

하이드로사이클론 내의 난류유동해석

주종일* · 최영석** · 이용갑*** · 김탁현** · 김상용**

Numerical Study of Turbulent Flow in a Hydrocyclone

Jong-Il Ju*, Young-Seok Choi**, Yong-Kab Lee***, Tak-Hyun Kim**, sangyong Kim**

Key Words: Commercial CFD Code (상용 CFD코드), Hydrocyclone (하이드로사이클론), Separation Efficiency (분리성능)

ABSTRACT

Numerical studies have been conducted to predict the solid-liquid separation efficiency of turbulent flow in a hydrocyclone using a commercial CFD code. To validate the CFD code, several preliminary numerical calculations are carried out to determine the influence of parameters such as grid systems, numerical schemes, and turbulence models. The numerical studies have been performed on the hydrocyclones with the different vortex finder geometries by changing the mass flow rate, and the results were compared with the experimental data. The results show that the CFD code can be used as a design tool to improve the performance of hydrocyclones.

1. 서론

원심력으로 입자의 침전속도를 가속시켜 입자를 분리시키는 하이드로사이클론은 1891년 Bretney에 의해서 고안되었으며⁽¹⁾, 가장 일반적인 산업용 습식 분별장치로서 기계적 구동부분이 전혀 없는 침전형 분별기이다. 하이드로사이클론은 중-저 점성 액체로부터 고형물을 분리시키고, 높은 전단력에 의해 입자들의 부상을 촉진시켜 응집 발생을 방지하며 적절한 크기 및 운전조건에 의해 농축기로도 사용이 가능하고, 슬라임체거 장치, 고 농축기, 탈수용 장치로 환경·산업 분야에서 많이 사용되고 있다. 이러한 하이드로사이클론은 간단한 디자인, 적은 비용, 쉬운 작동과 낮은 유지비 때문에

약 110년 동안 산업분야에서 널리 사용되었다⁽²⁾. 보편적인 하이드로사이클론은 직경 0.01m ~ 1.2m이고, 유량은 23,000 L/min 까지 처리 할 수 있고, 입자직경이 5 μm - 150 μm 인 입자를 보유하고 있는 부유물 분리, 농축등에 효과적으로 쓰인다⁽³⁾. 하이드로사이클론의 성능 즉 분리효율은 형상과 매우 밀접한 관계를 가지고 있다. 만족하는 분리효율을 얻기 위해서는 하이드로사이클론의 기하학적인 형상과 디자인에 관심을 가져야 하는데, 일반적으로 실험 결과나 경험적인 결과로 형상이나 디자인을 결정하기 때문에 최적의 형상을 결정하는 것은 쉬운 일이 아니다⁽⁴⁾⁽⁵⁾.

이번 연구는 상용 CFD코드인 CFX-4.3을 사용하여 하이드로사이클론의 고체-액체 분리효율 예측을 위한 수치적 계산을 하여 형상이 변하거나 운전조건, 고품물밀도 등이 변할 때도 분리효율을 예측하고 개선할 수 있는 가능성을 제시하는데 있다. 상용 CFD코드의 검증을 위해 여러 가지 난류모델, 수치기법, 그리고 격자의 영향을 결정하기 위하여 예비적인 수치해석을 하

* 연세대 대학원, 한국생산기술연구원

** 한국생산기술연구원 신에너지환경팀

*** CFX Korea

책임저자 E-mail : yschoi@kitech.re.kr

고, 전체적인 형상은 같으나 vortex finder의 S/D비가 일정한 비율로 다른 3가지 형상을 가지고 입구속도(유량), 질량 유량 (mass flow rate)을 변화시켜 계산을 수행하여 결과를 경험적인 Barth 식(5)의 결과와 실험값과 비교 분석 하고자 한다.

2. 상용CFD 코드 검증

본 연구에서는 상용 CFD코드인 CFX를 검증하기 위해 실험 및 유동해석에 대한 결과를 확보할 수 있는 Kim 과 Lee의 Type 2-1 사이클론에 대해 유동해석을 수행하였다⁽⁶⁾. 수치해석에 사용된 형상과 치수를 Fig. 1 과 Table 1에 나타내었다. 난류유동해석에 3차원 레이놀즈 평균 Navier-Stokes 방정식을 적용하며 지배방정식은 유한체적법에 의해 이산화 된다. 대류항의 이산화 기법에 의한 영향을 살펴보기 위해 CFX-4에서 적용 가능한 기법 중 Hybrid기법 (HDS)과 Van-Leer limiter를

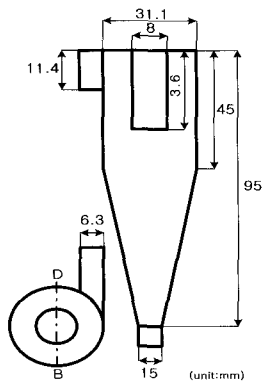


Fig. 1 Geometry of Cyclone

Table 1 Nomenclature

D	:	cylinder dia.
De	:	outlet pipe dia.
S	:	outlet pipe length
H	:	cyclone height
Hc	:	cylinder height
Hy	:	cone height
B	:	underflow dia.
Be	:	underflow length
ai	:	inlet pipe height
bi	:	inlet pipe width
li	:	inlet pipe length
2θ	:	cone angle
Q	:	flow rate

적용한 MUSCL기법을 사용하였다⁽⁷⁾. 난류모델은 RNG k- ϵ 난류모델과 레이놀즈 응력 난류모델 (RSM)을 사용하여 결과를 비교하였으며, 벽 근처에서 격자수를 줄이기 위해 벽 법칙을 이용하였다. 입구속도는 2.88 m/s이며 난류강도와 길이척도는 주어졌다.

2.1 계산격자의 선정

계산격자를 선정하기 위하여 Van-Leer limiter를 적용한 MUSCL 기법과 RNG k- ϵ 난류모델을 사용하여 3가지 서로 다른 격자수 (15000개 74000개 240000개)에 대해 격자 의존성을 검사하여 Fig. 2에 나타내었다. 74000개의 결과와 240000개 결과가 약 4% 차이를 보여 74000개 격자를 사용하기로 하였다.

2.2 수치기법과 난류모델의 영향

난류 모델과 수치기법의 조합에 의한 영향을 판단하기 위해 수치기법은 Hybrid 기법과 Van-Leer limiter를 적용한 MUSCL 기법을, 난류모델은 RNG k- ϵ 난류 모델과 RSM 난류모델을 조합하여 사이클론의 유동을 해석하였다. 유동해석의 결과로 속도성분과 분리 효율을 비교하여 보았다. 속도를 비교한 위치는 축방향으로 사이클론의 윗면에서 45mm이고 반경방향으로 Fig. 1의 B-D 이며 축방향 속도성분과 접선방향 속도성분을 Fig. 3, 4에서 비교하였다. Fig. 3을 보면 RSM

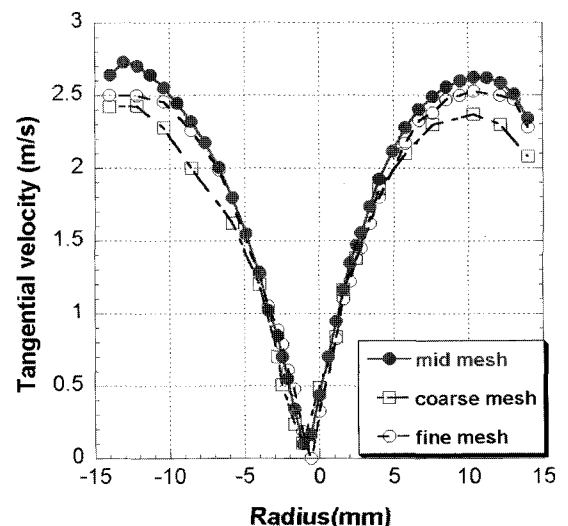


Fig. 2 Tangential velocity profile at x=45mm from top of cyclone for various grid

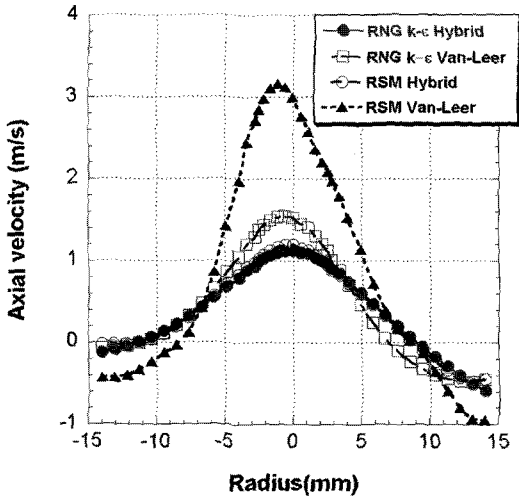


Fig. 3 Axial velocity profile at x=45mm from top of cyclone

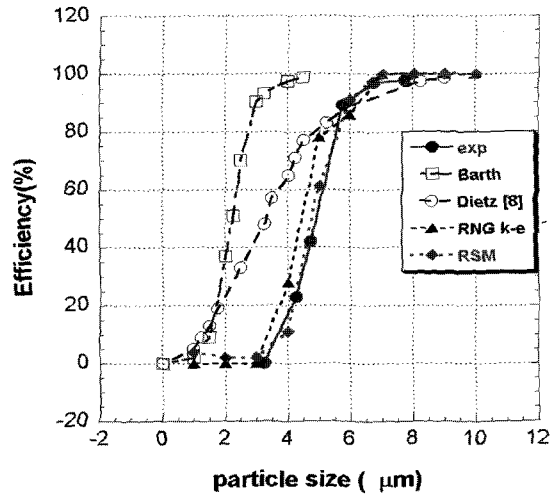


Fig. 5 Fractional separation efficiency for cyclone

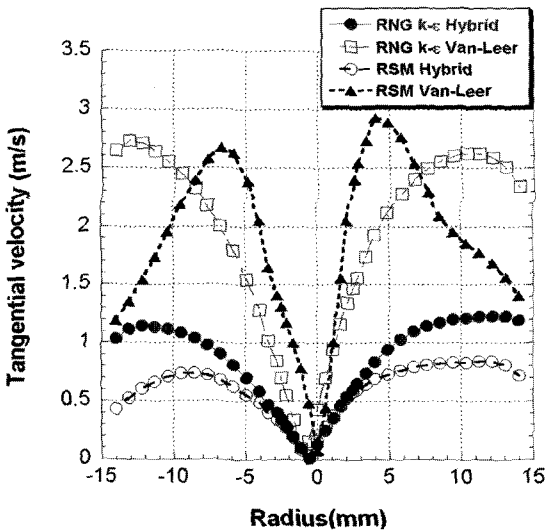


Fig. 4 Predicted tangential velocity profile at x=45mm from top of cyclone

난류모델과 MUSCL 기법을 적용한 경우 외에는 모두 비슷한 경향을 보이고 있다. Fig. 4를 보면 Hybrid 기법을 사용할 경우 RNG k-ε 난류모델과 RSM 난류모델의 결과는 모두 접선속도를 작게 예측하고 있다. RNG k-ε 난류모델과 Van-Leer를 사용하였을 경우에는 접선방향 속도성분이 과도하게 예측이 된다. 이것은 고차의 이산화기법을 사용하여 수치확산이 감소하기 때문에 접선속도 성분이 증가하기 때문이다. RSM 난류모델과 Van-Leer를 사용한 경우에 사이클론의 일반적인 유동현상인 Rankine vortex를 예측하는 결과를 얻을

수 있었다. 분리효율은 입자 궤적을 추적하여 수집된 경우와 유체 출구로 나가 수집되지 않는 경우를 비교하여 나타낼 수 있었다. 입자는 사이클론 입구에서 입자 지름당 대표입자를 100개씩 균일하게 분사하였다. 입자추적은 Newton 제 2법칙을 이용하여 입자속도를 계산하여 위치를 계산하였고 난류영향과 부력은 고려하지 않았다. Fig. 5는 분리효율을 나타낸 그래프이다. Fig. 5에서는 Hybrid 기법을 사용한 결과는 나타내지 못하였다. 그 이유는 Hybrid 기법을 사용한 것은 Fig. 4와 같이 원심력을 일으키는 접선속도성분을 낮게 예측하기 때문인 것으로 판단된다. Van-Leer 기법을 사용한 경우 RNG k-ε 난류모델과 RSM 난류모델 모두 사이클론의 분리효율을 근사하게 예측하고 있다. 그러나 계산시간 및 수렴성, 입자추적을 판단하기 위해 필요한 시간을 보면 RNG k-ε 난류모델이 더 효율적이었다. 따라서 수치기법과 난류모델의 영향을 알아보기 위하여 속도성분과 분리효율을 예측한 결과 난류모델 보다는 수치기법이 더 영향을 받고, RNG k-ε 난류모델과 Van-Leer 기법을 사용한 결과가 효율적이어서 하이드로사이클론 유동해석에 사용하고자 한다.

3. 유동해석

3.1 형상과 격자계

본 연구에서 연구된 하이드로사이클론은 입구형상이 접선공급 (Tangential Feed) 형상으로 전체적인 사

이클론 형상은 동일하고 Vortex finder의 S/D비가 다른 3가지 형태를 가지고 있다. Table 1에는 하이드로사이클론 각 부분의 기호를 설명하였고, Fig. 6과 Table 2에 하이드로사이클론의 형상과 치수를 나타내었다. Fig. 7은 3가지 형태의 하이드로사이클론의 격자를 나타내었다. (a)는 case 1의 격자이고 (b)는 case 2 격자 (c)는 case 3 격자이다. 모두 격자수는 약 15만개이고 CFX- Build로 격자를 형성하였다.

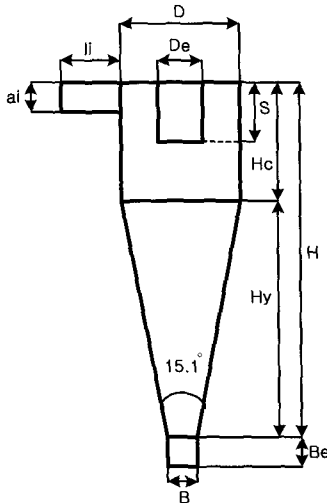


Fig. 6 Geometry of hydrocyclone

Table 2 Dimensions of hydrocyclone used in this work (unit:mm)

	D	De	S	H	Hc	B	Be	ai	bi	li	2θ	Q (L/min)
case1	114	27	63	514	114	13	30	26.6	26.6	50	15.1°	27-107
case2	114	32	74.4	514	114	13	30	26.6	26.6	50	15.1°	27-107
case3	114	22.2	51.6	514	114	13	30	26.6	26.6	50	15.1°	27-107

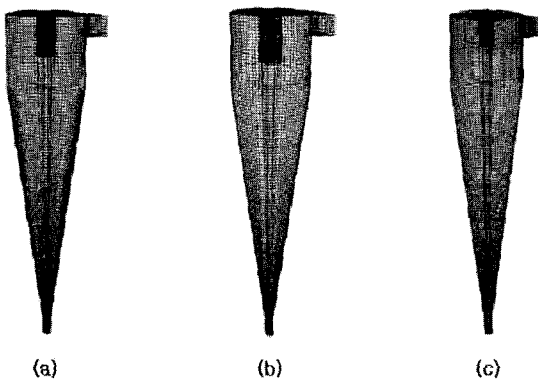


Fig. 7 Hydrocyclone grid

3.2 경계조건과 난류모델

CFX-4.3은 난류유동의 해석에 3차원 레이놀즈 평균 Navier-Stokes 방정식을 적용하며 지배방정식은 유한체적법에 의해 이산화 된다. 본 연구에서는 앞절에서 검증한바와 같이 Van-Leer limited를 적용한 MUSCL 기법과 RNG $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였고 벽 근처에서의 격자수를 줄이기 위해 벽법칙을 이용하였다. 입구속도는 계산조건에서 자세히 언급되었고 난류강도, 길이척도, 질량유량등이 주어지고 출구에서는 구배가 0인 조건이 적용되었고, 벽면에서는 집착 조건이 적용되었다.

3.3 계산조건

계산조건은 case 1, 2, 3형상에 대하여 입구속도 0.5 m/s, 0.93 m/s, 2.0 m/s이고 질량유량이 1%, 5%, 10%인 경우를 각각 계산하였다. 질량유량은 유체질량에 대한 입자의 질량비이다. 계산된 입자크기 범위는 $0.5\mu\text{m} \sim 50\mu\text{m}$ 이고 입자의 밀도는 $5.24 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 이다. 입자크기 범위에서 크기가 다른 20가지 대표입자를 100개씩 입구에서 균일하게 분사를 하고, 입자의 궤적을 추적하고 분리효율을 계산하였다.

4. 실험방법

CFD에 의하여 얻어진 하이드로사이클론의 분리효율을 비교하기 위하여 하이드로사이클론을 제작하여 실험을 하였다. 실험 공정도는 Fig. 8과 같이 구성하였다.

산화철 (Fe_2O_3 , 밀도: $5.24 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$) 입자가 5% 함유된 원수는 펌프에 의하여 하이드로사이클론으로

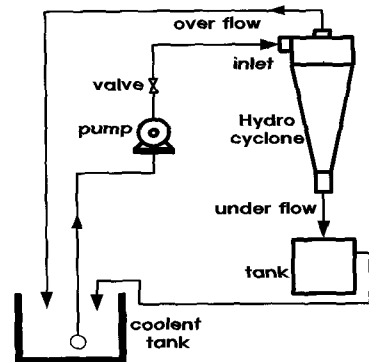


Fig. 8 Schematic diagram of the experimental apparatus

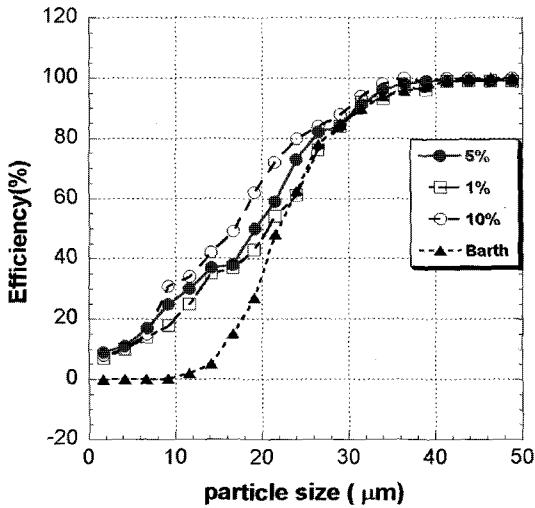


Fig. 9 Efficiency curve for case 1 ($v=0.93$ m/s)

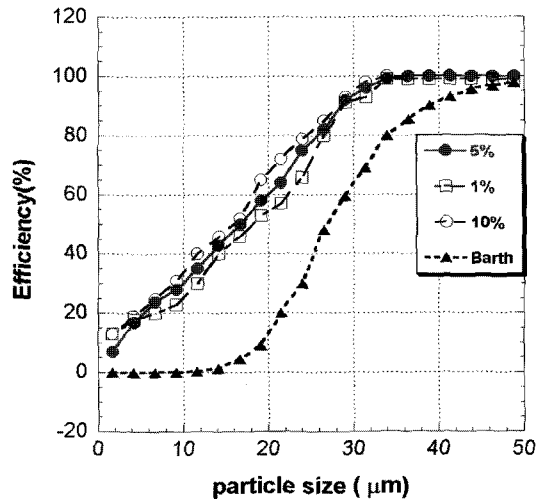


Fig. 11 Efficiency curve for case 2 ($v=0.93$ m/s)

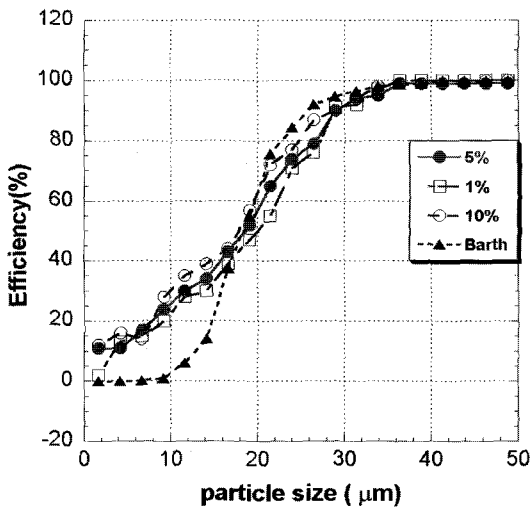


Fig. 10 Efficiency curve for case 2 ($v=0.93$ m/s)

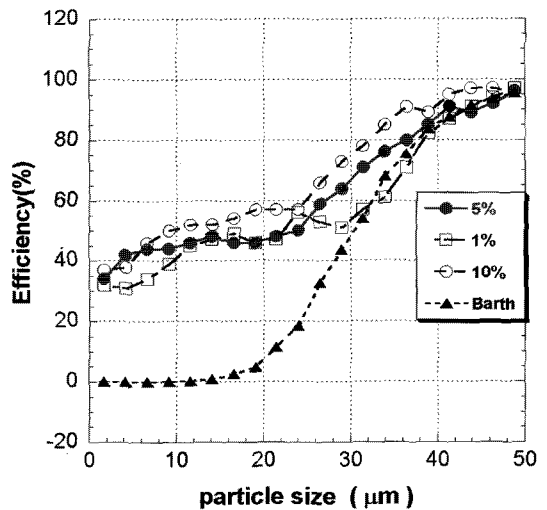


Fig. 12 Efficiency curve for case 1 ($v=0.5$ m/s)

분당 50 리터씩 유입되고, 산화철 입자중에서 수집이 되는 것은 under-flow로 빠져나가고 수집되지 않는 입자는 유체와 함께 over-flow로 함께 빠져나간다. 원수에 함유되어있는 입자의 크기별 함유량과 under-flow로 나온 것의 입자 크기별 함유량을 비교하여 분리효율을 구하였다. 입자분석은 MALVERN 사의 MASTER SIZE 에 의해서 분석하였다.

5. 결과 및 고찰

하이드로사이클론의 성능을 표현할 때 단순히 분리

효율 (separation efficiency) 뿐만 아니라 분리효율기 울기 (separation sharpness), 절단입경 (cut size), 용량 (capacity), 에너지효율 (energy loss efficient) 등을 고려해야 한다. 본 연구의 결과에서는 하이드로사이클론의 성능을 표현하기 위해 total 분리효율 (separation efficiency), 분리효율곡선기울기, 절단입경을 살펴보았다.

5.1 vortex finder 크기 변화에 따른 영향

Fig. 9 ~ 11은 vortex finder 크기 변화에 따른 하 이드로사이클론의 입자직경별 분리효율을 나타낸 곡선

Table 3 Geometrical proportions of hydrocyclone used in this work

	D/D	De/D	S/D	H/D	Hc/D	B/D	2θ	De/S
일반적사항	1.0	0.1-0.3	0.2-0.6	-	1.0 2.5	0.2-0.4	10-30°	-
case 1	1.0	0.24	0.55	4.5	1.0	0.11	15.1°	0.55
case 2	1.0	0.28	0.65	4.5	1.0	0.11	15.1°	0.65
case 3	1.0	0.19	0.45	4.5	1.0	0.11	15.1°	0.45

입구속도를 0.93 m/s로 고정하여 계산을 하였다. Table 3에는 각 case의 vortex finder S/D비가 나타내어져있다. Fig. 10은 case 2의 그래프로 S/D비가 가장 크고 Fig. 9, 11 순으로 S/D비가 크다. Fig. 9, 10, 11을 비교하면 전체 효율과 절단입경 (d50)은 비슷하지만 분리효율곡선의 기울기는 S/D비가 큰 Fig. 10의 경우가 가장 크다. 이때 Fig. 10의 경우 경험식인 Barth식 결과와 매우 일치하기 때문에 S/D비가 클수록 성능이 좋다고 판단되어진다.

5.2 입구속도 (유량) 변화에 따른 영향

Fig. 9, 12, 13은 case 1에서 입구속도 변화 (유량변화)에 대한 하이드로사이클론의 입자직경별 분리 효율을 나타낸 곡선이다. Fig. 12는 입구속도가 0.5 m/s (유량 27 L/min)에서 계산되었다. 이 경우 곡선모양은 일반적인 하이드로사이클론의 분리효율곡선인 S모양과는 차이가 있다. 이는 하이드로사이클론 중앙에서 강한 소용돌이를 만들어내는데 필요한 최소 압력강하보다 작기 때문에 정상적으로 작동을 하지 못한 것으로 보인다. 이러한 현상은 입구속도와 밀접한 관계가 있다고 생각한다. case 2, case 3에서는 정상적으로 작동을 하였다. 각 그림 모두 질량유량비를 1%, 5% 10%로 변화하면서 계산을 하였다. Fig. 9는 0.93 m/s (유량 50 L/min), Fig. 13은 2 m/s (유량 107 L/min)에 대하여 계산되었다. Fig. 9와 13을 비교하여 보면 입구속도가 빠른 Fig. 13의 경우가 Fig. 9보다 전체분리효율과 분리효율곡선 기울기가 크다. Table 4에 나타내었듯이 절단입경(d50)도 Fig. 13의 경우가 더 작고 경험식인Barth식의 결과와도 더 일치하기 때문에 성능이 좋다고 판단되어진다. 그러나 입구속도를 무한정 크게 할 수 없는 것은 하이드로사이클론이 처리할 수 있는 용량과 관계가 있고, 지나친 압력강하로 인한 하이드로사이클론의 파손, 많은 소요동력등의 문제에도 함께 고려해야 하기 때문이다. 따라서 경제성을 고려한 적절한 입구속도가 존재하리라 판단된다.

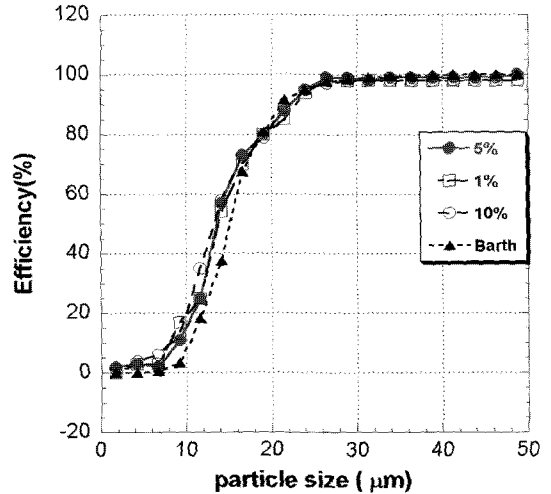


Fig. 13 Efficiency curve for case 1 (v=2 m/s)

Table 4 Calculated out size (d50) (μm)

입구속도	0.5 m/s			0.93 m/s			2 m/s		
mass flow rate	1%	5%	10%	1%	5%	10%	1%	5%	10%
case1	9	24	22	21	19	16	13	13.5	13.8
case2	6.7	19	26.5	19	18	18	14	13.8	14.5
case3	12	14	14	18	17	17	.	11	21
case1 barth's	30			22			15		
case2 barth's	25.1			18.4			12.6		
case3 barth's	37.2			27.3			18.6		

5.3 mass flow rate 변화에 따른 영향

Fig. 9~13을 보면 알 수 있듯이 질량유량비가 증가함에 따라 전체분리효율이 증가하고, 절단입경 (d50)은 작아진다. 따라서 질량유량비가 증가하면 분리효율도 증가된다고 판단된다. 공기가 유입되는 사이클론에서도 입자농도가 증가하면 효율도 증가하는것과 같은 원리라 할 수 있다.

5.4 계산결과 Barth 결과, 실험결과 비교

Fig. 14에 기본 조건에서 (case 1, 입구속도 0.93 m/s, 5%) CFD해석 결과와 경험식인 Barth식의 결과 그리고 실험 결과와 비교한 그래프를 나타내었다. CFD 해석결과는 시험결과와 비교하여 비교적 잘 일치하고 있으며, Barth 경험식도 약간의 오차는 있지만 시험결과와 근접하게 예측하고 있다. 상용 CFD코드 계산결과와 실험 결과를 비교해보면 입자크기에 따라 분리효율의

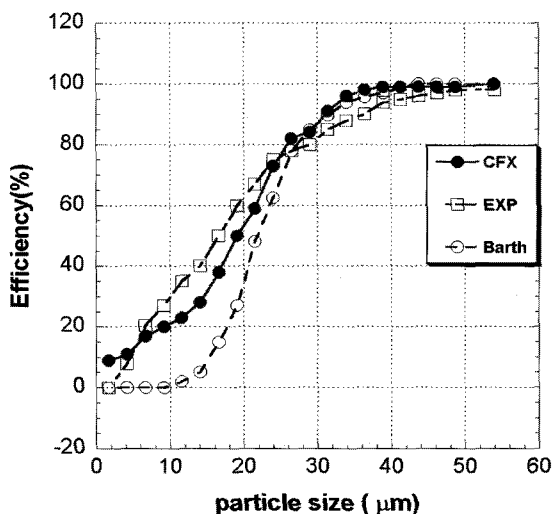


Fig. 14 Comparison of efficiency curve

차이가 다르지만 평균적으로 약 8% 정도 오차를 보이고 있으며, Barth 경험식은 실험 결과와 평균적으로 약 16% 오차를 보인다. 따라서 본 해석결과를 고려하면 CFD코드를 사용하여 하이드로사이클론의 분리효율을 어느 정도 합리적으로 예측할 수 있기 때문에 설계 단계에도 활용이 가능하다고 생각된다.

6. 결 론

본 연구는 하이드로사이클론의 내부유동을 상용 CFD 코드를 사용하여 분리효율을 계산하고, 경험적인 Barth 결과 및 실험 결과와 비교하여 하이드로사이클론의 형상이 변하거나 입구조건, 파라메타등이 변할 때 분리효율을 예측하고 개선할 수 있는 가능성을 연구하였다. 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

1. 기본 조건에서 (case 1, 입구속도 0.93 m/s, 5%) 계산된 결과와 Barth식 결과, 실험결과가 비교적 잘 일치하여 유동해석을 사용하여 하이드로사이클론의 분리효율을 합리적으로 예측할 수 있었다.
2. 전체형상이 같고 vortex finder S/D비가 다른 하이드로사이클론에서 vortex finder S/D비가 증가할수록

분리효율이 증가함을 알 수 있었다. 단 vortex finder S/D비가 일반적인 비의 범위에 속하여야 한다.

3. 형상이 같은 하이드로사이클론에서 입구속도가 증가하거나 질량유량비가 증가하면 분리효율이 증가함을 알 수 있었다.
4. 본 해석 결과를 종합해보면 CFD가 하이드로사이클론의 설계 및 검증방법으로 유용하게 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) Chu, Liang-Yin, Chen, Wen-Mei, Lee, Xiao-Zhong, 2000, "Effect of structural modification on hydrocyclone performance," Separation and Purification Technology, 21, 71~86.
- (2) Chine, B., Concha, F., 2000, "Flow patterns in conical and cylindrical hydrocyclones," Chemical Eng. Journal, 80, 267~273.
- (3) 중소기업청, 고효율 액체 사이클론 개발, 2002, 중소기업 기술혁신개발사업 연구보고서.
- (4) Kawatra, S. K., Bakshi, A. K., Rusesky, M. T., 1996, "The effect of slurry viscosity on hydrocyclone classification," Int. J. Miner. Process, Vol. 48, pp. 39~50.
- (5) Griffiths, W. D., Boysan, F., 1996, "Computational Fluid Dynamics (CFD) and Empirical Modeling of the Performance of a Number of Cyclone Samplers," Journal of Aerosol Science, Vol. 27, No. 2, pp. 281~304.
- (6) Kim, J. C., Lee, K. W., 1990, "Experimental Study of Particle Collection by Small Cyclones," Aerosol Science and Technology, Vol. 12, pp. 1003~1015.
- (7) AEA Technology, 2001, CFX-4.4: Solver, AEA Technology, Harwell Laboratory, Oxfordshire, UK.
- (8) Ma, L., Ingham, D. B., Wen, X., 2000 "Numerical Modelling of the Fluid and Particle Penetration Through Small Sampling cyclone," Journal of Aerosol Science, Vol. 31, No. 9, pp. 1097~1119.