

^{99m}Tc 추적자를 이용한 하수처리 시설 내 침전조의 정류벽 설치 유무에 따른 유체거동 변화측정

김진섭, 정성희, 김종범, 김재호
한국원자력연구원, 동위원소이용연구센터

2007년 7월 11일 접수 / 2007년 8월 10일 채택

지속적인 하수 발생량의 증가와 시설 부지비용의 상승효과로 인해 하수처리시설 중 가장 많은 면적을 차지하고 있는 침전조의 효율향상이 중요한 문제로 부각되고 있다. 본 연구에서는 선행연구로 수행한 최종 침전조 구조의 최적화를 위한 CFD(computational fluid dynamics) 모델링 결과를 실험적으로 검증하기 위해, 방사성추적자를 이용하여 정류벽 설치 유무에 따른 침전조 유동분포 변화를 측정하였다. 실제 하수처리장 침전조 설계제원을 바탕으로 수리학적 상사(1/21)를 고려하여 침전조 모형장치를 제작(L×W×H : 2.6×0.4×0.2 m)하였으며, 방사성추적자로 Tc-99m 약 30~40 mCi를 사용하였다. 실험결과, 최종 침전조 내부에 정류벽을 설치함으로써 바닥으로의 강한 밀도류와 출구 방향으로의 슬러지 휩쓸림 현상이 감소되었으며, 슬러지의 침전영역(settling zone)이 증가됨을 방사성추적자를 이용하여 성공적으로 가시화하여 확인하였다. 또한 정류벽 설치로 인하여 단락류가 전체 유출수에서 차지하는 부분이 48%에서 32%로 현저히 감소하고, 이의 슬러지 평균체제시간 또한 940 sec에서 810 sec로 감소되는 유동특성을 정량적으로 분석할 수 있었다. 이는 선행연구로 실시한 CFD 모델을 이용 침전조 최적설계 조건도출 연구와 일치하는 결과로서, 방사성추적자 기술이 신규로 침전조를 설계할 때나 기존 시설의 성능개선을 위한 구조변경 후 이의 검증을 위해 중요한 자료로 활용될 수 있음을 확인하였다.

중심어 : 하수처리시설, 침전조, 방사성추적자, 체제시간분포, 내부 정류벽, 단락류, CFD 모델검증

1. 서론

인구증가와 생활수준의 향상으로 생활하수 발생량은 증가하였고, 상대적으로 처리 방류수질에 대한 환경규제는 강화되고 있는 추세이다. 2006년 말 기준 전국에 가동 중인 하수처리장은 328 개소로써 1일 평균 7,446 톤의 하수슬러지가 발생하고 있으며, 이는 하수종말처리시설의 신·증설 등으로 2011년에는 473개소로 하수슬러지 발생량이 약 9,554 톤/일로 증가될 전망에 있다[1]. 하수처리시설 중 침전조는 미생물을 이용하여 분해처리된 하수슬러지를 중력으로 분리하는 설비이다. 일반적으로 생물학적 포기조 전·후단에 설치하여 유입수에 포함된 모래나 무기물질 등 입자성 물질을 최초 침전조에서 제거하고 최종 침전조에서는 포기조에서 유입된 활성슬러지 및 침전성 입자를 분리하는데 활용된다. 또한 하·폐수 처리장의 방류수 수질은 최종 침전조의 성능에 의해 직접적으로 영향을 받으며, 실제 하수처리장에서 가장 많은 면적을 차지하는 시설이므로 침전조 처리효율의 증대는 하수처리장 운영·유지 및 환경보호를 위해 매우 중요한 위

치를 차지하고 있다.

침전조의 효율증대를 위한 구조적인 설계인자에 대하여 그동안 다양한 연구가 수행되었다[2-6]. 하지만 이들의 효과를 정량적으로 측정할 수 있는 기술이 현재 없으며 다만, 유출부나 특정 위치에서의 샘플링을 통한 수질분석을 통해 간접적으로 내부 상태를 추정하는 방법에 의존하고 있는 실정이다. 또한 이는 침전조 구조변경에 따른 수리학적 정보를 제공하는 것이 아니라 오염물의 처리유무나 제거정도에 대한 국한된 정보를 제공하는 현실이다. 이에 대한 해결을 위하여 몇몇 국외 연구자에 의해 방사성추적자를 하수처리 공정에 적용하여 수리학적 유체거동 변화를 측정할 예가 있다[7, 8]. 방사성추적자란 관심 대상물질이 어떤 시스템 내에서 이동하는 경로, 속도와 체제시간분포 등 이동특성을 조사하기 위하여 인위적으로 넣어주는 방사성 동위원소를 말한다. 추적 대상물질과 물리·화학적 거동은 같으면서도 방사선으로 인해 대상물질과 구별되게 측정이 가능한 물질을 말한다. 방사성추적자는 기존의 염료 추적자나 형광 추적자에 비해 검출 감도가 매우 뛰어나며, 시료의 샘플링 측정을 통한 실험실 분석이 아닌 현장에서 실시간 측정이 가능하다는 장점이 있다.

본 연구의 일환으로 방사성추적자를 실제 하수처리시설의 최종 침전조에 적용하여 유체거동 변화를 측정할 바 있다. 또한 침전조 처리효율 증진에 관한 선행연구로 정류벽

책임저자 : 정성희, shjung3@kaeri.re.kr, 한국원자력연구원
대전 유성구 덕진동 150번지

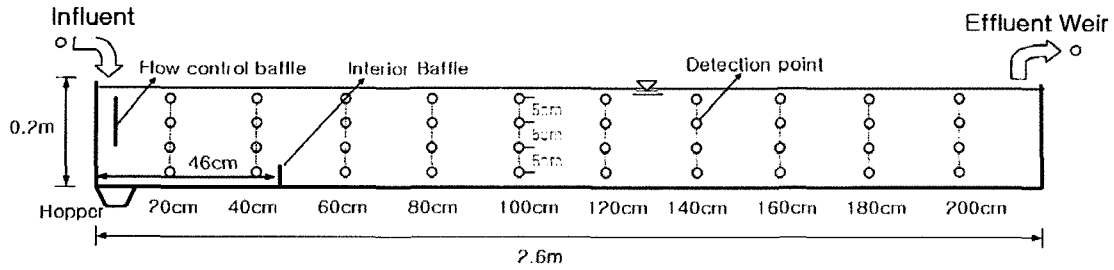


Fig 1. Detection points for hydrodynamic behaviors of radiotracer in the model clarifier

(interior baffle)의 설치를 통한 침전조 구조의 최적화 인자를 CFD(computational fluid dynamics) 모델을 통해 도출하였다 [9]. 따라서 본 연구에서는 이의 모델링 결과를 실험적으로 검증하기 위해 방사성추적자를 이용하여 정류벽 설치 유무에 따른 침전조 유동분포 변화를 측정하였다.

2. 재료 및 방법

실제 하수처리장 최종 침전조 설계제원을 바탕으로 수리학적 상사(1/21)를 고려하여 아크릴 재질의 침전조 모형장치를 제작하였다(L×W×H : 2.6×0.4×0.2 m). 방사성추적자 실험을 위해 사용된 동위원소는 ^{99m}Tc (T_{1/2}=6.01시간, E=0.14 MeV, Γ=0.067 R·m²/Ci·h)으로서 1회 실험에 약 30~40 mCi를 사용하였으며, 이동형 방사성동위원소 발생장치 (⁹⁹Mo/^{99m}Tc)로부터 인출 후 syringe를 이용하여 모형장치에 주입하였다. 동위원소가 침전조 내에 투입된 후 정류벽에 의한 지속적인 유량 유입으로 추적자는 희석작용을 통하여 유동 후 배출된다. 이의 거동을 측정하기 위하여 사전에 모형장치 수조 벽면에 설치한 방사선 계측장치를 이용하여 시간 경과에 따른 수조 내부 추적자의 농도변화 및 거동분포에 대한 데이터를 수집하였다[10]. 침전조 외벽에 설치된 방사선검출기는 $\phi 1/2" \times 1"$ NaI(Tl) 섬광검출기(Eberline, model 44-62) 8개가 사용되었으며, 깊이 방향으로 4 point 그리고 길이 방향으로 10 point를 실시간으로 이동하며 총 40 point에서 연속적으로 측정하였다(Fig. 1).

수리학적 상사를 고려하여 침전조 유입유량 2.4 l/min과 3.4 l/min 두 조건에 대해서 정류벽 설치 유무에 따른 조건별 추적자실험을 수행하였으며, 실험장치를 아래 그림 Fig. 2에 나타내었다. 이때 내부 정류벽(interior baffle) 설치를 통한 침전조 구조변경 후 유동특성 변화를 측정하기 위해 유입부로부터 약 46 cm 떨어진 위치에 높이 5 cm의 탈부착이 가능한 정류벽을 이용하였다.

방사선계측기는 방사선 검출부(detector)에 고전압을 공급함과 동시에 검출부로부터 나온 analogue pulse를 방사선 계수기가 인식할 수 있도록 TTL Pulse로 변환시키는 회로이다. 또한 방사선계수기는 방사선 계측기에서 나온 TTL Pulse를 각 채널 별로 계수하여 PC로 전송하는 기능을 하는 장치로서, 본 실험을 위해 24채널까지 확장된 데이터 수집장치

(KTG-DL1, 한국원자력연구원)를 추적자 실험에 사용하였다 (Fig. 3)[11]. 수집된 데이터를 실시간으로 확인하고 처리하기 위하여 National Instrument사의 그래픽 언어인 LabView 8.2를 사용하여 전용 software을 작성하였으며 이를 아래 Fig. 4에 나타내었다. 시간에 따른 방사성추적자의 수리학적 거동변화를 나타내기 위하여 계측된 데이터를 내삽(interpolation)을 통해 전체 실험구간에 대해 확장하고, 상용 프로그램인 Surfer 7.0(Golden Software, Inc)를 이용하여 등농도곡선에 대한 동적변화를 나타내었다. 또한 추적자의 평

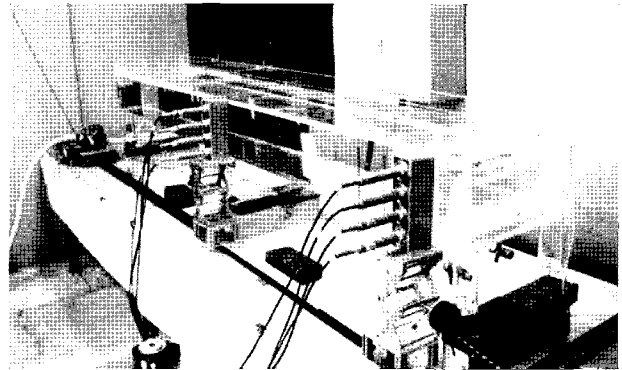


Fig 2. Experimental set-up for radiotracer application to the clarifier in WWTP

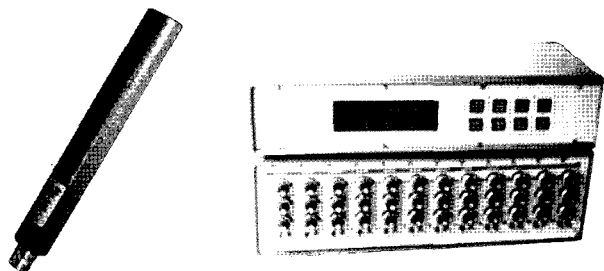


Fig 3. $\phi 1/2"$ NaI(Tl) gamma scintillation detector and 24ch data acquisition system

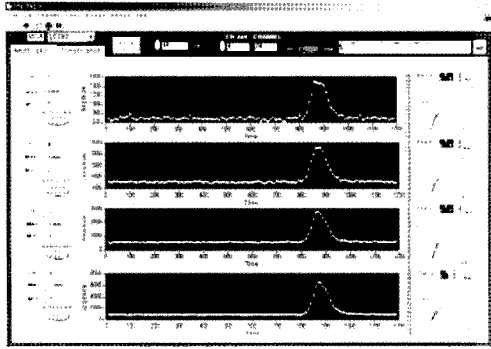


Fig 4. Application software for tracer data acquisition (LabVIEW)

균체계시간분포 변화를 분석하기 위하여 Visual Basic 6.0 기반의 K-RTD 소프트웨어를 이용하였다.

동위원소의 투입시 실험자는 surgical glove와 납 고글을 착용하고, 납차폐 유리를 사용하여 동위원소의 피폭 및 오염을 최소화하였다. 그리고 모형장치로부터의 예상치 못한 누수가 발생할 경우를 대비하여 불투수성 비닐커버가 부착된 steel 재질의 사각틀(360×90×7 cm) 안에 모형장치를 설치하여 추적자의 유동을 제한하였다. 또한 강력 흡수재(단위중량 : 0.58 g/mL, 흡수능 55 mL/g)를 비치하여 모형장치 내의 모든 물이 누수된다 할지라도 추가적인 오염 없이 그 자리에서 신속한 처리가 가능하게 하였다.

3. 결과 및 논의

관련 선행연구로 하수처리시설의 침전조 거동에 대한 3차원 CFD 모델을 개발하였으며, 추적자 현장실험을 통해 이를 검증하였다. 개발된 모델은 최종 침전조에서의 부유고형물질(SS; suspended solids) 제거효율 및 침전특성을 미리 예측할 수 있는 소프트웨어로써, 이를 이용하여 침전조의 제거효율 향상을 위한 설계 조건을 도출하였다. 선행연구 결과에서 침전조 유입구의 위치에 따른 고형물질의 전반적인 제거성능이 유입구 위치가 낮을수록 바닥 밀도류의 강도가 낮아지며 고형물질이 출구방향으로 이동되는 현상이 감소되었다. 반면에 유입구 위치가 높은 경우 입구 정류벽의 설치시 침전조의 성능을 개선시켜주었으나 유입구 위치가 낮은 곳

에서의 정류벽 설치시 오히려 밀도 폭포류에 의한 하향류 흐름을 증가시켜 결국엔 성능을 저하시키는 결과를 나타내었다. 연구 결과 해당 침전조 모델에서는 침전조 입구의 상부에 baffle을 설치하고 내부 정류벽을 설치하는 것이 침전조 성능을 개선시킬 수 있을 것으로 평가되었다. 아래의 Table 1.에 선행연구로 실시한 침전조 입구의 정류벽 설치 위치별 부유고형물질에 대한 영향을 요약하였다.

따라서 본 연구에서는 모델링 결과 중 유입구 위치(inlet position)를 상부로 하고 내부 정류벽 설치 유무에 따른 침전조 유동분포를 측정하기 위하여 방사성추적자를 이용하여 검증실험을 수행하였다. 이를 위해 방사성추적자 ^{99m}Tc을 모형 침전조에 순간 주입(pulse type injection)을 한 후, 매초 간격으로 방사선량을 유입·유출부와 침전조 측정위치(40 points)에서 계측하였다(Fig. 1 참조). 한 열에 4개의 방사선 검출기가 설치되어 있는 2세트의 detector guider는 길이가 1 m로서 매 10초 간격으로 20 cm 씩 이동하며 추적자의 농도 변화를 측정하였다. 설계 유량인 유입유량 2.4 l /min에 대하여 내부 정류벽 설치 유무에 따른 유출수의 추적자 농도를 측정하여 아래의 Fig. 5에 나타내었다.

추적자 투입 초기에 상당량의 단락류(short circuit stream)가 초기에 발생하였으며, 일정 시간 경과 후 침전조 내에서 순환과정을 거친 추적자가 배출되었다. 이에 대한 체재시간분포(RTD; residence time distribution)를 분석한 결과, 정류벽 설치 후 단락류가 전체 유출수에서 차지하는 부분이

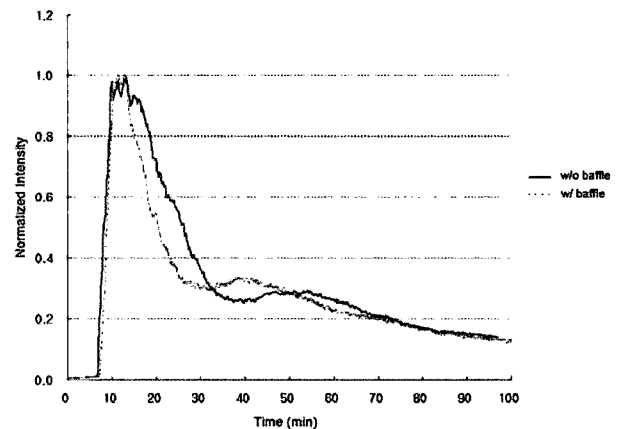


Fig 5. Influence of the interior baffle on RTD of radiotracer at flowrate 2.4 l /min

Table 1. Relative suspended solid concentration at the effluent by CFD model simulation in the previous study

Effluent quality on suspended solids, mg/L			
Inlet position	Without baffle	With baffle	Baffle effect
Top	5.17	3.88	Good
Middle	2.91	3.00	Negligible
Bottom	0.10	1.14	Bad

48 %에서 32 %로 감소하였으며, 상대적으로 이의 평균 체재 시간도 940 sec에서 810 sec로 감소되었다. 이는 정류벽을 설치함으로써 단락류가 차지하는 부분은 감소하였지만 침전조 내 체류시간이 감소되어 외부로 빠르게 배출됨을 의미한다 (Fig. 6). 단락류는 침전조 내 유입수가 정상적인 유로를 통과하지 않고 적정 체류시간보다 빨리 유출부에 도달하는 흐름을 말하며, 이 흐름이 클수록 미세화된 혼합 슬러지가 외부로 방출될 가능성이 증가됨을 의미한다. 따라서 단락류는 침전조의 가동 성능에 직접적인 영향을 주는 요인으로서 내부 정류벽의 설치가 단락류의 비율을 감소시켜 전체 침전조의 슬러지 제거효율을 증대시키는 역할을 함을 실험으로 확인하였다.

유출부를 제외한 침전조 내부에서의 방사성추적자의 시간에 따른 공간분포 변화를 조사하기 위하여 Surfer 7.0 프로그램 이용하여 가시화하였다. 침전조 유입유량 2.4 l/min과 3.4 l/min 두 조건에 대해서 각각 실험을 수행하였으며 그 결과를 아래 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다.

정류벽을 설치하기 전, 추적자 투입 초기에는 균일한 유동분포를 보이면서 일정 시간 경과 후 추적자 투입위치로부터 약 50 cm부터 바닥으로의 강한 밀도류(density current)가 형성되었다. 이는 실제 침전조에서 바닥에 침전된 슬러지를 재부상시킬 가능성이 크며, 이로 인해 침전조의 슬러지 처리 효율이 감소하는 결과를 초래할 수 있다. 그러나 침전조 바닥에 정류벽을 설치한 이후의 실험 결과, 침전조 바닥에서의 강한 밀도류 현상은 현저히 감소되었다(Fig. 7). 또한 침전조 유입유속의 영향을 살펴보기 위하여 설계 유량(2.4 l/min)에서 42 % 증가시킨 3.4 l/min 조건으로 동일한 실험을 수행하였다. Fig. 8에서 정류벽을 설치하기 전에는 설계유량 실험결과와 달리 바닥으로의 밀도류 현상이 현저히 감소하였으며, 정류벽을 설치한 이후에는 동일하게 상향류의 흐름을 관찰할 수 있었다. 이는 침전조 유입유량이 급격히 증가함으로써 표면유속이 중력에 의한 슬러지 침전속도 보다 증대되어 바닥으로의 밀도류 형성을 침전조 후단으로 연장한 것으로 판단된다. 또한 정류벽 설치 전에 비해 설치 후에 침전조 중간부

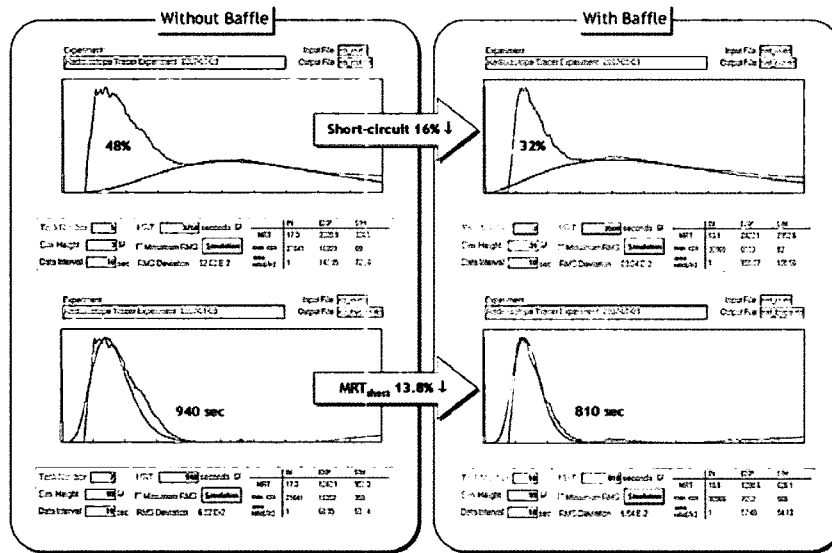


Fig 6. Hydraulic variations on short circuit stream in accordance with an interior baffle at flowrate 2.4 l/min

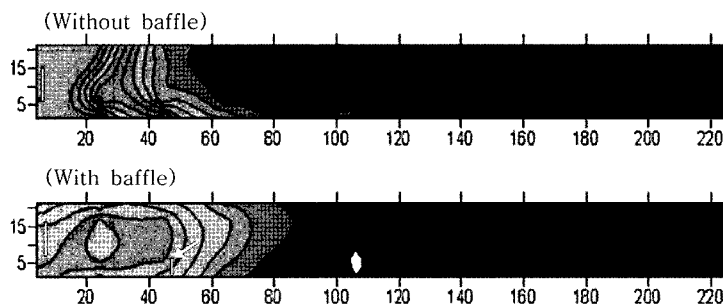


Fig 7. Change of flow behaviors of radiotracer injected to the model clarifier with an interior baffle at flowrate 2.4 l/min

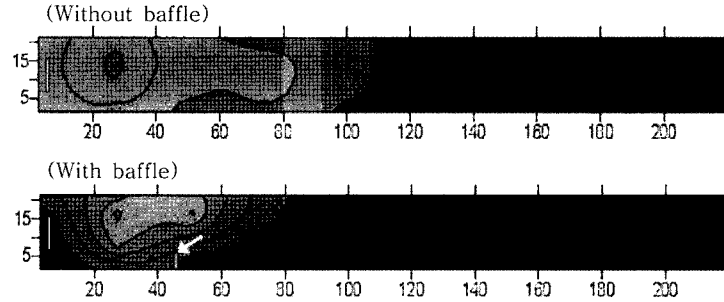


Fig 8. Change of flow behaviors of radiotracer injected to the model clarifier with an interior baffle at flowrate 3.4 l / min

로 갈수록 정류벽에 의해 상향류 흐름이 우세하게 형성되었다가 후단으로 가면서 흐름이 약화되어 유입슬러지의 중력에 의한 침전 기회가 그만큼 증가하였다. 이는 간섭침전(hindered settling)이나 압밀침전(compressive settling)에 비해 상대적으로 침강속도가 빠른 독립침전(discrete settling)에 속하는 슬러지가 많게 되어 침전조 처리효율이 하단부로 갈수록 증가됨을 의미한다. 이와 같은 결과는 선행연구로 실시한 CFD 모델 이용 최종 침전조 최적설계 조건과 비교해 볼 때(Table 1. 참조), 유입구 위치가 본 실험조건과 동일한 상단부일 경우 정류벽 설치로 인해 유출수의 부유고형물질 농도(suspended solid concentration)가 5.17 mg/L에서 3.88 mg/L로 감소되는 패턴과 일치하는 결과이다. 하지만 실제 하수처리장의 침전조 바닥에 내부 정류벽을 설치하기 위해서는 슬러지의 유입유속과 정류벽 설치위치 그리고 규격선정에 신중을 기해야 한다. 이는 과도한 단락류의 발생과 강한 밀도류 형성으로 충분히 침전되지 못한 유입 슬러지가 배출될 가능성이 있기 때문이다. 따라서 실제 하수처리장의 최종 침전조의 최적화 구조변경을 위해서는 평균체재시간을 증가시키고 슬러지 제거효율을 높이기 위해 정류벽 설치위치 및 규격 등 설계조건에 관하여 방사성추적자를 이용한 추가적인 연구가 필요하다.

최종 침전조 내부에 정류벽을 설치함으로써 바닥으로의 강한 밀도류와 출구 방향으로의 슬러지 휩쓸림 현상이 감소하고, 슬러지 침전영역(settling zone)이 증가됨을 ^{99m}Tc 방사성추적자를 이용하여 성공적으로 가시화하였다. 또한 정류벽 설치로 인하여 단락류가 전체 유출수에서 차지하는 부분이 현저히 감소하고, 오히려 침전조 내의 슬러지의 평균체재시간 분포 또한 감소되는 유동특성을 분석할 수 있었다. 하수처리 과정 중 침전조의 운전효율에 가장 큰 영향을 주는 인자 중의 하나가 유입수의 평균 체재시간분포이다[2]. 유입수가 침전조 내에 체류하는 시간이 증가될수록 혼합 슬러지가 상등수와 슬러지로 분리될 확률이 증가하게 되어 슬러지 제거효율이 그만큼 향상되게 된다. 따라서 설계유량과 한정된 부지를 고려할 때, 동일 조건에서 침전조의 평균 체재시간을 증대시키고 이를 정량적으로 측정할 수 있는 기술이 필요하다. 하지만 하수처리 설비의 체재시간 분포변화에 대해 현재 정량적으로 측정할 수 있는 대체기술이 없는 상황으로서, 방사성추적자를 이용한 평균 체재시간 측정기술은 가동 설비의

운전효율(performance assessment)을 평가하는데 중요한 기술이 될 것이다. 더욱이 방사성추적기술은 하수처리시설 중 체류시간이 중요한 평가인자가 되는 소화조(digester)와 포기조(aeration tank) 등의 다른 설비에 대해서도 성능검증에 동일하게 활용될 수 있는 장점이 있다.

4. 결론

^{99m}Tc 를 방사성추적자로 활용하여 정류벽 설치 유무에 따른 침전조 유동분포 변화를 측정하였으며, 선행연구로 수행된 침전조 구조의 최적화를 위한 CFD 모델링 결과를 실험적으로 검증하였다. 상단부 유입조건 시 정류벽 설치로 인해 바닥으로의 강한 밀도류와 출구 방향으로의 슬러지 휩쓸림 현상이 감소되었으며, 단락류가 전체 유출수에서 차지하는 부분이 48%에서 32%로 감소하고 상대적으로 이의 평균 체재시간도 940 sec에서 810 sec로 감소됨을 정량적으로 산정하였다. 이는 CFD 모델을 이용한 시뮬레이션 결과와 일치하는 결과로서, 침전조의 구조변경에 따른 유동특성 변화를 방사성추적자를 이용하여 성공적으로 평가할 수 있음을 확인하였다. 따라서 방사성추적자 기술은 침전조 효율개선을 위한 구조설계 연구개발 분야나 또는 기존 시설의 성능개선을 위한 구조변경 후 이의 검증에 중요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단을 통하여 과학기술부가 시행한 원자력연구개발사업 연구비지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 환경부, 런던협약 '96의정서 발효에 따른 하수슬러지관리 종합대책, 2007;1-58
2. Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering Treatment, Disposal, and Reuse, 3rd ed. McGraw-Hill, 1991;445-527
3. Vestner RJ, Gunther FW, Influence of sludge properties and hydraulic loading on the performance of secondary settling tanks-full-scale operational results, Water sci. & technol. 2004;50(7):179-186
4. Krebs P, Success and shortcomings of clarifier modelling,

- Water sci. & technol. 1995;31(2):181-191
5. Esler JK, Optimizing clarifier performance, paper presented at 57th Annu. Conf. Water pollut. Control Fed., New Orleans, La. 1984
 6. Parker DS, Kinnear DJ, Gerges, HZ, and Wahlberg EJ, Approach for Diagnosing Secondary clarifier performance problems and prescribing improvements, WEF plant operations specialty conference, 6-9 June, Milwaukee, Wisconsin, USA, 1999
 7. Chmielewski AG, Owczarczyk A, Palige J, Radiotracer investigations of industrial waste water equalizer-clarifiers, NUKLEONIKA, 1998;43(2):185-194.
 8. Borroto JI, Dominguez J, Griffith J, Fick M, Leclerc JP, Technetium-99m as a tracer for the liquid RTD measurement in opaque anaerobic digester: application in a sugar wastewater treatment plant, Chemical engineering and processing, 2003;42:857-865
 9. Kim HS, Shin MS, Jang DS, Jung SH, Jin JH, Study of flow characteristics in a secondary clarifier by numerical simulation and radioisotope tracer technique, Applied radiation and isotopes, 2005;63(4):519-526
 10. 한국원자력연구원, 방사성추적자 이용기술 개발에 관한 연구, 2002;140-176
 11. Kim JS, Kim JB, Jung SH, The RTD measurement of two stage anaerobic digester using radiotracer in WWTP, Int. conference on application of radiotracers in chemical, environmental and biological sciences, India, Mumbai, 2005;2:144-145

Investigation on the Hydrodynamic Behaviors of the Clarifier with an Interior Baffle in WWTP by using of Radiotracer ^{99m}Tc

Jin Seop Kim, Sung Hee Jung, Jong Bum Kim and Jae Ho Kim
Korea Atomic Energy Research Institute, Radioisotope Research & Development Center

Abstract - The hydrodynamic behaviors of the clarifier with an interior baffle in a wastewater treatment plant was investigated by using a radiotracer ^{99m}Tc (30 40 mCi) to verify the results of CFD(computational fluid dynamics) modelling in the previous study. The clarifier model was manufactured with consideration to the hydraulic similarity(1/21) of a real plant(L × W × H : 2.6 × 0.4 × 0.2 m). By installation of an interior baffle to the clarifier, the strong density current at the bottom of the clarifier decreased substantially and increased the area of sludge settling zone, which were visualized successfully from the radiotracer experiment. Also the portion of short circuit stream changed from 48 % to 32 % and the mean residence time of sludge decreased from 940 sec to 810 sec, which corresponds to the results of CFD modelling. As a result, it is anticipated that radiotracer technology can be used as an important tool for designing new wastewater treatment plants and verifying their performances after structural modifications.

Keywords : Wastewater treatment plant, Clarifier, Radiotracer, Residence time distribution, Interior baffle, Short circuit stream, CFD model validation