

## 혐기성처리를 위한 탄소원의 최적 혼합비율 결정에 관한 연구

김은호 · 장성호\*

동아대학교 환경공학과 · 밀양산업대학교 환경공학과 \*

## A study on determining the optimum mixing ratio of carbon source for anaerobic treatment

Eun-Ho Kim · Seong-Ho Jang\*

*Dept. of Environmental Engineering, Dong-A University*

*\* Dep. of Environmental Engineering, Milyang National University*

### Abstract

The purpose of this study were to determine the optimum mixing ratio of sewage sludge and papermill sludge as carbon source required to SRB in treating abandoned mine drainage with natural purification wetland.

If mixing sewage sludge/papermill sludge 2.0,  $\text{SO}_4^{2-}$  reduced 46.2%, and then 30% in mixing ratio 0.5.

Because sewage sludge was faster biodegradability than papermill sludge, effluent SCOD was 40mg/L in mixing ratio 0.5, and after that was all but regular. pH and ORP were almost neutral and -160mV, but after that was all but regular and it indicated that SRB activity was suitable. Fe removal rate was 60% in mixing ratio 2.0, and 54% in mixing ratio 0.5. In point of carbon source supply, It indicated that mixing ratio 0.5 was considered as the most appropriate, because degradability of sewage sludge under short time was higher than that of papermill sludge.

### I. 서 론

주유종탄(主油從炭)의 연료정책 전환, 인건비 상승, 저렴한 가격의 광산물 수입, 열악한 작업환경의 기피 그리고 산업 및 사회구조의 변화에 따른 경제적 여건변화 등으로 인하여 전국적으로 산악지대에 산재했던 석탄광을 위시한 광산들이 휴·폐광되면서 이들 폐광산지대에서 발생되는 폐광산 폐수는 오늘날 수자원 관리의 중요한 과제가 되고 있는 실정이다<sup>1)</sup>.

폐광산폐수는 대부분이 쟁내에서 유출되는 지하수에서 비롯되어 폐광산내에 유입된 산소와 물에 의하여 광상의 산화로 발전되어 강산성의 수질을 유지하게 된다<sup>2)</sup>. 이들은 다시 폐광산내의 철분을 비롯한 각종 중금속을 용해시켜 고농도의 철분과  $\text{SO}_4^{2-}$ 를 함유하는 소위 Yellow boy 현상<sup>3)</sup>을 만들어 지표로 유출되면서 하류의 생태계에 막대한 악영향을 끼칠 뿐만 아니라 pH와 유기물 농도가 낮은 특성을 지니고 있다.

외국의 경우에도 이와같은 사례가 많이 발생하

고 있는데, 특히 독일의 Ruhr과 Emscher 지역 등 전통적인 폐광산지역에서는 지반침하 및 폐광산폐수에 의한 수질오염 등으로 인해 이미 1900년초부터 특별법에 의하여 이를 지역의 수자원문제가 특별관리되고 있다<sup>4)</sup>.

미국에서는 1956년 Georgius Agricola에 의하여 최초로 폐광산폐수로 인한 환경영향이 기록된 이후에 1978년에 다양한 법규를 마련하여 Interagency Agreement Management Committee에 의하여 관리되고 있으며 폐광산폐수에 의한 환경문제를 저감하기 위하여 많은 연구가 수행중에 있다<sup>5)</sup>.

폐광산폐수의 처리에 있어서 물리·화학적 방법은 동력비, 시설비, 유지비 및 인건비 등이 많이 소요되는 단점을 지니고 있는 반면에 생물학적인 방법인 황산염환원균(Sulfate reducing bacteria : 이하 SRB)에 의한 소택지(Wetland)에 의한 처리는 무동력 무인력 방식(자연정화방식)으로써 유지관리비가 거의 들지 않으며 그 처리효과가 약 20년 지속 된다는 점 때문에 선진국(미국)에서 상당히 각광 받고 있다<sup>6)</sup>.

그러나, 소택지는 일반적으로 지형이나 여러 여건을 미루어 보아 자연정화방식으로의 지속성이 유기물의 반응정도 및 조건 등에 따라서 분해율이 달라질 것이므로 충진되어진 유기물의 지속성이 무엇보다도 중요하다<sup>1)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 초기에 분해용이성 하수슬러지로부터 유기물을 공급받고 그 이후에는 제지슬러지로부터 지속적인 유기물을 공급받도록 함으로서 장기적인 SRB 반응조의 운전이 가능할 것으로 여겨져 하수슬러지와 제지슬러지의 다양한 혼합비율에서 SRB의 탄소원으로서 그 효능성을 평가한 후에 최적 혼합비율을 도출하고자 한다.

## II. 실험방법

### 1. 폐광산폐수의 특성

본 연구에서 사용된 폐광산폐수의 성상은 Table 1에 나타난 바와 같이 pH는 평균 3.2로 강산성이고 TCOD는 평균 19mg/L이며 SCOD는 평균 17mg/L로서 비교적 낮은 농도를 나타내었으나  $\text{SO}_4^{2-}$ 는 평균 2,301mg/L로 상당히 높으며 FeTotal

Table 1. Characteristics of coal mine drainage.

Item	Division	Range(Average)
Temp.(°C)		11~21(16)
pH(-)		2.8~3.6(3.2)
TCOD(mg/L)		4~34(19)
SCOD(mg/L)		2~32(17)
$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)		1,994~2,608(2,301)
FeTotal(mg/L)		226.6~502.4(364.5)

또한 평균 364.5mg/L으로 아주 높은 농도를 나타내었다.

### 2. 주입탄소원의 특성

Table 2에서는 하수슬러지와 제지슬러지의 특성을 보여주고 있다. pH는 모두 슬러지 탈수시 사용되는 소석회 등의 영향으로 알칼리성을 유지하였다. 하수슬러지와 제지슬러지의 TS는 21.7%와 42.5%로서 제지슬러지에서 약 2배정도 높으며 TS 중 VS 함유량은 모두 40%를 나타내었다.

유기물(TCOD 기준)의 경우에는 하수슬러지 9.33g/100g, 제지슬러지 17g/100g으로 하수슬러지에서 가장 적게 나타났다. 하수슬러지와 제지슬러지내 함유되어 Fe의 농도를 보면 각각 1.3mg/L와 0.07mg/L로 탄소원으로서 슬러지 재활용으로 인한 2차적인 오염문제는 유발되지 않을 것으로 평가되었다.

Table 2. Properties of Sewage and Papermill.

Item	Sludge	Sewage	Papermill
pH(-)		8.17	7.9
Moisture(%)		78.3	57.5
TS(%)		21.7	42.5
VS(% of TS)		40	40
TCOD(g/100g)		9.33	17
$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/L)		125.9	314
Fe(mg/L)		1.3	0.07

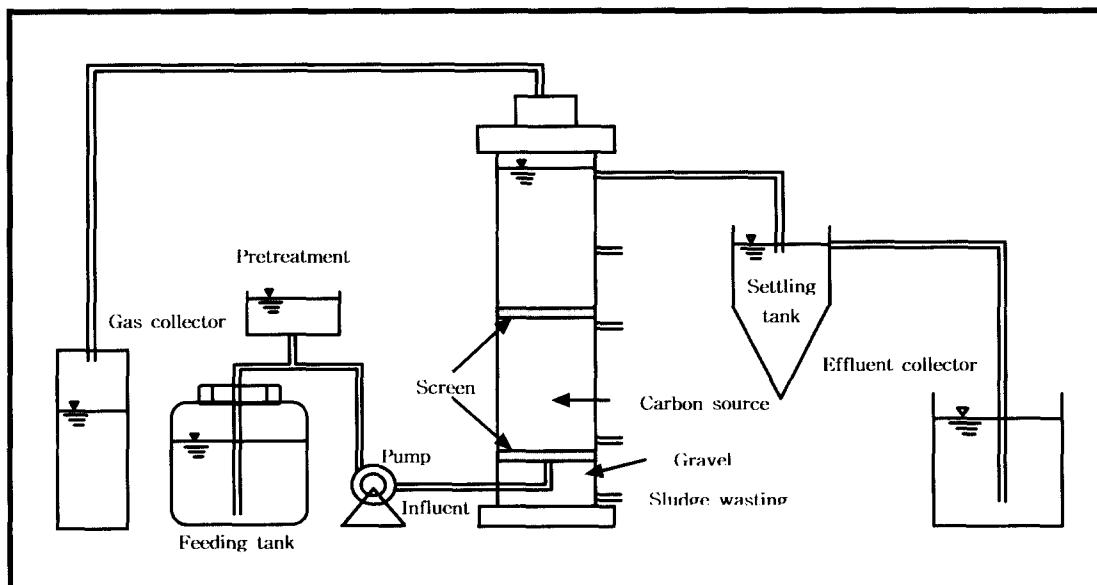


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for the treatment of abandoned mine drainage using SRB.

### 3. 실험장치 및 방법

SRB을 이용한 폐광산폐수의 처리실험에서 사용된 실험장치는 Fig. 1에서 보여주는 바와 같이 높이 100cm, 직경 11cm의 아크릴로 제작되었으며 총용량은 9.5L(유효용량 9L)였다.

반응조 내부에는 유입수의 단류화를 방지하기 위하여 하단으로부터 25cm 간격으로 테프론으로 제작된 다공성 유량분배기를 설치하였다. 반응조 상단부에는 생성가스( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  및  $\text{H}_2\text{S}$  등)의 포집을 위하여 용량 3.5L의 수위변위식 가스포집기와 연결하였다. 반응조 외부에는 태양광선에 의한 조류의 변식 및 이로 인한 산소의 생성과 알칼리도 상승문제를 방지하기 위하여 차광재를 부착하였다. SRB의 생육에 적합한 pH 유지와 현장 소태지에서 pH 상승을 위하여 사용되고 있는 석회석에 의한 전처리를 위하여 유입부 전단에 입경 4.76 mm인 석회석을 2kg 충진한 반응조를 설치하였다.

또한, SRB 반응조의 하단에 자갈을 약 5cm 정도 충진하였으며 자갈층 상부에 실험목적에 따라 하수슬러지와 제지슬러지를 적절한 혼합비율로 충진함으로서 SRB의 탄소원으로 활용하도록 하였다.

반응조에는 Table 3에 나타난 바와 같은 조건으

Table 3. Operating conditions of reactor

Reactor	Mixing ratio	Packing material & amount(kg)
R 1	0.0	Sewage(-) + Papermill(2.0)
R 2	0.5	Sewage(0.67) + Papermill(1.33)
R 3	1.0	Sewage(1.0) + Papermill(1.0)
R-4	2.0	Sewage(1.33) + Papermill(0.67)

로 제지슬러지에 대한 하수슬러지의 비율을 각각 0.0, 1.0, 0.5 및 2.0으로 혼합하여 충진하였으며 그 다음에 초기운전을 위하여 pH 7.3, TS 1.9% 및 TS 중 VS 함유량 35%인 협기성 소화슬러지를 1,000mL 석종하였다.

석종된 반응조는 밀봉하여 3~4일 방지한 후에 정량펌프를 이용하여 폐광산폐수를 각 반응조에 6.5L 주입하여 1개월 동안에 순응시켰다.

실험이 진행되는 약 100일 동안에 반응조의 운전온도는 14°C를 유지하였으며 HRT 또한 정량펌프를 이용하여 유입수 유량을 조절하는 방법으로 2일로 유지하였다.

분석항목은 pH, ORP, COD,  $\text{SO}_4^{2-}$  및 중금속이

며 환경오염공정시험법<sup>7)</sup>과 Standard methods<sup>8)</sup>에 준하여 주 3회 분석을 원칙으로 하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. $\text{SO}_4^{2-}$ 환원

$\text{SO}_4^{2-}$  환원의 지속성은 폐광산폐수내 중금속 성분의 정화기간을 의미하므로 소택지 설계시 무엇보다도 중요한 인자이다<sup>1)</sup>.

Fig. 2는 제지슬러지에 대한 하수슬러지의 혼합비율을 0.0, 0.5, 1.0 및 2.0으로 충진한 반응조에서  $\text{SO}_4^{2-}$  환원 특성을 보여주고 있다.

반응조내  $\text{SO}_4^{2-}$  유입량은 4.55g/d로서 동일하지만  $\text{SO}_4^{2-}$  환원율은 제지슬러지만 충진한 반응조에서는 24.2%에 불과하였으나 하수슬러지의 혼합비율이 0.5, 1.0 및 2.0으로 증가함에 따라 30%, 26.2% 및 46.2%로 점차 증가하는 경향을 보였다.

그러나, 하수슬러지의 혼합비율이 0.5 및 1.0일 때는 생분해도가 큰 하수슬러지 혼합의 뚜렷한 영향을 발견할 수 없었지만 혼합비율 0.5에서 다소 높은  $\text{SO}_4^{2-}$  환원율을 보였으며 하수슬러지의 혼합비율이 2.0으로 증가하였을 때는 최대 값을 보였다. 김<sup>9)</sup>에 의하면 하수슬러지는 제지슬러지에 비하여 분해가 활발하게 진행되어 SRB이 성장에 필요한 탄소원을 보다 용이하게 제공할 수 있기 때문

에  $\text{SO}_4^{2-}$  환원율이 높았다고 보고하였다. 그러나, 이<sup>10)</sup>는 하수슬러지는 탄소량이 적기 때문에 미생물원의 활성유지에 필요한 탄소원의 지속성과 공급에 문제가 있을 것으로 판단한 반면에 분해가 느린 제지슬러지와 적절하게 혼합하여 사용할 경우에 보다 더 안정적일 것으로 여겨진다고 보고되고 있다.

따라서, 탄소원의 공급과 지속성 측면에서 최적 혼합비율은 초기 분해가 쉬운 하수슬러지에 비하여 분해가 느린 제지슬러지가 2배 많이 충진된 혼합비율 0.5가 적절한 것으로 평가되었다.

#### 2. SCOD 변화

Fig. 3은 제지슬러지에 대한 하수슬러지의 혼합비율을 0.0, 0.5, 1.0 및 2.0으로 충진한 반응조에서 SCOD 변화특성을 보여주고 있다.

모든 반응조 유입 SCOD는 약 3.8mg/L 정도로 아주 낮았으나 SRB에 의한 폐광산폐수의 혐기성 처리시 외부 탄소원의 공급이 절대적으로 필요한 것으로 여겨진다. 따라서, 하수슬러지와 제지슬러지를 0.0, 0.5, 1.0 및 2.0의 비율로 혼합·충진한 경우에 유출 SCOD는 약 25mg/L, 40mg/L, 42mg/L 및 39mg/L 정도를 나타내었다.

그러나, 제지슬러지에 대한 하수슬러지의 혼합비율 0.0에서 0.5를 증가함에 따라 유출 SCOD 또

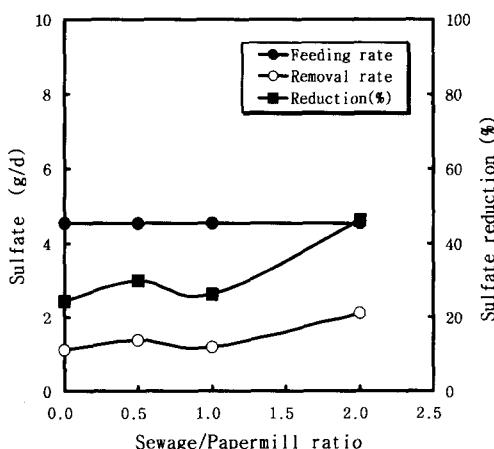


Fig. 2. Variation of  $\text{SO}_4^{2-}$  reduction according to Sewage/Papermill ratio.

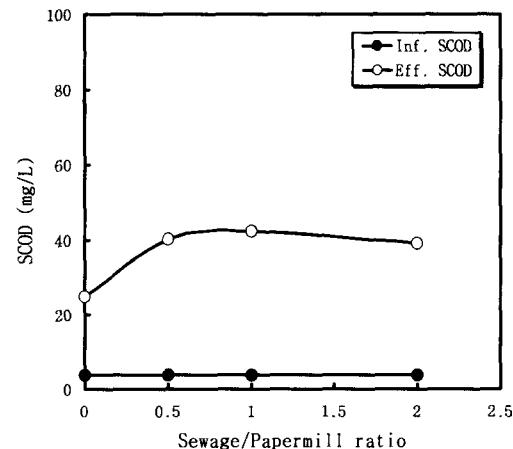


Fig. 3. Variation of SCOD according to Sewage/Papermill ratio.

한 증가하였으나 그 이후 혼합비율 0.5 이상에서는 약 40mg/L 정도로 거의 일정한 값을 나타내고 있다. 이것은 제지슬러지에 비해 하수슬러지의 큰 생분해도와 Table 2의 충진물의 특성에서 알 수 있듯이 높은 N 함유량에 기인한 pH 등의 SRB 생육환경 개선에 대한 기여도의 복합적인 영향으로부터 비롯되었다는 것을 의미한다.

### 3. pH와 알칼리도 변화

Fig. 4은 제지슬러지에 대한 하수슬러지의 혼합비율 0.0, 0.5, 1.0 및 2.0으로 충진한 반응조에서 pH와 알칼리도의 변화특성을 보여주고 있다.

유입수 pH는 4.51로 일정하였으나 유출수 pH는 제지슬러지에 대한 하수슬러지의 혼합비율이 0.0에서 2.0까지 증가함에 따라 6.2에서 SRB의 생육을 위한 최적조건에 가까운 7까지 증가하는 경향을 보였다. 유출 알칼리도 또한 유출 pH와 거의 유사하게 증가하는 경향을 보여주고 있다.

일반적으로  $\text{SO}_4^{2-}$  1mole이 환원될 때 알칼리도 2mole이 생성되는 것으로 알려지고 있으며<sup>11)</sup> 하수슬러지의 혼합비율 증가에 따른 pH 및 알칼리도의 증가는 Fig. 2에서 보여주는  $\text{SO}_4^{2-}$  환원율의 증가와 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있다.

한편, 오<sup>11)</sup>에 의하면 유기성 폐기물의 분해시 유기산 생성균의 활성이 저하되지 않고 활발한 분해작용이 진행되어 낮은 pH를 유지하였다고 하였으나 본 연구에서는 오히려 약알칼리성을 유지하고 있다. 이러한 이유는 하수슬러지와 제지슬러지는 탈수시 사용된 탈수제, 즉 소석회 또는 보조응집제 등의 영향으로 pH 8정도의 알칼리성이었던 충진물의 특성<sup>12)</sup>과 유기성 슬러지의 유기산 생성균에 의한 분해에 의하여 생성된 유기산 등의 영향으로 낮아진 pH가 서로 상쇄작용을 하였기 때문으로 여겨진다.

### 4. ORP 변화

Fig. 5는 제지슬러지에 대한 하수슬러지의 혼합비율 0.0, 0.5, 1.0 및 2.0으로 충진한 반응조에서 ORP 변화특성을 보여주고 있다.

협기성 처리에 있어서 SRB는 ORP의 저하, 즉 협기도의 유지에 중요한 역할을 담당하고 있다<sup>11)</sup>.

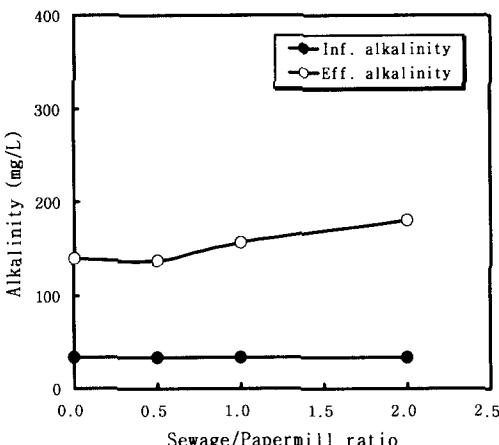
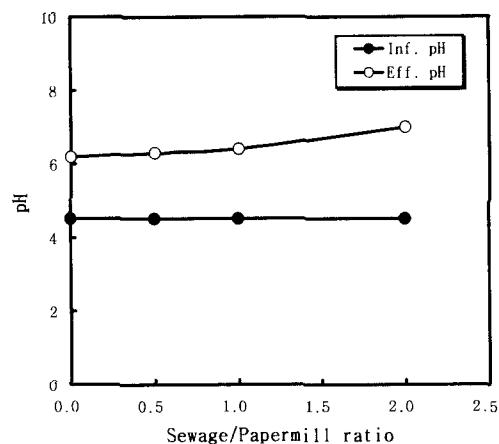


Fig. 4. Variation of pH and alkalinity according to Sewage/Papermill ratio.

혼합비율에 관계없이 ORP -150mV에서 -160mV를 유지하고 있는 것을 알 수 있다. 이 결과는  $\text{SO}_4^{2-}$  이 풍부한 환경에서 SRB의 활동이 활발하게 진행되고 있음을 의미하며 SRB에 의하여 생성된 황화물이 반응조내의 ORP를 낮게 유지시키고 있기 때문으로 여겨진다.

오<sup>11)</sup>에 의하면 SRB를 이용한 유기성 폐기물의 분해시 ORP는 강한 환원성 조건인 -150~ -300 mV의 범위를 유지하면서 비교적 안정적인 형태를 보였다고 한다. 또한, Jon H. Tuttle 등<sup>13)</sup>은 이화적 SRB는 -150~-200mV의 ORP를 필요로 한다고 한다.

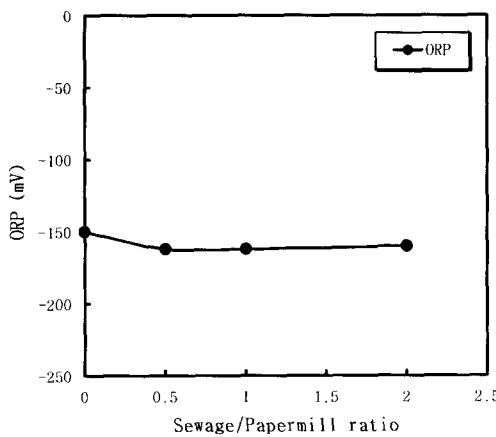


Fig. 5. Variation of ORP according to Sewage/Papermill ratio.

이<sup>10)</sup>는 인공소택지에서 우분을 탄소원으로 이용하여 HRT 2.5~3일로 운전한 결과, ORP는 약 -200mV 정도의 안정적으로 유지하였다고 한다.

이상의 결과에 의하면 제지슬러지에 대한 하수슬러지를 0.0, 0.5, 1.0 및 2.0의 비율로 혼합한 반응조 모두  $\text{SO}_4^{2-}$  환원반응이 일어날 수 있는 혐기성 환경을 유지하고 있어 SRB의 탄소원으로서 활용 가능한 것으로 여겨지만 혼합비율 0.5 이상에서는 거의 비슷한 ORP를 유지하고 있다.

## 5. Fe 제거율

Fig. 6은 세지슬러지에 대한 하수슬러지의 혼합비율을 0.0, 0.5, 1.0 및 2.0으로 충진한 반응조에서 폐광산폐수중에 고농도로 존재하는 Fe 제거 특성을 보여주고 있다. 이때 Fe 유입량은 약 0.746g/d 정도이었으며 Fe제거율은 각각 약 51%, 54%, 54% 및 60% 정도이며 Fe제거량은 각각 약 0.38g/d, 0.4g/d, 0.4g/d 및 0.45g/d 정도를 나타내었다.

Wagner, J. R.<sup>14)</sup>와 Hedin, R. S.<sup>15)</sup>에 의하면 각각 HRT 5day과 3day로 SRB에 의한 폐광산폐수 처리시 Fe 제거효율은 각각 68%와 100%에 가까웠다고 하지만 본 연구에서 적용한 HRT 2day에 비하여 길었기 때문에 Fe 제거효율이 높았던 것으로 보여진다.

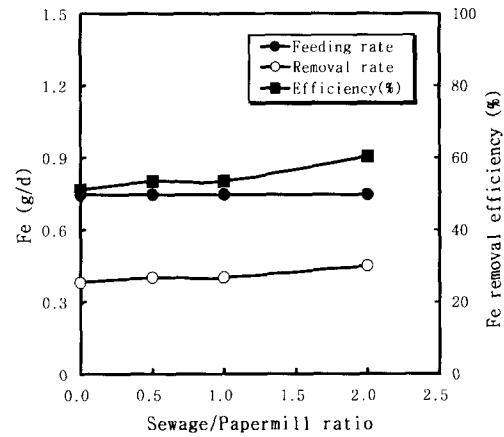


Fig. 6. Removal rate of Fe according to Sewage/Papermill ratio.

이상의 결과를 미루어볼 때, 제지슬러지 보다 유기물 분해성이 빠른 하수슬러지를 2배 많이 충진한 혼합비율 2.0에서  $\text{SO}_4^{2-}$  환원반응이 활발하게 일어나 중금속 제거율 또한 높게 나타났다. 그러나, BOD성 유기물인 하수슬러지가 COD성 유기물인 제지슬러지에 비하여 많아 갑작스런 BOD성 유기물의 분해로 유기물의 지속성 측면에서 그다지 적절한 혼합비율은 아닌 것으로 여겨진다.

오히려  $\text{SO}_4^{2-}$  환원량과 중금속 제거율을 고려한다면 혼합비율 2에 비하여 낮지만 유기물의 지속성 측면에서 혼합비율 0.5가 더 적합한 것으로 여겨진다.

## 6. 물질수지

본 연구에서는 SRB 반응조에서 충진 탄소원에 대한 물질수지를 구하기 위하여 탄소원의 유출율 및 소모율은 유출수에 함유되어 배출되는 유출율, 가스 전환율 및  $\text{SO}_4^{2-}$  환원에 의한 소모율의 합으로 산정하였으며, 반응조내 탄소원의 유입율은 초기 충진량과 유입폐수에 의한 유입율의 합으로서 구하였다.

이론적으로 화학양론식에서 SRB의 에너지 생성 과정에  $\text{CH}_3\text{COOH}$  1g이 산화될 때  $\text{SO}_4^{2-}$  1.6252g이 환원되며 황화물(as S) 0.53g이 생성된다<sup>16)</sup>.

따라서,  $\text{SO}_4^{2-}$  환원량에 대응하는 COD 소모량은

Table 4. Mass balance in reactor based on TCOD after experiment.

Item		Organic material(g)								remained
		inf.	packed	total	consumption					
Reactor	Mixing ratio				eff.	sulfate reduction	gas	total	rate(%)	
R-1	0.0	1.98	340.0	341.98	21.96	30.57	5.19	57.72	16.88	284.26
R-2	0.5	1.98	244.0	245.98	11.9	9.62	1.32	22.84	9.29	223.14
R-3	1.0	1.98	263.3	265.28	13.73	10.85	1.48	26.06	9.82	239.22
R-4	2.0	1.98	277.4	279.38	16.6	18.29	5.6	40.49	14.5	238.89

CH<sub>3</sub>COOH를 기준으로하여 COD 1g을 제거하는데 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>은 1.45g이 환원된 것으로 계산하였다<sup>11</sup>.

Table 4는 실험종료후에 각 반응조에서 구한 탄소원(TCOD)의 물질수지를 나타내고 있다.

제지슬러지만 충진한 R-1의 경우에는 반응조내 총유기물량은 340g이었으며 이중에 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 환원에 의하여 소모되는 양은 30.57%이고 유출에 의한 소모량은 21.96%이며 가스전환량은 5.19%로서 아주 적었으며 잔존 유기물량은 284.26g이였다. 이것은 제지슬러지는 유기물의 분해가 느릴 뿐만 아니라 충진물내 유기물량 또한 많아 그 지속성을 길 것으로 여겨지지만 초기 유기물의 공급문제가 대부분 될 것으로 여겨진다.

또한, R-4는 혼합비율이 R-2와 R-3에 비하여 유기물이 활발하게 분해되면서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 환원에 의한 소모량과 가스전환량이 많음에도 불구하고 유출에 의한 소모량 또한 많아 그 지속성이 문제시되며 적합한 혼합비율은 아닌 것으로 여겨진다.

오히려 초기 유기물의 공급이나 지속성 측면에서 볼 때 하수슬러지에 비하여 제지슬러지의 혼합비율이 2배 많은 R-2가 보다 더 적합한 혼합비율로 평가되었다.

이상의 결과를 미루어볼 때, SRB의 성장에 필요한 탄소원으로서 하수슬러지의 경우에는 쉽게 분해되면서 탄소원의 공급이 용이한 것으로 평가되었다. 그러나, 그 지속성이 짧은 단점이 있지만 제지슬러지는 지속성 보다 초기에 탄소원 공급능력이 문제시되었다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 하수슬러지와 제지슬러지를 적절한 비율로 혼합하여 SRB를 위한 탄소원으로서 그 효능성을 평가한 후에 최적 혼합비율을 도출한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 제지슬러지에 대한 하수슬러지의 혼합비율 2.0 일 때 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 환원율은 46.2%로 가장 효율적이었으며 그 다음에 혼합비율 0.5에서 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 환원율은 30%이었다.
- 제지슬러지에 비하여 하수슬러지의 큰 생분해도로 인해 혼합비율 0.5에서 유출 SCOD는 40mg/L을 나타내었으며 그 이후에는 거의 일정하였다.
- 혼합비율 0.5에서 pH와 ORP는 거의 중성과 -160mV를 유지하면서 그 이후에는 거의 일정하였으며 SRB의 생육을 위하여 적합한 것으로 평가되었다.
- Fe 세거율 또한 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 환원율이 높은 혼합비율 2.0에서 가장 높은 60%이었으나 혼합비율 0.5에서 54%를 나타내었다.
- 탄소원의 공급과 지속성 측면에서 하수슬러지에 비하여 제지슬러지의 혼합비율이 2배 많은 0.5 가 보다 더 적합한 것으로 평가되었다.

## 참 고 문 헌

1. 김은호 : 폐광산폐수의 혼기성 처리, 동아대학교 대학원 공학박사학위논문, 1998.
2. 임재명 : 생물학적 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 환원을 이용한 금속 광산 쟁내수의 중금속 제거, J. KSWQ, Vol. 11, No. 2, 77~85, 1995.
3. 성낙창 : Sludge 재활용을 통한 실험실내에서 폐탄광폐수의 처리에 관한 연구, 대한환경공학회지, 추계학술발표대회, 1997.
4. Walter Geller : Sulfur acidic lakes in Germany : what has to be done?, Poster presentation at american society for surface mining and reclamation, Knoxville, TN, 1996.
5. Schupe, M. W : Interagency agreement committee meeting in Butte, Montana, Mine waste camp '94, Butte, Montana, USA, 1994.
6. Frank T. Caruccio : Acid mine drainage : The problem and its solutions, International land reclamation and mine drainage conference and third international conference on the abatement of acidic drainage, workshop 5, 1994.
7. 환경부고시 1991-97호 : 환경오염공정시험법, 1991.
8. Standard method for examination of water and wastewater, 18th edition, USA. Public health association, Washington, D. C., 1992.
9. 김 철 : 슬러지 재활용을 통한 폐탄광폐수의 처리에 관한 기초연구, J. KSWQ, Vol. 14, No. 3, 367~374, 1998.
10. 이성택 : 중금속 함유폐수의 처리 및 회수기술 개발, 환경부, 1차년도 보고서, 1997.
11. 오태선 : 황산염환원균을 이용한 유기성 폐기물의 분해특성에 관한 연구, 전북대학교 대학원 토폭공학과 박사학위논문, 1998.
12. 김은호 : 산업폐기물 용출시험의 문제점 및 개선방안에 관한 연구, 한국폐기물학회지, 제 13 권, 제 6호, 776, 1996.
13. Jon H. Tuttle : Microbial sulfate reduction and its potential utility as an acid mine water pollution abatement procedure, Applied microbiology, Vol. 17, No. 2, 297~302, 1969.
14. Wagner, J. R. : Metal removal in wetland treatment systems, International land reclamation and mine drainage conference and third international conference on the abatement of acidic drainage, volume 1 of 4 : mine drainage, 80~88, 1994.
15. Hedin, R. S. : Passive treatment of coal mine drainage, Bureau of Mine IC 9389, Bureau of mines, U. S. Department of Interior, 35~37, 1994.