

고속 원심분리장치의 확산판에 따른 3상 분리효율에 관한 연구

이춘만*,#, 정호인**

*창원대학교 기계공학부, **창원대학교 메카트로닉스공학부

A Study on Three-Phase Separation Efficiency according to the Diffusion Plate of a High-Speed Centrifugal Separator

Choon-Man Lee*#, Ho-In Jeong**

*Dept. of Mechanical Engineering, College of Mechatronics, Changwon National University

**Mechanical Design and Manufacturing, School of Mechatronics Engineering, Changwon National University

(Received 6 September 2019; received in revised form 14 September 2019; accepted 27 September 2019)

ABSTRACT

Recently, as the high-precision machinery industry has developed rapidly, peripheral equipment has been developed to improve machining efficiency. Peripheral equipment for machining includes cooling units, housings, oil separators, and much more. Oil, such as cleaning and cutting fluids, is used for machining. When waste oil is reused, the contamination of the workpieces and reduction in machining accuracy are generated by the waste oil, including sludge. Therefore, the development of an oil separator is necessary for efficiently separating oil, water, and sludge. The purpose of this study is to analyze the oil separation efficiency and flow characteristics of a high-speed centrifugal separator according to the rotation velocity and diffusion plate. The oil separation efficiency and flow characteristics were analyzed using hydrodynamic theory and computational fluid dynamics (CFD). The results of this study will be used as basic data for the development of a high-speed centrifugal separator.

Key Words : Three-phase Centrifugal Separator(3상 원심분리장치), Cutting Fluid(절삭유), CFD(전산유체역학), Diffusion Plate(확산판), Separation Efficiency(분리효율)

1. 서 론

최근 항공우주 반도체 등과 같은 고정밀 가공을 필요로 하는 산업이 발달하면서 기계부품 가공의 효율을 높이기 위한 주변 장치 개발에 관한 연구가 진행되고 있다¹⁻⁴⁾. 그중 세척액이나 절삭유 등의 유종은 기계부품 가공에 주로 사용되며, 사용된 세척

액, 폐절삭유 등의 폐유에는 기름 성분 및 오염 슬러지 등이 포함되어 있다. 따라서 폐유를 재사용할 경우, 가공 정밀도가 떨어지기 때문에 정기적으로 세척액 및 폐절삭유를 청정처리하거나 교환해야 한다. 폐유 처리는 많은 비용부담이 발생하기 때문에 해외 선진사에서는 물, 기름, 슬러지를 분리하는 장치 개발에 많은 연구를 수행하여 상용화하고 있으며, 국내에서는 해외 장비를 수입하여 사용하고 있는 실정이다. 또한 국제환경법(바젤협약) 및 국내 폐기물관리법 등과 같은 국제 환경규제가 점차 강

Corresponding Author : cmlee@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3622, Fax: +82-55-267-1160

화되고 있는 추세에 따라 기계부품 가공 후의 폐절삭유 및 세척액 등의 폐유를 재사용하기 위한 장치의 국산화 개발이 필요하다⁵⁻⁸⁾.

본 연구에서는 재사용 절삭유 불순물 제거를 위한 고속 원심분리장치 개발에 앞서 고속 원심분리장치의 회전속도 및 확산판 유무에 따른 유체의 분리효율과 유동특성을 수치해석 기법과 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 사용하여 분석하였다. 고속 원심분리장치는 Fig. 1과 같이 드럼(Drum), 스크레퍼(Scraper), 확산판(Diffusion plate) 등으로 나뉜다. 해석에 사용된 고속 원심분리장치의 길이는 285 mm, 입구측 직경은 27.6 mm, 확산판 수는 3개, 확산판의 두께는 1 mm이다. 고속 원심분리장치의 초기 작동 유체는 물, 기름, 슬러지 등이 혼합된 재사용 절삭유이며, 고속 원심분리장치의 드럼은 3,600 ~ 9,000 rpm의 회전속도로 회전이 가능하다. 드럼의 고속 회전으로 인해 작동 유체는 원심력을 받으며, 각 물질에 가해지는 원심력과 비중차로 인해 원심분리가 일어난다⁹⁻¹⁰⁾. 절삭유의 오일과 물은 층을 이루며 분리되고 슬러지는 중력을 받아 드럼의 하부로 자동 배출된다.

2. 수치해석

2.1 유체의 지배방정식

고속 원심분리장치의 작동 유체는 3%의 오일과 97%의 물로 이루어져 있는 절삭유이며, 해석 시 유체 자체의 열전달 및 상태변화의 영향을 고려하지 않았기 때문에 유체유동의 지배방정식은 다음의 연속방정식과 운동량방정식의 연산으로 수행된다. 연속방정식은 질량보존의 법칙을, 운동량방정식은 운동량보존의 법칙을 만족한다¹¹⁻¹²⁾.

$$\begin{aligned} \text{연속방정식} \\ \nabla \cdot \vec{u} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{운동량방정식(Navier-stokes equation)} \\ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} + 2\vec{\Omega} \times \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} \end{aligned} \quad (2)$$

식(1)과 식(2)는 본 연구의 대상이 되는 원심분리

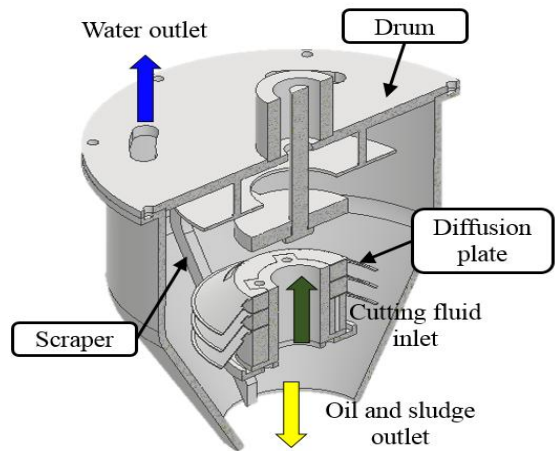


Fig. 1 Modeling of the high speed centrifugal separator

장치 내부의 유동에 대한 지배방정식을 나타낸 것이다. 통상 레이놀즈수가 낮은 층류 형태를 나타내는 회전 유동에 대해서는 식(2)을 이산화하여 수치해석 하는 DNS(Direct Numerical Simulation) 방법이 이용된다. 하지만 원심분리장치와 같이 고속으로 회전하는 회전체의 내부 유동은 레이놀즈수가 커서 난류 유동이 발생하며 식(2)의 좌변 두 번째 항인 대류항이 비선형성을 나타낸다. 비선형성의 영향이 극도로 커지게 됨에 따라 수치해석 시에 수렴하지 않는 문제가 발생기 때문에 DNS 법을 적용하기 어렵다. 따라서 난류 유동의 경우, 이러한 비수렴성의 문제를 극복하기 위하여 통계적인 방법을 사용해야 한다.

2.2 수치해석 방법 및 해석 모델

고속 회전 유동의 비수렴성 문제를 극복하기 위한 통계적인 방법으로써 SST(Shear Stress Transport) 모델을 이용하였다. SST 모델은 k-ε 모델과 k-ω 모델의 장점만을 융합한 모델로, 벽면 근처에서 k-ω 모델이 사용되며 나머지 영역에서는 k-ε 모델이 사용된다¹³⁻¹⁴⁾.

제안된 모델을 이용한 유동해석은 상용 해석소프트웨어인 ANSYS - Fluent Ver. 19.2를 사용하였다. 해석 모델의 메쉬(Mesh)의 구성은 Tetrahedral - prism으로 격자를 구성하였으며, 1,314,655개의 절점(Node)과 863,095개의 요소(Element)로 구성되어 있

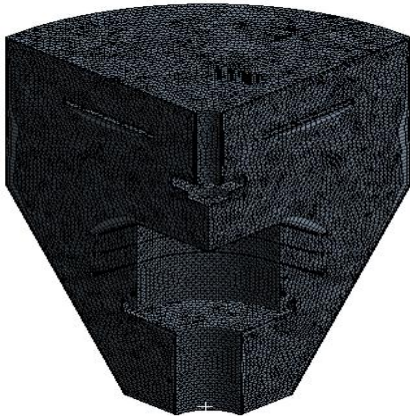


Fig. 2 1/4 analysis model of the high speed centrifugal separator

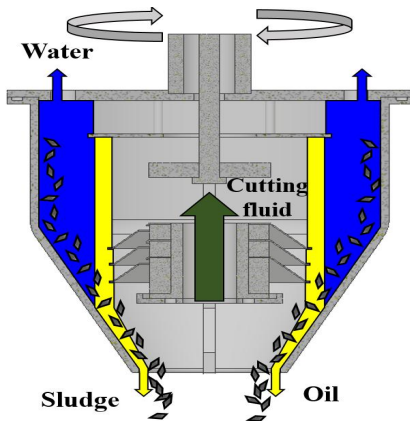


Fig. 3 Method of the three-phase separation at high speed centrifugal separator

Table 1 Analysis condition of the high speed centrifugal separator

Computational condition	Steady state
Turbulent model	SST-model
Inlet velocity	1.67 m/s
Outlet pressure	0 Pa(Gauge pressure)
Rotation speed	3,600/9,000 rpm
Periodic condition	1/4 model

다. 고속 원심분리장치의 경우 축대칭 형상을 지니고 있으므로, 해석 시간 단축을 위해 Fig. 2와 같이 유동장의 1/4에 대한 모델만 해석에 사용하였다. 회

전체 일부만 해석에 사용하였기 때문에 양쪽 절단면에 Periodic condition을 적용하여 해석을 수행하였다.

작동 유체 중 오일의 점도는 55 cSt, 밀도는 0.8277 g/m³이며, 입구측 유속은 1.67 m/s, 출구측 압력은 대기압을 적용하였다. 밀도 차이에 의한 부력 효과를 고려하였다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 고속 원심분리 장치의 3상 분리 방법을 나타낸다. 물과 기름은 확산판에 의해 층을 이루며 분리되고, 슬러지는 중력에 의해 드럼 하부로 분리되는 구조이기 때문에 해석 결과에 포함하지 않았다. Table 1은 해석에 사용된 경계 조건을 나타낸다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 회전속도에 따른 오일 분포

고속 원심분리장치의 드럼은 고속 회전으로 인해 원심력이 발생하고, 작동 유체는 밀도에 따른 비중 차에 의해 분리된다. 물에 비해 상대적으로 밀도가 낮은 오일은 회전축 방향으로 모이게 되고 물은 드럼의 벽면에 위치하게 된다.

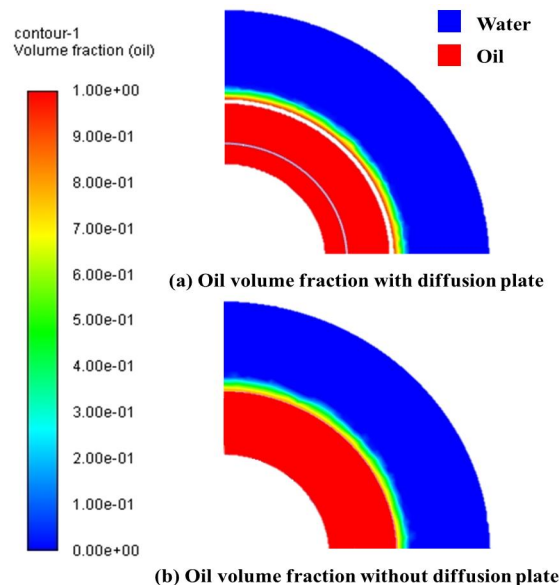


Fig. 4 Oil volume fraction according to the diffusion plate at rotation velocity 3,600 rpm

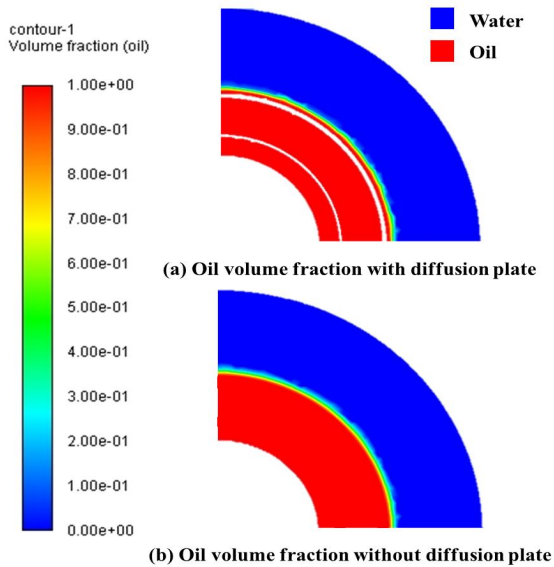


Fig. 5 Oil volume fraction according to the diffusion plate at rotation velocity 9,000 rpm

Fig. 4는 3,600 rpm의 속도로 회전하는 드럼 내부에서 확산판의 유무에 따른 오일의 거동을 나타낸다. 확산판의 유무에 따른 오일의 거동 분석을 위해 경계층 단면은 확산판이 가장 많은 비중을 차지하는 지점으로 드럼 최하단에서 125 mm 떨어진 지점에서 분석하였다. Fig. 5는 9,000 rpm의 속도로 회전하는 드럼 내부에서 확산판의 유무에 따른 오일의 거동을 나타낸다. 드럼의 회전속도가 높아짐에 따라 드럼 물과 기름의 경계면이 더욱 뚜렷해지는 것을 확인할 수 있다.

3.2 오일의 농도 및 분리효율

드럼의 회전속도 및 확산판의 유무에 따른 원심 분리 장치의 오일 농도와 분리효율을 분석하였다.

오일의 농도 및 분리효율은 고속 원심분리장치에서 분리된 물을 대상으로 분석하였다.

Fig. 6은 드럼의 회전속도 및 확산판 유무의 따른 원심분리장치의 오일의 농도 및 분리효율을 나타낸다. 드럼의 회전속도가 3,600 rpm이고 확산판이 없는 경우, 오일의 농도는 47 ppm 분리효율 55%로 가장 낮은 성능을 나타냈으며, 드럼의 회전속도가 9,000 rpm이고 확산판이 있는 경우, 오일의 농도는

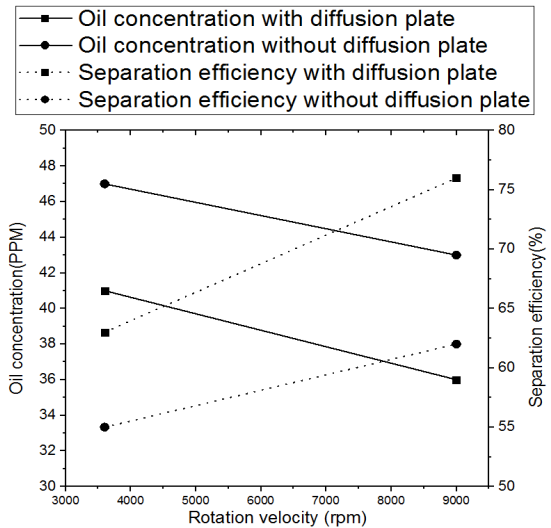


Fig. 6 Graph of oil concentration and separation efficiency of the high speed centrifugal separator

36 ppm 분리효율 76%로 가장 높은 성능을 나타냈다.

4. 결론

본 연구에서는 원심분리장치의 확산판 유무에 따른 유체의 분리효율과 유동특성을 분석하기 위해 수치해석 이론과 CFD를 사용하여 원심분리장치의 내부 유동 거동 및 물과 오일의 분리효율을 분석하였다. 해석 결과, 고속 원심분리장치는 회전속도 및 확산판 유무에 따라 최대 76%의 분리효율을 나타냈으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 드럼의 고속 회전에 의한 원심력으로 작동 유체는 밀도에 따른 비중차에 의해 분리되며, 드럼의 회전속도가 높아짐에 따라 물과 오일의 분리 경계가 명확해짐을 확인하였다.
2. 확산판이 적용된 경우, 작동 유체의 확산을 일으키며 동일한 회전속도에서 물과 오일의 분리가 더욱 촉진되어 경계선이 명확해짐을 확인하였다.
3. 확산판이 적용된 원심분리장치의 드럼 회전속도가 9,000 rpm일 때 원심분리장치는 오일의 농도 36 ppm 분리효율 76%로 가장 높은 성능을 나타냈다.

본 연구의 결과는 향후 고속 원심분리장치의 고효율 분리를 위한 설계 및 개발에 적용될 것이다.

후 기

“이 논문은 2018년도 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 ‘지역특화산업육성사업’의 연구비 지원에 의하여 연구되었음. [No. P0004997, 자기 진단형 고효율(1 Pass 불순물 제거 효율 75% 이상) 3상 고속 원심분리 장치 개발].”

REFERENCES

- Kilicay, K. and Ulutan, M., "Investigation of the Solid Lubrication Effect of Commercial Boron-Based Compounds in End Milling," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17, No. 4, pp. 517-524, 2016.
- Yoon, H. S., Kim, M. S., Jang, K. H., and Ahn, S. H., "Future Perspectives of Sustainable Manufacturing and Applications Based on Research Databases," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 17, No. 9, pp. 1249-1263, 2016.
- Nam, S. H., Lee, D. K., Jeong, Y. K., Lee, P., and Shin, J. G., "Environmental Impact Assessment of Composite Small Craft Manufacturing Using the Generic Work Breakdown Structure," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 3, No. 3, pp. 261-272, 2016.
- Kang, S. M., "Bioinspired Design and Fabrication of Green-Environmental Dry Adhesive with Robust Wide-Tip Shape," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 3, No. 2, pp. 189-192, 2016.
- Bensadok, K., Belkacem, M., Nezzal, G., "Treatment of cutting oil/water emulsion by coupling coagulation and dissolved air flotation," *Desalination*, Vol 206, pp. 400-448, 2007.
- Feng, W., Yin, Y., Mendoza, M. D. L., Wang, L., Chen, X., et al., "Freeze-Thaw Method for Oil Recovery from Waste Cutting Fluid without Chemical Additions," *Journal of Cleaner Production*, Vol. 148, pp. 84-89, 2017.
- Kobyas, M., Ciftci, C., Bayramoglu, M., and Sensoy, M. T., "Study on the Treatment of Waste Metal Cutting Fluids Using Electrocoagulation," *Separation and Purification Technology*, Vol. 60, No. 3, pp. 285-291, 2008.
- Lee, C. M., Choi, Y. H., Ha, J. H. and Woo, W. S., "Eco-Friendly Technology for Recycling of Cutting Fluids and Metal Chips: A Review," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, Vol. 4, No. 4, pp. 457-468, 2017.
- Yamamoto, T., Kageyama, T., Yoshida, H., and Fukui, K., "Effect of new blade of centrifugal separator on particle separation performance," *Separation and Purification Technology*, Vol. 162, pp. 120-126, 2016.
- Cambiella, A., Benito, J. M., Pazos, C., and Coca, J., "Centrifugal Separation Efficiency in the Treatment of Waste Emulsified Oils," *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 84, No. 1, pp. 69-76, 2006.
- Lee, J. Y. and Han, W. H., "An effect of laminated plate on the performance of pre-separator for marine oily water separator," *Journal of the Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers*, Vol. 16, No. 6, pp. 440-447, 2000.
- Batalovic, V., "Centrifugal separator, the new technical solution, application in mineral processing," *International Journal of Mineral Processing*, Vol. 100, 86-95, 2011.
- Le, T. T., Ngo, S. I., Lim, Y. I., Park, C. K., Lee, B. D., Kim, B. G. and Lim, D. H., "Three-Phase Eulerian Computational Fluid Dynamics (CFD) of Air-Water-Oil Separator with Coalescer," *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol. 171, pp. 731-747, 2018.
- Kim, B. J., Kim, Y. S., Roh, C. S. and Lee, Y. H., "A Study on the Flow Characteristics of Oil-Water Separator for Marine Ship CFD," *Journal of the Korean Society for Fluid Machinery*, Vol. 19, No. 4, pp. 48-53, 2016.