

이중유벽 사이에 가두어진 기름층의 거동특성

도덕희⁽¹⁾, 현범수⁽¹⁾, 최성환⁽²⁾, 홍성대⁽²⁾

On Oil-Water Interface of Oil Layer Contained in Tandem Oil Fences

by

D.H. Doh⁽¹⁾, B.S. Hyun⁽¹⁾, S.H. Choi⁽²⁾ and S.H. Hong⁽²⁾

요 약

이중유벽 사이에 가두어진 기름층과 전방 유벽의 끝에서 발생하는 보오텍스 거동간의 관계를 보기 위하여 파노라마 PIV 기법을 사용하였다. 물-기름 자유경계면 근처의 순간 및 시간평균 경계층 유속분포를 계측하여 경계면 상의 전단응력 도출가능성을 확인하였다. 본 기법을 사용하면 자유경계면의 거동이 작거나 규칙적인 경우 경계면상 전단층내 상세 유동구조를 파악하기 충분한 정도의 해상도를 가진 결과를 얻을 수 있다고 판단되었다.

Abstract

A panoramic-PIV technique is employed to characterize the travelling tip vortices and the profile of oil-water interface in the tandem fence arrangement. Instantaneous as well as time-averaged velocity profiles of the water layer close to the interface were obtained to evaluate the possibility of measuring the shear stress distribution on oil-water interface. It was proven that the present technique could provide some quality data precise enough to resolve detailed flow structures inside a shear layer formed on oil-water interface provided it is nearly stationary.

Keywords: 이중유벽 (Tandem Oil Fence), 파노라마 PIV (Panoramic-PIV), Tip Vortex, 물-기름 경계면 (Oil-water Interface), 전단응력 (Shear Stress)

I. 서 언

해상에 유출된 기름의 포획능력을 향상시키기 위하여 이중유벽을 설치하여 두 유벽사이에 기름을 가두는 방안이 제시된 이래 이에 대한 개괄적인 연구가 수행된 바 있으나 [1][2], 유벽사이에 가두어진 기름층의 상세한 거동특성에 대하여 정량적

인 결과가 제시된 바는 아직 없다. 한편, 도덕희 등 [3]은 이중유벽사이에 가두어진 기름층의 거동을 연구하기 위한 첫단계로서 기름층이 없이 이중유벽만 설치된 경우의 해수유동을 PIV를 이용하여 관측한 바 있다. 그 결과 본 문제가 이중유벽의 끝에서 발생하여 하류로 전개되는 Tip vortex가 전체 유동장에 미치는 영향이 대단히 큰 비정

(1) 한국해양대

(2) 한국해양대, 대학원

상 (unsteady) 유동임을 알 수 있었다.

본 연구에서는 이러한 비정상 유동장에서 이중 유벽 사이에 가두어진 기름이 빠져나가는 주된 메커니즘을 규명하기 위하여 기름-물 경계면유동을 관측하고, 해수층으로부터 기름층에 전달되는 힘의 역학적 메커니즘을 조사하고자 한다. 먼저 해수와 기름의 경계면이 조류방향에 거의 평행하고 안정되어 있는 저속흐름에서는 기름층의 거동은 경계면에서의 마찰응력에 의하여 지배될 것이다. 물론 유속이 증가하면서 기름층이 불안정해 지고 특히 유벽의 끝에서 발생하는 주기적인 보오텍스 열로 인한 기름층의 형상변화에는 마찰력이외에 압력이 큰 영향을 미치게 되어 매우 복잡한 양상의 흐름이 형성되게 된다. 본 논문에서는 유속의 변화에 따른 기름층의 이러한 거동변화를 PIV를 이용하여 거시적인 관점에서 파악하고자 한다. 또한 기름층이 비교적 안정되어 있는 저속의 경우에 대하여 경계면 상의 마찰응력을 구하기 위하여 경계면 부근에서의 해수경계층내 유속분포를 미시적인 시각으로 정량화함으로써 기름층의 이동과 경계면 상의 마찰응력 간의 관계를 조사하고자 시도하였다. 그러나 기름층이 불안정해져서 경계면이 시간에 따라 변화하는 유속범위에서는 경계면 부근 전단층 (shear layer)의 안정적 계측이 어렵기 때문에 본 논문에서는 그 계측가능성만을 조사하였다. 이를 위하여 기존의 PIV 계측시스템보다 공간해상도가 높은 Panoramic-PIV 계측시스템[4]을 사용하여 유동장내 작은 와구조 혹은 미세거동을 파악하였다.

2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 이중유벽의 형상을 나타내며 실험조건은 길이 (L)가 240mm, 홀수 (d)가 40mm로서 $L/d=6$ 이다. 사용한 기름은 콩기름 (specific gravity = 0.91)으로서 상온에서의 점성이 대략 50 cst이다. Fig. 2는 이중유벽 사이에 가두어진 기름층과 물층 경계면의 역학적 거동해석을 위하여 계측부 크기가 1m x 0.3m x 0.3m인 소형회류수조에서의 PIV실험 개요도를 나타낸다.

이중유벽 앞쪽 벽부와 뒤쪽 벽부 사이의 유동부분을 동시에 광역으로 관찰하기 위하여 3대의 상용카메라(Sony, SSC-M370)를 Fig. 2처럼 계측부에 대하여 평행으로 나란히 배치하였다. 이때 각 카메라의 영상은 분리된 형태로 나타나기 때문에 한 장의 파노라마 영상을 얻기 위해서는 각 카메라의 영상을 합성하여야 한다. 올바른 영상합성을

하기 위해서는 각 카메라간의 교정작업을 하여야 한다. 이는 Fig. 3(a), (b), (c)에 나타나 있는 것과 같이 실험을 진행하기전에 교정판의 위치정보를 미리 입력하여 본 실험시 영상합성의 정보로 이용하기 위한 작업이다.

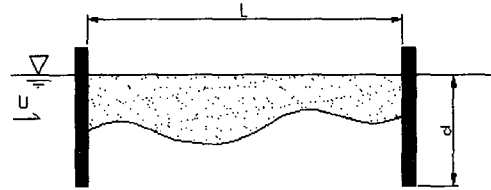


Fig. 1 Tandem Oil Fences

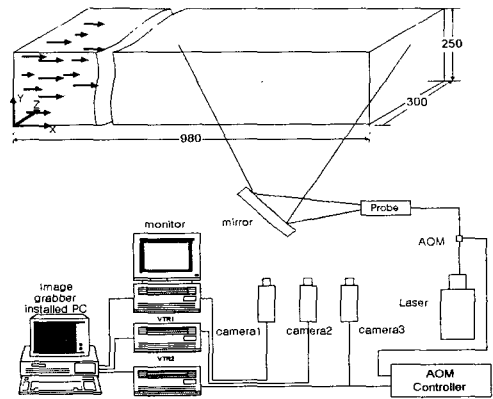
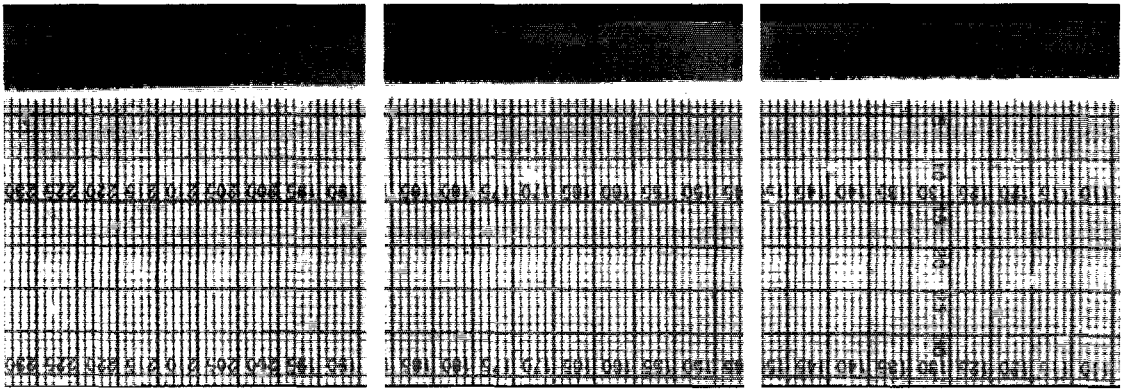


Fig. 2 Panoramic-PIV Measurement System

이후 각 카메라 영상의 합성점들의 상대적 위치를 기준으로 실험영상에 대하여 합성을 실시하면 하나의 파노라마 영상을 얻어낼 수 있는데, 실제 유동장에 대한 파노라마 영상을 얻기 위해서는 각 카메라로부터 얻어진 영상이 동시에 기록이 되어야 한다. Fig. 4는 이렇게 얻어진 실제 순간유동장에 대한 합성영상을 나타내는데 이러한 각 합성영상들의 연속적인 화상들이 속도계측에 이용되게 된다. 교정작업이 끝나면 이중유벽을 설치하고 기름을 이중유벽사이에 20mm의 두께로 주입한 후 직경이 100 μ m정도의 나일론입자 (비중 1.02)를 회류수조에 투입한다. 충분히 유동이 정상으로 되면 수조아래에 설치된 거울을 이용하여 상방향으로 회류수조의 계측부 중앙단면에 대하여 50-60cm 정도로 2차원 광원 (Ar-Ion Laser, 500mW)으로 가

이중유벽 사이에 가두어진 기름층의 거동특성



(a) Image of Camera 1

(b) Image of Camera 2

(c) Image of Camera 3

Fig. 3 Image of Calibration Plate for Panoramic-PIV.

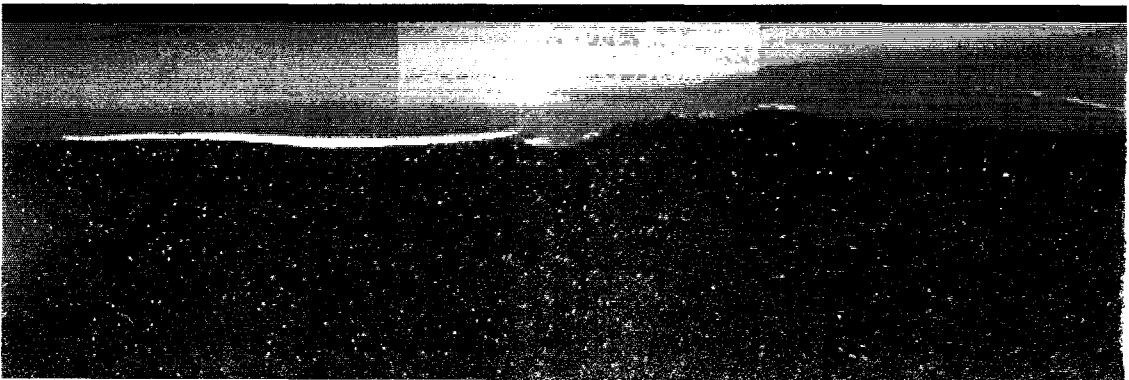


Fig. 4 Composed Image from the Images of Cameras, 1, 2, and 3

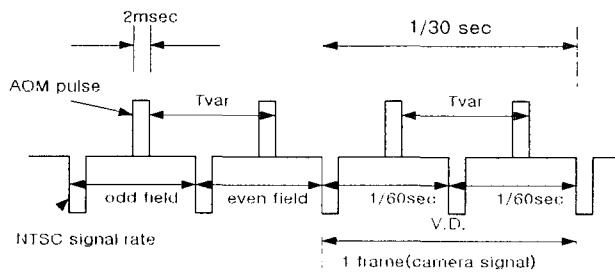


Fig. 5 Signal Relation Between NTSC (Camera Signal) and AOM Signal

시화 한다. 2차원 광원의 형성을 위하여는 LLS (Laser Light Sheet) Probe를 이용하였다.

3대의 카메라 (SSC-M370)를 통하여 가시화 된 영상은 VCR1 (Panasonic, AG-7350) 혹은 VCR2 (Sony, SLV-RS1) 및 VCR3 (SLV-595HF)와 호스트컴퓨터 (Pentium 266MHz)에 내장된 이미지 그래픽 (DT64)에 기록된다. 기록된 이미지는 영상합성과정을 거쳐서 이들 화상에 대하여 계조치 상호상관법[5]에 의거하여 속도벡터를 구한다. 한편 측정영역 내에서의 속도계측의 향상을 위하여 AOM (Acousto-Optic Modulator)시스템을 도입하였다[6]. 이 시스템을 이용하면 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 일반 CCD카메라의 고정된 기록시간 (1/60sec)에 대하여 레이저광원을 원하고자 하는 시각에 간헐적으로 단속이 가능하므로 계측영역을 통과하는 입자의 이동속도가 비교적 빠른 경우 속도벡터의 시점과 종점의 coding이 가능하게 된다. 특히, 고 해상도의 속도계측을 실시하고자 할 경우에는 계측영역이 확대되므로 이 영역을 통과하는 입자들의 상대속도가 빠르게 되어 속도계측 성능이 저하될 우려가 있으나 이 AOM시스템을 이용하면 계측의 성능향상을 도모할 수 있다.

카메라 및 VCR로부터 불러 들여지는 화상은 아날로그 신호이므로 이미지그래버에서 256계조의 밝기 정보를 갖는 화상으로 변환시킨 다음 64 프레임 (Frame)의 화상을 128장의 피일드 (Field) 화상으로 전환시킨 뒤 전술한 계조치상호상관법에 의하여 입자패턴의 추적을 행함으로써 유동장의 속도분포를 얻는다. 이때 두 피일드 화상간의 시간간격은 6msec로 하였다. 즉 Fig. 5에서 Tvar을 6msec로 고정시켰으며 이때 펄스 폭은 2msec로 하였다. 계조치상호상관법에 의하여 속도를 구함에 있어서 상관영역의 크기와 탐색영역의 크기를

결정하여야 하는데 실험하는 과정에서 적절한 경험치를 적용하여야 한다.

일반적으로 화상의 데이터를 취급할 때 벡터의 종점을 결정함에 있어서 픽셀해상도에 의존하는 경우에는 상하좌우방향으로 최대 ± 1 픽셀의 불확실성분이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 1픽셀 이내에까지 종점을 결정할 수 있는 서브픽셀 보간법[7]을 도입하였다. 또한 얻어진 속도벡터는 상관영역의 크기나 탐색영역의 크기에 따라서 에러벡터를 측정할 수도 있는데 본 연구에서는 유동의 연속성을 고려한 에러벡터법[8]을 도입하여 오류벡터를 최대한 줄였다.

3. 실험결과 및 토론

Fig. 6은 Fig. 4와 같은 연속된 화상에 대하여 전술의 계조치상호상관법으로 임의의 시간으로부터 1/30sec간격으로 속도분포를 얻어낸 결과의 예를 나타낸다. 그림의 좌측에 이중유벽의 첫 번째 유벽이 있으며 이로부터 120mm가량 떨어진 하류까지의 유동상태를 나타내고 있다. 유속은 0.28 m/s 정도이며, 속도분포 도출시 기름층 내부와 물층은 별도로 구분됨이 없이 해석되었다.

파노라마 PIV계측기술을 이용하여 유동의 구조를 살펴 본 결과 CCD카메라 한 대로써 계측을 실시하는 일반적인 PIV 기술로는 볼 수 없는 대, 소규모의 와구조들이 자세히 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 기름층과 물층사이의 경계면에 대한 역학적 메커니즘의 해석에 도움을 줄 수 있을 정도라고 여겨진다.

이중유벽내부의 전체적 유동거동을 파악하기 위하여 유속에 따른 유동장의 거동을 살펴보았다. Fig. 7, Fig. 8, 및 Fig. 9는 초기 주입 기름층의

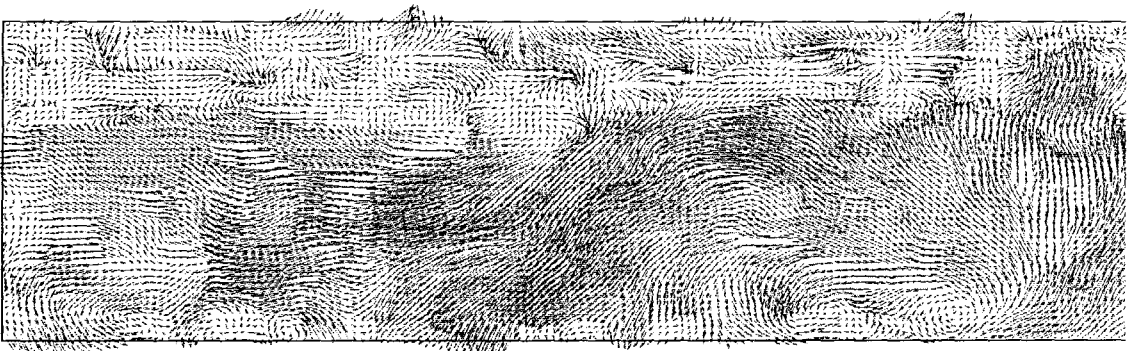
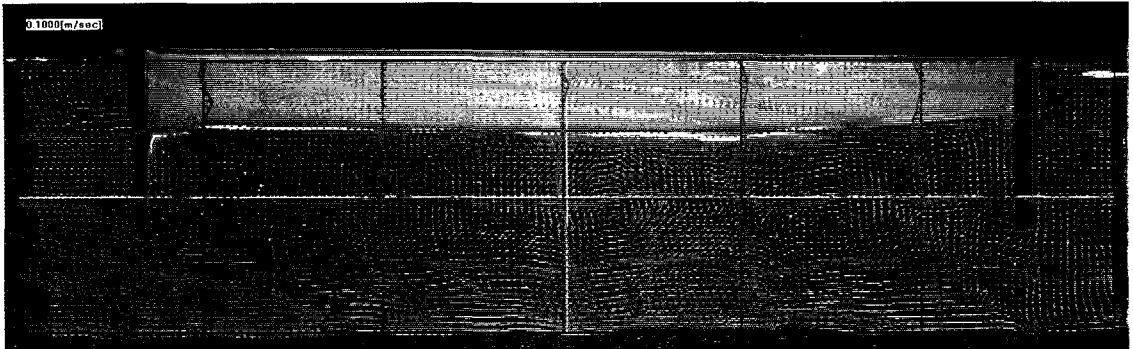
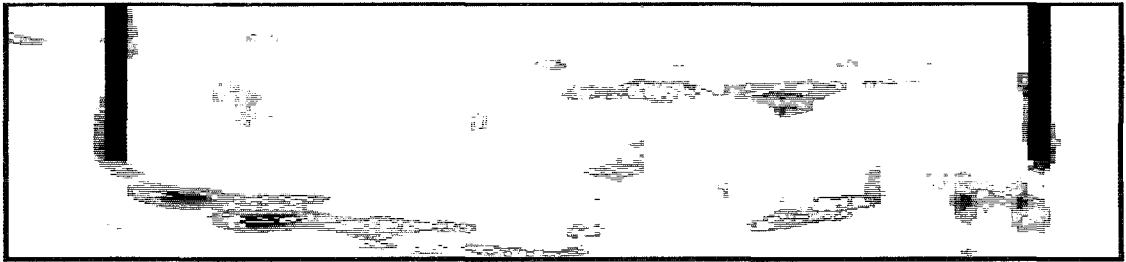


Fig. 6 Instantaneous Velocity Vector Distribution Obtained by Panoramic-PIV.

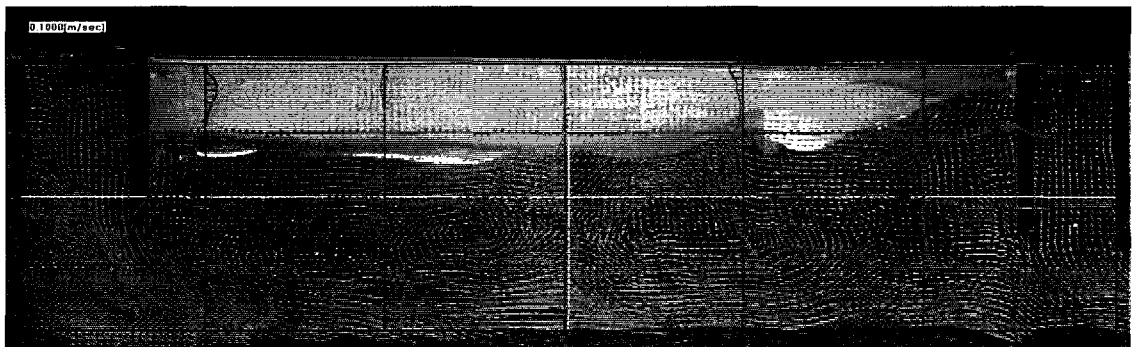


(a) Velocity Vector Distribution

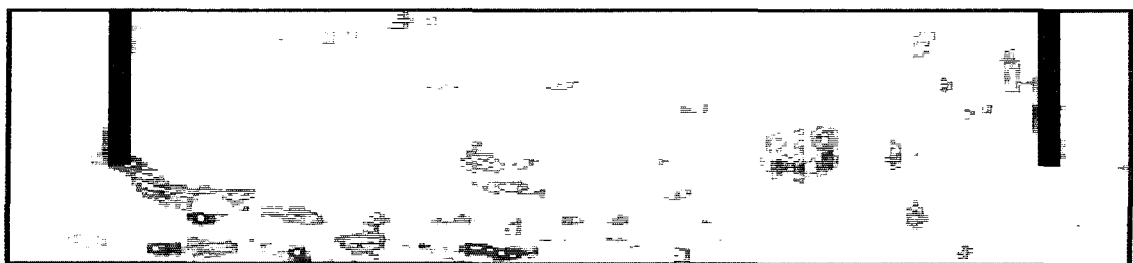


(b) Vorticity Distribution

Fig. 7 Instantaneous Flow Field Between Fences at $U = 0.14$ m/s ($Fr_d=0.745$)



(a) Velocity Vector Distribution



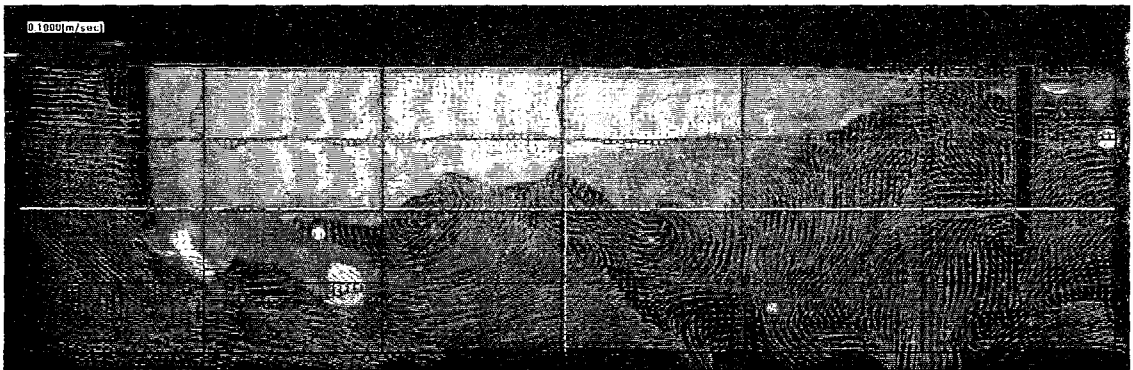
(b) Vorticity Distribution

Fig. 8 Instantaneous Flow Field Between Fences at $U = 0.22$ m/s ($Fr_d=1.171$)

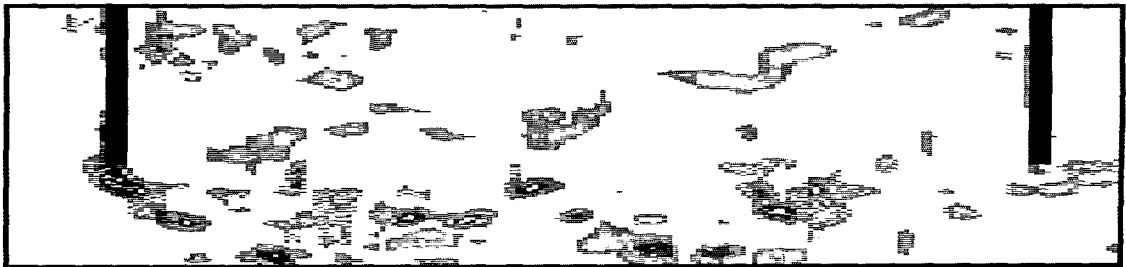
두께가 $d_o=20\text{mm}$, 펜스간격은 $L/d = 6$ 이고, $Fr_d = 0.745$ ($U=0.14\text{ m/s}$), 1.171 ($U=0.22\text{ m/s}$), 1.491 ($U=0.28\text{ m/s}$)일 때의 이중유벽 내부 유동장의 순간속도분포와 순간와도분포를 나타내고 있다. 여기서 $Fr_d = U / \sqrt{\Delta g d}$ 로서 Densimetric Froude수이며, U 는 수조내의 평균유속, g 는 중력가속도이다. 또한 Δ 는 물과 기름의 밀도비로서 $\Delta = (\rho_w - \rho_o) / \rho_w$ 이다. 순간와도 분포에서 점선으로 표시된 것이 양의 와도값 (시계반대방향)이고 실선은 음의 값을 나타낸다.

먼저 Fig. 7에서와 같이 유속이 낮을 때, 즉 Fr_d 가 작을 때에는 기름층이 이중유벽 사이의 전역에 걸쳐서 안정적이 되는 반면 Fig. 8이나 Fig. 9와 같이 유속이 커질수록 기름층이 점점 불안해 짐을 알 수 있다. 즉, 상류측 유벽 끝에서 발생한 tip vortex 들이 후방 벽으로 향하여 전개되어 나가면서 후방의 벽에 부딪히면서 반사되기도 하고 벽의 후방으로 빠져나가는 등 보오텍스들 간의 상호작용으로 인하여 유벽사이의 내부 유동장에는 다양한 와구조들이 형성되는 것을 볼 수 있다. 이 tip vortex의 이동경로를 따라서 전체유동장은 그림

(b)에 잘 나타나 있듯이 크게 두 부분으로 구별되는데 그중 하나는 유속이 빠른 외부유동이며, 나머지 구간은 두 유벽과 기름층, 그리고 tip vortex의 경로로 예측되는 영역 사이에 가두어진 저속영역이다. 이 저속영역의 유동은 두 유벽사이에서 움직이는 여러개의 tip vortex들로 구성되어 있으나 기름-물 경계면에 미치는 영향이 Fig. 7의 경우에는 아직 그리 크지 않기때문에 경계면의 형상이 유벽 끝부근을 제외하고는 전반적으로 안정되어 (stable and nearly stationary) 있음을 보여주고 있다. 이는 기름-물 경계면 부근에서 물층의 유속이 비교적 느리기 때문에 경계면상 전단응력 발생이 별로 이루어지지 않으며 그 방향도 대체적으로 주흐름방향에 평행하기 때문이다. 경계면 형상에 미치는 보오텍스 들에 의한 비정상성의 영향도 그리 크지 않기 때문에, 본 문제는 유속이 주기적으로 바뀌는 흐름 중에 놓여있는 평판경계층 주위 유동과 흡사한 유동의 형태가 예상된다. 다만 하류(오른쪽)에 있는 유벽의 전면에 있는 상대적으로 큰 와류가 그 부근의 기름층에 역 흐름방향의 전단응력을 부가시켜 기름층을 미소하나마 전방으로 이동시키는 경향을 나타내고 있다.



(a) Velocity Vector Distribution



(b) Vorticity Distribution

Fig. 9 Instantaneous Flow Field Between Fences at $U = 0.28\text{ m/s}$ ($Fr_d = 1.491$)

유속이 다소 증가한 Fig. 8은 Fig. 7과 상이한 양상을 보여주고 있다. 먼저 저속영역에서의 와류들의 세기가 강해져서 전체적으로 재순환영역(recirculation zone)이 잘 발달되어 역흐름방향의 유속이 증가되었고, 이로 인하여 기름-물 경계면에 상대적으로 강한 역방향 전단력이 작용하여서 기름층이 상류쪽(왼쪽) 유벽 방향으로 물리는 경향을 보여주고 있다. 또한 하류(오른쪽)의 유벽에서 반사된 강한 와류가 그 부근의 기름층에 높은 압력장을 야기시켜서 불안정한 경계면흐름을 유발하고 있다. 이러한 불안정한 현상은 다른 경계면에서도 간헐적으로 나타나고 있으며 전체적으로 유동의 불안정성을 증폭시키고 있다. 이로부터 유속이 빨라질수록 tip vortex 발생의 주기가 짧아짐과 동시에 기름층으로 전달되는 비정상력도 커지게 되어 경계면이 불안정해짐과 아울러 상류측 유벽에서의 기름층의 두께가 점점 두꺼워질 것임을 추론할 수 있다. 이러한 경계면 유동은 안정적이지 않기 때문에 경계면의 형상은 시간에 따라 변하는 파동현상을 나타내게 되며 따라서 경계면상의 전단응력분포의 계측을 위하여는 Reynolds 평균법 보다는 triple decomposition과 같은 보다 세련된 계측기법이 요구될 것이다.

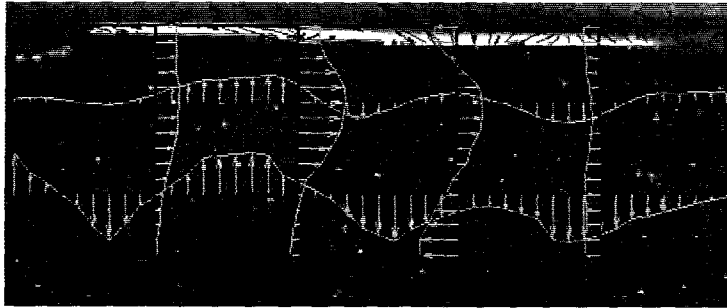
이 주기적인 비정상력(unsteady force)이 어느 정도 이상이 되면 상류 유벽쪽으로 몰려드는 단위 시간당 기름의 체적증가와 함께 상류 유벽쪽으로 몰린 기름층의 두께가 계속하여 두꺼워 지다가 유벽의 두께와 같아지게 되면 결국 상류측 유벽의 tip vortex와 함께 기름이 하류방향으로 떨어져 나가게 됨을 논할 수 있는데 Fig. 9는 이를 잘 예시해 준다. 이는 Fig. 8에서와 관찰한 물-기름 경계면에서 유기된 역흐름방향 전단력과 비정상 와류에 의한 변동압력에 의한 결과인데, Fig. 9에서처럼 물-기름 경계면이 총체적으로 불안정해지면 경계면 부근에서 경계층 개념은 더 이상 성립하지 않게 된다. 불안정한 경계면에서의 에너지 전달 메카니즘도 마찰력보다는 압력에 의하여 지배되리라 여겨지기 때문에 이 경우 경계면에서의 전단응력분포는 거시적인 관점에서 큰 의미가 없다. 이상에서 볼 때 본 논문에서 실험한 $L/d=6$ 인 경우에 포획된 기름은 전부 다 상류측에서만 유출되는 흥미로운 Failure mode를 나타내었다.

위와 같은 사실들은 상류측으로부터 떠나려오는 vortex가 두 번째 유벽의 전면에 부딪히는 주기와 이중유벽 내부 유동장의 변화가 어떤 관계로 되어 있는지와 이들 vortex들에 의한 기름과 물의 전단층 사이에 작용하는 역학적 관계가 어떻게 되는

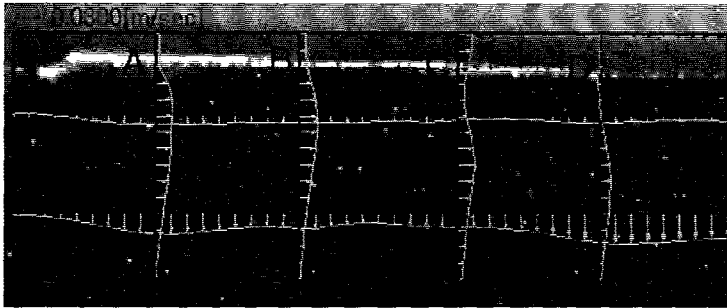
지에 대한 연구의 필요성을 암시한다. 이에 대한 보다 상세한 연구를 위한 첫 번째 단계로서 기름과 물의 경계면 부근에서의 속도분포를 조사하여 본다. Fig. 10(a)와 Fig. 11(a)는 유속이 각각 $U = 0.14, 0.22$ m/s인 경우 파노라마 PIV 계측용 카메라 3대중 가장 상류 측에 설치되어 있는 카메라의 화상만을 줌인(Zoom-in)한 순간유속분포 계측결과를 나타내며 Fig. 10(b)과 Fig. 11(b)는 이에 대한 순간속도분포 영상을 약 2초간 (64 프레임) 평균하여 얻어진 평균유속분포를 나타낸다. 각 화상간의 시간간격 Δt 는 1/30초이고 속도벡터분포 측정영역의 크기는 가로 x 세로가 68mm x 24mm로 클로즈업 되었다. 이때 $U = 0.14$ m/s ($Fr_d = 0.745$)인 경우 물-기름 경계면이 거의 잔잔하여 평판경계층내부 유동구조와의 정성적인 비교가 가능하리라 여겨지므로, 유벽끝에서 생성되는 와류열에 의하여 지배되는 유동장 내의 물-기름 경계면유동을 주기성을 가진 흐름 중에 놓여있는 평판주위의 문제로 근사적으로 치환할 수 있겠다. 이는 물의 점성이 기름에 비하여 무시할 수 있을 정도가 된다면 더욱 타당성을 갖게 된다.

먼저 Fig. 10(a)의 경우 전방 펜스의 후방에 형성된 재순환영역과 펜스 끝에서 생긴 보오텍스 등에 의하여 지배되는 강한 소용돌이가 유동형태를 보여주고 있다. 그러나 이러한 보오텍스 유동은 시간에 따라 주기적으로 변하기 때문에 그림 (b)의 시간평균 그림은 그림 (a)에 예로 보인 순간속도분포에 비하여 완만한 유동특성을 보여주고 있다. 기름-물 경계면에서의 경계층유동을 명확히 보이기에 실험의 정도가 다소 부족하나 흐름의 평균 유동이 주흐름방향에 가깝게 형성되는 A, B점 부근에서는 경계면 상의 경계층구조가 비교적 잘 보이고 있다. 경계층 두께는 약 3-4mm 정도로 예측되었다. 한편 C, D점의 속도분포는 흐름의 방향이 주흐름방향과 매우 다른 영역이기 때문에 경계층 가정을 적용하기에는 다소 무리가 있는 지점으로 판단된다. 전체적으로 볼 때 Fig. 10에서와 같이 경계면이 잔잔한 경우 기름-물 자유경계면상의 유속분포 계측이 어느정도 가능하였으나 이 경우에도 실제 기름-물 자유표면은 낮은 주파수로 동요하는 것이 관찰되는 등 그림 (b)와 같이 시간평균한 유속분포를 얻기 위하여는 자유표면의 동요를 고려한 평균유속분포를 얻어야 함을 알 수 있었다. 이를 위하여 조만간 보다 정도높은 계측법을 개발·사용할 예정이다.

Fig. 11은 $U = 0.22$ m/s ($Fr_d = 1.171$)에서의 순간유속과 시간평균 유속분포를 나타낸다. 그림

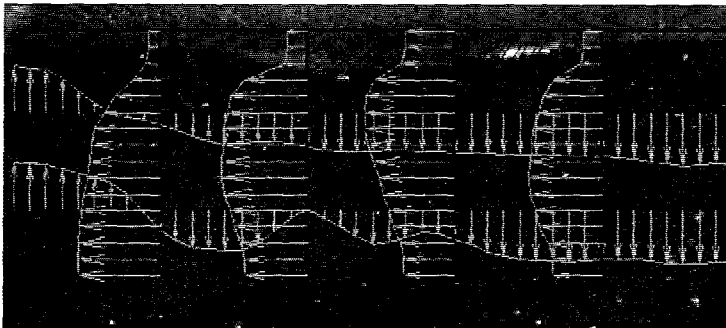


(a) Instantaneous Velocity Profiles

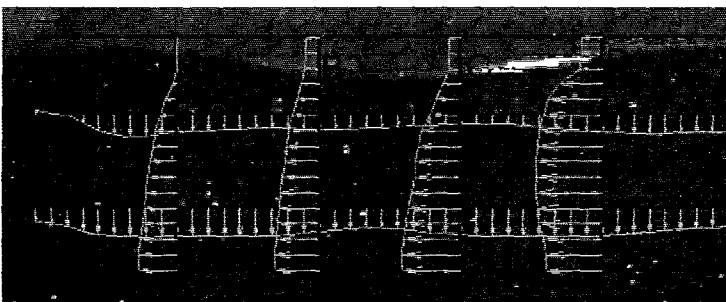


(b) Time-Averaged Velocity Profiles

Fig. 10 Closeup View of Flow Field Near the Oil-Water Interface at $U = 0.14$ m/s



(a) Instantaneous Velocity Profiles



(b) Time-Averaged Velocity Profiles

Fig. 11 Closeup View of Flow Field Near the Oil-Water Interface at $U = 0.22$ m/s

(a)에서 볼 수 있듯이 기름-물 경계면 형상이 시간에 따라 심하게 요동함을 짐작할 수 있으나 경계면에서의 순간유속분포는 경계층 분포의 구조를 비교적 잘 보여주고 있다. 그러나 그림 (b)의 시간평균분포는 경계층의 두께가 매우 크고 유속분포가 완만히 변하는 등 경계층구조가 잘 나타나 있지 않다. 이는 기름-물 경계면이 심하게 요동하는데 주로 기인하는 것으로 여겨지는데, 만일 시간에 따른 경계면의 이동을 고려하여 선택적으로 유동장을 해석한다면 이러한 오차는 많이 개선되리라 판단된다. 유동이 매우 복잡하고 유속이 빠른 $U = 0.28 \text{ m/s}$ ($Fr_d=1.491$)에서의 경계면유동 해석은 현 시점에서 시도되지 않았다.

끝으로 물로부터 기름층으로 전달되는 전단력을 예측하기 위하여 Fig. 10(b)에 나타나 있는 시간평균 유속분포로부터 A, B, C 및 D 지점에서의 유속분포를 $(u/U) = (y/\delta)^{1/n}$ 의 관계를 설정하여 조사하여 보았다. 경계층의 정의상 y 는 물-기름경계면에서 물층으로의 수직거리, δ 는 시간평균한 물 경계층의 두께를 나타낸다. 참고로 평판 경계층 유동의 경우 층류는 $n \sim 2$, 난류는 $n \sim 7$ 에 대략적으로 비례하고 있다. 기실 정상층류유동이 라면 시간평균한 값이나 순간유속값이 서로 같은 값을 주어야 할 것이나 유동의 비정상성, 계층상의 오차 등으로 다소 차이가 발생할 수 있다고 보여진다. 여러 종류의 불확실성 때문에 명확히 단정하기는 어려우나 비교적 정상유동에 가까운 $U=0.14 \text{ m/s}$ 인 경우에 A, B, C 점에서 $1.8 \leq n \leq 2.4$ 정도로 얻어졌다. 이로부터 기름-물 경계면 유동은 저속에서는 층류유동인 것으로 생각할 수 있었다. 한편 Fig. 11의 경우는 시간평균유동장 계층의 부정확성으로 인하여 아직 해석되지 못하였는데, 움직이는 경계면을 고려한 경계층 해석기법이 개발되는대로 해석을 시도해 볼 예정이다. 또한 추후 계층된 유속분포를 적분함으로써 구할 수 있는 Integral parameter (δ^* , θ , H 등)를 사용하여 유동이 층류인지 난류인지를 보다 명확히 분류해 보고자 한다.

비록 실험의 정도상 아직 명확한 결론을 내리기는 다소 무리가 있으나 현재 계층한 결과가 물-기름 경계면의 속도분포를 정성적으로나마 잘 보여주고 있기 때문에 추후 보다 정선된 실험결과를 바탕으로 신뢰성있는 결과를 보여줄 수 있을 것으로 판단된다. 경계면에서의 전단응력은 $\tau_w = \mu(du/dy)_{wall}$ 로 구할 수 있으므로 이들 값들로부터 위치와 시간의 변화에 따른 du/dy 를 구하게 된

다면 기름층과 물층간의 역학적인 유동특성을 규명하는데 사용될 수 있을 것이다. 끝으로 본 실험의 주요목적이 PIV를 이용한 유동장의 상세구조 계층가능성을 보는 것이었던 점에 비추어 추후 파노라마 PIV 기법은 많은 복잡한 유체역학 문제의 해결에 유용하게 응용될 수 있으리라 여겨진다.

4. 결론 및 제언

이상과 같이 파노라마 PIV 계층기술을 이용하여 이중유벽 사이의 유동특성을 조사한 결과는 다음과 같은 결론 및 제언으로 정리될 수 있다.

(1) 본 연구를 통하여 그동안 거시적인 유동장의 관찰에 주로 활용되어 온 PIV 기법이 미시적인 유동구조의 계층에도 훌륭하게 활용될 수 있음을 보였다. 순간유동장 내부의 상세한 순간속도분포를 얻음으로서 기름-물 경계면은 물론 이중유벽 사이에 발생하는 재순환영역과 tip vortex 등의 상세한 구조를 볼 수 있었다. 이로부터 기름층이 이동하는 경향과 물-기름 경계면의 전단력 간의 관계를 정성적으로 확인할 수 있었다.

(2) 하류측 유벽의 전방에 발생하는 강한 와류들은 부근의 기름층을 불안정하게 하면서 전체적으로 기름을 상류쪽으로 모으는 역할을 하였고, 상류측 유벽의 바로 뒷부분의 와류는 부근에 축적된 기름덩어리를 박리시켜서 유벽밖으로 유출시키는 역할을 하였다.

(3) 기름-물 경계면 부근의 유속분포를 조사하여 경계면에서의 shear rate를 도출하고자 하였다. 비정상유동, 이동경계면의 영향 등 여러 종류의 불확실성 때문에 결과의 신뢰도에 다소 문제가 있었으나 Densimetric Froude수가 0.745 일 때 경계층 유동은 층류경계층으로 판단되는 등 저속유동인 경우 상세유동장 해석에 파노라마 PIV가 훌륭히 사용될 수 있음을 보여줄 수 있었다. 또한 비록 매우 제한적인 경우이기는 하지만 기름-물 경계면상 경계층 계층은 저자가 아는 한 초유의 시도로써 그 의미를 부여할 수 있겠다.

(4) 현재 이중유벽 사이의 내부유동과 tip vortex와의 관계 및 기름-물 경계면에서의 전단력전달의 역학적 메커니즘에 대한 연구가 계속해서 진행되고 있다.

후 기

본 연구는 포항공과대학 부설 첨단유체공학연구센터와 한국해양연구소 선박해양공학분소의 연구비

지원으로 수행된 연구결과의 일부를 취합한 것임을 밝힌다.

참고문헌

- [1] 이정목, 강관형, "조류와 파랑중에서의 유벽의 보유성능의 이론 및 실험적 해석", 1997 한국해양환경공학회 추계학술대회 논문집, 기계연구원, Nov., 1997, pp.21-22.
- [2] 도덕희, 현범수, 최성환, 홍성대, "PIV를 이용한 이중격벽 사이의 유동특성에 관한 연구", 한국해양환경공학회 추계학술대회 논문집, 1998, pp.123-128.
- [3] 홍성대, 최성환, 백태실, 도덕희, 현범수, "파노라마-PIV계측기법의 개발", 대한기계학회 1999년도 춘계학술대회논문집(B), 1999, pp.26-30.
- [4] 木村, 高森, 井上, "相關を利用した流れの画像計測", 流の可視化, Vol. 6, No.22, 1986, pp.105-108.

- [5] 北條, 高島, "PIVにおける異常ベクトルの検出", 可視化情報, Vol.15, Suppl. No.2, 1995, pp.177-180.
- [6] Lee, C.M., K.H. Kang & N.S. Cho, "Prediction of Oil-droplet Motion and Containment of Spilt Oil with Tandem Oil Fences", Proc. of 4th KSME-JSME Fluids Eng. Conf., Haeundae, Pusan, 1998, Oct 18-21.
- [7] Kobayashi, T., Saga, T. Haeno, T., and Tsuda, N., 1991 "Development of a Real-Time Velocimetry Measurement System for High Reynolds Fluid Flow Using a Digital Image Processing Design", ASME FED-Vol.128, 1991, pp.1220-1227.
- [8] Utami, T., Blackwelder, R., "A Cross Correlation Technique for Velocity Field Extraction from Particulate Visualization", Exp. in Fluids, Vol.10, 1991, pp.213-223.