

Stereoscopic PIV 기법의 개발과 이를 이용한 축류 환 후류의 유동해석

윤정환*, 이상준†

(2001년 9월 19일 접수, 2001년 12월 10일 심사완료)

Development of Stereoscopic PIV Measurement Technique and Its Application to Wake behind an Axial Fan

Jong-Hwan Yoon and Sang-Joon Lee

Key Words : Stereoscopic PIV, Translation Configuration (Translation 배치), Velocity Field (속도장), Axial-Fan (축류 환), 2-D PIV (2 차원 PIV)

Abstract

A stereoscopic PIV (SPIV) measurement system based on the translation configuration was developed and applied to the flow behind a forward-swept axial-fan. Measurement of three orthogonal velocity components is essential for flow analysis of three-dimensional flows such as flow around a fan or propeller. In this study, the translation configuration was adopted to calculate the out-of-plane velocity component from 2-D PIV data obtained from two CCD cameras. The error caused by the out-of-plane motion was estimated by direct comparison of the 2-D PIV and 3-D SPIV results that measured from the particle images captured simultaneously. The comparison shows that the error ratio is relatively high in the region of higher out-of-plane motion near the axial fan blade. The turbulence intensity measured by the 2-D PIV method is bigger by about 5.8% in maximum compared with that of the 3-D SPIV method. The phase-averaged velocity field results show that the wake behind an axial fan has a periodic flow structure with respect to the blade phase and the characteristic flow structure is shifted downstream in the next phase.

기호설명

- R : 축류환의 반경
- X, Y : 영상면 좌표
- x, y, z : 물체체적 좌표
- u, v, w : 직각좌표계 속도성분
- U_{tip} : 날개 끝에서의 접선방향 속도
- U_{SPIV} : SPIV 로 측정된 속도
- $U_{2-D PIV}$: 2-D PIV 로 측정된 속도

1. 서론

최근 들어 컴퓨터 및 화상 처리기법의 발달에 힘입어 기존의 점측정 방법들이 제공할 수 없는 2 차원 단면, 또는 3 차원 공간의 유동정보 들을 제공할 수 있는 새로운 측정기법 들이 개발되고 있다. 그러나, 산업 현장이나 자연현상에서 나타나는 대부분의 유동은 비정상 난류유동이기 때문에 이러한 점 측정방법으로는 유동의 거시적인 변화를 제대로 해석할 수 없다. 현재 PTV (Particle Tracking Velocimetry)와 PIV (Particle Image Velocimetry)와 같은 2 차원(2-D) 속도장 측정기법 들이 개발되어 널리 활용되고 있다. 일반적으로 입자밀도가 높은 경우에 적용하는 PIV 방식은 유동화상의 미소 조사구간 (interrogation window) 내에 있는 산란 입자들의 분포에 대한 상관계수를 계산함으로써 조사구간을 대표하는 평균속도를 구하게 된다. 반면 PTV 방식은 유동영상 속에 있는 각각의 입자위치 들을 추출한 후, 그 입자 하나하

* 포항공과대학교 대학원 기계공학과
 † 책임저자, 회원, 포항공과대학교 기계공학과
 E-mail : sjlee@postech.ac.kr
 TEL : (054)279-2169 FAX : (054)279-3199

나를 추적함으로써 입자변위를 결정하며, 입자밀도가 상대적으로 낮은 유동에 유용하다.

열유체 분야에서 다루는 유동은 대부분 3 차원 난류유동으로 3 차원 PIV 속도장 측정기술을 개발하여 3 차원 유동정보를 얻고자 하는 시도는 자연스럽다. 3 차원 속도장 기법들 중 holographic PIV (HPIV)와 stereoscopic PIV (SPIV)가 현재 세계적으로 많이 연구되고 있다.⁽¹⁻⁶⁾ 3 차원 체적 내부의 3 차원 속도성분을 동시에 측정할 수 있는 HPIV 속도장 측정기법은 선진국을 중심으로 개발연구가 활발히 진행되고 있으나, 아직까지 측정 시스템 및 데이터 처리시간 등에 많은 제한점을 가지고 있다. 2 차원 평면 내에서 3 차원 속도성분을 측정하는 SPIV 측정기법은 HPIV 기법에 비해 실험이 용이하고 데이터 처리시간 짧으며, 가격이 상대적으로 저렴하다는 장점을 가지고 있다.

Arroyo & Greated⁽⁷⁾는 4 개의 거울과 현대의 카메라로 SPIV 시스템을 구성하였다. 두 거울을 레이저 평면광에 수직으로 물체면과 렌즈면의 중앙에 설치하여 입자영상이 두개의 거울을 거쳐 렌즈의 중앙부위를 통과하도록 하였다. 2 개의 거울은 렌즈를 통과한 2 개의 입자영상이 영상 기록면인 필름이나 CCD 센서의 절반을 차지하도록 설치하였다. 이 단일영상(single-image) PIV 방법은 하나의 카메라에 두개의 SPIV 영상을 동시에 기록하는 장점이 있다. 이 방식으로 측정된 측정평면을 벗어나는 (out-of-plane) 속도성분의 측정오차는 측정평면내에 들어있는 (in-plane) 속도성분 측정오차의 약 3 배 정도인 것으로 알려져 있다.

Prasad & Adrian⁽⁸⁾은 2 대의 카메라를 이용한 SPIV 시스템을 구성하고 상부에 디스크가 회전하는 원통 내부유동의 속도장을 측정하였다. 그들은 원통바깥에 직육면체 용기를 설치하고 3 축방향 속도성분을 측정하였으며, in-plane 변위는 0.2%, out-of-plane 변위에서는 약 0.8%의 오차를 갖는다고 밝혔다. Grant 등⁽⁹⁾은 두 카메라의 중심축이 일치하는 in-line SPIV 기법을 이용하여 3 차원 속도성분을 측정하였다.

기존의 SPIV 속도장 측정기법에서는 미리 구한 영상면과 유동 내부 측정면 사이의 기하학적인 상관관계를 이용하여 두 카메라로 측정되어진 속도장 결과로부터 3 차원 속도성분을 구하였다. 이러한 기존의 속도장 측정기법은 굴절률의 변화나 렌즈수차등에 기인한 입자영상의 왜곡을 고려하는데 어려움이 따른다. Soloff 등⁽¹⁰⁾은 2 차원 영상면과 유동 내부 3 차원 측정체적 사이의 상호관계를 보정실험을 통하여 직접 구하는 3 차원 보정기법

을 개발하였다. 3 차원 보정기법은 영상면과 측정면사이의 기하학적인 정보를 필요로 하지 않으며, 굴절률 변화나 영상왜곡에 의한 확대율의 공간적인 변화를 직접 측정하므로 SPIV 의 적용범위를 넓히는 데 크게 공헌하였다. 카메라와 렌즈, 레이저 조명과 같은 실험조건을 실제 측정조건과 동일하게 설치하여 보정실험을 통해 영상면과 3 차원 측정체적사이의 관계식을 구한 다음, 각 위치에서의 편미분 변수, 카메라로 측정되어진 영상면 변위, 측정면 변위사이의 관계식을 구하고, 이 관계식들을 수학적으로 계산함으로써 측정면에서의 변위값을 구하게 된다.

Hill 등⁽¹¹⁾은 3 차원 보정기법을 이용하여 원통형 내부에 장착된 Rushtone 터빈 주위유동을 측정하였는데, 굴절에 의한 영상 왜곡을 적절하게 보상하여 정확한 측정결과를 얻을 수 있었다.

축류웬은 전자기기의 냉각, 자동차 냉각 등에 널리 사용되고 있으며, 축류웬 주위 유동에 대한 정확한 해석은 성능향상과 소음감소에 필수적이다 그러나, 웬 주위 유동은 3 차원 난류유동이며, 날개 후단에서 꼬리와류(trailing vortex)가 생성되는 등 유동자체가 매우 복잡하여 이론적 연구 뿐만 아니라, 수치해석적 측면에서도 정확한 해석이 쉽지 않다. 따라서 축류웬에 관한 많은 연구들은 실험적인 결과에 의존해왔다.⁽¹²⁻¹⁴⁾

본 연구에서는 translation 배치(configuration)기법 및 3 차원 보정기법을 이용한 3 차원 SPIV 기법을 개발하고, 개발된 측정기법을 축류웬 후류유동에 적용하여 SPIV 측정기법의 정확성 및 유용성을 확인하고자 한다. SPIV 속도장 측정기법을 이용하여 축류웬 주위의 3 차원 속도 정보를 취득함으로써 축류웬의 소음감소 및 성능향상에 필요한 유동 정보를 취득할 수 있을 것으로 기대되며, 실험 결과들은 수치해석기법의 정확도를 검증하기 위한 비교 데이터로도 사용될 수 있을 것이다. 본 연구에서는 3 대의 CCD 카메라를 이용하여 2-D PIV 와 3-D SPIV 속도장 기법을 동시에 적용하여 이들 2 가지 속도장 측정기법을 비교하고자 한다. 이를 통해 out-of-plane 속도성분이 2-D PIV 측정결과에 미치는 영향을 관찰하고자 한다.

2. Stereoscopic PIV (SPIV)

Fig. 1 에 나타난 바와 같이 측정구간 내에 3 차원 속도성분이 있는 경우, out-of-plane 속도성분에 기인하여 하나의 카메라를 사용하는 2-D PIV 속도장 측정 결과에서 오차가 발생하게 된다. 즉, in-plane 속도성분이 없는 입자거동에 대하여 영상기

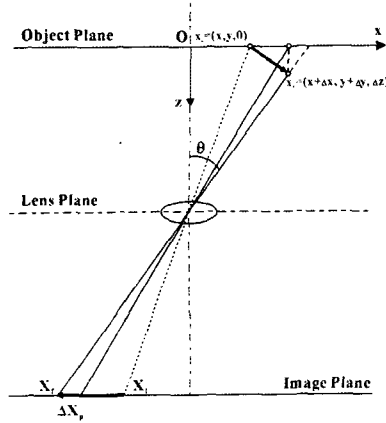


Fig. 1 Perspective error caused by out-of plane motion

록면에는 in-plane 입자변위 ($\Delta X_p = -\Delta z \times M \times \tan \theta$) 가 있는 것으로 나타나게 되어, PIV 속도장 결과에 측정오차를 유발하게 되는 것이다. Prasad⁽¹⁵⁾에 의하면 이러한 out-of-plane 속도성분이 기인한 측정 오차의 비는 $(\Delta z / \Delta x) \times \tan \theta$ 로 표시할 수 있다. 만약 각도 θ 가 5° 이고 $\Delta x \approx \Delta z$ 라고 가정하면 2-D PIV 에서 out-of-plane 속도성분에 의해 발생하는 오차는 약 10 % 정도임을 알 수 있다. 이러한 오차는 입자 위치가 렌즈의 중심축으로부터 멀어져 θ 가 증가하거나, out-of-plane 속도성분(Δz)이 큰 유동조건에서 더욱 증가함을 알 수 있다. 그러므로, out-of-plane 속도성분이 크게 존재하는 유동의 속도장 측정에서는 SPIV 측정기법을 이용하여 오차요인을 감소시켜야 한다.

2-D PIV 속도장 측정기법에서는 레이저 평면광으로 측정하고자 하는 유동영역을 조명된 다음, 유동 단면 내의 in-plane 속도성분을 하나의 카메라로 획득하게 된다. 반면 SPIV 기법은 2 차원 속도장 측정기법의 확장으로, 두 대의 카메라를 사용하여 레이저 평면광으로 조명된 유동단면 내부의 3 차원 속도성분을 측정한다. 측정 체적은 관측창(field of view)면적에 레이저 평면광의 두께의 곱으로 구해진다. 일반적으로 out-of-plane 속도성분은 직접 측정하는 것이 아니라, 두 대의 카메라로 측정한 2-D PIV 속도장 결과로부터 도출하게 된다. SPIV 기법에서는 일반적으로 유동의 입자영상을 서로 다른 두 각도에서 촬영하며, stereoscopic 접근 방법에 따라 translation 방법과 angular displacement 방법으로 나누어 진다. Translation 방법은 Fig. 2(a)에 나타난 것처럼 카메라의 광학축이 측정평면과 수직을 이루는 반면 angular displacement 방법(Fig.

2(b))은 두 카메라의 광학축이 측정평면에 대해 일정한 각도를 이루고 있다.

Translation 기법은 두 대의 카메라로 측정한 2 차원 평면 투사(projection)를 그대로 이용하여 3 차원 속도벡터를 구하는 방식이다. Translation 기법은 원근왜곡(perspective distortion)이 거의 없기 때문에, 영상면의 좌표계를 유체내부 물체면의 좌표로 쉽게 변환할 수 있다. 또한, 확대율이 영상면 좌표에 무관하기 때문에 3 차원 속도성분을 손쉽게 계산할 수 있다는 장점이 있다. 카메라 렌즈는 광학축과 일정한 각도 이상으로 기울어져 입사하는 빛을 받아들이지 못한다. Translation 기법에서는 이러한 렌즈의 제한으로 인해 두 렌즈사이의 각도를 일정 값 이상으로 증가시킬 수 없다. 카메라의 측정각도가 제한되기 때문에 in-plane 속도성분에 비해 out-of-plane 속도성분의 오차가 상대적으로 클 수 있으며, 영상 왜곡을 고려하는 것이 어렵기 때문에 왜곡과 수차가 적은 렌즈를 사용하는 것이 유리하다. 또한, 측정 조건이 바뀔 때마다 변수들을 새롭게 측정 및 보정해야 하는 번거로움이 있다.

Angular displacement 기법의 경우, 카메라의 설

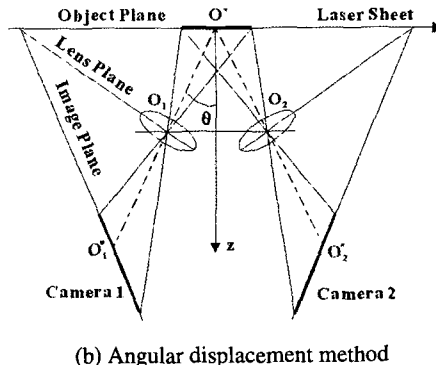
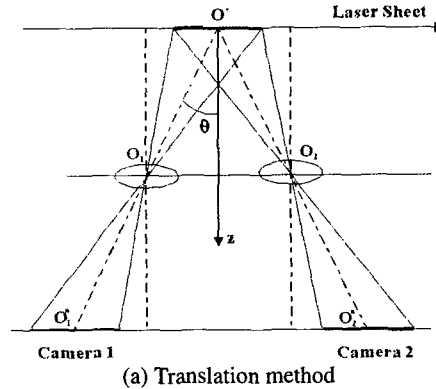


Fig. 2 Different configurations of stereoscopic PIV system

정각도에 제약이 따르지 않는다. 렌즈 중심의 광학축 근처에서 최상의 MTF(modulation transfer function)가 얻어지며 렌즈의 모서리부분에서는 MTF가 감소되어 깨끗한 영상을 얻기 힘들다. Translation 기법에서는 광학축과 일정한 각도를 가지고 영상을 취득하는 반면, angular displacement 기법에서는 렌즈의 광학축 방향으로 영상을 취득하도록 정렬되어 있기 때문에 상대적으로 높은 MTF의 깨끗한 영상을 얻는 데 유리하다.

Tilting 기능이 없는 두 대의 일반 카메라를 사용하는 angular displacement 방식의 SPIV에서는 측정면에 초점을 맞추기 위해 카메라 렌즈의 f-수(number)를 크게 설정하여 심도(depth of focus)를 가능한 깊게 설정하여야 한다. 반면, 추적 입자의 크기가 작기 때문에 PIV 측정에 적당한 크기의 입자영상을 얻기 위해서는 f-수를 줄여 입자영상의 크기를 조절해야 한다. 이러한 문제점을 극복하기 위해서는 Scheimpflug 조건으로 영상기록 평면과 렌즈를 기울여야 한다. Scheimpflug 방식은 각각의 카메라 렌즈면과 기록면이 측정평면과 한 점에서 만나도록 카메라 렌즈와 필름을 배치하는 것으로 측정면에 정확히 초점을 맞출 수 있기 때문에 자유롭게 f-수를 설정할 수 있다.

3. SPIV 보정기법

Fig. 3은 translation 기법에서의 실제 입자변위 $\Delta \mathbf{x} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 와 영상면에 투사(projection)된 변위 $\Delta \mathbf{X} = (\Delta X_1, \Delta Y_1, \Delta X_2, \Delta Y_2)$ 사이의 관계를 표현한 그림이다.

두 카메라를 translation 방식으로 설치한 경우, 각 카메라의 영상 기록면에 나타나는 변위는 다음

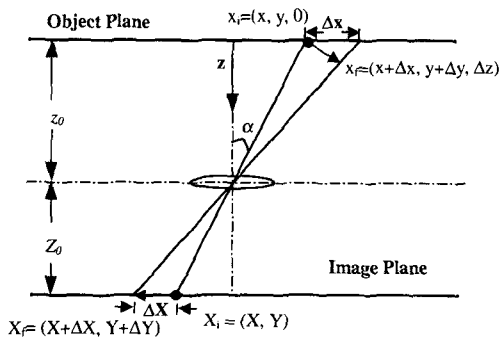


Fig. 3 Projection scheme of the translation configuration

과 같이 표현된다.

$$\Delta X_1 = a_1 \Delta x + a_2 \Delta z \quad (1)$$

$$\Delta Y_1 = a_3 \Delta y + a_4 \Delta z \quad (2)$$

$$\Delta X_2 = a_5 \Delta x + a_6 \Delta z \quad (3)$$

$$\Delta Y_2 = a_7 \Delta y + a_8 \Delta z \quad (4)$$

Translation 기법에서 영상의 왜곡을 고려하지 않는 경우, 8개의 상수가 좌표에 무관한 일정한 값을 가진다. 물체면과 두 카메라의 영상면과의 기하학적인 관계에 의해 구해진 네 방정식은 3개의 변수를 가져 과잉해(over-determined) 시스템이 되게 된다. SPIV에서는 최소 자승법(least square method)을 이용하여 4개의 방정식을 만족하는 가장 근사한 $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 값을 구하거나, 두 식을 평균하여 방정식의 개수를 줄이는 방법을 이용해 해를 구한다. 액체유동의 속도장 측정과 같이 빛의 굴절률이 액체와 공기의 경계면에서 변화하거나 영상의 왜곡이 심한 경우, 확대율이 좌표에 따라 일정한 상수를 갖지 않는다. 이와 같은 경우 translation 방식을 이용하여 간단한 계산과정을 통해 속도장을 측정하면 오차를 유발하게 된다. 본 연구에서는 translation 배치기법으로 카메라를 설치하여 영상의 왜곡을 최소화 하였으며, Soloff 등⁽¹⁰⁾이 개발한 3차원 보정기법을 적용하여 굴절을 변화를 보정하였다. 3차원 측정체적과 영상면과의 관계식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{X} = F(\mathbf{x}) \quad (5)$$

여기서 $\mathbf{X} = (X_1, Y_1, X_2, Y_2)$ 는 투영된 영상면에서의 좌표를 나타내며, $\mathbf{x} = (x, y, z)$ 는 측정체적 내의 실제 좌표를 나타낸다. Soloff 등⁽¹⁰⁾은 x 와 y 의 3차, z 의 2차식으로 매핑(mapping)함수 $F(\mathbf{x})$ 를 근사하였다.

$$F(\mathbf{x}) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4x^2 + a_5xy + a_6xz + a_7y^2 + a_8yz + a_9z^2 + a_{10}x^3 + a_{11}x^2y + a_{12}x^2z + a_{13}xy^2 + a_{14}xyz + a_{15}xz^2 + a_{16}y^2z + a_{17}yz^2 \quad (6)$$

그러나, translation 기법으로 카메라를 배치할 경우, 영상의 왜곡이 아주 작기 때문에 함수 $F(\mathbf{x})$ 를 다음과 같이 간단한 함수로 근사시킬 수 있다.

$$F(\mathbf{x}) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3z + a_4xz + a_5yz + a_6z^2 \quad (7)$$

함수 $F(\mathbf{x})$ 를 간단한 함수로 근사함으로써 계산시간을 단축할 수 있으며, 영상면 좌표 (X_1, Y_1, X_2, Y_2) 에서 물체면 좌표 $(x, y, 0)$ 로의 역매핑(inverse mapping) 함수 $G(\mathbf{X})$ 를 간단히 구할 수 있다.

$$F(x, y, 0) = a_0 + a_1x + a_2y \quad (8)$$

이며, $G(\mathbf{X})$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$G(\mathbf{X}) = b_0 + b_1X_1 + b_2Y_1 + b_3X_2 + b_4Y_2 \quad (9)$$

영상면의 입자변위 $\Delta \mathbf{X}$ 는 $\nabla F(\mathbf{x})\Delta \mathbf{x}$ 로 표현되며, $\nabla F(\mathbf{x})$ 는 함수 $F(\mathbf{x})$ 로부터 간단히 계산하거나 실제 측정할 수 있는 값이다. 그러므로, 입자 변위(Δx , Δy , Δz)에 관한 4 개의 방정식을 이용하여 3 차원 속도성분을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 ΔY_1 과 ΔY_2 에 관한 두 식을 평균하여 3 차원 변위를 계산하였다.

$F(\mathbf{x})$ 를 구하는 보정실험 시 먼저 직경 0.2 mm 의 흰색 점들이 1 mm 간격으로 정교하게 인쇄된 보정판을 이송장치에 부착하고 이를 레이저 평면 광이 입사하는 측정면에 설치한다. 보정판을 마이크로미터를 이용하여 z 축 방향으로 이송하며 두 대의 카메라로 보정판 입자영상을 취득한다. 본 연구에서는 z 축 방향으로 5 개의 단면에서 입자영상을 취득하였다. 취득한 영상들로부터 입자중심 (centroid)를 구한 다음, 최소 자승법을 이용하여 보정판 입자좌표와 영상기록면 좌표사이의 매핑 함수 $F(\mathbf{x})$ 를 구하였다. 구해진 $F(\mathbf{x})$ 의 평균 잔차 (averaged residual)는 0.1 픽셀 미만이었다.

4. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용된 측정 시스템은 SPIV 속도장 측정을 위한 두 대의 RS170 CCD 카메라, 2-D PIV 측정을 위한 한 대의 RS170 CCD 카메라, 3 채널 프레임 그래버, stereoscopic 렌즈, 회전 스테이지, 보정판 및 이송장치, 카메라 이송장치 등으로 구성되어 있다. Fig. 4는 본 연구에 사용되었던 카메라 및 렌즈 배치를 위에서 찍은 사진이다. SPIV 속도장 측정시스템에서 사용된 렌즈(PC Micro f/2.8D)는 일반 렌즈와는 달리 tilt / shift 시에 발생

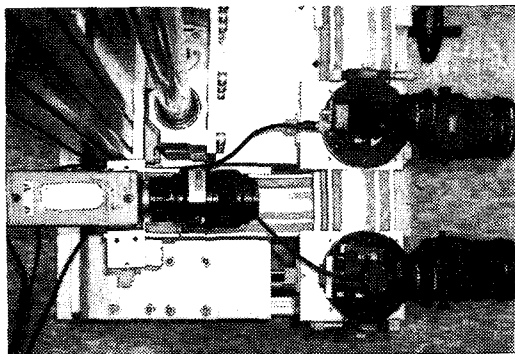
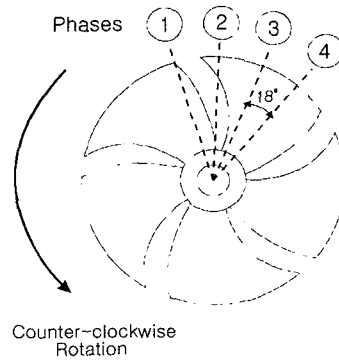


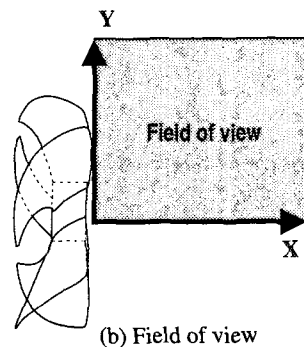
Fig. 4 Camera set-up for comparison between 2-D PIV and stereoscopic 3-DPIV measurements

하는 영상의 왜곡이나 화질 저하를 개선하기 위하여 특별히 설계된 것으로 광학적인 특성이 매우 우수하다. 두 대의 RS-170 CCD 카메라는 X-레일 위에 설치되어 두 대의 카메라 사이 간격을 쉽게 조절할 수 있으며, X-레일은 2 차원 이송장치에 부착되어 측정면과의 거리 및 상하 높이가 조절이 가능하다. 레이저 평면광에 의해 산란된 입자영상을 CCD 카메라를 이용해 전기 신호로 변환시킨 다음, A/D 변환을 통해 컴퓨터 영상메모리에 저장하였다. 초당 30fps (frames per second)로 취득한 CCD 카메라 영상은 해상도 $640 \times 480 \text{ pixels}^2$ 의 RS170 형식으로 저장되며, 한 프레임의 유동영상을 해상도가 $640 \times 240 \text{ pixels}^2$ 인 even 과 odd 필드의 두 영상으로 분리한 다음 보간(interpolation)을 통해 다시 2 장의 640×480 영상으로 복원하여 사용하였다. 좌우 카메라로부터 취득하여 복원된 2 개의 입자영상에 대하여 상호상관 방식의 PIV 기법을 이용하여 각 카메라의 변위벡터를 구한 다음, 3 차원 속도성분(u, v, w)을 계산하였다.

본 연구에서는 직육면체 수조($340 \times 280 \times 280 \text{ mm}^3$)



(a) Axial fan and 4 phases



(b) Field of view

Fig. 5 Schematic diagram of axial fan and a field of view

내부에 설치된 축류웬 주위유동을 레이저 평면광으로 조명하고 산란된 입자영상을 취득하여 속도장을 측정하였다. 직사각형 형태의 수조 측면 중앙에 구멍을 내어 DC 모터와 연결된 웬의 회전축을 삽입하였고, 모터의 동력축과 웬의 회전축간의 미세한 높이 차이에 의한 웬의 진동을 최소화하기 위해 웬 축과 모터 축을 고무 커플링으로 유연하게 연결하였다. DC 모터는 DC 전원공급장치(HP6555A)를 이용하여 정확하게 회전수(rpm)의 조절이 가능하도록 하였고, 지지대로 견고히 고정시켰다. 수조는 투명 아크릴로 제작하였으며 윗부분의 자유표면을 제거하기 위하여 수조에 덮개를 부착하였다. 본 연구에 사용되어진 축류웬은 직경(tip diameter)이 50mm 이며, 5 개로 구성된 날개의 피치 각(pitch angle)은 42° 이다. 실험장치에 관한 자세한 내용은 최제호 등⁽¹⁶⁾에 명시되어 있다. 작동유체로는 물을 사용하였으며, PIV 영상 획득을 위해 산란입자로 Vestosint 1118 을 사용하였는데, 평균직경이 37 μ m 이고 비중은 1.016 이다.

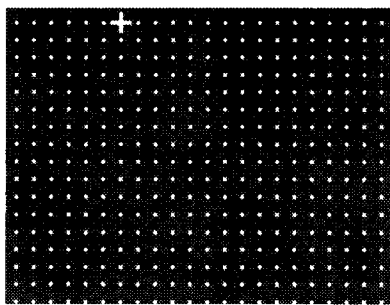
본 연구에 사용되어진 웬의 개략도와 속도장 측정을 수행한 4 가지 위상(phase)을 Fig. 5에 나타내었다. 실험시 전면과 수직인 종단면에서 입자영상을 측정하였는데, 관측창은 웬 직후 회전중심을

원점으로 40x40mm²의 크기를 갖는다. 실험하는 동안 회전수를 180 rpm으로 고정하고 웬 날개 하나를 4 개 위상(phase)으로 나누어 18° 간격의 위상 각에 따른 위상 평균화된 속도장을 획득하였다. 각각의 위상에 대해 1000 장의 순간 유동영상을 얻었으며, 500 장의 순간 속도장 결과를 앙상블(ensemble)평균하여 각 위상에 따른 평균속도, 와도, 난류강도 분포를 구하였으며, 그래프의 x, y, z 축을 웬의 반지름 R로 무차원화 하였다.

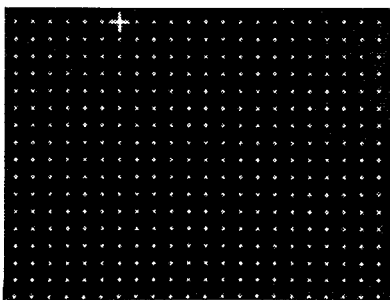
5. 결과 및 토의

Fig. 6은 본 연구에서 사용된 보정판울 2 대의 카메라로 취득한 영상이다. 사진에서 보는 바와 같이 영상의 왜곡은 크지 않으며, 회절의 영향 또한 뚜렷하게 식별하기 어렵다. Translation 기법을 적용함으로써 영상의 왜곡을 줄일 수 있었으며, 이것은 확대율의 공간적 변화가 적었음을 나타낸다.

Fig.7은 보정결과 중 오른 쪽 카메라에서 측정 한 dX/dz 와 dY/dz 를 나타내고 있다. dX/dz 는 x 값이 증가할수록 증가하고 있으며, dY/dz 는 y 축을

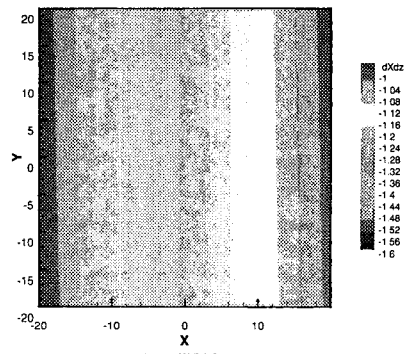


(a) Left camera image

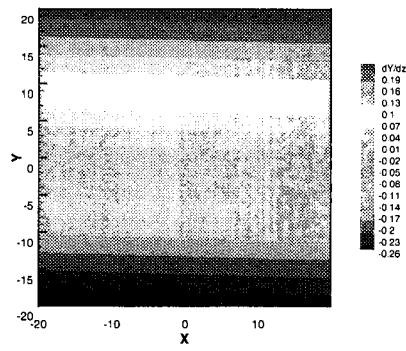


(b) Right camera image

Fig. 6 Two images of calibration targets



(a) dX/dz



(b) dY/dz

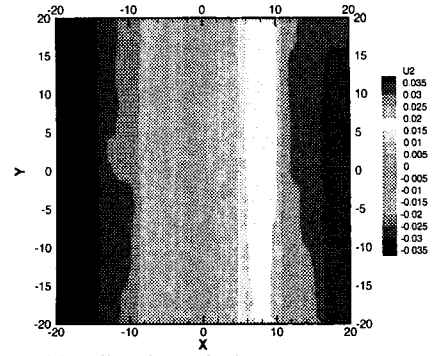
Fig. 7 Calibration result of the right camera (unit: pixels/mm)

Table 1 Comparison between the real and measured displacement of rigid body translation

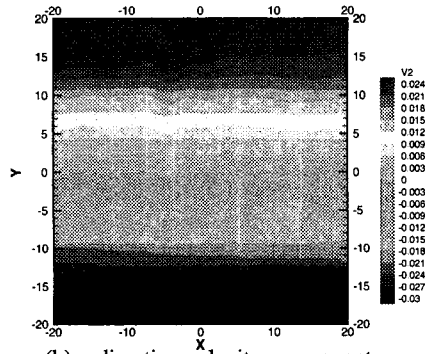
Real \ Measured	dx (mm)	dy (mm)	dz (mm)
dx=1(mm)	0.9878	-0.038	-0.0426
dy=1(mm)	0.0009	0.9852	-0.0045
dz=2(mm)	0.0004	-0.002	1.89573

따라 증가하고 있다. 이 결과는 영상왜곡을 고려하지 않은 경우의 보정결과와 유사한 경향을 보여주고 있다.

Fig. 8 은 실제로 측정된 변위와 영상왜곡을 고려하지 않은 SPIV 기법으로 측정된 변위의 차이를 나타낸 그림이다. x 방향 성분의 경우, x=0 인 직선에서 최소값을 가지며 x=0 에서 멀어짐에 따라 점차 증가하고 있다. 이것은 x=0 에서 굴절률 변화의 영향이 없음을 나타내며, x=0 에서 멀어짐에 따라 굴절률에 기인한 다른 영상의 왜곡이 크게 발생함을 의미한다. y-방향 속도성분의 경우, y=0 위치에서 오차가 최소값을 가지며 y=0 로부터 멀어짐에 따라 오차가 증가하고 있다. 액체유동의 속도장 측정에서 액체/기체 경계면에서 발생하는 굴절률 변화를 고려하지 않는 경우 오차가 발생함을 실험적으로 확인하였다. 본 실험에서 측정된 오차는 x 방향의 경우 약 $\pm 35 \mu\text{m}$, y 방향의 경우 약 $\pm 30 \mu\text{m}$ 이었다.



(a) x-direction velocity component



(b) y-direction velocity component

Fig. 8 Displacement difference between the actual displacement and SPIV result without distortion compensation

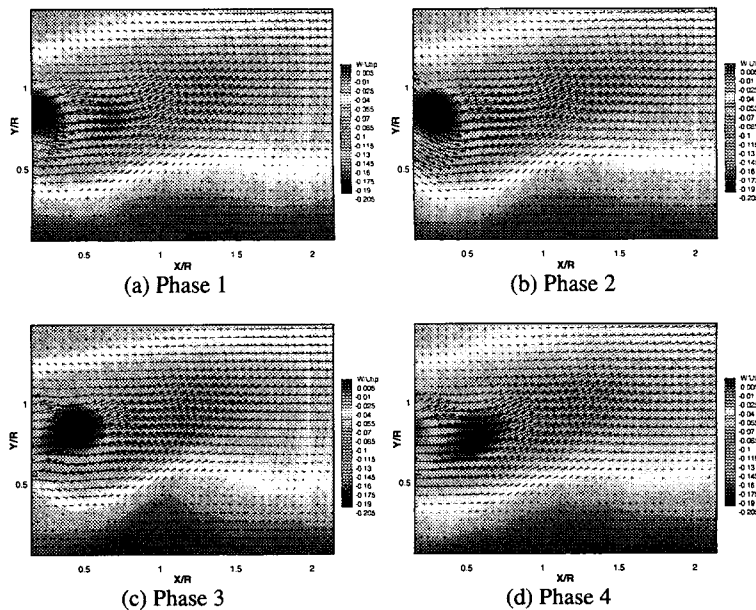


Fig. 9 Variation of the in-plane velocity vector field and out-of-plane velocity contour

Table 1 에 본 연구에서 사용된 3 차원 보정결과를 요약하였다. $dx=1\text{ mm}$ 와 $dy=1\text{ mm}$ 인 경우, 실제로 측정된 변위와 SPIV 기법으로 구한 변위의 차이는 약 1.4 %이었으며, out-of-plane 속도성분이 $dz=1\text{ mm}$ 인 경우에는 변위차이가 5.5 % 정도였다.

Fig. 9 는 500 장의 순간속도장 결과를 앙상블 평균하여 구한 평균 속도장 결과를 나타낸 것이다. 위상평균한 속도장 결과들은 위상변화에 따른 유

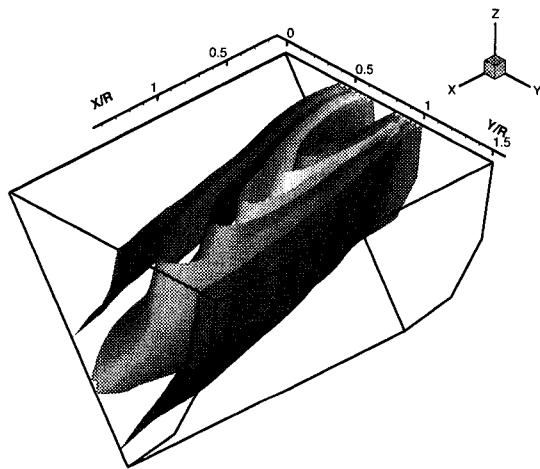


Fig. 10 Distribution of velocity speed $(u^2+v^2+w^2)^{1/2}$ of axial-fan wake

동구조의 변화를 뚜렷하게 보여주고 있다. 위상 1 과 위상 2 에서는 날개 직후 영역에서 허브 중심을 향하는 속도성분이 강하게 존재하며, 위상 3 에서 유동방향이 날개 바깥방향으로 향하고 있다. 그리고, 위상 4 에서는 다시 허브 중심을 향해 유동의 방향이 약간 변화함을 알 수 있다. 모든 위상에서 최대 속도는 날개의 중앙위치에서 발생하고 있다. 위상 평균한 속도장 결과로부터, 팬 후류 유동은 속도성분의 변화에 따라 크게 세 구간으로 나눌 수 있다. 첫번째 구간은 날개 직후 구간으로 팬 중심과 팬의 바깥쪽으로 유동방향이 주기적으로 변화하는 구간이다. 두 번째 영역은 유동이 팬의 중심축으로부터 바깥방향으로 향하는 구간이다. 마지막 구간은 속도성분이 위상에 크게 영향을 받지 않고 축방향에 평행하게 나아가는 영역이다. 날개 위상에 따른 속도장 측정 결과, 위상 변화는 날개 직후 영역에서의 유동형태를 지배하며, 후류 유동 또한 직전 위상의 유동형태가 하류로 이동되어 다음 위상에서 나타나는 주기적인 유동특성을 보여주고 있다. Fig. 9 에서 표시한 out-of-plane 속도성분 결과를 보면, in-plane 속도성분과 마찬가지로 날개 위상에 따른 주기적인 유동구조를 보여주고 있다. 최대값을 가지는 위치는 날개 끝에서 생성되어진 끝단와류의 영향을 크게 받고 있다. 이들 최대값을 갖는 위치는 주기에 따라 점차 하류로 진행하고 있으며, 하류로 나아갈수록 값도 작

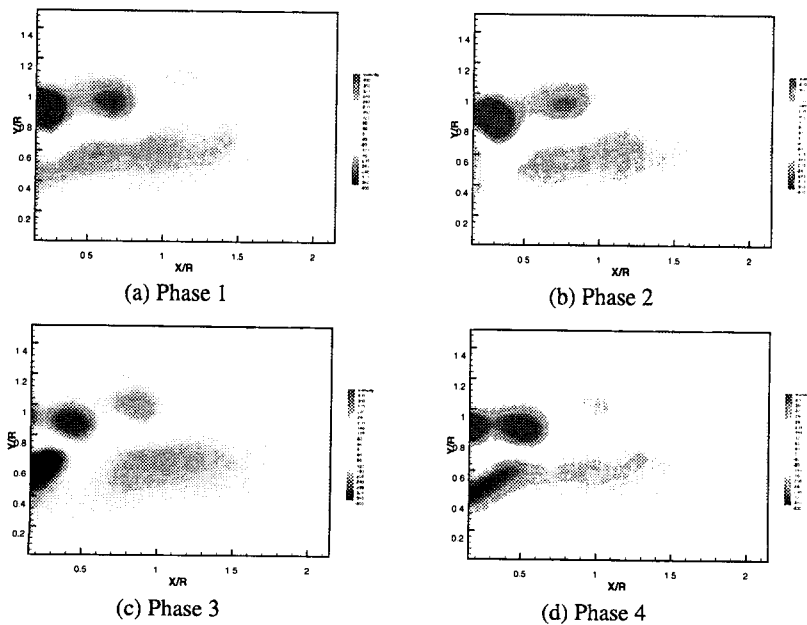


Fig. 11 Variation of vorticity contour with respect to blade phase

아지고 있다.

Fig. 10 은 SPIV 기법으로 구한 3 차원 속도성분을 이용하여 계산한 속도의 절대값 $(u^2+v^2+w^2)^{1/2}$ 분포를 나타낸 그림이다. 유동의 속도는 웬 날개에 작용하는 압력과 직접적인 상관관계를 가진다.⁽¹³⁾ 여기서 보면 약 $Y/R=0.8$ 영역에서 최대압력이 작용하고 있음을 예상할 수 있으며, 하류로 나아감에 따라 점점 속도값이 감소하고 있다.

Fig. 11 는 축류 웬 날개의 위상에 따른 후류의 와도분포를 나타낸 것이다. 날개의 상부에는 반시계 방향으로 회전하는 양의 값을 갖는 와동이 존재하는 반면, 날개의 중앙 위치에서는 음의 와도를 갖는 유동구간이 넓게 존재하고 있다. 위상 1 에서 위상 2 로 나아감에 따라 날개끝에서 발생한 와동이 $x/R=0.2$ 에서 $x/R=0.3$ 위치로 이동하고 있음을 관찰할 수 있다. 위상 3 에서는 날개 중앙부 ($0 < x/R < 0.2, 0.3 < y/R < 0.6$)에서 음의 값을 갖는 와동이 크게 발생하고 있으며, 위상 4 에서는 위상 3 에서 발생한 시계방향의 와동이 하류로 이동하면서 회전축 방향으로 길게 늘어났다. 위상 3 과 위상 4 의 경우 웬의 압력면(pressure side)을 지나는 평면으로, 이러한 늘어남(elongation)현상은 날개의 압력면 유동과 꼬리와(trailing vortex)와 같은 복잡한 유동현상에 기인한 것으로 사료된다. 위상 3 에서 팁 부근에서 생성된 양의 값을 가지는 끝단와류(tip vortex)는 위상 4 에서는 하류로 이동하여 나타나고 있다.

3 차원 등와도(iso-vorticity)구조를 Fig. 12 에 나타내었는데, 이로부터 날개 끝단에서 발생하는 끝단와류의 구조와 날개 압력면에서 발생하는 와류구조를 3 차원적으로 관찰할 수 있다. 끝단와류가 날개의 회전 반경방향으로 나선형 형태로 회전함과

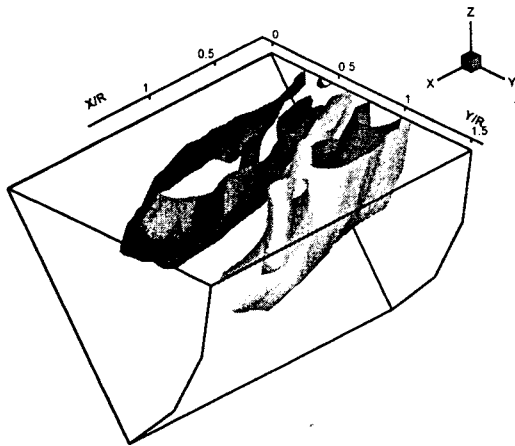


Fig. 12 Three-dimensional equi-vorticity surfaces

동시에 점점 하류로 나아가는 유동형태를 확인할 수 있다.

Fig. 13 는 SPIV 기법으로 측정된 축류 웬 후류 유동의 z-방향 순간 속도(w)분포 결과를 보여주고 있다. 축류 웬 근처에서 강한 회전유동에 의해 z-방향 속도성분이 큰 값을 가지며, 하류로 갈수록 감소하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 14 는 동시에 2-D PIV 와 3-D SPIV 로 측정된 in-plane 속도장 결과의 차이를 나타낸 것이다.

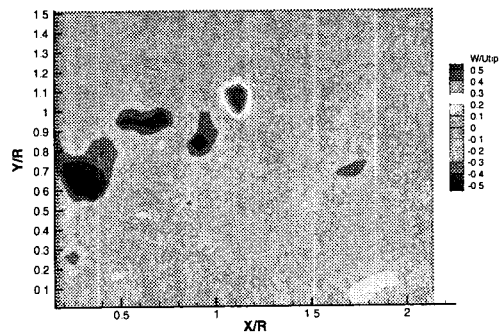
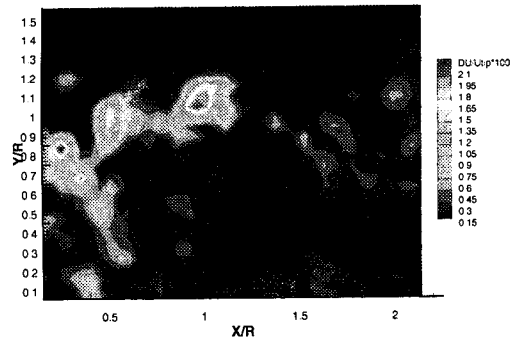
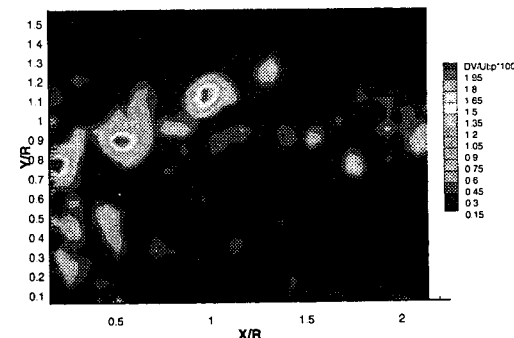


Fig. 13 Contour plot of instantaneous out-of-plane velocity component measured with SPIV method



(a) x-directional velocity component



(b) y-directional velocity component

Fig. 14 Difference of in-plane velocity components measured by the 2-D PIV and SPIV techniques

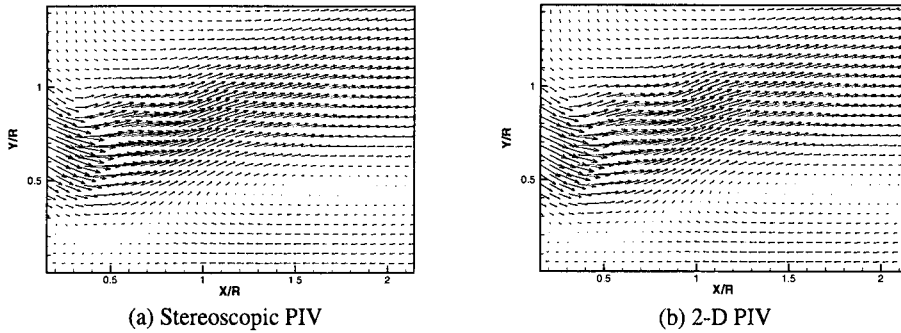


Fig. 15 Comparison of the ensemble-averaged in-plane velocity vector field at phase 2

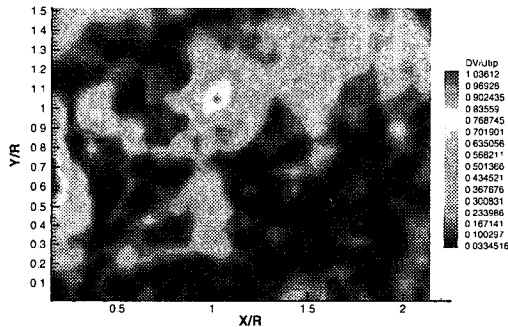


Fig. 16 Difference in spatial distribution of y-directional velocity component measured by 2-D PIV and SPIV techniques at phase 2

동일한 크기의 out-of-plane 속도성분이 전 구간에서 존재한다고 가정할 때, out-of-plane 속도성분으로 인한 측정오차는 광학축(optical axes)으로부터 측정지점까지의 거리에 비례한다. 그러나, 축류웬 주위유동과 같이 out-of-plane 속도성분이 위치에 따라 크게 변화하는 경우, 광학축 측 측정단면의 중심부에서 멀어질수록 측정 오차가 커지는 현상이 뚜렷이 관찰되지는 않는다. 반면, out-of-plane 속도성분이 큰 웬 바로 뒤쪽 영역에서 속도 성분 u, v 의 차이가 상대적으로 크게 나타나고 있다. 날개 끝에서의 접선방향 속도(U_{tip})에 기준한 x-축방향 속도성분의 차이($|U_{SPIV} - U_{2-D PIV}|$)는 최대 2.2%였으며, x-방향 최대속도(U_{max})에 기준한 속도차이는 4.4%이었다. 또한, SPIV 로 측정된 국부 속도(U_{SPIV})에 기준한 최대차이는 4.9% 이다.

위상 2에서 같은 순간에 3-D SPIV 와 2-D PIV 로 측정된 평균 속도장 분포를 Fig. 15 에 비교하여 나타내었다. 이들 평균 속도장 결과들은 500 장의 순간 속도장 결과를 앙상블 평균하여 구하였다. 두 가지 다른 속도장 측정기법으로 측정된 평균 속도장들을 비교하여 보면 큰 차이점을 관찰하기

어렵고, 거의 유사한 유동형태를 보여주고 있다.

Fig. 16 은 3-D SPIV 와 2-D PIV 기법으로 측정된 y 축 방향 평균속도의 차이를 나타낸 그림이다. 날개 끝단속도(U_{tip})에 기준한 속도성분의 차이는 최대 약 1.2%이며, 국부속도(U_{SPIV})에 기준한 경우 차이는 약 2.7%이다. Fig. 9 에 나타낸 위상 2에서의 속도장 결과를 보면 끝단와류가 발생하는 날개 끝 영역에서 가장 큰 out-of-plane 속도성분을 가지고 있음을 알 수 있다. 그러나, 2 가지 측정기법에 따른 순간 속도장 비교결과에 비해 평균속도장의 차이는 상대적으로 out-of-plane 속도 분포에 덜 민감한 것을 확인할 수 있다.

2-D PIV 와 3-D SPIV 로 측정된 축방향 난류강도의 차이를 날개 끝단속도(U_{tip})에 기준하여 무차원화한 결과를 Fig. 17 에 비교하여 나타내었으며, 그 차이를 Fig. 18 에 표시하였다. 3-D SPIV 로 측정된 결과에 비교하여 2-D PIV 로 측정된 결과가 전체적으로 크게 나타나고 있다. 이는 SPIV 측정기법의 경우 out-of-plane 속도성분에 기인한 원근오차(perspective error)를 제거할 수 있기 때문으로 나타나는 현상으로 사료된다. 이들 2 가지 속도장 측정기법으로 측정된 축방향 난류강도의 차이는 최대 약 2.6% 이고 국부적인 속도값(U_{SPIV})으로 무차원화한 값은 약 5.8% 이다. 이는 평균속도의 차이인 2.7%에 비해 상대적으로 큰 값이다. 이러한 현상은 out-of-plane 속도성분이 항상 일정한 방향으로 일정한 크기를 갖는 것이 아니라, 불규칙적으로 변동하기 때문에 평균 속도장 계산과정에서 변동성분이 제거 완화(smoothing)되기 때문이다. 이와 같은 결과로부터 out-of-plane 속도성분이 있는 3 차원 유동을 2-D PIV 로 측정하게 되면 평균속도에 비해 난류강도 측정에 더 큰 오차를 유발하고 있음을 알 수 있다.

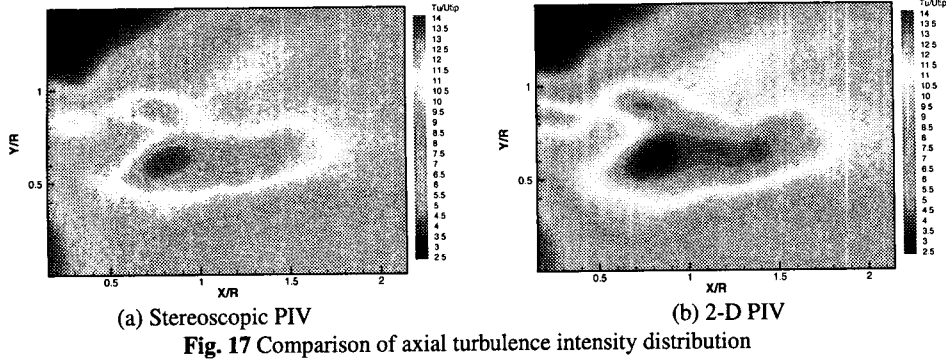


Fig. 17 Comparison of axial turbulence intensity distribution

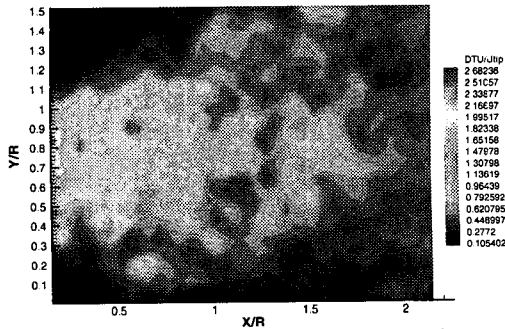


Fig. 18 Difference of axial turbulence intensity distribution measured by 2-D PIV and SPIV techniques at phase 2

6. 결론

3 차원 보정기법을 이용한 영상왜곡 보정기법과 translation 배치기법을 적용한 stereoscopic PIV 기법을 개발하였다. 개발한 3 차원 SPIV 속도장 측정기법을 축류팬 후류유동에 적용하여, 축류팬 후류유동의 유동구조를 측정하였다. 또한, 같은 유동에 대하여 2 차원 PIV 기법과 3 차원 SPIV 기법으로 동시에 측정한 속도장 및 난류강도 분포를 비교하였다. 위상평균하여 측정한 축류팬 후류유동의 측정결과, 팬의 위상에 따른 속도장 및 와류구조의 변화를 확인할 수 있었다. 직전 위상의 유동구조가 팬의 회전에 따라 하류로 이동되어 다음 위상의 속도장 결과에 나타나는 주기적인 유동특성을 보여주고 있다. 날개의 상부에는 반시계 방향으로 회전하는 양의 값을 갖는 와동이 존재하는 반면, 날개 중앙부에는 음의 와도를 갖는 유동구간이 넓게 존재하고 있다. SPIV 에 비해 2-D PIV 로 측정 한 in-plane 속도성분의 경우, 최대 2.7%의 차이를 보이며, 축방향 난류강도는 최대 5.8% 큰 값으로

평가 하였다. 이러한 측정기법에 따른 물리량 차이는 out-of-plane 속도성분이 큰 구간에서 크게 발생하였다.

후 기

본 연구는 국가지정연구실(NRL)사업의 지원을 통해 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Hinsch, K. D., 1995, "Three-dimensional Particle Velocimetry," *Meas. Sci. Tech.*, Vol.6, pp.742~753.
- (2) Gaydon, M., Raffel, M., Willert, C., Rosengarten, M., Kompenhans, J., 1997, "Hybrid Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *Exp. in Fluids*, Vol.23, pp.331~334.
- (3) Lawson, N. J. and Wu, J., 1997, "Three-dimensional Particle Image Velocimetry: Error Analysis of Stereoscopic Techniques," *Meas. Sci. Tech.*, Vol.8, No.8, pp.894~900.
- (4) Lawson, N. J. and Wu, J., 1997, "Three-dimensional Particle Image Velocimetry: Experimental Error Analysis of a Digital Angular Stereoscopic System," *Meas. Sci. Tech.*, Vol.8, No.12, pp.1455~1464.
- (5) Lecerf, A., Renou, B., Allano, D., Boukhalfa, A., Trinite, M., 1999, "Stereoscopic PIV: Validation and Application to an Isotropic Turbulent Flow," *Exp. in Fluids*, Vol.26, pp 107~115
- (6) Kahler, C. J., Kompenhans, J., 2000, "Fundamentals of Multiple Plane Stereo Particle Image Velocimetry," *Exp. in Fluids*, Vol.29, pp.S70~S77.
- (7) Arroyo, M. P. and Greated, C. A., 1991, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *Meas. Sci. Tech.*, Vol.2, pp. 1181~1186.
- (8) Prasad, A. K. and Adrian, R. J., 1993, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry Applied to Liquid Flows," *Exp. in Fluids*, Vol.15, pp.49~60.
- (9) Grant, I., Fu, S., Pan, X. and Wang, X., 1995, "The Application of an In-line, Stereoscopic PIV System to

- 3-component Velocity Measurements," *Exp. in Fluids*, Vol.19, pp. 214~221.
- (10) Soloff, S. M., Adrian, R. J., Liu, Z-C, 1997, "Distortion Compensation for Generalized Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *Meas. Sci. Tech.*, Vol.8, No.12, pp.1441~1454.
- (11) Hill, D. F., Sharp, K. V., Adrian, R. J., 2000, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry Measurements of the Flow around a Rushton Turbine," *Exp. in Fluids*, Vol.29, pp.478~485
- (12) Han, Y.O., Leishman, J.G. and Coyne A.J., 1997, "Measurement of The Velocity and Turbulence Structure of a Rotor Tip Vortex," *AIAA Journal*, Vol. 35, No.3, pp.477~492
- (13) Morris, S.C., Good, J.J. and Foss, J.F., 1998, "Velocity Measurements in the Wake of an Automotive Cooling Fan," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol.17, pp.100~106
- (14) Sinha, M. and Katz, J., 1998, "Flow Structure and Turbulence in a Centrifugal Pump with a Vaned Diffuser," *Proc. 1998 ASME Fluids Eng. Div. Summer Meeting*, Jun.21-25, 1998, Washington DC FEDSM98-5129
- (15) Prasad, A. K., 2000, "Stereoscopic Particle Image Velocimetry," *Exp. in Fluids*, Vol.29, pp.103~116.
- (16) 최제호, 김형범, 이상준, 이인섭, 2000, "위상 평균 PTV 기법을 이용한 축류팬 주위 유동의 속도장 측정 연구," 대한기계학회 논문집 B 권, 제 24 권 제 1 호, pp.114~123