

**UNCL(Uranium Neutron Collar-LWR Fuel) 검출기 교정곡선 결정 및
신핵연료 집합체의 ^{235}U 단위함량 측정**

**UNCL(Uranium Neutron Collar-LWR Fuel) Cross-Calibration and
Verification of ^{235}U Content in PWR Fresh Fuel Assembly**

박일진, 김종수, 안진수, 민경식, 최영명

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

UNCL(Uranium Neutron Coincidence Collar-LWR Fuel)은 핵연료 집합체 내의 ^{235}U 의 단위함량을 측정하는데 사용되는 비파괴 검증장비이다. UNCL을 사용하여 핵연료를 검증하기 위해서 검출기, 집합체, 그리고 선원에 대한 정확한 교정곡선이 요구된다. 본 논문에서는 cross-calibration을 사용하여 UNCL의 교정곡선을 구하는 방법에 대하여 소개하고, 표준 핵연료 집합체를 사용하여 통제기술센터가 보유하고 있는 UNCL의 보정상수 결정에 대한 내용을 기술하였다. 측정된 보정상수를 적용하여 한전연료(주)의 PWR 집합체를 검증한 결과 IAEA 기준인 6% 이내의 오차를 보임을 알 수 있었다. 이 결과를 통하여 결정된 교정곡선의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

Abstract

UNCL is being used for routine inspection activities by International Atomic Energy Agency(IAEA) to verify the ^{235}U content in light water reactor fuel assembly. Accurate calibration is required for each UNCL, assembly and interrogation source to use it. This paper introduces an cross-calibration of UNCL and describes the measurement of correction factor for the UNCL in TCNC(Technology Center for Nuclear Control). PWR assemblies in KNFC(KEPCO Nuclear Fuel Co.) were verified by the TCNC-UNCL after cross-calibrating using standard PWR assembly. The result shows below 6% error which agrees the IAEA criteria for the equipment.

1. 서론

UNCL(Uranium Neutron Collar-Light Water Reactor Fuel)은 중성자 계측을 통하여 신핵연료 집합체 내의 ^{235}U 단위함량(g/cm)또는 ^{238}U 단위함량을 측정하는데 사용되는 비파괴 검증장비이다. 미국의 Los Alamos National Lab.에서 장비를 개발하였으며, IAEA와 EURATOM등은 이 장비를 사용하여 신 핵연료 사찰을 수행하고 있다.[1,2]

^{235}U 단위함량을 측정할 경우 AmLi 중성자선원을 사용하여 유도 중성자를 검출하는 능동적 방법을 사용하며, ^{238}U 단위함량을 측정할 경우 신 핵연료 자체에서 발생하는 중성자를 직접 검출하는 수동적 방법을 사용한다. 일반적으로 IAEA 사찰시 ^{235}U 단위함량을 구하는 것이 사찰의 주목적이며, ^{238}U 측정법은 거의 사용하지 않는다.

UNCL을 사용하여 ^{235}U 의 단위함량을 정확히 측정하기 위해서는 검출기, 집합체 그리고 사용 선원에 따른 정확한 교정곡선이 필요하다. 그러나 각각의 검출기와 선원 그리고 서로 다른 우라늄 함유량을 가진 집합체에 대한 교정은 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 1980년대 중반 여러 연구소에서 pressurized water reactor(PWR)와 boiling water reactor (BWR) 집합체에 대한 표준 교정곡선을 구하기 위한 연구를 수행하여 왔으며 이들 교정곡선은 다양한 실험과 검증을 통하여 단위 ^{235}U 질량당 real count 수의 최종 함수로 표현되었다.

최근에는 burnable poison rods를 포함하고 있는 집합체를 사용하는 경우가 많은데 이러한 경우 표준 교정곡선을 다시 구해야 한다. Poison rod의 수에 독립적인 교정함수를 구하기 위하여 cadmium(Cd) liner를 UNCL에 삽입한다. Cd liner는 열 중성자를 효과적으로 차단함으로써 poison rod에 의한 분석 오차를 감소시킨다.

그러나 세계 여러 나라에서 사용되고 있는 선원과 검출기들은 표준 교정곡선을 구할 때 사용한 것들과 특성이 다르며 따라서 몇 가지 독립적인 보정 상수를 사용한 보정이 필요하다. 미국의 LANL에서는 표준 UNCL, 표준 선원 그리고 표준 연료 집합체를 사용하여 기본 교정곡선을 구한 후, 실제 사찰시 사용할 UNCL과 선원에 대한 보정상수를 구하여 각각의 UNCL에 대한 calibration을 수행하고 있다. 이러한 방법을 cross-calibration 이라 하며 IAEA 사찰에 사용되고 있는 모든 UNCL은 Los Alamos National Lab. (LANL)로부터 cross-calibration 과정을 거친 장비들이다. 보정상수는 선원, 전자장비, 검출기효율, burnable poisons, 우라늄 질량 등에 따른 독립적인 항으로 구성되어 있다.

TCNC에서 보유하고 있는 UNCL과 선원은 위의 cross-calibration 과정을 거치

지 않았으며, 따라서 사찰에 사용하기 위하여 보정상수를 결정할 필요가 있다. 선원과 검출기 효율에 대한 보정상수만 구해주면 그 외의 보정상수들은 LANL에서 사용한 식으로 계산할 수 있다.

본 논문은 UNCL의 cross-calibration에 대한 내용과 TCNC-UNCL 검출기의 보정상수 결정에 대한 내용(poison rods가 없는 PWR 집합체)을 요약하고, 실제 한전 연료(주)에서 실시한 집합체의 ^{235}U 함량 측정을 기술하였다.

2. ^{235}U 단위함량 측정원리

가. Interrogation 선원 (AmLi 중성자 선원)

우라늄의 경우 1g의 시료에서 방출되는 중성자수가 10^{-2} n/s 이하이므로 중성자의 방출률이 너무 낮아 수동적 방법으로는 분석할 수 없다. 따라서 외부 중성자 선원을 사용하여 우라늄 시료를 선원에 노출시켜 발생하는 유도중성자를 측정하는 방법을 사용한다. 이때 사용하는 선원을 interrogation source라 한다. ^{235}U 단위질량 측정에 사용되는 중성자 선원은 (α,n)반응 AmLi 중성자 선원이다. AmLi의 반감기는 433.6 년이며 평균 0.3 MeV 최대 1.5 MeV의 중성자 에너지분포를 나타낸다. 다른 중성자 선원에 비하여 에너지가 낮기 때문에 U 시료중 ^{235}U 를 정량 분석할 수 있는 좋은 interrogation 선원이 된다. 이 선원은 ^{241}Am 붕괴시 발생하는 60 keV 감마선(4.6×10^{10} gamma/g·s)을 차폐하기 위하여 약 1cm 두께를 가진 텅스텐 용기에 보관되어 있다.

나. 검출기

UNCL에 사용된 검출기는 중성자 검출에 널리 사용되고 있는 ^3He 검출기이며 그 구조는 그림 1과 같다.

^3He 와 중성자와의 반응은 다음과 같이 기술된다.



Discriminator를 사용하여 감마선과 중성자 혼합장으로부터 중성자신호만을 구별하였으며, counting system인 shift resistor(SR)를 사용하여 중성자와 ^{235}U 유도 핵

분열로부터 발생한 동시 중성자 신호를 검출한다.

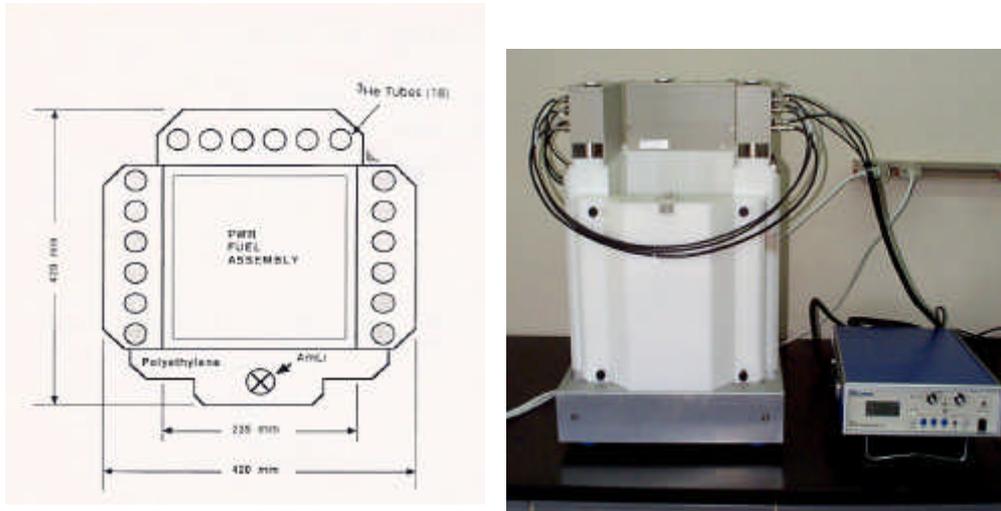


그림 1. UNCL의 구조

다. Shift resistor의 원리[3]

검출기에서 발생한 아날로그 신호는 디지털 신호로 바뀌어 shift resistor(SR)로 입력된다. SR에 신호가 입력되면 특정 시간폭을 갖는 gate (64 μ sec)가 발생되며 그 gate 안에 들어오는 후발 신호를 계수하여 그 값을 scaler(또는 accumulator)에 합산하여 나타낸다.

검출기에 입사하는 중성자 신호는 크게 세 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 U 자체의 (α, n) 반응에서 발생하는 중성자, 두 번째는 U 자체의 자발핵분열에 의하여 발생하는 중성자, 세 번째는 외부중성자와 ^{235}U 의 유도 핵분열로부터 방출되는 중성자이다. 자발핵분열과 유도핵분열로부터 발생하는 중성자는 동시에 여러 개가 발생하므로 이들로부터 발생한 신호는 시간 상관적인 신호라 할 수 있다. 자발핵분열에 의한 시간 상관적 신호발생 확률은 유도핵분열에 의한 것보다 무척 낮으므로 무시 가능하다.

SR에 계수 되는 중성자신호의 시간 특성은 다음과 같다.

만일 U의 (α, n)반응에 의해서 발생한 중성자 신호가 SR에 입사하는 경우 이들 신호들은 시간 독립적인 신호이므로 후발 신호의 발생은 어느 때나 가능하다. 따라서 이러한 시간 독립적인 신호들의 시간분포는 그림 2와 같다.

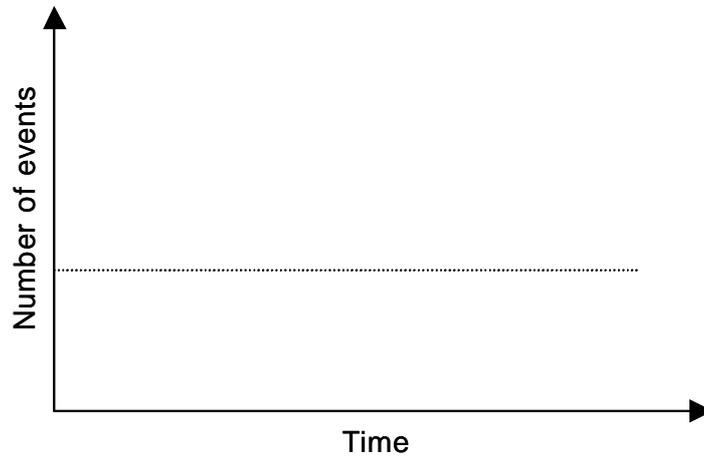


그림 2. Time interval distribution of time-independent signal

그러나 U의 자발핵분열이나 외부 중성자에 의해 발생된 유도 핵분열의 경우 즉발 중성자들간의 시간간격은 nanosecond의 차이로 거의 동시에 발생한다. 이들 고에너지 즉발 중성자들은 폴리에틸렌에서 감속된 후 검출기로 입사한다. 이들 시간상관적인 신호 분포는 그림 3과 같다.

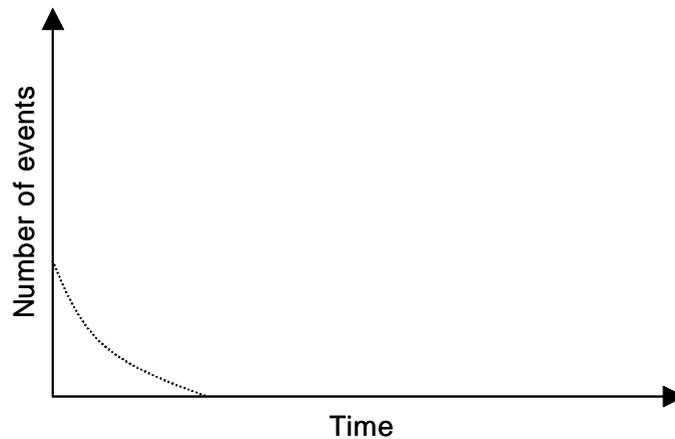


그림 3. Time interval distribution of time-correlated signal

중성자 선원을 사용하여 집합체의 ^{235}U 의 함유량을 측정하는 경우 검출된 계수값의 시간분포는 위의 시간 독립적인 신호와 시간 상관적인 신호가 모두 나타난다. 여기서 시간 상관적인 신호의 면적, 다시 말해 count 수는 대부분 유도 핵분열로부터 발생한 것으로 집합체 내의 ^{235}U 우라늄 함유량과 관련이 있다. 따라서 시간 상관적인 신호의 면적(R : real counts)을 구하기 위하여 그림 4와 같이 시간 독립적인 신호의 면적(A : accidental counts)을 빼 주어야 한다. 시간 독립적인 신호의 면적

은 delay를 사용하여 같은 시간간격을 가지는 새로운 gate를 하나 더 만들어 그 안에 계수된 신호를 합산하면 된다.

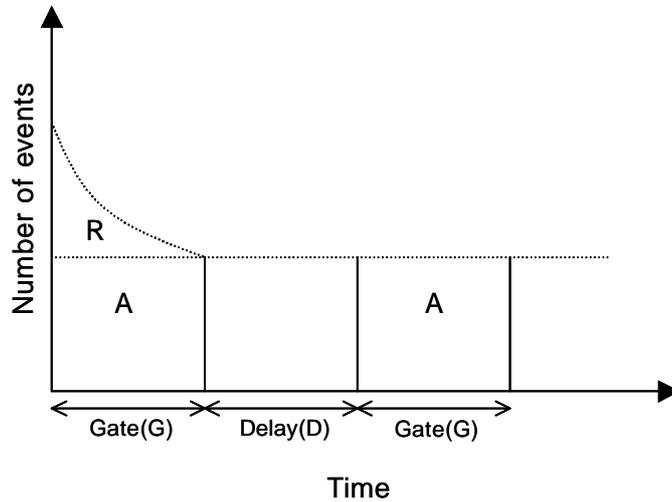


그림 4. Time interval distribution of SR

SR의 전면부에는 gate, delay, 측정시간을 조절하는 기능이 있으며, 총 카운트 수(T), R+A counts, A counts가 display된다.

UNCL을 사용하여 ^{235}U 함량을 측정할 경우, gate = 64 μsec , delay time = 4.5 μsec 로 하였다.

라. 표준 교정곡선

LANL에서는 집합체의 종류(PWR 또는 BWR)와 poison rod의 유무에 따라 4가지의 표준 교정곡선을 구하였다. 이들 교정곡선은 LANL의 표준 UNCL과 표준 선원을 사용하여 구하였다. 교정곡선은 다음과 같은 함수로 기술되며 집합체 종류와 poison rod 유무에 따라 a와 b상수 값이 다르다. 집합체 종류에 대한 상수를 표 1에 정리하였다.

$$R_0 = \frac{aM}{1+bM}$$
 [여기서 R_0 : Real count rate from standard UNCL, assemble and source, M : 단위 길이당 ^{235}U 질량]

표 1. 집합체 종류에 따른 상수 값
(LANL의 표준 UNCL, MRC 95 AmLi 중성자 선원에 대한 값)

PWR-no Cd Liner	PWR-Cd Liner	BWR-no Cd Liner	BWR-Cd Liner
a=9.646±0.216	a=0.4373±0.0047	a=24.91±0.331	a=0.7582±0.0105
b=0.0261±0.0013	b=0.0067±0.00048	b=0.0680±0.0021	b=0.00705±0.00126

마. Cross calibration 방법

위에서 기술한 함수는 표준 선원과 표준 UNCL에 대한 것이다. 그러나 선원과 UNCL 그리고 집합체가 다른 경우 다음과 같은 요소에 대한 보정을 해 주어야 한다.

- 중성자 선원 세기 : k_0
- Electronics drift : k_1
- 검출기 효율 : k_2
- Burnable poison, Gd_2O_3 : k_3
- Heavy metal loading, gU/cm : k_4
- Other conditions : k_5

위의 6가지 항들은 각각 독립적이며 검출기, 선원, 집합체 등이 표준과 다른 경우 다음 식과 같은 보정이 필요하다.

$$kR = (k_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5)R = R_0$$

위의 식은 모든 보정항들이 서로 독립적이라는 가정에서 출발하였다. 이러한 가정은 여러 실험결과로부터 충분히 수용할만한 가정이라는 것이 증명되었다. 만일 모든 실험 조건이 LANL과 같다면 위의 보정항은 1이 된다.

① 중성자 선원 세기 : k_0

중성자선원의 세기 및 붕괴에 따른 보정항이다. 기본 교정곡선을 구하기 위해 사용한 MRC95의 세기는 3.96×10^4 n/s (1989.1)이며, TCNC의 중성자 선원은 6.9×10^4 n/s (1988.1)이다. AmLi 선원의 반감기는 432년이다. 이 경우 보정항 k_0 는 다음과 같이 계산된다.

$$k_0 = \frac{MRC95}{AmLi(TCNC)} e^{\lambda \Delta t}$$

- AmLi(TCNC) : 교정당시 TCNC 소유 AmLi 선원의 세기
- MRC95 : 교정당시 MRC95 선원의 세기
- λ : 0.0016 y^{-1}
- Δt : 교정과 측정 시간차

2002 년 10월 21일 k_0 의 값은 0.586 으로 계산되었다.

② Electronics drift : k_1

측정 전자장비의 신뢰성과 관련된 항이다. 현재 사용하고 있는 AMPTEK electronic는 매우 안정적이며, 이로 인한 검출기의 효율 변화는 1% 이내로 알려져 있다. 따라서 이 보정항은 1이 된다.

③ 검출기 효율 : k_2

UNCL은 선원의 위치 및 검출기에 따라 그 효율이 다르게 나타난다. 선원의 위치는 항상 고정되어 있으므로 그에 따른 영향은 무시가능 하다고 본다. k_2 의 정의는 다음과 같다.

$$k_2 = \frac{R_0(\text{UNCL})}{R_0(\text{TCNC UNCL})}$$

위의 $R_0(\text{표준 UNCL})$ 는 LANL의 표준 UNCL과 표준 선원으로 측정된 real counts 값을 나타내며, $R_0(\text{TCNC UNCL})$ 은 LANL의 표준선원과 표준 집합체를 사용하여 측정된 TCNC UNCL의 real counts를 나타낸다. 검출기 효율을 제외한 나머지 보정항의 조건이 같으므로 $k_1 \times k_2 \times k_3 \times k_4 \times k_5 = 1$ 이된다. 그러나 TCNC 소유의 UNCL은 위의 $R_0(\text{TCNC UNCL})$ 값을 측정하지 않았으므로 독자적으로 k_2 값을 구하여야 한다.

검출기에 대한 보정항은 연구소내 표준집합체를 사용하여 다음과 같이 측정할 수 있다.

$$k_2 = \frac{R_0}{k_0 \cdot k_1 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot R}$$

여기서 k_0 , k_2 를 제외한 나머지 보정항들은 이미 MCNP 계산이나 실험을 통하여 LANL로부터 확인한 값을 사용하였으며, R은 연구소내 표준집합체와 중성자 선원을 사용하여 측정하였다.

④ Burnable poison, Gd_2O_3 : k_3

k_0 , k_1 , k_2 값은 PWR과 BWR에 대하여 같은 값을 적용할 수 있다. 그러나 burnable poison의 경우 PWR과 BWR의 집합체 크기가 다르므로 각각의 집합체에 대하여 다른값이 적용되며, 또한 Cd liner 사용 유무에 따라 k_3 값이 틀리다. 즉 총 4가지의 k_3 를 정의할 수 있다. k_3 에 대한 일반적 정의는 다음과 같다.

$$k_3 = \frac{BP}{BP}$$

우리나라의 경우 PWR만 고려하면 되므로 이에 대한 보정 factor만을 기술하고자 한다. 만일 집합체 내에 burnable poison 이 없다면 k_3 factor는 1이 된다.

PWR에서 burnable poison이 있는 경우 cd liner를 사용하는지 여부에 따라 k_3 값을 다음과 같이 두 종류로 표현할 수 있다. k_3 는 MCNP 시뮬레이션과 측정을 통하여 LANL에서 구하였으며 식은 다음과 같이 표현된다.

㉠ PWR Gd_2O_3 Correction-no Cd

$$k_3 = 1 + \frac{n(9.86)}{N}(1 - e^{-0.647Gd})(1 - 0.176E_n)$$

여기서 n 은 Gd rod의 개수이며, N 은 전체 핵 연료봉의 개수이다. E_n 은 핵연료 집합체의 평균 ^{235}U 의 농축도(%)를 나타내며, Gd 는 연료봉 내의 Gd weight percent 이다.

㉡ PWR Gd_2O_3 Correction-Cd

$$k_3(Cd) = 1 + \frac{n}{N}(0.602)(1 - e^{-0.647Cd})$$

여기서 n은 Gd rod의 개수이며, N은 전체 핵 연료봉의 개수이다.

⑤ Heavy metal loading(우라늄 질량 보정), gU/cm : k_4

집합체내의 단위길이 당 우라늄 양에 따라서 속 중성자의 multiplication, 중성자 산란 등이 다르게 나타난다. 이러한 값의 변화는 측정치에 영향을 주므로 이에 대한 보정이 필요하다. U 단위질량이 1215 g/cm 인 집합체에 대한 값을 1이라고 하였을 때 단위 질량이 다른 집합체를 측정하는 경우 다음과 같은 보정을 해 주어야 한다. 아래의 보정식은 시뮬레이션과 실험을 통하여 얻은 PWR에 대한 함수이다.

$$k_4 = 1 + 3.89 \times 10^{-4}(1215 - U)$$

위의 식은 Cd이 있는 경우와 없는 경우 모두 적용되며, U는 측정 집합체의 단위 길이당 질량 (gU/cm)를 나타낸다.

⑥ Other conditions : k_5

만일 신호에 영향을 줄 수 있는 어떤 인자를 우리가 미리 알고 있다면 그에 대한 보정을 해줄 수 있다. 예를 들면 집합체손상을 방지하기 위하여 곁에 싸고 있는 특수 플라스틱 백 등이 그것이다. 플라스틱 백이 있는 경우 PWR-no Cd 에 대한 k_5 는 0.997 그리고 PWR-Cd에 대한 k_5 는 0.985를 적용한다.

지금까지 cross-calibration에 사용되는 보정항들에 대한 정의를 설명하였다. k_2 를 제외한 나머지 보정항들은 시설에서 신고한 정보를 사용하여 위에서 기술한 식으로 계산할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 k_2 는 실험을 통하여 결정하여야 하며 그 방법은 다음과 같다.

3. TCNC UNCL의 k_2 보정값 결정

k_2 를 측정하기 위하여 자체 제작한 표준 집합체(표 2)와 KNFC의 17×17 집합체를 사용하였다. 이들 집합체는 단위 질량당 우라늄의 함량을 정확하게 알 수 있으므로 다음과 같은 방법으로 k_2 값을 측정할 수 있다.

표 2. TCNC 표준집합체

구분	수량 (ROD)	농축도 (%)	무게(g)			비고
			농축			
			(UO2)	(U)	(²³⁵ U)	
연료봉-III	36	2.34	7674.3	6764.9	158.3	(17X17), 40 cm active length
	36	4.10	7674.3	6764.9	277.4	(17X17) 40 cm active length
계	76		15770.1	13901.3	447.2	

$$R_0 = \frac{aM}{1+bM} = (k_0 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5)R,$$

$$k_2 = \frac{aM}{(1+bM)(k_0 \cdot k_1 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5 \cdot R)}$$

여기서 M = 단위질량당 집합체내의 ²³⁵U 함유량 (g/cm)

R = 측정된 real counts 값

k_n = 보정상수

본 실험에서는 PWR에 대하여 Cd liner가 없는 경우의 k₂를 구하였다. 따라서 표 1에서 기술한 바와 같이 a=9.646±0.216 그리고 b=0.0261±0.0013 의 교정상수를 사용하였다.

측정을 위하여 ³He 검출기의 인가전압을 1680 V로 하였으며, shift resistor의 첫 번째와 두 번째 gate length 는 64 μsec 그리고 delay time은 4.5 μsec 로 고정하였다. ²³⁵U의 단위질량 변화에 따른 R(real counts) 측정값과 표준 교정곡선에서의 R₀ 값 그리고 k₂를 제외한 나머지 보정항들을 계산하여 표 3에 정리하였다. R의 측정시간은 각각의 집합체에 대하여 500 초씩 두 번 측정하였다.

측정결과를 사용하여 계산한 결과 k₂ = 0.594±0.03의 값을 얻을 수 있었다. 이 값을 적용하여 실제 한전연료(주)의 핵연료 집합체를 검증하였다.

표 3. k_2 결정을 위한 UNCL 측정값 및 계산 데이터

번호	$g^{235}U/cm$	gU/cm	R	R_0	k_0	k_1	k_3	k_4	k_5
1	57.746	1283.66	678.0	222.197	0.586	1	1	0.973	1
2	57.707	1282.58	634.3	222.110	0.586	1	1	0.974	1
3	10.893	338.25	177.9	81.814	0.586	1	1	1.341	1
4	6.935	169.12	114.2	56.643	0.586	1	1	1.407	1

4. PWR 집합체 검증 결과 및 결론

실험으로 결정한 k_2 값을 적용하여 실제 한진연료(주)의 집합체를 검증하였다. 측정에 사용한 장비는 UNCL 그리고 JSR-11이며 사용한 소프트웨어는 IAEA에서 제공한 INCC4.0이다. INCC에는 집합체 내의 ^{235}U , ^{238}U 총질량, 집합체 길이, item number, total rod 수, poison rod 수 등 집합체에 대한 모든 정보를 입력하게 되어 있다. 또한 기본 교정곡선에 대한 정보와 k_0 , k_2 의 정보도 사용자가 직접 입력하여야 한다. 나머지 보정항들은 위의 입력정보들을 사용하여 자체적으로 계산을 한다. 세 개의 집합체에 대한 검증을 수행하였으며 그 결과는 표 4와 같다.

표 4. TCNC-UNCL을 사용한 KNFC PWR 집합체 측정 결과

FA item	length (cm)	$^{238}U(g)$	$^{235}U(g)$	Rod total number	Poision rod	Mass residuals result(%)
ky1r44	335.28	408629	19277	264	0	-0.284
ky1r44	335.28	408629	19277	264	0	+3.026
ky1r44	335.28	408629	19277	264	0	-1.530
kk4r17	335.28	411018	19367	264	0	+1.465
kk4r17	335.28	411018	19367	264	0	+0.953
kk4r18	335.28	410670	19348	264	0	+5.873

위의 표에서 mass residuals(%)는 declared ^{235}U 의 질량 대 measured ^{235}U 질량의 차이를 %로 나타낸 것이다. IAEA에서는 UNCL을 사용하여 ^{235}U 단위함량을 측정할 경우 ± 6 %의 오차율을 적용한다. 이 값은 ITV(International Target Value)

문헌[4]에 기술되어 있는 UNCL 장비에 대한 uncertainty component로부터 나온 것이다. ITV에는 UNCL의 우연오차($u(r) = 4\%$)와 계통오차($u(s) = 2\%$)가 명시되어 있다. 그러나 실제 IAEA의 측정 데이터에서도 이 오차를 넘어선 측정값이 관측이 되는 데 그 이유는 장비의 노화에 따른 에러 증가가 요인인 것으로 추정된다.

TCNC UNCL의 측정 결과를 살펴보면 모두 6 % 이내의 오차를 보임을 알 수 있다. 이 결과를 통하여 앞서 구한 TCNC-UNCL의 k_2 값의 신뢰도를 확인할 수 있었다.

위의 결과들은 poison rod가 없는 PWR 집합체에 대한 결과이다. 앞으로 poison rod가 존재하는 집합체의 수요증가가 예상됨에 따라 이에 대한 보정상수 결정이 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Neutron Collar Calibration and Evaluation for Assay of LWR Fuel Assemblies Containing Burnable Neutron Absorbers, LANL, LA-11965-MS (1990), H.O.Menlove et. al.
- [2] Description and Performance characteristics for the Neutron Coincidence Collar for the Verification of Reactor Fuel Assemblies, LANL, LA-8939-MS (1981), H.O.Menlove.
- [3] 중성자 검출법에 의한 핵물질 보장조치 기술, 한국원자력 연구소, KAERI/OT-295/96(1996), 이영길
- [4] International Target Value 2000 for Measurement Uncertainties in Safeguarding Nuclear Material, IAEA, 2000