



이중 수로 구조의 분배수로 내 다지점 유출 유량의 균등성 평가에 관한 연구 Examining the Equality of Multi-Outlet Flow Rates within a Dual Open Channel

김성수¹ · 박노석¹ · 정우창² · 왕창근³

Seong-Su Kim¹ · No-Suk Park¹ · Woochang Jeong² · Chang-Keun Wang³

1 K-water(한국수자원공사) · 2 경남대학교 토목공학과 · 3 충남대학교 환경공학과

(2012년 4월2일 접수; 2012 5월29일 수정; 2012년 6월1일 채택)

Abstract

This study was conducted to qualify the equality of the flow distribution from open channel between rapid mixing basin and flocculation basins in a domestic S₂ water treatment plant, and to suggest a remedy for improving the equality. In order to evaluate the feasibility of the suggested remedy, computational fluid dynamics (CFD) technique are used, and for verifying the CFD simulation results tracer tests were carried out. From the results of CFD simulation and tracer tests, it was investigated that the modification of hydraulic structure in the distribution channel, which is to install the longitudinal orifice baffle in flow direction, could improve the equality of the flow distribution over 75%.

Key words : distribution channel, equality of the flow distribution, computational fluid dynamics, dual open channel, tracer test
주제어: 분배수로, 유량분배의 균등성, 전산유체역학, 이중 수로, 추적자 실험

1. 서 론

수처리에 있어서 같은 모양과 기능을 가진 여러 개의 단위공정들이 병렬로 연결되어 운전되는 경우가 아주 많다. 그 예로 정수처리에서는 완전혼화를 목적으로 하는 혼화공정의 유출수가 병렬로 배치된 여러 개의 응집 및 침전지로 개수로인 분배수로를 통하여 다지점으로 유입되는 경우가 대부분이며(Fig. 1 참조), 또는 침전공정에서 유출된 침전수가 병렬로 배치된 여과공정으로 개수로 및 위어(wier)를 통하여 분배되는 것도 이러한 경우가 된다.

하수 처리장의 경우, 포기조 유출수를 원형 구

조의 2차 침전지로 균등하게 유입시키기 위해 유입관로를 중심으로 대칭적으로 배열함으로써 유량 분배의 균등화를 도모하고 있으나, 정수처리에서 혼화공정 후단의 단위 공정은 통상 장방형 구조로 시공되어 점감형 개수로(Fig. 1 참조)를 이용하거나 유입측 오리피스에 개도 조절을 통해 병렬로 배치된 단위 공정의 유입수를 공정별로 균등화시키고자 한다. 만약 분배수로에서 병렬로 나열된 응집공정으로의 유입 유량이 균등하지 못할 경우, 각 응집지의 체류시간이 상이할 뿐만 아니라 응집지와 통상 일체로 설치되어 있는 침전지의 체류시간에도 영향을 미치게 된다(Beak, et al., 2005; 백흥기 2003). 유량이

*Corresponding author Tel : 042-870-7527, Fax : 042-870-7549, E-mail : kssman@kwater.or.kr(S. S. Kim)

적게 유입되는 지에서는 지내 유속이 느려지고 체류시간이 길어지게 되어 슬러지 퇴적 등이 발생할 수 있으며, 반면 유량이 많이 유입되는 지는 통과 유속이 빨라져 체류시간이 단축됨으로써 플록의 파괴 또는 침전 슬러지의 재부상 등을 유발시킬 수 있다. 정수처리에서 혼화지와 응집지를 연결하는 분배수로 설계에는 기본적으로 유입부의 구조, 수로의 단면 형상 및 길이, 유출부 구조의 크기와 형상 등 다양한 설계인자들이 고려되어야 한다. 그러나 실제 분배수로내의 복잡한 유동현상을 정확히 파악하기는 매우 어렵기 때문에 최근까지도 분배수로 설계는 기본적인 유체역학 이론과 경험에 의한 자료를 토대로 이루어지고 있는 실정이다. 대부분 수리구조물은 형상의 복잡성으로 인하여 일반화된 식을 만들 수 없고 특히, 분배수로 내에서의 유동은 난류가 존재하는 3차원 유동을 보이고 있기 때문에 이를 1차원 시간의 함수로 해석하거나 또는 2차원 shallow water theory를 사용하는 code로 해석할 경우 그 결과는 실제 현상과 비교할 때 오차가 발생할 수 있다(박 등, 2007a; 박 등, 2007b).

수로내의 평균유속과 Froude 수가 작은 경우 유입된 유체가 개수로를 흐르면서 벽면 마찰 손실 등으로 끝단으로 갈수록 유출 유량이 작아진다. 반면 수로내 평균유속과 Froude수가 상대적으로 큰 경우에는 흐르는 유체의 에너지가 소산되지 않고 축적되어 끝단으로 갈수록 수위가 높아지는 현상이 나타난다. 이러한 반대되는 현상의 기준이 되는 Froude 수는 유체의 물리적 특성, 유황과 수로의 형상에 따라 각각 다르게 나타난다(박 등, 2007a; 박 등, 2007b).

분배수로 내 유동해석 방법의 차이에 의한 유량 불균등 발생 이외에 이론적 모델에서의 가정조건과 실제 설계 구조상의 상이함에서 초래되는 문제점도 있다. 현재까지 일반적으로 분배수로의 설계에 있어서는 Chao와 Trussel이 제안한 Step method를 널리 이용하고 있는데(Chao & Trussel, 1980), 이 방법은 각 위어 및 오리피스에서의 흐름 특성을 하류에서 상류방향으로 분배수로의 폭을 확대시킴으로써 제어하는 방안으로, 폭의 확대에 따라 발생하는 수위 저하는 Froude 수를 충분히 작게 하여 모든 위어의 유량계수가 거의 동일하게 유지될 수 있도록 한다. Larry 등은 이후에 분배수로에서의 불균등 분배를 최소화하기위해 위어 수위 변화 방법(changing the weir elevation), 수로폭 저감방안(tapering channel)을 제안하였다 (Larry et al., 1984). 이 같은 수정안들은 대부분 수로내 Froude 수의 유지와 수로폭 변화에 따른 수위 조절을 목적으로 제안되었다. 그러나 상기와 같은 Step method를 통해 설계된 대부분의 분배수로에서 만족할 만한 수량의 균등분배가 이루어지지 않고 있으며, 이러한 불균등 분배는 응집지 이하 침전지의 효율에 악영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Herbert, 1981; 한국수자원공사, 2000). 이후 박 등은 2007년에 이중 수로를 이용한 분배수로의 구조개선을 통하여 유량 불균등 분배를 감소시킬 수 있는 방안을 제시하였으며, 이를 CFD 및 실험실 규모의 실험으로 검증한 바 있다 (박, 2007b).

이에 본 연구에서는 국내 S_정수장 분배수를 대상으로 문제점(분배수로내의 평균유속저하로 인한 플록의 침전, 유량 분배의 불균등성)을 해결할 수 있는 수리구조 개선안을 제안하였으며, 제안된 개선안을 실험규모 분배수로에 시공하여 개선 정도를 평가하였다. 수리구조 개선안의 타당성 평가 및 개선 정도의 정량화를 위하여 기존의 분배수로와 중간도류벽을 이용하여 이중 수로구조로 개선된 분배수를 대상으로 CFD 모사 및 추적자 실험을 수행하였다.

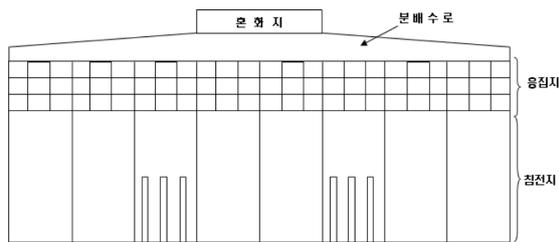


Fig. 1 Distribution of flow through a distribution channel

2. 실험방법

다음 Fig. 2는 본 연구의 대상인 경기도 S_정수장의 착수정, 혼화공정, 분배수로, 응집공정 및 침전공정의 평면도를 도시한 것이다. Fig. 2에서 제시한 바와 같이 각각의 제원에 대해서는 상세한 수치를 기입하였다. S_정수장의 경우 동일한 형상의 혼화공정, 응집공정 및 침전공정 두 계열(A, B계열)이 대칭적으로 시공, 운전 중에 있으며 각각의 세부 형상은 Fig. 2에 도시하였다. 추적자 실험은 비반응성 tracer를 입구측에 주입 후 특정지점에서 주입된 tracer의 농도를 분석하여 반응조의 수리적 특성을 평가하는 방법이다. 본 추적자 실험 당시 A계열은 왼쪽 1지, 2지, 3지 및 4지만 운전 중에 있었고, B계열의 경우 8지 모두 운전 중에 있었다. 이에 혼화지로 유입되는 유량을 각각 A계열로는 6,300 m₃/hr, B계열로는 13,300 m₃/hr로 조정하였다. 추적자 물질로는 불화규산(H₂SiF₆; 불소농도 25%, 비중 1.27)을 사용하였고, 추적자는 각 계열별 착수정에 일시로 주입하는 Slug Dose방법을 사용하였으며, 유입유량을 고려하여 A계열에는 60L, B계열에는 120L를 주입하였다. 착수정에서 혼화지까지는 1,200mm관수로로 연결되어 있는데, 유달 시간이 20초 미만임을 고려하여 추적자 실험으로부터 평균체류시간을 계산할 때에 이를 무시하였다. 샘플링 지점은 Fig. 2에 도시한 바와 같이 A계열 및 B계열 응집지 유출부를 기준으로 중앙지점 표층부로부터 1 m하단에서 샘플을 채취하였다. 불소농도는 DR2010(Hach, USA)을 이용하여 발색법으로 측정하였으며, 시료채취 간격은 2분, 실험시간을 수리학적 체류시간의 약 2배인 160분 정도로 각각 선정하였다. 추적자 실험 수행 동안 S정수장 응집지 수리학적 체류시간(T)은 74 분이였다. 연구 대상인 S_정수장의 응집지는 수직 패들형 타입의 응집지가 운영 중에 있으며, 침전지 한 지당 9개의 수직 패들형 응집기가 장착되어 있고 하나의 침전지로 유입되는 오리피스수는 총 3개가 설치되어 추적자 실험을 수행하는 동안은 100%로 전개(全開)하였다.

3. CFD 모사

본 연구의 대상인 S_정수장의 분배수로의 구조는 대칭이므로, CFD모사 시에 A 및 B계열의 1~4시까지 모사의 대상으로 삼았다. CFD모사에서는 A 및 B계열 응집지 유입 오리피스 12개를 통해 분배되는 유량의 균등 정도를 모사하기 위해 CFD 상용프로그램인 ANSYS CFX 12.0을 사용하였다. 모사 시 중간 도류벽에 설치된 오리피스의 최적 크기를 결정하기 위해 Table. 1과 같이 4개의 case로 구분하여 모사하였다.

Table. 1 CFD simulation conditions

구분	설명 및 입력 값
분배수로 유입유량	212,000 m ³ /일 (혼화지 → 응집지)
난류 모델	k-ε Model
Case 1	중간 도류벽이 없는 경우
Case 2	중간 도류벽 오리피스 크기 0.1189m ² (완전개도의 23.7%)
Case 3	중간 도류벽 오리피스 크기 0.3349m ² (완전개도의 66.7%)
Case 4	중간 도류벽 오리피스 크기 0.5027m ² (완전개도의 100%)

분배수로로부터의 유량 분배를 수치해석법으로 모사하기 위한 유체의 물리적 거동은 다음의 연속방정식과 운동량 방정식에 의해 설명될 수 있다.

① 연속방정식

$$\text{식(1)} \quad \nabla \cdot \rho \bar{V} = 0$$

② 모멘텀 방정식

(Navier-Stokes Equation)

$$\text{식(2)} \quad \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \bar{V} + F$$

여기서, ρ 는 밀도, \bar{V} 는 속도(각 방향 속도 성분), t 는 시간, P 는 압력, 그리고 ν 는 동점성계수를 나타낸다.

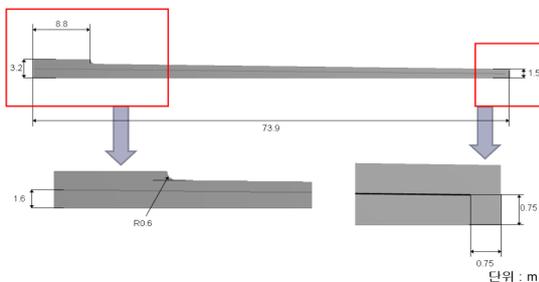
난류를 정확히 정의한다는 것은 어렵지만 대략적인 난류유동의 특성은 매우 불규칙적이며

임의성이 강하고, 강한 확산 특성을 가짐. 난류 유동 안의 어느 고정된 위치에서 속도를 측정하면, 시간에 따른 속도변화를 얻을 수 있으며, 순간속도(u)의 변동 성분이 시간-평균 속도(\bar{u})를 기준으로 변동속도(u') 성분과의 합에 의해 불규칙하게 나타남($u = \bar{u} + u'$). 3차원 공간에서 (x, y, z)에 해당하는 속도 성분을 (u, v, w)라 하면, 난류 운동에너지 k 는 $k = \frac{1}{2} \overline{u^2 + v^2 + w^2}$ 으로 표현된다. 난류의 유동장을 해석하기 위한 일반적인 방법인 Navier-Stokes 방정식을 이용 Eddy viscosity 모델 개념을 적용하는 방법은 수송방정식을 이용해서 난류 점성계수를 해석하는 방법으로 $k-\epsilon$ 모델이 가장 대표적이며, 난류해석에서 가장 많은 해석 및 검증이 이루어진 모델이다.

또한, 상부 자유 수면을 opening으로 지정하였으며, 공기와 접촉하고 있는 수위가 수두에 따라 계산결과에 의해 변하도록 가정하였으며 분배수로 유출구 경계조건으로 약 2m정도의 정수두가 존재하는 것으로 가정하였다. 일반적으로 바닥면, 벽면 및 중간 도류벽 등은 no-slip condition을 적용하였다.

본 연구에 있어서 CFD 프로그램을 이용 분배수로 해석의 절차 및 방법론을 아래에 간단하게 제시하였다.

- ① ANSYS Design-Modeler에 의한 형상작업
 - 해석 영역 설정
 - 해석 영역의 형상 작업

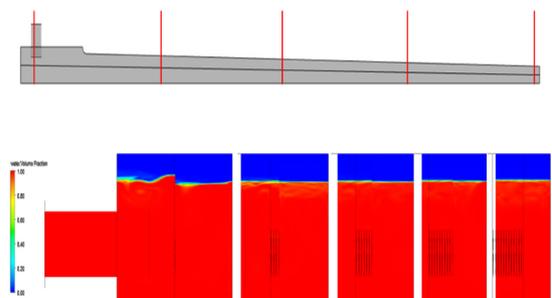


- ② CFX-Mesh를 활용한 격자형성
 - Tetrahedral 격자
 - Body, Face등 격자 크기 설정
 - Wall function 지정 등



- ③ CFX-Pre 초기 및 경계조건
 - Domain 설정
 - 경계조건 설정 등

- ④ CFX-Post 결과 해석



4. 결과 및 고찰

4.1 추적자 실험

Fig. 3과 4는 앞서 언급한 A계열(1~4지) 및 B계열(1~4지)를 대상으로 수행한 추적자 실험 결과를 도시 한 것이다.

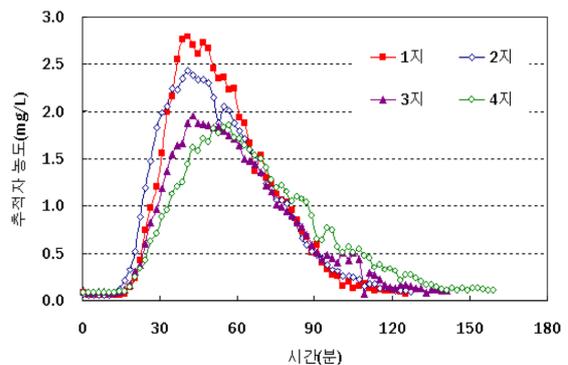


Fig. 3 Tracer test results of A line(1~4#)

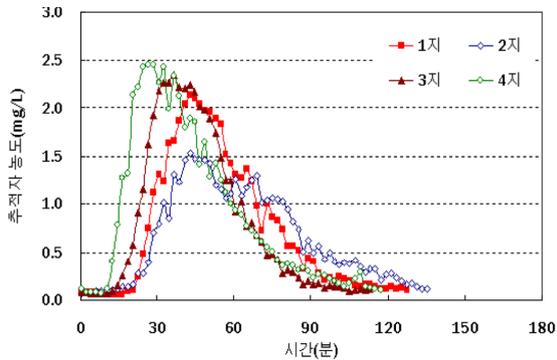


Fig. 4 Tracer test results of B line(1~4#)

자세한 추적자 실험 결과의 분석을 위해 각 응집지 평균체류시간 및 표준편차를 상기 그래프로 부터 도출하여 Table 3과 4에 정리하였다.

Table 3 Mean residence time and standard deviation of A line(#1~#4)

항목	1지	2지	3지	4지	표준편차
평균 체류 시간 (분)	55.1	54.2	59.8	66.7	5.7

※ 분배수로 유입유량 6,300 m³/시간 (응집지 유입부 100% 전개)

Table 4 Mean residence time and standard deviation of B line(1#~#5, #8)

항목	1지	2지	3지	4지	5지	8지	표준편차
평균 체류 시간 (분)	55.4	63.8	46.5	43.6	50.1	68.2	11.1

※ 분배수로 유입유량 13,300 m³/시간 (응집지 유입부 100% 전개)

평균체류시간(τ)는 각 응집지 용적(V)를 유입유량(Q)로 나눈 지표다. 이에 응집지의 용적에 대한 정보를 알고 있으면 각 오리피스를 통해서 유입되는 유량을 직접적으로 계산할 수 있다. 그 결과 중간도류벽을 설치한 A계열의 각 응집지 유입유량의 균등 분배정도가 B계열 분배수로에 비해 약 80%정도 제고된 것으로 판단할 수 있다. 또한, 추적자 실험 결과, A계열(1~4지)에서는 2지에서 추적자 농도가 검출되기 시작한 시간이 가장 빨랐고(측정 시점으로부터 12분), 4지에서 가장 느리게 검출되기 시작하였다 (18분). B계열에서는 4지에서 추적자 농도가 검출되기 시작한 시간이 가장 빨랐고(측정 시점으로부터 10분), 1지에서 가장 느린 것으로 관측되었다 (20

분). 이에, 중간 도류벽의 설치로 인해 각 응집지로 유입되는 유량의 균등 정도가 크게 제고되었음을 알 수 있었다.

4.2 CFD 모사 결과

앞 절의 추적자 실험 결과를 좀 더 자세히 분석하기 위해서 본 절에서는 Table. 1의 조건과 동일하게 CFD 모사를 수행하였다.

다음 Fig. 5와 6는 각각 case 1 중간 도류벽이 없는 경우와 case 4 중간 도류벽 오리피스 크기 0.5027m² (완전개도의 100%)인 경우 바닥에서 0.6m되는 평면에서 유속분포를 나타낸 그림이다. Fig. 5와 Fig. 6의 속도장 정보만으로 12개의 오리피스로부터 유출되는 정확한 유량을 추정하기에는 어려움이 있다. 이에 본 모사의 결과로부터 12개의 유출측 오리피스 단면의 “mass flow”에 대한 정보로부터 직접적으로 유출량을 산정하였다. Fig. 7은 참고적으로 case 4의 경우 단면 4곳을 선정하여 수위의 분포를 검토한 결과를 도시한 것인데, 붉은 선으로 표시한 각 단면에서 수위를 확인한 결과 분배수로 유입구 쪽 도류벽 전 후단의 수위 차를 확인 할 수 있었으나, 중간단면에서도 약간의 수위 차를 확인 할 수 있으며 분배수로 끝에서는 수위차이가 없어지는 것으로 관측되었다.

Fig. 8은 case 1~4에 대해 12개의 유출측 오리피스 단면의 “mass flow”에 대한 정보로부터 직접적으로 유출량을 산정한 결과이다.

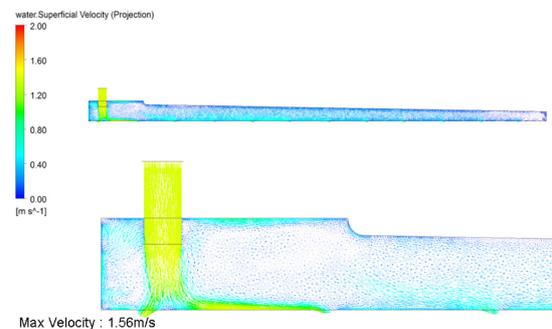


Fig. 5 Simulation results of flow patterns within non-baffled channel(case 1, at 0.6 meter above bottom level)

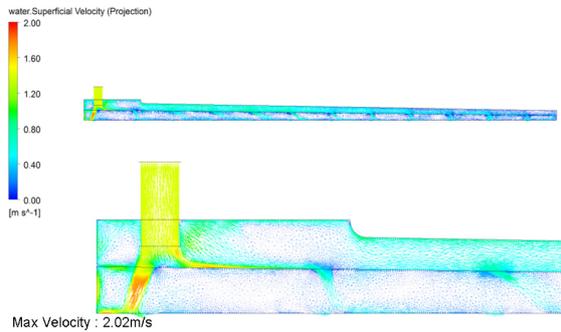


Fig. 6 Simulation results of flow patterns within baffled channel (case 4, at 0.6 meter above bottom level)

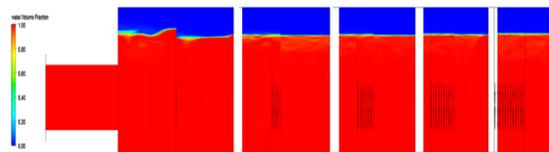
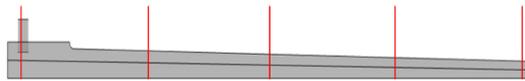


Fig. 7 Water level of each plane within baffled channel (case 4)

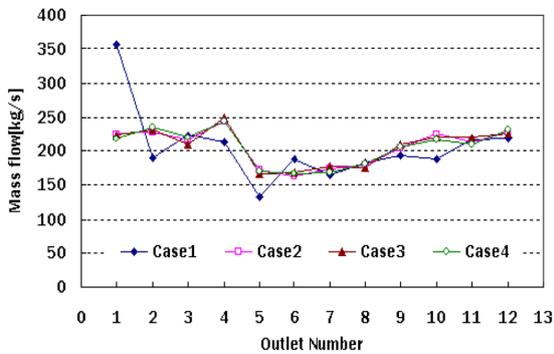


Fig. 8 Efflux flow rate of orifices in each case

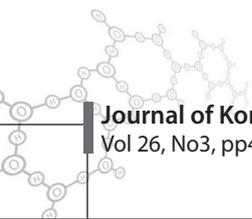
Fig. 7과 Fig. 8로부터 분배수로 내 오리피스 가 설치된 중간 도류벽에 의해 도류벽 후단의 압력 편차가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 중간도류벽의 설치로 인해 유입부로 유입된 유동이 4지(오리피스 outlet number 1,2,3)로 바로 빠져나가지 못하고 중간도류벽에 의해 저항을 받음으로써 오리피스 outlet number 1에서 유량 편차가 상당히 저감되는 것이 관측되었다. 오리피스가 설치된 도류벽의 시공 여부에

따라 유량 배분의 편차가 크게 좌우되는 것에 반해 오리피스의 직경은 균등성에 영향을 주지 못하는 것으로 모사되었다. 중간 도류벽이 없는 경우 유입유량 편차는 +72 ~ -35%이었으며, 중간 도류벽을 설치한 경우 유입 유량의 편차는 +20 ~ -20%로 약 75%의 균등성 제고 효과가 나타났다. 이는 앞서 수행된 추적자 실험 결과 균등 분배정도가 82%정도 제고되었음을 입증할 수 있는 결과이며, 수치해석을 이용한 설계 안이 유효함을 설명할 수 있었다. 이에, 추적자 실험 및 CFD모사 결과 중간 도류벽의 설치로 인해 각 응집지로 유입되는 유량의 균등 분배 정도가 제고 되었음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구는 국내 S_정수장 분배수로를 대상으로 문제점(분배수로내의 평균유속저하로 인한 플록의 침전, 유량 분배의 불균등성)을 해결할 수 있는 수리구조 개선안을 제안하였으며, 제안된 개선안을 실규모 분배수로에 시공하여 개선 정도를 평가하였다. 수리구조 개선안의 타당성 평가 및 개선 정도의 정량화를 위하여 기존의 분배수로와 중간도류벽을 이용하여 이중 수로구조로 개선된 분배수를 대상으로 CFD 모사 및 추적자 실험을 수행하였다. 이에 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 개수로를 이용하여 병렬로 배치된 여러 개의 단위공정에 균등한 유량배분을 위해서는 이중 수로가 효과적이며, 이 때 이중 수로로 수리구조를 개선하기 위해서는 중간 도류벽에 오리피스가 필요하다. 기존 실험실 규모에서 제안되었던 이중 수로 구조는 실규모에서도 병렬로 배치된 단위 공정으로의 유입 유량의 균등성을 제고하며 이에 따라 공정별 체류시간을 균일하게 함으로써 수질의 제고를 기대할 수 있다.
- 2) 본 연구의 대상이 된 S_정수장의 경우 오리피스가 설치된 중간 도류벽을 시공함으로써



써 이중 수로 구조의 분배수로와 기존의 수로(단일 수로)의 유량 분배정도를 추적자 실험과 CFD모사를 통해 비교 평가한 결과 약 75%이상의 균등 분배 정도의 제고를 나타냈다.

- 3) 단, 분배수로의 기능 중 균등 분배의 궁극적 목적인 수질 제고 관련 평가는 장기적인 수질 측정을 통한 데이터의 축적이 필요함에 따라 추후, 축적된 수질 데이터의 수집 및 분석으로 정확한 이중 수로의 유용성을 평가하여야 할 것이다.

사사

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호 : 10기술혁신 C-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

Heung-Ki Baek, No-Suk Park, Jeong-Hyun Kim, Sun-Ju Lee and Hang-Sik Shin, (2005) "Examination of three-dimensional flow characteristics in the distribution channel to the flocculation basin using CFD simulation," Journal of Water Supply : Research & Technology -AQUA- Vol. 54,

No. 6, PP.349-354.
백흥기 (2003) "3-D 전산유체 해석을 이용한 응집지 분배수로 유동장 연구", 박사학위 논문, 한국과학기술원
박노석, 김성수, 박중윤, 윤철환, 김충환, (2007a) "수리구조개선을 통한 분배수로 균등분배 성능 향상에 관한 연구 (I) : CFD를 이용한 설계 중심으로"상하수도학회지, Vol 21, No. 5, pp. 571-579, 2007
박노석, 김성수, 황준식, 임재림, 김충환, (2007b) "수리구조개선을 통한 분배수로 균등분배 성능 향상에 관한 연구 (II) : Pilot plant 실험을 통한 최적화"상하수도학회지, Vol 21, No. 5, pp. 581-587.
Chao, J. L and Trussel, R. R. (1980) "Hydraulic Design of Flow Distribution Channels", Journal of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 106, pp.321-333.
Larry, D. B., Joseph, F. J., and David, P. A., (1984) "Flow in Open Channels". Treatment Plant of Environmental Engineers, Prantice-Hall, INC., pp. 108-122
Herbert, E. H. Jr., (1981) "Water Clarification Processes Practical Design and Evaluation" Van Nostrand Inc., pp.258-275.
한국수자원공사, (2000) "성남권 관리단 기술진단 보고서", pp.53-105.