

수용액중의 Cr(VI) 이온 제거에서의 침전부상법과 흡착콜로이드부상법의 비교

강성길 · 최상준*†

경북대학교 공과대학 화학공학과, *환경공학과
(1994년 1월 31일 접수, 1994년 3월 31일 채택)

Comparison of the Precipitate Flotation and the Adsorbing Colloid Flotation on the Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution

Sung-Gil Kang and Sang June Choi*†

Dept. of Chem. Eng., *Dept. of Env. Eng., KyungPook National University, Taegu 702-701, Korea
(Received 31 January 1994; accepted 31 March 1994)

요 약

수용액중의 Cr(VI) 이온 제거를 음이온 계면활성제 sodium lauryl sulfate를 사용하여 거품분리기술(침전부상법, 흡착콜로이드부상법)을 이용하여 행하였다. Cr(VI) 이온 제거의 최적 pH는 침전부상법은 pH 8.0 근처에서 흡착콜로이드부상법은 Fe(OH)₃를 사용하는 경우 pH 4.0 근처에서 나타났다. Cr(VI) 이온 제거효율에 영향을 미치는 인자들인 계면활성제, Fe(III) 이온, 외부 이온 등의 영향에 대해 조사하였다. 수용액중의 Cr(VI) 이온 제거에 있어서 침전부상법과 흡착부상법의 흡착기구 및 분리 메카니즘을 비교하여 관찰하였다.

Abstract—Experimental investigations on the removal of Cr(VI) from aqueous solution were carried out by the foam separation techniques(precipitate and adsorbing colloid flotation) using sodium lauryl sulfate as a collector. The optimum pH for the removal of Cr(VI) was found to be about 8 for precipitate flotation and about 4 for adsorbing colloid flotation with Fe(OH)₃. The effect of surfactant and foreign ions(Na⁺, Ca²⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻) addition on the removal efficiency were observed. The adsorption and separation mechanism on the removal of Cu(II) ion by the foam separation techniques of precipitate and adsorbing colloid flotation were also observed.

1. 서 론

거품분리기술(foam separation techniques)은 희박한 용액중에 녹아 있는 물질이나 부유물질을 분리 또는 제거하는 기술로써 석유공업, 제지공업, 금속공업, 폐수 처리 등에 널리 응용되고 있다[1-5]. 이 기술의 원리는 계면활성제에 의해 고체-액체 또는 기체-액체 계면을 활성화하여 용액중의 이온이나 부유물 등을 계면활성

물질로 전환시킴으로써 부상하는 기포에 흡착시켜 용액으로부터 분리하는 것이다. 거품분리기술은 기체-액체 계면에 계면활성물질이 흡착하는 성질을 이용하여 용액중으로 기포를 상승시켜 계면활성물질을 상승하는 기포에 흡착시켜 용액으로부터 분리시킨다. 제거하고자 하는 물질이 계면불활성인 경우에는 용액중에 계면활성물질을 가하여 계면활성물질과의 결합 또는 흡착에 의해 계면활성을 띄게 한 다음 여기에 기포를 부상시

킴으로써 수용액중으로부터 분리시킨다.

거품분리기술에는 녹아 있는 형태로 분리시키는 거품분별법(foam fractionation)과 불용성의 물질을 분리시키는 거품부상법(froth flotation)이 있다. 거품부상법에는 용액중의 제거물질 또는 농축대상 물질에 따라 이온부상법(ion flotation), 침전부상법(precipitate flotation), 흡착콜로이드부상법(adsorbing colloid flotation) 등으로 구분된다. 이온부상법은 용액중의 이온을 포말의 계면, 즉 기체-액체의 계면을 계면활성제로 활성화시켜 이온이 포말 계면에 흡착되도록 하거나, 이온이 계면활성제와 결합하여 소수성을 띄게 하여 포말에 흡착되도록 한 다음 포말을 회수하는 기술이며, 침전부상법은 용액중의 이온을 침전물의 형태로 만들어 그 침전물의 표면을 계면활성제로 소수성이 되게 한 다음 포말에 흡착시켜 그 포말을 회수하는 것이다. 또한 흡착콜로이드 부상법은 용액내에 Fe(III)나 Alum 등을 첨가하여 흡착콜로이드를 만들어서 이 흡착콜로이드의 표면 위에 용액중의 이온이나 부유물을 흡착 또는 공침시킨 다음 계면활성제를 사용하여 흡착 또는 공침된 침전물의 표면을 소수성으로 만들어 상승하는 기포의 계면에 흡착시켜 제거시키는 방법이다.

폐수중의 희박한 중금속 처리를 위해서는 화학침전 방법이 가장 많이 사용되어 왔다. 그러나 화학침전 방법은 큰 침강 탱크가 필요하며 슬러지의 부피가 크고 용해도 이하로의 감량이 곤란하며 잔류 중금속 이온의 농도를 충분히 낮게 유지하기 위해서는 최종적으로 여과기에서 다시 여과하여야 하는 등 효율적 및 경제적인 분리가 어렵다. 이에 반해 거품분리기술은 용액중 잔존하는 금속이온의 농도를 낮게 유지할 수 있고, 조작이 빠르고, 좁은 공간에서도 조업이 가능하고, 다양한 크기의 여러 가지 금속에 적용이 가능하며, 비교적 싼 가격으로 조업이 가능한 등 여러 장점이 있다.

최근에는 경제성, 선택도 및 분리효율성 때문에 침전부상법과 흡착콜로이드부상법에 관한 연구가 이루어지고 있다. Barson과 Ray[6]에 의하여 개발된 침전부상법은 이온부상법과 거품분별법에 비해 용액중에 존재하는 외부 이온의 영향을 훨씬 적게 받으며 적은 양의 계면활성제량으로도 분리가 가능하였다[7-10]. 흡착콜로이드부상법은 Zeitlin 등[11, 12]이 사용한 이래 최근까지 많은 연구가 이루어졌다. 이 방법은 철이나 Alum을 용액중에 첨가하여 흡착콜로이드를 만들어 중금속을 공침시키거나, 침전물이 흡착콜로이드의 표면에 흡착하도록 하여 분리시키는 방법이다[13-20]. 본 연구 그룹[21]에서도 Cu(II)이온의 제거를 침전부상법과 흡착콜로이드부상법으로 제거한 바 있다.

Cr(VI)이온 제거를 위한 연구는 여러 연구자들에

의하여 이루어졌다. Bhattacharyya 등[22]은 NaHSO_3 를 사용해 Cr(VI) 이온을 Cr(III)로 환원한 뒤 NaOH를 사용해 크롬 수산화물 침전의 형태로 만들어 제거하는 침전부상법을 행하였다. Pietrenko[23]는 이온부상법과 침전부상법으로 수용액중의 Cr(III) 이온 제거를 행하였으며 최적 pH 범위는 pH 6-8인 것으로 나타났다. Huang 등[24, 25]은 흡착콜로이드로 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 와 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 를 사용한 흡착콜로이드 부상법과 FeSO_4 를 환원제로 사용하여 Cr(VI)을 Cr(III)로 환원한 후 흡착콜로이드와 공침시켜 Cr(VI) 이온을 제거하였으며 잔존 크롬 농도 0.5 ppm 미만으로 제거할 수 있었다.

지금까지 foam separation 방법을 이용한 Cr(VI) 이온 제거에서는 침전부상법과 흡착콜로이드부상법의 분리메카니즘을 비교하여 규명한 연구가 이루어지지 않았으며, 또한 수용액상에 존재하는 다른 이온 및 pH영향 등에 대한 연구가 부족하다. 본 연구에서는 수용액중의 Cr(VI) 이온 제거를 침전부상법과 흡착콜로이드부상법을 동시에 행하여 pH, 계면활성제 농도, 외부이온 등의 영향을 비교 검토하고 아울러 각각의 방법에 따른 흡착기구 및 분리 메카니즘을 규명하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 시약

본 실험에 사용한 계면활성제는 시약급의 음이온 계면활성제인 sodium lauryl sulfate(NLS)이다. Cr(VI)이온 수용액은 탈이온화된 증류수에 시약급의 $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 를 녹여서 만들었으며 환원제로는 NaHSO_3 를 사용하였다. 흡착콜로이드는 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 와 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 를 사용하여 만들었다. 외부이온으로는 NaNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, Na_2SO_4 를 사용하였다.

2-2. 실험장치

Fig. 1에 본 실험에 사용된 실험장치를 나타내었다. 거품컬럼은 pyrex glass로 만든 직경 3.5 cm, 높이 90 cm의 것을 사용하였다. 거품은 질소가스를 사용하여 소결한 유리스파저를 통하여 만들었다. 질소가스는 실험도중 수용액의 증발현상을 방지하기 위하여 물로 포화시킨 다음 함유된 입자나 액체를 glass wool column을 통과시켜 불순물을 제거한 다음 사용하였다.

2-3. 실험방법

Cr(VI) 수용액은 stock 용액(1000 ppm)을 사용하여 만들었다. 침전부상법에서는 Cr(VI) 수용액을 침강탱크에 준비한 뒤 환원제로 NaHSO_3 를 첨가하여 Cr(VI)을 Cr(III)로 환원한 다음 소량의 NaOH를 가하여 pH를

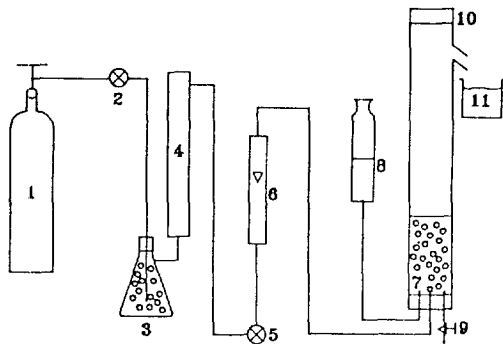


Fig. 1. Schematic diagram of experimental system.

- | | |
|----------------------|--------------------------|
| 1. Nitrogen supply | 7. Fritted glass sparger |
| 2. Valve | 8. Reagent syringe |
| 3. Humidifier | 9. Drain and sampling |
| 4. Glass wool column | 10. Foam discharge port |
| 5. Needle valve | 11. Discharge foam |
| 6. Rotameter | |

조절하여 침전시켰다. 침전물을 만든 다음 NLS를 가하여 전체 수용액 체적이 200 ml가 되게 한 다음 질소 가스를 유리스파저를 통과시켜 부상실험을 행하였다. Cr(III)로의 환원은 약산성 용액(pH 2.5-3.0)하에서 자석식 교반기로 교반하면서 만들었으며 $\text{HSO}_3^- : \text{HCrO}_4^-$ 의 몰비가 2:1이 되도록 하였다. Cr(VI) 이온의 환원 정도는 잔존하는 Cr(VI) 크롬을 산성용액(pH 1.5-2.0)하에서 diphenylcabazide로 착색시켜 UV-Vis Spectrophotometer로써 그 정도를 확인하였다[26]. 흡착콜로이드부상법에서는 Cr(VI) 수용액에 Fe(III) 이온을 적당량 첨가한 다음 NaOH를 가하여 pH를 조절하면서 공침시킨후 부상실험을 행하였다.

실험을 시작하고 나서 5분마다 2 ml의 시료를 취하였으며 수용액중의 잔존 중금속 이온의 농도는 원자흡광분석계(Shimadzu AA 610-S)를 사용하여 분석하였다. 잔존 용액중의 NLS의 농도는 methylene blue-chloroform 추출방법을 사용하여 측정하였다[27]. 침전시킨 후 용액중의 잔존 크롬 이온 농도는 0.45 μm pore filter paper를 통과시킴으로써 침전물을 분리한 수용액중의 크롬 이온 농도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. pH의 영향

Fig. 2는 침전부상에 의한 Cr(III) 이온 제거시 pH의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 점선은 여과 후 수용액중의 잔존 Cr(III) 이온 농도를 나타낸 것으로 이것은 침전의 영향만을 나타낸다. 크롬은 pH 5-6에서 침전을

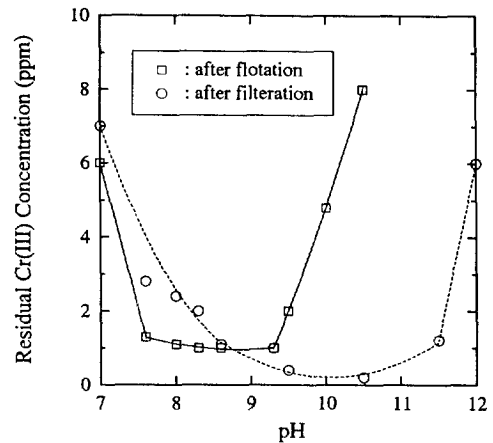


Fig. 2. Effect of pH on Cr(VI) removal by reduction with NaHSO_3 to Cr(III) followed by precipitate flotation [Cr(VI): 50 ppm, flotation time: 30 min, gas flow rate: 100 ml/min, NLS: 100 ppm].

형성하기 시작하여 pH 10.0 근처에서 가장 많은 침전이 형성되며, pH 12.0 이상에서는 대부분이 용해된 상태로 존재한다. 부상실험의 결과(실선) 최적 pH는 pH 7.5-9.0의 범위에서 나타나며 잔존 크롬 이온 농도 1 ppm 미만으로 제거할 수 있었다. 그러나 pH 7.0 미만에서는 Cr(III) 이온이 완전히 침전하지 않아서 용해된 Cr(III)이 많이 존재하므로써 제거효율을 저하시킨다. 그리고 pH 9.0 이상에서도 pH의 증가와 더불어 잔존 Cr(III) 이온의 농도가 증가한다. 이것은 크롬 침전이 물속에서 친수성을 띄고 있으므로 이를 제거하기 위해서는 계면활성제를 흡착시켜 소수성을 띄도록 하여야 한다. 소수성을 띤 침전물은 상승하는 기포에 흡착하여 부상이 가능하다. 그런데 NLS가 음이온 계면활성제이므로 부상하기 위해서는 침전물이 양전하를 띄도록 하여야 한다. 물속에서의 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 의 등전점[28]이 9.7 근처이므로 pH 9.0 이하에서는 크롬 수산화물이 양으로 하전되어 있어 음이온 계면활성제인 NLS의 침전 표면에 대한 흡착이 원활하게 이루어 지므로 효율적인 제거가 가능하다. 그러나 최적 pH 이상에서는 금속 수산화물 침전이 음전하를 띄게 되어 음이온 계면활성제인 NLS의 흡착이 어려워 지므로 제거효율이 떨어지게 된다.

Fig. 3은 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 를 사용한 흡착콜로이드부상법에 의한 Cr(VI) 이온 제거시 pH의 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 점선은 여과 후 수용액중의 잔존 Cr(III) 이온 농도를 나타낸 것으로 이것은 침전의 영향만을 나타낸다. 그림에서 Cr(VI) 이온 제거 결과(실선) pH 4.0-4.5의 범위에서 최적조건이 나타나며 0.5 ppm 미만으로 제거가 가능하였다. Fig. 2의 침전부상법에서의 최적조

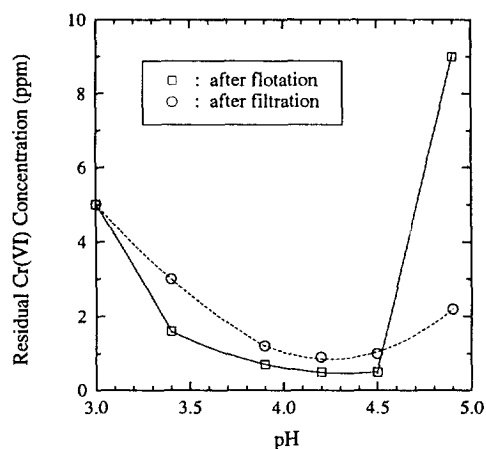


Fig. 3. Effect of pH on Cr(VI) removal by adsorbing colloid flotation with $\text{Fe}(\text{OH})_3$ [Cr(VI): 50 ppm, Fe(III): 500 ppm, NLS: 100 ppm, flotation time: 30 min, gas flow rate: 100 ml/min].

전인 pH 8.5 보다 낮은 pH에서 최적조건이 형성되고 있다. 이것은 pH 2-3 정도에서 침전하기 시작하는 Fe(III) 이온의 존재하에서 Cr(VI) 이온의 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 침전 표면으로의 흡착이 이루어 지기 때문으로 생각된다. 그러나 pH 4.5 이상에서는 pH의 증가와 더불어 제거 효율이 감소하고 있다. 이것은 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 의 등전점이 7.1 근처이므로 등전점[28]에 가까워짐에 따라 철수화물의 zeta potential이 낮아지므로서, 양이온성이 약해져서 HCrO_4^- 이온과 음이온 계면활성제의 철수화물 표면으로의 흡착이 잘 이루어 지지 않기 때문이다.

3-2. 초기 계면활성제 농도의 영향

Table 1과 2는 침전부상법과 흡착콜로이드부상법에 의한 크롬 이온 제거에 있어 초기 계면활성제 농도의 영향을 각각 나타낸 것이다. 침전부상에 의한 제거의 경우 계면활성제 농도 100 ppm에서 최적조건을 나타내고 있다. 최적조건 이하에서는 제거효율이 낮는데 이것은 낮은 계면활성제 농도하에서는 안정한 거품을 형성하지 못하여 컬럼을 따라 부상하던 침전물이 다시 용액중으로 재분산되는 현상이 일어나기 때문이다. 또한 최적조건 이상으로 계면활성제의 농도가 증가함에 따라 제거효율이 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 최적조건 근처에서는 침전이 계면활성제와 결합하여 소수성을 띄게 되므로 수용상으로부터의 분리가 가능하나 최적 조건 이상으로 과잉의 계면활성제가 존재하게 되면 소수성을 띄고 있는 침전에 다시 계면활성제가 흡착하게 되어 침전이 친수성을 띄게 되므로 제거효율이 감소하게 된다.

Table 1. The effect of initial surfactant concentration on Cr(VI) removal by reduction with NaHSO_3 to Cr(III) followed by precipitate flotation

Initial surfactant concentration(ppm)	Residual Cr(III) concentration(ppm)
20.	42.
40.	20.
60.	3.
80.	3.
100.	1.
150.	1.
200.	1.2
300.	6.

[Cr(VI): 50 ppm, gas flow rate: 100 ml/min, flotation time: 30 min, pH: 8.5]

Table 2. The effect of initial surfactant concentration on Cr(VI) removal by adsorbing colloid flotation with $\text{Fe}(\text{OH})_3$

Initial surfactant concentration(ppm)	Residual Cr(VI) concentration(ppm)
10.	8.
20.	5.
30.	1.2
40.	1.0
50.	0.5
100.	0.5
150.	0.8
200.	1.7
300.	9.

[Cr(VI): 50 ppm, Fe(III): 500 ppm, gas flow rate: 100 ml/min, flotation time: 30 min, pH: 4.5]

흡착콜로이드 부상에서 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 를 흡착콜로이드로 사용하는 경우 계면활성제 농도 50 ppm에서 안정한 거품을 형성하며 최적의 제거가 이루어 지는 것으로 나타났다. 침전부상에서는 침전물이 컬럼을 통해 상승하는 도중 재분산되므로 이를 방지하기 위해서 많은 양의 계면활성제가 필요하였으나 흡착콜로이드부상법에서는 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 가 응집물질로서 작용, 침전물의 재분산을 막을 수 있고 상대적으로 큰 표면적을 가지고 있으므로 적은 양의 계면활성제로도 효율적인 제거가 가능하였다.

3-3. 외부 음이온의 영향

Fig. 4는 침전부상법에 의한 Cr(VI) 이온 제거시 외부 음이온의 영향을 나타낸 것이다. NO_3^- 와 SO_4^{2-} 의 음이온은 소디움의 형태(NaNO_3 , Na_2SO_4)로 수용액중에 도입하였다. 그림에서 이가의 SO_4^{2-} 이온의 영향이 1가의 NO_3^- 이온의 영향보다 훨씬 큰 것으로 나타났다.

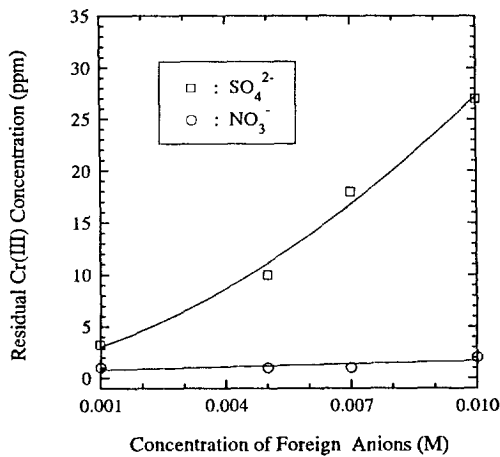


Fig. 4. Effect of foreign anions of Cr(VI) removal by reduction with NaHSO_3 to Cr(III) followed by precipitate flotation [Cr(VI): 50 ppm, NLS: 100 ppm, flotation time: 30 min, gas flow rate: 100 ml/min, pH: 8.0].

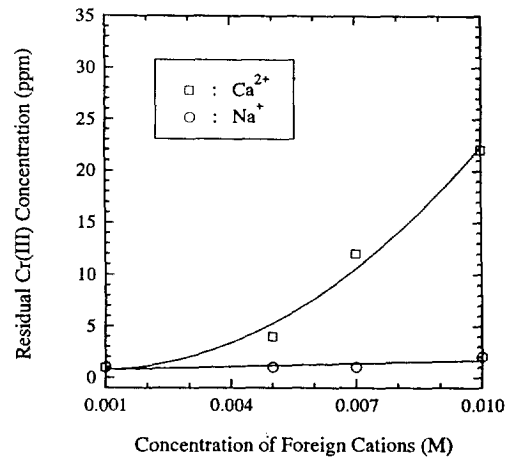


Fig. 6. Effect of foreign cations on Cr(VI) removal by reduction with NaHSO_3 to Cr(III) followed by precipitate flotation [Cr(VI): 50 ppm, NLS: 100 ppm, flotation time: 30 min, gas flow rate: 100 ml/min, pH: 8.0].

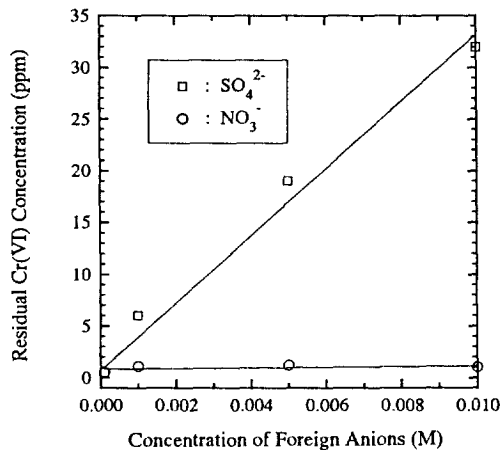


Fig. 5. Effect of foreign anions on Cr(VI) removal by adsorbing colloid flotation with Fe(OH)_3 [Cr(VI): 50 ppm, Fe(III): 500 ppm, NLS: 100 ppm, flotation time: 30 min, gas flow rate: 100 ml/min, pH: 4.5].

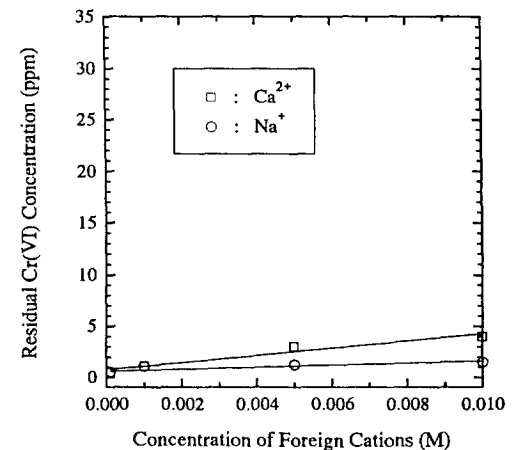


Fig. 7. Effect of foreign cations on Cr(VI) removal by adsorbing colloid flotation with Fe(OH)_3 [Cr(VI): 50 ppm, Fe(III): 500 ppm, NLS: 100 ppm, flotation time: 30 min, gas flow rate: 100 ml/min, pH 4.5].

이것은 이가의 SO_4^{2-} 이온이 일가의 NO_3^- 이온 보다 양전하를 띄고 있는 Cr(OH)_3 침전에 더욱 강력하게 결합하여 입자의 zeta potential을 감소시키고 양으로 하전된 침전물과 음이온 계면활성제간의 정전기적 인력이 감소하므로 제거효율이 떨어지는 것으로 생각된다.

Fig. 5는 흡착콜로이드부상에 의한 Cr(VI) 이온 제거시 외부 음이온의 영향을 나타낸 것으로 Fig. 4의 침전부상에 의한 제거 결과처럼 SO_4^{2-} 이온의 영향이 NO_3^-

이온의 영향보다 훨씬 큰 것으로 나타났다. 이것은 SO_4^{2-} 이온이 NO_3^- 이온 보다 강력하게 양전하를 띄고 있는 Fe(OH)_3 표면에 흡착하여 음이온 계면활성제의 Fe(OH)_3 표면에의 흡착을 방해하기 때문으로 설명된다.

3-4. 외부 양이온의 영향

Fig. 6과 7은 각각 침전부상법과 흡착콜로이드부상법에 의한 Cr(VI) 이온 제거시 외부 양이온의 영향을

나타낸 것이다. Na^+ 와 Ca^{2+} 의 양이온은 nitrate의 형태 $[\text{NaNO}_3, \text{Ca}(\text{NO}_3)_2]$ 로 수용액중에 도입하였다. Fig. 6의 침전부상법에서는 이가의 Ca^{2+} 이온의 영향이 일가의 Na^+ 이온의 영향보다 훨씬 큰 것으로 나타났다. 이것은 Ca^{2+} 이온이 음이온 계면활성제에 대해 표면에 양전하를 띄고 있는 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 침전과 서로 경쟁하므로 제거효율이 떨어지게 되는 것으로 생각된다. 그러나 Fig. 7에서 관찰할 수 있듯이 흡착콜로이드부상법에서는 Ca^{2+} 이온의 영향이 침전부상법에서보다 훨씬 적게 나타났다.

4. 결 론

(1) 수용액중의 $\text{Cr}(\text{VI})$ 이온 제거를 음이온 계면활성제인 sodium lauryl sulfate를 사용하여 침전부상법과 흡착콜로이드부상법으로써 행하였으며, 흡착콜로이드부상법에서 잔존 $\text{Cr}(\text{VI})$ 농도를 환경기준치인 0.5 ppm 미만으로 제거할 수 있었다.

(2) 거품분리기술에 의한 $\text{Cr}(\text{VI})$ 이온 제거효율은 pH에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며 최적 pH는 침전부상법에서는 pH 8 근처, 흡착콜로이드부상법에서는 pH 4 근처였다.

(3) Sodium lauryl sulfate를 $\text{Cr}(\text{VI})$ 이온 제거를 위하여 사용하였으며, 흡착콜로이드부상에서 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 의 flocculating 성질로 인하여 50 ppm 정도의 계면활성제가 필요하였다. 그러나 침전부상법에서는 금속수화물의 재분산 현상 때문에 흡착콜로이드부상에서보다 2배의 계면활성제가 필요하였다.

(4) 외부 이온의 존재는 거품분리기술의 적용에 심각한 장애가 되었다. 일반적으로 이가 이온인 Ca^{2+} , SO_4^{2-} 이온의 영향이 일가 이온인 Na^+ , NO_3^- 이온 보다 심각한 것으로 나타났다. 그러나 양이온의 존재시 흡착콜로이드부상법이 침전부상법 보다 제거가 잘 되었다.

참고문헌

1. Lemlich, R.(ed.): "Adsorptive Bubble Separation Techniques", Academic Press, New York(1972).
2. Clake, A. N. and Wilson D. J.: *Sep. Purif. Methods*, 7(1), 55(1978).
3. Grives, R. B.: *Chem. Eng.*, 10, 93(1975).
4. Somasundaran, P.: *Sep. Purif. Methods*, 1(1), 117(1972).
5. Wilson, D. J. and Clarke, A. N.: "Foam Flotation", Marcel Dekker, Inc., New York, 1983.
6. Barson, R. E. and Ray, C. I.: Amer. Inst. of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers Symposium, Dallas, Texas, 1963.
7. Rubin, A. J., Johnson, J. D. and Lamb, J. C.: *Ind. Eng. Chem. Pro. Des. Devel.*, 5(4), 368(1966).
8. Pinford, T. A.: "Precipitate Flotation in Adsorptive Bubble Separation Techniques", Lemlich, R.(ed.), Academic, New York(1972).
9. Grieves, R. B. and Bhattacharyya, D.: *Sep. Sci.*, 4(4), 301(1969).
10. Jurkiewicz, K.: *Sep. Sci. Technol.*, 19(13), 1051(1984).
11. Kim, Y. S. and Zetlin, H.: *Anal. Chem.*, 43, 1390(1971).
12. Kim, Y. S. and Zetlin, H.: *Sep. Sci.*, 7(1), 1(1972).
13. Huang, S. D. and Wilson, D. J.: *Sep. Sci.*, 10(4), 407(1975).
14. Huang, S. D. and Wilson, D. J.: *Sep. Sci.*, 11(3), 215(1976).
15. Wilson, D. J.: *Sep. Sci. Technol.*, 13(2), 107(1978).
16. Allen, W. D., Jones, M. M., Mitchell, W. C. and Wilson, D. J.: *Sep. Sci. Technol.*, 14(9), 769(1979).
17. McIntyre, G., Rodriguez, J. J., Thackston, E. L. and Wilson, D. J.: *Sep. Sci. Technol.*, 17(2), 359(1982).
18. McIntyre, G., Rodriguez, J. J., Thackston, E. L. and Wilson, D. J.: *Sep. Sci. Technol.*, 17(5), 673(1982).
19. McIntyre, G., Rodriguez, J. J., Thackston, E. L. and Wilson, D. J.: *Sep. Sci. Technol.*, 17(5), 683(1982).
20. Huang, S. D., Tzudo, J. J., Gau, J. Y., Hsieh, H. S. and Fann, C. F.: *Sep. Sci. Technol.*, 19(13-15), 1061(1984).
21. Choi, S. J. and Ihm, S. K.: *Sep. Sci. Technol.*, 23(4&5), 363(1988).
22. Bhattacharyya, D. J., Carton, A. and Grieves, R. B.: *Amer. Inst. Chem. Eng. J.*, 17, 419(1971).
23. Pietrenko, B. K. and Selecki, A.: *Sep. Sci. Technol.*, 19(13), 1025(1984).
24. Huang, S. D., Fann, C. F. and Hsieh, H. S.: *J. Colloid Interface Sci.*, 89(2), 504(1982).
25. Huang, S. D. and Wilson, D. J.: *Sep. Sci. Technol.*, 19(8), 603(1984).
26. Franson, M. H.: "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", Amer. Publ. Health Assoc., Washington, D. C.(1971).
27. Cross, J.: "Surfactant Science Series", 8, Dekker, New York(1977).
28. Parks, G. A.: *Chem. Res.*, 65, 177(1965).