



Received: 2026/03/02
Revised: 2026/03/13
Accepted: 2026/03/20
Published: 2026/03/31

***Corresponding Author:**

Min-Gyu Jeon

1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyungsangnam-do, 51704, Republic of Korea
Tel: +82-55-907-5335
E-mail: mgjeon@navy.ac.kr

해군기지 연안 해양오염 방제 하이드로사이클론 분리기 기술개발에 관한 연구

Development of a Hydrocyclone Separator for Coastal Marine Pollution Response at Naval Bases

전민규*

해군사관학교 기계시스템공학과 부교수

Min-Gyu Jeon*

Associate professor, Dept. of Mechanical System Engineering, Republic of
Korea Naval Academy

Abstract

해양사고로 인한 오일 유출사고에 빠르게 방제할수 있는 기술이 필요하다. 본 연구에서는 수치해석 방법으로서 고급 난류모델인 RNG $k-\epsilon$ 모델을 사용하였다. 형상치수 변경 조건으로서 유입 유량의 입구직경과 실린더 길이, 유입유량, 오버플로우 직경의 수치를 변경하여 분리효율 평가를 수행하였다.

Rapid and effective technologies are required to mitigate oil spill incidents caused by marine accidents. This study numerically evaluated the separation performance of a hydrocyclone using the advanced RNG $k-\epsilon$ turbulence model. A parametric study was conducted by varying the inlet diameter, cylindrical section length, inlet flow rate, and overflow diameter. Separation efficiency was assessed for each case.

Keywords

하이드로사이클론 분리기(Hydrocyclone Separator), 오일 유출 방제(Oil Spill Response), RNG $k-\epsilon$ 난류모델(RNG $k-\epsilon$ Turbulence Model), 분리 효율(Separation Efficiency), 형상 변수 최적화(Geometric Parameter Optimization)

Acknowledgement

이 논문은 2026년 해군사관학교 해양연구소 학술연구과제 연구비의 지원으로 수행된 연구임.

1. 서론

우리나라는 해양을 통해 다양한 무역선을 이용하여 무역 활동을 하고 연안을 방어하기 위해 대한민국 해군에서는 다양한 함정을 운용하고 있으므로 바다라는 자원의 관리가 매우 중요하다고 볼 수 있다. 이처럼 다양한 선박의 운용이 대한민국 인근 연안에서 이루어지고 있어 생태계 환경에 관한 관심을 가져야 한다. 2007년 태안군 대산항 인근에서 크레인 바지선이 정박 중이던 원유 운반선 허베이 스피릿(Hebei Spirit)과 충돌하여 10,900톤의 원유가 서해안으로 유출된 바 있다. 또한 2014년 여수시 원유부두로 들어오던 16만톤급 유조선이 송유관과 부딪혀 원유 800리터가 여수 앞바다로 유출된 바 있다. 이처럼 선박의 충돌에 의한 오일 유출사고가 불시에 일어날 수 있으므로 이를 제거하기 위한 효과적인 기술이 필요하다. 일반적으로 오일 유출 사고 시 오일(oil) 펜스와 스키머(skimmer)를 활용하여 유막을 수거한다[1-3]. 해당 기술은 물리적 격리로 오일 확산을 단기간에 억제 가능하고 회수된 오일을 재처리 또는 폐기하기 좋다고 알려져 있다. 하지만 큰 파도와 강한 바람이 있는 환경에서 효과가 감소하고 오일이 얇게 펼쳐진 경우 효율이 낮다. 또한 흡착제(sorbents)를 이용하여 물과 유체 사이의 친수성과 소수성 차를 이용하여 오일만 흡수 및 흡착하는 재료를 활용하는 경우가 있다[4,5].

해당 방식은 얇은 소규모 오일 유출 제거에 효과적이다. 하지만 이 또한 강한 바람과 조류 등 펜스의 이동이 필요한 경우 효율이 떨어지고 많은 양의 펜스의 설치가 필요하고 재활용 및 폐기의 비용과 환경 문제가 발생한다. 따라서 위와 같은 문제를 효율적으로 다루기 위해서 오일 유출과 같은 해양오염 사고에 신속한 대응이 가능한 방제선 기술개발이 필요하다. 최근 민·관·군의 적극적인 협조로 다양한 연구 활동이 지속되고 있으며 해군기지 또한 연안 해양오염에 자체 대응할 수 있는 기술개발이 필요하다. 본 연구에서는 강한 바람과 큰 파도에도 강건한 방제선에 탑재할 하이드로사이클론 분리기(hydrocyclone separator)를 개발하고자 한다. hydrocyclone separator는 악조건 상황에서도 지속 운용이 가능하고 구조적 특징인 원심력을 이용하여 밀도 차에 의한 해수와 오일의 분리에 적용할 수 있는 기술이다. 국내 D사에서 운용 중 미세오일 처리시스템의 운용조건을 활용하여 수치해석을 수행하여 hydrocyclone separator의 구조적 특징을 분석하고 이상적 형상치수 설계 방안을 도출하고자 한다.

2. Hydrocyclone Separator 수치해석

2.1 수치해석 모델 선정

본 연구에서는 hydrocyclone separator 수치해석을 통해 물과 오일의 분리효율을 예측하기 위해 상용 프로그램인 FLUENT(version 19.2; ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA)를 사용하였다. 수치해석을 진행하기 위한 초기 작업으로 ANSYS meshing을 사용하여 격자를 Fig. 1과 같이 생성하였다. element size를 0.002 m로 하여 각 케이스 별 총 elements 개수는 500,000개 이상이다. Mesh의 품질을 직교성(orthogonality)과 비대칭도(skewness)로서 판단하였다. Mesh 직교성 개념은 인접한 요소면(또는 인접한 요소 모서리) 사이의 각도가 최적의 각도에 얼마나 가까운지에 대해 관련이 있다. 직교성의 측정 범위는 0(나쁨)에서 1(양호)까지다. 사면체 요소의 비대칭도는 최적 볼륨의 편차로 가장 잘 포착된다. 모든 종류의 셀에 대해 요소의 반대쪽 중간면을 연결하는 두 선 사이의 최소 각도를 찾아 정규화된 각도 편차 개념에 따라 캡쳐할 수 있다. 비대칭도의 metric 범위

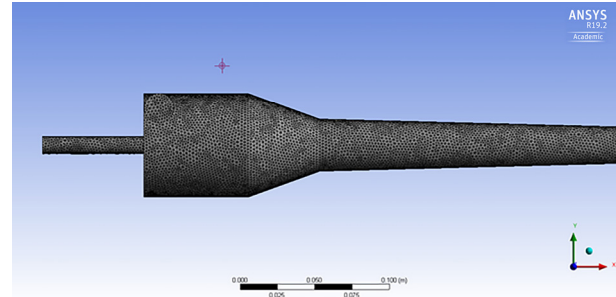


Fig. 1. Shape of mesh

는 0(좋음)에서 1(나쁨)까지다.

복잡한 유동의 수치해석을 위해 모델링 설정을 하여야 하며, 본 연구에서는 swirling flow를 고려한 난류유동을 고려하기 위해 ANSYS FLUENT의 고급 난류모델인 RNG k- ϵ 모델을 사용하였다. RNG 모델은 re-normalisation group(RNG) 방법을 사용하여 Navier-Stokes 방정식을 재 정규화하여 더 작은 규모의 모션 효과를 고려하여 개발되었다. 표준 k- ϵ 모델에서 와동 점성(eddy viscosity)은 단일 난류 길이 스케일에 의해 결정됨으로 난류 확산은 지정된 스케일에서만 발생하는 반면, 실제로 모든 모션 스케일은 난류 확산에 기여하게 된다[6].

본 연구에서는 수치해석 초기조건으로서 D사의 미세오일 분류기 데이터를 이용하였다. 최대 입구 유속은 10.2 m/s이며, 입구 유량은 434.0625 kg/h로 설정하였으며, vortex finder 부근의 over flow 출구 압력은 4.6 bar, under flow 출구 압력은 10.5 bar로 압력차가 발생하도록 설정하였다. Pressure velocity scheme은 coupled algorithm을 적용하였다. 압력 기반 solver를 사용하면 분리 또는 결합 방식으로 흐름 문제를 해결할 수 있다. 결합 방식을 사용하면 비결합 또는 분리 방식에 비해 이점이 있으며, 결합된 체계는 분리된 솔루션 체계에 비해 우수한 성능으로 정상 상태 흐름을 위한 견고하고 효율적인 단상 구현을 얻는다. 공간 이산화(spatial discretization)에서 압력은 PRESTO(pressure staggering option)를 사용하였고 second-order upwind scheme를 사용하였다[7]. 입자의 거동과 하이드로사이클론의 분리 효율을 예측하기 위해 DPM(discrete phase models)을 사용하였다[8]. 입자는 입구 영역에서 유입되는 유속과 같은 속도로 주입되도록 하였고 입자의 밀도는 698.8 kg/m³으로 오일을 모사한다. 이때 입자 사이즈는 50 μ m이다.

2.2 분리효율 평가

하이드로사이클론 내부 유체의 분리 효율(E)은 동일 시간동안 측정된 입구에서의 입자 질량유량과 상부 출구를 통해 나온 입자의 질량유량으로 식 (1)과 같이 계산된다. E 는 1에 가까운 값일수록 우수한 입자 분리 효율을 의미하며 다음 식으로 계산된다.

$$E = \frac{m_o}{m_i} \tag{1}$$

m_o 와 m_i 는 각각 인입구로 유입된 입자와 오버플로우 출구로 유출된 입자의 질량유량이다.

3. Hydrocyclone Separator 비교 분석

Fig. 2는 hydrocyclone separator의 치수 변경에 따른 분리효율 비교평가를 위한 개략도이다. 본 연구 수치해석에서 적용된 입구 조건의 유량정보는 Table 1에 정리되어 있다. 최적의 분리효율을 가지는 모델을 취하기 위해 입구직경 변경 및 오버플로우 직경을 변경하였으며 해당 정보는 Table 2에 정리되어 있다.

4. Hydrocyclone Separator 결과 검토

Fig. 3~Fig. 6는 각각의 Case별 오일 파티클의 이동경로를 보여준다. 이때 오일은 낮은 비중으로 D_o 방향으로 배출되어야 이상적인 형상으로 볼 수 있다. Hydrocyclone separator의 분리효율 비교를 위해 가장 가혹한 유량 조건인 최대유량 조건에서 입구직

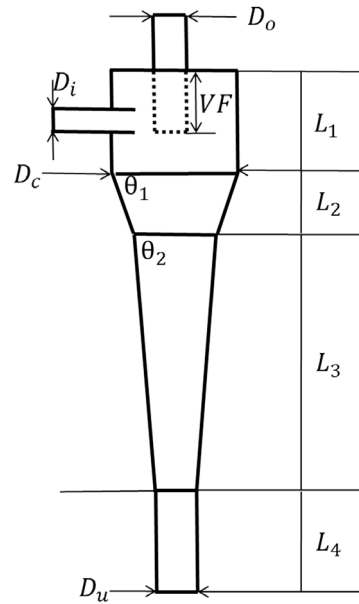


Fig. 2. A schematic of modified hydro cyclone

- D_i : Inlet diameter
 - D_o : Outflow diameter
 - D_c : Characteristic diameter
 - D_u : Underflow diameter
 - L_1 : Cylinder length
 - L_2 : Cone length
 - L_3 : Taper length
 - L_4 : Tail length
 - VF : Vortex Finder length
 - θ_1 : Cone degree
 - θ_2 : Taper degree
- * VF diameter (= D_o)

Table 1. Mass flow rate condition (inlet)

Contents	Max [kg/h]	Mean [kg/h]	Minimum [kg/h]
Blended	4634.06	2547.81	461.56
Oil in water	9.27	5.1	0.92
Fresh water	4624.8	2542.72	460.64

Table 2. Geometric and physical parameters used in the numerical simulations

Case No.	Mass flow rate (inlet)	D_i [m]	D_o [m]	D_u [m]	VF	L_1	L_2	L_3	L_4	D_c	θ_1	θ_2
1	Max	0.015	0.005	0.018	0.015	0.07	0.048	0.334	1.086	0.07	20	1.5
2	Max	0.02	0.005	0.018	0.02	0.07	0.048	0.334	1.086	0.07	20	1.5
3	Max	0.015	0.005	0.018	0.015	0.035	0.048	0.334	1.086	0.07	20	1.5
4	Max	0.02	0.005	0.018	0.035	0.035	0.048	0.334	1.086	0.07	20	1.5
5	Mean	0.02	0.005	0.018	0.02	0.07	0.048	0.334	1.086	0.07	20	1.5
6	Minimum	0.02	0.005	0.018	0.02	0.07	0.048	0.334	1.086	0.07	20	1.5
7	Mean	0.02	0.012	0.018	0.02	0.07	0.048	0.334	1.086	0.07	20	1.5
8	Mean	0.02	0.009	0.018	0.02	0.07	0.048	0.334	1.086	0.07	20	1.5

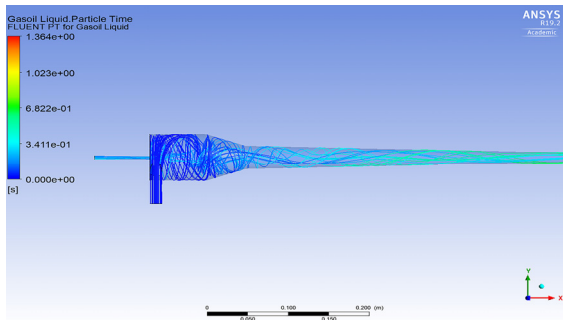


Fig. 3. Particle time of the vortex chamber (Case 1)

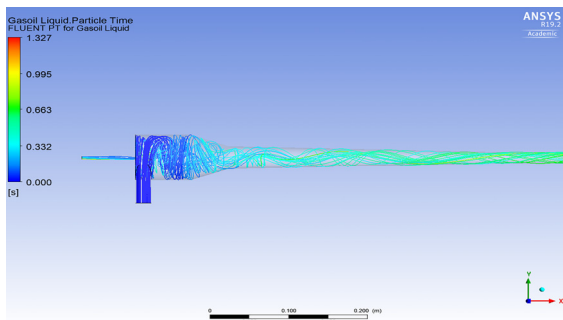


Fig. 4. Particle time of the vortex chamber (Case 2)

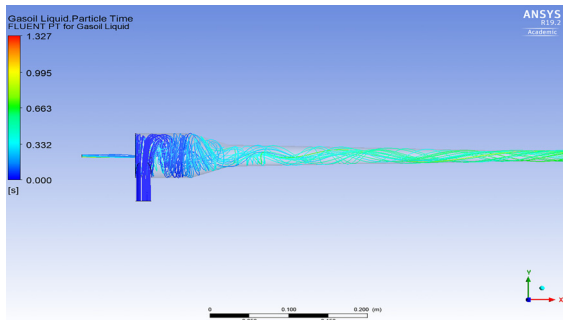


Fig. 5. Particle time of the vortex chamber (Case 3)

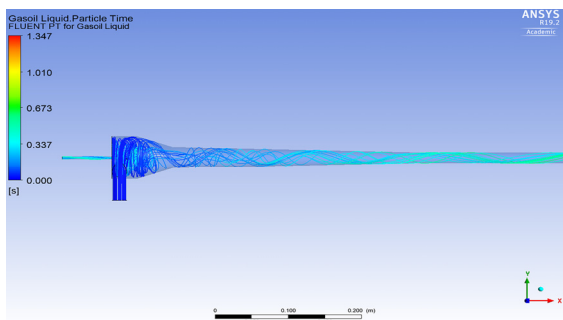


Fig. 6. Particle time of the vortex chamber (Case 4)

경(D_i : 0.015 m와 0.02 m) 그리고 실린더 길이(L_1 : 70 mm, 35 mm)를 변경하여 Case 1~4 각각의 분리 효율을 Table 3과 같이 비교하였다. Case 2의 효율이 32%로 가장 높았다. 즉 상기 치수 범위에서는 입구 직경이 크고 실린더 길이가 길수록 분리효율(E)이 좋을 수 있다.

Table 3. Comparison results for separation efficiency (Case 1~4)

Case No.	Mass flow rate (inlet)	D_i [m]	D_o [m]	D_w [m]	VF	L_1	E
1	Max	0.015	0.005	0.018	0.015	0.07	0.22
2	Max	0.02	0.005	0.018	0.02	0.07	0.32
3	Max	0.015	0.005	0.018	0.015	0.035	0.05
4	Max	0.02	0.005	0.018	0.035	0.035	0.25

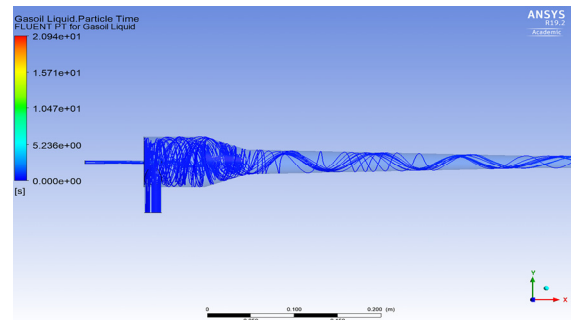


Fig. 7. Particle time of the vortex chamber (Case 5)

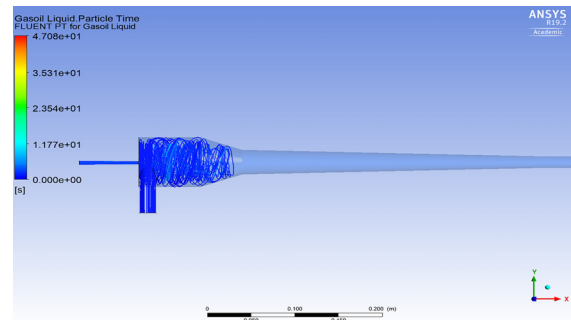


Fig. 8. Particle time of the vortex chamber (Case 6)

Case 1~4에서 효율이 가장 좋았던 Case 2를 기준으로 해서 입구 유량을 평균치 및 최소치로 변경하여 분리효율을 비교하였다. 그 결과 최소 유량조건인 Case 6에서 77%의 최대효율이 나왔다. 즉 입구 유량이 작을수록 분리효율이 증가함을 확인할 수 있다. Fig. 7, Fig. 8은 Case 5, 6의 오일 파티클의 이동경로를 보이며, Table 4는 각 Case별 분리효율을 보인다.

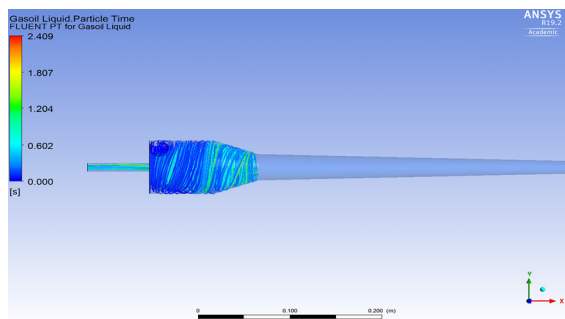
Table 4에서는 Case 6의 분리효율이 가장 높지만, 입구 유량이 최대인 가혹 조건이기에 평균유량을 이용한 Case 5를 기준으로 오버플로 직경(D_o)을 달리 하여 분리효율 변화를 검토하고자 한다. 이에 Table 5와 같이 D_o 를 0.005 m에서 0.01167 m 및 0.00875 m로 치수변경을 하여 각각의 분리효율을 검토해 본 결과 Fig. 9과 같이 D_o 가 가장 큰 Case 7의 경우에 효

Table 4. Comparison results for separation efficiency (Case 2, 5, 6)

Case No.	Mass flow rate (inlet)	D_i [m]	D_o [m]	D_u [m]	VF	L_1	E
2	Max	0.02	0.005	0.018	0.02	0.07	0.32
5	Mean	0.02	0.005	0.018	0.02	0.07	0.52
6	Minimum	0.02	0.005	0.018	0.02	0.07	0.77

Table 5. Comparison results for separation efficiency (Case 5, 7, 8)

Case No.	Mass flow rate (inlet)	D_i [m]	D_o [m]	D_u [m]	VF	L_1	E
5	Mean	0.02	0.005	0.018	0.02	0.07	0.52
7	Mean	0.02	0.012	0.018	0.02	0.07	0.99
8	Mean	0.02	0.009	0.018	0.02	0.07	0.97

**Fig. 9.** Particle time of the vortex chamber (Case 7)

율이 99%로 가장 좋았다.

5. 결론

본 연구는 대한민국 해군 함정의 작전 환경인 바다에서 발생할 수 있는 오일 유출 사고에 대비하여 방제선에 탑재할 hydrocyclone separator의 형상치수 변경에 따른 분리효율 평가를 수치해석을 통해 수행하였다. 수치해석 방법으로서 ANSYS FLUENT의 고급 난류모델인 RNG k- ϵ 모델을 사용하였다. 형상치수 변경 조건으로서 유입 유량의 입구직경과 실린더 길이, 유입유량, 오버플로우 직경의 수치를 변경하여 분리효율 평가를 수행하였다. 입구직경과 실린더 길이는 길수록 분리효율이 좋아지는 것을 확인할 수 있었으며, 입구 유량이 적을수록 분리효율이 좋아짐을 확인하였다. 또한 평균유량 조건에서 오버플로우 직경을 0.012 m로 키웠을 때 최대 분리효율이 99%임을 확인하였다. 따라서 hydrocyclone separator의 최적 설계에 필수인자로 입구직경, 실린더의 길이, 오버플로우의 직경이 크게 관여함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Diep Ngoc Long Huynh, Xuan Phuong Nguyen, Nguyen Dang Khoa Pham, Thi Thai Le, Xuan Thanh Tran, Cherdvong Saengsupavanich, & Anh Tuan Hoang, 'Booms and Skimmers for Oil Spill Recovery: Perspective Analysis from Lab Scale to Practical Applications,' Marine Pollution Bulletin, VOL. 224, 2026, article 119128.
- [2] Dagmar Schmidt Etkin & Tim J. Nedwed, 'Effectiveness of Mechanical Recovery for Large Offshore Oil Spills,' Marine Pollution Bulletin, VOL. 163, 2021, article 111848.
- [3] Victoria Broje & Arturo A. Keller, 'Improved Mechanical Oil Spill Recovery Using an Optimized Geometry for the Skimmer Surface,' Environmental Science & Technology, VOL. 40, NO. 24, 2006, pp. 7914-7918.
- [4] Miltiadis Zamparas, Dimitrios Tzivras, Vassilios Dracopoulos, & Theophilos Ioannides, 'Application of Sorbents for Oil Spill Cleanup Focusing on Natural-Based Modified Materials: A Review,' Molecules, VOL. 25, NO. 19, 2020, article 4522.
- [5] Neha Bhardwaj & Ashok N. Bhaskarwar, 'A Review on Sorbent Devices for Oil-Spill Control,' VOL. 243, No. B, 2018, pp. 1758-1771.
- [6] V. Yakhot, S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski, & C. G. Speziale, 'Development of Turbulence Models for Shear Flows by a Double Expansion Technique,' Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, VOL. 4, NO. 7, 1992, pp. 1510-1520.
- [7] B. Wang, K. W. Chu, & A. B. Yu, 'Numerical Study of Particle-Fluid Flow in a Hydrocyclone,' Industrial & Engineering Chemistry Research, VOL. 46, NO. 13, 2007, pp. 4695-4705.
- [8] Teja Reddy Vakamalla, Veera Bhadra Rao Koruprolu, Rakesh Arugonda, & Narasimha Mangadoddy, 'Development of Novel Hydrocyclone Designs for Improved Fines Classification Using Multiphase CFD Model,' Separation and Purification Technology, VOL. 175, 2017, pp. 481-497.