

수리구조 개선을 통한 분배수로 균등분배 성능 향상에 관한 연구(Ⅱ): Pilot plant 실험을 통한 최적화

The Remodelling of Hydraulic Structure in a Distribution Channel for Improving the Equality of the Flow Distribution (II): Optimization through Wet Tests

박노석* · 김성수 · 황준식 · 임재림 · 김충환

No-Suk Park* · Seong-Su Kim · Jun-Sick Hwang · Chung-Hwan Kim

한국수자원공사

(2007년 7월 12일 논문 접수: 2007년 10월 2일 최종 수정논문 채택)

Abstract

In order to suggest the methodology for improving the equality of flow distribution in a distribution channel, wet tests were carried out for pilot plant which was scaled down to 1/8 of full scale distribution channel being operated in domestic K₂O water treatment plant. The correlation between various hydraulic variables and their effects on the equality of flow distribution was evaluated through wet tests using pilot plant. From the results of wet tests, the longitudinal baffle with orifices was installed in the distribution channel, the equality of flow distribution was improved on the condition that the Froude number in pilot plant was similar with that in the full scale channel. Also, the opening ratio of the orifices on the longitudinal baffled did not have influence on the performance of the equality of flow distribution when the average flow velocity and Froude number were relatively low (Froude number \approx 0.01). In the other hand, the performance of the equality of flow distribution was improved with increasing the opening ration of on the longitudinal baffle under conditions of relatively high average flow velocity and high Froude number (\geq 0.1).

Key words: distribution channel, the equality of flow distribution, Froude number, longitudinal baffle, orifice

주제어: 분배수로, 분배의 균등성, Froude 수, 도류벽, 오리피스

1. 서 론

기존 정수처리 공정에서 혼화공정과 응집공정은

통상 긴 개수로를 통해 연결되어 있는데, 개수로로부터 각각의 응집지 및 침전지로 유입되는 유입수는 병렬로 설치된 오리피스를 통해 나간다(Fig. 1 참조). Fig. 1에서 도시하듯이 왼쪽에 위치한 혼화지에서 분

*Corresponding author Tel: +82-42-870-7525, FAX: +82-42-870-7549, E-mail: nspark@kwater.or.kr (Park, N.S.)

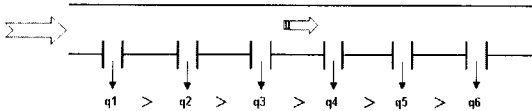


Fig. 1. 정수처리공정에서 혼화지와 응집지를 연결하는 분배수로(예시).

배수로로 유입되는 물은 각각의 오리피스 q_1, q_2, q_3, q_4, q_5 및 q_6 의 오리피스를 통해 응집지와 침전지로 유입된다. 이러한 수리구조물에서 각각의 오리피스를 통해 나가는 유출유량의 균등의 정도가 수질 및 운영의 효율성에 큰 영향을 미치며, 각각의 유출량을 일정하게 위한 분배수로의 수리구조 설계에 관한 연구가 선행 연구자에 의해 일부 수행되었다(Chao & Trussell, 1980; Larry et al., 1984). Chao & Trussell은 구형 측면 위어 나 수중 오리피스의 유량조절장치를 이용하여 구형, 삼각형(tapered type), 수평 수로의 유량 분배를 분석하는 방법에 대해 많은 연구를 하였는데 이들은 각 위어나 오리피스의 흐름 특성이 상위 단계에서 결정되고 분배수로의 끝단인 하류지점에서부터 유량이 수로로 유입하기 시작하는 상류지점까지 점차적으로 계산해 나가는 단계별 계산방법을 고안했다.

먼저 오리피스는 수조 또는 저수지 등의 측면 또는 밑바닥에 설치한 작은 구멍을 말하며, 물이 유출하는 규칙적인 형상의 유출구를 말한다(문형부, 1998; 민병헌 et al., 1997). 수조의 크기와 오리피스의 크기를 비교하여 오리피스의 크기가 그 수면에서 중심까지의 수두 H 에 비해 작으며 따라서 오리피스의 상하점의 수두차가 미소하여 유속이 같다고 볼 수 있을 때이 공구를 작은 오리피스(small orifice)라 부르고, 반면에 수두에 비해 오리피스가 커서 유속을 계산할 때 오리피스 상단에서 하단까지의 수두 변화를 고려해야 하는 오리피스를 큰 오리피스(large orifice)라 한다. 즉 대부분의 정수 처리 공정에서 운전되는 분배수로내에 만들어져 있는 오리피스는 큰 오리피스로 분류될 수 있다. 큰 오리피스의 경우 각 유출구가 되는 오리피스가 수면으로부터 깊이 H 가 되는 지점에 있는 경우, 유출속도는 (v)는 Torricelli의 정리에 의하여 구할 수 있다.

$$v = \sqrt{2gH} \quad (1)$$

여기서, g 는 중력가속도를 의미한다.

식 (1)에서 나타나듯이, 각 오리피스를 빠져나가는 유속 및 유량은 그 상부의 수심에 직접적으로 영향을 받으므로 오리피스 상부의 수심의 제어가 분배수로의 균등분배를 제어할 수 있음을 알 수 있다.

Camp(1961)는 병렬로 나열된 각 공정에 개수로 대신 관수로를 이용하여 균등분배를 도모하려는 다지관 관련 연구에서, 수리학적 특성이 서로 일치하도록 다지관을 설계하는 것은 어려운 작업이지만, 각 공정 수조로 연결된 관로를 각각의 개별적인 관로에 의해 구분 사용한다면 지나치게 많은 비용이 소요될 것이라고 지적하였다. 또한 그는 수로에서 흐름을 균등하게 배분하기 위해서는 각 분지관의 직경이 모두 같다면, 수평방향으로 병렬로 배열된 각 분지관의 손실 수두가 모두 같아야 한다고 역설하였다(문형부, 1998).

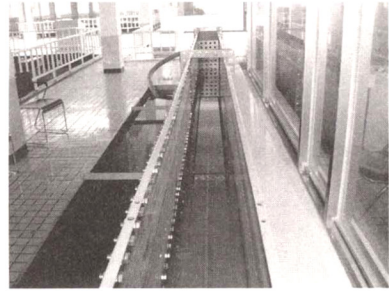
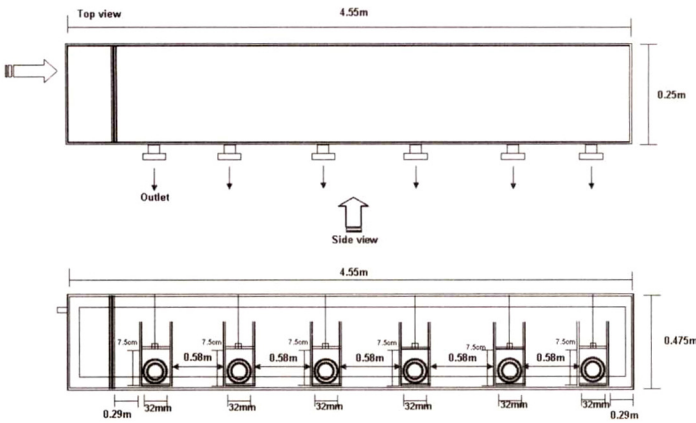
따라서 선행된 Step method(Chao & Trussell, 1984), Torricelli의 정리 및 Camp(1961)의 연구결과를 정리하면 Fig. 1에서 각 오리피스로 나가는 유량은 분배수로 내의 유속(V), 각 오리피스의 단면적(a), 중력 가속도(g), 오리피스 상부의 수두차(H) 및 유량 계수(C_D)로 정리할 수 있다. 이를 수식으로 표현하면, 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_0 = C_D a \sqrt{2gH} \quad (2)$$

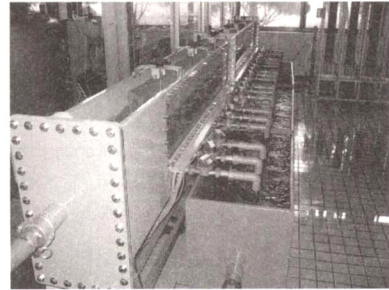
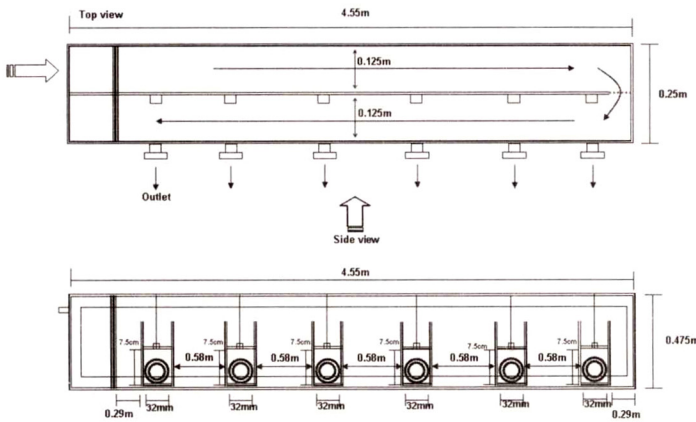
또한 여기서, $H = fV$ 로 나타낼 수 있으므로 상기 언급한 모든 변수에 의해 균등 분배의 효율이 결정됨을 알 수 있다. 또한 Froude 수는 다음 식 (3)과 같이 정의될 수 있다.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gR}} \quad (3)$$

여기서, Fr 은 Froude 수를 의미하며, R 은 동수반경을 의미한다. 통상 정수처리공정에 사용되는 개수로(분배수로, 응집지 및 침전지 등)와 같이 폭과 깊이의 비가 작은 경우 동수반경이 식 (2)의 수두차를 대신한다. 따라서 분배수로의 유황 및 균등분배의 성능에 가장 중요한 영향을 미치는 인자는 Froude 수라고 할 수 있다.



(a) 기존 분배수로를 모의한 pilot 규모의 분배수로



(b) 개선안을 모의한 pilot 규모의 분배수로

Fig. 2. 실규모 분배수로 및 개선안을 모의할 수 있는 pilot 규모의 분배수로.

그러나 Camp가 언급한 것과 같이 실규모의 분배수로를 대상으로 수리구조 개선 없이 식 (2)를 구성하는 어느 한 변수를 조정하면서, 하루 중에 발생하는 유량변동을 완벽하게 대처하면서 각 오리피스로 나가는 유량의 균등분배를 이루기에는 무리가 있다. 이에 본 연구의 companion 논문(수리 개선을 통한 분배수로 균등분배 성능 향상에 관한 연구(I): CFD를 이용한 설계 중심으로)에서는 실규모 분배수로 개선 설계안을 제시하였으며, 본 논문에서는 제시한 pilot 규모의 수리구조 개선 분배수로를 대상으로 식 (2)에서 제시한 각 변수들과의 균등 분배 효율과의 상관성을 분석하고자 하였다.

2. 실험 방법 및 재료

앞서 언급한 바와 같이 균등분배에 영향을 미치는 변수들을 도출하고 각 변수가 미치는 영향을 관측하고자 Pilot 규모의 분배수로를 Fig. 2와 같이 만들어 wet test를 수행하였다. Pilot 규모의 분배수로는 실규모의 분배수로(국내 K_정수장)의 길이를 1/8로 축소시킨 것이며, 실험시 실규모 운전 유황 상태의 Froude 수를 일치시킴으로써 상사조건을 수립하였다. 개선안(b)에서 중간도류벽의 오리피스는 개도물을 조절할 수 있도록 수문형식으로 장착하였다. (b)개선안에서 중간 도류벽의 오리피스는 가로 4cm, 세로

Table 1. 실험 조건

구 분	평균유속 (V, m/sec)	Froude 수	Reynolds 수	분배수로내 수위(m)	비 고	
도류벽 제거시 test1 (기존 모의) test2	0.0359 0.00402	0.376 0.042	2540 292	0.36 0.36	실규모 분배수로와 Froude 수가 비슷	
도류벽 설치시 우회시 (개선안 모의)	test 3(open ratio 0%) test 4(open ratio 26.7%) test 5(open ratio 66.7%) test 6(open ratio 100%) test 7(open ratio 26.7%) test 8(open ratio 66.7%) test 9(open ratio 100%)	0.008 0.008 0.008 0.008 0.0749 0.0739 0.1097	0.010 0.010 0.010 0.010 0.103 0.102 0.151	326 326 326 3056 3030 3040 4503	0.4 0.4 0.4 0.4 0.385 0.38 0.37	총 유입유량 Q = 0.4L/sec 상대적으로 Froude 수가 큰 경우
미우회시	test 10(open ratio 26.7%) test 11(open ratio 66.7%) test 12(open ratio 100%) test 13(open ratio 26.7%) test 14(open ratio 66.7%) test 15(open ratio 100%)	0.008 0.008 0.008 0.692 0.0736 0.0722	0.011 0.011 0.011 0.0957 0.102 0.100	331 331 331 2815 2987 2972	0.4 0.4 0.4 0.362 0.357 0.353	상대적으로 Froude 수가 작은 경우 전단과 후단의 수위 차 3cm* 전단과 후단의 수위 차 1.8cm* 전단과 후단의 수위 차 1.2cm*

*전단과 후단의 수위차는 실험을 수행하면서 나타난 결과이지만 편의를 위해 본 실험방법에 기술하였다.

7.5cm의 형상을 가지며 각각 개도률을 조정할 수 있도록 하였다.

Fig. 2에서 도시한 pilot 규모의 분배수로를 이용하여 다음 Table 1에 제시한 바와 같이 6조건에서 wet test를 수행하였다. 실험조건에서 "우회시"라는 표현은 (b) 개선안 top view에서 우측 중간도류벽을 열어 유입된 상단(평면도에서 윗부분) 흐름의 방향을 180° 회전시켜 하단(물이 선회한 후 오른쪽에서 왼쪽으로 흐르는 부분)으로 흐르게 하는 조건을 언급하는 것이며, "미우회시"라는 표현은 중간도류벽을 연장시켜 상단과 하단의 흐름을 완전히 구분하여 중간 오리피스만을 통해 물이 통과하는 조건을 의미한다. 즉 물을 우회시키는 것과 우회시키지 않는 조건으로 크게 구분하여 실험하였다.

Table 1에서 나타난 바와 같이 크게 실험조건은 5개의 군으로 나눌 수 있다. 첫 번째로 도류벽을 제거한 경우(test 1과 2), 두 번째 도류벽을 설치하고 수류를 우회시키면서 Froude 수를 상대적으로 작게 유지하는 경우(test 3, 4, 5 그리고 6), 세 번째 도류벽을 설치하고 수류를 우회시키면서 Froude 수를 상대적으로 높게 유지하는 경우(test 7, 8 그리고 9), 네 번째

수류를 미우회시키면서 Froude 수를 상대적으로 낮게 유지하는 경우(test 10, 11 그리고 12), 마지막으로 수류를 미우회시키면서 Froude 수를 높게 유지하는 경우(test 13, 14 그리고 15)로 구분하였다. 마지막 실험 조건 군(test 13, 14 그리고 15)에서는 전단과 후단의 수위차가 발생하였는데, 이를 실험결과에 적어야 하나 편의상 실험조건에 기술하였다.

3. 결과 및 토의

다음 Fig. 3은 실험조건 test 1과 2를 대상으로 분배수로 wet test 결과를 도시한 것이다. 균등 분배 측면에서 두 실험조건의 결과를 평가하자면 각각의 6개의 오리피스로 나가는 유량의 표준편차는 test 1의 경우 0.00580L/sec, test 2의 경우 0.0111L/sec로 나타났다. 즉 일정한 폭을 가진 분배수로에서는 운영시 Froude 수를 0.03 이상 유지하는 것이 균등분배를 달성하는 데 효과가 있음을 알 수 있다. 그러나 국내에서 운영하고 있는 대부분의 정수장내 실제 개수로 형태의 분배수로는 가동률이 낮은 이유에서 Froude 수가 0.03 이하로 운전되고 있어 각 오리피스에서 균등

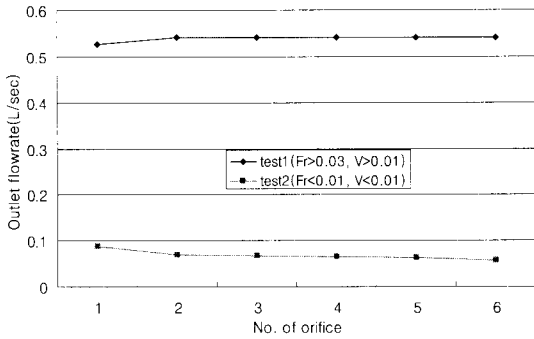


Fig. 3. 도류벽 제거시 Froude 수가 분배수로내의 균등분배 효율에 미치는 영향.

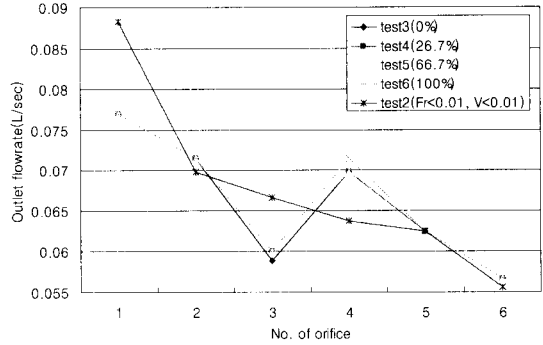


Fig. 4. 도류벽의 유무 및 중간 도류벽의 오리피스 개도률(open ratio)에 따른 분배 경향.

분배를 이루는데에는 무리가 있다.

다음 Fig. 4는 분배수로의 균등분배 성능의 향상을 위해 중간도류벽을 둔 경우(test 3, 4, 5, 및 6)와 도류벽을 제거한 경우(test 2)와의 비교평가를 수행한 결과이다. 각각의 경우 현재 국내 K 정수장에서 운영 중인 분배수로의 Froude 수 조건(격벽이 있는 경우 0.0311, 격벽이 없는 경우 0.0481)과 order 수가 같은 조건으로 실험을 수행한 결과이다. Fig. 4에서 나타나 듯이 도류벽을 설치한 개선시 분배수로가 기존의 분배수로보다 균등분배의 정도가 더 높다고 평가할 수 있다. 이를 정량화하기 위해 각각의 조건에 대해 각 오리피스로 나가는 유량의 표준편차를 Table 2에 정리하였다. Table 2에서 보면, 도류벽이 없는 경우와 있는 경우에 약 30% 정도의 표준편차가 발생함을 알 수 있다. 또한 실험 결과에서 Froude 수가 작은 경우 중간 도류벽에 있는 오리피스의 개도률에 크게 영향을 받지 않음 또한 확인할 수 있었다. Test 2의 결과를 제외하고는 test 3, 4, 5 및 6의 결과에서는 일정한 표준편차가 관측되었다. 이에 실제 운영조건과 유사하게 Froude 수와 평균유속이 낮은 분배수로에서의 오리피스 개도률의 조정은 균등분배의 성능에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

다음 Fig. 5는 우회시 분배수로내의 평균유속과 Froude 수가 상대적으로 큰 경우(Froude 수 > 0.1)의 균등분배 성능을 평가한 것이다. Test 7, 8 및 9조건

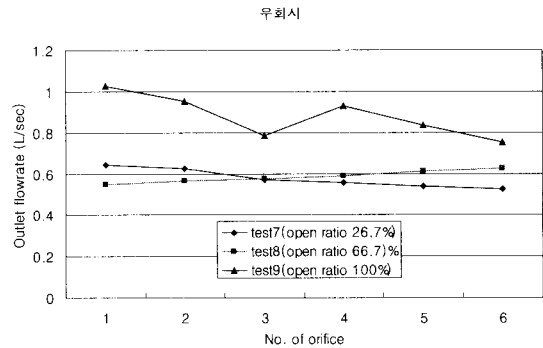


Fig. 5. 우회시 Froude 수가 상대적으로 큰 경우(Froude > 0.1)에서의 균등분배 성능평가.

에서는 분배수로 내부 평균 유속이 수위에 따라 변화함에 따라 Froude 수와 Reynold 수가 조건에 따라 약간씩 변화함을 알 수 있다. Fig. 4의 분배수로내의 Froude 수가 상대적으로 작은 경우와 비교하여 분배수로내 Froude 수가 증가하면 도류벽의 오리피스 개도률(open ratio)이 균등분배 성능에 영향을 미치는 것으로 관측되었다. 물론 실험 분배수로 유향과는 차이가 있지만 개도률이 66.7%일 때 균등 분배의 정도가 가장 높았고 이 조건에서 6개의 오리피스로 나가는 유량의 표준편차는 0.02944L/sec로 나타났으나, 이러한 경우에도 낮은 유속(Froude 수가 실험규모의 분배수로와 order 수가 같은 경우, test 3~6)조건에서의 표준편차보다 크게 나타남을 알 수 있다.

Table 2. Test 2~6조건에서 오리피스로 나가는 유량의 표준편차

조 건	test 2	test 3	test 4	test 5	test 6
각 오리피스로 나가는 유량의 표준편차(L/sec)	0.011	0.0079	0.0077	0.0076	0.0079

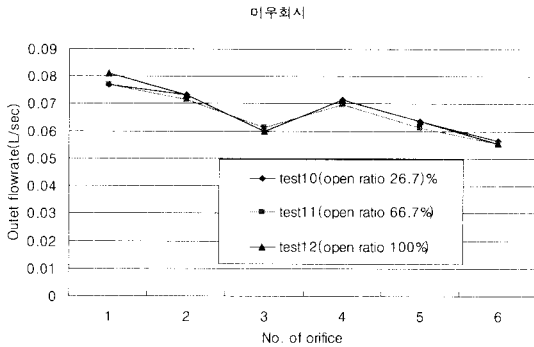


Fig. 6. 미우회시 Froude 수가 상대적으로 작은 경우(Froude 수 ≈ 0.01)에서의 균등분배 성능평가.

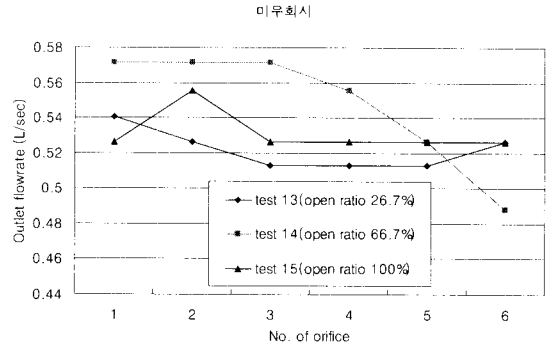


Fig. 7. 미우회시 Froude 수가 상대적으로 높을 경우(Froude 수 ≈ 0.1)에 균등분배 성능 평가.

다음 Fig. 6은 미우회시 분배수로내의 평균유속과 Froude 수가 상대적으로 작은 경우(Froude 수 ≈ 0.01)의 균등분배 성능을 평가한 것이다. Test 10, 11 및 12와 같이 Froude 수가 낮은 경우 수위를 일정하게 유지시킬 수 있었다. 실험 결과를 살펴보면 우회시 상대적으로 Froude 수가 낮은 경우와 마찬가지로 도류벽의 개도물이 균등분배에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 각각의 경우 균등분배의 정도를 6개의 오리피스로 나가는 유량의 표준편차로 도출한 결과(Table 3 참조), 도류벽을 중심으로 우회시키는 경우보다 편차가 크게 나타나 균등분배 성능이 악화되는 것으로 관측되었다. 즉 낮은 Froude 수의 조건에서 분배수로의 균등분배 성능의 향상을 위해서는 흐름을 우회시키는 것이 미우회시보다 유리하다고 결론 내릴 수 있다.

다음 Fig. 7은 미우회시 Froude 수가 상대적으로 높을 경우(Froude 수 ≈ 0.1)에 균등분배 성능을 평가한 것이다. 상기 Fig. 6과는 상이하게 Froude 수가 증가함에 따라 도류벽 오리피스의 개도물이 균등분배의 정도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나

개도물과 오리피스를 통해 나가는 유량의 표준편차 사이에(Table 4 참조) 일정한 관계가 나타나는 것은 아니지만 3번의 반복실험에 의해 같은 경향을 Fig. 7과 같이 나타냈다. 또한 미우회시 Froude 수가 낮은 실험조건(test 10~12) 결과와 비교하였을 때 표준편차가 크게 나타나는 것으로 판단하건데 균등분배의 성능이 Froude 수의 증가에 따라 악화됨을 알 수 있다. 또한 실험방법에서 언급한 바와 같이, 각각의 개도물에 따라 개도물이 감소할수록 전단과 후단의 수위차가 각각 3, 1.8 및 1.2cm로 나타나 실규모 분배수로에 적용시 전 공정인 혼화지로 도수현상이 나타나지 않을까 우려되는 바이다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 K 정수장에서 운영 중인 실규모 분배수로를 상사적으로 모의하는 pilot 규모의 분배수로를 제작하여 수리학적으로 연관된 관련 변수와 균등분배 성능간의 상관성을 실험적으로 관측하였다. 이에 본 연구를 수행하면서 얻은 결론은 다음과 같다.

Table 3. Test 10~12조건에서 오리피스로 나가는 유량의 표준편차

조 건	test 10	test 11	test 12
각 오리피스로 나가는 유량의 표준편차(L/sec)	0.0804	0.007958	0.009426

Table 4. Test 13~15조건에서 오리피스로 나가는 유량의 표준편차

조 건	test 13	test 14	test 15
각 오리피스로 나가는 유량의 표준편차(L/sec)	0.011253	0.034037	0.011962

1) 일정한 폭을 가진 분배수로에서는 운영시 Froude 수를 0.03 이상 유지하는 것이 균등분배를 달성하는 데 효과가 있음을 알 수 있다. 그러나 국내에서 운영하고 있는 대부분의 정수장내 실제 개수로 형태의 분배수로는 가동률이 낮은 이유에서 Froude 수가 0.03 이하로 운전되고 있어 각 오리피스에서 균등분배를 이루는 데에는 무리가 있다.

2) 상기와 같은 기존 동폭 분배수로의 불균등분배 문제점 해결을 위해 오리피스가 설치된 중간 도류벽을 설치한 경우 운영중인 분배수로의 Froude 수 조건과 order 수가 같은 조건으로 실험을 수행한 결과 도류벽을 설치한 개선시 분배수로가 기존의 분배수로보다 균등분배의 정도가 더 높다고 평가할 수 있다. 또한 실제 운영조건과 유사하게 Froude 수와 평균유속이 낮은 분배수로에서의 오리피스 개도률의 조정은 균등분배의 성능에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

3) 우회시 분배수로내의 평균유속과 Froude 수가 상대적으로 큰 경우(Froude 수 > 0.1)의 균등분배 성능을 평가한 결과, 분배수로내의 Froude 수가 상대적으로 작은 경우와 비교하여 분배수로내 Froude 수가 증가하면 도류벽의 오리피스 개도률(open ratio)이 균등분배 성능에 영향을 미치는 것으로 관측되었다.

4) 미우회시 분배수로내의 평균유속과 Froude 수가 상대적으로 작은 경우(Froude 수 \approx 0.01)의 균등분배 성능을 평가한 결과, 우회시 상대적으로 Froude 수가 낮은 경우와 마찬가지로 도류벽의 개도률이 균등분배에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한

낮은 Froude 수의 조건에서 분배수로의 균등분배 성능의 향상을 위해서는 흐름을 우회시키는 것이 미우회시보다 유리하다고 결론 내릴 수 있다.

5) 미우회시 Froude 수가 상대적으로 높을 경우(Froude 수 \approx 0.1)에 균등분배 성능을 평가한 결과, 도류벽 오리피스의 개도률이 균등분배의 정도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한, 미우회시 Froude 수가 낮은 실험조건(test 10~12) 결과와 비교하였을 때 표준편차가 크게 나타나는 것으로 판단하건데 균등분배의 성능이 Froude 수의 증가에 따라 악화됨을 알 수 있다.

사 사

본 연구는 한국수자원공사 "2007년 상반기 6-시그마 과제"의 연구 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 문형부 (1998) *최신 환경 수리학*, 서울, 동화기술.
2. 민병현, 한재석, 김성홍 (1997) *환경수리학*, 서울, 동화기술.
3. Chao, J.L. and Trussell, R.R. (1980) Hydraulic Design of Flow Distribution Channels. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, **106**, pp. 321-333.
4. 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.