

# 정수처리공정에서 3차원 수리해석 적용 연구

안 창 진 (한국수자원공사 수도건설처 부장)

## 1. 서 론

- 1.1 연구의 배경
- 1.2 연구의 목적
- 1.3 연구의 동향

## 2. 해석모델

- 2.1 범용 CFD 모델
- 2.2 적용모델
- 2.3 모델링
- 2.4 경계조건
- 2.5 해석
- 2.6 결과분석

## 3. 분배수로의 3차원 수리해석

- 3.1 분배수로 형상과 설계수량
- 3.2 해석조건 및 시뮬레이션
- 3.3 유량불균형에 따른 응집 및 침전효율 영향 분석

## 4. 결론 및 향후 연구계획

참고문헌

# 1. 서론

## 1.1 연구의 배경

정수처리공정은 일반적으로 화학적, 생물학적 처리 등으로 인식되어 수리적인 설계는 간과되어 왔으며, 각 처리공정의 구조물 설계가 단순 용량계산 및 수리계산(1차원) 만으로 실시되고 있어 정수처리 구조물의 유동현상 분석을 통한 최적의 설계는 불가능하였다. 그림 1.1에 의하면, 수질변환 메커니즘에서 수리역학적인 유동현상이 정수처리에 직·간접적으로 작용하는 것을 알 수 있다.

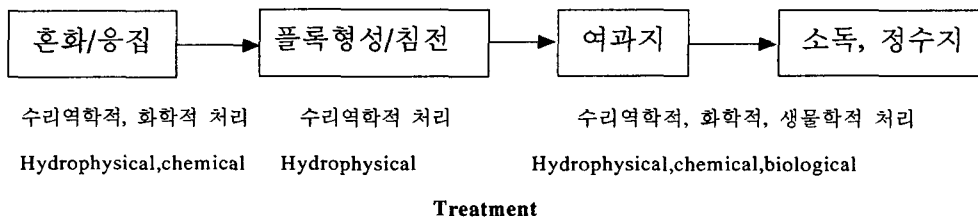


그림 1.1 정수처리공정별 수질변환 메커니즘

그러나 최근에는 CFD(Computational Fluid Dynamics) 프로그램을 이용하여 정수처리 구조물 내에서 유동현상에 대한 Simulation이 가능하게 되어, 정수처리공정별 최적 유동조건을 고려한 구조물을 설계함으로써 처리효율을 향상시킬 수 있게 되었다. 정수처리 구조물에서 기본적인 유체역학 이론과 3차원 유동해석의 차이점을 나타내면 표 1.1과 같다.

CFD프로그램을 이용한 3차원 유동해석의 가장 큰 장점은 Pilot plant 실험 또는 모형실험을 실시하기 전에 수치해석을 통하여 사전 검토가 가능하며, 해석결과를 증명할 수 있는 방법이 있다면 별도의 모형실험이 불필요하므로 이는 구조물의 설계시간 단축과 비용을 크게 절감할 수 있다.

선진국에서는 정수처리 구조물의 유동해석과 1, 2차 화학반응 메커니즘까지 simulation하는 단계이므로 우리 나라에서도 최적 정수처리 구조물의 설계뿐만 아니라 선진 정수처리기술의 도입과 기술선진화를 위하여 3차원 유동해석을 통한 정수처리 구조물의 설계가 절실히 요구되고 있다.

표 1.1 정수처리 구조물 설계에서 1차원 해석해와 3차원 수치해석의 차이점

공 정	1차원 해석해(解析解)	3차원 수치해석
혼 화	-교반기의 동력 ( $P=f(d, N, \nu, g, \rho)$ [Watts]) -단순 G-values 계산	-반응조의 형상 및 소요 동력별 임의지점 의 난류발생 정도, 유동현상에 대한 Simulation -평균 G-values 계산
응 집	-응집기의 소요동력 및 Gtc값	-응집지내 모든 지점의 난류에너지 및 평 균 G값 계산
침 전	-표면부하율, 난류정도(Re. No.) 및 간접적인 유동의 안 정성(Fr. No.) 파악	-외부조건(풍향, 대기온도, 밀도류, two fluids) 및 구조물의 형상별 유동현상 파 악
여 과	-경험식 또는 물리적 수리계산	-Two fluids(유체, 여재)의 여과 및 역세 척에 대한 simulation -유동현상 분석으로 구조물의 규모 및 규 격 결정 (이론상 가능하며 향후 연구대상 분야)
분배수로	-1차원 수리계산 및 Fr. No.에 의한 check	-수로내의 3차원 유동현상과 유량의 정량 적 비교검토 가능

본 연구는 상용화된 CFD프로그램인 FLOW-3D를 이용하였다. 모든 구조물은 3차원 CAD프로그램으로 입력 파일을 작성하여야 하며, 유동해석에 영향을 미치는 설비(혼화기, 응집기, 슬러지 수집기) 또는 매질(Porous media)이 존재하게 되므로 해석을 실시하기 전에 각 구조물의 해석조건을 충분히 검토하여야 한다. 따라서 2000년도에는 이러한 해석조건을 검토하고 해석이 비교적 간단하면서도 정수처리효율에 큰 영향을 미치는 것으로 알려진 분배수로에 대한 해석을 실시하였다.

정수처리공정에서 분배수로의 유량분배는 응집지에서 floc의 성장, 거동과 정수효율 등에 영향을 주므로 매우 중요한 설계 요소 중의 하나이다. 3차원 유동해석 프로그램인 FLOW-3D를 이용하여 4개 정수장에 대한 분배수로의 형상과 조건에 따른 해석을 실시하여 유량 균등분배에 영향을 미치는 인자를 규명하였다. 물의 균등분배는 분배수로의 Inlet구조물, 수로의 단면형상, 길이, 유출구의 크기와 형상 등에 영향을 받으므로 해석을 실시한 4개 정수장은 이와 같은 점을 고려하여 선정하였다.

## 1.2 연구의 목적

지금까지 대부분의 정수처리 구조물의 설계는 1차원 해석과 필요한 경우 Pilot plant 실험 또는 모형실험을 실시하여 선정된 구조물 형식에 대하여 문제점을 찾아내는 수준으로 창의적인 구조물의 설계는 매우 힘이 들었다. 그러나 CFD 프로그램을 이용하면 구조물의 수리해석에 있어서 여러 형식에 대하여 자유롭게 해석이 가능하고 모형실험을 실시하기 전에 각 형식에 대한 비교·검토가 가능하므로 해석시간과 설계비용을 대폭 줄일 수 있다.

따라서 본 연구는 정수처리 구조물에 대한 유동해석을 통하여 구조물 형식별로 수처리에 미치는 효과를 비교·분석하여 최적 정수처리 구조물을 설계하는 방안에 대하여 연구 하였다.

구체적으로 정수처리공정에서의 CFD 프로그램을 이용할 수 있는 부분과 효과를 정리하면 다음과 같다.

- 이용부분 : 공정최적화, 시설개선, 정수처리공정 설계기술의 혁신
- 이용효과 : 예측적인 설계, 시각적인 현상을 제공함으로써 명확한 설계결과 설명과 설계인자 결정에 도움

## 1.3 연구의 동향

CFD 프로그램을 이용한 정수처리 구조물의 설계는 단위공정별로 일부 활용이 되었으며, 실제 연구분야는 장방형수평류 침전지 등 유동해석에 관한 내용들이 대부분이다. 그러나 컴퓨터의 발달과 상업적인 CFD 프로그램이 발표되면서 이분야에 관심이 증대되기 시작 하였으며, 미국에서는 이미 유동해석과 1차화학반응을 포함한 해석이 이루어지고 있다.

또한 미국의 United Water와 프랑스의 Lyonnaise des Eaux에서 공동으로 전체 정수처리공정의 수리 및 화학반응을 시뮬레이션하는 CFD 프로그램 "Virtual Water Plant™"을 최초로 개발하였다. 국내에서는 아직 이러한 프로그램 개발과 3차원 수리해석을 통한 정수처리 구조물의 설계는 접근하지 못하고 있는 실정이다.

## 2. 해석모델

### 2.1 범용 CFD 모델

수치시뮬레이션은 수리모형실험과 같은 실험연구와 비교하여 개발에 소요되는 기간이 짧고 경비도 적게 드는 장점이 있다. 한편 신뢰성에 있어서는 실험쪽이 높다고 생각될 수 있으나, 실험은 대부분의 경우 모델실험으로 실제유동으로의 재현 및 환산에 문제가 따르며, 또 데이터를 수집하는 과정에서 계측오차, 특히 비정상 3차원 유동에서 그 상태를 충분히 파악할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 수치시뮬레이션을 도입하게 되었다.

범용적으로 이용되는 CFD모델은 Flow-3D, Fluent 및 CFX모델이 있다. 최근에 미국의 United Water와 프랑스의 Lyonnaise des Eaux에서 공동으로 전체 정수처리공정의 수리 및 화학반응을 시뮬레이션하는 CFD 프로그램 "Virtual Water Plant™"을 최초로 개발하였으나 아직 상용화된 프로그램은 아니다. 프로그램의 선정은 해석의 정도와 밀접한 관계가 있으므로 해석하고자 하는 대상 구조물의 특성과 유동에 대한 기본적인 자료를 분석하여 신중하게 결정하여야 한다. 표 2.1은 범용화된 프로그램의 특성을 비교한 것이다.

### 2.2 적용모델

본 연구에 적용한 FLOW-3D는 미국 New Mexico주 Los Alamos에 있는 Flow Science, Inc에서 개발한 상용 범용 CFD code이며, Los Alamos National Laboratory의 수치유체역학 branch에서 F. Harlow, B. Nichols 및 T. Hirt 등에 의해 개발된 MAC(Marker and Cell) 방법과 SOLA-VOF (Volume of Fluid)방식을 기초로 하고 있다. 그 후 Dr. Hirt가 1980년에 Flow Science사를 설립하여 계속 code를 발전시켰으며, 1985년부터 FLOW-3D로 명명하였다. 그 후 난류, shallow water, scalar, 옹고 등 다수의 model이 포함되어 현재의 상용 프로그램이 되었으며, 수리학 뿐만아니라 casting, inkjet 등 일반 산업공정 해석에도 널리 사용되고 있다.

Solver와 전·후처리기로 구성되어 있고 solver는 Fortran, 전·후처리기는 C언어를 주로 사용하고 있다. PC, workstation, super computer 등 거의 모든 computer 기종에서 사용이 가능하다.

해석방법은 기본적으로 비정상 유동 상태이며, 연속방정식, 3차원 Navier-Stokes 방정식 및 에너지 방정식을 유체 및 열유동 해석에, 그리고 유체로부터 또는 유체로의 열전달에 의한 고체내의 온도는 열전도에 의한 에너지 교환을 에너지 방정식 source term으로 사용하여 해석하고 있다. 또한 유체의 난류 유동에는 기본 대수 모형으로부터 RNG 모형까지의 난류 방정식

을 선택할 수 있으며, 자유표면 해석을 위해 VOF 방정식이 사용되고 있다. 직각 형상의 격자계에서는 일반 형상을 정의해 줄 수 있도록 FAVOR방법이 각 방정식에 적용되고 있으며, 비압축성 및 압축성의 계산시 해석 속도를 증진시키기 위해 별도의 보조 방정식 등을 사용하고 있다. 사용되는 방정식을 요약하면 다음과 같다.

- Mass conservation : Incompressible, Limited compressibility,  
Compressible
- Momentum conservation : Navier Stokes

표 2.1 범용 CFD 프로그램의 비교

항 목	FLOW-3D	FLUENT	CFX
수치해석 방법	Finite Volume approach	Finite Volume Technique	Finite Volume Technique
Mesh type	Rectangular grid technique	Unstructured Mesh (Version5)	Unstructured multi-block mesh
Geometry 형성	Built-in Obstacle Modeler CAD input import	Built-in Obstacle Modeler CAD input import	Built-in Modeler CAD input import
해석 영역 gridding	Rectangular mesh와 obstacle과의 interface가 FAVOR 기법에 의해 유동장 및 비유동장에 mesh 형성 (obstacle이 mesh 영역에 존재함으로써 grid 자동 생성)	obstacle 정의에 따라 grid modeler를 사용하여 grid 생성(mesh type에 따라 user가 gambit에서 grid를 작성함)	Finite Element Technique
응용성	General All in One model	General Model (Newtonian, Non-Newtonian, free surface 문제 등에 따라 모듈분리)	Multiphase,combustion, free surface등 은 Server 통합, radiation은 Module 분리
계산속도	빠른 preprocessing을 통한 문제 setup	grid 생성에 상당기간 소요	빠른 preprocessing을 통한 문제 setup
Free surface	매우정확(VOF 최초 개발)	VOF를 사용하지만 경계조건 적용 방법이 달라 자유표면 해석이 부정확함	VOF를 사용하지만 경계조건 적용 방법이 달라 자유표면 해석이 부정확함
chemical reaction	passive reaction	generalized reaction	generalized reaction

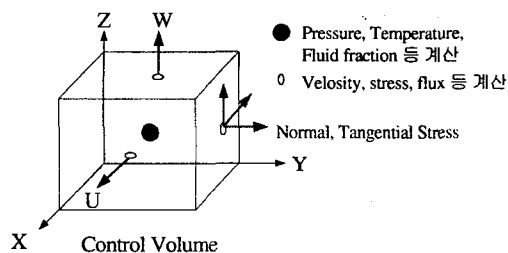
- Energy conservation : Phase change, Heat transfer
- Fluid fraction evolution : VOF method
- Turbulence Transport : k-e, RNG, Large eddy simulation
- Sclar advection & diffusion
- Physical model : Equation of state, Surface tension, Solidification/melting, cavitation, porous media, Mass & Marker particle, Non-Newtonian viscosities, Solidification Shrinkage

### 2.2.1 FVM

해석을 하는 방법에는 FEM(Finite Element Method)과 FDM(Finite Differential Method) 등의 여러 가지 방법이 있다. FLOW-3D는 FDM의 발전된 형태인 FVM (Finite Volume Method)을 사용하였다.

일반적으로 해석을 하게 되면 해석 영역을 작은 단위(Cell)로 나눈 후, 이 cell을 단위로 계산이 이루어지게 된다. 각 cell에 대해서 주어진 압력에 따른 시간에 대한 외재적 전진으로 다음 시간에서의 속도를 구하며, 이 속도를 이용하여 Poisson equation 형태의 압력방정식의 해를 구한 다음 다시 속도를 교정해 주고 그 후에 자유표면의 해석이 요구될 때는 VOF 방정식을 풀어어나가는 방법을 이용하고 있다

- 해석 영역을 작은 cell로 나누고 각 cell에 대해서 비선형 방정식을 해석

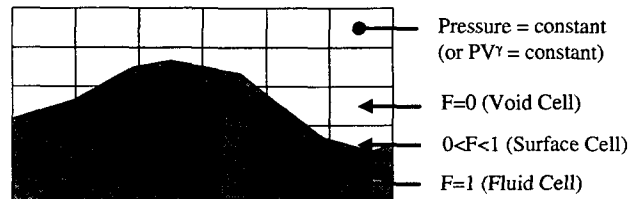


### 2.2.2 VOF 방법

Jets, splashing 및 wave breaking같은 복잡한 자유 표면 운동의 기술은 움직이는 격자를 사용하는 Lagrangian 방법보다 고정 Eulerian 격자를 사용하는 VOF(Volume of Fluid) 방법을 이용하여 보다 간단히 이루어 질 수 있다. FLOW-3D에 사용되고 있는 VOF 방법은 다른 공용되고

있는 VOF 방법과는 달리 정확한 압력 및 운동학적 경계 조건을 sharp interface(상이 경계면)에서 적용하고 있으며, 또한 유한 차분시의 상이 경계면의 smearing을 방지하기 위해 특별 수치차분법을 사용함으로써 두 유체(유체와 공기일 경우는 보통 자유표면으로 가정함) 사이의 운동을 기술할 수 있는 수치해석 방법이다.

- 자유표면을 정의하는 방법
- 가정: Void Pressure = Constant

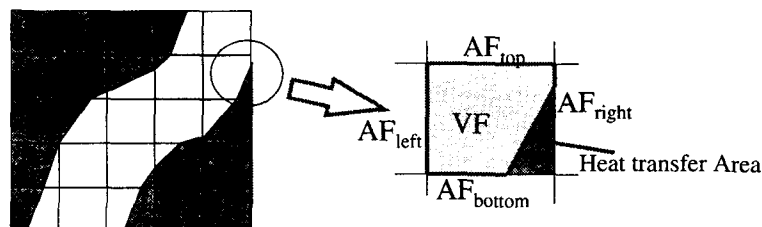


N = 1 ~ 8 (Cell에서 유체의 방향 정의)

### 2.2.3 FAVOR 방법

FAVOR(Fractional Area and Volume Ratios)은 직각형 격자 안에 들어있는 일반 형상을 기술하는 방법으로, 각 직각형 격자의 각기 면들이 전체 또는 일부가 유체가 출입할 수 없는 물체에 의해 막혀있을 수 있다고 정의하는 것이다. 그러므로 한 직각형 격자에서 유동물질이 차지하는 부피 및 이 매체가 통과하는 면적이 정의되며, 이 격자안에서의 질량, energy, 운동량들에 대한 통과 면적에 대한 flux를 고려한 방정식들의 유한 체적 적분을 통해 일반 물체 주위의 유동에 대한 영향을 기술하게 된다. 따라서, 일반 FDM 사용시 가장 큰 문제의 하나인 계단형 격자에 의한 결과의 정확도 저하를 해결하였다.

- FAVOR : Fractional Area/Volume Representation
- BFC를 사용하지 않아 신속하고 정확한 곡면 표현
- 유동 및 열전달 계산 정확성 확보

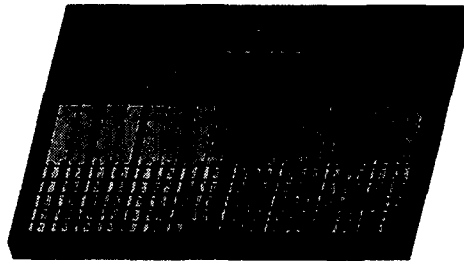




## 2.3 모델링

해석을 위해서는 우선 대상물의 형상을 실제 구조물과 동일한 크기와 좌표를 가지도록 3차원으로 나타내야 한다. 다음은 정수장의 3차원 Solid model 형상이다.

3차원 형상의 모델링(modeling)은 형상의 난이도에 따라 수 시간에서 수주의 작업을 요하는 과정이며, 경우에 따라 해석의 결과를 좌우하기도 한다. 모델링시에는 해석의 목적에 부합하는 방향으로 모델링을 실시하여야 한다. 구조물의 도면과 동일하게 모델링을 실시하는 것은 시간과 노력의 낭비가 되므로 해석에 영향을 주지 않거나, 고려할 수 없는 부분들은 상세히 모델링할 필요가 없다. 특히, 3차원 CAD 데이터가 있는 경우에는 모델링 시간을 크게 단축할 수 있다.

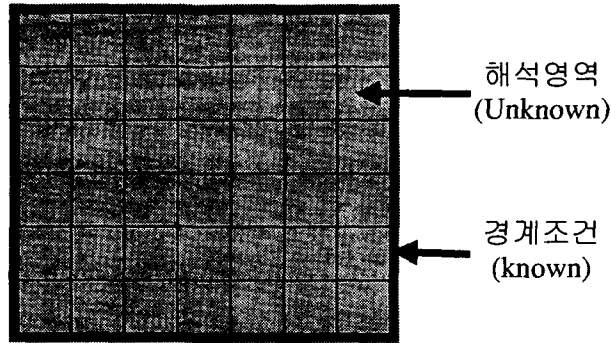


초기 모델링 단계에서는 1차 해석 후 모델을 수정할 경우를 고려하여야 한다. 그렇지 않으면 모델 수정을 위하여 처음부터 다시 모델링해야 하는 경우가 발생하기 때문이다. 따라서, 모델링을 시작하기 전에 형상을 완전히 이해하고, 모델링 방안에 대해 구체적인 계획을 세운 후 모델링에 착수해야 짧은 시간내에 형상 정의를 완료할 수 있다. 이와 같은 판단은 많은 해석과 모델링 경험을 통해 습득되는 것이므로, 해석전에 경험자에게 조언을 받고 다각적인 관점에서 검토를 해야 한다.

## 2.4 경계조건

해석은 우리가 모르는 영역을 작은 부분으로 쪼개어 각각에 대한 정보를 얻는 방법이다. 이를 위해서는 해석 영역의 경계부(Boundary)에서의 조건을 입력조건으로 정해주어야 한다.

경계조건(Boundary condition)을 정의하는 작업은 해석에서 매우 중요한 단계이다. 일반적으로 유체역학에서의 경계조건으로 정의할 수 있는 항목은 유체의 압력, 유량(속도), 온도, 유체의 높이 등이 있고 해석 결과에 직접적인 영향을 주기때문에 이들 중 실제와 가장 가까운 것을 선택하여야 한다.



## 2.5 해석

해석(Solving) 과정은 모델링과 함께 전체 해석에서 가장 많은 시간을 소비하는 과정이므로 비용을 고려한 가장 효율적인 해석방안을 찾아야 한다. 문제에 따라 차이가 있지만, 원하는 결과를 얻기 위해서는 조건을 바꾸어가며, 2-3회에서 10여회의 해석을 수행해야 하는데, 1회의 해석에 너무 긴 시간이 소요된다면, 해석을 하는 의미가 없다고 볼 수 있다. 해석의 정확성과 해석에 드는 비용은 비례하므로, 정확성과 비용이 적절한 수준에서 절충되도록 조절해야 한다.

## 2.6 결과분석

해석의 가장 중요한 단계이다. 앞에서 언급한 바와 같이 해석은 실제 현상을 단순화하여 가시화시키는 작업이므로 실제와는 다소 차이가 있을 수 있으며, 해석 자체의 오차도 포함하게 된다. 따라서 해석의 결과를 분석할 때 압력, 속도, 온도 등 물리적 값들의 정확성도 중요하지만 전체적인 경향을 분석하는 것이 더욱 중요하다. 해석 결과는 여러 가지 원인에 의하여 실제와 차이를 가지지만, 해석에서의 압력 및 속도, 온도 분포 등의 상대적 경향은 실제와 유사한 경향을 나타내므로 이를 통하여 문제의 원인 및 해결방안을 유추할 수 있다.

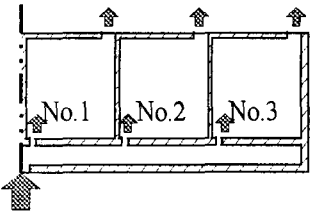
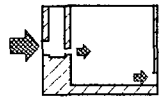
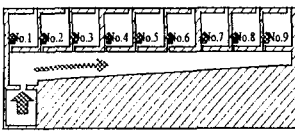
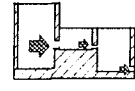
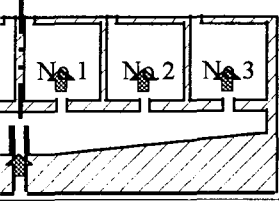
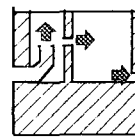
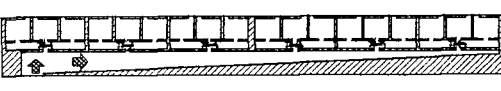
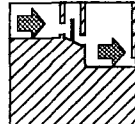
이 단계에서도 현장실무자와 해석자의 긴밀한 정보공유를 통하여 문제점의 원인을 파악하고, 해결 방안을 찾아야 한다. 문제점이 확실한 경우에는 결과 분석이 쉽게 이루어질 수 있지만, 문제점이 불확실한 경우에는 해석 과정과 결과에 대해 면밀하게 검토하고 점검해야 정확한 문제점 및 원인을 발견할 수 있다. 이를 위해서 생산과 해석의 정보 공유와 협의가 반드시 필요하고, 해석과 생산에 대한 경험이 매우 중요하다.

### 3. 분배수로의 3차원 수리해석

#### 3.1 분배수로 형상과 설계수량

해석을 실시한 4개 정수장의 분배수로의 특징과 형상은 표 3.1과 같다. D1과 P정수장의 분배수로는 2개의 침전지(6개의 응집지) 중앙에서 물이 유입되고, D2정수장은 단면이 변하는 분배수로로서 6개의 침전지(18개의 응집지) 중앙에서 물이 유입되고 있다.

표 3.1 해석대상 정수장의 분배수로의 특징 및 형상(반단면)

정수장	유입방법 지의 길이 (유입구)	유량	평 면 도	측면도
D <sub>1</sub>	수평 18.6m (3개)	35천 m <sup>3</sup> /d		
D <sub>2</sub>	수평 29.0m (9개)	27.3천 m <sup>3</sup> /d		
P	수직 11.8m (3개)	16.3천 m <sup>3</sup> /d		
N	수평 72.6m (6개)	140천 m <sup>3</sup> /d		

N정수장도 단면이 변하는 분배수로로서 6개의 침전지(18개의 응집지)로 물이 유입되고 있으나, D2정수장과는 달리 한쪽 끝에서 물이 유입된다. D1정수장과 P정수장의 차이점은 분배수로가 직사각형과 단면이 변하는 점축소형 분배구조라는 점이다

### 3.2 해석조건 및 시뮬레이션

분배수로에서 응집지로 유입되는 수량을 각 지별로 계산이 되도록 하기 위하여 분배수로로 유입되는 Inlet와 응집지 제1열까지 유동해석을 하였다. 초기 수리조건은 물을 설계수위까지 채운 상태에서 물이 분배수로로 유입되도록 하였다.

그림 3.1의 N정수장의 시뮬레이션 결과를 보면, 물을 흘린 후 150초가 지나야만 Steady state에 도달되므로 초기 시뮬레이션 값은 버리고 정상상태에 도달된 값만 취하였다. 정상상태의 판단은 유체의 운동에너지, 난류에너지, 유체의 부피, Time step 등이 변화하지 않을 경우를 말한다.

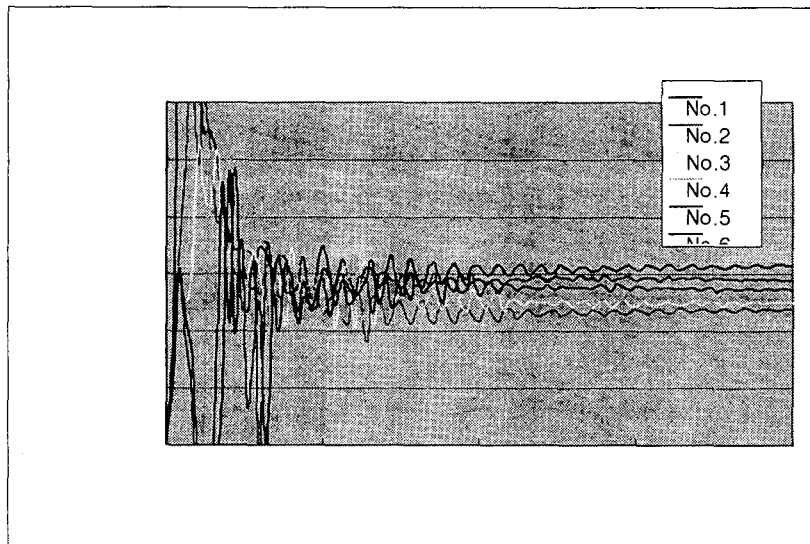


그림 3.1 N정수장의 응집지별 유량 시뮬레이션 결과

이러한 방법으로 각 정수장의 응집지 분배수로에 대한 유량분배현상을 시뮬레이션한 결과는 표 3.2와 같다.

D1정수장, D2정수장과 N정수장의 경우 중앙부의 No.1 응집지로 유입되는 유량이 가장 크다. 그 원인은 혼화지에서 분배수로 중앙부에 위치한 관을 나온 물이 응집지 입구로 직접 유입되기 때문이다. 이와 반대로 응집지 No.2의 유입량이 가장 작고 중앙에서 먼 응집지일수록 유입되는 물의 양이 증가하는 원인은 유속에 의한 dynamic pressure에 기인한다. 중앙에서 유출된 물은 응집지 벽에 부딪혀 분배수로의 길이 방향(응집지 입구와 수직인 방향)으로 흐르게 된다. 이때 응집지 No.2에서의 유속이 가장 빠르게 되므로 압력과 수위가 떨어지고, 분배수로 끝 쪽에서는 속도 성분에 의하여 압력과 수위가 높아지므로 응집지 No.2보다 많은 양의 물이

유입된다.

D1정수장, D2정수장과 N정수장의 경우 P정수장에 비하여 유량차가 3배 이상 발생한다. 이것의 원인은 분배수로로 유입되는 관의 방향과 분배수로의 형상에 의한 것으로 판단된다. 유량의 균등분배가 가장 양호한 P정수장의 경우 D1정수장과 D2정수장과는 달리 물이 위쪽으로 분출되는 방식(Bell mouth)인데, 이 경우 위에서 설명한 분배수로 방향의 속도성분이 최소화되기 때문에 균일한 유량분배가 이루어진다. 또한, 다른 정수장에 비하여 분배수로의 형상이 단면이 변하는 점축소형이며, 분배수로의 길이도 짧기 때문이다.

유량의 균등분배는 Inlet 구조물의 형태와 분배수로의 길이, 수로단면적의 변화율, 유속에 영향을 받는 것으로 판단된다. 일반적으로 유량 균등분배를 위한 분배수로의 설계는 Chao와 Trussell(1988)이 제안한 식에 의해서 검토할 수 있으나, 실제 설계에서는 계산이 복잡하여 경험에 의해서 설계하고 있다.

표 3.2 각 정수장의 응집지별 flowrate

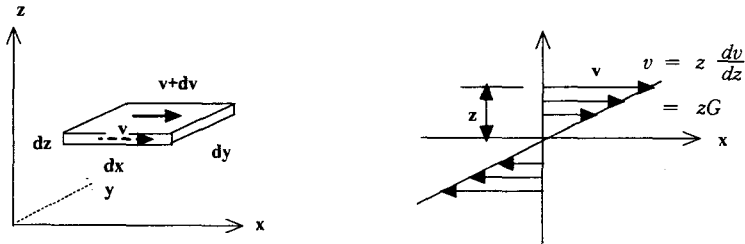
정수장	응집지 (유량%)	응집지별 유량차(%)	정수장	응집지 (유량%)	응집지별 유량차(%)
D <sub>1</sub>	No.1 (34.2)		P	No.1 (33.2)	
	No.2 (32.6)			No.2 (33.2)	
	No.3 (33.2)			No.3 (33.6)	
D <sub>2</sub>	No.1,2,3 (32.5)		N	No.1 (19.2)	
	No.4,5,6 (33.3)			No.2 (14.5)	
	No.7,8,9 (34.2)			No.3 (15.4)	
	No.4 (16.0)				
	No.5 (17.0)				
	No.6 (17.9)				

### 3.3 유량불균형에 따른 응집 및 침전효율 영향 분석

#### 3.3.1 응집지 체류시간 변화에 따른 입자의 감소율 변화

응집지에서 Orthokinetic Flocculation은 브라운 운동의 영향을 무시할 수 있는 1 $\mu$ m 이상되는 입자로서 침강성이 있는 플록을 형성하기 위해서는 입자의 상대적인 운동으로 충돌이 일어나야 한다. 그러므로 응집은 혼화(mixing)에 의한 G-value로 나타내는 속도구배가 필요하게 된다.

다음 그림과 같이 등 전단장 (uniform shear field)을 가정하면, 전단력은 다음과 같이 표시할 수 있다. 아래 그림에서 두 단면의 속도는  $v$ 에서  $(v+dv)$ 로 변한다고 가정할 때  $x$ - $y$  평면에서 전단력은 다음 식으로 나타낼 수 있다.



$$F = \mu G dx dy$$

여기서  $F$  : 전단력 [N]

$\mu$  : 역학적 동점성계수 [N sec/cm<sup>2</sup>]

$G$  : 속도구배 [=dv/dz=m/sec · m=sec<sup>-1</sup>]

따라서 필요한 동력(power)은

$$P = Fdv = \mu G dx dy dv = \mu G dx dy \frac{dv}{dz} dz = \mu G^2 dx dy dz$$

단위용적당 동력은

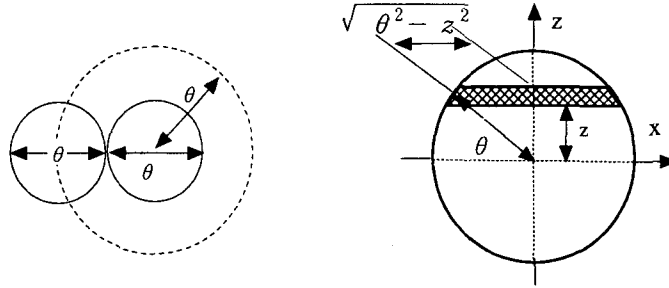
$$W = \frac{P}{V} = \frac{\mu G^2 dx dy dz}{dx dy dz} = \mu G^2$$

또는

$$G = \sqrt{\frac{W}{\mu}}$$

플록형성지는 연속류 혼합반응조(CFSTR, Continuous Flow Stirred Tank Reactor)로서 수리적으로 중요한 인자는 입자가 서로 충돌할 수 있는 기회가 많아야 한다. 충돌기회에 대한 인자로는 반응조의 구성과 체류시간이라고 할 수 있다.

층류흐름, 등전단 및 구형입자로서 직경  $\theta$ 의 크기를 가진 두 입자가 있다고 가정하면, 두 입자간의 충돌은 다음 그림(Smoluchowski's theory)과 같이 하나의 입자 중심에서 반경  $\theta$ 가 그리는 구체안에 다른 하나의 입자가 들어가는 것으로 나타낼 수 있다.



입자의 충돌횟수를 계산하기 위하여 중심에서 z 떨어진 판에 들어오는 유량을 결정한다. 유량은 다음과 같이 계산된다.

$$dq = \frac{dv}{dz} \cdot z \cdot 2\sqrt{\theta^2 - z^2} \cdot dz = \frac{dv}{dz} \sqrt{\theta^2 - z^2} \cdot 2z \cdot dz = G \sqrt{\theta^2 - z^2} \cdot 2z \cdot dz$$

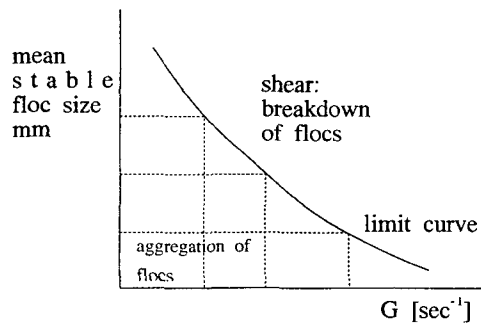
전체 구체에 들어오는 유량 q는 다음과 같다.

$$q = 2 \int_0^\theta G \sqrt{\theta^2 - z^2} 2z \cdot dz = \frac{4}{3} G \theta^3$$

물속에 단위시간과 단위체적 당 n개의 입자를 함유하고 있다면 입자들의 충돌횟수는 다음과 같다.

$$N = \frac{4}{3} G n^2 \theta^3$$

응집율은 충돌횟수에 비례하므로, 윗식에서 응집율은 입자수(농도)의 제곱, 속도구배 및 입자직경의 세제곱에 비례한다. 여기에서 물리적인 제어인자로는 속도구배이며, 높은 G값은 응집율을 높일 수 있으나 플록의 구조는 매우 약하여 깨어지기 쉽다. 그러므로 플록의 크기에 따라서 아래 그림과 같이 적절한 G값을 적용하여야 한다.



같은 크기의 입자 대신 직경  $d_1$  의 입자 수  $n_1$  , 직경  $d$ 의 플록 수를  $n_2$  라고 가정하고, 앞에서 유도된 공식에 적용하면 충돌횟수는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = \frac{1}{6} n_1 n_2 (d_1 + d_2)^3 \frac{dv}{dz}$$

$d_1$  : bacteria 1 - 5  $\mu\text{m}$

viruses 0.01 - 0.1  $\mu\text{m}$

colloids < 0.2 - 1  $\mu\text{m}$

$d_2$  : 100 - 2,000  $\mu\text{m}$

$d_1$  은  $d_2$  에 비하여 매우 작은 값으로 생략할 수 있다.

따라서,

$$N = \frac{1}{6} n_1 n_2 d_2^3 G$$

단위 시간당 입자의 감소는 입자의 충돌횟수  $N$ 에 비례한다.

$$-\frac{dn_1}{dt} = \alpha \frac{1}{6} G n_1 n_2 d_2^3$$

$\alpha$  : 충돌효율

단위 체적당 직경  $d_2$  의 플록  $n_2$  개가 있다고 한다면, 플록의 체적은 다음과 같다.

$$V = n_2 \frac{\pi d_2^3}{6}$$

그러므로,

$$-\frac{dn_1}{dt} = \frac{G}{\pi} \alpha V n_1$$

$$-\frac{dn_1}{n_1} = \frac{G}{\pi} \alpha V dt$$

적분하여 정리하면,

$$\frac{n_t}{n_0} = e^{-\frac{\alpha VGt}{\pi}}$$

따라서 탁도를 나타내는 입자수의 감소율은 속도구배  $G$ , 체류시간  $t$ , 그리고 플록의 수가 아니라 플록의 체적에 지배를 받고 있음을 알 수 있다. 실험에 의하면  $G$ 값이 커질 경우 플록의 체적은 작아진다. 매우 양호한 응집조건하에서 Camp에 의하면  $GV$ 값은 0.04 ~ 0.07 범위에서 변한다고 한다.  $GV$ 를 0.06 그리고  $\alpha$ 를 0.314라고 하면 입자의 감소비율은 다음 식과 같다.



$$\frac{n_t}{n_0} = e^{-6 \cdot 10^{-3} t} \quad or \quad \frac{n_0}{n_t} = e^{6 \cdot 10^{-3} t}$$

지수방정식은 완전 혼화상태에서 다음 식과 같이 간략화 할 수 있다(plug flow에서도 유효하다).

$$\frac{n_0}{n_t} = 1 + 6 \cdot 10^{-3} t$$

m개의 응집지가 직렬로 연결이 된다면 입자의 감소비율은 다음 식과 같다.

$$\frac{n_0}{n_t} = \left(1 + 6 \cdot 10^{-3} \frac{t}{m}\right)^m$$

위 식에서 응집지 내의 입자감소율은 t 즉 응집지내 체류시간에 영향을 받게되고, 체류시간은 응집지의 용량과 유량의 함수이므로 N정수장의 경우 체류시간변화에 따른 응집효율의 변화를 계산하였다. 유량변동에 따른 침전지별 각 응집지의 체류시간은 표 3.3과 같이 산출되었다.

표 3.3 침전지별 각 응집지의 체류시간(t)

구분	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Q(m <sup>3</sup> /s)	0.104	0.079	0.083	0.086	0.092	0.097
V(m <sup>3</sup> )	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4	40.4
t(sec)	388	511	486	470	439	416
응집지열수	3	3	3	3	3	3

체류시간 t의 변화에 따른 탁질(impurities) 수의 감소율은 다음 식

$$\frac{n_0}{n_t} = \left(1 + 6 \cdot 10^{-3} \frac{t}{m}\right)^m$$

을 적용하여 표 3.4와 같이 계산하였다.

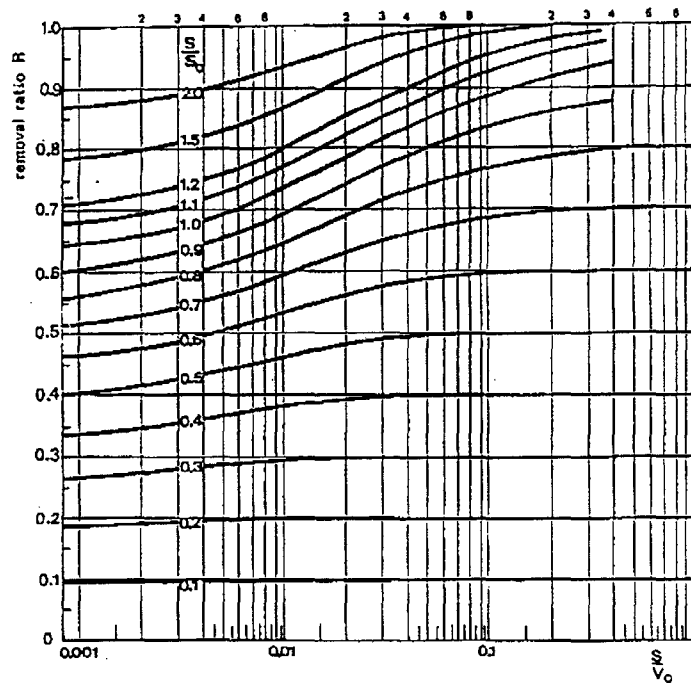
유량이 큰 No.1지의 경우 응집효율이 상대적으로 낮게 되고, 유량불균형에 따른 전체 탁질 수의 감소율은 같다고 하더라도 탁질의 크기별 분포범위가 넓어지게 되어 침전효율이 낮아지게 된다.

표 3.4 응집지별 탁질(impurities) 수의 감소율

Compart.	No.1		No.2		No.3		No.4		No.5		No.6	
	$n_o/n_t$	RI(%)	$n_o/n_t$	RI(%)	$n_o/n_t$	RI(%)	$n_o/n_t$	RI(%)	$n_o/n_t$	RI(%)	$n_o/n_t$	RI(%)
1	3.3	30	4.1	24	3.9	26	3.8	26	3.6	28	3.5	29
2	4.7	21	6.4	16	6.0	17	5.8	17	5.4	19	5.1	20
3	5.6	18	8.3	12	7.7	13	7.3	14	6.6	15	6.1	16

\*  $n_o/n_t$  : decrease in impurities

RI(%) : residual impurities



s : settling velocity,                       $s_o$  : overflow rate(Q/BL)  
 $v_o$  : displacement velocity in the basin (Q/BH)      r : removal ratio

그림 3.3.1 Removal ratio with turbulent flow

### 3.3.2 침전지의 효율감소

3차원 수리해석을 통한 분배수로의 유량을 계산한 결과 N정수장의 예를 들면 하루 6,580m<sup>3</sup>의 유량불균형이 일어난다. 이는 흐름상태가 당초 설계와 다른 난류정도의 심화로 침강효율을 저감시킨다.

침강실험을 실시하지는 못하였으나, 난류에 의한 효율저감을 고려하지 않고 통상제거율을 80%(s/s<sub>0</sub>)로 가정할 때, Camp(ASCE, 1946, p.895~958, "Sedimentation and the Design of Settling Tanks")에 의하면 N정수장의 침전효율은 표 3.5와 같이 No.1과 No.2침전지 사이에 약 15%의 차이가 있으며, 전체적으로도 5.4%의 효율저하가 있는 것을 보여준다.

표 3.5 N정수장의 침전지별 제거율 변화

구분	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
Q(m <sup>3</sup> /s)	0.311	0.236	0.249	0.259	0.275	0.290
s(m/s)	3.239*10 <sup>-4</sup>	3.239*10 <sup>-4</sup>	3.239*10 <sup>-4</sup>	3.239*10 <sup>-4</sup>	3.239*10 <sup>-4</sup>	3.239*10 <sup>-4</sup>
S <sub>0</sub> (m/s)	4.663*10 <sup>-4</sup>	3.538*10 <sup>-4</sup>	3.733*10 <sup>-4</sup>	3.883*10 <sup>-4</sup>	4.123*10 <sup>-4</sup>	4.348*10 <sup>-4</sup>
s/S <sub>0</sub>	0.69	0.92	0.87	0.83	0.79	0.74
v <sub>0</sub> (m/s)	5.41*10 <sup>-3</sup>	4.10*10 <sup>-3</sup>	4.33*10 <sup>-3</sup>	4.50*10 <sup>-3</sup>	4.78*10 <sup>-3</sup>	5.04*10 <sup>-3</sup>
s/v <sub>0</sub>	0.06	0.079	0.075	0.072	0.068	0.064
r(%)	67	82	78	77	76	68

## 4. 결론 및 향후 연구계획

응집지·침전지의 분배수로의 Inlet 구조물은 혼화지에서 유입되는 물의 속도수두를 최소화 (Energy dissipation)하는 구조물로 설계하여야 하고, 분배수로내의 유속은 분배수로 끝단에서 속도성분이 압력과 수위의 상승을 최소화하도록 하되 입자가 침강되지 않는 속도로 설계하여야 한다. 그리고 D1과 P정수장과 같이 1개의 분배수로가 담당하는 응집지 또는 침전지의 수를 가급적 줄여 분배수로의 길이가 작게 설계하는 것이 바람직하다.

정수처리공정에서 3차원 수리해석은 운영중인 시설에 대해서도 구조물의 효율성 평가와 시설개량 무에 활용될 수 있으며, 신규시설의 설계에서는 앞으로 혼화, 응집, 침전, 여과 및 역세척 등에서도 적용하여 구조물 설계에 대한 Guide line을 제시할 수 있고, 나아가서는 수리해석과 화학반응까지 결합된 해석으로 발전시킬 수 있다.

## 참고문헌

- Sicilian, J.M., Hirt, C.W., and Harper, R.P. (1987). "FLOW-3D: Computational modeling power for scientists and engineers." *Flow Science Report (FSI-87-00-1)*.
- Harlow, F.H., and Welch, J.E. (1965). "Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface." *Phys. Fluids*, Vol. 8, pp. 2182-2189.
- Hirt, C.W., and Nichols, B.D. (1981). "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries." *J. Comp. Physics*, Vol. 39, 201.
- Hirt, C.W., and Sicilian, J.M. (1985). "A porosity technique for the definition obstacles in rectangular cell meshes." *The 4th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, Sep 24-27.
- Huisman, I. (1986). *Sedimentation & flotation*.
- Camp (1946) *Sedimentation and the design of settling tanks*. ASCE.
- 신병록, 장근식, 조강래 (1993). 전산유체역학(기초와 응용).