

제 9 장 최적응집을 위한 혼화 조건

곽 중 운

9.1 서 론

물속의 부유입자는 주위분위기에 따라 안정할 수도 있고 불안정할 수도 있다. 입자표면이 어떤 이온으로 둘러싸여 있느냐에 따라 서로 뭉쳐지기도 하고 헤어지기도 한다. 입자간의 인력과 반발력을 적절히 조절할 수 있는 것이 바로 응집제이다. 응집제는 적게 들어가게 되면 미세입자는 그냥 잔류하게 되고 또 과잉으로 들어가게 되면 오히려 입자간의 반발로 인하여 오히려 물속에서 안정, 탁도가 다시 올라간다. 그래서 응집제는 적절한 량으로 투입되어야 함은 물론이고 들어간 응집제는 최대의 효과를 누리도록 해주어야 하는데, 응집제는 가능한 짧은 시간에 확산되어야 응집 효과가 향상된다.

9.1.1 응집제 분산의 중요성

응집제속에 들어있는 알루미늄이온 물 속에 들어가면 서로 헤어지기를 좋아한다. 꼬베폴린 망아지처럼 그들은 물속에서 제 2의 인생을 펼치는 것이다. 응집제는 물속에 들어가면 멍청히 가만히 있지 않고 되도록이면 멀리 확산하려고 한다. 배고픈 고양이가 쥐를 보고 달려가는 모습이랄까? 응집은 멀리 확산되어 가는 중에 일어난다. 문제는 주어진 시간 안에 어떻게 넣어준 응집제를 효율적으로 분산시키느냐가 중요하다.

응집제는 수초의 인생이므로 우리는 수초 안에 응집제를 물속에서 서로 되도록이면 떼어 놓아야 한다. 그렇지 않으면 워낙에 배가 고프고 그들(알루미늄)이라 물속에 들어가자마자 허리띠를 풀고 마음껏 허기찬 배를 채우는 것(수화과정, hydrolysis)이다. 응집제는 산이므로 염기적인 물을 만나면 즉시로 수화반응이 일어

나 수산화알루미늄($Al(OH)_3$)을 형성한다. 즉 물속의 OH를 정신없이 먹다 수산화알루미늄을 형성하는 것이다. Al은 일단 물속에서 배가 부르면($Al(OH)_3$ 를 생성하면) 자기 할 일을 잊어버리고 물아래로 서서히 침전하는 것이다. 그 놈의 장기란 오직 하나, 그저 배부르면 물속에서 다이빙하는 것 외에는 없다. 내려가는 길(침전)에 조무래기 입자들이나 등치 큰 입자들을 만나면 반갑다고 인사도 하고 기분에 따라 그들과 함께 동반침전 하는 경우도 있다.

9.1.2 수산화알루미늄생성의 억제

알루미늄이온이 물속에 들어가면 물분자(H_2O , 정확히는 OH)를 먹고 수소이온(H^+)을 발생시킨다. 알루미늄이온은 물속에서 물을 배불리 먹고 나들이하는 것이다. 학술적으로 이야기하면 알루미늄이 물속에 들어가면 가장 먼저 하는 것이 바로 수화반응이다. 그렇다고 $Al(OH)_3$ 가 응집력이 없다는 이야기가 아니다. 우리가 첨가해 준 Al 응집제는 최종적으로는 대부분 $Al(OH)_3$ 로 변한다. 다만 입자와 만나기도 전에 배가 부르면 할 일을 다 못한다는 것이다.

어떻게 하면 초기에 수산화알루미늄의 생성을 억제할 것인가? 알루미늄응집제는 물속에 들어가자마자 $Al(OH)_3$ 의 생성을 위해 사력을 다하는데 이것을 억제 못하면 응집의 효율이 저하하는 것이다. 초기에 절제시키지 못하고 배부른 다음에는 다이어트 해보아야 아무 소용없는 일이다. 알루미늄이온(갑순이: 알루미늄이온 하면 화학을 공부하지 않은 사람은 이해하기 어려우므로 필자는 이제부터 간단하게 우리 머리속에 가장 잘 기억되어 있는 갑순이로 명명한다)의 초기 식욕을 줄이기 위해서 사람들은 여러가지 방법을 사용해 왔다. 모질게도 자기는 못하면서 남의 다이어트는 팬시리 신경쓴 것이지. 물속에서 갑순이(알루미늄이온들)의 다이어트 요법! 세계 각국의 수처리도사들은 여러가지 재주와 튀는 아이디어로 갑순이의 비만증을 해결하기 위하여 수많은 논문들을 쓰고 기회만 되면 갑순이를 날씬하게 할려고 온갖 정력을 쏟았고 지금도 고삐를 놓치지 아니하고 지금도 땀을 흘리고 있다.

그래서 나온 처방책이 혼화론, 급속교반, 완속교반, 교반강도, G값 높이기, 제트 혼합, 터보혼합, line 혼합, 등이다.

갑순이로서는 참으로 행복한 일이지. 수많은 매니저를 둔 갑순이, 그저 오늘도

물속에서 인기는 최고. 물속에서는 갑순이는 온갖 부류의 파트너를 만난다. 그러니까 얼마나 몸관리를 잘 해야 될까?(물속에서 알루미늄이온은 적절히 OH기와 수화해야 응집능력이 올라간다. 즉 OH/Al의 물비가 1~2.1정도가 가장 우수하다. 물비가 3이면 침몰이 상책이다). 물속에서 인기가 있으려면 앞서 말한 데로 물비가 1~2.2사이에 있는 것이 가장 좋다. 지구촌의 물박사들은 물속에서 갑순이를 21세기의 스타를 만들려고 올챙이 가방처럼 책을 넣고 오늘도 학교와 집을 시계추처럼 왔다 갔다 하는 것이다.

최적응집은 적절한 물리화학적 조건하에서 반드시 이루어진다. 최적응집은 응집제의 종류, 원수의 성상도 관여하지만, 물리적 조건 즉 최적 교반강도는 빼놓을 수 없는 조건중의 하나다. 주어진 조건하에서 응집약품은 가능한 짧은 시간 안에 처리코자 하는 원수와 효율적으로 혼합되어야 한다. 응집초기에 완전한 혼합이 이루어지지 않으면 양질의 물을 생산할 수가 없다.

9.1.3 국부분산

응집제의 국부분산(local dispersion)은 결국은 미세플락을 유발시켜 침전력이 저하될 뿐만 아니라 필터의 세척주기가 짧아지는 등의 단점을 유발한다. 알루미늄이온은 용해도가 엄청나게 작기 때문에 수산화알루미늄을 형성하기 전에 원수에 균일하게 분산되어야 응집효율이 증가한다. 물론 물속에 넣어준 알루미늄은 거의 대부분이 종국적으로는 수산화알루미늄으로 가는 인생이지만 입자표면에 도달하기도 전에 전락해버리면 응집효율이 저하한다는 것이다. 결론적으로 주어진 교반시간, 주어진 공간에서, 주어진 응집제로 최적의 응집효과를 가져오기 위해서는 다음과 같은 사항에 초점을 맞추어야 한다.

- 혼합지점에서 고속혼합
- 원수와 응집제의 균일혼합
- 최적 플럭이 형성되는 완속교반

원수와 격렬하게 혼합이 되지 않으면 유효 알루미늄성분이 손실되어 부유물질

(입자성 유기물) 효율적으로 제거할 수가 없게 된다. 국내 대부분의 정수장에서는 급속교반조에 낙하식으로 응집제를 떨어뜨려 원수와 혼합시키고 있다. 초기응집은 대개 수초 안에(1/100 - 수초) 완결되므로 초기에 급속혼합이 이루어지지 않으면 응집의 핵심체인 알루미늄의 유효성분이 손실되어 이중적인 손해를 보게 된다.

유효성분이 유실되면 미세플록들이 증가할 뿐만 아니라 처리 후 잔류 알루미늄의 양도 함께 증가하게 되므로 응집제의 초기 균일 혼합은 상당히 중요하다. 주어진 공간과 시간안에서 투입한 약품이 균일하게 혼합되지 않으면 최적혼합을 얻을 수 없어 응집효과가 떨어지게 된다. 현재 국내에는 거의 대부분이 횡류식이며 극수의 정수장에서 맥동식 처리방식으로 처리하고 있다. 특히 맥동식의 경우 급속교반을 거친 후 바로 긴 관로를 통하여 바로 침전지로 들어가기 때문에 각별히 신경을 써야 한다.

수질기준도 점진적으로 강화될 전망이어서 응집제 자체에 대한 관심도 고조되고 있지만, 이와 함께 응집제 투입방법도 세계적으로 상당히 개선되고 있다. 국내 대부분의 정수장에서는 교반의 중요성이 강조되어 있지 않고 있으나 사실상은 상당히 중요하다. 급속교반에는 여러가지 방법이 있는데 본 논문에서는 세계적으로 사용되고 있는 모든 시스템을 소개하여 해 보고자 한다. 응집제의 혼합방법은 크게 두 가지, 즉 동적인 혼합과 정적인 혼합으로 나눌 수 있다.

9.1.4 기존정수장의 약품투입지

물은 흐른다. 누군가가 이렇게 물었다. 왜 물이 흐르느냐고? 대답은 간단하다. 중력이 있으니까 흐르지. 호랑이 담배 피우는 시절에는 응집제를 사용할 필요도 없었다. 그저 흐르느 물을 바가지로 떠서 먹으면 되었으니까? 수 년 전만 하여도 강원도 일부 정수장에서는 응집제를 사용치 않고 그냥 여과만 하였으나(특히 겨울철), 오늘날은 우리나라 전 정수장에서 이모양 저모양의 응집제를 사용하고 있다. 약품 투입지는 실제로 상당히 중요한 데, 본 장에서는 대나무처럼 길게 다룰 것이다. 응집제는 그냥 급속교반지에 넣는다고 다 되는 것은 아니다. 응집제도 제각기 잣대가 있어 조금만 자기와 안 맞으면 토라진다.

그럼 9.1에는 정수장의 전체흐름을 나타낸 것이다. 응집제를 투입하기 전에 대개

pH를 조절하고 그 다음 응집제를 투입한다. 응집제를 투입하기 전에 원수의 pH조절은 대개 염소로 하는데 우리나라의 경우 산의 사용이 되지 않고 있다. 원수를 적절한 pH를 가지게 해주어야 주어진 응집시간에 최적응집효과를 기대할 수 있다. 그림 9.1의 아래 그림은 좀더 시각적으로 나타낸 것이다.

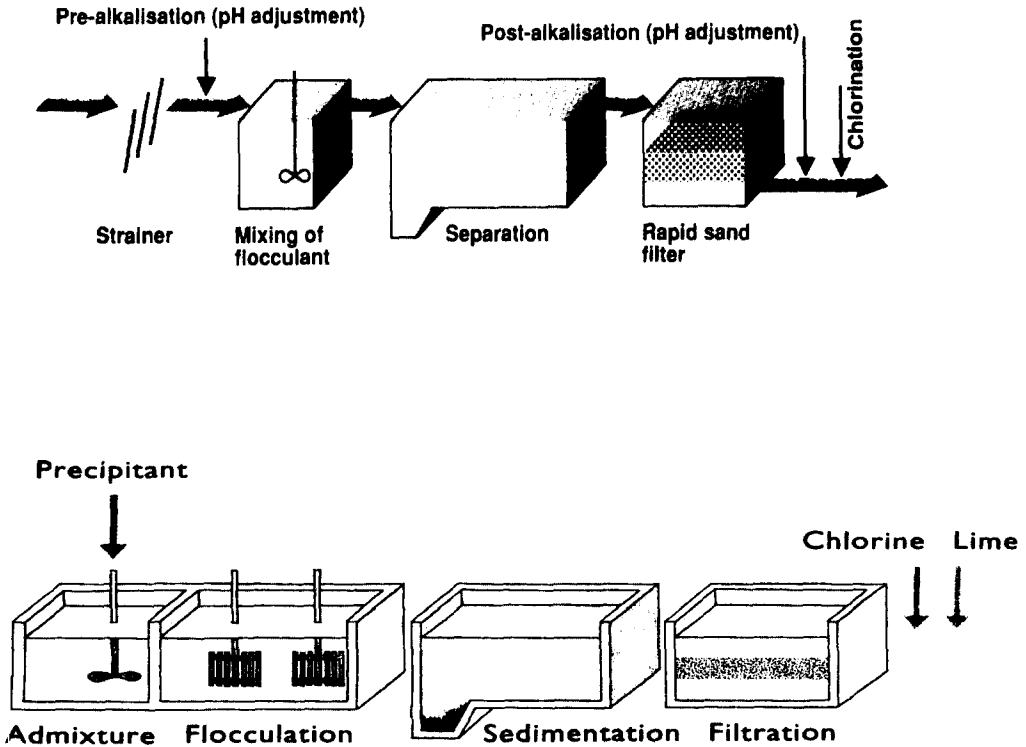


그림 9.1 수처리 공법

9.2 혼화특성과 방법

혼합의 개념을 정의하라고 하면 쉽게 설명할 수 있을 것 같지만 정확히 하기란 쉽지 않을 것이다. 이 글을 읽는 독자도 나름대로 혼합의 정의를 먼저 해보라. 물속에 들어가 아무렇게나 뒤범벅 되는 것이 혼합일까?

두 종류의 물질이 액상혼합이 일어날려면 "임의의 단위부피의 물이 두개 이상의

서로 다른 속도로 이동”하여야 한다. 앞서고 뒤서는 이동속도관계속에서 혼합이 이루어지는 것이다. 응집제는 물속에서 아주 빠르게 변하기 때문에 혼합이라는 개념이 상당히 중요하다.

9.2.1 동적혼합

가. 터보혼합기(turbo mixer)

그림 9.2에 도시된 것처럼 처리될 원수내에 터보엔진을 부착시켜 혼합하는 방법이다. 초기급속혼합을 위해서 유입방향 반대편으로 원형분배판이 설치되어 있으며, 이 때 응집제는 프로펠러 앞부분에 파이프 라인을 통하여 주입된다. 이러한 혼합기는 후침전법이나 정수장에 주로 쓰이고 있다.

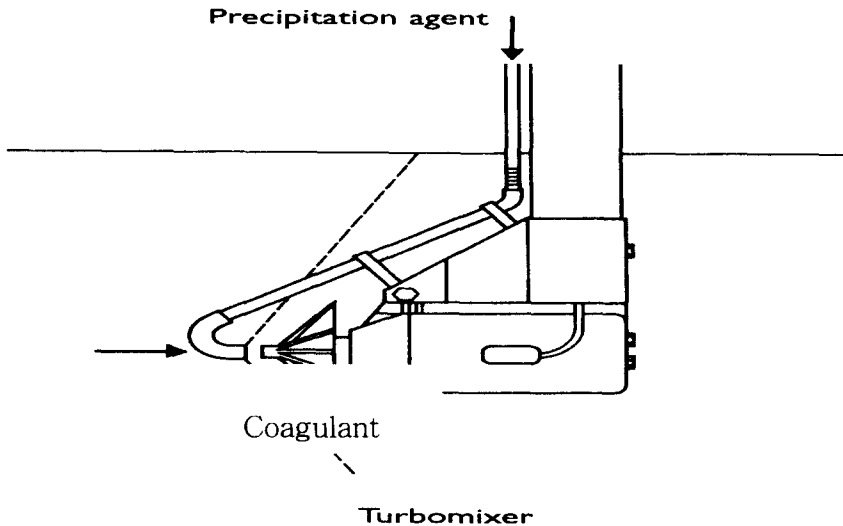


그림 9.2 터보형 급속교반 장치

장점: 균일 및 급속혼합이 가능하고 backmixing이 일어나지 않는다.

단점: 원수의 섬유물질 혹은 이물질이 프로펠러에 끼일 수 있어 수시로 확인이 필요하며, 생성된 플러크가 깨질 수 있다. 별도의 에너지가 필요하다.

나. 급속혼합기(Flash mixer)

이 급속교반장치는 국내에서 가장 잘 알려진 혼합방법이며, 응집제는 급속교반조에 라인을 통하여 연속적으로 주입된다. 급속교반조 가운데에는 혼합강도를 증가시키기 위하여 강력한 모타가 설치되어 있다(그림 9.3). 이 혼합방법은 비효율적인 것으로 알려져 있다. 특히 backmixing이 일어나 응집제의 손실이 크다.

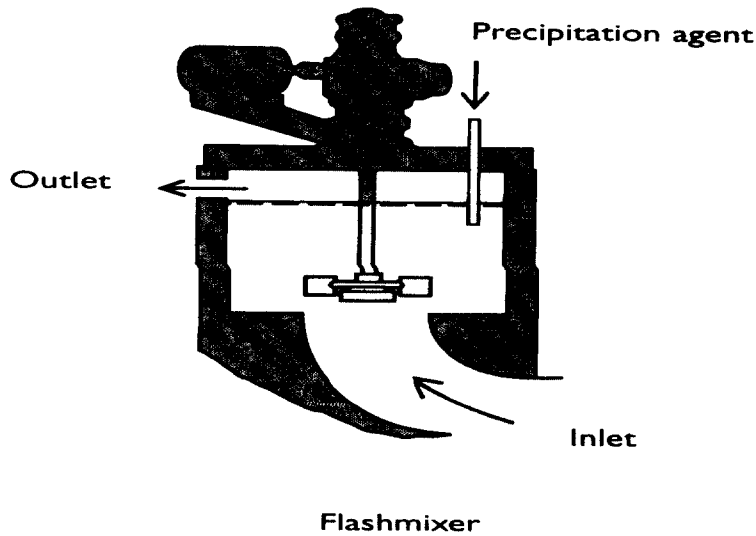


그림 9.3 일반형 급속교반 장치(backmixing)

이 혼합장치를 사용하는 경우에는 가능하면 강력한 교반기를 설치할 필요가 있으며 체류시간을 1-2분 이내로 하는 것이 바람직하다. 평균체류시간을 평균적으로 1-2분으로 할지라도 그 중에는 3분-4분을 넘기는 경우의 원수도 있을 것이다. 그런 경우 수산화알루미늄을 형성하는 경우가 대부분일 것이다. 갑순이가 다이어트를 전혀 하지 못하는 경우가 되고 만다는 것이다. 배불리 먹으면 침전하는 경우 외에는 길이 없는 것이다.

- 단점: 1.Back mixing현상때문에 응집제의 사용이 비효율적이다.
 2.급속교반조내에 원수의 부유물질(찌꺼기)이 잔존한다.
 3.에너지가 필요하다.

다. 공기주입혼합

이 방법은 공기주입지점에 응집제를 주입하는 것으로 혼합이 균일하지 못할 뿐만 아니라 back-mixing도 피할 수 없으므로 적절한 방법이 되지 못한다. 국내에도 이러한 장치는 현재 사용되지 않고 있다. 저자의 경험으로 보면 이 혼합장치는 급속혼합기(flash mixer)와 겸용할 경우 보다 효율적으로 초기에 응집제를 원수와 혼합시킬 수 있다. 공기주입도 결국은 에너지이므로 교반날개를 더 빠르게 할 것이나 공기를 불어넣을 것이냐는 약품의 투입위치와 현재의 교반강도를 고려하여 결정하는 것이 바람직하다.

9.2.2 외부에너지 없는 혼합

외부로부터 에너지를 주지 않고 원수와 응집제를 균일하게 혼합시켜주는 것이 고정혼합(비에너지 혼합)이다.

가. 관내에 S고정관을 설치한 혼합기(static tubular mixer)

이것은 물의 흐름을 이용하는 것으로 외부에서 에너지를 공급하지 않는다. 처리 원수가 고정관을 통과하면서 응집제와 혼합이 이루어지는 것으로, 관 내부에 비틀림 날개를 설치하므로 와류가 형성, 혼합이 균일하게 이루어진다.

이 S형 static(혹은 line) mixer는 관내에 180도로 비틀린 엘리먼트(element)가 90도로 서로 엇갈리게 내장되어 있어 유체가 이곳을 통과할 때 내장된 모양대로 물이 약품과 파장을 일으키며 골고루 혼합되는 것이다. 일부러 물을 꼬브랑길을 걷게 해서 서로 헛갈리게 하는 것이다. 그러니까 관속을 통과하는 유체는 element 하나를 통과할 때마다 2등분이 된다. 즉 물은 얼마나 많은 element를 통과하는냐에 따라 혼합정도가 결정되는 것이다. Element의 수를 n 이라고 하면 유체가 분할되는 수는 $D=2^n$ 으로 주어진다.

이를테면 element수가 6일 때 분할수는 $2^6=64$ 가 된다. 약품자체는 산이고 원수는 염기성이기 때문에 이 정도면 충분히 혼합될 수 있는 수치다. 또한 관내의 단면

적을 A 라고 한다면 분할되는 면적 $A'=A/2^n$ 이 된다. 즉 element의 수에 비례하여 분할면적은 더 작아져 원수와 약품이 더 균일하게 섞이는 것이다. S-line mixer의 혼합효과를 요약해보면 다음과 같다.

- (1) 흐름의 쪼개짐(Flow division): 유체의 분할은 기하급수적으로 증가된다.
- (2) 흐름방향의 뒤바뀜(Rotational circulation): Element가 좌방향 우방향으로 교대로 배향되어 있으므로 보다 완전한 혼합을 유도한다.
- (3) 흐름이 중심축으로 배향(Radial mixing): 유체는 중심부를 향하여 배향되면서 측면으로 흐른다.

이 방법은 먹는물처리에 적합하다(그림 9.4). 이 혼합기의 단점은 혼합강도가 유속에 의하여 결정되고 또한 이 물질이 관속에 끼이거나 스케일이 끼일 수 있다는 것이 단점이다. 현재 우리나라에서는 부산지역의 D정수장에서 이런 류의 혼합기가 사용되고 있다(Kwak, 1994).

- 장점: 1. 균일한 혼합
- 2. 에너지가 필요없다.
- 단점: 1. 원수의 이물질이 날개에 끼일 수 있다.
- 2. 혼합강도가 유속에 따라 변한다.

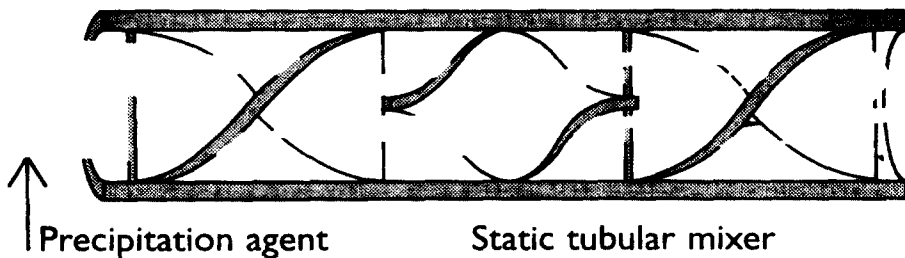


그림 9.4 고정관 교반장치

나. 다중주입혼합기(multi-holes mixer)

수중유입관을 이용하여 투입하는 것으로, 유입관에 여러개의 홀을 만들어 원수와 균일혼합이 형성되도록 고안된 것이다. 이 때 응집제의 관내유입속도가 물의 흐름속도보다 커야 한다(그림 9.5). 하수처리장에 사용은 적합하지 못하다. 이 방법은 아직 적용되지 않고 있으며 시험중에 있다.

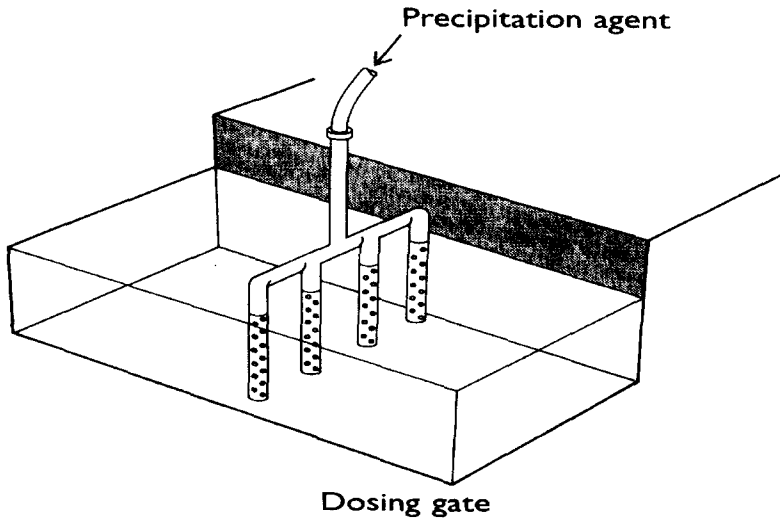


그림 9.5 여러개의 분배구가 달린 투입장치

장점: 1.Back mixing이 없다.

단점: 1. 이물질이 홀(hole)에 끼일 수 있다.

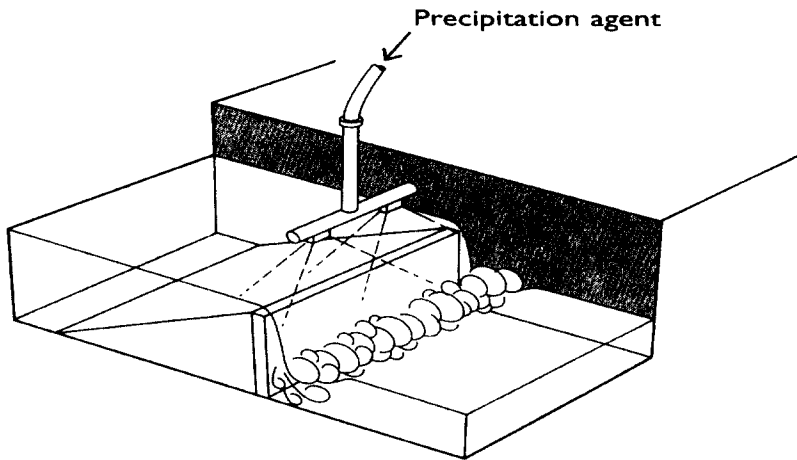
2. 혼합이 균일하지 못하다.

다. 분사식 혼합

유입원수를 overflow하게 하여 격렬한 섞임을 유도(일종의 폭포처럼), 응집제를 overflow되는 표면에 분사식(노즐 설치)으로 뿌려서 혼합시키는 것이다(그림 9.6).

이 경우 혼합정도는 overflow의 높이와 유속에 따라 달라지게 되며, 혼합효율을 증가시키기 위하여 overflow 전범위에 걸쳐 응집제가 균일하게 분배되어야 한다. 그림에서 보는 것처럼 분사수를 증가시킬수록 보다 균일하게 혼합될 수 있다. 이 방법은 응집제를 좀 많이 사용하는 경우에 사용될 수 있다. 이 혼합장치의 장점은 언제든 투입상황을 눈으로 확인할 수 있는 상당한 장점이 있다. 뿐만 아니라 에너지를 절약할 수 있는 장점이 있다. 국내의 경우 2군데 정도 실제 정수장에서 현재 이 방법이 사용되고 있다(군산소재 정수장, 일산정수장).

- 장점: 1. 장치가 간단하다.
 2. 급속교반 및 균일혼합이 가능하다.
 3. 유지비가 저렴하다.
- 단점: 1. 혼합정도가 유속에 따라 변한다.



Overflow with nozzle distribution

그림 9.6 흐름을 이용한 급속교반

9.2.3 By-pass에 의한 회석투입

유입원수와의 혼합효율을 증가시키기 위한 하나의 방법으로 응집제를 적당한 농도로 묽혀서 사용하는 방법이 있다. 그러나 너무 낮은 농도로 낮추면 수산화알루미늄

늄($Al(OH)_3$)을 형성할 수 있기 때문에 주의가 필요하며, 유효알루미늄의 손실을 방지하기 위해서는 물의 농도의 pH가 3이 넘지 않도록 조절하여야 한다. 약 1000배 정도 묽힐 경우, 즉시로 사용하여야 하며 체류할 경우에는 백탁현상을 초래할 수 있다. 저자의 경험에 의하면 염기도가 클수록 교반강도는 증가되어야 하며, 교반이 약할 경우에는 마치 쌀 뜬물처럼 허영게 변하는 것을 볼 수 있다. 시야에 하얀물이 희끗희끗 보이면 이미 응집제의 효력은 상당히 저하된 것으로 보아도 좋다. 수산화알루미늄으로 전화되면 기껏해야 침전하면서 맥없는 입자나 데리고 아래로 침전하는 것 외에는 별 책략이 없기 때문이다(Sweeping).

가. 수중펌프를 이용한 희석(dilution 혹은 thinning)

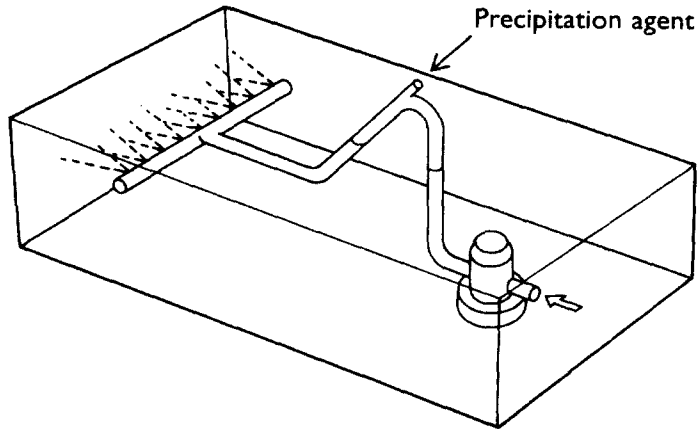
희석할 원수를 약품유입관에 펌프로 이송시키면서 by-pass로 응집제를 동시에 투입시키는 방법으로 장치가 간단하다(Fig.7). 이 때 투입량의 정확한 조절이 중요하다. 응집제는 처리원수의 수질에 따라 상이하지만 대개 응집제의 투입량은 적게는 10ppm 많게는 80ppm까지 투입한다. 처리물량이 일 50 만톤-100 만톤일 경우에는 투입량이 많아서 분사식으로 투입할 수가 있지만 일 처리량이 10만 이하일 경우에는 투입량이 너무 작아 분사형태로 투입하기가 상당히 어렵다. 이런 경우 응집제가 희석되면 양이 많아지므로 충분히 분사에 의해서 들어갈 수가 있다. 특히 응집제가 희석할 경우 불안정하여 지므로 가능하면 희석된 응집제는 IN-SITU로 바로 사용하는 것이 과수화반응을 막는 방법이 될 수 있다. 이 때 가능하면 희석수는 정수가 좋다. 유입원수를 그대로 사용하게 되면 전응집반응이 일어나 응집제의 손실이 너무 크므로 가급적이면 정수처리된 물을 희석수로 사용하는 것이 유리하다. 또한 이 경우 분배관에 이물질 등이 들어가 약품배출구를 막을 가능성이 있으므로 주기적으로 청수를 해주는 것이 필요하다.

장점: 1.장치가 간단하며 테스트 하기가 용이하다.

단점: 1.By-pass 로 인하여 수산화알루미늄이 형성될 수 있다.

2. 이 물질이 수중펌프에 끼일 수 있다.

3. 혼합이 균일하지 못하다.



Floodable pump

그림 9.7 By-Pass를 이용한 회석장치

나. Jet식 주입 혼합

제트식 주입혼합은 1979년 Chao와 Stone에 의하여 제안된 혼합방법으로 상기 회석방법을 더 발전시킨 것이다. 이 주입방법은 음용수처리용으로 적당하다. 응집제는 회석수관내에서 가장 유속이 빠른(유입관이 축소되는 지점) 지점에서 주입한다(그림 9.8). 이 경우 by-pass에 의한 유입속도는 원수의 유입속도보다 7배 이상 커야 강력하게 응집약품이 원수와 혼합될 수 있다. By-pass flow는 유입원수의 2-3% 정도의 양이 유입되도록 하는 것이 일반적이다. 약품이 나오는 지점에 강력한 프러펠러를 달아 나오는 약품이 순간적으로 원수와 혼합될 수 있도록 고안되어 있다.

장점: 1. 급속교반 및 효율적 분배가 가능하다.

2. 빠른 유속으로 혼합이 잘된다.

단점: 1. By-pass 할 때 이 물질이 없어야 한다.

2. 장비가 복잡하다.

3. 설치장비의 주기적인 청소가 필요하다.

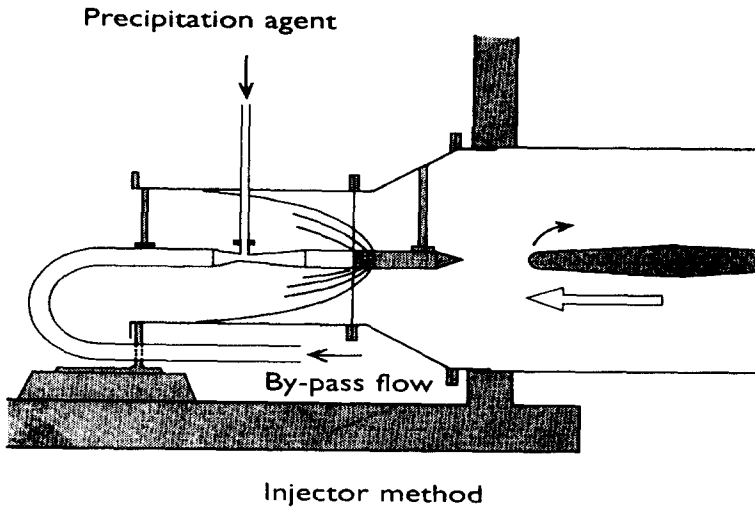


그림 9.8 제트형 교반장치

9.3 혼화와 응집과의 관계

응집처리는 시간싸움이다. 아무리 좋은 응집제라도 원수속에 들어가 균일분산이 일어나지 않으면 응집의 효과는 저하할 수밖에 없다. 무작정 교반강도만 빠르게 해주면 만사가 잘 되는 것만 아니다. 원수의 성상도 영향인자중의 하나다. 그러기 위해서 응집의 경로를 한번 검토해볼 필요가 있다.

9.3.1 응집경로

일반적으로 잘 알려진 응집메카니즘은 다음과 같다. 응집메카니즘은 응집제의 종류, 원수의 pH, 교반강도, 약품의 투입위치, 유기고분자의 사용여부등에 따라 달라진다. 여기에 대하여는 앞서 상세히 설명한 바 있다.

- Colloid destabilization(입자의 불안정화)
- Adsorption coagulation(흡착에 의한 응집)
- Patching(분자량이 작은 유기응집제에 의해서 일어남)

- Bridging(분자량이 큰 유기응집제에 의하여 일어남)
- Sweeping($Al(OH)_3(s)$ 가 침전하면서 일으키는 응집)

상기에서 언급한 응집메카니즘은 원수의 유입성상에 따라 달라질 뿐만 아니라 응집제의 종류와 투입방법에 의해서도 변하게 되므로 어느 하나의 응집메카니즘을 거치는 것이 아니고 복합적으로 일어나는 경우로 이해하여야 한다. 확일적으로 어느 하나의 응집메카니즘을 거치는 것이 아니라 상호보완적으로 일어난다는 것이다. 특히 pH가 올라가게 되면 흡착응집(adsorption coagulation)보다는 채거름응집(sweep floc aggregation)이 선택적으로 일어나게 되는 반면, 유기응집제가 사용될 경우에는 플러깅 bridge를 만들어 미세플러깅의 제거율을 증가시킨다는 것이다. 만약 교반강도를 초기에 아주 느리게 하면 어떤 현상이 일어날까? 예측은 간단하다. 국부적으로 과수화반응이 일어나 응집이 국부적으로 일어날 수 밖에 없다. 물속의 입자들을 불평등하게 대하면 그들도 자존심이 있는지라 빠지는 것이다. 응집제 냄새도 못 맡은 부유물질은 남들은 다 침전하는데 그냥 물속에서 버티어 보는 것이다. 또 국부적으로 생성된 수산화알루미늄의 입자는 불균일하게 생성, 부유입자를 효율적으로 침전시키지 못한다. 수산화알루미늄이 생성되면 어쩔 수 없이 sweeping(trapping)이 일어나게 되고 플러깅이 맥이 없고 느슨하며 쉬이 잘 깨어진다.

9.3.2 응집에 미치는 물리적 영향

응집에 미치는 물리적 효과는 응집효율과 직접적인 관계가 있기 때문에 상당히 중요하다. 기존의 정수장의 경우 무시되는 경우가 많은데 응집제가 투입될 때 두 가지 인자를 고려하여야 한다.

가. 응집제의 균일한 분포(homogeneous distribution)

응집제가 균일하게 분포되지 않으면 플러깅의 성장에 영향을 줄뿐만 아니라 생성된 플러깅이 쉽게 파괴될 수 있다. 응집제의 균일한 분포는 교반속도 및 원수성상에 주로 의존하므로 수질상황에 따라 달리 대처하여야 한다. 응집제가 제거할 입자주

위 혹은 표면에 도달하기 전에 수산화알루미늄을 형성해버리면 효력을 잃어버리므로 최적교반은 중요하다. 특히 pH가 8이상 올라간 원수를 처리할 때는 초기 교반속도를 정상상태보다 증가시켜야 하며 그렇지 않을 경우에는 투입량을 증가시키거나 중화제로 pH 를 적절한 범위로 조절하여 주어야 한다. 그러나 실제 수처리공정에서 응집제의 균일분포를 유도하기에는 상당한 주의를 요한다. 따라서 단분자 응집제 혹은 무기고분자 응집제의 경우 모든 입자표면에 균일하게 분포되지 않으면 local dispersion 현상을 유발, 플럭성장이 양호하지 못하여 최적응집효과를 얻을 수가 없다.

나. 확산속도(coagulant transport)

유효응집물질이 입자표면에 도달하는 시간이 혼화지의 체류시간보다 크거나 혹은 투입약품이 최적투입량보다 작으면 입자의 불안정화가 불완전하게 일어난다. 따라서 최대의 응집효율을 얻기 위해서는 응집물질이 가능한 짧은 시간에 입자표면에 도달하여야 한다. 이 경우 최적 투입지점이 필수적이다.

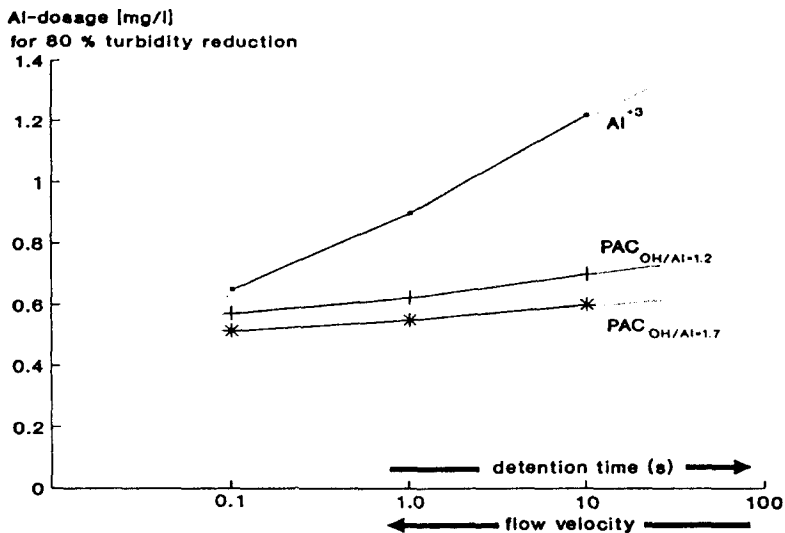


그림 9.9 체류시간이 탁도제거에 미치는 영향

그림 9.9는 응집제를 얼마나 빠른 시간에 분산시켜 주느냐가 중요하다는 것을 잘 보여주는 그림이다. 실제 정수장에서 가능하면 초기 교반강도를 증가시켜 주는 것이 유리하다.

9.3.3 화학적 변수

응집제가 수처리과정에서 응집을 할 때 다음과 같은 변수를 고려하여야 한다.

- 넣어준 알루미늄이온의 활성화(Aluminium activation)
- 플럭의 안정성(reversibility / irreversibility destabilization)

불안정화된 입자는 입자상호간 인력이 작용하여 하나의 플럭으로 성장을 시작한다. 다가 양이온(multivalent cation)에 의한 전기이중층 감소에 의한 응집메카니즘을 거칠 때 생성된 플럭은 가역적으로 깨어질 수가 있다. 그러나 분자량이 아주 큰 유기고분자에 의해서 생성된 플럭은 비가역적인 것으로 이미 생성되면 쉽게 파괴되지 않는다. 입자를 불안정하게 하여 침전을 유도하기 위해서는 알루미늄(혹은 철) 농도와 처리하고자 하는 원수의 pH를 함께 검토하여야 한다.

- a) 응집제에 의해서 부유입자가 제거될 때 일어나는 모든 응집반응은 알루미늄 이온의 dissolved/nondissolved 경계에서 일어난다는 것을 먼저 이해하여야 한다.
- b) 처리원수에 투입될 때, 응집제 자체는 농도의 급격한 감소와 pH의 상승이 일어난다. pH가 한계점(pH=5-7.5)에 도달하면 수산화알루미늄의 생성이 촉진되면서 응집이 일어나기 시작하며, 최소용해도 경계영역을 벗어나게 되면 마침내 응집효과가 감소하게 된다.
- c) 응집초기에 생성된 수산화알루미늄은 응집조건과 pH조절여부에 따라 재용해될 수가 있다. 실제로 투입한 알루미늄의 상당부분은 nondissolved 알루미늄으로 존재하게 되는데, 이 경우 응집효율이 감소하며 sweeping 메카니즘을 거치게 된다. Sweep-floc 메카니즘은 응집성분이 제거할 입자표면까지 걸리

는 시간이 길 경우(교반강도가 낮을 경우) 특히 선택적으로 일어난다.

9.3.4 응집제의 투입위치

동일한 응집제를 사용하여도 투입위치에 따라 서로 다른 응집효과를 가져온다. 투입위치를 어떤 지점을 택하느냐에 따라 투입량이 크게 달라진다. 이것은 최적혼합과 관련이 있으며 특히 염기도가 클수록 그 영향이 심화된다. #3의 경우 AI 유효성분이 손실되어(수산화알루미늄으로 침전) 투입량이 크게 증가되어야 한다. 원수처리과정에서 활성화되는 응집제의 경우는 최적활성화상태에서 응집역활이 진행되어야 보다 효율적인 응집효과가 얻어질 수 있다. 즉 응집제의 확산속도는 투입량에 영향을 줄 뿐 아니라 탁질제거 메카니즘에도 영향을 미칠 수가 있다. 가능하면 응집제는 교반날개 가까이 투입하여 짧은 시간 안에 분산시켜야 한다. 실제 정수장의 경우 급속교반중에 낙하로 투입하는 경우가 많은데 이 경우 개선이 요구된다. 본 실험에서는 1 리터 비이커를 사용, 투입지점에 따라 비이커 테스트를 수행하였다(표 9.1). 응집효율이 좋은 지점은 b지점(응집교반기 날개부분에 투입)으로 나타났으며 초기 급속교반이 중요함을 알 수 있다. 유효응집성분인 알루미늄성분이 입자표면에 도달, 흡착에 걸리는 시간과 수산화알루미늄으로 변화되는 시간의 경계에서 중요한 변수는 pH와 분산에너지가 주된 영향인자라 볼 수 있다. 응집제의 입자표면까지 효율적 전달은 교반강도와 직접적인 관련이 있으며 알루미늄이온이 침전성 수산화알루미늄으로 변화되기 전에 입자표면에 도달하여야 흡착-중화에 의한 응집이 일어난게 된다.

표 9.1 투입지점과 탁도제거효율과의 관계

Point	dosage($\mu\text{l}/\ell$)	strength(rpm)	turbidity(ntu)	pH
a	13	120	1.5	6.8
	16	140	1.3	6.7
b	13	120	1.2	6.9
	16	140	1.0	6.8

원수의 pH가 높을 경우에는 그 영향이 더 심화되어 나타난다. 표 9.3 에서 나타나는 것처럼 처리원수의 pH가 높을 경우에는 주어진 교반강도에서 투입위치가 큰 변수로 작용함을 알 수 있다. a위치(표면위에 떨어뜨림)에서 응집제를 투입하는 경우와 b위치(교반날개 가장 가까운 위치)를 비교해보면 탁질제거효과에 있어서 차이가 난다. 이것은 pH가 높을 때 응집제가 국부분산(local dispersion)되었기 때문으로 사료된다. 국부 분산율은 pH증가에 따라 증가하게 되며 sweep floc에 의한 응집 현상을 촉진시킨다.

Sweep floc 메카니즘의 경우, 생성된 수산화알루미늄 입자가 floc표면에 도달하는 평형도달시간이 가능하면 짧아야 한다. 또한 sweep에 의한 응집은 플럭강도가 아주 약하므로 물의 전단력에 의하여 쉽게 깨어질 수 있다. 그러한 이유로 실제 정수장에서 pH가 아주 올라가면 미세플럭이 증가할 뿐만 아니라 침전효과가 극히 저조하게 된다.

국부분산이 되면 결국 불균일한 응집반응이 일어나게 되어 응집효과가 떨어질 뿐만 아니라 응집제 소요량도 증가하는 원인이 된다. 원수의 pH가 증가하게 되면 수화반응이 촉진되기 때문에 더 빠른 속도로 응집성분을 입자표면에 흡착될 수 있도록 해주어야 한다. 단분자 응집제의 경우에는 초기 격렬한 교반조건이 필요하지 않으나 염기도가 증가할수록 초기 급속교반이 중요하다.

표 9.2를 보면 a위치(낙하식으로 떨어뜨림)에서의 탁도제거효과가 크게 떨어지는 것을 알 수 있다. 즉 pH가 증가할 경우 초기급속교반이 중요하며 교반이 미약하면 유효알루미늄성분의 손실율이 증가한다. 유효알루미늄농도가 감소하게 되면 결국 플럭성장에 저해요소가 되고 플럭강도도 크게 감소, 미세탁질이 증가하는 원인이 된다. 표 9.2에서 보는 것처럼 a지점에서 교반 rpm이 증가할수록 탁도제거율이 미소하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 동일한 투입조건에서 교반강도감소에 따라 탁도제거율이 떨어지는 것은 유효알루미늄의 손실율이 증가되었기 때문으로 사료된다.

그러나 b지점에서는 동일한 교반강도조건에서 탁도제거율이 상대적으로 우수함을 알 수 있다. 이것은 초기교반강도가 원수의 pH와 상당한 관련이 있음을 보여준다. 따라서 원수의 pH가 상승할 경우에는 교반강도를 적절히 증가시켜 주어야 한다. 이와 같이 무기응집제로 부터 알루미늄의 활성화반응과 비활성화반응은 서로

경쟁적으로 일어나기 때문에 초기에 충분한 교반강도를 제공하므로써 보다 효율적인 응집반응을 얻을 수가 있다. 대개 흡착중화에 의한 응집반응(coagulation)은 1초 이내에 완결되는 반면, sweep-floc 응집반응은 대개 수초이상 걸린다. 따라서 투입된 응집제는 수초이내 균일한 분포가 이루어져야 응집효율이 극대화되며 처리후 미세한 잔류탁질량도 감소한다.

표 9.2 투입지점과 입자제거

Point	dosage($\mu\text{l}/\ell$)	strength(rpm)	turbidity(ntu)
a	13	120	1.7
		140	1.5
		160	1.3
b	13	120	1.5
		140	1.3
		160	1.3

대부분의 정수장의 경우 교반강도와 투입위치를 고정시켜 놓고 운영하기 때문에 pH가 올라가게 되어도 변수는 아주 제한적이다. 거의 대부분이 투입량을 증가시키는 것이 상례로 되어 있으나 보다 경제적으로 보다 맑은 물을 생산하기 위해서는 적절한 최적운영이 요구된다.

그림 9.10을 보면 투입위치에 따라 입자의 제타퍼텐셜에 미치는 영향을 알 수 있다. 투입위치는 곧 투입량을 줄이면서 수질을 더 좋게 할 수 있는 하나의 방법이다. 동일한 응집제를 투입하고도 응집효과를 좋게 할 수도 있고 나쁘게 할 수도 있다. 이러한 현상은 우리가 쉽게 간과할 수 있는 분야로 화학적 이론을 알면 쉽게 이해할 수 있는 부분이다.

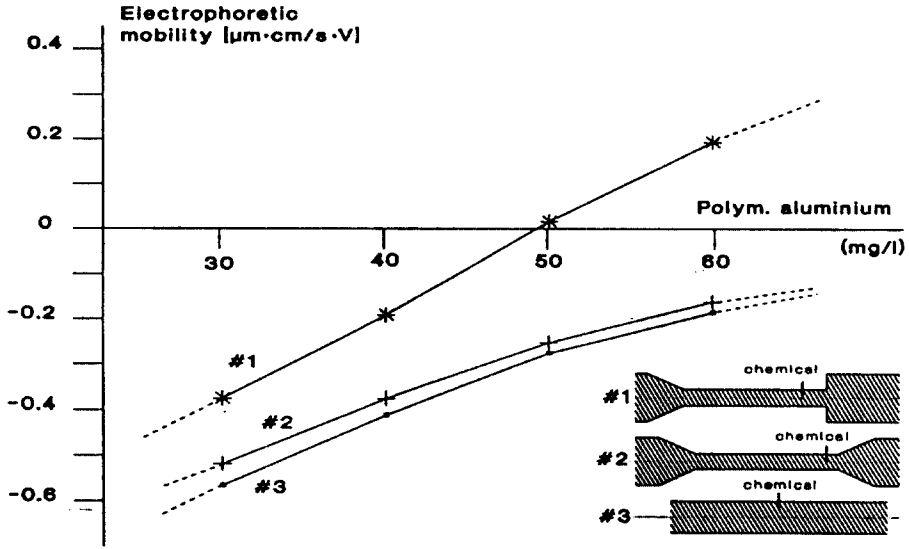


그림 9.10 투입량에 따른 제타퍼텐셜 곡선

9.3.5 교반과 Al의 활성화

단분자응집제의 경우 활성화방법에 따라 유효응집성분의 분율이 달라질 수 있다. 그림 9.11 에서 보는 것처럼 수산화알루미늄을 reactivating 하는 경우가 단순히 활성화시킨 것보다 응집성분분율이 높다. 그러나 pH=2.5 에서 reactivating 할 경우는 응집방해성분의 증가로 오히려 유효성분이 감소한다. 즉 활성화 pH값에 따라 서로 상이한 조성을 갖는 알루미늄이온이 형성되는 것으로 분석된다. Al^{3+} , $Al(OH)^{2+}$ 혹은 $Al(OH)_2^+$ 와 같은 이온은 pH에 아주 민감한 데 표 9.3에 도시한 것처럼 pH가 증가할수록 비활성화 응집종으로 전환하게 된다.

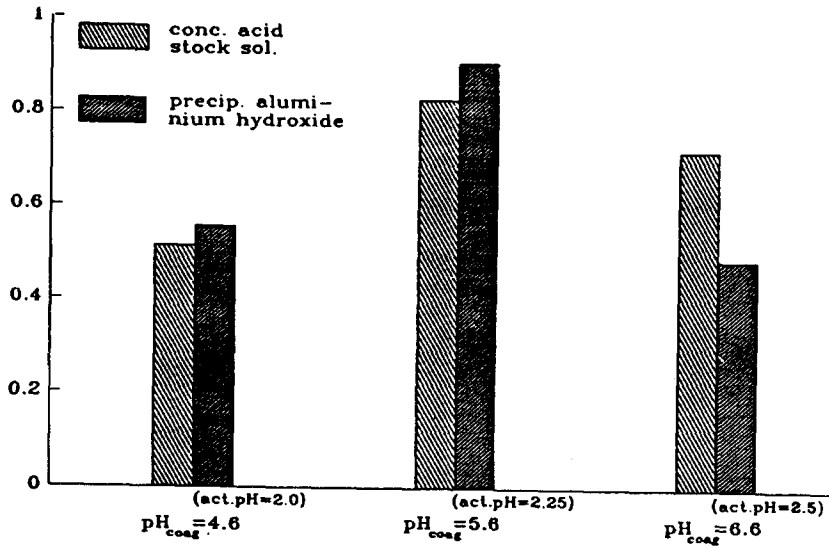


그림 9.11 pH가 Al종들의 활성화에 미치는 영향

그림 9.12에서 보는 것처럼 Al이온은 pH에 따라 초기에는 활성화가 진행되지만 Al(OH)₃가 생성되면서 비활성화가 일어난다. 표 9.3에서 보이듯이 활성화된 알루미늄 종류는 OH/Al 크기에 따라 여러형태의 이온이 존재할 수가 있다. pH가 증가할 경우 비활성화속도가 증가하는데 경계점에서 Al은 표면중화능력이 영이되며 sweep에 의한 응집현상이 두드러지게 나타난다. 모든 응집반응은 이 경계점에서 일어나게 되는 데, 경계점에 이르는 속도가 입자표면에 도달하는 속도보다 빠르게 일어나면 유효알루미늄이 손실되므로 교반강도를 적절하게 높혀 주어야 한다.

표 9.3 pH에 따른 Alldhs종들의 농도비의 관계

pH	$\log \frac{\text{Al(OH)}_2^{2+}}{\text{Al}^{3+}}$	$\log \frac{\text{Al(OH)}_2^+}{\text{Al}^{3+}}$	$\log \frac{\text{Al(OH)}_4^-}{\text{Al}^{3+}}$
6	1.11	3.44	0.5
7	2.11	5.44	4.5
8	3.11	7.44	8.5
9	4.11	9.44	12.5
10	5.11	11.44	16.5

Al(OH)₃이 생성되면 흡착중화효과가 극도로 저하되며 심할 경우 백탁현상을 초

래하게 된다. 이러한 메카니즘은 pH크기에 따라 각 응집종의 생성속도는 경쟁적으로 일어나게 되며 물리적 변수의 하나인 교반강도에 따라 각각의 분포율이 상이하게 된다. 일반적으로 활성화반응이 오른쪽으로 진행될 수록 흡착중화효과가 증가되는 반면, 상대적으로 물속에서 불안정하게 되므로 원수성상에 따라 적절히 대처하여야 한다(그림 9.12).

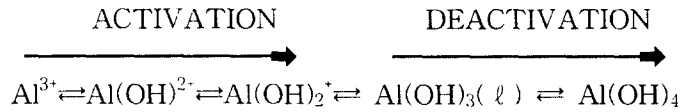


그림 9.12 Al의 활성화와 비활성화를 보여주는 Alwoon 모델

일반적으로 활성화반응이 오른쪽으로 진행될 수록 흡착중화효과가 증가되는 반면, 상대적으로 물속에서 불안정하게 되므로 원수성상에 따라 적절히 대처하여야 한다. 특히 한번 생성된 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 의 경우 대개는 비가역적으로 존재하며 부유입자에 흡착되거나 혹은 물속에 그냥 잔류하게 된다. 실제로 이론적으로 생성된 수산화알루미늄은 침전하여야 하나 대부분의 정수장의 경우 평형에 도달하기 전에 처리수는 여과지를 통과해버리기 때문에 최종처리수에 잔류될 가능성이 높다. 특히 횡류식이 아닌 맥동식(pulse system)일 경우 침전지 바닥에서 상방향으로 물이 부상하여 월류되기 때문에 평형도달에 큰 방해를 받는다.

동일조건하에서는 단분자응집제가 무기고분자 응집제보다 경계점에 도달하는 속도가 느리다. 그러나 처리원수의 수온과 알칼리도는 알루미늄의 활성화속도에 가장 직접적인 영향을 미치게 되므로 원수의 성상은 상당히 중요하다. 일반적으로 수온이 증가하면 활성화속도가 증가하게 되므로 겨울철 보다는 여름철이 응집반응이 유리하다.

활성화된 응집종 중에 가장 표면중화능력이 우수한 것은 비교적 안정한 것으로 $[\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}]^{7+}$ 으로 알려져 있다. 이러한 응집종은 in-situ 활성화과정에서는 생겨나기 어렵고 일정 압력, 온도하에서 반응기 안에서 합성이 가능하다. 이런 응집종의 분포가 높을수록 표면중화에 의한 응집력이 뛰어나 생성플록의 강도가 높을 뿐만 아니라 침전성이 개선되는 장점이 있다. 특히 이런 종은 flocculating

효과가 뛰어나 생성플렉입자가 크다.

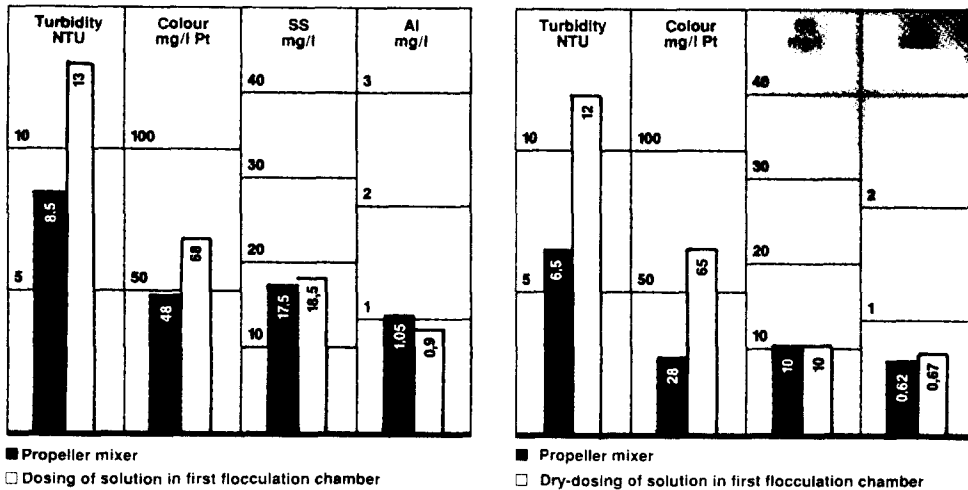


그림 9.13 (a).교반방법에 따른 혼합효과 분석

9.3.6 교반강도가 SS제거에 미치는 영향

응집제를 어떻게 투입하느냐의 중요성은 이미 누차 말한 바 있다. 여기서는 한 사례를 보자. 모델 우너수는 하수를 사용하였다. 그림 9.13(a)의 왼쪽그림은 프로펠러식의 교반지에 응집제를 투입하는 경우와 완속교반지에 액상응집제를 투입하는 경우고, 왼쪽의 그림은 고상응집제를 사용하는 경우다. 액상으로 사용하는 경우보다 고상으로 사용하는 경우가 제거율이 다소 우수한 것을 알 수 있고, 1차 완속교반지에 응집제를 투입하는 경우에는 응집효과가 크게 저하한다는 것을 알 수 있다. 그림 9.13(b)의 왼쪽 그림은 프로펠러 급속교반지에 투입하는 경우와 터빈교반기에 투입하는 경우를 비교한 것이고, 오른쪽 그림은 line mixer(static mixer)를 비교한 것이다. 프로펠러식보다는 터빈식이 보다 응집제의 효과가 뛰어난 것을 알 수 있고, line mixer는 프로펠러식과 유사한 결과를 보여주었다.

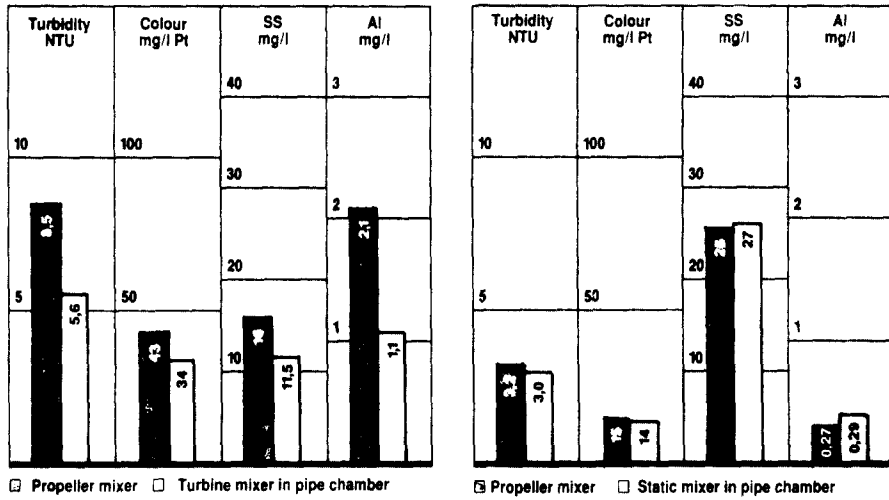


그림 9.13 (b). 교반이 혼화에 미치는 효과
(왼쪽:터보형 혼화, 오른쪽 : 라인형 혼화)

9.3.7 완속교반조의 영향

일반적으로 완속교반조는 급속교반조에서 불안정화된 입자들을 적절한 에너지를 주어 키우는 작업을 하는 곳이다. 너무 빠르면 생성되는 플러크가 깨어지고 너무 느리면 플러크의 성장이 늘려져 애매모호한 응집영역이다. 교반날개는 정수장마다 천차만별이고 세워서 혹은 눕혀서 교반시킨다. 완속교반날개가 할 일은 급속교반조에서 기진맥진한 입자들을 적절히 단합시켜 주는 것이 임무다. 한 마디로 가장 잘 가라앉도록(침전하도록) 해주는 것이다. 대개 일차 완속교반조의 날개는 0.5m/s, 두 번째는 0.3m/s, 마지막 날개의 속도는 0.1m/s정도가 적당하나(그림 9.14) 반드시 그런 것은 아니며 이것은 탁도의 농도와 성질에 따라 틀리다.

9.3.8 투입펌프 영향

실제 정수장에서 가장 중요한 것은 유입원수에 대한 정확한 농도계산이다. 사실 펌프를 통과하는 물의 양을 정확히 계산하는 것이 쉽지 않다. 게이지가 달려있어 수치를 읽어 분석하고 있지만 어느 누구도 측정해 볼 수 없다. 응집제의 정확한 투

입은 정확한 유입하는 원수의 양이다. 약품을 정량으로 투입하는 것은 쉬운 일은 아니다. 운영자가 모르는 사이에 사이폰이 걸려

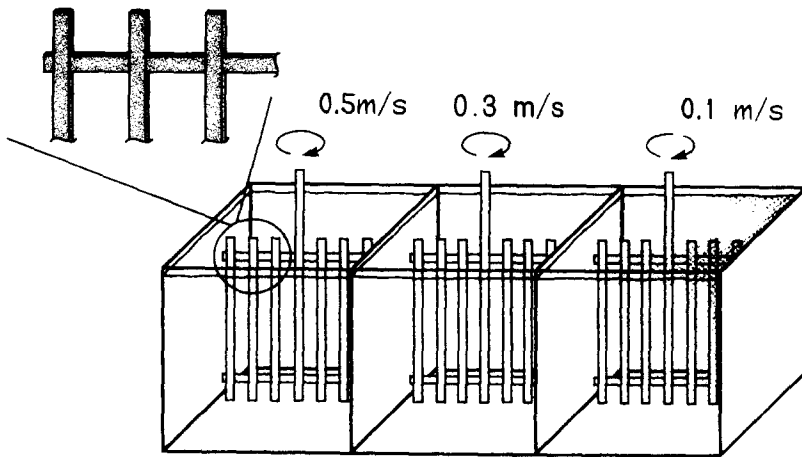


그림 9.14 플럭성장을 위한 완속교반

약품이 제대로 들어가지 않을 수도 있고, 과량으로 들어갈 수도 있다. 정수장마다 정량투입하는 방법은 천차만별이다. 물레방아식으로 주기적으로 일정량 떠서 넣는 정수장도 있고, 정량펌프를 달아서 투입하는 방법도 있고 자연낙하로 떨어뜨리는 방법도 있다.

가. 고체 응집제의 투입

우리나라에도 초기에는 고체상태의 황산알루미늄을 사용한 정수장이 많이 있었다. 보관도 편리한 장점이 있으나 정량투입이 용이하지 않다. 정확한 양의 투입이 어려울뿐만 아니라 사용상 여러 가지로 번거롭다. 그림 9.15는 고체상태의 응집제를 투입하는 장치를 소개한 것이다. 정량으로 나오는 응집제는 정수와 혼합시켜 용해시킨 다음 바로 급속교반지로 보내게 된다. 우리나라의 경우 울산지역소재 한 정수장에서 고상의 황산반토를 사용하는 곳이 있다. 이 정수장에서는 PAC와 혼용하는데, 조류발생시나 겨울철에는 음이온이 Cl⁻ 보다는 SO₄²⁻인 응집제가 플럭형성에 보

다 효과적이다.

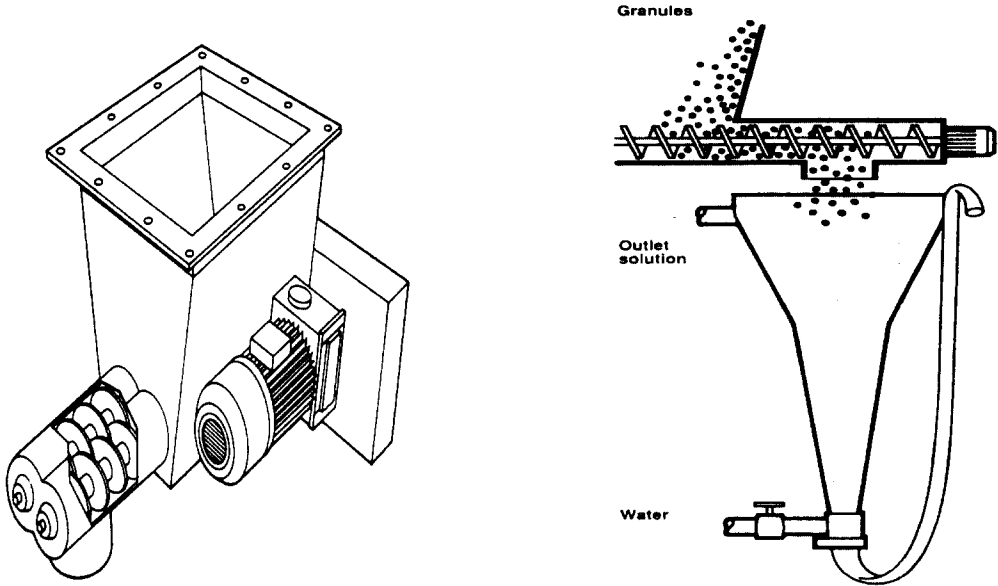


그림 9.15 응집제의 주입장치(왼쪽)와 응집제 용해장치(오른쪽)

나. 액상응집제의 투입

오늘날 전세계 도처에서는 액상 응집제를 대부분 사용하고 있다. 응집제를 생산하지 않는 지역이나 수송거리가 아주 먼 경우를 제외하고는 대개 액상응집제를 사용하고 있다.

액상의 경우 투입이 용이하나 하나의 단점은 추운지방의 경우 겨울철에 얼 가능성이 있다는 것이다. 관이 막히면 안된다. 그림 9.16에 간단한 장치를 나타내었다.

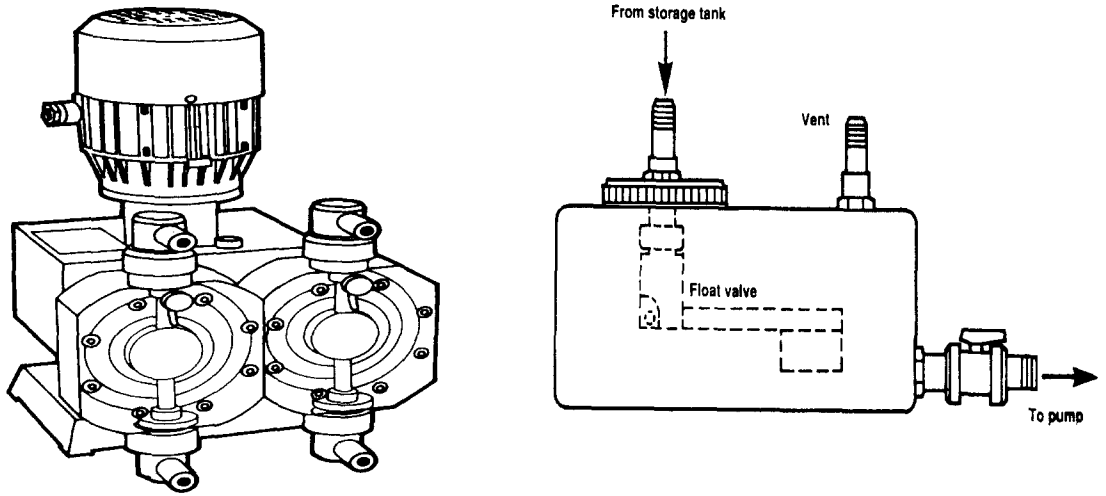


그림 9.16 응집제의 안정적 투입펌프(왼쪽) 및 방법(오른쪽)

9.4 속도경사와 응집

9.4.1 입자의 응집

두 입자를 어떻게 만나게 할 것인가? 주어진 짧은 시간안에 어떻게 만나게 해서 푹푹 뭉치게 하느냐가 응집이 요구하는 핵심이다. Van der Waals 인력이 작용하기 위해서는 두 입자가 충분히 가까이 있어야 한다. 분자운동(Brownian motion)에 의한 입자간 충돌은 사실 응집에 있어서 아주 사소한 것이다. 어떻게 두 입자들을 서로 상봉시킬 것이냐, 그것은 결국 외부로부터 에너지(어떤 형태의 에너지든 관계없다-공기를 불어넣어도 좋고, 중심축에 날개를 달아 정신없이 도려도 좋고, 흔들어도 좋고...)에 영향을 받는다. 두 개의 입자를 생각해보자. 두 개의 입자의 직경을 D_i , D_j 라하면 단위시간당 단위부피당 입자의 충돌수 N_{ij} 는 다음식으로 주어진다.

$$N_{ij} = (1/6)n_i n_j (D_i + D_j)^3 \frac{dv}{dz}$$

여기서 n_i , n_j 는 입자수를 나타낸다. 그림 9.17은 상기식을 도식해본 그림이다.

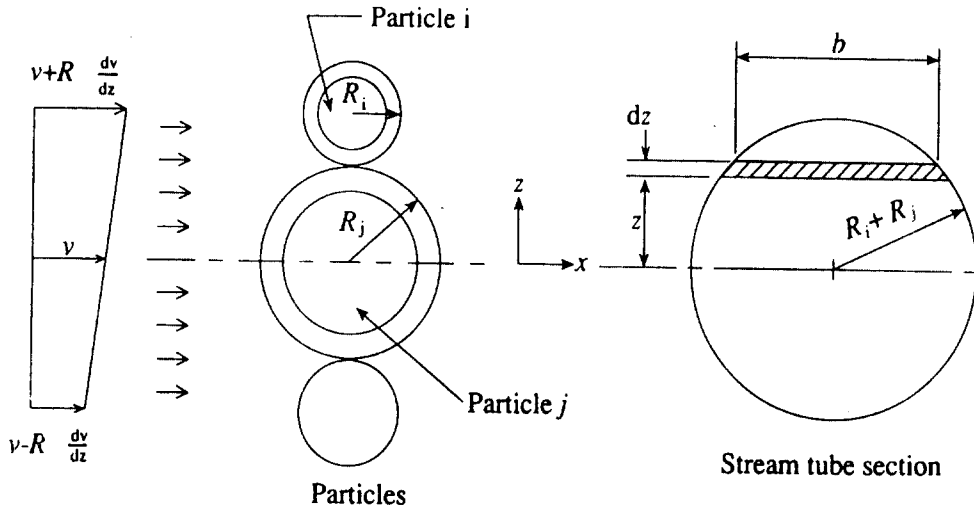


그림 9.17 혼화(외부에너지)에 의한 응집

9.4.2 속도가 응집에 미치는 영향

원수에 넣어준 응집제가 원수와 혼합(mixing)이 일어날려면 물층(water layer)간의 속도가 서로 달라야 한다. 물의 모든 단위볼륨이 동일한 속도로 이동하게 되면 모든 화학종은 동일한 위치를 고수하기 때문에 혼합이란 용어가 존재할 수 없다. 응집반응은 지금까지 보아온 것처럼 외부로부터 얼마나 많은 에너지를 집중적으로 지원을 받느냐에 따라 달라지는 것을 역력히 보았다. 이제 우리는 그 외부에너지를 어떻게 정량적으로 표현하는 나가 중요하다. 아주 쉽게 보면 rpm만 빠르게 해주면 혼합정도는 비례하여 증가한다.

가. 유체의 속도경사식

우선 가정하기를 하나의 단위부피가 x축 방향으로 흐른다고 생각해보자(그림 9.18). 이 때 아인슈타인의 점성의 법칙은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{Shear Stress} \quad \tau = \mu \frac{dv}{dz} \quad (9.1)$$

여기서 τ 는 전단력(shear stress) μ 는 점성계수 v 는 유체의 속도이다. 즉 laminar flow(한 방향으로 흐름)일 경우 전단력은 흐르는 방향의 수직흐름에 상응하는 속도경사(dv/dz) 비례한다. 한편,

Shear Force

$$F = \tau(\Delta x \cdot \Delta y) = \mu \frac{dv}{dz} (\Delta x \cdot \Delta y) \quad (9.2)$$

즉 단위면적에 작용하는 힘에 전단력을 곱한 값이 단위부피의 물이 이동하는데 필요한 힘이다. 자 그러면 이 단위부피의 물이 얼마만한 속도경사로 움직이느냐에 따라 물의 흐름속도가 달라질 것이다. 망치에 아무리 힘을 가하더라도 때리는 속도가 아주 천천히 해버리면 못은 끄덕도 않는다. 단위부피의 물이 얼마만한 속도를 가지고 움직이느냐에 따라 혼합의 정도는 달라질 것이다. 따라서,

$$\text{Power } P = F \cdot \Delta z \frac{dv}{dz} = \mu \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 (\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z) \quad (9.3)$$

식 9.3은 다음과 같이 쓸 수가 있다.

$$\frac{P}{V} = \mu \left(\frac{dv}{dz} \right)^2 = \mu G^2 \quad (9.4)$$

여기서 $G = dv/dz$ (x축의 수직 흐름방향 성분)으로 주어진다. 즉 단위볼륨당 작용하는 에너지(P)는 G 값에 비례한다. 입자의 성장은 결국 충돌횟수와 충돌시간으로 볼 수 있으며, 수식으로는 Gt (무차원 값)로 볼 수 있다. 일반적으로 응집이 적절히 잘 일어나는 범위는 10,000~100,000으로 알려져 있다. 속도경사값이 너무 크면 오히려 생성되는 플러크이 깨어질 수 있으므로 적절한 범위에 있어야 한다.

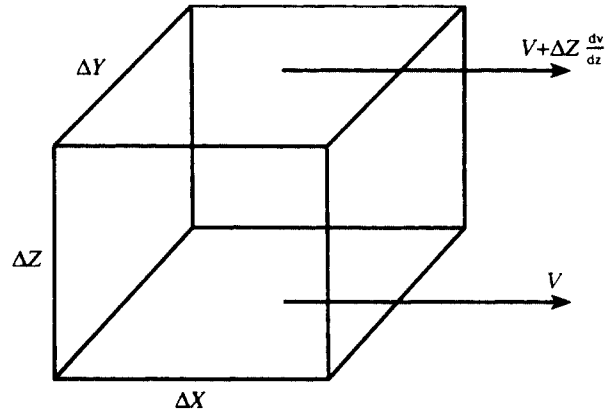


그림 9.18 유체의 전단력

9.5 Enhanced Coagulation

최근 국내에서도 “enhanced coagulation”에 대한 연구를 많이 하고 있다. 본 절에서는 아직 우리나라에 생소한 느낌이 없지 않은 것들인데 본 절에서 필자의 경험과 Hecht and Hildebrand가 경험한 것들을 중심으로 기술하고자 한다.

“Enhanced” 용어에 대하여는 앞서 필자가 이미 9.3절에서도 논한 바가 있지만 개괄적인 표현으로 “enhanced coagulation”은 응집효율을 향상시키는 것이다. 협의로 보면 유기물(NOM 등)을 효율적으로 제거하는 것이라고 보아도 좋다. 우리나라에서도 최근 각 정수장에서 응집효율의 향상을 위해서 노력하고 있다.

원수가 좋으면 사실 탁도 하나만 잘 잡으면 정수처리는 거의 끝난 것이나 다름없다. 종전에는 탁도를 감소시키는데 초점이 맞추어졌으나 최근에는 양상이 달라졌다. 규제가 자꾸 강화되니까 탁도만 잘 제거해서는 안되는 절박한 상황까지 온 것이다. 응집제 투입량과 최적응집 pH만 잘 조절하여 탁도만 잡는 것은 아득한 옛날이 되어 버렸다.

그러나 이젠 각국의 오염의 정도가 악화됨에 따라 종전의 탁도만 감소시키는 단계는 이미 넘어섰다. 나라마다 먹는물의 규제가 강화됨에 따라 처리방법이 개선되지 않으면 수질을 맞출 수가 없게 되어버렸다. 결국 수처리의 발전은 규제의 강화와 함께 나날이 진일보를 할 것이며, 21세기에는 먹는물 처리에 대한 각국의 기술

개발이 속출할 것으로 보인다.

대부분의 정수장들은 이미 지은지 오래되었고 상당히 낡아 있다. 어떻게 기존의 시설로 강화된 수질을 만들어 내느냐가 각국의 관건이다. 처리용량을 증가시키거나 초기교반강도를 증가시키거나 하는 작업은 기본적으로 피할 수 없는 것들이다. 기존의 먹는물 처리공정들은 앞서 이야기 한 것과 같이 물속의 부유물질(입자들)을 제거하는데 초점이 맞추어져 있다. 국내에 있는 대부분이 정수장들도 마찬가지다.

현재 각정수장마다 가장 어려움을 겪고 있는 것은 NOM(natural organic matter) 처리다. 아마 가장 큰 골칫거리로 당분간 남을 것이다. NOM은 주로 강유역에 있는 식물의 분해나 동물성 물질이 썩을 때 유발되는 것인데, 이 NOM이 최근에 불거진 것도 아니고 새로운 것도 아니다. 예전에도 원수에 들어 있었으나 우리가 신경을 안썼을 뿐이다. 이제 인류가 더 좋은 물을 마실려고 하다보니 자연스럽게 자라목 나오는 것처럼 불거지는 것이다.

문제는 산화과정에서 NOM이 염소등과 반응하여 생기는 인체에 해로운 부산물이다. 소위말하는 “D/DBP(Disinfectant/ Disinfection By-Products) Rule” 인데 NOM 때문에 생겨난 법칙이다. 염소와 같은 산화제를 투입하기 전에 NOM의 농도를 한계농도 이하로 낮추어야 한다는 이 법칙은 기존의 정수처리장의 시설로 해결한다는 것은 결코 쉬운 일이 아니다.

이 NOM을 어떻게 효율적으로 잘 제거하는냐? 어떤 최적화 처리방법을 쓰면 경제적으로 제거할 수 있는냐? 어떻게 시설을 잘 개조하면 NOM을 감쪽같이 없애 버릴 것이냐?

그렇게 할려니 그냥 평상시의 응집방법으로는 안되니까 우선 새로운 용어부터 하나 작명하였는데, 바다건너 언어로는 “enhanced coagulation”, 세종대왕이 지은 한글로는 사실 적절한 표현이 없지만 굳이 좀 풀어서 작명을 한다면 “유기물을 효율적으로 제거하는 응집” 정도랄까? 그런데 너무 길다. 차라리 “NOM 응집”이라고 하면 어떨까? 어떻게 쓰던 관계없다. 핵심은 염소와 같은 산화제와 유기물이 반응하여 인체에 해로운 부산물을 최소화시키는 응집을 하면 된다.

9.5.1 NOM의 농도

NOM은 물리화학적으로 너무 다양하고 광범위하기 때문에 단 한번으로 분석할 수 없다.

그래서 여러 가지 표현법이 나오고 있는데 대표적인 농도표현법은 다음과 같다.

- TOC(total organic carbon)
- DOC(dissolved organic carbon)
- UV 254 nm에서 흡수한 빛의 양
- DBP 형성할 수 있는 퍼텐셜(DBPFP)

9.5.2 NOM의 최적제거

NOM을 그냥 얼룩장 놓으면 끄떡도 안하고 버티는 습성이 있다. 물잡는 사람이 아무리 회초리를 들고 겁을 주어도 물속에서 살살 돌아 다니다 염소같은 물질이 들어오면 번개같이 달려들어 얼싸 안아 새로운 물질로 변해버린다. 유행감각이 있는 놈이지.

적당한 모이를 주어 살살 달래면 꼬리를 감추고 물러설까? 우선 NOM은 물속에 들어가면 자기의 존재를 알리는 신호를 보내는데 우리 인간처럼 말을 못하니까 색(colour)으로 그것을 대변한다. 자연은 희한하게도 말을 못하면 뭔가 존재를 알리는 방법을 가지고 있다.

지난 20년간 사실 NOM에 대하여는 등한시하였으나, 이제는 더 이상 방치해서는 안된다는 것이 각국의 수처리도사들이 내린 결론이다. 종전에는 수처리도사들은 이 NOM은 기껏해야 염소와 반응하여 부산물을 생성하는 정도로 생각했는데, 알고보니 NOM은 어떤 살균제(chemical disinfectant)와도 가리지 않고 반응하여 희한한 물질(DBPs)을 형성하는 것으로 알려졌다.

9.5.3 NOM의 특성

수많은 정수장에서 NOM은 마치 범죄자처럼 다루어지고 있다. 색을 좀 유발하였다고 너무 코너로 몰아부치는 느낌도 들지만 어쨌든 이 놈의 존재는 수처리공정 전체에 영향을 주는데 대단한 재주가 있다. 구체적으로 적어보면 다음과 같다.

- (1) 물속에서는 NOM(혹은 용해성 유기물 DOC(dissolved organic carbon))은 금속도 붙들고 농약(pesticides)등과 반응하여 부산물을 형성한다. 이런 부산물은 기존의 처리공정에서는 도저히 잡아낼 수가 없는 것들이다. 그들은 유유히 바리케이트를 제치고 정수장을 빠져나가 관로를 따라 수도꼭지까지 갈 수도 있다.
- (2) NOM이 있게 되면 살균제의 소모량이 증가하게 되고 관로에 적정량의 염소유지를 위해서는 부가적으로 염소투입량이 증가하는 원인이 된다. 특히 NOM은 산화처리후에도 남아있을 수가 있는 데 관로내부에서 미생물이 자라는 데 일조를 할 수 있다.
- (3) 더군다나 NOM은 물속에 존재하게 되면 입자들을 한사코 못 만나게 방해를 놓는데 못된 버릇이 있다. 입자주위를 돌면서 입자들이 모이는 것을 보초라도 서듯이 주위를 서성거리는데, 달리말하면 입자의 안정성을 증가시키는 꼴이 되며 입자들이 서로 뭉쳐 침전하는 것까지 간섭하는 못된 습성이 있다. 이처럼 NOM 물속에서 상당히 바쁘게 지낸다. 입자주위에 NOM이 할 일 없이 서성거리면 결국 투입해야 하는 응집제의 양도 늘어날 수 밖에 없다. NOM을 물리치고 입자들과 응집제가 상봉하려면 아무리 힘센 응집제이지만 아군의 손실도 뒤따르는 것이다(NOM이 -전하를 띄는 경우가 대부분인데 응집제의 Al일부가 그들과 착화합물을 형성한다).

요약하면, NOM을 줄이면 THMs와 DBPs를 감소시키는 결과가 되며, 관로내부에서 발생할 수 있는 미생물의 성장을 억제할 수도 있다. 또한 관로내부에 유지하

는 염소요구량이 감소하게 될 것이다.

9.5.4 NOM의 제거

자 그러면 이 채주많은 NOM을 어떻게 잡을 것인가? 용해성 NOM(혹은 DOC)은 물속에서 워낙 동작이 빠르기 때문에 여차하면 놓치기 쉽상이다.

몇 가지 방법을 적어보면 다음과 같다.

(1) 적절한 화학약품을 잘 선택한다.

-응집제의 종류와 적정투입량

NOM이 응집제를 만나면 대부분 착화합물을 형성하여 그냥 용해상태로 계속 머물수도 있고, $Al(OH)_3(s)$ 에 흡착되어 침전할 수도 있다.

-유기응집제의 사용여부와 투입량

-산화제의 종류와 적정투입량

(2) 여과지의 능력을 향상시킨다

아무리 응집/침전공정에서 잘해도 여과지가 게으름피우면 소용없다. 수차 이야기 한 적이 있지만 수처리공장은 하나지만 간 공정은 서로 연결되어 있기 때문에 앞에서 잘못해도 뒤에서 잘해주면 관계없지만, 앞공정에서 잘해 놓고 뒷공정이 잘못하면 엉망이 되고 마는 것이다. 여과지의 역할은 참으로 크다.

(3) 살균제의 종류와 투입량

대개 투입량이 증가하면 NOM은 대부분 제거되지만 pH저하, 처리비용의 증가, 부산물생성의 증가등의 요인이 있기 때문에 투입량을 높힌다고 반드시 좋은 것은 아니다.

(4) 관로내부의 수질상태

9.5.5 NOM이 응집에 미치는 영향

자연상태에서 입자들은 전하들을 띤다는 것을 이미 설명한 바 있다. 그런데 NOM들도 물속에서 이온 형태로 존재한다는 것이다. 우리가 응집제로 넣어주는 Al 혹은 Fe 염은 +전하를 띄고 있으므로 이들이 서로 만나면 일종의 중화반응이 일어나는 것이다. 즉 물속에 들어있는 총 전하의 농도를 응집제로 넣어준 +금속이 상대하는 것이다. 한편 씨름이 벌어지는 것이다. +전하는 부지런히 -전하를 찾아가는 것이다. 연구에 의하면 자연상태에서 유기물에 존재하는 전하가 훨씬 높다는 것이다. 결국 +금속이 중화해야 할 전하량은 입자보다 유기물이 더 크다는 것이다. 달리말하면 응집제의 투입량은 탁도보다 유기물의 영향이 더 크다는 것을 의미한다.

일반적으로 녹아있는 유기물을 입자성유기물(혹은 침전성유기물)로 전화시켜 침전시키는데 요구되는 응집제의 양은 대개 DOC 1 mg당 황산알루미늄 5-10mg이 소비된다.

예를들면, 물속에 DOC가 3mg/l 들어 있을 때 최적투입량은 약 15-39mg(alum기준)이 될 것이다.

9.5.6 여과지에서의 NOM의 제거

응집제가 할 일은 NOM을 침전시키는 것이라면 필터가 할 일은 못다 잡은 미세 플럭과 NOM들이다. 입자도 NOM도 여과지를 통과하면 모두가 자유의 몸이 된다. 최종적으로 NOM은 여과지만 통과하면 마침내 더 이상 도망 다니지 않아도 된다. 여과지의 능력은 상한 약품에도 민감하다. 여과지에 대하여 한번 구체적으로 알아보기로 한다.

여과는 여과층에 있는 매개체가 하는 것이 아니고 여과층을 통과하는 입자들이 하는 것이다. 보통 여과하면 여과층의 매개체(모래, 벤토나이트 등)가 있어 이들이 입자를 거른다고 생각하기 쉬운데 사실 주체는 입자다. 물론 큰 플럭들은 이모양 저모양 여과층에 걸리겠지만 미세한 입자들이 여과층에 붙느냐 안붙느냐는 전적으로 그들의 마음이다. 여기서 우리는 입자의 성질을 알아야 한다는 결론이 나온다.

여과는 물리화학적인 공정이다. 입자들이 여과층에 의하여 제거되는 것도 최적조건이 있다는 것이다.

- i) 물의 화학적 성질
- ii) 입자들의 화학적 표면성질
- iii) 여과재질의 표면특성

여과가 제대로 이루어지지 않을 때에는 물의 성질 또는 입자들의 표면 성질 혹은 여과매질(media)의 표면특성을 검토하여야 한다.

물의 화학적 성질이나 입자들의 화학적 표면성질에 영향을 줄 수 있는 변수는 다음과 같다.

- 응집제의 종류와 투입량
- 응집 pH
- 폴리머의 종류와 투입량
- 산화제종류와 투입량
- 매질(media)의 화학적 표면특성

이것들은 앞서 NOM을 제거하는데 미치는 변수들과 같다.

9.5.7 산화제/살균제를 이용한 NOM의 제거

어떠한 유기물이라도 산화제를 만나면 분해하는 성질을 가지고 있다. 물을 산화 처리하는 요인은 다음과 같다.

- 맛과 냄새
- 금속제거(산화시키므로 무해 또는 침전)
- 색 유발물질

투입량은 DOC의 양에 의존하며, 대개 오존을 사용할 경우 DOC 1mg 산화시키는데 0.3-0.8 mg의 오존(O₃)이 필요하다.

살균제의 첫째 목적은 미생물의 억제나 관로내에서 수질을 보호하자는데 있다. 투입량은 DOC의 온도에 따라 다르게 되며,

- 대개 1단계에서 DOC 1mg 제거하는데 1-2mg의 오존이 소요된다.
- 2 단계에서의 잔류살균제(염소)의 농도는 잔존유기물의 산화할 수 있는 농도에 다 관로내부에서 필요한 만큼의 농도를 더 계산하여 투입하여야 한다. 관로내부에 염소량을 잘 유지 못하면 미생물이 재성장을 피할 수 없게 된다.

9.5.8 D/DBP 법을 이용한 NOM의 제거

이제까지 우리의 관심을 끌어왔던 THMs는 서서히 인기를 잃어가고 있다. 이제는 THMs이 아니라 살균과정(전처리포함)에서 부생하는 모든 부산물(DBPs)를 최소화하자는데 있다. 우리 인간이 더 오래 살려는데 대한 강렬한 욕망이랄까? 아마도 과학의 문명이 발전할수록(분석기기가 개발될수록) 수질에 대한 규제는 더욱더 강화될 것이다.

지구촌의 물처리도사들은 이 NOM을 어떻게 하면 효율적으로 그리고 경제적으로 잡을 것이냐에 초점을 맞추고 NOM을 잡는 “D/DBP법”까지 제정하여 NOM을 위협하고 있다.

이제까지 THMs를 잡는 데 혈안이 되었는데 이제 범위를 넓혀 NOM자체를 모조리 몰살시키겠다는 강력한 의지가 담겨져 있는 법이 곧 D/DBP 법이다. THMs만 잡는다는 사실 그렇게 돈이 많이 안드는 데 이제 NOM을 다 잡으려면 물의 처리비용은 점점 올라갈 수 밖에 없다.

이러한 배경에서 EPA와 몇 개 환경단체기관에서도 NOM을 잡는 “D/DBP 법”을 쌍손을 들고 환영하고 있다. DBPs가 우리인체에 미치는 영향에 대하여는 거의 알려진 바가 없기 때문에 더욱 이들은 환영하는 일색이다.

일단 이들 관계자들은 “TOC 행동강령”을 확립하였는데 다음과 같은 세 가지 사항에 합의한 바 있는데, 그 당시에 “enhanced” 응집에 대한 정의는 내리지 않았다.

i) 살균제(염소)를 1차 투입하기 전 TOC농도가 2mg/l를 넘지 말아야 한다. 만약 넘으면 “enhanced” 응집을 할 수 있는 방법을 찾아야 한다(시설의 개선, 응집제의 전환 등)

ii) 만약 염소를 투입하기전 원수의 TOC 농도가 4mg/l를 넘어서면 파일롯 연구를 수행, GAC(granular activated carbon)에 의한 TOC 제거효과를 분석하여야 한다 (혹은 멤브레인을 사용하여).

9.5.9 NOM 제거의 실제

앞서 언급한 바 있지만 대부분의 정수장들은 응집-교반-침전-여과과정을 통하여 탁도를 제거하는데 초점이 맞추어져 있다. 그러나 우리가 enhanced 응집을 할려면 탁도 뿐만 아니라 TOC제거에도 탁도 못지 않게 조리개가 맞추어져야 한다.

응집/여과에 의한 NOM제거는 두 단계로 볼 수 있다.

- 1단계: 응집공정에서 용해성 NOM을 입자성 NOM으로 전환
- 2단계: 침전/여과과정에서 잔류하는 입자와 입자성 NOM을 제거

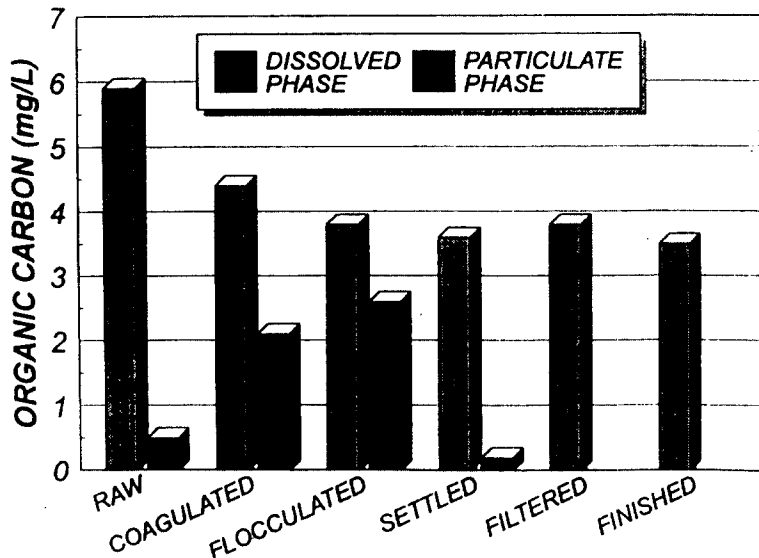


그림 9.19 응집에 의한 TOC의 감소

그림 9.19는 Southeastern 버지니아에 있는 정수처리장에서 수행한 결과인데, 이

그림으로부터 알 수 있는 것은 다음과 같다.

i) 용해성 TOC의 25%가 입자성(침전성) TOC 로 초기응집단계에서 전환 된 것을 알 수가 있다.

ii) 완속교반지에서 입자성 TOC의 생성량은 더 증가한다.

iii) 입자성(침전성) TOC의 생성은 플럭의 성장단계(완속교반지)에서 마무리 된다.

iv) 침전지와 여과지에서 입자성 TOC는 제거가 이루어지지만 용해성 TOC 는 유유히 그냥 통과한다는 사실을 알 수가 있다.

응집에 의한 TOC 제거는 응집제의 투입량과 응집 pH의 함수로 볼 수 있다. 이 제까지 알려진 결과에 의하면 TOC제거에 적절한 pH 범위는 5.5-6.0 사이에 있다. Alum 의 경우 대개 1 mg 의 TOC를 제거하는데 필요한 양은 약 5-10 mg 정도다. 경험적으로 보면 DOC농도가 높을 때 투입량을 증가시키면 DOC 농도는 한계농도 까지는 쉽게 감소한다. 그런데 아무리 투입량을 증가시켜도 제거되지 않는 DOC가 있는데, 대부분은 분자량이 $0.1\mu\text{m}$ 이하의 것들이다. 유기물도 입자크기 개념에서 보는 것이다.

특히 DOC의 제거는 응집 pH 범위가 중요한데 pH가 증가할수록 응집에 의한 제거는 점점 더 어려워 지게 된다. 일반적으로 응집에 의한 DOC 제거는 50-60%다. 이 정도 수치가지고는 앞서 제정한 “D/DBP법”을 만족시킬 수가 없다. 4mg/l이하로 떨어뜨려야 하는데, 그렇지 못할 경우 달리 생각해야 한다.

이 경우 아래 방법을 생각해 볼 수 있다.

i)GAC를 일차적으로 사용하면 DOC를 60-80% 제거가 가능하고, 응집/여과공정을 조합시키면 TOC의 75-90%는 제거가 가능하다.

ii)역삼투압 혹은 nanofilter를 사용하면 대개 80-99% TOC의 제거가 가능하다. Ultrafilter와 microfilter 멤브란은 각각 50%, 10% 수준으로 TOC를 제거한다.

9.5.10 기존의 정수장에서 TOC의 제거

기존의 정수처리장은 대개가 탁도제거에 최대의 초점을 두고 지었다. 이세와 “D/DBP 법”을 만들어 NOM을 잡으라고 하니 사실 무리가 뒤따른다. 나뭇가지로 만든 새송가지고 날아가는 참새를 잡으려면 여간 재주가 아니고는 어렵다. 나름대로 NOM의 최적제거조건을 알아보면 다음과 같다.

i) 기존의 공정에서 어떻게 하면 NOM을 입자성(침전성)형태로 최적전환을 할 것인가에 초점을 맞추어야 한다. 몇 가지 최적화 방법을 제안해 보면 다음과 같다.

a) 탁도보다 유기물제거에 관심을 두고 최적 응집제를 선택한다.

b) 응집 pH를 낮춘다. 이것은 현실적으로 상당히 어렵다. 원수의 pH가 우리나라의 경우 8-10범위에 있는데, 5-6범위로 낮춘다는 것은 사실상 실현 불가능하다. 산을 사용할 수도 없는 상황에서 더욱 그렇다.

c) 혼화공정을 개선한다. 초기급속교반을 강하게 해준다. 이것이 현실적으로 가장 쉬운 방법이다. 기존의 장치를 조금만 개선하면 가능한 것들이다.

d) 미세응집(microflocculation)을 촉진하기 위하여 오존등을 사용한다. 대개 오존을 사용하면 입자도 활성화되어 응집이 잘되어 플럭의 형성도 잘된다.

e) 가능하면 염기도가 큰 응집제를 사용한다(PAC계통(PAC, PASS, PACS, PACC)의 응집제가 좋다).

ii) DOC를 효율적으로 제거할 수 있는 공정을 사용하는 방법

기존정수처리시설에서 NOM제거의 최적화 수행방법

기존의 시스템운영으로 NOM 제거테스트는 각 공정의 샘플을 분석함으로써 가능하다. 즉 기존의 시설로 NOM을 최대로 제거하는 공정이 무엇인지 평가하는 것이다.

그 단계는 다음과 같다.

단계 1) 정수처리 전과정에서 각 공정별로 샘플을 취수한다. 즉 6지점에서 취수한다.

- 원수
- 급속교반지점(완속교반지로 넘어가기 전)
- 완속교반지점(침전지로 넘어가기 전)
- 침전지점(여과전)
- 여과지를 통과한 지점
- 최종수

단계2) 다음단계는 분석하는 것이다.

- pH
- 알칼리도 측정
- 유리 및 전체잔류 염소농도
- THMs 분석
- 관로에서 생성가능한 THMs 시뮬레이션(SDS-THMFP), 즉 관로내에서 예측 THMs 생성치
- TOC 분석

단계3) 동일 샘플에 대하여 0.45 μ m 필터를 통과시킨 다음 아래 사항에 대하여 분석한다.

- TOC
- UV측정(254 nm에서)
- SDS-THMFP

단계4) 자료의 분석

- DOC 전체제거량(UV흡수물질) 및 각 단위공정 및 전체공종에서 THM제거량
- DOC와 UV흡수의 상관관계 및 UV흡수-SDS-THMFP 상관관계를 정립한다.

이 외에 각 단위공정(급속교반지, 완속교반지, 침전지, 여과지, 최종수, 관로수)에서 DOC가 입자성 유기물로 전환된 양을 분석할 수가 있다. 뿐만아니라 입자성유기물의 제거량 및 각 단위공정에서 수질을 평가할 수 도 있다.

이제까지 NOM의 제거에 관하여 여러 가지 방법론과 대책에 대하여 기술하였다. 문제는 NOM 제거조건과 탁도의 제거조건이 서로 맞지 않다는데 있다. NOM을 최적으로 제거하려면 우선 pH 5-6사이에서 운영하여야 하는데 이 때 탁도제거는 빈약해진다. 이 범위에서는 응집이 제대로 되지 않는다. 포를 살리자니 차가 죽는 것이다. 가장 좋은 방법은 NOM을 제거하는 단계(enhanced coagulation)가 끝나면 탁도를 효율적으로 제거하는데 초점을 맞추는 것이다. 이 단계에서 선택할 수 있는 좋은 방법중에 하나는 유기응집제를 사용하는 것이다.

또한 NOM제거를 위해서 pH를 낮추게되면 시설일부의 부식에 관하여 생각하지 않을 수 없다. 차를 살리자니 아깝지만 쫄병하나 짬은 희생해야 한다는 것이다. 통상적으로 황산알루미늄 1mg이 첨가되면 알칼리도가 약 0.5mg 정도(CaCO_3 로써) 소비되며, FeCl_3 1mg은 약 0.93mg의 알칼리도를 감소시킨다. 응집제 첨가량이 증가하면 더욱더 알칼리도가 감소하는데 물의 완충능력은 점점 더 떨어지게 된다. 어쨌든 원수속에 포함된 NOM을 제거하기 위해서는 고농도의 응집제가 필요하고 상응하게 pH의 저하가 증가한다. 전술한 것처럼 유기응집제의 사용은 그러한 문제점을 어느 정도 해결할 수가 있다.

기존의 공정으로는 강화된 수질규제치를 만족시키기는 사실상 아주 어렵다. NOM을 제거하기 위해서는 기존의 공정을 개선할 필요가 있다. 점차적으로 강화되는 수질을 만족시키기 위해서는 THMs 와 DBPs의 전구물질인 DOC의 제거율을 극대화시켜야 한다. 또한 원수의 성질을 잘 파악해야 하는 것은 물론이고, 각 단위공정은 서로 상관관계가 있으므로 NOM을 효율적으로 제거하려면 공정전체가 최적화가 되도록 운영하여야 한다.

9.6 응집지 개선의 필요성

9.6.1 우리나라 혼화지 기준

우리나라의 혼화지는 다음과 같이 되어 있다(상수도 설계 기준 5장, 4절 4.2.혼화지, 97년 개정판).

응집을 위한 혼화지는 다음 각 항에 적합하여야 한다.

1. 혼화지에는 응집제를 주입한 후 즉시 급속교반을 할 수 있는 혼화장치를 설치하여야 한다.
2. 혼화장치는 혼화효과와 유지관리의 방침 등에 입각하여 적절한 방법으로 작동할 수 있도록 하여야 한다.
3. 응집제의 혼화시간은 신속하고 균일한 혼화가 되면 계획정수량에 대하여 1분 내외가 바람직하나 수질 및 현장조건에 따라 pH 조절제의 혼화와 관련하여 조정할 수 있다.
4. 혼화지는 수류전체가 동시에 회전하거나 단락류를 발생하는 일이 없도록 구조에 유의하여야 한다.

9.6.2 기존 혼화지의 문제점

여기서 우리가 논의해야 할 부분은 3항이다. 우리나라의 경우 30만톤/~50만톤/일 처리규모의 정수장이 많다. 원수량이 증가할수록 혼화시간은 주어진 공간에서 점점 길어질 수밖에 없다. 혼화시간은 짧으면 짧을수록 좋다. 가능하면 수십초 이내가 좋다. 문제는 기존의 시설로는 1분 이내에 응집제와 원수를 완전히 혼화할 수 없다는 것이다. 기존의 혼화시스템이 back mixing 형이므로 혼화시간이 부분적으로 상당히 길 수가 있다. 알루미늄은 완전혼화가 일어날 동안 수화반응 때문에 유효알루미늄이 상당히 감소하게 된다.

그래서 이미 앞서서 소개한 바 있지만 최근에는 유입수유입관에다 10초 이내로 혼화할 수 있는 터보혼합장치와 같은 고속혼화방법이 개발되고 있다. 그렇게 할 경

우 급속교반지에서 교반모터가 필요 없어 전력비를 상대적으로 절약할 수 있다. 특히 입자성콜로이드, 미세한 입자가 증가할수록 초기에 알루미늄이온과 접촉시켜주는 것이 유리하다. 그렇다고 초기 급속교반이 빠를수록 다 좋은 것은 아니며, 원수에 고전하를 띄는 유기물함량이 높을 경우에는 초기교반시간이 긴 경우가 유리할 수가 있다.

9.6.3 혼화지 개선의 필요성

국내 기존의 시설로는 짧은 시간안에 양호한 혼화상태를 기대하기 어렵다. 대부분의 경우 혼화지에서의 체류시간이 3-5분이므로 알루미늄이 입자의 표면에 도달하기 전에 수산화알루미늄으로 전화될 확률이 높다. 특히 여름철의 경우 수온이 상승하므로 알루미늄의 수화반응이 증가하게 되어 유효알루미늄이온이 더 감소하게 된다.

가. 혼화가 제대로 안되면 잔류탁도가 증가한다

혼화가 제대로 안된다는 것은 응집체가 국부적으로 분산되는 것이므로 부유입자들이 제대로 제거되지 못한다. 즉 local dispersion이 일어나게 되면 플럭의 성장이 빈약하게 될 뿐만 아니라 플럭이 뚝뚝하지 못하여 침전도 느리게 된다.

나. 초기혼화가 잘 안되면 잔류알루미늄도 증가한다

아무리 처리를 잘하여도 최종처리수에는 어쩔 수 없이 미세한 탁질이 있을 수밖에 없다. 탁질에는 응당 알루미늄이 흡착되어 있기 마련인데 탁질의 농도에 따라 대개의 경우 잔류알루미늄의 농도가 증가한다.

다. 여과지의 역세척주기가 짧아진다

초기상태에서 응집체가 제대로 분산이 되지 않으면 침전도 불량해지고 나아가서

여과효율도 저하하게 된다. 정수처리는 하나하나가 UNIT OPERATION이기 때문에 한 공정마다 최적조건이 존재하게 되며 한공정에서 아무리 처리가 잘되어도 그 다음단계에서 적절한 조건에서 이루어지지 않으면 전체적으로 효율이 떨어지는 결과를 가져올 수 밖에 없다. 역세척의 주기가 길어지면 결국 수처리비용이 상승하게 되므로 혼화공정은 반드시 개선할 필요가 있다.

9.6.4 혼화지 개선의 방향

개선의 방법은 여러 가지로 고려할 수 있으나 현실적으로 하루아침에 혼화방법을 전부 개선해 나갈 수는 없다. 대부분의 경우 원수의 유입수위가 강으로부터 취수하여 착수지로 오는 관로는 지하로 묻혀오기 때문에 터보혼합기를 관내부에 설치하기란 용이하지 않다. 그러나 장기적으로 에너지를 절약하고 수질을 향상시키는 관점에서 보면 반드시 개선해야 할 분야이다. 혼화방법을 개선하면 약품양도 줄일 수 뿐만 아니라 슬러지양까지도 파생적으로 감소시킬 수 있으므로 여러 가지 잇점이 있다. 캐나다지역의 한 정수장에서는 유입관에 터보혼합기를 설치하여 급속교반조를 찾아볼 수가 없다. 최근 신설 정수장의 경우 혼화지를 별도로 만들지 않고 원수유입관에 바로 약품을 투입하여 원수와 응집제를 혼화하고 있는 추세다. 전세계적으로 보면 물처리는 토목공학과를 졸업한 공학도들이 다루어 왔다. 그러다 보니 당연히 화학적 지식이 빈약할 수 밖에 없다. 우리나라에도 대부분 정수장의 책임자들이 토목을 배경으로 공부한 전문가들이다. 그들이 수처리공정에서 일어나는 화학적 반응을 제대로 이해하기 어렵다. 필자가 이렇게 말하면 주먹을 불끈지고 항의할지 모르지만, 사실을 사실대로 말할 필요가 있다. 응집제를 희석여 분사하면서 스케일이 낀다고 하는 어느 연구가의 이야기는 많은 것을 생각하게 한다. 정수장의 경우 따지고 보면 모두가 UNIT OPERATION이다. 필자가 지금까지 현장을 돌아 다니면서 얻은 경험으로 보면, 공정전체를 이해하는 데에는 토목을 전공한 공학도가 빠르지만 아래와 같은 화학적 단위공정을 이해하는 데에는 역시 한계가 있다는 것이다.

응집반응(Coagulation)

염소화반응(chlorination)

오존화반응(ozonation)

흡착반응(adsorption)

이 하나 하나는 모두가 최적조건이 있다는 것이고 어느 한공정은 다른 공정에 영향을 미칠 수 있다. 거대한 반응이 하나의 틀판에서 일어나는데 모두가 따지고 보면 화학적 반응이다. 이러한 화학적 반응을 토목을 전공으로 한 공학자가 파악하기란 쉽지 않다. 그런 차원에서 토목과에서는 화학관련 프로그램을 더 개설할 필요가 있다. 물처리효과를 제대로 증가시키기 위하여는 화학적 배경을 가진 수처리전문가들과의 상호도움이 필요하다.

9.7 결 론

이제까지 기술한 사실을 근거로 최적응집을 위한 물리화학적 조건을 요약해 보면 다음과 같다.

(1) 급속교반지 개선의 필요성

우리나라의 경우 거의 대부분이 back mixing에 의하여 응집제를 투입하고 있다. 초기급속교반만 제대로 되면 수분간씩이나 급속교반을 계속할 필요가 전혀 없다. 상당한 전력낭비다. 정수장마다 응집제와 원수의 교반을 위해서 3-5 분 급속교반을 해주는데 전력낭비를 하고 있는 것이다.

(2) 초기교반강도 증가

응집제의 종류와 초기 교반강도는 응집효과에 직접적인 관계가 있다. 원수의 pH가 상승할 경우, 단분자 응집제의 경우는 초기급속교반이 중요하지 않으나 무기고분자(염기도 20% 이상)의 경우에는 선택적으로 sweep floc 메카니즘 경로를 거치기 때문에 응집효과가 저하된다.

(3) 응집제의 국부분산 방지

투입된 알루미늄성분은 응집과정에서 활성화 및 비활성화가 경쟁적으로 일어나기 때문에 초기급속교반이 아주 중요하다. 비활성화속도를 줄이려면 초기에 응집제를 균일하게 분포시켜야 한다.

(4) 유효알루미늄 유실방지

급속혼합기의 경우, pH가 상승할 때 back mixing현상때문에 응집제의 손실이 증가한다. 특히 염기도가 큰 응집제의 경우 backing mixing이 일어나게 되면 침전성 수산화알루미늄 생성속도가 증가하기 때문에 유효알루미늄의 손실이 증가하여, 응집제의 투입량 증가가 요구된다. 또한 백탁현상때문에 잔류알루미늄의 농도도 증가하는 원인이 된다.

(5) 적절한 투입위치

원수 유입관 내부에 응집제를 투입할 경우, back mixing현상이 일어나지 않는 반면 투입위치에 따라 응집효율이 달라진다. 따라서 관내부에 응집제를 투입할 경우에는 균일혼합이 이루어질 수 있는 위치가 적절히 선정되어야 한다. 응집과정에서 단분자알루미늄의 경우, 물리적 인자보다는 화학적 인자에 더 큰 영향을 받는 반면, 무기고분자의 경우 물리적 인자에 더 큰 영향을 받는다.

(6) "Enhanced" 응집

우리나라의 정수처리시설은 최근에 세운 몇몇을 제외하고는 상당히 낡은 것이다. 대부분이 황류식이며 프랑스의 데그라몽사의 기술을 도입해 운영되고 있는 맥동식은 전국적으로 몇 개 되지 않는다. 최근 "enhanced" 응집을 하기 위해서 몇몇 정수장에서 시설의 일부개조를 통하여 추진되고 있다. 크게 보면

- a) 투입방법의 개선
- b) 약품의 변경(예, Al계(Fe계) + 유기응집제제)
- c) 투입위치의 변경
- d) 활성탄의 사용

그러나 국내여건으로 볼 때 각 정수장에서 가장 수행하기 어려운 점은 원수의 pH 조절이다. 거대한 정수장에서 원수의 pH를 NOM의 최적 pH인 5.5로 조절한다는 것은 사실상 불가능이다. 낙동강의 경우 8~10사이로 아주 높다. 어떻게 그리고 무슨 방법으로 pH를 조절할 것인가? 필자의 상식으로는 pH를 낮추어 NOM을 실제 정수장에서 효율적으로 제거한다는 것은 거대한 장벽이다. 예를 들어 pH가 10인 원수를 염소로 낮춘다고 생각해보자? 첫째는 그렇게 많은 양의 염소를 투입할 수 있는 장비도 문제고, 경비도 상승할 것이다. 우리나라의 경우 유기응집제도 사용할 수 없는 입장이고 보면 당분간 pH조절을 통한 NOM 제거율향상은 어려울 전망이다. 상기에서 언급한 항목들을 중심으로 개선하면 NOM제거를 상당히 개선할 수가 있을 것으로 본다.

9.8 향후 연구방향

우리나라에서는 혼화에 관한 연구는 활발하지 못하였으나, 최근 여러기관에서 연구를 하고 있고 정수장 자체에서도 투입방법을 개발하여 처리하는 곳도 있다. 혼화의 기본 목적은 적은 응집제로 응집처리를 더 효율적으로 수행하는데 목적이 있다.

혼화는 상당히 복잡한 학문이다. 혼화는 물리적 요소와 화학적 요소가 동시에 복합적으로 일어나는 경우이기 때문에 dynamic data를 얻는데 상당한 노력을 요한다.

9.8.1 이제까지의 연구

혼화는 여러 가지 변수에 의해 이루어지므로 대부분의 변수는 고정시키고 연구해야 하는 제한적인 요소다. 대부분의 연구내용을 보면 크게 두 가지로 나눌 수가 있다.

가. 물리적 변수

- 혼화장치(back mixer, turbi-mixer, line mixer 등)
- G값의 변화(교반날개의 모양, 교반속도 등)

- 체류시간(Micro-/macromixing)
- 모델링
- 투입위치

나. 화학적 변수

- 알칼리도 및 pH 영향
- 응집제

실제 현장에서 혼화는 이 모든 변수가 영향을 준다. 다른 여하를 고정시키지 않으면 사실 어느 하나의 변수가 미치는 영향을 조사하기가 어렵다. 거시적인 차원에서 실험은 사실 기대하기 어렵다. 실험실적(때로는 파일럿 실험도)으로 수행하는 실험은 사실상 현실과 거리가 멀다.

다. 화학적 변수에 대한 연구가 필요

지금까지 대부분의 실험은 화학적 변수를 고정시키고 물리적변수를 중심으로 수행되어 왔으며 향후에는 화학적 변수를 중심으로 수행할 필요가 있다. 혼화나 체류시간은 궁극적으로 응집제성분이 물속에서 불안정하기 때문에 중요한 변수로 부상한 것이므로 화학적 변수를 고정시키고 실험하면 사실상 한쪽으로 치우친 결과밖에 되지 않는다.

Line mixer이나 turbo 혼합기등은 최대한 짧은 시간에 응집성분과 원수를 혼화시키는 것이 목적인데 이미 설명한 것처럼 Al 혹은 Fe 이온들이 수초내에 수산화물로 변화되어 버리기 때문이다. 만약 물속에서 상대적으로 수분 동안 안정한 응집성분이 포함되어 있는 응집제가 있다고 하면 line 혼합기나 터보혼합기는 사실상 별 의미가 없는 것이다. Al₁₃ 중간종들은 pH가 10이 되어도 수 십분간 안정하다는 결과가 나와 있다. 그런 Al 화학종들이 많은 응집제는 물리적 변수가 중요하지 않게 작용하는 것이다. 필자는 반드시 그러한 응집제가 상용화되어 나올 것이라고 믿고 있다.

라. 투입위치와 방법을 바꾸는 대형 프로젝트

국내 정수장은 주로 flash 혼합장치이므로 향후 line mixer 또는 유입관 내부에 터보혼합기를 설치하는 것도 좋은 대안이다. 원수유입관만 적절히 변화시켜 교반없이 응집제를 투입한 후 바로 완속교반지로 보내어도 충분하다.

급속교반지에서 24 시간 안 쉬고 열심히 돌아가는 교반기의 아픔을 이제 치료할 때가 왔다. 급속교반지의 교반기는 정수장이 생긴 이래로 부지런히 돌려왔기 때문에 하루 아침에 안 돌리면 웬지 물이 안 잡힐 것 같고 물이 엉명이 될 것 같은 느낌을 저버리지 못하는 것이다. 필자는 이에 대한 제안서를 준비하고 있다.

우리나라의 급속교반지의 교반기 전력비만 아껴도 엄청난 자원을 절약할 수 있을 것이다. 물론 초기시설투자는 조금 해야 할 것이다. 오늘도 618개의 정수장에서 급속교반기는 힘겹게 돌아가고 있다. 이것을 멈출 거대한 프로젝트가 필요하다는 것이다.

참 고 문 헌

1. Amirtharajah, A. and Mills, K. J., (1982), "Rapid Mix Design for Mechanisms of Alum Coagulations", J. AWWA, Vol. 74, No 4, 210.
2. Hem, J. D. and Roberson, C. E., (1967), "Form and Stability of Aluminium Hydroxide Complexes in Dilute Solution", Geological Survey Water-Supply Paper, 1827-A.
3. Hetct, P. M. and Hillebrand, D. J., (1994), "Proc. of Flocculants, Coagulants and Precipitants in Water treatment", Atlanta, October 3-5, USA.
4. Jekel, M., (1986), "Interactions of Humic Acids and Aluminium Salts in the Flocculation Process", Water Research, Vol. 20, 1535.
5. Jong W. Kwak, (1997), "Influences of OH/Al Ratios of Al-based Coagulants in Drinking Water Treatability", Environmental Technology, Vol 18, 293-300.
6. Kemira Kemi, (1993), "Handbook on Water Treatment", Helsinborg, Sweden.
7. Klute, R., (1985), "Rapid Mixing in Coagulation. In : Chemical Water and Wastewater Treatment", Fischer, Stuttgart.