

사용후핵연료 건식 분말화/혼합장치 성능 평가 Performance Appraisal of the Spent Fuel Dry Pulverizing/Mixing Device

정재후, 윤지섭, 홍동희, 김영환, 진재현

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

사용후핵연료 건식 분말화/혼합 장치는 사용후핵연료를 재활용 또는 안전하게 처분하기 위하여 250 mm로 절단된 사용후핵연료봉을 slitting 장치를 이용하여 pellet과 hull을 분리한다. 분리된 pellet을 건식 분말화/혼합 장치 속에 넣어 UO_2 pellet을 U_3O_8 분말로 산화시키는 것으로, 건식 탈피복 방법 중에서 산화 탈피복인 voloxidation을 모체로 하는 건식 분말화/혼합 장치를 제작한다. 이 장치를 제작하기 위하여 기존 건식 분말화/혼합 기술의 차세대관리공정 적용성 분석, 일체형 탈피복/분말화 장치의 구조(수직/수평형)를 비교·분석, 수직형 건식 분말화/혼합 장치 성능 요건에 필요한 규격 및 용량 등을 도출하였다. 또한, 장치 부품의 내열 특성 조사 및 구조에 따른 온도 분포의 특성을 분석, 열변형 분석 자료의 신뢰도를 평가, 열해석 프로그램(I-DEAS)을 이용하여 대상 부품에 대한 열변형 및 항복 응력을 계산, 열변형 분석 결과의 신뢰도 검증 실험(KOLAS) 등을 완료하였으며, 이러한 결과들을 이용하여 장치를 설계·제작하는데 적용하였다. 이 장치는 UO_2 pellet을 가열기 속에 처리 용량은 20 kgHM/batch을 투입한 후, UO_2 pellet을 공기 분위기에서 약 500 °C 이상으로 가열함으로써 UO_2 pellet을 U_3O_8 의 분말로 산화시키고, 산화된 U_3O_8 분말을 용기에 수집한다. 반응기 내부에 다단계 다공판 mesh를 장착하여 분말화 입도(20~100 μm)를 단계적으로 감소시키고, UO_2 의 산화 반응에 요구되는 산소와 반응열을 연속적으로 공급하여 반응 시간을 줄일 수 있고, U_3O_8 의 분말을 회수함에 있어서 장치에 묻어 있는 분말까지 회수할 수 있도록 하였다. 이러한 실험을 토대로 실증용 장치를 설계·제작하는데 필요한 기초 자료로 활용될 것이다.

ABSTRACT

The spent fuel dry pulverizing/mixing device is used to deal with the spent fuels for the safe disposal. The separated pellets from hulls by a slitting device are put and oxidized from UO_2 solid pellet to U_3O_8 powder in the device. The device have been developed based on a voloxidation method which is one of several dry de-cladding methods. We have benchmarked dry de-cladding methods, analyzed applicability to the advanced spent fuel management process, integrated and compared several configuration, and finally derived detailed specifications proper to requirements for the device. Also, thermal characteristics of the device such as thermal stress and strain have been analyzed by the commercial software, I-DEAS, and the reliability of the results have been verified by the KOLAS(Korea Laboratory Accreditation Scheme). The UO_2 solid pellets are put in the device which has a capacity of 20 kgHM per a batch, heated up about 500 °C in the air environment. Then, the UO_2 solid pellets are oxidized into the U_3O_8

powder, and the powder is collected in a special vessel. The device has been designed and developed as follows: the multi-staged fine hole meshes are used to reduce the size of the powder gradually, heat and air(oxygen) are supplied continuously to reduce the reaction time, and slight vibration effect are applied to collect powder cling to the device. Based on these results, it will be effectively applied to available data for designing and producing of the hot test facility.

1. 서론

사용후핵연료 건식 분말화/혼합 장치는 사용후핵연료를 재활용 또는 안전하게 처분하기 위하여 분리된 UO_2 pellet을 사용후핵연료 건식 분말화/혼합 장치의 가열로 속에 넣어 U_3O_8 분말로 산화시키는 장치이다. 이 장치를 제작하기 위하여 기존의 기술을 분석하고, 성능 요건에 필요한 규격 및 용량 등을 도출하였다. 또한, 장치 부품의 내열 특성 조사 및 구조에 따른 온도 분포의 특성을 분석, 열변형 분석 자료의 신뢰도를 평가, 열 해석 프로그램(I-DEAS)을 이용하여 대상 부품의 열변형 및 항복 응력을 계산, 열변형 분석 결과의 신뢰도 검증 실험(KOLAS) 등을 하였고, 그 결과들을 적용하여 장치를 제작하였다. 제작된 장치를 이용하여 UO_2 pellet을 가열로 속에 일정한 용량을 투입한 후, 가열로 내부에 다단계 다공판 mesh를 이용하여 공기 분위기에서 약 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 이상으로 가열하여 산화시킴으로서 분말화 입도를 단계적으로 작게하고, UO_2 의 산화 반응에 요구되는 산소와 반응열을 연속적으로 공급하여 반응시간을 줄일 수 있도록 하였다. 산화된 분말은 분말 수집 용기에 수집되며, 분말을 회수함에 있어서 장치에 묻어 있는 분말까지 회수할 수 있도록 하였다. 이 장치를 이용한 동작 특성 실험을 수행하여 미비된 문제점을 도출하여 보완·개선하였다. 개선된 실험 장치를 이용하여 분말 회수율, 에어 유량 측정, 진동 측정, 분말 비산 확인, 가열로 내부와 외부 표면 온도측정실험 등의 성능 평가를 수행하였으며, 수행 결과 만족할 만한 결과를 얻었다.

2. 제작

사용후핵연료 건식 분말화/혼합 장치는 크게 몸체, 가열로, mesh, vibrator, cyclone, thermocouple, butterfly valve, 분말 수집 용기, 전기 장치부 등으로 구성된다. 그림 1은 장치의 컴퓨터 그래픽 모델링, 그림 2는 장치의 제작품을 나타낸 것이다. 장치의 크기는 높이 940 mm, 길이 726 mm, 폭 726 mm 이다. 사용한 재료는 부식이 잘 되지 않도록 SUS를 사용하여 제작하였다.

3. 성능 실험

장치의 성능 실험은 가열로 내의 온도를 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 로 가열한 상태에서 장치의 결함 여부, 분말의 비산, 분말의 다단계 mesh 통과 특성, 분말 회수율 등에 대한 성능을 실험하고, 필요에 따라 개선하여 장치 사양인 분말 입도 $20\sim 100\text{ }\mu\text{m}$, 분말 회수율 99 % 이상을 만족하도록 성능을 향상시키는데 있다. 성능 실험을 위해서, 사용후핵연료를 사용하여야 하지만 이를 구하기 어렵고, hot-cell에서 실험을 수행하여야 하기 때문에 장치 자체의 성능 실험은 인체에 해가 적은 silica 분말을 사용하였다. 장치에 대한 성능 실험은 분말 회수율, 공기 공급 실험, 진동 측정, 분말 입도의 크기 및 형상, 분진의 비산 확인, 가열로 내부 온도와 가열로 외부 표면의 온도 변화 등의 실험을 수행하였다.

3.1. 분말 회수율

분말 회수율을 측정하기 위하여 분말 입도 크기 $63\sim 200\text{ }\mu\text{m}$ 인 silica 분말 928.4 g을 가열로에 투입하여 일정한 시간동안 장치를 진동시킨 후 회수된 분말의 양을 측정하였다. 이때, mesh의 크기는

1차 mesh 4 mm, 2차 mesh 2 mm, 3차 mesh 100 μm 를 사용하였다. 실험 결과, 회수된 분말(100 μm 이하)은 845.94 g(91.1 %), 3차 mesh 보다 입자 크기가 커서(100 μm 이상) 3차 mesh를 통과하지 못하고 mesh 위에 잔류된 분말은 82.16 g(8.84 %)이었다. 나머지 0.3 g의 분말은 회수하지 못하였으며, 이는 가열로의 내벽에 잔류해 있거나 1차 필터(cyclone)로 비산되었다고 볼 수 있다. 그림 3의 (a)는 분말 통과 후 1차 mesh의 모습, (b)는 분말 통과 후 2차 mesh의 모습, (c)는 3차 mesh 위의 잔류 분말량을 나타낸 것이다. 그림 4의 (a)는 처음 분말(63~200 μm), (b)는 통과 한 분말(100 μm 이하), (c)는 통과하지 못한 분말(100 μm 이상)을 나타낸 것이다.

3.2. 공기 공급 실험

공기의 유량이 많으면 가열로 내로 공급되는 산소의 양이 증가하므로 반응 시간은 단축되지만 분말의 비산이 심해지고, 반대로 유량이 적으면 분말의 비산은 감소하지만 반응 시간이 증가하므로 적절한 공기 유량을 선정해야 한다. UO_2 1 mol의 산화에는 $1/3$ mol의 산소가 소요되고, 20 kg의 UO_2 는 74.06 mol에 해당하므로 24.68 mol의 산소가 필요하다. 일반적으로 공기중의 산소량은 21 %, 공기 자체는 1 mol 당 22.4 l이다. 따라서, 20 kg의 UO_2 의 완전 산화에 필요한 공기량은 2,633 l(= $100/21 \times 24.68 \times 22.4$ l)이다. 분말의 비산은 공기 흐름에 따른 분말 입자의 최종 속도와 관련이 있다. 즉, 공기 저항력과 분말의 무게와의 평형 관계를 통해서 최종 속도가 결정되는데, 최종 속도 이하로 공기 속도를 조절할 경우에 분말의 비산을 방지할 수 있다. 가열로의 동작 조건(500 $^{\circ}\text{C}$, 1기압)에 따른 공기 특성(비중 0.457, 점성 계수 3.55×10^{-5} kg/m $\cdot$ s), 입자의 특성(비중 8.39, 구형 입자) 및 reynolds 수가 낮다는 가정 하에 입자의 최종 속도를 계산하였다.

$$u_t = \frac{gD_p^2(\rho_p - \rho_a)}{18\mu_a}$$

여기서, g = 중력 가속도, D_p = 입자 직경(입도), ρ_p = 입자 밀도, ρ_a = 공기 밀도, μ_a = 공기 점성 계수이다. 표 1은 분말의 최종 속도에 해당하는 허용 공기 유량(= 최종속도 $\times$ 가열로 단면적)과 이에 따른 반응 시간을 계산한 결과이다. 반응 시간은 반응 효율을 고려하지 않고 이상적인 반응으로 가정하였다. 예를 들어, 입도 20 μm 를 기준으로 4,911 l/hr의 유량으로 공기를 공급하면 20 μm 이상의 입자는 비산되지 않으며, 반응 시간은 0.54 시간이 소요됨을 의미한다. 일반적으로 상용화된 공기 펌프는 6,000 l/hr 정도이므로, 22 μm 이상의 분말은 비산되지 않지만, 그 이하의 분말은 비산이 되기 때문에 22 μm 보다 충분히 작은 필터를 설치하거나, 산화 온도가 500 $^{\circ}\text{C}$ 인 경우에 U_3O_8 분말의 입도가 4 μm 이상이므로 반응 시간이 다소 늘어나더라도 196 l/hr 미만으로 유량을 조절하는 것이 바람직하다. 실리카(SiO_2)를 이용하여 유사한 실험을 수행하였다. 앞서서와 같은 방법으로 실리카 분말에 대한 비중 및 상온 공기 특성을 고려하여 최종 속도 및 허용 공기 유량을 계산하면, 본 연구에서 확보하고 있는 실리카 분말의 입도 63~200 μm 에 대해 허용 공기 유량은 61,000 l/hr 이상인데, 이는 가용한 공기 펌프의 용량을 넘어서는 수치이다. 이 보다 낮은 유량(3,000 l/hr과 6,000 l/hr)의 공기를 공급하며 비산 여부를 육안으로 확인하였는데, 예상대로 분말의 비산은 확인되지 않았다.

3.3. Vibration 측정

UO_2 pellet과 공기의 접촉 면적을 크게 하여 pellet이 빨리 분말화 되도록 하고, 산화된 분말을 용이하게 회수하기 위하여 vibrator를 사용하였다. 장치에 무리한 충격 하중을 부가하지 않으면서, 분말의 회수가 용이한 진동 가속도의 범위와 vibrator의 최적 부착 위치를 결정하기 위하여 진동 측정 실험을 수행하였다. 먼저, 그림 1과 같이 장치에 부착된 3개의 vibrator 중, 상단의 vibrator 1만 구동하는 경우, 하단의 vibrator 3만 구동하는 경우, 상단의 vibrator 1과 2를 동시에 구동하는 경우, 그리고 vibrator(1+2+3)를 구동하는 경우에 대하여 진동 시간 대비 분말의 회수량을 측정하였다. 실험 결과,

각 경우에 대하여 3차 mesh 표면에서 측정된 진동 가속도는 각각 0.24, 0.16, 0.38 및 0.54 mm/sec²로 측정되었다. 따라서, 장치에 부가되는 진동량은 예상한 대로 vibrator(1+2+3)를 구동하는 경우가 가장 큼을 알 수 있다. 그러나, 시간 대비 분말 회수량은 그림 5에서와 같이 상단 2개의 vibrator(1+2)만을 구동시킨 경우가 가장 많음을 알 수 있다. 이는 vibrator(1+2+3)를 구동하는 경우, 상단과 하단의 vibrator에 의하여 분말에 가해지는 진동의 방향이 서로 간섭하여 진동량이 큼에도 불구하고 분말의 회수량은 감소함을 나타내는 것으로 추정된다. 따라서, 향후 실증용 장치를 설계할 때, 상단에 두 개의 vibrator를 설치하고, 진동 가속도는 0.38 mm/sec²보다 큰 값을 적용하는 것이 바람직하다.

3.4. 분진 비산 확인

분진의 비산을 확인하기 위하여 그림 6(a)와 같이 흑색의 접착 종이를 필터 출구에 부착하고 가열로 내부로 6,000 l/hr의 공기를 3분 정도 공급하였다. 육안으로 확인한 결과, 접착 종이에 분말이 묻어 있지 않았으며, 이는 설계된 공기 유량에 대하여 장치 밖으로 배출되는 분진이 없음을 나타낸다. 그림 6(b)는 분진 확인 실험 종료 후, cyclone을 분리하여 내부를 확인한 것으로 미량의 분진이 관찰되었다.

3.5. 가열로 내부 온도와 외부표면 온도 측정

UO₂ pellet이 U₃O₈으로 산화될 때 가열로의 표면 온도가 720 °C 이상이 되면 우라늄이 가열로의 내부 표면에 접착되는 현상이 발생할 수 있기 때문에, 이를 미연에 방지할 수 있도록 가열로의 표면에 온도 센서를 부착하여 가열 온도를 제어하여야 한다. 가열로의 특성을 조사하기 위하여 가열로 내부 온도를 500 °C까지 상승시킬 때 소요되는 시간을 측정하였다.

3.5.1 실험 방법

가열로를 이용하여 UO₂ pellet을 U₃O₈으로 산화시 가열로의 내부 온도는 500 °C가 가장 적절한 산화 온도이다. 이때 가열로 내부 온도를 500 °C까지 상승시킬 때 가열로 외부표면온도가 몇 °C까지 상승하는지 알아보았다. 이러한 온도 측정 실험을 하기 위하여 공기 유량을 가변화 하면서 실험을 하였다. 온도 측정 실험은 공기의 유량을 단계별로 공급하고 장치 상단의 배기구 쪽의 밸브를 열어 둔 상태에서 실험을 하였으며, 반대로 공기 유량을 공급 안한 상태에서 실험을 하여 서로 비교 분석하였다. 온도 측정 실험시 공기 유량을 공급 안한 상태와 5, 10, 20 lpm/min 등으로 가변화 하면서 가열로의 내부 온도 및 외부표면온도와 소요되는 시간 등을 측정하였다. 실험시 실험 변수 및 실험 방법은 외부표면온도를 580 °C로 설정한 상태와 설정하지 않은 상태에서 공기 유량 5 lpm/min(공기 유량을 공급한 상태와 공기 유량을 공급 안한 상태), 10 lpm/min(공기 유량을 공급한 상태), 20 lpm/min (공기 유량을 공급한 상태)에서 실험을 하였다.

3.5.2 실험 결과

가열로의 내부 온도 및 외부표면온도를 측정하기 위하여 공기 유량을 가변화 하면서 실험을 하였으며, 실험시 가열로 내부 온도 500 °C 상승시 외부표면온도가 몇 °C까지 상승하는지를 측정하였다.

또한, 실험시 공기 유량을 가변화하여 공기를 공급하면서 장치 상단에 부착되어 있는 배기구 쪽의 밸브를 열어 둔 상태로 실험을 하였다. 공기의 유량 변화는 공기를 공급 안한 상태와 5, 10, 20 lpm/min 등의 공기를 가변화 하면서 가열로 내부 온도 및 외부표면온도와 온도 상승에 소요되는 시간 등을 측정하였다. 특히, 가열로 내부 온도 500 °C일 때 외부표면온도 720 °C 이하(630 °C)가 됨을 확인하였다. 표 2, 3은 공기 유량 별 가열로 내부 온도 및 외부표면온도를 580 °C로 설정한 상태와 설정하지 않은 상태에서 실험한 값을 나타낸 것이다.

3.5.2.1 외부표면온도를 580 ℃로 설정한 상태

그림 7~10은 가열로의 외부표면온도를 580 ℃로 설정한 상태에서 공기를 공급하지 않은 상태와 5, 10, 20 lpm/min으로 가변화 하면서 실험한 값을 그림으로 나타낸 것이다.

3.5.2.2 외부표면온도를 580 ℃로 설정하지 않은 상태

그림 11~14는 가열로의 외부표면온도를 580 ℃로 설정하지 않은 상태에서 공기를 공급하지 않은 상태와 5, 10, 20 lpm/min으로 가변화 하면서 실험한 값을 그림으로 나타낸 것이다.

3.5.2.3 외부표면온도를 580 ℃로 설정한 상태와 설정하지 않은 상태를 비교

그림 15, 16은 가열로의 외부표면온도를 580 ℃로 설정한 상태와 설정하지 않은 상태에서 실험한 값을 서로 비교하여 그림으로 나타낸 것이다. 그림 17은 건식 분말화/혼합 장치의 가열로 내부 온도와 외부표면온도를 측정하기 위하여 가열로 내부와 가열로 외부표면에 열전대를 설치한 모습을 나타낸 것이다.

4. UO_2 pellet을 이용한 산화 실험

UO_2 pellet의 산화 실험을 통해서 분말화 과정을 이해하고, 분말이 다단계 mesh를 통과하는 지를 확인하기 위하여 소형 실험 장치를 제작하여 실험을 하였다. 장치의 크기는 높이 55 mm, 지름 70 mm의 원통형이며, 건식 분말화/혼합 실험 장치에 사용한 동일한 규격의 3단계 mesh를 설치하였다. 실험용 산화로는 electric muffle furnace 이며, 산화로 내부의 크기는 길이 310 mm, 폭 150 mm, 높이 100 mm 이다. 실험에서는 pellet 2개(총 무게 36.51 g)를 건식 분말화/혼합 장치의 가열 온도와 같은 500 ℃로 가열하여 U_3O_8 분말로 산화시켰다. 실험 결과, UO_2 pellet이 산화된 시간은 2시간 53분 정도 소요되었으며, 회수율은 99.9 %로 측정되었다(회수한 U_3O_8 37.95 g). 그림 18의 (a)는 산화전의 pellet, (b)는 산화로 속에 pellet 투입, (c)는 산화된 U_3O_8 분말을 나타낸 것이다. 그림 19는 산화된 U_3O_8 분말의 입도 크기와 형상으로 (a)는 1,000배 확대, (b)는 100배 확대한 것을 나타낸 것이다. UO_2 pellet의 산화된 U_3O_8 분말 입도 크기는 100 μm 이하로 측정되었다.

5. 결론

건식 분말화/혼합 장치의 성능 실험과 UO_2 pellet을 이용한 산화 실험 등을 수행한 결과 몇 가지의 문제점 등을 도출하였으며, 이를 개선 보완하여 장치의 성능 실험을 완료하였다. 장치 성능 실험 결과, 실험용 장치의 일부 문제점을 보완하여 설계 목표인 분말 입도 20~100 μm , 분말 회수율 99 %, 처리 용량 20 kgHM/batch의 실증용 장치로 활용 가능함을 확인할 수 있었다. 또한, 실험용 장치와 동일한 구조의 크기를 갖는 mesh를 사용하여 UO_2 pellet을 이용한 산화 실험에서도 높은 회수율을 보였으며, 산화에도 문제가 없음을 확인하였다. 이와 같은 실험 결과를 토대로 향후 실증용 장치를 설계·제작하는데 자료로 활용하고자 한다.

참고 문헌

- [1] O.Levenspiel, "Chemical Reaction Engineering", 2nd Ed., p.361, McGraw-Hill, New York, 1972.
- [2] K.Okada, "Separation method for a spent fuel rod", Japanese Patent No. 84140163, July 5, 1984.
- [3] Y.Takashima, et al., "New concept on the head end of Purex process toward the nextcentury", RECOD '87 Proceedings, 569, 1987.

- [4] C.S.Choi et al., "Improvement of conversion and reconversion process for nuclear fuel", KAERI/RR-802/88, 1988.
- [5] 양명승 외, "핵연료제조자동화기술개발," KAERI/RR-1022/90, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1990.
- [6] 양명승 외, "핵연료제조 및 품질관리기술개발," KAERI/RR-1744/96, 한국원자력연구소, 과학기술처, 1996.
- [7] 신영준 외, "사용후핵연료 차세대관리공정개발," KAERI/RR-2128/2000, 한국원자력연구소, 과학기술부, 2000.

표 1. 분말 입자의 최종속도, 허용공기유량 및 반응시간.

입도 (μm)	최종속도 (m/s)	허용공기유량 (ℓ/hr)	반응시간 (hr)	입도 (μm)	최종속도 (m/s)	허용공기유량 (ℓ/hr)	반응시간 (hr)
1	0.000129	12.3	214.5	20	0.051519	4910.9	0.54
2	0.000515	49.1	53.6	22	0.05680	5942.1	0.44
4	0.002061	196.4	13.4	40	0.206076	19643.5	0.13
8	0.008243	785.7	3.4	80	0.824302	78573.4	0.034
10	0.012880	1227.7	2.2	100	1.287972	122771.5	0.022

표 2. 공기 유량 별 가열로 내부 온도 및 외부표면온도(외부표면온도를 580 $^{\circ}\text{C}$ 로 설정한 상태).

공기 유량(lpn/min)	가열로 내부온도($^{\circ}\text{C}$)	가열로 외부표면온도($^{\circ}\text{C}$)	가열 시간(분)
공급 안한 상태	500	580	56
5	500	579	70
10	500	580	59
20	500	580	58

표 3. 공기 유량 별 가열로 내부 및 외부표면온도(외부표면온도를 580 $^{\circ}\text{C}$ 로 설정하지 않은 상태).

공기 유량(lpn/min)	가열로 내부온도($^{\circ}\text{C}$)	가열로 외부표면온도($^{\circ}\text{C}$)	가열 시간(분)
공급 안한 상태	500	630	33
5	500	630	36
10	500	625	38
20	500	625	39



그림 1. 장치의 컴퓨터 그래픽 모델링.

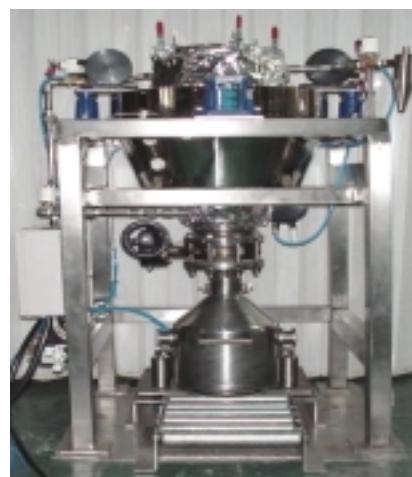


그림 2. 장치의 제작품.

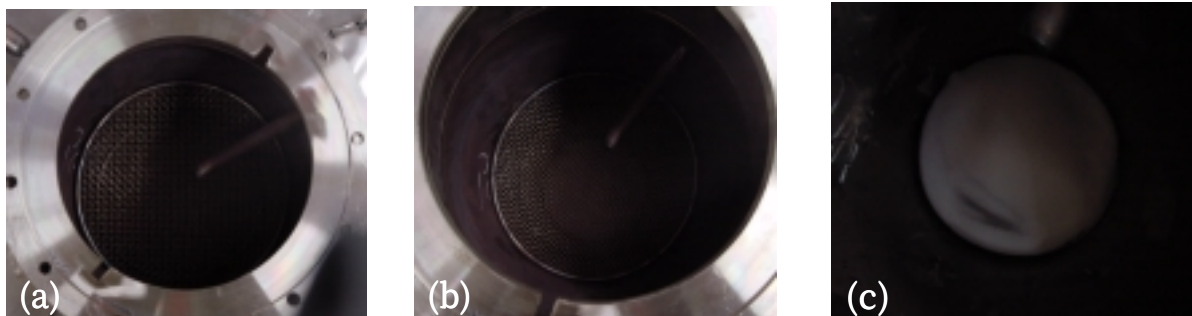


그림 3. 분말의 mesh 통과 여부.

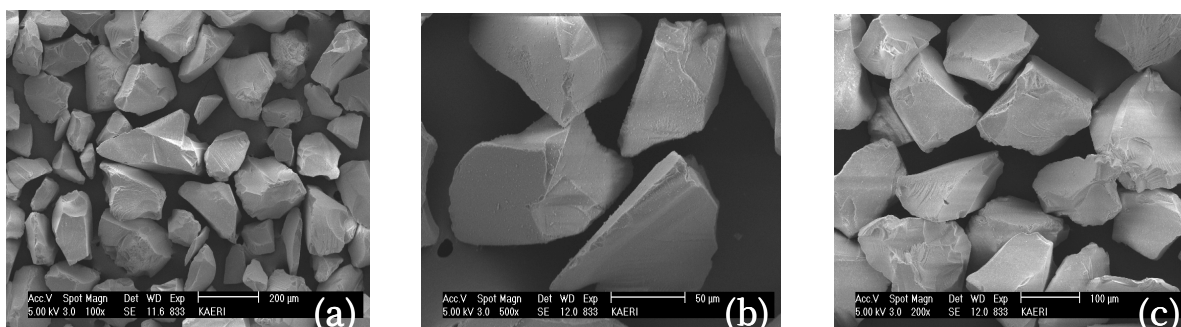


그림 4. 분말의 입도 크기와 형상.

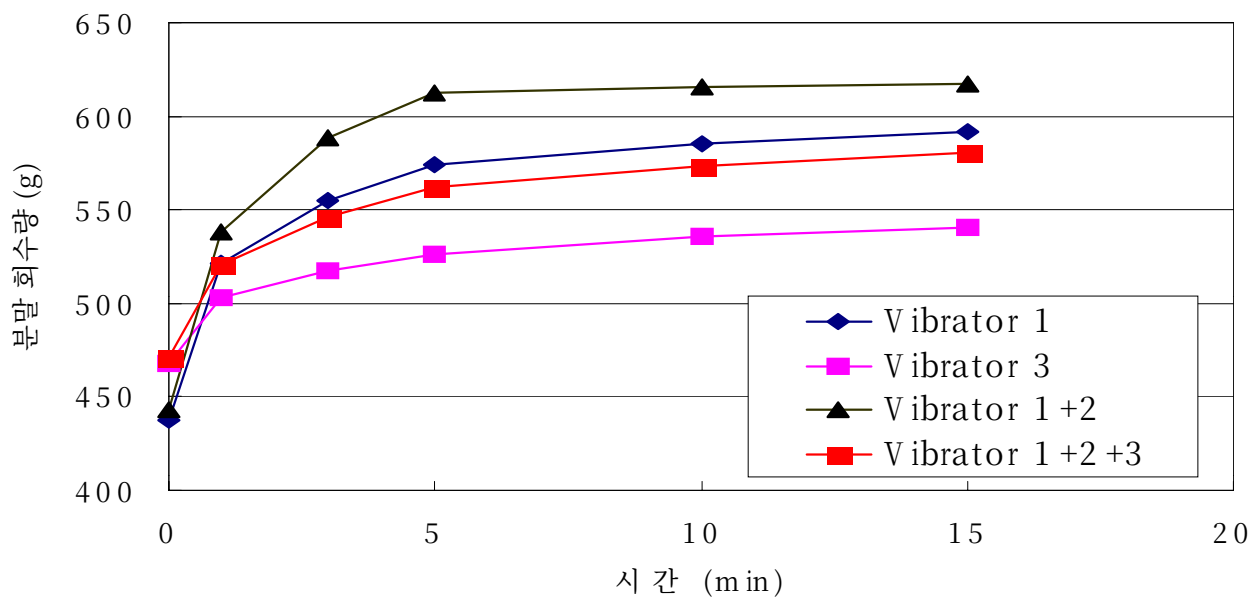


그림 5. Vibrator 구동 조건 변화에 따른 진동시간 대비 분말 회수 량.

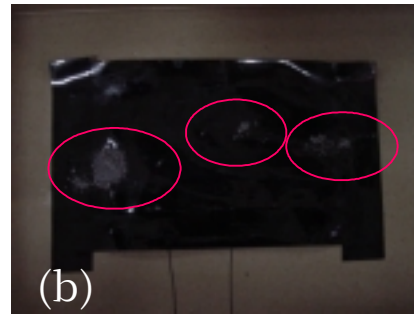
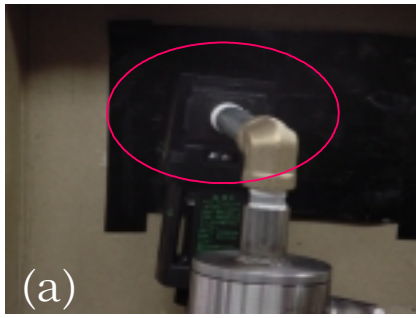


그림 6. 분진 비산 확인 결과.

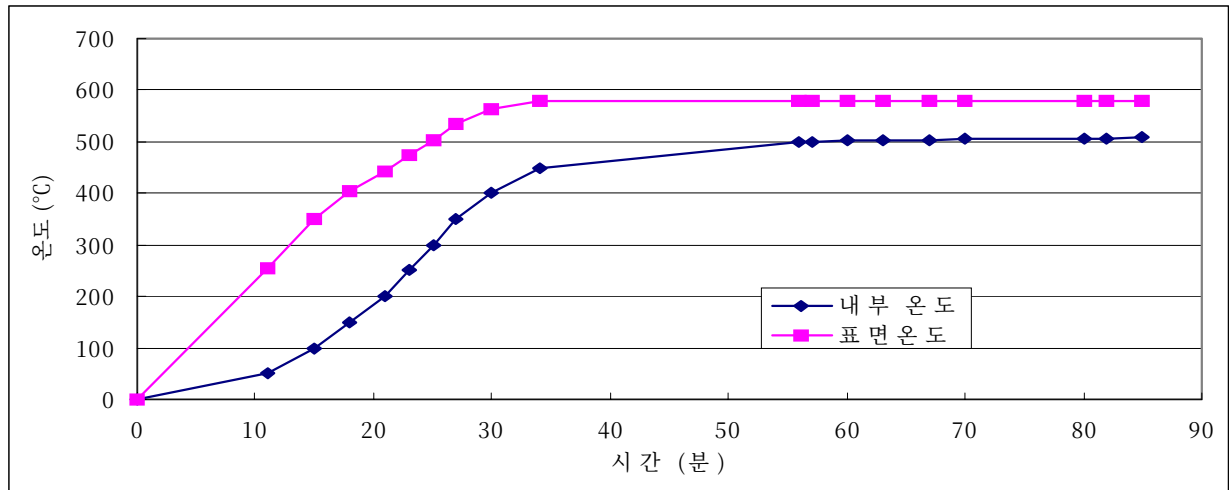


그림 7. 공기 유량을 공급하지 않은 상태(외부표면온도를 580 °C로 설정한 상태).

- * 외부표면온도를 580 °C로 설정시 최대상승온도 582 °C, 최저온도 576 °C
- * 최대상승온도와 최저온도 차이는 ± 6 °C
- * 가열로 내부 온도를 500 °C로 상승시키는데 소요되는 시간은 약 56분

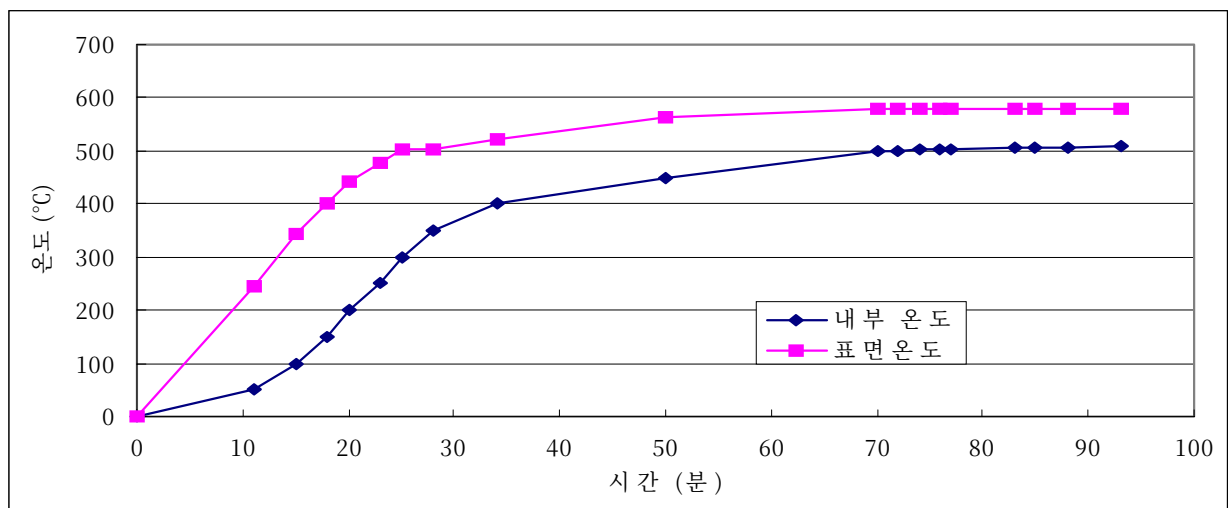


그림 8. 5 lpm/min 공기 유량을 공급 한 상태(외부표면온도를 580 °C로 설정한 상태).

- * 외부표면온도를 580 ℃로 설정시 최대상승온도 584 ℃, 최저온도 576 ℃
- * 최대상승온도와 최저온도 차이는 ± 8 ℃
- * 가열로 내부 온도를 500 ℃로 상승시키는데 소요되는 시간은 약 70분

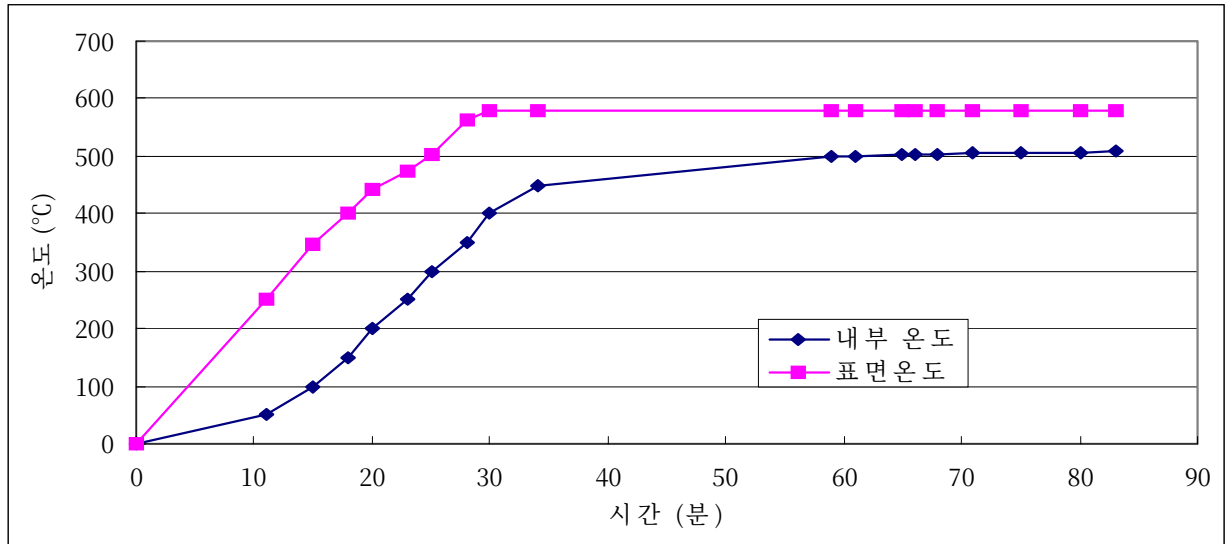


그림 9. 10 lpm/min 공기 유량을 공급한 상태(외부표면온도를 580 ℃로 설정한 상태).

- * 외부표면온도를 580 ℃로 설정시 최대상승온도 583 ℃, 최저온도 576 ℃
- * 최대상승온도와 최저온도 차이는 ± 7 ℃
- * 공기 유량 10 lpm/min일 경우 cyclone에 손을 되어 보니 따뜻함을 느낄 수 있으며, 배기구 쪽에서 따뜻한 공기가 나옴
- * 가열로 내부 온도를 500 ℃로 상승시키는데 소요되는 시간은 약 59분

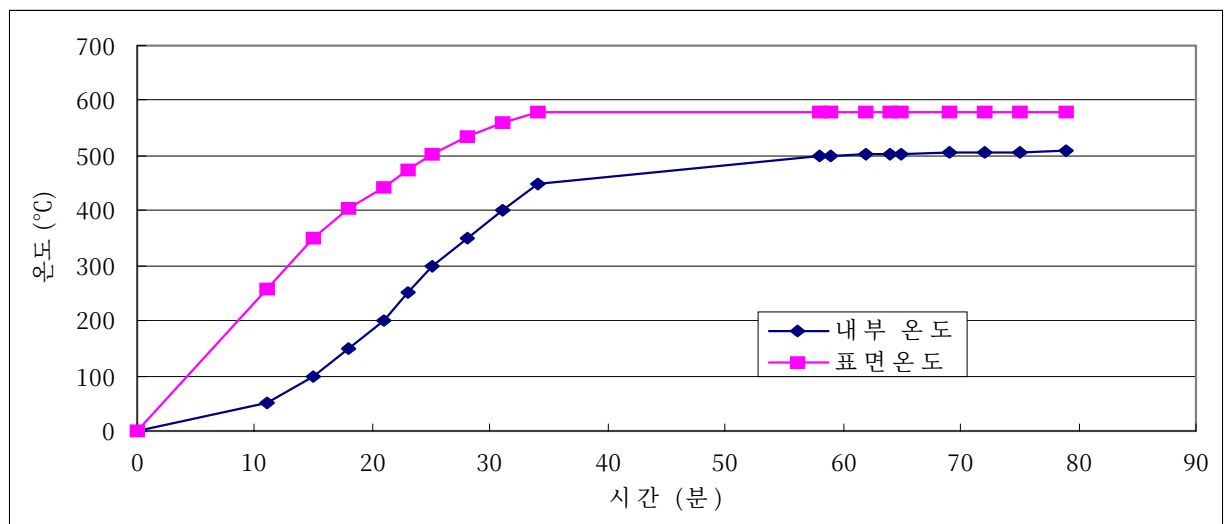


그림 10. 20 lpm/min 공기 유량을 공급한 상태(외부표면온도를 580 ℃로 설정한 상태).

- * 외부표면온도를 580 ℃로 설정시 최대상승온도 583 ℃, 최저온도 576 ℃
- * 최대상승온도와 최저온도 차이는 ± 7 ℃
- * 공기 유량 20 lpm/min일 경우 cyclone에 손을 되어 보니 따뜻함을 느낄 수 있으며, 배기구 쪽에서 따뜻한 공기가 나옴(10 lpm/min 보다 따뜻함)
- * 가열로 내부 온도를 500 ℃로 상승시키는데 소요되는 시간은 약 58분

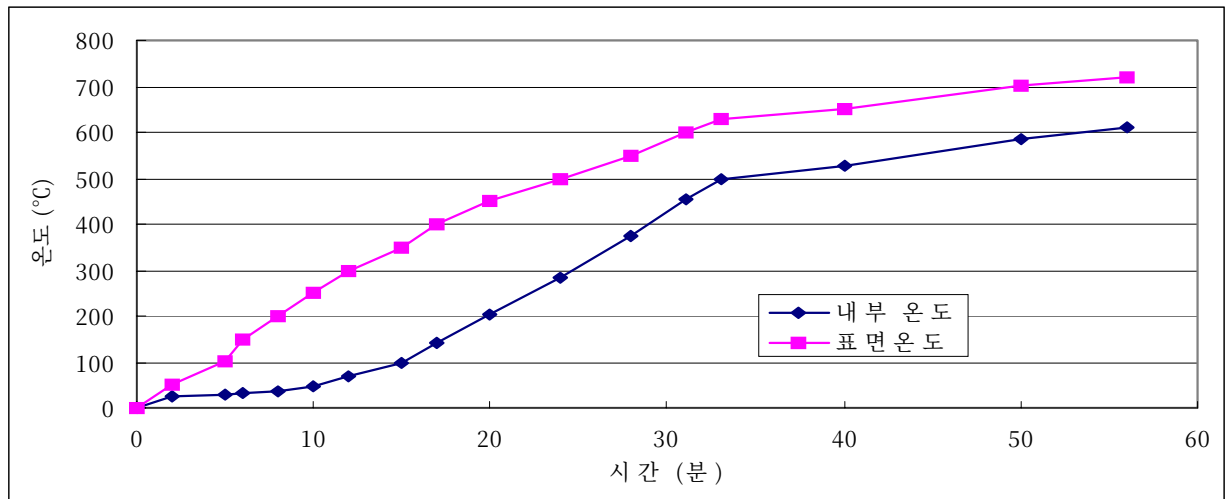


그림 11. 공기 유량을 공급 안한 상태(외부표면온도를 580 ℃로 설정하지 않은 상태).

- * 외부표면온도 720 ℃ 일 때 내부온도 612 ℃
- * 외부표면온도 630 ℃ 일 때 내부온도 500 ℃
- * 가열로 내부 온도를 500 ℃로 상승시키는데 소요되는 시간은 약 33분

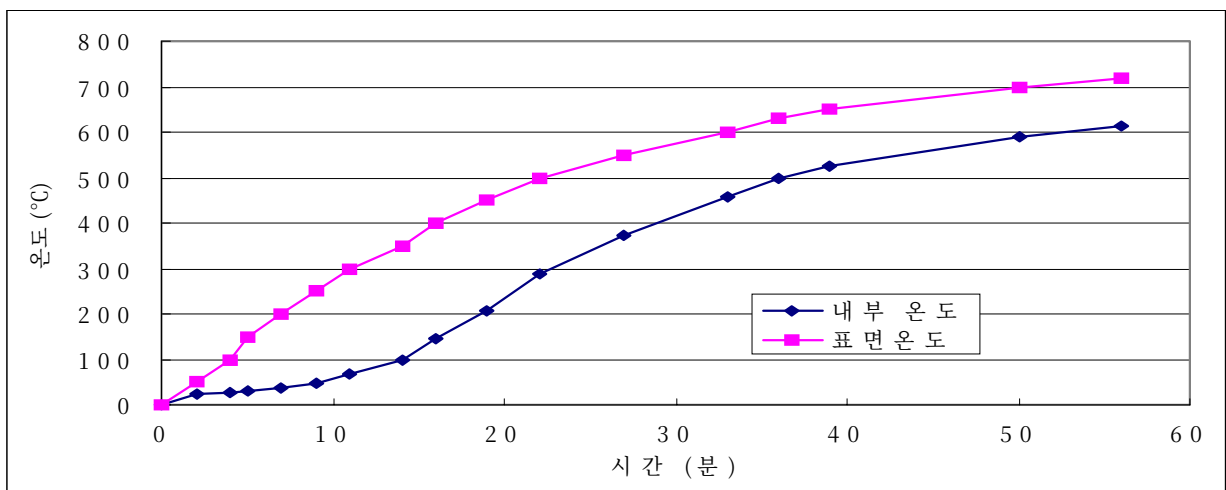


그림 12. 5 lpm/min 공기 유량을 공급한 상태(외부표면온도를 580 ℃로 설정하지 않은 상태).

- * 외부표면온도 629 ℃ 일 때 내부온도 500 ℃ (배기 온도 26 ℃ 이며, 실험 시작 36분 후의 온도)

- * 외부표면온도 720 ℃ 일 때 내부온도 614 ℃ (배기 온도 27 ℃ 이며, 실험 시작 56분 후의 온도)
- * 배기 온도 측정 당시 실험실의 온도는 23 ℃ 이며, 온도계를 배기 입구로부터 20 mm 거리에 설치
- * 가열로 내부 온도를 500 ℃로 상승시키는데 소요되는 시간은 약 36분

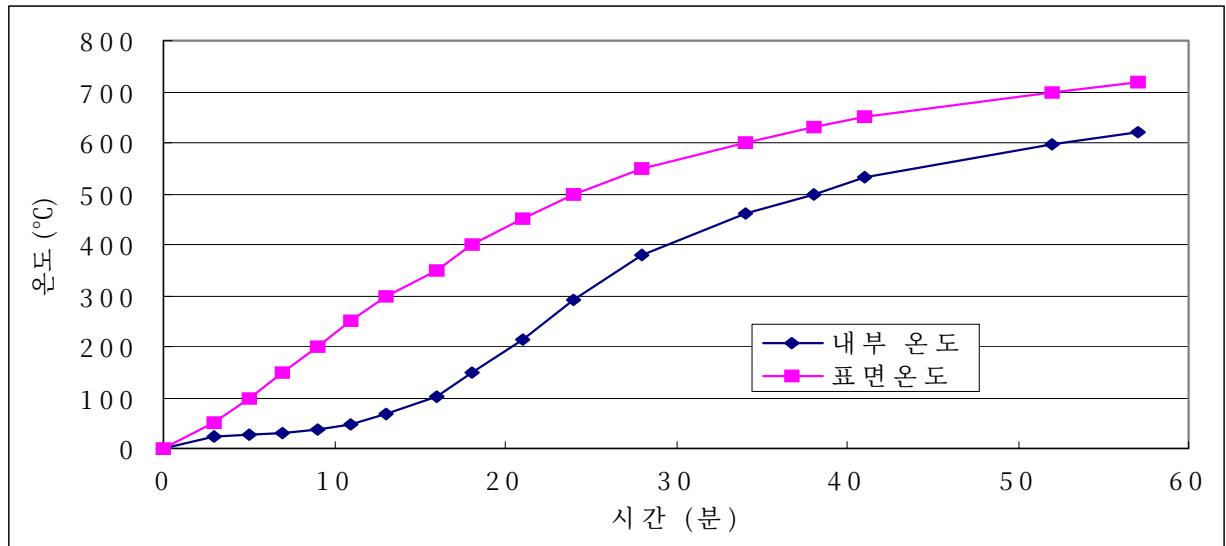


그림 13. 10 lpm/min 공기 유량을 공급한 상태(외부표면온도 580 ℃를 설정하지 않은 상태).

- * 외부표면온도 625 ℃ 일 때 내부온도 500 ℃ (배기 온도 32 ℃ 이며, 실험 시작 38분 후의 온도)
- * 외부표면온도 720 ℃ 일 때 내부온도 619 ℃ (배기 온도 46 ℃ 이며, 실험 시작 57분 후의 온도)
- * 배기 온도 측정 당시 실험실의 온도는 24 ℃ 이며, 온도계를 배기 입구로부터 20 mm 거리에 설치
- * 가열로 내부 온도를 500 ℃로 상승시키는데 소요되는 시간은 약 38분

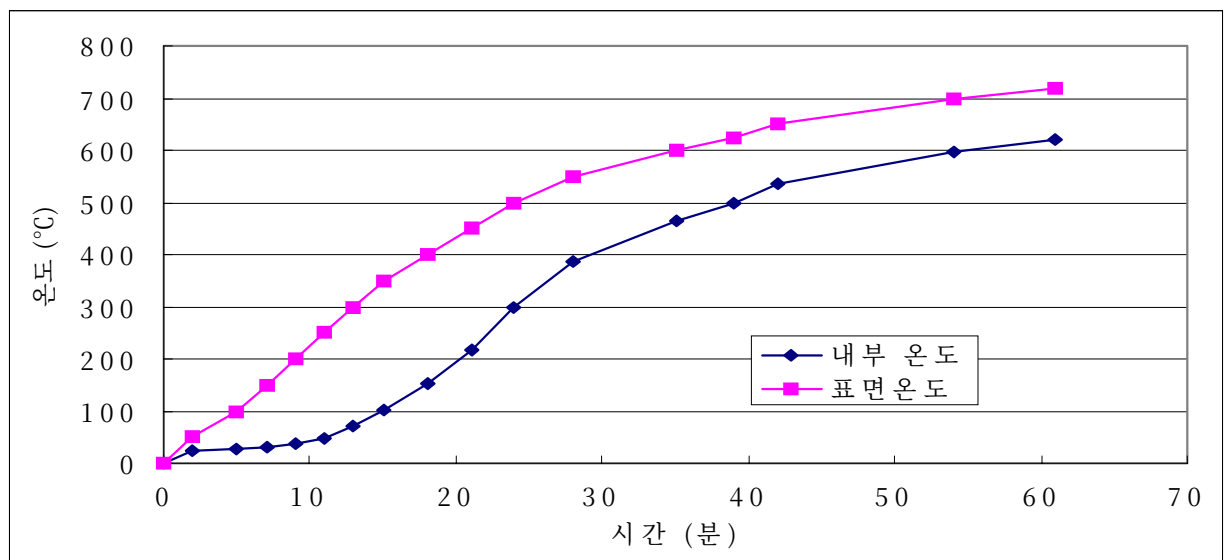
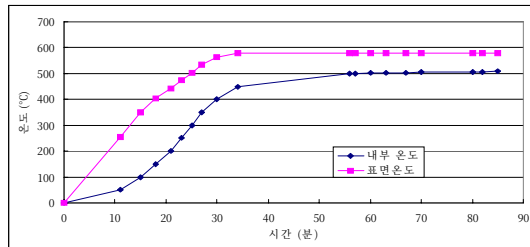
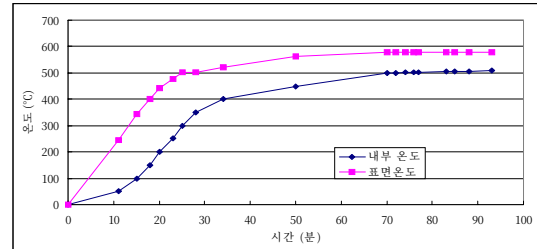


그림 14. 20 lpm/min 공기 유량을 공급한 상태(외부표면온도를 580 ℃로 설정하지 않은 상태).

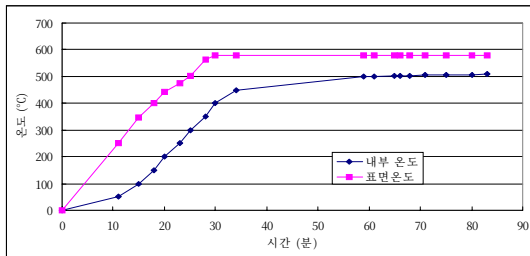
- * 외부표면온도 625 ℃ 일 때 내부온도 500 ℃ (배기 온도 53 ℃ 이며, 실험 시작 39분 후의 온도)
- * 외부표면온도 720 ℃ 일 때 내부온도 622 ℃ (배기 온도 75 ℃ 이며, 실험 시작 61분 후의 온도)
- * 배기 온도 측정 당시 실험실의 온도는 25 ℃ 이며, 온도계를 배기 입구로부터 20 mm 거리에 설치
- * 가열로 내부 온도를 500 ℃로 상승시키는데 소요되는 시간은 약 39분



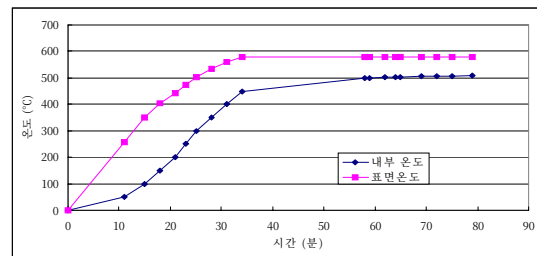
공기 유량 공급하지 않은 상태



5 lpm/min의 공기 유량 공급

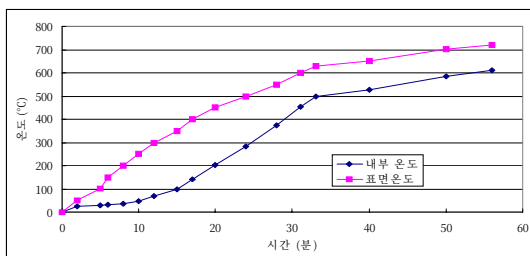


10 lpm/min의 공기 유량 공급

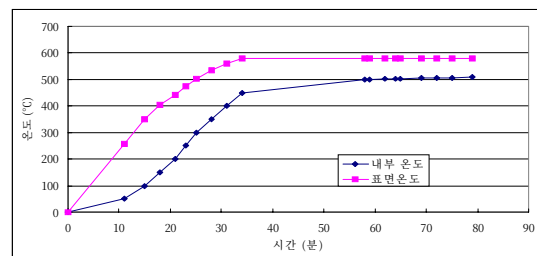


20 lpm/min의 공기 유량 공급

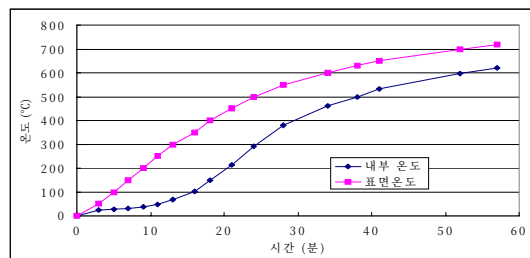
그림 15. 외부표면온도를 580 ℃로 설정한 상태



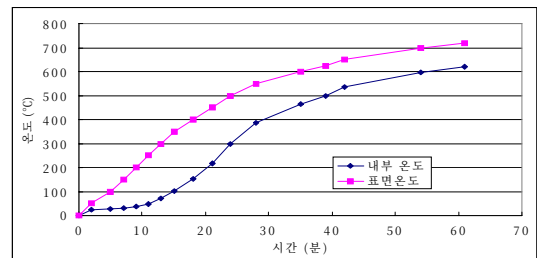
공기 유량 공급하지 않은 상태



5 lpm/min의 공기 유량 공급



10 lpm/min의 공기 유량 공급



20 lpm/min의 공기 유량 공급

그림 16. 외부표면온도를 580 ℃로 설정하지 않은 상태

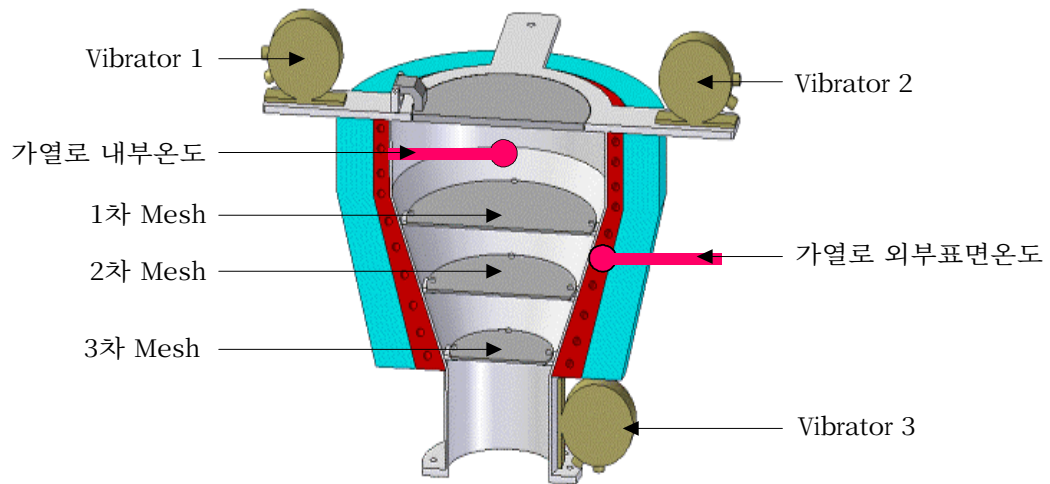


그림 17. 가열로 내부와 외부표면에 열전대 설치 모습.

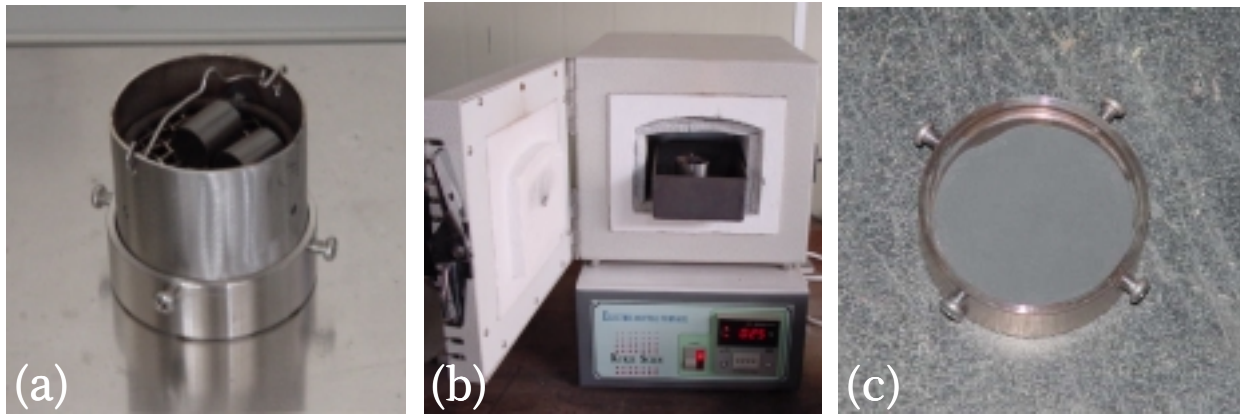


그림 18. UO_2 pellet을 이용한 산화 실험.

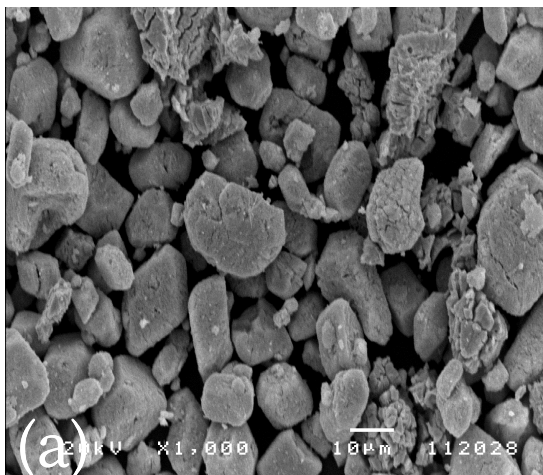


그림 19. U_3O_8 분말의 입도 크기 및 형상.