

유동상 담체를 이용한 Loop Reactor에서 유기물 및 질소, 인 제거

선용호*

상지대학교 환경공학과

The Removal of Organics, Nitrogen and Phosphorus in Loop Reactor Using Fluidized Media

Yong-Ho Seon*

Department of Environmental Engineering, Sangji University, Wonju, Kangwon-Do 220-702, Korea.

Abstract This study was accomplished using Anaerobic/Anoxic/Oxic upflow packed-bed column reactors with fixed media and Loop Reactor with fluidized media instead of Oxidic reactor. The objectives of this study was to investigate the characteristics of organics, nitrogen and phosphorus removal from sewage with the HRT. The average removal efficiencies of BOD₅ and SS increase as increasing the hydraulic retention time (HRT) until 16 h of the HRT, and they were constant over 16 h of the HRT. The removal efficiency of BOD₅ in case of packed-bed reactor and Loop Reactor was about 86.6% and 90.9% respectively at 16 h of the HRT. The removal efficiency of SS in packed-bed reactor and Loop Reactor was about 78.0% and 88.2% respectively at 16 h of the HRT. The average removal efficiencies of COD_{Cr} and COD_{Mn} showed similar trends as those of BOD₅ and SS. At the HRT of 16 h, the removal efficiency of COD_{Cr} in case of packed-bed reactor and Loop Reactor was 63.5%, 75.2% and that of COD_{Mn} was 60.7%, 73.6% respectively. The average removal efficiencies of T-N and T-P increase as increasing the HRT. The removal efficiencies of T-N and T-P in Loop Reactor were 33.6% and 54.5% respectively at 16 h of the HRT and T-N and T-P were better removed in Loop Reactor. From this result, it was found that the performance of Loop Reactor was much higher than the performance of packed-bed reactor and the optimum HRT was 16 h.

Keywords: Loop Reactor, packed-bed reactor, fluidized media, fixed media, HRT, sewage, organics, T-N, T-P, removal efficiency

서 론

현재 대도시로의 인구의 집중화 및 경제 및 산업발전에 따른 생활수준의 향상, 레저 문화의 발달에 의한 여가 활동의 증가로 인해 하수의 발생량은 계속 증가하고 있으며 2007년 발생량은 16,745천 m³/day로 발생한 하수는 바로 하천으로 유입되기 때문에 하천 오염시 하천의 수생태계를 파괴시키고 악취를 발생시켜 주변 주민들이 민원을 제기할 소지가 많다(1). 이러한 하천오염은 바로 수도권 상수원의 오염으로 연결되어 국가적인 관점에서 매우 중요한

현안이며 현재 정부에서는 오수분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률을 폐지하고 오수 및 분뇨를 하수도법에 통합시켜 하수도법으로 단일화하고 하수처리시설의 설치 대상 범위를 확대하고 적용 방법도 변경하였으며 방류수 수질 기준도 더욱 강화시킬 예정이다. 특히 하천의 부영양화는 질소와 인에 의한 영향으로 질소와 인에 대한 규제치가 더욱 낮아질 예정이며 댐 상류의 하수처리 통합시스템 구축으로 많은 마을하수도과 하수종말처리장이 신설되거나 고도처리로 변경되고 있는 실정이다. 이러한 고도처리 시 기존의 처리 장치인 활성슬러지법으로는 한계가 있어 담체를 충전한 처리장치, 막분리 처리장치, 정밀여과장치 등 새로운 처리장치가 개발되고 있다(2, 3). 현재 개발되어 있는 처리방법으로는 기존의 처리시설을 고도처리로 변경시 기존의 부지 면적을 초과하게 되어 있어 새로운 부지가 필요

*Corresponding author

Tel: +82-33-730-0445, Fax: +82-33-730-0403
e-mail: yhseon@sangji.ac.kr

한 실정이다(4). 따라서 이를 해결할 수 있는 단위면적 당 처리효율이 높은 새로운 처리장치 개발이 요구된다.

이들 방법 중에 담체를 충전하는 방법이 있으며, 이 방법은 반응기 내의 균체를 고농도로 유지하고 활성도를 보다 안정하게 유지할 수 있어서, 환경 변화에 대한 적응성과 처리효율을 높일 수 있으므로 장치의 용량이 작아지고 독성물질에 대한 영향을 감소시킬 수 있으며 높은 유속에서도 미생물의 증식 특성이 제한 받지 않으며 장기간 연속 조작을 할 수 있고 반면에 단락 현상 발생 및 공정 시작시간이 길어지고 균일한 혼합이 이루어지지 않는 단점이 있다(5). 특히 담체는 큰 유속을 가하여도 활성이 없는 미생물은 쉽게 떨어지지 않고 과다하게 부착되고 한 곳에 편중하는 문제점이 나타나고 있다. 이를 해결하기 위해 담체를 유동화할 필요가 있고 이러한 유동화를 극대화할 수 있는 장치가 Loop Reactor이다(6).

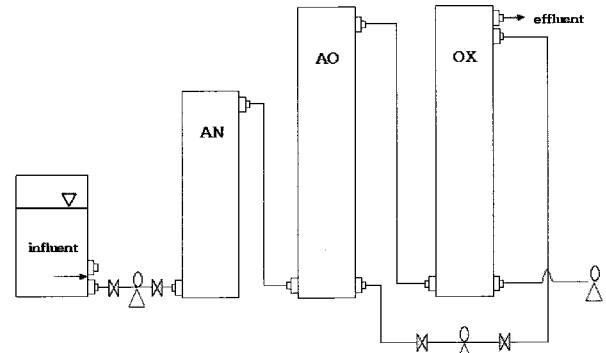
본 연구에서는 혐기/무산소/호기조의 3단계로 구성된 고정상 담체를 충전한 A²O (Anaerobic/Anoxic/Oxic) 생물막 공법을 이용한 상향류식 고정상 담체 반응장치와 호기조로 고정상 담체 대신에 유동상 담체를 사용한 Loop Reactor로 이루어진 장치의 성능을 비교하기 위해 생활하수를 대상으로 각각 성능실험을 수행하여 수리학적 체류시간 (HRT)에 따른 BOD, COD, SS, T-N, T-P 등 오염물질의 제거 특성을 비교 분석하였다.

재료 및 방법

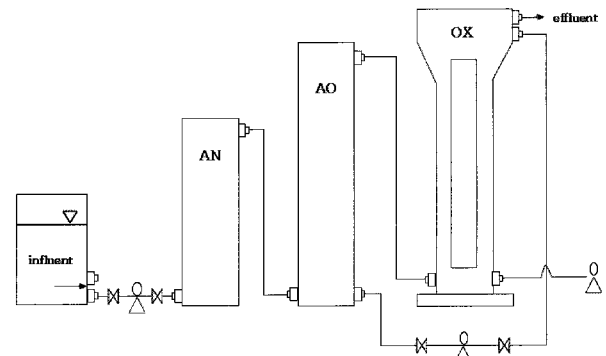
실험재료 및 장치

본 연구에 사용된 2가지 처리 장치는 고도처리 공법인 A²O공법의 변형으로 상향류식 고정상 담체 반응기로 구성된 장치와 호기조로 Loop Reactor를 이용한 장치로 이의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. 고정상 담체 반응기는 혐기조, 무산소조, 호기조로 구성되어 있으며 각 반응조는 아크릴 재질로 제작하여 설치하였고 각 반응조의 지름은 12cm이며 높이는 혐기조가 63cm이고 무산소조와 호기조가 각각 103cm인 원통형으로 그 용적은 각각 6 L, 10 L, 10 L로서 총 용적은 26 L로 제작하였다. 생물막으로 사용된 여재는 세로 3cm, 가로 5cm의 폴리에틸렌 재질의 원통형으로 표면을 거칠게 하기 위해 사포로 문질러 준 후 각 반응조에 이 여재를 충전하였다. 각 반응조별 여재 충전율은 모두 반응조 부피의 70%로 하고 실온에 맞추어 실험을 실시하였다. Loop Reactor를 이용한 장치는 고정상 담체 반응기와 마찬가지로 혐기조, 무산소조, 호기조로 구성되어 있으며 혐기조와 무산소조는 고정상 담체 반응조이며 호기조는 고정상 담체 반응조 대신에 Loop Reactor로 이루어져 있다. 혐기조와 무산소조의 용량은 고정상 담체 반응기와 같으며 Loop Reactor인 호기조의 용량은 앞에 고정상 담체 반응조와 마찬가지로 10 L이고 총 용적은 26 L이다.

안에 충전한 유동상 여재는 활성탄을 사용하였으며 충전율도 고정상 담체 반응기와 마찬가지로 70%로 하였다.



(a) A²O process using packed-bed reactors



(b) A²O process using loop reactor

Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus

실험방법

2가지 반응기의 혐기조와 무산소조로 유입되는 원수는 Watson Marlow 정량펌프를 사용해서 일정 유량으로 공급하였으며, 호기조에 약 2.0 L/min으로 공기가 공급되도록 하였다. 우선 상향류식 고정상 담체 반응기 및 Loop Reactor의 원활한 성능을 위해 실온에서 운전초기에는 HRT를 20 h로 하여 운전하면서 20일 정도 미생물 식중에 의한 담체 표면의 미생물 부착을 실시한 후 HRT를 각각 10 h, 13 h, 16 h, 20 h로 변화를 주어 실험을 수행하여 HRT에 따른 처리 성능을 비교하였다. 미생물이 담체에 쉽게 부착할 수 있도록 1주일간 처리수를 전량 반송하였으며, 1일 20 L의 처리수를 폐기하고 새로이 20 L를 공급하였다. 담체에 부착된 초기 부착 미생물은 조그마한 충격에도 쉽게 탈리되므로 초기의 공기 공급량은 너무 크지 않도록 조정하였다. 시료 채취는 두 반응기에서 유입수와 배출수 두 군데에서 하였고 산화조에서 무산소로 반송되는 라인을 만들어 반송하도록 하였다.

본 실험에 사용된 수질 분석법은 수질오염공정시험방법 (KSM)(7)과 EPA Standard Method(8)를 이용하였으며 구체적인 방법과 사용기기는 Table 1과 같다.

Table 1. Analytical methods and equipment used in experiment

Parameter	Analytical Method	Equipment
pH	KSM	Orion 290A
Temperature	KSM	Orion 290A
DO	KSM	YSI 55
COD _{Cr}	EPA Standard Method (Closed Reflux Method)	Shimadzu UV-1601
COD _{Mn}	KSM	Water Bath (Lab-1060)
BOD ₅	KSM	YSI Model 58, Incubator (R-1B120)
SS	KSM	Vacuum pump (DOA-P104-AA)
T-N	KSM	Shimadzu UV-1601
T-P	KSM	Shimadzu UV-1601

결과 및 고찰

pH 및 수온의 변화

수소이온농도 (pH)는 효소활성에 영향을 미침으로써 미생물 성장속도에 영향을 준다. pH는 미생물의 효소에 관계되며 pH의 급격한 변화는 생물의 환경에 해가 되어 처리시설의 정상적인 운전을 방해하게 되므로 pH 변화는 중요한 운전조건 중의 하나이며, 유기물 및 질소, 인 제거에도 영향을 미친다. 각 미생물에는 최적 pH의 영역이 있어 그 이상 그 이하가 되면 활성이 급격히 저하되기 때문에 중성인 pH 7.0 근방이 좋으며 보통 pH 6.0~8.0의 범위내로 유지되어야 하는 것이 보통이다. 미생물에 있어 최적 pH는 6.5~7.5 정도로 알려져 있으며 pH가 4.0~5.0 이하이거나 9.0~9.5 이상이면 박테리아 및 미생물의 활성이 저하된다(9). Fig. 2는 호기조로 상향류식 고정상 담체 반응기와 Loop Reactor를 사용한 각각 경우 HRT에 따른 평균 pH의 변화를 나타낸 것으로 HRT가 10 h, 13 h, 16 h, 20 h인 각각의 경우에 유입수의 평균 pH는 6.9, 7.0, 7.1, 7.3이고 고정상 담체 반응기의 배출수의 평균 pH는 각각 7.4, 7.0, 7.3, 7.1이며 Loop Reactor의 배출수의 평균 pH는 각각 7.3, 7.1, 7.3, 7.2를 나타내었다. 두 반응기 경우 유입수와 배출수의 pH는 거의 비슷한 수치를 나타내고 있으며 최적의 상태인 pH 7 근방에서 운전되고 있음을 알 수 있다.

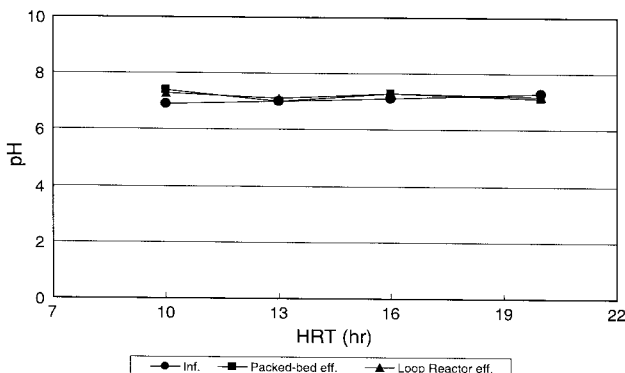


Fig. 2. Variation of pH with HRT

수온은 물의 물리적인 성질 중에서 가장 중요한 요소로, 수서생물, 화학반응 및 반응속도, 물의 이용 등에 영향을 미친다. 수온의 경우 통상 미생물이 증식할 수 있는 한계 농도는 0~70°C이지만 종류에 따라 그 이상의 온도에서도 증식 가능한 것도 있으며 온도가 10°C 상승함에 따라 반응속도가 2~3배 증가한다고 보고 되고 있다. 그러나 호기성 소화 및 질산화는 수온이 50°C로 올라가면 멈추며 수온이 약 15°C로 떨어지면 메탄생성 박테리아는 거의 활동하지 못하게 된다. 질산화 박테리아는 약 5°C가 되면 신진대사 기능이 중단되며 2°C가 되면 질산화 박테리아 뿐만 아니라 타 박테리아의 신진대사 기능이 완전히 정지되다. 보통 질산화 미생물이 질산화를 이루는데 최적의 온도는 20°C로 알려져 있으며, 8~30°C의 범위에서 증식하는 것으로 알려져 있으며 일반적으로 미생물 처리는 중온성 미생물에 의한 처리가 대부분이므로 10~40°C 정도가 유지되어야 하나, 생물막 형성 속도가 15~25°C에서 가장 크다는 사실이 보고 되어 있어(10) 20°C 근방에서 운전하는 것이 최적 상태로 판단된다.

Fig. 3은 고정상 담체 반응기와 Loop Reactor를 사용한 각각 경우 HRT에 따른 평균 수온의 변화를 그래프로 나타낸 것으로 HRT가 10 h, 13 h, 16 h, 20 h인 각각의 경우에 유입수의 평균 수온은 20.0°C, 19.4°C, 18.7°C, 18.2°C이고 고정상 담체 반응기의 배출수의 평균 수온은 각각 20.0°C, 19.7°C, 18.4°C, 18.2°C이며 Loop Reactor의 배출수의 평균 수온은 각각 20.0°C, 19.7°C, 18.5°C, 18.4°C이었다. 두 반응기의 모두 수온이 19 ± 1°C로 거의 비슷한 수온을 보였으며 본 수온 범위에서는 수온의 변화가 질화반응에 크게 영향을 주지 않을 것으로 사료된다.

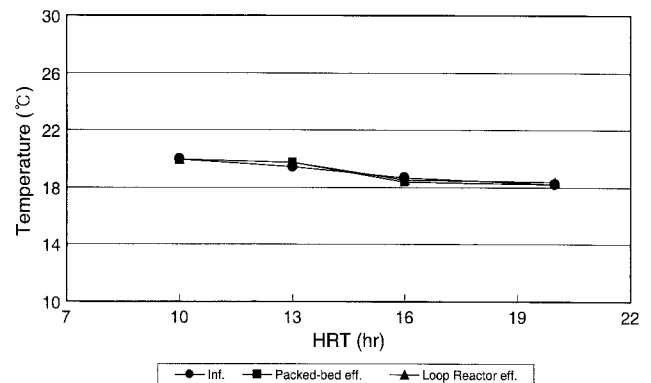


Fig. 3. Variation of temperature with HRT

부유물질 제거

부유물질 (SS)은 수중에서 현탁되어 탁도를 유발하는 불용성 물질로서 0.1 μm의 여과지에 여과되지 않고 걸리는 물질을 나타낸다. 토양의 점토성 물질, 초목, 낙엽 등의 분해물이 하천수 중의 부유물질 원인이 된다. 부유물질은 하수의 오염물 분석에 있어 BOD 및 COD와 같이 중요한 지표의 하나로, 하수 및 폐수에 운반되어 오는 입자상 고형

물의 양을 측정하여 각종 처리장치에 유입되는 부유물질의 부하를 알 수 있으며 유출수의 부유물질의 양을 측정함으로써 처리효율을 결정할 수 있다. 또한 SS는 빛의 투과율과도 관계되는 중요한 항목으로 SS 농도가 증가하면 빛의 투과율이 낮아지고 수중 동식물의 생육에 악 영향을 미치며 수중에서 분해되어 BOD 증가의 원인이 되기도 하며 SS 농도가 50 mg/L 이하이면 어류의 빈사 등은 피할 수 있지만, 수역의 정상 생산활동을 유지하기 위해서는 25 mg/L 이하인 것이 바람직하다.

Fig. 4는 고정상 담체 반응기와 Loop Reactor를 사용한 각각 경우 HRT에 따른 유입수와 배출수의 평균 SS 농도의 변화를 낸 것이다. HRT가 10 h, 13 h, 16 h, 20 h인 각각의 경우에 유입수의 평균 SS 농도는 133.1, 128.2, 124.8, 127.0 mg/L이고 고정상 담체 반응기의 배출수의 평균 SS 농도는 각각 51.4, 37.7, 27.4, 28.1 mg/L이며 Loop Reactor의 배출수의 평균 SS 농도는 각각 40.7, 28.2, 14.7, 17.4 mg/L이었다. 두 반응기 모두 HRT가 증가함에 따라 배출수 평균 SS 농도는 감소하며 HRT 16 h 이상에서는 거의 비슷한 수치를 나타내었다. 또한 고정상 담체 반응기보다는 Loop Reactor에서의 배출수가 10 mg/L 정도 더 낮은 수치를 나타내고 있어 Loop Reactor의 성능이 더 우수함을 알 수 있다.

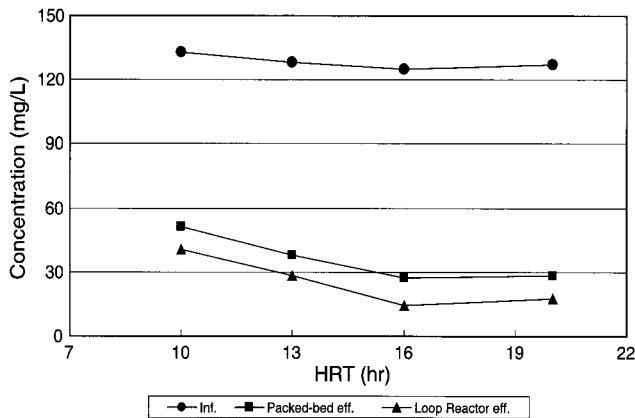


Fig. 4. Variation of SS concentration with HRT

Fig. 5는 고정상 담체 반응기와 Loop Reactor를 사용한 각각 경우 HRT에 따른 평균 SS 제거율을 나타낸 것으로 HRT가 10 h, 13 h, 16 h, 20 h인 경우에 고정상 담체 반응기의 평균 SS 제거율은 각각 61.3%, 70.5%, 78.0%, 77.8%로 HRT가 증가하면 평균 SS 제거율도 증가하다가 HRT 16 h 이상에서는 거의 비슷한 수치를 나타내고 있다. 또한 Loop Reactor의 평균 SS 제거율은 각각의 경우에 69.4%, 78.0%, 88.2%, 86.2%로 고정상 담체와 비슷한 경향을 보였으며 고정상 담체보다는 8.1~10.2% 더 높은 제거율을 나타내었다. Loop Reactor 처리장치에서 SS를 86% 이상 제거하기 위해서는 HRT를 16 h 이상 하여야 하며 경제적인 면에서 최적 HRT는 16 h인 것을 알 수 있다.

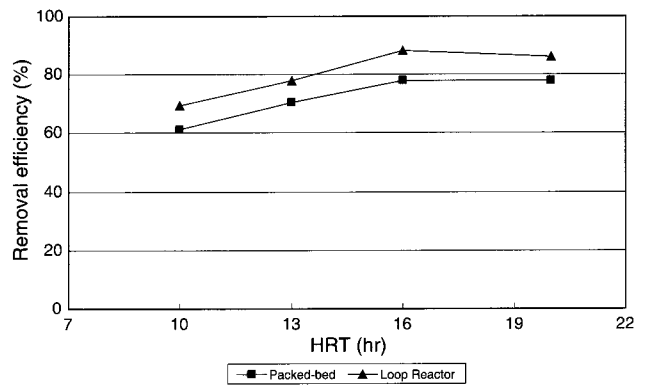


Fig. 5. Variation of SS removal efficiency with HRT

유기물 제거

오염된 물의 수질을 표시하는 한 지표로 즉 유기물 농도의 간접 지표로 사용되고 있는 대표적인 것이 생물화학적 산소요구량 (BOD)이다. 하천·호소·해역 등의 자연수역에 하수가 방류되면 그 중에 산화되기 쉬운 유기물질이 있어서 자연수질이 오염되며 이러한 유기물질을 수중의 호기성세균 등 미생물이 생화학적으로 산화할 때 소비되는 용존산소의 양을 mg/L 또는 ppm으로 나타낸 것이 생물화학적 산소요구량이다. 실제 물속에는 유기물질의 종류가 대단히 많아 일일이 그 농도를 각기 측정하는 일은 대단히 큰 작업이다. 따라서 이들이 물속에 들어와서 갖는 공통적 특성, 즉 호기성 미생물에 의해 소모되는 산소량만 측정하여 간접적으로 유기물의 양을 측정하는 방법이다. 이때 미생물은 유기물을 분해 섭취하여 세포를 합성하게 되며 없어진 유기질량 만큼 산소가 소모된다 하겠다. 따라서 BOD 농도가 높다함은 수중에 유기물질이 다량 함유 되어 미생물이 이것을 분해 안정화 하는데 많은 양의 산소를 소모해야 한다는 것이다. 따라서 이런 물에서는 DO가 낮아지거나 혹은 혐기성상태가 유발된다. 반대로 BOD 농도가 낮다는 것은 수중에 유기물질 함유량이 적어 적은 양의 산소가 소모되었다는 것이다. 따라서 BOD 농도는 수중의 DO의 상태를 파악할 수 있는 간접적 지표로서 유입된 유기물의 농도와 더불어 용존산소를 결핍시키는 잠재능력의 평가항목으로 이용되고 있다. 또한 BOD 실험 결과는 유기물의 생물학적 분해에 필요한 산소량 산정과 하수처리시설의 규모의 결정, 처리공정의 효율 측정 측정, 처리된 배출수의 수질이 법적 규제를 충족시키는지의 여부 판단에 사용된다. 보통 BOD는 관습적으로 20℃에서 5일간 해당시료를 배양했을 때 소모된 산소량을 측정하는데 BOD₅ 라고 하며 통상 그냥 BOD라고도 한다.

Fig. 6은 두 반응기에서 HRT에 따른 유입수와 배출수의 평균 BOD₅ 농도 변화를 나타낸 것이다. HRT가 10 h, 13 h, 16 h, 20 h인 각각의 경우에 유입수의 평균 BOD₅ 농도는 252.0, 269.6, 259.8, 248.0 mg/L이고 고정상 담체 반응기의 배출수의 평균 BOD₅ 농도는 각각 74.4, 60.8,

34.8, 35.4 mg/L이며 Loop Reactor의 배출수의 평균 BOD₅ 농도는 각각 62.9, 46.6, 23.6, 24.3 mg/L이었다. 두 반응기 모두 HRT가 증가함에 따라 배출수 평균 BOD₅ 농도는 감소하며 HRT 16 h 이상에서는 거의 비슷한 수치를 나타내었다. 또한 고정상 담체 반응기보다는 Loop Reactor에서의 배출수가 11.1~14.2 mg/L 정도 더 낮은 수치를 나타내고 있어 BOD 처리 관점에서 Loop Reactor의 성능이 더 우수함을 알 수 있다.

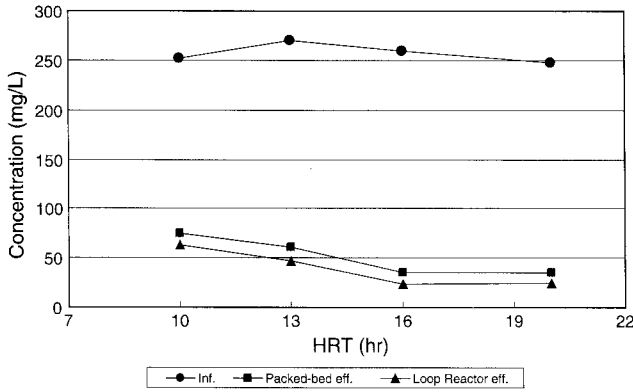


Fig. 6. Variation of BOD₅ concentration with HRT

Fig. 7은 두 반응기에서 HRT에 따른 평균 BOD₅ 제거율을 나타낸 것으로 HRT가 10 h, 13 h, 16 h, 20 h인 경우에 고정상 담체 반응기의 평균 BOD₅ 제거율은 각각 70.4%, 77.4%, 86.6%, 85.7%로 제거율이 HRT에 따라 계속 증가하다가 HRT 16 h 이상에서는 거의 비슷한 수치를 나타내고 있다. 또한 Loop Reactor의 평균 BOD₅ 제거율은 각각의 경우에 75.0%, 82.7%, 90.9%, 90.4%로 고정상 담체와 비슷한 경향을 보였으며 고정상 담체보다는 제거율이 4.3~5.3% 더 높은 제거율을 나타내었다. Loop Reactor 처리 장치에서 BOD₅를 90% 이상 제거하기 위해서는 HRT를 16 h 이상 하여야 하며 경제적인 면에서 최적 HRT는 16 h 인 것을 알 수 있다.

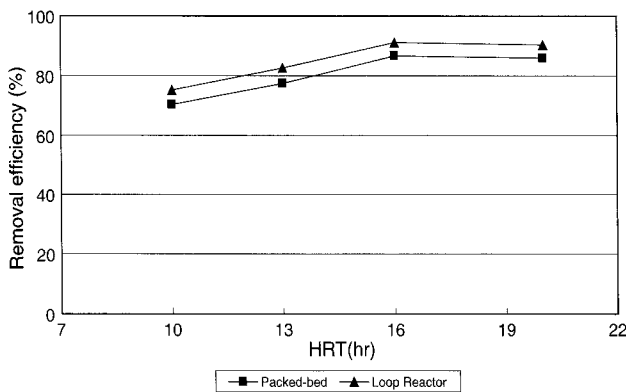


Fig. 7. Variation of BOD₅ removal efficiency with HRT

BOD와 더불어 유기물 농도의 간접 지표로 흔히 사용되

고 있는 것으로 화학적 산소요구량 (COD)이 있으며, COD 측정 방법에는 산화제로 중크롬산칼륨을 사용하는 크롬법과 과망간산칼륨을 사용하는 망간법이 있으며 두 가지 방법 모두다 수중의 유기물을 화학적으로 산화 시키는 것으로 COD 측정 원리는 같으며 산화정도의 차이이다. 크롬법이 국내에서 적게 사용되는 이유는 법적으로 망간법이 사용되고 있고 크롬법이 망간법보다 시약이 비싸고, 환경오염 정도가 더 심하고 실험 후 폐액처리가 곤란하며 측정시간이 4배 더 길고 약조제와 factor 산출이 더 까다롭기 때문이다. 그러나 크롬법이 망간법보다 산화력이 더 크므로 크롬법이 이론적인 산소요구량에 더 가깝기 때문에 더 정확한 수치를 보이므로 서구지역에서는 더 많이 사용되고 있으며 앞으로 우리나라도 이 방법으로 완전 전환할 가능성이 크며 법적으로 일부 사용되고 있다. COD_{Cr} 농도가 BOD 농도보다 높은 이유는 리그닌 같은 생물학적으로 산화되기 어려운 많은 유기물이 화학적으로 산화되고, 중크롬산에 의해 산화되는 무기물이 시료의 유기물 함량을 상승시키고, 어떤 유기물은 BOD 측정에 독성을 줄 수 있다는 사실에 기인한다.

Fig. 8은 두 반응기에서 HRT에 따른 유입수와 배출수의 평균 COD_{Cr} 농도 변화를 나타낸 것이다. HRT가 10 h, 13 h, 16 h, 20 h인 각각의 경우에 유입수의 평균 COD_{Cr} 농도는 414.3, 397.0, 413.3, 386.6 mg/L이고 고정상 담체 반응기의 배출수의 평균 COD_{Cr} 농도는 각각 313.3, 242.6, 150.6, 151.8 mg/L이며 Loop Reactor의 배출수의 평균 COD_{Cr} 농도는 각각 298.2, 196.0, 102.7, 103.8 mg/L이었다. 두 반응기 모두 HRT가 증가함에 따라 배출수 평균 COD_{Cr} 농도는 감소하며 HRT 16 h 이상에서는 거의 비슷한 수치를 나타내었다. 또한 고정상 담체 반응기보다는 Loop Reactor에서의 배출수가 15.1~48.0 mg/L 정도 더 낮은 수치를 나타내고 있으며 HRT가 증가하면서 고정상 담체 반응기와 Loop Reactor 배출수의 COD_{Cr} 농도의 차이가 더 컸으며 COD 처리 관점에서 Loop Reactor의 성능이 더 우수함을 알 수 있다.

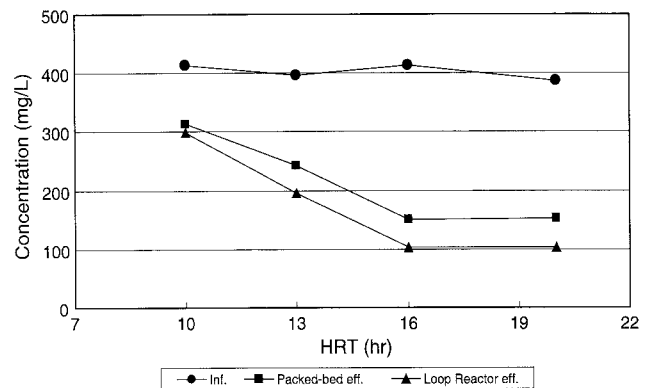


Fig. 8. Variation of COD_{Cr} concentration with HRT

Fig. 9는 두 반응기에서 HRT에 따른 평균 COD_{Cr} 제거율을 나타낸 것으로 HRT가 10 h, 13 h, 16 h, 20 h인 경우에 고정상 담체 반응기의 평균 COD_{Cr} 제거율은 각각 24.3%,

39.0%, 63.5%, 60.7%로 제거율이 HRT에 따라 계속 증가하다가 HRT 16 h 이상에서는 거의 비슷한 수치를 나타내고 있다. 또한 Loop Reactor의 평균 COD_{Cr} 제거율은 각각의 경우에 28.2%, 50.6%, 75.2%, 73.1%로 HRT가 증가함에 따라 제거율이 증가하다가 HRT 16 h 이상에서는 일정한 값을 갖게 되며 고정상 담체 반응기보다는 3.9%~12.4% 더 높은 제거율을 나타내었다. Loop Reactor 처리장치에서 COD_{Cr}를 73% 이상 제거하기 위해서는 HRT를 16 h 이상 하여야 하며 최적 HRT는 16 h인 것을 알 수 있었다.

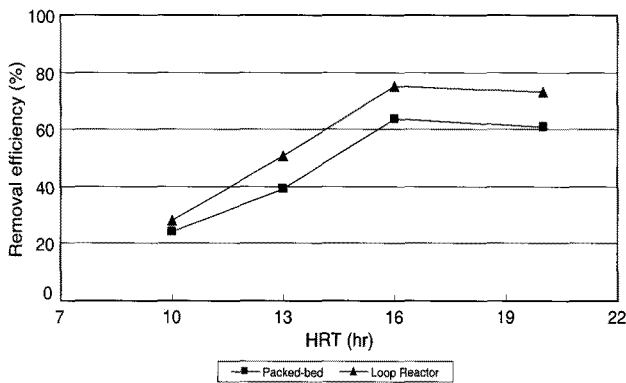


Fig. 9. Variation of COD_{Cr} removal efficiency with HRT

Fig. 10은 두 반응기에서 HRT에 따른 유입수와 배출수의 평균 COD_{Mn} 농도 변화를 나타낸 것이다. HRT가 10 h, 13 h, 16 h, 20 h인 각각의 경우에 유입수의 평균 COD_{Mn} 농도는 214.2, 199.6, 186.1, 177.8 mg/L이고 고정상 담체 반응기의 배출수의 평균 COD_{Mn} 농도는 각각 147.3, 121.0, 73.0, 73.6 mg/L이며 Loop Reactor의 배출수의 평균 COD_{Mn} 농도는 각각 134.9, 95.2, 49.0, 51.1 mg/L이었다. 두 반응기 모두 HRT가 증가함에 따라 배출수 평균 COD_{Mn} 농도는 감소하다가 HRT 16 h 이상에서는 거의 비슷한 수치를 나타내었으며 또한 고정상 담체 반응기보다는 Loop Reactor에서의 배출수가 12.4~25.8 mg/L 정도 더 낮은 수치를 나타내고 있다.

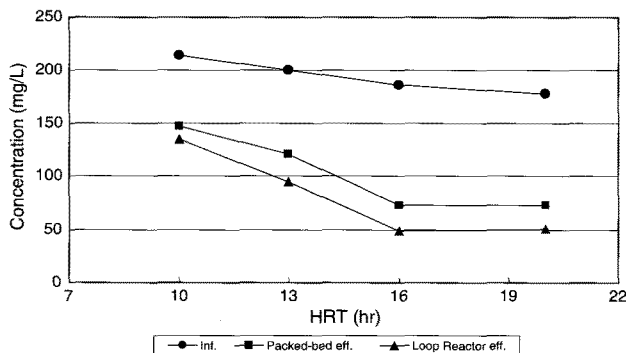


Fig. 10. Variation of COD_{Mn} concentration with HRT

Fig. 11은 두 반응기에서 HRT에 따른 평균 COD_{Mn} 제거율

을 나타낸 것으로 HRT가 10 h, 13 h, 16 h, 20 h인 경우에 고정상 담체 반응기의 평균 COD_{Mn} 제거율은 각각 31.2%, 39.4%, 60.7%, 58.6%로 제거율이 HRT에 따라 계속 증가하다가 HRT 16 h 이상에서는 거의 비슷한 수치를 나타내고 있다. 또한 Loop Reactor의 평균 COD_{Mn} 제거율은 각각의 경우에 37.0%, 52.3%, 73.6%, 71.3%로 HRT가 증가함에 따른 제거율은 증가하다가 HRT 16 h 이상에서는 일정한 값을 갖게 되며 고정상 담체 반응기보다는 5.8%~12.9% 더 높은 제거율을 나타내었다. 두 반응기에서 각각의 COD_{Mn} 제거율은 COD_{Cr} 제거율과 비슷한 경향 및 수치를 보여 주고 있다.

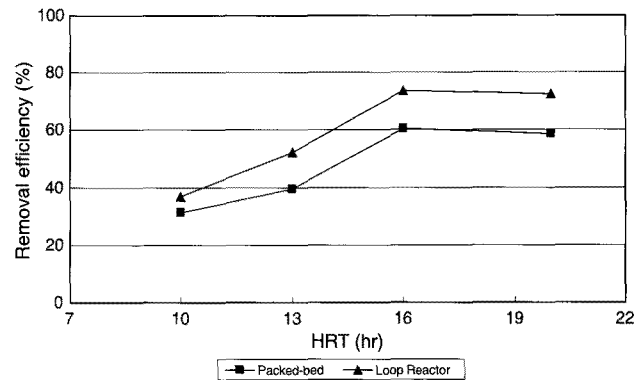


Fig. 11. Variation of COD_{Mn} removal efficiency with HRT

질소 및 인 제거

질소는 유기성 질소 및 무기성 질소의 총합으로 유기성 질소에는 아미노산, 폴리펩티드 단백질을 비롯한 여러 유기 화합물의 질소가 있다. 또 무기성 질소에는 암모니아성 질소와 아질산성 질소, 질산성 질소 등이 있다. 질소는 비료의 3요소 중의 하나로 미생물과 식물의 성장에 필수적인 성분이나 인과 같이 하천이나 호소에서 부영양화를 일으키는 원인물질이며 식물의 섭취 형태는 암모니아성 질소와 질산성 질소이다. 이러한 수역에서의 조류의 성장을 조절하려면 하수 내의 질소를 제거하거나 감소시킨 후 처리수를 배출하여야 할 것이다. 하수 내의 질소화합물의 주요 발생원은 분뇨, 가축분뇨 등 배설물과 농경지에 살포되는 비료 등이 있다. 하수 중의 질소는 40%의 유기질소로 구성되며 이는 호기성 상태에서 질산화 과정에 의해 아질산성 질소와 질산성 질소로 전환되며 호기조에서 일어난다. 이 물질은 무산소조에서 탈질 과정을 거쳐 질소로 변환되어 대기 중에 방출된다(11).

Fig. 12는 두 반응기에서 HRT에 따른 유입수와 배출수의 평균 T-N 농도 변화를 나타낸 것이다. HRT가 10 h, 13 h, 16 h, 20 h인 각각의 경우에 유입수의 평균 T-N 농도는 43.3, 42.3, 40.2, 37.2 mg/L이고 고정상 담체 반응기의 배출수의 평균 T-N 농도는 각각 35.5, 34.0, 32.5, 28.6 mg/L이며 Loop Reactor의 배출수의 평균 T-N 농도는 각각

33.1, 30.3, 26.9, 23.8 mg/L이었다. 두 반응기 모두 HRT가 증가함에 따라 배출수의 평균 T-N 농도는 계속 감소하는 양상을 보이고 있으며 Loop Reactor에서의 배출수가 고정상 담체 반응기에 비해 2.4~5.6 mg/L 정도 더 낮은 수치를 나타내고 있다.

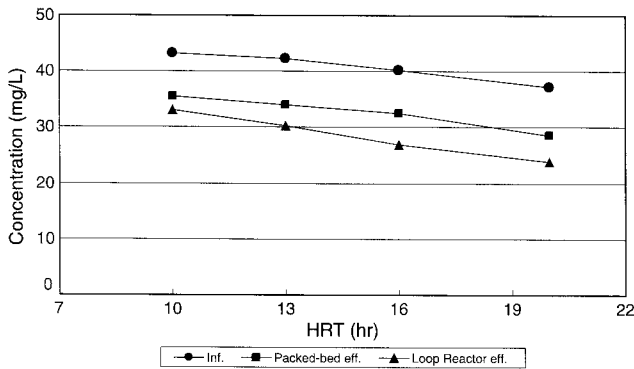


Fig. 12. Variation of T-N concentration with HRT

Fig. 13은 두 반응기에서 HRT에 따른 평균 T-N 제거율을 나타낸 것으로 HRT가 10 h, 13 h, 16 h, 20 h인 경우에 고정상 담체 반응기의 평균 T-N 제거율은 각각 17.9%, 19.3%, 19.5%, 23.0%로 제거율이 HRT에 따라 계속 증가하는 경향을 보여주고 있으며 Loop Reactor의 평균 T-N 제거율은 각각의 경우에 23.6%, 28.3%, 33.6%, 36.0%로 HRT가 증가함에 따른 제거율은 증가하는 양상을 보이고 있으며 고정상 담체 반응기보다는 5.7%~14.1% 더 높은 제거율을 나타내었다.

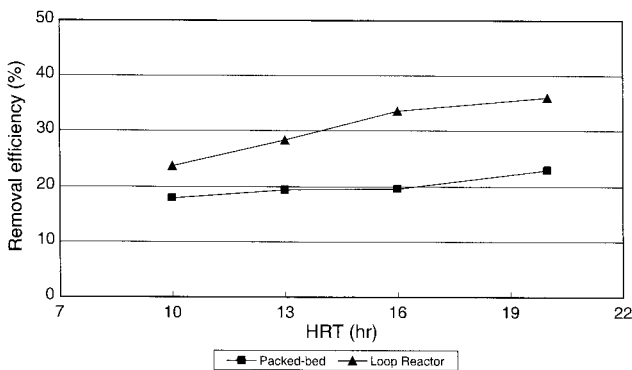


Fig. 13. Variation of T-N removal efficiency with HRT

인은 자연수 중에서 미량 존재하지만, 하폐수 내의 인화합물은 세제 및 비료의 영향으로 발생하며 세제에는 인산염이 광범위하게 쓰이고, 농경지에서는 비료로 대량 사용되고 있다. 인은 질산염과 함께 조류와 플랑크톤의 번식에 있어서 주영양분이기 때문에 부영양화의 주원인이 되고 있다. 농경지에 비료로 사용된 오르토인산염은 비에 섞여 하천으로 유입되고, 유기 인산염은 주로 생물학적 과정에서 생성된다. 다중 인산염은 모두 수용액 속에서 천천히 분해

되어 본래의 오르토 형태로 돌아간다.

Fig. 14는 두 반응기에서 HRT에 따른 유입수와 배출수의 평균 T-P 농도 변화를 나타낸 것이다. HRT가 10 h, 13 h, 16 h, 20 h인 각각의 경우에 유입수의 평균 T-P 농도는 5.67, 6.50, 5.50, 6.56 mg/L이고 고정상 담체 반응기의 배출수의 평균 T-P 농도는 각각 4.88, 4.20, 3.09, 3.65 mg/L이며 Loop Reactor의 배출수의 평균 T-P 농도는 각각 4.51, 3.60, 2.50, 2.86 mg/L이었다. HRT 16 h 이하의 범위에서는 두 반응기 모두 HRT가 증가함에 따라 배출수 평균 T-P 농도는 계속 감소하는 양상을 보이고 있으며 Loop Reactor에서의 배출수가 고정상 담체 반응기에 비해 0.37~0.79 mg/L 정도 더 낮은 수치를 나타내고 있다.

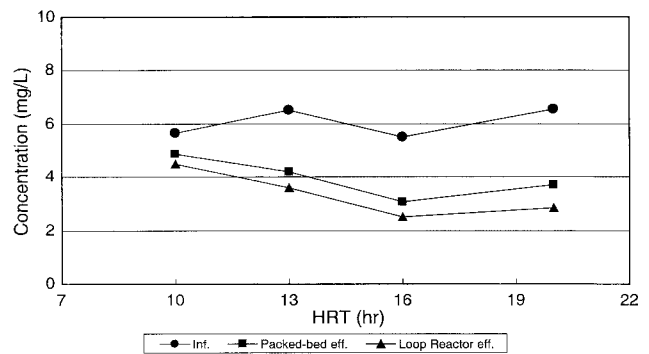


Fig. 14. Variation of T-P concentration with HRT

Fig. 15는 두 반응기에서 HRT에 따른 평균 T-P 제거율을 나타낸 것으로 HRT가 10 h, 13 h, 16 h, 20 h인 경우에 고정상 담체 반응기의 평균 T-P 제거율은 각각 13.9%, 35.9%, 43.7%, 44.5%로 제거율이 HRT에 따라 계속 증가하는 경향을 보여주고 있으며 증가폭은 HRT가 증가함에 따라 감소하였다. 한편 Loop Reactor의 평균 T-P 제거율은 각각의 경우에 20.4%, 44.6%, 54.5%, 56.4%로 HRT가 증가함에 따라 고정상 담체 반응기와 마찬가지로의 양상을 보이고 있으며 Loop Reactor와 고정상 담체 반응기의 제거율의 차이는 HRT가 증가함에 따라 증가하였으며 Loop Reactor가 고정상 담체 반응기보다는 6.5%~11.9% 더 높은 제거율을 나타내었다.

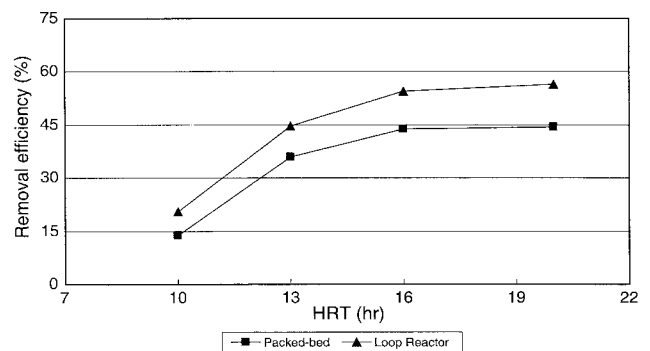


Fig. 15. Variation of T-P removal efficiency with HRT

요 약

본 연구에서는 혐기조 및 무산소조, 호기조로 구성된 상향류식 고정상 담체 반응장치와 호기조로 고정상 담체 대신에 유동상 담체를 사용한 Loop Reactor로 이루어진 장치에서 생활하수를 이용하여 성능실험을 수행한 후 HRT에 따른 유기물 및 T-N, T-P 등 오염물질의 제거 특성을 비교 분석하였다. 두 반응기 모두 평균 BOD 제거율과 SS 제거율은 HRT가 증가함에 따라 증가하다가 HRT 16 h 이상에서는 일정한 수치를 나타내고 있으며 HRT 16 h에서 고정상 담체 반응기와 Loop Reactor의 평균 BOD 제거율은 각각 86.6%, 90.9%이었으며 평균 SS 제거율은 각각 78.0%, 88.2%로 Loop Reactor의 경우가 각각 4.3%, 10.2%의 더 높은 BOD와 SS 제거율을 나타내었다. 또한 평균 COD_{Cr} 제거율 및 평균 COD_{Mn} 제거율은 BOD와 SS 제거율과 마찬가지로 HRT가 증가함에 따라 증가하다가 HRT 16 h에서 일정한 수치를 나타내고 있으며 고정상 담체 반응기와 Loop Reactor의 평균 COD_{Cr} 제거율은 각각 63.5%, 75.2%이었으며 평균 COD_{Mn} 제거율은 각각 60.7%, 73.6%로 Loop Reactor의 경우가 11.7%, 12.9% 더 높은 제거율을 나타내었다. 반면에 평균 T-N 제거율 및 T-P 제거율은 두 반응기 모두 HRT가 증가함에 따라 제거율은 계속 증가하는 양상을 보여주고 있으며 HRT 16 h에서 Loop Reactor의 경우 평균 T-N 제거율 및 평균 T-P 제거율은 각각 33.6%, 54.5%로 고정상 담체 반응기보다 14.1%, 10.8%의 더 높은 제거율을 나타내었다. 이상의 결과에서 Loop Reactor가 성능이 훨씬 더 우수하였으며 최적 HRT는 16 h임을 알 수 있었다.

감 사

이 논문은 2007년도 상지대학교 교내 연구비 지원에 의한 것으로 이에 감사를 드립니다.

접수 : 2009년 4월 24일, 게재승인 : 2009년 8월 7일

REFERENCES

1. Ministry of Environment (2008), Statistics of sewerage (2007), Environmental Statistics Yearbook. p1147, Ministry of Environment, Seoul, Korea.
2. Seon, Y. H. (2008), The Removal of Organics and nutrients in an anoxic/oxic process using surface-modified media, *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* **23**, 70-76.
3. Cho, J., K. Ahn, S. Lee, J. Kim, and Y. Lee (2003), modeling of submerged membrane bioreactor process using ASM No.1 coupled with resistance in series Model, *J. KSEE* **25**, 198-205.
4. Park, J. T., K. H. Lee, and W. R. Ryu, and M. H. Cho (2002), Biological treatment of dyeing wastewater using jet-loop reactor with activated carbon supports, *Korean J. Biotechnol. Bioeng.* **17**, 241-246.
5. Jang, A. H., S. Kim, and I. S. Kim (2000), Effect of nitrate and nitrite load on denitrification reaction in anoxic biofilm reactor, *KSEE* **22**, 1617-1625.
6. Metcalf & Eddy (2003), Wastewater Engineering : Treatment and Reuse, 4rd ed., pp967-969, McGraw-Hill, New York.
7. Ministry of Environment (2002), Korean standard methods for the examination of water and wastewater, p691, Dong Hwa Technology Publishing Co., Seoul.
8. APHA (1998), Standard methods for the examination of water and wastewater **20**, 5-17, American Public Health Association, Washington DC.
9. Wett, B., and W. Rauch (2003), The role of inorganic carbon limitation in biological nitrogen removal of extremely ammonia concentrated wastewater, *Wat. Res.* **37**, 1100-1110.
10. Kang, S., H. Lee, H. Nam, T. Park, and J. Jung (2004), Changes in the characteristics of microbial activity and EPS Composition with HRT in the aerobic biofilm reactors of BNR process, *KSEE* **26**, 244-253.
11. Hur, S. H. (2003), The removal technique of nitrogen and phosphorus of sewage using CN-Biocontact, *J. Environ. Hitechno.* **11**, 102-109.