2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Pool형 액체금속로 안전해석을 위한 SSC-K 코드의 CRDL 모델 개선

The CRDL Model of SSC-K Code for the Safety Improvement of a Pool-type Liquid Metal-cooled Reactor

정해용, 하귀석, 장원표, 허선, 이용범

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

KALIMER-600은 증가된 열출력으로 인해 과도 상태 시 핵연료 또는 내부구조물의 열팽창에 따른 반응도 궤환 효과를 정확하게 모델하는 것이 중요하다. KALIMER 설계에서 중요한 열팽창 효과는 핵연료 축방향 열팽창, 반경방향 노심 열팽창, CRDL/RV 열팽창 등인데 이 중 CRDL/RV 효과는 9.5 m 이상의 제어봉 구동축이 고온풀에 잠겨 있는 KALIMER 설계에서 상세한 모델을 개발하여 평가하는 것이 필요하다. SSC-K에 포함되어 있는 Hot-Pool 2-D 모델의 결과로 얻어지는 온도 분포를 이용하여 제어봉 구동축의 열팽창 효과를 모델할 수 있도록 SSC-K CRDL/RV 반응도 모델을 개선하였다. KALIMER-150의 UTOP에 대한 평가 계산 결과 개선된 모델은 초기의 온도 변화에 따른 부반응도 삽입 효과를 현실적으로 모사하는 것으로 나타났다.

Abstract

With the increased thermal power of KALIMER-600, it becomes important to model accurately the reactivity feedback effects due to the thermal expansion of a fuel rod and internal structure during a transient. In KALIMER design, the fuel axial expansion, core radial expansion, and the control rod drive line/reactor vessel (CRDL/RV) thermal expansion are the important reactivity feedback mechanisms. It is required to develop a more detailed CRDL/RV model for the accurate analysis of the KALIMER-600 transient because the control rod drive line of 9.5 m is immersed in the hot pool. For this a new CRDL/RV model was developed to model the effect of expansion of CRDL utilizing the temperature distribution obtained with the hot-pool 2-D model of SSC-K code. It is estimated that the developed model describes more realistically the negative reactivity insertion effect due to the initial temperature change during the UTOP transient of KALIMER-150.

1. 서론

원자로의 고유 안전성을 제어하는 반응도 궤환 모델은 액체금속로의 안전성 평가에 있어서 가장 중요한 모델이다. KALIMER-600은 증가된 열출력으로 인해 과도 상태 시 계통 내의 온도 변화가 보다 크게 나타날 수 있으며 이러한 경우 내부구조물과 핵연료의 열팽창으로 인해 나타나는 반응도 궤환 메카니즘인 핵연료 축방향 열팽창 효과, 반경방향 노심 열팽창 효과, CRDL/RV 열팽

창 효과가 중요해진다. 그림 1은 금속핵연료를 사용하는 KALIMER 노심에 작용하는 반응도 궤환 모델을 개념적으로 나타내고 있다.

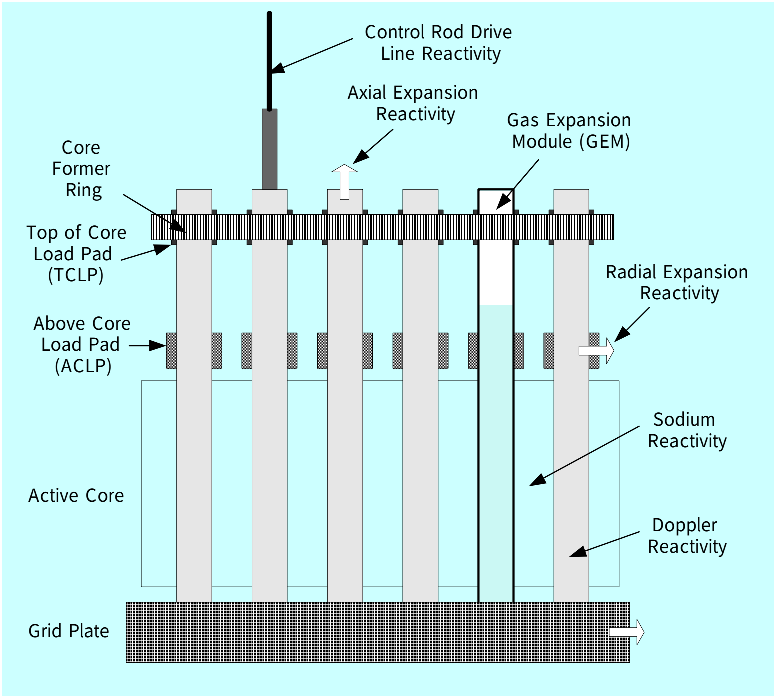

그림 1 금속핵연료의 반응도 궤환 모델

지금까지 수행된 SASSYS-1/SAS4A와의 비교 계산을 통해 SSC-K의 반경방향 노심팽창 반응도 모델을 검증하여 왔으며 핵연료봉과 피복재간의 힘의 균형에 의한 상대적인 변위로 인해 발생하는 핵연료의 축방향 열팽창 반응도 궤환 효과 또한 검증한 바 있다. 현재 SSC-K 반응도 모델 중 추가로 개선이 필요한 부분은 제어봉 구동축과 원자로 용기의 열팽창 모델이다. 제어봉 구동축은 원자로 용기 상부에 고정되어 있으므로 고온 풀의 온도가 상승하면 제어봉의 상대적인 위치는 노심 내부에 보다 깊이 삽입된다. 한편 핵연료 다발은 원자로 용기에 용접되어 있는 core support barrel에 의해 축 방향 위치가 지지되어 있다. 따라서 원자로 용기가 열팽창하게 되면 노심의 축방향 변위가 아래로 내려가므로 노심 내부의 제어봉은 상대적으로 노심에서 이탈된다. 제어봉구동축 반응도 궤환효과는 제어봉구동축과 원자로 용기의 상대적인 변위 차이로 인해 발생한다.

SSC-K의 CRDL/RV 열팽창 모델은 제어봉 구동축이 위치하는 고온풀의 평균 온도와 원자로 용기와 접촉하는 저온풀의 평균 온도를 기초로 평가된다. 그런데 KALIMER의 경우 제어봉 구동축의 약 9.5m가 고온풀에 잠기게 되고 과도 상태에서는 고온풀의 온도가 높이에 따라 다르게 나타나므로 하나의 풀 온도를 기준으로 제어봉 구동축의 열팽창 정도를 계산하는 것은 상당히 큰 오차를 포함하게 된다. 따라서 고온 풀의 온도 분포를 고려하여 제어봉 구동축의 열팽창을 평가할 수 있으면 보다 현실적인 결과를 얻을 수 있을 것이다. SSC-K 코드는 Hot Pool-2D (HP-2D) 모델을 이용하여 고온풀의 2차원 온도 분포를 얻을 수 있다. 따라서 HP-2D 모델에서 얻어지는 제어봉 구동축 주변의 고온 풀 온도를 반영하여 열팽창 효과를 계산하도록 SSC-K 반응도 모델을 개선하였다.

2. CRDL/RV 열팽창 모델 개선

2.1 기존 모델

CRDL의 열팽창을 고려하기 위한 기존 SSC-K의 모델은 CRDL을 하나의 노드로 모델하고 주변 고온풀의 온도, T_{Na}^{cr} 도 하나로 가정하여 다음과 같이 제어봉구동축의 온도, T_{cr} 를 계산한다.

$$M_{cr} C_p^{cr} \frac{dT_{cr}}{dt} = h_{cr} A_{cr} (T_{Na}^{cr} - T_{cr}), \tag{1}$$

여기서 M_{cr} = 제어봉 구동축 질량, kg

C_p^{cr} = 제어봉 구동축 비열, J/kg K

T_{cr} = 제어봉 구동축 온도, K

t = 시간, sec

h_{cr} = 냉각재와 구동축 사이의 열전달 계수, W/m^2 K

A_{cr} = 열전달 면적, m^2

T_{Na}^{cr} = 상부영역에서의 냉각재 온도, K, 이다.

그리고 이 온도를 기준으로 구동축의 변위를 다음과 같이 평가한다.

$$\Delta Z_{cr} = Z_{cr}^{0} * \alpha_{cr}(T_{cr}(t)) * \{(T_{cr}(t) - T_{cr}(0)\}. \tag{2}$$

위의 식 (2)를 사용하여 주어진 온도에서의 제어봉 구동축의 변위를 계산하기 위해서는 정상상태 온도 $T_{cr}(0)$ 에서의 제어봉 구동축의 길이 Z_{cr}^{0} 를 평가하여야 한다. 이를 위해 상부 공간에서는 완전한 혼합이 일어나는 것을 가정하고, 또한 냉각재와 제어봉 구동축도 열적 평형 상태에 있다고 가정한다. 즉,

$$T_{cr}(0) = T_l, \tag{3}$$

여기서 T_l 은 vessel 출구에서의 냉각재 온도이다. 그리고 이 온도에 대한 정상상태에서의 구동축 길이는 다음과 같다.

$$Z_{cr}^{0} = Z_{cr}^{ref} \{1 + \alpha_{cr}(T_{cr}(0)) * (T_{cr}(0) - T_{cr}^{ref})\}, \tag{4}$$

여기서 α_{cr} 은 제어봉 구동축의 열팽창계수이다. 그리고 T_{cr}^{ref} 는 기준 온도이며, Z_{cr}^{ref} 는 기준 온도에서의 소듐 풀에 잠기는 제어봉 구동축의 길이이다.

이제 식 (2)에 의해 평가된 제어봉 구동축의 변위, ΔZ_{cr} 과 저온풀과 접하고 있는 원자로용기의 온도 변화에 따른 변위, ΔZ_{vs} 의 차이를 기준으로 제어봉구동축 열팽창 반응도 계수를 평가한

다. 즉,

$$\Delta Z = \Delta Z_{cr} - \Delta Z_{vs} , \tag{5}$$

$$\rho^{CR} = C^{CR} \ \Delta Z \ . \tag{6}$$

여기서 C^{CR} 은 길이 변화에 따른 제어봉 반응도가의 변화를 나타내는 계수이다. ΔZ_{vs} 을 평가하는 방법은 앞에서 기술한 제어봉 구동축의 변위를 평가하는 방법과 동일하다. 자세한 절차 및 가정은 SSC-K 코드사용자 지침서 (권영민, 2002)에 기술되어 있다.

2.2 개선 모델

SSC-K 코드의 기존 제어봉 구동축 열팽창 반응도 모델의 가장 큰 제한점은 상당히 큰 고온풀의 온도 분포를 반영하지 못하는 것이다. 즉, 고온 풀 입구로 들어오는 냉각재의 온도 변화가 시간 지연없이 그대로 고온 풀 온도에 영향을 미치게 되어 고온 풀 내의 냉각재 온도 변화를 실제적으로 모사한다고 볼 수 없다. 이러한 제한점을 극복하기 위해 고온풀의 온도 분포를 보다 현실적으로 계산하기 위해 개발된 Hot-Pool 2-D 모델 (이용범, 2000)을 이용하여 제어봉 구동축 열팽창 반응도 모델을 개선하였다. HP-2D 모델은 SSC-K와의 연계를 통하여 SSC-K 코드의 사고해석 능력을 향상시켰으며 열전달 시간 지연 효과 등을 적절히 모사하는 것으로 입증한 바 있다.

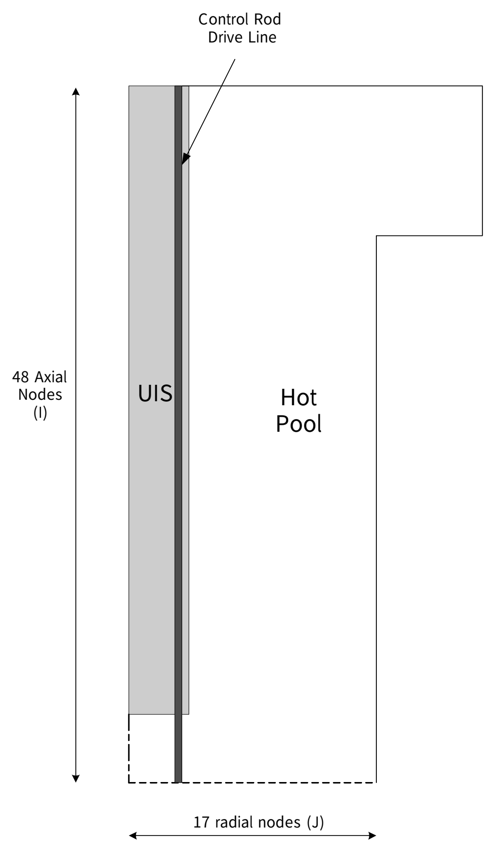

그림 2 고온풀과 제어봉 구동축의 위치

그림 2는 KALIMER의 고온 풀과 제어봉 구동축의 배치를 개략적으로 보이고 있다. KALIMER-150의 경우 반경 방향으로 17개의 노드로 고온풀을 나누고 있는데 J=4인 위치에 제어봉 구동축이 위치하게 된다. 축방향으로는 48개의 노드로 나누어지는데 I=1~6인 높이까지는 고온풀의 냉각재가 직접 구동축에 접하게 되고 그 이상인 I=7~48의 높이에서는 UIS 내부에 제어봉 구동축이 위치한다.

HP-2D 결과로서 얻어지는 고온풀 내의 온도 분포를 이용하여 제어봉 구동축 열팽창 반응도를 평가하기 위해서는 구동축과 접하는 소듐의 온도를 결정하여야 한다. I=1~6의 높이에서는 직접 소듐과 접하게 되므로 J=4인 위치의 고온풀 온도를 인접 온도로 지정하였으며, 그 이상의 I=7~48의 높이에서는 구동축에 가장 가까운 냉각재 온도인 J=5인 위치에서의 소듐 온도를 인접 온도로 지정하였다. 그리고 고온 풀의 상부 부분은 가스로 채워져 있으므로 이 부분은 가스의 온도를 인접 온도로 지정하였다.

사실 UIS 내부의 제어봉 구동축은 안내관 내에 위치하므로 앞에서 지정한 인접 온도는 실제와 다를 가능성이 있다. 하지만 고온 풀 상부의 온도는 노심에서 전달되는 온도에 따라 급격하게 변화하지 않으므로 고온 풀 전체를 하나의 온도로 가정하는 것보다는 현실적인 온도 분포를 반영할 수 있다고 판단된다.

고온풀 온도 분포를 고려할 수 있도록 개선된 모델은 HP-2D 모델의 축방향 노드 수, N에 맞추어 구동축과 고운풀을 노드화하여 식 (1)과 동일한 방법으로 각 부분의 열팽창을 계산한다. 즉,

$$M_{cr}(i)C_p^{cr}\frac{dT_{cr}(i)}{dt} = h_{cr}A_{cr}(i)\left\{T_{Na}^{cr}(\mathrm{i}) - T_{cr}(i)\right\},\ i=1, N-1 \qquad (7)$$

이 식을 사용하기 위해서는 전체 구동축 질량, M_{cr} 과 냉각재와의 접촉 면적, A_{cr} 을 각 노드의 크기에 맞추어 분할해야 한다. 다음으로 계산된 해당 노드의 온도를 기준으로 각 부분의 열팽창을 계산하고 이를 합하여 제어봉 구동축의 전체 열팽창 변위를 얻는다.

$$\Delta Z_{cr}(i) = Z_{cr}^0(\mathrm{i}) * \alpha_{cr}(T_{cr}(i)) * \{(T_{cr}(i) - T_{cr}^0(i)\}, \qquad (8)$$

$$\Delta Z_{cr} = \sum_{i=1}^{N-1}\Delta Z_{cr}(i). \qquad (9)$$

전체 제어봉 구동축의 변위, ΔZ_{cr} 이 결정되면 해당되는 반응도가는 기존 모델과 동일하게 식 (5)와 (6)에 따라 계산한다.

3. 모델 개선 결과

개선된 모델의 영향을 확인하기 위해 150 MWe의 전기 출력을 가지는 KALIMER 설계 (한도희, 2002)에 대해 비보호과출력(UTOP) 과도상태가 발생한 경우의 CRDL/RV 반응도 변화를 평가하였다. 그림 3과 4는 각각 UTOP 시 노심 출력의 변화와 CRDL/RV 반응도 변화를 비교하고 있다. 개선된 모델은 초기의 출력 상승에 따라 증가하는 고온풀 온도의 영향으로 인해 100초 이전에 삽입되는 반응도가 증대되는 효과를 잘 보이고 있다.

그림 5와 6은 일차원 고온풀 모델과 기존 CRDL/RV 반응도 모델을 사용한 경우와 HP-2D 고온풀

모델과 개선 CRDL/RV 모델을 사용한 경우의 노심 출구에서의 냉각재 첨두 온도와 핵연료 첨두 온도를 비교하고 있다. 약 20초 이전에 증가되는 출력으로 인해 노심 출구 냉각재 온도가 증가하고 이 후 여러가지 반응도 궤환 효과에 의해 출력이 감소됨에 따라 노심 출구 냉각재 온도도 감소하는 경향을 보인다.

그런데 CRDL/RV 모델의 개선된 영향은 이후 약 100초까지의 노심 출구 온도 변화를 통해 잘 파악될 수 있다. 기존 모델에 의한 평가 결과는 약 100초에 노심 출구 냉각재 온도는 약 866 K에 도달하여 이 후 855 K 근처에서 유지된다. 반면 개선된 모델의 예측 결과는 노심 출구 냉각재 온도가100초에 840 K에 이르고 이 후 CRDL/RV 반응도 변화에 따라 출력과 온도는 약간 증가하여 약 855 K 근처에서 유지된다. 그러므로 UTOP의 경우에 있어서 개선된 모델은 초기의 출력상승에 의한 온도 증가와 이에 따른 열팽창 효과를 잘 반영하여 이 후 출력이 보다 빨리 감소하고 이에 따라 노심 출구 온도가 감소하는 경향을 일관성 있게 예측하고 있음을 알 수 있다.

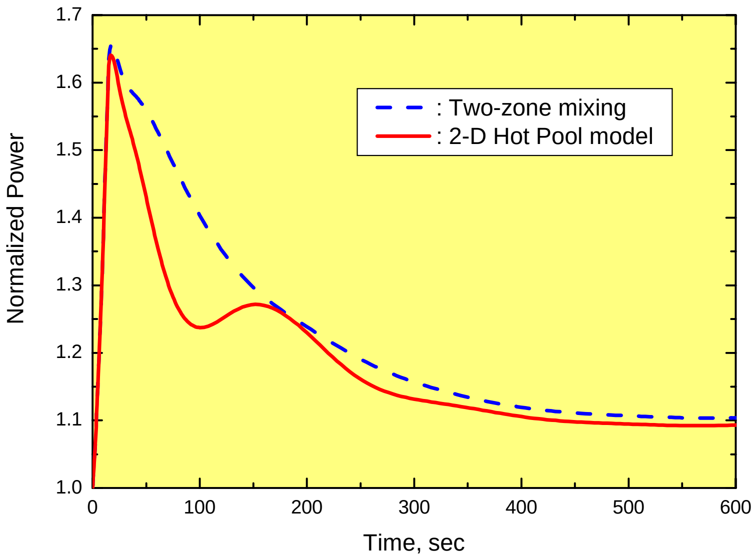

그림 3 모델에 따른 UTOP 시 출력 변화

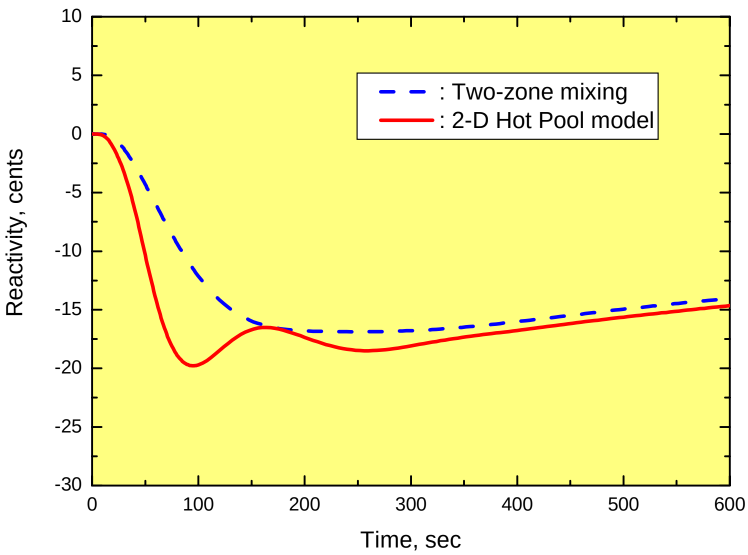

그림 4 모델에 따른 UTOP 시 CRDL/RV 반응도 변화

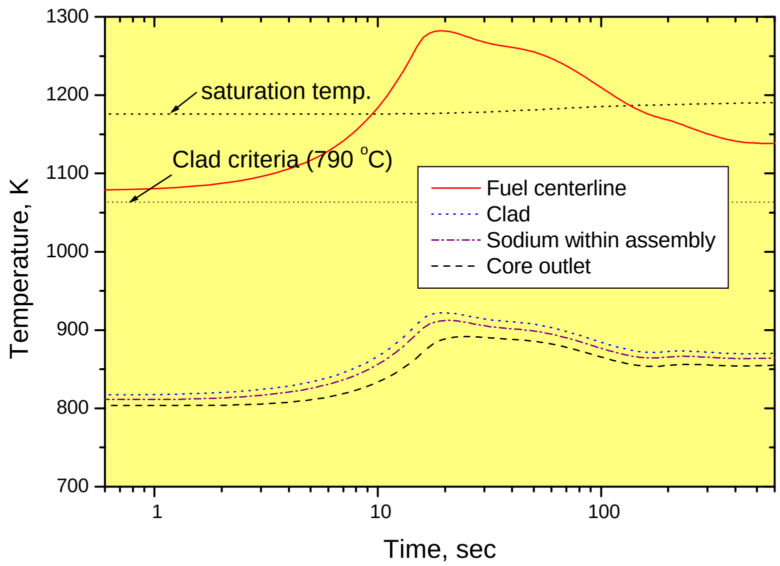

그림 5 1-D 고온풀 및 기존 반응도 모델에 의한 노심 출구 및 핵연료 첨두 온도

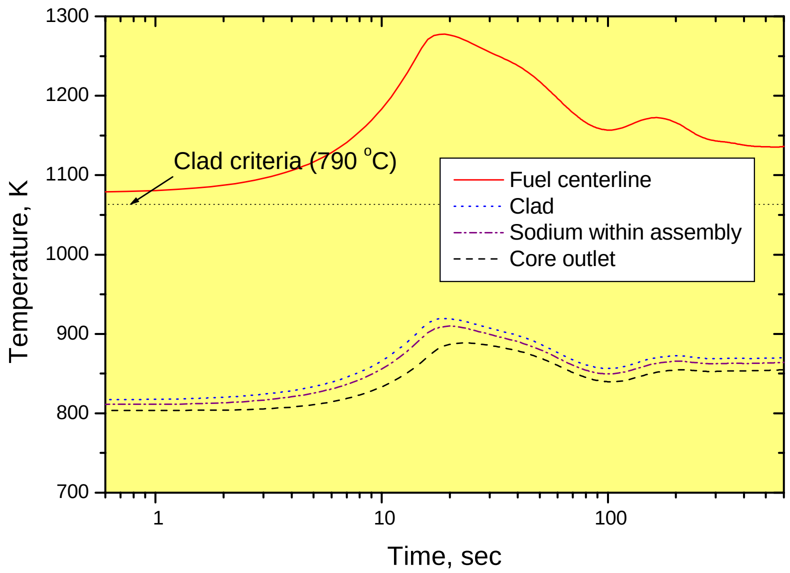

그림 6 HP-2D 모델과 개선 반응도 모델에 의한 노심 출구 및 핵연료 첨두 온도

4. 결론

액체금속로의 출력이 증가할수록 과도상태 시 내부구조물과 냉각재의 온도 변화 폭도 커질 것으로 예상되므로 핵연료와 내부구조물의 열팽창에 따른 반응도 궤환 효과를 정확하게 모델하는 것이 상대적으로 중요해진다. 특히 KALIMER는 9.5 m 이상의 제어봉 구동축이 고온 풀에 잠겨 있으므로 CRDL/RV 열팽창에 따른 반응도 변화를 정확하게 모델하는 것이 필요하다. 이를 위해 SSC-K에 포함되어 있는 Hot-Pool 2-D 모델의 결과로 얻어지는 온도 분포를 이용하여 제어봉 구동축의 열팽창 효과를 모델하도록 SSC-K 코드의 CRDL/RV 열팽창 반응도 모델을 개선하였다.

KALIMER-150의 UTOP에 대한 평가 계산 결과 개선된 모델은 초기의 온도 변화에 따른 부반응도 삽입 효과를 현실적으로 모사하는 것으로 나타났다. 그리고 이러한 반응도 궤환 효과에 따라 노심 출구의 냉각재 온도도 보다 빨리 감소하는 것으로 예측되었다. 따라서 고온 풀의 온도 분포를 반영하여 구성된 개선된 모델은 과도 상태 시 KALIMER 노심의 반응도 궤환 효과를 보다 정확히 예측하여 설계에서 구현하고 있는 피동안전성을 실제적으로 제시하는 것으로 평가된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발사업의 일환으로 수행되었다.

참고 문헌

[1] 권영민, “SSC-K 전산코드 사용자 지침서 (Rev.1)”, KAERI/TR-2014/2002, 한국원자력연구소 (2002).

[2] 이용범, “2차원 고온 풀 분석모델 개발”, KAERI/TR-1566/2000, 한국원자력연구소 (2000).

[3] 한도희, “KALIMER 개념 설계 보고서”, KAERI/TR-2204/2002, 한국원자력연구소 (2002).