

3-D Stereo PIV에 의한 비정상 델타윙 유동특성에 대한 연구

김범석[†] · 이 현* · 김정환** · 이영호***

A Study on the Unsteady Flow Characteristics of a Delta Wing by 3-D Stereo PIV

BeomSeok Kim, Hyun Lee, JeongHwan Kim and YoungHo Lee

Key Words: 3-D Stereo PIV(3차원 스테레오 PIV), Delta Wing(델타형 날개), Leading Edge Extension(연장된 앞전), Induced Vortex(흡입와류), High Speed Camera(고속도카메라)

Abstract

Leading edge extension(LEX) in a highly swept shape applied to a delta wing features the modern air-fighters. The LEX vortices generated upon the upper surface of the wing at high angle of attack enhance the lift force of the delta wing by way of increased negative suction pressure over the surfaces. The present 3-D stereo PIV includes the Identification of 2-D cross-correlation equation, stereo matching of 2-D velocity vectors of two cameras, accurate calculation of 3-D velocity vectors by homogeneous coordinate system, removal of error vectors by a statistical method followed by a continuity equation criterion and so on. A delta wing model with or without LEX was immersed in a circulating water channel. Two high-resolution, high-speed digital cameras(1280pixel×1024pixel) were used to allow the time-resolved animation work. The present dynamic stereo PIV represents the complicated vortex behavior, especially, in terms of time-dependent characteristics of the vortices at given measuring sections. Quantities such as three velocity vector components, vorticity and other flow information can be easily visualized via the 3D time-resolved post-processing to make the easy understanding of the LEX effect or vortex emerging and collapse which are important phenomena occurring in the field of delta wing aerodynamics.

1. 서 론

델타형 날개는 아음속 또는 초음속 유동에서 사용하기 위해 설계된 대칭적인 삼각형 구조의 날개로서 음속 부근에서의 충격파의 발생이 주는 여러 가지 영향을 적게 하여 비행기의 가속을 증가시키고, 안정성을 증가시킬 수 있는 장점을 가

진 날개이다^{(1),(2)}. 높은 받음각(Angle of attack)을 가지는 델타형 날개 상면의 공기흐름은 날개의 전연에서 두 개의 흐름으로 분리되어 나선형 구조를 갖는 흐름을 형성하게 되며, 이러한 나선형 와류의 중심에서 발생하는 빠른 유속은 날개 윗면에 큰 부압(Suction pressure)을 형성하여 고양력을 발생시키게 된다⁽³⁾. 날개의 받음각이 증가함에 따라 날개 상면의 와류 중심에서의 속도와 와도의 증가를 가져오며, 이러한 결과로 날개에서의 양력의 증가를 초래하게 된다. 그러나 실속각 이상의 받음각을 가지게 되면 날개 상부에서 집중된 와류선이 임의의 조건 하에서 붕괴되어 급격한 양력의 감소와 피칭모멘텀의 손실을 초래하는 와류붕괴(Vortex breakdown) 현상을 발생시키게

[†] 한국해양대학교 대학원 기계공학과

E-mail : bum_suck@pivlab.net

TEL : (051)410-4293 FAX : (051)403-0381

* 한국해양대학교 대학원 기계공학과

** 아이아이티 연구원

*** 한국해양대학교 기계·정보공학부

된다.

2차원 시간해상도 PIV를 적용하여 다양한 받음각(15°, 20°, 25°, 30°)과 날개위치(30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%)의 변화에 따른 델타형 날개에서의 나선형 와류의 발생, 와류의 발달, 와류붕괴등의 유동 특성을 고찰한 연구는 이미 행하여 졌다⁽⁴⁾. 그러나 델타형 날개에서 발생하는 나선형 와류는 본질적으로 강한 3차원 유동 특성을 가지고 있으므로 2차원 PIV 계측으로서는 완전한 와류 특성을 이해하는데 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 유동장의 3차원 정보를 획득할 수 있는 3차원 스테레오 PIV⁽⁵⁾를 적용하여 보다 신뢰성 있는 3차원 유동의 해석을 행하고자 하였다. 본 연구실에서 개발되어 연구에 채택한 3차원 스테레오 PIV의 호모지니어스 좌표계(Homogeneous coordinate)는 카메라의 사진좌표를 사용하지 않고 영상좌표를 사용하여 영상에 투영된 입자들의 3차원 위치를 계산하므로 기존의 3차원 스테레오 PIV에 비해 카메라 왜곡보정 및 표정요소등을 구하는 과정이 불필요하며, 이에 대한 계산 오차를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다. 스테레오 PIV에 의해 획득된 3차원 해석 영역에서의 속도벡터 및 유동정보는 3차원 애니메이션 소프트웨어에 의해 다양한 작업을 통하여 보다 현실적인 유동해석을 위한 여러 가지 정보를 획득할 수 있었으며, 실험 결과를 통해 획득된 3차원 PIV의 동영상은 델타형 날개에서 발생하는 복잡한 3차원 유동을 이해할 수 있는데 큰 도움을 주었다.

2. 실험

2.1 실험모델

Fig.1과 Fig.2는 델타형 날개의 모델을 나타내고 있다. 델타형 날개모델은 코드길이가 190mm, 뒷전에서 스패폭이 120mm, 65°의 후퇴각(Sweep angle)을 가지며, 86%의 코드 위치에서 90°로 잘라 낸 평판형 삼각 날개로서 앞전의 날개는 25°의 각도로 NC가공에 의해 황동으로 제작되었다. 이러한 델타형 모델은 받음각과 옆미끄럼각의 변화를 용이하게 조절할 수 있는 Fig.2와 같은 장치에 고정되어 수조내부에 설치되었으며, 실험에 사용된 회류주소는 내부의 유동장을

가시화 하기에 적합하도록 투명아크릴로 제작되었고 200mm×200mm의 해석영역을 가지도록 제작되었다.

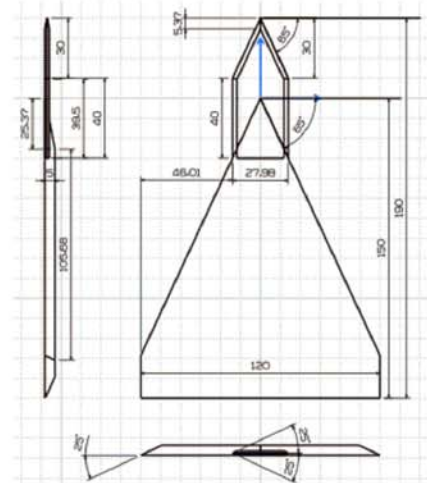


Fig.1 Dimension of model(with LEX)

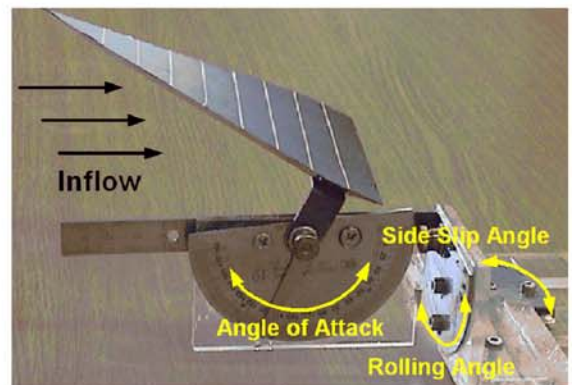


Fig.2 Controllable angle adjustment mechanism

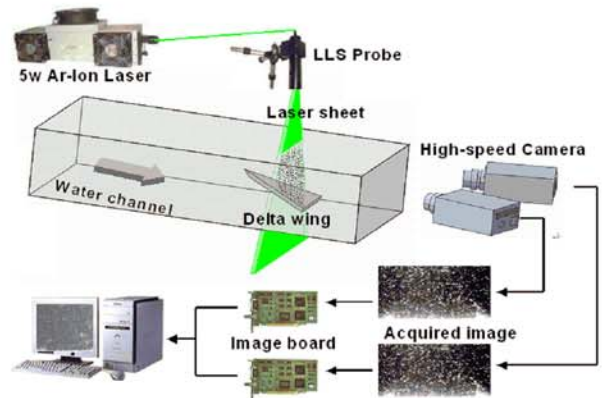


Fig.3 PIV arrangement

2.2 PIV 계측

Fig.3은 본 실험에 사용된 3차원 스테레오 PIV 시스템의 구성도를 나타내고 있다. 실험에서 작동유체로는 20℃ 상온수가 사용되었고, 수조의 하단에 설치되어 있는 밸브를 이용하여 입구속도 0.2m/sec($Re=3.0 \times 10^4$, chord length=150mm)로 설정하여 실험을 행하였다. 본 실험에 적용된 실험조건은 표1에 자세하게 나타내고 있다.

추적입자로는 작동유체의 흐름에 방해를 주지 않는 직경 120 μ m의 PVC 구형입자를 사용하였으며, 광원으로는 4W급 출력의 Ar-Ion 연속광 레이저를 사용하였고, 1280×1024 pixel의 해상도를 가지는 2대의 고속도 카메라(Maximum:1000FPS)를 입력장치로 하여 1,000장의 연속적인 영상을 획득하였다. 2대의 고속도 카메라에 의해 입력된 연속적인 1,000장의 영상은 2차원 동일입자 추적에서 영상의 잡음제거등에 효과적인 배경감산에 사용되는 평균영상을 만드는데 사용되었다. 1/500초의 시간간격으로 입력된 250장의 연속적인 영상은 다양한 전처리 과정을 거친 후, 상호상관법에 의한 동일입자 추적을 행하였다.

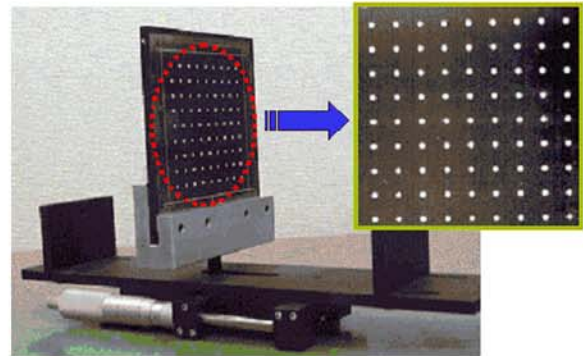


Fig.4 Calibration equipment

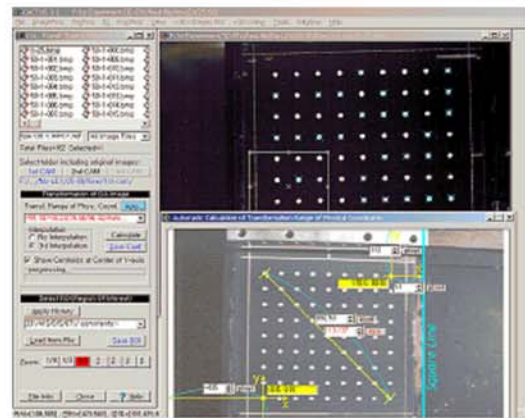


Fig.5 Calibration procedure

Table1 - PIV experimental conditions

	Item	Specification
Measuring condition	Working fluid	Tap-water(20℃)
	Particle	PVC
Image processing	Host Computer	PentiumIV
	Calculation time	2sec(1000frame)
	Frame number for time-averaging	250 frame
	Identification	Cross correlation PIV
	Software	<i>CACTUS3.1</i> (IIT Co.)
	Ratio of error vector	Less than 1% / frame
Identification condition	Maximum	9 pixel
	Time interval	500 Hz

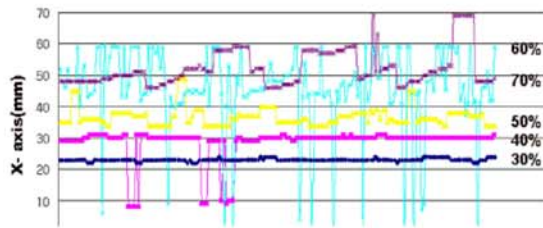
2.3 카메라 보정(Camera calibration)

스테레오 PIV에서 보다 정확한 스테레오 정합 및 실험결과를 획득하기 위해서는 정밀한 카메라 교정 과정이 진행되어야 한다. Fig.4는 본 실험에 사용된 캘리브레이터를 보여주고 있다.

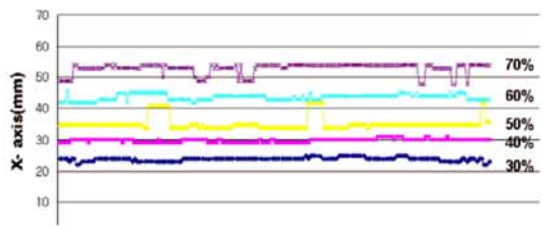
캘리브레이터는 가로100mm x 세로100mm인 얇은 금속평판에 10mm씩 등간격(가로9개 x 세로9개)으로 직경이 0.3mm인 원을 정확하게 표시한 후 깊이 방향으로 회전트래버싱(1/50mm scale) 손잡이를 1mm씩 11회 이송시켜 투영변환식을 구하는데 사용되는 지상좌표를 얻는다. Fig.5는 본 연구실에서 개발된 소프트웨어를 통한 카메라 교정 과정을 보여주고 있다.

3. 결과 및 고찰

Fig.6은 시간의 변화에 따른 델타형 날개의 x축에서의 와도중심의 변화를 나타내고 있다. LEX를 부착하지 않은 그림7(a)의 30%영역에서는 와도중심의 위치가 거의 일정하나, 후방으로 이동하면서 와도중심의 위치변화가 심하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 특별히 60%영역에서는 와도중심의 위치가 주기적으로 현저하게 낮은 x축의 위치에 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 날개 후방으로 이동하면서 현저하게 감소된



(a) Position of maximum vorticity (without LEX)



(b) Position of maximum vorticity (with LEX)

Fig.6 Comparison of maximum vorticity position with the passage of time

제1차 최대와도의 값이 2차 최대와도의 값보다 낮은 값을 가지게 되어 최대와도 중심의 위치가 2차 와도로 이동하는 것을 보여주고 있다. 반면에 LEX를 부착한 그림7(b)를 살펴보면 30%와 40%위치에서는 그림7(a)의 경우와 거의 비슷한 위치에 존재하며, 날개의 후방으로 이동하면서 와도중심의 위치변화가 나타나지만 그림7(a)와 같은 현저한 와도중심의 변화는 나타나지 않는다.

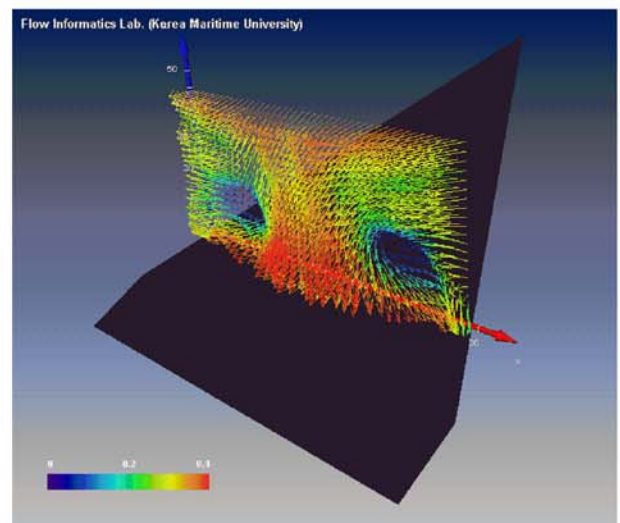
델타형 날개의 상면에서 발생하는 복잡한 와류 유동에 대하여 다이내믹 스테레오 PIV를 통해서 획득한 데이터는 애니메이션 전용 소프트웨어를 이용하여 나선형 와류의 복잡한 3차원 유동장을 해석하는데 유용하게 활용될 수 있다. Fig.7은 델타형 날개 상면의 70% chord 위치에서의 속도벡터, 난류강도, 운동에너지, 난류운동에너지 및 와도의 순간 및 시간평균 분포를 나타내는 여러 가지의 유동정보를 나타내고 있으며, 이와 같은 3차원의 애니메이션에 의하여 제반 유동특성을 보다 직관적으로 이해할 수 있다. 특히, LEX의 부착여부에 따른 유동특성의 변화가 아주 쉽게 구별할 수 있었다.

Fig.7(a)(b)는 LEX의 유무에 따른 속도벡터의 시간평균 3차원 분포를 나타내고 있으며, LEX가 존재하는 경우, 델타의 와가 보다 안정되게 존재함으로써 양력면에서 우수한 특성을 나타낼 수 있음을 쉽게 알 수가 있다. Fig.7(c)(d)는 시간평균

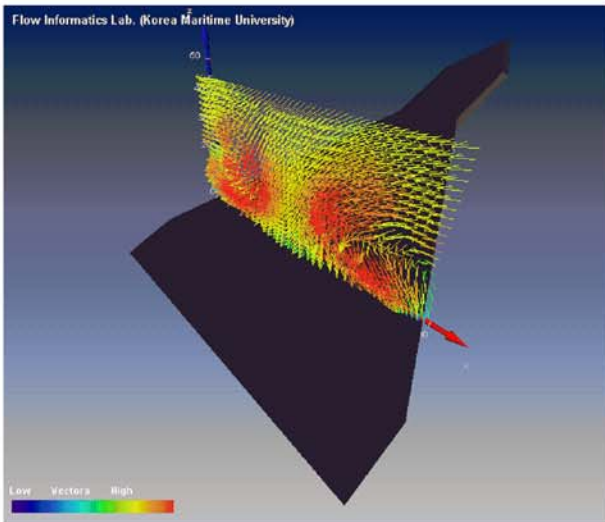
난류강도 분포를 나타내고 있다. LEX가 존재하는 경우에 난류강도 값이 크게 감소함을 알 수가 있다. LEX가 없는 경우에는 델타윙 흡입면에서 두쌍의 주와의 중심부분에서 속도변동이 매우 심하나, LEX가 존재하는 경우에는 주와의 위치보다는 LEX 와의 존재영역에서 보다 작은 규모의 난류강도가 집중되는 현상을 관찰할 수가 있다. 따라서, 델타윙에서의 속도변동 특성이 LEX의 존재에 의하여 크게 달라짐을 보이며, 델타윙의 안정성에 큰 영향을 미치고 있음을 쉽게 알 수가 있다. Fig.7(e)(f)는 난류운동에너지의 분포를 나타내고 있다. LEX의 존재 유무에 따라서 크게 달라진 분포특성을 관찰할 수가 있다. Fig.(g)(h)는 주류방향축을 중심으로 한 와도분포특성을 나타낸다. LEX 존재유무에 따른 분포가 다르게 나타나고 있으며, LEX가 존재하는 경우에는 LEX 와의 영향까지를 고려한 분포특성이 존재하여야 한다. 이에 관한 고찰은 다른 chord 단면에서의 결과를 포함하여 유동장 전체에 걸친 3차원적인 와도분포의 정보가 필요하다. 이를 위하여는 본격적인 3차원 volume PIV의 적용이 불가피하며, 이에 관하여는 차후의 검토과제로 한다.

4. 결 론

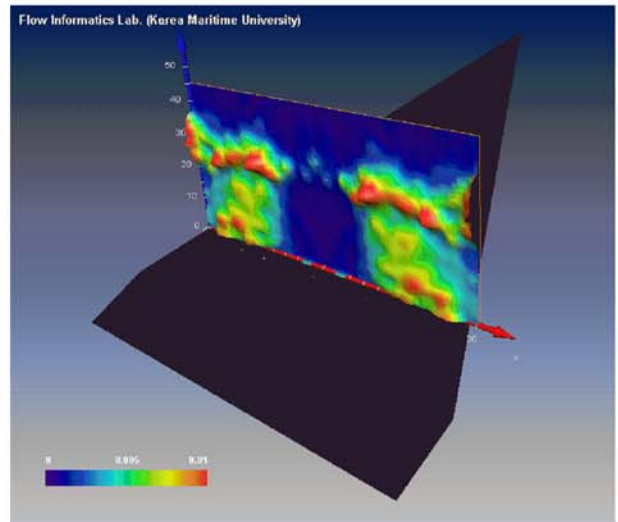
본 연구에서는 본격적인 3차원 유동장의 한 단면상의 속도벡터를 PIV로 계측하기 위하여 호모지니어스 좌표계와 상호상관식을 이용한 2프레임의 3차원 스테레오 PIV 기법을 제안하였다.



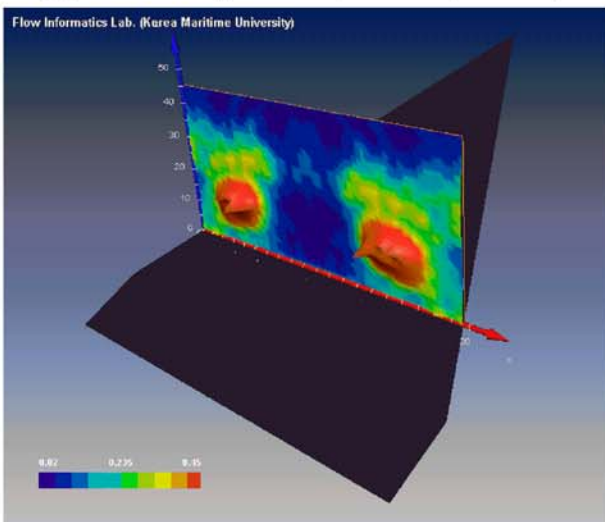
(a) Time averaged velocity vector (LEX-OFF)



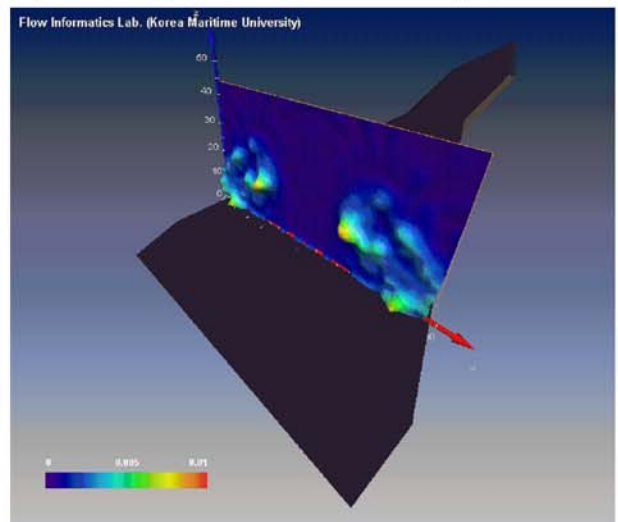
(b) Time averaged velocity vector (LEX-ON)



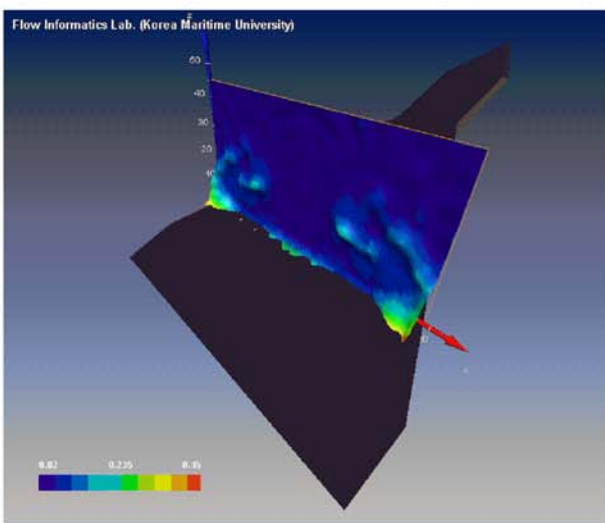
(e) Time averaged turbulence kinetic energy (LEX-OFF)



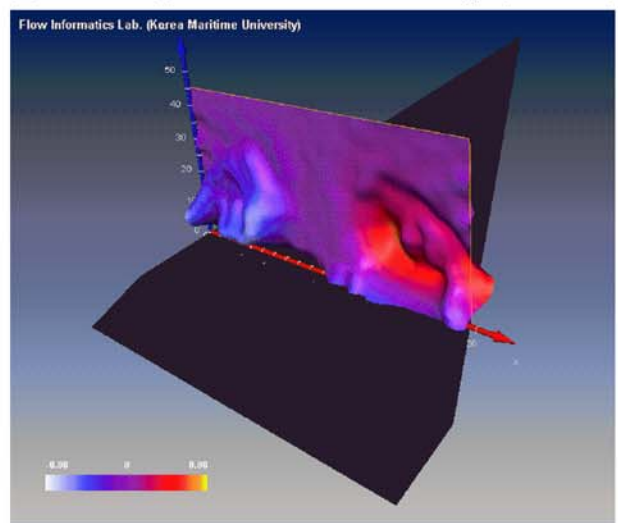
(c) Time averaged turbulence intensity (LEX-OFF)



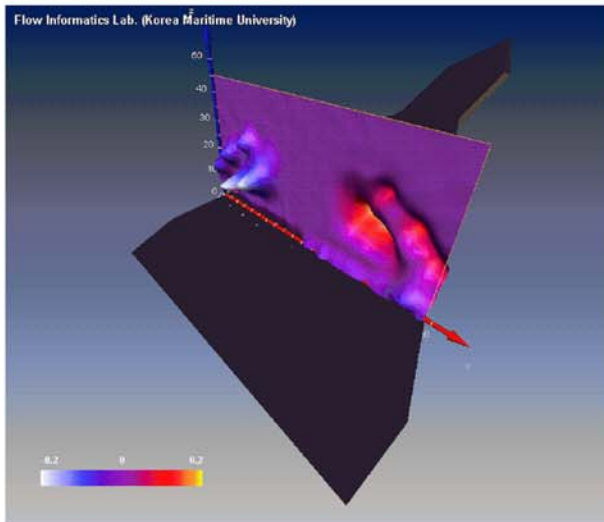
(e) Time averaged turbulence kinetic energy (LEX-ON)



(d) Time averaged turbulence intensity (LEX-ON)



(g) Time averaged vorticity (LEX-OFF)



(h) Time averaged vorticity(LEX-ON)

Fig.7 Various post-processing results from 3D stereo PIV

영상좌표를 사용하여 3차원 위치 정보를 획득함으로써 카메라 보정에 관한 오차를 줄일 수 있었다. 영상보정 작업을 행하여 각각의 카메라에 대하여 임의의 각도에서 촬영하더라도 스트레오 정합을 행할 수 있게 하였다. 3대의 카메라를 이용한 3차원 속도벡터를 구하는 기법을 개발하였으며, 2대의 카메라를 이용하여 3차원 속도벡터를 구하는 것 보다 정도 높게 3차원 속도벡터를 획득하였다. 또한, 오류벡터의 제거에는 통계적인 방법과 함께, 연속의 방정식을 최대한 만족하도록 하는 기법을 제시하였다.

구체적인 유동장 해석으로서 높은 받음각을 가지는 델타형 날개에서의 유동을 규명하기 위하여 Dynamic 3차원 스테레오 PIV를 적용하였다. 높은 해상도를 가지는 2대의 고속도 카메라를 2차원 상호상관법에 의한 동일입자 추적을 행하고 호모지니어스 좌표계에 의한 보다 정확한 3차원 좌표를 구한 후, 연속의 방정식에 의한 에러처리 등의 후처리를 행한 후 3차원 속도벡터 및 유동정보를 획득하였다.

Stereo PIV에 의해 획득된 결과는 델타형 날개에서 발생하는 복잡한 3차원 유동현상을 잘 표현하고 있으며, 특별히 고속도 카메라를 이용한 다이나믹 스테레오 PIV는 시간에 따른 와류중심의 변화 및 여러 가지 유용한 정보를 규명할 수 있도록 해 주었다. 3차원 단면에서의 속도분포와 와도분포등의 정량적인 데이터를 획득할 수 있었으며, 델타형 날개에서 LEX의 부착유무에 따른 결과를 비교함으로써 LEX의 부착에 따른 날개의 안정성을 저하시키는 와류붕괴의 지연 등에 대해서도 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Neven Lang N., 1998, "PIV Measurement in Sub-and Supersonic Flow over the Delta Wing Configuration," *Proc. of 8th Int. Sym. on Flow Visualization*, Paper number-205.
- (2) Dieterle L., Kompenhans J., Peiter U., 1998, "Flow Field Investigation on a Large Delta Wing Using LSI and PIV," *Proc. of 8th Int. Sym. on Flow Visualization*, Paper Number-204.
- (3) Hoeijmakers, H. W., and Vaatstra, W., 1983, "Vortex Flow over Delta and Double-Delta Wings," *Journal of Aircraft*, Vol. 20, No. 0, pp. 825~832.
- (4) Lee Y.H., Sohn M.H., Lee H., Kim J.H., Kim B.S., 2002, "PIV Analysis of a Delta Wing Flow with or without LEX," *Proc. of 11th Int. Sym. of Application of Laser Techniques to Fluid Mechanics*, Paper Number-45.
- (5) M.Y. Kim, J.W. Choi, K.M. Nam and Y.H. Lee, 2003, "Development of 3-D Stereo PIV by Homogeneous Coordinate System," *Trans. of Korean Society of Mechanical Engineers B*, Vol. 27, No. 6, pp. 736~743.