

유동가시화를 통한 자유표면과 와류 수직반응에 대한 실험적 연구

김석우* · 김경훈** · 이승환**

Experiments on Columnar Vortex with Free Surface using LIF (Laser Induced Fluorescence) Technique

S.W. Kim*, K.H. Kim** and S.H. Lee**

Key Words: Vortex, Free Surface, Stearic Acid, Surface Tension, Surface Viscosity, No-Slip, Solid-Like Surfactant

Abstract

Vortices terminating at free surface have been investigated extensively. Most of investigations, however, are focused on surface parallel vortices and little has been known about surface normal vortex or columnar vortex. Visualized experimental results utilizing LIF technique are discussed for the purpose of characterization of columnar vortex interacting with a clean and a contaminated free surfaces in the present investigation. The results reveal that surface tension changes due to surface contamination although bulk viscosity remains constant and eventually the behavior of a columnar vortex interacting with a contaminated free surface is totally different from the clean free surface case.

1. 서 론

자유표면과 와류와의 반응은 자유표면 난류유동을 이해하기 위한 기본적인 유동구조로서, 와류는 자유표면에 연결되므로써 보다 안정화되려는 경향을 지니고 있으며, 이에 대한 많은 실험적 연구결과⁽¹⁾들이 발표되었다. 또한 Lugt⁽²⁾는 이론적 해석을 통해 와류는 국소적으로 자유표면에 수직하게 반응하고 연결됨을 증명하였다. 특히, 최근 강화되고 있는 환경오염에 대한 국제적인 규제강화 노력은 이 분야에 대한 관심을 증가시키고 있다. 예로써 지구 온난화 현상의 원인이 대기 중에 포함된 이산화탄소로 인한 것임은 주지의 사실이며, 이산화탄소는 해수표면과의 반응을 통해 용해되어 수중생물에게 유용한 자원으로 활용될 수 있다. 이처럼 이산화탄소를 포함한 대

기와 해수표면과의 반응은 기본적으로 자유표면 난류유동, 즉 자유표면과 와류와의 반응과정에 의해 지배되며, 이 과정을 제어할 수 있다면 대기 중의 이산화탄소를 효율적으로 저감시킬 수 있다. 그러나 이 같은 반응 구조는 자유표면의 조건에 따라 지배된다. 먼지 등의 오염물질을 포함하고 있지 않은 순수한 물로 이루어진 청정자유표면과 해수나 강물 등으로 이루어진 일반적인 자유표면은 no-slip 조건이 타당성을 지니지만, 후자의 경우 그 표면에 포함된 여러 가지 이물질로 인해 와류와의 반응 시 전단응력이 발생하게 되며, 이는 유동장에 대해 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 증류수로 이루어진 청정자유표면과 Stearic Acid에 의해 그 표면이 오염된 두 가지 경우에 대하여 유동가시화를 통한 실험적 관찰을 수행하였다.

* 현대건설주식회사

** 경희대학교 기계·산업시스템공학부

2. 실험장치

2.1 실험장치의 구성

자유표면에 수직하게, 그리고 안정적으로 반응하는 와류를 실험실 조건하에서 발생시키는 것은 많은 어려움을 내포하고 있으며, 이러한 문제로 인해 발표된 연구결과가 극히 드물다. 본 연구에서는 다음의 Fig. 1과 같이 Step Motor와 회전날개 및 원통형 탱크로 구성된 실험장치를 통해 수직와류를 발생시킬 수 있었다.

원통형 탱크는 직경 250mm, 높이 305mm, 벽두께 6mm의 Plexiglas로 만들었다. 이 탱크는 원통형 표면을 통해 나타나는 광학적 굴절을 제거하기 위하여 한 번이 350mm인 사각탱크 내에 설치하였다.

회전날개는 너비 44mm, 길이 254mm, 두께 2mm이며 스테인레스 강으로 만들어졌다. 이 회전날개는 축, 풀리, 그리고 타이밍벨트로 Step Motor와 연결되어있다. Step Motor의 회전에 따라 모터에 연결된 회전날개가 회전운동을 시작하게 되면, 회전날개의 끝단에서는 Vortex Sheet가 발생하게 된다. 양 회전날개의 끝단에서 발생한

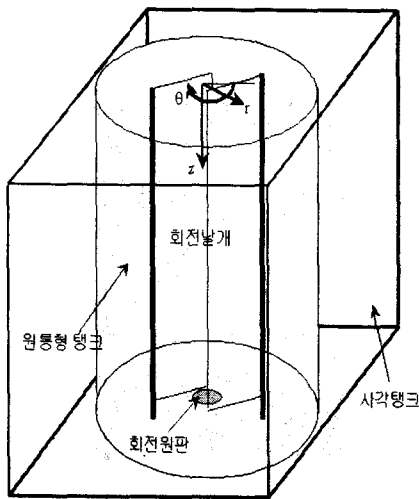


Fig. 1. Schematic diagram of the water tanks utilized in the columnar vortex generator.

Vortex Sheet은 회전 중심부에서 결합되어 와류를 형성한다. 회전날개는 66°의 회전을 한 후 그 운동을 정지한다.

이렇게 발생한 와류는 약 30초 정도 안정적으로 유지되었으나, 그 이후에는 Eckman Layer Effect에 의해 와류가 불안정하게 되고 결국 소멸됨을 관찰할 수 있었다. 발생한 와류는 Core의 반경이 약 2cm이며 1.1cm/sec의 회전속도를 지녔다.

원통형 탱크 내에서 자유표면에 수직하게 접한 상태로 생성된 와류는 LIF 기법을 사용하여 가시화된다. 이 장치의 광원으로는 Argon-Ion Laser (Lexel, Model 95-2, 2Watt)가 사용되었고 여기서 발생한 청색광(Blue Beam, 488 nm)은 초점거리 44mm의 cylindrical 렌즈를 통해 두께 1mm의 Light Sheet로 만들어진다.

와류의 발생에 앞서 강한 형광색을 띄는 플루오레세인 염료를 주사기를 사용하여 탱크의 중앙에 분사시킨다. 염료가 Laser Sheet에 의해 발광되므로써 발생한 와류를 가시화시킨다. 이 가시화된 영상은 분석을 위해 35mm 카메라(Nikon FM2)를 이용하여 매 5초마다 촬영되었다. Fig. 2는 유동가시화를 위한 실험장치를 도시하였다.

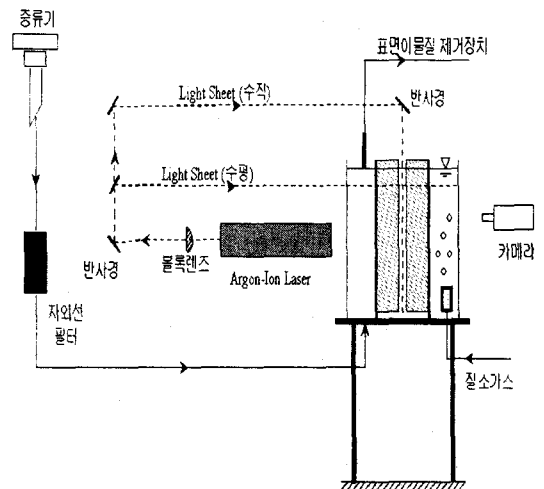


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental setup for the LIF visualization

2.2 자유표면의 준비

본 실험의 목적은 순도 100%의 증류수로 이루어진 청정자유표면과 오염된 자유표면이 와류유동에 미치는 영향을 고찰하기 위한 것이다.

먼저 청정자유표면을 만들기 위해서 원통형 물탱크는 증류기를 사용하여 증류되고 자외선 필터를 통과한 물로 채워진다. 또 탱크 바닥에서 고순도(99.998%)의 질소가스를 발생시켜 표면 오염물질을 최대한 제거하였다. 이렇게 만들어진 자유표면의 순도를 측정하기 위해 Ring-Type 표면장력 측정기를 이용하여 와류 발생 직전마다 측정하였으며, 측정오차는 $\pm 0.1 \text{ dyne/cm}$ 이었다. 또한 증류수의 경우, 측정된 표면장력은 72 dyne/cm 로서 준비된 자유표면의 순도가 100%임을 알 수 있었다.

오염된 자유표면은 Stearic Acid를 Benzene에 용해시켜, 그 액적을 자유표면에 도포하여 얻을 수 있었다. 자유표면에 살포된 미량의 Stearic Acid는 확산에 의해 표면전체에 균일하게 분포되며, 포화상태에서의 농도를 파악하기 위해 0.31 mg/m^2 로부터 2.47 mg/m^2 까지 그 농도를 증가시켜 가면서 표면장력을 측정하였으며, 이 때의 표면장력은 71.6 dyne/cm 으로부터 60.1 dyne/cm 으로 변화하였다. 농도가 2.47 mg/m^2 이상에서는 농도 증가에 따른 표면장력의 변화가 관찰되지 않았으며, 따라서 포화상태에 도달하였음을 알 수 있었다.

3. 결과

3.1 청정자유표면

발생된 와류는 자유표면에 수직하게 접한 상태에서 $Re=112$ 으로 회전운동을 하며, 와류의 Core 반경을 이용한 Froude Number는 0.012로서 와류의 수직반응으로 인한 자유표면의 변형은 무시될 수 있음이 증명되었다.

Fig. 3은 자유표면에 수평한 면에서 획득한 사진으로 $t=0 \text{ sec}$, 10 sec 그리고 20 sec 에서의 와류의 발달을 나타내고 있으며, 자유표면으로부터의 깊이는 0.2 cm 이다. 사진의 상하에 서로 마주본 상태에서 운동이 정지하고 있는 회전날개가 있으



(a) $t = 0 \text{ sec}$



(b) $t = 10 \text{ sec}$



(c) $t = 20 \text{ sec}$

Fig 3. LIF sequence of the columnar vortex in the cross-sectional plane as it interact with a clean free surface $z=0.2 \text{ cm}$, $Re=112$, $Fr=0.12$

며, 와류는 안정적인 상태에서 회전운동을 하고 있음을 알 수 있다. $t=0$ sec인 순간에 회전날개는 그 운동을 완료하고 촬영이 시작되었다. 시간의 경과와 함께 와류는 성장하게 되며, $t=10$ sec인 순간부터는 외부에 위치한 회전날개의 영향으로 인해 타원형으로 변형을 시작한다. 그러나 와류의 Core 지역은 사진에서와 같이 원형의 상태를 $t=20$ sec 까지도 유지한다.

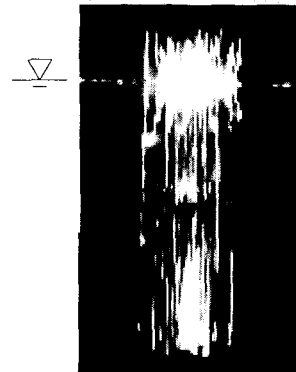
Fig. 4는 자유표면에 수직하고 $r=0$ cm에서 촬영된 와류의 유동이다. 도시된 모든 사진으로부터 발생된 와류가 자유표면에 수직한 상태에서 $t=20$ sec까지 안정적인 유동장을 형성하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3과 4를 통해 청정자유표면에 수직하게 발생 또는 반응하는 와류는 외부로부터의 교란이 유입되지 않는 한 안정적으로 그 성장과 발달을 지속한다는 것을 알 수 있었다.

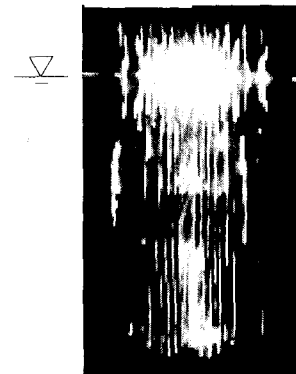
3.2 Stearic Acid에 의해 오염된 자유표면

청정자유표면에 대한 실험과정 중에 발견된 한 가지 흥미로운 사실은 전혀 오염되지 않은 순수로 이루어진 자유표면에 단순히 손을 접촉한 것만으로도 와류의 수직반응 과정이 전혀 달라진다는 것이다. 이에 대한 보다 정량화된 실험자료의 획득을 위해 Stearic Acid를 이용하여 청정자유표면을 인위적으로 오염시켰다. Stearic Acid는 액체이지만 자유표면상에서 분자 하나 정도의 두께를 지니는 소위 "Mono-Molecular Layer"를 형성하여 고체벽면과 유사한 경계조건을 생성하므로 "유사 고체 오염물질 (Solid-Like-Surfactant)"로 알려진 물질로서 경계면에서의 전단점성계수는 $1 \sim 10 \times 10^{-3}$ g/sec를 갖는다[3]. 이러한 유사고체 오염물질은 일반적으로 다른 종류의 오염물질, 즉 유사기체나 유사액체에 속하는 오염물질들에 비해 높은 점성을 지나게 되나 온도 및 자유표면의 면적에 따라 그 값이 큰 폭으로 변하게 된다. 참고로 본 실험과정을 통하여 실험실내의 온도는 21°C 로 유지되었다.

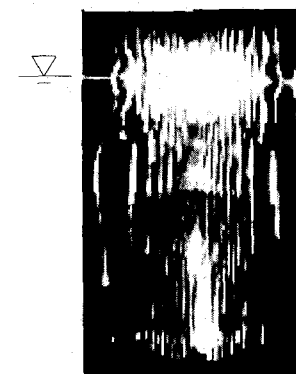
자유표면에 수평한 면에서의 유동가시화 측정은 청정자유표면의 경우와 비교할 때 변화가 전혀 없는 동일한 결과를 나타내었으며, 자유표면



(a) $t = 0$ sec



(b) $t = 10$ sec



(c) $t = 20$ sec

Fig. 4. LIF sequence of the columnar vortex in the meridional plane as it interacts with a clean free surface

이 와류의 수직반응에 미치는 영향을 발견할 수 없었다. 그러나 $r=0\text{cm}$ 인 지점에서 자유표면에 수직한 면에 대한 가시화 결과는 청정자유표면의 결과와는 전혀 다른 유동형상을 보여주었으며, 그림 5는 $t=0, 10, 20\text{sec}$ 에서의 결과를 도시하고 있다. 이 때 Stearic Acid의 농도는 $C=2.47\text{ mg/m}^2$ 이다.

회전날개의 운동이 정지된 시점인 $t=0\text{ sec}$ 에서 이미 Streak Line은 와류의 중심점을 향하여 수렴되었으며, 이는 그림 4와 비교할 때 전혀 다른 유동양상이다. 더불어 $t=10$ 및 20 sec 에서의 영상은 도우넛 형태의 와류가 자유표면 바로 아래 부분에서 형성되고 있음을 분명히 나타내고 있다. 이는 Stearic Acid의 영향에 의한 것으로 자유표면에서의 점성이 증가하고, 이는 결국 표면에서의 유체입자가 Slip되는 현상을 유발한다. 미끄러진 유체입자는 결국 자유표면으로부터 박리되어 유체내부로 진행하게 되면서 그림에 나타난 바와 같은 도우넛 형태의 이차유동을 발생시키게 된다.시간의 경과와 함께 수직한 와류는 자유표면으로부터 완전히 분리되고 도우넛 형태의 와류만이 존재하게 된다.

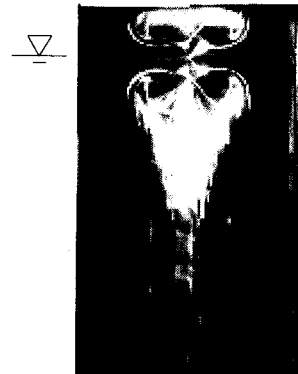
4. 결론

청정자유표면 및 오염된 자유표면과 와류의 수직반응에 대한 유동가시화 실험결과는 서로 다른 형태의 흥미로운 결과를 가져왔다. 즉, 자유표면을 갖는 유체유동에 있어서 Surface Rheology가 전체 유동장에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있었으며, 특히 유체가 수돗물이나 강물과 같이 순수가 아닌 경우에는 전체 유체에 대한 용적점성계수가 아닌 자유표면에서의 표면점성계수가 반드시 고려되어야 하는 요소임을 알 수 있었다. 표면점성계수가 유동장에 미치는 영향력에 대한 정량화된 평가를 위해서는 좀 더 다양하고 제어 가능한 오염물질을 이용한 실험이 수행되어져야 한다.

또한 본 실험의 주목적인 대기와 해수 또는 강 표면 사이의 질량 및 에너지 전달과정을 보다 활성화시킬 수 있는 수단으로서의 수직와류의 타당성은 Stearic Acid에 의해 오염된 경우에 대한 실험



(a) $t = 0\text{ sec}$



(b) $t = 10\text{ sec}$



(c) $t = 20\text{ sec}$

Fig 5. LIF sequence of the columnar vortex in the meridional plane as it interacts with a contaminated free surface by stearic acid

험결과에서 알 수 있듯이 그 유용성이 입증되었다. 즉, 오염물질에 의해 발생된 표면접성계수는 이차적인 유체유동을 발생시키며, 이를 통해 대기와 유체표면과의 접촉 및 전달과정이 보다 활성화될 수 있다.

참고문헌

- (1) Bernal, L.P., Kwon, J.T., 1989, "Vortex ring dynamics at a free surface", *Physics of Fluids A*, 1, 449-451
- (2) Lugt, H.J., 1987, "Local flow properties at a viscous free surface", *Physics of Fluids*, 30, 3647-3652
- (3) Poskanzer, A, Goodrich, F.C., 1975, "A new surface viscometer of high sensitivity: II. Experiments with stearic acid monolayers", *Journal of Colloid and Interface Science*, 52, 213-221