

## 고정의 끝와류의 난류 운동에너지 분배 특성

배 황\* · 한 용 운\*\*  
(1999년 4월 27일 접수)

### Turbulence Kinetic Energy Budgets of Tip Vortex Generated by a Fixed Wing

Hwang Bae and Yong Oun Han

**Key Words:** Turbulence Kinetic Energy Budgets(TKE Budgets, 난류 운동에너지 분배), Tip Vortex(끝와류), Vortex Core(와류핵), Wandering(불규칙 운동), Laser Doppler Velocimetry(레이저 도플러 유속계), Vortex Sheet(와판),

#### Abstract

The turbulence structure of a tip vortex generated by a fixed wing was investigated with the use of two-dimensional laser Doppler velocimetry. The velocity field, composed of circumferential and axial components, was measured on the vertical section to the vortex trail, located at 2C downstream from the wing tip in the incoming flow condition of  $Re = 2.24 \times 10^5$ . A quasi 3-dimensional measurement technique by use of 2-dimensional LDV system was suggested for Reynolds stresses and the higher moments. The validity of this technique was confirmed with the uncertainty analysis. The budget of the turbulence kinetic energy was analyzed by those results in the radial direction of the vortex core. It is resulted that the production is to be very likely balanced with the dissipation in most range of the vortex core.

#### 기호설명

C : 시위 길이, m  
 r : 끝와류 반경 좌표, m  
 $r_c$  : 끝와류 핵반경, m  
 R : 스펠 길이, m  
 $\overline{q^2}$  : 난류 운동에너지  
 x, y, z : 끝와류에 대한 직교 좌표계, m  
 U, V, W : 각 방향 속도 성분, m/s  
 u, v, w : 각 방향 난류 성분, m/s  
 $U_{mean}$  : 축 방향 평균 유속, m/s  
 $W_{max}$  : 회전방향 최대 유속, m/s

$V_{Green}, V_{Blue}$  : 측정체적부를 통과하는 산란입자의 광원에 대한 속도, m/s  
 $V_1, V_2$  : 측정체적부를 통과하는 산란입자의 광축에 대한 속도, m/s  
 $\alpha$  : 측정체적부를 통과하는 산란입자가 주축(x)과 이루는 각, degree  
 $\beta$  : 광축의 분할각, degree  
 $\delta U, \delta V, \delta W$  : 각 방향 속도 성분의 불확실성, m/s  
 $\epsilon$  : 소산율,  $m^2/s^3$   
 $\epsilon'$  : 오차율

\* 영남대학교 대학원 기계공학부

\*\* 회원, 영남대학교 기계공학부

## 1. 서 론

3차원 날개에서 발생하는 끝와류(tip vortex)는 공기역학적으로 볼 때, 내리 씻음(downwash)유동을 가속시켜 유도 항력의 증가를 유발하고, 주유동 방향에 대하여 수직인 강한 회전의 2차적 유동 성분을 발생시켜 초기 공급 에너지를 소모시키며, 또한 발생된 끝와류는 매우 긴 체적을 그리면서 회전 성분을 유지하기 때문에 하류에서 동체에 근접될 경우 부분 전단 응력을 증가시켜 국부 실속(local stall)을 유발시키는 등 공기역학적으로 불리한 영향을 끼치게 된다. 또한, 터보 기계의 블레이드에서 발생하는 끝와류 역시 와류 체계가 상당한 동안 하류에서 유지되므로 유량계수의 특성에 영향을 준다. 따라서, 발생 초기의 끝와류 유동 구조<sup>(1)</sup>를 파악함으로써 하류의 유로, 고정익에서의 동체 및 회전익에서의 로터 블레이드 사이의 간섭 현상(BVI)<sup>(2)</sup>을 예측하고 이러한 와류를 제어할 수 있는 방법을 확보하는 것은 공학적으로 큰 의미가 있다.

끝와류는 한정된 길이를 갖는 날개 상하면의 압력 불균형이 원인이 되어 말림(roll-up)형식의 강한 선회류로 만들어지는데, 날개끝단면의 형상,<sup>(3)</sup> 받음각<sup>(4)</sup> 및 유입 유동 조건<sup>(5)</sup>에 따라서 그 형상이 달라지나, 일반적으로 초기의 생성과정 후에 성장 및 전개과정을 걸친 후에 소멸과정의 순서로 사라진다. 주유동의 수직단면에서 나타나는 구조를 보면 충분히 성장했을 경우 최대 회전 성분을 나타내는 반경, 즉 핵반경(core radius)을 경계로 하여 내부는 강제 와류(bound vortex), 외부는 자유 와류(free vortex)의 구조를 가진다. 이때, 초기에 층류 와류로 생성된 내부의 강제 와류 영역은 하류로 진행하면서 회전속도의 구배가 매우 커져 왕성한 난류의 생성이 이루어지고 와류 소멸도 가속시키게 된다.

일반적으로 와류 구조를 이해하는 방법으로는 실험적 자료를 기초로 한 해석적 모델링<sup>(6)</sup>에 기초하고 있다. 최근까지도 와류의 평균 유동 구조만을 의존하여 해석하고 있지만 와류의 소멸 특성을 다루기 위해서는 와류의 난류 성장 및 천이 과정을 이해하지 않으면 해석 영역에 많은 제한을 받게 된다. 현재 이러한 측면에서 인위적으로

발생된 끝와류의 난류 특성,<sup>(7)</sup> 고정익에서의 난류 특성<sup>(8)</sup>과 회전익에서의 난류 특성에 관한 실험적 계속 결과<sup>(9)</sup>들이 발표되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 고정익의 끝와류의 평균 유동장과 난류장을 계속하여 단일 와류 구조를 해석하고 특히, 반경 방향의 난류운동에너지 분배를 해석하여 에너지 평형 구조를 제시하여 향후 와류의 소멸 과정에서의 난류 구조 천이를 해석할 수 있는 기본 자료를 얻고자 한다.

## 2. 와류의 난류 운동 에너지의 분배식

실제로는 불규칙하지만 주요동에 수직한 단면 상에 얻어지는 끝와류 유동장을 시간적으로 정상 상태의 난류 구조로 가정하여, 난류 운동에너지 식을 단순화 시키고자 한다. 일반 좌표계에서 난류 운동에너지(Turbulence Kinetic Energy, TKE)는 다음과 같이 표현된다.<sup>(9,10)</sup>

$$U_i \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \right) = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\overline{u_i p}}{\rho} + \frac{1}{2} \overline{u_i u_i u_j} - 2\nu \overline{u_i s_{ij}} \right) - \overline{u_i u_j} S_{ij} - \epsilon \quad (1)$$

여기서,  $s_{ij}$ 는 순간 속도변형률인  $S_{ij}$ 의 요동값이다.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

$\epsilon$ 은 난류 운동에너지의 소산항(dissipation)이다.

$$\epsilon = 2\nu \overline{s_{ij} s_{ij}} = \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (3)$$

충분히 발달된 꼬리와류는 그 중심 체적에 대하여 축대칭의 유동 구조를 갖기 때문에 위 난류 운동에너지 방정식, 식 (1)은 준정상적, 비압축성 및 축대칭 조건으로 가정할 수 있다. 또한, 우변 괄호 안의 확산항은 압력/속도 상관항, 속도의 3차 상관항과 점성항으로 구성되며, 내부 유동의 경우 상대적으로 매우 작은 값을 나타낸다. 이 확산항의 구성항중에서 압력/속도 상관항은 그 크기를 예측하기 힘들기 때문에 미세한 크기를 갖는 점성항과 같이 간류항으로 분류되기도 하지만, 점성항이 무시될 때 통상적으로 무시해 왔다. 같은 개념으로 본 논문에서도 두 항들을 무시했으나 끝와류는 외부 유동이므로 압력/속도 상관

항을 무시할 수 있는지는 의문시 되나 직접 측정이 가능하고 비교적 영향이 큰 속도의 3차 상관함만으로 확산항을 평가하기로 한다. 이러한 제한적 조건에서 식 (1)은 다음 식 (4)와 같이 간략화 시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left( V_r \frac{\partial}{\partial r} \overline{q^2} + V_x \frac{\partial}{\partial x} \overline{q^2} \right) = & - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial}{\partial r} \overline{wq^2} + \frac{\partial}{\partial x} \overline{uq^2} \right. \\ & \left. + \frac{\overline{wq^2}}{r} \right) - \left( \overline{w^2} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \overline{uw} \frac{\partial V_r}{\partial x} + \overline{v^2} \frac{V_r}{r} \right. \\ & \left. + \overline{u^2} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \overline{uw} \frac{\partial V_x}{\partial r} + \overline{vw} \frac{\partial V_x}{\partial r} \right) \quad (4) \\ & \left. + \overline{uv} \frac{\partial V_x}{\partial x} + \overline{vw} \frac{V_x}{r} - 2 \overline{v^2} \frac{V_x}{r} \right) - \epsilon \end{aligned}$$

여기서  $\overline{q^2}$ 는 난류 운동 에너지이며 식 (5)로 정의한다.

$$\overline{q^2} = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \quad (5)$$

위의 물리적 방정식은 축방향 단위 길이 ( $\Delta Z$ )에 대하여 와류 반경의 길이 ( $\Delta r$ )가 매우 작다는 가정을 통하여 다시 한번 간략화 시킬 수 있다. 이것은  $\Delta Z : \Delta r \approx R : r_c$ 의 비례식을 통하여 날개 스패 길이에 대한 와류핵의 반경의 비가  $r_c/R \ll 1$ 의 관계로 정의할 수 있다. 또한 와류의 반경 방향의 속도 성분은 다른 두 성분인 축방향과 접선 방향 성분의 크기에 비해 매우 작으므로 다음과 같은 비례식으로 표현할 수 있다.

$$V_u, V_x : V_r \approx \Delta x : \Delta r \approx R : r_c \approx 1 : \delta \quad (6)$$

따라서 식 (4)는 무차원 기호 ( $\delta \ll 1$ )를 이용하여 표현하면 다음과 같은 크기 비교 기법(order of magnitude)을 사용할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left( \delta \frac{1}{\delta} \frac{\partial}{\partial r} \overline{q^2} + 1 \frac{1}{1} \frac{\partial}{\partial x} \overline{q^2} \right) = & - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\delta} \overline{wq^2} + \frac{1}{1} \overline{uq^2} \right. \\ & \left. + \frac{\overline{wq^2}}{\delta} \right) - \left( \overline{w^2} \frac{\delta}{\delta} + \overline{uw} \frac{\delta}{1} + \overline{v^2} \frac{\delta}{\delta} \right. \\ & \left. + \overline{u^2} \frac{1}{1} + \overline{uw} \frac{1}{\delta} + \overline{vw} \frac{1}{\delta} + \overline{uv} \frac{1}{1} \right) \quad (7) \\ & \left. + \overline{vw} \frac{1}{\delta} - 2 \overline{v^2} \frac{1}{\delta} \right) - \epsilon \end{aligned}$$

위 식에서  $1/\delta$ 의 크기를 갖는 항들으로써 다시 배열하면 와류 좌표계에서의 난류 운동 에너지 방정식은 식 (8)과 같이 간략화 된다.

$$\begin{aligned} 0 = & - \frac{1}{2} \left( \frac{\partial}{\partial r} \overline{wq^2} + \frac{\overline{wq^2}}{r} \right) \\ & - \left( \overline{uw} \frac{\partial V_x}{\partial r} + \overline{vw} \frac{\partial V_x}{\partial r} + \overline{vw} \frac{V_x}{r} - 2 \overline{v^2} \frac{V_x}{r} \right) - \epsilon \quad (8) \end{aligned}$$

따라서, 와류 궤적의 수직 단면에 일시적으로 형성된 TKE 평형에서는 식 (8)은 관성항이 무시된 형태로 균형을 이루며, 우변의 각 항은 확산항, 생성항 및 소산항( $\epsilon$ )을 나타낸다. 크기 비교를 위하여,  $w$ 를 난류세기의 특성치,  $V$ 를 평균 속도의 특성치로 가정하면, 확산항의 크기는  $\partial(w^3)$ 로 평가되고, 생성항의 크기는  $\partial(w^2 V)$ 로 평가된다. 따라서, 확산항은 생성항에 비해 작은 값으로 평가 되어진다. 일반적으로 소산항은 직접 측정하기 매우 어렵기 때문에, 직접 측정 가능한 확산항과 생성항을 먼저 측정한 후, 평형식 (8)에 의해 간접적으로 평가하게 된다.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험 장치

실험은 시험부 단면이  $0.9m \times 0.7m \times 1.8m$ , 최대 풍속이  $25m/s$ , 초기 난류도가 0.5% 이하의 분출(Blowdown)방식의 개방형 아음속 풍동에서 수행되었다. 실험에 사용된 날개는 NACA 23012의 비대칭익으로 스패 길이가  $0.45m$ , 시위(chord)길이가  $0.168m$ 이며 가능한 한 초기에 강한 와류로 발전시키기 위해 수직 절단면의 끝형상을 갖도록 하였다.

와류의 속도장 특성을 보기 위하여 선행 연구에서 조사된 바와 같이 충분히 발달된 와류 형상을 갖는 위치로서 날개 끝에서 주유동(stream-wise) 방향으로 2C인 하류의 수직면을 선택하였으며, 와류 핵중심(core center)의 거동을 관찰하기 위하여  $3mm$ 간격의  $27 \times 28$ 의 정방 격자의 측정점을 선정하여 와류의 전체적인 유동장을 살핀 후,  $1mm$ 간격의 세밀 격자를 형성하여 반경 방향의 TKE 분석 자료를 얻었다.(Fig. 1) 실험 데이터는 핵중심을 제외하고는 난류 성분의 추출을 위해 한 지점에서 1000개 이상의 충분한 샘플을 수집하였다. 실험은 평균 유속이  $20m/s$ 이고 받음각이  $8^\circ$  인 조건하에서 수행되어 졌다.

본 실험에서는 4W Ar-Ion 레이저를 광원으로 하고, Gaussian Beam Diameter가  $0.998mm$ , 파장의 길이가 녹색광(green beam)이  $514.5nm$ , 파란광(blue beam)이  $488nm$ 이며, 후방 산란형(backscatter mode) 광학 배치를 갖는 2차원 프루브(probe) 타입의 LDV 시스템(DANTEC)을 사

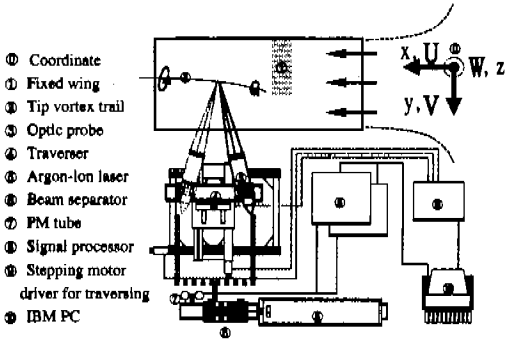


Fig. 1 Experimental layouts and measurement volumes.

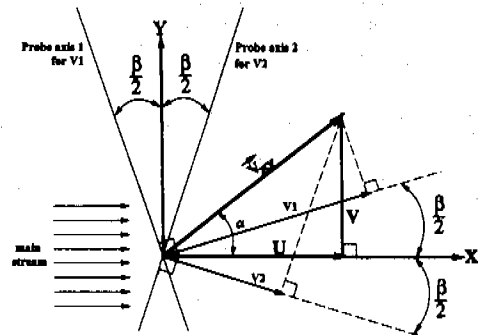


Fig. 2 Scheme of a coordinate transformation.

용했다. 부유물질로는 최소 비중이 0.855인 액체 파라핀을 기화시켜 사용하였으며, Burst Spectrum Analyzer(BSA, model 57N20, 57N35)를 신호처리기로 사용하였다. 프루브 이송은 PC와 인터페이스되고, 이송 범위가 590mm×590mm×690mm이며, 최소 12.5μm까지 정밀 이송이 가능한 3차원 이송 장치를 사용했다.

3.2 준 3차원 실험 기법

고정익에서 발생하는 끝와류는 준정상상태의 유동장을 형성시키므로 2차원 LDV 장치의 프루브를 Fig. 2와 같이 예각 β로 이동 배치하여 3방향의 평균 속도장 및 난류장을 근사적으로 얻을 수 있다.

즉, 주유동 방향을 x, 수직면상의 좌표로 y라 하고, 각각의 속도 성분들을 U, V, W 라고 하자. 이때 주유동에 수직(Fig. 2의 y 축)하게 놓여진 프루브에서 측속도 U, 지면에 수직한 회전속도 W와 u, w 및 uw에 대한 레이놀즈 응력을 얻었을 수 있다. 2차원 장치의 한계 때문에 지면상에서 주유동에 수직한 V 및 이와 관련된 난류 성분들을 동시에 얻을 수 없지만 프루브 축을 Fig. 2와 같이 β각만큼 이동시켜 각 위치의 프루브 축으로부터 측정된 속도값, V1, V2 를 이용하면, V 및 난류 고차항을 얻을 수 있다.<sup>(11)</sup>

즉,

$$V_1 = |\vec{V}_{xy}| \cos(\alpha - \frac{\beta}{2}) = |\vec{V}_{xy}| [\cos \frac{\beta}{2} \cos \alpha + \sin \frac{\beta}{2} \sin \alpha] \quad (9)$$

$$V_2 = |\vec{V}_{xy}| \cos(\alpha + \frac{\beta}{2}) = |\vec{V}_{xy}| [\cos \frac{\beta}{2} \cos \alpha - \sin \frac{\beta}{2} \sin \alpha] \quad (10)$$

$$U = \frac{V_1 + V_2}{2 \cos(\beta/2)}, \quad V = \frac{V_1 - V_2}{2 \sin(\beta/2)} \quad (11)$$

이때, 평균속도 V 와 v 는 문제 없으나 고차 상관항들( uv, vw, uw, ...)은 U, W 측정량과 동시성이 결여되어 있기 때문에 정확한 난류량들로서는 오차의 한계를 갖게 된다. 따라서 V 성분을 이용하여 제시된 오차 한계내에서는 고차 상관항들을 예측한 기법을 준3차원 기법이라 정의하여 얻어낸 자료를 통해 난류 운동에너지의 거동을 계산하여 끝와류의 난류 특성을 정성적으로 분석하고자 한다.

Fig. 3은 준 3차원 기법으로 얻은 V1, V2 값은 식 (11)에 적용하여 산출해 낸 평균값 U를 비교한 결과를 제시한 것이다. 두 값이 거의 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

본 실험에서는 제시된 오차 한계 내에서 얻어진 자료를 통하여 난류 운동에너지의 거동을 계산하여 끝와류의 난류 특성을 정성적으로 분석하였다.

3.3 준 3차원 기법을 이용한 실험 오차 한계

본 실험에 적용된 준 3차원 기법에 대한 신뢰성은 불확실성에 대한 오차의 검증으로 확인해 볼 수 있다. 준 3차원 기법에 대한 불확실성 해석은 ASME<sup>(12)</sup>의 불확실성에 대한 분류방법에 따른 우연오차와 고정오차 그리고 요소오차에 의해 오차를 예측해 볼 수 있다. 측정 데이터의 불확실성은 시간에 대하여 변동하는 측정치의 통계적 표준편차를 구하여 우연오차를 결정하고, 실험 기기의 영점조절에 관련한 오차를 구하여

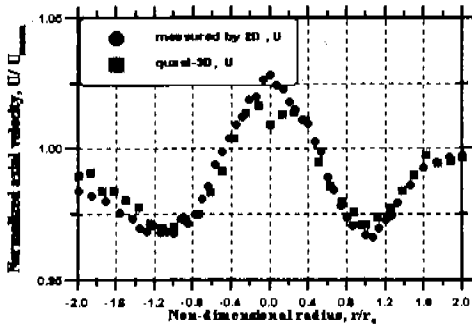


Fig. 3 Comparison of mean velocities measured by 2D system and quasi-3D system.

고정오차를 결정 한다. 통상적으로 LDV 장치는 영점조절에 대한 검증(calibration)이 필요없기 때문에, 본 실험에서도 이에 대한 오차는 없는 것으로 간주하였다. 일반적으로 오차는 우연오차들의 합과 고정오차들의 합을 모두 더한 오차의 총괄로 표현되며, 이것은 측정 데이터들이 가질 수 있는 통계적 표준편차의 제곱합의 평방근으로, Taylor전개에 의해 그 결과의 전파(propagation) 과정이 평균 속도에 대해 식 (11)로부터 식 (12)와 같이 표현할 수 있다.<sup>(11,12,13)</sup> 따라서, 측방향 오차율은,

$$\delta U = \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial V_1} \delta V_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial V_2} \delta V_2 \right)^2 + \left( \frac{\partial U}{\partial \beta} \delta \beta \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

으로 표현되며, 반경방향 오차율,  $\delta V$ 는 식 (12)와 동일한 방식으로 전개되고, 회전방향 오차율은  $\delta W = \delta V_{Green}$ 가 되어, 이들 각각은 각 속도 성분이 가지는 우연오차로 가정할 수 있다. 측정 체적부olum 지나는 산란입자의 속도( $V_1, V_2$ )는 도플러 주파수와 간섭부늄사이의 간격의 곱에 비례하며, 이것의 오차 또한 두 변수의 오차의 곱에 비례한다.<sup>(11,14)</sup> 특히 도플러 주파수의 오차는 내부발전기(clock generator)의 불확실성(uncertainty)과 직접적인 영향이 있는 것으로 알려져 있으며, 본 실험에 사용된 LDV 장치(DANTEC)의 신호분석기(BSA enhanced)는 주어진 실험 조건하에서 대부분  $\delta(V_1, V_2, V_{Green}) = \pm 0.001 \text{ m/s}$ ,  $\delta\beta = \pm 0.5^\circ$ <sup>(14)</sup>의 특성을 보이며,  $\delta(V_1, V_2)$ 은, 결국  $\delta(V_{Blue})$ 의 특성에 종속된다. 따라서, 주어진 속도 영역에서 각 방향 속도성분의 우연오차는 각각  $\delta U = 0.12\%$ ,  $\delta V = 1.8\%$ ,

$\delta W = 0.1\%$ 이다.

데이터의 샘플링 조건에 의해 발생하는 오차는 식 (13)<sup>(15)</sup>과 같이 표현되는데, 이때  $N$ 은 샘플링 데이터수,  $\bar{u}$ 는  $N \rightarrow \infty$ 일 때의 실제값으로 2차원 측정에 의한 속도 평균이며,  $u$ 는 순간값이다.

$$\epsilon' = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[ \frac{\sqrt{(u - \bar{u})^2}}{u} \right] \quad (13)$$

따라서, 식 (13)에 의한 샘플링 조건에서의 오차는 약 0.06%으로 무시할 만큼 작은 값을 가진다.

본 실험은 2차원 LDV장치를 이용하여, 3차원 기법을 이원화한 순차적 측정에 의한 결과이므로, 2차원 측정에 대한 준 3차원 측정의 상대적 오차를 고려해 볼 필요가 있다. 상대적 오차는 먼저 Fig. 3에 제시된 동일 측정 영역에서 2차원 및 준 3차원 측정된 각 지점에서의 상대적 오차로 평가가 가능하게 되는데, 이 결과들은 평균값에 대해 1.8%, 난류성분에 대해 12%의 상대적 오차폭을 가진다. 따라서 난류 운동에너지식에서 나타나는 물리량의 크기를  $U \bar{q}^2$ 로 가정하면, 분배에 대한 오차는  $f = U \bar{q}^2$ 에 대하여 식 (14)로 전개되어, 결과적으로 난류 운동에너지 전달식에서 나타나는 평균오차는 17%정도의 크기로 가정할 수 있다.

$$\delta f = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial U} \delta U \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial \bar{q}} \delta \bar{q} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

2차원 LDV장치에 적용된 준 3차원 기법에서 발생할 수 있는 오차들에 대한 분류와 총괄 그리고 상대적 비교를 통해, 주어진 조건하에서 수행된 본 실험은 각 성분의 평균속도값과 난류성분값들은 비교적 안정된 오차범위에 있으나, TKE 분배 특성을 관찰하기에는 정량적으로는 미흡하나, 정성적인 특성을 관찰하기에는 준 3차원 측정 기법도 충분하다고 평가할 수 있다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 평균 속도장의 구조

고정익에서 회전 방식에 의해 만들어진 끝와류는 초기생성, Onset과정, 확대 및 소멸 단계를 거치게 된다. 이들 단계중 끝와류가 성장 단계<sup>(8,16)</sup>인 고정익 날개 끝단으로부터 후류로 2C인 지점에서의 수직 절단면에 대한 속도 성분의 벡터장

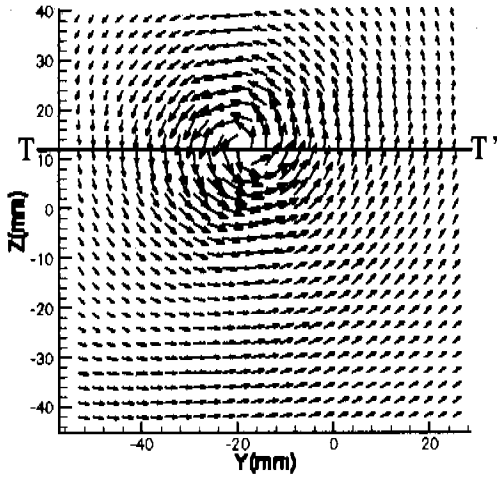


Fig. 4 Velocity vector, around the tip vortex core at the vertical cross section,  $x=2C$ ,  $\alpha=8^\circ$

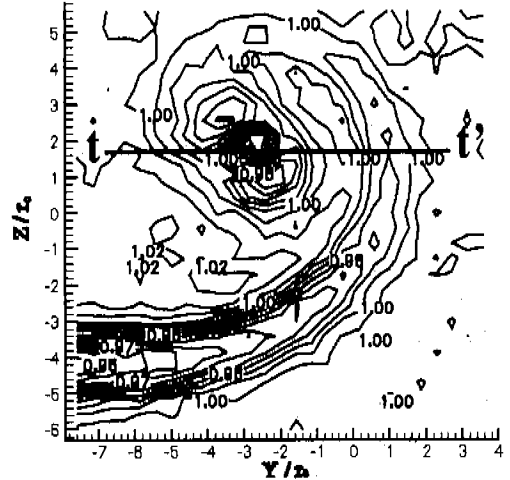


Fig. 6 Axial velocity contour,  $U/U_{mean}$ , around the tip vortex core at the vertical cross section,  $x=2C$ ,  $\alpha=8^\circ$ ,  $U_\infty=20\text{m/s}$ .

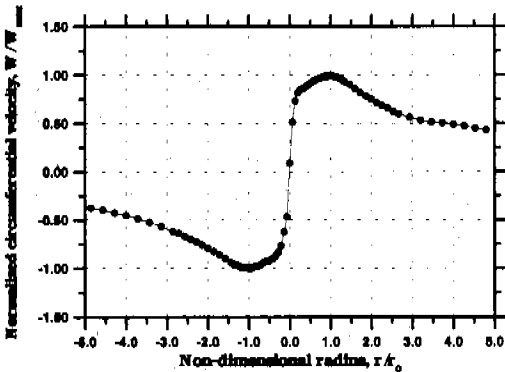


Fig. 5 Circumferential velocity component at  $x=2C$ ,  $\alpha=8^\circ$ ,  $U_\infty=20\text{m/s}$ .

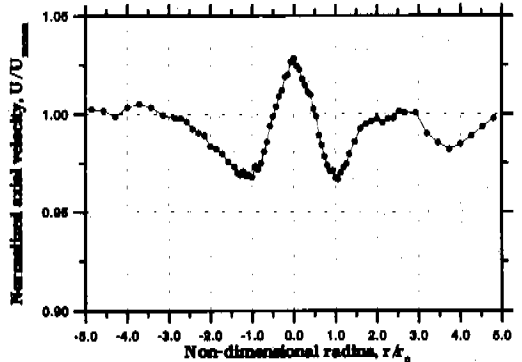


Fig. 7 Axial velocity component at  $x=2C$ ,  $\alpha=8^\circ$ ,  $U_\infty=20\text{m/s}$ .

( $V-W$ )을 Fig. 4에 나타내었다.

평균 거동에 근거한 수직 속도 성분 중에서 접선 속도의 분포는 와류의 강도와 후류로 전개되면서 나타날 수 있는 과정을 예측할 수 있다. Fig. 4를 측정된 동일 후류거리(2C)에서 주류동 방향에 수직이면서 날개 길이 방향의 접선 속도 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 이것은 접선 속도의 최대값으로 정의되는 핵반경을 포함하는 영역인 T-T'를 따라 측정된 평균값의 속도 분포이다.

와류 접선 속도 분포는 와류 핵 반경을 중심으로 그 안쪽과 바깥쪽에서 급격한 평균속도의 변화 양상을 나타내며 핵의 크기와 모양이 거의 대칭적 구조로 나타남을 확인할 수 있다.

끝와류 구조의 평균 거동에 대한 두 번째 평가

로 축방향 속도를 수직단면에 대한 분포(Fig. 6)와 Fig. 5와 동일한 영역인 t-t'를 따라 측정된 축속도(Fig. 7)로 나타내었다. Fig. 6의 축방향 속도 영역에서는 주익에 의한 와판(vortex sheet)과 축대칭 형태로 발전된 끝와류의 상호작용에 의해 나선의 발달 현상이 관찰된다. 이것이 일으키는 2차적 유동에 의해 손실이 발생함을 알 수 있다. Fig. 7에서 와류핵 중심의 바깥영역(outboard)으로 핵반경의 3-4배 지점에서 나타나는 축속도의 감속 구간이 이와 같은 손실에 의한 것으로 예측되어진다.

Fig. 7에서 알 수 있는 것은 급격한 속도 분포를 나타내는 접선속도에 비해 축방향 속도는 다

소 완만한 속도 분포를 나타내고 있으며, 접선속도가 최대가 되는 핵반경 주위에서 축방향 속도의 최대 결손이 나타나는 것이다. 이러한 최대 결손은 전체 속도장에 대해 거의 대칭적으로 나타난다. 이것은 접선 방향의 회전 성향이 운동 에너지를 소모하는 만큼 축방향 속도 성분의 운동량 결손이 나타나게 되고 결과적으로 총 운동 에너지를 보존하게 된다. 특이할 것은 핵중심에서의 축방향 성분은 오히려 주유동의 크기보다 가속됨을 볼 수 있다. 와류의 생성과정에서 발생하는 축방향 속도의 가속<sup>(1)</sup>은 이미 잘 알려져 있으며, 핵반경 주위의 강한 회전성분에 의해 발생된 핵중심에서의 순간적 음압의 영향으로 가속성분이 핵 중심으로 침투하여 이러한 가속현상을 유지하는 것으로 생각된다. 이러한 가속 현상은 하류로 가면서 쇠퇴되어 핵 중심에서 최대 축방향 결손이 나타나는 것으로 알려져 있다.<sup>(8)</sup>

4.2 난류 강도

고정익의 날개끝에서 생성되는 끝와류는 초기에는 총류 거동을 보이다가 하류로 가면서 반경 방향으로 운동 에너지가 증가하면서 난류물 형성한다. 끝와류는 주위의 정지 유동과 혼합단계를 거치면서 성장하여, 반경 방향으로 팽창하고 한편으로 와류의 경계에서는 점성에 의해 회전 성분이 감소하면서 쇠퇴하게 된다. 이런 끝와류의 생성, 소멸 단계를 살펴볼 때 끝와류는 초기 생성 단계의 지배를 받는다는 사실과 이 과정에서 끝와류의 난류 구조를 알아내는 것이 끝와류의 제어에 효과적임을 알 수 있다.

끝와류의 난류 성분이 성장단계 영역<sup>(8,16)</sup>으로 알려진 2C에서 측정된 축방향, 반경방향, 접선방향의 난류 성분들 Fig. 8에 나타내었다.

LDV를 이용한 본 실험은 핵중심 부근의 접선 속도에 의한 회전 성분이 측정에 필요한 작은 부유물질을 핵중심 내부로 투과하는데 장애를 주고 있고 결국 이것이 데이터 샘플링 시간을 지연시키게 한다. 나머지 두 성분에 비해 축방향 성분의 난류 강도가 작게 나타나고 있으며, 와류핵 부근에서 활발한 난류 거동을 확인할 수 있다. 또한 와류핵의 불규칙운동(wandering)이 접선방향과 반경방향의 난류 성분을 지배하고 있으며, 이 결과로 이 두 성분의 난류 성향이 크게 나타나고 있음을 의미한다.

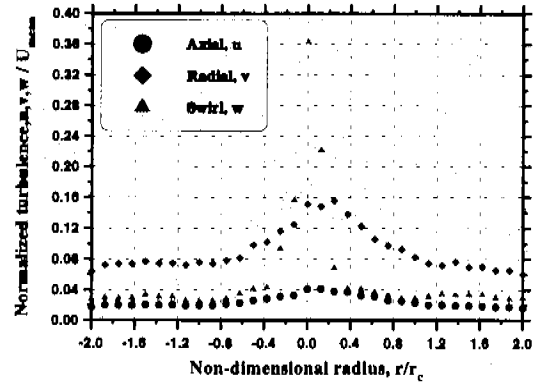


Fig. 8 Axial, radial and circumferential components of vortex turbulence at  $x=2C$ ,  $\alpha=8^\circ$ ,  $U_\infty=20\text{m/s}$ .

와류핵의 불규칙운동은 이처럼 와류핵의 난류 구조 해석에 악영향을 미치고 있으며 이것을 제거시키는 것이 난류 구조 해석의 핵심이 되고 있다. 만약 불규칙운동을 와류핵으로부터 제거시켜 와류의 경로가 공간적으로 변하지 않는 상태를 유지시킬 수 있다면 와류의 난류 성분의 최대값은 난류 핵중심에서가 아니라 접선 속도( $w$ )의 최대값을 나타내는 핵중심의 반경 근처에서 나타날 것이다

4.3 2차 난류항

측정된 난류 성분을 이용하여 구한 난류 운동 에너지를 Fig. 9, 10에 나타내었다. 끝와류의 핵중심에서 난류 운동 에너지 역시 와류핵 주위, 특히 와류핵 반경의 안쪽에서 활발한 거동을 나타내고 있으며, 이것은 각 성분에 대한 난류 강도와 유사하다. 반면 핵반경에 대한 무차원값,  $r/r_c$ 에 대해  $r_c$ 의 2배 반경 이후부터는 그 성분이 약화되거나 거의 나타나지 않고 있다. 난류 운동 에너지가 난류 운동 에너지 방정식에서와 같이 핵반경내에서 생성, 확산, 소산하면서 그 균형을 유지하고 있음을 나타내고 있다. 또한 앞에서 언급한 바와 같이  $v$ 성분을 다른 시간에 일은 후 레이블즈 용력을 Fig. 11에 나타내었다. 난류 강도와 난류 운동 에너지에서 볼 수 있듯이, 핵반경 내의 영역에서 활발히 활동하면서 반경의 두 배 이상의 후류에서 사라지고 있다. 난류의 전단 용력 성분 중  $vw$  성분이 가장 활발한 거동을 보이고 있으며 이것은 접선 방향의 회전 성분과 접

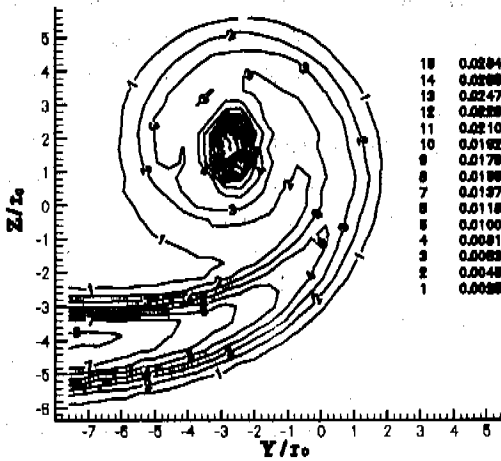


Fig. 9 Turbulence kinetic energy contour,  $q^2/U_{mean}^2$ , around the tip vortex core at the vertical section, 2C.

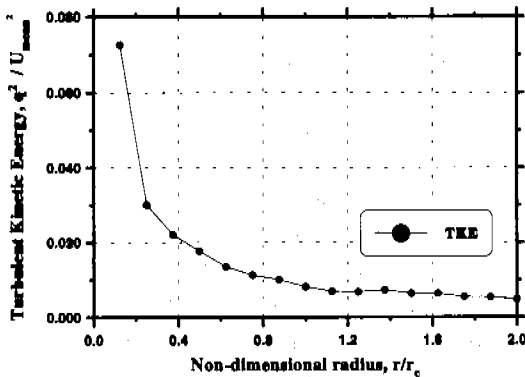


Fig. 10 Turbulence kinetic energy profiles along the nondimensional radius at the plane of  $x=2C$ .

선 방향의 섭동 성분이 와류의 핵반경 안에서 난류의 전단 응력을 지배하고 있음을 나타낸다. 이는  $v$  성분을 얻은 후 계산된 결과지만 기존의 3 차원 LDV에 의한 Rotor 실험<sup>(8)</sup>과 매우 유사한 결과를 얻으므로 2차원 LDV를 이용해 3차원 계산을 가능케 함을 보인다.

#### 4.4 난류 운동 에너지 분배 결과

난류 운동 에너지의 분배는 앞의 2장과 4.3절에서 이미 소개된 바와 같이 난류의 생성, 확산, 소산을 통해 그 에너지의 균형을 이루고 있음을 언급 하였다. Fig. 12는 확산항의 압력/속도 상관항과 점성항을 무시한 조건에서, 직접 측정된 생

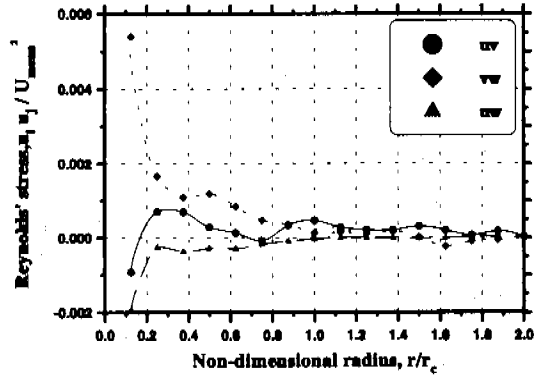


Fig. 11 Reynolds' stress of Axial, radial and circumferential components at  $x=2C$ .

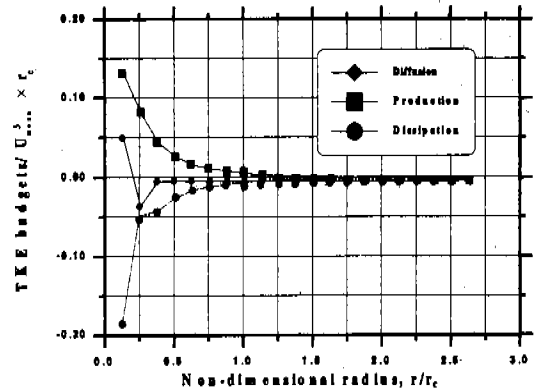


Fig. 12 TKE budget along the radial direction.

성항과 확산항의 속도 3차 상관항을 평형식 (8)에 대입하여, 미지수인 소산항에 대해 정리하는 간접 계산을 통해 소산항을 평가하여 끝와류의 난류 운동 에너지의 반경 방향 분배(budgets)를 나타낸 것이다. 이 결과에 의하면 끝와류의 난류 운동 에너지 분배는 주로 와류핵의 경계, 즉 반경의 안쪽 영역에서 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 관성항이 무시된 제한적 조건에서 측정 가능한 물리량으로 평가된 에너지 평형은 주로 생성항과 소산항에 의해 이루어짐을 알 수 있다. 끝와류의 점선 방향의 속도 성분이 와류핵의 경계 부근에서 급격하게 변하며,  $vw$  성분의 레이놀즈 응력항이 와류의 안쪽 영역에서 활발하게 활동함을 이미 앞절에서 확인하였다. 이러한 점선속도의 변화가 와류의 안쪽 영역에서 난류를 생성시키고 있음을 예상할 수 있으며, 레이놀즈 응력항을 가지는 생성항의 주도적인 역할에 의해 난류에너지의 분배가 이루어지고 있다고 판단되



어진다.

## 5. 결 론

받음각이 8°, 평균 유동 속도가 20m/s인 후류 2C에서 2차원 LDV 시스템으로 끝와류의 평균적 거동에 의한 구조를 평가하고, 이를 근거로 하여 관찰된 오차 한계내에서 난류 구조를 해석하여 다음의 결과를 얻었다.

(1) 축방향과 접선방향의 평균속도분포를 통해 와류의 평균 거동은 접선 속도의 회전 성분에 의해 축방향 속도의 운동량을 손실시키게 된다. 대부분의 난류는 핵반경의 안쪽 영역에서 생성되어 활발히 난류 운동이 진행되면서 바깥쪽으로 확산되어 간다.

(2) 준3차원 기법을 이용하였을 때 평균속도 및 난류 크기의 평가에는 2%이내의 오차범위로 평가되나, 난류 에너지 방정식의 각항에 대한 평가시에 약 17%의 오차를 보이므로 준 3차원 기법에 의한 TKE분배의 정성적인 평가가 가능한 것으로 나타났다.

(3) 난류 운동에너지, 레이놀즈 응력, 평균 속도 변화율이 난류 운동 에너지의 분배를 지배하고 있고, 특히 핵반경 안쪽에서 레이놀즈 응력과 평균 속도 변화율이 난류 생성의 주도적인 역할을 하면서 생성항이 소산항과 균형을 이루면서 난류 운동 에너지 분배를 구성한다.

## 후 기

본 연구는 포항공과대학교 첨단유체공학연구소 지원(AFR-98-A07)에 의해 수행되었습니다. 그동안 수고 해주신 관계자 분들께 감사 드립니다.

## 참고문헌

(1) Chow, J. S., Zilliac, G. G. and Bradshaw, P., 1997, "Mean and Turbulence Measurements in the Near Field of a Wing tip vortex," *AIAA Journal*, Vol. 35, No. 10, pp. 1561~1567.  
 (2) Yu, Y. H., Tung, C., Gallman, J., Schultz, K. J., and Wall, B., "Aerodynamics and Acoustics of Rotor Blade-Vortex Interactions," *J. of Aircraft*, Vol. 32, No. 5, 1995, pp. 970~977.

(3) Marchman III, J. F. and Uzel, J. N., 1972, "Effect of Several Wing Tip Modifications of a Trailing Vortex," *J. of Aircraft*, Vol. 9, No. 9, pp. 684~686.  
 (4) Francis, M. S. and Kennedy, D. A., 1979, "Formation of a Trailing Vortex," *J. of Aircraft*, 79-4038, Vol. 16, No. 3, pp. 148~154.  
 (5) Jarvinen, P. O., 1973, "Aircraft Wing-Tip Vortex Modification," *J. of Aircraft*, Vol. 10, No. 1, pp. 63~64.  
 (6) Mariani, J. D., Zilliac, G. G., Chow, J. S. and Bradshaw, P., 1995, "Numerical/Experimental Study of a Wingtip Vortex in the Near Field," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 9, pp. 1561~1568.  
 (7) Bandyopadhyay, P. R., Stead, D. J. and Ash, R. L., 1991, "Organized Nature of a Trailing Vortex," *AIAA Journal*, Vol. 29, No. 10, pp. 1627~1633.  
 (8) Devenport, W. J., Rief, M.C., Liapis, S.I., and Follin, G.J., 1996, "The Structure and Development of a Wing-Tip Vortex," *JFM*, Vol. 312, pp. 67~106.  
 (9) 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. 477~485.  
 (10) Hinze, O. J., 1975, *Turbulence*, McGraw Hill, New York, 2nd Edition.  
 (11) 이상준, 백승조, 1993, "LDV를 이용한 3차원 유동 측정," 대한기계학회 열.유체 공학부문 학술강연회 논문집, pp. 221~245.  
 (12) 1985, *Measurements Uncertainty*, ASME, ANSI/ASME PTC, 19.1-1985  
 (13) Beckwith, T. G. and Marangoni, R. D., 1993, *Mechanical Measurements*, Addison- Wesley, 5th Edition  
 (14) BSA enhanced, installation and user's guide  
 (15) George, W. K., 1978, "Processing of random signals," *Proceeding of the dynamic Flow Conference*, pp. 757~793.  
 (16) 한용운, 사종엽, 김영수, 1998년, "꼬리와류의 초기유동구조," 한국항공우주학회지, 제26권, 제 2호, pp. 10~18.