

CANDU 6 채널유로차단 가상사고시의 RUFIC 핵연료 안전성 평가 Safety Assessment for Channel Flow Blockage of RUFIC in CANDU 6

정종업, 임홍식, 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 채널유로차단 가상사고에 대해 안전성 평가를 수행하였고, 그 결과를 기존 37개봉 천연우라늄 핵연료와 비교하였다. 이를 위해 채널유로차단 가상사고에 대하여 계통 열수력 거동, 핵연료 채널 거동, 핵분열 생성물 누출, 용융물질 생성량 등의 분석이 수행되었다. 계통열수력 평가 결과 기존 37개봉 천연우라늄 핵연료와 RUFIC 핵연료의 경우 차단크기에 관계없이 계통 열수력 거동은 거의 동일함을 확인하였고, 핵연료 채널 거동, 핵분열 생성물 누출, 용융물질 생성량 등의 분석에서는 RUFIC 핵연료가 기존 37개봉 핵연료에 비해 안전성이 향상됨을 확인할 수 있었다.

Abstract

The safety of RUFIC (Recovered Uranium Fuel in CANDU reactors) fuel in the channel flow blockage condition which resulted in fuel failure has been assessed. The assessment results have been compared to those of the existing 37-element NU fuel. According to the comparison results, the system thermal-hydraulic behaviors of 37-element NU bundle and RUFIC bundle are found to be almost same. However, in terms of the fuel channel integrity, fission products release, and molten mass from failed fuel for the channel flow blockage, the safety features of RUFIC bundle are more enhanced compared to the existing standard 37-element bundle.

1. 서론

RUFIC (Recovered Uranium Fuel In CANDU reactors) 핵연료다발[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 농

축도가 보다 높은 0.92 w/o의 저농축 순환우라늄을 핵연료로 사용하고 있다. CANFLEX 43봉 핵연료다발은 중수로용 기존 37개 핵연료봉다발과 핵연료봉 직경 및 배열이 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 첨두치를 약 20% 정도 감소시킨다. 이러한 보다 낮은 연료봉 선출력 첨두치는 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 길어지고, 재장전 횟수를 줄여 주며, 핵연료 효율을 증대시켜 경제성을 향상시킬 것으로 기대된다.

그러나 순환우라늄 핵연료가 천연우라늄 핵연료와 비교하여 보다 높은 우라늄 농축도를 가짐으로 인해 재장전 전략 변경을 필요로 하고 결과적으로 노내 출력 분포 등의 노심 특성이 바뀌게 된다. 따라서 RUFIC 다발을 장전한 경우의 안전성 평가는 노심 특성 변경과 핵연료봉 구조 차이의 영향이 나타나는 핵연료 거동에 대해 주로 수행되어야 한다. RUFIC 핵연료다발 안전성 평가의 궁극적인 목적은 RUFIC 다발을 장전한 경우가 37개 핵연료봉다발을 장전한 경우에 비해 가상 설계기준사고시의 경과를 저해하지 않음을 보이는 것이다.

RUFIC 핵연료다발의 장전으로 인한 채널내 열수력 특성 변경과 노심 특성 변화는 중수로에서 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, RUFIC 다발을 CANDU-6 중수원전에 장전한 경우, 이들 사고 중 채널유로차단 가상사고에 대해 안전성 평가를 수행하였으며, 분석 방법, 분석결과 그리고 안전여유도에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 특히, 채널유로차단 가상사고의 영향을 받은 단일채널에 대해 계통 열수력 거동, 핵연료 채널 거동, 사고시점에서의 핵분열생성물 재고량과 과도 기간동안의 핵분열 생성물 누출량 그리고 용융물 생성량 평가를 중점적으로 다루었다. 이러한 분석으로부터 RUFIC 다발이 CANDU 6과 같은 중수로에 장전되었을 경우 채널유로차단 가상사고에 대해 기존의 37개봉 핵연료다발에 비해 안전성이 향상되는 결과를 얻을 수 있었다.

2. 채널유로차단 가상사고 분석 방법

핵연료채널에서 유로의 부분 혹은 완전 차단이 일어나면, 핵연료채널은 여전히 거의 전출력 및 정상압력을 가지지만, 유량이 줄어든 상태에서 핵연료 및 압력관이 가열될 수 있다. 따라서 유로차단의 정도에 따라 가열율 및 가열 정도가 다르게 된다. 분석 목적을 위해 “차단 (blockage)”을 단일 채널에서 유동저항이 급격히 증가하여 냉각재 유량이 줄어드는 것으로 정의하며, 보수적인 계산을 위해 채널 입구에서 차단이 발생하는 것으로 가정한다. 유로차단 정도가 적은 경우, 영향

을 받은 채널의 핵연료다발에서 드라이아웃이 발생하지 않으며 따라서 채널상태는 정상상태와 유사하다. 냉각재 유동을 심각하게 제한하는 대형 유로 차단인 경우는 채널내에서 과열 증기가 생성된다. 이로 인해 핵연료다발과 압력관이 급격히 가열되고 따라서 압력관과 칼란드리아관 파손이 초래된다.

유로차단시 RUFIC 핵연료 다발에 대한 안전성 평가의 허용기준은 월성 2/3/4 FASR[4]에 제시된 기준을 따르며, 주로 핵연료/핵연료채널 건전성 및 핵분열생성물 누출량, 그리고 용융물질 생성량에 대해 기존의 37개봉 핵연료다발에 대한 상대적 안전도를 평가하는데 주안점을 두도록 하였다.

2.1 계통 열수력 분석 방법

계통 열수력 분석은 CANDU 6 안전성 분석용 이상유체 비균질/비평형 열수력 분석코드인 CATHENA[5]를 이용하여 수행되며, RUFIC 핵연료다발이 핵연료채널에 장전될 경우, 채널에 걸친 유동저항 증가와 채널내 냉각재량 증가의 영향이 평가된다. 또한 두가지 다른 직경을 갖는 핵연료봉 각각의 기하학적 구조가 고려되며, RUFIC 평형 노심에 대한 축방향 및 반경 방향 출력 분포가 고려된다. RUFIC 핵연료의 경우, 8다발 장전방식대신 4다발 장전방식을 채택하는 노심 특성으로 인해 중심다발에서 첨두를 가지는 37봉 다발과 달리 다발 5에서 첨두를 가지게 된다. 이 때, 단일 채널은 극한 출력 채널 (O6_mod)로 모사되고, 유로차단시 채널 내 기포 증가로 인한 출력 상승 효과를 고려하기 위해 채널출력을 5.5% 증가시킨다.

2.2 핵연료채널 분석 방법

채널 분석의 주목적은 심각한 유로차단에 대해 채널 파손 시점 및 채널 파손 시점에서의 채널 조건을 예측하는 것과 이때의 용융물질 생성량을 결정하는 것이다. 유로차단에 대한 채널 반응의 분석은 CATHENA 코드[5]를 사용하여 수행한다. CATHENA 분석은 CATHENA 단일 채널 모사를 사용하여 개별 채널 특성 (높이, 피더 모양, 채널 출력 등)의 영향을 고려할 수 있으며, 유로차단 분석에 대한 모관 경계조건은 정상운전 경계조건 값을 사용하며, 차단 지점은 입구 종단이음관에서 발생한다고 가정한다.

2.3 핵분열생성물 누출 평가 방법

사고 시점에서 핵연료내의 핵분열생성물 재고량은 핵연료 온도 및 핵연료봉내의 여러 가지 다른 종류의 핵분열생성물 분포를 제공하는 ELESTRES 전산코드[6]로 평가한다.

안전 분석을 위하여, 극한 출력 경계곡선은 기준 과출력 경계곡선을 수정하여, 다발 출력에 대하여 최대 출력이 극한 조건과 같아지도록 수정하여 구하며, 그 결과를 그림 1에 나타내었다. 각 봉에 대한 출력/연소도 이력은 극한 출력 곡선과 사고 시점에서의 각 다발의 출력값을 이용하여 결정하였다. 만일 사고시점에서의 연료봉 출력/연소도 점이 극한 출력 경계를 넘으면 연료봉이 극한 출력 경계에서 운전되었다고 가정하며, 출력/연소도 점이 극한 출력 경계이하이면 연료봉의 연소도 이력은 극한 출력 경계곡선과 평행으로 운전된다고 가정한다. 이 때, RUFIC 핵연료다발에서

모사된 48개 연료봉 각각의 출력은 채널 냉각재 기포화에 따른 채널 출력 증가를 보정하기 위하여 5.5%만큼 상승시키며, 5.5% 출력 증가는 모든 연료봉에서 15분동안 지속된다고 가정한다.

유로차단시 영향을 받은 채널의 핵연료피복관 전부가 사고 순간에 파손되며, 곧바로 핵분열생성물 간극 (gap) 재고량이 누출되는 것으로 가정한다. 만약 핵연료 소결체가 피복관에서 방출되어 작은 조각들로 깨어지면, 결정립계 (grain boundary) 재고량의 일부가 누출될 것이다. 채널 파손위치와 채널 차단부위 사이에 남아 있는 핵연료봉은 채널파손 후 가열이 계속될 것이다. 이러한 사실이 어떠한 핵연료다발에 대해서도 예외가 아니기 때문에, 핵연료봉의 결정립계 재고량 및 결정립(grain)내 재고량 또한 사고 순간에 누출되는 것으로 가정한다. 이 재고량은 냉각재의 기포화로 인한 출력증가 효과가 고려된 것이다.

2.4 용융물질 생성량 평가 방법

채널 파손시 용융된 핵연료 및 피복관 질량은 CATHENA 핵연료채널 분석 결과로부터 계산되며, 채널 파손 시점은 압력관 파손 기준을 따른다. 차단채널의 압력관이 압력관/칼란드리아관 접촉 이전에 파손되기 때문에, 압력관 파손시점을 압력관 파손이 가장 늦은 시점인 압력관/칼란드리아관 접촉 시점으로 간주하는 것이 가장 보수적이다. 압력관/칼란드리아관 접촉 시점을 예측하기 위해 CATHENA 단일 채널 모델을 사용하며 이를 “팽창 기준”이라 한다. 압력관/칼란드리아관 접촉 이후의 채널 파손의 경우, 채널 파손시점은 최하부 핵연료봉 피복관 온도가 1850°C에 도달한 후 2초 경과시 발생한다고 가정한다. 이 2초는 용융 물질이 압력관과 접촉하여 채널을 파손시키는데 걸리는 시간을 보수적으로 고려한 것이다. 이 기준을 “피복관 용융기준”이라 한다.

용융질량을 평가하기 위한 목적으로, 핵연료 및 채널은 예측되는 채널 파손시간 이후 추가로 2초 동안 더 가열된다고 가정된다. 추가적인 2초 동안 채널파손이 무시되기 때문에 이러한 가정은 매우 보수적인 가정이며, 지르칼로이 피복관 및 UO₂ 핵연료의 용융 온도는 각각 1760°C 및 2840°C로 선정한다.

3. 채널유로차단 가상사고 분석 결과

3.1 계통 열수력 분석 결과

유로차단에 대한 계통 열수력 분석은 완전 차단과 부분차단 두가지 경우를 수행하였다. 이 분석을 위해 월성 2/3/4 FSAR의 전체 계통 모델에서 핵연료채널 입력 부분을 수정하였으며, 과도 분석에 선행되는 정상상태 계산은 3000초까지 수행하였다. 유로차단을 모사하기 위해 채널입구에 유동저항계수 값인 10¹⁰ (완전차단)과 10⁴ (부분차단)를 적용하였다. 그림 2와 그림 3은 37개봉 다발의 경우와 RUFIC 다발의 경우에 대한 유로차단시 모관 압력 및 기포율 과도를 보여 준다. 표 1에서 보여진 채널 파손 시간 및 파손 위치의 차이로 계통 변수들의 경향이 다소 달라지긴 하지만, 일반적인 수력학적 거동은 유사하다고 볼 수 있다. 따라서 영향 받지 않는 채널들에 대한 채널 건전성은 37개봉 핵연료다발의 경우와 마찬가지로 문제되지 않는다. 그러나 영향받는 채널에 대해서는 연료봉 온도 분포가 반경 방향 및 축방향 출력 분포에 대응하는 분포를 가지기 때문에, 침투 출력

다발 (RUFIC의 경우는 다발 5, 37개봉 다발의 경우는 다발 7)에서의 연료봉 평균 온도 분포는 두 다발에 대해 매우 다르다. 이러한 특성은 RUFIC 다발의 기하학적 구조 특성과 연계하여 핵연료 및 핵연료 채널 거동에 영향을 줄 것으로 예측된다.

3.2 핵연료채널 분석 결과

단일채널 내에서의 심각한 유로차단 사고후의 핵연료가열 과도현상 및 압력관 거동은 채널 냉각재 유량, 열 발생율 (채널 출력), 핵연료 소결체로부터 피복관으로의 열전달계수와 같은 매개변수들의 영향을 크게 받는다.

채널 파손시점에서 용융 물질의 최대 질량을 결정하기 위한 매개변수 효과를 살펴보기 위해 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 4와 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. 유로차단 후, 채널 유량이 정상적인 상태에서 급격히 감소하여 핵연료피복관의 고갈 (dryout)을 유발한다. 고갈이후 냉각재로의 열전달 감소로 인해 피복관 온도가 급격히 핵연료 온도에 접근하게 된다. 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. RUFIC 핵연료다발의 경우 유동면적이 37개봉 핵연료다발에 비해 5% 크기 때문에 같은 유량 조건하에서 성층화 수위가 37개봉 핵연료다발에 비해 낮다. 따라서 보다 많은 핵연료봉이 증기에 노출되는 경향이 있다. 이러한 이유로 보다 큰 유량의 경우, 사고 후반부에는 RUFIC 핵연료다발의 핵연료 및 핵연료피복관 온도가 37개봉 핵연료다발에 비해 높게 유지된다.

표 2와 표 3은 각각의 유량에 대한 압력관/칼란드리아관 접촉 시점 및 하부 핵연료봉의 핵연료 피복관 내면에서의 용융시점을 보여 준다. 표 2에 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 대류열 전달 계수의 유체 속도 의존성 때문에 RUFIC 핵연료다발의 경우 유동 면적의 증가로 인한 유체 속도 감소로 대류 열전달량이 37개봉 핵연료다발에 비해 상대적으로 작아짐)와 복사 열전달 감소로 압력관 가열이 느리기 때문이다. 또한 RUFIC 핵연료다발의 경우 과도동안 핵연료 온도가 37개봉 핵연료다발에 비해 낮기 때문에 표 3의 결과와 같이 피복관 용융에 의한 채널파손시점도 늦어진다.

한편, 과도동안 각 연료봉에 대한 핵연료 중심 온도와 핵연료 피복관 온도의 경우도 RUFIC 핵연료다발이 37개봉 핵연료다발에 비해 상당히 낮음을 알 수 있었으며, 특히 낮은 연료봉 선출력을 가지는 중환봉과 외환봉에서 핵연료 온도가 많이 낮음을 확인하였다. 이러한 결과는 위에서 언급한 느린 압력관 가열 및 이로 인한 압력관 접촉 시간의 지연을 설명해 준다.

이상의 핵연료채널 분석 결과에 의하면, 채널이 파손되기 전까지 RUFIC 핵연료다발의 모든 핵연료 및 피복관 온도가 37개봉 핵연료다발의 경우에 비해 낮았다. 비록 기포량에 의한 채널 출력 상승이 RUFIC 핵연료다발에서 보다 크지만, RUFIC 핵연료다발의 기하학적 구조 특성과 연계하여 반경 방향 및 축방향 출력 분포등의 노심 특성이 채널 건전성 측면에서 긍정적인 결과를 보임을 확인하였다.

3.3 핵분열생성물 누출 분석 결과

핵분열생성물 재고량 : ELESTRES 전산코드를 사용하여 사고시점까지의 핵분열생성물 재고량을 계산한 결과, 전체 채널에 대하여 대부분 핵종의 경우 RUFIC 다발이 37개 다발에 비해 평균 약 8%정도 적게 생성되었음을 확인하였다. 한편, 생성된 방사성핵종의 대부분은 단수명 핵종으로, 이들은 연소도보다는 출력 크기에 따라 재고량 크기가 결정되는 양상을 보였다. RUFIC 다발의 경우 37개 핵연료봉 다발에 비해 외환봉, 중환봉에서 훨씬 작은 출력으로 연소되기 때문에, 핵분열생성물 재고량도 37개 핵연료봉 다발에 비해 적음을 알 수 있었다.

핵분열생성물 누출량 : 심각한 유로차단 후, 최대 출력 채널 (O6_mod)의 모든 핵연료봉 (RUFIC 인 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% 적음을 의미한다.

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 시점 이후 2초) 경과후 UO_2 -Zr 합금, UO_2 및 피복관의 용융량 계산결과를 표 4에 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. 0.9 kg/s - 2.0 kg/s 사이의 유량에서는, 채널 파손이 피복관 및 핵연료 중심선 용융보다 일찍 발생하여 용융 질량이 없으며, 2.5 kg/s - 2.9 kg/s 유량에서는 37개봉 다발의 경우 채널 파손이 핵연료 중심선 용융 이후에 발생하므로 단지 용융 UO_2 만이 존재하며, RUFIC 다발의 경우 핵연료 중심선이 용융온도에 도달하지 않는다.

압력관 용융기준의 경우도 표 3과 같이 RUFIC 핵연료가 37개봉 핵연료에 비해 채널 파손시점이 지연된다. 피복관 용융개시 후 4초 경과 시점에서의 UO_2 -Zr 합금, UO_2 및 피복관의 용융량을 계산한 결과 (표 5), 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. 결 론

RUFIC 핵연료다발이 장전되어도 차단 크기에 관계없이 계통 열수력 거동은 37개봉 핵연료다발을 장전한 경우와 거의 동일하며, 핵연료채널 분석에서는 과도동안 핵연료 및 핵연료피복관 온도가 37개봉 핵연료다발에 비해 낮게 유지된다. 이는 RUFIC 핵연료다발의 경우 비록 직경이 작은 중환과 외환에서는 핵연료봉 가열율이 보다 높더라도 반경방향 선출력이 보다 평탄하고 침투 출력이 보다 채널 앞쪽에 있음으로 인해 37개봉 핵연료다발에 비해 초기 핵연료봉 온도가 보다 낮기 때문이다.

37개봉 핵연료다발에 비해 보다 평탄한 반경방향 선출력 분포 및 방출시점에서의 보다 낮은 연료봉 출력을 가지는 RUFIC 핵연료다발에 대한 핵분열생성물 재고량은 37개봉 핵연료다발에 비해 8% 적게 예측되었다. 이는 보다 낮은 핵연료 온도 분포를 가짐으로 인해 대부분의 방사성 핵종들이 결정립계나 간극으로 확산되지 못하고 결정립 내에 갇히기 때문이다. 용융물질 평가에 의하면, 과도동안 RUFIC 핵연료다발의 보다 낮은 핵연료봉 온도로 인해 UO_2 용융이 현저히 감소하였고, 피복관 및 UO_2 -Zr 혼합물의 용융은 비슷하였다. 이로 인해 채널 파손시점까지의 최대 용융물질 생성량은 37개봉 핵연료다발에 비해 45% 적게 예측되었다.

이와같은 결과로부터 CANDU 6와 같은 중수로에 43개봉 RUFIC 핵연료다발을 장전할 경우 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] 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.

표 1 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 2. 유로차단시 채널 O6_mod의 압력관/칼란드리아관 접촉 시간 및 위치

유량(kg/s)	첫 번째 압력관/ 칼란드리아관 접촉시간(초) (위치)		압력관파손 ¹ 시간(초) (위치)	
	37봉 다발	RUFIC 다발	37봉 다발	RUFIC 다발
0.0	10.0(7)	12.5(5)	17.6(3)	15.0(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

Note : 1. Shewfelt 기준으로 인한 압력관 파손

표 3 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)	발생 없음
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 4 유로차단시 채널 O6_mod에 대해 유량에 따라 압력관/칼란드리아관
접촉이후 2초 경과 시점(팽창기준)에서 평가된 용융물질 질량

유량 (kg/s)	UO ₂ -Zr		UO ₂		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 5 유로차단시 채널 O6_mod에 대해 유량에 따라 피복관 용융 개시이후
4초 경과 시점(피복관 용융기준)에서 평가된 용융물질 질량

유량 (kg/s)	UO ₂ -Zr		UO ₂		피복관		총량	
	37봉 다발	RUFIC 다발	37봉 다발	RUFIC 다발	37봉 다발	RUFIC 다발	37봉 다발	RUFIC 다발
0.0	6.7	7.2	0.0	0.0	13.44	14.7	20.1	21.9
0.5	4.7	6.5	0.0	0.0	9.4	13.3	14.1	19.8
0.9	2.8	3.4	3.4	0.0	5.7	6.9	11.9	10.3
1.2	5.2	1.8	24.5	0.4	10.4	3.7	40.1	5.9
1.5	1.1	0.5	19.4	0.4	2.1	1.0	22.6	1.85
2.0	0.0	0.0	18.5	0.38	0.0	0.0	18.5	0.38
2.5	0.0	0.0	11.0	0.0	0.0	0.0	11.0	0.0
2.9	0.0	0.0	8.9	0.0	0.0	0.0	8.9	0.0
3.4	0.0	0.0	5.5	0.0	0.0	0.0	5.5	0.0

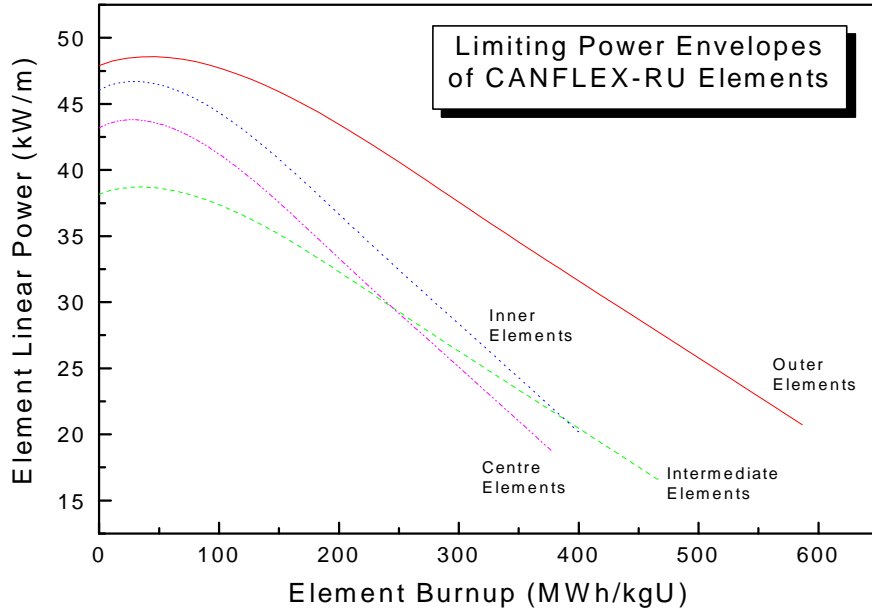


그림 1 핵연료봉의 각 링에 대한 극한출력 경계곡선

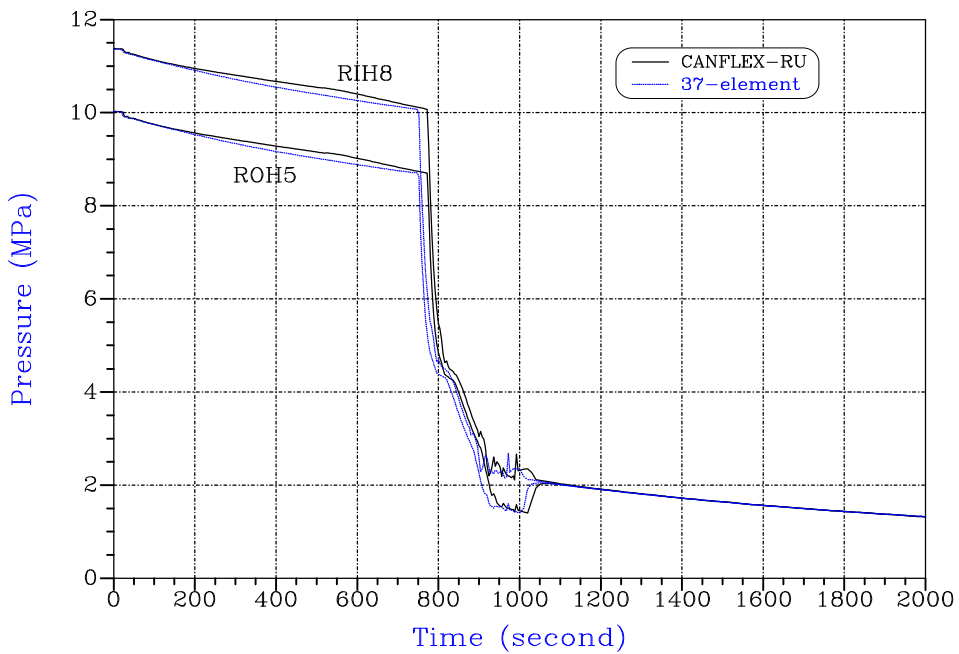


그림 2 부분유로차단시 원자로 입구/출구 모관의 압력

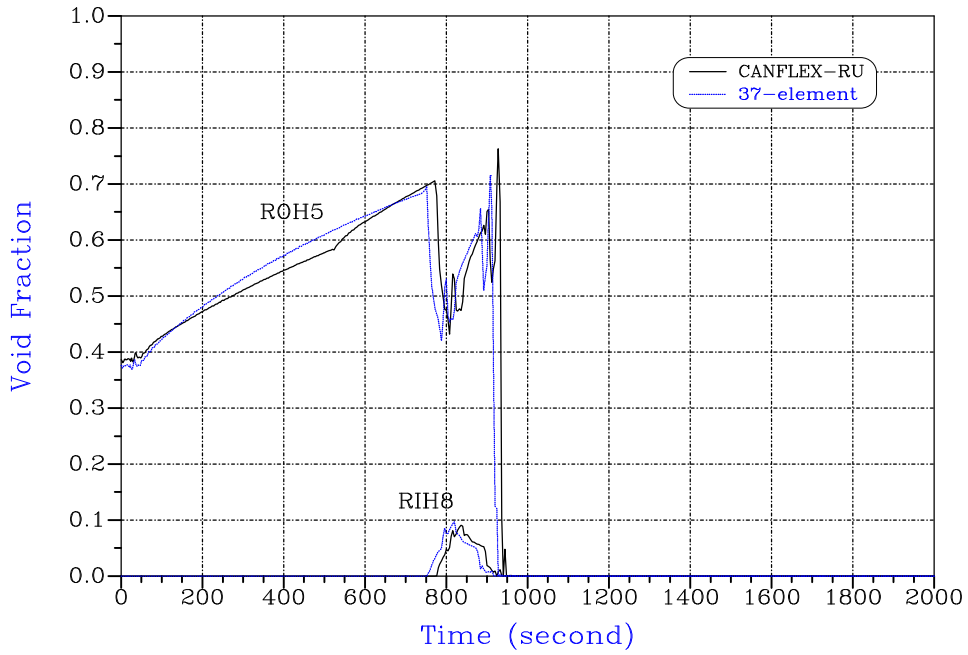


그림 3 부분유로차단시 원자로 입구/출구 모관의 기포율

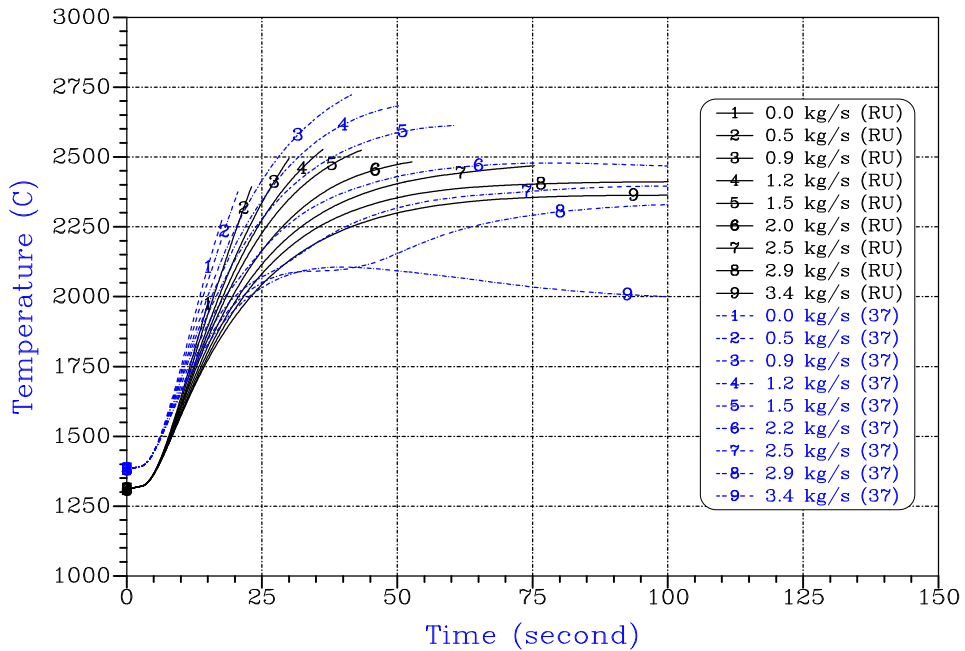


그림 4 유로차단시 유량에 따른 최상부봉 핵연료 온도

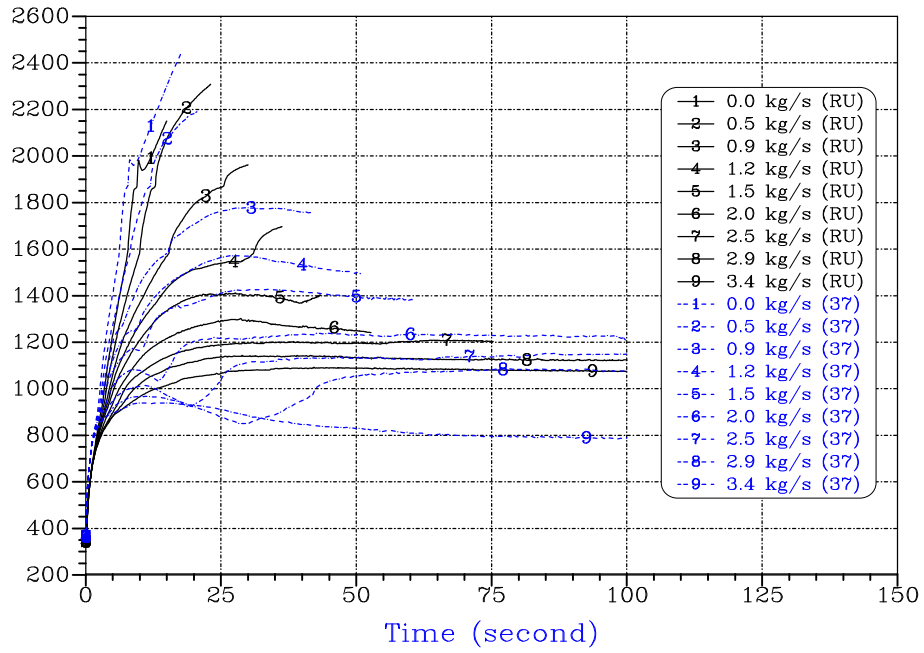


그림 5 유로차단시 유량에 따른 최상부봉 핵연료피복관 온도