

탄소나노관에서 방사선립자들의 집초와 수송특성

리수정, 정연성, 윤철수

모세관구조에서 α, β, γ n 등 방사선립자들과 이온들의 수송과 집초과정에 대한 문제는 실험적으로 중요하게 제기되고있는것으로 하여 이와 관련된 많은 연구가 진행되었다.[1-4] 현재 많이 리용되고있는 관구조는 직경이 $1\sim 10\mu\text{m}$, 길이가 $10\sim 100\text{cm}$ 인 유리섬유관들이다.[5]

본문에서는 탄소나노관에서 립자들의 반사와 수송특성에 대한 연구를 진행하고 방사선립자들의 수송가능성을 평가하였다.

1. 나노관에서 립자의 수송과정

일반적으로 유리모세관에서 빛이 $\sin\theta_c = n_2/n_1$ 로 결정되는 일정한 한계값 θ_c 이상의 각으로 입사할 때 전반사가 일어날수 있으며 그 크기는 굴절법칙에 의하여 $\sin\alpha = n$ ($\alpha = 90^\circ - \Psi_c$) 이므로

$$\cos\Psi_c = n \quad (1)$$

이다.(그림 1) 따라서

$$n = \sqrt{1 - \sin^2\Psi_c} \approx 1 - \frac{1}{2}\sin^2\Psi_c \quad (2)$$

$$\sin\Psi_c = \frac{\sqrt{(R+d)^2 - R^2}}{R+d} \approx \sqrt{\frac{2d}{R}}$$

이고 $\sqrt{\frac{2d}{R}} \ll 1$ 이므로 $\sin\Psi_c \approx \Psi_c = \sqrt{\frac{2d}{R}}$ 이다. 여기서 Ψ_c 는 전반사 임계각, R 는 모세관의 곡률반경, d 는 모세관의 직경이다. 탄소나노관에서 표면우의 원자사이의 거리는 0.142nm , 최소직경은 풀러렌(C_{60})의 직경 $\sim 0.74\text{nm}$ 와 같다.

입사빛은 $\cos\Psi_c = n$ 일 때에만 가능한데 관내부의 전자플라즈마진동수를 고려하면 굴절률은

$$n = \sqrt{\varepsilon(\omega)} = \sqrt{1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (3)$$

이다. 식 (2)와 (3)을 비교하면 $\sin^2\Psi_c = \omega_p^2/\omega^2$ 이므로 $\Psi_c \ll 1$ 인 경우

$$\Psi_c = \omega_p/\omega \quad (4)$$

라는 결론이 나온다. 여기서 ω 는 입사빛의 진동수, ω_p 는 플라즈마진동수이다. 결국 구부러진 모세관에서 진동수가 ω 인 빛이 통과하자면 다음과 같은 조건

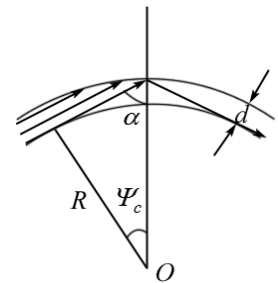


그림 1. 모세관에서 빛의 반사

$$\sqrt{\frac{2d}{R}} \leq \frac{\omega_p}{\omega} \ll 1 \quad (5)$$

이 만족되어야 한다.

나노관내부에서 플라즈마진동수는 전자밀도를 n , 전하를 e , 질량을 m 으로 표시할 때

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m}} \quad (6)$$

과 같이 표시되는데 전자밀도 n 에 의하여 결정된다.

탄소나노관의 경우에 탄소원자주위에서의 전자밀도를 n' 라고 하면 이미 잘 알려진 공식

$$n'(r') = \frac{z}{4\pi a^2 r'} \sum_{i=1}^3 a_i b_i^2 e^{-\frac{b_i}{a} r'} \quad (7)$$

을 리용하여 결정할수 있다.[1] 여기서 z 는 탄소의 원자번호, a 는 데바이차폐길이로서 $a = 0.046 \cdot 8z^{-1/3}(\text{nm})$, a_i, b_i 는 각각 $\{a_i\} = (0.1, 0.55, 0.35)$, $\{b_i\} = (6, 1.2, 0.3)$ 이다.

2. 계산 및 분석

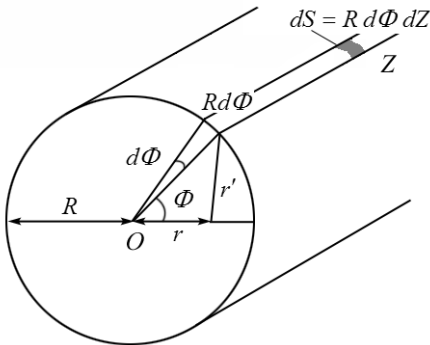


그림 2. 나노관요소

나노관의 표면에서의 전자수밀도는 풀러렌과 같으므로 $n_s = \frac{60}{\pi D^2}$ 이다.(그림 2)

나노관의 단위길이에 해당하는 요소 $Rd\Phi$ 에 있는 원자수 $dN = n_s Rd\Phi$ 가 r 위치에 주는 전자수밀도는 $n_s Rd\Phi n'(r')$ 이다. 따라서 단위길이의 고리요소전체가 중심 O 로부터 r 만큼 떨어진 점에서의 전자밀도 n 은 $r' = \sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos \Phi}$ 임을 고려하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$n(r) = \frac{R n_s z}{\pi a^2} \sum_i a_i b_i^2 \int_0^\pi J_0 \left(\frac{b_i}{a} \sqrt{r^2 + R^2 - 2Rr \cos \Phi} \right) d\Phi \quad (8)$$

여기서 $J_0(x)$ 는 링차베셀함수이다.

식 (8)에서 Φ 에 따르는 적분을 수행하고 식 (6)에 대입하면 플라즈마의 진동수 ω_p 를 결정할수 있다.(그림 3) 이로부터 진동수가 ω 인 빛이 나노관으로 입사할 때 관내부로 반사될수 있는 림계각 Ψ_c 가 결정되는데 관벽쪽에서는 전자수밀도가 크므로 다중 반사되어 γ 선의 선택성을 크게 하여준다.

보통의 유리섬유로 된 모세관을 리용할 때와 비교하면 나노관에서는 X선뿐만아니라 에너기가 매우 큰 γ 선들도 집초수송할수 있는 우점을 가진다. 이러한 효과는 중성자에 대해서도 나타나는데 이 경우에는 중성자의 입사를 물질과의 입사로 볼수 있다. 이 경우 관내부에서의 수송

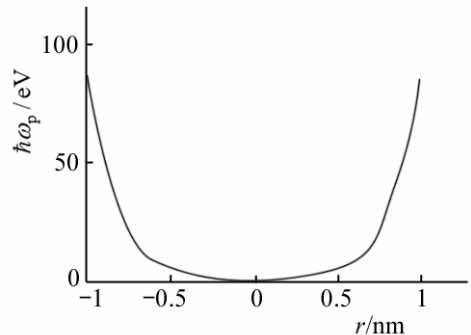


그림 3. 나노관에서 플라즈마진동수

가능한 림계각은

$$\psi_n = \sqrt{\frac{2U}{E}} \quad (9)$$

에 의하여 결정된다. 여기서 E 는 중성자의 입사에너지, U 는 유효광학포텐셜로서 $U = 3 \cdot 10^{-7} \text{ eV}$ 와 같다. 실험적연구결과들에 의하면 나노관안에서 집초, 수송되는 중성자의 에너지대역은 $10^{-3} < E_n < 10^5 \text{ eV}$ 정도로 평가되고있으며 직경이 $10 \mu\text{m}$ 이고 길이가 0.1 m 인 유리섬유관에서 열중성자는 $10 \sim 20\%$ 의 효율로 30° 까지 편향시킬수 있다.[2, 3] 그러나 나노관을 쓰는 경우에는 편향체계의 크기를 수백~수천분의 1 정도로 훨씬 줄일수 있을뿐만아니라 반사계수가 훨씬 크므로 수송효율도 크게 할수 있다.

맺는 말

탄소나노관은 보통의 유리섬유로 된 모세관들에서보다 큰 에너지대역의 γ 림자들도 집초할수 있다. 또한 탄소나노관은 비교적 넓은 에너지대역($10^{-3} \sim 10^5 \text{ eV}$)의 중성자들을 집초 및 수송할수 있다.

참고 문헌

- [1] C. D. Cress et al.; IEEE Transactions on Nuclear Science, **57**, 6, 152, 2010.
- [2] G. Lubkowski et al.; IEEE Transactions on Nuclear Science, **59**, 4, 759, 2012.
- [3] S. A. Francis et al.; IEEE Transactions on Nuclear Science, **60**, 6, 323, 2013.
- [4] S. W. LaGasse et al.; IEEE Transactions on Nuclear Science, **62**, 6, 82, 2015.
- [5] L. Dai; Carbon Nanotechnology, Springer, 124~176, 2006.

주체106(2017)년 9월 5일 원고접수

Focusing and Transport Characteristics of Radiation Particles in Carbon Nanotube

Ri Su Jong, Jong Yon Song and Yun Chol Su

We discussed on reflection and transport process of particles in carbon nanotube, and estimated the transport possibility of radiation particles with high energy.

Carbon nanotube can focus gamma particles with higher energy than case in capillary tube made of normal glass fiber, and focus and transport neutrons with wide range of energy($10^{-3} \sim 10^5 \text{ eV}$).

Key words: carbon nanotube, radiation particle transport