탄소폐기물 분해용 Screw-Conveyor System의 열유동 해석

양인환*, 양희철, 김형주, 최윤정, 이시영, 정동용, 문제권, 최종원
한국원자력연구원, 대전광역시 유성구 대덕대로 989번길 111
*ihyang@kaeri.re.kr

1. 서 론

입자상 탄소폐기물(carbowaste)의 열분해를 위해 회분식 또는 연속식 운전이 가능한 다양한 형식의 반응기가 연구되고 있다. 그중 연속식 열분해 공정이 가능한 반응기의 경우 투입 장치에서부터 반응 후 잔여물질 처리까지를 하나의 기계화 시스템으로 구성이 가능함으로 최소의 인원으로 연속운전이 가능한 장점을 가지고 있다.

Screw-conveyor 시스템은 입자상 탄소폐기물 열분해를 연속식 공정으로 수행 가능한 시스템으로서, 외부와 격리된 튜브 내부 중심축에 위치한 나선형 스크루의 회전에 의하여 호퍼에서 주입되는 시료를 screw-conveyor 내부 가열 구간을 지나 screw-conveyor의 출구로 연속적으로 이송할 수 있는 장치이다. 따라서 유동층 반응기 등을 사용하는 시스템에 비하여 반응기의 부피가 작으며 제한된 시료 경로로 인하여 시료 손실률이 매우 낮고, 열전달 효율이 우수한 장점을 갖고 있다.

이러한 screw-conveyor 시스템에서 시료의 열분해 반응도는 내부의 가열구간의 길이와 설정 온도, 그리고 스크루의 회전 속도에 따른 체류시간에 의하여 결정된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 screw-conveyor 시스템의 복잡한 운전 특성을 예측하고 운전 최적화 조건을 도출하기 위하여, 운전 조건에 따른 내부 열유동장 및 시료 유동에 대하여 컴퓨터 모델링을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 Screw-conveyor 모델링

Fig. 1은 본 연구에서 전산모사를 위하여 사용한 screw-conveyor 시스템에 대하여 도시 하였다. 반응기는 4개의 단열 구간으로 구분된 3단계 등온 가열구간으로 구성되었다. screw-conveyor 내 시료는 스크루의 회전 운동에 의하여 이송되어 연속적으로 각 가열 구간을 통과하게 되며, screw-conveyor 외부 가열 조건에 따라 시료의 성분별 열분해가 수행될 수 있도록 설계하였다.

따라서 screw-conveyor 외부에 직렬로 설치된 히터에 의하여 가열되는 screw-conveyor 내부 온도는 screw-conveyor의 회전 운동으로 생성되는 기체의 유동과 screw-conveyor 시스템 외부 히터에서 전달되는 열량에 의하여 결정된다.

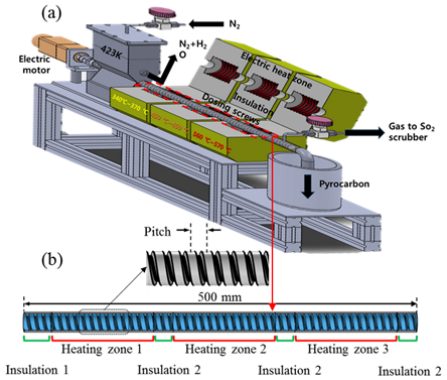

Fig. 1. Schematic diagram of a screw-conveyor reactor system (a) and screw-conveyor (b).

2.1.1 지배방정식

screw-conveyor 시스템의 전산모사를 위한 지배방정식으로 다음의 연속방정식 (1), 운동량 방정식 (2), 에너지 방정식 (3)에 대하여 회전 기준 좌표계(rotating reference frame)를 적용하여 계산을 수행하였다.

$$\nabla(\rho\vec{u}) = 0 \qquad (1)$$

$$\rho\vec{u} \cdot \nabla\vec{u} = -\nabla P + \mu\nabla^2\vec{u} + \frac{1}{3}\mu\nabla(\nabla \cdot \vec{u}) + \rho g + F \qquad (2)$$

$$\rho C_p\vec{u} \cdot T + \nabla \cdot q = 0 \qquad (3)$$

식(1-3)에서 ρ, μ, $\vec{u}$, P, F 는 반응기내 기체의 밀도, 점도, 속도 벡터, 압력 그리고 물체력(body force)을 나타내며, C_p는 비열, T는 온도, q는 열전도에 의한 열유량을 나타낸다.

2.1.2 회전 기준 좌표계

Screw-conveyor 시스템에 대한 컴퓨터 모델링에서는 스크루 회전을 모사하기 위한 계산비용을

절감하고 동시에 정상상태 해석 적용이 가능하도록 스크루 중심축에 위치하는 회전 기준 좌표계를 사용하였다. 따라서 관성 기준 좌표계를 대신하여 회전하는 비관성 기준 좌표계를 적용함에 따라 회전 좌표계에서 생성되는 가상적인 힘인 전향력(coriolis force)과 구심력(centripetal force)을 다음의 식을 이용하여 계산하였다[1].

$$F = \rho[(\vec{\omega} \times \vec{u}) + \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r})] \qquad (4)$$

식 (4)에서 $\vec{\omega}$ 와 $\vec{r}$ 는 회전 기준 좌표계의 각속도와 반지름 방향의 위치 벡터를 나타내며, 유도된 전향력과 구심력은 운동량 방정식 (1)의 물체력에 대입하여 계산을 수행하였다.

본 연구에서는 screw-conveyor 시스템에 대한 지배 방정식을 풀기 위하여 상업용 전산유체역학 프로그램인 Comsol 5.2 [2]를 사용하여 계산을 수행하였다.

2.2 결과 및 토의

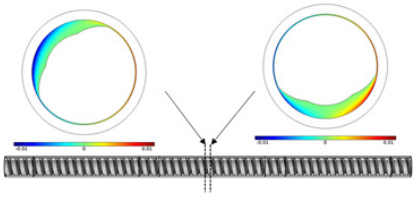

Fig. 2. Velocity magnitudes of the vertical component in the cross-section of the screw-conveyor reactor.

Fig. 2는 screw-conveyor의 길이 방향에 수직한 단면에서 기체 유동장내 y축 방향 성분의 속도장을 도시하였다. Fig. 2의 screw-conveyor 단면의 우측과 좌측에서 대칭적으로 형성되는 y축 방향의 상승과 하강 속도에서 확인 할 수 있듯이, 관성 기준 좌표계에서 시계 반대 방향으로 회전하는 스크루의 거동에 의하여 발생되는 기체유동은 회전 기준 좌표계를 적용함에 따라 고정된 스크루의 나선을 따라 시계방향으로 흐르는 유동으로 전환되어 나타남을 확인 할 수 있다. 따라서 본 전산모사에서 적용된 회전 기준 좌표계를 이용한 screw- conveyor 반응기 내 기체 유동 해석의 유효성을 확인 할 수 있다.

시스템 내에서 이송되는 시료의 온도 변화는 screw-conveyor 출구로 시료와 함께 이송되는 기체의 온도와 같다고 가정할 수 있으며, 이러한 내부 기체의 온도 변화는 가열 구간의 표면에 수직한 방향으로 유입되는 열유량에 의하여 결정된다. Fig. 3 (a, b)는 시스템 내 나선형 기체 유동 경로에 따라 변하는 기체의 평균 온도와, 반응기 중심부에서

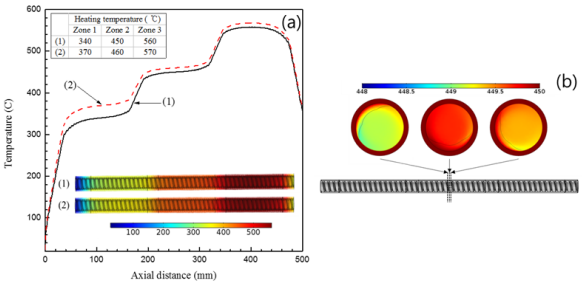

Fig. 3. Simulated temperature field in the radial direction (a) and average temperature profile in the axial direction of the screw-conveyor reactor (b).

반응기 길이 방향에 수직한 단면의 온도분포를 각각 도시하였다.

Fig. 3(a)에서는 상온에서 유입되는 기체의 평균 온도는 각 단열구간에서 이웃한 고온의 가열구간의 영향으로 급속히 온도가 증가되나, 각 가열구간에서는 히터 설정 온도와 동일한 온도를 유지하는 것을 확인할 수 있었다. 전산모사 결과에서는 또한 100rpm 이하의 스크루 회전속도에서는 screw-conveyor 내부 기체 평균온도 분포가 일정한 것을 확인할 수 있었으나, 가열구간에서 반지름 방향으로 온도 분포가 형성됨을 확인하였다. 그러나 Fig. 2(b)에서 확인 할 수 있듯이 스크루 표면 온도와 스크루 외부 튜브의 내측 온도 차이는 최대 2℃ 이하로 매우 작은 것으로 확인되었다.

3. 결 론

본 연구에서는 screw-conveyor 시스템의 열유동 해석을 위하여 사용된 회전 기준 좌표계의 유효성을 확인하였으며, 또한 전산해석을 통하여 반응기내 스크루의 회전 속도는 시료의 체류시간에는 영향을 줄 수 있으나 반응기 내부 온도에는 영향이 없음을 확인하였다.

4. 참고문헌

[1] Q. Xiong, S. Aramideh, A. Passalacqua, and S.-C. Kong, “Characterizing effects of the shape of screw conveyors in gas-solid fluidized beds using advance numerical models”, J. Heat Tranfer, 137, 061008 (2015).

[2] “Comsol CFD user’s guide”, Comsol AB, Stockholm (2015).