

토륨주기 연구용 핵자료 생산을 위한 Th-232의 공명상수 평가

The Evaluation of Neutron Resonance Parameters for Th-232 in the Energy Region from 0 to 200 eV

김영애, 류건중, 장중화
한국원자력연구소
대전시 유성구 덕진동 150

요 약

최근에 핵비확산성 관점에서 토륨 주기에 대한 관심이 높아졌다. 따라서 토륨을 핵연료로 사용하는 원자로의 노물리 연구와 설계를 뒷받침하기 위한 토륨계열 원소의 보다 정밀한 핵자료 생산이 요구되고 있다. 본 연구에서는 0 eV에서 200 eV까지의 에너지 영역에서 토륨의 공명상수를 평가하였다. 최근의 실험자료를 바탕으로 평가된 공명상수 자료들을 가중평균 방법, Bayesian 조건부 확률과 Portor-Thomas 분포를 이용해 평가하였다. 본 연구에서 평가한 열에너지 영역의 특성 자료 결과들은 ENDF/B-VI, JENDL-3, JEF-2, CENDL-2 자료와 비교하여 일치함을 알 수 있었다. 분리공명영역에서는 각 공명별 궤도 각운동량과 스핀, 중성자 강도함수, 평균 준위간격 등을 결정하였으며 중성자폭의 Porter-Thomas 분포를 누적분포 그래프로 표시하여 계산 결과가 데이터와 일치함을 보였다. 또한 본 연구를 통하여 구한 중성자폭, 감마폭, 에너지 준위 등의 공명상수를 ENDF 형식의 파일로 작성하였다.

Abstract

The Thorium fuel cycle has been recently interested as an alternative fuel option in the aspect of non-proliferation. Therefore, more accurate nuclear data of the Thorium became necessitated to support the research activities in the area of reactor physics and design on the reactor which uses the Thorium as a fuel. In this study, neutron resonance parameters of Th-232 are evaluated using the weight average method, the Portor-Thomas distribution and the Bayesian approach in the energy region from 0 to 200 eV. It is shown that the evaluated capture and scattering cross sections in the thermal energy region are well agreed with ENDF/B-VI, JENDL-3, JEF-2 and CENDL-2 data. Also, the orbital angular momentum, spin and neutron strength function are assigned and the resonance parameters such as neutron widths, gamma widths and energy are prepared in the format of ENDF file.

1. 서론

토륨을 사용하는 원자로의 안전설계에 있어서 토륨의 공명상수는 임계도, 반응도, 도플러 상수 등에 영향을 미치는 중요한 역할을 한다. 따라서 핵연료 물질인 토륨과 토륨주기 원소들에 대한 정밀한 공명상수 자료가 필요하다. 본 연구의 목적은 기존의 토륨 공명상수 평가 핵자료집에 최근의 실험 자료로부터 생산된 공명상수를 반영하여 더 정확한 공명상수 핵자료를 생산하는 것이다.

토륨주기 연구용 핵자료 생산의 일환으로 Th-232의 공명상수를 0 eV에서 200 eV까지의 에너지 영역에서 평가하였다. 실험자료를 바탕으로 평가된 공명상수 자료들을 수집하고 가중 평균하여 하나의 파일을 작성한 후에 Porter-Thomas 분포와 Bayesian 조건부 확률 등을 이용하여 각 공명의 궤도 각운동량, 스핀, 중성자 강도 함수 등을 정해주고 공명별 에너지, 중성자폭, 감마폭 등을 계산하여 ENDF 형식의 파일을 작성하였다. 열에너지 영역에서의 포획, 산란단면적과 표적핵 유효반경, 포획공명적분 등의 특성 값을 계산하고 기존의 평가자료집 ENDF/B-VI, JENDL-3, JEF-2, CENDL-2 자료와 비교하였다.

앞으로는 토륨의 전체 공명영역에서 공명상수를 평가하고 더 나아가 토륨주기 원소의 공명상수도 평가해서 토륨주기 연구용 핵자료를 완성하는 것이 최종 목표이다.

2. Th-232 공명상수 평가

1) 평가 방법

공명상수 평가 방법에는 실험 자료를 이용해 직접 공명상수를 평가하는 방법도 있으나 최근에 행해진 Th-232의 중성자 단면적 측정 실험 결과가 없기 때문에 본 연구에서는 2000년 BNL(Brookhaven National Laboratory, USA)과 KAERI가 공동연구로 작성한 보고서에 기록된 평가 방법을 이용하였다[1].

평가 핵종에 대해서 가장 최근에 보고된 공명상수 자료들을 수집하여 가중 평균하였다. 가중 평균은 각각의 데이터가 가지고 있는 오차를 근거로 데이터에 가중치를 부여해 평균하는 방법이다. 즉, 정확도가 높은 데이터는 가중치를 크게 정확도가 낮은 데이터는 가중치를 낮게 부여해 평균을 계산하는 방법이다.

위와 같은 방법으로 얻어진 공명상수를 분석하여 각 공명의 궤도 각운동량(orbital angular momentum, l), 스핀(spin, J), 중성자 강도 함수(neutron strength function, S_l), 평균 준위 간격(energy level space), 중성자폭(the reduced neutron width, g_l^n), 평균 감마폭(the averaged gamma width, Γ_γ)을 결정하였다. 각 공명이 s-파 또는 p-파일 확률이 Porter-Thomas의 확률분포를 따른다고 가정하고 Bayes의 조건부 확률정리에 따라 계산하여 궤도 각운동량을 정해주었다. 스핀은 준위 밀도 함수의 역수가 $(2J+1)$ 에 비례한다는 $(2J+1)$ 법칙에 따라 임의의 방식으로 결정해 주었다. 또한 분리 공명들의 통계적 특성을 분석하여 평균 공명상수에 상응하는 입사

중성자별 평균 준위 간격과 중성자 강도함수를 구하였다.

이와 같이 하여 열에너지 영역에서의 포획단면적(capture cross section), 유효산란 반경(effective scattering radius), 산란진폭(coherent scattering amplitude), 포획공명적분(capture resonance integral)을 평가하였다.

2) 평가 자료 수집

국제 원자력기구 IAEA의 핵자료부서(Nuclear Data Section)에서 운영하는 홈페이지(<http://www-nds.iaea.or.at>)에 있는 CINDA(Computer Index of Nuclear Data)나 NSR(Nuclear Science References)을 통해 자료를 수집하였다. 특히 CINDA는 핵종별, 년도별, 반응별로 관련 논문이나 연구자료, 실험자료 등에 대해 정리되어 있어 자료 검색에 유용하다. 본 연구에서는 1980년대 이후 Th-232 공명상수 평가 자료를 검색한 결과 Olsen et al.(1982)[2]과 Kobayashi et al.(1988)[3]의 평가 자료가 최근의 자료로 검색되었다. 이 중 1982년 이전의 모든 자료를 이용한 Mughabghab(1984)의 평가 자료[4]에 Olsen의 자료가 포함되어 있으므로 본 연구에서는 Mughabghab의 자료와 Kobayashi의 자료를 이용해 평가를 실시하였다.

평가에 사용되는 기본 자료로는 표적핵의 질량, 비탄성산란 반응, 문턱에너지 등이 있다. 기존의 평가자료집에서는 Th-232의 원자질량을 230.040이나 230.045 amu를 사용하고 있으나 본 연구에서는 232.038 amu를 사용하였다[5]. 열에너지 특성 자료에는 bound level 공명을 설정하기 위한 자료들인 열에너지 중성자 포획 및 산란 단면적(σ_v^o 및 σ_s^o), 표적핵의 유효반경(R'), 산란진폭(b'), 포획 공명 적분(I_v) 등의 값이 있고 분리공명영역 자료에는 분리공명상수로 평가되는 공명에너지, 반응별 공명폭($\Gamma_n, \Gamma_p, \Gamma_f$), 포획면적(A_v), 양자수(궤도 각운동량 l 및 스핀 J) 등이 있다. 비분리 공명영역 자료로는 비분리공명영역에 평균 공명상수로 평가되는 포획 및 산란 단면적, 중성자 강도함수(S_1), 평균 준위 간격, 평균 포획폭이 있다.

3) 평가 코드

본 연구에서는 ORDER, ANAL, PSY325 등 세 개의 코드를 사용하였다. ORDER 코드는 수집된 공명상수 자료의 오차와 공명 순서 등을 고려해 각 에너지 준위의 공명상수를 가중 평균으로 계산하여 하나의 파일 BNL325.TXT를 작성하는데 이용되었다. 이렇게 작성된 BNL325.TXT 파일은 ANAL 코드에서 분리공명상수 분석 대상이 된다.

ANAL 코드는 분리공명영역의 공명상수를 분석하는 코드이다. ANAL의 입력에는 Bayesian 계산 시 초기 값으로 사용되는 중성자 강도함수, 평균준위간격 등이 주어지고 기본 자료로 원자 질량, 원자번호, 평균 감마폭, 그리고 평가할 에너지 영역의 한계 에너지 등을 정해 준다. 앞서 작성된 공명상수 파일 BNL325.TXT와 ANAL의 입력을 기본으로 각 공명을 분석하여 ENDF 파일 형식의 ENDF.A.TXT 파일을 작성하고 공명별 개별 정보를 결정하였다.

PSY325 코드는 열에너지 영역에서 산란 단면적, 유효산란반경, 산란진폭, 포획공명적분 등을 계산하는데 사용하였다.

3. 결과 및 토의

본 연구에서는 0 eV에서 200 eV까지의 에너지 영역에서 Th-232의 공명상수를 평가하였다. ORDER 코드를 이용해 작성한 BNL325.TXT 파일과 ANAL 코드를 이용해 공명에서의 개별 정보들을 계산하였다. 중성자 공명폭의 Portor-Thomas 분포를 누적분포로 그래프를 작성해 데이터와 계산 결과를 비교하였다. s-파 공명에 대한 그림 1과 p-파 공명에 대한 그림 2에 나타난 바를 보면 계산 결과가 데이터를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 200 eV 까지의 에너지 영역에서 공명의 개수는 29개이다. 그 중에 11개는 s-파이고 18개는 p-파로 계산되었다. 각 공명의 궤도 각운동량에 따른 준위 간격과 중성자 강도함수는 s-파의 경우에 15.73 ± 3.74 eV와 1.08이고 p-파의 경우에는 8.14 ± 1.50 eV와 0.62이다. ANAL 코드의 결과인 공명상수를 ENDF 파일의 형식으로 작성한 ENDF.A.TXT 파일은 표2와 같다.

열에너지 영역에서의 포획단면적, 산란단면적, 표적핵의 유효반경, 산란진폭, 포획공명적분값을 계산하여 기존의 평가 파일들과 비교한 결과를 표1에 정리하였다. ANAL 코드에서 계산한 유효반경은 8.3569 fm으로 기존의 평가 값들 보다 적게 계산되었으며 이는 산란진폭과 산란단면적을 낮게 평가하는 원인이 되었다. Mughabghab는 유효반경을 변형광학모델(Deformed Optical Model)을 이용해 계산하였는데 이는 $R = r_0 A^{1/3}$ 이나 구형광학모델(Spherical Optical Model)로 계산한 결과와 비교하여 더 정확하였다[2]. 그래서 열에너지 영역을 유효반경의 값을 Mughabghab가 계산한 9.65 fm로 바꾸어 평가하였다. 그 결과 산란단면적이 7.831 barn에서 10.607 barn으로 산란진폭이 7.8941 fm에서 9.1872 fm으로 재계산되어 다른 평가파일의 값과 일치하였다. 따라서 열에너지 영역에서의 정확한 평가를 위해서는 ANAL 코드에서 사용하는 유효반경 계산 과정을 변형광학모델을 적용한 계산 방법으로 바꾸는 것이 필요하겠다.

앞으로는 전체 분리공명영역과 비분리 공명영역, 그리고 열에너지 영역에서의 공명상수를 평가하여 토륨의 공명상수 핵자료를 완성하고 마찬가지로 방법으로 토륨주기 원소들에 대한 공명상수 핵자료를 완성하여 토륨주기 연구에 유용하게 이용될 수 있도록 하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 주관하는 원자력 연구개발 원자력중장기계획 사업의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

- [1] Soo-Youl Oh, Jonghwa Chang, Said Mughabghab, Neutron Cross Section Evaluations of Fission Products Below the Fast Energy Region, BNL-NCS-67469 (ENDF-362, KAERI/TR-1511/2000), KAERI and BNL
- [2] Olsen, Nucl. Sci. and Eng. vol. 82, pp. 289-306, 1982
- [3] Kobayashi, Ann. Nucl. Energy. vol. 15, no. 8, pp. 381-388, 1988
- [4] S. F. Mughabghab, Neutron Cross Sections, Volume 1: Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections, Part B : Z=61-100, Academic Press, Inc., 1984
- [5] 장종화, 핵자료표(Table of nuclides), KAERI/GP-106/95, 한국원자력연구소

표 1 열에너지 영역 특성자료 평가 결과

	UNIT	JEF2	CENDL	JENDL-3	ENDF/B-6	Present	
						ANAL	Mughabghab
σ_f	barns	0.42420	0.41961	0.41961	0.41797	0.40956	0.40956
σ_s	barns	9.1499	12.010	11.428	10.758	7.831	10.607
R'	fm	8.9874	10.250	10.010	9.72	8.3569	9.6500
b'	fm	8.5330	9.7763	9.5363	9.2527	7.8941	9.1872
I_f	barns	69.537	70.315	70.315	69.257	68.878	68.878

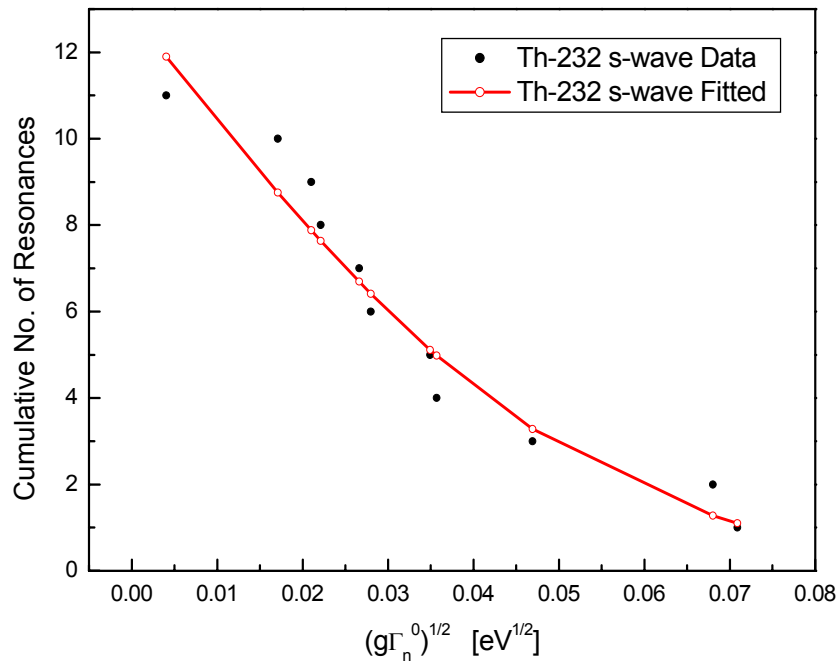


그림 1. s-파 공명에 대한 중성자 공명폭의 누적 분포

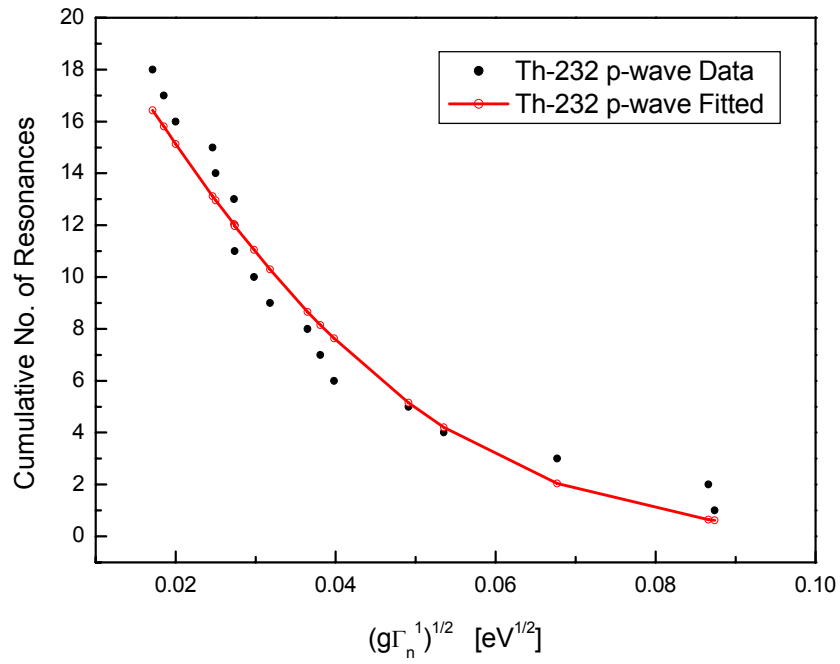


그림 2. p-파 공명에 대한 중성자 공명폭의 누적분포

표 2. ENDF 파일 형식으로 작성한 공명상수 평가 결과

					9040 1451
					9040 1451
					9040 1451
		0	0	1	19040 1451
					9040 1 099999
					9040 0 0 0
9.023200+4	2.320380+2	0	0	1	09040 2151
9.023200+4	1.000000+0	0	0	1	09040 2151
1.000000-5	2.027000+2	1	2	0	09040 2151
0.0	9.650000-1	0	0	2	09040 2151
2.320380+2	0.0	0	0	66	119040 2151
2.179600+1	5.000000-1	2.723680-2	2.049800-3	2.518700-2	9040 2151
2.348500+1	5.000000-1	2.989770-2	3.795700-3	2.610200-2	9040 2151
5.950400+1	5.000000-1	2.875865-2	3.762650-3	2.499600-2	9040 2151
6.919600+1	5.000000-1	6.468650-2	4.178550-2	2.290100-2	9040 2151
1.130100+2	5.000000-1	3.399800-2	1.355600-2	2.044200-2	9040 2151
1.209400+2	5.000000-1	5.065800-2	2.420200-2	2.645600-2	9040 2151
1.290600+2	5.000000-1	3.275385-2	3.314850-3	2.943900-2	9040 2151
1.541100+2	5.000000-1	2.313798-2	2.019850-4	2.293600-2	9040 2151
1.701300+2	5.000000-1	8.239800-2	6.025000-2	2.214800-2	9040 2151
1.929000+2	5.000000-1	3.910100-2	1.696300-2	2.213800-2	9040 2151
1.991200+2	5.000000-1	3.375950-2	9.974500-3	2.378500-2	9040 2151
2.320380+2	0.0	1	0	108	189040 2151
8.330000+0	5.000000-1	2.900011-2	1.150000-7	2.900000-2	9040 2151
1.313000+1	1.500000+0	2.463005-2	4.750000-8	2.463000-2	9040 2151
3.697000+1	1.500000+0	2.463028-2	2.750000-7	2.463000-2	9040 2151
3.819000+1	5.000000-1	2.463031-2	3.100000-7	2.463000-2	9040 2151
4.103000+1	5.000000-1	2.463030-2	2.950000-7	2.463000-2	9040 2151
4.705000+1	5.000000-1	2.463080-2	8.000000-7	2.463000-2	9040 2151
5.878000+1	1.500000+0	2.463213-2	2.125000-6	2.463000-2	9040 2151
6.451000+1	1.500000+0	2.463025-2	2.500000-7	2.463000-2	9040 2151
9.014000+1	1.500000+0	2.463125-2	1.250000-6	2.463000-2	9040 2151
9.807000+1	1.500000+0	2.463100-2	1.000000-6	2.463000-2	9040 2151
1.036600+2	1.500000+0	2.463130-2	1.300000-6	2.463000-2	9040 2151
1.282100+2	1.500000+0	2.464825-2	1.825000-5	2.463000-2	9040 2151
1.458600+2	1.500000+0	2.465175-2	2.175000-5	2.463000-2	9040 2151
1.480500+2	5.000000-1	2.463600-2	6.000000-6	2.463000-2	9040 2151
1.671700+2	1.500000+0	2.463475-2	4.750000-6	2.463000-2	9040 2151
1.789000+2	1.500000+0	2.463950-2	9.500000-6	2.463000-2	9040 2151
1.962500+2	1.500000+0	2.465075-2	2.075000-5	2.463000-2	9040 2151
2.025000+2	1.500000+0	2.463750-2	7.500000-6	2.463000-2	9040 2151
0.0	0.0	0	0	0	09040 2 099999
0.0	0.0	0	0	0	09040 0 0 0