

## UO<sub>2</sub> 핵연료의 산화거동

강권호<sup>†</sup> · 문흥수 · 나상호 · 오세용\*

한국원자력연구소 전식공정핵연료 기술개발부, \*충남대학교  
(2005년 6월 13일 접수, 2005년 11월 24일 채택)

### Oxidation Behavior of UO<sub>2</sub> Fuel

Kweon Ho Kang<sup>†</sup>, Heung Soo Moon, Sang Ho Na and Se Yong Oh\*

Korea Atomic Energy Research Institute, \*Chung Nam National University

(Received 13 June 2005, Accepted 24 November 2005)

#### 요 약

열중량 분석기와 XRD를 이용하여 573~873 K의 온도범위와 이론밀도의 94.64~99.10% 범위에서 UO<sub>2</sub> 핵연료 소결체의 공기 중 산화실험을 수행하였다. XRD를 이용하여 실험온도 범위에서 UO<sub>2</sub>는 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>으로 산화되는 것을 확인하였다. 시간에 따른 산화반응은 S자의 형태를 나타내고 있어 핵생성과 성장의 과정을 따르는 것으로 나타났다. 밀도가 증가함에 따라 산화속도는 떨어지고, 산화유도시간은 늘어나는 것으로 나타났다. UO<sub>2</sub>에서 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>으로의 산화에 대한 활성화 에너지는 573~723 K의 온도범위에서 약 89.54 kJ/mol, 723~873 K의 온도범위에서는 34.40 kJ/mol로 나타났다.

**주요어** : UO<sub>2</sub>, 산화, X-선회절, 열중량 분석기, 밀도, 활성화 에너지

**Abstract** — The oxidation behavior of UO<sub>2</sub> pellet was studied using an XRD and a thermogravimetric analyzer in the temperature range from 573 to 873 K and in the density range from 94.64 to 99.10% of theoretical density in air. It was found from the XRD study that UO<sub>2</sub> was completely converted to U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> in this experimental temperature range. The formation of U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> displays sigmoidal reaction kinetics. The oxidation rate was reduced with density. Induction time for the oxidation of UO<sub>2</sub> was delayed with density because of open pore formed in surface of UO<sub>2</sub> pellet. The activation energy for oxidation of UO<sub>2</sub> was determined to be 89.54 kJ/mol and 34.40 kJ/mol in the temperature range from 573 to 723 K and from 723 to 873 K, respectively.

**Key words** : UO<sub>2</sub>, Oxidation, XRD, Density, Activation energy

#### 1. 서 론

UO<sub>2</sub>는 높은 용융점, 노내 안정성 등의 이유로 발전소 핵연료용으로 가장 널리 이용되고 있는 핵물질이다. 그러나 노내에서 핵분열로 인해 발생하는 핵분열 생성물 때문에 핵연료내의 산소 포텐셜이 달라지고 이로 인해 UO<sub>2</sub>가 UO<sub>2+x</sub>의 형태로 산화될 가능성이 있다. 이럴 경우

비열, 열전도도, 크립 등의 물성이 크게 달라져 핵연료의 노내 건전성에 영향을 미치게 된다. 또한 UO<sub>2</sub>가 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>으로 산화될 경우 밀도차이에 의한 부피 팽창으로 핵연료 피복관과 상호응력이 작용하여 피복관의 건전성에도 영향을 미친다. 또한 부피팽창으로 핵연료에 크랙이 형성되며 심하면 분말로 변하게 된다. 이럴 경우 열전도도가 감소하여 핵연료의 중심온도 상승을 초래하여 핵연료의 노내 건전성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한 사용후핵연료의 건식저장을 위한 용기 설계, 방사성 폐기물 처분장 건설을 위한 열해석, DUPIC(Direct Use of spent PWR fuel In CANDU

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
Korea Atomic Energy Research Institute  
Tel: 042-868-2565  
E-mail: nghkang@kaeri.re.kr

reactors) 핵연료 제조공정 확립 등에도 핵연료의 산화에 관한 정보가 필요하다. 이런 이유로 UO<sub>2</sub>의 산화에 관한 연구는 지난 40년간 꾸준히 연구가 수행되어 왔다. UO<sub>2</sub>는 U<sub>3</sub>O<sub>7</sub>이나 U<sub>4</sub>O<sub>9</sub>을 거쳐 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>으로 산화 되는 것으로 알려져 있다. U<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 또는 U<sub>4</sub>O<sub>9</sub>으로의 산화에서는 약간의 부피감소가 일어나지만 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>으로의 산화에서는 밀도가 UO<sub>2</sub>보다 23% 줄어들고, 총 부피는 36% 늘어난다.

Aronson *et al.*<sup>[1]</sup>은 공기와 산소의 분위기하에서 433~623 K의 온도범위에서 UO<sub>2</sub>의 산화실험을 수행하였다. 그들은 UO<sub>2</sub>의 산화가 UO<sub>2</sub> 격자를 통한 산소의 확산에 의해 U<sub>3</sub>O<sub>7</sub>상이 형성되고, 핵생성과 성장에 의해 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>상으로 진행된다고 보고하였다.

Peakall and Antill<sup>[2]</sup>은 623~873°C의 온도에서는 산화 유도시간이 존재하며 온도가 증가할수록 줄어든다고 발표하였다.

Scott *et al.*<sup>[3]</sup>은 미세한 UO<sub>2</sub> 분말의 산화는 UO<sub>2-35±0.02</sub>로의 산화와 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>으로의 산화인 두단계로 진행된다고 하였다. Iwasaki and Ishikawa<sup>[4]</sup>는 1073 K와 1173 K 온도의 산화에서 초기에는 빠른 산화율을 보이다가 O/U가 약 2.25에 도달할 때 급격히 줄어들며, 이때에는 시편이 깨지지 않았다. 그 후에는 산화율이 다시 증가하여, O/U가 약 2.7에 가까워지면 시편은 작은 조각으로 깨지는 것을 발견하였다. Gilbert *et al.*<sup>[5]</sup>은 UO<sub>2</sub>와 사용후핵연료를 대상으로 전식저장조건하에서 산화실험을 수행하여, 사용후핵연료의 산화속도가 UO<sub>2</sub>의 산화속도보다 50에서 100배 빠른 것으로 발표하였다.

Hasting *et al.*<sup>[6]</sup>은 결정립 10.6 μm UO<sub>2</sub> 시편의 산화 실험을 통해서 활성화 에너지는 140 kJ/mol이라고 발표하였으며, Tayler *et al.*<sup>[7]</sup>은 97% 밀도 시편의 산화에 대한 활성화 에너지는 112 kJ/mol이라고 발표하였다. Harrison *et al.*<sup>[8]</sup>은 593~653 K의 온도범위에서 활성화 에너지가 160 kJ/mol을 구하였으며, Scott *et al.*<sup>[3]</sup>은 1073 K까지의 온도범위에서 활성화 에너지가 평균 80 kJ/mol이라고 발표하였다.

이처럼 많은 과학자들이 UO<sub>2</sub> 핵연료의 산화속도에 관한 연구를 통해 활성화에너지를 발표하였으나, 온도, 시편의 형상에 따라 약 50 kJ/mol에서 190 kJ/mol의 범위까지 다양하게 나타났다. 이는 산화속도에 영향을 미치는 온도, 습도, 불순물, 비표면적, 결정립 크기, 밀도 등을 명확하게 고려하지 않았기 때문이다.

본 연구에서는 UO<sub>2</sub> 산화에 대한 문헌을 검토하고 산화속도에 영향을 미치는 주요 인자 중에 밀도와 온도의 영향을 분석하였다. 573~873 K의 온도범위와 이론밀도의 94.64~99.10%의 범위에서 UO<sub>2</sub> 핵연료 소결체의 공기 중 산화실험을 수행하였다.

## 2. 산화실험

### 2-1. 실험재료

본 연구에서는 UO<sub>2</sub> 분말을 1973 K, 4시간 수소분위기에서 소결한 소결체를 이용하였다. 산화거동에 미치는 밀도의 영향을 확인하기 위해서 이론밀도의 94.64~99.1%의 시편이 이용되었다. 이들 시편은 다이아몬드 커터를 이용하여 두께 1.4 mm, 직경은 8.06~8.41 mm, 무게는 약 803±3 mg의 디스크 형태로 가공되었다. 또한 온도에 따른 산화율을 확인하기 위하여, 개기공의 영향이 적은 이론밀도의 96.88%의 시료를 이용하였으며, 이들 시편은 직경 약 8.5 mm, 두께 약 1.4 mm, 무게 약 800±6 mg의 디스크 형태로 가공되었다. 시편 표면의 가공 거칠기가 산화에 미치는 영향을 최소화 하기 위하여 600번 silicon-carbide 연마지를 이용하여 표면 연마를 수행하였으며, 표면 이물질 제거를 위하여 아세톤으로 초음파 세척기에서 세척하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용된 시료의 조직사진을 나타낸 것이며, 결정립 크기는 약 14.7 μm 정도였다.

### 2-2. 실험장치

UO<sub>2</sub> 핵연료의 산화실험을 위해 사용된 열중량 분석기(TGA, Thermo-Gravimetric Analyzer)는 TGA 92-12 (SETARAM, France)를 이용하였다. TGA 92-12는 광천칭(beam balance) 형태의 열전칭, 가열히터, 시료용기, 가스 및 냉각수 공급라인, 열전대, 온도조절기, 데이터수신용 컴퓨터, 전력공급 및 온도 조절기로 구성되어있다. 사용온도는 상온에서 1273 K까지이며, 최대가열속도는 분당 99.9 K이다. 최대 측정 가능 무게는 20 g이며, 측정 한계는 1 μg까지이다. 시료와 용기와의 반응을 막기 위해 1.5 m<sup>3</sup>의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 용기를 이용하였다. Fig. 2는 본 연구에서 수행한 TGA의 개략도를 나타낸 것이다.

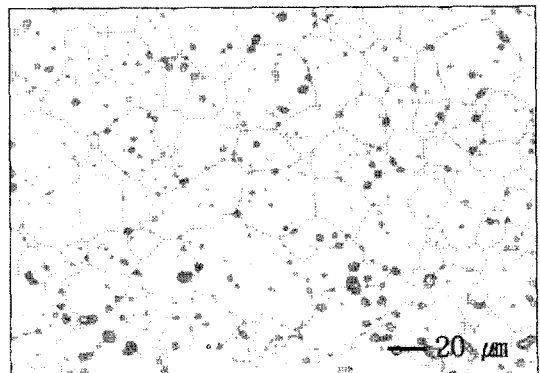


Fig. 1. Microstructure of UO<sub>2</sub> pellet.

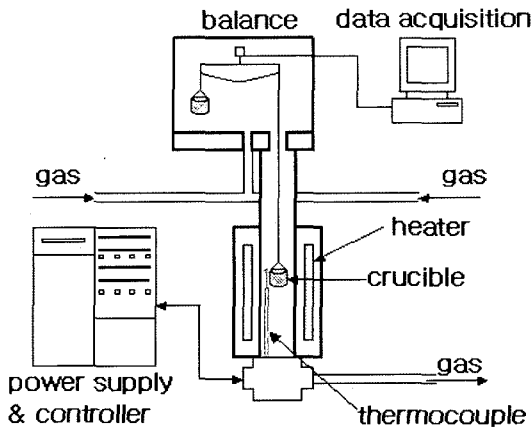


Fig. 2. Schematic diagram of TGA 92-12.

2-3. 실험방법

주 실험에 앞서 예비 실험으로 열중량 분석기내의 가스 흐름과 온도상승에 따른 부력효과를 측정하기 위한 빈 용기 시험(blank test)을 수행하였다. 즉, 시료를 담지 않은 빈 용기를 열중량 분석기에 걸은 후 상온에서 573~873 K까지 가열되는 동안 무게변화를 측정하였다. 이때 가스의 양과 압력의 영향도 확인하였으며, 산화온도까지 가열되는 중에 시료가 산화되는 것을 막기 위해 승온 속도를 분당 50 K로 하였다. 빈 용기 실험을 통해 얻은 자료는 주 실험을 통해 얻은 자료의 보정 자료로 활용될 것이다. 주 실험에서는 산화율에 영향을 미치는 주요 인자 중에 밀도와 온도의 영향을 분석하였다. 우선 산화거동에 미치는 밀도의 영향을 확인하기 위하여 773 K에서 이론밀도의 94.64~99.10%에 해당하는 밀도의 시료를 이용하여 산화반응에 의한 무게변화를 측정하였다. 온도에 따른 산화율 변화를 확인하기 위하여 573~873 K의 등온조건에서 1 bar의 공기 공급 압력과 10 // hr 유속의 공기 중에서 산화실험을 수행하였다. 산화 후 XRD를 이용하여 산화물의 상을 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 빈 용기 시험

열중량 분석기의 고유 특성인 가스흐름과 온도상승 때문에 발생하는 부력이 무게변화에 미치는 영향을 확인하기 위해 빈 용기 시험을 수행하였다. Fig. 3은 빈 용기 실험의 결과를 나타낸 것이다. 온도의 증가에 따라 부력에 의한 무게 변화는 유속이 10 //hr일 때 573 K에서 약 0.83 mg이었으며, 온도가 증가할수록 무게변화가 크게 나타나 923 K에서는 약 1.72 mg까지 증가하였다. 공기 흐름에 대해서는 온도가 873 K에서 유속이 1 //hr

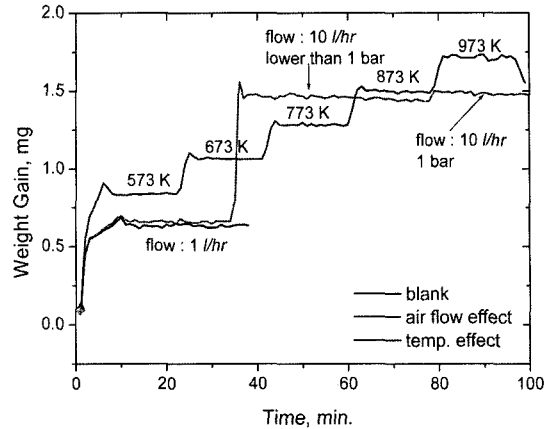


Fig. 3. The results of the blank test.

일 때 약 0.64 mg이었으며, 같은 온도에서 유속이 10 //hr일 때 약 1.49 mg으로 증가하였다. 또한 공기 공급 압력이 온도 873 K, 유속 10 //hr에서 약 0.8 bar에서 1 bar로 높아짐에 따라 1.43 mg에서 1.49 mg으로 증가하였다.

3-2. 산화물의 상

UO<sub>2</sub> 핵연료의 산화 실험 후 산화물의 상을 X선 회절(XRD) 분석을 이용하여 확인하였다. 일반적으로 573 K 이하의 온도에서 UO<sub>2</sub>는 준 안정상인 U<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 또는 U<sub>4</sub>O<sub>9</sub>을 거쳐 안정한 상인 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>으로 산화되지만, 그 이상의 온도에서는 중간상을 거치지 않고 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>으로 산화되는 것으로 알려져 있다. 본 연구의 산화온도 범위인 573 K 이상의 온도에서는 완전히 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>으로 산화된 것을 확인하였다. Fig. 4는 본 연구에서 얻은 산화물의 XRD 패턴을 나타낸 것이다.

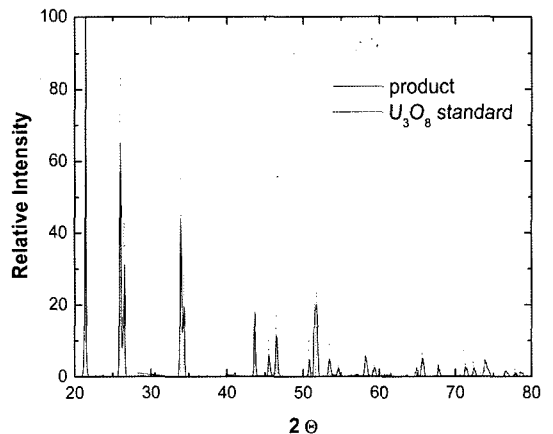


Fig. 4. XRD pattern of product after complete oxidation of UO<sub>2</sub>.

3-3. 밀도의 영향

산화율에 미치는 밀도의 영향을 확인하기 위하여 773 K의 등온 조건에서 이론밀도의 94.64, 96.88, 97.96 및 99.10%의 밀도를 갖는 시료를 이용하여 공기 중 산화 실험을 수행하였다. 대부분의 산화는 표면에서 산소와의 반응으로 일어나기 때문에 시간에 따른 산화반응을 시편의 초기 반응 표면적에 대한 무게 증가로 나타내는 것이 일반적이다. 하지만 UO<sub>2</sub>의 경우 산화반응이 진행됨에 따라 시편에 크랙과 분쇄로 인해 표면적이 변하게 된다. 따라서 UO<sub>2</sub> 핵연료의 산화반응 진행정도는 산화에 의한 무게증가를 완전 산화의 무게증가에 대한 비율로 나타낸다. Fig. 5는 본 연구에서 구한 시간에 따른 산화를 비율로 나타낸 것으로, 773 K까지의 가열시간인 10분을 제외한 부분을 나타낸 것이다. 산화온도인 773 K까지 가열되는 동안 산화의 진행정도는 시편의 밀도가 94.64, 96.88, 97.96 및 99.10%일 때 0.188, 0.071, 0.039 및 0.173% 산화가 진행되었다. 이는 산화율, 활성화 에너지 등의 계산에 영향을 미치지 않을 만큼 무시할 정도의 적은 양이다. 약 10% 산화가 진행될 때를 기준으로 산화율을 구하였으며, Table 1에 밀도에 따른 산화율을 나타내었다. 밀도가 증가할수록 산화유도시간

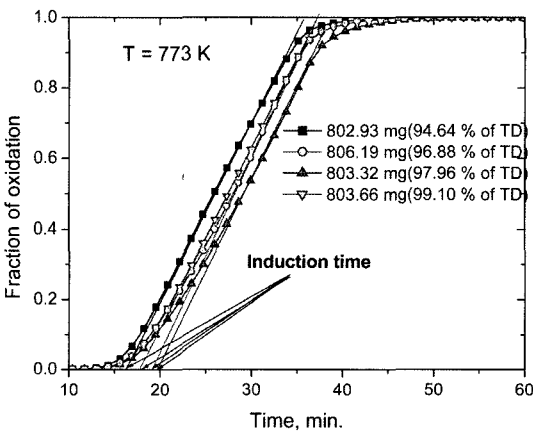


Fig. 5. Fraction of oxidation with density variation in air at 773 K.

Table 1. Oxidation rates and induction times for oxidation of UO<sub>2</sub> with density variation.

Density, % of TD	Induction time, min	Time of 10% oxidation, min	Oxidation rate, min <sup>-1</sup>
94.64	6.03	17.75	0.0375
96.88	8.95	18.91	0.0337
97.96	9.79	19.49	0.0320
99.1	7.68	18.89	0.0357

이 증가하고, 산화율은 늦어지는 것으로 나타났으나 96.88% 이상의 시료에서는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 94.64% 시료의 산화 유도 시간이나 산화율이 다른 시료에 비해 큰 차이가 나는 것은 96% 이하의 시료표면에 존재하는 개기공 때문으로 생각된다<sup>[9]</sup>. 즉, 96% 이상의 시료에는 표면에 개기공이 없어 96% 이하의 시료보다 비표면적이 적기 때문으로 생각된다. 99.1%의 밀도를 갖는 시료의 경우 산화 유도 시간이 짧아지고, 산화율이 빨라진 것은 표면에 약간의 크랙이 있었으며, 이로 인해 비표면적이 커졌기 때문으로 생각된다.

3-4. 온도의 영향

산화율에 미치는 온도의 영향을 확인하기 위하여 573, 623, 673, 723, 773, 873 K 온도의 등온 조건에서 공기 중 산화실험을 수행하였다. 일반적으로 UO<sub>2</sub> 소결체가 공기 중에서 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>으로 산화되는 경우, 핵생성과 성장의 기구로 진행된다. 산화초기는 산화 유도 시간이 존재하여 매우 낮은 산화율을 보이다가 점차 속도가 빨라져 일정 기간 선형구간을 지나 마지막에는 다시 속도가 늦어지는 S자 형태의 산화거동을 보이는 것으로 알려져 있다<sup>[10][11]</sup>. Fig. 6은 시간에 따른 산화정도를 비율로 나타낸 것이다. 산화온도까지 가열되는 동안 산화 반응에 의한 무게증가는 거의 나타나지 않았다. 본 연구에서 측정된 무게변화 역시 실험온도 전 구간에서 전형적인 S자 형태의 산화거동을 보이고 있어, 핵생성 및 성장의 거동을 따르는 것으로 나타났다. UO<sub>2</sub> 소결체 표면에 형성된 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>은 밀도차이로 인해 크랙이 형성되고 더 진행되면 분말의 형태로 떨어져 나간다. 산화율은 소결체 표면의 크랙 형성과 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>이 떨어져나가는 속도에 의해 좌우된다<sup>[12]</sup>. 본 연구에서 구한 산화율을 5, 10, 20 및 50% 산화가 진

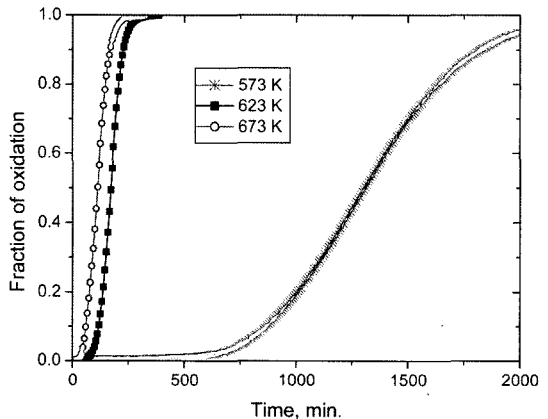


Fig. 6. Fraction reacted-time curve for the oxidation of UO<sub>2</sub> at 573~673 K in air.

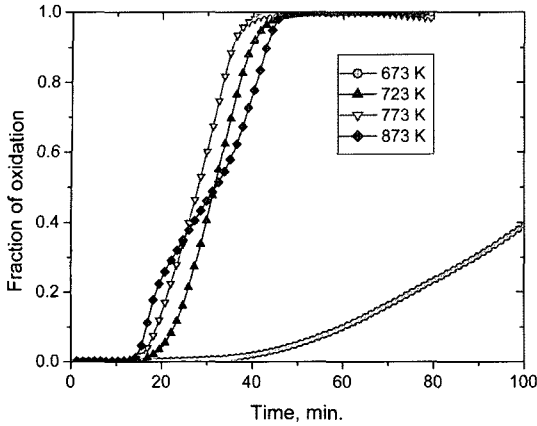


Fig. 7. Fraction reacted-time curve for the oxidation of  $UO_2$  at 673~873 K in air.

Table 2. Oxidation rates of  $UO_2$  in air at 573~873 K.

Temp. K	Rate of oxidation, %/hr			
	5% conv.	10% conv.	20% conv.	50% conv.
573	0.39792	0.699064	1.203538	2.320293
623	3.115265	5.415162	9.302326	18.25928
673	7.075472	11.42857	17.69912	28.87392
723	25.21008	42.55319	70.17544	130.4348
773	39.47368	64.51613	100.8403	163.0435
873	73.17073	120	166.6667	148.5149

행될 때를 기준으로 Table 2에 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 산화율이 증가하는 것으로 나타났으나, 723 K에서 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 각 온도에서 산화가 진행됨에 따라 산화율이 증가하는 것으로 나타났으나, 873 K에서는 약 20% 산화가 진행될 때까지 산화율이 증가하다가 다시 감소하는 것으로 나타났다. 이는 Peakall and Antill<sup>[2]</sup>의 실험결과와 유사하게 나타났다. 이들은 873 K까지의 온도범위에서 산화 유도 시간을 관찰했고, 낮은 산화율에서 높은 산화율로의 전환은 핵생성과 성장에 지배된다고 발표하였다. 산화 유도 시간 이

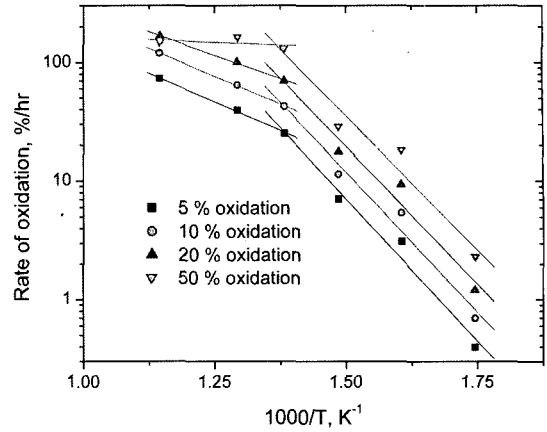


Fig. 8. Rate of oxidation versus  $1000/T$ .

후는 시료표면에 형성된 크랙이 없는 얇은  $U_3O_8$  층을 통한 산소이온의 확산에 의해 산화율이 정해진다고 발표하였다.  $U_3O_8$  층이 더 진행되면 산화층간에 상호 응력이 발생하여 크랙이 형성된다. 773~1173 K의 온도범위에서는 온도증가에 따라 산화율이 감소하는 것을 발견하였다. 이는 온도 증가에 따라 산화층의 소성이 증가하여 산화층 간에 발생하는 응력이 크랙보다는 소성 변형으로 흡수되기 때문으로 해석하였다.

온도에 따른 산화속도를 구하기 위하여 5, 10, 20 및 50% 산화가 진행될 때 산화율의 자연 대수 값을 온도의 역수의 함수로 Fig. 8에 나타내었다. 산화율이 급격히 변하는 723 K를 기준으로 전, 후의 온도에 대해 근사화 하였다. 산화속도는 Arrhenius plot을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\%/\text{hr} = Ae^{\left(\frac{-E}{RT}\right)}$$

여기서 A(%/hr)는 상수, E(J/mol)는 활성화 에너지, R(J/mol K)은 기체상수, T(K)는 절대온도를 나타낸다.

본 연구에서 구한  $UO_2$ 의 산화 진행 정도에 따른 상수와 활성화 에너지는 Table 3과 같다. 온도가 증가함

Table 3. Rate constants and activation energies for the oxidation of  $UO_2$ .

Temp. (K)	Constant (%/hr)				Activation energy (kJ/mol)			
	5%	10%	20%	50%	5%	10%	20%	50%
573~723	1.13	1.48	1.80	2.23	91.938	90.557	88.897	86.768
723~873	1.21	1.75	2.06	2.53	37.010	36.123	30.053	3.557
603~623								170[13]
623~723								67[13]
523~623								143[14]
623~723								109[1]

에 따라 그리고 산화가 진행됨에 따라 활성화 에너지는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 온도가 증가하고, 산화가 진행됨에 따라 산화율이 증가하기 때문으로 생각된다. Boase and Vandergraaf<sup>[13]</sup>와 You *et al.*<sup>[14]</sup>은 50% 산화가 진행된 시간을 이용하여 산화율을 구했으며, 이를 이용하여 활성화 에너지를 구하였다. 이들이 구한 활성화 에너지를 Table 3에 나타내었다. Boase and Vandergraaf는 603~623 K 온도범위에서 170 kJ/mol, 623~723 K의 온도범위에서 활성화 에너지가 67 kJ/mol이라고 발표하였으며, You 등은 523~623 K의 온도범위에서 143 kJ/mol, 623~673 K의 온도범위에서 109 kJ/mol이라고 발표하였다. 본 연구에서는 723 K까지의 온도범위에서 약 87 kJ/mol의 활성화 에너지를 구하였다. 이 값은 Boase and Vandergraaf와 You 등이 제시한 값의 중간 값을 나타내고 있다.

### 5. 결 론

UO<sub>2</sub> 산화에 대한 문헌을 검토하고 573~873 K의 온도에서 이산화우라늄 핵연료의 공기 중 산화거동에 미치는 밀도와 온도의 영향에 관한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. XRD 분석을 통하여 573~873 K의 온도에서는 완전히 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>으로 산화되는 것을 확인하였다.
2. 밀도의 증가에 따라 산화유도시간은 길어지고, 산화율은 감소하는 것으로 나타났으나, 개기공이 없는 96% 이상에서는 큰 차이가 없었다.
3. 등온조건에서 시간에 따른 무게변화는 S자 형태의 산화거동을 보이고 있어, 핵생성 및 성장의 거동을 따르는 것으로 나타났다.
4. 산화속도는 10% 산화를 기준으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\%/\text{hr} = 1.48e^{\left(\frac{-90,557}{RT}\right)} \quad 573 < T(\text{K}) < 723$$

$$\%/\text{hr} = 1.75e^{\left(\frac{-36,123}{RT}\right)} \quad 723 < T(\text{K}) < 873$$

5. 본 실험을 통해서 UO<sub>2</sub> 산화거동에 미치는 온도와 밀도의 영향을 확인하였으나, 결정립크기, 불순물 등 다른 변수에 대한 영향과 초기산화속도에 영향을 미치는 산화유도시간 등에 대해서는 더 많은 연구가 수행되어

야 할 것으로 생각된다.

6. 본 연구에서 얻은 이산화우라늄의 산화거동에 미치는 온도와 밀도의 영향은 핵연료의 성능평가에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행 되었음.

### 참고문헌

1. Arosen, S.; Roof, R.B.; J.R.; Belle, J. J. Chem. Phys., 1957, 27, 137.
2. Peakall, K.A.; Antill J.E. J. Nucl. Mater. 1960, 2, 194.
3. Scott, K.T.; Harrison, K.T. J. Nucl. Mater., 1963, 3, 307.
4. Iwasaki, M.; Ishikawa, N. J. Nucl. Mater., 1970, 36, 116.
5. Gilbert, E.R.; White, G.D.; Knox, C.A. Proceedings of irradiated fuel storage: Toronto Canada, 1984, 551.
6. Hasting, J.; Rose, D.H.; Kelm, J.R.; Irvine, D.A.; Novak, J. J. Am. Ceramic Soc., 1986, 69(2).
7. Tayler, P.; Burgess, E.A.; Owen, D.G. J. Nucl. Mater., 1980, 88, 153.
8. Harrison, K.T.; Padgett, C.; Scott, K.T. J. Nucl. Mater., 1967, 23, 121.
9. Na, S.H.; Kim, S.H.; Lee, Y.W.; Yoo, M.J. KNS, 2000, 34(5), 434.
10. Johnson, W.A.; Mhel, R.F. Trans. Am. Inst. Mining Metall. Eng., 1939, 135, 416.
11. Avrami, M. J. Chem. Phys., 1939, 7, 1103.
12. Turker, P.M. Proc. Workshop on Chemical Reactivity of Oxide Fuel and Fission Product Release., 1987, 49.
13. Boase, D.G.; Vandergraaf, T.T. Nucl. Technol., 1977, 32, 60.
14. You, G.S.; Kim, K.S.; Ro, S.G.; Kim, E.K. J. Korean Nucl. Soc., 1995, 27, 67.