

## 수질원격감시체계의 시료채취조의 수리적 거동 및 혼합특성 평가

오원기<sup>1,†</sup> · 최종우<sup>2</sup> · 이원석<sup>2</sup> · 추용엽<sup>1</sup> · 허정욱<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국산업기술시험원, <sup>2</sup>국립환경과학원

### Hydraulic Behavior and Mixing Characteristics in Sampling Tank for Tele-monitoring System

Wonki O<sup>1,†</sup>, Jeongwook Heo<sup>1</sup>, Wonseok Lee<sup>2</sup>, Yongyeop Choo<sup>1</sup>, and Jongwoo Choi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea Testing Laboratory

<sup>2</sup>Environmental Infrastructure Research Department National Institute of Environmental Research

Received August 5, 2014/Revised September 4, 2014/Accepted September 14, 2014

The tele-monitoring system (TMS) refers to a system that monitors the emission state of pollutants on a 24-hour basis by online-connecting a remote water quality control center with automatic measurement devices attached to the discharging outlets of wastewater processing facilities and wastewater-producing businesses. The core of the TMS is the reliability of data from the continuous water monitoring equipment (CWME). The data reliability depends upon the accuracy and uniformity of the monitoring equipment as well as the representativeness of samples. The water sampling system is a major factor affecting the measuring results because it consists of a series of continuous sample collection processes from the effluent outlet to the CWME. Experiments were performed with a specially designed sampling system. The mixing characteristics of each sample in the designed system were investigated using three-dimensional computational analyses of fluid and tracer tests. In addition, the residence time distribution (RTD) and the dispersion number were analyzed. The results showed that the sampling system is applicable as a standard of performance test for sampling baths.

**Key words:** Hydraulic characteristics, Residence time distribution, Tele-monitoring system, Three-dimensional computational analysis, Tracer test

#### 1. 서 론

우리나라는 수질오염 및 수생태계 훼손을 방지하기 위하여 지난 2008년부터 방류수의 수질변동을 연속적으로 확인하는 수질원격감시체계(TMS, Tele-Monitoring System)를 운영하고 있다. 수질TMS의 도입 이후 기존 현장방문검사의 지도점검은 원격상시감시체계로 전환되었으며, 실제 배출량을 기준으로 배출부과금이 산정되어 환경정책에 대한 투명성과 효율성을 확보할 수 있게 되었다. 수질TMS의 지속적인 발전과 안정적인 운영은 수질연속측정결과의 신뢰성을 바탕으로 하며, 측정결과

의 신뢰성은 수질연속측정기기의 정확성과 통일성 그

리고 시료의 대표성에 의존한다.

「환경분야 시험·검사 등에 관한 법률」은 환경측정기기의 정확성과 통일성을 확보하기 위한 법적근거가 된다. 측정기기의 구조규격 및 성능 등에 대하여 환경부장관의 형식승인을 받도록 하고 있으며(제9조), 형식승인을 받은 측정기에 대해서는 형식승인을 받은 내용대로 구조와 성능이 유지되는지에 대한 정도검사를 수행하고 있다(제11조). 측정기기에 대한 실제적인 검사는 「환경측정기기의 형식승인·정도검사 등에 관한 고시」를 따르며(국립환경과학원, 2013), 「환경측정기기의 형식승인·정도검사 등에 관한 고시」는 「환경측정기기 정확도/정밀도 개선연구」를 통하여 국제적인 기준을 만

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

축하도록 지속적으로 개선되었다(국립환경과학원, 2013; 환경부, 2012).

시료채취시스템(Water Sampling System)은 수질환경측정기의 정확성 및 통일성과 함께 측정결과의 신뢰성에 영향을 미치는 또 다른 핵심요소이다. 신뢰성을 갖춘 수질연속측정기를 운영하더라도 시료가 방류수의 상태를 제대로 반영하지 못한다면 측정결과를 더 이상 신뢰할 수 없다. 수리적 모델에 기초한 TOC 연속자동측정기 연구 및 총질소연속자동측정기에 대한 불확도 연구결과에 따르면 측정결과에 대하여 매질효과(solvent effect)에 의한 불확도 기여율이 가장 큰 것으로 조사되어 퇴적물 등의 유기물 입자가 유입수와 함께 공급될 경우 측정불확도가 크게 증가함을 확인할 수 있다(이충열 등, 2007; 박종호 등, 2010). 대표성을 갖춘 시료를 수질연속측정기로 공급할 수 있어야만 측정불확도를 최소화하여 신뢰성을 갖춘 측정결과를 확보할 수 있다. 측정결과의 신뢰성확보의 측면에서 시료채취시스템은 수질연속측정기의 정확성보다 더 중요한 요소라고 판단할 수 있다.

시료채취시스템은 수질연속측정기의 연속적이고 안정적인 측정분석을 위하여 하수 및 폐수처리시설의 방류구에서 시료를 채취하고 펌프를 이용해 시료채취조까지 이동시키는 일련의 프로세스로서 시료펌프, 배관 및 시료채취조로 구성된다. 이 중 시료채취조(Sampling Bath)는 수질원격감시체계에서 방류구의 시료를 채류시켜 수압과 유량을 안정화시키기 위한 목적으로 설치된다.

시료채취시스템은 수질연속측정기의 연속적이고 안정적인 측정분석을 위하여 하수 및 폐수처리시설의 방류구에서 시료를 채취하고 펌프를 이용해 시료채취조까지 이동시키는 일련의 프로세스로서 시료펌프, 배관 및 시료채취조로 구성된다. 이 중 시료채취조(Sampling Bath)는 수질원격감시체계에서 방류구의 시료를 채류시켜 수압과 유량을 안정화시키기 위한 목적으로 설치된다. 시료와 반응하지 않는 재질로 방류수 이외의 물이 혼합되지 않도록 덮개를 설치하고, 부유물질로 인해 측정방해가 있을 경우 100  $\mu\text{m}$  이상의 여과 장비를 설치할 수 있도록 수질오염공정시험기준에 제시되어 있으며, 수질 TMS 설치·운영 업무편람에 시료채취조의 용량은 30 L 이상, 체류시간은 5분 이내 그리고 호퍼형태의 구조를 갖출 것을 권고하고 있다(환경부, 2011). 하지만 수질오염공정시험기준 및 수질TMS업무편람에 제시된 용량 및 체류시간에 대한 과학적인 근거를 확인할 수 없으며 단순 용량으로 제시된 기준으로 다양한 형태와 크기의 시

료채취조가 설치·운영되고 있는 실정이다.

국내 시료채취조의 설치현황을 조사한 결과, 시료채취조는 안정적인 측정이 가능하도록 설치되어 그 크기와 형태가 다양하였다(국립환경과학원, 2013). 원형보다는 장방형 시료채취조가 보다 일반화되어 있으며, 직사각형 형태의 장방형 시료채취조의 경우 수중펌프 또는 흡입식 펌프를 이용해 방류수의 시료를 시료채취조의 한쪽 측면으로 연속 유입시키고, 시료채취조 내부에서 부유물질 및 수소이온농도를 연속측정 센서를 이용해 측정하는 한편, 시료 중 일부를 화학적산소요구량, 총질소, 총인 등 분석형 연속측정기로 이송시켜 분석하고 나머지 대부분의 시료는 시료채취조의 유입측 반대쪽 측면으로 유출된다.

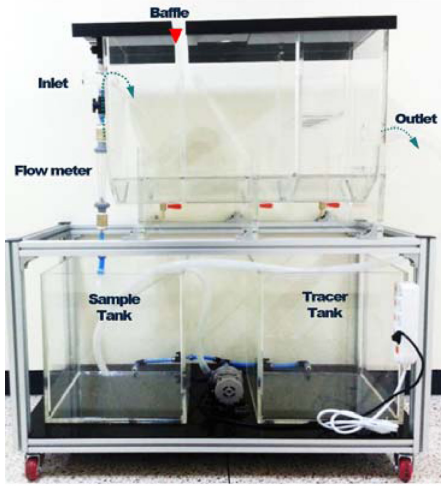
시료채취조의 안정적인 운영에 가장 크게 고려되는 항목은 부유물질 연속자동측정기이다. 부유물질 연속자동측정기의 경우 대부분 90° 산란광 방식의 측정원리가 적용되어 있어 시료와 함께 유입되는 공기방울은 간섭물질로 작용하여 빛에 의한 산란광 측정에 방해가 주게 된다. 시료채취조 내부는 1단 또는 2단의 격벽을 설치하거나 시료의 유속을 느리게 유지하는 방식으로 시료채취조에서 공기방울의 발생을 최소화할 수 있도록 시료채취조를 운영하고 있다. 따라서 시료채취조의 구조적 특성과 유속 등 운전조건에 의존하여 부유물질이 바닥에 침전되는 경우가 발생하며 이러한 경우 수질연속측정기의 측정결과는 방류수의 특성을 제대로 반영하지 못 할 가능성이 높아진다.

수질TMS 측정결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 시료채취조 내에서 시료의 혼합특성을 확인하고 정량화할 수 있는 방안이 마련되어야 한다. 본 연구에서는 수리구조물의 적정성을 평가에 적용되는 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)의 난류모델을 활용하여 시료채취조의 혼합특성을 확인하였으며, 시료채취조를 제작하여 추적자 시험을 수행하여 채취조 내 오염물질의 평균체류시간(Mean Residence Time)과 함께 시료의 혼합특성을 조사하였다. 또한 이러한 결과를 바탕으로 시료채취조의 특성을 수치로 정량화하여 시료채취조의 설치기준으로 제시할 수 있는 방안을 마련하고자 하였다.

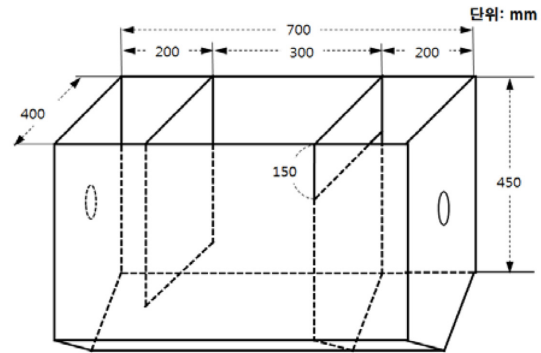
## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 시료채취조의 설계 및 제작

국내 수질원격감시체계에는 장방형과 원통형 시료채



(a)



(b)

Fig. 1. Water sampling tank for 3D CFD and tracer test.

취조가 다양한 크기로 설치되어 있다. 원통형보다는 장방형이 보다 일반화되어 있으며 장방형채취조의 길이는 600~800 mm, 폭은 250~600 mm, 높이는 300~600 mm로 설문조사를 통해 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 현재 설치된 조사된 시료채취조의 평균크기에 해당하는 길이 700 mm, 폭 400 mm, 높이 500 mm의 시료채취조를 설계·제작하였다. 시료채취조는 2개의 격벽으로 인하여 3개조로 구분된 형태를 갖도록 설계하였다. 첫 번째 격벽의 하부에 틈을 두어 시료는 격벽의 하부 유로로 흘러 2단으로 유입하며, 2단에서는 상향류 흐름으로 인해 시료가 혼합되고 두 번째 격벽의 상부를 넘어 3단으로 흐르게 된다. 1단에서는 부유물질 측정에 방해가 되는 공기방울이 제거되고, 2단에서는 상향류 흐름을 이용해 시료의 혼합성을 높였다.

시료채취조의 첫 번째 격벽은 좌·우 이동이 가능하도록 하여 시료채취조의 내부 크기 및 구조 변화에 따른 체류시간 변화를 확인할 수 있도록 하였으며, 두 번째 조는 부유물질 측정 센서의 설치 및 산란광 측정에 문제가 없도록 충분한 간격(30 cm 이상)을 유지시켰다. 시료채취조의 바닥면은 시료채취조의 중앙을 기준으로 양쪽 벽면에서 수렴하도록 1/4의 경사를 두어 시료채취조의 청소 및 슬러지의 배출이 용이하도록 하였다. 선반을 제작하여 실험용 시료채취조를 고정하였으며 하부에는 시료와 추적자가 펌프를 통해 유입될 수 있도록 각각의 구분된 2개의 저장조를 설치하였다. 유입측 부분에는 유량계를 설치하여 유입시료의 유속 확인하였으며,

바닥에 바퀴를 설치하여 현장에 이동하여 시험할 수 있도록 하였다.

## 2.2. CFD Model

3차원 유체해석 프로그램인 Water-CFD V10.1을 활용하여 시료채취조에서 시료의 흐름과 혼합특성을 파악하였다. Water-CFD는 비정렬 격자계에서 S.I.P 최적화방법(신영섭, 2012)을 적용하여 반응조내 수리적 특성을 파악하는 프로그램이다. 시료채취조의 크기 조건은 Fig. 1과 같으며 시료의 평균 유입 유속을 0.4665 L/s로 설정하였으며 3D 유체해석을 위한 격자정보는 Table 1과 같다.

## 2.3. 추적자 시험(Tracer Test)

추적자 실험은 주입 방법에 따라 Pulse 주입법(혹은 Slug method)과 Step 주입법의 2가지 형태로 구분된다. Pulse 주입법은 유입부에서 충분히 많은 양의 추적자를 순간적으로 주입한 후 일정한 시간 간격으로 유출부에서 농도를 확인하는 시험이며, Step 주입법은 일정한 농도의 추적자를 지속적으로 주입하여 유출부에서의 추적

Table 1. The grid information for 3D CFD

	Number of Tetrahedron
Nodes	113,886
Element	608,617
Boundary Element	47,648

(computational fluid dynamics)

자 농도가 일정한 농도가 될 때(Steady-state)까지 유출부의 농도를 확인하는 방법이다.

### 2.3.1. Pulse 주입법

본 연구에서는 Fluorescein 추적자 용액과 잔류염소 추적자 시험을 수행하였다. 형광물질인 Fluorescein 용액을 통해 시료의 혼합특성을 가지적으로 확인하고, 잔류염소 표준시료로 정량 분석하였다. Fluorescein 추적자 시험에서는 Fluorescein(CAS No. 2321-7-5) 1 g을 증류수 1 L에 용해하여 충분히 혼합시킨 후 유리섬유 여지의 여과액을 추적자 실험용액으로 하였다. 준비된 Fluorescein 용액 0.5 L를 시료 도입부에 순간적으로 투입하고 시료채취조 내부를 거쳐 유출부까지 흐르는 과정을 연속 촬영하여 시료채취조내 시료의 혼합특성을 가지적으로 확인하였다.

잔류염소 추적자 시험에서는 배출수의 잔류염소 최고 농도가 약 1.8 mg/L가 되도록 0.1128 mg 정도의 잔류염소를 도입부에 순간 투입하였다. 배출구 측에는 CLF-111(TOA-TOA)를 설치하여 측정결과를 4~20 mA로 송출시킨 후 Hybrid Recorder(YOKOGAWA)를 이용해 실시간으로 측정값을 기록하였다. 또한 시료채취조의 채취조 내부의 설계 구조변화에 따른 체류시간 변화를 파악할 수 있도록 유입단(1단)과 측정단(2단)을 구분하는 격벽의 위치를 10 cm와 20 cm에 위치시킨 후 배출수의 잔류염소 농도를 연속 측정하였다.

### 2.3.2. Step 주입법

광산란법 부유물질 연속자동측정기의 교정용액으로 적용되는 Formazine 용액을 이용하여 Step 주입법의 추적자 시험을 진행하였다. 약 80 NTU의 Formazine 표준용액 200 L 가량을 시료주입탱크에 준비하여 초기농도 0.4 NTU에서 배출수 농도가 주입 시료의 농도인 80 NTU까지 도달하여 안정화될 때까지 일정한 유속으로 주입하였으며, 이후 20초 간격으로 배출구의 시료를 채취하여 2100AN Turbidimeter를 활용하여 추적자의 농도를 확인하였다.

### 2.3.3. 평균체류시간(Mean Residence Time, $\bar{t}$ ) 및 분산(Variance, $\sigma^2$ )

추적자 시험의 결과를 바탕으로 체류시간분포(RTD, Residence time distribution)를 확인하여 평균체류시간(Mean Residence Time,  $\bar{t}$ )을 산출할 수 있다. 체류시간분포는 추적자가 반응조 내에 머무르는 시간을 가

능성으로 나타낸 분산함수이다. 체류시간은 추적자가 반응조에 머무르는 시간이며, 평균체류시간은 시간의 흐름에 따라 반응조에 머무르는 추적자의 변화량을 고려하여 평균에 해당하는 추적자가 반응조에 머무르는 시간이라 할 수 있다. Pulse 주입법의 경우 유출부에서 유출되는 유량과 추적자의 농도( $C_t$ )를 활용하여 다음 식에 의하여 E-curve를 확인하였다. E(t)는 시간의 역수 단위를 가지게 되며 충분한 시간이 흐르면 E(t)는 결국 1이 된다. 이론체류시간은 배출구의 추적자 분포의 첫 순간에 주어진 평균체류시간( $\bar{t}$ )과 같으며, 반응조내에 사영역이 존재하지 않을 경우  $\bar{t}$ 는 이론체류시간인  $\tau$ 와 같다.

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad (1)$$

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot E(t)dt \quad (2)$$

Step 주입법에서 유입구의 추적자 농도를 0에서  $C_0$ 까지 한 번에 변화시켜 유출구에서의 추적자 농도  $C_t$ 를 측정하고 무차원의  $F(t)$ -curve를 확인하였다.  $F(t)$ -curve를 활용하여 다음의 방법으로 평균체류시간 및 분산(Variance,  $\sigma^2$ )을 산출하였다.

$$F(t) = \frac{C(t)}{C_0} \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 \cdot E(t)dt \quad (4)$$

### 2.3.4. 기타 인자

본 연구에서는 시료채취조의 추적자 시험 결과의 해석을 위해 침전지의 수리학적 효율을 평가하는 지수법(Index)과 분산수(Dispersion number)를 확인하였다. Index법은 추적자의 시간별 유출농도 곡선에서 각 Index를 구하여 수리학적 효율을 비교하는 것으로 단락류 Index, Morill Index, Modal Index, 단락류(Short circuiting Index)로 나타낸다. 단락류 Index( $t_i/T$ )는 반응조 내 흐름의 단락류(short circuiting) 정도를 나타내는 값으로 항상 0보다는 크고 1에 가까울수록 단락류가 적은 것을 의미하며, Modal Index( $t_p/T$ )는 반응조 내에서의 압출형 흐름의 정도를 나타내는 상수로 1에 가까울수록 이상적 상태의 압출형 흐름에 가까운 것을 의미한다(Hart and Gupta, 1978). 반면, Morril Index( $t_{90}/t_{10}$ )는 반응조 내에서의 혼합정도를 나타내는 상수로 이상적인 압출형 흐름에서는 1, 완전혼합 흐름에서는 1보다 매우 큰 값을 가진다. Dispersion number는 추적자 실

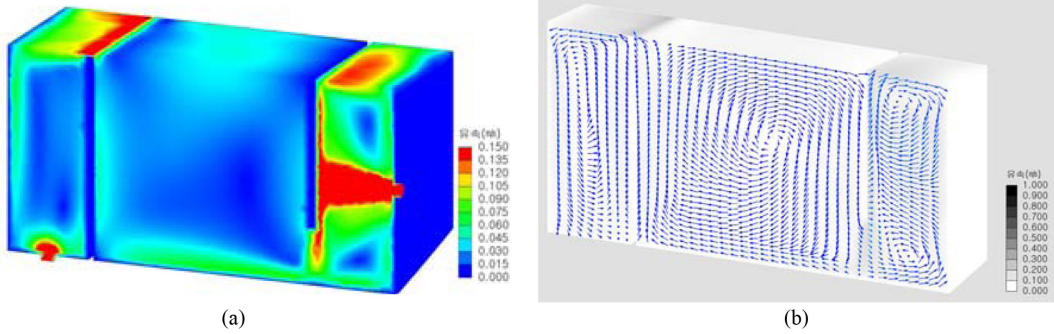


Fig. 2. (a) Velocity distribution and (b) velocity vector of the longitudinal section in water sampling tank.

험결과로 구한 exit age distribution( $E(t)$ )의 분산( $\sigma_E^2$ )과 dispersion model에 의한 예측  $E(t)$ 값을 일치시키는 방법으로 결정한다(Levenspiel, 1999). 추적자 시험 결과에서 도출된 평균 체류시간( $\bar{t}$ )을 이용해 아래 식의 해를 구하여 반응조 고유의  $D/v_x L$ 값을 제시하였다.

$$\frac{\sigma_E^2}{\bar{t}^2} = 2 \frac{D}{v_x L} - 2 \left( \frac{D}{v_x L} \right)^2 \left( 1 - \exp\left(-\frac{D}{v_x L}\right) \right) \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_E^2$  : exit age distribution의 분산  
 $\bar{t}$  : 평균체류시간(mean residence time)

$$\text{Dispersion No.} = \frac{D}{v_x L} \quad (6)$$

여기서,  $D$  : Dispersion Coefficient  
 $v_x$  : 수평유속,  $L$  : 채취조의 장방향 거리

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. CFD 수치해석

##### 3.1.1. 단면별 유속분포

실험용 시료채취조의 종단면 유속분포를 보면 1단의

시료유입조에서 붉은 색으로 표현되는 영역을 확인할 수 있다. 해당 영역은 시료가 시료채취조로 도입되고 있는 구간으로 시료의 유속이 빠르게 유지되는 구간이다. 또한 두 번째 격벽의 상부와 3단의 하부 배출구간이 붉은 색을 띄고 있다. 시료는 빠른 속도로 두 번째 격벽의 상부에서 월류하여 3단으로 넘쳐흐르고, 3단의 하부에서 자연유하로 빠르게 배출되고 있음을 뜻한다. 또한 1단과 2단의 하부에서 첫 번째 격벽의 하부를 통해 연결된 녹색영역을 확인할 수 있다. 유입 시료가 첫 번째 격벽의 하부를 통해 2단으로 흐르고 있기 때문이다. 2단에서는 첫 번째 격벽의 하단에서 유입되는 시료로 인하여 유도된 상향류 흐름과 함께 두 번째 격벽에 부딪혀 하강하는 시료가 복잡하게 혼합되면서 와류가 형성되었다.

실험용 시료채취조의 2단에서 생성되는 복잡한 흐름은 단면별 흐름 분포에서 확인이 가능하다. Fig. 4 정단면 흐름분포는 시료의 유입구 방향에서 일정 길이 간격으로 수직인 단면의 흐름 분포를 나타낸 그림이다. (a)는 유입구측 첫 번째 격벽을 바로 지난 지점으로 시료가 격벽의 하부로 흐르는 것을 확인할 수 있다. (b)는 2단의 중심에 해당하는 지점으로 시료의 혼합으로 2개의 소용돌이가 단면의 좌·우에 하나씩 발생하는 것을 확인할

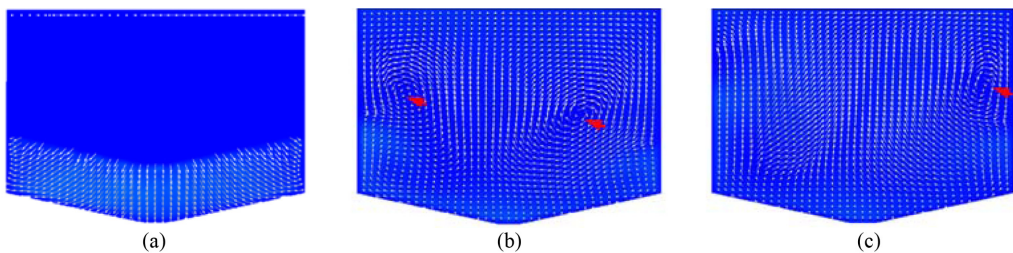


Fig. 3. The cross sectional flow distribution of the front views at (a) 155 mm, (b) 350 mm and (c) 445 mm from the sample inlet point.

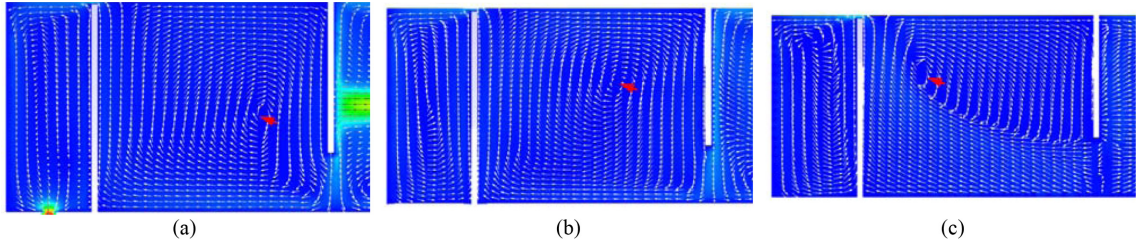


Fig. 4. The cross sectional flow distribution of the side views at (a) 250 mm, (b) 375 mm and (c) 445 mm from the side of a sampling tank.

수 있다. 생성된 소용돌이는 (c)와 같이 양 측면 벽면으로 이동하여 소멸되었다. Fig. 5 횡단면 흐름분포는 시료채취조의 측면에서 바라볼 때 일정 거리에 따른 수직 단면의 시료흐름을 나타낸다. 시료의 중심부인 (a)와 (c)에서 생성된 소용돌이를 확인할 수 있으며 벽면인 (d)에 이르러서 유입부쪽 첫 번째 격벽의 하부에서 두 번째 격벽의 상부까지 시료가 이동하는 경로를 따라 소용돌이가 길게 퍼져 있는 모습을 확인할 수 있다.

3.1.2. 혼합특성

Water-CFD V10.1의 수치해석 프로그램을 이용하여 일정 농도의 추적자를 지속적으로 투입하였을 때 해당 농도 배출구에서의 시간에 따른 농도변화를 확인하였다. 일종의 Step 주입법에 의한 추적자 시험을 가상으로 수행한 결과라 할 수 있으며 시험결과는 Fig. 5와 같다. 3D 가상추적자 시험 결과 80초가 지나면서 10%의 추적자가 배출되었으며, 205초 이후에는 50% 그리고 약 498초를 지나면서 전체 주입된 추적자의 90%가 배출

되었다.

3.2. 추적자 시험

시료채취조의 구조와 운전 조건의 변화에 따라 시료채취조에서 시료가 체류하는 시간은 달라진다. 시료 유입 및 유출구의 위치, 설치된 격벽의 형태, 슬러지 수집을 위한 경사판 등 다양한 구조적인 원인으로 시료채취조 내부에서 국부적인 난류가 발생한다. 따라서 채취조 내에서 제대로 혼합되지 못한 시료가 직접 유출부로 배출되거나, 어느 지점에 정체되어 지속적으로 유입하는 이후의 시료에 상당한 기간 동안 영향을 미치기도 한다. 국부적인 난류에 따른 단회로 현상(Shorting Circuiting)과 사영역(Dead Space)은 시료의 혼합성을 저해하여 시료의 대표성을 잃게 하는 요인이 된다.

3.2.1. Fluorescein 추적자 시험

안정적인 정상상태로 흐르고 있는 시료채취조의 유입단에 Fluorescein 용액을 순간적으로 투입하였다. 이후

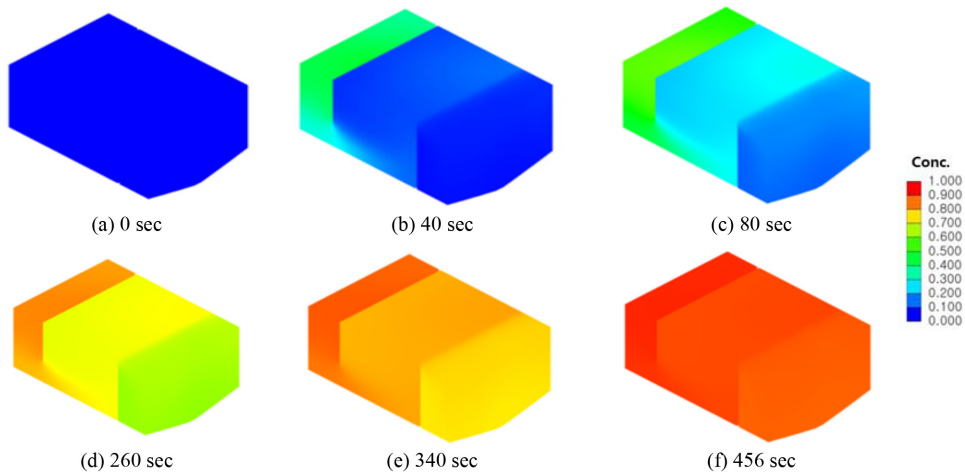


Fig. 5. The virtual trace test result of water-CFD program by the elapsed time.

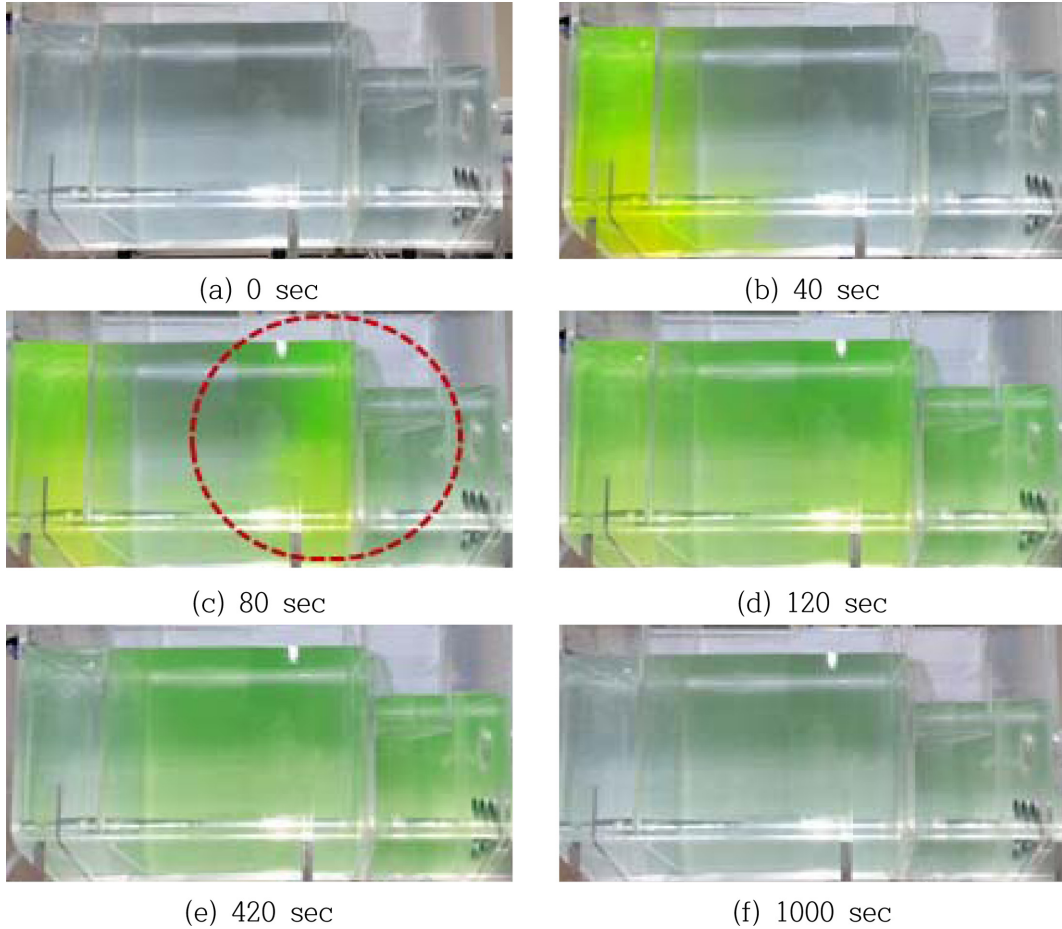


Fig. 6. The practical fluorescein tracer test.

모든 시험과정은 시료의 혼합성을 확인할 수 있도록 일정 시간간격으로 사진으로 기록하여 Fig. 6에 나타내었다. 시료가 주입된 즉시 시료는 20 cm에 위치한 첫 번째 격벽 하부로 흘러들어 2단(측정부)으로 유입하였다(b). 2단에서 Fluorescein 용액은 두 번째 격벽까지 이동하여 닿은 후 격벽을 타고 상부로 흘렀으며(c) 이 중 일부는 그대로 3단(유출부)으로 흘러넘쳐 유출되고, 나머지는 첫 번째 격벽방향으로 이동하여 2단 내부에서 혼합되었다(d). 첫 번째 격벽의 하부에서 유입한 시료는 바닥면을 따라 두 번째 격벽으로 이동하고 두 번째 격벽을 만나면 상향한 후 상부에 이르게 되고, 일부 시료는 격벽을 월류하여 3단으로 넘치며 나머지는 다시 첫 번째 격벽으로 이동하였다. 2단에서의 시료 흐름은 첫 번째 격벽 하부에서 시작하여 두 번째 격벽의 상부까지 큰 원을 그리듯 순환하면서 지속적인 혼합이 이루어지는 형

태이다. 이는 3D 유체흐름 모델 결과인 Fig. 5 횡단면 흐름분포 (c)의 그림과 같은 형태임을 알 수 있다.

Fluorescein 추적자 시험을 통하여 주입된 추적자는 시험 초기 2단의 하부에서 3단으로 일부가 바로 배출되고 있음을 가시적으로 확인할 수 있었다. 하지만 Fluorescein 추적자를 이용하여 방류수의 농도를 측정하고 평균체류시간 등 조내 수리특성에 대한 정량적인 실험 결과를 제시하는데 한계가 있었다. 가장 큰 이유는 유출수의 농도를 산출하기 어렵다는 것이다. 우선 1 g의 Fluorescein을 1 L의 증류수에 용해시킬 때 Fluorescein은 용액에 완전 용해되지 않아 여과액을 시료로 사용할 수밖에 없었다. 더 낮은 농도로 용해한 경우에도 Fluorescein은 완전히 용해되지 않았다. 더욱이 일정 시간 경과 후 Fluorescein 용액의 흡광도가 변하는 것을 확인하여 Fluorescein 용액에 대한 정확한 검량선을 제

시할 수 없었다. 따라서 실험용 시료채취조의 Fluorescein 추적자 시험결과는 시료채취조에서 시료의 혼합 특성을 가시적으로 확인하는 목적으로만 활용하였다.

### 3.2.2. 잔류염소 추적자 시험

추적자시험은 물속에 존재하는 다른 물질과 반응하지 않는 비반응성물질, 즉 보존성물질을 추적자로 하여 조내에 유입시키고 다양한 시간 간격으로 유출부에서 농도의 변화를 측정함으로써 반응조의 내부의 시료 흐름과 혼합특성을 확인하는 시험이다. 유입부에서 충분히 많은 양의 잔류염소를 순간적으로 주입한 후 일정한 시간 간격으로 유출구에서 잔류염소 농도를 연속측정하는 방법으로 시료채취조에 대한 Pulse 주입시험을 수행하였다. 잔류염소 추적자 시험은 첫 번째 격벽의 위치를 유입구에서 10 cm와 20 cm로 옮겨 두 가지 상황에 대한 유출수의 잔류염소 농도변화를 측정·기록하여 Fig. 7에 제시하였다.

시료채취조의 첫 번째 격벽의 위치를 10 cm로 하였을 경우 시료의 유입 이후 약 140초가 지나면서 유출수의 잔류염소 농도는 1.838 mg/L로 최고로 높았으며 이후 완만하게 감소하여 약 1400초가 지난 후 원수의 농도까지 감소하였다. 반면 첫 번째 격벽의 위치를 20 cm로 하였을 경우 시료의 유입 이후 약 248초가 지나면서 유출수의 잔류염소 농도가 2.013 mg/L로 가장 많은 양의 잔류염소가 배출하였으며 이후 점차 감소하여 약 1087초가 지난 후 최초 원수의 농도까지 감소하였다.

시간의 흐름에 따른 잔류염소 유출농도의 누적배출량을 분율로 나타낸 그래프인 F(t)-curve는 Fig. 8과 같다. 격벽의 위치를 유입구에서 10 cm에 위치시킬 경우 투입된 추적자의 10%가 배출되는 시간( $t_{10}$ )은 183초이며, 90%가 배출되는 시간( $t_{90}$ )은 1051초이다. 또한 50%가 배출되는 시간( $t_{50}$ )은 494초로 확인되었다. 반면 격벽의 위치를 유입구에서 20 cm에 위치시킬 경우 추적자의 전체 배출량 중 10%가 배출되는 시간( $t_{10}$ )은 193초이며, 90%가 배출되는 시간은( $t_{90}$ )은 766초였다. 또한 50%가 배출된 시점인  $t_{50}$ 은 430초로 확인되었다.

추적자 시험결과를 바탕으로 시료채취조의 수리학적 특성을 Table 2에 제시하였으며 그 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

첫째, 같은 크기의 시료채취조에 대하여 격벽의 위치를 (a) 10 cm와 (b) 20 cm로 변경하였을 때 평균체류시간(min)는 큰 차이가 없었다. 첫 번째 격벽의 위치가 10 cm인 경우 6분 12초로 확인되었으나 20 cm일 때 6

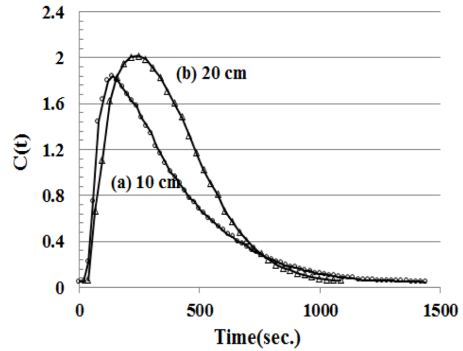


Fig. 7. The residual chlorine tracer curves of (a) 10 cm and (b) 20 cm.

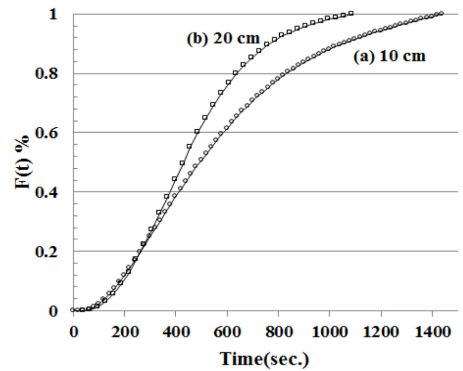


Fig. 8. The residual chlorine tracer test (pulse input) (a) 10 cm and (b) 20 cm converted to F(t)-curves.

분 2초였다. 10 cm인 경우를 기준으로 두 값의 상대적인 차이는 2.7%로 큰 차이를 확인할 수 없었다. 체류시간은 특정물질이 반응조에 머무르는 양에 대하여 시간적 평균개념이 적용된다. 서울에서 부산까지 500 km의 거리를 두 대의 차량이 출발하여 5시간 후 함께 도착하였다면 두 대의 차량은 모두 시속 100 km/h로 달린 것이다. 하지만 평균속도만으로는 어떤 차량이 어느 구간에서 더욱 빠르게 달렸는지 확인할 수 없다. 체류시간은 시료채취조에서 잔류염소가 배출되는 양에 대한 시간의 평균개념이 적용되므로 시료채취조에 대한 시료의 혼합특성을 규정하기 어렵다. 다만 10 cm와 20 cm의 격벽의 위치 변화에 따른 체류시간 결과를 바탕으로 해당 시료채취조를 적용할 경우 시료는 평균적으로 약 6분 남짓하여 배출될 것이라는 예상만 가능하다.

둘째, (a)격벽의 위치가 10 cm인 경우와 (b)격벽의 위치가 20 cm인 경우 잔류염소가 시료채취조를 떠나는 시

**Table 2.** Hydrodynamic characteristics of the sampling tank by index

Index	The Value of each Index	
	10 cm	20 cm
$t_i$ (sec)	14	17
$t_p$ (sec)	140	248
$t_{10}$ (sec)	183	193
$t_{50}$ (sec)	494	430
$t_{90}$ (sec)	1051	766
$\bar{T}$ (min)	6' 12"	6' 2"
$\bar{T} / \tau$	1.322	1.286
Short circuiting ( $t_p/T$ ) <sup>1)</sup>	0.0497	0.0603
Modal Index ( $t_p/T$ ) <sup>2)</sup>	0.4968	0.8808
Morrill Index ( $t_{90}/t_{10}$ ) <sup>3)</sup>	5.743	3.969
Dispersion No.	0.419	1.167

1) Time when tracer initially exist / theoretical detention time.

2) Time where peak conc. of tracer curve is reached / theoretical detention time.

3) Time for 90 percent of tracer to exit / Time for 10 percent of tracer to exit.

간을 시료배출량에 대한 구간으로 확인하였을 때 큰 차이를 보였다. 잔류염소의 최초 유출시간은 (a)와 (b)의 경우 14초와 17초로 3초의 차이가 있었다. 추적자의 10%가 유출되는 시간은 (a)와 (b)의 경우 각각 183초와 193초로 10초 가량 차이가 났다. 50% 유출 시간부터 두 경우의 차이는 더욱 벌어져 (a)의 경우는 494초이나 (b)의 경우 430초로 확인되었으며, 90% 유출시간의 경우 (a)는 1051초, (b)는 766초로 두 값의 차이는 약 285초(약 5분)로 늘어났다. 또한 최고농도의 피크를 확인할 수 있는 지점의 경우 (a)의 경우 추적자 10%가 배출되는 이전인 140초에서 최고농도를 확인할 수 있었으며 (b)의 경우 248초로 추적자 10%가 배출된 이후에 확인되었다. 따라서 격벽의 위치가 10 cm인 시료채취조는 초기에 많은 양의 잔류염소가 빠르게 배출되었지만 90%의 시료가 배출되는 시간은 격벽의 위치가 20 cm인 시료채취조가 약 5분 가량 빨랐다. 결과적으로 격벽의 위치가 10 cm인 경우 시료채취조에 유입된 시료는 단락류가 발생하여 많은 양의 잔류염소가 초기 배출되었지만 나머지 잔류염소는 제대로 혼합되지 않은 채 시료채취조의 사영역에 갇히고 완전히 빠져나오는 시간은 20 cm보다 더 오랜 시간이 소요되는 것이다.

셋째, 격벽의 위치가 10 cm와 20 cm일 때 시료채취조의 시료 혼합특성은 체류시간분포에서 유도된 다양한 지수로 확인 가능하였다. 단락류(Short circuiting)는 항상 0보다 크며 1에 가까울수록 단락류가 적다고 알려져

있다. 10 cm일 때 단락류는 0.0497이며 20 cm일 때의 0.0603보다 작아 10 cm일 때 단락류가 더 많이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 압출형 흐름을 나타내는 Modal Index의 경우 10 cm는 0.4968이지만 20 cm는 0.8808로 20 cm일 때 혼합성이 커짐을 확인할 수 있다. 하지만 조 내의 혼합을 나타내는 Morrill Index는 10 cm일 때 5.743으로 20 cm의 3.969보다 더 크게 조사되었다. Morrill Index는 추적자의 10% 배출시간에 대한 90% 배출시간의 비로 계산하며, 이상적인 압출형 흐름(PFR, Plug Flow Reactor)인 경우 0이 되며, 이상적인 완전혼합(CSTR)인 경우 무한대의 값을 갖는다. 하지만 사영역이 많은 경우 시료의 배출시간이 느려지므로 90% 배출시간이 길어져 Morrill Index가 함께 커지는 경향이 있다. 본 시험에서 격벽의 위치를 10 cm로 정하였을 때 90% 배출시간은 20 cm로 정하였을 때와 비교하여 약 5분 가량 증가하였다. 이에 따라 시료채취조의 혼합 특성에 상관없이 10 cm일 때 Morrill Index가 더 큰 값을 나타내게 되었다. 따라서 시료의 혼합특성을 판단하는 기준은 Morrill Index가 아닌 분산수(Dispersion Number)로 적용하는 것이 보다 합리적이다.

Dispersion number은 분산과 이류 간의 상대 중요도에 대한 정보를 제공하며 이상적인 압출형 흐름인 경우 0이며 이상적인 완전혼합인 경우 무한대의 값을 갖는다. 시험용 시료채취조의 경우 첫 번째 격벽의 위치가 10 cm일 때 0.149였으며, 20 cm인 경우 1.167로 확인되었다. 시료의 혼합이 중요한 시료채취조의 경우 완전혼합에 가까울수록 시료를 대표할 수 있는 시료의 채수가 가능하므로 분산수를 이용한 시료채취조의 기준체시가 가능할 것이다. 분산수 0.5를 기준으로 그 이하에서는 압출형 흐름이며 그 이상일 때 완전혼합 흐름으로 구분이 가능하다고 제시하는 연구가 있으며, 0.74를 완전혼합으로 구분하여 반응조를 설계한 경우가 있었다(David, 2011; Wang, 2009). 따라서 완전혼합을 추구하는 시료채취조의 설계에서 분산수에 대하여 0.5 이상의 기준을 제시하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

### 3.2.3. Formazine 추적자 시험

STEP 주입법은 추적자가 존재하지 않은 반응조에 일정한 농도의 추적자를 일정한 속도로 주입한 후 배출구에서의 추적자 농도가 주입 농도로 안정적인 때까지 배출수의 농도를 확인하는 시험이다. 본 연구에서는 광산란법 부유물질 측정의 교정용액으로 적용되고 있는 Formazine 용액을 이용하여 시험용 시료채취조에 대한

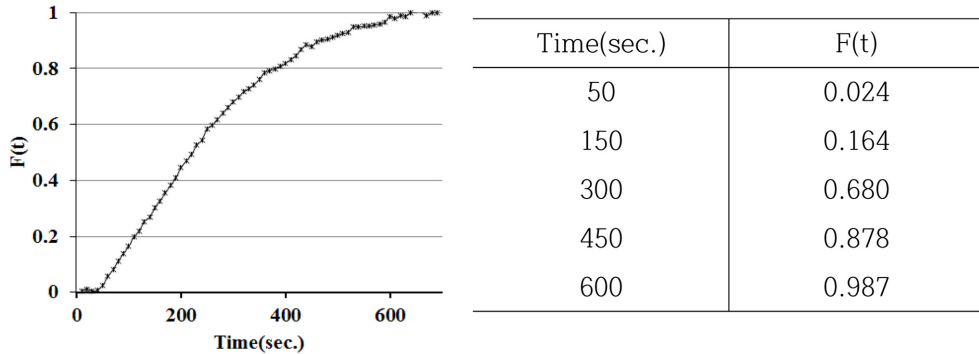


Fig. 9. The F(t)-curves of the formazine tracer test (step input).

Step 주입 추적자 시험을 수행하였다.

실험용 시료채취조의 Formazine 추적자시험의 결과는 Fig. 7과 같다. 추적자의 10%가 유출되는 시간은 시료의 유입이후 76초로 확인되었다. 또한 223초 이후 추적자의 50%가 유출되었으며 465초 이후엔 90%가 유출되었다. 이는 앞에서 수행된 잔염소추적자 시험의 결과(20 cm)에 비하여 상당히 빠른 시간이다. 하지만 Formazine 추적자 시험결과는 시료채취조에 대한 3D 가상추적자시험의 결과인(Fig. 5)  $t_{10}$ 의 80초,  $t_{50}$ 의 205초 및  $t_{90}$ 의 489초와 크게 다르지 않다. 가상추적자 시험 역시 Step 주입법을 기초로 한 수치해석기법이 적용된 시뮬레이션 결과이기 때문으로 사료된다.

또한 Step 주입법의 경우 추적자 투입량이 많으며 Pulse 주입법에 비하여 체류시간분포의 결과가 불안정하다고 알려져 있다. 또한 Step 주입법을 위한 시험 준비에 있어 200 L 가량의 균질한 추적자 시료를 미리 준비하고, 안정적으로 시료채취조에 공급하는 것은 쉬운 작업이 아니다. 따라서 Step 주입법에 비하여 측정 안정성이 높고, 시험 준비로 인한 오차의 발생이 적은 Pulse 주입법을 시료채취조 성능평가에 적용하는 것이 보다 적절할 것이다.

#### 4. 결 론

국내의 시료도입부 기준 및 규격 및 운영관리 현황을 파악하여 이를 바탕으로 실험용 시료 시료채취조를 설계·제작하였다. 실험용 시료채취조의 3D 유체해석 및 추적자 시험을 바탕으로 시료채취조의 성능 평가를 수행한 결과는 다음과 같다.

첫째, 실험용 시료채취조의 3D 유속분포를 통하여 시

료채취조에 대한 단면별 흐름분포 및 혼합 특성을 보다 자세하게 확인할 수 있었다. 측정이 이루어지는 2단 하부의 유입수와 내부에 잔류하는 시료가 격렬하게 혼합하여 소용돌이가 생성되고, 생성된 소용돌이는 시료유입부에서 유출부 쪽으로 그리고 채취조 내부에서 좌우 측면 방향으로 퍼져나가듯 이동하였다. Fluorescein 추적자 시험에서는 주입된 추적자가 시험 초기 2단의 하부에서 3단의 상부로 일부가 즉시 배출됨을 가시적으로 확인할 수 있었다.

둘째, 잔류염소추적자 시험 결과에서 똑같은 크기의 시료채취조라 할지라도 구조 및 형태에 따라 시료의 혼합 특성은 크게 달라짐을 확인하였다. 같은 크기의 시료채취조이지만 첫 번째 격벽의 위치를 10 cm로 하였을 때 시료는 제대로 혼합되지 못하고 단락류를 형성하며 빠르게 유출하였다. 하지만 20 cm로 조정할 경우 시료채취조내 시료의 혼합성은 향상되었으나 시료의 유출시간은 늦어졌다. 이로 인하여 격벽의 위치를 10 cm로 정하였을 때 90% 배출시간은 20 cm로 정하였을 때와 비교하여 약 5분 가량 증가하였다. 이에 따라 시료채취조의 혼합 특성에 상관없이 10 cm일 때 Morrill Index가 더 큰 값을 나타내게 되었다. 따라서 시료의 혼합특성을 판단하는 기준은 Morrill Index가 아닌 분산수(Dispersion Number)로 적용하는 것이 보다 합리적인 것으로 사료된다. 완전혼합을 추구하는 시료채취조의 설계를 위하여 분산수에 대한 기준을 제시하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

결론적으로 시료채취조의 구조와 운전 조건의 변화에 따라 시료채취조에서 시료가 체류하는 시간은 달라진다. 시료 유입 및 유출구의 위치, 설치된 격벽의 형태, 슬러지 수집을 위한 경사판 등 다양한 구조적인 원

인으로 시료채취조 내부에서 국부적인 난류가 발생한다. 따라서 채취조 내에서 제대로 혼합되지 못한 시료가 직접 유출부로 배출되거나, 어느 지점에 정체되어 지속적으로 유입하는 이후의 시료에 상당한 기간 동안 영향을 미치기도 한다. 시료채취조에서 국부적인 난류에 따른 단회로 현상(Shorting Circuiting)과 사영역(Dead Space)은 시료의 혼합성을 저해하여 시료의 대표성을 잃게 하는 요인이 된다.

국부적인 난류를 완전히 제어하는 시료채취조의 구조와 형태를 구현하는 것은 사실상 불가능하다. 현재 제시된 업무편람의 채류시간은 시료채취조가 완전히 비워진 상태에서 채취조를 시료로 가득 채우는데 필요한 물리적인 소요 시간으로 측정대상물질이 시료채취조에 머무르는 시간적 특성을 반영하지 못하고 있다. 하지만 본 연구의 결과를 바탕으로 시료채취조에 대한 평균채류시간을 시료의 혼합특성이 반영될 수 있는 개념으로 재정립하고, 향후 시료채취조에 대한 형식승인 규정에 분산수(Dispersion Number)를 도입하여 시료채취조를 규격화한다면 수질원격감시체계의 일정 수준이상의 혼합특성을 갖춘 시료채취조가 보급되어 수질원격감시체계의 시료채취에 대한 통일성을 확보하는데 큰 효과를 얻을 수 있을 것이다. 측정결과에 대한 정확성과 정밀성 향상에 크게 기여할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 연구는 환경부의 지원으로 수행되었습니다(NIER-SP2013-33).

## 참고문헌

1. 국립환경과학원, 수질오염공정시험기준, **2011**, 1036-1037.
2. 국립환경과학원, 환경측정기기 형식승인 · 정도검사 등에 관한 고시, 제2013-35호.
3. 김영일, 박노석, 정남정, 김성수, 배병욱, “침전지 추적자 실험의 해석을 위한 Dispersion Number의 적용”, *상하수도학회지*, **2007**, 21(2), 1-7.
4. 박종호, 조정철, 김대승, 김인탁, “수질자동측정망에 대한 측정불확도 및 숙련도 시험 (T-N장비를 중심으로)”, *한국환경과학회-대한상하수도학회*, **2010**, 539-540.
5. 방기웅, 최창수, 김종호, 이준호, 남병철, “추적자 주입기의 형태 및 주입지점에 따른 침전지의 수리특성평가”, *한국도시환경학회지*, **2011**, 11(2), 169-176.
6. 신영섭, “비정렬 격자계에서 S.I.P. 최적화 방법을 이용한 점성유동 수치해석”, *대한조선학회논문집*, **2012**, 49(2), 196-202.
7. 이충열, 이용운, 이준홍, 임병진, 권영진, 강범주, 홍영민, “수질자동측정시스템에서 온라인 TOC 자동측정장치의 불확도 산출”, *한국하천소수학회*, **2007**, 40(2), 193-200.
8. 환경부, “수질 TMS 설치 · 운영 업무편람”, **2012**, 54-66.
9. 환경부, “환경측정기기의 정확도/정밀도 개선연구(IV)”, **2012**.
10. B. Morrill, J. B. Dean, J. W. Orthon, and J. W. Ellms, “Sedimentation Basin Research and Design”, *Journal of the American Water Works Association*, **1932**, 24(9), 1442-1463.
11. D. D. W. Tsai, R. Ramaraj, and P. H. Chen, “A Method of Short-Circuiting Comparison”, *Water Resource Management*, **2012**, 26, 2689-2702.
12. F. L. Hart and S. K. Gupta, “Hydraulic Analysis of Model Treatment Units”, *Journal of the Environmental Engineering Division*, **1978**, 785-798.
13. O. Levenspiel, “Chemical Reaction Engineering”, **1999**, 3rd edition, 296-303, John Wiley&sons Publishing, USA.
14. Y. Wang, Sanly, M. Brannock, and G. Leslie, “Diagnosis of Membrane Bioreactor Performance Through Residence Time Distribution Measurement”, *Desalination*, **2009**, 236(1), 120-216.