

2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

Pb-Bi 냉각 HYPER 1/6 노심 핵연료 집합체 부수로 해석

Subchannel Analysis of Fuel Assemblies in 1/6 HYPER Core Cooled by Pb-Bi

탁 남 일, 송 태 영, 박 원 석
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

김 창 현
한국과학기술원
대전광역시 유성구 구성동 373-1

요 약

수정된 SLTHEN 코드를 이용하여 Pb-Bi 냉각 HYPER 1/6 노심 핵연료(TRU) 집합체들에 대한 부수로 해석을 수행하였다. 본 연구는 기존 단일집합체 또는 7개 집합체들만을 고려했던 연구들을 확장한 셈이다. 분석대상으로서 덕트를 가진 237개 핵연료 집합체로 구성된 HYPER 노심의 제 1주기 주기초 노심(BOC)과 주기말 노심(EOC)을 선정하였다. 우선 본 연구를 통하여 수정된 SLTHEN 코드에 대한 HYPER 전노심 부수로 해석 가능성을 확인할 수 있었다. 부수로 해석결과 참조노심의 제 1주기 최대피복재온도는 BOC 및 EOC에서 각각 565.3, 578.2 °C로서 설계기준값보다 약 70 °C 이상 낮았다. 보다 간단한 계산결과인 단일집합체 및 7 집합체 계산결과와 비교한 결과는 집합체간 열전달이 설계의 주요 관심 인자인 최대냉각재온도 및 최대피복재온도에 커다란 영향을 주지 않음을 보여준다. 따라서 개념설계 단계의 HYPER 열수력 해석에서는 단일집합체 또는 7 집합체 분석이 매우 유용하다고 판단된다.

Abstract

Subchannel analysis was performed for fuel (TRU) assemblies in the 1/6 HYPER core cooled by Pb-Bi using the modified SLTHEN code. The present study is an extension of the existing studies considering only single or 7 fuel assemblies. The calculations were made for the fuel assemblies in BOC and EOC states of the first cycle of the reference core consisting of 237 fuel assemblies with ducts. First of all, it is confirmed by the present study that the modified SLTHEN code is capable of analyzing all of fuel assemblies in the HYPER at once. SLTHEN predicted that the maximum cladding

temperatures in BOC and EOC are 565.3 and 578.2 °C, respectively. The predicted maximum cladding temperatures are below the design limit by at least ~70 °C. The comparison of results with those of single or 7 assemblies shows that interassembly heat transfer does not affect the maximum coolant temperature and the maximum cladding temperature which are major concerns in the conceptual design. Therefore, it is concluded that simpler analysis considering single assembly or 7 assemblies is very useful for the thermal hydraulic design of HYPER under a conceptual design stage.

1. 서 론

사용후 핵연료 문제를 해결할 수 있는 현실적인 대안들 중의 하나가 가속기 구동 미임계 핵변환로(Accelerator-Driven transmutation System, ADS)이다. 한국원자력연구소는 1997년부터 원자력 중장기 사업의 일환으로 가속기 구동 미임계 핵변환로 HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor)의 개념설계에 관한 연구를 추진중이다[1]. 그림 1은 HYPER의 원자로 설계 개념을 보여준다.

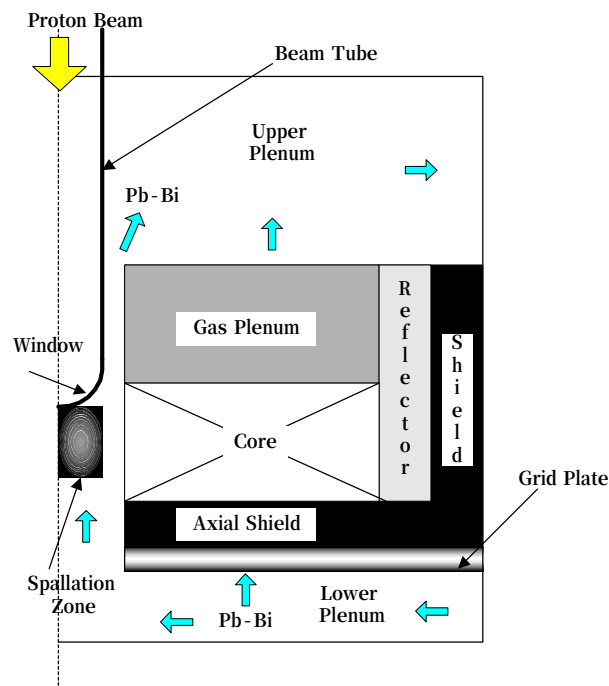


그림 1. HYPER 원자로 개념도

HYPER는 연간 약 258 kg의 TRU를 소멸처리시킬 수 있으며 이과정에서 발생하는 열출력은 1000 MW이다. Pb-Bi eutectic을 원자로 냉각재 및 핵파쇄 표적 물질로 사용하며 중앙에 핵파쇄 표적을 두고 있는 점이 기존 임계형 원자로와의 커다란 차이점이다.

본 연구에서는 수정된 SLTHEN 코드[2,3]를 이용하여 덕트를 가진 HYPER 설계 노심 사양에 대한 부수로 해석을 수행하였다. 기존의 단일핵연료 집합체[4]와 7개 핵연료 집합체 분석결과[5]를 확장하여 HYPER 1/6 노심영역을 모두 고려한 보다 실제적 해석을 수행하였다. 이를 통하여 수정된 SLTHEN 코드가 덕트를 가진 Pb-Bi 냉각 원자로의 전노심 열수력 해석 가능성을 확인하고 향후 열수력 설계에 있어 단일 집합체 또는 7개 집합체의 이용효용성을 평가하고자 하였다.

2. HYPER 핵연료 집합체 설계내용

그림 2는 한국원자력연구소에서 설계중인 HYPER 노심사양들 중에서 본 연구에서 고려한 참조노심의 1/6 영역을 나타낸 그림이다. 대칭성 때문에 그림 2의 1/6 영역은 HYPER 참조노심의 전노심을 대표한다고 볼 수 있다. 참조노심은 각각 237개의 핵연료(TRU) 집합체, 126개의 reflector, 78개의 shield, 12개의 fission product burning 집합체, 그리고 3개의 safety zone으로 구성되어있다. 237개의 핵연료 집합체는 TRU 농축도가 서로 다른 inner zone, middle zone, outer zone으로 구성되어 있다. 노심 중앙에는 핵과쇄 중성자를 얻기 위한 표적영역이 있다. 냉각재 입출구 온도는 340~510℃, active core height는 1.6m 이다. HYPER의 노심관련 설계 파라미터는 표 1에 기술하였다.

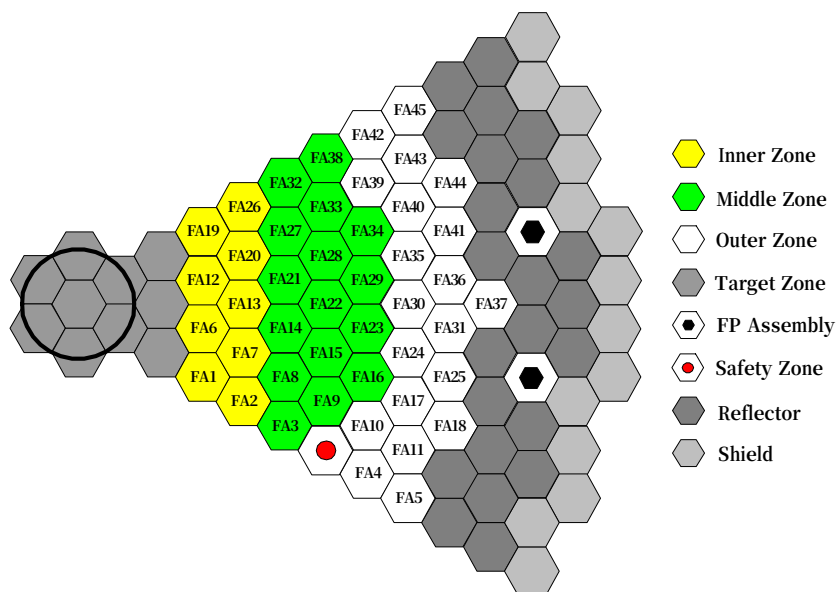


그림 2. 237개 TRU 핵연료 집합체를 갖는 HYPER 노심 (1/6 영역).

본 연구에서는 전체 노심을 구성하는 집합체들 중에서 그림 2에 나타난 45개 핵연료 집합체들 만을 부수로 해석 대상으로 삼았다. (핵연료 집합체 중앙에 표시된 숫자가 집합체 ID를 나타낸다.) 열수력 개념설계에서 reflector, shield, fission product burning 집합체, safety zone 등은 핵연료 집합체에 비해 상대적으로 열출력이 작기 때문에 무시될 수 있다. 그러나 표적 영역은 핵과쇄 반응에 의한 열출력이 약 20 MW에 달함에도 불구하고 본 연구

에서 사용한 SLTHEN 코드가 표적영역을 모사하는데 한계가 있기 때문에 본 연구에서는 무시하였다. 따라서 보다 상세한 열수력 설계 및 분석에서는 반드시 고려해야할 것이다.

본 연구에서 고려한 핵연료 집합체는 직경 0.67 cm의 연료봉이 삼각배열 형태로 정렬되어 있으며 집합체당 연료봉수는 217개이다. 핵연료 집합체는 육각형의 단일 덕트 구조로 둘러싸여 있어 집합체간 냉각재 혼합은 없다. 핵연료봉 사이의 거리는 0.9916cm, P/D가 1.48로서 기존의 나트륨 냉각 액체금속로에 비해서 핵연료봉 사이의 간격이 넓다.

표 1. HYPER 노심 열수력 분석을 위한 주요설계자료

Parameter	Values
Core :	
Core Thermal Power [MWth]	1000
Coolant	Pb-Bi Eutectic
System Operating Temperature [°C]	340 - 510 °C
Cooling Type	Forced Convection
Active Core Height [m]	1.6
Fuel Assembly :	
Number of Assembly	237
Assembly Pitch [cm]	16.13
Inter Assembly Gap Thickness [cm]	0.3
Duct Inside Flat to Flat Distance [cm]	15.01
Duct Wall Thickness (cm)	0.26
Rods per Assembly	217
Nominal Assembly Mass Flowrate [kg/s]	173.6 kg/s
Fuel Rod :	
Fuel Rod Arrangement	Triangular
Active Height (cm)	160
Nominal Linear Power Generation [W/m]	12152.6
Outer Diameter (cm)	0.67
Pitch/Diameter	1.48
Cladding Thickness (cm)	0.068

3. 1/6 노심 핵연료 집합체 부수로 해석

3.1 참조노심 출력분포

HYPER 노심에는 평형노심이 존재하지 않기 때문에 부수로 해석을 위한 참조노심으로서 그림 2로 구성된 HYPER의 제 1주기 노심을 채택하고 BOC와 EOC 출력분포에 대해 부수로 해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 HYPER 참조노심의 제 1주기 BOC 및 EOC에서의 집합체별 출력 분포는 그림 3과 같다.

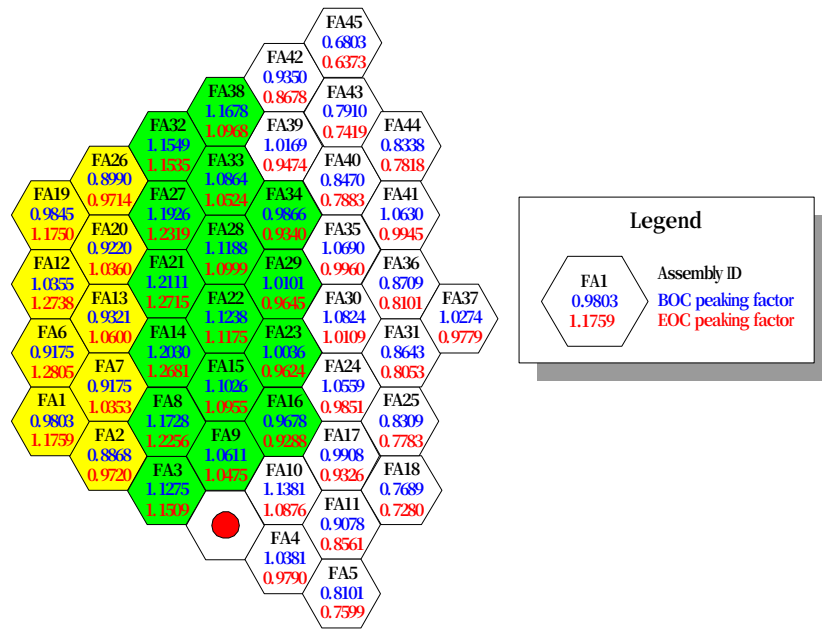


그림 3. HYPER 참조노심 제 1주기 BOC 및 EOC에서의 집합체별 출력분포

그림 3을 보면 주기초에는 middle zone에 있는 집합체가 inner zone이나 outer zone 보다 출력이 크지만 주기말에는 inner zone에 있는 집합체의 출력이 높아짐을 알 수 있다. 이는 연소가 진행되면서 표적영역으로부터의 외부 중성자원의 영향이 증가함을 보여준다. 그림 3의 중앙영역에 있는 FA6, FA14, FA23, FA31 집합체에 대한 축방향 출력분포를 그림 4에 도시하였다.

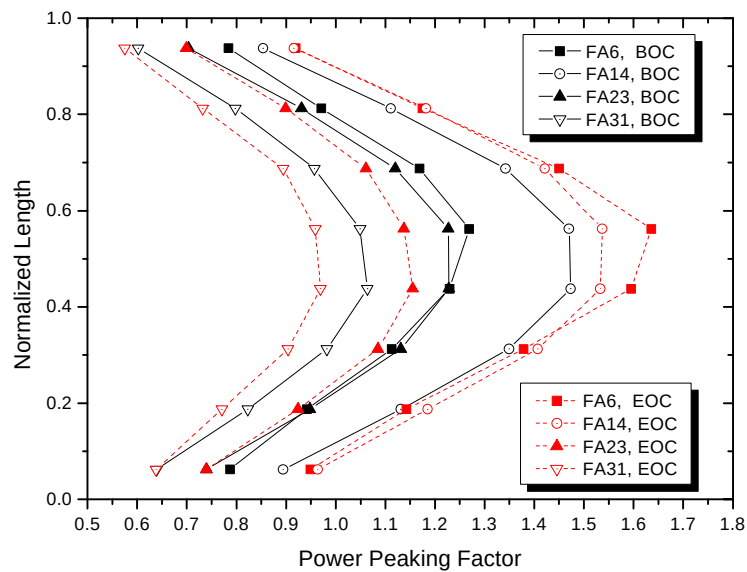


그림 4. 선정된 4개 집합체에서의 축방향 출력분포

전체적인 형상은 기존 임계형 원자로가 갖는 chopped cosine 형상과 유사하다. 그림 4를 보면 노심 외곽에 가까운 FA23과 FA31 집합체는 연소가 진행되면서 출력이 낮아지지만 노심 중앙에 가까운 FA6과 FA14 집합체는 연소가 진행되면서 출력이 증가함을 알 수 있다. 특히 표적영역과 접해있는 FA6 집합체의 출력 증가가 뚜렷하다.

3.2 핵연료 집합체 부수로 해석

SLTHEN 해석을 위해서 본 연구에서 고려한 45개 핵연료 집합체들에 대해 모두 그림 5와 같이 interior, edge, corner 부수로 포함하여 총 438개 부수를 구성하였다.

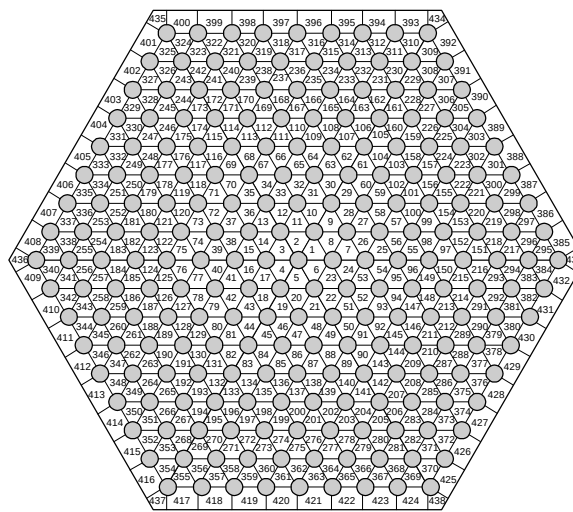


그림 5. 한 개의 핵연료 집합체를 구성하는 438개 부수들

그 외에 덕트의 온도계산을 위한 노드와 덕트와 덕트사이의 갭에서의 온도계산을 위한 노드로 각각 54개의 노드를 할당하였다. 즉 핵연료 집합체 하나의 부수로 계산을 위해서는 축방향 노드당 총 546개의 노드가 할당된 셈이다. 이러한 집합체가 45개라면 축방향 노드당 2만개이상의 계산노드가 사용된 셈이다.

HYPER는 평형노심이 존재하지 않기 때문에 기존 나트륨 냉각 원자로와는 달리 오리피스를 이용한 냉각재의 유량조절은 고려하지 않는다. 따라서 모든 집합체에 균일한 Pb-Bi 유량이 분배된다고 가정하였다. 또한 P/D가 크기 때문에 연료봉 고정을 위해서 grid spacer가 이용될 예정이지만 본 분석에서는 grid spacer를 무시한 bare rod 만을 고려하였다.

그림 6과 그림 7은 제 1주기 BOC와 EOC 노심에 대해 SLTHEN 코드 계산결과를 정리한 것이다. 먼저 열수력 설계의 주관심 대상인 최대피복재온도 및 그 위치를 보면 주기초에는 FA21 집합체에서 565.3 °C이던 것이 주기말에는 FA6 집합체에서 578.2 °C이다. 연소가 진행됨에 따라 최대출력분포가 표적영역 가까이로 변화함과 함께 온도분포도 함께 변화

함을 알 수 있다. 그러나 1 주기에서의 최대피복재온도는 설계기준으로서 고려하고 있는 650 ℃에 비해 약 70 ℃ 이상 낮다.

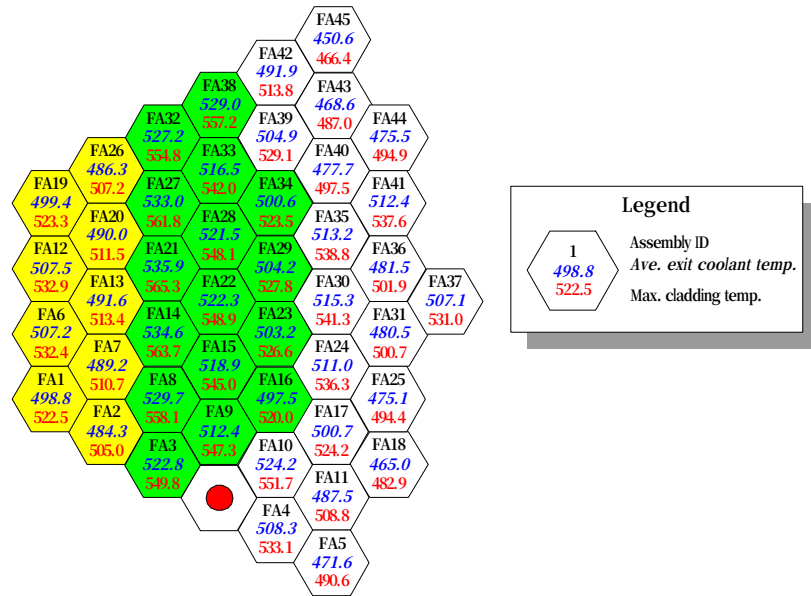


그림 6. HYPER 제 1주기 BOC 노심 부수로 해석결과

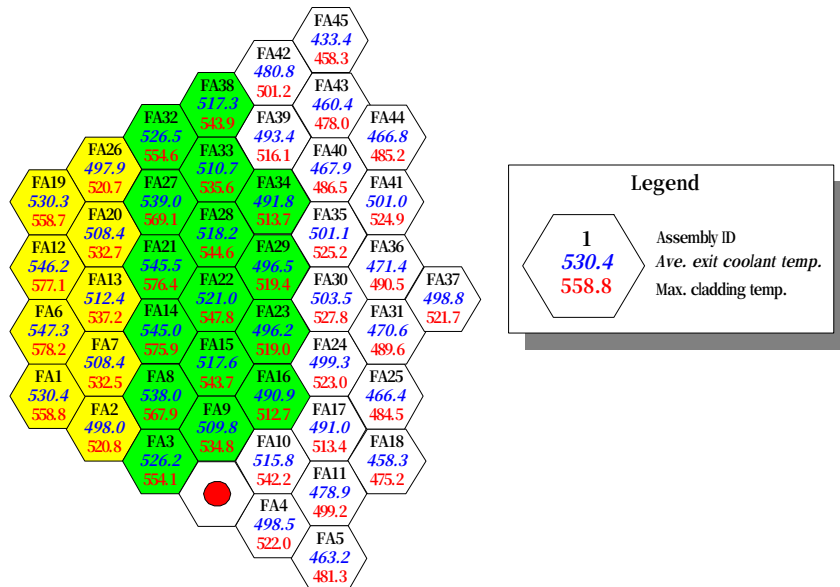


그림 7. HYPER 제 1주기 EOC 노심 부수로 해석결과

그림 6과 그림 7은 집합체간 열전달을 고려한 계산결과이다. 집합체간 열전달 영향을 평가하기 위해 집합체간 열전달이 없다는 가정하에 SLTHEN 계산을 수행하였다. 그 결과 BOC 및 EOC 모두에서 최대피복재 온도 및 그 위치는 변함이 없었다. 이것은 기존 7 집합

체 계산결과[5]에서 보인 바와 같이 집합체간 온도변화가 최대피복재온도를 일으키는 집합체 내부 부수로까지 전파되지 않기 때문이다. 평균냉각재출구온도는 집합체간 열전달을 무시했을 때 주기초 FA21 집합체의 경우 535.9 ℃에서 536.5 ℃로 0.6 ℃ 상승하였고 주기말 FA6 집합체의 경우는 547.3 ℃에서 547.7 ℃로 0.4 ℃ 상승하였다. 이렇게 집합체간 열전달량이 작은 이유는 본 연구에서 고려한 핵연료 집합체간 출력분포 차이가 크기 않기 때문으로 풀이된다.

표 2와 3은 주기초 최대피복재온도를 보이는 FA21 집합체를 중심으로 주변 6개 집합체 (FA28, FA27, FA20, FA13, FA14, FA22)만을 고려한 7집합체 SLTHEN 계산결과이다.

표 2. 제 1주기 BOC에 대한 7 집합체 부수로 해석결과

Assembly ID Number	FA21	FA28	FA27	FA20	FA13	FA14	FA22
Radial Peaking Factor	1.2111	1.1188	1.1926	0.9220	0.9321	1.2030	1.1238
Ave. Exit Coolant Temp.(℃)	535.9 (536.5) ^a	521.7 (521.6)	533.3 (533.5)	489.9 (489.5)	491.5 (491.1)	534.9 (535.2)	522.5 (522.4)
Peak Coolant Temp.(℃)	553.0 (553.0)	536.8 (536.8)	549.8 (549.8)	502.0 (502.0)	503.7 (503.7)	551.6 (551.6)	537.7 (537.7)
Max. Cladding Temp.	565.3 (565.3)	548.1 (548.1)	561.8 (561.8)	511.5 (511.5)	513.4 (513.4)	563.7 (563.7)	548.9 (548.9)

^a괄호안의 값은 집합체간 열전달을 고려하지 않은 결과임.

표 3. 제 1주기 EOC에 대한 7 집합체 부수로 해석결과

Assembly ID Number	FA21	FA28	FA27	FA20	FA13	FA14	FA22
Radial Peaking Factor	1.2715	1.0999	1.2319	1.0360	1.0600	1.2681	1.1175
Ave. Exit Coolant Temp.(℃)	545.5 (546.1)	518.4 (518.2)	539.4 (539.6)	508.2 (507.9)	512.2 (511.9)	545.3 (545.6)	521.3 (521.1)
Peak Coolant Temp.(℃)	563.4 (563.4)	533.1 (533.1)	556.3 (556.3)	522.0 (522.0)	526.3 (526.3)	562.8 (562.8)	536.2 (536.2)
Max. Cladding Temp.(℃)	576.4 (576.4)	544.6 (544.6)	569.1 (569.1)	532.7 (532.7)	537.2 (537.2)	575.9 (575.9)	547.8 (547.8)

^a괄호안의 값은 집합체간 열전달을 고려하지 않은 결과임.

먼저 FA21 집합체의 평균냉각재출구온도는 두 경우 모두 535.9, 545.5 ℃로 BOC, EOC에 대해 전혀 45개 집합체 계산결과와 다름이 없다. 최대피복재온도의 경우도 45개 집합체 계

산결과와 동일하다. 이것은 FA21 집합체가 주변집합체 6개에 둘러싸여있고 주변집합체들의 온도변화가 크기 않기 때문이다. 대표적으로 BOC에서 상대적으로 낮은 온도를 갖는 FA26 집합체와 인접한 FA27 집합체를 보면 533.0 °C에서 533.3 °C로 7 집합체만 고려할 경우 단지 0.3 °C 온도가 증가했다. 집합체가 열전달을 고려하지 않은 FA21 집합체 평균냉각재출구 온도 533.5 °C와 비교해보면 0.5 °C 차이를 보인다. 표 2와 3에는 집합체간 열전달을 고려하지 않은 7 집합체 계산결과도 괄호안에 나타내었다. 집합체간 열전달을 고려하지 않은 계산결과는 단일집합체 계산결과와 같다. 집합체간 열전달을 고려한 결과와 고려하지 않은 결과를 비교해보면 평균냉각재출구온도만 0.1~0.4 °C 정도 증가했을뿐 최대냉각재온도나 최대피복재온도에는 변함이 없음을 알 수 있다. 이러한 계산결과는 단일집합체 또는 7 집합체 계산결과의 중요성을 보여준다고 할 수 있다. 즉 단일집합체 또는 7 집합체의 단순화한 계산결과로 부터도 HYPER 전노심의 최대냉각재온도 및 최대피복재온도를 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

수정된 SLTHEN 코드를 이용하여 HYPER 1/6 노심 핵연료 집합체들에 대한 부수로 해석을 수행하였다. 분석대상으로서 단일 덕트를 가진 237개 핵연료 집합체들로 구성된 HYPER 노심 설계사양의 제 1주기 주기초 노심과 주기말 노심을 선정하였다.

우선 본 연구를 통하여 수정된 SLTHEN 코드를 이용한 전노심 부수로 해석 가능성을 확인할 수 있었다. 부수로 해석결과 참조노심의 제 1주기 최대피복재 온도는 BOC 및 EOC에서 각각 565.3, 578.2 °C로 설계기준값보다 약 70°C 이상 낮았다. 또한 단일집합체와 7 집합체 계산결과와 비교한 결과 집합체간 열전달은 설계의 주요 관심 인자인 최대냉각재온도 및 최대피복재온도에 커다란 영향을 주지 않았다. 따라서 사소한 설계사양 변경시 단일집합체 또는 7 집합체 분석이 매우 유용함을 확인할 수 있었다.

그러나 본 연구에서 고려하지 않은 표적영역은 부근 집합체 열전달에 적지않은 영향을 줄 수도 있을 것으로 예측되므로 향후 보다 상세한 분석에서는 표적영역을 고려한 해석을 수행해야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 박원석 외, "고준위 폐기물 처리·전환 기술 개발 : 핵종변환기반기술개발," KAERI/RR-2117/2000, 2000.
- [2] W. S. Yang, "An LMR Core Thermal-Hydraulics Code Based on the ENERGY Model," Journal of Korean Nuclear Society, Vol. 29, No. 5, pp. 406-416, 1997.

- [3] 양원식 외, “정상상태 액체금속로 노심 열수력 해석 코드 개발,” 95-83, 기초전력공동연구소, 1996.
- [4] 김창현 외, "SLTHEN 코드를 이용한 HYPER 단일 핵연료 집합체 부수로 해석," 2001 원자력학회 추계학술발표회 논문집, 2001.
- [5] Nam-il Tak et al., "Preliminary Evaluation of Coolant Temperature Distribution in HYPER Fuel Assemblies," Submitted for Presentation at the PHYSOR 2002, 2002.