

AFMR 공정을 이용한 광산폐수의 중금속 제거

백병천 · 김광복

여수대학교 환경공학과

(1999년 9월 1일 접수, 1999년 11월 1일 채택)

Removal of Heavy Metals from Acid Mine Drainage using AFMR Process

Byeong Cheon Paik · Gwangbok Kim

Department of Environmental Engineering, Yosu National University

ABSTRACT

This research is to remove heavy metals from AMD(Acid Mine Drainage) using AFMR(Anaerobic Floating Media Reactor) process. Two AFMR were operated at HRT(hydraulic retention time) of 3 days, COD/sulfate ratio from 0.3 to 0.8, temperature from 30°C to 35°C, and alkalinity of 1,000mg/l(as CaCO₃). At COD/sulfate (SO₄²⁻) ratio of 0.5 and temperature of 35°C, the ratio of reduced sulfate(SO₄²⁻)/removed COD(mg/mg) kept about 1 and the reactor achieved 99.99% of Cr, Pb and Fe, 98% of Cd, and 90% of Mn removal efficiencies, respectively. Decreasing temperature to 30°C increased the ratio of reduced sulfate(SO₄²⁻)/removed COD(mg/mg) to 1.37. Amount of sulfate reduction maximized at the temperature of 30°C and the COD/sulfate ratio of 0.4 in the influent and then removal efficiencies of heavy metals were 99.99% of Fe, 99.99% of Pb, 99.99% of Cr, 97.3% of Mn, 99.9% of Zn, 99.9% of Cd and 99.9% of Cu.

Key Words : AFMR Process, Heavy Metals, Removal Efficiency, Operating Temperature, COD/Sulfate ratio

요 약 문

본 연구는 AFMR(Anaerobic Floating Media Reactor) 공정을 이용하여 폐광산폐수로부터 중금속을 제거하기 위한 연구로서 본 연구에서는 두 개의 AFMR 반응조를 HRT 3일, COD/sulfate 비는 0.3~0.8, 운전온도는 30℃~35℃, 알칼리도는 1,000 mg/l(as CaCO₃)으로 운전하였다. 실험결과 AFMR 반응조는 COD/Sulfate 비 0.5, 운전온도 35℃에서 환원된 SO₄²⁻ 양/제거된 COD양(mg/mg) 비는 약 1를 유지하였으며, 중금속 Cr, Pb, Fe은 99.99%, Cd 98%, Mn 90%의 제거효율을 나타내었다. 운전온도를 35℃에서 30℃로 감온시킬 때 AFMR 반응조내의 환원된 SO₄²⁻ 양/제거된 COD양(mg/mg) 비는 1.37배로 증가하였다. 또한 운전온도 30℃, COD/Sulfate 비가 0.4일 때 최대의 황산염 환원을 보였으며 이때 유입되는 중금속인 Fe, Pb, Cr은 99.99%, Zn, Cd, Cu는 99.9%, Mn 97.3%의 중금속 제거효율을 보였다.

주제어 : AFMR 공정, 중금속, 제거효율, 운전온도, COD/Sulfate 비

1. 서 론

지하수와 산화광물의 산화작용으로부터 발생하는 산성광산폐수는 낮은 pH, 높은 황산염(SO₄²⁻)농도 및 철, 망간, 아연, 구리 등의 중금속을 고농도로 함유하고 있어 주변수계를 산성화시키고 수중에 서식하는 미생물, 조류, 어류를 사멸시키며, 폐광주변의 하천을 붉게 하거나 백색침전물을 만들어 주변 식물 뿌리에 심각한 타격을 줄 뿐 아니라 식물의 뿌리를 고사시키는 등 주변 환경에 심각한 피해를 주므로 이에 대한 적절한 대책이 필요한 실정이다.^{1,2)} 이러한 환경으로부터 중금속을 제거하기 위한 기존의 물리적, 화학적 공정으로는 산화·환원법, 응집침전법, 흡착·이온교환법, 전기분해법, 중화법 및 추출법등 매우 다양한 기술들이 있으나, 이러한 방법들은 경제적인 측면에서 운전 및 유지 비용의 증가와 기술적인 측면에서는 2차 오염물질의 발생, 낮은 중금속 제거효율, 중금속의 회수 등 많은 문제점들이 도출되어 제한적으로 사용되고 있는 실정이다.³⁻⁵⁾ 이에 따라 중금속 제거기술 개발에 대한 연구가 여러 방면에서 진행되어오고 있는데 근래에 와서 생물학적인 중금속 제거 기술에 대한 연구가 점차 관심을 모으고 있으며, 특히 이들 중 혐기성 생물학적 처리공정인 황산염 환원균(Sulfate Reducing Bacteria, 이하 SRB라 칭함)을 이용한 중금속 제거공정이 북미를 중심으로 활발히 연구되고 있는 실정이다.^{6,7)}

SRB를 이용한 중금속 제거공정은 유기물을 전자공여체로 이용하여 황산염(Sulfate)을 황화물(Sulfide)로 환원시킬 때 생성되는 황화물(Sulfide)이 폐수내에 존재하는 여러 중금속과 반응하여 황화물 침전(Sulfide precipitation)을 형성함으로써 생물학적으로 중금속을 제거하는 반응기작을 이용한 것이다. 이는 폐수로부터 중금속의 제거뿐만 아니라 폐수의 특성에 따라 폐수로부터 중금속의 회수 가능성도 시사해 준다. 이와 같은 방법으로 제거되는 중금속 황화물은 재용출의 우려가 적고 혐기성 소화조에서 유기탄소원을 이산화탄소와 중탄산염으로 변화시켜 결과적으로 알칼리도를 증가시키게 되므로 다량의 황산염을 함유하고 있는 폐광산폐수로부터 중금속을 제거하는 효과적인 방법으로 인식되고 있다.⁶⁻¹⁰⁾

따라서 본 연구에서는 SRB를 이용하여 폐광산폐수내의 중금속을 제거하기 위해 개발된 AFMR(Anaerobic Floating Media Reactor) 공정을 선정하여 운전인자가 공정의 효율에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 실험장치

폐광산폐수내의 중금속을 생물학적으로 제거하기

위해 AFMR 신공정을 선정하였다. AFMR 공정은 충전된 여재가 유동(fluidizing)하는 것과는 달리 물보다 가벼운 여재가 반응조 상층에 충전되어 있으며, 상층에 충전된 여재에 생물막이 형성되어 반응조 내에 고농도 혐기성 미생물을 유지시키면서 효과적으로 중금속을 제거하도록 만들어졌다. 반응조의 재질은 아크릴 수지로 제작되었고, 5ℓ (높이 54cm, 내경 13cm)의 유효 용량을 갖고 있으며, 비중이 0.96을 갖는 부유성 불활성 여재를 반응조에 2ℓ 투입하였다. 연속운전을 위한 실험장치도는 Fig. 1에 나타내었다.

반응조는 온도 조절이 가능한 항온실에서 운전하였고, 회분식 실험에서 중금속 제거율이 반응 2일째 이후에는 큰 차이를 보이지 않아⁸⁾ 수리학적체류시간(HRT)은 3일로 조정하였으며, 유입 폐광산폐수는 4℃ 냉장고에서 미량소실펌프에 의해 반응조에 공급되었다. 유출수의 분석을 위한 시료 채취는 반응조 상부 측면에 설치되어 있는 유출수 조에서 채취 분석하였다.

2.2. 실험방법

반응조의 식종슬러지로는 다양한 종 및 많은 양의 황산염 환원균을 확보하기 위해 K 하수처리장의 혐기성 소화조 슬러지와 D 맥주공장에서 채취한 소화슬러지를 혼합시켜 소화슬러지에 포함된 이물질을 제거하기 위해 No.16 (1.18mm) 체로 거른 후 실험실에서 황산염이 풍부한 인공폐수에서 황산염 환원균을 배양한 것으로 사용하였다. 각 반응조에 식

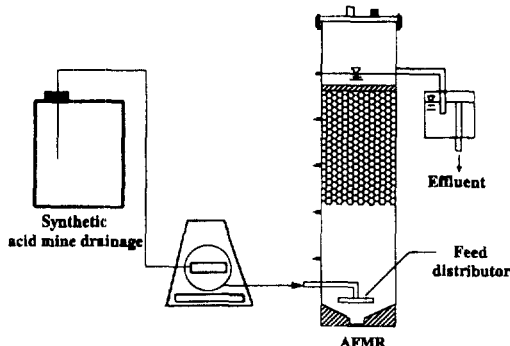


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental apparatus.

종된 슬러지의 체적은 2.8ℓ였으며, 초기 TS(Total Solid) 농도는 10,000 mg/l, VSS(Volatile Suspended Solid) 농도는 8,850 mg/l였다.

실험에 필요한 폐광산폐수의 조제를 위해서 우선 국내의 주요 광산 및 폐광지역 중에서 환경오염으로 인한 민원이 빈번한 광산지역 3군데를 선정하여 현장조사를 실시하였다. 현장 조사 및 시료 채취를 실시한 곳은 전남 화순군 한천면 오음리에 위치한 폐탄광인 호남광업 부근의 하천과 현재 가행중인 대한석탄공사 화순광업소 그리고 부산광역시 기장군에 위치한 폐금속광인 일광광산 일대이다. 위의 지점들에서 채취한 폐광산폐수에 함유된 중금속의 조성 및 농도, 폐수의 pH, 황산염 농도, CODcr 등을 파악한 결과, pH 3.1~7.3, 황산염 (SO_4^{2-}) 341~1,096 mg/l, 부유물질(SS) 1.0~1.5 mg/l의 범위였으며, CODcr은 없는 것으로 조사되었고, Fe 6.5~232.8 mg/l, Mn 1.0~17.9 mg/l, Zn 0.3~11.6 mg/l, Cd 0~10.2 mg/l, Pb 0.9~1.6 mg/l, Cu 0.1~7.6 mg/l, Cr 0.3~0.6 mg/l로 조사되어 석탄광산에 비해 금속광산 폐수 내에는 특정유해물질로 분류되는 카드뮴, 구리, 납, 아연 등의 중금속 함량이 각종 환경기준치를 훨씬 웃도는 농도를 나타내었을 뿐만 아니라 석탄광 폐수에 비해서도 월등하게 높은 수치를 나타내고 있는 것으로 조사되었다.⁸⁾ 따라서 연구에 사용될 인공 폐광산폐수는 금속광산 지역의 폐수 수질을 기준으로 하여 Table 1과 같이 제조하였다.

황산염 환원균의 활성에 미치는 온도의 경향 및 온도 변화에 따른 중금속 제거 특성을 조사하기 위해 운전온도를 35℃에서 30℃로 변화시켜 운전을 실시하였으며, 최적 COD/sulfate 비에서의 중금속 제거 특성을 조사하기 위해 AFMR 공정 운전동안 기질농도의 COD/sulfate 비를 0.3, 0.4, 0.5, 0.8이 되도록 조정하여 황산염 환원율을 조사하였다.

유출수 시료는 1시간 정도 침전시킨 후 상등액을 채취하여 0.2μm membrane filter로 여과시킨 후 Atomic Absorption Spectrophotometer(AA-680, Shimadzu)를 사용하여 중금속을 분석하였으며, SO_4^{2-} 는 Turbidometric method에 따라 정량하였고, CODcr 및 알칼리도는 Standard methods¹¹⁾에 준하여 분석하였다.

Table 1. Composition of the synthetic acid mine drainage used this study

	Components	Concentration (mg/l)
SO ₄ ²⁻	Na ₂ SO ₄	1,000
Fe	FeCl ₂ · nH ₂ O	250
Mn	MnCl ₂ · 4H ₂ O	20
Zn	ZnCl ₂	10
Cd	Cd(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	10
Pb	PbCl ₂	2
Cu	CuCl ₂ · 2H ₂ O	8
Cr	CrCl ₃ · 6H ₂ O	1
alkalinity (as CaCO ₃)	NaHCO ₃	1,000
Nutrient	NH ₄ Cl	170
	K ₂ HPO ₄	50
	KH ₂ PO ₄	50
	MgCl ₂ · 6H ₂ O	40
	KCl	50
Trace element	FeCl ₂ · nH ₂ O	2
	ZnCl ₂	0.05
	CuCl ₂ · 2H ₂ O	0.03
	MnCl ₂ · 4H ₂ O	0.5
	H ₃ BO ₃	0.05
	NiCl ₂ · 6H ₂ O	0.05
	CoCl ₂ · 6H ₂ O	0.05
Vitamin	Biotin	0.0312
	Cyanocobalamin	0.0016
	Folic acid	0.0312
	Nicotinic acid	0.08
	Ca-Pantothenate	0.08
	Pyridoxin-HCl	0.16
	Riboflavin	0.08
	Thiamin-HCl	0.08
pH	3.0	

3. 결과 및 고찰

3.1. 제거효율

불활성 부유여체로 충진된 신공정 혐기성 반응조 (Anaerobic Floating Media Reactor, AFMR)를

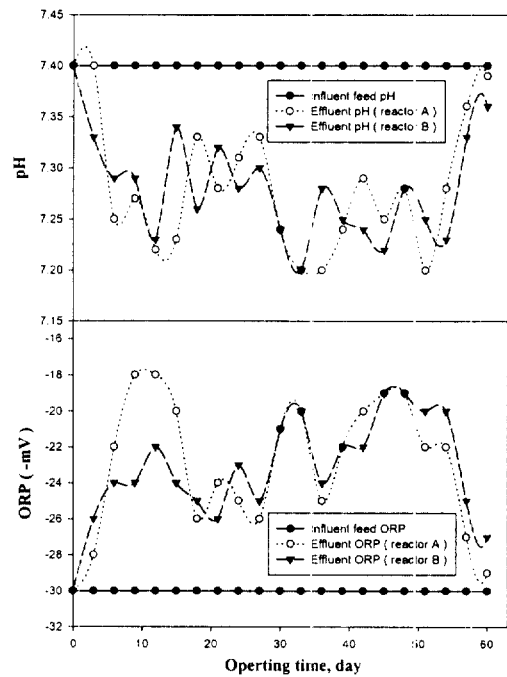
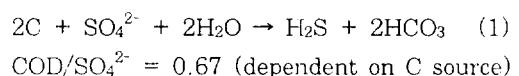


Fig. 2. pH and ORP value in AFMR.

이용하여 폐광산폐수 내에 존재하는 다양한 중금속을 제거하기 위한 반응조의 운전특성을 평가하기 위하여, 먼저 대상 폐수의 COD 농도는 glucose를 이용하여 500mg/l로 고정시킨 후, 황산염(SO₄²⁻)의 농도를 COD/SO₄²⁻의 비가 약 0.5에 해당하는 약 1000mg/l로 조정하고, 수리학적체류시간(HRT)은 3일, 운전온도 35℃에서 초기 운전을 시작하였다.

Fig. 2 와 Fig. 3은 운전 경과 시간에 따른 유입수 및 유출수의 pH, ORP, COD, 황산염(SO₄²⁻), 알칼리도 농도를 보여준다. 운전기간 동안 유출수 pH는 7.2~7.4, ORP는 -30~-18mV의 범위를 유지하였다. 반응 25일 후 COD 제거율과 황산염 제거율의 변화가 일정하게 유지되는 정상상태에 도달하였으며, 이 기간동안 COD농도는 평균 400mg/l의 제거를 보였고, 황산염(SO₄²⁻) 농도는 약 400 mg/l의 제거를 보여주었다. 황산염 환원균(SRB)에 의하여 황산염(SO₄²⁻) 1mg이 환원하는데 요구되는 이론적인 COD 값은 식 (1)에 의하면 약 0.67 mg이다.



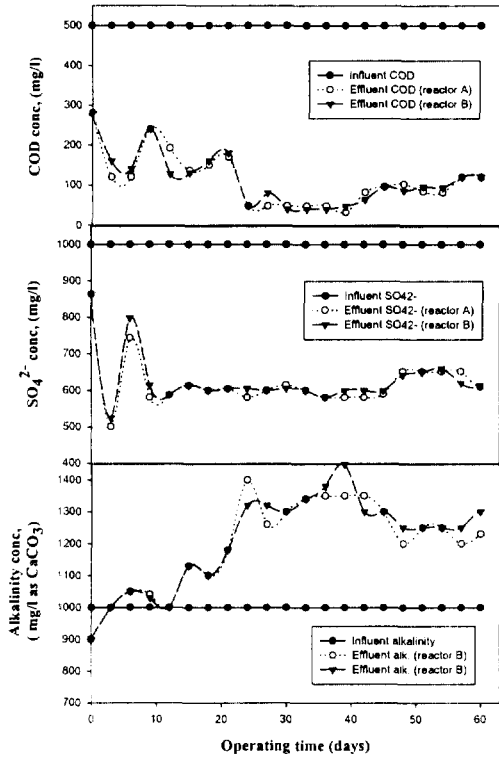


Fig. 3. COD and SO_4^{2-} and alkalinity concentration in AFMR.

황산염(SO_4^{2-}) 단위 mg을 환원하는데 필요한 COD mg 값은 사용된 탄소원과 반응조 시스템에 따라 0.7~1.5의 범위를 갖는다고 보고하고 있는데^{12,13)}, 탄소원으로 glucose를 사용한 본 반응조에서는 정상상태에서 이 값을 제산한 결과 황산염(SO_4^{2-}) 단위 mg을 환원하기 위해서는 약 1.0mg의 COD가 요구되는 결과 값을 보였으며, 이는 회분식 실험결과와도 일치하였다.⁸⁾

반응시간에 따른 반응조내의 알칼리도 변화를 살펴본 결과 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 반응조내의 알칼리도는 유입 알칼리도 보다 약 200~400 mg/l as $CaCO_3$ 정도 더 생성되는 것을 볼 수 있는데, 이는 황산염 환원균(SRB)이 황산염(SO_4^{2-})의 환원 과정에서 유기탄소원을 전자공여체로 이용하여 황화물(sulfide)로 전환시킬 때 탄산염(carbonate) 및 중탄산염(bicarbonate)의 생성에 기인된 것으로, 이렇게 생성된 탄산염 및 중탄산염은 반응조내의 완충능력을 증가시키는 효과를 가져온다.

운전시간에 따른 중금속 제거 변화를 측정한 결과

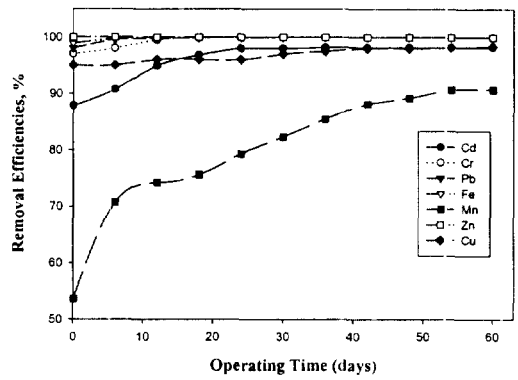


Fig. 4. Removal efficiencies of heavy metals in AFMR.

는 Fig. 4에 나타내었다. 혐기성 반응조의 연속운전이 가능하도록 $NaHCO_3$ 로 유입 알칼리도를 1000 mg/l를 맞추어 주는 과정에서 pH 상승에 따른 중금속의 화학적 결합에 의해 유입폐수내의 일부 중금속들이 수산화물 침전에 의해 제거되었으며, 유출수내 중금속은 반응 운전초기 약 6일 째에 급격히 농도가 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 중금속은 황산염 환원 과정에서 환원된 황화물과의 침전에 의해 제거되었으며, 반응 시간이 경과됨에 따라 Zn, Cr, Pb, Fe 등의 중금속은 99.99%의 제거율을 보였고, Cu 98%, Cd 98%, Mn 90%의 제거율을 보였다.

3.2. 운전온도

황산염 환원균에 의한 황산염 환원율은 온도에 의해 큰 영향을 받으며, 순수한 황산염 환원균이 성장하기 위한 최적 온도 조건인 28~32℃인 것으로 보고하였다.¹⁴⁾ 일반적으로 혐기성의 중온소화는 35℃에서 운전되고 있으며, 혐기성 반응에서 황산염 환원균과 메탄생성균의 유기물에 대한 경쟁이 이루어지고 있는 바, 메탄생성균의 과도 성장은 공급해주는 유기물의 소모를 가져오므로 본 공정에서는 바람직하지 않다. 따라서 운전온도를 35℃에서 30℃로 변화시켜 황산염 환원균의 활성에 미치는 온도의 영향 및 온도 변화에 따른 중금속 제거 특성을 조사하였다. 이때 공급되는 유기물은 glucose를 전자공여체로 이용하여 COD(as glucose)/sulfate 비를 0.5로 고정시켰다.

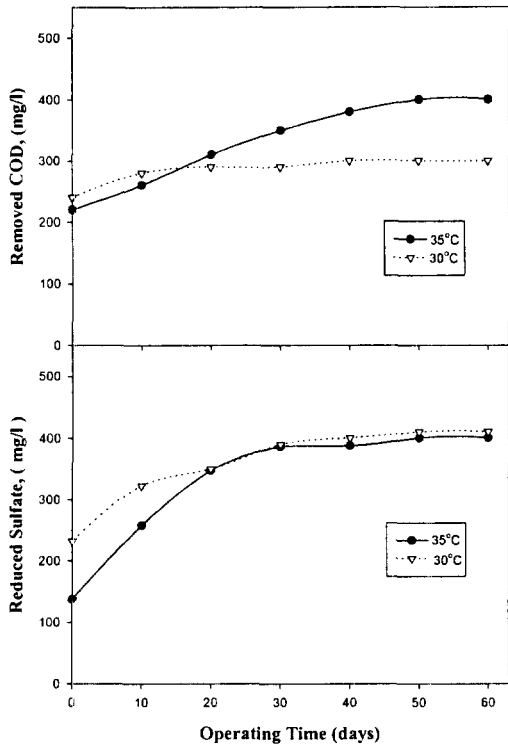


Fig. 5. Effect of temperature on removal of sulfate and COD in AFMR.

Fig. 5는 온도 변화에 따른 황산염(SO₄²⁻)농도 및 COD 농도를 보여주고 있다. 운전온도 35°C에서는 COD 제거 농도는 반응시간이 경과됨에 따라 직선적으로 증가함을 보이는 반면, 30°C일 경우에는 반응 20일 쯤부터 COD 제거량은 일정한 값을 보였다.

반응조의 운전 온도가 35°C일 때는 유입 COD 농도의 약 80% 정도가 황산염 환원균에 의해 400 mg/l의 황산염(SO₄²⁻)을 환원하는데 사용되었던 반면, 30°C일 때는 유입 COD 농도의 약 60% 정도만으로도 황산염 환원균에 의해 약 400 mg/l의 황산염(SO₄²⁻)을 환원하였다. 이 값은 운전 온도 변화에 따른 Reduced sulfate/Removed COD 값으로 비교하여 보면 35°C일 때의 Reduced sulfate/Removed COD 값이 약 1.0인 반면, 30°C일 때는 1.37의 값으로 나타났다. 이는 환원된 황산염 양에 있어서 차이를 보이지 않고 단지 제거된 COD 양이 줄어든 것으로 35°C에서 COD 제거에 메탄균이 높은 비율로 관여하고 있으며, 이러한 메탄균은 온도변화에 황산염 환원균 보다 민감한 것을 시사하고 있다.

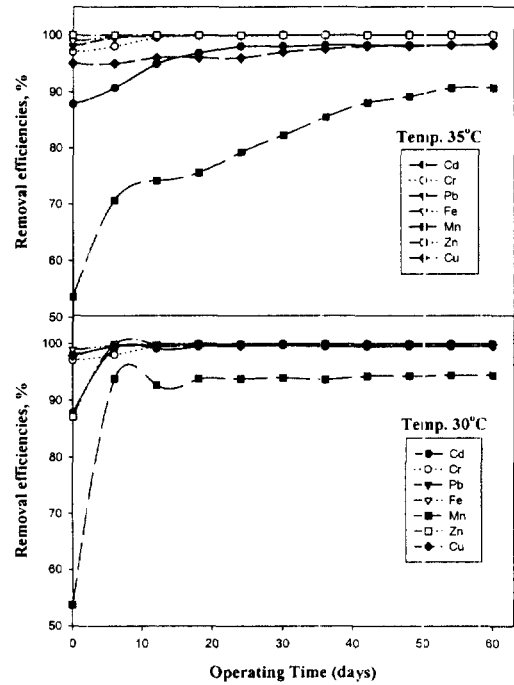


Fig. 6. Effect of temperature on removal efficiencies of heavy metals in AFMR.

Fig. 6은 이들 온도에서 중금속의 제거 경향을 보여 준다. 측정 대상 중금속들은 35°C와 30°C 모두 반응 초기에 급격히 농도가 감소하여 반응 6일째에 카드뮴 99.5%, 철 99.99%, 납 99.99%, 크롬 99.99%, 망간 94%, 아연 99.9%, 구리 99.9%의 높은 중금속 제거율을 보이는 것으로 나타났으며, 35°C일 때 보다는 30°C에서 더욱더 높은 중금속 제거율을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 실험 결과로 미루어 보아 황산염 환원율의 활성을 높이는 반면 경제적인 COD의 사용 효율성을 높이며, 중금속을 제거할 수 있는 온도는 30°C가 적합한 것으로 조사되었다.

3.3. COD/sulfate 비

COD/sulfate 비의 변화에 따른 황산염의 환원율을 비교 평가하고 폐광산폐수 처리를 위한 적정 탄소원의 주입량을 결정하는 한편, 최적 COD/sulfate 비에서의 중금속 제거 특성을 조사하기 위해 glucose를 전자공여체로 이용하여, 연속반응조 운전동안 기질농도의 COD/sulfate 비를 0.3, 0.4, 0.5, 0.8이 되도록 조정하여 황산염 환원율을 조사

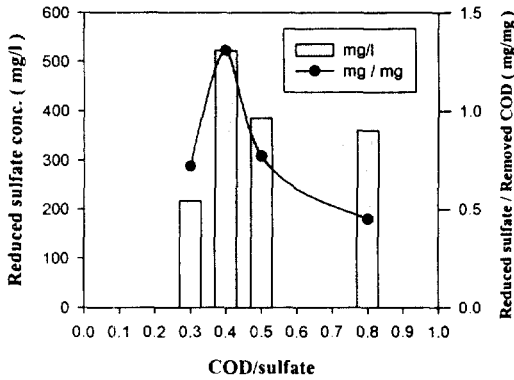


Fig. 7. Effect of COD/sulfate ratio on sulfate reduction during the continuous operation of AFMR.

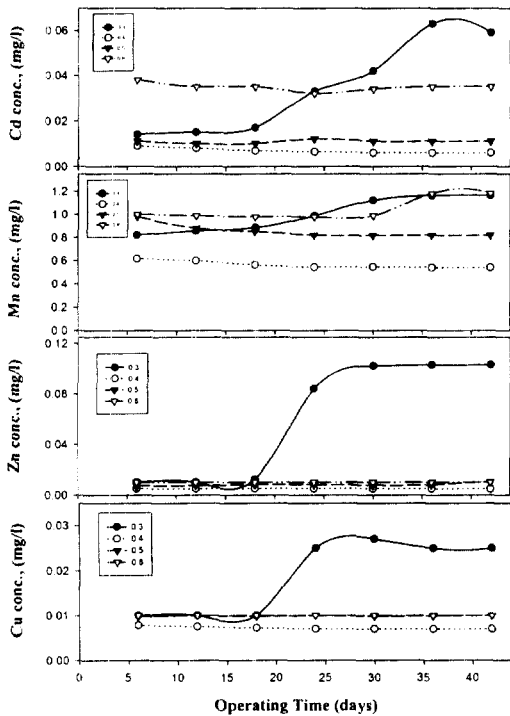


Fig. 8. Effect of COD/sulfate ratio on heavy metals removal.

하였다.

Fig. 7은 COD/SO₄²⁻비 변화에 따른 황산염 환원량을 비교한 그림으로서, 그림에서 보듯이 COD/SO₄²⁻비가 0.3에서 환원된 황산염(SO₄²⁻)량은 약 217 mg/l, 0.4에서는 522 mg/l, 0.5에서는 385 mg/l, 0.8에서는 360 mg/l의 황산염 환원량을 보

여 이중 COD/SO₄²⁻비 0.3일 때 217 mg/l로서 가장 낮은 황산염 환원율을 보이고 있었으며, 0.4일 때 522 mg/l의 가장 높은 황산염 환원율을 보이는 것으로 조사되어, COD/SO₄²⁻비가 0.4일 때가 COD/SO₄²⁻비 0.5에 비해 약 137 mg/l의 황산염(SO₄²⁻)이 더 환원되는 것으로 조사되었다.

한편, 탄소원 이용량에 대한 황산염 환원량을 비교하면, 그림에서 보듯이 COD mg당 황산염(SO₄²⁻) 환원량 mg은 COD/SO₄²⁻비가 0.3에서는 0.72, 0.4에서는 1.31, 0.5에서는 0.77, 0.8에서는 0.45의 값을 보이는 것으로 나타나 COD/SO₄²⁻비가 0.4일 때가 최저 유기물질 이용율로 최대의 황산염(SO₄²⁻) 환원율을 보이는 것으로 나타났으며, 이와 같은 결과로 미루어 볼 때 황산염의 농도가 1,000 mg/l를 최대로 환원되는데 필요한 COD/SO₄²⁻비는 0.4임을 알 수 있다.

Fig. 8은 COD/SO₄²⁻비의 변화에 따른 중금속 제거 경향을 보여준다. 실험결과 COD/SO₄²⁻비 0.3에서의 Cd 제거율은 94%, 0.4에서는 99.9%, 0.5에서는 99%, 0.8에서는 99%의 제거율을 보였으며, Mn 제거율은 COD/SO₄²⁻비 0.3에서 94.2%, 0.4에서는 97.3%, 0.5에서는 95.9%, 0.8에서는 94.1%의 Mn 제거율을 보였다. 또한 Zn 제거율은 COD/SO₄²⁻비 0.3에서는 99%, 0.4에서는 99.9%, 0.5에서는 99%, 0.8에서는 99%의 제거율을 보였으며, Cu 제거율은 COD/SO₄²⁻비 0.3에서 99.6%, 0.4에서는 99.9%, 0.5에서는 99%, 0.8에서는 99%의 Cu 제거율을 보여, COD/SO₄²⁻의 비가 0.4에서 모든 중금속 제거율이 가장 높게 나타났다.

4. 결 론

폐광산폐수내의 다량의 중금속과 고농도의 황산염(SO₄²⁻) 제거를 위해 AFMR 공정의 연속운전 실험을 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) AFMR 반응조는 황산염(SO₄²⁻) 단위 1mg이 환원되기 위해서는 약 1.0mg의 COD가 요구되는 결과를 보였으며, 이때 Zn, Cr, Pb, Fe 등의 중금속은 99.99%의 제거율을 보였고 Cu 98%, Cd 98%, Mn 90%의 제거율을 보

- 었다. 또한 반응조내의 알칼리도는 유입 알칼리도 보다 약 200~400mg/l as CaCO₃ 정도의 높은 값을 유지하였다.
- 2) 반응조 운전온도 변화에 따른 황산염 환원균의 활성을 조사한 결과, 35℃에서는 COD 1mg이 제거될 때 약 1mg의 황산염(SO₄²⁻)이 환원되는 것으로 나타났으며 반면, 30℃에서는 약 1.37mg의 황산염(SO₄²⁻)이 환원되는 것으로 나타나 COD의 사용 효율성을 높이며, 높은 중금속 제거율을 얻을 수 있는 온도는 30℃로 나타났다.
- 3) COD/SO₄²⁻비 0.3~0.8 범위에서 연속으로 운전되는 AFMR 반응조에서 황산염 환원율을 비교한 결과, COD/SO₄²⁻비가 0.3에서는 약 217 mg/l의 가장 낮은 황산염 환원율을 보였으며, 0.4일 때 522 mg/l로서 가장 높은 황산염 환원율을 보이는 것으로 나타나 황산염 농도가 1,000mg/l인 경우 황산염을 환원시키기 위한 경제적인 COD/SO₄²⁻비는 약 0.4로 조사되었다. 이때 유입되는 중금속은 Fe, Pb, Cr은 99.99%, Zn, Cd, Cu은 99.9%, Mn 97.3%의 높은 제거율을 보이는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구과제(과제번호 : 96-0601-07-01-3)의 지원에 의하여 수행되었습니다. 연구비를 지원해 주신 재단에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 석탄합리화 사업단, 폐광에 따른 광산지역 환경 개선 연구(폐수, 폐석), 기술업서 95-02, 석탄합리화사업단, pp. 5~8(1995).
- 대한지질학회, "폐광산 지역의 환경 보존 및 활용방안," 제12회 공동학술강연회 논문집, pp. 2~5(1996).
- Dean, John G., Roy, E. and Williams, Omar Shadid, "Removing heavy metals from wastewater," *Environ. Sci. Technol.*, **6**(6), 73~78(1972).
- Maruyama, T., Sidney, A. Hannah, and Jesse, M. Cohen, "Metal removal by physical and chemical treatment processes," *Journal WPCF*, **47**(5), 47~56(1975).
- Barnes, H. L. and Romberger, S. B., "Chemical aspects of acid mine drainage," *Journal WPCF*, **51**(1), 371~384(1968).
- Dvorak, D. H., Hedin, R. S., Edenborn, H. M. and P. E. McIntire, "Treatment of metal contaminated water using sulfate reduction: result from pilot-scale reactors," *Biotech. & Bioeng.*, **40**(5), 609~616(1992).
- Richard, E. Mclauslin, "Demonstration of an innovative heavy metals removal process," *Colorado State University Tailings and Mine Waste '96 Conference Proceedings*, pp. 443~450(1996).
- 박은화, 광산폐수의 중금속제거를 위한 혐기성 소화, 여수수산대학교 석사학위논문(1998).
- Christensen, B. M. Laake, and T. Lien., "Treatment of acid mine water by sulfate-reducing bacteria: result from a bench scale experiment," *Water Research*, **30**(7), 1617~1624(1996).
- Wijaya, S., Henderson, W. D., Bewtra, J. K. and Biswas, N., "Optimization of dissolved heavy metals removal using sulfate reducing bacteria," *Proceedings of the 48th Purdue Industrial Wastewater Conference*, pp. 469~481(1993).
- APHA-AWWA-WEF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th Edition, Washington, D.C. (1987).
- Anderson, G. K., Sanderson, J. A., Saw, C. B. and Donnelly, T., "Fate of COD in anaerobic system treating high sulfate bearing wastewater," in *Biotechnology for*

Degradation of Toxic Chemicals in Hazardous Wastes, Noyes Data Corporation, Park Ridge, NJ, p. 504(1988).

13. Choi, E. and Rim, J. M., "Competition and inhibition of sulfate reducers and methane producers in anaerobic treatment," *Water Sci. & Technol.*, **23**, 1259~1267(1991).
14. Oliver, J. Hao., Jin, M. Chen. and Robert, L. Buglass, "Sulfate-Reducing Bacteria," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **26**(1), 155~187(1996).