

DUPIC 공정에서 중성자 계수에 의한 핵물질 측정시 발생하는
중성자 증배 효과 분석

Neutron Multiplicity Effects in Nuclear Material Measurement by Neutron
Counting in DUPIC Process

김현조, 박재우

제주대학교

제주도 제주시 아라 1동 산 1번지

고원일, 차홍렬, 김호동

한국원자력연구소

대전시 유성구 덕진동 105

요 약

듀픽과 같은 사용후핵연료 건식처리 공정에서는 다양한 형태의 핵물질이 존재하는데 이들 물질들은 밀도, 조성, 핵분열생성물의 양 등 서로 다른 특성을 가지게 된다. 이러한 서로 다른 특성은 중성자 동시 계수기를 이용한 핵물질 측정시 유도 핵분열에 의한 중성자 방출로 인하여 서로 다른 중성자 증배효과가 발생하여 핵물질 측정에 오차로 작용할 수도 있다. 본 연구에서는 듀픽 공정물질에서 중성자 계수 방법에 의한 핵물질 측정용으로 사용되고 있는 DSNC(DUPIC Safeguards Neutron Counter)를 사용하여 듀픽 공정물질에서 발생할 수 있는 중성자 증배 효과를 측정하여 보정식을 도출하였다. 본 연구에서 얻은 보정식은 향후 DSNC를 이용한 핵물질 측정시 측정오차를 감소시켜 줄 것으로 기대된다.

Abstract

In DUPIC process, nuclear materials of various form exist, and these materials have different properties(density, composition, etc). The different properties could generate unexpectedly some neutron multiplication derived from induced fission neutron when the process materials are measured by coincidence neutron counter. By this neutron multiplication, measurement errors could be generated. In this study, neutron multiplication effects were evaluated in DUPIC process specimens by use of DSNC(DUPIC Safeguards Neutron Counter), and then correction curve derived by neutron multiplication were estimated. The correction curve obtained in this study could be useful for reducing measurement errors of the DSNC in the future.

1. 서 론

DUPIC 핵연료 제조 공정에서는 공정 원료 물질인 사용후핵연료를 직접 취급하기 때문에 사용후

핵연료에 포함된 민감한 핵물질인 플루토늄을 함유하고 있어 철저한 핵물질 계량관리가 요구된다. 이를 위하여 DUPIC 핵연료주기 기술개발을 하고 있는 한국원자력연구소에서는 미국의 로스알라모 스국립연구소와 공동으로 비파괴적인 방법을 이용하여 원격으로 핫셀내 핵물질을 간접적으로 측정할 수 있는 중성자 검출장치(일명, DSNC : DUPIC Safeguards Neutron Counter)를 개발하여 왔다[1~3]. 이 중성자 검출장치는 고준위감마선을 갖는 사용후핵연료로 제조된 DUPIC 핵연료의 중성자를 검출하여야 하는 특수성으로 인하여 일반적인 중성자 검출기와는 다른 설계 특성을 가지고 있다.

이 장비는 동시계수기(shift resister)라는 전자 장비를 이용하고 있으며, DUPIC 공정물질에서 방출되는 자발핵분열 중성자와 (α, n) 중성자를 분리하여 기록해주는 역할을 하고 있다. 그러나 이 동시계수기는 시간 상관적으로(time correlated) 발생하는 자발핵분열 중성자와 시간 독립적으로(time independent) 방출되는 (α, n) 중성자를 분리하지만, 역시 시간 상관적으로 발생하는 자발핵분열 중성자와 유도핵분열 중성자는 구별하지 못한다. 만일 측정 시료에 유도 핵분열이 발생하여 새로운 중성자가 방출될 때에는 핵물질의 양이 과대 평가될 가능성이 존재하게 되며, 핵물질 측정시 이를 고려하지 않을 경우에 핵물질 측정에 측정 오차로 작용할 수도 있다.

일반적으로 사용후핵연료에 있어서 이러한 유도 핵분열 중성자 수는 자발핵분열 중성자수에 비하여 매우 미미한 것으로 알려져 있으나, 핵분열성물질의 농도가 높은 MOX 핵연료 등에서는 흔히 나타나는 현상이며[4~7], 사용후핵연료에서도 측정 시료의 밀도, 양 등이 커짐에 따라 이러한 중성자의 발생 가능성도 예견할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 DSNC의 측정오차를 줄이기 위한 작업의 일환으로 다양한 형태의 DUPIC 공정물질(산화물, 소결체, 압분체, 등)들에서 유도핵분열 중성자가 방출되는지, 방출된다면 어느 정도 방출 되는지, 즉 중성자 증배 효과를 측정하였다. 이를 위하여 중성자 증배 효과를 분석할 수 있는 이론적 방법을 조사하였으며, 이를 근간으로 하여 밀도가 다른 다양한 형태의 시료를 준비하여 시료 내에서 발생하는 중성자 증배계수를 평가하였다. 또한 이 증배계수를 이용하여 DSNC 측정의 보정식을 도출함으로써 DSNC 측정시 발생하는 측정오차를 줄이고자 하였다.

2. 중성자검출기를 이용한 듀픽공정의 핵물질 측정

DUPIC 공정에서는 사용후핵연료의 물리적 형태, 밀도 등이 변할 뿐만 아니라 핵물질 조성도 변하게 된다. 그러나 재처리 공정과는 달리 DUPIC 공정전후를 통하여 사용된 사용후핵연료의 양은 변하지 않는다. 따라서 핵물질 안전조치 측면에서 우라늄과 플루토늄의 전용여부를 검증하기 위하여 사용후핵연료의 양이 공전 전,후를 통하여 일정하게 유지되고 있는지를 확인하여야 한다. 사용후핵연료의 양을 확인할 수 있는 방법중의 하나가 핵연료로부터 방출되는 중성자를 검출하는 것이다.

그림 1은 사용후핵연료에서 방출되는 중성자들과 이들 중성자들 중에서 자발핵분열 중성자만을 분리해내는 원리를 나타낸 그림이다. 기본적으로 사용후핵연료내서 발생할 수 있는 중성자는 전술한 바와 같이 3가지 종류, 즉, 자발핵분열 중성자, 유도핵분열 중성자 및 (α, n) 중성자이다. 만약 1개의 다발을 제조하는데 필요한 핵연료에서 단위시간당 100개의 중성자가 방출되고 이것은 자발핵분열 중성자 90개, 유도핵분열 중성자 4개 그리고 핵연료에서 생성된 알파입자가 연료내에서 핵반응을 일

르켜 생긴 (α, n) 중성자 6개로 구성되었다고 할 경우, 생산된 DUPIC 핵연료 다발의 경우에는 자발 핵중성자 90개를 제외하고는 모두 변하게 된다. 이 변하게 되는 이유는 핵연료의 밀도, 물리적 형태, 핵분열물질의 함량 등이 다르기 때문이다. 따라서 DUPIC 공정에 사용된 PWR 핵연료에서 방출하는 자발핵분열중성자수를 측정하고, 공정의 생산물인 DUPIC 연료의 자발핵분열중성자수와 공정에 남아있는 자발핵분열중성자 수를 측정하여 이들 값이 일치하면 핵투명성을 입증할 수 있다.

다행히 DUPIC 핵연료로 사용하고 있는 가압경수로 사용후핵연료는 10년 이상 냉각시킨 핵연료로서 방출되는 중성자 중에서 자발핵분열중성자가 약 97.2%며, 나머지는 (α, n) 중성자이다. 또한 연소도가 20GWd/tU 이상인 경우 대부분(약 99%)의 중성자원은 Cm²⁴⁴에서 방출되는 자발핵분열중성자이다.

DSNC는 shift resistor라는 전자 장비를 이용하여 DUPIC 공정물질에서 방출되는 자발핵분열 중성자와 (α, n) 중성자를 분리하여 자발핵분열 중성자만을 측정하도록 되어 있다. 이 자발핵분열 중성자는 대부분 Cm²⁴⁴에서 방출되기 때문에 이 자발핵분열 중성자를 측정하여 Cm²⁴⁴양을 평가하고, 다시 이미 결정된 Cm 비율, 즉, Cm/Pu, Cm/U235를 이용하여 핵물질 안전조치상에서 관리대상 핵물질인 Pu, U²³⁵ 및 U 양을 평가하도록 되어 있다.

shift resistor를 이용하여 중성자수를 측정하기 위하여 single rate, double rate라 불리는 다음과 같은 이론식을 사용하고 있다[5, 6].

$$S_C(M_L) = \varepsilon M_L F_S \overline{\nu_{S(1)}} (1 + \alpha) \quad (1)$$

$$D_C(M_L) = \varepsilon^2 f M_L^2 F_S \left[\overline{\nu_{S(1)}} + \frac{M_L - 1}{\overline{\nu_{I(1)}} - 1} \overline{\nu_{S(1)} \nu_{I(2)}} (1 + \alpha) \right] \quad (2)$$

여기서,

S_C : singles rate:

D_C : double rate

ε : 측정효율

F_S : 초당 핵분열수

f : double gate 비율

$\overline{\nu_{S(1)}}$: 자발핵분열중성자에 대한 first order factorial moment

$\overline{\nu_{S(2)}}$: 자발핵분열중성자에 대한 second order factorial moment

$\overline{\nu_{I(1)}}$: 유도핵분열중성자에 대한 first order factorial moment

$\overline{\nu_{I(2)}}$: 유도핵분열중성자에 대한 second order factorial moment

singles rate의 물리적 의미는 시간 독립적인 (α, n) 중성자와 시간 상관적인 자발핵분열중성자 및 유도핵분열중성자가 모두 고려된 전체 중성자를 의미하며, double rate는 시간 상관적인 중성자수를 의미하게 된다. 우리가 원하는 것은 시간 상관적으로 발생하는 중성자 중에서 Cm²⁴⁴에서 발생

하는 자발핵분열중성자이다. shift resister만을 이용할 경우 시간 상관적인 자발핵분열 중성자와 유도핵분열 중성자를 구별하지 못하게 된다.

현재 설계된 DSNC는 shift resister를 이용하여 시간 상관적인 중성자를 측정하고 있어, 유도핵분열 중성자가 미미할 경우에는 문제가 되지 않지만, 많이 발생할 경우에는 DSNC의 새로운 측정오차를 유발하게 된다. 다행히 shift resister를 이용하여 중성자동시 계수시 이를 해결하는 방안들이 제시되어 왔다[4~7]. 유도핵분열 중성자에 의한 영향을 보정해 주기 위한 방법에는 MCNP같은 설 계코드를 이용하여 추정하는 방법도 있지만, 이 방법보다는 Ensslin[4]이 제안한 직접 측정방법이 많이 사용되고 있다. Ensslin이 제안한 방법은 두 가지 측정시료, 즉, 유도핵분열이 없는 측정시료와 유도핵분열이 일어날 수 있는 시료를 이용하여 shift resister를 이용하여 single rate와 double rate를 각각 측정하여 이들의 비율을 계산하여 다음 장에서 주어진 식을 이용하여 유도핵분열 정도를 계산하여 보정해 주는 방법이다.

표 1은 동일 batch에서 얻은 총 17개의 DUPIC 공정 시료를 DSNC를 이용하여 측정(유도핵분열 중성자를 무시했을 경우) single 및 double rate를 나타낸 것이다. 측정된 공정 시료는 크게 밀도가 낮은(약 3g/cm^3) 산화 파우더와 밀도가 약 10.3g/cm^3 인 소결체로 구별되고 있다. 이 표에는 g당 single rate 및 g당 double rate들이 나타나 있으며, 공정 초기(상기 batch가 DUPIC 공정에 막 들어온 순간)에 측정된 base 값과의 상대적 오차도 나타나 있다. 상대적 오차를 보면 파우더에서는 증가가 없지만 소결체에서는 크게 증가한 것으로 나타나고 있다. 그림 2와 3은 표 1에 나타난 g당 double rate 및 g당 single rate를 나타낸 것이다. g당 single rate 인 경우에 두 종류의 시료에서 차이가 거의 없으나 double rate인 경우 파우더 시료와 소결체 시료에서 크게 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 밀도가 큰 소결체 시료에서 유도 핵분열이 존재 가능함을 나타내고 있다.

3. 중성자 증배효과 보정 이론

일반적으로 중성자 증배(multiplication) 개념은 검출기 관점에서는 “leakage multiplication (M_L)” 혹은 “self multiplication” 개념을 정의하여 사용하고 있다. 이 M_L 은 우물형 검출기 시스템에서 측정 시료에서 검출기 쪽으로 방출되는 중성자수를 시료 자체내에서 생성된 중성자의 수로 나누어 준 값으로서 정의되며, 중성자 검출기 관점에서 바라본 증배계수라 할 수 있다. Ensslin[8]은 열중성자 동시계수기(thermal neutron coincidence counting)에서 중성자 증배 영향을 설명하기 위한 이론 모델을 다음과 같이 제시하였는데, 이 방법은 측정시료에서 자발핵분열 중성자수와 (α, n) 중성자의 비인 α 값을 알고 있는 경우에 매우 유용한 방법으로 알려지고 있다. Ensslin이 제안한 접근 방법은 다음과 같다.

① 측정시료의 α 값을 알아낸다.

$$\alpha \equiv (\alpha, n) \text{ neutron/spontaneous fission neutron} \quad (3)$$

② 유도 핵분열이 일어나지 않을 것으로 생각되는 시료(밀도가 낮고 소량)를 취하여 동시계수기로 single rate(S_0), Double rate(D_0)를 측정하고 α_0 값을 계산한다.

- ③ 중성자 증배 보정이 요구되는 시료를 취하여 동시계수기로 single rate(S_c), Double(D_c)을 측정한다.
- ④ ②와 ③에서 측정된 single, double rate의 비를 다음과 같이 γ 로 정의하여 계산한다.

$$\gamma \equiv \frac{\frac{D_C(M_L)}{S_C(M_L)}(1+\alpha)}{\frac{D_0}{S_0}(1+\alpha_0)} \quad (4)$$

일반적으로 유도핵분열이 일어나는 경우 single보다는 double이 더 크게 증가하기 때문에 γ 값은 1 보다 큰 값을 가지게 된다. 또한 이 γ 값은 동일 측정 장비로 측정되는 것이기 때문에 측정 효율, die-away time, double gate 등의 측정장치의 파라미터 값과는 무관하게 된다. 여기서 상기한 γ 값을 식 1 및 식 2에서 정의된 이론식과 다음과 같이 연결할 수 있다.

$$\text{singles: } M_0(M_L) = \varepsilon t_m M_L F_S \overline{\nu_{S(1)}} (1+\alpha) \quad (5)$$

$$\text{singles rate: } S_C(M_L) = \frac{M_0}{t_m} = \varepsilon M_L F_S \overline{\nu_{S(1)}} (1+\alpha) \quad (6)$$

$$\text{doubles: } M_1(M_L) = \varepsilon^2 t_m f M_L^2 F_S \left[\overline{\nu_{S(1)}} + \frac{M_L-1}{\nu_{K(1)}-1} \overline{\nu_{S(1)}\nu_{K(2)}} (1+\alpha) \right] \quad (7)$$

$$\text{doubles rate: } D_C(M_L) = \frac{M_1}{t_m} = \varepsilon^2 f M_L^2 F_S \left[\overline{\nu_{S(1)}} + \frac{M_L-1}{\nu_{K(1)}-1} \overline{\nu_{S(1)}\nu_{K(2)}} (1+\alpha) \right] \quad (8)$$

여기서 t_m 은 측정시간을 나타내고 있다. 식(6) 및 식(7)를 식(4)에 대입하면, 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{\frac{D_C(M_L)}{S_C(M_L)}(1+\alpha)}{\frac{D_0}{S_0}(1+\alpha_0)} = M_L \frac{\overline{\nu_{S(2)}} + \frac{M_L-1}{\nu_{K(1)}-1} \overline{\nu_{S(1)}\nu_{K(2)}} (1+\alpha)}{\overline{\nu_{S(2)}}} \quad (9)$$

여기서 S_0 와 D_0 는 $M_L=1, \alpha=\alpha_0$ 을 대입한 값이다. 여기서 핵자료로부터 얻어질 수 있는 또 다른 k 값을 다음과 같이 정의한다.

$$k \equiv \frac{\overline{\nu_{S(1)}}}{\nu_{K(1)}-1} \frac{\overline{\nu_{K(2)}}}{\nu_{S(2)}} \quad (10)$$

식(10)을 식(9)에 대입하면 다음과 같이 종속변수 M_L 를 갖는 2차식을 유도할 수 있다. 즉,

$$\gamma = M_L [1 + (M_L - 1)(1 + \alpha)k]$$

$$k(1 + \alpha)M_L^2 + [1 - k(1 + \alpha)]M_L - \gamma = 0$$

$$M = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (11)$$

여기서, $A = 3(1 + \alpha_M)$

$$B = -(3.022 + 4.192\alpha_M + 0.8689\gamma)$$

$$C = 1.192\alpha_M + 0.8909$$

⑤ α 를 갖는 측정시료의 M_L 에 의한 영향을 보정한다.

$$S_C(M_L=1) = \varepsilon F_S \overline{\nu_{S(1)}} (1 + \alpha)$$

$$D_C(M_L=1) = \varepsilon^2 f F_S \overline{\nu_{S(2)}}$$

따라서 중성자 증배효과를 보정한 측정시료 singles는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{S_C(M_L)}{S_C(M_L=1)} = M_L \rightarrow S_C(M_L=1) = \frac{S_C(M_L)}{M_L} \quad (12)$$

한편 중성자 증배효과를 보정한 측정시료 doubles는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{D_C(M_L)}{D_C(M_L=1)} &= \frac{\varepsilon^2 f M_L^2 F_S \left[\overline{\nu_{S(2)}} + \frac{M_L - 1}{\nu_{K(1)} - 1} \overline{\nu_{S(1)} \nu_{K(2)}} + (1 + \alpha) \right]}{\varepsilon^2 f F_S \overline{\nu_{S(2)}}} \\ &= M_L M_L \frac{\overline{\nu_{S(2)}} + \frac{M_L - 1}{\nu_{K(1)} - 1} \overline{\nu_{S(1)} \nu_{K(2)}} + (1 + \alpha)}{\overline{\nu_{S(2)}}} = M_L \gamma \\ &\rightarrow D_C(M_L=1) = \frac{D_C(M_L)}{M_L \gamma} \quad (13) \end{aligned}$$

지금까지 유도된 식으로부터 유도핵분열이 없는 측정시료와 유도핵분열이 일어날 수 있는 시료를 이용하여 single rate와 double rate가 각각 측정된다면 중성자 증배계수뿐만 아니라 식 (12) 및 식 (13)을 이용하여 single rate 및 double rate에 대한 보정식을 구할 수 있다.

4. 측정 결과 및 고찰

DSNC를 이용하여 17개의 DUPIC 공정 시료를 측정된 자료(표 1)를 가지고 제 3장에서 기술된 측정 이론식을 이용하여 소결체에서 발생 가능한 중성자 증배 효과를 계산하였다. 먼저 밀도가 낮은 파우더 시료중에서 무게가 작은 시료를 유도핵분열이 없는 시료(즉, multiplication이 없는 시료)로

가정하여 DSNC 이용하여, single 및 double rate를 측정하여 S_0 및 D_0 라하였다. 그리고 소결체 시료에서 측정된 single 및 double rate를 이용하여 소결체에서의 증배효과를 분석하였다.

본 연구에서는 α 값을 현재 듀픽 공정물질로 사용하고 있는 가압경수로 사용후핵연료(ID No.: G23)에 대해서 연소모사 코드인 ORIGEN Code[8]를 이용하여 계산한 값을 이용하였다. 코드 계산 결과는 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{7.642 \times 10^6 n/s.MTU}{2.565 \times 10^8 n/s.MTU} = 0.103$$

표 2는 전장에서 기술된 Ensslin이 제안한 보정 이론을 이용하여 중성자 증배 영향을 조사한 결과를 나타내고 있다. 식 (11)를 이용하여 계산한 multiplication(M)는 1.0397에서 1.1103사이의 값을 보이는 것으로 나타났다. 예상했던 바와 같이 소결체 시료에서 유도핵분열에 의한 중성자 증배효과가 발생했음을 알 수 있다. 식(12) 및 식(13)을 이용하여 multiplication을 보정해 준 single과 double rate값도 보정하기 전의 값보다 많이 감소했음을 알 수 있다. 그 감소비율을 보면, single rate의 경우 시료 ID "IMEF sample #2"에서 9.93%로 가장 크며, double rate에서는 무려 30.9%까지 감소되는 것으로 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 전체적으로 예상했던 바와 같이 single rate 보다 double rate 쪽이 더 크게 감소되고 있음을 알 수 있다. 이는 single rate에는 (α, n) 중성자가 포함되어 있기 때문인 것으로 보인다.

그림 3은 소결체 시료의 무게 함수로 double rate를 나타낸 그림이다. 실제로 동시계수기로 측정된 double rate와 보정된 double rate는 많이 차이가 나고 있음을 알 수 있다. 여기서 도출된 curve는 향후 DSNC를 이용하여 소결체 시편을 측정하는 경우 보정식으로 유용하게 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 듀픽 공정물질에서 중성자 계수 방법에 의한 핵물질 측정용으로 사용되고 있는 DSNC(DUPIC Safeguards Neutron Counter)를 사용하여 single과 double rate를 측정하여 듀픽 공정물질에서 발생할 수 있는 중성자 증배 효과를 측정하였다. 또한 측정된 값으로부터 소결체시료에 대한 double rate 보정식을 도출하였다. 듀픽 공정에서는 밀도가 다른 다양한 형태의 핵물질이 존재하기 때문에 본 연구에서 얻은 보정식은 향후 DSNC를 이용한 핵물질 측정시 측정오차를 감소시켜 줄 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 이영길 외, "DUPIC 핵물질 안전조치용 중성자 검출장치 개발", KAERI/TR-1381/99, 한국원자력연구소 (1999)
2. 김호동 외, "DUPIC 핵물질 안전조치 기술개발", KAERI/RR-2016/99, 한국원자력연구소 (1999)
3. 차홍렬 외, "DUPIC 핵물질 계량관리를 위한 DSNC의 교정 및 IAEA 인증시험", KAERI/TR-

1477/2000, 한국원자력연구소 (2000)

4. N. Ensslin et al, "Self-Multiplication Correction Factors for Neutron Coincidence Counting", Nucl. Materials Management, vol. 8, pp.60 (1979)
5. M.S.Krick and J.E.Swansen, "Neutron Multiplicity and Multiplication Measurements", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 219 pp.384-393, North-Holland, Amsterdam (1984)
6. N.Ensslin, "Principles of Neutron Coincidence Counting", in Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials, edited by T.D.Reilly, N.Ensslin, and H.A.Smith, US Nuclear Regulatory Commission NUREG/CR-5550, March (1991)
7. N.Ensslin, M. L. Evans, H. O. Menlove, and J. E. Swansen, "Neutron Coincidence Counters for Plutonium Measurements" INMM Journal, Vol. VII, No. 2, (1978)
8. A.G. Croff, "A User's Manual for the ORIGEN2 Computer Code," ORNL/TM-7175, Oak Ridge National Laboratory, July (1980)

표 1 DUPIC 시료의 DSNC 측정 자료

fuel type	item name	measurement date	mass(g)	single rate	double rate	single rate/g	decay double rate/g	relative error(%)*
powder	Oxidation powder (Home-sample #1)	00-02-07	9.847	408.667	28.974	41.5017	2.9424	-4.7900
	Oxidation powder (Home-sample #1)	00-02-07	7.184	347.329	20.843	48.3476	2.9013	-6.2748
	Oxidation powder (Home-sample #1)	00-02-07	11.133	469.898	32.442	42.2077	2.9140	-5.8105
	Oxidation powder (Home-sample #1)	00-02-07	11.744	510.059	34.614	43.4315	2.9474	-4.6137
	Oxidation powder (Home-sample #1)	00-02-07	11.836	523.743	38.152	44.2500	3.2234	4.3441
	Oxidation powder (Home-sample #1)	00-02-07	9.102	375.28	26.602	41.2305	2.9227	-5.4986
	Oxidation-Reduction Powder #1	00-04-15	14.275	611.707	43.034	42.8516	3.0146	-2.2795
	Oxidation-Reduction Powder #2	00-05-23	6.224	281.794	19.689	45.2754	3.1634	2.5302
sintered pellet	mini-element #1	00-04-14	41.98	1789.519	151.601	42.6279	3.6113	14.6183
	mini-element #2	00-04-14	42.15	1779.63	145.208	42.2214	3.4450	10.4983
	mini-element #3	00-04-14	42.788	1808.706	150.597	42.2713	3.5196	12.3948
	mini-element assembly	00-04-18	126.916	5212.537	421.012	41.0708	3.3172	7.0507
	sintered pellet #1	00-04-15	20.221	854.052	68.411	42.2359	3.3832	8.8617
	sintered pellet #2	00-05-23	14.869	646.339	51.444	43.4689	3.4598	10.8808
	IMEF sample #1	00-04-18	2.257	95.163	7.682	42.1635	3.4036	9.4097
	IMEF sample #2	00-04-18	1.413	55.604	5.076	39.3517	3.5924	14.1689
	IMEF sample #3	00-04-18	2.294	91.128	7.362	39.7245	3.2092	3.9225

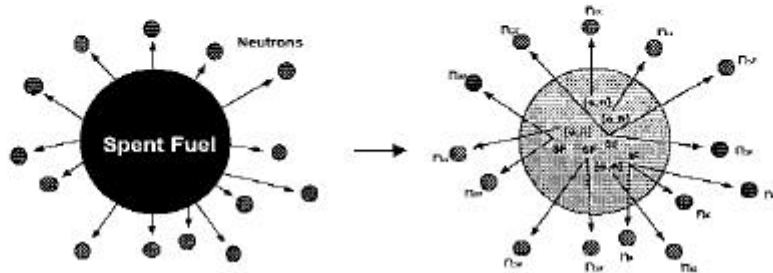
*base: 3.08 double rate/g

표 2 소결체 시료에서 증배계수 계산 결과

fuel type	items	coefficient of M			M	corrected singles rate	corrected double rate	corrected double/g	reduction rate of single rate(%)	reduction rate of double rate(%)
		A	B	C						
sintered pellet	mini-element #1	3.3090	-4.5053	1.0137	1.0771	1661.36	116.29	2.77	7.16	23.29
	mini-element #2	3.3090	-4.4666	1.0137	1.0611	1677.08	117.40	2.79	5.76	19.15
	mini-element #3	3.3090	-4.4873	1.0137	1.0397	1690.83	118.36	2.77	6.52	21.41
	mini-element assembly	3.3090	-4.4564	1.0137	1.0569	4931.98	345.24	2.72	5.38	18.00
	sintered pellet #1	3.3090	-4.4481	1.0137	1.0534	810.73	56.75	2.81	5.07	17.04
	sintered pellet #2	3.3090	-4.4418	1.0137	1.0508	615.10	43.06	2.89	4.83	16.30
	IMEF sample #1	3.3090	-4.4558	1.0137	1.0567	90.06	6.30	2.79	5.36	17.93
	IMEF sample #2	3.3090	-4.5869	1.0137	1.1103	50.08	3.51	2.48	9.93	30.94
	IMEF sample #3	3.3090	-4.4566	1.0137	1.0570	86.22	6.04	2.63	5.39	18.02

Neutrons from Spent Fuel

Spontaneous Fission $n : n_{sf}$
 Induced Fission $n : n_{if}$
 (α, n) reaction $n : n_{\alpha}$



Shift Register (SR)

Sorting Time Correlated Signals(n_{sf}, n_{if})
 from Time Independent Signals(n_{α})

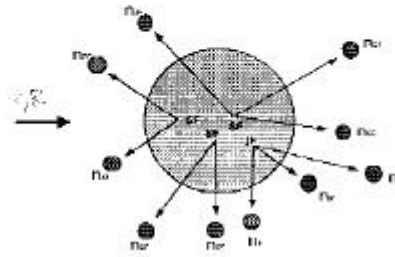


그림 1. 사용후핵연료에서 발생되는 중성자 및 shift register를 이용한 측정 원리

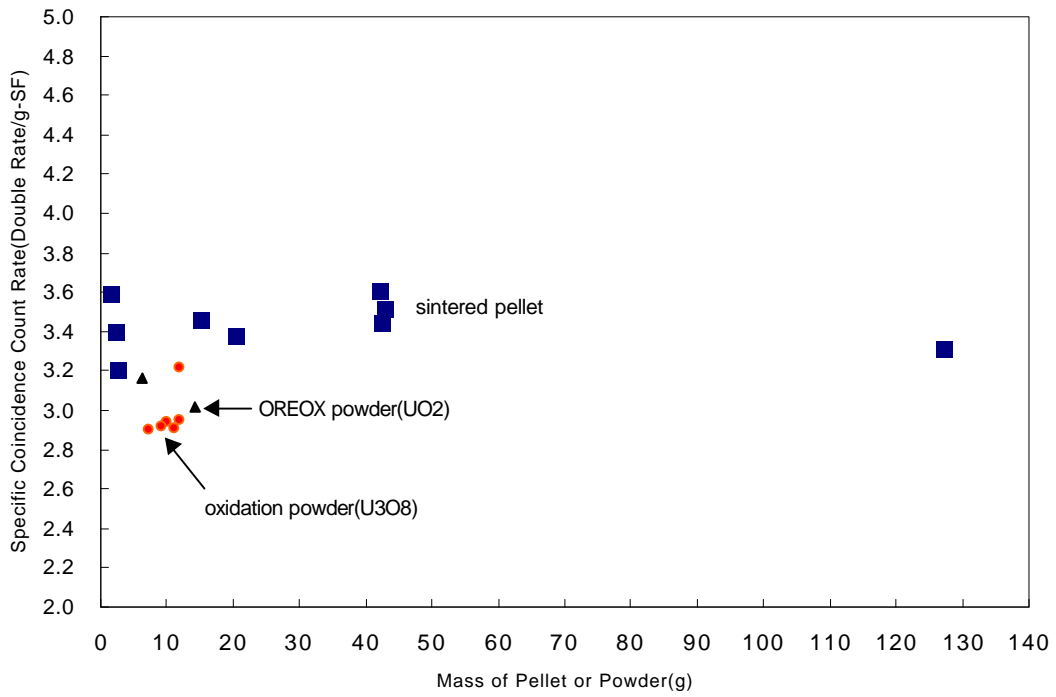


그림 2. DUPIC 시편에서의 specific double rate 측정 결과 비교

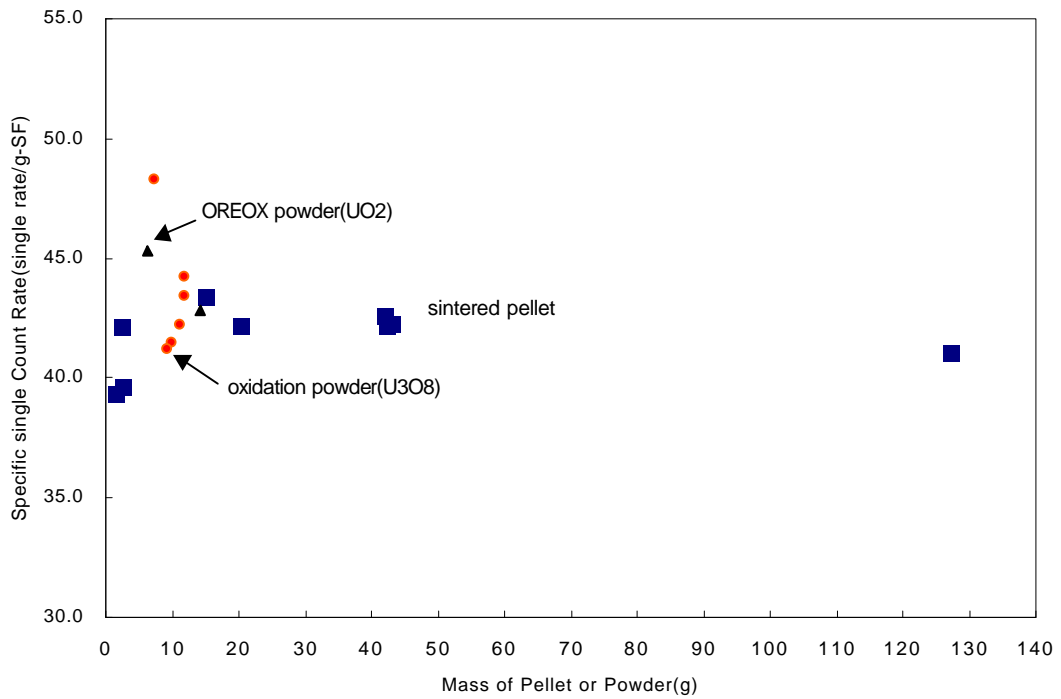


그림 3. DUPIC 시편에서의 specific single rate 측정 결과 비교

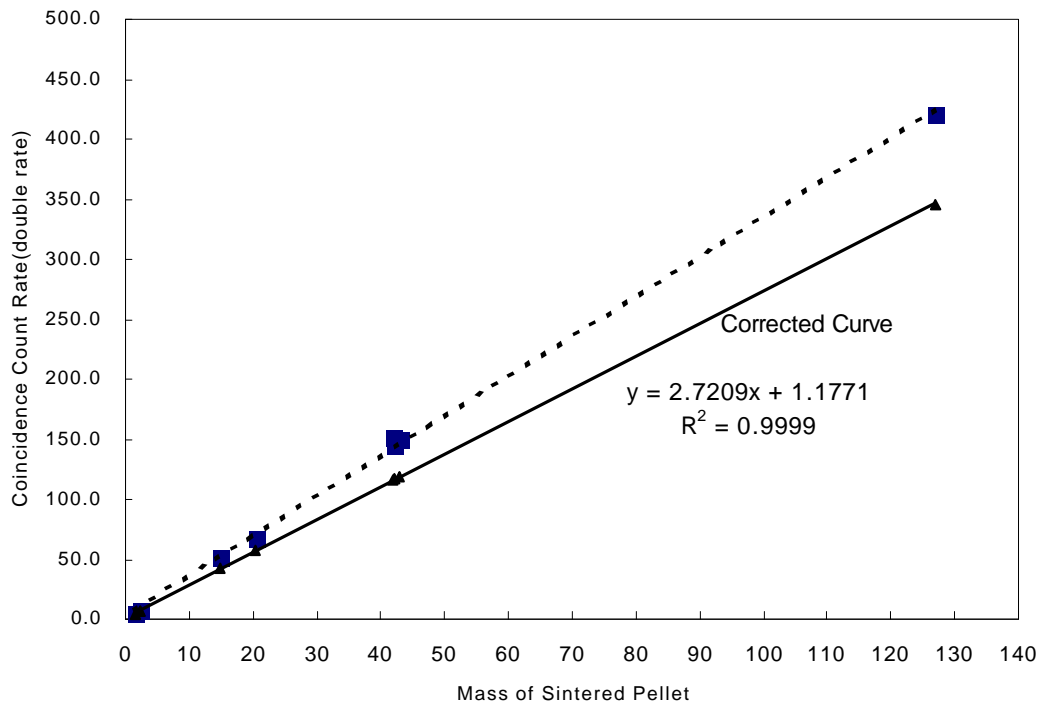


그림 3. double rate에 대한 multiplicity 보정