

중력식 습식산화반응기 내 산화제 공급부의 유동특성에 관한 연구

이홍철* · 황인주* †

A Study on the Flow Characteristics of an Oxidizer Feed Section for Wet-air Oxidation in Gravity Pressure Reactor

Hongcheol Lee*, Inju Hwang* †

Key Words : Wet-air Oxidation(습식산화), Gravity Pressure Reactor(중력가압반응기), Two Phase Flow(이상유동)

ABSTRACT

The wet-air oxidation in gravity pressure reactor is effective for organic waste treatment with energy saving under high pressure and high temperature. But its oxidation control is difficulty because its multi-phase flow characteristics is very complicated. The flow characteristics of an oxidizer feed section in the gravity pressure reactor were investigated using numerical method which are verified by comparison with experimental results. In this study, the results showed that the flow rate of oxidizer have an effect on the generation of bubble around feed section.

1. 서 론

최근 국내외적으로 도시, 산업단지 등에서 발생하는 폐기물의 관리, 처리 등에 관한 규제가 강화되고 있으며, 이에 따라 폐기물의 처리 및 처리 과정의 부산물 활용 기술이 다양하게 검토되고 있다.

중력식 습식산화반응기기술은 폐기물 처리기술의 하나로 슬러지, 난분해성 유기물질, 가황고무 등 다양한 물질의 처리에 습식산화 공정이 실증 단계에 있으며, 셀룰로오스 물질의 에탄올 전환을 위한 습식산화 공법이 검토되고 있다.

이러한 방식은 슬러지, 독성 폐수 및 난분해성 물질의 처리에 습식산화 기법은 다른 방법에 비하여 유리하며, 처리 과정에서 발생하는 생성물 및 에너지 회수가 가능하다.⁽¹⁾

또한 액상 유기물이 고온, 고압 조건에서 신속하게 반응하기 때문에 처리시간이 단축되며, 액상 반응으로 반응 과정에서 2차 오염이 없으며, 산화 반응에서 발생하는 발열 반응이 연속적인 산화반응을 유도한다.

국내의 경우에도 침출수의 처리, 제지 폐수 처리를 위한 습식산화 공정, 촉매를 이용한 습식산화 반응을 개선 등이

검토되고 있다. 그러나 습식산화 공정은 고온, 고압을 유지하기 위해 에너지 소모량이 크고, 산화 반응에 따른 반응기 부식 등 위험이 있다.

이에 반하여 중력식 습식산화 반응기는 대심도에 길이방향으로 설치되어 내부 수두압을 이용하여 고압의 반응조건을 형성하므로 고압 환경의 유지에 소모되는 에너지 비용을 대폭 줄이고, 대심도에 길이방향으로 설치되므로 설치간을 절감할 수 있는 장점을 가지고 있다.

현재 미국, 영국, 네덜란드 등에서는 심정 깊이 1,000 m 아임계 습식산화 공정이 실용화 단계에 있으며, 2,000 m 이상의 초임계 조건에 대한 연구가 진행되어 방사능 폐기물의 처리나 다양한 연료화 공정에 응용을 모색하고 있다.

이홍철 등은 중력식 습식산화시스템의 운전 중활성 온도 확보를 위한 연구 결과를 제시⁽²⁻³⁾하였고, 유기성 폐기물의 처리를 위하여 중력식습식산화 반응기 내부에 공급되는 산화제의 부유 방지를 위한 산화제 공급 조건을 제시⁽⁴⁾하였다. 다만, 산화제 공급량 조절에 의한 운전 제어의 경우 슬러지의 분해에 소요되는 충분한 산화제를 공급하는데 제한적이다.

* 한국건설기술연구원 환경·플랜트연구소(Environmental and Plant Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

† 교신저자, E-mail : ijhwang@kict.re.kr

이에 본 논문에서는 중력식 습식산화 반응기 산화제 공급에 대한 실험적, 수치적 방법을 이용하여 유동 모형을 제시하였으며, 산화제 공급부 주변의 유동 특성을 정량적으로 검토하였다.

2. 습식산화반응기 유동부 모델링

2.1 해석모델 및 지배방정식

중력식 습식산화 반응기의 해석을 위한 기본 모델을 Fig. 1에 도시하였다. 슬러지와 냉각수 유로가 동심으로 설치된 형태를 고려하였으며, 지하 0~500 m 구간에 설치된 반응기 중 산화제 공급부 주변 500 mm 구간을 대상으로 유동 특성을 검토하였다.

반응기의 형상은 직경이 32.4 mm의 슬러지 유로 내부에 직경이 12.0 mm의 산화제 공급관이 설치된 형태로 구성되어 있으며, 운전 중 산화제 부유 특성을 개선을 위하여 산화제 공급부 말단에 유동 제어 가이드가 설치된 형태이다.

Figure 1의 우측 그림은 2차원 직교좌표계를 적용한 해석격자를 보여주고 있으며, y축에 따라 심부에서 지상방향으로 구성되어 있고, 반경 방향을 따라 산화제 공급관, 슬러지 배출관 순서로 구성되어 있다. 해석 격자는 사각격자(rectangular mesh)를 이용하였으며, 32,732개의 격자로 구성되었다. 본 연구에서는 산화제가 공급되는 틈새부분과 후류단의 유동특성을 평가하기 위하여 2차원 단면에 대하여 조밀한 격자로 정확도를 확보하였다.

중력식 습식산화 반응기 내부 산화제의 부유 특성 및 슬러지와 산화제의 혼합 특성의 검토를 위하여 비정상상태 이상 난류유동을 가정하였으며, 질량보존법칙, 운동량보존법칙을 적용하였다. 난류유동의 모사를 위하여 표준 k-ε 난류 모델을 적용하였으며, 이상유동의 모사를 위하여 VOF(volume of fluid) 모델을 적용하였다. VOF 모델은 운동량 방정식과 부분체적량방정식을 지배방정식으로 각 상 간의 표면을 추적하여 계산하는 모델이다. 이 모델은 수직 컬럼 내부의 버블 유동 분석에 적용, 검토된 바 있다.⁽⁵⁾

2.2 해석모델의 검증

중력식 수직 반응기 내 슬러지수용액과 산화제의 유동특성 해석 모델의 검증을 위하여 산화제 공급부를 실험 크기로 제작하였다.

시험 장치는 Fig. 2에 도시한 것과 같이 가시화를 위한 이상유동 시험, 계측부, 순환수 공급, 순환장치, 가압공기 공급, 순환장치, 제어, 모니터링 장치, 순환수 저장 탱크, 설치베드, 기타 부대 장치로 구성하였다. 이상유동 시험, 계측부의 경우 Ø32 mm, Ø10 mm의 이중관으로 구성되며,

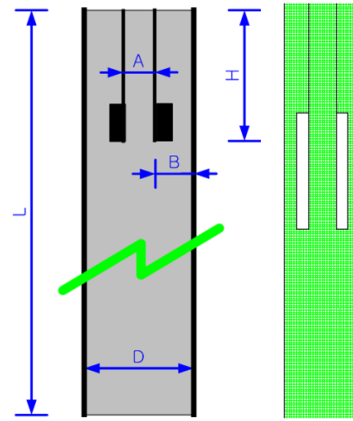


Fig. 1 Geometry and mesh shape near oxidizer inlet area of gravity pressure reactor

Mass conservation :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Momentum conservation :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) \\ = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_i + F_i \end{aligned} \quad (2)$$

Turbulent model(standard k-ε) :

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} + G_k - \rho E \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_1 G_k \frac{\epsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

Volume fraction

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_q \rho_q u_{iq}) \\ = S \alpha_q + \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) \end{aligned} \quad (5)$$

10 kg/cm² 이상의 내압 성능을 확보하였다.

이상유동 시험, 계측부 외측에 설치된 Ø32 mm 유로에는 순환수가 공급되고, 내측에 설치된 Ø10 mm 유로에는 압축공기가 공급되도록 하였다. 이상유동 시험, 계측부 내측에 설치된 압축공기 공급관의 경우 공급관 말단부의 형상 교체가 가능하도록 설계하였다.

시험장치의 운전을 위하여 순환펌프 on/off, 공급수 by-pass, 산화제 가압시스템 on/off, 산화제 공급압 제어, 산화제 공급량 제어를 실시하였으며, 유동특성의 평가를 위



Fig. 2 The equipment of oxidizer feed flow characteristics test of the GPR-WAO

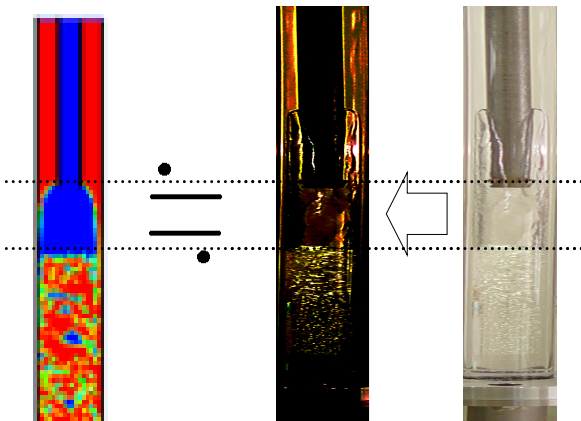


Fig. 3 Comparison of the numerical analysis and the experimental results at $m_{\text{sludge}}=0.30$ kg/hr, $m_{\text{oxidizer}}=20\%$

하여 운전 중 순환수 공급 유량, 입출구 압력, 산화제 공급 유량, 입구압력에 대한 모니터링을 실시하였다.

Figure 3은 슬러지 수용액의 유량(m_{sludge}) 0.3 m³/hr, 이론적 산화제 요구량 대비 산화제 공급량(m_{oxidizer}) 20% 조건에서 수치해석과 실험 결과를 비교한 결과로서 산화제 공급부 아래에 형성되는 에어포켓의 형태와 크기, 에어포켓 하단에 형성되는 산화제 미소기포의 형태가 매우 유사한 형태를 나타내고 있음을 보여주고 있다.

3. 결과 및 고찰

산화제와 슬러지의 유동특성 검토를 위하여 슬러지 공급량의 변화(300, 450, 600 kg/hr), 산화제 공급량 변화(단위 슬러지 산화에 소요되는 이론적 산화제 소요량 1.35 kg의 5, 10, 20, 50%), 산화제 공급유로 간극 변화(5.2, 6.2, 7.2, 8.2, 9.2, 10.2 mm)에 따른 슬러지와 산화제의 혼합특성을 검토하였다. 또한 반응기 내에서 산화제의 부력에 의한 산화제 부유 특성을 검토하였다.

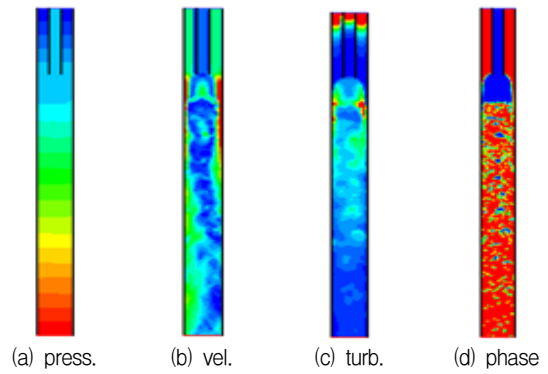


Fig. 4 Flow characteristics around oxidizer supply section ($m_{\text{sludge}}=300$ kg/hr, $m_{\text{oxidizer}}=20\%$)

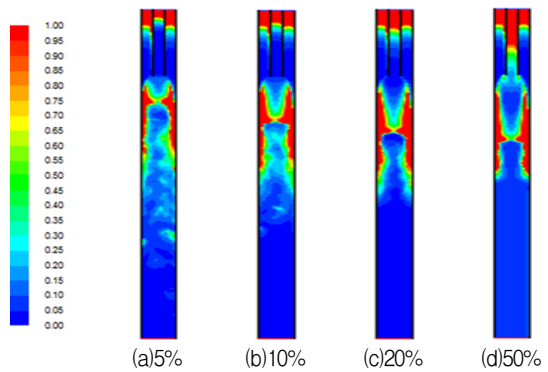


Fig. 5 Turbulence dissipation rate around oxidizer supply section with flow rate of oxidizer ($m_{\text{sludge}}=450$ kg/hr)

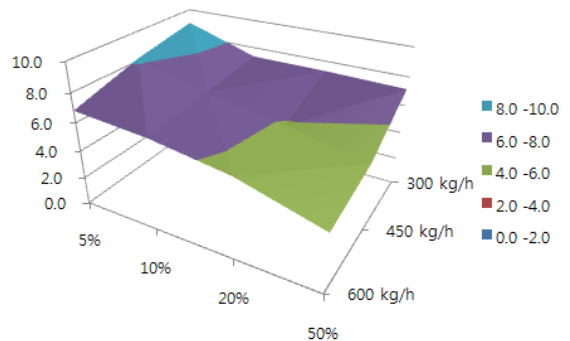


Fig. 6 Turbulence dissipation rate around oxidizer supply section with flow rate of oxidizer in GPR-WAO

다양한 조건의 슬러지, 산화제 공급 조건, 산화제 공급 유로 간극에 따른 유동 특성을 객관적으로 비교를 위하여 각 경우별 일정량(1.283 kg)의 산화제가 공급되는 시점에서의 유동 특성을 상호 비교하였다.

Figure 4는 대표 사례로서 슬러지 공급량 300 kg/hr, 이론적 산화제 소요량의 20% 산화제 공급, 산화제 공급 유로 간극 10.2 mm에 따른 산화제 공급부 주변 정성적 유동 분포를 도시하고 있다.

Figure 4 (a)는 압력장을 도시하고 있는 결과로서 반응기

내부 슬러지 및 산화제의 입구~출구로 이어지는 수직 전구
간에서 압력이 변화되는 현상을 관찰할 수 있으며, 이 경우
에 4,869 Pa의 정압차가 비교적 일정하게 발생하고 있다.

Figure 4 (b)는 속도장을 도시하고 있는 결과로서 상대적
으로 공급량이 많고 비중이 큰 슬러지를 중심으로 속도가
0.856 m/s 범위에서 유동하고 있으며, 반응기 중심부에서
는 슬러지와 산화제의 혼합이 발생하고 있음을 알 수 있다.
유동이 상류에서 하류로 진행함에 따라 슬러지와 산화제의
혼합은 비교적 안정된 형태를 보이고 있다.

Figure 4 (c)는 유동장 내 난류 분포를 도시하고 있는 결
과로서 슬러지와 산화제가 혼합되는 산화제 공급부 주변으
로 8.02~14.95 m²/sec³의 난류소산이 발생하고 있으며, 반
응기 내부 산화제 공급부 주변에서 교란이 가장 활발하게
발생하고 있다. 이는 산화제가 슬러지 혼합물과 혼합되면서
기포가 발생하는 주요 요인으로 볼 수 있다.

Figure 4 (d)는 슬러지와 산화제의 혼합 특성을 도시하고
있는 결과로서 반응기 내부에 공급된 산화제가 기포형태로
서 슬러지 혼합물과 상 경계를 이루는 분포를 파악할 수 있
으며, 산화제가 공급부 주변에서 미소 기포의형태로 분할되
지 못하고 공기층을 형성하고 있어 슬러지 수용액과 산화제
혼합을 촉진할 수 있는 장치의 개선이 필요하다.

Figure 5는 슬러지 공급량 450 kg/hr, 산화제 공급부 간
극 10.2 mm인 경우에 산화제 질량유량을 변동시키면서 기
포발생에 미치는 영향을 도시한 결과이다.

산화제 유량이 증가함에 따라 산화제 공급부 주변에서 기
포가 결합하여 기포를 크게 형성하는 현상을 보이고 있다.
이는 하향하는 슬러지 유량은 일정하지만 증가한 산화제가
미세기포로서 하향류를 타지 못하고 공급부 부근에서 덩어
리를 형성하기 때문으로 보인다.

또한 산화제 공급량 증가에 따라 난류는 산화제 공급부
주변에 집중되어 발생하고 있으나 하류로 더 전파되지 못하
고 소멸되는 현상을 보이고 있다. 이는 산화제 공급량이 증
가함에 따라 산화제 공급부 주변에 기포층이 성장하여 슬러
지와 산화제의 유동 에너지를 흡수하기 때문에 발생하는 현
상으로 보인다. 산화제 공급부 주변에서 발생한 난류는 반
응기 하류로 진행함에 따라 점차 안정화 되는 현상이 관찰
되고 있다.

Figure 6은 Fig. 5에서 도시하고 있는 슬러지공급량, 산
화제 공급량별 난류소산 정도를 종합한 것으로서 슬러지와
산화제 공급량에 비례하여 감소하고, 슬러지와 산화제의 상
대유속에 비례하여 증가하는 경향을 파악할 수 있다.

4. 결 론

이상과 같이 수치해석적 방법을 이용하여 중력식 습식산
화 반응기 내부 슬러지와 산화제의 혼합 유동 특성을 검토

하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

슬러지와 산화제의 혼합 특성의 정량적 비교를 위하여 접
촉면적을 이용하였으며, 혼합 특성 비교를 위한 타당한 결
과가 제시되었다.

중력식반응기 내부 산화제 공급량이 감소함에 따라 산화
제의 미소기포 분할이 활성화 되었으며, 접촉 면적이 증가
하였다. 산화제 공급부위에서 교란에 의하여 생성된 기포는
유동이 하향으로 진행하면서 기포가 결합되면서 덩어리를
형성하는 현상을 보였다.

중력식 습식산화반응기 내부 산화제 부유에 따른 불안정
적인 시스템 운영을 방지하기 위해서는 슬러지 공급량을 산
화제의 부유속도 이상으로 유지하여야 한다.

후 기

본 논문은 국토교통과학기술진흥원의 2014년도 국토교통
기술촉진연구사업 “아임계(150 atm 이하) 압력조건하 대심
도 유기폐기물 무해화 연속반응모델 및 설계코드 원천기술
연구” 과제의 일부 결과입니다.

References

- (1) H. Debellefontaine and J. N. Foussard, 2000, “Wet air
oxidation for the treatment of industrial wastes.
Chemical aspects, reactor design and industrial
applications in Europe,” Waste management, Vol. 20,
pp. 15~25.
- (2) H. C. Lee. and I. J. Hwang, 2010, “A study on the
thermal characteristics in the GPV reactor of WAO at
start up,” KSME 2010 spring conference, pp. 299~304.
- (3) H. C. Lee, J. H. Ahn, and I. J. Hwang, 2010, “A
numerical study on the control of reaction heat in
GPV-WAO system,” SAREK 2010 summer conference,
pp. 727~732.
- (4) H. C. Lee and I. J. Hwang, 2010, “A numerical study
on the flow characteristics around oxidizer supply
nozzle of GPV type WAO reactor,” 2010 ANSYS
conference, p. 89.
- (5) J. I. Yoo, I. B. Lee, H. S. Hwang, and Y. H. Kim,
2009, “Utilization of CFD simulation model for a bubble
column photo bioreactor,” Journal of the Korean society
of agricultural engineers, Vol. 51, No. 5, pp. 1~8.
- (6) M. Lovo, H. A. Deans, and V. Balakotaiah, 1990,
“Modeling and simulation of aqueous hazardous waste
oxidation in deep well reactors,” Chemical Engineering
Science, Vol. 45, No. 8, pp. 2703~2710.