

고효율 침전조 설계를 위한 실험 및 수치해석

김홍민* · 최상철* · 김광용** · 김병희*** · 임영택***

Numerical and Experimental Studies for the Design of High Efficiency Sedimentation Bed

Hong-Min Kim*, Sang-Cheol Choi*, Kwang-Yong Kim**, Byung-Hee Kim***, Young-Taek Lim***

Key Words: Sedimentation Bed (침전조), Sedimentation Efficiency (침전효율), Blockage Ratio (단면축소율), Angle of Distributor (분배판의 각도), Center Feed Wall (정류벽), Volume Fraction(체적점유율)

ABSTRACT

Both numerical and experimental studies on the sedimentation efficiency of a sedimentation bed were carried out. Three different structures of sedimentation bed and five different combinations of blockage ratio of center feed wall and angle of distributor are implemented to find the optimal values of geometric parameters. The effect of rotation of the distributor on sedimentation efficiency is also investigated. It reveals that the effects of blockage ratio and angle of distributor on sedimentation efficiency are considerable, while rotation effect can be neglected, and that calculated efficiencies show good agreements with those of experiment, qualitatively.

1. 서 론

침전공정은 중력의 힘을 이용하여 고체와 액체를 분리하는 가장 원천적이고 간단한 수처리 방법이다. 현재 국내에서 99%이상 사용되고 있는 침전조는 자연 침강 및 밀도차를 이용한 방법으로써 날로 늘어나는 공장 및 생활 오·폐수를 처리하기 위해서는 처리량의 증가에 비례해 침전조의 설치면적을 증가시켜야 하며, 하수 및 오수처리장의 경우, 침전조의 효율증가를 위해 1차 및 2차 침전조와 농축조 그리고 경우에 따라서

는 화학적 침전조가 사용되기도 한다.

침전조의 형태는 장방형과 원형으로 구분하는데, 본 연구에서는 원형을 대상으로 하였다.

침전조는 복잡한 기계장치를 포함하지 않아 단순한 구조물로만 여겨지고 상수도 하수도 시설 기준에도 설계기준이 체류시간 및 고형부하율 등으로만 설정되어 있는 등, 그 기술적 중요성이 과소 평가되고 있다. 이는 침전현상에 대한 이해부족에서 비롯되며, 실제로 침전조에서 발생하는 물리적 현상은 매우 복잡하고 중요하다. 침전조 내에서는 입자들끼리의 응집과 침전이 지속적으로 발생되어 입자의 크기가 시간에 따라 변화하는 복잡한 현상이 발생하고 있다. 그러므로, 침전조 내의 현상을 정확히 예측하고 침전조를 효율적으로 설계하고 운전하기 위해서는 침전조 내의 유동현상에 따

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학과

*** 중앙종합기계(주) 환경기술연구소

책임저자 E-mail : kykim@inha.ac.kr

른 입자의 거동에 대한 연구가 필요하며, 이를 바탕으로 보다 효율적인 응집 및 침전방법의 개발이 이루어져야 한다.

침전조 내에서의 유체거동에 대한 실험적, 수치적인 연구는 활발하게 수행되어 왔다. 초기에는 Hazen⁽¹⁾과 Camp⁽²⁾ 등이 복잡한 흐름을 단순화하여 침전조를 설계하였고, Anderson⁽³⁾과 Larsen⁽⁴⁾은 복잡한 침전조 내부의 밀도류에 의한 순환현상과 침전물의 재부유 현상을 연구하였으며, Heinke⁽⁵⁾와 Lakehal 등⁽⁶⁾에 의해 단락류 현상이 밝혀지면서 침전조 내의 복잡한 유동특성에 대한 많은 실험적인 연구가 수행되었다. Iman⁽⁷⁾은 침전조 폭 대 수심비가 약 1.0 정도인 실험실 모형에서 레이저 유속계로 유속을 측정하여 침전조 내부의 유동현상을 규명하였고, Stamou와 Adams⁽⁸⁾는 보다 현장조건에 부합하는 유출부 형상에 대해 농도분포 및 유속분포를 색소추적방법, 흐름가시화, 그리고 레이저 유속계를 사용하여 측정하였다. 또한 레이놀즈 수와 침전조 폭 대 수심비 등의 변화에 따른 영향을 규명하였다. Lyn과 Rodi⁽⁹⁾는 2차원 레이저 유속계를 사용하여 침전조 유입부에서의 흐름 및 난류특성을 세부적으로 측정하여 유입부에서의 유동현상은 매우 복잡한 3차원적인 특성을 보이며 난류강도가 높은 것으로 보고하고 있다. Krebs 등⁽¹⁰⁾은 밀도차에 의한 비균등 유동현상을 개선하기 위해 새로운 입구형상을 제안하고 이에 대한 모형실험 및 수치적 연구를 수행하였다. 그들은 입구 에너지속 (energy flux)을 최소화하기 위해서

는 입구가 바닥에 가까이 위치해야 하며, 두 개의 각진 막대 (angle bar)를 설치하여 입구에서 난류에너지의 소산을 유발하고, 속도변동을 감소시킴으로써 침전 효율이 증가함을 보였다.

측정기기의 발달에 힘입어 실험에서는 3차원 유속을 정밀하게 측정할 수 있는 ADV (Acoustic Doppler Velocimeter)나 LDV (Laser Doppler Velocimeter)를 이용한 정밀한 측정이 이루어지고 있으나, 대부분의 모형실험에서는 순수한 물을 작동유체로 사용하기 때문에 부유물질이 존재하는 침전조의 유동구조를 정확하게 모사할 수 없다는 문제가 있다.

본 연구에서는 물과 부유물의 이상 (two-phase)유동에 대한 실험 및 유동해석 전용 소프트웨어인 CFX-4.4를 이용한 해석적 연구를 수행하였다. 기존의 침전조 구조와 개선된 구조들, 즉 정류벽에 단면축소부가 있는 경우, 분배판이 설치된 경우와 분배판이 회전하는 경우에 대해 각각의 침전효율을 비교하여 단면축소부와 분배판이 침전효율에 미치는 영향을 규명하였다. 또한, 단면축소율과 분배판의 각도변화에 따른 침전효율을 비교하여 최적의 단면축소율과 분배판의 각도를 제시하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

침전조의 형상에 따른 침전효율을 비교하기 위해 사용한 실험장치의 구성은 Fig. 1에 나타낸 바와 같다.

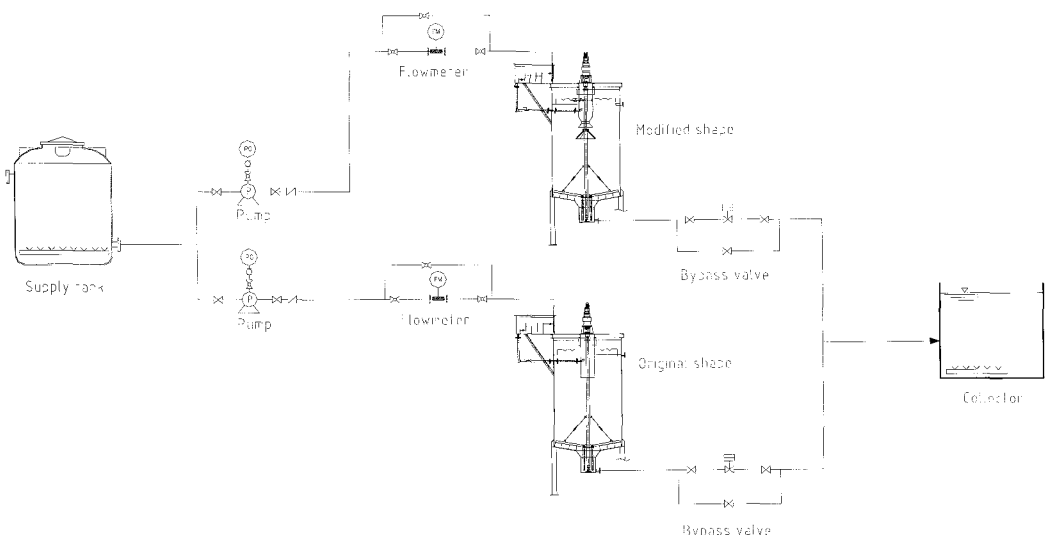


Fig. 1 Schematic of experimental setup

원수 공급탱크 (supply tank)는 PVC로 제작된 용량 5m³의 원형탱크이며, 유입된 원수가 완전 혼합되어 농도가 일정하게 유지되도록 공기공급장치를 설치하였다. 또한, 원수 공급탱크에 유입되는 원수의 양을 자동으로 조절하기 위해 수위에 따른 유입 펌프 자동 조절장치를 설치하였으며, 원수 공급탱크로부터 각각의 침전조로 공급되는 유량을 조절하기 위해 펌프의 회전수를 조절할 수 있는 센서를 장착하였다. 그리고 각각의 침전조에 유입되는 원수의 양을 동일하게 하기 위해 침전조 각각에 펌프를 설치하여 원수 유입량의 불균형으로 인한 오차를 최소화하였다.

침전조는 두 개를 설치하여 동시에 두 가지 형상의 실험이 가능하도록 하였고, 침전조의 용량은 8m³이며 내부의 정류벽 형상과 분배판을 제외한 외형은 동일하게 제작하였다. 각각의 침전조 상단에는 유입되는 원수의 원활한 공급을 위해 혼화조 및 분배조가 설치되어 있으며, 침전조 내에는 원수의 혼합을 위한 스크래퍼와 감속기가 설치되어 있다. 침전물은 침전조 중앙의 배출구를 통하여 배출되어 포집기 (collector)에 저장된 후 건조과정을 거쳐 침전량을 측정하게 되며, 침전조 하단에는 전동 밸브를 설치하여 실험자가 실험조건에 따라 배출량을 조절할 수 있도록 하였다. 침전물은 원수가 유입된 후 8시간 후에 배출되도록 하였으며, 각각의 형상에 대하여 5회의 실험을 실시하였다.

실험에서 유입수와 처리수의 부유물질 (SS, mg/ℓ) 측정은 수질오염공정시험법 (105℃ 2hr)을 채택하였고, 시료량은 유입수와 처리수 각각 50, 100ml로 하였다.

3. 침전조 형상

Fig. 2는 정류벽에 단면축소부를 설치하고 그 하단에 분배판을 설치한 침전조의 단면구조를 나타내고 있다. 물과 부유물이 혼합된 유동은 중앙에 설치된 관의 상부로부터 유입되어 침전조 내부순환을 거쳐 침전조 벽을 넘어 밖으로 유출된다. 기존의 침전조는 Fig. 3(a)와 같이 정류벽이 수직으로 설치되어 유동이 직접 침전조 바닥을 향해 유입됨으로써 침전물의 재부유 현상이 유발되므로, 새로 설계된 형상에서는 이를 방지하기 위해 Fig. 3(b)~(d)와 같이 정류벽에 단면축소부와 분배판을 설치하여 유동이 바닥으로 직접 유입되지 않도록 함으로써 침전효율의 향상을 도모하였다. 분배판과 단면축소부가 침전효율에 미치는 영향을 파악하기 위해 Fig. 3(b)와 같이 분배판만을 갖는 구조와 Fig. 3(c)와

같이 분배판과 단면축소부를 설치한 경우, 그리고 Fig. 3(d)와 같이 분배판이 회전하는 경우를 각각 계산하였다. 그리고, 단면축소율(D/d)과 분배판의 각도(α)변화에 따른 침전효율을 비교하기 위해 Table 1에 나타낸 바와 같이 세 개의 단면축소율과 세 개의 분배판의 각도를 조합한 다섯 가지 형상의 침전조에 대한 실험 및 계산을 수행하였다.

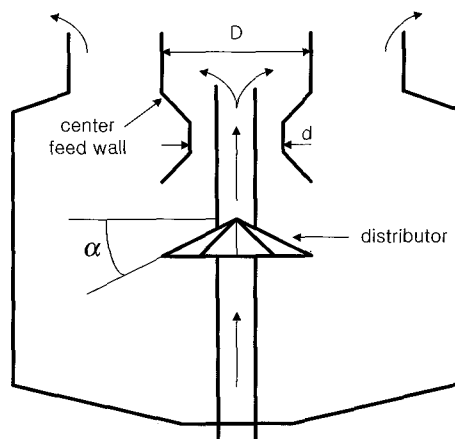


Fig. 2 Geometric shape of sedimentation bed

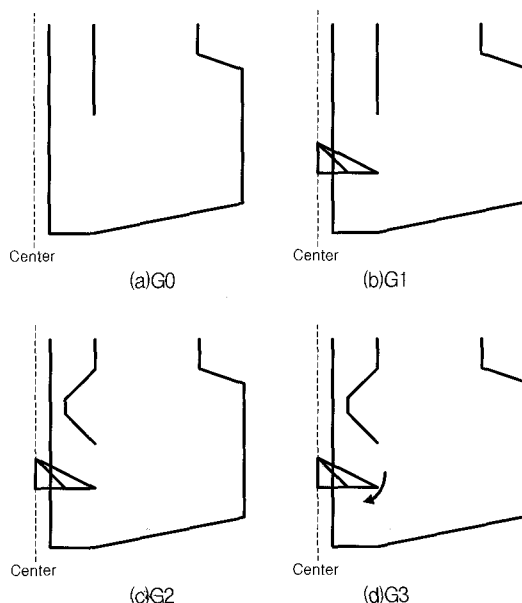


Fig. 3 Computational shapes
 (a) original
 (b) with distributor
 (c) with distributor and blockage ratio
 (d) with rotation of distributor

Table 1 Dimensions of angle of distributor and blockage ratio.

Type	Angle of distributor	Blockage ratio
T1	22.3 °	0.55
T2	33 °	0.55
T3	45 °	0.55
T4	45 °	0.5
T5	45 °	0.67

4. 유동해석

유동해석에서는 부유물의 체적점유율이 0.4%인 물과 부유물의 혼합유체를 작동유체로 사용하였다. 실제 유동에서는 다양한 비중과 입자직경을 갖는 부유물이 혼합되어 있으나 유동해석에서는 비중 및 입자직경에 대한 분포분석실험으로부터 얻은 부유물의 대표비중 및 대표입자직경을 사용하였는데, 비중은 1.01, 입자직경은 $15.61 \mu\text{m}$ 이며, 점도는 $0.7\text{Mpa} \cdot \text{s}$ 이다.

4.1. 지배방정식

침전조의 형상과 시간에 따른 침전효과를 해석하기 위해 물과 부유물 각각에 대하여 삼차원, 비압축성, 비정상유동에 대한 시간평균 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식을 이용하였으며, 난류모델로는 일반적으로 널리 사용되는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 계산시간을 절감하였다. 여기서 물과 부유물의 질량 및 운동량 보존방정식은 SIMPLE 방법과 결합된 Spalding⁽¹¹⁾의 IPSA (InterPhase Slip Algorithm)를 이용해 계산되며, 물과 부유물 입자사이의 운동량 교환을 고려하여 각각의 운동량 방정식의 생성항에 물과 부유물 사이의 항력과 상대속도의 곱으로 정의되는 운동량 교환항을 사용하였다⁽¹²⁾. 또한 지배방정식의 이산화방법으로는 유한체적법 (finite volume method)을 사용하였다.

4.2. 경계조건 및 해석영역

입구경계조건으로는 현재 사용되고 있는 침전조의 처리 유량을 바탕으로 0.567 m/s 의 균일유속조건을 사용하였으며, 출구조건으로는 정화된 물이 대기로 흘러나가므로 일정한압력조건으로 대기압을 사용하였다. 벽 조건으로는 접촉 (no slip)조건을 사용하였고, 대칭면에서는 대칭 (symmetry)조건을 이용하였다. 그리고, 유체와 대기가 접한 자유표면은 미끄럼 (slip) 조건으로

지정하였다. 체적점유율의 계산을 위해 분포분석실험으로부터 물과 부유물의 초기치를 각각 99.6%와 0.4%로 가정하였으며 입구에서 동일한 분포를 가진 혼합물이 유입되는 조건을 사용하였다.

계산시간의 절감을 위해 형상의 대칭성을 고려하여 전체 침전조의 1/4부분만을 해석하였으며 효율적인 격자생성을 위해 회전판과 정류벽의 두께를 무시하였다.

5. 결과 및 고찰

침전현상은 중력에 의한 자연침강과 부유물 사이의 화학적 반응에 의한 고형물 (floc)의 형성에 의해 이루어진다. 본 연구에서는 침전의 주요 구동력을 중력으로 간주하여 부유물 사이의 화학적 반응은 고려하지 않았다. 계산에 사용된 격자수는 $60 \times 90 \times 20$ 개로 총 108,000개가 사용되었으며, 펜티엄 III 1GHZ CPU를 사용하여 한번의 계산에 약 48시간이 소요되었다.

Fig. 4는 Fig. 3에 나타난 네 가지 형상, 즉 기존의 형상, 단면축소부와 분배판을 갖는 형상 및 분배판이 0.44 rad/s 의 속도로 회전하는 경우에 대해 해석을 통해 얻은 깊이에 따른 부유물의 체적점유율을 비교한 결과이다. 그림에서 h 는 침전조 바닥으로부터의 높이를 나타낸다. 기존의 형상에 비해 분배판과 단면축소부를 설치한 세 가지 형상에서 부유물의 체적점유율이 침전조 바닥으로부터 20cm 이내의 구역에서 현저히 증가하고 있으며, 분배판의 회전은 체적점유율 분포에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 또한 침전조의 바닥으로부터 27cm 이상의 구역에서는 체적점유율의 변화가 무시할 수 있을 정도로 작아 침전이 거의 일어나지 않음을 알 수 있다.

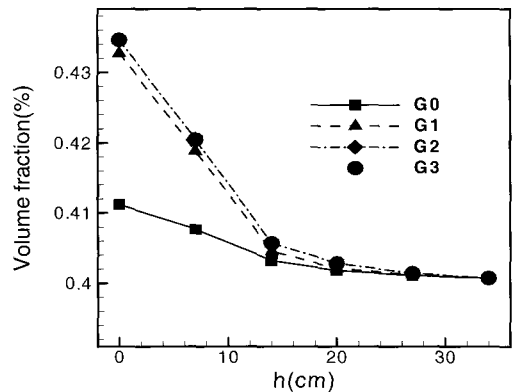


Fig. 4 Distributions of volume fractions of sludge for G types

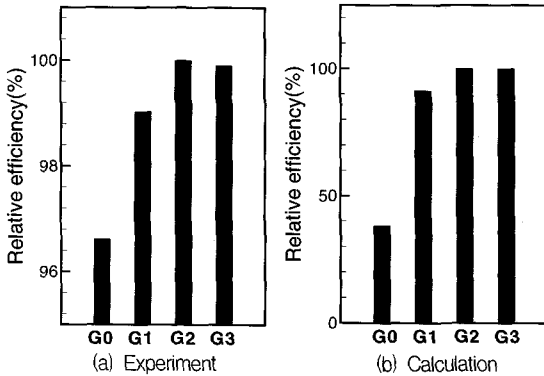


Fig. 5 Comparisons of relative efficiency for G type sedimentation bed

Fig. 5에는 유동해석과 실험으로부터 얻은 침전효율을 G2를 기준으로 한 상대효율로 나타내었다. 여기서 침전효율은 입구로 들어오는 부유물의 총량에 대한 침전된 부유물의 비로 정의하였으며, 상대효율은 최대효율을 갖는 형상의 침전효율에 대한 다른 형상의 침전효율의 비를 나타낸다. 유동해석에서 얻은 침전물의 양은 앞서 살펴본 바와 같이, 침전조 바닥으로부터 27 cm 이내에서 부유물의 체적점유율과 밀도의 곱으로 계산하였다. 단면축소부와 분배판이 설치된 경우, 기존형상보다 높은 침전효율을 보이고 있는데, 이는 Krebs⁽¹⁰⁾이 보고한 바와 같이 분배판의 설치로 인해 큰 와(eddy)가 작은 와로 급속히 쪼개짐으로써 에너지 소산(dissipation of kinetic energy)을 촉진하여 속도변동(velocity fluctuation)을 감소시키고, 이 결과 침전조 내부의 유동이 안정되어 침전효율이 증가한 것으로 사료된다.

기존의 형상(G0)에 비해 단면축소부와 분배판을 설치한 형상(G2)의 침전효율증가가 정성적으로 잘 일치하고 있으며, 분배판의 회전(G3)은 침전효율에 영향을 미치고 있지 않음은 정확히 일치하고 있다. 여기서 상대효율의 기준이 되는 G2형상의 절대효율은 유동해석과 실험으로부터 각각 0.671%와 97.3%로 정량적으로 매우 큰 차이를 보이는데, 이는 충분히 예상된 결과로서 실험에서는 8시간 동안의 침전량을 기준으로 침전효율을 산출한 반면, 해석에서는 비정상유동의 해석에 소요되는 계산시간의 절감을 위해 초기 1000초 동안의 침전량만을 기준으로 침전효율을 계산하였으므로 시간에 따른 침전량의 차이가 침전효율의 정량적인 차이를 유발하는 주된 원인이다. 실험에 사용된 부유물의 밀도 및 입자직경은 상당히 다양한데 비해 해석에서는

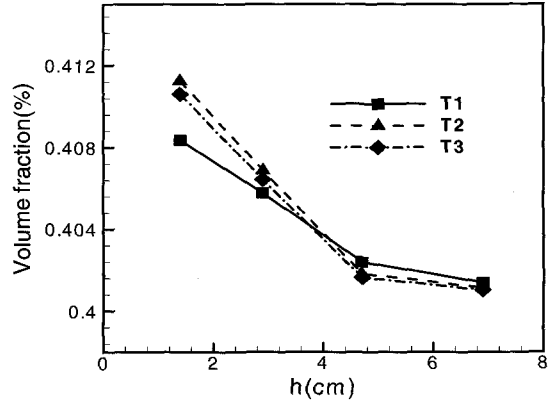


Fig. 6 Effects of angle of distributor (blockage ratio = 0.55)

이를 단순화하여 대표값을 사용한 것도 또 하나의 요인이 될 수 있다. 이러한 이유로 인하여 유동해석과 실험의 정량적인 차이는 필연적인 수밖에 없으며, 침전량은 시간에 따라 증가한다는 점을 고려해 볼 때 침전조의 형상변화에 따른 침전효율의 정성적인 경향은 일정하게 유지될 것으로 예상할 수 있다. 따라서, 유동해석을 바탕으로 최적의 침전효율을 갖는 형상을 설계하고자 하는 본 연구의 목적에 비추어 볼 때 정성적인 경향의 정확한 예측은 만족할 만한 결과이다.

이를 바탕으로 침전조에 설치된 정류벽의 단면축소율과 분배판의 각도가 침전효율에 미치는 영향을 비교하여 최적의 단면축소율과 분배판의 각도를 찾기 위해 Table 1에 나타낸 바와 같이 단면축소율이 0.5, 0.55, 0.67인 경우와 분배판의 각도가 22.3°, 33°, 45°인 경우에 대해 계산하였다.

Fig. 6은 정류벽의 단면축소율을 0.55로 고정시키고, 분배판의 각도를 변화시켜가며 계산한 침전조 바닥으로부터의 부유물의 체적점유율을 나타내고 있다. 단면축소율이 일정할 때, 분배판의 각도가 33°와 45°인 경우가 22.3°인 경우에 비해 침전효과가 크게 나타났으며, 33°인 경우가 45°인 경우에 비해 약간 더 높은 체적점유율을 보이고 있다. 이는 분배판 각도가 증가됨에 따라 분배판을 지난 유동에서 난류의 생성이 억제되어 중력에 의한 침전효과가 증가하기 때문으로 사료된다.

Fig. 7은 분배판의 각도변화에 따른 실험과 계산의 결과를 T2를 기준으로 한 상대효율로 나타내고 있는데 유동해석과 실험으로부터 얻은 절대효율은 각각 0.091%와 97.94%이다. 앞서 언급된 바와 같이, 분배판의 각도가 33°인 경우 실험 및 계산에서 모두 최대의 침전효율을 나타내고 있으며, 분배판의 각도에 따른

침전효율변화의 정성적인 경향이 동일하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 단면축소율이 0.55인 경우, 분배판의 각도 변화에 따른 난류운동에너지의 분포를 나타낸다. 세 경우 모두 단면축소부를 지난 유동에서 유로의 급격한 확대와 분배판과의 충돌로 인해 난류운동에너지가 급격히 증가하는 경향을 보이고 있다. 분배판의 각도가 22.3°인 경우 침전조 벽에서 난류운동에너지의 구배가 상당히 커짐을 알 수 있으며, 분배판의 각도를 증가시킬수록 유동이 벽과 직접 충돌하는 현상을 완화시킴으로써 난류생성이 억제되고 있음을 볼 수 있다. 또한 분배판의 각도가 45°인 경우 넓은 범위에 걸쳐 난류에너지가 생성되고 있음을 알 수 있다.

이 결과는 침전효율이 난류운동에너지의 분포에 상당한 영향을 받는다고 보고한 Krebs 등⁽¹⁰⁾과 Adams와 Rodi⁽¹³⁾의 결과와 잘 일치하고 있다. 이러한 결과로 볼

때, 난류생성의 제어를 통해 질량혼합을 억제시킴으로써 침전성능의 향상을 도모할 수 있는 것으로 사료된다.

Fig. 9는 분배판의 각도를 45°로 고정시킨 경우 단면축소율의 변화가 침전능력에 미치는 영향을 보여주고 있다. 단면축소율이 0.55인 경우의 침전효율이 가장 크게 나타남을 알 수 있으며, 이는 단면축소율이 0.5인 경우, 가속된 유동이 분배판과 충돌함으로써 난류생성이 증가하여 침전효율의 저하를 유발하며, 단면축소율이 0.67인 경우는 유속의 감소로 인해 유동이 충분히 확산되지 못하므로 중력에 의한 침전이 일어날 수 있는 침전면적이 감소하기 때문으로 판단된다.

Fig. 10은 단면축소율의 변화에 따른 실험과 계산의 결과를 T3를 기준으로 한 상대효율로 나타내고 있는데 유동해석과 실험으로부터 구한 절대효율은 각각 0.088%와 97.6%이다. 실험과 계산 모두에서 침전효율은 단면축소율이 0.55인 경우에 최대값을 보이고 있으며, 침전

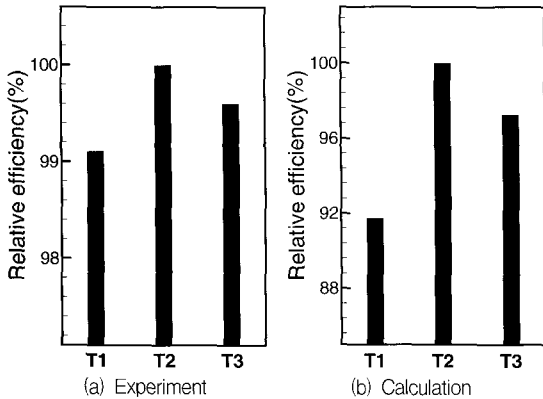


Fig. 7 Comparisons of relative efficiency for different angle of distributor

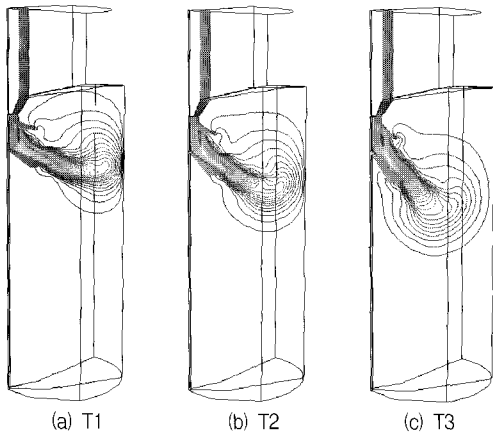


Fig. 8 Turbulent kinetic energy contours

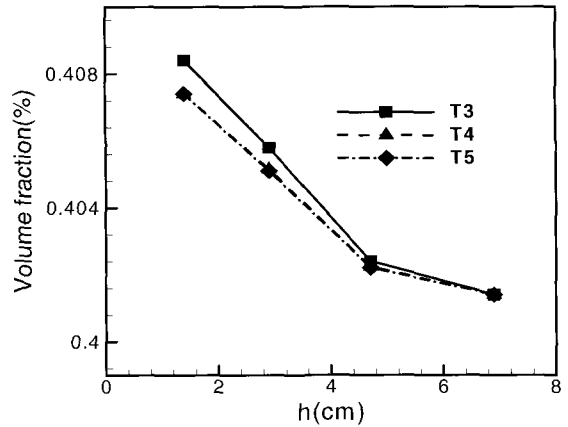


Fig. 9 Effects of blockage ratio (angle of distributor = 45°)

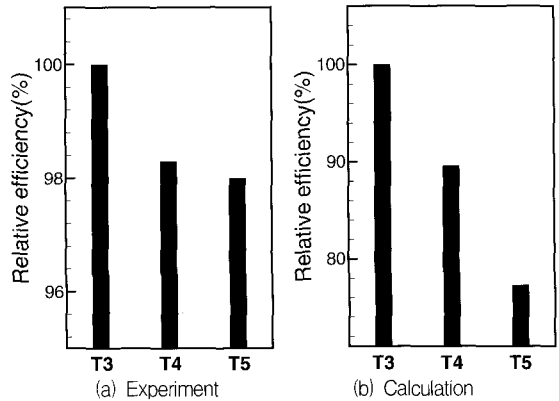


Fig. 10 Comparisons of relative efficiency for different blockage ratio

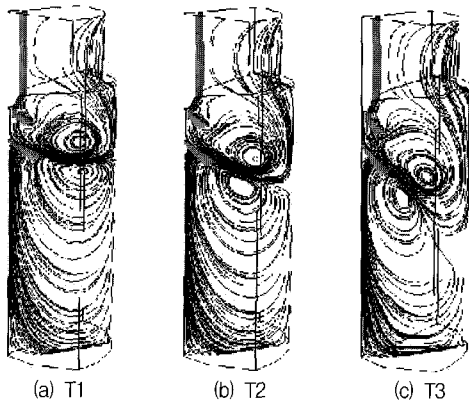


Fig. 11 Streamlines

효율의 정성적인 경향이 동일함을 알 수 있다.

Fig. 11은 분배판의 각도가 다른 세 가지 경우에 대한 유선분포를 나타내고 있다. 세 경우 모두 Lakehal 등⁽⁶⁾이 제시한 바와 같이, 분배판을 기준으로 상부와 하부의 유동으로 나뉘는 단락류의 발생을 볼 수 있으며, 자연침전면적으로 정의되는 상부와 하부의 유동 경계면은 분배판의 각도가 45°인 경우 최대이지만 그림에서 볼 수 있듯이 이 경우 침전조 바닥근처의 유선이 조밀하게 분포함으로써 유속이 증가하고, 유속의 증가는 침전효율을 저하시키는 요인이 된다.

6. 결론

기존의 침전조 형상과 단면축소부와 분배판을 갖는 개선된 형상에 대한 실험 및 유동해석을 통해 침전조의 침전효율을 비교하였다. 기존 형상에 비해 분배판과 정류벽에 단면축소부를 설치한 개선된 형상에서 실험결과 침전효율이 3.5% 증가하였고, 분배판의 회전효과는 침전효율에 큰 영향을 미치지 않았다. 다섯 가지 조합의 단면축소율과 분배판의 각도에 대한 계산과 실험의 결과로부터, 단면축소율이 0.55, 분배판의 각도가 33°인 경우의 침전효율이 다른 형상에 비해 증가함을 알 수 있으며, 실험결과 최대 1.5% 침전효율이 증가함을 확인하였다. 단면축소부와 분배판은 단락류의 형성과 유속 등 유동구조와 난류에너지의 생성에 민감한 영향을 미치며, 계산 결과 단면축소율이 0.55, 분배판의 각도가 33°인 경우 다른 형상에 비해 최대 1.49%의 난류운동에너지 감소효과를 보였다. 이러한 유동구조의 변화는 자연침전면적의 크기를 변화시키고 난류에너지 생성을 억제하여 침전효율을 증가시킨

다. 본 수치해석의 결과는 실험의 결과와 정량적으로는 차이를 나타내나 정성적으로는 잘 일치하여 침전조의 형상개선을 위한 연구에 유용한 수단이 될 수 있음을 알 수 있다.

참고문헌

- (1) Hazen, A., 1904, "On Sedimentation," Trans. ASCE 53, pp. 45~71.
- (2) Camp, T. R., 1945, "Sedimentation and the Design of Settling Tanks," In proceedings American Society of Civil Engineering, Paper No. 2285, pp. 895~958.
- (3) Anderson, N. E., 1945, "Design of Settling Tanks for Activated Sludge," J. Sewage Works, Vol. 17, No. 1, pp. 50~63.
- (4) Larsen, P., 1977, *On the Hydraulics of Rectangular Settling Basins*, Report No. 1001, Dept. of Water Resources Engineering, Lund Inst. of Tech., Lund, Sweden.
- (5) Heinke, G. W., 1974, *Design and Performance Criteria for Settling Tanks for Removal of Physical-chemical Flocs*, Environment Canada, ISBN 0662007298.
- (6) Djamel Lakehal, Peter Krebs, Johan Krijgsman, and Wolfgang Rodi, 1999, "Computing Shear Flow and Sludge Blanket in Secondary Clarifiers," J. of Hydraulic Engineering, pp. 253~262.
- (7) Iman, E., 1991, *Numerical Modeling of Rectangular Clarifiers*, Ph.D. Thesis, U. of Windsor, Ontario, Canada.
- (8) Adams, E. W., and Stamou A. I., 1988, *A Study of flow in a Two-Dimensional Model Settling Basins*, Report No. SFB 210/E/40, Univ. of Karlsruhe, Germany.
- (9) Lyn, D. A., and Rodi, W., 1990, "Turbulence Measurements in a Model Settling Tank," J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 1, pp. 3~21.
- (10) Krebs, P., Vischer, D., and Gujer, W., 1995, "Inlet-Structure Design for Final Clarifiers," J. of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 8, pp. 558~564.

- (11) Spalding, D. B., 1976, *The calculation of free-convection phenomena in gas-liquid mixtures*, ICHMT seminar, Dubrovnik
- (12) *CFX Solver manual*, pp. 342~344.
- (13) Adams, E. W., and Rodi, W., 1990, "Modeling Flow and Mixing in Sedimentation Tanks," *J. of hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 7, pp. 895~913.