

MCNP를 리용한 붕소농도측정장치의 측정감도개선방법

전혜영, 리철학, 배성길

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《우리는 자체로 필요한 조건을 하나씩 마련하면서 원자력을 경제건설에 리용하기 위한 사업을 추진시켜야 합니다.》(《김정일전집》 제1권 483페이지)

경수로에서는 여유반응도보상조종을 1차회로랭각재속의 붕소농도조종을 통하여 진행한다. 랭각재속의 붕소농도측정은 중성자흡수법에 기초하고있으며 붕소농도측정감도를 높이기 위하여서는 중성자원천의 세기를 크게 하거나 중성자검출장치의 기하학적구성방안과 재료를 합리적으로 선택함으로써 실현할수 있다.[1, 2]

우리는 중성자 및 대전립자수송모의프로그램인 MCNP를 리용하여 붕소농도측정장치 구성요소들의 기하학적배치상태와 재료선택에 따르는 중성자계수특성을 모의함으로써 붕소농도측정감도를 높이기 위한 합리적인 방안을 수립하였다.

1. 붕소농도측정감도에 영향을 주는 인자들

중성자흡수법에 의한 경수로 1차회로랭각재속의 붕소농도측정용중성자검출장치의 구조는 그림 1과 같다.[1]

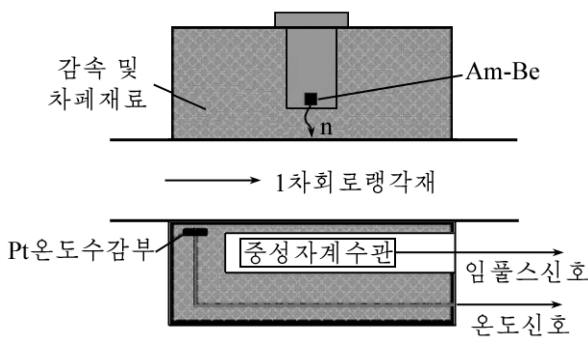


그림 1. 붕소농도측정용중성자검출장치의 구조

검출기에서 단위시간동안에 계수된 중성자수 즉 중성자계수율과 붕소농도사이에는 다음과 같은 관계가 존재한다.[2]

$$\frac{n}{n_0} = e^{-tP} \quad (1)$$

여기서 n 은 붕소농도가 P 일 때 중성자계수율, n_0 은 순수한 물에서의 중성자계수율, P 는 붕산용액의 붕소농도, t 는 중성자검출장치의 구조와 ^{10}B 흡수자름면에 관계되는 상수이다.

식 (1)을 테일러합렬의 2차항까지 전개하면 다음의 식이 얻어진다.

$$\frac{n_0}{n} = c - tP - \frac{t^2}{4}P^2 \quad (2)$$

보통 $0 < t < 1$ 이므로 $t^2/4$ 이 아주 작아지며 함수감소율에 대하여 결수 t 가 중요한 작용을 하게 된다.

우의 식으로부터 측정정확도를 높이기 위해서는 다음과 같은 요구를 만족시켜야 한 다는것을 알수 있다.

첫째로, 감소결수의 영향을 받지 않는 상태에서 계수률이 많은것을 요구한다. 그것은 유효계수률이 많을수록 응답시간이 줄어들수 있고 통계적요동으로 인한 오차가 줄어들기 때문이다.

둘째로, 결수 t 가 클수록 좋다. 그것은 t 가 클수록 붕소농도에 따르는 계수률변화곡선이 가파로와지고 따라서 측정감도가 높아지기때문이다.

첫번째 요구는 중성자원천의 세기를 크게 하여 실현할수 있다. 그런데 원천의 세기가 클수록 차폐제재료체적이 증가되므로 일정한 한계내에서 제한된다. 그러므로 검출장치의 구조와 재료에 관계되는 t 를 크게 하는 방법으로 측정감도를 개선할수 있으며 이를 위하여 합리적인 기하학적구조설계와 재료선택을 하여야 한다.

2. MCNP모의를 위한 입력카드작성

붕소농도측정장치의 특성과 관로의 기하학적크기에 맞게 그림 2와 같은 구조를 가지도록 세포카드와 표면카드를 작성한다.[3] 이때 중성자원천은 $^{241}\text{Am-Be}$ 원천[2]을 리용하였고 비례계수관은 BF_3 비례계수관 《CENTRONIC》[1]를 리용하였다.

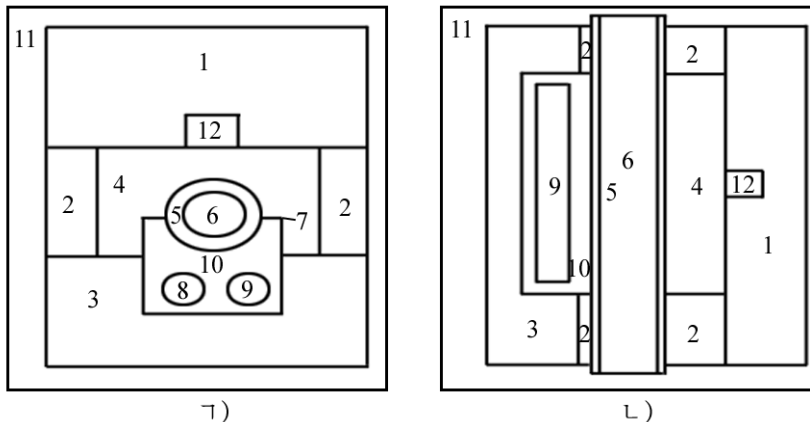


그림 2. MCNP모의자름면도

ㄱ) 가로자름면, ㄴ) 세로자름면

- 1, 2, 3—중성자차폐층(10% 함붕소폴리에틸렌재료), 4—중성자감속층(폴리에틸렌),
5—붕산수관로, 불수강재료, 외경 4.5cm, 내경 3.9cm, 6—측정액체, 붕산수,
7—간접기록차폐막(Cd 두께 1mm), 8, 9— BF_3 비례계수관활성구역
(반경 2.55cm, 높이 38.5cm), 10, 11, 12—공기

3. 붕소농도측정감도개선을 위한 MCNP모의

1) 폴리에틸렌감속층의 영향평가

폴리에틸렌감속층의 두께가 측정감도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 그림 2의 자름면도에 기초하여 단위원천중성자당 BF_3 계수관의 활성구역내에서 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 반응확률과 상대표준편차를 결정하였다. 모의는 일반 점원천방식으로 수행되었으며 매 모의에 대하여 원천에서 발생한 중성자수는 $2 \cdot 10^6$ 이었다.

폴리에틸렌감속층의 두께는 0~7cm까지, 붕소농도는 $0 \sim 4 \cdot 10^{-1}\%$ 까지 변화시켰으며 계수물변화는 순수한 물에서의 계수물을 1로 놓고 그에 대한 상대계수물의 변화를 고찰하였다.(그림 3)

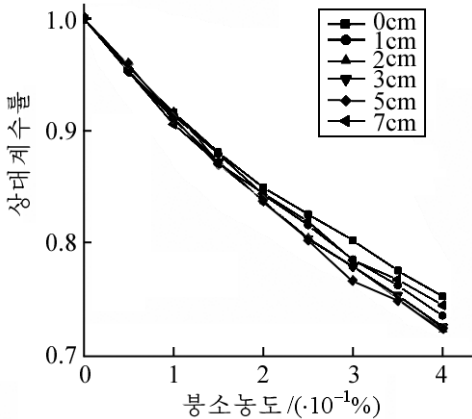


그림 3. 감속층두께에 따른 중성자계수물변화

그림 3에서 보는바와 같이 폴리에틸렌두께가 2cm일 때 상대적으로 경사가 제일 급한 계수물곡선이 얻어진다는것을 알수 있다.

경험식[1]에 의하면 붕소농도와 계수물사이에는 다음의 선형관계가 성립한다.

$$\frac{1-x}{x} = t \cdot W \quad (3)$$

여기서 $x = I/I_0$, t 는 장치에 따르는 결수, W 는 붕소농도이다. 즉 $(1-x)/x$ 와 붕소농도가 선형관계에 있으며 결수 t 가 클수록 직선의 경사가 급해져 감도가 높아지게 된다. 이 관계식을 리용하여 감속층이 있을 때와 없을 때 경사도를 비교해본 결과 감속층이 있을 때의 경사도가 없을 때보다 1.2배

커진다는것을 알수 있다.

폴리에틸렌층의 두께가 2cm일 때 중성자계수물곡선의 경사도가 제일 급하게 나타나는 원인은 다음과 같다.

매질속에서의 중성자세기약화는 지수함수형태를 가지므로 입사중성자뭉침에서 열중성자뭉침이 클수록 붕산용액에서의 열중성자흡수에 의한 약화효과가 더 크게 나타나게 된다. 그러므로 붕산용액속으로 입사할 때 최대한 열중성자뭉침을 크게 하여야 한다. 매질에서 열중성자스펙트르의 형태는 감속결수 $\xi\Sigma_s/\Sigma_a$ 에 의하여 결정되는데 일정한 두께의 폴리에틸렌은 부분적으로 중성자스펙트르를 연화시키는 작용을 한다.

감속층두께에 따르는 중성자에너지스펙트르변화는 그림 4와 같다.

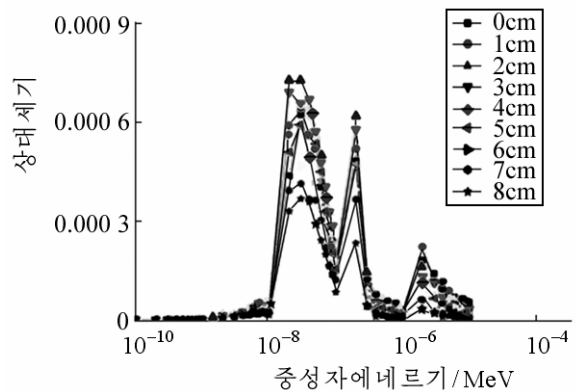


그림 4. 감속층두께에 따른 중성자에너지스펙트르변화

그림 4에서 보는바와 같이 감속층(폴리에틸렌)의 두께가 2cm일 때 중성자에너지스펙트르가 제일 최대가 된다는것을 알수 있다.

2) 카드미움차폐층의 영향평가

중성자계수관주위에 열중성자흡수자름면이 큰 1mm 두께의 카드미움차폐층을 설치하였을 때 계수물곡선에 미치는 영향을 평가하기 위하여 Cd층이 있을 때와 없을 때 계수물변화특성을 모의하였다. 모의형식은 그림 2에서와 같은 방식으로 진행하였다.

식 (3)을 리용하여 Cd가 있을 때와 없을 때 경사도를 비교해보면 차폐층이 있을 때 경사도가 2.1배정도로 커진다.(그림 5)

모의계산결과곡선으로부터 다음의 결론을 얻을 수 있다.

붕소농도가 같은 조건에서 Cd가 있을 때의 기록수가 Cd가 없을 때의 기록수보다 작다. 그것은 Cd가 뿔각관주위를 에돌아 산란된 간접기록수를 줄이기때문이다. 이때 기록수가 낮아지지만 신호대 잡음비는 높아진다.

붕소농도가 $0 \sim 4 \cdot 10^{-1}\%$ 범위에서 Cd가 있을 때 기록수의 붕소농도에 따르는 약화곡선은 Cd가 없을 때 곡선에 비하여 더 가파롭다. 그러므로 붕소농도측정에 유리하다.

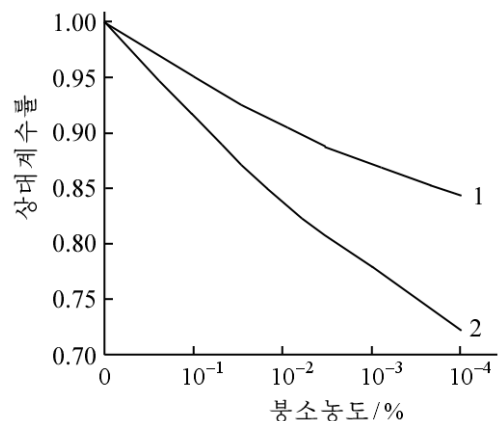


그림 5. 붕소농도에 따르는 상대계수변화
1-Cd가 없을 때, 2-Cd가 있을 때

맺는 말

붕소농도측정장치의 측정감도를 높이기 위해서는 중성자원천과 측정관로사이에 중성자감속층을, 비례계수관주위에 열중성자흡수층을 설치하여야 하며 감속층은 폴리에틸렌으로 하고 감속층의 두께는 2cm정도로, 흡수층은 1mm두께의 카드미움으로 하는것이 합리적이다. 이 경우 붕소농도에 따르는 계수률변화경사도는 2.5배정도 커지게 된다.

참고 문헌

- [1] Andrzej Bolewski Jr; Nukleonika, 1, 2012.
- [2] 桂龙刚; 新型硼表一次仪表研制, 南华大学出版社, 1~68, 2014.
- [3] 邓圣 等; 核电站硼浓度在线监测系统, CN102376374 A, 1, 2012.

주체106(2017)년 12월 5일 원고접수

Methods of Improving the Measurement Sensitivity of Boron Concentration Measurement Device by using MCNP

Jon Hye Yong, Ri Chol Hak and Pae Song Gil

In this paper we simulated the geometric distribution state of the boron concentration measurement devices and neutron counting feature according to the material choice, with a result that we established a rational method of enhancing the boron concentration measurement sensitivity.

Key words: boron concentration measurement device, MCNP