

건식분말화 장치설계를 위한 U_3O_8 분말의 미세입자 유동해석

김영환*·정재후*·홍동희*·윤지섭*

Analysis on the flow of U_3O_8 powder for design of the voloxidizer

Y. H. Kim, J. S. Yoon, J. H. Jung, D. H. Hong

Abstract

Voloxidizer for hot cell demonstration that handle spend fuel of high radiation virulence in limited space should become a small size and not scatter in its exit. This study determine optimum velocity of U_3O_8 using Newton-Raphson Method. We have conducted fortran programing on the Newton-Raphson Method, obtained a theory results and, predicted optimum velocity on the particle size distribution of U_3O_8 . We have conducted experimentation using acrylic experimental device for verification of theory method, sampled and analyzed using the particle size analyzer. In the results, we have found maximum 5~7% error rate in the comparative value of theory and experimentation. Optimum velocity and experimental results of U_3O_8 for scatter prevention have applied for design of demonstration voloxidizer, and produced operation condition of voloxidizer.

Key Words : optimum velocity, U_3O_8 , demonstration, voloxidizer

1. 서론

원자력 발전소에서 사용하고 난 사용후 핵연료는 해마다 발생량이 증가하고 있다. 매년 발생되는 화학적 독성이 강한 방사선폐기물량을 줄임으로써 방사선 위험도를 감소하고 환경적 위험으로부터 안전하게 보관 관리를 위하여 차세대관리 공정이 개발되고 있다. 차세대관리 공정들 중에서 방사선 독성이 강한 특정원소를 추출하는 금속전환로의 반응효율을 높이기위해서 건식분말화 장치에서 UO_2 Pellet을 산화하여 균질한 U_3O_8 분말을 공급하여야 한다. 실험의 목적은 U_3O_8 의 최적 유속을 측정하여 범용의 실증용 건식분말화 장치의

기본설계 자료 산출을 위한 것이다. 설계자료 산출을 위해서 핫셀 공간이 제한되어 있고, 방사선 독성이 높은 사용후핵연료를 취급해야 한다는 조건을 고려하고 소형화된 장치가 되어야 하며, 분말이 비산되지 않으면서 최대 회수율을 갖는 장치가 되어야 한다. 따라서 실험에서는 장치출구에서 분말이 밖으로 비산되지 않는 적정의 유속을 결정하고자 한다. 이를 위해서 Newton-Raphson 방법을 사용하여 포트란 프로그램(STAR-CD)을 작성하고 U_3O_8 의 입도분포별로 해석을 수행하였다. 그 해석결과를 아크릴 실험 장치를 제작하여 최적유속에 대한 실험을 하고 유속별 분말을 Sampling

* 한국원자력연구소 사용후핵연료기술개발팀

하여 입자크기를 Particle Analyser로 분석하였다. 그 결과 이론식과 실험식이 최대 5-7%의 오차를 보여 주었으며, U_3O_8 가 비산되지 않는 최적유속과 실험결과는 실증용 UO_2 Pellet 건식 분말화 장치 설계에 적용되었으며, 운전조건을 결정하였다.

2. 본론

U_3O_8 의 최적 유속을 측정하기 위하여 U_3O_8 분말의 입도에 따른 Newton-Raphson 식을 적용하였다. 이에 대해 최적유속의 해석을 통하여 실험을 함으로서 장치의 이론식을 검증한다.

- U_3O_8 분말의 입도에 따른 유량 조절 계산

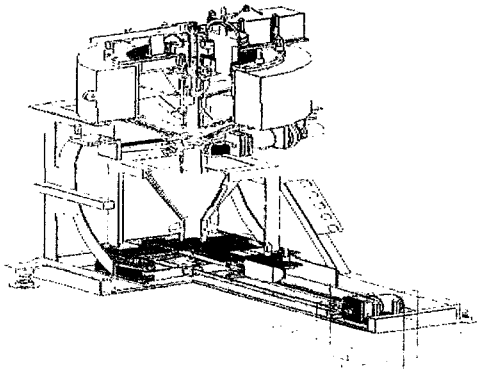


그림 1. 건식분말화 장치의 장치 모델.

그림 1은 건식분말화 장치의 장치 모델이며, 20 kg UO_2 의 완전 산화를 위해 필요한 공기량은 다음과 같다. UO_2 분자량은 270.07, 따라서, UO_2 20 kg은 74.055 몰에 해당한다($UO_2 + 1/3O_2 = 1/3 U_3O_8$). UO_2 1 몰의 산화에는 1/3 몰의 공기가 필요하고, 20 kg의 UO_2 산화에는 24.68 몰의 공기가 요구된다. 이상기체로 가정하면 1 기압 298 K에서 이상기체 1몰은 22.4 ℓ 이고, 공기는 보통 공기 중에 21 %를 차지한다. 따라서, $100/21 \times 24.68 \times 22.4 \ell = 2633 \ell$ 의 공기가 소요된다.

분말 비산 방지를 위한 공기 속도 계산 조건은 다음과 같다. 대상 분말의 입도는 1 μm , U_3O_8 밀도는 8.39 g/cm³, 입자형상은 구형으로 가정하였으며, 상온 공기특성에서의 공기밀도는 1.220 kg/m³, 점성계수 1.8 x 10⁻⁵ kg/m·s 로 하였고, 500 °C

에서 공기 특성밀도는 0.457 kg/m³, 점성계수 3.55 x 10⁻⁵ kg/m·s 이고, 1 기압으로 가정하였다[1]. 최적속도를 해석하기 위해서 Newton-Raphson 방법을 이용하였고, 아래 식(1)~식(6)과 같다. 그리고 아래의 식을 만족시키는 유속을 구하기 위해 Fortran 프로그램(표 1)을 작성하여 수행하였다.

$$F_{Drag} + F_{Bouyancy} = F_{weight} \text{-----(1)}$$

$$F_{Drag} = C_d \frac{1}{2} \rho v^2 S \text{-----(2)}$$

$$C_d = 24(1 + 0.15Re_d^{0.687})/Re_d \text{-----(3)}$$

$$Re_d = \frac{\rho_{air} \cdot v \cdot D_{particle}}{\mu_{air}} \text{-----(4)}$$

$$F_{Bouyancy} = \rho_{air} \cdot g \cdot V_{Particle} \text{-----(5)}$$

$$F_{weight} = \rho_{Particle} \cdot g \cdot V_{Particle} \text{-----(6)}$$

표 1. 포트란 프로그램 결과 값.

D(micron)	D(meter)	V(m/s)	Re	Cd	Drag(N)	Weight(N)	Bouyancy(N)	Error(%)
2	0.000002	0.0010	0.9001	174525.2717	3.4443E-13	3.4441E-13	5.0081E-17	5.1353E-05
20	0.00002	0.0978	0.1326	187.7237	3.4441E-10	3.4441E-10	5.0081E-14	-1.5362E-06
40	0.00004	0.3543	0.9606	28.6292	2.7553E-09	2.7553E-09	4.0085E-13	-4.1867E-06
60	0.00006	0.6988	2.8417	11.0418	9.2991E-09	9.2991E-09	1.3522E-12	-1.4118E-09
80	0.00008	1.0792	5.8518	6.1721	2.2042E-08	2.2042E-08	3.2052E-12	1.4251E-04
100	0.0001	1.4689	9.9559	4.1641	4.3046E-08	4.3051E-08	6.2601E-12	1.0806E-05
120	0.00012	1.8585	15.0996	3.1266	7.4392E-08	7.4393E-08	1.0818E-11	-4.0142E-06

여기서 미세입자를 떠오르게 하는 최소 유체의 속도는 양력 + 부력 = 중력의 관계에서 힘의 평형을 이룰때 미세입자는 정지 상태에 이른다. 이때의 유체속도를 구하기 위해 유동해석을 수행하였다.

그림 2와 같이 유체가 움직이고 미세입자가 고정인 상태이므로 해석의 편의를 위하여 유체가 정지해있고 미세입자가 떨어지는 문제로 치환하였다.

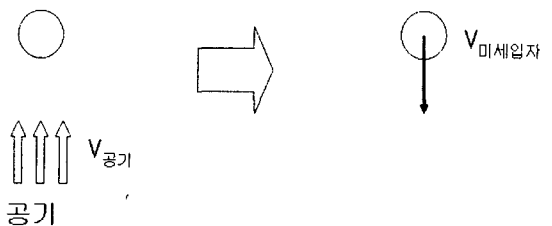


그림 2. 공기부양에 대한 구형입자의 힘 평형도.

그림 3과 같이 미세입자가 자유낙하를 시작하여 속도가 일정해지는 때까지 해석을 수행하였다.

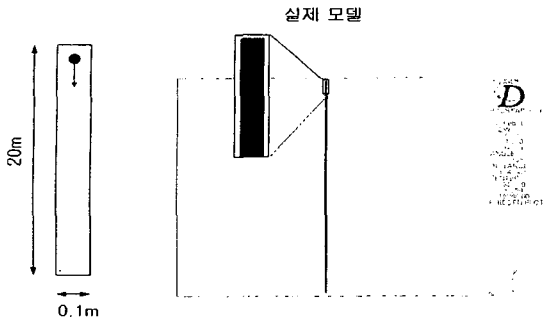


그림 3. 미세입자 해석의 실제모델.

- 프로그램 해석 결과

그림 4는 미세입자 해석 결과 예(미세입자 크기 120미크론)를 보여주고 있다.

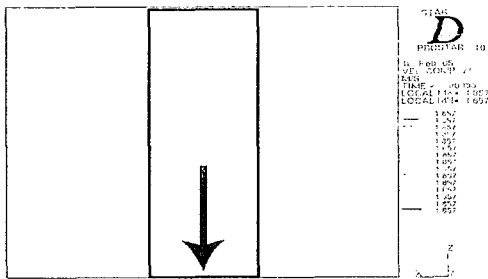


그림 4. 미세입자크기의 유동해석결과(120μ)

그림5 에서와 같이 유동해석 결과 와 입자 분포 크기에 따른 시간과 미세입자 속도를 보여주고 있다. 여기서 일정시간이 지난 후 입자속도가 동일해지는 것을 이용하여 이 해석모델로 유체의 속도를 구할 수 있음을 보여준다.

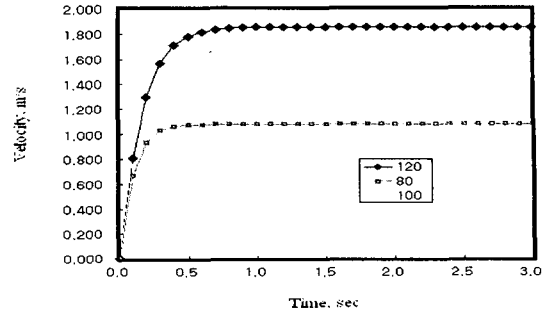


그림 5. 입자의 시간에 따른 미세입자의 속도.

그림 6과 같이 최종 해석 결과, 입자 크기에 대한 최적 유속의 결과를 보여 준다.

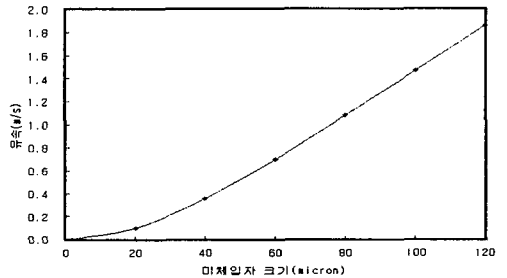


그림 6. 미세입자크기에 대한 최적유속.

- 실험

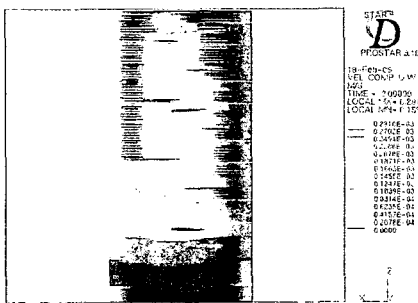


그림 4. 미세입자크기의 유동해석결과(120μ)

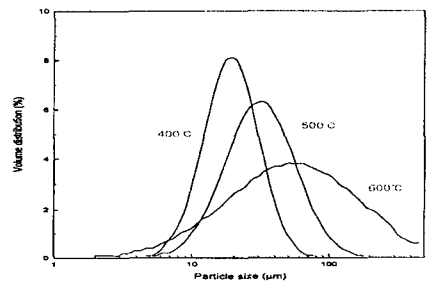


그림 7. U₃O₈의 온도별 입도 분포도.

그림 7은 U₃O₈의 온도별((a) 400 °C, (b) 500 °C, (c) 600 °C) 입도 분포도를 나타낸다. 여기서 500°C를 기준으로 할 때 분말이 3μ이하의 존재하지 않는다. 따라서 3μ이 배출되지 않는 입자 크기를 기준으로 정하고 최적유량 측정실험을 하였으며, 그림 7과 같이 U₃O₈의 입도분포도는 2-120μm의 범위를 선정하여 실험하였다.

(U₃O₈ 최적유량 검증 실험)

실험시료는 U₃O₈ 5kg을 사용하였으며, 식(7)과, 식(8)으로부터 TDH(Transport Disengaging Height) 값을 구하고 이론모델 크기와 동일한 아크릴 모델을 로 제작하여 상온에서 유속의 변화를 주어 실험을 하였으며, 16시간마다 sampling 하여 분석하였다. 그림 8은 U₃O₈의 최적유속이론식이 검증을 위한 장치이다. 실험 당 공기공급을 16시간으로 하여 유속별로 채취하였다.

$$Q = A \cdot V, d_t = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}} \text{-----}(7)$$

$$TDH = C \cdot d_t \text{-----}(8)$$

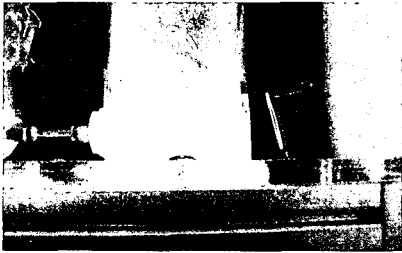


그림 8. 최적유량에서의 분말입자 측정장치.

- 실험 결과

그림 9는 최적속도 실험 후 SEM 사진을 나타낸다. 유속에 대한 입도분포 측정은 Particle Size Analyzer(MICROTRAC-S3000)로 분석하였으며, 평균 입도 분포는 10.2 μm이다. 공급 유량별 실험 결과에서 각 유속에 대한 평균 입자 크기를 측정 분석하여 정리하였다.



그림 9. U₃O₈의 입자형상

이론식과 실험결과 비교분석결과를 그림 10에서 보여주고 있다 여기서 이론식은 실험식과 비교해서 약 5~7%의 오차율을 보여주고 있다.

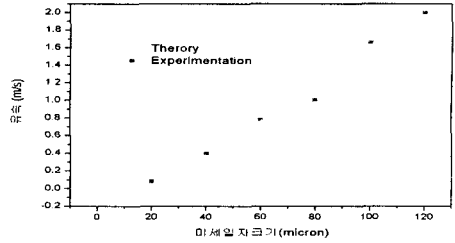


그림 10. 최적유량에 대한 이론식과 실험식 결과.

3. 결론

해마다 증가하는 방사선 폐기물량을 감소하기 위하여 사용후 핵연료 차세대관리공정이 개발되고 있다. 이 공정 장치들 중에서 금속전환로 반응효율을 증가하기 위해서 균질화된 U₃O₈분말을 공급하는 실증용 건식분말화 장치개발이 필요하다. 실증용 건식분말화 장치의 설계와 최적공급유속을 결정하기위하여 이론식과 실험으로 해석을 검증하였다. 본 연구에서는 Newton-Raphson 방법을 이용하여 방사선 독성이 강한 U₃O₈이 비산되지 않는 최적유속을 결정하였다. 실험방법으로는 Newton-Raphson 방법을사용하여 포트란프로그램(STAR-CD)을 작성하고 U₃O₈의 입도분포별로 해석을 수행하였다. 그 해석결과를 아크릴 실험장치를 제작하여 유속에 따른 유동특성실험을 수행하고, 유속별 분말을 Sampling하여 입자크기를 Particle Analyser로 분석하였다. 그 결과 이론식과 실험식이 최대 5-7%의 오차율을 보여 주었으며, U₃O₈가 비산되지 않는 최적유속과 실험결과는 실증용 UO₂ Pellet 건식 분말화 장치설계에 적용되었으며, 운전조건을 결정하였다.

참고 문헌

1. K. Adachi, S. Kiriya, "The Behavior a Swarm of Particles Moving in a Viscous Fluid", Chem. Eng. Sci., 33: 115(1978)
2. G. Richard Eisler " Maximum Terminal Velocity Turns at Constant Altitude" AIAA Journal of Guidance & Control (1987).
3. S.S. Alves, "Effect of bubble contamination on rise velocity and mass transfer" Chemical Engineering Science, In Press, Corrected Proof, Available Sep.(2004).