

《Technical Report》

核分裂 중성자스펙트럼이 核計算에 미치는 影響 (Effects of Fission Neutron Spectra in Reactor Calculations)

김 정 도 · 이 증 태

한국에너지연구소
(1983. 8. 23, 접수)

요 약

핵분열 중성자스펙트럼이 원자로핵계산에 미치는 영향을 고속임계로심의 임계계산을 통해 다각적으로 분석하였다. 검토된 내용은 Maxwell식과 Watt-Cranberg 형의 식 적용, 영역별 스펙트럼자료의 적용, Maxwell식에서 핵온도 선정에 따른 효과, 우라늄과 플루토늄의 가중평균된 스펙트럼자료의 적용, 노심내 전에너지에 따른 핵온도를 고려한 스펙트럼자료의 적용 등이다.

Abstract

Effects of fission neutron spectra in the reactor calculations have been analysed through applications of several cases of spectra in the criticality calculations of fast critical assemblies. They were the application of Maxwellian or Watt-Cranberg type formulae, of region dependent spectrum, of composition dependent spectrum, of fission transfer matrix, and the effects due to the selection of nuclear temperature in Maxwellian formula.

1. 序 論

原子爐核計算에 이용되고 있는 多群 확산코드나 수송코드의 入力핵자료중의 하나인 핵분열 중성자 스펙트럼(核分裂線源) 자료는 모든 핵계산코드에서 핵연료의 構成成分이나 爐心領域에 관계없이 우라늄235(U-235)나 플루토늄239(Pu-239)에 관한 핵분열선원자료중의 한 값이 사용되고 있다. 또한 대부분의 원자로에서 우라늄238(U-238)의 核分裂寄與는 작지만 핵연료내의 含有量이 U-238나 Pu-239보다 많다. 특히 고속로의 부랑켓트나 臨界로심의 反射體영역에는 U-238이 거의 전부를 차지하고 있다. 따라서 핵분열에 기여하는 핵종들의 핵분열선원값이 각기 다르다면 핵계산에서 이들 각각에 대한 考慮가 있어야 할 것이다.

현재 핵분열선원 계산에는 Maxwell식이나 Watt-Cranberg형의 식이 이용되고 있다.¹⁾

Maxwell식은 임사 중성자에너지 E 에 대해

$$\chi(E) \propto \sqrt{E} \exp(-E/T)$$

로 표시되는 核溫度 T 의 함수로,

그리고 Watt-Cranberg형의 식은

$$\chi(E) \propto \exp(-E/a) \sin h \sqrt{bE}$$

로 표시되는 a 와 b 두 파라메타의 함수로 표시되며 T 나 a, b 값은 완만하기는 하나 임사중성자에 따라 변한다.

그러나 현재 핵계산에 이용되고 있는 각종 群斷面積 라이브라리에 내장된 핵분열선원자료나 실제 계산에 이용되고 있는 거의 모든 자료는 임사 중성자에너지를 하나의 대표값으로 하여 처리한 群資料이고, 그것도 U-235나 Pu-239에 대한 자료만이 이용되고 있다.

원자로핵계산에 입력되는 群斷面積자료를 생산하기 위해 이용되고 있는 基本 核資料源중에서 평가핵자료 파일인 ENDF/B나 KEDAK에는 핵분열선원계산을 위한 자료가 수록되어 있는데 ENDF/B-III와 IV에서는 Maxwell식, ENDF/B-V와 KEDAK-3에서는 Watt-Cranberg형의 식에 대한 자료를 주고 있다. ENDF/B 자료는 T 나 a, b 값이 임사 중성자에너지의 함수로 표시되어 있고 KEDAK-3 자료는 a 와 b 값이 각각 0.965

MeV 및 2.29 MeV^{-1} 인 Cranberg 식으로 주어져 있다. 따라서 핵분열선원 계산과정에서 입사중성자의 대표값 選定에 따라 서로 다른 자료가 생산되고, 이는 핵계산 결과에 영향을 주게 된다.

이와같은 문제와 관련하여 E. Kiefhaber 등은²⁾ ABBN세트 자료와 ENDF/B-III 및 KEDAK 자료를 이용한 결과를, 국내의 陸根億은³⁾ 고속로용으로 생산된 각종 群定數세트의 핵분열선원자료에 의한 영향을, 그리고 최근에 魯聖基등은⁴⁾ Maxwell, Watt 및 Cranberg 식에 의한 결과를 서로 비교하고 있다. 또한 핵연료의 구성성분이나 노심영역별 핵분열선원자료의 선택이 핵계산에 미치는 영향에 관해 E. Kiefhaber 등²⁾, R.B. Kidman 등⁵⁾ 및 H. Takano 등이⁶⁾ 각각 報告한 바 있다.

이 報告書에서는 핵분열선원이 핵계산에 미치는 영향을

- 1) Maxwell식과 Watt-Cranberg型의 式 적용
- 2) 영역별 핵분열선원자료의 적용
- 3) 우라늄과 플루토늄의 加重平均된 핵분열선원자료의 적용
- 4) Maxwell식에서 핵온도의 선정
- 5) 노심내 전에너지에 따른 핵온도를 고려한 핵분열선원의 적용

등으로 구분하여 고속임계로심과 대형 고속로심을 대상으로 검토, 분석하였다.

2. 核分裂線源 計算

입사 및 핵분열 중성자에너지를 각각 E, E' 라 하고 핵분열중성자의 에너지분포를 $\chi(E \rightarrow E')$ 라 하면 i 群의 핵분열중성자 스펙트럼은 $\nu(E)\sigma_f(E)\phi(E)$ 를 加重函數로 하여

$$\chi_i = \frac{\int dE \int_i dE' \nu(E) \sigma_f(E) \chi(E \rightarrow E') \phi(E)}{\int dE \nu(E) \sigma_f(E) \phi(E)} \quad (1)$$

로 구해진다.

그러나 만일 $\chi(E \rightarrow E')$ 값이 고려되고 있는 에너지영역내에서 E 값에 따라 큰 변화가 없는 量이라면

$$\chi_i = \int_i dE' \chi(E^* \rightarrow E') \quad (2)$$

단 E^* 는 적절히 선정된 E 의 대표값로 부터 群核分裂線源값을 구할 수 있다.

계산에 적용된 Maxwell 式과 Watt-Cranberg型의 式은 각각 다음과 같다.

$$\chi_i = \int_i \sqrt{\frac{4E'}{\pi T}} \exp(-E'/T) dE' \quad (3)$$

$$\chi_i = \int_i \left(\frac{4}{\pi a^3 b} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{ab}{4}\right) \exp(-E'/a) \cdot \sin h \sqrt{bE'} dE' \quad (4)$$

2-1. E^* 값의 결정

거의 모든 원자로핵계산에서는 (1)식을 적용하기 보다는 (2)식에 의한 값을 핵분열선원자료로 사용하고 있으며 실제로 적절한 E^* 값의 선정에 따라 좋은 결과를 얻기도 한다.

E^* 값으로 R.B. Kidman 등은⁵⁾ 1 MeV, R.W. Hardie 등은⁶⁾ 2 MeV를 택하여 고속로용 다군 군정수자료로 사용하고 있으며 H. Takano 등은⁷⁾ 원자로내의 전에너지 영역에 걸쳐 상하에서의 각 핵분열反應率의 습이 같아지는 점을 찾아 E^* 값으로 선정, 사용하고 있다.

즉,

$$\int_0^{E^*} \sigma_f(E) \phi(E) dE = \int_{E^*}^{\infty} \sigma_f(E) \phi(E) dE \quad (5)$$

의 관계를 만족하는 E^* 값을 택하고 있다.

실제로 H. Takano 등 은⁸⁾ JFS-V-II 세트에서 1,000 MWe급의 LMFBR스펙트럼을 갖는 ZPPR-2의 노심평균 중성자속을 이용하여 E^* 값을 구했는데 U-235 및 Pu-239에 대해 200 keV를 얻었고, U-238에 대해서는 2 MeV를 적용하였다. 금번 계산과정에서도 E^* 값으로 위의 값을 사용하였다.

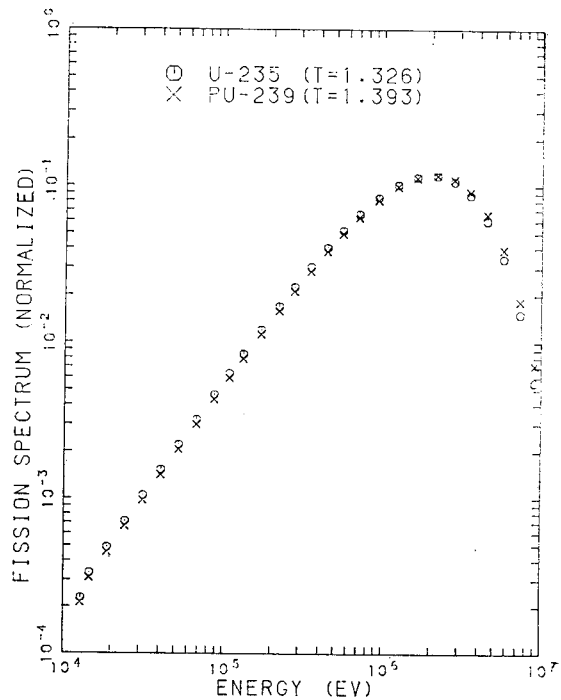


그림 1. U-235 및 PU-239 핵분열 중성자스펙트럼

이제 이 E^* 값에 해당하는 핵온도 T 를 ENDF/B-IV 파일에서 찾아 보면

$$U-235 : T=1.326 \text{ MeV}$$

$$U-238 : T=1.330 \text{ MeV}$$

$$Pu-239 : T=1.393 \text{ MeV}$$

이로 ENDF/B-V 파일에서는

$$U-235 : \begin{cases} a=0.988 \text{ MeV} \\ b=2.249 \text{ MeV}^{-1} \end{cases}$$

이다. 그리고 a 와 b 가 Cranberg의 값으로 주어진 KEDAK-3 파일에서는

$$U-235 : \begin{cases} a=0.965 \text{ MeV} \\ b=2.29 \text{ MeV}^{-1} \end{cases}$$

이다.

이들 파라메타값을 (3)식과 (4)식에 입력하여 핵분열선원자료를 계산하였다. 그림 1의 U-235($T=1.326$)와 Pu-239($T=1.393$)에 대한 Maxwell 스펙트럼에서 Pu-239의 핵분열선원이 약간 硬化되어 있음을 보여주고 있다.

2-2. 加重平均 핵분열선원

핵연료중에 포함된 핵분열성물질은 단일 핵종이기 보다는 우라늄이나 플루토늄의 여러가지 동위원소들의 복합물로 이루어져 있다. 따라서 이 속에서의 핵분열을 U-235나 Pu-239만의 핵분열선원으로 처리함은 정확한 계산일 수 없다. 그러므로 구성성분 각각의 영향을 고려한 加重平均 핵분열선원을 구할 필요가 생긴다.

이를 위해 핵연료 구성성분중 주종을 이루는 U-235, U-238 및 Pu-239의 구성성분으로 加重平均된 핵분열선원을 다음과 같이 계산하였다. 즉, i 群, j 核種의 加重值 W_j 는 j 核種의 원자수밀도를 N_j 라 할때

$$W_j = \sum_i N_j \sigma_{fj}^i \phi^i \quad (6)$$

로 하고 가중평균된 핵분열선원 $\bar{\chi}$ 값은

$$\bar{\chi} = \frac{\sum_{j=1}^3 W_j \chi_j^i / \sum_{j=1}^3 W_j}{\sum_{j=1}^3 W_j} \quad (7)$$

단, $j=U-235, U-239$ 및 $Pu-239$

로 구하였다.

이 때의 중성자속 ϕ 는 대상로심의 핵계산과정에서 (6)식과 (7)식을 이용한 핵분열선원으로 로심체적적분 중성자속의 반복계산을 수행하여 그 수렴치를 적용하였다.

2-3. 핵온도의 에너지존성을 고려한 핵분열선원

현재 사용되고 있는 대부분의 군단면적자료에서 볼 수 있는 핵분열선원자료는 (2)식에 의한 계산결과이다. 그러나 만일 $\chi(E \rightarrow E')$ 값이 노심내의 전에너지에 따라 변하는 물이라면 (1)식을 (2)식으로 대체할 수 없다.

따라서 群核분열선원은 노심내 전에너지영역을 포함하는 입사 중성자에너지와 핵분열 중성자에너지의 매트릭스로부터 축약하여 구해진다.

이를 위해 NJOY 코드에 노심에 관계없이 공통으로 Maxwell, $1/E$ 및 핵분열스펙트럼을 연결한 중성자속을 적용하여 ENDF/B-IV의 Pu-239에 대한 자료로부터 26群의 핵분열선원을 계산하였다.

3. 臨界計算 및 論議

원자로핵계산에서 핵분열선원자료의 변화에 따른 有效增殖係數(K_{eff})값의 변화를 알아보기 위해 CSEWG에서 추천한 벤치마크 고속임계로심중에서 표 1과 같이 6개의 우라늄로심과 5개의 혼합산화물로 심을 해석 대상으로 선정하였다. 그밖에 대형고속로심에 관한 영향을 검토하기 위해 1,200MWe 급인 Superphenix 1차로심을 모의하여 초기로심과 480일 연소로심을 택하였다.⁸⁾

핵계산을 위한 群斷面積자료로는 ENDF/B-IV로부터 생산된 26群의 KAERI-26G 세트, 그리고 핵계산용 전산코드로는 1차원 확산코드 1DX가 이용되었으며 대형고속로심의 연소계산에는 별도로 2차원 확산코드 2DB가 이용되었다.

多領域로심의 핵계산에서는 영역별 핵분열선원에 의한 계산이 바람직하다. 실제로 고속로심에서는 노심내에서도 핵연료 구성성분이 서로 다른 몇개의 영역으로 구분되기도 하지만 부랑켓트나 반사체영역은 노심과 구성성분에서 큰 차이를 보이게 되므로 이를 고려할 필요가 생긴다. 그러나 현재 사용중인 모든 핵계산코드들은 영역별로 자기 다른 핵분열선원을 고려할 수 없게 되어 있다. 본계산에서는 1DX를 수정하여 두개 영

표 1. 벤치마크용 고속임계로심 특성

Assembly	Fissile Fuel	Fertile-to-Fiss. Ratio	Approx. Core Vol. (liter)	Ref.-to-Core Vol. Ratio
VERA-1B	U	0.081	30	
ZPR-3-6F	U	1.1	50	
ZPR-3-12	U	3.8	100	
ZPR-3-11	U	7.5	140	
ZEBRA-2	U	6.2	430	
ZPR-6-6A	U	5.0	4000	
ZEBRA-3	Pu	8.6	60	10.9
SNEAK-7A	Pu	3.0	110	7.6
SNEAK-7B	Pu	7.0	310	4.3
ZPR-3-48	Pu	4.5	410	3.6
ZPR-6-7	Pu	6.5	3100	1.6

역에 별개의 스펙트럼을 사용한 계산이 가능하도록 하였다. 또한 고속임계로심은 모두 1차원 球形으로, 그리고 Superphenix 1차로심은 노심영역과 부랑켓트영역만의 2영역 1차원 원주형으로 단순하게 처리하여 해석하였다.

각각의 고려된 핵분열선원에 의한 계산결과는 다음과 같은 기준값과의 차로 비교하였다.

즉,

$$\text{변화량}(\%) = \frac{\text{계산값} - \text{기준값}}{\text{기준값}} \times 100$$

3-1. Maxwell 및 Watt-Cranberg형 핵분열선원 비교

핵분열 중성자스펙트럼 계산을 위한 경험식들 간의 차에서 오는 임계계산에 대한 영향을 표 1의 6개 우라늄로심에 대해 검토한 결과는 그림 2와 같다.

그림 2는 ENDF/B-IV (Maxwell 자료)를 기준으로 하고 ENDF/B-V (Watt-Cranberg자료)와 KADAK-3 (Cranberg자료)에 의한 결과를 비교한 것이며 KAERI-26G 세트의 결과도 함께 비교한 것이다.

계산결과는 ENDF/B-IV와 KADAK-3의 결과가 0.14% 이내에서 서로 일치하고 있다. 그러나 ENDF/B-V와 KAERI-26G의 결과는 각각 최고 0.61%와 0.5%의 큰 차이를 보이고 있는 반면에 노심에 따라서는 0.1%의 차로 접근하기도 한다.

따라서 특정 스펙트럼계산식이 노심의 핵계산에 적합하다는 단적인 결론을 내릴수가 없으며 두 선원 모

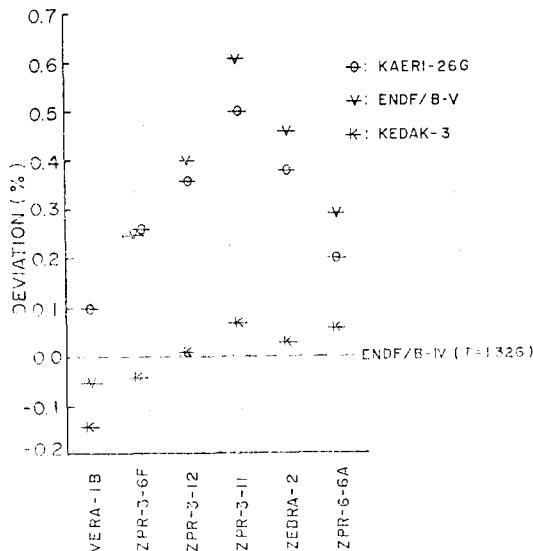


그림 2. Maxwell과 Watt-Cranberg형 핵분열선원에 의한 Keff의 비교(T=1.336 MeV의 Maxwell 식기준)

두가 노심의 핵계산에 사용될 수 있음을 알 수 있다.

3-2. 영역별 핵분열선원 적용

표 1의 혼합산화물연료에 의한 임계로심에서는 반사체영역에 천연우라늄이나 감손우라늄(depleted uranium)이 사용되고 있다. 그런데 이를 위한 일반적인 핵계산에서는 노심과 반사체 전영역에 Pu-239의 단일 핵분열선원자료를 사용하고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 Pu-239 자료는 우라늄자료에 비해 硬化되어 있다. 이 효과를 알아보기 위해 노심영역에는 Pu-239, 그리고 반사체영역에는 U-238의 핵분열선원을 적용한 계산결과는 표 2와 같다.

표 2. 영역별 Pu-239(노심) 및 U-238(반사체) 스펙트럼 적용결과

임 계 로 심	변 화 량*(%)
ZEBRA-3	-0.10
SNEAK-7A	-0.10
SNEAK-7B	-0.05
ZPR-3-48	-0.07
ZPR-6-7	-0.03

* 단일 Pu-239 핵분열선원 기준

결과는 최고 0.1% 정도의 차이를 보이고 있으며 이는 반사체대 노심체적 비가 클수록 커지고 있다. 실제로 그 비가 66.4인 12cc의 고농축 소형로심인 VERA-11A에 영역별선원을 적용한 결과 단일선원의 계산결과와는 0.2%의 차를 나타냈다.

3-3. 加重平均 핵분열선원 적용

2-2절에서의 加重平均을 위한 각 임계로심과 대형로심의 加重値계산결과는 표 3과 같다. 그리고 이들을 (7)식에 대입하여 구한 加重平均된 핵분열선원을 노심영역에, U-238의 핵분열선원을 반사체 혹은 부랑켓트

표 3. 계산된 가중치

노 심	U-235	U-238	Pu-239
ZEBRA-3	0.041	0.236	0.723
SNEAK-7A	0.020	0.101	0.879
SNEAK-7B	0.105	0.173	0.723
ZPR-3-48	0.009	0.123	0.868
ZPR-6-7	0.013	0.123	0.864
SUPERPHENIX-1			
(초 기)	0.028	0.122	0.850
(480일연소)	0.021	0.122	0.857
	(0.217)*	(0.329)	(0.454)

*부랑켓트영역

표 4. 가중평균된 핵분열선원 적용결과

노심	변화량*(%)
ZEBRA-3	-0.33
SNEAK-7A	-0.13
SNEAK-7B	-0.24
ZPR-3-48	-0.13
ZPR-6-7	-0.09
SUPERPHENIX-1 (초기)	-0.08
(480일 연소)	-0.10

*단일 Pu-239 핵분열선원 기준

에 적용한 계산결과를 Pu-239 단일선원에 의한 계산결과와 비교하면 표 4와 같다.

즉 ZEBRA-3 노심에서 최고 0.33%의 차를 보이고 대형 고속로심에서는 초기와 480일의 연소로심에서 다 같이 0.1% 정도의 차를 보이고 있다.

이는 노심영역에서 Pu-239의加重值(표 3)가 0.72인 ZEBRA-3나 SNEAK-7B에서 큰 차를 보이며 그밖에는 0.1%선에 머물고 있다. 따라서 대형 고속로심의 임계계산에서도 Pu-239의 단일선원에 의한 계산은 0.1%의 과대평가가 예상된다.

3-4. Maxwell 식에서의 핵온도선정

Maxwell식에 의한 핵분열선원은 핵온도 T 값에 의존하므로 T 값의 선정이 직접 핵계산에 영향을 미친다. 이 영향을 알아보기 위해 $T=1.393$ 을 기준값으로 각각 1 및 2%의 T 값 증가에 따른 K_{eff} 의 변화를 조사하였다.

표 5에서 보는 바와 같이 T 값의 +1% 변화에서 K_{eff} 값의 변화가 약 0.2% 이내였으나 +2% 변화에서는 ZEBRA-3와 SNEAK-7B가 각각 0.44 및 0.33%의 증가를 보이고 있다. 이 +2%의 증가는 ENDF/B-IV에

표 5. 핵온도의 변화에 따른 K_{eff} 의 변화

노심	변화량*(%)	
	$T=1.407$	$T=1.421$
ZEBRY-3	0.22	0.44
SNEAK-7A	0.12	0.24
SNEAK-7B	0.17	0.33
ZPR-4-48	0.13	0.27
ZPR-6-7	0.21	0.24
SUPERPHENIX-1 (초기)	0.11	0.22
(480일 연소)	0.12	0.23

* $T=1.393$ MeV 기준

서 중성자에너지가 약 2 MeV에 해당한다. 따라서 (2)식의 E^* 값의 선정이 핵계산에 결정적인 영향을 초래하고 있음을 알 수 있다.

3-5. 매트릭스법에 의한 핵분열선원 적용

실제로 핵분열선원 계산에서 핵온도의 에너지존성을 고려하는 것이 보다 정확한 계산 방법일 것이다. 이를 위해 앞의 2-3절에서 구한 線源資料, 즉 노심내 전 에너지영역에 따른 핵온도를 고려해서 각각의 스펙트럼을 구하고 이 입사에너지와 핵분열스펙트럼의 매트릭스로부터 群線源자료를 구해 적용한 결과는 표 6과 같다.

표 6. 매트릭스 합 핵분열선원 적용결과

임계로심	변화량(%)	
	$E^*=200\text{KeV}$	$E^*=2\text{MeV}$
ZEBRA-3	0.08	-0.36
SNEAK-7A	0.03	-0.20
SNEAK-7B	0.04	-0.28
ZPR-3-48	0.04	-0.23
ZPR-6-7	0.02	-0.21

이 결과는 E^* 값으로 각각 200 keV 및 2 MeV인 $T=1.393$ 과 1.421 MeV에 대한 계산결과와의 차를 보여주고 있다. 표에서 $T=1.93$ MeV 값을 Maxwell식에 적용한 핵분열線源에 의한 계산이 매트릭스법에 의한 핵분열線源으로의 계산에 접근함을 알 수 있으며 이는 Pu-239의 핵분열선원계산에서 E^* 값으로 선정된 200 keV 값이 적합함을 보여준다.

그러나 (1)식을 이용한 보다 정확한 線源계산을 위해서는 해당로심의 중성자속을 이용해야 할 것이다.

3-6. 反應率

고에너지영역에 發端에너지를 갖고 있는 핵종이 특히 핵분열선원의 변화에 민감한 반응율변화를 보이게 된다. 이 중의 하나가 U-238의 핵분열반응이다.

고속임계로심계산에서 반사체영역의 U-238에 의한 핵분열반응은 이 영역의 고에너지중성자에 크게 의존하므로 핵분열선원과 밀접한 관계가 있다.

ZPR-3-48 노심에 대해 노심과 반사체영역에 Pu-239의 단일 핵분열선원을 사용해 계산한 반경방향의 U-238의 핵분열 및 방사성포획반응율과 노심에 가중평균된 핵분열선원, 그리고 반사체영역에 U-238 핵분열선원을 사용한 계산값과의 차를 보면 그림 3과 같다.

그림을 보면 MeV 영역에서 發端에너지를 갖고 있는

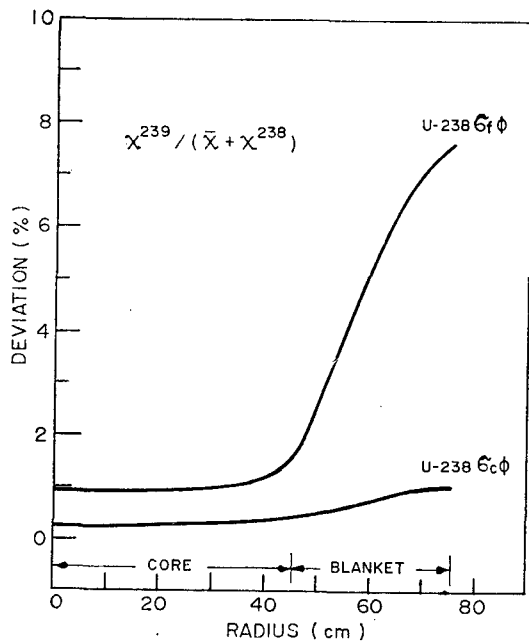


그림 3. ZPR-3-48의 반응율변화

U-238의 핵분열반응율은 반사체영역의 경우 Pu-239와 U-238의 핵분열선원에 의한 계산에 최고 약 7%의 차이를 보이고 있다. 즉 반사체영역에서의 U-238에 대한 핵분열에 Pu-239의 핵분열선원을 사용하므로써 핵분열반응율 계산에서 약 7%의 과대평가 현상을 초래하고 있다.

4. 결 론

가. 고속로심의 핵계산에 이용되는 핵분열선원은 群資料生産에 사용된 Maxwell 혹은 Watt-Cranberg型식 등 공식의 선택문제보다는 대상로심을 적절히 표현할 수 있는 입사 중성자에너지의 대표값 선정문제가 더 중요하다.

나. 현재 기본핵자료원으로 이용되고 있는 ENDF/B-IV, V 및 KEDAK-3 파일의 핵분열선원 자료간에

도 검토된 고속로심계로심의 Keff 계산에서 최고 0.6%의 差를 보이고 있다.

다. 노심에 비해 부랑켓트 혹은 반사체체적이 상대적으로 큰 노심일수록 영역별 핵분열선원을 사용한 계산이 바람직하다.

라. 우라늄과 플루토늄의 혼합산화물핵연료에서 Pu-239이외의 핵분열성물질의 가중치가 상대적으로 큰 경우에는 구성성분에 따른 가중평균 핵분열선원이 적용되어야 한다.

마. 입사중성자의 대표값 E*의 선정에 오류를 막고 보다 정확한 핵분열선원계산을 위해서는 노심 전에너지에 따른 매트릭스를 고려한 핵분열선원이 생산되어야 한다.

바. 고속로심에서 특히 부랑켓트나 반사체영역의 핵분열 반응율을 정확히 평가하기 위해서는 영역별 핵분열선원을 사용한 핵계산이 수행되어야 한다.

끝으로 본 연구를 수행함에 있어 Superphenix 1차로심자료와 연소계산결과를 제공해 주시고 유익한 의견을 주신 柳健重博士께 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

1. W.L. Zijp and J.H. Barb, EUR 7164 EN, 146, 1981.
2. E. Kieffhaber and D. Thiem, Proc. Cont. Meeting on Prompt Fission Neutron Spectra, Vienna, 1972.
3. 陸根億, 忠南大學校, 物理學科, 1981.
4. 魯聖基의, 방사선방어학회지, 제 7 권 1 호, 56, 1982.
5. R.B. Kidman, R.E. MacFalane and M. Baker, LA-7191-MS, Appen, D, 1978.
6. R.W. Hardie; et al., Nucl. Sci. Eng., 57, 222, 1675.
7. H. Takano and K. Kaneko, Nucl.Sci. Tech. 18(3), 236, 1981.
8. H. Takano; et al., JAERI-1255, 29, 1979.
9. 趙滿, 柳健重의, KAERI/RR-374/82, 1983.