

Pump Diffusion Mixer에서 압력수량에 따른 응집제 확산분포 특성 Characteristics of Coagulants Distribution by the Pumping Rate in Pump Diffusion Mixer

박영오¹ · 김기돈¹ · 박노석¹ · 임재림¹ · 임경호^{2*}

Youngoh Park¹ · Ki-Don Kim¹ · No-Suk Park¹ · Jae-Lim Lim¹ · Kyung-Ho Lim^{2*}

1 한국수자원공사, 2 공주대학교 건설 환경공학부

(2007년 3월 29일 접수 ; 2008년 1월 16일 채택)

Abstract

This study collected the latest 30-year (1976~2005) continuous rainfall data hourly recorded at 61 meteorological observatories in Korea, and the continuous rainfall data was divided into individual rainfall events. In addition, distribution charts of average rainfall event-depth were created to facilitate the application to the overflow risk-based design of detention storage basin. This study shows that 4 hour is appropriate for SST (storm separation time) to separate individual rainfall events from the continuous rainfall data, and the one-parameter exponential distribution is suitable for the frequency distribution of rainfall event depths for the domestic rainfall data. The analysis of the domestic rainfall data using SST of 4 hour showed that the individual rainfall event was 1380 to 2031 times, the average rainfall event-depth was 19.1 to 32.4mm, and ranged between 0.877 and 0.926. Distribution charts of average rainfall event-depth were created for 4hour and 6 hour of SST, respectively. The inland Gyeongsangbuk-do, Western coastal area and inland of Jeollabuk-do had relatively lower average rainfall event-depth, whereas Southern coastal area, such as Namhae, Yeosu, and Jeju-do had relatively higher average rainfall event-depth.

Key words : continuous rainfall, individual rainfall, overflow risk, SST, exponential distribution, distribution chart of average rainfall event-depth

요 약

급속 혼합공정에서 응집제의 동력학적 수화반응 특성을 고려하여 1초 이내의 순간혼합을 제시하고 있으며, 이러한 이론에 근거하여 설치된 Pump Diffusion Mixer(PDM)의 관내 응집제 확산 분포특성을 조사하였다. D=1,200mm 관경에서 압력수 유량비에 따라 응집제 주입지점으로부터 4.5D되는 지점에서 관 단면의 지점별 제타 전위를 측정하여 평가한 결과, 압력수의 유량비가 2%에서는 분사 속도가 낮아 관 단면에 응집제가 골고루 분사되지 못하는 것으로 조사되었다. 그러나 압력수 유량비가 4% 이상이 되면 비교적 균등하게 혼합되며, 8%에서는 관 단면 전체에 균등하게 확산 분포되는 것으로 나타났다.

주 제 어 : 응집제 확산 분포, 펌프 디퓨전 mixer, 압력수 유량비

* Corresponding author Tel : +82-41-850-8633, FAX : +82-41-856-9388, E-mail : khlim@kongju.ac.kr

1. 서론

정수처리공정에서 혼화공정은 가장 규모가 작고 짧은 체류시간을 가지고 있지만 미세 오염물질을 제거하기 위한 첫 번째 공정이다. 따라서 후속공정 전체에 영향을 준다는 점에서 매우 중요한 공정이다. 그러므로 혼화공정을 최적화 시키면 후속공정의 효율을 향상시킬 수 있게 되어 결과적으로 전체적인 정수처리의 효율을 향상시킬 수 있게 된다. 하지만 혼화공정은 응집제가 투입되어 원수내 오염물질과 반응하는데 걸리는 시간이 매우 짧고 반응 기작이 매우 복잡하여 아직까지도 정확한 혼화 메커니즘이 규명되지 못하고 있는 실정이다. 이러한 이유에서 많은 연구가 진행되었으나 원수에 따른 설계나 시설운영 방법이 명확히 정립되지 못하고 있으며, 연구 결과가 상이하게 나타나고 있다.

급속혼화는 응집제를 가능한 짧은 시간 내에 원수에 균등하게 분산시켜 응집제와 원수중의 불순물(탁질과 용존 유기물질)과의 접촉 및 반응이 효율적으로 이루어지도록 하는 정수과정의 중요한 공정으로, 후속 공정인 응집, 침전, 여과공정에서 불순물을 제거할 수 있도록 불순물의 전기 화학적 특성을 불안정화시키는 역할을 수행한다. 원수의 탁도, 용존 유기물질 농도, 전기전도도, pH, 알칼리도, 수온 등의 인자를 비롯하여 응집제의 화학적 반응 동력학, 조의 형상 및 impeller의 기하학적 요소 등이 급속혼화공정의 처리효율을 결정한다.

최근 국내외에서 적용하고 있는 급속혼화공정의 체류시간 및 속도구배는 Table 1과 같다. ASCE 및 AWWA의 설계지침은 속도경사를 $700\sim 1,000\text{sec}^{-1}$, 체류시간을 $20\sim 60\text{sec}$ 로 제시하고 있다. Camp 등은 후속공정인 응집 및 침전공정에 적합한 최적의 floc특성이 조장될 수 있는 조건으로 $1\sim 2$ 분간의 급속교반을 제시하였으며, 일본에서는 100초 이상의 체류시간을 제시하고 있다. 반대로 Amirtharajah나 Kawamura 등은 응집제의 동력학적 수화반응 특성을 고려하여 1초 이내의 순간혼합을 제시하고 있다.

이러한 상이한 급속혼화 조건은 원수의 수질이나 지역적

인 특성으로 설명할 수도 있으나, 정수공정운영의 목표를 어디에 두고 있는냐의 차이로 설명하는 것이 좋을 것이다. Amirtharajah나 Kawamura 등이 제안한 급속혼화공정의 설계기준은 응집제의 화학적 반응속도를 고려한 최적의 혼화조건이라고 평가할 수 있으며, 일본의 설계기준은 전기적으로 불안정화 된 불순물들을 후속 공정에서 침전성이 양호한 floc(일종의 micro-floc)으로 성장시키기 위한 조건으로 해석할 수 있다. 즉, 원수중의 불순물을 전기적으로 불안정화 시키기 위한 화학적 당량보다 응집제를 수 배 이상 주입하여 일차적으로 일부의 불순물을 불안정한 상태로 만들어 micro floc과 응집제 floc을 생성시키고, 일정한 강도($G > 100\text{sec}^{-1}$)로 충분히 교반하여 남아있는 불순물들을 흡착-불안정화 시키면서 침전성이 양호한 밀도가 큰 floc을 만들기 위한 일종의 고강도 응집공정(sweep coagulation mechanism)으로 해석할 수 있다.

최근, 국내외적인 연구결과에 의하면, 응집제의 반응 동력학이나 turbulent mixing의 유체 역학적 측면에서 가능한 짧은 체류시간 내에 충분한 교반 에너지를 투입함으로써 최적의 응집효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났으며, 체류시간을 1초(최대한 10초 이내), 교반강도를 $1,000\text{sec}^{-1}$ 로 하는 설계기준을 제시하고 있다. Kawamura 등의 이러한 설계이론에 근거하여 Pump Diffusion Mixer(이하 PDM)가 고안되었으며 국내에서도 이를 도입하여 사용하고 있으나, 실 공정에서의 효율검증이 제대로 이루어지지 않은 상태에서 무분별하게 설치되어 불균등한 혼화로 인한 침전지별 수질 차이 등의 문제점이 발생되고 있는 현실이다.

따라서 본 논문에서는 최근 도입이 급증하고 있는 PDM에서의 혼화효율 저하요인을 파악하기 위해 관 단면에 걸친 응집제의 확산정도, 분포상태 및 후속공정에 미치는 영향을 분석·평가함으로써 개선방안을 제시하고자 하였다.

2. PDM 설치 정수장의 문제점

본 논문에서는 PDM을 도입하여 운영하고 있는 정수장에서의 문제점을 도출하여 그 원인이 어떠한 공정에서 기인하는지를 먼저 파악하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 OS 정수장의 침전지별 탁도와 pH 측정결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 $1\sim 3$ 지의 pH와 탁도는 높은 반면 $4\sim 6$ 지는 상대적으로 낮게 나타나고 있다. 이러한 침전지별 수질차이는 탁도의 경우 침전지별 유량불균등 분배에 의해 체류시간의 차이로 지별 탁도 차이가 발생할 수 있으나, pH의 경우 유량분배와는 상관성이 거의 없다. 정수장 근무자와의 인터뷰에 의하면 PDM 내부 상태를 관찰한 결과 응집제 석출물이 방해판에 고착되어 있는 것을 발견할 수 있었고, 이를 제거한 후에 다시 침전지별 수질측정을 하였으나 동일한 현상이 반복되

Table 1. Guide Lines of Veloc(G) and Detenity Gradiention time(t) for a Rapid Mix system

Site	t(sec)	G(sec ⁻¹)	Comments
AWWA, ASCE	20~60	700~1,000	Back-mix Type
Camp	60~120	700~1,000	"
Amirtharajah	<1	700~1,000	"
	<1	3,000~5,000	In-line Blend
Japan	120~180	>100	Back-mix Type
Korea	60~300	1.5 m/sec*	"
Janssens	0.1~1	1,000~5,000	In-line Blend
Hudson	<1	<3,500	"
Kawamura	0.5~1	700~1,000	Injection

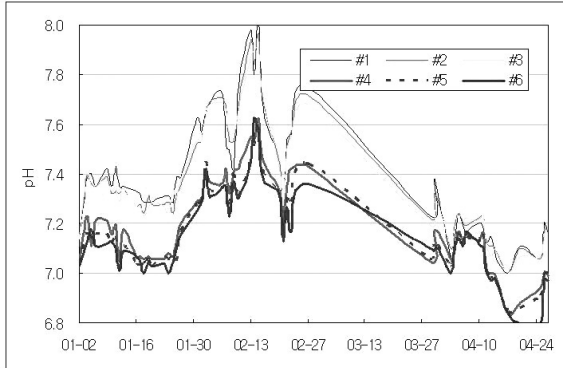


Fig. 1. Settled water pH('06. 1-4).

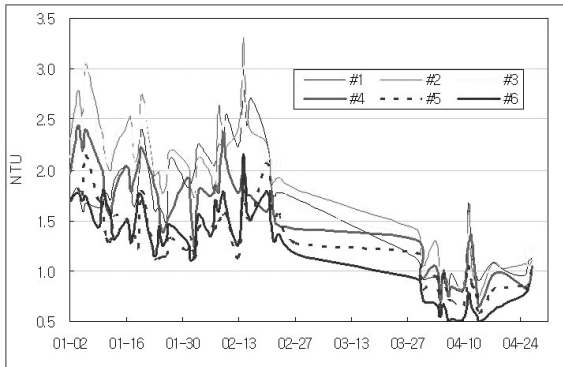


Fig. 2. Settled water turbidity('06. 1-4).

었다고 한다.

Fig. 3은 또 다른 PS정수장의 사례로서 5회에 걸친 분석 결과 침전지 1, 2지 쪽은 탁도가 높게 나타나고 있고, 3, 4지 쪽은 상대적으로 낮게 측정되었다.

지별 level 차이에 의한 유량 편중현상이 아닌가 하는 의

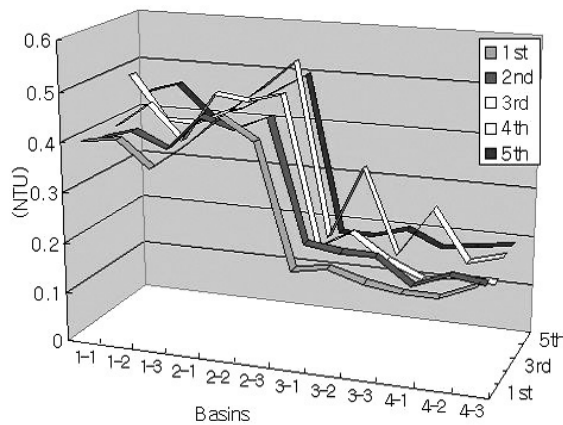


Fig. 2. Settled water turbidity('06. 1-4).

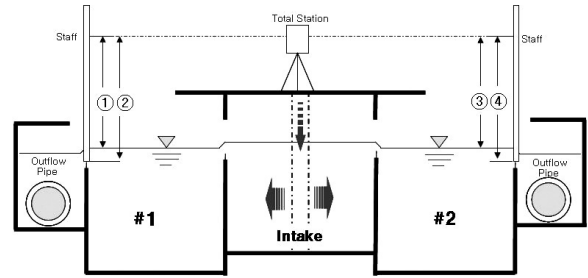


Fig. 4. Measuring water level difference between two mixing tanks.

심이 들어, Fig. 4와 같이 혼화지 유출측의 level을 측정한 결과, 그 차이가 1 mm 정도로서 유량차이는 거의 없는 것으로 조사되었다. 혼화지 #1에서는 침전지 1, 2지로 혼화지 #2에서는 침전지 3, 4지로 분배된다.

3. 실험대상 및 실험방법

3.1 OS 정수장

OS 정수장의 침전지별 수질차이에 대한 문제점을 찾기 위해 응집지 유입부의 분기관별로 Z-P(Zeta-Potential)과 Streaming Current(SC)를 측정하였다. Zeta-Potential meter는 Malvern사 Model Zen2600을, SCD (Streaming Current Detector)는 Micro Metrics사의 제품을 사용하였다. 실험 당시 침전지 6호지는 청소중이어서 비어있는 상태로 5개 침전지만을 사용하고 있었다.

3.2 PS 정수장

OS 정수장과 마찬가지로 혼화공정의 문제로 침전지별로 수질차이가 발생하는 것으로 판단하고 PDM에 대한 혼화효율 평가를 하였다. 실험방법은 Fig. 5, Fig. 6과 같이 응집제 주입후 4.5D 되는 배관 토출측 상단 개구부에서 수심별 격자형으로 구획 후 시료를 채취하여 Z-P를 측정하였다

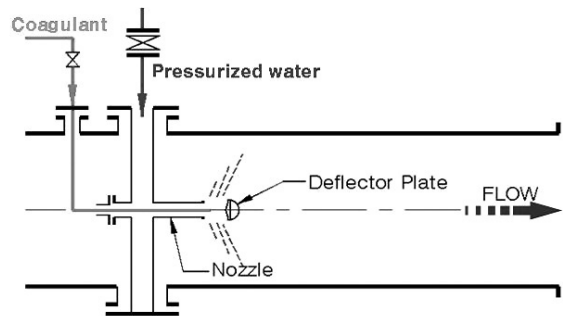


Fig. 5. Schematic diagram of PDM.

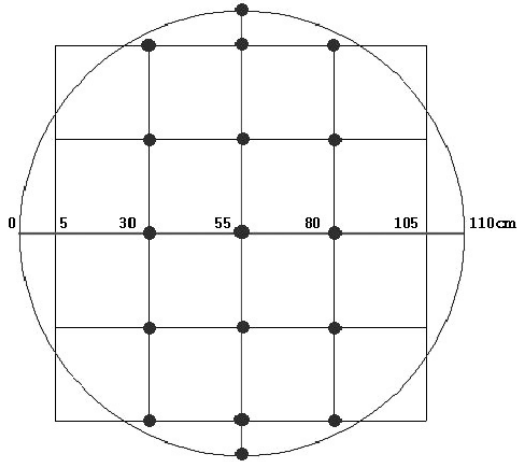


Fig. 6. Sampling point on the cross section of the pipe.

3.3 SJ 정수장

관내 혼화시설의 경우 대부분 후단 배관구조에 곡관부나 분기부가 형성되어 있어 응집제의 분포상태를 직접 측정하기 곤란한 구조로 되어있다. 상기 OS정수장도 이러한 이유로 관 단면의 응집제 분포를 측정하지 못했으며, BS정수장에서는 시료채취 지점이 관 중심부에 편중되어 있어 혼화효율 저하요인을 설명하기에는 부족함이 있다. 따라서 본 연구에서는 PDM 후단의 구조가 직관이고 비교적 배관 길이가 짧아 관내 수류변동과 응집제의 분포상태에 미치는 영향이 적을 것으로 예상되는 SJ정수장 PDM 혼화시설을 대상으로 압력수량비에 따라 관내 응집제 분포상태를 측정하고, 그 결과를 바탕으로 OS, PS 정수장의 혼화효율 저하요인을 판단하였다.

PDM의 시설현황은 Table 2와 같이 교반강도는 750sec^{-1} , 압력수 유량은 2~5%, 방해판 직경비는 11.7% 로 설계되었다.

실험방법은 Fig. 7, Fig. 8과 같이 4.5D 거리의 원수배관 토출측 상단부를 천공(5개)하여, 수심별 격자형으로 구획 후 시료 채취용으로 수심별로 시료를 채취하여 제타전위를 측정하는 다음, 응집제 분포도를 분석하여 보았다. 이때 원수와 압력수의 유량비가 2, 4, 8%(유속비 5.6, 11.1, 22.2배)인 상태에서 각 지점별 제타전위를 측정하였다.

Table 2. PDM 시설개요

구분	교반강도(sec^{-1})	압력수유량비	비고
설계	750	설계유량	-수온 = 5°C -혼화시간 = 1초
기준		2~5%	-원수관D = 1.2m -채수지점 = 4.5D
실험	356~	유입원수	
조건	1,425	2~8%	-방해판직경비 12%

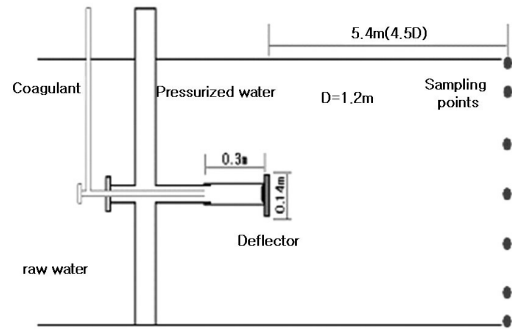


Fig. 7. Schematic diagram of sampling points.

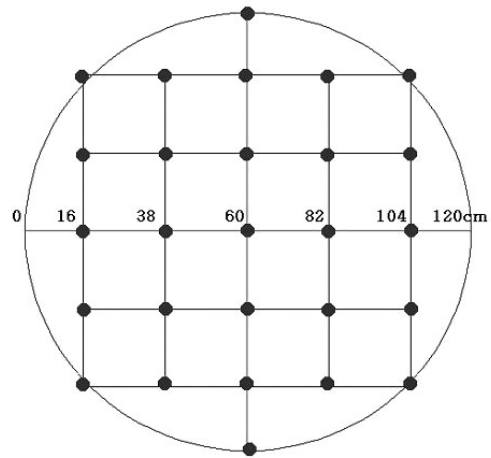


Fig. 8. Sampling point in the pipe.

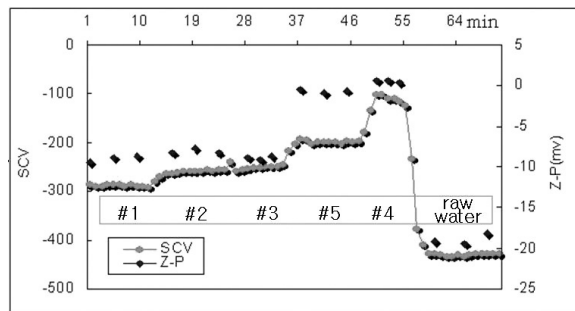


Fig. 9. SC, Z-P at the inlet of flocculation basin.

4. 결과 및 고찰

4.1 OS 정수장 응집지별 Z-P 측정결과

Fig. 9와 같이 Z-P과 SC값이 상기의 Fig. 1, Fig. 2의 pH 및 탁도의 측정결과와 동일하게 나타나 예상대로 혼화공정에 문제점이 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 1~3지

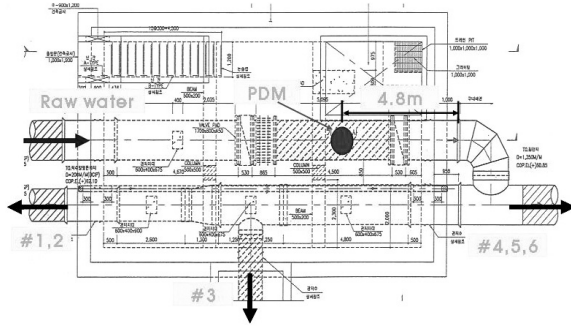


Fig. 10. Schematic of PDM.

쪽은 응집제가 적게 분포하고 상대적으로 4~6지 쪽은 응집제가 과다하게 분포하는 데서 나타난 현상이다.

Fig 10.의 도면을 보면 PDM에서 4.8m 후단에 곡관과 분기부가 있는데, 결국 PDM에서 원수와 응집제가 완전하게 혼합되지 않은 상태에서 1~3지, 4~6지 쪽으로 혼화수가 분배되고 있다는 것을 알 수 있다.

4.2 PS 정수장의 관단면 응집제 분포특성

Fig. 11은 PS정수장의 평상시 운영조건(110,400m³/d, 압력수 유량비 1.3%)에서 관내 응집제의 확산 분포상태를 조사한 그림으로 응집제가 관 우측(혼화지 2지) 방향으로 편향되어 주로 침전지 3, 4지로 유입되는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 앞의 「침전지 수질현황 조사」와 부합되는 결과로서 PDM이 설치된 관내에서 균등한 혼화가 일어나지 않는 것으로 판단되며, 후속 공정에도 영향을 미칠 것으로 판단되어 혼화시설 내부 상태를 조사하여 보았다.

조사 결과 Fig. 12과 같이 PDM의 방해판 전면에 이물질

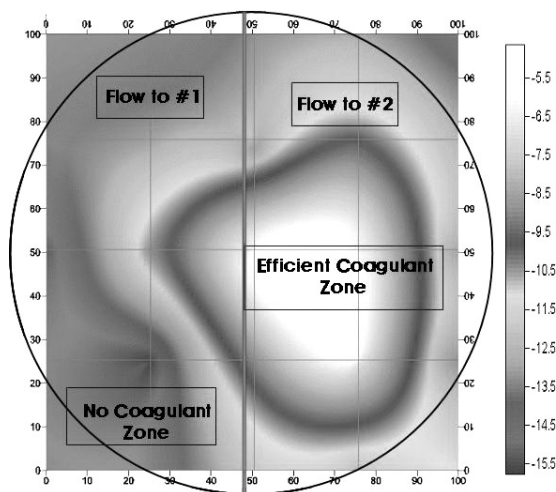


Fig. 11. Distribution analysis of the coagulants in the section of pipe.

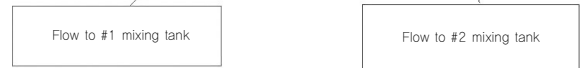


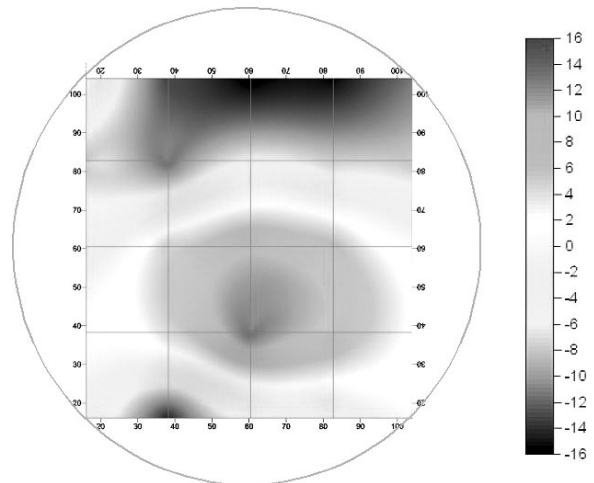
Fig. 12. PDM deflector condition.

이 점착되어 있으며, 특히 방해판 안쪽을 보면 혼화지 1지 방향에 큰 이물질 덩어리가 멩쳐있는 것으로 나타났는데, 이것으로 인하여 압력수와 응집제가 혼화지 1지 방향으로 분사되지 못하고 2지 방향으로 편중된 것을 알 수 있다. 응집제 석출물과 점토 등의 이물질 점착은 PDM 운영의 일반적인 문제점이며, 이물질이 방해판의 한쪽 방향으로 덩어리져 있는 것은 압력수 노즐, 응집제 주입관 및 방해판의 중심이 맞지 않거나 압력수의 유속이 너무 낮을 때 발생할 수가 있으므로 이에 대한 조치가 필요하다.

4.3 SJ 정수장의 관단면 응집제 분포특성

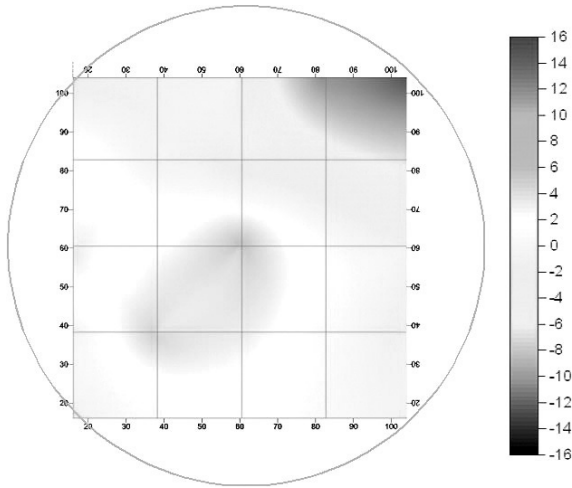
4.3.1 유량비 2%에서의 응집제 분포

Fig. 13은 원수에 대한 압력수의 유량비를 2%(유속비



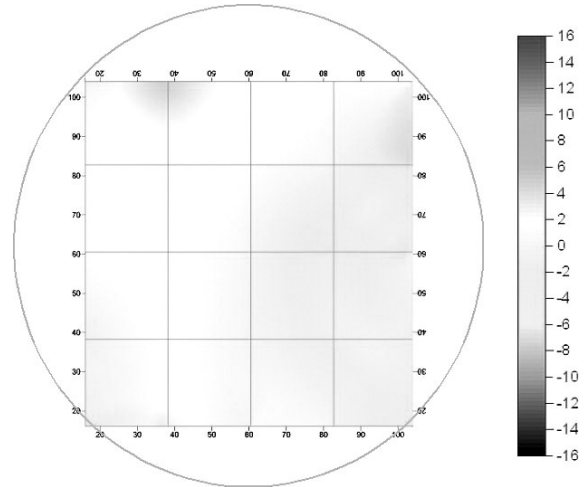
(raw water 1,625m³/hr pressurized water 32.5m³/hr)

Fig. 13. Distribution analysis of the coagulant in the raw water pipe : condition 2%.



(raw water 1,625m³/hr & pressurized water 65m³/hr)

Fig. 14. Distribution analysis of the coagulant in the raw water pipe ; condition 4%.



(raw water 1,625m³/hr & pressurized water 130m³/hr)

Fig. 16. Distribution analysis of the coagulant in the raw water pipe ; condition 8%.

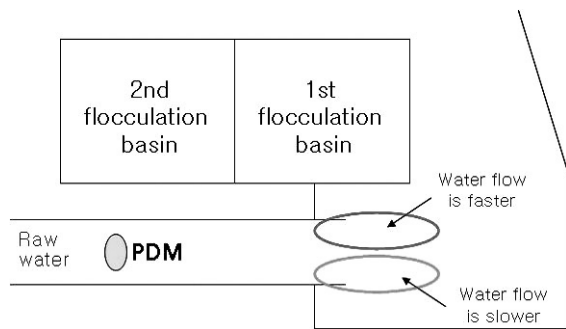


Fig. 15. Layout of influent to the flocculation basin.

5.6)로 응집제가 주로 관 중앙 하단부에 편중되어 있으며 상단부에는 거의 응집제가 분포되지 않는 것으로 나타났다.

이러한 결과로 볼 때, 관내 응집제 분포는 원수와 압력수의 유량(유속)비에 영향을 받는 것으로 예측되며, 그 비율이 2%(유속비 5.6)인 경우에는 압력수의 분사속도가 낮아 응집제가 관 단면 전체에 분사되지 않는 것으로 조사되었다.

4.3.2 유량비 4%에서의 응집제 분포

Fig. 14는 원수에 대한 압력수의 유량비를 4%(유속비 11.1)로 설정하여 측정된 결과로서 응집제는 관 단면의 우측 상단부를 제외하고는 비교적 균등하게 혼합되는 것으로 나타났다.

다만, 그림의 우측 모서리부분에 응집제가 분포하지 않고 좌측 하단부에 편중되는 것은 Fig. 15와 같은 응집지 유입수로의 구조로 인하여 좌측 하단부에 상대적으로 빠른 흐름이

형성되었으며, 이로 인하여 분사된 압력수가 쏠리는 현상이 발생되었기 때문으로 추정된다.

4.3.3 유량비 8%에서의 응집제 분포

Fig. 16는 원수에 대한 압력수의 유량비를 8%(유속비 22.2)로 설정하여 측정된 결과로서 응집제는 관 단면 전체에 균등하게 분포하고 있는 것으로 나타나 응집효율이 양호한 것으로 평가된다.

이러한 현상은 압력수의 유속이 충분하여 분사된 응집제가 관 벽체까지 도달되었으며, 응집지 유입수로의 구조로 인한 압력수 쏠림 현상도 극복되었기 때문으로 평가된다.

다만, 그림에서 좌측의 응집제 분포정도가 우측보다 조금 높게 나타난 것으로 유입수로의 구조로 인한 영향을 받았기 때문이며, 응집효율에는 영향이 없을 것으로 평가된다.

4.3.4 OS정수장의 PDM 효율저하 요인

Fig. 9의 OS정수장의 PDM 배관도면을 보면 PDM의 설치·운영 상태는 적정하였으나, 분기관별 Z-전위가 크게 차이가 나는 등 편중현상이 일어나는 것으로 조사되었다. 따라서, PDM의 설계 및 운영인자 이외의 조건에서 혼합효율 저하요인을 찾고자 원수 유입배관의 구조 및 부속물 등을 검토하였다.

Fig. 9에서 배관구조는 PDM 전단 50m 지점, 후단 4.8m 지점에 곡관부가 있으며, PDM 전·후에 제수밸브가 설치되어 있다. 배관구조와 제타전위 측정결과를 비교해 볼 때, 응집제의 편중현상은 PDM 전·후 제수밸브와 PDM 전단 곡관부는 영향이 거의 없는 것으로 예측되며, PDM 후단 근

거리에 있는 곡관부가 그 원인인 것으로 추정된다.

즉, 응집제 분포도가 비교적 높은 곳은 PDM 후단 곡관부의 흐름이 빠른 바깥쪽 부분의 원수가 유입되는 혼화지나 응집지인 것으로 나타났는데, 이것은 앞의 「SJ정수장 PDM 혼화효율 분석결과」에서 도출된 PDM 후단부의 유속이 빠른 부분으로 압력수가 편중되는 것과 일치하는 결과이다.

따라서 현 설계 및 운영조건에서는 PDM내에서 응집제와 원수가 관 단면 전체에 균등하게 혼화되지 않고 있다는 사실을 알 수 있으며, 이렇게 불균등하게 혼화된 물이 곡관부를 거치거나 분기되는 경우 각 지별로 수질차이를 유발하므로, 앞서 언급한 압력수 유량비 증가 등의 혼화조건을 개선하거나, 곡관부나 분기점이 발생하지 않도록 어느 정도의 직관거리를 확보하는 것이 중요하다.

5. 결론

기존 정수장에서 응집제를 교반시키는 방법으로 사용하고 있는 급속혼화공정은 Alum의 수화반응, 흡착 및 전하중화반응, 콜로이드의 불안정화 등의 Chemical coagulation과 불안정화된 입자의 충돌, 미세플록 형성 등의 Physical coagulation의 반응이 일어나는 공정이다. 하지만 최근의 추세는 1초 이내에 일어나는 Alum의 수화반응에 초점을 맞추어 체류시간을 1초 이내로 하고, 교반강도를 크게 하기 위해 G값을 증가시키고 있다. 본 논문에서는 최근 국내에서 도입이 증가하고 있는 순간혼화방식인 PDM의 관내 응집제 확산분포에 대한 평가를 실시하여 개선방안을 제시하고자 하였다.

PS 정수장의 PDM 상태를 살펴본 결과 응집제 석출물과 점토 등의 이물질 덩어리가 방해판의 한쪽 면에 부착된 것을 볼 때, 압력수 노즐, 응집제 주입관 및 방해판의 중심이 일치하지 않을 수가 있으므로, 주기적으로 자체 점검을 실시하여 이를 확인 및 교정하여야 한다.

OS정수장의 침전지별 수질차이는 PS 정수장과는 달리 PDM을 청소 한 상태에서 실험이 이루어졌기 때문에 관내

불균등 혼화가 응집제 석출물에 의한 것보다는, 압력수 유량 부족 등의 원인으로 인해 PDM내에서 순간적으로 완전혼화가 이루어지지 않은 채, 곡관부를 지나면서 관내 흐름이 변동되어 불균등하게 응집제가 분포된 상태에서 혼화수의 분배가 이루어졌기 때문으로 추정된다.

S.Kawamura는 혼화장치 PDM의 교반강도(750sec⁻¹), 혼화구역(1.5D), 압력수 유량비(2~5%) 등에 대한 설계기준을 제시하고 있다. 하지만, Orifice Mixer나 PDM같은 In Line Mixer는 압력수의 유량, 유속에 따라 응집제의 분사범위가 제한되며, 또한 관내 수류의 변화에 따라 희석수의 편중현상이 심하게 발생되어 불균등한 혼화를 초래할 가능성이 높으므로, 이를 적용할 경우에는 혼화시설 압력수 펌프용량, 방해판 직경비, 전·후단 곡관부, 분기부 및 내부 시설물 등 관내 응집제의 혼합 및 수류의 변화를 일으키는 요인에 대한 충분한 검토가 필요한 것으로 나타났다.



참고문헌

1. Amirtharajah, Appiah and Mills, Kirk M.,(1982) "Rapid mix design for mechanisms of alum coagulation", *J.AWWA*, Vol. 74, No. 4, 210-216.
2. AWWA,(1991) *Mixing in Coagulation and Flocculation*, 3-25.
3. AWWA,(1990) *Water Treatment Plant Design*, McGraw-Hill Publishing Company, 88-140.
4. Camp, T.R. and Stein, P.C.(1943), "Velocity gradients and internal work in fluid motion", *Boston Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 10, 219-237.
5. Kawamura Susumu, *Integrated Design of Water Treatment Facilities*, John Willy & Sons Inc, 63-80.
6. Montgomery James M, *Water Treatment Principles and Design*, John Willy & Sons Inc, 504-506.