

회전형 휘발성 산화장치 이용 다공성 우라늄산화물 그레놀 제조 연구

이재원[†] · 윤여완 · 신진명 · 이정원 · 박근일 · 박장진

한국원자력연구원

(2011년 8월 11일 접수, 2011년 9월 15일 심사, 2011년 10월 4일 채택)

Study on the Fabrication of Porous Uranium Oxide Granule Using a Rotary Voloxidizer

Jae-Won Lee[†], Yeo-Wan Yun, Jin-Myeong Shin, Jung-Won Lee, Guen-IL Park, and Jang-Jin Park

Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-353, Korea

(Received August 11, 2011; Revised September 15, 2011; Accepted October 4, 2011)

회전형 휘발성 산화장치(voloxidizer)와 200 g U_3O_8 분말을 사용하여 초기 미세 입자층의 운동형태, 열처리 온도 및 시간, voloxidizer의 회전속도에 따른 다공성 그레놀의 회수율과 특성을 분석하였다. 초기 미세 입자층의 운동형태에 따른 1 mm 이상의 그레놀의 회수율은 rolling 운동 때보다 slumping 운동일 경우에 보다 높았다. 초기 미세 입자층이 rolling 운동형태인 경우에는 미세입자로부터 그레놀이 생성됨에 따라서 slumping 운동형태로 변하며 slumping 빈도가 매우 높았다. 열처리 온도의 증가 및 10 h까지는 시간의 증가에 따라서 그레놀의 회수율이 매우 크게 증가하였다. Slumping 운동형태를 보이는 초기 미세 입자층의 경우에 voloxidizer의 회전속도가 증가함에 따라서 그레놀의 회수율은 81.5에서 88.7%로 증가하였으나, 그레놀 특성 측면에서 보면 회전속도가 2 rpm인 경우에 밀도, 파쇄강도, 구형도가 가장 높았다.

The fabrication characteristics of porous uranium oxide granules from U_3O_8 powder was investigated in terms of initial particle bed motions such as slumping and rolling, thermal treatment conditions, and rotational velocities in slumping motion using a rotary voloxidizer. With respect to the initial particle bed motion the recovery rate of granule of above 1 mm in slumping motion was higher than that in the rolling motion. Rolling motion was changed into slumping motion with high slumping frequency by formation of granules from fine particles. Recovery rate of granule significantly increased with the increases in thermal treatment temperature and time of upto 10 h. As the rotational velocity of voloxidizer in the case of the initial particle bed showing slumping motion increased, the recovery rate of granule increased from 81.5 to 88.7%. However, the rotational velocity of 2 rpm provided an effective density, crushing strength and sphericity of granules.

Keywords: advanced voloxidation, particle size control, granulation, rotary voloxidizer, uranium oxide

1. 서 론

파이로 공정을 통해 산화물 형태인 사용후핵연료 내의 핵연료 물질을 금속형태로 회수하여 고속로에서의 재사용을 위한 연구가 수행되고 있다[1]. 파이로 공정은 고온 용융염 매질 내에서 사용후핵연료를 구성하는 원소들의 열역학적 특성차를 이용하여 전기화학적으로 핵연료 물질을 회수하는 기술로써 전해환원, 전해정련 및 전해제련과 같은 세부공정으로 구성된다[1].

휘발성 산화공정(voloxidation)은 사용후핵연료의 건식 재활용을 위해서 우선 UO_2 펠렛 또는 파단 조각들을 약 500°C에서 산화시켜 U_3O_8 분말형태로 만들면서 휘발성 핵분열생성물을 제거 위한 공정으로 개발되었으나, 휘발성 핵분열생성물 중에 삼중수소만 제거되고 I, Kr, Xe, C-14 등과 같은 핵종의 제거율은 매우 낮았다[2]. 이러한 휘발성 핵분열생성물을 완전히 휘발제거하고 또한 준휘발성 핵분열

생성물인 Cs, Te, Tc, Mo, Ru 등의 핵종을 휘발시켜 제거하는 관점에서 약 1200 °C에서의 고온 휘발성 산화공정 개발에 대한 연구가 수행되었다[3,4].

따라서 파이로공정의 전처리공정인 고온 휘발성산화공정에서는 파이로공정의 핵분열생성물에 대한 부하 저감을 위해 사용후핵연료 내의 휘발성 및 준휘발성 핵분열생성물의 휘발제거와 동시에 산화물 상태인 사용후핵연료를 금속으로 전환시키는 전해환원공정의 처리효율 증대를 위한 원료입자의 입도제어 관점에서 연구가 최근에 수행되고 있다.

전해환원공정의 처리효율을 증대시키기 위한 원료입자 조건으로는 전해질의 침투가 용이한 다공성 구조, 충전율을 높일 수 있는 형태, 그리고 mm 단위 정도의 크기가 요구되고 있다[5]. 따라서 전해환원공정의 원료물질로는 다공성의 구형 그레놀 또는 펠렛 형태의 UO_2 입자가 고려되고 있다. 일본의 CRIEPI에서는 원료입자의 전해환원 처리용량을 높이기 위해서 SIMFUEL을 이용하여 1000 °C의 공기분위기하에서 휘발성 산화처리를 한 후에 얻은 분말을 성형 및 소결하여 펠렛

[†] 교신저자(e-mail: njwlee@kaeri.re.kr)

형태의 원료입자를 제조하였다[6]. 이러한 원료입자 제조방법은 성형과 같은 부가적인 공정이 요구된다.

U_3O_8 분말은 고온 산화시에 1000 °C 이상에서는 미세입자들이 함께 화학적으로 결합하여 응집체 형상으로 변한다[7]. 한편, Rotary kiln은 tumbling 운동에 의해 분말의 혼합이나 상온에서 습식으로 제조된 그래놀의 하소에 이용되고 있다[8,9]. 일반적으로 반응물질을 직접 화염에 노출시키는 rotary kiln과는 달리 사용후핵연료로부터 열에너지와 반응가스를 이용하여 방사능이 높은 핵분열생성물을 휘발제어하고 휘발된 핵종을 필터로 포집해야 하기 때문에 간접가열 방식을 택하게 되며 이를 회전형 휘발성 산화장치(rotary voloxidizer)라 한다. 따라서 rotary kiln 형태의 장치, 즉 회전형 휘발성 산화장치를 이용할 경우에 부가적인 성형체 제조공정 없이 사용후핵연료를 열처리하는 동안 핵종의 휘발제거와 동시에 우라늄산화물의 입도를 제어 할 수 있을 것으로 여겨진다[5].

본 연구에서는 회전형 휘발성 산화장치 및 200 g U_3O_8 분말을 이용하여 초기 미세 입자층의 운동형태, 열처리 온도 및 시간, voloxidizer의 회전속도에 따른 그래놀 회수율과 특성을 분석하였다.

2. 실험

2.1. 실험장치 및 분말 제조

Voloxidizer의 반응기 부분은 Inconel alloy 601로 제작하였다. 반응기는 원통형으로 크기는 내경이 200 mm, 길이가 200 mm이며, 반응 후에 입자의 회수시에 입자의 흐름이 용이하도록 반응기 좌우를 절두체 형태로 하였다. 입도제어 실험에 사용되는 출발물질인 U_3O_8 산화분말은 순수한 UO_2 소결체를 회전형 voloxidizer에 장입한 후에 voloxidizer의 회전속도를 2 rpm으로 하여 공기분위기하의 500 °C에서 5 h동안 산화열처리를 하여 제조하였다. 산화분말의 비표면적은 0.65 m²/g, 평균입자크기는 10 μm, 겉보기 밀도는 1.8 g/cm³였다.

2.2. 입자층 거동 분석

반응 전후에 실 온도에서 입자층의 유동상태를 CCD 카메라를 이용하여 분석하였다.

2.3. 그래놀 제조

다공성 입자는 U_3O_8 분말 200 g를 휘발성 산화장치에 장입한 후에 반응온도는 1150과 1200 °C, 반응시간은 5에서 15 h, 회전속도는 1에서 5 rpm으로 하여 제조하였다. 열처리는 Ar분위기하에서 수행하였다. 최대 열처리 온도는 Inconel alloy 601의 용융범위(1360~1411 °C)를 고려하여 1200 °C로 제한하였다.

2.4. 입자 특성분석

열처리에 의해 얻은 입자의 크기는 회전운동 방식의 회전체(Retsch사 AS400)를 이용하여 분석하였다. 회전체의 회전속도를 100 rpm으로 하여 15 min동안 분석하였다. 그래놀의 밀도 및 기공율은 수침법으로 측정하였다[10]. 그래놀의 구형도는 실체현미경(stereoscopic microscope)을 이용하여 분석하였다. 그래놀의 강도는 예비하중 0.3 N, 재하속도를 1.0 mm/min으로 압축력(여기서는 파쇄강도라 함, crushing strength)을 측정하였다. 그래놀의 비표면적은 BET방법, 미세구조는 전자주사현미경을 이용하여 분석하였다. 열처리 전후 입자의 상변화는 X선 회절 분석, O/U비 변화는 생성입자들을 500 °C에서 산화시킨 후 무게변화를 측정하여 계산하였다.

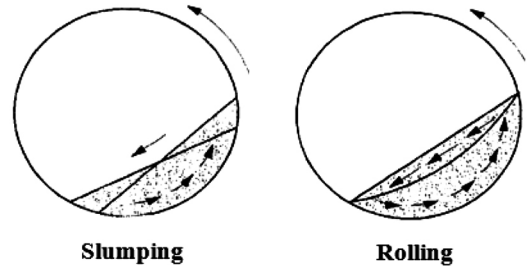


Figure 1. U_3O_8 particle bed motion in rotary voloxidizer.

3. 결과 및 고찰

3.1. 입자층 운동형태

초기 미세 입자층의 운동형태가 그래놀 회수율에 미치는 영향을 알아보기 위해 우선 U_3O_8 입자 200 g을 반응기에 충전하였으며, 이때 입자층전율은 1.3 vol.%, 입자층 높이는 0.96 cm였다. 반응기 내에서 열을 이용하여 미세 U_3O_8 입자들로부터 그래놀을 얻기 위해서는 입자층이 유동되어야 하는데, U_3O_8 입자층의 운동형태는 혼합 및 반응공정에 이용되고 있는 slumping 또는 rolling 운동이 바람직하였다 (Figure 1)[8]. 그래서 상온에서 voloxidizer 회전속도에 따른 U_3O_8 입자층의 운동형태를 CCD 카메라로 관찰하였다. 회전속도 1~3 rpm에서는 입자층이 반응기 벽면을 따라 상승하다가 떨어지는 slumping 운동형태를 보였으며, slumping은 일정한 주기로 반복되었다. 회전속도가 4 rpm 이상으로 증가함에 따라서 입자층은 반응기 벽면을 따라 상승하다가 회전하는 rolling 운동형태로 유동되었다.

미세 입자층의 운동형태에 따른 U_3O_8 분말의 입도제어 특성을 분석하기 위해서 voloxidizer의 회전속도를 각각 2 rpm 및 5 rpm로 하였다. 열처리는 1150 °C에서 5 h동안, Ar 분위기하에서 하였다.

열처리하여 얻은 입자층의 운동형태를 알아보기 위해 voloxidizer를 2~5 rpm으로 회전시키면서 입자층 유동을 관찰한 결과에 의하면 열처리 중 회전속도와는 관계없이 모두 slumping 운동형태를 보였다. 입자층의 상승과 하강을 반복하는 횟수를 slumping 수라 하며, slumping 수는 2 rpm에서 생성된 입자층은 62 slumps/min로 열처리 전의 63 slumps/min과는 큰 차이가 없었으며, 5 rpm에서 생성된 입자층은 89 slumps/min로 2 rpm에서 생성된 입자층보다 slumping 수가 증가하였다.

열처리하여 얻은 생성물의 입도를 분석하여 Figure 2에 나타내었다. Voloxidizer의 회전속도를 2 rpm으로 하여 얻은 입자에서는 5 mm 이상의 큰 입자들이 많이 생성되었고, 반면에 5 rpm에서는 미세입자들이 많았다. 회전속도 5 rpm에서 열처리를 하여 얻은 입자층의 slumping 수는 2 rpm에서 얻은 입자층보다 약 1.4배 높다. 따라서 1 mm이상의 입자인 그래놀이 성장 중에 그래놀을 구성하는 미소결정들의 파쇄와 마모가 2 rpm에서보다 많이 일어난 것으로 유추된다. 그래놀 회수율은 2 rpm에서는 73%로 5 rpm의 61%보다 매우 높았다.

3.2. 온도 및 시간

입자층 운동형태에 따른 그래놀 회수율이 5 rpm보다는 2 rpm에서 높아, voloxidizer의 회전속도를 2 rpm으로 하여 U_3O_8 분말을 열처리하는 온도 및 시간이 그래놀의 회수율과 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 열처리 조건은 1150~1200 °C, 5~15 h동안 Ar분위기에서 수행하였다. Figure 3은 평균입도가 10 μm인 U_3O_8 분말을 1200 °C, 10 h 동안 열처리하여 얻은 UO_{2+y} ($0.25 \leq y < 0.667$) 입자의 형상을 나타

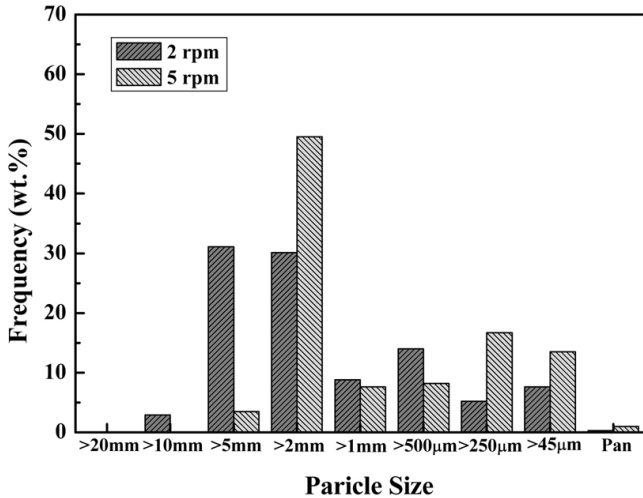


Figure 2. Particle size distribution according to variation of initial particle bed motion.

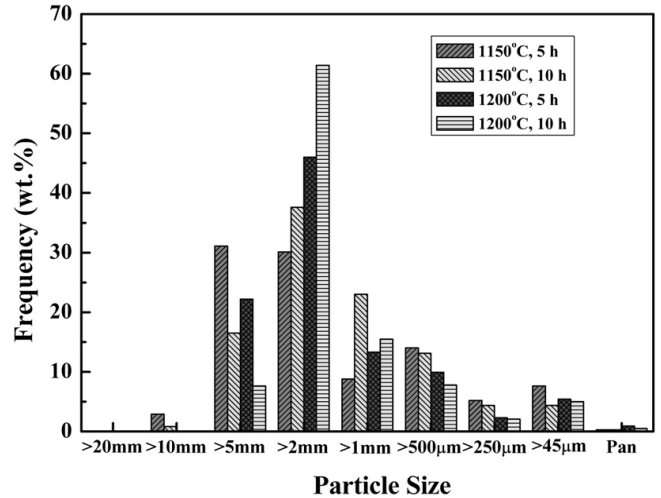


Figure 4. Particle size distribution of UO_{2+y} with thermal treatment temperature and time.

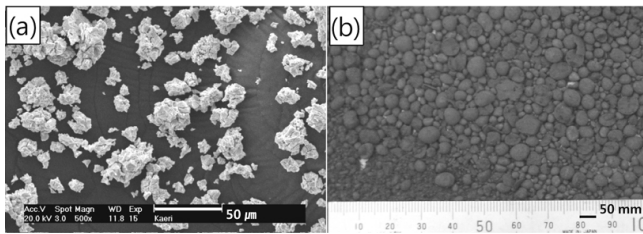


Figure 3. Change of particle shape and size : (a) starting material and (b) granulated product.

낸 사진으로 대부분 둥근 형태의 입자로 구성되어 있음을 알 수 있다. 각 열처리 조건별로 얻어진 생성물에 대하여 입도분석을 하여 Figure 4에 나타내었다. 생성 입자들은 주로 0.5~10 mm에 분포하며, 최대 분포를 보이는 입자크기는 2~5 mm였다. 최대 분포 입자관점에서 보면 열처리 온도 및 시간의 증가에 따라서 그 함량이 증가하였다. 그레놀 회수율은 열처리 온도의 증가 및 10 h까지는 시간이 증가함에 따라서 증가하였다. 1200 °C에서 그레놀의 회수율은 80% 이상이 되었으며 10 h동안 열처리한 경우에 84.5%로 가장 높은 회수율을 보였다(Figure 5). 열처리 후에 84.5%의 높은 그레놀 회수율에도 불구하고 UO_{2+y} 입자층은 2~5 rpm 회전속도 범위에서 모두 slumping 운동형태를 보였다.

그레놀의 밀도 및 기공율은 수침법으로 측정하였으며, Figure 6은 1200 °C에서 열처리하여 생성된 그레놀의 밀도 및 기공율을 나타낸 것이다. 밀도는 10 h까지는 열처리 시간이 증가함에 따라서 3.50에서 4.38 g/cm^3 로 증가하였으며 기공율은 60에서 55.3%로 감소하였다. 10 h 이후에는 밀도가 4.05 g/cm^3 로 감소하고 기공율은 58.5%로 증가하는데, 우라늄산화물의 상변화와 관련된 O/U비는 열처리 시간이 증가함에 따라서 계속하여 감소하였다(Figure 7). 그레놀 밀도의 감소는 O/U비 변화 즉, 우라늄산화물의 상변화와 밀접한 관계가 있는 것으로 보인다.

따라서 열처리를 15 h동안 한 경우에 생성된 그레놀의 밀도 감소에 대한 원인을 해석하기 위해서 X선 회절분석, O/U비를 이용하여 상분율 계산, 비표면적 측정을 하였다. Ar 분위기하에서는 산소농도가 낮기 때문에 U_3O_8 상은 고온에서 열분해되어 UO_{2+y} 및 U_3O_{8-z} 상으로 공존

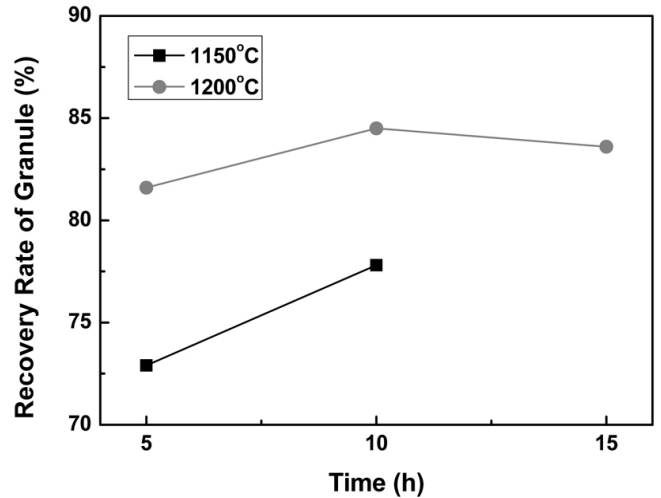


Figure 5. Recovery rate of granule with thermal treatment temperature and time.

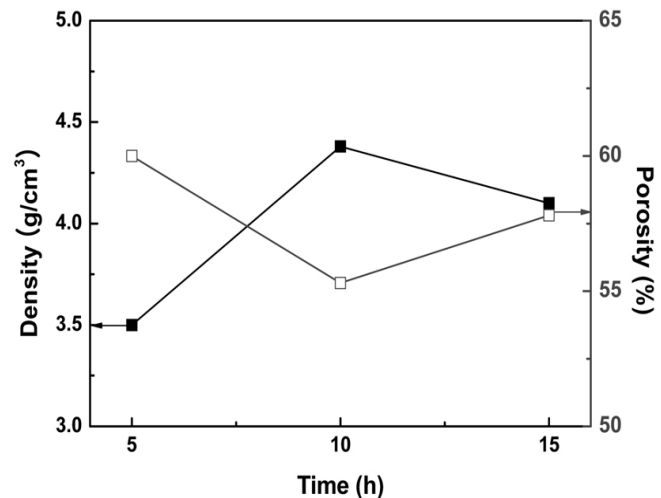


Figure 6. Density and porosity of granule with heating time at 1200 °C.

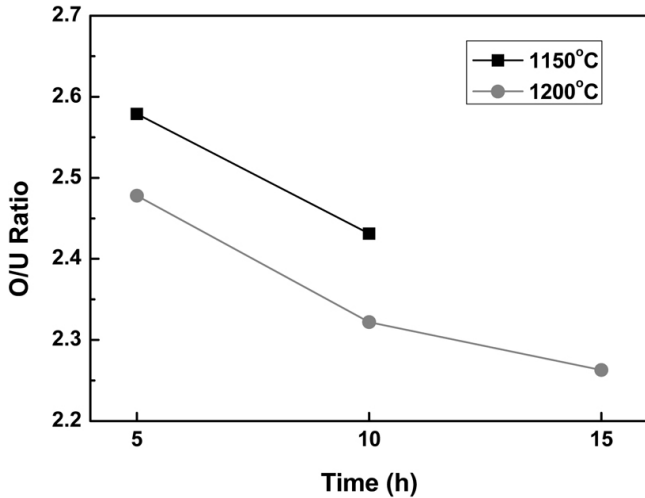


Figure 7. O/U ratio of UO_{2+y} granules with thermal treatment temperature and time.

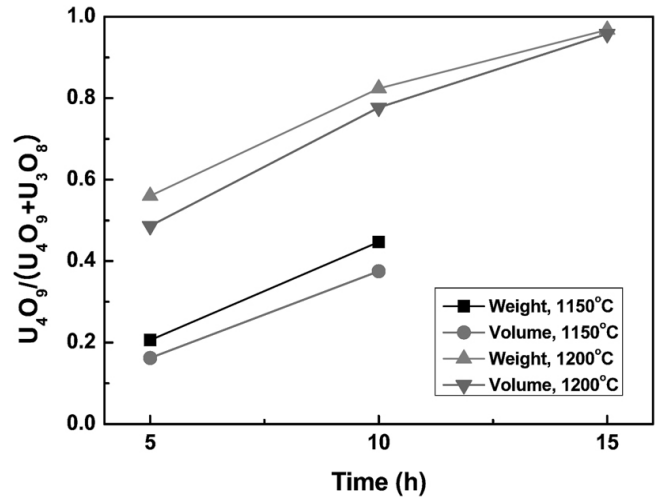


Figure 9. Weight and volume fraction of U_4O_9 phase in granule.

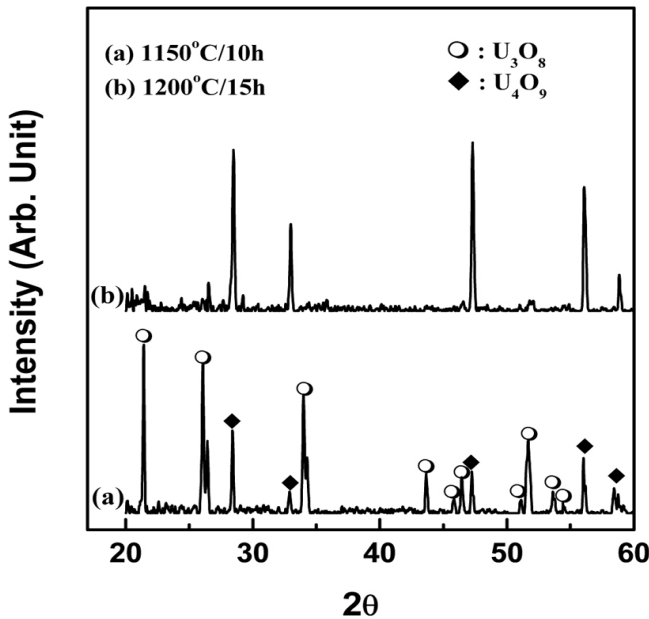


Figure 8. XRD pattern of granules with thermal treatment temperature and time.

하게 된다[11]. 그래놀을 X선 회절 분석한 결과에 의하면 U_4O_9 형태의 상과 U_3O_8 형태의 상이 공존함을 알 수 있었으며, 열처리 온도가 증가함에 따라서 U_3O_8 형태 상의 회절강도가 감소하고 U_4O_9 형태 상의 회절강도가 증가하였다(Figure 8). Ar 분위기하에서 제조된 그래놀의 O/U비는 그래놀을 500 °C에서 5 h동안 공기 중에서 산화시켜 무게 변화를 측정하여 계산하였다. O/U비 자료를 이용하여 U_3O_8 과 U_4O_9 혼합상에서 각 상의 무게분율 및 부피분율을 계산하여 Figure 9에 나타내었다. 열처리 온도 및 시간이 각각 1200 °C, 10 h 이상이 되면 무게 및 부피 분율 양면에서 그래놀의 주된 상은 U_4O_9 이 됨을 알 수 있었다.

일반적으로 밀도가 8.4 g/cm³인 U_3O_8 이 밀도가 11.29 g/cm³인 U_4O_9 로 상전환이 될 때에 밀도차에 의해 26%의 부피수축이 일어나게 된다. 따라서 상전환시에 미소입자가 성장을 하지 않고 수축만 될 경우에 밀도가 감소하게 된다. 열처리동안 미소입자의 성장 및 수축에 따

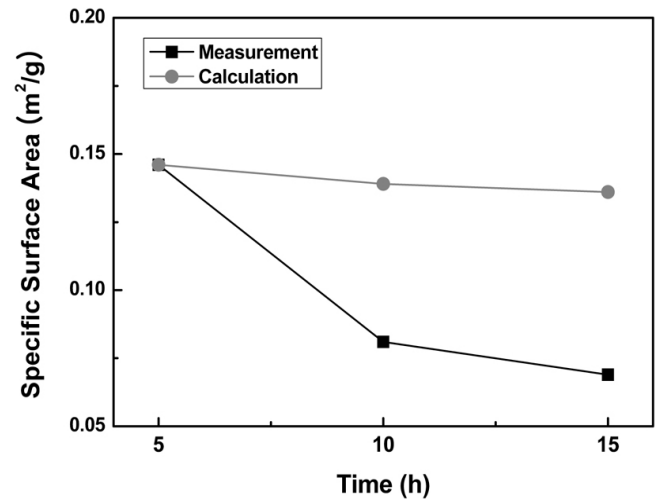


Figure 10. Specific surface area with thermal treatment time.

라서 비표면적이 크게 변하기 때문에 밀도변화에 대한 해석을 위해 비표면적 측정 자료와 이론적 비표면적 변화를 계산하여 비교하였다. 열처리 시간에 따른 이론적 비표면적은 O/U비로 계산한 각 상의 무게 및 밀도를 이용하여 이론적 비표면적 변화율(x)을 계산한 다음에, 이 결과($1+x$)를 5 h 열처리하여 얻은 그래놀의 비표면적 측정치에 곱하여 계산하였다. Figure 10은 비표면적 측정치와 이론적 계산치를 비교하여 나타낸 것이다. 열처리를 10 h 한 경우에 비표면적 측정치는 계산치보다 낮았는데, 이는 미소입자의 성장에 의한 것으로 여겨진다. 그러나 15 h동안 열처리 한 경우에 측정된 비표면적은 시간에 따라서 비례적으로 증가하지는 않았다. 따라서 15 h동안 열처리를 한 경우에 생성된 그래놀의 밀도 감소는 U_3O_8 이 U_4O_9 로 95% 이상 전환되는 (Figure 9) 동안에 그래놀 내 미소입자의 성장은 거의 없이 미소입자의 수축으로 인하여 상대적으로 기공의 증가에 의한 것으로 여겨진다.

그래놀의 충전밀도와 관련된 구형도를 입체현미경으로 분석한 결과를 Figure 11에 나타내었다. 그래놀의 구형도는 모두 0.9 이상으로 높았으며, 열처리 온도의 증가와 10 h까지는 시간이 증가함에 따라서 증가하였다. 구형도는 1200 °C에서 10 h 열처리를 하였을 때가 0.955로 가장 높았다.

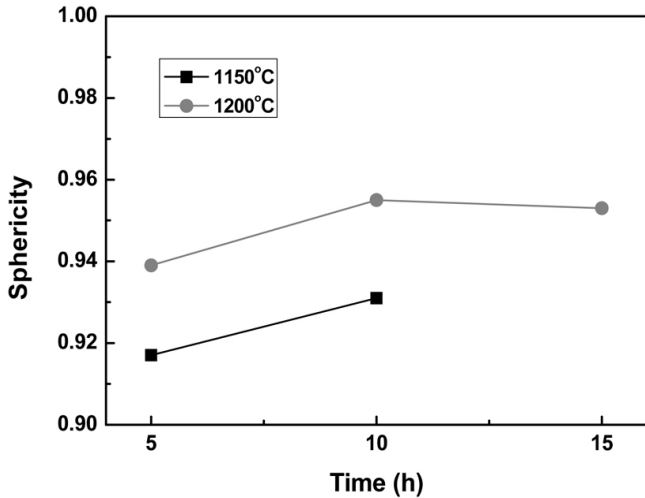


Figure 11. Sphericity of granule with thermal treatment temperature and time.

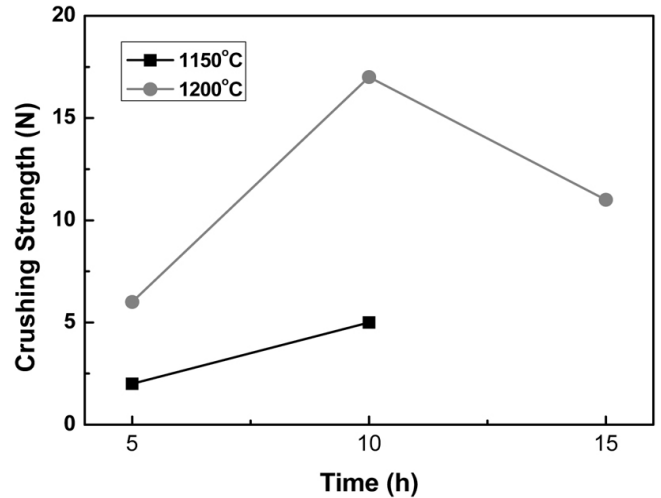


Figure 13. Crushing strength of granule with thermal treatment temperature and time.

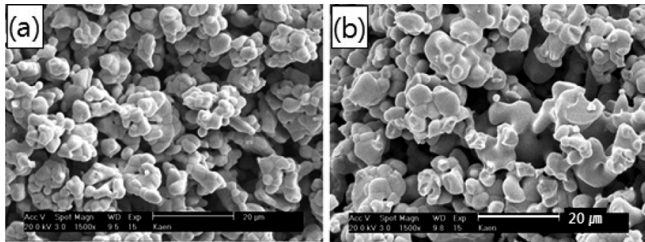


Figure 12. SEM micrograph of granules with thermal treatment temperature for 10 h : (a) 1150 °C and (b) 1200 °C.

그레놀의 미세구조를 전자주사현미경(SEM)으로 분석하여 관찰한 결과를 Figure 12에 나타내었다. 미소결정들이 연속적으로 잘 결합되었으며 열처리 온도가 증가함에 따라서 미소결정간의 목(neck)의 성장과 함께 미소결정들이 성장됨을 알 수 있었다. 미소결정의 크기는 2~12 μm 범위로 존재하였다. 이러한 그레놀들은 전해환원시에 전해물의 침투가 매우 용이한 다공성 구조이며 또한 결정들이 매우 작기 때문에 전해환원 처리속도를 높일 수 있을 것으로 예상된다.

그레놀의 취급 안전성과 관련된 그레놀의 파쇄강도 시험에서는 구형도가 0.94 이상인 그레놀을 시료로 선정하여 측정하였다. 그레놀의 파쇄강도는 열처리 온도 및 시간의 증가에 따라서 매우 크게 증가하였다. 즉, 그레놀의 파쇄강도는 밀도가 증가하고 미소결정간의 목(neck)의 크기가 큰 경우에 증가함을 알 수 있었으며, 1200 °C에서 10 h 열처리한 경우에 17 N으로 가장 높았다(Figure 13).

3.3. 회전속도

회전속도를 2 rpm으로 하여 1200 °C, 10 h동안 열처리한 경우가 그레놀 특성이 가장 우수하였다. 초기 미세 입자층의 운동이 slumping 형태가 되는 voloxidizer의 회전속도 범위 내에서 회전속도에 따른 그레놀의 회수율 및 특성을 분석하기 위해서 열처리 온도 및 시간을 동일하게 하고 voloxidizer의 회전속도를 1, 3 rpm으로 변화시키면서 U₃O₈ 분말의 입도제어 실험을 하였다.

열처리 하여 생성된 입자들에 대해 입도분석을 한 결과(Figure 14)에 의하면 입자의 50% 이상이 2~5 mm 사이에 분포하였다. 그레놀 회수율은 voloxidizer 회전속도가 1에서 3 rpm으로 증가함에 따라서

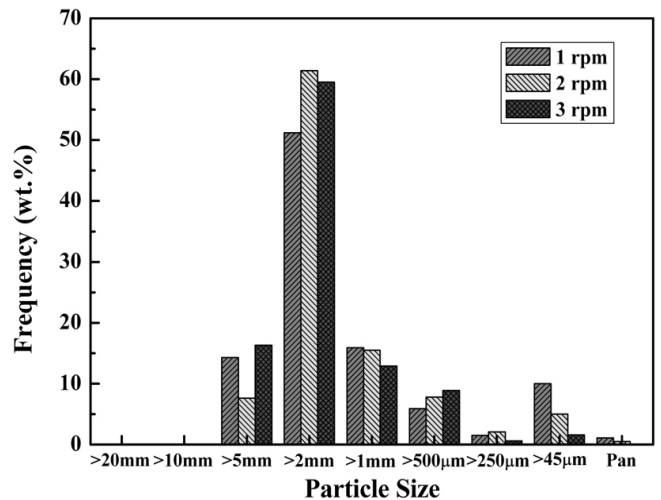


Figure 14. Particle size distribution of products according to variation of rotational velocity.

81.5에서 88.7%까지 증가하였는데, 이를 해석하기 위해서 열처리 때와 동일한 회전속도에서 열처리에 의해 생성된 입자층의 운동형태를 관찰하였다. 열처리에 의해서 생성된 입자층은 모두 slumping 운동 형태를 보였으며 slumping 수는 열처리전 초기 U₃O₈ 미세 입자층보다 증가하였다(Figure 15). 이는 열처리에 의해서 크고 둥근 입자들이 생성되어 입자와 반응기 벽면간의 마찰력감소에 의해 입자의 유동성 향상에 의한 것으로 여겨진다. CCD 카메라 관찰에 의하면 voloxidizer의 회전속도가 증가함에 따라 입자들이 입자층 상부 표면을 따라서 보다 빨리 이동함을 알 수 있었다. 따라서 회전속도가 증가함에 따라서 그레놀 회수율의 증가는 큰 입자들이 미세입자들과 접촉할 확률이 높아지게 되므로 입자들이 성장할 수 있었기 때문인 것으로 여겨진다. 또한 이러한 이유로 2 rpm보다 3 rpm에서 5~10 mm 사이의 입자들의 함량이 증가하였다. 반면에 1 rpm에서 5~10 mm의 입자가 많았는데 이는 회전속도가 낮아서 그레놀의 마모 및 파쇄가 비교적 적었기 때문인 것으로 여겨진다. 그러나 회전속도가 낮은 만큼 45 μm 이하의 미세입자들도 상대적으로 많이 존재함을 알 수 있었다.

Voloxidizer의 회전속도를 변화시켜 얻은 UO₂ 그레놀의 밀도 및 기공

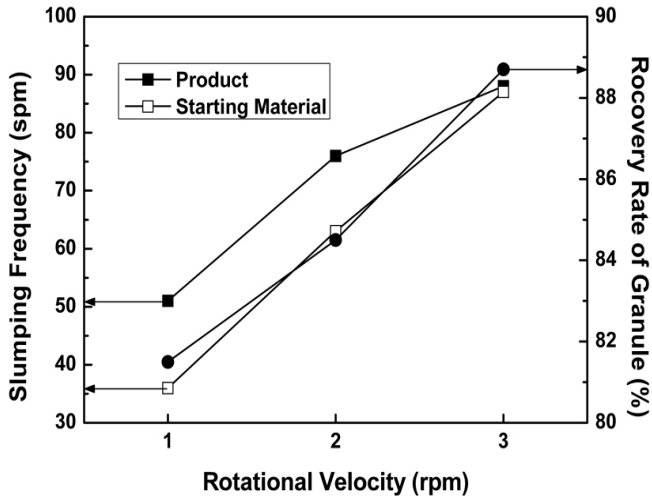


Figure 15. Slumping frequency and recovery rate of granules according to variation of rotational velocity.

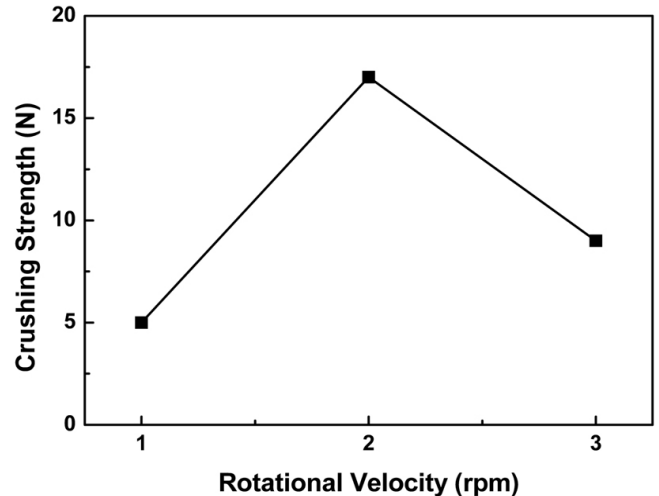


Figure 17. Crushing strength of granule according to variation of rotational velocity.

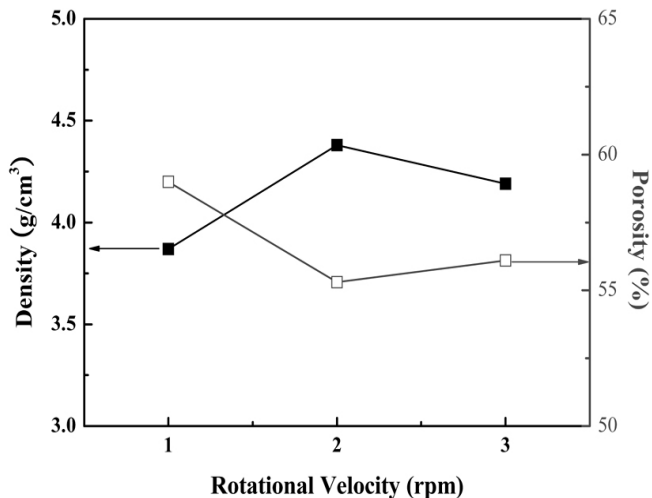


Figure 16. Density and porosity of granules according to variation of rotational velocity.

를 측정하여 Figure 16에 나타내었다. 그레놀의 밀도는 입도분석 결과에서 기술한 입자층의 운동현상에 의해 결정되는 것으로 보이며 2 rpm에서 4.38 g/cm^3 로 가장 높았다. 회전속도 2 rpm에서의 UO_{2+y} 그레놀의 기공률은 55.3%로 다공도가 매우 높았다. 그레놀의 파쇄강도도 또한 밀도가 증가함에 따라서 높아졌으며 2 rpm에서 가장 높았다(Figure 17).

4. 결 론

회전형 휘발성 산화장치(voloxidizer)와 200 g U_3O_8 분말을 사용하여 초기 미세 입자층의 운동형태, 열처리 온도 및 시간, voloxidizer의 회전속도에 따른 다공성 그레놀의 회수율과 특성을 분석하였다. 초기 미세 입자층의 운동형태에 따른 1 mm 이상의 그레놀의 회수율은 rolling 운동 때보다 slumping 운동일 경우에 보다 높았다. 초기 미세 입자층이 rolling 운동형태인 경우에는 미세입자로부터 그레놀이 생성됨에 따라서 slumping 운동형태로 변하며 slumping 빈도가 매우 높았다. 열처리 온도의 증가 및 10 h까지는 시간의 증가에 따라서 그레놀의 회수율이 매우 크게 증가하였다. Slumping 운동형태를 보이는 초

기 미세 입자층의 경우에 voloxidizer의 회전속도가 증가함에 따라서 그레놀의 회수율은 81.5에서 88.7%로 증가하였다. 회전속도가 2 rpm인 경우에 그레놀의 회수율은 84.5%로 3 rpm일 때보다 낮으나, 그레놀 특성 측면에서 보면 회전속도가 2 rpm인 경우에 밀도, 파쇄강도, 구형도가 가장 높았다. Voloxidizer의 회전속도를 2 rpm으로 할 때 온도 증가와 열처리 시간의 증가가 그레놀의 회수율 및 특성에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

감 사

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.

참 고 문 헌

- H. S. Lee, J. M. Hur, J. G. Kim, D. H. Ahn, Y. Z. Cho, and S. W. Paek, *Energy Procedia*, **7**, 391 (2010).
- G. Uchiyama, M. Kitamura, K. Yamazaki, S. Torikai, S. Sugikawa, M. Maeda, and T. Tsujino, *Radioactive Waste Management and the Nuclear Fuel Cycle*, **17**, 63 (1992).
- Y. Kosaka, K. Itoh, H. Kitao, Y. Mori, T. Shimada, H. Yamatoya, K. Sutou, and O. Amano, *J. Nucl. Sci. Tech.*, Supplement **3**, 902 (2002).
- B. R. Westphal, K. J. Bateman, C. D. Morgan, J. F. Berg, P. J. Crane, D. G. Cummings, J. J. Giglio, M. W. Huntley, R. P. Lind, and D. A. Sell, *Nucl. Tech.*, **162**, 153 (2008).
- J. J. Park, J. M. Shin, G. I. Park, Jae W. Lee, J. W. Lee, and K. C. Song, Proc. of Global 2009, 9161, Paris (2009).
- Y. Sakamura, M. Iizuka, and T. Inoue, Proc. of Global 2009, 9176, Paris, France (2009).
- J. W. Lee, J. W. Lee, M. S. Yang, K. C. Song, and G. I. Park, Proc. of Global 2007, 921, Boise Idaho, USA (2007).
- A. A. Boateng, *Rotary Kiln : Transport Phenomena and Transport Process*, 265, Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom (2008).
- J. Mellmann, *Powder Technol.*, **118**, 251 (2001).
- ASTM C830 (2006).
- Y. S. Kim, *J. Nucl. Mater.*, **279**, 173 (2000).