

회전의 끝와류의 초기 난류 구조에 관한 실험적 연구

김영수* · 한용운**
(1998년 12월 23일 접수)

An Experimental Study on the Turbulence Structure of Tip Vortices Generated by a Rotor Blade at the Initial Wake Age

Young Soo Kim and Yong Oun Han

Key Words: Tip Vortex(끝와류), Wake Age(후류시기), Laser Doppler Velocimetry(레이저 도플러 유속계), Phase Average(위상평균), Slipstream(선회후류)

Abstract

The evolutionary structure of a tip vortex in the initial period have been investigated by the two-dimensional LDV system. Circumferential and axial components of mean velocities, their turbulences and Reynolds stresses were measured by the phase averaging technique at seven different wake ages within one revolution of the rotor. Core growth was also analyzed. It was resulted that circumferential velocity components showed a Rankine combined vortex shape and their circulation profiles viewed in the radial direction were close to the $n=2$ model of Vatisas' algebraic formula, while axial velocity components seemed to have the Gaussian profiles in these measured ranges with the base width of three times of core radii. Peaks of circumferential velocities and core radii showed distinct asymmetric behaviors before the wake age of 150° over inboard and outboard sides of the slipstream, but they became symmetric afterwards. Turbulence profiles which had two peaks inside the core radii in the earlier wake age were also changed to single peaks after 150° . These trends imply that the tip vortex was barely mature at this wake age.

기호설명

A	: 후류 축소비
c	: 블레이드의 시위, m
k_1, k_2	: 축방향 이동 계수
n	: 대수적 모델의 지수
N	: 블레이드 수
r_c	: 와류 핵 반경, m
r_0	: 초기 와류 핵 반경, m
\bar{r}	: 무차원화된 와류 핵 반경
R	: 로터 반경, m
t	: 시간, s
u_t, v_t, w_t	: 끝와류 좌표계에서의 각 방향 난류성분, m/s

U_t, V_t, W_t	: 끝와류 좌표계에서의 각 방향 속도성분, m/s
U_r, V_r, W_r	: 로터 좌표계에서의 각 방향 속도성분, m/s
$U_{t,peak}, W_{t,peak}$: 끝와류 좌표계에서의 각 방향 속도성분의 극대값, m/s
V_{tip}	: 블레이드 끝의 접선속도, m/s
\bar{U}_t	: 무차원화된 축방향속도
\bar{W}_t	: 무차원화된 회전방향속도
x_t, y_t, z_t	: 끝와류좌표계, m
X_r, Y_r, Z_r	: 로터좌표계, m
δ	: 소용돌이 점성계수
λ	: 반경방향 축소계수
ν	: 대기의 동점성계수, m^2/s
ζ	: 후류시기, $degree$
Γ	: 순환값, m^2/s
Ω	: 로터의 회전각속도, $degree/s$

* 영남대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 영남대학교 기계공학부

1. 서론

유한한 길이(*span*)를 갖는 3차원 날개 끝에서는 상하면 압력차에 의해 불가피하게 날개 끝와류(*wing tip vortex*)가 발생한다. 회전익기의 날개 끝에 의해 생성되어지는 끝와류는 기체의 하강, 선회 비행시 상당 시간 기체와 로터 주위에 머무르며 공기역학적 하중을 증가시킨다. 특히, 블레이드-와류 상호작용(*Blade Vortex Interaction*)은 뚜렷한 3차원 비정상 거동을 보이며 로터 진동하중, 블레이드 공탄성, 극심한 소음생성 등 기체성능 전반에 걸쳐 영향을 미친다. 따라서, 블레이드 끝와류가 발생하여 전개되어 가는 구조를 정확히 예측하여 하류에서의 소멸과정을 진전시킬 수 있는 것은 공학적으로 매우 유용하다.

회전의 끝와류에 관한 초창기 연구들은 주로 Cook⁽¹⁾ 등에 의해 열선유속계 및 가시화방법을 이용하여 수행되어졌다. Tung^(2,3)은 끝와류의 강도가 최대 강제순환(*bound circulation*)과 일치되어야 하지만 Cook의 실제 결과들과는 차이가 있음을 발견하고, 블레이드의 기하학적 형상이 와류 강도와 구조에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험을 하였다. 또한, 그는 와류의 구조를 총류 내부영역(*laminar inner region*), 난류대수영역(*turbulent logarithmic region*), 전이영역(*transition region*) 그리고, 비회전 외부영역(*irrotational outer region*)의 4개 영역으로 구분하였다. Vatisas⁽⁵⁾는 He-Ne 레이저광원을 이용하여 액체가 담긴 비커 내에서 발생한 복합와류를 가시화함으로써 회전방향 속도의 대수적 모델을 제시하였다.

70년대 이후 LDV 장치의 개발이 활발함에 따라 유동을 방해하지 않고 정확한 속도 측정이 가능하며, 작은 측정체적으로 인한 우수한 공간적 분해능(*resolution*), 넓은 속도 범위와 높은 주파수 응답 등의 장점으로 회전의 후류 측정에 LDV 시스템이 이용되기 시작했다. Landgrebe^(7,8)와 Thompson⁽⁹⁾ 등에 의해 1차원 LDV 시스템을 사용한 실험결과들이 발표되었으며, Sullivan⁽¹⁰⁾은 로터 후류의 비주기적 특성과 측정의 어려움을 언급하였다. 또한, 2차원 LDV 시스템을 사용한 실험들이 Biggers *et al.*⁽¹¹⁾와 Hoard *et al.*⁽¹²⁾ 등에 의해 수행되어졌으며, 최근 들어서 3차원

LDV 시스템을 사용한 로터 후류에 관한 세부적인 연구가 Seelhorst *et al.*,⁽¹³⁾ McAlister *et al.*,⁽¹⁴⁾ Leishman *et al.*^(15,16)과 Han *et al.*^(17,18) 등에 의해 이루어지고 있다. 특히, Han은 끝와류핵(*core*) 내부에서의 난류는 반경방향 성분이 지배적이며, 이것은 또한 레이놀즈응력에 강하게 기여한다는 사실과 와류내의 난류운동에너지분배(*turbulent kinetic energy budgets*)는 생성항과 소산항이 주도적으로 평형을 이룬다는 실험적 결과를 발표했다.

본 연구에서는 와류의 점성 핵 크기, 축방향 속도성분과 회전방향 속도성분의 로터 반경방향 분포, 와류 중심의 하류방향 이동속도 및 위치변화 등의 가시화 및 정량적 해석을 통하여 생성, 전달, 확산 및 소멸되어지는 끝와류의 물리적 특성과 하류에서 만들어지는 큰 회전성분 형상을 이해하고자 한다. 그러나, 난류강도의 구조를 파악함에 있어, 고속으로 회전하고 있는 블레이드 끝에서 발생하는 끝와류는 생성 초기이거나 높은 회전방향 속도를 가질 때 관성, 점성저항력에 의해 와류핵 내부로의 부유물질(*seeding particle*) 삽입이 곤란하여 주기적 로터 유동의 위상평균(*phase averaging*)을 만족시킬만한 유효 표본수를 얻기가 어렵다. 또한, 유입공기의 품질과 자기 유도효과(*self induced effect*)에 의해 야기되어지는 와류 중심의 불규칙 이동 현상(*wandering*)⁽¹⁹⁾이 존재하는 등의 어려움이 있기 때문에 본 실험에서는 이러한 문제를 최소화할 수 있는 조건을 확보하여 1회전 동안에 이루어지는 위상평균 와류 거동의 유동 구조를 파악하려고 하며, 아울러 LDV 시스템을 이용한 회전의 후류 측정기법 향상에 도움이 되고자 한다.

2. 실험

2.1 실험장치 구성

본 실험에 사용되어진 로터 시스템은 회전익기의 제자리비행(*hovering*) 조건을 만족하며 지면 효과를 줄이기 위해 주유동은 지면의 평행방향으로 유지하였다. 로터 블레이드 끝에서 만들어진 와류와 뒤따라오는 블레이드와의 간섭을 줄이기 위해 단일 블레이드를 채택하였으며, 동적균형을 맞추기 위해 시소형대(*teetering type*)를 갖는 허브(*hub*)에 블레이드 그립(*blade grip*)을 장착하여

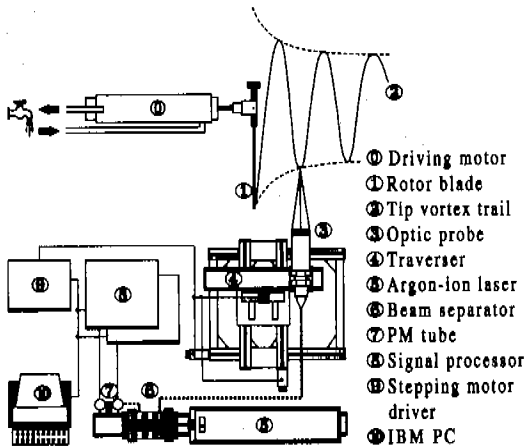


Fig. 1 Experimental layouts and LDV system.

블레이드 반대편에는 적정 무게의 추를 달았다. 사용되어진 블레이드는 길이가 $0.525m$, 시위가 $0.055m$ 이며 비틀어지지 않은(*untwisted*) 직사각 평면을 갖고 날개단면이 *NACA23012* 인 비대칭 익형이다.

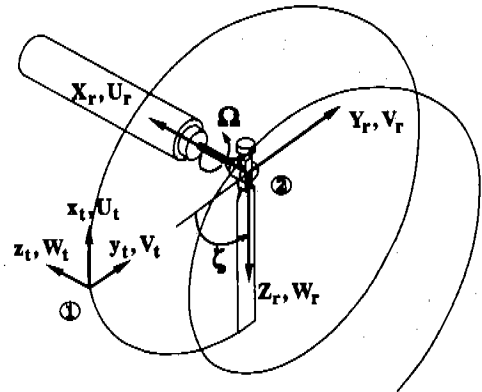
로터 회전면 상류에서 유입되어지는 유동을 방해하지 않기 위해 로터 반경에 비해 충분히 작은 반경($0.11R$)을 가지는 5마력의 수랭식 삼상 가변 주파수 제어 모터(*PS-5032H*)를 사용하였으며, 로터 회전속도와 블레이드 방위각에 대한 정보는 로터 축과 타이밍벨트로 연결되어진 엔코더(*encoder*)에 의해 주어지며, 사용되어진 엔코더는 1회전 당 3600bin(*bins*)의 높은 분해능을 가지며 0.1° 단위각의 위상평권이 가능하다.

실험장비 구성은 Fig. 1에 도시하였으며, 사용된 좌표계는 Fig. 2에서와 같이 끝와류좌표계(*tip vortex coordinate system*)와 로터좌표계(*rotor coordinate system*)로 구분하였고, 후류시기 ζ 는 블레이드 코드 의 $1/4$ 선을 기준점 0° 로 잡았다.

2.2 계측장비 구성

사용되어진 계측장비는 $4W$ 아르곤-이온 레이저 광원의 2차원 LDV 시스템(*DANTEC*)이며 광분리기, 광학프루브, PM튜브(*photo multiplier tube*), 신호처리기 등으로 구성되어 있다.

파장의 길이가 각각 $514.5nm$, $488.0nm$ 로 2색(*blue, green*) 분리된 빔은 유체의 방향성을 측정하기 위해 *Bragg cell*에 의해 각각 $40MHz$ 의 주파수 편이가 일어나며, 이후 4개의 빔은 $5m$ 길이



① Tip vortex coordinate ② Rotor coordinate

Fig. 2 Coordinate systems used in experimental setup.

의 광학유리섬유를 거쳐 광학프루브(*fiber optic probe*)까지 이동된다.

광학프루브에는 초점거리가 $0.5m$ 인 볼록렌즈를 장착하였고, $75mm$ 의 간격으로 각각의 레이저빔들을 분리시켰으며, 또한 후방산란형(*back scatter mode*)의 광학 배치와 *Burst Spectrum Analyzer(BSA, model 57N20, 57N35)*를 신호처리기로 사용하였다.

부유물질은 최소 0.855 의 비중을 갖는 유체파라핀이 사용되었으며, 연기발생기(*model SDA-SG16*)에 의해 미립화된 입자가 측정체적 안으로 자연스럽게 분무되도록 연기발생기의 분무노즐을 위치시켰다.

광학프루브의 이송은 PC에 의해 작동되는 3차원 이송장치에 의해 이루어지며, 사용된 이송장치는 최대 $590mm \times 590mm \times 690mm$ 의 이송범위와 최소 $12.5\mu m$ 의 분해능을 가진다.

2.3 실험 조건

실험실 내부 평균 대기온도 $15^\circ (\pm 5^\circ, \nu = 1.45 \times 10^{-5})$ 에서 본 실험은 진행되었고, 끝와류 계측의 나선간격을 넓히기 위해 4° 의 컬렉티브 피치(*collective pitch*)를 주었다. 로터의 분당 회전수는 $2000rpm(33.3Hz)$ 으로서 날개 끝 마하수 0.32 , 레이놀즈수 4.25×10^5 를 유지시켰으며 $\zeta = 12.5^\circ, 25.0^\circ, 40.0^\circ, 84.0^\circ, 150.0^\circ, 240.0^\circ, 355.0^\circ$ 의 7개 구간에 걸쳐 와류 핵 반경방향으로 $0.2 \sim 10mm$ 의 비균일 격자계를 사용하여 실험하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 회전방향 속도성분

회전의에 의해 만들어진 끝와류는 나선구조의 체적을 형성하며 로터 중심으로 축소되어지는 선 와류의 경계면을 따라 표류(drift)하듯 하류로 이동해 간다.

Fig. 3에서 로터좌표계의 반경방향과 축방향의 가로, 세로 좌표축에 위상평균되어진 회전방향 속도벡터(V, W)를 도시하였다. 최근에 만들어진 끝와류($\zeta = 25.0^\circ$, 좌측상단)와 로터 1회전 전에 만들어져 하류로 이동되어진($\zeta = 385.0^\circ$, 우측하단) 두 개의 끝와류 형상을 볼 수 있다. 로터 선 와류에서 시간평균되어진 유도속도성분(Fig. 4)은 이러한 와류 이동의 원동력이 되지만 회전방향 속도성분에 합세하므로, 순수 와류 형상을 파악하기 위해 회전방향 속도성분에서 유도속도를 제하였다.

초기의 높고 날카로운 극대값과 가파른 기울기를 가지는 회전방향 속도성분은 하류로 가면서 기울기는 완만해지고 극대값은 낮아지며 무뎠어진다.^(17,18,20) 얻어진 순수 회전방향 속도성분들을 식 (1)을 이용하여 무차원화시키면 Fig. 5와 같이 중첩되어 상사성을 보이는데 이것은 Vatistas⁽⁶⁾가 제안한 식 (1)의 $n=2$ 에 근접함을 알 수 있다.

$$\bar{W}_t = \frac{\bar{r}}{(1+r^{2n})^{1/n}}$$

$$\bar{W}_t = 2\pi r_c W_t / \Gamma_\infty, \quad \bar{r} = r/r_c \quad (1)$$

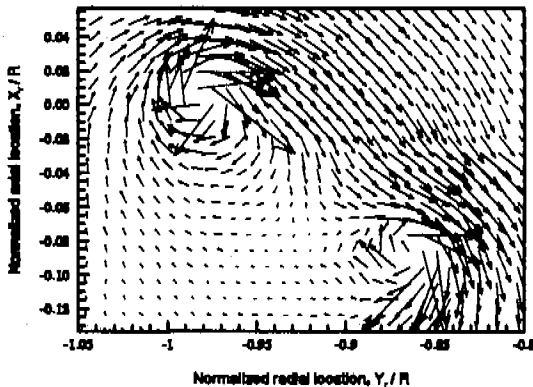


Fig. 3 Tip vortices made by velocity vectors in the phase plane of $\zeta = 25.0^\circ$ or 385.0° .

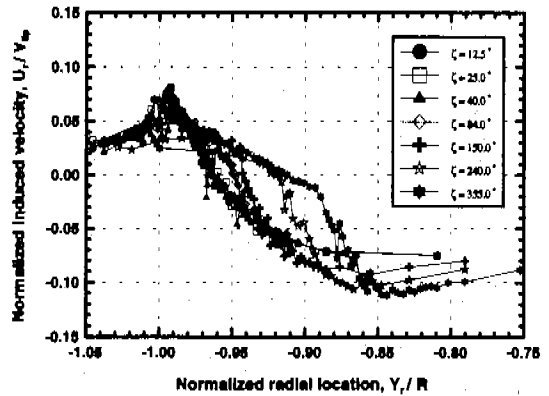


Fig. 4 Time averaged induced velocities of slip stream at different wake ages.

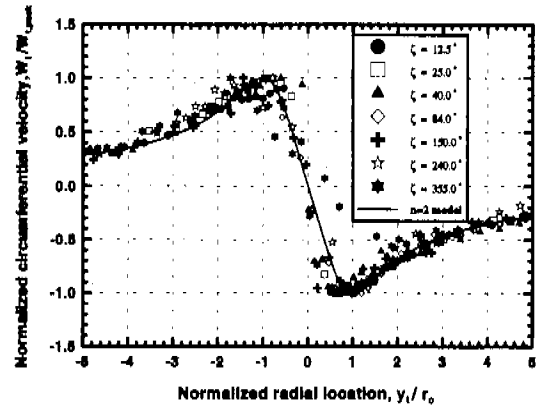


Fig. 5 Similarity of circumferential velocity components at different wake ages.

회전방향 속도의 극대값들은 Fig. 6에서와 같이 후류 시기에 대하여 지수적 감쇠경향을 보이며 식 (2)와 같은 Lamb-Oseen 모델⁽²¹⁾에 근접함을 알 수 있다.

$$W_t(r,t) = \frac{\Gamma}{2\pi r} [1 - \exp(-\frac{r^2}{4\nu t})] \quad (2)$$

끝와류의 후류시기가 초기일 경우에는 성장과정($\zeta = 12.5^\circ$ 이하) 및 초기 쇠퇴과정($\zeta = 12.5^\circ$ 에서 변 극점 50° 사이)으로 완만한 감쇠경향을 보이다가 로터가 약 1/4 바퀴 회전한 후에는 초기값의 절반으로 떨어지는 급격한 감쇠경향을 보인다. 선행된 연구에 의하면 매우 이른 후류시기($\zeta = 9.7^\circ$)에서는 본 실험에서 나타나는 완전한 성장기($\zeta = 12.5^\circ$)에서의 회전방향 속도의 극대, 극소

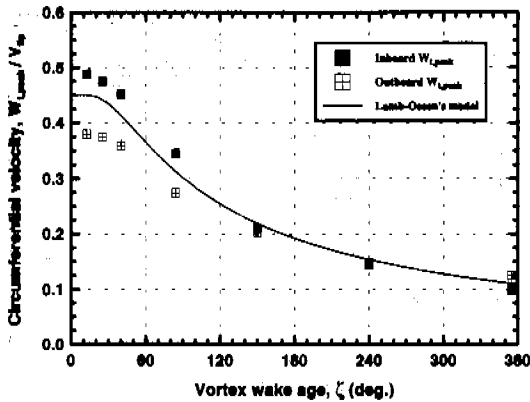


Fig. 6 Estimated peak diminution of circumferential velocity versus wake age.

값보다 낮은 값이 측정되기도 하였다.⁽²⁰⁾
 로터 회전이 약 1/4 바퀴 ($\zeta = 90.0^\circ$) 되기 전의 회전방향 속도성분의 극대값들은 선회후류 안팎에서 그 크기가 서로 일치하지 않는데, 이것은 와류 형성과정에서 초기의 불완전하고 비대칭적인 경향으로 여겨지며, 약 150° 이후 부터 와류는 충분히 성숙된 대칭적 형상으로 바뀌어 간다.

3.2 축방향 속도성분

회전익에서의 축방향 속도성분은 유체의 점착 조건(*no-slip condition*)에 준하여 블레이드 표면에서 최대값을 가지며 후류시기가 증가함에 따라 점성저항력에 의해 급격히 감소된다. 따라서, 축방향 속도성분은 회전방향 속도성분과는 달리 성장과정은 없으며 생성, 쇠퇴과정만 존재할 뿐이다. Fig. 7은 위상평균된 축방향 속도성분의 등고선(*contour*)으로서 Fig. 3의 회전방향 속도성분과 비교해 볼 때 와류 중심에서 최대값을 가지며 블레이드 길이방향의 긴 와판(*vortex sheet*)에 의해서 가장 강한 축방향 속도가 생성됨을 알 수 있다. 시간평균되어진 로터 선회후류의 선회 속도는 Fig. 8과 같으며 유도속도에 비해 약 1/5 배의 수준에 머무르며 팁 근처에 극부적으로 나타난다. 이러한 큰 선회성분을 배제시킨 와류의 축방향 섭동 속도성분은 생성 초기에 와류 핵 중심에서 날카로운 최대치를 가지며 와류가 성장하면서 최대치들은 지속적으로 감소하지만 분포영역은 넓어지는 경향성을 보인다.⁽¹⁸⁾

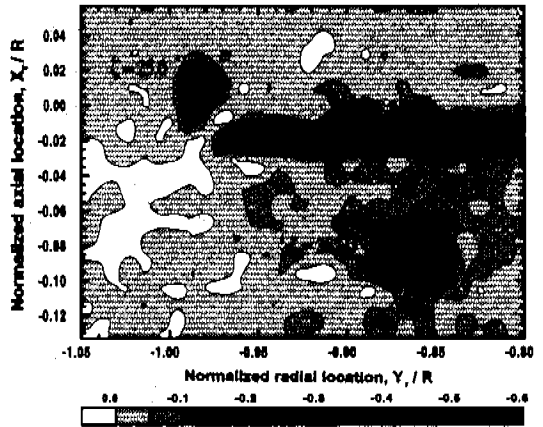


Fig. 7 Phase averaged axial velocity contour in the tip vortex at $\zeta = 25.0^\circ$.

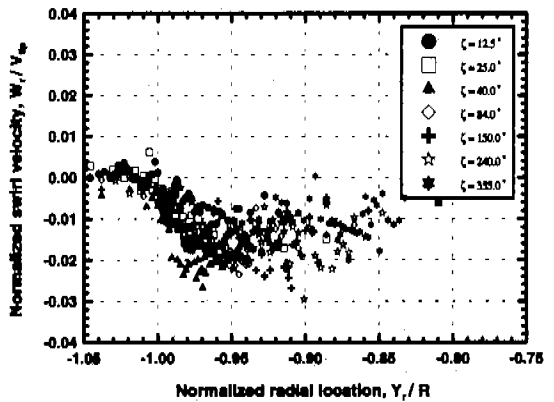


Fig. 8 Time averaged swirl velocities of slip stream at different wake ages.

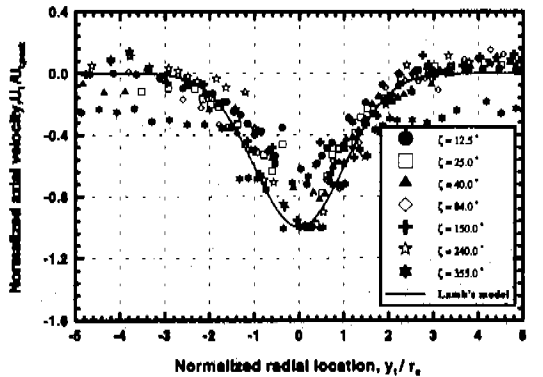


Fig. 9 Similarity of axial velocity components at different wake ages.

측정된 결과치들을 최대치로 무차원하여 중첩시켰을 때 Fig. 9에서와 같이 축방향 속도성분은 대체적으로 가우시안 분포를 만족하는 좌우대칭적 종모양의 상사성을 보이며 식 (3)과 같은 Lamb 모델식에 근접함을 알 수 있다.

$$\bar{U}_z(r, t) = \frac{A}{t} \exp\left(-\frac{r^2}{4\nu t}\right) \quad (3)$$

3.3 순환값의 분포

와류의 강도를 식 (4)에 의하여 Γ 로 표현하였으며 측정된 와류의 회전방향 속도 데이터들이 이를 통해 Fig. 10에 도시하였다.

$$\Gamma(r) = \oint \bar{\mathbf{V}} \cdot d\mathbf{s} = W(r)(2\pi r) \quad (4)$$

제시한 분포값들은 선회후류 안쪽 영역에서의 순환값으로서 대체적으로 전구간에서 상사성을 보이고 있으며 역시 $n=2$ 모델에 근접한다. 이는 고정된 와류의 특징⁽²²⁾인 $n=1$ 모델과 초기결과인 Tung의 모델과 많은 차이를 보이고 있으므로, 특히, Tung에 의하여 주장된 끝와류의 영역 분할 방법에 수정이 필요함을 알 수 있다.

3.4 와류 핵의 성장 및 이동

복합와류는 강제와류의 유동특성을 가지는 핵 내부와 자유와류의 유동특성을 가지는 핵 외부와의 경계에서 회전방향 속도성분이 극대값을 갖게 되므로 이를 이용해 와류 핵 반경의 크기가 결정되어진다. 와류의 핵 반경은 Fig. 11에 도시한 바와 같이 시간($t = \zeta/\Omega$)이 경과함에 따라 성장해 나가며 나선구조의 긴 와류관(vortex tube)을 형성하게 되는데 선행된 연구결과인 식 (5)에 매우 근접한다.

$$r_c(\zeta, \delta) = r_0 + 0.00855 \sqrt{\delta \zeta} \quad (5)$$

즉, 위 식을 이용할 때 얻어진 결과들은 소용돌이 점성계수 $\delta = 10$ 을 만족하며 초기 와류 핵 반경이 $r_0 = 0.01$ 임을 알 수 있다. Han^(17,18)의 실험결과와 다소 차이는 있으나 동일한 소용돌이 점성계수를 갖는 정성적 유사성을 보인다.

와류의 핵 중심은 축방향으로는 선형적, 반경방향으로는 비선형적으로 이동하며 특히, 블레이드 각도(ζ)가 $360/N^\circ$ 씩 증가함에 따라 축방향

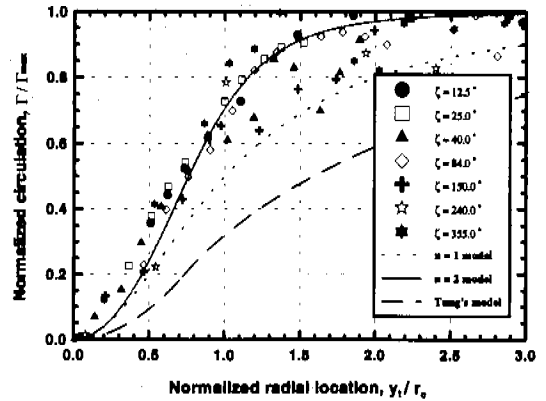


Fig. 10 Circulation profiles in the tip vortex at different wake ages.

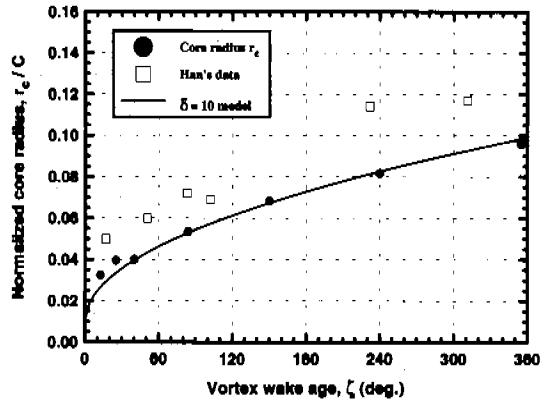


Fig. 11 Estimated vortex core growth versus wake age.

이동속도는 증가하는 것으로 알려져 있다. 이러한 핵의 공간적 위치에 대한 정확한 정보는 BVI 문제를 극복할 수 있는 좋은 자료로 사용되어질 수 있으며, 회전익기가 일정속도로 하강할 때 와류궤적이 로터 회전면에 꾸준히 머물러 기체의 안정성, 조정성이 급격히 저하되며 연료 소모량 및 소음이 증가하는 와류고리상태(vortex ring state)의 공간, 시간적 조건을 예측할 수 있는 기초 자료가 된다. 식 (6)과 식 (7)은 Landgrebe⁽⁸⁾ 모델로서 로터 축방향의 이동은 X_r/R 로서 식 (6)으로 표현되고 반경방향의 축소 크기는 Y_r/R 로서 식 (7)로 표현된다.

Fig. 12에서 Landgrebe 모델과 실험결과들이 매우 근접됨을 알 수 있으며 위 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 $k_I = 0.015$, $\lambda = 0.14$ 의 값을 얻었고

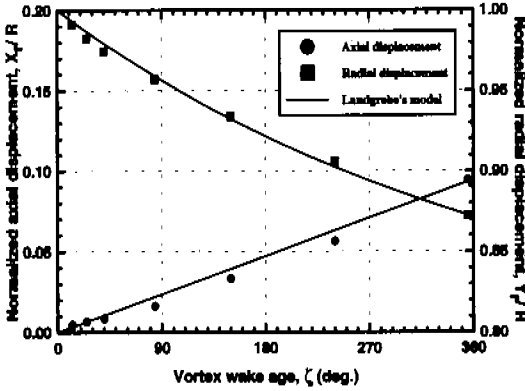


Fig. 12 Axial versus radial displacements and Landgrebe's model.

$$\frac{X_r}{R} = \begin{cases} k_1 \zeta & 0 \leq \zeta \leq \frac{2\pi}{N} \\ \left(\frac{X_r}{R}\right)_{\zeta=\frac{2\pi}{N}} + k_2 \left(\zeta - \frac{2\pi}{N}\right) & \zeta > \frac{2\pi}{N} \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{Y_r}{R} = A + (1-A)e^{-\lambda\zeta} \quad (7)$$

여기서, 통상적으로 후류축소비 $A = 0.78$ 을 사용한다.

3.5 난류 특성

회전의 유동장에서 LDV를 이용한 끝와류의 난류 측정의 어려움으로는 핵 내부에서 강제회전의 원심력에 의한 부유물질 삼입이 곤란하며, 핵 내부의 가파른 속도기울기를 따라가는 부유물질의 유체에 대한 추종성이 떨어진다는 것이다. 따라서, 유효 샘플들의 시간적 연속성이 결여되며, 상대적으로 작은 크기를 갖는 와류에 대한 측정장비의 공간적 분해능, 와류 핵의 저주파수대 임의적 이동현상으로 인한 비정상 거동 특성의 증가들로 인해 측정은 매우 어렵다. 이로 인해 수 μm 이하 단위의 매우 작은 크기의 부유물질을 이용하고 Wandering 현상을 배제시키기 위한 노력이 선행되어야 한다. 본 실험은 하류로 갈수록 증대되는 Wandering 효과를 최소화하기 위해 로터 초기 1회전내에서 측정되어졌으며, 또한, 재순환 효과를 줄이기 위해 측방향과 반경방향 성분들을 동시측정모드에서 샘플을 수집하였다. Fig. 13~15는 두 성분의 난류강도 변화로서 대체적으로 와류 핵 반경 내부에서 난류는 매우 활동적이다.

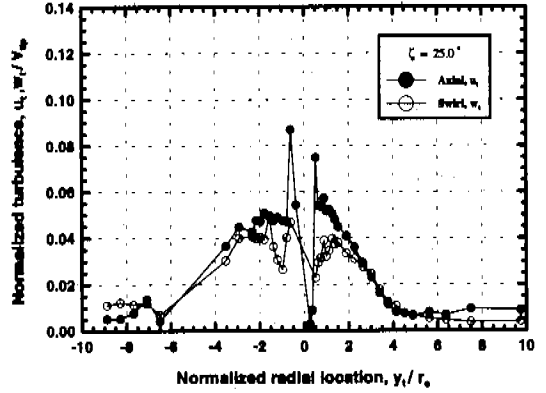


Fig. 13 Axial, swirl components of turbulence in the tip vortex at $\zeta = 25.0^\circ$.

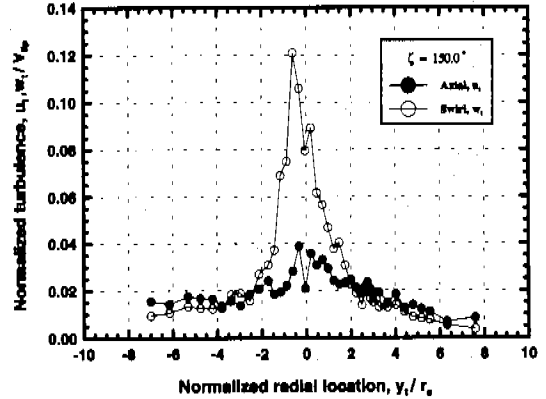


Fig. 14 Axial, swirl components of turbulence in the tip vortex at $\zeta = 150.0^\circ$.

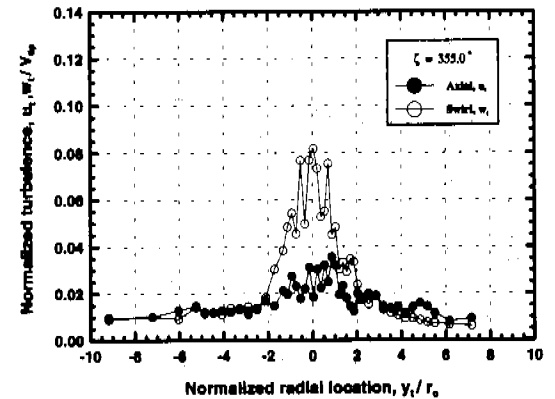


Fig. 15 Axial, swirl components of turbulence in the tip vortex at $\zeta = 355.0^\circ$.

후류 초기 $\zeta = 25.0^\circ$ 의 핵 경계 부근에서 두 개의 극대값을 갖던 난류는 와류가 성장하여 $\zeta = 150.0^\circ$ 에 중심에서 한 개의 극대값으로 뭉쳐져 마침내 $\zeta = 355.0^\circ$ 에서는 두 성분 모두 쇠퇴해짐을 볼 수 있다.

축방향의 난류강도는 축방향 속도 감쇠경향(성장과정이 없습)과 일치하여 시간이 경과함에 따라 세력은 약해져 가지만, 회전방향의 난류강도는 생성 후, 후류시기 150.0° 까지 성장과정을 겪게 되며, 이후 쇠퇴하기 시작한다. 즉, 회전방향 속도가 먼저 생성되어 아주 짧은 시간의 성장과정을 겪은 후 쇠퇴기에 접어들었을 때를 즈음하여 난류성분의 성장은 최고조에 도달한다.

Fig. 16은 후류시기 25.0° , 150.0° 그리고 355.0° 의 3개 구간에서 측정되어진 와류의 레이놀즈응력으로서 핵 반경을 경계로 무차원 반경 0.5에서 극대, 극소값을 갖지만 핵 외부는 그 크기가 매우 미미하여 무시할 만하며, 레이놀즈응력 또한 355.0° 에서는 그 세력이 매우 약해짐을 볼 수 있다. 후류시기 25.0° , 150.0° 에서 선회후류 안팎으로 반대 부호를 가지는 것은 전단응력이 와류의 회전방향 순간 속도성분의 방향에 의존하는 까닭으로 여겨지며, 바깥 영역의 절대값이 상대적으로 높게 나타나는 것은 핵으로 이루어진 긴 와류관이 도너츠모양의 3차원 나선구조로 만들어지는 과정에서 와류 중심이 로터 허브쪽으로 쏠리는 비축대칭성과 선회후류 내, 외부에서의 난류강도 차이를 그 원인으로 볼 수 있다.

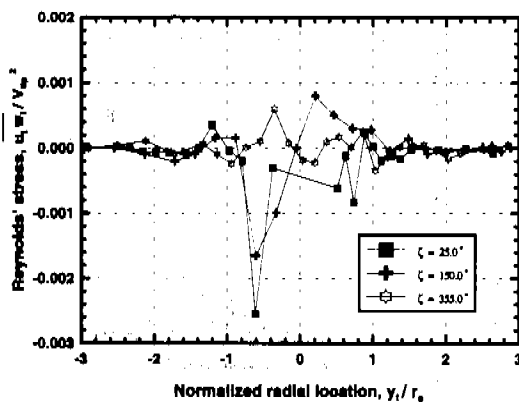


Fig. 16 Reynolds' stresses in the tip vortex at three wake ages; 25.0° , 150.0° & 355.0° .

4. 결 론

회전방향 속도성분은 전 구간에서 vorticity의 $n = 2$ 대수적 모델에 근접하는 상사성을 보이며 후류 초기에는 선회후류 안팎에서 비대칭적 구조를 갖는다. 회전, 축방향 속도성분들은 모두 Lamb 모델에 근접하며 로터가 1/4 바퀴 회전하는 동안 급격히 감소하는 지수적 감쇠경향을 보인다. 와류 핵은 $\delta = 10$ 모델에 근접하여 성장하며 축방향으로는 선형적, 반경방향으로는 비선형적으로 이동한다. 가파른 속도기울기를 가지는 핵 부근에서 난류강도는 측정된 전구간에서 강하게 나타나며, 초기에 핵 경계지역에서 나타났던 두 개의 날카로운 극대값은 시간이 경과함에 따라 하나로 뭉쳐지며 그 강도는 약해진다. 3차원 나선구조의 비축대칭성을 가지는 와류관에 의해 선회후류 안팎으로 레이놀즈응력의 비대칭성이 증가한다. 끝와류 회전방향의 평균속도와 난류성분들은 로터 1회전 동안 생성 후, 성장할 뿐만 아니라 쇠퇴과정까지도 겪는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술 연구 조성비(기계공학 ME97-B-08)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- (1) Cook, C. V., 1972, "The Structure of the Rotor Blade Tip Vortex," Paper3, *Aerodynamics of Rotary Wings*, AGARD CP-111.
- (2) Tung, C., Pucci, S. L., Caradonna, F. X. and Morse, H. A., 1983, "The Structure of Trailing Vortices Generated by Model Rotor Blades," *Vertica* Vol.7, pp.33~43.
- (3) Ramachandran, K., Tung, C. and Caradonna, F. X., 1989, "Rotor Hover Performance Prediction Using a Free-Wake, Computational Fluid Dynamics Method," *Journal of Aircraft*, Vol.26, No.12, pp. 1105~1110.
- (4) Vatistas, G. H., Lin, S. and Kwok, C. K., 1986, "Theoretical and Experimental Studies on Vortex Chamber Flows." *AIAA Journal*. Vol. 24.

- No.10, pp.635~642.
- (5) Vatas, G. H., Lin, S. and Kwok, C. K., 1986, "Reverse Flow Radius in Vortex Chambers," *AIAA Journal*, Vol.24, No.11, pp.1872~1874.
- (6) Vatas, G. H., Kozel, V., Mih, W. C., 1991, "A Simpler Model for Concentrated Vortices," *Experiments in Fluids*, Vol.11, pp.73~76.
- (7) Landgrebe, Antone J., Johnson, Bruce V., 1974, "Measurement of Model Helicopter Rotor Flow Velocity with a Laser Doppler Velocimeter," *Journal of the the American Helicopter Society*, pp.39~43.
- (8) Landgrebe, A. J., 1972, "The Wake Geometry of a Hovering Rotor and its Influence on Rotor Performance," *Journal of the American Helicopter Society*, Vol.17, No.4, pp. 2~15.
- (9) Thompson, T. L., Komerath, N. M. and Gray, R. B., 1988, "Visualization and Measurement of the Tip Vortex Core of a Rotor Blade in Hover," *Journal of Aircraft*, Vol.25, pp.1113~1121.
- (10) Sullivan, J. P., 1973, "An Experimental Investigation of Vortex Rings and Helicopter Rotor Wakes Using a Laser Doppler Velocimeter," Massachusetts Institute of Technology Aerophysics Laboratory, Technical Report 183, *MIT DSR No. 80038*.
- (11) Biggers, J. C., Chu, S., and Orloff, K. L., 1975, "Laser Velocimeter Measurements of Rotor Blade Loads and Tip Vortex Rollup," *Proc. of the 31st Annual American Helicopter Society Forum*, Washington D.C..
- (12) Hoad, D. R., 1991, "Helicopter Local Blade Circulation Calculations for a Model Helicopter Rotor in Forward Flight Using Laser Doppler Velocimeter Measurements," *Proc. of the 47th Annual American Helicopter Society Forum*, Phoenix.
- (13) Seelhorst, U., Beesten, B. M., and Butefisch, K. A., 1994, "Flowfield Investigation of a Rotating Helicopter Rotor Blade by Three-Components Laser Doppler Velocimetry," *Proc. of the 75th AGARD Fluid Dynamic Panel Symposium*, Berlin, Germany.
- (14) McAlister, K. W., Schuler, C. A., Branum, L. and Wu, J. C., 1995, "3-D Wake Measurements near a Hovering Rotor for Determining Profile and Induced Drag," NASA TP3577.
- (15) Leishman, J. G., Baker, A. and Coyne, A., 1995, "Measurements of Rotor Tip Vortices Using Three-Component Laser Doppler Velocimetry," *Proc. of AHS, Aeromechanics Specialists Meeting*, Fairfield County, CT.
- (16) Leishman, J. G., Bagai, A., 1996, "Challenges in Understanding the Vortex Dynamics of Helicopter Rotor Wakes," *Presented at the 27th AIAA Fluid Dynamics Conference*, New Orleans.
- (17) Han, Y. O., Leishman, J. G. and Coyne, A. J., 1996, "On the Turbulent Structure of a Tip Vortex Generated by a Rotor," *Proc. of American Helicopter Society*, Washington D.C..
- (18) 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.
- (19) Devenport, W. J., Rife, 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.
- (20) Alan J. Coyne, 1997, "An Experimental Investigation into the Detailed Flow Structure of Rotor Tip Vortices," Master Thesis, University of Maryland, pp.78~133.
- (21) Lamb, H., 1932, *Hydrodynamics*, 6th ed., Cambridge Univ. Press, New York, pp.592~593.
- (22) 한용운, 사종엽, 김영수, 1998, "꼬리와류의 초기유동구조," *한국항공우주학회지*, 제26권, 제2호, pp.10~18.
- (23) 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.
- (24) Favier, D., Nsi Mba, M., Barbi, C. and Maresca, C., 1987, "A Free Wake Analysis for Hovering Rotors and Advancing Propellers," *Vertica*, Vol.11, No.3, pp.493~511.
- (25) Phillips, W. R. C., and Graham, J. A. H., 1984, "Reynolds-stress measurements in a turbulent trailing vortex," *JFM*, Vol.147, pp.353~371.