

PIV를 이용한 만곡형 전개판의 유동장 계측에 관한 연구

박경현* · 이주희* · 현범수** · 노영학** · 배재현***

*부경대학교, **한국해양대학교, ***백경공업(주)

(2002년 1월 5일 접수)

Study on the Measurements of Flow Field around Cambered Otter Board Using Particle Image Velocimetry

Kyoung-Hyun Park*, Ju-Hee Lee*, Beom-Soo Hyun**, Young-Hak Ro** and Jae-Hyun Bae***

*Pukyong National Univ., **Korea Maritime Univ., ***Baek Kyung Ind. Co. Ltd.

(Received January 5, 2002)

Abstract

This paper introduces an analysis method to predicting the flow characteristic of flow field around otter board in order to develop a high performance model.

In this experiment, it is used a numerical analysis of flow field through CFD(Computational Fluid Dynamic), PIV method in which quantitative, qualitative evaluation is possible.

In this experiment, it is used PIV method with flow field image around otter board in order to analysis of flow characteristic. The result compared flow pattern with analysis result through CFD and also measurement result of lift and drag force coefficient carried out in CWC(Circulating Water Channel).

The numerical analysis result is matched well with experiment result of PIV in the research and it is able to verify in the physical aspect.

The result is as follows ;

- (1) It was carried out visibility experiment using laser light sheet, and picture analysis through PIV method in order to analysis fluid field of otter-board. As a result, the tendency of qualitative fluid movement only through the fluid particle's flow could be known.
- (2) Since PIV analysis result is quantitative, this can be seen in velocity vector distributions, instantaneous streamline contour, and average vorticity distributions through various post processing method. As a result, the change of flow field could be confirmed.
- (3) At angle of attack 24° where it is shown maximum spreading force coefficient, the analysis result of CFD and PIV had very similar flow pattern. In both case, at the otter-board post edge a little boundary layer separation was seen, but, generally they had a good flow.

- (4) As the result of post processing with velocity vector distributions, instantaneous streamline contour and average vorticity distributions by PIV, boundary layer separation phenomenon started to happen from angle of attack 24° , and from over angle of attack 28° , it happen at leading edge side with the width enlarged.

緒 論

그물이나 전개판과 같이 복잡한 유동장에서 동작을 하게 되는 물체의 역학적 특성을 예측하고 성능향상을 위해서는 수반하는 유동장의 거동을 파악하는 것이 필요하다.

유체운동의 해석은 연속방정식과 세 방향의 운동방정식 그리고 열역학적 에너지방정식으로 구성되는 지배방정식의 해를 해석적으로 구함으로써 가능하며, 해석 방법으로는 수치계산에 의한 방법(CFD : Computational Fluid Dynamics)과 실험에 의한 방법을 들 수 있다.

일반적으로 실험에 의한 유체의 속도 계측 방법으로는 피토크, 열선유속계(hot wire), LDV Laser Doppler Velocimetry) 등이, 압력계측방법으로는 프로브(probe) 등이, 그리고 온도 계측 방법으로는 열전대(thermo-couples) 등이 사용되고 있으나, 이들 계측방법들로부터 얻어낸 정보는 정량적이기는 하지만 점 계측에 의한 것이기 때문에 유동장 전체의 거동을 해석하기에는 상당히 부족하다.

이를 보완하기 위한 실험적 방법으로 유동가시화 현상을 직접 관찰하는 유동가시화(flow visualization) 방법이 있다. 염료, 기포, 연기 등을 이용한 고전적 유동 가시화 방법은 전체 유동장의 정성적인 정보를 제공하지만, 정확한 유동 해석에 요구되는 정량적인 결과를 얻을 수 없다는 단점이 있어 왔다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근의 급속한 디지털 화상 매체기와 컴퓨터의 발달에 힘입어 화상처리를 통한 해석 기술로써 지금까지는 원리적으로만 가능하였던 기법들이 실용화 단계에 이르렀다.

특히, 컴퓨터와 디지털 화상 처리기술(digital image processing)의 발달은 유동장에 투입된 가시화용 추적입자들의 거동을 정량화할 수 있게

하였는데 이를 근간으로 한 유동장의 속도 계측법이 PIV(Particle Imaging Velocimetry)이다.

이 방법은 3성분의 속도를 동시에 전 영역에 걸쳐 연속으로 계측할 수가 있으며 이 값들을 NS(Navier-Stokes)방정식에 대입하여 압력 구배 항을 공간 적분하면 벽면의 정압까지를 포함한 실시간 압력장을 구할 수가 있다. 또한 감온 액정 입자(thermo-sensitive liquid crystal particle)를 추적입자로 이용하면 공간의 온도분포까지도 동시에 구해질 수 있다.

앞서 국내의 전개판 형상 및 유체역학적 특성에 관한 연구에서도 다양한 가시화 기법과 전산 유체역학적 해석을 통하여 많은 진척이 있었다. 金(1981)이 전개판의 설계이론에 대하여, 李 등(1987)이 단순만곡형과 V-전개판에 관하여, 金 등(1987)이 Flap을 부착한 전개판에 관하여, 高 등(1992)이 전개판의 유체역학적 특성에 관하여, 權(1993)이 전개판의 형상요소별 성능의 변화에 대한 연구와 가시화 및 수치해석법을 도입한 시뮬레이션 분석, 朴(1994)은 전개판의 양향력 특성 및 정적, 동적 안정성 등 유체 특성에 관한 연구 등 다양한 시도가 있었다.

이러한 연구는 정성적인 가시화이거나 양력 및 항력 등의 정량적 계측으로 일반적인 전개판의 특성을 파악하거나 성능 개선의 방향은 제시할 수 있었으나, 다양한 부가양력장치의 유체역학적 특성을 파악하거나 전개판의 성능 개선에 이용할 수 있는 다양한 인자들을 해석하기에는 한계가 있었다.

본 실험에서는 전개판 주변의 유동장 가시화에 PIV를 이용한 화상 처리 해석기법을 적용함으로써 이러한 한계를 극복하고, 전산 유체역학적 해석 결과와 비교 검토함으로써 전개판의 성능향상 및 어구 주변의 유동 해석을 위한 새로운 실험방법을 제시하고자 한다.

材料 및 方法

1. 실험장치 및 방법

본 실험에서 사용된 PIV의 하드웨어 구성을 Fig. 1에 보여주고 있다.

PIV를 구성하기 위한 기본적인 하드웨어는 광원, 화상의 입력 및 저장장치, 화상처리장치로 나누어질 수 있다.

(1) PIV 실험 장치

1) 광 원

2차원의 속도계측을 위해서는 두께 1~3mm 전후의 광막(sheet light)이 필요하다. 광원으로서 2차원의 광막을 제공하기 위해서 저속액체 유동장의 경우(1.0m/s 이하, 유동장 크기 150mm×150mm)에는 0.5mW 전후의, 고속기체 유동장의 경우(10~40m/s, 유동장 크기 150mm×150mm)에는 5W 전후의 가시광 레이저를 사용할 수 있으나, 저속액체의 경우에는 광원용의 조명 열에 의하여 자연대류가 발생할 우려가 있으므로 유의하여야 한다.

실험에 사용된 광원으로는 5W 아르곤이온 레이저를 사용하였고, 광원을 광케이블로 연결하여 원통형 렌즈가 부착된 탐침을 사용하여 레이저 광막을 형성하였다. 최적의 광막을 형성하기 위해서 조사용 탐침을 수밀 아크릴 통에 삽입하여 수중에 직접 설치하였다.

광막은 두께 2mm 정도로 생성되도록 조절하여 전개판 단면을 조사하도록 하였으며, 산란입자로 는 비중이 1.02, 직경이 100 μ m인 PVC(Poly Vinyl Chloride)분말을 사용하였다.

Fig. 2는 카메라와 광원을 펄스제어하기 위한 AOM (Acousto-Optical Modulator)신호와의 상관관계를 나타낸다. 한 장(frame)의 이미지는 두 개의 필드(field)로 나누어질 수 있으며, 그 필드 이미지와 AOM신호와의 상관관계는 Fig. 2와 같다.

AOM과 같은 광학조절장치를 쓰게 되면 조명 시간의 조절이 가능하게 되므로 Fig. 2의 T1이라는 시간간격을 마음대로 조정이 가능하게 되기 때문에 그 시간 간격을 미소시간으로 줄인다면 그 시간사이에서의 물리적 변화가 거의 없다고 볼 수 있다.

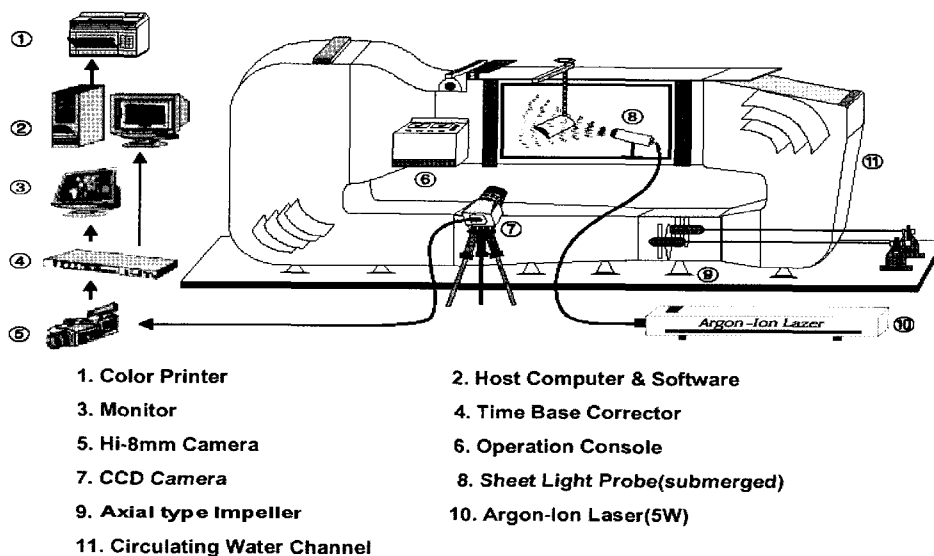


Fig. 1. Layout of PIV system³⁾.

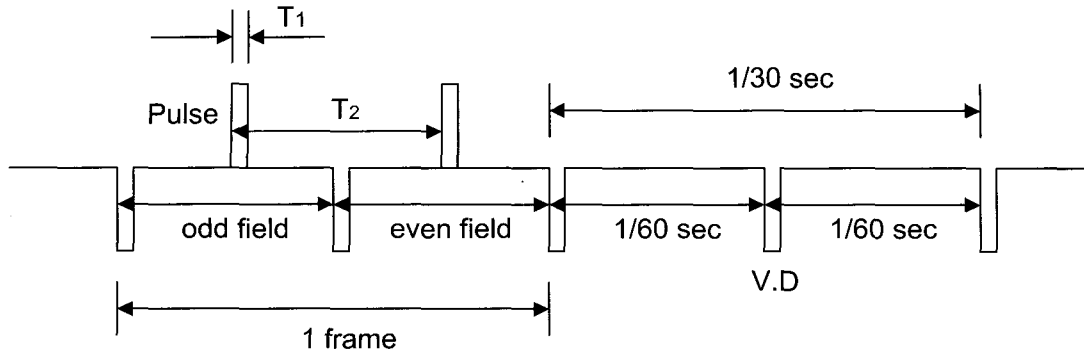


Fig. 2. Signal relation between NTSC(camera signal) and AOM signal.

결국은 각 필드에서 한 펄스씩 T1이라는 시간 간격으로 짧게 조명이 되었다면 모든 필드의 시간간격은 T2로 볼 수 있으며, 또한 그 필드들이 담고 있는 화상 정보는 동일 시각에서 찍힌 정보로 볼 수 있다.

노출시간은 짧을수록 이론적으로 유리하나 빛의 광량(light intensity)은 노출시간에 비례하므로 노출 시간이 너무 짧으면 광량 부족으로 화면이 어두워질 수 있고, 한 필드 내에 나타나는 입자의 수가 너무 적어져서 상호 상관법을 적용하기 어려울 수가 있으므로 노출시간 설정에는 PIV 실험에 대한 다소간의 반복경험이 필요하였다. 각 필드의 저장간격은 촬영영역의 길이와 유속, 그리고 상호 상관법을 적용할 때의 최대허용 입자이동 픽셀수에 의하여 식(1)과 같이 결정된다.

$$\Delta t = 1.5625 \frac{w p}{V} \text{ (ms)} \dots\dots\dots (1)$$

- Δt : 두 필드간의 시간간격 (ms)
- w : 한 화면에 해당하는 실제 촬영영역의 흐름 방향 길이 (m)
- p : 최대허용 입자이동 픽셀수
- V : 유속 (m/s)

2) 화상 입력 장치 및 저장 장치

화상 입력 장치는 PIV의 속도 추출 기법에 따라서 결정되며, 대표적인 입력 장치로서 기계니컬 스캐너, CCD카메라, Hi-8mm 캠코더, 고속도 비

디오카메라 등이 있다. 비디오 카메라는 기계니컬 카메라에 비하여 분해능은 떨어지지만 가격, 변환성 및 조작성 등의 면에서 우수하고 유동장으로 부터 정보를 직접 받아들인다는 이점을 갖는다. 시간분해능은 카메라의 프레임 속도(일반 CCD카메라는 1/30sec)에 의존하는데, 최근에는 고속 카메라가 시판되고 있으며, 또한 고해상도를 갖춘 HDTV(High Density TV)카메라, 디지털 카메라도 보급되고 있어 시·공간의 해상도 문제는 점차 해결되어 가고 있다

본 실험에서는 조사된 2차원영상을 광각렌즈가 부착된 CCD 카메라 (SONY SSC - M370)로 640×480픽셀 해상도로 촬영과 동시에 NTSC방식으로 비디오레코더(Panasonic AG - 7350)에 녹화하였다.

3) 화상처리장치(이미지보오드)

이미지 보오드는 영상 매체를 통해 나타나는 신호(아날로그 신호)를 샘플 당 정의된 비트로 디지털화하여 PC가 처리할 수 있는 신호로 바꾸어 주고 산술, 논리 연산 및 화상처리를 행하여 분석하기 위한 하드웨어이다. 이미지 보오드는 프레임 그래버(frame grabber)라고도 하며, 프레임 그래버는 대개 고해상도용 비디오 프레임의 두 필드를 모두 디지털화하며 필드 그래버는 비디오 프레임을 구성하는 두 비디오 필드 중의 하나만을 디지털화한다.

카메라에서 입력된 아날로그 입력신호는 프레

임 그래픽(DT3155)를 사용하여 256 계조의 밝기 정보를 갖는 2차원 디지털 영상정보로 바꾸어 640×480 픽셀의 해상도로 녹화된 영상을 디지털 화 하여 하드 드라이브에 저장하였다.

저장된 한 장의 영상 화면은 NTSC 주사방식인 기수 필드(odd field)와 우수 필드(even field)로 분리, 보간 처리되어 두 장의 영상 필드로 만들어진 후 단일 조명 이중 화상 계조치 상호 상관법에 의하여 입자패턴의 추적을 행함으로써 유동장의 속도와 와도분포를 구하였다. 탐색영역의 크기 300mm×300mm로 설정하였다.

PIV해석을 통한 속도 벡터검출을 위해서는 상용프로그램인 'Thinker's Eye'를 사용하였다.

(2) PIV의 화상 처리 방법

유동장의 국소 속도는 어느 한 점을 통과하는 추적 입자가 미소 시간 간격 동안 이동한 미소 직선 거리 및 방향을 알면 쉽게 구해진다. 즉, 주어진 측정시간(Δt) 동안 움직인 유동 입자(particle)들의 변위 정보를 CCD 카메라와 같은 화상 입력 장치를 이용하여 2차원 화상자료를 저장한 후 디지털 화상 처리 기법을 이용하여 입자 변위(u, v)를 측정하는 것이다.

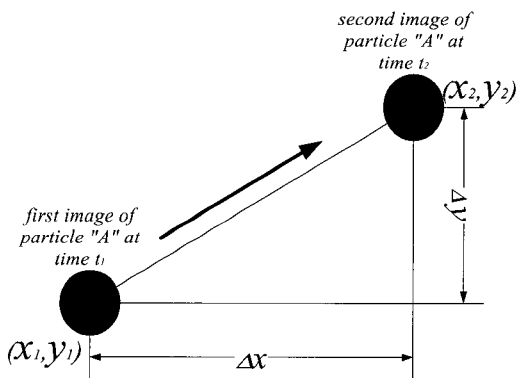


Fig. 5. Schematic diagram of PIV.

$$u = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \dots\dots (2)$$

$$v = \lim_{t_2 \rightarrow t_1} \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta y}{\Delta t} \dots\dots (3)$$

유동 화상으로부터 정량적인 속도장을 구하는 데에는 입자 변위를 구하는 방법에 따라 여러 가지 방법들³⁾이 있다.

정량적인 속도장 측정의 초기단계에서 개발된 PSV(Particle Streak Velocimetry)는 카메라의 노출 시간을 길게 함으로써 형성된 입자 궤적을 이용하여 속도를 구하는 방법으로 매우 간단하지만 대부분 필름을 사용함으로써 실시간 처리가 불가능하고, 입자 밀도가 높을 경우 궤적(streak)이 서로 겹치는 문제가 발생하며 추출된 속도의 방향결정에 어려움이 있다.

PTV(Particle Tracking Velocimetry)는 연속적으로 획득된 여러 장의 화상으로부터 각 입자 위치를 추출한 후 그 입자 하나 하나를 추적함으로써 입자의 변위를 결정하는 방법이다. 즉, 추출에 이용되는 개별 입자의 중심을 이용해서 입자 속도 벡터를 구해내는 것이다. PTV는 화상 안에 추적 입자의 수가 많을 경우 입자의 중복 및 상관 관계의 신뢰성이 떨어질 수도 있고, 입자가 매우 빠르게 움직이는 부분과 매우 느리게 움직이는 부분이 공존할 경우에는 입자 추적의 제한이 따르고 해석 시간이 오래 걸리는 단점이 있으나, 관찰영역 내의 소규모 와류 및 복잡한 형상 주변의 유동 변화를 쉽게 관찰할 수 있는 장점이 있다.

PIV(Particle Imaging Velocimetry)란 원래 유동 화상을 일정한 영역으로 구분한 뒤, 조사 구간(interrogating window)내 산란 입자들의 강도 분포에 대한 Fourier변환이나 직접적인 상관 계수 계산으로부터 조사 구간의 평균 속도를 구하는 방법이다. 즉 PTV는 입자를 직접 추적한다면, PIV는 입자군들의 분포에 대한 상관 관계로부터 속도를 구한다. 일정 시간 간격으로 얻어진 두개의 화상을 이용하여 조사 구간 사이의 상호상관 함수(cross-correlation)를 계산하고, 그 값이 가장 큰 점을 평균 변위로 간주함으로써 속도를 구할 수 있다. PIV는 입자밀도가 매우 큰 경우에 보통 적용되며, 조사 구간내의 평균 속도를 추출함으로써 제한된 공간 분해능을 지닌다.

본 실험에서는 두 장의 화상을 이용한 이중 화상 상호 상관 PIV방법을 채택하여 실험하였으며,

속도 벡터를 검출하는 알고리즘으로는 계조치 상호 상관법을 사용하였으나, 어느 경우나 미소시간 이전의 화상과 이후의 화상을 나누어 그 화상과의 상관관계를 입자 또는 개개의 구간별 이동성분을 찾아내는 것이라고 할 수 있다.

Fig. 4는 계조치 상호 상관법(Grey level cross-correlation method)의 원리⁴⁾를 설명하기 위한 것이다. 미소 시간 동안 유동장의 화상의 계조 패턴은 크게 변화하지 않는다고 가정하면 제1프레임에서의 상관 영역 내의 계조치 분포와 미소 시간 후의 제2프레임에서의 계조치 분포는 유사한 특성을 나타낸다. 따라서, 제1프레임의 입자의 위치를 중심으로 하여 제2프레임상의 같은 크기를 갖는 영역과의 계조치에 대하여 상호 상관 계수 값을 구하여 비교하여 그 중 가장 큰 값을 동일 입자군의 이동위치로 간주할 수 있다. 이와 같은 계산을 빠른 속도로 행할 수 있으면 가상의 중심 입자군 속도(속도벡터의 시점)에 대하여 이동벡터의 종점을 용이하게 구할 수 있게 된다. 연속된 두 프레임 입간의 상관계수는 다음의 식 (4)로 구한다.

$$C_{fg} = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f}_i)(g_i - \bar{g}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f}_i)^2 \sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g}_i)^2}} \dots\dots(4)$$

Table 1. Experimental Condition

Articles	Item	Specification
Visualization equipment	Image Board	DT3155 (640×480pixel)
	Light Source	5W Argon-Ion Laser
	Sheet Light	Cylindrical Lens (width : 2mm)
Measuring condition	Working Fluid	Water
	Temperature	15 ℃
	Particle	Poly Vinyl Chloride (100 μ m)
	Inlet velocity	0.35m/sec
	Re No.	7.0 X 10 ⁴
Input Device		CCD Camera
Host Computer		Pentium PC (CPU speed: 800MHz)
Calculation Time		3.0 min/frame
Number of time mean data		30 Frames
Image processing	Image recoding	Hi-8mm
	Identification	Two-frame Gray-level Cross Correlation Algorithm
	Ratio of Error Vector(%)	Under 1.0%/frame Average:0.4

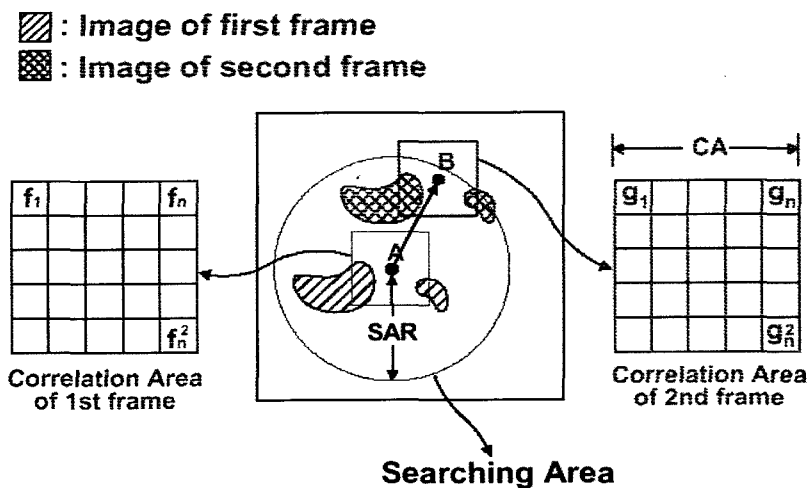


Fig. 4. Principle of grey-level cross-correlation⁴⁾.

식(4)에서 f_i, g_i 는 상관영역내의 각 픽셀의 계조치를 의미하며 $\overline{f_i}, \overline{g_i}$ 는 연속화상에 대한 시간평균이다.

본 실험에 사용된 PIV관련 실험 장비 및 방법을 Table 1에 간략히 나타내었다.

(3) CFD를 이용한 數值解析

본 실험에서는 PIV 실험결과와 비교하기 위하여 전산 유체역학적 해석을 실시하였으며 수치해석에 사용된 CFD 소프트웨어는 상용 소프트웨어인 플루언트(Fluent V5.1)을 사용하였다. 플루언트는 FVM (Finite Volume Method, 유한체적법)을 사용하는 CFD 소프트웨어로 다양한 해석모델이 개발되어 있는 대표적인 범용 소프트웨어이다.

영각은 모델 실험에서 슬롯 크기에 따른 최대 양력 계수가 나타나는 각도를 취하였으며, 초기 조건은 자유 유동 조건을 사용하였다.

경계 조건으로는 물체 표면에서는 점착 조건과 표면 압력 구배가 0인 조건을 사용하였고 외부 경계는 물체로부터 충분히 먼 거리에 있다고 가정하여 자유 유동 조건을 사용하였다.

격자계는 익형의 유동분석에 사용되는 C형 격자망을 사용하였으며 격자계 형성 및 최적화를

위해 플루언트 전용의 전처리 프로그램(pre-processor program)인 티그리드(T-Grid)와 갬비트(Gambit)를 사용하였다. 가시화 및 생성된 결과값의 자료 처리를 위해서는 내장된 후처리 소프트웨어와 테크플랏(Tecplot)을 후처리프로그램(post-processor program)으로 사용하였다.

(4) 模型 展開板

본 실험에 사용된 모형 전개판은 슬롯이 없는 만곡형 전개판과 2슬롯 만곡형전개판을 사용하였다.

Fig. 5는 제작된 모형 전개판을 나타내고 있으며, 현장(chord) 200mm, 길이(length) 340mm로, 종횡비(aspect ratio)는 1.7, 만곡도(camber ratio) 0.13이며, 슬롯의 위치는 전연으로부터 0.1C(chord)와 0.6C에 있다. 최대 만곡도의 위치는 현재 사용되는 전개판의 경우 통상 0.5C(C는 chord)에 위치하므로 이에 준하여 모형을 제작하였다. 슬롯의 크기는 0.02C이다.

전개판의 천정판은 투명 아크릴로 제작하여 회류수조의 관측창으로 향하도록 설치하여 촬영이 용이하도록 하였다.

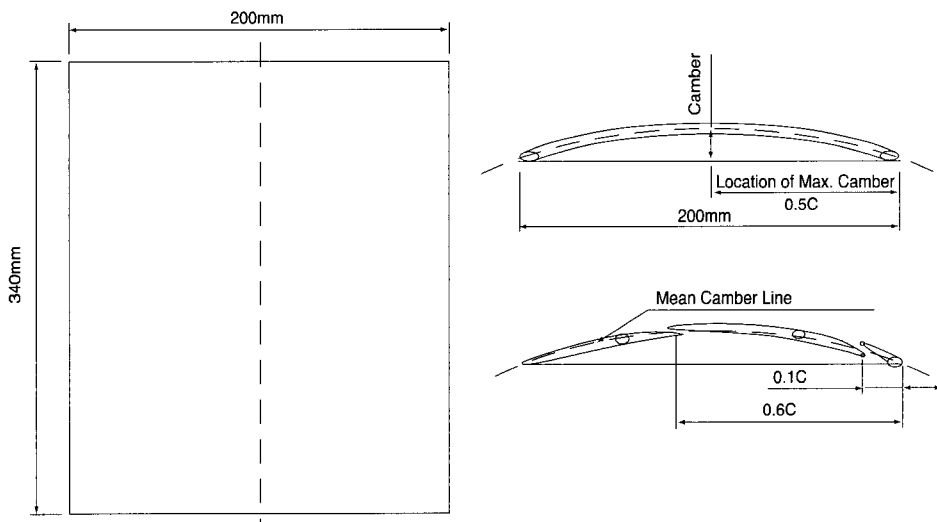


Fig. 5. Structure of the cambered otter board.

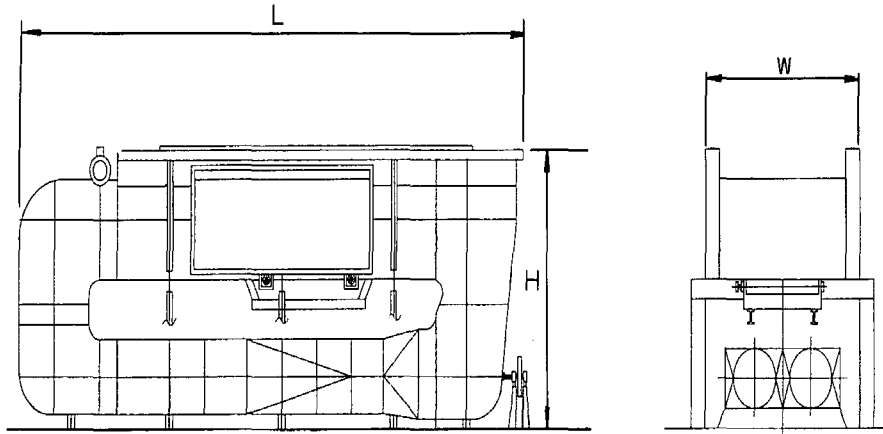


Fig. 6. Schematic drawing of the vertical circulation water channel.

(5) 회류 수조

Fig. 6은 실험에 사용된 수조의 개략도이다. 본 수조는 수직순환형 회류수조로써 전체크기는 L 11,500×W 2,300×H 4,200(mm)이고, 관측창은 L 3,200×H 1,400(mm)이며, 2개의 축류 임펠러에 의해 작동된다. 수조의 상부에는 정류망, 정류격자, 기포제거기, 표면류가속장치, 제파판 등의 정류장치가 있어 수로 내에서 유속이 일정하게 흐르도록 제작되었으며, 유속의 범위는 0~1.0 m/s이고, 관측부의 단면유속편차는 수면, 수조바닥, 벽면으로부터 100mm 이내를 제외한 구간에서 유속 0.8m/s일 때 ±6% 이내였다. 유속의 측정은 propeller type 유속계(VO-101A, Kenek)와 Pivot tube를 사용하였다. 실험에 사용된 유속은 0.35m/s, Reynolds 수는 $Re=7.0 \times 10^4$ 에 대하여 영각은 20°~30°로 각 2°씩 증가시키면서 실험하였다.

結果 및 考察

본 실험에서는 모형 전개판 주변의 유동 현상을 가시화하고, PIV를 이용하여 유동장에 분포된 추종입자의 위치를 영상처리에 의해 추적함으로써 관측영역 내의 속도벡터를 계측하였으며, 따라서, CFD에 의해 시뮬레이션된 결과와 직접 비교할 수 있는 정량적인 자료를 획득할 수 있었다.

1. PIV에 의한 유동장의 가시화 및 유동해석

Fig. 7은 영각 28°에서의 가시화된 화상을 PIV에 의해 소프트웨어를 후처리한 결과를 보여주고 있다. 본 화상 분석을 통해 정량화된 결과는 평균 속도 벡터도와 순간 유선도와 평균 와도로 후처리하여 유동 특성을 평가하였다.

Fig. 7a에서는 PIV에 가시화된 화상이며 AOM을 사용하지 않은 일반 비디오카메라로 사용하여 캡처한 화상으로 입자 궤적과 해석된 자료를 비교하기 위하여 제시하였다. 7b는 평균 속도 벡터를 보여주고 있는데 순간 속도 벡터를 각 격자점에서 30프레임을 산술 평균하여 시간평균 속도 벡터를 구하였으며, 전개판 주변 및 후류의 벡터분포도가 잘 나타나고 있다. 7c는 순간유선도이며 7d는 평균와도(Average vorticity)이다.

전면에서 0.6c지점에서 전개판 벽면 근방에 점성작용에 의한 얇은 속도 구배층, 즉 경계층이 발생됨을 알 수 있고, 경계층 외부에서는 점성작용을 무시할 수 있는 균일한 유체운동분포를 보이고 있다. 원시화상과 순간유선도, 평균 와도를 비교하여 보면 상당히 유사한 패턴을 보여주고 있었으며, 원시화상의 동화상을 직접 비교하여 보면 더욱 일치함을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 영각 변화에 따른 전개판 주변 유동장에 유입된 입자의 흐름을 캠코드로 촬영한 원시화상이다. 본 그림에서 유체의 흐름방향은 왼쪽에

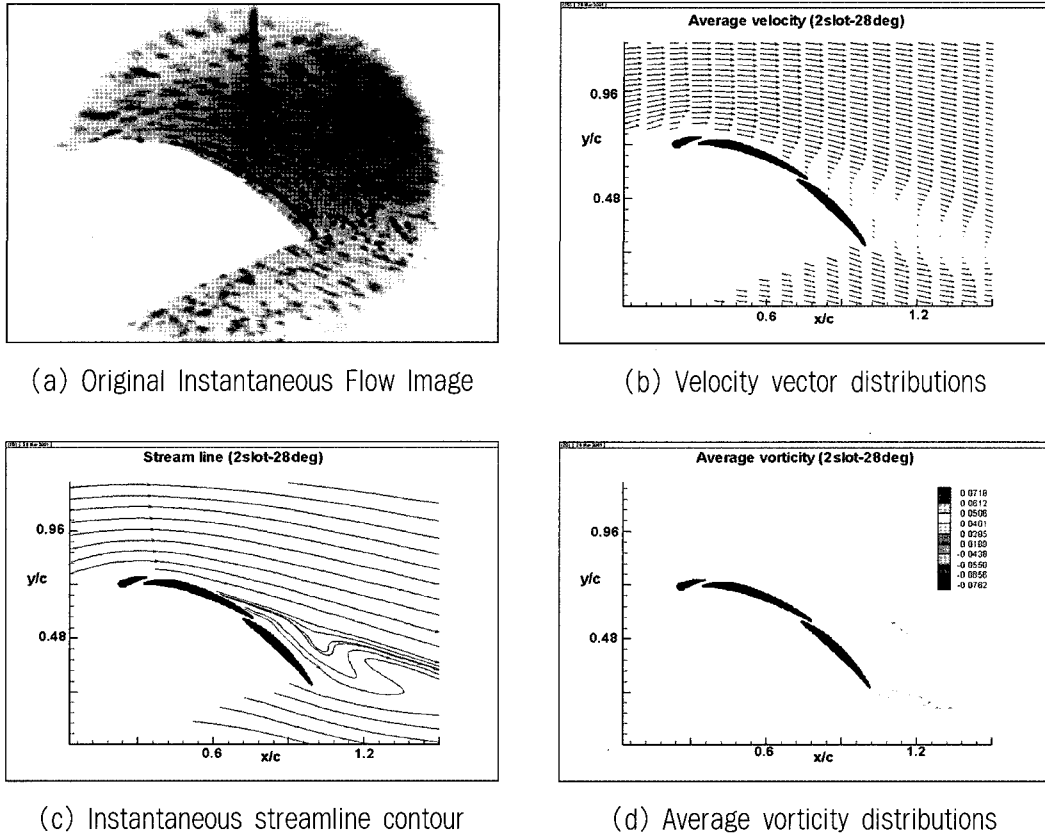


Fig. 7. Results according to PIV Image processing software.

서 오른쪽이며, 흑색의 유적선은 PVC 입자들의 움직임을 나타내고 있다.

입자의 속도가 낮거나 정체할 경우 입자의 크기가 작고 명확하게 나타나는 반면 유속이 빠른 영역에서는 궤적이 길게 나타나고 있었다. 다만 단일 광원에 의한 방식을 취함에 따라 맹목 현상에 의해 전개판 아래 영역의 유선 분포를 확인할 수 없었다. 일반적으로 익형의 경우 경계층 박리가 일어나는 위쪽 영역의 흐름이 그 역학적 특성을 크게 좌우하므로 실험 결과의 비교에는 큰 영향은 없겠지만, 향후 광원의 방향이나 이중 광원 등을 고려하여 해결할 수 있을 것이다.

Fig. 8a, 8b, 8c, 8d에서는 전개판 후연에서 입자의 궤적이 작고 명확히 나타나는 영역이 점점 증가하는 것이 나타나고, 그 현상도 전연 쪽으로

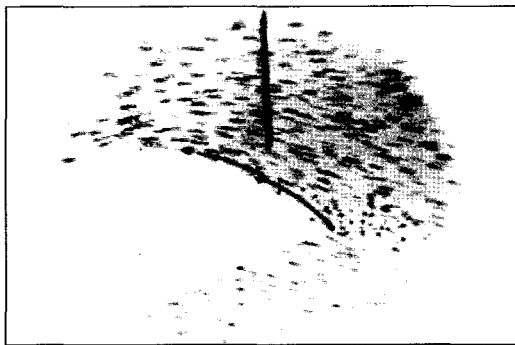
확대하는 양상을 보였다. 즉, 영각이 증가할수록 전개판 후연에서 경계층 박리에 의한 와동하는 입자의 양이 늘어남을 알 수 있었는데, 대략 영각 26° 이후 더욱 급속히 증가하였다. 특히 Fig. 8e, 8f에서는 이러한 궤적의 형상이 명확히 와류의 형태로 나타났고, 이러한 현상은 후처리 후 입자의 평균와도 등에서도 잘 나타났다.

Fig. 9, 10은 영각의 증가에 따른 순간 속도 벡터를 산술 평균한 평균 속도 벡터도와 순간 유선 분포도를 보여주고 있다.

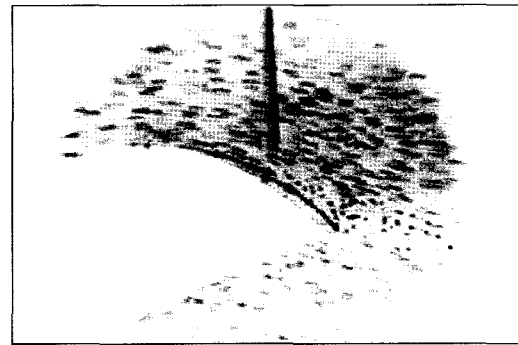
영각 20°, 22°에서는 전개판의 상부와 하부에서 층류에 가까운 유동을 보이고 있으며 경계층 박리 또는 역압력 구배가 관찰되지 않고 있다. 영각이 증가할수록 균일한 속도분포를 갖고 있는 흐름이 통과하면서 전개판의 상부 측에서 속도가

점점 줄어들고 압력이 상승하면서 박리가 일어나는 경계층을 중심으로 하부 측보다는 상부 측에서 보다 높은 운동에너지를 보유하고 있음을 알 수 있다. 특히 후류에서는 미세하지만 와류가 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

영각 24°가 지남에 따라 전개판의 경계면을 따라 형성되는 경계층이 그 두께는 증가하고, 벽면 근방의 점성마찰에 의한 속도에너지 손실로 유동이 익면으로부터 이탈되어 박리가 발생되고, 역압력 구배에 의해 역류가 나타남을 알 수 있다.



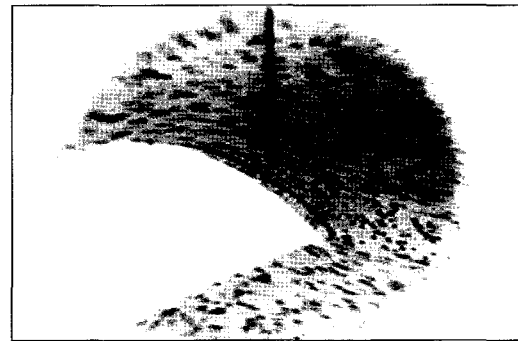
(a) Angle of attack = 20°



(b) Angle of attack = 22°



(c) Angle of attack = 24°



(d) Angle of attack = 26°

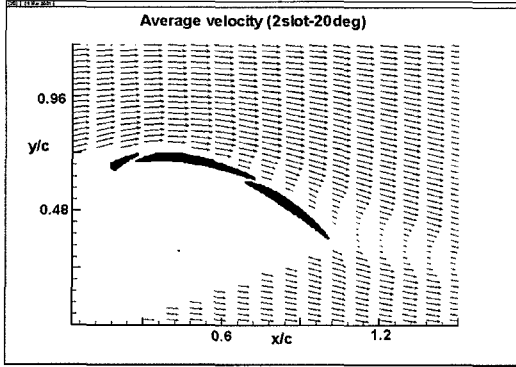


(e) Angle of attack = 28°

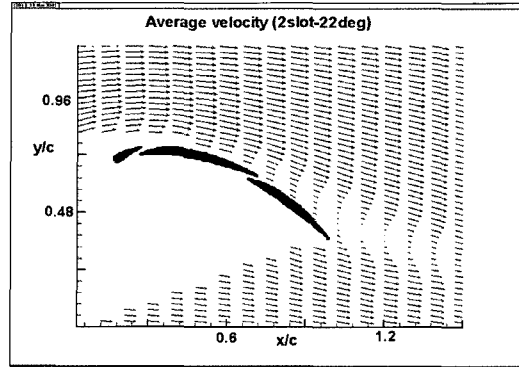


(f) Angle of attack = 30°

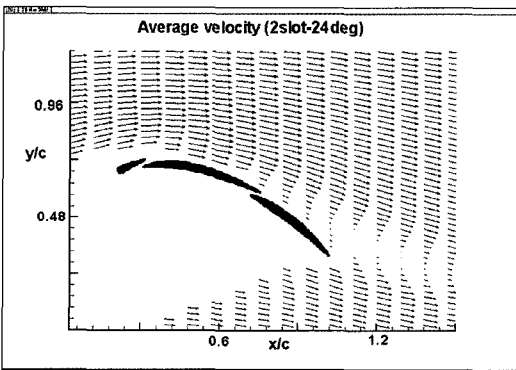
Fig. 8. Original Instantaneous Flow Image for PIV.



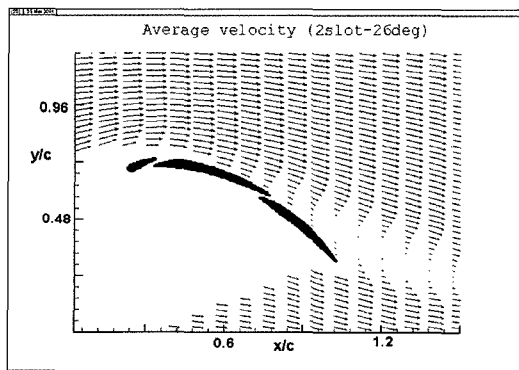
(a) Angle of attack = 20°



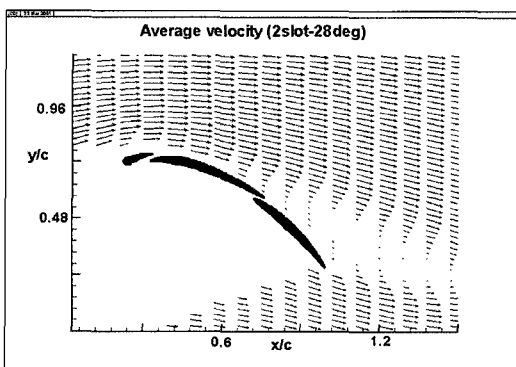
(b) Angle of attack = 22°



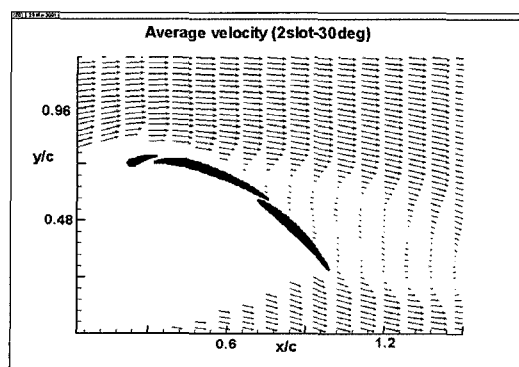
(c) Angle of attack = 24°



(d) Angle of attack = 26°

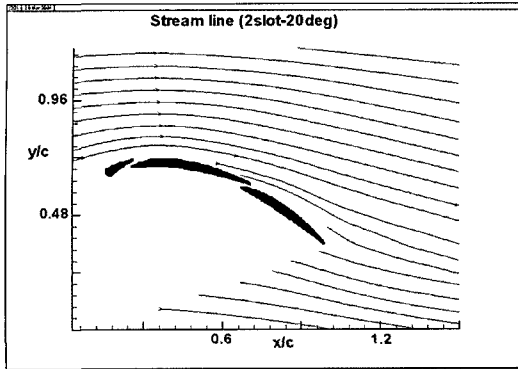


(e) Angle of attack = 28°

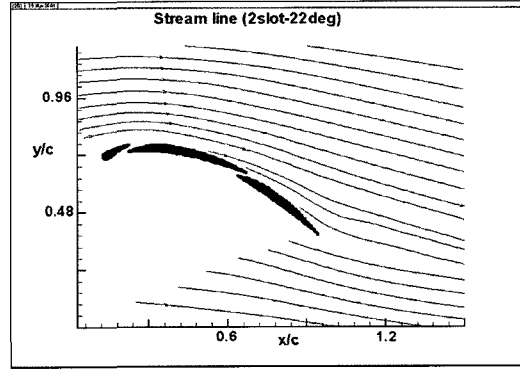


(f) Angle of attack = 30°

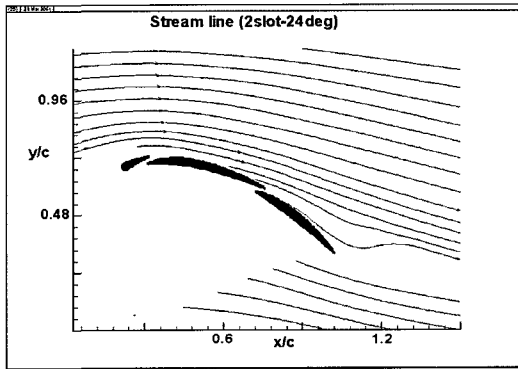
Fig. 9. Average velocity vectors distributions according to attack angle.



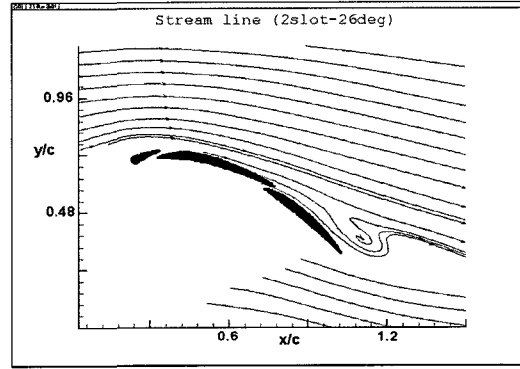
a) Angle of attack = 20°



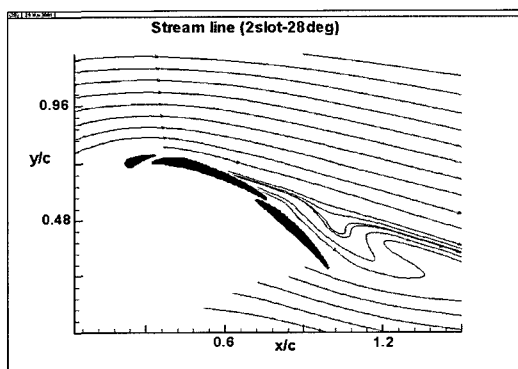
(b) Angle of attack = 22°



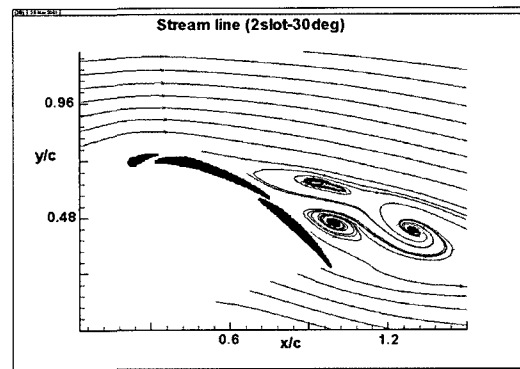
(c) Angle of attack = 24°



(d) Angle of attack = 26°



(e) Angle of attack = 28°



(f) Angle of attack = 30°

Fig. 10. Instantaneous streamline contours in accordance with attack angle.

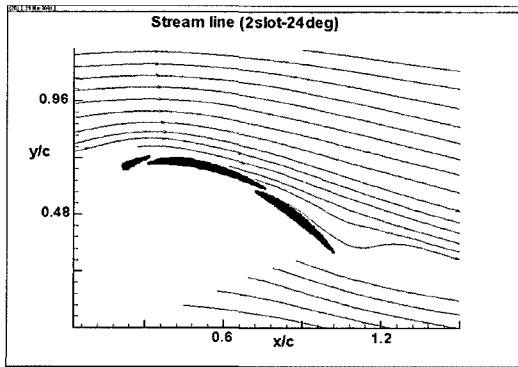
특히 영각 28°, 30°에서는 이러한 역류가 심하게 발생하였다. 이러한 역류는 불규칙한 회전유동영역을 크게 생성시켜 자유유동을 교란시키는 것으로 나타났다. 또한 영각의 증가에 따라 전연 쪽으로 박리점이 점점 이동되고, 박리의 규모가 매우 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 후류에서도 발생하는 와류가 보다 활발하게 나타났다.

일반적인 익형에서는 박리점이 전연 쪽으로 이동될수록 항력이 증대하고, 후연 쪽으로 이동될수록 항력이 감소한다. 박리가 발생되면 박리역의 압력저하에 따라 양력을 감소시키고, 영각이 일정한도를 넘어서면 양력이 급속하게 떨어지는 실속(stall)현상을 동반한다. 따라서 전개판 설계

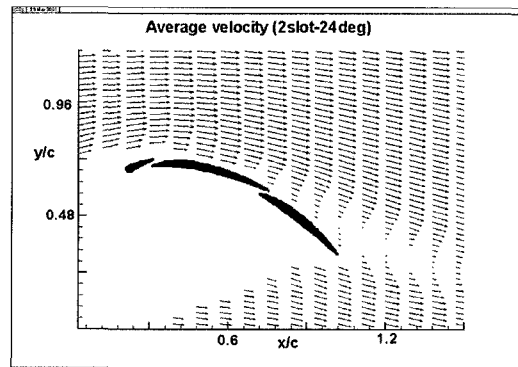
시 박리 억제, 또는 박리 발생을 가급적 전개판의 후연으로 이동시키는 설계가 필요하며, 이를 위하여 본 실험에서 사용된 만곡형 전개판 모형에서는 2개의 슬롯이 사용되었으나, 영각 28°에서 급격한 와동의 발달을 확인하였으며, 이를 지연시키기 위한 연구를 지속적으로 해나가야 할 것으로 판단되었다.

2. CFD와 PIV에 의한 결과 비교

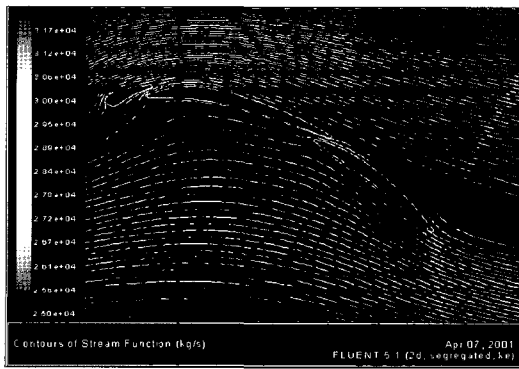
Table 2는 최대전개력계수가 나타난 영각 24°에서 플루언트에서 수치해석한 결과와 모형실험에 의해 측정된 양력계수와 항력계수를 나타내었다.



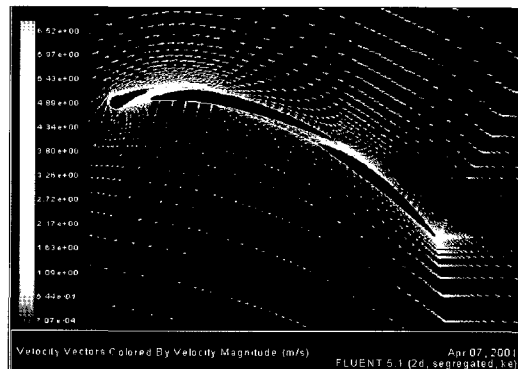
(a) Instantaneous streamline contour



(b) Velocity vector distributions



(c) Streamline contour



(d) Velocity vectors contour

Fig. 11. Streamline and vorticity contour of CFD and PIV in accordance with the maximum CL.

정량적으로 직접 비교는 앞서 단일 슬롯 만곡형 전개판의 유동특성 실험⁵⁾에서보다 크게 나타났다. 특히 모형실험에서 항력이 높게 나타났으며, 모형의 재질과 결속장치의 저항을 다시 고려하여야 할 것으로 판단되었다. 다만, 받음각 변화에 정성적인 비교는 유사한 변화 추이를 보여주었다.

Table 2. Results of Numerical analysis and Experiment of Otter board Model with 2 slot at angle of attack 24°

	Calculation			Experiment		
	C_{Lmax}	C_D	C_L/C_D	C_{Lmax}	C_D	C_L/C_D
Model Scale ($Re=7.0 \times 10^4$)	2.36	0.30	7.87	2.02	0.41	4.93

Fig. 11은 최대 전개력 계수가 나타나는 영각 24°에서 시뮬레이션한 CFD결과와 PIV 분석결과를 보여주고 있다. 유선분포에서 상당히 유사한 패턴을 보여주고 있다.

또한, 앞서 실험에 의한 양력 및 항력의 측정에서도 CFD에 의한 결과와 유사하였으므로 향후 CFD만으로 모델 개발을 실시하고 이를 PIV와 모형실험을 통해 검증하는 방법으로 개발을 한다면 신뢰성 높고, 경제적인 개발모델이 될 수 있음을 확인하였다.

본 실험을 통하여 PIV에 의한 가시화와 화상분석을 통해 유동장에 관한 다양한 자료를 얻을 수 있었다. 또한, 가시화실험을 통한 영상자료를 디지털화함으로써 유체의 운동을 전산유체역학에 의한 결과와 다양한 방법으로 검증이 가능함을 알 수 있었다.

앞으로 PIV에 의한 화상분석을 통하여 전개판의 다양한 부가양력장치의 특성과 전개판 주변의 유동특성 분석에 활용한다면 전개판의 성능 개선에 도움이 되리라 판단되었다.

要 約

본 연구는 고성능 전개판을 개발하기 위하여 전개판 주변의 유동장을 계측할 수 있는 해석 방

법을 제시하고자 하였다. 실험 방법으로는 CFD를 이용한 유동장의 수치 해석과 유동장의 정량적, 정성적 계측이 가능한 PIV 실험방법을 사용하였다.

본 실험에서는 전개판 주변의 가시화된 영상을 PIV 기법을 이용한 화상처리로 유동특성을 해석하였으며, 이 결과를 CFD에 의한 해석 결과와 유동 패턴을 비교하였다. 또한, 회류 수조에서의 양력 계수 및 항력계수의 계측 결과를 상호 비교하였다. 그 결과, 수치 해석된 결과와 PIV의 실험 결과는 정성적으로 매우 잘 일치하였으며, 물리적으로 타당성을 확인할 수 있었다.

그 결과는 다음과 같다.

- (1) 전개판의 유동장 분석을 위하여 레이저 광원을 이용한 가시화 실험을 실시하고, PIV 기법으로 화상분석을 실시하였으며, 유동입자의 흐름으로도 충분한 정성적인 유체운동의 경향을 파악할 수 있었다.
- (2) PIV해석결과가 정량적인 결과이므로 이를 다양한 후처리 방법을 통해 속도벡터장, 순간 유동장, 평균 와도로 나타내어 유동장의 변화를 확인할 수 있었다.
- (3) 최대전개력계수가 나타난 영각 24°에서 비교한 CFD와 PIV 해석 결과, 유동 패턴은 유사하였고, 두 경우 모두 전개판 후연에서 약간의 경계층 박리가 발생하였으나 양호한 흐름을 보였다.
- (4) PIV에 의한 속도 벡터도, 순간 유선도, 평균 와도로 후처리한 결과, 영각 24°에서부터 경계층 박리 현상이 일어나기 시작하여, 영각 28°이상이 되면 심하게 전연으로 발생지점이 이동하게 되고, 그 폭도 확대됨을 확인할 수 있었다.

參 考 文 獻

高冠瑞 · 權柄國 · 盧基德 (1992) : 展開板에 대한 數值解析 - 5. - 過絲近似法에 의한 特

- 性計算 - , 漁業技術 28(2), 132~143.
- 權炳國 (1993) : 展開板의 流體力學的 特性에 관한 研究, 釜山水產大學校 大學院 博士學位論文.
- 金大安 (1981) : 트롤漁具의 展開板 設計理論에 관하여, 麗水水產專門大學研究報告 第2號, 9~13.
- 金龍海·高冠瑞 (1987) : Flap을 부착한 模型 展開板의 展開性能, 韓水誌, 20(6), 484~488.
- 박경현, 이주희, 현범수, 배재현 (2001) : 단일 슬롯 만곡형 전개판의 유체역학적 특성에 대한 연구, 한국어업기술학회지 37(1), 1~8.
- 朴倉斗 (1994) : 오타보드의 유체특성에 관한 연구, 東京水產大學 大學院 水產學博士學位論文.
- 李秉錡·高冠瑞·金龍海·朴璟鉉 (1987) : 單純彎曲型和 슈퍼-V型 展開板의 流體力學的 性能에 관한 模型實驗, 韓水誌, 20(2), 114~118.
- 이영호·최장운 (1996) : PIV의 분류 및 원리, 대한기계학회지 제36권 12호, 1146~1162.
- 이영호·최장운 (1996) : PIV에서의 계조치 상호 상관법개발, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 2권, 396~400.