

선형무게이동평균알고리즘을 리용한 중성자계수속도측정방법

문충남, 리철학

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

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

가압경수원자력발전소에서 1차계통랭각재의 실시간적인 붕소농도측정은 중성자흡수법을 리용하여 진행한다. 중성자흡수법에서는 중성자원천을 리용하여 용액속의 붕소농도에 따르는 중성자계수속도를 측정함으로써 랭각재속의 붕소농도를 결정한다. 하지만 중성자계수임펄스들은 뽕송분포에 따르는 통계적요동특성을 가지므로 중성자계수속도측정값은 일정한 값으로 고정되지 않고 시간에 따라 계속 요동하게 된다.[1-3] 평균계수속도 추정을 위하여 일정한 평균화알고리즘을 리용하는데 임펄스계수와 같은 불연속량들에 대한 평균화에는 일반적으로 지수근사 및 일반이동평균알고리즘을 많이 적용하여왔다.

론문에서는 일정한 시간간격으로 계수임펄스개수들을 표본화하고 매 표본값들에 선형무게를 곱하여 평균화하는 선형무게이동평균알고리즘을 개발하고 한소편처리기프로그램에 구현하여 붕소농도를 측정하기 위한 방법을 제안하였다.

1. 선형무게이동평균알고리즘의 구성

이동평균알고리즘에 의한 계수속도추정식의 일반적형태는 다음과 같다.

$$R_n = \frac{1}{mt_{ab}} \sum_{i=1}^n N_i \quad (n < m) \quad (1)$$

$$R_n = \frac{1}{mt_{ab}} \sum_{i=n-m+1}^n N_i \quad (n \geq m) \quad (2)$$

여기서 m 은 정의 용근수, t_{ab} 는 1개 순환의 시간간격, N_i 는 i 번째 측정에서의 임펄스개수이다. 이 알고리즘에 의한 R_n 결과값은 가장 최근의 m 개의 측정결과들에 기초하여 얻어지며 새로운 n 번째 측정이 완료되면 $n-m$ 번째 측정결과는 삭제된다.

선형무게이동평균알고리즘을 리용하여 평균계수속도 R_n 추정을 위한 n 개의 순환값들로부터 추정된 결과는 다음과 같은 관계식들에 의하여 얻어진다.

$$R_n = \frac{2}{m(m+1)t_{ab}} \sum_{i=1}^n (m-n+i)N_i \quad (n < m) \quad (3)$$

$$R_n = \frac{2}{m(m+1)t_{ab}} \sum_{i=n-m+1}^n (m-n+i)N_i \quad (n \geq m) \quad (4)$$

추정량 R_n 의 통계적요동으로 인한 상대오차는 다음과 같이 표시된다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{3\rho_{ab}n} \cdot \frac{6m(m-n+1)+2n^2-3n+1}{(2m-n+1)^2}} \quad (n < m) \quad (5)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{3\rho_{ab}m} \cdot \frac{2m+1}{m+1}} \quad (n \geq m) \quad (6)$$

2. 전형적인 평균화알고리즘들과의 비교

선형무게이동평균알고리즘의 특성을 검증하기 위하여 MATLAB에서 측정주기를 $t_{ab} = 1s$ 로 주고 평균계수속도를 0으로부터 1 000개/s로 계단변화를 주었을 때 전형적인 수자식 계수속도추정알고리즘들인 이동평균알고리즘과 지수근사알고리즘의 응답특성을 평가하였다.(그림 1)

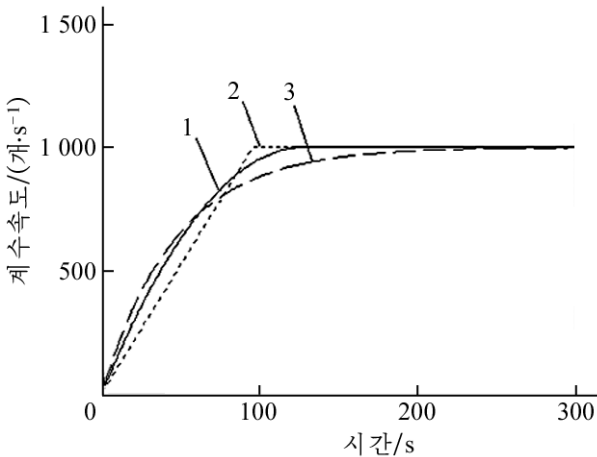


그림 1. 서로 다른 알고리즘들에 대한 계단응답특성
1—무게이동평균알고리즘, 2—이동평균알고리즘,
3—지수근사알고리즘

그림 1에서 보는바와 같이 계수속도의 계단변화에 대한 응답과도주기의 3/4 구역안에서 무게불은 이동평균알고리즘은 명백히 이동평균알고리즘의 응답속도보다 빠르며 그 다음구역부터는 지수근사알고리즘보다 응답속도가 빠르다. 즉 응답속도는 무게불은 이동평균알고리즘이 가장 좋은 특성을 보여준다는것을 알수 있다.

다음으로 3개의 알고리즘에 대하여 과도과정에서 평균값을 기준으로 평균값±표준오차를 그래프로 표시하여 계수속도의 계단변화에 대한 응답과도과정에서 통계적요동의 진폭변화특성을 고찰하였다.(그림 2-4)

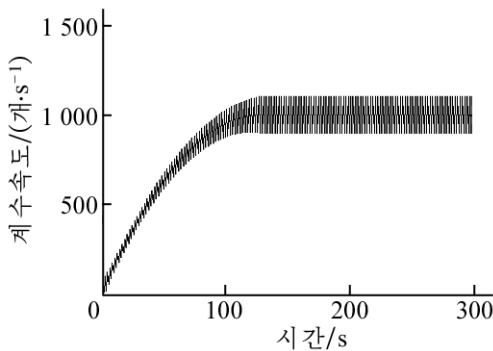


그림 2. 선형무게이동평균알고리즘의 경우 계단응답특성

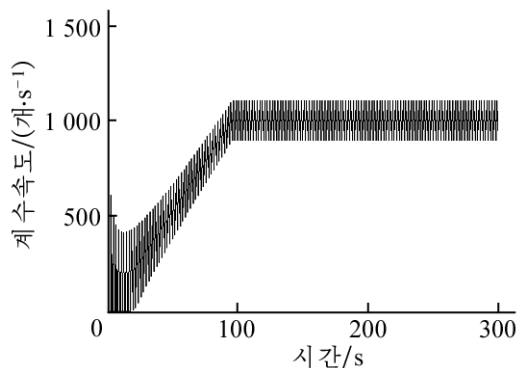


그림 3. 이동평균알고리즘의 경우 계단응답특성

추정값들인 R_n 이 근사적으로 정규분포라고 가정하면 계수속도의 계단변화때 68%의 추정량들에 대하여 그래프에서 통계적요동진폭 범위안에 떨어지게 된다고 말할수 있다. 그래프에서 알수 있는바와 같이 제안한 무게불은 이동평균알고리즘이 과도주기에 더 작은 요동을 준다고 평가할수 있다. 이로부터 선형무게이동평균알고리즘이 한소편처리기를 이용한 계수속도추정알고리즘들가운데서 이미 알려진 지수근사알고리즘과 이동평균알고리즘보다 계수속도변화에 대하여 더 좋은 통계적특성을 가진다는 결론을 내릴수 있다.

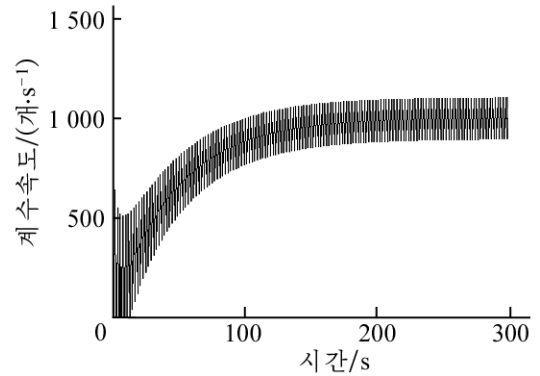


그림 4. 지수근사알고리즘의 경우 계단응답특성

3. 알고리즘을 이용한 붕소농도추정

논문에서는 선형무게이동평균알고리즘을 한소편처리기 PIC18F4550에 적용하여 실시간적으로 평균중성자계수속도를 추정한 후 계수속도에 따르는 붕소농도곡선으로부터 랭각재속의 붕소농도를 결정하였다. 이때 선형무게이동평균법을 이용한 한소편처리기의 중성자계수알고리즘은 그림 5와 같다.

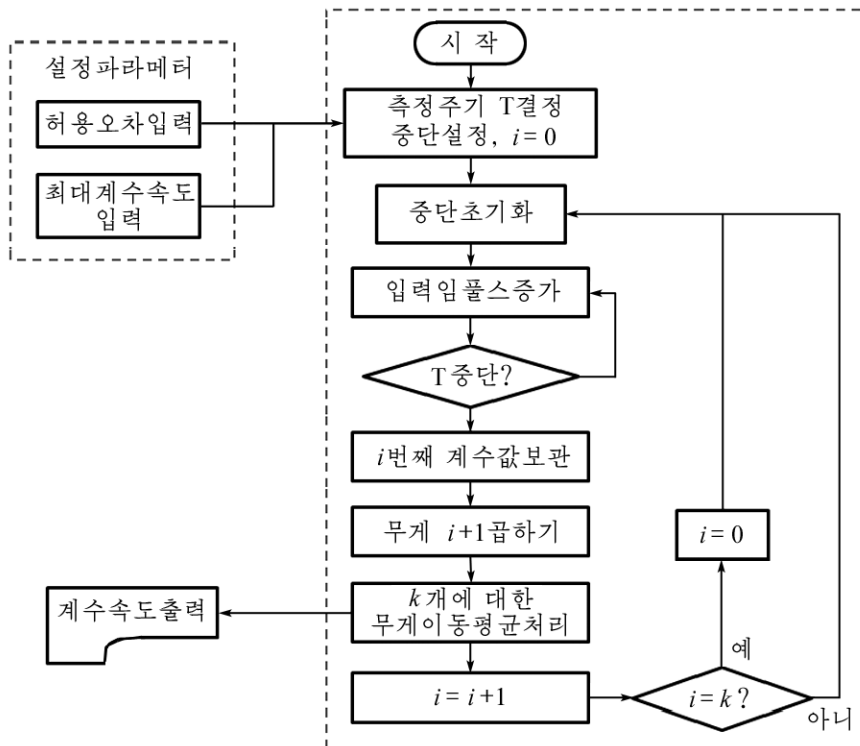


그림 5. 선형무게이동평균법을 이용한 한소편처리기의 중성자계수알고리즘

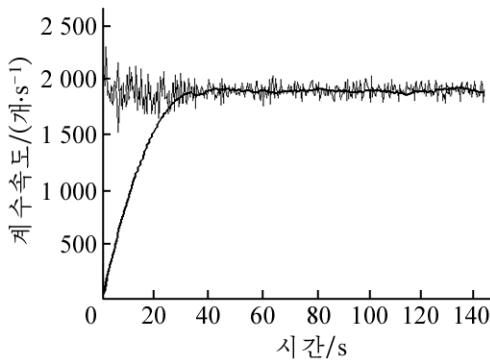


그림 6. 무게불은 이동평균알고리즘에 의한 초기계수속도의 증가

계산에서 보는바와 같이 정상과정에서의 평균요동폭은 이론적으로 설정한 허용오차(상대오차)보다 크다. 이것은 중성자계수속도측정에서 통계적요동외에 계통오차, 기구오차가 존재하기때문이다.

다음으로 붕소농도를 500ppm 으로부터 1 000ppm 으로 변화시키었을 때 붕소농도 측정장치의 응답특성을 평가하기 위한 실험을 진행하였다.(그림 7)

그림 7에서 보는바와 같이 계수속도요동의 허용오차(상대표준편차)를 0.5%로 설정하였을 때 붕소농도변화가 발생한 순간부터 측정장치의 응답시간은 약 30s정도로서 응답시간에 대한 이론적인 계산값 $mt_{ab} = 500 \cdot 0.053 \approx 26(s)$ 과 거의 일치한다.

이로부터 계수속도요동의 허용오차(상대표준편차)를 0.5%로 설정할 때 붕소농도측정장치의 응답시간은 대략 30s로 볼수 있다.

실험에서는 입력파라미터로 최대계수속도를 2 000개/s, 계수속도의 허용오차를 0.5%로 설정하고 붕소농도가 0일 때 계수속도를 측정하여 무게불은 이동평균알고리즘을 적용하였을 때와 적용하지 않았을 때 계수속도를 비교하였다.(그림 6)

그림 6에서 보는바와 같이 무게불은 이동평균알고리즘은 계수속도의 통계적요동을 효과적으로 평활화하였다. 이때 정상과정에서 한소편처리기로부터 오는 50개의 계수속도값에 대하여 계수속도의 상대오차를 계산하였다. 계산결과는 다음과 같다.

$$\bar{n} = 1\,945.83, \sigma = 10.18, \delta = 0.52(\%)$$

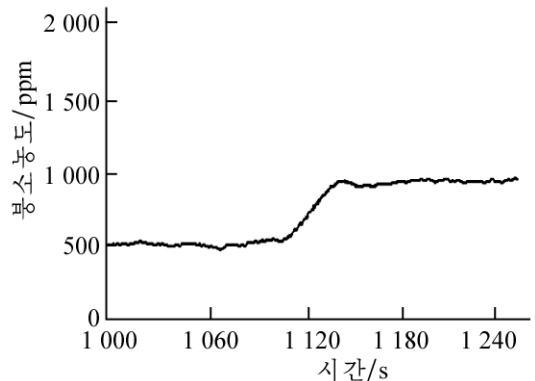


그림 7. 붕소농도변화에 대한 붕소농도측정 장치의 응답특성

맺는 말

중성자흡수법을 리용하여 붕소농도를 실시간측정할 때 중성자계수속도의 통계적요동을 효과적으로 감소시키기 위한 선형무게이동평균알고리즘을 개발하고 한소편처리기에 구현하였으며 붕소농도변화에 대한 알고리즘의 응답특성을 평가하였다.

참고 문헌

- [1] P. M. Dighe; Annals of Nuclear Energy, 134, 414, 2019.
- [2] V. Arandjelovic et al.; IEEE Trans. Nucl. Sci., 49, 5, 3855, 2002.
- [3] 谭世杰 等; 核动力工程, 33, 1, 112, 2012.

Measurement Method of Neutron Counting Rate Using Linear Weight Moving Average Algorithm

Mun Chung Nam, Ri Chol Hak

In the paper, we developed the linear weight moving average algorithm for suppressing the statistical fluctuation of neutron counting rate in short response time when we measured the boron concentration in real time by using the neutron absorption method, and estimated the response time properties of the algorithm on the boron concentration variation.

Keywords: counting rate, response time, moving average