2000춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

가속기 구동 미임계 핵변환 노심 계산에 대한 중성자 확산 근사의 타당성 평가

Validity of the Neutron Diffusion Approximation against an Accelerator-Driven Subcritical Reactor

김용남
한양대학교
서울특별시 성동구 행당동 17

박원석, 김용희
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

본 논문은, 가속기 구동 미임계 핵변환 노심 계산에 대한 중성자 확산 근사 해법의 타당성을 평가하는데 그 목표를 두었다. 이와 관련하여 한국원자력 연구소 KALIMER (Korea Advanced KIquid MEtal Reactor) 노심설계팀에서 구축하여 사용하고 있는 K-CORE 전산체제의 단면적 라이브러리 KAFAX-F22와 노심 계산용 확산이론 코드 DIF3D를 대상으로 가속기 구동 미임계 노심 계산에 대한 적용 가능성을 분석하였다. 수행된 평가 결과들을 토대로 다음과 같은 결론에 도달하였다. 첫째, KAFAX-F22 단면적 자료를 HYPER 노심 계산에 그대로 적용하면 상당한 오차를 유발할 수 있다. 둘째, 확산 근사 해법을 그대로 가속기 구동 미임계로심에 적용하여 타당한 계산 결과를 얻기 어려우며, 확산 근사 해법을 적용하기 위해서는 어떤 적절한 치유 내지는 보정 기법이 요구된다.

Abstract

In this paper, the validity of the neutron diffusion approximation is evaluated against an ADS (Accelerator-Driven Subcritical system). A very simplified subcritical core has been analysed with the K-CORE code system, which is used for the critical fast reactor, KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor). Based on the various results, it is observed that the naive neutron diffusion approximation to an ADS results in significant errors in the system reactivity and the power distribution. Therefore an adequate technique of remedy or correction for neutron diffusion approximation is required for more accurate calculation of ADS core. Also, the inherent characteristics of ADS should be taken into in constructing the multi-group cross section library.

1. 서론

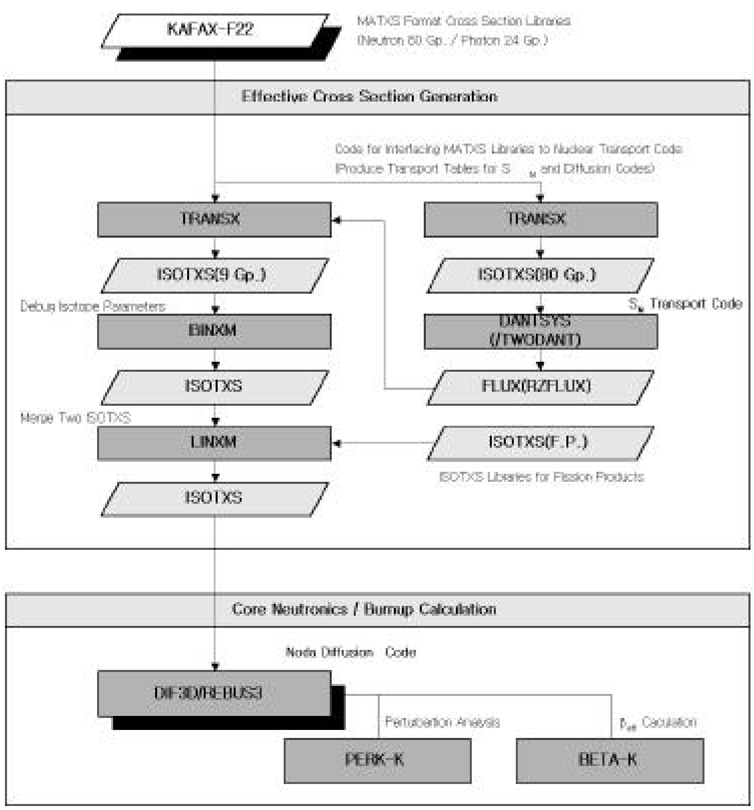
한국원자력연구소에서 연구/개발 중인 HYPER(HYbrid Power Extraction Reactor) 시스템은 양성자 가속기로부터 입사된 양성자빔의 핵파쇄반응에 의하여 외부중성자원을 공급받는 미임계 원자로이다. 현재 HYPER 핵설계 팀에서는 주로 확률론적 수송이론 코드인 MCNP4B를 이용, 노심계산을 수행하고 있다. 몬테카를로 방법에 기초한 MCNP코드는 그 특성상 특정 시스템의 고유 특성에 상관없이 그 타당성을 확보하고 있다. 그러나 매우 긴 계산 시간을 필요로 하기 때문에 코드 간 비교 또는 검증 목적이 아닌 설계 계산용으로 사용하기에는 그다지 효율적이라 하기 어렵다. 따라서 HYPER 시스템의 노심 특성에 부합하는 결정론적 코드 체계의 구축이 요구된다.

대부분의 기존 임계원자로심 계산을 위한 결정론적 코드 체계의 구성은 크게 두 단계로 나누어 볼 수 있다. 그 첫째는 수송이론 코드를 이용한 영역별 유효미시단면적을 생산하는 단계이고 둘째는 확산이론 코드를 이용하여 최종적으로 구하고자 하는 노심 변수들을 계산하는 단계이다. 둘째 단계에서 확산 근사 이론을 적용하는 주요한 이유는 적절한 정확도를 유지하면서 계산 시간을 크게 감소시킬 수 있다는 점이다. 이와 관련하여 본 논문에서는 기존 임계로와는 노심 특성이 크게 다른 가속기 구동 미임계 핵변환로심 계산에 대한 확산이론의 타당성 평가를 그 목표로 두었다.

HYPER 시스템은 그 목적에 부합하기 위하여 일단 중성자 스펙트럼 환경은 액체 금속 냉각 방식의 고속 중성자 스펙트럼으로 선정한 바 있다[1]. 따라서 본 논문에서는 현재 한국원자력연구소에서 연구/개발하고 있는 임계 개념의 고속로, KALIMER(Korea Advanced LIquid MEtal Reactor), 노심설계팀에서 구축하여 사용 중인 K-CORE 전산체계[2]를 대상으로 가속기 구동 미임계 핵변환로에 대한 타당성을 분석하였다.

2. K-CORE 전산체제

<그림 1>은 K-CORE 전산체제의 구성 및 계산 절차를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 체제 구성은 유효핵단면적 생산 그룹과 최종적인 노심 계산 그룹의 두 부분으로 나뉘어 질 수 있다. 먼저 KAFAX-F22 라이브러리[3](80군 중성자/24군 광자)로부터 TRANSX[4]와 DANTSYS(/TWODANT)[5] 전산코드를 이용하여 필요한 물질의 조성과 중성자 스펙트럼 환경에 따른 유효미시핵단면적을 생산한다. 이 과정에서, 몇몇 동위원소 정보의 에러를 수정하는 BINXM, 그리고 미리 따로 준비된 pseudo(lumped)- fisson products의 단면적 자료를 병합시키는 LINXM 등의 보조 프로그램을 이용하여 최종적으로 9군의 유효핵단면적이 생산된다. DIF3D[6]와 REBUS-3[7] 전산코드에서는 생산된 유효핵단면적을 이용하여 노심에 대한 핵특성 및 연소도 계산을 수행하게 된다. 반응도 궤환효과 및 동특성 분석을 위하여 PERT-K와 BETA-K 전산코드가 추가적으로 수행된다.



<그림 1> K-CORE 전산체제의 구성 및 계산 절차

3. 평가 방법 및 모델

3.1 평가 방법

HYPER 노심의 중성자 특성 계산의 관점에서 볼 때, KALIMER 등과 같은 일반 고속로와 다른 특성으로서는 크게 다음의 두 가지를 들 수 있으리라 여겨진다. 첫째, 일반 여타 임계로와는 달리 양성자가속기로부터 외부중성자원을 공급받아 운전되는 미임계로심이다. 이와 관련하여, 노심 중앙에 핵분열성 물질이 아닌 표적 물질 영역이 존재하며 더욱이 그 상단부에는 양성자 빔이 입사되는 진공 영역을 포함하고 있다.(8) 둘째, 노심에 장전되는 연료 조성에 있어서, 전환로 또는 증식로 개념의 고속로에 장전되는 연료에 다량 포함되는 ^{238}U 등의 공명흡수 효과가 큰 fertile 핵종을 포함하지 않고 다만 초우란핵종(TRU)들만으로 구성되어 있다.

위와 같은 두 가지 특성 차이에 근거를 두고 다음의 두 단계를 순차적으로 수행하였다. 먼저, 궁극적인 목표인 확산이론 코드의 정확도 평가에 선행하여, K-CORE의 노심 계산 시작 단계에서 사용되는 핵단면적 라이브러리인 KAFAX-F22를 그대로 HYPER 등과 같은 미임계 핵변환로에 적용할 수 있는가에 대한 적합성 평가를 수행하였다. 최종 단계로서, DIF3D7.0의 적용가능성에 대하여 고찰하였다. 즉, 노심 중앙에 핵특성이 크게 다른 물질로 채워져 있는 미임계 노심에 대하여 확산이론코드를 이용한 노심 계산이 얼마나 정확성을 확보할 수 있는지를 검토하였다.

3.1.1 KAFAX-F22 라이브러리의 적합도 평가

KAFAX-F22 라이브러리에 대한 적합도 평가를 위하여 수송이론 코드인 TWODANT-3.0을 이용하여 고유치 계산 모드로 노심의 유효증배계수 및 반응도 계수 계산을 수행하였고, 계산 결과를 MCNP4B[9]의 계산과 비교하였다. KAFAX-F22는 한국원자력연구소에서 KALIMER 노심 계산을 위해 생산한 것으로 중성자 80, 광자 24의 에너지군의 자료로 구성된 라이브러리이다. 대부분의 핵종에 대하여 JEF-2.2 평가핵자료집의 단면적 자료를 토대로 하고 있으며, 다만 본 논문에서 사용된 핵종 중에서 JEF-2.2에 들어 있지 않거나 자료 처리에 문제가 되는 ^{242m}Am과 천연 Pb에 대해서만은 각각 JENDLE-3.2와 ENDL-84 자료를 사용, 생산한 것이다. 이에 부합하는 MCNP 계산을 수행하기 위하여 똑같이 JEF-2.2 자료를 이용 MCNP 라이브러리를 생산하여 비교 계산을 수행하였다. 여기서도 다만 Pb 동위원소에 대해서는 ENDF-VI 자료를 근간으로 하였다. TWODANT 계산은 P_3,S_8 근사로 수행하였으며 공간차분화에 있어서 반경방향, 축방향 모두 노드 크기를 2.0cm로 일정하게 하였다. MCNP 계산 시, total cycle 수를 250, 싸이클 당 중성자 수를 5000으로 하여 표준편차 약

0.00066 정도로 계산하였다.

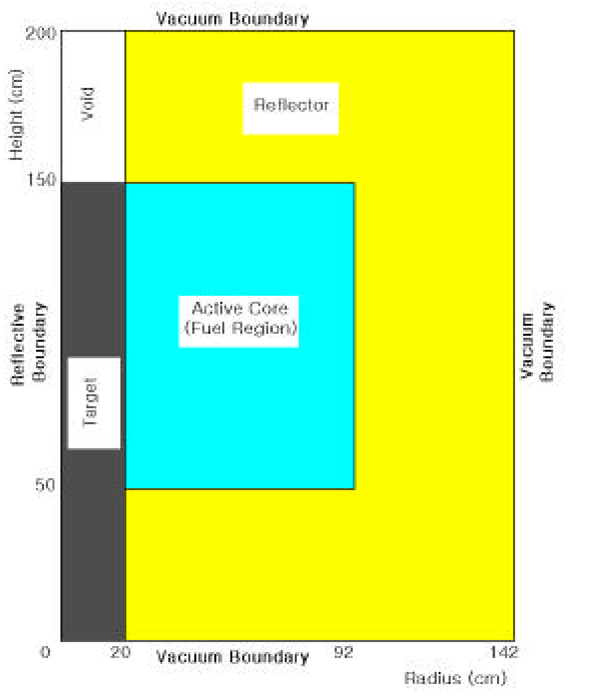
3.1.2 확산이론 코드(DIF3D7.0)의 정확도 평가

전술한 바 있듯이, DIF3D7.0의 가속기 구동 미임계 노심 해석에 대한 정확도는 노심 중앙에 존재하는 표적 물질 영역과 특히 그 상단부에 위치하는 진공 영역에 대하여 확산이론으로 근사한 계산이 얼마나 수송이론 코드의 해와 근접하느냐 하는 것이다. 따라서 근사 방법론의 차이에 기인한 오차를 평가하고자 하는데 초점을 두었다. 즉 계산 결과에 영향을 미칠 수 있는 다른 여타 영향을 제거하기 위하여 동일 유효단면적 자료를 사용하고자 하였다. 먼저, KAFAX-F22의 단면적 자료로부터 TWODANT코드로 P_3,S_8 계산을 수행, 80군에 대한 RZFLUX(Regular Zone FLUX)를 생산하였다. 생산된 영역별 80군 스펙트럼을 가중함수로 하여 다시 TRANSX를 이용, 9군 유효단면적으로 축약하였다. 최종적인 비교 계산 단계에서 이 동일 단면적 자료를 이용, TWODANT 수송 이론 계산과 DIF3D 확산 이론 계산을 병행, 비교하였다. 확산이론 코드는 밀도가 극히 낮은 매질에서는 반복계산 시 그 해가 발산, 유일해를 구하지 못하는 한계가 있다. 그러므로 본 계산에서는 진공영역에 중성자 반응 단면적이 매우 작은 ^4He 핵종을 충분히 낮은 밀도($1.0x10^{-10}$ /barn-cm)로 대체하여 물리적 상태는 진공 상태와 크게 다르지 않은 범위에서 수렴하도록 하였다.

본 연구에서는 우선적 비교인자로 유효증배계수와 반응도 및 중성자속 분포를 고려하였다. 연소 반응도 계산을 위한 연소 계산은 K-CORE 체제의 연소 계산 코드인 REBUS-3를 이용하였다. 제 2장에서 시사한 바 있듯이, K-CORE 전산체계의 계산 시작 단계에서 공급되는 KAFAX-F22 라이브러리는 핵분열생성물에 속하는 핵종들의 자료를 개별적으로 수록하지 않고 있다. 그러므로 핵분열 생성물을 포함한 TWODANT 계산은 불가능한 실정이다. 따라서 연소계산은 핵분열 생성물의 생성, 소멸을 연소 사슬에서 제거하여 연소에 따른 악티나이드 핵종의 구성비 변화에 따른 반응도 추이 계산 결과를 비교하는데 초점을 두었다. 중성자속 분포 계산은 고정선원(fixed source) 계산모드로 수행하여 외부중성자원의 존재가 활성노심(active core) 영역뿐만 아니라 중성자원의 상부에 존재하는 진공영역의 국부적인 출력분포에 대한 계산의 정확도에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다.

3.2 평가모델

지난 1999년 OECD/NEA가 주관하여 세계 각국, 각 기관 간 미임계 핵변환 노심 계산에 대한 비교 분석을 위해 제시한 그리고 현재 그 벤치마크 계산이 진행 중에 있는 노심을 평가 모델로 선택하였다.[10] <그림 2>는 평가 노심의 종단면도를 나타낸 것으로, 기하학적 구조가 HYPER 노심과 매우 유사하며 다만 활성노심 영역이 균질화된 R-Z 모델이다.



<그림 2> 평가 노심의 R-Z 모델

<표 1> 영역별 핵종 수밀도 (단위: /barn-cm)

Active Core				Target	
Np237	4.377E-04	Fe54	9.759E-04	Pb	1.320E-02
Pu238	4.226E-05	Fe56	1.488E-02	Bi209	1.632E-02
Pu239	5.051E-04	Fe57	3.507E-04	**Reflector**	
Pu240	2.321E-04	Fe58	4.386E-05	Fe54	2.990E-03
Pu241	1.232E-04	Cr50	1.128E-04	Fe56	4.560E-02
Pu242	9.102E-05	Cr52	2.096E-03	Fe57	1.075E-03
Am241	8.084E-04	Cr53	2.328E-04	Fe58	1.344E-04
Am242m	1.089E-05	Cr54	5.682E-05	Cr50	3.458E-04
Am243	5.827E-04	Ni58	6.451E-05	Cr52	6.422E-03
Cm242	4.079E-08	Ni60	2.384E-05	Cr53	7.134E-04
Cm243	3.326E-06	Ni61	1.015E-06	Cr54	1.741E-04
Cm244	2.371E-04	Ni62	3.173E-06	Ni58	1.977E-04
Cm245	3.164E-05	Ni64	7.792E-07	Ni60	7.305E-05
Cm246	5.355E-07	Mo	1.163E-04	Ni61	3.111E-06
N15	1.058E-02	Mn	1.114E-04	Ni62	9.724E-06
Zr90	3.847E-03	W182	6.984E-06	Ni64	2.388E-06
Zr91	8.465E-04	W183	3.770E-06	Mo	3.565E-04
Zr92	1.285E-03	W184	8.045E-06	Mn	3.412E-04
Zr94	1.292E-03	W186	7.439E-06	W182	2.140E-05
Zr96	2.064E-04	Pb	6.360E-03	W183	1.155E-05
		Bi209	7.865E-03	W184	2.465E-05
				W186	2.280E-05
				Pb	4.075E-03
				Bi209	5.039E-03

노심 중심부에 납-비스므트 표적 물질이 채워져 있으며 그 상부에는 양성자 빔이 입사되는 진공영역이 위치하고 있다. 활성노심 영역에는 질화물연료와 납-비스므트 냉각재가 균일하게 장전되며 노심 외곽을 stainless steel 반사체가 둘러싸고 있다. 각 영역별 핵종 수밀도를 <표 1>에 수록하였다. 노심 중앙의 표적 물질로부터의 외부 중성자원의 공간 분포 및 스펙트럼에 대한 자료는 OECD/NEA가 핵파쇄 반응을 모사하는 HETC 코드의 PSI version 으로 계산한 값을 그대로 사용하였다. 이 때, 노심 상부에서부터 입사되는 양성자 빔의 반경은 10cm 이며 양성자 에너지는 1GeV로 고려되었다.

4. 결과 및 토의

4.1 KAFAX-F22 라이브러리의 적합도 평가

<표 2>의 TWODANT 계산은 본 논문에서 평가하고자하는 KAFAX-F22의 80군 단면적 자료를 사용한 결과이며 MCNP4B 계산은 연속에너지 단면적 자료를 사용한 것으로 타당성 평가의 기준값이다. 표의 핵연료온도계수는 활성노심 영역의 운전 온도 980K에서의 유효증배계수와 상승온도 1580K에서의 값을 감하여 계산한 것이다. 냉각재기포계수는 납-비스므트 냉각재 밀도가 15% 감소하였을 때의 효과이다.

<표 2> KAFAX-F22 적합도 평가를 위한 반응도 계산 결과

	K-eff	St. Dev.	Fuel Doppler Coefficient (pcm)	St. Dev.	Coolant Void Coefficient (pcm)	St. Dev.
MCNP4B	0.95844	0.00066	17.0	0.00112	588.0	0.00138
TWODANT	0.95074		16.3		567.1	
Difference	0.00770		0.7		20.9	

TWODANT 계산의 유효증배계수는 MCNP4B 보다 770pcm 정도 낮게 계산, 0.8 % 이상의 오차를 보이고 있다. 따라서 TWODANT 코드의 공간 차분화에 따르는 민감도나 계산의 정확도를 지배하는 P_l,S_N의 l, N 또는 수렴도 등의 조정에 의한 개선 정도를 감안하더라도 현 상태의 KAFAX-F22 자료를 그대로 HYPER 노심 설계에 적용할 수 있다고 단언하기는 어려울 듯 싶다. 그렇다하더라도 이 계산 결과만으로 KAFAX-F22의 적합성 여부에 대한 결정적 의사결정을 하기에는 불충분하다고 여겨진다. 이에 앞서, 다군중성자속과 핵종별 다군유효미시단면적을 동일한 에너지 군 구조로 생산, 상호 비교함으로써 오차의 근원을 탐색하는 일이 추후 연구사항으로 요구된다 하겠다.

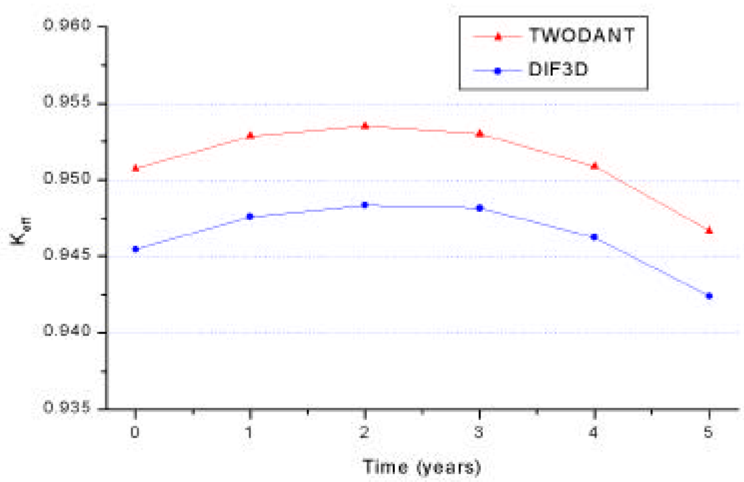
한편, 반응도계수는 전반적으로 MCNP4B 계산과 잘 일치하는 결과를 보이고 있다. 표에서 온도계수에 대한 결과는 MCNP4B 계산 값이 극히 작아서 유효증배계수 계산에 대한 오차 허용범위를 넘고 있어 좀더 많은 계산을 필요로 하다 하겠으나 예상되는 결과는 두 코드간 차이가 거의 무시할 만큼 작을 것으로 예상된다. 그 절대값이 큰 기포계수 결과로 보면, 그 차이는 MCNP4B 계산의 통계 오차보다도 작은 범위에 있음을 알 수 있다. 이 결과가 시사하는 바는 다음과 같다. 즉, 연소에 따른 반응도 추이 분석 등과 같이 노심 내 물질 조성이 크게 달라지지 않은 상태에서의 상태간 반응도 비교 계산은 기준값인 MCNP4B 계산과 잘 일치할 것으로 기대된다.

4.2 DIF3D7.0 코드의 정확도 평가

반응도 계산의 정확도 비교를 위한 계산 결과를 <표 3>과 <그림 3>에 나타내었다.

<표 3> DIF3D 코드의 정확도 평가를 위한 반응도 계산 결과

	K-eff	Fuel Doppler Coefficient (pcm)	Coolant Void Coefficient (pcm)	K-eff-0
TWODANT	0.95074	14.72	567.1	0.96665
DIF3D	0.94546	14.74	429.0	0.96833
Difference	0.00528	-0.02	138.1	-0.00168

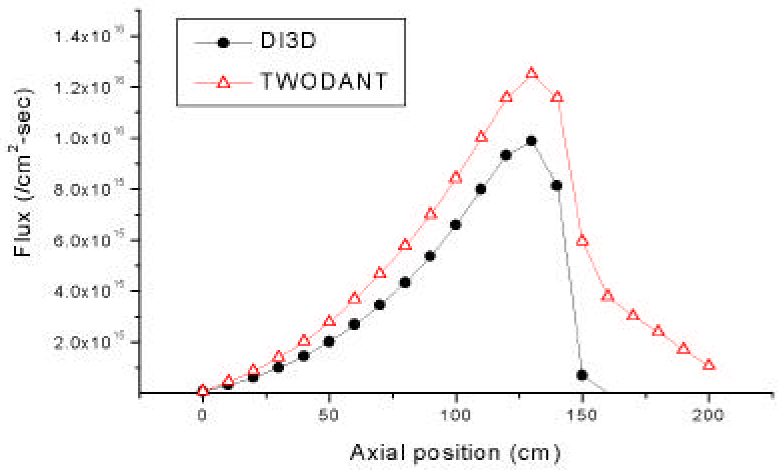


<그림 3> 연소 진행에 따른 유효증배계수 추이 계산 결과

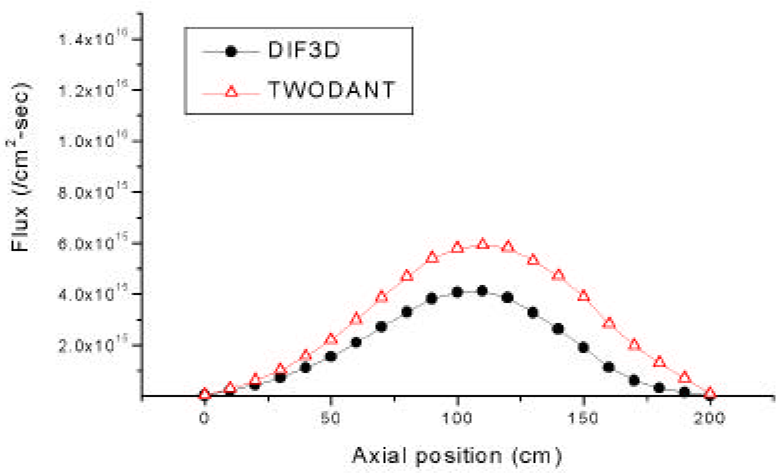
표의 첫째 열(K-eff)에 표기된 유효증배계수 계산 결과에서, 확산근사 해법은 수송이론보

다 0.56% 정도 낮게 계산하고 있음을 볼 수 있다. 두 코드의 수치해석적 접근 방법의 차이에 기인한 바도 없지 않겠으나, 우려했던 바대로 매질 중심부에 특이 영역의 존재가 그 주요 원인이라고 봐야 타당할 것이다. 이와 관련하여, 특이 영역의 존재로 인한 오차만을 따로 추산하기 위한 별도의 계산을 수행하였다. 노심 중앙의 표적물질이 채워진 영역을 활성노심의 핵연료로, 그 상·하부를 납-비스무트 냉각재로 대체시켜 특이 영역을 제거하였다. 표의 마지막 열(K-eff-0)에 표기된 결과에서 추산해 보면 전체 오차의 약 130% 가량이 특이 영역의 존재에 기인한다고 여겨진다. 다시 말해서, 매질 내 특이 영역의 존재로 인한 확산 근사의 오차는 0.7%를 훨씬 초과하고 있다. 반면, 반응도계수 계산 결과는, 전 절의 KAFAX-F22의 적합도 평가 결과와 마찬가지로, 노심내 물질 조성이 크게 달라지지 않은 상태에서의 상태간 반응도 비교 계산은 타당한 결과를 얻을 수 있음을 의미한다. <그림 3>의 연소반응도 계산 결과가 이를 뒷받침해준다. 즉 연소가 진행됨에 따라 반응도 추이 변화는 일관된 결과를 보이고 있다.

반응도 계산의 오차의 주원인은 노심 중심부에 특이 영역이 존재함에 기인하여 중성자속 분포를 정확히 계산하지 못한 데 있다고 여겨진다. 노심 내 중성자속 분포를 계산한 결과를 <그림 4>와 <그림 5>에 나타내었다. 확산 근사 해법은 중성자속 분포 계산에서 매우 큰 오차를 유발시키고 있음을 알 수 있다. 활성 노심 거의 모든 영역에서 TWODANT 수송이론 계산보다 훨씬 중성자속을 낮게 계산하고 있으며 노심의 중심으로 접근할수록 그 오차는 훨씬 증가한다. 특히 중심 상단부 진공 영역에서는 상당히 큰 오차를 보이고 있다. 이는 노심 중앙의 특이 영역 즉 표적 물질영역과 진공영역에 대한 확산 근사가 적절하지 못함을 의미한다. 외부중성자원의 매우 경화된 스펙트럼은 이 오차를 더욱 증폭시키고 있다고 판단된다. 즉 높은 에너지의 중성자가 매질의 비등방성을 강화시킴으로써 확산 이론의 등방성 산란 근사의 오차를 증가시키고 있는 것이다. 중성자속 분포 계산의 오차는 결국 시스템의 출력 분포 계산의 오차로 파급됨을 의미한다. 그러나 전술한 반응도 계산 결과와 관련지어 추론해보면, 확산이론 근사 해법은 출력분포 계산에 있어서도 그 절대값에서 상당히 큰 오차를 내고 있으나, 전혀 터무니없는 계산이 아니라 그 오차가 일관된, 해석 가능한 결과를 산출하고 있다고 판단된다. 이는, 확산 근사 해법을 그대로 가속기 구동 미임계로심에 적용할 수 있다고 보기 어려우나 오차의 발생 근원과 진행 방향에 대한 분석을 통하여 적절한 치유 내지는 보정 기법을 도입하면 수송이론 코드와 부합하는 결과를 산출하는 방안을 구할 수 있다는 가능성을 시사한다.



<그림 4> 축방향 중성자속 분포, r=0cm



<그림 5> 축방향 중성자속 분포, r=56cm

5. 결론 및 제언

임계 개념의 고속로심 계산에 사용되고 있는 중성자 확산 근사 해법의 가속기 구동 미임계 노심에 대한 적용 타당성을 평가하였다. 수행된 평가 결과들을 토대로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 첫째, KAFAX-F22 단면적 자료를 가속기 구동 미임계 노심 계산에

그대로 적용하면 작지 않은 오차를 유발할 수 있다. 따라서 정확한 노심 특성 분석을 위해서는 가속기 구동 미임계 노심의 특성이 반영된 단면적 자료의 생산이 요구된다. 둘째, 확산근사 해법을 그대로 가속기 구동 미임계로심에 적용하면 노심 반응도와 출력분포 등에서 상당히 큰 오차가 발생할 수 있다. 따라서 결과적으로 가속기 구동 미임계 노심 해석에 확산근사 해법을 적용하기 위해서는 적절한 치유 혹은 보정 기법이 요구된다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 수행하고 있는 중장기 연구사업의 일환으로 수행된 것입니다.

참고문헌

1. 한석중 외, “미임계 핵변환 시스템 최적 냉각재 선정”, KAERI/TR-1117/98, KAERI, 1998.

2. 김영철 외, “액체금속로 요소기술 개발,” KAERI/RR-17173/96, KAERI, 1997.

3. 김정도 외, “KAFAX-F22: JEF-2.2를 이용한 고속로용 다군 단면적 라이브러리 생산 및 검증,” KAERI/TR/97, 1997

4. R. E. MacFarlane, ““TRANSX-2: A Code for Interfacing MATSX Cross-section Libraries to Nuclear Transport Codes,””LA-12312-MS, LANL, 1993.

5. R. E. Alcouffe, “Users Guide for TWODANT: A Code Package for Two-Dimensional, Diffusion-Accelerated, Neutron Transport,””LA-10049-M, LANL, 1990.

6. R. D. Lawrence, “The DIF3D Nodal Neutronics Option for Two-, and Three-Dimensional Diffusion Theory Calculations in Hexagonal Geometry,””ANL-83-1, ANL, 1983.

7. B. J. Toppel, “A users Guide for the REBUS-3 Fuel Cycle Analysis Capability,” ANL-83-2, ANL, 1983.

8. 박원석 외, “HYPER 시스템 설계연구”, KAERI/TR-1316/99, 1999.

9. MCNP4B Mannual, “MCNP^{TM}- A General Monte Carlo N-Particle Transport Code," LANL, 1997.

10. B. C. Na et al., “OECD/NEA Comparison Calculations for an Accelerator-Driven Minor Actinide Burner: Analyses of Preliminary Results," Proceedings of Workshop on Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators, Aix-en-Provence, France, November 1999.