

## 《기술보고》

### 로듐 자기 기전력형 중성자 계측기의 수명 연장에 관한 연구

김성래 · 김길곤 · 김정식 · 박성훈 · 권종수 · 박현우

한국원자력연구소

(1995. 7. 31 접수)

#### 요 약

로듐 자기 기전력형 중성자 계측기는 단위 중성자당 발생하는 전류 신호가 매우 커 계측성이 우수하나 연소율이 빨라 자주 교체해야 하므로 재장전 기간 연장 및 새로운 로듐계측기 구입 등의 문제점이 있다. 75% 연소에 해당하는 제5핵연료 주기 기간 동안 영광 3, 4호기와 같은 C-E 원자로에 사용되고 있는 로듐 자기 기전력형 중성자 계측기의 연소 거동이 C-E에 의해서 연구되었다. 약 제3핵연료 주기까지 분석한 C-E의 초창기 연구에서는 중성자 방사화율 개념에 근거하여 약 66% 연소시점까지 로듐계측기 연소 특성곡선은 선형적임이 밝혀진 바 있다.[1, 2] 그 후 C-E의 연구에 의하면 약 75% 연소에 해당하는 제5핵연료 주기까지도 로듐계측기 연소 특성 곡선은 선형적임이 밝혀졌다. 그 결과로 C-E형 원자력발전소에서 사용되는 로듐 노내계측기의 수명을 약 60% 연소에서 66% 연소 시점까지 연장시킬 수 있게 되었다.[3] 이 정도의 계측기 수명 연장은 약 반년의 원자로 운전 기간에 해당되며 차기 핵연료 주기에서 많은 로듐 노내계측기를 계속 사용할 수 있게 한다. 특히 영광 3, 4호기가 12개월 핵연료 주기에서 18개월 핵연료 주기로 재장전 전략을 바꿀 경우 로듐 노내계측기의 수명이 연장되지 않으면 계측기 교체가 빈번해 질 것으로 사료되어 로듐 수명 연장과 관련된 기술 특히 C-E 및 B&W의 로듐 노내계측기 연소도 특성곡선 불확실도 평가 및 출력 측정 계통 오차 분석 기술을 소개하고자 한다. 영광3, 4호기에서 사용중인 로듐 노내계측기 수명을 현재 연소도 기준 66%내로 한정하고 있는데 C-E 및 B&W의 로듐 노내계측기 연소 특성에 관한 연구 내용을 분석한 결과 노내계측기 수명을 연소도가 66%를 초과하는 계측기가 있어도 전체적으로 불확실도가 안전한계를 넘지 않으면 노내상주가 가능한 것으로 평가되었다.

#### 1. 서 론

중성자속이 변하지 않는다 하더라도 로듐 자기 기전력형 중성자 계측기의 신호는 노심내 상주기간에 따라 변하게 되어 있다. 로듐계측기는 로듐-103의 중성자 방사화 원리로 신호를 발생시킨다. 따라서 로듐이 중성자를 포획하면 계측기 신호(전류)를 발생시키는 전자 발생 원재료의 양이 점차 감소하게 된다. 즉, 주어진 중성자속에서 전류 신호를 발생시킬 방사화 물질이 연소하게 된다. 로듐 노내계측기 전류 신호로 출력분포를 결정하기 위해서는 로듐 원자핵 소멸 정도를 고려해 주어야 하고 노내계측기가 연소함에 따라 전자는 더 깊은 곳

에서 발생하므로 전자가 Collector에 도달할 확률 즉 베타선 방출 확률이 감소 할 수 있다. 따라서 중성자속을 측정하기 위해서는 베타선 방출 확률과 로듐 원자핵 연소를 모두 고려해 주어야 한다.

로듐 노내계측기가 장착된 핵연료집합체의 계측기 길이당 국소 출력(P)은 다음과 같이 표현된다.

$$P = \frac{I \times W'}{S} \quad (1)$$

여기서 I : 비중성자신호가 보상된 계측기신호

S : 계측기 특성도

W' : 로듐의 중성자 포획량에 대한 출력 비율로 정의한다.

로듐 노내계측기 방사화량으로부터 핵연료집합체 출력으로 변환하는 인자  $W'$ 는 C-E의 CECOR 코드 저장 함수로 미리 계산된다. 로듐 방사화율에 대한 핵연료집합체 출력비는 다음과 같이 된다.

$$W = \frac{\text{POWER}}{\frac{1}{V} \int_V \int_E \sigma \phi dE dV} \quad (2)$$

여기서  $\sigma$ =로듐 중성자 흡수 단면적

$\phi$ =로듐 방출체에서의 중성자속

$V$ =로듐 방출체의 체적

$E$ =중성자의 에너지이다.

영광 3, 4호기 로듐 노내계측기 계통의 계측기 특성도 (S)는 방사화 개념을 사용하고 있다. 어떤 연소시점에서 로듐계측기로부터 발생하는 신호는 로듐의 방사화량에 영향을 받게 된다. 방사화 원리에 기초한 계측기 연소 특성도 법칙은 선형성을 갖고 있으며 다음과 같이 표현된다.[4]

$$S = S_0 (1 - Q / Q_\infty) \quad (3)$$

여기서  $S_0$ =초기계측기의 특성도

$Q$ =어떤 연소 시점에서 측정된 전하량

$Q_\infty$ =이론적 총 전하량이다

## 2. 베타선 방출 확률

$E'$ 의 에너지를 갖는 전자가 방출체의 표면에 도착했을 때  $E$ 의 에너지를 가질 확률을 궤도 길이 확률 밀도 함수라고 정의하자. 에너지  $E$ 와  $E+dE$ 를 갖고 방출체 표면에 도달할 확률은 궤도 길이  $l$ 과  $l+dl$ 의 궤도를 비행할 확률과 같다. 방출체내에 존재하는 방출체 표면까지 거리  $l$ 의 단위 궤도 거리당 비행한 궤도 거리 확률은  $N(l) dl$ 이다. 여기서 방출체내의 에너지가  $E$ 와  $E'$ 인 전자가 비행한 거리차를 궤도 길이 함수라고 정의하면  $l=R(E')-R(E)$ 와 같이 된다. 따라서  $dl = -dR(E)$  또는

$$dR(E) = -\left(\frac{dE}{dx}\right)^{-1}_E dE \quad (4)$$

여기서  $(-dE/dx)^{-1}_E$ 는 방출체내에서 에너지  $E$ 를 갖는 전자가 단위 길이당 손실하는 에너지량의 역수로 정의된다. 그래서  $E'$ 의 에너지를 갖는 전자가 에너지  $E$ 를 갖고 방출체 표면에 도달할 확률은 다음과 같다.[5]

$$N(l)dl = N[R(E')-R(E)] \left(\frac{dE}{dx}\right)^{-1}_E dE \quad (5)$$

그러면 베타선 방출 확률은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon = \int_0^{E_s} C(E) dE = \int_{E_{MIN}}^{E_s} \left(-\frac{dE}{dx}\right)^{-1}_E dE \times \int_E^{E_s} N[R(E')-R(E)] B(E') dE' \quad (6)$$

$E_{MIN}$  보다 작은 에너지로 방출체 표면에 도달한 전자는 계측기 신호로서 나타나지 못하며,  $E_{MIN}$ 은 다음과 같이 구한다. 절연체가 전자의 균일한 분포를 갖는다고 가정 할 경우 절연체내의 Poisson의 방정식의 해는 다음과 같다.

$$V(r) = A \left[ -\left(\frac{r}{r_i}\right)^2 + \frac{\ln\left(\frac{r}{r_e}\right) + k^2 \ln\left(\frac{r_i}{r}\right)}{\ln\left(\frac{1}{k}\right)} \right] \quad (7)$$

여기서  $A$ =방사선 강도와 절연체 종류에 관련된 비례 상수

$r$ =방출체 중앙으로부터 절연체내의 어떤 지점까지 거리

$r_e$ =방출체의 반경

$k=r_e/r_i$

$r_i$ =절연체의 외경이다.

정상 작동시 로듐 자기 기전력형 중성자 계측기의 경계조건으로  $V(r_e)=V(r_i)=0$ 을 적용하면 방정식(7)으로부터 구해진 전장은 다음과 같다.

$$E(r) = \frac{2A}{r_i} \left\{ \frac{r}{r_i} - \left[ \frac{1-k^2}{2\ln(1/k)} \right] \frac{r_i}{r} \right\}$$

방출체의 중앙으로부터 전위차가 최대이며 전장이 영이고 방향이 바뀌는 지점  $r_0$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$r_0 = r_i \left\{ \frac{1-k^2}{2\ln(1/k)} \right\}^{1/2}$$

그러면 무한히 긴 계측기의 평균 궤도길이는 다음과 같이 된다.

$$\bar{r} = \frac{(r_i-r_e)}{(1-k)} \left( \left[ \frac{1-k^2}{2\ln(1/k)} \right]^{1/2} \times E \left( k \left[ 2 \frac{\ln(1/k)}{1-k^2} \right]^{1/2} \right) - k \right)$$

여기서  $r_i-r_e$ =절연체 벽두께

$k=r_e/r_i$

$E(\arg)$ =complete elliptic integral of the second kind

평균 궤도 길이  $r$ 이 구해지면 Range-Energy T-

ables [6]에 의해서  $E_{MIN}$ 을 계산한다. 방출체로부터 정규화된 베타선 붕괴 에너지 스펙트럼은

$$B(E') = \frac{105}{16} \frac{1}{(E_\beta)^{7/2}} (E_\beta - E')^2 \sqrt{E'} \quad (11)$$

로 Fermi에 의해서 주어진다.[7] 즉  $B(E')dE'$ 는 원자핵에서 전자가 에너지 범위  $E'$ 와  $E'+dE'$ 을 갖고 방출될 확률이다. 한편 궤도 길이 확률 밀도 함수  $N(\ell)$ 은 다음과 같이 계산된다.[5]

$$N(\ell) = \frac{2(1-p^2)}{3\pi r_e p^2} K(p) - \frac{2(1-2p^2)}{3\pi r_e^2} E(p) - \frac{1+4p^2}{8\pi \alpha r_e p^2} \sin^{-1} p + \frac{1}{4\alpha r_e} + \frac{1-6p^2}{8\pi \alpha r_e p} \sqrt{1-p^2} \text{ for } p \leq 1 \quad (12)$$

여기서  $p=1/2r_e$

$\alpha=L/2r_e$ =방출체 길이/직경

$K(p)$ =complete elliptic integral of the first kind

$E(p)$ =complete elliptic integral of the second kind

따라서  $E_{MIN}$ , 궤도 길이 확률 밀도 함수  $N(\ell)$ , 베타선 붕괴 에너지 스펙트럼  $B(E')$ 는 로듐-103 원자핵의 밀도에 무관하다. 즉 로듐 노내계측기의 형상이 주어지면 베타선 방출 확률은 이론적으로 일정하다는 것을 보여 주고 있다.

### 3. 로듐 노내계측기 연소 특성도 곡선

감마선에 의해 직접적으로 발생되는 1~2% 정도의 신호를 무시하면 로듐 자기 기전력형 계측기의 전류 신호는 로듐 방출체 내의 중성자 흡수와 베타선 방출 확률에 비례한다. 즉

$$I = \epsilon \overline{P_\beta} \overline{N} \int_V \int_E \sigma \Phi dEdV \quad (13)$$

여기서  $\epsilon$ =전자의 전하량

$\overline{P_\beta}$ =평균 베타선 방출 확률

$\sigma$ =로듐의 흡수 단면적

$\Phi$ =중성자속

$V$ =로듐 방출체의 체적

$E$ =중성자의 에너지이다.

로듐 노내계측기의 신호이론에 의하면 연소특성곡선

의 특성도(Sensitivity)는 연소중인 로듐 노내계측기 신호를 신 로듐계측기에 대응하는 신호로 변환시켜 주는 인자로서 정의된다. 이 방법은 로듐 노내계측기 위치에 있는 핵연료집합체 출력을 결정하기 위한 신 로듐계측기의 신호에 대하여 미리 계산된 핵연료집합체 출력 변환 인자  $W'$ 와 함께 사용된다.  $D$ 와  $N$ 을 각각 연소중인 로듐계측기와 신 로듐계측기로 정의할 때 연소 특성곡선 상관식은 다음과 같이 표현된다.

$$\left(\frac{S}{S_o}\right)_s = \frac{I^D}{I_N} = \frac{\epsilon \overline{P_\beta} \overline{N_D} \int_D \int \sigma \Phi dEdV}{\epsilon \overline{P_\beta} \overline{N_N} \int_N \int \sigma \Phi dEdV} \quad (14)$$

로듐계측기 전하량  $Q$ 는 로듐 계측기내 로듐-103 원자 밀도  $N$ 에 역 비례하므로 상관식(14)는 다음과 같이 된다.

$$\left(\frac{S}{S_o}\right)_s = \left(1 - \frac{Q}{Q_\infty}\right) \frac{\int_D \int \sigma \Phi dEdV}{\int_N \int \sigma \Phi dEdV} \quad (15)$$

중성자 수송 이론 설계 코드 DIT(8)를 사용하여 상관식 (14)의 연소 중인 로듐계측기와 신 로듐계측기의 중적분 비율을 평가하면 그 비율은 1.0~1.6으로 계산되며 이 결과를 바탕으로 상관식을 만들면 다음 상관식으로 표현된다.

$$\left(\frac{S}{S_o}\right)_s = \left(1 - \frac{Q}{Q_\infty}\right)^\alpha \quad \alpha = 0.70 \sim 0.75 \quad (16)$$

방사화 이론 및 계측기 신호 이론들은 모두 로듐 원자 연소 따른 특성도를 정의하는 함에 있어 동일한 원리를 갖는다. 그러나 방사화된 양을 기준으로 하면  $Q/Q_\infty$ 에 따른 특성도가 선형적으로 변화하나, 신호크기를 기준으로 하면 위로 볼록한 곡선에 따라 변화한다

방사화 이론에 근거한 연소 특성 곡선을 사용할 경우 선형적으로 특성도가 변화하므로 간단하게 나타낼 수 있으나 신호 처리할 때마다 변환 인자  $W'$ 를 계산해야 실시간 출력을 계산이 어렵다. 반면, 계측기 신호이론에 근거한 로듐계측기 연소 특성 곡선은 복잡하지만 초기 신 로듐계측기 신호에 대한 변환 인자만 계산하면 연소하는 동안 계속 사용할 수 있기 때문에 신호 처리 알고리즘으로 처리할 수 있다. 그러나  $Q_\infty$  불확실도 평가에는  $Q_\infty$  관련된 항이 단순하게 표현되는 로듐계측기 방사화이론을 사용하는 것이 유리하다. 따라서 로듐계측기

방사화 이론을 사용하여  $Q_{\infty}$  불확실도로 인한 출력 불확실도 평가 방법을 기술하고자 한다.

중성자 방사화 이론에 근거하여 로듐 노내계측기 특성을 중성자 방사량에 대한 계측기 전류 신호 비율로 정의하면 다음과 같이 된다.

$$S = \frac{I}{\frac{1}{V} \int_V \int_E \sigma \phi dEdV} \quad (17)$$

상관식 (13)과 (17)에 의하면 평균 베타선 방출 확률은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \overline{P_{\beta}} &= \frac{I}{N \epsilon \int_V \int_E \sigma \phi dEdV} \\ &= \frac{S}{\epsilon NV} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서  $P_{\beta}$ 가 일정한 상수라면 계측기 특성도는 로듐 방출체의 원자핵 밀도  $N$ 에 선형적으로 변화할 것이다. 또한 평균 베타선 방출 확률이 연소도에 따라서 일정하다면 계측기 특성도는 다음과 같은 선형 연소 특성도 곡선을 만족할 것이다.[2, 4]

$$S = S_0 (1 - Q / Q_{\infty}) \quad (19)$$

$$S_0 = Q_{\infty} \quad (20)$$

$$Q_{\infty} = S + Q \quad (21)$$

상관식 (19), (20)과 (21)들은 로듐 노내계측기의 연소 법칙 거동을 설명하고,  $Q_{\infty}$ 과 노내계측기 연소 특성도 곡선의 성질을 결정하는 상관식들이다. 계산 모델과 실측치의 출력 차이를 보상하는 C-E의 표준 설계 방법으로부터 계산된 로듐 중성자 방사화율과 로듐계측기로 계측된 비중성자 신호를 보정한 전류 신호를 비교함으로써 축적된 전하량의 함수로 상관식(17)을 설명할 수 있다. 이 상관식 (17)은 로듐계측기 특성 곡선의 성질을 잘 나타내고 완전 연소 시점까지 외삽하면  $Q_{\infty}$  값을 계산할 수 있다. 또한  $Q_{\infty}$  값은 상관식 (21)에 의해서도 계산할 수 있다.

1981년 C-E에서 처음으로 상기에서 기술한 방법론에 대하여 약 25% 노내계측기 연소 기간에 해당하는 한 핵연료 주기동안 시험을 수행하였다.[1] 그 결과 평균 베타선 방출 확률은 연소율에 대하여 일정하며 노내계측기 연소 특성도 곡선은 선형성을 갖고 있음이 발견되었다. 이러한 결과를 바탕으로 1983년 제 3핵연료 주기 동안의 연소에 따른 노내계측기 연소 특성 거동이 연구되었으며, 그 결과 노내계측기 연소도가 60~66%가 될

때까지 평균 베타선 방출 확률은 일정하며 노내계측기 연소 특성도 곡선은 선형성을 갖음을 밝혀졌다[2].

그 후 C-E는 4개의 로듐계측기를 한 개의 집합체로 하는 한 계열의 계측기를 제 5 핵연료 주기까지 노심에 계속 상주시켜 노심 하단에서 세 번째로 위치하는 로듐 계측기에 대한 연소 특성 거동 연구를 수행하였다. 그 시험 결과 약 75% 연소 시점인 제 5핵연료 주기 동안에 노내계측기의 평균 베타선 방출 확률은 0.41~0.42 범위 있음이 밝혀졌다.[3] 측정값에서 나타난 각 핵연료 주기간의 소량의 계단식 변동은 물리적인 현상이라기 보다는 모델링상의 문제로 사료된다. 평균 베타선 방출 확률이 연소도에 따라 일정하다면 노내계측기 연소 특성도 곡선은 선형성을 가질 것이다.

상관식(19)의 선형적 직선 보정 및 완전 연소 시점까지 보정된 선형 직선의 외삽에 의해서  $Q_{\infty}$ 의 값을 구하면 314~319 쿨롱 정도이다. 한편 상관식(21)에 의해서  $Q_{\infty}$ 을 구하더라도 거의 동일 값을 구할 수 있다. 실측치에 대한 보정을 하면  $Q_{\infty}$  값은 316 쿨롱이고 실제 로듐 노내계측기 제작자가 공급한  $Q_{\infty}$  값인 329 쿨롱과 비교적 잘 맞아 주고 있다. 계산된 값과 제작자가 공급한  $Q_{\infty}$  값과의 차이는 약 10~15 쿨롱으로 약 3~5% 이다. 이 차이는 실제  $Q_{\infty}$  값과 계산에 사용된 방법론에 대한 불확실도를 의미한다. C-E의 연구에 의하면 연소 정도가 다른 경우에도 비슷한 결과를 나타내고 있었다. 결론적으로 노내계측기 연소 특성도 곡선은 75% 연소 시점까지 선형성을 갖고 있으며  $Q_{\infty}$  값은 314~329 쿨롱 범위에 존재한다.[3]  $Q_{\infty}$  값의 불가피한 산포는 실제  $Q_{\infty}$  값과 계산 방법상의 복합적인 불확실도를 의미한다.

#### 4. 계측기 신호 크기

로듐 노내계측기의 전류 신호는 로듐-103 평균 원자핵 밀도, 중성자 흡수 단 면적과 노심내 중성자속에 비례한다. 로듐과 바나듐의 평균 중성자 흡수 단 면적은 각각 150과 7 barns 이다. 실용적으로 사용되고 있는 바나듐 노내계측기는 낮은 중성자 흡수 단면적 때문에 방출체의 크기가 로듐 방출체보다 조금 크다. 중성자 수송 이론 설계 코드 DIT의 계산 결과에 의하면 90% 연소 시점에서 18 mils 직경인 로듐 노내계측기 방출체의 전류 신호 크기가 42 mils 직경인 신 바나듐 노내계측기의 전류 신호의 크기 보다 큰 값을 보여 주었다.

현재 영광 3, 4호기에서 사용중인 18 mils 직경×15.

748 inches 길이의 로듐 방출체가 90% 연소 시점에서 신호 처리 가능한 전류 신호를 발생시킬 수 있다. 즉, 신호 크기로만 평가한다면 90% 까지 연소 가능하나 로듐 노내계측기가 고 연소될 때는 신호를 다시 검교정하여야 할 것이다.

### 5. 계측기 수명

로듐 노내계측기 내에 로듐-103 원자가 존재하는 한 중성자속에 의한 전류 신호를 발생시킬 수 있다. 그러나 로듐계측기 수명은 로듐 노내계측기 연소 특성 곡선의 불확실도, 즉 선형 로듐 연소 특성 곡선의 이론적 총 전하량  $Q_{\infty}$  불확실도에 전적으로 의존한다. 로듐 노내계측기 연소도를 계측기 나이로 정의하면( $r=Q/Q_{\infty}$ ) 이론적 총 전하량인  $Q_{\infty}$ 의 불확실도에서 기인된 핵연료집합체 국소 출력의 불확실도는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dP}{P} = -\frac{r}{1-r} \left( \frac{dQ_{\infty}}{Q_{\infty}} \right) \quad (22)$$

그림 1에서 보듯이 국소 출력의 백분율 불확실도는 전적으로 계측기 연소도에 의존하며  $Q_{\infty}$ 의 2% 불확실도는 50% 계측기 연소시점에서 2%의 출력 불확실도가 발생함을 보여준다. 60%계측기 연소 시점에서 3%의 출력 불확실도를, 66%계측기 연소 시점에서 4%의 출력 불확실도를, 75% 계측기 연소 시점에서 4.6%의 출력 불확실도를 나타내고 있다. 로듐 노내계측기로 측정된 출력의 오차가 적절한 수준으로 유지되기 위해서는 로듐 노내계측기의 연소도를 제한하는 것이 필수적이다. C-E의 설계 코드인 CECOR는 출력의 허용 측정 오차를 3% 이내로 제한하고 있다.[3] 여기서 말하는 3% 오차란 침투 Box 참 출력의 95%가 측정된 Box 출력 더하기 3% 이내에 존재할 확률이 95%라는 것을 의미한다. 이런 불확실도를 유지하기 위해서는 상관식(22)에 의해서만 계산될 수 있으며  $Q_{\infty}$ 가 2% 불확실도를 갖는 계측기일 경우 50% 연소만이 허용될 수 있다.

노심내 다른 계측기의  $Q_{\infty}$  불확실도 때문에 어떤 측정 중인 핵연료집합체의 출력 불확실도의 감소 효과가 있을 수 있다. 특히 노심내의 모든 로듐 노내계측기의 이론적 총 전하량  $Q_{\infty}$ 의 불확실도인  $\delta Q_{\infty}$ 가 동일하다면 측정된 출력의 불확실도를 감소시키는 소위 통계적 Renormalizing Effect를 가져온다.

$$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i = 1 \quad (23)$$

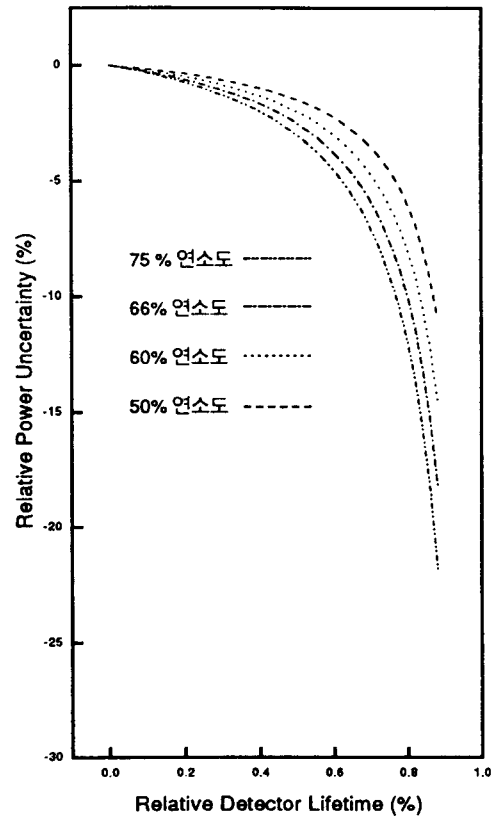


그림 1 Relative Power Uncertainty vs Detector Life Time

식 (23)이 성립하도록 상대적 Box 출력  $P_i$ 를 정규화하면  $Q_{\infty}$ 의 계통 오차를 고려한 상대 Box 출력의 불확실도  $\delta P_i / P_i$ 는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\delta P_i}{P_i} = \frac{\delta Q_{\infty}}{Q_{\infty}} \left\{ \frac{-r_i}{1-r_i} + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_j \frac{r_j}{1-r_j} \right\} \quad (24)$$

여기서  $P_i$ =Box i의 상대 출력

$\delta Q_{\infty} / Q_{\infty}$ = $Q_{\infty}$ 의 계통오차

$r_i = Q / Q_{\infty}$ =계측기의 연소도

$N$ =계측기의 개수이다.

따라서 계측기 연소도가 증가하면 측정 오차는 계속 증가하지만 통계적 계통 오차가 이를 보상하는 Renormalizing Effect가 있어서 총 오차를 감소시키는 효과를 가져온다. 그러나  $Q_{\infty}$ 에서의 불확실도가 모든 로듐 노내계측기에 대하여 동일하지 않는다. 일반적으로 모든 노내계측기에 대하여  $Q_{\infty}$  평균값의 계통 오차에 추가적으로  $Q_{\infty}$ 의 고유 오차가 존재할 것이다. 노심내의 모

든 노내계측기에 대하여 상대 Box 출력의 불확실도는 상관식(24)에 상관식(22)와 비슷한 형태의 식이 합해져 주어진다.  $Q_{\infty}$ 의 계통 오차와 고유 불확실도에 기인한 Box 출력의 상대적인 불확실도는 상관식 (25)로 주어진다.

$$\frac{\delta p_i}{p_i} = \frac{\delta Q_{\infty i}}{Q_{\infty}} \left[ \frac{-r_i}{1-r_i} + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_j \frac{r_j}{1-r_j} \right] + \frac{\Delta Q_{\infty i}}{Q_{\infty}} \left( \frac{-r_i}{1-r_i} \right) + \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N p_j \frac{r_j}{1-r_j} \frac{\Delta Q_{\infty j}}{Q_{\infty}} \quad (25)$$

여기서

$\Delta Q_{\infty} / Q_{\infty}$ 은 Box i에 있는 계측기  $Q_{\infty}$ 의 고유 불확실도이다.

Box 출력의 실제 불확실도 크기와 노내계측기 허용 수명은  $Q_{\infty}$ 의 종합적인 불확실도와 고유 오차 및 계통 오차의 독립적인 영향에 전적으로 의존한다. C-E의 노내계측기 연소 연구 결과에 의하면  $Q_{\infty}$ 의 분포 범위는 314~319 쿨롱이며 이 산포는 현재 실제 공급되고 있는 노내계측기  $Q_{\infty}$ 인 329 쿨롱에 대하여 3~5% 산포에 해당된다.

교정된 노내계측기의 종합적인 데이터베이스의 통계에 의하면 어떤 주어진 무게의 노내계측기에 대하여 초기 노내계측기 특성도 분포는 3~4% 크기를 갖고며  $Q_{\infty}$ 는 평균값에서  $\pm 2\%$  분포에 해당된다. 위와 같은 자료를 기준으로 계통 오차와 고유 오차를 포함한  $Q_{\infty}$ 의 불확실도는 2~3%로 예측된다. 이러한  $Q_{\infty}$ 관련 정보를 근거로 노내계측기 허용 수명을 연장이 가능하다.

## 6. 차주기말 총 전하량 예측

연소중인 로듐 노내계측기 총 전하량 축적율을  $Q'$ , 신 로듐 노내계측기 초기 총 전하량 축적율을  $Q'_0$ 라고 정의하면 상대 속도의 비는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{Q'}{Q'_0} = \left(1 - \frac{Q}{Q_{\infty}}\right)^{\alpha} \quad (26)$$

$$\alpha = 0.70 \sim 0.75$$

로듐 노내계측기 교체를 위하여 차주기말 총 전하량 예측이 필요한 시점은 제 2주기말과 제 3주기말로 예측되고 예측할 연소 구간을 적절히 선택하면 이러한 연소 구간 내에서는  $Q' / Q'_0$ 가 이론적으로 일정하다고 근사할 수 있다. 따라서 중성자 수송 이론 설계 코드 DIT을 이용하여 신 로듐 노내계측기 초기 총 전하량 축적율을  $Q'_0$ 를 계산했다면 상관식(26)에 의해서 차주기말에 축

적될 것으로 예측되는 총 전하량을 구할 수 있다.

## 7. 결 론

로듐 노내 중성자 계측기 평균 베타선 방출 확률은 근본적으로 연소도에 따라 일정하며 C-E형 로듐 노내계측기 연소 특성 곡선은 75% 연소도까지 선형성을 갖고 있음을 알 수 있다. 분석에 의하면 C-E형 원자력발전소의 로듐 노내계측기의 연소도를 기존의 66%내에서 66% 이상까지도 증가시킬 수 있을 것으로 평가되었다. 이러한 연소도 증가로 인하여 다음 주기에 교체해야 할 노내계측기를 차주기에 노심에 계속 상주시켜 사용할 수 있다.

현재 영광 3, 4호기에서 사용중인 로듐 노내계측기 수명을 현재 연소도 기준 66%내로 한정하고 있는데 노내계측기 수명을 연소도 기준 66%를 초과해도 상주 가능하나 이를 위해서는 실제 계측기의 노심내 위치에서의 출력 및 각 계측기에서의 연소도 평가를 통한 계측기 노심내 상주 시간을 결정을 위한 연구보다 필요하며, 정확한  $Q_{\infty}$  불확실도의 계통 및 고유 오차 정량화 연구가 필수적이다.

## 참고문헌

1. W.B. Terney, et. al., "The C-E CECOR Fixed In-Core Detector Analysis System," Trans. Am. Nucl. Soc., **44**, p542 (1983)
2. W.B. Terney, C.O. Dechand, A. Jonhsson, "Depletion Laws for Self-Powered Rhodium Detectors," Trans. Am. Nucl. Soc., **46**, p768 (1984)
3. C.O. Dechand, W.B. Terney, M.L. Kantrowitz, "Extended Verification of the C-E Rhodium Detector Sensitivity Depletion Laws," Trans. Am. Nucl. Soc., **54**, p346 (1987)
4. H.D. Warren, "Depletion Characteristics of Beta-Decaying Self-Powered Neutron Detectors," Trans. Am. Nucl. Soc. **23**, p460 (1976)
5. H.H. Warren, "Calculational Model for Self-Powered Neutron Detector," Nucl. Sci. and Eng., **48**, p331~342 (1972).

6. M.J. Berger, S.M. Seltzer, "*Tables of Energy Losses and Ranges of Electrons and Positrons*," NASA-SP-3012, National Aeronautics and Space Administration (1964).
7. J. Orear, A.H. Rosenfeld, and R.A. Schluter, *Nuclear Physics*, p78, The University of Chicago Press (1950).
8. A. Jonsson, et. al., "Verification of a Fuel Assembly Spectrum Code Based on Integral Transport Theory," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **28**, p778, 1978.
9. J. Handschuch, et. al., "Improving In-Core Detector Instrumentation," *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **44**, p542 (1981)