Journal of the Korean Society of Water and Wastewater
Vol. 18, No. 4, pp. 500-507, 2004

상하수도학회지, 논문
18권 4호, pp. 500-507, 2004

전산유체역학을 이용한 응집지 분배수로의 흐름 해석에 관한 연구

Examining Three-Dimensional Flow Characteristics in the Distribution Channel to the Flocculation Basin using CFD

박노석[1,*] · 백흥기[1] · 김정현[1] · 민진희[1] · 신항식[2]

Park, No-Suk[1,*] · Beak, Heung-Ki[1] · Kim, Jeong-Hyun[1] · Min, Jin-Hui[1] · Shin Hang-Sik[2]

1 한국수자원공사
2 한국과학기술원 건설 및 환경공학과

(2004년 6월 21일 접수 ; 2004년 7월 29일 최종수정논문채택)

Abstract

This study was conducted to evaluate the equity of the flow distribution from rapid mixing basin to the flocculation basins. Also, several types of inlet structures of the open channel affecting the flow pattern and distribution trend were studied using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. For investigating the factual phenomena in distribution channel, we selected a certain domestic water treatment plant with capacity of 361,000m^3/d. From the measurements of flow discharge, it is investigated that this existing inlet geometry resulted in significant inequitable distribution. The both largest deviations in the basins and rows were over 10%. In order to reduce the these deviation, this study suggested installing a baffle against the influent, and showed the effectiveness which the largest deviation was less than 3%. Also, it was concluded that the existing design method of open channel could be improved by three-dimensional hydrodynamic analysis for optimizing the even flow.

Key words: Equitable distribution, distribution channel, CFD simulation, standard deviation
주제어: 균등 분배, 분배 수로, 전산유체역학 모사, 표준 편차

1. 서 론

정수처리에서 분배수로로부터 응집지로의 유량 분배는 플록의 성장 거동 및 응집 · 침전효율에 큰 영향을 미치는 주요 설계요소 중의 하나이다. 만일 분배수로에서 응집지로의 유입 유량이 균등하지 못할 경우, 병렬 설치된 각 응집지의 체류시간이 상이할 뿐만 아니라 응집지와 일체로 설치되는 침전지의 체류시간에도 영향을 미치게 된다. 유량이 적게 유입되는 지에서는 지내 유속이 느려지고 체류 시간이 길어지게 되어 슬러지 퇴적 등이 발생할 수 있으며, 반면 유

*Corresponding author Tel: +82-42-860-0390, FAX : +82-42-860-0399, E-mail: nspark@kowaco.or.kr (Park, N.S.)

상하수도학회지, 논문
18권 4호, pp. 500-507, 2004

량이 많이 유입되는 지는 통과 유속이 빨라져 체류시간이 단축됨으로써 플럭의 파괴 또는 침전 슬러지의 재부상 등을 유발 시킬 수 있다.

분배수로 설계 시에는 기본적으로 유입부 구조, 수로의 단면 형상 및 길이, 유출부 구조의 크기와 형상 등 다양한 설계 인자들이 고려되어야 한다. 그러나 실제 분배수로내의 복잡한 유동 현상을 정확히 파악하기는 매우 어렵기 때문에 최근까지도 분배수로 설계는 기본적인 유체역학 이론과 경험에 의한 자료를 토대로 이루어지고 있는 실정이다. 대부분의 수리 구조물은 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 발생될 수 있다(백홍기, 2003).

이와 같이 분배수로 내 유동해석 방법의 차이에 의한 유량 불균등 발생이외에 이론적 모델에서의 가정조건과 실제 설계구조상의 상이에서 초래되는 문제점도 있다. 현재까지 일반적으로 분배수로의 설계에 있어서는 Chao와 Trussel이 제안한 Correction Step Method를 널리 사용하고 있으며(Chao & Trussel, 1980), 이 방법은 각 위어 및 오리피스에서의 흐름 특성을 하류에서 흐름이 개수로로 유입되는 상류방향으로 분배수로의 폭을 확대시킴으로써 제어하는 방안으로, 폭의 확대에 따라 발생하는 수위 저하는 Froud Number를 충분히 작게 하여 모든 위어의 유량계수가 거의 동일하게 유지될 수 있도록 하는 방안이다. 이들은 이후에도 분배수로에서의 불균등 분배를 최소화하기 위하여 위어 수위 변화 방법(changing the weir elevation), 수로폭 체감방안(tapering channel 수정방안을 제안하였다(Larry et al., 1984). 이 같은 수정안들은 대부분 수로내 Froude Number의 유지와 수로폭 변화에 따른 수위 조정을 목적으로 제안되었다. 그러나 상기와 같은 step method를 통해 설계된 대부분의 분배수로에서 만족할 만한 수량의 균등 분배가 이루어지지 않고 있으며, 이러한 불균등 분배는 응집지 이하 침전지의 효율에 악영향을 미치는 것으로 보고되어지고 있다(Herbert, 1981; 한국수자원공사, 2000).

기존의 해석적인 방법만으로 분배수로에서의 흐름 거동을 해석하여 설계하는 데에는 한계가 있음에 수치해석적인 방법의 도입이 절실히 요구되고 있는바 본 연구에서는 최근 수치해석기법과 컴퓨터 기술이 조합된 전사유체역학(CFD; Computational Fluid Dynamics)을 이용하여 분배수로내 유량분배의 불균등의 원인을 파악하고 이를 저감할 수 있는 방안을 제시하고자한다. 본 연구를 위해서는 경기도 S_정수장 분배수로를 선택하였으며, CFD 모사결과를 검증하기 위해서 ADV(Acoustic Doppler Velocimetry)을 사용하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 시설용량 361,000m³/일의 경기도 S 정수장을 실규모의 대상 정수장으로 선정하였다. 다음 **Fig. 1**은 분배수로 및 응집지 구조의 평면도로서, 실제 총 응집지 수는 8지로 구성되어 있고, 각 지는 3열×3단의 9개 격실로 구획되어 있으나, 4지씩 좌·우대칭으로 설치되어 있어 제반 수리구조가 동일함을 고려하여 본 실험에서는 우측 부의 분배수로 및 응집지(No. 1~4지)만을 대상으로 하였다.

급속 혼화조로부터의 유출수는 전체 응집지 중앙부로 유입된 후 좌·우 분배수로를 통과하면서 각 응집지 유입부에 수위가 동일하게 설치되어 있는 지 당 3개의 밸브를 통해 응집지로 유입된다. 분배수로의 길이는 72m의 사각형 단면 구조이며, 유입구 쪽의 상류로부터 하류로 갈수록 폭이 감소하는 점감식 수로형태(tapered channel)이다.

상기 분배수로 수리구조 및 유입 장치의 조건하에서 각 응집지 별 유량 분배 오차 확인 및 CFD 해석결과의 검증을 위하여 분배수로 내 유속 분포와 유입량을 실측하였다. 유량 측정은 처리 수량 7,900m³/hr 및 응집지 각 유입밸브를 완전히 열어 놓은 상태에서 실시되었다. 측정 지점은 분배수로내 각 응집지 유입부 지점에서 유속을 측정하여 수로 전반적인 유속분포를 측정하였으며(**Fig. 1** 참조) 각 응집지 단별 도류벽 유출부와 침전지 유출 트라프에서 유속 및 유수단면적을 측정하여 응집지별 유입유량을 산정하였다. 본 측정에 사용된 유속계는 ADV(Acoustic Doppler Velocimetry)로서, 측정 대상지점의 x, y 그리고 z방

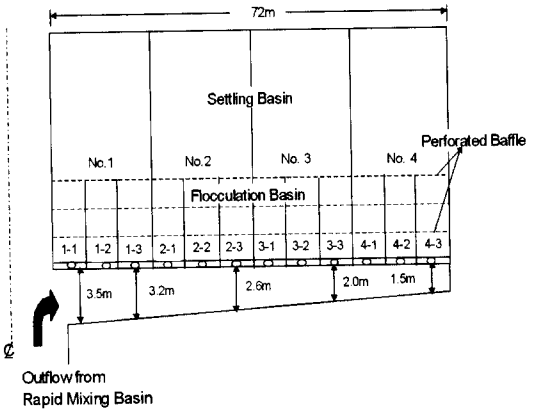


Fig. 1. Lay-out of distribution channel and flocculation basin.

Table 1. Features of Acoustic Doppler Velocimetry

Acoustic Frequency	10MHz
Velocity Range	0.002 - 0.1m/s
Velocity Resolution	0.1mm/s
Velocity Bias	±0.5%
Operating Temperature	Probe 0 - 40
Maximum Depth	Up to 60m

향의 유속을 5분간 400회 측정한 후 각각의 평균값에 대한 벡터의 합으로 최종 유속을 산출하였다. 사용한 ADV의 세부 제원은 다음 **Table 1**과 같다.

3. 전산유체해석기법

CFD는 수작업으로 해석이 불가능한 복잡한 구조물내의 유동장 해석을 FDM(Finite Differential Method)기법을 이용하여 작은 셀로 분할하여 각각의 경계조건을 두어 해를 구해내는 방법으로 본 연구에서는 분배수로에서 응집지로의 흐름거동을 해석하기 위해 상용 전산유체 프로그램인 Flow-3D를 사용하였다(박노석 등, 2000; Sicilian et al., 1987).

3.1 지배방정식

분배수로의 수치해석을 위한 일반 지배방정식은 일반 종속변수 Φ에 대해 다음과 같은 표준형으로 나타내어진다(Suhas, 1980; Versteeg & Malalasekera, 1995).

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho V)=-\nabla\cdot(\Gamma_\Phi\nabla_\Phi)+S_\Phi \qquad \text{식(1)}$$

식 (1)에서 첫 번째 항은 물리량의 시간적 변화를 나타내며 두 번째 항은 유동 항, 세 번째 항은 단위체적당 표면적을 통해 유입되는 양을 그리고 네 번째 항은 생성 · 소멸을 나타낸다. Φ는 단위 질량당의 물리량으로 세 방향 속도성분 u, v, 그리고 w, 난류 에너지 k, 및 k의 소산률인 ε 등이 해당되며 Γ_Φ와 S_Φ는 각각 난류확산계수 및 생성항을 나타낸다.

3.2 난류 모델링

일반적으로 난류 상황에서 모멘텀의 전달을 모델링하기 위해서는 k-ε 모델이 대부분 사용되며(일본기계학회, 1991), 본 연구에서는 난류가 등방성 방향으로 분포된다고 가정하는 Standard k-ε 모델의 발전형태인 RNG k-ε 모델을 사용하였다(Suhas, 1980; Sicilian et al., 1987).

3.3 경계 조건

본 연구에서는 분배수로 자유수면은 평면적이며 마찰이 없다고 가정하였다. 그 이유는 공기와 접촉하고 있는 자유 수면에서의 마찰력은 무시할 정도로 작기 때문이다. 그리고 측벽면과 바닥면은 No-Slip Condition을 적용하고, 잘 알려진 Prandtle 이론에 의해 유체의 점성에 의한 표면 박리현상이 발생한다는 가정을 적용하였다(Currie, 1993).

4. 결과 및 고찰

4.1. 중앙유입방식 분배수로 CFD 해석결과

다음 **Fig. 2**에서는 각 응집지로 분배되는 흐름 거동 모사 결과를 지별 및 열별로 나타낸 것이다. 분배수로 유입부에서 가장 근거리에 위치한 No. 1지로의 분배 유량은 57,500m^3/일로 산출되었으며 이 값은 전체 분배수로에 유입되는 양의 31.9%에 해당하는 값이다. 반면에 유입유량이 가장 작은 지는 No. 2지인데 분배 유량은 39,000m^3/일이며 그 비는 21.8%로 나타났다. 나머지 No. 3과 4지의 분배 유량 비는 각각 22.7%와 23.6%로 산출되었다. No. 1의 분배유량은 각지로 분배되는 유량의 평균(Q25% = 45,100m^3/일)의 1.27배이며, No. 2지로 분배되는 유량의 1.46배가

상하수도학회지. 논문
18권 4호, pp. 500-507, 2004

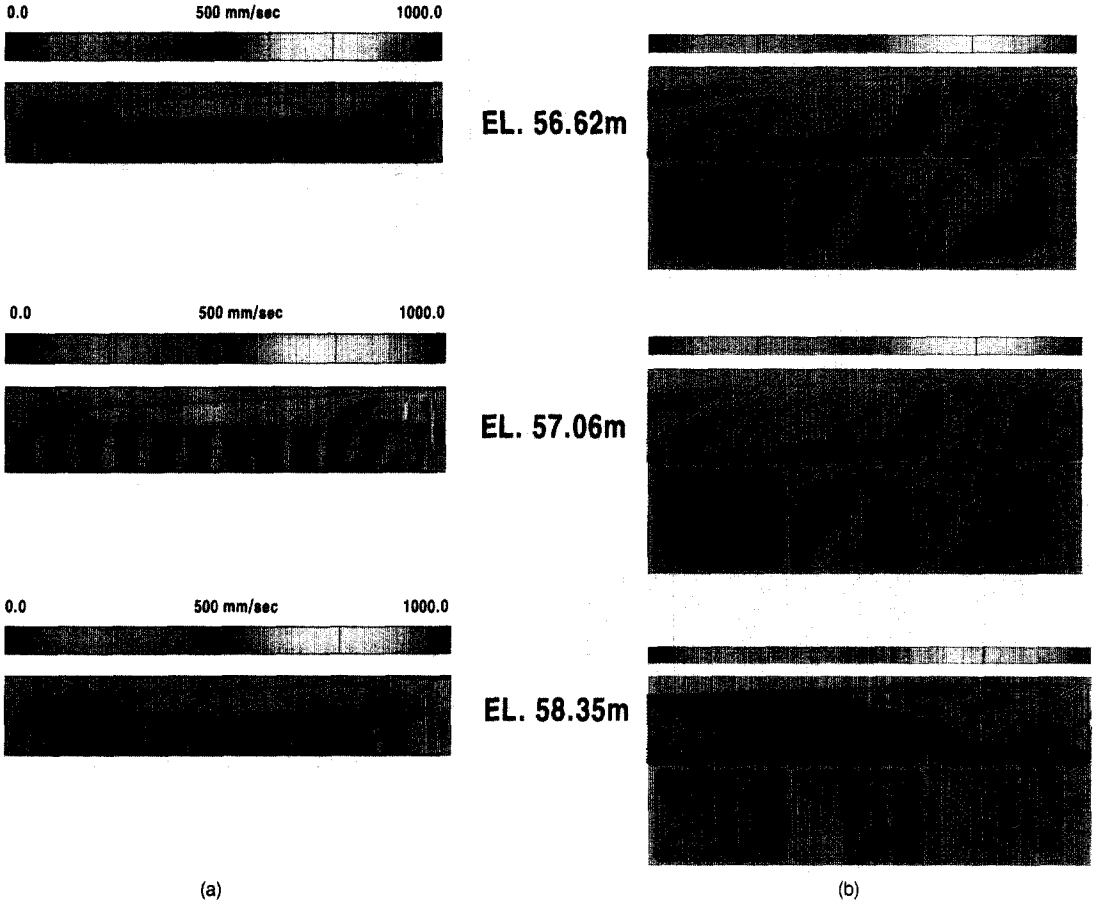
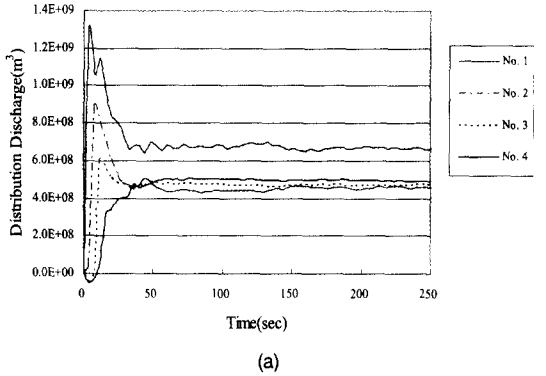


Fig. 2. Simulation Results of Flow Fluid in the Open Channel; (a) Right Side Channel(Basin No. 1-4), (b) Channel in front of Basin No. 1.

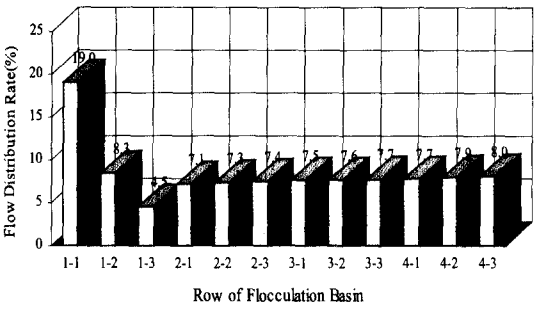
된다. 즉 지별 최대 분배율의 차는 10.1%이고 표준편차(σ^2)는 4.03으로 조사되었다.

또한 한 지내에 있는 세 열에서도 분배 유량의 편차가 크게 나타남을 알 수 있었다. No. 1-1열에 분배되는 유량은 No. 1 지 총 유입량 57,500m^3/일의 59.8%인 34,400m^3/일로 나타나, 지내 이론적 평균 분배율(33.3%)를 1.79배 초과하고 있다. No. 1-2 및 1-3열의 유입량은 각각 15,000m^3/일과 8,100m^3/일로 No. 1지 총 유입량의 26.1%와 14.1%로 나타나 No. 1-1열에 비해 상대적으로 적은 유량이 유입되고 있음이 나타났다. No. 2-1열에서부터 하류 방향인 No. 4-3열까지는 하류로 갈수록 분배수로 내 느린 속도 성분에 의하여 압력과 수위가 높아짐에 따라 유입량이 점차 증가하는 분배 경향을 보이고 있으며, 평균 분배율 8.33% 기준으로 (-)1.2% 범위 내의 분배차가 발생하였다. 전체 열별 최대 분배 오차는 14.5%, 표준편차는 3.36으로 분석되었다.

다음 **Fig. 3**은 분배 수로 유입량 180,500m^3/일 및 분배수로 수위 58.5m의 조건하에서 각 응집지별 시간에 따른 유입량 변화를 도시한 것이다. 분배 수로 유입구에 바로 인접되어 있는 No. 1 응집지의 유입량은 57,500m^3/일로, 전체 4개 응집지 총 유입량의 31.9%를 차지하고 있으며, 평균 분배율 25%를 기준으로할 때 약 1.27배 이상의 유입량 초과현상을 보이고 있다. 이러한 결과는 앞의 분배수로 모사 결과에서와 같이, 응집지 설치 위치 상의 혼화지 유출부와 응집지 유입구가 거의 동일 선상에 위치하고 있기 때문에 빠른 y 방향 유입 유속의 영향을 직접 받아 유입량이 집중되는 것으로 해석된다. 반면 No. 1 응집지에 바로 인접해 있는 No. 2 응집지의 유입량은 평균 분배량의 약



(a)



(b)

Fig. 3. Trend of Flow Distribution to Basin and Rows; (a) Flocculation Basin, (b) Rows of Flocculation Basin.

87%에 해당하는 39,300m³/일 로, 4개지 중 최소 유입량 즉 전체 유입량의 21.8%로 나타나 No. 1지와는 상반된 결과를 보여주고 있다. 이러한 현상은 y 방향 유입 유속의 영향은 비록 적게 받는 위치이나, 유입수가 응집지 벽체에 부딪친 후 응집지 유입구가 설치되어 있는 측벽 부근에 형성되는 x 방향의 속도가 직각 방향의 응집지 유입 유속에 비해 상대적으로 크기 때문인 것으로 판단된다.

4.2. CFD 해석결과의 검증

본 연구에서는 실제 분배 수로 구조에서의 유속 분포 및 유량을 측정하여 앞서 수행된 CFD 해석결과를 검증하였다. 본 측정에서는 ADV를 이용하여 각 응집지 유입부 단면에서의 수로 내 유속 분포를 조사하였으며, 응집지 유입량 측정은 침전지 유출부에 설치되어 있는 위어 내에서의 유속을 측정한 후 평균 유량으로 환산하여 각 응집지의 유입량을 결정하였다. 유

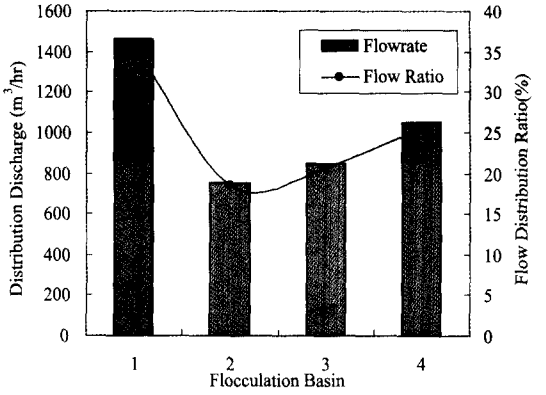


Fig. 4. Results of Flow Measurement at Full-scale Channel.

속 측정은 x, y 그리고 z 방향의 유속을 5분간 400회 측정한 후 각각의 평균값에 대한 벡터 합으로 산출하였다. 현 구조 여건상 응집지의 각 열별 측정은 곤란하였기 때문에 각 응집지별 유량만을 산출한 결과 **Fig. 4**와 같이 우측부 4지의 총 유입량은 4,110m³/hr으로 계산되었다. 각 지별 분배량 및 분배율을 보면, No. 1 지에서는 총 유입량의 35.5%인 1,460m³/hr이 유입되어 전체 4지 중 최대 유입량이 나타났으며, 반면 No. 2지에는 750m³/hr(18.2%)의 최소량이 유입되는 것으로 측정되었다. No. 2지 이후 하류로 갈수록 점차 유량이 증가하는 경향이 나타났는데, No. 3지 및 4지에는 각각 850m³/hr(20.7%), 1,050m³/hr(25.6%)이 유입되었다. 이에 앞서 나타난 CFD 해석 결과와 같이 일부 지에서의 유입량 집중현상 등 유상한 분배 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

다음 **Fig. 5**는 **Fig. 4**의 결과를 기초로 유입량 4,110m³/hr을 초기 조건으로 수행한 CFD 해석결과와 ADV를 통해 실측한 유속을 근거로 산출한 분배율과의 비교 그래프이다. No. 1-4지의 분배율은 각각 32.5%, 20.8%, 22.6% 그리고 24.1%로 나타나, 실측결과와 비교할 때 지별 유량 오차는 있으나 분배 경향은 일치함을 알 수 있다. 최대 및 최소 유입량 발생 위치가 동일하게 나타났으며, 하류로 갈수록 증가하는 동일한 분배 경향을 보여주고 있다. 실측값과 CFD 해석결과 값의 지별 최대 오차는 No. 1지에서 약 3.1% 발생하였으나, No. 4지의 경우에는 약 1.4% 정도였다. 이와 같이 비교 결과에서 전체적으로 4% 이하의 오차가 발생되었지만, 지별 분배 경향의 유사

상하수도학회지. 논문
18권 4호. pp. 500-507. 2004

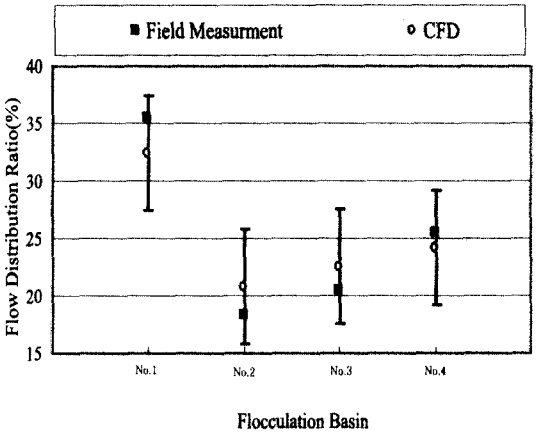


Fig. 5. Comparison of Flow Distribution Between Field Measurement and CFD simulation.

성이 명백하게 검증됨에 따라 본 CFD 해석결과의 신뢰도 및 정도는 충분한 것으로 입증되었으며, 아울러 이 방법을 이용한 분배수로 구조내 유동 해석 및 설계 방법의 검토는 타당성이 있는 것으로 판단되었다.

4.3. 분배 편차 최소화 방안 제시

상기 해석 및 검증에서 분배수로 유입부의 구조에 의해 발생되는 유속이 응집지로의 균등분배에 큰 영향을 미치는 인자가 됨을 알 수 있었다. 다음 **Fig. 6**는 분배수로 유입부의 구조에 따른 흐름 거동을 CFD 모사로 나타낸 것이다. Type A는 분배 편차가 심한 기존 S정수장의 형태를 나타낸 것이고, Type B는 곡관을 이용한 수직 유출부 형태이며, Type C는 유입흐름 방향으로 위어를 설치한 형태이다. Type B의 경우 곡관에서 유입되는 상향류의 흐름으로 인해 맴돌이 흐름이나 도수(back-water) 현상이 발생되어 No. 1지로의 분배 유량이 최소화되는 결과를 보이고 있는데 Type A에서는 No. 2지에서 분배 유량이 최소였었다. 또한 Type C의 경우흐름 방향의 위어가 접근 유속을 감소시킴으로써 분배 편차를 최소화시킬 수 있는 것으로 나타났다.

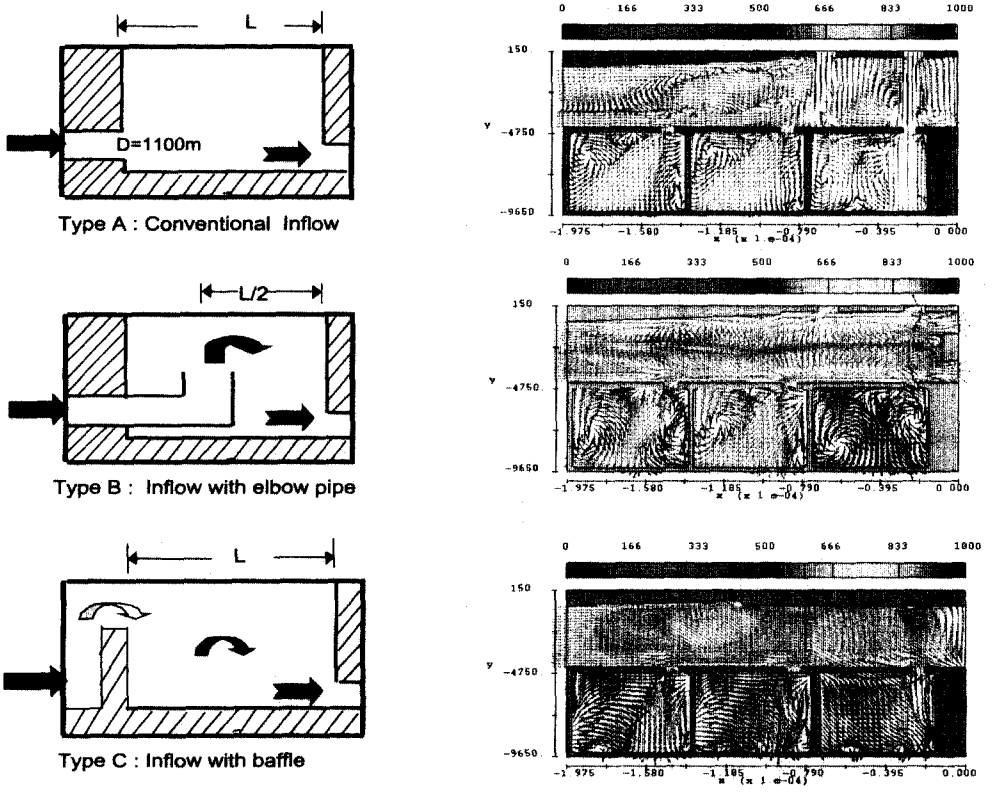


Fig. 6. Flow Patterns in the Channel according types of Inlet Structure.

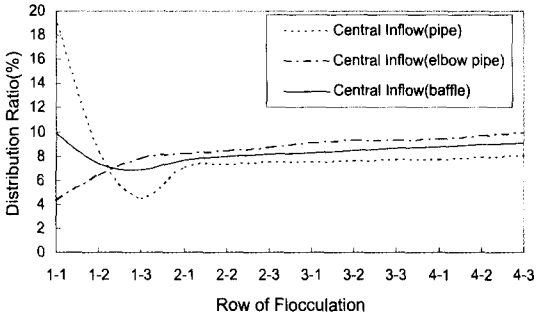


Fig. 7. Distribution Trend according to types of Inlet Structure.

다음 **Fig. 7**은 상기 **Fig. 6**의 모사 결과를 기초로 유입부의 구조에 따른 유량 분배 경향을 정리한 것이다. Type B의 경우, 지별 분배 오차 최대값과 표준편차는 각각 10.5%와 4.05이며, 지별로는 5.5%와 1.53으로 나타났다. 이 결과는 열별 오차는 다소 감소하였으나 아직 지별 분배 편차가 심각한 것으로 나타났다. Type C의 경우 분배 편차의 오차가 1% 이상으로 나타나지만 다른 Type A 및 B에 비해 균등 분배 차원에서 효과적인 것으로 조사되었다.

본 연구는 기존 분배 수로에서 유입부의 구조에 영향을 받아 발생되는 분배 오차를 감소하기 위해 진행되었다. 균등분배에 영향을 미치는 다른 인자, 예를 들어 유입부의 위치, 수로의 길이, 유량 및 지의 수, 도 있겠지만 본 연구에서는 우선적으로 유입부 구조에 대해 관심을 가지고 연구하였다. 추후 상기 인자들에 대한 영향 또한 연구해보고자 한다.

8. 결 론

본 연구에서 대상으로 한 분배 수로에서의 불균등 분배는 현재 많은 정수장에서 당면한 과제로 그 해법을 모색 중에 있는 부분이다. 분배 수로에서 발생하는 분배 오차는 유입부의 구조 및 분배 수로에서의 흐름거동에 기인함을 알 수 있었다. 다음은 본 연구를 수행하면서 도출된 결론을 정리한 것이다.

1) 기존 중앙 유입 방식의 분배수로를 대상으로 CFD 모사 및 ADV 실측한 결과 분배 편차가 심각하게 발생되고 있으며 이러한 현상은 후속되는 응집 및 침전 공정의 효율에 영향을 미친다. 특히, 본 연구에서 대상으로 선정한 S정수장의 경우는 지별 최대 분배율 차가 10%이상이 되는 것으로 조사되었다. 이러한 분배 수로의 분배 편차는 유입부의 구조가 주된 인자로서 작용하며 유입부의 구조 개선을 통해 감소를 도모할 수 있는 것으로 나타났다.

2) 중앙 유입방식 중 곡관 대신 위어를 이용한 개수로 형태의 유입구조를 모델로 하여 분석한 결과, 지별 및 열별 최대 분배오차는 각각 3%, 2.8%, 표준편차는 1.16 및 0.77로 나타나 타 방식에 비해 전체적인 분배 효과가 상당히 개선됨을 보여주고 있다.

3) 기존 분배 수로 설계 방법인 step method의 경우 1차원적인 해석을 근간으로 많은 가정을 내포하고 있어 실제 분배 수로내 흐름 거동을 해석하여 설계의 최적화를 도모하기에는 무리가 있다. 이에 최근 수처리 공정에 적용되기 시작한 CFD 해석 기법은 현재 문제가 되고 있는 분배수로내의 분배 오차의 저감 방안 제시뿐만 아니라 신설 정수장의 설계에 있어서 그 유용성이 제고되고 있다.

참고문헌

박노석, 이상형, 박희경, 신항식, 황웅주 (2000) 3-D 전산유체를 이용한 급속 혼화에서의 난류 유동장 해석, *대한환경공학회지*, Vol. 20, pp. 139-146.

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

일본기계학회 (1991) *전산유체역학*, 대영사

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

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

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

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

H. K. Versteeg and W. Malalasekera (1995) *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, Prentice-Hall, New York.

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.

Sicilian, J. M., Hirt, C. W. and Harper, R. P. (1987) *FLOW-3D: Computational Modeling Power for Scientists and Engineers*,

Flow Science Report (FSI-87-00-1).

Suhas V. Patankar (1980) *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York.