

## 제지공정 폐슬러지처리용 지렁이 분변토의 담체화 기술

조옥상 · 이은영 · 조남혁\*

수원대학교 환경공학과 · (주) 화양\*

### Immobilization of Earthworm Casts to Treat the Waste Sludge Produced from Pulp & Paper Plants as a Biocarrier

Wook Sang Cho · Eun Young Lee · Nam Hyeuk Cho\*

Department of Environmental Engineering · University of Suwon, Hwa Young\*

#### 요 약

제지슬러지를 지렁이에게 급이하여 생산된 분변토의 하·폐수 고도처리용 담체로의 적용 가능성에 대하여 알아보았다. 먼저 폐수를 일반 활성슬러지법으로 운전한 후 이를 담체와 유입수의 조건을 달리하여 영양 염류의 제거 효율을 알아보았다. 담체를 적용하기 전엔 T-P 및 T-N의 제거율은 각각 평균 52%와 31% 정도로 나타났다. Pellet 형 및 pack 형으로 제조된 두 종류의 분변토 담체를 적용한 후에는 T-P의 경우는 제거효율이 약 1.3~1.4배 증가하였으며 T-N의 제거효율은 약 1.9 ~ 2.0 배 증가하여 상당히 뛰어난 영양염류의 제거 효율을 보여주었다. 또한, T-N 및 T-P의 제거효율은 담체의 종류에는 큰 영향을 받지 않아 다양한 미생물이 서식하는 분변토는 성형 방법에 관계없이 뛰어난 성능을 보임을 알 수 있었다. 반면, 담체 적용 전후의 BOD 및 COD의 제거 효율은 큰 차이가 없었다. 본 연구를 통하여 분변토로 제조된 담체는 하·폐수 고도처리용 담체로의 활용 가능성이 매우 높은 것으로 사료된다.

ABSTRACT : The adaptability of earthworm casts produced from the waste sludge of pulp and paper plants for a biocarrier used in the advanced wastewater treatment was investigated. Removal efficiencies of nutrients in the activated sludge technology without carrier were compared with those treated with carrier made of casts under the different conditions such as the composition of the input and kinds of carrier. When the waste water was treated in the activated sludge technology without carriers, removal efficiencies of T-P and T-N were average values of 31% and 52%, respectively. On the contrary, pellet type carrier and pack type carrier increased the removal efficiencies of T-P and T-N by 1.3~1.4 and 1.9~2.0 times, respectively. At the same time, the high removal of T-P and T-N were observed irrespective of the types of carrier in which many kinds of microorganisms were grown. The difference in the removal efficiencies of BOD and COD between the treatment with and without carrier was negligible. According to this research, the carrier made of casts was thought to be highly applicable in the advanced wastewater treatment.

## 1. 서 론

우리나라의 인구 및 산업활동 증가에 따라 생활 오수배출량과 산업폐수발생량은 꾸준히 증가하여 왔다. 87년 12,495 천 $m^3$ /day이었던 오폐수 발생량은 97년 21,346 천 $m^3$ /day로 10년 사이에 약 2배정도 증가하였다[1]. 국내에서는 1970년대 이후 하수종말처리장의 90%이상을 활성슬러지 공법을 사용하여 처리하고 있다[2]. 이러한 활성슬러지법은 우수한 유기물 처리효율과 저렴한 운전비용을 장점으로 갖고 있지만, SRT를 적정하게 유지해 주기 위해서는 고도의 운전 기술과 유지관리가 필요하고 슬러지 팽화(Sludge Bulking)현상이 자주 발생하며, 부하변동이 큰 경우에 대처하기가 어려울 뿐만 아니라 잉여 슬러지가 다량 발생하는 등의 문제점과 최근 부영양화의 주원인이 되고 있는 영양염류에 대한 처리가 어려워 만족할만한 방류수질을 얻을 수 없는 실정이다[3].

이후 1977년 미국의 Spector에 의해 개발된 A/O 공법은 혐기성조를 호기조와 조합시켜 벌킹억제 뿐만 아니라 인제거에도 효과가 있는 것으로 나타났다[4]. A/O 공법은 설계 SRT가 상대적으로 짧으며 높은 유기부하율을 설계에 사용할 수 있으며 타공법에 비해 공정이 단순하여 운전조작이 비교적 간단하고 인제거 효율이 기타 공법보다 탁월하며, 체류시간이 비교적 짧다. 하지만 방류수의 여과장치가 필요하며, 질소의 인의 동시 제거율은 매우 낮으며 추운 기후에서는 처리효율이 좋지 못하고 BOD : P의 비율이 높아야 한다는 단점을 가지고 있다[4]. 따라서 최근 들어 처리효율, 경제성, 유지관리의 용이성 등에서 차별화 될 수 있는 고도처리 기술의 하나로 미생물을 고정화시킨 담체를 폐수 처리에 활용하는 것에 대한 연구가 진행되고 있다[5-8]. 고정화담체를 폐수처리 반응조에 적용할 경우, 운전 초기 많은 미생물상으로 인하여 생물막 형성기간의 단축과 미생물의 재순환에 드는 비용을 절감할 수 있고, 반응조 내 미생물상의 다양성을 야기할 수 있어 처리 효율을 높게 유지할 수 있다. 또한, 높은 회석속도에서 증식속도가 느린 미생물이 세출(wash out)되는 문제점을 극복할 수 있을 뿐 아니라, 슬러지의 자기산화가 촉진되기 때문에 폐슬러지의 발생량이 적은 점이

큰 장점으로 알려져 있다 [9, 10]. 생물학적 처리법에 이용되는 담체는 단위부피 당 표면적이 넓고, 가격이 저렴하며, 내구성이 좋고, 물리·화학·생물학적으로 안정한 것이 바람직하다[11]. 그러나, 담체를 적용한 폐수 처리공정에서 장기적인 운전에 의한 미생물의 탈리현상, 플라스틱 담체의 공극 막힘 현상, 겨울철 온도저하에 따른 동결현상 및 악취 등의 문제가 발생되어 이에 대한 해결책이 요구된다[12].

따라서 기존 무기성 담체에 비하여 제조 과정이 쉽고, 제조 단가가 저렴하며, 장기적으로 운전함에 있어 지속적인 미생물상이 존속될 수 있고, 자체적으로 악취 물질에 대한 흡착력이 있는 새로운 담체에 대한 필요성이 시급하다. 본 연구에서는 가격이 매우 저렴하며, 통기성이 우수하고 비표면적이 큰 고른 구형입자(0.2mm~2.0mm)로 되어있으며, 높은 이온교환능력과 흡착력으로 폐수처리공정에서의 악취제거가 가능하다[13-15]는 지렁이 분변토를 이용한 유기성 생물담체를 제조하여 하·폐수의 고도처리에 이용하여 그 성능을 평가하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료 및 방법

#### 2.1.1 담체의 제조

##### 가) 분변토 채취

본 실험에서의 담체는 지렁이가 계지슬러지를 먹이로 섭취하여, 소화관내에서 당, 지질, 단백질 등의 소화물을 흡수하고 체외로 배출된 분변토를 이용하였다. 생산된 분변토에는 분변토뿐만 아니라 지렁이가 미섭취한 물질(오버스(OVERS))이 혼합되어 있으므로 1.5mm 체와 2.5mm 체를 이용하여 분변토를 선별하였다.

Table 1. The physico-chemical characteristics of earthworm castings [10]

| Weight (g) | Water capacity (%) | Solids (%) | Organic contents (%) |
|------------|--------------------|------------|----------------------|
| 2.4        | 3.07               | 96.93      | 58.37                |

나) 담체제조

1) 펠렛형

선별된 분변토와 증류수에 5배 희석한 EVA (Ethylene-Vinyl Acetate)를 3 : 1 (v/v)로 잘 섞은 후 파이프(Φ15×H20)에 넣고 압력(3~5kg/cm<sup>2</sup>)을 가하여 성형한 후 꺼내어 그늘에서 1시간 동안 완전 건조시켰다. 실험에 사용된 담체의 물리적 특성은 Table 2. 에 정리되어있다.

Table 2. The physical characteristics of the carrier composed of casting

| Characteristics | Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> ) | Packing water capacity (%) | Tentative density (g/cm <sup>3</sup> ) | Porosity (%) | CFC (cm <sup>3</sup> /kg) | pH      |
|-----------------|---------------------------------------|----------------------------|--|--------------|---------------------------|---------|
|                 | 0.6~0.8                               | 88.2%                      | 0.60                                   | 74           | 40~80                     | 6.5~7.5 |

2) 팩형

선별된 분변토를 장섬유(폴리에스테르)로 제조된 Bag(H100×L80)에 20g씩을 넣어 밀봉한다.

2.1.2 실험장치

본 실험에서 사용한 반응조에는 반응 상태를 알 수 있도록 DO, pH, MLSS, 온도센서가 내장되어 있으며 각각의 센서들은 모두 PLC장치에 연결되어 4~20mA의 전송출력 속도로 각각의 data값을 MMI 프로그램으로 전송하였다(Fig.1). 각 센서들의 감지 범위를 Table 3에 정리하여 놓았다.

Table 3. The types of sensor in the reactor

| Type           | Model    | Company          | Ranges   |
|----------------|----------|------------------|----------|
| DO (ppm)       | DD-600   | DIK (Korea)      | 0~15     |
| pH             | PH-6000  | DIK (Korea)      | 0.0~14.0 |
| Temperature(℃) | TZ4L     | Autonics (Korea) | -10~50   |
| MLSS (ppm)     | MLSS-610 | DONGIL (Korea)   | 0~500×10 |

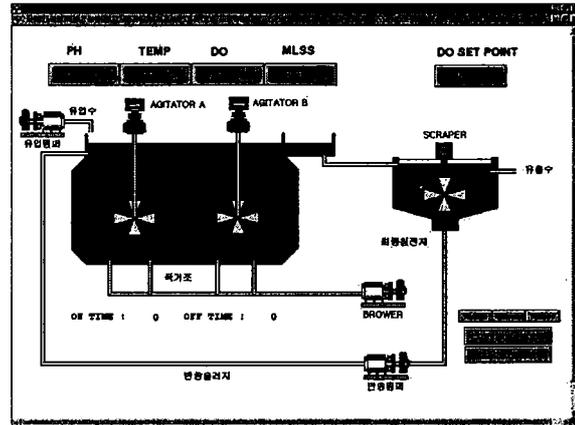


Fig. 1. MMI program connecting to the reactor.

폐수처리를 위한 활성슬러지법과 pellet 형 및 pack 형 담체 적용 실험을 위하여 실험실 규모의 반응기를 만들고, 반응조 (300mm(H)×700mm(W)×300mm(D))와 최종침전지 (370mm(H)×200mm(φ))를 설치하였으며, 용량은 각각 60ℓ와 18ℓ로 설계하였다. 본 실험을 위해 사용된 처리공정도는 Fig 2.와 같다.

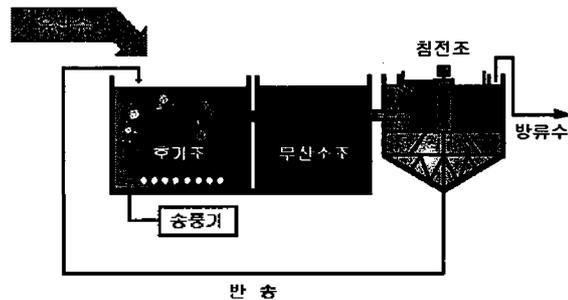


Fig. 2. Lab scale reactor for the treatment of waste water.

반응조로 유입되는 폐수의 유입속도와 HRT는 각각 100ℓ/d, 14.4hr로 설정하였다. 폭기는 blower를 이용하여 산기관으로 주입하였으며, 이때 호기조의 DO는 폭기 시 2mg/ℓ 이상을 유지하였다. 무산소조에는 agitator를 장착하여 슬러지의 침전을 방지하며, 탈질 미생물이 유입수에 함유된 유기물을 충분히 이용할 수 있도록 혼합하였다. 무산소조의 DO는 0.2mg/ℓ 이하로 유지되었다. 반응기는 호기조와 무산소조를 각각 같은 부피로 하였으며, 담체 충전부의 부피는 총 부피의 30%로 하였다. 유입수는 최초침

전지에서 폭기조로 유입되는 생활하수(S시 하수종말 처리장)와 합성폐수를 사용하였다. 합성폐수의 조성은 Table 4에 정리되어있다

Table 4. Compositions of the synthetic waste water

| Chemicals                                       | Stock (g/L) | Amounts in 50 L (mL) |
|---|-------------|----------------------|
| Glucose   | 46.875      | 50                   |
| CH <sub>3</sub> COONa                           | 36.62       | 50                   |
| KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>                 | 18          | 50                   |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 42.45       | 300                  |
| MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O           | 50          | 50                   |
| CaCl <sub>2</sub>                               | 18.75       | 10                   |
| FeCl <sub>6</sub> · H <sub>2</sub> O            | 1.25        | 10                   |
| MnSO <sub>4</sub> H <sub>2</sub> O              | 25          | 10                   |
| NaHCO <sub>3</sub>                              | 52.5        | 100                  |

2.1.3 실험장치의 분석방법

각 반응조의 처리효율 및 호기조/무산소조에 따른 COD<sub>cr</sub>, BOD, SS, T-N, T-P의 변화를 관찰하였다. 각 반응조 하단에서 1ℓ씩 채취하여 GF/C로 거른 후 여과액을 측정하였다. BOD<sub>5</sub>, T-N, T-P, SS는 공정시험방법에 의하여 측정하였으며[16], COD<sub>cr</sub>의 측정은 DR-4000 (Hach Chemical Co., USA)을 이용하여 분석하였다.

2.3 실험 결과

본 실험은 처음 반응조를 운전하여 10일간의 적응기를 경과한 후 분변토 담체를 식중한 후 총60일에 걸친 운전 동안 4회의 시료 채취로 영양염류의 제거 효율을 비교하였다. 총 60일의 운전기간 동안 반응조의 센서로부터 연결된 PLC로부터 반응조 내의 pH, 온도, DO 및 MLSS 값을 받았다. 운전이 진행되면서 반응조의 성상은 큰 변화가 없이 pH와 온도는 각각 6.7~7.5와 18~22℃를 유지하였으며, MLSS도 2000~2500의 범위였다. 운전이 시작된 지 10일에 활성슬러지 법에 의거하여 담체를 적용하기 전의 영

양염류의 제거 효율을 알아보았다.

Fig. 3의 (A), (B)는 담체를 적용하기 전과 두 종류(pellet 형, pack 형)의 담체를 적용한 후의 BOD 및 COD의 변화를 알아본 결과이다. Pellet 형 담체는 S하수처리장의 유입수를 이용하였으며, pack 형 담체는 합성 폐수를 제조하여 운전한 결과이다. 또한, 담체를 적용하기 전의 결과는 활성슬러지법에 따라 운전한 것으로 포기조만으로 구성된 단일 반응조로 되어있었다.

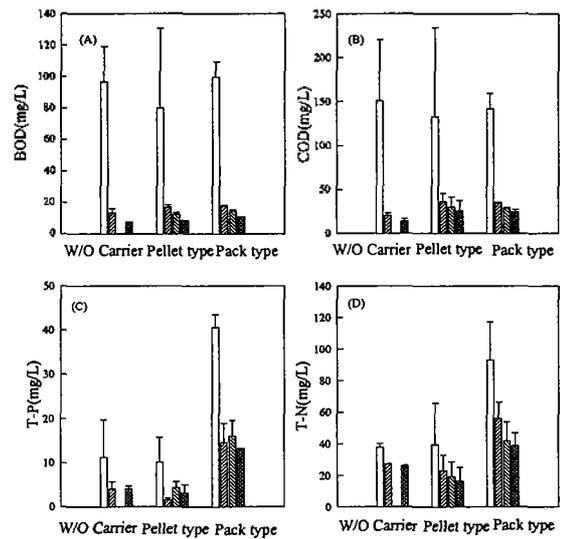
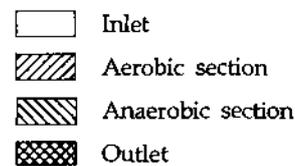


Fig. 3. Nutrients removal in waste water.

(a) BOD (b) COD (c) T-P (d) T-N



따라서 그래프의 결과는 무산소조의 결과가 생략되어있다. 담체를 적용하기 전과 두 종류의 담체 모두에서 유입수의 BOD 및 COD는 반응조를 통과함에 따라 점차 낮아지는 일반적인 경향을 보였다. 담체를 적용하기 전 BOD와 COD는 각각 평균 97mg/ℓ, 151mg/ℓ의 유입수 조건에서 유출수가 각각 평균 7.7mg/ℓ, 14.5mg/ℓ의 값을 보였다. Pellet 형 담체를 적용한 실험에서 S 하수처리장에서 채취해 온 유입수는 시료의 성상에 따른 효율을 비교하기

위하여 BOD 값과 COD 값이 44~116 (평균 80 mg/ℓ)이며, 61~204 (평균 133mg/ℓ)의 범위의 극단적인 두 경우를 취하여 실험하였다. 합성 폐수의 경우, 하수처리장 유입수에 비해 성상의 편차는 적었으며, 유입수의 BOD (100mg/ℓ) 및 COD (142mg/ℓ) 값이 높았다. BOD의 경우 담체를 적용한 후 호기조와 무산소조를 거쳐 출구로 나갈 때는 평균 8.3~26mg/ℓ의 결과를 얻었다. Fig. 3(C), (D)는 담체를 적용하기 전과 후의 T-P 및 T-N의 변화를 알아본 결과이다. 담체를 적용하기 전의 유입수의 T-P 및 T-N는 각각 11.3mg/ℓ 과 37.7mg/ℓ 이었으며, 유출수의 값은 각각 4.1mg/ℓ 및 26mg/ℓ 이었다. 합성폐수의 경우 유입수의 T-P 및 T-N는 하수처리장의 것(평균 10mg/ℓ, 45mg/ℓ)에 비해 농도가 각각 4배에서 2배로 높았다. 그러나 유출수의 T-P 는 담체를 적용한 네 경우 모두 2~15mg/ℓ 의 범위로 수질 기준치를 만족하는 것이었다. T-N은 담체를 적용할 경우 매우 높은 제거효율을 보였다.

본 연구를 통하여 얻은 결과를 각 수질 항목 별로 담체 적용전과 두 종류의 담체를 적용하였을 때의 수질 개선 효율을 살펴보았다(Fig. 4). 그래프에서 보듯이 BOD 및 COD의 경우 담체 적용전 후의 수질 개선효과는 크게 달라진 것이 없었다. BOD와 COD 항목의 경우 담체 적용전의 효율은 담체 적용 후의 결과의 에러범위에 드는 것으로 거의 유사한 결과를 얻은 것으로 사료된다. 반면 T-P 및 T-N의 경우, 담체 유형에 관계없이 적용하기 전에 비하여 효율이 매우 높아졌다. 먼저, T-P의 경우, 담체 적용 전에 평균 52%의 제거 효율을 보인데 반해, pellet 형 담체를 적용한 경우 평균 68%, pack 형 담체를 적용한 경우 평균 70%의 제거효율을 얻을 수 있었다. T-N의 개선 효과는 매우 커서 담체 적용전의 평균 31%에 비해 pellet 형 및 pack 형 담체의 적용 후 효율이 두 배 이상 개선 되어 각각 64% 와 60%의 제거 효율을 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 수질 항목을 4가지로 선정하여 얻은 결과이지만, 담체를 적용함으로써 전체적인 수질 개선 효과를 얻을 수 있었으며, 특히 T-P 및 T-N 제거 효과는 매우 우수하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서 얻은 결과는 우리나라의 폐

수 처리에서 문제점으로 지적되고있는 영양염류의 제거의 문제점을 개선할 수 있는 방법론을 제시할 수 있다고 본다.

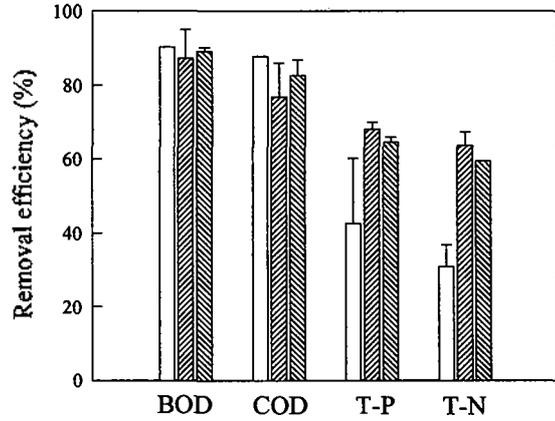


Fig. 4. Removal efficiencies of nutrients in waste water

□ Without carrier,  
 ▨ Pellet type carrier,  
 ▩ Pack type carrier

### 3. 결 론

지렁이에게 급이하여 생산된 분변토를 이용하여 pellet 형과 pack 형 담체를 제조하여 하·폐수처리 반응조에 적용하여 수질 개선효과를 관찰하였다. BOD와 COD 항목의 경우 담체 적용전·후의 결과가 거의 유사한 결과를 보여 큰 차이가 없었다. 반면 T-P 및 T-N의 경우, 담체 유형에 관계없이 적용하기 전에 비하여 효율이 매우 높아졌다. 먼저, T-P의 경우, 담체 적용 전에 평균 52%의 제거 효율을 보인데 반해, pellet 형 담체를 적용한 경우 평균 68%, pack 형 담체를 적용한 경우 평균 70%의 제거효율을 얻을 수 있었다. T-N의 개선 효과는 매우 커서 담체 적용전의 평균 31%에 비해 pellet 형 및 pack 형 담체의 적용 후 효율이 두 배 이상 개선 되어 각각 64% 와 60%의 제거 효율을 얻을 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. 김환성, 표면개질 담체를 이용한 무산소/호기 공

- 정에서의 유기물 및 T-N 제거 특성, 상지대학교 석사학위논문 (2001)
2. 유성환, 이승목, 이현모, 은종국, 정용태, 최석순, 기초폐수처리, 동화기술, p365-366 (1998)
  3. Hegemann, W., "A combination of the activated sludge process with fixed film biomass to increase the capacity of wastewater treatment plants," *Wat. Sci. Tech.*, 16, 119~130 (1984)
  4. Spector, M.L, Production of non-bulking activated sludge, US Patent, No4, 056, 465 (1977)
  5. 박재구 외, 폐수처리용 담체, 세라미스트 v.3 n.6, (2000)
  6. Tyagi, R. D. and Kannan, V., "Application of biomass carriers in activated sludge process", *Wastewater treatment by immobilized cells*, CRC Press. pp 103~142, (1990)
  7. Bitton, G., *Wastewater Microbiology*, John Wiley & Sons, INC., New York, NY. 89~198 (1994)
  8. Morper, M. R., "upgrading of activated sludge systems for nitrogen removal by application of the LINFOR-CN process", *Wat. Sci Tech.*, 29(12). 167~176 (1994)
  9. Michael LS and Fikret K, *Bioprocess Engineering*, Prentice Hall, (1992)
  10. Denac, M., Miguel, A. and Durm, I. *Biotechnol. Bioenging.*, 31: 1~ (1998)
  11. 조영일 외 7인 폐수처리공학, 동화기술, p558-559, (1987)
  12. 고재경, 지렁이의 농업적 연구 (1997)
  13. 김인학, 지렁이를 이용한 소화조 슬러지 탈비화 및 분변토의 탈황효과에 관한 연구, (1998)
  14. 최훈근, 류재근, 토양생물 지렁이를 이용한 폐기물 활용, 신광출판사 (2001)
  15. 환경부, 폐기물관리법 (1998)