

신개념 기계식 선박평형수 처리장치의 디스크 형상에 따른 유동특성에 관한 수치해석 연구

손상호[†] · 김영철¹ · 최경관²

(Received September 16, 2014 ; Revised December 11, 2014 ; Accepted December 25, 2014)

Numerical study on fluid characteristics due to disc shape in a novel mechanical ballast water treatment system

Sang-ho Sohn[†] · Young-Chul Kim¹ · Kung-Kwan Choi²

요약: 최근에 국제해사기구(IMO)에서 선박 평형수 처리장치(Ballast water treatment system, BWTS)와 관련된 국제 규정을 강화함에 따라 이에 대응할 수 있는 BWTS 기술개발의 중요성이 대두되고 있다. 지금까지는 세계 각국에서 선박 평형수 처리기술을 처리방식에 따라 크게 물리적 방식(막분리, 원심분리, 자외선 등)과 화학적 처리방식(염소처리, 오존처리, 화학약품 등)으로 개발하여 왔으나, 기존의 기술 방식들은 추가적인 구동전력, 낮은 생산성, 잔류처리 문제 등으로 기술적인 보완이나 대안이 요구되고 있다. 본 연구에서는 기존과는 다른 새로운 방식의 기계식 방식 평형수 처리장치의 설계를 위한 유동해석 연구이다. 고속 회전하는 몇 가지 디스크 형상에 따라 유동에서 발생하는 여러 가지 유동특성을 전산 유체해석(CFD)를 통하여 분석하였다. 평판형 및 계단형 형상에서는 반경을 따라서 국부적으로 공동현상이 발생가능하며, 원주형에서는 전단응력 강도를 높일 수 있었다.

주제어: 선박 평형수 처리장치, 국제해사기구, 기계식 회전체, 디스크 형상, 전산유체해석

Abstract: As the recent regulation of International Maritime Organization (IMO) is enforced, the advanced technology of Ballast water treatment system (BWTS) is needed to meet its requirements. Until now, there are two kinds of the BWTS technologies such as physical methods (Membrane and UV) and chemical methods (Chlorin and Ozone). However, these conventional methods have some limitations of auxiliary power, low productivity, residual treatment and etc. In order to overcome these problems, this paper introduces the new kind of BWTS based on mechanical principle and investigates the effect of rotating disc shapes on flow characteristics between rotating and stationary discs by computational fluid dynamics (CFD). Planar and Step types can make the local cavitation generated along radius, and Circular type can increase the intensity of shear stress.

Keywords: Ballast water treatment system, International Maritime Organization, Mechanical rotator, Disc shape, Computational Fluid Dynamics

1. 서론

선박평형수(Ballast Water)는 선박의 안전하고 효율적인 운항을 위해 배 안에 채우는 바닷물을 말하며, 배에 싣는 화물의 무게에 따라 선체 내부에 선박평형수를 담아 배의 무게중심을 낮추어 선박의 안정성을 높이는 역할을 한다. 하지만, 선박평형수에 포함된 다양한 해양생물들이 다른 국가 해안으로 이동해 생태계를 교란시키는 악영향을 미치기도 한다. 국제해사기구(IMO)에 따르면 매년 50억톤 이상

의 바닷물이 평형수를 통하여 이동하고 있으며, 이로 인해 박테리와 같은 미생물이나 작은 무척추동물물을 비롯하여 다양한 종의 해양생물들이 운반되어 전세계 해양 생태계에 부작용을 유발하고 있다. 또한, 생태계 오염으로 인하여 연안의 어족자원이 변화되어 경제적인 피해로 연결되고 있다. 이에 따라, 선박평형수 이동에 의해 발생할 수 있는 생태적, 경제적 피해를 막고 생물의 다양성을 보존하기 위하여 IMO는 2004년 2월 선박의 평형수와 침전물의 통제 및

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3164-2367>): Department of Extreme Thermal Systems, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 305-343, Korea, E-mail: sangho@kimm.re.kr Tel: 042-868-7389

¹ Department of System Dynamics, Korea Institute of Machinery & Materials, 156 Gajeongbuk-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-343, Korea, E-mail: kyc@kimm.re.kr Tel: 042-868-7877

² Laboratory, Teagwang Mechatec Co., Ltd., E-mail: cck5190@tg21.net, Tel: 055-273-1113

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

관리를 위한 국제협약을 체결하였다. 채택된 협약에서는 평형수 교환기준과 성능기준을 마련하였으며, 교환기준은 연안에서 실은 선박평형수는 깊고 먼 바다에서 교환한 후 입항하여 배출하는 것이고 성능기준은 물리적 또는 화학적 방법 등의 처리장치를 이용하여 기준 이하로 생물을 사멸시켜 배출하도록 되어있다.

이와 같이 IMO에 의해 평형수 관련 국제 규정[1]이 강화되고 있고, 이에 대응하여 Table 1과 같은 선박 평형수 처리장치의 성능기준을 만족하는 선박 평형수 처리장치(Ballast water treatment system, BWTS) 기술개발이 요구되고 있다[2]. 이 규제에 따르면, 2009년부터 건조하는 신조선부터 BWTS 설치를 의무화하고 있으며, 2017년 이후에는 현재 운항하고 있는 선박에 의무적으로 설치해야만 한다. 지금까지 세계 각국이 다양한 BWTS를 전기분해, 오존, 자외선, 필터, 원심분리, 열처리 등을 이용한 다양한 방식으로 개발하고 있지만, 현재 상용화된 BWTS는 구동에 필요한 추가 소요전력이 발생하여 예비발전기의 가동이나 제작 생산성의 문제점으로 이를 해결하기 위한 기술개발의 필요성이 대두되고 있다[3].

최근에는 기존 방식의 문제점을 극복하기 위하여 몇 가지 방식들을 조합하는 기술개발이 시도되고 있지만, 기존의 기술적인 한계를 근본적으로 극복할 수 있는 새로운 대안 기술개발이 요구되고 있다. 본 연구에서는 지금까지 연구보고된 바가 없는 기계적인 원리를 이용한 신개념 기계식 선박평형수 처리장치를 소개하고, 디스크 형상 및 회전수에 따른 유동특성과 성능에 관한 해석연구를 수행하였다.

Table 1: IMO standards for discharged ballast water[2]

대 상	기 준
최소길이 10 μ m ~ 50 μ m	생존가능 개체수 10개/ml 미만
최소길이 \geq 50 μ m	생존가능 개체수 10개/m ³ 미만
독성비브리오 콜레라균	균체형성 단위(cfu) 1개/100ml 미만 또는 1개cfu/1g 동물성플랑크톤(습중량) 미만
대장균	250cfu/100ml 미만

2. 기계식 평형수 처리장치

2.1 구조 및 작동원리

본 연구에서 소개하는 기계식 선박 평형수 처리장치는 좁은 간극의 디스크 사이로 흐르는 유체의 회전력에 의한 전단력과 유체충돌, 캐비테이션 등을 유도하여 평형수 내에 존재하는 다양한 해양생물 등을 제거하는 원리로 작동된다. 디스크는 상하판으로 구성되며, 디스크 중심을 회전축으로 하판이 고정된 상태에서 상판이 고속 회전하게 된다. 평형수는 디스크 중심부로 유입되어 회전에 의한 원심력과

함께 디스크 바깥방향으로 빠져나가게 되며, 디스크 상하판 간의 거리는 500 μ m 간극이고 디스크 상판이 회전하며 간극사이에 존재하는 유체는 전단력(Shear stress)의 영향을 받게 된다. 또한, 디스크 형상은 Figure 1과 같이 3가지로 평판형(Planar type), 계단형(Step type), 원주형(Circular type)으로 구분하였으며, 유체에 유동저항을 주기위해 설계되었다. 평판형을 기준으로, 계단형은 유체가 반경방향의 출구측으로 빠져나가는 유동성분에 저항을 주기 위한 것이며, 원주형은 디스크를 따라 회전하는 유동성분에 저항을 구한 것이다.

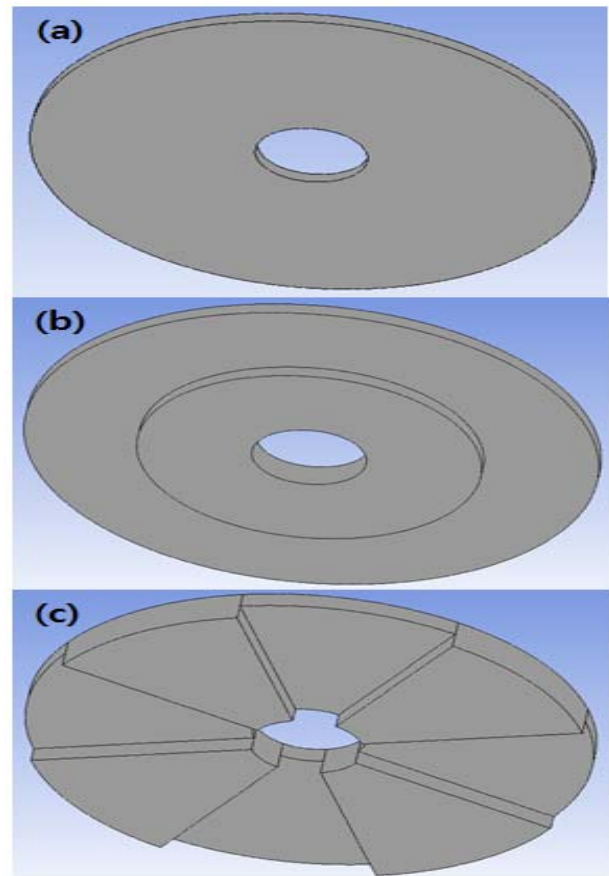


Figure 1: Fluid zone due to Disc shape type of mechanical ballast water treatment system - (a) Planar type, (b) Step type, (c) Circular type

2.2 사양 및 구동조건

기계식 선박평형수 처리장치의 디스크 직경은 500mm, 디스크 사이의 기본 간극은 500 μ m이고, 계단형과 원주형에서 두꺼운 간극 부분은 1mm로 설정하여 각 각 반경방향 및 회전방향으로 유체충돌효과를 고려하였다. 평형수 유입 유량은 36m³/h으로 질량유량 10kg/s이며, 이를 기준으로 5개 유닛을 모듈로 약 150m³/h 방출용량을 만족하는 사양이다. 디스크 상판이 회전축을 중심으로 3000과 5000 RPM의 회전수로 축회전하는 조건이다.

3. 수학적 해석모델

3.1 지배방정식

기계식 평형수 처리장치 내의 유동현상에 대한 해석적 분석을 위하여 상용 전산열유체해석 프로그램인 ANSYS CFX 15.0을 사용하였으며, 디스크 회전과 회전수에 따른 압력, 전단력, 속도분포 등의 유동특성을 디스크 형상에 대하여 비교분석하였다. CFD 유동해석을 위한 지배방정식으로 Equation (1)과 Equation (2)와 같은 연속방정식과 운동량 보존방정식을 만족하며, k-e 난류모델을 사용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = \rho g - \nabla p + \nabla \cdot \tau_{ij} \quad (2)$$

난류모델의 와동점성(Eddy viscosity)의 유효점성(μ_{eff})은 Equation (3)과 같이 정의되며, 난류점성 μ_t 는 난류운동에너지(k)와 손실(ϵ)간의 관계를 나타내며, C_μ 는 k-e 난류모델 상수이다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3)$$

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

유동해석을 위한 검사체적 모델(CFD model)은 Figure 2와 같으며, 유로의 작은 간극사이를 10개 셀(cell)로 나누어 속도 프로파일을 충분히 표현하도록 유한요소로 나누었다. 경계조건으로 디스크 중심부와 외곽부를 입구단(Inlet)과 출구단(Outlet)으로 정의하였다. 입구단의 질량유량은 10kg/s으로 입력하였고, 출구단의 압력은 대기방출의 대기압으로 설정하였다. 디스크 하판은 고정된 벽(Fixed wall)으로 하고, 디스크 상판은 회전하는 벽(Rotating wall)으로 정의하여 회전수를 3000과 5000 RPM를 세팅하였다. 사용유체의 점성계수는 0.001003kg/m.s이다.

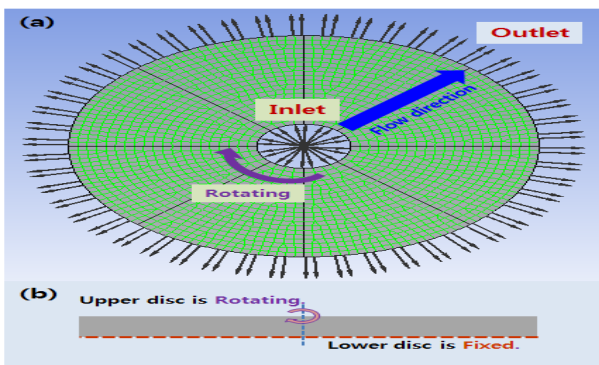


Figure 2: Boundary conditions of CFD model - (a) top view, (b) side view

4. 해석결과 및 고찰

4.1 디스크 형상에 따른 유선 특성

기계식 선박평형수 처리장치의 디스크 형상에 따른 유체 유선은 CFD 유동해석을 통하여 얻어진 Figure 3으로 확인할 수 있다. 우선 평판형에서 디스크 하판에서 상판으로 갈수록 상판 회전에 따라 회전반경이 점차 길어져 빠져나감을 알 수 있다. 이는 반경방향보다 회전방향으로 유로 길이가 길어짐을 의미하고 회전력의 영향이 보다 높음을 알 수 있다. 계단형에서는 입구단으로 유입된 유동의 하부부분이 하판의 계단부분에서 충돌되고, 그 후 절반으로 좁아진 간극으로 유량이 집중되어 유속이 빨라지면서 빠져나간다. 계단부근에서의 유동충돌효과와 계단부분 후에서의 전단력의 영향을 크게 받게 되는 형태이다. 원주형에서는 회전방향으로 계단이 반복적으로 배열되어 회전방향을 따라 유속이 높아진 유체가 계단부근에 충돌이 일어나고, 다시 좁아진 간극으로 빨라지는 과정을 반복하며 빠져나가는 유동패턴이다. 이는 회전력을 활용하여 충돌강도를 높이는 효과를 의미한다.

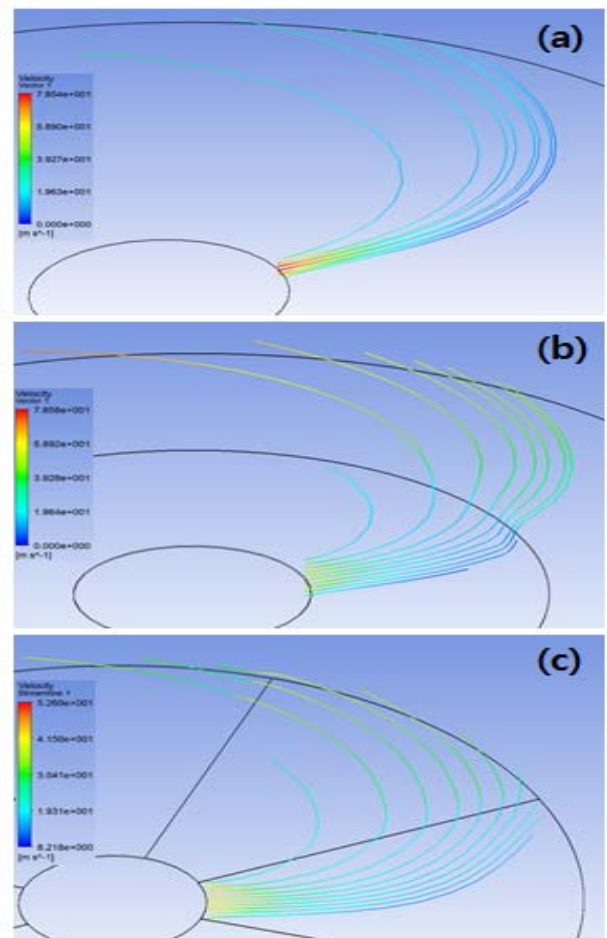


Figure 3: Streamlines in each disc type of (a) Planar, (b) Step, and (c) Circular

3.2 디스크 형상에 따른 압력 및 전단 효과

Figure 4-9는 각 디스크 형상별로 회전수 3000, 5000RPM에 따른 압력 및 전단응력 분포를 디스크 전체면에 대한 등고선(Contour)와 반경방향으로의 그래프로 나타낸 것이다.

평판형에서는 **Figure 4-5**와 같이 입구 근처로부터 압력이 반경방향으로 상승하다가 반경 80 mm에서부터 낮아지는 경향을 보인다. 초기에 입구단의 좁은 면적으로 유입되는 유속은 빠르지만, 반경방향의 유로면적이 넓어지며 유속이 줄어들어 압력이 상승한 것이며, 반경 80 mm에서 압력이 낮아지는 것은 반경방향의 유속은 줄어들었지만 회전방향의 유속이 증가하면서 압력이 감소하였다. 이는 **Figure 10**에서 반경방향의 속도(V_r), 회전방향의 속도(V_t)와 두 성분이 합산된 속도(V_{sum})의 발달되는 분포를 확인할 수 있다. 전단응력은 고정된 디스크 하판으로부터 속도구배가 존재하는 간극높이사이에 작용하게 되며, 유속과의 관계는 압력과는 상반되는 경향을 보인다. 그리고, 회전수가 3000에서 5000 RPM으로 높아지면, 일부 구간에서는 국부적인 압력 감소가 발생하여 공동현상(Cavitation)이 생길 수 있음을 보여준다. 일반적으로 과도한 공동현상은 기포의 생성과 소멸을 반복하며 소음과 진동을 유발하고 기계요소의 표면을 침식시키며 장치의 내구성과 성능에 악영향을 미칠 수 있지만, 평형수 처리장치에서는 적절한 공동현상은 평형수 내 존재하는 해양생물이나 미생물, 세균 등을 제거할 수 있는 효과적인 수단이 될 수 있다. 또한, 회전수 5000 RPM에서는 전단응력이 출구단에서 2배 정도 상승하는 결과를 보여준다. 따라서, 평판형에서는 회전수의 적절한 제어를 통하여 국부적인 공동현상과 전단력 상승을 유도할 수 있음을 알 수 있다.

계단형에서의 압력 및 전단응력 분포는 **Figure 6-7**과 같으며, 계단구조에 따라 평판형과는 조금 다른 경향을 보인다. 평판형보다 넓어진 면적의 입구단에 낮은 유속으로 유입되어 평판형에 비해 1bar 정도 높은 압력이 형성되었고, 전단응력은 절반 수준으로 감소되었다. 계단구조가 위치한 반경 150mm까지는 압력이 서서히 상승하지만, 계단부근에서 좁아진 간극으로 유속이 빨라지며 압력이 국부적으로 크게 줄어들고, 이어서 출구단까지 완만한 기울기로 감소하는 경향을 보여준다. 계단구조에 의한 유동저항이 크게 발생하여 유동이 위아래로 충돌하며 흐르게 되어, 국부적인 큰 압력변화와 유동충격의 효과를 기대할 수 있다. 또한, 디스크 회전속도에 따라서 계단구조에서 발생하는 압

력강하 크기가 결정되며, 5000 RPM에서는 공동현상이 발생할 수 있음을 보여준다. 전단응력은 입구단에서 평판형보다 낮게 형성되어 계단구조를 지나 점차 상승함을 보여 주며, 회전수 3000 RPM에 비해 5000 RPM에서 최대값이 2배정도 상승함을 알 수 있다.

마지막으로, 원주형의 압력과 전단응력 분포는 **Figure 8-9**에 나타내었으며, 계단형과는 달리 회전방향으로 위치한 계단구조에 의해 좁은 간극과 넓은 간극을 번갈아 유동하는 결과이다. 반경방향 분포 그래프는 디스크 면의 등고선에서 최대값을 지나는 반경방향 성분으로 그린 것이며, 넓은 간극에서 좁은 간극으로 지나가는 부근에 해당된다. 입구단에서 유입되는 속도와 회전방향으로 간극이 축소되며 상승하는 속도가 배가되어 압력이 상당수준으로 떨어짐을 알 수 있다. 그리고, 회전수 3000 RPM에서는 반경방향을 따라 점점 높아지는 유속이 계단구조에 의해 정체되어 압력이 상승하였다. 이런 압력분포 특성은 높은 회전수 5000 RPM에서 압력변화 기울기가 더 커짐을 알 수 있고, 입구단에서 과도한 공동현상을 야기하여 부적절한 운전조건으로 판단된다. 전단응력은 저회전수에서는 전반적으로 평판형과 유사한 수준이지만, 고회전수에서는 그 강도가 높아짐을 알 수 있다.

Figure 11은 디스크 형상에 따른 반경방향 압력 및 전단응력 분포 그래프를 함께 비교하여 나타내었다. 압력분포는 평판형과 계단형이 유사하며, 반경이 0.15m를 넘어서면서 압력강하가 발생하여 공동현상을 유발할 수 있다. 반면에, 원주형의 압력분포는 이와는 반대되는 경향을 보이며, 입구단에서부터 낮은 압력으로 공동현상이 발생함을 알 수 있다. 따라서, 안정적인 운전을 위해서는 원주형보다는 평판형이나 계단형이 보다 적절하다고 판단된다. 이에 반하여, 전단응력은 세 가지 형상에 대해 모두 유사한 경향을 보여주며, 회전수에 따라 상승하는 최대값은 다소 차이가 발생하였다.

3.3 유입수 유량 효과

평형수 처리장치의 사양 중에 하나인 유입수 유량에 따른 효과를 분석하기 위하여 평판형 디스크 타입에서 처리 유량에 따른 압력 및 전단응력 결과를 비교하여 **Figure 12**에 나타내었다. 유량이 높아질수록 입구단에서 유속이 함께 증가하여 음압이 발생함을 알 수 있고, 본 평판형 디스크 크기의 사양에서는 50m³/h까지는 처리가능한 범위로 판단된다. 이에 상응하는 전단응력의 최대 크기는 20,000 Pa로 작용하는 경우이다.

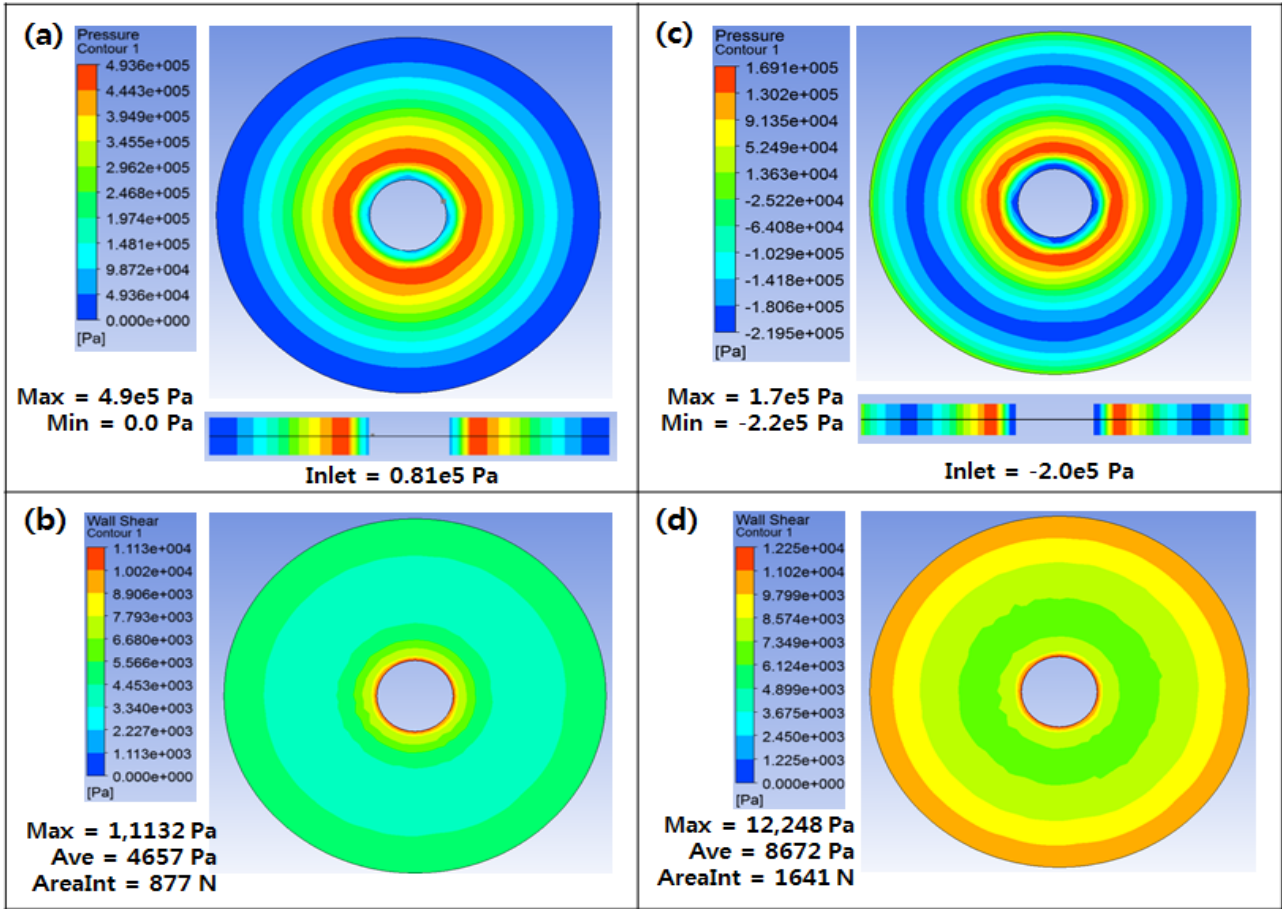
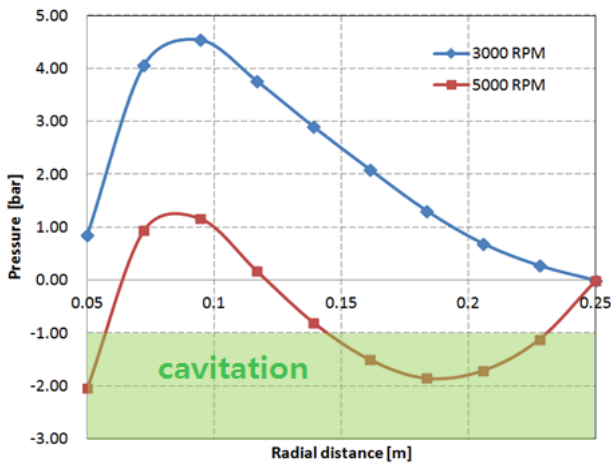
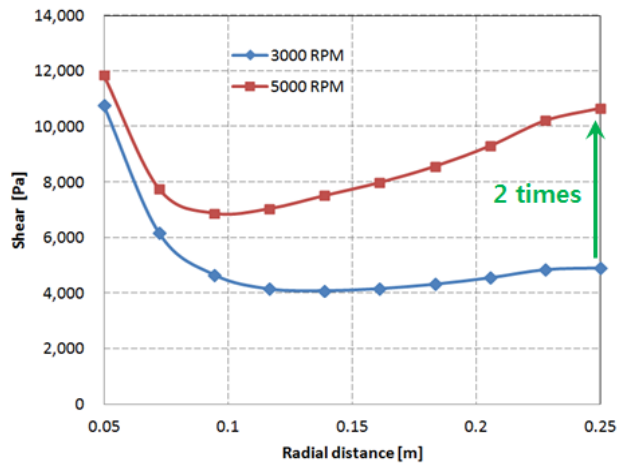


Figure 4: Pressure and Shear stress distributions in Planar disc type - (a) Pressure and (b) Shear stress at 3000 RPM, (c) Pressure and (d) Shear stress at 5000 RPM



(a) Pressure distribution



(b) Shear stress distribution

Figure 5: Comparison of Pressure and Shear stress in Planar disc type between 3000 and 5000 RPM

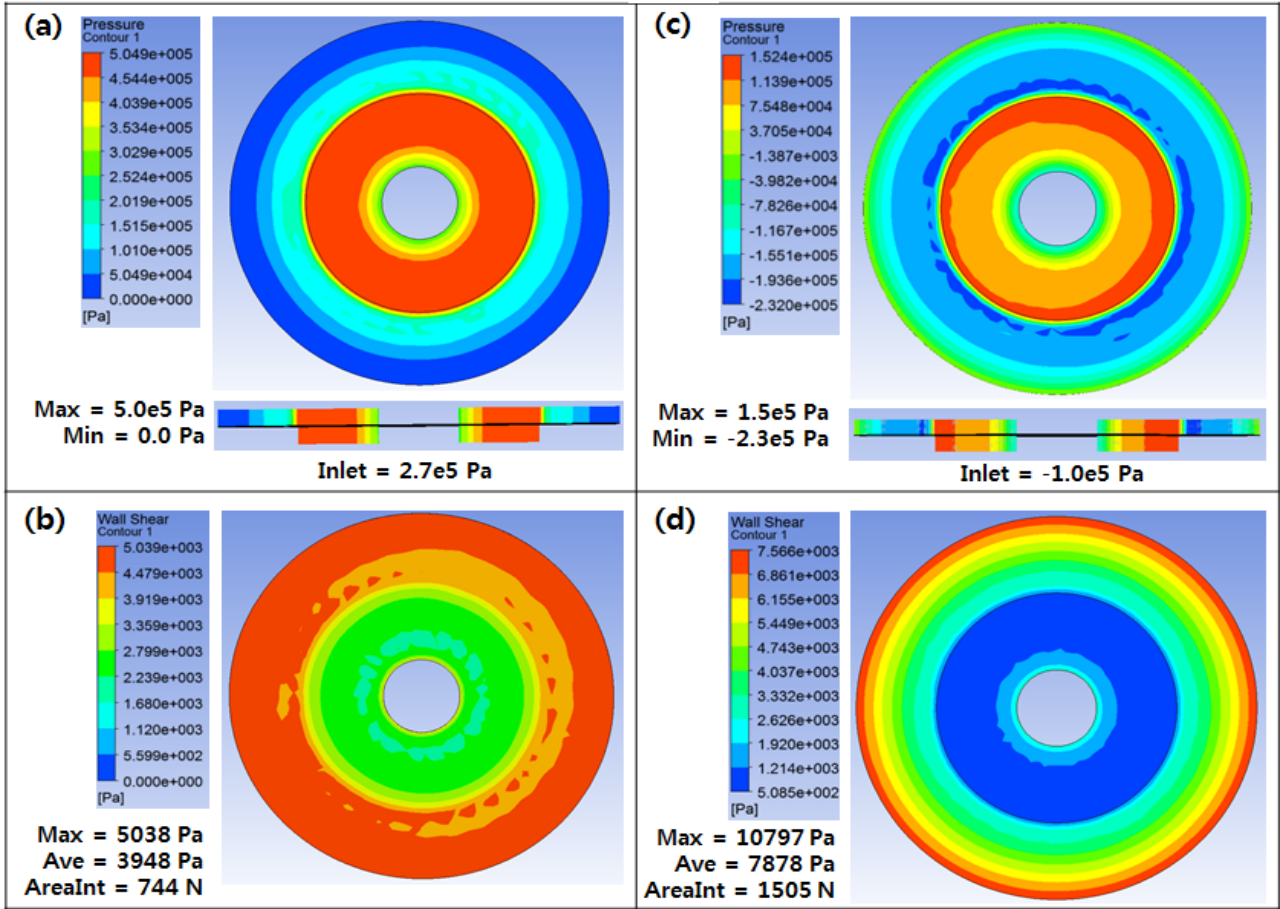


Figure 6: Pressure and Shear stress distributions in Step disc type - (a) Pressure and (b) Shear stress at 3000 RPM, (c) Pressure and (d) Shear stress at 5000 RPM

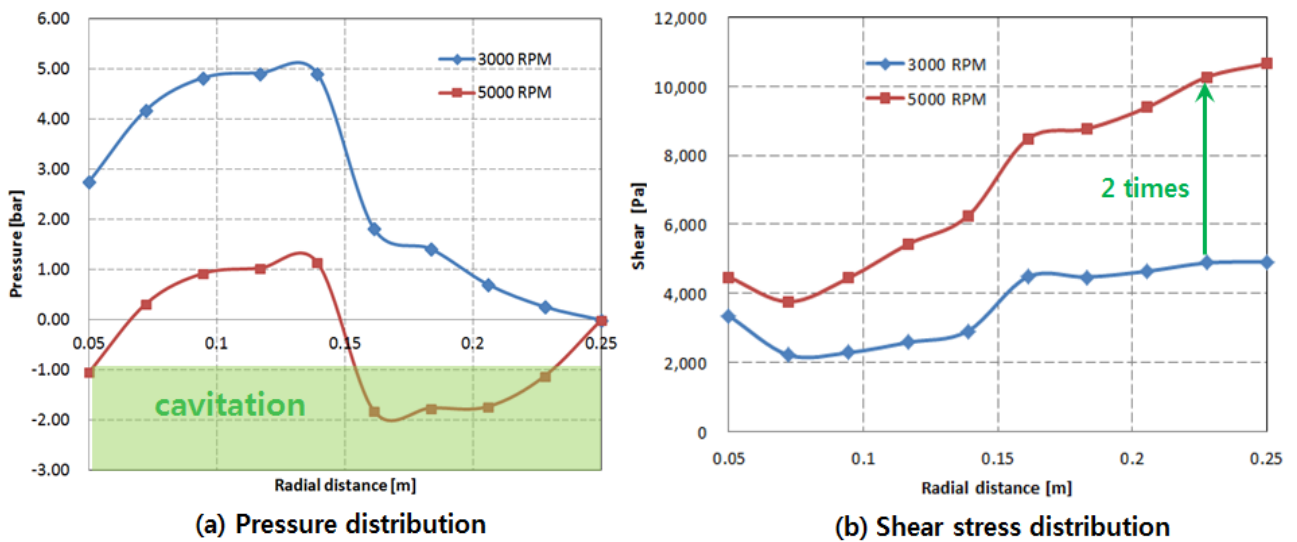


Figure 7: Comparison of Pressure and Shear stress in Step disc type between 3000 and 5000 RPM

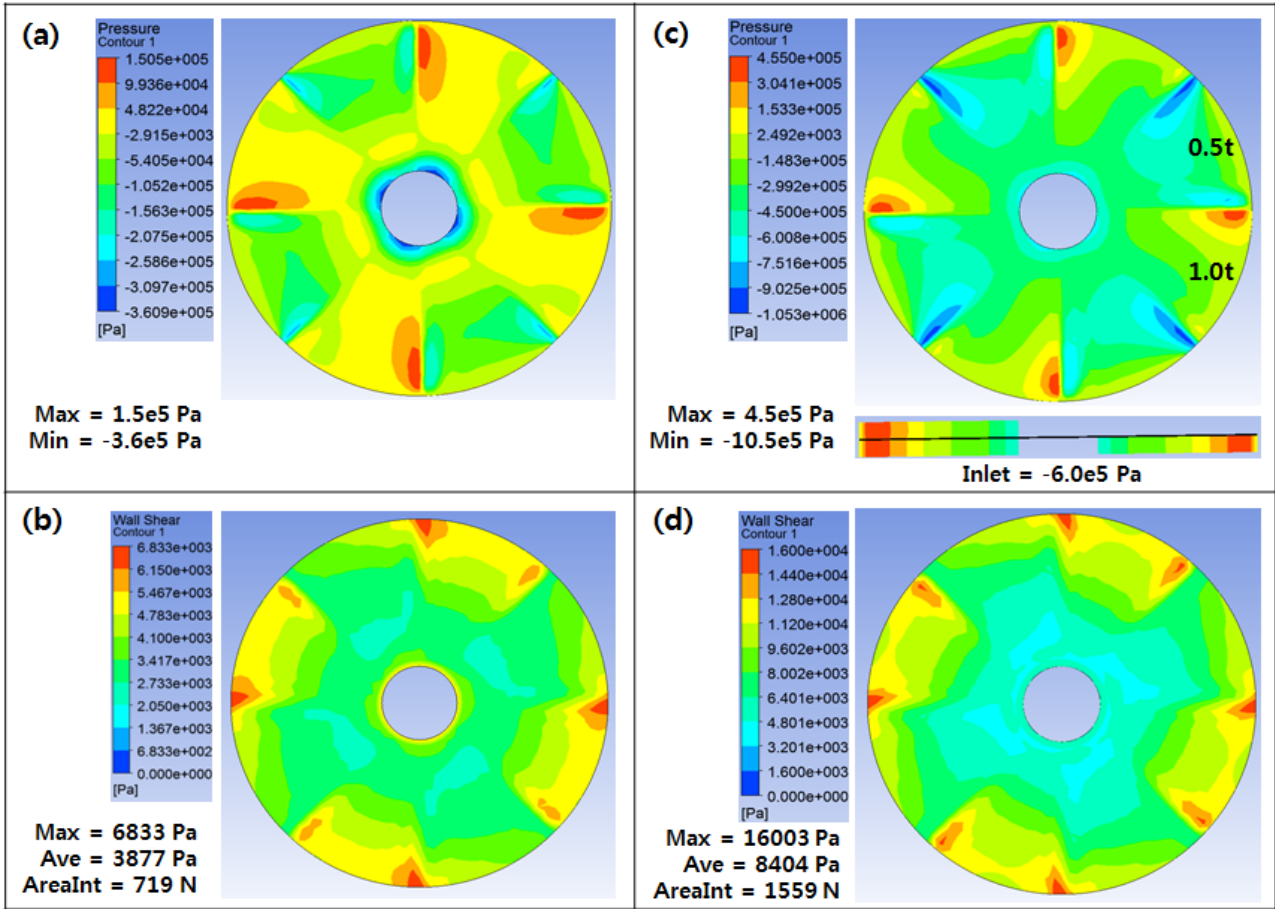


Figure 8: Pressure and Shear stress distributions in Circular disc type - (a) Pressure and (b) Shear stress at 3000 RPM, (c) Pressure and (d) Shear stress at 5000 RPM

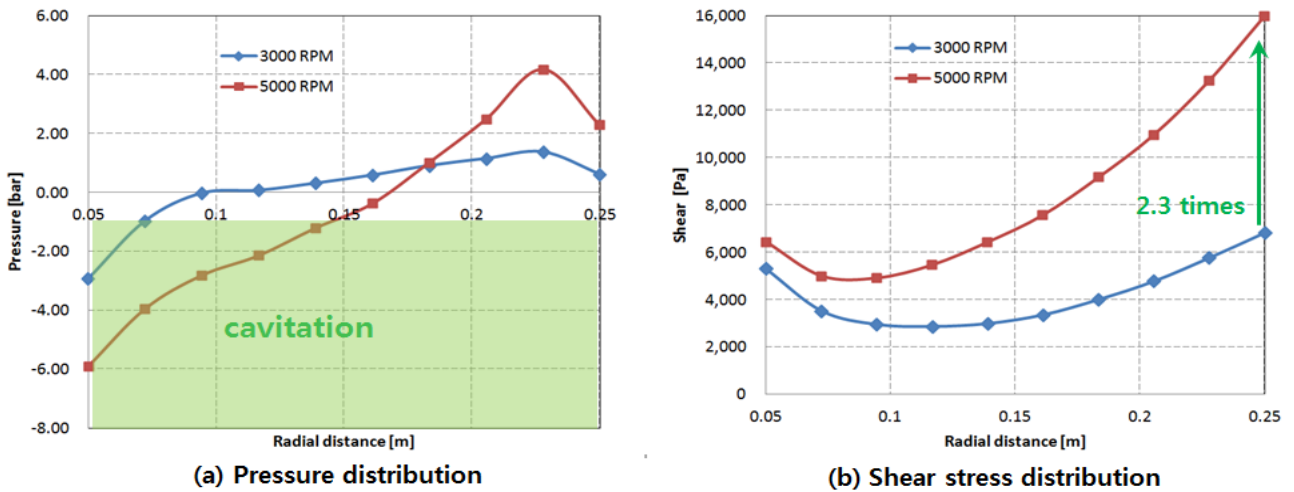


Figure 9: Comparison of Pressure and Shear stress in Circular disc type between 3000 and 5000 RPM

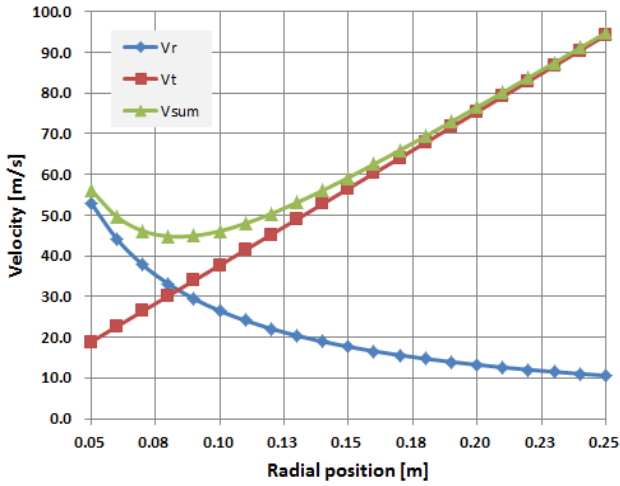
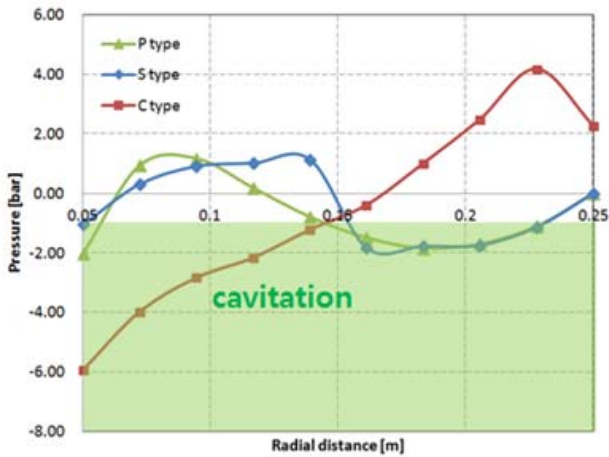
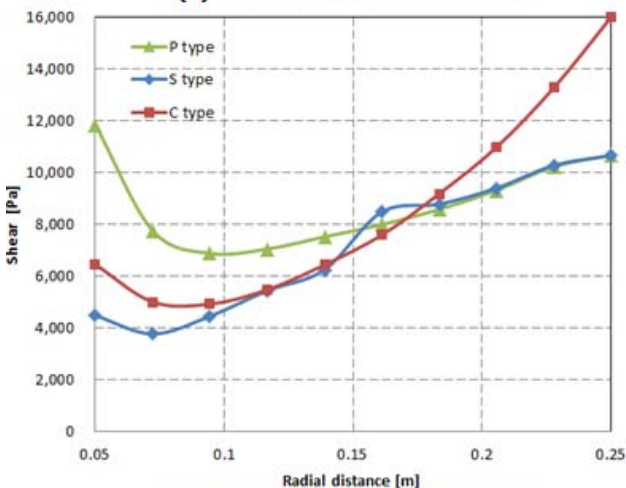


Figure 10: Velocity distribution along radial length (Vr : Radial velocity, Vt : Tangential velocity, Vsum : Velocity magnitude)



(a) Pressure distribution



(b) Shear stress distribution

Figure 11: Comparison of Pressure and Shear stress in all disc types (P type : Planar type, S type : Step type, C type : Circular type)

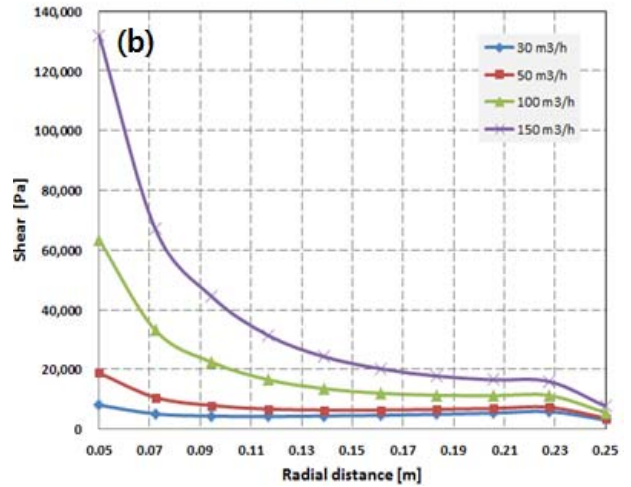
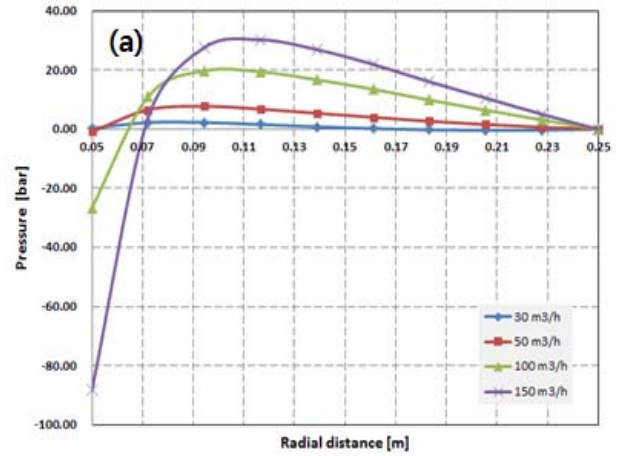


Figure 12: (a) Pressure and (b) Shear stress according to flow rates from 30 to 100 m³/h

5. 결 론

본 논문에서는 최근 국제해사기구(IMO)에서 평형수 처리장치 규제를 강화하고 의무화함에 따라 지금까지 전세계적으로 연구된 바가 없는 신개념 기계식 평형수 처리장치를 소개하고, 디스크 형상과 유량에 따른 유동특성을 상용 전산유체해석 기법을 이용하여 분석하였다. 디스크 형상은 평판형을 기준으로 반경방향으로 계단구조가 있는 계단형과 원주방향으로 계단구조가 있는 원주형으로 구분하였다. 이는 유선결과를 통하여 반경방향과 원주방향으로 계단구조에 의해 하부유동은 정체되고 상부유동은 좁은 간극으로 빠르게 빠져나가는 경향을 보였다. 평판형과 계단형에서는 압력분포가 비슷한 수준으로 형성되며, 반경을 따라서 압력이 감소하여 경우에 따라서 음압에 도달하여 공동현상을 야기함을 확인하였다. 반면에, 원주형의 압력분포는 입구 단에서부터 낮은 압력으로 형성되고 반경방향으로 점차 증가하는 경향을 보였다. 반면, 전단응력은 세 가지 형상에 대해 동일한 경향을 보여준다. 또한, 기계식 평형수 처리장치의 디스크 회전수를 적절히 제어함으로써 디스크 간극사

이의 유동에 다양한 형태의 효과를 줄 수 있을 것으로 판단된다.

향후 기계식 인자인 압력, 진단, 충격, 공동현상 등에 의한 평형수 내의 해양생물이나 미생물 등을 제거 메커니즘을 실험적으로 규명하는 연구와 이에 대한 데이터베이스가 필요하며, 본 연구결과와 함께 친환경 기계식 평형수 처리장치를 설계하는 데 유익한 데이터로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2014년도 중소기업청의 재원으로 연구수행 중인 중소기업융복합기술개발사업인 ‘IMO 규제 강화 대응을 위한 신개념 기계식 선박평형수 처리장치 개발’ 연구과제의 연구결과입니다.

References

- [1] International Maritime Organization regulation, Standards for Discharged Ballast Water, 2011.
- [2] K. M. Kim, H. J. Kim, and W. J. Ha, “A study on the strategy of concerned parties with regard to the performance standards and implementation schedule of ballast water treatment systems,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 38, no. 3 pp. 325-332, 2014 (in korean).
- [3] E. C. Kim, “Consideration on the ballast water treatment system technology and its development strategies,” Journal of Electrical Engineering and Information Technology (MEE), vol. 15, no. 4, pp. 349-356, 2012.
- [4] T. S. Pyo, S. G. Cheon, D. W. Park, S. K. Choi, S. Y. Kim, and G. S. Kil, “Design and fabrication of a ballast water treatment system using UV lamps,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 33, no. 6 pp. 952-958, 2009 (in korean).
- [5] D. W. Park, G. S. Kil, Y. K. Choi, C. Y. Choi, J. Chang, and S. G. Cheon, “A study on the development of an energy saving ballast water treatment device (I),” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 34, no. 6 pp. 880-886, 2010 (in Korean).
- [6] G. J. Jeong, K. H. Han, T. J. Lee, Y. H. Ahn, Y. G. Kim, J. H. Lee, and S. Y. Song, “Electrolysis Ballast Water Treatment System,” Korea, Patent 101062559, August 30, 2011 (in Korean).