

Most suitable design method of post-chlorination process in portable water process by using CFD

전산유체를 활용한 정수공정에서 후염소 투입공정 최적설계 방안

Youngman Cho*

조영만*

Water Quality Research of Busan Water Authority
부산광역시상수도사업본부 수질연구소

Abstract : Post-chlorination for disinfection in portable water process is final process. The design factors of post-chlorination are inflow pipe line from tank of filtrated water to cleanwell, injection point of chlorine, appropriate shape of baffle in cleanwell for disinfection efficient improvement. Until now, we did not have the design standard for post-chlorination. we evaluated most suitable design method of post-chlorination process in portable water process by using computational fluid dynamics in this research. We found the result that the pipe to connect the cleanwell should be one. If pipe line split into two or more, uniform distribution of the flow is difficult. Second, optimal injection point of chlorine is the middle of pipe line to connect the cleanwell. Therefore, it is not economical to install chlorine contact basin in cleanwell. Third, the shape of baffle should be designed in order to water flows in one direction. And we found that it is better to design the low number of flow turning.

Key words : Post-chlorine, Injection point of chlorine, Clearwell, Computational Fluid Dynamics(CFD)

주제어 : 후염소, 염소투입점, 정수지, 전산유체역학

1. 서론

후염소 투입공정은 정수된 물을 최종적으로 소독처리하는 공정으로 실제 정수 수질을 최종 결정한다는 의미에서 매우 중요한 공정이다. 후염소 투입공정은 정수 수질의 미생물적 안전성을 확보하는 차원뿐만 아니라 염소 농도가 적정하게 제어되지 않을 경우 가정 수도꼭지에서 염소 냄새를 발생시켜 시민들에게 수도물에 대한 불신과 불쾌감을 유발하기도 하기 때문에 후염소 투입공정은 전 단계 어떤 공정보다 정밀하게 제어되어야 한다. 또한 정수의 소독능은 후염소의 투입 농도와

접촉시간으로 산정되기 때문에 투입농도 뿐만 아니라 적절한 소독시간(체류시간) 확보는 소독능 평가와 관련하여 그 중요성이 점점 커지고 있다 (Bishop, 1993).

이와 같은 후염소 투입공정의 중요성에도 불구하고 대부분의 정수장에서 후염소 공정은 설계 단계에서부터 수리적 문제들이 제대로 검토가 이루어지지 않음으로 해서 운영상에 여러 가지 문제를 안고 있는 것이 사실이다. 본 연구에서는 가장 일반적인 정수장의 후염소 투입 지점, 투입된 염소의 교반 방법, 정수지내 도류벽 구조, 송수관의 위치 등에 대한 중요한 사항을 검토하여 최적 설계 방안을 제시하고자 한다. 이와 같은 후염소 공정 설계 전반에 대한 문제를 전산유체역학 소프트웨어

어를 활용하여 검토하였다.

전산유체역학 진단 및 설계 기법은 컴퓨터 하드웨어 기술의 비약적인 발전과 더불어 거의 모든 산업분야에서 활발하게 응용되고 있으며(Cao et. al, 2001) 최근 들어 정수처리공정 진단과 개선에도 적극적으로 활용되고 있는 추세이다.

2. 연구방법

본 연구는 현재 부산시 D정수장 후염소 투입공정에 대한 진단과 평가를 통해 일반적으로 후염소 투입공정 설계에서 중요한 설계인자들에 대한 검토를 통해 최적 방안을 제시하고자 하였다. 연구대상 후염소 투입공정 평면도는 Fig. 1과 같다. 활성탄 여과수는 집수정에서 정수지 3-1($v=20,000 \text{ m}^3$)로 분배되고 다른 하나는 3-1($v=20,000 \text{ m}^3$)으로 분배된다. 정수지 3-1로 분배된 정수는 정수지 3-2를 거친 다음 송수관을 통해 송수된다. 여과지 집수정에서 분배된 정수는 3-1정수지내에 설치되어 있는 후염소 투입공정과 접촉조에서 소독이 이루어지고 마찬가지로 3-3 정수지로 분배된 정수 역시 비슷한 구조와 과정으로 소독이 이루어지고 있다.

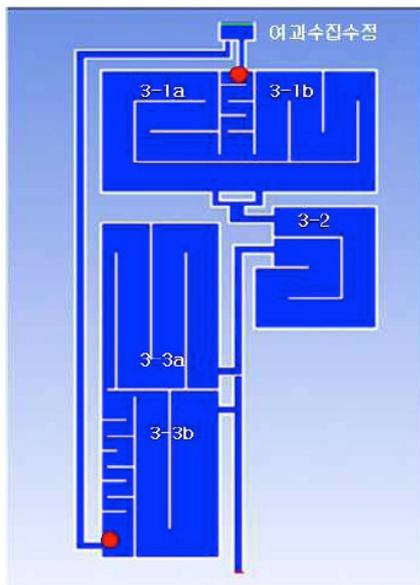


Fig. 1. Shape of Clearwell at the D water treatment plant(Red point : injection point of chlorine)

정수지로 유입되는 관로 중간에 염소를 직관으로 투입할 경우 염소의 혼합 정도와 거리에 대한 평가를 위해 2400 mm 관로에 염소 투입관 50 mm을 통해 5 kg/cm^2 압력으로 염소를 투입할 경우 혼합 여부와 거리별 농도를 평가하여 완전혼합이 이루어지는 거리를 전산유체역학 기법으로 진단하였다. 원수의 유속은 0.5 m/sec 이었고 염소수 투입은 모관의 수류 방향과 같은 방향으로 투입하여 모관 직경거리에 해당하는 거리에서 동심원 별로 농도를 측정하여 혼합여부를 진단하였다.

본 연구에서는 상용 CFD 프로그램인 Ansys 14.0 버전을 사용하였으며, 정수지의 Geometry에 tetra형 격자 약 450,000개를 배열하였다. 난류 거동을 모사하기 위해 Standard $k-\epsilon$ 모델을 사용하였으며, 수렴기준은 난류운동에너지(κ)와 난류소산율(ϵ)의 잔차(Residuals) 10^{-4} 를 적용하였다. 혼합도 평가는 전산유체 해석 기법 중 species transport 방법을 활용하여 비정상상태로 0.5초간 염소를 투입한 다음 0.1초 간격으로 관로 내 염소 농도를 수집하여 관로 내 염소 혼합 여부를 평가하였다.

컴퓨터 성능의 눈부신 발전에 힘입어 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 해석 결과에 대한 신뢰도가 급격히 높아짐에 따라 일반 실험을 대체하는 수준까지 발전하고 있으며, 현재 상하수도 수처리공정 해석과 진단 설계 등에 적극적으로 활용되고 있다.(Panneerselvam et. al, 2009). 국내에서도 유공블럭하부집수장치에 대한 전산유체역학적 진단(Ryu, et. al, 2003)과 더불어 기존 정수장의 효율향상 제고에 전산유체 진단이 크게 기여할 수 있음이 입증된(Park, et. al, 2004) 이후 정수장 혼화기 평가(Lee, et. al, 2009) 그리고 침전지와 정수지 등 정수공정에서 기존의 추적자 실험과 전산유체 진단 값의 비교 연구를 통해 실험값과 거의 일치하는 연구결과가 발표되면서 전산유체역학적 기술진단이 실험을 대체할 수 있는 충분한 신뢰도를 확보할 수 있다는 점이 입증되었다

(Kim, et. al, 2011, Lim. et. al, 2012). 따라서 본 연구자들은 후염소 공정설계에서 고려해야 하는 관로와 정수지 지내 유동이 선행 연구를 토대로 전산유체역학적 진단기법을 통해 본 연구를 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 정수지 유입 수로의 적절한 설계

집수한 여과수를 정수지로 보내는 수로는 현장 조건에 따라 구조와 형태는 매우 다양하다. 본 연구 대상 유입 수로는 입상활성탄 여과지에서 여과된 정수가 2계열의 정수지로 따로 따로 각각 분리되어 분배되고 있다. 따라서 이와 같이 2계열로 분리되어 있는 구조에서는 많은 수리적인 문제를 야기하는 원인이 된다.

Fig.2는 각 정수지로 분배되는 유량의 유속 분포를 전산유체역학적 해석으로 얻은 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 각 정수지의 도류벽의 형태와 구조 및 유입관의 길이 등에 의한 수두손실의 차이로 인해 3-1과 3-3 정수지로 분배되는 분배 유량이 같을 수 없다. 즉 이와 같은 2계열 분배에서 유량차이는 필연적인 것이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 3-1과 3-3 정수지로 분배되는 유량은 초기에는 3-1정수지로 거의 두 배의 유량이 유입되다가 점차 시간이 지나면 3-1 정수지로는 유량이 줄고 3-3 정수지로 유량이 증가하면서 점차 3-1정수지로는 54 %, 3-3정수지로는 46 %로 유량이 안정되는 것을 알 수 있다. 즉 정수지로 공급되는 초기에는 관로 저항이 적은 3-1 정수지로 물이 급격하게 유입되지만 3-1 정수지의 내부 도류벽 저항에 의해 에너지 손실이 증가하면서 3-3정수지로 유량이 증가하는 형태를 보이는 것이다.

이와 같은 2계열 정수지인 경우 송수 유량이 변하지 않고 일정하게 공급된다고 가정하면 3-1 정수지와 3-3 정수지로 각각 54 %, 46 %로 안정된 유량 분배가 가능하겠지만 본 연구대상 정수지 외에 다른 여러 개의 정수지가 송수관에 합

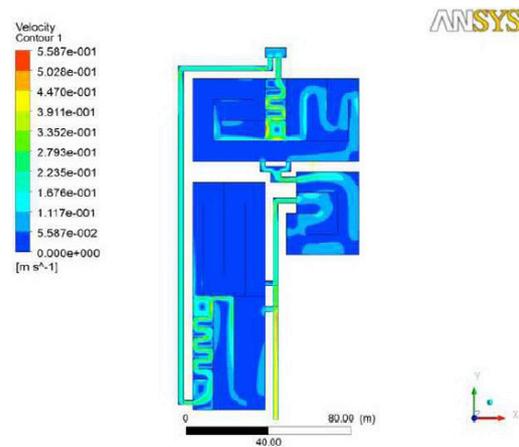


Fig. 2. Velocity contour at the cleanwell

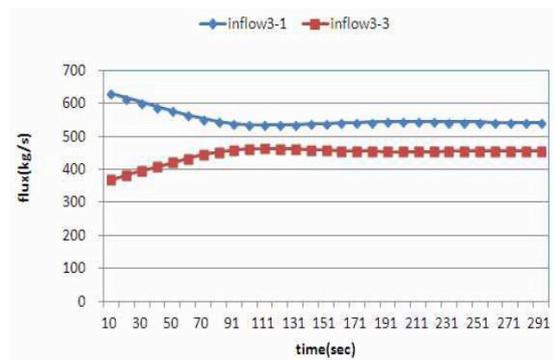


Fig. 3. The various curve of inflow according to time at the 3-1 cleanwell and 3-3 cleanwell

께 연결되어 있고 또한 자연 유하로 가압장 펌프 흡수정에 공급되고 있어 실제 송수 유량은 여러 변수들로 인해서 시시각각 변할 수밖에 없는 상황이다. 따라서 송수 유량이 시시각각 변화하기 때문에 여과수 집수정에서 분배되는 유량 역시 안정적으로 일정한 유량이 분배되는 것은 불가능한 실정이다.

이와 같은 유량 변화가 발생할 경우 각 정수지로 유입되는 또는 정수지에서 유출되는 유량을 전산유체역학적 해석 기법으로 모사한 결과 Fig. 4와 같은 결과를 얻었다. 즉 송수 유량이 변하게 되면 정수지에서 유출되는 유량 역시 순간적으로 크게 변화하는 것을 알 수 있다. Fig. 4에서 초기 송수 유량이 안정된 상태 즉 3-2,

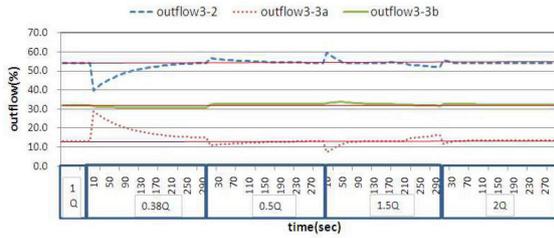


Fig. 4. The outflow profile of cleanwell according to change of supply quantity

3-3a, 3-3b에서 송수되는 유량은 각각 54 %, 13 %, 32 %로 각각 안정된 상태에서 유량이 갑자기 0.38Q로 유량이 감소될 경우 3-2정수지는 40 %까지 감소되고 3-3b는 비교적 변화가 적은 반면 3-3a는 13 %에서 거의 30 %까지 증가하였다가 시간이 지나면서 다시 안정되는 것을 알 수 있다.

또한 0.5Q, 1.5Q, 2Q로 유량이 점차 상승할 경우에도 각 정수지에서 송수되는 유량이 심하게 변화하는 것을 그림에서 확인할 수 있다. 이와 같은 사실은 송수 유량에 따라 정수지로 유입되는 유량이 시시각각으로 바뀐다는 것을 의미한다. 따라서 후염소를 정량 투입하기 위해서는 각 투입지점에서 유량 대비로 투입 염소량을 실시간으로 제어해야 하는데 이는 많은 시설 부담 뿐만 아니라 실제 운영상 문제도 많아 실시간 투입량 제어 방식은 현실적으로 불가능하다. 따라서 실제 정수장에서는 여과 유량에 따라 투입 염소량을 수동 제어하는 경우가 일반적인 상황이다. 따라서 염소가 투입되는 원수량이 시시각각으로 변화하지 않도록 염소투입공정을 설계해야 한다. 그렇게 하려면 정수지와 송수량에 의해 정수지로 유입되는 원수량이 달라지지 않도록 정수지 유입라인을 단일화해야 한다. 즉 송수량의 변화는 정수지에서 흡수할 수 있도록 하며 여과 수량이 2개 이상의 관로로 분배되지 않고 단일 관로로 그대로 정수지로 유입되도록 관로를 설계해야 한다.

3.2 최적 후염소 투입 지점

본 연구 대상 후염소 투입 지점은 정수지 내에 접촉조를 만들어 투입하고 있는 구조이다. 이와 같이 후염소 투입 접촉조를 따로 설치할 경우 많은 시설비가 소요뿐만 아니라 수리적으로 매우 불리한 구조를 감수해야 한다. 따라서 접촉조를 따로 설치하지 않고 바로 정수지로 유입되는 관로에 염소를 투입하여 혼합시키는 것이 최선이다. 본 연구에서는 이와 같이 관로 내 직관 투입이 가능한 지 여부를 전산유체방법으로 평가하였다.

관로는 2400 mm관이고 염소투입관은 50 mm, 분사압력은 5 kg/cm² 이었다. 진단 결과 Fig. 5와 같이 1D(2.4 m)와 2D(4.8 m) 거리에서는 동심원 농도 차이가 매우 크게 나타났으나 4D지점에서 각 동심원에서 농도가 일치하는 것으로 나타났다. 즉 확산판 없이 직관으로 염소를 바로 투입하더라도 투입지점에서 4D 거리 즉 9.6 m 거리에서 혼합이 완료되는 것을 알 수 있다. 혼합거리를 줄이기 위해 투입관 전방에 확산판을 설치하여 혼합 강도를 높이는 방법은 선행 연구에서 직경 0.1D(24 cm)인 원형 확산판을 거리 0.2D(48 cm) 전방에 설치한 경우가 가장 효과적인 것으로 알려져 있으며 Fig. 6의 농도 그래프에서 보는 바와 같이 3D에서 완전 혼합이 가능하다(cho et. al, 2011). Fig. 7은 분사관에서 확산되는 벡터로 수류 흐름에 따라 투입된 염소수가 혼합되는 것을 보여주고 있다.

따라서 후염소 최적 투입 위치는 정수지 내부가 아니라 정수지로 유입되는 관로 상에 투입하는 것이 투입의 용의성이나 혼합효율, 시설 투자비 등 모든 면에서 최적 위치임을 알 수 있다. 혼합 거리는 확산판을 설치할 경우 3D 거리이고 확산판이 없는 경우는 4D에서 혼합이 완료된다.

3.3 적정한 도류벽 설계 방법

본 연구 대상 정수지는 Fig. 1에서와 같이 3-1 정수지에서도 정수지 내에서 a, b로 수로가 나누

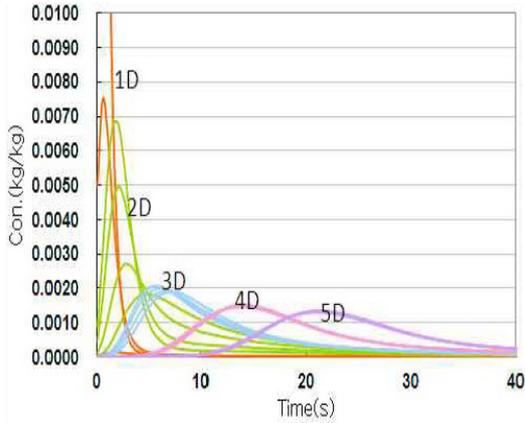


Fig. 5. The concentric concentration according to mixing distance at the pipe

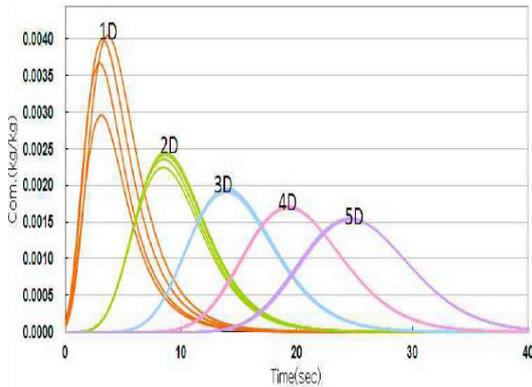


Fig. 6. The concentric concentration according to mixing distance at the pipe with plant(Diameter 0.1D, distance from the injection pipe : 0.2D)

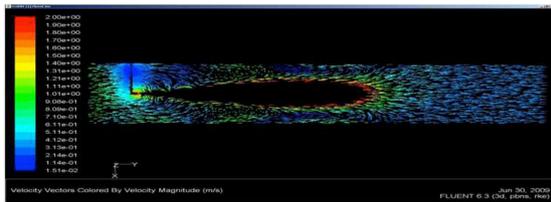


Fig. 7 The velocity vector of injected chlorine at the pipe

어지고 3-3 정수지도 a, b로 정수지 내에서 후염소 투입 및 접촉조가 시설되어 있는 구조로 되어 있다. 이와 같이 정수지 내에서 물의 흐름이 나누어지게 되면 전술한 집수정에서와 마찬가지로 유량의 균등한 분배가 어렵게 된다. 3-1 정수지와 3-3 정수지 내에서 분배되는 유량을 산

정한 결과 Fig. 8과 같이 매우 차이 남을 알 수 있다. 3-1정수지의 a, b로 방향으로 각각 53 %와 47 %로 유량 차이가 발생한 것을 분석해 보면 b 수로는 염소 접촉조에서 나오자마자 흐름의 방향이 바뀌면서 크게 에너지 손실을 겪게 되고 또한 정수지 벽면 쪽에서는 수로가 반으로 줄어들면서 또한 에너지 손실의 원인이 되어 전체적으로 유량의 흐름이 적어지는 요인으로 작용한 것이다. 3-3의 a, b는 유량이 29 %와 71 %로 b 방향으로 거의 2/3 유량이 유입되는데 이와 같은 유량 차이 역시 도류벽 간격의 변화와 전체 수로의 길이 차이에서 그 원인을 찾을 수 있다. 3-3a 쪽은 염소 접촉조에서 유입되는 도류벽의 간격의 거의 1/2로 작아져 있을 뿐만 아니라 전체적으로 유로 역시 3-3a보다 두 배 더 길어서 수류 흐름이 불리한 구조를 갖고 있다.

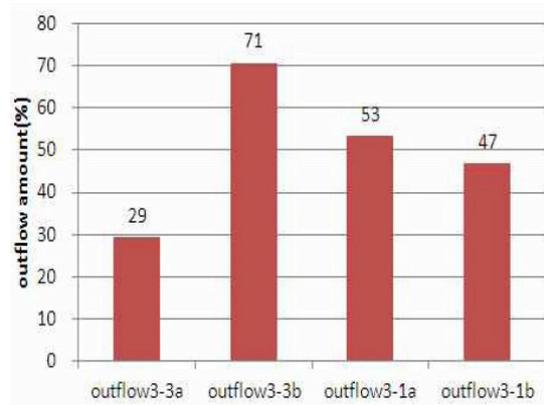


Fig. 8. Various distribution flow in the cleanwell

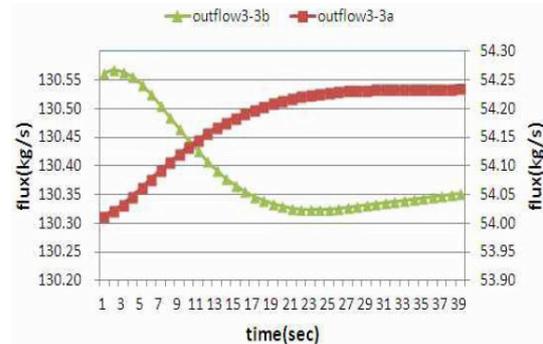


Fig. 9. Profile of outflow at the 3-3a, 3-3b cleanwell

Fig. 9는 순간 유량의 변화 추이를 나타낸 그림으로 3-3b 쪽으로는 순간 유량이 크게 증가하였다가 점차 감소하여 정상상태로 수렴하고 3-3a 쪽으로는 유량이 시간에 따라 조금 상승하여 유량이 일정해 지는 경향을 보이고 있다.

또한 이상적인 도류벽의 구조는 정수지 내 수류흐름을 관형흐름(plug flow)에 가깝도록 하는 구조로 선행 연구에 따르면 정수지 내 수류 흐름의 방향을 최소화하는 구조가 가장 이상적인 구조로 알려져 있다(cho1 et. al, 2011). Fig. 10은 정수지내 수류 흐름의 방향이 바뀌는 회수와 유동에서 사구간으로 평가할 수 있는 저유속 구간의 면적을 도식한 그래프로 수류 방향전환 횟수가 적은 구조의 모델일수록 사구간 면적이 적음을 알 수 있다. 따라서 정수지 도류벽은 일방향 흐름이 되도록 설계되어야 하며 또한 가능한 수류 흐름 방향이 바뀌는 횟수가 적도록 설계하는 것이 이상적이다.

3.4 2계열 정수지의 최적 운영 방법

본 연구 대상처럼 여과지 집수정에서 3-1정수지와 3-3정수지로 분배되는 경우는 유량 차이 발생이 필연적이기 때문에 염소 투입량을 적정하게 제어하기 어렵다. 이와 같은 경우 염소 농도를 정확히 제어하기 위해서는 집수정이나 집수정 전단에 염소를 투입하든지 아니면 집수

정에서 정수지로 유입되는 관로를 하나만 활용하는 두 가지 방법이 있을 수 있다. 그러나 본 연구 대상 정수장의 경우 집수정과 집수정 전단은 정수관로 대기 중으로 오픈 되어 있어 염소를 투입할 경우 대기 중으로 염소가스가 방출 될 가능성이 높아 대안으로 삼기 힘든 상황이다. 따라서 집수정 이후에 하나의 유입관로를 활용하는 방법이 유일한 방법이다.

먼저 3-3 정수지 계열을 유입관을 활용하고 3-1 정수지로 가능 유입 밸브를 잠그고 정수지 전체를 활용할 수 있는 방법을 생각해 볼 수 있는데 3-3 정수지로 유입되는 물을 3-3 a, b를 거친다면 송수관의 전단에 위치한 정수지 3-2, 3-1로 유입되는 것은 불가능하다. 따라서 3-3 유입라인을 활용하는 방법은 불가능하다.

두 번째로 3-1 라인을 활용하고 3-3라인의 폐쇄하는 경우이다. 이 경우 Fig. 11에서와 같이 정수지 3-1을 거친 정수가 3-2를 경유하여 송수관을 따라서 다시 3-3a로 유입되어 거친 다음 다시 3-3a 정수지 쪽으로 유입되어 송수관으로 송수되게 된다. 이와 같이 수류 흐름을 만들기 위해서는 기존의 3-3 a, b의 송수관 사이에 밸브를 신설해야 한다.

결론적으로 기존 수류 흐름은 집수정 → 3-1 → 3-2 → 송수관, 집수정 → 3-3 → 송수관으로 2계열화로 운영되던 방식에서 집수정 → 3-1

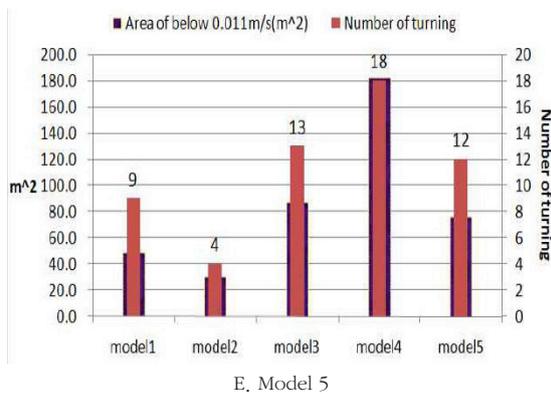


Fig. 10. Area of velocity below 0.011 m/s and number of flow turning in the each model (cho et. al, 2011)

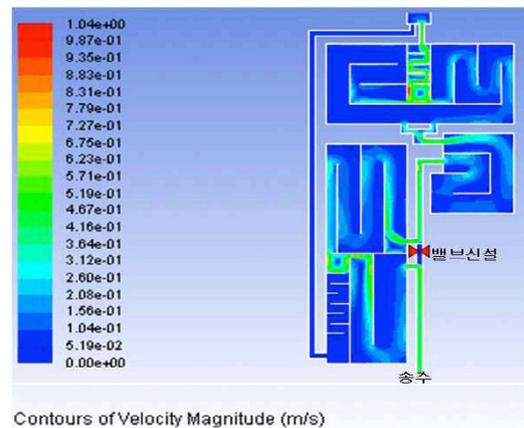


Fig. 11. After improvement, velocity contour at the cleanwell

→ 3-2 → 3-3a → 3-3b → 송수관으로 흐름을 1계열 방식으로 개선함으로써 수량 분배의 수리적 문제에 따른 염소투입 농도 제어의 어려움을 해결할 수 있었다.

4. 결론

전산유체역학적 기법을 활용하여 정수공정에서 후염소 투입공정의 최적 설계 방안 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 여과지 집수정에서 정수지로 유입되는 유입관로는 2개 이상으로 분리할 경우 균등한 유량의 분배가 어렵기 때문에 단일 관로를 형태로 설계되어야 한다.
- 2) 후염소의 투입 지점은 가능한 유입관로 중간에 직관으로 투입하는 것이 가장 경제적이고 효율적이며 시설비를 투자하여 정수지 내에 접촉조를 따로 만들 필요 없다.
- 3) 정수지 내 도류벽의 간격은 항상 일정해야 하며 수류 흐름은 일방향으로 흐르도록 설계되어야 한다.
- 4) 도류벽의 구조는 가능한 흐름의 방향 전환횟수가 최소화 되도록 설계하는 것이 사구간을 최소화하여 소독능을 향상시킬 수 있다.

참고문헌

Bishop Mark M.(1993) Improving the disinfection detention time of a water plant clearwell, Jour. AWWA, 85(3), 68-75

Mark M. Clark(1999) Improving clearwell design for CT compliance, AWWARF and AWWA

Imad A. Hannoun et. al(1998) Using hydraulic modeling to optimize contact time, AWWA, 90(8), 77-87

Cao, Z., Wiley, D. E., Fane, A. G.,(2001) CFD simulations of net-type turbulence promoters in a narrow channel, J. Membr. Sci, 185, 157-176

Cockx, A., Do-quang, Z., Line, A. & Roustan, M.,(1999) Use of computational fluid dynamics for simulating hydrodynamics and mass transfer in industrial ozonation tow-

ers, Chem. Eng. Sci., 54(21), 5085~5090

Panneerselvam, R., Savithri, S., Surender, G. D.,(2009) CFD simulation of hydrodynamics of gas-liquid-solid fluidised bed reactor, Chem. Eng. Sci., 64(6), 1119-1135

Seong Ho Ryu, Bong Ki Kwon, Dong Woo Lee, Kwang Yeon Kim, Dong Ku Chung, Jong Hoon Park(2003), CFD simulation of Power Block Underdrain System, Workshop presentation file in Korean Society of Water and Wastewater, 2003, 67-70

No Suk Park, Hee Kyung Park, Hyo Won Ahn(2004), Potentials of Computational Fluid Dynamics Technique for Optimization of Water Treatment Process, Journal of Korean Society of Water and Wastewater, 18(3), 291-300

Sun Ju Lee(2009), Evaluation of the Flashmixing Type using the CFD in the U,j Water Treatment Plant, Workshop presentation file in Korean Society of Water and Wastewater, 2009, 471-472

Tae Kyun Kim, Young June Choi, Young Mahn Jo(2011), Tracer test and Analysis by Computational Fluid Dynamics to Evaluate the Hydraulic Efficiency of Clearwell, Journal of Korean Society of Water and Wastewater, 25(5), 635-642

SeughoLim · ChulsooKim · Leesooyoon · Eonsang Park · Youngjae Lee, (2012) L/W Ratio-Evaluation of Expansion Reservoir through Tracer Test and CFD, Workshop presentation file in Korean Society of Water and Wastewater, 2012, 732-733

Youngman Cho¹, Soojeon Yoo, Jaesoon Roh, Jaehoon Bin, Kwangju Choe, Kwangug Lee, Gibong Lee, Jeonggyu Lee,(2011) Evaluation of pressurized water diffusion in water treatment process using CFD, Korean society of environmental engineers, 33(5), 319-367

Youngman Cho, Jaesoon Roh, Jaehoon Bin, Tae Kyun Kim, Young June choi, (2011) Evaluation of economic L/W ratio and the best shape of baffle in clearwell by using CFD, Korean society of environmental engineers, 33(6), 432-438