

## CANDU 6 단일 가상사고시의 RUFIC 핵연료 안전성 평가 Safety Assessment of RUFIC Fuel for Postulated Accidents in CANDU 6

정종엽, 석호천

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요약

월성로와 같은 CANDU 6 중수로에 RUFIC (Recovered Uranium Fuel in CANDU reactors) 핵연료를 장전한 경우, 안전해석시 고려하는 가상 설계기준사고들 중에서 핵연료 손상이 발생하는 사고인 피더 파단사고, 채널유로 차단사고, 종단이음관 파손사고, 압력관 파손사고 등에 대해 안전성 평가를 수행하였고, 그 결과를 기존 37개봉 천연우라늄 핵연료와 비교하였다. 본 안전해석은 월성 2/3/4호기의 최종 안전성 분석보고서에서 사용되었던 방법론을 이용하였으며, 정상상태에서의 핵분열 생성물 재고량, 각 사고 개시 이후 과도기간동안의 채널건전성, 핵분열생성물 누출량, 그리고 용융물 생성량 등에 대한 평가를 수행하였다. 각 사고에 대한 안전성 분석 결과, RUFIC 핵연료가 기존 37개봉 핵연료에 비해 안전성이 향상됨을 확인할 수 있었다.

### Abstract

The safety assessment of RUFIC (Recovered Uranium Fuel in CANDU reactors) fuel in the CANDU reactor was carried out for the postulated accidents which resulted in fuel failures such as feeder break, channel flow blockage, end fitting failure, and pressure tube rupture. The assessment results were compared to those of the existing 37-element NU (Natural Uranium) fuel. The safety analysis methodology used in Wolsong 2/3/4 final safety analysis report was adopted for the safety analysis of RUFIC fuel. The fission product inventory during the steady state, channel integrity, molten material mass, and release of the fission product during the transient after the accident were evaluated for each postulated accident. The analysis results indicate that the safety margin of the reactor with RUFIC fuel was enhanced compared to that with the existing 37-element NU fuel.

### 1. 서론

순환우라늄을 핵연료로 이용하는 RUFIC (Recovered Uranium Fuel In CANDU reactors) 핵연료 다발[1]은 이미 KAERI와 AECL이 공동으로 개발 완료한 CANFLEX-NU (Natural Uranium) 핵연료다발[2]의 기하학적 특성의 이점을 유지하는 CANFLEX 핵연료다발 설계를 채택하고, 우라늄 농축도가 0.72 w/o인 천연우라늄대신에 농축도가 보다 높은 0.92 w/o의 저농축 순환우라늄을 핵연료로

사용하고 있다. CANFLEX 43봉 핵연료다발은 중수로용 기존 37개 핵연료봉다발과 핵연료봉 직경 및 배열은 다르지만 CANDU 6 중수원전의 핵연료장전계통과 양립하고, 또한 핵연료 성능 면에서도 우수하다. CANFLEX 핵연료다발은 기존 37개 핵연료봉다발과 비교하여 다음과 같은 두 가지 개선된 설계 특성을 가진다. 첫째, CANFLEX 43개 핵연료봉다발에서는 중심봉과 내환봉의 직경이 보다 크고 중환봉과 외환봉의 직경이 보다 작다. CANFLEX 핵연료다발은 직경이 다른 두 가지 연료봉을 가짐으로 인해 연료봉 선출력 침투치를 약 20% 정도 감소시킨다. 이러한 낮은 연료봉 선출력 침투치는 CANDU 원자로의 안전여유도를 향상시키는 역할을 한다. 둘째, “button”이라 불리는 CHF 향상물이 각 핵연료봉의 최적위치에 부착되어 있어, 임계채널출력 (critical channel power, CCP)을 약 5% 이상 증가시킴으로써 운전여유도를 향상시킨다[3]. 이러한 CANFLEX 다발의 구조를 가지는 RUFIC 핵연료는 또한 고연소가 가능한 순환우라늄을 사용하기 때문에 노내 장전 시 체류시간이 길어지는 등의 핵연료 효율을 증대시켜 경제성을 향상시킬 것으로 기대된다.

그러나 RUFIC 핵연료다발의 경우, 채널내 열수력 특성 변경과 노심 특성 변화로 인해 사고가 발생했을 경우 핵연료 거동을 상당히 변화시킬 것이고, 궁극적으로 안전성 여유도가 RUFIC 다발에 의해 영향을 받게 될 것이다. 중수로에서 안전해석시 고려하는 가상 설계기준사고들 중에 핵연료 손상을 발생하는 사고로는 대형냉각재 상실사고, 피더파단사고, 채널 유로차단사고, 압력관 파단사고, 종단이음관 파손사고 등이 있다. 본 연구에서는, 이들 사고 중 피더파단사고, 채널 유로차단사고, 압력관 파단사고, 종단이음관 파손사고에 대해 안전성 평가를 수행하였으며, 각각의 가상 사고에 대해 영향을 받은 단일채널에서의 계통 열수력 거동, 핵연료 채널 거동, 사고시점에서의 핵분열생성물 재고량과 과도 기간동안의 핵분열 생성물 누출량 그리고 용융물 생성량 평가에 대해 고찰하였다. 안전성 해석방법은 월성 2/3/4호기 FSAR[4]에 제시된 방법론을 이용하였다. 이러한 분석으로부터 RUFIC 다발이 중수로에 장전되었을 경우 핵연료 손상을 발생하는 가상사고에 대한 안전성을 기존의 37개봉 천연우라늄 핵연료다발의 것과 비교하였다.

## 2. 피더파단사고 안전성 분석 결과

안전 분석을 위한 극한 출력 경계곡선은 그림 1과 같이 노심 해석으로부터 구한 기준 과출력 경계곡선을 수정하여 다발 출력에 대해 최대 출력이 극한 조건과 같아지도록 수정하여 구하였다. 각 봉에 대한 출력/연소도 이력은 극한 출력 곡선과 사고 시점에서의 각 다발의 출력 값을 이용하여 결정하였고 정상상태 계산에 이용하였다.

### 2.1 계통 열수력 분석 결과

계통 열수력 분석은 CANDU 6 안전성 분석용 이상유체 비균질/비평형 열수력 분석코드인 CATHENA[5]를 이용하여 수행하였다. 정상상태 열수력 계산은 3000초까지 수행하였고, 정체와 비정체 파단 면적은 각각  $20\text{ cm}^2$ 과  $40\text{ cm}^2$ 를 적용하였다. RUFIC 핵연료다발과 37개봉 핵연료다발이 수력학적으로는 거의 유사한 거동을 보였지만, 연료봉 온도 분포는 반경 방향 및 축방향 출력 분포에 대응하는 분포를 가지기 때문에 두 다발에서 다르게 나타난다.

### 2.2 핵연료채널 분석 결과

**정체 피더파단:** 정체 피더파단시 채널 파손이 발생하며, 채널 파손 시점과 그 시점에서의 채널 조건은 파단 크기에 따라 크게 좌우된다. 파단 직후 채널 유량은 급격히 감소 및 역전되며, 채널 파손이 발생하기 12초 전에 월성 2/3/4 37개 핵연료봉 다발의 경우와 같이 RUFIC 다발의 경우에도  $17.75 \text{ cm}^2$ 에서 정체 조건에 가장 가까워진다. 그림 2는 각 연료봉에서의 핵연료 중심 온도를 보여 주는데, 과도동안 모든 연료봉에 대해 RUFIC 다발의 핵연료 온도가 37개 핵연료봉 다발에 비해 낮음을 알 수 있다. 한편 핵연료피복관 온도 계산 결과에서도 RUFIC 다발이 보다 낮은 온도를 가진다. 이는 RUFIC 다발의 기하학적 구조 특성과 연계하여 반경 방향 및 축방향 출력 분포 등의 노심 특성이 채널 건전성 측면에서 긍정적으로 작용한다는 것을 보여준다고 할 수 있다.

**비정체 피더파단:** 비정체 피더파단시 채널 분석은 CATHENA 계통 열수력 분석으로부터 얻어진 모관 경계조건을 사용하여 수행되며, 단지 채널 파손 시점이 원자로 트립 시점에 가장 근접하는 파단크기를 조사한다. 조사 결과에 따르면  $37 \text{ cm}^2$ 의 파단 크기가 극한 비정체파단을 대표하는 것으로 선정되었다. 37개 핵연료봉 다발에서 원자로트립 시점과 채널파손 시점은 각각 162.7초와 152.5초이고, RUFIC 다발에 대해서는 각각 163.0초와 144.5초이다. RUFIC 다발의 경우 축방향 출력 분포가 앞쪽으로 치우쳐 있기 때문에 이 영역에서 다발출력이 높아서 37개 핵연료봉 다발에 비해 압력관 접촉이 약 8초 일찍 발생한다. 그림 5는 과도기간동안 ELOCA-MK6 코드[6]로 계산한 다발 5에서 다발 9까지의 외환봉에 대한 핵연료 중심선 온도 결과로, 가장 높은 경우에도 핵연료 용융 온도 ( $2840^\circ\text{C}$ ) 이하로 핵연료 온도가 유지되고 있음을 보여주고 있다.

## 2.3 핵분열생성물 누출 평가 결과

**핵분열생성물 재고량:** ELESTRES 전산코드[7]를 사용하여 사고시점까지의 핵분열생성물 재고량을 계산한 결과, 표 1에 나타낸 바와 같이 전체 채널에 대하여 대부분 핵종의 경우 RUFIC 다발이 37봉 다발에 비해 평균 약 8%정도 적게 생성되었음을 확인하였다.

**정체 피더파단:** ELESTRES와 CATHENA 핵연료채널 분석에서 각각 구한 핵분열생성물 재고량과 핵연료 및 핵연료피복관 온도를 가지고, Gehl 모델[8]을 이용하여 채널파손시점에서의 핵분열생성물 누출량을 계산하였다. 그림 3은 핵분열생성물 총 누출량 과도를 보여주는 것으로 RUFIC 다발의 누출량이 37개 핵연료봉 다발에 비해 약 40% 작게 예측되었다.

## 2.4 용융물질 평가 결과

37개 핵연료봉 다발과의 상대적 안전성 평가를 위해 채널파손시점에 대한 기준으로 부품기준과 피복관 용융기준 모두를 사용하여 용융 물질 평가를 수행하였다. 부품기준의 경우, 채널 파손 후 2초 (보수적으로 압력관/칼란드리아관 접촉 시점 이후 2초) 경과후  $\text{UO}_2\text{-Zr}$  합금,  $\text{UO}_2$  및 피복관의 용융량을 계산한 결과, 최대 총 용융량은 19.8 kg으로 37개 핵연료봉 다발에 비해 약간 적게 예측되었다. 압력관 용융기준의 경우에도, 피복관 용융개시 후 4초 경과 시점에서의  $\text{UO}_2\text{-Zr}$  합금,  $\text{UO}_2$  및 피복관의 용융량을 계산한 결과, RUFIC 다발의 경우 약 35% 낮게 예측되었다. 이는 RUFIC 다발의 경우, 파단크기가 증가함에 따라 피복관 용융시점이 37개 핵연료봉 다발에 비해 빨라지므로 용융되는 물질의 양도 상대적으로 적어지기 때문이다.

### 3. 채널유로차단사고 안전성 분석 결과

분석 목적을 위해 “차단 (blockage)”을 단일 채널에서 유동저항이 급격히 증가하여 냉각재 유량이 줄어드는 것으로 정의하며, 보수적인 계산을 위해 채널 입구에서 차단이 발생하는 것으로 가정하였다. 냉각재 유동을 심각하게 제한하는 대형 유로 차단인 경우, 채널 내에서 과열 증기가 생성되고 이로 인해 핵연료다발과 압력관이 급격히 가열되고 따라서 압력관과 칼란드리아관 파손이 초래된다.

#### 3.1 계통 열수력 분석 결과

유로차단에 대한 계통 열수력 분석은 채널입구에 유동저항계수 값을 각각  $10^{10}$ 과  $10^4$ 을 적용하여 완전차단과 부분차단 두 가지 경우를 수행하였다. 그림 4는 두 핵연료다발에 대한 유동차단 시, 모관 압력의 변화를 보여 준다. 표 2에서 보여진 채널 파손 시간 및 파손 위치의 차이 때문에 계통 변수들의 경향이 다소 달라지긴 하지만, 일반적인 수력학적 거동은 유사하다고 볼 수 있다. 그러나 영향 받는 채널에서의 반경 방향 및 축 방향 온도 분포는 출력 분포에 대응하기 때문에 두 다발에 대해 다른 양상을 보인다.

#### 3.2 핵연료채널 분석 결과

채널 파손이 발생할 수 있는 유량 영역인 0.0 kg/s와 3.4 kg/s사이에서 13 가지의 서로 다른 유량에 대해 채널 O6\_mod에 대한 분석을 수행하였다. 그림 5는 서로 다른 유량 조건에 대해 최대 출력 다발에 상응하는 최상부 핵연료 및 핵연료피복관 온도 결과를 보여준다. 이 분석은 채널 파손의 열수력 효과를 모사하지 않았기 때문에, 핵연료 및 채널이 채널파손 (“압력관 팽창” 및 “피복관 용융” 파손) 시간 이후까지 비현실적으로 계속 가열된다. 37개봉 핵연료다발에 비해 RUFIC 핵연료다발에서는 침투 출력이 보다 채널 입구 쪽 다발에서 발생하기 때문에, 초기 핵연료 온도는 RUFIC 핵연료다발에서 보다 낮다. 그러나 연료봉 가열율이 비슷하기 때문에 전체 과도동안 RUFIC 핵연료다발의 핵연료 온도는 37개봉 핵연료다발에 비해 낮은 값을 보인다. 이러한 특성은 유량이 작은 경우에 더욱 현저하며, 유량이 증가하면 핵연료봉 온도거동은 성층화 조건에 의존한다. 표 3과 4는 각각의 유량에 대한 압력관/칼란드리아관 접촉 시점 및 하부 핵연료봉의 핵연료피복관 내면에서의 용융시점을 보여 준다. 표 3에 따르면 두 다발 모두에서 압력관 접촉 시간은 유량에 따라 단조롭게 증가하며, RUFIC 핵연료다발의 경우가 대체로 압력관 접촉 시간이 길어지는데 이는 43개봉 다발 구조의 특성인 유동 면적 증가에 의한 열제거량 감소 (증기에 의한 대류열전달 계수의 유체 속도 의존성 때문에 RUFIC 핵연료다발의 경우 유동 면적의 증가로 인한 유체 속도 감소로 대류 열전달량이 37개봉 핵연료다발에 비해 작아짐)와 복사 열전달 감소로 압력관 가열이 느리기 때문이다. 또한 RUFIC 핵연료다발의 경우 과도동안 핵연료 온도가 37개봉 핵연료다발에 비해 낮기 때문에 표 4의 결과와 같이 피복관 용융에 의한 채널파손시점도 지연된다.

#### 3.3 핵분열생성물 누출 분석 결과

심각한 유로차단 후, 최대 출력 채널 (O6\_mod)의 모든 핵연료봉 (RUFIC인 경우는 516개, 37개봉인 경우는 444개)으로부터 간극 재고량,  $UO_2$  결정립계 및 결정립내 재고량이 사고 시점에 핵연료로부터 누출되는 것으로 가정하였다. 따라서 채널내 총 재고량이 누출되므로 RUFIC 핵연료다발의 경우가 37개봉 핵연료다발의 경우보다 핵분열생성물 누출량이 약 8% 적게된다.

### 3.4 용융물질 생성량 분석 결과

용융 물질 평가는 채널 파손 시간 2초 후의 핵연료 및 피복관 온도를 근거로 하여 수행되었고, 채널파손시점에 대한 기준으로 팽창기준과 피복관 용융기준 모두를 사용하여 용융물질 생성량 평가를 수행하였다. 팽창기준의 경우, 채널파손시점에 근거한 채널 파손 후 2초 (보수적으로 압력관/칼란드리아관 접촉 시점이후 2초) 경과 후  $UO_2$ -Zr 합금,  $UO_2$  및 피복관의 용융량 계산결과를 표 5에 나타내었다. 채널이 파손되기 전까지 RUFIC 핵연료다발의 모든 핵연료 및 피복관 온도가 37개봉 핵연료다발의 경우에 비해 낮지만, 채널파손시점의 지연으로 인해 최대 총 용융량은 20.4 kg으로 37개봉 핵연료다발에 비해 약간 높게 예측되었다. 압력관 용융기준의 경우도 RUFIC 핵연료가 37개봉 핵연료에 비해 채널 파손시점이 지연되며 피복관 용융개시 후 4초 경과 시점에서의  $UO_2$ -Zr 합금,  $UO_2$  및 피복관의 용융량을 계산한 결과, 최대 용융 물질량은 37개봉 경우는 1.2 kg/s 유량에서 40.1 kg, RUFIC 경우는 0.0 kg/s 유량에서 21.9 kg (45% 감소)으로 예측되었다.

## 4. 종단이음관 파손사고 안전성 분석 결과

핵연료채널에서 종단이음관 파손이 발생하면, 채널로부터 모든 핵연료다발들이 파손된 종단이음관을 통하여 고압의 냉각재에 의해 빠른 속도로 방출되며 핵연료교환기실에 도달할 때 파손된다. 이때 일부 핵연료봉은 봉단접합관으로부터 분리되고 여러 조각으로 부서지어 파편화되며, 파편화된 핵연료의 핵분열생성물 간극재고량 (gap inventory)은 격실대기로 즉발방출 (prompt release) 되고, 이후 계속해서 핵연료의 초기 파손 정도, 핵연료의 가열정도 및  $UO_2$ 의 산화율 등에 따라 핵연료 결정립내 재고량으로부터 핵분열생성물의 지발방출 (delayed release)이 발생한다.

### 4.1 핵분열생성물 재고량 계산 결과

사고시점까지 정상상태 동안의 핵분열생성물 재고량은 앞서 언급한 두 사고의 경우와 같은 결과를 보인다. 생성된 방사성핵종의 대부분은 단수명 핵종으로, 이들은 연소도 보다는 출력 크기에 따라 재고량 크기가 결정되는 양상을 보이는데, RUFIC 다발의 경우 37개봉 핵연료다발에 비해 외환봉, 중간봉에서 훨씬 작은 출력으로 연소되기 때문에, 핵분열생성물 재고량도 37개 핵연료봉 다발에 비해 적게된다.

### 4.2 핵연료 파편의 온도과도상태 계산 결과

그림 6은 채널 내 RUFIC 핵연료다발 중 최대 출력을 보이는 다발 5 (핵연료 채널의 냉각재 입구에서 5번째 다발)의 외환봉에 대해 핵연료 파편의 크기가 1, 2, 4, 8 mm인 각각의 경우에 대하여 계산한 온도과도 결과를 보여주고 있다. 사고시점에서의 핵연료온도는 37개봉 핵연료에 비해

RUFIC 핵연료가 낮지만 사고 후 핵연료 파편의 온도변화는 비슷하게 나타났다. 핵연료 파편의 온도는 핵연료 파편의 산화율과 산화된  $UO_2$ 로부터의 핵분열생성물 누출율에 영향을 끼치며 따라서 지속적인 핵분열생성물 누출량을 결정하는 중요 인자이다.

### 4.3 핵분열생성물 누출량 평가 결과

**핵연료 파편 크기 1 mm 인 경우:** 즉발 방출량은 핵연료의 파편화 후 바로 방출되는 소결체-피복관 틈새 재고량과 결정립계 재고량으로 구성된다. 누출되는 결정립계 재고량은 소결체내 총 결정립 표면적에 대한 노출된 표면적의 비율과 같다고 가정하고 계산한 결과, 총 즉발방출량은 37개봉 핵연료다발과 RUFIC 핵연료다발에서 각각 153.24 TBq와 31.47 TBq 이었다. 한편, REDOU 코드[9]를 이용하여 핵연료 파편의 산화에 따라 누출되는 I-131의 지발방출량 계산결과를 표 6에 정리하였다. 채널 전체의 I-131 누출량 결과를 비교해보면, 37개봉 핵연료다발 채널은 732.5 TBq 그리고 RUFIC 핵연료다발 채널은 304.4 TBq로 RUFIC 핵연료다발의 경우 약 59% 정도 감소했음을 알 수 있다

**핵연료 파편 크기 8 mm 인 경우:** 앞의 파편크기 1 mm인 경우와 같은 방법으로 계산한 즉발방출량은 37개봉 핵연료다발과 RUFIC 핵연료다발에서 각각 116.44 TBq와 16.77 TBq 이며, 지발방출량 결과는 표 7에 정리하였다. 채널 전체의 I-131 누출량 결과를 비교해보면, 37개봉 핵연료다발 채널은 696.4 TBq 그리고 RUFIC 핵연료다발 채널은 463.9 TBq로 RUFIC 핵연료다발의 경우가 약 33% 정도 감소했음을 알 수 있다.

## 5. 압력관 파단사고 안전성 분석 결과

보통의 경우, 압력관의 균열이 임계크기에 도달하기 전에 압력관 누설이 발생하는 파단전 누설(leak-before-break)이 발생하지만, 분석에서는 보다 심각한 경제적 손실을 야기할 것으로 예상되는 자발 압력관 파단과 같은 가장 심각한 경우를 가정한다. 파단 압력관을 둘러싸고 있는 칼란드리아관도 동시에 파손되는 것으로 가정하여 채널내의 핵연료가 감속재로 방출되도록 한다. 만일 압력관이 파단된 후 칼란드리아관이 건전성을 유지한다면, 냉각재 압력에 의한 높은 응력 때문에 벨로우즈가 손상될 수 있다. 벨로우즈 손상 이후의 거동은 노외 소형파단과 유사한 경우가 되고, 또한 채널 유동 정체를 일으키는 보다 작은 압력관 파단에 대한 냉각재계통의 거동은 피더파단과 유사하므로 기 수행된 피더파단사고 해석 결과의 범주 내에 속한다.

파단채널 이외의 채널에서는 핵연료 손상이 예견되지 않으므로 손상된 채널에 대해서만 분석을 수행한다. 파단채널 내의 모든 핵연료피복관은 사고 순간에 파손이 가정되어 간극재고량의 핵분열생성물을 즉각적으로 방출하게 된다. 만일 핵연료 소결체가 피복관으로부터 분출되어 조그만 파편으로 부서지면 입계재고량 일부가 누출될 수 있다. 상한치로 전체 채널의 간극과 입계재고량이 사고 시작과 동시에 누출된다고 가정한다. 핵연료 온도가 상대적으로 낮기 때문에 사건동안 결정립으로부터의 과도상태 누출은 예상되지 않는다. 따라서 핵분열생성물 계산에 열수력 계산 결과는 필요치 않다.

**핵분열생성물 누출량 평가 결과:** 사고 시점에서의 핵분열생성물 재고량은 피더파단 사고에서

의 결과와 같이 RUFIC 핵연료다발의 경우가 기존 37개봉 핵연료다발에 비해 약 8% 정도 적게 생성된다. 한편 사고순간 파단채널 내에서는 핵연료 파손이 가정되므로 채널로부터의 요오드와 불활성기체의 핵분열생성물이 누출된다. 사고 시작시점에서 총 누출량은 37개봉 핵연료에 비해 약 54% 정도 적게 얻어졌다. 여기서 총 누출량은 총 간극재고량과 총 입계재고량의 합이다. 사고동안에 구속재고량의 과도상태 누출은 예상되지 않으므로, 총 누출량은 사고 시작시점에서의 값과 동일하다.

## 6. 결 론

핵연료 손상이 발생하는 가상사고인 피더 파단사고, 채널유로 차단사고, 종단이음관 파손사고, 압력관 파손사고 등에 대해 RUFIC 핵연료의 안전성 평가를 수행하였고, 그 결과를 기존 37개봉 천연우라늄 핵연료와 비교하였다. 각 사고의 경우 모두 계통 열수력 거동은 RUFIC 핵연료와 37개봉 핵연료다발을 장전한 경우 거의 동일한 결과를 얻었지만, 반경방향과 축방향으로의 온도분포는 RUFIC 핵연료다발의 경우가 낮은 경향을 보였다. 이는 온도분포가 핵연료다발의 출력분포에 상응하기 때문이며, 이러한 양상은 채널 건전성 측면과 핵분열 생성물 재고량에 긍정적인 영향을 끼치게 됨을 확인하였다. RUFIC 핵연료다발에 대한 핵분열생성물 재고량은 37개봉 핵연료다발에 비해 8% 적게 예측되었고, 이는 보다 낮은 핵연료 온도 분포로 인해 대부분의 방사성 핵종들이 결정립계나 간극으로 확산되지 못하고 결정립내에 갇히기 때문이다.

이와 같은 결과로부터 CANDU 6와 같은 중수로에 43개봉 RUFIC 핵연료다발을 장전할 경우 본 연구에서 고려한 가상사고들에 대해 기존의 37개봉 핵연료다발에 비해 핵연료채널 건전성과 용융물질 생성량 및 핵분열생성물 누출량 모든 측면에서 안전성이 향상됨을 확인하였다.

## 후 기

본 논문은 과학기술부의 원자력 중장기 연구개발 사업의 일환으로 수행되었다.

## 참 고 문 헌

- [1] H.C. Suk, et al., "Basic Research and Industrialization of CANDU Advanced Fuel," KAERI/RR-2011/99, May 2000.
- [2] H.C. Suk, et al., "CANFLEX-NU Fuel Design Report," KAERI/TR-681/95, June 1996.
- [3] J.H. Park, et al., "The Effect of Fuel Bundle Appendages on Critical Heat Flux and Critical Channel Power," KAERI/TR-906/97, August 1997.
- [4] "Wolsong Unit 2/3/4 Final Safety Analysis Report," KEPCO, 1995.
- [5] B.N. Hanna, Editor, "CATHENA MOD-3.5/rev.0 Theoretical Manual," RC-982-3/COG-93-140(Vol.3) Rev0.0, AECL/Whiteshell Lab., October 1995.
- [6] J.W. Lian and L.N. Carlucci, "ELOCA.MK6 Mod 0: Users Manual," COG-94-270, RC-1236, 1996.

- [7] M. Tayal, "Modelling CANDU Fuel under Normal Operating Conditions: ELESTRES Code Description," AECL-9331, 1987, "Users' Manual for the M11C Version of the ELESTRES Code" TTR-234A, February 1989.
- [8] S.M. Gehl, "The Release of Fission Gas during Transient Heating of LWR Fuel," Argonne National Lab. Report ANL-80-108, March 1981.
- [9] K.M. Lee, "Computer Codes for Fission Product Releases from Fuel (ELESTRES, COREFPR and REDOU): Model Descriptions and Input Data," AECL Analysis Report, 86-03500-AR-038, Rev. 0, 1992.



표 1 채널 O6\_mod내의 총 재고량 (TBq)

핵종	반감기	채널내 총 재고량 (TBq)	
		37봉 다발	RUFIC 다발
I-131	$6.95 \times 10^5$	7682.0	7085.72
I-132	$8.23 \times 10^3$	11870.52	11016.75
I-133	$7.49 \times 10^4$	18548.51	17216.85
I-135	$2.37 \times 10^4$	17417.45	16166.43
I-137	$2.45 \times 10^1$	9307.51	8664.08
KR-83M	$6.70 \times 10^3$	1435.51	1332.26
KR-85M	$1.61 \times 10^4$	3505.65	3253.78
KR-85	$3.38 \times 10^8$	23.79	25.73
KR-87	$4.56 \times 10^3$	6819.05	6328.22
KR-88	$1.01 \times 10^4$	9634.02	8941.50
KR-89	$1.90 \times 10^2$	12647.38	11776.95
XE-133M	$1.93 \times 10^5$	524.42	486.74
XE-133	$4.57 \times 10^5$	17061.66	15786.22
XE-135M	$9.18 \times 10^2$	2982.75	2766.99
XE-135	$3.30 \times 10^4$	1987.38	1844.67
XE-137	$2.29 \times 10^2$	17071.64	15899.34
XE-138	$8.52 \times 10^2$	17040.73	15807.74
I-134	$3.16 \times 10^3$	20762.21	19266.49
총 량		176322.2	163666.2

표 2 채널 O6\_mod에 대해 파단유형별로 예측된 채널파손 위치 및 채널 파손시간

차단 유형	채널입구에 서의 K 인자	채널파손 위치(다발사이)		채널파손시간(초)	
		37개봉 다발	RUFIC 다발	37개봉 다발	RUFIC 다발
완전 차단	$10^{10}$	6 과 7	4 와 5	10.0	12.6
부분 차단	$10^4$	11 과 12	10 과 11	20.5	23.5

표 3. 유로차단시 채널 O6\_mod의 압력관/칼란드리아관 접촉 시간 및 위치

유량(kg/s)	첫 번째 압력관/ 칼란드리아관 접촉시간(초) (위치)		압력관파손 <sup>1</sup> 시간(초) (위치)	
	37봉 다발	RUFIC 다발	37봉 다발	RUFIC 다발
	0.0	10.0(7)	12.5(5)	17.6(3)
0.5	10.9(7)	12.7(8)	20.3(3)	23.0(2)
0.9	12.9(7)	15.2(11)	39.5(2)	30.0(2)
1.2	15.3(11)	16.1(11)	49.9(2)	36.2(2)
1.5	17.0(11)	17.7(11)	60.0(2)	43.4(2)
2.0	22.4(11)	21.7(11)	발생 없음	52.7(2)
2.5	29.5(11)	29.8(12)	발생 없음	75.3(2)
2.9	44.9(11)	44.5(12)	발생 없음	발생 없음
3.4	발생 없음	발생 없음	발생 없음	발생 없음

표 4 유로차단시 채널 O6\_mod의 피복관 용융에 의한 채널 파손 시간 및 위치

유량 (kg/s)	하부 핵연료봉의 핵연료피복관 내면에서의 용융시점 (초) (위치)		최상부 핵연료봉 중심선 용융시간 (초) (위치)	
	37개봉 다발	RUFIC 다발	37개봉 다발	RUFIC 다발
	0.0	12.1(8)	14.2(8)	17.3(6,7)
0.5	12.8(6)	14.2(6)	18.2(6)	발생 없음
0.9	20.1(6)	23.1(5)	19.5(6)	29.6(4,5)
1.2	47.3(9)	발생 없음	20.6(6)	34.1(4)
1.5	발생 없음	발생 없음	21.6(6)	39.1(4)
2.0	발생 없음	발생 없음	23.4(6)	49.2(4)
2.5	발생 없음	발생 없음	25.0(6)	발생 없음
2.9	발생 없음	발생 없음	26.6(6)	발생 없음
3.4	발생 없음	발생 없음	28.1(6)	발생 없음

표 5 유로차단시 채널 O6\_mod에 대해 유량에 따라 압력관/칼란드리아관  
접촉이후 2초 경과 시점(팽창기준)에서 평가된 용융물질 질량

유량 (kg/s)	UO <sub>2</sub> -Zr		UO <sub>2</sub>		피복관		총량	
	37봉 다발	RUFIC 다발	37봉 다발	RUFIC 다발	37봉 다발	RUFIC 다발	37봉 다발	RUFIC 다발
0.0	5.4	6.7	0.0	0.0	10.8	13.7	16.2	20.4
0.5	4.1	3.8	0.0	0.0	8.3	7.9	12.4	11.7
0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.5	0.0	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0	1.3	0.0
2.9	0.0	0.0	3.8	0.0	0.0	0.0	3.8	0.0
3.4	0.0	0.0	5.5	0.0	0.0	0.0	5.5	0.0

표 6 채널 O6\_mod 종단이음관 파손사고시 결정립내 재고량으로부터 누출된  
 각 다발과 전체 채널의 I-131 누출량 (TBq) :파편크기 1 mm

	외환봉		중간봉		내환봉		중심봉		다발 총계	
	37개봉	RUFIC	37개봉	RUFIC	37개봉	RUFIC	37개봉	RUFIC	37개봉	RUFIC
다발 1	2.232	1.008	1.214	0.526	0.533	0.319	0.084	0.043	4.063	1.897
다발 2	8.762	10.32	4.771	5.505	2.090	3.338	0.330	0.448	15.95	19.61
다발 3	12.90	15.10	7.401	8.551	3.977	4.998	0.514	0.684	24.79	29.34
다발 4	35.30	15.90	8.602	9.257	3.955	5.355	0.629	0.725	48.48	31.24
다발 5	95.10	16.05	8.808	9.246	4.195	5.396	0.675	0.728	108.8	31.42
다발 6	101.8	16.05	8.989	9.246	4.178	5.396	0.673	0.728	115.6	31.42
다발 7	125.0	16.23	8.940	9.234	4.162	5.439	0.671	0.732	138.8	31.63
다발 8	127.2	16.41	8.871	9.212	4.145	5.482	0.669	0.734	140.9	31.84
다발 9	70.21	16.45	8.748	9.206	3.984	5.490	0.637	0.734	83.58	31.88
다발10	13.37	15.98	7.709	8.618	3.420	5.116	0.540	0.695	25.03	30.41
다발11	10.53	11.71	5.755	6.250	1.836	3.791	0.398	0.508	18.52	22.26
다발12	4.442	6.006	2.419	3.220	1.063	1.949	0.168	0.262	8.092	11.44
	채널 총계								732.5	304.4

표 7 채널 O6\_mod 종단이음관 파손사고시 결정립내 재고량으로부터 누출된  
 각 다발과 전체 채널의 I-131 누출량 (TBq) :파편크기 8 mm

	외환봉		중간봉		내환봉		중심봉		다발 총계	
	37개봉	RUFIC	37개봉	RUFIC	37개봉	RUFIC	37개봉	RUFIC	37개봉	RUFIC
다발 1	2.232	1.008	1.214	0.526	0.533	0.319	0.084	0.043	4.063	1.897
다발 2	8.762	10.58	4.771	5.505	2.090	3.338	0.330	0.448	15.95	19.87
다발 3	15.80	22.28	7.957	9.834	4.076	6.622	0.527	0.855	28.36	39.59
다발 4	40.63	32.58	10.54	11.34	4.450	8.882	0.692	0.997	56.30	53.80
다발 5	83.93	32.88	14.09	11.33	5.034	8.949	0.776	1.002	103.8	54.16
다발 6	86.22	32.88	14.69	11.33	5.014	8.949	0.774	1.002	106.7	54.16
다발 7	95.08	33.25	15.48	11.31	5.100	9.020	0.788	1.006	116.4	54.59
다발 8	95.93	33.62	15.79	11.28	5.077	9.092	0.786	1.009	117.6	55.01
다발 9	68.60	33.71	12.16	11.28	4.681	9.106	0.717	1.010	86.16	55.10
다발10	20.54	22.61	8.672	10.13	3.677	6.778	0.567	0.886	33.45	40.40
다발11	11.32	12.88	5.899	6.406	1.836	4.076	0.418	0.534	19.47	23.90
다발12	4.442	6.006	2.419	3.220	1.063	1.949	0.168	0.262	8.092	11.44
	채널 총계								696.4	463.9

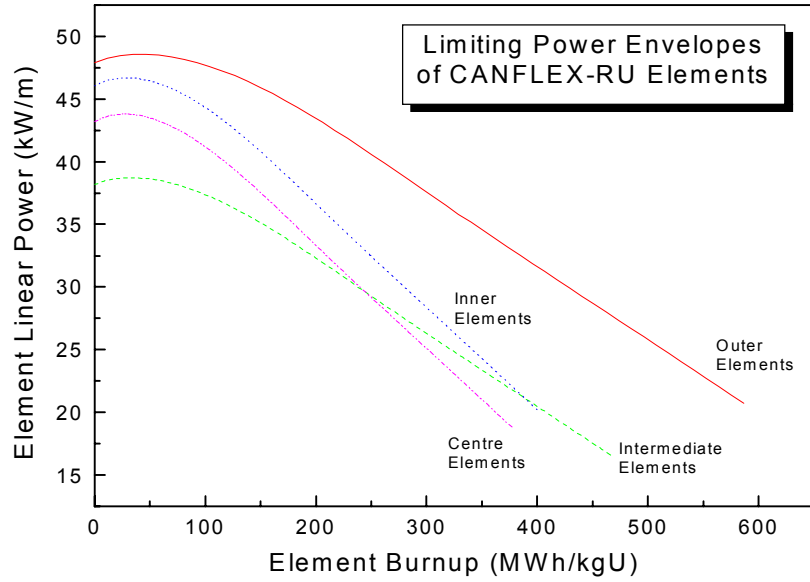


그림 1 핵연료봉의 각 링에 대한 극한출력 경계곡선

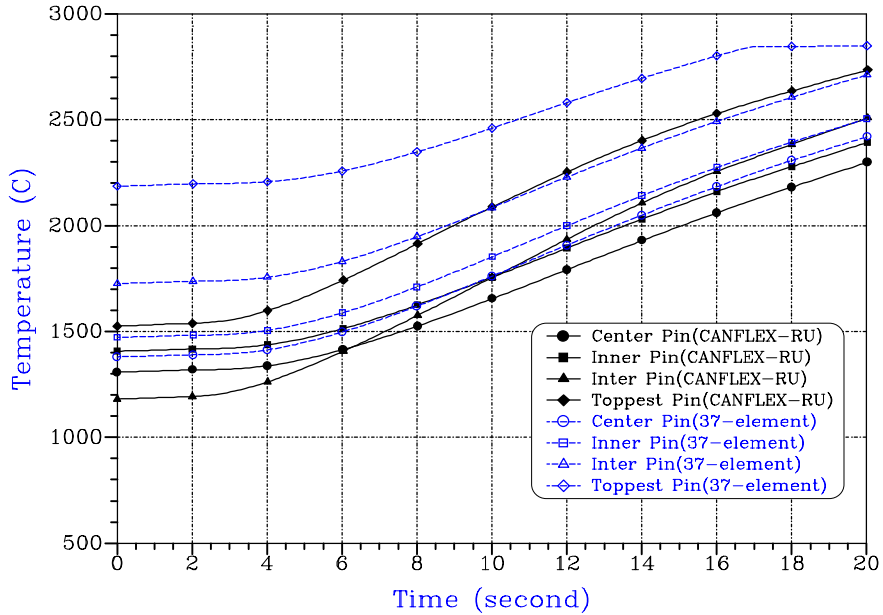


그림 2. 정체피더파단시 17.75 cm<sup>2</sup> 파단에 대한 핵연료봉 중심선 온도

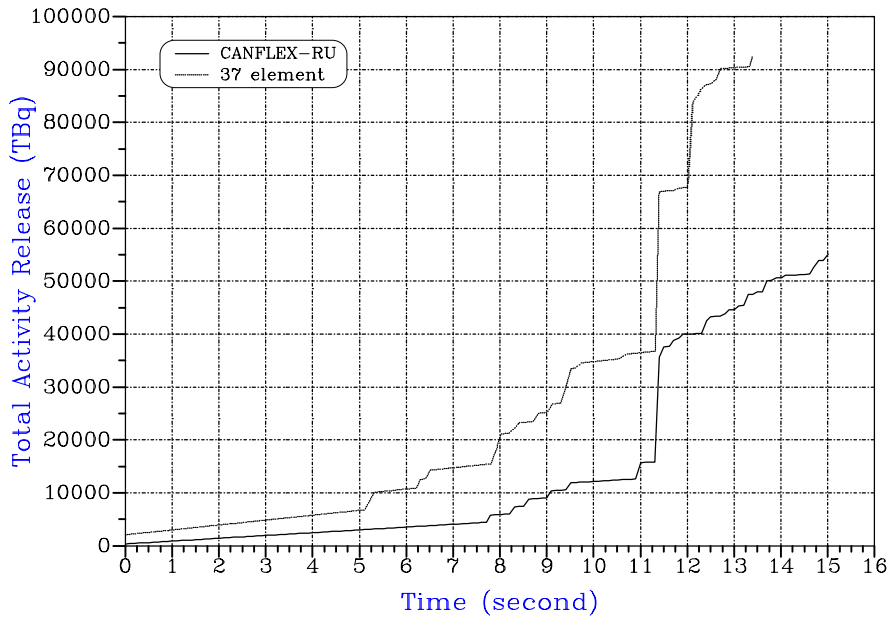


그림 3. 정체피더파단시 극한채널의 핵분열생성물 총 누출량

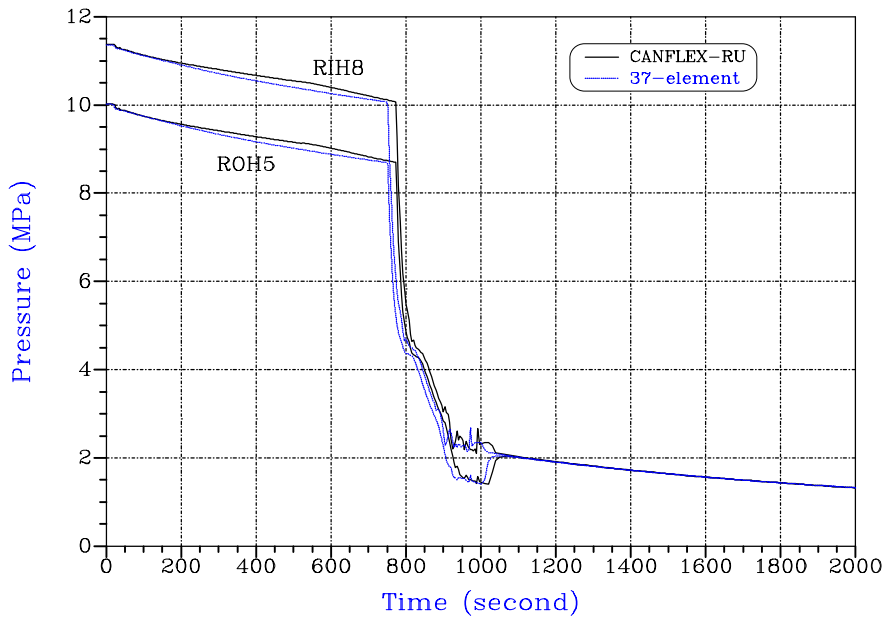


그림 4. 부분유로차단시 원자로 입구/출구 모관의 압력

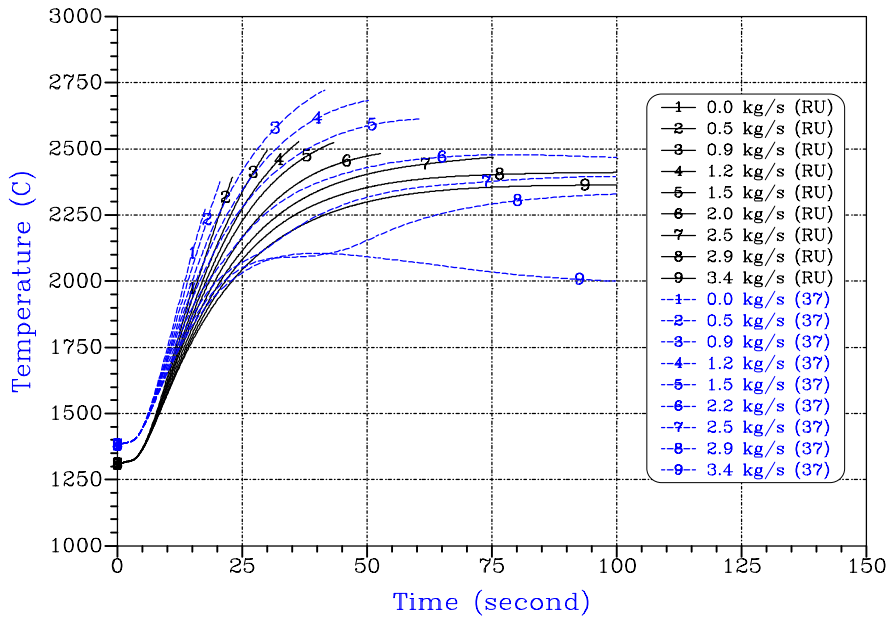


그림 5 유로차단시 유량에 따른 최상부봉 핵연료 온도

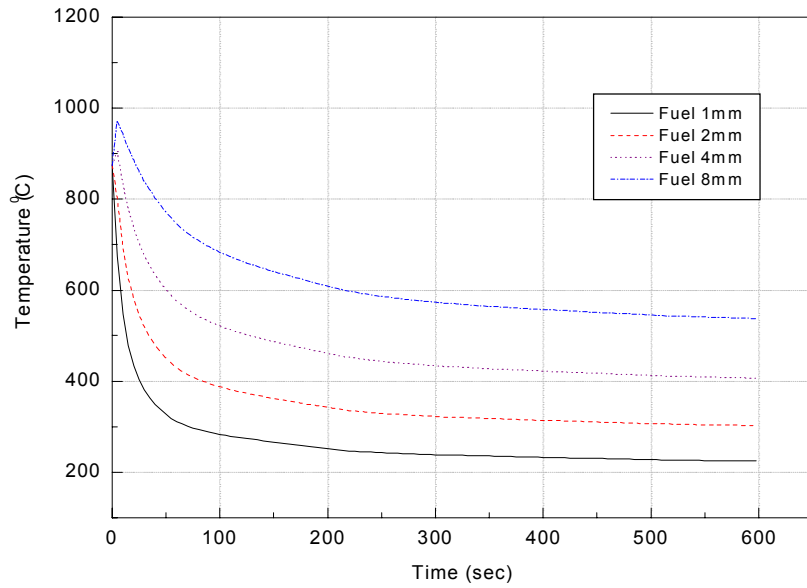


그림 6 RUFIC 다발5 외환봉의 종단이음관 사고 후 파편크기에 따른 온도변화