

## 수리구조 개선을 통한 분배수로 균등분배 성능 향상에 관한 연구(I): CFD를 이용한 설계 중심으로

### The Remodelling of Hydraulic Structure in a Distribution Channel for Improving the Equality of the Flow Distribution (I): Design Using CFD Simulation

박노석\* · 김성수 · 박종윤 · 윤철환 · 김충환

No-Suk Park\* · Seong-Su Kim · Jong-Yoon Park · Cheol-Hwan Yoon · Chung-Hwan Kim

한국수자원공사

(2007년 7월 12일 논문 접수; 2007년 10월 2일 최종 수정논문 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 full-scale water treatment plant, and 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 wet tests were carried out for the pilot scale channel based on geometric similarity. From the results of CFD simulation and wet 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. Also, in the case that Froude number is relatively small (Froude number  $\ll 0.03$ ), the open ratio of orifices on the installed baffle hardly affects the equality of flow distribution.

**Key words:** distribution channel, the equality of the flow distribution, computational fluid dynamics, Froude number

**주제어:** 분배수로, 분배의 균등성, 전산유체역학, Froude 수

#### 1. 서 론

정수처리에서 분배수로로부터 응집공정으로의 유량 분배는 플록의 성장 거동 및 응집·침전 효율에 큰 영향을 미치는 주요 설계 요소 중의 하나이다. 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). 유량이 적게 유입되는 지에서는 지내 유속이 느려지고 체류시간이 길어지게 되어 슬

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

러지 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.

기존 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.

Fig. 1은 균등한 폭을 가진 분배수로의 평면 형상과 유형의 Froude 수가 작을 경우 거리별로 나타나는 수두손실을 도시한 것이다(민병헌 외, 1997). 수로내의 평균유속과 Froude 수가 작은 경우 유입된 유체가 개수로를 흐르면서 벽면 마찰 손실 등으로 끝단으로 갈수록 유출 유량이 작아진다. 반면 수로내 평균유속과 Froude 수가 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.

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 상류 방향으로 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 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 조정을 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).

이에 본 연구에서는 국내 K\_정수장 분배수로를 대상으로 현재 나타나는 문제점(분배수로내의 평균유속저하로 인한 플록의 침전, 유량 분배의 불균등성)을 정량화하고 이러한 문제점을 해결할 수 있는 수리구조 개선안을 도출하였다. 수리구조 개선안의 타당성 평가를 위하여 기존의 분배수로와 구조가 개선된 분배수를 대상으로 CFD(Computational Fluid Dynamics) 모사를 선행한 후 이를 검증하기 위하여 1/8로 축소된 pilot 규모의 wet test를 수행하였다.

## 2. 이론적 배경 및 설계

다음 Fig. 2는 Fig. 1과 같이 균등한 폭을 가진 분배수로에서 발생하는 불균등 분배와 평균 유속의 저하에 따른 분배수로내 플록의 침전문제를 해결하기 위해

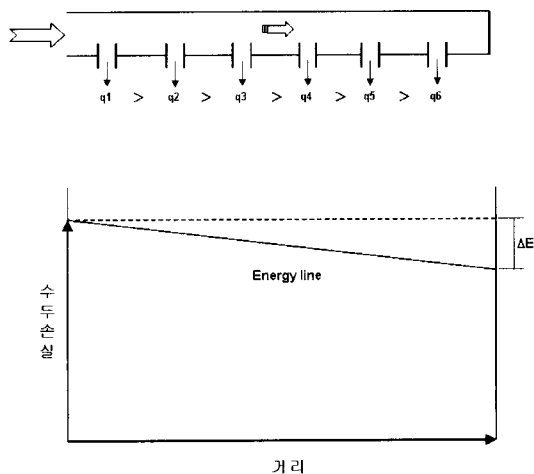


Fig. 1. 균등한 폭을 가진 분배수로(평면도)와 Froude 수가 작을 경우 거리별 발생하는 수두손실.

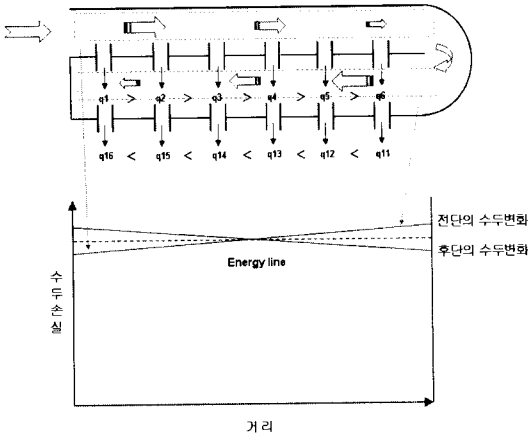
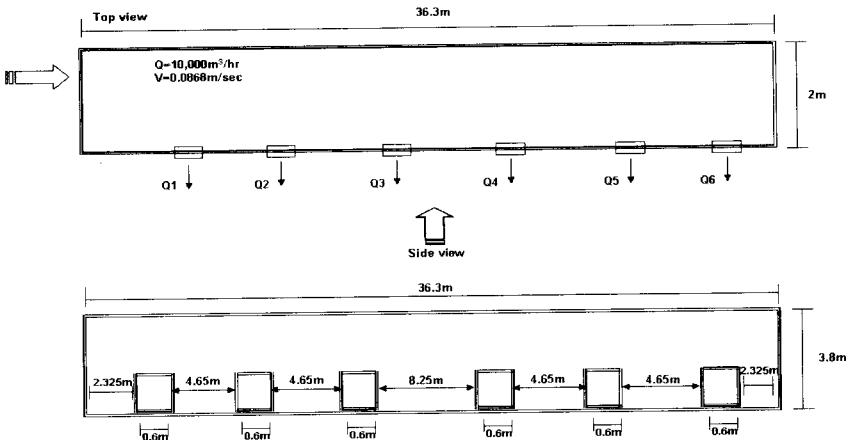
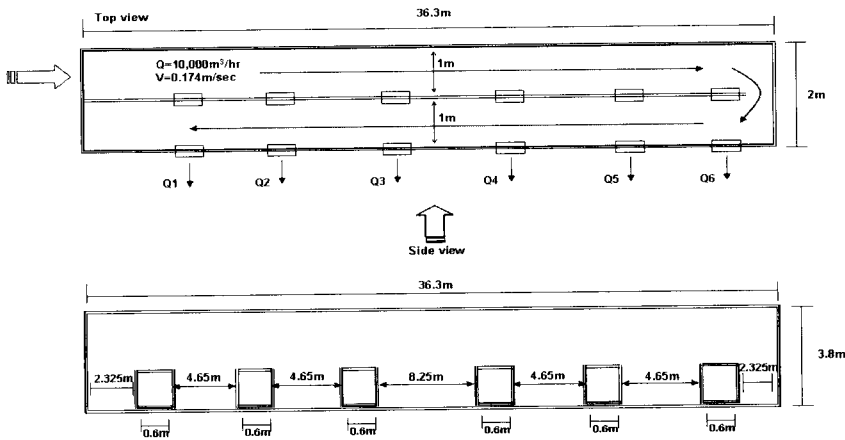


Fig. 2. 수리구조를 개선한 분배수로의 수두손실 양상.

본 연구에서 제안하는 수리구조 개선의 개념도이다. 기존 분배수로의 중간에 오리피스가 있는 도류벽을 둬으로써 유입부에서 말단으로 다시 말단에서 유입부 쪽으로 물을 선회시키는 것이 본 제안의 기본 개념이다. 중간 도류벽을 둬으로써 전단(유입부에서 말단으로 가는 흐름)에서는 왼쪽이 오른쪽보다 수위가 높고 후단(선회후 말단에서 유입부로 가는 흐름)에서는 오른쪽이 왼쪽보다 수위가 높아지므로 전단과 후단 사이에 오리피스를 통해 물이 통과하면서 일정한 수위가 유지되는 것이다. 또한 Fig. 1과 Fig. 2를 비교할 때 총 이론적 체류시간은 동일하나 Fig. 1의 경우에는 통수 단면이 크기 때문에 평균유속이 느리지만, Fig. 2의 경우 통수단면이 반으로 축소되어 비교적 빠른 유

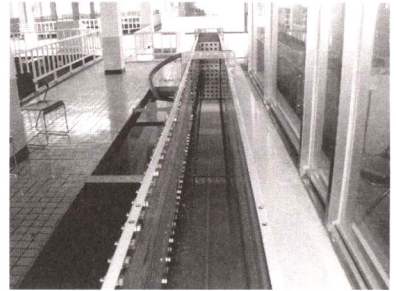
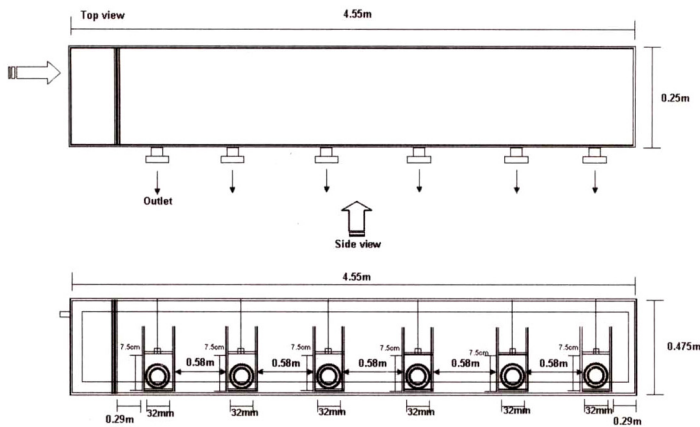


(a) 국내 K\_정수장 기존 분배수로(설계유량: 10,000m³/일, 평균유속 0.0868m/sec)

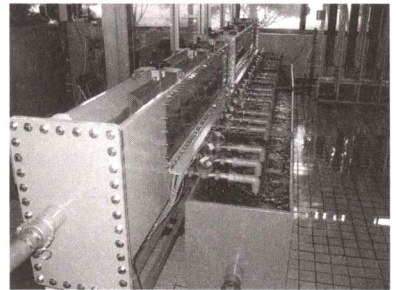
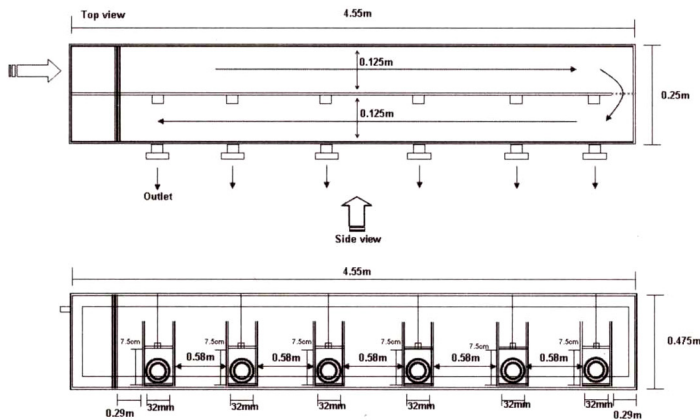


(b) 분배수로내 격벽을 둔 개선안(설계유량: 10,000m³/일, 평균유속: 0.174m/sec)

Fig. 3. 국내 K\_정수장 분배수로 및 개선안.



(a) 기존 분배수로를 모의한 pilot 규모의 분배수로



(b) 개선안을 모의한 pilot 규모의 분배수로

Fig. 4. 실규모 분배수로 및 개선안을 모의할 수 있는 pilot 규모의 분배수로.

속을 유지할 수 있어 플록의 분배수로내 침전을 감소시킬 수 있다.

다음 Fig. 3은 국내 K\_정수장내 운영중인 기존 분배수로와 위에서 언급한 개념을 토대로 설계한 수리구조개선안을 도시한 것이다. (a) 기존 분배수로의 Froude 수는 0.0311이고 (b) 수리구조개선시 분배수로의 Froude 수는 0.0489로 계산되었다.

실규모의 분배수로(기존(a) 및 개선안(b))를 대상으로 각각 균등분배 성능을 평가하기 위해 CFD 모사를 수행하였다. 그리고 이러한 CFD 모사 결과를 검증하고 최적 설계안을 도출하기 위해 실규모의 분배수로를 모의할 수 있는 Pilot 규모의 분배수로를 Fig. 4와 같이 만들어 wet test를 수행하였다. Pilot 규모의

분배수로는 실규모의 분배수로의 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.

### 3. CFD 모사

Fig. 3에 도시한 실규모 기존 분배수로와 개선안을 대상으로 CFD 모사를 수행하여 각각의 경우 유량분배의 균등성을 평가하고자 하였다. CFD는 수작업으로 해석이 불가능한 복잡한 구조물내의 유동장 해석을 FDM(Finite Difference Method)기법을 이용하여

작은 셀로 분할하여 각각의 경계조건을 두어 해를 구해내는 방법으로 본 연구에서는 분배수로내의 수리거동을 평가하기 위해 상용 전산유체 프로그램인 CFX 10.0을 사용하였다.

### 3.1. 지배방정식

유입수가 분배수로로 유입되어 6개의 유출구(오리피스)를 통해 유출되는 과정에서 유체의 물리적인 성질의 변화는 아래 연속방정식과 운동량 방정식 등의 지배방정식에 의해 설명될 수 있다.

본 모델링에서 사용되는 기본적인 식은 아래의 두 식이다.

연속방정식

$$\nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \tag{1}$$

모멘텀 방정식(Navier-Stokes Equation)

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \vec{V} + F \tag{2}$$

여기서,  $\rho$ 는 밀도,  $\vec{V}$ 는 속도(각 방향 속도성분),  $t$ 는 시간,  $P$ 는 압력 그리고  $\nu$ 는 동점성계수를 나타낸다.

### 3.2. 난류모델링

일반적으로 난류상황에서 모멘텀의 전달을 모델링하기 위해서는 k-ε 모델이 대부분 사용되며, 본 연구에서는 난류 에너지가 등방성으로 전달됨을 가정하고 standard k-ε 모델을 사용하였다.

### 3.3. 경계조건

본 연구에서는 분배수로의 자유수면은 평면적이며

마찰이 없다고 가정하였다. 그 이유는 공기와 접촉하고 있는 자유수면에서의 마찰력은 무시할 정도로 작기 때문이다. 그리고 측벽면과 바닥면 그리고 중간도류벽(개선시)의 표면은 No-slip condition을 적용하였고, 잘알려진 Prandtl 이론에 의해 유체의 전선에 의한 표면 박리현상이 발생한다는 가정을 적용하였다 (Currie, 1993).

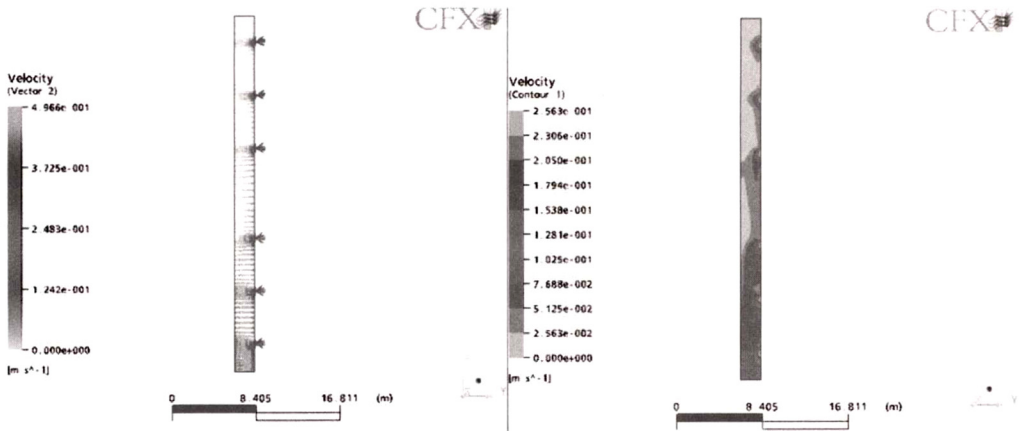
## 4. 실험 방법

Fig. 4에서 도시한 pilot 규모의 분배수로를 이용하여 다음 Table 1에 제시한 바와 같이 6조건에서 wet test를 수행하였다.

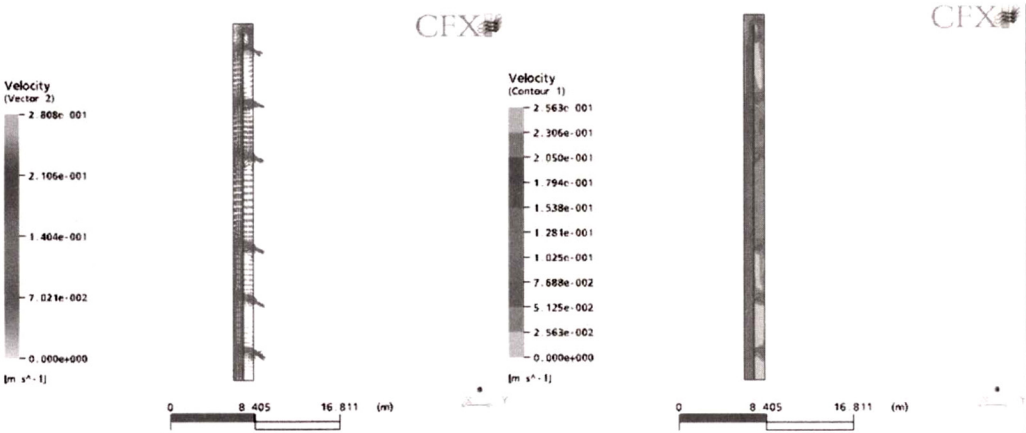
Table 1에서 제시한 조건 중 test 2의 경우 Froude 수가 0.042로 계산되어졌는데 이는 본 연구의 대상인 K\_정수장 실규모 분배수로의 Froude 수(0.0311)와 비슷한 조건임을 알 수 있다. 이에 반해 test1 실험을 수행한 것은 분배수로내의 Froude 수가 상대적으로 큰 경우, 각 유출구로 나가는 분배유량에 미치는 영향을 조사하기 위함이다. 개선안을 모의하는 test 3, 4, 5 및 6에서는 중간 도류벽에 설치된 6개 오리피스의 개도률(open ratio)를 일률적으로 0%(완전 폐쇄), 26.7%, 66.7% 및 100%로 조정하여 조건을 수행하였다. Pilot 규모의 분배수로에서 각 오리피스는 가로 4cm, 세로 7.5cm의 형상을 가지며 각각 개도률을 조정할 수 있도록 하였다. 도류벽을 설치하는 경우 동수반경(perimeter)이 증가하여 Froude 수가 약간 감소하는 경향을 가진다.

Table 1. 실험 조건

구 분	평균유속 (V, m/sec)	Froude 수	Reynolds 수	분배수로내 수위 (m)	비 고
도류벽 제거시 test 1	0.0359	0.376	2540	0.36	
(기준 모의) test 2	0.00402	0.042	292	0.36	실규모 분배수로와 Froude 수가 비슷
도류벽 설치시 test3(open ratio 0%)	0.008	0.010	326	0.4	총 유입유량
(개선안 모의) test4(open ratio 26.7%)	0.008	0.010	326	0.4	Q = 0.4L/sec
test5(open ratio 66.7%)	0.008	0.010	326	0.4	
test6(open ratio 100%)	0.008	0.010	326	0.4	



(a) 기존 분배수로 CFD 모사결과



(b) 개선안 CFD 모사결과

Fig. 5. 기존 분배수로와 개선안의 분배수로 (평면도(바닥에서 0.4m되는 평면), 유입구는 하단).

## 5. 결과 및 토의

### 5.1. CFD 모사 결과

다음 Fig. 5는 Fig. 3에서 도시한 실규모 분배수로를 대상으로 기존 분배수로와 분배수로내 격벽을 둔 개선안에 대해 CFD로 모사한 결과이다.

Fig. 5에서 나타나듯이, (a) 기존 분배수로의 모사 결과에서는 아래의 유입측에서 멀어질수록 오리피스를 통해 나가는 유속이 감소함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 vector 뿐만 아니라 contour로 속도장을 나타낸 오른쪽 그림에서 더 정확히 나타나고 있다. 반면에, (b) 개선안의 모사결과에서는 (a)와 비교하여

분배수로내 전체적인 속도장이 상대적으로 균등한 것으로 관측되고 있다. 특히 (a)와 (b)의 각각의 오른쪽 그림을 비교할 경우, 상대적으로 낮은 유속을 나타내는 노란색과 높은 유속을 나타내는 빨간색의 유속분포의 정도를 볼 때 (a)에 비해 (b)가 훨씬 더 노란색의 분포 비율이 낮은 것을 확인할 수 있다.

다음 Fig. 6은 개선안의 CFD 모사결과를 압력의 분포로 나타낸 것이다. 개수로상에서 오리피스를 통과하는 유속은 통상  $\sqrt{g \cdot \Delta h}$  ( $g$ : 중력가속도,  $\Delta h$ : 수두차)로 표현됨을 감안할 때 분배수로내의 압력의 분포는 오리피스를 통과하는 유속 및 유량을 정확히 예측하는 간접지표가 될 수 있다. 개선 시 분배수로내 압력은 상당히 균등하게 분포하는 것으로 나타났으나,

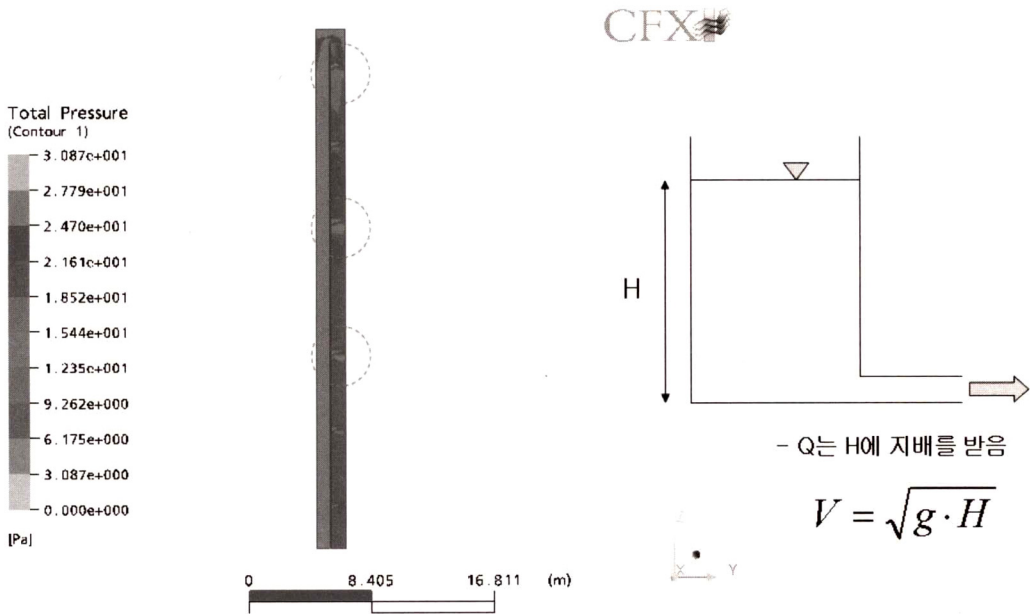
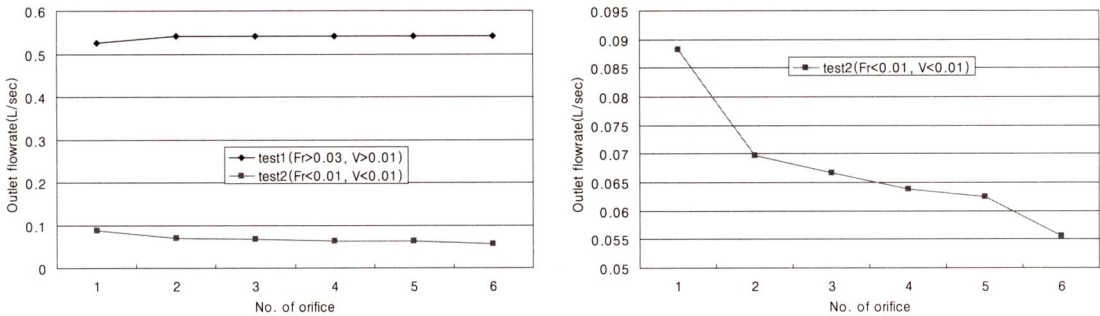


Fig. 6. 개선시 분배수로내의 압력분포.



(a) 기존 분배수로에서 Froude 수가 큰 경우(test 1조건)와 작은 경우(test 2조건)의 실험 결과

(b) test 2의 실험결과

Fig. 7. 기존 분배수로 균등분배 경향.

유입구측에서 가장 먼 6번 오리피스와 중간에 있는 3 및 4번 오리피스에서 그 압력이 상대적으로 낮음이 관측되었다 (빨간 동그라미로 표시). 이와 같은 예상 결과는 wet test로 모사결과를 검증하고자 하였다.

5.2. Wet test 결과

다음 Fig. 7은 실험용 기존 분배수로를 모의한 pilot 규모의 분배수로를 대상으로 test 1과 test 2의 조건에서 실험한 결과를 나타낸 것이다. (a)는 Froude 수가 큰 경우와 작은 경우를 상호 비교한 것이고 (b)는 그 중 실험용 기존 분배수로 운영조건(Froude 수의 상사

성 고려)과 상대적으로 더 유사한 test 2 조건의 결과를 y축의 scale을 조정하여 나타낸 것이다.

Fig. 7(a)에서 나타나듯이, 앞서 이론적 배경에서 예측한 결과대로, Froude 수와 평균유속이 큰 경우(test 1조건)에는 유입구 측에서 멀수록 각 오리피스로부터 유출되는 유량이 증가하는 양상을 보이는 반면에 Froude 수와 평균 유속이 상대적으로 작은 경우에는 유입구 측에서 멀수록 각 오리피스로부터 유출되는 유량이 감소하는 경향을 보이고 있다. 실제 K\_정수장 운영조건과 비교한다면 test 2의 조건에서 실제 Froude 수가 상호 비슷하므로 test 2 실험결과에서

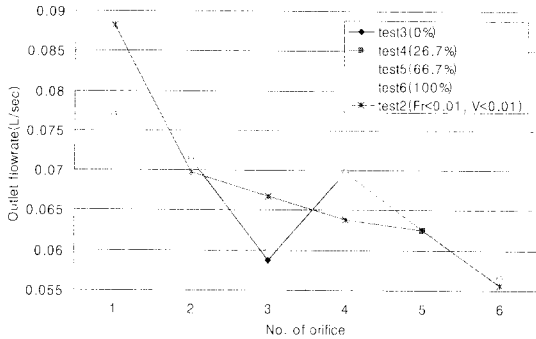


Fig. 8.

y축(각 오리피스에서 나가는 유출량)의 스케일을 조정하여 경향을 쉽게 판독할 수 있도록 조정한 후 관측해본 결과(Fig. 7(b)), 각 오리피스로 나가는 유량의 표준편차가 0.011L/sec로 계산되어진다.

다음 Fig. 8은 기존 분배수로(test 2조건)와 중간 도류벽을 설치한 개선시 분배수로(test 3, 4, 5 및 6)의 균등분배 정도를 평가한 실험 결과이다. Fig. 8에서 나타나듯이 도류벽을 설치한 개선시 분배수소가 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 역 30% 정도의 표준편차가 발생함을 알 수 있다. 또한 실험 결과에서 Froude 수가 작은 경우 중간 도류벽에 있는 오리피스의 개도물에 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 개도물의 조정은 균등분배의 성능에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

중간 도류벽이 설치된 test 3~6의 결과에서 동일하게 3번과 6번 오리피스에서 유출유량이 작음을 실험으로 확인하였는데 이는 CFD 모사결과 Fig. 6에서 언급하였던 분배수로내의 압력 분포에서 3, 4번 그리고 6번 오리피스 전단에서 압력의 저하가 모사된 것

과 일치하는 경향을 보이고 있다. 그러나 CFD 모사 결과에서 4번 오리피스 통과 유량의 저하가 예상되었는데 실험에서는 나타나지 않았다. 이러한 오차의 원인은 유체의 물리적 특성(온도 및 이물질 함유여부), 벽면 및 바닥의 상대조도의 정확한 정량화가 수반되지 않은 것에 기인하리라 판단된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 국내 K\_정수장 분배수로를 대상으로 현재 나타나는 문제점을 정량화하고 이러한 문제점을 해결할 수 있는 수리구조 개선안을 도출하였다. 수리구조 개선안의 타당성 평가를 위하여 기존의 분배수로와 구조가 개선된 분배수로를 대상으로 CFD(Computational Fluid Dynamics) 모사를 수행한 후 이를 검증하기 위하여 1/8로 축소된 pilot 규모의 wet test를 수행하였으며, 본 연구를 수행하면서 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 기존 분배수로내 오리피스가 있는 도류벽을 설치하여 수평 흐름을 우회시킴으로써 균등분배의 성능을 향상시킬 수 있다. 이는 현재 운영 중인 정수장내 분배수로의 Froude 수가 상대적으로 작아서 유입구측에서 멀어질수록 수위가 낮아져 오리피스를 통해서 응집지로 유입되는 유량이 감소하기 때문이다. 또한 Froude 수( $\ll 0.03$ )가 작은 경우에는 격벽에 설치된 오리피스의 개도물이 균등분배 성능에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있었다.

2) 중간 도류벽을 두는 개선안은 균등분배의 성능을 향상시킬 뿐만 아니라 총 체류시간은 동일하지만 지내의 유속이 2배로 증가하여 분배수로내에서 발생하는 플록의 침전 현상도 감소할 것으로 기대한다. 현재 K\_정수장의 경우 Froude 수는 0.0311, Reynolds 수는 약 3,000이 됨에 따라 분배수로내 플록의 침전이 바닥면의 혐기화 및 스킴의 발생 등을 발생시키고 있다. 이에 분배수로내 수평유속의 향상은 이와 같은 문제의 저감을 가져올 것이다.

Table 2. wet test 결과 정리

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



3) 본 연구에서 제시한 기존 분배수로의 개선안은 다소 개념적이고 실험적이라 수 있다. 아직 한 번도 실규모의 정수장에 적용된 적이 없으므로 그 적용상의 문제점 및 최적화를 언급할 단계는 아닌 것이 사실이다. 이에 본 논문에서는 그 개념과 적용원리 그리고 타당성을 위한 CFD 모사와 모사결과를 검증할 wet test를 언급한 것이며 본 논문과 companion이 되는 논문에서 실험 결과 위주의 최적화 방안의 제시를 언급하고자 한다.

### 사 사

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

### 참고문헌

1. 민병현, 한재석, 김성홍 (1997) 환경수리학, 동화기술

2. 백홍기 (2003) 3-D 전산유체 해석을 이용한 응집지 분배수로 유동장 연구. 박사학위 논문. 한국과학기술원

3. 한국수자원공사 (2000) 성남권 관리단 기술진단 보고서, pp. 53-105.

4. 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-*, 54(6), pp. 349-354.

5. Chao, J.L and Trussel, R.R. (1980) Hydraulic Design of Flow Distribution Channels. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 106, pp. 321-333.

6. 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.

7. Herbert, E.H. Jr. (1981) *Water Clarification Processes Practical Design and Evaluation*, Van Nostrand Inc., pp. 258-275.

8. Currie, I.G. (1993) *Fundamental Mechanics of Fluids*, McGraw-Hill, New York.