

2004 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

방사선을 이용한 하수슬러지의 전처리

Pretreatment of Sewage Sludge by Using The Radiation Technology

이재광, 유대현, 이병진, 이면주
한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

방사선 조사에 의한 하수슬러지의 멸균과 탈수 후 발생하는 케이크의 함유 수분 저감에 관한 연구를 수행하였다. 슬러지 전처리 공정으로 방사선을 조사 하였으며 폐수산자원의 하나인 불가사리를 슬러지 물리개량제로 사용하였다. 방사선 단독공정만을 사용 하였을 경우 슬러지 함유율이 7%(w/w) 정도 저감되었으며, 물리개량제와 병용하였을 경우 20%의 저감 효과를 얻을 수 있었다. 방사선 조사량이 증가할수록 탈수케이크의 함유율이 저감되었으나 응집제의 첨가량이 증가하였으며, 물리개량제를 첨가할 경우 요구되는 응집제의 양이 감소하였다. 또한 방사선 조사 하였을 때 흡수선량 1kGy 이상의 선량에서 일반세균과 대장균이 99% 이상 제거되었다. 이는 방사선 조사에 의한 미생물 입자 표면의 파괴에 기인한 것으로 방사선 조사 후 SCOD, S-protein, S-carbohydrate의 증가와 일치하는 결과를 보여준다.

Abstract

A study on enhancement of sludge dewaterability and disinfection of the microorganisms in sewage sludge by using radiation technology was accomplished. Moisture content in sludge was reduced by using irradiation and adding the starfish as a dewatering aid. Moisture content was reduced by 20%(w/w) after irradiation and adding the dewatering aid while decreased by ~7%(w/w) after only irradiation. The amount of coagulant to form sludge flocs was dramatically increased in accordance with the irradiation dose because of the degradation of sludge particles but it was reduced when adding the dewatering aid. The colony forming unit of bacteria and *E.coli* were reduced over 99% after irradiation at the dose of >1kGy and SCOD, S-protein and S-carbohydrate were largely increased after irradiation.

1. 서 론

하수슬러지의 발생량은 매년 증가하는 추세이며 슬러지의 처리는 중요한 문제로 인식되고 있다. 특히 슬러지 케이크 발생량, 또는 함수율의 저감은 슬러지의 최종처분 측면에서 매우 민감한 문제로 인식되고 있으며, 케이크를 감소시키기 위한 안전하고 바람직한 슬러지 처리에 관한 연구가 오랜 시간 동안 진행되어 왔다.^{1), 2), 3)} 특히 우리나라의 경우 하수슬러지 발생량이 1998년 이후 매년 약 10%씩 증가하여 2001년 기준으로 전국 201개 하수종말 처리장에서 연간 1,902,410 ton의 하수 슬러지가 발생되고 있으며 하수처리장의 지속적인 건설로 향후 하수슬러지 발생량의 증가는 불가피한 실정이다. 발생하는 슬러지는 2001년 기준으로 재이용(6%), 매립 (12%), 소각 (7%) 그리고, 해양투기 (73%)의 순으로 처리되고 있으며 해양투기는 매년 상당량 증가하는 추세이다(Table 1).⁴⁾ 2003년 6월부터 환경부는 함수율 75% 이하인 슬러지에 한하여 처리 후 슬러지의 직매립을 인정하고 있으나 현시점에서 슬러지의 수분감량을 위한 효과적인 기술 개발이 부족한 실정이다.

Table 1. Generation and treatment of sewage sludge in Korea (unit : tons)

Year	Total	Reuse	Landfill	Incineration	Ocean Dump
1998	1,447,170	34,466 (2%)	792,828 (55%)	20,947 (1%)	552,188 (38%)
1999	1,593,001	80,293 (5%)	640,515 (40%)	33,350 (2%)	820,135 (51%)
2000	1,741,371	88,101 (5%)	439,099 (25%)	93,163 (5%)	1,118,453 (64%)
2001	1,902,410	118,339 (6%)	229,082 (12%)	138,440 (7%)	1,390,779 (73%)

슬러지의 수분은 (1) 자유수 (슬러지 부유입자에 결합되거나 영향을 받지 않는 수분), (2) 간극수 (플록과 미생물의 간극에 갇혀 있는 수분), (3) 인접수(입자표면에 수소결합되어 있는 수분에 단단히 부착되어 있는 여러 겹의 수분층), (4) 수화수(슬러지 입자와 화학적으로 결합되어 있으며 열에 의하여 제거 가능한 수분)로 분류한다.⁵⁾ 일반적으로 슬러지의 부착수는 기계적인 방법으로 쉽게 제거할 수 없는 수분을 통칭하며, 간극수의 일부와 인접수, 그리고, 수화수 등이 여기에 포함된다. 현장에서 슬러지의 수분을 저감시키기 위하여 필터프레스, 벨트프레스, 그리고 원심탈수기 등의 기계적 탈수 방법이 사용되고 있지만 부착수의 강한 결합에너지 때문에 효과적인 탈수가 이루어지지 않고 있다. 또한 슬러지 입자의 친수성 때문에 일부 자유수는 탈수 후에 입자와 재결합되기도 한다. 자유수의 결합에너지는 0.28kJ/kg water 인 반면, 부착수는 5kJ/kg water 이상이다.⁶⁾ 따라서 이들 결합에너지 이상

으로 에너지를 가해 줄 수 있는 방법을 사용 하여야만 부착수가 분리될 수 있을 것이다.

본 연구에서는 기계적 탈수 전에 방사선을 조사함으로써 슬러지 케이크의 수분함량 저감과 슬러지 내 미생물의 사멸에 중점을 두었으며 아울러 슬러지 탈수에 미치는 pH, 총고형분 농도 (total solid concentration ; TS), 그리고, 조사선량의 강도 등의 인자에 대한 영향을 평가하고자 하였다.

탈수시 슬러지 물리개량제를 첨가할 경우 다공성이며 투과성이 좋아 탈수 전단계에 첨가하면 슬러지가 압축될 때 발생하는 폐쇄현상을 방지할 수 있을 뿐만 아니라, 탈수과정에서 화학개량제보다 슬러지 성상에 변화를 거의 주지 않는 장점이 있다.⁷⁾ 아울러 개량제를 이용하면 슬러지 탈수의 후단공정으로 슬러지의 퇴비화나 소각 등의 최종처분을 용이하게 할 수 있으며, 이는 탈수 증진뿐만 아니라 폐기물 재활용측면에서도 매우 바람직한 방법으로 사료된다. 본 연구에서는 방사선 조사와 병행하여 폐수산자원인 불가사리를 물리개량제로 이용함으로써 슬러지의 감량화 및 자원화에 대한 기초 연구를 수행하고자 하였다.

2. 실험방법 및 재료

2.1 실험재료

본 연구에서는 탈수보조제로서의 효과를 알아보기 위하여 D시의 하수종말처리장에서 발생하는 소화슬러지를 대상 시료로 이용하였다. 소화슬러지의 초기 특성을 Table 2에 요약하였다. 대상 시료의 고형분 함량(TS)은 3.9~4.8 %의 범위였고 유기물 함량은 평균 53.7 % 였다. 초기 슬러지 특성의 변화를 최소화하기 위하여 대상 시료는 실험 직전 채취하여 사용하는 것을 원칙으로 진행하였고 실험은 상온에서 실시하였다.

Table 2. Characteristics of digested sludge

Item	Average
TS (%)	4.3
pH	6.9
SCOD _{Cr} (mg/L)	77.1
DOC (mg/L)	42.4
TVS/TS (%)	53.7
Temperature (°C)	25.7

서해안과 남해안 일대에서 수거한 극피동물문 불가사리과의 별 불가사리와 아무르 불가사리 등을 불순물 및 염분의 제거를 위해 상수와 증류수를 이용하여 수회 세척 후 건조 및 열처리, 분쇄과정을 거쳐 분말을 소화슬러지에 첨가하여 탈수하였다. 불가사리의 완전 건조를

위해 105 °C 온도에서 건조 하여 제조하였다. 불가사리의 분쇄는 기존에 알려진 슬러지 개량제의 최적 입경인 20~80 mesh⁸⁾ 범위에 속하는 분말로 만들기 위해 분쇄 후 50 mesh로 체가름 하였다.

2.2 실험방법

방사선 조사 후 하수슬러지의 탈수능을 소화슬러지에 방사선을 조사하였으며, 물리개량제의 영향을 평가하기 위하여 불가사리 분말을 3g/100mL sludge의 양으로 첨가하여 30분간 슬러지와 교반하여 실험을 수행하였다. 현재 하수처리장에서 주로 사용하고 있는 양이온계 고분자 응집제인 SC-050(Songwon Co.)을 첨가하여 Jar tester를 이용한 응집과정을 거쳐 벨트형 탈수기(유천, SP-1000)를 이용하여 슬러지를 탈수하였다. 탈수 후 슬러지 케이크의 함수율의 측정은 Standard method 2540 에 준하여 측정하였다.⁹⁾

탈수능 변화를 간접적으로 측정하기 위하여 CST 장치를 이용하였다. Type 304B Capillary suction timer(Triton Electronics Ltd., UK)를 이용하여 stainless funnel (L=1.8 cm, Φ =5mm) 에 시료 3mL를 주입하여 CST 여지 (Triton Electronics Ltd., UK)에 흡수되어 측정된 값을 구하였다. CST는 여과지의 일정 거리를 슬러지의 수분이 전과되어지는 시간을 측정하는 것으로 일반적으로 CST 값이 낮은 슬러지 일수록 여과성과 탈수성이 우수한 것으로 평가된다.

2.3 방사선 조사 후 슬러지 탈수에 대한 영향인자 평가

실험 결과를 이용한 실험적 모델링을 하기 위해 3-변수, 3-준위의 통계적 실험양식인 Box-Behnken 모델을 사용하였다. 이 모델은 슬러지 탈수에 영향을 주는 두 개 또는 그 이상의 요소에 대한 영향을 동시에 평가하는 데에 효과적인 방법이다.^{10), 11), 12)} 모델의 3가지의 독립변수와 그에 따른 3-준위는 Table 3과 같이 설정하였다.

Table 3. Value of the Variables at each Level of the Experimental Design

Variables	Coded levels		
	-1	0	1
X ₁ , pH	5	7	9
X ₂ , Dose (kGy)	0	3	10
X ₃ , TS (%)	4	6	8

실험 디자인과 통계적 분석을 통한 실험적 모델링을 함으로써 세 가지 독립변수의 범위 내에서의 방사선 조사에 의한 슬러지 함수율을 예측할 수 있다. 실험 결과를 이용하여 다음의 식 (1)을 계산하면 슬러지 케이크 내 수분 함량에 대한 결과를 얻을 수 있다.

$$\text{함수율 (\%)} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (1)$$

여기서, b_0 = 상수항의 회귀계수값

b_{11}, b_{22}, b_{33} = 제곱항의 회귀계수값

b_{12}, b_{23}, b_{31} = 상호작용항의 회귀계수값

x_1, x_2, x_3 = 실험변수

3. 결과 및 토의

3.1. 방사선 조사에 의한 슬러지 물성 변화

슬러지 입자의 분해

슬러지 입자의 파괴정도를 확인하기 위하여 G. Lehne 등이 제안한 COD 분해도(DI_{COD})를 측정하였다.¹³⁾ 아래 식 (2)에 따라 방사선 조사에 따른 COD 분해도를 계산하여 Fig. 1에 도식하였다. COD 분해는 5kGy 까지 급격히 증가되며, 10kGy 이상 조사하였을 경우에는 완만한 속도로 증가하였다. 이는 방사선을 조사하였을 때 슬러지 입자가 파괴되어 COD의 발생량이 증가하는 것으로 판단된다. 또한 슬러지 파괴의 다른 척도로 방사선 조사 후 슬러지 여액의 탁도 변화를 측정하였다. 여액의 탁도 역시 조사선량에 비례하여 증가함을 알 수 있다.(Fig. 2)

$$DI_{COD} = \frac{COD_{Irradiated} - COD_0}{COD_{NaOH} - COD_0} \quad (2)$$

$COD_{Irradiated}$: 방사선 조사 후 슬러지의 COD

COD_{NaOH} : 1 N NaOH와 슬러지를 1:1의 비율로 혼합후 90℃에서 10분간 가열 후 분해된 COD

COD_0 : 사용된 초기 시료 슬러지의 COD

하수슬러지 파괴에 따른 입자 내 유기물의 용출을 측정하여 슬러지에 방사선을 조사하여 그에 따른 제반 물리화학적 성상변화를 고찰하였다.(Table 4) 방사선조사는 1kGy, 3kGy, 6kGy, 10kGy의 4가지 조건으로 실시하였으며 대조군으로 Control(미조사)를 두어 방사선조사 시료와 물리화학적 성상 변화를 비교 평가하였다. 방사선 조사 후 pH 및 TS, TVS에는 거의 변화가 나타나지 않은 반면, 슬러지를 구성하고 있는 박테리아에 존재하는 탄수화물이나 단백질은 비교적 쉽게 분해되는 것을 알 수 있다. 특히 단백질은 세포벽에 의해 차단되어 있으므로 분해가 용이하지 않은 것으로 알려져 있다. 그러나 방사선 조사 시 단백질의 용출량이 증가하는 것은 슬러지 입자뿐만 아니라 미생물의 세포벽까지 파괴되는 것으로 판단된다.

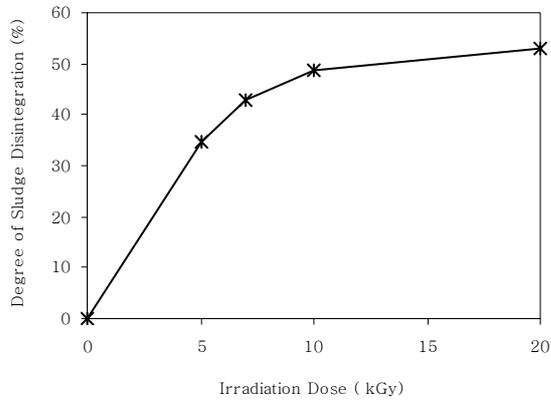


Fig. 1 Sludge disintegration after irradiation

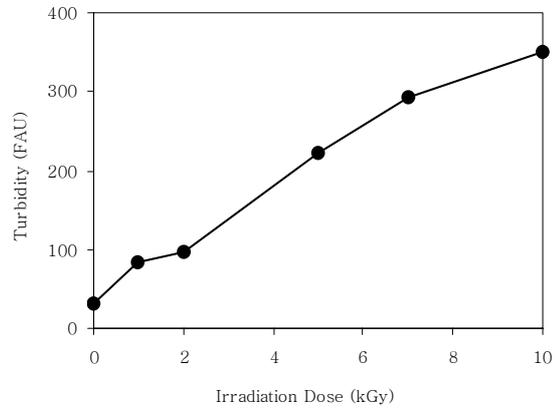


Fig. 2 Turbidity of sludge filtrate

Table 4. Physico-chemical Properties of Sludge after Irradiation

Items	Irradiation Dose				
	0kGy	1kGy	3kGy	6kGy	10kGy
pH	6.85	6.81	6.79	6.79	6.78
TS(%)	1.17	1.15	1.16	1.14	1.18
TVS(%)	0.57	0.58	0.6	0.57	0.62
mg S-Protein Solubilized/g TVS	44	132	184	234	283
mg S-Carbohydrate Solubilized/g TVS	9	48	74	99	124

방사선 조사에 의한 슬러지의 탈수능 향상

방사선을 0~20kGy의 선량으로 조사하였을 때 슬러지 케이크의 수분 함량이 7% 정도 감소하였다.(Fig. 3) 방사선의 강한 에너지가 슬러지 입자를 파괴하여 입자 내부의 수분이 제거 되는 것으로 판단되며, COD 분해 및 조사 후 슬러지의 성상변화 실험 결과와 일치하는 경향을 나타낸다.

제타전위를 측정하여 방사선 조사 후 슬러지 표면특성 변화를 관찰하였다. 0~30kGy의 범위에서 조사하였을 경우 방사선 조사에 따른 제타전위는 1~9 mV 증가하였다.(Fig. 4) 제타전위는 용액의 조건과 전기적 이동성을 이용하여 입자 분산의 안정도를 측정하는 것으로¹⁴⁾ 이처럼 방사선 조사에 의해 제타전위가 증가한 것은 음전하를 띠는 세포표면의 점성 고분자 물질이 방사선에 의해 분해되어 표면전하가 감소하는 것을 시사하여 준다. 또한 이러한 제타전위의 증가는 방사선의 조사가 입자간의 반발력을 감소시켜 응집 및 탈수를 용이하게 하는 개량의 효과를 가져다 주는 것으로 이해할 수 있다.

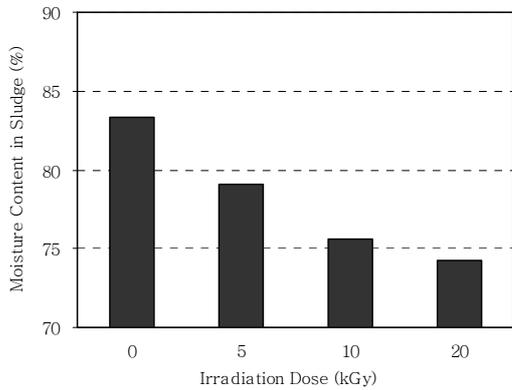


Fig. 3 Moisture content of the sludge cake after irradiation

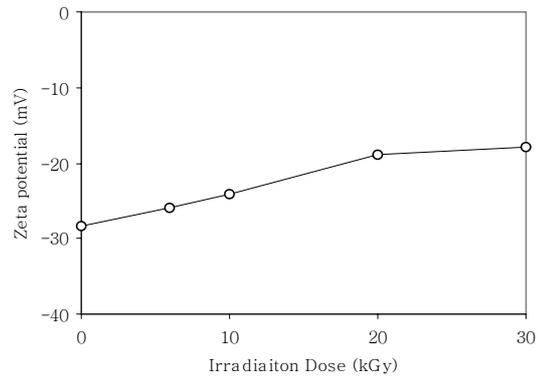


Fig. 4 Zeta potential of sludge as a function of the irradiation dose

슬러지 탈수에 대한 영향인자 평가

pH, TS, 그리고 조사선량을 변화시키면서 방사선 조사에 따른 슬러지 탈수 영향인자를 Box-Behnken 모델을 이용하여 평가하였다.(Fig. 5a, 5b) pH는 각각 5.0, 7.0, 그리고, 9.0으로 조절하여였으며 pH가 낮을수록 함수율도 감소하는 경향을 나타내었다. 비록 pH에 의한 영향이 크게 나타나지 않았지만 pH가 낮아질수록 음전하를 띠는 슬러지 입자 표면의 전하가 증가하여 슬러지의 응집효율이 향상되는 것으로 판단된다. Fig. 5a에는 조사선량에 대한 영향을 나타내었다. 조사선량은 실험에 고려한 다른 인자들보다 슬러지 탈수에 대한 영향이 가장 크게 나타났다. 실험적 모델링 결과를 통하여 3kGy이하의 조사선량에서 탈수능이 비교적 급하게 증가하다가 조사선량이 3kGy 이상 증가할 경우 완만하게 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있었다. 이 실험 결과는 Fig. 1과 Table 4에 언급하였듯이 5kGy 이하의 조사선량에서 방사선 조사에 의해 슬러지가 급격히 파괴되는 실험결과와 일치하며, 방사선 조사에 의한 슬러지 분해를 통해 일정량의 수분이 슬러지 입자 외부로 유출되는 것으로 기작을 설명할 수 있다. 특히 3kGy 이상 조사할 경우 슬러지 케이크의 수분 함량을 저감시킬 수 있을 뿐만 아니라, 병원성 미생물 사멸¹⁵⁾의 복합적 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. TS의 영향은 Fig. 5b에 나타내었다. TS는 pH와 조사선량보다 슬러지 탈수에 대한 영향이 적게 나타났으며, 이는 방사선 조사에 의한 슬러지 전처리 공정에서 TS 부하량에 영향을 받지 않음을 시사하여 준다.

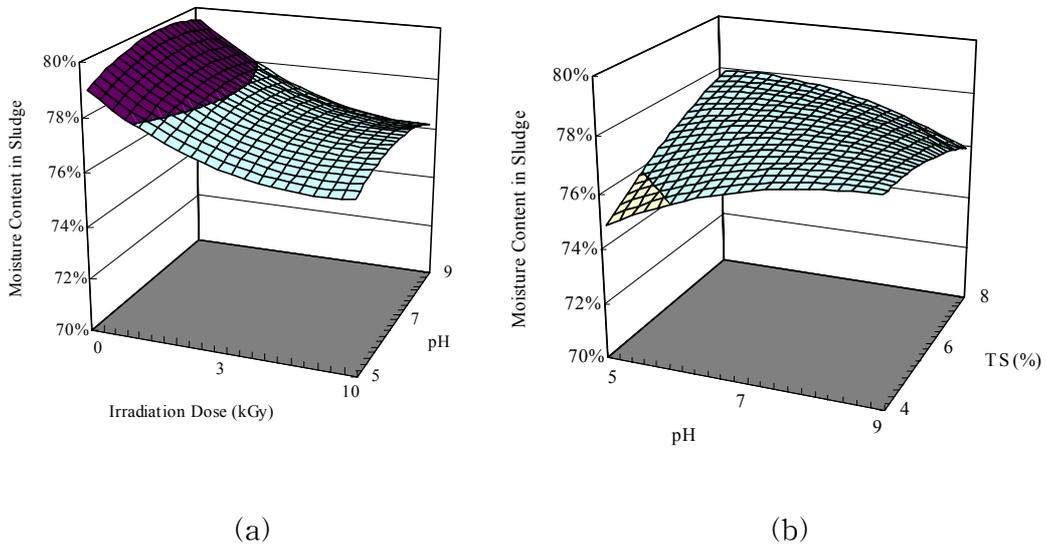


Fig. 5 The effect of the pH, irradiation dose and total solid concentration on the sludge dewaterability (a) irradiation dose and pH effect, (b) pH and total solid concentration effect

방사선과 슬러지 물리개량제를 병용한 슬러지 함수율 저감

방사선을 조사한 슬러지에 15°C에서 건조한 50 mesh 이하의 불가사리 분말을 물리개량제로 이용하여 슬러지 케이크의 함수율 변화를 측정하였다. 물리개량제는 3g/100 mL sludge의 양으로 주입하였으며 응집 후 벨트형 탈수장치를 이용하여 탈수하였다.

Fig. 6에서 나타낸 바와 같이 방사선만 조사한 슬러지에 비해 방사선 조사 후 개량제를 첨가한 소화슬러지를 탈수할 경우 10 % 이상의 함수율 저감효과를 얻을 수 있다. 이는 방사선과 불가사리 분말을 동시에 적용할 경우 초기 탈수케이크의 함수율 대비 약 20 %의 함수율 저감을 얻을 수 있어 탈수케이크의 부피 및 수분 감소, 그리고 그에 따른 소각 등의 후속공정의 적용을 용이하게 할 것으로 판단된다.

슬러지에 방사선을 조사한 후 불가사리분말의 첨가량에 따른 응집제 투여량 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 전처리를 하지 않은 초기 소화슬러지에 비하여 방사선을 조사한 슬러지는 조사량이 증가함에 따라 응집제 투여량도 크게 증가하여 7 kGy 조사하였을 때 플록 형성을 위해 4배 이상의 응집제가 소모되었다. 이는 Fig. 1, 2에서 확인한 바와 같이 방사선에 의해 슬러지입자가 파괴되어 응집에 어려움이 있는 것으로 판단된다. 그러나 이러한 방사선 조사 슬러지에 불가사리분말을 첨가하였을 경우 방사선 조사로 인해 추가로 소모되는 응집제의 양의 증가가 매우 적게 나타났다.(Fig. 7)

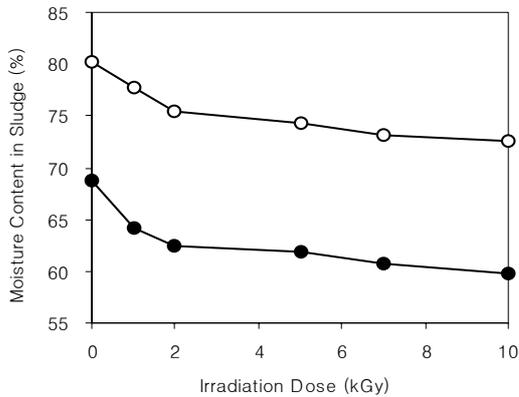


Fig. 6 Water in sludge with starfish powder

○: irradiation only
●: irradiation/dewatering aid

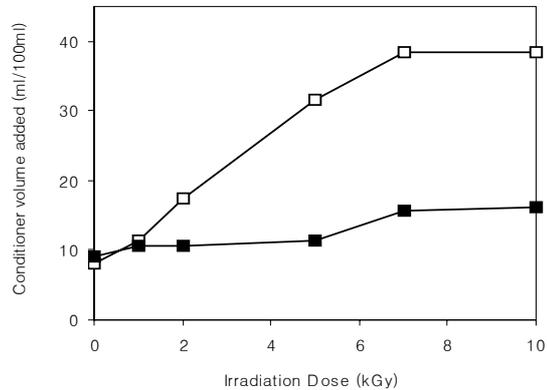


Fig. 7 Conditioner volume added after irradiation

□: irradiation only
■: irradiation/dewatering aid

조사에 의한 슬러지 내 미생물 사멸 효과

D시 하수종말처리장에서 배출되는 슬러지를 Grab Sampling하여 방사선 조사선량에 따른 조사 전·후의 대장균군 및 일반세균수를 측정함으로써 방사선에 의한 살균효율을 평가하고자 하였다. 대장균군의 개체수는 수질오염공정시험법상의 평판집락법을 이용하였으며, 일반세균의 경우 중온성일반세균의 개체수로서 평가하였다.

그 결과 1kGy의 낮은 선량에서도 일반세균, 대장균 모두 99.7%이상의 제거율을 나타나 방사선조사가 슬러지내 대장균, 일반세균의 사멸에 탁월한 것으로 나타났다.

슬러지 내 미생물에 의한 Extracellular polymer substance 용출에 관한 실험의 일환으로 실험실내에서 0.3%로 순수배양한 대장균을 대상으로 3kGy선량으로 방사선조사를 실시하여 세포의 형태변화를 관찰하였다. Fig. 8, 9의 SEM사진을 통하여 알 수 있듯이 방사선을 조사하지 않은 E.coli cell과 3kGy로 방사선을 조사한 E.coli의 형태는 뚜렷한 차이를 보였다. 즉, 방사선을 조사하지 않은 E.coli배양체의 세포는 외관상 뚜렷한 간균 구조를 보이나 3kGy로 조사한 E.coli는 표면에 방사선에 의한 손상의 흔적이 관찰되며 세포의 길이도 짧아진 것을 확인할 수 있다.

조사선량 변화에 따른 S-Protein과 S-Carbohydrate의 농도변화를 측정하였다. 한편 S-Protein의 농도는 control 배양체 5.2mg/L, 3kGy 배양체 70.2mg/L로 13배 이상 증가되었으며 S-Carbohydrate은 control 배양체 11.7mg/L에서 3kGy 배양체 184.1mg/L로 15배 이상 증가되었다. 따라서 이는 방사선에 의한 슬러지내의 유기물가용화는 방사선조사와 그에 따르는 슬러지 내 미생물의 세포 손상에 의한 Extracellular polymer substance의 용출이 주요 기작임을 뒷받침해주는 결과로 사료된다.

Table 5. Reduction of The Colony Forming Unit of bacteria after Irradiation

Irradiation Dose	CFU/ml	제거율(%)
0 kGy	1,300,000,000	0.000
1 kGy	1,040,000	99.920
3 kGy	460,000	99.965
6 kGy	220,000	99.983
10 kGy	77,000	99.994

Table 6. Reduction of The Colony Forming Unit of *E.coli* after Irradiation

Irradiation Dose	CFU/ml	제거율(%)
0 kGy	375,000	0.000
1 kGy	1,050	99.720
3 kGy	330	99.912
6 kGy	290	99.951
10 kGy	185	99.923

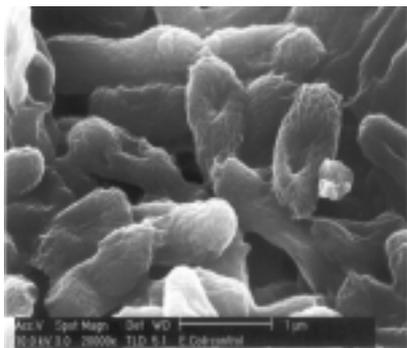


Fig. 8 SEM images of *E. coli* before irradiation

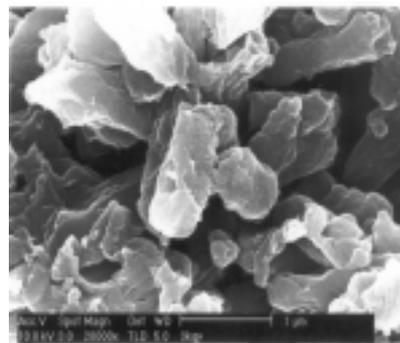


Fig. 9 SEM images of *E. coli* after irradiation at the dose of 3kGy

4. 결 론

하수슬러지 처리 계통에 방사선 전처리와 불가사리를 물리개량제로 재활용하여 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

슬러지에 방사선을 조사하면 입자 세포벽이 파괴 되어 SCOD, S-protein, S-carbohydrate 등의 용출이 증가하였다. 또한 방사선을 조사한 슬러지는 입자 내부에 존재하는 일부 수분이 유출되어 최종 탈수 케이크의 함유 수분이 약 7% 정도 감소하였으며, 이는 방사선 조사가 최종 슬러지 발생량을 저감시킬 수 있는 한가지 방법임을 시사하여 준다. 방사선은 함수율 저감뿐만 아니라 슬러지의 멸균에도 양호한 효과를 나타내어 1kGy 이상의 조사선량에

서 일반세균 및 *E.coli*를 99%이상 제거하였다. 방사선 조사 후 슬러지의 COD 분해율을 측정한 결과 입자가 다량 분해된 것을 확인하였으며, CST 및 제타전위 측정하여 슬러지 탈수 특성이 향상되는 것을 간접적으로 평가하였다. 방사선 조사 후 폐수산자원인 불가사리를 물리개량제로 첨가하여 최고 20%이상 슬러지의 함수율을 저감시킬 수 있었으며, 방사선과 물리개량제를 병용할 경우 방사선을 단독으로 사용하였을 경우보다 플록형성에 소모되는 응집제의 양을 상당량 저감시켰다.

본 연구결과를 토대로 향후 시범시설을 구축하여 방사선을 이용한 슬러지 처리의 현장 적용성을 검토할 예정이다. 아울러 탈수능 향상 뿐만 아니라, 퇴비화 등의 후속공정에 관한 연구를 수행할 예정이다.

-
- 1) SAWAI, T., YAMAZAKI, M., SHIMOKAWA, T., Improvement of sedimentation and dewatering of municipal sludge by radiation. Radiation Physics and Chemistry 35, 465-468 (1990)
 - 2) LEE, C.H., LIU, J.C., Sludge dewaterability and floc structure in dual polymer conditioning. Advances in Environmental Research, 5, 129-136 (2001)
 - 3) MIKKELSEN, L.H., KEIDING, K., Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludges with implications to dewatering. Water Research, 36, 2451-2462 (2002)
 - 4) Statistics of sewerage. Ministry of Environment, Korea, 1998-2002
 - 5) VESILIND, P.A., The role of water in sludge dewatering. Water Environment Research, 66, 4-11 (1994)
 - 6) KOPP, J., DICHTL, N., Influence of the free water content on the dewaterability of sewage sludges. Water Science and Technology, 44(10), 177-183 (2001)
 - 7) 김은호 등, 소화슬러지 탈수성 증진을 위한 폐굴껍질의 재활용, J. Kor. Ind. Eng. Chem., 11(2), pp. 176-182 (2000)
 - 8) Water Environmental Federation, Sludge Incineration : Thermal Destruction of Residues, 49 (1992)
 - 9) Clesceri, L S. Greenberg, A E. Eaton, A D., "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 20th ed.", American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, Washington DC,

USA (1998)

- 10) CHO, Y.H., JEONG, C.H., HAHN, P.S., Sorption characteristics of ^{137}Cs onto clayeffect of mineral structure and ionic strength. *J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 205(1), 33-4 (1996)
- 11) LEE, J.K., CHO, Y.H., HAHN, P.S., SEO, Y.C., Adsorption of Cu^{2+} and Ni^{2+} at solution/mineral (goethite, kaolinite, montmorillonite) interface. *J. Korean Society of Environmental Engineers*. 20(6), 831-840 (1998)
- 12) TICKNOR, K.V., CHO, Y.H., Interaction of iodide and iodate with granitic fracture-filling minerals. *J. Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 140(1), 75-90 (1990)
- 13) Lehne, G., Müller, J., Schwedes, J., Mechanical disintegration of sewage sludge. *Water Science and Technology*. 43(1), 19-26 (2000)
- 14) Instruction manual for ZetaPlus, Zeta Potential Analyser. Brookhaven Instruments Corporation, (1992)
- 15) LEE, M.J., et al. Development of a technique for environmental treatment by radiation. KAERI/RR-2010/99 (Final Report), Korea Atomic Energy Institute. Korea (2002)