

아림계장치의 조종봉제작과 그 특성

김성지, 오영호

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《우리도 앞으로는 원자력을 리용하여 전력을 생산하여야 합니다.》(《김정일전집》 제1권 482페이지)

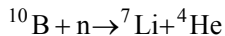
원자로의 조종봉특성을 정확히 결정하는것은 원자로에서 여유반응도조성, 반응도보상, 출력조종을 위하여 필요하다. 현재 가동하고있는 원자로들에서 조종물질로서는 ^{10}B , Hf, Cd가 리용되며 많은 경우 탄화붕소(B_4C)조종봉을 리용하고있다.[1, 2] 그러나 아림계장치와 같이 중성자묵음이 작고 아림계상태에 있는 경우에는 붕소농축을 하지 않고 천연재료인 붕사를 그대로 리용하여 조종특성을 고찰할수 있다.

본문에서는 붕사를 조종재료로 리용하여 조종봉을 제작한 경우 아림계원자로에서의 조종봉특성을 연구하였다.

1. 조종봉제작

일반적으로 원자로조종재료는 중성자흡수자름면적이 커야 하고 방사선손상을 적게 받으며 조종재료에서 불필요한 핵반응이 진행되지 말아야 한다. 또한 재료의 원가가 적고 내부식성이 좋아야 한다.

중성자흡수재료인 붕사($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)의 밀도는 0.977 g/cm^3 이고 자연계에서 ^{10}B 의 동위원소함량은 18.8%정도이다. 중성자흡수재료로 리용하는 ^{10}B 의 흡수자름면적은 3 840b이며 중성자의 에너지에 거꿀비례한다. 즉 $1/v$ 법칙을 만족한다. ^{10}B 와 중성자의 핵반응식은 다음과 같다.



반응생성물들인 ^7Li 과 ^4He 는 비방사성원소들이며 붕사의 미시흡수자름면적은 250b이다. 이러한 붕사의 특성들로부터 조종봉재료로 리용할수 있다. 제작된 조종봉의 구조는 그림 1과 같다.

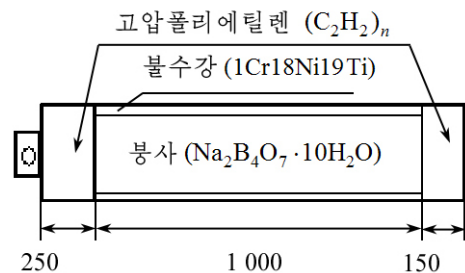


그림 1. 조종봉의 구조
그림에서 수값의 단위는 mm임

2. 조종봉효율결정법

실험적으로 조종봉의 효율을 결정하는 방법들에는 붕락하법, 아림계법, 주기법, 비교법, 임펄스법, 원천법 등 여러가지가 있다. 붕사조종봉의 특성은 아림계법으로 고찰하였다. 아림계원자로인 경우 증식결수 k_{eff} 와 증식비 M 사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$M = \frac{1}{1 - k_{\text{eff}}} \quad (1)$$

한편 원자로의 반응도는 다음식으로 표시된다.

$$\rho = \frac{k_{\text{eff}} - 1}{k_{\text{eff}}} \quad (2)$$

이로부터 반응도와 증식비사이의 관계식을 얻을수 있다.

$$\rho = \frac{1}{1 - M} \quad (3)$$

증식비와 실험에서 측정되는 중성자계수속도(N)사이에는 다음의 관계식이 성립한다.

$$M = CN \quad (4)$$

여기서 상수 C 는 검출기의 효율과 중성자원천, 검출기 및 조종봉의 상대위치에 관계된다. 이 상수 C 는 이미 알고있는 반응도 ρ_0 을 주었을 때 검출기의 계수속도 N_0 으로부터 구할수 있다. 즉

$$\rho_0 = \frac{1}{1 - M_0} = \frac{1}{1 - CN_0}$$

이다. 여기로부터

$$C = \left(1 - \frac{1}{\rho_0}\right) \frac{1}{N_0} \quad (5)$$

로 된다. 식 (4)와 (5)를 식 (3)에 대입하면 다음식을 쓸수 있다.

$$\rho = \frac{1}{1 - \left(1 - \frac{1}{\rho_0}\right) \frac{N}{N_0}} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 반응도를 결정할수 있다.

조종봉효율은 주어진 조종봉이 원자로의 반응대에 삽입될 때 반응대의 수직방향위치와 반경방향위치에 관계되므로 매 위치에서의 반응도를 결정하여야 정확히 평가할수 있다. 그러나 조종봉의 가치가 가장 큰 위치는 중심위치이므로 실험에서는 제작된 조종봉이 반응대중심에 투입되는 경우에 대하여 특성을 평가하였다. 우리가 제작한 장치인 경우 2개의 중성자원천사이에 조종봉을 투입하였다.

3. 조종봉효율결정실험

실험에서 리용된 장치는 천연우라늄-물계이며 격자간격은 45mm이다. 연료봉직경은 29mm, 표피두께는 1mm이고 연료봉수는 191개이다. 검출기로서 BF_3 계수관을 리용하였다. 반응대중심에 2개의 Pu-Be원천이 대칭으로 설치되어있다.

실험은 중심위치에서 조종봉을 수직으로 삽입하면서 매 위치에서 중성자측정을 하고 식 (6)에 의하여 반응도를 계산하였다. 실험에서 $\rho_0 = -0.0785$ 이다. 실험결과는 표와 같다.

표. 반응대중심위치에서 조종봉침투깊이에 따르는 반응도평가

회수	H/cm							
	0	10	22	42	52	62	82	102
1	1 154	1 143	1 093	1 017	998	1 001	972	916
2	1 073	1 088	1 052	1 046	989	918	952	951
3	1 095	1 116	1 076	1 037	1 006	906	947	925
4	1 065	1 054	996	1010	1 045	982	960	925
5	1 106	1 054	1037	987	979	1017	890	900
평균값/min ⁻¹	1 098.6 ±31	1 091.0 ±34	1 050.8 ±33	1 019.4 ±20	1 003.4 ±22	964.8 ±44	946.0 ±24	923.4 ±16
ρ	-0.078 5	-0.079	-0.081 8	-0.085 1	-0.086 6	-0.090 3	-0.092 3	-0.094 8
$\Delta\rho$	0	0.000 59	0.003 3	0.006 6	0.008 1	0.011 8	0.013 8	0.016 3

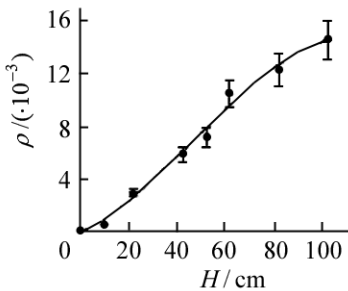


그림 2. 수직방향에서 조종봉깊이에 따르는 반응도변화

수직방향에서 조종봉깊이에 따르는 반응도변화는 그림 2와 같다. 실험곡선으로부터 제작된 조종봉의 깊이에는 반응도변화의 선형구간은 20cm로부터 80cm사이라는것을 알수 있다. 그리고 붕사조종봉 1대의 최대반응도변화는 0.016 3정도이다.

맺는 말

아림계장치에서 조종봉특성결정방법을 확립하였다. 천연재료로서 붕사를 아림계장치에서 조종봉으로 리용할수 있다.

참고 문헌

- [1] Yoshiaki Oka; Nuclear Reactor Design: Control Rod Worth, Springer, 19~34, 2010.
- [2] W. M. Stacey; Nuclear Reactor Physics, A Wiley-Interscience Publication, 245~247, 2000.

주체107(2018)년 6월 5일 원고접수

Manufacture of Control Rod for Subcritical Assembly and Its Characteristics

Kim Song Ji, O Yong Ho

We manufactured control rods for subcritical assembly using borax and studied the control characteristics in the water-uranium system. Maximum change of reactivity by control rods of using borax is about 0.016 3.

Key words: subcritical assembly, control rod, borax