

반응면기법을 이용한 침전조의 형상최적설계

김홍민* · 최승만* · 김광용**

Shape Optimization of Sedimentation Tank Using Response Surface Method

Hong-Min Kim*, Seung-Man Choi*, Kwang-Yong Kim**

Key Words: Sedimentation tank (침전조), Sedimentation efficiency (침전효율), Blockage ratio (단면축소율), Angle of distributor (분배판의 각도), Center feed wall (정류벽), Volume fraction (체적점유율), Response surface Method (반응면 기법)

ABSTRACT

A numerical procedure for optimizing the shape of three-dimensional sedimentation tank is presented to maximize its sedimentation efficiency. The response surface based optimization is used as an optimization technique with Reynolds-averaged Navier-Stokes analysis for multi-phase flow. Standard $k-\epsilon$ model is used as a turbulence closure. Three design variables such as, tank height to center feed wall diameter ratio, blockage ratio of center feed wall and angle of distributor are chosen as design variables. Sedimentation efficiency is defined as an objective function. Full-factorial method is used to determine the training points as a means of design of experiment. Sensitivity of each design variable on the objective function has been evaluated. And, optimal values of the design variables have been obtained.

1. 서론

정수처리 과정에서 침전공정은 중력의 힘을 이용하여 고체와 액체를 분리하는 가장 원초적이고 간단한 방법이다. 현재 국내에서 사용되고 있는 대부분의 침전조는 자연침강 및 밀도차를 이용하므로 날로 늘어나는 공장 및 생활 오·폐수를 처리하기 위해서는 처리량의 증가에 비례해 침전조의 설치면적을 증가시켜야 하지만, 현실적으로 침전조의 면적을 무한히 증가시킨

다는 것은 불가능하므로 제한된 공간 내에서 보다 효율적인 침전조의 개발이 요구되고 있다.

침전조는 복잡한 기계장치를 포함하지 않아 단순한 구조물로만 여겨지고 상수도와 하수도 시설 기준에도 설계기준이 체류시간 및 고품부하율 등으로만 설정되어 있는 등, 그 기술적 중요성이 과소평가되고 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 유동현상을 정확히 예측하여 침전조를 효율적으로 설계하고 운전하기 위해서는 침전조 내의 유동해석

* 인하대학교 기계공학과 대학원

** 인하대학교 기계공학부

책임저자 E-mail : kykim@inha.ac.kr

을 통한 입자의 거동에 대한 연구가 필요하며, 이를 바탕으로 보다 효율적인 응집 및 침전설비의 개발이 이루어져야 한다.

침전조 내에서의 유체거동에 대한 실험적, 수치적인 연구는 활발하게 수행되어 왔다. Heinke⁽¹⁾와 Lakehal 등⁽²⁾은 실험을 통해 침전조 내에서 층상류가 형성됨을 밝혔고, Iman⁽³⁾은 침전조 폭 대 수심비가 약 1.0 정도인 실험실 모형에서 레이저 유속계로 유속을 측정하여 침전조 내부의 유동현상을 규명하였다. Stamou와 Adams⁽⁴⁾는 실제에 가까운 침전조에서의 농도 및 속도분포를 색소추적을 통해 가시화하였으며, 레이저 유속계를 사용하여 정량적인 측정결과를 보고하였다. 또한 레이놀즈수와 침전조 폭 대 수심비 등의 변화에 따른 영향을 실험하였다. Lyn과 Rodi⁽⁵⁾는 이차원 레이저 유속계를 사용하여 침전조 유입부에서의 흐름 및 난류특성을 측정하여 유입부의 유동현상은 매우 복잡한 삼차원적 특성을 보이며 국부적으로 난류강도가 증가한다고 보고하였다. Krebs 등⁽⁶⁾은 밀도차에 의한 비균등 유동 현상을 개선하기 위해 새로운 입구형상을 제안하고 이에 대한 모형실험 및 수치적 연구를 수행하였다. 그들은 입구 에너지속(energy flux)을 최소화하기 위해서는 입구가 바닥에 가까이 위치해야 하며, 두 개의 각진 막대(angle bar)를 설치하여 입구에서 난류에너지의 소산을 유발하고, 속도변동을 감소시킴으로써 침전효율이 증가함을 보였다.

수치적인 연구로, Kim 등⁽⁷⁾은 상용소프트웨어인 FLUENT를 이용하여 장방형 침전지 내의 유출부 형상변화에 따른 유체흐름을 해석하였고, Park 등⁽⁸⁾은 CFX를 이용하여 단순화 된 침전지 내에서의 밀도류를 해석한 바 있다. 그러나 이들의 연구는 침전조의 일부 형상, 또는 지나치게 단순화 된 형상에 대한 해석만을 수행함으로써 복잡한 침전조 내의 장치를 모두 고려한 해석결과를 제시하지는 못하였다. 반면, Kim 등⁽⁹⁾은 실제 침전조 내에 정류벽과 분배판을 갖는 구조에 대한 유동해석을 통해 정류벽과 분배판이 침전효율을 향상시킴을 밝혔으며, 이를 바탕으로 정류벽과 분배판의 형상변화에 따른 5가지의 침전조 형상에 대한 침전효율을 계산하여, 최대의 효율을 갖는 정류벽과 분배판의 형상을 제안한 바 있다.

본 연구에서는 상용소프트웨어인 CFX-5.6을 이용해 물과 슬러지의 이상(two-phase)유동을 해석하고, 이를 바탕으로 최적설계를 수행하였다. 설계변

수는 정류벽의 단면축소율(D/d), 분배판의 각도(α) 그리고 침전조의 높이와 정류벽의 지름비(H/D) 등 세 개이며, 목적함수로는 침전효율을 사용하였다. 계산결과를 바탕으로 각 설계변수가 침전효율에 미치는 민감도 분석 및 최적설계를 수행하여 침전효율이 최대가 되는 설계변수의 값을 제시하였다.

2. 유동해석

선행연구에서 Kim 등⁽⁹⁾은 상용소프트웨어인 CFX를 이용한 물과 슬러지의 이상유동해석을 통해 침전효율을 계산하였고, 이를 실험결과와 비교함으로써, CFX가 침전조 내의 이상유동해석에 유용한 수단이 될 수 있음을 증명한 바 있다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 슬러지의 체적점유율이 0.4%인 물과 슬러지의 이상유동을 CFX를 이용하여 해석하였다. 실제 유동에서는 다양한 비중과 입자직경을 갖는 슬러지가 혼합되어 있으나 유동해석에서는 비중 및 입자직경에 대한 분포분석실험으로부터 얻은 슬러지의 대표비중 및 대표입자직경을 사용하였는데, 비중은 1.4, 입자직경은 72.02 μm 이며, 점도는 250 Mpa · s이다.

2.1 지배방정식

침전조의 형상과 시간에 따른 침전효과를 해석하기 위해 물과 슬러지 각각에 대하여 삼차원, 비압축성, 비정상유동에 대한 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식과 이상유동해석에 사용되는 체적보존 방정식은 다음과 같다.

연속방정식(Continuity equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma_\alpha \rho_\alpha) + \nabla \cdot (\gamma_\alpha \rho_\alpha \overline{U}_\alpha) = 0 \quad (1)$$

운동량방정식(Momentum equation)

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\gamma_\alpha \rho_\alpha \overline{U}_\alpha) + \nabla \cdot (\gamma_\alpha (\rho_\alpha \overline{U}_\alpha \otimes \overline{U}_\alpha)) \\ & = -\gamma_\alpha \nabla P_\alpha + \nabla \cdot (\gamma_\alpha \mu_\alpha (\nabla \overline{U}_\alpha + (\nabla \overline{U}_\alpha)^T)) + \overline{M}_\alpha \end{aligned} \quad (2)$$

체적보존방정식 (volume conservation equation)

$$\sum_{\alpha=1}^{N_p} \gamma_{\alpha} = 1 \quad (3)$$

여기서, γ_{α} , ρ_{α} , P_{α} 및 \vec{U}_{α} 는 각각 각 상의 체적점유율, 밀도, 압력 및 속도벡터이고, \vec{M}_{α} 는 서로 다른 상 사이의 운동량 교환항으로 다음과 같다.

$$\vec{M}_{\alpha} = -\frac{C_D}{8} A_{\alpha\beta} \rho_{\alpha} |\vec{U}_{\beta} - \vec{U}_{\alpha}| (\vec{U}_{\beta} - \vec{U}_{\alpha}) \quad (4)$$

$A_{\alpha\beta}$ 는 두 상이 공유하고 있는 면적이며, C_D 는 항력 계수로써 다음과 같이 수정된 Schiller-Naumann 모델을 사용하여 계산하였다.

$$C_D = \max\left(\frac{24}{Re}(1 + 0.15Re^{0.687}), 0.44\right) \quad (5)$$

식 (1)~(3)에서 미지수는 속도벡터의 세 방향 성분 U_{α} , V_{α} , W_{α} 와 γ_{α} , P_{α} 이며, 전체 미지수의 개수는 $5 \times N_p$ 이다 (N_p 는 상의 개수). 반면, 방정식의 개수는 $4 \times N_p + 1$ 개이므로, $N_p - 1$ 개의 방정식이 추가로 필요하다. 따라서, 다음과 같이 압력에 대한 추가적인 방정식이 사용되었다.

$$P_{\alpha} = P, \quad \alpha = 1, \dots, N_p \quad (6)$$

난류모델로는 일반적으로 널리 사용되는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 계산시간을 절감하였다.

2.2 해석영역 및 경계조건

Fig. 1은 정류벽에 단면축소부를 설치하고 그 하단에 분배판을 설치한 침전조의 단면구조를 나타내고 있다. 물과 슬러지가 혼합된 유동은 중앙의 상부로부터 유입되어 침전조 내부순환을 거쳐 우측의 침전조 벽을 넘어 밖으로 유출된다. 정류벽의 단면 축소부와 분배판은 유동이 바닥으로 직접 유입되지 않도록 함으로써 침전된 슬러지가 재부유하는 현상을 방지하여 침전효율의 향상을 도모한다.

격자구조는 형상의 대칭성을 고려하여 Fig. 2와 같

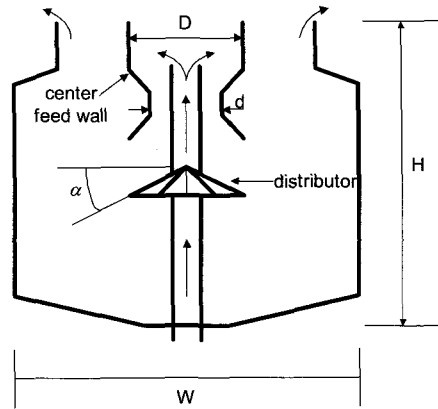


Fig. 1 Shape of sedimentation tank

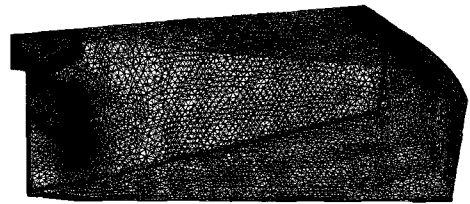


Fig. 2 Grid system

이 전체의 1/12부분을 비정렬격자 (unstructured grid)를 이용하여 구성하였으며, 효율적인 격자생성을 위해 회전판과 원통의 두께를 무시하였다. 또한, 속도구배가 큰 정류벽과 분배판 주위에 조밀격자를 사용함으로써 수치에러 (numerical error)를 최소화 하였다.

입구경계조건으로는 현재 사용되고 있는 침전조의 처리 유량을 바탕으로 0.45 m/s의 균일유속조건을 사용하였으며, 출구조건으로는 정화된 물이 대기로 흘러나가므로 일정 압력조건으로 대기압을 사용하였다. 벽에서는 점착조건을 사용하였고, 대칭면에서는 대칭조건을 이용하였다. 그리고, 유체와 대기가 접한 자유표면은 미끄럼조건으로 지정하였다. 체적점유율의 계산을 위해 분포분석실험으로부터 물과 슬러지의 초기치를 각각 99.6%와 0.4%로 가정하였으며 입구에서 동일한 분포를 가진 혼합물이 유입되는 조건을 사용하였다.

3. 최적설계기법

3.1 반응면기법 (Response surface method)

본 연구에서 사용된 반응면기법은 최근 단일 또는

다목적 최적설계에 많이 적용^{(10)~(12)}되는 방법으로, 목적함수를 매끄러운 다항 함수로 모델링 하기 위해 물리적 또는 수치적 실험을 통하여 도출된 결과들을 이용하는 일련의 수리통계적 기법이다. 원래는 실험으로부터 관찰된 값들의 경험적인 관계식을 만들기 위해 이용되었지만, 한정된 수의 실험으로 임의의 공간 내의 반응을 모델링함으로써 실험의 시행횟수를 줄일 수 있다는 특징이 방대한 해석을 필요로 하는 최적설계에 적용되면서 널리 이용되고 있다.

반응면 함수는 일반적으로 다항식의 형태를 갖고 있으며, 각 항의 미지 상수는 회귀분석을 통하여 구하게 된다. 이차 다항식으로 반응면 모델을 형성할 경우 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (7)$$

여기서 x_i 는 설계변수, σ 는 측정된 반응값이고, n 은 설계변수의 수를 나타낸다. 위 식의 계수 (β)는 실험 또는 수치해석의 결과로부터 최소자승법 (least square method)을 사용하여 결정된다. 본 연구에서 사용된 반응면기법의 전체적인 흐름을 Fig. 3에 나타내었다.

3.2 설계변수 및 목적함수

수치최적설계기법을 수행하기 위해서는 목적함수와 설계변수 등이 정의되어야 한다. Fig. 1과 같은 침전조 형상에 대한 형상변수는 모두 5개로 침전조의 높이 (H)와 직경 (W), 중앙정류벽의 직경 (D)과 단면

Table 1 Design variables and design spaces

Lower limit	Design variable	Upper limit
0.95	H/D	1.27
1.49	D/d	2.0
22.3°	α	45°

축소부의 직경 (d), 그리고 분배판의 각도 (α)이다. 본 연구에서는 침전조의 직경과 높이를 고정시키고, 나머지 변수들로 설계변수를 구성하여 H/D, D/d, 및 α 로 정의되는 세 개의 설계변수를 사용하였으며, 각 설계변수의 범위는 Table 1에 나타내었다. 또한, 유동해석에 필요한 설계점은 실험설계법 (design of experiment) 중 완전계승법 (full factorial method)을 이용하여 27개의 실험점을 선택하였다.

목적함수는 침전효율로서 다음과 같이 정의하였다.

$$\eta = \frac{m_s}{m_i} \times 100 \quad (8)$$

여기서 m_i 는 침전조 내의 총 슬러지 무게이며, m_s 는 침전조 바닥으로부터 1 m 이내의 슬러지 무게를 나타낸다.

4. 결과 및 고찰

침전현상은 중력에 의한 자연침강과 슬러지 사이의 화학적 반응에 의한 고형물 (floc)의 형성에 의해 이루어진다. 본 연구에서는 침전의 주요 구동력을 중력으로 간주하여 슬러지 사이의 화학적 반응은 고려하지 않았다. 시간에 따른 침전량을 비교하여, 600초 이후 침전량의 변화가 작음을 확인하였고, 따라서 최적설계는 600초 동안의 유동해석으로부터 얻은 침전량을 이용하여 수행되었다.

계산시간은 Pentium IV 2.4GHz CPU를 사용하여 한번의 계산에 약 48시간이 소요되었다.

4.1 격자테스트

Fig. 4는 격자테스트 결과를 나타낸다. 500초 후 침전조 바닥으로부터의 높이에 따른 슬러지의 체적점 유율을 비교한 결과, 격자수가 1.2×10^5 개 이상에서는 격자의존도가 사라짐을 확인할 수 있다.

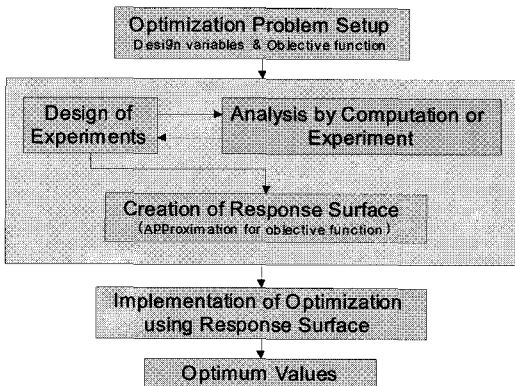


Fig. 3 Response surface method

4.2 민감도 분석 (Sensitivity analysis)

최적설계에 앞서 각 설계변수가 침전효율에 미치는 영향을 분석할 필요가 있다.

Fig. 5는 $H/D=1.27$, $D/d=2$ 일 때 분배판의 각도에 따른 침전효율의 변화를 나타내는데, 분배판의 각도가 커질수록 침전효율이 증가함을 볼 수 있다. 이는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 분배판의 각도가 커질수록 유입면적이 증가함으로써 속도가 감소하고, 유동이 안정되어 침전이 활발하게 일어나기 때문으로 사료된다.

Fig. 6은 $H/D=1.27$, $\alpha=45^\circ$ 인 경우에 대해 정류벽의 단면축소율이 침전효율에 미치는 영향을 나타내는데 그림에서 알 수 있듯이 D/d 는 침전효율에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 $D/d=2$, $\alpha=45^\circ$ 인 경우에 H/D 가 침전효율에 미치는 영향을 나타낸 것이다. H/D 가 증가할수록, 즉 침전조가 깊을수록 좋은 효율을 보이고 있

으나 현실적으로 침전조의 깊이를 한없이 크게 하는 것은 상당한 비용을 요구하므로 여건이 허락하는 한 크게 하는 것이 좋다는 결론을 도출할 수 있다.

4.3 최적설계결과

완전계승법을 이용하여 선택된 27가지의 형상에 대한 유동해석을 수행하여, 각 형상에서의 침전효율을 식 (8)을 이용하여 계산하였다. 반응면 함수를 구하기 위해 식 (7)에 사용되는 각각의 미지상수는 통계학 소프트웨어인 SPSS를 사용하여 결정하였으며, 완성된 반응함수는 t-검정과 adjusted R^2 법⁽¹³⁾을 사용하여 신뢰도를 향상시켰다. Table 2에는 ANOVA와 회귀분석의 결과를 나타내었다. 반응면 기법에 의해 반응값이 정확히 예측된 경우 $0.9 \leq R^2_{adj} \leq 1.0$ 을 갖는다고 알려져 있다⁽¹⁴⁾. 따라서 본 연구에서 형성된 반응면과 설계변수의 최적값은 신뢰할 만한 것으로 판

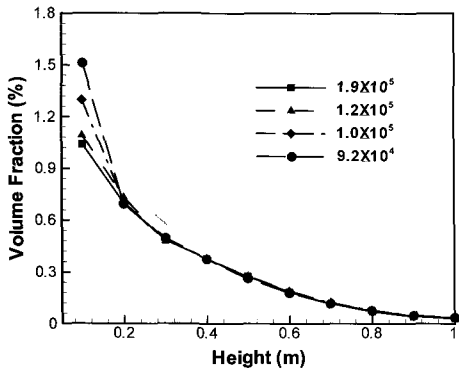


Fig. 4 Grid dependency test

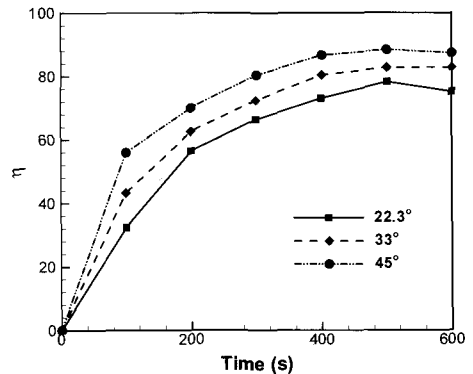


Fig. 5 Sensitivity of angle of distributor ($H/D=1.27$, $D/d=2.0$)

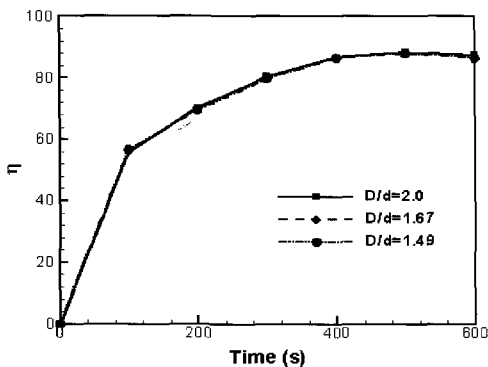


Fig. 6 Sensitivity of blockage ratio ($H/D=1.27$, $\alpha=45^\circ$)

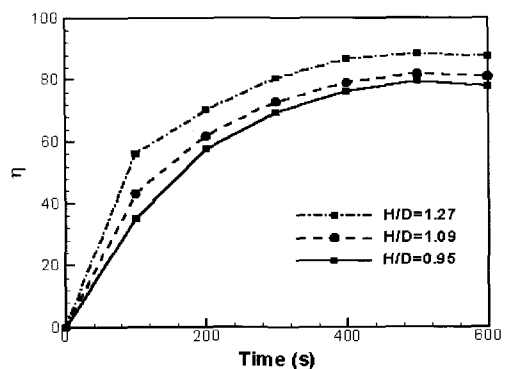


Fig. 7 Sensitivity of tank height ($D/d=2.0$, $\alpha=45^\circ$)

단된다. 이를 바탕으로 최적설계를 수행하였으며, Table 3에 기준형상과 최적설계를 통해 구한 각 설계변수의 최적값을 나타내었다. 최적설계 결과, 침전효율은 기준형상에 비해 17.1% 증가하였으며, 주어진 설계범위에서 H/D, D/d, α 가 증가할수록 침전효율이 높아지는 것으로 나타났다.

Table 2 Results of ANOVA and regression analysis

R	R ²	R ² _{adj}
0.990	0.979	0.968

Table 3 Optimization results

	H/D	D/d	α	η
Reference	0.95	1.5	22.3°	70.3
Optimal	1.27	2.0	45.0°	87.4

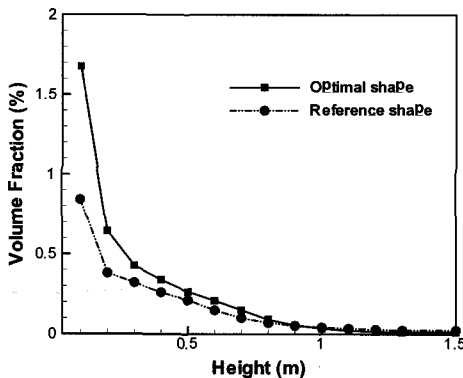


Fig. 8 Comparison of averaged volume fraction

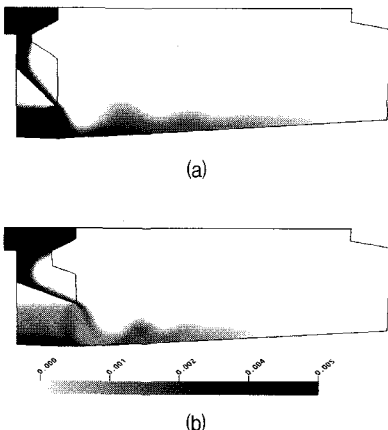


Fig. 9 Local volume fraction distributions of sludge : (a) optimal shape and (b) reference shape

Fig. 8은 기준형상과 최적형상에 대해 침전조 바닥으로부터 선택된 높이에서 평균된 슬러지의 체적점유율을 비교한 것이다. 최적형상은 기준형상에 비해 침전조의 바닥으로부터 0.8 m 높이까지 슬러지의 체적 점유율이 증가함을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 최적형상과 기준형상에서의 국부적인 슬러지의 분포를 보여주고 있다. 최적형상에서 분배판 아래의 체적점유율이 기준형상에 비해 상당히 증가하며, 침전지 외벽쪽으로 넓은 범위에 걸쳐 침전이 이루어짐을 확인할 수 있다.

5. 결론

침전조의 효율향상을 위해 단면축소부와 분배판을 갖는 새로운 형상에 대해 물과 슬러지의 이상유동해석과 최적설계기법을 결합하여 최적설계를 수행하였다. 설계변수는 H/D, D/d, α 등 세 개의 설계변수를 사용하였으며, 완전계승법을 이용하여 선택된 27개의 형상에 대한 유동해석을 수행하여 침전효율을 계산하였다.

설계변수가 침전효율에 미치는 민감도 분석을 수행하여, 침전조의 높이와 정류벽의 각도는 침전효율에 상당한 영향을 미치는 반면, 정류벽의 단면축소율인 D/d는 침전효율에 큰 영향을 미치지 않음을 보였다. 최적설계 결과, 세 개의 설계변수 모두 주어진 설계공간상에서 설계변수의 값이 클수록 침전효율이 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구를 토대로, 향후 보다 많은 설계변수를 고려한 침전조의 최적설계가 가능할 것으로 기대된다.

후 기

본 연구를 위해 협조해 주신 중앙종합기계(주)의 김병희 전무 등 관계자들에게 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Heinke, G. W., 1974, Design and Performance Criteria for Settling Tanks for Removal of Physical-chemical Flocs, Environment Canada, ISBN 0662007298.
- (2) Lakehal, D., Krebs, P., Krijgsman, J.,

- and Rodi, W., 1999, "Computing Shear Flow and Sludge Blanket in Secondary Clarifiers," *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 253~262.
- (3) Iman, E., 1991, Numerical Modeling of Clarifiers, Ph.D. Thesis, U. of Ontario, Canada.
- (4) 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.
- (5) Lyn, D. A., and Rodi, W., 1990, "Turbulence Measurements in a Model Settling Tank," *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, No. 1, pp. 3~21.
- (6) Krebs, P., Vischer, D., and Gujer, W., 1995, "Inlet-Structure Design for Final Clarifiers," *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 121, No.8, pp. 558~564.
- (7) 김진우, 최영균, 김규동, 정태학, 2002, "수치유체 동력학모델을 이용한 장방형 침전지에서의 유체흐름 분석," *한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집*, pp. 341~344.
- (8) 박노석, 안제영, 류승민, 박희경, 2002, "CFD를 이용한 침전지의 밀도류 해석," *한국물환경학회 · 대한상하수도학회 공동춘계학술발표회 논문집*, pp. 79~82.
- (9) 김홍민, 최상철, 김광용, 김병희, 임영택, 2003, "고효율 침전조 설계를 위한 실험 및 수치해석," *유체기계저널*, 6권, 2호, pp. 54~61.
- (10) Ahn, C. S. and Kim, K. Y., 2003, "Aerodynamic Design Optimization of a Compressor Rotor with Navier-Stokes Analysis," *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part A - Journal of Power and Energy*, Vol. 217, pp. 179~184.
- (11) 김홍민, 김광용, 2004, "반응면 기법을 이용한 경사진 리브가 부착된 삼차원 열전달유로의 최적설계," *대한기계학회 논문집 B권*, Vol. 28, No. 7, pp. 879~886.
- (12) Shyy, W., Papila, N., Vaidyanathan, R. and Tucker, K., 2001, "Global Design Optimization for Aerodynamics and Rocket Propulsion Components," *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 37, pp. 59~118.
- (13) Myers, R. H. and Montgomery, C. C., 1995, *Response Surface Methodology: Progress and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley & Sons.
- (14) Guinta, A. A., 1997, "Aircraft Multi-disciplinary Design Optimization Using Design of Experimental Theory and Response Surface Modeling Methods," Ph. D. Dissertant, Department of Aerospace Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA.