

복통 사이클론 분리기를 이용한 다상유체의 분리효율 향상연구

강지윤* · 진정민* · 김윤제**†

Improvement of the Separation Efficiency of Multiphase Fluids using Dual-Cyclone Separator

Ji-Yun Kang*, Jeong-Min Jin*, Youn-Jea Kim**†

Key Words : Cyclone separator(사이클론 분리기), Gas-liquid flow(기체-액체 유동), Pressure drop(압력 강하), CFD(전산유체해석)

ABSTRACT

A gas-liquid cyclone separator is generally used to separate gas from a liquid stream through vortex separation. The principle of gas-liquid cyclone separation is based on enhancing gravity separation by rotating and accelerating the fluid flow to increase the separation force through centrifugation, which is particularly effective for high momentum dissipation and foam reduction. In this study, the dual-cyclone separator was divided into two segments to minimize the pressure drop and improve the separation efficiency. The numerical analysis based on change in the configuration of the dual-cyclone separator was performed using commercially available fluid dynamics software (ANSYS FLUENT ver. 17.1). The mass flow rate of gas and liquid at the outlet was calculated to evaluate the separation efficiency. In addition, the velocity vector field, the volume fraction, and the streamlines were graphically depicted to elucidate flow fields based on the configuration change of the dual-cyclone separator.

1. 서 론

산업화 이후 화석에너지 사용이 증가하면서 중동을 기반으로 한 기존 전통 에너지 자원은 점차 고갈되어 가는 실정이다. 또한 2003년 이후 형성된 고유가로 인하여 기존 전통 에너지 자원에 대한 개발은 점차 오일샌드, 셰일가스 등 비 전통 에너지 자원, 해양심해자원, 극한지 자원 개발로 이관되고 있는 실정이다. 비전통 자원 및 해양심해 자원의 경우 기존 원유 및 가스 전처리 과정 이외에 각종 불순물을 처리하는 과정이 필요하며, 이는 전통자원 대비 채굴 단가를 높이는 역할을 한다. 특히 머드(mud), 샌드(sand) 등으로 이루어진 고체상의 물질들은 직접 전처리 공정으로 유입될 경우 배관 내 유체 흐름을 정체시키며 설계된 유량이 공정유닛으로 유입되는 과정을 방해하여 전체 공정 효율을 저하시키며, 때에 따라서는 공정전체 블랙아웃을 일으키기도 한다. 또한 기체상으로 유입되는 가스들은 배관 내부 부식의 원인이 되며, 수증기는 배관의 동결을 유발하여 전처리 공정 및 이송

파이프라인의 손상을 입힐 수 있다. 따라서 최근 고체입자 및 기체상의 가스들을 유체와 분리하는 전처리 과정에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.⁽¹⁾ 원심력을 이용해 입자의 침전 속도를 가속시켜 입자를 분리시키는 사이클론 분리기(cyclone separator)는 전처리 공정 내에서 고체와 액체, 액체와 기체를 분리시키는 주요 장치이며, 전통적으로 에너지 개발 강국인 미국을 필두로 유럽, 일본 등이 사이클론 분리기에 관한 기술을 선도하고 있다. 사이클론 분리기는 단순한 형상임에도 내부 유동장은 다소 복잡한 패턴을 보이는데, 이러한 유동장 발생 특성은 장치의 성능과 직결된다. 따라서 장치의 형상변화를 통해 분리기 내부 벽면에서 빠른 속도로 유동이 회전하게 하고 벽면 전체에 유동이 고르게 분포하도록 함으로써, 혼합물에서 각 유체의 입자를 효과적으로 분리시킬 수 있다. Farchi⁽²⁾은 실제 크기의 기체-액체 사이클론 분리기에 대한 실험적 연구를 통하여 다양한 입자별 분리 효율에 대한 실험식을 도출하였고, 이를 Erdal 등⁽³⁾이 3차원 단상유동에 대한 사이클론 분리기 수치해석 기법 적용 가능

* 성균관대학교대학원 기계공학과(Graduate school of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

** 성균관대학교 기계공학부(School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University)

† 교신저자, E-mail : yjkim@skku.edu

성을 도출하였다. 이후 Erdal 등⁽⁴⁾은 수치해석 기법을 더욱 발전시켜 기포와 물을 활용한 다상유동에 대한 사이클론 분리기 특성을 도출하였고 이를 실험과 비교하여 검증하였다. Yoshida 등⁽⁵⁾은 분리효율을 향상시키고 압력강하를 제어할 수 있는 방안으로 작은 입구를 추가 시키는 등의 형상 변화를 통한 연구를 수행하였고, Chuah 등⁽⁶⁾은 사이클론 분리기의 원추부 형상 변화가 압력강하 및 집진율에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. Mousavian 등⁽⁷⁾은 오일과 물, 그리고 가스를 작동유체로 사용하는 사이클론 분리기에 대한 수치해석 연구를 3가지 난류모델을 통해 수행하였다.

본 연구에서는 기존의 사이클론 분리기에 모듈화 방식을 사용하여 복통 구조를 적용함으로써 유입되는 작동유체를 두 개의 세그먼트로 분할하여 기존의 사이클론 분리기에 비해 미세입자를 효과적으로 분리할 수 있도록 도왔고, 원통부 형상변화를 통해 빠른 속도로 유동을 회전, 이에 따른 원심력을 통해 분리효율을 향상시키는 연구를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 해석모델 및 경계조건

본 연구에서는 복통 구조의 사이클론 분리기를 해석 모델로 사용하였으며, 분리기는 원통부와 원추부로 구성된다. 원통부의 직경(D_2)은 0.2 m, 길이(h_1)는 0.4 m이고 원추부의 길이(h_2)는 0.4 m이다. 유입구는 가로(a) 0.025 m, 세로(b) 0.1 m로 구성되었으며, 분리기 상단의 기체 출구 직경(D_1)은 0.05 m, 하단의 액체 출구 직경(B)은 0.05 m이다(Fig. 1 참조). 오일 가스 플랜트 전처리 공정 내 사이클론 분리기를 고려함으로써 가스와 오일, 그리고 물을 작동유체로 선정, 3상 유체에 대한 해석을 Mixture 모델을 사용하여 수행하였으며 유입되는 물의 10% 비율로 오일의 유입량을 조절하였다. 입구에서의 각 유체는 20 m/s의 속도로 유입되도록 경계조건을 각각 설정하였다(Table 1 참조). 본 연구에서는 사이클론 분리기의 형상이 분리 효율에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 복통 구조를 고려하고, 원통부의 종횡비(aspect ratio)에 따른 8가지 경우를 수치적으로 해석하였다(Table 2 참조). 유동장 예측을 위해서 사용되는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 방법은 장치의 분리효율을 분석하기에 효과적이므로 상용코드인 ANSYS FLUENT ver 17. 1을 사용하여 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 사이클론 분리기의 난류 모델은 일반적으로 swirl 속도장을 예측할 수 있는 Reynolds Stress Model (RSM)을 사용하였다. 또한, 준과도상태(pseudo-transient) 기법을 사용하여 다상유동 모델의 정상상태 해석 시 발생하는 불안정성을 완화하였다.

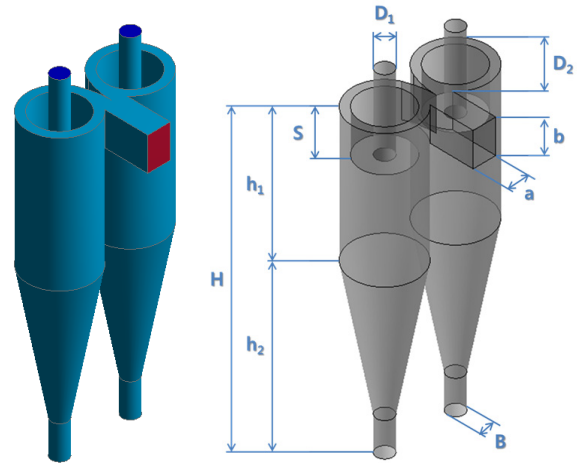


Fig. 1 Schematic of the modeled dual-cyclone separator

Table 1 Boundary conditions

	Oil	Water	Gas
Density (kg/m ³)	800	998.2	1.225
Viscosity (kg/m·s)	0.003	0.001	1.7894e-05
Operating Temperature (K)	288.16		
Inlet Velocity	20 m/s		
Turbulent Intensity	10 %		
Turbulent Viscosity Ratio	10		

Table 2 Parameters of model

Cases	D_2 (m)	h_1 (m)
1	0.25	0.5
2	0.2	
3	0.15	
4	0.25	0.4
5 (Ref.)	0.2	
6	0.15	
7	0.25	0.3
8	0.2	
9	0.15	

2.2 준과도해석

준과도상태 해석 기법은 높은 이방성 격자와 Rotating Reference Frame의 수렴성 개선에 많은 이점을 가지고 있다.⁽⁸⁾ 이는 식 (1)과 같이 수송방정식에 준과도상태 항을 고려함으로써, 다상유동을 비정상상태로 가정하여 해석할 수 있다.

$$\rho_p Vol_p \frac{(\phi_p^{n+1} - \phi_p^n)}{\Delta t} + a_p \phi_p^{n+1} - \sum a_i \phi_i^{n+1} = S_p \quad (1)$$

위 식에서 ρ_p 은 밀도, Vol_p 은 체적, a 는 질량, ϕ 는 단위 시간당 보존양을 각각 나타낸다.

2차원 u-운동량의 전환 형태는 다음과 같다.

$$\frac{a_{i,j}}{\alpha_u} u_{i,j} = \sum a_{nb} u_{nb} + (p_{I-1,j} - p_{I,j}) A_{i,j} + b_{i,j} + \left[(1 - \alpha_u) \frac{a_{i,j}}{\alpha_u} \right] u_{i,j}^{(n-1)} \quad (2)$$

상기 식을 과도상태의 u-운동량 식과 비교하면 다음과 같다.

$$\left(a_{i,j} + \frac{\rho_{i,j}^0 \Delta V}{\Delta t} \right) u_{i,j} = \sum a_{nb} u_{nb} + (p_{I-1,j} - p_{I,j}) A_{i,j} + b_{i,j} + \frac{\rho_{i,j}^0 \Delta V}{\Delta t} u_{i,j}^0 \quad (3)$$

식 (2)에서 상첨자 n-1은 앞 반복을 의미하고 식 (3)에서 상첨자 0은 앞 시간 단계를 의미한다. 정상상태 공식의 전환된 형태와 과도상태 식 사이에 다음과 같은 유사성이 있음을 알 수 있다.

$$(1 - \alpha_u) \frac{a_{i,j}}{\alpha_u} = \frac{\rho_{i,j}^0 \Delta V}{\Delta t} \quad (4)$$

식 (4)를 만족시키는 시간 간격의 크기를 취하여 동일한 초기 장(field)으로부터 시작하여 준과도상태 연산을 수행하면 주어진 초기 장으로부터 전환된 반복 정상상태 계산의 효과를 얻는 것이 가능하다는 것을 보여준다. 대안으로 정상상태 계산들을 공간적으로 다른 시간 간격을 갖는 준과도상태 절차로 해석할 수 있다. 지배 방정식들이 안정성 문제를 발생시키는 부양 유동(buoyant flow), 소용돌이 유동, 그리고 충격파(shock wave)를 갖는 압축성 유동과 같은 상황에서 준과도상태 해석 기법을 사용할 수 있다.

2.3 다상유동 해석

유체유동에 관한 수치해석은 비선형 편미분방정식인 Navier-Stokes 방정식을 기반으로 하며, 이를 이산화하기 위해 본 논문에서는 유한체적법(FVM)을 사용하였다. 또한, 사이클론 내부 다상유동에 대한 정확한 해석을 위해 임의의 두 인접한 서로 다른 위상 사이의 계면(interface) 위치가 서로 섞이지 않는 다중 위상 흐름의 시뮬레이션을 위해 설계된 표면 추적 모델인 VOF 모델을 사용하였다. VOF 모델에서는 운동량 방정식의 단일 식이 유체에 의해 공유되며, 각 계산 셀에 대한 유체의 체적분율은 영역 전체에서 추적된다. VOF 모델의 적용에는 자유표면 흐름, 슬로싱(sloshing), 액체 내 큰 사이즈의 기포 운동, 댐 붕괴 후의 유체운동, 제트 분열의 시뮬레이

션 및 액체와 기체 경계면의 안정적 혹은 동적 추적이 포함된다. 또한, 검사체적 내에 액상의 체적비로 정의된 VOF값을 사용하여 상경계면을 추적하여 각 상의 체적이 보존되기 때문에 다상유동의 물리적인 현상을 왜곡 없이 표현할 수 있다는 장점이 있다.

VOF 모델에서 연속방정식은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_m \rho_m) + \nabla \cdot (\alpha_m \rho_m \vec{U}_m) = S_m$$

여기서, 임의의 상 m에 대하여 \vec{U}_m 은 상의 속도(m/s), S_m 은 질량소스(kg/s · m³), 그리고 α_m 은 체적분율이다. 초기상의 체적분율은 아래 식을 기반으로 한다.

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1$$

VOF 모델의 운동량 방정식은 다음 식으로 정의된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{U}) + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \cdot \vec{U}) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho g + \vec{B}$$

위 식에서 τ 는 점성응력텐서(N/m³)이며, \vec{B} 는 외력이다. 특히, 본 연구에서는 검사체적내의 자유표면 위치와 VOF값을 직접적으로 추적하고 계산하는 경계면 추적법(interface tracking method)을 사용하였다. 또한, 경계면의 표면장력에 대한 영향을 고려하기 위해 CSF모델(Continuum surface force model)을 이용하였다.

2.4 RSM(Reynolds Stress Model)

본 논문에서는 수렴성 판단 기준으로 convergence criteria 수치가 1.0e-4이 되도록 적용하였으며, 추가적으로 효율을 판단하기 위해 주요지표인 토출량이 일정하게 유지되는 시점까지 수치해석을 진행하여 수렴성을 판단하였다. 이 때, 사용된 지배방정식은 정상상태 및 비압축성 유체의 3차원 난류 유동을 지배하는 보존형방정식은 RANS (Reynolds Average Navier-Stokes)이며, RANS 방정식의 Reynolds 응력항에 따른 닫힘 문제를 해결하기 위한 난류 모델로써 Reynolds Stress Model (RSM)을 사용하였다. k-ε 모델은 소용돌이 유동에서 과도한 난류점성계수 및 점선방향속도가 예측되어, 사이클론 분리기 내 복잡한 난류유동현상을 정확히 예측하기 위한 RSM이 적절하다. RSM은 등방성 난류라는 가정과 Reynolds 응력항에 대한 미분형 수송방정식의 해를 직접 구할 수 있으므로, 이를 통해 강한 소용돌이 현상이 발생하는 사이클론 내 난류유동특성을 규명할 수 있다. Reynolds 응

력항에 대한 미분형 수송 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \overline{u_i u_j}) = D_{ij} + P_{ij} + \phi_{ij} - \rho \epsilon_{ij} \quad (5)$$

위 식에서 D_{ij} 는 확산항, P_{ij} 는 생성항, ϕ_{ij} 는 압력 변형항, $\rho \epsilon_{ij}$ 는 난류 소산항을 각각 나타내며, 응력 확산항을 다음과 같다.

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k}(-\rho \overline{u_i u_j u_k} - \delta_{ik} \overline{p u_j} - \delta_{jk} \overline{p u_i} + \mu \delta_{kl} \frac{\partial}{\partial t_l} \overline{u_i u_j}) \quad (6)$$

2.5 격자계 구성

RSM 모델이 갖는 수렴성 문제를 해결하고 향상시키기 위해 표준 $k-\epsilon$ 모델을 통해 우선적으로 유동을 수렴시킨 후, RSM 모델을 조합적으로 사용하는 방법을 적용하였으며 격자 구성 시, 격자계의 타당성을 조사하기 위하여 격자 의존성 테스트를 수행하였다. 초기 설정 10만개부터 40만개까지 격자 수를 늘려가면서 수치해석을 수행한 결과, 25만개보다 격자 수가 많은 경우에는 분리효율의 평가지표가 되는 오일 질량유량 값이 상대적으로 일정한 경향을 나타냄을 확인할 수 있었다(Fig. 2 참조). Fluent를 통한 다상 유동 해석의 경우 각 노드를 통해 정보를 전달받기 때문에 조밀하게 구성된 사면체(tetrahedrons) 격자계를 구성하여 수치해석을 수행하였다(Fig. 3 참조).

3. 결과 및 고찰

3.1 복통 구조를 통한 유동 변화

본 연구에서는 복통 구조를 통해 유입되는 유체가 두 개의 세그먼트로 분할되면서 기존 단일 구조의 사이클론 분리기와 어떤 유동 특성 차이를 보이는지 고찰하였다. Fig. 4을 통해 단일 구조와 복통 구조 내 유동을 유선(streamline)으로 표현하였으며, 복통 구조에서 유입되는 유체는 두 개의 흐름으로 분리되는 과정에서 원활한 흐름을 보임을 확인할 수 있다. 하지만 흐름이 분리되면서 유입되는 유체가 출구까지의 유동 흐름에서 회전력을 상실하여 원심력에 의한 분리가 이루어지지 않는 것이 확인되었다. 단일구조와 복통구조에서 발생하는 차이를 명확히 확인하기 위해, 사이클론의 원통부의 중간지점(section A-A'), 원추부의 중간지점(Section C-C') 및 원추부에서 원추부로 전환되는 지점(Section B-B'), 총 3가지 섹션에 대한 접선속도를 확인하였다. 단일구조에서는 해당 3개의 지점에서 접선속도가 각각, 12.9 m/s, 20.3 m/s, 8.4 m/s로 나타났으나, 복통 구조에서는 10.5

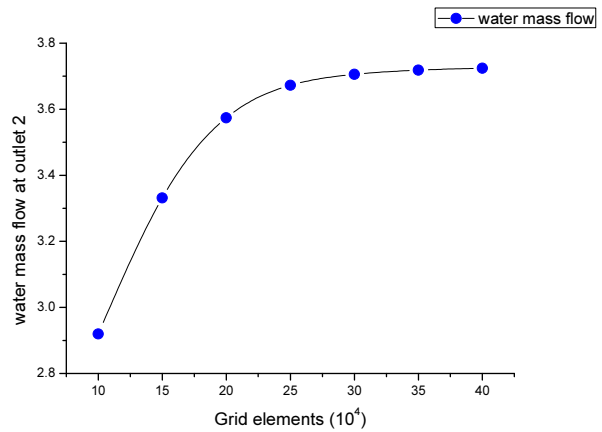


Fig. 2 Grid dependency test

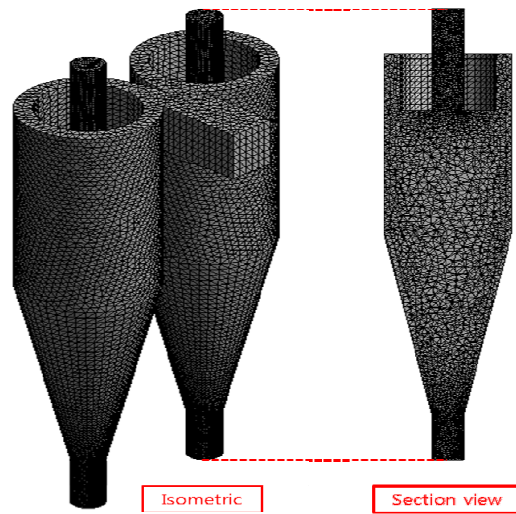


Fig. 3 Grid systems

m/s, 18.8 m/s, 5.7m/s로 확인하였다. 접선속도의 차이를 통해 단일구조 대비 복통구조에서 회전력 상실이 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 사이클론 분리기 중심부에서 벽면으로 이동함에 따라 유속이 증가한 내부 유동이 벽면에서 크게 감소했기 때문이다. 복통구조에 특히 이러한 영향이 두드러지는 이유는 단일구조에서 복통구조로 전환됨에 따라 유입되는 유체가 2개의 세그먼트로 분기되며, 분기과정에서 발생하는 유동저항과 유체가 접하는 면적이 증가함으로써 회전력이 크게 감소하여 접선속도에서의 차이가 발생한 것으로 고려된다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 원통부의 직경 및 길이 변화를 고려하여 수치해석을 진행하였다.

3.2 원통부 형상 변화

복통 구조 사이클론 분리기 원통부의 지름과 길이 변화에 따른 유동 변화를 명확히 고찰하기 위해 유선을 통한 흐름

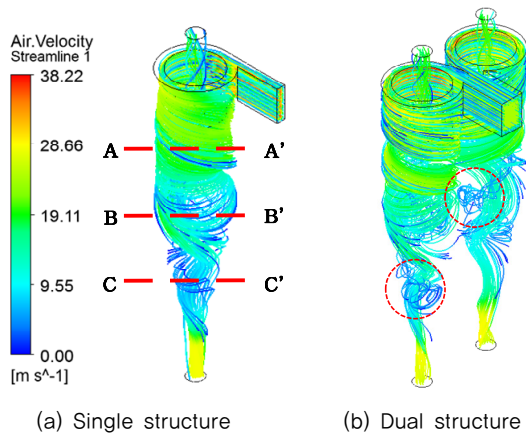


Fig. 4 Streamline of cyclone separator

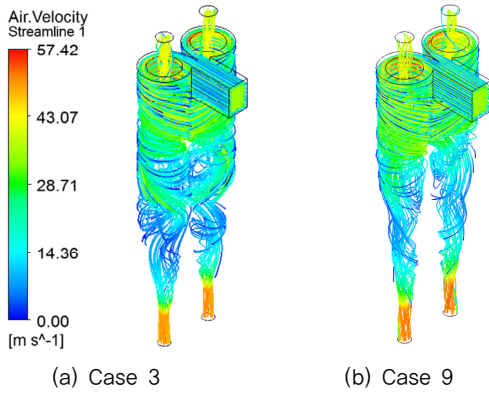


Fig. 5 Streamline of dual cyclone separator

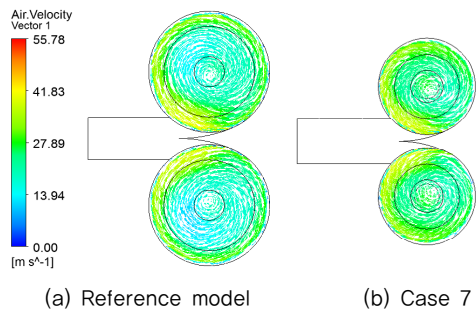


Fig. 6 Cross-sectional view of air velocity distributions in the dual-cyclone separator

을 우선 파악하였다. Fig. 5은 원통 부의 직경을 줄임과 동시에 서로 다른 길이 변화를 통한 유동을 표현한 것이다. 기존 모델보다 직경이 감소함에 따라 기존 모델에서 발생된 회전력이 상실되는 유체 흐름이 두 모델에서 모두 사라진 것을 확인할 수 있다. 이는 원통부 단면적 감소로 유속이 증가하기 때문이며 분리 효율 상승에 큰 영향을 미친다. 두 모델의 유동을 비교해 볼 때 기존 0.4 m의 원통부 길이를 0.3 m로 줄임으로써 접촉 면적을 축소한 Case 9에서 훨씬 원활한 흐름이 유지되며 원심력에 의한 분리 효율 향상이 예측된다.

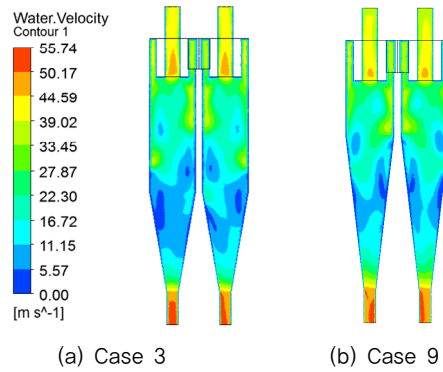


Fig. 7 Contour of water velocity in the dual-cyclone

3.3 속도 분포 및 벡터장

원통부 형상 변화에 따른 속도 변화를 보다 명확하게 파악하기 위하여 contour를 이용한 속도 분포와 벡터장을 활용하였다. Fig. 6은 기본 모델과 형상변화를 통해 원통부의 직경을 줄인 모델의 속도 분포를 벡터장을 통해 표현한 것이다. 원통부의 직경이 감소함으로써 분리기 내부 유속이 빨라지는 것을 case 7을 통해 확인할 수 있다. 또한, 원통부의 길이 변화가 내부 유동에 미치는 영향을 Fig. 7의 contour를 통해 분석하였다. 원통부 길이에서 차이를 갖는 두 모델의 속도 분포를 보면, case 9가 상대적으로 뚜렷하고 넓은 속도분포를 나타낸다. Case 9의 경우 원통부 길이 변화를 통해 유체의 접촉 면적이 상대적으로 감소되었고, 이를 통해 유속이 증가하며 그 결과 원심력에 의한 분리 효율이 향상됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 각 case에 대한 분리효율을 계산하기 위하여 오일과 물의 질량유량 값을 분석하였다(Fig. 8 참조). 오일과 물의 질량유량은 유입된 오일 또는 물의 토출량 대비 출구에서 해당 유체의 토출량을 계산한 것이다. 원통부의 직경 및 길이 변화에 따라 각 케이스별로 분리효율에서 큰 차이를 보였으며, 유선과 속도 분포를 통해 높은 분리효율을 보일 것으로 예상된 case 9의 경우 가장 높은 분리효율을 보였다.

4. 결론

본 연구에서는 준과도상태 수치해석 기법을 이용하여 사이클론 분리기의 복통구조 및 원통부 형상에 따른 면적 변화가 유동에 미치는 영향을 고찰하였다. 유입되는 유체가 복통구조로 인해 두 개의 세그먼트로 분할되는 과정에서 출구까지의 유동 흐름이 회전력을

상실하여 원심력에 의한 분리가 원활하게 이루어지지 않는 것이 확인되었다. 이를 해결하기 위하여 원통부의 직경 및 길이 변화를 고려하여 유체가 접촉하는 단면적을 감소시켜 유속을 증가, 분리효율을 향상시킬 수 있도록 하였다.

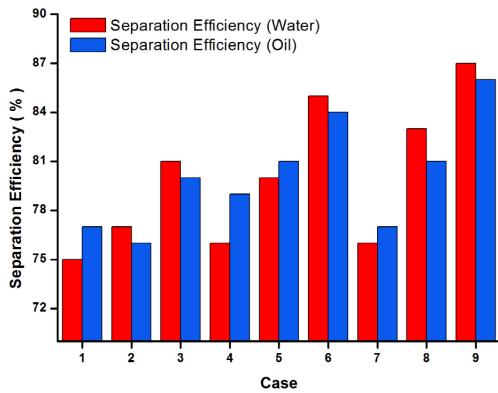


Fig. 8 Separation efficiency of dual cyclone separator

Case 9의 경우 원통부의 형상 변화를 통해 유체의 접촉 단면적이 크게 감소하면서 가장 높은 분리효율을 나타내었다. 이를 통해 실제 오일 가스 플랜트에서 다량으로 유입되는 원유의 흐름을 나누어 효과적으로 분리시킬 수 있는 가능성을 확인하였으며, 향후 추가적인 연구를 통해 FWKO vessel과 같은 대형 유수분리기 내에 입구장치로써 사이클론 분리기를 활용하여 유동 안정화 및 효율을 개선할 수 있도록 할 계획이다.

후 기

본 연구는 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원(18IFIP-B089070-05)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Arato, E.G., Barnes, N.D., 1992, "In-line free vortex separator used for gas/liquid separation within a novel two-phase pumping system", Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- (2) Farchi, D., 1990, "A study of mixers and separators for two-phase flow in M.H.D. energy conversion system", M.S. thesis(in Hebrew), University of Ben-Gurion.
- (3) Erdal, F.M., Shirazi S.A., Shoham O., Kouba G.E., 1997, "CFD simulation of single-phase and two-phase flow in gas-liquid cylinder cyclone separators", Journal of Society of Petroleum Engineering, 2, pp.436-446.
- (4) Erdal, F.M., Shirazi S.A., Shoham O., 1998, "CFD study of bubble carry-under in gas-liquid cylindrical cyclones separators", Journal of Society of Petroleum Engineering, Vol.15, pp.217-222.
- (5) Hideto Yoshida, Kouichiro Ono, Kunihiro Fukui, 2005, "The effect of a new method of fluid flow control on submicron particle classification in gas-cyclones", powder technology, Vol. 149, pp. 139~147.
- (6) T.G. Chuah, Jolius Gimbin, Thomas S.Y. Choong, 2006, "A CFD study of the effect of con dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics", Powder technology, Vol. 162, pp. 222~230.
- (7) S.M.Mousavian, A.F. Najafi, 2008, "Numerical simulations of gas-liquid-solid flows in a hydrocyclone separator", Arch Appl Mech. Vol. 79, pp. 395-409.
- (8) Shi, S. X., Yu, Y., Yang, W. W. and Zhou, H. X., 2013, "Flow filed test and analysis of KYF Flotation Cell by PIV," Applied Mechanics and Materials, Vol. 331, pp. 200-204.