

A Study on the Wigner Energy Release Characteristics of Irradiated Graphite of KRR-2

연구로 2호기 중성자 조사 흑연의 Wigner 에너지 방출 특성 연구

Gyeong Hwan Jeong, Sei-Hun Yun, Dong-Gyu Lee, Chong-Hun Jung and Keun Woo Lee

Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

nghchung@kaeri.re.kr

정경환, 윤세훈, 이동규, 정종현, 이근우

한국원자력연구소, 대전시 유성구 덕진동 150번지

(Received July 26, 2006 / Approved August 8, 2006)

Abstract

Characteristics of heat release process, while the Wigner energy was drawn off the graphite during DSC(Differential Scanning Calorimeter) measurement as an example of annealing process which is one of release methods of Wigner energy that is contained in the irradiated graphite, was studied. Linear temperature rise method in DSC operation was selected to estimate the total Wigner energy content and the heat release rate of each graphite samples, which were located in several positions in the thermal column in KRR-2 research reactor. As an annealing process in DSC operation Wigner energy of the irradiated graphite samples were totally released by heat supplying to the graphite from room temperature to 500°C, in DSC. Characteristics of Wigner energy release from the graphite sample was well correlated with the various activation energy model of the kinetic equation.

Key Words : Irradiated Graphite, Wigner Energy, Annealing, DSC Measurement, Linear Temperature Rise Method

요 약

중성자가 조사된 흑연에 내재되어 있는 Wigner 에너지를 배출시키는 방법의 하나인 가열냉각 공정의 적용 예로 DSC(미분 주사선 열량계) 측정을 통해 흑연으로부터 Wigner 에너지가 배출되는 열 배출 특성을 연구하였다. 일정온도 상승 방법에 의한 DSC 운전에서 중성자가 조사된 흑연을 가열냉각(annealing)하는 동안 배출되는 Wigner 에너지의 총량과 처리온도에 따른 배출속도

를 측정하였다. 연구로 2호기(KRR-2) thermal column 내에 위치별로 중성자의 조사량에 차이가 나는 흑연 시료를 분말로 만들어 상온에서 500℃까지의 온도 범위에서 DSC를 운전하고 이로부터 Wigner 에너지의 배출 속도를 측정하였다. 가열냉각 동안 중성자가 조사된 흑연에서 배출되는 Wigner 에너지의 배출 특성은 가변적 활성화 에너지 속도 식으로 잘 상관시킬 수 있었다.

중심단어 : 중성자 조사된 흑연, 위그너 에너지, 가열냉각, DSC 측정, 일정온도 상승 법

I. 서 론

중성자의 조사를 받은 흑연은 탄소결정의 격자구조가 불안정하게 재배치되며 이 변화 폭은 중성자의 조사량에 따라 크게 영향을 받는다[1-3]. 중성자의 충격으로 흑연결정의 격자구조가 변화될 때 흑연 내에 열적으로 불안정한 에너지가 생성되는데 이를 Wigner 에너지라 한다[1-6]. 즉, 흑연의 결정구조 속 탄소원자들이 중성자속의 영향을 받아 변위(dislocation)를 일으키는 과정에 이웃한 탄소원자간에 새로운 결합이 형성되고(예, vacancy-interstitial의 연결에너지) 이 새로 형성된 탄소원자-탄소원자간 결합 에너지가 흑연 내에 축적되는 것으로 알려지고 있다[1,2,6].

흑연 내 새로 형성된 결정구조로 인해 열적으로 불안정하게 생성된 에너지를 제거하기 위해 흑연을 불활성 기체 하에 열처리함으로써 흑연의 열적 안정성을 확보하는 가열냉각(annealing) 공정에 대한 연구가 진행되고 있다[1-5]. 상온에서 중성자의 조사를 받은 흑연의 경우 최고 2700 J/g까지 Wigner 에너지가 축적되어 있다는 보고가 있다. 이 정도의 에너지가 축적된 흑연은 산화반응이 없는 경우, 즉 연소가 일어나지 않을 때 흑연의 온도가 1500℃까지 상승되는 것으로 보고하고 있다[2,3]. 원자로의 운전 온도가 상온보다 높을 때는 중성자의 조사에 따른 충격 에너지의 일부가 흑연의 내부 에너지로 축적되는 공정(Wigner 에너지의 발생)과 함께 가열냉각 공정이 동시에 일어나 흑연에 축적될 Wigner 에너지의 일부가 다시 흑연 밖으로 방출되는 현상이 일어난다[3-5]. 따라서 흑연에 대한 가열속도를 적절히 제어함으로써 가열냉각에 의해 흑연으로부터 Wigner 에너지를 제

거하는 것이 가능하며, 이 과정을 거쳐 열적으로 안정화된 흑연을 얻을 수 있고 결과적으로 흑연을 더 이상 물리화학적으로 처리하지 않고 폐기처분하는 것이 가능하다는 것이다[7,8].

가열냉각 공정 중 흑연에서 Wigner 에너지가 배출되는 메커니즘을 반응속도(kinetics)로 나타낼 수 있다. 이 속도식의 매개변수로 활성화 에너지(activation energy)와 빈도인자(frequency factor)를 계산하여 Wigner 에너지의 배출속도를 표현함으로써 가열냉각 공정의 에너지 배출 현상을 해석할 수 있다[2,3,5,9]. 중성자가 조사된 흑연의 Wigner 에너지를 열을 공급함으로써 배출시키는 가열냉각 공정의 한 구체적인 방법으로 DSC(Differential Scanning Calorimeter) 분석이 적용되고 있다[2,3,5,7].

KRR-2 연구로의 thermal column에서 나온 흑연 내부에는 Wigner 에너지와 휘발성 방사성 물질, 비 방사성 물질들이 포함되어 있다. 낮은 온도(100℃ 미만)와 단기간 운전(69,000 MWh) 기록을 가진 KRR-2 원자로의 흑연은 이로 인해 상업적인 원자로 흑연들과 비교해 Wigner 에너지 총 함량이 낮고 가열냉각 공정에서 Wigner 에너지의 배출 특성에 차이가 날 것으로 예측된다[2,3].

본 연구에서는 중성자가 조사된 흑연의 Wigner 에너지 함량과 가열냉각 공정에서 배출되는 Wigner 에너지의 배출속도 관계식을 얻기 위해 흑연을 분말(fine powder)로 만들고 일정온도 상승 방법(linear temperature rise method)으로 DSC를 운전하였으며 흑연 내에 축적된 Wigner 에너지의 배출특성(열적 거동)을 반응속도식으로 해석하였다[2,3,5,9].

II. 실험

KRR-2 연구로의 thermal column 내 흑연시료의 열용량과 Wigner 에너지 총량을 측정하기 위해 노심과 떨어진 거리(위치)에 따라 중성자의 조사량에 차이가 나는 흑연 시료를 취하였고, 이 각각의 블록(block) 형태 흑연시료를 분말로 만들어 건조기에서 하루 이상을 건조시켜 사용하였다. 중성자가 조사된 흑연의 열용량 변화를 DSC (DSC Q100, TA Instruments)로 측정하였으며 DSC 운전에 선형 온도 상승 방법을 적용하여 25°C/min, 10°C/min 속도 하에 일정한 무게의 시료에서 배출되는 열량변화를 측정하였다[9]. DSC 측정에 사용되는 흑연 시료를 5~15±0.010 mg의 오차범위로 측정하여 알루미늄팬에 담아 사용하였으며 모든 실험의 재현성을 위해 세 번 이상 측정하였다(산술평균값 적용). DSC 측정을 inert gas 분위기 하에서 진행하고자 본 실험에서는 99.999%의 헬륨 가스를 사용하였다.

실험에 사용한 KRR-2 연구로의 흑연에 대한 모형을 Fig. 1(a)와 Fig. 1(b)에 나타내었다. Fig. 1(b)의 모형도에 따르면 C시료(#53C, #48C, #56C, #45C), B시료 C시료의 순으로 원자로 중심에 근접한 흑연시료임을 알 수 있고 #48 시료 옆으로 그려진 사선은 stainless tube를 의미하며 이 관을 통해 중성자가 이동할 수 있다. 따라서 KRR-2의 thermal column에서 #53C 흑연시료보다 #48C 흑연시료가 중성자의 충격을 더 많이 받는다. KRR-2 연구로의 thermal column

내의 위치에 따른 흑연 시료 각각의 표면선량률과 비방사능 분석을 각각 Teletector(방사선량을 측정기 ADI/Ad-t, Automess)와 반도체 검출기(감마핵종 분석기 GDS-4PB, Canberra)로 측정하였다. 방사선량을 측정에서는 흑연시료를 50~200 g의 범위 내에 정량하였다.

III. 결과 및 고찰

KRR-2 연구로의 thermal column 내의 위치에 따라 흑연시료가 받는 중성자의 조사 결과로 보는 시료 각각의 표면선량률과 비방사능 분석결과를 Table 1에 나타내었다.(흑연시료의 thermal column 내의 위치별 번호를 C 시료에는 C자를 생략하고 B시료는 #53B와 같이 표현하였다) Fig. 1(b)와 Table 1에서 보는 바와 같이 thermal column 내의 위치에 따른 흑연시료의 표면선량률과 비방사능 수치가 노심에 가까운 시료일수록(#48, #53 흑연시료) 큰 값을 나타내

Table 1. Radiological Properties of Irradiated Graphites. (Located in Different Positions apart from Reactor Core in Thermal Column in KRR-2)

Graphite Sample No.	Wigner Energy (J/g)	Surface Effective Dose Rate (mSv/h)	Specific Radioactivity (Bq/g)	Remark (Position)
#53C	150	1.95	8679.78	1J05
#48C	160	0.32	5252.24	1J04
#45C	120	0.22	4157.38	1J01
#56C	35	0.55	5619.96	1J12

* Surface effective dose rate was measured within 5~10 cm apart from the graphite brick surface.

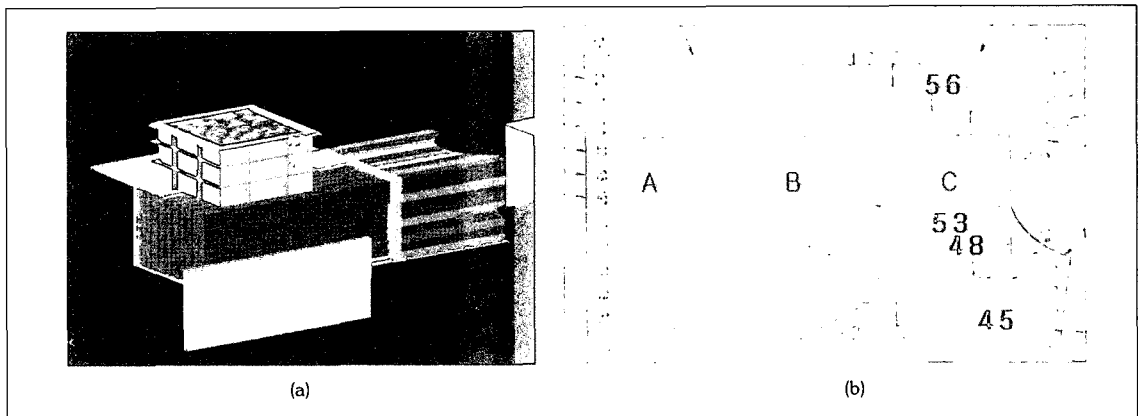


Fig. 1. (a) Schematic Structure of Thermal Column of KRR-2, (b) Arrangement of Graphite Blocks with Positional Numbers.

는데 이는 이들 위치의 흑연시료가 다른 위치의 흑연 시료보다 상대적으로 중성자 조사량을 많이 받아 나타난 결과로 추정된다. KRR-2 연구로에서 발생한 thermal column 내 흑연시료의 방사능 오염도는 최대 2.0 mSv/h로, 비방사능은 8700 Bq/g으로 나타났다(KRR-2 연구로의 thermal column graphite 중 #53, #48 position의 흑연시료).

일정 온도 상승 방법에 의한 DSC 측정에서 KRR-2 연구로의 thermal column 내의 위치별 흑연 시료의 열흡수(또는 열배출) 특성곡선을 측정하여 Fig. 2(#48 흑연시료)와 같은 결과를 얻었다. Fig. 2에서 실선으로 나타낸 곡선은 DSC 측정 시 흑연 시료(#48)를 25°C/min(또는 10°C/min) 속도로 가열할 때 흑연의 보여주는 열흡수 관계(일정한 온도로 DSC cell의 온도를 상승시킬 때 흑연시료가 가지는 열용량, 즉 흡열량에 따라 외부에서 cell의 온도를 정해진 온도로 유지하기 위해 열을 공급하는 양과 Wigner 에너지의 배출로 인해 배출되는 만큼 외부의 열 공급을 줄여 cell이 정해진 온도를 유지하도록 공급량을 줄일 때 외부에서 열을 공급하는 양과의 비교 관계 도식)를 보여주는 DSC chart이다. 이 흑연 시료를 같은 방법으로 DSC에서 2차, 3차의 가열냉각 단계를 더 거쳐 Wigner 에너지가 완전히 배출된 흑연 시료의 열흡수 곡선을 Fig. 2의 점선으로 나타냈고 이 점선은 Fig. 3의 점선과 같은 의미를 가지고 있다. Fig. 3은 중성자의 조사를 받지 않은 흑연이 온도에 따라 나타내는 열용량 곡선과 중성자가 조사된 흑연을 가

열냉각 하여 Wigner 에너지를 완전히 배출한 후 나타내는 열흡수 곡선을 비교한 결과를 나타낸다. Fig. 3에서 실선은 순수 흑연의 열용량 곡선을 의미하고 점선은 Fig. 2에서와 같이 2, 3차의 가열냉각 후 흑연의 열흡수 곡선을 나타내는데 이들은 유사한 열흡수 곡선을 보여준다. 따라서 중성자가 조사된 흑연을 500°C까지 가열냉각 할 때 열적으로 불안정한 Wigner 에너지가 흑연에서 배출되고 이를 다시 가열 냉각하면 순수 흑연이 보여주는 열용량 곡선을 가지는 것으로 추정할 수 있다. 그러므로 Fig. 2에서 두 개 곡선 간의 차이는 중성자가 조사되어 흑연 내부에 축적된 Wigner 에너지의 총 합량을 의미한다.

Fig. 4는 KRR-2 연구로의 thermal column 내의 위치별 흑연 시료 각각에 대해 가열냉각 공정(DSC 측정

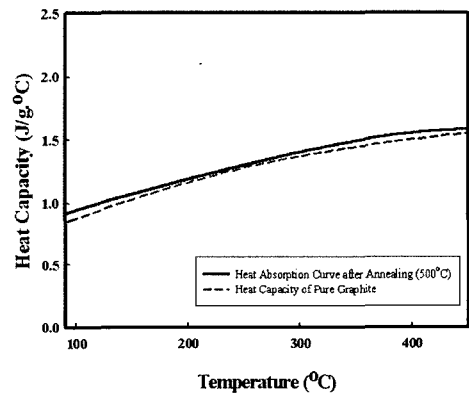


Fig. 3. Comparison of Heat Capacity of Pure Graphite and Heat Capacity of Irradiated Graphite after Annealing(500°C) in DSC (#48 Graphite Sample).

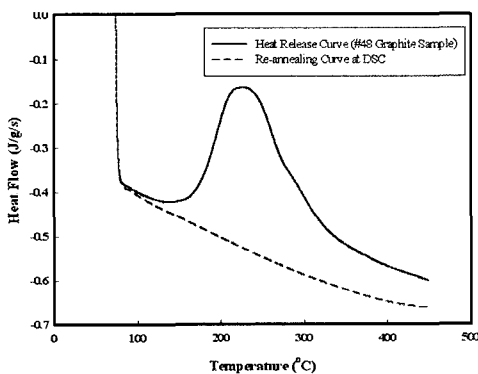


Fig. 2. Heat Flow Curve vs. Temperature in DSC (#48 Graphite Sample).

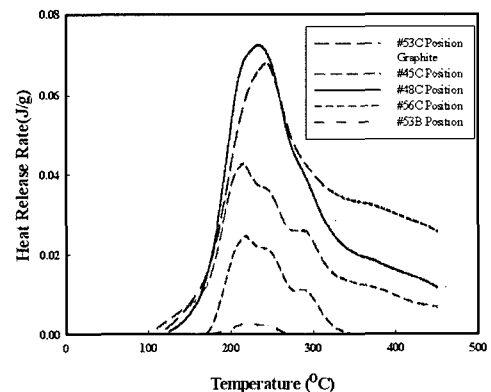


Fig. 4. Heat Release Curves of Various Graphite Samples vs. Temperature (in DSC).

에서)에서 배출되는 Wigner 에너지의 크기를 온도에 따라 도식한 것이다. 흑연 시료들이 원자로의 위치별로 중성자 조사량을 다르게 받은 차이로 인해 Fig. 4에서 보는 바와 같이 온도에 따른 Wigner 에너지의 배출 모형을 다양하게 나타냈다. Fig. 4의 다양한 Wigner 에너지 배출 모형이 서로 다른 변곡점 위치를 가지는 것은 흑연이 중성자의 조사를 받는 동안 중성자 조사량과 온도에 따라 흑연의 결정격자 내에 새로 형성되는 탄소원자-탄소원자 간의 배열과 군집(cluster)의 형성 메커니즘이 서로 다르기 때문이다[6].

Fig. 4에서 보는 바와 같이 배출 에너지 크기가 서로 다른 흑연 시료의 Wigner 에너지 총량을 Table 1에 나타내었다(#48 흑연시료는 160 J/g의 Wigner 에너지가 내재된 것으로 측정되었고, #53 시료는 150 J/g 정도의 Wigner 에너지가 측정되었다). Fig. 2와 Fig. 4에서 보는 바와 같이 #48(#53 흑연 시료는 Fig. 4) 흑연 시료에 내재된 Wigner 에너지의 배출속도(ramp rate = 25°C/min)는 243°C를 최대 피크로 130°C~500°C까지 총 160 J/g의 열량을 가지는 확률 분포로 배출된다. #53 흑연 시료의 Wigner 에너지 배출 모형에서는 #48 흑연 시료보다 300°C 이상의 온도에서 tailing의 폭이 크게 나타났다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 Wigner 에너지의 생성 메커니즘이 #48과 #53 시료 사이에 차이가 있으며 Wigner 에너지의 배출 모형도 가열냉각 시 처리 온도에 따라 속도 관계식이 달라지는 것으로 해석된다. 또한 흑연의 Wigner 에너지 배출과 관련한 문헌에서 흑연의 열처리로 Wigner 에너지의 방출이 500°C까지 대략 90%에 이르지만 그 이상의 Wigner 에너지 방출이 쉽지 않고 1500°C 이상의 가혹한 조건이 필요하다고 보고한 예도 있다[2,3]. 그러나 대부분의 경우 완전 밀폐되지 않은 흑연이 800°C 이상의 조건에서는 분해과정을 거쳐 기화되기 때문에 연소와 같은 고온에서 Wigner 에너지가 배출되는 것을 고려할 필요는 없다.

중성자가 조사된 흑연의 가열냉각에 따른 Wigner 에너지의 배출 모형은 다음과 같이 단일 활성화 에너지 속도식(Eq. (1), single activation energy equation)과 가변적 활성화 에너지 속도식(Eq. (2), variable activation energy equation)으로 나타낸다

[2,3,5,9].

단일 활성화 에너지 속도식:

$$\frac{dS}{dt} = -\nu S \cdot \exp^{-\frac{E}{kT}} \dots\dots\dots (1)$$

가변적 활성화 에너지 속도식:

$$\frac{dS(E,t)}{dt} = -\nu S(E,t) \cdot \exp^{-\frac{E}{kT}} \dots\dots\dots (2)$$

여기에서

- S = 배출된 저장 에너지 또는 남아있는 에너지 [eV/sec]
- E = 단일(또는 가변적) 활성화 에너지 [eV]
- k = Boltzmann 상수 [eV/K]
- ν = 빈도 인자 [sec⁻¹]
- T = 온도 [K]
- t = 시간 [sec].

중성자의 조사를 받아 Wigner 에너지를 저장한 흑연을 가열냉각 공정으로 에너지를 배출시킬 때 적용하는 모형으로 Eq. (2)의 가변적 활성화 에너지 속도식을 일반적으로 선택한다. 이는 중성자의 충격으로 흑연 내에 Wigner 에너지가 저장되는 메커니즘이 단일한 조건(온도, 압력, 중성자속 등) 하에 이루어지는 것이 아니라 원자로의 운전 조건에 따라 다양한 변화로 전개된 연유에서다. 이로 인해 탄소원자-탄소원자의 결합과 군집이 다양한 형태로 생성되고 결합 에너지도 다양한 온도 하에 분산되어 흑연 내에 축적되며, 반대로 Wigner 에너지의 배출 특성 또한 생성 과정과 같이 복잡한 메커니즘으로 구성되어 있기 때문이다 [5,6,9].

Iwata는 Fig. 4와 같은 전형적인 흑연의 가열냉각 곡선 중 #45C, #56C와 같은 Wigner 에너지 배출곡선에 대한 Eq. (2)의 표현을 3-단계 비가역 반응 모형으로 표현하였다[5]. 즉, 3-단계 peak를 가지는 가열냉각 공정의 반응속도에 대한 해석에 3개의 활성화 에너지가 연속적으로 진행되는 반응 모형으로 모사하였다. 여기에서 3-단계 반응 모형은 중성자에 의한 탄

소 탄소의 배열이 변형되고 발달되어 흑연구조 내에 중간상(interstitial)과 빈공간(vacancy) 탄소 원자로 새로운 연결고리들을 다양하게 이루며 비이상적 에너지를 축적한 것을 냉각가열 공정에서 그 에너지들이 배출되는 것으로 해석된다. 이 관계와 Eq. (2)를 elementary reaction으로 비교하면 다음과 같다.

(Iwata's scheme): $A \rightarrow B \rightarrow C$

(Eq. (2)): $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow \dots \rightarrow R \rightarrow S \rightarrow T$

따라서 이 두 표현의 비교에서 Eq. (2)가 보다 포괄적인 반응 모형을 나타내며, Fig. 4의 #48C, #53C 흑연에 대한 Wigner 에너지 배출 모형을 잘 표현할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 중성자가 조사된 흑연을 가열냉각할 때의 Wigner 에너지 배출 모형을 가변적 활성화 에너지 속도식(Eq. (2))에 상관시킨 결과이다. 가변적 활성화 에너지 속도식에서 활성화 에너지를 Bridge와 Mottershead가 온도의 함수로 근사적으로 제시한 식(Eq. (3))에 대입하였다[2,10].

$$E = [33.7 - 1.83 \log_{10}(a)T \times 10^{-4} - 0.037, (0.1 < a < 2 \times 10^{-4} [^{\circ}\text{C}/\text{min}]) \dots \dots \dots (3)$$

여기에서 a = 일정온도 상승속도 [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$].

Fig. 5에서 Eq. (3)를 적용하여 #48 흑연 시료의

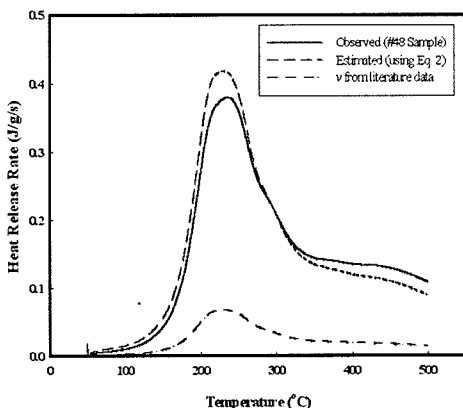


Fig. 5. Heat Release Curve using Variable Activation Energy Model Equation comparing with Experimental Data (#48 Sample).

Wigner 에너지 배출 속도를 상관시키는데 적용한 매개변수인 빈도 인자의 최적값은 $\nu = 4.66 \times 10^{14} [\text{sec}^{-1}]$ 으로 나타났다(문헌에서 일반적으로 적용하는 단일 빈도 인자 값, $\nu = 7.5 \times 10^{13}$ 이지만, 본 계인 #48 흑연 시료에 적용할 때 가변적 활성화 에너지 속도식인 Eq. (3)에 문헌치를 대입하면 Fig. 5의 낮은 피크와 같은 결과를 얻게 된다).

Fig. 5에서 가변적 활성화 에너지를 온도에 대해 선형 관계식(Eq. (3))을 대입한 결과 peak point(200 $^{\circ}\text{C}$ ~250 $^{\circ}\text{C}$)와 tailing(330 $^{\circ}\text{C}$ ~500 $^{\circ}\text{C}$) 구간에 오차가 발생하였지만 실험결과를 잘 상관시킬 수 있었다. Fig. 5에서 보는 오차를 보정하기 위해서는 Eq. (3)의 선형 관계식을 온도에 대해 다항식으로 표현하여 실험결과에 보다 접근시킬 수 있을 것이다. Fig. 5에서 빈도 인자의 값으로 문헌치($\nu = 7.5 \times 10^{13}$)를 적용한 결과 낮은 위치에 확률 분포도를 가지는 곡선(dash-dot

Table 2. Comparison of Parameters in Activation Energy Model for Wigner Energy Release.

Researcher	Model Equation	Parameter		Remark
		Activation Energy E [-]	Frequency Factor ν [s^{-1}]	
This Work	Eq. ②	Eq. ③	4.66×10^{14}	
Kelly[2,9]	Eq. ②	Eq. ③	7.5×10^{13}	
Iwata[5]	Eq. ①	1.34	2.2×10^{12}	Combination of 3 steps
		1.50	8.5×10^{12}	
		1.78	1.5×10^{12}	
Single Frequency Factor [9]	Eq. ①	1.47	7.5×10^{12}	Combination of 3 steps
		1.59		
		1.74		

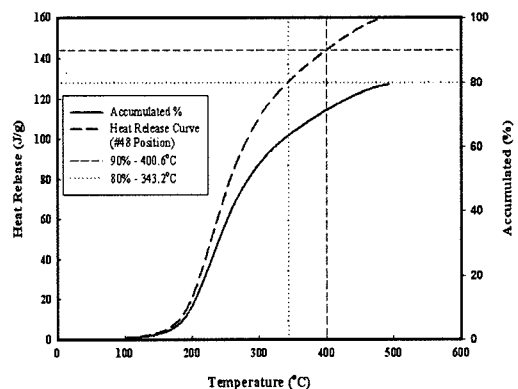


Fig. 6. Accumulated Heat Release Rate vs. Temperature during Annealing of Irradiated Graphite.

line)으로 나타났다. Iwata는 가변적 활성화 에너지의 적용을 변화시켜 3개의 단일 활성화 에너지의 합으로 흑연에서 Wigner 에너지가 배출되는 모형을 모사하였는데 이 구간별 활성화 에너지 모형에서는 6개의 매개변수(3개의 활성화 에너지, 3개의 빈도 인자)를 결정하여야 한다[5]. KRR-2의 thermal column 내 흑연시료(#48)가 온도에 대해 가지는 Wigner 에너지 배출 속도를 가변적 활성화 에너지 속도식(Eq. (2))와 단일 활성화 에너지 속도식에 적용한 매개변수 비교치를 Table 2에 나타내었다(Fig. 4에서 #48 흑연시료와 #53 흑연시료는 유사한 Wigner 에너지 배출 모형을 나타내고 있어 상기 Wigner 에너지 배출 모형식으로 나타낼 수 있으나, 다른 흑연시료는 Iwata와 같은 3-단계 반응 모형을 적용하여 배출 모형을 상관시킬 수 있으며 이 경우 3 단계 빈도 인자 및 3 단계 활성화 에너지 값을 대입한다[9]).

Fig. 6에서는 흑연 시료(#48 시료)를 가열냉각 할 때 앞서 설명한 온도 의존성을 가지는 활성화 에너지(Eq. (3))를 대입한 가열냉각 속도식(Eq. (2))를 이용하여 흑연에 내재된 Wigner 에너지의 배출을 누적 배출량 곡선으로 나타냈다. #48 흑연 시료를 온도에 따라 Wigner 에너지가 배출되는 배출 총량을 추정할 결과 500℃까지의 Wigner 에너지 총 배출량을 100%로 기준할 때 343.2 ℃까지 약 80%의 Wigner 에너지 배출이 이루어지고 400.6 ℃까지 약 90%의 Wigner 에너지가 배출되는 것으로 나타났다.

IV. 결론

연구로 2호기(KRR-2)의 중성자가 조사된 흑연(#48, #53 position)에 내재된 Wigner 에너지를 DSC로 측정하였다. DSC 운전을 일정 상승 온도 조건(linear temperature rise method)으로 하여 흑연에 내재된 Wigner 에너지의 배출 특성을 측정하고 DSC 운전에 의한 가열냉각 공정에서 에너지 배출 속도를 모사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. KRR-2의 thermal column에 있는 중성자 조사된 흑연에 내재된 에너지의 저장량을 평가한 결과 220~240℃에 최대 저장량을 가지며 160 J/g의

$$\frac{dS(E, t)}{dt} = -\nu S(E, t) \exp\left(-\frac{E}{kT}\right)$$

$$E = (33.7 - 1.83 \log_{10} a) T \times 10^{-4} - 0.037$$

$$\nu = 4.66 \times 10^{14} \text{ [sec}^{-1}\text{]}$$

Wigner 에너지가 저장되어 있다.

2. 중성자에 조사된 흑연의 Wigner 에너지의 배출 모형 식을 다음과 같이 얻었다.

3. KRR-2에서 발생한 중성자에 조사된 흑연에 함유된 Wigner 에너지의 배출이 가열냉각 온도에 따라 영향을 받으며 340℃까지 가열냉각 할 때 약 80%, 400℃까지는 약 90%의 에너지가 배출되었다.

참고 문헌

- [1] B. Kelly, Fundamentals of Radiation Damage in Graphite due to Energetic Neutrons, IAEA-TECDOC-1154, 1 ~ 34 (2000)
- [2] B. Kelly, Stored Energy and the Thermo-Physical properties of Graphite, IAEA-TECDOC-1154, 85 ~ 112 (2000).
- [3] B. J. Marsden, Irradiation Damage in Graphite, Graphite Moderator Lifecycle Behaviour, IAEA-TECDOC-901, 17 ~ 46 (1995).
- [4] W. Botzem and J. Wörner, Inert Annealing of Irradiated Graphite by Inductive Heating, Proceedings of Nuclear Graphite Waste Management, IAEA Technical Committee Meeting held in Manchester, United Kingdom, 18-20 Oct. (1999).
- [5] T. Iwata, Fine Structure of Wigner Energy Release Spectrum in Neutron Irradiated Graphite, J. Nuclear Materials, 133 ~ 134, 361 ~ 365 (1985).
- [6] C. P. Ewells, R. H. Telling, A. A. El-Barbary and M. I. Heggie, Metastable Frenkel Pair Defect in Graphite: Source of Wigner Energy?, 91, 2, 1 ~ 4 (2003).
- [7] R. M. Guppy, J. McCarthy and S. J. wisbey,

Technical Assessment of the Significance of Wigner Energy for Disposal of Graphite Wastes from the Windscale Piles, IAEA Technical Committee Meeting held in Manchester, United Kingdom, 18-20 Oct. (1999).

- [8] J. Wörner, W. Botzem, and S. D. Preston, Heat Treatment of Graphite and Resulting Tritium Emissions, IAEA Technical Committee Meeting held in Manchester, United Kingdom, 18 ~ 20 Oct. (1999).
- [9] P. C. Minshall and A. J. Wickham, The Description of Wigner Energy and Its Release from Windscale Pile Graphite for Application to Waste Packaging and Disposal, IAEA Technical Committee Meeting held in Manchester, United Kingdom, 18 ~ 20 Oct. (1999).
- [10] H. Bridge and D. Mottershead, *J. Nuclear Materials*, 20, 281 (1966).