

자유표면에 작용하는 와동 현상에 대한 연구

손 권⁺, 류 흥 곤^{*}, 김 경 훈, 김 석 우^{**}

경희대학교 기계공학과, (주)블랙^{*}, KIER^{**}

A Study on Vortex Pair Interaction with Fluid Free Surface

K. Sohn, H. K. Ryu, K. H. Kim, S. W. Kim

ABSTRACT

Today, the research to examine a fact that interaction between the air and the fluid free surface affects the steady state flow and air. We proved the interaction between vortex pairs and free surface on each condition that is created by the end of delta wings. another purpose of this study is to investigate the effect of surface active material which can change the surface tension and we must consider when we refer to turbulent flow on surface tension. therefore, this research examined the growth process of vortex pairs on condition of clean, contaminated free surface and wall after we made vortex pairs through counter rotating flaps. The results of this study suggest that vortex pairs in clean free surface rise safely but the vortex pairs in contaminated free surface and rigid, no slip is made secondary vortex or rebounding. However the secondary vortex in rigid, no slip is stronger than before, and we can find the vortex shape which roll up more completely. However, these will disappear by the effect of wall.

key word : Vortex pair(와류 쌍), Surface tension(표면장력), Turbulent flow(난류 유동), Rebounding(반향), Secondary vortex(이차 와류)

기 호 설 명

Fr : Froude 수, $Fr = \Gamma / (g\delta^3)^{1/2}$

g : 중력가속도 [m/s²]

Re : Reynolds 수, $Re = \Gamma / \nu (\Gamma_{app} = 2\pi\delta_0 V_0)$

V₀ : 유속 [m/s]

t : 시간 [sec]

x : 와류 축 직각 방향에 수평하는 좌표

y : 와류 축 직각 방향에 수직하는 좌표

z : 와류 축 평행 방향에 수평하는 좌표

그리스 문자

Γ : 순환 [m²/s]

δ : 와쌍 분리 거리 [m]

μ : 표면 전단 점성 계수 [g/sec]

ν : 동점성 계수 [m²/s]

π : 표면 압력 [dyne/cm]

1. 서 론

공학에서 중요한 유체역학의 문제는 대부분 난류 유동의 영역에 존재한다. 유체역학에서 와동의 중요성은 이미 입증되었고, 좀 더 공간적으로 확장된 대규모의 와동을 발견하고 해석하기 위한 연구가 현재 진행 중이다. 자유표면 난류의 중요한 양상을 얻을 수 있는 와류 기하학의 한 예로는 역회전하는 와류

+ Corresponding author

Tel: +82-31-201-2874; FAX: +82-31-201-8106

E-mail address: twins@kebi.com

로 인한 자유표면의 상승 및 하강 작용이다. 서로 역회전하는 와류에 의한 vortex pair와 자유표면 그리고 고체벽면과의 상호작용은 지금까지 약간의 연구가 진행되어 왔고, vortex pair가 고체 벽뿐만 아니라 자유표면에서 반향(rebounding) 한다는 사실이 알려지고 있다.^(1,2) 현재까지 대부분의 연구들은 단지 동일한 회전방향에서 강도의 크기가 다른 와동에 관한 것이었다. 따라서 정지해 있는 유체의 자유표면에 대한 회전방향이 서로 다른 vortex pair의 발달과 소멸에 관한 연구는 아직 진행 중이라고 할 수 있다. 지금까지 연구되어온 이러한 연구의 결과로서 중요한 것은 자유표면과 와류의 상호작용에 대한 표면활성물질의 역할이었고, 오염된 표면이 성장하는 vortex pair의 상호작용에 미치는 영향에 대한 연구가 활발하게 진행 중에 있다. 본 연구에서는 vortex-pair 발생기를 이용하여 발생된 vortex pair가 자유표면에 수평하게 수직상승하여 자유표면과 반응하는 과정을 유동가시화를 통하여 관찰할 수 있었다. 기체-액체 경계면(공기와 물)의 경계조건이 vortex pair와 자유표면과의 상호작용에 미치는 영향을 비교하기 위하여 증류수로 만들어진 청정자유표면과, 실제와 같이 자유표면에 활동하는 물질을 포함한 자유표면을 만들기 위하여, 표면활성물질을 사용하여 자유표면 상에 불용성 단층을 형성시켜 만든 오염된 자유표면, 그리고 아크릴로 만들어진 고체벽면의 경계면 등, 각각의 변화된 조건에서 실험을 수행하였다. vortex pair와 자유표면의 상호작용은 레이저와 형광물질을 이용한 유동가시화를 통하여 해석하였다.

2. 실험 및 실험방법

2.1 실험 장치

실험은 한 쌍의 역회전하는 플랩으로 구성되어 있는 vortex pair 발생기를 이용하여 수행하였는데, 그 개략도는 Fig. 1과 같다. 여기서 플랩은 vortex pair를 생성하기 위하여 서로 닿을 때까지 회전함에 따라 vortex sheet는 각단으로부터 발산하게 된다. 이 시스템에서 주요한 구성요소는 스텝모터와 기어, 그리고 플랩과 형광염료이다. 회전날개의 끝단은 불필요한 불안정을 최소화하기 위하여 둥글게 하였는데, 이것은 둥근 모서리의 회전날개보다 날카로운 끝을 가진 회전날개에서 발생된 와류가 더 빠르게 난류화

되는 실험적 결과에 의한 것이다. 바닥면에 인접한 플랩사이에 얇은 필름(mylar sheet)을 설치하는데, 이는 필름(mylar sheet)없이 생성된 vortex pair가 플랩의 바깥으로부터 유입된 반대 방향을 가진 유체의 많은 양 때문에, 좀 더 빠르게 난류가 된다는 것을 알았기 때문이다.³⁾

Fig. 2는 유동가시화를 위한 장치로서 레이저, CCD 카메라, CCD 카메라로 촬영된 영상을 수집하기 위한 캡처 보드가 설치된 컴퓨터로 구성되어 있다.

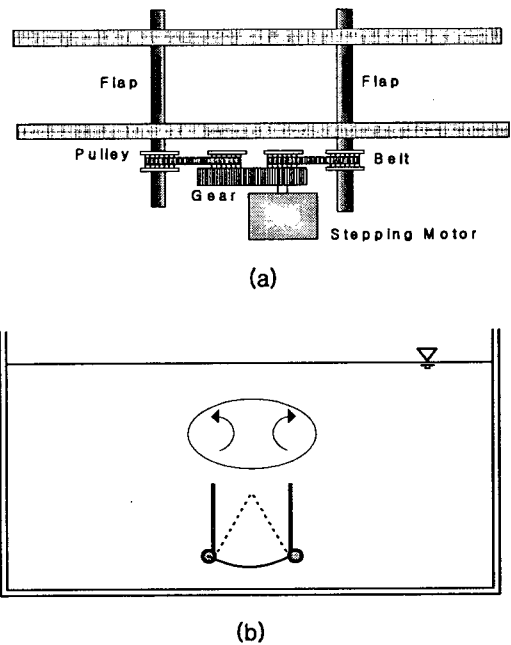


Fig. 1 Schematic of the vortex generator, producing vortices which propagate vertical the free surface : (a) top view, (b) front view

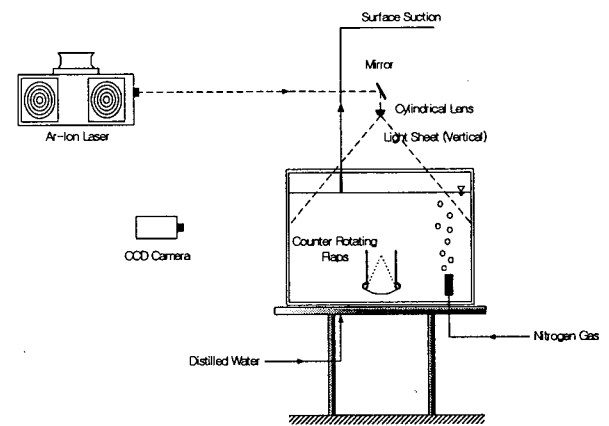


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup for the flow visualization

2.2 실험

2.2.1 자유표면 실험

완벽하게 정화된 청정자유표면의 청정도를 확인하기 위하여 표면정화 후 ring type 표면장력계를 사용하여 표면장력을 측정하였다. 이 표면장력계의 측정오차는 ± 0.1 dyne/cm이다. 측정된 청정자유표면의 표면장력은 72 dyne/cm로, 이는 실험조건인 온도(24°C)에서 알려진 물의 표면장력의 값과 일치하였다. 오염된 자유표면을 만들기 위하여 표면오염물질인 스테아린 산(steric acid)을 사용하였다. 신속하고 균일한 농도의 분자단층을 형성시키기 위하여 스테아린 산(steric acid)을 휘발성 용제인 벤젠(benzene)을 사용하여 용액화시킨 후, 그 액적을 자유표면에 도포하면, 표면오염물질은 확산에 의해 표면전체에 균일하게 분포되며, 농도가 일정한 표면단층을 형성하게 된다.

2.2.2 고체평판 실험

와류가 점착조건의 벽에 접촉하게 되면 주 와류를 반향(rebounding)시키는 2차 와류를 형성하여 벽에서 불안정하게 롤업된 얇은 경계층의 형성이 이루어진다고 연구되었다.⁽²⁾ 두께 10 mm이고 수조단면의 약 1/2(340×340 mm)크기인 아크릴 평판을 수조 상부의 수면위에 놓았다. 형광염료 주입은 주사기가 연결된 스테인리스 봉의 끝부분을 구부러서 플랩에 수직으로 주입된다. 청정 또는 오염된 자유표면의 형광염료 주입 방식과 다른 이유는 표면이 아크릴로 덮여져 있기 때문이다. 처음에는 염료를 넣는 곳의 위치에 아크릴의 구멍을 뚫었는데 그 사이를 레이저가 통과하게 됨에 따라 빛의 산란이 일어났다.

2.2.3 유동가시화

형광물질(Rhodamine B)과 레이저를 이용하여 청정·오염된 자유표면 그리고 고체평판과의 경계 조건에서 상호작용하는 vortex pair에 대한 동적 거동을 관찰하기 위하여 유동가시화를 수행하였다. 광원으로는 Ar-Ion laser(Ion Laser Technology, Model 5500A, 300 mW)를 사용하였다. 가시화는 와류의 발생에 앞서 강한 형광색을 띄는 fluorescein 염료(Rhodamine B)를 주사기를 사용하여 플랩사이로 수직으로 주입시킨

다. 반대로 회전하는 두 개의 플랩이 서로 닿을 때까지 회전을 하게 되면 자유표면에 닿기 전에 부드럽게 롤업(roll-up)된 vortex pair가 생성되며, light sheet내에서 염료는 강한 형광색을 띄기 때문에 와류를 분명하게 관찰할 수 있게 된다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 청정 자유표면

청정자유표면과 상호작용하는 와류의 궤적과 전파속도를 측정하기 위해서 유동장 내에 seeding particles을 형광염료를 넣는 방법과 같은 방식으로 플랩사이로 도포하여 그 유동과정을 캠코더를 사용하여 촬영한 후, 녹화된 영상을 30 frame/sec 간격으로 분석하여 얻을 수 있었다. vortex pair의 Reynolds 수 측정은 명백한 순환에 근거하여 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Re = \frac{(\Gamma_{app})}{\nu} \quad (\Gamma_{app} = 2\pi\delta_0 V_0)$$

명백한 순환은 비점성 유체에서 점와류로 가정하여 결정된다. 여기서 δ_0 는 vortex pair의 분리거리이고, V_0 는 전파속도이며, ν 는 동점성계수이다.⁽³⁾ Fig. 3에 나타난 최대속도 V_0 는 1.65 cm/sec이며, 그 때 δ_0 는 11.6cm이다. 이를 통하여 계산된 Reynolds수는 대략 12,026이며, 여기에 대응하는 Froude수는 $Fr = \Gamma_{app} / \sqrt{g\delta_0^3}$ 으로 정의되며, 약 0.097 이다.

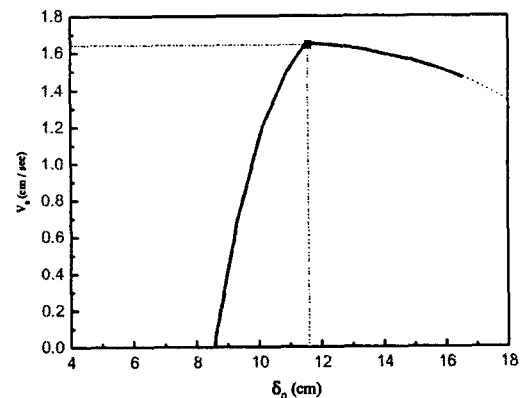


Fig. 3 Relationship between V_0 and δ_0 of the vortex pair.

이는 중력의 영향으로 인한 표면변형이 매우 작다는 것을 의미하므로 자유표면과 상호작용한 vortex pair에 대해서는 중력이 거의 영향을 미치지 않고 있음을 나타낸다. 여기서 δ_0 는 vortex pair 분리거리, Γ_{app} 는 와류의 명백한 순환이며, g 는 중력가속도이다. vortex pair의 분리거리를 이용해서 얻은 낮은 Froude수는 와류가 자유표면과 상호작용하는 동안 표면변형이 작다는 것을 보여준다. $22,000 \leq Re \leq 66,000$ 이고 $0.34 \leq Fr \leq 1.1$ 에서는 성장한 vortex pair의 분리거리가 자유표면과의 거리와 같게 될 때, 표면변형과 줄무늬들이 나타난다고 알려져 있다.⁽⁴⁾

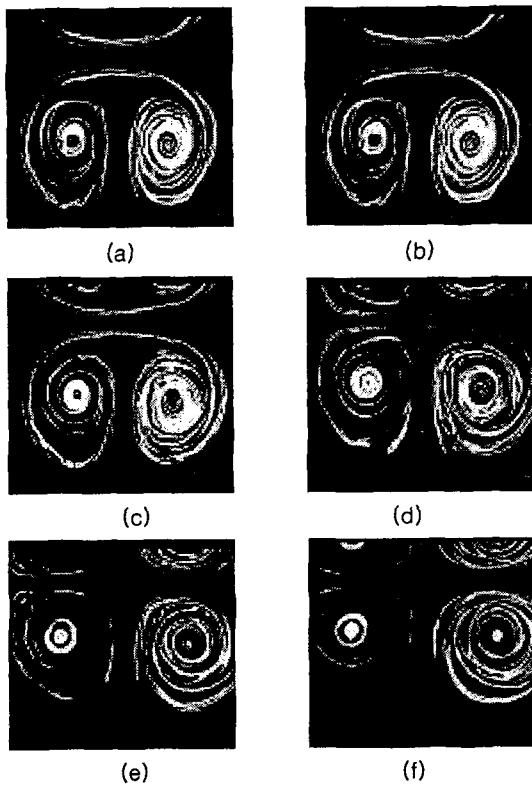


Fig. 4 Visualization sequence of vortex pair interaction with a clean free surface. Time increments between digital images is $\Delta t=0.5s$, $Re=12,026$ $Fr=0.097$

Fig. 4는 각각의 플랩이 서로 다른 방향으로 서로 달을 때까지 회전하고 부드럽게 롤업된 vortex pair가 성장하여 자유표면과 상호작용하는 과정을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)의 vortex pair의 중심은 자유표면에서 아래로 8.6 cm의 거리를 두고 있다. 사진으로부터 알 수 있듯이 vortex pair는 층

류이고, 자유표면과 상호작용하기 이전에 잘 발달되는 것을 알 수 있다. Fig. 5(a)는 Fig. 4(f)와 같은 이미지이고 와류가 발산하기 시작하는 사진이다.

Fig. 5에서는 2차 와류가 생성되거나 반향(rebounding)이 나타나지 않는 것을 보여준다. 이것은 와류가 표면을 따라 이동할 때의 포텐셜 유동 이론과 같고, 자유표면과 수평하게 이동하여 소멸하는 것을 보여준다.

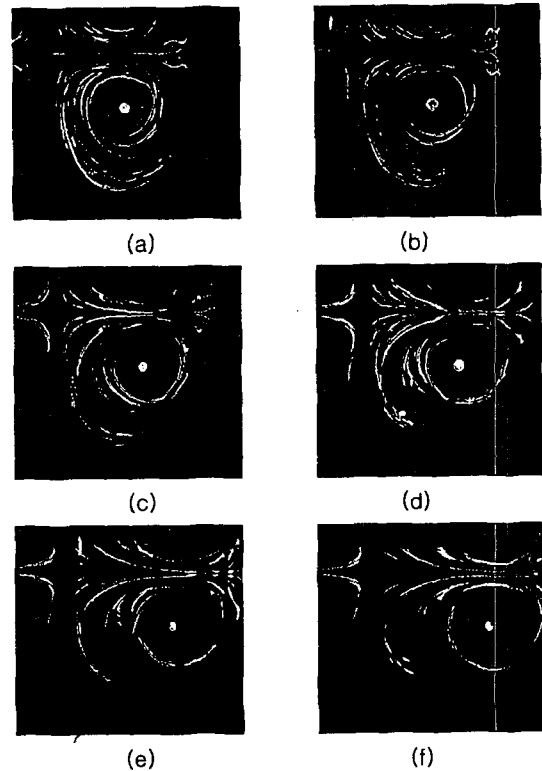


Fig. 5 Visualization sequence of right-hand vortex as it interaction with a clean free surface. Time increments between digital images is $\Delta t=0.5s$, $Re=12,026$ $Fr=0.097$

3.2 오염된 자유표면

Fig. 6은 오염된 자유표면에서 vortex pair가 성장하여 자유표면과 상호작용하기 시작할 때부터 0.5초 간격으로 촬영한 오른쪽 단면 사진이다. Fig. 6은 부드럽게 롤업된 vortex pair가 성장하여 자유표면과 반응하기 시작하는 순간부터 촬영을 시작한 것이다.

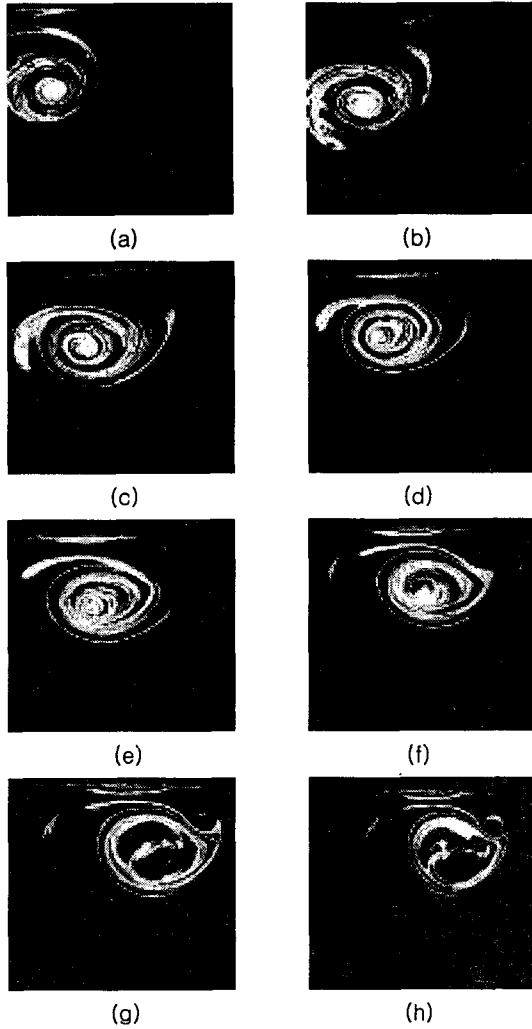


Fig. 6 Visualization sequence of right-hand vortex as it interacts with the surface covered by a stearic acid monolayer($\pi=62.5$ dyne/cm). Time increments between digital images is $\Delta t=0.5s$, $Re=12,026$ $Fr=0.097$

Fig. 4와 비교할 때 전혀 다른 유동현상이다. Fig. 6의 (f)의 사진에서 보이는 바와 같이 자유표면 아래에서 환형의 vortex가 형성되고 있음을 분명히 나타내고 있다. 이는 스테아린 산(stearic acid)의 영향에 의한 것으로 자유표면에서의 점성이 증가하고, 이는 결국 표면에서의 유체입자가 미끄러지게 되는 현상을 유발한다. 미끄러진 유체입자는 결국 자유표면으로부터 박리되어 유체 내부로 진행하게 되면서 Fig. 6(g)에 나타난 바와 같이 환형의 2차 유동을 발생시키게 된다. 시간이 경과됨에 따라 와류는 자유표면으로부터 완전히 분리되고 환형의 와류만이 존재하게 된다. 이러한 현상은 스테아린 산의 높은

표면점성에 의해 스테아린 산의 분자단층이 마치 고체벽면과 같은 정착조건을 형성하기 때문에 발생한다. Fig. 6(h)는 층류가 나타나고 있지만 난류로의 천이가 일어나는 것을 보여준다.

3.3 고체평판 경계층

고체평판 경계층과 와류와의 상호작용을 청정자유 표면과 오염된 자유표면에서의 와류의 상호작용을 비교하기 위하여 수행되었다. 고정된 정착조건의 경계는 평판 하부에서 높은 점성 경계층을 형성하여 어떠한 표면변형도 허용하지 않는다.

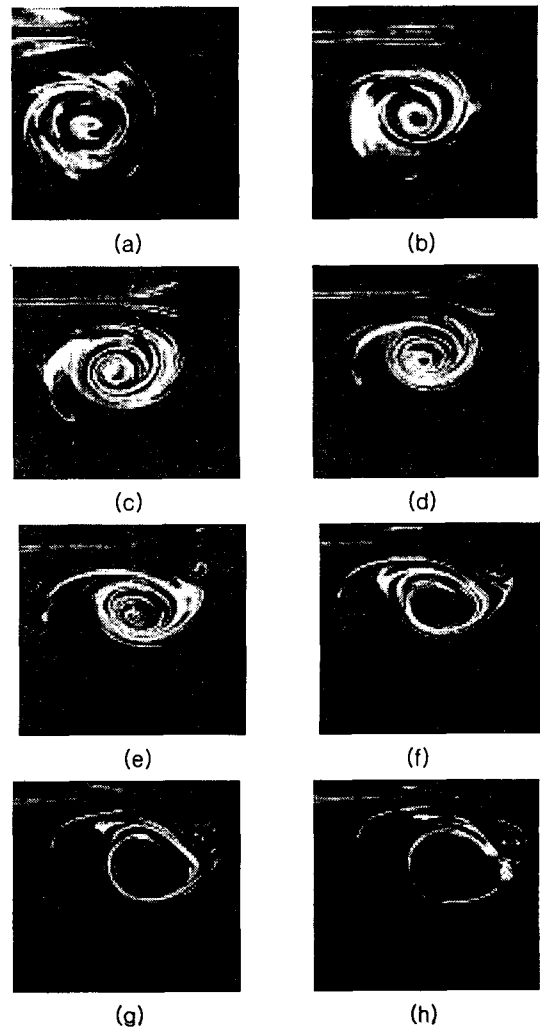


Fig. 7 Visualization sequence of right-hand vortex as it interacts with the a solid wall. Time increments between digital images is $\Delta t=0.5s$, $Re=12,026$ $Fr=0.097$

이러한 차이는 오염된 자유표면과 유사하지만 구별되는 점이라고도 할 수 있다. 고체 평판이 자유표면에 접촉하여 점착 경계조건이 될 때, 와류는 오염된 자유표면의 경우와 유사한 유동이 나타나지만, Fig. 7(e) 이상에서는 환형으로 나타나는 2차 와류가 스테아린 산(steric acid)의 경우보다 더 강하게 나타나고 있다. Fig. 6과 Fig. 7에서 알 수 있듯이 결국, 오염된 자유 표면과 고정된 고체평판의 경계 표면의 경우에서와 같이 두 경우 모두 와류의 소멸을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

청정, 오염된 자유표면 그리고 고체평판과 vortex pair의 상호작용을 실험적으로 해석하였다. 비점착조건의 청정자유표면과 오염된 자유표면, 그리고 점착조건의 고체평판까지의 서로 다른 표면조건에서의 유동가시화 실험은 서로 다른 결과를 가져왔으며, 다음과 같이 정리된다.

- i) 청정한 자유표면에서는 2차 와류가 생성되거나 반향이 나타나지 않았고, 와류가 표면을 따라 수평으로 이동하면서 벽면의 영향으로 인하여 소멸하였다.
- ii) 수돗물이나 바닷물의 표면과 같이 오염된 자유표면이 실질적인 표면과 상호작용 하는 vortex pair에 중요한 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 즉, 높은 표면전단점성계수를 갖는 스테아린 산으로 오염된 자유표면의 경우, 청정자유표면에서는 나타나지 않았던 주(primary) 와류와 반대로 회전하는 약 1/5크기인 2차 와류가 생성되었다. 또한 2차 와류는 주 와류를 표면으로부터 반향하게 한다. 따라서 청정한 자유표면의 경우보다 주와류의 소멸

이 2차 와류로 인해 빨리 소멸된다.

- iii) 고체 평판으로 인한 점착조건(no slip condition)에서는 오염된 자유표면의 경우와 유사한 거동이 나타나지만, 계면활성제로 오염된 자유표면의 경우보다 환형의 2차 와류가 다소 강해지고, 더 완전하게 말아 올려지는 것으로 나타났다. 즉 오염된 자유표면에서의 경우보다 2차 와류의 크기가 더욱 커지고, 청정자유표면에서 보이지 않는 유체 거동이 발생한다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지역대학 우수과학자 지원연구과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Baker, S.J. & Crow, S.C. 1977 The motion of two-dimensional vortex pairs in a ground effect. *J. Fluid Mech.* 82 pt. 4, 659-671
- 2) Harvey, J.K., & Perry, F.J., 1971 "Flow field produced by trailing vortices in the vicinity of the ground", *AIAA Journal*, 9, 1659-1660
- 3) Lamb, H. 1932, *Hydrodynamics*, 6th edition, Cambridge University Press
- 4) Sarpkaya, T. & Henderson Jr., D. O. 1985 Free surface scars and strictions due to trailing vortices generated by a submerged lifting surface. *AIAA paper no. 85-0445, AIAA 23rd Aerospace Sci. Mtg.*, Jan. 1985 Reno, Nevada.