
 論 文

大韓造船學會論文集
 제 30 卷 第 2 號 1993 年 5 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 30, No. 2, May 1993

수면하 보오텍스 유동과 자유표면과의 상호 작용에 관한 연구

송무석*

Numerical and Experimental Investigation on the Interaction of Subsurface Vortical Flows with a Free Surface

by

Museok Song*

요 약

자유표면과 수면하 vortex 유동과의 상호작용으로 생기는 수면위의 특이 형상을 실험과 수치해석으로 얻어진 결과에 근거하여 논하였다. 먼저 2차원적인 실험이나 해석적인 연구로 이해될 수 있는 "striation"의 발생을 살펴 본다. "Scar"라 불리우는 striation과 수직한 형상은 2차원 vortex filament와 vortex pair 생성시 생겨나는 residual vortex의 상호작용으로 설명하였다. 간단하면서도 중요한 상호작용의 역학을 연구할 목적으로 vortex ring이 자유표면과 수직하게 충돌할 경우에 나타나는 현상들을 실험적으로 논하였고 이때 상호작용의 초기단계를 축대칭 문제로 하여 수치해석적으로 얻어진 결과와 비교하였다. 상호작용의 후기단계는 vortex reconnection을 포함하는 복잡한 과정인데 이때 수면에서의 짧은파 생성을 vortex ring의 수면과의 경사진 충돌로 설명하였다. 또한 위의 수면파 생성을 간단한 해석적 model로 재구성하여 비교해 보았다. 끝으로 수면위에 존재하는 오염물질이 수면하 vortex 유동에 미치는 영향을 수치해석적인 방법으로 free slip 및 rigid wall 조건의 경우와 비교하여 살펴보았다.

Abstract

In order to predict the free surface signature of turbulent ship wakes two things are essential: a basic understanding of the mechanism of turbulent vortical flow/free surface interactions and a mathematical model to accurately predict the signature. The goal of the study described here is both to supplement experimental work to obtain basic understanding, as well as to condense this understanding in a model(or models) that captures the es-

발 표 : 1992년도 대한조선학회 추계연구발표회('92. 11. 14)

접수일자 : 1992년 12월 21일, 재접수일자 : 1993년 2월 17일

* 정회원, 홍익대학교 조선해양공학과

sential phenomena and thus allows predictions. To do so we followed two main paths guided by experimental observations. One is full simulations of the flow using the Navier-Stokes equations. The other is a vortex modeling, where the vortical structures of the flows are approximated by idealized structures, and the interaction assumed to be essentially inviscid. These approaches complement each other. Full simulations are only applicable to small scale phenomena, where the system is simple, and the Reynolds number is low. The vortex modeling, on the other hand, cannot represent essentially viscous aspects of the problem such as the effect of contamination gradient. Obviously, the modeling is what may eventually lead to a prediction method; the full simulations-too limited to mimic all but the simplest circumstances-are to aid and support the construction of realistic models. We address two-dimensional aspects of the vortex/free surface interaction first. Secondly we obtain some basic understanding of the interaction process through an experiment and then talk about several three-dimensional problems hoping to develop a successful prediction model.

1. 서 언

고전적인 선박유체역학의 관점에서 선체로부터 멀리 떨어져 나가는 후류의 존재는 큰관심의 대상이 아니라 할 수 있다. 하지만 근래 급속히 발전하고 있는 remote sensing 기술은 선박의 후류를 또다른 시각으로 관찰할 수 있게끔 하였으며, 대부분의 SAR (Synthetic Aperture Radar) image를 통하여 본 선체의 후류는 일반적으로 발하여지는 Kelvin wake와는 전혀다른 특이하고 오래 지속되는 자유표면상의 항적을 포함하고 있다 (Fig. 1). 이와같은 자유표면 형상은 radar의 파장과 유사한 파장의 짧은 자유표면 파들의 생성 및 특정구역에로의 밀집과 직결된 것으로 이해되고 있는데, 감지된 항적이 포함하는 정보를

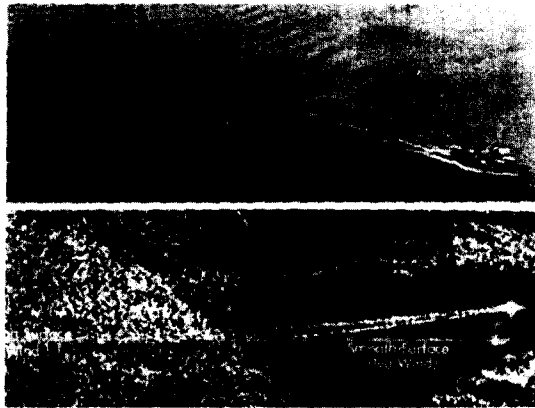


Fig. 1 Aerial photograph and SAR image of the ocean surface behind an ocean surface vehicle. (Kasischke, Meadows and Jackson [1984])

정확하게 끌어 내고 혹은 선박항적의 이러한 감지 가능성을 최소화할 필요가 있을경우 언급한 자유표면 특이형상의 형성 및 변환에 대한 깊은 이해가 필요하다.

선박의 진행에 의해 유기되는 여러종류의 와류성분중에는 (vortical structures, Lugt[1983]) 선수에서 떨어져나오는 수면으로 떠오르는 쌍보오텍스가 (pair vortices) 포함되어 있는데, 이 쌍보오텍스와 자유표면과의 상호작용에 관한 연구를 통하여 SAR image상의 특이형상을 파악하려는 노력이 Sarpkaya[1986]의 delta wing 실험으로 시작되었다. 그후로 다수의 연구자에 의하여 수치해석적인 방법을 포함한 해석적인 접근과 실험이 뒤따랐으며, 그중 Yu 와 Tryggvason[1990]은 2차원 vortex/free surface 문제의 수치해석적 해들을 완료된 여러 다른 연구들과 비교하여 잘 설명하고 있으며, Hirsu[1990]는 쌍보오텍스와 자유표면과의 상호작용을 통하여 제기될 수 있는 문제들을 실험적 결과를 이용하여 폭넓게 언급하고 있다. 한편 2차원적 문제의 설정으로는 설명될 수 없는 현상들의 해석을 Bernal과 Madnia[1989]는 자유표면과 수면하 jet와의 상호작용의 실험적 연구로 시도하였고, Bernal과 Kwon [1989]은 보오텍스 링의 수면과의 경사진 충돌을 관찰함으로써 짧은 수면파의 생성을 vortex filament의 자유표면에서의 재결합으로 설명 하였으며, Kwon[1989]의 연구는 이와 관련된 문제들을 상세히 언급하고 있다.

본 논문에서는 자유표면과 수면하 vortex 유동과의 상호작용으로 수면위의 특이 형상을 설명하려는 최근의 여러 연구들을 간단히 살펴보고 그중 몇가지

문제를 실험과 수치해석으로 얻어진 결과에 근거하여 논하였다. 먼저 2차원적인 실험이나 해석적인 연구로 이해될 수 있는 "striation"의 발생을 살펴 본다. "scar"라 불리는 striation과 수직한 형상은 2차원 vortex filament 와 vortex pair 생성시 생겨나는 residual vortex의 상호작용으로 설명하였다. 간단하면 서로 중요한 상호작용의 역할을 연구할 목적으로 vortex ring이 자유표면과 수직하게 충돌할 경우 나타나는 현상들을 실험적으로 논하였고 이때 상호작용의 초기단계를 축대칭 문제로 하여 수치해석적으로 얻어진 결과와 비교하였다. 상호작용의 후기단계는 vortex reconnection을 포함하는 복잡한 과정인데 이때 수면에서의 짧은파 생성을 vortex ring의 수면과의 경사진 충돌로 설명하였다. 또한 위의 수면파 생성을 간단한 해석적 model로 재구성하여 비교해 보았다. 끝으로 수면위에 존재하는 오염물질이 (surfactant) 수면하 vortex 유동에 미치는 영향을 수치해석적인 방법으로 free slip 및 solid wal 조건의 경우와 비교하여 살펴보았다.

2. 쌍보오텍스의(Vortex Pair) 수면과의 충돌

Sarpkaya[1986]는 delta wing을 수면 아래에서 음의 입사각을 유지시키며 전진시켜 수면으로 떠오르는 vortex pair를 생성시키고 이 vortex pair가 자유표면과 상호작용을 하며 만들어내는 수면 형상을

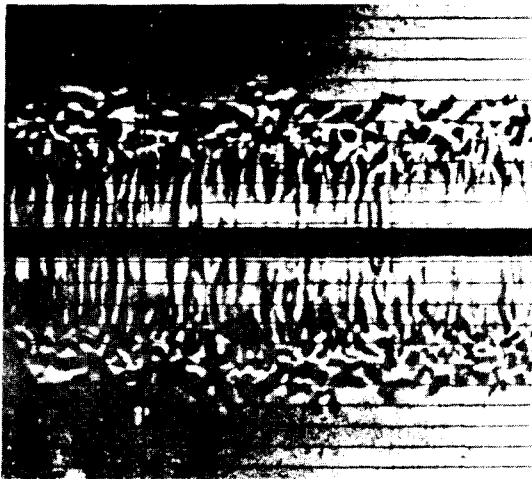


Fig. 2 Scars and striations above trailing vortex pair.(Sarpkaya[1986])

관찰하였다. Fig. 2는 상호작용이 상당히 진전된 -pair vortex가 image effect로 수면 가까이에서 서로 멀어지는-상태에서 자유표면 변형을 shadow-graph image로 보여주고 있다. Fig.2에서 delta wing의 진행방향과 수직으로 나타나는 형상을 "striation"이라 하고 striation을 감싸는 delta wing 진행방향과 평행한 형상을 "scar"라 한다. 이와같은 자유표면 형상들이 짧은 파장의 수면파 생성을 설명하고 있지는 않지만 자연스럽게 만들어질 수 있는 vortex pair가 팔목할 만한 자유표면 변형을 일으킬 수 있음을 보여주고 있으며 scar가 중심선과 이루는 각도등은 선박후류의 SAR image와 상당히 근사함을 알 수 있다.

이와같은 형상중 scar의 형성은 vortex pair를 이용한 2차원 수치해석으로 설명할 수 있으며 striation은 pair vortex와 중심선 근처에 잔류하는 약한 vortex filament들의 상호작용에 기인한 자유표면 변형으로 이해할 수 있다. Fig. 3은 boundary integral method를 이용하여 비교적 약한 vortex pair가 자유표면과 상호작용을 하는 한 과정을 보여준다. 초기 조건으로 vortex sheet을 수면하에 위치시키고 이 vortex sheet가 pair vortex를 형성하고 자유표면으로 접근하여 서로 멀어지며 자유표면상에 음의 변형을 일으킴을 잘 보여준다. Vortex pair의 세기에 따라 vortex pair가 수면을 밀치며 기준 수면 위로 상승할 수도 있으나 일반적으로 중심선 근처에서의 수면 상승과 vortex core 윗부분의 음의 수면 변형이 두드러진다.

한편 Fig. 4는 striation의 발생 작용의 이해를 돕기 위한 간단한 계산 예이다. 초기조건으로 vortex pair를 두개의 vortex filament로 모델화 하고 중심선 부근에 주보오텍스의 세기의 0.1배의 pair vortex를-잔류 보오텍스-작은 교란을 포함시켜 수면 아래 위치시켰다. 주보오텍스에 의하여 수면으로 상승하는 잔류보오텍스는 filament 주위의 strain field에 따라 교란이 확대되며 궁극적으로는 자유표면에서의 striation-like 변형을 예측할 수 있게 하는 형태로 발전한다.

물론 주보오텍스로부터 벗겨져 나오는 보오텍스들이 수면과 상호작용을 함으로써 어느정도의 중심축과 수직한 자유표면 형상을 생성시킬 수는 있지만, Sarpkaya의 실험에서 보여지는 상당히 규칙적인 striation의 발생은 Fig. 4로의 설명이 합당한 것으로 사료된다.

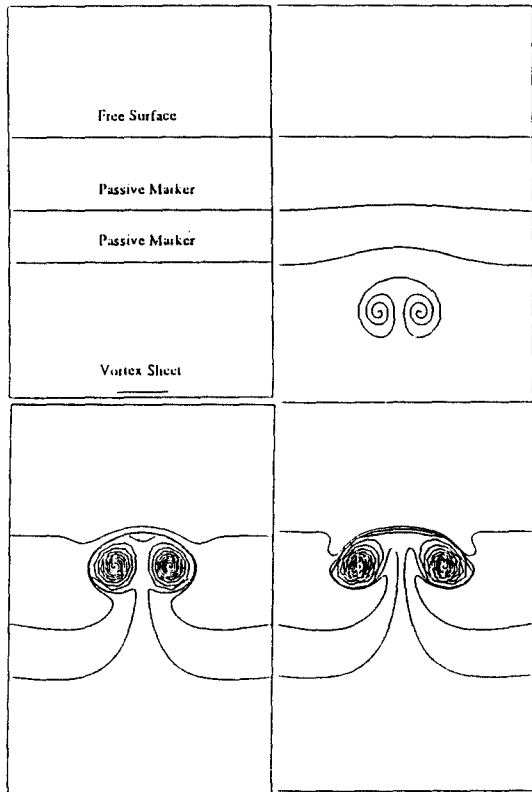


Fig. 3. Free surface deformation due to vortex pair.

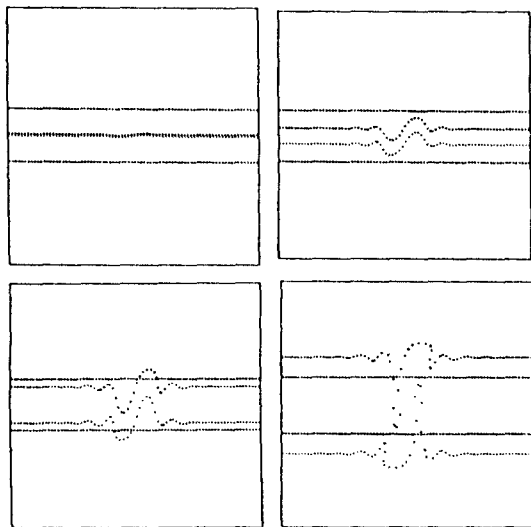


Fig. 4 Deformation of residual vortex filaments due to stronger vortex pair.

결론적으로 2차원적 실험들은-대부분의 경우 낮은 Froude 수의($Fr=r/(gL^3)^{0.5}$) 유동에 대한-striation과 scar의 발생을 잘 설명하고 있으나 짧은 수면파의 생성의 증거는 보이지 않고 있으나, 2차원 수치 해석은 그외의 대부분의 실험실에서의 현상을 잘 재현할 수 있다.

3. 보오텍스링의 수면파의 수직충돌

기존의 2차원 실험연구는 낮은 Reynolds 수에 ($Re=r/v$) 관한 것들이었으며 비록 비교적 높은 Reynolds 수의 유동에 관한 것들도 3차원 수면파의 생성은 설명하지 못하였다. 또한 vortex ring을 이용한 실험들도 작은 크기의 링을 이용한 것들로서 실제 현상을 설명하기 위하여는 척도영향에 관한 이해가 필요하다. 이에 보다 크고 강한 vortex ring을 ($D=10\text{ CM}$, $Re=5000$) 이용하여 자유표면과의 상호작용을 연구함으로써 실제 해양에서 자주 관찰되는 up-welling 유동과의 상호작용으로 나타나는 자유표면 현상들을 살펴보고 vortex/free surface 상호작용의 성공적인 수학적 모델링을 위해 필수적인 정보를 얻고자 한다.

Fig. 5는 실험장비의 배치도이며 자세한 설명은 Song, Bernal, Tryggvason[1992]에 을 참조바란다. Fig. 6와 Fig. 7은 각각 $Fr=0.25$ 와 0.99 의 경우 시간에 따른 자유표면의 형상을 shadowgraph image로 보인 것이다. 낮은 Froude 수의 경우 수면 변형은 vortex core상부의 작은 강하가-2차원의 경우와 비슷한-나타나고 있고 상호작용 말기에는 vortex filament의 reconnection 지역 주위로 작은 파들이 생성

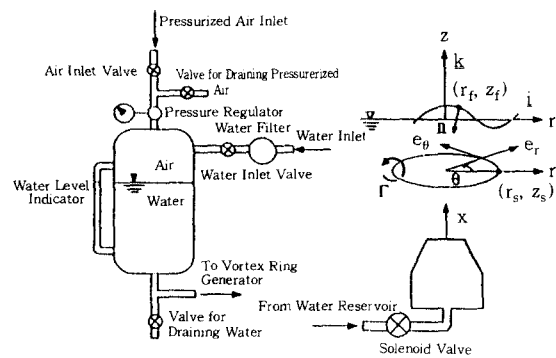


Fig. 5 Experimental apparatus and the coordinate system.

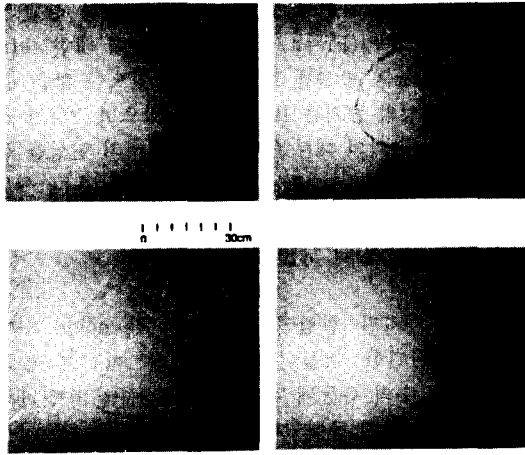


Fig. 6 Shadowgraph images of free surface signature. $Fr=0.25$.

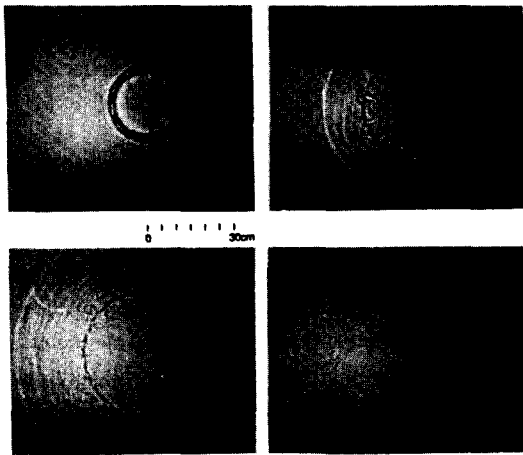


Fig. 7 Same as the Fig. 6 $Fr=0.99$.

되어 전파되어감을 볼 수 있다. 반면 강한 Froude 수의 경우 상호작용 초기의 뚜렷한 축대칭 변형외에 core 외곽에서 벗겨진 vortical structure와 관련된 3차원 형상들이 눈에 뜨인다. 후기는 vortex filament의 reconnection지역을 가리키는 검은 점들이 main core 바깥쪽으로 많이 나타나고 있으며 작은 파들이 전파되고 있다. 마지막 사진에서는 main core와 연결된 수면형상은 사라지고 Crow-like instability (Crow[1970])의 발전으로 main filament가 끊기어 자유표면에서 여러개의 half ring을 구성하는 형태를

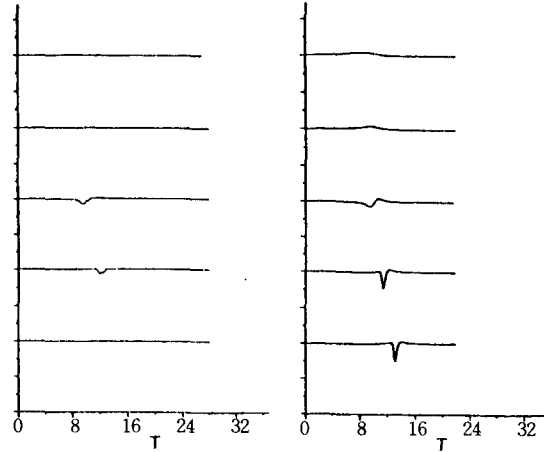


Fig. 8 Time history of the free surface elevation at fixed points for $Fr=0.25$. (a) Experiment: $r/R=0.0, 0.66, 1.31, 1.97$ and 2.63 (from top to bottom). (b) Calculation: $r/R=0.0, 0.67, 1.35, 2.02$ and 2.70 (from top to bottom). The vertical scale is enlarged.

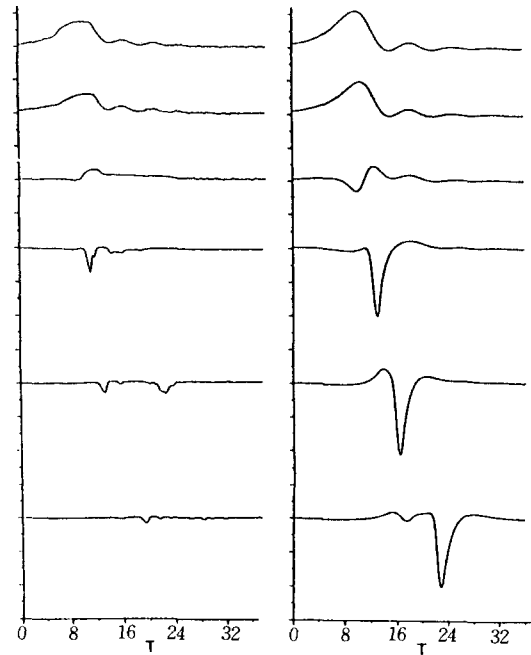


Fig. 9 Time history of the free surface elevation at fixed points for $Fr=0.99$. (a) Experiment: $r/R=0.0, 0.62, 1.24, 1.85, 2.47$ and 3.71 (from top to bottom). (b) Calculation: $r/R=0.0, 60, 1.27, 1.87, 2.55$ and 3.82 (from top to bottom). The vertical scale is enlarged.

보이고 있다. Fig. 8과 Fig. 9은 두가지 Froude 수의 경우 중심으로부터 거리가 다른 여러 지점에서 계측한 시간에 따른 수면 변화와 boundary integral method를 이용해 계산한 결과를 비교한 것이다. 측대칭이 유지되는 순간까지의 비교는 정량적으로 양호하나 표면파 생성이 시작되는 시간영역에서의 상호작용은 설명할 수 없다.

4. 보오텍스링의 수면과의 경사진 충돌

전장에서 링의 수면과의 수직충돌의 후기는 vortex filament의 수면에서의 reconnection으로 많은 짧은파를 생성시키는 완전한 3차원 현상임을 알 수 있었다. 이과정을 더욱 세밀히 관찰하고자 vortex filament의 한부분을 vortex ring의 수면과의 경사진 충돌로 모델화하고 vortex method를 -vortex particle method (Leonard[1980,1985], Winckelmans [1989])- 이용하여 풀었다. Fig. 10은 사용된 좌표계와 유동을 간략히 표시한 것이다.

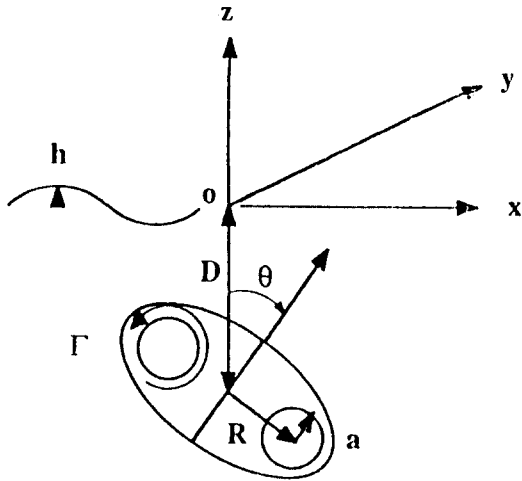


Fig. 10 Schematic picture of the coordinate system and the flow.

Vortex ring을 수면아래 지름의 1.5배 되는 지점에 수직축과 링의 중심축이 70도의 각도를 이루도록 위치시켰다. Fig. 11은 시간에 따른 자유표면의 변형을 보여주는 것으로 링이 수면에 접근하며 core 위쪽 수면에 강하를 일으키고 reconnection을 완료하면서 dimple을 생성시키며 이순간 수면파가 생성되어 전

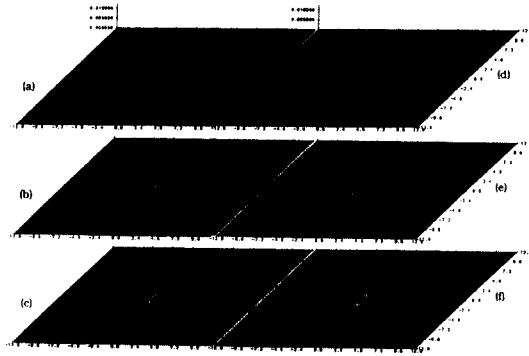


Fig. 11 Free surface deformation due to an inclined vortex ring.

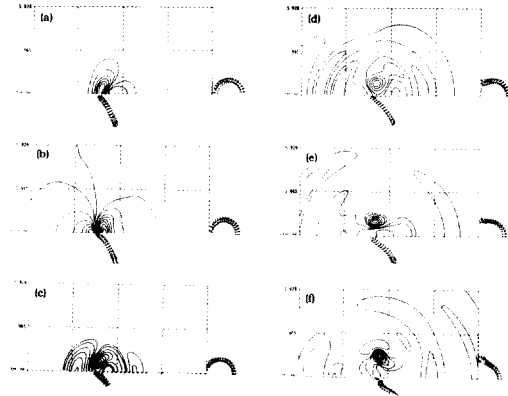


Fig. 12 Contour plots of the free surface deformation and front/ side views of the vortex ring.

파되어 나감을 잘 보여주고 있다. Fig. 12는 vortex ring과 수면 형태의 관련을 살펴보기 위해 보인것으로 core의 위치와 그때의 수면 변형을 볼 수 있다.

이 그림에서 dimple이 vortex filament가 수면과 만나는 지점에 생김을 확인할 수 있고 일단 reconnection이 완료되면 수면과 재결합한 링의 운동은 파를 더이상 생성시키지 않음을 알 수 있다.

5. 표면파 생성의 해석 모델

전장에서의 결과를 재언하면 자유표면의 짧은파는 vortex reconnection 과정에서 수면에 주어지는 급격한 압력변화에 기인한다는 것인데, 이 사실에 근거하여 좀더 복잡한 큰 문제에 있어서의 수면파생성을 단순히 처리할 목적으로 간단한 해석 모델을 제안한

다. 여러 초기조건에서 vortex reconnection의 관찰을 통하여 체계적인 pressure impulse에 관한 정보가 제공된다면 수면파 문제는 Cauchy-Poisson 타입의 초기치 문제로 볼 수 있다. Impulse가 주어지는 분포를 Gaussian으로 가정하면 임의의 시간에서의 수면교란은 다음과 같은 닫힌꼴로 얻어진다(Song and Tryggvason[1992]).

$$h(r, t) = -\frac{\gamma t^3}{2^{7/2} \pi^4 Fr^2} \exp\left(-\frac{\beta^2 t^4}{32r^4 Fr^4}\right) \sin\left(\frac{t^2}{4r Fr^2}\right)$$

여기서 γ 와 β 는 각각 impulse의 크기와 모양을 결정하는 변수로 전장에서 vortex 계산에서 구해진다.

Fig. 13과 Fig. 14은 한개의 impulse와 3개의 impulse를 사용하였을 때의 수면파 전파를 보여주는데 전자의 경우와 비교하여 후자의 경우가 약간 빠른 downstream wave를 보여주는 점에서 전장의 결과나 실험결과 등과 정성적으로 잘 일치한다고 사료되며, vortex reconnection에 따른 pressure impulse에 대한 체계적인 연구가 뒤따른다면 유용한 모델로 발전될 수 있을 것으로 기대된다.

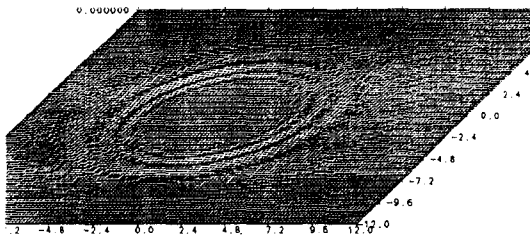


Fig. 13 Wave due to a point impulse.

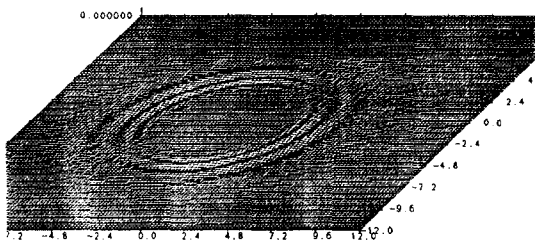


Fig. 14 Wave due to three-point impulses.

6. 자유표면 오염물질의(Surfactant)의 영향

표면장력은 일반적으로 작은 크기의 표면파 문제를 다룰 때에 중요한 인자로 알려져 있다. 하지만 정확하다고 믿어지는 표면장력을 포함하여 계산하였음에도 실험실에서 관찰된 유동과는 많이 다른 결과를 얻곤 하는데 이는 실험에 사용되는 수면이 완전히 깨끗하기 어렵다는데 기인할 경우가 많다. 즉 아무리 작은 양의 수면 오염물이라도 일단 수면하 유동에 의해 그 분포가 수면상에서 불균일하게 되면 평균표면장력의 차이에 기인하는 문제 이상의 영향이 표면장력 자체의 수면상에서의 불균일로 나타난다. 수면상의 불균일 표면장력은 수면하에 secondary vorticity를 유지시키고 이 보텍스는 기존의 수면하 유동과 상호작용을 하며 영향을 준다. Bernal과 Kachman의 실험적 연구는 이러한 현상을 vortex ring이 오염된 수면과 경사져서 충돌할 때 링의 아래쪽 부분의 자유표면에서의 재결합이 거부되는 형태로 잘 보여주고 있다. 본 논문에서는 Bernal과 Kachman의 실험 문제를 수치해석의 모델로 설정하고 수면 오염물의 영향을 정량적으로 관찰해 본다.

하나의 보텍스링을 수면아래에 수직축과 70도 경사시켜 위치시키고 변형이 없는 자유표면에 오염물을 균일하게 분포시킨다. 이 오염물은 물로 녹아들지 않는다고 가정하고 오염물 밀도에 대해 보존방정식을 설정하고 수면하 유동을 표현하는 Navier-Stokes 방정식과 함께 푼다. 우리가 조절하는 요소들은 초기 오염물의 밀도로서 깨끗한 수면, 약간 오염된 수면, 심하게 오염된 수면 그리고 rigid wall의 4가지 경우를 비교하며 살펴본다. Fig. 15은 Reynolds 수 400의 경우 보텍스링과 깨끗한 수면과의 경사진 충돌을 보여준다. 링의 윗부분과 아래부분의 연속적인 reconnection을 잘 보여주고 있으며 아래부분의 reconnection은 상당한 양의 vorticity를 upstream 쪽에 남기고 있음을 알 수 있다. Fig. 16은 4가지 경우의 2 time step에서 중심면의 vorticity를 보여주고 있다 (Re=200). 깨끗한 수면의 경우의 링의 윗부분에 해당하는 vorticity가 중심면에서 사라짐으로써 완전한 reconnection을 나타내고 있지만 오염된 수면의 경우 수면과 가까이 있는 링의 vorticity와 반대인 secondary vorticity가 수면의 표면장력 변화로 생성됨을 볼 수 있고, 이들 secondary vorticity는 링과 상호작용을 하며 깨끗한 수면의 경우와는 다른 유동장을 만들고 있음을 보여준다. 또한 rigid wall의



Fig. 15 Vortex ring evolution toward a free slip surface.

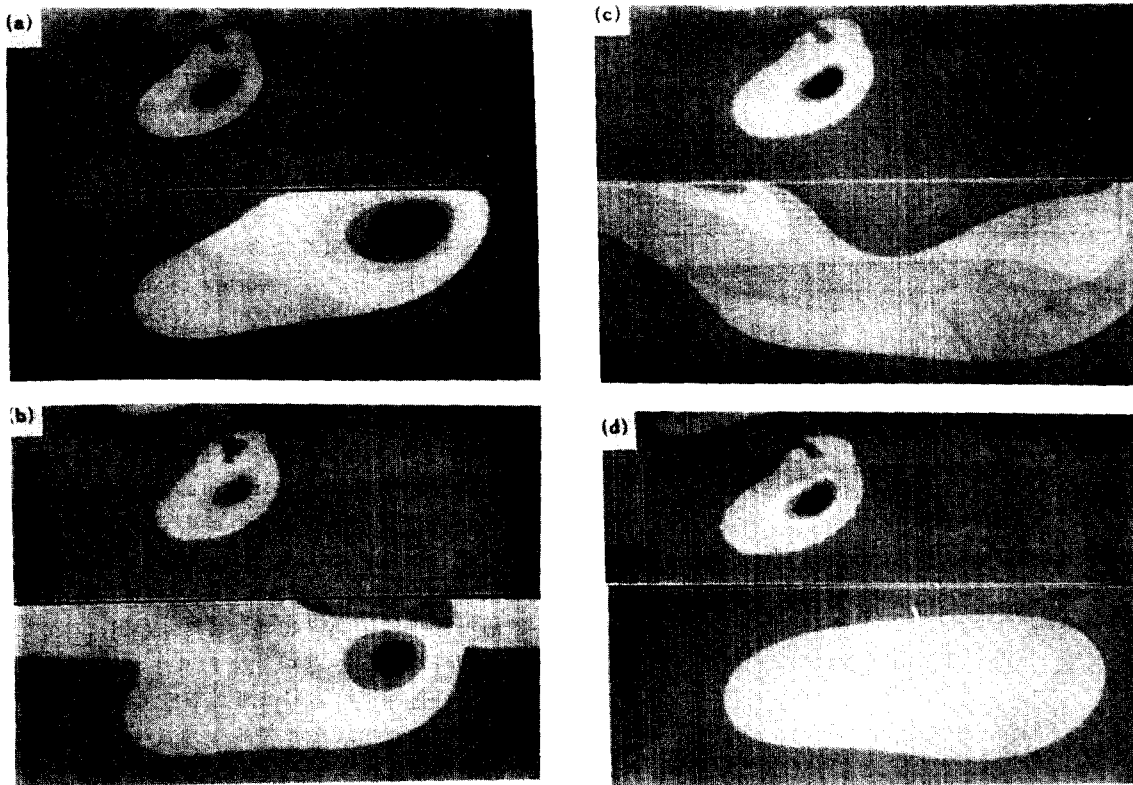


Fig. 16 Vorticity at the center plane for 4 different cases. a) clean, b) weakly contaminated, c) strongly contaminated and d) rigid wall.

경우 secondary vorticity는 오히려 단순한 형태로 발생되며 2차원의 경우와는 달리 심하게 오염된 수면의 극한이 rigid wall일 수 없음을 알 수 있다.

Fig. 17은 약간 오염된 수면과의 상호작용을 통해 나타나는 수면에서의 속도 벡터와 그때의 오염물 밀도를 보여 준다. 링의 윗부분이 수면과 가까이 있어 upstream 쪽으로의 속도가 두드러지고 reconnection이 완료됨에 따라 중앙선을 따라 downstream 쪽으로의 속도 성분이 나타나고 있다. 각각의 수면속도에 대응되는 오염물의 분포는 초기의 링 상부의 수면이 깨닫해지는 -Reynolds ridge의 형성 (Scott[1982]) -경향에서 reconnection이 완료되며 링의 아래부분의 영향으로 약하지만 shock structure가 형성되어, downstream 쪽으로 옮겨감을 보여주고 있다.

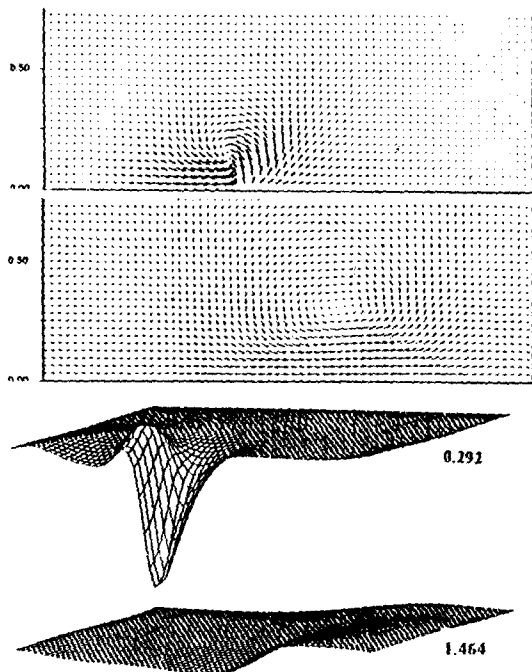


Fig. 17 Surface velocity at the top surface and surfactant density for weakly contaminated case.

7. 결 언

수면하 보오텍스 유동과 자유표면과의 상호작용으로 야기되는 몇몇 문제들을 실험적이고 해석적인 방

법으로 고찰해 보았다. 2차원 수치해석을 이용한 pair vortex와 자유표면의 상호작용의 연구는 설정가능한 거의 모든 문제들에 대한 해가 가능하다. 자연스럽게 생성될 수 있는 pair vortex는 자유표면 근처에서 서로 중심선으로 부터 멀어지며 core 상부에 약간의 음의 수면 변형을 (scar-like) 일으키고 striation의 발생은 잔류 보오텍스의 인장(stretching)작용으로 이해될 수 있다.

실험으로 실제현상을 이해하려는 과정에서 부딪치게 되는 척도영향을 살펴보고 3차원 문제의 이해를 돕기 위해 큰 규모의 보오텍스링의 자유표면과의 수직층들을 실험적으로 고찰하였다. Froude 수의 변화에 따라 수면변형의 정도가 달라지는 외에 큰 Froude 수의 경우 axisymmetric short wave가 core 상부의 주된 수면 강하에 앞서 전파됨을 알 수 있고 상호작용 후기는 vortex filament의 자유표면에서의 재결합에 따른 짧은 3차원 표면파들의 생성으로 말하여질 수 있음을 보였다. 수치해석을 통한 결과와의 비교는 실험에서 측대칭이 유지되는 순간까지 여러 특성들이 정량적으로 일치함을 알 수 있었으며 측대칭이 파괴되는 시간영역중의 현상의 해석을 위해 완전 3차원의 문제설정이 필요함을 알 수 있었다.

Vortex particle method를 이용한 보오텍스링의 수면과의 경사진 층들은 작은 Froude 수의 실험적 결과에 근거하여 선형의 자유표면 조건을 적용하여 해석하였다. Vortex 입자의 수를 적당히 조절하고 약간의 점성영향을 고려하면 vortex reconnection 현상을 잘 재현할 수 있으며 얻어진 결과는 -reconnection time scale 등- 현존하는 실험결과와 잘 일치한다. Vortex filament가 자유표면에서 재결합할 때 큰 pressure impulse가 수면에 가해지고 이로 인하여 원래의 보오텍스링의 크기보다 작은 수면파들이 생성됨을 알 수 있었다. 이와같은 원리를 이해하고 vortex reconnection에 따른 수면파의 생성을 간단한 pressure impulse 모델로 해석적으로 살펴 보았다. 해석 모델이 재결합과정의 상세한 국부요인들을 반영하지 않는 관계로 재결합지역 근처에서의 3차원 모델과의 비교는 용이하지 않지만 파의 전파의 정성적 특성은 상당히 유사하게 재현될 수 있음을 알았고 vortex reconnection 자체의 체계적 연구가 뒤따른다면 유용하게 쓰일 수 있는 모델이 될 것으로 사료된다.

수면 오염물질의 수면하 유동에 미치는 영향은 Bernal과 Kachman의 실험에서 보여주는 vortex

filament의 수면에서의 재결합이 거부되는 것으로 뚜렷하게 알 수 있다. 비록 낮은 Reynolds 수에 국한된 계산이지만 이러한 현상의 주원인인 수면하 2차 보오텍스의 생성을 보였다. 2차원 vortex pair의 경우와 달리 3차원의 경우 rigid wall과 심하게 오염된 수면과는 수면과 수직인 축에 대한 유체회전의 억제여부 때문에 서로 다른 현상을 유발함을 알 수 있었다. 계산결과로 얻어지는 surfactant의 분포와 수면에서의 속도 분포등은 실험으로 규명하기 어려운 정보들로써 Reynolds ridge의 형성을 이해하게 해준다.

Aknowlegments

본연구비는 미국 Office of Naval Research 및 한국 과학 재단의 연구비 보조로 이루어졌음.

참 고 문 헌

- [1] Bernal, L.P. and Kwon, J.T., "Vortex Ring Dynamics at a Free Surface", *Phys. Fluids A*, Vol.1, No.3, 1989.
- [2] Bernal L.P. and Kachirnan, N., private communication.
- [3] Bernal L.P. and Madnia, K., "Interaction of Turbulent Round Jet with the Free Surface", *Proc. 17th Symp. on Naval Hydrodynamics*, The Hague, The Netherlands, 1988.
- [4] Crow, S.C., "Stability Theory for a Pair of Trailing Vortices", *AIAA J.*, Vol.8, 1970
- [5] Hirska, A., "An Experimental Investigation of Vortex Pair Interaction with a Clean and Contaminated Free Surface", *Ph.D. Thesis*, The University of Michigan, 1990.
- [6] Kasischke, E., Meadows, G. and Jackson, P., "The use of Synthetic Aperture Radar to Detect Hazards to Navigation", *ERIM Report*, Ann Arbor, Michigan, 1984.
- [7] Kwon, J.T., "Experimental Study of Vortex Ring Interaction with a Free Surface". *Ph.D. Thesis*, The University of Michigan, 1989.
- [8] Leonard, A., "Vortex Methods for Flow Simulation", *JCP*, Vol.37, 1980.
- [9] Leonard, A., "Computing Three-Dimensional Incompressible Flows with Vortex Elements", *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol.17, 1985.
- [10] Lugt, H.J., "Vortex Flows in Nature and Technology", *John Wiley and Sons*, NY, 1983.
- [11] Sarpkaya, T., "Trailing Vortex Wakes on the Free Surface", *Proc. 16th Symp. on Naval Hydrodynamics*, National Academy Press, 1986.
- [12] Scott, J.C., "Flow Beneath a Stagnant Film on Water: Reynolds Ridge", *JFM*, Vol.116, 1982.
- [13] Faical, T., Unverdi, O., Song, M. and Tryggvason, G., "Collision of Viscous Vortices with a Free Surface and Density Interfaces", *Proc. Applied Mechanics and Biomechanics Summer Conf.*, Columbus, Ohio, 1991.
- [14] Song, M., Bernal, L.P. and Tryggvason, G., "Head-on Collision of a Large Vortex Ring with a Free Surface", *Physics of Fluids, A* Vol.4, No.7, 1992.
- [15] Song, M. and Tryggvason, G., "Numerical Investigation of an Oblique Collision of a Vortex Ring with a Clean Free Surface", *Proc. 19th Symp. On Naval Hydrodynamics*, Seoul, Korea, 1992.
- [16] Tryggvason, G., Unverdi, O., Song, M. and Abdollahi-Alibeik, J "Interaction of Vortices with a Free Surface and Density Interfaces", *Lectures in Applied Mathematics*, Vol.28, 1991.
- [17] Winckelmans, G., "Topics in Vortex Methods for the Computation of Three-and Two-Dimensional Incompressible Unsteady Flows", *Ph.D. Thesis*, CALTECH, 1989.
- [18] Yu, D. and Tryggvason, G., "The free Surface Signature of Unsteady, Two-Dimensional Vortex Flows", *JFM*, vol. 218, 1990.