

Feasibility Study on the Calculation of Tritium Breeding Ratio using Geant4 Toolkit

Byung Chul KIM*

KFE, Daejeon 34135, Korea

(Received 19 January 2021 : revised 8 March 2021 : accepted 8 March 2021)

For fusion power generation, the reliable production of tritium, one of the fuels, is a critical challenge. The calculation of the tritium breeding ratio and the design of devices to optimize that ratio are essential when designing fusion demonstration reactor. Usually, MCNP codes are mainly used to calculate the tritium breeding ratio, but in this review, the feasibility of using Geant4, which is mainly used in the field of high-energy physics research, to examine tritium breeding ratio calculation was studied. Comparisons of tritium breeding ratios calculated using MCNP and Geant4 code in simple 1-D models with the same geometry and material properties showed agreement within a range of 1%. Comparisons of other variables (Flux, Energy Deposition) available from Monte Carlo computer simulations was also performed to consider the potential for expanding the utilization area of the Geant4 toolkit.

Keywords: Geant4, Nuclear Fusion, Tritium, Monte-Carlo Simulation

Geant4 툴킷을 이용한 삼중수소 증배율 계산 타당성 평가

김병철*

한국핵융합에너지연구원, 대전광역시 34133, 대한민국

(2021년 1월 19일 받음, 2021년 3월 8일 수정본 받음, 2021년 3월 8일 게재 확정)

핵융합 연료의 하나인 삼중수소를 안정적으로 생산하기 위해서 핵융합 실증로 설계시 삼중수소 증배율 계산과 이를 최적화하기 위한 증배 구조의 설계가 필수적이다. 보통 삼중수소 증배율 계산시 MCNP 코드를 이용한 계산이 이루어지고 있다. 반면, 본 검토 사례에서는 고에너지 물리연구 분야에서 주로 활용되는 Geant4를 이용한 삼중수소 증배율 계산의 타당성을 평가하여 실증로 설계시 적용 가능성을 분석하기 위한 시도를 하였다. 동일한 기하 구조와 재료 물성을 가지는 1차원 모델에서의 MCNP와 Geant4에 의해 전산 모사된 삼중수소 증배율을 비교한 결과 1% 이내의 범위에서 일치하였다. 몬테카를로 전산 모사에 의해 구할 수 있는 다른 변수(Flux, Energy Deposition)들의 비교도 수행하여 Geant4 툴킷의 활용 영역 확대 가능성도 같이 검토하였다.

Keywords: Geant4, 핵융합, 삼중수소, 몬테카를로 시뮬레이션

*E-mail: bckim@kfe.re.kr



I. 서론

현재 기술로 가장 유력한 방법으로 고려되고 있는 핵융합 반응은 10^9 °C 이상의 초고온 플라즈마에서 중수소와 삼중수소 이온의 충돌에 의한 핵융합 반응이다 [1]. 반응의 연료 물질의 하나인 중수소는 그 이용이 용이한 반면 방사성 동위원소로 분류되는 삼중수소는 인공적인 방법에 의해 생산되어야 하는 연료 물질로 이의 안정적 공급이 핵융합 실증로(Demonstration Reactor) 및 핵융합 발전소(Fusion Power Plant)의 운영을 위해 필수적으로 해결해야 할 과제이다. 삼중수소는 연료일 뿐만 아니라 환경에 누출될 경우 기체 상태의 방사성 오염원으로도 작용하기 때문에 이의 철저한 관리가 요구되는 물질이다. 따라서 장치 내부에서의 철저한 관리가 필수적이기 때문에 관련 운영 기술의 개발이 핵융합 상용 에너지 개발을 목표로 하는 관심 국가들에 의해 지속적으로 진행되고 있다 [2]. 국내에서도 Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI) 등을 중심으로 삼중수소 관련 기술 개발이 중수 냉각형 원자로 운전 이래 지속적으로 진행되어 오고 있다 [3]. 이와 병행하여 그 효율적인 생산 공정 개발을 위한 연구도 진행되고 있다. 현재 유력하게 고려되고 있는 삼중수소 대량 생산 방법은 실증로 운전 중 그 내부에서 ^6Li 와 중성자 반응에 의해 생성되는 삼중수소를 저장, 회수하여 사용하는 것으로 운전에 사용한 삼중수소보다 더 많은 양의 삼중수소를 생산하는 것이다. 이는 실증로 설계 과정에서 중요한 설계 목표 중의 하나이기도 하다. 생산 대비 사용된 삼중수소의 비를 삼중수소 증배율(Tritium Breeding Ratio, TBR)로 정의하는데 TBR: 1.05 이상을 달성하기 위한 다양한 설계들이 제안되고 있다. 실제로 국제열핵융합실험로(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)에 참여하는 각국은 독자적인 설계안을 가지고 Test Blanket Module을 제작하여 ITER 운전시 그 가능성을 점검하기 위한 프로그램이 진행 중이고 우리나라도 이에 참여하고 있다. 삼중수소 증배를 위한 ^6Li 를 포함한 물질과 설치 구조에 따른 실증로 내에서의 TBR 계산이 설계 과정에서 필수적으로 요구되는 데 이를 위해 가장 많이 이용되는 핵 해석 프로그램은 Monte Carlo N-Particle(MCNP) 코드로 방사선 수송(Radiation Transport), 원자력 발전소 설계 등 기존의 이용 분야 이외에 ITER 장치 설계 등 핵융합 분야에서도 표준 핵 해석 코드로 활발하게 이용되고 있다. 한국형 핵융합 실증로인 Korea Demonstration Reactor(K-DEMO) 설계에도 지속적으로 이용되어 왔다. 그러나 MCNP는 미국의 수출 규제 대상 품목으로 분류되어 사용시 허가와 일정 비용 지불 등 그 제약 조건 등으로 인해 유럽 등을 중심으로 이에 대한 대안 프로그램을 찾기위한 시도가 있는 데 대표적으로

Geometry and Tracking 4(Geant4) 툴킷을 사용한 핵 해석 결과와 MCNP를 이용한 계산 결과를 비교하는 사례가 늘고 있다 [4,5]. Geant4의 경우 객체 지향 언어인 C++로 작성되어 다양한 클래스를 활용한 확장 가능성, 오픈 소스로 운영되는 점 등 현대 소프트웨어가 요구하는 개방성을 가진 프로그램이다. MCNP 대비 입자의 궤적에 대한 다양한 정도 추적 기능이 풍부하여 원래 용도인 고에너지 물리 분야 이외에 핵물리, 가속기 설계, 의약 분야 등 [6,7]으로 그 활용 영역이 점차 확대되고 있다. 본 검토 사례는 Geant4의 모든 기능을 점검하기 위한 시도는 아니고 핵융합 실증로에 적용 가능한 MCNP TBR 계산 모델을 [8,9] Geant4에 적합한 모델로 재구성하여 전산 모사한 결과와 변형된 모델을 이용한 MCNP 계산 결과를 비교하여 그 상대적인 오차를 도출한 후, 이 특정 주제에서의 적용 타당성을 점검하기 위한 것이다. Geant4 코드는 사용자가 대부분의 실행에 필요한 내용을 직접 코딩하는 것이 가능하지만 본 사례 검토에서는 가능한 한 사용자가 직접 코딩하는 것을 최소화하고 코드에서 기본적으로 제공하는 예제를 최대한 활용하였다. 그리고 이러한 사례 검토는 향후 Korea Superconducting Tokamak Advanced Research(KSTAR) 중성입자빔 가열 장치에서 생성되는 중성자, KSTAR에서 발생하는 중성자의 대면 재료(Plasma Facing Components) 등에 대한 영향 분석 및 이를 위한 중성자 진단 [10], 핵융합 발전소 설계에의 확대 활용 가능성까지 그 연구 영역을 확대하기 위한 사전 연구의 성격을 가지는 것이기도 하다.

II. 해석 모델 및 재료 구성

해석에 사용된 코드는 Geant4 10.6.p02이다 [11]. 이 버전에서 제공하는 G4NEUTRONHP용 핵반응 단면적 라이브러리는 JEFF-3.3이지만 MCNP와의 비교를 고려하여 ENDF/B-VII.1과 ENDF/B-VIII.0을 각각 사용한 결과도 필요시 도출하였다 [12]. 기본적으로 Geant4 입력으로 사용한 계측기(Detector) 모델의 기하학적 구조를 Fig. 1에 도시하였다. 사용자의 Graphic User Interface(GUI) 환경에 따라 다르지만 본 사례에서는 Qt 환경이 이용되었다. 그림에 선형 프레임(Wire Frame)으로 구현된 3차원 형상과 선원으로부터 입사된 입자의 궤적, 그리고 궤적에 대한 정보(입자의 에너지, 모멘텀, 위치 등)를 같이 보여주고 있다. 다음 필수적으로 지정해주어야 하는 물리 모델은 기본적으로 제공되는 FTFP_BERT_HP 모델을 주로 이용하였다. 물리 모델의 차이에 따른 TBR 계산 결과의 차이도 제한된 경우에 대해서 결과를 도출하였다. 물리 모델을 달리하여 사전 해석한 결과 20 MeV 이하의 중성자 관련 핵

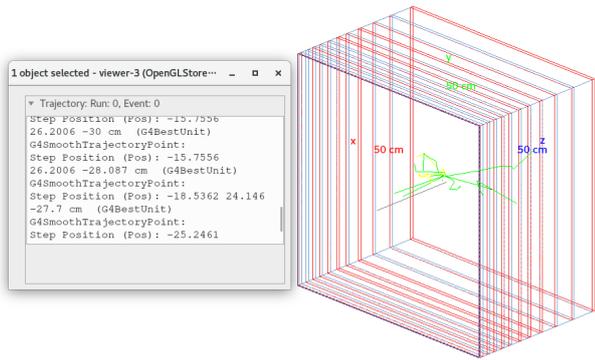


Fig. 1. (Color online) 1-D simplified Model of Tritium Breeding and Neutron Multiplying Layer generated by Geant4.(RAFM and Water are included in the thin layer)

석을 위해서 필요한 High Precision(HP) 모델이 포함되어야만 MCNP의 결과에 근접하는 결과를 보여 주었다. HP 모델이 포함된 FTFP_BERT_HP, QGSP_BERT_HP, QGSP_BICT_HP 모델들 각각을 이용한 계산 결과는 의미있는 차이를 보이지는 않았다. 그러나 HP 모델을 제외한 QBBC 물리 모델을 사용한 해석 결과는 HP 모델이 포함된 경우에 비해 0.67배 정도 낮은 값을 보여주었다. 기하 구조는 입자 진행 방향, 즉 수평 (Longitudinal, Z)방향으로는 Reduced Activation Ferritic Martensitic steel(RAFM)+Water와 삼중수소 생산을 위한 ^6Li 함유 물질이 적층된 구조이다. 플라즈마를 향하는 면은 텅스텐이 위치하고 있다. 수직(Transverse(X, Y)) 방향은 1.0 m * 1.0 m 이다. 기존 MCNP에서 사용된 모델을 더 단순화하여 토카막(TOKAMAK)의 수평(Equatorial) 포트에 국부적으로 설치된 삼중수소 증배 구조를 가상하여 이 영역에만 국한된 TBR을 계산하였다. 토카막 진공용기 내부에 설치되는 증식용 블랭킷(Blanket) 구조물의 경우 토로이달(Toroidal), 폴로이달(Poloidal) 방향으로 연속적인 구조를 가지지만 수평 포트의 경우에는 연속적인 구조를 가진다고 볼수는 없기 때문에 Geant4나 MCNP 전산 모사 시 Fig. 1 구조에서의 수직 방향의 단면에서의 경계 조건에 유의하여야 한다. 단순한 기하 구조를 사용하여 무한(혹은 주기) 구조 해석을 하는 경우 MCNP에서는 반사 면(Reflective Surface) 지정을 하지만 본 사례에서는 특별한 경계 조건이 없는 경우로 해석을 수행하였다. 사용한 Geant4 툴킷에는 MCNP와 같은 효과적인 반사 면 경계 조건 설정 기능이 포함되어있지 않은 것도 이러한 무 경계 조건을 사용한 다른 이유이다. Geant4 사용자 입장에서는 다양한 경계 조건 설정 가능성이 추가되어야 계산 시간 단축 등의 효과가 있을 것이므로 기능 추가가 사용 영역 확장에 필요할 것으로 판단되는 부분이다.

Table 1. Material Composition of Tritium Breeding Layer for Geant4 Simulation.

Material	Density (kg/m ³)	Atomic Number(Symbol)	Abundance Ratio
RAFM+Water	4,990.0	23(V)	0.0012
		24(Cr)	0.0533
		25(Mn)	0.0022
		26(Fe)	0.4934
		74(W)	0.0017
		1(H)	0.2988
		8(O)	0.1494
		[$^6\text{Li}+^9\text{Be}$]Mixt	1,385.9
14(Si)	0.0130		
8(O)	0.0520		
4(Be)	0.8151		
22(Ti)	0.0679		

다음은 모델을 구성하는 물질의 재료 구성을 설정하는 부분에 대해 살펴본다. MCNP의 경우 자료 카드(Data Card) 영역에 사용하는 원소를 구성하는 각각의 동위원소별로 참조하는 라이브러리 절대 경로 위치 등을 정확하게 지정하기만 하면 되는 반면에 Geant4는 계측기 구축(Detector Construction) 클래스에서 사용할 물질을 지정하기 위해 사용자가 직접 코딩을 거치도록 되어있다. 엄격한 코드 간 상호 비교를 위해서는 각각의 코드에서 사용되는 핵반응 단면적 라이브러리의 차이까지 염두에 둔 분석이 이루어져야 하지만 본 사례에서는 그 미세한 차이까지 고려한 것은 아니다. Geant4의 경우 코드에서 제공되는 물성 자료가 기본적으로 이용되었고 MCNP는 FENDL2.1, FENDL3.0 반응 단면적 같이 사용하였다. 주요 재료는 핵융합 환경에서 사용하기 위해 개발되었거나 개발중인 RAFM, Li_4SiO_4 , Be_{12}Ti 과 같은 재료들이다. 주요 재료의 질량 구성비는 [RAFM(Mass Fraction=0.9197)+Water(Mass Fraction=0.803)], [Li_4SiO_4 (Mass Fraction=0.125)+ Be_{12}Ti (Mass Fraction=0.875)]이다. Table 1에서 더 세부적인 정보를 정리한 내용을 보여주고 있다.

중성자 선원은 입자 진행 방향과 수평인(Logitudinal, Z) 방향의 축에 수직인 단면(XY, 1.0 m * 1.0 m)에 고르게 분포하여 D-T 핵융합 반응에 의해 발생하는 14.1 MeV의 중성자이다. 진행 방향은 +Z 방향으로 입사되는 것으로 설정하였다. Geant4 코드는 처음부터 새로운 코드를 작성하는 것보다 기 작성된 클래스나 예제에서 적용하고자 하는 경우에 적합한 사례를 활용하는 것이 효과적인 경우가 있는데 Hadronic 관련 예제 중에서 필요한 클래스나 소스 코드를 조합하여 필요한 코드를 최종 수정하였다. 주로 재료 물성 부분을 추가하고 구조물에서 발생하는 2차 입자 수 및 에너지 분포를 출력해 주는 기능을 이용하였다. TBR

은 2차 입자 중 삼중수소가 발생하는 경우를 계수하여 입사 중성자 대비 증배되는 양을 도출하였다. 이는 핵융합 반응에 의해 발생하는 중성자 수는 삼중수소 소모량과 일대일 대응하기 때문이다. 중성자 속 정보 추출을 위해 MCNP 메시 탈리(Mesh Tally)와 유사한 Geant4 스키어링(Scoring) 기능 중 상자 메시(Box Mesh)를 이용해 필요한 정보를 추출하였다. 이 기능은 Z 축에 수직인 단면에 유효하게 동작하도록 하였는데 원래 소스 코드의 X 방향의 입사 진행 방향과 마크로 파일을 이용한 YZ 단면 크기 초기 설정 및 X 축 방향의 기하 구조 적층 생성 기능을 +Z 축 방향으로 입사 입자 진행, Z 축 방향의 적층 구조 생성이 가능하도록 코드를 수정하였다. 정보 취득은 관심 영역의 크기에 해당하는 가상 메시를 만든 후 그 위치를 Z 축 방향으로 변경해 가면서 이루어 졌다. MCNP의 Average Surface Flux Tally를 이용하여 일괄적으로 정보를 취합하고 확인하는 경우와 비교하여 Geant4 역시 마크로 파일을 이용하여 일괄 처리할 수도 있지만 다수의 상자 메시(Box Mesh)를 만들 경우 처리 속도 등에 영향을 미치기 때문에 다소 불리한 측면이 있는 방법이다.

III. Geant4 결과 및 MCNP 결과와의 비교

먼저 Geant4 전산 모사에 사용된 전체적인 적층 구조(Layer) 별 물질 구성, 기하 구조 정보 및 계산 결과인 에너지 조사량(Energy Deposition), TBR 정보를 Table 2에 정리하였다.

Geant4의 전산 모사 결과를 보면 경계에서의 반사 면(Reflective Surface) 조건이 없는 상태에서 삼중수소 증배율은 약 0.6, 14.1 MeV 중성자로 인해 전체 구조물에 전해진 에너지는 12.26 MeV로 계산되었다. MCNP를 이용한 비교 계산 결과를 보면 입사된 중성자의 수에 상당하는 양이 구조물 밖으로 누설되는 것으로 계산되어 경계면에서의 반사 조건에 따라 TBR 계산 결과에 큰 영향을 줄 수 있음을 유추할 수 있다. 텅스텐 전면에서 면에 수직인 방향으로 입사된 중성자가 구조물 내를 진행하면서 구조물에 방사하거나, 생성된 2차 입자에 의해 방사된 에너지의 총량을 입사 진행 방향으로 도사한 것이 Fig. 2이다. 이 결과는 하나의 입사 입자인 경우로 정규화된 값으로 실제 상황에 적용할 경우 입사된 중성자 수를 곱한 만큼의 에너지가 구조물에 전달되는 것이다.

Fig. 3은 구조물 내에서 생성된 2차 입자의 에너지 분포를 보여주고 있다. 생성된 삼중수소의 에너지 분포는 열중성자에 의해 생성된 경우 [13]와 비교하여 입사된 중성자 에너지 부근의 삼중수소도 생성되는 결과를 보여주고 있다.

Table 2. Tritium Breeding Layer Composition for Geant4 Simulation and Results. RAFMW means [RAFM + Water] composites and Mixt means [${}^6\text{Li}+{}^9\text{Be}$]composites.

No.	Material	Thick. (cm)	Dist. (cm)	Edep. (keV)	TBR	Flux(1/cm ²)
1	Tungsten	0.5	0.0	568		1.79500E-04
2	Vanadium	0.1	0.5	38.6		2.10685E-04
3	RAFMW	1.5	0.6	901		2.13617E-04
4	Mixt1	2.3	2.1	886	0.05323	2.33781E-4
5	RAFMW	1.5	4.4	895		2.54569E-04
6	Mixt2	2.3	5.9	911	0.07242	2.53642E-04
7	RAFMW	1.5	8.2	803		2.53266E-04
8	Mixt3	2.5	9.7	907	0.08173	2.43870E-04
9	RAFMW	1.5	12.2	678		2.29661E-04
10	Mixt4	2.9	13.7	879	0.08364	2.17578E-04
11	RAFMW	1.5	16.6	545		1.97230E-04
12	Mixt5	3.6	18.1	845	0.08188	1.79417E-04
13	RAFMW	1.5	21.7	411		1.56892E-04
14	Mixt6	3.8	23.2	674	0.06793	1.45251E-04
15	RAFMW	1.5	27.0	300		1.20248E-04
16	Mixt7	5.2	28.5	620	0.06135	1.06502E-04
17	RAFMW	1.5	33.7	199		8.18425E-05
18	Mixt8	6.6	35.2	486	0.04791	7.42718E-05
19	RAFMW	1.5	41.8	121		5.08450E-05
20	Mixt9	8.0	43.3	328	0.03221	4.53249E-05
21	RAFMW	1.5	51.3	64.5		2.60330E-05
22	Mixt10	10	52.8	177	0.01551	2.22350E-05
23	RAFMW	1.5	62.8	25.5		8.28196E-06
Total			64.3		0.59787	

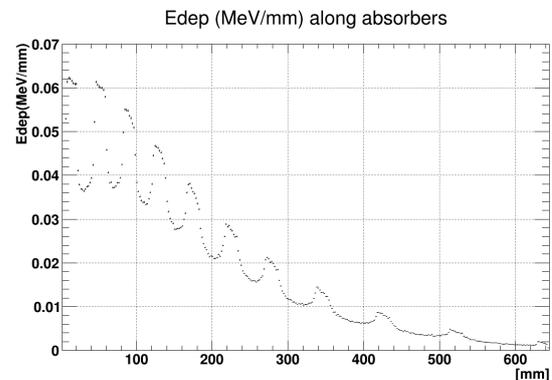


Fig. 2. Energy Deposition along TB Layer Structures.

10^7 개의 중성자 입사 대비 6×10^6 개 정도의 삼중수소가 계수되는 결과를 보여주고 있다. 이는 전산 모사의 오차까지 고려된 값은 아니다. 입사 중성자 대비 1.8배의 중성자가 2차적으로 생성될 수 있음도 확인할 수 있다. 생성된 중성자 에너지 대부분은 수 MeV 이하에 분포하고 있다. 다음으로 각각의 적층면 전면에서의 중성자 속 변화를 보여주는 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 에너지 구간별 중성자 속도 같이 도시하였는데 예상한 바와 같이 14.1 MeV로 입사된 입사는 구조물 내에서 감속되어 그 양이 지속적으로 줄고

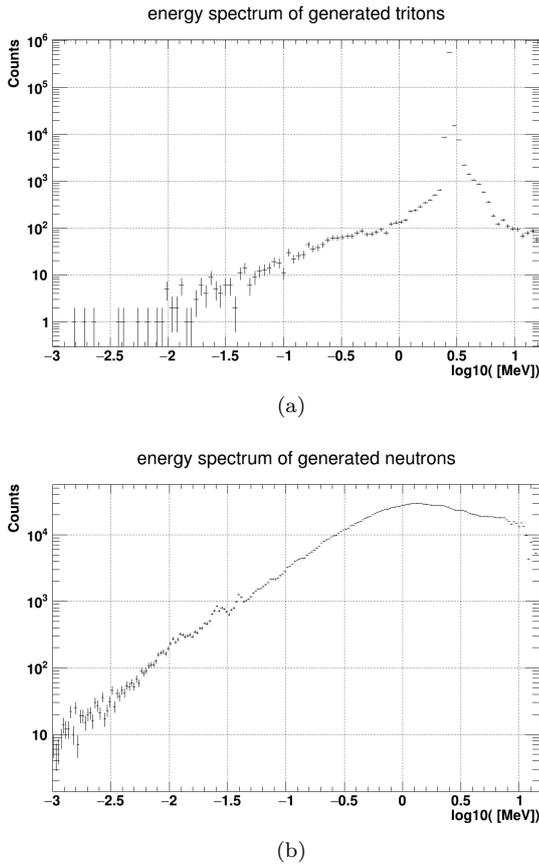


Fig. 3. The Energy Spectrum of the generated Particles.

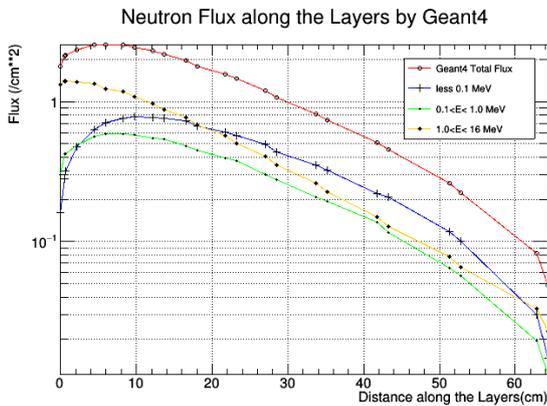


Fig. 4. (Color online) The Neutron Flux by Geant4.

있음이 확인된다. 반면 저속과 중속 구간의 중성자는 베릴륨(Beryllium)에 의한 증배, 감속에 의한 양의 증가 등이 합해져 그 양이 증가한 후에 포획되거나 외부로 유출되어 감소되는 것을 보여 주고 있다. MCNP에서 취득 가능한 TBR, 에너지 조사량(Energy Deposition in Material), 중성자 속(Neutron Flux) 정보를 Geant4에서도 기본적으로 취득할수 있음이 확인되는 것이다.

다음으로 동일한 기하구조와 물질 구성을 가진 모델에

Table 3. MCNP6 Simulation Results.

No.	Edep.(keV)	TBR	Flux(1/cm ²)
1	459.8		1.79082E-04
2	33.9		2.10599E-04
3	813.2		2.14391E-04
4	876.3	0.05271	2.35468E-04
5	791.9		2.55559E-04
6	890.2	0.07101	2.56122E-04
7	705.7		2.56117E-04
8	885.6	0.08043	2.45884E-04
9	595.3		2.34762E-04
10	862.0	0.08298	2.19595E-04
11	476.9		2.01201E-04
12	830.4	0.08171	1.85235E-04
13	360.2		1.61155E-04
14	665.8	0.06857	1.46629E-04
15	263.4		1.23924E-04
16	615.7	0.06264	1.11672E-04
17	175.2		8.68010E-05
18	485.2	0.04937	7.76694E-05
19	105.6		5.43565E-05
20	325.8	0.03353	4.82453E-05
21	56.7		2.95368E-05
22	177.9	0.01631	2.56023E-05
23	22.5		9.00825E-06
Total	11.48 MeV	0.59926	at front surface

대한 MCNP 전산 모사 결과를 살펴본다. MCNP 전산 모사의 전반적인 계산 결과를 Table 3에 정리하였다. 중성자 속의 경우 5,6,7 번 적층(Layer) 근처에서 가장 큰 값을 보여주고 있다. 이는 Geant4에 의한 계산 결과와 동일한 양상으로 베릴륨(Beryllium) 등에 의해 대부분 수 MeV 이하의 중성자가 생성되어 증가된 것으로 Fig. 4를 통해서도 확인 할 수 있다. MCNP를 이용한 경우 반사 면 조건을 X, Y 축에 수직인 면만 설정한 경우 TBR은 0.8825, 선원이 위치한 면의 Z 축에 수직인 면까지 반사 면 조건을 설정하면 1.22769으로 계산된다. 물론 반사 면 조건의 사용 여부는 실제 물리 상황을 고려하여 신중하게 사용되어야만 한다.

이제 각각의 코드 실행 결과 취득한 정보를 비교해 본다. 주요 관심사로 삼은 TBR의 결과를 비교한 것이 Fig. 5이다. 구조물 전체에서의 TBR은 0.5 % 이내의 오차를 보이면서 일치하는 것을 확인할 수 있지만 각각의 적층별(Layer) 구조에서의 TBR은 5% 범위까지 오차가 증가하지만 적층 진행 방향에 따른 변화 추이는 유사한 경향을 보이고 있다.

에너지 조사량은 Fig. 6에 각각 층에서의 값을 도시하였다. 구조물 전체적으로 방사된 양에서는 약 7%의 오차를 보이고 있지만 국부적으로는 약 14%의 차이를 보이는 경우도 있다. 그런데 이 차이의 크기가 고속 중성자의 양과 관련된 것으로 추정되어 두 코드의 고속 중성자 영역에서의 핵반응 단면적 라이브러리(ENDF/B-VII.1 vs FENDL)의 차이 등으로 인한 것으로 추정된다. 다른 핵반응 단면적

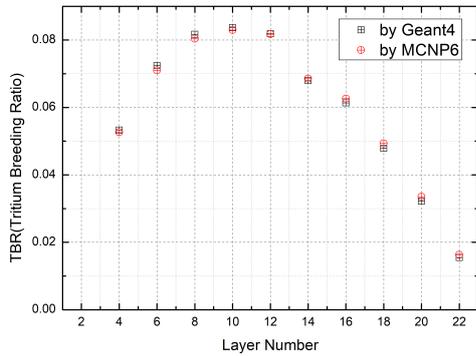


Fig. 5. (Color online) The comparison of Tritium Breeding Ratio in the Layer by Geant4 and MCNP6.

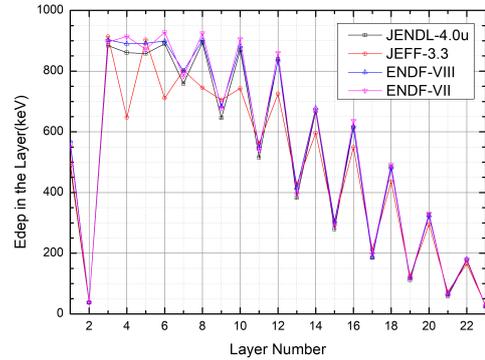


Fig. 7. (Color online) The Geant4 simulation result that shows the difference of Edep in each layer with the different Cross Section Data.

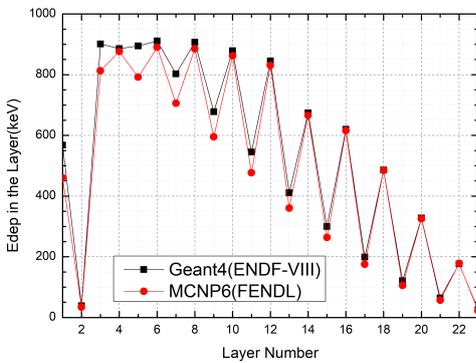


Fig. 6. (Color online) The comparison of Energy Deposition in the Layer by Geant4 with CX ENDF-VIII and MCNP6 with FENDL.

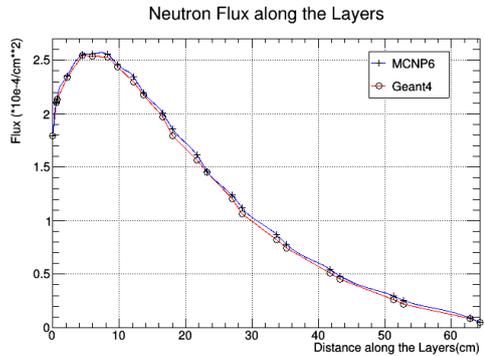


Fig. 8. (Color online) The comparison of Neutron Flux by Geant4 and MCNP6.

라이브리리를 사용할 경우의 차이를 보여 주는 것이 Fig. 7 이다. JEFF-3.3의 경우 그 값의 크기가 역전되는 경우도 있음을 관찰할 수 있다. 아직 Geant4에서는 MCNP와 달리 FENDL에서 제공하는 자료를 사용 가능한 형태로 변환시킨 자료는 제공하고 있지 않아 [12] 이 부분에 대한 직접적인 비교와 원인 규명 등은 향후 심화 검토가 필요한 부분이다.

전체 중성자 속 계산 결과의 경우 대부분의 영역에서 5% 이내의 차이를 보이는 것을 Fig. 8에 도시하였다. 중성자 속의 경우 적층 구조 종단으로 갈수록 모사에 사용되는 입자 수의 감소로 인해 그 차이가 커지면서 최종 단에서는 약 10%의 차이를 보이고 있다. 이는 각각의 코드가 종단으로 갈수록 오차가 커지는 것에서 기인한다. MCNP의 경우 Number of Particle Histories(NPS) 값을 변화시키면서 전산 모사 오차 및 Figure of Merit(FOM) 등에 대한 정보를 함께 제공받을 수 있어 전체적인 모사의 오차 추정 등이 용이하다. 반면 Geant4의 경우 실행할때 마다 자동으로 이런 정보 입수가 용이하지 못한 측면이 있다. Geant4의 경우 통

계 처리가 필요할 경우 실행 완료 후 G4ConvergenceTester subroutine 후처리 기능을 처리가 필요한 정보 별로 추가 코딩하여 필요한 통계 정보를 얻어야 한다 [14].

IV. 결론

유럽 등을 중심으로 본 검토 사례와 유사한 [14] 검증 사례가 최근 늘고 있지만, 국내에서도 Geant4의 핵융합 분야에서의 활용 가능성을 모색하기 위한 시도로 삼중수소 증배율 계산에의 활용 가능성을 탐색하였다. Geant4에 필요한 기하 모델과 재료 물성 자료를 코딩한 후 그 계산 결과를 같은 기하 구조를 가지는 MCNP를 이용한 해석 결과와 비교하였다. Geant4에서 중성자 반응 단면적 라이브리리를 다르게하여 TBR을 계산한 결과도 Fig. 9에 비교하여 도시하였다. 같은 해석 코드를 사용한 경우에도 반응 단면적 라이브리리에 따라 전체 TBR 값은 MCNP에 의한 모사 결과 대비 +1.18 % 에서 -0.3 % 사이의 값을 보여주었다. 전산 모사 프로그램 간의 결과값에 대한 상대 오차 허용

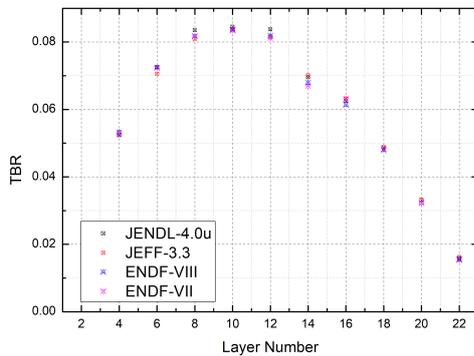


Fig. 9. (Color online) The Geant4 simulation result that shows the difference of TBR in each layer with the different Cross Section Data.

기준 등이 확립된 것은 없지만 각각의 결과들은 유사 상황에 대한 실험 결과 비교가 가능해지는 경우에 최종 검증이 이루어질 수 있을 것이다. 이러한 과제에도 불구하고 본 사례 검토를 통해 Geant4 역시 TBR 계산에 충분히 사용 가능함을 확인하였지만 TBR 계산의 경우 그 오차를 더욱 줄이기 위한 중성자 반응 단면적 라이브러리의 보완 등도 필요함을 확인하였다.

사용 기능과 관련해서는 특히 MCNP와 같은 반사 면 (Reflective Surface)을 설정하는 기능이 부족하여 토카막 (TOKAMAK) 진공용기 내부에 설치되는 연속적이고 주기적인 구조에서의 계산에는 상대적인 약점을 가지는 것으로 판단된다. 필요한 경우 사용자가 Geant4 코드에 이런 기능을 스스로 코딩하는 작업이 필요하다. 개발자들에 의한 이 부분에 대한 보완이 기대되는 부분이기도 하다. 실제로 본 검토에서 사용한 구조로 외곽 경계면 6면 중 5면에 대해 반사 면 조건을 설정하면 TBR이 2배 정도 증가한 값을 MCNP에서는 보여준다. 다른 주요한 출력 변수인 에너지 조사량의 경우 구조물 전체에서 조사량은 반응 단면적 라이브러리에 따라 변화가 있지만 큰 경우 전체적으로 약 7%의 차이를 보였다. 특히 고속 중성자가 많은 영역에서의 차이가 두드러져 고속 중성자의 비율이 큰 핵융합 분야에서 이 에너지 영역에서의 재료 물성 연구 등 후속 연구가 필수적임을 재확인할 수 있다. 이를 위해 실제 14.1 MeV 중성자 선원을 사용한 재료 조사 실험 결과와 전산 모사 결과와의 비교 등을 통해 코드 보완, 이와 병행한 핵반응 단면적 라이브러리의 보완 등이 지속적으로 시도되고 있다. 반면, 중성자 속 계산 결과는 전체적으로 유사한 결과를 보여 주어 Gaent4 이용에 문제가 없을 것으로 판단된다. 일부 상이한 결과를 보여 준 부분도 있지만 전반적으로 Geant4 역시 입자와 물질의 상호 작용 규명을 위해 개발된 코드

인지라 핵융합 분야에서의 핵 해석을 위한 대안 수단으로 활용하는데 무리가 없음을 확인할 수 있다 [15], [16]. 다만, 향후 핵융합 분야에서의 활용 분야를 확대하기 위해서 특정 사례마다 그에 따른 타당성 평가는 수단되어야 할 것으로 판단된다. 그러나 최종적인 활용을 위해서는 MCNP 만을 선호하는 우리나라의 핵 규제 당국에서 Geant4를 사용한 핵 해석결과를 연구 목적을 넘어 공식적인 핵융합 설비 건설 인가 및 허가 절차에서 사용 가능한 코드로 인정받기 위한 절차를 통과하는 것이 활용 영역 확대의 변수가 될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부의 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다.

REFERENCES

- [1] J. Wesson, *Tokamaks, 4th Ed.* (Oxford Univ. Press, New York, 2011), Chap. 1.
- [2] I. Cristescu *et al.*, *Fusion Science and Technology* **76**, 446 (2020).
- [3] J. Kim *et al.*, *Fusion Science and Technology* **76**, 267 (2020).
- [4] A.N. Solovyev, V.V. Fedorov, V.I. Kharlov and U.A. Stepanova, *Nuclear Energy and Technology* **1**, 14 (2015)
- [5] E. Nunnenmann and U. Fisher, *Fusion Engineering and Design* **146**, 1579 (2019).
- [6] J. W. Choi and B. S. Kang, *New Phys.: Sae Mulli* **67**, 1319 (2017).
- [7] M. M. Nasser, *J Fusion Energ* **35**, 621 (2016).
- [8] J. S. Park *et al.*, *Fusion Engineering and Design* **100**, 159 (2015).
- [9] J. S. Park *et al.*, *IEEE TRANSACTION ON PLASMA* **46**, 1713 (2018).
- [10] j. Zhang *et al.*, *Applied Radiation and Isotopes* **150**, 63 (2019).
- [11] GEANT4 homepage, <https://geant4.cern.ch>
- [12] IAEA Nuclear Data Services, <https://www-nds.iaea.org/geant4/>
- [13] V. Santoro, D. D. DiJulio and P. M. Bentley, *J. Phys. Conf. Series* **746** 012012 (2016).

- [14] E. Nunnenmann, U. Fisher and A. Seikov, [Fusion Engineering and Design](#) **161**, 111927 (2020).
- [15] E. Mendoza, D. Cano-Ott, T. K. and C. Guerreo, [Fusion Engineering and Design](#) **61**, 2357 (2014).
- [16] Emiloí Mendoza and Daniel Cano-Ott, IAEA Technical Report INDC(NDS)-0758 (2018), <https://www-nds.iaea.org/publications/indc/indc-nds-0758/>.