

Cf252 중성자원을 이용한 유효지발중성자분율 결정
Measurement of the Effective Delayed Neutron Fraction
by Cf252 Fission Source Technique

김택겸, 김영일, 김상지, 김영진

한국원자력연구소

대전시 유성구 덕진동 사서함 105호

Email : tkkim@nanum.kaeri.re.kr

요약

유효지발중성자분율(β_{eff})을 결정하기 위하여 Cf252 중성자원 방법을 이용하여 IPPE의 고속임계로 BFS-55-1과 BFS-73-1에서 β_{eff} 측정 실험을 수행하였다. BFS-55-1과 BFS-73-1 임계노심은 각각 플루토늄과 우라늄 금속연료를 장전하고 있다. 실험적으로 β_{eff} 를 결정하기 위해 필요한 핵분열율, 보정인자 등은 실험에 참가한 IPPE와 KAERI의 계산 체제를 이용하여 각각 계산하였는데, KAERI는 액체금속로 노심설계 전산체제인 K-CORE 코드를 사용하였다. 두 노심의 β_{eff} 값은 각각 405 ± 17 과 748 ± 28 pcm으로 결정되었으며, 이는 IPPE에서 결정한 값과 코드를 이용하여 계산한 값들과 실험오차 범위에서 일치함을 확인하였다.

Abstract

We have measured the effective delayed neutron fraction values with a Cf252 fission source pseudo-reactivity method in two fast critical assemblies, BFS-55-1 and BFS-73-1 of IPPE. BFS-55-1 is a metallic plutonium core and BFS-73-1 is a metallic uranium core. KAERI and IPPE calculated fission integrals and correction factors, which were needed to obtain the experimental β_{eff} values, by their own computation systems. We calculated by using the LMR core design computation code system, K-CORE, of KAERI. Within the error bound, the experiment β_{eff} values, 405 ± 17 and 748 ± 28 pcm respectively, are in reasonable agreement with the calculation and the results of IPPE.

1. 서론

유효지발중성자분율(β_{eff}), 중성자 유효수명, 중성자 평균 속도 등과 같은 동특성 변수는 액체 금속로 천이분석을 위해 매우 중요한 변수들이다. 특히 이 가운데 유효지발중성자분율은 동특성 분석을 위해서 중요할 뿐만 아니라 임계실험을 통하여 측정되는 각종 노물리 자료는 유효지발중성자분율에 대한 상대치로 반응도를 측정하기 때문에 유효지발중성자분율의 정확성이 모든 임계 실험의 정확성을 결정하는 중요한 변수가 된다. 유효지발중성자분율을 측정하기 위한 방법은 Cf252 중성자원(fission source)을 이용한 방법, Rossi- α 방법, VTM(Variance to Mean) 방법 등 다양한 방법이 제시되어 왔는데, 대부분의 방법들은 측정장비를 통하여 얻어지는 핵분열율, 제어봉의 반응도가와 같은 측정값과 핵분열분포, 중요도 분포 등과 같이 계산으로부터 얻어지는 계산값을 조합하여 유효지발중성자분율을 결정하기 때문에 측정방법 뿐만 아니라 계산방법 등에 따라 유효지발중성자분율의 정확성이 결정된다. 최근에 일본원자력연구소의 FCA(Fast Critical Assembly)에서 국제 공동으로 다양한 방법으로 유효지발중성자분율을 측정하였는데[1], 측정방법과 이 실험에 참여한 기관에 따라 결정된 유효지발중성자분율이 약간씩 상이하고, 또한 측정에 사용된 지발중성자 라이브러리에 따라 차이를 보이고 있음이 밝혀졌다[2]. 한편, 한국원자로연구소 액체금속로 노심설계기술개발 팀에서는 액체금속로 노심설계에 사용되는 코드의 검증자료를 확보하고, 유효지발중성자분율 결정과 관련된 실험 방법을 습득 및 측정된 실험치를 이용하여 유효지발중성자분율을 계산해 내는 기술을 확보하기 위하여 러시아 IPPE(Institute of Physics and Power Engineering)의 BFS 임계시설을 이용하여 유효지발중성자분율을 측정하였다.

이 논문의 목적은 Cf252 중성자원을 이용하여 유효지발중성자분율을 측정하는 방법을 소개하고 BFS 임계시설에서 얻어진 실험값과 한국원자력연구소에서 보유하고 있는 액체금속로 노심설계 전산체제로부터 얻어진 계산값을 이용하여 어떻게 유효지발중성자분율을 결정하게 되는지 소개하는 것이 주요 목적이다. 따라서 2장, 3장에서는 각각 Cf252 중성자원을 이용하여 유효지발중성자분율을 결정하는 방법과 BFS 임계 실험을 기술하고, 4장에서는 실험으로부터 계산된 유효지발중성자분율을 소개하고, 5장에서는 결론에 이르게 된다.

2. Cf²⁵² 중성자원을 이용한 유효지발중성자분율 측정 방법

외부 중성자원이 없을 경우에 노심의 중성자원(neutron source)은 중성자 생성량에서 중성자 흡수량을 뺀 상태를 의미하므로 반응도는 다음과 같이 중성자원을 중성자 생성율로 나누어 얻을 수 있다.

$$\rho = \frac{\int_{\text{core}} \langle S_f \rangle dV}{\int_{\text{core}} \langle \nu \Sigma_f \phi \rangle dV} \quad (1)$$

단, S_f 는 외부 중성자원이 없을 경우에 $S_f = \nu \Sigma_f - \Sigma_a$ 과 같이 표현되며, $\langle \rangle$ 는 중성자 에너지에

대한 적분을 의미한다. 식 (1)에서 반응도 단위를 $\$$ 로 표현하기 위하여 식을 수정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho_{\$} = \frac{1}{\beta_{\text{eff}}} \frac{\int_{\text{core}} \langle \chi_f \phi^* \rangle \langle S_f \rangle dV}{\int_{\text{core}} \langle \chi_f \phi^* \rangle \langle \nu \Sigma_f \phi \rangle dV} \quad (2)$$

위 식에서 반응도를 $\$$ 로 표현하기 위하여 식 (1)의 양변을 유효지발중성자분율(β_{eff})로 나누었으며, 핵분열 스펙트럼과 중성자 중요도로 우변의 분자, 분모를 나누었다. 만일 노심 중심에서 핵분열율(fission rate)을 핵분열계수기(fission chamber)의 측정율로 나누는 값을 $\langle \Sigma_f \phi_c \rangle_m$ 로 정의하면 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\langle \Sigma_f \phi_c \rangle_m = \frac{\langle \Sigma_f \phi_c \rangle}{m} \quad (3)$$

단, m 은 측정율을 의미하며 하첨자 c 는 노심 중심을 의미한다. 식 (3)을 이용하여 식 (2)를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\rho_{\$} \cdot m = \frac{1}{\beta_{\text{eff}}} \frac{\int_{\text{core}} \langle \chi_f \phi^* \rangle \langle S_f \rangle dV}{\int_{\text{core}} \langle \chi_f \phi^* \rangle \frac{\langle \nu \Sigma_f \phi \rangle}{\langle \nu \Sigma_f \phi_c \rangle} \langle \nu \Sigma_f \phi_c \rangle_m dV} \quad (4)$$

만일 반응도 변화가 생기지 않도록 제어하면서 세기가 S_c 인 Cf252 중성자원을 노심 중심에 주입시키면 식 (4)는 다음과 같이 변하게 되며,

$$\rho_{\$} \cdot m_c = \frac{1}{\beta_{\text{eff}}} \frac{\int_{\text{core}} \langle \chi_f \phi^* \rangle \langle S_f \rangle dV + \langle \chi_c \phi^* \rangle S_c}{\int_{\text{core}} \langle \chi_f \phi^* \rangle \frac{\langle \nu \Sigma_f \phi \rangle}{\langle \nu \Sigma_f \phi_c \rangle} \langle \nu \Sigma_f \phi_c \rangle_m dV} \quad (5)$$

위 식에서 m_c 는 Cf252 중성자원에 의하여 변화된 측정율을 의미한다. 물론, 식 (5)에서 주입되는 중성자원의 세기가 크지 않기 때문에 노심의 중성자속 분포, 중요도 분포 및 $\langle \Sigma_f \phi_c \rangle_m$ 등에는 영향이 없다고 가정한 것이다. 식 (5)에서 식 (4)을 빼서 정리하면 다음과 같이 유효지발중성자분율을 실험으로 구할 수 있는 식을 얻게 된다.

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{1}{\rho_{\$}(m_c - m)} \frac{\langle \chi_c \phi^* \rangle S_c}{\int_{\text{core}} \langle \chi_f \phi^* \rangle \langle \nu \Sigma_f \phi \rangle dV} \quad (6)$$

위 식을 살펴보면 유효지발중성자분율을 결정하기 위해서 필요한 값은 $\$$ 단위로 표현되는 반응도($\rho_{\$}$), 핵분열계수기를 통하여 얻어진 측정율(m , m_c), Cf252의 세기(S_c), 그리고 노심내 핵분열을 분포와 중요도 분포가 필요하다. 이 가운데 측정율, m , m_c 은 계수기를 통하여 실험적으로 얻을 수 있는 것이며, 세기가 잘 알려진 Cf252 중성자원을 사용하면 중성자원의 세기 S_c 는 실험하기 전에 이미 알려진 값이다. $\$$ 단위로 표현되는 노심 반응도 $\rho_{\$}$ 는 잘 교정된(calibrated)된 제어봉을 삽입함으로써 노심에 주입된 반응도를 $\$$ 단위로 표현할 수 있게 된다. 이때, 제어봉 교정방법으로 널리 사용되는 방법이 다음과 같이 표현되는 positive period technique 방법이다 [2].

$$\rho = \sum_i \sum_k \frac{\beta_{eff,i}^k}{1 + \lambda_i^k T} \quad (7)$$

단, 식 (7)에서 T는 원자로 주기(reactor period)를 의미하며, 하첨자 i 와 k 는 각각 핵종과 지발 중성자군을 의미한다. 따라서 원자로 주기, T를 측정하면 제어봉의 반응도 값이 절대값으로 주어 지지 않지만 \$ 혹은 cent 단위로는 알 수 있게 된다. 마지막으로 핵분열분포와 중요도 분포를 측정하게 되면 식 (6)을 이용하여 유효지발중성자분율을 결정할 수 있다. 그러나 핵분열율을 측정하기 위해서는 노심의 모든 위치에서 핵분열율을 측정해야 하는데, 이는 사실상 불가능하기 때문에 실험을 통하여 핵분열율 측정은 일부 위치에서만 실시하고 나머지 부분에 대한 핵분열율은 계산치를 이용하여 사용하게 된다. 이를 위하여 식 (6)을 다음과 같이 변경하게 된다.

$$\beta_{eff} = \frac{S_e}{\rho_f \cdot Q_f \cdot v_{core} \cdot f} \cdot \left(\frac{F_{x,e}^*}{F_x^*} \right) \quad (8)$$

단,

$$\bar{v}_{core} = \frac{\int_{core} \langle \nu \Sigma \phi \rangle dV}{\int_{core} \langle \Sigma \phi \rangle dV} \quad (9.a)$$

$$f = \frac{\int_{core} \langle \Sigma \phi \rangle dV}{\langle \Sigma \phi_c \rangle} \quad (9.b)$$

$$\left(\frac{F_{x,e}^*}{F_x^*} \right) = \frac{\langle \chi_e \phi_c^* \rangle \int_{core} \langle \nu \Sigma \phi \rangle dV}{\int_{core} \langle \chi \phi^* \rangle \langle \Sigma \phi \rangle dV} \quad (9.c)$$

$$Q_f = \frac{m_e - m}{m} \langle \Sigma \phi_c \rangle \quad (9.d)$$

위 식에서 Q_f 는 핵분열계수기를 통하여 얻어진 측정값과 노심 중앙에서 절대핵분열계수기 (absolute fission chamber)를 이용하여 절대 핵분열율을 측정하여 결정할 수 있는 값이다. 나머지 식 (9.a) ~ 식 (9.c)까지의 값은 계산을 통하여 얻게 된다. 이때, 식 (9.a) ~ 식 (9.c)까지의 값은 분수로 이루어져 있기 때문에 절대값을 알지 못해도 상대적인 중성자속 분포나 중요도 분포에 의하여 결정될 수 있기 때문에 계산값으로 충분하다. 단, 식 (9.a) ~ 식 (9.c)까지의 값을 결정하는데 중요한 역할을 하는 중성자속 분포가 실제 분포와 다를 수 있기 때문에 이를 몇몇 위치에서 측정한 값과 상대적인 분포가 일치하도록 보정하게 된다.

3. 유효지발중성자분율 측정 실험

3.1. BFS 임계시설

유효지발중성자분율은 BFS시설을 이용하여 두 가지 서로 다른 핵연료 조성을 가지는 노심에 대하여 실시하였는데, 하나는 금속 우라늄 연료가 장전된 BFS-73-1[3] 노심이며, 다른 하나는 플루토늄 연료가 장전된 BFS-55-1[4] 노심이다. 노심의 형태는 전체적으로 육각형 모양을 하고 있는데, 노심의 중앙에 금속연료를 장전하고 이를 상하 40~50cm, 반경방향은 약 40cm의 반사체를 두었다. 핵연료는 직경 50mm의 핵연료봉에 pellet 형태로 제작된 핵연료와 감속재를 그

림 1과 같이 번갈아 가면서 노심 중앙에 약 100cm 정도 장전하였기 때문에 평균적으로 BFS-55-1 노심은 10% 농축된 플루토늄이, BFS-73-1 노심은 18% 농축된 우라늄 노심이다. 표 1은 BFS 노심을 간략히 요약한 것이다.

표 1. BFS 임계 노심에 대한 요약

	BFS-55-1	BFS-73-1
노심 핵연료 (평균 농축도)	Metal Plutonium (10%)	Metal Uranium (18%)
핵연료 봉 수	362	425
등가 반경	50.95 cm	55.20 cm
높이	102.30 cm	98.30 cm
반경방향 블랑켓 물질	Depleted UO ₂	Depleted UO ₂
두께	39.50 cm	34.93 cm
축방향 블랑켓 물질	U ₂₃₈ & Depleted UO ₂	Depleted UO ₂
두께	41.10	49.73 cm

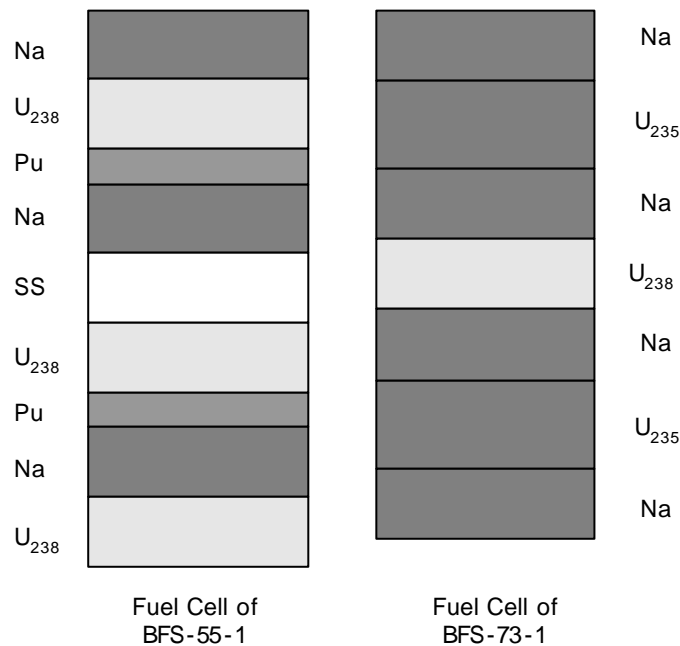


그림 1. BFS 임계 노심의 Pellet 배치도

3.2. 측정 및 계산

유효지발중성자분율을 결정하기 위하여 측정해야 할 변수는 식 (8)에서 S_e , ρ_f , Q_f 등이며 나머지는 계산값으로 사용하게 된다. 이 가운데, S_e 및 ρ_f 는 2절에서 설명한 바와 같이 주어지거나 교정 값으로 이미 알려져 있는 값이므로, Q_f 만을 실험으로 결정하면 되는데, BFS 임계 실험

에서는 Pu239 절대 핵분열측정기를 노심 중앙에 넣어 노심 중앙에서의 절대 핵분열율을 측정하여 Q_f 를 결정하였다. 식 (9.a) ~ (9.c)는 계산값을 사용하게 되는데, 이 중에 식 (9.a)와 식 (9.c)는 계산값과 실험값의 차이가 거의 없기 때문에[5] 계산치를 보정하지 않지만 식 (9.b)와 같이 주어지는 핵분열율 분포는 계산값을 보정하게 된다. 따라서 보정에 필요한 핵분열율을 측정하기 위하여 노심 중앙으로부터 반경방향과 축방향으로 Pu239 혹은 U238 핵분열계수기를 일정한 간격으로 움직이면서 핵분열율을 측정하고 측정된 핵분열율은 노심 중앙에서 측정한 값으로 규격화하였다. 한편, 식 (9.a) ~ 식 (9.b)와 같은 계산값을 구하기 위해 사용된 전산체제는 한국원자력연구소가 보유하고 있는 액체금속로 노심해석용 전산체제인 K-CORE 전산체제[6]를 사용하였는데, 이 전산체제는 9군 유효군정수를 이용하여 노심내 중성자속 및 수반중성자속을 계산할 수 있으므로 식 (9.a) ~ (9.c)를 계산하기에 충분하다. 그러나 K-CORE 전산체제가 사용하는 유효군정수는 균질 핵연료에 대한 군정수이므로 그림 1과 같이 주어지는 비균질 핵연료가 장전된 노심에 대해서는 비균질효과(heterogeneous effect)를 보정해야 하는데, 이는 K-CORE 전산체제의 군정수 생산코드인 TRANSX 코드의 비균질 계산 방법을 이용하여 계산하였다. 표 2와 그림 2는 K-CORE 전산체제를 이용하여 계산된 핵분열율을 노심 중앙 핵분열율로 규격화 한 후 이를 측정값과 비교하였다. 표 2와 그림 2를 보면 계산값과 측정값이 비교적 잘 일치하지만 앞 절에서 설명한 바와 같이 식 (9.b)의 분자에 주어진 노심 전체의 핵분열율을 측정값을 이용하여 다음과 같이 보정되어야 한다.

$$I_f^{measured} = I_f^{calculated} \cdot f_{hetero} \cdot \frac{\sum_m V_m \sum_f F_f^{m, measured}}{\sum_m V_m \sum_f F_f^{m, calculated}} \quad (10)$$

단, 위 식에서 m 과 f_{hetero} 는 각각 핵분열율 측정 위치와 비균질효과를 의미하며, I_f 와 F_m^f 는 다음과 같이 정의되는 변수이다.

$$I_f = \int_{core} \langle \Sigma_f \phi \rangle dV \quad (11.a)$$

$$F_m^f = \int_m \langle \Sigma_f \phi \rangle dV \quad (11.b)$$

표 2. BFS-55-1의 규격화된 핵분열율에 대한 C/E

Z \ R	2.9 cm	23.7 cm	32.4 cm	41.2 cm	47.2 cm
0.6 cm	1.000/1.00*	0.937/0.995	0.950/0.972	0.945/0.958	0.925/0.948
22.2 cm	1.027/1.029	1.011/1.028	0.991/1.005	0.963/0.988	0.930/0.957
32.2 cm	1.022/ -	1.004/ -	0.969/ -	0.956/ -	0.937/ -
40.7 cm	0.941/0.917	0.925/0.920	0.906/0.902	0.827/0.877	0.862/0.834

* Pu239/U238

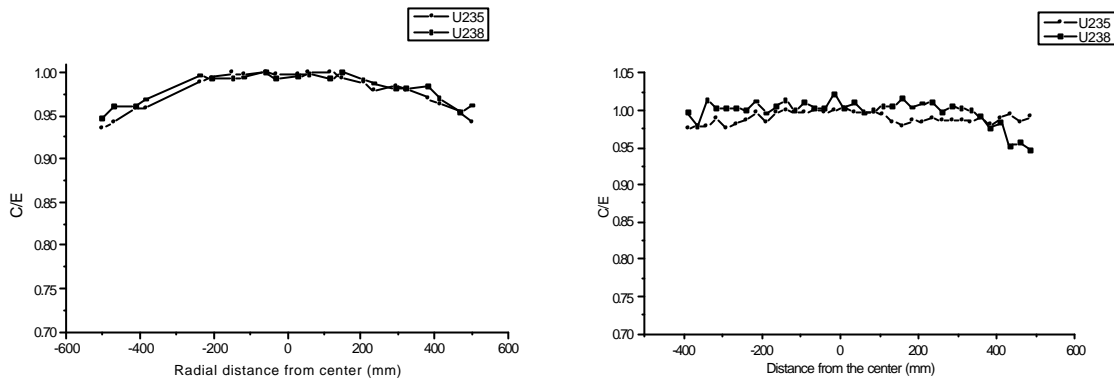


그림 2. BFS-73-1의 규격화된 핵분열율에 대한 C/E(좌: 반경방향, 우:축방향)

4. 유효지발중성자분율 결정

BFS 실험에서 얻어진 측정값과 계산값을 이용하여 유효지발중성자분율을 계산하여 표 3에 나타내 보았다. BFS 임계 실험은 러시아 IPPE와 공동으로 수행하였기 때문에 IPPE 에서도 같은 실험자료를 이용하여 유효지발중성자분율을 결정하였는데, 표 4는 두 기관의 결과를 비교한 것이다. 한편, 표 4에는 한국원자력연구소에서 육각형 노달전개법을 기초로 개발된 유효지발중성자분율 계산코드 BETA-K [7] 결과도 함께 수록하였다.

표 4와 같이 주어지는 계산 결과를 분석해 보면 플루토늄 노심인 BFS-55-1의 유효지발중성자분율은 IPPE와 KAERI의 실험치 및 계산치가 비교적 일치된 결과를 얻을 수 있었으나, 우라늄 노심인 BFS-73-1에 대한 유효지발중성자분율 계산 결과에서는 Cf252 방법에 의해 결정된 IPPE의 유효지발중성자분율이 다른 값보다 적게 나타나고 있음을 알 수 있다. 여기서 주목되는 것은 같은 실험값을 사용하고 있지만, IPPE와 KAERI에서 각각 결정한 유효지발중성자분율이 차이를 보이고 있는 것은 식 (9.a) ~ (9.c)와 같이 주어지는 계산값의 차이에 의한 것으로 판단된다. 특히 우라늄 노심인 BFS-73-1에서 차이가 있는 것은 두 기관의 군정수 가운데 U235 혹은 U238 핵분열 군정수가 서로 차이나고 있음을 의미하는 것이다. 이러한 결과는 참고문헌 [1]에서도 나타나고 있는데 IPPE가 Cf252 중성자원 방법을 이용하여 유효지발중성자분율을 결정한 값이 다른 기관에서 결정한 값보다 일반적으로 낮게 나타나고 있다. 표 4에서 또 한가지 주목할 사실은 KAERI가 Cf252 중성자원 방법으로 결정한 유효지발중성자분율과 계산코드 BETA-K로 계산한 값이 거의 일치한 결과를 보여주고 있는데, 이는 Cf252 중성자원 방법에서 사용되는 중성자속 계산 모듈과 BETA-K의 계산 모듈이 일치하기 때문인 것으로 판단된다.

표 3. BFS 임계실험으로부터 결정한 유효지발중성자분율

		BFS-55-1	BFS-73-1
측정 값	$S_d(\rho_4 \cdot Q_f)$	9.610±0.271	24.261±0.777
계산값	\bar{v}_{core}	2.887	2.524
	F_{Xe}/\bar{F}_X	1.830	1.743
	I_f	1504±45	2238±45
	$I_f^{calculated}$ f_{hetero} (C/E) correction	1427 1.037 1.017	2210 1.012 1.001
β_{eff} (pcm)		404.9±17	748.4±28

표 4. BFS 임계노심의 유효지발중성자분율 비교 (단위 pcm)

계산기관	계산 방법	BFS-55-1	BFS-73-1
IPPE	Cf252 방법	416±17	720±27
	Rossi -a 방법	-	740±15
	Code로 계산	396	736
KAERI	Cf252 방법	405±17	748±28
	BETA-K	406	745

5. 결론

플루토늄과 우라늄이 각각 장전된 두 임계 노심 BFS-55-1과 BFS-73-1에 대해 러시아 IPPE와 공동으로 유효지발중성자분율을 결정해 보았다. 특히 BFS-73-1 노심에 대해서는 공동으로 실험 수행하여 유효지발중성자분율 실험방법을 습득하였으며, 실험을 통해 얻어진 실험값과 실험으로 측정할 수 없는 변수는 계산을 통하여 얻은 값을 사용하여 유효지발중성자분율을 결정하였다. 결정된 유효지발중성자분율의 정확성을 검증하기 위하여 IPPE의 계산 결과와 KAERI의 계산 결과를 상호 비교하였으며, 또한 두 기관에서 보유하고 있는 유효지발중성자분율 계산 코드를 이용하여 코드로부터 얻어진 값도 서로 비교해 보았다. 실험에 의하여 결정된 유효지발중성자분율을 비교해 보면 플루토늄 노심에 대해서는 두 기관의 계산값이 실험 오차 범위에서 일치하고 있으나 우라늄 노심인 경우는 Cf252 중성자원 방법으로 계산한 IPPE 결과가 다른 결과에 비하여 낮게 나타나고 있다. 이는 IPPE와 KAERI간의 U235 혹은 U238 핵분열 균정수가 차이 나기 때문이다. 한편, Cf252 중성자 방법으로 유효지발중성자분율을 계산할 때 사용되는 중성자속 계산 모듈과 BETA-K에 사용되는 중성자속 계산 모듈이 일치하기 때문에 BETA-K에 의해 계산된 유효지발중성자분율이 실험값과 완전히 일치하는 결과를 얻었다.

감사의 글

이 논문은 대한민국 과학기술부에서 시행하는 원자력 중장기 사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. T. Sakurai, et al., "Benchmark Experiments of Effective Delayed Neutron Fraction β_{eff} in JAERI-FCA," Int. Conf. Physics and Nuclear Science and Technology, Long Island(1998).
2. S. Okajima, et al., "Evaluation of Delayed Neutron Data Using FCA β_{eff} Benchmark Experiment," J. Nucl. Sci. Technol. 35, 963(1998)
3. "Results of Measurement on Benchmark Core of BFS73-1 Critical Assembly," IPPE (1997)
4. "Results of Measurement on Benchmark Core of BFS73-1 Critical Assembly," IPPE (1992)
6. T. Sakurai, "Benchmark Experiments of Effective Delayed Neutron Fraction β_{eff} at FCA, JAERI," Internal report between KAERI and JAERI(1997).
7. Y. C. Kim, "Development of LMR Design Technology," KAERI/RR-1528/94(1995)
8. Taek Kyum Kim, "Development of An Effective Delayed Neutron Fraction Calculation Code, BETA-K," KAERI/TR-1120/98, Korea Atomic Energy Research Institute(1998).