

몰수실린더에 의하여 생성되는 쇄파주위 점성유동의 고찰 (제3부 : PIV를 이용한 순간유동장 해석)

현범수*, 신용헌**, 최경신**

On the Viscous Flow Around Breaking Waves Generated by a Submerged Cylinder (Part 3 : Survey of Flow Field Using PIV Technique)

by

B.S. Hyun*, Y.H. Shin** and K.S. Choi**

요 약

본 연구는 PIV 기법을 사용하여 쇄파와 몰수체의 상호작용에 의한 점성유동장의 변화를 가시화 함과 아울러 순간유동장을 해석하는데 목적을 두고 수행하였다. 몰수깊이의 변화에 따른 쇄파와 실린더의 상호작용은 $S/D = 1.5$ 정도에서 부터 감지되기 시작하여 몰수깊이가 얕아질수록 상호작용이 크게 발생하였으며 $S/D = 1.0$ 이하가 되면 쇄파로 인한 와류가 실린더로부터 유기되는 와류를 압도하여 실린더 후방의 전반적인 와도분포를 심하게 변형시킴을 알 수 있었다. 이로 부터 PIV 기법은 와도분포 해석과 같은 비정상 보오텍스 유동장의 해석에 매우 유용한 방법임을 확인하였다.

Abstract

A breaking-wave caused by a cylinder moving under the free-surface is studied, which is designed to unveil the interaction between breaker and cylinder using PIV at CWC. The detailed structures of the vortical flow is obtained from the velocity field measured by PIV technique. The vorticity distribution behind the breaker and cylinder well demonstrates the vortices shedded from the cylinder as well as those originated from the breaker. It has been obvious that the vortices from breaker greatly affect the whole wake field at $S/D=1$. Certainly PIV was confirmed to be a very versatile means to investigate the complex flow fields such as breaking wave.

접수일자 : 1999년 8월 20일, 재접수일자 : 2000년 1월 21일

*한국해양대학교 조선해양공학부

**한국해양대학교 조선공학과 대학원

1. 서 언

수면하 낮은 물수깊이에서 정속으로 움직이는 물수체에 의하여 야기되는 강제쇄파는 파랑에너지가 난류에너지로 변환되어 소멸되는 메커니즘을 가지고 있으며, 쇄파 발생 시 중력파의 파경 부근에 와도가 강한 영역, 즉 회전자가 생긴다고 알려져 있다. Duncan [1]은 이로 인한 저항의 증가를 전수두의 계측으로 확인하였는데 이는 쇄파주위 유동이 Reynolds 수에 지배되는 점성유동임을 의미한다.

최근 Sheridan et al. [2]은 원형실린더에서 방출(shedding)되는 보오텍스와 자유표면 쇄파영역에서 발생한 보오텍스 간의 상호작용을 관찰하기 위하여 PIV (Particle Image Velocimetry)를 이용하여 동시계측한 순간유동분포를 사용하여 물체후류의 와도분포를 구한 바 있다. 그에 의하면 실린더의 물수깊이와 Froude수에 따라서 자유표면 쇄파에서 발생하여 하류로 전개되는 보오텍스의 크기와 방향이 크게 변화하며, 실린더와의 상호작용 양상도 다양함을 볼 수 있었다. 예를 들어 어떤 조건하에서는 실린더에서 방출된 1쌍의 보오텍스와 수면에서 생성된 보오텍스가 수면에 평행하게 배열되어 전개되나, Froude수가 증가된 상황에서는 쇄파에 의한 보오텍스가 아래 방향으로 진행하면서 실린더 상부에서 생성되어 방출되는 보오텍스를 짓누르는 등 보오텍스 들간에 매우 강한 상호작용 양상을 나타내고 있었다. 이러한 현상은 유동 자체가 비정상 (unsteady)적인 측면이 있음을 감안할 때 더욱 복잡할 것임을 예상케 하며 임계조건에 따라 현저히 다른 결과를 얻을 수 있음을 말해준다.

본 연구는 실린더에 의하여 생성되는 강제쇄파현상의 실험적 연구의 마지막 제3부이다. 제1부 [3]와 제2부 [4]에서는 실린더에 의하여 생성되는 쇄파를 평균유동의 관점에서 파형관측, 압력분포계측, 후류에서의 전수두손실 및 난류강도의 계측을 통하여 조사하였다. 그 결과 쇄파가 발생하는 지점의 파경사각은 약 12° 정도이며, 물수깊이의 변화에 따라서 실린더 표면에서의 유동박리점

이 상당히 지연된다는 사실을 알 수 있었다. 또한 쇄파저항은 명백히 점성저항의 일부로서, 쇄파에 의한 반류와 실린더에 의한 반류가 물체후방의 비교적 짧은 거리에서 서로 만나면서 반류 내부유동이 심하게 변화하고, 실린더에 의한 반류분포가 비대칭적이 됨을 볼 수 있었다. 그리고 난류용력 계측 결과 쇄파가 발생하는 부근에서 난류용력이 급격히 증가하면서 파랑에너지가 난류에너지로 변환되는 것을 확인하였다.

본 제3부에서는 쇄파유동장 해석에 PIV 기법을 사용하여 쇄파와 물수체의 상호작용에 의한 점성유동장의 변화를 순간유속의 관점에서 보다 자세히 해석하는데 목적을 두고 수행하였다. 먼저 사용한 PIV 기법의 정도를 확인하기 위하여 균일 유동과 2차원 실린더 후류의 Karman 와류열 (vortex street)에 대하여 순간유속의 계측을 시도하였고 와도분포를 구하여 실험의 정도를 확인하였다. 물수깊이의 변화에 따른 쇄파와 실린더의 상호작용 영향을 보기 위한 실험은 물수깊이 $S/D = 1.88 \sim 0.86$ 사이에서 수행하였는데, 자유표면 부근에서의 실험정도에 다소간의 미흡함에도 불구하고 물수깊이 변화시 쇄파와 물수체 간의 보오텍스 유동장의 상호작용 양상에 대한 여러 유익한 정보를 얻을 수 있었다.

2. 실험장치, 모형 및 계측방법

회류수조에서의 자세한 실험장치와 방법은 본 논문의 제1부 [3]와 같다. 실험모형은 직경 (D)이 7cm인 원형실린더이다. 유동가시화 장치는 6w Ar-Ion Laser, fiber optic cable 및 cylindrical lens가 부착된 probe로서, 조사용 probe는 가시화 정도를 향상시키기 위하여 수밀 아크릴 통에 삽입하여 수중에 직접 설치하였다. 두께 5mm 정도로 생성된 단면광 (Laser sheet)은 실린더 후방의 30cm x 30cm 정도를 조사하도록 조절하였다. 산란입자로는 비중이 1.1인 vinyl chloride polymer를 사용하였으며 균일 유동 중에서의 실험결과 유동추적성능이 우수함을 확인할 수 있었다. Fig. 1은 실험장치와 모형을,

Fig. 2는 사용한 PIV 시스템의 개략도를 각각 보여주고 있다.

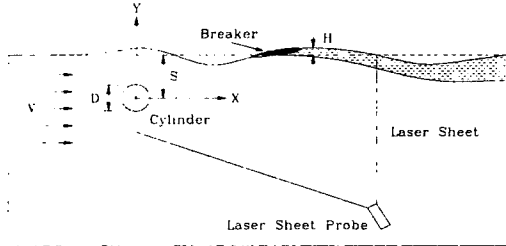


Fig. 1 Schematics of PIV experiment

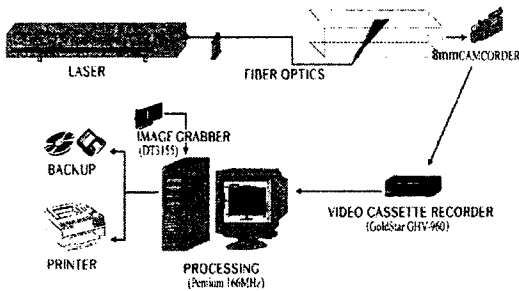


Fig. 2 PIV system

PIV 기법은 유동장에 분포된 추적입자의 이동 거리와 이에 따른 이동시간을 측정하여 입자의 이동속도를 구하는 방법으로, 추적입자는 미소시간 동안 직선 등속도 운동을 한다고 가정한다. 보통 유속이 0.5 m/s 이하의 저속시 측정정도가 우수하며 고속유동장의 경우는 특수 고속 CCD 카메라를 사용하여야 하는데, 본 실험의 경우 8mm 캠코더(1/60초, 640×480 pixels)를 사용하였다. 촬영된 영상은 DT-3155 이미지 그래버를 사용하여 원하는 1/30초 동안의 순간 이미지를 P/C로 받아들인 후, 이 이미지를 odd field와 even field로 분리하여 2개의 영상에 대해 상호 상관법에 의한 동일입자를 찾게 된다. 이렇게 얻어진 1/60초 동안의 입자 이동거리를 계산하여 속도를 구하는데 여기서는 상호상관 (cross-correlation) PIV 기법인 단일조명/이중프레임 (single exposure / double frame) 방법을 사용하여 순간속도 벡터를 구하였다. 얻어진 순간 속도장은 exponential cubic spline으로 보간하여

와도분포를 구하였다. 참고로 Fig. 3은 단면광으로 가시화된 유동장을 이미지 그래버로 읽어들이인 원시영상의 예를 보여주고 있다.

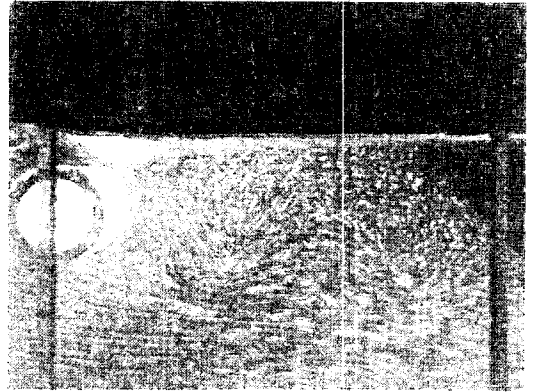


Fig. 3 Visualized flow field

실험조건은 실린더 직경과 유속으로 무차원된 $Fr=0.47$ 에 대하여 물수깊이 $S/D=2.5, 1.88, 1.43, 1.0, 0.86$ 에 대해서 수행하였다. 여기서 $S/D=2.5$ 는 쇠파가 발생하지 않은 경우이고 쇠파가 시작되는 물수깊이는 $S/D=1.88$ 이다. 또한 $S/D=1.0$ 은 쇠파가 전체 자유표면에 걸쳐 강하게 발생하는 경우이다.

3. 결과해석 및 고찰

본 실험에 앞서 균일 유동에 대한 경우와 낮은 Fr 수에 대한 기초실험을 수행하여 PIV 시스템 검증을 실시하였다. 먼저 $Re=32900$ ($Fr=0.567, V=0.47$ m/sec)에서 회류수조의 계측부 균일유동에 대한 실험결과는 Fig. 4와 같다. PIV로 해석한 유속을 평균한 평균유속은 $V=0.455$ m/sec로서 Prandtl tube로 계측한 값보다 3%정도 작은 값을 나타냈다. 이는 회류수조 계측부의 수표면 유속이 설정유속보다 다소 작게 나타난 점, freestream turbulence의 존재 및 Prandtl tube 계측 값이 대부분의 다른 유속계에 비하여 1 ~ 2% 정도 큰 값을 주는 사실에 비추어 볼 때 비교적 정확한 값으로 판단된다.

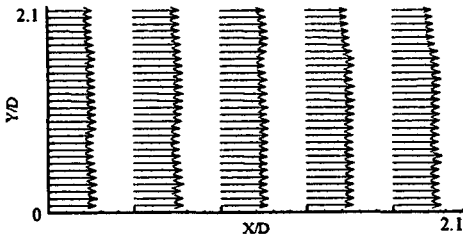
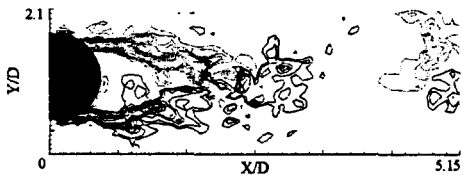
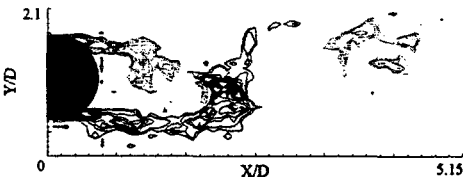


Fig. 4 Uniform flow

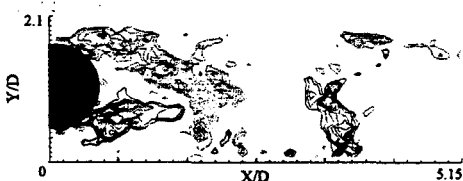
다음으로 실린더에서 발생하는 Karman 와류열을 Fig. 5에 보는 바와 같이 $S/D=2.5$ 에서 3개의 Re 수에 대하여 조사하였다. 상대적으로 높은 유속과 작은 화상처리영역으로 인하여 여러 보오틱스를 한 화면에 보여주지는 못하고 있다.



(a) $Re=11900$ ($Fr=0.21$)



(b) $Re=18900$ ($Fr=0.33$)



(c) $Re=32900$ ($Fr=0.567$)

Fig. 5 Effect of reynolds number on shedding vortices at $S/D=2.5$

본 그림에 잘 나타나 있지는 않으나 특이할 사항은 $Re=11900$ 에서 보오틱스 들이 상하로 확산되

는 경향을 보여주고 있는데 이는 유체의 점성에 기인한 확산으로 판단된다. $Re=32900$ 의 경우 육안으로 1분간 관측한 방출주파수 (shedding frequency)를 사용하여 구한 Strouhal 수는 $St=0.17$ 이었다. 한편 이미지 그래버를 이용하여 $1/30$ 간격으로 획득한 60장의 순차적인 영상을 PIV로 구한 속도분포로부터 간접 확인한 Strouhal 수는 0.186이었다. 이 차이는 산란입자의 추적성능이나 이미지 그래버의 영상획득 정확도 여부 등 복합적인 영향에 의한 오차가 아닌가 여겨진다. 한편 Fig. 6은 Fig. 5(c)에 대한 순간속도분포와 4초 동안 측정된 120 프레임의 순간유동장을 산술평균한 평균유속분포를 보여주고 있는데 물체 후류에서의 반류분포가 잘 나타나 있다. 쇄파가 발생하지 않는 조건이기 때문에 자유표면에서의 유속결손은 눈에 띄지 않는다.

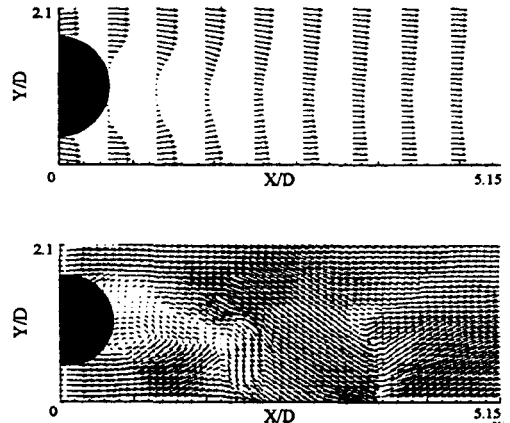


Fig. 6 Mean and instantaneous velocity distributions at $S/D=2.5$ ($Fr=0.567$)

Fig. 7 ~ Fig. 10은 $Fr = 0.567$ 에서 물수깊이가 변화하는데 따라서 실린더에서 방출되는 와류열과 쇄파영역에서 발생되어 전개되는 와류열간의 상호작용과 반류 특성을 보여주고 있다. 각 그림마다 순간유속분포, 시간평균 유속분포 및 순간 와도분포가 순차적으로 나타나 있다. 먼저 Fig. 7은 쇄파 발생이 최초로 감지되는 물수깊이 ($S/D=1.88$)로서 초기쇄파지점 부근에 국부적으로 집중된 보오틱스가 하류방향으로 x 축에 평행하

계 전개되어 나감을 알 수 있다. 쇠파와 실린더 후방의 보오텍스 들 간의 상호작용은 아직 감지되

영향은 자유표면 부근에 국한되어 약간의 속도결손이 일어나고 있다.

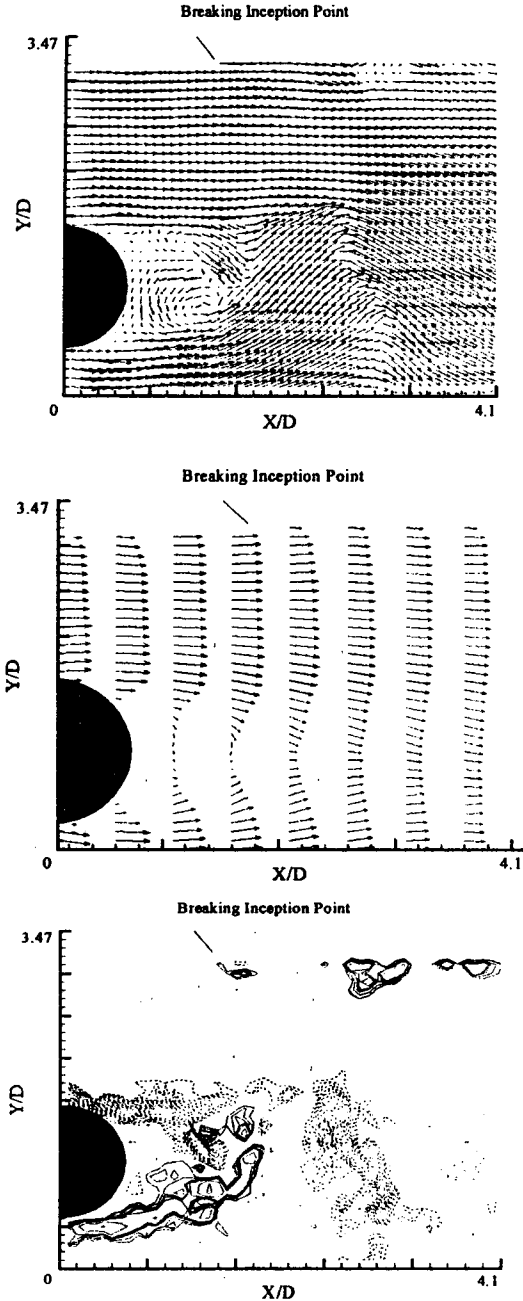


Fig. 7 Flow field at S/D=1.88 (Fr=0.567)

지 않고 있다. 따라서 평균유동장에서 반류분포는 상하 대칭성을 비교적 잘 유지하고 있으며 쇠파의

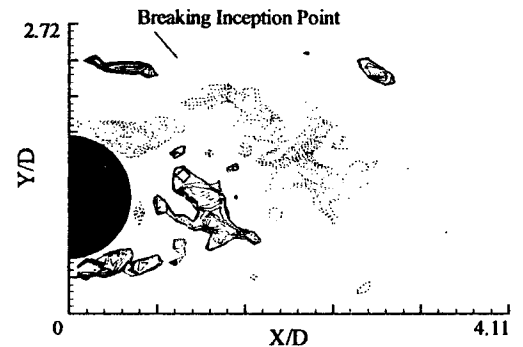
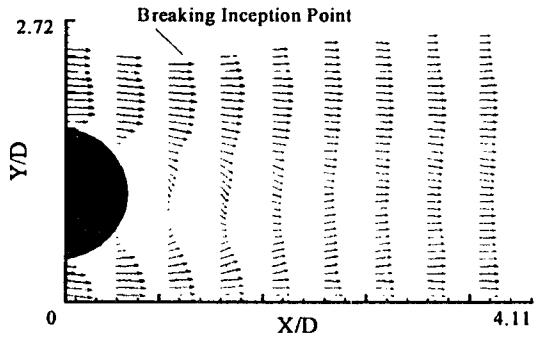
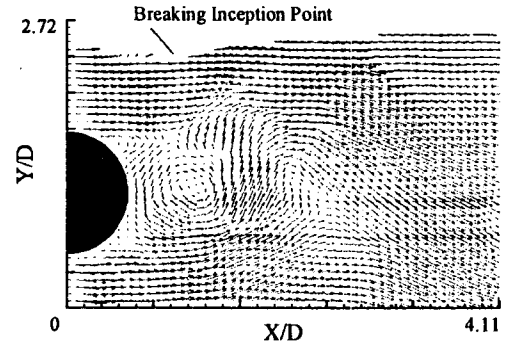


Fig. 8 Flow field at S/D=1.44 (Fr=0.567)

몰수깊이가 S/D = 1.44인 Fig. 8은 실린더 상부에서 떨어져 나가는 보오텍스 들이 자유표면의 쇠파영역에서 발생한 보오텍스 들에 의하여 영향을 받기 시작해서 실린더의 반류분포가 어느정도 상하 비대칭성을 띄고 있다. 이는 쇠파에서 방출되는 와류열이 x축에 평행하게 전개되지 않고

깊이방향으로 다소 휘어져서 진행함에 기인한다고 여겨진다. 수표면 부근의 반류(즉, 속도결손)의 폭은 breaker 후류에서 $S/D=1.88$ 인 경우에 비하여 더 넓게 얻어졌다.

breaker에 의한 보오텍스에 의하여 아래쪽으로 위축되면서 심한 상하 비대칭성을 보여주고 있는 등 Sheridan 등 [2]에 의한 실험결과와 일치되는 경향을 얻을 수 있었다. 그 결과 breaker에 의한 와류열의 후류에 형성되는 저속영역이 Fig. 8과 비교해서 훨씬 더 넓게 확대되면서 거의 정체 유동에 가깝게 되어 짐을 볼 수 있었다.

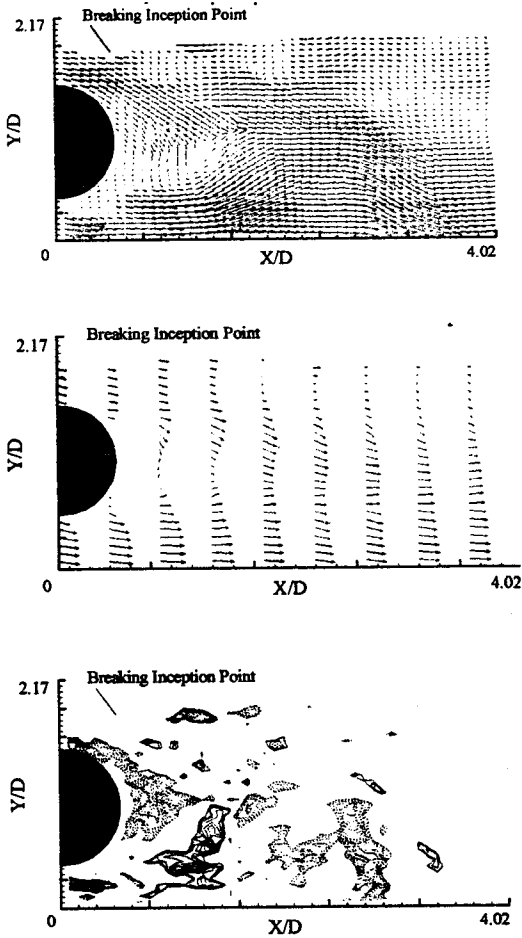


Fig. 9 Flow field at $S/D=1.0$ ($Fr=0.567$)

물수깊이가 더 얇아진 Fig. 9 ($S/D=1.0$)에서는 쇄파영역에서 발생한 강한 보오텍스가 실린더로부터 방출되는 보오텍스와 강한 상호작용을 일으킴을 명확히 볼 수 있다. 즉, breaker로부터 강력한 보오텍스가 수면으로부터 아래쪽을 향하여 발달하고 있고 이로 인하여 전체 유동장이 크게 변형되었다. 실린더 상부에서 생긴 와류열도

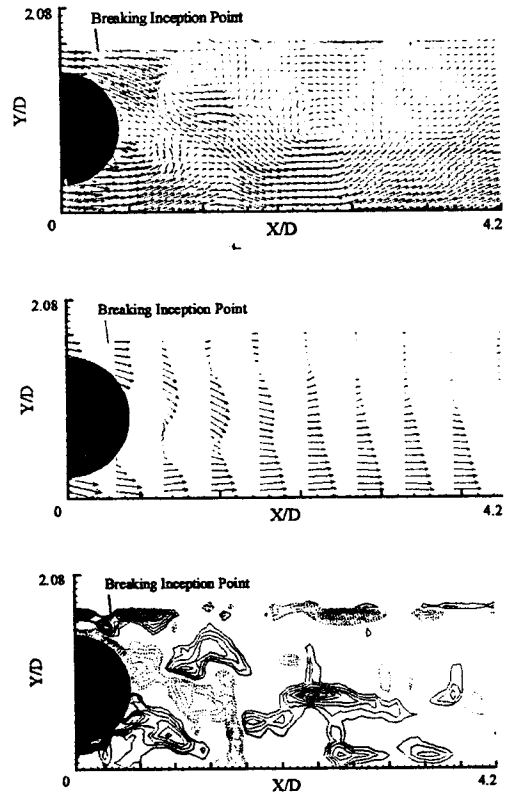


Fig. 10 Flow field at $S/D=0.86$ ($Fr=0.567$)

$S/D = 0.86$ 인 Fig. 10은 breaker에 의한 와류열이 더욱 심하게 아래쪽으로 진행하면서 실린더 상부에서 생긴 보오텍스를 억제할 뿐 아니라 실린더 하부에서 발생한 보오텍스 들마저 아래로 눌러서 전개됨을 볼 수 있다. 이는 또 다른 2차 와류열을 자유표면 부근에 형성시킬 만큼 강하였다. 또한 하류에 형성된 정체유동 영역은 자유표면을 제외하고는 유속뿐만 아니라 와도도 거의 영

에 근접함을 볼 수 있었다.

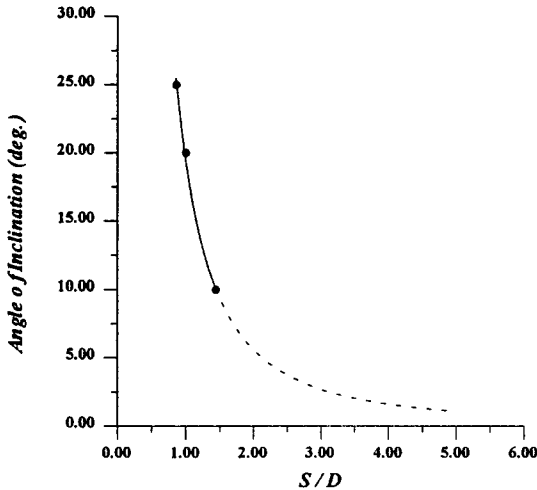


Fig. 11 Angle of vortex street shedded from breaker with respect to freestream direction

끝으로 Fig. 11은 쇄파영역에서 발생하여 후류로 전개되는 보오틱스 열이 물수깊이의 변화에 따라서 정수면과 어떠한 각도로 아래 방향으로 진행하는 지를 보여주는 그림이다. 물수깊이가 가장 얇은 $S/D=0.86$ 에서 약 25° 까지 기울어져서 하류로 진행하는 보오틱스 열이 $S/D=1.44$ 에서는 10° 까지 감소함을 볼 수 있다. 물수심이 더욱 깊어지면 육안으로 그 각도가 잘 분별되지 않고 깊이방향 진행각이 거의 영에 가깝게 수렴함을 (즉 x축에 거의 평행하게) 관찰하였다. 이 관찰결과가 Fig. 11에 점선으로 추정되어 표시되어 있다. 이상으로 볼때 보오틱스 열의 진행각도는 S/D의 함수임을 알 수 있었으며, 본 논문에 기술하지는 않았으나 개략적인 실험결과 Froude수에 따라서는 다소 변화하는 것으로 판단되었다.

4. 요약, 결론 및 제언

균일류 중 수면하에 놓여 있는 실린더에 의하여 생성되고 소멸되는 쇄파주위 점성유동 해석에 PIV 기법을 적용한 본 연구결과를 요약하면 다음

과 같다.

(1) 회류수조에서의 PIV 해석기법을 정립하였다. 균일유동장에 대하여 화상 처리한 유속분포의 평균값이 Prandtl tube로 측정한 유속치와 3% 정도의 오차를 보인 점으로부터 PIV를 사용한 정량적인 유속측정이 충분히 가능함을 확인할 수 있었다.

(2) 무한수심에서 실린더로부터 떨어져 나가는 vortex street을 확인할 수 있었으며 구해진 와도분포가 정성적으로 타당함을 볼 수 있었다.

(3) 몇 개의 물수깊이에서 물수체와 자유표면 사이 유동장의 순간유속분포와 평균유속분포를 측정하여 쇄파 부근의 점성유동장과 물수체와 breaker에 의하여 생성되는 와류열 들 사이의 강한 상호작용을 살펴보았다. 쇄파가 미약하게 발생할 때 ($S/D = 1.88$)에도 자유표면근처 쇄파발생지점에 강한 와도가 존재하며 x축에 평행하게 방출 됨을 감지할 수 있었다. 물수깊이가 얇아 질수록 쇄파의 영향이 실린더 후류유동에 더욱 크게 미쳐서 $S/D = 1.0$ 이하가 되면 쇄파로 인한 와류열이 실린더로부터 유기 되는 와류열을 압도하여 실린더 후방의 전반적인 와도분포를 심하게 변형시켰다. 이로부터 와류열의 깊이방향 진행각은 물수깊이의 함수임을 확인하였다.

(4) 이상의 연구로부터 PIV 기법을 사용한 와도분포 해석기법은 매우 유용한 방법임을 확인하였고, 추후 PIV 영상취득장치의 정도를 향상시킨다면 다양한 경우에 대한 해석을 통하여 쇄파현상을 보다 명확히 밝힐 수 있을 것으로 확인하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비지원으로 1996년부터 3년간 수행한 특정기초연구사업 (과제번호 : 96-0200-14-01-3)의 연구결과 임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- [1] Duncan, J.H, "The breaking and non-breaking wave resistance of a two-dimensional hydrofoil", J. Fluid Mech., Vol. 126, pp. 507-520, 1983.
- [2] Sheridan, J., J.-C. Lin and D. Rockwell, "Flow Past a Cylinder Close to a Free Surface", J. Fluid Mech., Vol. 330, pp. 1-30, 1997.
- [3] 현범수, 신용현, "물수실린더에 의하여 생성되는 쇄파주위 점성유동의 고찰 (제1부 : 파형 및 압력분포)", 대한조선학회 논문집 제37권 제1호, 2000.
- [4] 현범수, 신용현, "물수실린더에 의하여 생성되는 쇄파주위 점성유동의 고찰 (제2부 : 점성유동 특성)", 대한조선학회 논문집 제37권 제1호, 2000.