

# MCNP 시뮬레이션을 통한 폴리에틸렌 코팅 탄화붕소 혼입 시멘트 페이스트의 중성자 차폐 성능 평가

## Evaluation of Neutron Shielding Performance of Polyethylene Coated Boron Carbide-Incorporated Cement Paste using MCNP Simulation

박재연\*      지현석\*\*      배성철\*\*\*  
Park, Jae-Yeon      Jee, Hyeon-Seok      Bae, Sung-Chul

### Abstract

To develop an effective shielding material for spent fuel that emits fast neutrons is necessary. In this study, thermal neutron and fast neutron shielding performance of polyethylene coated boron carbide-incorporated cement paste was quantitatively analyzed by Monte Carlo N-Particle transport code (MCNP) simulations. As the results of the simulations, fast neutrons were effectively shielded through large quantity of hydrogen and boron elements in polyethylene and boron carbide.

키워드 : 폴리에틸렌, 탄화붕소, 시멘트 페이스트, 중성자 차폐  
Keywords : polyethylene, boron carbide, cement paste, neutron shielding

## 1. 서론

사용후핵연료의 중·장기적 처리 방법의 개선은 인류의 존속과 직결되는 문제로서 필수적으로 해결해야할 과제이다. 사용후핵연료에서는 평균 2 MeV의 고속 중성자가 방출되는데, 일반적인 고속 중성자 차폐 방법으로 수소 함량이 높은 물, 에폭시 등이 중성자 감속재로 사용된다. 그러나 고속 중성자가 수소와 감쇠 반응 시 많은 양의 열중성자가 방출되는데, 이는 중성자 반응 단면적이 넓은 붕소, 희토류 원소 등을 통해 차폐가 가능하다. 본 연구에서는 수소 함량이 높지만 밀도가 낮아 콘크리트의 기계적 물성을 저하시키는 폴리에틸렌 (PE)<sup>1)</sup>을 열중성자 포획 단면적이 넓고 경도가 높아 콘크리트의 기계적 성능을 향상 시키는 탄화붕소 (B<sub>4</sub>C)<sup>2)</sup>에 표면 처리한 PE 코팅 B<sub>4</sub>C (PCB)를 시멘트에 적용하였고, 이 PCB 혼입 시멘트 페이스트의 중성자 차폐성능을 Monte Carlo N-Particle transport code (MCNP) 시뮬레이션을 통해 정량적으로 분석하였다.

## 2. 재료 및 실험 방법

### 2.1 재료

PCB의 제작을 위하여 PE (Sigma aldrich, USA)과 B<sub>4</sub>C (Kojundo, Japan)가 사용되었다. 그리고 시멘트 페이스트 샘플 제작을 위해 보통 포트랜드 시멘트 (Sungshin, Korea), 감수제 (Chemistar, Korea) 그리고 증류수가 사용되었다.

### 2.2 시험체 제작 및 MCNP 시뮬레이션

PCB는 PE와 B<sub>4</sub>C를 질량비 1대1로 혼합하여 분쇄기 (Pulverisette 23, Fritsch, Germany)에서 10분 동안 물리적인 코팅과정을 거쳐 합성되었다. 원재료인 B<sub>4</sub>C와 합성 PCB의 결정 구조는 X선 회절 (XRD, D2 Phaser, Bruker, Germany)을 이용하여 분석하였다. 그리고 물-시멘트 비 (W/C) 0.3의 순수 시멘트 페이스트, 시멘트 대비 2 wt%의 B<sub>4</sub>C, PE 그리고 PCB를 혼입한 시멘트 페이스트 (OPC, B2, PE2, PCB2)가 각각 배합된 뒤 양생되었고, 각 샘플은 원소조성비 계산 후 MCNP6 (Los Alamos, USA)를 사용하여 각 두께 별 샘플 (0, 5, 10, 20, 30, 50 cm)에 열중성자 (0.025 eV)와 고속 중성자 (2 MeV)를 조사시킨 뒤 검출되는 선량을 검출하는 시뮬레이션을 통해 중성자 차폐 성능을 비교 분석하였다.

\* 한양대학교 건축공학과 석·박 통합과정  
\*\* 한양대학교 건축공학과 석사과정  
\*\*\* 한양대학교 건축공학과 조교수, 공학박사, 교신저자(sbae@hanyang.ac.kr)

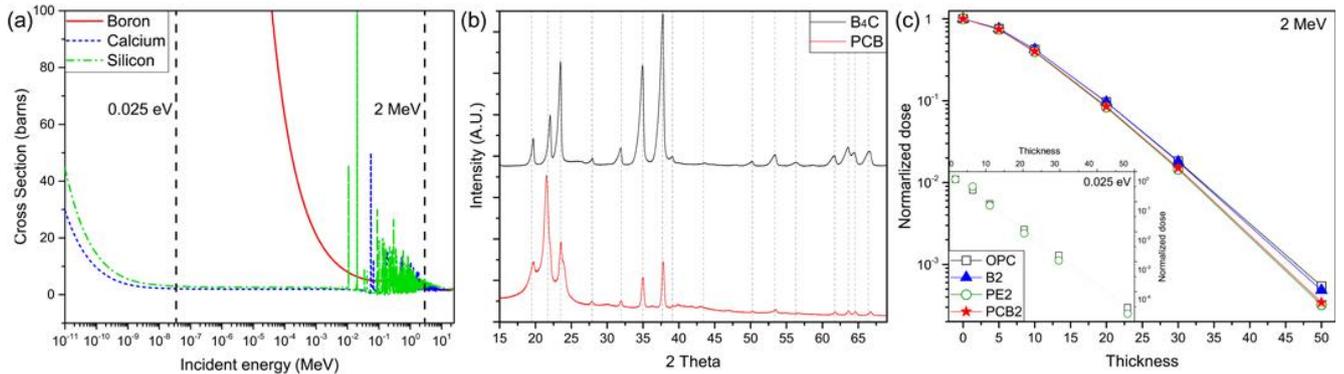


그림 1. (a) Boron, Calcium, Silicon 원소의 중성자반응단면적, (b) PCB의 XRD 분석 결과, (c) 0.025 eV, 2 MeV 조사 시 MCNP 결과

### 3. 결과 및 토의

B<sub>4</sub>C와 PCB의 XRD 분석 결과를 그림 1(b)에 나타내었다. B<sub>4</sub>C와 PCB는 모든 결정면의 위치가 동일함이 확인되었지만, 코팅 과정 후 PCB의 25°–69°에서의 Peak의 강도는 B<sub>4</sub>C의 결과에 비해 약 50% 정도로 감소했다. 그리고 18°와 22°에서의 Peak가 크게 증가하였고, 15°에서부터 55°까지의 영역에서 완만한 둔덕 모양의 그래프 형태를 보였다. 이는 PCB가 B<sub>4</sub>C와 PE가 1대1 비율로 혼합되어 B<sub>4</sub>C의 절대적인 양이 50%로 줄어들었기 때문이고, PE가 Amorphous하고 [110]과 [200] 결정면에서 높은 결정성을 띠는 성질을 갖기 때문이다.

그림 1(c)에서는 열중성자 (0.025 eV)와 고속 중성자 (2 MeV)를 각 샘플 (OPC, B2, PE2, PCB2)로 구성된 두께 별 차폐 벽 (0, 5, 10, 20, 30, 50 cm)에 조사 시 검출되는 중성자 선량 수치를 표준화 한 값을 나타낸다. 열중성자 조사 시뮬레이션 결과에서 B2와 PCB2에서는 두께 5cm의 차폐 벽을 통과한 중성자 선량이 전혀 검출되지 않았다. 이는 그림 1(a)에서 보이는 바와 같이 열중성자 영역에서 시멘트 페이스트의 주된 원소인 칼슘과 규소에 비해 중성자 반응 단면적이 600배 이상 넓은 붕소가 포함된 B<sub>4</sub>C의 혼입 때문이다. 또한 OPC에 비해 PE2에서 중성자 선량 값이 적게 검출되었는데 이는 수소 함량이 많은 PE의 혼입 때문이다. 고속 중성자 조사 시뮬레이션 결과에서 검출된 중성자 선량은 50 cm 두께에서 가장 큰 차이를 나타내었고, OPC에 비해 B2, PE2 그리고 PCB2에서 각각 89%, 59%, 63%로 감소된 것으로 나타났다. 이는 차폐 벽이 두꺼워질수록 중성자와 차폐 벽이 반응하는 시간이 증가하기 때문이고, 붕소의 중성자 반응 단면적이 고속 중성자 (2 MeV) 영역에서 크게 감소하여 수소의 중성자 감속재로서 역할의 비중이 증가했기 때문이다. (그림 1(a))

### 4. 결 론

MCNP 시뮬레이션을 통하여 확인한 결과, 열중성자 영역에서 붕소의 넓은 중성자 반응 단면적으로 인하여 B<sub>4</sub>C의 시멘트 혼입을 통해 훌륭한 중성자 차폐 효과를 확인했다. 그리고 고속 중성자 영역에서는 수소 원자의 중성자 감속재로서의 역할로 인하여 시멘트에 PE가 혼입되었을 때 더 효과적인 중성자 차폐 성능이 나타났다. 따라서 PE와 B<sub>4</sub>C가 모두 포함된 PCB의 시멘트 혼입은 열중성자와 고속 중성자 모두에서 효과적인 차폐 성능을 보이는 것이 확인되었다. PCB 혼입 시멘트를 활용한 콘크리트는 열중성자와 고속 중성자 영역 모두에서 효과적인 중성자 차폐 성능을 보여 사용후핵연료 처리 시설의 재료로서 적합하지만 추가적으로 PCB가 시멘트에 혼입되었을 때, 콘크리트의 기계적, 화학적 물성에 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다.

### Acknowledgement

본 논문은 2016년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호: NRF-2016R1C1B1014179)임을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

### 참 고 문 헌

1. 민지영, 합성 고분자 화합물 및 탄화붕소 혼입에 따른 모르타르의 중성자 차폐성능 분석, 콘크리트 학회 논문집, 제28권 제2호, pp.197~204, 2016
2. Jaewoo Kim et al, Enhancement of thermal neutron attenuation of nano-B<sub>4</sub>C, -BN dispersed neutron shielding polymer nanocomposites, Journal of Nuclear Materials, 2014