

## 유동층 전극반응기에서 기체의 유입이 산업폐수로부터 동입자의 회수에 미치는 영향

송평섭 · 손성모 · 강 용<sup>†</sup> · 김승재\* · 김상돈\*\*

충남대학교 화학공학부, 나노신소재공학원, \*전남대학교 환경공학과, \*\*한국과학기술원 생명화학공학과  
(2004년 5월 17일 접수, 2005년 4월 21일 채택)

### Effects of Gas Injection on the Recovery of Copper Powder from Industrial Waste Water in Fluidized - Bed Electrolytic Reactors

Pyung-Seob Song, Sung-Mo Son, Yong Kang<sup>†</sup>, Seung-Jai Kim\*, and Sang Done Kim\*\*

School of Chemical Engineering and Institute of Nano Technology and Advanced Materials, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

\*Department of Environmental Engineering, Chonnam National University, Gwangju 505-757, Korea

\*\*Department of Biomolecular & Chemical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

(Received May 17, 2004; accepted April 21, 2005)

유동층 전극 반응기에서 기체의 주입이 산업폐수로부터 동입자의 회수에 미치는 영향을 고찰하였다. 유동층 전극 반응기에서 액체유속(0.1~0.4 cm/s), 전류밀도(2.0~3.5 A/dm<sup>2</sup>) 그리고 투입되는 유동 고체입자의 양(1.0~4.0 wt%)의 일정조건에서 기체의 주입(0.1~0.4 cm/s)이 각 상들의 체류량과 동입자 회수효율에 미치는 영향을 검토하였다. 유동 고체 입자로는 폴리 스틸렌과 DVB (Divinyl Benzene)로 구성된 직경 0.5 mm의 구형입자(swelling 밀도: 1100 kg/m<sup>3</sup>)를 사용하였다. 유동층 전극반응기에서 주입되는 기체 유속이 증가함에 따라 고체 체류량과 기체 체류량은 증가하는 반면 액체 체류량은 감소하는 경향을 나타내었다. 반응기내에 기체를 0.1~0.2 cm/s 정도 주입한 경우 기체 주입전에 비해 동 회수율이 증가한 반면 0.3~0.4 cm/s 이상 주입하면 기체 주입전보다 동 회수율은 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 유동층 반응기에서 기체 및 액체 유속, 두 전극간 거리 그리고 유동고체입자의 양이 증가함에 따라 동의 회수율은 증가하다가 최대의 회수율을 나타낸 후 점점 감소하는 경향을 나타내었다. 전류밀도가 증가함에 따라서 동의 회수율은 패러데이 법칙에 의해 거의 선형적인 증가를 나타내었다.

Effects of gas injection on the copper recovery from industrial waste water in a fluidized-bed electrolytic reactor were investigated. Effects of gas injection on the individual phase holdup and efficiency of copper recovery for given operating variables such as liquid and gas velocity (0.1~0.4 cm/s), current density (2.0~3.5 A/dm<sup>2</sup>) and amount of fluidized solid particles (1.0~4.0 wt%) were examined. The solid particle, whose diameter and swelling density were 0.5 mm and 1100 kg/m<sup>3</sup>, respectively, was made of polystyrene and divinyl benzene. It was found that the holdup of gas and solid phases increased, but that of the liquid phase decreased with increasing velocity of gas injected into the reactor. With increasing gas and/or liquid velocity and increasing amount of fluidized particles is not needed, the rate of copper recovery increased to a maximum value of and subsequently decreased. The recovery rate of copper increased almost linearly with increasing current density in accordance with Faraday's law.

**Keywords:** copper recovery, three phase, fluidized bed electrolytic reactor, phase holdup

### 1. 서 론

전자공장의 산업폐수로부터 동과 같은 유가금속을 회수하는 반응 공정으로 낮은 전류밀도를 사용하여 금속판 형태로 회수하는 공정들이 실험, 응용되고 있으나, 이는 다행의 폐수를 처리하는데 많은 시간이 걸릴 뿐만 아니라 구리가 성장한 금속판과 다른 극판과의 단락의 위험성이 증대되고 있다. 따라서 이와같은 공정은 일정시간 반응 후에는 반응을 정지시키고 금속판을 회수해야 하는 조작이 필요하며,

이 때문에 연속조업이 어렵다는 단점을 가지고 있다. 이에 비해 산업 폐수로부터 동을 회수하는 반응기로 유동층 전극반응기를 사용하면 반응기 내부에서 폐수와 전극간의 접촉이 매우 효과적이어서 폐수에 포함된 동 이온의 석출이 매우 효율적일 뿐만 아니라, 전기화학 반응 결과 생성되는 기체의 배출이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 또한 전극반응기 내부에서 불필요한 동이온의 착화합물 형성을 억제하고 순수 동으로 석출되는 전환율을 높일 수 있으며, 분말로 석출된 동 입자를 쉽게 전극판에서 분리할 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 꾸준히 진행되고 있는데, 특히, 반응기 내부에 유동 고체 입자를 투입하면

† 주 저자(e-mail: kangyong@cnu.ac.kr)

반응기 내부 액체의 흐름에 의한 유동 고체 입자의 유동현상으로 인하여 유동입자와 전극판들 간의 유효접촉 효율이 증대되어 동의 석출 반응 효율을 증대시킬 것으로 예견할 수 있다[1-6]. 한편, 유동층 반응기에서 석출되는 동입자는 전극판에서 성장하게 되므로 이 전극판으로부터 동입자의 효율적인 분리는 회수되는 동입자의 크기와 동입자 회수 효율의 결정에 큰 영향을 미칠 수 있다. 회수되는 동입자의 크기는 동입자를 사용한 흑연 분말의 코팅이나 동 복합 분말 재료의 제조에 결정적인 영향을 미치므로 이에 대한 연구는 매우 긴요하다 하겠다.

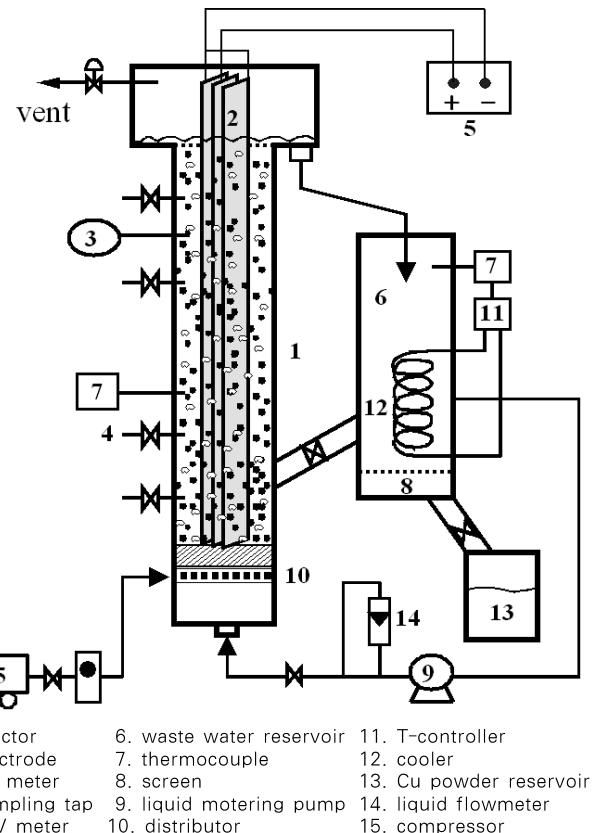
유동층 전극 반응기에서 반응을 계속 진행시키면서 석출되는 동입자를 전극판에서 효과적으로 분리하기 위한 방법의 하나로 전극 반응기에 미세탕의 기체 유입 방법을 도입할 수 있다. 유동층 전극 반응기에 기체의 유입은 반응기 내부의 유동입자의 거동을 활발하게 하여 동이 석출되는 전극판 주위의 난류 현상 증가를 가져와[7-9], 석출된 동의 분리를 효과적으로 촉진시킬 수 있기 때문이다. 뿐만 아니라, 전극 반응기내에 유입된 기체는 반응기 내부의 전극 반응에 의해 생성된 미세기포와 합체하여 이들을 전극판에서 분리하는 효과를 가져와 전극판에서 일어날 수 있는 부분적인 전류 밀도의 감소를 억제해 주며, 생성된 미세기포를 반응기로부터 배출이 용이하게 하여주는 효과를 가져올 수 있는 것으로 예견된다. 그러나, 이에 대한 연구나 시도는 국내·외를 막론하고 매우 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 전자 공장의 폐수로부터 동입자를 회수하는 공정 개발의 일환으로 액체-고체 유동층 전극 반응기에 미세 기체의 유입이 전극 반응기 내부에서 상 체류량 등 수력학적 특성과 동입자의 회수에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다. 이와 같은 본 연구의 결과는 삼상 유동층 전극 반응기의 개발 및 운전조건 결정에 필수적인 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 실험

본 연구에 사용된 실험장치는 Figure 1에서 보는 바와 같이 직경이 0.102 m이고 높이가 1.0 m인 아크릴 판으로 제작된 유동층 반응기를 사용하였다[5]. Figure 1에서 볼 수 있듯이 반응이 진행되는 동안 유동층 반응기 내부의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 온도조절기를 사용하여 순환되는 액체의 온도를 조절하였다. 반응기를 거쳐 나온 액체는 weir와 고체-액체 분리 스크린을 거쳐 액체 저장조로 보내져 반응기에 일정유속으로 재순환되도록 하였다. 반응기 내부의 pH측정을 위해 반응기 벽면에 pH meter (Orion Co. Model 420A)를 설치하였으며, 반응이 일정시간 진행된 후에 액체에 남아있는 Cu 이온의 농도를 측정하기 위하여 반응기 벽면에 시료채취 tap을 설치하고 이를 solenoid valve로 연결하여 시료를 채취하였다. 각 반응조건에 따른 시료 분석은 atomic absorption spectrometry (AAS)를 사용하여 정량분석으로 하였으며, 회수된 동 분말은 X-ray deflection에 의해 확인하였다(Figure 2)[1,2].

본 연구에 사용한 폐수는 전자 공장에서 1차 처리한 실제 폐수를 사용하였는데, 그 성분은 Table 1과 같으며, 본 실험에서는 폐수 중 동의 초기 농도를 1.0 wt%로 희석하여 사용하였다. 반응기내 전기화학 반응을 유도하기 위한 전극판은 폭 0.06 m, 길이 0.6 m인 납합금 (Pb:Sb = 90:10)판을 양극으로 사용하였고, 양쪽에 폭 0.06 m, 길이 0.6 m인 스테인레스 스틸판을 음극으로 사용하였는데, 이를 전극판을 암페어-볼트 미터에 연결하여 전류밀도를 조절하였다. 이들 전극판들은 유동층 반응기 하반부의 액체분산판과 플라스틱판을 이용하여 절연시켰다.



**Figure 1. Experimental apparatus of three-phase fluidized bed electrolytic reactor.**

**Table 1. Composition of Waste Water from Electronic Industry after Pre-treatment**

Element	Cu	Fe	Mn	Ni	Zn
Content	6.31 wt%	0.29 ppm	N.D.	0.43 ppm	13.11 ppm

(N.D. : Not Detected)

유동층 반응기에서 각상의 체류량은 각 운전조건에서 층높이와 압력강하를 측정하여 식 (1)~(3)을 이용하여 정압강하법에 의해 결정하였다[3,4].

$$\varepsilon_s = \frac{W}{\rho_s A H} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta P}{\Delta L} = (\varepsilon_G \cdot \rho_G + \varepsilon_L \cdot \rho_L + \varepsilon_s \cdot \rho_s) g \quad (2)$$

$$\varepsilon_G + \varepsilon_L + \varepsilon_s = 1.0 \quad (3)$$

본 연구에서 고체 유동 입자로는 폴리스티렌과 divinyl benzene (DVB)로 만들어진 직경이 0.5 mm의 구형 입자를 사용하였는데, 19 °C에서 swelling 되었을 때의 밀도는 1100 kg/m<sup>3</sup>이었다.

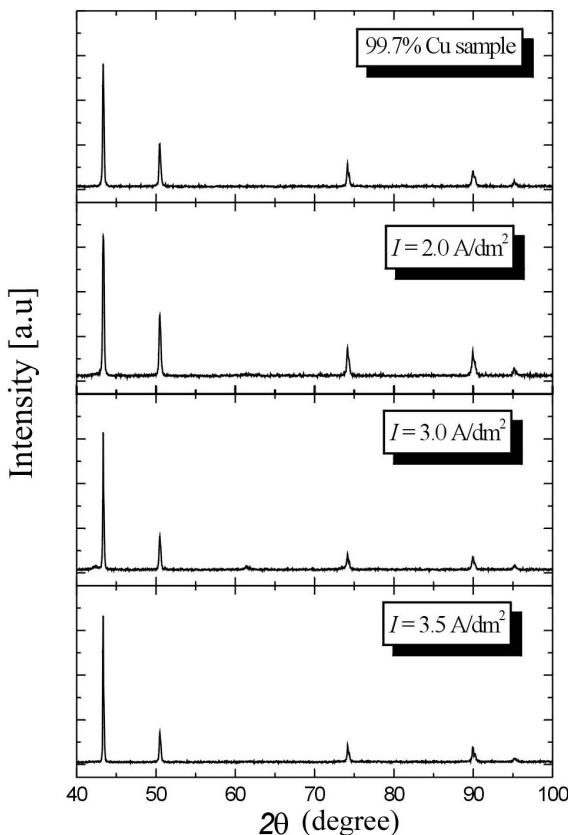


Figure 2. XRD analysis of copper powder recovered in the reactor ( $L_{AC} = 1.5 \text{ cm}$ ,  $U_G = 0.1 \text{ cm/s}$ ,  $U_L = 0.2 \text{ cm/s}$ ).

### 3. 결과 및 고찰

유동층 전극 반응기에서 기체가 유입되면 삼상 유동층의 형태가 되는데, 삼상유동층을 이용한 여러 반응기들에서 각 상들의 반응기내 체류량은 상들간의 물질전달과 열전달 그리고 반응속도 등에 매우 중요한 요소가 되는데, 특히 전해반응은 전해질용액과 전극표면간의 반응으로 각 운전변수의 변화에 따른 체류량의 변화가 전극반응 및 동입자의 회수율에 매우 중요한 역할을 할 것으로 예상되므로 본 연구에서는 각 운전 변수의 변화에 따른 각 상들의 체류량의 변화를 측정하였다. 삼상유동층 전극반응기에서 기체 및 액체유속의 변화에 따른 각 상들의 체류량(holdup)변화의 전형적인 예를 Figure 3에 나타내었다. Figure 3에서 일정한 전류밀도( $3.5 \text{ A}/\text{dm}^2$ )에서 유동고체입자의 양이 1.0 wt%일 때, 액체 유속이 증가함에 따라 액체 체류량은 증가하나, 기체와 고체 체류량은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 반면, 반응기내에 유입되는 기체의 유속이 증가함에 따라서는 기체와 고체 입자의 체류량은 증가하나 액체의 체류량은 감소하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상들은 삼상 유동층 반응기에서 액체의 유속이 증가하면 반응기 내부에서 충팽창이 일어나거나, 미세한 양의 기체의 유입은 유동입자가 매우 작은(0.5 mm) 경우 충 수축이 일어나기 때문으로 해석할 수 있다[10].

삼상유동층 전극반응기에서 기체 유입이 산업폐수로부터 회수되는 동의 회수율에 미치는 영향을 Figure 4에 나타내었다. Figure 4는 반응 시간에 따른 동 회수율의 전형적인 형태로, 일정한 액체유속( $0.1 \text{ cm/s}$ )에서 기체유속이 0 cm/s에서 0.4 cm/s까지 변함에 따라 180 min의 반

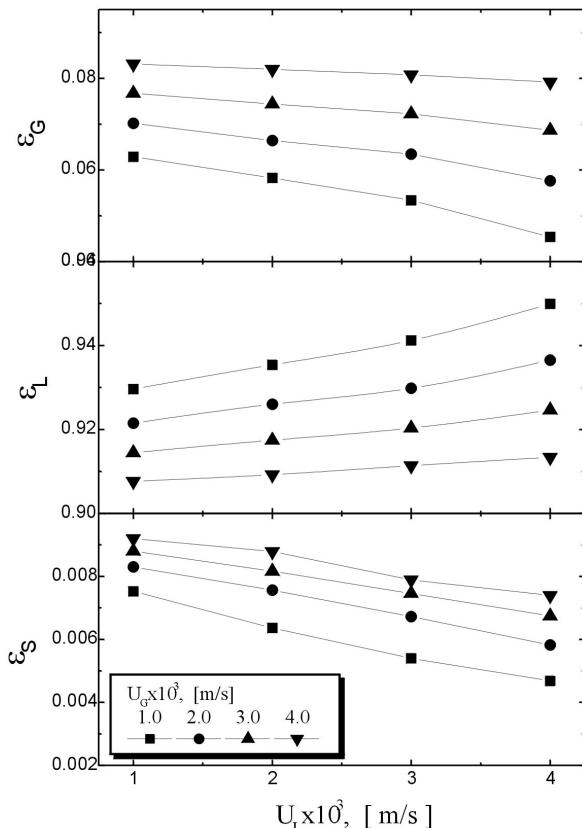


Figure 3. Individual phase holdups in three-phase fluidized bed electrolytic reactors ( $W = 1.0 \text{ wt\%}$ ,  $I = 3.5 \text{ A}/\text{dm}^2$ ).

응시간이 경과 할 때까지는 시간에 따라 동의 회수율( $R$ )이 거의 선형적으로 증가하나 반응 시간이 180 min 지난 후에는 모든 경우에 동의 회수율의 증가가 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 액체-고체 유동층에 기체를 0.1 cm/s의 유속으로 유입시킨 경우에 동의 회수율은 기체를 유입시키기 전과 비교하여 최대 30%까지 증가시킬 수 있었으며, 기체의 주입속도를 0.2 cm/s로 증가시킨 경우에는 기체 유속이 없는 경우보다 동의 회수율이 증가하였으나(최대 8%), 기체 유속이 0.1 cm/s인 경우에 비하여 폐수에 포함된 동의 회수율은 감소하였다. 그러나, 기체 유속을 더욱 증가시켜 0.3 cm/s로 하였을 경우에는 동의 회수율은 기체를 유입시키지 않은 경우( $U_G = 0 \text{ cm/s}$ )보다 오히려 감소하였으며, 기체의 유속이 0.4 cm/s인 경우에는 동의 회수율은 더욱 감소하였다. 이와 같은 결과들로부터 삼상유동층 전극반응기에서 상대적으로 높은 기체의 유속은 동 회수율에 저항으로 작용한다는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 기체의 체류량이 어느 정도 이상 증가하면 금속이온을 포함하는 액체의 체류량이 감소되어 금속석출 반응과정의 첫 번째 단계인 금속이온 물질이 용액내에서 전극표면으로 이동하는 금속이온의 양을 감소시킬 뿐만 아니라, 기체 체류량의 증가에 따른 유효 전압의 강하에 의해 산화전극판과 환원전극판 사이의 전기 전도도가 감소하기 때문에 해석할 수 있다.

삼상유동층 전극 반응기에서 기체의 유입에 따른 반응이 진행되면서 산업 폐수의 pH가 변화하는 양상을 Figure 5에 나타내었다. Figure 5에서 시간이 지남에 따라 산업 폐수의 pH가 점점 감소하여 산성이 높아짐을 알 수 있다. 이는 산업폐수로부터 구리 분말을 전해 반응을 통해 석출하게 되면, 황산 이온의 양이 증가하기 때문에 산업 폐수의

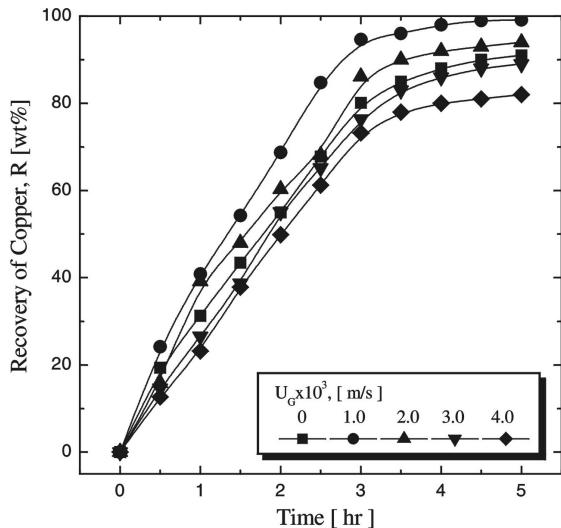


Figure 4. Recovery rate of copper with variation of gas velocity in three-phase fluidized bed electrolytic reactors ( $W = 1.0 \text{ wt\%}$ ,  $L_{AC} = 0.5 \text{ cm}$ ,  $U_L = 0.1 \text{ cm/s}$ ,  $I = 3.5 \text{ A/dm}^2$ ).

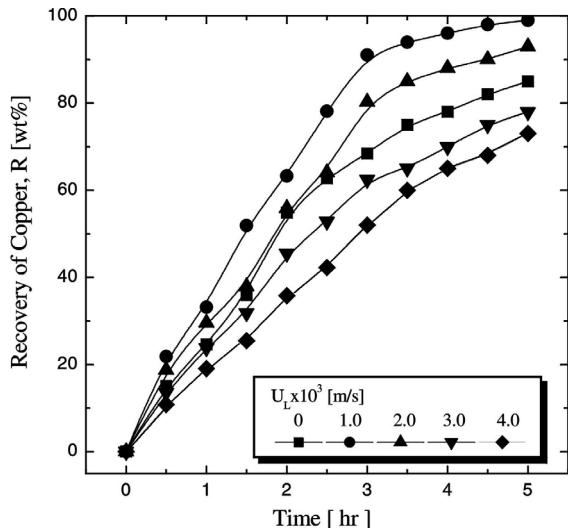


Figure 6. Recovery rate of copper with variation of liquid velocity in three-phase fluidized bed electrolytic reactors ( $W = 1.0 \text{ wt\%}$ ,  $L_{AC} = 0.5 \text{ cm}$ ,  $U_G = 0.1 \text{ cm/s}$ ,  $I = 3.5 \text{ A/dm}^2$ ).

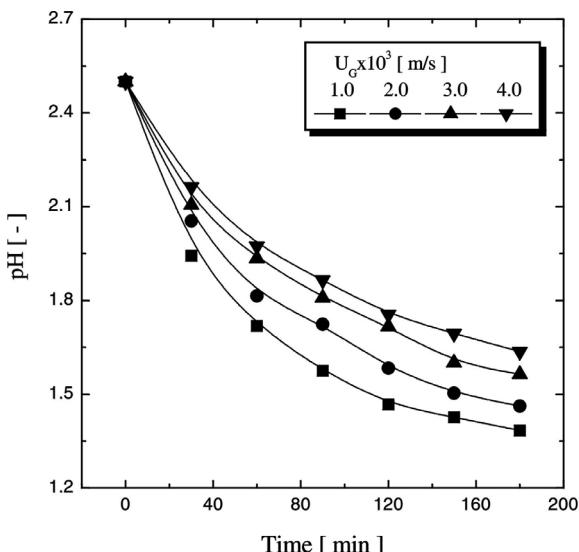


Figure 5. Change of pH with reaction time in the three-phase fluidized bed electrolytic reactors ( $W = 1 \text{ wt\%}$ ,  $L_{AC} = 0.5 \text{ cm}$ ,  $U_L = 0.1 \text{ cm/s}$ ,  $I = 3.5 \text{ A/dm}^2$ ).

산성도가 증가한다고 할 수 있다. Figure 5에서, 기체 유속이  $0.1 \text{ cm/s}$ 에서 가장 높은 산성도를 나타내었는데, 이는  $0.1 \sim 0.4 \text{ cm/s}$ 의 범위인 본 연구의 실험 범위에서 기체 유속이 증가하게 되면 생성되는 구리 분말의 회수율이 상대적으로 감소하게 되어(Figure 3) 반응 결과 생성되는 황산 이온의 양이 감소하기 때문에 해석할 수 있다.

삼상유동층 전극반응기에서 액체유속이 석출되는 동의 회수율에 미치는 영향을 Figure 6에 나타내었다. Figure 4에서 기체의 유입 속도가  $0.1 \text{ cm/s}$ 인 경우 동의 회수율이 최대이었으므로, 기체의 유속을  $0.1 \text{ cm/s}$ 로 일정하게 유지하면서 액체의 유속을  $0 \sim 0.4 \text{ cm/s}$ 로 변화시켰다. Figure 6에서 볼 수 있듯이 동의 회수율은 액체 유속이  $0.1 \text{ cm/s}$ 인 경우 액체의 흐름이 없는 경우( $U_L = 0 \text{ cm/s}$ )보다 45%까지 증가하였다가 최대값을 나타낸 후 액체의 유속이 증가함에 따라 점점 감소

하는 경향을 나타내었다. 이는 액체유속이 상대적으로 낮은 영역( $U_L = 0.1 \text{ cm/s}$ )에서는 액체의 흐름에 의해 산업폐수 용액에서 전극표면으로의 물질전달이 증가[11-14]하는 동시에 액체의 흐름에 의한 전단응력(shear stress)의 증가에 의해 전극표면에 수직으로 성장한 동분말을 효과적으로 분리하여 성장되는 동 입자층의 두께를 적절히 유지함으로써 전기 화학반응의 효율을 증대시키기 때문에 상대적으로 낮은 액체 유속에서는 동의 회수율이 증가한다고 할 수 있다. 그러나, 액체 유속이 상대적으로 증가하면 물질전달은 증가하는 반면 상대적으로 액체흐름에 의한 전극표면에서의 전단응력이 필요이상으로 커져 금속석출과정의 두 번째 단계인 전극표면에서의 전하이동과정과 마지막 단계인 결정화과정에서 필요한 반응시간의 확보가 방해되어 동의 회수율이 점점 감소하게 된다고 할 수 있다. 특히, 상대적으로 높은 액체유속의 범위에서는 전극표면에서 전자를 얻어 성장하는 동 분말이 상대적으로 큰 전단응력 때문에 전극표면에 수직으로 성장하는 수지상 결정성장을 하는 대신에 평면적으로 성장하는 나선성장으로 성장하는 결정화형태의 변화를 가져오기 때문에 동이 분말로 회수되기 어려운 판상으로 되는 경향을 나타낸다[1,11-13].

삼상유동층 전극반응기에서 전류밀도가 동의 회수율에 미치는 영향을 Figure 7에 나타내었다. Figure 7에서 볼 수 있듯이, 삼상 유동층 반응기에서도 액체-고체 유동층의 경우와 유사하게 전류밀도가 증가함에 따라 전극반응에 의한 이온의 이동량이 증가하여 동의 회수율은 증가하는 경향을 나타내었다. Figure 7에서, 전류밀도가  $2.0 \text{ A/dm}^2$ 에서  $3.5 \text{ A/dm}^2$ 로 증가함에 따라 동의 회수율은 Faraday 법칙에 의해 거의 선형적인 증가를 나타내었다.

Figure 8은 삼상유동층 전극반응기에 투입된 유동고체입자의 양이 동의 회수율에 미치는 영향을 나타낸 그림으로, 유동입자의 양이  $1 \text{ wt\%}$ 일 때 최대의 동의 회수율을 나타낸 후 유동입자의 양이 증가함에 따라서 동의 회수율은 점점 감소하는 경향을 나타내었다. 유동층 전극반응기에 투입된 고체입자는 액체와 기체의 흐름에 의해 유동화하면서 동 이온이 석출되어 성장하는 전극표면과의 접촉과 충돌에 의해 전극표면에서 석출되어 성장하는 동의 입자를 효율적으로 분리함으로써 전극 표면에서 성장되는 동 분말에 의해 야기되는 전압강하를

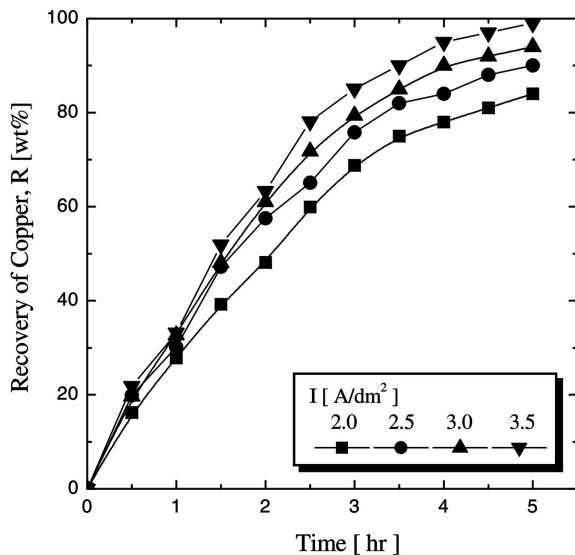


Figure 7. Recovery rate of copper with variation of current density in three-phase fluidized bed electrolytic reactors ( $W = 1.0 \text{ wt\%}$ ,  $L_{AC} = 0.5 \text{ cm}$ ,  $U_G = 0.1 \text{ cm/s}$ ,  $U_L = 0.1 \text{ cm/s}$ ).

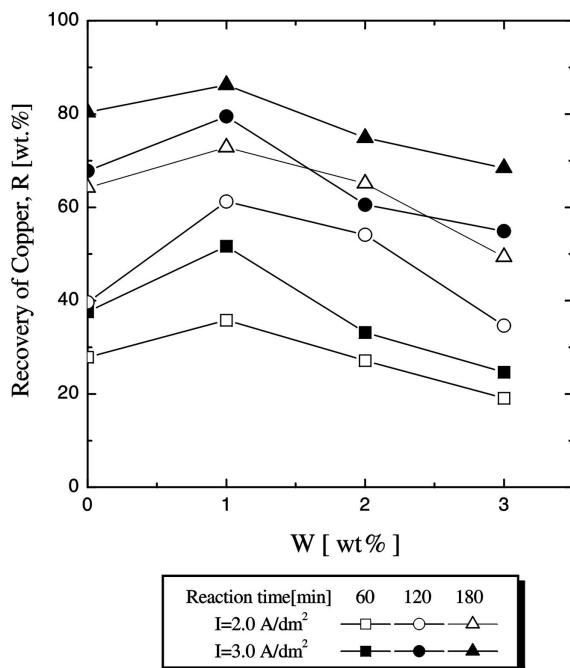


Figure 8. Effects of the amount of fluidized solid particles on the recovery of copper in three-phase fluidized bed electrolytic reactors ( $L_{AC} = 1.5 \times 10^{-2} \text{ m}$ ,  $U_G = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ,  $U_L = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ ).

감소시켜 줌으로써 동의 회수율을 증가시킨다고 할 수 있다. 다시 말하면, 금속석출과정의 율속단계인 전하이동과정에서 전극표면으로 이동한 금속이온이 전자를 얻어 금속으로 환원되는 단계가 가장 중요한 과정이므로, 동의 회수율을 증가시키려면 전극표면에 존재하는 저항들을 감소시켜야 하는데, 반응기내에 유동하는 입자들이 전극표면에 수지상으로 성장한 동 분말을 접촉과 충돌에 의해 효과적으로 분리시켜 줌으로써 이를 저항을 감소시키는 역할을 한다. 그러나 유동입자들이 너무 많이 존재하게 되면 유동입자들과 전극판 표면과의 접촉빈

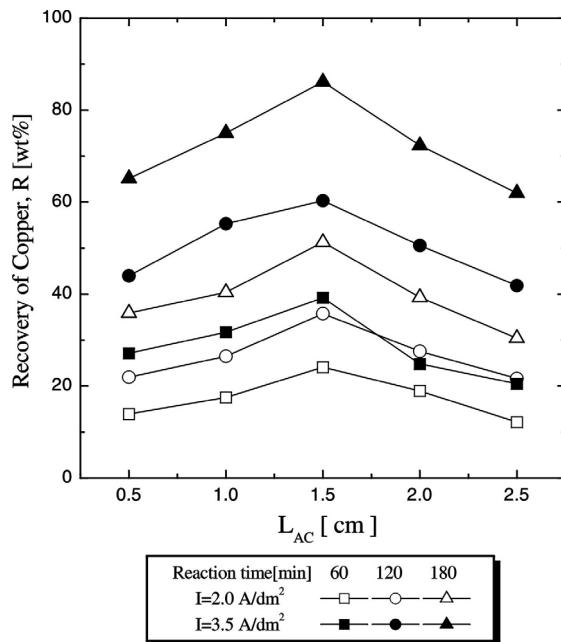


Figure 9. Effects of the  $L_{AC}$  on the recovery of copper in three-phase fluidized bed electrolytic reactors ( $W = 1.0 \text{ wt\%}$ ,  $U_L = 0.1 \text{ cm/s}$ ,  $U_G = 0.2 \text{ cm/s}$ ).

도와 접촉강도가 필요 이상으로 너무 증가하게 되어 동 이온들이 전자를 얻어 금속으로 환원되어 성장하는 기회를 감소시킴으로서 오히려 동의 회수율은 감소한다고 할 수 있다. 위의 결과로 볼 때 본 연구의 실험 조건에서는 유동 고체입자의 투입량이 1.0 wt%일 때 최적이라 할 수 있다.

삼상유동층 전극반응기에서 두 전극판 사이의 거리가 동의 회수율에 미치는 영향을 Figure 9에 나타내었다. Figure 9에서 볼 수 있듯이, 전극판 사이의 거리가 1.5 cm일 때 최대의 동의 회수율을 나타내고 있다. 산화 전극과 환원전극 간의 거리가 너무 가까우면 전류 밀도는 증가하지만, 두 전극 사이에 존재하는 동 이온의 양이 적어 물질 전달되는 양이 감소하기 때문에 동의 회수율이 적은, 반면에 두 전극간의 거리가 멀어지면, 두 전극 사이의 동 이온의 양은 증가하지만, 두 전극간의 유효 전류 밀도가 감소하기 때문에 동의 회수율이 감소한다고 할 수 있다.

#### 4. 결 론

유동층 전극 반응기에서 기체의 소량 주입은 반응기 내부에 기체 및 고체 유동 입자의 체류량의 증가를 가져온 반면, 액체 체류량은 감소하였으며, 액체 유속이 증가함에 따라서 기체와 고체 유동입자의 체류량은 충돌장애에 의해 감소하는 반면 액체 체류량은 증가하는 경향을 나타내었다.

유동층 전극 반응기내에 기체를 0.1~0.2 cm/s 정도 주입한 경우 기체를 주입하기 전보다 산업 폐수로부터 동 회수율은 최대 30% 증가한 반면 기체의 주입속도가 상대적으로 큰 0.3~0.4 cm/s인 경우에는 기체를 주입하기 전보다 동의 회수율은 오히려 감소하는 것으로 나타났는데, 본 연구의 실험 범위에서 주입되는 기체 유속이 0.1 cm/s일 경우 동의 회수율은 최대값을 나타내었다.

삼상유동층 반응기에서 동의 회수율은 낮은 유속 범위인 액체유속

o] 0.1 cm/s일 때 최대값을 나타낸 후 액체의 유속이 점점 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 동의 회수율에 대한 전류밀도의 영향은 패러데이 법칙에 의해 전류밀도가 증가함에 따라 선형적인 증가를 나타냈으며, 본 연구의 실험 범위내에서 유동 고체입자의 투입 양이 1.0 wt%인 경우 그리고 두 전극판의 거리가 1.5 cm인 경우에 산업 폐수로부터 동 분말의 회수율은 최대값을 나타내었다.

## 사용기호

A	: surface area, $m^2$
H	: height of bed, m
I	: current density, $A/dm^2$
$L_{AC}$	: length of anode and cathode of electrode, m
$\Delta P$	: pressure drop, $N/m^2$
R	: recovery ratio of copper powder, %
t	: reaction time, min
$U_L$	: liquid velocity, m/s
$U_G$	: gas velocity, m/s
W	: weight ratio of solid particle, wt%
$W_s$	: amount of fluidized solid particle, kg

### 그리아스 문자

$\varepsilon_G$	: gas holdup
$\varepsilon_L$	: liquid holdup
$\varepsilon_S$	: solids holdup

## 감사

본 연구는 한국과학재단의 연구비 지원(R01-2002-000-00337-0)으로 수행되었으며, 귀 재단에 감사드립니다.

## 참고문헌

- P. S. Song, H. T. Kim, Y. Kang, S. J. Kim, and S. D. Kim, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **14**, 807 (2003).
- P. S. Song, H. T. Kim, S. M. Son, Y. Kang, S. J. Kim, and S. D. Kim, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **14**, 903 (2003).
- K. Juttner, U. Galla, and H. Schmieder, *Electrochim. Acta*, **45**, 2575 (2000).
- M. A. Rabah, *Hydrometallurgy*, **56**, 75 (2000).
- C. W. Won, Y. Kang, and H. Y. Sohn, *Metallurgical Transaction B*, **24B**, 192 (1993).
- C. W. Won and Y. Kang, *J. Materials*, **49**, 41 (1997).
- S. D. Kim and Y. Kang, Cheremisimoff, N. P. ed. Gulf Pub. Co. (1996).
- S. D. Kim and Y. Kang, *Chem. Eng. Sci.*, **52**, 3639 (1997).
- Y. J. Cho, S. J. Kim, S. H. Nam, Y. Kang, and S. D. Kim, *Chem. Eng. Sci.*, **56**, 6107 (2001).
- Y. Kang, K. J. Woo, M. H. Ko, and S. D. Kim, *Chem. Eng. Sci.*, **52**, 3723 (1997).
- F. H. Harbashi, Gordon, and Breach Science Pub., Inc., New York, (1969).
- R. D. Pehlke, American Elsevier Pub. Co. Reading, MA (1972).
- A. Sinha, S. Kumar Das, T. V. Vijaya Kumar, V. Rao, and P. Ramachandrarao, *J. Materials Synthesis and Processing*, **7**, 373 (1999).
- S. M. San, H. J. Shin, S. H. Kang, Y. Kang, and S. D. Kim, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **15**, 652 (2004).