

방사성동위원소 추적자를 이용한 폐수처리시설의 응집조에서 유입수의 체류시간분포 분석

RTD Analysis using Radioisotope Tracer on the Water Flow Characteristics in a Flocculator of Wastewater Treatment Facility

김진섭*†, 정성희*, 김종범*

Jinseop Kim*†, Sunghee Jung* and Jongbum Kim

초 록 폐수처리시설의 응집조를 대상으로 0.392MeV의 감마선을 방출하는 In-113m을 추적자로 이용하여 체류시간분포(RTD; residence time distribution)를 측정하였다. 측정 결과는 CFSTR (constant flow stirred tank reactor) 모델을 바탕으로 구축한 K-RTD 프로그램을 이용하여 수학적으로 분석하였으며, 이를 바탕으로 혼합 특성을 규명하고자 하였다. 모델에 의한 시뮬레이션 결과를 측정결과와 맞추는 과정에서 유체 거동의 특성을 표현하는 인자들을 계산하였으며, 이들 인자에 의한 시뮬레이션 결과는 실험결과에 매우 성공적으로 부합하였다. 또한 향후 본 실험에서 관찰된 bypass flow의 성분을 이론적 모델에 포함시키고 이를 분석하여 혼합조의 효율에 영향을 미치는 요소들에 대한 추가 연구의 필요성을 확인하였다.

주요용어: 방사선, 방사성동위원소 추적자, 체류시간분포, 폐수처리 반응기, Bypass, 완전혼합기

Abstract Using In-113m emitting gamma ray of 0.392MeV as radioisotope tracer the RTD (residence time distribution) of water in the flocculator of wastewater treatment facility was measured. The result was analyzed mathematically using K-RTD program constructed on the basis of CFSTR (constant flow stirred tank reactor) model. The mean residence time and the tank number are the main parameters which describe the flow behavior of the system. Those parameters were obtained in the fitting process of the simulated curves to the experimental results. It was suggested to construct a modified numerical model to describe the bypass flow which was observed in the experiment.

Keywords: Radiation, Radioisotope Tracer, Residence Time Distribution, Reactor, CFSTR

1. 서 론

응집제를 이용하여 폐수를 처리하고자 할 경우 폐수처리의 효율은 응집반응조의 형태, 체류시간 및 혼합방식 등에 큰 영향을 받으며, 체류시간의 분포는 혼합방식과 응집반응조 간에 직접적인 상관관계

를 갖는 매우 중요한 설계인자이다. 대부분의 경우 설계에 의해 설치된 응집반응조는 일단 운전이 시작된 이후에는 슬러지의 비대화에 의한 하부로의 슬러지 침전, 교반 조건의 변화 그리고 응집반응조로 유입되는 폐수의 유입구와 유출구간의 비적절한 위치 선정에 따라 설계상의 체류시간을 벗어나기 쉽고,

폐수의 체류시간분포 또한 변하게 되어 설계상에서 얻고자 했던 최대 효율을 얻기 어렵다. 따라서 오랫동안 운전된 응집반응기들에 대해서는 폐수의 체류시간분포 등을 주기적으로 점검할 필요성이 대두되고 있다. 하지만 실제 반응기를 대상으로 기존에 사용하던 방식 즉, 염료 또는 전해물질 등을 사용하는 방법들은 폐수의 색깔이 염료와 구분이 안되고, 다양한 성분 물질을 포함하고 있는 폐수의 특성상 전해물질의 사용 역시 불가능하기 때문에 새로운 추적물질의 이용이 불가피하다[1]. 방사성동위원소를 이용한 추적기술은 1960년대 선진국을 중심으로 연구가 시작되어 현재 정유, 화학, 철강 등 장치산업 분야와 환경평가 및 공해의 추적 등에도 폭넓게 활용되고 있다. 방사성추적자를 이용할 경우 방사선의 높은 투과력과 계측장비의 뛰어난 검출효율에 의하여 실험대상 시스템에 영향을 주지 않고 추적대상물질의 실시간 거동추적이 가능하여 정확한 유체의 거동 파악이 가능하다[2]. 본 연구에서는 방사성추적자를 이용하여 폐수처리시설 중 응집조 유입폐수의 거동을 정확하게 파악하고, 조 내에서 폐수의 체류시간분포를 분석함으로써 응집조의 최적 운전 여부를 진단하고자 하였다.

2. 수학적 모델과 RTD 분석

반응기를 통과하는 유체는 완전 혼합(complete mixing)과 비확산 흐름(plug flow)의 두 가지 이상적인 경우의 중간 형태로 변형된 것으로 볼 수 있다. 이러한 실제 흐름의 특성 파악을 위한 수단으로 유체에 포함되어 있는 각각의 요소들이 반응기 내부에 머무르는 시간의 분포를 표현하는 나이 분포 함수(age distribution function) 개념을 도입하여 실험대상 반응기에 대한 임펄스 응답(impulse response)의 체류시간분포(exit age distribution) $E(t)$ 를 구함으로써 반응기 내부에서 유체의 거동 특성을 연구하여 왔다[3-6].

실험 또는 분석 대상에 따라 다양한 수학적 모델을 적용할 수 있으나, 여기서는 추적자 실험의 대상인 혼합기의 분석에 적합한 CFSTR (constant flow stirred tank reactor) 모델을 사용하였다. CFSTR 모델은 Fig. 1에 보인 바와 같이 유체가 반응기로 유입된 직후 반응기 내부 전체에 고루 혼합되는 것으로 동일한 크기(v)를 갖는 n 개의 perfect mixer가 직렬로 연결되어 있는 것으로 가정한다. 이를 바탕으

로 i 번째 perfect mixer의 mass balance는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{d}{dt}[vC(t)] = QC_{i-1}(t) - QC_i(t) \quad (1)$$

이는 Laplace 변환을 통하여 식 (3)와 같은 단일 perfect mixer의 $h(s)$ (impulse response)를 구할 수 있다.

$$h(s) = \frac{C_i(s)}{C_{i-1}(s)} = \frac{1}{\tau s + 1} \quad (2)$$

$$h(t) = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

여기서 $C_i(t)$ 는 일정 시간에서의 추적자의 농도를 의미하며, Q 는 유속, τ 는 nv/Q 로서 평균체류시간(MRT; mean residence time) 그리고 s 는 $1/\tau$ 을 나타낸다. 식 (2)로부터 impulse response를 n 개의 perfect mixer로 확장시키면 식 (4)와 같아진다.

$$C_n(s) = \frac{C_{n-1}(s)}{\tau s + 1} = \frac{C_{n-2}(s)}{(\tau s + 1)^2} = \dots = \frac{C_0(s)}{(\tau s + 1)^n} \quad (4)$$

$$h(\theta) = \frac{n^n}{(n-1)!} \theta^{n-1} e^{-n\theta} \quad (5)$$

여기서, θ 는 t/τ 로 무차원의 reduced time이다. Perfect mixer의 수(n)에 따라 얻게 되는 impulse response의 결과는 Fig. 2와 같게 된다.

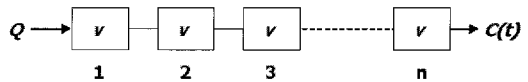


Fig. 1 Perfect mixers in series of equal size.

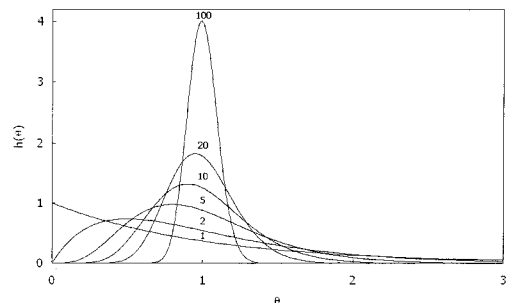


Fig. 2 Impulse responses from perfect mixers in series for different numbers of mixers.

유체의 거동 특성을 묘사하고 규명하는 주요 인자로 mean residence time(τ)과 dispersion of the residence time distribution(variance, σ^2) 등을 들 수 있다. 이들의 계산과 분석에는 moment method가 사용되어 왔으며, 식 (6)~(8)로 요약된다[7].

$$M_j \text{ (j-th moment)} = \int_0^\infty t^j \cdot C(t) \cdot dt \quad (6)$$

$$\tau \text{ (mean residence time)} = \frac{M_1}{M_0} \quad (7)$$

$$\sigma^2 \text{ (variance)} = \frac{M_2}{M_0} - \left(\frac{M_1}{M_0} \right)^2 \quad (8)$$

여기서 t 는 시간을, $C(t)$ 는 일정 시간에서의 농도를 의미한다.

3. 실험 및 결과

실험은 1995년에 설치된 이래로 평균 300 m³/day의 폐수를 처리하는 수처리시설의 응집 공정을 대상으로 수행되었다. 응집공정은 Fig. 3과 같이 pH 조절조와 응집제 혼합을 위한 급속 교반조 그리고 플럭의 크기를 증대시키는 완속 교반조 등 3개의 반응조로 구성되어 있다. 각 반응조의 체적은 26.1 m³이고 27 m³/hr의 유속에서 약 58분의 예상 평균체류시간을 갖는다. 각 반응조의 체류시간분포 측정을 위하여 Fig. 3에 보인 것과 같이 방사선 검출장치를 각 반응조의 유입구(1)와 배출구(4) 그리고 반응조별 연결부위(2, 3)에 각각 설치하였다. 추적자로 사용한 In-113 m은 0.392 MeV의 비교적 낮은 감마선을 방출하며 99.5분의 짧은 반감기를 갖고 있으며, Sn/In portable generator에서 InCl₃의 형태로 약 7mCi를 추출하여 사용하였다. 양이온의 In-113 m을 혼합조에서 유입수와 동일한 거동으로 흐르게 하기 위하여 EDTA (ethylenediamine tetra-acetic acid)로 처리하여 화학적으로 안정한 형태인 착화합물로 생산하여 사용하였다. 추적자를 이용한 체류시간분포의 측정에서는 추적자의 투입 방법 및 위치가 미치는 영향이 매우 크다. 정확한 체류시간분포 측정을 위해서는 파이프의 단면(cross section)에 대하여 균일하게 분포될 수 있도록 mixing length를 고려하여 혼합조의 전단에서 고압을 이용한 투입 장치로 추적자를 순간 투입하였다[8-10].

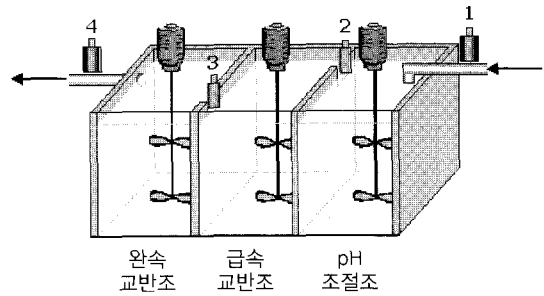


Fig. 3 The mixers in wastewater treatment facility.

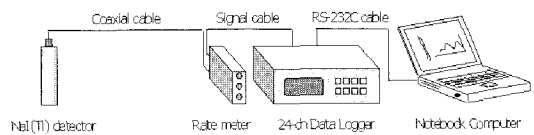


Fig. 4 The schematic diagram of the radiation detection and data acquisition system.

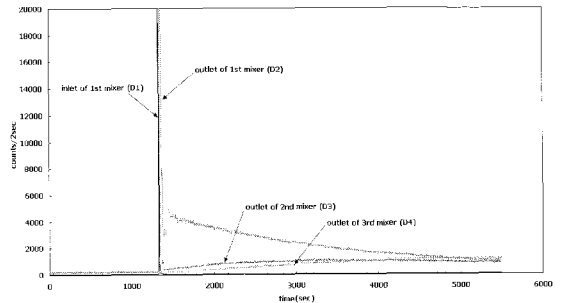


Fig. 5 Response curves at each detector to the tracer injection

Fig. 4는 방사성동위원소 추적자를 이용한 RTD 계측 실험을 위한 실험 장비를 간략히 나타내었다. 방사선의 검출을 위한 NaI(Tl) 섬광검출기(2×2 inch, Eberline)의 PM-tube에 고전압을 공급하고 방사선에 의한 신호를 처리하여 PC로 전송하는데 필요한 rate meter module과 24-channel data acquisition system은 방사성 추적자 실험을 위하여 자체 설계 제작되었다.

실험 데이터로부터 자연 방사선에 의한 영향을 보정해 주기 위하여 방사성동위원소 추적자의 투입 전에 매 2초 간격으로 데이터의 기록을 시작하였다. Fig. 5의 계측 결과에 보인 바와 같이 추적자의 투입이 짧은 순간에 이루어져 impulse injection 되

있음을 알 수 있다. 또한 추적자의 투입 직후 첫 번째 혼합기의 출구에서 추적자가 검출되어 빠른 흐름의 bypass flow가 있었음을 알 수 있다.

수학적 모델을 이용하여 추적대상의 거동을 분석하기 위해서는 식 (9)에 의하여 자연 방사선에 의한 영향과 추적자로 사용된 방사성동위원소의 자연감쇠에 의한 영향이 우선적으로 보정되어야 한다.

$$C = (C_m - C_{bkg}) \times e^{\ln 2 \times t / T_{1/2}} \quad (9)$$

여기서, C_m 은 계측치, C_{bkg} 는 자연 방사선 계측치, $T_{1/2}$ 는 방사성동위원소의 반감기를 의미한다. 방사성동위원소 추적자의 투입은 물론 투입을 준비하는 동안의 주변 방사선이 상승되어 실험 대상 시스템에 설치한 방사선 검출기에 영향을 줄 수 있으며, 이러한 다양한 경로를 통한 영향을 보정하기 위한 수학적 해결 방법들이 제안되었다[11]. 본 실험의 경우에는 투입지점이 지하에 설치된 펌프의 직 후단에서 이루어져 이로 인한 계측치의 영향은 무시하였다.

4. CFSTR 모델을 이용한 분석

앞서 보인 식 (5)는 추적자의 투입이 식 (10)으로 정의되는 $\delta(t)$, Dirac impulse injection을 가정으로

한 것이다. 실험에서 추적자의 투입이 짧은 시간 내에 완료되었지만, 이론적으로 아래와 같이 정의되는 $\delta(t)$ 에서 변형된 것이다. 투입 지점에서의 계측 데이터를 입력 함수로 사용하기 위해서는 convolution integral을 하여야 한다[5].

$$\delta(t) = \begin{cases} 1/\Delta t, & 0 \leq t < \Delta t \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

실제 추적자의 입력 함수, $QC_0(t)$ 를 Dirac impulse에 근사하도록 dt 의 짧은 시간으로 나누어 이로부터 계산되는 impulse response들을 모두 더하여 실험에서 얻은 입력 데이터로부터 분석 대상 시스템의 response를 simulation한다. $\delta(t)$ 에 대한 결과가 $h(t)$ 라고 할 때, $QC_0(t)$ 에 대한 convolution integral의 계산은 식 (11)과 같이 표현된다.

$$C(t) = \int_0^{\infty} C_0(u)h(t-u)du \quad (Q = \text{constant}) \quad (11)$$

방사성동위원소 추적자를 이용한 계측 데이터를 보정하고 이를 이용하여 시스템의 체류시간분포를 분석하기 위하여 작성된 프로그램[12]으로 실험 결과를 분석한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이를 정리한 table 1에 보인 바와 같이 각 반응조들은 CFSTR 모델에서 정의한 perfect mixer의 혼합 패턴을 보이

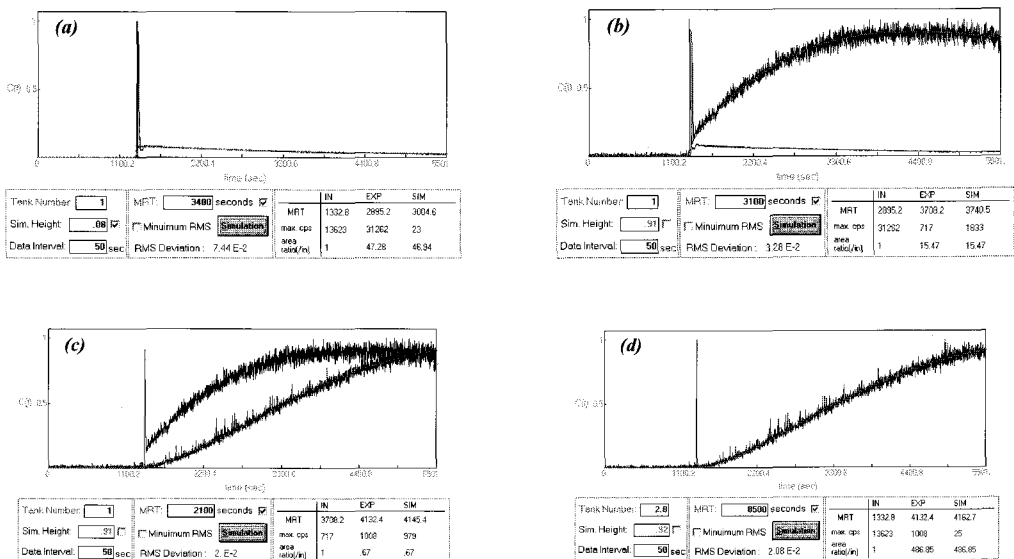


Fig. 6 RTD analysis result on (a) 1st, (b) 2nd, (c) 3rd mixer and (d) mixers in series.

고 있으며, 체적(V)과 유속(Q)에 의한 이론적인 평균체류시간($\tau = V/Q$)과의 비교로부터 각 반응조의 실제 유효체적 비율을 계산하였다.

Table 1 The analysis result from the simulation of the data with CFSTR model

Mixer	Tank no.	MRT (sec)	Active volume (%)
1 st	1	3,400	97.7
2 nd	1	3,100	89.1
3 rd	1	2,100	60.3
1 st ~ 3 rd	2,8	8,500	81.4

유효체적의 비율이 후단으로 갈수록 감소하는 것은 장기간의 시설 운영에 의하여 반응조 내에 응집된 플러들이 쌓여 일종의 dead volume을 형성시켜 유입된 폐수의 체류시간을 감소시키기 때문이다. 또한 bypass flow는 최초 폐수가 유입되는 1st 반응조(pH 조절조)에 설치된 유입 배관이 수면 위쪽에 위치하고 있기 때문에 반응조로 쏟아져 내리는 과정에서 유입된 공기가 다시 수면 위로 부상하는 흐름을 발생시켜 반응조의 수면에 1st 반응조(pH 조절조)의 배출방향으로 빠른 흐름을 형성시키고 있기 때문에 이는 육안 관찰에서도 확인할 수 있었다. 이러한 bypass는 유입 배관을 수면 아래까지 연장시킴으로써 제거 또는 감소시킬 수 있을 것으로 예상되며, 배관의 연장 후 체류시간분포를 측정하여 그 비율을 비교함으로써 확인할 수 있다.

5. 결 론

방사성동위원소 추적자를 이용하여 폐수처리시설의 응집공정 내에서 유체의 거동에 대한 체류시간분포를 계측하여 이를 이론적인 반응기 모델을 이용하여 응집조를 정량적으로 분석하였다. 응집조의 혼합특성을 CFSTR 모델로 시뮬레이션 한 결과는 실험을 통하여 얻은 계측치와 잘 부합하여 완전혼합기를 기반으로 한 모델의 구성이 적합함을 확인하였다. 또한 응집조에서 bypass flow가 관찰되었으며, 각 응집조의 평균체류시간이 예상보다 짧아져 내부 체적이 감소되어 있음을 확인하였다.

실제 혼합 특성에서 관찰되는 bypass와 같은 변형된 흐름을 포함한 시뮬레이션을 위해서는 새로

운 수학적 model의 개발 적용이 필요하며, 이를 통하여 내부 유동의 특성은 물론 공정의 최적화를 위한 설계 정보를 제공할 수 있다[13]. 금번 실험에서 관찰된 bypass flow를 고려하여 이를 모사할 수 있는 model을 구축하여 유속의 변화와 유입관의 위치와 형태에 따른 bypass의 정성적 정량적 변화에 대한 방사성동위원소 추적자 이용 연구 가능성을 확인하였다.

사 사

본 연구는 과학기술부의 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- [1] Guo-Hua Hu, "Modeling and on-line measurement of overall and local residence time distribution in extruder reactors," Proceedings of the First International Congress on Tracers and Tracing Methods, CNRS-ENSIC, Nancy, pp. 153-160, (2001)
- [2] J. S. Charlton, "Radioisotope Techniques for Problem Solving in Industrial Process Plant," Leonard Hill, London, pp. 84-96, (1986)
- [3] P.V. Danckwerts, "Continuous flow systems - distribution of residence times," Chem. Eng. Sci. Vol. 2, No. 1, pp. 1-18, (1953)
- [4] H. Weinstein and R.J. Adler, "Micromixing effects in continuous chemical reactors," Chem. Eng. Sci., Vol. 22, pp. 65-75, (1967)
- [5] IAEA, "Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry", Technical report No. 316, pp. 39-68, IAEA, Vienna, (1990)
- [6] Octave Levenspiel, B.W. Lai and C.Y. Chatlynne, "Tracer curves and the residence time distribution," Chem. Eng. Sci., Vol. 25, pp. 1611-1613, (1970)
- [7] Z. Stegowski, "Accuracy of the residence time distribution function parameters," Nucl. Geophys. Vol. 7, No. 2, pp. 335-341, (1993)
- [8] Octave Levenspiel and J.C.R. Turner, "The interpretation of residence-time experiments," Chem. Eng. Sci., Vol. 25, pp. 1605-1609, (1970)

-
- [9] IAEA, "Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry", Technical report No. 316, pp. 102-103, IAEA, Vienna, (1990)
- [10] C. G. Clayton, Spackman, R. and Ball, A. M., "The accuracy and precision of liquid flow measurement by radioactive isotopes," Proceedings of the Symposium on Radioisotope Tracers in Industry and Geophysics, Prague in 1966, IAEA, Vienna pp. 563, (1967)
- [11] J. Tyn and R. Zitny, "Problems of residence time distribution analysis with applications of radiotracers," Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles, Vol. 205, No. 2, pp. 225-233, (1996)
- [12] 한국원자력연구소, 체류시간분포 분석 프로그램; K-RTD, (1999)
- [13] A. D. Martin, "Interpretation of residence time distribution data," Chem. Eng. Sci., Vol. 55, pp. 5907-5917, (2000)