

해수 냉각시스템 효율 향상을 위한 하이드로사이클론의 적용가능성

김부기* · 한원희** · 조대환** · 최민선**

*목포해양대학교 실습선, **목포해양대학교 기관시스템공학부

Applicability of the Hydrocyclone for Efficiency Improvements to Sea-water Cooling Systems

Bu-Gi Kim* · Won-Hui Han** · Dae-Hwan Cho** · Min-Seon Choi**

* Training ship, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

**Division of Marine Engineering System, Mokpo National Maritime University, Mokpo, 530-729, Korea

요 약 : 하이드로사이클론은 다양한 산업 방면의 고·액 분리를 위해 널리 사용되어왔다. 왜냐하면 하이드로사이클론의 적당한 응용으로 폭 넓은 범위의 입자에 적용이 가능하기 때문이다. 불순물을 함유한 해수가 펌프나 열교환기로 흘러가면 그것은 해수 냉각시스템의 효율을 저하시키는 원인이 된다. 본 연구에서는 하이드로사이클론을 이용한 해수 냉각시스템에서 불순물을 분리하는 몇가지 방법을 제시했다. 실제의 영향을 미치는 인자로서 고체농도, 사이클론 입구압력, 하부배출구의 직경과 유량에 따른 하이드로사이클론의 분리효율에 대해 연구를 하였다. 이 연구의 결과는 다음과 같다. 1) 고형물질의 농도가 감소할수록 고·액 분리의 효율이 증가하였다. 2) 사이클론 입구압력이 증가함에 따라 분리효율이 증가하였다. 결과적으로 이 연구에서는 하이드로사이클론을 기계류 냉각시스템의 전처리장치로 사용한다면 엔진시스템에서 예상치 못했던 사고를 방지할 수 있을 것이다.

핵심용어 : 하이드로사이클론, 고·액 분리, 회수율, 해수냉각시스템, 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 a decrease in the 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 this study are summarized as follows: 1) In proportion to the decrease 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 machines, and eventually prevent unexpected accidents in engine systems.*

KEY WORDS : Hydrocyclone, Solid-Liquid separation, Concentration, Sea-water cooling system, Impurities

1. 서론

선박은 오대양을 비롯해 항내 협수로, 운하, 강, 천수영역(Shallow water condition)(권과 이, 2004)등 지구촌의 곳곳을 정박 및 항해하고 있다. 특히, 선박이 흙탕물, 곡류(Cereals), 천연유기물, 육상의 오·폐수, 새우류와 폐사된 어패류 등에 의해 오염된 곳으로 항행(Sailing)시 이러한 불순물이 선박 냉각시스템으로 유입되는 것을 방지하기 위한 각별한 주의가 요구된다.

선박의 냉각시스템은 중앙집중 시스템과 기기별 냉각시스템으로 구별될 수 있으나 중앙집중 냉각시스템의 경우에도 청수(Freshwater)를 해수로 냉각해야한다. 선박의 해수냉각시스템에는 선내의 각종 파이프라인, 펌프와 열교환기 및 응축기(Condenser) 등이 있고, 이에 서식 또는 부착되는 해양자생물의 생성방지 장치로서 M.G.P.S(Marine Growth Preventing System)는 있으나, 수중유동물질의 제거를 위한 장치는 없다. 따라서 이러한 수중유동물질이 해수 흡입구(Sea chest)를 통해 여과기(Strainer) 및 열교환장치에 유입되면 그 장치들은 천연적 연성물질 등의 폐색(Fouling)(최, 1976; Lee and Moon, 2002)현상으로 해수냉각시스템의 효율에 심각한 장애를 초래할 수 있다.

* 대표저자 : 정회원, kim60091@mmu.ac.kr 061)240-7165

** 중신회원, winhar@mmu.ac.kr 061)240-7239

** 중신회원, dhcho8@mmu.ac.kr 061)240-7104

** cmscms@mmu.ac.kr 051)240-7081

실제적인 예로 4,700톤급 목포해양대학교 실습선 새누리호의 운항로(한국근해, 동남아시아 등) 및 정박위치는 서해안, 영산강하구로 개펄(Slime)과 미세한 모래(Silt)가 다량 함유된 해수 상에 접안해 있어 주해수펌프(Main cooling seawater pump), 보조해수펌프(Auxiliary cooling seawater pump) 및 에어컨용 해수펌프의 메커니컬씰(Mechanical seal)이 이러한 물질에 의해 손상되었고, 열교환기에도 열전달을 방해하는 침전물의 형성이 빠르게 나타나 열전달 표면에 형성된 파울링은 유체가 흐르는 단면적을 감소시켜 유량이 감소되고 압력손실을 증가시켜 결론적으로 에너지의 과소비를 유발하게 된다. 특히, 중국의 황포강(Huangpujiang), 브라질의 아마존강(Amazon River), 미국의 미시시피강(Mississippi River)(서, 1996)등은 이러한 고형물의 농도가 심각한 상태다. 이러한 해수와 담수에 있는 이물질이 해수흡입구를 통해 해수펌프와 열교환기로 유입되고 있어 기계류 냉각시스템에 폐색현상 등의 장애를 초래하고 있다.

사이클론(Cyclone)은 기체중에 고체를 분리하는 고·기 사이클론(Solid-Gas Cyclone), 액체중에 기체를 분리하는 기·액 사이클론(Gas-Liquid Cyclone)(Wang, 2000)과 액체중에 고체를 분리하는 고·액 사이클론(Solid-Liquid Cyclone)(Caldentey, 2000)이 있다. 고·기 사이클론은 단독 또는 고성능 집진장치 전처리용으로 산업체 모든 분야에서 광범위하게 사용되고 있으며 기·액 사이클론은 석유정제공업, 매립지 가스자원화사업과 세정집진 장치(Scrubber) 등에 이용되며 많은 연구자들에 의해 활발한 연구가 이루어지고 있다. 이에 비해 고·액 사이클론(하드로사이클론)은 저수지 퇴적물의 처리, 준설 퇴적물의 입자분리와 유기물 거동, 분급 특성, 정수장 슬러지(Sludgy) 처리 등에 제한적으로 사용되고 있다.

하이드로사이클론의 기본적인 분리이론은 원심력 침전으로 수중유동물질들을 분리시키기 하는 원심가속도의 영향과 유체 중에 수중유동물질과 유체의 비중차이를 이용하여 고·액 혼합물을 분리하는 장치이다. 원심분리기와 비교해보면 사이클론에는 움직이는 부분이 없고, 유체 자체의 힘에 의해서 선회운동이 이루어지는 차이점이 있다. 또한, 하이드로사이클론은 다른 분리장치에 비해 적은 시설 투자비와 유지비, 설치의 용이성과 작은 공간, 소형장치로 연속적으로 많은 양을 처리할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 해수나 담수에 함유된 고형물을 분리 및 제거하여 선박용 냉각수시스템의 전처리장치로서 하이드로사이클론의 적용가능성을 실험적으로 고찰하였다.

2. 실험방법 및 장치

2.1 실험방법 및 장치

하이드로사이클론은 유체로부터 유체속에 분산되어 있는 고체 물질을 원심력에 의해 분리하는 장치이다. Fig. 1 은 하이드로사이클론의 원리를 개략적으로 나타낸 그림으로 크게 원통부(Cylindrical section)와 원추부(Conical section)로 구성되어 있다. 부유입자를 포함한 유체는 압력에 의해 원통부 위쪽에 위

치한 유입구를 통해 접선방향으로 주입되어진다. 유체가 유입구로 들어옴에 따라 사이클론 안쪽에서 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 배출된다.

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도는 Fig. 2 에 나타난 바와 같다. 물탱크에 300리터의 물을 채운다음 시료의 비중이 1.1 인 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 제작 된 사이클론 실험장치를 이용하였다.

사이클론 몸체(Dc)의 직경은 230mm, 원추부의 각도는 20°, 재질은 아크릴로 제작하여, 펌프의 회전수 조절장치를 통하여 유량(l/min), 농도(w/v %), 전력(Kw) 및 압력(kg/cm^2)의 변화와 그에 따른 분리효율(%)을 알아보았다.

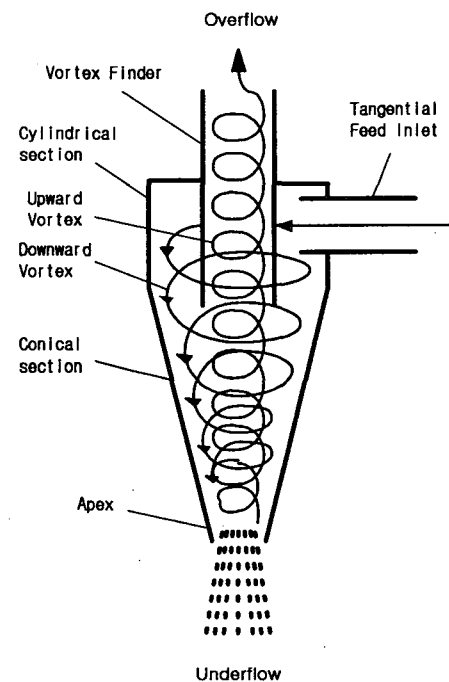
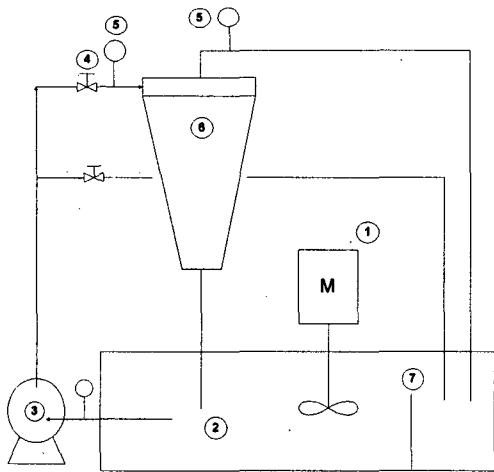


Fig. 1 Schematic of hydrocyclone



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

Fig. 2 Schematic diagram of experiment

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 1 은 본 연구에 사용된 사이클론에 대한 형상과 규격을 나타내었으며 유입압력과 하부배출수의 고형물질 농도와와의 상관관계와 D_u/D_c 차이에 의한 분리특성을 중심으로 관찰하며 실험하였다.

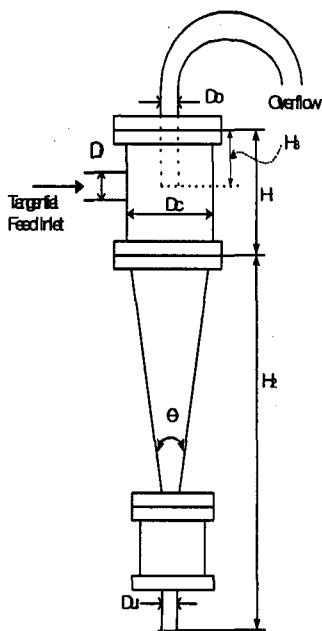


Fig. 3 Cross-section of Hydrocyclone

Table 1 Dimension of hydrocyclone (Unit : mm)

Description	Dimension
Cyclone dia.(Dc)	230
Inlet dia.(Di)	34
Apex dia.(Du)	8
Vortex finder dia.(Do)	51.2
Cylindrical section(H ₁)	230
Conical section(H ₂)	853.5
Cone angle(θ)	20(°)

2.2 유동장의 가시화

내부 유동형태를 고찰하기 위하여 가시화 실험을 하였다. 실험장치는 가시화를 위하여 투명한 재질의 아크릴로 제작하였으나 구조상 사이클론의 상부판과 유입 파이프($\Phi=50A$)에 접합되어있는 플랜지(16K-50A) 연결부분 볼트부분이 투명도를 유지할 수 없어 Fig. 4 와 같이 계측영역을 설정하였다. 내부 유동의 가시화는 광원을 반사할 수 있는 입자를 유동장에 고루 분포시키고 2차원의 시이트라이트(Sheet light)를 유동장에 조사하면 가시화를 하고자 하는 단면의 유동을 설정된다. 연구에서는 가시화된 영상을 고속카메라를 이용하여 촬영하고 이를 컴퓨터에 전송하여 가시화 영상을 확보하였다. 고속카메라의 해상도는 1024 x 1024 픽셀(픽셀당 8비트의 그레이 레벨), 250pps 이다.

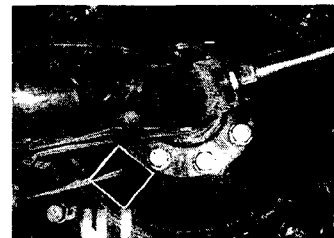


Fig. 4 Measuring region

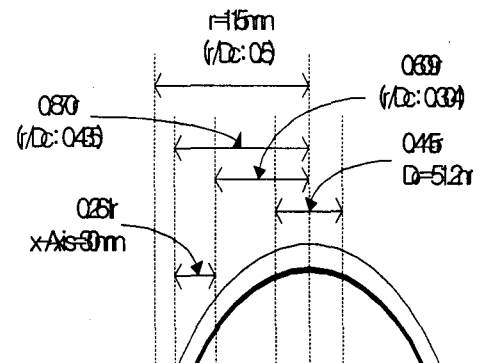


Fig. 5 Dimension data of Measuring range for PIV

가시화에 필요한 입자는 사이클론의 고체입자로 사용한 PVC입자가 충분히 레이저 광을 반사하므로 별도의 입자를 사용하지는 않았다. 유동장 광원은 상용출력 5W의 연속광 아르곤-이온 레이저(Argon-Ion Laser)로서 실험 때의 출력은 5.3W

였다. 레이저는 광파이버를 이용하여 두 개의 원통형 렌즈가 삽입된 시이트라이트 장치에 연결하였으며 원통형렌즈의 거리를 조절하여 폭 2mm의 이차원 시이트라이트가 유동장에 조사될 수 있도록 하였다. 가시화된 단면은 사이클론의 원통부에 한정하였으며, 계측위치의 선정은 예비실험결과 사이클론내부에서의 유입수, 상향류 및 하향류의 간섭이 완화된 회전류가 정상적으로 발달하는 0.5H_i, 0.6H_i 및 0.7H_i로 원통부 상부로부터 130mm, 150mm 및 170mm되는 지점으로 선정하였다. 가시화된 영상은 전술한 바와 같이 고속카메라로 촬영하여 PIV(Particle Image Velocimetry) 계측에 이용되었으며, 계측에 사용된 프로그램은 CACTUS 3.1이다. Fig. 5는 PIV 계측을 위한 범위(30 x 40mm)를 나타낸 것으로 사이클론 원통부의 중심에서 0.609r(r/Dc : 0.304~0.870r(r/Dc : 0.435)에 위치하고 상부에서 원추부 방향으로 130, 150, 170mm에서 각각 촬영을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 내부 유동 특성

1) 속도분포 특성

하이드로사이클론 점선방향에 위치한 유입구로 들어오는 유체에 의하여 생성되는 나선형 흐름은 상부의 Vortex와 하부의 Apex로 배출되는 동시에 고형 입자들을 분리하게 된다. 따라서 내부 유동장의 형태는 강력한 나선형 흐름으로 대칭성이 없으며 또한 중심부에서는 유체의 흐름이 없는 영역(Air-core)이 형성된다. 따라서 하이드로사이클론의 유동장에 대한 3차원적인 해석이 효과적이나 순간적인 유동가시화 및 속도계측으로 내부 속도장에 대한 추정이 가능하다. 유동형태를 보면 중앙에 근접한 영역과 벽면에 근접한 영역이 확연히 다른 형태를 나타낸다. Fig. 6은 원통부 상부에서 170mm 아래에서 계측한 순간 속도 벡터를 나타낸 것으로 가운데 검은선은 Fig. 9~12의 데이터를 추출한 기준선이다. 속도장에 대한 벡터는 원추부 방향으로 내려갈수록 약 0.03m/sec 떨어졌으며 중심부로 향할수록 속도가 빨라지고 있다. 본 실험에서는 중심부에서 0.855r(r/Dc : 0.428) 떨어진 위치에서의 속도가 가장 낮음을 알 수 있었다.

Fig. 7과 Fig. 8은 원통부에서 170mm 하부에 위치한 계측 영역(30x40mm)의 영상에 대해서 PIV 처리를 한 결과이다. Fig. 7은 수평속도에 대해 등속도를 도시한 것으로서 나선형 흐름을 잘 나타내고 있다. 입구관으로서 사이클론으로 유입되는 흐름은 급확대관 흐름의 패턴과 유사하다. 입구관의 부근에서는 유입흐름속도가 비교적 균일하게 유지되나 유입이 진행함에 따라 하향 선회류의 흐름패턴을 유지하게 된다. PIV 계측 단면은 수평단면이다. 따라서 진행 방향에는 등고선 형태의 등속도 분포가 나타나게 된다. Fig. 7은 이러한 현상을 잘 나타내고 있으며 중심부로 가면 상향류의 흐름이, 바깥쪽은 하향류의 흐름이 존재하는데 사각형으로 나타난 부분이 그 경계선으로 추정된다. Fig. 8은 등속도 분포이다.

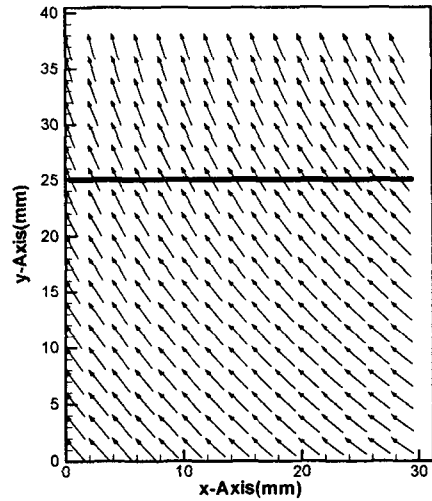


Fig. 6 Velocity Vector Plot(m/sec)

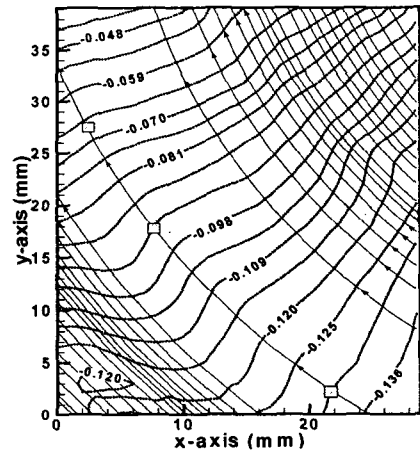


Fig. 7 Equi-component distribution

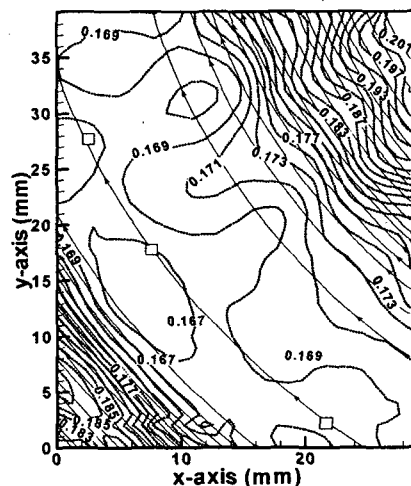


Fig. 8 Velocity component distribution

Fig. 6에서 보면 우측상부는 중앙에 접근한 영역이고 좌측 하부는 벽면에 근접해 있다. 사이클론의 유동특성상 중앙부에서는 위로 상승하는 흐름이 유지되며 Fig. 8에서는 중앙부분에 이러한 경계영역이 뚜렷이 나타나 있다. 이러한 것은 유입압력

이나 내부흐름속도에 따른 경계면의 분석에 대한 연구가 차후에 필요하다.

2) 반경방향 유동특성

Fig. 9~ 11 은 사이클론 원통부에서 약 $y/D_c = 0.07$ 의 간격을 두고 상부에서 $y/D_c = 0.56$, $y/D_c = 0.65$ 그리고 $y/D_c = 0.74$ 의 지점을 기준으로 x축에 평행한 평면을 대상으로 계측영역을 선정하고 사이클론의 상부에서 에서 촬영한 영상을 PIV 기법으로 처리한 결과를 분석한 결과이다. 좌측의 Y축에는 수평속도성분과 수직속도분을 유입되는 평균유속으로 무차원화하여 나타내었고 우측의 y축은 속도를 나타낸 것이다. 데이터의 샘플링은 반경방향으로 0.25mm간격을 두고 20개를 얻어 도 시하였다. 그림에서 보면 사이클론 원통부에서 원추부 방향으로 내려 갈수록 수평성분속도(u)가 약 $u/u_0=0.0025$ 정도 증가하고 중심부에 근접할수록 감소하는 경향을 보였다. 수직성분속도(v)는 큰 차이는 없으며, 이는 원통부에서의 흐름은 수평회전 운동하기 때문으로 판단된다.

Fig. 12 는 사이클론 원통부에서 약 $y/D_c=0.07$ 의 간격을 두고 설정한 세 군데의 계측위치에서 속도성분을 비교한 것이다. 속도성분을 각 위치에 따라 관찰하여 보면 굴곡진 형태를 보이고 있다 이것은 사이클론의 흐름특성상 회전하면서 하류로 진행하기 때문에 각 위치별로 다른 속도를 유지하고 있음을 알 수 있다. 이는 중심부에는 상향류의 흐름이, 바깥쪽은 하향류의 흐름이 존재하기 때문이며 사이클론의 원통부에서는 이러한 속도구배가 하류로 갈수록 커지고 있음을 알 수 있다. 또한 속도구배의 변곡점은 하류방향으로 갈수록 벽면에 근접하여 나타나고 속도구배의 차이는 나타나지 않고 있다. 반경방향에 대하여 무차원화된 수직속도분포를 보면 그 값이 하류 방향으로 갈수록 작아지는 경향을 보인다. 이것은 사이클론의 입구에서 유입된 흐름이 급격한 경사를 갖는 나선형의 형태에서 다소 평탄하게 전환되고 있음을 추정 할 수 있으며, 이러한 현상을 유발하는 에너지 분배구조에 대한 연구는 사이클론의 내부 유동특성을 파악하는데 매우 중요할 것으로 판단되나 이 연구의 범위를 벗어나므로 차후의 과제로 남긴다.

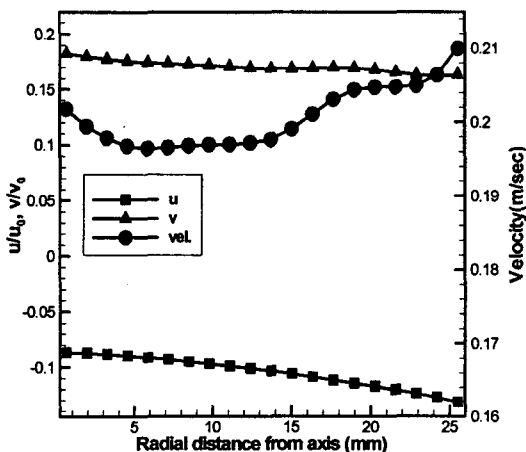


Fig. 9 130mm lower from cylindrical section

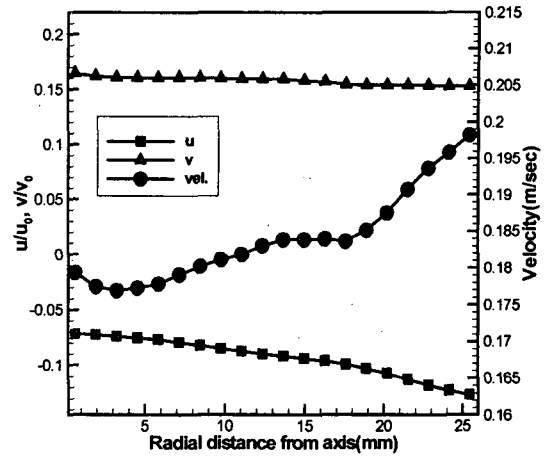


Fig. 10 150mm lower from cylindrical section

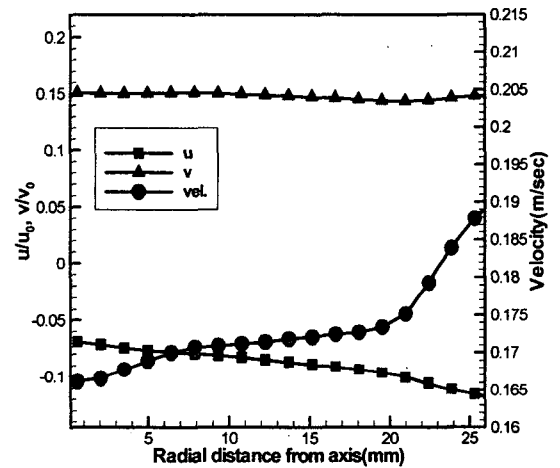


Fig. 11 170mm lower from cylindrical Section

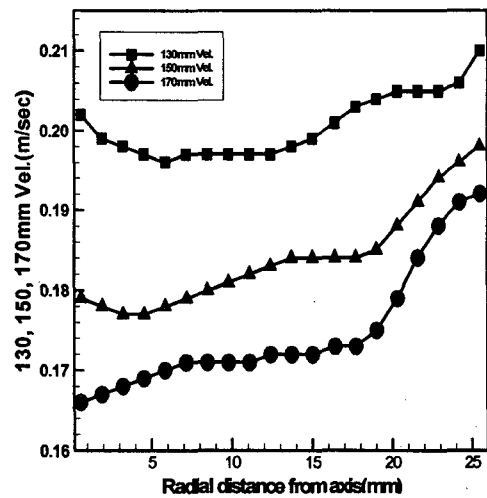


Fig. 12 Component of velocity at 130, 150, 170mm from cylindrical section

3.2 현탁액의 농도에 따른 분리 특성

1) 유입압력과 유량의 상관관계

유입압력(Cp)은 유입 슬러리에 대한 변수로서 유입속도와 유량(Q)에 영향을 미쳐 처리량 결정에 매우 중요하다. 선박에서는 통상 펌프의 구동동력으로 유도전동기를 사용하며 그 회전수는 1200 RPM 또는 1800 RPM 이다. 모터의 회전수는 전원 주파수와 극수로 결정이 되기 때문에 미세한 회전수의 조정을 위해서는 인버터와 같은 별도의 부가 장비가 필요하다. Fig. 13 은 농도가 다른 현탁액의 펌프회전수에 따른 유입압력과 유량과의 상관관계를 나타낸 것으로 농도가 낮을수록 유입압력과 유량은 높게 나타났다. 이는 선박용 냉각수에 불순물의 농도가 높으면 해수압력과 유량이 감소되어 냉각효과가 저하됨을 알 수 있다. 또한, 펌프의 회전수가 높을수록 사이클론 입구압력과 유입유량은 증가하는데 유입압력은 1200 RPM에 비하여 1800 RPM에서 약 1.7배 상승하였고, 유량은 1.4배 정도 증가한다. 이 경우 고형물질 회수율에 있어서도 압력에 따라 증가함을 알 수 있었다. 이는 양(2003)의 연구와도 일치함을 보였고, 압력이 높을수록 원심력이 커져서 미립자까지도 내벽에 부딪혀 하부배출구로 배출되는 고형물질의 농도(Sc)가 증가되었다.

2) 보정 회수효율

유입수의 고형물질 농도는 사이클론의 분리(회수)효율에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서 채택한 사이클론의 경우 농도가 다른 회수효율을 다음과 같이 실험에 의해 구하였다. 우선, 일정농도의 시료를 확보하기 위하여 PVC 입자를 크기별로 분류하였다. 분류방법은 100 μ m, 125 μ m, 150 μ m 및 210 μ m의 Mesh를 갖는 4개의 체(Sieve)를 이용해서 125 ~ 150 μ m 사이의 입자를 선별하였다. 저장조에 300리터의 물을 채운다음 전자저울로 계측한 선별된 시료 200g을 투입하여 고형물질의 농도가 0.67[g/l]로 조제한 현탁액을 실험에 이용하였다. 현탁액의 농도가 1.0[g/l]의 경우에는 동일한 물량에 선별된 시료 300g을 투입하였다.

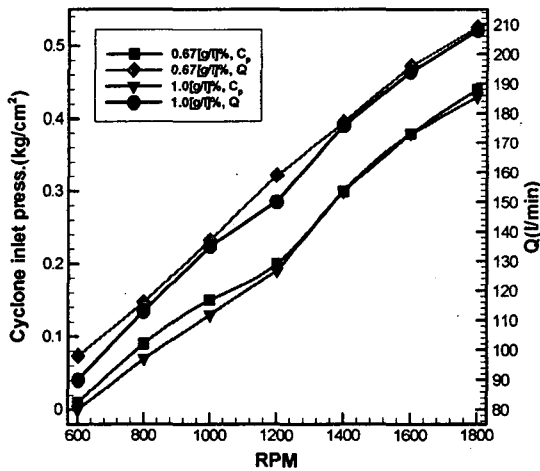


Fig. 13 Correlation of cyclone inlet pressure and Q with RPM (Density : 0.67[g/l], 1.0[g/l])

Fig. 14 는 고·액 혼합물의 농도에 따른 하부배출구의 고형물질 보정회수효율(Er)을 나타내었고, 펌프회전수 1600 RPM 과 유입압력이 0.25kg/cm² 이상에서는 높은 분리효율을 나타내었다. 유입고형물질의 회수효율은 유입압력과 하부 배출구 직경에 큰 영향을 받게 된다. 따라서 하부배출구(Apex)의 크기는 Du/Dc의 비가 작고 유입압력이 높을수록 좀 더 농축된 고형물질의 분리가 가능하나 본 실험에 사용한 농도가 1.0[g/l]인 현탁액으로 사이클론 유입압력이 0.4 kg/cm² 이상과 Du/Dc의 비가 2.5% 이하에서는 막힘 현상이 일어났다.

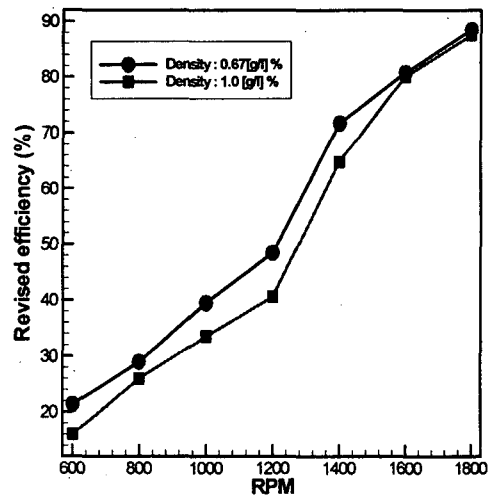


Fig. 14 Revised efficiency with RPM

4. 결론

본 연구는 해수와 담수에 함유된 수중유동물질을 제거하기 위한 전처리 장치로서 하이드로사이클론의 적용가능성을 평가하고자 시료의 특성, 유입압력과 수중유동물질의 농도 및 펌프회전수에 따른 고·액 혼합물의 분리 실험을 하였다. 그 결과 하이드로사이클론은 수중유동물질을 분리 및 제거의 유용한 효과로 예상치 못했던 사고를 방지할 수가 있기에 선박용 냉각수시스템의 전처리장치로서 적용 가능성을 확인하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. PIV 계측 실험으로 사이클론 원통부내의 수평, 수직, 속도 성분을 계측한 결과 중앙부분의 상승류와 벽면부분을 따라 하강하는 하향류의 경계영역이 계측영역을 기준으로 면적대비 중앙부분에 약 15% 전후로 뚜렷하게 형성되었으며, 또한 상승류와 하향류의 경계부분의 속도비는 약 85% 전후였다.
2. 사이클론 원통부에서 원추부 방향으로 내려 갈수록 수평 성분속도(u)가 약 u/u₀=0.0025 정도 증가하고 중심부에 근접할수록 감소하는 경향을 보였다. 또한 y/Dc = 0.07의 간격을 두고 설정한 세 군데의 계측위치에서 속도성분을 비교한 결과 속도 구배는 하류로 갈수록 증가하고 속도구배의 변곡점은 하류방향으로 갈수록 벽면에 근접하여 나타났다.

3. 유입압력과 하부배출수 중의 고형물 농도와의 상관관계에 대한 실험 결과, 유입압력이 증가할수록 하부 배출수 중 고형물질의 농도가 점차적으로 증가되었고, 고형물질 회수율 또한 증가하였다.

4. 사이클론 형상 가운데 분리효율과 직접적인 관계가 있는 하부배출구의 크기는 Du/Dc 의 비가 작을수록 좀 더 농축된 고형물질의 분리가 가능하였다. 하부배출구에서 채취된 샘플을 건조 후 비교해 보았을 때 사이클론 유입유량이 180 ~ 200 /min, 압력이 약 0.25 ~ 0.40kg/cm²에서 가장 효과적인 시료의 분리가 이루어지는 것으로 나타났다.

참고문헌

- [1] 권수연 · 이영길(2004), 천수영역에서 고속선박의 저항특성에 대한 연구, 대한조선학회논문집, 제41권 제2호, pp. 1-11.
- [2] 서일원(1996), 미시시피강의 주운이 하천환경에 미치는 영향, 한국수자원학회, 제29권 제3호, pp. 53-59.
- [3] 양인환(2003), 정수장 슬러지 처리용 Hydrocyclone 모델링, 아주대학교 석사학위논문, pp. 52.
- [4] 최창훈(1976), 冷却水系統의 水側 Fouling 및 Scale, 한국부식학회지, 제5권 1호, pp. 11-14.
- [5] Caldentey J. C.(2000), A Mechanistic Model for Liquid Hydrocyclones(LHC), The University of Tulsa, Oklahoma, USA, pp. 98.
- [6] Lee H. J., S. H. Moon(2002), Fouling of Ion Exchange Membranes and Their Fouling Mitigation, Membrane Journal, Vol. 2 No. 2, pp. 55-66.
- [7] Wang S.(2000), Dynamic Simulation, Experimental Investigation and Control System Design of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators, a Doctorally Dissertation, The University of Tulsa, pp. 224.

원고접수일 : 2005년 5월 20일

원고채택일 : 2005년 6월 24일