

## 감마선 측정을 통한 천연 우라늄 붕괴 사슬 분석

### The Analysis of Natural Uranium Decay based on Gamma-ray Measurements

김경완, 김동규, 노원섭, 박평원, 양성우, 박광현  
경희대학교  
경기도 용인시 기흥읍 서천1

#### 요 약

천연 우라늄으로 제조된  $UO_2$  소결체를 이용하여 감마선 측정 실험을 수행, 우라늄 붕괴사슬을 분석하였다. Ge-계측기로 시편( $UO_2$  소결체 10.1g)에서 방출되는 감마선을 24시간동안 에너지별로 측정하였다. Genie-2000 프로그램을 이용하여 측정된 데이터 값을 분석하여, 천연 우라늄(U-238, U-235)의 각 핵종별 에너지 영역에 대한 분석을 수행하였다. 각 핵종의 붕괴상수를 이용하여 에너지 영역 당 방출하는 방사선량을 구하였고 여기서 나온 이론치와 실험에서 산출한 측정치를 비교함으로써 붕괴 시 방출되는 감마 에너지를 통해 천연 우라늄의 붕괴 사슬에 대한 분석을 하였다.

#### Abstract

Measurements of gamma-radiations from natural uranium dioxide were performed to analyze the decay chain of natural uranium. 10.1g of natural uranium dioxide was used as a specimen and the measurement was done for 24 hours. Genie-2000 was used for the analysis of gamma ray energy from uranium. Theoretical estimation of gamma rays from the decay chain and data from the measurement were compared quantitatively. Based on these comparisons, the gamma rays from the decay chain of natural uranium were analyzed.

## 1. 서론

천연 우라늄은 자연적으로 붕괴를 한다. 붕괴시 다른 핵종으로의 변환을 일으키며, 감마 에너지를 방출한다. 이때 방출되는 감마 에너지의 값이 핵종당 모두 다르고, 특정한 값을 가지게 된다. 각각의 핵종은 고유의 반감기 및 붕괴 상수 값을 가지게 되고, 그 데이터를 바탕으로 붕괴 사슬이 성립한다. 이 붕괴 사슬을 이용하여 고유의 감마선 에너지를 측정하면 천연 우라늄의 잔존량을 비파괴적으로 측정할 수 있다. 천연우라늄 붕괴는 연속적인 방사선 동위 원소의 붕괴로 이어진다. 연속적인 붕괴 변화량을 통해 보면 두 핵종과 반감기의 차이가 매우 클 때 생성된 딸 핵종의 방사선은 모핵종의 방사선 변화와 거의 유사하게 나타나며, 반감기 차이가 그다지 크지 않으면 핵종들 간의 변화는 앞에서 말한 변화보다 크게 나타난다. 이와 같은 방법으로 천연 우라늄 붕괴 사슬로부터 우라늄의 수명을 구할 수 있다. 천연 우라늄은 붕괴시 핵종 당 고유의 감마선 에너지를 방출하게 된다. 우라늄을 채광하는 단계에서 우라늄의 수명을 알기 위해서는 구성하고 있는 천연 우라늄과 동위 원소의 비율을 비교함으로써 알 수 있다. 현재 원자력 발전소를 운영함으로써 발생하는 많은 방사성 폐기물이 문제가 되고 있다. 오랜 기간 원자력 발전소가 운영되면서 발생하는 방사성 폐기물을 처리하기 위한 방사성 폐기물 처리장의 건설은 중요한 국책 사업으로서 현재 방사성 폐기물을 저장하는 공간이 포화상태임을 감안해 볼 때 가장 중요한 현안으로 대두되고 있다. 하지만 부지 선정에서부터 많은 사회적 문제점이 발생하여, 지금까지도 국민과 국가 간의 합의를 보지 못한 상태에서 계속 지속되고 있다. 이러한 문제의 발생원인은 국민들이 원자력 안전에 대한 충분한 이해가 부족하기 때문이다. 더욱이 국민들의 원자력 안전성에 대한 불신이 높아져 방사성 폐기물 처리장의 건설은 아직도 멀다.

앞에서도 언급하였듯이 방사성 폐기물의 저장 창고는 현재 포화상태이다. 본 연구에서는 국민들이 알고 있는 환경방사능에서 발생하는 방사선에 대한 이해를 돕는데 목적을 두고 있다. 환경방사능에서 우라늄의 붕괴에 의해 발생하는 방사선량은 결코 무시할 수 없다. 방사능 폐기물 처리장과 비교해보면 더욱 더 많은 양이 자연적으로 환경 방사선으로 나온다. 이에 따라 핵연료 사용 후 나오는 방사성 폐기물의 비파괴 분석은 더욱 중요하다고 할 수 있다. 이를 분석하기 위해서는 우라늄의 붕괴사슬에 대한 이해와 정확한 분석이 우선적으로 필요하다.

본 연구에서는 방사능 붕괴에 따른 감마선 에너지의 측정을 통한, 이론치와 측정치의 비교를 주목적으로 하였다. 우선 핵종 당 발생하는 감마선 에너지의 영역을 이용하여 이론적인 값을 분석을 해서 다음으로 Ge-계측기로 측정한 실험치를 이론치와 비교하였다. 이를 통해 천연 우라늄 붕괴 상수를 분석하였다.

현재까지 우라늄 붕괴사슬에 대한 정확한 에너지 값의 비교 분석 연구가 이루어지지 않고, 비파괴 분석법의 필요성이 요구되는 바에 따라 각 핵종별 에너지를 분석하고, 붕괴사슬에 따른 감마선 에너지의 분석을 통해 천연우라늄의 붕괴사슬을 이해하는데 그 목적이 있다.

## 2. 이론

### 2-1 천연우라늄의 붕괴사슬

자연적으로 존재하는 천연 우라늄 중 구성비가 높은 U-238(약 99.282 w/o)과 U-235(약 0.72 w/o)의 붕괴사슬을 조사하였다.

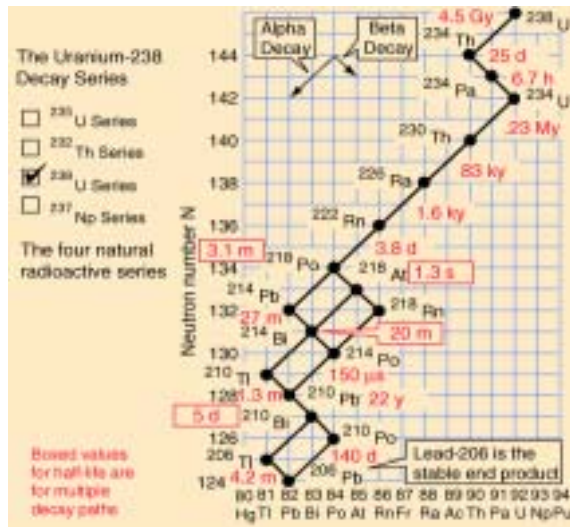


그림 2-1 U-238의 붕괴 사슬

(우라늄 붕괴 계열  $A=4n+2$ . 우라늄 붕괴 계열은  $\alpha$ 붕괴 : 8번,  $\beta$ 붕괴 6번이 일어남으로써 안정해진다.  $Bi^{214}$ 의 붕괴는 알파, 베타의 순 또는 그 역순으로 진행될 수 있다.)

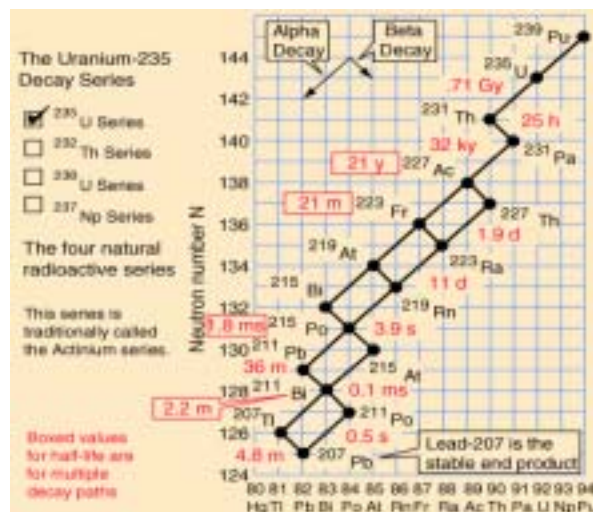


그림 2-2 U-235의 붕괴 사슬

(악티늄 붕괴 계열  $A=4n+3$ , 악티늄 계열은  $\alpha$ 붕괴 : 7번,  $\beta$  붕괴 : 4번으로 안정해진다.)

### 2-1-1 붕괴사슬에 의한 방사선량의 변화

천연우라늄이 붕괴시 시간에 따라 모핵종과 딸핵종의 방사선량이 변화한다. 감마선 붕괴선량을 분석하기 앞서 천연우라늄 U-238, U-235 의 붕괴를 통해 나온 방사선 동위원소의 방사선량을 조사하였다. 모핵종과 딸핵종들과의 반감기 차이가 많이 나며, 이런 사실을 통하여 조사 해 본 결과, 딸핵종들의 방사선량 변화가 일정하게 나타났다. 그림 2-3은 U-235의 방사선량 변화를 나타낸 것이며, 그림 2-4는 U-238의 방사선량을 나타낸 것이다.

Change of the U235

| Time(yr) | U235       | Th231      | Pa231      | Ac227      | Th227      | Ra223      | Rn219      | Po215      | Pb211      | Bi211      |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1.00E+04 | 1.5371E-02 | 3.5670E-04 | 3.7829E-13 | 1.6370E-18 | 1.6370E-18 | 1.6370E-18 | 1.6370E-18 | 1.6370E-18 | 1.6370E-18 | 1.6370E-18 |
| 1.00E+05 | 1.5371E-02 | 3.2767E-03 | 3.5910E-11 | 3.8912E-16 | 3.8912E-16 | 3.8912E-16 | 3.8912E-16 | 3.8912E-16 | 3.8912E-16 | 3.8912E-16 |
| 1.00E+02 | 1.5371E-02 | 1.3902E-02 | 1.9966E-09 | 2.4584E-13 | 2.4584E-13 | 2.4584E-13 | 2.4584E-13 | 2.4584E-13 | 2.4584E-13 | 2.4584E-13 |
| 1.00E+01 | 1.5371E-02 | 1.5371E-02 | 3.1082E-08 | 4.7360E-11 | 4.7360E-11 | 4.7360E-11 | 4.7360E-11 | 4.7360E-11 | 4.7360E-11 | 4.7360E-11 |
| 1.00E+00 | 1.5371E-02 | 1.5371E-02 | 3.2390E-07 | 5.0643E-09 | 5.0643E-09 | 5.0643E-09 | 5.0643E-09 | 5.0643E-09 | 5.0643E-09 | 5.0643E-09 |
| 1.00E+01 | 1.5371E-02 | 1.5371E-02 | 3.2459E-06 | 4.6515E-07 | 4.6515E-07 | 4.6515E-07 | 4.6515E-07 | 4.6515E-07 | 4.6515E-07 | 4.6515E-07 |
| 1.00E+02 | 1.5371E-02 | 1.5371E-02 | 3.2439E-05 | 2.2664E-05 | 2.2664E-05 | 2.2664E-05 | 2.2664E-05 | 2.2664E-05 | 2.2664E-05 | 2.2664E-05 |
| 1.00E+03 | 1.5371E-02 | 1.5371E-02 | 3.2134E-04 | 3.1139E-04 | 3.1139E-04 | 3.1139E-04 | 3.1139E-04 | 3.1139E-04 | 3.1139E-04 | 3.1139E-04 |
| 1.00E+04 | 1.5370E-02 | 1.5370E-02 | 2.9273E-03 | 2.9191E-03 | 2.9191E-03 | 2.9191E-03 | 2.9191E-03 | 2.9191E-03 | 2.9191E-03 | 2.9191E-03 |
| 1.00E+05 | 1.5369E-02 | 1.5369E-02 | 1.3511E-02 | 1.3510E-02 | 1.3510E-02 | 1.3510E-02 | 1.3510E-02 | 1.3510E-02 | 1.3510E-02 | 1.3510E-02 |
| 1.00E+06 | 1.5359E-02 | 1.5359E-02 | 1.5356E-02 | 1.5356E-02 | 1.5356E-02 | 1.5356E-02 | 1.5356E-02 | 1.5356E-02 | 1.5356E-02 | 1.5356E-02 |
| 1.00E+07 | 1.5220E-02 | 1.5220E-02 | 1.5221E-02 | 1.5221E-02 | 1.5221E-02 | 1.5221E-02 | 1.5221E-02 | 1.5221E-02 | 1.5221E-02 | 1.5221E-02 |
| 1.00E+08 | 1.3930E-02 | 1.3930E-02 | 1.3930E-02 | 1.3930E-02 | 1.3930E-02 | 1.3930E-02 | 1.3930E-02 | 1.3930E-02 | 1.3930E-02 | 1.3930E-02 |
| 1.00E+09 | 5.7439E-03 | 5.7439E-03 | 5.7439E-03 | 5.7439E-03 | 5.7439E-03 | 5.7439E-03 | 5.7439E-03 | 5.7439E-03 | 5.7439E-03 | 5.7439E-03 |
| 1.00E+10 | 8.1587E-07 | 8.1587E-07 | 8.1587E-07 | 8.1587E-07 | 8.1587E-07 | 8.1587E-07 | 8.1587E-07 | 8.1587E-07 | 8.1587E-07 | 8.1587E-07 |

그림 2-3 U-235의 붕괴사슬에 의한 방사능량의 변화

Change of the U238

| Time(yr) | U238       | Th234      | Pa234      | U234       | Th230      | Ra226       | Rn222      | Po218      | Pb214      | Bi214       |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|
| 1.00E+04 | 3.3360E-01 | 3.4379E-03 | 3.3252E-03 | 4.5616E-13 | 7.2143E-17 | -1.8368E-18 | 3.9308E-17 | 3.7903E-17 | 3.8179E-17 | 2.4899E-17  |
| 1.00E+03 | 3.3360E-01 | 3.2629E-02 | 3.2723E-02 | 4.8823E-11 | 1.3212E-14 | -1.0397E-18 | 3.9529E-17 | 3.8688E-17 | 3.8889E-17 | 2.5628E-17  |
| 1.00E+02 | 3.3360E-01 | 2.1529E-01 | 2.1521E-01 | 3.5883E-09 | 1.0693E-11 | 2.8944E-17  | 5.5794E-17 | 5.7914E-17 | 5.8089E-17 | -4.4771E-17 |
| 1.00E+01 | 3.3360E-01 | 3.3379E-01 | 3.3379E-01 | 8.5293E-08 | 3.1770E-09 | 4.2956E-14  | 2.7947E-14 | 2.7947E-14 | 2.7261E-14 | 2.7193E-14  |
| 1.00E+00 | 3.3360E-01 | 3.3380E-01 | 3.3380E-01 | 9.3594E-07 | 2.9934E-07 | 4.5925E-11  | 4.3623E-11 | 4.3623E-11 | 4.3623E-11 | 4.3623E-11  |
| 1.00E+01 | 3.3360E-01 | 3.3380E-01 | 3.3380E-01 | 9.4304E-06 | 8.3942E-06 | 1.6037E-08  | 1.6032E-08 | 1.6032E-08 | 1.6032E-08 | 1.6032E-08  |
| 1.00E+02 | 3.3360E-01 | 3.3380E-01 | 3.3380E-01 | 9.4394E-05 | 9.3266E-05 | 1.9677E-06  | 1.9671E-06 | 1.9671E-06 | 1.9671E-06 | 1.9671E-06  |
| 1.00E+03 | 3.3360E-01 | 3.3380E-01 | 3.3380E-01 | 9.4282E-04 | 9.4170E-04 | 1.7732E-04  | 1.7731E-04 | 1.7731E-04 | 1.7731E-04 | 1.7731E-04  |
| 1.00E+04 | 3.3360E-01 | 3.3380E-01 | 3.3380E-01 | 9.3894E-03 | 9.3893E-03 | 7.2041E-03  | 7.2041E-03 | 7.2041E-03 | 7.2041E-03 | 7.2041E-03  |
| 1.00E+05 | 3.3379E-01 | 3.3379E-01 | 3.3379E-01 | 8.2298E-02 | 8.2297E-02 | 8.0583E-02  | 8.0583E-02 | 8.0583E-02 | 8.0583E-02 | 8.0583E-02  |
| 1.00E+06 | 3.3374E-01 | 3.3374E-01 | 3.3374E-01 | 3.1494E-01 | 3.1494E-01 | 3.1391E-01  | 3.1391E-01 | 3.1391E-01 | 3.1391E-01 | 3.1391E-01  |
| 1.00E+07 | 3.3329E-01 | 3.3329E-01 | 3.3329E-01 | 3.3330E-01 | 3.3330E-01 | 3.3330E-01  | 3.3330E-01 | 3.3330E-01 | 3.3330E-01 | 3.3330E-01  |
| 1.00E+08 | 3.2966E-01 | 3.2966E-01 | 3.2966E-01 | 3.2966E-01 | 3.2966E-01 | 3.2966E-01  | 3.2966E-01 | 3.2966E-01 | 3.2966E-01 | 3.2966E-01  |
| 1.00E+09 | 2.8587E-01 | 2.8587E-01 | 2.8587E-01 | 2.8587E-01 | 2.8587E-01 | 2.8587E-01  | 2.8587E-01 | 2.8587E-01 | 2.8587E-01 | 2.8587E-01  |
| 1.00E+10 | 7.0824E-02 | 7.0824E-02 | 7.0824E-02 | 7.0829E-02 | 7.0829E-02 | 7.0829E-02  | 7.0829E-02 | 7.0829E-02 | 7.0829E-02 | 7.0829E-02  |

그림 2-4 U-238의 붕괴사슬에 의한 방사능량의 변화

모핵종 U-235의 붕괴는 연속적인 방사선 동위원소의 붕괴로 이어진다. 모핵종이 붕괴함에 따라 딸핵종의 방사능량이 증가하게 되며, 모핵종과 딸핵종의 매우 큰 반감기의 차이는 특정한 방사선량 변화를 나타낸다. 연속적 붕괴 변화량을 통해 보

면 두 핵종과 반감기의 차이가 매우 크면 생성된 딸핵종의 방사선은 모핵종의 방사선 변화와 거의 유사하게 나타나며, 반감기 차이가 그다지 크지 않으면 핵종들 간의 변화는 앞서 말한 변화 보다 큰 차이를 나타낸다. 이런 방사선의 변화를 아래 그림 2-5 에 나타내었다.

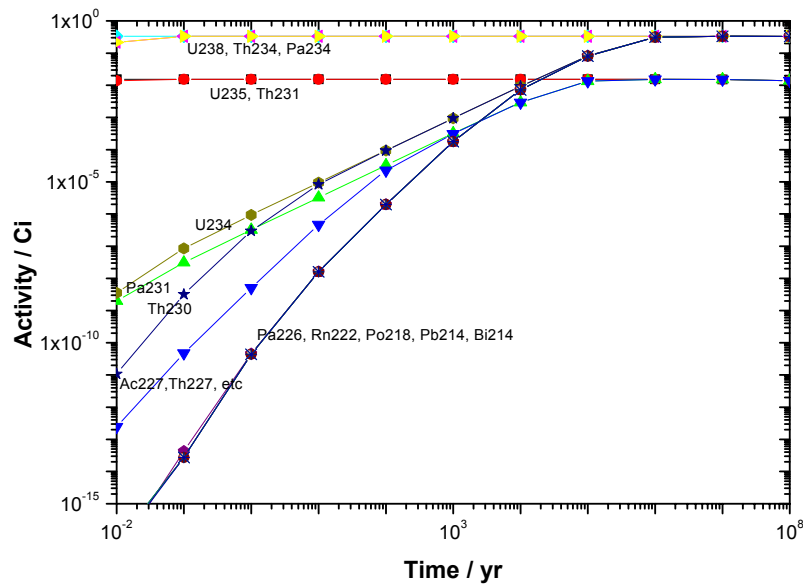


그림 2-5 시간에 따른 핵종별 방사능량의 변화

### 3. 실험

#### 3-1 시편(Natural $UO_2$ )

원자력 발전소에서 ADU(Ammonium Di-Uranate)공정으로 제조한  $UO_2$ 분말을 사용하여,  $3 t/cm^2$  압력으로 압축하여 성형체를 제조하였다. 성형체를  $1700^\circ C$ 에서 4시간 동안 수소기체 분위기에서 소결하여  $UO_2$ 소결체를 제조하였다.

소결체는 질량 10.1g을 사용하였고, 직경 8mm, 높이 10mm 이고, 물부력법으로 구한 밀도는 97% TD(Theoretical density,  $10 g/cm^3$ )이고, 직선교차법으로 구한 결정립 크기는  $7.5\mu m$  이다. 아래 그림 3-1에서 소결체 결정립 시편거치대 사진을 나타내었고, 그림 3-2에서  $UO_2$  소결체 시편을 나타낸 것이다.

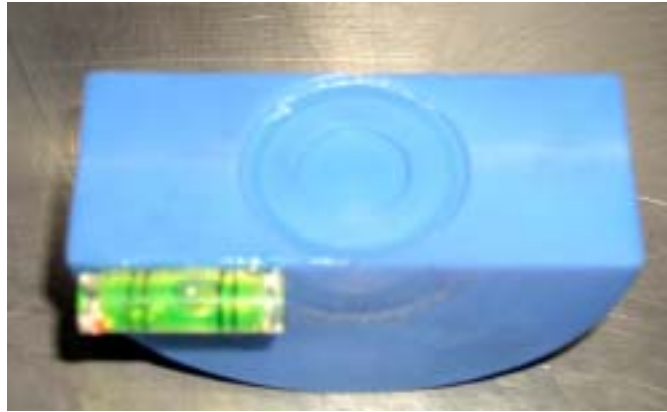


그림 3-1 소결체 결정립 시편 거치대



그림 3-2  $UO_2$  소결체

### 3-2 실험방법

먼저 스탠다드 선원인 코발트(Co), 세슘(Cs), 바륨(Ba)을 Ge-계측기에 장착했다. Ge-계측기에 준비된 시편을 1m 간격으로 두어 1시간씩 측정을 하여 감마선 에너지를 조사하였다. 이와 동일한 방법으로 원자력 연구소에서 제조한  $UO_2$ 소결체 10.1g을 유리 바이알에 넣고, 준비된 시편을 24시간 동안 Ge-계측기에서 감마선 에너지를 측정하였다. 측정시 사용한 Ge-계측기는 그림 3-3에 나타내었다. 24시간 측정 후 나온 데이터는 핵종 별 분석을 위해 Genie-2000 프로그램을 사용하였으며, 사용한 프로그램의 형태는 그림 3-4에 나타내었다.



그림 3-3  $UO_2$  소결체 감마선 에너지 분석에 사용된 Ge-계측기

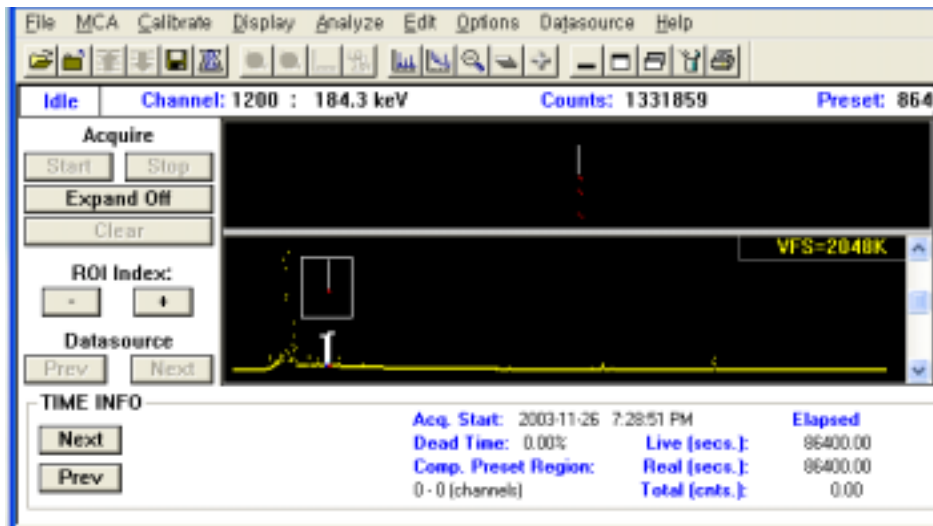


그림 3-4 핵종별 분석에 사용한 Genie-2000 프로그램

## 4. 실험 결과

### 4-1 감마선 스펙트럼

Ge-계측기를 통해 감마선 에너지 별 방사선량을 측정하였다. 이론치와는 달리 측정치에서는 에너지 당 방사선이 작게 측정되었다. 이는 계측기의 효율과 밀접한 관련이 있다. 또한 낮은 에너지에서 주요핵종들의 붕괴가 활발하면서 복잡한 피크를 보였다. 이 피크들은 여러 핵종들의 방사선이 겹치면서, 오히려 이론치보다 높이 측정되었다. 에너지가 높아짐에 따라 에너지 당 방사선량은 선형적으로 변화하였으며, 이로써 400~700keV 영역의 방사선량은 특정한 변화를 보이지 않음을 알 수 있었다. 이런 실험 결과를 통해 이론치의 감마선 에너지와 비교하였다. 그림 4-1은 0~1300keV영역의 감마선 선량을 측정된 데이터를 그래프화 한 것이고, 그림 4-2은 감

마선량 분포가 복잡한 낮은 에너지 영역 0~200keV에서의 데이터를 그래프로 나타낸 것이다.

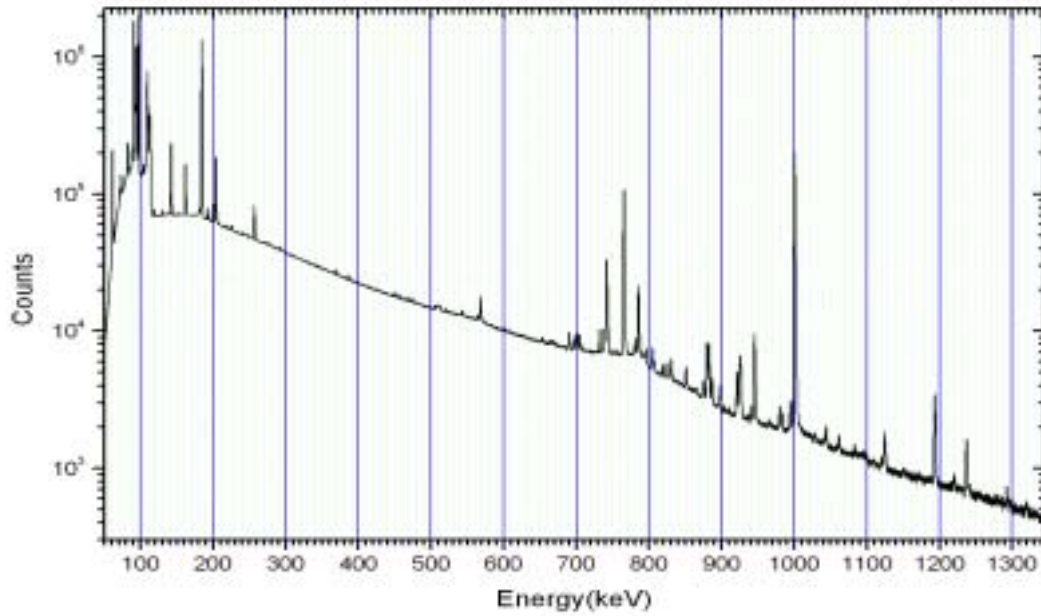


그림 4-1  $UO_2$  소결체 감마에너지 측정시 초당 붕괴수

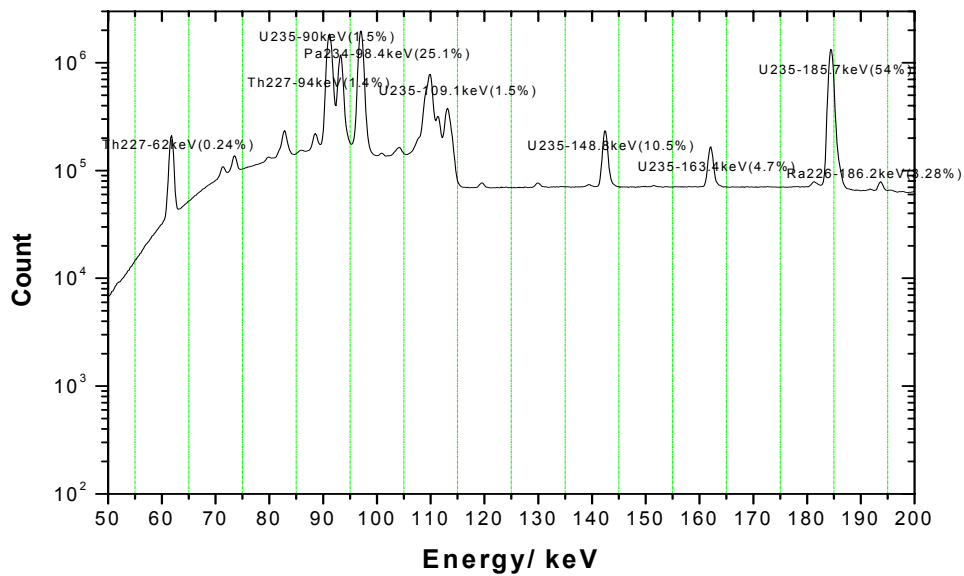


그림 4-2  $UO_2$  소결체 감마 에너지 측정시 초당 붕괴수(저에너지 영역)



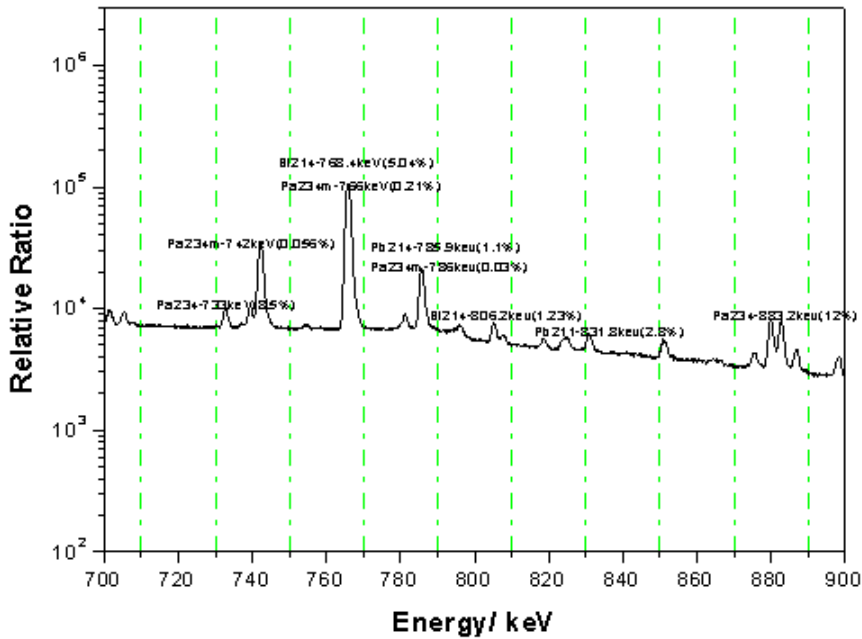


그림 4-3  $UO_2$ 소결체 감마 에너지 측정시 초당 붕괴수(700~900keV)

## 5. 논 의

아래 표 5-1은 각 핵종당 에너지에 따라 측정된 실험값이다. 이때 방사선량은 Cs-137을 기준으로 하여 에너지에 따라 효율을 구하여 상대적 비를 구해 보정하였다. 그리고 Pa-231을 중심으로 하여 상대적 비율을 구하였고 그 값을 실제 이론치와 비교하였다. 이때, 많은 오차가 발생하였다. 예를 들어 Th-227을 보면, 62keV와 256.3keV영역인 경우 상대비율이 매우 큰 차이를 보였다. 이는 핵종이 겹쳐서 나타나는 현상 및 오차를 무시했기 때문으로 판단된다.

표 5-1에서 조사된 데이터를 종합하여 시간대별 핵종의 방사선량 및 상대비율을 아래의 표 5-2로 정리하였다. 표 5-2는 천연우라늄 붕괴시 각 핵종당 나오는 방사선량을 Pa-231을 기준으로 비교한 것이다. 결국 상대비율을 통하여 각 핵종을 비교하여 보면 실험한  $UO_2$ 소결체의 제조시기를 알아낼 수 있고, 나아가 이러한 데이터는 앞에서 언급하였듯이 환경방사능에서 발생하는 방사선에 대한 핵종 분석에 유용하게 쓰일 수 있다.

본 연구에서 미루어 보아 상대비율을 통해 제조시기를 추측한 결과 그 기간이 10년에서 100년 사이로 판단된다.

표 5-1 핵종별 에너지에 따른 상대비율 측정치

| 핵종     | Energy (keV) | 분율     | Area     | 661keV (Eff) | Counts  | 상대비율     |
|--------|--------------|--------|----------|--------------|---------|----------|
| Th227  | 62           | 0.24%  | 960603   | 3.171849     | 302852  | 93.64242 |
| Th227  | 256.3        | 6.80%  | 249809   | 2.190952     | 114018  | 35.25465 |
| Th227  | 299.9        | 2.00%  | 2614     | 2.021914     | 1292    | 0.399746 |
| Th227  | 329.8        | 2.75%  | 2761     | 1.914862     | 1441    | 0.445831 |
| Th231  | 84.2         | 8%     | 687395   | 3.037846     | 226277  | 69.96515 |
| U235   | 90           | 1.50%  | 2723453  | 3.003883     | 906644  | 280.3355 |
| U235   | 105          | 1%     | 47924    | 2.917995     | 16423   | 5.078198 |
| U235   | 109.1        | 1.50%  | 5519484  | 2.895        | 1906558 | 589.51   |
| U235   | 143.8        | 10.50% | 1027667  | 2.708326     | 379447  | 117.3256 |
| U235   | 163.4        | 4.70%  | 584887   | 2.608908     | 224188  | 69.31933 |
| U235   | 185.7        | 54.00% | 8504085  | 2.5008       | 3400546 | 1051.453 |
| U235   | 205.3        | 4.70%  | 816953   | 2.409988     | 338986  | 104.815  |
| Pa234  | 98.4         | 25.10% | 11423557 | 2.955443     | 3865260 | 1195.143 |
| Pa234  | 110          | 8.55%  | 4182855  | 2.889979     | 1447365 | 447.5271 |
| Pa234  | 131.3        | 20%    | 40917    | 2.773964     | 14750   | 4.560832 |
| Pa234  | 152.7        | 7.20%  | 7298     | 2.66266      | 2740    | 0.84748  |
| Pa234  | 226.9        | 6.50%  | 43216    | 2.314266     | 18673   | 5.773944 |
| Pa234  | 569.3        | 10.40% | 54283    | 1.266852     | 42848   | 13.24888 |
| Pa234  | 733          | 8.50%  | 25491    | 0.982039     | 25957   | 8.026007 |
| Pa234  | 936          | 20.00% | 81059    | 0.74372      | 108991  | 33.70023 |
| Ra226  | 186.2        | 3.28%  | 1483208  | 2.498435     | 593654  | 183.5588 |
| Pa231  | 283.7        | 1.60%  | 1803     | 2.08287      | 865     | 0.267655 |
| Pa231  | 330.1        | 1.30%  | 6191     | 1.913822     | 3234    | 1.000231 |
| Bi211  | 351.1        | 12.20% | 4822     | 1.842711     | 2616    | 0.809117 |
| Bi211  | 404.8        | 4.10%  | 969      | 1.674888     | 578     | 0.178887 |
| Bi211  | 426.9        | 1.90%  | 1827     | 1.611282     | 1133    | 0.350597 |
| Bi214  | 609.3        | 46.30% | 1869     | 1.187695     | 1573    | 0.48657  |
| Bi214  | 768.4        | 5.04%  | 961133   | 0.932615     | 1030579 | 318.6562 |
| Bi214  | 806.2        | 1.23%  | 28334    | 0.883852     | 32057   | 9.912193 |
| Bi214  | 934.1        | 3.21%  | 1315     | 0.745501     | 1763    | 0.545405 |
| Bi214  | 1155.2       | 1.69%  | 669      | 0.580426     | 1152    | 0.356386 |
| Bi214  | 1238.1       | 5.94%  | 10191    | 0.536222     | 19005   | 5.876433 |
| Pa234m | 742          | 0.06%  | 218253   | 0.969113     | 225209  | 69.63493 |
| Pa234m | 1001         | 59.00% | 2163157  | 0.687004     | 3148680 | 973.5757 |
| Pb214  | 785.9        | 1.10%  | 142145   | 0.909544     | 156281  | 48.32248 |
| Pb211  | 831.8        | 2.80%  | 16830    | 0.853018     | 19729   | 6.100525 |

표 5-2 시간대별 핵종의 방사선량 및 상대비율

| 핵종     | Curie(0.1y) | 상대비율        | 핵종     | Curie(1y)   | 상대비율       |
|--------|-------------|-------------|--------|-------------|------------|
| U-235  | 1.5371E-02  | 4.9436E+05  | U-235  | 1.5371E-02  | 4.7533E+04 |
| Th-231 | 0.015370525 | 494359.4594 | Th-231 | 0.015370525 | 4.7533E+04 |
| Pa-231 | 3.10918E-08 | 1           | Pa-231 | 3.23363E-07 | 1.0000E+00 |
| Th-227 | 4.73596E-11 | 0.001523219 | Th-227 | 5.06433E-09 | 1.5661E-02 |
| Pb-211 | 4.73596E-11 | 0.001523219 | Pb-211 | 5.06433E-09 | 1.5661E-02 |
| Bi-211 | 4.73596E-11 | 0.001523219 | Bi-211 | 5.06433E-09 | 1.5661E-02 |
| Pa-234 | 0.333785984 | 10735498.89 | Pa-234 | 0.333796647 | 1.0323E+06 |
| Ra-226 | 4.25562E-14 | 1.36873E-06 | Ra-226 | 4.55849E-11 | 1.4097E-04 |
| Pb-214 | 2.7261E-14  | 8.76785E-07 | Pb-214 | 4.36423E-11 | 1.3496E-04 |
| Bi-214 | 2.71931E-14 | 8.74607E-07 | Bi-214 | 4.36354E-11 | 1.3494E-04 |
| 핵종     | Curie(10y)  | 상대비율        | 핵종     | Curie(100y) | 상대비율       |
| U-235  | 1.5371E-02  | 4.7356E+04  | U-235  | 1.5371E-02  | 4.7383E+02 |
| Th-231 | 0.015370525 | 4.7356E+04  | Th-231 | 0.015370525 | 4.7383E+02 |
| Pa-231 | 3.24577E-06 | 1.0000E+00  | Pa-231 | 3.2439E-05  | 1.0000E+00 |
| Th-227 | 4.65151E-07 | 1.4331E+00  | Th-227 | 2.26639E-05 | 6.9866E-01 |
| Pb-211 | 4.65151E-07 | 1.4331E+00  | Pb-211 | 2.26639E-05 | 6.9866E-01 |
| Bi-211 | 4.65151E-07 | 1.4331E+00  | Bi-211 | 2.26639E-05 | 6.9866E-01 |
| Pa-234 | 0.333796647 | 1.0284E+06  | Pa-234 | 0.333796642 | 1.0290E+04 |
| Ra-226 | 1.60873E-08 | 4.9564E-02  | Ra-226 | 1.96767E-06 | 6.0657E-02 |
| Pb-214 | 1.60321E-08 | 4.9394E-02  | Pb-214 | 1.96706E-06 | 6.0639E-02 |
| Bi-214 | 1.60321E-08 | 4.9394E-02  | Bi-214 | 1.96706E-06 | 6.0639E-02 |

## 6. 결 론

본 연구에서는 감마선 측정을 통한 천연 우라늄 붕괴 사슬을 분석하기 위해 측정치와 이론치를 비교하였다. 첫째로 원자력 연구소에서 지원을 받은 시편,  $UO_2$  소결체를 Ge-계측기에 장착하여 24시간 동안 천연 우라늄에서 방출되는 감마선을 측정하였다. 이를 통해 천연우라늄(U-238, U-235)의 붕괴 사슬을 분석을 하였고, 천연 우라늄 각 핵종 당 붕괴 시 방출하는 에너지 영역의 값을 조사하였다. 둘째로 천연 우라늄의 각 핵종의 붕괴 상수를 계산하여 이론적인 감마선에너지 영역 값을 산출하였다. 이론적인 값을 토대로 천연 우라늄의 각 핵종별 시간에 따른 방사선량의 변화값을 계산하고, 그 결과를 표로 나타내었다. 마지막으로 이론적인 데이터로 만든 예상 감마선 스펙트럼과 실험을 통해 측정한 실제 감마선 스펙트럼을 그림으로 나타내어 에너지 영역 당 방사능량의 변화 유형을 비교 할 수 있도록 하였다.

## 참고문헌

- 1) 이기순, "핵연료 개론", 도서출판 효일
- 2) 김희문, "단결정 핵연료의 핵분열 기체 확산 계수 측정 및 자료화 연구", 하나로 공동이용 활성화 사업
- 3) Karl Heinrich Lieser, "Nuclear and Radiochemistry"
- 4) Glenn F.Knoll "Radiation Detection and measurement"
- 5) <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/nuclear/radser.html>