

DUPIC 핵연료다발의 반경방향 출력분포가 임계열유속에 미치는 영향

Radial Power Profile Effect of DUPIC bundle on Critical Heat Flux

박주환, 정창준, 양명승
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

DUPIC 핵연료다발은 가압경수로의 사용후핵연료를 핵비확산성을 유지하면서 건식 공정으로 재 가공하여 제조되며, CANDU 원자로에 핵연료 재장전 방법은 2 다발 장전 방법을 고려하므로 기존의 37 개 핵연료봉 다발과는 반경 및 축방향 출력 분포가 매우 다르다. 일반적으로 CANDU-6 핵연료다발의 경우 환별 출력분포가 달라지는 경우 부수로의 유동 및 엔탈피 분포가 달라지며, 이는 부수로별 CHF 발생 위치뿐만 아니라 CHF 값도 달라지게 한다. 마찬가지로, 핵연료다발의 축방향 분포가 달라지는 경우 축방향 엔탈피, 건도, 압력 분포 등이 달라질 뿐만 아니라 CHF 및 축방향 CHF 발생 위치도 달라진다.

DUPIC 핵연료다발은 37 개 핵연료봉 다발에 비해 연소도 증가에 따라 환별 출력분포가 크게 달라지는데, 한 개 핵연료 채널내 장전된 12개 핵연료다발들 중 각 두 개 핵연료다발씩 환별 출력분포가 축방향으로 다른 위치에 있는 핵연료다발의 환별 출력분포와 다르다. 따라서, DUPIC 핵연료다발 장전 핵연료 채널의 경우 한 개 핵연료 채널내의 각 다발별 연소도 혹은 환별 출력분포를 어떻게 고려하여 해석하는가가 해석결과에 매우 큰 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서는 한 개 채널내 DUPIC 핵연료다발의 환별 출력분포가 CHF 미치는 영향을 평가하기 위해 열수력 해석을 수행하였다. 이를 위해 ASSERT-PV 부수로 해석 코드를 이용하여 DUPIC 핵연료다발의 0부터 18,000 MWd/tHM 까지의 각 연소도별 부수로 엔탈피, 질량유속 분포와 CHF를 평가하였으며, 그 결과를 기존 37 개 핵연료봉 다발의 결과와 비교.검토하였고, DUPIC 핵연료다발의 기존 CANDU-6 원자로와의 열수력적 양립성을 제시하였다.

ABSTRACT

The axial and ring power profiles of DUPIC bundle are much different from those of reference 37-element fuel bundle since a DUPIC fuel bundle is re-fabricated under proliferation resistance using spent PWR fuel and 2-bundle shift refuelling scheme of DUPIC bundle is proposed to CANDU-6 reactor. In case that the ring power profile of a fuel bundle is altered, the flow and enthalpy distribution of subchannels and the radial position of CHF occurrence will be changed. Similarly, the axial power profile of a fuel channel affects CHF, axial position of CHF occurrence, axial enthalpy, quality and pressure distribution.

The ring power profile of the DUPIC bundle as increasing burnup is much altered and flattened at high burnup, compared to 37-element bundle. It caused that one fuel bundle has a

different ring power profile from the other fuel bundles at the different axial positions even in the same fuel channel. Therefore, how to consider burnup or ring power effect on CHF is very important to DUPIC thermalhydraulic analysis.

At present study, thermalhydraulic analysis of a DUPIC bundle was performed in order to evaluate the ring power profile effect on CHF. The subchannel enthalpy, mass flux and CHF distribution from 0 burnup to discharged burnup (18,000 MWd/tHM) of DUPIC bundle were evaluated using ASSERT-PV subchannel code. The results of DUPIC bundles were compared to those of 37-element bundle and the compatibility of DUPIC bundle with an existing CANDU-6 was presented in a CHF point of view.

1. 서론

원자력 발전 비율이 증가함에 따라 사용후핵연료 누적이 가중되고 이에 대한 처리 방안이 심각하게 대두되고 있다. 따라서 선진국뿐만 아니라 국내에서도 사용후핵연료를 핵폐기물이 아닌 자원으로 이용하고자 하는 연구를 계속하여 왔다. DUPIC 핵연료 기술은 경수로 사용후핵연료를 분리 공정없이 중수로 핵연료로 직접 전환하는 기술로 사용후핵연료 내의 잔존 핵분열성 물질을 최대한 활용할 수 있다. 또한, DUPIC 핵연료 주기기술은 핵확산 저항성이 높고, 우라늄자원의 활용성이 높으며, 방사성 폐기물 방출량을 최소화하는 장점을 갖고 있다[1]. 이러한 DUPIC 핵연료를 중수로 원전에 이용하기 위해서는 기존 중수로 노심 즉, 핵적, 기계적, 열수력적으로 서로 양립하여야 한다.

열수력 측면에서 볼 때 DUPIC 핵연료다발은 경수로용 사용후핵연료를 재 가공하여 제조하고, 핵연료장전 방법도 2 다발 재장전 방법을 이용하므로 축방향 및 반경방향의 열유속 분포가 기존 37-개 핵연료봉 다발과 비교하여 상당히 다르다. 반경방향의 열유속 분포가 달라지는 경우 핵연료 채널 단면의 각 부수로별 유동분포 즉, 유량 및 엔탈피 분포가 달라질 뿐만 아니라 임계열유속 발생 위치에도 영향을 미치게 된다. 또한, 축방향 위치가 달라지는 경우 축방향으로의 엔탈피 분포, 유동 건도분포 및 압력분포도 달라지며 결국 임계열유속에 영향을 주게 된다. 특히, DUPIC 핵연료 다발의 경우 기존 37-개 핵연료봉 다발에 비해 연소도에 따라서 반경방향 열유속 분포가 크게 달라지는데[2] 이는 임계열유속에 커다란 영향을 줄 수 있다.

중수로는 가동중 핵연료 재장전을 수행하며, 핵연료 채널이 수평으로 되어 있어 핵연료다발 장전도 수평으로 이루어진다. 이러한 핵연료 채널 내에서의 열수력 해석은 크게 두가지 해석방법을 통하여 수행되는데, 이는 핵연료 채널내의 복잡한 구조를 한 개의 유동관 내에 유체가 흐른다고 가정한 단일수로 해석 방법과 핵연료봉과 봉들 사이에 형성된 수로를 부수로로 정의하여 각 부수로의 유동장을 해석하는 부수로 해석 방법을 이용한다. 단일수로 해석방법의 경우 계산시간이 짧고, 요구되는 입력자료도 비교적 단순하지만 반경방향으로의 국부적인 유동 물성치를 알 수 없는 단점이 있다. 또한, 임계열유속의 예측을 위해서는 다발에 대한 임계열유속 실험자료 결과와 이를 이용한 다발 임계열유속 모형이 필요하다.

반면에 부수로 해석 방법을 도입하는 경우 각 부수로의 유동 물성치를 계산할 수가 있으므로 채널내 반경방향 유동 분포뿐만 아니라 반경방향으로의 임계열유속 발생 위치에 대한 정보도 얻을 수 있다. 그리고 각 부수로를 한 개의 유동관으로 생각하여, 각 부수로에 대한 지배방정식을 풀고 이와 동시에 부수어들 사이에는 횡류가 존재한다고 가정하여 유동 물성치를 구하게 된다. 따라서, 기존의 원형관에 적용하는 임계열유속 상관식과 직경 차이 및 기하학적 형상 차이에 따른 임계열유속 수정계수를 도입함으로써 새로운 핵연료다발의 임계열유속을 구할 수 있다.

지금까지 DUPIC 핵연료다발에 대한 열수력 해석은 주로 단일 수로 해석 방법을 통해 수행되어 왔으나, 핵연료다발의 임계열유속 및 압력강하에 대한 자료가 부족하여 이에 대한 정확한 계

산 결과를 얻기 힘들었다. 부수로 해석방법을 도입하는 경우 핵연료다발의 각 부품별로 압력 손실 계수, 이들이 임계열유속에 미치는 영향 및 부수로의 수력직경 변화에 따른 임계열유속 변화 등을 고려할 수 있으므로 DUPIC 다발에 대한 임계열유속 실험 결과가 없다하더라도 기존 핵연료다발과의 상대적 비교 분석이 가능하다.

본 연구에서는 DUPIC 핵연료다발의 임계열유속 실험 및 모형 개발이 수행되지 않은 상태에서 DUPIC 핵연료다발의 열수력 거동을 평가하기 위해 KAERI/AECL JRDC(Joint Research Development Center) 프로그램에 의해 캐나다로부터 전수된 ASSERT-PV 코드[3]를 이용하여 37-핵연료봉 다발 및 DUPIC 핵연료다발의 임계열유속 계산을 수행하였다. 또한, 임계열유속 상관식으로 ASSERT-PV 코드에 내장된 tube table lookup method[4]를 이용하여 연소도 변화에 따라 달라지는 DUPIC 핵연료다발의 반경방향 열유속 분포가 임계열유속에 미치는 영향을 분석하였고, 그 결과를 기존 37 개 핵연료봉 다발의 임계열유속 결과와 비교 검토하였다.

2. DUPIC 핵연료다발 및 입력자료

2.1 DUPIC 핵연료다발

DUPIC 핵연료다발은 기존의 UO_2 소결체 대신 경수로용 사용후핵연료를 OREOX 공정을 거쳐 소결체를 성형 가공하며, 외형은 43개 이원봉 구조로 기존 중수로 핵연료 채널과 기하학적으로 양립하도록 설계한다는 개념이다. 고려되고 있는 DUPIC 핵연료다발이 압력관에 장전되었을 경우 채널 단면도와 43 개 핵연료봉 다발의 중심과 압력관에 의해 형성되는 부수로 및 절점 번호를 Figure 1에 나타내었으며, 기존 37 개 핵연료봉 다발과 비교하였다. Figure 1에서 보는 바와 같이 DUPIC 핵연료다발의 핵연료봉 개수는 43개로 기포반응도를 감소시키기 위해 중심봉 한 개에 다이오프록시움 독극물을 혼합하며, 직경은 13.5 mm이다. 내부봉 7개는 직경이 13.5 mm로 농축도 약 1.5 %를 갖는 사용후핵연료를 사용하며, 중간봉 14개와 외환봉 21개는 직경이 11.5 mm이고 내환봉과 동일한 농축도를 갖는 사용후핵연료를 이용한다[2].

2.3 주요 입력자료

부수로 해석코드인 ASSERT-PV 코드에 의한 해석을 위해서는 여러 가지 입력자료 요구되며, 특히 채널의 기하학적 형상에 대한 복잡한 자료가 요구된다. 즉, 기존의 수직 유동 채널에서는 부수로별 유동장에 미치는 중력의 영향을 무시할 수 있었으나, 중수로와 같이 수평 유동채널에서는 중력의 영향이 고려되어야 한다. 따라서, 수평채널에서의 핵연료봉들의 반경방향 위치가 중요하며, 이들의 위치를 정확하게 지정해 주도록 되어 있다. ASSERT-PV 코드에서는 각 부수로의 기하학적 제원 뿐만 아니라 부수로 무게 중심간 거리, 위치 및 기준 점에서의 핵연료봉들의 위치에 대한 정보를 입력하도록 되어 있으며, 기하학적 입력자료, 축방향 열유속 분포, 반경방향 출력분포를 다음에 기술하였다.

기하학적 구조

핵연료다발의 부수로별 기하학적 구조에 대한 자료가 요구되는데, 부수로 형태, 유동 면적, 접수길이, 가열길이, 인접수로 번호, 인접부수로 사이의 간격, 부수로 무게중심간 거리, 부수로간 무게중심간 가상 연결선의 각도 등에 대한 자료가 요구된다. 특히, 무게중심간 거리와 가상연결선의 각도는 지배방정식을 푸는데 중요한 자료가 되므로 이에 대한 정확한 계산 입력자료가 요구된다.

본 계산에서는 DUPIC 핵연료다발이 원자로에 장전된 상태를 모사하게 되므로 다발 중심과 압력관 중심이 일치되지 않고 편심이 발생한다. 따라서, 최소 대칭단면은 180도 대칭 단면이 되지 만 전체 부수로를 모사하였다. Figure 1에 DUPIC 핵연료다발 및 37-개 핵연료봉 다발의 단면과

각 부수로들의 형상 및 절점 번호를 비교되어 있으며, 각 부수로의 면적, 부수로 면적 중심 (centroid), 봉간 간격 및 부수로간에 이루어지는 각도(offset angle)에 대해 CANGEO 프로그램[5]을 이용하여 계산하였으며, 부수로간 이루어지는 가상선의 각도는 수직선을 0도로 하여 계산하였다. 또한 핵연료다발의 중심이 압력관 중심에서 아래쪽으로 편심되며, 그 편심은 압력관의 크립 발생률에 따라 달라지고 크립이 발생하지 않은 경우 자중에 의한 편심은 0.65 mm (압력관 직경 : 103.38 mm)이 되며, 12개 다발이 장전된 한 개 채널의 총 길이는 5.9436 m 이고, 유동방향은 수평 유동이다.

축방향 열유속 분포

DUPIC 핵연료다발의 핵연료 채널내 축방향 열유속 분포는 핵적 계산으로부터 얻어지며, 각 채널마다 열유속 분포가 조금씩 다르다. 본 계산에서는 DUPIC 핵연료다발에 대한 핵적 해석 자료를 이용하여 최소 임계채널출력을 갖는 채널인 H-07의 축방향 열유속 분포[6]를 이용하였다. 또한, 37-개 핵연료봉다발의 경우에는 최소 임계채널출력비 채널이 L-11 채널이므로 이 채널에 대한 축방향 열유속 분포[6]를 이용하였다. 각 핵연료다발의 축방향 채널출력 분포를 Figure 2에 비교하였으며, 그림에서 보는 바와 같이 37-개 핵연료봉 다발의 경우 축방향 중심부근에서 최고출력이 나타나지만 장전 방법의 변경으로 인해 DUPIC 핵연료다발의 경우 축방향 상류 지역에서 최고출력이 나타난다.

반경방향 출력 분포

DUPIC 핵연료다발에 대한 반경방향 출력 분포는 핵적 계산으로부터 얻어지며, 연소도가 달라짐에 따라 그 분포가 크게 달라진다. 또한, 연소도에 따른 반경방향 출력분포는 37 개 핵연료봉과 비교하여 Figure 3에 제시하였다. DUPIC 핵연료다발은 2 다발 장전방법을 택하므로 두 개 다발마다 반경방향 출력분포가 크게 달라진다[6]. 즉, 채널입구 두 개 다발은 초기연소도의 출력분포를 갖으며, 그 다음 두 개 다발은 연소도가 총 연소도의 1/6의 연소가 진행된 반경방향 출력분포를 갖는다. 이와 같은 방법으로 채널출구 부분의 2개 다발은 총연소도의 5/6의 연소가 진행된 반경방향 출력분포를 갖게 된다. DUPIC 핵연료다발 장전 채널의 열수력 해석을 위해 장전방법에 따라 실제 상태를 모사하는 방법을 택하여야 하나 현재의 ASSERT-PV 부수로 해석 코드에서는 각 핵연료다발별로 반경방향 출력분포를 달리 선택할 수 없다. 따라서, 본 해석에서는 핵연료채널 내 장전된 37개 핵연료봉다발 및 DUPIC 핵연료다발 12개가 모두 동일한 반경방향 출력분포를 갖는다고 가정하여 연소도 0부터 18,000 MWd/tHM 에 대해 계산하였다.

한편, DUPIC 핵연료채널의 반경방향 출력분포가 열수력 해석 결과에 미치는 영향을 검토하기 위해 초기 연소도(0 MWd/tHM)부터 말기 연소도(18,000 MWd/tHM)까지를 24등분하여 24가지 종류에 해당하는 반경방향 출력분포에 대해 각각의 열수력 영향을 평가하였다. 37-개 핵연료봉다발의 경우에는 말기 연소도가 약 7,000 MWd/tU이 되나, DUPIC 핵연료다발의 열수력 해석 결과와 비교를 위해 DUPIC 핵연료채널과 마찬가지로 총 연소도 18,000 MWd/tU을 24 구간으로 나누어 한 개 채널내 축방향으로 동일한 반경방향 출력분포를 이용하였다.

3. 해석 결과 및 검토

본 부수로 해석을 통해 DUPIC 핵연료다발의 열수력해석을 수행하였으며, 임계열유속 특성을 평가하였다. 또한, 이 결과를 37-핵연료봉다발의 열수력적 특성과 상호 비교함으로써 DUPIC 핵연료다발의 열수력적 타당성을 제시하고자 하였다. 현재 KAERI 보유 ASSERT-PV 코드는 AECL로부터 도입된 것이며, 37-핵연료봉다발에 대한 열수력적 검증은 이미 수행되었으나[3], DUPIC 핵연료다발에 대해서는 아직까지 열수력 실험이 수행된 적이 없으며, 검증된 전산코드도 없는 실정이다. 그러나, 43개 핵연료봉으로 구성된 DUPIC 핵연료다발과 37-핵연료봉 다발의 부수로내에서 유

로 측면에서 매우 유사하므로 본 부수로 해석을 통해 DUPIC 핵연료다발과 37-핵연료봉 다발 열수력 해석 결과와의 상대 비교를 수행하고자 하였다.

따라서, 본 해석에서는 DUPIC 핵연료다발과 37-핵연료봉다발의 최소 임계채널출력비 채널[6]에 대해 동일한 채널출력 및 유량 조건을 이용하였으며, 이로부터 최소 임계출력비를 계산하였다.

3.1 핵연료채널 출력

37-개 핵연료봉다발 장전 및 DUPIC 핵연료다발 장전 최소임계출력비 채널의 축방향 출력분포가 Figure 2에 비교되어 있다. DUPIC 핵연료다발의 2개 다발 장전 방법으로 변경은 37-개 핵연료봉 다발에 비해 채널 출력분포 변화를 초래하며, 연소도에 따라 반경방향 출력분포도 상당히 달라진다. Figure 2에 나타난 37-개 핵연료봉 다발 및 DUPIC 핵연료다발의 최소임계출력비 채널에 대한 축방향 출력분포를 보면 37-개 핵연료봉 다발 장전 L-11 채널은 축방향 중앙 지점이 최대 출력을 나타내는 코사인 형태의 출력 분포로 나타난다. 반면에 DUPIC 핵연료다발 장전 H-07 채널의 경우 축방향 중앙에서 상류 지역에 최대 출력이 나타나고 하류로 갈수록 출력이 낮아지는 형태이다. DUPIC 핵연료다발 장전 채널의 이러한 전형적인 출력 분포로 인해 37-개 핵연료다발에 비해 상류 쪽에 엔탈피 증가를 초래하고, 비등길이가 증가하여 압력강하가 증가하게 되는 경향이 있으므로 임계열유속에는 나쁜 영향을 줄 수가 있다. 반면, 채널의 임계열유속은 일반적으로 압력, 질량유속, 유체 건도 및 비등길이의 함수로 나타나므로 축방향 하류 지점으로 갈수록 임계열유속이 낮아진다. 따라서, DUPIC 핵연료다발 장전 채널의 경우, 임계열유속 관점에서 볼 때 상류 지점의 최대 축방향 출력, 비등 발생길이 증가 및 압력강하 증가로 임계열유속비 감소를 초래할 수 있으나, 하류의 낮은 출력은 임계열유속 비를 증가시키는 영향을 주므로 열수력적 상호 보상 효과의 형태로 나타나게 된다.

한편, DUPIC 핵연료다발은 연소도가 기존 다발에 비해 최소 2배 이상이 되고 연소도에 따른 반경방향 출력분포도 Figure 3에서와 같이 변화가 심하다. 37 개 핵연료봉 다발의 경우 연소도가 약 7,000 MWd/tU 이지만 DUPIC 핵연료다발의 경우와 비교를 위해 18,000 MWd/tU 까지 반경방향 열유속분포에 대해 계산을 하였다. Figure 3에서 보듯이 DUPIC 핵연료다발의 경우 초기 연소도에서는 최외곽 환의 핵연료봉들의 출력이 중심에 비해 매우 높으며, 중심환 쪽으로 갈수록 출력이 낮아진다. 반면에 말기 연소도에서는 최외곽 환의 출력이 매우 낮아지고 중심 환의 출력이 높아져 출력분포가 평탄해지는 것을 알 수 있다. 이러한 초기 연소도시 DUPIC 핵연료다발 최외곽 환의 높은 출력은 최소 임계열유속 비 감소에 기여할 것으로 예상되며, 연소 말기에는 출력분포가 평탄해짐으로써 최소 임계열유속 비가 상승할 것으로 예상된다.

본 계산에서는 각 핵연료다발의 초기 연소도를 포함하여 연소도 18,000 MWd/tHM 까지 24단계로 나누어 계산하였으며, 이들 결과 중 세가지 연소도 조건(0, 14,000 및 18,000 MWd/tHM)에 대한 엔탈피 및 질량유속의 결과를 비교하였다.

3.2 축방향 최소 임계열유속 발생 위치

각 핵연료다발의 축방향 최소 임계열유속 발생 위치 계산 결과를 Figure 4에 제시하였다. Figure 4에서 보는 바와 같이 초기 연소도에서 DUPIC 핵연료다발은 8번째 다발의 축방향 중앙 하류 지점에서 최소 임계열유속이 발생하였으며, 연소도가 약 2,000 MWd/tHM 진행된 후에는 8번째 다발 중앙 지점으로 이동하였다가, 연소도 14,000 MWd/tHM 이후에는 다시 8번째 다발 하류쪽의 지지체 부근에서 임계열유속이 발생하였다. 반면에 37-개 핵연료봉 다발의 경우 연소 초기에 8번째 다발의 하류쪽 지지체 부근에서 임계열유속이 발생하였다가 연소도 3,000 MWd/tHM 이후에는 상류쪽으로 조금 이동하였으며, 이 이후 연소도에서는 축방향 임계열유속 발생 위치의 변화가 없었

다. 이 결과에서 두 다발 장전 방법을 택하고 있는 DUPIC 핵연료다발 재장전 관점에서 볼 때 축방향 임계열유속 발생 위치인 8번째 핵연료다발은 약 9,000 MWd/tHM 정도의 연소도를 경험한 다발이다. 반면에 37 개 핵연료봉 다발의 축방향 임계열유속 발생위치를 나타낸 Figure 4에서 볼 때 연소도에 따른 반경방향 출력분포 변화가 거의 없으므로 인해 최소 임계열유속 발생 위치의 변화도 거의 없었다.

3.3 부수로 엔탈피 분포

채널출구 지점

초기, 중기 및 말기 연소도에 대한 채널 출구에서의 부수로별 엔탈피 분포를 DUPIC 핵연료다발 및 37-개 핵연료봉 다발의 계산결과를 비교하여 Figure 5에 나타내었다. 먼저, DUPIC 핵연료다발의 엔탈피 분포를 보면 초기 연소도의 경우 내부 부수료들의 엔탈피가 외부 부수료의 엔탈피보다 낮은 것으로 나타났으며, 이는 Figure 3(a)에서 보는 바와 같이 내부 8개 봉들의 출력이 외곽 봉들의 출력보다 상당히 낮았기 때문이다. 반면에 말기 연소도의 경우 내부봉들 주변 부수료의 엔탈피가 외곽 부수료들의 엔탈피보다 높았으며, 초기연소도에 비해 평탄하게 나타났다. 이는 Figure 3(a)에서 보는 바와 같이 봉들의 출력이 초기 연소도에 비해 상당히 평탄화되었기 때문이다. 또한, 다발 중심에서 아래쪽 부수료들의 엔탈피가 상부 부수료들의 엔탈피보다 낮았으며, 이는 중력에 의해 기포들이 상부로 이동하였기 때문인 것으로 보인다.

37-개 핵연료봉 다발의 경우에는 중심봉 주변 부수료들의 엔탈피가 외곽봉 주변 부수료들의 엔탈피 보다 높게 나타났으며, 초기 연소도에 대한 결과가 말기 연소도에 대한 결과와 거의 동일한 것으로 나타났다. 이는 Figure 3(b)에서 보는 바와 같이 연소도에 따른 반경방향 출력분포의 변화가 거의 없었기 때문이었다. 또한, 37-개 핵연료봉 다발의 경우에도 다발 중심을 기준으로 상·하부 부수료들의 엔탈피 분포를 비교해 보면 DUPIC 핵연료다발의 경우와 마찬가지로 상부 부수료들의 엔탈피가 하부 부수료들의 엔탈피보다 높게 나타났다.

CHF 발생지점

세가지 연소도 조건(초기, 14,000 MWd/tHM 및 18,000 MWd/tHM)에 대해 축방향 임계열유속 발생지점(축방향 8번째 다발 지점)에서의 부수로별 엔탈피 분포를 Figure 6에 비교하였다. 초기 연소도의 결과인 Figure 6 상부 그림에서 보는 바와 같이 DUPIC 핵연료다발의 경우 내부 부수로보다 외부 부수료의 엔탈피가 높게 나타났으나, 37-개 핵연료봉 다발의 경우 내부 부수로보다 외부 부수료의 엔탈피가 낮아졌다. 이는 채널 출구에서의 결과와 마찬가지로 DUPIC 핵연료다발의 초기 연소도의 경우 외곽환의 출력이 내부환의 출력보다 상당히 높기 때문이다. 연소도 14,000 MWd/tHM에 대한 엔탈피 분포는 Figure 6 중앙부에 제시하였으며, 그림에서 보는 바와 같이 37 개 핵연료봉다발의 경우에는 초기 연소도와 비교하여 엔탈피 분포의 변화가 거의 없으나, DUPIC 핵연료다발의 경우 초기 연소도 경우에 비해 내부 부수료들의 엔탈피가 증가하였고 외곽봉 주변 부수료의 엔탈피는 상대적으로 낮아졌다. 말기 연소도인 18,000 MWd/tHM에 대한 엔탈피 분포를 보면 연소도 14,000 MWd/tHM의 조건에 비해 DUPIC 다발의 엔탈피 분포는 중앙 부수료들의 엔탈피가 조금 더 높아졌으며, 37-개 핵연료봉다발의 경우에는 예상되었던 바와 같이 거의 변화가 없었다. 이들 두가지 종류 다발의 엔탈피 분포를 상호 비교해 볼 때 말기 연소도에 가까워짐에 따라 DUPIC 핵연료다발의 엔탈피 분포가 37-개 핵연료다발의 엔탈피 분포 보다 매우 균일해 짐을 알 수 있었다.

한편, 축방향 임계열유속 발생지점에서의 엔탈피 분포와 채널 출구에서의 엔탈피 분포를 비교해 보면 임계열유속 발생지점에서는 채널 단면 상부 부수료들의 엔탈피가 낮았으나, 채널 출구에서는 채널단면 상부 부수료들의 엔탈피가 높은 것으로 나타났다. 이는 유체가 축방향으로 이동 중에 생

성된 기포들의 생성량이 많아지면서 void drift 현상과 중력에 의해 상부로 이동되었기 때문인 것으로 보인다.

3.3 축방향 CHF 발생지점의 부수로 질량유속 분포

축방향 CHF 발생 지점에서의 부수로별 질량유속 분포를 Figure 7에 나타내었다. Figure 7에서 보는 바와 같이 초기 연소도시 DUPIC 핵연료다발 내부 부수호가 외부 부수호보다 질량유속이 높은 반면, 37-개 핵연료봉 다발의 경우 7개 내부봉 주변 부수호의 질량유속이 외곽 혹은 중심봉 주변 부수호보다 낮아졌다. 이는 DUPIC 핵연료다발의 경우 초기 연소도시 중심봉 및 내한봉의 출력이 외곽환 봉들 보다 상당히 낮아 내부봉 주변 부수호들에서 기포 발생량이 적었기 때문이며, 반면에 37-개 핵연료봉 다발의 경우에는 중심봉 및 내한봉의 출력이 DUPIC 핵연료다발에 비해 상대적으로 높았기 때문인 것으로 보인다.

연소도 14,000 MWd/tHM에 대해 DUPIC 핵연료다발의 경우 초기 연소도에 비해 질량유속 분포가 균일해졌으며, 단면 상부 부수호들의 질량유속이 대체로 높았다. 37-개 핵연료봉다발의 경우 초기 연소도와 거의 동일한 것으로 나타났으며, DUPIC 핵연료다발과 마찬가지로 상부 부수호의 질량유속이 높았다.

연소도 18,000 MWd/tHM에 대해 37-개 핵연료봉 다발의 경우는 예상된 바와 같이 전 연소도 기간의 경우와 거의 동일한 결과를 얻었으나, DUPIC 핵연료다발의 경우에는 연소도가 진행됨에 따라 부수로별 질량유속의 분포가 보다 균일해 짐을 알 수 있었다. 이는 DUPIC 핵연료다발의 경우 Figure 3(a)에서 보는 바와 같이 연소도가 진행될수록 출력이 평탄지기 때문에 질량유속도 매우 균일화된 것으로 나타났다.

3.4 부수로별 최소 임계열유속 발생 위치

DUPIC 핵연료다발 및 37-개 핵연료봉 다발의 부수로별 최소 임계열유속 발생 위치에 대한 결과를 Figure 8 및 Figure 9에 각각 제시하였다. DUPIC 핵연료다발의 핵연료봉 및 부수로별 CHF 발생위치를 나타낸 Figure 8에서 볼 때 초기 연소도에서 9,000 MWd/tHM 까지 DUPIC 핵연료다발은 외곽봉 35번 혹은 36번 핵연료봉과 접한 38번 부수호에서 최소 임계열유속이 발생하였으며, 연소도 14,000 MWd/tHM 까지는 수직 대칭 지점인 32번 혹은 31번 핵연료봉과 접한 32번 부수호에서 최소 임계열유속이 발생하였다. 연소도 14,000 MWd/tHM 이상에서는 최소 임계열유속 발생 지점이 중간 부수로로 이동하였으며, 내부 핵연료봉 6번에 접한 15번 부수호에서 최소 임계열유속이 발생하였다. 반면에 37 개 핵연료봉 다발의 경우 외곽 핵연료봉 30번 혹은 31번과 접한 34번 부수호에서 최소 임계열유속이 발생하였다.

이들 결과를 종합하면, 연소도 14,000 MWd/tHM까지는 DUPIC 핵연료다발 및 37 개 핵연료봉 다발 모두 거의 동일한 위치인 최외곽 핵연료봉의 중심에 접한 부수호들 중, 단면에서 볼 때 하부 부수호에서 최소 임계열유속이 발생하였다. 그러나, DUPIC 핵연료다발의 경우 14,000 MWd/tHM 이상의 연소도에서는 반경방향 출력분포의 평탄화로 인해 최소 임계열유속 발생 위치가 내부 핵연료봉들의 바깥쪽 하부 부수로로 이동하였다. 전술한 부수로별 엔탈피 분포 면에서 볼 때 채널 출구 부분에서는 횡단면 상부 유로 지역이 엔탈피가 높으나, 임계열유속 발생 축방향 지점에서의 횡단면에서는 하부 부수로 지역의 엔탈피가 높았기 때문에 모든 최소 임계열유속 발생지점이 핵연료다발의 횡단면 하부 부수호에서 임계열유속이 먼저 발생한 것으로 나타났다.

3.5 최소 임계열유속비

상기 두 가지 핵연료다발의 연소도에 따른 최소 임계열유속비 계산 결과를 Figure 10에 비교

하여 나타내었다. DUPIC 핵연료다발의 경우 연소도에 따라 최소 임계열유속비가 증가하였으며, 연소도 약 14,000 MWd/tHM에서 최대값이 얻어졌으며, 이후에는 다시 감소하는, 연소도 증가에 따라 단조 증가 후 단조 감소하는 경향을 나타내었다. 이 원인은 Figure 3(a)에 제시한 DUPIC 핵연료다발의 반경방향 출력분포가 연소도 증가에 따라 평탄해 짐으로써 임계열유속을 향상시키는 효과를 나타내는 것을 알 수 있었다.

37-개 핵연료봉 다발의 경우에는 Figure 10에서 보는 바와 같이 연소도 증가에 따라 최소 임계열유속비의 변화가 거의 없었으며, 이는 Figure 3(b)에서 보는 바와 같이 연소도 증가에 따라 반경방향 출력분포의 변화가 거의 없었기 때문이다.

한편, DUPIC 핵연료다발과 37-개 핵연료봉다발의 최소 임계출력비를 비교해 보면 초기연소도의 경우 DUPIC 핵연료다발의 최소 임계열유속비가 7.3 % 낮았으나, 연소도 9,000 MWd/tHM에서 거의 동일한 것으로 나타났고, 연소도 14,000 MWd/tHM에서는 37개 핵연료봉 다발 대비 DUPIC 핵연료다발의 최소 임계열유속비 상승이 4 %로 가장 높았다. 이러한 결과는 고연소도에서 DUPIC 핵연료다발의 반경방향 출력분포가 평탄해짐에 따라 임계열유속 향상을 가져온다는 것을 나타내 주고 있다. 그러나, DUPIC 핵연료다발의 연소도 14,000 MWd/tHM 이상에서는 내부봉 7개의 반경방향 출력이 다른 핵연료봉들의 출력에 비해 상대적으로 커졌기 때문에 14,000 MWd/tHM 이상의 고연소도에서는 임계열유속 발생이 외곽봉들에서 내부봉으로 옮겨졌으며, 이러한 현상이 임계열유속에 영향을 미친 것으로 나타났다.

3.6 DUPIC 핵연료다발의 열수력적 평가

기존 37-개 핵연료봉 다발의 경우 0.71 % 농축도를 갖는 천연우라늄을 이용하고 8-다발씩 장전하므로 핵연료 채널내 장전된 다발들간의 반경방향 출력분포의 차이가 심하지 않았다. 그러나, DUPIC 핵연료다발의 경우에는 약 1.4 % 농축도를 이용하며, 2-다발씩 장전하는 방법을 택하므로 인해 연소도에 따른 핵연료다발 반경방향의 출력분포에 커다란 변화가 발생한다. 또한, 한 개의 핵연료 채널 내에서도 각 다발들 간의 반경방향 출력분포가 상당히 다르다. DUPIC 핵연료다발과 같이 연소도에 따른 반경방향 출력분포의 커다란 변화는 부수로 엔탈피 분포, 최소 임계열유속 발생 위치 및 최소 임계열유속비에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

한편, DUPIC 핵연료채널은 2다발 장전 방법을 선택하며, 정상적인 핵연료 재장전 방법을 택하는 경우 두 다발씩 연소도가 다르므로, 채널 입구에서부터 채널 출구 쪽으로 이동할수록 핵연료다발의 연소도가 약 3,000 MWd/tHM 씩 증가하게 되어 새 핵연료 장전 시점에 출구 마지막 두 개 핵연료다발은 15,000 MWd/tHM의 연소도를 이미 경험한 다발이 된다. 또한, 전술한 바와 같이 DUPIC 핵연료다발 장전 채널의 축방향으로 최소 임계열유속비 다발 발생 지점이 8번째 핵연료다발이 되므로 새 핵연료 장전시 채널 입구에서 8번째 DUPIC 핵연료다발은 9,000 MWd/tHM의 연소도를 이미 경험한 다발이고, 이 핵연료다발의 반경방향 출력분포는 Figure 3(a)에서 보는 바와 같이 상당히 평탄하다. 즉, DUPIC 핵연료 장전 채널의 하류쪽 8번째 핵연료다발에서 최소임계열유속이 발생한다는 점에서 DUPIC 핵연료 장전 채널의 임계채널출력이 37-개 핵연료봉 다발 장전 채널의 경우보다 저하되지는 않는다는 것을 알 수 있다.

본 부수로 해석에서 핵연료 채널내 12개 핵연료다발이 동일한 반경방향 출력분포를 갖는다는 가정으로부터 얻은 부수로 해석 결과로 볼 때 DUPIC 핵연료다발의 연소도가 약 9,000 MWd/tHM 이상의 경우 기존 37-개 핵연료봉 다발보다 임계채널출력이 증가되며, 연소도 14,000 MWd/tHM에서 최소 임계열유속비가 최대로 향상된다는 것을 알 수 있었다. 이와 같이 DUPIC 핵연료 채널내 장전된 각 핵연료다발들의 연소도 조건을 고려하여 최소 임계열유속비를 평가해 볼 때 DUPIC 핵연료채널의 최소 임계열유속비는 37-개 핵연료봉 다발 장전 채널보다 동일하거나 향상되는 것으로

나타났다. 그러나, DUPIC 장전 핵연료 채널에 대한 보다 정확한 부수로 해석을 위해서는 핵연료 채널내 임의의 핵연료다발 상류 지점의 반경방향 출력분포로 인한 유동 분포가 하류 지점의 유동 분포에 미치는 영향을 고려한 해석이 수행되어야 할 것으로 보인다.

4. 결론

DUPIC 핵연료다발의 반경방향 출력분포가 임계열유속에 미치는 영향을 평가하기 위하여 부수로 해석 방법을 도입하여 열수력 해석을 수행하였다. 기존 37 개 핵연료봉 다발은 연소도 증가에 따라 반경방향의 출력분포가 거의 동일한 반면 DUPIC 핵연료다발은 연소도 증가에 따라 반경방향 출력분포의 변화가 크므로 이를 고려하여 열수력적 평가를 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

37 개 핵연료봉 다발에 비해 DUPIC 핵연료다발과 같이 연소도에 따른 반경방향 출력분포 변화가 큰 경우 부수로 엔탈피 분포, 최소 임계열유속 발생 위치 및 최소 임계열유속비에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다.

DUPIC 핵연료다발 장전 채널의 경우 전 연소도 조건(0 ~ 18,000 MWd/tHM)에서 최소 임계열유속은 유동방향으로 8번째 핵연료다발에서 발생하였으며, 37-개 핵연료봉 다발도 마찬가지로 8번째 핵연료다발에서 임계열유속이 발생하였다. DUPIC 핵연료다발의 최소 임계열유속 발생 위치인 8 번째 다발은 실제 장전 상태를 고려한 핵연료 채널내의 각 다발 별 연소도 조건에서 볼 때 약 9,000 MWd/tHM 이상 진행된 다발이었다.

DUPIC 핵연료다발은 37-개 핵연료봉 다발의 경우보다 고연소도로 갈수록 축방향 임계열유속 발생 지점에서의 질량유속 및 엔탈피 분포가 균일해지는 것으로 나타났다. 이러한 유동 분포의 결과는 임계열유속에 크게 영향을 미쳤으며, DUPIC 핵연료다발 장전 채널의 임계열유속 발생 위치에서 연소도가 약 9,000 MWd/tHM 이상이 됨을 고려해 보면 기존 37-개 핵연료봉 다발의 경우보다 임계열유속이 향상될 수 있으며, 임계열유속 발생 위치에서의 연소도가 14,000 MWd/tHM인 경우에는 37 개 핵연료봉 다발 대비 최고 4 % 까지 최소 임계열유속비가 향상된다는 것을 알 수 있었다.

따라서, DUPIC 핵연료다발 장전 채널의 각 다발별 연소도 조건을 고려한 열수력해석 결과, DUPIC 핵연료채널은 기존 CANDU-6 원자로와 임계출력비 측면에서 양립할 뿐만 아니라 DUPIC 핵연료채널의 최소 임계채널출력은 37-개 핵연료봉 다발 장전 채널보다 동일하거나 우수하다고 볼 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력 중장기 개발 계획의 일환으로 수행된 것입니다.

참고문헌

- [1] H. Keil, P.G. Boczar and H.S. Park, Options for the Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU (DUPIC), Proceeding of 3rd International Conference of CANDU Fuel, Chalk River, Canada, 1992.
- [2] H.B. Choi et al. Physics study on Direct Use of Spent PWR Fuel in CANDU (DUPIC), Nucl. Sci. Eng., 126, 80, 1997
- [3] E.K. Zariffah and P. Pfeiffer, ASSERT-PV V2R8M1 : Release Documentation for ASSERT-PV V2R8M1
- [4] Groeneveld, D.C., Cheng, S.C., and Doan, T. 1986 AECL-UO Critical Heat Flux Lookup

Table, Heat Transfer Engineering, Vol. 7, No. 1-2, pp. 46-62.

- [5] J.H. Park, J.S. Jun, H.C. Suk, D.H. Hwang and Y.J. Yoo, CANGEEO Program Description and User's Instruction, KAERI/TR-000/97, October 1997.
- [6] 최항복 외, 경중수로 연계 핵연료주기 기술개발-DUPIC 핵연료 양립성평가, KAERI/RR-1999/99, 과학기술부, 2000년 3월

Table 1. Operating conditions for 37-element and DUPIC fuelled channel

Parameter	37-element Channel	DUPIC fuel channel
Channel exit pressure	10.0 MPa	10.0 MPa
Channel Inlet temperature	256.0 °C	256.0 °C
Channel Mass flow rate	20 kg/s	20 kg/s
Channel inlet mass flux	5.5350 kg/m ² s	5.844265 kg/m ² s
Averaged heat flux	1.02838 MW/m ²	1.082525 MW/m ²

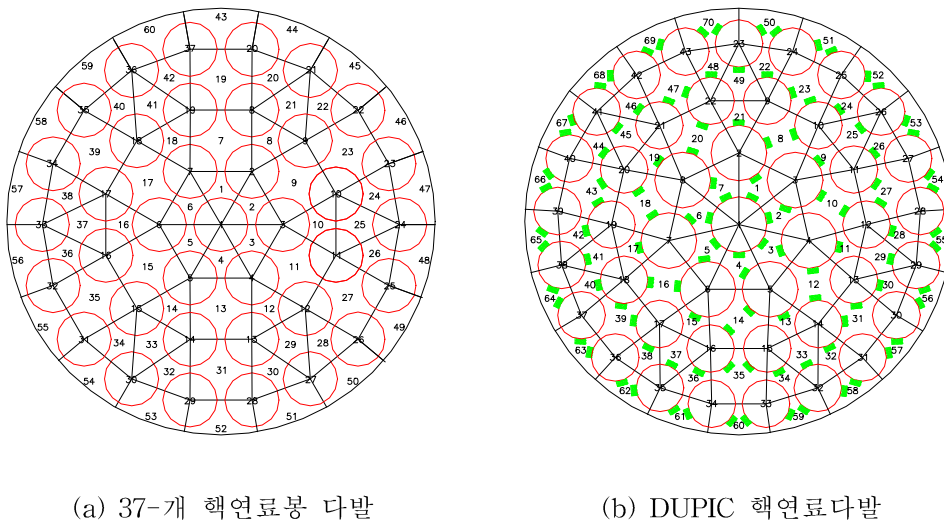


Figure 1. Cross-sectional View and Subchannel and Rod Numbers of DUPIC and 37-element Bundles

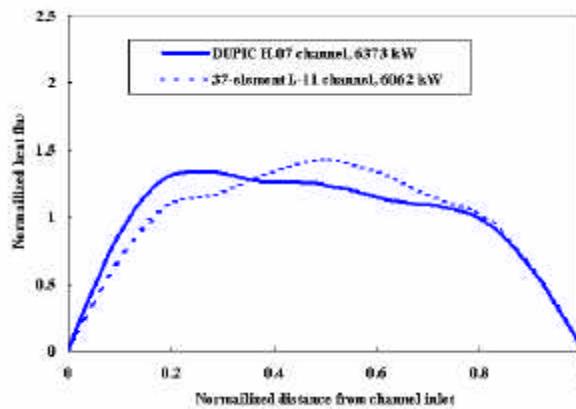
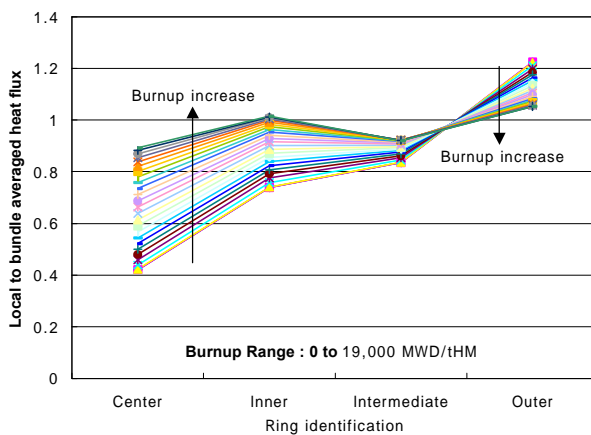
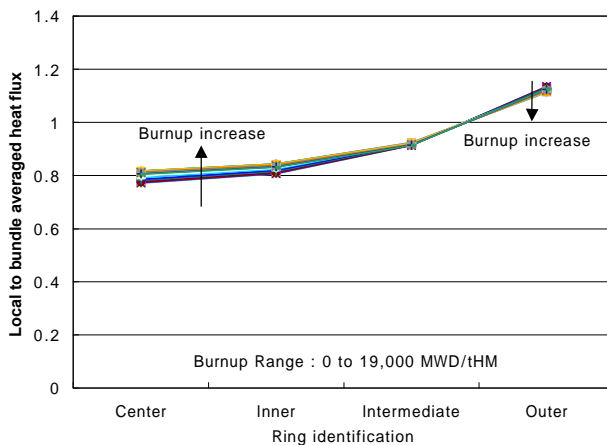


Figure 2. Typical Axial Power Distributions of 37-element and DUPIC Bundle



(a) DUPIC fuel bundle



(b) 37-element bundle

Figure 3. Local to Bundle Averaged Heat Flux Profile According to Burnup Increases of DUPIC Bundle and 37-element Bundle

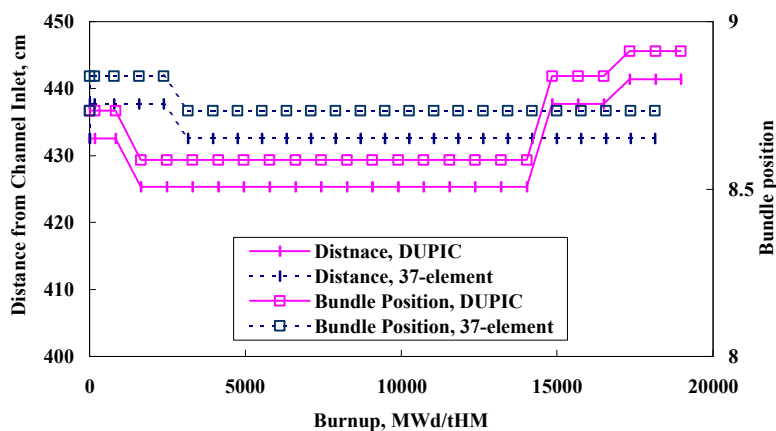
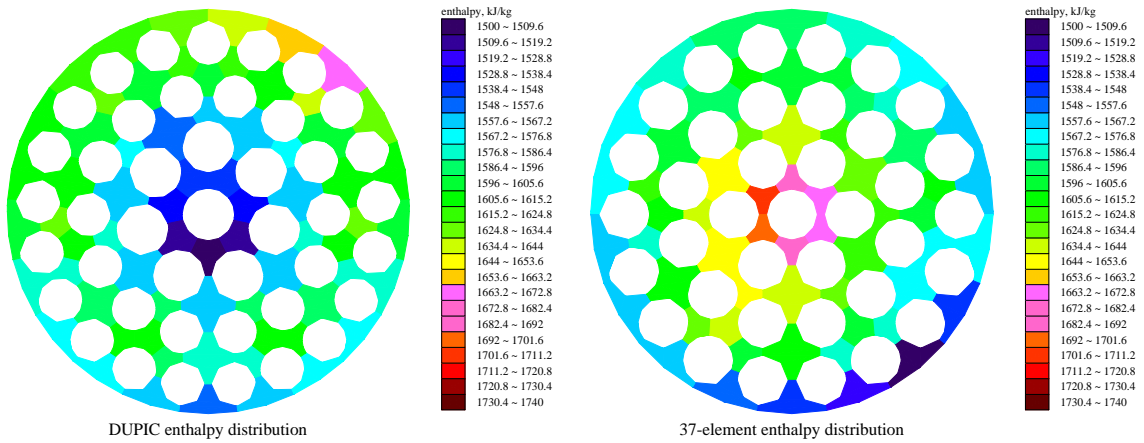
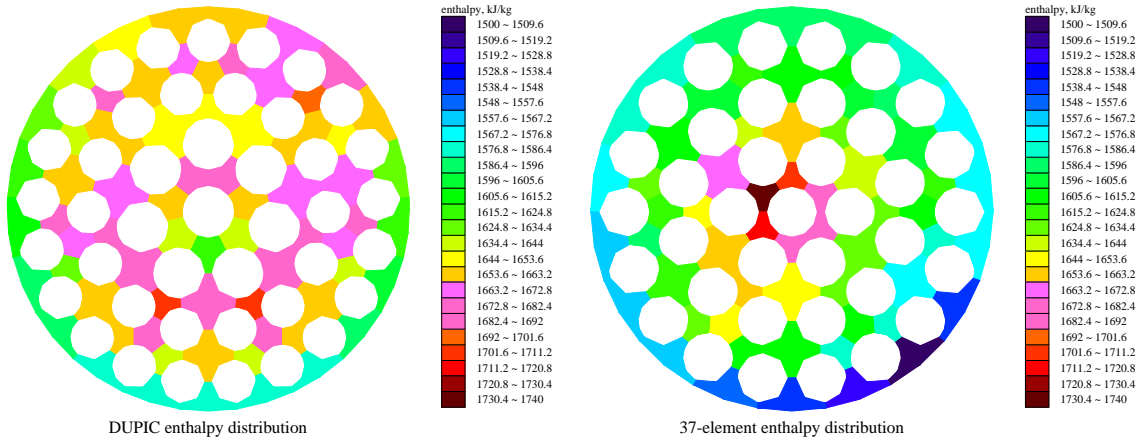


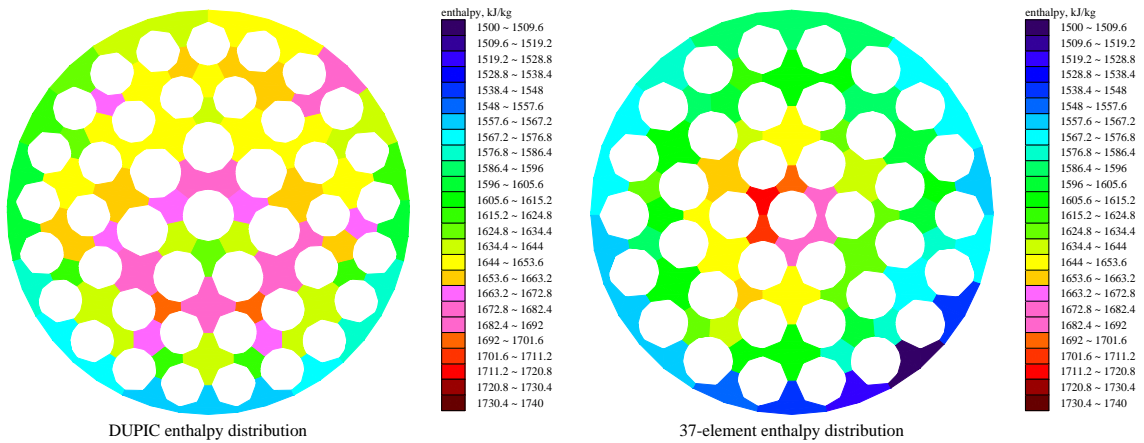
Figure 4. Axial CHF Locations for DUPIC and 37-element Bundle Fuelled Channels



enthalpy distribution at channel exit (0 Burnup)

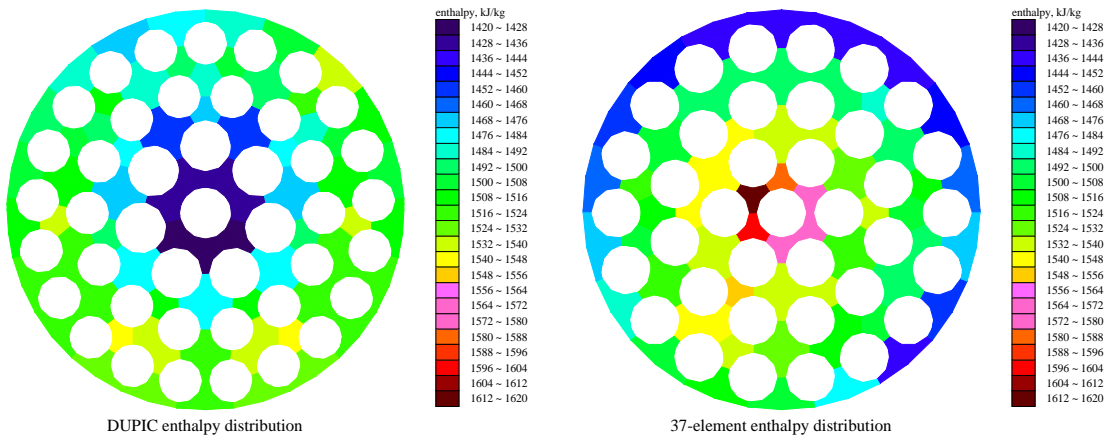


enthalpy distribution at channel exit (14,000 Burnup)

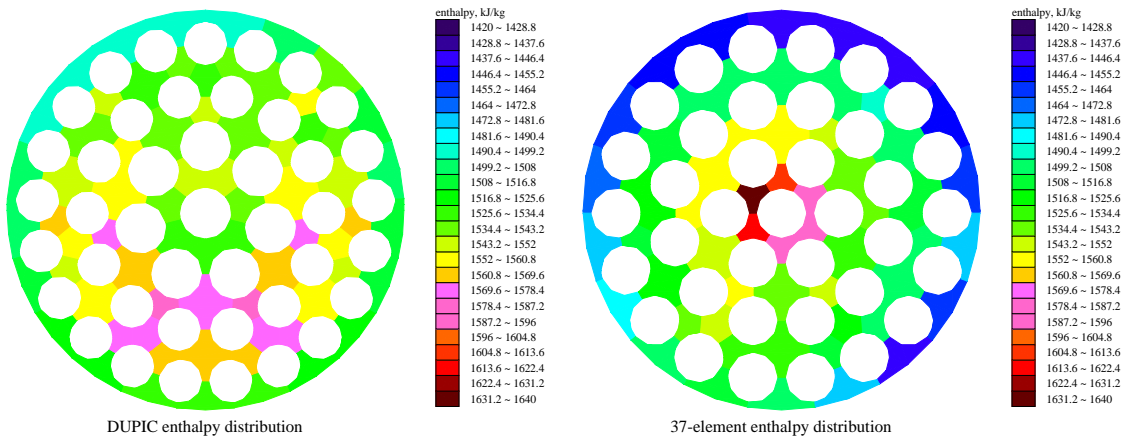


enthalpy distribution at channel exit (18,000 Burnup)

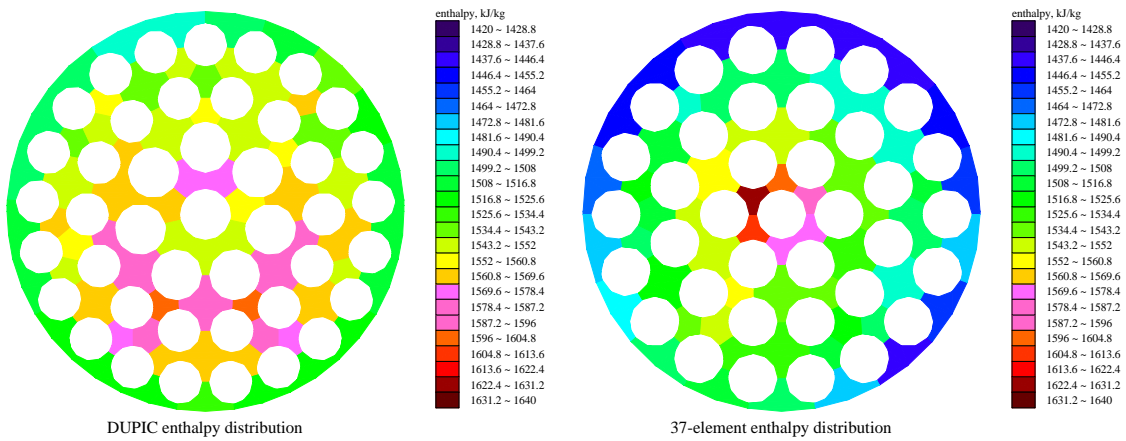
Figure 5. Enthalpy Distribution of DUPIC and 37-element Bundle at Channel Exit



enthalpy distribution at CHF position (0 Burnup)

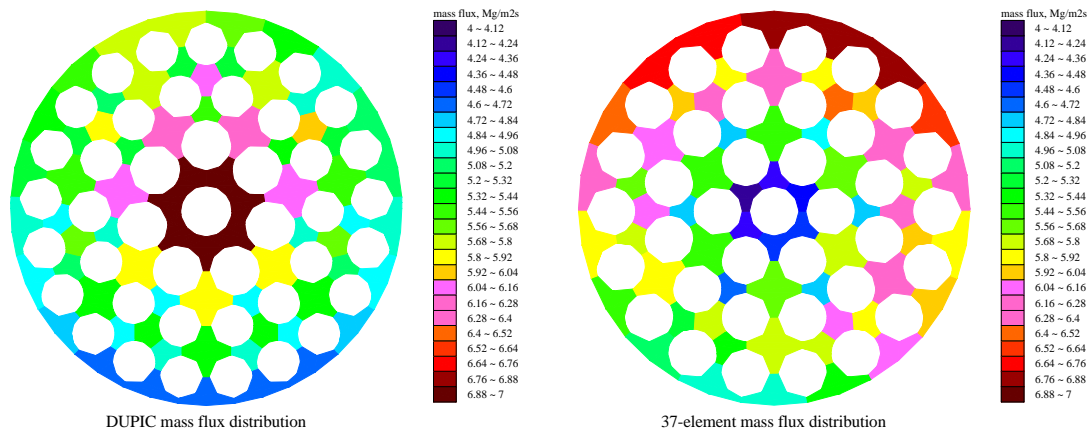


enthalpy distribution at CHF position (14,000 Burnup)

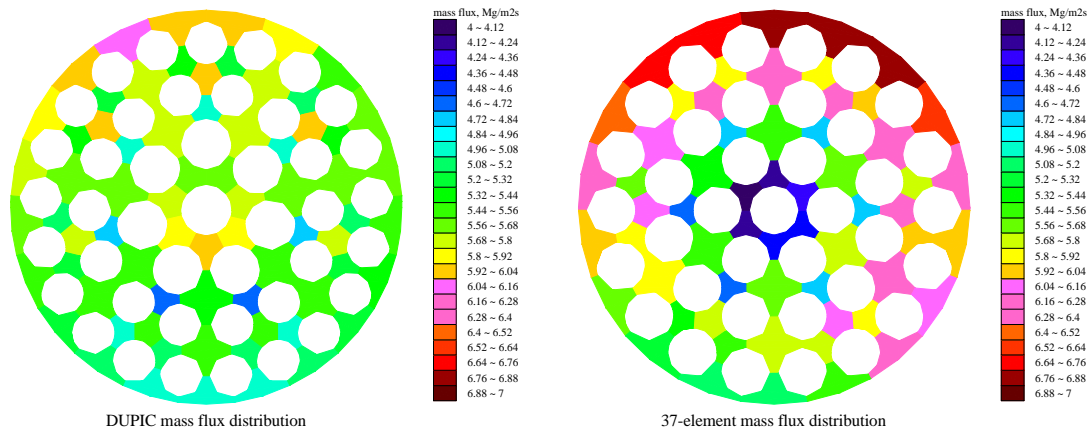


enthalpy distribution at CHF position (18,000 Burnup)

Figure 6. Enthalpy Distributions of DUPIC and 37-element Bundle at CHF Position



mass flux distribution at CHF position (0 Burnup)



mass flux distribution at CHF position (18,000 Burnup)

Figure 7. Mass Flux Distributions of DUPIC and 37-element Bundle at CHF Position

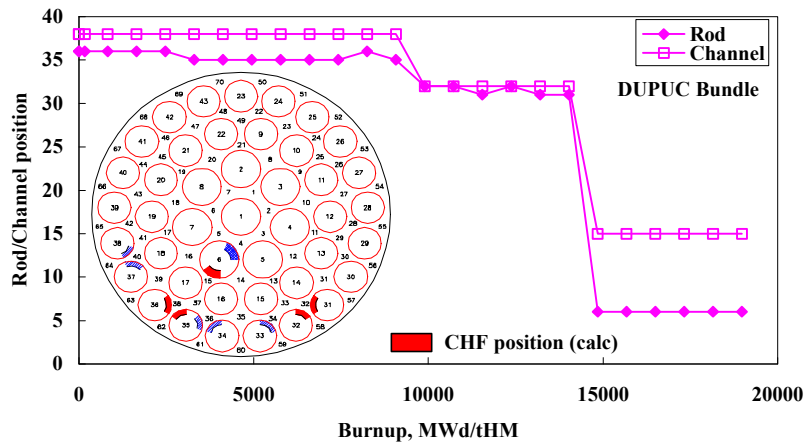


Figure 8. Radial CHF Locations for DUPIC Bundle Fuelled Channels

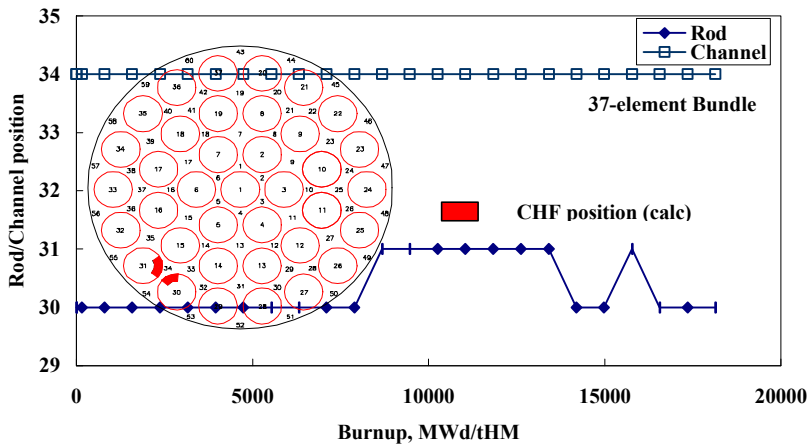


Figure 9. Radial CHF Locations for 37-element Bundle Fuelled Channels

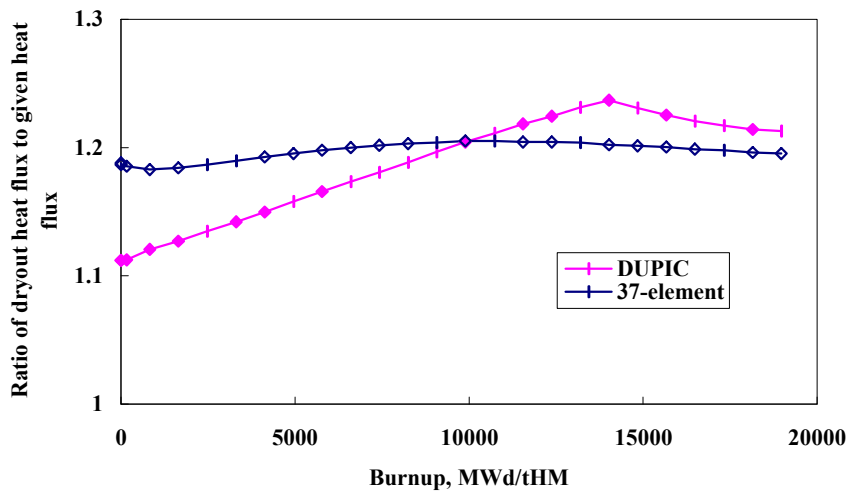


Figure 10. CHF Ratio of DUPIC and 37-element Bundle Fuelled Channels According to Burnup