

폴리에틸렌과 폴리프로필렌의 중성자감속특성

최명신, 박철순, 리혜련

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《모든 과학자, 기술자들이 과학기술발전의 추세에 맞게 첨단과학과 기초과학발전에 힘을 넣어 나라의 과학기술을 세계적수준에 올려세우도록 하여야 합니다.》(《김정일선집》 증보판 제20권 62페이지)

물질에서 중성자의 감속과 확산을 정량적으로 밝히고 그것을 옹게 적용하는것은 핵 과학기술연구에서 중요한 문제로 제기된다.[1, 2]

중성자의 감속은 원자로의 계산과 설계, 중성자방어에서 엄밀하게 고려되어야 한다. 일반적으로 빠른중성자감속재로 좋은것은 함수소물질이다.

본문에서는 중성자감속재로서의 폴리에틸렌과 폴리프로필렌의 중성자감속특성을 고찰하였다.

1. 중성자감속특성평가의 기하구성

대부분의 중성자원천들은 에네르기가 수MeV정도의 빠른중성자들을 내보낸다. 이러한 중성자를 필요한 에네르기까지 감속시켜야 하는데 이 중성자들과 물질핵의 기본호상 작용은 산란이다. 중성자의 탄성산란과 비탄성산란을 리용한 중성자감속재료는 다층구조와 단일층복합재료구조로 구성한다.

에네르기가 5MeV이상일 때 다층구조를 받아들이는 경우 중성자가 입사하는쪽에 철, 니켈, 연, 월프람 등을 설치하며 그것의 (n, n), (n, n), (n, 2n) 등의 반응을 통하여 3~5 MeV 이하의 에네르기로 낮춘다. 에네르기가 1MeV정도로 감속된 중성자들은 탄성산란을 일으킨다.

중성자의 에네르기가 1MeV정도일 때 중성자감속물질로는 원자번호가 작고 산란자 림면적이 큰 물질이 가장 적합하다. 이때 제일 효과적인 감속재료는 함수소물질이므로 급속중다층의 두번째 층은 함수소물질을 쓴다. 함수소재료에서 중성자들은 열에네르기대역으로 감속되며 차폐를 목적으로 할 때에는 흡수층을 설치한다. 그러나 흡수층의 두께가 크면 다중산란과 포획반응, 2차중성자발생을 고려하여야 하기때문에 합리적인 감속구조는 수치모의를 통하여 설계하는것이 효율적이다.

중성자원천의 세기가 작을 때에는 폴리에틸렌과 폴리프로필렌, 파라핀으로 감속층을 구성하기때문에 이 두 물질에서 감속특성을 몽때까를로방법으로 비교평가하였다.

폴리에틸렌과 폴리프로필렌의 수소원자수밀도는 각각 $8.1 \cdot 10^{22}$, $4.6 \cdot 10^{22}$ 개/cm³이다.

중성자의 감속특성을 평가하기 위하여 직선자리길수송모형화를 리용하고 중성자는 평행으로 입사시켰다. 반경이 2cm인 면원천은 x, z 평면에 놓이고 중성자는 y 축방향으로 입사한다.

중성자 및 립자수송모의프로그램 MCNP-5를 리용하여 수치모의를 할 때 적합한 세 포크기를 선택하는것이 매우 중요하다. 모의에서는 세 포크기를 반경이 5cm, 두께가 5cm

인 원판으로 분할하였다.(그림 1) 그림 1에서 수값의 단위는 cm이다.

2. MCNP-5에 의한 중성자감속모의결과

MCNP-5에 의한 중성자감속모의실험에서는 경계면을 지나는 중성자를 F1형출구방식으로 기록하였다.

위상공간의 점에서 립자의 가치를 단위무게의 립자가 방출하는 기록과 같다고 보고 위상공간세포의 가치

$$\text{가치} = \frac{\text{세대에 들어가는 립자에 의한 전체 기록}}{\text{세포에 들어가는 전체 무게}} \quad (1)$$

을 계산하고 무게창을 발생시켜 분산을 줄이였다.

다음으로 오차를 줄이기 위하여 검사항목을 설정하고 그 요구에 맞게 모의실험을 하였다. 모의에서 기록값 x 의 상대오차가

$$R = \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{x}} = \left[\frac{1}{N} \left(\frac{\overline{x^2}}{\bar{x}^2} \right) - 1 \right]^{1/2} \quad (2)$$

과 같을 때 점검출기평가를 고려하여 이 값이 0.05이하로 되게 하였다. 식 (2)에서 $S_{\bar{x}}$ 는 표준편차, N 은 시행수이다.

모의실험에서는 시행기록을 보간하는 보간함수

$$f(x) = \frac{1}{a} \left(1 + \frac{kx}{a} \right)^{-(1/k+1)} \quad (3)$$

을 도입하고 경사도 $(1/k+1)$ 을 3.0이상으로 보장하였다. 상대분산은 0.1 그리고 모의효율과 오차평가를 위한 기본특성량인 FOM이 20이상일 때 필요한 정확도에 이르렀다고 보고 계산결과를 분석하였다.

이와 같은 분산감소조건에서 입사중성자의 에너지는 10MeV로 하고 단위기록수값을 기록하였다. 그리고 에너지대역을 0~0.1, 0.1~0.5, 0.5~10MeV로 나누어 평가하였다.(표 1)

표 1. 폴리프로필렌매질두께에 따르는 중성자의 감속계산결과

매질두께/cm	중성자묶음 /(개·cm ⁻² s ⁻¹)		
	0~0.1MeV	0.1~0.5MeV	0.5~10MeV
10	4·10 ⁻⁴	4.8·10 ⁻⁵	1.3·10 ⁻⁴
15	1.6·10 ⁻⁴	2.3·10 ⁻⁵	8.3·10 ⁻⁵
20	7·10 ⁻⁵	9.1·10 ⁻⁶	3.5·10 ⁻⁵
25	2.6·10 ⁻⁵	3.1·10 ⁻⁶	1.2·10 ⁻⁵
30	1.1·10 ⁻⁵	1.1·10 ⁻⁶	3.4·10 ⁻⁶
35	3.2·10 ⁻⁶	7.6·10 ⁻⁷	1.4·10 ⁻⁶
40	5.1·10 ⁻⁷	7.22·10 ⁻⁷	6.5·10 ⁻⁷
45	3·10 ⁻⁷	1.2·10 ⁻⁷	3.8·10 ⁻⁷
50	2.2·10 ⁻⁷	—	2.5·10 ⁻⁷

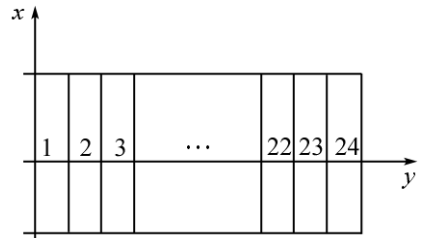


그림 1. 감속계모의구조

방사선조임기준에 의하면 중성자의 세기와 에너지가 $80\text{개}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, 0.1MeV 일 때 인체는 $18\text{개}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 의 조임을 받는것이 허용된다.

중성자의 세기를 $106\text{개}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 로 하고 폴리프로필렌의 감속두께를 평가하면 안전한 두께는 중성자에에너지가 0.1MeV 이하일 때 13cm , $0.5\sim 10\text{MeV}$ 일 때에는 24cm 이다. 중성자의 에너지가 충분히 크다면 폴리프로필렌의 두께를 24cm 이상으로 보장하여야 인체에는 영향이 없지만 체적이 커진다.

다음으로 폴리에틸렌매질두께에 따르는 중성자의 감속계산결과를 표 2에 주었다.

표 2. 폴리에틸렌매질두께에 따르는 중성자의 감속계산결과

매질 두께 /cm	중성자 묶음 $/(\text{개} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$		
	$0\sim 0.1\text{MeV}$	$0.1\sim 0.5\text{MeV}$	$0.5\sim 10\text{MeV}$
10	$2.9 \cdot 10^{-4}$	$4.5 \cdot 10^{-5}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$
15	$1.1 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	$3.8 \cdot 10^{-5}$
20	$3.2 \cdot 10^{-5}$	$3.6 \cdot 10^{-6}$	$8.1 \cdot 10^{-6}$
25	$7.1 \cdot 10^{-6}$	$8.7 \cdot 10^{-7}$	$1.9 \cdot 10^{-6}$
30	$2.5 \cdot 10^{-6}$	$5.6 \cdot 10^{-7}$	$7.7 \cdot 10^{-7}$
35	$1.3 \cdot 10^{-6}$	$3.9 \cdot 10^{-7}$	$2.9 \cdot 10^{-7}$
40	$3.9 \cdot 10^{-7}$	$1.8 \cdot 10^{-7}$	$1.7 \cdot 10^{-7}$
45	$1.8 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-7}$	$1.1 \cdot 10^{-7}$
50	$1.0 \cdot 10^{-7}$	—	—

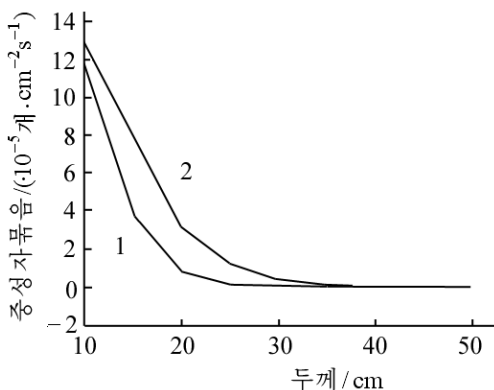


그림 2. 폴리프로필렌과 폴리에틸렌의 두께에 따르는 중성자 묶음 변화
1—폴리에틸렌, 2—폴리프로필렌

우와 같은 방법으로 해석하면 에너지가 0.1MeV 이하일 때 감속두께는 5cm , $0.1\sim 0.5\text{MeV}$ 일 때 16cm , $0.5\sim 10\text{MeV}$ 일 때 19cm 이다. 세가지 경우를 다 고려하면 폴리에틸렌의 두께가 20cm 정도 되어야 한다.

다음으로 폴리프로필렌과 폴리에틸렌의 감속특성을 비교하였다.

$0.5\sim 10\text{MeV}$ 중성자에 대하여 비교한 결과 폴리프로필렌과 폴리에틸렌의 두께에 따르는 중성자 묶음 변화는 그림 2와 같다.

그림 2에서 보는바와 같이 폴리프로필렌의 두께가 25cm 이고 폴리에틸렌의 두께가 19cm 일 때 차폐효과가 같다. 이로부터 폴리에틸렌을 감속물질로 선택하는것이 더 좋다는것을 알수 있다.

맺 는 말

중성자에 대한 폴리프로필렌과 폴리에틸렌의 감속특성을 몽떼카를로방법으로 수치모의를 하여 허용선량에 대응하는 차폐두께를 계산하였으며 10MeV 중성자를 감속시킬 때 같은 차폐효과를 가지는 두께는 폴리프로필렌에서는 25cm , 폴리에틸렌에서는 19cm 이라는것을 확증하였다.

참 고 문 헌

- [1] D. D. DiJulio; Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 859, 41, 2017.
- [2] John. Wagner; Progress in Nuclear Energy, 42, 1, 22, 2003.

주체109(2020)년 12월 5일 원고접수

Neutron Attenuation Behavior of Polyethylene and Polypropylene

Choe Myong Sin, Pak Chol Sun and Ri Hye Ryon

We numerically simulated the neutron attenuation behavior of polyethylene and polypropylene with Monte Carlo method, and calculated the shielding thickness correspondent with the tolerance dose. In case of the moderation of 10MeV neutron, the thickness of taking the same shielding effects is 19 and 25cm in polyethylene and polypropylene, respectively.

Keywords: polyethylene, polypropylene