

## Hydrocyclone 특성 예측 모델링

양인환, 신치범, 김병희\*  
아주대학교 화학공학과, (주)중앙종합기계\*

### A modeling to predict the characteristics of a hydrocyclone

**I.H. Yang, C.B. Shin, B.H. Kim**

Dept. of Chem. Eng., Ajou university  
Chungang General Machinery Co., Ltd.\*

#### 서론

정수장에서 발생하는 폐기물은 폐기수나 고·액상 슬러지로서 이런 폐기물의 처분은 음용을 목적으로 하는 모든 정수장에서 일상적인 문제로 되고 있다. 현재 슬러지의 발생량을 고려한 정수 처리방법 중 슬러지의 감량화는 거의 초보수준으로, 정수장 슬러지는 중력에 의한 자연침강과 기계적인 탈수 방법이 사용되고 있다. 그러나 슬러지를 처리하는 시설 중 자연중력 농축방식은 시설용량 및 시설비용에 너무 큰 예산이 소모되고 있다. 따라서 원심력을 이용한 고액분리 장치인 Hydrocyclone을 이용하면 시설문제와 비용에 큰 이점을 볼 수 있으므로 가장 적합한 방식이라 볼 수 있다.

Hydrocyclone은 상부에서 접선방향으로 유입되는 실린더부와 이에 연결되어 있는 개구 apex가 있는 원추부로 구성되어 있으며 노즐을 통해 접선방향으로 주입되어 원심운동을 형성하고 이에 의해 높은 분리력 및 배출력을 만들어 낸다. 이러한 hydrocyclone의 간단한 설계로 인하여 산업적 이용에 매우 편리하나 hydrocyclone은 기하학적 모양과 feed의 물리적 특성 및 operating condition 등의 인자들에 의하여 분리력에 많은 영향을 받을 수 있다. 그러므로 hydrocyclone의 정확한 설계를 위하여는 이들의 영향을 상세히 이해하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

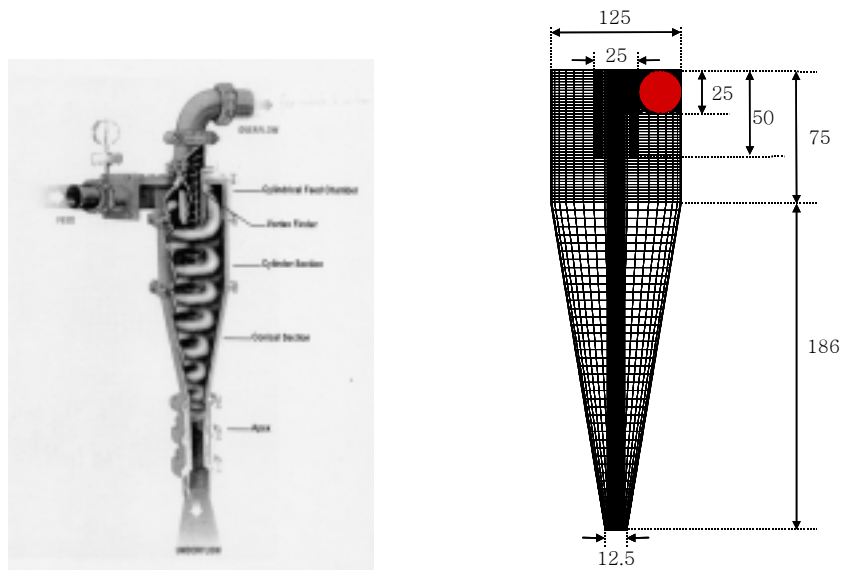


Fig. 1. Cross-sectional view of a hydrocyclone and the finite volume mesh used for calculations with the dimensions of the hydrocyclone.

따라서 본 연구에서는 hydrocyclone의 분리력에 큰 영향을 주는 내부 유동장 대한 전산모사를 통하여 hydrocyclone의 분리력과 유동장에 대한 해석을 하였다.

### 해석모델

Fig. 1은 hydrocyclone의 각 부분에 대한 명칭과 전산모사에 사용된 Hsieh's hydrocyclone[1]에 대한 설계사양 및 mesh를 도시하였다. Hydrocyclone은 크게 원기둥 모양의 부분과 원뿔모양의 부분으로 이루어져 있다. Feed slurry는 inlet pipe를 통하여 원통부분의 접선 방향으로 주입된다. 이 흐름은 hydrocyclone안에서 강한 나선형 모양의 흐름을 만들며 이로 인한 원심력의 증가에 의하여 feed의 solid particle과 liquid를 분리하게 된다.

이러한 분리력을 생성하는 유동장은 중심에서 벗어난 위치에 있는 inlet pipe를 통하여 들어온 유체에 의하여 생성된다. 따라서 hydrocyclone 내부 유동장은 대칭구조가 되지 않는다. 또한 중심부에서는 유체의 흐름이 없는 영역(air core)이 생성된다.

이러한 비대칭성을 해석하기 위하여 3차원 mesh를 전산모사에 적용하였으며 또한 비등방성에 난류 유동에 대하여 수정된 standard k-ε model[3]을 적용하였다.

전산모사는 기본적으로 fully three-dimension Reynolds average continuity와 Reynolds Averaged Navier-Stokes(RANS)가 적용 되었다. Hydrocyclone 내부에서는 유체의 강한 소용돌이 흐름에 의하여 매우 큰 곡선을 가진 유동장이 형성됨으로 일반적인 k-ε식을 적용할 수 없다. 따라서 hydrocyclone의 지름에 따른 영향을 고려한 무차원 상수인 Richardson number( $Ri_t$ )을 이용하였다. 수정된 standard k-ε model은 standard k-ε model[2]에서 dissipation rate에 관한 식을 다음과 같이 Richardson number( $Ri_t$ )를 이용하여 수정하였다.

$$\rho \left( u_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial r\varepsilon}{\partial r} + \frac{u_r}{r} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} \right) \\ = \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( r\mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( r\mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \mu_{eff} \frac{1}{r} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} \right) \right] + \frac{\varepsilon}{k} [C_1 G - C_2 (1 - C_c Ri_t) \rho \varepsilon]$$

$$Ri_t = \frac{k^2}{\varepsilon^2} \frac{u_\theta}{r^2} \frac{\partial(ru_\theta)}{\partial r}$$

$C_c$ 는 실험상수이다.

전산모사에서는 hydrocyclone의 wall에서는 no slip 조건을 주었으며 내부 air core에 부분에서는 slip 조건과 air core에서 hydrocyclone 중심으로 향하는 flux가 없다가 가정했다.

전체 유동장 내에서 wall 주위의 유동장을 해석하기 위하여 standard wall function[2]을 적용하였다. 운전조건은 table 1과 같이 주었다.

Table 1. Operating conditions used for modeling to predict the characteristics of the hydrocyclone.

Viscosity(cp)	Liquid feed (kg/min)	Solid feed (kg/min)	Overflow(kg/min)	Underflow(kg/min)
1	66.990	0	63.720	3.270
1.054	67.162	3.446	63.581	3.581

Particle에 대한 underflow에서 지름에 따른 회수율을 구하는 과정에서 particle에 의하여

생성되는 모든 힘은 무시 하였다.

## 결론

유동장은 나선형 흐름을 형성함으로 inlet pipe와 수직인면을 기준으로 시계방향에 따라 각 단면에서의 유동장 특성을 Hsieh의 실험결과와 비교하였다.

Fig. 2는 0°에서는 유동장의 형태와 상승흐름과 회전흐름 크기를 도시하였으며 Fig. 3은 hydrocyclone의 상부에서 6cm, 180°에서의 상승흐름의 속도를 fig. 4에서는 회전흐름의 속도를 실험 결과와 비교하였다.

전산모사를 통하여 얻어진 내부 유동장의 모습은 실험 결과와 거의 일치하는 모습을 보여준다. Fig. 5는 전산모사에서 얻은 유동장을 바탕으로 실제 particle이 들어간 유체에 대하여 underflow에서 particle 지름에 따른 회수율을 실험 결과와 전산모사 결과를 비교하였다. 각 particle 지름에 대한 회수율은 particle에 의하여 생성되는 힘을 전산모사에서는 무시하여 그 결과 지름이 작은 particle에 관해서는 실험값과 전산모사 값이 매우 잘 일치하였으나 지름이 커질수록 실험값보다 전반적으로 높은 회수율을 나타내었다.

따라서 particle에 의하여 생성되는 영향력에 대한 연구가 계속 필요하며 또한 분리력에 영향을 미치는 운전조건 및 설계사양에 따른 air core의 형성과 split에 대한 연구가 더 필요하다.

## 참고문헌

1. Hsieh, K. T.: Phenomenological model of hydrocyclone, PhD Thesis, 1988
2. David C. Wilcox: "Turbulence modeling for CFD", 2nd, DCW Industries, inc.
3. P. He, M. Salcudean and I. S. Gartshore: Trans IChemE, Vol 77, Part A, July, (1999), p429
4. Emil C S. M, Martha E S., Ian S G.: Fil.Sep., July/Agust, 36, 2001
5. L.Svarovsky: "Solid-Liquid Separation", 3rd ed, Butterworths, London(1990).

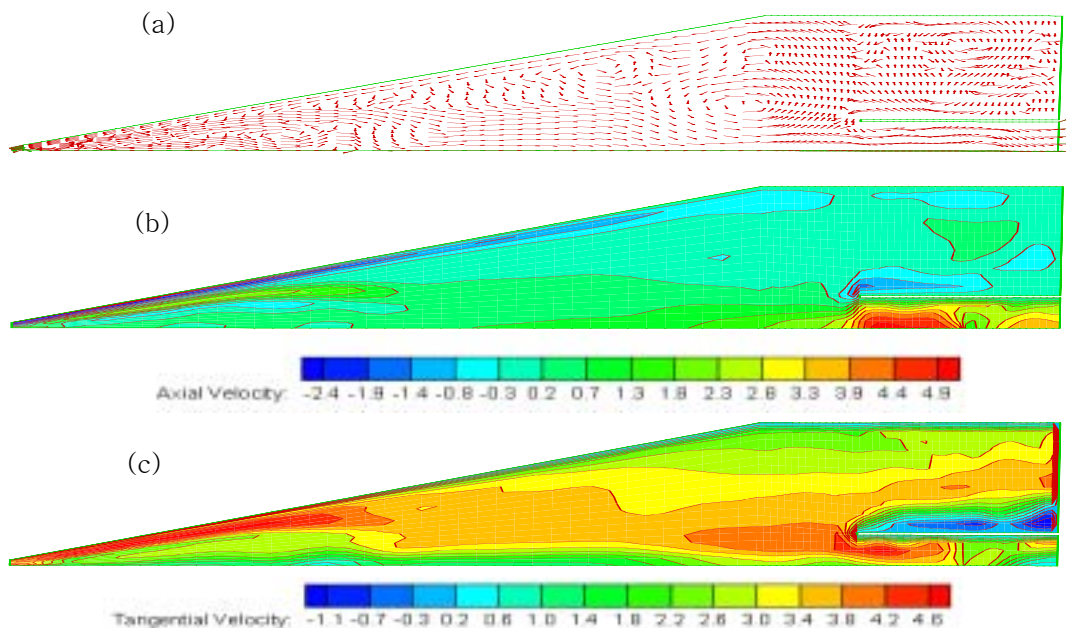


Fig. 2. (a) Velocity vector plot; (b) Contour plot of axial velocity field; and (c) Contour plot of tangential velocity field.

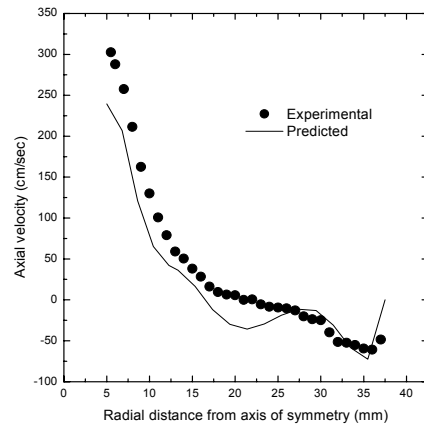


Fig. 3. Comparison of the predicted axial velocity profile with experimental data.

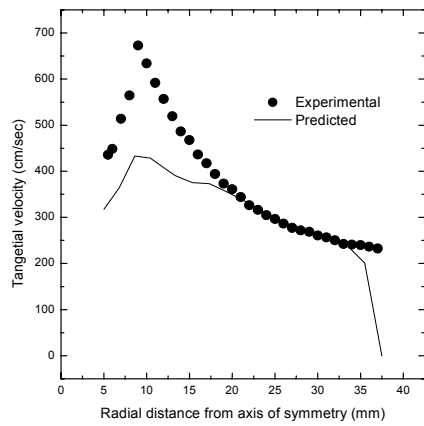


Fig. 4. Comparison of the predicted tangential velocity profile with experimental data.

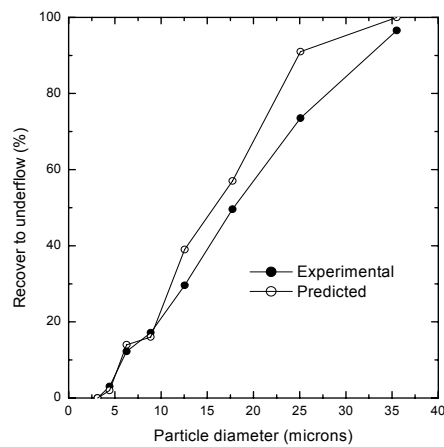


Fig. 5. Comparison of the separation efficiency with experimental data