Check for updates

동력시스템공학회지 제28권 제4호 pp. 60-66 2024년 8월 ISSN 2713-8429(Print) ISSN 2713-8437(Online)
Journal of Power System Engineering https://doi.org/10.9726/kspse.2024.28.4.060
Vol. 28, No. 4, pp. 60-66, August 2024

휴대용 미세플라스틱 수거시스템 설계를 위한 유동 및 구조해석
Fluid Flow and Structural Analysis for the Design of Portable Microplastic Collection System

강기섭* · 김영식** · 최윤환* †
Ki-Seop Kang*, Young-Shik Kim** and Yoon-Hwan Choi* †

(Received 10 July 2024, Revision received 14 August 2024, Accepted 19 August 2024)

초록 : 본 연구에서는 휴대용 미세플라스틱 분리장치에서 중요한 역할을 하는 사이클론 시스템의 성능을 평가하였으며 사이클론 분리장치가 미세플라스틱과 그 내부로 유입되는 모래를 얼마나 잘 분리하는지 살펴보았다. 분리성능 평가에 사용된 사이클론은 총 4가지이며, 4가지 사이클론 중에서 단일 내부 구조를 가진 형태가 분리 성능 측면에서 가장 높은 효율을 가지는 것으로 확인되었고, 또한 10, 50, 100 μm 크기의 미세플라스틱 입자 크기에 대한 분리 성능을 평가하여 50 μm 크기보다 큰 입자 크기에서 분리 성능이 향상됨을 확인하였다. 그리고 휴대용 미세플라스틱 포집 시스템의 작동에 따른 구조적 안정성을 평가하기 위해 사이클론 시스템과 일체화된 흡입구, 분리구, 토출구에 대해 구조 해석을 수행하여 안전률 1.5를 상회하는 결과를 얻었다.

키워드 : 사이클론 시스템, 휴대용 미세플라스틱 분리장치, 내부구조, 미세플라스틱 입자크기, 구조안정성

Abstract : This study evaluated the performance of the cyclone system, which plays an important role in the portable microplastic separation device, and examined how well the cyclone separation device separates microplastics and sand flowing into them. There are four types of cyclones used to evaluate the separation performance, and it was confirmed that the form with a single internal structure had the highest efficiency in terms of separation performance among the four cyclones. In addition, by evaluating the separation performance for the microplastic particle sizes of 10, 50, and 100 μm, it was confirmed that the separation performance was improved at particle sizes larger than 50 μm. In addition, in order to evaluate the structural stability of the operation of the portable microplastic collection system, a structural analysis was performed on the inlet, separation port, and discharge port integrated with the cyclone system, resulting in a result exceeding the safety factor of 1.5.

Key Words : Cyclone System, Portable Microplastic Separation Device, Internal Structure, Microplastic Particle Size, Structural Stability

* † 최윤환(https://orcid.org/0000-0003-3641-5534) : 대표, 주식회사 모션다이나믹스
E-mail : yhchoi@motiondynamics.co.kr, Tel:070-4870-3955
*강기섭(https://orcid.org/0009-0007-7169-4424) : 졸업생, 전주대학교 탄소융합공학과
**김영식(https://orcid.org/0000-0001-5673-6314) : 센터장, 선박해양플랜트연구소

* † Yoon-Hwan Choi(https://orcid.org/0000-0003-3641-5534) : CEO, Motiondynamics Co., Ltd.
E-mail : yhchoi@motiondynamics.co.kr, Tel : 070-4870-3955
*Ki-Seop Kang(https://orcid.org/0009-0007-7169-4424) : Graduate, Department of Carbon Convergence Engineering, Jeonju University
**Young-Shik Kim(https://orcid.org/0000-0001-5673-6314) : Director of center, Korea Research Insititute of Ship and Ocean.

1. 서 론

플라스틱은 우리 생활에서 가장 밀접한 물질로 자리 잡고 있으며, 광범위한 사용으로 미세플라스틱이라는 새로운 위험에 당면하게 되었다. 미세플라스틱은 평균직경 기준 5 mm 이하의 물에 녹지 않는 고체 플라스틱을 지칭하며 광범위한 플라스틱 사용과 투기로 인하여 완벽히 분해되지 않는 미세플라스틱이 다량 발생해 물, 공기, 토양을 오염시키고 있다. 특히 해양에 투기된 플라스틱은 바닷물과 파도에 의해 미세화되고 해안으로 유입되어 해양생태계에 악영향을 미치고 있다.

해안가로 유입된 미세플라스틱을 제거하는 한 방편으로 독일 KARCHER사에서 개발한 제품이 있으나 이용시간이 짧고 고중량으로 본 연구에서 적용된 시스템을 적용하여 개선된 형태의 수거 시스템을 제안하였다. Fig. 1과 같이 해안가 모래와 혼합된 미세플라스틱을 분리하는 휴대용 미세플라스틱 수거 시스템의 내부 사이클론 장치의 플라스틱 분리 성능평가는 효과적인 미세플라스틱 분리 프로세스를 확인하는 핵심 요소 중 하나이다. 이 평가는 시스템의 내부 사이클론 장치가 미세플라스틱 입자를 효과적으로 분리하고 수거할 수 있는 능력을 평가하는 데 중요한 요소이다. 일반적인 분리 성능은 플라스틱 입자의 크기, 유동 속도, 밀도 등 여러 변수에 따라 변화할 수 있으며, 이러한 변수를 테스트하여 시스템의 성능을 최적화할 수 있다.

본 연구에서는 휴대용 미세플라스틱 수거 시스템 설계를 위하여 두 가지 부분의 평가를 수행하였다. 첫 번째로 사이클론 시스템에 의한 모래 속에 포함된 미세플라스틱의 분리성능 평가를 전산유동해석으로 수행하였으며, 총 4가지 사이클론 형상과 미세플라스틱 입자의 크기에 대한 분리성능을 평가하여 미세플라스틱 수거시스템 설계에 활용하였다. 두 번째로 휴대용 미세플라스틱 수거 시스템 구동에 따른 구조안정성을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 사이클론 시스템과 통합된 흡입구, 분리구 및 토출구에 대한 구조해석을 수행하였다.

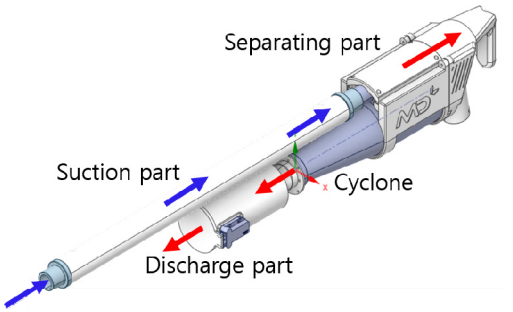


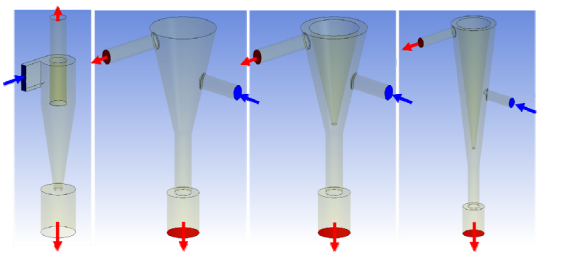
Fig. 1 Model of Portable Microplastic Collection System

2. 유동해석

2.1 해석모델

본 연구에서는 Fig. 2과 같이 4가지 형태의 사이클론에 대한 유동해석을 수행하였다. Fig. 2(a)는 일반적으로 분진 등을 분리하는 경우 가장 널리 사용되는 형태의 사이클론이며,[1,2] 상부 측면으로 유입되어 중앙의 유출관을 통해 비교적 가벼운 플라스틱은 상부로 유출되고 무거운 모래는 하부로 배출되는 형태이다.[3] 이에 반하여 (b), (c), (d)는 미세플라스틱 수거장치의 크기와 작동메커니즘에 기반하여 본 연구에서 새롭게 제안된 모델이며 (a)와는 상이하게 중간지점에서 유입되어 상부 측면으로 유출되는 구조를 가지고 있다.

유입되는 플라스틱과 모래는 고체 입자이기 때문에 전산유동해석에서는 Lagrange 기법으로 입자



(a) (b) (c) (d)

Fig. 2 Model according to cyclone internal shape((a) simple, (b) composite, (c) hollow standard, (d) hollow tall

의 거동을 추적하여 분리성능을 평가할 수 있다. 식 (1)은 유동장에 입자가 존재하는 경우, 유동에 의해 입자의 거동이 어떻게 변화되는지를 나타내는 식이다. 본 식에서는 주로 입자에 미치는 항력과 입자의 자중에 의한 중력이 주된 힘이며, 부과적으로 마찰력 등이 있다.

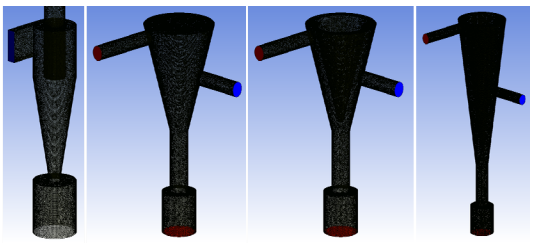
$$\frac{du_p}{dt} = F_D\,(u - u_p) + g_x\,(\rho_p - \rho)/\rho_p \qquad (1)$$

여기서, u_p와 u는 각각 입자의 속도 그리고 유체의 속도이며, F_D는 항력, g_x는 중력, ρ_p는 입자의 밀도, ρ는 유체의 밀도를 의미한다.

2.2 해석격자 및 경계조건

4가지 형태의 사이클론 형태에 대하여 ANSYS ICEM-CFD를 사용하여 유동해석을 위한 해석격자를 Fig. 3과 같이 생성하였다. 격자의 형태는 사면체격자와 벽면에는 프리즘 격자이며, 총 격자수는 약 760,000개이다. 입구로 유입되는 유량은 3.2 m^3/min이며, 난류모델은 표준 k-ε 모델이 사용되었다.[4,5] 유동해석에 대한 전처리, 후처리 및 유동장 계산은 ANSYS CFX 2021R2가 사용되었다.

Table 1은 해석에 사용된 경계조건 및 난류모델 등을 나타낸 것이고, 작동유체는 표준상태의 공기가 사용되었으며, 정상상태에 대한 유동해석을 수행하였고 벽면에서는 점착조건(no slip condition)이 사용되었다. Lagrange 기법으로 입자의 거동을 계산하기 위하여 유동장 해석 수행 후 모래입자와 플라스틱 입자를 사이클론 입구부에 투입하여 각 거동을 해석하였다.



(a) (b) (c) (d)

Fig. 3 Grid system for each type of cyclone

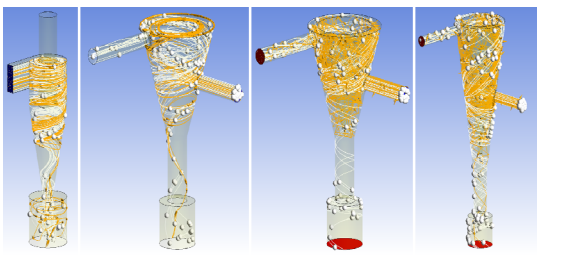
Table 1 Boundary and working conditions

Item	Recent setting
Particle type	Sand, plastic
Flow Rate [kg/s]	3.2 m^3/min
Working fluid	Air, ρ =1.185 kg/m^3
Simulation type	Steady state
Turbulence Model	Standard k-ε
Pre and Solving process	ANSYS CFX 2021R2
Number of Nodes	760,000
Wall condition	No slip condition

2.3 해석 결과

Fig. 4는 각 형태의 사이클론에 대한 플라스틱과 모래의 분리성능을 입자의 궤적으로 나타낸 것이며 노란색은 모래이고 흰색은 플라스틱의 궤적이다. 그림에서 (b) 모델에서 상부 출구측으로 포집된 비율이 약 78%로 가장 우수한 것으로 판단되며, 이중구조 모델인 (c) 모델은 약 72%, (d) 모델은 약 65% 그리고 기본 모델 (a)는 52%로 가장 미흡한 것으로 확인되었다. 또한 (b) 모델에서 하부로 유출되는 모래가 가장 많고, 상부로 유출되는 모래는 적은 것으로 확인되어 분리성능이 우수한 것으로 판단된다.

유체가 사이클론을 통과하면서 생기는 압손은 전체시스템 동력에 영향을 미치므로 Fig. 5와 같이 내부 압력장을 도시하여 입출구의 압력차를 확인하였다. 해석 결과는 단순모델인 (a)가 가장 압손이 낮은 것으로 확인되었고, 일체형 모델인 (b), 이중구조 연장형인 (d) 모델 그리고 (c) 순서로 압손이 큰 것으로 나타났다. (a) 모델의 압손



(a) (b) (c) (d)

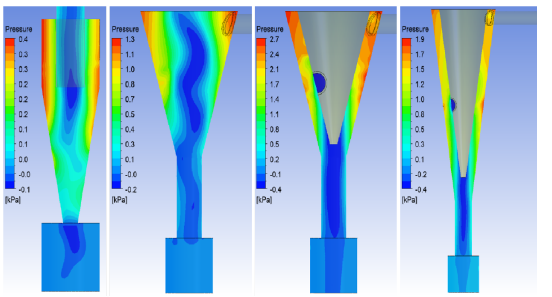
Fig. 4 Particle tracking for each type of cyclone

이 낮지만 분리성능을 위하여 (b) 모델이 최적인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 각 형태의 사이클론에 대한 내부 유동장을 나타낸 것이며, 사이클론 경사구조에 의해 강하고 복잡한 스월이 형성된다. 특히 (a) 형태는 중앙 분배관이 큰 관계로 유동이 저항 없이 상승하는 구조를 가지기 때문에 흡입된 모래와 플라스틱이 분리 없이 상승하여 제거되지 못할 것으로 예상된다. (c), (d)는 (b)에 비하여 내부 유동장의 부피가 적은 관계로 유속이 가속되고 상부의 유출관으로 모래가 분리되지 않고 배출될 것으로 예측되므로 (b) 형태에 비해 나쁜 성능을 가질 것으로 판단된다.

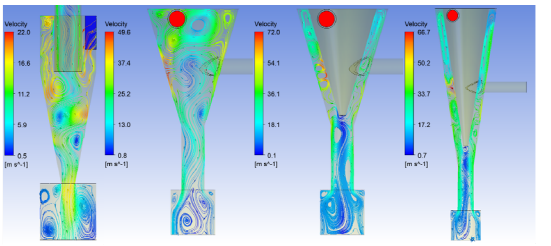
입자직경에 따른 분리성능을 평가하기 위하여 Fig. 7과 같이 분리성능이 가장 우수한 (b) 형태의 사이클론에 대한 내부 유동장 해석을 수행하였다.

입자의 크기는 10, 50, 100 μ m이며, 입자의 직경이 커지면 중력의 영향으로 상부 출구로 이동하는 플라스틱의 양이 많아지는 것을 확인할 수



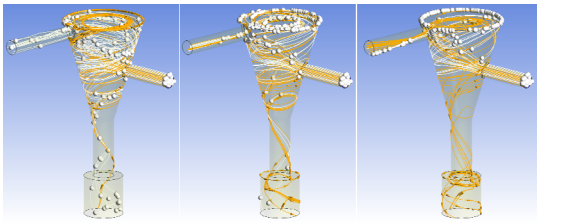
(a) (b) (c) (d)

Fig. 5 Pressure contour for each type of cyclone



(a) (b) (c) (d)

Fig. 6 Streamline for each type of cyclone



(a) d=10 μ m (b) d=50 μ m (c) d=10 μ m

Fig. 7 Particle tracking for each size of particle

있다. 특히 입자직경이 100 μ m 이상이 되면 100%의 플라스틱이 상부로 이동하여 분리됨을 알 수 있다.

3. 구조해석

3.1 해석모델

미세플라스틱 제거시스템 구동에 따른 구조해석은 사이클론 및 내부 구조물에 작용하는 약 3 bar 압력에 의한 구조물의 안정성 해석과 구조해석 후 나타난 토출구와 사이클론 부분의 취약점을 보완하기 위해 흡입부와 연결하는 브라켓에 대한 설계가 수행되었다.

Fig. 8은 구조해석을 위해 Fig. 1의 모델을 단순화한 형상이다. 흡입구, 사이클론, 분리구 및 토출구의 구조는 Fig. 1 모델과 동일하다.

구조해석을 위한 격자계 생성과 구조물에 대한 물성치는 Table 2와 같다. 해석에 사용된 격자계는 사면체 및 육면체 격자계가 사용되었으며, 총 격자수는 약 329,000개이다. 해석을 위한 하중 조건은 사이클론 압력을 기반으로 최대 압력을 3 bar로 설정하였으며, 미세플라스틱 제거시스템의 작업조건을 고려하여 흡입구 끝단과 손잡이 부분을 고정하여 해석을 수행하였다.

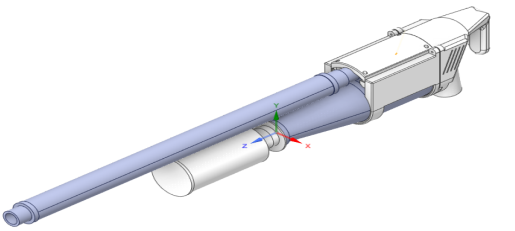
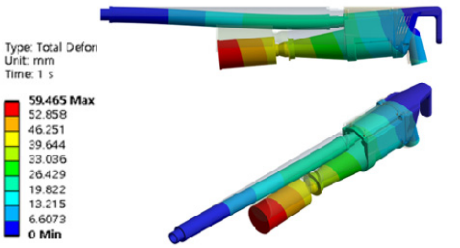


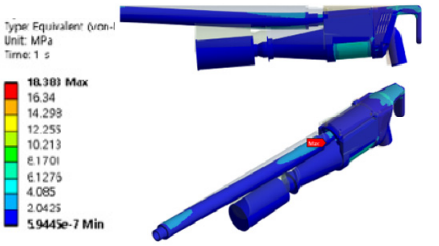
Fig. 8 Simple Model of Portable Microplastic Collection System

Table 2 Mesh properties and material properties

Mesh Properties	Node	329,000
	Element	172,200
Material Properties	Young's Modulus	420 MPa
	Possison's Ratio	0.45
	Bulk Modulus	1,396 MPa
	Tensile Yield Strength	21 MPa



(a) Total deformation



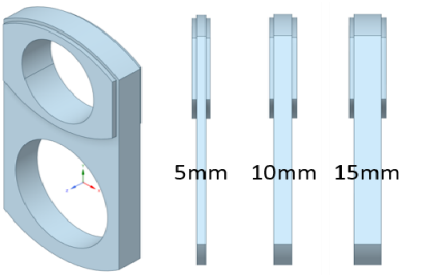
(b) Equivalent stress

Fig. 9 Total deformation and Equivalent stress of Portable Microplastic Collection System

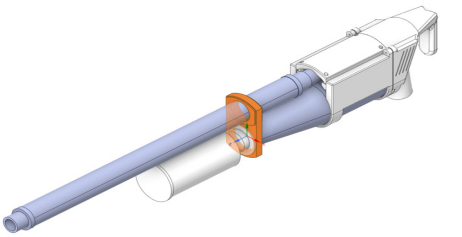
Fig. 9는 전체변형률과 등가응력에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 해석 결과, 전체변형량의 최댓값은 59 mm, 등가응력의 최댓값은 18.3 MPa 이었다. 그림에서 알 수 있듯이 최대변형량이 발생하는 위치는 미세플라스틱 집진기가 흡입되는 파이프와 싸이클론 집진 하우징 사이이며, 그 부분에서 처짐이 발생하였다. 등가응력의 해석 결과는 전체변형률과 동일하게 흡입파이프와 집진하우징의 접촉 부근에서 최대응력이 발생하는 결과를 보였다. 이로 인해 시스템 구동 시 흡입 파이프의 안정성에 문제가 있을 것으로 예상된다.

전체변형량과 등가응력의 해석 결과를 통해 흡입파이프의 처짐과 응력집중을 분산하기 위해서 Fig. 10과 같이 브라켓을 설치하였다. 브라켓의 위치는 사이클론의 하단부와 흡입파이프 사이에 배치하였다. 브라켓은 Fig. 10(a)와 같이 브라켓의 두께에 따라 5 mm, 10 mm, 15 mm에 대해서 구조해석을 진행하였다.

해석 결과, 브라켓의 두께가 5 mm와 10 mm인 경우의 Fig. 11의 전체변형률(31 mm)과 Fig. 12의 등가응력(17 MPa)은 거의 유사한 결과를 보였다. 브라켓이 없는 경우와 비교하여 전체변형률은 약 52.5% 감소한 결과를 보였으며, 등가응력은 1 MPa이 감소한 결과를 보였다. 그러나 브라켓의 두께가 15 mm인 경우의 전체변형률은 브라켓이 없는 경우와 비교하여 약 54% 감소하였으며, 등가응력은 52.5% 감소하는 결과를 보였다. 특히, 브라켓을 설치한 모델의 최대등가응력은 브라켓의 두께와 관계 없이 흡입파이프와 집진하우징의 접촉 부근이 아닌 부분에서 발생하였다. 따라서 미세플라스틱 집진기 흡입파이프의 구조안정성을 향상시키기 위해서는 브라켓의 설치가 필요하다고 판단된다.



(a) type of bracket

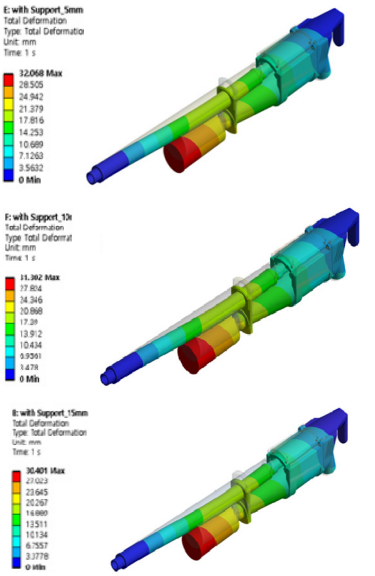


(b) location of bracket

Fig. 10 Type and location of bracket

구조안정성에 대해 살펴보기 위해 Fig. 13과 같이 브라켓이 없는 경우와 브라켓 두께에 따른 안전율을 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 브라켓이 없는 모델의 안전율이 1.125이었다. 등가응력의 분포와 같이 흡입파이프와 하우징의 접촉부에서 안전율의 최솟값이 나타났다. 브라켓의 설치 후의 최대안전율은 브라켓의 두께가 15 mm인 경우 2.13이었으며, 브라켓으로 인해 미세플라스틱 흡입기의 구조안정성을 증가시킬 수 있었다.

Fig. 14는 브라켓에 따른 안전율의 분포를 그래프로 나타낸 것이다. 브라켓이 없는 경우와 브라켓의 두께가 5 mm, 10 mm 경우의 안전율은 브라켓이 없는 경우의 안전율과 크게 차이가 없었으며, 일반기계구조물 안전율의 기준인 1.5보다 작은 결과를 보였다. 그러나 브라켓의 두께가 15 mm인 경우는 안전율이 2.13이므로 미세플라스틱 집진기의 구조안정성을 위해서는 브라켓의 두께가 최소 15 mm 이상으로 하는 것이 구동 시 안정적으로 작동될 것이라 판단된다.

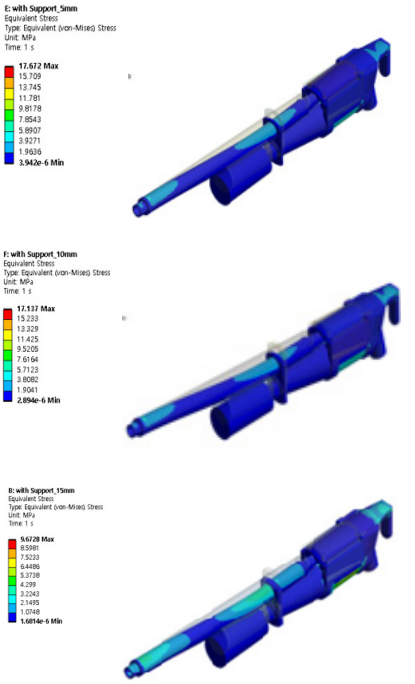


(a) 5 mm

(b) 10 mm

(c) 15 mm

Fig. 11 Total deformation for each size of bracket

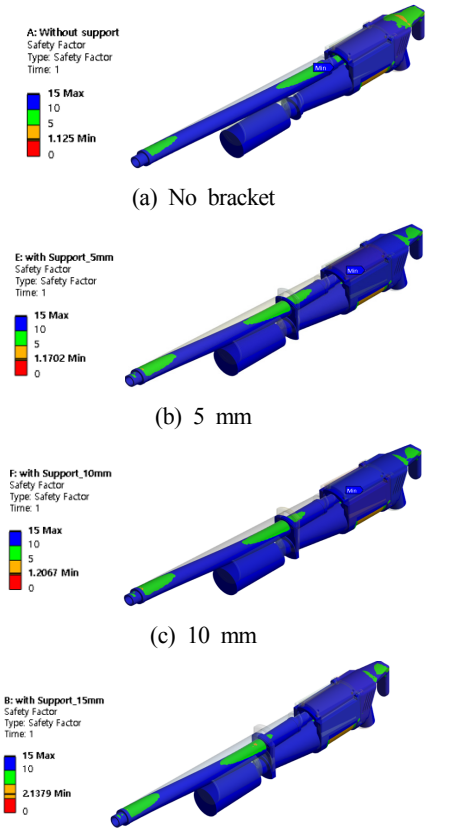


(a) 5 mm

(b) 10 mm

(c) 15 mm

Fig. 12 Equivalent stress for each size of bracket



(a) No bracket

(b) 5 mm

(c) 10 mm

(d) 15 mm

Fig. 13 Safety factor for each size of bracket

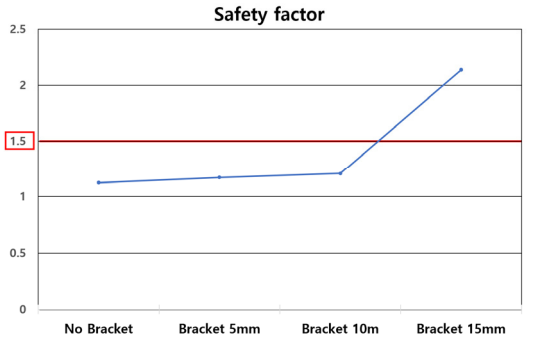


Fig. 14 Quantitative safety factor for each size of bracket

4. 결 론

휴대용 미세플라스틱 제거시스템에 사용되는 사이클론 형태에 대한 유동해석과 구조해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 기존의 분진제거용 사이클론은 모래와 플라스틱이 혼합된 흡입조건에서는 좋은 성능을 보이지 못하는 것으로 확인되었고, 본 연구에서 제안된 (b) 모델이 플라스틱 분리에는 유리한 것으로 판별되었다.

2) (b) 모델에 대하여 흡입되는 플라스틱 입자 직경이 100 μ m 이상인 경우 모두 제거되는 것으로 확인되었다.

3) 시스템 구동에 따른 구조안정성 해석을 통하여 흡입파이프와 사이클론 부분의 브라켓이 필요한 것으로 판정되었고, 브라켓 두께는 15mm 이상인 경우 안전율은 2.13이다.

후 기

본 논문은 2023년 전라북도 도약기업 육성사업 - 기술개발(R&D) 지원사업으로 수행되었고, 해양수산부 지원 국가연구개발사업인 “해안가 미세플라스틱 수거장비 기술개발” 과제(1525012613)의 일부 연구결과임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한 한국동력기계학회 2023년도 추계학술대회에 발표된 논문을 수정한 것입니다.

Author contributions

K. S. Kang; CFD, Structure Computation & Data curation. Y. S. Kim; Conceptualization, Investigation & Methodology. Y. H. Choi; Project adminstration, Supervision & Validation.

References

1. Y. R. Kang, J. B. Kwak, 2021, “Study on Fluid Flow and Particle Behavior of Cyclone Filter”, Proceedings of the Korean Society for Power System Engineering Spring Conference.
2. S. K. Shulka, P. Shulka and P. Ghosh, 2013, “The effect of modeling of velocity fluctuations on prediction efficiency of cyclone separators”, Applied Mathematical Modelling, 37, 5774-5789. (https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.11.019)
3. S. K. Jeong and E. Kim, 2005, “Numerical Analysis of A Vortex Cyclone in A Recirculating Aquaculture System”, Journal of The Korean Society for Power System Engineering, 9(1), 36-41.
4. Y. J. Kim, 1993, “Cyclone dust collector”, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 22(6), 36-41.
5. M. Narasimha, 2007, “A Comprehensive CFD Model of Dense Medium Cyclone Performance”, Journal of Minerals Engineering, 20(4), 414-426. (https://doi.org/10.1016/j.mineng.2006.10.004)