

## CFD에 의한 선박용 유수분리기의 유동특성에 관한 연구

김병준\* · 김성윤\*\* · 노춘수\*\*\* · 이영호\*\*\*\*†

### A Study on the Flow Characteristics of Oil-Water Separator for Marine Ship CFD

Byeong Jun Kim\*, Sung Yoon Kim\*\*, Chun Su Roh\*\*\*, Young Ho Lee\*\*\*\*†

Key Words : Centrifugal Separator(원심분리기), CFD(전산유체역학), Laminated Plate(적층판), Oil-Water Separator(유수분리기), Separation Efficiency(분리효율)

#### ABSTRACT

The centrifugal separator which uses gravity separation method for oil-water separation, rotating at high-speed, is one of the most commonly used device for controlling the amount of the oil in waste water collected in bilge. The IMO (International Maritime Organization) has set regulations, also known as MARPOL 73/78, for the prevention of marine pollution. In addition, DET NORSKE VERITAS (DNV) has set standards regarding the assignment of Environmental Class Notation, CLEAN or CLEAN DESIGN, of ships. One of the requirements for classification is that in addition to conforming to MARPOL 73/78, more stringent measures must be taken as well. One of these measures is to limit the oil concentration in bilge water to less than 5ppm. So in this study, an Oil-Water Separator (OWS) is used together with multiple separating plates as a filtration system to be used as an oil-water separation device. The OWS operates using centrifugal separation in which the mixture is separated by centrifugal forces. The main purpose of this paper is to present the OWS separation efficiency according to the rotation speed, mass-flow rate, the angle and the number of stacked layers of the laminated plate using Computational Fluid Dynamics (CFD). Improvements to the device will be investigated from these results.

#### 1. 서론

그린해양(green ocean)의 보존에 대한 인식도가 고조되면서 해양환경 오염억제문제의 관심이 날로 높아져 가고 있다. 해양을 항해하는 선박들이 국가경쟁력 차원에서 대형화, 고속화, 고출력화됨에 따라 해상에 유출되는 유수혼합물이 양도 증가하며 이에 의한 해양오염이 가속화되고 있다.<sup>(1-3)</sup> 이러한 해양 및 수질오염을 방지하기 위해 MARPOL 73/78이 제정되었으며, 선저폐수의 선외 배출에 대한 기준을 강화하여 2016년부터 5 ppm 이하의 농도로 제한된다. 여기에 적합

한 유수분리기(oil water separator) 설치를 의무화 하고 있다. 이에 규제치인 유분농도 5 ppm 이하의 배출수를 위해 필터여과방식과 유수분리장치를 결합하여 기존의 필터여과식 장치의 문제점을 보완 할 수 있는 여러 방법중 분리판식 유수분리장치는 구조가 비교적 간단하면서도 유지, 보수가 용이할 뿐만 아니라, 비중이 높은 기름이 다량 함유하고 있어 처리 및 분리에 적합하여 전처리장치로(Pre-separator)로 많이 사용되고 있다.<sup>(4-6)</sup>

본 연구에서는 유수분리장치의 회전속도, 유량에 따른 이론과 CFD를 통한 유수분리 효율에 관한 유동 특성을 고찰 하였다.

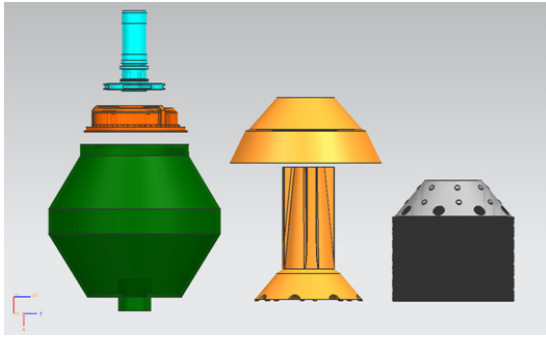
\* 한국해양대학교 대학원 기계공학과(department of mechanical engineering, graduate school, Korea Maritime & Ocean University)

\*\* 한국조선해양기자재연구원(Korean Marine Equipment Research Institute)

\*\*\* (주)우레아텍(Ureatec Co.)

\*\*\*\* 한국해양대학교 기계공학부(division of mechanical engineering, KMOU)

† 교신저자, E-mail : lyh@kmou.ac.kr



(a) Casing (b) Stator (c) Rotating disk  
Fig. 1 Modeling of Oil-water separator

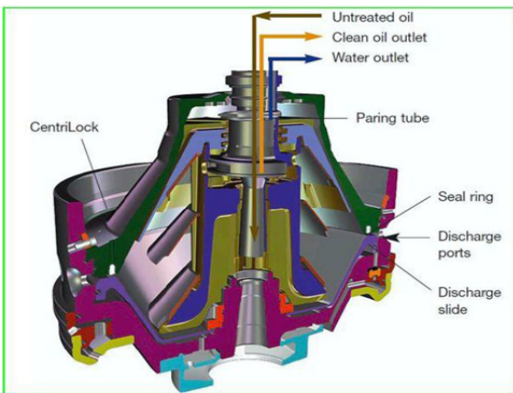


Fig. 2 Separator half bowl

### 1.1 유수분리기 형상

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 크게 Casing, Stator, Rotating disk로 3 부분으로 나뉜다. 과제수행중인 유수분리 장치를 사용하였으며, 길이는 395 mm, Inlet의 직경은 33 mm, Disk수는 90개, Disk 두께는 0.2 mm, Disk사이의 간격은 0.5 mm이다.

원심분리 방식의 유수분리는 고속 회전으로부터 발생하는 가속 중력 작용에 의하여 물과 기름의 물리적, 기계적 분리가 된다. 초기 슬러지, 기름, 물 등이 혼합되어 오염되어 있는 작동유체가 유입되었을 때, 각각의 물질의 분리를 이루어 내는 원동력은 각 물질에 가해지는 원심력의 차이에 의한 Disk를 통해 전달 받는 원심력을 바탕으로 비중차에 의해 분리 된다. 고형물은 디스크 하부로 분리되어 별도로 배출이 되며, 본 계산에서는 고려하지 않았다.<sup>(7)</sup>

## 2. 수치해석 방법

### 2.1 유체지배 방정식

해석의 대상이 되는 유수분리기의 유동조건은 작동유체로 oil과 water를 사용하고 유체자체의 열전달 및 열변화의 영

향을 고려하지 않았기 때문에 유체유동의 지배방정식은 다음의 연속방정식과 운동량방정식의 연산으로 수행된다.

연속방정식은 질량보전의 법칙을, 운동량방정식은 운동량보전의 법칙을 만족한다.

Oil 및 Water에 대한 유동해석

연속방정식

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식(Navier-stokes equation)

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} + 2\vec{\Omega} \times \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 \vec{u} \quad (2)$$

식(1)과 식(2)은 본 연구의 대상이 되는 유수분리기 내의 유동에 대한 지배방정식을 나타낸 것이다. 이 지배방정식을 이용하여 수치해석을 수행하는 다양한 방법이 존재한다. 통상 레이놀즈수가 낮아 층류형태를 나타내는 회전유동에 대해서는 식(2)를 직접적으로 이산화하여 수치해석하는 DNS(Direct numerical simulation)법이 이용된다. 하지만 고속으로 회전하는 유수분리기 내의 유동과 같이 레이놀즈수가 커서 난류유동이 나타나는 경우에는 DNS법을 사용할 수 없다. 이유는 식(2)의 좌변 두 번째 항인 대류항이 비선형성을 나타내며 레이놀즈 수가 클 경우 비선형성의 영향이 극도로 커지게 됨에 따라서 수치해석 시에 수렴하지 않는 문제가 발생한다. 따라서 난류유동의 수치해석에 있어서는 이러한 비선형성의 문제를 극복해야하기 위하여 통계적인 방법을 사용한다.<sup>(8-9)</sup>

### 2.2 계산 격자 및 수치해석 방법

본 유수분리장치는 상용코드인 ANSYS-CFX Ver.13을 사용하였으며, 난류모델은 SST 모델을 이용하였다.<sup>(5)</sup> 이 모델은 k-ε모델과 k-ω모델의 장점만을 융합한 모델로서 벽면 근처에서 k-ω모델이 사용되며 나머지 영역에서는 k-ε모델이 사용된다. 계산 격자의 품질은 CFD해석에 있어서 해석 결과의 신뢰성 및 해의 수렴성에 직접적인 영향을 미친다. 보다 우수한 계산격자를 확보하기 위해 격자 생성 툴인 ICEM-CFD 13을 사용하여 격자 생성을 수행 하였으며 격자의 구성은 Tetrahedral-prism grid로 격자를 구성하였으며, 전체 격자수는 약 1000만 노드이다.

Fig. 3에 (a), (b), (c)는 각각 유수분리장치 1/4 모델의 정면, 오른쪽 하단, 디스크의 수치격자를 나타낸 그림이다.

유수분리기의 경우 축대칭 형상을 지니고 있으며 Disk 사이의 간격이 매우 작고 적층수가 많은 특징을 가지고 있기 때문에 정확한 유동해석을 위하여 많은 격자가 집중 되어야 한다. 따라서 유동장의 1/4에 대하여 격자구성을 하였으며

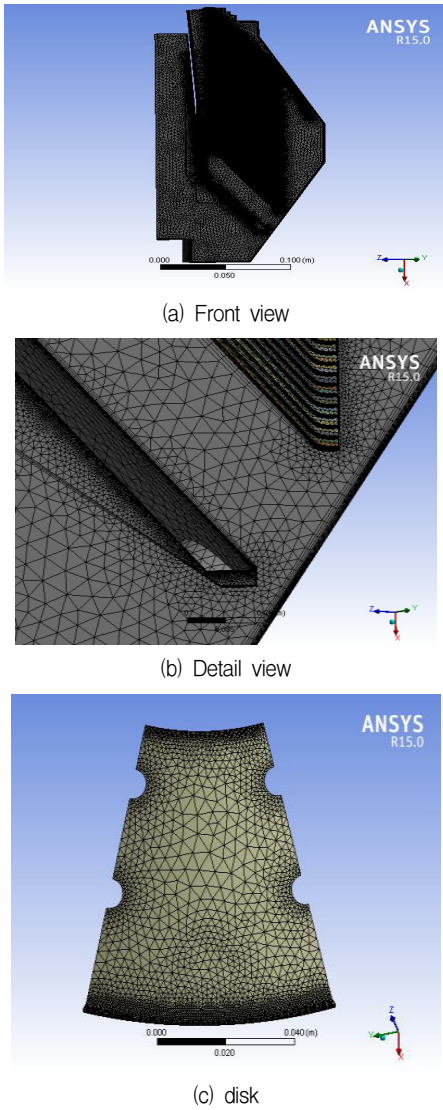


Fig. 3 Computational grid of the 1/4 Oil-water separator model

유동해석 수행 시 Periodic condition을 적용 하였다.

Fig. 3은 해석 모델에 대한 유동 영역과 격자 구성을 나타낸 것이다. 격자는 앞서 설명한 것과 같은 Disk 사이의 유동 현상을 모사해야 하기 때문에 많은 격자를 집중 시켜야만 한다. 이를 위해서 본 연구에서는 Workbench meshing을 이용하여 Disk와 Bowl body 부분을 따로 구성하여 Tetra mesh로 구성하였다. 1/4 model에 대한 총 nod수는 약 1000만개로 각 격자는 CFX를 통해 Interface 시켰다.

Table 1은 해석을 위한 경계 조건으로 작동 유체인 Oil은 점도 55[cST], Density 0.8277[g/cm<sup>3</sup>]이며, 정상상태, SST 난류 모델 조건을 가진다.

Inlet은 유량 8.681×10<sup>-6</sup>(Oil)[kg/s], 1,649×10<sup>-4</sup>(Water)[kg/s], Outlet pressure=0[Pa]이며, 난류 모델은 SST 난류 모델을 사용하였으며 밀도차이에 의한 부력 효과를 고려하였다.

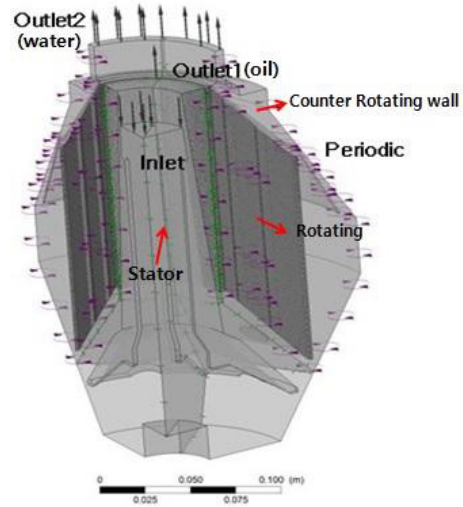


Fig. 4 CFX-Pre Conditions

Table 1 Computational condition

Computational Condition		Steady state	
Turbulent Model		SST-model	
Inlet Condition		Mass flow rate	
		8.68055 × 10 <sup>-6</sup> (Oil)	1.6493045 × 10 <sup>-4</sup> (Water)
Outlet Condition	Outlet1	Pressure=0[Pa]	
	Outlet2	Pressure=0[Pa]	
RPM		12000	
Periodic Condition		1/4 Part	

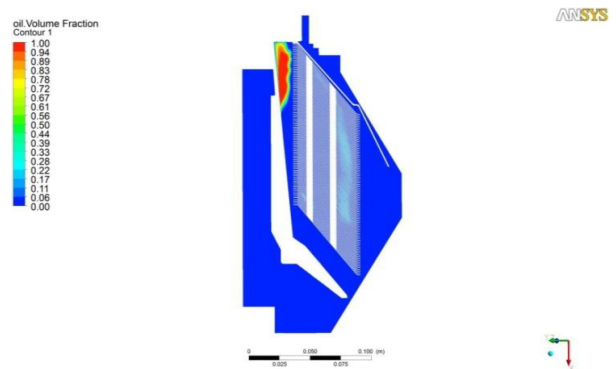


Fig. 5 Oil volume fraction of half Oil-water separator at 5% oil

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 오일, 압력, 속도 분포

Fig. 5는 총 유량중 5% 오일 일때의 volume fraction을 나타낸 그림이다. 오일은 디스크의 고속 회전에 의해 원심력을 통한 비중차에 의해 분리된 기름은 회전축 방향으로 모이게

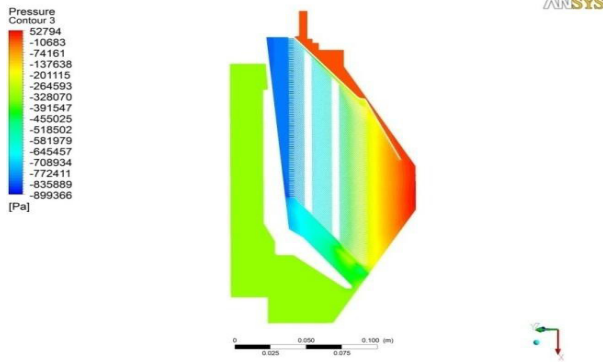


Fig. 6 Total Pressure of half Oil-water separator at 5% oil

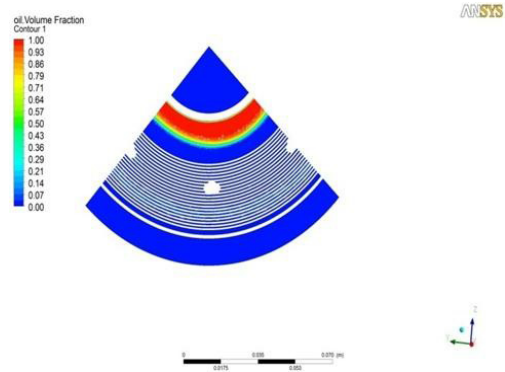


Fig. 9 Oil volume fraction for Oil-Water Separator Disk at 3000 rpm

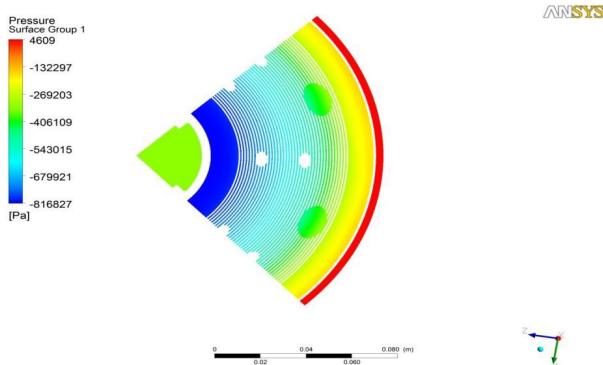


Fig. 7 Total Pressure of Oil-water separator disk at 5% oil

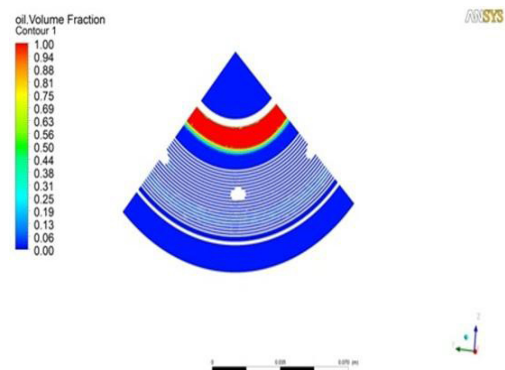


Fig. 10 Oil volume fraction for Oil-Water Separator Disk at 6000 rpm

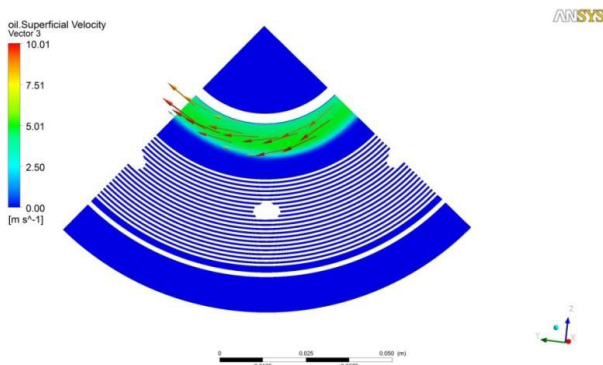


Fig. 8 Oil velocity of Oil-water separator disk at 5% oil

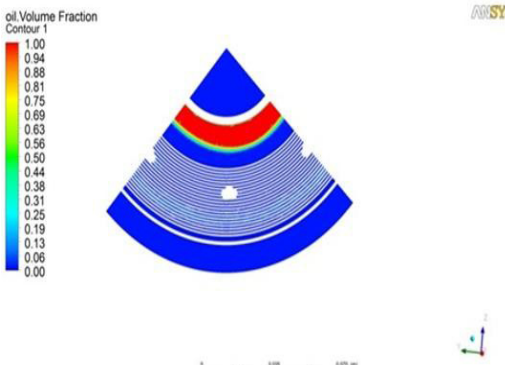


Fig. 11 Oil volume fraction for Oil-Water Separator Disk at 9000 rpm

되고 Disk 바깥쪽으로는 물로 채워져 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 6, 7은 유수분리기의 1/4 단면과 디스크의 Total Pressure를 나타내고 있다. Total Pressure의 경우 회전체를 잡아주는 Bowl 벽면에서 압력이 가장 크게 나타나고 Disk 내부로 갈수록 압력이 낮게 나타남을 볼 수 있다.

Fig. 8은 모여진 오일의 속도 벡터와 방향을 나타낸 그림이다. 상대 좌표계로 바라본 청정기 내부의 속도는 대체적으로 회전하는 구조물과 동일한 유속으로 회전을 하고 있어 같은 속도로 표현이 된다.

### 3.2 회전속도에 따른 오일 분포

Fig. 9-12는 5% 오일 유량 이고 3000, 6000, 9000, 12000 rpm 일때 유수분리장치의 Volume fraction을 나타낸 것이다. RPM이 높아 짐에 따라 물과 기름의 경계면이 더욱 뚜렷해 지는 것을 볼 수 있다. 입구로부터 유입된 유체가 회전하고 있는 Disk를 통해 전달 받는 원심력을 이용하여 비중이 서로 다른 물-기름을 분리하는 역할을 하게 된다.

내부를 감싸고 있는 Bowl을 따라 회전하면서 비중차이

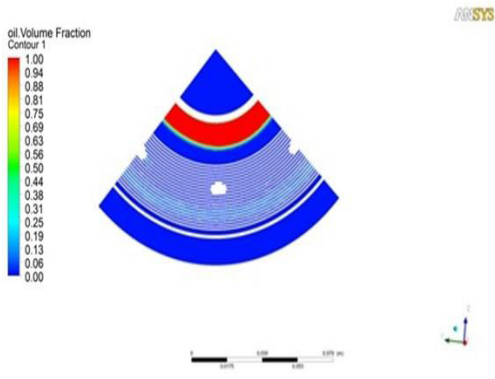


Fig. 12 Oil volume fraction for Oil-Water Separator Disk at 12000 rpm

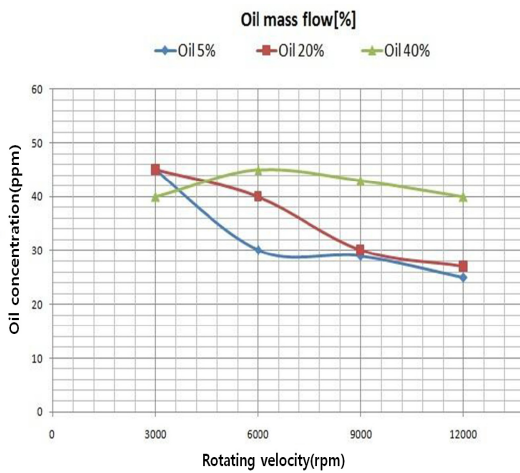


Fig. 13 PPM characteristics curves for Oil-water separator at different rpm

에 의해 발생하는 원심력의 크기차이에 의해서 분리를 하게 된다.

### 3.3 오일농도 및 제거효율

#### 3.3.1 오일농도

Fig. 13은 Fig. 4의 Outlet2 물 출구 단면에서의 CFD를 통한 디스크의 3000, 6000, 9000, 12000 rpm과 오일 5%, 20%, 40%일때의 오일 PPM을 나타낸 그림이다.

오일의 유량이 5%이고 12000 rpm일때 유수분리장치의 가장 좋은 성능인 25 ppm을 얻었고 선박의 전처리장치와 결합 한다면 더욱 좋은 효율을 보일 것이다.

#### 3.3.2 제거효율

Fig. 14는 물 출구 단면에서의 CFD를 통한 디스크의 3000, 6000, 9000, 12000 rpm과 오일 5%, 20%, 40%일 때의 오일 제거 효율(%)을 나타낸 그림이다.

오일의 유량이 5%이고 12000 rpm일 때 유수분리장치의 가장 좋은 제거효율인 76%을 얻었고 유량이 40%일때는

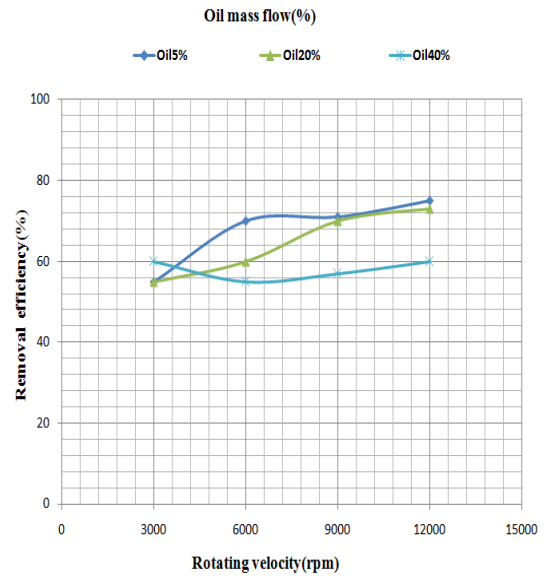


Fig. 14 Removal efficiency curves for Oil-water separator at different rpm

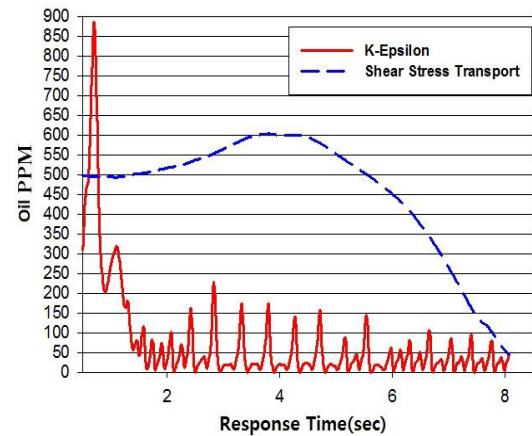


Fig. 15 PPM characteristics curves for Oil-water separator at different turbulence model

rpm이 올라 감에 따라 큰 제거 효율은 보이지 않았다.

Fig. 15는 오일 5% 유량이고 12000 rpm일때 각기 다른 난류 모델에서의 Time step을 이용하여 오일 PPM의 반응 시간을 계산한 그림이다.

SST모델과 K-ε모델을 비교한 결과 K-ε모델이 빠른 반응 시간을 보여 준 반면 SST모델은 디스크 주변부의 속도구배 계산과 정밀한 해석 수행에 사용됨을 알 수 있다.<sup>(10)</sup>

## 4. 결 론

유수분리장치의 회전속도, 유량에 따른 이론과 CFD를 통해 다음과 같은 내용을 알 수 있었다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 오일의 유량이 5%이고 12000 rpm일때 유수분리장치의

- 가장 좋은 성능인 25 ppm, 제거효율은 76%를 얻었다.
- 2) 경계층영역의 속도구배를 충분히 모사하고 유수분리장치의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 Disk 주변의 정밀한 수치해를 얻기 위해서는 SST 난류모델 사용이 필요하다는 것을 알 수 있었다.
  - 3) 유수분리장치의 분리효율에 가장 큰 영향을 미치는 Disk에 관한 연구가 더 필요하다.

## 후 기

본 연구는 2014년도 중소기업청 기술혁신개발 글로벌전략 기술개발 지원사업에 의해 수행되었습니다.

## References

- (1) Latour, J., 1996, "The canadian response model : the necessity for public-private cooperations," Proceedings of the third Korea-Canada Symposium on Marine Environment, pp. 196~207.
- (2) Bieger, T., Hellou, J., and Abrajanno, T. A., 1996, "Petroleum biomarkers as tracers of lubricating oil contamination," Marine Pollution Bulletin, Vol. 32, No. 3, pp. 270~274.
- (3) United Nations Conference on Trade and Development Report, "Review of Maritime Transport 2014".
- (4) Hanjin Shipping Interim Report, "Effect of Pre-separator installation", 1997
- (5) Sasakura Engineering Co., Ltd, 1996, "Manual of Sasakura oily water separator(Model SMT-A)," Osaka, Japan.
- (6) IMO, 1992, "MARPOL73/78 1992 Amendment to Annex I," IMO, London, pp. 1~4.
- (7) Jeon, H. J., Kim, C. S., Choi M. S., and Kim, Y. T., 2012, "Marine Auxiliary Machine"(Maritime equipment), DaSom publisher, pp. 247~261.
- (8) Lee, J. Y. and Han, W. H., 2000, "An effect of laminated plate on the performance of pre-separator for marine oily water separator," The Korean Society of Tribologists & Lubrication Engineers, Journal of the KSTLE, Vol. 16, No. 6, pp. 440~447.
- (9) Veselin Batalovic, "Centrifugal separator, the new technical solution, application in mineral processing," International Journal of Mineral Processing, Vol. 100, Iss. 3-4, 86-95.
- (10) ANSYS CFX Solver Modeling Guide, 2009, "The k omega and SST models," Ver. 13, p. 99.