

수송, 확산이론의 반응도계수 비교, 분석을 통한  
예비 수송이론 보정인자 생산

Generation of Preliminary Transport Correction Factor  
through the Comparison of Reactivity Coefficients  
by Transport and Diffusion Theory

김학성, 이기복, 김상지, 김영일

한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

이 논문의 목적은 액체금속로 노심설계에서 주로 사용되는 확산이론에 의한 계산결과를 수송이론의 정확도 정도로 유지하기 위한 수송이론 보정인자를 예비 생산하는 것이다. IAEA CRP Phase1 에서 제시된 BN-600 원자로와 러시아 IPPE의 BFS-1 임계시설을 대상으로 BFS-73-1 임계실험에서 측정된 각종 반응도 계수를 K-CORE 전산체제의 수송이론 코드와 확산이론 코드로 각각 계산하여 그 결과를 비교 분석하였고, 계산결과를 토대로 예비 수송이론 보정인자를 생산하였다. K-CORE 전산체제에 의한 수송이론 코드와 확산이론 코드를 이용한 계산결과와의 차이를 종합해보면 K-CORE 전산체제의 수송이론 계산결과가 다른 참여국이나 실험값에 비해서 과대평가되고 있는 것으로 나타났으며, 특히 밀도계수의 경우 수송이론과 확산이론에 의한 값이 큰 차이를 보였다. 따라서 반응도계수 계산에 대해 좀 더 심도있는 연구가 필요하며, 이는 2004년 BN-600 원자로 노심의 일부 실험값 공개에 따라 정확한 검증과 개선이 이루어질 예정이다.

Abstract

The purpose of this paper is to generate the preliminary transport correction factor keeping the accuracy of the transport theory by using the result of diffusion theory calculation, which mainly used in the core design of liquid metal reactor. The reactivity coefficients for the BN-600 reactor proposed as IAEA CRP Phase 1 and the BFS-73-1

critical experiment using BFS-1 facility in IPPE are calculated by using the K-CORE code system based on transport and diffusion theory, and compared the results with each other, and the preliminary transport correction factors are produced based on those results. According to the differences between the transport and diffusion calculation results, the values of the K-CORE code system by transport theory show higher trends than other country participants and the measurement results. So the calculation of reactivity coefficients requires further investigation, and more correct verification and improvement will be continuously performed according to the measurements data of BN-600 reactor to be released in the middle of 2004.

## 1. 서론

현재 KALIMER 노심설계를 위한 K-CORE 전산체계[1]의 신뢰성 향상을 위해 수송이론에 기초한 노심 반응도 분석연구가 진행 중이다. 본 연구는 BN-600[2],[3],[4] 원자로 노심과 BFS-73-1[5] 임계실험 노심을 대상으로 기존 확산이론에 의한 반응도계수 계산결과와 수송이론에 의한 계산결과를 비교, 분석하여 노심 반응도 계산의 불확실도를 최소화시키는 수송이론 보정 노심반응도 분석체계 개발을 위한 예비 수송이론 보정인자를 생산하는 것이 목적이다.

## 2. 연구내용 및 방법

본 연구에서는 국제원자력기구(IAEA) 협력연구과제(CRP)에서 액체금속로를 연구하는 각국의 전산코드와 방법론의 검증과 개선을 위해 표준문제로 제시한 BN-600 원자로 노심과 러시아 IPPE의 고속임계시설인 BFS-1시설을 이용한 BFS-73-1 임계실험의 각종 반응도 계수를 KAERI에서 개발된 K-CORE 전산체계의 수송이론 코드와 확산이론 코드로 각각 계산하여 그 결과를 비교 분석하여 예비 수송이론 보정인자를 생산하였다.

BN-600 원자로의 계산절차는 그림 1에 나타낸바와 같이 JEF-2.2에 기초한 KAFAX-F22 [6]와 ENDF-B/VI에 기초한 KAFAX-E66 다군 중성자 단면적 라이브러리를 이용하여 유효 미시단면적을 생산 하였으며, 유효 미시단면적 계산을 위해서 TRANSX[7] 코드와 TWODANT[8] 코드를 이용하여 150군, 80군, 9군 단면적 라이브러리를 생산하였다. 그리고 수송이론 코드인 TWODANT와 확산이론 코드인 DIF3D[9]를 원주(R-Z)모델 노심에 대한 계산을 수행하였고, 계산된 각종 반응도 계수를 비교, 분석하였다. 단, 150군 KAFAX-E66를 사용하여 계산한 경우 150군 핵분열생성물(FP)단면적이 만들어져 있지 않기 때문에 FP를 제외하고 계산하였다.

BFS-73-1 임계노심의 계산은 JEF-2.2에 기초한 KAFAX-F22[4] 라이브러리를 이용하여, TRANSX 코드와 TWODANT 코드를 이용하여 80군, 9군 유효미시단면적 라이브러리를 생산하였다. 그리고 수송이론 코드인 TWODANT로 R-Z계산을 수행하였고, 확산이론 코드인 DIF3D를 이용하여 R-Z와 육각주(Hex-Z)모델 계산을 수행하여 각종 반응도 계수를 실험값과 비교, 분석하였다.

본 연구에서 계산된 반응도 계수는 핵연료 도플러 계수, 구조물 도플러 계수, 소듐 밀도계수, 구조물 밀도계수, 핵연료 밀도계수, 흡수체 밀도계수, 축 방향 팽창계수 그리고 반경방향 팽창계수로 총 8가지이며, 각각의 정의는 다음과 같다.

#### Fuel Doppler Coefficient ( $K_D^{fuel}$ )

핵연료 온도계수는 핵연료를 구성하는 원소인 U235, U236, U238, Pu239, Pu241, Pu242, O16, 그리고 FP의 온도가 1500K(T1) 에서 2100K(T2)로 변화하였을 때를 가정하여 계산하였고 정의 식은 다음과 같다.

$$K_D^{fuel} = \frac{k_{eff}^2 - k_{eff}^1}{k_{eff}^2 \cdot k_{eff}^1} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}$$

#### Steel Doppler Coefficient ( $K_D^{steel}$ )

구조물 온도계수는 노심의 구조물을 구성하는 원소인 Fe, Cr, Ni, Mo의 온도가 600K(T1) 에서 900K(T2)로 변화하였을 때를 가정하여 계산하였고 정의 식은 다음과 같다.

$$K_D^{steel} = \frac{k_{eff}^2 - k_{eff}^1}{k_{eff}^2 \cdot k_{eff}^1} \cdot \frac{1}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)}$$

#### Sodium Density Coefficient ( $W_{Na}$ )

냉각재밀도계수는 노심 전 영역에서의 냉각재 1% 감소를 가정하여 계산하였고, 정의 식은 다음과 같다.

$$W_{Na} = \frac{\partial k}{\partial \rho_{Na}} \cdot \frac{\rho_{Na}}{k^2}$$

#### Steel Density Coefficient ( $W_{steel}$ )

구조물밀도계수는 노심 전 영역에서의 모든 구조물 밀도가 1% 감소함을 가정하여 계산하였고, 정의 식은 다음과 같다.

$$W_{steel} = \frac{\partial k}{\partial \rho_{steel}} \cdot \frac{\rho_{steel}}{k^2}$$

#### Fuel Density Coefficient ( $W_{fuel}$ )

핵연료밀도계수는 핵연료의 밀도가 1% 감소를 가정하여 계산하였고, 정의 식은 다음과 같다.

$$W_{fuel} = \frac{\partial k}{\partial \rho_{fuel}} \cdot \frac{\rho_{fuel}}{k^2}$$

#### Absorber Worth ( $W_{abs}$ )

제어봉반응도가는 중성자 흡수체의 밀도가 1% 감소함을 가정하여 계산하였고, 정의 식은 다음과 같다.

$$W_{abs} = \frac{\partial k}{\partial \rho_{abs}} \cdot \frac{\rho_{abs}}{k^2}$$

### Axial Expansion Coefficient ( $R_{ax}$ )

축방향팽창계수는 노심이 축방향으로 균일하게 1% 팽창함을 가정하여 계산하였고, 정의 식은 다음과 같다.

$$R_{ax} = \frac{\partial k_{all}}{k^2} \bigg/ \frac{\partial H}{H_0}$$

### Radial Expansion Coefficient ( $R_{rad}$ )

반경방향팽창계수는 노심이 반경방향으로 균일하게 1% 팽창함을 가정하여 계산하였고, 정의 식은 다음과 같다.

$$R_{rad} = \frac{\partial k_{all}}{k^2} \bigg/ \frac{\partial R}{R_0}$$

표준문제로 제시된 BN-600 원자로 노심의 R-Z모델은 그림 2에 나타나 있으며, BFS-73-1 임계노심의 구성은 그림 3에 나타내었다.

## 3. 연구결과

K-CORE 전산체제로 계산된 BN-600 원자로의 각종 반응도계수를 참가국들의 계산결과 실험값과 비교하고 수송이론 코드와 확산이론 코드로 계산한 결과의 차이를 비교하여 표 1에 정리하였다. 전체적인 계산결과를 요약하면, K-CORE 전산체제로 계산한 핵연료온도계수와 냉각재밀도계수가 참여국의 결과보다 다소 크게 나타나는 경향을 보였으나, 그 외의 반응도계수 계산결과와 참여국의 결과와 비교적 비슷한 결과를 보였다. 핵연료온도계수 계산결과와 참여국의 결과는 민감도 분석에서 밝혀진 것처럼 JEF-2.2 라이브러리를 사용한 영향이라 판단되어지고, 냉각재 밀도계수의 경우 참여국 각각의 계산결과와 편차가 크게 나타나는 부분이므로 좀 더 심도있는 연구가 필요하다고 판단되어진다. 또한 수송이론 코드를 이용한 계산결과와 확산이론 코드를 이용한 계산결과를 살펴보면 다른 참여국에 비해서 다소 크게 나타남을 볼 수 있었는데, 이는 2004년 일부 실험 값 공개에 따라 정확한 검증과 개선이 이루어질 예정이다.

BFS-73-1 임계실험노심의 계산결과 역시 BN-600 원자로 노심의 계산결과와 마찬가지로, K-CORE 전산체제의 수송이론 계산결과가 실험값에 비해 다소 크게 나타나는 경향을 보였다. BFS-73-1 임계실험 노심의 계산결과를 표 2에 정리하였다. 또한 BN-600 노심과 BFS-73 임계실험자료의 계산결과를 종합하여 예비수송이론 보정인자를 도출하였고, 그 결과는 아래의 표 3과 같다.

## 4. 결론

수송이론 보정 노심 반응도 분석체제 개발을 위해 BN-600 원자로와 BFS-73 임계노심을 대상으로 수송, 확산이론의 케환반응도를 비교, 분석하였고, 계산결과를 토대로 예비 수송이론 보정인자를 생산하여 수송이론 보정 노심 반응도 분석체제 개발에 필요한 기초자료로 제

시하였다. 본 연구의 주된 목적인 수송이론 코드를 이용한 계산결과와 확산이론 코드를 이용한 계산결과의 차이를 종합해보면 K-CORE 전산체제의 수송이론 계산결과가 다른 참여국이나 실험값에 비해서 다소 크게 나타남을 볼 수 있었다. 이는 2004년 BN-600 원자로 노심의 일부 실험값 공개에 따라 정확한 검증과 개선이 이루어질 예정이다.

수송이론 보정인자를 개발하는 연구는 수많은 경우의 수가 통계처리 되어 신뢰도를 향상시켜야 한다. 따라서 향후 입수 가능한 실험자료와 KALIMER 노심의 반응도계수 계산결과를 이용하여 수송이론 보정인자가 생산될 것이며, 추후 각종 반응도계수 계산에 적용되어 신뢰성을 향상시켜 줄 것이다.

## 감사의 글

본 논문은 과학기술부에서 시행하는 원자력중장기사업의 지원으로 수행되었다.

## 참고문헌

- [1]. 김영진 외, "액체금속로 설계기술개발", KAERI/RR-2027/99, 한국원자력연구소, 1999.
- [2]. 김영인, "BN-600 Hybrid Core Benchmark Analysis(Phase 1, 2 and 3)," IAEA, 2003.
- [3]. 이기복 외, "Analysis of the IAEA Coordinated Research Project(CRP) Benchmark Problem Phase IV for Liquid Metal Fast Reactors," KAERI/TR-2528/2003, KAERI, 2003.
- [4]. 김학성, "BN-600 원자로를 대상으로 한 수송, 확산이론의 케환반응도 비교, 분석," LMR/CD221-WR-01, KAERI, 2003.
- [5]. 송 훈 외, "BFS-73-1 임계실험 분석," KAERI/TR-1133/98, KAERI, 1998.
- [6]. J. D. Kim, et al., "KAFAX-F22 : Development and Benchmark of Multi-group Library for Fast Reactor Using JEF-22," KAERI/TR-842/97, 한국원자력연구소, 1997.
- [7]. R. E. MacFarlane, "TRANSX 2 : A Code for Interfacing MATXS Cross-section Libraries to Nuclear Transport Codes," LA-12312-MS, Los Alamos National Laboratory, Dec., 1993.
- [8]. R. E. Alcouffe, et al., "User's Guide for TWODANT: A Code Package for Two-Dimensional Diffusion-Accelerated Neutral Particle Transport," LA-10049-M, Los Alamos National Laboratory, 1990.
- [9]. K. L. Derstine, "DIF3D : A Code to Solve One-, Two-, and Three-Dimensional Finite-Difference Diffusion Theory Problems," ANL-82-64, Argonne National Laboratory, April, 1984.

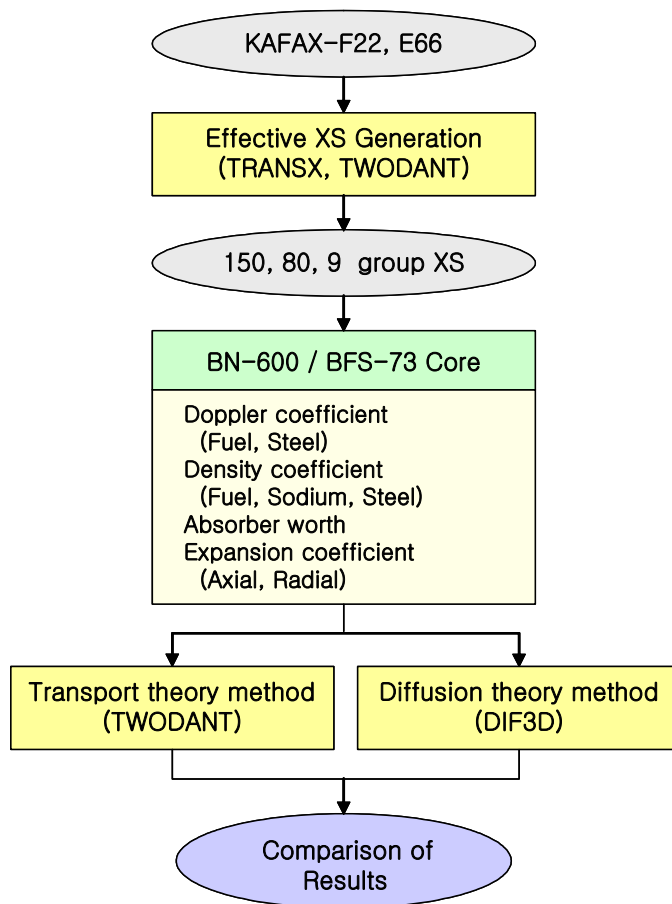


그림 1. K-CORE 전산체제를 이용한 계산 절차

20.0	Axial reflector												
24.7		UB		UB	SCR	UB		UB	UB	UB			
5.5	SHR		SHR				SHR						
52.2		LEZ-1		LEZ-2	Follower + rod tail	LEZ-3		MEZ	MOX	HEZ	SSA	SSA	Radial reflector
52.2	Follower + rod tail	LEZ-1	Follower + rod tail	LEZ-2	Follower	LEZ-3	Follower + rod tail	MEZ	MOX	HEZ			
5.5													
29.7		LB		LB		LB		LB	LB	LB			
20.0	Axial reflector												
(cm)	5.2	36.8	1.8	5.8	1.6	18.9	2.5	10.38 2	13.5	9.48	9.48	25.43	50.0

그림 2. BN-600 노심의 R-Z Geometry

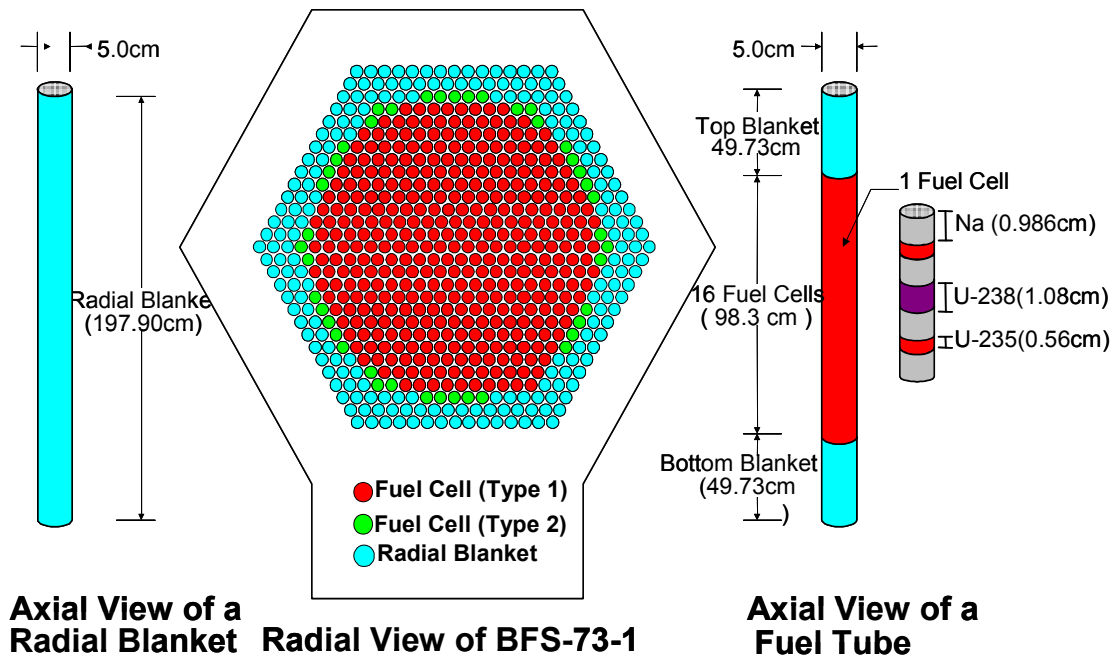


그림 3. BFS-73-1 임계노심의 구성과 연료봉 구성

Reactivity Coefficients	Participants	KAERI Korea		ANL USA	CEA/SA France	CIAE China	IGCAR India	IFPE Russia	JNC Japan	OKEM Russia
		JEF-2.2 80/9	ENDF/B-VI 150/9	ENDF/B-V.2 2082/230	JEF-2.2 1968/33	LIB-IV-M 46/12	CV2M 26/26	ABEN-93 26/18	JENDL-3.2 70/18	ABEN-93 26/26
K-EFF	Transport	1.0235	1.0210	1.0079	1.0230	1.0150		1.0058	1.0095	
	Diffusion	1.0145	1.0182	0.9968	1.0168	0.9981	1.0036	1.0014	1.0042	0.9980
Fuel Doppler	Transport	-0.0081	-0.0074		-0.0057			-0.0063	-0.0062	
	Diffusion	-0.0079	-0.0076	-0.0065	-0.0068	-0.0050	-0.0046	-0.0062	-0.0064	-0.0066
Steel Doppler	Transport	-0.0013	-0.0012		-0.0015			-0.0012	-0.0011	
	Diffusion	-0.0013	-0.0012	-0.0011	-0.0013	-0.0005		-0.0012	-0.0012	-0.0010
Sodium Density	Transport	0.0050	0.0039		0.0034			0.0021	0.0040	
	Diffusion	0.0078	0.0106	0.0175	0.0052	0.0021	0.0045	0.0090	0.0077	0.0107
Steel Density	Transport	-0.0118	-0.0149		-0.0147			-0.0088	-0.0149	
	Diffusion	-0.0098	-0.0080	-0.0384	-0.0112	-0.0055	-0.0021	-0.0063	-0.0126	-0.0114
Fuel Density	Transport	0.3547	0.3642		0.3382			0.3466	0.3491	
	Diffusion	0.3488	0.3643	0.3343	0.3423	0.3492	0.3410	0.3505	0.3491	0.3628
Absorber Worth	Transport	-0.0278	-0.0277		-0.0263			-0.0260	-0.0270	
	Diffusion	-0.0273	-0.0252	-0.0266	-0.0273	-0.0391	-0.0269	-0.0274	-0.0265	-0.0267
Axial Expansion	Transport	-0.1419	-0.1466		-0.1374	-0.1341		-0.1267	-0.1361	
	Diffusion	-0.1378	-0.1430	-0.1327	-0.1378	-0.1432	-0.1395	-0.1297	-0.1393	-0.1415
Radial Expansion	Transport	-0.4852	-0.4940		-0.4573	-0.4603		-0.4787	-0.4647	
	Diffusion	-0.4801	-0.4948	-0.4360	-0.4650	-0.4232	-0.4840	-0.4868	-0.4812	-0.4827

표 1. BN-600 노심의 반응도계수 계산 결과

Experimental value	TRANSPORT	DIFFUSION					
	TWODANT (R-Z/80g)	DIF3D (R-Z/80g)		DIF3D (Hex-Z/80g)		DIF3D (Hex-Z/9g)	
K-eff = 1.0008	Value	Value	Rel. Diff (%)	Value	Rel. Diff (%)	Value	Rel. Diff (%)
K-eff	1.00561	1.00065	0.49	0.99987	0.57	1.00324	0.24
Doppler	-0.00018	-0.00019	-5.83	-0.00020	-11.40	-0.00019	-5.83
Sodium Density	0.02097	0.02257	-7.63	0.02278	-8.63	0.02236	-6.63
Steel Density	0.02077	0.02283	-9.92	0.02272	-9.39	0.02240	-7.85
Fuel Density	0.36987	0.40246	-8.81	0.40178	-8.63	0.39822	-7.67
Axial Expansion	-0.44185	-0.45037	-1.93	-0.44978	-1.79	-0.44703	-1.17
Radial Expansion	-0.88487	-0.90244	-1.99	-0.90146	-1.87	-0.89631	-1.29

\* Relative Difference = (Transport - Diffusion) / Transport x 100 (%)

표 2. BFS-73-1 임계노심의 반응도계수 계산결과

	JEF-2.2		ENDF/B-VI	
	보정인자	SD ±	보정인자	SD ±
Fuel Doppler	1.02792	0.00303	0.98024	0.00231
Steel Doppler	1.02400	0.00041	0.95082	0.00042
Sodium Density	0.63918	0.00560	0.37311	0.00588
Steel Density	1.20408	0.01297	1.86250	0.01371
Fuel Density	1.01692	0.01643	0.99973	0.03220
Absorber Worth	1.01832	0.00515	1.09921	0.00615
Axial Expansion	1.02975	0.01177	1.02517	0.01748
Radial Expansion	1.01062	0.03916	0.99838	0.05344

표 3. 예비수송이론 보정인자