

CFD모사 기법을 이용한 관내 혼화장치내 흐름 특성 평가

Evaluation of Flow Characteristics within In-Line Mixer for Water Treatment using CFD Technique

박대진^{1*} · 박영오¹ · 박노석¹ · 김성수¹ · 왕창근²

Dae-Jin Park^{1*} · Young-Oh Park¹ · No-Suk Park¹ · Seong-Su Kim¹ · Chang-Kuen Wang²

1한국수자원공사, 2충남대학교 환경공학과

(2008년 3월 4일 접수 ; 2008년 6월 5일 채택)

Abstract

The modified in-line mixer which was suggested in this study for small water treatment facilities was evaluated on the performance of coagulation. For the objectives of this research, computational fluid dynamics(CFD) simulation was applied for analysis of flow characteristics within the modified in-line mixer. For verifying the results of CFD simulation, wet tests for the pilot plant were conducted. The wet test was to measure the actual coagulant dispersion distribution on the overall cross-section at a distance of 5.5D from the chemical injection point. From the results of CFD simulation and wet test, it was shown that the coagulant dispersion within the modified in-line mixer was occurred more uniformly than within the existing PDM(Pump diffusion Mixer). The results have confirmed the modified in-line mixer had several advantages compared with the existing PDM in terms of dispersion efficiency.

Key words : in-line mixer, pump diffusion mixer, CFD simulation, wet test

주 제 어 : 관내 혼화, 펌프 디퓨전 혼화, 전산유체해석

1. 서론

수처리 공정에서 혼화공정은 가장 규모가 작고 짧은 체류 시간을 가지지만 입자성 물질을 제거하기 위한 가장 우선되는 공정이다. 따라서 후속공정 전체의 제거효율에 영향을 준다는 점에서 매우 중요한 공정이다(박영오 등, 2008). 그러므로 혼화공정을 최적화 시키면 후속공정의 효율을 향상시킬 수 있게 되어 결과적으로 전체적인 정수처리 효율을 향상

시킬 수 있게 된다. 급속혼화공정에서 급속계 응집제의 확산은 이론적으로 1초 이내에 이루어지는 것을 권유하고 있지만, 실제 설계나 운전여건상에서는 1~2초 내에 이루어지는 것을 허용하고 있다(Hudson and Wolfner, 1967)(Vrale and Jorden, 1971). 그러나 기계적 혼화 방식을 사용하고 있는 많은 정수장에서는 2초 이내에 응집제를 공정수내에 골고루 확산시키는 것이 불가능하기 때문에 약 30~40%정도 과잉 투입하여 콜로이드와의 충돌기회를 증가시키고 있는 실정이다(Kawamura, 1991).

*Corresponding author Tel: +82-42-629-3722, Fax: +82-42-629-3739, E-mail: parkdj@kwwater.or.kr (Park, D. J.)



Fig. 1. 방해판(Deflector)과 PDM내 알루미늄 스케일 형성.

최근 응집제가 원수에 투입됨과 동시에 가능한 빠르게 수중에 확산시킬 수 있는 장치로서 펌프 디퓨전 혼화장치(PDM: Pump Diffusion Flash Mixer)의 적용성이 증가 추세에 있다. 펌프 디퓨전의 경우 여러모로 기존의 기계식 혼화장치의 단점을 해결할 대안으로서 자리매김하고 있는데, 특히 기존 기계식 혼화공정이 필요로 한 긴 체류시간, 소음, 과도한 에너지의 소비 및 높은 유지관리 비용 등의 문제가 저감됨에 따라 수처리 공정에서 펌프 디퓨전의 사용이 권장되고 있다 (Kim & Lee, 2006). 또한 Clark 등(1994)은 여러 혼화 장치의 혼화효율을 추후공정인 침전성능으로 평가하였는데, 그 결과 기계식 혼화장치와 같은 효율을 얻는데 in-line mixer 또는 static mixer의 경우 더 작은 양의 응집제가 소요됨을 발표하였다. 박 등은 상용 PDM에서 중요한 운영인자로서 가압수/원수 유입속도의 비를 선정하였으며, 충분한 혼화효율을 생성시키기 위해서는 20~28(무차원)가 되어야 한다고 하였다(박영오 등, 2008a).

그러나 현재 도입되고 있는 펌프 디퓨전 혼화장치의 경우 외부에서 수류의 흐름이 관측되지 않고(대부분 불투명한 금속 재질로 이루어진 관수로 흐름), 유입 수질 및 수량에 따른 운전 지침이 수립되어 있지 않아 성능의 최적화를 이루는데 미흡한 실정이다. 또한 혼화강도(mixing intensity)의 산정 방법론이 기존의 기계식 혼화 장치와 상이하여 운전자의 혼란을 가중시키며(실험실에서는 기계식 혼화를 이용하는 jar-test로 응집제 투입량을 결정함), 실공정 규모에서 효율 검증에 관한 사례 연구가 거의 없어서 설치 후 관내에서 불균등한 혼화로 인한 침전지별 수질차이 등의 문제점이 발생하는 경우 있다. 관내 불균등한 혼화는 통상적으로 PDM내에 장착되어 있는 방해판(deflector; 관 중앙에 위치하면서 원수 및 가압수의 속도에너지를 소산시키면서 난류를 증가시키는 판)의 편심 시공 또는 PDM을 운전하면서 주입되는 응집제를 구성하는 알루미늄 점착물의 성장 등에 기인한다.

다음 Fig. 1은 국내 PS 정수장내 설치된 PDM내부 방해판 주변의 알루미늄 화합물들이 성장되어 있는 사진이다. PS정수장은 2년째 PDM을 운전 중이며, 사진에 나타난 점착물 대부분은 알루미늄 성분이었다(박영오 등, 2008b).

이에 PDM의 혼화효율을 결정하는 주요 인자를 앞서 언급된 PDM 시공 및 운영상의 문제점을 토대로 도출하자면 관내 설치된 방해판 구조의 적정성으로 귀결됨을 알 수 있다. 기존 상용 PDM의 가장 큰 문제점은 에너지 소산을 일으키기 위한 방해판이 하나만 장착되어 있어 이 방해판이 시공될 때 편심 된다면, 점착되는 알루미늄수화물이 중심으로부터 불균형하게 성장될 때에는 가압수와 같이 분사되는 응집제가 편류에 분사되어 급속혼화의 효율이 떨어진다는 것이다. 본 연구에서는 기존의 일반적인 PDM의 수리구조 개선안을 제시하고 관내혼화장치의 혼화효율에 가장 큰 영향을 주는 혼화구역내의 흐름 특성을 CFD(Computational Fluid Dynamics; 전산유체역학) 기법으로 분석하였다. 또한, 예측되는 흐름특성에 의한 혼화효율을 검증하기 위해 개선된 관내혼화장치를 대상으로 wet test를 수행하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 개선된 관내혼화장치 수리 구조

다음 Fig. 2는 기존에 주로 사용되는 PDM과 본 연구에서

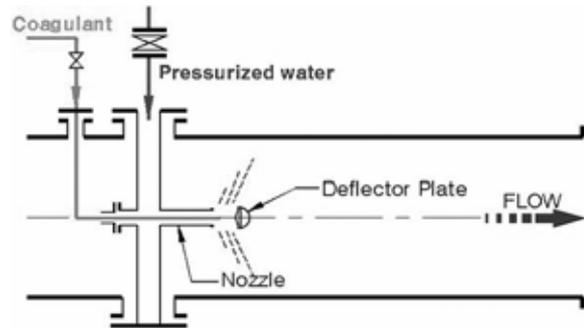


Fig. 2. 기존 PDM 개요.

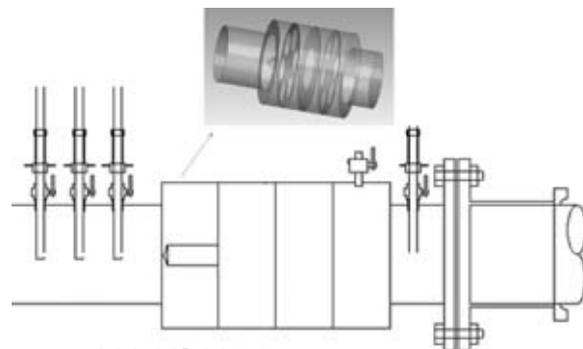


Fig. 3. 개선된 관내혼화장치 개요.

제안하고자 하는 개선된 관내혼화장치의 개요도를 나타낸 것이다. Fig. 2에서 나타낸 바와 같이 기존 PDM의 경우에는 가압수와 같이 분사되는 응집제가 유일하게 장착된 방해판에 충돌하여 확산되면서, 동일한 방해판에 의해 발생한 난류 및 에너지의 소산 등으로 혼화가 일어난다. 이에 반해 개선된 관내혼화장치의 경우(Fig. 3 참조), 원수 및 가압수의 흐름방향 순으로 4개의 난류 발생 수리구조물을 설치하였다. 첫 번째는 급확대 오리피스 및 고정자(탄환 모양의 고정자), 두 번째로는 6개 원형 구멍이 천공된 다공 오리피스, 세 번째로는 오리피스 마지막으로는 다시 6개의 원형 구멍이 천공된 다공 오리피스 및 급축소 구조물을 장착하였다.

본 연구의 대상이 되는 개선된 관내혼화장치는 CFD모사 및 검증 실험을 위해 pilot 규모로 제작하였다. 이에 원수관 크기는 D=150mm, 급확대 오리피스는 D=250mm를 적용하였으며, 다공 오리피스는 원수관의 단면적과 동일하게 D=61mm 6개를 원형으로 천공하였으며, 두 번째 오리피스는 D=120mm 1개를 설치하였다.

2.2 CFD 모사 방법론

본 연구에서 개선된 관내혼화장치의 혼화효율에 영향을 미치는 혼화구역내의 흐름 특성을 가시화하기 위해 CFD 기법을 이용하여 원수의 유속이 0.15m/sec인 경우와 0.3m/sec인 경우로 구분하여 모사하였다. CFD는 복잡한 구조물내의 유동장 해석을 FDM(Finite Difference Method)기법을 이용하여 작은 셀로 분할하여 각각의 경계 조건을 두어 해를 구해내는 방법으로 본 연구에서는 대상으로 한 관내혼화장치(Fig. 3 참조)에서 각각의 방해판 사이에서 발생하는 유체의 거동과 국부속도경사(local velocity gradient)를 도출하기 위해 상용 전산유체 프로그램인 CFX 11.0을 사용하였다.

본 모델링에서 사용된 기본적인 지배 방정식은 다음 식 (1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

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, ρ 는 밀도, \vec{V} 는 속도(각 방향 속도성분), t 는 시간, P 는 압력 그리고 ν 는 동점성계수를 나타낸다.

식(1)과 (2)의 연속방정식과 모멘텀 방정식이 그리드(grid)

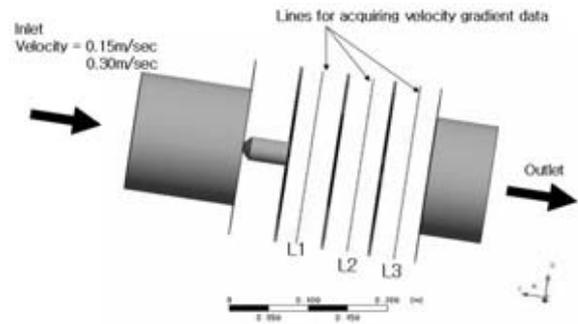


Fig. 4. CFD 모사대상 관내혼화장치의 pre-process 개요.

Conventional G value	Local velocity gradient
<ul style="list-style-type: none"> derived from the total mechanical power input to the impeller of the jar represent mixing intensity still widely used in the industry 	
$G = \sqrt{\frac{P}{V\mu}}$ <p>G : G value (s⁻¹) P : Mechanical Power input (Watt) V : Volume (m³) μ : viscosity coefficient (Ns/m²)</p>	<p>Local velocity gradient(s⁻¹)</p> $\frac{u1 - u2}{dy}$

Fig. 5. 기존 G값과 국부속도경사(local velocity gradient)정의.

로 분할된 관(pipe) 내의 약 20만개의 셀에서 해를 구하게 되는 것이다. 일반적으로 난류 상황에서 모멘텀 전달을 모델링하기 위해서는 모델이 대부분 사용되며, 본 연구에서는 난류가 등방성 방향으로 분포된다고 가정하는 Standard 모델의 발전형태인 RNG 모델을 사용하였다. 모사 대상이 된 관에서는 자유 수면이 없다고 가정하였다. 관 벽면과 deflector는 No-Slip Condition을 적용하고, 잘 알려진 Prandtle 이론에 의해 유체의 점성에 의한 표면 박리현상이 발생한다는 가정을 적용하였다. 모사 조건은 앞서 언급한 바와 같이 추후 wet test 검증단계에서 실험할 원수 유입속도 0.3m/sec와 0.15m/sec로 두 가지 경우만 모사하였다.

CFD 모사결과를 좀 더 자세히 분석하기 위해 Fig. 4에서 표시한 선상에서의 속도값을 근거로 하여 국부속도경사 값을 도출하였다. 흔히 혼화공정에서 사용하는 기존의 G값과 국부속도경사의 정의는 Fig.5와 같이 정의하였다(Park et al., 2002)

2.3. Wet test

CFD 모사결과를 검증하기위해 본 연구에서는 pilot규모의 wet test를 수행하였다. 실험은 수자원연구원 상하수도 연구센터 pilot 플랜트를 이용하였으며(Fig. 6참조), Fig. 7과 같이 응집제 주입지점에서 820mm (5.5D : 관경D의 5.5배 되는 지점)가 되는 지점에서 수직과 수평으로 20mm 간

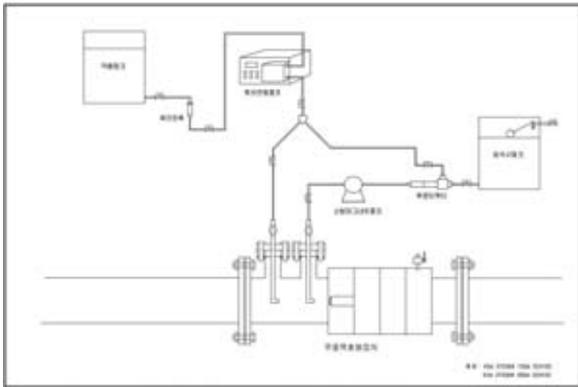


Fig. 6. 개선된 관내혼화장치 사진 및 장치 구성도.

격으로 응집제가 혼화된 샘플을 취수하여 제타 포텐셜을 측정하였다. 샘플링 지점을 5.5D 지점으로 선정된 것은 “상수도 시설기준”에 관로에서 유량측정을 하는 지점 선정시 상류부에 곡관, 접합부 및 밸브 등이 있는 경우 흐름 상태가 안정화되어 측정 유량값이 일정하게 취득되기 위해서는 관경 변화 지점부터 5D이상에서 측정할 것을 권장하기 때문이었다.

또한 응집제 혼화 효율을 평가하기 위하여 7D지점 후단에서 연속적으로 유동전류(Streaming Current)를 측정하였다. 측정된 제타전위 결과는 상용프로그램인 Surfer(서퍼) 프로그램을 사용, 등고선식으로 분포도를 작성하여 응집제 확산 정도를 살펴보았다. Zeta-Potential은 Malvern사 Model Zen2600을, SCD (Streaming Current Detector)는 Micro Metrics사의 제품을 사용하여 각각 측정하였다.

Table 1. 실험조건

측정일시	대상시설	응집제		원수 유입량(m ³ /hr)	원수유속(m/s)
		주입방법	주입률(mg/L)		
1차(8.24)	개선된 관내혼화장치	원액	10	24	0.3
2차(9.21)	개선된 관내혼화장치	·	·	24	0.3
3차(10.02)	개선된 관내혼화장치	·	·	12	0.15
4차(10.05)	기존 PDM	원액	·	24	0.3

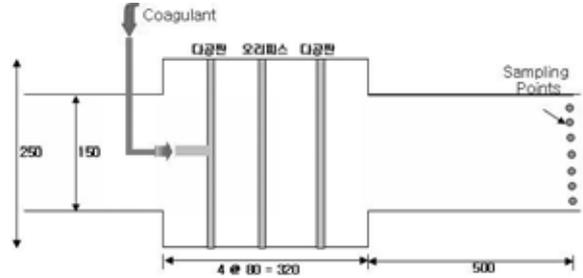


Fig. 7. 혼화수 샘플링 지점 개요.

본 실험에서 사용한 응집제는 HiB-PAHCS(폴리수산화염화황산알루미늄, Poly aluminum hydroxy chloro sulfate, Al₂O₃ 12.5%)를 사용하였다. 실험일정 및 실험 조건은 다음의 Table 1와 같이 수행하였다.

실험 수행동안 사용한 원수는 대청호의 호소수를 이용하였는데, 1차 및 2차 실험시에는 탁도는 각각 3.0 NTU, 4.5 NTU 였으며, 기존 PDM과의 비교실험을 위해서 수행한 3차 및 4차 실험에서는 동일한 원수탁도(2~2.1NTU)를 대상으로 실험하였다.

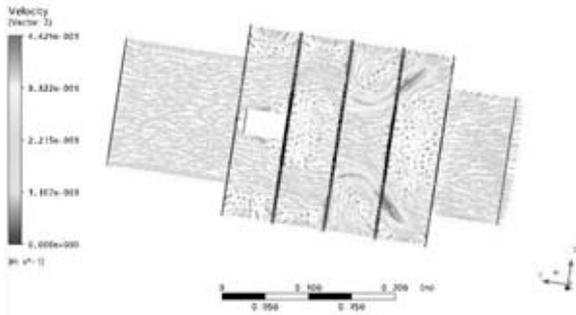
3. 결과 및 고찰

3.1. CFD 모사 결과

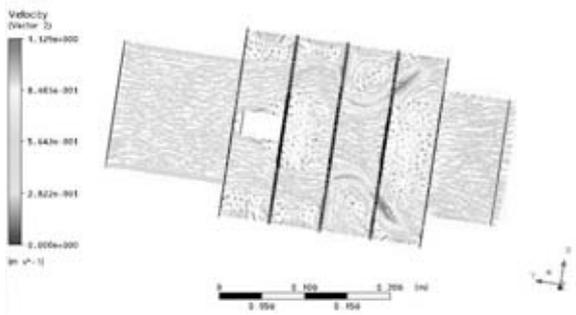
다음 Fig. 8은 상기 언급한 대로 원수 유속이 0.15m/sec인 경우와 0.3m/sec인 경우를 대상으로 CFD 모사한 결과를 vector로 표시한 그림이다. 유입유속의 차이가 두 배가 남에도 불구하고 흐름 형태에서는 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 단 좌측면에 혼화구역내 속도 절대값을 나타내 주는 legend에서 최대값이 0.15m/sec인 경우에는 0.429m/sec로 나타났으며, 0.3m/sec에서는 1.129m/sec로 나타났다.

상기의 CFD 결과를 바탕으로 Fig. 4에서 언급한 각 경우에 대해 세 개(L1, L2 그리고 L3)의 데이터 취득 라인에서 각각 등간격(12.5mm 간격)으로 20개의 속도 데이터(y방향의 속도; v)를 취득하여 각 지점별 간격 12.5mm로 나눈 값을 정리하였다(Fig. 9).

Fig. 9에서 나타낸 각각의 국부속도경사 값을 종합적으로 정량화하기 위해 각각의 데이터 취득 라인에서의 평균값을 도출하였다. 0.15m/sec의 유속으로 유입되는 경우에는 L1,



(a) CFD 모사 결과(내경 150mm, 유입유속 0.15m/sec)



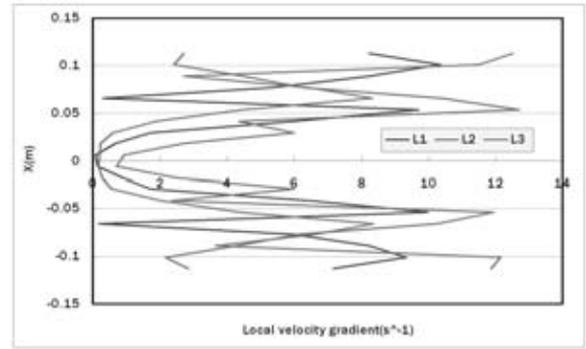
(b) CFD 모사 결과(내경 150mm, 유입유속 0.3m/sec)

Fig. 8. CFD 모사 결과.

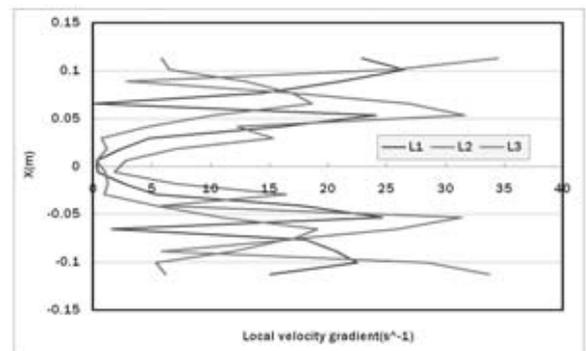
L2 및 L3선상의 국부속도경사 값의 평균은 각각 5.03sec^{-1} , 5.11sec^{-1} 및 4.94sec^{-1} 로 계산되었으며, 0.3m/sec 의 유속으로 유입되는 경우에는 13.08sec^{-1} (L1), 13.34sec^{-1} (L2) 및 11.98sec^{-1} (L3)로 도출되었다. 각각의 오리피스가 혼화효율에 미치는 영향이 비슷한 것을 알 수 있다. 두 번째로 장착된 급속속 확대 오리피스가 상대적으로 다른 오리피스의 역할에 비해 크다고 할 수 있지만 그 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 참고적으로 기존 PDM의 운전을 모사한 박 등의 연구결과(2008b)에서 유입원수의 유속이 0.2558 m/sec 의 경우 방해판 바로 후단에서의 국부속도경사 평균값은 1.07sec^{-1} 로 계산되었다. 즉, 혼화효율면에서 본 연구에서 제안하는 개선된 관내혼화장치가 기존 PDM보다 좋을 것으로 예상하였다. 본 CFD로 모사한 결과는 기존 PDM과 개선된 관내혼화장치의 응집제 혼화 후 혼화수의 제타포텐셜 및 SCD를 측정·비교

Table 2. 개선된 관내혼화장치의 Wet test 평가 결과

구분		1	2	3	4	5	6	7	평균	최대	최소	표준편차	원수
1차 (8.24)	수직	-6.4	-7.7	-7.7	-4.7	-6.3	-7.8	-7.9	-6.7	-4.2	-8.4	1.4	-15.1
	수평	-4.2	-7.2	-6.7	-4.7	-6.0	-8.4	-7.7					
2차 (9.21)	수직	-9.9	-10.0	-10.4	-9.4	-10.2	-9.8	-10.6	-9.8	-8.7	-10.6	0.6	-18.0
	수평	-9.6	-10.5	-9.8	-10.4	-9.0	-8.7	-9.0					
3차 (10.2)	수직	-9.3	-8.5	-9.9	-9.3	-8.4	-10.0	-9.7	-9.3	-8.4	-10.0	0.5	-17.9
	수평	-9.0	-9.1	-8.5	-9.1	-9.5	-9.2	-9.9					
4차 (10.5)	수직	-12.8	-7.1	-9.7	-9.7	-10.0	-8.2	-8.3	-8.2	-3.9	-12.8	2.5	-15.9
	수평	-6.0	-3.9	-4.8	-6.0	-8.0	-11.8	-8.8					



(a) 국부속도경사 (내경 150mm, 유속 0.15m/sec)



(b) 국부속도경사 (내경 150mm, 유속 0.3m/sec)

Fig. 9. 국부속도경사.

함으로써 성능을 검증하였다.

3.2 Wet test 결과

개선된 관내혼화장치의 실제 혼화효율을 평가하기 위하여 Wet test 방법에서 언급한 대로 혼화이후의 5.5D가 되는 위치에서 혼화수를 채취하여 제타 포텐셜을 측정하였다. 측정된 제타 포텐셜 결과를 이용하여 확산 분포도를 작성하였다(Fig. 10 참조). 또한, 응집제 혼합·확산 분포의 안정성을 평가하기 위하여 후단(7D)에 연속으로 Streaming Current(SC)를 측정하였다.

다음의 Table 2는 관 단면의 응집제 확산분포를 알아보기 위해 Table 1에서 제시한 조건대로 수직 및 수평의 지점별 제타전위를 4차에 걸쳐서 측정한 결과를 나타낸 것이다.

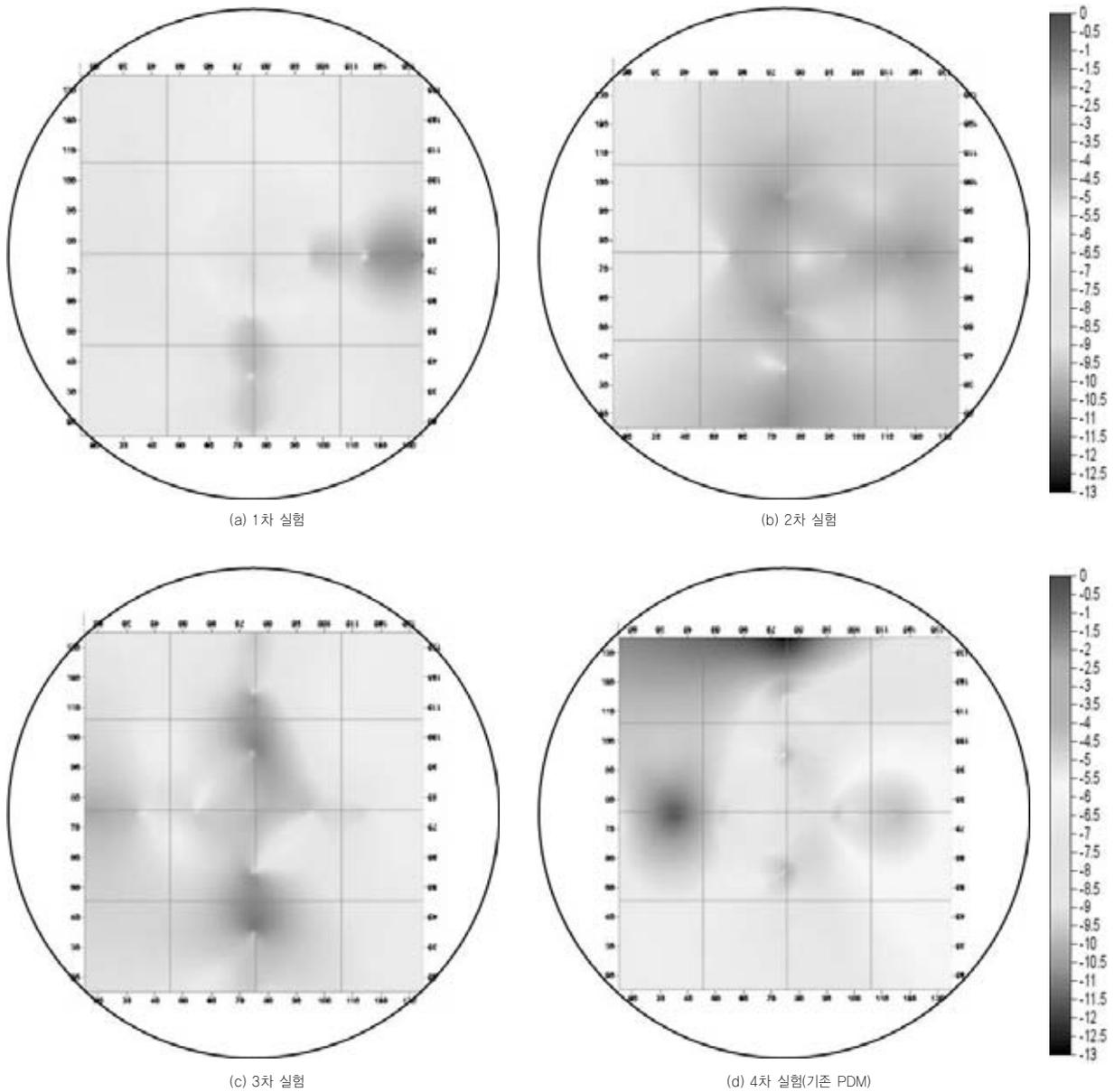
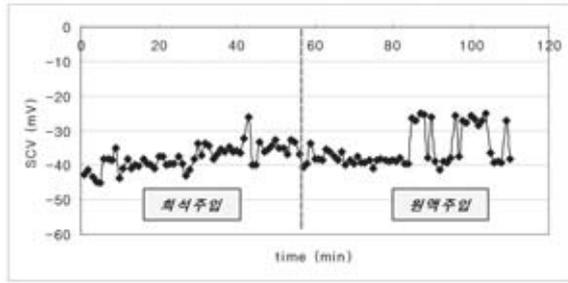


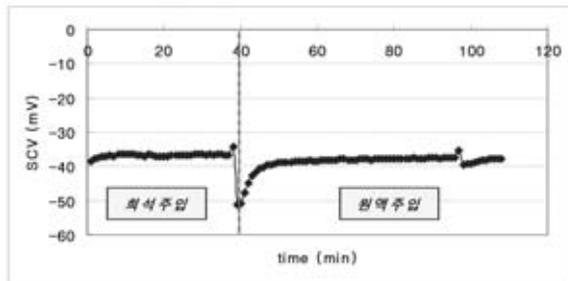
Fig. 10. 개선된 관내혼화장치 및 기존 PDM 관단면에서의 응집제 확산 분포.

Table 2 및 Fig. 10에서 나타났듯이, 1차 시험결과로 도출된 제타 포텐셜 분포도에서는 평균 -6.7mV 를 표준편차 1.4를 나타내었고, 2차 시험결과에서도 평균 -9.8mV , 표준편차 0.6을 나타내었고, 또한, 3차 실험결과에서도 1, 2차 실험결과와 마찬가지로 각각 평균 -9.3mV , 표준편차 0.5로 나타났다. 본 연구에서는 Wet test결과 평가시 응집제의 균등한 확산 및 제타 포텐셜의 관 단면 전체에 걸친 균등분포를 성능평가의 지표로 삼고자 하였다. 이는 기존 PDM의 가장 큰 문제점으로 지적되었던 응집제의 편중 및 충분한 혼화가 결여되었던 것이 큰 문제점으로 지적되었기 때문이다. 이

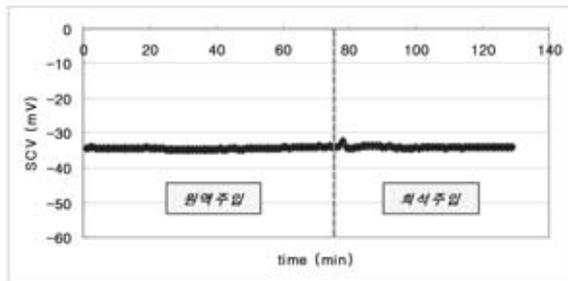
에 관심이 집중되었던 4차 실험(기존 PDM 사용)의 결과에서는 응집제 확산 분포도에서 표준편차가 2.5로 도출되어 1~3차 실험결과에 적용되었던 개선된 관내혼화장치에 비해 혼화 효율이 낮은 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 유동전류 측정결과에서도 1차 실험(8.24)의 원액주입시 측정후반부에서 다소 편차가 발생하기는 했으나 2, 3차 실험시에는 원액주입에 따른 값의 차이가 크지 않고 매우 안정적으로 나타났다. 또한, 관 단면별 응집제 확산 분포도를 보면 두 조건에서 뚜렷한 응집제 분포의 차이가 없이 전체적으로 개발된 소규모 혼화장치의 경우 관 단면별 균등혼화가 이루어지는 것으



(a) 1차 시험(8.24)



(b) 2차 시험(09.21)



(c) 3차 시험 (10.02)

Fig. 11. 소규모 혼합장치 후단(7D)의 유동전류 측정결과.

로 판단되어 진다 (Fig. 11 참조).

4. 결론

본 연구에서는 기존의 PDM혼화장치의 문제점을 극복하고자 오리피스 및 고정자 등 수리구조를 변형시킴으로써 보다 균등하고 신속하게 응집제를 확산시키는 개선된 관내혼화장치를 제시하였고, 이 PDM의 흐름특성을 CFD 기법을 이용하여 분석하였다. 또한 CFD의 결과는 Pilot 규모의 Wet test를 통해 검증 및 기존 PDM과 비교실험을 통해 그 진보성을 증명하였다. 본 연구를 수행하면서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) CFD 모사 결과, 기존 PDM의 국부속도경사값은 약 1 sec^{-1} 부근인데 반해, 개선된 관내혼화장치는 원수 유입 유속에 따라 다르지만 0.15 m/sec 인 경우에는 5 sec^{-1}

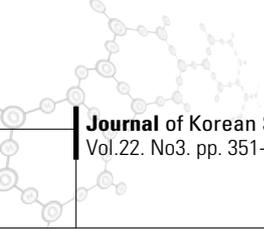
이상, 0.3 m/sec 인 경우에는 10 sec^{-1} 이상으로 도출되어 혼화효율이 증진됨을 예상할 수 있었다. 또한 CFD결과에서 개선된 관내혼화장치에 장착된 오리피스 및 고정자의 혼화에 기여하는 정도가 균일한 것으로 해석되었다.

- 2) Wet test결과 응집제 확산 분포를 실측한 결과에서 개선된 관내혼화장치의 경우가 기존 PDM에 비해 판단면 전체 걸쳐 응집제가 균등하게 분포하는 것을 알 수 있었다. 이는 CFD를 결과를 간접적으로 검증하는 것이며, 개선된 관내혼화장치가 기존 PDM에 비해 혼화성능이 좋다는 것을 결론지을 수 있는 근거가 된다.
- 3) 평가결과를 종합적으로 고려할 때 CFD 결과 및 wet test의 결과로 개선된 관내혼화장치의 혼화효율은 양호한 것으로 나타났으며, 기존 불균등한 응집제의 분포가 문제점으로 지적되었던 기존 PDM보다 혼화 효율 및 응집제 확산 분포의 균등성에서 우수한 것으로 평가되었다. 향후 대용량 시설에서의 적용을 통하여 지속적인 검증·평가가 추가적으로 필요한 것으로 판단된다.



참고문헌

1. 박영오, 박노석, 김성수, 김기돈, 임경호 (2008) CFD모사 기법을 이용한 Pump Diffusion Mixer내의 응집제 확산분포에 대한 평가, *상하수도학회지*, 22(1), pp.49-63.
2. Hudson, H. E. and Wolfner, J. P., (1967) Design of Mixing and Sedimentation Basins, *Journal of AWWA*, 59(10), pp. 1257~1268
3. Vrale, L. and Jordan R. M. (1971) Rapid Mixing in Water Treatment, *Journal of AWWA*, 63(1), pp. 52~58
4. Kawamura, S. (1991) *Integrated Design of Water Treatment Facilities*, JOHN WILEY & SONS, INC, New York
5. Hyun-Chul Kim and Seockheon Lee. (2006) Pump diffusion flash mixing for improving coagulation process in drinking water treatment, *Separation & Purification Technology*, 52, pp. 117~125
6. Clark M.M., Srivastava J.S., Lang R.R., Trussell L.J., McCollum D., Bailey, J.D. Christie, G. Stolarik (1994) *Selection and Design of Mixing Processes for Coagulation*, AWWA Research Foundation, Denver, USA.
7. 박영오, 김기돈, 박노석, 임재림, 임경호 (2008) Pump Diffusion Mixer에서 압력수량에 따른 응집제 확산분포 특성, *상하수도학회지*, 22(1), pp.65-71.



8. 건설교통부 (2005), **상수도시설기준**
9. No-Suk Park and Heekyung Park, 2002, Analysis of
local velocity gradients in rapid mixer using particle

image velocimetry technique, *Water Science and
Technology: Water Supply*, Vol. 2, No. 5-6, pp. 47-55,