

중대사고 환경에서의 중수로 수평연료관 처짐 모델 개선

ISAAC Model Improvement for Horizontal Fuel Channel Sagging  
under CANDU Severe Accident Conditions

김동하, 김시달, 박수용

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

중수로에서 수평연료관 내외부의 냉각재 및 감속재 상실로 연료관이 가열되면 온도 상승으로 인한 물성 변화와 자체의 하중으로 수평연료관은 아래로 처지게 되고 이로 인해 수평연료관이 손상된다. 이러한 거동을 모사하기 위해 상세한 모델을 필요하지만 현상 및 내부구조의 복잡성과 실험 자료의 부족으로 ISAAC에서는 간단하지만 현상을 구현할 수 있는 변수를 도입하여 사고진행을 예측하고 있다. 즉, 수평연료관이 처지면 하부에 위치한 연료관과 접촉하게 되고, 이로 인해 감속재와의 열전달 면적 감소로 연료관의 가열이 촉진되는데 ISAAC에서는 열전달 면적 감소 비율이 입력으로 제공되며, 적용 조건이 만족되면 바로 열전달 면적이 감소한다. 본 논문에서는 이러한 스텝 방식 대신 완화 기법을 이용하여 수평연료관과 감속재 사이의 접촉 면적 변화를 시간에 따라 점차적으로 감소하도록 모델을 개선하였다. 새로이 제안된 모델은 수평연료관의 재배치 과정을 연속적으로 모의할 뿐 아니라, 기존 모델이 입력 값에 의존하여 결과가 분산되는 것을 개선하여 현상은 모사하되 입력에는 크게 영향 받지 않는 결과를 제공한다.

Abstract

At CANDU plants, loss of coolant and moderator inside and outside the channel, which could be presumed under severe accident conditions, may cause the horizontal fuel channel sagging and finally loss of channel integrity. That is, when the horizontal fuel channels are sagged, they contact with the channels located below and lose their heat transfer area to the moderator. Though a detailed model is required to simulate the accident, complexity of

phenomena itself and inner structures as well as lack of experimental data forces to choose a simple but reasonable model as the first step. A heat transfer area reduction coefficient is required in ISAAC as an user input and when the sagging conditions are satisfied, the heat transfer area reduces by this factor right away. In this paper, a relaxation technique is introduced to avoid a sudden heat transfer area change and to lessen the dependency on the user-defined input variable. The new model is expected to simulate continuous fuel channel relocation and to show the consistent accident progression following the important phenomena inside the calandria tank.

## 1. 서론

CANDU 원전에서의 중대사고는 수평연료관 내부의 냉각재의 열 제거 능력 상실과 수평연료관을 외부에서 감싸고 있는 칼랜드리아 탱크의 감속재 상실로 진행된다. CANDU 원전의 감속재는 CANDU 고유의 특성으로, 천연 우라늄을 쓰기 위한 감속 능력 제고뿐 아니라 안전성 측면에서도 중요성을 갖는다. 즉, 일차계통에서의 노심 냉각 능력을 상실하게 되면 감속재는 감속재 냉각계통을 통해 붕괴열을 충분히 제거하며, 만일 냉각계통이 가용하지 않은 경우는 피동형 열 제거원으로 역할을 담당하여 노심 손상을 상당기간 지연시킴으로써 운전원에게 후속 조치할 수 있는 시간적 여유를 제공한다. [1]

감속재가 상실하기 시작하여 칼랜드리아탱크의 상부에 위치한 수평연료관이 노출될 때까지 운전원 조치가 취해지지 않으면, PWR에서 냉각재 수위 저하로 상부 노심이 노출되어 경험하는 것처럼 노출된 수평연료관은 붕괴열로 인한 온도 상승 및 산화 반응으로 인한 급격한 가열로 재배치되어 건전성을 상실하게 된다. CANDU 원전의 이와 같은 중대사고 환경에서의 수평연료관의 재배치는 칼랜드리아 탱크 내부의 연료관 구조물과 재배치 현상의 복잡성 때문에 매우 다양한 시나리오를 가질 수 있다. 그러나 이러한 사고 전개를 포괄할 수 있는 상세한 모델링은 실험 자료의 부족 등으로 현실적으로 매우 어려우며, 따라서 현재 중수로 원전에서의 중대사고를 모의하는 ISAAC에서는 우선 첫 단계로, 간단한 모델 변수를 도입하여 수평연료관의 재배치로 인한 현상을 모의하려고 노력하였다 [2].

ISAAC에서는 재배치되는 수평연료관이 아래에 위치한 연료관과 접촉하게 되면 감속재료의 열전달 면적이 그만큼 감소하게 되므로, 열전달 면적 감소비율을 모델 변수 (FSAGKT)로 정의하여 기존 표면적을 이 모델변수 값만큼 감소하도록 모의하였다. 수평연료관의 처짐 기준으로는 압력관과 칼랜드리아관의 평균 온도를 사용하였고, 처짐 조건이 만족되면 바로 표면적에 모델변수를 적용하여 노심 손상을 진행하였다.

그러나 기존의 ISAAC 해석 결과에 따르면, 수평연료관과 감속재 사이의 열전달 면적을 모의하는 FSAGKT 모델 변수의 값에 따라 수평연료관의 재배치 여부가 결정될 정도로 사고진행이 모델 변수에 민감하게 반응하며, 부가적으로 노심에서의 수소 생성량에도 큰 차이를 보인다. [3] 즉, 참고문헌 3에 따르면, FSAGKT 값이 작은 경우 (0.1에서 0.3 범위)에서는 수평연료관의 연료다발 (노드)과 감속재의 접촉 면적 감소로 수평연료관이 손상되어 칼렌드리아 탱크 바닥으로 재배치 되지만, 0.5 이상의 값에서는 감속재로의 원활한 열전달로 수평연료관의 건전성이 유지됨을 확인하였다. 따라서 본 논문에서는 사용자가 일정한 값을 지정하는 FSAGKT 대신에 사고진행에 따라 칼렌드리아관의 재배치로 인한 감속재로의 열전달 감소 효과를 나타낼 수 있도록 재배치 진행 시간에 따라 FSAGKT 값을 선형으로 감소하도록 모델을 수정하여 분석하였고, 고압 및 저압사고에 대하여 기존 입력을 이용한 해석 결과와 비교하였다.

## 2. ISAAC의 노심 손상 모델 검토

### 2.1 피복재 부풀음 및 파손

CANDU 원전의 경우 압력관 내부의 연료봉은 냉각재 손실 이후 붕괴열에 의해 가열되며 피복재는 먼저 부풀게 된다. 피복재의 온도가 입력 값보다 높거나 혹은 피복재 내부 기체의 압력으로 인한 후프 응력이 파손 응력보다 크면 피복재의 부풀음을 예상하고 변형율을 계산하되, 최대 변형율을 압력관 내부의 유로 면적을 연료핀 개수로 나눈 정사각형 분할 면적의 한 변으로 제한하고 있다.

피복재의 건전성은 2단계의 과정을 거쳐 판단된다. 먼저 Larson Miller 방법에 의해 크립 파손 시점을 계산한다. Larson Miller 공식은 얼마나 피복재가 오랫동안 지탱하는가를 예측하며, 피복재 파손변수, 피복재 온도, 그리고 파손 시간의 관계식으로 구성된다. ISAAC에서는 사용자가 입력한 피복재 파손온도에 도달하면 0.01시간에 피복재가 파손되는 조건으로 파손 변수값을 구하고, 이로부터 파손 시간을 예측하고 이 값을 역으로 적분한 누적 손상비율을 얻어 이 값이 1보다 커지는가를 비교한다.

일단 크립 파손 조건을 만족하면 다음 단계인 피복재의 산화층 두께와 온도로부터 궁극적인 파손을 판단한다. 여기서 고려되는 변수는 산화층의 형성으로 인한 피복재의 건전성 유지 여부이다. 산화된 피복재의 건전성을 판단하기 위해 ISAAC은 최소 피복재 파손온도와 최대 허용 가능한 산화층 두께를 사용자 입력으로 요구한다. 그러나 온도와 산화층 두께 기준의 엄격한 적용으로 인한 수치적 불안정성을 피하기 위해 피복재 온도와 산화층의 두께 (혹은 질량)를 동시에 고려한

통합된 결과를 입력 값 (코드에서는 산화비율 (FZORUP))을 비교하여 건전성 여부를 판단하도록 하였다. ISAAC에서 사용되는 관계식은 다음과 같다:

$$S = S_0 + (1 - S_0) * f$$
$$f = (TCL - TCLMAX) / (TMP - TCLMAX)$$

여기서, S는 주어진 피복재 온도에서 최대 허용 산화 가능 비율, S<sub>0</sub>는 피복재 파손 조건으로 제시된 지르칼로이 최대 허용 산화 비율 (FZORUP), f는 피복재 온도를 건전성 판단에 고려하기 위해 도입된 변수 (FRCINC), TCL은 피복재 온도 (코드 계산값), TCLMAX는 사용자 입력의 피복재 파손 온도 (2500 K), 그리고 TMP는 ZrO<sub>2</sub> 용융온도 (코드 내장값=2911 K)이다.

ISAAC 코드에서는, 피복재가 건전성을 유지하기 위해 사용자가 지정한 최대 산화 비율로 계산한 산화 질량을 실제 산화된 질량과 비교한다. 만일 전자가 후자보다 크면, 즉 허용 가능한 산화량이 실제 산화량보다 커지게 되면, 실제 산화량이 건전성 판단의 기준보다 작고, 따라서 산화된 두께가 입력보다 낮으므로, 그 결과 피복재가 견디지 못하고 파손되는 것으로 판단한다. 위 식에서 계산되는 S는 최대 허용 산화질량을 구하는데 사용되며, 이 값이 클수록 환산 질량이 커지므로 쉽게 파손된다. 이 식에서 보듯이, 입력 변수인 S<sub>0</sub> (FZORUP) 값이 클수록, 그리고 피복재 온도가 높을수록 쉽게 파손 조건을 만족함을 알 수 있다. 피복재 온도인 TCL이 TCLMAX이면 f=0, S=S<sub>0</sub>가 되고, TCL이 TMP이면 f와 S가 모두 1이 되며, 그 사이의 온도에서는 f (0<f<1)의 값에 따라 S가 결정된다.

## 2.2 압력관 부풀음

압력관도 온도 및 압력 상승에 따라 부풀음 및 파손 과정을 거친다. 피복재의 부풀음과 마찬가지로, 압력관 압력에서의 후프 응력과 파손 응력을 비교하여 전자가 커지면 부풀음 현상을 고려하고, 칼렌드리아관 내벽까지 닿으면 더 이상의 부풀음은 고려하지 않는다. 고압사고의 경우, 수평 연료관의 압력관 내부 압력과 압력관 외부 압력의 차이로 압력관이 부풀고 결국은 칼렌드리아관과 접촉하게 된다. 이로 인해 압력관과 칼렌드리아관 사이의 대류 및 복사 열전달에서 직접적인 전도 열전달이 이루어지며, 이것은 칼렌드리아 탱크의 감속재료의 열전달을 증가시키고, 동시에 칼렌드리아관의 온도도 증가시킨다. 그러나 한편 칼렌드리아관의 온도 증가는 칼렌드리아관을 약하게 하고 궁극적으로 칼렌드리아관의 지지 부족으로 인해 압력관의 파손을 야기할 수 있다.

ISAAC에서 압력관이 손상되면 칼렌드리아관의 내벽과 압력관의 수증기가 접촉하게 되고, 이로 인한 열전달 및 산화 반응 면적 증가에 대한 모델이 고려되어 있다. 그러나 노심 재배치 평가시

에는 압력관 손상만으로는 판단하지 않으며, 압력관과 칼랜드리아관 동시 손상을 근거로 재배치를 모의하고 있다. 압력관의 처짐 역시 압력관의 독자적인 처짐은 따로 모의하지 않으며, 칼랜드리아관이 처지게 되면 같이 움직이도록 모의하고 있다.

### 2.3 칼랜드리아관 처짐 및 재배치

칼랜드리아 탱크의 감속재 상실로 칼랜드리아관이 노출되면 붕괴열로 인한 온도 상승으로 물질의 특성이 변하여 연성이 증가하고, 또한 칼랜드리아관 자체의 하중을 견디지 못해 양쪽이 고정되어 있는 칼랜드리아관은 중앙 부위부터 관은 처지기 시작한다. 이러한 처짐 현상은 연료관 재배치의 초기 단계로, 이로 인해 연료관과 감속재와의 열전달 면적이 감소하고 이 효과를 모의하기 위하여 ISAAC에서는 FSAGKT라는 모델 변수를 도입하였다. 즉, 처짐 조건이 만족되면 칼랜드리아관의 표면적에 FSAGKT를 곱한 값으로 새로운 열전달 면적을 정의하고, 이 면적에 근거하여 감속재와의 열전달 현상을 모의한다. 일반적으로 FSAGKT는 1보다 적은 값이므로, 감속재로의 열전달 감소로 칼랜드리아관은 가열이 촉진되어 연료물질의 용융 및 칼랜드리아 탱크로의 재배치로 사고는 발전한다.

ISAAC에서의 재배치 기본 단위로는 노드가 활용되며, ISAAC 코드에서는 연료봉과 피복재, 그리고 그 부분에 해당하는 압력관과 칼랜드리아관이 포함된다. AECL의 보고서 [4]에 따르면 상세 노심 손상 (core disassembly) 모델 중 수평연료관의 재배치 단위로 연료다발 (노드)을 사용하고 있다. 즉, 수평 연료관의 처짐이 심해져서 약 1 m이상 처지게 되면, 처짐으로 인한 변형으로 전체 연료관이 연료 다발 (노드) 단위로 분리되는 결과를 인용하고 있다. 이렇게 손상된 연료물질은 칼랜드리아 탱크 내부의 복잡한 칼랜드리아관 배치를 고려하여 보면 칼랜드리아 탱크 중간 아래 위치에 이러한 연료 물질이 서로 쌓여 영키는 공간을 예상할 수 있고, 이러한 공간을 ISAAC에서는 Holding Bin이라고 정의하여 일단 재배치시키고, 그 곳에서의 독립적인 가열을 통해 용융된 물질만 칼랜드리아로 재배치시키도록 모의하고 있다.

### 3. 재배치 개선 모델 제안

ISAAC에서는 노심 재배치와 관련하여 현재 FSAGKT가 사용되고 있고, 단일 값이 입력되어 있다. 즉, 압력관과 칼랜드리아관의 평균 온도가 입력인 TSAGKT보다 높아지면 그 순간부터 연료관이 Holding Bin으로 재배치될 때까지 칼랜드리아관과 감속재와의 열전달 접촉 면적을 초기 값의 FSAGKT 비율만큼만 허용함으로 연료다발의 붕괴열에 의한 노심 가열 및 손상을 촉진시키고 있다. 재배치 관련 변수로는 FSAGKT 외에도 TSAGKT가 있는데, 이 변수에 대한 민감도 해석 결과에 따르면 TSAGKT가 높을수록 재배치될 때까지의 시간이 길어져 수소 생성량은 서로

차이를 보이지만, 칼렌드리아 탱크 파손 등 전반적인 사고진행 경향에는 큰 차이가 없음이 보고되었다 [3]. 따라서 여기서는 단일 값으로 사용되는 FSAGKT를 대신할 수 있는 모델을 제안하였다.

현재 FSAGKT는 칼렌드리아관의 처짐 조건이 만족되면 그 즉시 감속재로의 열전달 면적을 인위적으로 FSAGKT 비율만큼 감소시킴으로 사고진행을 모의하는데 사용되고 있다. 그러나 실제 사고진행 상황을 짐작해보면, 수평연료관이 처지기 시작하면 온도와 자체 하중의 영향으로 서서히 아래로 내려앉으며 점진적으로 칼렌드리아관과 감속재 사이의 열전달 면적이 감소하게 된다. 따라서 이 논문에서는 처지기 시작하면서 바로 입력으로 지정한 FSAGKT를 사용하는 대신, 재배치 시점부터 진행 시간에 따라 FSAGKT 값을 서서히 줄여가도록 모의하였다. 우선은 이러한 모델 도입에 의한 영향을 판단하기 위해 선형으로 감소하는 간단한 경우를 검토하였고, 이를 위해 새로운 모델 변수인 TSAGCH와 FSAGMIN을 도입하였다. TSAGCH는 재배치 시간 상수 (초)로 이 시간 동안 FSAGKT가 감소하며, FSAGMIN은 FSAGKT의 최소값을 의미한다. 예로, TSAGCH와 FSAGMIN을 각각 600.0과 0.05로 입력하면, 처지기 시작하는 시점부터 600초 (10분) 동안 FSAGKT가 1.0에서 0.0으로 감소하며, FSAGKT값이 0.05보다 낮아지면 그 이후는 0.05로 고정하여 사용한다는 의미이다. 여기서는 가장 빠른 재배치를 모의하도록 30초를 사용하였고, 늦게는 3600초로 1시간에 걸쳐 FSAGKT 값이 바뀌도록 모의하였다. 최소 값인 FSAGMIN은 0.05로 고정하여 계산하였다.

## 4. 개선 모델 평가

### 4.1. 고압사고에서의 재배치 모델 평가

고압사고를 모의하기 위하여 증기발생기 완전 급수상실사고 (TLOFW)를 선정하였다. 칼렌드리아관의 처짐 입력에 따라 다르게 나타나는 결과 중의 하나가 노심 내 수소 생성량이다. 기존의 모델을 이용하여 분석한 급수상실사고에서의 FSAGKT에 따른 수소 생성량은 참고문헌 3의 그림 4.1-33부터 4.1-36에 정리되었고 이 중 폐회로 1에서의 수소 생성량을 그림 1에 인용하였다. 그림에서 보듯이 FSAGKT의 값에 따라 사고 종료 시점인 72시간에서의 폐회로 1에서의 총 수소 생성량은 약 78kg (FSAGKT=0.1)에서 많게는 약 260kg (FSAGKT=0.5)까지의 분포를 보인다. 0.5 보다 높은 경우는 72시간까지 유사한 양의 수소 생성량을 보여주고 있다. 폐회로 2에서의 수소 생성량도 폐회로 1과 유사하다. 현재 기본값으로 사용하는 FSAGKT 값은 0.1로, 사고진행을 촉진시키기 위해 낮은 값을 사용하고 있다. 그림 2는 LOFW에서 각 폐회로에서의 고정된 FSAGKT (0.1, 0.3, 0.5)와 새로운 모델 (TSAGCH=30초, 3600초)을 사용한 경우를 서로 비교하였다. 재배치 진행시간을 30초와 1시간으로 모의하였으나, 결과는 큰 차이를 보이지 않으며,

FSAGKT=0.1의 결과와 전반적인 경향을 같이 하였다.

노심에 남아있는 연료 물질의 량과 칼렌드리아 탱크로 재배치된 연료 물질의 양을 그림 3에 정리하였다. FSAGKT의 값을 0.5로 고정하여 사용한 경우에는 칼렌드리아 탱크로 연료 물질이 전혀 이송되지 않았고, 0.3의 경우는 약 140톤의 초기 량 중 약 96톤이 재배치됨을 보여 준다. 0.1의 경우는 128톤 정도 재배치되었는데, 새로운 모델을 사용하여 재배치 시간을 30초와 1시간으로 모의한 경우 각각 128톤에서 132톤으로, 0.1을 사용한 경우와 유사한 경향을 보여준다. 또한 칼렌드리아 탱크 파손 시점도 FSAGKT 값을 0.5로 사용한 경우만 칼렌드리아 탱크가 건전하며, 나머지 경우는 파손 시점이 40시간에서 42시간으로 비슷한 결과를 예측하고 있다.

#### 4.2. 저압사고에서의 재배치 모델 평가

저압사고로는 원자로 출구 헤더 (ROH)에서의 냉각재 상실에 의한 대형 LOCA를 분석하였다. 대형 LOCA에서의 수소 생성량은 참고문헌 3의 결과를 인용하여 그림 4에 수록하였다. 그림에서 보듯이 FSAGKT의 값에 따라 사고 종료 시점인 72시간에서의 총 수소 생성량은 차이를 보이며, 적게는 72kg (FSAGKT=0.1)에서 많게는 264kg (FSAGKT=0.5)까지의 분포를 보인다. 그림 5에는 대형 LOCA에서 각 폐회로에서의 고정된 FSAGKT (0.1, 0.3, 0.5)와 새로운 모델 (TSAGCH=30초, 3600초)을 사용한 경우를 서로 비교하였다. 앞 절의 LOFW 사고 경위 결과와 마찬가지로, FSAGKT에 따라서는 큰 차이를 보이지만, 새로운 모델에서의 재배치 진행시간에 따른 차이는 상대적으로 작으며, 새로운 모델 결과는 FSAGKT=0.1의 결과와 유사하였다.

Holding Bin으로 재배치되기 전까지 노심 내 연료 물질의 량과 칼렌드리아 탱크로 재배치된 연료 물질의 양은 그림 6에 도시하였다. 칼렌드리아 탱크로의 연료 물질 이송 경향은 앞 절의 LOFW의 해석 결과와 매우 흡사하다. 칼렌드리아 탱크 파손 시점도 FSAGKT 값을 0.5로 사용한 경우만 칼렌드리아 탱크가 건전하며, 나머지 경우는 파손 시점이 40시간 전 후로 민감도 해석 결과가 모두 비슷한 결과를 예측하고 있다. 동일한 경우에 대하여 격납건물의 압력을 비교하여 그림 7에 정리하였다. 고정된 FSAGKT를 사용한 경우는 격납건물 파손을 배제한 해석 결과로, 격납건물 파손인 520 kPa (a) 이상으로 증가하여도 깨지지 않도록 모의하였다. 따라서 격납건물 파손 압력에서의 정상적인 파손을 고려하면, FSAGKT가 0.5인 경우 파손 시간은 약 42시간이며, 0.1과 0.3의 경우는 약 40시간 부근으로, 수정된 모델에서 1시간을 사용하면 약 38시간에, 30초를 사용하면 40시간에 파손됨을 알 수 있다. FSAGKT가 0.1과 0.3인 경우는 칼렌드리아 탱크가 파손될 때 격납건물 압력이 갑자기 상승하여 격납건물 파손 압력에 도달하지만, 0.5인 경우는 칼렌드리아로 연료 물질이 재배치되지 않아 칼렌드리아 탱크가 건전하기 때문에 다른 경우처럼 침투 압력이 발생하지 않는다.

## 5. 결론

고압사고 및 저압사고에서 FSAGKT의 값 (0.1, 0.3, 그리고 0.5)에 따른 결과와 수정 제안된 모델에 따른 결과를 비교, 검토하였다. 기존의 FSAGKT에 값에 따라서는, 낮은 값을 사용하는 경우는 수평연료관이 가열되어 손상되고 칼랜드리아 탱크로 재배치되지만, 0.5 이상의 높은 값을 사용하면 수평연료관은 건전성을 유지하여 칼랜드리아 탱크로 연료물질이 재배치되지 않으며, 따라서 칼랜드리아 탱크도 건전성을 유지한다. FSAGKT 값에 따라 수소 생성량도 차이를 보이지만, 가장 큰 영향은 기본적인 사고진행의 틀이 서로 달라 적당한 값에 대한 선택이 매우 중요하게 부각된다.

계단 형태의 순간적인 열전달 면적 변화를 대신하여, 재배치되는 시간에 따라 FSAGKT 값을 계산할 수 있도록 재배치 특성 시간 (TSAGCH)과 최소 FSAGKT 값 (FSAGMIN)을 도입하였다. 재배치 특성 시간에 따른 영향을 분석하기 위하여 30초부터 3600초 (1시간)의 두 경우에 대하여 분석을 수행하였고, 그 결과를 이전 모델에서의 고정된 FSAGKT 값에 따른 사고 경향과 비교하였다. 재배치 특성 시간에 따라 수소 생성량 및 사고진행이 영향을 받긴 하지만, 30초와 1시간의 넓은 범위에서도 사고진행 경향은 거의 같으며, 칼랜드리아 탱크 파손 시점의 정량적인 값에서도 1-2시간 내외의 차이만 보인다. 즉, 사용자가 어떠한 재배치 특성 시간을 입력하여도 그 결과는 큰 차이를 보이지 않으며, 모두가 일관성 있는 결과를 생산한다.

수평연료관이 재배치되면서 구조적 변형으로 인한 감속재와의 열전달 면적 변화를 고려한다면, 제안된 모델은 한 가지 값을 사용하는 이전의 모델에 비하여 그 재배치 효과를 시간적인 면에서 잘 모의하고 있다. 두 극단적인 입력 (30초와 3600초)을 사용한 경우, 그 결과가 FSAGKT를 0.1 (코드의 기본 값)로 모의한 기존의 결과와 유사하며, 이는 기존 입력 값의 타당성을 높여준다. 비록 FSAGKT에 사용할 수 있는 구체적인 실험값은 없지만, 수평 연료관 재배치 이후의 복잡한 구조에서의 열전달을 가정하고 사고 전개에 대한 불확실성을 고려한다면, 민감도 분석의 목적으로 수행한 0.5 이상의 높은 값의 FSAGKT에 대한 결과는 신뢰성이 약해진다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기과제에서 재정적 지원을 받았습니다.



## 참고문헌

- 1 김동하 외, “월성발전소의 급수상실 사고시 피동안전계통의 열제거 능력 연구,” PSA96, Park City, 1996.10
- 2 김동하 외, “가압 중수로형 원자력 발전소의 2단계 PSA를 위한 전산코드 개발,” KAERI/RR-1573/95, 한국원자력연구소, 1995.12.
- 3 김시달 외, “ISAAC에 사용된 칼랜드리아관 처짐 모델이 수소 생성에 미치는 영향 평가,” KAERI/TR-2557/2003
- 4 D.A. Meneley 외, “Coolability of Severely Degraded CANDU Cores,” AECL-11110, 1996.

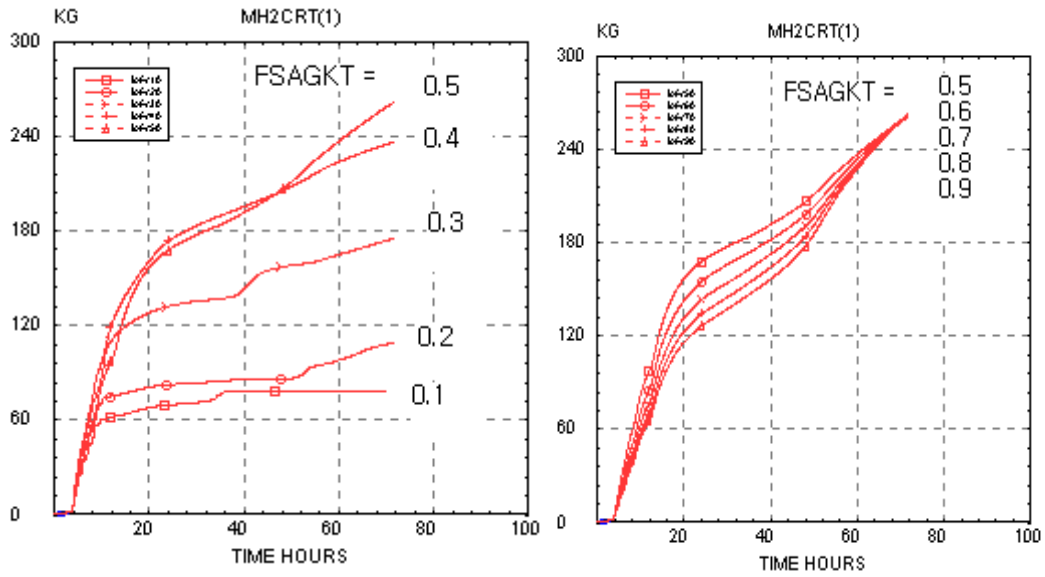


그림 1 LOFW에서의 FSAGKT에 따른 연료관 (Loop 1) 수소 생성량 비교

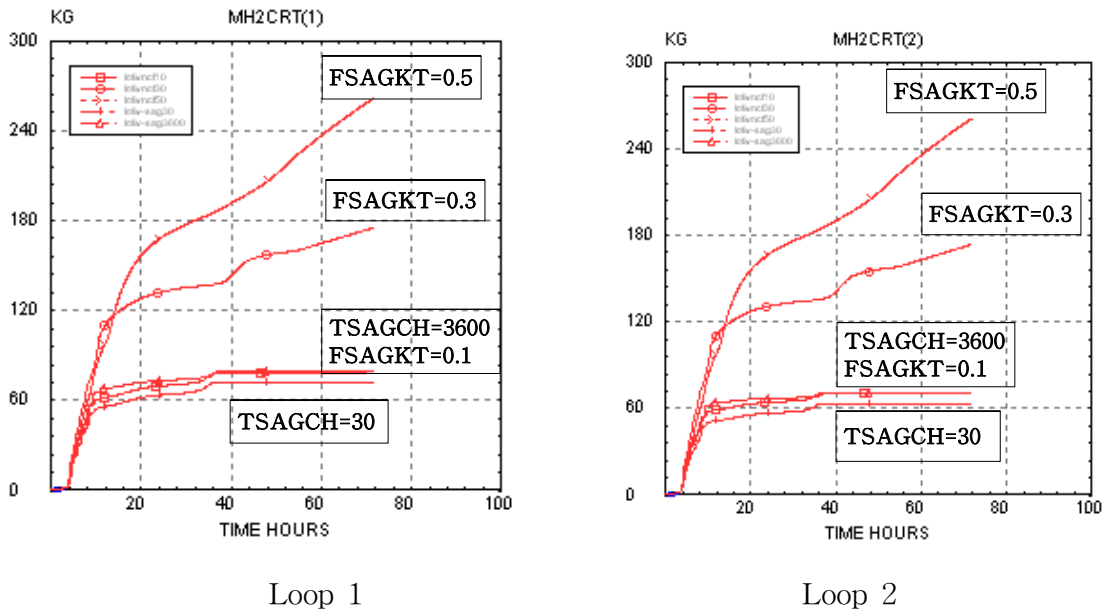


그림 2 LOFW에서의 기존/새로운 모델을 이용한 연료관 수소 생성량 비교

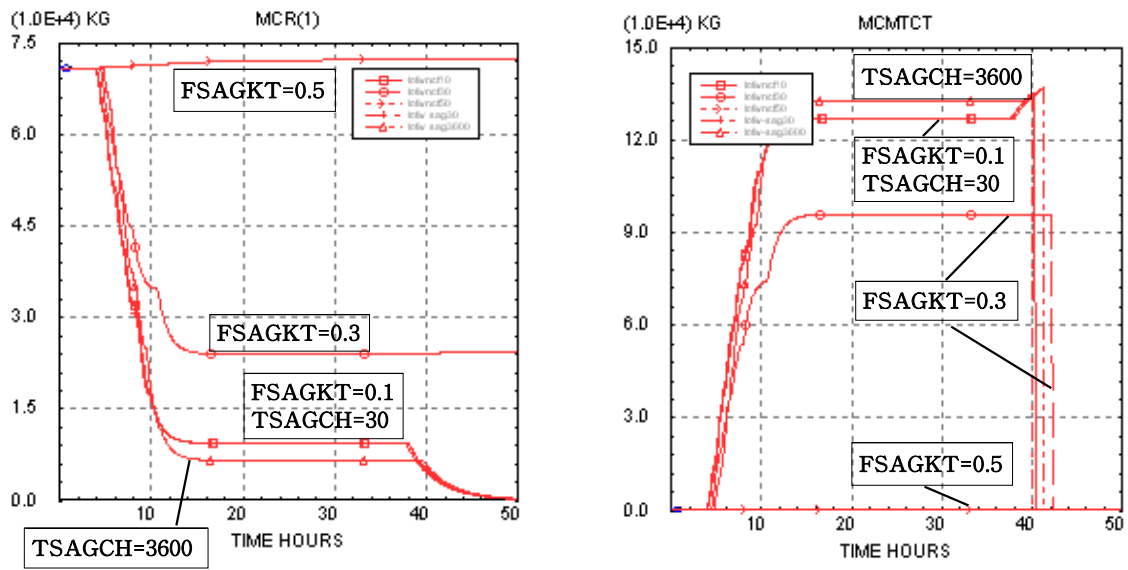


그림 3 노심 (LOOP 1)과 칼랜드리아 탱크에 남아있는 연료물질 비교

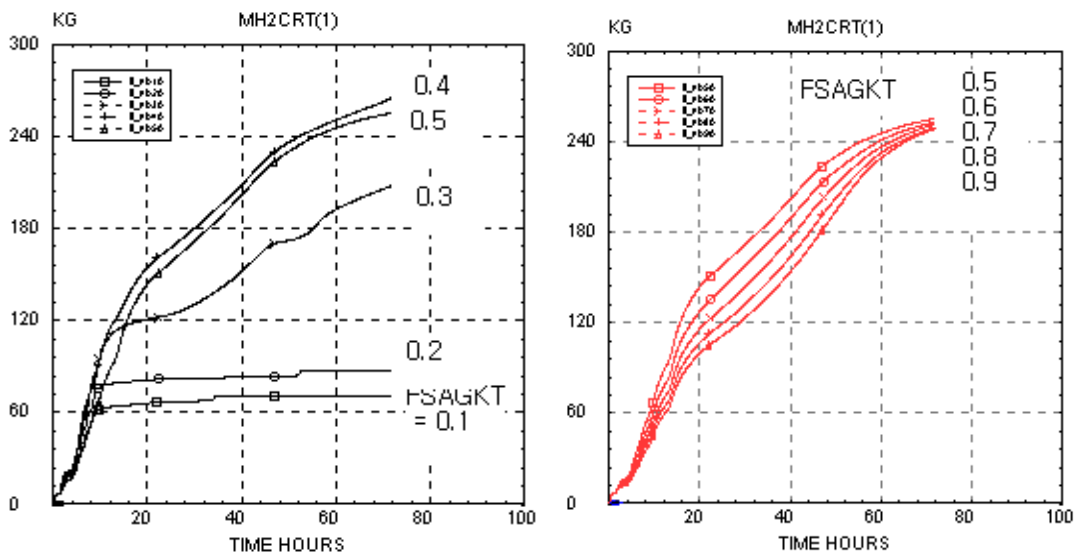


그림 4 대형 LOCA에서의 FSAGKT에 따른 연료관 (Loop 1) 수소 생성량 비교

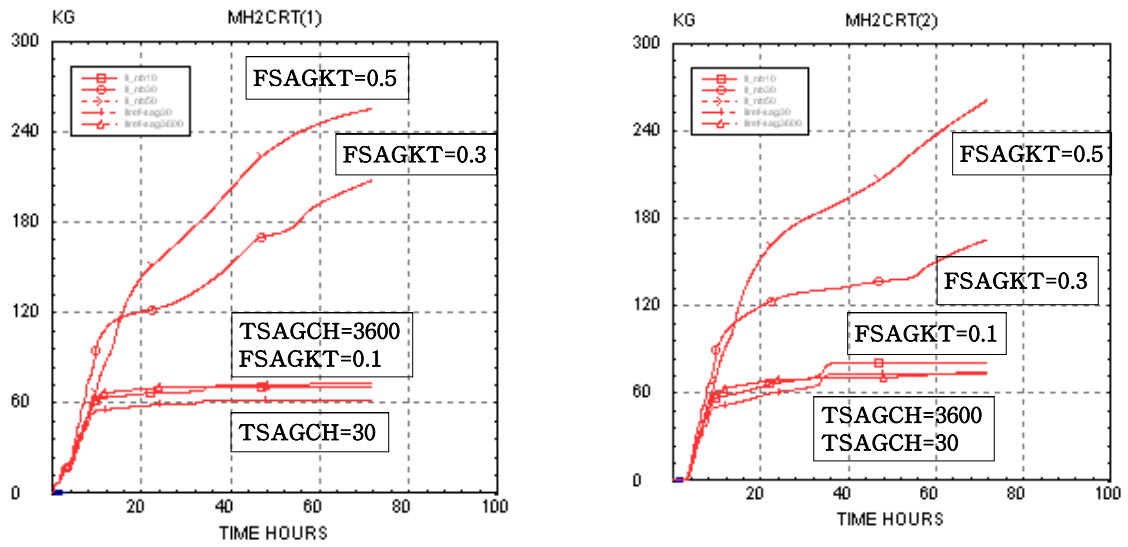


그림 5 폐회로 1 (Loop 1)에서의 노심 내 수소 생성량 비교

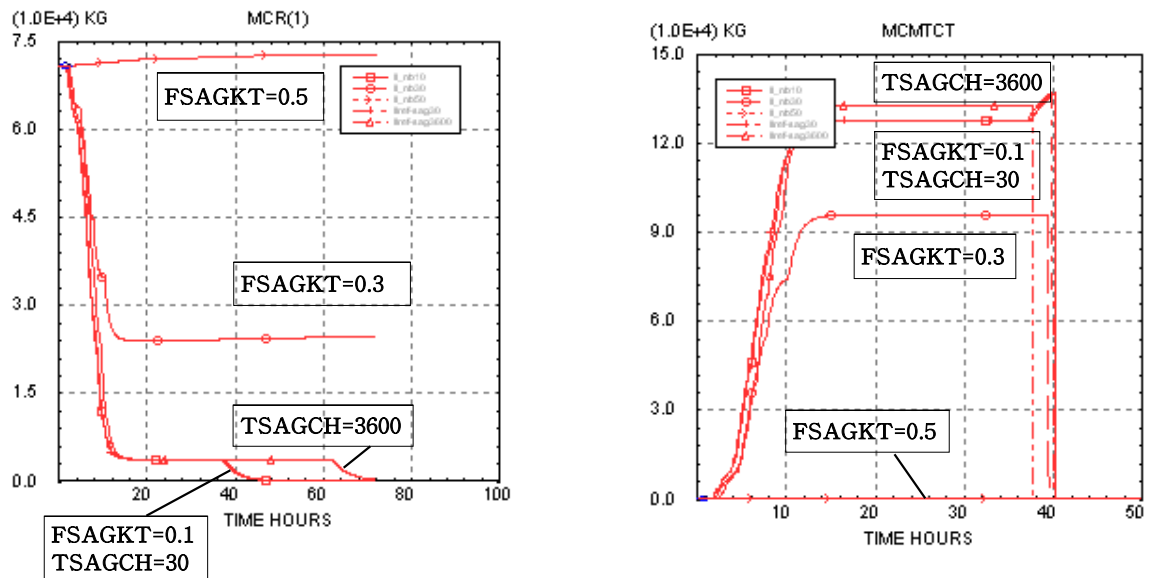


그림 6 노심 (LOOP 1)과 칼랜드리아 탱크에 남아있는 연료물질 비교

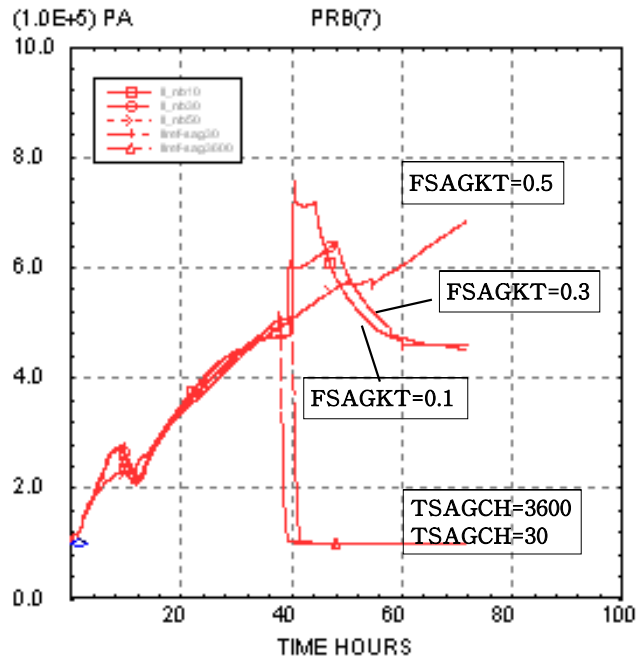


그림 7 LLOCA에서의 고정 FSAGKT (0.1, 0.3, 0.5)와 새로운 모델 (30초, 3600초)에 따른 격납건물 압력 거동 비교