

## 전자선으로 처리한 하수슬러지의 특성연구

신경숙 · 강 호 · 방기연\*

충남대학교 환경공학과  
\*충남대학교 환경문제연구소

(2000년 1월 6일 접수, 2000년 4월 6일 채택)

## Physico-Chemical Characteristics of Sewage Sludge under Electron Beam Irradiation

Kyung-sook Shin · Ho Kang · Ky-youn Bang\*

*Dept. of Environ. Eng., Chungnam National University*

*\*Institute of Environmental Science & Technology, Chungnam National University*

### ABSTRACT

This study was carried out to define the effect of electron beam irradiation on the physico-chemical characteristics of sewage sludges. The experimental evidence showed that both pH and alkalinity of irradiated sludge were generally increased as the dose of irradiation increased. It was found that the soluble protein concentration (SPC) and soluble chemical oxygen demand (SCOD) from the sludge right after electron beam irradiation at 3kGy(kilo-joule/kg) increased 2.2 times and 10 times respectively more than those sludges without electron beam treatment. This highly solubilized organics could be resulted in a good soluble substrate for the subsequent anaerobic digestion process. The specific resistance of filtration (SRF) tests showed that sludge dewaterability under electron beam irradiation at 6kGy was found to be 8.8 times higher than that of unirradiated sludge. The sludge dewaterability seemed to be directly related to the dosage of electron beam irradiation up to 10kGy. However, the efficiency of sludge dewaterability tended to be smaller with higher applied irradiation dose. In comparing treatments by different inorganic chemical conditioner with irradiated and unirradiated sludges, it appeared that the dewaterability with irradiated sludge was approximately 4~10 times better than that of unirradiated sludge. Even electron beam treatment itself could replace the result from the sludge conditioned with inorganic chemical coagulants.

---

Key Words : Sewage Sludge, Electron Beam, Soluble Protein, Specific Resistance of Filtration

## 요 약 문

연간 발생량이 1,563천톤에 달하는 하수슬러지의 효율적인 감량화 및 안정화를 위하여 전자선조사시의 물리·화학적 특성변화를 살펴보고 탈수에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다. 슬러지에 3~20kGy의 전자선을 조사한 경우, pH와 알칼리도는 증가하는 양상을 띠었으며, 3kGy 조사시 용존단백질농도는 2.2배, SCOD는 10배 이상 증가하여 후속처리로 혐기성소화와 연계시 양질의 기질을 제공할 수 있어 전처리로서의 효과가 매우 우수함을 알 수 있었다. 여과비저항을 통해 살펴본 슬러지의 탈수성은 소화슬러지에 6kGy의 전자선을 조사한 경우 원슬러지에 비해 8.8배 가량 향상되었으며, 동일조건에서 화학개량한 경우에도 전자선을 조사한 슬러지의 탈수성이 4~10배 우수한 것으로 나타났다. 또한 여과비저항 측면에서만 볼 때 전자선조사만으로도 무기용집제를 통한 개량효과를 대체할 수 있는 것으로 조사되어 슬러지의 탈수성향상에 있어 전자선조사가 매우 효과적인 것으로 나타났다.

주제어 : 하수슬러지, 전자빔, 용존단백질, 여과비저항

## 1. 서 론

1998년말 슬러지발생량은 연간 1,563천톤에 달하며 이는 하루 3,756톤이 발생하는 것으로 하수처리장의 설치 및 증설에 따라 2001년에는 슬러지 케익이 21,729m<sup>3</sup>/day, 2011년도에는 24,329m<sup>3</sup>/day가 발생할 것으로 예상된다. 이와 같은 막대한 양의 슬러지를 효과적으로 처리 또는 처분하기 위해서는 도시하수 슬러지의 감량화와 더불어 안정화 기술의 개발이 절실하게 요구된다. 현재 슬러지의 처리에 있어 가장 널리 이용되고 있는 혐기성소화의 기질인 슬러지는 대부분 호기성박테리아인데 이 세포가 내생호흡을 거쳐 자연분해가 이루어 질 때 비로소 내부 물질이 세포밖으로 나오면서 혐기성소화조의 기질이 될 수 있다. 그러므로 긴 체류시간을 요구하고 있으며 또한 처리효율이 매우 낮은 실정이다. 이에 초음파 조사<sup>1)</sup> 혹은 기계적인 파쇄<sup>2)</sup> 등으로 슬러지의 세포벽을 파괴함으로써 차단되어 있던 기질을 혐기성 미생물 등에 의해 이용가능하게 하여 혐기성 소화효율을 향상시키고자 하는 연구가 진행되어 왔다. 한편 슬러지의 최종 처리를 위한 탈수공정은 슬러지처리 비용 절감을 위한 부피감소뿐 아니라 후속 퇴비화공정이 연계될 경우 가장 중요한 인자인 수분함량과 직결되므로 탈수성이 불량한 도시

하수슬러지의 탈수성을 향상시키고자 하는 노력이 요구되어 왔다. 특히 2001년부터 하수슬러지의 직매립이 금지되므로 막대한 양의 슬러지를 효과적으로 감량·안정화시키고 나아가 재활용할 수 있는 방안을 마련하는 것이 시급한 과제이다. 전자선을 슬러지처리에 이용한 사례는 미국, 러시아, 독일 등을 중심으로 1980년대부터 시작되었다. 독일의 Geiselbullach<sup>3)</sup>에서는 1973년부터 1993년까지 50,000 m<sup>3</sup>/day의 처리규모 플랜트를 운영하여 혐기성소화조를 거친 소화슬러지에 함유되어 있는 병원균을 효과적으로 사멸시켰으며, 일본의 Takasaki<sup>4)</sup>에 있는 National Atomic Center에서는 퇴비화공정을 거친 슬러지를 전자선을 이용하여 최종 살균시킴으로써 위생성을 확보할 수 있었다. 이처럼 현재까지 국내·외를 통해 전자선을 슬러지처리에 이용한 연구는 대부분 병원균을 사멸시켜 슬러지의 위생성을 확보함으로써 후속 처리공정을 원활히 하거나 혹은 재활용의 계기를 마련하고자 하는 노력이 주를 이루었다.

본 연구에서는 전자선조사시의 하수슬러지의 물리·화학적 특성변화를 살펴보고 또한 탈수에 미치는 영향을 고찰함으로써 효율적인 슬러지처리를 위한 전자선조사의 효과를 종합적으로 고찰하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1. 실험장치

#### 2.1.1. 전자선 가속장치

전자선조사는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 S중공업(주) 중앙연구소가 보유하고 있는 1MeV, 40kW급, ELV-4모델의 전자선 가속기를 이용하였으며, Pyrex유리로 제작된 35×22.5×5.6cm의 덮개가 없는 반응조에 슬러지를 넣고 가속된 전자에 노출(Exposure)시키는 방식을 택하였으며 실험조건별로 3~20kGy(1kGy = 1kJ/kg)의 흡수선량범위에서 슬러지의 물리·화학적 특성에 미치는 전자선의 영향에 관한 기초실험을 실시하였다.

#### 2.1.2. 여과비저항 실험

전자선조사 전·후의 슬러지 탈수특성을 파악하기 위하여 널리 이용되고 있는 여과비저항<sup>5)</sup>을 측정하였다. Büchner 깔대기에 진공펌프를 연결하였으며 실험중 표준 작동압력은 400mmHg로 유지하였고, 여과지는 직경 11cm의 TOYO5A여지( $\phi=7\mu\text{m}$ )를 이용하였으며 측정에 사용된 시료의 양은 150ml였다.

### 2.2. 대상시료

본 실험에서 사용된 시료는 T시 소재 하수종말처리장의 슬러지로서 전자선조사로 인한 슬러지의 특성변화를 관찰하기 위하여 주로 호기성미생물로 구성되어 있는 반송슬러지(Return Activated Sludge, 이하 RAS)와 1차슬러지와 폐슬러지를 혼합하여 농축한 농축슬러지(Thickened Activated Sludge, 이하 TAS)를 이용하였으며, 혐기성소화조를 거치고 난 소화슬러지를 대상으로 전자선조사가 탈수성에 미치는 영향을 고찰하였다. Fig. 2에 시료채취지점을 나타내었다.

### 2.3. 실험방법 및 분석

반송슬러지와 농축슬러지에 대해서는 3~20kGy

Fig. 1. Electron beam accelerator used in this study.

Fig. 2. Sampling points of sludge in wastewater treatment plant.

의 선량범위에서 전자선조사량에 따른 슬러지의 성상변화를 파악하기 위하여 pH, Alkalinity, Soluble COD(이하 SCOD) 및 용존단백질을 측정하였다. SCOD 및 용존단백질농도는 슬러지를 18,000g로 20분간 원심분리한 후 GF/C로 여과한 후 SCOD는 Standard Methods의 Open Reflux Method에 의하여 측정하였으며 용존단백질의 농도는 Bradford가 제시한 방법<sup>6)</sup>에 준하여 측정하였다.

또한 전자선을 조사하지 않은 소화슬러지와 각각 3, 6, 10kGy씩 전자선을 조사한 소화슬러지를 대상으로 탈수특성을 파악하기 위해 4가지 종류의 무기용집제로 개량한 후 평균여과비저항(Specific Resistance of Filtration, 이하 SRF)을 측정하였다. 여과비저항을 측정하기 위한 실험조건을 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Experimental conditions for SRF

Sample	Digested Sludge (HRT 30day) : 150ml
Irradiation dose(kGy)	0(Control), 3, 6, 10
Chemical conditioner	Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> · 17H <sub>2</sub> O, FeCl <sub>3</sub> , FeSO <sub>4</sub> , Fe <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>
Chemical dose (kg/ton of dry solid)	0(Control), 400, 700, 1000

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 전자선조사에 의한 슬러지의 성상변화

반송슬러지(RAS)와 농축슬러지(TAS)에 각각 3, 6, 10, 20kGy의 전자선을 조사하고 슬러지의 물리·화학적 특성변화를 관찰하기 위하여 pH, Alkalinity, SCOD(Soluble COD) 및 용존단백질농도(Soluble Protein Concentration, 이하 SPC) 값을 측정 후 원슬러지와 비교하였다.

##### 3.1.1. pH 및 알칼리도의 변화

Fig. 3에 나타난 바와 같이 농축슬러지의 pH는 전자선조사량에 따라 7.2~7.4 범위로 변화폭이 작았으며 반송슬러지의 경우 전자선을 조사하지 않은 초기 pH는 6.9였으나 3kGy조사 후 7.2로 증가하였으며 10kGy 조사시는 7.32, 그리고 20kGy 조사시는 7.35까지 증가하는 양상을 띠었으나 그 변화폭은 크지 않다. 또한 알칼리도는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 반송슬러지의 경우 초기 490mg/l as CaCO<sub>3</sub>였으나 전자선조사로 인해 20kGy인 경우 최고 35%가 증가한 660mg/l as CaCO<sub>3</sub>까지 증가하였다. 농축슬러지의 경우에도 초기 2,700mg/l as CaCO<sub>3</sub>에서 3kGy에서는 2950mg/l as CaCO<sub>3</sub>로 증가하였고, 20kGy에서는 3,250 mg/l as CaCO<sub>3</sub>까지 증가하는 경향을 보였으며 특히 낮은 조사량에서 증가폭이 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 최 등<sup>2)</sup>이 하수슬러지를 역학적 파쇄 등 기계적 수단으로 전처리하였을 때 얻은 연구결과와 일치하는 것으로 전자선을 슬러지에 조사함에 따라 미생물세포가 파괴되면서 세포내 물질인 단백질, 지질의 용출에 기

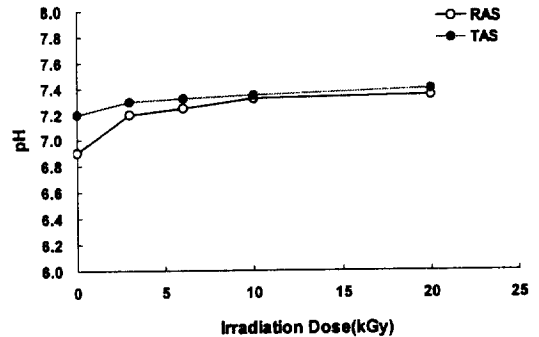


Fig. 3. Temporal variation of pH at different irradiation doses.

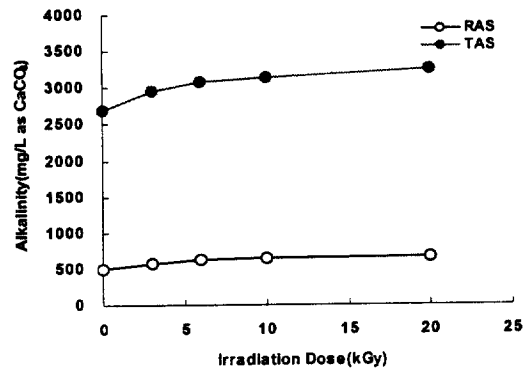


Fig. 4. Temporal variation of alkalinity at different irradiation doses.

인한 것으로 판단된다. 이러한 알칼리도의 증가는 농축슬러지의 후속 혐기성소화시 반응조를 안정적으로 유지할 수 있도록 Buffer Capacity를 공급할 수 있다는 점에서 긍정적인 매우 효과라 사료된다.

##### 3.1.2. 용존단백질농도 및 SCOD의 변화

박테리아의 세포질은 다량의 단백질을 포함하고 있으므로 전자선 조사로 인한 시료내 용존단백질농도의 변화는 SCOD와 함께 전자선의 조사로 인한 박테리아 세포벽의 파괴를 간접적으로 시사하는 중요한 지표가 된다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 농축슬러지의 초기 용존단백질농도는 평균 36.4mg/l였으며 3kGy의 전자선을 조사하였을 때 80.3mg/l로 2배 이상 급격히 증가하였다. 이후 전자선조사량을 6, 10, 20kGy까지 증가시킴에 따라 각각 91, 105, 112mg/l로 증가하였으나 증가폭은 크지 않았다.

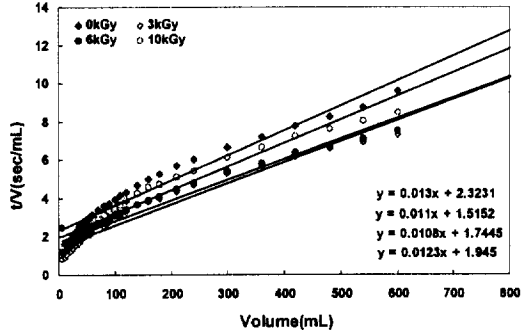


Fig. 7. Results of filtrate volume and filtering time/volume according to irradiation dosages.

Fig. 5. Temporal variation of SPC at different irradiation doses(TAS).

Fig. 6. Temporal variation of SCOD at different irradiation doses(□: RAS, ■: TAS).

SCOD의 경우도 Fig. 6에서 나타난 바와 같이 단백질농도변화와 마찬가지로 전자선조사량이 적은 초기에 증가폭이 크고 이후 완만히 증가하는 포물선 형태의 변화를 나타내었다. 반송슬러지의 경우 전자선을 조사하지 않은 경우 SCOD 35.5mg/l 이던 것이 3kGy조사시는 459mg/l 로 10배이상 증가하였고 10kGy에서는 749mg/l, 그리고 20kGy에서는 810mg/l 까지 증가하였다. 이러한 결과는 세포벽에 의해 차단되어 있던 각종 용존성 유기물성분이 세포벽파괴로 인해 용출되었음을 의미하며 후속 혐기성소화와 연계시 양질의 기질을 제공할 수 있어 소화효율을 향상시킬 수 있으므로 전자선조사가 전처리로서의 효과가 매우 우수함을 알 수 있다. 특히 전자선조사선량이 낮은 3kGy에서 더욱 경제성이 높은 것으로 사료된다.

### 3.2. 전자선조사에 의한 슬러지 탈수특성의 변화

슬러지의 탈수는 슬러지 처리비용을 절감하기 위한 부피감소뿐 아니라 하수슬러지를 퇴비화할 경우 슬러지내 수분 함량이 가장 중요한 영향인자가 되므로 매우 중요하다. 농축슬러지를 대상으로 전자선선량을 변화시키면서 선량변화에 따른 여과비저항을 측정하여 탈수성의 변화를 관찰하였으며 화학개량제를 이용해 개량한 후 각각의 조건에 따른 최적 주입율을 결정하였다.

#### 3.2.1. 전자선조사선량에 따른 여과비저항의 변화

Büchner Funnel Test에 탈수실험을 실시하여 여액량(V)과 단위여액을 탈수하는데 걸리는 시간(t/V)과의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 통상 여과시간이 경과함에 따라 여지공극이 폐쇄되어 동일부피를 여과하는데 걸리는 시간이 증가하여 V와 t/V의 관계가 직선을 이루지 않는다는 보고<sup>7)</sup>가 있으나 본 연구에서는 매우 양호한 직선관계( $r^2 = 0.98$ )를 보여주었다. 이 그래프로부터 얻은 기울기를 토대로 Fig. 8에서는 소화슬러지에 각각 3, 6, 10kGy의 전자선을 조사한 후 여과비저항을 측정하여 원슬러지의 값과 비교하여 나타내었다.

그림에 나타난 바와 같이 원슬러지의 여과비저항은  $59.3 \times 10^{12} \text{m/kg}$ 으로 이 등<sup>8)</sup>의 연구에서 나타난 값과 유사한 값을 보였으며, 3kGy 조사시는 13.6

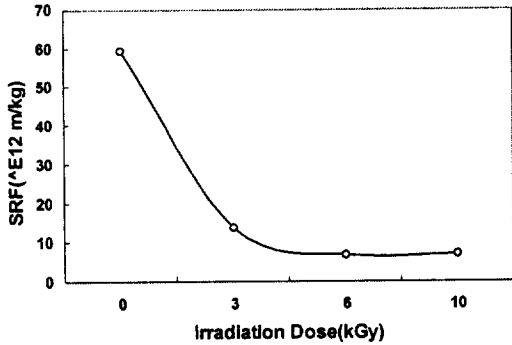


Fig. 8. Effect of electron beam irradiation on the SRF.

$\times 10^{12}$  m/kg으로 큰 폭으로 감소하여 탈수효과가 현저히 향상됨을 알 수 있다. 6kGy에서는  $6.72 \times 10^{12}$  m/kg으로 탈수성이 더욱 증가하다가 10kGy에서는 평균여과비저항이  $6.90 \times 10^{12}$  m/kg으로 오히려 탈수성이 다소 악화되는 것으로 나타났다. 이는 Thomas

Waite<sup>9)</sup> 등이  $\gamma$ -Source Irradiation에서 400krad의 선량조건에서 89.0%의 여과비저항이 감소하였다는 연구결과와 매우 유사한 것으로 슬러지의 탈수성을 향상시키는데 있어  $\gamma$ 선과 전자선의 효과가 동일 선량조건에서는 거의 유사한 경향을 띠을 수 있다.

### 3.2.2. 전자선조사량에 따른 화학개량특성의 변화

4종류의 무기응집제 첨가량을 변화시키면서 원슬러지와 각각 3, 6, 10kGy의 전자선을 조사한 슬러지를 개량한 후 여과비저항을 측정하여 전자선조사 선량에 따른 화학개량시의 효과에 대해 고찰하였다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 전자선을 조사하지 않은 원슬러지의 경우 무기화학개량제를 슬러지 건조무게 1ton당 400kg 첨가한 경우  $19 \sim 40 \times 10^{12}$  m/kg의 여과비저항값을 나타내었으며 700kg/ton dry

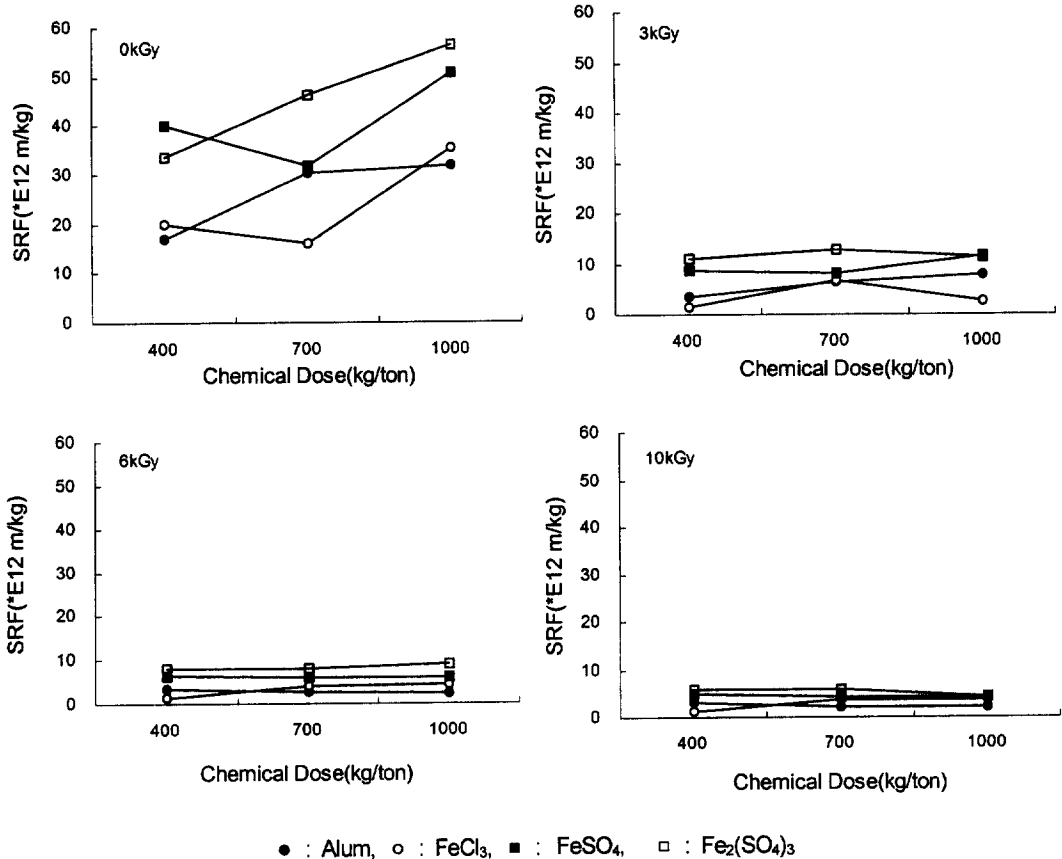


Fig. 9. Effect of irradiation dosage on various inorganic chemical conditioner of thickened sludge.

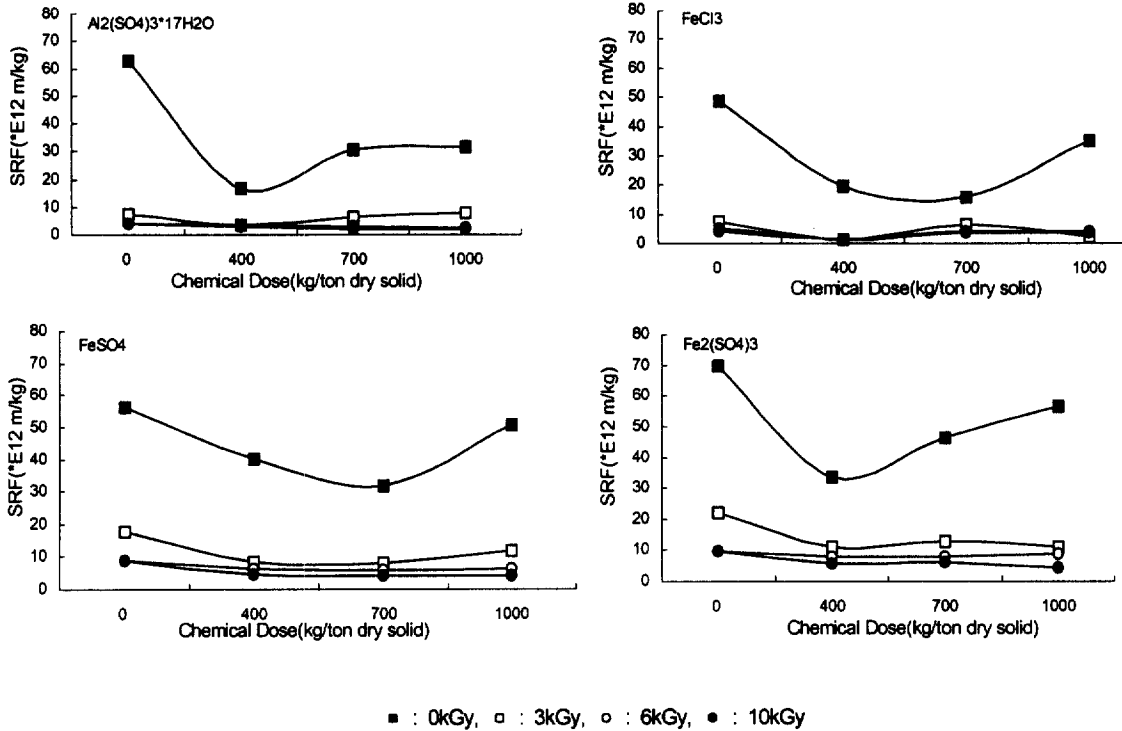


Fig. 10. Effect of various chemical dose on SRF.

solid를 첨가한 경우도 이와 유사한 범위의 값을 나타내었으나 1000kg/ton dry solid를 첨가한 경우는  $30 \sim 55 \times 10^{12} m/kg$ 까지 증가하여 과량 응집제 투여에 의한 콜로이드 입자의 재안정화기작(Destabilization Mechanism)을 보여주었다. 한편 전자선을 3kGy의 선량으로 조사한 슬러지를 화학개량한 경우 여과비저항은 응집제별로 다소 차이는 있으나 응집제투여량과 거의 무관하게  $2 \sim 12 \times 10^{12} m/kg$  범위의 값을 보여 동일조건에서 전자선을 조사하지 않은 원슬러지에 비해 4~10배 가량 여과비저항이 감소하여, 전자선조사가 탈수성 향상에 아주 큰 효과를 나타냄을 알 수 있다. 또한 전자선조사선량을 10kGy까지 증가시켜 처리한 후 개량하였을 경우 6kGy 조사시에 비해 약 15~30% 감소하는데 그쳐 전자선조사량의 증가에 비해 탈수성의 향상도는 크지 않음을 알 수 있다. 따라서 하수슬러지의 탈수성을 향상시키기 위해서는 3~6kGy 범위의 전자선조사 범위에서 운영하는 것이 가장 경제적인 것으로 판단된다.

### 3.2.3. 개량제 특성에 따른 탈수특성

Fig. 10에 4가지의 서로 다른 개량제의 주입량별 여과비저항값을 나타내었다. 원 농축슬러지의 경우  $FeSO_4$ 의 경우를 제외한 모든 경우에서 400kg/ton dry solids, 즉 슬러지 건조고형물의 40%에 해당하는 응집제를 첨가하였을 때 가장 양호한 탈수성을 보였으며 과다한 응집제주입은 오히려 탈수효과를 감소시키는 것으로 나타났으며 개량제별로는 염화철의 경우가 가장 효과적으로 하수슬러지를 개량하여 탈수효과를 증대시키는 것으로 나타났다. 한편 전자선을 조사하고 개량제를 주입하지 않은 경우에도 여과비저항이  $8 \sim 22 \times 10^{12} m/kg$ 으로 낮게 나타나 전자선조사만으로 무기응집제 개량시의 효과를 대치할 수 있는 양호한 효과를 나타내었다.

## 4. 결론

도시하수처리장에서 발생하는 슬러지에 전자선을

조사하여 슬러지의 물리·화학적 변화 및 탈수성에 미치는 영향에 대해 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 슬러지에 3~20kGy 범위에서 전자선을 조사하였을 경우 pH와 알칼리도는 원슬러지에 비해 증가하는 경향을 보였다.
- 2) 농축슬러지에 3kGy의 전자선을 조사하였을 때 용존단백질 농도(SPC)는 2.2배, SCOD는 10배 이상 급격하게 증가하였으며, 조사선량이 증가함에 따라 증가폭이 점차 감소하는 포물선형태의 변화추이를 나타내었다.
- 3) 소화슬러지를 대상으로 한 탈수실험에서는 3kGy의 전자선 조사시 여과비저항은  $13.6 \times 10^{12} \text{m/kg}$ 으로, 원슬러지 대비 1/4 수준으로 감소하는 것으로 나타났다.
- 4) 전자선조사슬러지와 원슬러지를 동일한 조건에서 화학개량한 경우 전자선을 조사한 슬러지의 경우는 응집제 투여량과 거의 무관하게 여과비저항이  $2 \sim 12 \times 10^{12} \text{m/kg}$  범위의 값을 보여 원슬러지에 비해 4~10배 가량 탈수성이 향상됨을 알 수 있었다.
- 5) 전자선을 조사한 슬러지의 경우 여과비저항 측면에서만 볼 때, 개량제를 주입하지 않은 경우에도 무기응집제 개량시의 효과를 대치할 수 있는 양호한 효과를 나타내었다.

이상의 결과로 미루어 볼 때 하수슬러지에 전자선을 조사하면 혐기성소화의 전처리로서 슬러지를 양질의 기질로 전환시킬 수 있을 뿐 아니라 소화슬러지의 탈수성을 향상시킬 수 있음을 알 수 있으며 최적 조사량은 3~6kGy인 것으로 나타났다.

## 사 사

이 연구는 1999년 과학기술부 원자력연구개발사업의 연구비 지원에 의해서 이루어졌으며 이에 감사의 뜻을 표합니다.

## 참 고 문 헌

1. Fraunhofer Institut Keramische Technologien und Sinterwerkstoffe, Partikelanalytik und Ladungsmesstechnik zur Abwasserreinigung und Klaerschlamminimierung, Fraunhof-Gesellschaft(1996).
2. 최홍복, 황경엽, 신웅배, "혐기성 소화 전단계에서의 활성슬러지의 기계적 전처리 공정," 한국폐기물학회지, **14**(2), 189~194(1997).
3. Timm Lessel, "Radiation Processing of Sewage Sludge by Gamma Irradiation : Electron Beam Radiation and Other Alternative Methods," *Consultants' Meeting on Radiation Processing of Liquid Wastes and Water*(1994).
4. A. K. Pikaev and V. N. Shubin, "Radiation Treatment of Liquid Wastes," *Radiat. Phys. Chem.*, **24**(1), 77~97(1984).
5. 임성삼, 정용대, "여과 평균 비저항값의 측정방법에 대한 연구," 대한환경공학회지, **10**(3), 61~70(1988).
6. Bradford, M., *Ana. Biochem.*, **72**, 248~256(1976).
7. 원성연, 서인석, 이상일, "슬러지 개량시 혼합강도 및 혼합시간이 탈수특성에 미치는 영향," 대한환경공학회지, **12**(5), 496~504(1995).
8. 이윤환, 조광명, 이면주, "소화슬러지의 수리학적 부하가 소화슬러지의 탈수성에 미치는 영향," 대한환경공학회지, **18**(6), 693~705(1996).
9. Thomas Waite, Tiezheng Wang, Charles Kurucz, William J. Copper, "Electron Beam Treatment of Biosolids : Parameters Effecting Dewaterability Enhancement," *Journal of Environmental Engineering*, (1996).