

Evaluation of hydraulic behavior within parallel arranged upflow sedimentation basin using CFD simulation(II) -A CFD methodology for the design of distribution channel for improving inlet equity

CFD를 이용한 병렬 배열형 상향류식 침전지 수리해석에 관한 연구(II)
- 침전지 내 유입유량 균등성 향상을 위한 유입 분배수로 개선 -

No-Suk Park¹ · Seong-Su Kim² · Jong-Woong Choi² · Chang-Keun Wang³

박노석¹ · 김성수² · 최종웅² · 왕창근³

¹Department of Civil Engineering and Engineering Research Institute, Gyeongsang National University · ²K-water · ³Chungnam National University

¹경상대학교 토목공학과 및 공학연구원 · ²한국수자원공사 K-water연구원 · ³충남대학교 환경공학과

Abstract : In order to suggest the methodology for improving the equity of flow distribution in open channel with multiple outlet, CFD simulations were carried out for actual scale distribution channel being operated in domestic G_WTP(Water Treatment Plant). Also, before and after installing the longitudinal multi hole(diameter=250 mm, 116 holes) baffle suggested by this research, turbidity measurements data were collected for evaluating the effects of hydraulic modification for inlet flow equity. From the both results, total turbidity of settled water was lowered by 30 % and equity of flow distribution was improved about 60 % compared with before hydraulic structure modification.

Key words : Distribution channel, inlet equity, CFD(Computational Fluid Dynamics), flow distribution

주제어 : 분배수로, 유입유량 균등성, 전산유체역학, 유량분배

1. 서론

일반적으로 수돗물을 생산해내는 “시스템”은 여러 단위공정의 집합체로 구성되어있다. 그 예로 급속혼화 공정으로부터 유출된 물은 통상 병렬로 배열된 응집지로 유량이 분배되고, 응집공정으로부터 유출된 물은 병렬로 배치된 침전지로 유입된다. 또한 침전수도 마찬가지로 고액분리의 최종 단계인 병렬 배치된 여과공정으로 유입된다. 이 과정에서 분배수로는 통상 관수로나 개수로 형태를 띠고 있다. 그런데 만약 각 병렬 배치된 공정으로 유입되는 유입수가 균등하지 못한 경우 후단 공정의 효율이 만족스럽지 못한 경우가 많다(박노석 등, 2007). 그 예로 혼화공정과 응집공정간의

분배수로로부터 병렬로 배치된 응집공정으로 유입 유량이 균등하지 못한 경우, 각 응집지의 체류시간이 상이할 뿐만 아니라 응집지와 통상 일체형으로 설치되어 있는 침전지의 체류시간에도 영향을 미치게 된다(Beak, et al., 2005). 유량이 적게 유입되는 지에서는 지내 유속이 느려지고 체류시간이 길어지게 되어 슬러지의 퇴적, 부패 및 혐기화 등이 발생할 수 있으며, 반면 유량이 많이 유입되는 지는 통과 유속이 빨라져 체류시간이 단축됨으로써 플록의 파괴 또는 슬러지의 재부상 등을 유발할 수 있다.

기존 정수처리 공정 간을 연결하는 분배수로의 설계는 기본적으로 유입부의 구조, 수로의 단면형상 및 유출부의 구조와 크기, 형상 등 다양한 설계 인자들이 고려되어야 한다. 그러나 이러한 분배수로 내의 복잡한 유동현상을 정확히 파악하기

• Received 28 February 2013, revised 10 April 2014, accepted 11 April 2014.

* Corresponding author: Tel : 042-870-7527 Fax : 042-870-7549 E-mail : kssman@kwater.or.kr

는 매우 어렵기 때문에 최근까지도 분배수로 설계는 기본적인 유체역학 이론과 경험에 의한 자료를 토대로 설계 및 시공되고 있다. 수처리 공정이 반응조를 포함하는 대부분의 수리구조물은 형상의 복잡성으로 인하여 일반화된 식을 만들 수 없고, 특히 분배수로 내에서의 유동은 난류특성을 고려해야하는 3차원 분석이 필요하므로 1차원 시간의 함수로 해석하거나 2차원의 shallow water theory를 사용하는 code로 해석할 경우 실제현상과 상이한 오차가 발생할 수 있다 (박노석 등, 2007).



(a) Distribution open channel



(b) Uneven distribution results

Fig. 1. Distribution Channel between Rapid mixing and flocculation processes.

다음 Fig. 2는 균등한 폭을 가진 개수로가 다지점으로 유출되는 오리피스를 가지고 있는 경우의 평면 형상 및 유출 유량의 변화 양상을 도시한 것이다. Fig. 2의 아래 그림은 수로내의 유입

유속이 작고 수로 내 Froude 수가 작은 경우 유입부로부터 거리에 따른 수두손실을 도시한 것이다(민병헌 외 1997).

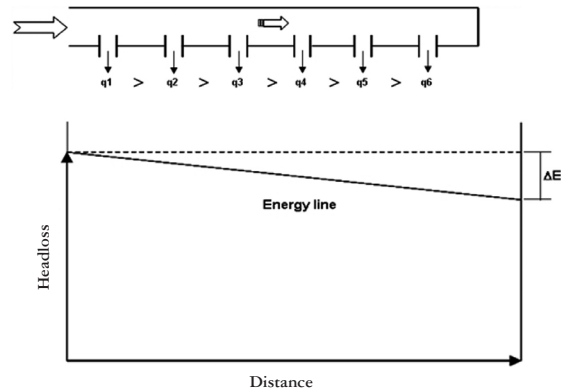


Fig. 2. Outlet flow and headloss within distribution channel.

현재까지 분배수로의 설계 및 최적화에 관한 연구가 많지는 않지만, 1980년 Chao와 Trussel이 제안한 “Step method”를 널리 이용하고 있는데, 이 방법은 각 위어(weir) 앞 오리피스에서의 흐름특성을 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 최소화하기 위해 위어 수위 변화방법(changing the weir elevation), 수로폭 저감방안(tapering channel)을 제안하였다 (Larry et al., 1984). 이 같은 수정안들은 대부분 수로 내 Froude 수를 일정하게 유지시키고, 수로폭의 변화를 주어 수위를 일정하게 제어하고자 하는 방법들이다. 그러나 이러한 Step method는 분배수로내로 유입되는 유량이 시간에 따라 변화는 경우 점차적으로 감쇠시킨 수로 폭의 각도가 적절하지 않는 문제점을 가지게 된다. 이후 2007년 박 등은 CFD와 pilot 규모의 실험을 통해 분배수로 내 오리피스가 장착된 이중 도류벽 설치함으로써 다지점으로 유출되는 유량의 균등성을 증가

시킬수 있었다는 연구결과를 발표하였다(박노석 등, 2007a, 2007b).

본 연구의 반(companion) 논문에서 제기되었던 G정수장의 병렬 배열형 상향류식 침전지의 문제점이 각각의 침전공간으로 유입되는 유량의 불균등으로 각 트라프에서 유출되는 수질이 상이함을 지적하였다. 이에 상향류식 침전지 자체의 운전 및 수리구조의 개선보다는 침전지의 유입유량 균등성을 제고함으로써 침전효율을 증가시키려고 하였다. 침전지 전단에 있는 분배수로의 수리구조 개선을 위하여 도출된 설계안을 CFD를 이용하여 최적화하여 시공한 후 일정기간 동안 5개의 트라프를 통해 유출되는 수질을 측정하여 그 효율을 검증하고자 하였다.

2. 대상 분배수로

상기 Fig. 3은 본 연구의 대상인 침전지 유입수로를 도시한 것이다. 본 수로는 침전지의 좌측에 설치되어 있으며, 왼쪽 끝 위어(파란색 사각형; inlet)를 통해 들어온 유입수가 5개의 출구(outlet) 유출되는 형상이다. 수로의 폭은 1 m이고, 전장은 28 m이며, 깊이는 2 m이다. 각 유출

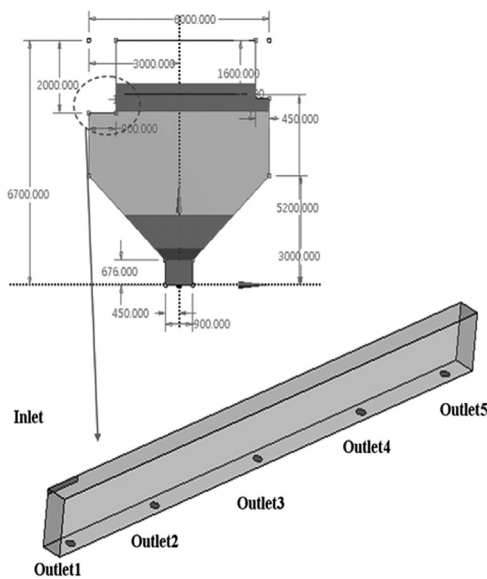


Fig. 3. Schematic representation of the target distribution channel.

구의 직경은 0.45 m이며, 유입구는 전폭 위어로 너비 2 m, 깊이는 18,000 m³/일로 운전 시 0.2 m의 수위를 가진다. 각 유출구에서 유출되는 유량은 침전지 바닥에 설치된 유입구를 통해 유입된다. 분배수로 유입 위어가 outlet 1과 가까워 outlet 1으로부터 유출되는 유량이 가장 클 것으로 유추되었다. 추후 이를 확인하고 정량화하기 위하여 CFD 모사를 수행하였다.

3. 연구방법론

3.1 CFD 모사 방법

본 연구에서는 분배수로 수리구조 개선안 두 가지를 대상으로 CFD를 이용하여 유출 유량의 균등성을 모사하였다. 그 형상을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 유출 유량 균등성의 모사를 위한 개선안 첫 번째 수리 구조로서 입구에서 출구까지 균일한 수두 손실을 발생하기 위하여 수리 구조 내부에 80 mm 두께의 격벽을 설치한 후 격벽을 통하여 유체가 입구에서 출구로 유출되도록 직경 450 mm의 홀을 생성하였다. 그리고 출구 5영역의 격벽 끝단에는 벽면과의 500 mm의 거리를 두어 가장 크게 작용하는 수두손실을 줄일 목적으로 간격을 두었다. Fig. 4(b)는 유출 균등성의 모사를 위한 개선안 두 번째의 수리 구조이다. 첫 번째 수리 구조와 동일하게 격벽을 설치하였으며, 격벽에는 직경 250 mm의 홀을 생성하였다. 이 홀은 전체 2열 55행으로 구성되었으며, 홀과의 가로 간격은 500 mm, 세로 간격은 400 mm 이다.

해석을 위한 격자정보를 Table 1에 나타내었으며, ANSYS Meshing Tool를 사용하여 각각의 형상에 대하여 격자를 생성하였다. 수리 구조의 격벽에 설치된 홀의 해상도를 위하여 상대적으로 조밀한 격자를 홀 주위에서 생성하였다. 기존 형상, 개선형상 I, 개선형상 II의 사용된 격자 수는 각각 230,000, 280,000, 620,000 노드이다. 격자의 형태는 벽면에서 난류로 인한 유동장 형성의 해상도를 위하여 prism 격자를 사용

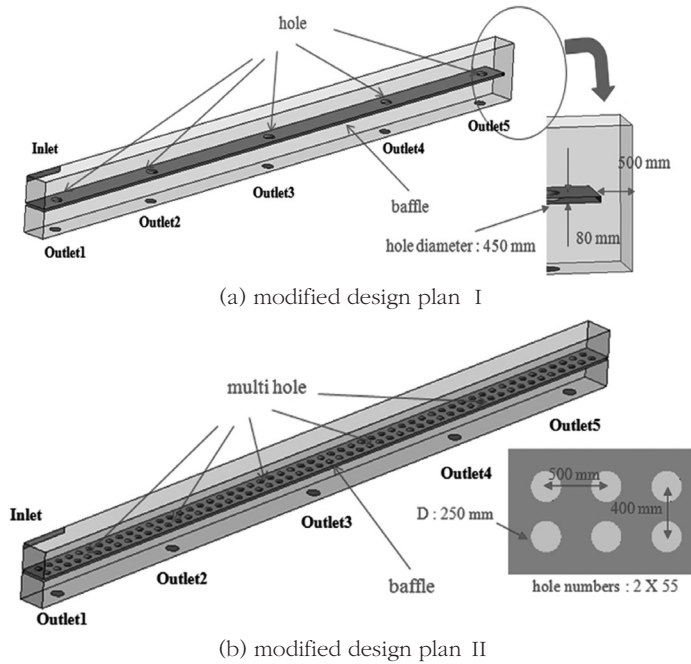


Fig. 4. Schematic representation of the modified design plans.

Table 1. Mesh information of the configuration for the distribution channel

Item	prototype design	modified design I	modified design II
Mesh type	Tetra + Prism	Tetra + Prism	Tetra + Prism
Node numbers	230,000	280,000	620,000
Element numbers	860,000	920,000	2,300,000

하였으며, 공간 상에서는 tetra 격자를 사용하였다. 수치계산은 상용프로그램인 ANSYS CFX 12.1을 사용하였으며, 입구에는 하루 운전 유량 18,000 m³/day에 해당하는 질량 유량 유입조건, 출구에는 압력 조건을 적용하였다. 벽면 조건으로는 no-slip wall condition을 적용하였으며, 자유표면에 해당하는 수리 구조 형상의 상부에는 free slip wall condition을 적용하였다. 작동유체로서 20 °C에 해당하는 밀도와 점성을 가지는 물을 사용하였다. 난류모델은 scalable 벽법칙을 사용하는 standard $k-\epsilon$ 난류 모델을 적용하였다.

3.2 수질 측정

상기 CFD모사 방법에서 기술된 설계안 중에서 5개의 유출유량에 있어서 더 낮은 편차가 예측된 설계안(CFD모사 결과에서 언급하겠지만 다공성 플레이트로 선정)을 실제 G_정수장 병렬 배열된 상향류식 침전지 유입부에 2012년 6월 20일 시공 완료하였다. 이에 개선된 유입부의 수리구조가 수질에 미치는 영향을 알아보기 위해 18,000 m³/일 유량조건에서 왼쪽 벽면으로부터 outlet1 ~ outlet8까지 샘플링하여 탁도를 측정하였다. 탁도 측정은 동일한 개선 전과 개선 후 동일한 시간대에 측정하였으며, 측정간격은 일중 변화를 평가하기 위하여 30분 간격으로 19번 측정하였다.

4. 결과 및 토의

4.1 CFD 모사 결과

다음 Fig. 5는 기존 분배수로와 상기 “CFD 모사 방법”에서 언급한 두 가지 개선안을 대상으로 수행한 CFD모사 결과를 streamline으로 도

시한 것이다. 각 streamline의 거동을 관측할 때에 (a) 기존 분배수로의 경우 유입부(왼쪽)에서 멀어질수록 유속이 느려지며, 5개의 유출부로 나가는 streamline의 수도 현저히 감소하는 것으로 관측되었다. Fig. 6는 각 경우 5개의 유출부(outlet)로 유출되는 유량을 막대그래프로 표시한 것이다. Fig. 6(a)에서 나타낸 바와 같이 기존 분배수로(a)의 경우 최대 유량이 유출되는 outlet 1과 최소 유량이 유출되는 outlet 2와 편차가 3.727%로 계산되었으며, 5개의 outlet으로 유출되는 유량의 표준편차(standard deviation)는 276.48 m³/일로 도출되었다.

이와 같은 결과는 본 논문의 반(companion) 논문에서 제시한 상향류식 침전지의 상단 5개의 트라프에서 측정된 탁도 데이터(Table 2)의 양상을 설명하는 데 유용하리라 판단된다. 각 분배수로의 유출부는 침전지의 유입구와 연계되어 있고 분배수로 유출부 간의 유출유량의 불균등은 병렬 배열된 상향류식 침전지 내로의 유입유

량의 불균등으로 이어지고 이는 각 트라프마다 유출되는 유출수의 수질에 영향을 미치는 것으로 귀결할 수 있다.

이에 본 연구에서 앞서 “CFD 모사 방법”에서 언급한 두 가지 개선안을 대상으로 CFD모사를 수행한 결과를 Fig. 5((b), (c))와 6((b), (c))에 도시하였다. 기존 분배수로에 비해 직경 450 mm 홀을 천공한 중간 도류벽이 있는 경우에는 유입부에서 가장 가까운 outlet1의 유출 유량과 가장 많은 양이 유출되는 outlet4의 편차가 오히려 증가하여 4.492%에 달한다. 또한 개선안(modified design I)의 경우 5개의 유출유량의 표준편차가 349.86 m³/일로 계산되어져 기

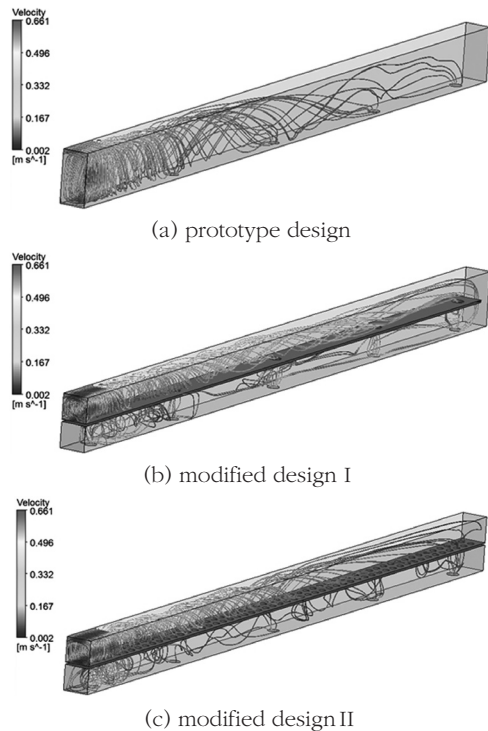


Fig. 5. Streamline of the prototype and modified design I, II.

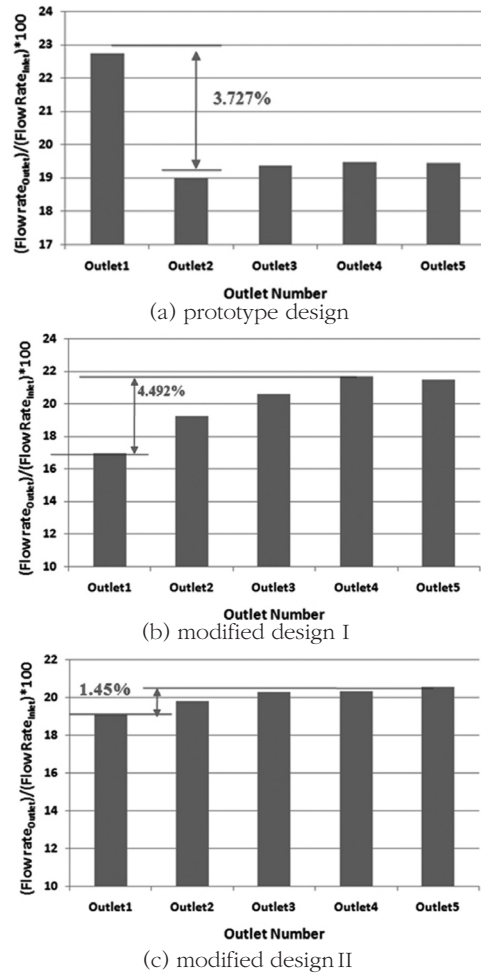


Fig. 6. Flow rate at the outlet of the prototype and modified design I, II.

존 분배수로에서 발생한 유입유량간의 표준편차보다 큰 것으로 나타났다.

이에 반해 직경 250 mm의 오리피스를 천공한 다공판 도류벽을 설치한 경우(Fig. 5(c), Fig. 6(c))는 최대 유량이 유출되는 outlet 5와 최소 유량이 유출되는 outlet 1간의 편차가 1.45 %밖에 나타나지 않았으며, 각 유출부간의 유출 유량값의 표준편차 또한 104.85 m³/일로 약 30 % 정도의 유량 균등성의 향상을 예측할 수 있었다. 따라서, 본 G_정수장에서는 2012년 6월 4일부터 5일 이틀 동안 개선안 II 대로 기존 분배수로 개선 공사를 수행하였으며, 약 한 달 정도 안정화 기간을 보내고 동일한 조건에서 트라프 1-5에서 유출되는 침전수의 탁도를 측정하였다.

4.2 탁도 측정결과

다음 Fig. 7은 기존분배수로에 다공성 도류벽(직경 250 mm 오리피스 116개)를 설치한 후 약 한 달 정도의 안정화 기간을 보낸 후 2012년 7월 16일 하루 동안 5개 트라프(outlet1-10)에서 30분 간격으로 19회 측정된 탁도 데이터를 제시한 것이다. 대상 침전지의 대칭성을 고려하여 왼쪽 벽면으로부터 트라프 1(outlet1-2), 트라프 2(outlet 3-4), 트라프 3(outlet 5-6), 트라프 4(outlet 7-8) 그리고 트라프 5(outlet 9-10)을 선정하였다.

Table 2와 Fig. 7에서 나타난 바와 같이, 개선전의 데이터는 분배수로의 개선하기 전 5월 17일 측정 데이터이며, 개선 후는 분배수로를 개선안 II 대로 시공한 약 한달 정도 운전 후 7월 16일에 측정 한 데이터이다. 각 트라프에서 채취한 샘플의 탁도가 상당히 안정화 되었을 알수 있는데, 개선 전 탁도 데이터 중 최대 값을 기준으로 평균은 2.51 NTU, 표준편차 0.58 NTU임에 반해 분배수로 개선 후 최대 탁도의 평균은 2.16 NTU, 표준편차 0.11NTU로 측정되었다. 또한 최소값을 기준으로 개선 전에는 평균값 1.86 NTU, 표준편차 0.76 NTU임에 반해, 1.63 NTU, 표준

편차 0.16 NTU로 측정되었다. 각 트라프에서 유출되는 유출수의 탁도 향상정도가 크지 않지만 유량 균등화를 통한 각 트라프 유출수의 수질 균등화 정도는 최대 60 %이상 개선되었으며, 이로 인한 통합 탁도의 경우 개선 전 2.69 NTU이었던 것이 개선 후 1.83 NTU로 측정되어 약 32 %정도의 탁도 개선 효과를 가져왔다. 이와 같은 결과는 개선 전 탁도가 가장 높았던 트라프 1 유출수가 유출 유량 또한 가장 많아 통합 탁도에 지배적인 영향을 미쳤으나, 유량 균등화 도모를 위해 시공한 다공성 도류벽으로 유출 유량의 안전화를 개선함으로써 수질이 개선된 것으로 파악된다.

Table 2. Turbidity measurement results of outlet (trough)

Existing facility (5-17)						
Trough #	1	2	3	4	5	통합
Average	3.35	1.75	2.00	1.75	2.00	2.69
Min.	3.19	1.41	1.50	1.40	1.78	2.42
Max.	3.50	2.20	2.51	1.75	2.00	2.69
Improvement facility (7-16)						
Trough #	1	2	3	4	5	통합
Average	1.75	1.95	1.95	1.81	2.00	1.83
Min.	1.51	1.81	1.70	1.42	1.72	1.62
Max.	1.99	2.11	2.20	2.19	2.29	2.16

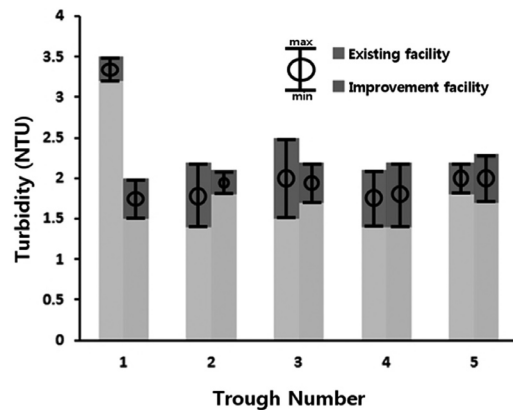


Fig. 7. Turbidity measurements.

5. 결론

본 연구의 반(companion) 논문에서 제기되었던 G정수장의 병렬 배열형 상향류식 침전지의 문제점이 각각의 침전공간으로 유입되는 유량의 불균등으로 각 트라프에서 유출되는 수질이 상이함을 지적하였다. 이에 상향류식 침전지 자체의 운전 및 수리구조의 개선보다는 침전지로의 유입유량 균등성을 제고함으로써 침전효율을 증가시키하고자 하였다. 침전지 전단에 있는 분배수로의 수리구조 개선을 위하여 도출된 설계안을 CFD를 이용하여 최적화하여 시공한 후 일정기간 동안 5개의 트라프를 통해 유출되는 수질을 측정하여 그 효율을 검증하고자 하였다. 이에 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 연구 대상인 G_정수장에서 운전 중인 병렬 배열된 상향류식 침전지의 유입부 분배수로 개선안을 CFD모사로 최적 설계한 결과 다공성 도류벽의 설치가 5개의 유출부로 유출되는 유량을 균등화하는데 효과적임을 밝혔다. CFD모사 결과로부터 좀 더 자세하게 언급하자면 기존 분배수로의 경우 최대 유출유량과 최소유출유량의 차가 3.727 %, 직경 450 mm 오리피스가 5개 천공된 도류벽의 경우 4.492 %, 그리고 직경 250 mm 오리피스가 116개 천공된 다공성 도류벽의 경우 1.45 %인 것으로 모사되었다.
- 2) 다공성 도류벽의 시공하고 한 달 정도의 안정화 기간을 거친 후, 개선 전과 후의 각 트라프로 유출되는 유출수의 탁도를 측정한 결과 통합 탁도로 개선 전 2.7 NTU이었던 것이 개선 후 1.8 NTU로 측정되어 약 30 %정도의 탁도 개선 효과를 가져왔다. 이와 같은 결과는 개선 전 탁도가 가장 높았던 트라프 1 유출수가 유출 유량 또한 가장 많아 통합 탁도에 지배적인 영향을 미쳤으나, 유량 균등화 도모를 위해 시공한 다공성 도류벽으로 유출 유량의 안전화를 개선함으로써 수질이 개선된 것으로 파악된다.

사 사

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원(과제번호 : 10기술혁신 C01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- B.H. Min, J.S. Han, S.H. Kim (1997) "Environmental Hydraulics" Dong-Hwa Tech., Seoul, Korea of Republic
- N.S. Park, S.S. Kim, J.Y. Park, C.H. Yoon, C.H. Kim (2007) "The Remodelling of Hydraulic Structure in a Distribution Channel for Improving the Equality of the Flow Distribution (I): Design Using CFD Simulation," *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 21, No. 5, pp.571-579.
- N.S. Park, S.S. Kim, J.S. Hwang, J.L. Lim, C.H. Kim, (2007) "The Remodelling of Hydraulic Structure in a Distribution Channel for Improving the Equality of the Flow Distribution(II): Optimization through Wet test" *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 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.
- 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.
- 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