

용융염산화 반응기에서 기체체류량 및 기-액 흐름특성

조용준[†] · 양희철 · 은희철 · 유재형 · 김준형

한국원자력연구소 핵연료주기기술개발단

305-353 대전시 유성구 덕진동 150

(2003년 7월 14일 접수, 2003년 8월 19일 채택)

Gas Holdup and Gas-Liquid Flow Characteristics in a Molten Salt Oxidation Reactor

Yong-Jun Cho[†], Hee-Chul Yang, Hee-Chul Eun, Jae-Hyung You and Joon-Hyung Kim

Nuclear Fuel Cycle R&D Group, Korea Atomic Energy Research Institute, P.O. Box 105, Yuseong, Daejeon 305-353, Korea

(Received 14 July 2003; accepted 19 August 2003)

요 약

용융염산화는 혼성폐기물과 유해폐기물을 효과적으로 산화 및 분해할 수 있는 소각대체기술중 하나이다. 본 연구에서는 직경이 0.079 m이고 높이가 0.653 m인 용융염산화 반응기에서 기체체류량 및 기-액 흐름특성에 대한 연구를 수행하였다. 액상으로 용융탄산나트륨을 기상으로 건조된 공기를 사용하였으며 기체유속(0.05-0.22 m/s)과 용융염온도(870-970 °C) 변화가 기체체류량 및 기-액 흐름특성에 미치는 영향을 규명하였다. 기체체류량은 용융염 온도가 상승함에 따라 증가하였는데, 이는 용융염 온도의 증가로 인해 용융된 탄산나트륨의 점도와 표면장력이 감소하였기 때문이다. 실험에서 얻어진 기체체류량 데이터를 drift-flux 모델에 적용하여 용융염반응기 내의 흐름특성을 규명할 수 있었으며, 이를 통해 흐름영역에 따른 기체체류량을 정확하게 예측할 수 있었다.

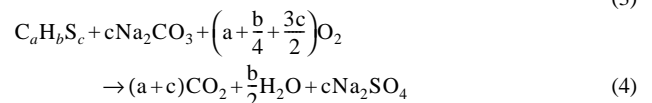
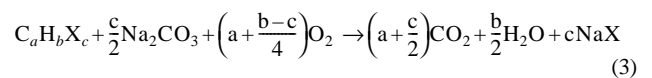
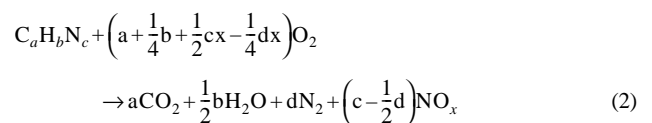
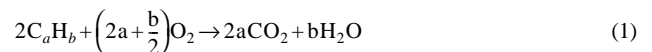
Abstract – Molten salt oxidation is one of the most promising alternatives to incineration that can be used to efficiently destroy the organic components of mixed wastes and hazardous wastes. In this study, the gas holdup and gas-liquid flow characteristics are investigated in the molten salt oxidation reactor (0.076 m D.×0.653 m H.). Effects of input air velocity (0.05-0.22 m/s) and molten salt temperature (870-970 °C) on the gas holdup and flow characteristics have been studied. Molten carbonate as the liquid phase and air as the gas phase have been used in this study. The gas holdup increases with increasing molten salt temperature due to the decrease of viscosity and surface tension of molten carbonate. The experimentally obtained gas holdups in the molten salt reactor have been well described and characterized by means of drift-flux model. The gas holdups with variation of the flow regime have been well predicted.

Key words: Molten Salt Oxidation Reactor, Gas Holdup, Gas-Liquid System, Regime Transition, Drift-Flux Model

1. 서 론

용융염산화(molten salt oxidation)는 혼성폐기물(mixed waste), 유해폐기물, 의료폐기물, 화학부기류 그리고 energetic 물질(추진제, 폭발물 등) 등을 비화염산화반응(flameless oxidation reaction)을 통해 완전산화 및 분해는 물론 무기물과 방사성물질을 용융염내에 포획할 수 있는 공정이다. 현재 다양한 유기폐기물 처리에 있어서 소각공정을 대체할 수 있는 기술중 하나이며, 최근 미국을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있다[1-3]. 용융염산화의 전체적인 공정은 1) 폐기물과 공기를 염이 용해되어 있는 반응기내로 동시에 주입 2) 폐기물내의 유기물질을 산화 3) 산화시 발생하는 산화열을 이용해서 염의 용융상태를 유지 4) 발생하는 산성가스와 폐기물속의 무기물을 용융염층내에 포집 5) 용융염을 배출시켜 최종처분(final disposal) 또는 재사용을 위한 처리의 순으로 진행된다.

용융염으로는 Na_2CO_3 가 단독으로 사용되기도 하고, Na_2CO_3 과 NaCl , K_2CO_3 , Li_2CO_3 등을 혼합하여 사용하기도 하는데, 용융염으로 Na_2CO_3 만이 사용되었을 경우에 폐기물과 용융염과의 가능한 화학반응은 다음과 같다(X와 S는 각각 할로젠과 황을 나타낸다).



[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: choyj@kaeri.re.kr

용융염산화공정은 다른 폐기물처리 방법과 상이한 운전특성을 가지고 있으며 다음과 같이 간단히 요약할 수 있다.

염의 촉매작용과 긴 체류시간 그리고 상들간의 접촉효율 증가에 의해서 뛰어난 유기물 분해능력을 가지고 있다. 일반적인 소각공정에 비해 수백도 낮은 상태에서 산화반응이 진행될 뿐 아니라 젖음(wetting), 캡슐화(encapsulation), 용융염과의 화학반응을 통해 중금속과 방사성물질을 용융염층에 포집하여 유해한 물질의 배출을 최대한 억제하며, HCl, HF, SO₂, P₂O₅ 등의 산성가스는 용융염내에서 중화되어 이러한 산성가스의 배출을 최대한 억제한다[1, 2].

용융염산화는 반응기내에 분산상인 산화용공기와 연속상으로 존재하는 용융염과의 이상흐름(two-phase flow)으로 이러한 이상흐름을 효율적으로 해석하는 것은 전체적인 용융염산화 공정의 작업성능 및 운전 조건 설정에 매우 중요한 요소가 된다. 특히, 전체적인 계의 흐름특성에 가장 많은 영향을 미치는 기체체류량 특성을 파악하는 것은 매우 중요한 일이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 용융염산화반응기에서 기체유속 및 용융염 온도에 따른 기체체류량 특성을 연구하였으며, 기-액 이상계의 흐름특성을 효과적으로 규명하기 위해 drift-flux 모델을 이용하여 용융염산화 반응기내의 기-액 흐름특성을 해석하였다. 이와 같은 연구의 결과는 용융염산화 반응기내의 기-액 흐름특성이 열전달 및 물질전달, 기포특성 그리고 액상의 분산 및 혼합특성 등과 같은 전달현상에 미치는 영향을 규명하는데 매우 중요한 정보로 활용될 수 있으며, 용융염산화 공정의 설계, 운전 그리고 제어 등 공학적으로 필수적인 자료를 제공할 것으로 판단된다.

2. 실험

본 연구에서 사용한 용융염산화장치의 전체적인 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 용융염산화장치는 크게 공기/폐기물 주입계, 용융염 반응기 및 가열계, 폐용융염 처리계, 배기가스처리계로 구성되어 있다. 투입되는 폐기물의 비불꽃 산화반응(non-flame oxidation)이 발생하는 용융염 반응기는 직경이 0.076 m이고 높이가 0.653 m이며 재질로는 내열성과 내부식성이 강한 Inconel을 사용하여 제작하였다. 반응기 외부에 ceramic heater를 설치하여 염을 녹는점 이상으로 가열하였으며 온도제어기를 이용하여 반응기내 용융염의 온도를 제어하였다. 폐기물과 산화용 공기를 용융염층내로 주입하는 주입관은 직경이 0.013 m인 단일분산관 형태이

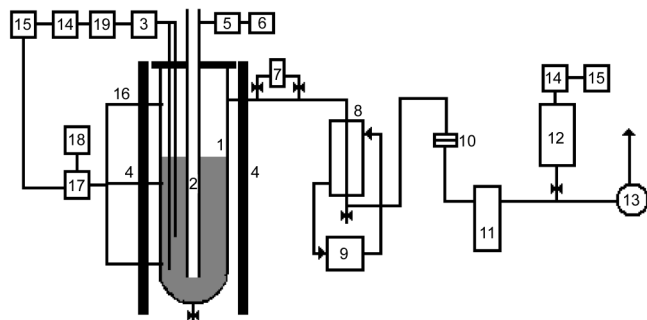


Fig. 1. Schematic diagram of the integrated molten salt oxidation system.

- | | |
|-------------------------------------|----------------------------|
| 1. Molten salt vessel | 11. Silica bed |
| 2. Gas/Waste injector | 12. Off gas analyzer |
| 3. Differential pressure transducer | 13. I.D. fan |
| 4. Electric heater | 14. A/D converter |
| 5. Screw feeder | 15. Computer |
| 6. RPM controller | 16. Thermocouple |
| 7. Impactor | 17. Temperature indigater |
| 8. Heat exchanger | 18. Temperature controller |
| 9. Cold water bath | 19. Low pass filter |
| 10. HEFA filter | |

Table 1. Physical properties of molten sodium carbonate with temperature

Temperature (°C)	Density (kg/m ³)	Viscosity (Pa.s)	Surface tension (dyne/cm)
870	2476.62	4.1×10 ⁻³	211
900	2476.54	3.0×10 ⁻³	210
930	2476.46	2.2×10 ⁻³	208
970	2476.35	1.6×10 ⁻³	206

며 주입관의 최하단은 반응용기 바닥에서 0.04 m 상부에 위치하도록 하였다. 용융염으로는 녹는점이 850 °C인 탄산나트륨(Na₂CO₃)을 사용하였다. 용융상태로 존재하는 탄산나트륨의 물성변화[4]를 Table 1에 나타내었다.

기체체류량은 용융염온도(870 °C-970 °C) 및 공기유속(0.05-0.22 m/s) 변화에 따라 용융염층내의 차압(differential pressure)을 측정된 후 식 (5)를 이용하여 계산하였다.

$$\varepsilon_g = \frac{\frac{\Delta P}{L} - \rho_l}{\rho_g - \rho_l} \quad (5)$$

실험조건 변화에 따른 용융염층내의 차압을 측정하기 위하여 반응기의 상부에서 수직으로 2개의 sus관을 용융염층내로 삽입한 후 차압센서(PAT-D05Kpa, ULFA Co.)를 연결하였으며, 차압센서에서 측정된 차압신호는 데이터 수집장치(data aquisition system, DASY lab.)를 사용하여 디지털 신호로 전환한 후 컴퓨터에 저장하여 해석하였다. 각 실험조건에서 압력요동의 측정속도는 200 Hz이고 20초간 40,000개의 신호를 수집하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 기체체류량 특성

용융염산화 반응기에서 실험조건 변화에 따른 기체체류량은 용융염층내에서 차압센서를 이용하여 구해진 볼트-시간 신호를 압력-시간 신호로 전환하고 이를 다시 식 (5)를 이용하여 기체체류량-시간 신호로 전환한 후 평균값을 내어 실험적으로 구하였다. Fig. 2는 시간에 따른 압력차요동(differential pressure fluctuation)의 전형적인 예를 나타내었다.

Fig. 3에는 용융염산화반응기에서 온도가 870 °C로 일정할 때 공기유속 증가에 따른 기체체류량 변화양상을 상온에서 수행된 다른 연구자들의 공기-물 이상계(기포탑) 기체체류량 결과와 비교하여 나타내었다.

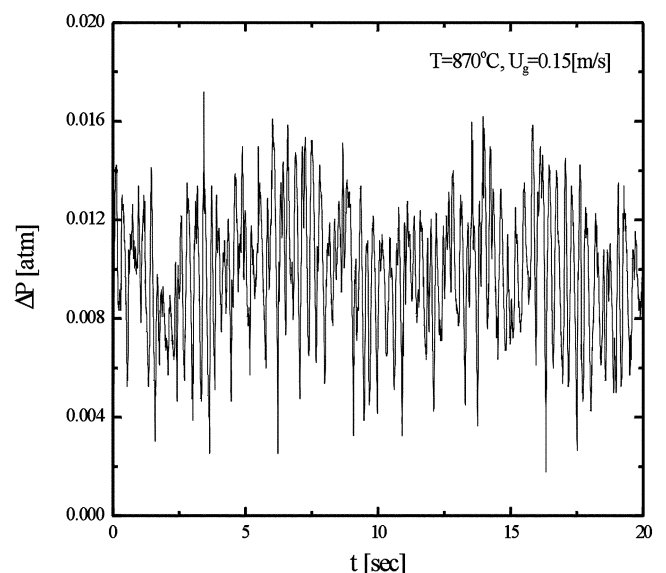


Fig. 2. Typical example of differential pressure fluctuations.

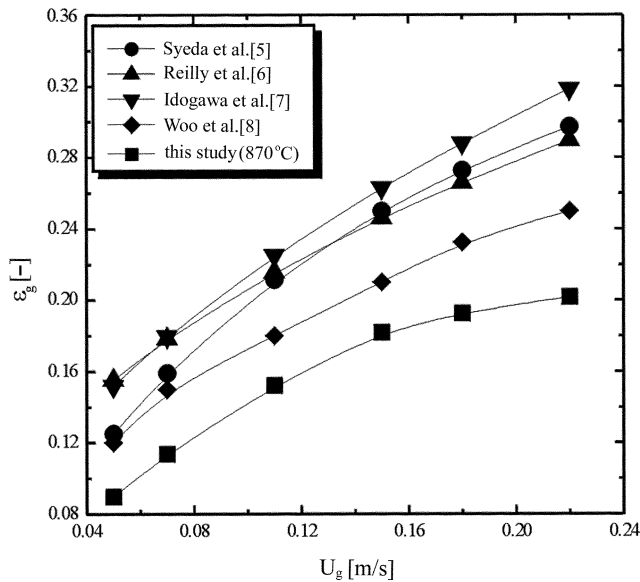


Fig. 3. Effects of gas velocity on the gas holdup.

Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 기체체류량은 일반적인 공기-물 이상계와 비교할 때 상대적으로 작은 값을 가짐을 볼 수 있는데, 이는 용융되어 있는 탄산나트륨의 물성에 기인하는 것으로 870°C에서 용융상태로 존재하는 탄산나트륨의 밀도는 2,476 kg/m³으로 물과 비교시 2.4배가량 크고, 점도는 4 cP로 4배가량 높으며, 표면장력은 211 dyne/cm로 3배가량 크다. 기체체류량은 연속상인 액상의 물리적 특성에 가장 큰 영향을 받는데 액상의 밀도가 증가하면 기포에 작용하는 부력이 증가하여 기체체류량이 작아지며, 점도와 표면장력이 증가하면 평균 기포크기가 증가되어 결과적으로 기체체류량이 감소하는 경향을 나타낸다[5-8]. 이러한 이유로 인해 용융염산화 반응기에서 기체체류량은 공기-물을 사용하는 일반적인 이상흐름과 비교하여 작은 값을 가진다는 것을 알 수 있다.

용융염산화 반응기에서 온도가 기체체류량에 미치는 영향에 대해서는 Fig. 4에 나타내었는데 온도가 증가함에 따라서 전 유속범위에서 기체체류량은 증가하였으며 특히 낮은 기체유속 범위보다 기체유속이 0.15 m/s보다 큰 범위에서 온도증가에 따른 기체체류량 증가가 보다 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 온도가 기체체류량에 미치는 영향에 대해서는 서로 상반된 연구결과가 보고 되고 있다. 즉, Decker[9]는 질소, 파라핀을 사용하여 실험을 수행한 결과 작은 슬러리기포탑에서는 온도가

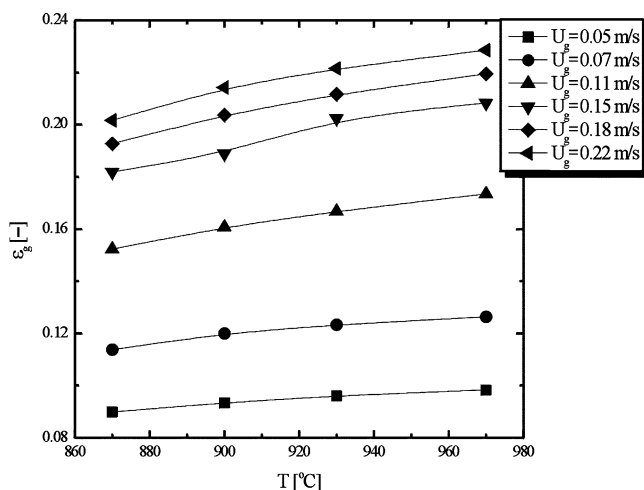


Fig. 4. Effects of molten salt temperature on the gas holdup.

증가함에 따라서 기체체류량은 감소하였으나 큰 기포탑에서 온도에 무관하다고 하였으며, Grover 등[10]은 공기-물 이상기포탑에서 온도의 증가에 따라서 기체체류량의 감소경향을 관찰하였다. 이와는 반대로 Zou 등[11]과 Pohorecki 등[12] 그리고 Lin 등[13]은 온도의 증가는 항상 기체체류량의 증가를 유발한다고 하였으며 이러한 이유에 대해서 온도가 액상의 표면장력과 점도에 미치는 영향과 온도증가에 따른 증기압의 증가로 계 내부에서 상승하는 분산상의 순유속(net flow rate)의 증가현상을 들었다.

다상흐름계에서 기체체류량에 영향을 미치는 변수에는 여러 가지가 있을 수 있지만 그 중에서 가장 중요한 요인으로 기체밀도, 액체의 점도 및 표면장력을 들 수 있는데 기체밀도가 증가하면 기포분산판에서 기포형성시 발생하는 운동량(momentum)에 영향을 주어 기포크기가 작아져서 결과적으로 기체체류량이 커지게 되며, 액상의 점도 및 표면장력이 감소할수록 작은 기포와 기포크기 분포를 작게 하는 효력을 나타내므로 기체체류량을 증가시키는 결과를 가져오게 된다. 용융염산화반응기에서 온도가 증가하게 되면 기체밀도가 작아져서 기체체류량이 감소하지만 반대로 용융된 탄산나트륨의 점도와 표면장력이 감소하여 기체체류량을 증가시키는 상반된 영향을 나타내게 되는데, 온도가 기체체류량에 미치는 영향은 이러한 상반된 영향중 어떠한 것이 우세하게 작용하는가에 따라 결정된다고 할 수 있다. 결국, 기체밀도, 액체점도 및 표면장력의 영향으로 기체체류량이 변화한다는 것은 이러한 변수들에 의하여 계내의 기포특성이 변하기 때문임을 의미하며 기포특성은 기포의 형성과정과 상승하는 기포의 분쇄 및 합체특성에 의해 좌우된다.

기포형성에 대해서 Fan[14]에 의해서 연구가 수행되었는데 표면장력과 부력이 기포형성에 가장 큰 영향을 미친다고 하였다. 기체분산판에서 형성되는 기포크기($d_{b,0}$)는 Davidson과 Schuler[15]에 의해서 다음과 같이 제안되었다.

$$d_{b,0} = \left[\frac{6D_0\sigma_l}{g(\rho_l - \rho_g)} \right]^{1/3} \quad (6)$$

기포분쇄는 기포 가장자리에서 작은 일부분이 떨어지거나 상승하는 기포의 상부에 작용하는 방해효과(hindrance effect)가 커질 때 발생하게 되는데, 이러한 형태의 기포분쇄는 상승하는 기포의 상부에 작용하는 중력이 표면장력보다 큰 경우에 발생하는 Rayleigh-Taylor instability에 의해서 발생한다고 알려져 있다[16]. Bellman과 Pennington[17]은 Rayleigh-Taylor instability를 기초로 하여 액상의 점도와 표면장력의 영향을 연관시킨 기포의 안정성에 대한 연구를 수행하였으며 임계파장(critical wavelength, λ_c)보다 큰 파장을 가진 기포는 불안정성이 증가하여 분쇄 현상이 발생한다고 하였다. 임계파장은 식 (7)로 계산된다.

$$\lambda_c = 2\pi \sqrt{\frac{\sigma_l}{g(\rho_l - \rho_g)}} \quad (7)$$

즉, 임계파장은 기포분쇄 현상을 특성화 시킬 수 있는 정량적인 변수가 되며 다상흐름계(multiphase flow system)에서 안정하게 존재할 수 있는 최대 기포크기가 된다. Wilkinson과 Dierendonck[16]은 이러한 임계파장에 상간의 상대적인 움직임을 설명할 수 있는 Kelvin-Helmholtz 이론을 도입하여 안정한 최대 기포크기에 대한 식을 유도하였다.

$$\lambda_c = d_{b,max} = \frac{2\pi \sqrt{\frac{\sigma_l}{g(\rho_l - \rho_g)}}}{\frac{\rho_l}{(\rho_l - \rho_g)} \frac{\rho_g U_r / 2}{\sqrt{\sigma_l g(\rho_l - \rho_g)}} + \sqrt{1 + \frac{(\rho_l \rho_g U_r^2 / 2)^2}{(\rho_l - \rho_g)^2 g \sigma_l (\rho_l - \rho_g)}}} \quad (8)$$

Fig. 5에 용융염산화 반응기에서 온도가 870 °C에서 970 °C로 변화할 때 식 (6)과 식 (7)을 사용하여 계산한 $d_{b,0}$ 와 $d_{b,max}$ 의 변화 양상을 나타

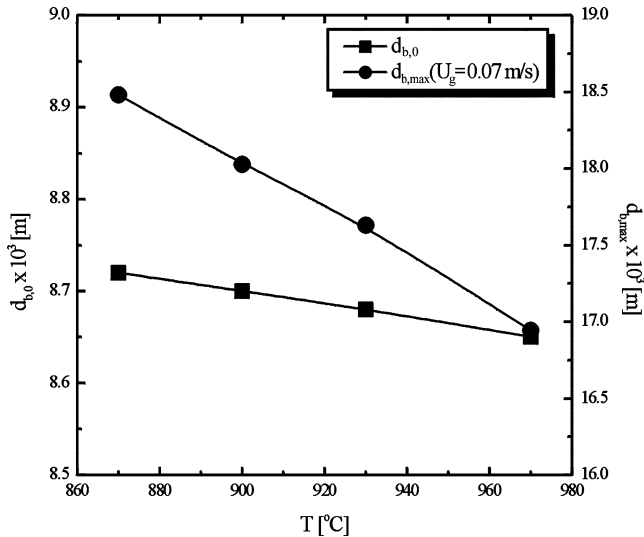


Fig. 5. Effects of molten salt temperature on the calculated initial bubble diameter ($d_{b,0}$) and maximum stable bubble diameter ($d_{b,max}$).

내었는데, $d_{b,0}$ 는 온도가 증가함에 따라서 거의 변화하지 않지만 $d_{b,max}$ 는 온도가 증가함에 따라서 감소하는 것을 볼 수 있다. $d_{b,max}$ 가 감소한다는 것은 안정된 상태로 존재할 수 있는 기포의 크기가 작아진다는 것 즉, 기포분쇄로 인해 큰 기포의 형성이 억제된다는 것을 의미한다. 결과적으로 용융염산화 반응기에서 온도가 증가함에 따라서 기체체류량이 증가(Fig. 4)하는 이유는 온도증가가 기포형성에는 영향을 미치지 않지만 기포분쇄 효과를 증가시켜 큰 기포의 형성을 억제하기 때문인 것으로 판단된다.

Zou 등[11]은 고온상태에서 이상계(two-phase system)의 기체체류량을 기체유속(U_g), 액체점도(μ_l), 밀도(ρ_l), 표면장력(σ_l), 증기압(P)의 함수로 규정하고 차원해석을 통해 식 (9)와 같은 상관식을 제안한 후, 공기-물, 공기-알코올 이상계에서 $k=0.173$, $a_1=-0.154$, $a_2=1.611$, $a_3=1.590$ 의 값을 가진다고 보고하였다.

$$\epsilon_g = k \left(\frac{\mu_l g}{\rho_l \sigma_l} \right)^{a_1} \left(\frac{P + P_s}{P} \right)^{a_2} \left(\frac{U_g \mu_l}{\rho_l} \right)^{a_3} \quad (9)$$

용융염산화반응에 사용하는 탄산칼슘의 증기압은 본 실험온도 범위에서 무시할 수 있으므로 [4] 식 (9)에서 증기압 항을 무시하고 최소자승법을 이용하여 기체체류량에 관한 상관식을 구하면 식 (10)과 같으며 식 (10)의 상관계수는 0.98로 실험결과와 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

$$\epsilon_g = 0.091 \left(\frac{\mu_l g}{\rho_l \sigma_l} \right)^{-0.176} \left(\frac{U_g \mu_l}{\rho_l} \right)^{0.576} \quad (10)$$

3.2. 기체-액체 흐름특성

Zubar와 Findly[18]의 Drift-flux 모델은 많은 연구자들에 의해서 기액 이상계에서 기체흐름을 효과적으로 예측하는데 사용되어 왔는데[18-22], 이 모델은 칼럼의 반경방향으로 흐름의 불균일도와 체류량 분포를 고려하여 기포상승속도와 평균-부피-flux density와의 차이를 나타내는 drift-flux 속도가 일정하다고 가정하고 있다. 이와 같이 가정하여 drift-flux 모델은 식 (11)과 같이 표현된다.

$$V_G = C_0 V_M + V_d \quad (11)$$

여기서, V_G 는 실제가스속도, V_M 은 혼합상의 부피 flux, C_0 는 분배변수(distribution parameter) 그리고 V_d 는 상간의 부분 상대속도를 나타내

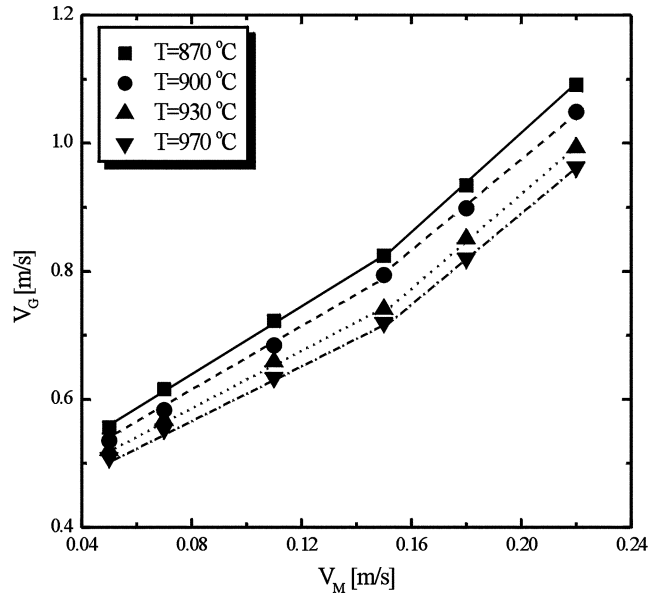


Fig. 6. Characterization of flow regime transition based on the drift-flux model.

는 drift 속도로 연속상에서 부력에 의한 기포의 상승속도로 해석되기도 한다.

용융염산화 공정은 액체-회분식(liquid-batch)이므로 U_g 와 U_g/ϵ_g 를 X-Y 좌표상에 도시하였을 때 기울기가 분배변수 C_0 가 된다. Fig. 6에 용융염산화 반응기에 drift-flux 모델을 적용하였을 때의 경향을 나타내었다. Fig. 6을 보면 전 온도 범위에서 0.15 m/s를 기준으로 2개의 기울기가 나타남을 알 수 있는데 이는 기체유속에 따라서 2개의 서로 다른 분배변수를 가진다는 것을 의미한다. 분배변수는 흐름영역에 따라서 변하므로[20-22] 용융염산화 반응기에서 기체유속에 따라 흐름영역의 전이현상이 발생하며 전이현상이 발생하는 유속은 전 실험온도 범위에서 기체유속이 0.15 m/s일 경우에 발생한다는 것을 알 수 있다. 이상계에서 흐름영역은 분산상의 유속에 따라서 균일 흐름영역에서 불균일 흐름영역으로 전이되며 불균일 흐름영역은 bubble-slug 흐름에서 slug 흐름이나 churn-turbulent 흐름으로 발전하는데[14], 용융염산화 공정은 기체분산상의 직경이 크므로 균일흐름의 형성이 어렵다. 따라서 용융염산화 공정에서 기체유속이 증가함에 따라서 흐름영역은 bubble-slug 흐름에서 slug 흐름으로 전이한다고 할 수 있다.

Table 2에 흐름영역에 따른 분배변수값을 나타내었는데 흐름영역이 bubble-slug일 때가 slug 흐름일 때보다 작으며 온도가 증가하면 전체적으로 값이 작아지는 것을 알 수 있다. 분배변수는 유속과 체류량분포간의 상호작용결과 발생하는 분산상의 분균일도에 대한 척도가 되는데, 분배변수가 커진다는 것은 반경방향의 불균일도(ununiformity)가 커진다는 것을 나타낸다. 따라서 용융염산화 반응기에서 반경방향의 균일도는 bubble-slug 흐름영역이 slug 흐름영역보다 크고 이러한 균일도는 온도가 증가하면 증가한다는 것을 알 수 있다.

Table 2. Distribution parameter of drift-flux model with temperature and flow regime

Temperature (°C)	Distribution parameter, C_0	
	Bubble-slug flow regime	Slug flow regime
870	2.67	3.81
900	2.59	3.70
930	2.21	3.60
970	2.10	3.47

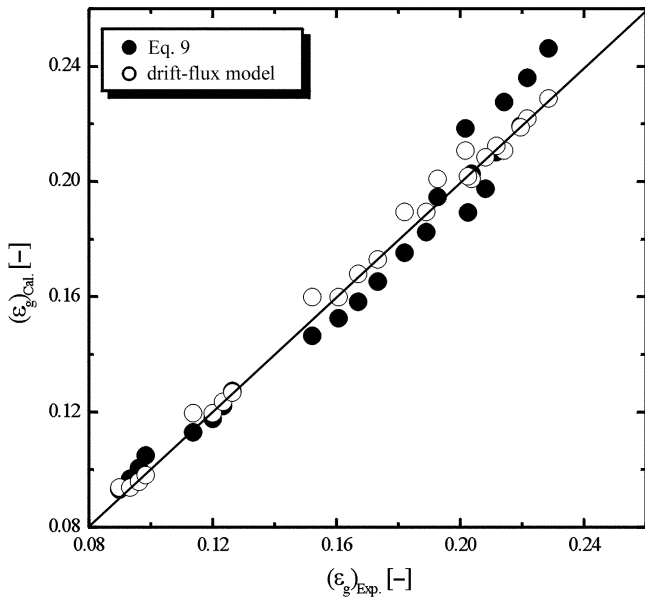


Fig. 7. Comparison between the calculated and the experimentally obtained values of gas holdup.

한편, drift-flux 모델을 사용하면 효과적으로 기체체류량을 예측할 수 있다. Fig. 7에 식 (10)를 사용하여 예측한 기체체류량과 drift-flux 모델을 사용하여 예측한 기체체류량을 나타내었는데 식 (10)를 사용한 경우보다 drift-flux 모델을 사용하였을 때 더 정확하게 기체체류량을 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

용융염산화 반응기에서 기체체류량 및 기-액 흐름특성에 대한 연구결과 다음과 같은 몇 가지의 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 용융염산화 반응기에서 기체체류량은 용융염온도가 증가함에 따라 증가하였는데, 이는 온도증가와 공기밀도의 감소로 인해 줄어드는 기체체류량보다 용융염의 점도와 표면장력의 감소로 인해 증가되는 기체체류량이 훨씬 더 많기 때문인 것으로 사료된다.
- (2) Drift-flux 모델의 분산변수에 대한 변화양상을 통해 용융염산화반응기의 흐름은 기체유속 증가에 따라 bubble-slug 흐름에서 slug 흐름으로의 전이 현상이 발생한다는 것을 알 수 있었으며 이러한 전이현상에서의 유속은 실험온도 범위 내에서 0.15 m/s로 일정하였다.
- (3) Drift-flux 모델은 용융염산화 반응기내 공기-용융탄산염간의 흐름 거동을 해석하는데 효과적으로 사용될 수 있었으며 보다 정확한 기체체류량의 예측을 가능하게 하였다.

감 사

본 논문은 과학기술부의 원자력연구개발 기금으로 수행되었습니다.

사용기호

C_0	: distribution coefficient [-]
$d_{b,0}$: initial bubble diameter [m]
$d_{b,max}$: maximum stable bubble diameter [m]
D_0	: orifice diameter [m]
g	: gravitational acceleration [m/s ²]

L	: axial distance [m]
ΔP	: differential pressure [atm]
P	: total pressure of system [atm]
P_s	: vapor pressure of liquid phase [atm]
U_g	: gas velocity [m/s]
U_r	: relative velocity at gas-liquid interphase [m/s]
V_d	: drift velocity of gas phase [m/s]
V_G	: actual gas velocity ($=U_g/\epsilon_g$) [m/s]
V_M	: volume flux of mixture ($=U_g+U_l$) [m/s]

그리스 문자

ϵ_g	: gas phase holdup [-]
λ_c	: critical wavelength [m]
μ_l	: liquid viscosity [Pa·s]
ρ_g	: gas density [kg/m ³]
ρ_l	: liquid density [kg/m ³]
σ_l	: liquid surface tension [N/m]

참고문헌

1. Hsu, P. C., Foster, K. G., Ford, T. D., Wallman, P. H., Watkins, B. E., Pruneda, C. O. and Adamson, M. G., "Treatment of Solid Wastes with Molten Salt Oxidation," *Waste Management*, **20**, 363-368(2000).
2. Pruned, C. O., Watkins, B. E. and Upadhye, R. S., "Recent Advances in the Molten Salt Destruction of Energetic Materials," JANNAF Propulsion and Subcommittee Joint Meeting, December, FL(1995).
3. Cho, Y. J., Yang, H. C., Yun, J. S. and Kim, J. H., "Destruction of Halogenated Plastics in a Molten Salt Oxidation Process," *J. of Environmental & Thermal Engineering*, **1**(2), 75-82(2002).
4. Janz, G. J., *Molten Salts Handbook*, Academic Press, NY(1967).
5. Syeda, S. R., Afacan, A. and Chuang, K. T., "Prediction of Gas Hold-up in a Bubble Column Filled with Pure and Binary Liquids," *Can. J. Chem. Eng.*, **80**(1), 44-50(2002).
6. Reilly, I. G., Scott, D. S., De Bruijn, T. J. W. and MacIntyre, D., "Role of Gas Phase Momentum in Determining Gas Holdup and Hydrodynamic Flow Regimes in Bubble Column Operations," *Can. J. Chem. Eng.*, **72**(1), 3-12(1994).
7. Idogawa, K., Ikeda, K., Fukuda, T. and Morooka, S., "Effect of Gas and Liquid Properties on the Behavior of Bubble in a Column Under High Pressure," *International Chemical Engineering*, **27**(1), 93-99(1987).
8. Woo, K. J., Cho, Y. J., Kim, K. I., Kang, Y. and Kim, S. D., "Chaos Analysis of Gas-Liquid Flow and Mass Transfer Characteristics in Pressurized Bubble Columns," *HWAHAK KONGHAK*, **36**(6), 937-944 (1998).
9. Deckwer, W. D., *Bubble Column Reactor*, Wiley, NY(1992).
10. Grover, G. S., Rode, C. V. and Chaudhari, R. V., "Effect of Temperature on Flow Regime and Gas Hold-up in a Bubble Column," *Can. J. Chem. Eng.*, **64**, 501-512(1986).
11. Zou, R., Jiang, X., Li, B., Zu, Y. and Zhang, L., "Studies on Gas Holdup in a Bubble Column Operated at Elevated Temperatures," *Ind. Eng. Chem. Res.*, **27**(10), 1910-1916(1988).
12. Pohorecki, R., Moniuk, W., Zdrojowski, A. and Bielski, P., "Hydrodynamics of a Pilot Plant Bubble Column under Elevated Temperature and Pressure," *Chemical Engineering Science*, **56**, 1167-1174(2001).
13. Lin, T. J. Tsuchiya, K. and Fan, L. S., "Bubble Flow Characteristics in Bubble Column at Elevated Pressure and Temperature," *AIChE J.*

- 44(3), 545-560(1998).
14. Fan, L. S., Gas-Liquid-Solid Fluidization Engineering, Butterworths, Stoneham, MA(1980).
 15. Davidson, J. F. and Schuler, B. O. G., "Bubble Formation at an Orifice in an Inviscid Liquid," *Trans. Inst. Chem. Eng.*, **38**, 335-341(1960).
 16. Wilkenson, P. M. and Dierendonck, L. L. V., "Pressure and Density Effects on Bubble Break-up and Gas Hold-up in Bubble Columns," *Chemical Engineering Science*, **45**(8), 2309-2315(1990).
 17. Bellman, R. and Pennington, R. H., "Effects of Surface Tension and Viscosity in Taylor Instability," *Q. J. Applied Math.*, **12**, 151-162(1953).
 18. Zubar, N. and Findlay, J., "Average Volumetric Concentration in Two-Phase Flow System," *Trans. ASME, J. Heat Transfer Ser.*, **C87**, 453-468(1965).
 19. Kang, Y., Lim, W. M. and Kim, S. D., "Axial and Radial Mixing Characteristics in Bubble Columns," *HWAHAK KONGHAK*, **25**(5), 460-467(1987).
 20. Clark, N. N. and Flemmer, R. L. C., "Predicting the Holdup in Two Phase Bubble Upflow and Downflow Using the Zuber and Findlay Drift-Flux Model," *AIChE J.*, **31**(3), 500-503(1985).
 21. Clark, N. N., Egmond, J. W. and Nebiolo, E. P., "The Drift-Flux Model Applied to Bubble Columns and Low Velocity Flows," *Int. J. Multiphase Flow*, **16**(2), 261-279(1990).
 22. Mishima, K. and Hibiki, T., "Some Characteristics of Air-Water Two-Phase Flow in Small Diameter Vertical Tubes," *Int. J. Multiphase Flow*, **22**(4), 703-712(1996).
 23. Hibiki, T. and Ishii, M., "One-dimensional Drift-Flux Model for Two-Phase Flow in a Large Diameter Pipe," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, **46**, 1773-1790(2003).