

放射線과 廢水産資源을 利用한 下水 濃縮슬러지 處理에 관한 研究

柳大鉉 · 李裁廣 · 李冕周 · 姜 浩

韓國原子力研究所 放射線利用研究部, *忠南大學校 環境工學科

Treatment of Thickened Sewage Sludge by Using the Sea Waste Resource and the Radiation Technology

Dae-Hyun Yoo, Jae-Kwang Lee, Myun-Joo Lee and Ho Kang

Division of Radiation Application, Korea Atomic Energy Research Institute, Korea

*Department of Environmental Engineering, Chungnam National University, Korea

요 약

본 연구는 하수처리장에서 발생하는 농축슬러지의 처리방법에 대해 진행하였다. 방사선을 15 kGy 조사하였을 때 농축슬러지에 존재하는 일반세균 및 대장균을 99% 이상 제거, 유기물 분해등 소화조에서 일어나는 공정을 대체 할 수 있다. 폐수산자원인 불가사리를 가공하여 제조한 물리개량제를 첨가하여 응집공정의 효율을 높이고 아울러 함수율 10% 이상의 저감효과를 얻을 수 있다.

주제어 : 농축슬러지, 방사선, 불가사리, 함수율

Abstract

This study was focused on the treatment of thickened sewage sludge. General bacteria and E. coli were disinfected over 99% and organic compounds were decomposed after irradiation. It was suggested that this process can be an alternative for digestion process. The moisture content in sludge was decreased over 10% (w/w) and the coagulation of sludge particles was enhanced by irradiation at the dose of 15 kGy and addition of sea waste resource (star-fish) as a dewatering aid.

Key words : thickened sludge, radiation, star-fish, moisture contents

1. 서 론

현재 정부는 런던 덩핑협약 가입과 슬러지 직매립 금지조치와 관련하여 대상 폐기물을 최대한 감량화함과 동시에 재활용을 적극 추진하는 것을 기본 원칙으로 하고 있다. 이로 인해 기존에 이용되어지고 있는 슬러지 매립이나 해양투기 등의 처리방식은 소각 및 자원화하여 이용하는 방향으로 전환될 것이다. 이에 슬러지 자원화 및 슬러지내에 존재하는 수분을 제거하는 탈수공정을 통하여 탈수케이크의 부피를 감소시켜 처리비용의 절감 및 효율성을 높이기 위한 여러 연구들이 진행되고

있다.¹⁻³⁾ 하지만 현재까지는 뚜렷한 처리방안이 제시되지 않고 있으며 하수 슬러지 처리 공정의 단순화와 슬러지 자원화에 도움을 줄 수 있는 전처리 공정 개발이 요구되고 있다.

최근 슬러지 개량방법으로는 열처리, 동결, 물리개량제 첨가, 오존처리 등의 방법들이 연구 진행되고 있다.^{4,6)} 그러나 기존의 물리개량제 등은 함수율 저감에는 효과적이거나 슬러지 발생량 증가는 물론 후속 공정으로 소각 및 퇴비화등을 연계할 경우 단점을 보이고 있다.

일반적으로 불가사리 성체 1마리당 연간 약 10 kg의 폐류를 섭취하며 1회당 번식력도 커서 현재 서해 인근 해역에만도 1 ha 당 약 12만 마리의 불가사리가 서식하고 있다. 이러한 불가사리의 막대한 번식력과 어패류 섭취는 국내뿐만 아니라 세계의 모든 해안에 걸쳐 일어나고

*2004년 1월 19일 접수, 2004년 8월 12일 수리

*E-mail: ex-dhyoo@kaeri.re.kr

있으며 해양 자원의 보호를 위해 각종 구제방법 및 활용에 대한 모색이 진행되고 있다. 하지만 현재까지 연구된 불가사리의 활용은 불가사리 구성 성분 중 일부분만을 추출하여 화장품 및 약품에 이용하는 정도에 머물고 있어 추출 후 남은 부산물의 발생으로 환경 문제의 해결에는 큰 도움이 되지 못하고 있다.

방사선을 이용한 슬러지 분해는 슬러지 및 슬러지내에 존재하는 미생물을 파괴하여 내부수 및 부착수를 탈수가 용이하도록 만들 수 있다.⁷⁾

따라서 본 연구에서는 하수처리장에서 발생하는 농축 슬러지를 대상으로 방사선 및 불가사리 물리개량제를 이용하여 슬러지 분해 및 가용화를 수행하였으며 이를 이용한 슬러지 처리방법 및 재활용 방안을 제시하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 실험재료

2.1.1. 하수 농축 슬러지

슬러지 분해 및 가용화 효과를 알아보기 위하여 D시의 하수종말처리장에서 발생하는 농축 슬러지를 대상으로 이용하였다. 공정시험법에 준하여 측정된 농축 슬러지의 초기 특성은 Table 1에서 나타나는 것과 같이 고형분 함량(Total Solids, TS)은 2.6%의 내외였고 유기물 함량은 평균 57% 였다. 농축 슬러지를 이용함에 있어 초기 슬러지 특성의 변화를 최소화하기 위하여 대상 시료는 실험 직전 채취하여 사용하는 것을 원칙으로 진행하였고 실험온도는 상온으로 하였다.

2.1.2. 불가사리

폐수산자원인 불가사리를 이용한 슬러지 물리개량제를 개발하였다. 서해안과 남해안 일대에서 수거한 극피동물문 불가사리과의 별 불가사리와 아무르 불가사리등을 불순물 및 염분의 제거를 위해 상수와 증류수를 이

Table 1. Characteristics of thickened sludge.

Item	Average
TS (%)	2.6
SCOD _{cr} (mg/L)	362.0
DOC (mg/L)	217.8
TVS/TS (%)	57.0
Temperature (°C)	25.7

Table 2. The elemental contents in starfish.

Composition	Concentration (ppm)
Al	188
Ca	264,522
Fe	1,164
K	9,444
Mg	21,467
Mn	36
Na	19,573
Si	102

용하여 수회 세척 후 건조 및 분쇄과정을 거쳐 분말을 농축 슬러지에 첨가하여 탈수하였다. 제조된 불가사리 분말의 물성은 ICP를 이용하여 분석하였고 결과를 Table 2에 요약하였다. 불가사리의 완전 건조를 위해 105°C 온도에서 열풍건조 하였으며 불가사리의 분쇄는 기존에 알려진 슬러지 개량제의 최적 입경인 20~80 mesh 범위에 속하는 분말로 만들기 위해 분쇄 후 50 mesh로 체가를 하였다.⁸⁾

2.2. 실험 방법

2.2.1. 방사선 조사

방사선조사를 위해 고준위 ⁶⁰Co 선원(AECL IR-79, 200,000 Ci, Canada)으로부터 방출되는 감마선을 사용하였다. 조사실 내부의 온도는 24°C 내외의 상온이었으며 1L 유리 바이알에 시료를 담아 방사선의 조사선량은 0~20 kGy 범위에서 실시하였다.

2.2.2 농축 슬러지 탈수

농축슬러지의 탈수능 변화를 평가하기 위하여 방사선 조사 전·후의 슬러지에 불가사리 분말을 첨가하였고 이를 30분간 교반 하여 슬러지와 충분히 혼합한 후 하수처리장에서 사용되어지고 있는 것과 동일한 양이온계 고분자 응집제인 SC-050을 사용하여 Jar tester를 이용한 응집공정을 거쳐 현재 처리장에 가장 많이 보급되어 있는 Belt press 탈수기와 동일한 방식의 탈수장비(Yu Chon SP-1000)를 이용하여 슬러지를 탈수 후 탈수케이크의 함수율을 측정하였다. 불가사리 분말을 첨가하지 않은 공시험의 경우에도 분말 첨가한 경우와 동일하게 30분간 교반 후 사용하였다. 함수율의 측정은 Standard method 2540에 준하여 측정하였다.⁹⁾

2.2.3 일반세균 및 대장균

D시 하수종말처리장에서 배출되는 슬러지를 Grab Sampling하여 방사선 조사 전·후의 대장균군 및 일반세균수를 측정함으로써 살균효율을 평가하고자 하였다. 대장균군의 개체수는 수질오염공정시험법상의 평판집락법을 이용하였으며, 일반세균의 경우 증온성 일반세균의 개체수로써 평가하였다.¹⁰⁾

3. 결과 및 고찰

3.1. 방사선과 불가사리 물리개량제를 이용한 슬러지 개량

농축 슬러지에 방사선과 불가사리 물리개량제를 첨가하였을 때의 슬러지 탈수케이크의 함수율 변화를 측정하였다. 방사선을 조사하지 않은 농축 슬러지의 초기 함수율은 82.4% 였으며 이에 방사선을 5~15 kGy 까지 조사하여 방사선에 의한 함수율 저감 효과를 측정하였다. 그러나 농축 슬러지에 방사선을 조사할 경우 탈수 전 응집공정에서 응집제를 과량 투입하여도 플록을 형성할 수 없음을 확인하였다. 이에 본 연구에서 개발한 불가사리 물리개량제를 방사선 조사 농축 슬러지 100 ml에 3 g 첨가하였을 경우 응집공정에서의 플록 형성이 가능하였으며 이를 이용하여 기계적 탈수공정을 거친 탈수케이크의 함수율을 측정하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 방사선을 조사하지 않은 농축슬러지에 불가사리 물리개량제만을 첨가하였을 경우 3%의 함수율 저감을 얻을 수 있었으며 방사선을 조사한 후 불가사리 분말을 첨가하여 응집·기계적 탈수공정을 거친 탈수 케이크의 경우 15 kGy에서 10% 이상의 함수율 저감

효과를 얻을 수 있었다. 이는 방사선 조사를 통해 슬러지 입자가 잘게 부서지며 이에 따라 슬러지 입자 내부에 존재하는 부착수의 일부가 유리되어 함수율 저감을 얻을 수 있으나 응집공정에서의 플록 형성이 불가능하게 되는 문제점을 불가사리 분말을 첨가함으로써 응집 효과가 개선되어 탈수가 가능해 짐으로 부터 얻어진 결과라 사료된다.

슬러지 입자의 파괴정도를 확인하기 위하여 SCOD를 이용한 DRCOD(Disintegration of COD)를 이용하였다. DRCOD는 슬러지의 파괴로인해 세포 및 미생물 내부로부터 용출된 탄소원을 측정하여 슬러지의 파괴정도를 간접적으로 판단하는 것으로 아래의 식으로부터 계산된다.¹¹⁾

$$DR_{COD} = \frac{COD_{Irradiated} - COD_0}{COD_{NaOH} - COD_0} \quad (1)$$

$COD_{Irradiated}$: 방사선 조사후 슬러지의 COD

COD_{NaOH} : NaOH 1 Mole 과 슬러지를 1:1의 비율로 혼합후 90°C에서 10분간 열처리 후 측정값

COD_0 : 사용된 초기 시료 슬러지의 COD

위의 식에 따라 방사선 조사에 따른 슬러지 파괴도를 계산하여 Fig. 2에 도식하였다. 슬러지의 파괴는 10 kGy 까지 급격히 진행되어 지며 그이상 조사하였을 경우에는 완만한 속도로 파괴가 진행되어 진다. 방사선 조사를 이용한 공정의 경우 조사장치에 일정량의 슬러지를 주입하며 연속식으로 처리하게 되어 다량의 슬러지 처리에도 일정한 조사의 효과를 얻을 수 있다. 이에 본 연구에서는 농축슬러지 개량에 요구되는 최적 방사선 조사선량을 10~15 kGy로 선정할 수 있었다.

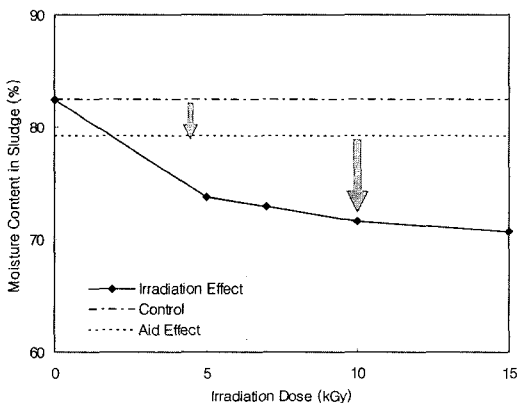


Fig. 1. Moisture content in sludge cake after irradiation and addition of star-fish powder.

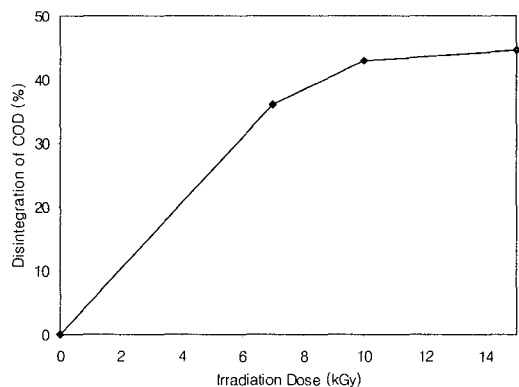


Fig. 2. Sludge disintegration after irradiation.

3.2. 방사선에 의한 농축슬러지 멸균

방사선 조사를 이용한 처리방법은 유기물 분해와 동시에 멸균효과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 이에 본 연구는 농축슬러지에 존재하는 대장균 및 일반세균 제거를 확인하였다.

Fig. 3에 방사선을 이용한 농축슬러지내 일반세균의 제거효과를 도식하였다. 농축슬러지에 존재하는 초기 일반세균의 개체수는 6,200,000,000 CFU/ml 였으나 1 kGy의 낮은 조사량에서도 99% 이상의 제거율 (158,000 CFU/ml)을 나타내어 방사선 조사가 일반세균의 사멸에 탁월함을 알 수 있었다. 일반적으로 하수처리장에 설치되어 운영되고 있는 소화조 공정 이후의 소화슬러지에 존재하는 일반세균의 개체수는 16,200,000 CFU/ml로 1 kGy의 방사선 조사만으로도 기존의 소화조에 비해 일반세균 제거율이 월등히 높게 나타났다.

Fig. 4에는 방사선 조사에 의한 농축슬러지내 대장균의 변화를 나타내었다. 초기 840,000 CFU/ml의 개체수를 보이는 대장균의 경우에도 일반세균과 동일하게

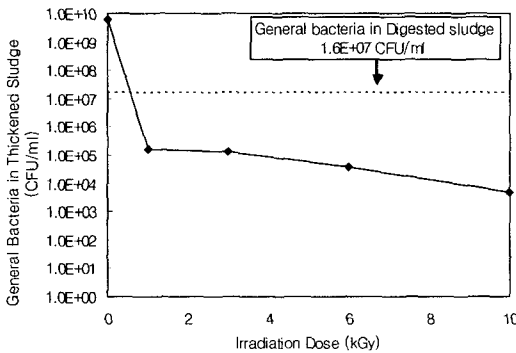


Fig. 3. Reduction of colony forming unit of bacteria in thickened sludge after irradiation.

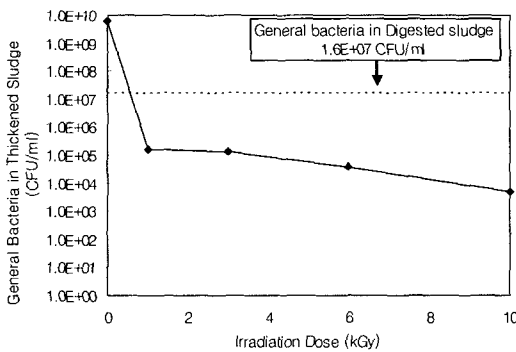


Fig. 4. Reduction of colony forming unit of E.coli in thickened sludge after irradiation.

1 kGy에서 99% 이상의 제거율(1,170 CFU/ml)을 나타내었다. 이러한 결과는 소화슬러지에서 확인되는 대장균 개체수인 36,700 CFU/ml 보다 적은 수로 방사선 조사가 기존 공정에 비해 일반세균 및 대장균 제거에 효과적임을 보여준다.

3.3. 방사선에 의한 농축슬러지의 물리화학적 특성변화

방사선을 조사한 후 농축슬러지의 물리화학적 특성변화를 분석하여 처리 후 탄소원으로의 재이용 가능성을 평가하였다. Fig. 5는 5, 10, 20 kGy의 방사선을 조사한 농축슬러지의 DOC와 SCOD를 측정된 결과를 나타낸다. 20 kGy의 방사선을 조사한 경우 DOC는 초기 217.8 mg/L에서 5배 이상 증가하여 1,160.5 mg/L를 나타냈으며 SCOD 또한 6배 이상의 증가를 나타냈다. 이는 슬러지 입자의 파괴와 슬러지에 존재하는 미생물의 파괴로 인한 용출에서 기인하는 것으로 판단된다. 이러한 미생물 파괴에 의한 용출을 확인하기 위하여 실험실 내에서 0.3%로 순수배양한 E.coli를 대상으로 3 kGy 조사량으로 방사선조사를 실시하여 E.coli cell의 형태변화 관찰과 함께 S-Protein과 S-Carbohydrate의 농도변화를 측정하였다. 그 결과 Fig. 6, Fig. 7의 SEM사진을 통하여 알 수 있듯이 방사선을 조사하지 않은 E.coli cell과 3 kGy로 방사선을 조사한 E.coli의 형태는 뚜렷한 차이를 보였다. 즉, 방사선을 조사하지 않은 E.coli배양체의 cell은 외관상 뚜렷한 간극 구조를 보이나 3 kGy로 조사한 E.coli는 표면에 방사선에 의한 손상의 흔적이 관찰되며 cell의 길이도 짧아진 것을 알 수 있다.

한편 S-Protein의 농도는 control 배양체 5.2 mg/L, 3 kGy 배양체 70.2 mg/L로 13배 이상 증가되었으며 S-Carbohydrate은 control 배양체 11.7 mg/L에서 3 kGy

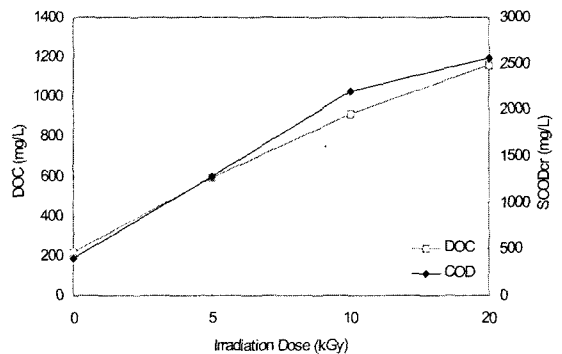


Fig. 5. Variation of DOC and SCOD concentration of thickened sludge after irradiation.

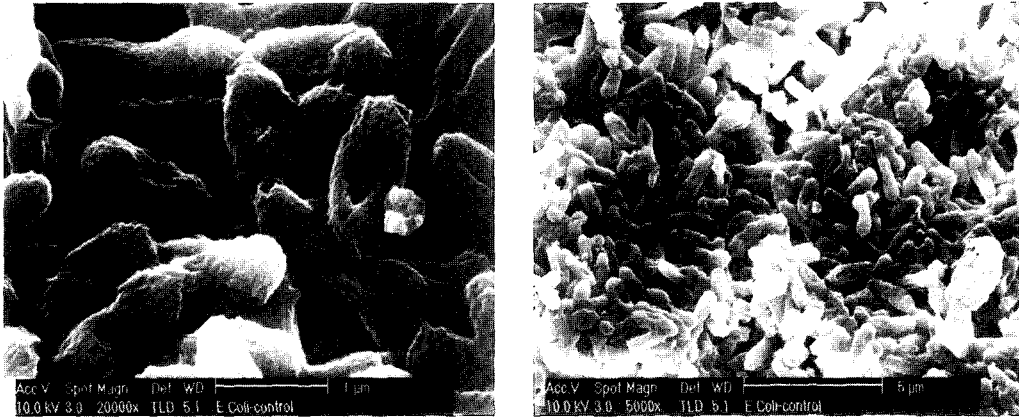


Fig. 6. Scanning electron microscopic of unirradiated E.coli cell.

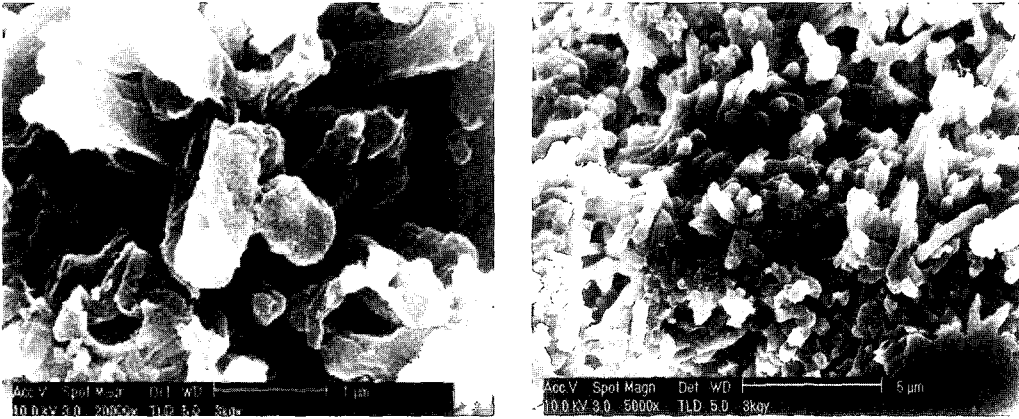


Fig. 7. Scanning electron microscopic of irradiated E.coli cell.

배양액 184.1 mg/L로 15배 이상 증가되었다. 따라서 방사선에 의한 슬러지내의 유기물가용화는 방사선조사와 그에 따르는 슬러지내 미생물의 세포 손상에 의한 용출이 주요 기작임을 뒷받침해주는 결과로 사료되며 이를 이용하여 탈질공정등에 이용되는 고도처리에 탄소원으로 적용이 가능하리라 사료된다.

3. 결 론

농축슬러지 개량을 위한 전처리 공정으로 방사선 조사공정을 이용하고 물리개량제로서 폐수산자원인 불가사리 분말을 이용하는 방법을 도입하였다. 가압식 탈수장치를 이용한 탈수케이크의 함수율 변화 및 미생물 멸균, 그리고 슬러지의 물리화학적 성상변화 등을 측정하였으며 이러한 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻

을 수 있었다.

- 1) 농축슬러지에 방사선을 조사하였을 때 슬러지 파괴로 인한 내부수의 유리로 탈수케이크의 함수율을 10% 이상 저감시킬 수 있으나 방사선 조사이후 응집공정이 불가능한 문제점이 있으며 불가사리 분말을 첨가함으로 이러한 문제점을 해결할 수 있다.
- 2) 방사선을 이용하여 유기물 제거와 동시에 1 kGy의 조사량 만으로도 99% 이상의 미생물 멸균 효과를 얻을 수 있으며 이러한 전처리 공정을 이용하여 기존의 소화조 공정의 개선이 가능할 것으로 사료된다.
- 3) 슬러지입자 및 미생물의 파괴로부터 기인하는 탄소원의 용출을 확인하였으며 이는 슬러지 가용화 및 고도처리에 소요되는 탄소원으로 재활용할수 있는 기초자료로 활용될 수 있는 것으로 사료된다.
- 4) 석회등의 타 물리개량제에 비해 유기물 함량이

60% 이상으로 높은 불가사리 분말을 물리개량제로 첨가함으로 후속공정으로 소각을 이용할 경우 발생하는 소각재 발생량을 현격히 감소시킬 수 있어 후속공정 연계에 이점이 있는 개량제로 사료된다.

5) 추출등을 통한 일부만이 아닌 불가사리 전체를 이용하여 폐지원인 불가사리의 활용방법을 제시하였다.

6) 농축슬러지의 미생물 멸균, 유기물 제거 및 함수율 저감을 위한 방사선 조사량을 10-15 kGy로 선정하였다.

사 사

본 연구는 과학기술부의 원자력 증장기 연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

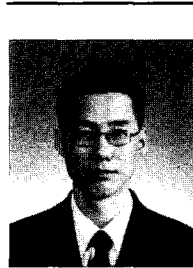
1. Sawai, T., Yamazaki, M., and Shimokawa, T., 1990: Improvement of sedimentation and dewatering of municipal sludge by radiation, *Radiation Physics and Chemistry*, **35** (1-3), pp. 465-468.
 2. Lee, C. H., Liu, J. C., 2001: Sludge dewaterability and floc structure in dual polymer conditioning, *Advances in*

Environmental Research, **5**, pp. 129-136.
 3. Mikkelsen, L. H., and Keiding, K., 2002 : Physico-chemical characteristics of full scale sewage sludge with implications to dewatering, *Water research*, **36**, pp. 2451-2462.
 4. Gregorio, D. D., and Shell, G. I., 1976: Dewatering chemical-primary sludge, *J. ASCE*, **102**, pp. 1087-1105.
 5. Yoshio Sakai, et al., 1997: An activated sludge process without excess sludge production, *Wat. Sci. Tech.*, **36**(11), pp. 163-170.
 6. Jean, D. S., et. al., 2000: Reduction of microbial density level in sewage sludge through pH adjustment and ultrasonic treatment, *Wat. Sci. Tech.*, **42**(9), pp. 97-102.
 7. 신경숙, 2002: 하수슬러지의 효율적인 처리를 위한 전자빔 응용, pp. 138-142, 박사학위논문, 충남대학교, 대전, 대한민국.
 8. Water Environmental Federation, 1992: Sludge Incineration, *Thermal Destruction of Residues*, 49.
 9. Clesceri, et al., 1998: 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.
 10. 임무창, 1997: 수질오염 공정시험방법, pp. 279-280, 크로바출판사, 서울, 대한민국.
 11. Muller, J., 2000: Disintegration as a key-step in sewage sludge treatment, *Wat. Sci. Tech.*, **41**(8), pp. 123-130.



柳 大 鉉

- 1998년 연세대학교 환경공학과 학사
- 2000년 연세대학교 환경공학과 석사
- 현재 연세대학교 환경공학과 대학원 박사재학
- 현재 한국원자력연구소



李 栽 廣

- 1997년 연세대학교 환경공학과 학사
- 1999년 연세대학교 환경공학과 석사
- 현재 연세대학교 환경공학과 대학원 박사재학
- 현재 한국원자력연구소 연구원



李 冕 周

- 1980년 충북대학교 화학공학과 학사
- 1985년 인하대학교 환경공학과 석사
- 1992년 인하대학교 환경공학과 박사
- 현재 한국원자력연구소 책임연구원



姜 浩

- 1974년 충남대학교 화학공학과 학사
- 1984년 Univ. of Florida 환경공학과 석사
- 1987년 Univ. of Florida 환경공학과 박사
- 현재 충남대학교 환경공학과 교수