

CFD와 실증실험 적용을 통한 최적혼화 방법 도출 및 수리구조개선으로 정수장 혼화방법 개선

유민수* · 김홍집**†

The Mixing Method Improvement through Optimized Water Supply Structure using the CFD and Verification Test in Water Treatment Plant

Minsu You*, Hong Jip Kim**†

Key Words : Hydraulic Mixing(수류식 혼화), Mechanical Mixng(기계식 혼화), Coagulation(응집), Water Treatment Facility(정수설비), CFD(수치해석), Verification Test(실증실험)

ABSTRACT

The existing mixing basin is comprised of 16 basins and each basin has different inflow flux and input chemical flow rate. Therefore, the mixing efficiency of the existing mixing basin was very lower due the inappropriate distribution channel and the nonuniform flow pattern, In this study, in order to investigate the flow pattern and the mixing efficiency, there were simulated the flow patten, the flow stability, and the mixing pattern by using the CFD analysis and experiment for the previous model and the advanced model. As a result of the numerical calculation, CFD results confirm that the weir height is increased to 0.2m from the existing model to obtain the most optimal flow. Because the head water level was more than 0.7m, which showed sufficient mixing strength. Also, in the verification test, the zeta potential, the flow current, the cohesive floc size, and the filtration time were compared with mechanical mixing, showing superiority in all items. By replacing the existing mechanical mixing with a head water level, reducing the number of used mixing basin from 16 to 2, and improving the weir drop height, the length from the mixing basin to the coagulation basin could be reduced by approximately 30m and the flocculation efficiency was improved.

1. 서 론

혼화·응집이란, 용수나 폐수에 화학약품을 첨가하여 음전하로 대전되어 안정한 상태의 콜로이드 입자를 전기적으로 중화시킴으로서 불안정하게 만들어 주는 일련의 조작을 말하며, 금속염이 수화되면서 생성되는 양전하를 띤 착염이 음으로 대전된 콜로이드 및 용존성 유기물질을 중화 후 흡착시켜 침전성이 양호한 플럭(floc)을 형성시켜 보다 큰 플록을 생성할 수 있도록 유도하는 수처리 공정이다. 혼화공정은 정수처리공정에서 외형적으로 규모가 작고 수초에서 수분정도

짧은 체류시간을 갖는 전처리 공정이지만 후속공정 전체에 걸쳐 영향을 준다는 점에서 매우 중요한 공정이다⁽¹⁻⁹⁾.

해석대상인 OO정수장의 혼화방식은 기계적 교반 방식을 사용하고 있으나 혼화지별로 원수유입 유량과 응집제의 불균등으로 인해 혼화효율 차이가 크며, 긴 혼화·응집지 분배수로로 인해 응집·침전 효율이 낮은 것으로 나타나 개선방안 강구가 요구되고 있다⁽¹⁰⁾. 이에 따라 본 연구에서는 CFD와 수리계산을 통하여 “위어의 낙차를 이용한 혼화방식”의 개선 방안을 제시하고 이를 통하여 최적화를 도출하였다.

최적화의 결과 기존의 각 착수정 및 혼화지에서 침전지가

* 한국수자원공사 (Korea Water Resources Corporation)

** 충남대학교 기계공학과 (School of Mechanical Engineering, Chungnam National University)

† 교신저자, E-mail : khongjip@cnu.ac.kr

Table 1 Mixing process facility and operation status

Operating Status	
Facility capacity	400,000m ³ /day (operation rate 57%)
Receiving well	A total of 6 basin, (2 lines, 4 each)
Mixing basin	A total of 12 basin, each of six out of 16, are in use

지 이르는 분배수로 길이가 약 30m 단축되는 부수적인 효과도 거둘 수 있어, 수로에서의 접촉시간 과다로 인한 응집·침전효율의 저하를 상당부분 해소할 수 있다. 이로부터 수질 개선이 됨을 확인하였다.

2. 본론

2.1 해당 정수장 혼화지 제원

OO정수장의 혼화지는 유입구를 기준으로 좌우에 A, B계열로 나누어져 Table 1과 같이 계열별 착수정과 혼화지는 각각 4지, 8지로 구성되어 있다.

Fig. 1과 Fig. 2의 유동전류(Streaming Current; SC) 변화와 제타전위(Zeta potential)⁽¹⁻⁹⁾를 조사한 결과 혼화지로 유입되는 유량이 불균등하여 문제가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 원인은 긴 분배수로, 약품분배수로의 문제 등 최적화가 되지 않은 점이 있어 응집지 유입부에 워터챔프를 설치함으로 급속혼화를 통하여 개선하는 의견이 검토되었으나 이에 대한 것은 과다한 공사비로 사업시행이 유보되었다.

이에 혼화공정에서 각 혼화지별 유량 균등분배는 공정개선 영역에서 제시한 수리 구조물 개선의 경우 투자비 대비 경제성이 낮아 도입에 어려움이 있어, 착수정, 혼화지 등 구조물 손상을 최소화 할 수 있는 공정으로 개선하는 방안을 검토하였다.

혼화방식에는 착수정의 원수 유입관로에 설치하는 방식의 펌프분사식 혼화(Pump Diffusion Mixer), 인라인 고정식 혼화(In-line Static Mixing) 방식이 추가적 손실수두가 없고 혼화효과도 우수하며 혼화강도의 조절이 가능하고 소비 전력도 기계식에 비해 대폭 절감이 가능한 등 많은 장점이 있어 우선적으로 고려하였으나, OO정수장에 적용은 기존 구조물의 간섭과 비좁은 공간으로 인해 설치가 불가능한 것으로 나타났다.

2.2 수리변경 사항

착수정의 여유수두를 활용한 수류식 혼화(Hydraulic Mixing) 방식인 “위어의 낙차를 이용한 혼화방식”을 검토하였다.

변경모델의 경우에는 낙차혼화 조건인 최소 0.5m이상의

낙차를 확보하기 위해 계열당 각 1개의 착수정을 이용함으로써 Fig. 3과 같이 수리구조를 변경하였다. 이에 대한 내용은 Table 2와 같이 변경하였고, 운전수위는 Table 3과 같이 변경된다. 다만, 이에 대한 변경안(案)은 CFD해석과 수리계산을 통하여 결정하게 되었다.

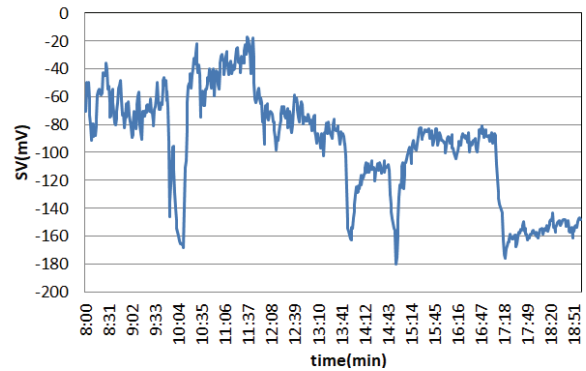


Fig. 1 Change of current flow (SC) by outlet point of mixing basin

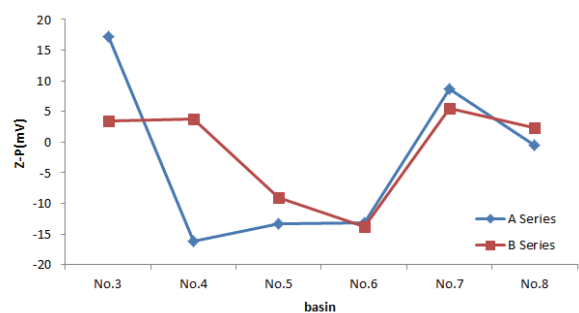


Fig. 2 Change of Zeta potential for each basin

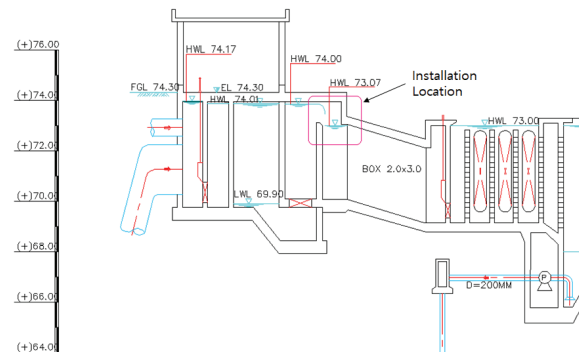


Fig. 3 Hydraulic system of mixing method using head drop

Table 2 Changes to existing water purification plant equipment for optimization

	Previous M.	Advance M.	Remarks
Inflow gate Receiving well	1×1m gates 8	1×1m 2 ea + 1.7×1.7m 2 ea	Facility capacity 700,000m ³ /day
Inlet of Mixing basin	1.5×1.5m	3×3m	Prevention of excessive rise level of receiving well
Weir crest of A, B Series 1, 2 mixng basin	EL. 73.22	EL. 73.425	Raising the head drop to weir 0.205m height

Table 3 Changed operating water level of previous water purification plant facilities

	Previous Water Level	For the changing Water level (700,000 tons/day)	Remarks
Inlet region of receiving well 착수정 유입거	EL. 73.56	EL. 74.19	Floor above the building: EL. 74.60
Water level of receiving well	EL. 73.40	EL. 73.967	
Water level of receiving well(1)	EL. 73.39	EL. 73.838	
Weir crest	EL. 73.22	EL. 73.425	
Divided water way (2)	EL. 73.07	EL. 73.07	
Head (1)-(2)	0.32m	0.768m	

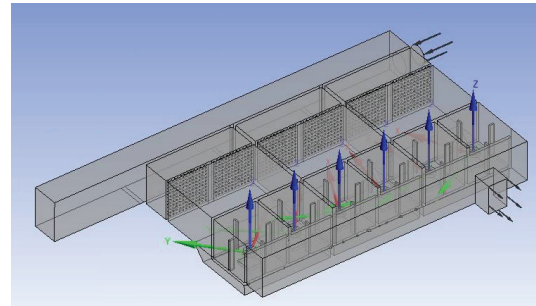
3. CFD 해석

3.1 해석방법

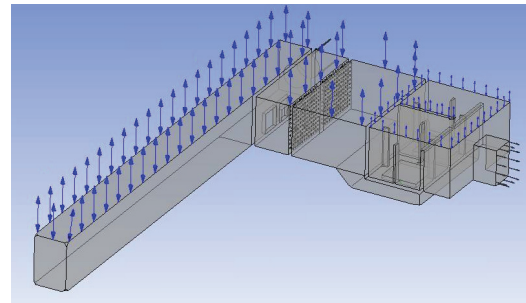
OO정수장내 유동패턴을 확인하기 위하여 Fig. 4와 같이 CFD 해석하였다. A와 B계열은 대칭적 형상을 갖으며 유동 특성 또한 대칭적으로 발생 예상됨으로 B계열만을 대상으로 하였다.

정수장의 수위와 위어의 낙차를 이용한 믹싱을 해석하기 위하여 부력을 고려한 Two-phase(물과 공기) 해석을 적용하였고 약품에 대한 검토는 하지 않았으며 난류모델은 혼화기내 믹서의 회전을 정확히 모사하기 위하여 난류모델은 SST(Shear Stress Transport)을 적용하여 수치해석을 실시하였다⁽¹¹⁻¹⁵⁾.

계산격자는 Tetra+Prism 격자를 채용하여 전체 유동장에 대하여 격자의존성(격자의 양에 따른 출구의 속도값의 유의성 98%이상)을 기준으로 기존모델의 경우 Nodes는 1,013,777와 Elements는 5,113,109, 변경모델 경우의 Nodes는 941,985



(a) previous model



(b) advanced Model

Fig. 4 Modeling for the CFD analysis

Table 4 Parameters for CFD analysis

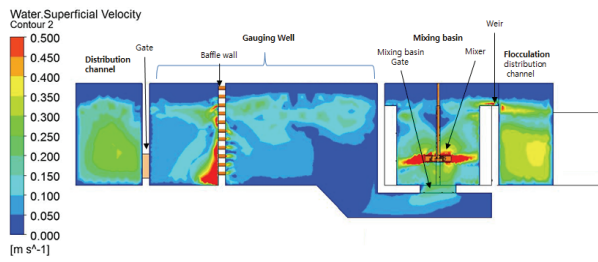
	Weir Height	Gate of receiving well		Inlet gate of Mixing basin
		ea	size	
Pre. M.	73.22m	3	1×1m	1.5×1.5m
Adv. M1	73.22m	1	1×1m + 1.7×1.7m	3×3m
Adv. M2	73.42m	1		
Adv. M3	73.62m	1		

와 Elements는 3,857,079로 충분한 계산격자를 생성시켜 적용하였다⁽¹⁶⁾. Fig. 4에서 입구조건과 출구조건 모두 유량조건 (200,000m³/일, $Re_{inlet}=2.7 \times 10^6$)으로 적용하였으며, 상부는 Free slip wall 조건을 사용하였다. 그리고 믹서 해석을 위한 경계조건으로 계산 영역안에 회전부와 정지부를 설정하였으며, MFR (Multiple Frame of Reference)를 사용하였다. 여기서 회전부와 정지부 사이의 경계면에서 정보 전달방식은 “Frozen Rotor” 방식을 사용하였으며 사용된 S/W는 ANSYS-CFX14이다⁽¹⁷⁾.

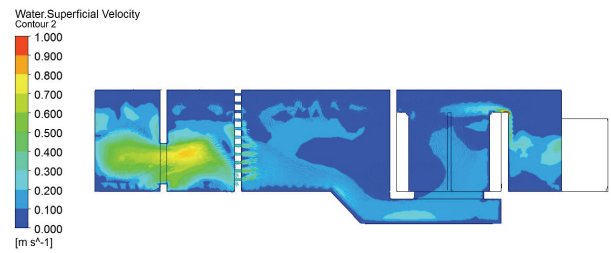
3.2 해석모델

본 연구에서는 Table 4와 같이 기존 기계식 교반을 사용한 기존모델과 위어의 낙차를 사용하여 혼화를 하기 위한 변경모델에 대한 해석을 하였다.

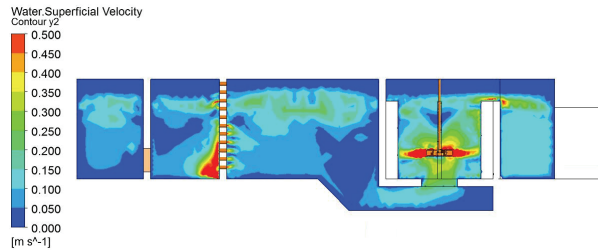
기존과 수리변경시 모델의 차이점을 비교하여 보면 기존 착수정 유입 분배수로는 원안대로 적용되었으며, 변경모델



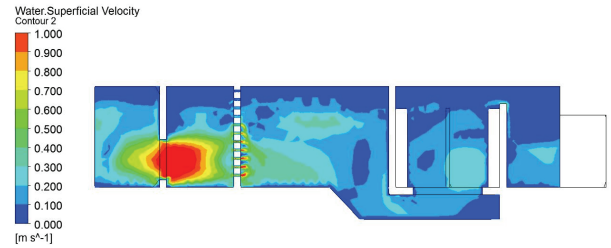
(a) central plane of mixing basin #2



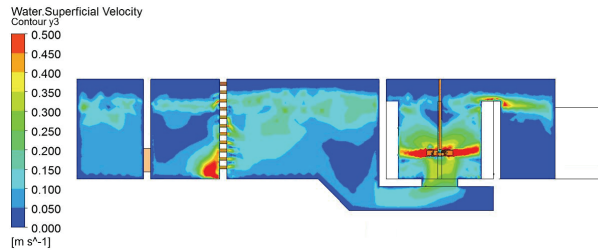
(a) Adv M1 (weir height : 73.22m)



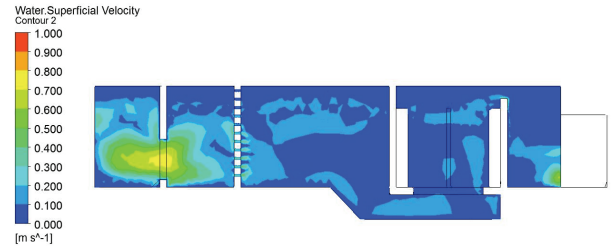
(b) central plane of mixing basin #4



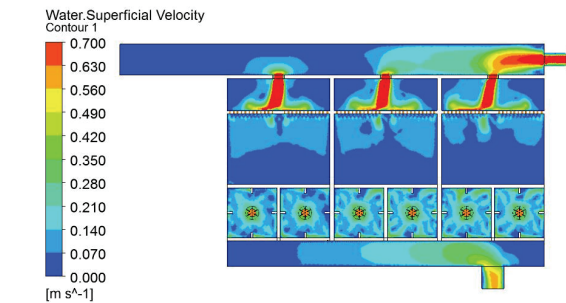
(b) Adv M2 (weir height : 73.42m)



(c) central plane of mixing basin #6



(c) Adv M3 (weir height : 73.62m)



(d) EL.70.5m

Fig. 5 Analysis results of previous model
(Velocity shade contour, top view)

Fig. 6 Analysis results of advanced model
(Velocity shade contour, side view)

의 경우는 계열당 1개의 착수정만 이용하므로 나머지 착수정 수문은 폐쇄하였다. 즉 계열당 1개의 착수정으로 전체물량을 처리함으로 높아진 수위에서 최적의 낙차수위를 찾기 위하여 0.2m씩 위어를 증고하면서 해석을 실시하였다.

기존모델의 기계식 믹서를 해석하기 위하여 전체 6개의 축을 생성시켜주었으며, 시계반대방향으로 68rpm 회전시켜 주었다. 변경모델에서는 기계식 믹서를 사용하지 않고 낙차를 이용하여 해석을 하기 때문에 필요낙차수두(0.5 m이상) 확보를 위하여 위어를 0.2m 씩 상승시키며 최적의 낙차수두를 해석을 통해 검토하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 기존 모델

OO정수장의 기존 모델에 대한 해석결과는 Fig. 5와 같다. Fig.5에서는 6개의 혼화지를 기준으로 보았을 때 혼화지 2지, 4지, 6지의 단면의 결과를 (a), (b), (c)에 표시하였으며, (d)는 위에서 보았을 때 수위 70.5m의 단면의 속도등고선을 표시하였다. Fig.5와 Fig.6에 Legend(표시)에 표시된 water.superficial.velocity의 의미는 공기와 물의 해석결과에서 물의 속도만 나타내기 위하여 표현된 것이다.

Fig. 5에서 보면 알 수 있지만 분배수로가 길게 세팅되어 착수정으로 유입되게끔 구성되어 있으나 이는 CFD결과(Fig. 5(d))에서 보듯이 분배수로 끝까지 유량이 가지 않고 착수정 수문(1×1m)으로 유입에서 다른 유량이 들어옴을 알 수 있다. 이는 형태로 인한 균등 압력분배가 되지 않으므로 즉 최적화되지 않았기 때문이다.

이러한 현상으로 3개의 착수정 및 6개의 혼화지에 유량이 불균형하게 유입되고 있음을 알 수 있다. 특히 기존의 설비

에서는 믹서 밑단에 약품주입구가 있으므로 유량이 불균형하게 유입되면 유입유량 대비 약품량의 비율이 적정범위를 벗어나게 되고 그로 인해서, 부적절한 혼화 후 위어를 넘어가게 된다. 결과적으로 혼화지별 불균형한 혼화는 전체적인 혼화효율을 떨어뜨리게 한다.

4.2 수리변경 모델

낙차혼화로 변경을 위해 수리 변경시 적절한 교반강도를 위한 낙차수두 확보를 위해 2개의 착수정만 이용하고 나머지 6개 착수정의 유입수문을 폐쇄하였고 기존모델 수리형상을 이용하면 손실수두의 증가로 인해 수위가 높아져 물이 외부로 넘치기 때문에 혼화지의 유입수문을 확장해야 한다. 또한 필요낙차 수두를 확보하기 위하여 최적의 위어중고 높이 설정은 중요하다. 해석에서는 Table 4에서 언급하였듯이 기존의 위어높이인 73.22m에서 0.2m씩, 상승시켜 주어 모델링하여 Fig. 6에서 Fig. 7와 같이 위어높이에 대한 결과를 나타내었다.

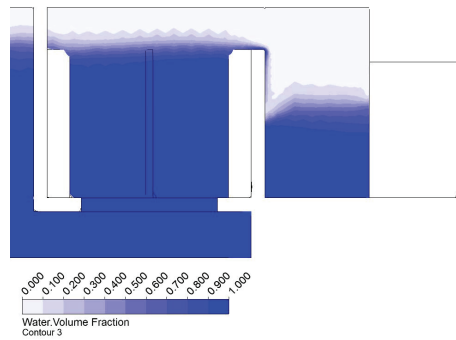
Fig. 6에서는 혼화지 2지의 중심단면을 기준으로 위어변화에 대하여 속도 등고선을 나타내었다. 그리고 Fig. 7에는 혼화지와 응집지 유입 분배수로 중심으로 수위 검토를 위하여 Water를 기준한 체적비(Volume Fraction)를 나타내었으며 Fig. 7의 검토시 파란색으로 표시된 영역은 물만 있는 경우이며, 연한 회색은 공기만 있는 경우를 나타낸다. 물과 공기가 희석되어 있는 부분은 연한 파란색으로 처리하여 주었다.

Fig. 6의 경우를 살펴보면 위어의 높이에 따라 착수정과 혼화지의 영역의 속도차이가 남을 알 수 있다. 기존 위어의 높이를 사용하면 유입된 유량이 저항 없이 위어상부로 그대로 넘어가고 있다. 반면에 위어높이를 0.2과 0.4m 증고한 변경2와 3의 경우에는 분배수로로 천천히 넘어가고 있음을 알 수 있다. 다만 위어높이가 0.4m의 경우는 혼화지의 수위가 너무 높아져 외부로 넘치는 경우가 발생할 것으로 판단된다.

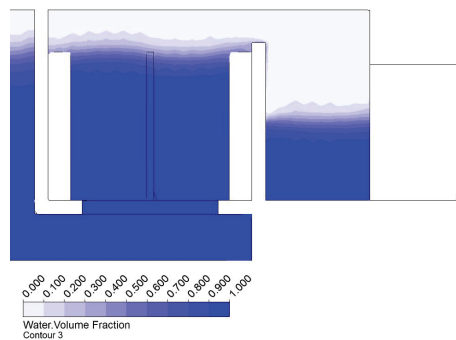
이러한 결과는 Fig. 7의 체적비 결과를 보면 확연하게 구분할 수 있다. 기존 위어높이의 경우는 저항 없이 위어높이를 빠져나감으로 응집지로 유입되는 분배수로의 수위가 계획보다 낮음을 알 수 있다. 반면에 위어수위가 0.4m의 경우인 Fig. 7(c)의 경우는 혼화지 수위가 너무 높아지고 분배수로의 수위도 너무 높은 것으로 판단된다. 수위의 결과로 살펴본 경우 위어의 높이를 0.2m로 올려주는 것이 최적으로 판단된다.

본 해석에서 약품의 혼화는 해석하지 않았지만 약품의 주입구가 위어의 높이 0.3m 위에서 투입되도록 변경 설계하였다. 따라서 주어진 위어로 인한 낙차의 높이 검토는 약품혼화강도를 예측할 수 있다.

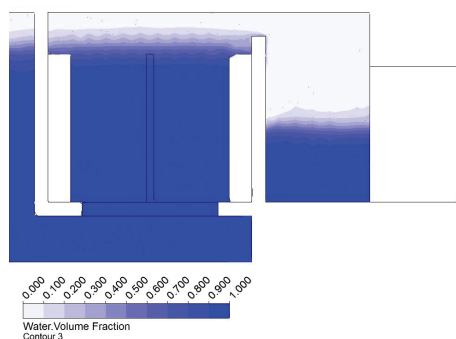
변경 2나 변경 3의 경우와 같이 위어높이를 증고시켜 수두차이를 크게 하여 혼화강도가 가장 높여 주어야 하지만 너



(a) Adv. M1 (weir height : 73.22m)



(b) Adv. M2 (weir height : 73.42m)



(c) Adv. M3 (weir height : 73.62m)

Fig. 7 Analysis results of advanced model (Volume Fraction: Water)



(a) Expansion of the inlet of (b) Increase of weir area the mixed basin

Fig. 8 Improving improvement through optimization

무 높게 올리면 착수정위로 물이 오버플로(overflow)하게 되므로 최적의 위치를 검토하였다. 즉 변경 3의 경우 착수정에서 오버플로의 위험성이 있기 때문에 변경 2의 경우가 필요 낙차수두로 적정함을 확인할 수 있다. 즉 약품을 혼합시키기

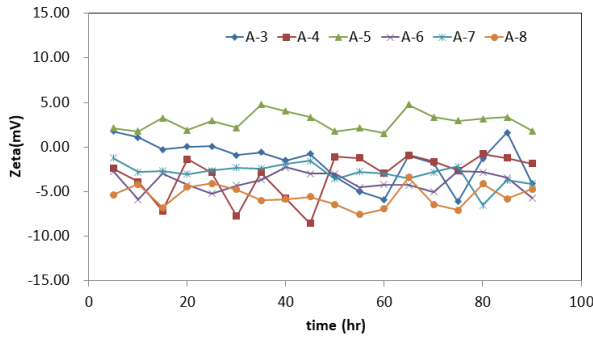


Fig. 9 Zeta (mV) change for mechanical mixing method

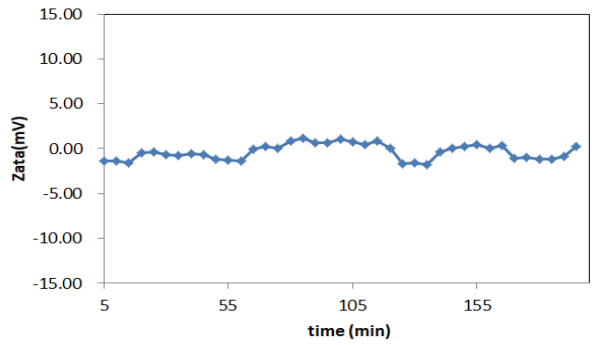


Fig. 10 Zeta (mV) change for Head type mixing

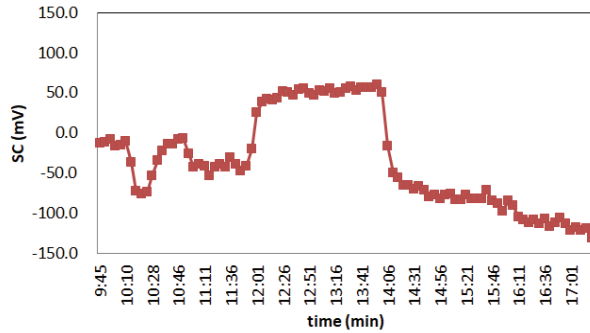


Fig. 11 SC change for mechanical mixing method

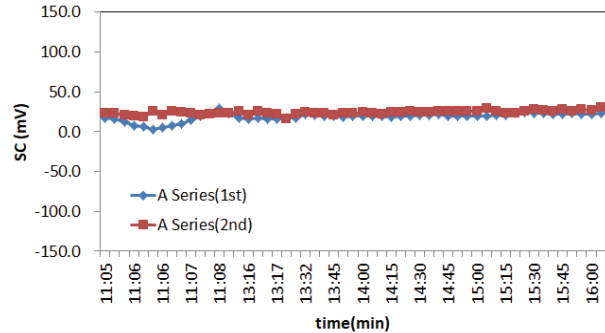


Fig. 12 SC change for Head type mixing

적당한 필요낙차수두 0.05m 이상을 확보하였다.

5. 실증실험

5.1 개요

CFD의 최적화 해석과 수리계산을 통한 최적화 결과로부터 위어의 증고 높이를 0.2m로 결정하였으며, Fig. 8과 같이 구조변경하였다. 이 실증실험에서 지별 혼화효율 평가 및 지점별 혼화상태를 계량 평가하기 위하여 혼화지별로 10분 간격으로 18회 제타 전위값과 유동 전류값을 측정하였다.

응집지 1단에 플러성장 측정장치를 설치 후 연속모니터링을 하였으며 응집상태, 응집지 플록사이즈 변화추이, 혼화방식별 침전지 탁도 변화추이를 파악하였으며, 이를 통한 여과 지속시간의 비교를 통하여 개선여부에 대한 신뢰성을 확인하였다.

5.2 실험결과

제타전위 측정 결과를 보았을 때 기존 기계식 혼화방식의 경우 Fig. 9에서 보면 A계열의 각지별로 제타전위 측정결과가 제각각이었지만 낙차혼화로 변경 후 Fig. 10과 같이 일정하고 안정된 값을 보여주고 있다.

기존 기계식 혼화방식의 경우 Fig. 11에 보면 각 지별로

유동전류가 제각각이었지만 낙차혼화로 변경 후 Fig. 12와 같이 모두 안정된 값을 보여주고 있다. 기계식에서 낙차식으로 전환 시 짧은 시간 안에 안정된 값을 찾아가는 것을 볼 수 있었다.

낙차시 혼화로 변경한 후 응집지에 유입되는 플러크기 분포를 조사한 결과 0.16~0.36 FSI로 고른 분포를 나타내었다. 기계식 혼화방식 침전지 탁도는 평균 0.66NTU이나 낙차혼화 적용시 침전탁도는 평균 0.59NTU로 12% 정도 낮아졌다. 침전지 탁도가 낮아짐으로서 역세척 주기도 길어져 약품비 및 역세척에 들어가는 전력비도 절감되었다.

기존과 개선시스템의 여과지속시간을 비교한 결과 Fig. 13에서 보는 것과 같이 66%, 여과지속시간의 상승을 가져왔다. (평균 45% 지속시간 향상)

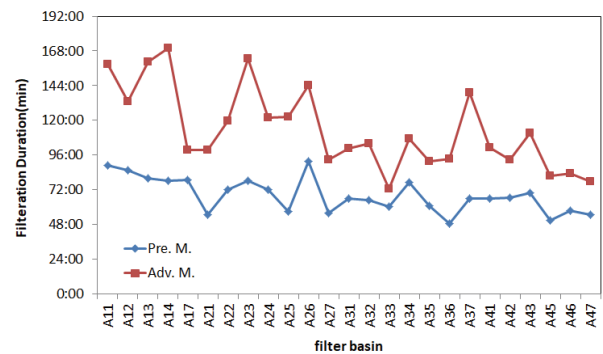


Fig. 13 Comparison of filtration duration

6. 결 론

기존의 기계식 혼화를 정수장의 수리개선을 CFD와 수리 계산을 통하여 최적화를 수행하였고 구조개선후 실증실험을 한 결과를 요약하면 다음과 같다

1) 혼화지 위어의 높이를 기존모델에서 0.2m로 증고하고 착수정 수문을 추가한 결과가 가장 최적의 유동을 얻을 수 있음을 CFD결과를 통하여 확인하였다. 이는 착수정 이후의 수두 증가로 인해 낙차수두도 0.7m 이상되어 충분한 혼화강도를 보여주었기 때문이다.

2) CFD해석을 통해 구조개선을 예측하였으며 실증실험을 한 경우 제타전위, 유동전류, 응집지 플록사이즈, 여과시간을 기계식 혼화와 비교한 결과 모든 항목에서 우위를 나타내었다.

3) 이에 대한 그 원인은 유량분배가 균일하지 못한 기존 착수정의 구조적인 결함에 있다고 볼 수 있고 수리개선을 통해 착수정 2지만을 사용하여 균등한 약품분배와 혼화를 실시하여 균등효과와 충분한 낙차수두에 의한 무동력 낙차혼화 실시로 기존 기계식 혼화기 12기를 사용하는 것 이상으로 혼화효과가 높고 아울러 연간 약 1억의 에너지 절감효과를 볼 수 있었다.

이와 같이 개선으로, 기존의 각 착수정 및 혼화지에서 침전지까지 이르는 분배수로 길이가 약 30m 단축되는 부수적인 효과도 거둘 수 있어, 수로에서의 접촉시간 과다로 인한 응집·침전효율의 저하를 상당부분 해소할 수 있다.

References

- (1) 한국수자원공사, 기존 정수장 효율향상 기술, 1998, 환경부
- (2) Appiah Amirtharajah, Mark M.Clack, and R. Rhodes Trussell, 1991, "Mixing in Coagulation and Flocculation", AWWA, pp. 35.
- (3) 환경부, "상수도 시설기준," 한국상하수도협회, 2004, pp.

- 317~320.
- (4) 남윤환, 박철중, 임성은, 박태진, 2009, "정수설비핸드북", 홍릉과학출판사, pp. 237~300.
- (5) 김홍석, 한무영, 2003, "정수시설의 종합설계와 유지관리", 대한상하수도협회, pp. 83~116.
- (6) 백흥기, 전항배, 신항식, 1994, "급속혼화공정 최적운영 및 설계조건에 대한 연구", 대한환경공학회 춘계학술연구발표회.
- (7) 김태선, 김진수, 류신하, 서광석, 하창원, 2005, 전산유체(CFD)와 입자동역학을 이용한 혼화·응집공정 설계기법 및 효율향상 방안연구, 한국수자원공사.
- (8) McConnachie, G. L and Liu, J. "Design of baffled hydraulic channels for turbulence-induced flocculation". Water Research, Vol. 34, No. 6, 2000, pp. 1886-1896
- (9) Mark M. Clack, 외 7인, "Selection and Design of Mixing Processes for Coagulation", AWWA, Denver, 1994, pp 9.
- (10) 김영도, 배상식, 박영오, 박대진, 반재혁, 고태근, 최동규, 고수현, 2009, 전북지역본부(고산정수장) 수도시설 기술진단, 한국수자원공사.
- (11) Rodi, W, Turbulence Models and Their Application in Hydraulics-A State of the Art Review, 1980, International Association of Hydraulic Research publication, June
- (12) Hirt, C. W. and Nichols, B. D., 1981, "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries", Journal of Computational Physics, Vol. 39, pp. 201-225.
- (13) John E. Richardson and Karel Pryl, 1999, Computational Fluid Dynamics, CE News, October, pp. 74-76.
- (14) John E. Richardson and Karel Pryl, 1999, Computational Fluid Dynamics, CE News, October, pp. 74-76.
- (15) 김사랑, 2013, CFD분야 연구동향, 한국유체기계학회 논문집, 제 16권, 제2호.
- (16) 한국수자원공사, 2013, "강제설비 진동해석 가이드라인 수립 용역 보고서
- (17) ANSYS-CFX14 Manual, ANSYS