배급수 저장시설에서의 물의 혼합 및 체류

✣ 본 논문은 미국수도협회(AWWA)의 협회지 2004년 9월에 게재된 논문(Mixing and aging of water in distribution system storage facilities)을 발췌, 번역한 것입니다.

1. 서론

물의 혼합과 체류는 두 개의 연관된 현상으로서 배급수 저장 탱크 및 저장소에서 일어나는 수질변화에 영향을 미친다. 체류시간이 길어지면 소독제 잔량이 줄어들어 박테리아의 재번식을 촉진할 수 있고, 혼합이 균일하지 못하면 물이 오래도록 체류하는 구간이 생길 수 있다. 따라서 체류시간을 최소화 시키고 저장 시설에 장기 체류 영역이 없도록 하는 것이 배급수 저장시설의 설계와 운영에 있어서 궁극적인 목표가 되어야 한다. 이 논문은 불충분한 혼합과 과도한 체류로 인해서 발생할 수 있는 심각한 수질저하를 최소화 시키는데 사용할 수 있는 배급수 저장시설의 설계, 개선, 운영에 관한 여러 가지 정보와 방법들을 소개하고 있다.

2. 본론

저장시설은 배수 시스템에 있어서 빼놓을 수 없는 시설로서 전통적으로 비상 저장 능력 보유, 균등한 수압 보증, 각 시간대의 안정된 물 사용 등, 배수 시스템의 수리학적 요구조건을 충족시키는 데 목적을 두고 설계 운영되었다. 하지만 이들 시설이나, 탱크 또는 저장소 ("탱크"와 "저장소"의 차이에 대한 통일된 정의가 없기 때문에 본고에서는 두 용어를 저장시설을 지칭하는 상호 호환적 용어로 사용한다.)로 이루어진 배수 시스템에서 수질이 저하되는 것을 막으려면, 이 시설들의 설계와 운영이 수질에 미치는 영향을 고려하여야 한다.

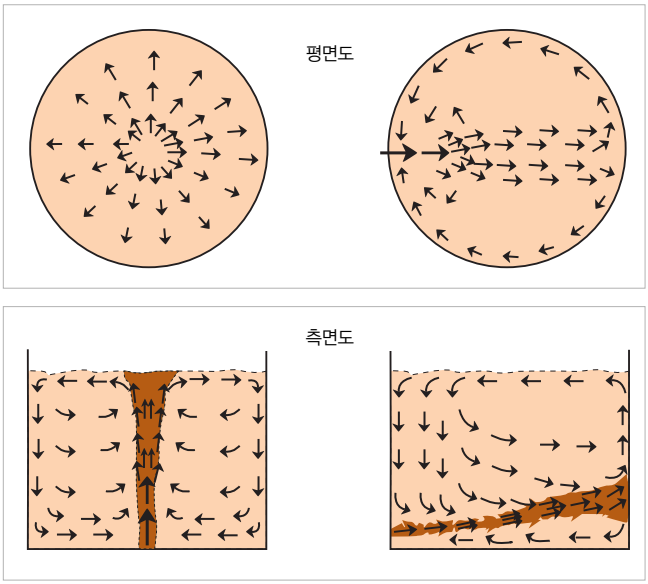
물의 혼합과 체류는 두 개의 연관된 현상으로서 처리수의 배수 저장 탱크 및 저장소에서 일어나는 수질변화에 영향을 미친다. 이들 설비에서의 수질 저하는 물의 체류시간과 자주 관련이 있다. 체류시간이 길어지면 잔류 소독제가 저하되어 박테리아의 재번식을 촉진할 수 있고, 혼합이 균일하지 못하면 물이 오래 체류하는 구간이 생길 수 있다. 따라서 체류시간을 최소화 시키고 저장 시설에 장기간 남아있는 물의 영역이 없도록 하는 것이 배급수 저장시설의 설계와 운영에 있어서 궁극적인 목표가 되어야 한다. 최대허용 체류시간은 수질 및 그 반응성, 사용된 소독약의 종류, 물이 저장시설에 들어오기 전후의 이동시간 등에 따라 달라져야 한다.

용기 내에서의 혼합과정에 대한 화공학적 및 관련 분야에서의 연구는 반세기가 넘게 진행되었지만(Levenspiel, 1972; Fossett & Prosser, 1949), 음용수 저장시설에서의 수질문제 및 혼합 공정에 대한 연구는 비교적 최근의 일이다. Burlingame 및 Brock(1985)은 필라델피아의 지상 저장 탱크에서의 수질저하를 조사하였고, Grayman과 Clark(1993)은 컴퓨터 모델을 이용하여 배수 저장시설이 수질에 미치는 영향을 연구하였으며, Kennedy(1993) 등은 저장 탱크 설계가 수질에 미치는 영향을 평가했다. Boulos 등(1996)과 Grayman(1996) 등은 추적자 연구를 수행하고, 여러 가지 모델을 응용하여 캘리포니아에 있는 한 저장소의 혼합공정을 평가했다. AWWA 연구재단(AWWARF)이 후원한 한 프로젝트에서는 광범위한 모니터링 및 모델링 기법이 탱크 및 저장소에서의 혼합 및 수질을 연구하는데 적용되었다(Grayman et al, 2000). Kirmeyer 등(1999)은 수질문제를 예방하거나 바로 잡을 수 있는 저장 탱크 또는 저장소의 모니터링, 운영, 유지관리에 관한 지침서를 작성하였다.

(1) 혼합공정

유체를 혼합하려면 에너지 공급원이 있어야 한다. 처리된 물의 저장 탱크나 저장소들은 대체로 터빈이나 임펠러 등과 같은 능동적 혼합장치 없이 운영되는 대신에 유입되는 물의 동력학적 에너지에 의존하고 있다. 유체가 오리피스(즉, 파이프)를 통해서 보다 큰 체적의 물(즉, 저장탱크)로 유입될 때에는 제트 흐름이 생기게 되는데, 그 제트 흐름의 직경은 오리피스에서 멀어질수록 커져서 그 퍼지는 각도는 대체로 14°가 된다. 이렇게 퍼지는 경향이 있는 데다 제트흐름의 경계를 따라 격렬한 역류가 발생하기 때문에 상당한 량의 주위 유체가 제트 흐름에 휩쓸리면서 운동량이 보존된다. 수직 제트 흐름이 탱크 내 비어있는 표면에 부딪치거나, 수평 제트

흐름이 반대편 벽에 부딪치면, 제트흐름에서 나온 희석된 유입수는 주위 유체로 방향을 바꾸어 유출된다. 시간이 지나면서, 이 물의 상당 부분은 제트흐름으로 재순환되어 주입구를 통해서 들어오는 새로운 물과 혼합된다. Okita와 Oyama(1963)에게서 차용한 일련의 다이어그램 중 아래의 그림 1〉에 도시한 바와 같이 제트흐름을 저장탱크의 제한된 공간 내에서 물을 혼합하는데 이용할 수 있는 것은 제트흐름의 바로 이런 행동 때문이다.



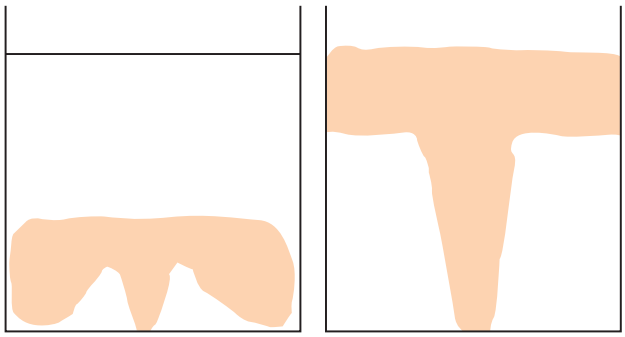
* Okita & Oyama 1963을 개작한 것이다.

그림 1〉 탱크내에서의 제트 배합 투영도

제트흐름은 난류와 층류로 분류될 수 있는데, 완전 난류는 약 3,000 이상의 레이놀즈수를 지닌 것을 말하고 완전 층류는 약 1,000 이하의 레이놀즈수를 지닌 것을 지칭한다(McNaughton& Sinclair 1966). 이 두 개의 값 사이에 수많은 중간 값들이 존재한다.

층류는 난류처럼 주위의 물을 끌어들여 제트흐름 내부의 물과 재순환 시키지 않기 때문에 물의 혼합에 별로 효과가 없다. 층류에서는 두 액체가 각각 별개의 실체로 분리되어 있고, 혼합은 매우 느린 분자확산의 메커니즘을 통해서만 일어나게 된다. 제트흐름의 흐름 에너지는 유입수의 운동량에서 나오는 것이다. 유입되는 물의 온도가 탱크 내의 물보다 더 높거나 낮으면, 그로 인한 밀도차이가 또 다른 운동의 원천이 된다.

이런 조건에서의 제트흐름을 부양성 제트흐름이라고 부른다. 유입되는 물이 탱크 내 주위 물의 온도보다 낮을 때에는 음성 부양이라고 하는데, 이때 새로운 물은 그림 2〉의 A처럼 탱크 바닥 가까이에 정착하게 된다. 유입되는 물이 탱크 내의 물보다 온도가 높을 경우, 양성 부양이라고 부르는데, 이 경우 새로운 물은 그림 4〉의 B처럼 이전 물보다 높은 곳에 정착한다.



A-유입수 온도가 주위 물 온도 보다 낮을 때
B-유입수 온도가 주위 물 온도 보다 높을 때

그림 2〉 부양성 제트로 인한 탱크내 층리 형성

이런 조건들로 인해서 탱크 내의 물에 층이 생길 경우, 저장시설 내에 물이 오래 체류하는 구간이 생길 수 있다. 부양성 제트흐름의 행동과 그것이 혼합도구로 기능할 수 있는 가능성(즉, 층리현상 조성 예방)은 운동량과 부양성 두 추진력의 상호작용에 따라 달라진다.

(2) 이상적 혼합 상황

물이 저장 탱크 또는 저장소를 통해서 흐르는 방식은 이론적으로는 두 가지로 구분해 볼 수 있는데, 하나는 완전 혼합 상태에서의 흐름이고, 다른 하나는 불완전혼합 상태에서의 흐름이다. 각각 혼합흐름과 플러그흐름으로 불리는 이러한 이상적 흐름상태를 도식화시키면 다음 페이지의 그림 3〉과 같이 된다.

혼합흐름에서는 탱크로 유입되는 모든 물은 즉시 탱크 내에 이미 있던 물과 혼합되어 전체적으로 균일한 혼합물을 이룬다. 따라서 탱크에서 나가는 물은 탱크 내에 있는 물과 동일한 배합체이다. 플러그 흐름에서는 탱크로 유입되는 각 단위 물은 다른 단위와 섞이지 않고 있다가 탱크에 유입된 순서대로 탱크에서 나가게 된다.

실제 상황에서는 완전 혼합흐름과 완전 플러그흐름 중 어떤 것도 일어나지 않는다. 탱크 유입구와 유출구 간의 단락현상, 온도차이로 인한 층리현상, 재순환 역류, 무흐름 지대 등으로 인해 비이상적 흐름 현상이 생기기 때문이다.

이런 현상들로 인해 저장된 물 일부의 체류 시간이 이상적 조건에서 보다 더욱 길어짐으로써 수질이 저하될 수 있다. 정수장에서의 많은 단위 공정들은 플러그 흐름이 되도록 설계된다. 침전 수조, 여과지, 염소 접촉실 또는 정수지 등이 이에 해당된다. 이런 공정들에 있어서는 혼합 흐름 대신 플러그 흐름을 채택해야할 만한 물리적인 이유와 공정과 관련된 이유들이 있다. 예를 들어 염소 접촉실에서의 플러그흐름은 혼합 흐름 방식보다 동일한 체류 시간에

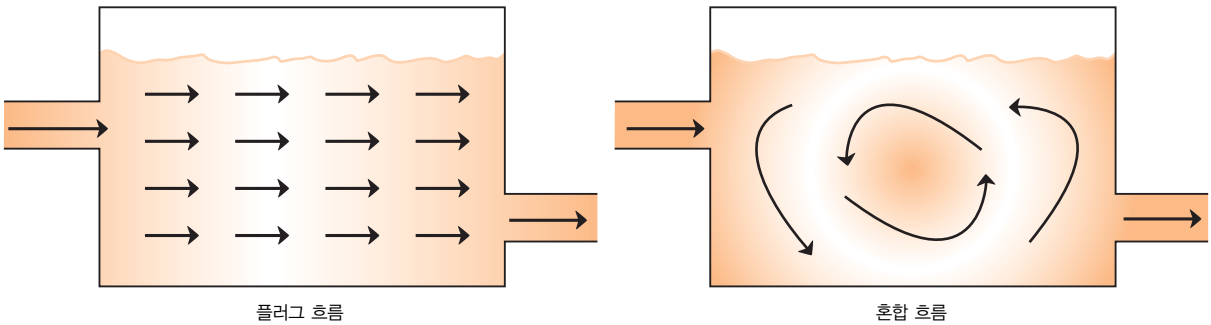


그림 3〉 이상적 흐름 체제

보다 높은 소독효과를 얻을 수 있다. 염소 접촉실에서는 도류벽을 자주 사용해서 필요한 염소 접촉시간을 충족시킨다. 이런 경험에 근거해서 배수 저장시설은 플러그흐름으로 설계되어야 한다고 결론을 짓기가 십상이다. 하지만 이들 시설에서의 일차적 수질 관심사는 저장 중 발생하는 소독제 잔량의 손실이다. 따라서 일차적으로 혼합 흐름과 플러그 흐름 중 어떤 것이 소독제 손실을 적게 할 것인가를 고려하여야 한다.

그 다음 고려사항은 이 흐름 상태 중 어떤 것이 현실적으로 보다 쉽게 달성할 수 있는가이다. 소독제 손실과 관련하여, 시간에 대한 소독제 손실의 비율은 농도에 의존한다는 증거가 수없이 많다(Fair et al, 1948). 염소의 농도가 높으면 높을수록 염소가 빨리 소멸한다. 이것을 반응 역학적으로 표현하면, 플러그 흐름으로 운영하는 탱크는 혼합 흐름으로 운영하는 탱크 보다 빠른 속도로 소독제를 상실한다. 이 결과는 연속 유입-유출 방식의 탱크에서는 항상 일치하고, 주입-배수 방식으로 운영되는 탱크에는 대부분 일치한다.

이런 결과가 나오는데 대한 설명은 혼합흐름 탱크에서 반응률을 결정하는 농도는 항상 그 탱크에서의 최저 농도라는 사실에 근거하고 있다. 플러그 흐름에서는 소독제 농도가 높기 때문에 물이 처음 탱크에 들어올 때에 반응률이 높다. 이 비율은 소독제가 고갈되면서 점점 낮아지게 된다. 그 결과, 플러그흐름으로 운영되는 탱크는 혼합흐름 조건으로 운영되는 탱크보다 소독제를 더 많이 상실하는 경향이 있다.

이러한 두 방식 사이의 소독제 상실 차이는 소독제 반응성이 클수록, 체류시간이 길수록, 주입시간에 대한 배수시간의 비율이 클수록, 최저 물 높이 대 최고 물 높이의 비가 줄어듦에 따라 더욱 커진다. 주입 및 배수 기간 12시간이고, 상이한 유입 및 유출비율로 운전되기 때문에 체류시간이 1일 내지 5일이 되는 1-mil-gal(4-ML) 탱크에서의 혼합흐름 조건에 대한 플러그흐름 조건에서의 염소의 상대적 손실을 그림 4〉에 도시하였다.

체류시간이 짧고 소멸계수치가 낮을 경우, 탱크에서의 염소잔량 손실이 거의 일어나지 않는 사실은 플러그흐름과 혼합흐름 조건 모두에서 경험하는 바이다. 하지만 소멸율 및 체류시간이 늘어남에 따라, 염소 손실은 혼합흐름 조건 보다 플러그흐름 조건에서 더 급속하게 일어난다.

(3) 물의 연령

위스키와는 달리, 수질은 시간이 지난다고 좋아지지 않는다. 물은 시간이 경과함에 따라 박테리아가 재성장하고 소독제 농도는 감소하면서 소독 부산물이 늘어날 가능성이 더욱 커진다. 물이 탱크에 체류하게 되는 평균 시간은 유입 및 유출 형태에 따라 달라진다. 물은 대체로 탱크나 저장소에서 수일 내지 수주일 간 머물기 때문에 이런 저장시설에서 수질이 저하될 가능성은 매우 높다. 따라서 저장설비는 수질과 그 반응성, 사용된 소독제의 종류 등을 고려하여 물의 체류시간이 과도하지 않도록 운영되어야 한다. 저장시설에의 유입을 전후한 물의 이동 시간, 한 저장시설에서 다른 저장시설로 옮겨갈 가능성 또한 한 탱크 내에서의 적정 체류시간을 결정하는데 고려하여야 할 요인이다.

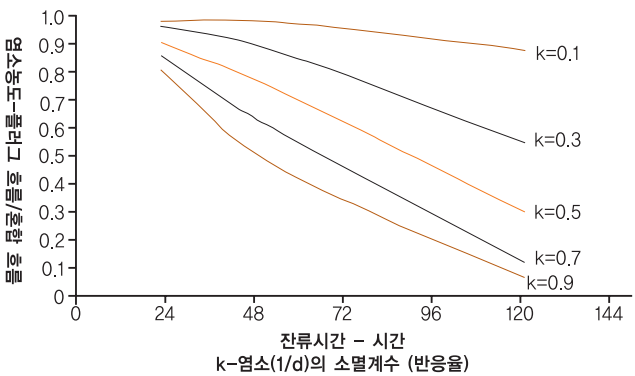


그림 4〉 소멸율과 탱크체류 시간의 함수로서의 플러그 흐름과 혼합 흐름간의 유출수 평균 염소 잔량비

(4) 설계 및 운영기준

이 절에서는 과도한 체류와 혼합 부족으로 인한 수질저하를 방지하기 위한 배급수 저장시설의 설계 및 운영지침을 다룬다. 구체적인 필요성은 시설마다 상이하고, 한 저장시설의 구체적 가동형태는 탱크나 저장소의 상세설계 및 운영 특성과, 현지 사정에 따라 달라지기 때문에 이 지침은 일반지침으로 받아들여져야 할 것이다.

① 배급수 저장소

앞에서 논했던 바와 같이 사이즈와 유입-유출 특성이 동일할 경우, 혼합흐름 조건보다는 플러그흐름 조건으로 운영하는 탱크에서 대체로 보다 많은 소독제가 상실된다. 따라서 저장시설에서의 소독제 상실을 줄이려면, 플러그흐름 가동보다는 혼합이 양호하게 되는 방향으로 설계가 이루어져야 한다.

② 배급수 탱크 및 저장소에서의 도류벽 설치

내부 도류벽은 설비를 통한 흐름의 방향을 정하고 조절하기 위한 목적으로 수조에 설치되고 있다. 하지만 플러그흐름보다는 혼합흐름이 바람직한 배급수 탱크 및 저장소에 도류벽를 설치하면 혼합이 제대로 일어나지 않게 되고, 특히 주입-배수 운영방식에서는 물이 정체되거나 혼합이 잘 되지 않는 지대가 발생할 수 있다. 따라서 대부분의 경우 배급수 저장시설에는 도류벽을 설치하지 않아야 한다.

③ 제트류의 발생을 통한 혼합

유체를 혼합하려면 에너지 공급원이 있어야 하는데, 배급수 저장시설에서는 이 에너지를 유입수로부터 받는다. 물이 설비로 유입되면서 제트흐름이 일어나면 주위의 물이 거기에 휩쓸려 순환이 되면서 혼합이 된다. 혼합이 원활하게 이루지려면, 제트흐름의 경로가 휩쓸림과 혼합과정이 발생할 수 있을 정도로 충분히 길어야 한다. 그러려면, 유입 제트가 벽, 저장고 바닥, 변류장치 등과 같은 방해물 쪽으로 곧바로 향하지 않도록 하여야 한다.

예를 들어, 어떤 탱크에는 유출이 이루어지는 동안 와류를 방지하고 출구에 침전이 생기지 않도록 하기 위해 입, 출구 바로 위에 정류판을 설치했었는데, 이로 인해서 수직 운동량이 감소되었고, 수온 까지 불리해지는 경우, 심각한 층리현상이 자주 발생했다.

④ 저장설비에서의 층리현상

저장탱크로 유입되는 물과 탱크 내 주위 물과의 온도차이는 부유성 제트를 일으킬 수 있다. 양성 부유(유입수 온도가 주위 물보다 높을 경우)는 유입수가 물 표면으로 올라가게 하며, 음성 부유(유입수 온도가 주위 물보다 낮을 경우)는 유입수가 탱크 바닥으로 가라앉게 한다. 유입 제트의 운동량에 비해 유입 제트의 부유성이 과다할 경우(양성, 음성 어느 경우이든), 혼합은 효율이 떨어지고, 탱크 내에 안정적인 층리현상이 생길 수 있다.

여러 실험을 통해서 층리현상을 일으킬 수 있는 임계온도차이(ΔT)는 식 1〉로 추정할 수 있는 것이 확인되었다.

식 1〉 $|\triangle T| = CQ^2/(d^3H^2)$

위의 식 1〉에서 C는 입구 구조, 부유성의 종류, 탱크의 직경 및 단위 등에 따른 계수이고, Q는 유입률(cfs), d는 입구의 직경(ft), H는 물의 깊이(ft), |△T|는 탱크 유입수와 탱크 내 물과의 절대 온도차이다. 온도차이는 모르는 경우가 많고, C의 값은 불확실성이 높기 때문에 식 1〉은 층리현상에 대한 성향을 질적으로 측정하는 방법으로 받아들여야 할 것이다. △T의 값이 크면 클수록, 층리현상이 생길 확률은 떨어진다.

⑤ 탱크 혼합시간

주입-배수 방식으로 운영되는 탱크에 있어서 혼합은 주로 주입주기에 행하여진다. 주입이 끝날 무렵에 혼합이 비교적 잘 되었을 경우, 혼합으로 인한 문제는 거의 없다. 여러 개의 탱크와 저장소를 갖춘 설비의 경우, 혼합시간은 주로 설비의 직경 또는 폭, 물높이, 주입구 운동량에 따라 달라진다는 것이 실험결과 확인되었다. Jayanti(2001)는 수조에서의 수학적 혼합 모델링을 이용하여 수조의 형상 역시 혼합 특성에 영향을 미친다는 것을 밝혔다. 식 2〉는 폭(직경)이 높이보다 크고, 등온 조건, 주입-배수 방식으로 운영되는 원통형 탱크를 위해 개발된 것이다.

식 2〉 $\text{배합시간(초)} = 10.2V^{2/3}/M^{1/2}$

위의 식 2〉에서 V는 주입 착수 시의 물의 체적(cu ft)이고, M은 운동량으로서 유입 속도에 유입율(U x Q)을 곱해서 산출한다. Q는 유입율(cfs)이고, U는 유입 속도(fps)이다.

이 방정식은 단위들이 변수들에 일관되게 사용될 경우 표준(영국) 단위와 미터 단위 모두에 적용된다. 이 방정식은 축척 모델링 연구(Rossman & Grayman, 1999)에 근거해서 개발된 것으로 이전의 제트 혼합에 관한 연구결과들(Fossett & Prosser, 1949)과 일치한다.

주입시간이 혼합시간보다 길어야 한다는 요건과 관련하여 식 2〉를 주입주기 동안에 일어나는 물 체적의 변화를 주입 시작 시의 체적에 대한 분율로 하여 식 3〉과 같이 바꿀 수 있다.

식 3〉 $\Delta V/V > 9.03d/V^{1/3}$

위의 식 3〉에서 ΔV는 주입기간 동안 물 체적의 변화이고, V는 주입 시작시의 물 체적, d는 유입구의 직경이다. 모든 단위는 일관된 길이 단위(ft 또는 m)를 사용하여야 한다.

예를 들어, 주입 개시 시 물 체적 = 267,000 cu ft = 2mil gal(8ML), 유입구 직경 = 2ft (0.61m)인 탱크의 경우, 혼합시간이 주입 시간을 초과하지 않으려면, 물 체적이 주입시간 동안에 약 28%(75,000 cu ft; 0.56 mil gal; 2.11 ML)가 변화되어야 한다. 그림 5〉은 주입기간 동안에 혼합을 완료하는데 필요한 체적 변화를 도시한 것이다.

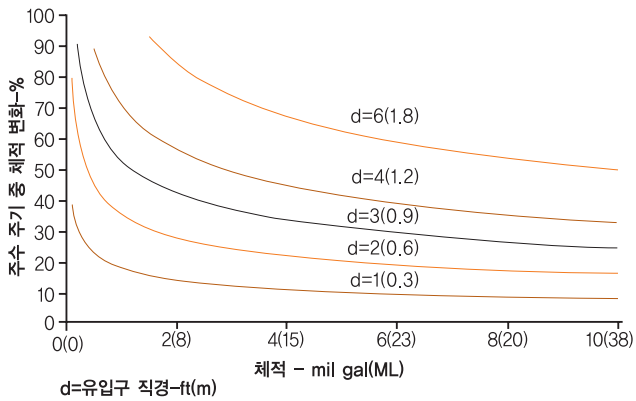


그림 5〉 주수주기 중 배합을 양호하게 하기 위해 필요한 저장소 회전율

유입구 직경과 주입기간 동안 교환되는 물의 양이 혼합시간에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 유입구 직경은 혼합이 적절히 일어날 수 있도록 적절한 크기가 되어야 할 것이다.

⑥ 유입구 구조

앞에 기술한 요인들에 비해 유입구의 위치나 방향은 혼합과 관련하여 2차적인 요인들이다. 하지만 여러 실험결과 그림 6〉에 도시된 구조들은 저장시설에서 과도하거나 불완전한 혼합을 초래할 가능성이 높은 것으로 밝혀졌다.

⑦ 배수탑

저장설비의 배수탑에서는 깊이가 직경보다 더 크다. 배수탑은 탱크 높이에 의존하기 때문에, 층리현상과 불완전 혼합이 일어나기가 더욱 쉽다. 기존의 배수탑들은 잠재적인 문제점들을 점검해 보고, 층리가 발생하지 않는지 더욱 자주 모니터링을 해야 한다. 층리현상은 배수탑의 깊이 마다 소독제 잔량이 차이가 나는 결과를 일으킬 수 있다.

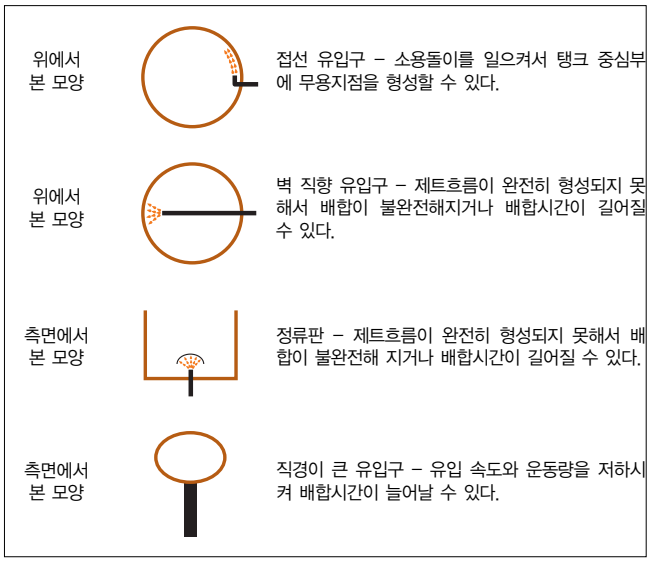


그림 6〉 배합에 문제를 일으킬 수 있는 유입구 구조 예

⑧ 체류시간

체류시간이 길면, 혼합이 잘 이루어진 탱크에서도 소독제 잔량이 줄어들고, 세균이 재번식할 수 있다. 혼합이 잘 이루어지지 않을 경우 물의 장기 체류 구역이 발생하고 소독제 잔량이 감소할 수 있다. 혼합이 잘 된 탱크에서도 체류시간이 과도하면 소독제 잔량이 줄고, 세균이 재성장할 수 있다. 체류시간은 주입-배수 주기 지속시간을 그 주기 동안 교체되는 물의 비율로 나누거나, 식 4〉를 이용하여 보다 정확하게 추정할 수 있다.

식 4〉 $\text{체류시간} = [0.5 + (V/\Delta V)](\tau d + \tau f)$

위의 식 4〉에서 V는 주입 시작 시의 물 체적이고, ΔV는 주입시간 동안의 물 체적의 변화, τd는 배수시간, τf는 주입시간이다.

식 4〉 이외에, 후술되는 시스템 모델을 이용하여 시간경과에 따른 탱크 내에서의 물 연령 변화와 소독 수준을 산출할 수 있다. 그런 다음 체류시간을 소독제 잔량을 추정하는 데에 소독제 소멸율과 함께 사용할 수 있다.

(5) 모니터링과 모델링

저장시설이 배수시스템의 수질에 미치는 영향을 평가하기 위해서 모니터링과 모델링이라는 두 가지 조사방법이 이용될 수 있다. 모니터링은 대체로 탱크나 저장소의 기존 조건을 평가하는데 이용된다. 모델링은 기존 조건의 평가에 있어서 모니터링을 보강하거나, "탱크의 물 수위가 보다 자주 바뀌면 염소 잔량은 어떻게 될까?"라든가, "도류벽의 일부를 제거하면 혼합에 어떤 영향이 미칠까?" 등의 질문에 해답을 얻는데 사용될 수 있다.

① 모니터링

모니터링 연구는 수질 연구, 추적자 연구, 온도 연구 등 세 개의 범주로 나눌 수 있다. 수질 연구에서는 저장시설과 유입구 및 유출구에 있어서의 수질 매개변수들의 시간별, 공간별 데이터가 나온다. 추적자 연구는 시설에서의 혼합 가동에 대한 정보를 제공한다. 온도 연구는 시설의 상이한 장소와 깊이에 있어서 단기 및 장기에 걸친 온도변화에 대한 정보를 수집한다. 이 세 가지 연구 방법은 저장소의 가동을 보다 잘 파악하기 위해서 개별 또는 함께 시행할 수 있다. 샘플링 결과도 저장시설의 수학적 모델 또는 축척 모델을 보정하거나 입증하는 데에 이용될 수 있다.

② 수질 연구

수질은 하나의 저장 탱크 내에서도 위치나 시간에 따라 변하고 유입 라인과 유출 라인 간에도 틀리기 때문에, 수질연구는 그러한 차이를 평가하고 그 원인을 파악하기 위해서 시행한다. 이 연구에서 가장 흔히 측정되는 매개변수는 염소이지만, 그 외에도 유입수에 함유된 비보존성 물질이나 보존성(시간이 지나도 소멸되지 않는) 물질을 연구하기도 한다.

그림 7〉은 한 탱크의 수질 연구에서 수집되는 데이터의 종류를 나타낸 것으로, 이 경우는 유입구와 유출구가 별개인 2-mil-gal(8-ML)의 탱크로부터 42시간에 걸쳐 측정한 것이다.

측정은 유입구와 유출구에서 그림 8〉에 표시된 높이가 각각 틀린 세 개의 샘플링 포트를 통해 이루어졌다. 이 데이터로부터 다음과 같은 몇 가지 추론이 가능하다.

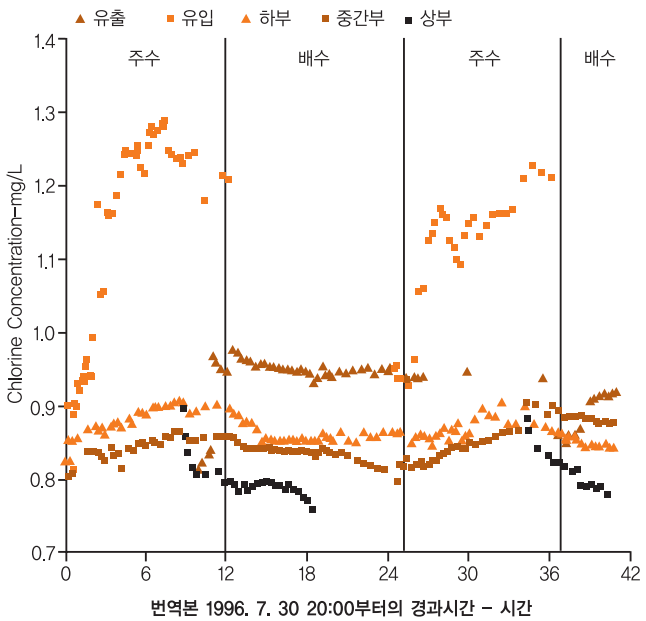


그림 7〉 2-mil-gal(8-ML) 탱크에서의 염소잔량 측정

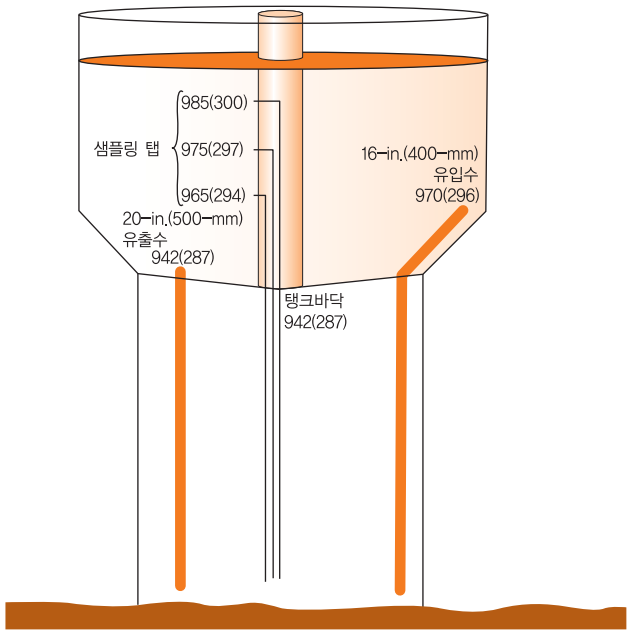


그림 8〉 2-mil-gal(8ML) 탱크 도해

(a) 염소 잔량은 입구와 출구 간에 상당한 차이가 있다.

(b) 탱크 내의 높이에 따라서도 염소에 차이가 있는데, 입구와 출구 부근 낮은 곳에서 더 많은 염소 잔량이 검출된다.

(c) 주입주기 시점의 염소잔량은 배수주기 종점의 잔량과 거의 같은데, 이는 주입주기 초기에 들어왔던 물이 배수주기 끝 무렵에 나간다는 것을 시사한다.

③ 추적자 연구

하나의 탱크 또는 저장소 내에서의 혼합 현상을 파악하기 위하여, 보존성 추적자를 유입구에 첨가해서 시설 내의 각 상이한 위치와 유출구에서 시간 경과에 따른 농도를 측정할 수 있다. 정수지 또는 처리장의 저장시설에서 C×T(염소 농도 곱하기 접촉시간) 값을 측정해서 염소 접촉시간을 파악하기 위한 추적자 연구를 시행할 경우, 측정은 저장소의 유출구에서만 하면 된다. 하지만 배수시스템의 탱크 또는 저장소 내에서의 혼합현상을 알기 위한 연구의 경우는 유출구 외에 가능한 여러 군데에서 추적자를 측정하는 것이 최선이다. 추적자로 사용되는 물질은 보존성이어야 하며, 해당 지역, 주 및 연방의 법규에 따르는 것이어야 한다. 불소, 염화칼슘, 염화나트륨, 염화리튬 등이 연구에 흔히 쓰이는 물질들이다.

④ 온도 연구

한 탱크 또는 저장소 내에서의 온도차이는 한 시설 내의 혼합 특성에 상당한 영향을 미친다. 극단적인 경우, 그러한 온도차이는 층리

현상을 유발하여 혼합을 억제해서 탱크 전체에 걸쳐 물의 연령과 소독제 잔량에 커다란 차이를 초래한다. 현장 연구결과 어떤 경우에는 1℃(2°F) 정도의 작은 온도 차이에서도 층리가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 수온은 샘플링 탭을 이용하여 수동으로 측정할 수도 있고, 펌프나 샘플링 기구를 사용하여 상이한 깊이에서 물을 길어 올릴 수도 있다. 또는 아래의 그림 9〉에서와 같이, 서미스터 여러 개를 데이터 기록장치에 달아 각 상이한 깊이에서의 수온을 측정할 수도 있다.

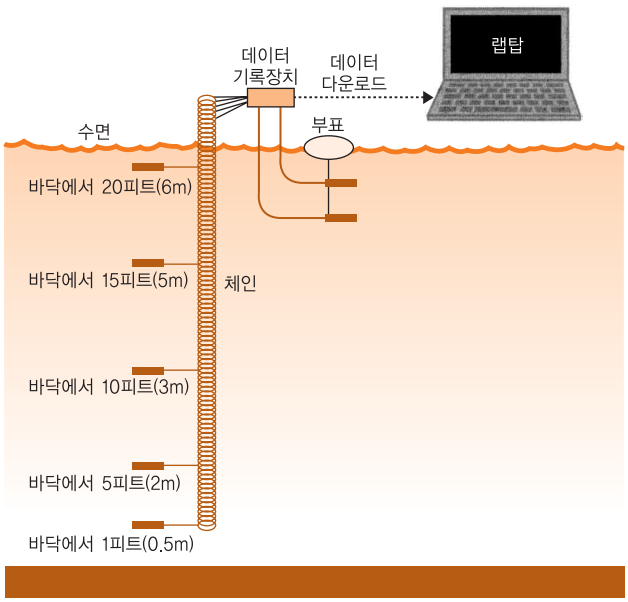


그림 9〉 온도 모니터링 장치 도해

이 경우 서미스터는 줄에 매달아 특정 깊이에 있도록 한다. 그 외의 서미스터를 부표에 매달아서 수위가 변하더라도 수표면으로부터 일정 깊이에서의 온도를 측정하도록 한다. 일정한 간격(수일 또는 수주)을 두고 데이터 기록장치로부터 데이터를 내려 받아 그것을 도식 또는 통계적으로 분석할 수 있다. 상이한 높이에서 상당한 온도차이가 일관되게 나타나면, 그것은 해당 설비에 층리가 생긴다는 증표가 될 것이다.

⑤ 모델링

모니터링은 기존의 탱크 또는 저장소에서 어떤 현상이 나타나고 있는지에 대한 정보를 제공하는데 반해, 모델링은 여러 운영 상황하에서 기존, 개조 또는 계획 중인 설비에 어떤 현상이 나타날 것인지를 추정하는데 이용할 수 있다. 모델링의 주된 종류에는 물리적 축척 모델과 수학적 모델 두 가지가 있다. 두 종류의 모델을 보정 또는 입증하는 데에 기존 설비에서의 추적자 연구를 이용할 수도 있다.

⑥ 물리적 축척 모델링

물리적 축척 모델은 대안으로 제시된 탱크/저장소 설계 및 운영의 혼합 특성을 비교적 저렴하게 연구할 수 있는 수단을 제공한다. 축척 모델에서는 추적자 약품을 유입구 (또는 모델 내부에)에 첨가해서 추적자의 움직임을 실험을 통해 모니터한다. 추적자 물질로는 혼합현상을 질적으로 파악하기에 적합한 가시 염료나 양적 측정에 이용할 수 있는 염화나트륨 등과 같은 약품을 사용한다.

밀도가 상이한 추적자들을 사용하거나 추적자의 온도를 세심하게 조절하면, 혼합에 있어서의 온도변이의 영향을 파악할 수 있다. 측정 후에는 유사한 법칙을 이용하여 축척의 효과를 해석하여야 한다. 본 연구를 위하여, 앤 아버의 미시건 대학에 축척 모델을 하나 축조하였다. 이 경우에는 가시 염료를 중력을 이용하여 투입해서 그 염료의 모델 내에서의 움직임을 디지털 카메라로 추적하였다. 거기에서 나온 사진들을 조사해서 염료의 움직임에 대한 한 장의 질적 사진을 만들어, 그것을 디지털화한 다음 컴퓨터 분석을 통해서 혼합을 양적으로 측정하였다. Rossman과 Gray(1999)는 염화나트륨을 추적자로 사용한 물리적 축척 모델로 앞에서 기술한 혼합의 일반적 실증 방정식을 유도하였다. 이는 혼합과정을 시각 및 양적으로 축정하기 위해서 한 커다란 저장소의 유입수에 염료와 전도성 차이를 함께 사용한 축척 모델이다. 탱크 내에서의 혼합과정을 상세히 측정하는 데에는 레이저 유도 3차원 형광을 이용한 새로운 기술이 응용되고 있다(Roberts & Tian, 2002).

⑦ 수학적 모델링

수학적 모델에서는 탱크 또는 저장소에서 일어나는 물의 움직임과 약품들의 반응을 모의 실험하기 위해 수학 방정식을 수립한다. 수학적 모델에는 탱크의 유체역학을 3차원적으로 상세 표현하는 계량 유체 역학(CFD)부터 단순히 입, 출력을 표현한 시스템 모델에 이르기까지 다양한 모델들이 있다.

(a) CFD 모델

CFD 모델은 수학 방정식을 이용하여 흐름의 형태, 열전이, 화학반응을 모의 실험한다. 이 모델에서는 질량, 운동량, 에너지 보존을 나타내는 부분 미분방정식을 수치적으로 풀어서 탱크의 기학적 구조와 유사한 2차원 내지 3차원의 그리드를 생성한다. 그리드 개발을 지원해 주고 문제를 풀어서 결과를 디스플레이 해주는 상용 소프트웨어 패키지가 몇 가지 유통되고 있다. 화학, 핵, 기계 엔지니어링 분야에서 광범위하게 이용되어 온 CFD 모델링은 최근에 음용수 사업부문의 새로운 모델링 도구로 등장했다. "배수 시스템 탱크 및 저장소 분석에의 CFD 모델의 이용"이라는 주제로 열린

AWWA 2003 연례 회의의 한 분과에서는 이 기술을 집중적으로 다루었다 (Duer, 2003; Grayman & Arnold, 2003; Hannoun & Miller, 2003; Mahmood et al, 2003; Ta, 2003). CFD 모델은 저장설비 내의 온도 차이, 불규칙한 수리 및 수질 조건, 구성 성분의 소멸 등의 모의실험에 이용할 수 있다. CFD 모델을 적용하려면 상당한 경험이 있어야 하며, 복합적 상황인 경우 모델 운영 시간이 수 시간, 수 일 심지어 수 주일도 걸리는 수가 있다.

(b) 시스템 모델

이 범주의 모델들은 물리적 공정들(즉, 탱크 또는 저장소 내에서의 혼합현상)을 고도로 개념적인 실증적 관계식으로 나타내는 것들이다. 이 종류의 모델은 블랙박스 모델 또는 입출력 모델로도 불린다. 이 모델들은 탱크 내 물의 움직임을 기술하기 위해서 복잡한 수학 방정식을 사용하는 대신, 엔지니어링 판단이나 현장 데이터 또는 과거의 경험에 의존해서 그 모델의 행동을 제어하는 매개변수들을 정의한다. 시스템 모델은 주입-배수 방식 또는 연속(동시) 유입-유출 방식으로 운영되는 탱크 및 저장소들을 설명하는데 사용해 왔다. 여기에는 완전 혼합 모델, 플러그 흐름 모델, 후착/선출(LIFO) 모델, 다중 구획 모델 등이 해당된다. 물 연령과 아울러 보존성 물질 및 1차 소멸 기능에 의해 소멸되는 물질 모두 모의실험의 대상이 될 수 있다. 시스템 모델은 사용하기가 비교적 쉽고, 배수 시스템의 수리 및 수질 모델과 신속하고 손쉽게 통합할 수 있다. 여러 개의 탱크 및 저장소 시스템 모델을 통합해서 사용자 중심의 컴퓨터 프로그램으로 개발해 놓은 것이 있다(Grayman et al, 2000). 이 프로그램은 1일에서 수년에 이르는 기간 동안의 유출농도 및 물 연령의 모의실험 연구에 광범위하게 사용되었다. 그림 10〉은 그 프로그램의 그래픽 출력 예이다. 4개월에 걸친 탱크 내의 물 연령을 산출한 이 예에서 물 연령은 40시간에서 150시간에 이르기까지 다양한 것으로 나타나 있다.

(6) 모델링 및 모니터링의 통합사용

모니터링과 모델링은 모두 탱크 및 저장소 내의 혼합과 수질을 평가하는데 유용한 도구들이긴 하지만, 이 두 도구를 하나의 프로그램으로 잘 통합해서 사용하면 그 효과를 더욱 높일 수 있다. 기존의 조건들을 평가하기 위한 메커니즘인 모니터링은 모델들을 보정하고 입증하기 위한 데이터를 개발하는 수단으로도 활용되고 있다. 다양한 모델들이 혼합현상을 연구하는데(일차적으로 모니터링 과정에서 관찰된 결과를 해명하고, 그 다음 대안 설계나 운영 방식을 조사하기 위하여) 단독 또는 통합하여 이용될 수 있다.

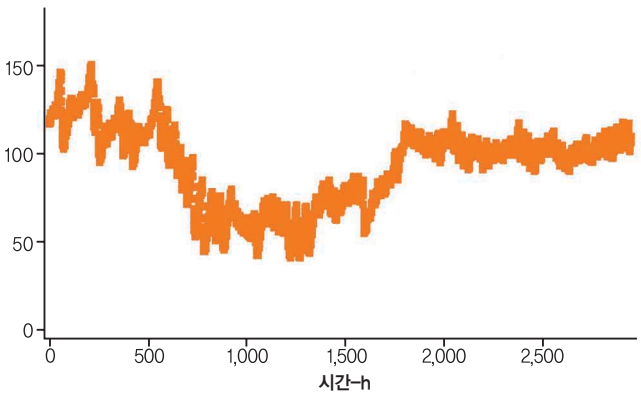


그림 10〉 컴퓨터 프로그램 모델로 출력한 물 연령 플롯

3. 결론

배급수 저장시설에서의 물의 노화는 소독제 잔량의 손실과 세균의 재번식으로 인하여 수질악화를 초래할 수도 있다. 따라서 각 설비는 수질 및 그 반응성, 사용된 소독제의 종류, 저장시설에 오기까지와 그 이후의 이동시간을 고려하여 물이 지나치게 오래되지 않도록 관리하여야 한다.

저장설비 내에서 혼합이 잘 이루어지지 않으면 물이 오래 체류하는 지대를 만들어 물의 노화와 관련하여 문제를 더욱 악화시킬 수 있다. 흐르지 않아 오래된 물 지대가 생기지 않게 하려면, 배급수 저장설비가 혼합이 잘 될 수 있도록 설계 운영되어야 한다. 저장시설은 적절한 소독제 접촉시간을 확보하기 위해 플러그 흐름 시스템을 주로 사용하는 정수지나 접촉실과는 이런 점에서 상당한 차이가 있다. 탱크나 저장소에는 노화나 혼합상의 문제가 일어날 수 있는데, 이 둘은 상호 연관되어 있을 수도 있고, 단독적일 수도 있다. 이런 문제들을 해결하려면, 먼저 그 문제의 성질을 파악한 다음에 적절한 설계나 운영상의 조치를 취하여야 한다. 일례로, 물의 연령이 과도할 경우 혼합상의 문제점을 해결하는 것만으로는 근본 문제를 치유할 수 없다. 기존 또는 계획된 탱크 및 저장소의 혼합 및 노화과정을 평가하는데 다양한 모델링 및 모니터링 도구가 이용 가능하다. 이런 방법을 사용하면 저장설비에서의 수질이 개선될 수 있도록 설계나 운영을 계획할 수 있다.

(본 논문에 대한 의견이 있으면, journal@awwa.org로 연락 바랍니다.)