

CANDU 6 종단이음관 파손 가상사고시의 RUFIC 핵연료 안전성 평가 Safety Assessment for End Fitting Failure of RUFIC in CANDU 6

정종업, 임홍식, 석호천

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

월성로와 같은 CANDU 6 중수로에 RUFIC 핵연료를 장전한 경우, 안전해석시 고려하는 가상 설계기준사고들 중에서 핵연료 손상이 발생하는 사고인 종단이음관 파손 사고에 대해 안전성 평가를 수행하였고, 그 결과를 기존 37개봉 천연우라늄 핵연료와 비교하였다. 핵연료 파편의 크기가 1 mm와 8 mm인 두 경우에 대해 I-131의 과도기간 누출량 평가를 수행한 결과, 파편크기가 1 mm인 경우는 RUFIC 핵연료다발이 장전된 채널이 37개봉 핵연료다발이 장전된 채널에 비해 I-131 누출량이 약 60 % 정도 감소하였고, 파편크기가 8 mm인 경우에는 약 33 % 정도 감소하였다. 이러한 결과로부터, 본 보고서에서 고려한 종단이음관 파손 가상사고시, RUFIC 핵연료 다발에 대한 안전성이 기존 37개봉 핵연료다발에 비해 상당히 향상되는 것으로 분석되었다.

Abstract

The safety assessment of RUFIC fuel in the end fitting failure condition which resulted in fuel failure was performed and then the analysis results were compared to those of the existing 37-element NU fuel. The assessments of I-131 release in the accident were carried out for both cases of fragment sizes of 1 mm and 8 mm. Comparing to the I-131 release from the 37-element bundle channel, the I-131 release from RUFIC bundle channel was reduced by about 60 % in the case of the fragment size of 1 mm, and by about 33 % in the case of the fragment size of 8 mm. From this result, the safety of RUFIC bundle is significantly enhanced in the event of end fitting failure compared to the existing 37-element fuel bundle.

1. 서 론

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 잇점을 유

지하는 CANFLEX 핵연료다발 설계를 채택하고, 우라늄 농축도가 0.72w/o인 천연우라늄대신에 농축도가 보다 높은 0.92w/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 중간봉과 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 장전시 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 유동차단사고, 압력관 파단사고, 종단이음관 파손사고 등이 있다. 본 보고서에서는, RUFIC 다발을 CANDU-6 중수원전에 장전한 경우, 이들 사고 중 종단이음관 파손사고에 대해 안전성 평가를 수행하였으며, 분석 방법, 분석결과 그리고 안전여유도에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 특히, 종단이음관 파손사고의 영향을 받은 단일채널에 대해 사고시점에서의 핵분열생성물 재고량 평가, 그리고 핵연료 파손에 따른 핵연료 파편의 온도 변화와 I-131의 누출량 평가를 중점적으로 다루었다. 이러한 분석으로부터 RUFIC 다발이 CANDU 6과 같은 중수로에 장전되었을 경우 종단이음관 파손사고에 대해 기존의 37개봉 핵연료다발에 비해 안전성이 향상되는 결과를 얻을 수 있었다.

2. 종단이음관 파손사고 분석 방법

종단이음관 파손사고시 RUFIC 핵연료다발에 대한 안전성 평가의 허용기준은 월성 2/3/4 FSAR[4]에 제시된 기준을 따르도록 하였다. RUFIC 핵연료다발이 기존의 37개봉 핵연료다발과 부합하는 설계 특성을 가지므로 열수력학적 거동이 유사할 것으로 기대되며, 따라서 종단이음관 파손시의 사건 전개는 월성 2/3/4 FSAR의 기술과 거의 일치한다. 이러한 이유로 종단이음관 파손시 RUFIC 핵연료다발에 대한 안전성 평가에서는 주로 핵분열생성물 누출량에 대해 기존의 37개봉

핵연료다발에 대한 결과와 비교하여 상대적 안전도를 평가하는데 주안점을 두도록 하였다. 이러한 평가를 위해 사고 발생 시점에서의 핵분열생성물 재고량 계산, 사고후 핵연료교환기실로 방출되어 깨진 핵연료 파편의 온도 변화 계산 등의 작업을 아울러 수행하였다.

2.1 사고 개요 및 가정

극도의 심각한 조건 하에서 한 개의 핵연료채널에서 중단이음관의 완전파손이 발생하면, 채널로부터 모든 핵연료다발들이 파손된 중단이음관을 통하여 고압의 냉각재에 의해 빠른 속도로 방출되며 핵연료교환기실에 도달할 때 파손된다. 이때 일부 핵연료봉은 봉단접합판으로부터 분리되고 여러 조각으로 부서지며 파편화되며, 파편화된 핵연료의 핵분열생성물 간극재고량 (gap inventory) 은 격실대기로 즉각적으로 방출되고 (prompt release), 이후 계속해서 핵연료의 초기 파손 정도, 핵연료의 가열정도 및 UO_2 의 산화율 등에 따라 핵연료 결정립내 재고량으로부터 핵분열생성물이 누출된다.

본 연구에서는 사고 후에 핵연료 파편의 온도 변화와 핵분열생성물 누출량 계산을 쉽게 할 수 있도록 다음과 같은 가정들을 전제로 하여 분석을 수행하였다.

- 핵연료채널에서 중단이음관 사고가 발생하면, 그 채널내의 모든 핵연료다발은 즉시 방출됨.
- 방출후 핵연료다발이 격실 (vault) 바닥이나 벽에 충돌하면 핵연료다발은 각각의 핵연료봉으로 깨지고 핵연료봉으로부터 방출된 핵연료 소결체는 작은 조각으로 파편화 됨.
- 핵연료 파편의 온도계산과 핵분열생성물 누출량 계산의 편의를 위해 모든 핵연료 파편은 구형이라고 가정함.
- 핵연료 파편의 초기온도는 사고 시점에서의 체적-평균 핵연료온도와 같다고 가정함.
- 핵연료 파편은 복사 (radiation)와 대류 (convection)에 의해 열을 잃는다고 가정함.
- UO_2 산화에 필요한 산소는 무한하다고 가정함.

2.2 핵분열생성물 재고량 평가 방법

정상운전 동안과 사고 시점에서 핵연료내의 핵분열생성물 재고량은 핵연료 온도 및 핵연료피복관-소결체 틈새와 입자 경계로 방출된 핵분열생성물 분포 등을 계산하는 핵연료봉 성능평가 용 ELESTRES 전산코드[5]를 이용하여 수행하였다.

안전 분석을 위한 극한 출력 경계곡선은 노심 해석으로부터 구한 기준 과출력 경계곡선을 수정하여 다발 출력에 대해 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 경계 이하이면 그림 2와 같이 연료봉의 연소도 이력은 극한 출력 경계곡선과 평행으로 운전된다고 가정한다.

2.3 핵연료 파편으로부터의 핵분열생성물 누출 결정 방법

피복관 파손시점 (시간 0)에서 모든 핵연료봉의 간극재고량이 누출된다고 간주한다. 나머지 핵분열생성물 재고량은 UO_2 파편의 결정립 혹은 결정립계에 구속되어 있다. 핵연료가 작은 파편으로 파열될 때, 누출되는 UO_2 표면적은 증가한다. 누출된 표면적이 증가하여 이미 결정립계에 있던 핵분열생성물의 추가적인 누출이 발생하고 (즉각방출), 핵연료파편의 산화로 인해 계속적으로 핵분열생성물의 누출이 일어난다 (계속방출).

(1) 즉각방출 (prompt release) : ELESTRES 코드 모사로부터 결정립계에 있는 핵분열생성물 동위원소의 재고량이 얻어진다. 핵연료 파쇄후 누출되는 입계 재고량 분율은 소결체내 총 결정립 표면적에 대한 누출된 표면적의 비율과 같다고 가정한다.

(2) 계속방출 (continuous release) : REDOU[5] 코드를 이용하여 공기중의 핵연료 산화 정도를 기준으로 결과적인 구속 요오드 누출분율을 계산한다. UO_2 의 산화율을 보수적으로 결정하기 위해 $900^{\circ}C$ 이하의 온도에서 분당 잔존 UO_2 의 10%가 산화된다고 가정한다. 이 가정에 의하면, 조건에 관계없이 모든 파편은 약 600초 전후에 완전히 산화된다. 그리고 산화 핵연료로부터의 핵분열생성물 누출상수는 핵연료 온도의 함수로 가정하며, $1100^{\circ}C$ 이상에서는 산화된 UO_2 에서 요오드가 100% 누출되며, $600^{\circ}C$ 이하의 온도에서는 약 4%가 누출된다. 요오드 방사능 과도상태를 얻기 위한 각 핵연료봉으로부터의 누출분율은 위에서 가정한 UO_2 의 산화율 (분당 10% 산화)과 온도에 따른 누출상수의 곱으로 결정되며, 과도상태 동안 요오드의 계속방출량은 누출분율과 요오드의 결정립내 구속재고량을 곱함으로써 구해진다. 그리고 O6_mod 채널내의 모든 핵연료봉 전체에 대해 더해짐으로써 과도상태 동안 채널내 요오드의 방출량이 결정된다. 한편, 불활성기체의 구속재고량은 사고발생 즉시 누출된다고 가정한다.

3. 종단이음관 파손사고 분석 결과

3.1 핵분열생성물 재고량 계산 결과

ELESTRES 전산코드를 사용하여 사고시점까지의 핵분열생성물 재고량을 계산한 결과, 표 1에 나타난 바와 같이 전체 채널에 대하여 대부분 핵종의 경우 RUFIC 다발이 37봉 다발에 비해 평균 약 8% 정도 적게 생성되었음을 알 수 있다. 한편, 생성된 방사성핵종의 대부분은 단수명 핵종으로, 이들은 연소도 보다는 출력 크기에 따라 재고량 크기가 결정되는 양상을 보인다. RUFIC 다발의 경우 37개 핵연료봉다발에 비해 외환봉, 중간봉에서 훨씬 작은 출력으로 연소되기 때문에, 핵분열생성물 재고량도 37개 핵연료봉다발에 비해 적음을 확인할 수 있다.

3.2 핵연료 파편의 온도과도상태 계산 결과

그림 3은 37개봉 핵연료다발 중 최대 출력을 보이는 다발 8의 외환봉에 대하여 핵연료 파편의 크기가 1, 2, 4, 8 mm인 각각의 경우에 대하여 온도과도를 계산한 결과를 나타내고 있으며, 그림 4는 RUFIC 핵연료다발 중 역시 최대 출력을 보이는 다발 5의 외환봉에 대해 계산한 온도과도 결과를 보여주고 있다. 사고시점에서의 온도가 37개봉 핵연료는 $1123^{\circ}C$, RUFIC 핵연료는 $874^{\circ}C$ 로

약간 차이가 나지만 곧 비슷한 값으로 생각됨을 알 수 있으며, 파편 크기가 작을수록 빠르게 생각됨을 확인할 수 있다. 파편크기에 따른 온도과도는 다른 핵연료다발의 핵연료봉에서도 모두 유사하게 나타났다. 핵연료 파편의 온도는 핵연료 파편의 산화물과 산화된 UO_2 로부터의 핵분열생성물 누출율에 영향을 끼치며 따라서 지속적인 핵분열생성물 누출량을 결정하는 중요 인자이다.

3.3 핵분열생성물 누출량 평가 결과

중단이음관 파손 사고 시 핵분열생성물 누출 측면에서 기존 37개봉 핵연료다발과 RUFIC 핵연료다발의 안전성을 비교하기 위해 사고 후 핵연료 파편 크기가 1 mm 와 8 mm 인 두 경우에 대해 각각 모사를 수행하여 두 핵연료다발간의 핵분열생성물 누출량을 비교, 평가하였다.

3.3.1 핵연료 파편 크기 1 mm 인 경우의 핵분열생성물 누출량 평가

즉각 방출량은 소결체내 총 결정립 표면적에 대한 노출된 표면적의 비율과 같다고 가정하였다. 결정립의 반은 직경 $200 \mu\text{m}$, 반은 $15 \mu\text{m}$ (초기 결정립 크기의 두배)의 구형이라고 가정하면 총 결정립의 표면적/체적 (S/V) 비율은 215 mm^{-1} 가 된다. 파편 크기 1 mm인 경우, 표면적/체적 비율은 6 mm^{-1} 이며, 따라서 입계로부터의 누출분율은 약 0.028 이다. 사고 시점에서의 I-131 결정립계 재고량은 37개봉 핵연료다발의 경우는 1503.58 TBq, RUFIC 핵연료다발의 경우는 599.78 TBq 이고, 이들 값을 결정립계 누출분율 값과 곱하여 구한 37개봉 핵연료다발과 RUFIC 핵연료다발의 즉각 방출량은 각각 42.1 TBq, 16.8 TBq 이었다.

O6_mod 채널에 장착된 12개의 37개봉 핵연료다발과 RUFIC 핵연료다발 각각의 외환봉, 중간봉, 내환봉, 중심봉에 대하여 REDOU 코드를 이용하여 구한 결정립내 재고량 누출분율 결과는 표 2와 같다. 해석에 이용된 각 봉들의 초기 온도조건과 출력조건은 정상상태에서 ELESTRES 코드를 이용하여 구한 결과를 이용하였다. 표 2의 결과에서 37개봉 다발4 - 다발9의 외환봉에서 상대적으로 높은 누출분율 결과를 나타내었는데, 이는 이들 봉의 사고시점 온도가 상대적으로 높기 때문인 것으로 분석된다. 계산된 각 봉들의 결정립내 재고량 누출분율 값과 사고시점에서의 각 봉의 I-131 결정립내 재고량 값을 이용하여 37개봉 핵연료다발과 RUFIC 핵연료다발 각각의 다발과 채널전체에 대해서 구한 I-131 누출량 결과를 표 3에 정리하였다. 채널 전체의 I-131 누출량 결과를 비교해보면, 37개봉 핵연료다발 채널은 732.5 TBq 그리고 RUFIC 핵연료다발 채널은 304.4 TBq로 RUFIC 핵연료다발이 장전된 경우가 37개봉 핵연료다발이 장전된 경우에 비해 I-131 누출량이 약 59% 정도 감소했음을 알 수 있다

3.3.2 핵연료 파편 크기 8 mm 인 경우의 핵분열생성물 누출량 평가

3.3.1절의 계산과정과 같은 방법을 이용하여 구한 파편 크기 8 mm인 경우의 37개봉 핵연료다발과 RUFIC 핵연료다발의 즉각 방출량은 각각 5.3 TBq 그리고 2.1 TBq 이었다.

역시 3.3.1절에서 언급한 방법을 이용하여 37개봉 핵연료다발과 RUFIC 핵연료다발 각 봉의 누출분율 결과를 표 4에 정리하였다. 계산된 각 봉들의 결정립내 재고량 누출분율 값과 사고시점에서의 각 봉의 I-131 결정립내 재고량 값을 이용하여 37개봉 핵연료다발과 RUFIC 핵연료다발 각각의 다발과 채널전체에 대해서 구한 I-131 누출량 결과를 표 5에 정리하였다. 채널 전체의 I-131 누

출량 결과를 비교해보면, 37개봉 핵연료다발 채널은 696.4 TBq 그리고 RUFIC 핵연료다발 채널은 463.9 TBq로 RUFIC 핵연료다발이 장전된 경우가 37개봉 핵연료다발이 장전된 경우에 비해 1-131 누출량이 약 33% 정도 감소했음을 알 수 있다.

4. 결 론

37개봉 핵연료다발에 비해 보다 평탄한 반경방향 선출력 분포 및 방출시점에서의 보다 낮은 연료봉출력을 가지는 RUFIC 핵연료다발에 대한 핵분열생성물 재고량은 37개봉 핵연료다발에 비해 약 8% 적게 예측되었다. 특히 보다 낮은 핵연료 온도 분포를 가짐으로 인해 대부분의 방사성핵종들이 입계나 간극으로 확산되지 못하고 결정립내에 갇히게 되는 경향을 보였다.

중단이음관 파손 사고후 핵연료로부터 누출되는 핵분열생성물은 핵연료 파편의 온도와 크기에 따라 달라진다. 이러한 영향을 분석하기 위해 핵연료 파편의 크기가 1 mm와 8 mm인 두 경우에 대해 1-131의 과도기간 누출량 평가를 수행하였다. 파편크기가 1 mm인 경우, RUFIC 핵연료다발이 장전된 채널이 37개봉 핵연료다발이 정전된 채널에 비해 즉각방출량은 약 60 % 정도 감소했으며, 과도기간 중 핵연료파편의 산화에 의한 계속누출량은 약 59 % 정도 감소하였다. 한편 파편크기가 8 mm인 경우에는, RUFIC 핵연료다발이 장전된 채널이 37개봉 핵연료다발이 정전된 채널에 비해 즉각방출량은 약 60 % 정도 감소했으며, 과도기간 중 핵연료파편의 산화에 의한 계속누출량은 약 33 % 정도 감소하였다.

이와 같은 결과로부터 CANDU 6와 같은 중수로에 43개봉 RUFIC 핵연료다발을 장전할 경우 기존의 37개봉 핵연료다발에 비해 중단이음관 파손 사고시에 핵분열생성물 재고량 및 누출량 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] 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.
- [6] 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	6.95×10^3	7682.0	7085.72
I-132	8.23×10^3	11870.52	11016.75
I-133	7.49×10^4	18548.51	17216.85
I-135	2.37×10^4	17417.45	16166.43
I-137	2.45×10^1	9307.51	8664.08
KR-83M	6.70×10^3	1435.51	1332.26
KR-85M	1.61×10^4	3505.65	3253.78
KR-85	3.38×10^3	23.79	25.73
KR-87	4.56×10^3	6819.05	6328.22
KR-88	1.01×10^4	9634.02	8941.50
KR-89	1.90×10^2	12647.38	11776.95
XE-133M	1.93×10^3	524.42	486.74
XE-133	4.57×10^3	17061.66	15786.22
XE-135M	9.18×10^2	2982.75	2766.99
XE-135	3.30×10^4	1987.38	1844.67
XE-137	2.29×10^2	17071.64	15899.34
XE-138	8.52×10^2	17040.73	15807.74
I-134	3.16×10^3	20762.21	19266.49
총 량		176322.2	163666.2

표 2 채널 O6_mod 중단이음관 파손사고시 결정립내 재고량 누출분율 : 파편크기 1 mm

	외환봉		중간봉		내환봉		중심봉	
	37개 봉	RUFIC	37개 봉	RUFIC	37개 봉	RUFIC	37개 봉	RUFIC
다발 1	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
다발 2	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
다발 3	0.04	0.041	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
다발 4	0.106	0.041	0.04	0.04	0.04	0.041	0.04	0.04
다발 5	0.298	0.041	0.04	0.04	0.04	0.041	0.04	0.04
다발 6	0.321	0.041	0.041	0.04	0.04	0.041	0.04	0.04
다발 7	0.397	0.041	0.041	0.04	0.04	0.041	0.04	0.04
다발 8	0.407	0.041	0.041	0.04	0.04	0.041	0.04	0.04
다발 9	0.219	0.041	0.041	0.04	0.04	0.041	0.04	0.04
다발10	0.04	0.041	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
다발11	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
다발12	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04

표 3 채널 O6_mod 중단이음관 파손사고시 결정립내 재고량으로부터 누출된 각 다발과 전체 채널의 I-131 누출량 (TBq) :파편크기 1 mm

	외환봉		중간봉		내환봉		중심봉		다발 총계		
	37개 봉	RUFIC	37개 봉	RUFIC	37개 봉	RUFIC	37개 봉	RUFIC	37개 봉	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 4 채널 O6_mod 종단이음관 파손사고시 결정립내 재고량 누출분율 : 파편크기 8 mm

	외 환 봉		중 간 봉		내 환 봉		중 심 봉	
	37개 봉	RUFIC	37개 봉	RUFIC	37개 봉	RUFIC	37개 봉	RUFIC
다발 1	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
다발 2	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
다발 3	0.049	0.059	0.043	0.046	0.041	0.053	0.041	0.05
다발 4	0.122	0.084	0.049	0.049	0.045	0.068	0.044	0.055
다발 5	0.263	0.084	0.064	0.049	0.048	0.068	0.046	0.055
다발 6	0.272	0.084	0.067	0.049	0.048	0.068	0.046	0.055
다발 7	0.302	0.084	0.071	0.049	0.049	0.068	0.047	0.055
다발 8	0.307	0.084	0.073	0.049	0.049	0.068	0.047	0.055
다발 9	0.214	0.084	0.057	0.049	0.047	0.068	0.045	0.055
다발10	0.063	0.058	0.045	0.047	0.043	0.053	0.042	0.051
다발11	0.043	0.044	0.041	0.041	0.04	0.043	0.042	0.042
다발12	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04

표 5 채널 O6_mod 종단이음관 파손사고시 결정립내 재고량으로부터 누출된 각 다발과 전체 채널의 I-131 누출량 (TBq) : 파편크기 8 mm

	외 환 봉		중 간 봉		내 환 봉		중 심 봉		다 발 총 계	
	37개 봉	RUFIC	37개 봉	RUFIC	37개 봉	RUFIC	37개 봉	RUFIC	37개 봉	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 총 계								696.4	463.9

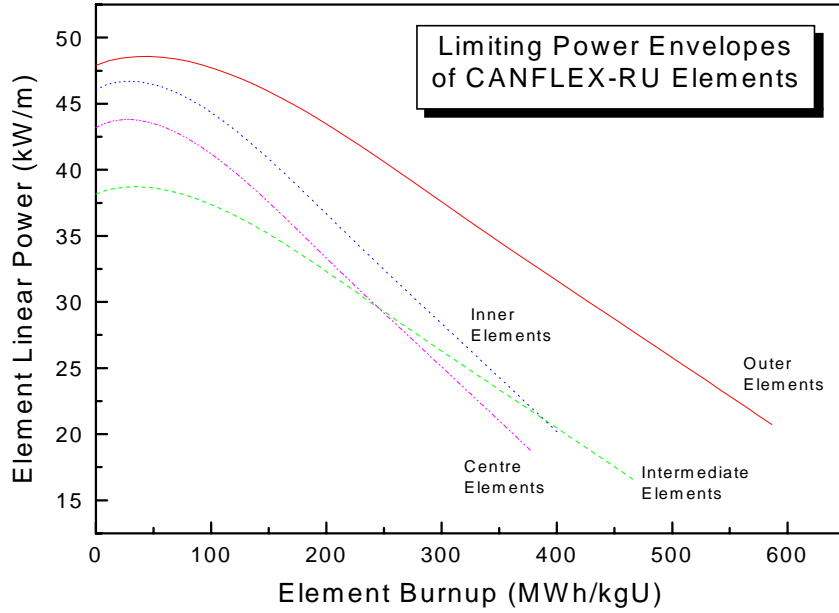


그림 1 핵연료봉의 각 링에 대한 극한출력 경계곡선

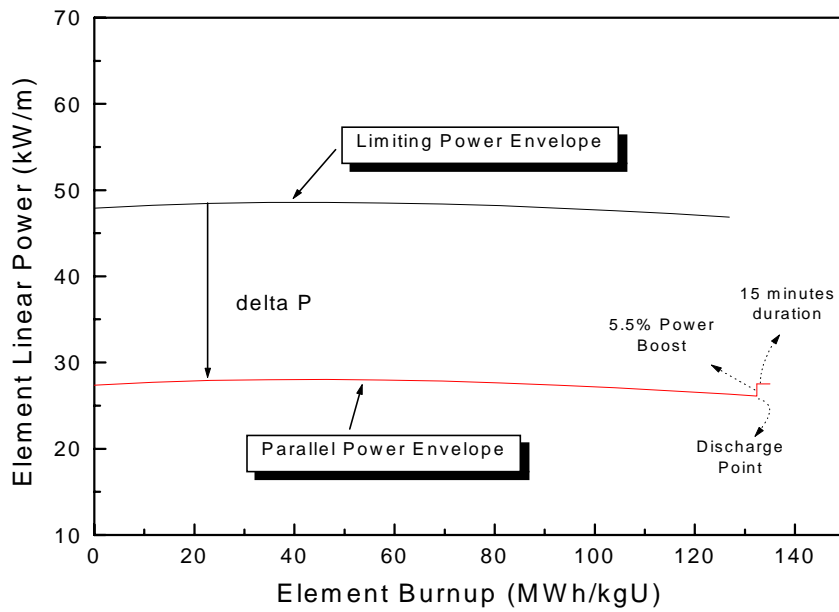


그림 2 극한출력 경계곡선으로부터의 연료봉 출력이력 개발

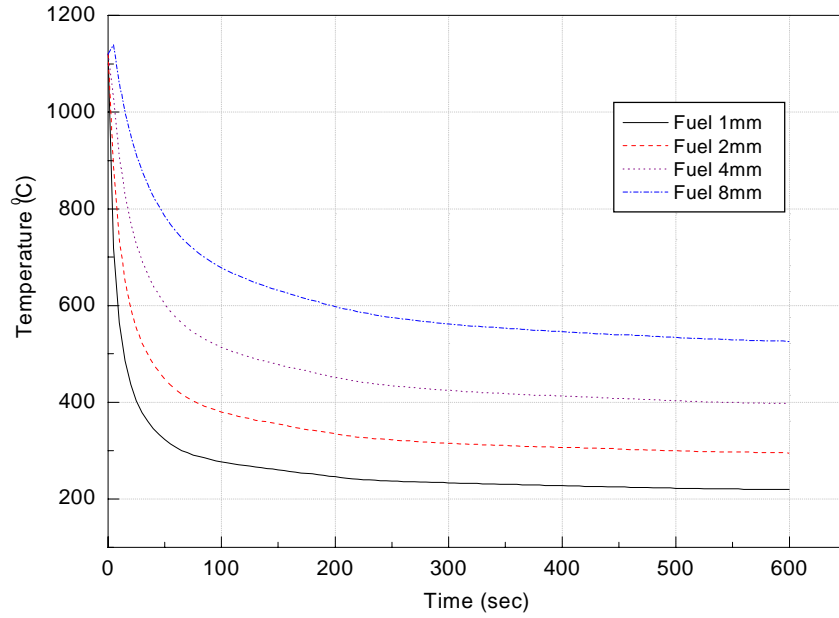


그림 3 37개봉 다발8 외환봉의 종단이음관 사고 후 파편크기에 따른 온도변화

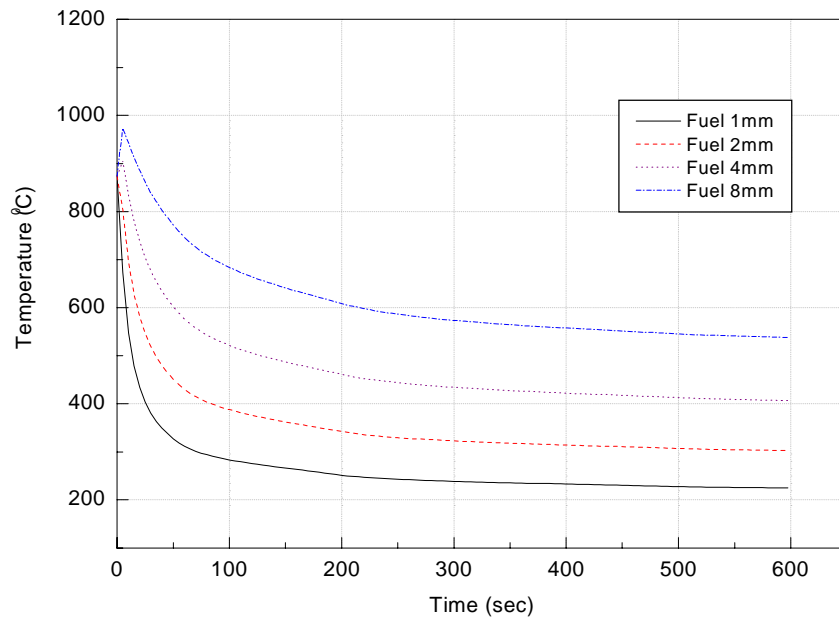


그림 4 RUFIC 다발5 외환봉의 종단이음관 사고 후 파편크기에 따른 온도변화