

PIV에 의한 NACA0012 익 주변의 유동특성

Flow Characteristics around a NACA0012 Airfoil by PIV

최민선 · 조대환 · 이영호

M. S. Choi, D. H. Cho and Y. H. Lee

Key Words : Flow Characteristics(유동특성), Angle of Attack(영각), Velocity Distribution(속도분포), Separation Phenomena(박리현상), 2-D PIV(2차원 PIV), Turbo-Machinery(터보기계)

Abstract : The flow characteristics of a NACA0012 airfoil was investigated in rectangular water circulating channel. The flow patterns around an airfoil at various angles of attack between 0° and 30° at $Re = 1.91 \times 10^4$ were visualized and measured with 2-D PIV system and laser sheet illumination. Flow behaviors such as velocity distribution, kinetic energy and flow separation etc. around an airfoil were obtained by means of 2-D PIV system. The behaviors show the difference of flow pattern clearly and separation phenomena become more active with increasing angle of attack.

1. 서 론

터보기계의 성능향상을 위하여 여러 가지 종류의 익형이 사용되고 있는데 익형을 설계하는데 임펠러내의 부압면의 압력분포와 캐비테이션 억제를 위하여 익각도의 변화 및 단면변화는 완만하게 하여 급격한 속도변화가 없도록 설계하고 있다.

특히, 원심펌프 임펠러내 익 형상 및 영각(angle of attack)에 따라 유동특성¹⁾이 크게 달라 펌프성능에 지대한 영향을 주고 있는데, 원심펌프 임펠러의 익 통로사이의 가속영역은 경계층을 안정시키는 압력구배를 동반하여 효율적인 과정이 되지만, 감속영역은 역압력구배로 비효율적 과정으로 원심펌프내의 감속유동은 유동박리, 유동불안정, 와류생성과 에너지손실을 촉진하는 역압력구배를 수반한다. 특히 터보기계 익에서 박리가 발생하면 효율저하, 압력변동, 유량변동, 소음 등을 발생시키는 경우가 있다. 따라서 터보기계의 성능향상을 위해서 유동 제어 특히 박리제어^{2,3)}에 관한 연구가 임펠러 익 설계시 중요하다. 종래에는 익주변의 유동현상 규명을 수치계산에 의한 검토가 주로 행하여져 왔으며 실험^{4,5)}에 의한 정량적인 속도장계측은 많지 않은 실정이다. 이것은 연구대상 유동장이 주기성을 갖는 전형적인 비정상유동 이므로 종래의 계측

기법인 피토판이나 열선유속계 등에 의한 점계측 데이터 분석이 난해하기 때문이다.

본 연구에서는 터보기계의 임펠러 설계에서 중요한 익 주위의 유동현상을 고찰하기 위하여 실험 계측기법으로서 비정상 유동장에 대하여 동시다점으로 속도계측이 가능한 PIV⁶⁾(Particle Image Velocimetry)를 적용하여 단일익(NACA0012) 주위 유동에 대하여 가시화 실험⁷⁾을 행하고, 영각변화에 따른 익 주변의 경계층영역, 가속영역, 감속영역, 박리발생, 역류영역 형성, 압력구배, 역압력구배 등의 유동특성을 검토 하고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험장치

Fig. 2.1은 본 연구에서 채택한 실험장치의 구성도를 보이고 있다. 소형회류수조의 시험부는 길이 1300mm, 폭300mm, 높이300mm인 사각형이다. 수조 안에 각도조절이 가능한 NACA0012 익을 길이 1000mm, 높이190mm, 폭103mm인 아크릴평판 사이에 설치하고 익상부의 수면파에 의한 빛의 굴절 현상을 없애기 위하여 상부를 얇은 유리를 설치하여 4각형 유로를 만들었다. 익의 상류로 유입되는 유속은 회류수조 하부에 부착된 축류펌프의 회전수를 조정하여 가변하였다. 실험에서 채택한 회전수는 300rpm 이다. Fig. 2.2는 유동발생장치의 크기를 보여 주고 있다. 유로 내부 흐름은 좌측에서

접수일 : 1998년 2월 26일
최민선, 조대환 : 목포해양대학교 기관공학부
이영호 : 한국해양대학교 기계·냉동·자동차공학부

우측으로 흐르며 유동장의 폭은 103mm이다. 아크릴 평판 한쪽 면에 가변축을 설치하여 익 각도 변화를 행하였다. Table 1은 NACA0012의 규격을 나타내는 익좌표를 보이고 있다.

2.2 PIV계측실험

Table 2는 제반 실험조건을 나타낸다. 본 실험에서는 가시화 및 PIV의 영상획득을 위하여 추적 입자로써 직경100 μ m 전후의 PVC입자(비중1.02)를 사용하였다. 실험초기에 정전기에 의하여 달라붙는 것을 방지하기 위하여 세제를 소량 혼합하여 이를 투입하였으며, 작동유체의 온도는 23.5~28.5 $^{\circ}$ C에서 수 차례에 걸쳐 실험을 하였다. 그 결과 낮은 온도(23.5 $^{\circ}$ C)에서 PVC입자의 부유가 잘되어 가시화 활

Table 1 Contour coordinates of NACA0012 ($\alpha=0^{\circ}$)

(Unit: mm)

번호	x 좌표	$\pm y$ 좌표
1	0.0000	0.0000
2	1.0322	1.5655
3	1.7000	2.5758
4	1.8750	2.8410
5	3.7500	3.9225
6	5.0000	4.3925
7	7.5000	5.3325
8	11.2500	6.3000
9	15.0000	7.0245
10	22.5000	8.0175
11	30.0000	8.6055
12	37.5000	8.9115
13	45.0000	9.0030
14	60.0000	8.7045
15	75.0000	7.9410
16	90.0000	6.8445
17	105.0000	5.4960
18	120.0000	3.9960
19	135.0000	2.1720
20	142.5000	1.2105
21	150.0000	0.0000

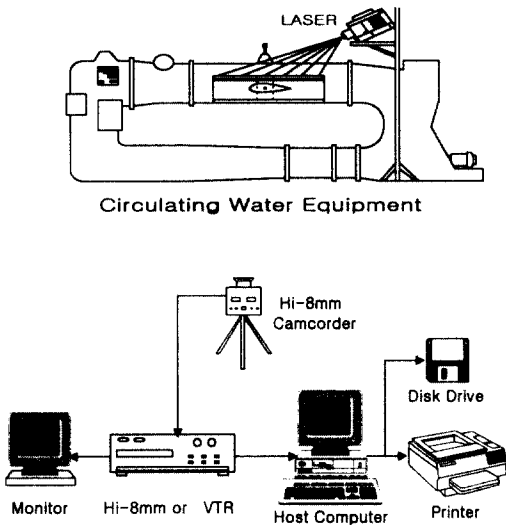


Fig. 2.1 Schematic arrangement of PIV system

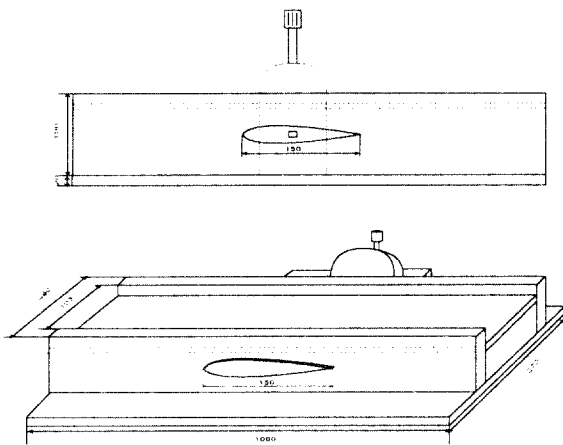


Fig. 2.2 Dimension of flow generator

영이 용이함을 알 수 있었다. 유동장은 캠코오더(삼성, 모델: SV-S99)를 설치하여 상류, 익 주변 및 후류유동을 촬영하였다. 조명용 레이저로서는 300mW출력의 연속광 아르곤 이온레이저를 사용하였으며, 아크릴 익에 두께가 약 2mm의 시이트라이트(Sheet light)를 가변축이 설치된 아크릴 평판으로부터 익 폭 70mm 위치에서 조사하였다. 또한 익의 가변축이 설치된 아크릴 평판을 검은색 코딩지로 부착하여 산란광을 없애고, 계측영역에 나타날 수 있는 잡음성분을 최소로 하였다.

Fig. 2.3은 익 주변의 경계층에서 속도분포와 유입 유동방향을 나타내고 있다. 코드길이 150mm, 두께18mm, 스펠길이103mm인 NACA0012익에 유입되는 4각형 유로 내의 유속 $U_{\infty}=0.178$ m/sec, $Re=1.91 \times 10^4$ 에서 익 영각 $\alpha=0^{\circ}$ 에서 30° 까지 영각을 변화시켜서 유동가시화와 PIV속도계측을 하였다.

Table 2 Experimental condition

Articles	Item	Specification
Visualization equipment	Image board	DT3155(640×480pixel, B/W)
	Light source	300mW Argon-Ion laser
	Sheet light	Cylindrical lens(width:2mm)
Measuring condition	Working fluid	Water (23.5 °C)
	Pump motor	300rpm(10Hz)
	Inlet velocity	$U_{\infty} = 0.178 \text{ m/sec}$
	Re	1.91×10^4
	Particle	PVC(specific gravity1.02, diameter: 100 μm)
Image processing	Time Resolution	60pps (Camcorder)
	Host computer	Pentium PC(CPU speed: 200MHz)
	Calculation time	3 Minute/frame
	Image recording	Hi-8mm
	Number of time-mean data	30 Frames
	Identification	Two-frame grey-level cross correlation algorithm Calculation Grid:30×30
	Ratio of error vector(%)	under 1% /frame average : about 0.4%

Fig. 2.4는 PIV속도계측의 일반적인 처리과정을 보여주고 있다. 우선 유동장의 형성이 중요하며 이후에 추적입자의 주입 및 조명의 공급이 필요하다. 다음으로 캠코더 등을 이용하여 실제 계측대상의 유동장을 기록한다. 전처리과정은 화상의 질을 개선하거나 화상을 특정한 목적에 알맞도록 변환시키는 등의 화상처리를 의미하는데 계조치의 공간분포를 정도 높게 구하기 위하여 배경영상제거에 의한 잡음처리를 하였다.

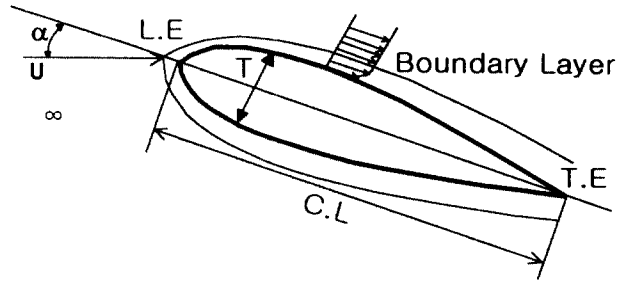


Fig. 2.3 Velocity profiles in the boundary layer

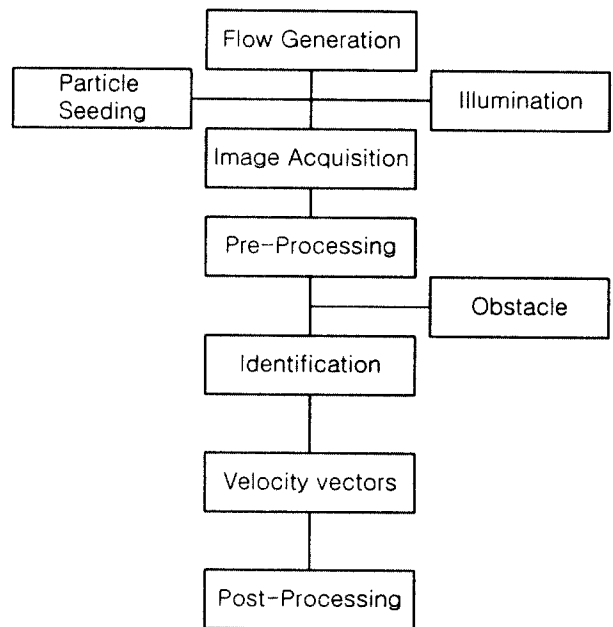


Fig. 2.4 Flow chart of PIV Processing

전처리과정이 끝나면, 계산영역을 설정하고 장애물처리를 하여 계조치상호상관법을 이용한 동일입자 확인을 실시하였다. 이 장애물 처리는 AUTO CAD 상에서 $\alpha=0^\circ$ 일 경우 NACA0012 익전연의 절대좌표(mm단위)를 원점(0,0)으로 하여 익 좌표점을 입력시킨 후 익회전축 좌표(코드길이의 1/3 지점)에서 PIV장치의 PC모니터상 픽셀좌표로 환산시킨 후 익전연의 절대좌표의 원점을 익전연의 픽셀좌표로 이동시켰다. 또한, 익형상 픽셀좌표는 회전축을 중심으로 영각변화에 따라 회전 이동하여 구하였다. 이렇게 전 처리된 영상에 대하여 적당한 속도벡터 추출알고리즘을 적용하여 유동장의 속도벡터를 구한다.

후처리과정에서는 이상치(Outlier)를 판별하여 파오벡터를 제거하는 에러처리, 격자점 재배치, 픽셀단위의 속도벡터를 m/sec단위로 바꾸는 단

위환산 등을 하였다.

Table 3은 PIV전용소프트웨어(CACTUS'97, (주)IIT)를 이용하여 속도벡터처리를 행한 각종 데이터 정보를 나타내고 있다.

Table 3 Processing data($\alpha=0^\circ$)

Articles	Re= 1.91×10^4	
CAS	42	
SAR	10	
Time interval	1/60	
Dist. measured by image(pixel)	up stream	342
	down stream	342
Dist. measured by real object(mm)	150	
Speed unit(m/sec)	0.5	
Vel. vector scale	55.0	
Vel. arrow scale	0.4	

3. 결과 및 검토

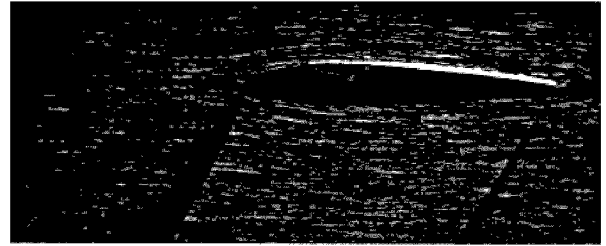
3.1 상류 유동분포

상류에서 유입되는 유동특성을 조사하기 위하여 익 후연근방으로부터 상류방향으로 가로, 세로의 유동장을 대상으로 $Re=1.91 \times 10^4$, $\alpha=0^\circ$, 30° 에서 가시화를 행하여 상류에서 유입되는 유동특성을 고찰하였다.

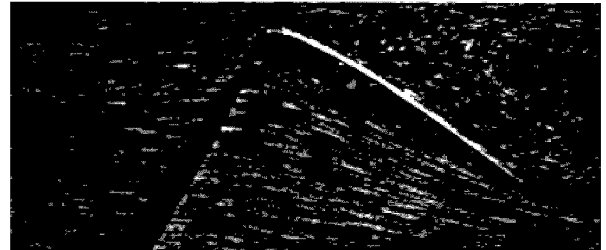
Photo. 1은 레이저 광원을 조사하여 상류로부터 익 주변 유동장에 유입된 추적입자의 흐름을 캠코 오더로 촬영하여 가시화한 장면이다. 흰색으로 된 유선은 PVC입자들의 움직임을 나타내고 있다.

Fig. 3.1은 $\alpha=0^\circ$, 30° 에서 30개의 순간속도 벡터를 평균한 상류유동의 시간평균속도분포를 나타낸 것이다.

Fig. 3.2는 상류유동의 평균속도분포 및 유동방향으로 12개의 단면으로 구분해서 도시한 단면속도분포를 나타낸 것이다. 전반적으로 익의 전면부까지는 균일하게 유입되는 속도분포를 나타내고 있다.

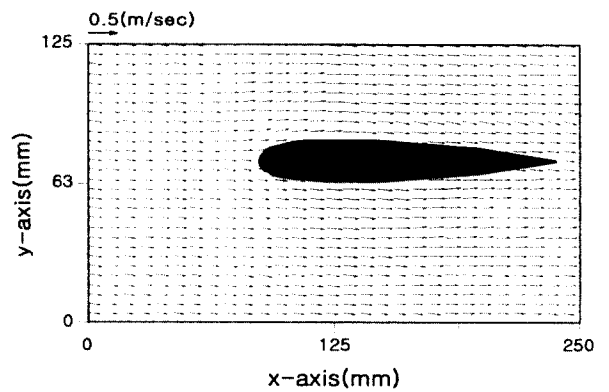


(a) $\alpha=0^\circ$

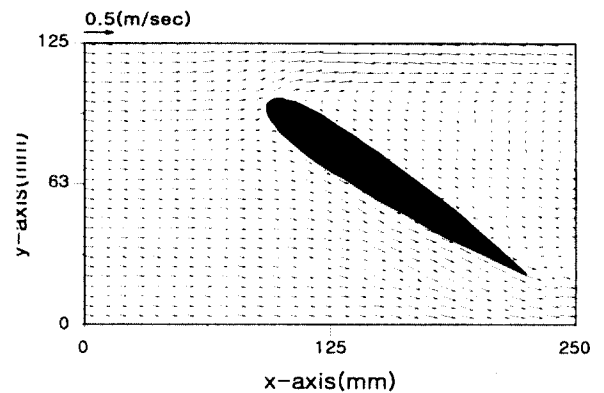


(b) $\alpha=30^\circ$

Photo. 1 Visualization of flow field



(a) $\alpha=0^\circ$



(b) $\alpha=30^\circ$

Fig. 3.1 Time-mean velocity distribution

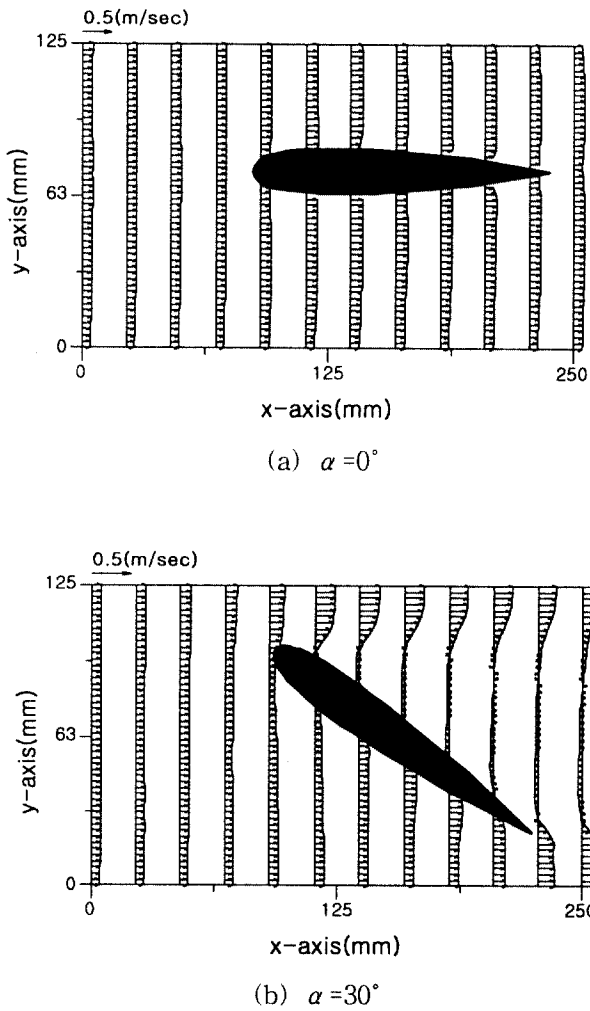


Fig. 3.2 Time-mean velocity profiles

3.2 익 주변 및 하류 속도분포

Fig. 3.3은 $Re=1.91 \times 10^4$ 에서 영각변화에 의한 30개의 순간속도벡터를 각 격자점에서 산술 평균한 시간평균 속도벡터를 구하여 익 주변 및 익 후류의 유동분포를 고찰하였다.

익면을 따라서 형성되는 경계층은 영각이 증가함에 따라 그 두께는 증가하고, $\alpha = 15^\circ$ 부터 벽면 근방의 점성마찰에 의한 속도에너지 손실로 경계층내 유동속도가 감소되어 역압력구배에 의해 박리가 발생되고, 박리점 바로 하류에서 역류가 발생되어 재순환 유동영역이 생성됨을 알 수 있다. 역류가 일어나면 와류영역이 크게 생겨 자유유동을 교란시킨다. 영각이 증가할수록 전연 쪽으로 박리점이 이동하고 박리의 규모가 증가함을 알 수 있다. 하류에서는 발생하는 와류가 영각의 증가에 따라

보다 활발하게 나타나고 있다.

Fig. 3.4는 $Re= 1.91 \times 10^4$ 에서 영각 변화에 따른 순간속도벡터를 산술평균한 시간평균 단면속도 분포이다.

$\alpha = 0^\circ$ 에서 익면 근처에 점성작용에 의해 얇은 속도구배층 즉 경계층이 발생되고, 경계층 외측에서는 점성작용을 무시할 수 있는 균일한 유동인 자유유동 또는 포텐셜 유동을 나타내고 있다. 경계층의 유동은 외부의 자유유동보다 느리기 때문에 주류의 빠른 유동이 경계층내의 느린 유동에 운동 에너지를 공급하여 경계층이 계속하류로 흐를 수 있도록 해준다.

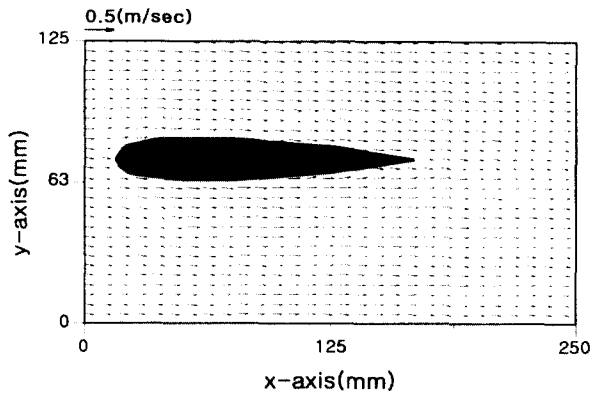
$\alpha = 10^\circ \sim 15^\circ$ 에서 익 후연부 근방에서 속도가 감소되는 유동 즉 역압력구배가 생기고, 익면 근처에서 경계층 두께가 증가하고 있음을 알 수 있다.

$\alpha = 15^\circ$ 에서 역압력구배에 의해 경계층내 속도가 감소되어 박리가 발생함을 알 수 있다.

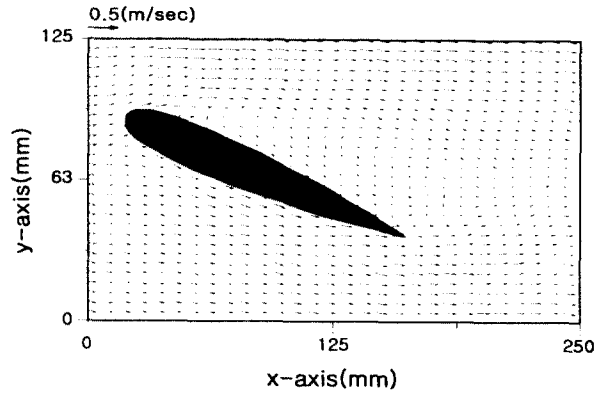
$\alpha = 20^\circ \sim 30^\circ$ 에서 속도벡터의 분포를 보이고 있으며 영각이 증가함에 따라 익의 경계층 두께가 $\alpha = 20^\circ \sim 30^\circ$ 에서 속도벡터의 분포를 보이고 있으며 영각이 증가함에 따라 익의 경계층 두께가 증가하고, 박리점이 전연쪽으로 이동하여 박리점 바로 하류에서 역압력구배 때문에 벽면에 가까운 경계층으로부터 역류가 발생하고, 와동과 함께 불규칙한 회전유동영역이 크게 생성되어 자유유동을 교란시킨다. 박리점이 전연쪽으로 이동되면 될수록 항력이 증대하고, 하류쪽으로 이동될 수록 항력이 감소한다. 박리가 발생되면 박리역의 압력저하는 또한 양력을 감소시키고 영각이 일정한도를 넘어서면 양력이 급속하게 떨어지는 현상을 동반한다. 따라서 익 설계시 박리억제 또는 박리발생을 가급적 하류로 이동시키는 설계⁸⁾가 필요하다.

Fig. 3.5는 $Re=1.91 \times 10^4$ 에서 영각 변화에 따른 시간평균운동에너지 분포이다.

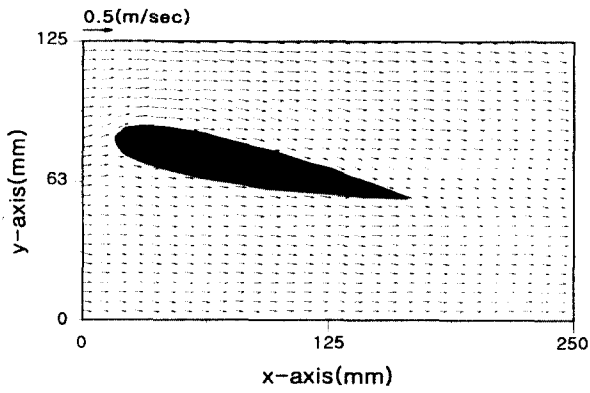
$\alpha = 0^\circ$ 에서는 익 상부측과 하부측에서 균일한 운동에너지 분포를 나타내고 있다. 또한 영각이 증가할수록 점성에 의한 경계층 영향과 역압력 구배에 의해 유동속도가 감소되는 익면 근방의 경계층 영역보다 경계층 외측영역 즉 자유유동 영역에서 운동에너지 분포가 크게 됨을 알 수 있다.



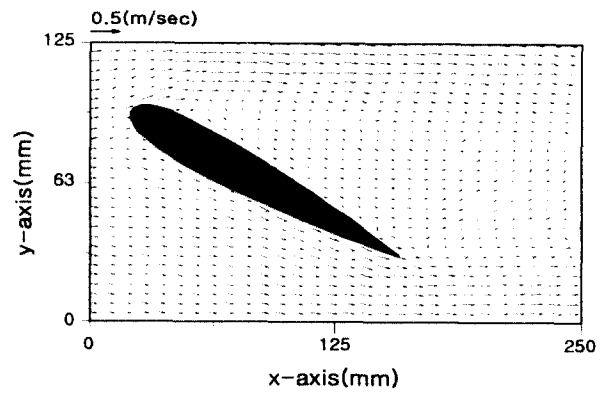
(a) $\alpha = 0^\circ$



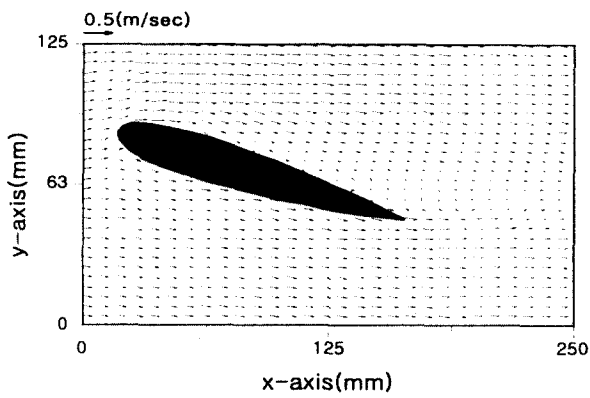
(d) $\alpha = 20^\circ$



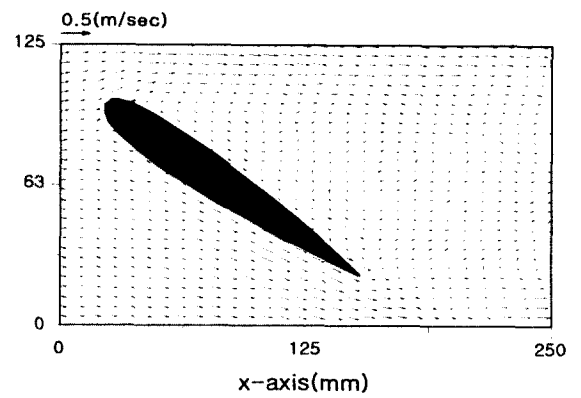
(b) $\alpha = 10^\circ$



(e) $\alpha = 25^\circ$

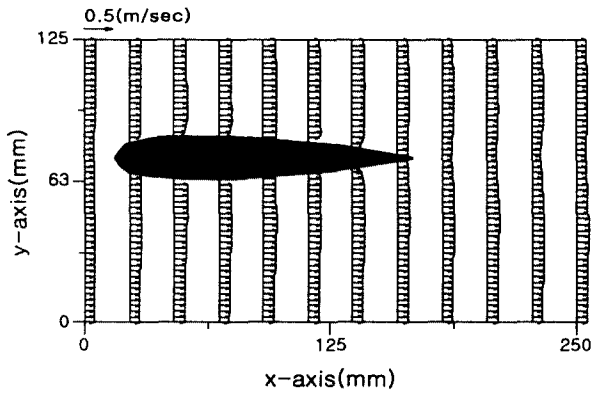


(c) $\alpha = 15^\circ$

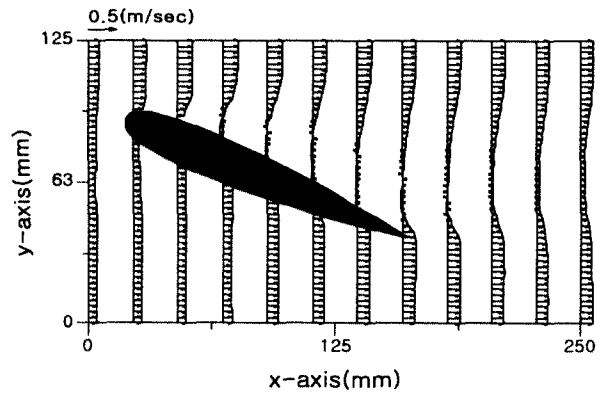


(f) $\alpha = 30^\circ$

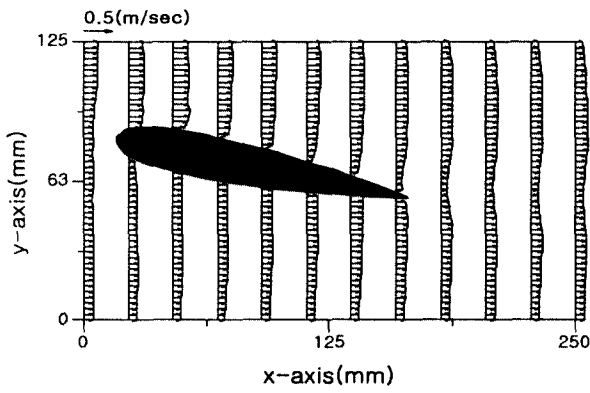
Fig. 3.3 Time-mean velocity distribution



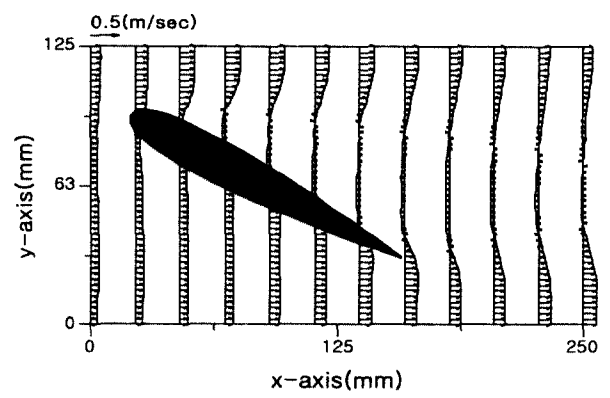
(a) $\alpha = 0^\circ$



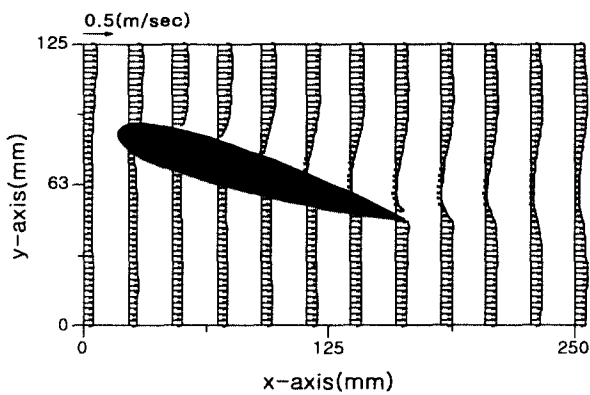
(d) $\alpha = 20^\circ$



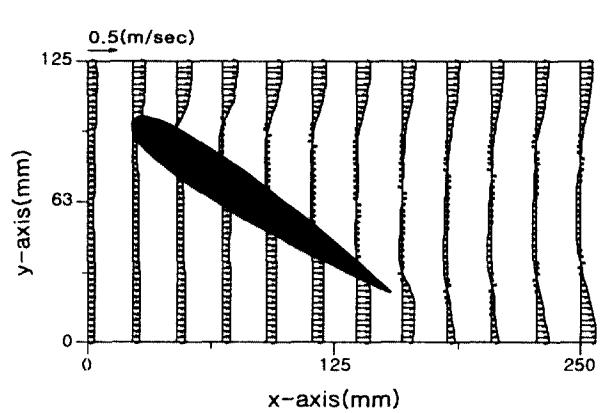
(b) $\alpha = 10^\circ$



(e) $\alpha = 25^\circ$

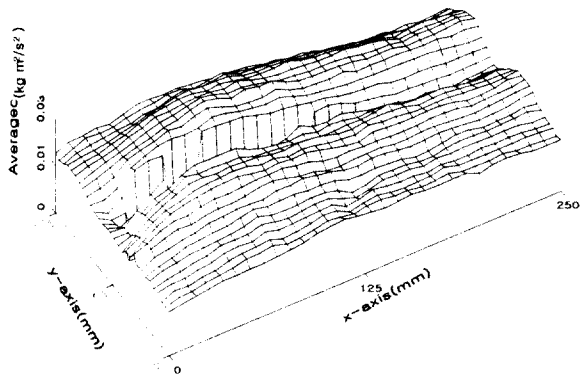


(c) $\alpha = 15^\circ$

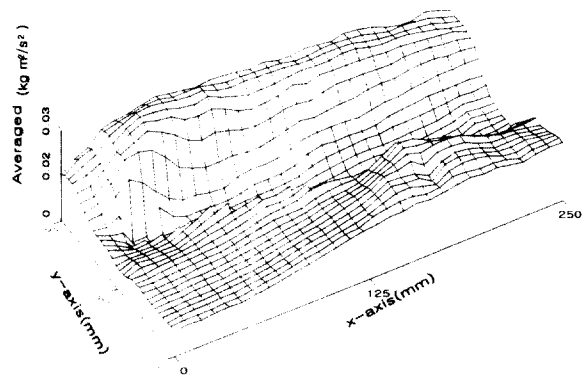


(f) $\alpha = 30^\circ$

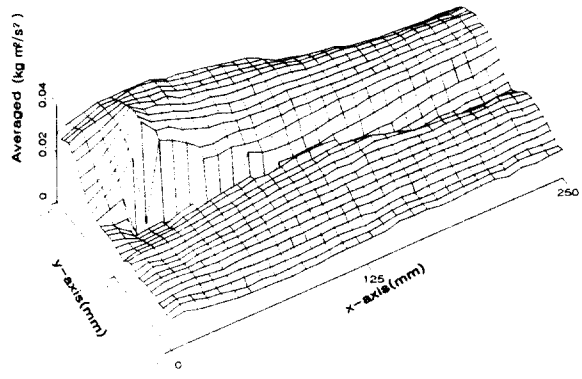
Fig. 3.4 Time-mean velocity profiles



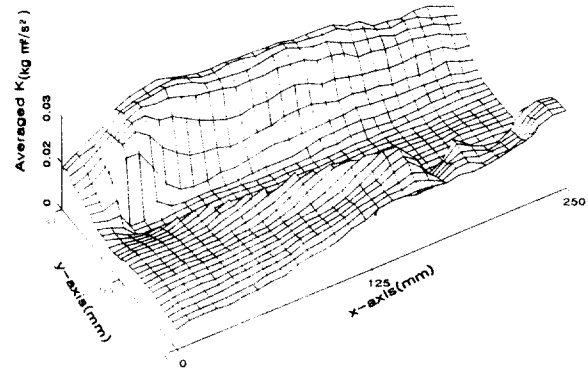
(a) $\alpha = 0^\circ$



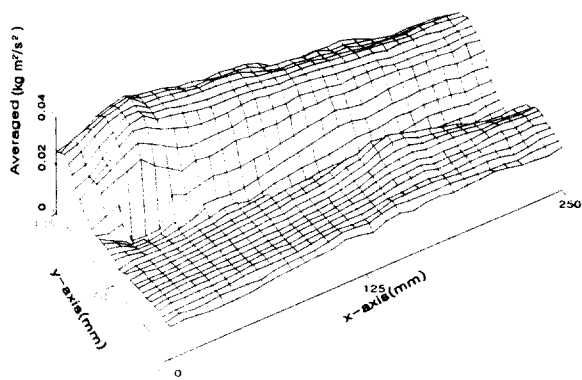
(d) $\alpha = 20^\circ$



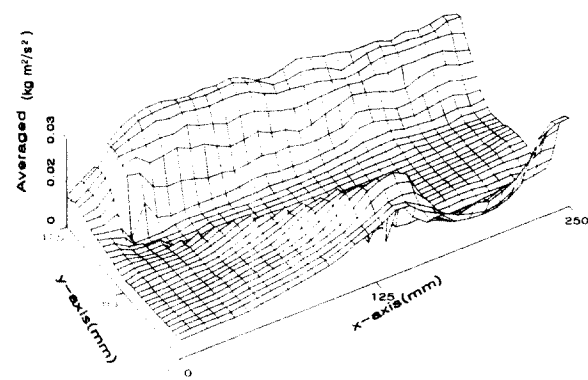
(b) $\alpha = 10^\circ$



(e) $\alpha = 25^\circ$



(c) $\alpha = 15^\circ$



(f) $\alpha = 30^\circ$

Fig. 3.5 Time-mean kinetic energy

4. 결 론

점계측방법인 피토크나 열선유속계 등에 의한 기존실험방법과 달리 비정상 유동장에 대하여 동시다점으로 속도계측이 가능한 PIV에 의해 익주변의 유동특성을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 설계한 유동발생기로부터 PIV속도계측실험을 통하여 NACA0012 익의 영각 증가에 따라서 경계층 두께가 증가하는 유동특성과 전연 쪽으로 박리점이 이동하는 유동특성을 확인할 수 있었고, 특히 $\alpha=15^\circ$ 로부터 경계층 박리가 발생됨을 알 수 있었다.

추후 본 연구는 PIV계측실험에 의한 피칭 운동을 하는 가변익 또는 펌프 임펠러내 익주변의 유동해석에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 최민선, “2차원 원심식 터보기계의 성능특성에 관한 연구”, 한국해양대학교 박사학위논문, 1995
2. 塚本寛, 田中和博, 松永成徳, 田中博喜, “形状記憶合金アクチュエータによる翼形状の制御”, 日本機械學會論文集(B編), 58卷, 552号 pp. 2493~2497, 1992
3. 木谷 勝, “剝離流れの能動制御”, ターボ機械, 22卷, 第5号, pp. 262~268, 1994
4. 강신형, 신상철, 이현구, “NACA0012 날개 위의 천이 경계층에 관한 실험적 연구” 대한기계학회 논문집(B), 제20권, 제5호, pp. 1689~1699, 1996
5. 佐野正利, 平山直道, “翼近傍後流の平均特性, 亂流特性”, 日本機械學會論文集(B編), 第55卷, 510号, pp. 358~364, 1989
6. 이영호, 최장운, “PIV분류 및 원리”, 대한기계학회지, 제36권, 제12호, pp. 1146~1162, 1996
7. 明石 光一郎, “煙風洞を用いた航空機翼まわりの局所流れの可視化”, 可視化情報, Vol. 15, Suppl. No. 2, pp. 101~104, 1995
8. 손병진, 맹주성, 이상환, “상설 유체역학”, 회중당, pp. 933~1131, 1992