

방사성동위원소 추적자를 이용한 침적형 고정 미생물 반응조 진단

정성희 · 진준하 · 이면주

한국원자력연구소

(2000년 2월 14일 접수, 2000년 3월 31일 채택)

Diagnosis of Submerged Fixed Bioreactor using Radioisotope Tracer

Sunghee Jung · Joonha Jin · Myunjoo Lee

Korea Atomic Energy Research Institute

ABSTRACT

A radioisotope tracer experiment was carried out in the submerged fixed bioreactor of a dye wastewater treatment facility to evaluate the flow behaviors in the 6 compartments of the reactor and to find any possible factors which may affect to the efficiency of the process. Approximately 20mCi of ^{131}I was injected into the system as a tracer and 8 radiation detectors were placed in the 6 compartments and at the inlet and the outlet of the system to measure the change of the tracer concentration with time. Using the Perfect Mixers in Series Model the measured data were analyzed to calculate the mean residence time and the characteristic parameters of the flow in the system. The mean residence time of the system was calculated as 17 hours which is 76% of the designed MRT(22.3hr). Among the 6 compartments, the first compartment doesn't show the characteristic of perfect mixer, whereas, the other 5 compartments are working as perfect mixers. The output response of the first compartment is fit well with the simulated output of a model which consists of a perfect mixer with an exchange volume. It indicates that a quarter of the tank volume is working as a dead volume or an exchange volume. From the measured residence time distributions in each compartment, the appropriate sampling times after the change of operational condition of the electron beam accelerator were evaluated.

Key Words : Radioisotope, Tracer, Wastewater Treatment, Mean Residence Time,
Residence Time Distribution, Efficiency, Dead Volume

요 약 문

염색폐수를 생물학적으로 처리하여 방류하는 연속으로 연결되어있는 6개의 단으로 구성된 폐수처리시설에서 폐수 유동을 관찰하고 처리공정에 영향을 줄 수 있는 요인들을 찾기 위해 동위원소를 이용한 추적자 실험을 수행하였다. 추적자로 약 20mCi의 ^{131}I 를 첫 번째 단의 폐수 유입부에 투입하고 각 단에 방사선 검출기를 설치하여 시간에 따른 추적자 농도변화를 측정하였다. 측정된 데이터를 Perfect Mixers in Series Model을 이용한 분석을 통하여 평균체제시간과 시스템에서의 유동 특성 파라미터들을 계산하였다. 시스템의 평균체제시간은 설계치인 22.3시간의 76%인 17시간으로 계산되었다. 시스템을 구성하고 있는 6개의 단 중에서 제1단은 완전혼합기(perfect mixer)로서의 특성을 보이지 않았으나, 나머지 5개의 단은 완전혼합기와 같이 작동하였다. 제1단의 출력은 상호 교환이 일어나는 탱크를 가진 완전혼합기 모델로 모사한 출력과 좋은 일치율을 보였다. 이 교환되는 탱크의 크기는 전체의 약 4분의 1인 것으로 분석되었다. 체제시간분포 실험의 결과는 유입 폐수의 방사선 전처리를 위해 설치된 전자선가속기의 가동조건 변경 후 그 영향에 대한 연구를 위한 적정 시료채취시간 산정에 사용되었다.

주제어 : 방사성동위원소, 추적자, 폐수처리, 평균체제시간, 체제시간분포, 처리효율

1. 서 론

여러 개의 단(compartment)으로 구성된 침적형 고정상 미생물 반응조는 대부분 유량이나 폭기 또는 고정상 미생물의 증식 및 탈리 정도에 따라 반응조 내부에 부동층(dead volume) 또는 bypass flow가 형성되어 처리효율을 감소시킬 수 있다. 그리고 이와 같은 현상의 발생유무에 대한 진단을 위해서는 운전중 중지하고 폐수를 모두 반응조에서 제거한 뒤에야 가능하나, 이 경우 가동중의 이상을 정량적으로 진단하기는 어렵다. 최근 운전을 중지하지 않고도 이러한 문제점을 찾을 수 있는 방법으로 비색법이나 농도분석법을 이용하는 추적자기술¹⁾이 대두되고 있다. 그러나 농도 및 색도가 아주 높은 폐수처리 분야에 있어서는 추적자의 측정이 어려워 이러한 방법의 사용이 근본적으로 거의 불가능하다. 반면, 감마선을 방출하는 방사성동위원소를 추적자로 이용할 경우 반응조 내부의 부동층이나 bypass 현상을 용이하게 진단할 수 있는 체제시간분포를 쉽게 측정할 수 있다. 이 방법은 방사선의 높은 투과력과 예민한 검출능력²⁾에 의해 운전중인 시설에 대한 정보를 실시간으로 얻을 수 있어 폐수처리시설에도 효과적으로 적용할 수 있다.

본 연구에서는 염색공단으로부터 배출되는 고농도 염색폐수를 전자선가속기로 방사선을 조사시킨 다음 활성슬러지 처리조에서 처리하기 앞서 전처리조로 활용되는 6개의 단으로 구성된 침적형 고정상 미생물 반응조를 대상으로 부동층 또는 bypass flow의 형성 여부를 진단하고, 측정된 각 단별 체제시간분포로부터 전자선가속기의 가동조건 변경후 각 단별 적정 시료채취시간을 결정하기 위한 목적으로 추적자실험을 실시하였다.

2. 실 험

2.1. 폐수처리 시설

실험대상 시설은 침적형 고정 미생물 접촉조로서 인근 염색공단으로부터 배출되는 염색폐수를 처리하는 시설이다. 강알칼리성의 염색폐수는 중화조에서 황산으로 중화된 후 생물학적 처리를 위하여 접촉폭기조로 이송된다. Fig. 1에 보인 바와 같이 접촉폭기조는 크기가 다른 여섯 개의 단이 직렬로 연결되어 있으며, 각 단마다 공기공급을 위한 산기통이 설치되어 있다. 각 단은 Fig. 2와 같이 칸막이

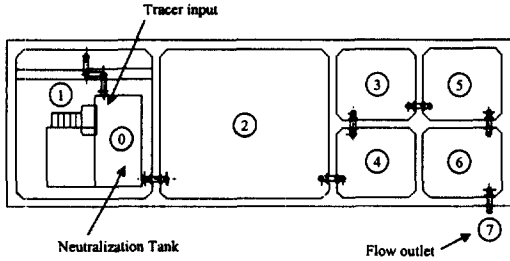


Fig. 1. The schematic diagram of the submerged biological contactor and the detector positions.

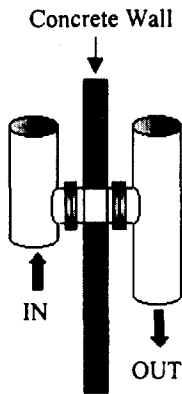


Fig. 2. Over flow pipeline between the tanks.

구실을 하는 콘크리트 구조물을 사이에 두고 H 형태의 over flow 배관으로 연결되어 있다. 폭기조에는 미생물이 부착되는 접촉여재(media)가 설치되어 있는데, 제1단은 유동상 여재가, 그리고 제2단부터 제6단까지는 고정상 여재가 사용되었다.³⁾ 각 단의 규격은 Table 1과 같다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 방사성동위원소

실험 대상인 6단의 접촉폭기조에서 반응하는 유입수의 예상 체재시간이 약 21시간이므로 장시간의 추적자 실험에 적합한 반감기 등을 고려하여 선정된 ¹³¹I(Half-life: 8.04day, γ -energy: 0.284 MeV, 0.364MeV, 0.637MeV)를 한국원자력연구소의 연구용 원자로(HANARO, neutron flux: $4.21 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$)에서 ¹³⁰Te(n, γ)¹³¹Te→¹³¹I 반응으로 제조하여 NaI 용액형태로 준비하였다. 실험에 사용된 추적자의 방사능은 약 20mCi로서 투입 후 추적자가 반응조 전체에 희석된다면 방사능 농도가 $19.4 \times 10^{-6} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ ($0.02\text{Ci}/1031\text{m}^3$)로서 수중 최대허용농도⁴⁾인 $6.0 \times 10^{-5} \mu\text{Ci}/\text{cm}^3$ 에 비하여 매우 낮은 수치이므로 방사성동위원소 추적자를 이용한 본 실험이 주변환경에 미치는 영향은 무시하여도 된다.

2.2.2. 방사선 계측기 설치 및 자연방사선 측정

각 단(compartment)의 특성을 파악하기 위해서는 각각의 유입구와 배출구에 방사선검출기를 설치하여 input signal에 대한 output response를 구하여 분석하는 것이 일반적이다. 그러나 실험대상인 6단의 접촉폭기조는 Fig. 2에 보인 바와 같이 구조적으로 각 단의 연결부위가 콘크리트 구조물의 내부에 위치하여 접근이 용이하지 않기 때문에 각 단의 상부 덮개로부터 배출구에 가까운 위치에 6개의 방사선검출기(Eberline, SPA-3 2×2 inch scintillation detector)를 수면으로부터 약 10cm가량 잠긴 상태로 각각 설치하였다. 평균체재시간에 비해 혼합

Table 1. The dimension of each compartment of the bio-reactor

Compartment No.	Width(mm)	Length(mm)	Water level(mm)	Volume(m ³)
1	6,100	5,600	8,000	273.3
2	6,100	6,900	7,900	332.5
3	3,300	2,900	7,800	74.6
4	3,300	2,900	7,700	73.7
5	3,300	2,900	7,600	72.7
6	3,300	2,900	7,500	71.8
Total	25,400	24,100	46,500	898.6

속도가 훨씬 빠를 때는 탱크 내의 임의의 지점에서 방사성동위원소 추적자의 농도변화를 측정하는 경우와 배출구에서 측정하는 경우에 거의 동일한 체재 시간분포 곡선을 얻는다. 이를 확인하기 위하여 Fig. 1의 7번 위치에 검출기를 설치하여 6번과 비교하였다. 이 검출기는 제1단의 상부에 위치한 증화조에 방사성동위원소 추적자를 투입할 때 input peak를 얻기 위하여 추적자 투입 직전부터 제1단으로의 추적자 유입이 완료되는 시점까지 약 10분 동안 증화조에서 제1단으로 유입되는 파이프에 배치하였다.

설치된 방사선검출기로부터 얻은 신호를 계측하고 기록하기 위한 장치들은 방사선검출기로부터 약 15~30 m 가량 떨어져 설치되었는데, 각 cable의 길이와 검출기의 특성에 따른 각 방사선검출기의 plateau를 구하여 방사선검출기의 인가 고전압(H.V.)을 설정하였다. 계측신호는 방사성동위원소를 이용한 추적자실험을 위하여 자체 제작한 24-channel data aquisition system에 연결하고, 방사선계측신호 처리시간을 조절하고 저장하여 화면에 표시할 수 있는 프로그램을 이용하여 데이터를 수신하였다.

장시간의 실험에 따른 계측시스템의 안정성과 주변시설로부터의 전기적인 장애요소가 없음을 확인하고 실험 후 계측치로부터 자연방사선에 의한 영향을 제거해 주기 위하여 장비 설치 후 약 이틀에 걸쳐 계측장비를 가동하여 Fig. 3과 같은 결과를 얻었다. 전반적으로 모든 계측치가 안정한 값을 보이고 있다. 다만, 7번 위치에 설치된 검출기에서 계측치가 높게 나타나고 있는데 이는 폭기조 내부의 수면에 잠긴 다른 검출기와는 달리 노출되어 있어 주변 콘

크리트 구조물로부터 방출되는 자연방사선을 많이 검출하기 때문이다.

2.2.3. 방사성동위원소 추적자 투입

제1단 상부에 위치한 증화조의 배출구를 추적자 투입위치로 정하였다. 작업자의 방사선 피폭을 줄이고 추적자가 쉽게 유입수와 혼합되도록 하기 위하여 Fig. 4와 같은 장치를 제작 사용하였다. 추적자를 포함하고 있는 NaI 용액을 vial에 담긴 상태로 장치의 아래쪽 용기에 넣은 후 덮개를 닫고, 이를 투입위치에 담긴 다음 손잡이 부분에 있는 막대기를 이용하여 vial을 깨뜨리는 방법으로 추적자를 투입하였다. Vial을 넣은 용기에는 많은 구멍을 충분히 내어 유입수와 쉽게 혼합되도록 하였다.

2.2.4. 방사선 계측

추적자를 제1단으로 주입하기 직전부터 처음 10분간은 2초 간격으로 계측치를 기록하여 추적자의 거동을 관찰하였고, 이후에는 10분 간격으로 기록하였다. Fig. 5의 1번 위치에서의 계측치 변화를 보면 추적자가 투입된 후 약 120초만에 제1단 탱크 안에 완전 혼합된 것을 알 수 있다. 투입된 추적자가 제1단으로 유입된 10분 후까지 1번 검출기를 제외한 다른 검출기에서의 계측치는 아무런 변화를 보이고 있지 않다.

실험결과 분석을 위하여 시간의 경과에 따른 계측치로부터 자연방사선에 의한 영향을 제거하고, 추적자로 사용된 ¹³¹I의 자연감쇄($t_{1/2}=8.04$ 일)에 의한 영향을 보정하여 얻은 계측결과를 Fig. 6에 나타

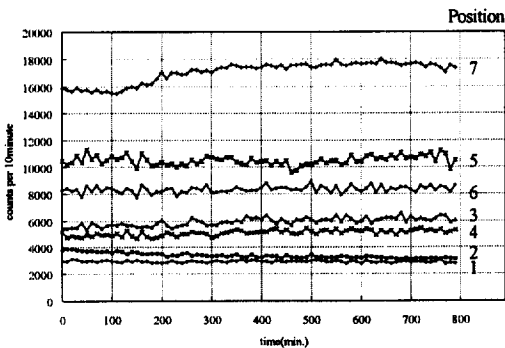


Fig. 3. The background measurement at each position before tracer injection.

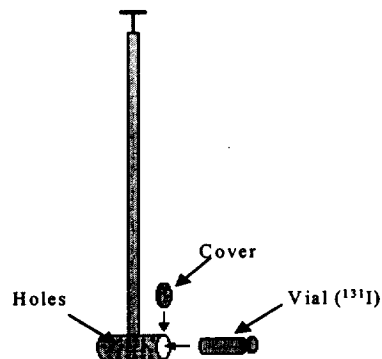


Fig. 4. The tool for tracer injection.

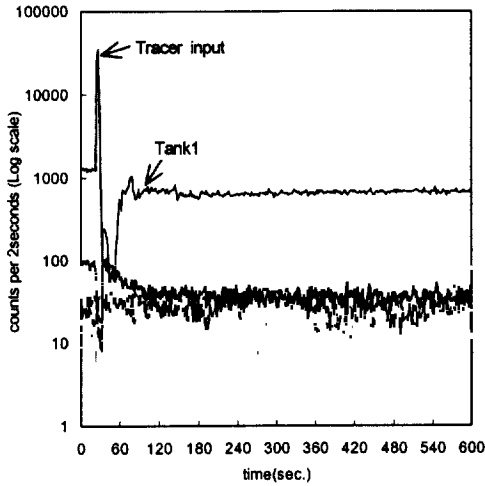


Fig. 5. Radiation counts measured with 7 detectors.

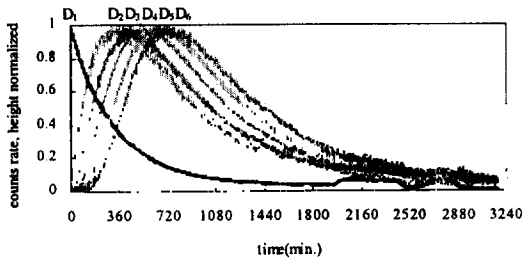


Fig. 6. RTD curves after the background and decay correction.

내었다. 이 그림에서 실험 시작 약 1일이 경과한 후 부터 나타나는 계측치의 불안정한 변화는 폐수처리 시설로 유입되는 폐수의 유량 변화에 의한 것이다. 실험 후 각 방사선검출기의 검출효율을 측정하여 Table 2에 요약하였다. 실험 종료시까지 방사선검출기 및 계측장비에 아무런 이상이 없었음을 확인하고 계측결과의 신뢰성을 확보하였다.

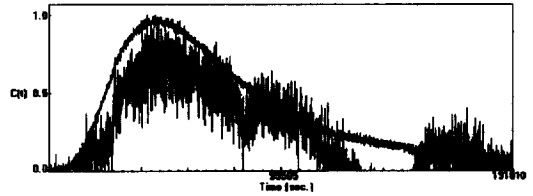


Fig. 7. Radiation counts measured at position 6 and position 7.

또한 6번 위치와 7번 위치에서의 체제시간 분포곡선에 차이가 없음을 보이기 위하여 Fig. 7에 두 계측치를 normalization한 후 비교하였다. 방사선검출기가 대부분 공기 중에 노출된 상태로 설치된 7번 위치에서는 방사선 검출부위가 수면아래에 잠긴 상태의 6번 위치에 비하여 상대적으로 낮은 방사선량이 계측되어 그에 따른 측정오차도 매우 크게 나타나고 있다. 그러나 시간에 따른 방사선 계측치의 변화에 있어서는 동일한 패턴을 보이고 있어 검출기 설치위치에 따른 차이는 없음을 짐작할 수 있다.

3. 결과 및 분석

방사성동위원소 추적자를 이용한 실험으로부터 평균체제시간분포를 분석하는데 있어서 Perfect Mixers in Series Model, Axial Dispersion Model 등의 수학적 모델이 이용될 수 있는데,^{5,6)} 본 연구에서는 대상 시스템의 구성이 Perfect Mixers in Series Model과 유사하므로 이 모델을 분석에 적용하였다. 실험대상의 경우 6개 단의 용량이 동일하지는 않지만, Perfect Mixers in Series Model이 n개의 완전 혼합조(perfect mixer)가 직렬로 연결

Table 2. The efficiency of each detector

Detector No.	Background(cpm)	¹³¹ I+Background(cpm)	¹³¹ I(cpm)	Efficiency
1	468	25607	25149	1.1
2	362	22589	22227	1.0
3	506	26931	26425	1.2
4	501	27519	27018	1.2
5	604	28321	27717	1.2
6	549	24328	23779	1.1
7	436	23740	23304	1.0

되어 있는 형태를 고려한 것이라는 점에서 실험대상을 가장 유사하게 표현하고 있다. 이 모델에 의한 순간적인 input에 대한 output 응답함수(impulse response function)는 다음과 같이 표현된다.¹⁾

$$h(\theta) = \frac{n^n \times \theta^{n-1} \times \exp(-n\theta)}{(n-1)!}$$

여기서, θ 는 평균체재시간에 대한 실제시간의 비로 표현되는 시간(reduced time), n 은 perfect mixer의 개수를 나타낸다.

또한, 유속이 Q 이고 체적이 V 인 시스템에 대하여 추적자 실험에서 측정된 평균체재시간(MRT)과 이론적인 평균체재시간(τ)은 각각 다음의 식들로 표현되는데, τ 에 비해 MRT가 낮게 측정되는 것은 시스템 내부에 dead volume이 존재함을 의미한다.⁶⁾

$$MRT = \frac{\int_0^\infty C(t) t dt}{\int_0^\infty C(t) dt}, \quad \tau = \frac{V}{Q}$$

Fig. 8에 실험이 진행되는 동안 시간에 따른 적산 유량을 측정하여 나타내고 기울기를 구하여 평균 유입속도를 계산하였다. 그림에서와 같이 유입속도($slope=39.5m^3hr^{-1}$)에 큰 변화가 없었기 때문에 체재시간분포 분석시 유입속도를 안정상태(steady state)인 것으로 간주하였다.

Perfect mixer의 체재시간 분포곡선은 이론적으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다. 이 경우 계측치를 자연대수 값으로 계산하여 plot하면 직선이 된다.⁷⁾

$$\frac{dC(t)}{dt} = -a \cdot C(t), \quad \ln C(t) = -a \cdot t + \ln C_0$$

그러나, 제1단의 계측치를 plot한 Fig. 9는 직선이 아닌 것으로 나타나, 이 단이 완전혼합기의 특성과는 다른 형태의 혼합특성을 갖는 상태로 운전되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10에 추적자 투입에 의한 input peak로부터 제1단에서 측정된 방사선계측치를 Perfect Mixers in Series Model을 이용한 분석 결과를 나타내었다. (a)에서는 1개의 perfect mixer로 구성된 모델

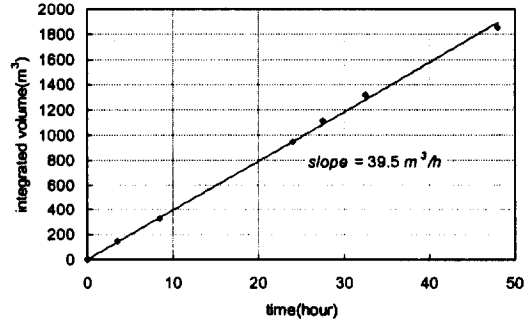


Fig. 8. Calculation of the flow rate during the experiment.

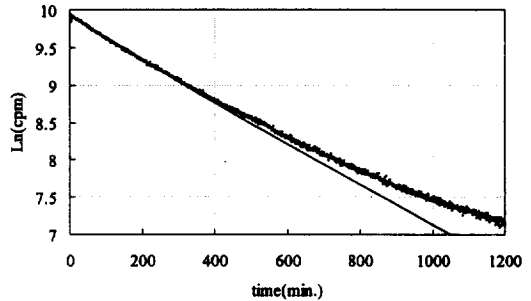


Fig. 9. The slope of Ln value of the measured data from the 1st compartment.

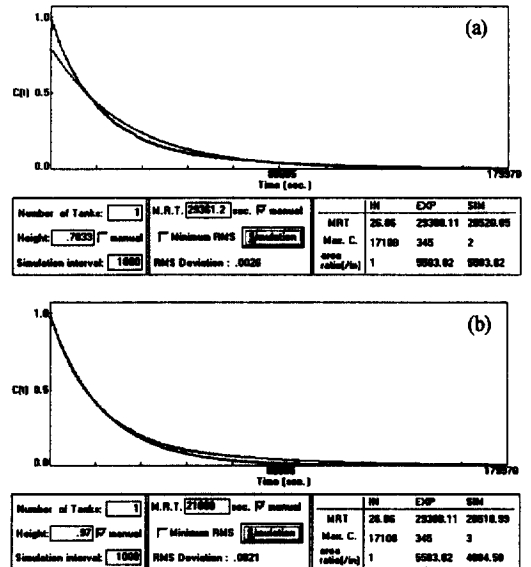


Fig. 10. Calculation of MRT of the 1st compartment.

에 의한 계산치가 실험치와 잘 일치하지 않음을 알 수 있다. (b)에서는 실험결과와 앞부분을 일치시키기 위하여 MRT값을 조정하여 모사한 결과이다. 이 경우 계측치 뒷부분에 큰 편차를 보이고 있는데, 이는 제1단의 내부에 매우 느리게 움직이는 흐름 또는 dead volume이 존재할 가능성이 있음을 시사하는 것이다.

Fig. 11의 (a)~(e)는 제2단부터 제6단까지 각각의 tank에 대하여 Perfect Mixers 모델(tank number=1)을 사용하여 분석한 결과로서 실험치와 계산치가 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 각 분석으로부터 얻은 평균체재시간(MRT)을 Table 3에 요약하였다.

용량이 유사한 3, 4, 5, 6번 단에서는 1.45 ± 0.05 정도의 비슷한 MRT값을 보였으며, 용량이 큰 1, 2단에서는 MRT가 5시간 이상으로 나타났다. 2번 단에서 계측된 값을 input으로 하고 6번 단에서의 값을 output response로 하여 분석한 결과를 Fig. 12에 보였는데, 각 단에 대하여 계측된 값의 합인 $n=4$, $MRT=5.78$ 시간(20800초)로 계산된 모사결과가 실험치와 매우 잘 일치하고 있어 3, 4, 5, 6번 단에 대한 Table 3의 분석결과가 타당함을 보여주고 있다.

추적자 투입에 의한 input peak로부터 시스템 말단에서의 response를 분석한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 추적자를 투입하고 약 2시간이 경과한 후 배출구에서 추적자가 검출되기 시작하였으며, 약 12시간 후에 최고치에 도달하였고, 전체 시스템의 평균체재시간은 17시간으로 측정되어 설계치인 22.7시간($898.6 \text{ m}^3/39.5 \text{ m}^3 \cdot \text{hr}^{-1}$)에 비하여 25% 짧았다. 이러한 차이는 각 조 내부의 구조물과 폭기

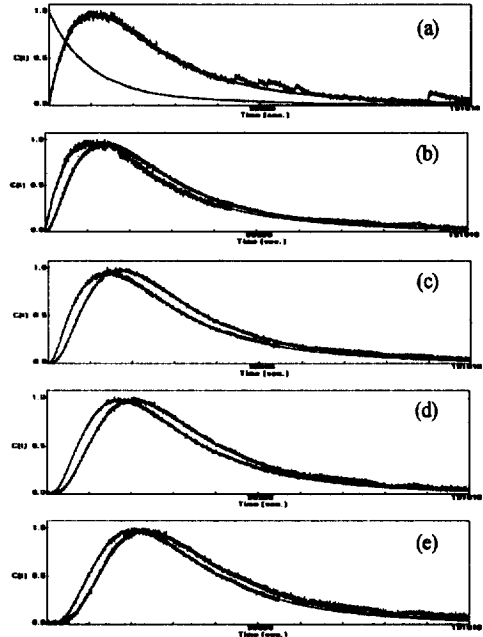


Fig. 11. Calculation of MRTs for compartment 2, 3, 4, 5, 6.

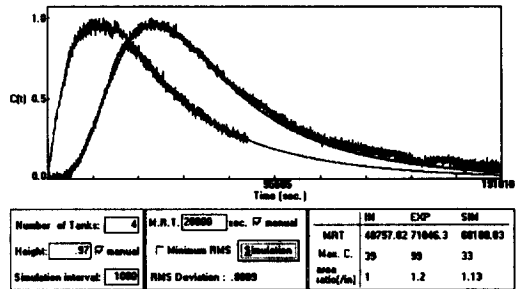


Fig. 12. MRT calculation between the outlet of compartment 2 and the outlet of compartment 6.

Table 3. Number of perfect mixers and MRT calculated by perfect mixers in series model

Compartment No.	No. of Perfect Mixer (n)	Mean Residence Time (hour)		
		Calculated*	Measured	%(M/C)
1	1	6.92	(5.83)	(84)
2	1	8.42	5.42	64
3	1	1.89	1.39	74
4	1	1.87	1.47	79
5	1	1.84	1.50	82
6	1	1.82	1.42	78

* : (Volume in Table 1)/(Mean flow rate ($39.5 \text{ m}^3/\text{hr}$))

() : MRT in the volume of a perfect mixers in the 1st compartment

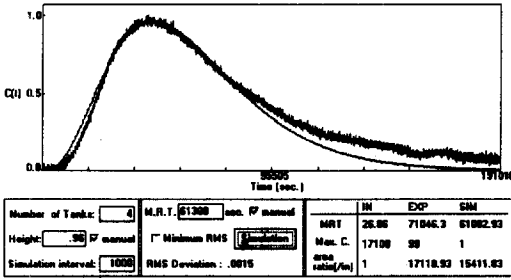


Fig. 13. MRT calculation between the tracer injection point and the outlet of compartment 6.

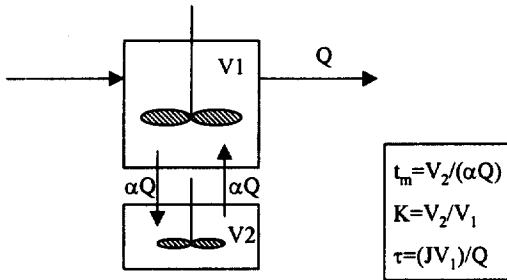


Fig. 14. The simulation model of the 1st reactor with DTS program.

되는 공기가 차지하는 부피 및 dead volume 등에 기인하는 것으로 보인다.

제1단의 혼합특성에 대하여 보다 정확하게 분석하기 위하여 IAEA로부터 입수된 체재시간분포 분석프로그램(DTS)을 이용하였는데, 이 프로그램은 다양한 기본 혼합모델을 이용하여 실험대상 시스템을 표현하도록 구성하여 실험결과를 모사할 수 있도록 하는 기능을 갖고 있다.⁸⁾ 이 실험결과를 모사할 수 있도록 구성한 모델을 Fig. 14에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 이 모델은 perfect mixer와 일정 유속으로 상호 교환(exchange)하는 일정 부피를 가진 제2의 mixer(dead volume)로 구성되어 있다. 이는 제1단 내부에 일정 유속으로 상호작용(exchange)을 하는 여분의 공간(volume)이 있음을 의미한다. 이 모델을 이용하여 Fig. 15와 같은 분석 결과를 얻었으며, 이때 계산된 제1단의 파라미터를 Table 4에 요약하였다.

아래 표에서 τ 는 main flow의 평균체재시간, J 는 main flow의 혼합특성을 완전혼합기(perfect mixer)의 수로 표현하는 tank number, T_m 는 여분

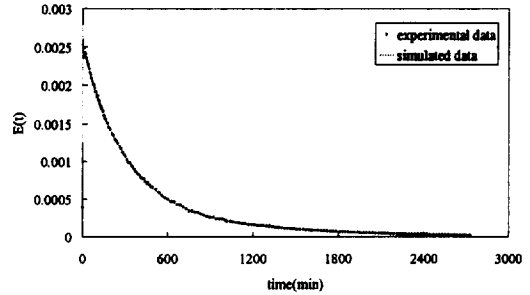


Fig. 15. The simulation result of the experimental data by DTS.

Table 4. The parameters of the 1st compartment calculated by DTS

MRT1 (τ)	Tank No. (J)	MRT2 (T_m)	Volume ratio (κ)
6.6 hour	1	9.2 hour	0.28

의 공간(dead volume) 내에서의 체류시간, 그리고 κ 는 perfect mixer에 대한 dead volume의 체적비를 의미한다. 따라서, 이 분석의 결과는 제1단 내부에 약 22% ($\frac{\kappa}{1+\kappa}$)의 부피가 유동성이 저하되어 있으며 이 부피 내의 평균체재시간은 약 9시간인 것을 의미한다.

접촉폭기조 안에 설치한 접촉여재(media)의 형태를 고려해 볼 때, 고정형 접촉여재를 사용한 제2단~제6단과 달리 제1단에는 물의 흐름에 따라 같이 움직이는 유동상 접촉여재를 사용하고 있으며, 이로 인하여 제1단의 경우 시설을 장기간 사용함에 따라 접촉여재의 비중이 높아져 폭기조 내부의 일부분에 쌓여 일종의 부동층이 형성되어 있음을 예상할 수 있다.

제1단부터 제6단까지 전체 폭기조에 대한 DTS 모사를 위하여 Fig. 16과 같은 모델을 구성하여 Fig. 17과 같은 계산 결과를 얻었다. 제2단의 MRT는 5.8시간으로 계산되었고, 제3단~제4단의 MRT는 5.5시간으로 계산되어 Perfect Mixers 모델로부터 얻은 결과(MRT₂=5.8시간, MRT₃₋₆=5.7시간)와 잘 일치하고 있다.

체재시간분포 실험의 결과는 유입 폐수의 방사선 전처리를 위해 설치된 전자선가속기의 가동조건 변경 후 그 영향에 대한 연구를 위한 적정 시료채취시

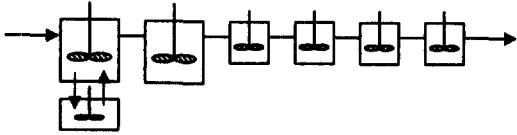


Fig. 16. The simulation model of the system with DTS program.

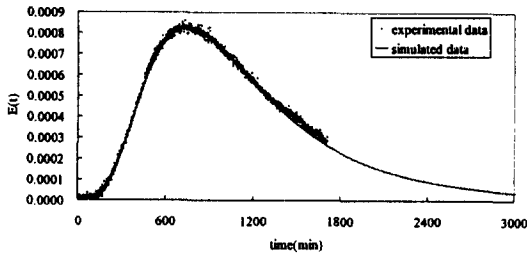


Fig. 17. The simulation result of the experimental data by DTS.

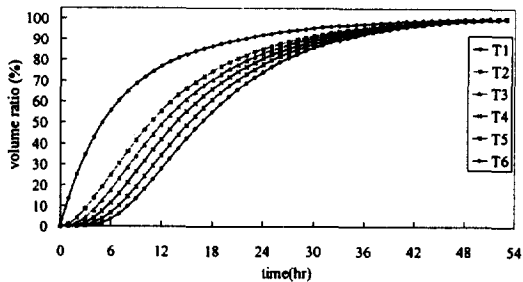


Fig. 18. Calculation of the sampling time in each tank.

간 산정에 사용되었다. 각 단에서의 시간에 따른 운전조건 변경 후 유입된 폐수의 부피비의 변화를 계산하여 Fig. 18과 같은 그림을 얻었다. 전자선가속

기 운전조건을 바꾼 후 유입된 폐수의 부피 분율이 각 단에서 50%, 90%, 95% 및 99%에 달하는 시간을 Table 5에 정리하였다.

4. 결 론

방사성동위원소 추적자를 이용하여 6단의 폭기반응조로 구성되어 있는 폐수처리시설 각 단에서의 체재시간분포를 측정하였다. 이 실험을 통하여 6개의 폭기조 중 제1단을 제외한 나머지는 완전혼합조(perfect mixer)의 특성을 보이고 있음을 알 수 있었다. 제1단의 경우에는 약 22%의 부피비를 갖는 부동층이 존재하고 있는 것으로 분석되었다. 시스템 전체의 평균체재시간은 설계치인 22.7시간에 비해 약 25% 짧은 17시간으로 측정되었으며, 각 단 사이의 bypass는 관찰되지 않았다. 미생물반응조의 전단에 설치된 전자선가속기가 이 반응조의 처리효율에 미치는 영향을 측정하기 위한 연구에 활용할 수 있도록 하기 위해, 체재시간분포측정 결과를 이용하여 각 단별로 전자선가속기의 가동조건 변경 후의 적정 시료채취시간을 구하였다.

사 사

본 연구는 한국염색기술연구소와 삼성중공업 중앙연구소의 협조 하에 과학기술부 원자력연구개발사업의 일환으로 수행되었음.

Table 5. Sampling time after the change of electron beam operation condition

compartment No.	sampling time (hours)			
	volume % of wastewater input after condition change			
	50%	90%	95%	99%
1	5.1	21.5	29.3	43.5
2	10.8	28.2	35.2	46.8
3	12.3	29.4	36.3	47.4
4	13.8	30.8	37.4	47.9
5	15.3	32.1	38.5	48.4
6	16.7	33.4	39.6	49.0

참 고 문 헌

1. IAEA, Guidebook on Radioisotope Tracers in Industry, Technical Reports Series No. 316, IAEA, Vienna, pp. 11~59(1990).
2. D. M. Himmelblau and K. B. Bischoff, Process Analysis and Simulation, Wiley, New York, pp. 59~61(1968).
3. 염색기술연구소, 전자빔 가속기를 이용한 염색 폐수처리기술개발에 관한 연구, 산업자원부, pp. 125~151(1999).
4. 과학기술부, 고시1998-12, 방사선량 등을 정하는 기준.
5. J. S. Charlton, Radioisotope Techniques for Problem Solving in Industrial Process Plants, Leonard Hill, London, pp. 112~137(1986).
6. S. M. Rao, IAEA, "Radioisotope Tracer Application in Industry," in *Seminar on the application of nuclear techniques in industry*, Kuala Lumpur (Malaysia), Malaysia, p. 17(1987).
7. A. Nir, "Tracer techniques in environmental systems studies," Radiation Engineering in the Academic Curriculum, IAEA, Vienna, p. 298(1975).
8. IAEA, Software "D.T.S. v3.1" (1996).