

# Unsteady Analysis of Hydraulic Behavior Characteristics in Water Treatment System Using CFD Simulation

CFD를 이용한 정수처리 공정 내 유량변동시 수리흐름 해석에 관한 연구

Seong-Su Kim<sup>1\*</sup> · Jong-Woong Choi<sup>1</sup> · No-Suk Park<sup>2</sup> · Chang-Keun Wang<sup>3</sup>

김성수<sup>1\*</sup> · 최종웅<sup>1</sup> · 박노석<sup>2</sup> · 왕창근<sup>3</sup>

<sup>1</sup>K-water · <sup>2</sup>Gyeongsang National University · <sup>3</sup>Chungnam National University

<sup>1</sup>한국수자원공사 K-water연구원 · <sup>2</sup>경상대학교 · <sup>3</sup>충남대학교

**Abstract :** The fluctuation of inlet flow to a water treatment plant makes a serious problem that it can change the outlet flow-rate from each process abruptly. Since it takes very short time for the surface wave occurred from the fluctuation of inlet flow to reach the latter processes, it is impossible for operators to cope with that stably. In order to investigate the characteristics of hydraulic behavior for rectangular sedimentation basin in water treatment plant, CFD(Computational Fluid Dynamics) simulation were employed. From the results of both CFD simulations, it was confirmed that time taken for the follow-up processes by the fluctuation in intake well can be estimated by the propagation velocity of surface waves. Also, it takes very short time for the surface wave occurred from the fluctuation of inlet flow to reach the latter processes. In the case of inlet flow rate being increased sharply, local velocity within sedimentation basin appeared as wave pattern and increased due to convection current. Also, it could be observed that vortex made local velocity in the vicinity of bottom rise.

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

**주제어 :** 분배수로, 유입유량 균등성, 전산유체역학, 유량분배

## 1. 서론

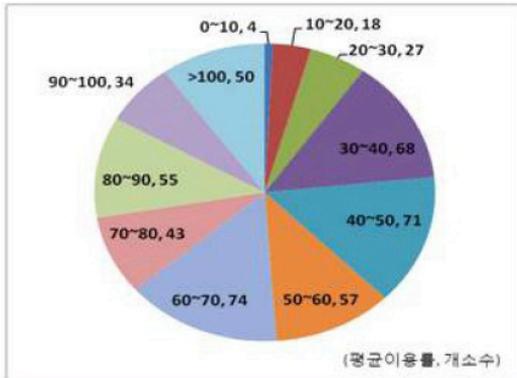
일반적으로 표준정수처리 공정의 설계는 계획 정수량 즉, 계획 1일 최대급수량을 기준으로 공정의 설계와 시공이 이루어지게 되어 운영시 실제 설계조건과 차이점을 나타내게 된다. 운영 유량은 수용가 수요패턴에 따라 결정되어지며, 광역상수도 시설의 경우 배수지 수요량에 대처하면서 정수처리 시설이 운영됨에 따라 이러한 운영유량의 변동 또한 급격하게 발생하게 된다. Fig. 1에서 나타낸 상수도 통계(2010)자료에 의하면 국내 운영 중

인 500여개의 정수장 전체 평균이용률은 52 % 범위에서 다양한 분포를 보이며, 생산량의 일일 첨두율(최대가동율 / 평균이용률)은 1 ~ 4.45 범위까지 다양하게 나타나고 있는 실정이다.

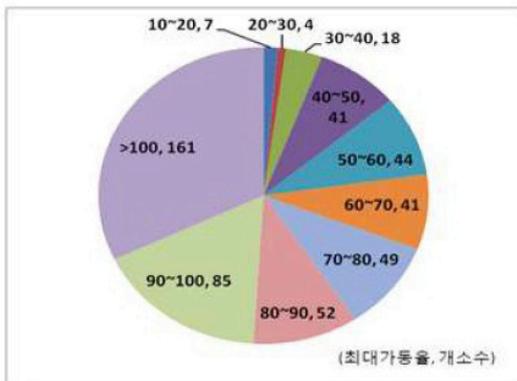
정수처리 시설의 처리용량에 있어서 설계 조건과 운영 조건이 다른 경우 정수처리 효율 저하 가능성이 존재하게 되며, 정수처리 생산원가의 상승 또한 발생할 수 있다. 따라서, 정수처리 공정의 설계 조건과 시공된 정수처리 각 공정의 구조 및 설비들의 운영조건 차이 발생은 새로운 운영유량조건에서의 정수처리 공정별 운영최적화 과정을 요구하게 된다. 그러나, 수도시설의 인프라에 있어서 실질적인 유량조건으로의 변동에 대처

\* Received 19 February 2013, revised 5 April 2013, accepted 8 April 2013.

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



(a) Average operation rate



(b) Maximum operation rate

Fig. 1. Operation rate of water facilities (Source, 2010 Statistics of Waterworks)

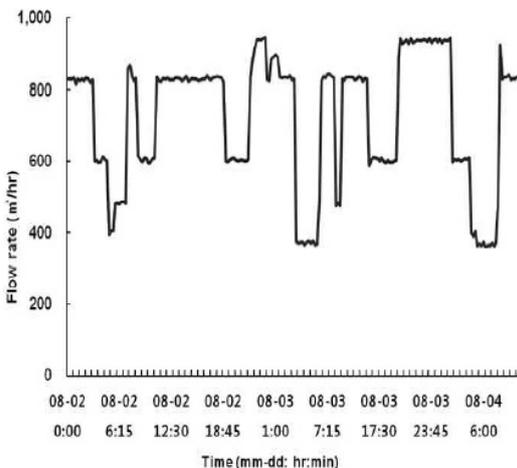


Fig. 2. Profile of inflow in G-WTP

가 가능한 부분과 대처가 불가능한 부분도 존재하게 된다. 콘크리트 구조물로 건설된 공정에 대한 수리학적 구조는 변동시 대처가 불가능하며,

약품주입 설비 등도 일부 대처가 불가능한 부분이 존재하게 된다. 이러한 운전유량 조건에서의 대처는 시설의 정수장 이용률인 평균생산량 뿐만 아니라 일일 침투율이 큰 국내 대부분의 시설의 경우 시간대별 유량변동 조건에서도 이루어져야 한다.

정수시설에서 유량의 변동과 유량의 공정 내 분배는 다양한 원인과 다양한 형태로 나타나게 된다. 착수정 즉, 정수처리 시스템 내 최초 시작 시점에서의 유량의 변동은 수용가 사용량 추이에 따른 취수량의 변동에 근본적으로 기인된다. 광역상수도 시설의 경우 대규모 수용가인 지방자치단체의 배수지 시설의 운영에 따라 급격하게 변동되어질 수 있다. 반면에, 지방자치단체에서 운영하는 정수장의 경우 정수장 내 정수지와 배수지의 연계에 따라 이러한 급격한 유량변동을 최소화 할 수 있다. 또한, 정수처리 시스템 설계에 있어서 원수를 취수하여 정수장으로 이송하기 위한 펌프가 대규모로 설계되어 있음에 따라 펌프의 추가 가동 및 가동정지에 따른 급격한 유량의 변동이 발생하게 된다. 정수장 내에서도 이러한 착수정에서 유량변동 요소가 존재하며, 이것은 바로 역세척 배출수지로부터 회수펌프가 가동되는 경우 착수정에서 유량변동이 발생하게 된다.

정수처리 공정내 유량의 변동은 설계조건과 상이한 운영조건에 발생에 따라 적절한 최적화가 이루어지지 않는 한 정수처리시 수질 및 운영 측면에 여러 가지 영향을 미칠 수 있다. 수질적으로 공정내 효율 차이를 유발할 수 있으며, 운영측면에서는 운영로직 상 문제점 발생과 설비 이용률의 증가에 따른 운영비 상승의 문제점을 유발 할 수 있다.

이러한 문제점에 대한 인식 확산에 따라 박노석(2008) 등은 일 1,000m<sup>3</sup> 규모의 실규모 정수처리 플랜트 설비를 이용하여 실험적으로 착수정 유량변동 발생시 후속 공정에 전파되는 시간을 실측하여 유량변동은 후속공정에 전파되는 시간이 표면파의 전파속도로 예측되어짐을 제시

하였다. 상기 논문에서 제시한 결과에 의하면, 유량변동이 후속 공정에 전파되는 속도가 매우 빠르기 때문에 공정 운영상 이를 예측하여 대처하기란 매우 어려운 상황임을 알 수 있다.

전산유체해석(CFD, Computational Fluid Dynamics)은 현재 컴퓨터의 발달로 인하여 많은 분야에서 이용되어지는 기술로서 현재 정수처리 시스템 내에서도 이러한 기법을 이용하여 실험적으로 규명하기 어려운 부분에 대해 많은 연구가 진행 중에 있으며, 매우 높은 신뢰성을 가진 결과를 제공하고 있다.(Goula et al., 2008) (Rauen et al., 2008) (Pak et al., 2008) (Kaushal et al., 2012) (최종웅 외, 2012).

본 연구에서는 유량변동이 후속 공정에 전파되는 속도를 실험 및 실측에 의해 제시했던 박노석(2008) 등의 논문에서 이용된 동일한 정수처리 플랜트 시설(1,000 m<sup>3</sup>/일 규모, Fig. 3 참조)을 대상으로 전산유체해석 기법을 이용하여 유량변동 발생조건을 모사하고, 유량변동 발생시 후속 공정에 나타나는 수리적 특성을 살펴보고자 연구를 수행하였다.

## 2. 수치해석

### 2.1 수치해석 대상

본 연구 대상시설은 1,000m<sup>3</sup>/일 규모의 실 규모 정수처리 플랜트 설비로서 구성 공정은 Fig. 3에서 나타난 바와 같이 착수정-전오존-혼화-응집-침전-급속여과-후오존-활성탄 공정으로

구성되어 있다. 전체 공정은 착수정으로부터 맨 후단 공정인 입상활성탄 흡착공정(GAC)까지 자연유하방식의 일반적인 정수장과 동일하게 설계되어 운영 중에 있다. 상기 시설 내 공정에서 침전공정까지를 수치계산 영역으로 선정하여 착수정 유량이 변동되는 조건을 설정하여 모사하고자 하였으며, 계산영역의 시설 제원은 Table 1 과 같다.

Table 1. Dimension specification of WTP

Process	Dimension specification
Pre-Ozon.	H 6.0 m × L 1.8 m × W 0.7 m
Coa.	H 1.1 m × L 1.5 m × W 0.9 m
Floc.	H 2.0 m × L 5.8 m × B 2.4 m
Sed.	H 4.0 m × L 13.0 m × B 2.4 m

대상시설은 1,000 m<sup>3</sup>/일의 시설용량 대비 전 오존 공정의 경우 10.8분의 수리적 체류시간으로 설계되어 있으며, 급속혼화 공정 10.9분, 응집공정 40분, 침전공정은 3시간의 체류시간을 확보토록 설계되어 상수도 시설기준에서 제시하고 있는 각 공정별 설계기준을 모두 만족하는 시설이다.

### 2.2 수치해석 방법

착수정 내 유량 변동이 발생하는 경우 후속 공정에 영향이 전파되는 것을 전산유체해석 프로그램으로 모사하고, 이 때 각 공정별 수리흐름

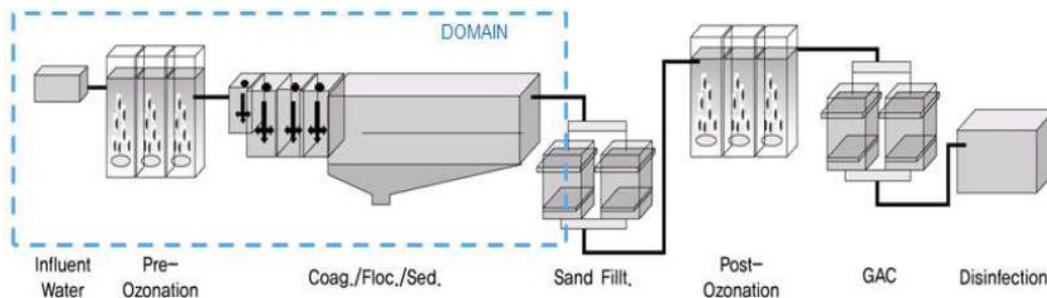


Fig.3. Schematic of water treatment plant

특성 변화를 알아보기 위해 앞 절에서 언급한 바와 같이 계산영역을 결정하였으며, 수치해석을 위한 형상은 3차원의 유동이 발생하지 않는다는 가정으로 2차원으로 구성하였다.

Fig. 4는 표면상의 계산 격자 분포를 나타내고 있으며, ANSYS Meshing Tool 소프트웨어를 사용하여 격자를 생성하였으며, 벽면과 자유표면의 높은 해상도를 위하여 조밀한 격자를 사용하였다. 수치 계산은 상용프로그램인 ANSYS CFX 12.1(ANSYS, 2009)을 사용하였으며, 경계조건으로 입구에는 설계 용량에 해당하는 속도조건, 출구에는 대기압 조건을 적용하였으며, 25 °C 조건의 물과 공기 영역에서 중력의 영향을 고려한 Buoyancy model 과 Free surface model을 적용하여 수치해석을 진행하였으며, 벽면 조건으로는 no-slip condition을 적용하였다. 난류모델은 scalable 벽법칙을 사용하는 standard k-ε 난류 모델을 적용하였다.

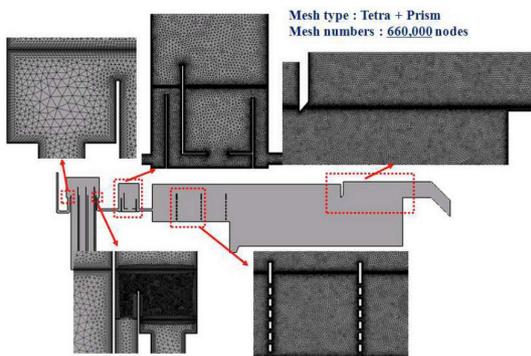
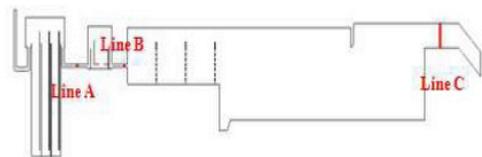


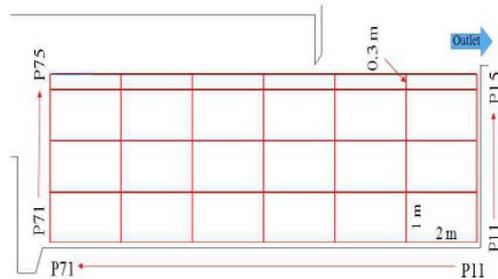
Fig.4. Mesh distribution on the domain

정상상태(steady state) 조건에서는 유입유량을 11 m<sup>3</sup>/hr의 박노석(2008) 등의 논문조건과 동일한 조건을 적용하여 계산을 수행하였으며, 비정상상태(unsteady state) 계산시 유입유량 조건을 상기 논문의 동일한 실험조건인 22 m<sup>3</sup>/hr으로 변경시켜 후단 공정에서 이의 변화 특성을 전오존 공정 후단, 혼화공정 후단, 침전

지 유출부(Fig. 5 (a)) 등 각 공정별 유속이 증가되기 시작하는 시간 경과 특성과 침전지 내 Fig. 5 (b)에서 제시된 바와 같이 선정된 각 지점에서의 유속변화 특성을 분석하였다. 침전지 길이방향에서는 후단부터 앞의 자리가 1부터 전단부 7 지점까지 7개 지점으로 분할하였으며, 깊이 방향으로는 바닥부터 1지점에서 표면부 5 지점까지 5개 지점으로 분할하여 지점별 유속을 분석하였다.



(a) Monitoring point of propagation



(b) Monitoring point of local velocity distribution

Fig. 5. Monitoring point

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 유량변동 전파 특성

박노석(2008) 등의 선행 연구에서 제시된 연구대상 정수처리 플랜트에서 착수정 유입유량 변동시 후속 공정인 침전지 유출부에서 전파시간은 약 11초로서 매우 짧은 시간 동안 각 공정별 체류시간의 합이 아닌 표면파 전파속도를 근간으로 전파됨을 제시하였다. 본 연구에서 각 공정별 유입유량의 정상상태 11 m<sup>3</sup>/hr에서 22 m<sup>3</sup>/hr으로 2배 증가시 각 공정별 전파시간을 Fig. 6에 도시하였다.

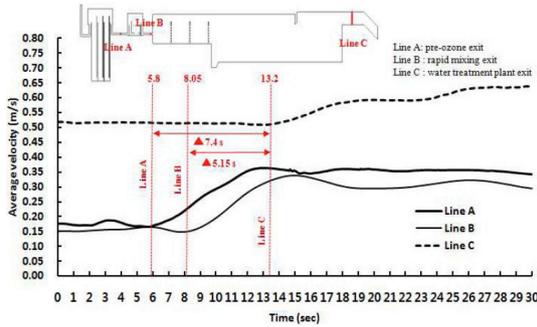


Fig. 6. Characteristics of flow fluctuation among the processes

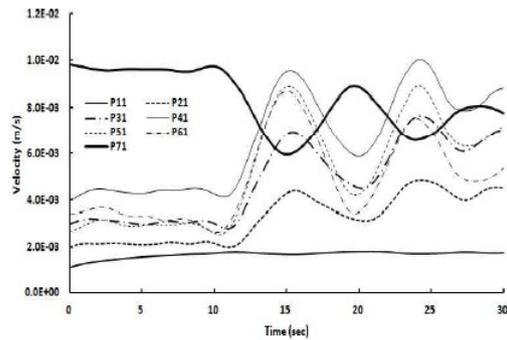
Fig. 6에서 보이는 바와 같이 유입유량이 2배 증가된 시점에서 총 13.2초 후 침전지 유출부의 유량이 증가되는 것으로 모사되었으며, 오존 공정 유출부와 침전공정 유출부와의 시간 차이는 약 7.4초로 모사되었다. 실험 조건에서 실측된 11초와 약 3.6초의 차이는 발생하였지만 매우 빠른 시간 내 후속 공정에 이러한 유량변동의 영향이 전파됨을 확인할 수 있었다. 그리고 이러한 작은 차이 발생은 본 모의가 컴퓨터 성능 문제로 2-D 조건에서 모사되어 각 공정별 폭 방향에 대한 영향이 고려되지 못한 점에 기인된 영향으로 판단할 수 있다. 결과적으로 상기 논문에서 제시된 유입유량이 변동되는 경우 매우 빠른 속도로 그 영향이 전파되는 결과를 본 연구의 전산유체 해석 프로그램을 활용한 모사에서 유사한 결과가 도출되어 이 프로그램을 활용한 공정 내 수리흐름 특성 변화 또한 신뢰성 있는 결과를 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 이러한 급격한 유량 증가시 후속 공정의 유량 증가 속도는 유입유량의 증가 속도보다는 상대적으로 완만하게 증가되는 것으로 경향을 나타냈으며, 이러한 특성은 후속 공정으로 진행될수록 운반의 길이가 길어짐에 따라 더욱 완만한 증가 특성을 나타내었다.

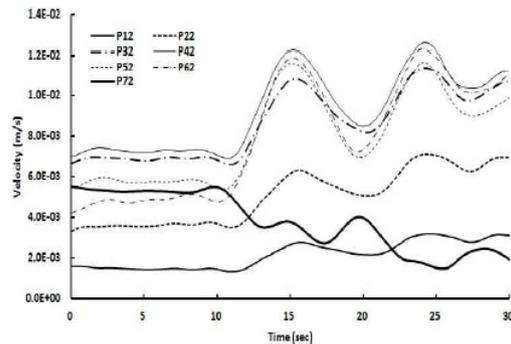
### 3.2 침전지 내 각 지점별 수리흐름 특성

Fig. 7은 급격한 유량 증가시 침전지 내 각 지점별 수리흐름 특성을 알아보기 위해 대표 지점

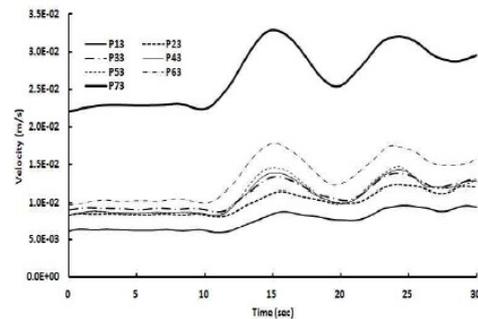
을 선정하여 지점별로 유속 변화를 도시한 그림이다. 그림에서 보이는 바와 같이 각 지점별 유속 변화는 일정 시간 이후 파(wave)형을 나타내면서 입구의 증가된 유량의 대류 전달로 인하여 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 7(a)는 시간 변화에 따른 침전지 저면부(바닥으로부터 높이 0.3 m 위치)에서 속도 변화를 나타내고 있다.



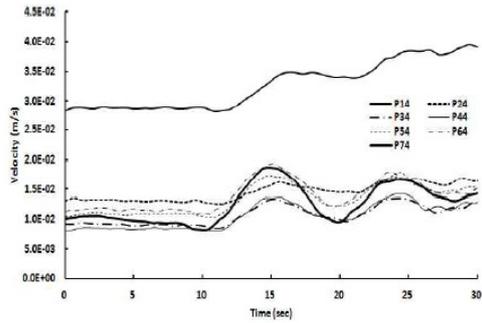
(a) P11-P71 (0.3m above the bottom)



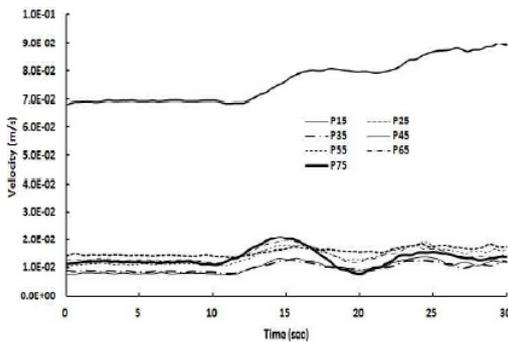
(b) P12-P72 (1.3m above the bottom)



(c) P13-P73 (2.3m above the bottom)



(d) P14-P74 (3.3m above the bottom)



(e) P15-P75 (3.6m above the bottom)

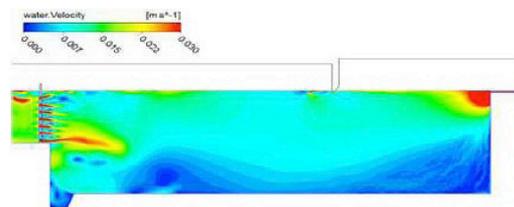
Fig. 7. characteristics of local velocity

p71의 빠른 유속은 일정 시간 이후 p61 ~ p21 까지 속도가 전달된다. 그러나 p11의 경우 침전지 형상에 의한 와류 발생 영역으로서 타 지점과 같은 큰 속도 변화가 발생하지 않았다. Fig. 7(b) 높이에서, p72의 빠른 속도는 정류벽 하단 후방의 빠른 속도에 의한 유체의 전단으로 발생하는 와류의 영향으로 일정 시간 이후 감소한다. 그러나 다른 위치의 속도는 증가하는 경향을 보인다. Fig. 7(c) 위치에서는 모든 영역이 일정 시간 이후 속도의 증가를 보인다. Fig. 7(d), (e) 위치는 자유표면에 가까운 위치에 해당하여 출구로 유출하는 빠른 속도의 영향으로 인하여, 출구 쪽 근처에 해당하는 위치 p14, p15에서 상대적으로 빠른 속도분포가 나타났다.

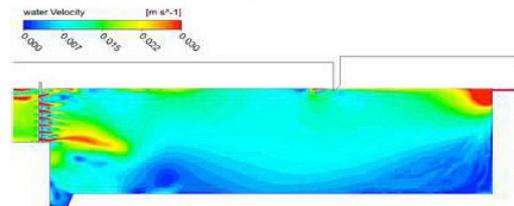
Fig. 8은 시간 변화에 따른 침전지에서의 속도 구배를 나타낸 것이다. 시간 0초에서 침전지 입구부의 단면변화와, 출구의 상대적인 유로 축소로 인한 상대적인 빠른 속도 분포를 볼 수 있

다. 침전지 입구부에서의 빠른 속도 분포는 유량 증가로 인하여 특정 시간 이후 확연히 증가하는 것을 볼 수 있으며(예 Fig. 8(c)), 이것으로 인해 침전지 저면부에서 와류가 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 침전지 중간 영역의 저면에서는 시간 변화에 따라 낮은 속도의 분포가 입구 영역의 빠른 속도의 전파로 인하여 빠른 속도 구배가 나타난다.

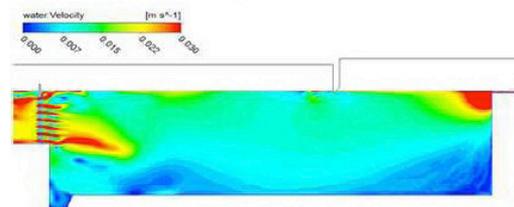
침전지에서 급격한 유량 증가시 침전지 표면부에서는 빠른 유속 증가경향이 나타났으며, 그 영향은 중간 및 저면부 영역에도 전파되어 전체적인 속도 증가를 유발하였다. 그리고 이러한 유



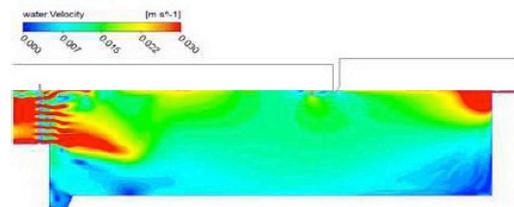
(a) simulation time 0 sec



(b) simulation time 10 sec



(c) simulation time 20 sec



(d) simulation time 30 sec

Fig. 8. Velocity contour in sedimentation basin

속 증가로 인해 슬러지 침강 구역의 저면부에서는 와류의 영향에 의해 침강된 슬러지의 재부상 등이 발생할 수 있으리라 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구는 유량변동이 후속 공정에 전파되는 속도를 실험, 실측에 의해 제시했던 선행 박노석(2008) 등의 논문에서 이용된 동일한 정수처리 플랜트 시설(1,000 m<sup>3</sup>/일 규모)을 대상으로 전산유체해석 기법을 이용하여 유량변동 발생시 동일 조건을 설정하여 모사 및 검증하고, 이를 바탕으로 급격한 유량변동 발생시 후속 공정에 영향이 미치는 시간과 침전지내 수리적 특성변화를 조사하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 착수정에서 급격한 유량증가 발생시 후속 공정에 전파되는 시간이 각 공정별 체류시간의 합이 아닌 표면파 전파속도로 상당히 빠른 시간 내 전파되는 것을 제시한 선행 연구결과와 마찬가지로 전산유체해석 기법을 적용하여 동일 조건으로 모사한 결과에서도 매우 빠른 시간 내 후속 공정에 전파됨을 확인할 수 있었다. 또한, 이러한 급격한 유량 증가시 후속 공정의 유량 증가속도는 유입유량의 증가속도보다는 상대적으로 완만하게 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 급격한 유량 증가시 침전지 내 각 지점별 유속 증가 경향은 파(wave)형을 나타내면서 입구의 증가된 유량의 대류 전달로 인하여 속도가 증가하였다. 또한, 표층부에서 상당히 빠른 속도로 전파되는 것을 확인할 수 있었으며, 침전지 저면부에서도 와류의 영향으로 인해 국부적인 유속 증가 특성을 나타내어 침강된 슬러지의 재부상 등이 발생할 수 있을 것으로 예측되었다.
- 3) 정수처리장 내 착수정의 급격한 유량변동은 운반의 길이에 따라 각 정수장 별로 차이는 나타나겠지만 수초에서 수분 범위의

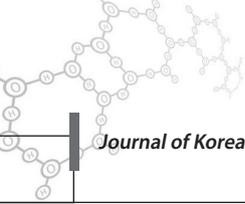
빠른 속도로 후속 공정에 전파되어 유량 또는 유속 조건의 변화에 따른 후속 공정의 대처가 현실적으로 매우 어려워질 것으로 예측된다. 따라서, 가급적 정수처리장 내 급격한 처리유량의 변동을 억제하는 정수처리 운영이 필요할 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비 지원(과제번호 : 10기술혁신 C01)에 의해 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- Ministry of Environment(2011), "2010 Statistics of Waterworks"
- Athanasia M. Goula, Margaritis Kostoglou, Thodoris D. Karapantsios, Anastasios I. Zouboulis(2008), "A CFD methodology for the design of sedimentation tanks in potable water treatment: Case study: The influence of a feed flow control baffle", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 140, Issues 1-3, pp. 110-121.
- William B. Rauen, Binliang Lin, Roger A. Falconer, Edmilson C. Teixeira(2008), "CFD and experimental model studies for water disinfection tanks with low Reynolds number flows", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 137, Issues 3, pp. 550-560.
- Afshin Pak, Toraj Mohammadi, S.M. Hosseinalipour, Vida Allahdini(2008), "CFD modeling of porous membranes", *Desalination, Volume 222*, Issues 1-3, pp. 482-488.
- D.R. Kaushal, T. Thinglas, Yuji Tomita, Shigeru Kuchii, Hiroshi Tsukamoto(2012), "CFD modeling for pipeline flow of fine particles at high concentration", *International Journal of Multiphase Flow*, Volume 43, pp. 85-100.
- Jong-Woong Choi, Seong-Su Kim, No-Suk Park, Young-Joo Lee, Seon-Ha Chae(2012), "UV predictions for ultra violet flowing water



purification of axial reactor type based on the location of the exit by CFD”, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol.26, No.4, pp.521-533

No-Suk Park, Seong-Eun Lim, Seong-Su Kim, Jun-Sik Hwang, Nahm-Chung Jung(2008), “Analysis of relationship between daily in-flow rate fluctuation and surface wave transfer velocity in water treatment processes”, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol.22, No.2, pp.239-243