

고리1,2호기 연료저장시설 최대 허용 가능 농축도 결정

Determination of Maximum Permissible Enrichment for Fuel Storage Facilities of Kori Unit 1 & 2

구본승, 차균호, 최유선, 박문규, 이창섭
한전전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

고리1,2호기 연료저장시설(사용후연료저장조 및 신연료저장고)의 최대 허용 가능 농축도를 결정하기 위하여 SCALE4.4와 MCNP4B 전산코드를 이용하여 임계안전해석을 수행하였다. 그리고 사용 전산코드 및 단면적 자료의 불확실도를 평가하기 위하여 네 종류의 임계실험을 대상으로 검증계산을 수행하였다. 임계안전해석 결과, 고리1,2호기 사용후연료저장조에는 어떠한 이득(Credit)을 고려하지 않고도 5.0w/o로 농축된 연료집합체의 저장이 가능함을 확인하였으며, 신연료저장고의 경우는 최적감속조건을 고려하여 고리1호기와 고리2호기가 각각 4.3w/o 및 5.0w/o로 농축된 연료집합체를 안전하게 수용할 수 있는 것으로 분석되었다.

Abstract

The criticality safety analysis of spent fuel storage rack and new fuel storage rack was performed to determine the maximum permissible enrichment of Kori unit 1&2 using SCALE4.4 and MCNP4B code system. In addition, the uncertainty of the code systems and cross-section data was evaluated by verifying the four types of criticality experiments. As a calculational result, the fuel assemblies enriched with 5.0w/o uranium can be stored in the spent fuel storage rack of Kori unit 1&2 without any credit. For the new fuel storage rack, it is proved that Kori unit 1 & 2 can afford to keep the fresh fuel assemblies enriched with 4.3 and 5.0w/o U^{235} respectively under the optimum moderated condition.

1. 서 론

가압경수형원전의 연료는 출력생산을 목적으로 노심에 장전되기 전에 일시적으로 신연료저장고에 저장된 후 사용후연료저장조로 이동 저장하게 되며, 노심에서 연소된 후에는 사용후연료저장

조에 임시로 저장된다. 이와 같이 노심 이외의 곳에서 원전연료와 같은 핵물질이 취급될 경우에는 핵임계 안전을 반드시 고려하여야 한다. 사용후연료 저장시설은 (10년+1노심)분의 연료를 저장할 수 있도록 설계되는 것이 일반적이며 여러 규제 요건들에 의하여 임계안전 요건을 만족하도록 규정되어 있다.[1,2,3,4,5] 이러한 임계안전은 연료집합체간에 충분한 간격을 유지(기하학적 방법)하거나, 중성자 흡수 독물질을 삽입(물리적인 방법)하여 반응도를 제어한다. 과거에는 임계안전해석시 저장되는 연료를 모두 신연료로 가정하여 보수적으로 해석하였으나, 현재는 연소도효과(Burnup Credit)를 고려하여 설계하는 것이 허용되고 있다. 국내 경수형 원전의 경우 고리1,2호기를 제외한 원전의 사용후연료저장조가 연소도효과를 적용하여 임계안전해석이 수행되었다. 한국표준형원전(영광3,4,5,6호기 및 울진 3,4,5,6호기)의 경우는 설계단계부터 연소도효과를 적용하였으며, 고리3,4호기, 영광1,2호기 및 울진1,2호기는 Reracking을 수행하면서 연소도효과를 적용하였다.

고리1,2호기 사용후연료저장조의 임계도는 연료 농축도가 5.0w/o까지 저장 가능하도록 평가되었으나[6,7] 당시 인허가는 3.8w/o로 취득된 바 있다. 원전의 이용률 향상을 위해 타원전의 연료와 같이 Axial Blanket이 적용된 연료를 고리1,2호기에 적용할 경우 농축도의 국부적인 상승이 예상되며, 이에 따라 연료저장시설(사용후연료저장조 및 신연료저장고)의 임계도는 재평가되어야 한다[8].

앞서 언급된 규제요건에 따르면 사용후연료저장조는 연료를 신연료로 가정한 상태에서 최대의 임계도 값을 갖는 조건에서도 불확실도가 포함된 유효증배계수가 0.95를 초과하지 않도록 하고 있으며, 신연료저장고[9]는 순수로 침수된 상태와 최적감속조건으로 가정한 상태에서 불확실도가 포함된 유효증배계수가 각각 0.95 및 0.98을 초과하지 않도록 하고 있다. 또한 불확실도에는 단면적 라이브러리를 포함한 전산코드의 불확실도, 제작오차의 불확실도, 이상상태로 인한 불확실도 그리고 Monte Carlo 방법을 사용하는 경우에는 방법론상의 통계적 불확실도 등이 고려되어야 한다.

2. 본 문

2.1 임계도해석 최적화를 위한 검증계산

임계도를 평가하기 위해서는 임계도 해석 최적화를 위한 코드선정 및 검증계산이 선행되어야 한다. 본 계산에서는 ORNL에서 개발한 SCALE4.4[10] 전산코드 체계와 LANL에서 개발한 MCNP4B[11] 코드를 이용하였다. 이 전산코드는 모두 공개된 코드로 임계안전해석에 널리 적용되고 있어서 해석방법의 타당성을 추가로 입증할 필요가 없으며, 전산코드의 개선 및 자료의 수정이 있을 경우 이에 대한 추가적인 지원을 쉽게 받을 수 있다는 장점이 있다.

SCALE4.4 전산코드 체계는 임계안전해석, 방사선원항 계산 및 연소계산, 차폐계산 등을 수행할 수 있는 여러 모듈로 구성되어 있다. 검증계산에는 원전의 연료저장시설 임계도 평가에 적합한 CSAS (Criticality Safety Analysis Sequence) 모듈을 이용하였으며 중성자 단면적 라이브러리는 ENDF/B-V에 근거한 44그룹 단면적 자료(44GROUPNDF5)를 사용하였다. CSAS 모듈 중 연소도효과를 고려하지 않는 일반적인 임계해석에 주로 사용되는 모듈은 CSAS25 모듈이며, 이 모듈은 BONAMI, NITAWL-II, KENO-V.a로 구성된다. KENO-V.a 코드는 3차원 기하학적 구조의 문제에 대한 다군 수송방정식을 Monte Carlo 방법으로 유효증배계수 값을 계산하는 프로그램이다. 44GROUPNDF5는 ENDF/B-V로부터 생성된 238그룹 단면적 자료를 44그룹으로 축약하여 사용후연료 및 방사성 폐기물 등의 분석에 사용되도록 개발된 단면적 자료이다.

MCNP4B 코드는 임계문제의 고유치 계산 및 중성자, 광자, 전자 또는 이들의 연계계산의 수송 문제에 사용된다. 이 코드는 복잡한 3차원 문제를 쉽게 구현할 수 있으며 사용자의 목적에 따라 라이브러리(Pointwise or Continuous)를 선택할 수 있다. 그리고 선원항을 자유롭게 정의할 수 있으며 분산감쇄기법(Variance Reduction Technique)을 이용, 계산시간의 단축 및 효율적인 계산결과를 얻을 수 있다.

이들 전산코드 및 단면적 자료의 불확실도를 평가하기 위해서 네 종류의 임계실험을 대상으로 검증계산을 수행하였다. 검증계산의 대상으로 선정되는 임계실험은 실제 임계안전을 평가하려고 하는 대상의 특성을 잘 반영하여야 한다. 이 검증계산에 고려된 임계안전해석 대상은 경수로용 연료 저장시설이다. 이에 따라 해석 방법의 타당성을 입증하기 위하여 UO₂ 연료봉이 집합체 형태를 구성하고 있으며 감속재로 물을 사용하는 임계실험을 검증 대상으로 설정하고, ICSBEP (International Criticality Safety Benchmark Evaluation Project)가 OECD/NEA 문서로 발간한 International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments[12] 중에서 이러한 조건을 만족하는 임계실험을 선정하였다. 이 Handbook은 전 세계적으로 수행된 여러 종류의 임계실험에서 얻어진 임계안전 검증자료를 포함하고 있는데, 이 자료는 임계계산의 타당성을 입증하는데 사용될 목적으로 정리된 것이다. 선정된 임계실험들은 Pacific Northwest Laboratory (PNL)에서 1970년대 후반에서 1980년대 초반까지 수행된 일련의 임계실험으로 경수로 연료 저장 시설의 특징을 잘 반영하고 있으며, 선정된 임계실험 제목 및 내용은 다음과 같다.

1) LEU-COMP-THERM-009

: Water-Moderated Rectangular Clusters of U(4.31)O₂ Fuel Rods (2.54cm Pitch) Separated by Steel, Boral, Copper, Cadmium, Aluminum or Zircaloy-4 Plates

2) LEU-COMP-THERM-010

: Water Moderated U(4.31)O₂ Fuel Rods Reflected by Two Lead, Uranium or Steel Walls

3) LEU-COMP-THERM-016

: Water-Moderated Rectangular Clusters of U(2.35)O₂ Fuel Rods (2.032cm Pitch) Separated by Steel, Boral, Copper, Cadmium, Aluminium or Zircaloy-4 Plates

4) LEU-COMP-THERM-017

: Water-Moderated U(2.35)O₂ Fuel Rods Reflected by Two Lead, Uranium or Steel Walls

모두 118개 경우의 UO₂ 연료 임계실험에 대한 검증 결과를 표 2.1~2.2에 정리하였다. 표에서 나타나듯이 코드 간 약간의 임계도 차이는 보이지만 전체적인 계산결과가 임계실험의 유효증배계수 값인 1.0에 매우 근접함을 볼 수 있으며, 이는 임계해석 방법으로 선정한 SCALE4.4 및 MCNP4B 전산코드 체계가 임계안전해석에 아주 적합하다는 것을 의미한다. 임계실험에 대하여 수행된 검증계산의 평균 유효증배계수 값은 SCALE4.4와 MCNP4B가 각각 0.99741, 0.99711로 계산되었다. 검증계산에 대한 *bias*는 임계실험의 유효증배계수 1.0과 계산된 평균 유효증배계수의 차이이며 표준편차(σ)는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{avg})^2} \quad (1)$$

식(1)에서 n 은 자료의 수를 의미하며 x_{avg} 는 계산된 유효증배계수의 평균이며, x_i 는 i 번째 계산의 유효증배계수 값이다. 이 계산결과의 *bias* 및 통계적 불확실도는 임계안전평가시 반드시 고려되어야 한다. 임계실험 검증계산은 자료의 수가 118로 충분히 크므로 유효증배계수의 분포가 정규분포를 가진다고 볼 수 있다. 따라서 Monte Carlo 방법을 사용함에 따른 통계적 불확실도 $\Delta k_{MC}(2\sigma)$ 는 표 2.3과 같다.

2.2 고리1,2호기 사용후연료저장조 임계도 평가

고리1호기 사용후연료저장조는 건설당시 매년 1회의 재장전 후 약 1년 동안 사용후연료를 저장할 목적으로 4/3 노심(162 연료 집합체) 분의 저장용량으로 건설되었으나, 미국의 핵정책 변경으로 적어도 10년 이상의 저장용량을 확보하지 않을 수 없게 되어 1978년 14/3 노심(562 연료집합체) 분의 용량으로 확장하였다.[13] 저장랙은 7×7, 7×6 및 6×6형의 세 가지 형태의 모듈로 이루어져 있으며 이들 개수는 각각 4개, 7개 및 2개이고, 격자의 네 측면에 Stainless Steel-304의 Corner Angle이 위치하여 연료집합체를 지지한다. 이 저장조는 연료집합체 중심간의 거리가 36.0cm이며 방사선 차폐 및 냉각재로써 냉각수가 연료집합체 상부로 약 3m 정도 채워져 있다.

고리2호기 사용후연료저장조는 모두 약 23/3노심 (920 집합체)의 연료집합체를 저장할 수 있으며 이 저장조에는 방사선 차폐 및 붕괴열 제거의 목적으로 냉각정화계통이 설치되어 약 2000ppm의 붕산을 포함한 냉각수의 온도를 48.9℃ 이하로 유지될 수 있도록 설계되어 있다. 집합체 저장 격자의 중심간의 거리는 33.02cm로 46×20 격자로 배열되어 있다. 연료집합체를 5×6 혹은 5×5씩 한 설치대에 넣게 되어있으나 실제로 설치대간의 거리가 저장 격자간의 거리와 같아서 설치대의 구별이 없으므로 SCALE4.4와 MCNP4B 코드의 입력 모양에서는 설치대의 구조물은 모두 무시하고 단지 저장격자인 Stainless Steel-304 만을 묘사하였다.

2.2.1 정상상태 계산

고리1,2호기의 정상상태 계산을 위한 기하학적 모양은 그림 2.1~2.2와 같으며 다음과 같은 보수적인 가정들을 사용하였다.

- 1) 저장된 연료는 연소되지 않은 5.0 wt.% U^{235} 신연료이다.
- 2) 저장조 내의 물은 보론을 고려하지 않은 순수한 물이다.
- 3) 저장조 내 냉각수의 온도는 섭씨 27℃ 이고, 압력은 1기압이다.
- 4) 한 개의 연료집합체와 Corner Angle이 x, y 방향으로 무한히 배열되어 있으며, z 방향으로 상·하 30.0cm 두께의 순수(Pure Water) 반사체가 존재한다.
- 5) 연료봉 및 Guide Tube를 제외한 모든 구조물은 무시한다.
- 6) IFBA나 WABA와 같은 중성자 독물질은 없다고 가정한다.
- 7) 저장조의 구조재는 저장격자의 Corner Angle을 제외하고 모두 무시하고, Corner Angle은 z 방향으로 연료부분 까지 존재하는 것으로 한다.
- 8) 연료의 밀도는 농축도에 관계없이 이론밀도의 95% 인 10.412 g/cm³이다.

2.2.2 이상상태 계산

미임계 상태가 확보됨을 보이기 위해서는 정상상태에서 계산된 유효증배계수에 여러 가지 가능한 이상상태를 고려하여 계산한 불확실도가 포함되어야 한다. 그러나 두 가지의 독립적인 사건이 동시에 일어나는 조건은 임계도 분석의 범위에 포함되지 않는다. 이 이중우발성의 원리는 가상사고나 사건의 효과를 계산할 때 실제적 조건이 임계도 계산에서 가정될 수 있다는 것을 의미한다. 이 이중우발성의 원리에 따라 이상상태에 따른 불확실도로 인한 임계도 증가의 원인이 될 수 있는 다음의 5가지 이상상태를 고려하였다.

- 1) 네 격자의 중심으로 집중된 상태 (Coring) - 그림 2.3~2.4
; 사용후연료저장조의 저장격자는 연료집합체의 삽입이 용이하도록 Clearance를 유지하고 있다. 네 개의 연료집합체가 격자 중심으로 집중된 상태를 가정하였다.
- 2) 연료집합체 하나가 다른 집합체들 위에 길게 놓이는 경우 (Malposition) - 그림 2.5
; 크레인 조작상의 실수로 15×5의 집합체 위에 집합체 하나가 길게 놓이는 경우를 가정하였다.
- 3) Corner Angle의 두께가 변화된 경우 (Corner Angle Thickness Tolerance)
; 제작상 오차로 Stainless Steel-304 Corner Angle 두께가 변한 경우로 고리1호기는 0.6cm에서 0.05cm 감소된 0.55cm, 고리2호기는 0.2cm에서 0.01cm 감소된 0.19cm로 가정하였다.
- 4) 저장격자의 제작오차로 인한 저장 설치대간의 거리가 변화된 경우 (Pitch Tolerance)
; 표준설계에서 저장격자를 형성하는 Corner Angle 간의 간격은 고리1호기가 21.2cm이나 제작과정 오차로 0.15cm 감소한 21.05cm, 고리2호기는 21.18cm에서 21.028cm로 감소한 경우를 가정하였다.
- 5) 저장조의 냉각 및 정화계통이 정상 작동시의 최고온도인 48.9℃로 증가한 경우와 100℃까지 점진적으로 증가한 경우 (Water Temperature Variation)

위의 가정을 적용하여 임계해석을 수행하였다. 그리고 농축도 5.0 wt.% 연료집합체에 대한 고리1,2호기 사용후연료저장조의 정상상태 및 이상상태 유효증배계수를 표 2.4에 정리하였다. SCALE4.4나 MCNP4B 모두 냉각재 온도변화를 고려하지 않았을 경우 집합체의 집중상태(Coring)에서 가장 큰 임계도 값을 보였으며 집합체 낙하사고의 경우는 정상상태 계산 값과 별 차이가 없는 것으로 나타났다. 모든 계산에서 경계조건을 x, y 방향으로 무한배열을 가정하였기 때문에 중성자 누설은 z 방향에서만 이루어진다. 정상상태의 경우 Plenum, Top/End Plug 그리고 물 반사체가 연료의 상·하부에 위치하기 때문에 z 방향으로의 누설량이 작은 반면, 집합체 낙하사고의 경우는 상부 쪽으로는 물 반사체만이 존재하기 때문에 누설량이 정상상태에 비해서 크게 증가하기 때문이다. Corner Angle의 두께변화와 저장간격 오차 계산은 SS-304 양의 변화와 연료집합체와의 간격변화 등으로 인한 흡수효과와 산란효과의 변화로 약간씩의 임계도 차이를 보였다. 냉각재 온도변화의 경우 두 코드간의 임계도 차이가 발생하였다. MCNP4B는 냉각재 온도가 증가함에 따라서 임계도 값이 감소하지만 SCALE4.4는 증가하는 경향을 보였다. MCNP4B는 미세한 온도변화에 따른 영향을 계산할 때 특정온도(300K, 500K, 700K 등) 라이브러리를 사용하고 온도변화에 따른 밀도를 입력문에서 고려하지만 SCALE4.4는 각 온도에 맞는 단면적 라이브러리를 직접 읽어 들여 계산하기 때문이다.

유효증배계수에는 이상상태 및 정상상태 계산결과의 차이($\Delta k = k' - k_{normal}$)가 보수적으로 반영되어야 한다. 각각의 이상상태가 서로 독립적이면 불확실도는 통계적으로 결합될 수 있으나 서로 상관관계가 있을 경우에는 가산되어야 한다. 따라서 표 2.4의 결과 중에서 정상상태 보다 덜 보수적으로 계산된 경우에 대해서는 유효증배계수 계산에서 제외시켰다. 그리고 앞에서 언급했듯이 사용후연료저장조의 임계안전 평가기준은 정상 및 이상상태의 유효증배계수가 불확실도를 포함하여 95% 신뢰구간에서 0.95를 넘지 않을 확률이 95%가 되어야 한다. 이때 불확실도는 검증계산 상의 불확실도, Monte Carlo 계산 방법상 발생한 통계적 불확실도, 제작오차에 따른 불확실도 및 온도 증가에 따른 불확실도 등을 모두 포함해야 한다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$k_{eff} = k_{normal} + \Delta k_{bias} + \sqrt{\Delta k_{MC}^2 + \Delta k_{coring}^2 + \Delta k_{mal}^2 + \Delta k_{CA}^2 + \Delta k_{Temp}^2} \quad (2)$$

표 2.4의 결과와 위의 식(2)를 이용하여 최종 유효증배계수를 계산하여 표 2.5에 정리하였다. 규제지침에 따른 유효증배계수 값은 일방 상부 공차한계(One Sided Upper Tolerance Limit) 값을 의미하므로 정상상태의 편차에 1.6배(1.6σ) 한 값을 더해 준 값이 최종 유효증배계수가 된다. 즉 연료 농축도에 대한 Tolerance 5%를 제외한 4.95w/o의 농축도를 가진 연료집합체를 고리1,2호기 사용후연료저장조에 수용할 수 있음을 알 수 있다.

2.3 고리1,2호기 신연료저장고 임계도 평가

신연료저장고 내의 저장대는 연료와 관련된 다음의 가정을 따라야 한다. 즉, 연료 저장대는 제어봉 또는 연료집합체와 일체가 아닌 어떠한 중성자흡수체(예: 가연성 독물질)의 이득(Credit)을 고려하지 않고 가장 높은 농축도를 가진 신연료집합체가 저장되어 있으며 순수로 침수된 조건에서 저장대는 횡방향으로 무한하다고 가정하거나 실제 설계와 같이 물 반사체와 콘크리트 반사체로 둘러싸여 있다고 가정한다. 축방향으로는 무한하다고 가정하거나 연료 상하부의 물이나 구조물의 효과가 연료의 축방향 특성과 함께 고려되어야 한다. 그리고 저장대의 기계적, 재질적 변화는 최악의 조건으로 가정하거나 민감도 분석을 통하여 얻어진 적절한 불확실도를 고려할 수 있으며 이 둘의 조합을 사용할 수도 있다. 신연료저장고는 안개, 소방거품 등에 기인한 극저밀도의 물이나 수소함유물로 감속된 경우에 대하여 분석되어야 한다. 이때 물이나 수소함유물이 가장 큰 유효증배계수를 나타내는 조건으로 결정되어야 하며 유효증배계수는 0.98 이하 이어야 한다.

건조상태의 신연료저장고에 대해서 임계도 해석을 수행하였다. SCALE4.4 코드는 238-Group 라이브러리를 이용한 CSAS25 모듈을 사용하였다. 기계적공차나 온도변화에 따른 계산을 생략한 채 최적감속조건에 대해서만 해석하였는데 그 이유는 이 조건에서 최대의 임계도 값을 보이기 때문이다. 대신 최종적인 임계도 값의 계산에는 충분한 불확실성을 고려하였다. 일반적으로 신연료저장고의 최적감속(Optimum Moderation) 효과는 물의 밀도가 낮을 때, 즉 물의 밀도가 0.2g/cc 이하에서 나타난다. 물 밀도 변화에 따른 중성자 감속 vs. 흡수의 상대적인 크기 변화로 증배계수가 변하는데 그 값이 최대치일 때의 물의 밀도를 최적감속조건이라 하며 집합체간 간격, 연료의 농축도 등에 따라 약간씩 변한다.

그림 2.6~2.7은 고리1,2호기 신연료저장고 해석을 위한 기하학적 모양을 보여준다. 신연료저장고의 집합체 배열은 정사각형이 아니므로 그림과 같이 직사각형의 모형을 사용하여 신연료저장고

에서의 최적 감속에 따른 임계도를 분석하였다. 일반적으로 물의 밀도가 1g/cc부터 감소해 감에 따라 증배계수도 감소하다가 다시 증가하여 최적감속조건에서 최고치를 이루고 그 이후에는 급격하게 감소한다. 본 평가에서도 물의 밀도를 1g/cc에서 점차로 줄였으며 특히 최대의 증배계수를 보일 것으로 추정되는 0.05g/cc 이하의 구간에서는 0.01g/cc 간격으로 계산하였다. 모델링에 있어서는 단일 저장조가 x, y 방향으로 무한배열을 이루고 z 방향으로 적절한 크기의 반사체가 존재하는 것으로 하였다. 특히 물의 밀도가 낮아지면 낮아질수록 중성자의 평균자유행정 거리가 길어짐을 고려하여 각 물의 밀도에 따른 두 배의 평균자유행정 거리를 반사체의 두께로 정하였다.

일반적으로 신연료저장고에서의 최종 증배계수 분석에는 최적감속조건하에서의 값과 기계적공차 및 검증계산으로부터의 불확정성만을 고려한 다음의 식을 사용한다.

$$k = k_{OM} + \sqrt{u_{method}^2 + \sum_i \Delta k_{MT,i}^2} \quad (3)$$

여기서 k_{OM} 은 최적 감속 때의 임계도 값으로 $k + 1.96\sigma$ 를 의미하고 u_{method} 는 검증계산으로부터 얻은 값이며 $\sum_i \Delta k_{MT,i}$ 는 기계적공차(Mechanical Tolerance)에 따른 Δk 값들의 합을 말한다. 하지만 실제로는 계산된 k 값과 위 식의 root 안에 각 경우 분산의 합을 더해서 최종 결과 값을 구하는 것이 타당하다. 왜냐하면 KENO-V 계산결과인 각 값에 따른 불확정성은 u_{method} 에 반영되어 있으므로 처음부터 k 값에 1.96σ 를 더해서 고려하는 것은 지나치게 보수적이기 때문이다. 본 계산에서는 신연료저장고 해석에 있어서 기계적공차에 따른 임계도 변화와 온도변화에 따른 계산 없이 최적감속조건에 대해서만 계산을 수행하였기에 사용후연료저장조의 최종 임계도 계산에서 이용했던 식(2)를 이용하였다. 이는 실제로 식(3)에 비해서 더욱 보수적인 결과를 보일뿐만 아니라 118개의 임계실험을 통한 bias 및 사용후연료저장조 계산을 통한 root 안의 불확실성을 이용하기 때문에 위의 계산 방법보다 합리적이라고 할 수 있다.

표2.6 및 그림 2.8~2.11에 고리1,2호기 신연료저장고의 물 밀도 변화에 따른 최적감속조건에서의 임계도 및 표준편차를 정리하였다. 고리1,2호기는 각각 물 밀도 0.05g/cc와 0.04g/cc에서 최대의 임계도 값을 보였으며, 또한 SCALE4.4/MCNP4B 두 코드 모두 동일한 결과를 보여 코드상의 임계도 차이 또한 크지 않음을 볼 수 있다. 물 밀도의 차이는 고리1,2호기의 기하학적 형태가 서로 다르기 때문이다. 전술한 바와 같이 물의 밀도가 점차로 줄어들어 따라 임계도 값도 선형적으로 감소하다가 다시 증가하여 최대의 값을 가지고 급격하게 줄어드는 것을 볼 수 있다.

그리고 최적감속조건에서의 최대 임계도 값과 임계실험에서 구한 Δk_{bias} , 그리고 사용후연료저장조 계산에서 얻은 root 안의 값을 이용하여 고리 1,2호기 신연료저장고에 대한 최종 임계도 값을 표2.7 및 표2.8에 정리하였다. 신연료저장고가 안개, 소방거품 등에 기인한 극저밀도의 물이나 수소함유물로 감속되는 경우 즉, 최적감속조건에서의 최대 유효증배계수는 0.98을 넘지 않아야 한다. 따라서 표2.8에서 볼 수 있듯이 신연료저장고가 최적감속조건에 도달하더라도 고리1,2호기는 각각 4.3w/o U²³⁵ 및 5.0w/o U²³⁵ 연료를 안전하게 수용할 수 있는 것으로 분석되었다.

3. 결 론

고리1,2호기 연료저장시설의 최대허용가능 농축도를 결정하기 위하여 SCALE4.4와 MCNP4B 전산코드를 이용, 사용후연료저장조 및 신연료저장고의 임계안전해석을 수행하였다. 그리고 전산

코드 및 단면적 자료의 불확실도를 평가하기 위하여 네 종류의 임계실험을 대상으로 검증계산을 수행하였다. 사용후연료저장조의 임계도 평가 결과는, 정상상태뿐만 아니라 이상상태에서도 연소도효과(Burnup Credit)를 고려하지 않고도 5.0w/o로 농축된 연료집합체가 고리 1,2호기 사용후연료저장조에 각각 저장 가능함을 확인하였다. 또한, 신연료저장고의 임계도 평가 결과는 순수침수 조건(<0.95) 및 안개, 소방거품 등에 기인한 극저밀도의 물이나 수소함유물로 감속되는 최적감속 조건(<0.98)에 도달하더라도 고리1호기와 고리2호기는 각각 4.3w/o U^{235} 및 5.0w/o U^{235} 로 농축된 연료집합체를 안전하게 수용할 수 있는 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. "Spent Fuel Storage Facility Design Basis," Reg Guide 1.13 (Proposed Rev.2), US Nuclear Regulatory Commission, 1981.
2. American Nuclear Society, "American National Standard for Nuclear Criticality Safety in Operations with Fissionable Materials Outside Reactors," ANSI/ANS-8.1-1983, October 7, 1983.
3. "Design Requirements for Light Water Reactor Spent Fuel Storage Facilities at Nuclear Power Plants," ANSI/ANS-57.2, American Nuclear Society, 1983.
4. 10CFR Part 50 - Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities, Section 50.68 Criticality Accident Requirements.
5. "경수로형 원자력 발전소 안전심사 지침서" 9.1.2, KINS-G-001, 개정 2, October 1999.
6. 조희봉 외, "원자력 2호기 핵연료저장시설의 최대수용가능 농축도 결정 연구," 한국전력공사 84N-S16, August 1984.
7. 윤익보 외, "원자력 1,5,6,7,8,9,10호기 핵연료저장시설의 최대수용가능 농축도 결정 연구," 한국전력공사 86N-S03, December 1986.
8. 차균호 외, "SCALE4.4 코드체계를 이용한 고리1호기 사용후연료저장조 임계안전해석, 춘계학회논문, May 24, 2001.
9. American Nuclear Society, "American National Standard Design Requirements for New Fuel Storage Facilities at Light Water Reactor Plants," ANSI/ANS-57.3-1983, January 13, 1983.
10. "SCALE4.4 (Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation for Workstation and Personal Computers)," C00545/MNYCP00, Oak Ridge National Laboratory, 1998.
11. Judith F. Briesmeister et al., "MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," LA-12625-M, Version 4B, March 1997.
12. NEA/NSC/DOC(95)03, "International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments," NEA Nuclear Science Committee, September 2000 Edition
13. "고리원자력 발전소 1호기 기사용 연료 저장용량 확장용역 최종보고서", 한국원자력기술주식회사, January 1978.

그림 2.1 고리1호기 사용후연료저장조 정상상태 계산을 위한 기하학적 모양

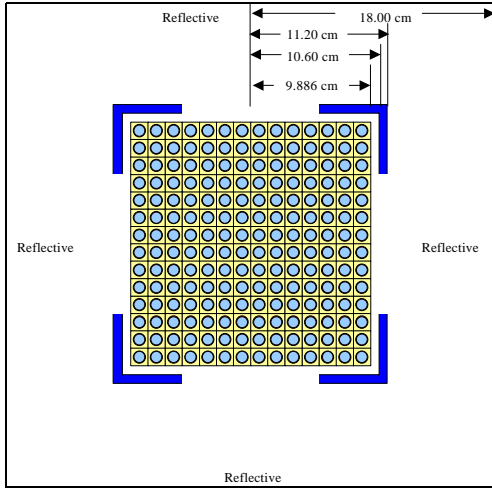


그림 2.2 고리2호기 사용후연료저장조 정상상태 계산을 위한 기하학적 모양

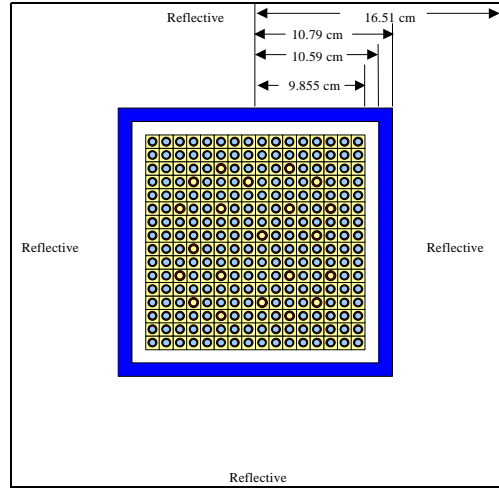


그림 2.3 고리1호기 사용후연료저장조 Coring 계산을 위한 기하학적 모양

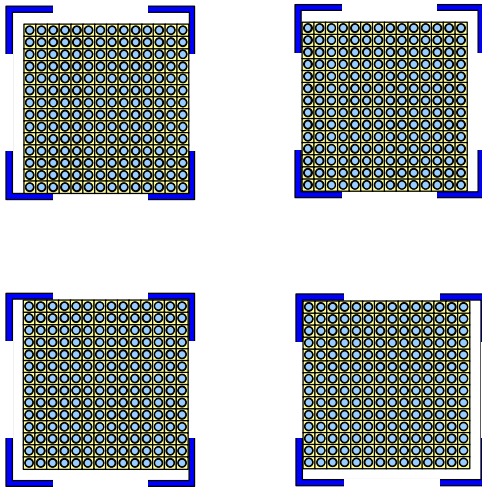


그림 2.4 고리2호기 사용후연료저장조 Coring 계산을 위한 기하학적 모양

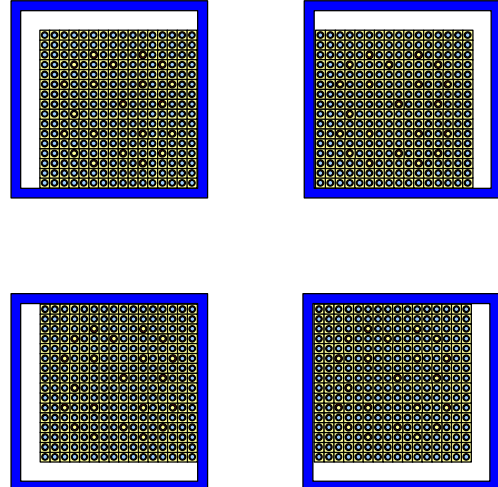


그림 2.5 고리1,2호기 사용후연료저장조 Malposition 계산을 위한 기하학적 모양

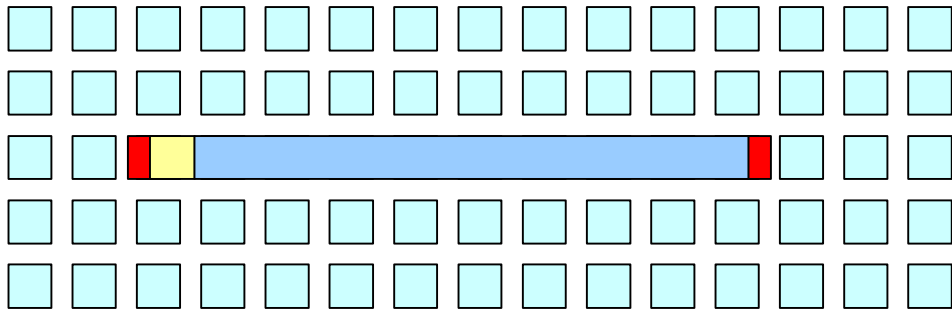


그림 2.6 고리1호기 신연료저장고 해석을 위한 기하학적 모양

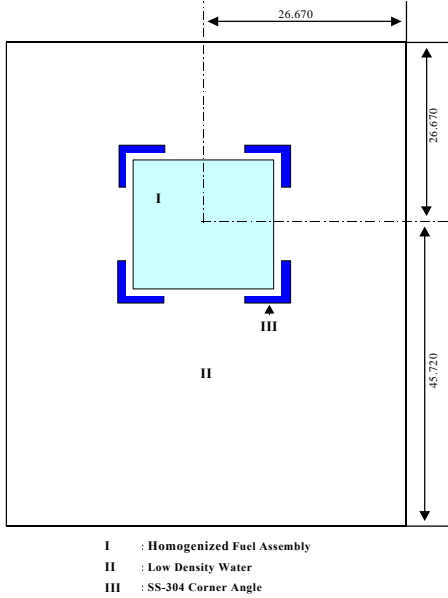


그림 2.7 고리2호기 신연료저장고 해석을 위한 기하학적 모양

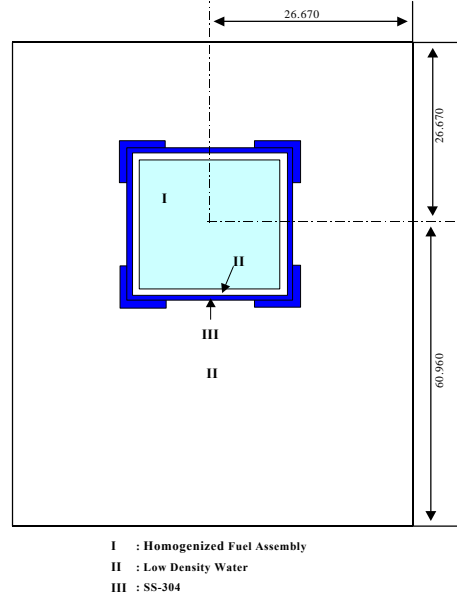


그림 2.8 물 밀도 변화에 따른 고리1호기 신연료저장고 임계도 변화 - SCALE4.4

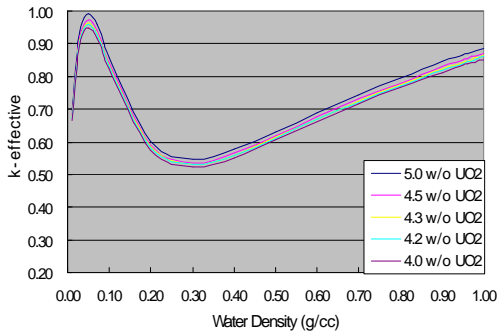


그림 2.9 물 밀도 변화에 따른 고리1호기 신연료저장고 임계도 변화 - MCNP4B

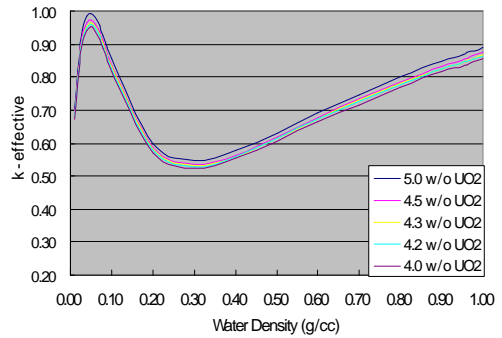


그림 2.10 물 밀도 변화에 따른 고리2호기 신연료저장고 임계도 변화 - SCALE4.4

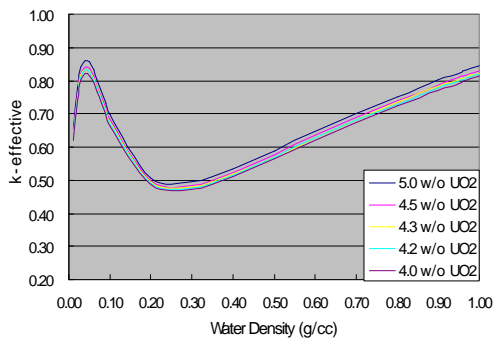


그림 2.11 물 밀도 변화에 따른 고리2호기 신연료저장고 임계도 변화 - MCNP4B

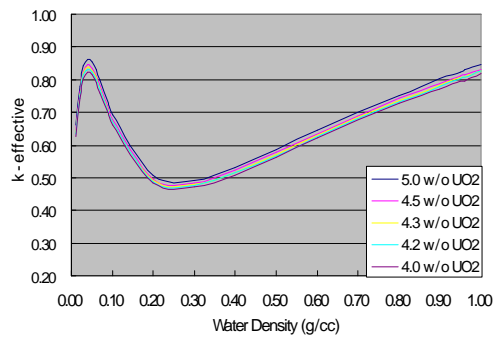


표 2.1 LEU-COMP-THERM-009/010 임계실험 해석 결과

Case No.	LEU-COMP-THERM-009		LEU-COMP-THERM-010	
	SCALE4.4	MCNP4B	SCALE4.4	MCNP4B
1	0.9920±0.0018	0.9971±0.0019	1.0083±0.0020	1.0080±0.0018
2	0.9976±0.0020	0.9966±0.0020	1.0073±0.0018	1.0085±0.0021
3	0.9946±0.0018	0.9968±0.0019	1.0079±0.0016	1.0082±0.0018
4	0.9965±0.0027	0.9976±0.0019	0.9931±0.0018	0.9966±0.0017
5	0.9901±0.0020	0.9984±0.0019	0.9978±0.0018	0.9968±0.0015
6	0.9956±0.0020	0.9969±0.0018	1.0016±0.0017	1.0003±0.0016
7	0.9983±0.0021	1.0002±0.0019	1.0016±0.0020	0.9989±0.0019
8	0.9959±0.0018	0.9975±0.0018	1.0012±0.0020	0.9968±0.0018
9	0.9984±0.0020	0.9965±0.0017	1.0019±0.0019	0.9980±0.0018
10	0.9947±0.0017	0.9975±0.0021	1.0043±0.0020	0.9989±0.0017
11	1.0021±0.0020	0.9944±0.0018	1.0041±0.0018	1.0017±0.0019
12	0.9966±0.0019	0.9963±0.0019	1.0022±0.0020	1.0001±0.0018
13	0.9959±0.0024	0.9963±0.0017	0.9936±0.0018	0.9956±0.0018
14	0.9957±0.0018	0.9943±0.0019	1.0010±0.0016	0.9992±0.0020
15	0.9940±0.0024	1.0024±0.0019	1.0043±0.0023	0.9972±0.0019
16	0.9982±0.0019	0.9984±0.0017	1.0059±0.0021	0.9997±0.0017
17	0.9978±0.0018	0.9981±0.0017	0.9997±0.0021	0.9945±0.0020
18	0.9938±0.0018	1.0009±0.0016	1.0005±0.0018	0.9959±0.0020
19	0.9944±0.0020	0.9982±0.0019	0.9976±0.0022	0.9983±0.0018
20	0.9936±0.0019	0.9973±0.0018	1.0032±0.0020	1.0013±0.0019
21	0.9972±0.0019	0.9981±0.0017	1.0031±0.0016	1.0032±0.0020
22	0.9979±0.0022	0.9972±0.0018	1.0024±0.0020	1.0003±0.0018
23	1.0002±0.0017	0.9993±0.0018	1.0006±0.0018	1.0000±0.0018
24	0.9978±0.0018	0.9948±0.0019	0.9996±0.0015	0.9952±0.0016
25	0.9959±0.0020	1.0017±0.0019	1.0009±0.0018	0.9914±0.0020
26	0.9955±0.0020	1.0003±0.0018	0.9976±0.0016	0.9977±0.0020
27	0.9990±0.0020	0.9984±0.0017	1.0007±0.0016	0.0086±0.0018
28			1.0036±0.0018	0.9960±0.0018
29			1.0002±0.0021	0.9993±0.0016
30			0.9984±0.0019	0.9970±0.0020

표 2.2 LEU-COMP-THERM-016/017 임계실험 해석 결과

Case No.	LEU-COMP-THERM-016		LEU-COMP-THERM-017	
	SCALE4.4	MCNP4B	SCALE4.4	MCNP4B
1	0.9940±0.0017	0.9963±0.0016	1.0021±0.0015	1.0028±0.0017
2	0.9966±0.0016	0.9971±0.0016	0.9988±0.0015	1.0005±0.0016
3	0.9961±0.0020	0.9952±0.0016	0.9970±0.0018	0.9999±0.0016
4	0.9915±0.0015	0.9978±0.0017	0.9986±0.0017	0.9961±0.0015
5	0.9935±0.0016	0.9914±0.0015	1.0008±0.0018	0.9949±0.0015
6	0.9958±0.0019	0.9953±0.0016	0.9976±0.0015	0.9983±0.0016
7	0.9941±0.0018	0.9961±0.0016	0.9975±0.0017	0.9993±0.0016
8	0.9934±0.0017	0.9954±0.0014	0.9958±0.0016	0.9940±0.0016
9	0.9944±0.0016	1.0014±0.0015	0.9935±0.0015	0.9974±0.0016
10	0.9944±0.0019	0.9957±0.0016	0.9959±0.0016	0.9923±0.0015
11	0.9955±0.0017	0.9967±0.0014	0.9986±0.0016	0.9964±0.0016
12	0.9959±0.0015	0.9938±0.0015	0.9962±0.0017	0.9974±0.0016
13	0.9956±0.0018	0.9956±0.0016	0.9970±0.0015	0.9989±0.0018
14	0.9962±0.0016	0.9946±0.0016	0.9970±0.0017	0.9919±0.0018
15	0.9968±0.0016	0.9947±0.0015	0.9981±0.0017	0.9976±0.0017
16	0.9909±0.0017	0.9910±0.0017	0.9976±0.0017	0.9877±0.0017
17	0.9922±0.0017	0.9962±0.0016	0.9962±0.0016	0.9983±0.0019
18	0.9991±0.0017	0.9961±0.0017	0.9947±0.0020	0.9923±0.0018
19	1.0005±0.0017	0.9978±0.0018	0.9979±0.0017	0.9997±0.0016
20	0.9950±0.0018	0.9952±0.0018	0.9973±0.0021	0.9947±0.0016
21	0.9971±0.0018	0.9999±0.0017	0.9929±0.0017	0.9970±0.0016
22	0.9945±0.0016	0.9956±0.0017	0.9920±0.0020	0.9933±0.0015
23	0.9941±0.0017	0.9941±0.0017	1.0001±0.0015	0.9967±0.0016
24	0.9969±0.0016	0.9982±0.0017	0.9987±0.0018	0.9955±0.0017
25	0.9930±0.0017	0.9994±0.0016	0.9984±0.0018	0.9961±0.0015
26	0.9936±0.0015	0.9970±0.0015	0.9940±0.0016	0.9911±0.0017
27	0.9930±0.0017	1.0012±0.0016	0.9979±0.0017	0.9911±0.0014
28	0.9978±0.0020	0.9962±0.0016	0.9964±0.0017	0.9928±0.0016
29	0.9931±0.0016	0.9925±0.0017	0.9932±0.0015	0.9919±0.0016
30	0.9951±0.0016	0.9934±0.0015		
31	0.9939±0.0017	0.9948±0.0017		
32	0.9955±0.0017	0.9927±0.0018		

표 2.3 SCALE4.4와 MCNP4B의 임계해석 결과

Code	avg. k-effective	bias	σ	$\Delta k_{MC}(2\sigma)$
SCALE4.4	0.99741	0.00259	0.003640	0.007280
MCNP4B	0.99711	0.00289	0.003339	0.006678

표 2.4 고리1,2호기 사용후연료저장조에 대한 임계도 계산 결과 (5.0 wt.%)

	Case No.	고리1호기		고리2호기	
		SCALE4.4	MCNP4B	SCALE4.4B	MCNP4B
정상상태	T=27.0 °C	0.92039±0.00076	0.92051±0.00112	0.92204±0.00089	0.92029±0.00108
이상상태	Coring	0.92433±0.00090	0.92302±0.00116	0.92941±0.00095	0.92578±0.00111
	Malposition	0.92229±0.00088	0.91898±0.00103	0.92095±0.00081	0.91863±0.00104
	CA 두께 오차	0.92354±0.00082	0.92125±0.00112	0.92419±0.00084	0.92070±0.00105
	RD 간격 오차	0.92205±0.00084	0.92095±0.00109	0.92092±0.00081	0.91839±0.00099
	T=35.0 °C	0.92377±0.00092	0.91925±0.00101	0.92361±0.00085	0.91656±0.00107
	T=48.9 °C	0.92243±0.00088	0.91890±0.00114	0.92537±0.00087	0.91758±0.00116
	T=55.0 °C	0.92553±0.00095	0.91935±0.00111	0.92670±0.00078	0.91665±0.00110
	T=65.0 °C	0.92596±0.00091	0.91827±0.00121	0.92781±0.00087	0.91495±0.00109
	T=75.0 °C	0.92348±0.00094	0.91693±0.00117	0.92904±0.00077	0.91312±0.00111
	T=85.0 °C	0.92523±0.00089	0.91374±0.00107	0.92998±0.00078	0.91407±0.00105
	T=100. °C	0.92621±0.00090	0.90992±0.00106	0.93245±0.00083	0.91151±0.00104

표 2.5 고리1,2호기 사용후연료저장조에 대한 임계도 계산 결과 (5.0 wt.%)

	고리1호기		고리2호기	
	SCALE4.4	MCNP4B	SCALE4.4	MCNP4B
k-eff.	0.93387	0.93059	0.93947	0.93183
final k-eff.	0.93509	0.93238	0.94090	0.93356

표 2.6 물 밀도 변화에 따른 고리1,2호기 신연료저장고의 임계도 계산 결과

case	rho	고리1호기 - 4.3w/o U ²³⁵		고리2호기 - 5.0w/o U ²³⁵	
		SCALE4.4	MCNP4B	SCALE4.4	MCNP4B
1	1.00	0.86408 ± 0.00086	0.86805 ± 0.00109	0.84320 ± 0.00083	0.84528 ± 0.00110
2	0.99	0.85911 ± 0.00099	0.86283 ± 0.00117	0.83917 ± 0.00087	0.84216 ± 0.00123
3	0.98	0.85627 ± 0.00090	0.85739 ± 0.00110	0.83627 ± 0.00092	0.83915 ± 0.00120
4	0.97	0.85102 ± 0.00082	0.85309 ± 0.00116	0.83245 ± 0.00083	0.83580 ± 0.00107
5	0.96	0.84709 ± 0.00090	0.85206 ± 0.00106	0.82789 ± 0.00088	0.83161 ± 0.00107
6	0.95	0.84310 ± 0.00087	0.84470 ± 0.00114	0.82176 ± 0.00090	0.82459 ± 0.00117
7	0.90	0.82258 ± 0.00077	0.82490 ± 0.00111	0.80168 ± 0.00100	0.80473 ± 0.00112
8	0.80	0.77687 ± 0.00091	0.78142 ± 0.00103	0.75217 ± 0.00084	0.75212 ± 0.00107
9	0.70	0.72558 ± 0.00074	0.73094 ± 0.00103	0.70104 ± 0.00076	0.70181 ± 0.00115
10	0.60	0.66982 ± 0.00074	0.67228 ± 0.00110	0.64540 ± 0.00081	0.64557 ± 0.00093
11	0.50	0.61213 ± 0.00074	0.61335 ± 0.00095	0.58722 ± 0.00070	0.58757 ± 0.00102
12	0.40	0.55972 ± 0.00073	0.56052 ± 0.00096	0.53339 ± 0.00071	0.53213 ± 0.00091
13	0.30	0.53171 ± 0.00082	0.53055 ± 0.00098	0.49638 ± 0.00065	0.49318 ± 0.00081
14	0.20	0.58465 ± 0.00075	0.58123 ± 0.00096	0.50759 ± 0.00059	0.50689 ± 0.00085
15	0.10	0.83305 ± 0.00070	0.83032 ± 0.00088	0.69611 ± 0.00087	0.69313 ± 0.00085
16	0.09	0.86931 ± 0.00073	0.86478 ± 0.00087	0.73021 ± 0.00068	0.72774 ± 0.00087
17	0.08	0.90118 ± 0.00078	0.90067 ± 0.00093	0.76652 ± 0.00071	0.76443 ± 0.00092
18	0.07	0.93185 ± 0.00070	0.92969 ± 0.00098	0.80150 ± 0.00064	0.79846 ± 0.00096
19	0.06	0.95420 ± 0.00074	0.95196 ± 0.00090	0.83288 ± 0.00070	0.83091 ± 0.00088
20	<u>0.05</u>	<u>0.96392</u> ± <u>0.00073</u>	<u>0.96491</u> ± <u>0.00094</u>	0.85480 ± 0.00069	0.85477 ± 0.00098
21	<u>0.04</u>	0.95454 ± 0.00076	0.95408 ± 0.00096	<u>0.86158</u> ± <u>0.00071</u>	<u>0.86211</u> ± <u>0.00097</u>
22	0.03	0.91223 ± 0.00082	0.91518 ± 0.00099	0.83979 ± 0.00065	0.84402 ± 0.00095
23	0.02	0.82402 ± 0.00079	0.82748 ± 0.00103	0.77920 ± 0.00069	0.78042 ± 0.00087
24	0.01	0.67535 ± 0.00065	0.68003 ± 0.00085	0.65490 ± 0.00074	0.66010 ± 0.00087

표 2.7 고리1,2호기에 대한 SCALE4.4와 MCNP4B의 불확실도

불확실도	고리1호기		고리2호기	
	SCALE4.4	MCNP4B	SCALE4.4	MCNP4B
Δk_{bias}	0.00259	0.00289	0.00259	0.00289
\sqrt{sum}	0.010894	0.007186	0.014843	0.008655
<i>total</i>	0.013484	0.010076	0.017433	0.011545

표 2.8 고리1,2호기 최적감속조건에서의 최종 임계도 값

U ²³⁵ w/o	고리1호기				고리2호기			
	SCALE4.4		MCNP4B		SCALE4.4		MCNP4B	
	k _{eff.}	final-k _{eff.}	k _{eff.}	final-k _{eff.}	k _{eff.}	final-k _{eff.}	k _{eff.}	final-k _{eff.}
5.0	0.99120	1.00468	0.99025	1.00033	0.86158	<u>0.87901</u>	0.86211	<u>0.87366</u>
4.5	0.97205	0.98553	0.97264	0.98272	0.84122	0.85865	0.84461	0.85616
4.3	0.96392	<u>0.97740</u>	0.96491	<u>0.97499</u>	0.83452	0.85195	0.83884	0.85039
4.2	0.95949	0.97297	0.95977	0.96985	0.83120	0.84863	0.83191	0.84346
4.0	0.95058	0.96406	0.95217	0.96225	0.82253	0.83996	0.82309	0.83464