

순환여과 양식장에서 와류형 분리기에 대한 수치적 검토 Numerical Analysis of A Vortex Cyclone in A Recirculating Aquaculture System

정석권 · 김은필

S. K. Jeong and E. Kim

Key Words : Recirculating Aquaculture System(순환여과 양식장), Finite Volume Method(유한체적법), Collection Efficiency(수집효율), Hydrocyclone(분리기)

Abstract : This study investigated the performance of a vortex hydrocyclone for solid removal in a recirculating aquaculture system. In a fish-breeding industry, effluent water is mainly disposed by gravity sedimentation. Thus, a large settling tank and a lot of water are needed to purify effluent water. However, this typical method does not show consistent efficiency. In case of low efficiency, discharged water contains a lot of feeding sediments. This causes environmental problems. Instead of this typical method a hydrocyclone is tested to discharge water which contains a lot of feeding sediments. In this paper, a hydrocyclone with low velocity and pressure drop in a recirculating aquaculture system is investigated.

1. 서 론

본 연구는 순환여과식 양식장에서 사용하는 와류형 분리기에 대한 연구이다. 현재 우리나라 내수면 양식장에서의 배출수 처리는 중력침전에 의존하므로 면적이 큰 침전조가 필요하며, 또한 사용하는 물의 양도 많다. 이와 같은 처리방식은 각 양식장의 상황에 따라 효율이 크게 변하므로 효율이 낮은 경우에 배출되는 배출수는 먹이 찌꺼기와 배설물이 외부에 유출되므로 자연환경에 크게 영향을 미치고 있는 실정이다. 와류형 분리를 사용하는 침전조는 사용 면적이 기존의 시스템과 비교하여 크게 줄어들 뿐 만 아니라 안정적인 효율을 기대할 수 있어 자연을 보호할 수 있는 장치라고 볼 수 있다. Madhumita 등⁽¹⁾은 상업용 크기의 가스 사이클론에서 입자의 제거 효율을 높이는 데 대한 연구를 수행하였다. 그들은 5 μm 이하의 입자에 대하여 유체 유동이 강한 스월이 형성하도록 형상을 최적화하였다. 결과는 유체 흐름의 패턴과 실험 결과치를 비교하였다. Dia 등⁽²⁾은 하이드로 사이클론의 크기가 직경

200 mm인 샘플에 대하여 수치해석적인 연구를 수행하였다. 그들은 입자의 분리효율은 사이클론 내의 스월 유동이 중요한 인자이므로 사이클론의 효율보다는 유체의 내부 유동에 대한 결과를 제시하였다. Ray 등⁽³⁾은 수치해석을 통한 가스 사이클론의 유동 패턴과 수집 효율에 관한 연구를 수행하였다. 그들은 또한 입자의 크기가 1-3 μm 에 대하여 실험을 수행하여 수치해석 결과와 비교하였다. Hoffmann⁽³⁾은 두 종류의 사이클론에 대하여 실험을 수행하였다. 첫 번째 종류는 접선방향으로 유속이 주어진 경우이고, 두 번째는 와류를 생성하는 가이드 배인에 의해 와류가 생성되는 입구형상을 가진 사이클론에 대한 유동 패턴을 연구하였다. 결과는 접선 입구유속을 가진 경우는 원통형을 따라 깊은 데 까지 축방향으로 일정속도를 유지하고 있으나, 와류형 입구유속을 가진 경우는 박리 영역에서 중심방향의 속도가 거의 없었다. Solero 와 Coghe⁽⁴⁾은 가스 사이클론에 대하여 연구실용 모델로 실험을 수행하였다. 그들은 LDV를 이용하여 3 방향의 속도성분을 측정하였으며, 입자에 대하여 가스/고체상의 분리형상에 대하여 자세히 연구하였다. Griffiths 와 Boysan⁽⁵⁾은 소형 규모의 사이클론에 대하여 선행연구자들이 제시한 입자의 유동에 대한 식과 수치해석상의 결과를 비교 분석하였다. 그들은 유동의 패턴을 자세히 기술하였다. 또한 입자 유동에 따른 사이클론의 성

접수일 : 2004년 12월 21일
김은필(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : ekim@pknu.ac.kr Tel. 051-620-1508
정석권 : 부경대학교 기계공학부

능에 대하여도 자세히 분석하였다.

이전 연구는 가스유동에 대한 사이클론에 대한 유동 패턴의 연구가 많으며, 유체유동에 대하여는 미미한 실정이다. 특히 본 연구에서와 같은 상황은 입구에서 유체가 저압, 저속에서 이루어진 경우는 드물다. 본 연구는 양식장에서 사용되는 분리형 순환 여과 장치의 일종인 사이클론에 대한 유체 유동의 현상과 운전조건에 따른 입자의 효율을 제시하였다.

2. 지배방정식 및 경계조건

실제적인 계산영역은 복잡하므로 본 논문에서는 와류형 분리기 본체 형상의 계산영역을 단순하게 선택하였다.(Fig. 1 참조) Fig. 1에서 D_i 는 입구측 직경을 나타내고 D_o 와 D_u 는 각각 와류형 분리기 위측과 아래측의 직경을 나타낸다. 그리고 H_{cy} 와 H_{co} 는 각각 와류형 분리기 실린더 부분과 콘 부분의 높이를 나타낸다. 본 연구에서는 와류형 분리기 유동특성을 해석하기 위해 아래와 같이 가정하였다.

- ① 3차원 비정상상태, 비압축성 유동이다.
- ② 유체의 점성계수와 밀도는 일정하게 유지된다.
- ③ 부력은 무시한다.

이상의 가정에서 연속방정식, 운동량방정식을 직교 좌표계에서 텐서를 사용하여 나타내면 다음과 같다.

연속방정식 :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식 :

$$\rho U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) \quad (2)$$

여기서 U_i 는 속도, P 는 압력을 나타내며 i 와 j 의 범위는 각각 1에서 3이며, ρ 는 밀도, μ 는 점성계수이다.

운동량방정식에서 전단응력항은 Boussinesq 가정에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_{ij} = -\rho u_i u_j - \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

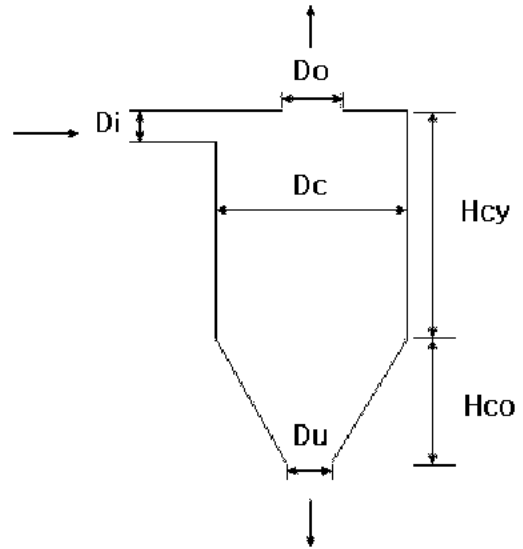


Fig. 1 Schematic diagram of a cyclone geometry

여기서 δ_{ij} 는 Kronecker delta이다.

난류점성계수는 난류 운동에너지 K 와 소산율 ϵ 로 다음과 같다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{K^2}{\epsilon} \quad (4)$$

난류모델은 RNG $K-\epsilon$ 모델로 난류운동에너지 K 와 난류에너지 소산율 ϵ 의 방정식을 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁷⁾

$$\rho U_j \frac{\partial K}{\partial x_j} - \tau_{ij} \frac{\partial K}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_K} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\rho U_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} - C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{K} \tau_{ij} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{K} - R \quad (6)$$

여기서 σ_K , σ_ϵ , C_μ , $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$ 는 난류상수이다.

식(6)의 마지막 항은 표준 $K-\epsilon$ 모델과는 다른 추가항으로 다음과 같다.

$$R = \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \epsilon^2}{(1 + \beta \eta^3) K} \quad (7)$$

$$\eta = \frac{K}{\epsilon} \left[\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right]^{1/2} \quad (8)$$

본 논문에서는 입구에서 압력, 속도가 주어지며 출구에서는 모든 변수에 대하여 Neumann 조건을, 벽면에서의 속도 성분은 모두 아래와 같은 점착조건을 적용하였다.

$$u_{wall} = v_{wall} = w_{wall} = 0 \quad (9)$$

입자에 대한 식은 입자가 유체유동에 영향을 미치지 않는다고 가정하였다. 각 입자의 라그랑지안 운동방정식은 다음과 같다.

$$\rho_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = -\frac{18\mu_f}{d_p^2} C_D \frac{Re}{24} (\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_f) + \rho_p \mathbf{g} \quad (10)$$

여기서 μ_f 는 유체의 점성 계수, $\mathbf{v}_p, \mathbf{v}_f$ 는 각각 입자와 유체의 속도, d_p 는 입자의 지름이고, \mathbf{g} 는 중력 가속도, ρ_p, ρ_f 는 각각 입자와 유체의 밀도이다. 식(9)에서는 ρ_p 는 ρ_f 에 보다 크며, Basset힘 등은 무시하였다. 그리고 레이놀즈수는 다음과 같이 정의한다.

$$Re = \frac{\rho_f d |\mathbf{v}_p - \mathbf{v}_f|}{\mu_f} \quad (11)$$

마찰계수는 Clift 등⁽⁸⁾의 식을 사용하였다.

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0.15 Re_p^{0.6867}) \quad (12)$$

본 논문에서는 유한체적법을 적용하였으며 수치적 정확도를 검토하였다. 수치해석에 대한 자세한 설명은 참고 논문에서 상세하게 설명하였으므로 여기서는 생략한다.⁽⁹⁾ 입자추적은 식(9)를 적분하므로 얻을 수 있으며 Barton⁽¹⁰⁾을 참조하였다.

3. 결과 및 토론

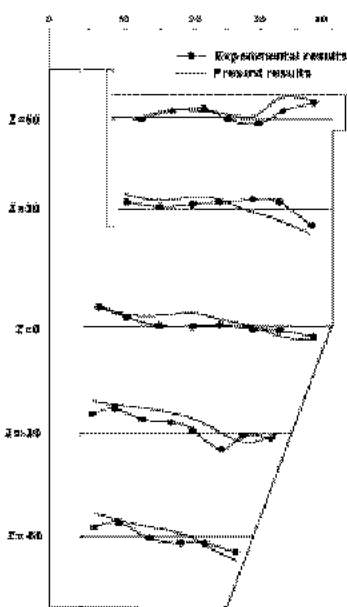


Fig. 2 Comparative results of velocity profiles

먼저 해의 정확성을 검증하기 위하여 이전의 실험 결과와 비교하였다. Fig. 2에서는 Dai 등⁽²⁾의 결과와 계산된 결과의 축방향 속도분포를 사이클론 중심축을 중심으로 나타내었다. 전반적으로 속도분포가 잘 일치하고 있다. 축방향 속도는 사이클론의 중심축으로 감에 따라 증가하고 있으며, 사이클론의 측면 벽 방향으로 감에 따라 유체의 축방향 속도는 감소하고 외부 벽에서는 속도가 음인 것을 알 수 있다. 이는 사이클론의 측면 벽에서의 유동이 아래쪽 출구를 향하고 있는 것을 의미한다.

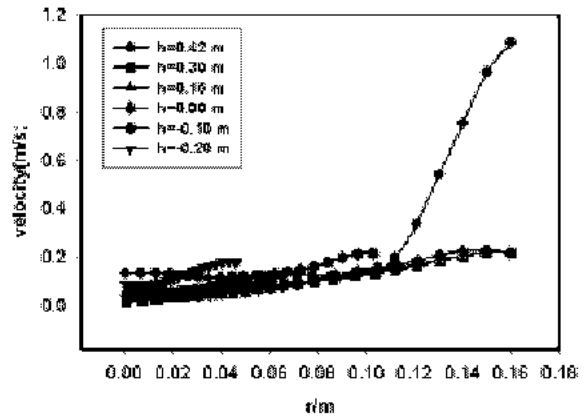


Fig. 3 Velocity profiles with varying cylinder heights in a hydrocyclone.

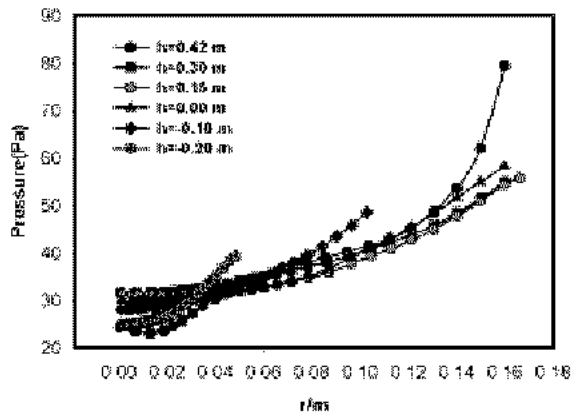


Fig. 4 Pressure profiles with varying cylinder heights in a hydrocyclone.

Figs. 3과 4는 사이클론 내부에서 높이에 따른 속도와 압력의 분포를 나타내고 있다. 속도와 압력은 입구 측에서 가장 크게 나타나며 실린더 보다는 콘 부분에서 더 증가한다. 그리고 전체적인 분포는 속도와 압력 모두 중심축에서는 낮게 사이클론의 측면에서는 높게 나타났다. 이것은 사이클론 내에서 유체가 측면을 따라 강한 소용돌이를 만들다가 콘

의 상부에서 단면적이 감소함에 따라 속도가 증가하기 때문이다.

Fig. 5 는 사이클론의 입구 속도에 대한 사이클론의 수집효율을 나타내었다. 여기서 수집효율은 사이클론의 입구 측에서 투입된 입자 수와 아래 측 출구로 빠져나온 입자 수의 비로 나타내었다. 결과는 두 경우로 살펴 볼 수 있다. 아래 측 출구의 직경이 30mm 이하인 경우 입자 수집효율은 속도가 증가함에 따라 증가하다가 입구 속도 1m/s 이상에서는 다시 감소하는 것을 볼 수 있다. 이와는 반대로 40mm 이상인 경우 입자의 수집효율은 속도에 영향을 크게 받지 않는 것으로 나타났다. 특히 50mm 이상인 경우에는 낮은 입구 속도인 0.4m/s~0.6m/s에서 가장 높은 수집효율을 나타내었다. 이것은 아래 측 출구 직경이 너무 커질 경우 콘의 상부에서 발생하는 상승 모멘텀이 충분히 발달하지 못하여 아래 측으로 빠져나가는 유량이 증가하기 때문이다. 이 경우 속도가 낮을수록 아래 측으로 빠져 나가는 비율은 더욱 커지게 된다.

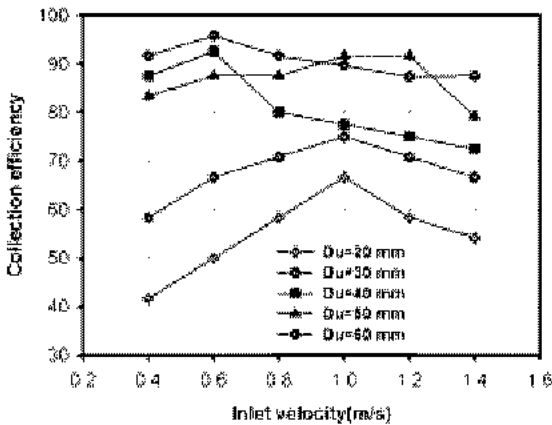


Fig. 5 Collection efficiencies with varying inlet velocities

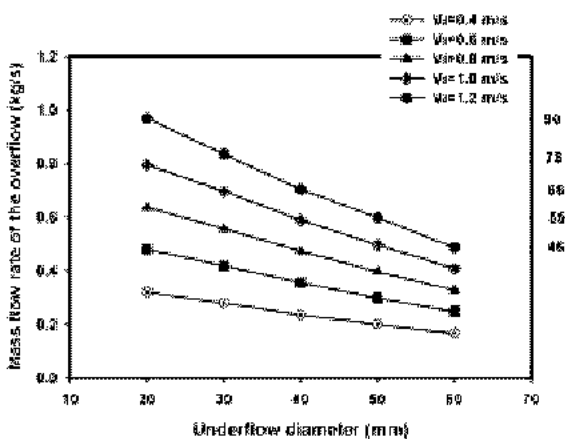


Fig. 6 Mass flow rate of the overflow

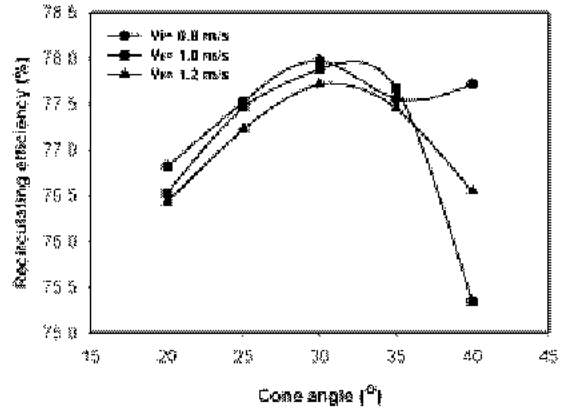


Fig. 7 Recirculation efficiencies with varying the cone angle

Fig. 6 는 아래 측 출구의 직경에 따른 위 측 출구로 빠져나가는 유량을 나타낸다. 이 결과는 순환여과 양식장에서 사용되는 사이클론의 목적이 폐수를 재순환하여 사용하는 것으로 재순환하는 유량을 파악하기 위해 사용된다. Fig. 5에서 Du 가 40 mm 이상에서는 거의 모든 경우에서 80%가 넘는 수집효율이 나타나고 있지만 이것은 전체 폐수량의 35% 이상이 재순환하지 못하고 버려지므로 순환여과장치의 사용에는 비경제적이다.

입구 유입 속도에 따른 출구 측 유량은 선형적인 증가를 나타내었고 아래 측 직경이 작고 속도가 커질수록 위 측으로 빠져나가는 유량이 크게 증가하였다. 이 다음 실험들에서는 아래 측 출구의 직경은 30 mm로 고정하여 실험하였다.

Fig. 7은 콘의 각도에 대한 재순환율을 나타내었다. 여기는 나타내지 않았지만 다른 콘의 각도에 대한 수집효율의 변화는 거의 없었다. 하지만 재순환율에서는 약간의 차이를 보이는데 콘 각도가 30°일 때 가장 큰 재순환율을 보였다. 이것은 콘의 상부에서 발생하는 상승 모멘텀이 콘의 각도가 너무 작을 경우 충분히 발전하지 못하게 되고 큰 각도에서는 콘의 높이가 낮아지게 되므로 상승 모멘텀이 발생할 수 있는 공간이 줄어들어 순환수의 상승을 방해하기 때문이다.

Fig. 8은 실린더의 다른 높이에 따른 재순환율을 나타내었다. 실린더의 높이가 증가함에 따라 재순환율도 증가하다가 높이가 450 mm 이상에서는 증가율이 둔화되어졌다. 이것은 처음에는 실린더의 높이가 높아짐에 따라 입구 측에서 들어오는 유체에 중력가속도가 작용하여 상승 모멘텀이 증가하게 되고 일정 높이 이상이 되면 위 측 출구로 향하는 유동에

더 큰 영향을 주게 되어 재순환율은 떨어지게 된다. Fig. 9는 다른 입자크기에 따른 수집효율을 나타낸다. 입자의 크기가 커짐에 따라 입자 수집효율도 증가한다. 이것은 중력의 영향으로 입자의 크기가 클수록 중력 침전의 영향도 커지기 때문이다.

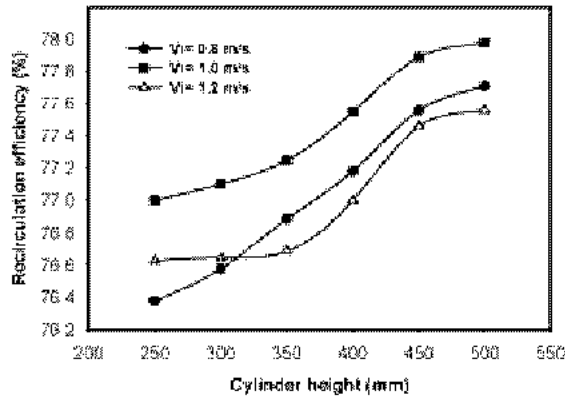


Fig. 8 Recirculation efficiencies with varying the cylinder height

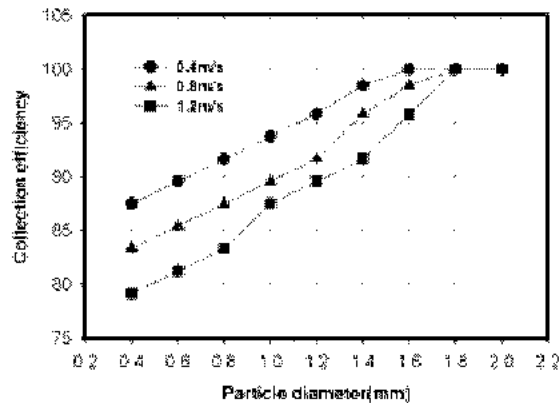


Fig. 9 Collection efficiencies with varying the particle diameter

이 실험에서는 1.8mm 이상의 입자 크기를 가지고 실험한 경우 100%의 수집효율을 나타내었다. 이 실험으로 입자의 크기가 약 2.0mm 이상의 입자 크기에서는 중력침전의 영향을 고려하여 순환여과 장치의 경제적인 운전도 고려할 수 있을 것이다.

4. 결 론

양식장에서 배출수는 중력침전에 의해 처리된다. 이 방법은 배출수를 정화시키기 위해 큰 침전조와 많은 물이 필요하다. 이와 같은 전형적인 방법을 대신하여 Hydrocyclone 이 많은 먹이 찌꺼기와 배설

물을 포함한 배출수에 적용되었다. 우리는 최상의 분리기 성능을 위한 여러 설계 조건을 검토하였다.

- 1) 사이클론의 입구측 속도에 따른 수집효율에서는 1m/s의 경우에 가장 큰 효율을 얻을 수 있었다.
- 2) 순환여과장치인 사이클론의 아래 측 출구 직경은 수집효율 뿐 아니라 재순환율을 고려할 경우 30 mm에서 이상적인 설계가 가능하다.
- 3) 사이클론의 다른 콘 각도에 대한 수집효율에는 거의 변화가 없었으며 재순환율에서는 각도 30°에서 가장 큰 재순환율을 보였다.
- 4) 사이클론의 다른 실린더 높이에 대한 재순환율은 450 mm 까지는 높은 증가율을 가졌다가 그 이상에서는 낮은 증가율을 나타냈다.
- 5) 다른 입자 크기에 대한 수집효율에서는 입자의 크기가 커짐에 따라 수집효율도 선형적으로 증가하다가 1.8 mm 이상에서는 거의 완전한 여과 분리가 일어났다. 이 이상에서는 입구 속도를 감하더라도 중력에 의한 침전을 고려할 수 있다.

위 결과는 안정된 수집효율을 가지면서도 환경을 보호할 수 있는 시스템인 와류형 분리기를 설계하는데 사용될 수 있다.

참고문헌

1. Madhumita, B. R., 1998, "Improving the Removal Efficiency of Industrial-scale Cyclones for Particles Smaller than Five Micrometre", Int. J. Miner. Process., 53, pp. 39-47.
2. Dai, G., Li J. M. and Chen, W. M., 1999, "Numerical Prediction of the Liquid Flow within a Hydrocyclone", Chem. Eng. J., 74, pp. 217-223
3. Ray, M. Luning, P. and Beumer, M., 1998, "Improving the Removal Efficiency of Industrial Scale Cyclones for Particles Smaller than Five Micrometre", Int. J. Miner. Process, 53, pp. 39-47.
4. Peng, W., Hoffmann, A.C., and Kater, J., 2002, "Flow Pattern in Reverse Flow Centrifugal Separators", Power Tech., 127, pp. 212-222.
5. Solero, G. and Coghe, A., 2002, "Experimental Fluid Dynamic Characterization of a Syclone Chamber", Exp. Thermal Fluid Sci., 27, pp. 87-96.

6. Griffiths, W. D., and Boysan, F., 1996, "Computational Fluid Dynamics and Empirical Modelling of the Performance of a Number of Cyclone Samplers", *J. Aerosol Sci.*, 27, pp. 281-304.
7. Yakhot, V., Orszag, S. A., Thangam, S., Gatski and T. B., Speziale, C. G., *Physics of Fluids A*, 4, pp. 1510-1520.
8. Clift, R. Grace J. R. and Weber, M. E., 1987, *Bubbles, Drops and Particles*, Academic Press,
9. Kim, H. and Kim, E., 1999, "Characteristics of an Entrainment into the Turbulent Buoyant Jet in a Cross Flow", *KSME J.*, 23, pp. 342-351.
10. Barton, I. E., 1996, "Exponential-lagrangian Tracking Schemes Applied to the Stokes Law", *J. Fluids Eng.*, 118, pp. 85-89