

Al-X 2 중복합재료의 양성자투과특성

채철, 최명신, 송일심

관성핵융합과 고에너지고밀도물리연구, 가속기에 의한 초중수소생산연구가 심화되면서 최근에 가속된 양성자속의 수송에 대한 연구가 매우 중요한 문제로 제기되고있다. 또한 양성자가속기에서 가속된 양성자로 무거운 표적을 때려 파편중성자를 발생시켜 아림계반응로를 조종하는 혼성로(ADS)연구가 추진됨에 따라 임의의 재료속에서 양성자의 수송에 대한 연구[1, 2]가 광범하게 진행되고있다.

우리는 함수변환법을 리용하여 Al-X 2 중복합재료의 양성자투과특성을 연구하였다.

1. 함수변환법에 의한 혼합매질의 양성자스펙트르투과특성계산

위상공간의 요소체적속에서 립자수가 보존되고 원천항이 없다고 가정하면 볼츠만수송방정식은 다음과 같다.

$$\Omega \nabla_r f(r, E, \Omega, t) = \iiint \Sigma_s(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega) f(r, E', \Omega') dE' d\Omega' - \Sigma_t(r, E, \Omega) f(r, E, \Omega, t) \quad (1)$$

여기서 $f(r, E, \Omega, t)$ 는 립자의 분포함수, $\Sigma_t(r, E, \Omega)$ 는 호상작용자름면, $\Sigma_s(r, E' \rightarrow E, \Omega' \rightarrow \Omega)$ 는 산란자름면이다.

양성자수송인 경우 매질립자의 려기 및 이온화에너지는 양성자의 에너지 $E(1 \sim \text{수백 MeV})$ 에 비하여 매우 작으므로(약 $1 \sim \text{수백 eV}$) 양성자는 매질립자와 호상작용하여 련속감속된다고 볼수 있으며 이때 련속감속근사에 의한 1차원양성자수송방정식을 얻을수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \Phi(x, E) = \frac{\partial}{\partial E} [S(E) \Phi(x, E)] - \Sigma_t(E) \Phi(x, E) \quad (2)$$

련속감속근사에 의한 양성자수송방정식을 풀기 위하여 $F(x, E) = S(E) \Phi(x, E)$ 로 표시되는 함수 $F(x, E)$ 를 도입하고 다시 함수 F 를 $F(x, E) = \exp \left(\int_{E_0}^E \frac{\Sigma_t(E_1)}{S(E_1)} dE_1 \right) \cdot f(x, E)$ 로 변형하면

$$\begin{aligned} S(E) \frac{\partial F(x, E)}{\partial E} &= \exp \left(\int_{E_0}^E \frac{\Sigma_t(E_1)}{S(E_1)} dE_1 \right) \cdot \left[\frac{\partial f(x, E)}{\partial E} + \frac{\Sigma_t(E)}{S(E)} f(x, E) \right] \cdot S(E) = \\ &= \exp \left(\int_{E_0}^E \frac{\Sigma_t(E_1)}{S(E_1)} dE_1 \right) \cdot \left[S(E) \frac{\partial f(x, E)}{\partial E} + \Sigma_t(E) f(x, E) \right]. \\ \frac{\partial f(x, E)}{\partial x} &= S(E) \frac{\partial f(x, E)}{\partial E}. \end{aligned} \quad (3)$$

이제 $t = \int_{E_0}^E \frac{dE_1}{S(E_1)}$ 로 표시되는 함수 t 를 받아들이면 식 (3)은 $\frac{\partial f(x, t)}{\partial x} - \frac{\partial f(x, t)}{\partial t} = 0$ 으로

표시되며 이 방정식의 풀이는 다음과 같다.

$$G(x, t) = G(x + c \cdot t) \quad (4)$$

식 (4)는 속도 c 로 전파하는 파동방정식과 같으므로 다음과 같은 가정을 할수 있다.

가정 1 매질로 입사하는 대전립자스펙트르는 일정한 기간 자기의 모양을 거의 변화시키지 않으면서 매질속을 통과한다.

가정 2 파동을 단색파들의 합성으로 볼수 있는것처럼 립자스펙트르도 단색스펙트르의 합성으로 볼수 있다.

이러한 가정으로부터 입사하는 양성자스펙트르를 i 개의 단색스펙트르들의 조합으로 보고 양성자가 수송되는 거리 x 를 일정한 미소거리 Δx 의 배수(j 배수)로 표시할수 있다.

이때 단순매질속에서 x 위치의 양성자에에너지는 다음과 같이 표시할수 있다.

$$E_{i, j} = E_{i, j-1} + S(E_{i, j-1})\Delta x$$

$$S(E_{i, j}) = \frac{4\pi Qe^2 nZ}{m\beta^2 c^2} \left[\ln \left(\frac{2mc^2 \gamma^2 \beta^2}{I} - \beta^2 \right) \right]$$

여기서 m 은 전자의 정지질량, $\beta = v/c$, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-0.5}$ (로렌츠결수), Q 는 입사립자의 전하수, Z 는 매질립자의 원자번호, n 은 매질립자의 단위체적당 원자수이다.

혼합매질인 경우 Z 대신 유효원자번호 $Z_{\text{유효}}$ 를, n 대신 $n_{\text{유효}}$ 를 리용하여 계산하여야 한다.

$$Z_{\text{유효}} = \frac{\sum_k N_k \cdot Z_k}{\sum_k N_k}, \quad n_{\text{유효}} = \sum_k n_k$$

한편 단순매질속에서 양성자속 $\Phi(x, E_{i, j})$ 와 양성자밀도 $n(x, E_{i, j})$ 는 다음과 같다.

$$\Phi(x, E_{i, j}) = \frac{1}{\sqrt{E_{i, j}/2m}} n(0, E_{i, 0}) \exp \left(\left(- \sum_{j=0}^{j-1} \Sigma_t(E_{i, j}) \right) \cdot \Delta x \right)$$

$$n(x, E_{i, j}) = \frac{\sqrt{E_{i, 0}/2m}}{\sqrt{E_{i, j}/2m}} n(0, E_{i, 0}) \exp \left(\left(- \sum_{j=0}^{j-1} \Sigma_t(E_{i, j}) \right) \cdot \Delta x \right)$$

혼합매질인 경우 $\Sigma_t(E_{i, j})$ 대신 $\sum_k \Sigma_{tk}(E_{i, j})$ 를 리용하여 계산하여야 한다. 즉 혼합매

질속에서 양성자의 에너지와 속, 밀도는 다음과 같다.

$$E_{i, j} = E_{i, j-1} + \frac{4\pi Qe^2 n_{\text{유효}} Z_{\text{유효}}}{m\beta_{j-1}^2 c^2} \left[\ln \left(\frac{2mc^2 \gamma_{j-1}^2 \beta_{j-1}^2}{I} - \beta_{j-1}^2 \right) \right] \Delta x$$

$$\Phi(x, E_{i, j}) = \frac{1}{\sqrt{E_{i, j}/2m}} n(0, E_{i, 0}) \exp \left(\left(- \sum_{j=0}^{j-1} \sum_k \Sigma_{tk}(E_{i, j}) \right) \cdot \Delta x \right)$$

$$n(x, E_{i,j}) = \frac{\sqrt{E_{i,0}/2m}}{\sqrt{E_{i,j}/2m}} n(0, E_{i,0}) \exp\left(\left(-\sum_{j=0}^{j-1} \sum_k \Sigma_{tk}(E_{i,j})\right) \cdot \Delta x\right)$$

2. Al-X 2중복합재료의 양성자투과특성계산

Al재료의 양성자스펙트럼투과특성 Al-X 2중복합재료의 양성자투과경로는 그림 1과 같다.

함수변환법을 리용하여 계산한 두께가 10mm인 Al재료의 양성자스펙트럼투과특성은 그림 2와 같다.

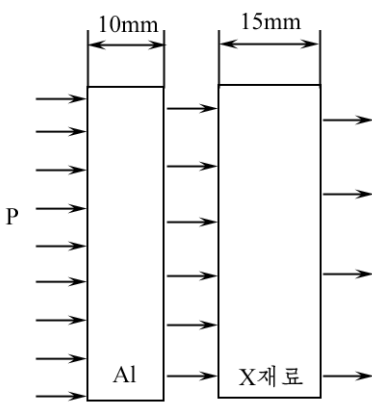


그림 1. 양성자투과경로

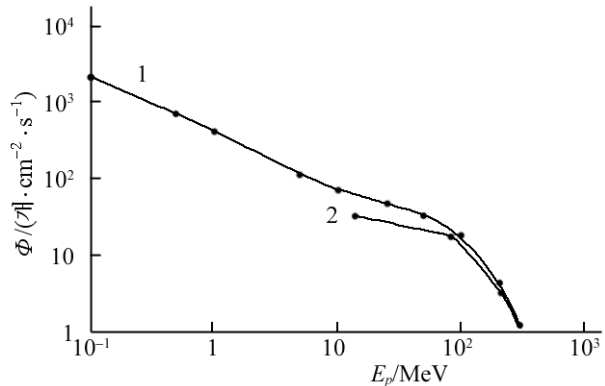


그림 2. Al재료의 양성자스펙트럼투과특성
1-초기양성자스펙트르, 2-Al재료를 통과한 후의 양성자스펙트르

그림 2에서 보는바와 같이 에너지가 55MeV이하의 양성자들은 두께가 10mm인 Al 재료를 투과하지 못하였다.

투과된 양성자들은 에너기가 작을수록 에너지손실이 크고(58MeV일 때 85%) 에너기가 클수록 에너지손실(300MeV일 때 0.023%)은 거의 없었다.

X재료의 양성자스펙트럼투과특성 함수변환법을 리용하여 양성자방어재료로 많이 리용되고있는 두께가 15mm인 X재료의 양성자스펙트럼투과특성을 계산하고 초기스펙트럼과의 관계를 밝혔다. 이때 X재료의 원소포함비는 표와 같다.

표. X재료의 원소포함비

원소	C	K	H	Cl	Sb	O	Al	Fe
포함비	1.19	0.96	19.6	0.57	0.08	3.35	0.1	2.2

X재료의 유효원자번호($Z_{\text{유효}}$)와 유효원자밀도($n_{\text{유효}}$)는 다음과 같다.

$$Z_{\text{유효}} = \frac{\sum_k N_k \cdot Z_k}{\sum_k N_k} = 5.26, \quad n = \sum_k n_k = 8.5 \times 10^{21}$$

함수변환법을 리용하여 계산한 두께가 15mm인 X재료의 양성자스펙트럼투과특성은

그림 3과 같다.

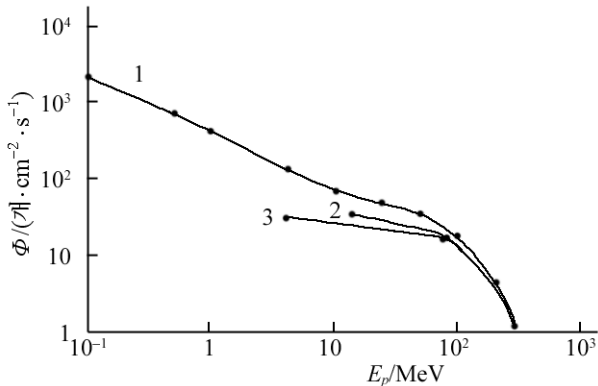


그림 3. X재료의 양성자스펙트르투과특성
1-초기양성자스펙트르, 2-Al재료를 통과한 후의
양성자스펙트르, 3-X재료를 통과한 후의
양성자스펙트르

그림 3에서 보는바와 같이 에너지가 13MeV이하의 양성자들은 두께가 15mm인 X재료를 투과하지 못하였다.

투과된 양성자들은 에너지가 작을수록 에너지손실이 크고(14MeV일 때 70.3%) 에너지가 클수록 에너지손실(294MeV일 때 0.29%)은 거의 없었다.

따라서 68MeV이하의 에너지를 가진 양성자들은 Al(10mm)-X(15mm) 2중복합재료를 통과하지 못하며 그 이상의 에너지를 가진 양성자들은 에너지가 클수록 투과된 후 에너지와 속이 적게 감소된다.

맺는 말

함수변환법으로 혼합매질에서의 1차원양성자수송방정식의 풀이방법을 확립하고 함수변환법을 리용하여 Al-X 2중복합재료의 양성자투과특성을 밝혔다.

참고 문헌

- [1] S. Tayernier; Experimental Techniques in Nuclear and Particles Physics, Springer, 30~50, 2010.
- [2] Marco Silari et al.; International School of Radiation Damage and Protection 10th Course, 1~51, 2011.

주체104(2015)년 10월 5일 원고접수

Positron Penetration Characteristics of Al-X Double Composition Material

Chae Chol, Choe Myong Sin and Song Il Sim

We established the resolving method of 1 dimension positron transport equation in mixing medium by function transformation method and showed the positron penetration characteristics of Al-X double composition material using the function transformation method.

Key words: Al-X double composition material, positron penetration characteristics