

선박용 냉각수의 고·액분리에 관한 연구

A Study on the Solid-Liquid Separation of Cooling Water in Ships

최민선 · 김준효 · 조대환 · 한원희 · 김부기

M. S. Choi, J. H. Kim, D. H. Jo, W. H. Han and B. G. Kim

Key Words : Hydrocyclone(하이드로싸이클론), Solid-Liquid Separation(고·액 분리), Sea-water Cooling System (해수 냉각 시스템), Impurities(불순물)

Abstract : Hydrocyclone has been widely used for the solid-liquid separation in many industrial sites because of its comparatively preferable applications that can be applied to wide-range particle sizes. If seawater with impurities flows through pumps or heat exchanger, it might cause an decrease in efficiency of cooling system. In this paper, we have suggested some methods of separating impurities from seawater in the cooling system by using a Hydrocyclone. The effects of design factors as solid concentration, cyclone inlet pressure, flow rate and diameter of underflow on the separating performance of the Hydrocyclone were investigated. The results from the study are summarized as follows: 1) In proportion to the increase of solid concentration, the efficiency of solid-liquid separation is improved. 2) According as the cyclone inlet pressure increases the efficiency of separation is improved. Conclusively, this research suggested that the Hydrocyclone will be used as a pre-treatment system of cooling water in ships, and eventually prevent unexpected accidents in engine systems.

기호 설명

- D_c : Hydrocyclone diameter (mm)
- D_i : Cyclone inlet diameter (mm)
- D_o : Vortex finder diameter (mm)
- D_u : Underflow orifice diameter (mm)
- H_1 : Length of cylindrical section (mm)
- H_2 : Length of conical section (mm)
- E_r : Revised efficiency (%)
- C_p : Cyclone inlet press. (bar)
- S_c : Concentration of test sample (wt %)
- Q : Quantity of Solid-Liquid flow (ℓ /min)
- Q_u : Quantity of underflow (ml/s)
- W_u : Sample weight to underflow (g/s)
- θ : Cone angle ($^\circ$)

1. 서 론

선박은 오대양을 비롯해 항해 협수로, 운하, 강, 담수(Fresh water), 수심이 얇은 구역등 지구촌의 곳곳을 정박 및 항해하고 있다. 특히, 선박이 해안의 쓰레기, 기름물, 육상의 오·폐수, 유빙(Ice floe)과 폐사된 어패류등이 도사리고 있는 곳의 항행(Sailing)시에는 각별한 주의가 요망된다. 왜냐하면 선박의 냉각시스템은 해수냉각을 기본으로 하고있기 때문에 이러한 불순물들이 해수 흡입구(Sea chest)를 통해 필터(Filter, Strainer) 및 열·교환장치등의 폐색(Blocking)을 초래하여 해수냉각시스템의 효율에 심각한 장애를 초래할 수 있다.

실제적인 예로 목포해양대학교 실습선 P-008호의 운항로(중국 황포강 등) 및 정박위치는 서해안, 영산강하구로 갯벌과 모래가 다량 함유된 해수상에 집안해 있어 주(Main)해수펌프, 보조해수 펌프 및 에어컨용 해수펌프의 메커니컬씰(Mechanical seal)이 이러한 불순물에 의해 계속적으로 손상을 유발하고 있으며 특히, 중국의 황포강이나 브라질의 아마존강은 불순물의 농도가 심각한 상태다.

지금까지 이러한 해수와 담수에 섞인 불순물의 계

접수일 : 2003년 8월 11일

최민선(책임저자) : 목포해양대학교 기관시스템공학부

E-mail : cmscms@mmu.ac.kr, Tel. 061-240-7081

김준효, 조대환, 한원희 : 목포해양대학교 기관시스템공학부

김부기 : 목포해양대학교 해양산업대학원

거 노력없이 해수 흡입구를 통해 해수 펌프로 유입되고 있음이 현실이나 본 연구에 사용된 하이드로싸이클론(Hydrocyclone)을 전처리 장치로 이용한다면 해수냉각을 하는 장비의 정비주기를 늘릴 수 있으며 예상치 못한 사고의 발생은 예방할 수 있으리라 판단된다.

하이드로싸이클론의 장치는 1939년 Netherland의 Driessen에 의하여 소개¹⁾된 이래 많은 연구자들이 하이드로싸이클론의 장치, 설계, 효율등에 대하여²⁻³⁾ 연구가 발표되었다. 하이드로싸이클론의 이용에 대한 연구는 1960년대 Rietema⁴⁾에 의해 사이클론의 크기와 최적조작조건 등에 대한 연구가 발표되었고, Bradley⁵⁾를 비롯한 여러 연구자들이 하이드로싸이클론의 설계, 제작, 효율계산 등에 관한 연구 논문이 발표되었다. 최근 들어서 하이드로싸이클론 내부에서 일어나는 입자와 유체와의 운동현상이나 제반적으로 일어나는 일련의 현상들을 다른 각도에서 해석하려는 움직임이 활발하게 연구되고 있다. M. Antunes⁶⁾ 등은 Bradley가 제시한 각기 다른 직경을 갖는 사이클론을 제작하여 고형물 농도를 변화시켜가며 Stokes number와 Euler number 사이에서의 관계를 알아내어 원시료에서 사이클론 하부방향으로 회수되는 모형을 밝혀내었다.

고·액 분리에 사용하기 위해 고안된 하이드로싸이클론의 기본적인 분리이론은 원심력 침전으로 부유입자를 분리시키게 하는 원심가속도의 영향과 유체 중에 부유물결과 유체의 비중차이를 이용하여 고·액 혼합물을 분리하는 장치이다. 원심분리기와 비교해보면 사이클론에는 움직이는 부분이 없고, 유체 자체의 힘에 의해서 선회운동이 이루어지는 차이점이 있다. 또한, 하이드로싸이클론은 다른 분리장치에 비해 적은 시설 투자비와 유지비, 설치의 용이성과 작은 공간, 소형장치로 연속적으로 많은 량을 처리할 수 있다³⁾.

본 연구에서는 해수나 담수에 함유된 불순물을 제거 및 분리하여 선박용 냉각수시스템을 위한 전처리 장치로서 하이드로싸이클론의 적용가능성을 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험방법 및 장치

하이드로싸이클론은 유체로부터 유체속에 분산되어 있는 고체 물질을 원심력에 의해 분리하는 장치이다. Fig. 1 은 하이드로싸이클론의 원리를 개략적으로 나

타낸 그림⁷⁾으로 크게 원통부(Cylindrical section)와 원추부(Conical section)로 구성되어 있다.

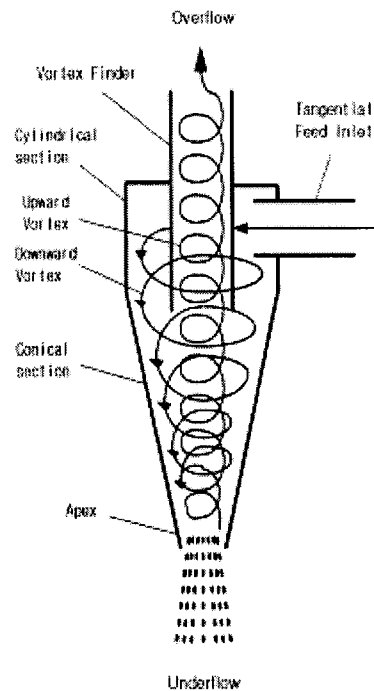
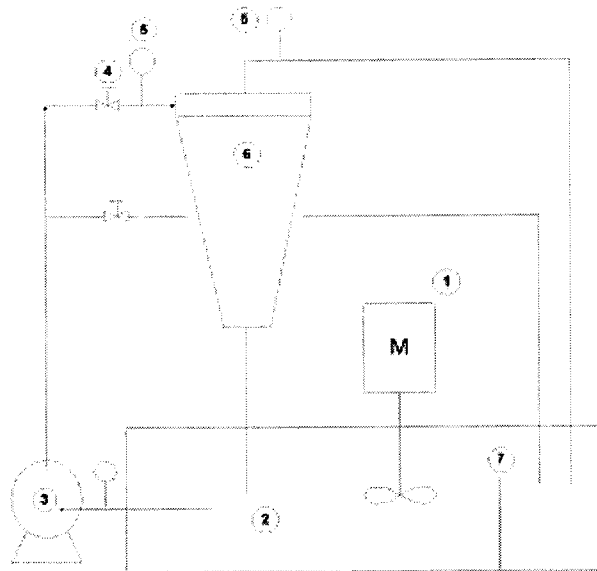


Fig. 1 Schematic of hydrocyclone

부유입자를 포함한 유체는 압력에 의해 원통부 위쪽에 위치한 유입구를 통해 집진방향으로 주입되어진다. 유체가 유입구로 들어오에 따라 사이클론 안에서 유체의 강한 회전력이 시작되고 이에 따라, 외측벽을 향한 입자의 이동을 가속시키는 원심력이 발생하여 입자들은 원통부와 원추부를 통해서 나선형태로 하향 이동하게 된다. 이러한 원심력은 원주 방향으로 작용하기 때문에 입자가 안쪽으로 흐르는 것을 방해하고, 이러한 원심력에 의해 내벽으로 이동한 입자들은 내벽과 부딪히면서 관성력을 잃고 하부 배출구를 통해 분리 배출된다. 입자에 작용하는 원심력이 항력(Drag force)보다 클 경우, 입자는 원을 그리며 하향 이동하여 하부 배출구로 배출되고, 반대로 항력이 더 클 경우 입자는 안쪽으로 이동하여 상부배출구를 통해 배출된다⁸⁾.

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 2 에 나타난 바와 같다. 물탱크에 300리터의 물을 채운다음 시료의 비중이 1.1인 Poly-vinyl 200g, 300g을 균일하게 사이클론 안으로 유입시키기 위해 물탱크내에 교반기(Agitator)를 설치하여 임펠러(Impeller)의 회전력을 약 440 R.P.M.의 속도로 물과 시료를 완전히

교반시켜 고·액 혼합물을 만든다. 이렇게 만들어진 고·액 혼합물을 펌프를 통해 흡입, 사이클론 유입구로 보내어 지도록 하였다. 이러한 실험에 대한 데이터는 컨트롤 판넬(Control panel)에서 쉽게 볼 수 있고, 컴퓨터로 데이터를 처리할 수 있도록 제작된 사이클론 실험장치를 이용하였다.



① Agitator ② Mixed tank ③ Feed pump ④ Valve
⑤ Press. gauge ⑥ Hydrocyclone ⑦ Baffles

Fig. 2 Schematic dia. of Hydrocyclone testrig

사이클론 몸체(D_c)의 직경은 230mm, 원추부의 각도는 20°, 재질은 아크릴로 제작하여, 펌프의 회전수 조절장치를 통하여 유량(l/min), 농도(w/v %), 전력(kW) 및 압력(bar)의 변화와 그에 따른 분리효율(%)을 알아보았다.

하이드로사이클론 가동시 분리 효율에 영향을 미치는 인자로는 장치특성에 의한 변수인 사이클론 직경, 유입구 및 배출구의 직경, 사이클론 길이, 상부배출구(Vortex finder)의 길이 등이 있고, 유입 슬러지의 특성에 의한 변수로 유입수 중에 포함되어 있는 고체 입자의 비중, 유입압력, 유입수의 농도 등을 들 수 있다.

Fig. 3 과 Table 1은 본 연구에 사용된 사이클론에 대한 형상과 규격을 나타내었으며 유입압력과 하부배출수의 고형물질 농도와의 상관관계와 D_i/D_c 차이에 의한 분리특성을 중심으로 관찰하며 실험하였다.

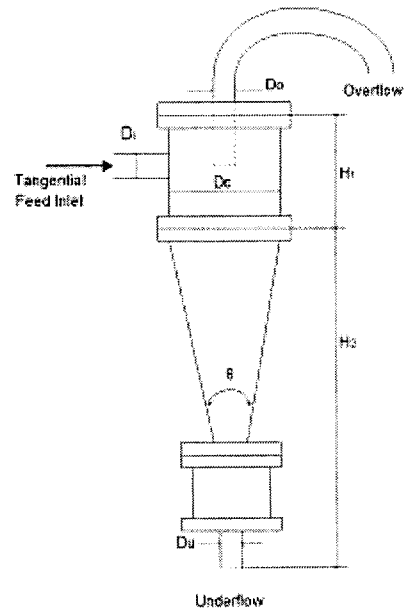


Fig. 3 Cross-section of hydrocyclone

Table 1 Dimension of hydrocyclone

(Unit : mm)

Description	Dimension
Cyclone dia.(D_c)	230
Inlet dia.(D_i)	34
Apex dia(D_u)	8
Vortex finder dia(D_v)	51.2
Body length($H_1 + H_2$)	1083.5
Cone angle(θ)	20(°)

3. 결과 및 고찰

3.1 농도가 다른 원탁액중 펌프 회전수에 따른 유입압력과 유량의 상관관계

유입압력(C_p)은 유입슬러지에 대한 변수로서 유입속도와 유량(Q)에 영향을 미쳐 처리량 결정에 매우 중요하다. Fig. 4 와 5 에서 나타나는 바와 같이 고·액 혼합물의 농도가 낮을수록, 펌프의 회전수가 높을수록 사이클론 입구압력과 유입유량은 증가하였다. 또한, 고형물질 회수율은 압력이 증가할수록 회수율도 증가함을 알 수 있었다. 이는 압력이 높을수록 원심력이 커져서 미립자까지도 내벽에 부딪혀 하부배출구로 배출되며, 하부배출구로 배출되는 고형물질의

농도(S_2)가 증가되었다.

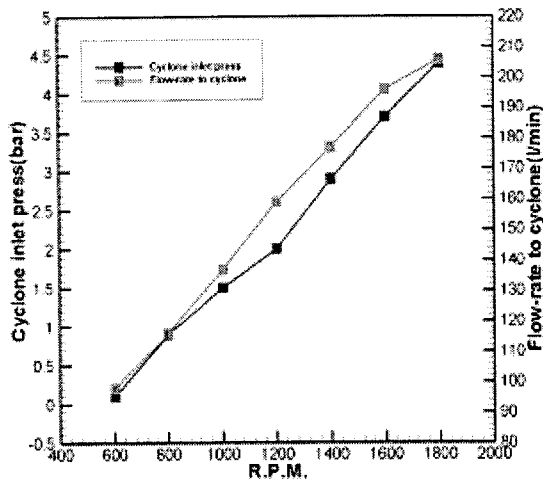


Fig. 4 Density of test sample : 0.67[g/ℓ] %

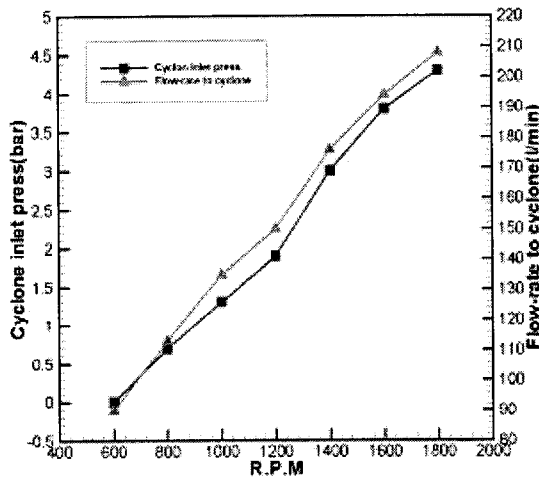


Fig. 5 Density of test sample : 1.0[g/ℓ] %

3.2 D_u/D_c 차이에 의한 분리 특성

하부배출구 직경 (D_u) 크기는 하부배출수 중의 고형물질의 농도와 배출수의 유량에 영향을 주기 때문에 D_u/D_c 는 분리효율에 가장 직접적인 영향을 미치는 변수라 할 수 있다. 따라서 하부배출구 크기에 따른 분리특성 실험은 고·액 혼합물을 처리할 경우 최적의 처리량 결정에 중요한 변수라 할 수 있다. Fig. 6은 원통부의 직경 (D_u)과 하부배출구의 직경 (D_c)에 따른 유량의 변화를 나타내었다.

D_u/D_c 의 비가 작을수록 하부배출구로 분리되는 유량은 감소 및 시료의 농도가 증가함을 알수 있었고 본 연구에서는 Type-A를 사용하여 실험을 수행하였다.

Table 2 Comparison of result as a ratio of D_u and D_c

Type	D_u (mm)	D_u/D_c (%)	Underflow (ml/s)
A	8	3.48	19.4
B	11	4.78	58.5
C	12	5.22	71.5
D	45	19.57	137.0

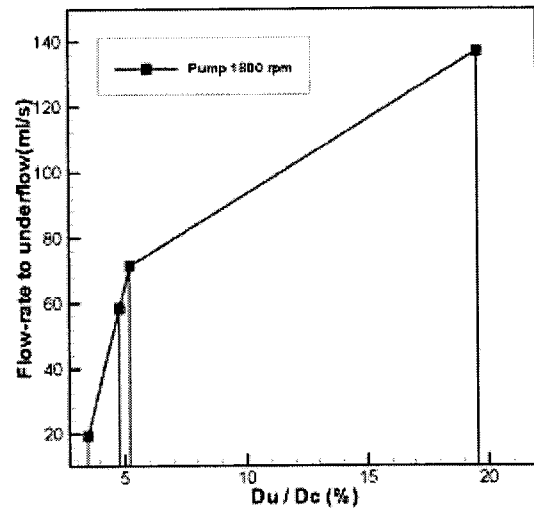


Fig. 6 Flowrate to underflow by ratio of D_u and D_c

3.3 농도가 다른 현탁액중 펌프 회전수에 따른 보정 회수효율

유입수의 고형물질 농도에 따른 배출수의 고형물질 농도변화 실험은 총 고형물질농도가 0.67, 1.0 [g/ℓ] %로 시료를 조제하여 실험하였다.

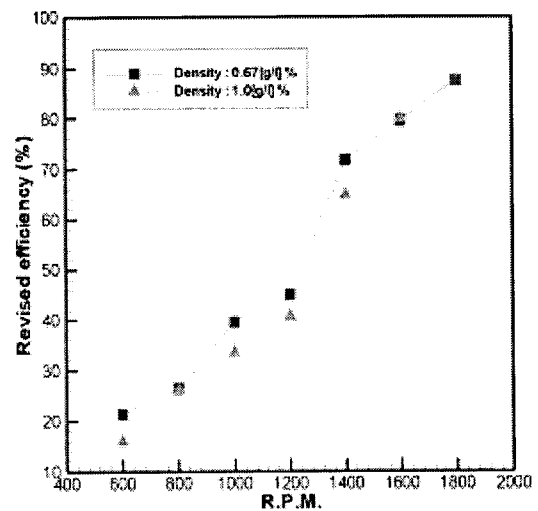


Fig. 7 Revised efficiency by Pump R.P.M.

Fig. 7 은 고·액 혼합물의 농도에 따른 하부배출구의 고형물질 보정회수효율(E_s)을 나타내었고, 펌프회전수 1600 R.P.M. 과 유입압력이 2.5bar 이상에서는 높은 분리효율을 나타내었다. 유입고형물질의 회수효율은 유입압력과 하부 배출구 직경에 큰 영향을 받으므로 하부배출구(Apex)의 크기는 D_u/D_s 의 비가 작을수록 좀 더 농축된 고형물질의 분리가 가능하다.

3.4 농도가 다른 현탁액중 펌프 회전수에 따른 하부배출구의 유량 및 소요시간

펌프의 회전수 상승시 유입수의 유량, 전력(kW), 펌프 출구압, 싸이클론 입구압력, 하부배출 고·액 혼합물의 농도 및 시료의 보정 회수효율에 증가하였으며, 하부배출구를 통한 샘플의 유량(Q_u)과 투입된 시료의 100% 회수가정시 소요시간은 감소하였다. 고·액

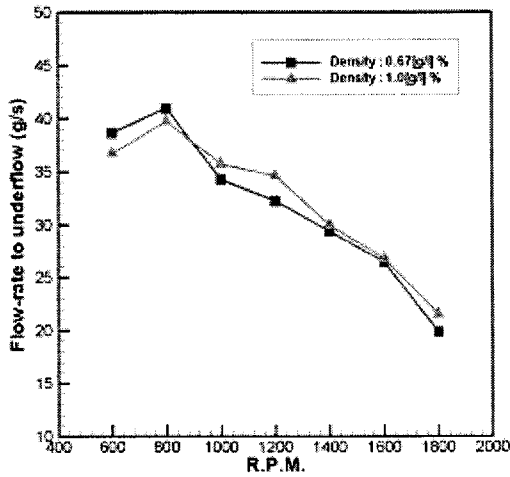


Fig. 8 Flowrate to underflow by R.P.M.

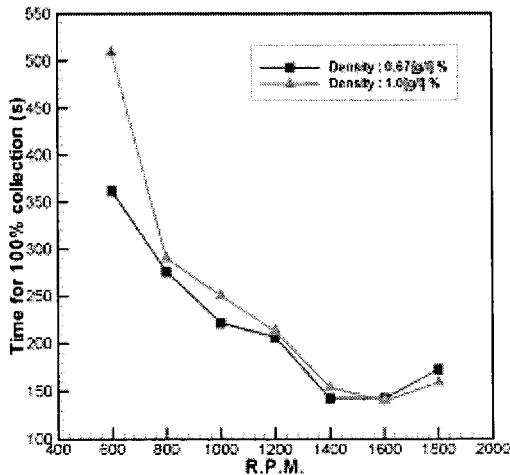


Fig. 9 Time for 100% collection by R.P.M.

혼합물의 농도가 낮을수록 하부배출구 유량의 감소폭이 증가하였으며, Fig. 8 은 농도가 다른 고·액 혼합물중 펌프 회전수에 따른 하부배출구의 샘플량(W_u)을 나타내었다. 농도가 다른 현탁액 모두 펌프의 회전수가 1400~1600 R.P.M.에서 투입시료의 100% 회수가정시 소요시간이 가장 짧게 나타났으며 또한, 농도가 낮을수록 시료의 회수소요시간은 단축되었고, Fig. 9 는 투입된 시료의 100% 회수가정시 소요시간을 나타내었다.

3.5 농도가 다른 현탁액중 펌프 회전수에 따른 하부배출구 샘플의 농도

Fig. 10 에서 펌프 회전수가 높을수록 하부배출구 샘플량은 감소되는 반면 채취된 샘플(시료 + 물)중 시료의 농도(S_u)가 증가되었고 현탁액의 농도가 낮을수록 채취된 샘플의 보정농도가 높게 나타났다. 하부배출구에서 채취된 샘플을 건조 후 비교해 보았을 때 싸이클론 유입유량이 180~200 l/min, 압력이 약 2.5~4.1bar에서 가장 효과적인 시료의 분리가 이루어지는 것으로 나타났다.

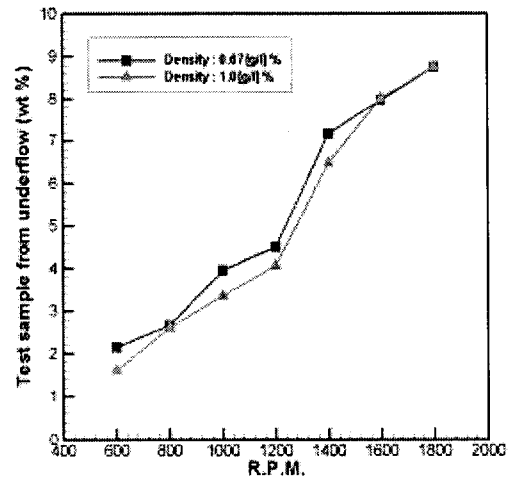


Fig. 10 Test sample from underflow by R.P.M.

펌프는 정량이상이 가능한 슬러지 펌프로 최대유량이 240 l/min인 것을 사용하였으며, 고·액분리 최적의 조건을 찾아내기 위해 고형물 농도, 유량, 및 압력과 펌프회전수를 변화시켜 실험하였다.

각 변수에 대한 공통현상은 유량(Q)이 증가할수록, 하부배출유량(Q_u)이 적을수록, 펌프 회전수가 높을수록 그리고, 싸이클론 입구압력이 증가할수록 현탁액에 포함된 시료의 분리효율이 뚜렷이 증가하는 경향을 보였다.

4. 결 론

본 연구는 해수와 담수에 함유된 불순물을 제거하기 위한 전처리 장치로서 하이드로싸이클론의 적용가능성을 평가하고, 효과적인 분리 및 농축을 위하여 싸이클론의 유효한 구조를 찾아내고자 유입압력, 시료의 농도 및 펌프회전수의 변화를 통해 고·액 혼합물의 분리 실험을 실시하였다.

유입압력과 하부배출수 중의 고형물 농도와의 상관관계에 대한 실험 결과, 유입압력이 증가할수록 하부배출수 중 고형물질의 농도가 점차적으로 증가되었고, 고형물질 회수율 또한 증가하였다. 따라서 유입압력이 높을수록 효과적인 농축을 할 수 있으나, 고압으로 인한 운전비용의 문제를 고려할 때 좀 더 높은 압력에서의 실험을 통해 적정압력 산출이 선행되어야 한다.

싸이클론 형상 가운데 분리효율과 직접적인 관계가 있는 하부배출구의 크기는 D_1/D_2 의 비가 작을수록 좀 더 농축된 고형물질의 분리가 가능하며 전체적인 분리효율이 증가하였다.

본 연구로 부터 하이드로싸이클론이 해수나 담수에 함유된 불순물을 제거 및 분리하는데 효과적이기에 선박용 냉각수시스템의 전처리장치로서 적용 가능성을 확인하였고, 앞으로 좀 더 다양한 구조 및 형태의 실험을 통하여 보다 구체적인 동작 메커니즘을 규명하고, 효과적인 설계기준을 제시하고자 한다.

참고 문헌

1. E. J. Pryor, 1965, "Mineral Processing Industrial Sizing and Sorting", 3rd edition, Elaevier co., LTD, pp. 222~232.
2. 정연규 외 6인, 2001, "Hydrocyclone을 이용한 준설 퇴적물의 입자분리와 유기물의 거동" 대한환경공학회논문집, 제1권, pp. 25~26.
3. 오종민, 노성혁, 2001, "하이드로싸이클론을 이용한 준설된 퇴적물의 분급 특성" 한국물환경학회지, 제17권, 제5호, pp. 619~625.
4. K. Rietema, 1961, "Performance and design of hydrocyclones - I", Chemical engineering Science, Vol. 15, Pergamon press Ltd, London, Printed Great Britain, pp. 238~325.

5. Bradly, 1965, The Hydrocyclone. Pergamon Press, New York.
6. M. Antunes, R. A. Medronho, 1992, Bradley Hydrocyclone: Design and Performance Analysis, Hydrocyclone, analysis and applications. pp. 3~13.
7. 石川峰男, 2000, "쿨러트용 액체사이클론" 기계기술. pp. 127.
8. Ladislav Svarovsky, 1981, Solid-Liquid Separation (2nd edition), Butterworths Monographs in Chemisty and Chemical Engineering, pp. 162~188.