

중수로 단일 대표 연료봉 모델 타당성 평가

Assessment of Single Fuel Rod Modeling for Thirty-Seven Rods  
under CANDU Severe Accident Conditions

김동하, 김시달, 박수용

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

CANDU 원전 중대사고 해석 코드인 ISAAC은 압력관 내부의 37개의 연료봉을 대표연료봉 하나로 모의하고 있다. 이 방법의 장점은 코드 전체의 전반적인 열수력 모델과의 균형을 유지하면서 중대사고 관점에서 필요한 정보를 빨리 얻을 수 있지만 37개 연료봉 사이의 온도분포가 큰 경우 이를 고려할 수 없는 단점을 지니고 있다. 기존의 AECL 실험과 해석 결과에 따르면 초기 구조를 유지하고 있는 경우 연료봉 사이의 최대 온도 차이는 약 200° C 정도이고, 온도가 상승하여 연료봉이 압력관 하부로 재배치되었을 경우는 연료봉 안쪽에서의 수증기 고갈로 외곽에 위치한 연료봉과의 온도차이는 시간이 지남에 따라 오히려 감소함을 보여주었다. 따라서 ISAAC에서의 단일 대표 연료봉을 이용한 모델링은, 사고 초기 연료봉들의 재배치 이전 동안 압력관 내부에서의 연료봉들의 온도 분포를 간과하지만, 그 영향은 중대사고 관점에서 크지 않음을 확인하였다.

Abstract

The ISAAC computer code, which models severe accident phenomena at CANDU plants, assumes a single representative fuel rod for 37 fuel elements. This assumption has a merit of balanced thermal hydraulic analysis with the quick plant response, though it loses temperature distribution information among the fuel rods. According to the AECL reports, the maximum temperature difference among fuel rods was about 200° C and when the fuel rods are heated and disassembled into the lower part of pressure tube, the temperature difference decreases due to the steam starvation at the center. Therefore, single fuel rod modeling is a good approach to simulate the severe accident progression at CANDU plants.

## 1. 서론

월성 발전소는 실린더 형태의 칼랜드리아 탱크의 내부에 380개의 수평 연료관이 22개의 행과 열의 형태로 원을 이루면서 수평으로 놓여있고, 그 안에 연료봉들이 수평으로 놓이는 큰 특징을 갖는다. 수평 연료관은 외곽으로부터 칼랜드리아관 (calandria tube), CO<sub>2</sub> 가스층, 압력관 (pressure tube), 그리고 압력관 내부의 수평 연료봉으로 구성되어 있다. 압력관 내부에는 지르칼로이 판 (end plate)에 의해 양단이 고정된 12개의 다발 (bundle) 형태의 수평 연료봉이 들어 있고, 다발 단위로 연료 교체가 이루어진다. 각 연료봉 다발은 4개의 링 형태로 구성된 37개의 수평 연료봉으로 구성되어 있으며, 각 연료봉은 경수로에서처럼 지르칼로이 피복재로 보호되어 있다. 따라서, 칼랜드리아 탱크의 감속재나 압력관 내부의 냉각재 수위가 감소하면 높이에 따라 수평 연료관이 나 수평 연료봉의 일부 혹은 전체가 증기 환경에 노출되는 월성 원전 고유의 현상이 일어난다.

경수로의 경우 일반적으로 노심 입력을 마련할 때 축 방향으로 10개에서 15개 정도로 나누어 계산한다. 이는 중대사고시 냉각수가 고갈됨에 따라, 수직으로 놓여있는 연료봉의 상단부터 그리고 가운데 위치한 연료봉부터 노출되어 먼저 가열되고 재배치되므로, 연료봉 (또는 집합체)을 축 방향으로 세분할수록 가열되거나 재배치되는 현상을 자세하게 모의할 수 있기 때문이다. 한편 연료봉 (또는 집합체)을 감싸고 있는 shroud로의 열전달 효과를 모의하기 위해 반경 방향으로도 보통 5개 정도로 구분한다.

월성 발전소 고유의 노심을 모의하기 위해서, 경수로에서 축 방향과 반경방향으로 연료봉을 균집화하여 단위 노드가 몇 개 (혹은 수십 개)의 실제 연료봉의 임의의 위치에서의 특성을 모의하듯이, 월성 중대사고 해석코드인 ISAAC에서도 비슷한 연료관 (또는 연료봉) 균집화 모델링 개념이 도입되었다. 즉, 380개의 수평 연료관을 최대 74개의 대표 수평 연료관으로 정의하여 칼랜드리아 내부에서의 수평 노심의 거동을 예측하고 있다. 각 대표 연료관은 서로 다른 높이와 출력을 가짐으로써 칼랜드리아 내부의 감속재 수위 효과와 가열 정도를 고려하도록 하였다. 또한 수평 연료관 내부의 12개의 다발을 각각 또는 2개씩 묶어 출력을 지정하도록 함으로써 축 방향의 온도 분포를 모의할 수 있도록 하였다.

이제 마지막 관심의 대상은 연료 다발 안의 37개의 연료봉을 어떻게 모의하느냐 하는 방법이다. 실제 수평으로 놓여있는 37개의 연료봉은 제일 가운데 1개 (링 1), 그 주위의 6개 (링 2), 그 외곽의 12개 (링 3), 그리고 제일 바깥쪽의 18개 (링 4)로 구성되어 있다. 37개의 연료봉을 각각, 또는 높이에 따라 2개씩 균집화하여 19개로 모의할 수도 있고, 아니면 링으로 구분하여 4개의 대표 연료봉으로 정의하여 모의할 수도 있고, 또는 37개의 연료봉을 대표 연료봉 하나로 정의하여 모의하는 방법도 있다.

각각의 연료봉을 모의하는 첫 번째 방법은 CATHENA 코드에서 사용하는 모델링으로, 연료관 내부의 연료봉 온도 거동만을 해석하는 경우에는 유용하다. 그러나 다른 일차계통이나 격납건물 전반에서의 열수력 모델에 비하면, 모델 정도가 너무 깊어 모델 균형이 맞지 않으며, 또한 이 방법을 전체의 연료관에 적용하게 되면 해석해야 할 연료봉의 수가 너무 많아 현실적으로 중대사고 시 발전소를 모의하는데 한계가 있다.

두 번째 방법은 현재 CHAN 코드에서 사용하고 있는 방법으로, 연료봉이 37개의 경우 4개의 링으로, 28개인 경우 3개의 링으로 모의한다. 이러한 방법은 압력관 내부의 연료봉들의 온도 분포를 적절한 수의 연료봉을 정의하여 예측할 수 있는 장점이 있는 반면, 그 적용 범위는 여전히 한계가 있다. 즉 압력관 내부에 냉각수가 있는 경우 냉각수 수위가 감소하면 같은 링으로 모사하더라도 급격한 온도 분포를 갖는다. 예로, 제일 외각의 링 (링 4)의 경우 상부에 위치한 일부 연료봉은 대기에 노출되지만, 하부에 위치한 연료봉들은 여전히 냉각수에 잠겨있게 된다. 이와 같이 같은 링이라도 온도 차이가 크면 링으로 모델하는 의미가 퇴색한다. 실제로, CHAN을 이용한 실험 해석에서는 이미 사고가 많이 진행되어 압력관 내부가 순수하게 수증기로 채워져 있는 경우를 대상으로 분석하며, 그 때의 연료봉의 온도 분포를 실험과 비교한다.

현재 ISAAC에서는 제일 마지막 방법, 즉 압력관 내부의 37개의 개별 연료봉을 대표연료봉 하나로 모의하는 방법을 채택하고 있다. 이 방법은 압력관 내부에서의 열전달을 모의하기 위한 가장 간단한 방법으로, 이의 장점은 코드 전체의 전반적인 열수력 모델과의 균형을 유지하면서 중대사고 관점에서 필요한 정보를 빨리 얻을 수 있는 데 있다. 또한, 단일 연료봉이지만 외부 조건 (냉각수 혹은 대기와의 접촉)에 따라 연료봉 내부에서의 온도분포를 구하여 압력관 내부의 수위 변화에 따른 열전달 효과를 고려할 수 있도록 하였다. 다만, 37개의 연료봉을 대표 연료봉 하나로 취급하기 때문에 37개 연료봉 사이의 온도 분포가 큰 경우 이에 대한 영향을 고려할 수 없는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 37개의 연료봉을 하나의 대표 연료봉으로 모의하는 ISAAC에서의 기본 가정이 중대사고 진행 관점에서 그 영향이 얼마나 있는지를 평가하였다. 이를 위해, 기존 논문이나 보고서를 통하여 상세 모델로 얻은 연료봉들의 온도 분포를 파악하고, ISAAC 결과와 비교함으로써 위에서 언급한 현안들에 대한 검토 결과를 정리하였다.

## 2. 수평연료관 연료봉 가열 실험 및 해석 결과 검토

현재 CANDU 원전에서의 중대사고에 관련된 실험은 AECL만이 수행하고 있고, 그 대부분도 COG (CANDU Owner's Group) 소유로 되어있어 외부에서는 관련 실험이나 해석 내용을 접근할 수 없는 상황이다. 이 논문에서 검토하고자 하는 압력관 내부에서의 연료봉 온도 분포 관련 내용도 AECL의 논문이나 보고서에 의존하여 수행할 수밖에 없는 한계를 가지고 있다.

중대사고 환경에서의 연료봉 거동에 대한 보다 나은 이해와 해석 코드 검증용 자료를 생산하기 위해 AECL이 COG 후원으로 단계별로 실험 및 해석을 수행하였다. 한편으로는 모의하는 연료봉의 개수를 7개부터 시작하여 28개, 그리고 37개로 늘이고, 또 다른 한편에서는 중대사고 환경에서 실험이 수행되는 동안 연료봉이 압력관 내부의 처음 위치에 그대로 놓여있는 상황과 가열된 연료봉들이 압력관 하부로 재배치 된 이후의 조건에서 실험을 수행하였다.

## 2.1 연료봉 재배치 이전의 온도 분포 해석

참고문헌 1에서는 모의 연료봉 7개에 대한 out-of-pile 고온 열화학 (high-temperature thermal-chemical) 실험 중 네 번째 실험에 대하여 CHAN-II (Mod 6), CHAN-II-WL, 그리고 CATHENA를 사용하여 실험과 결과를 비교하였다. 특히, 이 논문은 실험 결과를 모른 채로 실험을 모사하고 결과를 비교하는 내용으로, 이러한 비교 테스트를 통하여 이 세 가지 코드가 실험을 모사할 수 있는 능력이 있음을 확인하고 있다.

CHAN-II 코드는 압력관 내부가 과열 수증기 (superheated steam)로 차 있는 경우 연료채널의 과도 거동을 예측하기 위한 속성 코드로, 열적, 화학적 모델을 포함하고 있고, 기하학적 모양과 물질 성질에 대한 수정을 통하여 비상 노심 급수가 안 되는 LOCA 사고 해석에 사용되었다. CHAN-II (Mod 6)는 CHAN-II 코드를 수정하여 연료봉의 수에 따라 최대 4개의 링까지, 중심 핀이 있는 경우와 없는 경우, 그리고 단상 증기 유량에서 사용할 수 있도록 하였고, CHAN-II-WL 역시 CHAN-II를 수정하여 복사 열전달 모델을 개선 (온도에 따른 emissivity 계산)하고 압력관 외부의 냉각 재킷 (cooling jacket)을 모의하도록 하였다. 마지막으로, CATHENA는 CANDU 원전에서의 LOCA 사고를 모의하기 위해 AECL에서 개발된 코드로, 파이프에 연결되어있는 구조에서 이상 유동을 2 fluid 모델을 이용하여 모의하며, 사용되는 고체 물질이 용융 온도까지 상승하는 경우까지 모의할 수 있는 모델을 가지고 있어, 열 복사, 압력관 변형, 지르칼로이/증기 산화반응, 그리고 비응축 기체까지 모사가 가능하다. CHAN과 CATHENA 코드는 압력관 내부에 위치한 복잡한 연료봉 형상을 모의하기 위하여 서로 다른 기하학적 가정을 사용한다. 그림 1에서 보듯이, CATHENA는 각각의 연료봉과 연료봉 사이에 생기는 유로 채널을 일일이 모의하는 반면, CHAN 코드는 링 구조를 가진 형상을 가정하며, 이 경우 2개의 연료 링, 2개의 유량 채널, 그리고 압력관으로 구분하여 모의한다.

그림 2는 7개의 연료봉을 사용한 모의 실험에서의 실험 측정치와, 개별 연료봉을 모의하는 CATHENA, 그리고 링으로 연료봉을 대표하는 CHAN 코드의 계산 결과를 내부 및 외부 연료봉의 여러 위치에서 비교하고 있다 [1]. 각 그림에서의 실험과 코드와의 온도 차이는 가열되는 동안 (stage 4) 내부 연료봉에서 약 200° C, 외곽의 연료봉에서는 약 100° C의 차이를 보이며, 관심이

되고 있는 내 외부 연료봉 사이의 온도 차이는 최대 약 200° C 정도임을 보여주고 있다.

참고문헌 2에서는 중대사고 환경에서의 현상 이해 및 해석 코드 검증용 데이터 생산을 위해 위의 예비 계산을 수행한 후 28개의 연료봉이 있는 경우에 대하여 고온 열화학 (thermal-chemical) 실험인 CS 28-1을 수행, 분석하였다. 10g/sec의 증기 유량 조건에서 연료봉 온도가 1680° C에 도달하여 지르칼로이 산화반응으로 인한 온도 상승을 확인하였다. 실험결과를 모의하기 위하여 해석 코드로는 CHAN-II-WL Mod28a를 사용하였고 2개의 지르칼로이 산화모델 (Urbanic-Heidrick Model (UH)과 Leistikow with Prater-Courtrigut correlation (LE))을 이용하였다. 실험과 코드 해석 모두 증기 고갈 현상을 확인하였고, LE 상관식이 UH보다 온도 상승 시점 및 상승량이 빠르고 크게 나타났으며, 최대 수소 생성량을 비교한 결과 UH 모델이 실험을 더 근사하게 모의한다고 확인되었다. 다만, 코드 해석 결과 얻어진 압력관의 온도가 실험보다 과도하게 높게 예측되어 원인 규명 중에 있으며, 원인 중 하나는 코드에서 반영되지 않은 CO<sub>2</sub> 가스층에 의한 냉각 효과로 판단하고 있다.

28개의 연료봉에 대하여 수행된 고온 열화학 실험인 CS 28-1에서의 압력관 내 연료봉의 온도분포는 그림 3에 제시되어 있다 [3]. 출력이 40kW보다 적은 600 초 이전에는 위치별로 최대 약 60° C 정도의 차이를 보이며, 급격히 가열되는 그 이후부터는 온도 증가율이 서로 달라 제일 안쪽에 위치한 TC 34 (중앙 링), 두 번째 링의 TC 32, 그리고 중앙 링의 가열되지 않은 연료봉의 TC 33이 높은 온도 분포를 갖는다. 산화 반응이 발생하기 이전인 850초 부근에서 대부분의 연료봉 사이의 온도차이는 약 180° C정도이고, 최외곽 연료봉 표면의 TC 29를 포함하면 약 260° C정도이다.

## 2.2 연료봉 재배치 조건에서의 온도 분포 해석

참고문헌 4는 압력관 내부의 연료봉의 형상 변형의 효과를 보여주는 실험으로, 37개의 연료봉이 있는 압력관에서의 온도 분포를 CATHENA Mod3.5a로 분석하였다. 특히 중대사고 환경에서의 연료봉의 거동 모사에 초점을 맞추어, 연료봉들이 압력관 하부로 촘촘하게 재배치된 형상에서의 열화학적 특성 거동을 코드로 분석하였다. 냉각수 상실사고로 인한 과열 수증기 환경에서, 연료봉 각각과 압력관, 그리고 칼랜드리아 튜브에서의 열전도 현상과, CATHENA 모델을 이용한 정상 상태와 재배치 상태에서의 복사열 가시변수 (view factor) 계산, 그리고 변형으로 연료봉이 서로 닿게 되는 경우의 metal-to-metal contact 열전달을 고려하였다. 또한, 압력관의 부분적인 처짐으로 인한 연료봉의 위치 재배치 효과나, 산화 반응시 수증기 고갈 효과 등도 CATHENA의 모델을 이용하였다. 해석 결과 연료봉이 재배치되면 심각한 수증기 고갈로 연료봉에서의 산화반응에 의한 열 생성이 급격하게 감소함을 확인할 수 있었고, 이로 인해 재배치된 연료봉에서의 온도는 재

배치가 되지 않은 경우의 급격한 온도 상승에 비하여 상당히 작게 예측되었다.

일반적으로 압력관 내부가 과열의 수증기로 가득 차게 되면 연료봉의 온도는 이미 냉각재 상실로 상승한 상태이며 따라서 그림 4와 같이 연료봉들이 원래 자리를 이탈하여 처지는 현상이 발생하게 된다 [4]. 이러한 형상에서의 연료봉 온도 거동은 지금까지의 분석 대상이었던 건전한 형상과 다르게 예측된다. 그림 5는 정상 형상을 유지하고 있는 연료채널에서의 CATHENA 해석 결과로, 제일 위 그림에서 보면, 중앙 연료 다발인 7의 경우 시간에 따라 중앙 연료봉 1번의 피복재와 최외곽의 연료봉 21의 피복재에서의 온도차이가 계속 증가함을 보여준다. 그러나 그림 4와 같이 연료 채널 내부에서의 연료봉 재배치를 고려하여 해석하게 되면 (100초에 재배치된다고 가정) 그림 6의 실선 온도처럼 내부에 위치한 연료봉의 온도가 시간이 지날수록 더 이상 증가하지 않으며, 심지어 외부로의 열 손실로 감소하는 경향을 보인다. 이러한 이유는, 형상 재배치로 중앙에 위치한 연료봉 사이의 유로 면적이 감소하여 수증기의 공급과 산화 반응이 제한되기 때문이다. 참고로 일점 쇄선의 온도 거동은 연료 다발 사이의 지르칼로이 막판 (end plate)에서의 유량 혼합을 완전 혼합 (complete mixing)으로 가정한 결과로, 재배치 상황에서의 최대 산화 반응으로 인한 온도 상승을 보여주며, 온도가 발산하는 굵은 점선은 초기 형상을 계속 유지하는 경우에서의 온도 거동을 보여준다.

### 3. ISAAC의 단일 대표 연료봉 모델 평가

ISAAC에서는 연료봉, 피복재, 압력관, 칼렌드리아관, 압력관 내부의 냉각재 및 칼렌드리아관 외부의 감속재에서의 에너지 보존 방정식을 세워 열전달 현상을 모의한다. 즉, 각 구성 요소에서 열원과 열침원을 정의하고, 열전달 계수를 도입하여 미분 방정식을 작성한다. 이때 전도, 대류, 복사 효과를 고려하며, 기하학적 형상이 바뀌거나 냉각재의 상태가 바뀌는 경우까지 고려하여 열전달 계수를 계산한다. 예로, 압력관과 칼렌드리아관 사이의 열전달은 복사열, CO<sub>2</sub> 가스층에서의 열전도, 그리고 압력관이 부풀어 칼렌드리아관과 접촉하였을 때의 접촉으로 인한 열전달까지 고려하도록 상관식을 도입하여 계산한다. 특히 수평연료관의 건전성과 관련되어 관심이 되고있는 칼렌드리아관과 감속재와의 열전달은, 감속재가 있는 경우는 풀 비등, 핵 비등, 그리고 막 비등에 의한 대류 현상을 고려하고 있으며, 칼렌드리아관이 대기에 노출되어 있는 경우는 칼렌드리아 탱크 상부 대기의 온도 차이에 의한 자연 순환에 의한 대류를 고려하도록 모의하였다.

ISAAC에서 모의하고 있는 수평연료관의 형상은 그림 7에 잘 정리되어 있다. 그림에서 보듯이 칼렌드리아 탱크 내부에 수평으로 놓여있는 수평연료관은 칼렌드리아관 외벽의 감속재 수위와 연계된 열전달 현상과, 압력관 내부의 열수력 조건에서 칼렌드리아관, CO<sub>2</sub> 가스 층, 압력관, 그리고 대표연료봉에서의 열전달 현상을 다루고 있다. 그림에는 나타나있지 않지만 축 방향으로도 12개

의 연료다발을 정의하여 온도 분포를 예측하고 있다.

대형 파단사고와 발전소 정전사고에서의 ISAAC에서 예측하는 노심 내 온도 분포를 그림 8부터 그림 10에 정리하였다. 그림 8은 LOCA 사고에서 수평연료관 내부의 온도 분포를 보여주고 있는데, 위에서부터 연료봉, 피복재, 압력관, 그리고 칼랜드리아관의 순서이다. 발전소 정지이후 온도가 감소하다가 냉각재 상실로 압력관이 고갈되면서 온도는 거의 1,600° K까지 상승하고, 1시간 30분 경에는 산화반응으로 인한 급격한 발열 현상으로 연료봉 온도가 용융온도까지 도달한다. 피복재 온도는 연료봉 온도와 유사하게 변하고, 압력관 온도는 약간 낮은 온도로 쫓아가다가 산화반응이 시작되면서 바로 연료봉 온도로 접근한다. 칼랜드리아 탱크의 감속재와 닿아있는 칼랜드리아관은 감속재 온도를 유지하다가 역시 산화반응 이후 연료봉 온도에 도달함을 보여준다. 그림 9는 칼랜드리아 탱크 안에 높이별로 위치해 있는 수평연료관의 연료봉 온도를 보여준다. 높이별로 연료봉 출력이 다르긴 하지만 건전성이 손상되는 순서는 연료관 외부의 감속재의 수위에 밀접하게 연관되어 있으며, 따라서 높은 위치에 있는 연료봉부터 손상된다 (모두 6개의 수평 연료관 중 #1, #2, #3은 원자로 모관 2번과 3번에, #4, #5, #6은 원자로 모관 1번과 4번에 연결되어 있고, 서로 사이사이에 엮히도록 위치하여 높이 순서는 #1, #4, #2, #5, #3, 그리고 #6이다). 그림 10은 제일 상단에 위치한 수평연료관 (#1)의 축 방향에 위치한 연료봉들의 온도 분포를 보여준다. ISAAC에서는 축 방향으로 12개의 연료 다발에 대한 출력을 지정하여주고, 출력이 높은 중앙부터 가열되어 손상되며 출력이 낮은 가장자리로 전파됨을 알 수 있다.

#### 4. 결론

위에서 검토한 압력관 내부의 연료봉 사이의 온도 분포로부터 ISAAC에서 가정하는 단일 대표 연료봉 모델의 적용성 여부를 다음처럼 정리하였다:

- 1) 압력관 내부에 냉각수가 남아있는 동안에는 CHAN에서처럼 37개의 연료봉을 4개의 링으로 구분하여 모의해도 수위에 따른 온도 분포 효과를 평가할 수 없다. 즉, 동일한 링에 소속된 연료봉도 상부에 있으면 대기에 노출되어 가열되고, 하부에 위치한 연료봉은 냉각수 온도를 유지하게 되기 때문이다. AECL에서 수행한 실험에서 보듯이, 중대사고 환경을 모의하기 위하여 이미 압력관 내부의 냉각수는 모두 고갈되어 과열의 수증기가 차있는 경우를 모의하였고, 이 경우를 CHAN으로 해석하였다.
- 2) 수증기 환경인 압력관 내부에서 연료봉들이 처음 위치에 있다고 가정하였을 때, 지르칼로이 산화이전까지는 안쪽의 연료봉과 외곽에 위치한 연료봉 사이의 온도 차이가 최대 200° C 정도로 나타남을 확인하였다.
- 3) 압력관 내부가 수증기 환경인 경우는 이미 연료봉이 가열되어 있는 상황으로, 압력관 내부의

연료봉의 형상은 초기의 형상에서 그림 4처럼 이미 재배치되어 있을 가능성이 매우 높다. 이 경우 실험에서 나타났듯이 내부의 연료봉에서의 증기 고갈 현상이 심하여 더 이상의 온도 증가가 일어나지 않아, 내부와 외곽의 연료봉 사이의 온도 차이가 시간에 따라 증가하지 않음을 보여준다.

- 4) ISAAC 결과에서 보면 압력관 내부의 냉각수가 고갈되고 나면 연료봉의 온도는 바로 상승하여 지르칼로이 산화반응을 일으킴을 알 수 있다. 일단 압력관 내부의 연료봉의 온도가 상승하게 되어 재배치되고 나면, 그 이후의 연료봉의 형상에 대해서는 불확실성이 높아 연료봉에 대한 자세한 모델링은 큰 의미를 갖지 못한다.

따라서, 중대사고에서의 노심 열전달 현상을 모의하는 ISAAC 코드에서 압력관 내부의 37개의 연료봉을 대표 연료봉으로 정의하여 모델링하는 접근 방법은, 압력관 내부의 연료봉들을 여러 개의 링으로 구분하여 모델링하는 것에 비하여, 사고 초기 연료봉들의 재배치 이전 동안 압력관 내부에서의 연료봉들의 온도 분포를 간과하지만, 그 영향은 중대사고 관점에서 크지 않음을 확인하였다.

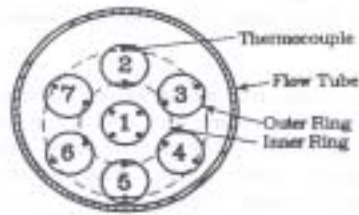
## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 중장기과제에서 재정적 지원을 받았습니다.

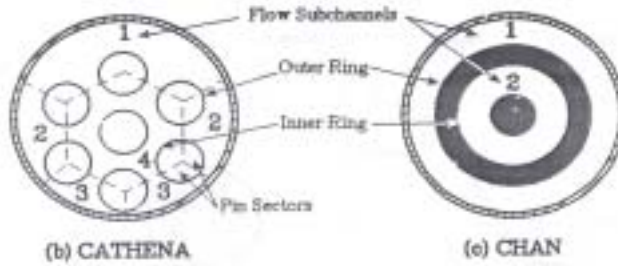
## 참고문헌

- [1] Sanderson D. B. et al., "A Blind Simulation Study of an Out-of-Pile High-Temperature Fuel Channel Experiment," presented at the 16th Annual Nuclear Simulation Symposium, Saint John, NB, 1991.
- [2] Lei Q. M. et al., "Pre-test Simulation of a 28-element High-Temperature Thermal-Chemical Experiment using the Computer Codes CATHENA AND CHAN-II-WL," presented at the 13th Annual CNS Conference, Saint John, NB, 1992.
- [3] Lei Q. M., et al., "Post-test Analysis of the 28-Element High-Temperature Thermal-Chemical Experiment CS 28-1," AECL, presented at the 4th International Conference on Simulation Methods in Nuclear Engineering, Montral, June 2-4, 1993.
- [4] Lei Q. M., et al., "Modeling Disassembled Fuel Bundles using CATHENA MOD-3.5a under LOCA/LOECC Conditions," AECL, presented at the CNA/CNS Annual Conference, Saskatoon, Saskatchewan, June 4-7, 1995.





(a) EXPERIMENT



(b) CATHENA

(c) CHAN

그림 1 실제 실험에 사용된 연료관 형상 및 코드 별 모델 방법[1]

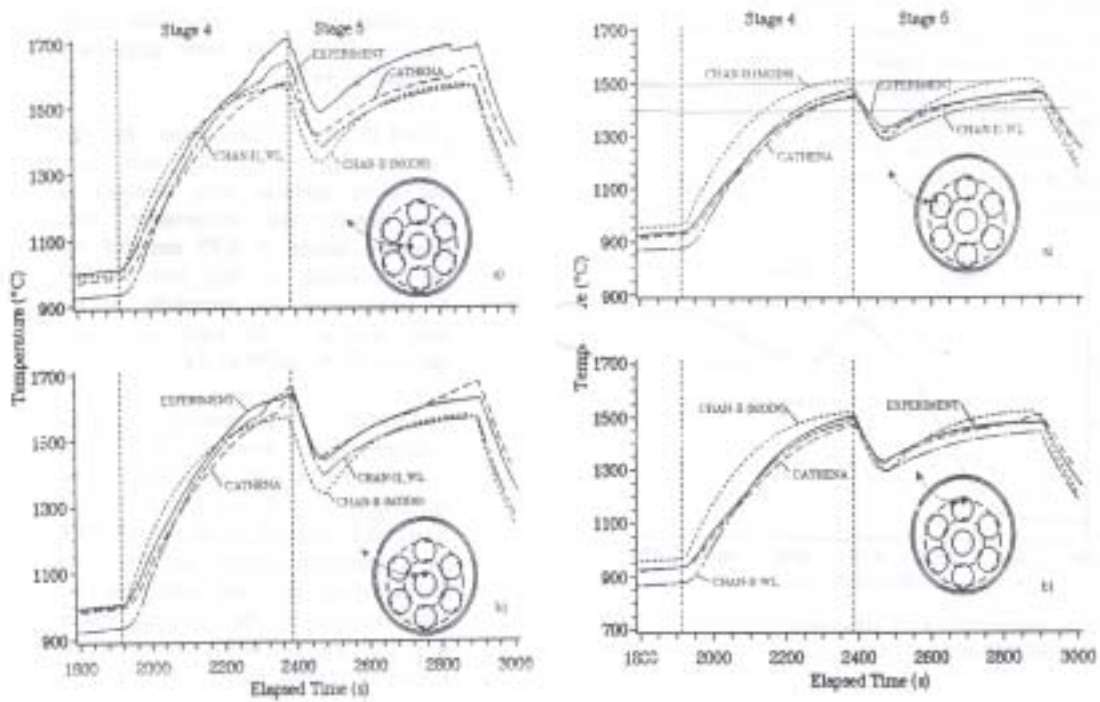


그림 2 실험, CHAN, 그리고 CATHENA에서의 연료봉 온도 거동[1]

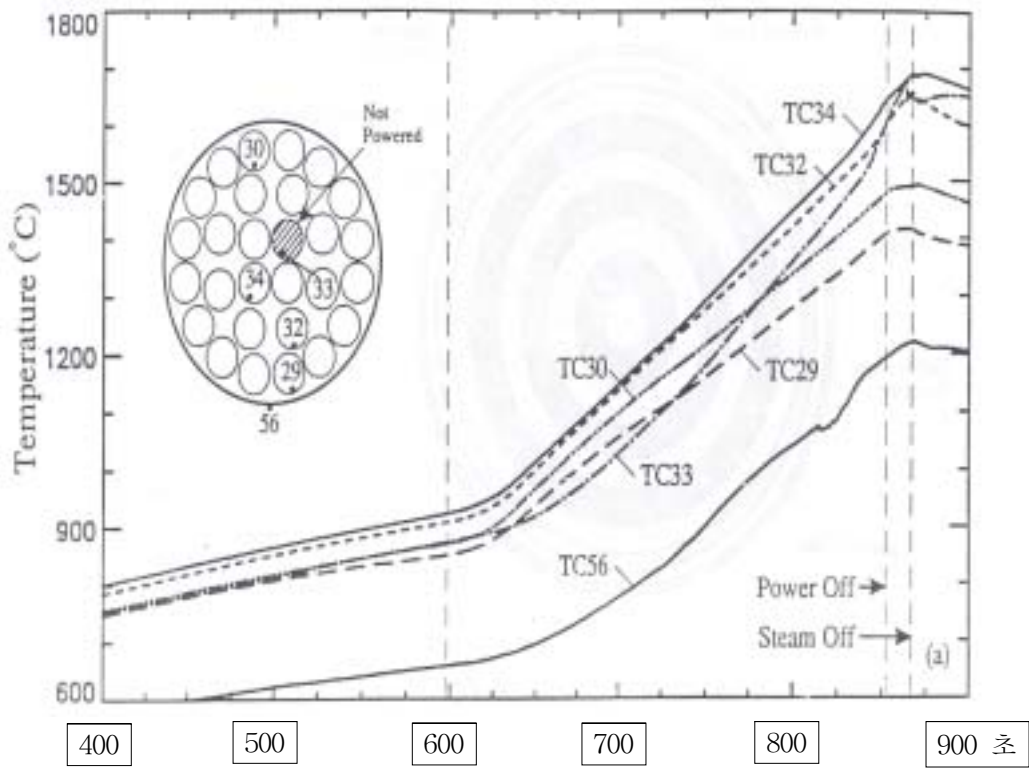


그림 3 실험에서 측정된 연료봉에서의 온도분포 [3]

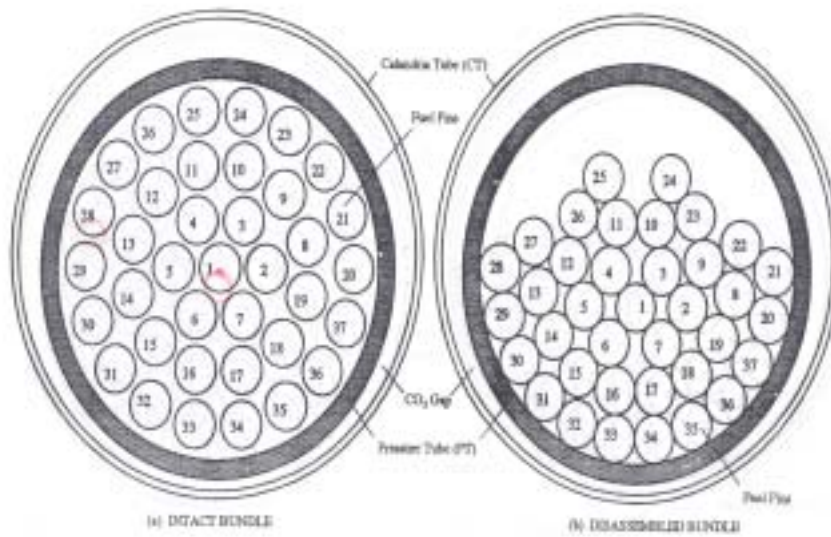


그림 4 가열 환경에서 압력관 내부에서의 연료봉의 가능한 형상 [4]

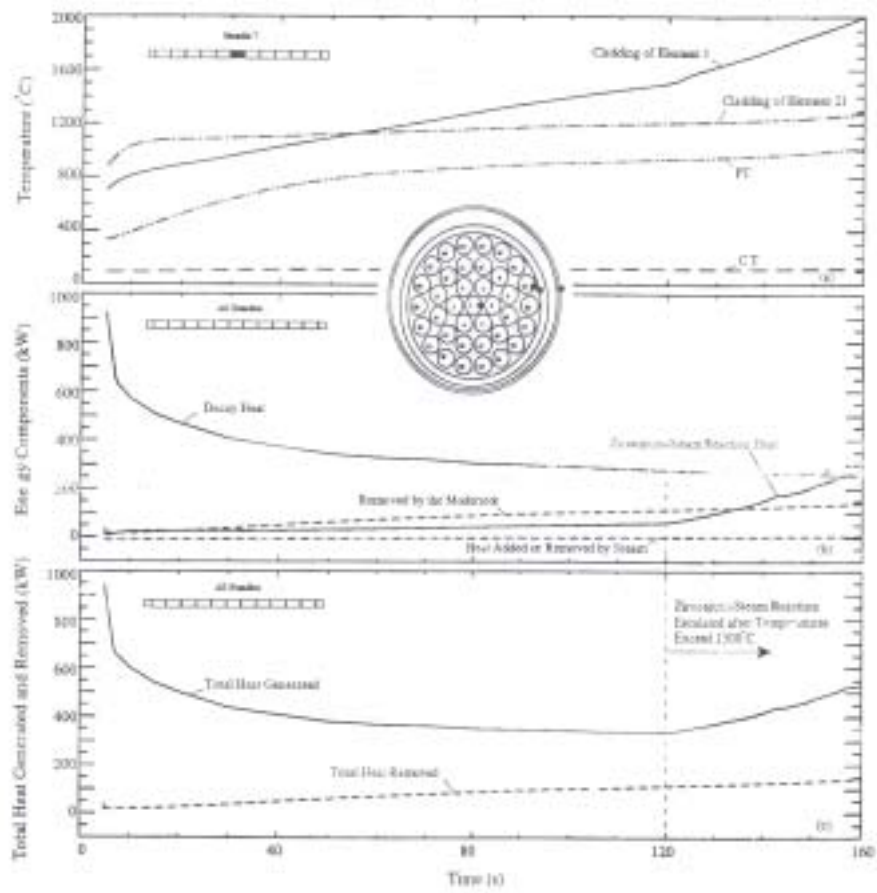


그림 5 연료봉이 제 위치에 있을 경우 CATHENA로 예측한 연료봉 거동[4]

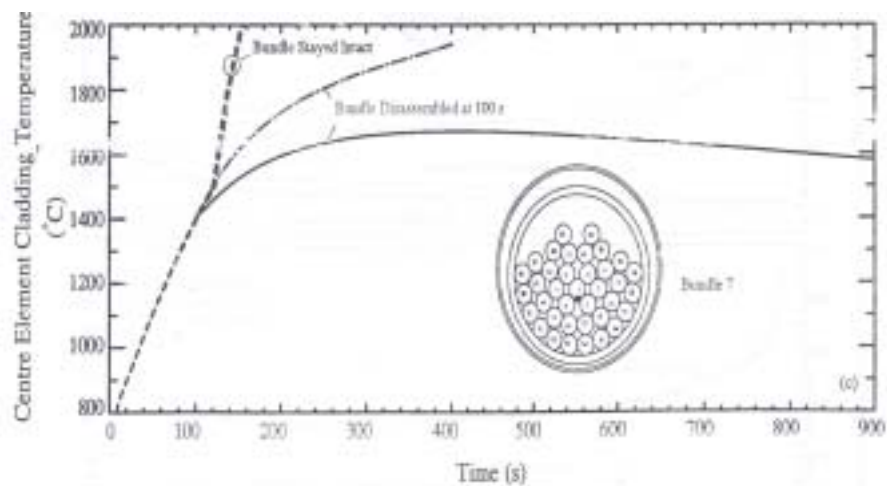


그림 6 연료봉이 재배치되었을 경우 CATHENA로 예측한 연료봉 거동[4]

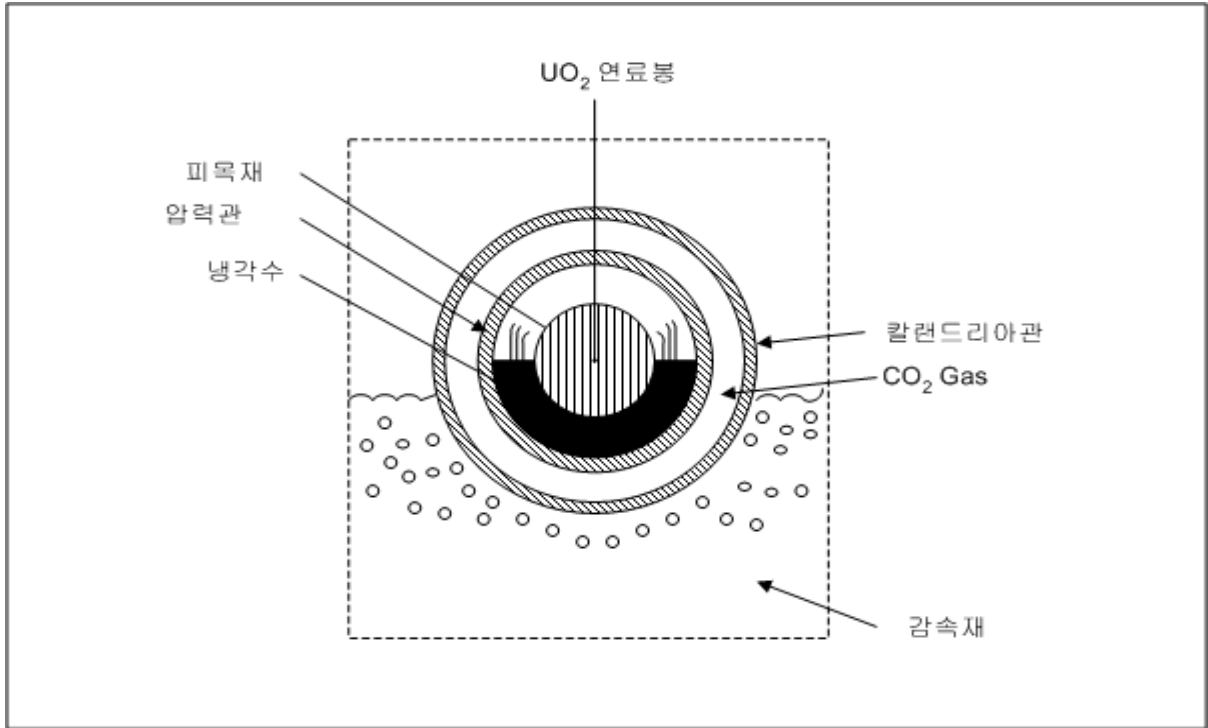


그림 7 ISAAC에서의 수평연료관 반경방향 모델링

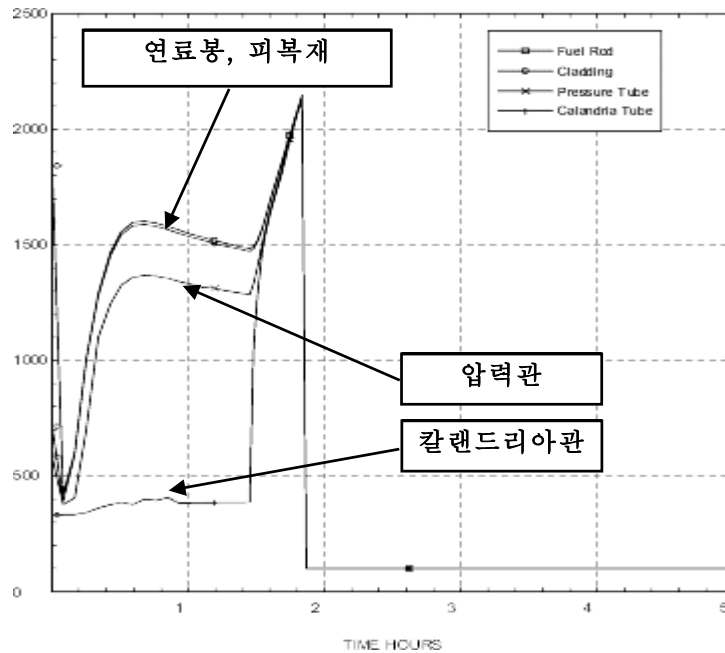


그림 8 대형 파단사고에서의 ISAAC을 이용한 수평연료관 내부 온도 분포

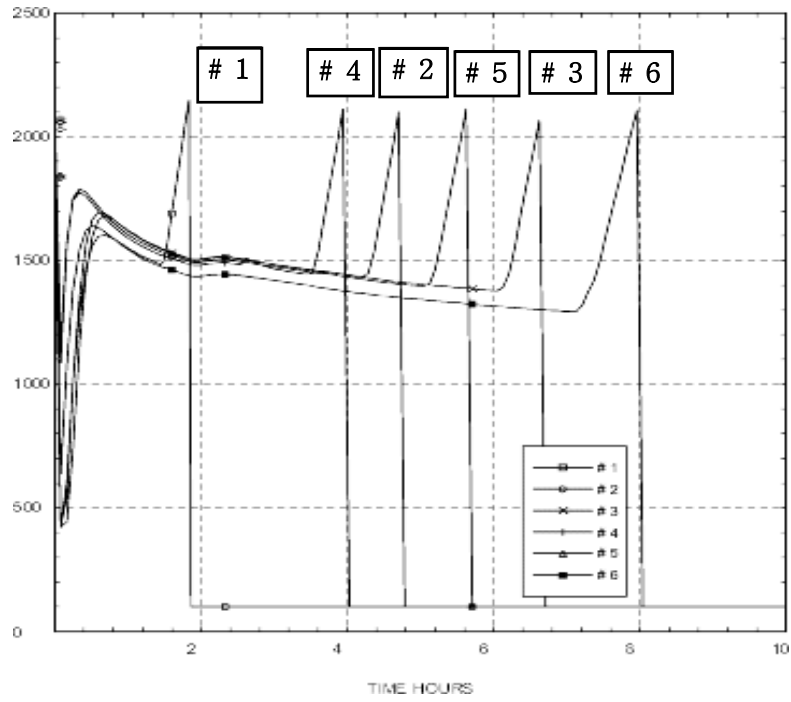


그림 9 대형 파단사고에서의 수평연료관 높이별 연료봉 온도 거동 비교

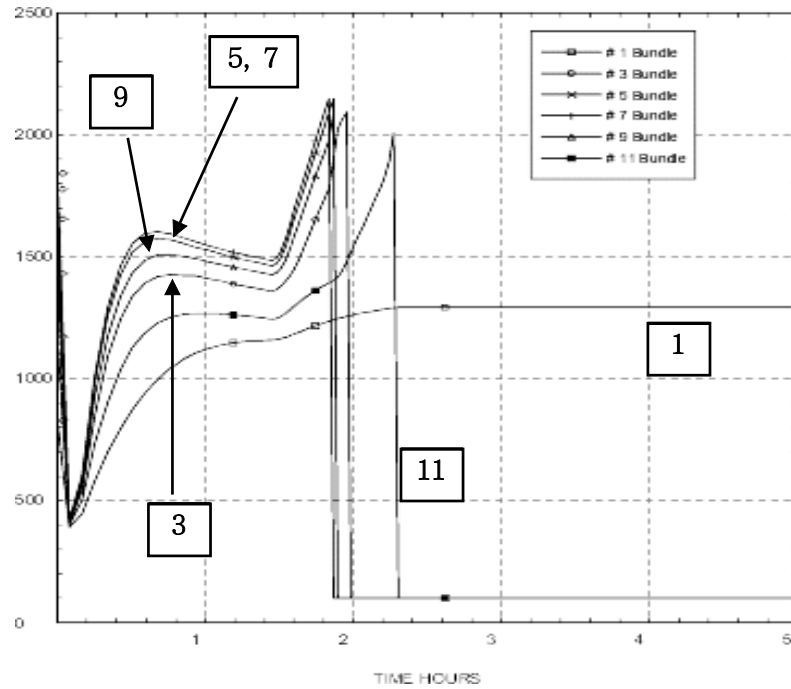


그림 10 대형 파단사고에서의 수평연료관 축 방향별 온도 거동 비교