

CFD를 활용한 수처리공정 대형관에서 압력수 혼합공정 평가

조영만^{1a} · 유현철^{1b} · 장경혁^{1c} · 정용준^{2,*}

¹부산상수도사업본부 수질연구소 · ²부산가톨릭대학교 환경공학과

Evaluation of Pressurized Water Mixing of Big Pipe with CFD at Water Treatment Process

Young-Man Cho^{1a} · Hyun-chul Yu^{1b} · Gyeong-Hyuk Jang^{1c} · Yong-Jun Jung^{2,*}

¹Water Quality Institute of Busan Water Authority

²Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan

(Received 4 January 2021, Revised 14 April 2021, Accepted 15 April 2021)

Abstract

Mixing is a very important unit in water treatment process. A mechanical stirring method is generally used for mixing, but recently, the use of pressurized water mixing method (pump diffusion flash mixer) has gained interest because it is more advantageous in terms of mixing time, noise, energy consumption, and maintenance. The following conclusions were obtained from the study of pressurized water mixing method by Computational Fluid Dynamics. Firstly, the mixing degree in the pipe increased as the density of water increased. Secondly, even if the relative velocity between flow rate in the pipe and the pressurized water was constant, the mixing degree decreased as the flow velocity in the pipe increased. Thirdly, the stronger the injection energy the higher the mixing degree. It was also found that the mixing degree was greatly affected by the injection velocity as compared to the injection flow amount. Finally, the required energy to achieve 95% mixing degree at the distance of 10 times diameter in big pipes of 500 mm to 3000 mm was 0.3 to 4.5 kJ. The result of this study could be used in the process design of injection with water purification chemicals, such as, ozone, chlorine, and coagulant.

Key words : Computational Fluid Dynamics (CFD), Mixing degree, Pressurized water, Water treatment process

^{1a} 연구관(Senior researcher), cho12211@daum.net, <https://orcid.org/0000-0001-8393-0382>

^{1b} 연구사(Researcher), yu1128@korea.kr, <https://orcid.org/0000-0000-8486-2094>

^{1c} 연구사(Researcher), khjang@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2384-8288>

^{2,*} Corresponding author, 교수(professor), yjjung@cup.ac.kr, <https://orcid.org/0000-0002-4355-0374>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. Introduction

혼합(mixing)은 수처리 공정에서 매우 중요한 단위공정으로 염소와 오존과 같은 기체-액체혼합, 분말활성탄을 혼합하는 고체-액체혼합 그리고 응집제를 혼합하는 액체-액체 혼합까지 다양하게 활용되고 있다(Clark and Srivastava, 1994; Hudson and Wolfner, 1967; Kawamura, 1976; Vrale and Jorden., 1971). 수처리 공정에서 혼합은 일반적으로 기계적인 교반방식이 많이 활용되고 있으나 약품 투입과 동시에 빠르게 수중에서 혼합할 수 있는 펌프 디퓨전 혼합방식(Pump Diffusion Flash Mixer) 등이 활용이 증가하고 있다. 이와 같은 압력수 혼합방식은 기존의 기계 혼합방식보다 혼합시간, 소음, 에너지 소비, 유지관리 측면에서 유리하기 때문이다(Kim et al., 2017; Panneerselvam et al., 2009; Park and Park, 2002).

또한 압력수 혼합방식은 후염소 투입 후 정수지 전단에 난류 혼합을 유도하는 배플을 설치하여 염소를 혼합하는 수류 혼합방식처럼 배플 설치에 따른 토목시공 비용 역시도 유발하지 않기 때문에 기존의 수류 혼합방식보다도 훨씬 유리하다. 이와 같이 압력수 혼합방식은 기계적 교반과 배플 설치와 같은 방식에 비해 동력비, 시공 건설비, 유지관리 측면에서 가장 경제적이고 효과적인 혼합방식이다(Kim and Lee, 2006; Lee et al., 2003; Park, Kim et al., 2008; Park, Park et al., 2008).

압력수 혼합 방식에서 압력수를 분사하는 방법에는 압력수 분사관의 개수, 분사방향, 노즐이나 유공 설치 여부 등과 같은 다양한 방식이 있다. 이와 같은 다양한 방식에 대해 각기 다른 설치 조건과 설계 인자가 있기 때문에 설계 조건을 일반화하기 힘들다. 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 적 수치기법은 수처리 공정의 설계(Choi et al., 2018; Jun et al., 2014) 뿐만 아니라 다양한 산업 분야에서 광범위하게 활용(Cho et al., 2011; Kim et al., 2017) 되고 있지만, 실제 운영 중인 처리장을 대상으로 한 대형관에서의 압력수 혼합공정을 평가한 사례는 찾아보기 어려운 실정이다.

현재 수처리 공정에서 활용되고 있는 압력수 혼합공정은 운영자의 단순 경험에 의존하고 있을 뿐만 아니라, 공정설계와 관련한 시공 전문업체 역시 압력, 수량, 혼합거리 등에 대한 공학적 설계인자를 제시하고 있지 못하고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 유동 흐름방향으로 한 개의 분사관에서 압력수를 분사하는 경우에 대해 CFD를 활용한 연구를 수행하였다. 수처리공정의 대형관에 압력수를 분사한 경우에

대해 관내 혼합도를 평가하고, 압력수 분사관의 직경과 분사 속도 등과 상관관계를 규명하여 대형관에서 적정 혼합거리를 확보하기 위한 필요 에너지 등을 산출함으로써 편리하고 쉽게 응용할 수 있는 기초 설계 인자를 제시하는데 그 목적이 있다. 이를 통해 실제 수처리 현장에서는 압력수 혼합공정 운영 효율을 개선할 수 있고, 공정설계 시공 전문업체는 압력수 혼합공정 표준설계 자료로 활용할 수 있을 것이다.

2. Materials and Methods

2.1 진단 방법

본 연구는 수처리 공정에서 일반적으로 많이 쓰이고 있는 500 mm, 1000 mm, 2000 mm 대형관 각각에 대해 압력수 분사관 직경별, 분사 속도별로 분사되는 유량과 에너지별로 관내 혼합도를 평가했다. 분사관의 직경과 분사속도에 따른 분사 유량 및 이에 따른 유량과 유속을 운동에너지(1/2 mv²)로 환산한 값은 Table 1과 같다.

분사관과 대형관의 분사 조건은 Fig. 1과 같이 대형관의 중심에 분사관에서 압력수가 수평으로 분사되었을 때 직경거리(D)별로 압력수 혼합도를 평가하였다. 직경거리(D)는 예를 들면 대형관 지름이 500 mm인 경우는 0.5 m가 1D가 된다. 수처리 공정에서의 분사 압력수는 수처리공정에서는 일반적으로 염소 용해수, 오존 용해수, 응집제 희석수 등을 사용하는데 대부분 투입되는 약품 농도가 mg/L 수준으로 저농도이므로 일반 물과의 물성차이는 거의 무시할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 일반 물의 물성치와 같은 물리량을 사용했으며 혼합은 순수한 난류 확산에 의한 혼합만 고려하였다.

수온변화에 따른 혼합도는 여름철 수온 27°C 물과 겨울철 4°C 물을 비교하였다. 혼합도 비교 조건인 관경, 분사관 직경, 관내 유속과 분사 유속은 Table 2와 같다.

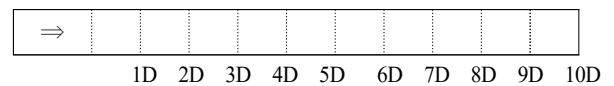


Fig. 1. Injection direction and diameter distance at the big pipe.

Table 2. Evaluation condition of uniformity index

Dia. of pipe	Dia. of injection	Vel. of pipe	Vel. of injection	Temp.
500 mm	20 mm	0.5 m/s	5.5 m/s	4°C, 27°C

Table 1. Flow rate and Kinetic energy depending on injection diameter and flow velocity

(Unit: m³/hr, kJ)

d(mm) \ V(m/s)	5		10		15		20		25		30	
	Flow Rate	Kinetic Energy	Flow Rate	Kinetic Energy	Flow Rate	Kinetic Energy	Flow Rate	Kinetic Energy	Flow Rate	Kinetic Energy	Flow Rate	Kinetic Energy
10	1.41	0.0049	2.83	0.0393	4.24	0.1325	5.65	0.3140	7.07	0.6133	8.48	1.0598
20	5.65	0.0196	11.30	0.1570	16.96	0.5299	22.61	1.2560	28.26	2.4531	33.91	4.2390
30	12.72	0.0442	25.43	0.3533	38.15	1.1922	50.87	2.8260	63.59	5.5195	76.30	9.5378
40	22.61	0.0785	45.22	0.6280	67.82	2.1195	90.43	5.0240	113.04	9.8125	135.65	16.9560

바탕유속 변화에 따른 혼합도 평가 조건은 Table 2와 같다. 대형관 바탕유속은 0.5 m/s, 1 m/s, 1.5 m/s와 같이 3가지 경우에 대해 분사관의 유속은 각각 5.5 m/s, 6.0 m/s, 6.5 m/s로 상대속도를 5 m/s로 동일하게 하여 혼합도 차이를 평가하였다.

분사유속과 유량에 따른 혼합도는 500 mm, 1000 mm, 2000 mm 대형관에 대해 각각 Table 1과 같은 분사관 직경, 분사유속으로 압력수를 분사한 후 각 대형관의 직경 거리별로 혼합도를 평가하였다.

2.2 전산유체 설정 조건

CFD는 실험이나 수작업으로 해석이 어려운 공정을 유한차분법을 이용하여 해석 대상 공정 모형을 작은 셀로 분할한 뒤 각각 경계조건을 주고 해를 구하는 방법이다(Amirtharajah and Mills, 1982). 진단은 상용 CFD 프로그램인 Fluent 19.0과 CAD tool은 Design Modeler를 사용하였다. 해석을 위한 격자는 tetra형과 hexa형 4,528,000여개로 Fig. 2는 분사관 주변 단면의 격자 형상을 나타낸 그림이다. 유체의 유동 특성과 유체의 물리적 성질의 변화는 기본적으로 연속방정식, 모멘텀 방정식(Navier-Stokes Equation) 등을 사용하였다. 난류 거동을 모사하기 위해서는 Standard k-ε 모델을 사용한 정상상태로 해석하였다. 수치 알고리즘은 Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations (SIMPLE)이고, 압력분할변수는 standard scheme을 사용하였으며, 나머지 변수는 이차 상류도식(second order upwind)기법을 사용하였다.

수처리 공정에서 유체의 유동특성이나 수리학적 효율을 평가하는 방법으로 추적자 시험(Tracer test)이 일반적으로 활용되고 있는데 실제 공정에서 추적자 시험은 추적자의 균등투입, 시간대별 추적자 농도 측정 등 시간과 인력이 많이 요구되는 난해한 실험이다(Kawamura, 2000; Mazzolani et al., 1998). 하지만 컴퓨터 가상공간에서 이루어지는 전산유체역학적 추적자 방법은 상대적으로 매우 쉽고 용이하게 유체 유동상태를 평가할 수 있다. 본 연구에서는 정상상태에서 유동장에 대한 해석을 완료한 후 압력수 입구(inlet)에 추적자를 분사한 후 비정상상태(Transient state)로 시간에 따른 추적자 농도를 계산하였다. 추적자 농도는 Fig. 1과 같이 직경거리(Distance of diameter) 단면에서 추적자의 농도를 혼합도(Uniformity index)로 산출하였다. 특정 물질에 대한 혼합도는 일반적으로 다음식과 같이 표현된다.

$$r = 1 - \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(a - C_i)^2}}{\bar{C}}$$

여기서 C_i는 특정지점(격자)에서 농도, n는 격자수, \bar{C} 평균 농도이다.

3. Results and Discussion

3.1 수온변화에 따른 혼합도

관내 수와 분사수의 밀도 차에 의한 혼합도 차이를 알아보기 위해 밀도가 가장 높은 4°C 물과 여름철 수온 27°C 물

의 혼합도를 Table 3과 같은 조건으로 비교하였다. 대형관 중심에서 강한 압력수를 분사할 때 압력수가 수중에서 혼합되는 일반적인 속도 분포는 Fig. 3와 같이 확산이 이루어진다. 즉 중심에서 관 바깥쪽으로 확산이 이루어지며 분사 속도가 강할수록 확산 역시 강하게 일어난다.

Fig. 4는 분사 직후부터 시간별로 5D, 10D, 15D, 20D 거리에서 혼합도를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 각 거리에서 27°C 혼합도와 4°C 혼합도가 겹쳐 육안으로 구별이 안 되므로 그 차이를 구분하기 위해 27°C 혼합도에서 4°C 혼합도를 제외한 값을 Fig. 5와 같이 나타내었다. 초기 혼합도 차이 값은 음의 값을 나타냈고, 시간이 경과함에 따라 음의 값이 감소하다가 20D 거리에서 최종 혼합도 차이는 약 -0.1%를 나타내었다. 즉 27°C 혼합도 보다 4°C 혼합도가 0.1% 양호하다는 의미이다. 즉 밀도가 높은 물이 밀도가 낮은 물보다 혼합이 잘 이루어진다는 것을 알 수 있다.

Table 3. Ranking of kinetic energy (Unit: Ranking)

V(m/s) \ d(mm)	5	10	20	30
10	1	3	7	10
20	2	6	11	13
30	4	8	12	15
40	5	9	14	16

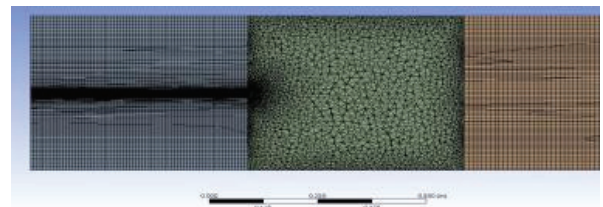


Fig. 2. Cross-sectional view of mesh around the injection pipe.



Fig. 3. Profile of velocity by pressurized water injection in the pipe.

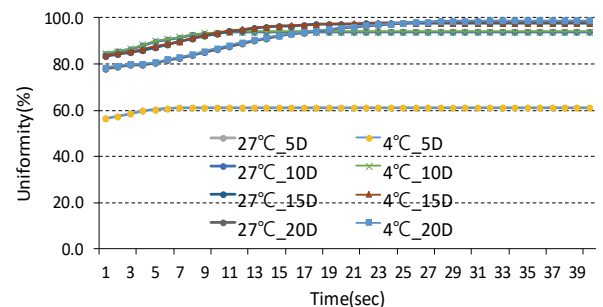


Fig. 4. Mixing degree at water temperature 27°C and 4°C.

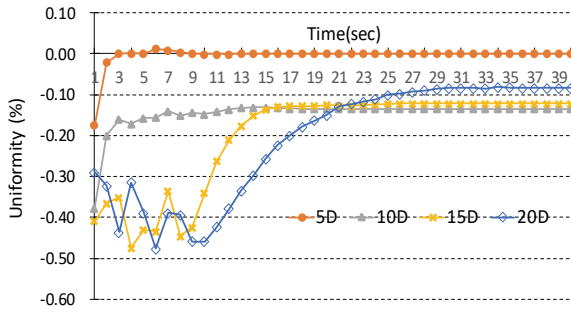


Fig. 5. Difference in mixing degree at water temperature 27°C and 4°C.

3.2 바탕유속 변화에 따른 혼합도

압력수 혼합도와 혼합거리는 대형관 바탕에 흐르는 유체의 유속에 크게 영향을 받는다. 즉 유속이 빠를수록 혼합거리는 당연히 증가할 것이다. 관에서 혼합은 분사액과 바탕 유체의 충돌 에너지에 의해 이루지기 때문에 그 속도차가 혼합에 주 에너지원이다. 따라서 상대속도가 같은 경우 즉 바탕유속이 변화할 때 분사 속도도 바탕유속 증가만큼 증가시켜 상대속도가 동일한 경우 혼합도 차이를 평가하였다. Fig. 6은 3가지 바탕 유속 변화에 따른 거리별 혼합도 차이를 나타낸 것이다. 혼합도 60%을 기준으로 할 때 바탕 유속이 0.5 m/s에서는 5D, 바탕유속이 1 m/s에서는 10D 그리고 1.5 m/s에서는 18D 로 혼합거리가 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 동일한 상대 속도 5 m/s로 분사를 하더라도 바탕 유속이 증가하면 혼합거리는 거의 배 이상 증가한다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 차

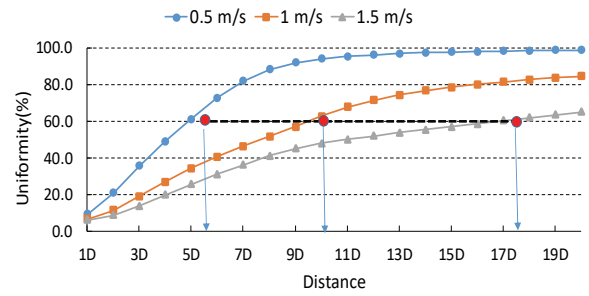
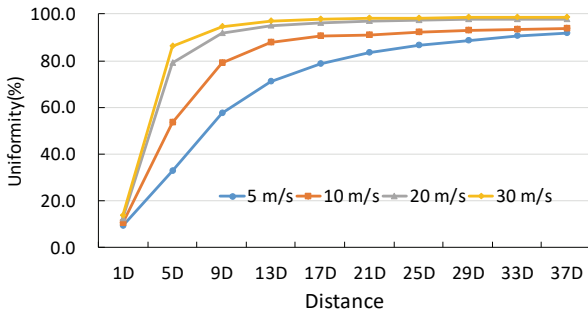


Fig. 6. Mixing degree depending on fluctuation of ground velocity in the pipe.

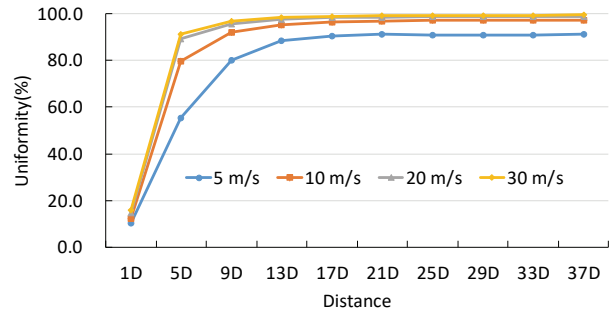
이는 상대속도가 일정하더라도 바탕 유속이 증가할수록 유체의 충돌 에너지는 감소한다는 것을 의미하므로 혼합도 역시 감소하고 비례하여 혼합거리가 증가하는 경향을 보인다.

3.3 분사유속과 유량에 따른 혼합도

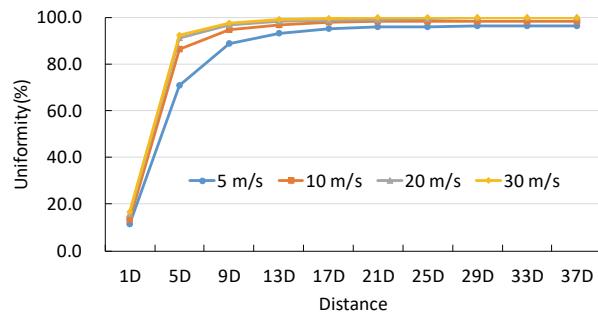
Fig. 7은 500 mm관에서 관의 직경거리별 혼합도는 나타낸 그림으로 분사 속도와 분사관 직경이 증가할수록 혼합거리가 짧아짐을 알 수 있다. Fig. 8은 1000 mm, Fig. 9는 2000 mm 관에서 혼합도를 나타낸 그림으로 500 mm 관과 같이 분사 속도와 분사관 직경이 증가할수록 혼합거리가 짧아지는 동일한 경향을 보이고 있다. 또한 500 mm 보다는 1000 mm 그리고 1000 mm보다는 2000 mm가 혼합거리가 길어지는 경향을 보이고 있다. 이는 관경이 증가할수록 혼합해야 하는 관내 유량이 증가하기 때문이다.



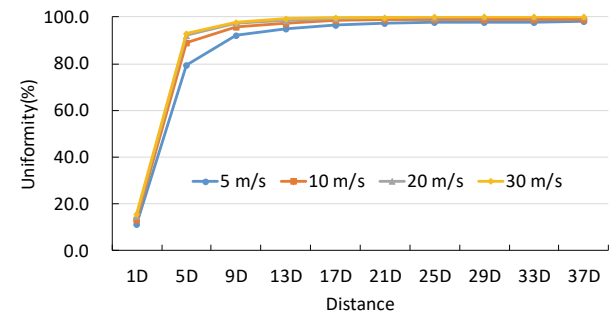
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 7. Mixing degree depending on diameter and velocity of injection in the 500 mm pipe.((a) : 10 mm injection pipe, (b) : 20 mm, (c) : 30 mm, (d) : 40 mm).

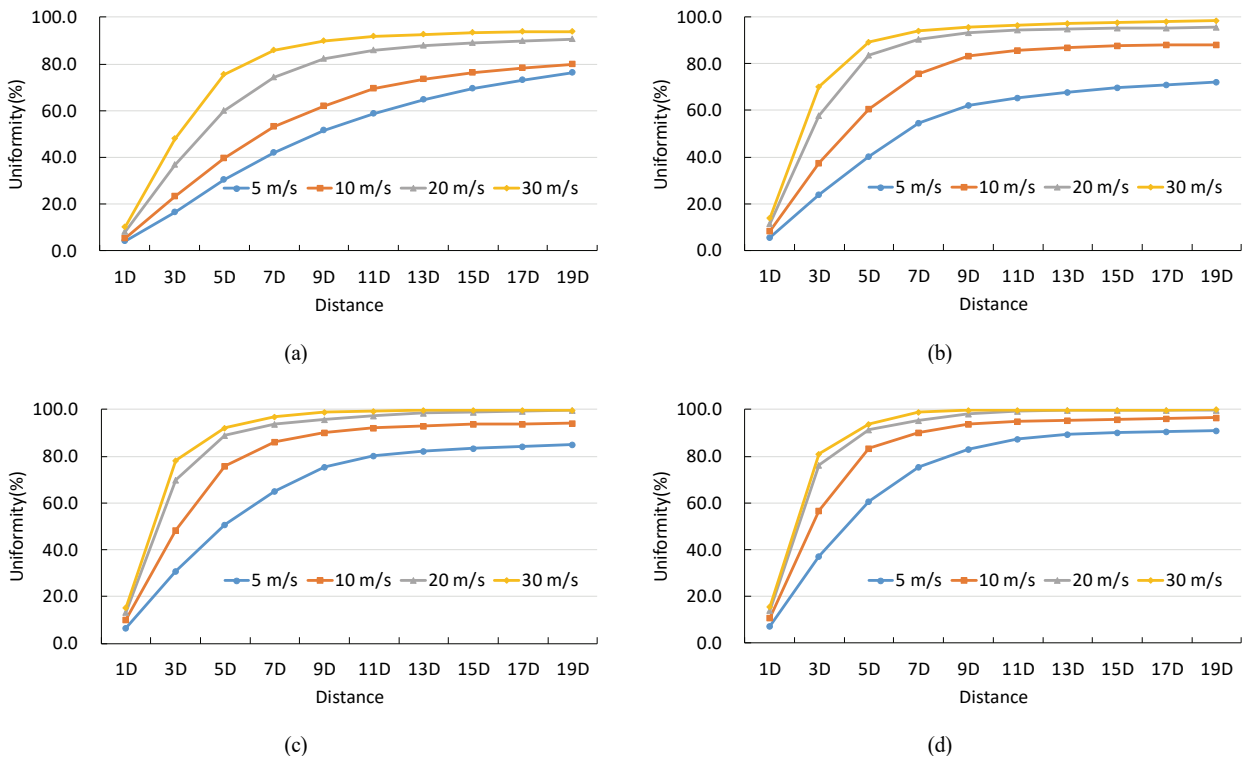


Fig. 8. Mixing degree depending on diameter and velocity of injection in the 1,000 mm pipe.((a) : 10 mm injection pipe, (b) : 20 mm, (c) : 30 mm, (d) : 40 mm).

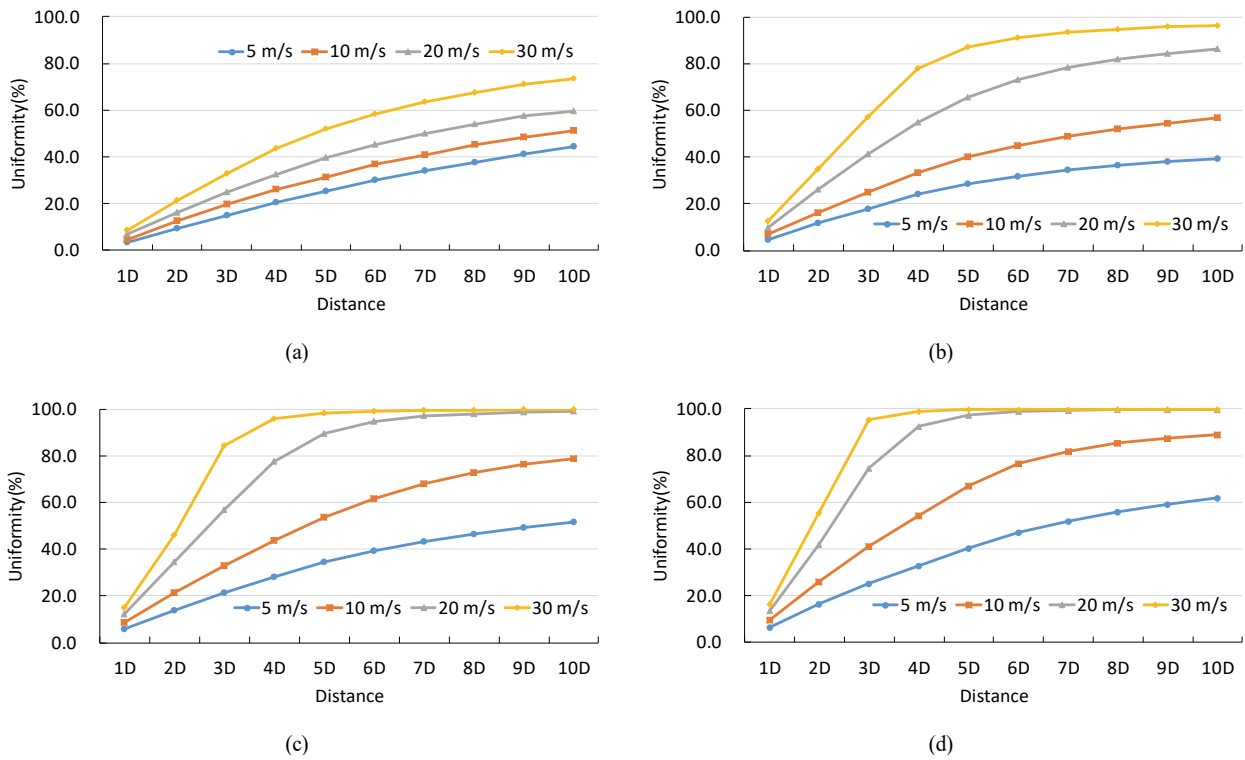


Fig. 9. Mixing degree depending on diameter and velocity of injection in the 2,000 mm pipe.((a) : 10 mm injection pipe, (b) : 20 mm, (c) : 30 mm, (d) : 40 mm).

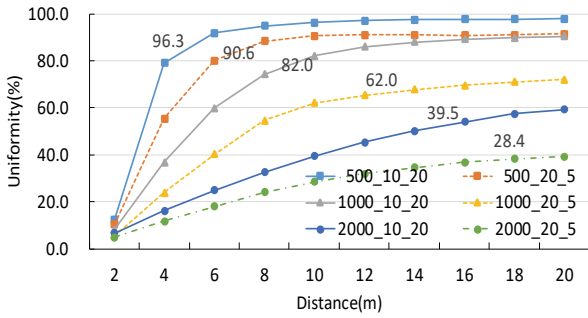


Fig. 10. Comparison of mixing degree at the same flow amount (10mm_20 m/s and 20 mm_5 m/s).

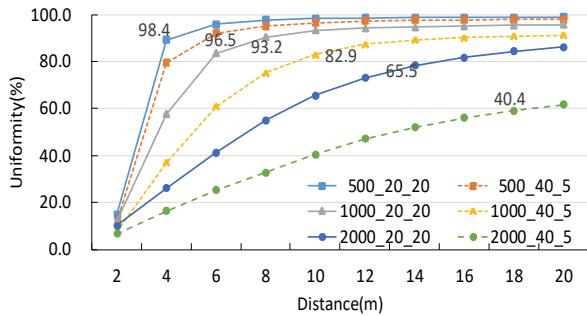
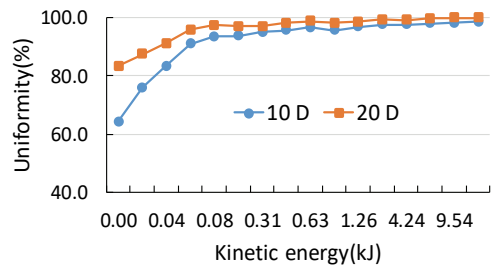


Fig. 11. Comparison of mixing degree at the same flow amount (20 mm_20 m/s and 40 mm_5 m/s).

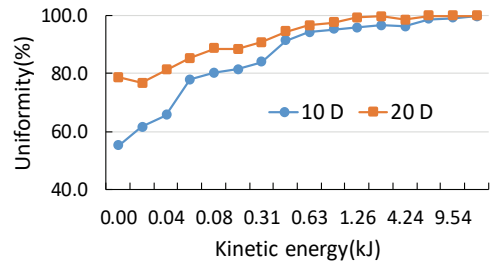
Table 1에서 분사관 10 mm에서 분사속도 20 m/s와 20 mm에서 5 m/s 유속인 경우 유량이 5.7 m³/hr로 같고 분사관 20 mm에서 20 m/s와 분사관 40 mm에서 5 m/s 유속인 경우 유량이 22.6 m³/hr로 동일하다. 따라서 유량이 같고 분사 유속이 다른 이 두 경우의 혼합도를 비교해 보면 유량이 혼합도에 미치는 영향을 알 수 있다. Fig. 10은 10 mm_20 m/s(분사관_분사유속)와 20 mm_5 m/s에서 혼합도를 나타낸 그림으로 분사유속이 높은 10 mm_20 m/s 혼합도가 20 mm_5 m/s 혼합도 보다 모든 관경에서 보다 양호한 것을 알 수 있다. 10 m 지점에서 대형관경별 혼합도를 비교해 보면 500 mm 관에서 10 mm_20 m/s의 혼합도는 39.5%인 것에 반해 20 mm_5 m/s는 28.4%로 약 11% 양호하고 1000 mm에서는 82%와 62%로 20%, 2000 mm에서는 96.3%와 90.6%로 약 6% 보다 양호하였다.

Fig. 11은 관경에 따른 20 mm_20 m/s와 40 mm_5 m/s 간의 혼합도는 비교한 그림으로 500 mm에서는 65.5%와 40.4%로 약 15%, 1000 mm에서는 93.2%와 82.9%로 약 10%, 2000 mm 관에서는 98.4%와 96.5%로 약 2%로 20 mm_20 m/s경우가 40 mm_5 m/s 보다 혼합도가 양호하였다. 이와 같은 결과는 압력수의 분사 유량이 동일한 경우, 분사 유속이 강할수록 관내 혼합도는 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 혼합도는 유량보다 분사되는 유속에 보다 큰 영향을 받는다는 것을 의미한다.

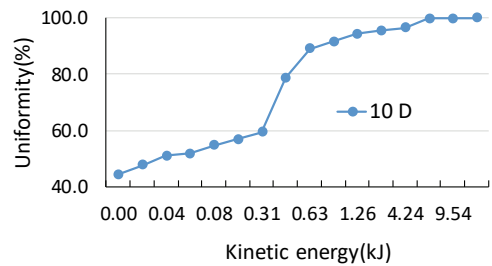
Table 1과 같이 분사에너지에 의한 혼합도 차이를 평가하였다. Table 1의 운동에너지 크기 순위는 Table 3과 같고 이 에너지 순위 별로 혼합도를 비교하였다. Fig. 12은 Table 3의 순위별로 혼합도를 나타낸 그래프이다. 그림에서와 같이 혼



(a)



(b)



(c)

Fig. 12. Mixing degree depending on Kinetic energy(Pipe diameter, (a) 500 mm, (b) 1000 mm, (c) 2000 mm).

합도가 분사 운동 에너지에 비례하여 증가하는 것을 명확히 알 수 있다. 즉 혼합도는 분사되는 분사 운동에너지(1/2 mv²)에 의해 결정되는데 에너지는 질량에 비례하고 속도 제곱에 비례하기 때문에 유량보다 유속에 크게 영향을 받는다.

3.4 관경별 적정 분사관 제원 산출

실제 수처리 공정에서 압력수 혼합과 관련하여 중요한 관심사는 대형관에 특정 정수 약품을 투입하고자 할 경우 완전한 혼합을 달성하기 위한 분사관의 직경, 분사유속과 혼합거리이다. 따라서 본 연구에서는 500 mm, 1000 mm, 2000 mm 관에 대한 연구결과를 토대로 2500 mm와 3000 mm관에 대해 10D, 20D혼합거리에서 필요한 분사관 제원(설계조건)을 산출하였다.

Table 4는 혼합거리 10D와 20D에서 95% 이상 혼합도를 달성하기 위한 관경별 필요한 운동에너지를 나타낸 것이다. 혼합거리 10D에서 2500 mm, 3000 mm와 혼합거리 20D에서 2000 mm, 2500 mm, 3000 mm의 에너지 값은 500 mm~2000 mm 계산 결과 값에서 추세선을 그은 추정값이다. 운동 에너지 값을 추정해야 하는 이유는 혼합거리와 관경이 증가할수록 해석 격자수가 급격히 증가하여 계산하는데 많은 시

Table 4. Required kinetic energy at 10D and 20D for each pipe diameter (Unit: kJ)

D.	Pipe(mm)	500	1000	2000	2500	3000
	10D		0.314	1.060	2.826	3.650
20D		0.044	0.628	1.750	2.301	2.811

간이 소요되기 때문이다.

Table 4와 같은 에너지를 얻기 위해 요구되는 분사관 직경과 유속을 나타낸 운동에너지 값은 Table 1과 같다. 유량이 충분한 조건이라면 분사관의 직경을 크게 하는 것이 유리하고, 상대적으로 유량보다 유속을 높이는 것이 유리하다면 유속을 증가시키면 되지만 전술한 바와 같이 유량보다는 유속을 제어하는 것이 혼합도 향상에는 보다 유리하다.

4. Conclusion

전산유체역학적 해석 기법을 활용한 수처리공정에서 대형관 내 압력수 혼합공정을 평가한 결과는 다음과 같다.

- 1) 관내 압력수의 혼합은 물의 밀도가 높을수록 혼합도가 증가하며 밀도가 가장 높은 4℃는 27℃에 비해 약 0.1% 혼합도가 높다.
- 2) 관내 유속과 분사 유속의 상대 속도가 일정하더라도 관내 유속이 증가할수록 혼합도는 낮아진다.
- 3) 분사액의 혼합도는 분사 유량에 비례하고 분사속도 제곱에 비례하므로 분사 유량보다 분사속도에 보다 크게 영향을 받으며 분사속도가 강할수록 혼합도는 증가한다.
- 4) 500 mm에서 3000 mm까지 대형관에서 분사액의 95% 혼합도를 달성하기 위한 필요 에너지는 혼합거리 10 직경거리(D)는 0.3~4.5 kJ 범위이고 20 직경거리에서는 0.04~2.8 kJ 범위이다.
- 5) 본 연구결과는 오존, 염소, 응집제 등의 정수약품을 투입하는 공정설계에 유용하게 활용될 수 있다.

References

Amirtharajah, A. and Mills, P. (1982). Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation, *Journal of American Water Works Association*, 74(5), 210-216.

Cho, Y. M., Roh, J. S., Bin, J. H., Kim, T. K., and Choi, Y. J. (2011). Evaluation of economic L/W ratio and the best shape of baffle in clearwell by using CFD, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 33(6), 432-438. [Korean Literature]

Choi, Y. W., Han, M. S., Song, J. H., and Wang, C. K. (2018). Analysis of water storage tank flowfield using computational fluid dynamics (CFD) simulation, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 34(2), 173-182. [Korean Literature]

Clark, M. M. and Srivastava R. M. (1994). *Selection and design*

of mixing processes for coagulation, AWWA Research Foundation, Denver, USA.

Hudson, H. E. and Wolfner, J. P. (1967). Design of mixing and Sedimentation basins, *Journal of American Water Works Association*, 59(10), 1257-1268.

Jun, H. B., Tian, D. J., Hong, K. W., Han, H. S., and Park, B. C. (2014). Evaluation of local velocity gradient and total mass transfer time at various rotating velocity by using computational fluid dynamics, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(2), 166-174. [Korean Literature]

Kawamura, S. (1976). Consideration in improving flocculation, *Journal of American Water Works Association*, 68(5), 328-336.

Kawamura, S. (2000). *Integrated design and operation of water treatment facilities*, second edition, John wiley & sons, Inc., New York, 160-175.

Kim, H. C. and Lee, S. H. (2006). Pump diffusion flash mixing for improving coagulation process in drinking water treatment, *Separation & Purification Technology*, 52, 117-125.

Kim, S. Y., Chae, J. S., Kim, S. Y., Zhang, M. Y., and Ohm, T. I. (2017). A study on applicability of coagulant mixer and flow analysis of the non-powered vortex mixer using CFD, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, 39(12), 706-713. [Korean Literature]

Lee, Y. S., Kim, M. G., Kim, J. S., Tarkafumi, U., and Yoshihito, K. (2003). Flow patterns and critical circulation frequency for mixing in shaking vessels with various geometry, *Journal of Korean Society of Industrial Purification*, 6(1), 49-56. [Korean Literature]

Mazzolani, G., Pirozzi, F., and d'Antoni, G. (1998). A generalized settling approach in the numerical modeling of sedimentation tanks, *Water Science and Technology*, 38(3), 95-102.

Panneerselvam, R., Savithri, S., and Surender, G. D. (2009). CFD simulation of hydrodynamics of gas - liquid - solid fluidised bed reactor, *Chemical Engineering Science*, 64(6), 1119-1135.

Park, Y. O., Kim, K. D., Park, N. S., Lim, J. L., and Lim, K. H. (2008). Characteristics of coagulants distribution by the pumping rate in pump diffusion mixer, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 22(1), 65-71. [Korean Literature]

Park, Y. O., Park, N. S., Kim, S. S., Kim, D. K., and Lim, K. H. (2008). Evaluation of coagulants dispersion in pump diffusion mixer for water treatment, *Journal of the Korean Society of Water and Wastewater*, 22(1), 49-63. [Korean Literature]

Park, N. S. and Park, H. K. (2002). Analysis of local velocity gradients in rapid mixer using particle image velocimetry technique, *Water Science and Technology, Water Supply*, 2(5), 47-55.

Vrale, L. and Jordan R. M. (1971). Rapid Mixing in water treatment, *Journal of American Water Works Association* 63(1), 52-58.