

PIV를 이용한 수중의 주위 복잡유동장의 정량적 계측

현범수*, 최경신**, 도덕희***

Quantitative Measurements of Complex Flow Field Around a Hydrofoil Using Particle Image Velocimetry

B.S. Hyun*, K.S. Choi** and D.H. Doh***

요 약

수면 하에서 정속으로 움직이는 NACA0012 수중익에 의하여 생성되는 정상파 및 쇄파에 대한 실험적 연구를 회류수조에서 수행하였다. 실린더의 물수깊이에 따른 자유표면 파형을 관측하였고, PIV를 이용하여 수중익과 자유표면 사이 유동장의 순간속도와 평균속도를 계측한 후 와도분포를 구하였다. 쇄파의 발생, 전개 그리고 소멸과정을 조사하였고, 특히 자유표면 부근의 와류 구조와 같은 복잡 순간유동장의 가시화를 통하여 수중익과 쇄파 간의 상호작용을 해석하고자 하였다. 본 실험으로 PIV 계측기법은 조선해양공학의 다양한 연구분야에 훌륭히 적용될 수 있음을 보였고 더욱이 정량적인 해석이 필요한 실험에도 사용이 가능함을 확인하였다.

Abstract

An experimental study has been carried out at circulating water channel to investigate the viscous flow around breaking waves generated by a submerged hydrofoil (NACA0012). Detailed flow measurements were made at several critical points including an incipient wave-breaking point and a fully-developed wave breaker. Particle Image Velocimetry (PIV) was employed to visualize the flow field very close to the breaker as well as at the near- and far-wake of the breaker. Generation, development and decay of the wave breaker have been investigated. It is found that PIV technique could be well applied to the complex flow field, including the vortical structures near the free surface as well as the wake of the hydrofoil.

접수일자: 2000년 2월 18일, 승인일자: 2000년 4월 24일

*정회원, 한국해양대학교 조선해양공학부

**학생회원, 한국해양대학교 조선공학과

***정회원, 한국해양대학교 기계시스템공학부

1. 서 언

최근 세계적으로 많은 유체역학 관련 연구자들이 Particle Image Velocimetry (PIV)를 이용하여 복잡한 유동장의 실시간 정량적 계측을 실시하고 있다. 국내에서도 비록 소수에 불과하기는 하나 이를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있으며 점차 조선해양공학의 여러 분야에 응용이 이루어지고 있다. 특히 자유표면 상에서 발생하는 쇄파현상과 같이 복잡한 유동구조를 파악하기 위하여는 현재 PIV가 거의 유일한, 그리고 유망한 계측기구로 여겨지고 있다. 현재 PIV는 전체적인 복합유동장의 속도분포를 정성적으로는 비교적 훌륭하게 계측할 수 있다고 알려져 있으나 아직도 유동구조의 미세하고 정밀한 계측에는 많은 제약이 있는 것이 사실이다.

수면하에서 운항하는 수중익과 자유표면 간의 상호작용 문제는 수중익이 수면에 가까워 질수록 수중익 주위의 국부적인 유동변화와 수면상에서 쇄파가 발생하여 전개되는 매우 복잡하고 어려운 현상을 내포하고 있는 난제 중의 하나이다. Duncan [1]이 수중익에서 발생하는 쇄파저항을 실험적으로 계측한 것을 시작으로, Coite & Tulin [2]이 수중익에 의하여 생성되는 정상쇄파 (Steady breaker)에 대하여 연구한 결과는 여러 흥미있는 현상을 밝혀주고 있다. 그들은 수중익을 뒤따르는 첫 번째 파형의 앞쪽 면에 올라 앉아있는 정체와류 (Stagnant eddy)로 구성되어진 Breaker의 물리적인 모형을 연구하였는데, 이 와류는 와류와 하부유동으로 분리되는 전단유동영역 내의 난류응력에 의해 떠받쳐지며 자유표면 바로 밑을 따르는 난류 반류에 의해 생성된다는 것을 밝혔다. 또한 Eddy breaker 모형에서 전단영역 내 난류 전단응력 계측의 중요성과 와류내에 포함되는 기포의 포함정도 파악의 중요성을 역설하였다. 최근 Lin & Rockwell [3]도 수중익에 의하여 생성되는 쇄파가 Froude 수에 따라 어떻게 변하는지를 고정도 PIV를 사용하여 계측한 바 있다. 그들은 Froude 수가 증가함에 따라 수면상 유동박리와 그로 인한 Mixing layer의 크기와

강도가 점차 커지며 유동박리점에서 수면의 급격한 변화가 발생함을 유동장의 순시와도분포를 사용하여 잘 보여주었다.

본 연구에서는 NACA0012 수중익의 몰수깊이와 받음각 변화가 자유표면과 물체 후류에서의 와도분포의 양상에 어떠한 영향을 주는지를 PIV를 이용하여 조사하고자 한다. PIV 실험은 다음의 두가지 관점을 증명하기 위하여 수행되었다.

(1) 즉, PIV 기법이 경계층과 반류영역에서의 점성유동 구조나 받음각이 증가하였을 때 발생하는 유동박리 등을 정량적으로 보여줄 수 있는지를 파악하고,

(2) 확보된 계측기술의 정확성을 바탕으로 수중익에 의하여 생성되는 쇄파현상의 계측타당성을 밝히고자 함이다. 이를 위하여 보통의 PIV 장치에 AOM (Acousto-Optic Modulator)과 같은 특별한 장비를 부착하여 계측정도를 획기적으로 향상시킬 수 있는 방법을 도모하고자 한다.

2. 모형, 실험장치 및 실험조건

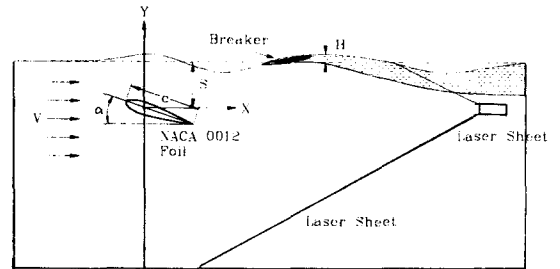


Fig. 1 Coordinate and schematics of experiment

본 연구에서 사용한 수중익 모형은 코오드 (C)와 스펠이 각각 10cm, 1m인 NACA0012 단면을 사용하였다. 실험은 한국해양대학교 회류수조에서 수행하였는데 회류수조 관측부의 크기는 길이 5.0m, 폭 1.8m, 높이 1.2m이다. 유동가시화 장비는 6W Ar-Ion LASER, Fiber Optic Cable 및 Cylindrical Lens가 부착된 Probe를 사용하였는데 최적의 LASER Sheet를 형성하기

위해서 조사용 Probe을 수밀 아크릴 통에 삽입하여 수중에 직접 설치하였다. 두께 5mm 정도로 생성된 LASER Sheet는 수중의 주위나 후방후방의 30cm×30cm 정도를 조사하도록 조절하였으며 산란입자로는 비중이 1.1인 Vinyl Chloride Polymer를 사용하였다. 조사된 2차원 영상은 광각렌즈가 부착된 CCD Camera (SONY SSC - M370)로 640×480 Pixel 해상도로 촬영과 동시에 NTSC (National Television System Committee) Composite 방식으로 Video Cassette Recorder (Panasonic AG - 7350)에 녹화하였다.

카메라나 영상저장장치로부터 받아들인 영상의 Analog 입력신호는 Image Grabber를 사용하여 256 계조의 밝기 정보를 갖는 2차원 디지털 영상 정보로 바꾸어 지는데 본 연구에서 사용한 Image Grabber (DT3155)는 640 × 480 Pixel의 해상도로 녹화된 영상을 디지털화 하여 하드드라이브에 저장을 하게된다. 저장된 한 장의 영상 Frame은 NTSC 주사방식인 Odd와 Even Field로 분리되고 보간 처리되어 두 장의 영상 Field로 만들어진 후 단일조명/이중프레임 계조치 상호상관법에 의하여 입자패턴의 추적을 행함으로써 유동장의 속도와 와도분포를 구하였다. 설정하는 상관영역과 탐색영역의 크기는 실험하는 과정에서 적절한 경험치를 적용하였다. 사용한 PIV 장치의 구성도는 Fig. 2와 같다.

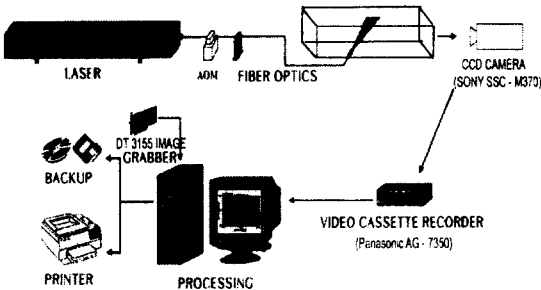


Fig. 2 PIV system

이때 수중의 주위와 자유수면 근처의 유동장을

보다 정밀하게 계측하기 위하여, 촬영하고자 하는 영역이 작거나 유속이 빠를 경우 매우 유용하게 활용되는 첨단장비인 AOM (Acousto-Optic Modulator)을 추가하여 사용하였다. AOM은 백만분의 일초의 해상도를 가지고 빛을 단속적으로 조사시키는 장치로서 노출시간 (Exposure time)과 두 Field 화상 간의 저장간격시간(Δt)을 원하는 데로 조절할 수 있다. Fig. 3은 AOM의 영상 취득방법을 그림으로 표시한 것이다. 노출시간은 짧을수록 이론적으로 유리하나 빛의 광량 (Light intensity)은 노출시간에 비례하므로 노출시간이 너무 짧으면 광량부족으로 화면이 어두워 질 수 있고, 한 Field내에 나타나는 입자의 수가 너무 적어져서 상호상관법을 적용할 때 문제가 생길수 있기때문에 노출시간 설정에는 PIV 실험에 대한 다소간의 경험이 필요하다.

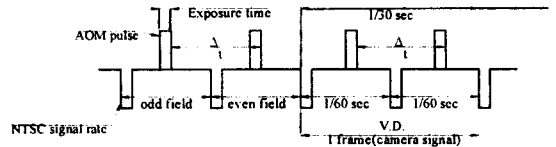


Fig. 3 Signal relation between NTSC (camera signal) and AOM signal

한편 Field 저장간격은 촬영영역의 길이와 유속, 그리고 상호상관법을 적용할 때의 최대허용 입자이동 픽셀(Pixel)수에 의하여 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta t = 1.5625 \frac{w \cdot p}{V} \text{ (msec)}$$

Δt : 2 field간의 시간간격 (msec)

w : 1 화면에 해당하는 실제 촬영 영역의 흐름방향 길이 (m)

p : 최대허용 입자이동 픽셀수

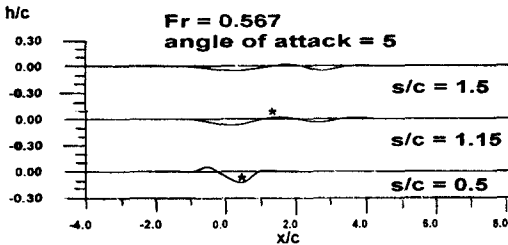
V : 유속 (m/sec)

일반적으로 최대허용 픽셀수가 크면 Δt 를 크게 설정해도 되지만 최대허용 픽셀수가 커지면 계산 시간도 길어지고 에러도 많아지기 때문에 20 픽

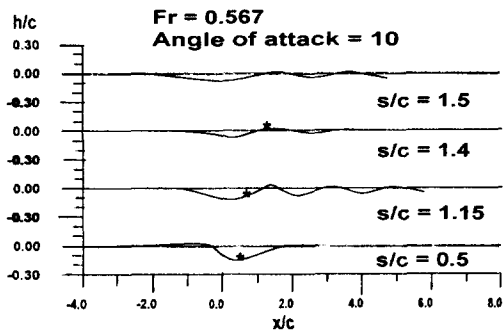
셀보다 작은 값 (통상 7~10 픽셀 정도)으로 설정한다. 끝으로 본 논문에서 PIV해석을 통한 속도 벡터검출을 위해서는 'Thinkers' [4]를 사용하였으며, 와도분포 계산을 위해서는 Exponential Cubic Spline 프로그램을 사용하였다. 실험유속은 $Fr = 0.567$ 에 대하여 $S/c = 0.25 \sim 2.0$ 사이에서, 받음각은 $5^\circ \sim 20^\circ$, 계측영역은 7cm ~ 30cm사이에 대하여 수행하였다. 이때의 Reynolds 수는 $Re = 5.8 \times 10^4$ 이었다.

3. 파형 계측결과

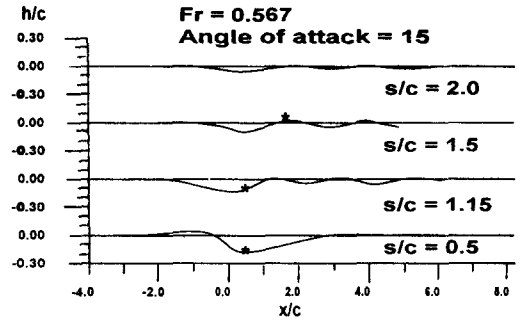
PIV를 사용한 유동장 계측에 앞서 수중익이 잠겨있는 물수깊이의 변화에 따라 파형이 변하는 것을 먼저 관측하였다. 관측결과는 Fig.4에 수중익의 받음각 별로 나타나 있다. 쇄파가 발생하는 지점 (그림에 *로 표시)은 두 번째 파가 시작하여 파정에 이르는 중간지점으로서 여기서 파경사각이 최대가 된다.



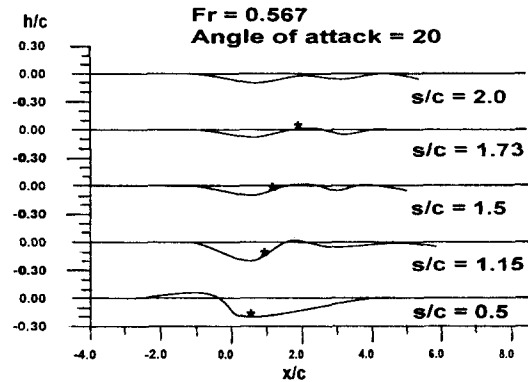
(a) Angle of attack = 5 deg.



(b) Angle of attack = 10 deg.



(c) Angle of attack = 15 deg.



(d) Angle of attack = 20 deg.

Fig. 4 Wave Profiles

날개의 받음각 (α) 변화에 따른 파형의 변화를 보면 받음각 증가에 따라 다양한 파형 패턴을 나타내고 있으며 첫 번째 파의 골(Trough)이 깊어짐을 볼 수 있다. 쇄파가 발생한 이후의 파는 파고가 현저히 감소하고 있으며 받음각이 증가함에 따라 이러한 경향은 더욱 두드러져 보인다. 이는 쇄파 발생이 파에너지를 난류에너지로 변환하는 메커니즘을 가지고 있기 때문에 쇄파발생이 심할수록 정상파의 파고는 낮아진다는 과거의 연구 결과들과 일치하는 결과이다. [5], [6]

Fig. 5에는 받음각이 변함에 따라 파형발생, 초기쇄파 및 완전쇄파가 발생하는 물수깊이가 표시되어 있다. 세 경우 모두 받음각이 증가할수록

발생수심이 증가함을 한 눈에 볼 수 있으나 받음각 15도에서의 쇄파발생 물수깊이가 상대적으로 얇은 점이 눈에 띈다.

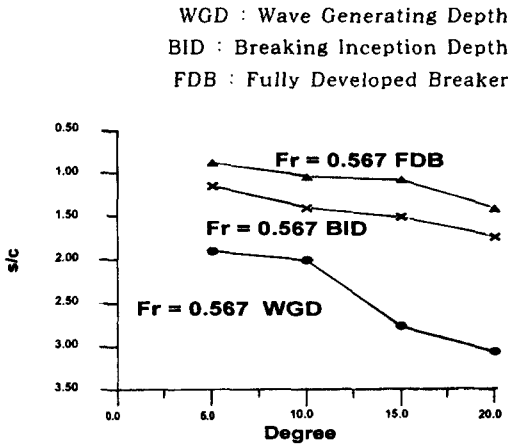


Fig. 5 Wave characteristics

4. 유속 및 와도분포 계측결과

Fig. 6은 취득한 원시영상의 예를 보여주고 있다. AOM으로 노출시간과 Field간 영상저장간격을 1 ~ 5 msec 정도로 매우 짧게 조절한 영상이기 때문에 육안으로 관찰된 영상보다 훨씬 어둡고 추적입자수가 적어 보인다. 그러나 수중의 상부에서의 유동박리현상과 수면근처에서의 강한 쇄파영역은 비교적 잘 나타나 있다.

본 실험에 앞서 사용한 PIV 기법이 깊게 잠겨



Fig. 6 Original images captured by DT3155 image grabber(S/C=0.80, $\alpha = 20^\circ$)

있는 수중의 주위의 경계층과 반류영역에서의 점성유동구조 (받음각 10° 이하)나 유동박리 (받음각 15° 이상)을 정량적으로 보여줄 수 있는 지를 먼저 파악하고자 하였다. 먼저 Fig. 7은 받음각의 증가에 따른 수중의 주위 유동장의 평균유속분포를 보여주고 있다. 받음각 5° 에서 경계층이 영상처리장치의 해상도에 비하여 상대적으로 얇은 관계로 경계층 구조가 잘 나타나지는 않지만 반류의 폭이나 속도분포는 비교적 잘 계측되고 있음을 볼 수 있다. 받음각이 증가하면서 수중의 표면에서 유동박리가 발생하여 전개되는 양상도 잘 재현되고 있으며 Fig. 8에 주어진 받음각 20° 에서의 순간유속분포에서 보는 것처럼 유동박리로 형성된 재순환영역에서의 해석결과도 본 실험의 정도를 입증하고 있다.

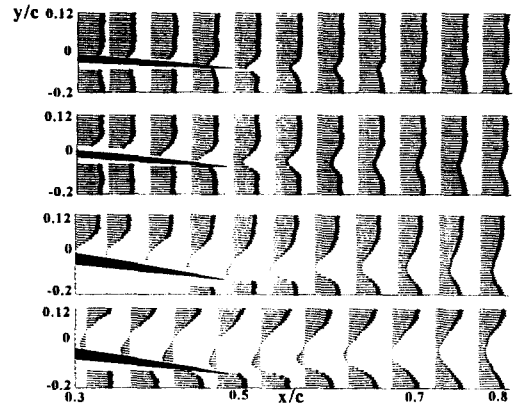


Fig. 7 Time-averaged velocity distributions at infinite depth (From Top, $\alpha = 5, 10, 15, 20$ Degrees respectively)

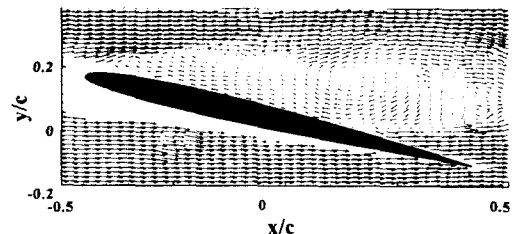


Fig. 8 Instantaneous flow field around a hydrofoil at $\alpha = 20^\circ$

받음각 5도에서 쇄파가 시작되는 조건인 $S/C=1.15$ 에서 받음각에 따른 순간 와도분포의 변화가 Fig. 9에 나타나 있다. 받음각 5도에서 파정 부근에 와도가 감지되고 있는데, 실제 관찰 결과도 쇄파의 초기생성은 파정 부근에서 시작하여 쇄파가 발달되고 강해질수록 파저 쪽으로 이동하는 경향을 보여주었다. 받음각이 증가할수록 와도의 세기가 강하게 표시되는 쇄파발생지점의 위치가 파저 쪽으로 전진 이동하면서 그 강도가 점차 증가함을 알 수 있다. 받음각 15도 이상에서는 수중의 상부에서의 유동박리로 인한 강한 와류가 잘 표현되어 있으나, 수면에 형성된 쇄파에 의한 와류와 수중의 유동박리로 인한 와류간에 상호작용은 그 리 눈에 띄지 않았다.

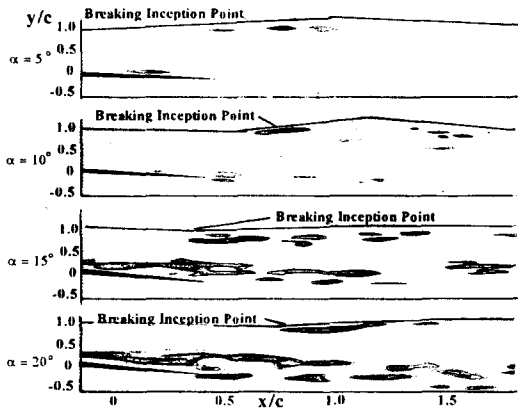


Fig. 9 Instantaneous vorticity distributions at $S/C = 1.15$

한편 60장의 순시영상을 시간평균하여 구한 평균유동장은 Fig. 10과 같다. 물체 후류에서의 유동은 앞의 Fig. 7과 거의 유사하게 얻어졌으나, 수면 근처에서는 쇄파로 인한 속도결손(즉, 운동량결손)이 잘 나타나 있다. 단, 초기쇄파가 발생하였으나 그 강도가 매우 낮은 받음각 5도의 경우는 쇄파 위치의 유속변화가 직접 드러나지는 않고 있다. 참고로 Fig. 10(a)에서 $y/c=0.5$ 부근에 속도결손이 일어난 것과 같이 표시된 것은 일종의 영상해석상의 오류로서, 물체 후류에서 조사

된 Laser 시트가 수면에서 그 영역으로 우연히 굴절되어 영상의 질이 저하되었기 때문임을 밝힌다.

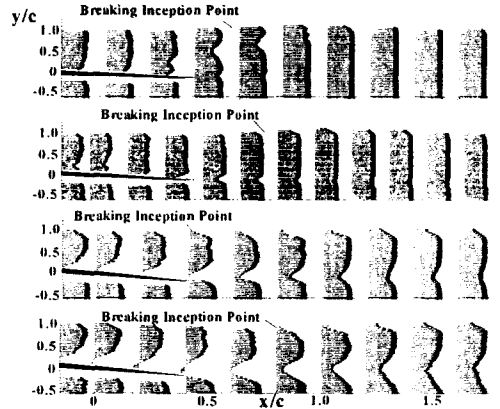


Fig. 10 Time-Averaged velocity distributions at $S/C = 1.15$ (From Top, $\alpha = 5, 10, 15, 20$ Degrees respectively)

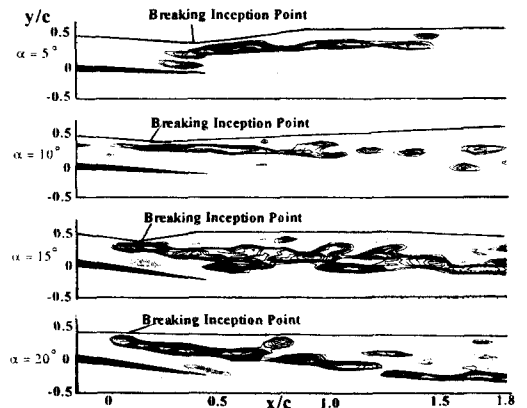


Fig. 11 Instantaneous vorticity distributions at $S/C = 0.5$

마지막으로 Fig. 11과 Fig. 12는 $S/C=0.5$ 에서 얻어진 순간와도분포와 시간평균 유속분포이다. $S/C=1.15$ 에서의 순간와도분포보다 전체적으로 강도가 증가되었으며, 특히 받음각 15도 이상에서는 수중의 상면에서의 유동박리현상이 사

라졌음을 볼 수 있었다. 또한 수면부근에서의 강한 와도분포로 표현되는 Dividing Streamline이 받음각 5도에서는 수면에 거의 평행하게 전개되나 받음각이 증가함에 따라 점차 아래쪽을 향하여 전개됨을 확인하였다. Fig. 12의 평균유속분포로부터 모든 받음각에서 쇄파로 인하여 큰 속도결손이 수면상에서 일어나고 있으며 특히 받음각 20도에서는 대단히 큰 재순환영역이 수면상에서 발생하였고, 이로 인하여 흡입면 상 경계층과 반류영역에서의 속도결손이 어느 받음각에서도 나타나지 않음을 알 수 있었다.

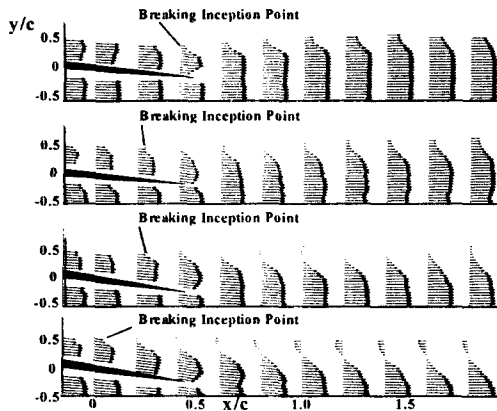


Fig. 12 Time-Averaged velocity distributions at $S/C = 0.5$ (From Top, $\alpha = 5, 10, 15, 20$ Degrees respectively)

5. 결 언

본 연구를 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 균일류 중 수면하에 놓여있는 수중익에 의하여 생성되고 소멸되는 쇄파 주위 점성유동장에 대한 실험적 연구를 수행하였다.

(2) PIV 실험결과 깊게 잠긴 수중익 주위의 경계층과 반류, 그리고 유동박리 영역의 유동장 특성이 비교적 높은 정도로 계측되었다.

(3) 수중익의 몰수깊이와 받음각이 변함에 따라 수중익과 쇄파의 상호작용 양상이 변화하는 것

을 잘 확인할 수 있었다. 쇄파가 발생하여 전개되는 수면부근과 수중익 후류에서 유속결손과 강한 와도분포가 계측되었는데, 몰수깊이가 감소하면서 수면부근의 쇄파로 인한 강한 와류가 수중익 상부의 와류를 억압하여 유동패턴이 크게 달라짐을 볼 수 있었다.

(4) 본 실험으로 PIV 계측기법은 조선해양공학의 다양한 연구분야에 훌륭히 적용될 수 있음을 보았고 더욱이 정량적인 해석이 필요한 실험에도 사용이 가능함을 확인하였다. 추후 시간을 갖고 다양한 계측결과를 발표할 계획이다.

후 기

이 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 자유공모과제 "수중익과 자유표면의 상호작용 연구 (과제번호 1997-001-E00119)" 연구비에 의하여 연구되었음을 밝힌다. 또한 본 연구에 사용된 수중익을 제공해 주신 KRISO의 반석호 박사님과 실험과정을 거쳐 많은 도움을 준 한국해양대학교 해양시스템공학부의 노영학, 윤정후, 배정진, 이동연 제군을 비롯한 최류수조실의 학생들에게 고마움을 표한다.

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] Cointe, R. and M.P. Tulin, "A theory of Spilling Breakers", *J. Fluid Mech.*, Vol. 276, pp. 1-20, 1994.
- [3] Lin, J.C. and D. Rockwell, "Evolution of Quasi-Steady Breaking Wave", *J. Fluid Mech.*, Vol. 302, pp. 29-44, 1995.
- [4] 최성환, "3차원 PIV계측법의 개발과 후향단 유동계측", 공학박사학위논문, 한국해양대, 2000.
- [5] 현범수, 신용현, "몰수실린더에 의하여 생성되는 쇄파주위 점성유동의 고찰 (제1부 : 파형 및 압력분포)", 대한조선학회 논문집 제37권 제1

호, 2000.

- [6] 현범수, 신용현, 최경신. "물수실린더에 의하여 생성되는 쇠파주위 점성유동의 고찰 (제3부 : PIV를 이용한 순간유동장 해석)", 대한조선학회 논문집 제37권 제2호, 2000.