정도 작으며, 역중성자속($1/v_g$) 값은 약 1/3 정도 작음을 알 수 있다. 또한 토륨 장전 노심의 즉발 중성자 생존시간(l_p)은 우라늄 장전 노심에 비해 약 2/3 정도임을 알 수 있다. 동특성 인자들에서 나타난 토륨 장전 노심의 이러한 특성들은 토륨 장전 노심이 β_{eff} 값이 작아 제어봉 이탈시 우라늄 장전 노심에 비해 다소 큰 반응도 삽입을 가져오며, l_p 값이 작아 과도 계산시 우라늄 장전 노심에 비해 다소 급격한 출력상승을 가져올 수 있음을 의미한다. 그러나 표 3에서 알 수 있듯이 토륨 장전 노심은 이탈 제어봉가가 우라늄 장전 노심에 비해 5~15 % 정도 작기 때문에 작은 β_{eff} 값으로 인한 반응도 삽입량의 증가분을 어느 정도 상쇄할 수 있을 것으로 보인다.

4. 제어봉 이탈 사고 계산 및 비교 평가

4.1 전출력 상태

그림 3은 전출력 상태에서 토륨 장전 SMART 노심의 제어봉 이탈에 따른 노심 출력의 변화를 우라늄 장전 노심과 비교하여 나타낸 것이다. 두 노심 모두 0.015초 부근에서 노심 출력 115% 트립 설정치를 초과하게 되며, 0.05 ~ 0.06 초 부근에서 최대 출력에 도달하며, 1.66초 부근에서 노심 트립에 따른 제어봉의 삽입이 시작되면서 노심 출력이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 토륨 장전노심의 과도출력 변화추이를 살펴보면, 우라늄 장전노심에 비해 최대 출력에 이르는 시간에서 0.01초 정도 빠르게 나타났으며, 최대 출력에서도 주기초에서는 비슷하나 주기말에서는 약 4% 정도 높음을 알 수 있다. 그러나 토륨 장전 노심은 Doppler 궤환효과에 의한 노심 출력의 감소 속도 또한 빠르게 나타나 노심 최대 출력 이후에는 우라늄 장전 노심에 비해 낮은 출력을 유지함을 알 수 있다. 이는 참고 문헌 3에서 나타났듯이 토륨 장전 노심의 Doppler 궤환효과에 의한 음의 반응도 삽입량이 우라늄 장전 노심에 비해 크기 때문으로 풀이된다.

4.2 영출력 상태

그림 4는 영출력 상태에서 제어봉 이탈에 따른 토륨 장전 노심의 노심 출력 변화를 우라늄 장전 노심과 비교하여 나타낸 것이다. 과도 상태 출력은 제어봉이 빠지는 0.05초 정도에서 prompt jump 현상을 보이고, 이후에는 핵연료 온도 상승에 따른 음의 반응도 삽입에 의해 완만한 곡선을 그리며 증가하다가 포화 출력 상태에 이른다. 주기초 토륨 장전 노심에 삽입된 반응도는 $0.00219/0.007154 = 0.31 \$$ 로 우라늄 장전 노심의 $0.00251/0.007424 = 0.34 \$$ 에 비해 약 10% 정도 작다. 따라서 그림 4에서 알 수 있듯이 토륨 장전 노심의 출력은 우라늄 장전 노심에 비해 느리게 증가하며 또한 포화 출력에서도 낮은 값을 나타남을 알 수 있다. 그러나 주기말 토륨 장전 노심에 삽입된 반응도는 $0.00252/0.005315 = 0.47 \$$ 로 우라늄 장전 노심의 $0.00243/0.005650 = 0.43 \$$ 에 비해 약 10% 정도 크다. 이로 인해 그림 4에서 알 수 있듯이 과도상태 초반에는 토륨 장전 노심의 출력이 우라늄 장전 노심에 비해 다소 빠르게 증가함을 알 수 있다. 그러나 포화 출력에서는 주기초와 마찬가지로 토륨 장전 노심이 오히려 낮은 값을 나타낸다. 이는 앞서도 언급했듯이 토륨 장전 노심의 Doppler 궤환효과에 의한 음의 반응도 삽입량이 우라늄 장전 노심에 비해 크기 때문으로 풀이된다.

5. 결론

이 연구에서는 토륨 장전 SMART 노심에 대해 안전성 평가의 일환으로 주기초 및 주기말에 대해 전출력 및 영출력 상태에서의 제어봉 이탈 사고를 모사하였으며 이를 우라

늄 장전 노심과 비교하였다. 토륨 장전 노심의 이탈 제어봉가는 우라늄 장전 노심에 비해 대체로 작게 나타났으나, 동특성 인자중 과도 출력에 영향을 미치는 β_{eff} 와 즉발 중성자 생존시간 (ℓ_p) 또한 작게 나타나, 노심 사고 결과에 영향을 미치는 장점 및 단점을 모두 갖고 있는 것으로 나타났다. 토륨 장전 노심의 제어봉 이탈 사고에 따른 과도 출력은 최대 출력에서 우라늄 장전 노심에 비해 같거나 약간 높게 나타났으나, 토륨 장전 노심의 높은 Doppler 궤환효과의 영향으로 포화출력에서는 낮게 나타났다. 따라서 제어봉 이탈 사고에 의해 추가로 발생한 에너지 총량을 고려할 때, 토륨 장전 노심이 우라늄 장전 노심보다 작게 나타났으므로 토륨 장전 노심의 안전성은 우라늄 장전 노심에 비해 약간 우위에 있다고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. M. Lung, A Present Review of the Thorium Nuclear Fuel Cycles, Nuclear Science and Technology, Eupropean Commission, 1997.
2. M.S.Kazimi, et.al., "On the Use of Thorium in Light Water Reactors," MIT-NFC-TR-016, Department of Nuclear Engineering, MIT, April 1999.
3. 조진영 외, "토륨을 이용한 5년 주기 SMART 노심 설계," KAERI/TR-1775/2001, KAERI, March, 2001.
4. R. Stammler et. al., "User's Manual for HELIOS," Scanpower, 1994.
5. B. O. Cho, et. al., "The Features and Solution Methodologies of the KAERI Nuclear Design Code," International Conference on the Physics of Reactors, Mito, Japan, Sep. 16-20 (1996).

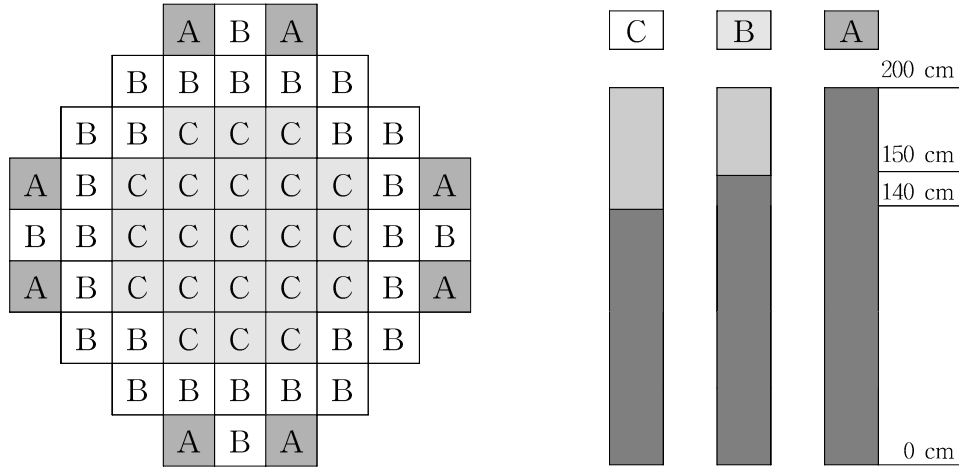


그림 1. SMART 기본설계 노심 핵연료 장전모형

표 1. 토륨 및 우라늄 장전 SMART 노심 사양 요약 및 비교

		우라늄 장전 노심			토륨 장전 노심			
집합체 ID		A	B	C	A	B	C	
집합체 수		8	28	21	8	28	21	
집합체당 연료봉 수		224	240	236	224	240	236	
집합체당 독봉수	Gd 봉	12	4	4	12	0	0	
	Al ₂ O ₃ -B ₄ C 독봉, ¹⁰ B 선밀도(g/cm)별	0.01110	28	0	0	28	0	0
		0.01588	0	20	8	0	12	0
		0.02900	0	0	16	0	12	28
열출력, MWth		330						
우라늄 농축도, %		4.95			20			
핵연료 혼합비(우라늄:토륨)		-			40:60			
주기길이	전출력일(EFPD)	1020			1680			
	노심 연소도(MWD/kgHM)	26.16			45.76			

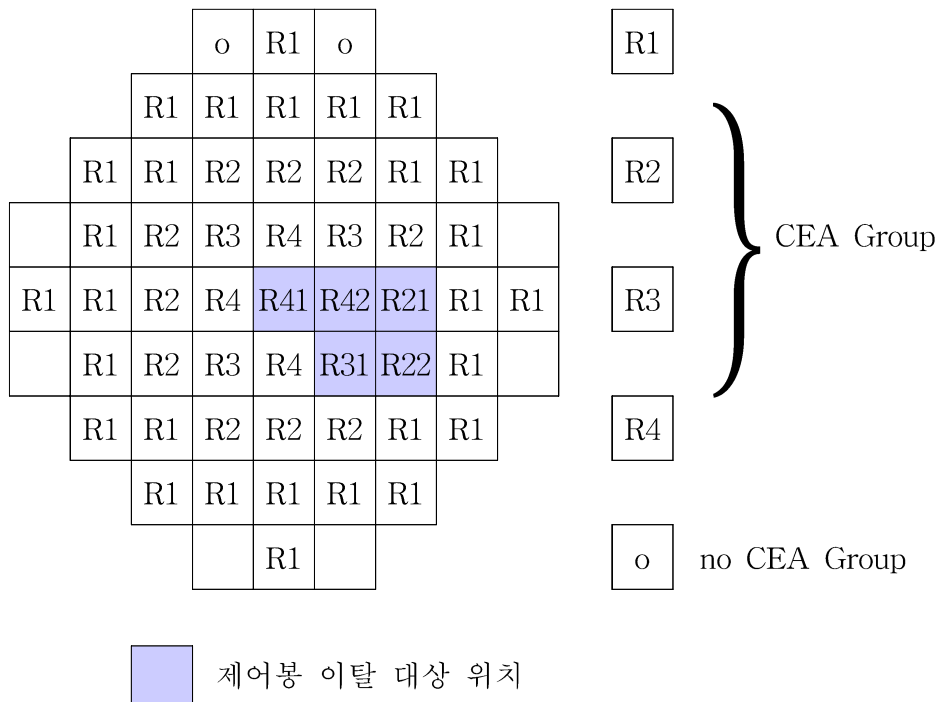


그림 2. 제어봉 이탈 사고 모사를 위한 제어봉 이탈 대상 위치

표 2. 제어봉 이탈 사고 모사를 위한 초기 제어봉 위치

	노심 상태	초기 제어봉 위치(cm)				이탈 제어봉	이탈 제어봉가 (pcm)	
		R4	R3	R2	R1			
우라늄 장전노심	주기초	HZP	80	140	200	200	R42	251
		HFP	40	100	160	200	R42	238
	주기말	HZP	120	180	200	200	R42	243
		HFP	40	100	160	200	R42	274
토륨 장전노심	주기초	HZP	60	120	180	200	R31	219
		HFP	40	100	160	200	R42	220
	주기말	HZP	40	100	160	200	R42	252
		HFP	40	100	160	200	R42	264

표 3. 제어봉 이탈사고 모사에 사용될 동특성인자 비교

동특성인자		주기초		주기말	
		우라늄 노심	토륨 노심	우라늄 노심	토륨 노심
지발 중성자 분율	β_{eff}	0.007424	0.007154	0.005650	0.005315
	β_1	0.0002560	0.0002629	0.0001759	0.0002172
	β_2	0.0015019	0.0014877	0.0011836	0.0011671
	β_3	0.0013686	0.0013306	0.0010507	0.0010176
	β_4	0.0030018	0.0029125	0.0022077	0.0020658
	β_5	0.0010517	0.0009555	0.0008300	0.0006902
	β_6	0.0002442	0.0002052	0.0002024	0.0001569
Precursor 붕괴상수(/sec)	λ_1	0.012746	0.012720	0.012792	0.012695
	λ_2	0.031776	0.031780	0.031500	0.031875
	λ_3	0.118424	0.116875	0.122671	0.121113
	λ_4	0.316720	0.313101	0.324520	0.316554
	λ_5	1.402223	1.393747	1.404395	1.386056
	λ_6	3.919943	3.863019	3.805249	3.697439
역 중성자속 (sec/cm)	$1/v_1$	0.512212E-7	0.289131E-07	0.520697E-7	0.304582E-07
	$1/v_2$	0.234544E-5	0.190051E-05	0.262573E-5	0.225455E-05
즉발중성자 생존시간(μ sec)	l_p	13.7902	10.8965	19.2903	15.2405

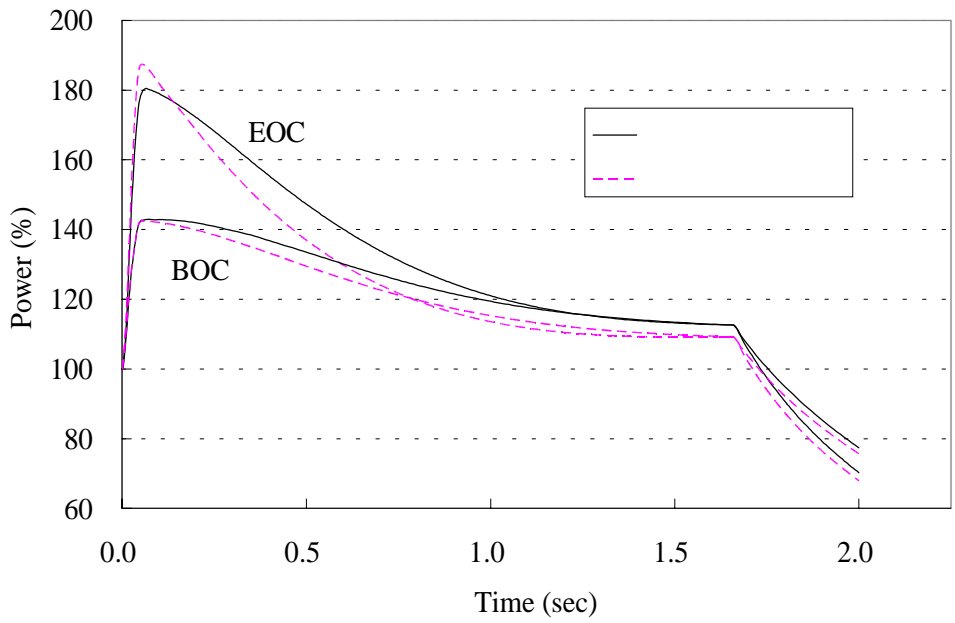


그림 3. 전출력 상태에서의 제어봉 이탈사고 모사 및 비교

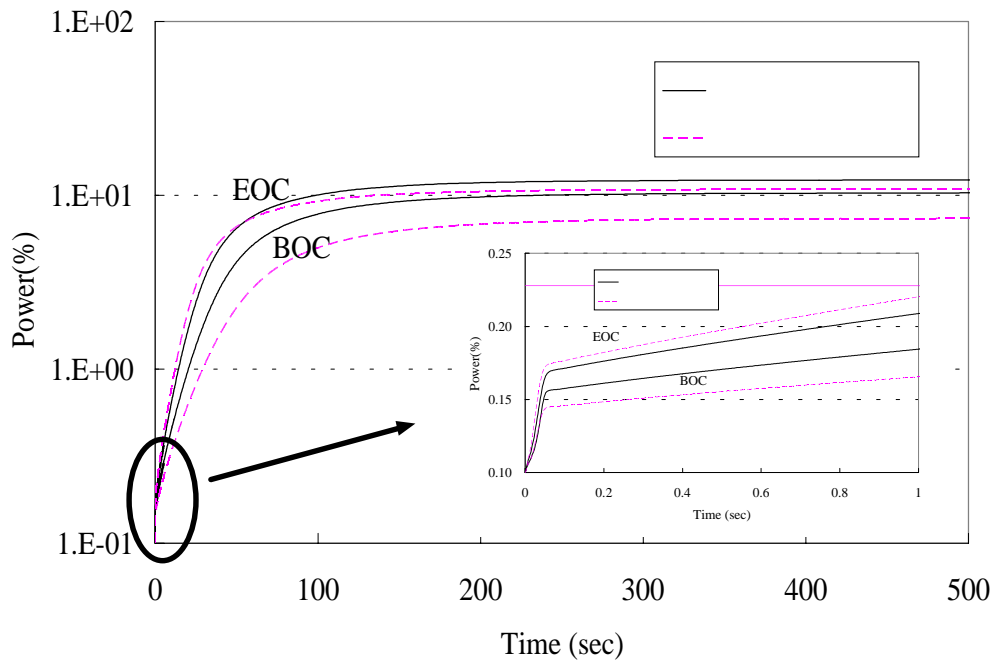


그림 4. 영출력 상태에서의 제어봉 이탈사고 모사 및 비교