creative commons
COMMONS DEED

저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

공학석사 학위논문

PIV에 의한 압력장 추정 개선방안에 관한 연구

A Study on the Improvements on the Predictions of the Pressure Fields using PIV

지도교수 도 덕 희

2011년 2월

한국해양대학교 대학원

냉동공조공학과

이 창 제

목 차

그림 목차 ····· ii

사용 기호 ····· iii

Abstract ····· vi

제1장 서 론 ····· 1

1.1 연구배경 ····· 1

1.2 연구목적 ····· 3

제2장 PTV 측정법에 의한 압력장 추정 ····· 4

2.1 PIV측정법 원리 ····· 4

2.2 Poisson's 방정식에 의한 압력장 계산 ····· 9

2.3 운동량 방정식에 의한 압력장 계산 ····· 11

2.4 압력장 추정 비교 ····· 15

제3장 사각주 유동에 대한 압력장 추정 ····· 32

3.1 실험 장치 구성 및 실험 조건 ····· 32

3.2 실험결과 및 토론 ····· 36

제4장 결론 ····· 43

참고문헌 ····· 44

그림목차

Figure 2.1 Method of velocity measurement ····· 6

Figure 2.2 Concept of Cross-Correlation Function ····· 7

Figure 2.3 Priciple of Cross-correlation ····· 8

Figure 2.4 Control volume for the continuity equation ····· 12

Figure 2.5 Control volume for u ····· 13

Figure 2.6 Control volume for v ····· 14

Figure 2.7 Experimental setup ····· 17

Figure 2.8 Instantaneous velocity field at 30 x 30 ····· 18

Figure 2.9 Instantaneous pressure field using the Poisson's equation at 30 x 30 ····· 19

Figure 2.10 Instantaneous pressure field using the momentum equation at 30 x 30 ····· 20

Figure 2.11 Instantaneous velocity field at 60 x 60 ····· 21

Figure 2.12 Instantaneous pressure field using the Poisson's equation at 60 x 60 ····· 22

Figure 2.13 Instantaneous pressure field using the momentum equation at 60 x 60 ····· 23

Figure 2.14 Instantaneous velocity field at 90 x 90 ····· 24

Figure 2.15 Instantaneous pressure field using the Poisson's equation at 90 x 90 ····· 25

Figure 2.16 Instantaneous pressure field using the momentum equation at 90 x 90 ····· 26

Figure 2.17 Calculation Area in CFD ····· 27

Figure 2.18 Velocitu vector at X-Z place ····· 28

Figure 2.19 Velocity profile of u component ····· 29

Figure 2.20 Velocity profile of v component ····· 30

Figure 2.21 Pressure Contour at X-Z plane ····· 31

Figure 3.1 Experimental setup ····· 34

Figure 3.2 Square bluff body ····· 35

Figure 3.3 Velocity grid point location ····· 38

Figure 3.4 Compare pressure and v velocity component ····· 39

Figure 3.5 Instantaneous vector field ····· 40

Figure 3.6 Instantaneous pressure field the momentum equation ····· 41

Figure 3.7 Instantaneous pressure field the poisson`s equation ····· 42

사용 기호

Nomenclature

A_e	: Control volume
a_E, a_W, a_S, a_N, a_{nb}	: Neighbor coefficient
J, K	: Cross-Correlation area
N, M	: Image Size
p, p_E, p_W, p_S, p_N	: Pressure
p, $p_E^{'}$, $p_W^{'}$, $p_S^{'}$, $p_N^{'}$	: Pressure correction
p, p_E^{*}, p_W^{*}, p_S^{*}, p_N^{*}	: Guessed pressure
r	: Coordinate factor
S	: The rate of heat generation per unit volume
t	: time
u, v, w	: Velocity component
$u^{'}, v^{'}, w^{'}$	: Velocity correction
u^{*}, v^{*}, w^{*}	: Guessed velocity
x, y, z	: Photographic coordinate system

Greek characters

α	: Relaxation factor
Γ	: Diffusion coefficient
ρ	: Density of water
ϕ	: General variable

A Study on the Improvements on the Predictions of the Pressure Fields using PIV

by Chang Je, Lee

Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

PIV(Particle Image Velocimetry) is a very powerful measuring technique. By recording two sequential particle images separated by a short time interval, the instantaneous velocity distribution of the whole flow field can be determined by the cross-correlation analysis of the two sequential images.

A staggered grid momentum equation and Poisson's equation which are able to produce correct pressure distribution directly if correct velocities are given, is proposed to solve the pressure distribution for PIV experiments. The proposed pressure equation solvers are first calibrated with a two-dimensional wakes around a cylinder. Poisson's equation pressure field solved is realistic and accurate then momentum equation pressure field.

Simultaneous measurement system for the pressure field and the velocity field has been constructed. The reference pressure has been measured simultaneously when the PIV measurements have been carried

out. The measurement region is the near field of a square bluff body. The pressure fields have been calculated by using the velocity field obtained by the PIV system and the reference pressure measured simultaneously at a reference point. It has been shown that the v velocity components influences the pressure fluctuations. In rear side, it has been shown that the pressure profiles show similar pattern with those of v component. Using the measured data, we obtain the normalized pressure field.

1. 서론

1.1 연구배경

Particle Image Velocimetry(PIV)는 유체 유동장에 입자를 넣어 카메라로 입자의 움직임을 디지털 카메라로 획득하여 이미지 2장의 입자 위치정보로 부터 속도를 계산하는 기법이다. 컴퓨터의 발전으로 인해 PIV의 알고리즘 계산시간이 줄어 많은 분야에서 사용되고 있다.

유체의 속도장은 PIV로 측정이 가능하나, 압력장 측정은 주로 압력센서에 의존하고 있어 센서에 의한 압력장 측정은 국소적인 영역에서만 이루어지고 있다. 압력 센서로 계측이 불가능한 대부분의 유체의 압력장의 경우 전산유체역학(Computational fluid dynamics : CFD)의 연구결과를 참고해 왔으며, 컴퓨터의 성능이 향상됨에 따라 공간 분해 능력이 향상 되어, 압력장을 계산하는데 많은 시간이 단축되었으며, 알고리즘 또한 높은 정확도를 갖게 되었다.

특히 스케일이 큰 조직 구조의 발생으로부터 소멸에 이르기까지의 메커니즘을 파악하기 위해서는 유동장의 공간적인 속도와 압력을 동시에 계측할 수 있는 방법이 필요하게 된다. 종래의 대표적인 난류계측법인 열선·열막유속계 혹은 레이저 도플러 유속계는 원칙적으로 유동장의 한 점에서의 속도를 측정하는 방법이기 때문에 공간구조에 관한 정보를 직접 얻기가 어렵다. 유동장의 공간 및 벽면압력분포를 추정하기 위해서는 유동장의 전역에 걸쳐서 속도계측을 해야한다. 이를 위해서 개발된 것이 PIV기법이며, 구해진 속도를 바탕으로 압력분포를 추정하고 있다.

유동장에서 압력분포 추정은 많은 기계 분야에서 첫 번째로 고려되어 왔다. 캐비테이션의 원인이 되는 공기방울이 낮은 압력에서 생성되며 (Arndt 2002), 벽면 압력의 변화가 flow-induced vibration과 소음을 야기하는 구조물의 원인이 되며, 물체가 움직이는 유체안에 있을 때 양력과 항력 생성하는 가장 큰 원인중의 하나가 압력이다 (Blake1986).

속도와 압력 분포의 순시적인 측정은 실험 기법의 부족으로 인해 속도-압력 분포를 동시적으로 얻기는 거의 불가능했다. Ooi and Acosta (1983); O`Hern (1990); Ran and Katz(1994) 가 마이크로스코픽 버블 압력 센서를 이용하여 제한된 순시 압력을 측정하였으나, 속도 측정이 압력과 동시적으로 이루어지지 않았고, 매우 제한된 점(point)에서만 압력 정보를 제공하였다. 실질적으로 이용가능한 실험 데이터는 운동량 방정식으로부터 나온 압력 분포였다.(Gutmark and Wyganski (1976); Wygnanski and Fiedler (1969); Liu and Thomas (2004)). Kurtulus et al.(2007)는 Time-Resolved PIV 방법을 통하여 비정상 유체유동의 압력분포를 구하고자 하였으며, de Kat R. et al.(2009)은 사각단면 실험을 수행한 후 time-resolved Tomographic-PIV를 이용하여 3차원 속도분포를 구한 후 물체주위의 순간 압력분포를 구하였으며, 압력센서로부터 구해진 데이터와 비교 분석하였다.

실험에 있어서 압력 센서를 이용한 유동장에서의 압력은 제한된 영역에서만 계측이 가능하기 때문에 넓은 영역에서의 압력분포를 알기위해서는 시간과 노력이 많이 들어간다. 이를 보완하기 본 연구에서는 PIV를 이용하여 속도를 구하고, 얻어진 속도로부터 압력 방정식에 속도를 대입하여 압력을 구하였다.

1.2 연구 목적

본 연구에서는 실린더 후류를 실험으로부터 속도값을 구하여 CFD와 속도값을 비교하여, 같은 유동장에서의 압력장을 비교한다. 그리고 사각주 유동으로부터 PIV로 얻어진 속도벡터값으로 운동량방정식에 속도값을 대입하여 압력장을 구하고, Poisson's 방정식에 속도값을 대입하여 압력장을 구한다. 2개의 방법으로 구해진 압력장을 비교하여 더 나은 압력장 추정 방법을 제시한다.

또한, 압력센서를 이용하여 2차원 압력장에 영향을 주는 속도 성분을 구하고, 운동량 방정식과 Poisson's 방정식을 비교한다.

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

제2장 PIV 측정법에 의한 압력장 추정

2.1 PIV측정법 원리

PIV는 유동장의 비중과 동일한 입자(Paricle)를 유동장에 투입하여 레이저 조명을 투명시켜 디지털 카메라로 입자의 이동을 디지털 화상(Image)로 저장한 다음 영상처리 방법으로 분석하여 유체역학적인 특성을 계측하는 방법이다.

Fig 2.1과 같이 유동장의 국소 속도는 어느 한점의 통과하는 입자가 미소 시간간격동안 이동한 미소 직선거리 및 방향을 알면 쉽게 구해진다. $\triangle x/\triangle y$를 실제의 유동 속도에 근사시키려면 이동변위가 충분히 작아야 한다. 다시 말하면 입자가 그리는 궤적은 직선성과 등간격성이 보장되어야 한다.

PIV는 개별입자추적 PIV와 입자분포상관 PIV로 나누어지는데 여기서는 입자분포상관 PIV기법중에서 상호상관 PIV를 이용하여 속도벡터를 추출하였으며, 상호상관 PIV의 방법은 다음과 같다.

Fig 2.2에서와 같은 영역에서 2차원 이산 상호상관함수(Cross-Correlation Function, CCF)는 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$c(s,t)=\sum_{x}\sum_{y}f(x,y)w(x-s,y-t) \qquad (2.1.1)$$

여기서 미소영역w(x, y)의 크기는 $J\times K$이며 전체영역 $f(x,y)$의 크기는 $M\times N$이다. 또한 s = 0, 1, 2, ...M-1, t=0, 1, 2,....N-1이다. 그러나 위식으로 주어지는 함수식은 $f(x,y)$ 및 $w(x,y)$ 의 진폭의 변화에 매우 민감하여 다음의 식으로 정의되는 상호상관계수(Cross Correlation Coefficient, CCC)를 구하여 최대상관의 위치를 찾아내는 것이 합리적이다.

$$\gamma(s,t)=\frac{\sum_x\sum_y\left[f(x,y)-\bar{f}(x,y)\right]\left[w(x-s,y-t)-\bar{w}\right]}{\left\{\sum_x\sum_y[f(x,y)-\bar{f}(x,y)]^2\sum_x\sum_y[w(x-s,y-t)-\overline{w^2}\right\}^{1/2}} \quad (2.1.2)$$

여기에서 $\bar{w}$는 w(x, y)영역내의 평균치(1회 계산)이며 $\bar{f}(x,y)$는 w가 현재 위치하는 곳의 평균값을 의마한다. 이 때 상관계수$\gamma(s,t)$는 -1과 1사이의 값을 갖게 된다.

상호상관 PIV에서는 Fig 2.1의 (x, y)의 원점이 제 1프레임상에서 속도벡터를 구하기 위한 가상격자의 중심 즉 벡터의 시점을 나타낸다. 이 점을 중심으로 제 2프레임상에서 M(또는 N, 일반적으로는 $M=N$)의 값으로 정의되는 탐색영역 반경내의 모든 픽셀의 위치(s,t)에서 $(J\times K)$의 값으로 표시되는 상관영역에 대한 $\gamma(s,t)$의 값을 구한다. 다음으로 이 값들중에서 최대치의 위치를 찾으면 이곳이 제2프레임에서의 벡터의 종점이 된다.

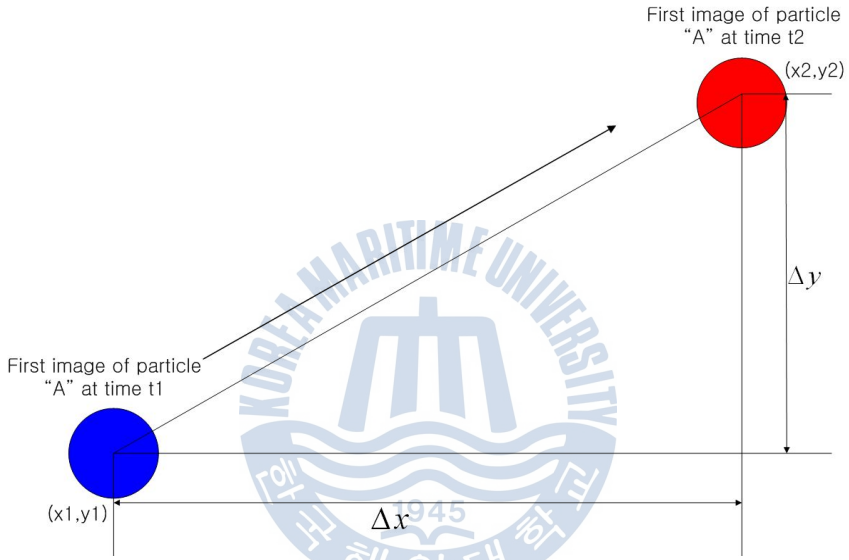

Figure 2.1 Method of velocity measurement

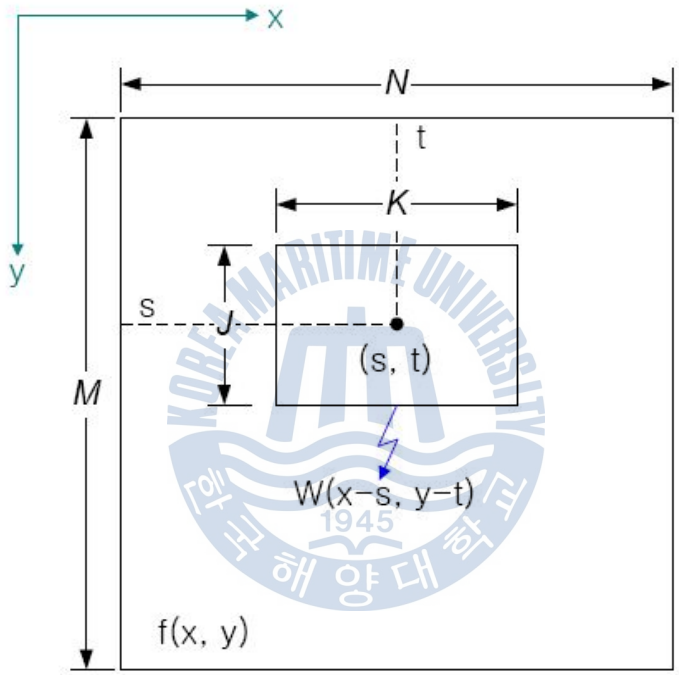

Figure 2.2 Concept of Cross-Correlation Function

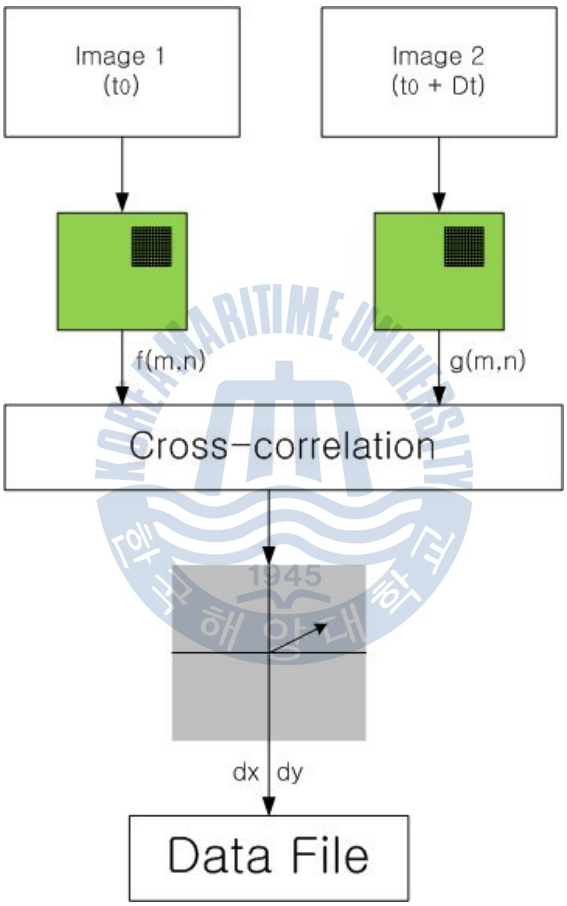

Figure 2.3 Priciple of Cross-correlation

2.2 Poisson's 방정식에 의한 압력장 계산

무차원 N.S Equation에서(비 압축성, 자유표면이 없을 때)

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{Re}\nabla^2 u \tag{2.2.1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{1}{Re}\nabla^2 v \tag{2.2.2}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{1}{Re}\nabla^2 w \tag{2.2.3}$$

에서, 비압축성 정상유동, 2차원 일 때

$$u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \tag{2.2.4}$$

$$u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{1}{Re}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \tag{2.2.5}$$

식2.2.4와 식2.2.5를 다시 P에 관하여 정리하면

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}=-\frac{\partial}{\partial x}\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{1}{Re}\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) \tag{2.2.6}$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}=-\frac{\partial}{\partial y}\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{1}{Re}\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) \tag{2.2.7}$$

식2.2.6에 식2.2.7를 더하면

$$\nabla^2 P=-\frac{\partial}{\partial x}\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)+\frac{1}{Re}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)\right]$$

여기서 Re항은

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)+\frac{\partial^2}{\partial y^2}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)\right]=0 \tag{2.2.8}$$

$\left(\because \frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0\right)$ 연속의 식

Re항을 대입하면

$$\therefore \nabla^2 P=-\frac{\partial}{\partial x}\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\frac{\partial}{\partial y}\left(u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}\right) \tag{2.2.9}$$

$$=-\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)+u\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}\right]-\left[\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)+v\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial y}\right]$$

$$-\left[\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)+u\frac{\partial^2 v}{\partial x\partial y}\right]-\left[\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)+v\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right]$$

여기서, 연속방정식에 의해

$u\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+u\frac{\partial^2 v}{\partial x\partial y}+v\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial y}+v\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}=u\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)+v\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)=0$이 되므로

$\nabla^2 P=-\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)-\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)-\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)$ 이 되고

$$\nabla^2 P=-\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2-2\left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \tag{2.2.10}$$

가 된다. 유도된 미분방정식을 풀어 격자점에서의 압력을 구한다.

2.3 운동량 방정식에 의한 압력장 계산

비압축성 정상유동에 대한 일반형 수송방정식으로 나타낸 x방향 및 y방향의 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho uv)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)-\frac{\partial p}{\partial x} \tag{2.3.2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho uv)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v^2)=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu\frac{\partial v}{\partial y}\right)-\frac{\partial p}{\partial y} \tag{2.3.3}$$

PIV에서 이미 속도를 구했기 때문에 미지수인 P만 남게 된다. P값을 엇갈린 격자상에서 직접적으로 풀어 압력을 구한다. Fig. 2.4는 운동량 방정식을 적용할 제어체적(control volume)을 나타내고 Fig. 2.5는 x방향의 엇갈린 격자를 나타내고, Fig. 2.6은 y방향의 엇갈린 격자를 나타낸다.

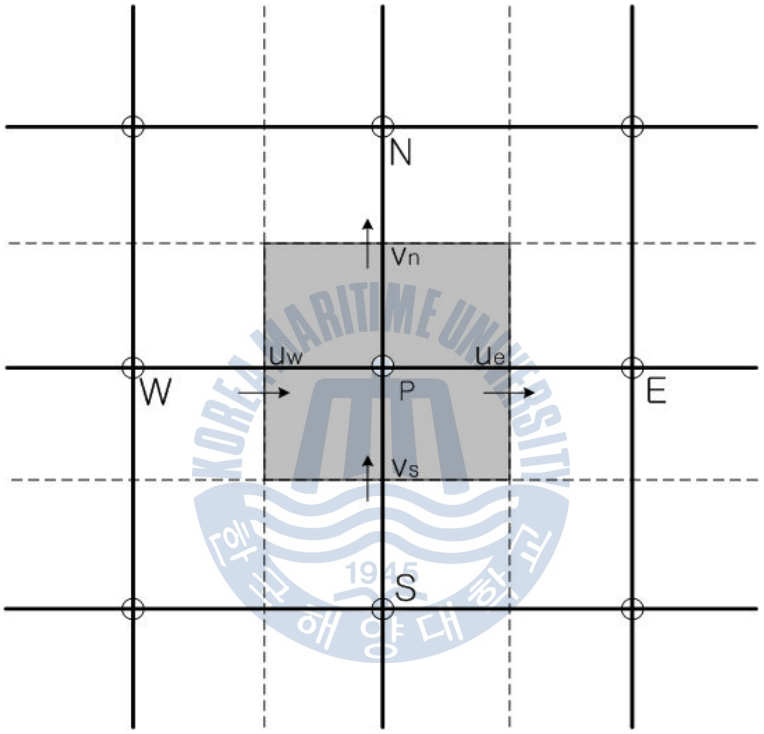

Figure 2.4 Control volume for the continuity equation

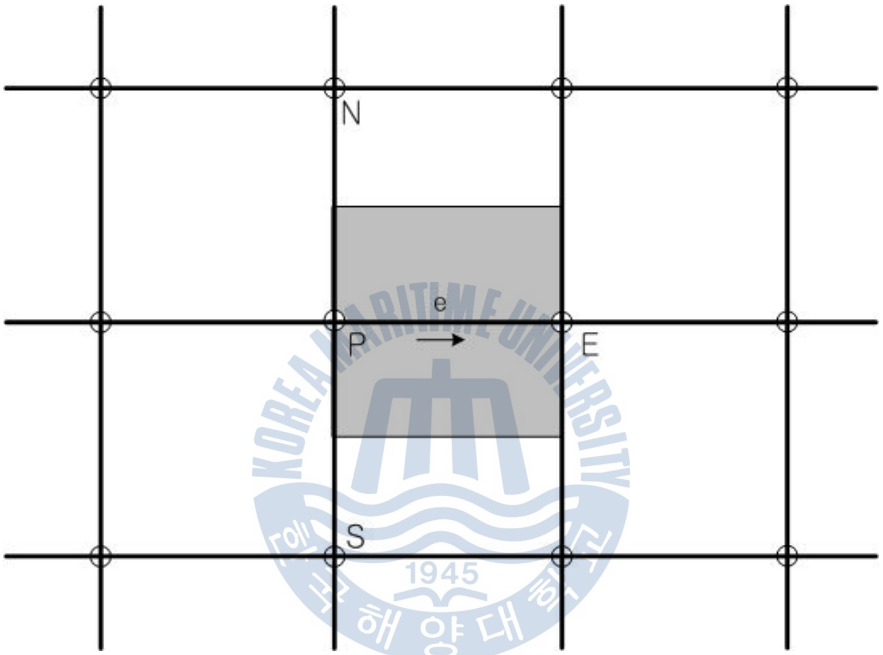

Figure 2.5 Control volume for u

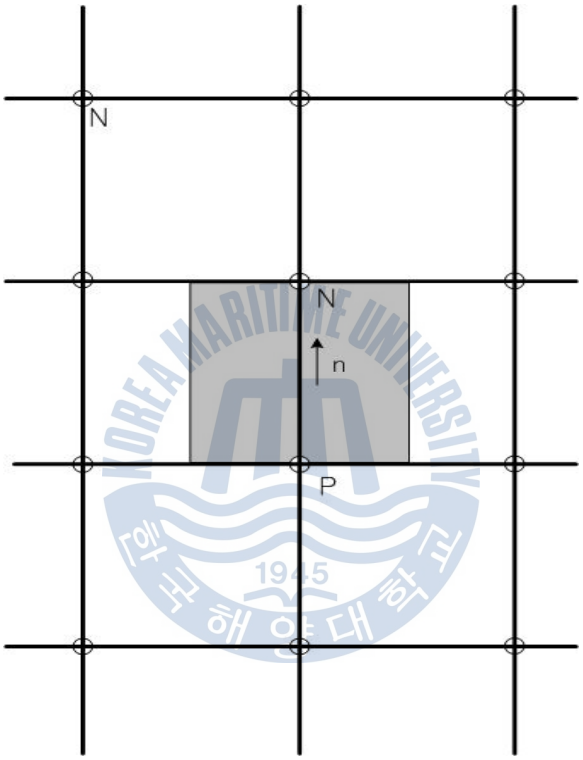

Figure 2.6 Control volume for v

2.4 압력장 추정 비교

Fig 2.7은 실린더 후류 속도 측정을 위한 시스템을 나타내고 있다. 시스템은 回流수조(1100mm x 300mm x 300mm), CCD카메라(Double pulse, PCO, 1392 x 1024 x 8bit), Nd/Yag Laser(15Hz, 120mJ, Pulse Width 3~5ns, 532 nm wavelength), 카메라와 레이저 동기화를 위한 Logic controller(Labsmith, LC880), Host Computer로 구성된다.

실험에서는 외경 10mm인 실린더를 사용하였으며, 레이저 광원의 산란 및 굴절을 최소화 하기 위해 무광 도료를 도포하였다. 실린더 위치는 회류수조의 출구에서 약 2/3 지점에 설치되었으며, 입구에는 일량류(uniform flow)가 되도록 허니콤(honey comb)을 설치하였다. 입구의 평균 유속은 0.03m/s이며, 물의 동점성 계수 $\mu = 1.0 \times 10^{-6}$ 이며, 레이놀즈 수 Re는 약 300이다. 카메라 계측 영역은 실린더 중앙에서부터 46mm x 34mm 이며, 속도 벡터 추출을 위한 상호상관 영역은 31.5mm x 30mm이다. 이미지 크기는 1024 pixel x 992 pixel이거, 1픽셀당 0.033mm/pixel이다.

운동량 방정식을 사용한 경우 차분법 방법으로 계산되기 때문에 격자의 영향을 보기 위해, 속도벡터를 얻기위한 조건으로 격자를 30x30, 60x60, 90x90으로 계산하였다. Fig. 2.8, Fig. 2.11, Fig. 2.14는 격자 변화에 따른 속도 벡터를 나타내고 있다.

Poisson's 방정식을 사용한 압력장의 경우 격자가 달라짐에도 불구하고, 운동량 방정식을 사용한 압력장에 비해 큰 차이가 없었다. Fig. 2.9, Fig. 2.12, Fig. 2.15은 격자 변화에 따른 Poisson's 방정식을 이용하여 계산된 압력장을 나타내고 있다. 이는 Poisson's 방정식을 사용한 압력장의 경우 격자 속도값만 이용하여 압력을 계산하는 반면, 운동량 방정식을 이용하여 압력장을 계산한 경우는 면적에 영향을 받는다는 것을 나타내고 있다. Fig. 2.10, Fig. 2.13, Fig. 2.16은 격자 변화에 따른 운동량 방정식을 이용하여 계산된 압력장을 나

타내고 있다.

CFD계산을 위하여 유동장의 모델은 3차원으로 모델링하였으며, 메쉬를 생성하기위해 총 3개의 영역으로 구분하였으며, 입구 유입속도는 PIV실험과 같은 0.03m/s, 출구 상대 압력은 0Pa이며, 실린더 부분과 나머지 벽 부분은 no slip 조건을 주었다. 열전달은 없다고 가정하여 등온조건을 주었으며, 온도는 25[℃]로 하였다. 난류조건은 층류(Laminar)로 하였으며, 유동장의 압력은 대기압 1[atm], 부력영향은 없다고 설정하였다. 총 계산 시간은 10초, 시간 간격은 0.1초로 하였다. Fig. 17과 같이 실린더 직경은 10mm, 계산 영역은 x방향으로 60D, y방향으로 28D, z방향으로 30D로 설정하였다.

Fig. 18은 PIV와 CFD u방향 속도를 유동장의 유입 속도로 나누어 그린 그래프이고, Fig. 19는 v방향 속도 그래프를 나타낸다. x축은 유동장 길이를 실린더 직경으로 나누어 무차원화 했으며, y축은 속도를 대표속도로 나누어 무차원화 시켰다. 두 개의 그래프로부터 PIV의 속도장과 CFD의 속도장이 비슷한 패턴임을 알수 있으며, CFD의 경우 smoothing 효과로 인해 속도장과 압력장이 연속적으로 부드럽게 나타나는 것을 알수 있다.

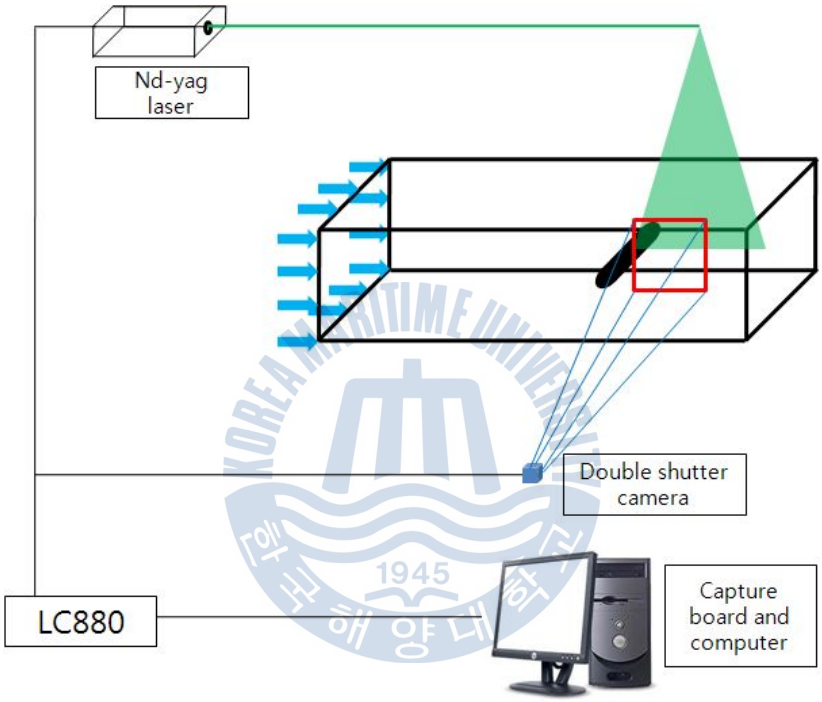

Figure 2.7 Experimental setup

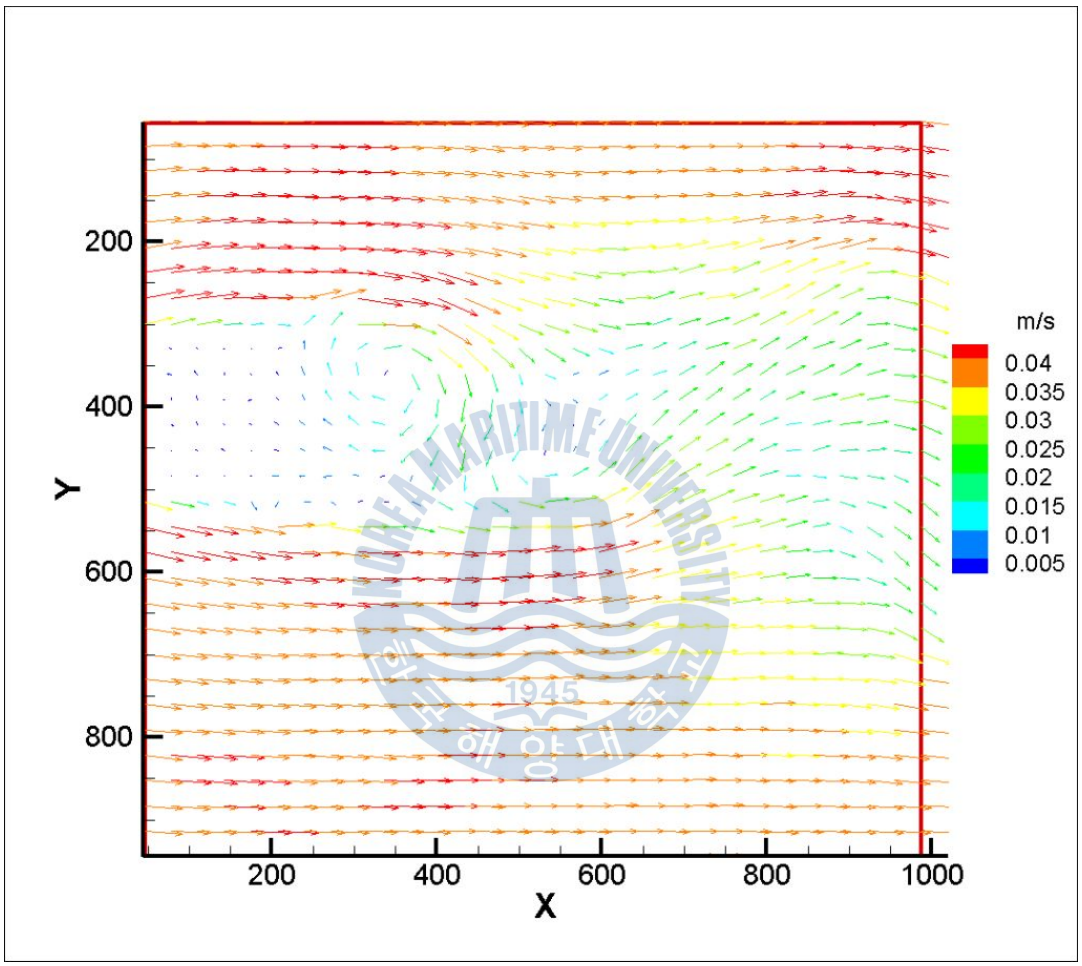

Figure 2.8 Instantaneous vector field at 30 x 30

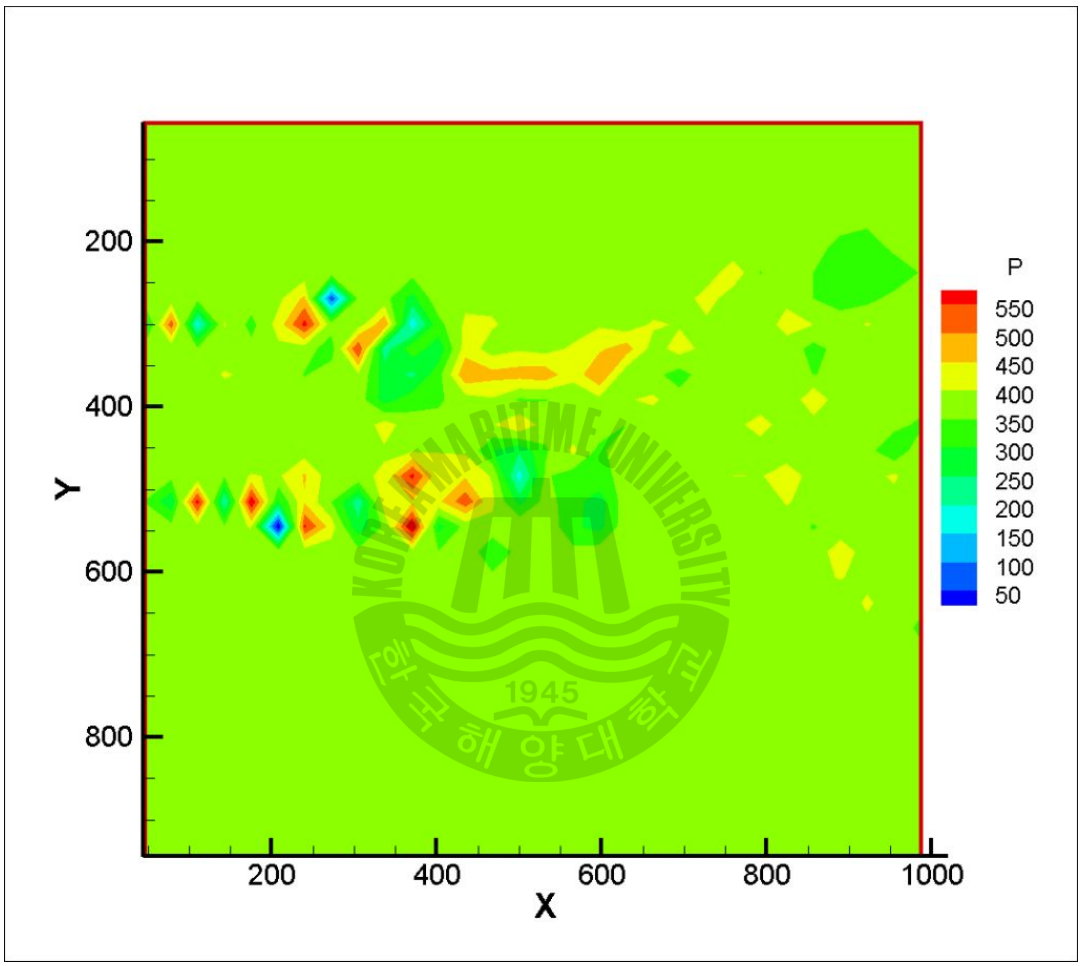

Figure 2.9 Instantaneous pressure field using the Poisson's equation at 30 x 30

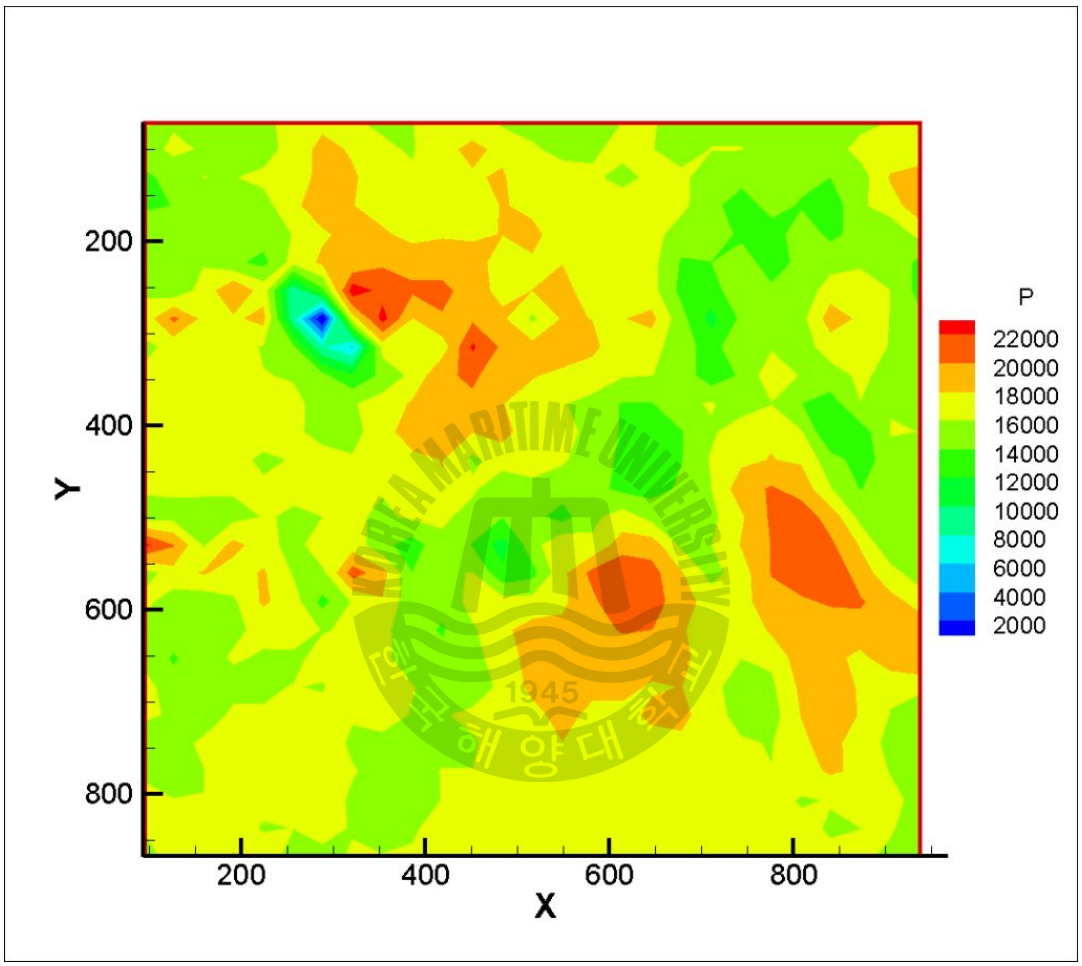

Figure 2.10 Instantaneous pressure field using the momentum equation at 30 x 30

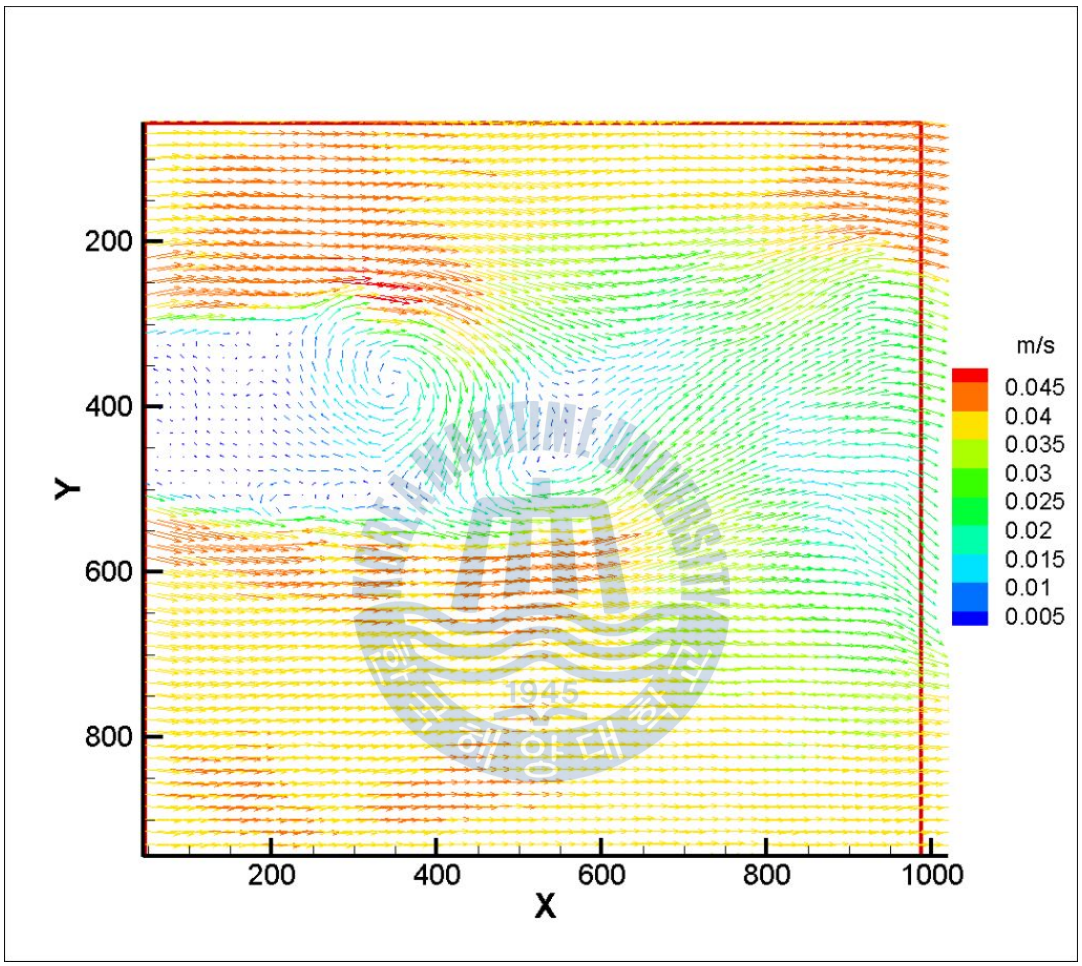

Figure 2.11 Instantaneous vector field at 60 x 60

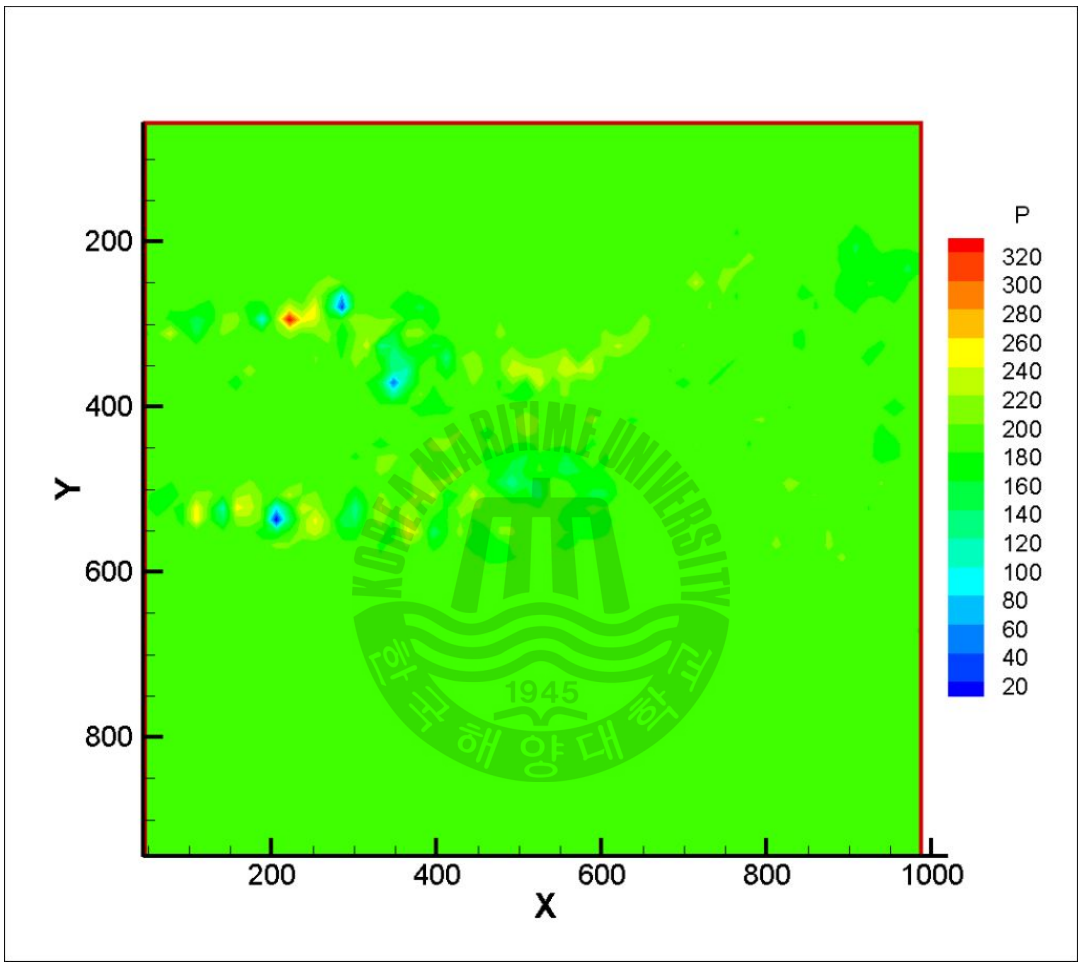

Figure 2.12 Instantaneous pressure field using the Poisson's equation at 60 x 60

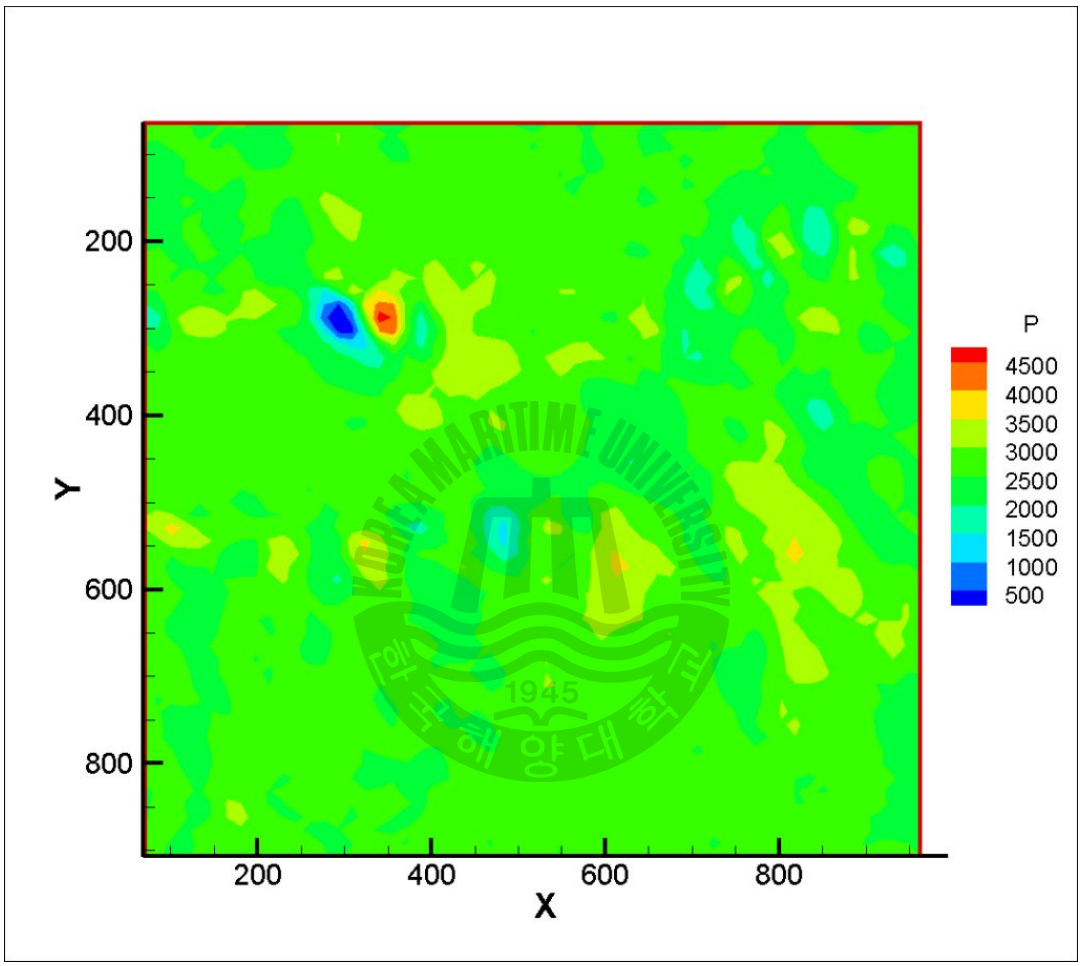

Figure 2.13 Instantaneous pressure field using the momentum equation at 60 x 60

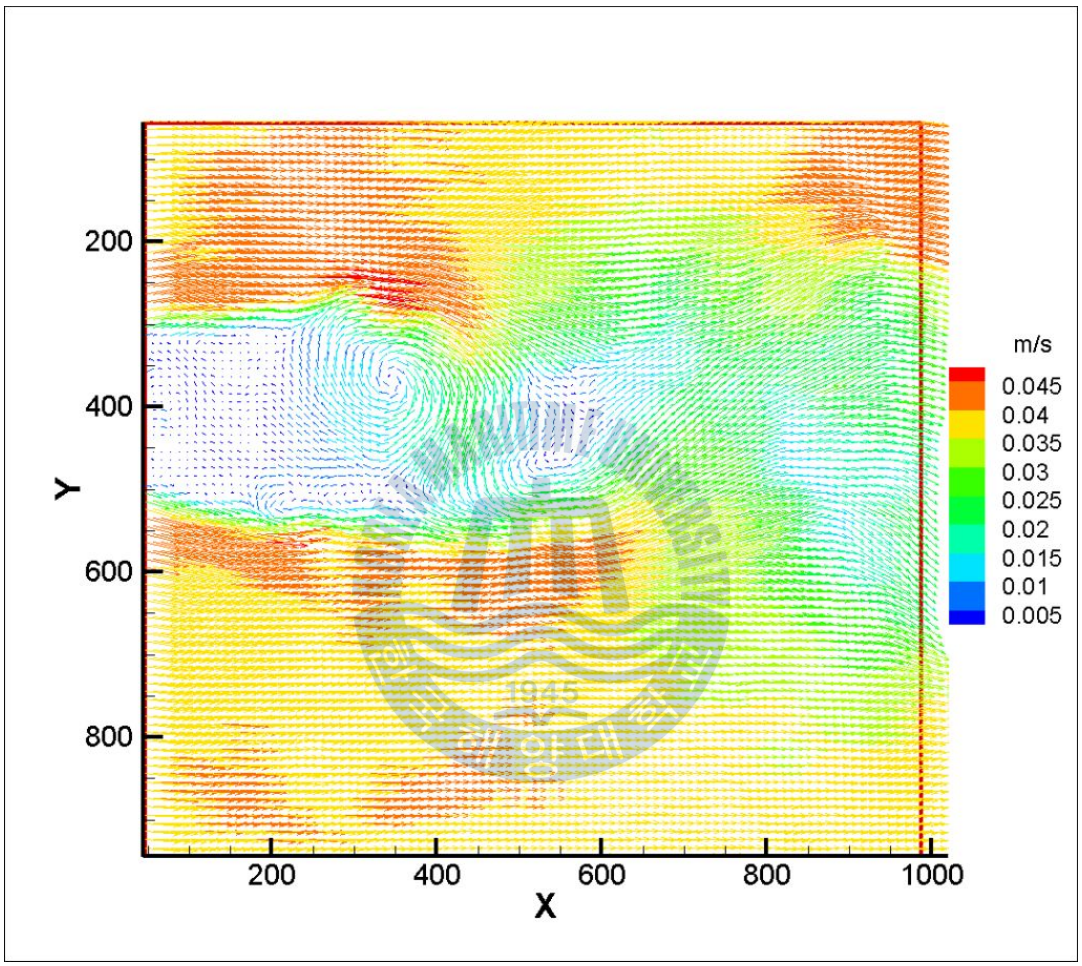

Figure 2.14 Instantaneous vector field at 90 x 90

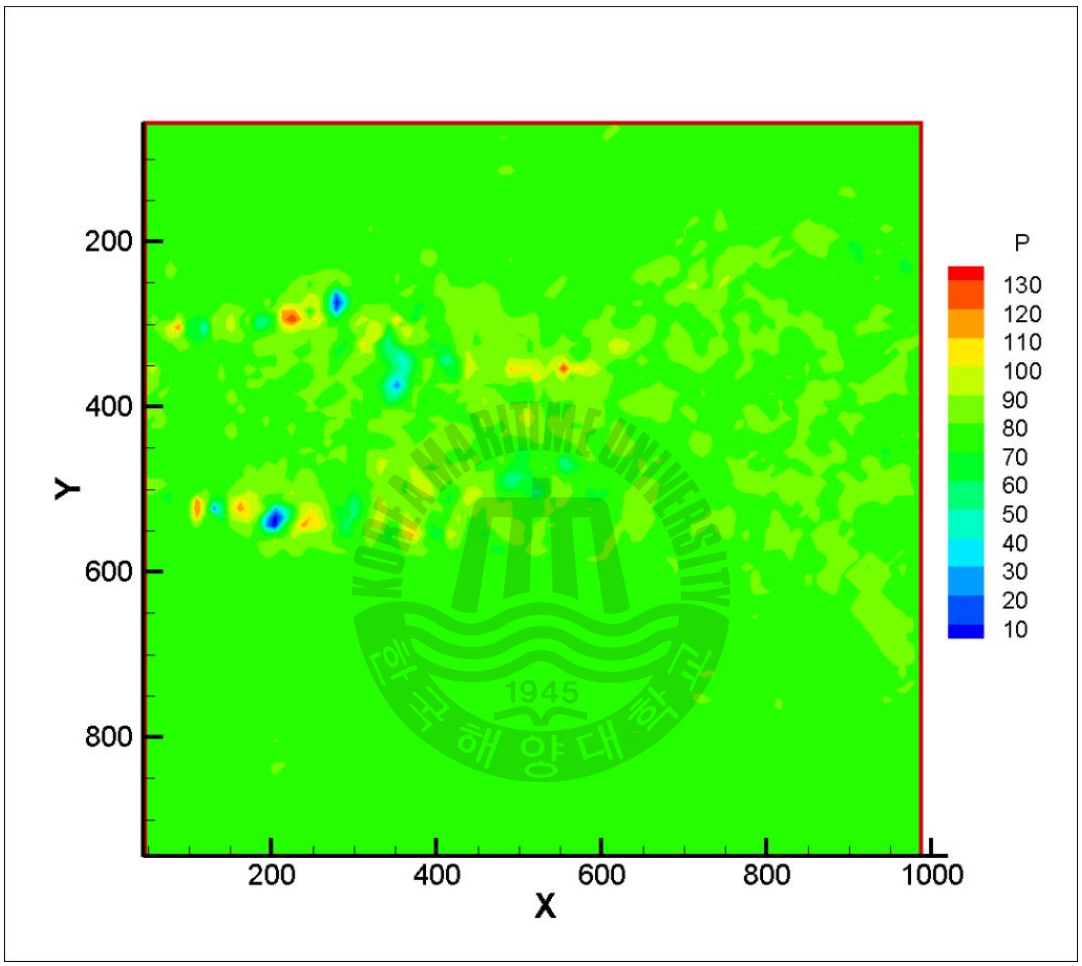

Figure 2.15 Instantaneous pressure field using the Poisson's equation at 90 x 90

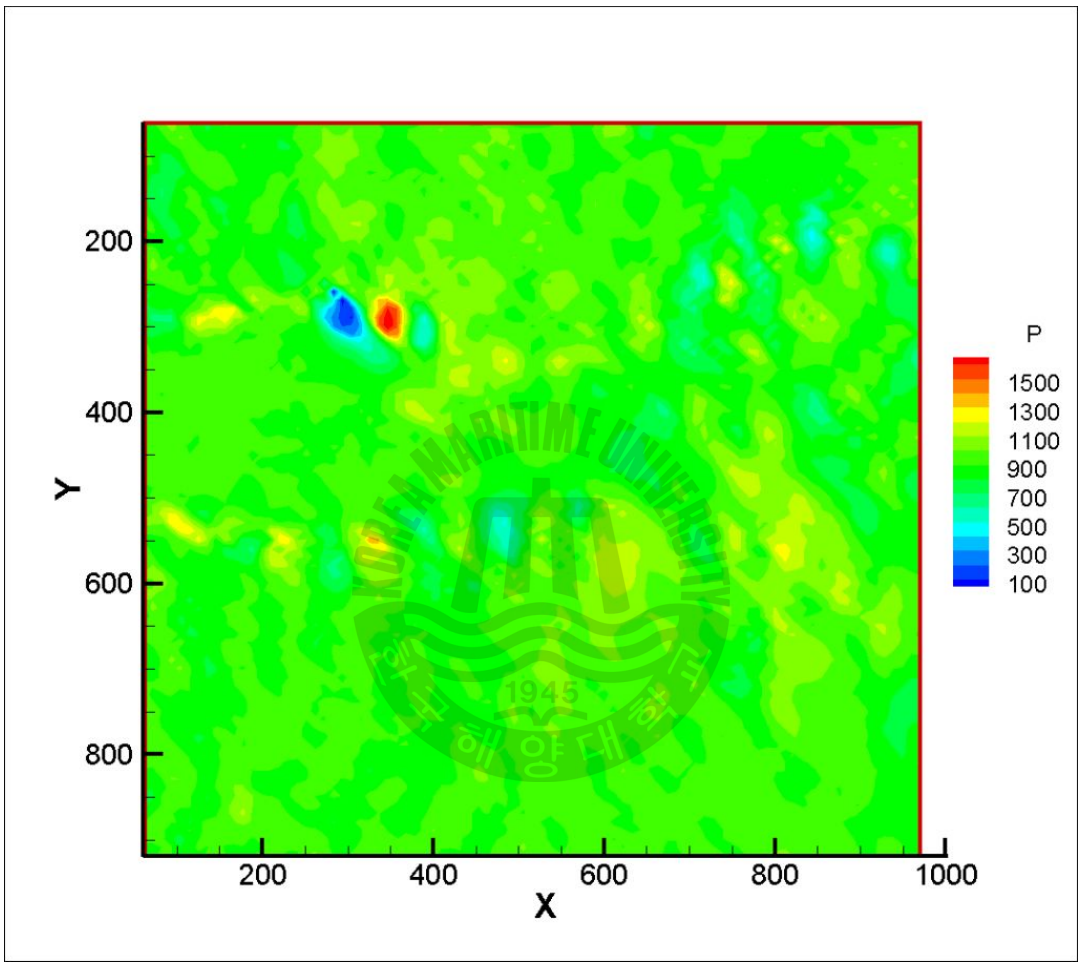

Figure 2.16 Instantaneous pressure field using the momentum equation at 90 x 90

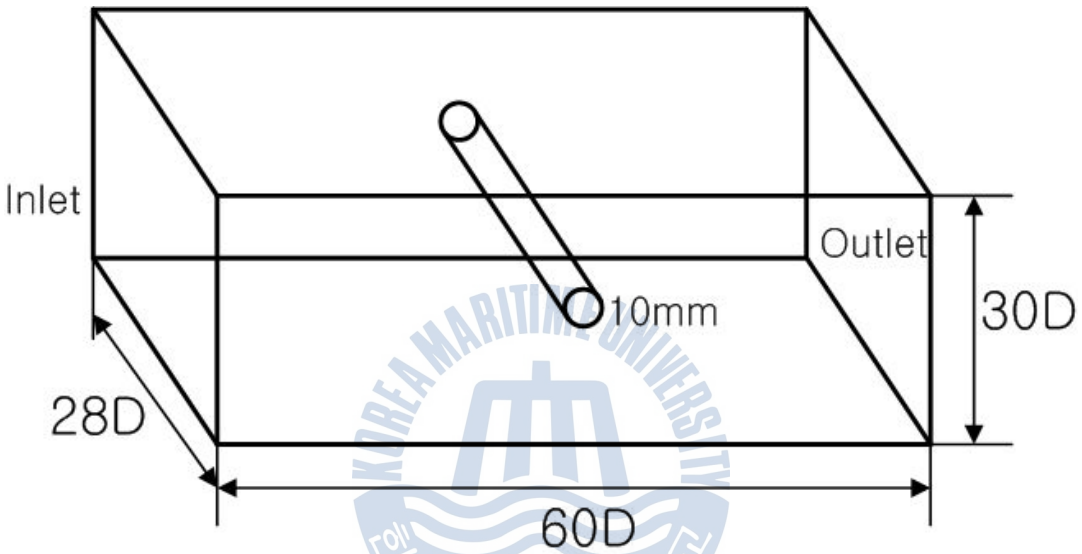

Figure 2.17 Calculate Area in CFd

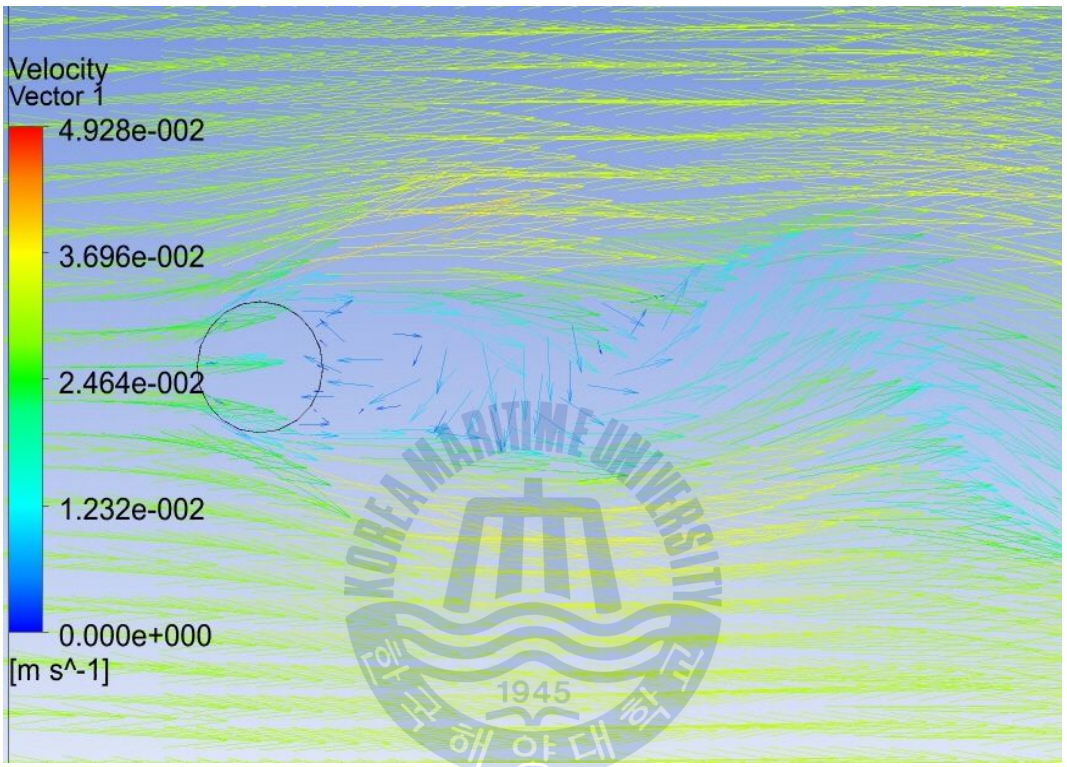

Figure 2.18 Velocity vector at X-Z plane

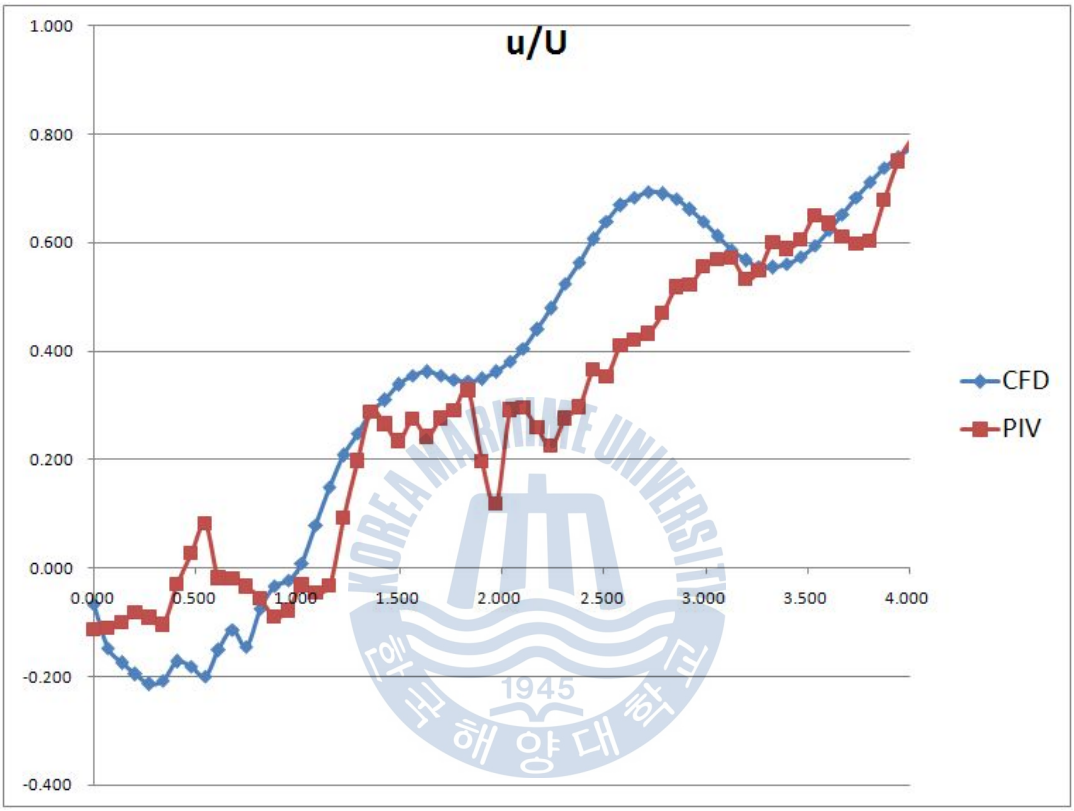

Figure 2.19 Velocity profile of u component

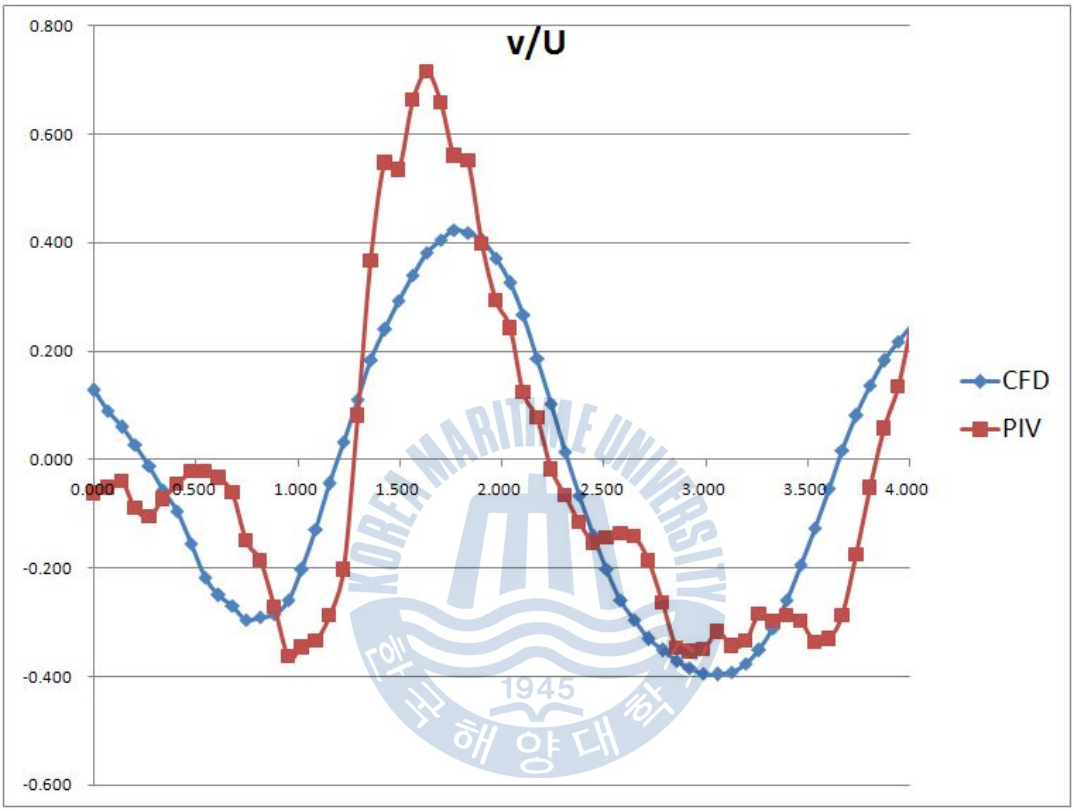

Figure 2.20 Velocity profile of v component

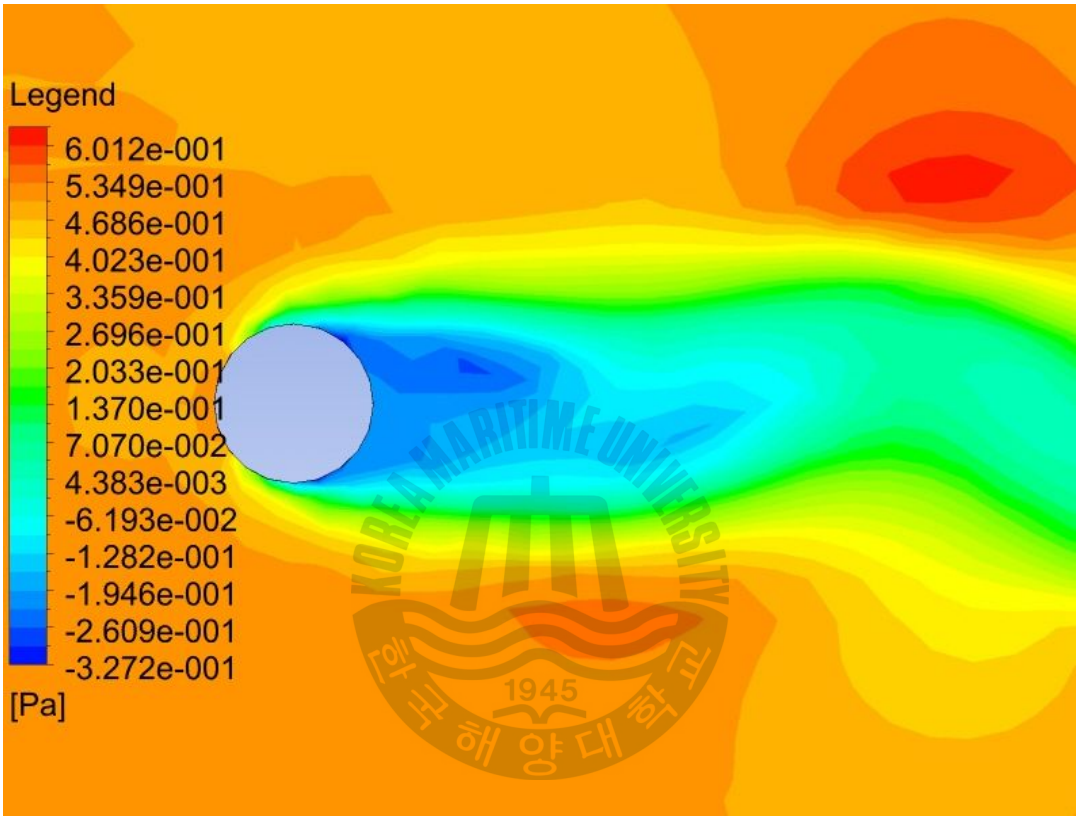

Figure 2.21 Pressure Contour at X-Z plane

제 3장 사각주 유동에 대한 압력장 추정

3.1 실험 장치 구성 및 실험 조건

속도장과 압력을 동시에 계측하기 위한 시스템 전체 구성도를 Fig 3.1에 나타내었다. 측정 시스템은 크게 두 부분으로 나누어지는데, 실제 압력을 측정하기 위한 압력측정 시스템과 영상을 분석하여 속도를 계산하는 PIV 시스템으로 이루어져 있다.

먼저 압력측정 시스템을 살펴보면 Fig 3.2에 나타낸 압력측정 시스템은 장방형 몰수체, 몰수체에 매입된 압력 센서, 압력 Data 저장 및 취합을 위한 PXI-4472B모듈이 장착된 PXI-8106 컴퓨터로 구성하였다.

압력 취득 장치는 National Instrument사의 PXI-8106 2.16GHz 듀얼코어 컴퓨터와 아날로그 입력 (8SE, 102.4kS/s/ch, 24bit)의 PXI-4472B모듈을 이용하여 초당 100개의 압력 데이터를 얻었다. 압력 센서는 Kistler사의 211B5Type 센서를 사용 하였고, 센서의 측정 압력은 상대 압력으로, 스스로 칼리브레이션을 하며, 칼리브레이션 된 값에서 변동치만 측정한다. 센서의 측정 범위는 0~100pis, 감도는 후면부 - 51.44mV/psi이다. Linearity는 ≤± 1.0% FSO이고 Resolution는 6.8pa이다. 압력센서의 직경은 5.5㎜이고, 전기 노이즈에 민감한 장치이므로 모든 장비에 대하여 접지를 하였다.

장방형 몰수체는 60× 60× 240㎜ 크기의 알루미늄 재질로 제작하여 몰수체의 후면에 1개의 압력 센서를 몰수체의 표면과 일치하게 설치하였다. 센서의 위치는 회류수조 바닥으로부터 130㎜높이에 설치하였다. 장방형 몰수체 표면은 레이져 광원에 의한 산란과 굴절을 피하기 위하여 표면을 무광흑색도료로 염색하였다.

압력 센서가 설치된 장방형 몰수체는 수조 바닥면으로부터 20㎜의 간격을 두어 수조와 분리 설치하여 회류수조의 진동을 최소화하였다. 균일한 유동을 생

성하기 위하여 회류수조 입구에 정류기(Honeycomb)를 설치하였다.

장방형 몰수체는 회류수조(960× 280× 200mm)의 입구로부터 600mm떨어진, 수조 길이의 2/3지점 정중앙에 유동과 수직하게 설치하였다. 회류수조의 속도는 0.057m/s, 동점성 계수는 $1\times10^{-6}m^2/s$이고, Re수는 3400이다.

PIV시스템은 연속광 레이져, 고속 카메라, 호스트 컴퓨터, 속도 해석 소프트웨어로 이루어졌다. Blitz사의 연속광 레이져는 532nm의 녹색 파장의 8W 의 출력을 가졌다. 고속 카메라(Ditect사)에 30mm 렌즈를 장착하고 물체의 상부에 이미지센서가 레이저시트와 평행이 되도록 설치하였다. 1024× 992Pixel의 해상도로 초당 100Frame으로 42.28초동안 저장하였다. 압력 Data와 속도 영상은 동시 측정할 수 있도록 동기화시켰다. 측정된 입자 영상들은 해석 소프트웨어 Thinkers 3.0(Eyelizer사)을 이용하여 속도를 계산하였다.

연속광 레이져의 beam sheet는 센서 중앙과 같은 높이인 130mm높이에 조사하였고, 수조에 주입된 입자는 유동에 방해가 되지 않도록 나일론 재질의 직경이 100~150nm이고, 비중이 1.01인 입자를 사용하였다.

KOREA MARITIME UNIVERSITY 1945 한국해양대학교

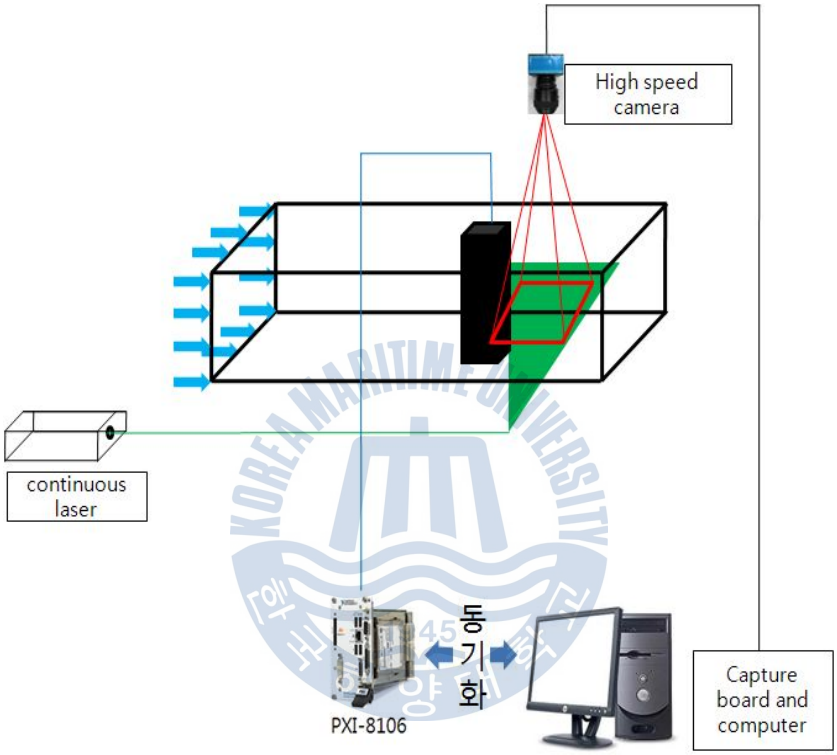

Figure 3.1 Experimental setup

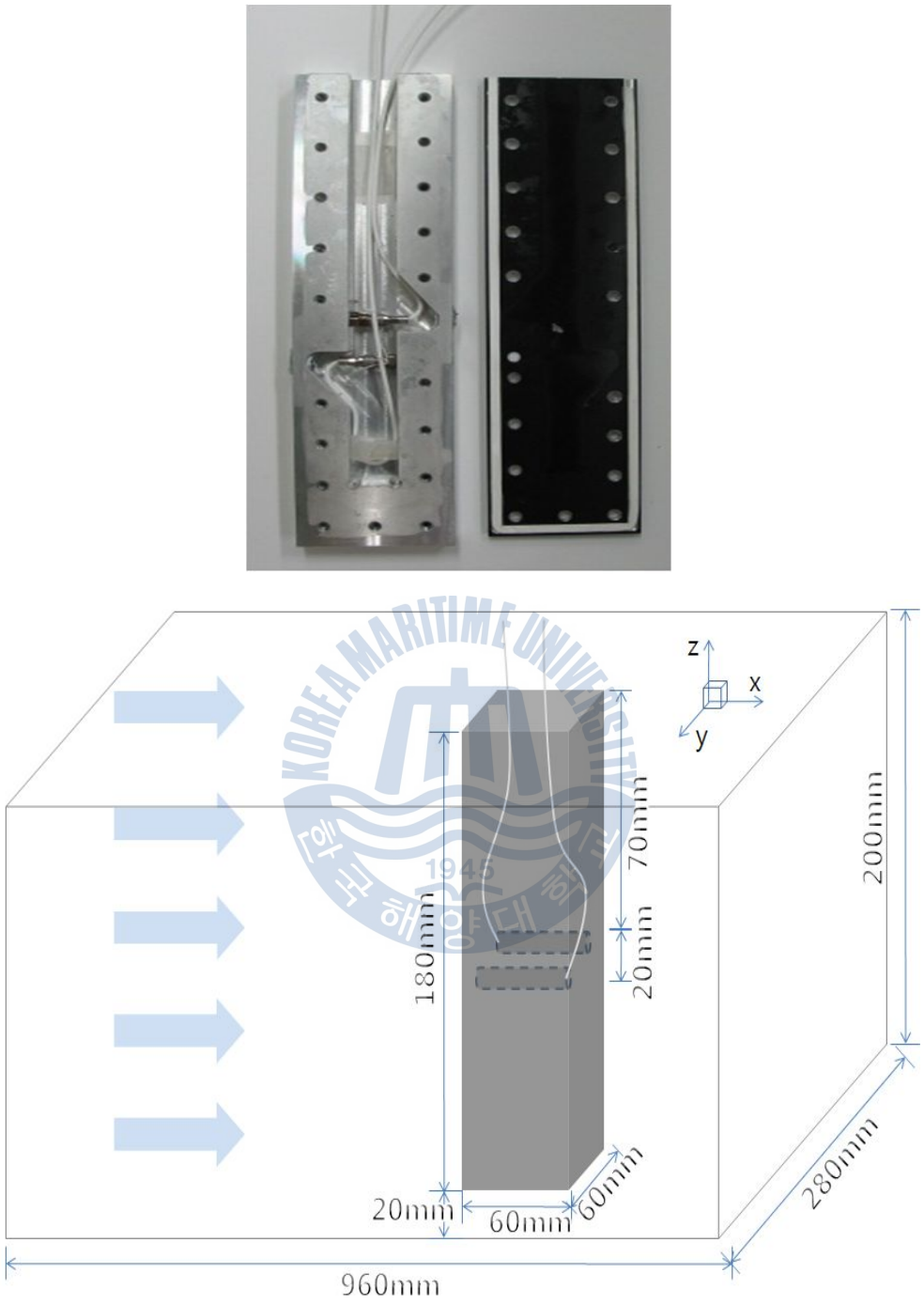

Figure 3.2 Square bluff body

3.2 실험결과 및 토론

실험은 4228장의 영상을 취득하였으며 압력센서와 동기화하여 42.28초 동한 측정하였다. 측정된 영상은 해석 소프트웨어를 사용하여 속도벡터를 취득하였으며, 취득된 영역은 센서가 있는 면 가로영역 길이를 기준으로 가로 약 4D, 세로 약 4D로 메인 유동방향을 x축으로 메인 유동방향의 직각 방향을 y축으로 하였다. 1픽셀당 0.255mm이며, 계산 영역의 격자는 90*80으로 계산하였다.

속도벡터값은 t1에서 t2로가는 속도이므로 압력센서가 취득한 압력값의 시간과는 다르므로 t1에서 t2로 가는 속도값과 t2에서 t3로 가는 속도값을 평균을 하여 압력측정과 동일한 시간대의 속도값을 구하였다.

속도값 추출 지점은 압력센서의 면적에 들어오는 모든 격자점의 속도값을 평균하여 속도를 계산하였으며, Fig. 3.3은 속도값을 추출하는 격자점을 나타내고 있다.

압력센서는 수면으로부터 90mm 잠겨 있으며, 압력 센서의 측정치는 900Pa에서 변동치만을 측정하였다.

압력값과 유동장의 속도장과의 상관관계를 살펴보면 속도값은 Fig. 3.3에서 보여진 3개의 격자점에서 속도성분을 평균하였다. 압력센서값의 경우 Volt로 측정이 되는데, PIV로 측정된 속도값과는 다르므로 상대적인 값만 비교하기 위해 압력값과 속도값 스케일을 맞추어 비교하였다. Fig. 3.4의 그래프를 보면 v 속도성분이 42초 동안 측정된 압력값과 상반되는 위상이 나타나 v성분속도 변화가 압력변화와 관계가 있는 것으로 나타났다.

유동장의 절대 압력을 알기 위해 Poisson's 방정식과 운동량 방정식을 사용하여 사각주 후류의 압력장을 계산한 후, 압력센서로 얻어진 절대압력값을 바탕으로 Poisson's 방정식과 운동량 방정식을 사용하여 계산된 압력장을 정규화하였다. Fig. 3.3은 사각주 후류의 순간 속도장이며 Fig. 3.4는 운동량 방정식을 사용하여 구한 순간 압력장이며, Fig.3.5는 Poisson's 방정식을 사용하여 구한

순간 압력장이다.

Fig. 3.6는 평균 속도장이며, Fig. 3.7는 운동량 방정식을 사용하여 구한 평균 압력장이며, Fig. 3.8는 Poisson's 방정식을 사용하여 구한 평균 압력장이다. 속도장의 단위는 m/s이며, 압력장의 단위는 Pa이다.

정규화 방법으로는 먼저 압력센서의 면적에 들어오는 계산된 압력장 격자점의 압력값들을 평균하여 압력센서에서 측정된 압력값을 계산된 평균 압력값들로 나누어준다. 이렇게 계산되어 나온 값들을 압력장 전체에 걸쳐 곱해주었다.

정규화 결과는 순간 압력장의 경우 Poisson's 방정식을 사용한 압력장은 -700Pa ~ 600Pa(10Pa = 1㎜) 범위의 압력값이 계산되었고, 운동량 방정식을 사용한 압력장은 -800Pa ~ 900Pa의 범위의 압력값이 계산되었다.

KOREA MARITIME UNIVERSITY
1945
한국해양대학교

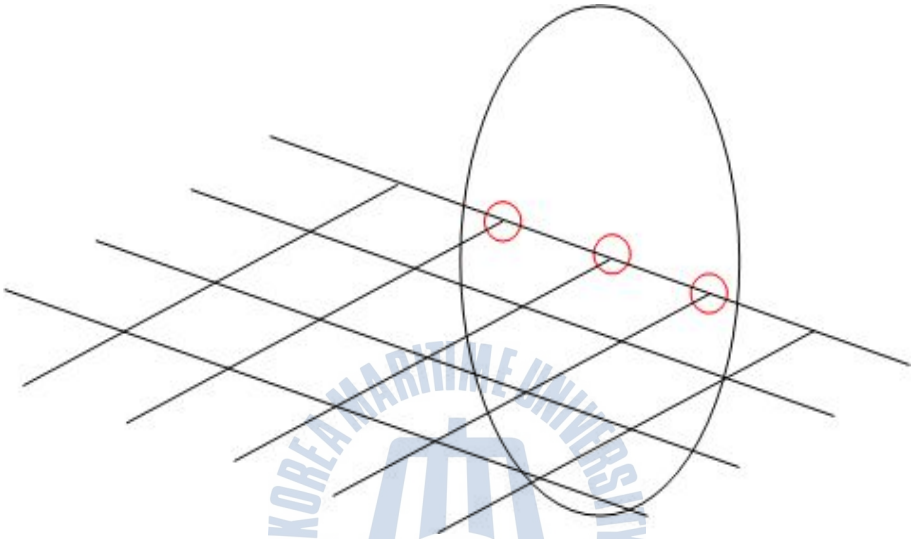

Figure 3.3 Velocity grid point location

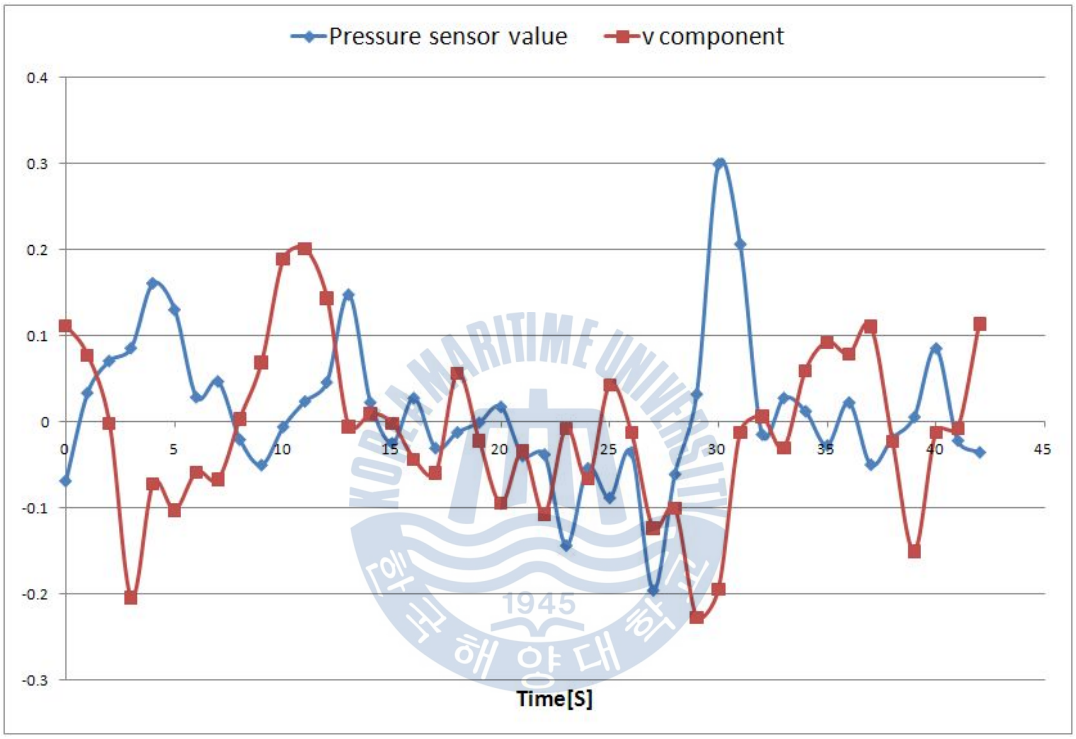

Figure 3.4 Compare pressure and v velocity component

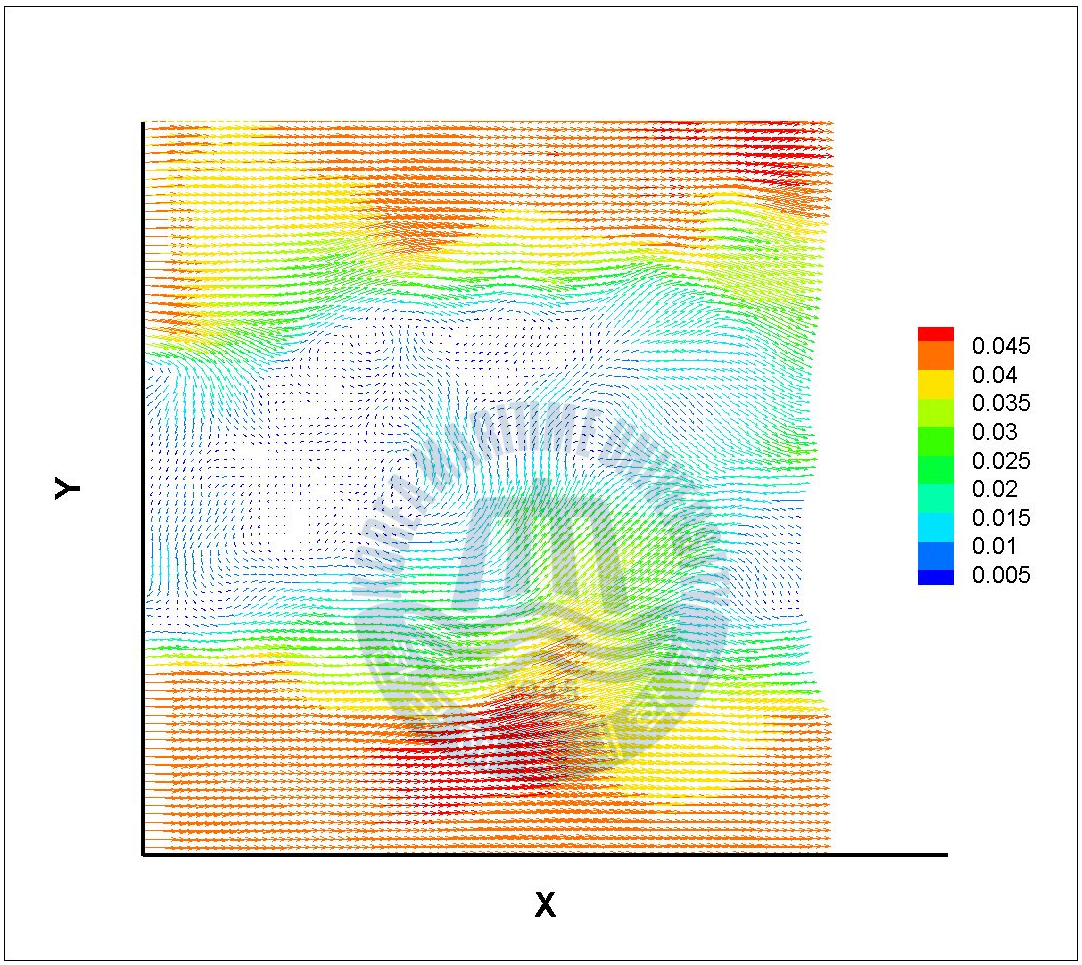

Figure 3.5 Instantaneous vector field

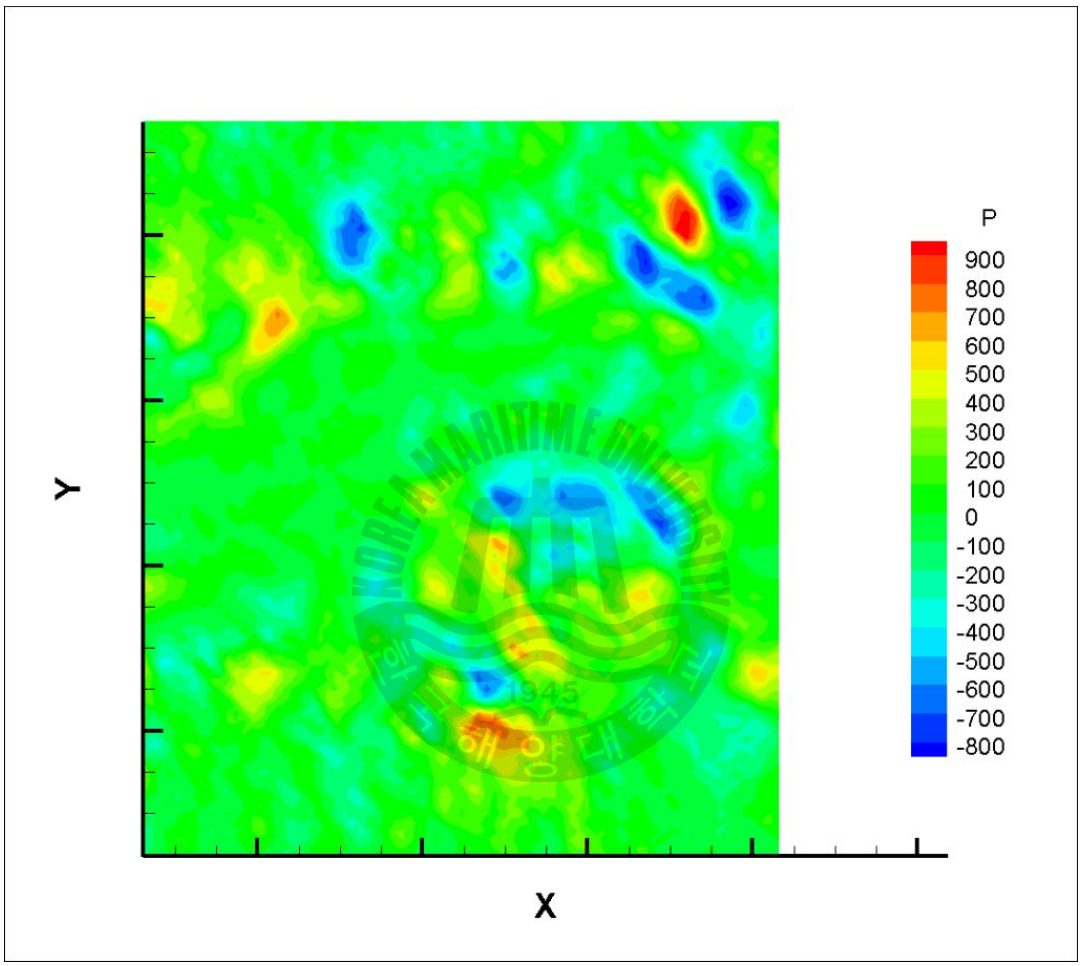

Figure 3.6 Instantaneous pressure field the momentum equation

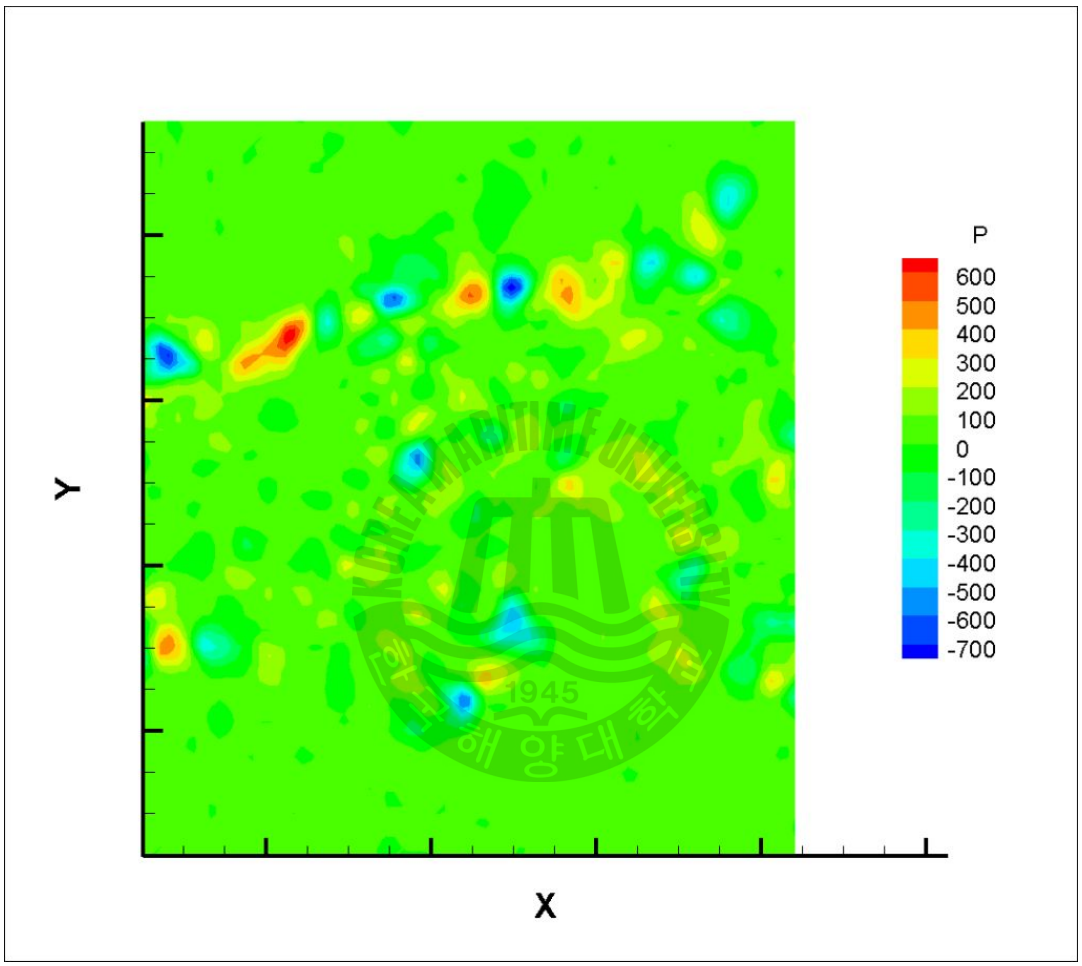

Figure 3.7 Instantaneous pressure field using the Poisson's equation

결론

원주후류에 대하여 얻어진 PIV속도장 데이터를 이용하여 프와송방정식과 차분방정식에 의한 압력장 추정법을 구축하였으며 이 과정에서 다음과 같은 결과를 얻었다.

프와송방정식에 의하여 얻어진 압력장은 연속방정식 기반으로 얻어진 압력장인 관계로 매우 연속적인 압력장의 분포를 보임을 알 수 있었다.

이에 반하여 차분방정식에 의한 압력장 계산결과는 불연속적인 PIV속도벡터로부터 계산되는 관계로 압력장 계산을 위한 격자의 구성 및 계산방식에 많이 의존함을 알 수 있었다.

CFD의 계산결과 속도장의 경우 PIV실험과 비슷한 속도 프로파일을 얻을수 있었으며, 압력장은 내부 알고리듬 차이로 인해 다르게 나타났다.

한편, 장방형사각주 후류 유동장의 실제 압력과 PIV속도측정결과로부터 계산되는 압력장 계산결과에 대한 비교로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

사각주 후측벽면상의 압력은 속도벡터 v성분과 역상관 관계가 있음이 확인된바, 이는 사각주에 미치는 벽면 압력은 벽면상의 유동속도 v성분에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 이는 사각주 벽면근방의 유동이 매우 불안정한 상태임을 의미한다.

본 연구에서 구축한 프와송방정식 기반의 압력장 계산법과 운동량방정식에 대한 차분법 기반의 압력장 계산법에 의한 결과는 원주후류와 사각주 후류에 대한 압력추정에 있어서 정성적으로 일치함을 확인하였으며 정량적으로는 차분법의 계산스킴(scheme)에 따라 다소 차이가 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

Arndt REA 「Cavitation in vortical flows」, Annual Revuew of Fluid Mechanics, 34, 143-175, (2002)

Blake WK <<Mechanics of flow-induced sound and vibration>>, Academic, New York, 1986

de Kat R., van Oudheusden, B.W. and Scarano, F.「Instantaneous pressure field determination around a square-section cylinder using time-resolved stereo-PIV」*In Proc.* 39th Fluid Dynamics conference, AIAA, 22-25, (2009).

de Kat R., van Oudheusden, B.W. and Scarano, F. 「Instantaneous Pressure Field Determination in a 3D Flow using Time-Resolved Thin Volume Tomographic-PIV」, 8th International symposium on particle image velocimetry, PIV09, (2009)

Gutmark E, Wygnanski, 「The planar turbulent jet」, Journal of Fluids, 73, 465-495, 1976

Kurtulus, D.F., Scarano, F.& David, L., 「Unsteady aerodynamic forces estimation on a square cylinder by TR-PIV」, Experiments in Fluids, 42, 185-196, (2007).

Liu X, Thomas FO, 「Measurement of the turbulent kinetic energy budjet of a planar wake flow in pressure gradients」, Experiments in Fluids, 37, 469-482, 2004

Ooi KK, Acosta AJ, 「The utilization of specially tailored air bubbles as static pressure sensors in a jet」, Journal of Fluids, 106, 459-469, 1983

O'Hern TJ 「An experimental investigation of turbulent shear flow cavitation」, Experiments in Fluids, 215, 365-391, 1990

Ran B, Katz J, 「Pressure fluctuations and their effect on cavitation inception within water jets」, Journal of Fluids, 262, 223-263, 1994

Suhas V. Parankar, << Numerical heat transfer and fluid flow >>, McGraw-HILL BOOK COMPANY

Wygnanski I, Fiedler H,「Some measurements in the self - preserving jet」, Journal of Fluids, 38, 577-612, 1969