

# 각도변화에 따른 Sharp Plane의 유동특성에 관한 PIV계측

최종웅\*, 한종석\*, 강호근\*\*, 문종준\*\*\*, 이영호\*\*\*\*

## (PIV Measurement on the Flow Characteristics of a Sharp Plane with Inclined Angles)

J. W. Choi\*, J. S. Han\*, H. G. Kang\*\*, J. C. Mun\*\*\*, Y. H. Lee\*\*\*\*

### Abstract

Animation understanding and time-resolved analysis of the wake characteristics of 2-D sharp plane flows were executed by applying the multi-vision PIV to a sharp plane(three angle of attacks : 15° , 30° , 45° ) submerged within a circulating water channel( $Re = 2 \times 10^4$ ). The macroscopic shedding patterns were discussed in terms of instantaneous velocity, vorticity, velocity profile, kinetic energy, turbulent intensity, frequency analysis. Particularly, the time-averaged distribution of turbulent intensity in each experimental cases revealed separate island-like small regions magnitude of turbulent intensity was always strengthened.

Key Words : Multivision PIV(멀티비전 PIV), Karman Vortex(카르만 와류), Frequency analysis(주파수분석) Separation(박리), Vorticity(와도), Turbulent Intensity(난류강도), Sharp Plane(날카로운 평판)

### 1. 서론

유체역학에 관련된 기계나 기기의 설계 또는 성능향상을 위한 제반 과정에서 가장 기본적인 것은 수반하는 유동장의 거동을 파악하는 일일 것이다.

끝이 날카로운 평판은 우리 주위에서 흔히 찾아볼수 있으며, 평판의 각도 변화 시 그 후류의 유동현상을 관찰하는 것은 평판의 경계층과 관련하여 중요한 의미를 갖는다.<sup>(1)</sup> Karman은 물체의 후면부에 와류가 일정한 주기를 가지고 유출하는 와열의 생성양상의 기하학적 관계<sup>(2)</sup>를 밝혔으며, 와류가 물

체로부터 떨어지는 진동수는 유속과 그 물체의 지름에 의하여 무차원화된, Reynolds 수에만 좌우되는 Strouhal 수를 실험적으로 도출하였다.<sup>(3)</sup>

실제로 공학적인 문제에 있어서도 물체 표면으로부터 유체가 박리하여 와류를 형성하는 각종구조물의 주위에서는 카르만 와류가 발생하여 후류와 공력 불안정 진동 현상을 초래한다. 그러므로 물체 후류의 유동특성에 관한 연구는 중요한 의미를 갖는다.

이러한 배경에서 본 연구는 끝이 날카로운 평판의 후류 유동장에 관심을 갖고  $Re = 2 \times 10^4$ 에서 각도 15° , 30° , 45° 의 평판 후류의 유동장을 정확하게 측정하기 위하여 입력매체로 3개의 CCD 카메라를 이용한 Multivision PIV<sup>(4)(5)</sup>를 적용하여 유동특성을 PIV계측기법<sup>(6)</sup>으로 임의의 순간에 동

\* 한국해양대학교 대학원  
\*\* 일본고베대학  
\*\*\* 경동정보대학  
\*\*\*\* 한국해양대학교 기계·정보공학부

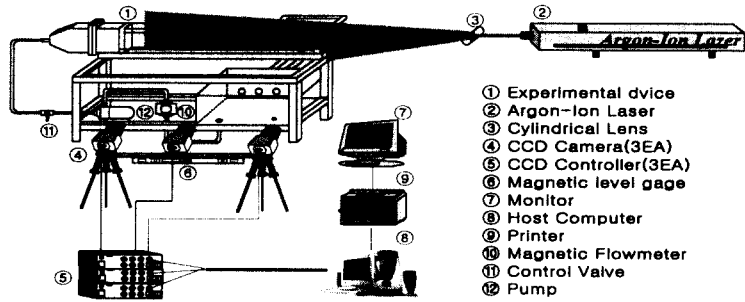


Fig.1 Experimental apparatus

시다점으로 계측한 비교 실험을 통하여 순간 속도 벡터, 와도, 난류강도 그리고 운동에너지를 도시하여 평판 후류에서의 방출 와류에 대한 유체역학적인 유동특성을 고찰하였다.

그 결과 끝이 날카로운 평판 후류에 발생하는 와류의 거시적인 유동구조 파악하였으며, 일정한 주기를 갖는 와류의 생성과 소멸을 시각적으로 직접 확인 할 수 있었다. 또한 주파수 분석을 통하여 정현파의 주기적인 변동특성을 나타내었으며 이러한 주기성은 카르만 와류의 주기성과 관련하여 와류의 특성을 잘 나타내고 있었다.

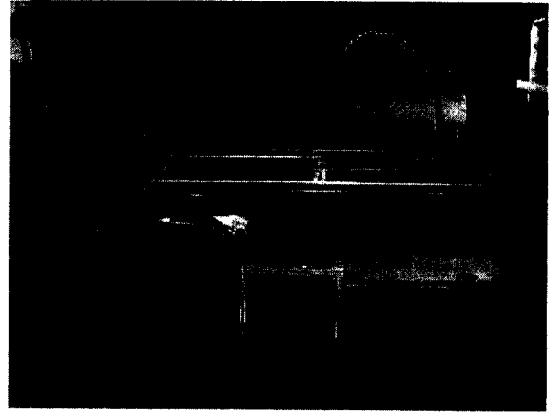


Photo 1 Experimental apparatus

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에 사용된 PIV 실험 장치도를 나타내고 있다. 2차원의 회로수조는 내부의 유동장을 가시화 하기에 적합한 투명아크릴과 고강도 유리로 제작하였다. 회로수조 내부에서 이루어지는 실험은 유입부에서의 균일한 유입이 보장되어야 하며, 이를 위하여 물체의 전방에 정류판과 다공판을 설치하였고, 실험에 앞서 균일 유입의 여부를 확인한 후 실험을 행하였다. Photo 1은 실제의 PIV 실험장치의 배치를 보여 주고 있다. 조명으로는 5W출력의 아르곤 이온 레이저에서 발생하는 빛이 Cylindrical Lens를 통하여 만들어지는 사이트 라이트는 두께 2mm내외의 2차원의 단면광을

생성하여 유동장에 직접 조사하였다. 입력장치로는 BNC케이블을 통해 동기된 3대의 CCD카메라 (SONY, XC-77RR, B&W, 768×439pixel)가 Multivision 영상의 획득을 위하여 사용되었다. 여기에 사용된 3대의 CCD카메라는 동일 축 상에서 움직이기 위하여 이송장치를 설치하여 이동하였고 정확한 수평을 맞추기 위해 수평계를 이송장치 밑에 달아 수평을 유지하였다. 실험에 사용된 모델은 아크릴로 제작되었으며 정밀한 피칭 콘트롤러와 서보모터에 의하여 제어되었다. 한편, 유동장내의 유체 입자 선별분체는 광원과 함께 PIV계측정도에 큰 영향을 미친다. 본 실험에서는 비중이 1.02전후로서 물과의 비중차가 작고 크기가 110 $\mu$ m 전후의 값을 갖는 조명에 대해 산란성이 우수한 백색의 PVC (polyvinyl chloride, [CH<sub>2</sub>CH(Cl)]<sub>n</sub>) 구형입자를

사용하였다.

2차원의 회로수조는 저장용 물탱크를 설치하여 물이 순환될 수 있도록 구성하였고, 유입되는 유량은 회로의 전면부에 설치된 디지털 유량계에 의해 측정되었다. 그리고 실험이 진행되는 동안 순환되는 물의 온도가 상승되면 기포발생 등의 이상현상이 일어날 수 있으므로 이를 방지하기 위하여 저장용 물탱크의 물을 일정한 온도로 유지시킬 수 있도록 얼음을 이용하였다.

회로수조내의 유체의 유입속도는 수조내의 밸브를 조절하여  $0.2m/s(Re = 2 \times 10^4)$ 로 설정하였다. 3개의 CCD카메라에서 획득된 영상은 후처리 과정에서 합성과정을 거쳐서  $505(mm) \times 167(mm)$ 의 계측영역이 만들어진다. Table 1은 본 실험에서 사용된 모델의 규격과 실험조건을 나타내고 있다.

Table 1. Experimental condition

	Item	Specification
Sharp plane	length	100mm
	width	17mm
	height	7mm
Visualization Equipment	Image Board	DT3154 (640×480pixel)
	Light Source	5W Argon-Ion Laser
	Sheet Light	Cylindrical Lens
Measuring Condition	Working Fluid	Tap Water
	Temperature	8°C
	Tracer	PVC(110 $\mu$ m)
Image Processing	Host	Pentium III PC
	Computer	(533MHz)
	Calculation Time	1.0min/frame
	Identification	Two-frame Gray-level Cross Correlation Algorithm
	Ratio of Error Vector	Under 1%/frame



Photo 2 Original image

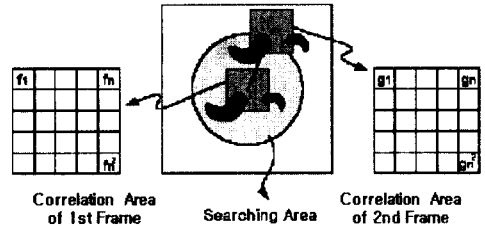


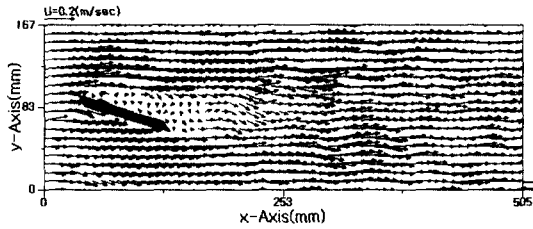
Fig. 2 Diagram of cross correlation method

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

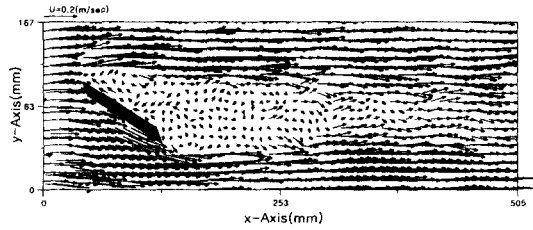
## 2.2 실험 방법

본 가시화 실험에 있어서는 먼저 유동장을 형성하고 추적입자를 유동장에 주입시킨 후에 적당한 조명을 제공한다. 영상처리장치로는 이미지 그래픽(DT3154, 640×480pixel, B&W)을 CPU(533MHz)의 호스트 컴퓨터에 내장하여 사용하였다. 본 실험에서 사용된 DT3154 이미지 보오드는 영상 저장장치로부터 공급된 유동장의 아날로그 신호를 2차원의 디지털 영상정보로 바꾸어 주는 역할을 하며 각종 전처리 조작은 전용의 처리 소프트웨어(FlowInside3.0)를 이용하였다. Photo 2는 Sharp plane이 30° 일 때의 계측영역의 임의의 순간영상을 나타낸 것이다. 속도벡터 추출을 위한 유동장의 영상처리에는 반드시 전처리 과정이 필요하며 다양한 기법들이 소개된다. 이 과정으로 잡음제거, 회전보정 등을 거친 다음, 이치화된 영상으로 탐색반경을 결정한 후에 유동장의 거동특성을 관찰하

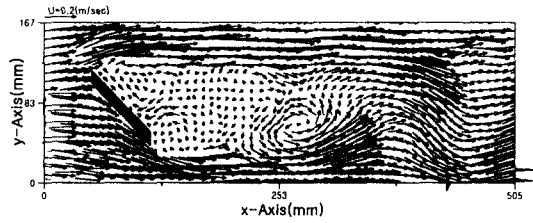
각도변화에 따른 Sharp Plane의 유동특성에 관한 PIV계측



(a) angle of attack 15°

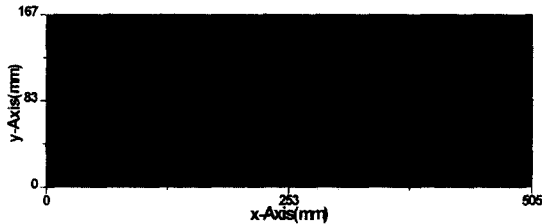


(b) angle of attack 30°

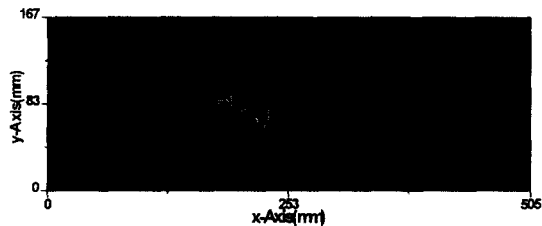


(c) angle of attack 45°

Fig. 3 Instantaneous velocity distribution



(a) angle of attack 15°

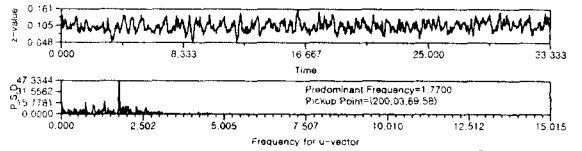


(b) angle of attack 45°

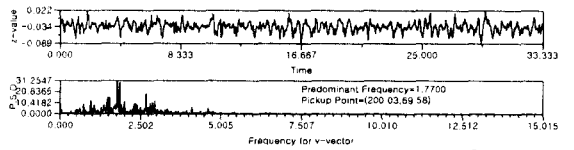
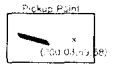


(c) angle of attack 45°

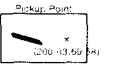
Fig. 4 Time-averaged turbulent intensity



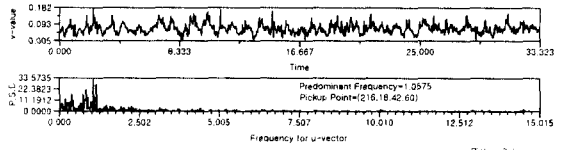
Used file No. = 1001  
Average dt = 0.0333  
DFac = 4.0000  
HFac = 1.0000  
Filtering Range = 0.0000 - 0.0000



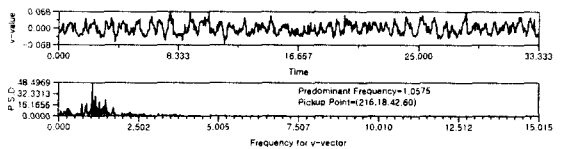
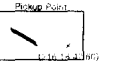
Used file No. = 1001  
Average dt = 0.0333  
DFac = 4.0000  
HFac = 1.0000  
Filtering Range = 0.0000 - 0.0000



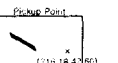
(a) angle of attack 15°



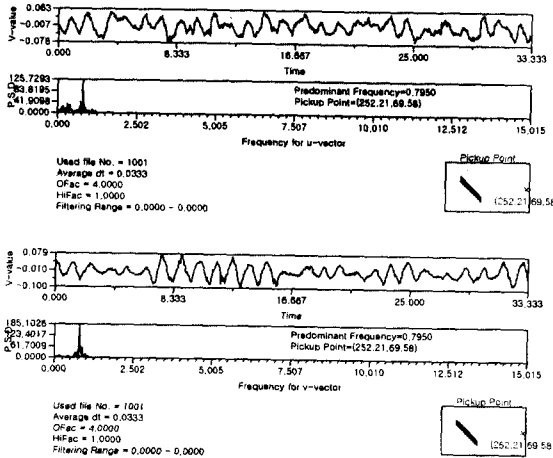
Used file No. = 1001  
Average dt = 0.0333  
DFac = 4.0000  
HFac = 1.0000  
Filtering Range = 0.0000 - 0.0000



Used file No. = 1001  
Average dt = 0.0333  
DFac = 4.0000  
HFac = 1.0000  
Filtering Range = 0.0000 - 0.0000



(b) angle of attack 30°



(c) angle of attack 45°

Fig. 5 Spectrum of u, v velocity

여 상관영역을 설정한다. 전처리 과정 중에 잡음 제거 효과를 얻을 수 있는 것이 배경영상 처리과정이다. 이것은 계측영역에서 입자를 제외한 영상의 불필요한 부분을 최소화하며 처리영상에 포함된 노이즈를 제거하기 위한 것이다. 이를 위하여 연속된 273개의 원시 영상의 계조치를 산술 평균한 다음, 실제로 처리하고자 하는 순간의 유동장으로부터 감산하는 방법으로 택하였다. 잡음이 제거된 영상에 대해서 계측영역내 직선 윤곽선을 이용하여 CCD카메라의 위치에 대한 회전보정을 행하였다. 전처리가 끝나면 계산영역을 설정하고 장애물처리를하여 계조치상호상관법<sup>(6)</sup>을 이용한 동일입자 확인을 실시하였다. Fig. 2는 미소간격을 갖는 연속된 두 프레임의 영상의 계조치에 대하여 식 (1)과 같은 상호상관계수를 이용하여 최대상관계수의 위치를 속도벡터의 종점좌표로 정하는 방법의 원리를 보여주고 있다. 단,  $f_i$ ,  $g_i$ 는 상관영역내의 각 pixel의 계조치를 의미하며 “-”는 평균을 뜻한다. 계조치 상호상관법을 적용할 때 탐색반경(SAR)과 상관영역(CAS)의 설정은 속도벡터의 신뢰성 뿐만 아니라 계산시간의 단축에도 결정적인 영향을 미친다. 속도벡터의 격자수는 각각 3개의 영상에  $45 \times 39$ (R),  $39 \times 39$ (G),  $36 \times 39$ (B)이고, 상관계수를 구하기 위한 탐색영역의 반경은 11pixel이다. 상관영

역의 크기는 41pixel이며 하나의 순간 유동장에 대한 처리는 기종(CPU 533MHz)에서 15°, 30°, 45° 영상 3개를 각각 R, G, B 3개씩 처리한 후 다시 각 각도의 R, G, B를 하나로 합성하고 합성된 15°, 30°, 45°를 처리하였다. 처리시간은 약 30분 정도 소요되었으며, 원하는 영상을 얻기 위해 273개의 영상을 순차적으로 처리한 다음 산술 평균하였다. 후처리 과정에서는 기록된 영상의 화질에 따라 발생한 고유의 에러 성분인 이상치를 판별하여 과오백터를 제거하는 에러제거, 격자점재배치, pixel 단위를 m/sec로 바꾸는 단위환산, 시간평균 등을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 3-Fig. 4는 sharp plane이 유체 유입에 대해서 각도가 15°, 30°, 45°도 일 때의 순간속도벡터와 시간평균 난류강도를 나타낸다. 이 그림에서 살펴보면 sharp plane의 각도변화에 따른 후류의 유동 패턴의 변화가 각도에 따라 잘 보여지고 있다. 유동장은 좌측으로부터 균일하게 유입하여 우측으로 유출되며 주기적인 와류의 방출에 의한 박리점에서 와류의 발생, 성장, 소멸 과정의 주기적인 과정이 잘 나타나고 있다. 또한, sharp plane의 각도에 따른 앞의 부분과 뒷부분에서의 압력차이로 인하여 plane의 뒷부분에서 압력항력이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 그리고 받음각이 커질수록 평판 상부에서 유체의 속도가 빠르게 나타남을 관찰할 수 있었다. 그 영향으로 평판 후방에까지 영향을 미침을 볼 수 있었다. Fig. 4은 시간평균 난류강도의 결과를 나타낸 것이다. 시간평균 난류강도는 순간속도분포의 표준편차와 시간평균속도와의 비를 나타낸 것이며 그림에서 살펴보면 난류강도가 강한 부분이 물체후방의 국소 부위에 집중되어 나타나는 것을 발견할 수 있다. 이와 같은 난류강도는 물체의 각도에 따라 다르며, 물체의 각도가 클수록 후방으로 이동하여 나타남을 알 수 있다. Fig. 5는 sharp plane의 15°, 30°, 45° 일때의 각 pickup point에서의 u방향과 v방향의 속도변동과 이를 이용한 주파수분석의 결과를 보이고 있다.

Fig. 5(a), (b) 및 (c)는 v방향에 비해 u방향에서 속도변동이 크고 sharp plane 후류영역에서의 주파수 성분은 1개의 탁월주파수 (Predominant Frequency) 값이 강하게 나타남을 알 수 있다. sharp plane의 받음각이 작을수록 탁월주파수가 커짐을 알 수 있으며, 카르만 와류의 주기적인 방출로 인한 제 1주파수 성분의 존재가 확인되고 방출와의 제1주파수 성분만이 존재함을 보여주고 있다. 이것은 와의 재부착 현상이 두드러지지 않으며, sharp plane의 먼 후방에 고차의 주파수가 나타날 것을 예측할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 2차원 회로수조 내부( $Re=2 \times 10^4$ )에 아크릴 모델을 유입시켜 각도 변화에 따른 ( $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ) sharp plane에서의 유동현상을 Multivision PIV를 적용하여 고찰하였다. Multivision PIV를 적용함으로써 계측영역의 한계를 극복할 수 있었으며, 후류 영역에서의 정량적인 유동정보를 획득할 수 있었다. 획득한 데이터를 이용하여 순간 속도벡터의 분포, 순간 단면속도의 분포, 시간평균 난류강도, 시간평균 와도, 그리고 시간평균 운동에너지 등을 도시하여 유동장의 거시적인 구조를 검토하였다. 그 결과, sharp plane의 각도 변화는 속도분포를 변화시켜 와의 난류강도 분포가 각이 커질수록 점점 후방으로 집중분포되어 생성되는 것을 알 수 있었다. 주파수 분석결과 정현파의 주기적인 변동특성이 나타났다. 이것은 일정한 주기를 가지고 방출(shedding)되는 카르만 와류의 특성을 잘 나타내고 있었다. 향후에는 보다 넓은 범위의 Reynolds 수에서 평판 후류의 유동특성이 검토되어야 할 것으로 사료된다.

#### 후기

이 연구는 2000년도 한국과학재단 특정기초연구(과제번호 : 2000-1-30500-003-3)의 지원으로 이루어졌음을 밝힌다.

#### 참고 문헌

1. 신성호, 전우평, 강신형 ; “자유유동 난류강도 변화에 따른 평판위 천이 경계층의 유동특성에 관한 실험적 연구”, 대한기계학회 논문집 B권, pp. 1335-1348, 1998
2. H. J. Lugt ; “Vortex Flow in Nature and Technology”, Karlsruhe, G. raun, pp.140-165(1983)
3. A. Roshko ; “On the Development of Turbulent Wakes from Vortex Streets”, NACA TN, pp.2913(1953)
4. Lee Y.H., Nam C.D., Choi J.W., Lee H., Animation Understanding of 2-D Simple Bluff bodied Flows by Multi-Vision PIV, Proc. of the 9th International Symposium on Flow Visualization, Edinburgh, 2000.
5. Lee Y.H., Lee H., Choi J.W., A Study of Fluid Characteristics in the Wake of Bluff Bodies by Multivision PIV, 2000.
6. 이영호, 최장운 ; “PIV에서의 계조치 상호상관법 개발”, 대한기계학회 춘계학술대회 논문집 2권, pp.396-400, 1996.