

## 선박평형수 처리장치의 Scale-up을 위한 조건 최적화 연구

강아영 · 송주영<sup>†</sup>

창원대학교 토목환경화학융합공학부  
51140 경남 창원시 의창구 창원대학교 20  
(2016년 4월 28일 접수, 2016년 5월 30일 수정본 접수, 2016년 7월 16일 채택)

### A Study on the Optimization of Ballast Water Treatment System for Scale-up

Ahyoung Kang and Ju Yeong Song<sup>†</sup>

Division of Civil, Environmental and Chem. Eng., Changwon National University, 20, Changwondaehak-ro, Uichang-gu,  
Changwon, Gyeongnam, 51140, Korea  
(Received 28 April 2016; Received in revised form 30 May 2016; accepted 16 July 2016)

#### 요 약

선행연구에서는 2차오염이 없는 물리적 처리방법인 전단응력을 이용한 선박평형수 처리장치에 대하여 연구하였다. 정지상태의 외부 실린더와 회전하는 내부 실린더 사이에 발생하는 전단응력을 이용하여 다양한 미생물을 파쇄 처리하는 원리이며, 전단응력은 실린더 표면의 형태나 회전속도에 따라 크기가 달라진다. 전단응력의 크기와 전단응력을 받는 시간에 따라 멸균정도가 차이를 보이기 때문에, 다양한 조건에 따른 멸균효율을 밝히는 실험이 필요하며 이를 통해 상업용 장치의 제작을 위한 기초 자료를 마련하고자 하였다. 선행연구에서는 disk type과 cylinder type의 비교를 통하여 cylinder type이 우수함을 밝혔다. 본 연구에서는 선행연구를 통하여 얻은 결과를 바탕으로 cylinder type, groove type, knurling type의 표면 조건을 변화시켜 가장 우수한 조합을 밝혀냄과 동시에 실린더 사이의 간격에 따른 회전속도 및 유속 조건을 최적화 하고자하였다. 그 결과 groove type에서 250 mL/min의 유량조건에서는 8000 rpm 이상, 혹은 500 mL/min의 유량조건에서는 10000 rpm 이상에서 100% 살균 처리되는 결과를 얻었다.

**Abstract** – In the prior work, we studied a ballast water treatment apparatus, which is secondary pollution free by using physical treatment of shear stress. The principle of this apparatus is smashing various microorganisms by shear stress generated between stationary outer cylinder and revolving inner cylinder. Because of various magnitude of shear stress according to the inner cylinder surface type and revolution speed, an appropriate surface type and optimum revolution speed should be studied by consecutive experiment to determine the reference data for commercial apparatus. Through a comparative study of disk type and cylinder type of ballast water treatment apparatus, cylinder type is turned out to be superb to disk type. In this study, we studied to determine the superior collaboration of cylinder type, groove type and knurling type of inner cylinder to non patterned outer cylinder, and to optimize the revolution speed and flow rate according to the gap between inner cylinder and outer cylinder. As a result, we could get perfect sterilization effect at groove type under the conditions of 250 mL/min of flow rate at 8,000 rpm and 500 mL/min of flow rate at 10,000 rpm respectively.

**Key words:** Ballast water, Physical sterilization, Shear stress, Surface condition, Revolution speed

#### 1. 서 론

선박의 하중 및 균형을 조절하는 선박평형수는 국가 간 교역이 활발할수록 그 이동이 증가하고 있다[1-4]. 선박평형수의 많은 이동은 선박평형수가 배출되는 인근 해역의 외래종 및 병원균 도입을 광범

위하게 증가시키고 있다[5]. 이에 국제해사기구에서는 선박평형수 배출농도를 설정함에 따라 외래종 및 병원균의 이동, 방출을 규제하고 있다[6-8]. 선박평형수의 처리방법에는 화학적 처리와 물리적 처리, 생물학적 처리가 있으며, 현재 개발된 기술 가운데 물리적 처리방법은 규제 대상이 큰 유기물의 처리는 가능하나 대장균을 포함한 박테리아의 처리가 어렵다는 단점이 있다[2,8]. 화학적 처리방법과 생물학적 처리방법은 유기체 처리가 가능한 반면 화학물질의 잔여나 유기체의 돌연변이 발생 등의 2차 오염 발생의 위험이 있다[9-12]. 따라서 2차 오염 물질을 처리하는 추가적인 처리시설을 필요로 한다[13-16]. 선행연구에서 2차오염의 위험이 없는 물리적 처리 방법을 연

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: jusong@changwon.ac.kr

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.

구하였다[17,18]. 전단응력을 이용하여 균을 파쇄하여 멸균하는 원리의 장치를 개발하고, 전단응력과 멸균정도에 영향을 미치는 조건을 변화시키며 더 우수한 조건을 찾는 실험을 진행하였다[17,18]. 회전속도와 회전체의 직경을 달리한 두 장치의 비교를 통하여 동일한 전단응력이라면, 회전속도가 높은 것이 직경이 큰 것보다 멸균효율이 좋다는 것을 밝혀냈다[17]. 또한, 회전체의 표면의 형태에 따라서 멸균효율이 달라지는 것을 확인하고, 표면의 형태를 세분화 하여 가장 우수한 형태의 표면 조건을 찾아내었다[18]. 본 연구에서는 선행 연구를 통해 밝혀낸 우수 표면 조건들에서 간격과 유량을 변화시켜 가장 경제적이면서 효율적인 조건을 구하는 실험을 진행하였다. 연구를 통해 이루어진 최적화 조건은 상용화 장치개발에 기초자료로 사용될 예정이다.

## 2. 연구배경

전단응력을 이용하여 해수 중에 존재하는 균을 물리적으로 환경 친화적으로 처리하는 방법을 연구하였다. 전단응력은 유체의 흐름이 층류일 때만 나타나며, 비교적 흐름이 빠른 난류에서는 전단응력이 발생하지 않는다. 연구에 사용된 장치는 유체의 흐름과 수직의 방향으로 inner cylinder를 회전시켰다. Fig. 1은 설계한 장치의 흐름 분포를 나타낸 것이다. 유체가 흐르는 통로의 바깥 면(outer cylinder)은 고정시켰고, 안쪽 면(inner cylinder)은 빠른 속도로 회전시켰다. Fig. 1의 (a)는 속도분포를 나타내고, 전단응력분포는 (b)와 같이 나타나며 최대 전단응력은  $4589 \text{ kg/cm} \cdot \text{min}^2$ 이다. 좌표는 원주좌표를 적용해야 하나 실린더 직경에 비해 실린더 간의 간격이 작아서 직교좌표를 적용하였다.

전단응력 값은 유체가 흐르는 간격, 유체의 점성, 유체의 속도 등에 의해 변한다. 본 연구의 장치에서는 해수의 흐름방향이 실린더 회전 방향과 수직이기 때문에 유량 및 유속은 회전속도에 영향을 미치지 않는다. 다만 유체가 장치에서 전단응력을 받는 시간의 영향을 받는다. 장치에서 전단응력에 영향을 미치는 요인으로는 회전체의 지름과 회전속도, 표면 형상 등이 있다.

첫 번째 선행연구에서는 우선 물리적 선박평형수 처리장치의 기본형을 실험을 통해 설정하였다. 회전속도와 회전체의 직경은 각각 전단응력에 비례하는 요소이다. 따라서 이 둘은 서로 반비례 관계에 있다. 회전속도가 높은 장치와 직경이 큰 장치 중 더 유리한 조건을 찾기 위해서 회전체의 직경은 작으나 회전속도가 빠른 cylinder type과 회전체의 직경은 크나 회전속도가 느린 disk type을 제작하여 실험하였다. Cylinder type은 disk type에 비해 회전속도가 2배로 빠르고(2,000, 4,000, 6,000, 8,000 rpm) 회전 반경이 절반이다. 반면 Disk type은 회전속도는 느린 반면(1,000, 2,000, 3,000, 4,000 rpm)

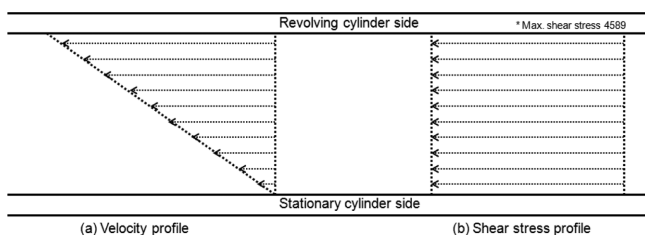


Fig. 1. Velocity and shear stress profile of ballast water treatment apparatus.

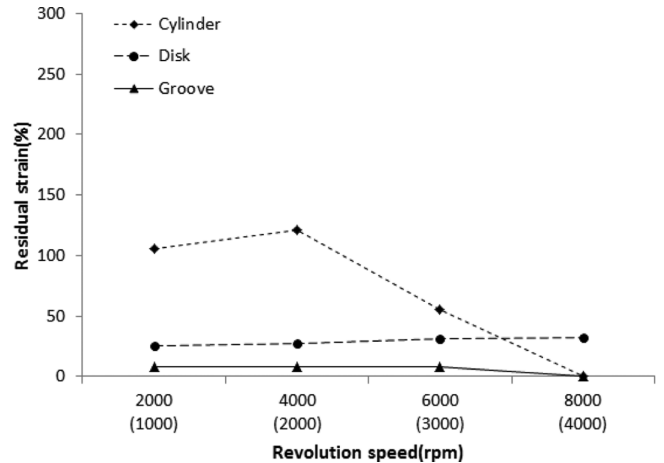


Fig. 2. Comparison of the sterilization efficiency with Cylinder, Disk, and Groove type at 0.5 mm interval and 250 mL/min of flow rate.

회전반경이 2배로 크다. 팔호 속 disk type의 회전속도일 때, disk type의 2배에 이르는 cylinder type의 회전속도일 때와 동일한 전단응력을 가진다. 전단응력이 동일할 때의 cylinder type과 disk type을 비교한 선행연구를 통해 disk type은 cylinder type에서 완전히 멸균되는 회전속도에서도 멸균 처리되지 않음을 확인하고 cylinder type을 기본형으로 선정하였다.

Fig. 2에 나타난 groove type 그래프에서 변형형의 가능성을 확인하였다. 비교결과 완전히 멸균되는 지점은 8,000 rpm으로 동일하지만, 보다 낮은 회전속도에서 cylinder type보다 멸균정도가 우수했기 때문에, 변형형이 기본형보다 더 우수한 멸균성을 가질 가능성을 확인할 수 있었다.

두 번째 선행연구에서는 변형형과 혼합형을 비교하여 가장 우수한 type을 찾아본 결과 Fig. 3의 결과를 얻었다. 기본형 cylinder type과 변형형 groove type은 8,000 rpm에서 완전 멸균을 보였고, 혼합형 가운데 외부 실린더 knurling에 내부 실린더 groove type에서만 8,000 rpm에서 완전 멸균을 보인다. 반면 회전체인 내부실린더가 민무늬(non pattern) 실린더인 경우의 혼합형에서는 멸균효율이 떨어

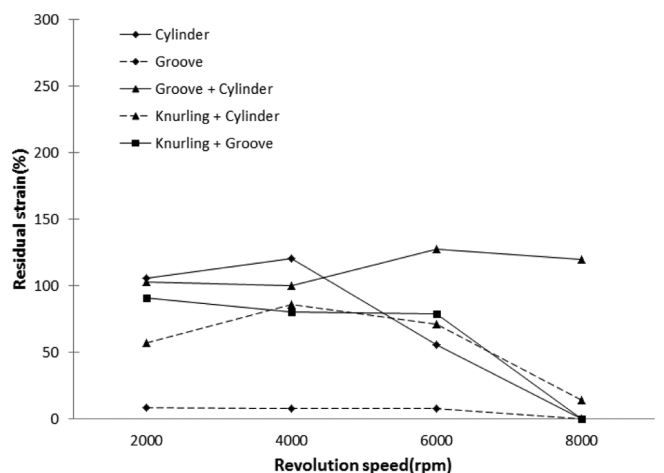


Fig. 3. Sterilizing power of aerobic germs at the 250 mL/min for cylinder, groove + cylinder, knurling + cylinder, and knurling + groove types.

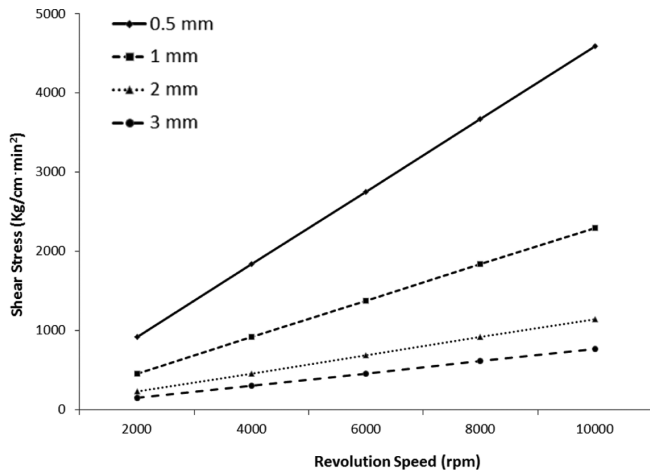


Fig. 4. Shear stress distribution according to the revolution speed and interval (mm) between two cylinders.

지는 것으로 나타났다. 이 연구는 장치의 type에 따른 멸균효율을 비교하기 위해 그 외의 조건은 최대 멸균효율을 나타낼 수 있도록 맞춰주었다. 전단응력이 가장 높고, 오래 받을 수 있도록 간격은 가장 좁은 0.5 mm로 설정하고 유량은 250 mL/min으로 실험한 결과이다. Fig. 3에서는 cylinder type과 groove type, knurling + groove type의 우수성을 비교하기가 힘들며, 보다 경제적인 넓은 간격과 높은 유량의 가능성을 나타낸다.

본 연구에서는 선행연구에서 우수성을 확인한 장치의 세 가지 형태 중 보다 효율적인 것을 가리고자 실험을 진행하였다. Fig. 4에는 간격과 회전속도에 따른 전단응력의 크기를 나타낸 그래프이다. 간격이 좁을수록 높은 전단응력을 가지고 있어, 간격이 좁을 때 멸균 효율이 높다. 하지만 경제적인 측면에서는 간격이 넓을수록 동일한 조건에서 많은 유량을 처리할 수 있고, 장치 개발이 용이해진다. 따라서, 실험을 통하여 처리가 가능한 간격 범위에서 가장 넓은 간격을 알아보았다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3-1. 실험장치

실험장치의 전체 구성도를 Fig. 5에 나타내었다. 해수 저장조로부터 펌프를 이용하여 여과장치를 통과시킨다. 여과장치 통과를 통해 50  $\mu$ m 이상의 유기체는 걸러지고, 50  $\mu$ m 이하의 유기체는 처리장치로 유입된다. 유입된 해수 내의 유기체는 처리장치를 통과하며 강력한 회전에 의한 전단응력을 받아 멸균된다. 전단응력은 유체의 흐름 간격, 회전체의 회전 속도, 회전체의 표면형태에 따라 달라지게 되며 유체의 흐름 속도에 따라 전단응력을 받는 시간이 달라진다.

회전체의 표면형태는 기본형인 cylinder type과 변형형인 groove type, 혼합형의 외부 실린더로 사용되는 knurling type이 있으며, 총 5가지 type 비교에서 우수성을 입증한 cylinder type과 groove type, knurling + groove type에 대한 간격과 유량을 최적화에 관한 실험을 하였다.

#### 3-2. 실험 방법

장치의 type과 간격을 실험 조건에 맞게 설치한다. 장치는 60%의 에탄올을 튜브에 통과시켜 소독한다. 멸균 처리되어 나온 처리액

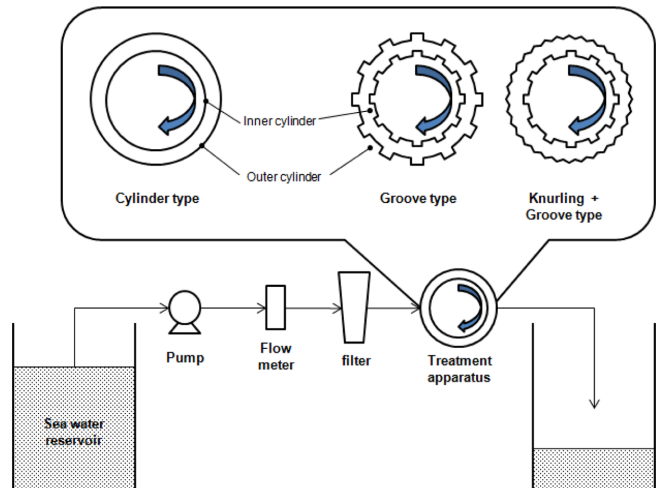


Fig. 5. Schematic diagram of an experimental apparatus.

sample 희석을 위한 바닷물 및 비커, 팁, 시험관은 autoclave에서 121 °C로 30분간 멸균 시켜서 사용한다.

대조군에 해당하는 원액 시료를 채취하고, 회전속도를 2000 및 4000, 6000, 8000, 10000 rpm으로 변화시켜서 10분간 유지 후 처리된 바닷물을 채취한다.

채취된 시료는 멸균된 clean bench에서 작업하며, 멸균시킨 바닷물로 10<sup>3</sup>배 희석시키고 일반세균 간이 계수용 petrifilm (3 M, USA)에 접종한다.

접종한 petrifilm은 33 °C incubator (Yamato, Japan)에서 3일간 배양 후 계수한다.

#### 3-3. 변수에 따른 실험

본 실험은 기본형과 변형형 type의 최적 조건에서 우수한 type을 선별하여 보다 나은 type인 cylinder type 및 groove type, knurling + groove type의 보다 넓은 간격과 높은 유량에서 멸균효율을 비교하였다.

실험을 통해 밝혀낸 우수한 type의 간격과 유량에 대한 최적화 조건을 찾기 위해서, 우수 type인 cylinder-cylinder, groove-groove 및 knurling-groove type에서 간격 0.5와 1, 2, 3 mm 및 유량 250과 500 mL/min에서 실험하였다. 또한, 장치를 보다 안정적이도록 보완하여 회전속도를 보다 높은 10,000 rpm까지 높여 실험하였다.

#### 3-4. 결과처리

Petrifilm으로 접종시킨 처리된 바닷물은 배양 후 계수된다. 계수된 균수는 아래 식을 사용하여 보다 효과적으로 비교하였다.

$$\text{Residual strain (\%)} = \frac{[\text{cfu}] \text{ at the treated sample}}{[\text{cfu}] \text{ at the raw}} \times 100$$

### 4. 결과 및 고찰

#### 4-1. 실험결과 및 고찰

##### 4-1-1. Cylinder type

기본형인 Cylinder type에서 유량 250 mL/min이며, 회전속도는 2,000과 4,000, 6,000, 8,000, 10,000 rpm일 때 간격에 따른 멸균효율을 실험하였다. 결과를 나타낸 그래프는 Fig. 6이며, 10,000 rpm에서는

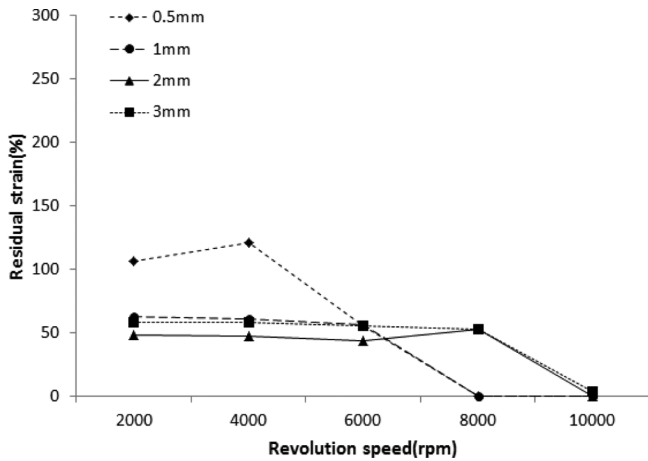


Fig. 6. Sterilizing power at 250 mL/min flow rate and at four different intervals of non-pattern cylinder type.

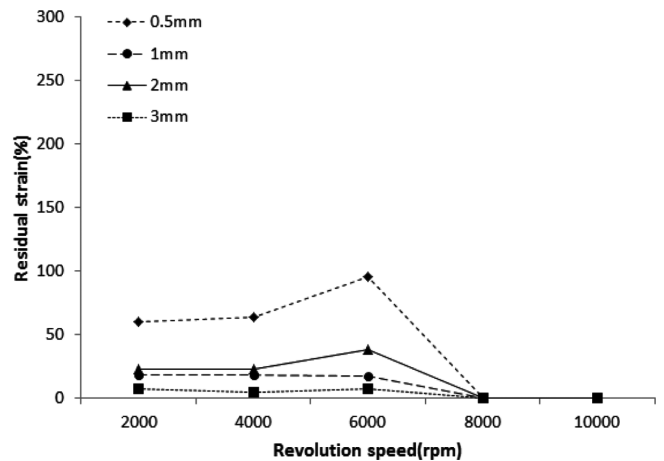


Fig. 8. Sterilizing power at 250 mL/min flow rate and at four different intervals of groove type.

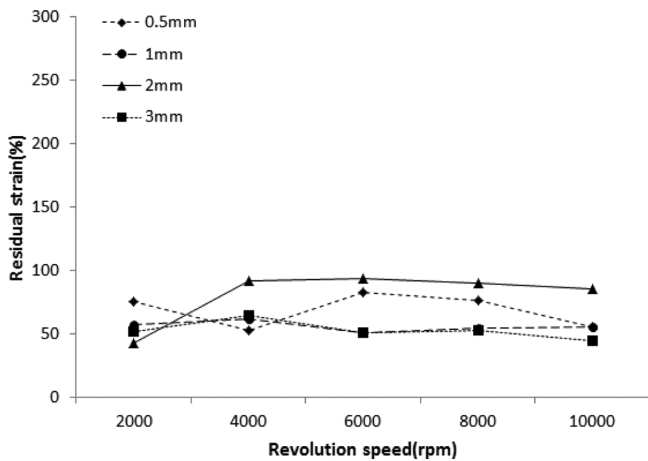


Fig. 7. Sterilizing power at 500 mL/min flow rate and at four different intervals of non-pattern cylinder type.

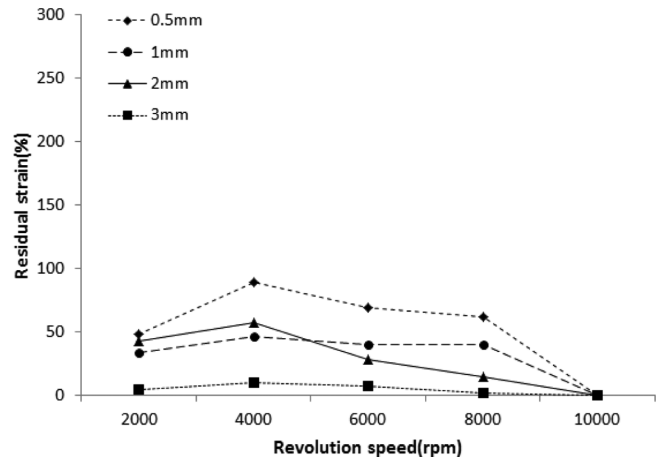


Fig. 9. Sterilizing power at 500 mL/min flow rate and at four different intervals of groove type.

최대 2 mm 간격에서 완전 멸균 되었다. 8000 rpm에서는 10,000 rpm 일 때보다 한 단계 낮은 1 mm 간격이 완전멸균 되는 최대 간격인 것으로 나타났다.

간격 3 mm, 회전속도 4,000 rpm에서 균의 농도가 2,000 rpm에서 보다 증가하는 경향을 보인 이유는 colony가 전단응력에 의하여 작은 단위로 분리된 것으로 사료된다.

유량 500 mL/min에서 cylinder type을 실험한 결과는 Fig. 7에 나타나있다. 회전속도 2000부터 10,000 rpm까지 2,000 단위로 변화를 주며, 간격에 따른 멸균효율을 살펴보았다. 완전 멸균 되는 지점은 최소 간격인 0.5 mm에서도 나타나지 않았기 때문에 cylinder type에서 처리할 경우 본 실험 조건 범위 내 살균가능 최대 유량은 250 mL/min임을 알 수 있었다.

#### 4-1-2. Groove type

Fig. 8는 변형형의 groove type에서 유량 250 mL/min이며, 간격과 회전속도에 따른 멸균효율을 실험한 결과 그래프이다. 장치의 최대 간격인 3 mm와 8,000 rpm에서 완전 멸균 결과를 보여, 보다 넓은 간격에서의 멸균 가능성을 보여주었다.

Fig. 9은 groove type의 유량 500 mL/min에서 간격과 회전속도에 따른 멸균효율을 알아본 결과이다. 장치의 최대간격인 3 mm까지 멸균

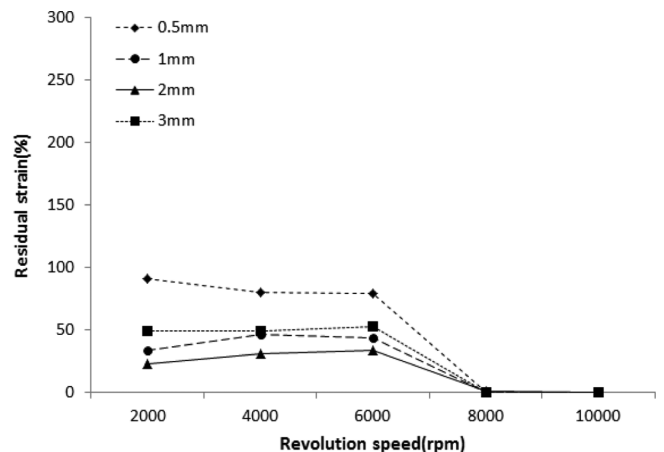


Fig. 10. Sterilizing power at 250 mL/min flow rate and at four different intervals of outer cylinder knurling & inner cylinder groove type.

되었으나 그때의 최소 회전속도가 10,000 rpm이었다. 따라서 groove type에서는 최대 3 mm의 간격을 사용할 수 있으며, 이때 선택 가능한 범위는 유량 250 mL/min 일 때 8,000 rpm 이상이거나 유량 500 mL/min일 때 10,000 rpm 이상으로 나타났다.

#### 4-1-3. Knurling + groove type

Fig. 10은 외부 실린더 knurling type에 내부 실린더 groove type에 서 유량이 250 mL/min일 때 간격과 회전속도에 따른 멸균효율을 나타낸다. 최대간격인 3 mm와 8,000 rpm 이상의 범위에서 완전 멸균 되는 것을 확인 할 수 있었다.

Fig. 11는 유량이 500 mL/min일 때, 외부실린더 knurling 및 내부 실린더 groove type의 간격과 회전속도에 따른 멸균효율을 나타낸 그래프이다. 최대간격 3 mm의 10,000 rpm에서 완전 멸균이 된 것을 확인하였다.

Fig. 10과 11를 통해 외부 knurling cylinder와 내부 groove cylinder type에서는 groove type과 마찬가지로 최대 3 mm에서 유량 250 mL/min의 8,000 rpm 회전속도나 유량 500 mL/min의 10,000 rpm 회전 속도를 선택할 수 있었다.

이상의 결과를 정리하여 실린더의 간격과 유량에 따른 살균 결과를 회전 속도를 parameter로 하여 Fig. 12과 같이 나타났다. 실린더의 조합에 따라 유량이 250 mL/min일 때는 8,000 rpm에서도 살균효과가 우수하나 유량이 500 mL/min을 넘어가면 10,000rpm 이상이 되어야 살균효과가 나타나는 것으로 확인되었다.

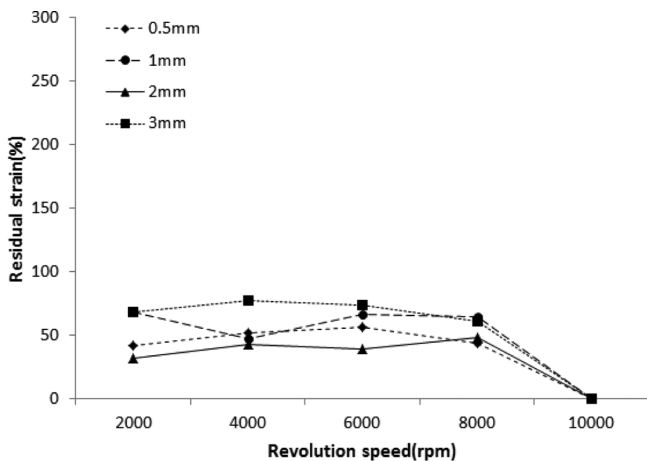


Fig. 11. Sterilizing power at 500 mL/min flow rate and at four different intervals of outer cylinder knurling & inner cylinder groove type.

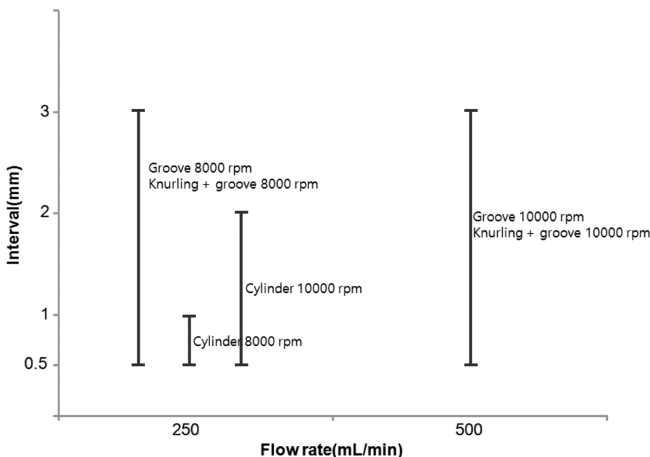


Fig. 12. Optimization about the cases with types, intervals, rotational speed, and flow rate.

## 5. 결 론

선박평형수 물리적 처리장치의 최적화 조건을 찾은 결과, 유량이 낮을수록 완전 멸균되는 회전속도와 실린더 간격 조건이 다양하고, 기본형인 cylinder type에 비해 변형형 groove type과 혼합형 knurling + groove type이 간격과 유량에서 더 경제적인 결과를 나타내었다. cylinder type은 낮은 유량(250 mL/min)에서만 완전 멸균의 결과가 나타났지만, groove와 knurling + groove type은 500 mL/min에서도 완전 멸균의 결과를 나타내었다. 또한, 간격에서도 변형형과 혼합형은 3 mm까지 완전 멸균이 가능했지만, 기본형에서는 1 mm 혹은 2 mm 까지만 완전 멸균이 나타나는 한계를 보였다.

결론적으로 cylinder type보다 groove type 및 knurling + groove type이 우수했으며, groove type과 knurling + groove type은 동일한 우수성을 보여 비교하기가 어려웠다. 우수한 두 type에서 간격은 3 mm의 최대 간격에서 멸균이 가능하여 간격 확장의 가능성을 보였고, 유량과 회전속도는 서로 영향을 미쳤기 때문에 한 가지를 선택하기는 어려웠다. 높은 유량의 500 mL/min은 동일 시간 내 많은 양을 처리할 수 있는 이점이 있으나, 회전속도 10,000 rpm에서만 처리가 가능하기 때문에 회전속도를 높이는 면에서 경제적으로 불리하다. 회전속도 8,000 rpm으로 처리하는 경우, 처리 가능한 유량이 250 mL/min 이하이기 때문에, 처리 속도 면에서 경제적으로 불리한 단점을 가지고 있다. 따라서 상업용 장치 제작에 소요되는 장비의 비용 및 장치의 설계 처리용량을 고려하여 최적화범위 내에서 선택하여야함을 확인하였다.

## References

1. Rivas-Hermann, R., Kohler, J. and Scheepens, A. E., "Innovation in Product and Services in the Shipping Retrofit Industry: A Case Study of Ballast Water Treatment Systems," *Journal of Cleaner Production*, **106**, 443-454(2015).
2. Jung, Y., Yoon, Y., Hong, E., Kwon, M. and Kang, J., "Inactivation Characteristics of Ozone and Electrolysis Process for Ballast Water Treatment Using *B. Subtilis* Spores as a Probe," *Marine Pollution Bulletin*, **72**(1), 71-79(2013).
3. Seiden, J. M. and Rivkin R. B., "Biological Controls on Bacterial Population in Ballast Water During Ocean Transit," *Marine Pollution Bulletin*, **78**, 7-14(2014).
4. Wright, D. A., Gensemer, R. W., Mitchelmore, C. L., Stubblefield, W. A., Genderen, E. V., Dawson, R., Dawson, C. E. O., Bearr, J. S., Mueller, R. A. and Cooper, W. J., "Shipboard Trials of An Ozone-based Ballast Water Treatment System," *Marine Pollution Bulletin*, **60**(9), 1571-1583(2010).
5. Zhang, N. and Shan, K. H. B., "Ballast Water Treatment Using UV/TiO<sub>2</sub> Advanced Oxidation Processes: An Approach to Invasive Species Prevention," *Chemical Engineering Journal*, **243**, 7-13(2014).
6. Maranda, L., Cox, A. M., Campbell, R. G. and Smith, D. C., "Chlorine Dioxide as a Treatment for Ballast Water to Control Invasive Species: Shipboard Testing," *Marine Pollution Bulletin*, **75**(1-2), 76-89(2013).
7. International Maritime Organization (IMO), International convention for the control and management of ship's. ballast Water and Sediments, 25/09/06, accessed from website(2004).
8. International Maritime Organization (IMO), Global ballast water

- management programme, 15/01/08, accessed from <http://global-last.imo.org>(2008).
9. David, M., Gollasch, S. and Leppakoski, E., "Risk Assessment for Exemptions from Ballast Water Management - The Baltic Sea Case Study," *Marine Pollution Bulletin* **75**(1-2), 205-217(2013).
  10. Delacroix, S., Vogelsang, C., Tobiesen, A. and Liltved, H., "Disinfection by-products and Ecotoxicity of Ballast Water After Oxidative Treatment - Results and Experiences from Seven Years of Full-scale Testing of Ballast Water Management Systems," *Marine Pollution Bulletin*, **73**(1), 24-36(2013).
  11. Zhang, N., Ma, B., Li, J. and Zhang, Z., "Factors Affecting Formation of Chemical by-products During Ballast Water Treatment Based on An Advanced Oxidation Process," *Chemical Engineering Journal*, **231**, 427-433(2013).
  12. Tang, Z., Butkus, M. A. and Xie, Y. F., "Enhanced Performance of Crumb Rubber Filtration for Ballast Water Treatment," *Chemosphere*, **74**(10), 1396-1399(2009).
  13. Zhang, N., Zhang, Y., Bai, M., Zhang, Z. and Chen, C., "Risk Assessment of Marine Environments from Ballast Water Discharges with Laboratory Scale Hydroxyl Radicals Treatment in Tianjin Harborm China," *Journal of Environmental Management*, **145**, 122-128(2014).
  14. Lafontaine, Y. D. and Despatie, S. P., "Performance of a Biological Deoxygenation Process for Ships' Ballast Water Treatment Under Very Cold Water Conditions," *Science of the Total Environment*, **472**, 1036-1043(2014).
  15. Feng, D., Shi, J. and Sun, D., "Inactivation of Microalgae in Ballast Water with Pulse Intense Light Treatment," *Marine Pollution Bulletin*, **90**(1-2), 299-303(2015).
  16. Akram, A. C., Noman, S., Javid, R. M., Gizicki, J. P., Reed, E. A., Singh, S. B., Basu, A. S., Banno, F., Fujimoto, M. and Ram, J. L., "Development of an Automated Ballast Water Treatment Verification System Utilizing Fluorescein Diacetate Hydrolysis as a Measure of Treatment Efficacy," *Water Research*, **70**, 404-413 (2015).
  17. Kang, A., Kim, S. and Song, J., "A Study on the Sterilization Effect of Ballast Water According to the Combination of Types of Treatment Apparatus," *J. Korean Oil Chemists' Soc.*, **32**(3), 412-417(2015).
  18. Kang, A., Kim, S., Kim, Y. and Song, J., "A Comparison Study on the Sterilization Effect of Ballast Water with Cylinder Type and Groove Type," *J. Korean Oil Chemists' Soc.*, **32**(4), 363-371 (2015).