2002 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

중성자 격자계산 코드 DENT-2D 개발 및 벤치마크 계산

김강석, 김하용, 지성균
한국원자력연구소
305-333 대전시 유성구 덕진동 150

요약

노심분석 분산코드의 계산에 필요한 소수군 군정수계산에 주로 사용될 새로운 격자계산 코드인 DENT-2D(Deterministic Neutral Particle Transport Code in 2-Dimensional Space)를 개발하였다. DENT-2D 는 KAERI 의 노심분석 노달코드인 MASTER 와 결합하여 핵설계 절차 패키지를 완성할 목적으로 작성되었다. 지금까지는 MASTER 용 군정수 계산을 위하여 CASMO-3 와 HELIOS 가 사용되어 왔다. 현재 DENT-2D 는 2 차원 데카르트 좌표계에서 중성자 수송계산 만이 가능하다.

공간차분화를 위해서는 복잡한 기하구조 및 심한 비등방성 산란의 취급이 용이한 Characteristics 방법을 사용한다. 공명영역은 Subgroup 방법으로 취급하고 실제 노심에서의 중성자 누출효과를 고려하여 임계 중성자속을 얻는 방법은 B1 근사법을 이용한다. 연소계산은 행렬지수함수법을 이용한다.

벤치마크 계산결과는 DENT-2D 가 기존의 CASMO-3 나 HELIOS 의 정도로 정확한 계산을 수행할 수 있슴을 보여주고 있다.

Abstract

We developed new transport lattice code called DENT-2D (Deterministic Neutral Particle Transport Code in 2-Dimensional Space) primarily to generate few-group constants for the reactor physics analysis diffusion codes. This code is designed to be coupled with KAERI reactor analysis nodal code, MASTER[1], to complete the design system package. CASMO-3 and HELIOS have been used in generating the few-group constant for MASTER. Currently DENT-2D includes only neutron particle transport calculation in 2-dimensional Cartesian geometry.

The characteristics method is adopted for the spatial discretization, which is advantageous for the treatment of the complicated geometry structure and the highly anisotropic scattering. The subgroup method is used for the resonance treatment. B1 approximation has been used to obtain the criticality spectrum considering the leakage

effect in the real core situation. The exponential matrix method has been used for the depletion calculation.

The results of benchmark calculations show that the prediction capability of DENT-2D is comparable to the other lattice codes such as HELIOS and CASMO-3.

I. 서론

가압경수형 원자로의 노심핵설계절차는 크게 핵연료집합체 계산을 통한 소수군 군정수 계산 및 소수군 군정수 라이브러리를 이용한 3 차원 노심 계산으로 나눌 수 있다. 현재 국내에서는 한국원자력연구소에서 3 차원 노심계산이 가능한 MASTER 코드[1]를 개발하여 상업용 가압경수로의 노물리분석 및 SMART 와 같은 중소형원자로의 개발 등에 사용되고 있다. 그러나 SMART 계산에 사용되는 소수군의 군정수 계산에 사용되는 격자계산용 코드는 국내에서 개발된 코드가 전무한 까닭에 Studsvik 사의 CASMO-3[2] 또는 HELIOS[3] 등이 이용되고 있다. 이러한 코드들은 가압경수로와 비등경수로를 주 대상으로 작성되어 있는 까닭에 새로운 연료 또는 노심의 개발 시 목적에 맞도록 적절한 수정작업이 필요하다. 그러나 이러한 코드들은 국내에서 작성된 코드가 아니므로 코드의 내부를 수정하는 데는 한계가 있어왔다. 또한 가동 중인 가압경수로의 노심설계는 미국의 Westinghouse 사의 PHOENIX-P/ANC[4] 핵설계 패키지를 이용하고 있는 상황이므로 기술종속의 우려 또한 존재한다. 따라서 새로운 격자계산용 코드의 개발은 핵설계 분야에 있어서 MASTER 코드와의 연계로 핵설계 코드의 완전한 국산화를 의미한다. 뿐만 아니라 현재 전세계적인 추세인 노심핵설계를 중성자수송론에 근거한 직접적인 노심계산을 통하여 시행하고자 하는 연구에서 기술적 우위를 확보하는데 필수 불가결한 핵심 요소라 할 수 있다. 본 연구에서는 중성자 수송계산을 위한 격자계산 코드인 DENT-2D (Deterministic Neutral Particle Transport Code in 2-Dimensional Space)[5]의 개발과 가압경수형 원자로의 핵연료에 대한 벤치마크 계산결과를 보여준다.

제 2 장에서는 DENT-2D 에서 사용된 방법론에 대하여 설명하고 3 장에서는 가압경수형원자로의 핵연료봉 및 집합체에 대하여 DENT-2D, CASMO-3, HELIOS, MCNP-4C[6] 등을 사용하여 벤치마크 계산을 수행하고 비교하였다.

II. 방법론

DENT-2D 는 여러 세부모듈로 나눌 수 있는데 크게 입, 출력모듈, 기하학적 구조 취급모듈, 공명단면적 처리모듈, 수밀도 및 거시적단면 계산 모듈, 중성자수송계산 모듈, 임계중성자속 계산 모듈, 연소계산모듈, 가속계산모듈 등으로 구성되어 있다. 전체적인 계산절차는 그림 1 에서 보여지는 바와 같다. 아직까지 DENT-2D 를 위한 다군 단면적 라이브러리와 연소계산을 위한 붕괴상수 및 핵붕괴 생성율등을 포함한 라이브러리는 별도로 준비되어 있지 않다. 현재 격자계산 및 연소계산을 위해서 당분간 HELIOS 라이브러리와

ORIGEN-2[7] 라이브러리를 그대로 사용한다. DENT-2D 에 사용된 주요 방법론은 다음과 같다.

공간차분법은 characteristics 방법[8,9,10]을 사용하였는데 이 방법은 적분수송법과 S_N 방법의 장점을 동시에 지니고 있다. 적분수송법은 아주 복잡한 기하학적구조를 지닌 문제를 취급하는데 용이하다. S_N 방법은 심한 비등방성산란을 취급하는데 용이할 뿐만 아니라 메모리를 크게 필요로 하지 않기 때문에 기하적으로 큰 문제를 푸는데 장점이 있다. 따라서 전체 노심 계산을 characteristics 방법으로 푸는 것이 가능하다.

수치해석 방법론은 일반적으로 에너지 군별로는 산란선원반복법 (Source Iteration), 유효증배계수의 결정을 위하여서는 누승법 (Power Iteration)을 사용한다. 그러나 이러한 방법은 지나치게 많은 시간을 소요로 한다. 계산의 효율을 높이기 위하여 CMFD (Coarse Mesh Finite Difference) 방법[11]을 사용하여 계산시간을 절대적으로 줄였다.

공명단면적을 다루기 위하여 subgroup 방법[12,13]을 사용하였는데 이 방법에서 공명적분은 구적법에 의해 근사된다. 이 subgroup 방법에서 배경단면적을 계산하기 위해서 공명에너지 영역에서 고정선원 수송계산을 수행하여야 한다. DENT-2D 에서는 격자계산에 사용되는 characteristics 방법을 그대로 이용하여 고정선원 수송계산을 수행하였다. 이 경우 에너지 군별로 독립된 관계에 있으므로 CMFD 방법으로 가속화 시킬 필요가 없다. 두개 이상의 공명핵종이 공존하는 경우 공명핵종간의 영향을 고려하기 위하여 반복법을 사용하여 공명핵종들의 최종적인 미시적 흡수단면적을 결정한다.

격자계산에서는 전반사 경계조건의 계산을 수행하므로 핵연료집합체의 유효증배계수는 1.0 에서 크게 벗어난 값을 보여준다. 그러나 실제 노심에서는 원자로의 운전시 항상 임계를 유지하는 까닭에 전반사 경계조건에서 구한 중성자속으로 연소계산을 수행하는 경우 실제와 상당한 차이를 보여준다. 따라서 이러한 효과를 고려하기 위하여 버클링을 임의로 조절하여 임계중성자속을 계산한 후 이를 이용하여 연소계산을 수행해야 한다. DENT-2D 에서는 임계중성자속을 계산하기 위하여 B_1 근사방법[3]을 이용한다.

연소에 따른 구성물질의 변화는 행렬지수함수법 (Matrix Exponential Method)[7]을 통하여 계산한다. 이 방법에서 핵종들을 장수명핵종과 단수명 핵종으로 구분하여 장수명 핵종의 경우 행렬지수함수를 테일러시리즈로 수렴시키고, 단수명핵종의 경우 반복계산법을 통하여 계산한다. 이 방법은 핵종의 추가 또는 삭제가 자유롭다는 이점이 있다. 예측, 수정법을 통하여 연소에 따른 구성물질의 변화를 정확히 계산 할 수 있다.

III. 벤치마크 계산

가압경수로의 핵연료봉 및 집합체를 대상으로 DENT-2D 와 CASMO-3, HELIOS 및 Monte-Carlo 계산을 수행하고 그 결과를 비교하여 보았다. 표 1 에서는 순수 핵연료봉과 가돌리니아 연료봉에 대하여 여러가지 온도의 경우에 대하여 유효증배계수를 계산하여 비교하였다. 표에서 보여지는 바와 같이 HELIOS 와 DENT-2D 는 증배계수가 최대

100pcm 이내에서 잘 일치하고 있음을 보여준다. MCNP 와의 비교에서는 약 300pcm 범위 내에서 일치하고 있음을 보여준다. HELIOS 와 DENT-2D 는 동일한 라이브러리를 사용하였으나 MCNP 의 경우 다른 라이브러리를 사용하였으므로 이러한 차이가 계산의 방법론에서 오는 차이인지 라이브러리의 차이에서 오는 것인지는 현재의 단계에서는 알 수 없다. 그러나 어떠한 이유로 인한 차이일지라도 이 정도의 차이는 단일연료봉 계산에서는 어떠한 격자계산 코드에서도 발생 가능한 차이로 불 수 있다.

표 2 에는 여러가지 독물질을 포함한 가압경수형 원자로의 핵연료 집합체에 대해 핵연료온도 및 감속재의 온도를 변화시키면서 벤치마크 계산을 수행한 결과이다. 계산은 CASMO-3, HELIOS 및 DENT-2D 를 이용하여 유효증배계수 및 봉출력분포를 비교하였다. 가연성 독물질이 포함되지 않은 경우 유효증배계수는 HELIOS 와 DENT-2D 는 약 150pcm 정도, HELIOS 와 CASMO-3 는 약 240pcm 정도의 차이를 보여주고 있다. 가돌리니아 독봉을 사용하는 경우에서는 HELIOS 와 DENT-2D 는 최대 45pcm 이내에서 잘 일치하고 있으나 CASMO-3 와는 최대 190pcm 정도의 차이를 보여주고 있다. Pyrex 가연성독봉을 사용하는 경우 HELIOS 와 DENT-2D 는 최대 210pcm 의 차이를 보여주나 CASMO-3 의 계산결과는 최대 600pcm 정도의 큰 차이를 보여준다.

표 2 에서 봉출력을 각각 비교해 보면 HELIOS 와 DENT-2D 는 가연성독봉을 포함하지 않은 경우와 Pyrex 독봉을 사용한 경우 최대 봉출력오차가 약 1.5%이고, 가돌리니아 독봉을 사용한 경우 최대오차가 2.5% 정도로 잘 일치 하고 있다. CASMO-3 의 경우 가연성 독물질을 사용하지 않은 경우 최대 2.1%, 가돌리니아 독봉을 사용한 경우 4.6%, Pyrex 독봉을 사용한 경우 3.1%의 최대 오차를 보여준다.

온도의 변화에 따른 반응도의 변화를 살펴보면 감속재 및 핵연료의 온도가 10^{o}K 상승하였을 때 독물질이 포함되지 않은 경우 HELIOS 는 -80pcm, CASMO-3 는 -74pcm, DENT-2D 는 -77pcm 변화하였다. 가돌리니아 독봉이 사용된 경우 각각 -100pcm, -100pcm, -106pcm 변화하였다. Pyrex 독봉을 사용한 경우 각각 -120pcm, -128pcm, -132pcm 변화하였다. 계산에 사용된 3 가지 코드 모두 거의 유사한 결과를 보여준다.

한편 핵연료의 온도만을 300^{o}K 상승한 경우를 알아보면 독물질이 사용되지 않은 경우 각각 -1270pcm, -987pcm, -1251pcm 변화하였다. 가돌리니아 독봉을 사용한 경우는 각각 -1250pcm, -960pcm, -1236pcm 변화하였다. Pyrex 독봉을 사용한 경우는 각각 -1150pcm, -898pcm, -1142pcm 변화하였다. 앞에서 보여주는 바와 같이 HELIOS 와 DENT-2D 는 거의 같은 값을 보여 주는 반면 CASMO-3 의 경우는 상당한 차이를 보여준다.

그림 2 과 3 는 가연성 독봉이 포함되지 않은 핵연료집합체와 12 개의 가돌리니아봉을 사용한 경우의 봉출력을 전체적으로 비교한 그림이다. 그림에서 보여 지는 바와 같이 전체적으로 거의 유사한 봉출력 분포를 보여주고 있슴을 알 수 있다.

HELIOS 와 DENT -2D 는 계산 방법론이 다르기는 하나 사용된 라이브러리가 동일한 까닭에 거의 유사한 결과를 나타내며, CASMO -3 의 경우는 라이브러리가 전혀 다른 까닭에 다소 큰 차이를 보여주는 것으로 판단이 된다.

IV. 결론 및 토의

국내에서는 처음으로 완전한 형태를 갖춘 격자계산 코드인 DENT -2D 를 개발하였다. 가압 경수형원자로의 핵연료에 대한 벤치마크 계산은 DENT -2D 가 상업용 격자계산코드에 비교하여 거의 유사한 결과를 생산하고 있음을 보여준다. DENT -2D 는 아직까지 상업용 격자계산코드에 비하여 다양한 기능을 갖추고 않은 까닭에 추후에 지속적인 연구개발 및 개선작업이 이루어 져야 할 것이다. 특히 MASTER 와 연계하여 핵설계 패키지를 구성하는 데 필요한 모든 요소들을 갖추어야 할 뿐만 아니라 하나로와 중수형원자로 그리고 새로운 노심의 개발에 적용 가능하기 위하여는 육각형 핵연료를 포함하여 다양한 기하구조의 핵연료를 취급할 수 있어야 한다. 전세계적인 추세에 맞추어 독립적으로 전체 노심을 계산할 수 있도록 확장성도 동시에 포함하여야 할 것이다.

참고문헌

1. B. O. Cho, et al., " MASTER -2.0 : Multi -purpose Analyzer for Static and Transient Effects of Reactors, " KAERI/TR -1211/99 (1999)

2. M. Edenius et al., " CASMO -3, A Fuel Assembly Burnup Program Methodology Version 4.4, " STUDSVIK/NFA -89/2 (1989)

3. R. J. Stamml'er et al., " HELIOS Methods, " Studsvik Scandpower (1998)

4. T.Q. Nguyen et al., " Qualification of PHOENIX -P/ANC Nuclear Design System for PWR Cores, " WCAP -11596 -P -A, Westinghouse (1988)

5. K.S. Kim, H.Y. Kim, S.Q. Zee, " Development of DENT -2D Code Based on the Characteristics Method, " (Accepted to ANS 2002 Annual Meeting)

6. J.F. Briesmeister, " MCNP4C A General Monte Carlo N -Particle Transport Code, " LA -13709 -M, Los Alamos Nat ' l Lab. (2000)

7. M. J. Bell, " ORIGEN -The ORNL Isotope Generation and Depletion Code, " ORNL -4628 (1973)

8. J. R. Askew, " A Characteristics Formulation of the Neutron Transport Equation in Complicated Geometries, " AEEW -M 1108, U.K. Atomic Energy Authority (1971)

9. M. J. Halsall et al., " CACTUS, A Characteristics Solutions to the Neutron Transport Equations in Complicated Geometries, " AEEW -R -1291, U.K. Atomic Energy Authority (1980)

10. S. G. Hong and N. Z. Cho, "CRX: A Code for Rectangular and Hexagonal Lattices Based on the Method of Characteristics," *Ann. Nucl. Energy*, **25**, 547-565 (1998)

11. J.Y. Cho et al., "Cell Based CMFD Formulation for Acceleration of Whole-core Method of Characteristics Calculations," Proc. of KNS Autumn Mtg., Suwon, Korea (2001)

12. A. Khairallah and J. Recolin, "Calcul de l'autoprotection r sonnante dans les cellules complexes par la m thode des sous-groupes," *Proc. Seminar IAEA-SM-154 on Numerical Reactor Calculation*s, pp 305-317, I.A.E.A., Vienna (1972)

13. C. Notari and Z. Garraffo, "Spatial self-shielding for heterogeneous cells," *Ann. nucl. Energy,* **14**, 615-618 (1987)

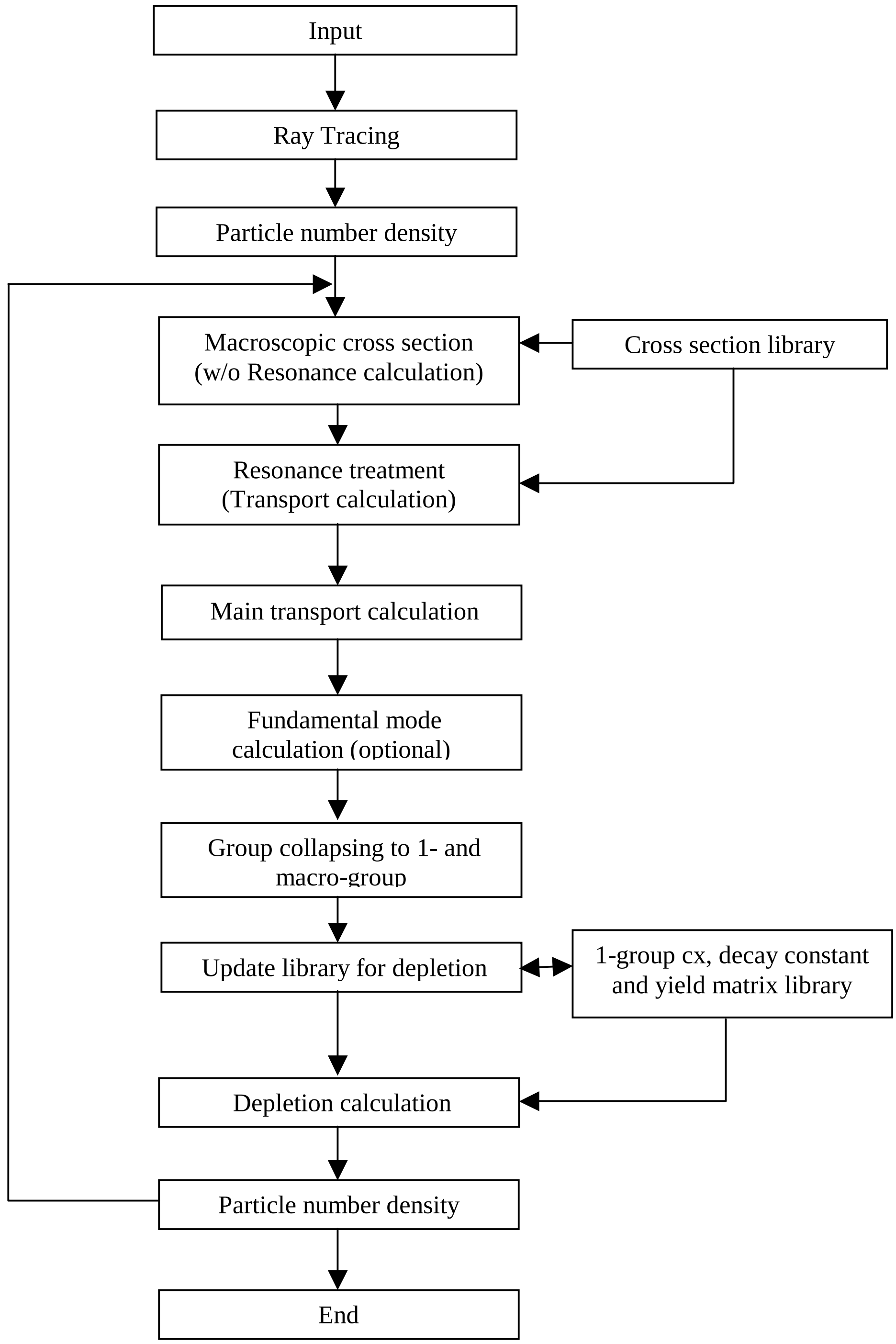

그림 1. DENT -2D 계산 절차

HELIOS	1.50545
CASMO -3	1.50216
DENT -2D	1.50606

0.000 0.000 0.000								
1.055 1.057 1.063	1.019 1.009 1.012							
1.056 1.058 1.064	1.019 1.008 1.012	1.020 1.008 1.013						
0.000 0.000 0.000	1.057 1.064 1.064	1.059 1.067 1.067	0.000 0.000 0.000					
1.054 1.057 1.063	1.018 1.008 1.012	1.022 1.010 1.016	1.072 1.079 1.080	1.068 1.051 1.058				
1.051 1.055 1.060	1.015 1.005 1.009	1.019 1.008 1.014	1.072 1.081 1.081	1.100 1.104 1.100	0.000 0.000 0.000			
0.000 0.000 0.000	1.043 1.053 1.051	1.047 1.057 1.054	0.000 0.000 0.000	1.077 1.083 1.078	1.038 1.050 1.046	0.970 0.967 0.967		
1.019 1.026 1.026	0.985 0.979 0.980	0.986 0.979 0.981	1.023 1.035 1.028	0.982 0.976 0.977	0.943 0.944 0.945	0.920 0.923 0.920	0.903 0.908 0.903	
0.939 0.940 0.941	0.937 0.937 0.936	0.937 0.937 0.936	0.938 0.939 0.940	0.929 0.930 0.929	0.915 0.918 0.916	0.904 0.908 0.904	0.896 0.901 0.895	0.892 0.898 0.891

그림 2. 독봉이 없는 핵연료집합체의 봉출력 비교

HELIOS	1.37026
CASMO -3	1.37081
DENT -2D	1.36817

0.000 0.000 0.000								
1.130 1.134 1.139	1.086 1.077 1.079							
1.115 1.120 1.126	1.069 1.058 1.062	1.045 1.028 1.033						
0.000 0.000 0.000	1.067 1.075 1.078	1.016 0.996 1.017	0.000 0.000 0.000					
1.087 1.086 1.088	0.991 0.954 0.974	0.166 0.164 0.162	1.031 1.010 1.031	1.094 1.071 1.076				
1.101 1.106 1.109	1.035 1.027 1.030	1.001 0.964 0.985	1.092 1.101 1.102	1.147 1.151 1.143	0.000 0.000 0.000			
0.000 0.000 0.000	1.115 1.128 1.121	1.114 1.125 1.115	0.000 0.000 0.000	1.136 1.142 1.132	1.029 1.014 1.027	0.166 0.164 0.162		
1.111 1.122 1.115	1.074 1.070 1.064	1.073 1.068 1.062	1.108 1.124 1.110	1.050 1.046 1.043	0.969 0.972 0.973	0.905 0.884 0.896	0.923 0.933 0.927	
1.033 1.036 1.031	1.030 1.033 1.024	1.028 1.030 1.022	1.024 1.028 1.023	1.004 1.009 1.003	0.976 0.982 0.975	0.956 0.961 0.951	0.952 0.961 0.952	0.955 0.967 0.958

그림 3. 가돌리니아 독봉을 사용한 핵연료집합체의 봉출력 비교

표 1. 단일연료봉에 대한 유효증배계수 비교

w/o	T_m (°K)	T_f (°K)	UO_2 Fuel			$UO_2+Gd_2O_3$ Fuel rod		
			MCNP	HELIOS	DENT-2D	MCNP	HELIOS	DENT-2D
3.0	300.0	300.0	1.39035 ±.00073	1.39295	1.39307	0.21970 ±.00023	0.21609	0.21619
	310.0	310.0	-	1.39220	1.39228	-	0.21674	0.21663
	300.0	600.0	1.37759 ±.00086	1.38053	1.38061	0.21812 ±.00030	0.21524	0.21503
5.0	300.0	300.0	1.49351 ±.00083	1.49282	1.49386	0.30384 ±.00034	0.30094	0.30109
	310.0	310.0	-	1.49199	1.49291	-	0.30154	0.30168
	300.0	600.0	1.47818 ±.00096	1.47980	1.48068	0.30233 ±.00035	0.29959	0.29954

표 2. 핵연료집합체에 대한 유효증배계수 및 봉출력 비교

Case	T_m (°K)	T_f (°K)	Multiplication factor			*Pin power (max. % error)		
			HELIOS	CASMO-3	DENT-2D	HELIOS[a]	CASMO-3[b]	DENT-2D[b]
No-BP	300.0	300.0	1.50110	1.49775	1.50264	-	2.09	1.36
	310.0	310.0	1.50030	1.49701	1.50187	-	2.09	1.45
	300.0	600.0	1.48840	1.48788	1.49013	-	2.09	1.36
Gadolinia	300.0	300.0	1.45120	1.44930	1.45151	-	4.61	2.45
	310.0	310.0	1.45020	1.44830	1.45045	-	4.08	2.45
	300.0	600.0	1.43870	1.43970	1.43915	-	3.97	2.45
Pyrex	300.0	300.0	1.37690	1.37792	1.37492	-	3.14	1.44
	310.0	310.0	1.37570	1.37911	1.37360	-	2.81	1.45
	300.0	600.0	1.36540	1.37141	1.36350	-	2.92	1.54

*) $|(b-a)/a|*100.0$