

제어봉 낙하 반응도 측정에서 중성자원, 감마, 중성자 분포 함수의 복합적인 영향 분석

전병진, 박상준, 이지복

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

임계 근처에서 반응도 미터로 계단식 반응도 변화를 측정할 때는 중성자원과 감마의 영향하에서도 정확한 반응도를 결정할 수 있으며, 중성자원과 감마를 측정할 수도 있다. 중성자원과 감마의 영향은 없으나 중성자 분포 함수만 변하는 경우에는 계산으로 예측한 분포 함수의 변화로 측정된 중성자 신호를 보정하여 반응도를 예측할 수 있다. 그러나 중성자원, 감마, 분포 함수가 복합적으로 작용하는 경우에 대하여는 이러한 방법을 적용할 수 없다. 이 때 중성자원과 감마의 영향만 있는 경우에 적용하는 방법을 쓰면 분포 함수의 변화가 측정 결과에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다. 그 결과 분포 함수의 변화도 어느 정도 측정이 가능하며, 계산으로 예측하는 분포 함수의 변화로 측정 결과를 단순 보정하여 실제 반응도를 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

1. 서 론

반응도 미터는 중성자 계측기의 신호를 입력으로 하여 역동특성 방정식을 풀어 실시간으로 반응도 변화를 나타낸다. 이 때 중성자원이나 주변 감마가 영향을 미치고 있으나 이를 알 수 없어 무시하면 측정 결과는 실제와 다르며, 반응도의 변화가 매우 큰 제어봉 낙하 등의 경우에는 중성자 분포 함수의 변화도 커서 측정된 중성자 신호를 보정하여 반응도를 계산한다. 강한 광중성자를 내는 중수 또는 베릴륨 반사체를 사용하는 연구로에서는 중성자원 영역의 상한이 매우 높아서 제어봉의 반응도값 등을 측정할 때 중성자원의 영향을 벗어날 수 없다. 또한 중성자 계측기는 보통 반사체 바깥에 두는데, 보상형 전리함 등을 써서 주변 감마의 영향을 충분히 보상하더라도 반사체에서 생긴 광중성자가 계측기로 직접 들어오는 성분이 주변 감마와 비슷한 작용을 한다. 발전로 가운데는 반응도 미터의 중성자 계측기로 비보상형 전리함을 쓰는 경우가 있는데, 이 때는 주변 감마의 영향을 받는다.

임계 근처에서 약간의 반응도 변화가 있을 때는 분포 함수의 변화를 무시할 수 있으며, 이 때는 중성자원이나 감마의 영향을 모르는 상태에서도 정확한 반응도를 측정할 수 있다.[1] 제어봉 낙하와 같이 반응도의 변화가 크더라도 분포 함수의 변화가 거의 없다면 같은 방법을 쓸 수 있다.[2] 또한 이 방법으로 서로 다른 반응도에서 측정하면 중성자원과 감마를 결정할 수도 있으며, 이렇게 결정된 값을 반응도 미터에 입력시키면 역동특성 방정식을 푸는 일반적인 방법으로

정확한 반응도를 측정할 수 있다. 분포 함수가 크게 변하지만 중성자원이나 감마의 영향이 없는 경우에는 계산으로 예측되는 분포 함수의 변화로 측정된 중성자 신호를 보정하여 참값에 가까운 결과를 얻을 수도 있다.[3]

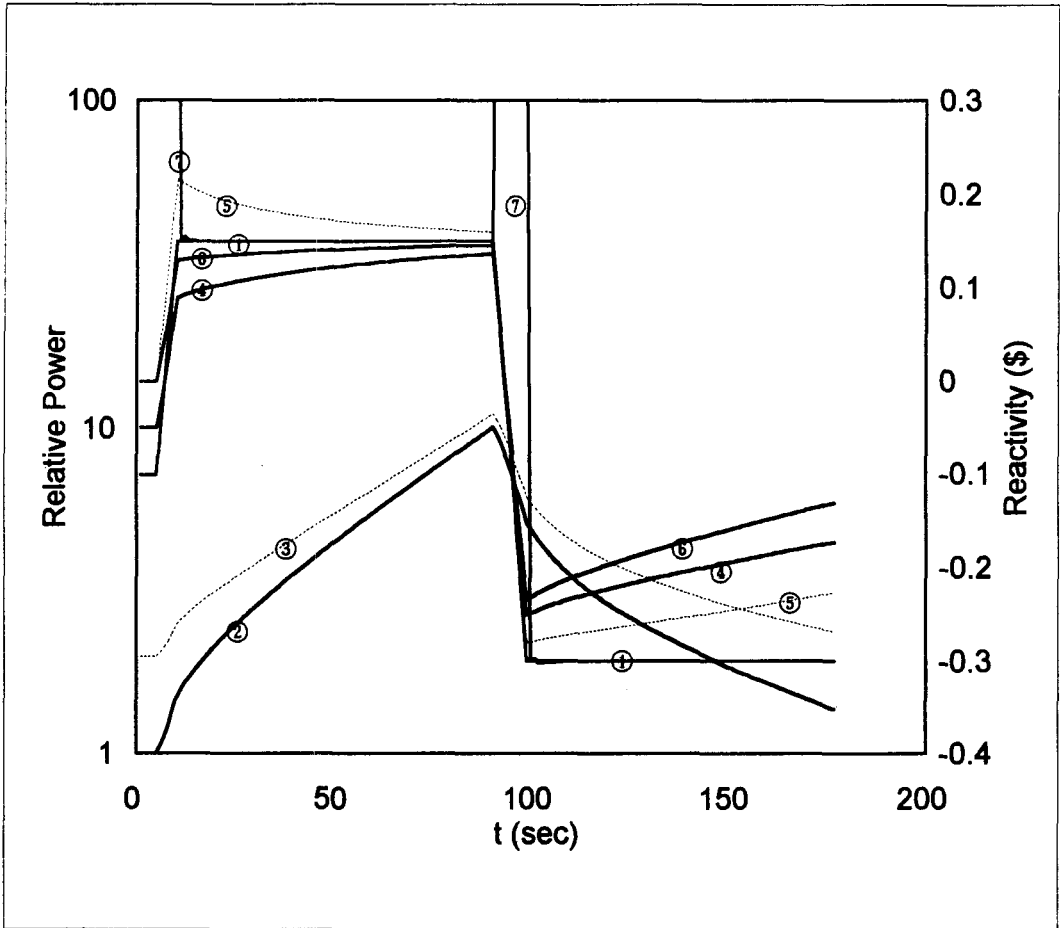


그림 1. 반응도 측정에 감마와 중성자원이 미치는 영향 비교

- ① 가정한 반응도 변화, ② 가정한 반응도 변화에 따른 출력 변화,
- ③ 감마 영향 (초기 중성자 신호의 100%)으로 측정되는 출력,
- ④ 감마 영향으로 실제와 다르게 측정되는 반응도,
- ⑤ 중성자원을 모르기 때문에 실제와 다르게 측정되는 반응도,
- ⑥ 감마와 중성자원 영향이 복합되어 측정되는 반응도,
- ⑦ 식(7)을 미분하여 구한 반응도

중성자원이나 감마의 영향이 강하면서 분포 함수도 크게 달라지는 경우에는 분포 함수의 변화가 거의 없는 임계 근처에서 중성자원과 감마를 측정하고 분포 함수의 변화는 계산으로 예측하

여 반응도를 결정하는 방법을 생각할 수 있다. 그러나 제어봉이 낙하한 뒤에는 출력이 크게 낮아져서 중성자원과 감마의 영향이 훨씬 크므로 매우 정확한 값이 요구될 뿐만 아니라 중성자 계측에 미치는 중성자원과 감마의 영향도 달라져서 임계 근처에서 측정된 값을 그대로 쓰면 오차가 매우 크다. 따라서 계산으로 구한 분포 함수 변화로 측정된 중성자 신호를 정확하게 보정할 수 없고 측정된 반응도도 정확할 수 없다.

임계 근처에서 반응도가 계단형으로 변할 때 중성자원이나 감마의 영향으로 인해 틀리게 측정되는 반응도의 예를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 보듯이 반응도가 계단형으로 변한 뒤에 실제 반응도는 변하지 않는 일정한 값이지만 측정된 반응도는 중성자원이나 감마의 영향으로 변하는 모습을 나타낸다. 이러한 현상은 강한 광중성자원을 가진 하나로나 비보상형 전리함을 사용하는 발전로에서 제어봉의 반응도값을 측정할 때 흔히 보는 것이다. 발전로에서는 출력이 더 높은 곳에서 측정하여 이러한 오차를 줄이려고 애를 쓰기도 한다.

이 상황에서 미지수는 중성자원, 감마, 실제 반응도로서 3 개인데 중성자원과 감마는 복합되어 하나의 미지수로 나타난다. 측정하는 점의 수는 매우 많으므로 두 개의 미지수를 구하는 방법이 있을 수 있다. 중성자원과 감마가 복합된 값은 반응도의 1차 함수 형태여서 다른 반응도 조건에서 여러번 측정하면 중성자원과 감마를 따로 구할 수 있다. 그런데 여기에 분포 함수의 변화가 추가되었을 때는 단순히 미지수가 하나 늘어난 것과는 달라서 이를 간단히 구할 수는 없다. 그러나 분포 함수의 변화에 따라 측정값이 변하는 경향을 분석해보면 반복 계산법으로 분포 함수의 변화를 결정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 분포 함수의 변화를 신뢰성 있게 계산할 수 있으면 측정 결과에 분포 함수의 변화 인자를 단순히 곱하여 실제 반응도를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 중성자원, 감마, 분포 함수의 영향 분석

반응도 미터를 써서 계단식 반응도 변화를 측정할 때 중성자원과 감마가 어떠한 영향을 미치며, 이러한 영향 속에서 실제 반응도를 측정하는 방법에 대하여는 참고 문헌 1에 기술되어 있다. 그러나 여기에 분포 함수의 변화가 복합되었을 때의 영향을 분석하기 위해서는 이전의 식 전개가 필요하므로 다시 기술한다.

점 동특성 방정식을 써서 반응도를 측정하는데 쓰는 식은 다음과 같다. 이하의 식에서 각 부호는 점 동특성 방정식을 나타낼 때 일반적으로 쓰는 것들이다.

$$\rho(t) = \beta + \frac{\Lambda}{n} \left(\frac{dn}{dt} - \sum \lambda_i C_i - s \right) \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n - \lambda_i C_i \quad (2)$$

중성자원의 영향을 무시할 수 없고, 계측기 신호에 일정한 감마 성분이 실리고 있으나 이들을 모르기 때문에 0으로 가정하여 위 식들을 풀면 반응도가 실제와 다를 것이다. 이러한 상태에서 풀어 내는 식의 각 변수에 아래 첨자 1을 붙이면 위 식들이 다음과 같이 된다.

$$n_1 = n + \gamma \quad (3)$$

$$\rho_1(t) = \beta + \frac{\Lambda}{n_1} \left(\frac{dn_1}{dt} - \sum \lambda_i C_{1i} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dC_{1i}}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n_1 - \lambda_i C_{1i} \quad (5)$$

식(2)와 (5)를 적분하고 식(1)과 (3)에 대입하여 정리하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$C_{1i} = C_i + \frac{\beta_i}{\Lambda \lambda_i} \gamma \quad (6)$$

$$n_1 \rho_1 = n_1 \rho + \Lambda s - \gamma \rho \quad (7)$$

이 상관 관계는 s 와 γ 가 변하지 않는 동안에는 항상 성립한다. ρ 가 변하지 않는 동안에는 $n_1 \rho_1$ 이 n_1 의 1차 함수이므로, $n_1 \rho_1$ 의 n_1 에 대한 1차 미분값으로 ρ 를 결정할 수 있다. 즉, s 와 γ 를 모르더라도 ρ 를 결정할 수 있다. 이 상관 관계는 실험적으로 이미 확인한 바 있으나[1] 수치 해석적 모의 계산 결과를 그림 1의 ①에 나타내었다. 이 그림에서 보듯이 반응도가 변하고 있는 동안에는 전혀 뜻없는 값이지만 반응도가 일정해지면 곧 실제 값과 같아지는 것을 알 수 있다.

s , γ 와 함께 분포 함수도 달라졌으나 이를 알 수 없으므로 무시하고 측정할 때 사용하는 식의 각 변수에는 아래 첨자 2를 붙이기로 한다. 그리고 제어봉이 낙하한 직후에 중성자 계측기가 있는 곳의 노심 상대 중성자속이 그 이전의 a 배로 바뀌었다고 가정하면 식은 다음과 같다.

$$n_2 = a n + \gamma \quad (8)$$

$$\rho_2(t) = \beta + \frac{\Lambda}{n_2} \left(\frac{dn_2}{dt} - \sum \lambda_i C_{2i} \right) \quad (9)$$

$$\frac{dC_{2i}}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n_2 - \lambda_i C_{2i} \quad (10)$$

제어봉이 완전히 낙하하기 이전까지의 a 는 다른 값이므로 위 식들은 중성자원이나 감마와는 달리 제어봉이 낙하한 직후부터 적용된다. 식 전개 편의를 위해서 낙하에 걸리는 시간은 무시하고, 낙하 직후의 시점을 $t = 0$ 라고 하자. 식(11)의 초기 조건을 쓰고, 식(10)을 적분하여 정리하면 식(12)가 된다.

$$C_{2i}(0) = C_{1i}(0) = C_i(0) + \frac{\beta_i}{\Lambda \lambda_i} \gamma \quad (11)$$

$$C_{2i}(t) = C_{1i}(t) + (a - 1) C_i(t) - (a - 1) C_i(0) \exp(-\lambda_i t) \quad (12)$$

식(7)과 마찬가지로 $\rho_2 n_2$ 를 유도하면 다음과 같다.

$$\rho_2 n_2 = \rho n_2 + a \Lambda s - \gamma \rho + (a - 1) \Lambda \sum \lambda_i C_i(0) \exp(-\lambda_i t) \quad (13)$$

또한 이 식을 n_2 로 1차 미분하면 다음과 같다.

$$\frac{d(\rho_2 n_2)}{dn_2} = \rho + \frac{a - 1}{a} \Lambda \sum \lambda_i C_i(0) \frac{d \exp(-\lambda_i t)}{dn} \quad (14)$$

여기서는 오른쪽 끝 항이 0이 아니어서 이렇게 측정된 값이 실제 ρ 와 다르며, 이 끝 항은 미

지수 a와 낙하 직후의 지발 중성자 모핵종 밀도 $C_i(0)$ 를 가지고 있어 직접 결정할 수 없다. 이 끝 항이 어떠한 값을 갖는지에 대하여는 다음과 같이 유추할 수 있다.

$C_i(0)$ 는 제어봉이 낙하한 직후의 값인데, 제어봉 낙하법에서와 같이 짧은 시간 동안에 C_i 는 변하지 않는다고 가정하면 다음과 같이 근사된다.

$$C_i(0) \approx n_0 \beta_i / \Lambda \lambda_i \quad (15)$$

여기서 n_0 는 제어봉이 낙하하기 전 정상 상태에서의 n이다. 따라서 식(14)의 오른쪽 끝 항에서 초기 지발 중성자 모핵종이 시간에 따라 붕괴하는 부분은 다음과 같이 근사된다.

$$\Lambda \sum \lambda_i C_i(0) \exp(-\lambda_i t) \approx \sum \beta_i n_0 \exp(-\lambda_i t) \quad (16)$$

한편 반응도가 계단형으로 변한 뒤의 출력 변화에 대한 해석적인 해는 다음과 같고 이 식의 계수 A_i 는 식(18)로 표시된다.

$$n_a(t) = \sum_{i=0}^6 A_i n_0 \exp(\omega_i t) \quad (17)$$

$$A_i = \frac{1 + \sum_j \frac{\beta_j / \Lambda}{\omega_i + \lambda_j}}{1 + \sum_j \frac{\beta_j \lambda_j / \Lambda}{(\omega_i + \lambda_j)^2}} \quad (18)$$

이 가운데 A_0 는 즉발 중성자 항이고, $A_1 \sim A_6$ 는 지발 중성자 항으로써 다음과 같이 근사하였을 때 실제와 매우 비슷하다.

$$A_0 \approx -\rho / (\beta - \rho) \quad (19)$$

$$\sum_{i=1}^6 A_i \approx \beta / (\beta - \rho) \quad (20)$$

제어봉이 낙하한 즉시 즉발 중성자 항인 $A_0 n_0 \exp(\omega_0 t)$ 는 0이 되어 실제 출력 변화는 지발 중성자 항으로만 나타난다. 어느 정도 시간이 지나면 이 가운데 반감기가 가장 긴 항만 남는다(이를 6군이라고 하자). 마찬가지로 식(16)도 반감기가 가장 긴 항만 남는다.

$$n_\infty(t) = A_6 n_0 \exp(\omega_6 t) \quad (21)$$

$$\Lambda \sum \lambda_i C_i(0) \exp(-\lambda_i t)|_\infty = \beta_6 n_0 \exp(-\lambda_6 t) \quad (22)$$

역시간 방정식을 보면 ρ 가 -0.5β 이하일 때 ω_i 는 $-\lambda_i$ 와 거의 같다. 따라서 제어봉 낙하후 어느 정도의 시간이 지난 뒤에는 식(14)가 다음과 같이 근사된다.

$$\frac{d(\rho_2 n_2)}{dn_2} |_\infty \approx \rho + \frac{a-1}{a} \frac{\beta_6}{A_6} \quad (23)$$

식(20)을 보면 A_6 는 $\beta_6 / (\beta - \rho)$ 로 근사할 수 있을 것처럼 여겨지는데, 식(18)로 다양한 반응도 조건에 대하여 계산해 보면 실제로는 다음과 같은 식으로 근사된다.

$$A_6 \approx \beta_6 / (B\beta - \rho) \quad (24)$$

U-235의 지발 중성자 자료를 쓰고 ρ 가 $-2 \sim -50$ \$인 경우에 대하여 계산해 본 결과 B는 -0.3017 에서 -0.3296 으로 서서히 감소하였다. 따라서 식(23)은 다음식으로 근사된다.

$$\frac{d(\rho_2 n_2)}{dn_2} |_\infty \approx \rho/a + (a-1)B\beta/a \quad (25)$$

이상의 분석을 확인하기 위하여 제어봉 낙하 상황을 수치 해석적으로 모의해 보았다. 이 모의 계산에서 초기 상태는 임계이고 (s 는 0), 이 때의 n 을 100, γ 는 10으로 하였다. 제어봉 낙하

시간은 1 초이고 낙하후 반응도는 -10 \$로 하였으며, 낙하 도중에는 반응도가 시간에 비례하여 감소하고 a는 반응도에 비례하여 변하는 것으로 하였다.

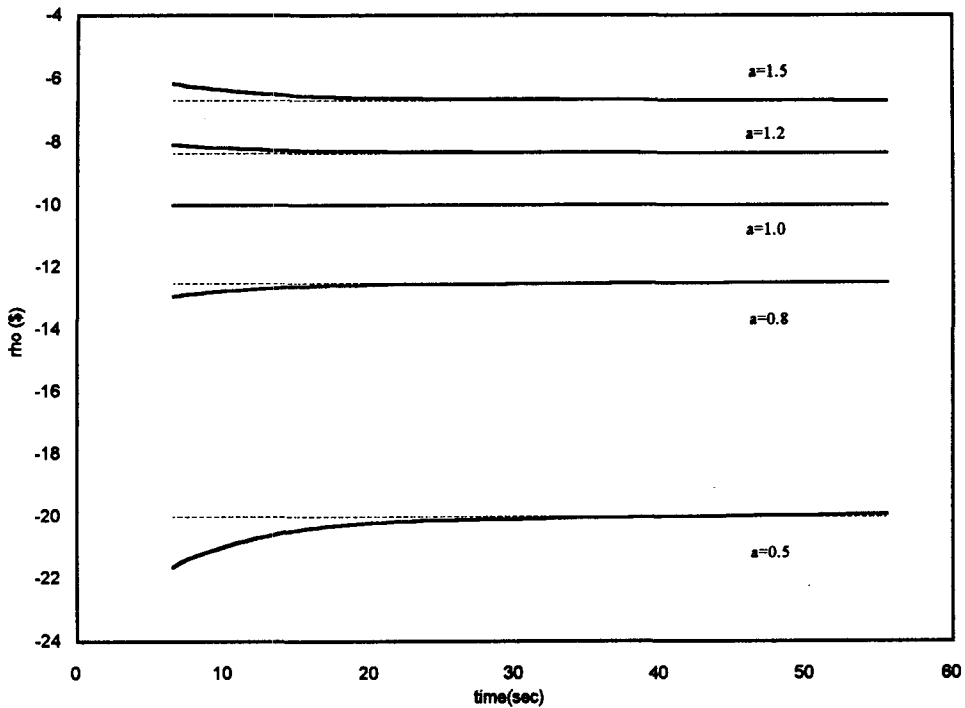


그림 2. 분포 함수 변화 정도에 따라 제어봉 낙하후 $d(\rho_2 n_2)/dn_2$ 가 변하는 경향 (점선은 ρ/a)

이 모의 계산의 결과를 그림 2에 나타내었다. 이 그림을 보면 $d(\rho_2 n_2)/dn_2$ 는 점차 ρ/a 에 수렴한 뒤 이 값을 지나가는데, 매우 긴 시간이 지나면 식(25)의 오른쪽 항과 비슷한 값에 수렴할 것이다. 한편 이러한 조건이 성립하기 위해서는 시간에 대한 차분 방정식의 시간 간격이 0.1 초 이하가 되어야 함을 확인하였다. 0.1 초보다 크고 a가 1에 가까우면 낙하 직후 수초간 이 그림과는 약간 다른 경향성을 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있는 특징적인 현상은 다음과 같다.

- 1) $a > 1$ 일 때는 ρ/a 보다 큰 값에서 내려오고, $a < 1$ 일 때는 ρ/a 보다 작은 값에서 올라오며, a가 정확한 1이면 처음부터 일정한 값으로 실제 반응도를 나타낸다.
- 2) ρ/a 를 지나가는 시점이 어느 경우에도 낙하후 약 35 초로 거의 같으며, 낙하후 25 - 50 초에서의 값은 ρ/a 와 거의 같다.

따라서 0.1 초 이하의 시간 간격으로 중성자 신호를 측정하여 (n_2) 저장해 둔 뒤 임의의 a를 가정하여 n_2 를 보정하여 낙하 이후 반응도가 시간에 따라 변하지 않는 조건을 찾을 수 있을 것이다. 이렇게 하여 실제 반응도 ρ 뿐만 아니라 분포 함수의 변화 인자인 a도 결정할 수 있을 것이다. 그런데 그림에서 보듯이 a가 1에 가까우면 낙하 이후 측정된 값의 변화도 매우 적어서 이렇게 결정된 값의 오차가 클 수 있다. 이 때 만일 신뢰성 있는 a를 계산으로 구할 수 있다면 측정된 반응도에 단순히 a를 곱하여 실제 반응도를 예측할 수 있을 것이다.

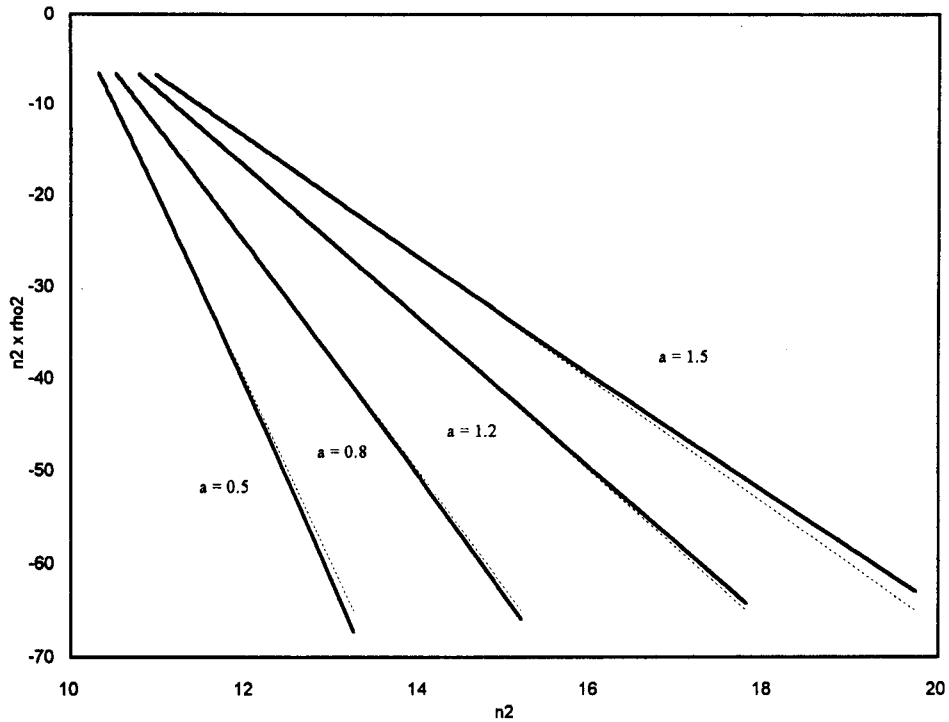


그림 3. 분포 함수 변화 정도에 따라 $\rho_2 n_2$ 가 n_2 에 대하여 변하는 경향 (점선은 $\rho n_2/a$)

그런데 실제 측정에서는 $\rho_2 n_2$ 를 n_2 로 미분하기 어려울 것이다. 미분값은 약간의 신호 요동에도 매우 민감하므로 실제 측정에서 단순히 미분하면 그림 2와 같은 결과를 얻을 수 없고 매우 요동하는 어지러운 값이 나올 뿐이다. 식(7)을 써서 실제 반응도를 구할 때도 어느 정도의 측정 자료로 $\rho_1 n_1$ 을 n_1 의 1차식으로 fitting하여 구한다. 비슷한 방법을 적용할 수 있는지 가능성을 보기 위하여 $\rho_2 n_2$ 와 n_2 사이의 관계를 그림 3에 나타내었다. 그림에서 점선은 $\rho n_2/a$ 로서 직선이다. 그림에서 보듯이 $a < 1$ 일 때는 약간 위로 볼록한 곡선이고, $a > 1$ 일 때는 약간 아래로 볼록한 곡선이다. 따라서 측정 결과를 2차식으로 fitting하고 2차항의 계수가 0이되는 a 를 반복 계산으로 구하는 방법을 생각할 수 있다. 그러나 이 그림에서 보듯이 a 가 1에서 상당히 벗어난 상태에서도 $\rho_2 n_2$ 가 n_2 에 대하여 직선에 매우 가깝기 때문에 실제 측정 결과에 이 방법을 적용하였을 때 신뢰도 있는 a 와 ρ 를 결정할 수 있을 것인지에 대하여는 의문이 있다. 이러한 사항은 앞으로 실험을 통해 확인해 보아야 할 것이다. 만일 이것이 어려운 경우에는 낙하후 25 - 50 초 사이의 값으로 1차 fitting하여 ρ/a 를 구하고 계산으로 구한 a 를 곱하여 ρ 를 구하면 된다.

3. 결 론

중성자원, 감마, 분포 함수의 영향이 복합적으로 나타나는 제어봉 낙하 반응도 측정 실험에서 중성자원과 감마의 영향을 배제하는 측정법을 사용하면 분포 함수의 변화 효과만 측정 결과에 나타난다. 낙하 이후 약 25 - 50 초 사이의 값으로 결정되는 반응도에 계산으로 예측하는 분포

함수의 변화 인자를 단순히 곱하여 실제 반응도를 추정할 수 있다. 한편 낙하 이후 측정값의 변화 경향으로부터 분포 함수의 변화 인자가 1보다 큰지 또는 작은지를 알 수 있으며, 이론적으로는 반복 계산법으로 분포 함수의 변화 인자도 결정할 수 있다. 그러나 실제 실험 결과에 적용하였을 때에도 가능할 것인지는 아직 확실하지 않다. 실험에 본 이론을 적용하는 일은 추후 과제이다.

참고 문헌

1. B.J. Jun, C.G. Suh and J.B. Lee, "Determination of Neutron Source and Gamma Effects for a Reactivity Meter," *Proc. 5th Asian Symposium on Research Reactors*, May 29-31, 1996, Taejon, Korea, p767.
2. V.A. Litiskii, *et al.*, "Measurement of Reactivity When a Background Component is Present in the Input Signal by the Method of the Inverse Solution of the Kinetic Equations," *Atomic Energy (Russia)*, Vol.76, No.3, 1994.
3. Yu.A.Kazanskii, *et al.*, "Accounting for Spatial Effects in Measuring Reactivity Using the Inverse Solution of the Kinetic Equations," *Atomic Energy (Russia)*, Vol.51, No.6, pp387-389, Dec. 1981.