

저기포 반응도용 순환우라늄 핵연료의 중수노심 특성에 관한 연구

Study on Core Characteristics in CANDU-6 Reactor with CANFLEX-RU fuel for the Low-Void Reactivity

민병주, 정창준, 석호천

한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

중수로에 저농축 또는 순환 핵연료를 사용할 경우, 천연 우라늄 핵연료 사용과 비교하여 냉각재 기포 반응도가 다소 상승되어 원자로의 안전성이 저해될 우려가 있다. 이에 따라, 중수로에 순환핵연료 사용시, 냉각재 기포반응도를 줄이고 출력계수(power coefficient)를 현재 가동중인 37개 핵연료봉 다발보다 작게 하기 위한 다양한 핵연료 모델을 설정하였다. 나아가, 이 설정된 각 모델에 대하여 중간 연소도에서의 격자특성을 분석하고, 기존의 CANDU 6 용 37개 핵연료봉 다발의 격자특성과 비교하여, 최적 저 기포반응도용 순환우라늄 핵연료를 예비 선정함과 동시에 이 핵연료 노심의 특성을 분석하였다.

Abstract

The use of SEU(Slightly Enriched Uranium) or RU(Recovered Uranium) fuel might be reluctant in the Korean licensing aspect of reactor safety due to its increase of coolant void reactivity. To design CANFLEX-RU fuel, it has to have equal or smaller coolant void reactivity and power coefficient than those of 37-element fuel bundles in CANDU-6 operation. Therefore, various models of low-void fuels are established and lattice characteristics for each model are analyzed at mid-burnup in this paper. The lattice characteristics of CANFLEX-RU and -ST(30 % Annulus) fuel bundles for low-void reactivity are compared with those of 37-element fuel bundles in CANDU-6 operation. CANFLEX-ST(30 % Annulus) fuel bundle design is preliminary selected for low-void reactivity fuel and its core characteristics are calculated, where CANFLEX-ST(30 % Annulus) fuel bundle consists of a Stainless Steel rod in the center element and RU fuel in others.

1. 서 론

핵연료를 고연소시킬 경우 사용후 핵연료의 방출량을 대폭 감축시킬 수 있으며, 우라늄의 이용률도 향상시킬 수 있어, 핵연료 비용을 감소시킬 수 있다. 기존 중수로의 핵연료를 고연소시키기 위해서는 천연우라늄 대신 농축 우라늄 핵연료를 사용하여야 한다. 이 경우 기존 원자로 노심 특성과 양립되어야 하며, 또한 원자로의 운전이나 안전성에 영향을 주지 않도록 하여야 한다. 따라서 저농축우라늄 또는 이와 동등한 순환 우라늄을 이용한 고연소도 핵연료를 개발하기 위해서는 기존 원자로 노심 특성과 양립할 수 있도록 핵연료를 선정하여야 한다.

현재까지 알려진 바에 의하면, 월성 원자로와 같은 중수로(CANDU-6)의 하드웨어 변경 없이 사용할 수 있는 저농축 우라늄 핵연료의 농축도는 1 % 이내로써 0.9 % 내외가 최적이다. 이러한 우라늄 농축도와 핵연료의 경제성을 고려하면 순환 우라늄 핵연료가 중수로용 최적 고연소도 핵연료 후보중의 하나이다. 순환우라늄은 사용 후 핵연료의 재처리과정의 부산물로 생산되며, 공칭 농축도가 0.9 % 이므로 추가 농축이 필요하지 않고, 영국 및 프랑스 등의 서방세계에 이미 월성 1 호기에 500 년간 사용할 수 있는 2500 톤이 산재되어 있어 구매가 용이하며 이와 아울러 경제성도 충분하다. 따라서 0.9 %의 순환 핵연료를 대상으로 CANDU-6 원전과의 양립성을 평가할 수 있도록 노물리 특성을 계산하였다.[1]

본 노물리 특성 계산 결과에 의하면, 중수로에 순환 핵연료를 사용할 경우, 천연 우라늄 핵연료 사용과 비교하여 냉각재 기포 반응도가 다소 상승되어 원자로의 안전성이 저해될 우려가 있는 것으로 나타났다. 따라서, 중수로에 순환핵연료 사용시, 특히 냉각재 기포반응도를 줄이기 위하여 핵연료의 중심부에 감손 우라늄이나 천연우라늄의 사용이 제안되었다. 그러나, 감손 우라늄을 사용할 경우 연소도 손실이 크게 나타나며, 천연우라늄을 사용할 경우 안전성 향상은 미미하고 또한 천연우라늄 가격이 순환우라늄 가격보다 잠정적으로 비쌀 것으로 예상되므로 경제적인 손실도 판단된다. 이에 따라 연소도 손실을 줄이고 안전성 향상을 위하여 흑연의 사용을 시도하였다.[2,3] 흑연은 일반적으로 원자로의 감속재나 반사체로 사용되고 있는 재료로써 중성자의 흡수가 적으므로 연소도의 손실을 감소시킬 수 있으며, 냉각재 상실시 중성자 상승이 제일 큰 핵연료의 중심부에 핵연료 대신에 위치함으로써 핵반응을 저하시켜 냉각재 기포반응도를 감소시킨다. 또한 정상 운전 시에는 감속재 또는 반사체로 작용하여 출력의 평탄화에 기여한다. 그러나 흑연봉을 CANFLEX 핵연료다발[3]의 중심봉과 내환봉까지 8개를 사용한 경우 핵연료봉 최대 선출력(MLHR)은 순환우라늄 핵연료 사용에 비해 15 % 이상 증가하여 37봉 핵연료와 비슷한 수준이 되었다. 또한 power coefficient도 37 봉 핵연료보다 약간 증가하였다. 따라서 이 핵연료를 사용할 경우는 최대 선출력이 높고 인허가 면에서도 불리할 뿐 아니라, 핵연료 자체의 무게 감소로 인한 핵연료 다발의 진동이 일어날 수 있는 문제점을 들 수 있다.

그러므로 본 논문에서는 냉각재 기포반응도를 줄이고 power coefficient가 현재 가동중인 37개 핵연료 봉 다발보다 작게 하기 위해서 CANFLEX 핵연료다발 설계를 기초한 다양한 핵연료 모델을 설정하고 각 모델에 대한 격자특성을 계산하고, 중간 연소도에서의 격자특성을 분석하였으며, 기존의 CANDU-6 용 37개 핵연료봉 다발의 격자특성과 비교한 바, 최적 저 기포반응도용 순환우라늄 핵연료를 예비로 선정하여 이에 대한 노심 특성을 해석하였다.

2. 계산 방법

경수로에서 연소되고 방출된 사용 후 핵연료를 재처리하면 순환 우라늄이 부산물로 생산된다. 순환우라늄의 U-235 농축도는, 천연우라늄의 것보다 높으며, 약 0.9 w/o 이다. 이와 같은 순환 우라늄은 재농축 없이 CANDU 원자로에 그대로 사용될 수 있으며, 천연우라늄에 비해 연소도가 약 2배 증가한다. 따라서 본 연구는 저농축우라늄 (0.9 % SEU) 의 농축도와 중성자 특성이 비슷한 순환우라늄(RU)에 대하여 월성로와 같은 중수로(CANDU-6)의 노심 특성을 계산하였다. 사용된 순환 우라늄의 조성비는 다음과 같다.

U-234 : 0.016% U-235 : 0.9% U-236 : 0.349% U-238 : 98.744%

현재 가동중인 CANDU 원자로의 노심설계는 격자코드로써 POWDERPUFS - V (PPV) 코드 [4] 를 사용하고 있고, WIMS - AECL 코드 [5] 가 보조로 사용되고 있으며, RFSP 코드 [6] 를 이용하여 노심계산을 수행하고 있다. 격자코드로 이용되고 있는 PPV 코드는 천연 우라늄을 사용하는 현재의 CANDU 노심에만 적합하도록 실험적인 관계식을 많이 사용하고 있다. 따라서 순환 우라늄을 사용할 경우 중성자 스펙트럼이 경화되어 기존의 PPV 코드의 사용은 부적합하다. 그러므로 본 연구에서는 격자코드로 WIMS - AECL코드를 노심코드로 RFSP 코드를 이용하여 격자특성과 노심 특성계산을 수행하였다. 이 때 순환우라늄의 경우 천연우라늄에서의 노심 관리방안인 8 Bundle Shift Refuelling Scheme 대신 4 Bundle Shift Fuelling Scheme을 사용하였다.

위의 코드들을 이용하여 저기포 반응도용 순환우라늄 핵연료의 격자계산을 수행하고, 시간-평균 노심의 특성을 계산하였다. 또한 원자로 정지후 30분 경과시 xenon worth를 계산하고 기존 중수로의 반응도 제어장치의 반응도가에 대하여도 계산을 수행하였다.

3. 계산 결과 및 논의

CANFLEX 핵연료다발 설계를 기초로한 저기포 반응도용 순환우라늄 핵연료는 일차적으로 월성로와 같은 기존 중수로(CANDU-6)의 노심과 양립되도록 개발하고자 한다. 이에 따라, CANFLEX 핵연료다발 설계를 기초로한 다양한 핵연료 모델들에 대한 중간 연소도에서의 격자특성을 분석하여 표 1 과 같이 정리하였다. 표 1 에는 CANFLEX 저기포 반응도용 핵연료 모델의 격자특성을 비교할 수 있는 CANDU-6 원자로용 37개 핵연료봉 다발의 격자특성도 수록되어 있다. 표 1 에서 알 수 있는 바와 같이 순환 우라늄 핵연료를 CANDU-6 원전에 사용할 경우 기존 37 개 천연우라늄 핵연료봉 다발과 비교하여 냉각재 기포 반응도가 다소 증가함을 알 수 있다.

순환우라늄을 사용할 경우 우려되는 중수 노심 특성은 중수로의 취약점인 냉각재 기포 반응도이다. 또한, 국내 인허가 사항 중, 중수로 설계와 관련하여 가장 우려되는 것이 Negative power coefficient 요건이다. 그러므로 현재 가동중인 중수로(CANDU6)의 power coefficient를 ~ 0.0 이라 할 때, 적어도 이 보다는 작아야 한다. 따라서, 냉각재 기포반응도를 줄이고 power coefficient를 현재 가동중인 중수로(CANDU6)보다 작게 하기 위하여 다양한 순환우라늄 핵연료 모델을 설정하고 이 각각의 핵연료모델에 대한 격자특성을 계산한 결과는 다음과 같다.

CANFLEX 핵연료다발의 전체 핵연료 봉에 순환우라늄 핵연료를 장입한 소위 CANFLEX-RU 핵연료다발을 사용하면 기존 37봉 핵연료보다 방출연소도가 80 % 이상 증가하고, MLHR

(Maximum Linear Heat Rating)이 17 % 정도 감소하여 경제성이나 열수력 여유도가 증가한다. 그러나 냉각재 기포 반응도가 10 % 증가하고, power coefficient가 0.0037 mk/%FP 증가한다. 이 냉각재 기포반응도의 증가는 원자로의 안전성에 영향을 주고, power coefficient의 증가는 중수로 설계 인허가에 영향을 미친다.

순환우라늄 CANFLEX 핵연료의 냉각재 기포반응도와 power coefficient 수준을 기존 37개 천연우라늄 핵연료봉 다발의 것과 비교하여 같거나 혹은 작게하기 위하여, 본 연구에서는 1차적으로 흑연 대신 우라늄의 밀도에 가까운 iron봉 1개를 CANFLEX 핵연료다발 설계의 중심봉에 사용하고, 나머지 핵연료봉에 순환우라늄 핵연료를 장입한 소위 CANFLEX-Fe 핵연료의 격자특성을 계산하였다. 이 계산결과는 37봉 핵연료다발의 것과 비교하여 냉각재 기포반응도가 5 % 정도, MLHR이 14 % 정도, power coefficient가 0.00045 mk/%FP 감소하였다. CANFLEX-Fe 핵연료의 방출 연소도는 37봉 핵연료에 비해 55 % 증가하였으나 CANFLEX-RU에 비해 20 % 정도 감소하여 경제성이 다소 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 방출 연소도를 증가시켜 경제성을 향상시키기 위해 iron봉 가운데 구멍을 뚫어 iron봉 부피의 10 % ~ 40 % 까지 감소시켜 계산하였다. 37봉 핵연료 보다 냉각재 기포 반응도와 power coefficient가 작으면서 burnup penalty가 가장 작은 것은 iron봉의 부피를 10 % 감소시킨 Annulus 봉임을 알 수 있다.

다음은 iron과 재질이 비슷한 Stainless Steel(S.S.)봉 1개를 CANFLEX 핵연료다발 설계의 중심봉에 사용하고, 나머지 핵연료봉에 순환우라늄 핵연료를 장입한 소위 CANFLEX-ST 핵연료의 격자특성을 계산하였다. 이 계산 결과는 37봉 핵연료의 것과 비교하여 냉각재 기포반응도가 8 %, MLHR이 14 % 정도, power coefficient가 0.00155 mk/%FP 감소하였다. CANFLEX-ST 핵연료의 방출 연소도는 37봉 핵연료의 것과 비교하여 50 % 증가하였으나 CANFLEX-RU에 비해 24 % 정도 감소하여 경제성이 다소 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 방출 연소도를 증가시켜 경제성을 향상시키기 위해 iron봉과 마찬가지로 가운데 구멍을 뚫어 S.S. 봉 부피의 10 % ~ 50 % 까지 감소시켜 계산하였다. 이 계산 결과는 그림 1 및 2 와 같다. 그림 1 및 2 에 나타난바와 같이, CANFLEX-ST의 냉각재 기포 반응도와 power coefficient 는 37봉 핵연료의 것보다 작다. 이 경우, burnup penalty가 가장 작은 것은 Stainless Steel 봉의 부피를 30 % 감소시킨 Annulus 봉임을 알 수 있으며, 이 핵연료 다발을 CANFLEX-ST(30 % Annulus) 로 칭하였다.

이상의 결과로부터 기존 37봉 핵연료, CANFLEX-NU 및 CANFLEX-RU, 핵연료와 저 기포 반응도용 핵연료 모델 후보인 CANFLEX-ST(30 % Annulus) 핵연료의 최대 선출력, 냉각재 기포 반응도, 방출 연소도, relative power coefficient 등을 표 2에 정리하였다.

표 2 로부터 냉각재 기포 반응도와 relative power coefficient가 기존 37봉 핵연료보다 작으며 burnup penalty가 가장 적은 것은 CANFLEX-ST(30% Annulus) 다발임을 알 수 있다. 이 때, CANFLEX 핵연료 다발을 사용한 핵연료는 핵연료의 재질에 상관없이 최대 선출력의 값이 비슷함도 알 수 있다.

그러므로 CANFLEX-ST (30% Annulus) 다발을 사용하면 기존의 37봉 핵연료와 비교하여 최대 선출력은 14 %, 냉각재 기포 반응도는 3 %, 연간 핵연료 다발 사용량은 32 % 감소하며 방출 연소도는 약 60 % 정도 증가한다. 또한, 현재 37봉 핵연료의 power coefficient를 중간 연소도에서 0으로 할 때 국내 인허가 사항 중 가장 중요한 Negative power coefficient 요건을 만족할

수 있다.

잠정적으로 선정된 저 기포 반응도용 순환우라늄 핵연료, CANFLEX-ST (30% Annulus) 의 노물리 특성을 예비 해석한 결과는 다음과 같다.

시간-평균 노심 계산결과에 의한 방출연소도 비교하면, CANDU 6 와 CANFLEX-NU 핵연료의 경우는 거의 같으나 CANFLEX-RU 핵연료의 경우는 CANDU 6 핵연료와 비교하여 농축도의 차이로 80 % 이상 증가한다. 그러나 CANFLEX-ST (30% Annulus) 핵연료의 경우는 저 기포반응도를 위하여 핵연료 다발의 가운데 스테인레스 스틸 봉이 들어 있으므로 방출연소도가 CANFLEX-NU 핵연료에 비해 53 % 증가하나 CANFLEX-RU 핵연료에 비하면 방출연소도가 17 % 감소한다.

또 최대 채널출력은 CANFLEX-RU 핵연료 장전경우가 6570 kW이고, CANFLEX-ST (30% Annulus) 핵연료 장전 경우가 6499 kW로 CANDU 6 원자로의 기존 37 개 천연우라늄 핵연료봉 다발 장전 경우보다 약간 낮으며, 최대 다발출력도 CANFLEX-RU 핵연료 장전 경우가 775 kW 이고, CANFLEX-ST (30% Annulus) 핵연료 장전 경우가 767 kW로 CANDU 6 원자로의 기존 37 개 천연우라늄 핵연료봉 다발 장전 경우보다 약간 낮다.

또한 CANDU 6 원자로의 기존 37 개 천연우라늄 핵연료봉 다발 장전 경우, CANFLEX-RU 핵연료 장전 경우 및 CANFLEX-ST (30% Annulus) 핵연료 장전 경우의 시간-평균 노심에서의 반응도 기구에 대한 반응도가를 계산한 결과 요약은 표 3 과 같다. CANDU 6 원자로에서 조절봉의 30분 xenon-override 능력을 분석한 그림 3 은 CANFLEX-NU, CANFLEX-RU 및 CANFLEX-ST (30% Annulus) 핵연료를 장전 사용할 경우, 평형 노심에서 원자로 정지 후 xenon transient를 나타낸 것이다. CANFLEX-RU 핵연료 장전 노심의 xenon buildup은 약 11 mk로서 천연우라늄 장전 노심보다 약 3 mk 작다. 그러므로 CANFLEX-RU 핵연료 장전시 조절봉의 반응도가는 14.7 mk 로서 30분 동안 충분히 xenon을 override 할 수 있다. 따라서 순환 우라늄을 사용하여도 설계변경 없이 현재의 조정봉이 사용 가능하다.

또한 CANFLEX-RU 혹은 CANFLEX-ST(30 % Annulus) 핵연료 장전 노심의 Spatial과 Bulk Control 을 담당하는 Zone controller 는 원자로의 기존 37 개 천연우라늄 핵연료봉 다발을 장전한 경우보다 크므로 설계 변경 없이 사용 가능하고, CANFLEX-RU 혹은 CANFLEX-ST(30 % Annulus) 핵연료 장전 노심의 Mechanical Control Absorber 는 원자로의 기존 37 개 천연우라늄 핵연료봉 다발을 장전한 경우보다 다소 작으므로 계속 검토하여야 하나 MCA 의 기능에는 문제가 없을 것으로 예측된다.

4 결론

순환우라늄을 사용할 경우, 중수로의 취약점인 냉각재 기포 반응도와 Negative power coefficient 의 국내요건을 만족시키기 위하여 다양한 핵연료 모델에 대한 계산을 수행하였다.

그 결과로부터 CANFLEX-ST(30 % Annulus) 핵연료를 사용하면 기존의 37봉 핵연료와 비교하여 최대 선출력은 14 % , 냉각재 기포 반응도는 3 % , 연간 핵연료 다발 사용량은 32 % 감소하며, 방출 연소도는 약 60 % 정도 증가하고, 현재 37봉 핵연료의 power coefficient를 중간 연소

도에서 0 으로 할 때 국내 인허가 사항 중 중요한 Negative power coefficient 요건을 만족할 수 있음을 알 수 있다.

따라서 중수로의 노물리 관점에서는, CANFLEX-ST(30 % Annulus) 핵연료는 방출 연소도가 CANFLEX-RU에 비해 약 17 % 줄고 연간 핵연료 다발 사용량이 20.7 % 늘어 경제성이 약간 감소하나, 안전성과 Negative power coefficient 인허가 요건을 만족하므로, 저 기포반응도용 핵연료 모델로 선정하는 것이 적합하다고 노물리 관점에서 판단된다.

위의 판단을 근거로 저 기포반응도를 위하여 중심봉에 스테인레스 스틸 봉이 들어 있는 CANFLEX-ST(30 % Annulus) 핵연료의 시간-평균 노심 계산결과에 의하면, 방출연소도는 CANFLEX-NU 핵연료에 비해 53 % 증가하나 CANFLEX-RU 핵연료에 비하면 방출연소도가 17 % 감소한다. 또한 CANFLEX-ST(30 % Annulus) 핵연료는 각종 반응도 제어기구의 반응도가의 계산결과로부터 설계변경 없이 현재의 반응도 조절기구의 사용이 가능하다고 판단된다.

그러나, 이상의 결과로 부터 CANFLEX-RU 사용시 저기포 반응도용으로 CANFLEX-ST(30 % Annulus) 핵연료의 사용이 노물리 관점에서는 적합하나, Stainless Steel 이라는 새로운 재질을 중수로에 사용함에 따른 재료문제와 중심봉에서 열을 발생하지 않기 때문에 부수로간 나타날 수 있는 냉각재 밀도 차이와 반경방향 출력분포 변화가 CHF에 미칠 수 있는 영향과 같은 열수력 관점에서의 문제점은 없는 지 상세히 규명되어야 할 것이며, 아울러 경제성 분석도 좀 더 정확히 수행될 필요가 있다.

본 논문은 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

5. 참고문헌

- [1] 민병주, 석수동, 심기섭, 김봉기, "순환우라늄을 사용한 중수로 출력증강에 관한 연구", 한국원자력학회 춘계학술대회(1998)
- [2] B.J. Min, B.G. Kim, K-S Sim and H.C. Suk, "The Use of Graphite for the Reduction of Void Reactivity in CANDU Reactors", Proceedings of the 4th International conference on CANDU Fuel, Pembroke(1995)
- [3] B.J. Min, B.G. Kim, K-S Sim and H.C. Suk, "The Use of Graphite in CANDU Fuel with Recovered Uranium", Proceedings of the 5th International conference on CANDU Fuel, Toronto(1997)
- [4] E. S. Y. Tin and P. C. Loken, "POWDERPUFS-V Physics Manual", TDAI-31 part 1, AECL, 1979.
- [5] J. V. Donnelly, "WIMS - CRNL A User's Manual for the Chalk River Version of WIMS", AECL Report AECL-8955, 1986.
- [6] D. A. Jenkins and B. Rouben, "Reactor Fuelling Simulation Program - RFSP : User's Manual for Microcomputer Version", TTR-321, Rev. 1, 1993.

표 1. 저 기포반응도용 핵연료 모델 후보

Fuel Types	MLHR (kW/m)	Coolant Void Reactivity (mk)	Discharge Burnup (MWD/MTU)	Relative Power Coefficient (mk/%FP)	Annual Fuel Bundles (Bundles/yr)
37-elm.(NU)	57,912*	14,41494	7055	0,0	4672,004
CANFLEX-NU (NU43)	49,015	15,49894	6997	0,00137	4874,578
CANFLEX-RU (RU43)	49,528	15,91076	13034	0,00369	2616,804
CANFLEX-Fe (10% Annulus)	50,981	13,93268	11070	-0,00002	3177,115
CANFLEX-ST (30% Annulus)	50,974	13,96273	11133	-0,00002	3159,136

표 2 . RFSP Time-Average 계산결과

	CANDU 6 (PPV)	CANDU 6 (WIMS-AECL)	CANFLEX -NU	CANFLEX -RU	CANFLEX-ST (30% Annulus)
Total Reactor Power (MW)	2061,4	2061,4	2061,4	2061,4	2061,4
Maximum Channel Power(kW)	6582,	6583	6583,	6570,	6499
Location	N-17	P-08	P-08	P-08	N-17
Average Channel Power(kW)	5425,	5425	5425,	5425,	5425
Maximum Bundle Power(kW)	801,8	791,5	790,6	774,7	756,5
Location	P-11 (bundle6)	P-06 (bundle6)	P-06 (bundle6)	N-08 (bundle4)	M-19 (bundle5)
Radial Form Factor	0,824	0,824	0,824	0,826	0,835
Axial Form Factor	0,684	0,693	0,694	0,707	0,716
Overall Form Factor	0,564	0,571	0,572	0,584	0,598
K_{eff}	1,001182	0,996500	0,996500	0,996500	0,996500
Average Exit Burnup (MWh/bundle)	3344	3395	3218	5928	4922

표 3 . 반응도 기구의 반응도가

	Adjuster Rod (mk)	Zone Controller (mk)	MCA (mk)
CANDU 6	16,6	6,5	-11,3
CANFLEX-RU	14,7	7,3	- 8,5
CANFLEX-ST (30% Annulus)	15,0	7,1	- 9,0

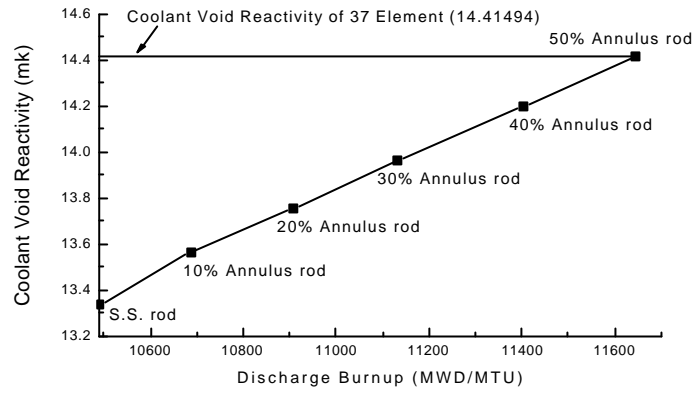


그림 1. 다양한 S.S.봉 사용시 냉각재 기포 반응도와 방출연소도의 관계

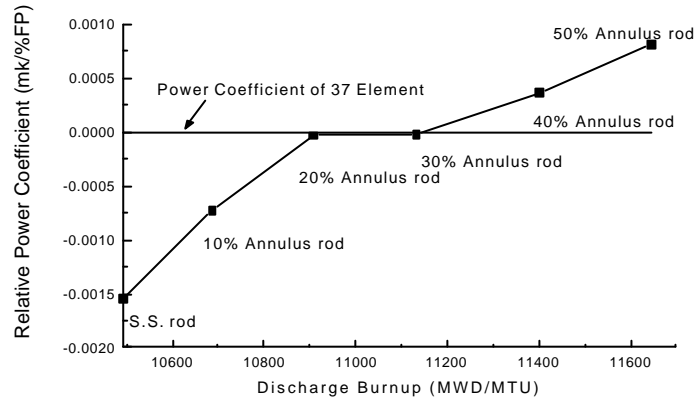


그림 2. 다양한 S.S. 봉 사용시 상대 출력계수와 방출연소도의 관계

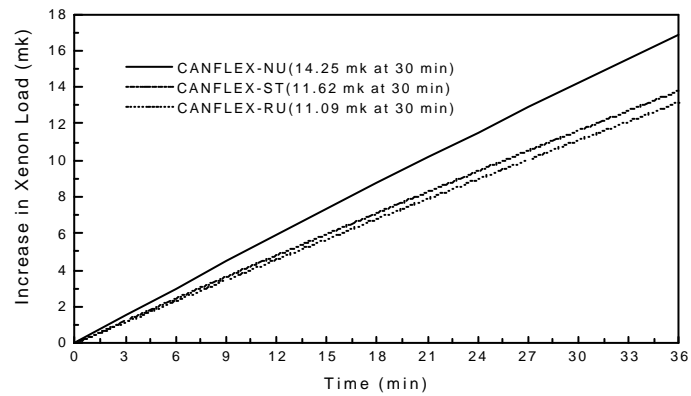


그림 3. Xenon Transient for 30 Minutes after Reactor Shutdown