

스팬방향 슬롯을 가지는 회전익 끝와류의 특성

정운진* · 한용운**

(2000년 2월 18일 접수)

Characteristics of Rotor Blade Tip Vortices with Spanwise Slots

Woon Jin Chung and Yong Oun Han

Key Words: Tip Vortex(끝와류), Wake Age(후류시기), Laser Doppler Velocimetry(레이저 도플러 속도계), Phase Average(위상평균), Vortex Core(와류핵), Turbulence Kinetic Energy Budgets(TKE Budgets, 난류 운동에너지 분배)

Abstract

The evolutionary structure of tip vortices has been investigated with a two-dimensional LDV system for a plain and a slotted blade, respectively. To analyze the effect of slots which bypasses a part of main stream into the tip face, velocity profiles, vortex sizes, their displacements and turbulence intensities during one revolution of the rotor were measured by the phase averaging process. For the comparison of circumferential velocity components of the plain blade and the slotted blade, the peak values of the slotted blade were lower than those of the plain blade, and axial velocity components of the slotted blade were considerably larger than those of the plain blade. The slotted rotor blade enlarged the core size and made the vortex delayed compared with those of the plain blade at the same wake ages. Turbulence profiles had peaks inside the core radii and decayed gradually in the radial direction of vortex coordinate. Also, using a quasi 3-D LDV measurement technique the budget of turbulence kinetic energy was analyzed in radial direction of the vortex core.

기호설명

A : 후류 축소비
 c : 블레이드의 시위, m
 k_1, k_2 : 축방향 이동계수
 λ : 반경방향 축소계수
 N : 블레이드 수
 r_c : 끝와류 핵반경, m
 r_0 : 초기 와류 핵 반경, m
 R : 로터 반경, m
 U_t, V_t, W_t : 각 방향 속도 성분, m/s

u_t, v_t, w_t : 각 방향 난류 성분, m/s
 V_{tip} : 블레이드 끝의 접선속도, 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
 X_r, Y_r, Z_r : 로터 좌표계, m
 x_t, y_t, z_t : 끝와류 좌표계, m
 α : 측정체적부를 통과하는 산란입자가 주축(x)과 이루는 각, $degree$
 β : 광축의 분할각, $degree$
 $\delta U_t, \delta V_t, \delta W_t$: 각 방향 속도 성분의 불확실성, m/s
 δ : 와점성(eddy viscosity)계수
 ζ : 후류시기, $degree$

* 영남대학교 대학원 기계공학부

** 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : yohan@yu.ac.kr

TEL : (053)810-2454 FAX : (053)813-3703

1. 서 론

회전익기의 끝와류(*tip vortex*)는 큰 나선 모양을 그리며 진행되고 기체의 선회 또는 하강시에는 상당기간 기체와 로터 주위에 머물러 공기역학적 하중을 증가시키며 블레이드-와류 상호작용(*Blade Vortex Interaction*) 문제 및 기체와의 상호작용으로 극심한 소음과 로터 진동, 기체 진동을 야기하여 로터 성능과 기체에 매우 불리한 요소로 작용한다. 이러한 끝와류는 일반적으로 유동 속도, 날개 받음각, 날개 끝형상 등의 유동인자에 예민하며 후류시기 및 핵반경에 따라 초기 생성 단계를 거쳐 천이·확산·소멸되어진다. 따라서, 끝와류의 형성과 전개구조를 이해하고 하류에서의 소멸과정을 진전시켜 공학적으로 유익한 방법으로 변형시킬 필요가 있다.

회전익 끝와류에 대한 연구의 초창기에는 열선 유속계를 이용하여 Cook,⁽¹⁾ Tung et al⁽²⁾ 등에 의해 이루어 졌으며 Tung은 와류의 구조를 층류내부영역(*laminar in ner region*), 난류대수영역(*turbulent logarithmic region*), 천이영역(*transition region*), 그리고 비회전외부영역(*irrotational outer region*)의 4개 영역으로 구분하였다. Landgrebe⁽³⁾는 와류궤적을 가시화하여 와류의 이동 방정식을 정립하였다. 최근에는 LDV장치의 개발과 더불어 Leishman et al.,⁽⁴⁾ 김영수와 한용운⁽⁵⁾ 등에 의해 로터 후류의 가시화와 유동 특성의 측정 및 끝와류에 대한 정량적인 연구가 이루어지고 있으며 회전익 끝와류의 영향을 Kim and Komerath⁽⁶⁾ 등이 가시화를 이용하여 측정하였다.

끝와류 형상을 변형시키기 위한 연구로 끝단을 변형시키거나 Muller and Staufenbiel⁽⁷⁾과 같이 회전익에 윙렛(*winglet*)을 설치하는 방법들이 적용되었으며, 이봉준과 유상신⁽⁸⁾은 흡입/분출 등의 경계층 유동 제어 방식을 적용하였다. 그러나, 이러한 방법들은 날개끝 형상 변형에 따른 형상항력을 증가시키거나 경계층 제어를 위한 추가 동력을 필요로 하기 때문에 저항감소와 와류세기 감소의 득실을 감안한 형상 최적화를 고려해야 하며 특히, 회전익에서는 날개의 형상변형에 따른 원심력의 증가로 회전익의 피로를 고려해야 한다.

최근에 배황과 한용운⁽⁹⁾은 고정익의 끝단에 슬롯을 설치하여 와류강도의 완화에 대한 이점을 제시한 바 있으며 본 연구에서는 이를 회전익에

적용하여 부가적인 동력을 필요로 하지 않으며 외부의 형상 변형없이 회전익의 끝단에 슬롯을 설치하여 블레이드 전방의 주 유동 일부를 슬롯을 통해 블레이드 측면으로 보냄으로써 끝와류에 대한 영향을 속도 분포, 와류의 점성 핵 크기, 핵의 이동 등의 정량적 해석과 난류 특성에 대한 정성적인 평가를 통해 슬롯을 이용한 회전익의 끝와류 제어에 관한 기초 자료를 얻고자 하였다.

2. 실 험

2.1 실험장치의 구성

본 실험은 슬롯의 유무에 따른 끝와류의 구조와 그 궤적의 변형을 비교하기 위해 NACA 23012의 길이 0.38m, 시위가 0.09m, 종횡비가 4.2인 비틀어지지 않은 켈렉티브 피치각 12°의 단일 블레이드를 사용하여 5마력의 수냉식 삼상 가변 주파수 제어모터(*PS-5032H*)에 의해 구동하는 로터시스템을 구성하였다. 이때, 로터 중심은 지상에서 1.5m의 높이에 위치하도록 슬립형의 철재 구조물을 제작하여 수평으로 후류가 전개되도록 하였고 로터 블레이드는 발사(*balsa*)를 가공하여 웨브와 표면작업을 한 후에 플라스틱 코팅으로 처리하여 제작하였다. 또한 모터축을 확장하여 알루미늄 블록으로 가공된 허브를 연결시켰으며 허브와 블레이드는 일정한 피치를 유지하도록 연결부위를 밀링가공한 후에 볼트로 체결하였다. 로터 회전수는 1800rpm(30.5 Hz)을 유지하여 날개 끝 마하수 0.21, 레이놀즈수 4.28×10^5 가 되도록 하였다. 또한 지면 효과를 줄이기 위해 주유동이 지면과 평행방향이 되도록 유지하였고 시소형태(*teetering type*)의 허브(*hub*)와 반대쪽에는 유동을 방해하지 않도록 최소의 체적을 가지는 추를 달아 동적균형을 유지하였다.

속도장 측정을 위하여 4W 아르곤-이온형의 후방산란형(*back scatter mode*) 2차원 LDV 시스템(*DANTEC*)을 사용하였다. 측정구간에서는 파장의 길이가 각각 514.5nm, 488.0nm의 2색(*blue, green*)의 빔으로 측정된 도플러 신호를 Burst Spectrum Analyzer(*BSA, model 57N20, 57N35*)를 이용하여 신호처리하였다.

부유물질(*seeder*)을 발생시키기 위하여 6 jet

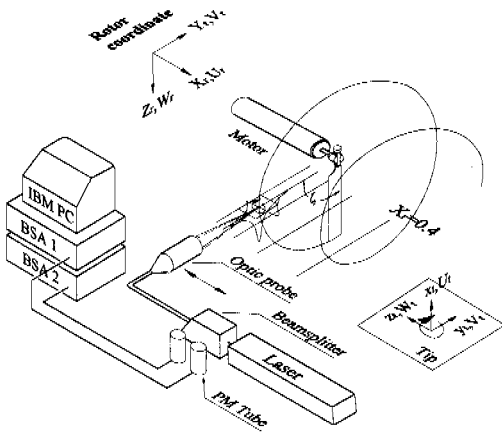


Fig. 1 Experiment layout of LDV system and measurement plane

atomizer(TSI)를 이용하였으며 0.913의 비중을 갖는 올리브 오일을 평균입자 크기 $0.6\mu\text{m}$ 로 미립화시켜 측정구간 안으로 자연스럽게 분무되도록 하였다. 프루브(probe)의 이송은 PC에 의해 작동하고 분해능이 최소 $12.5\mu\text{m}$ 까지 정밀 이송이 가능한 3차원 이송장치를 사용하였다.

측정은 끝와류의 초기 구조를 파악하기 위해 1회전내인 끝단궤적(Tip Path Plane)을 기준으로 $X/R=0.02, 0.05, 0.11, 0.16, 0.22, 0.30$ 의 5구간에 걸쳐 와류핵(vortex core) 반경방향으로 $1\sim 20\text{mm}$ 의 비균일 간격으로 측정하였고 로터 회전속도와 후류시기(ζ)⁽¹¹⁾를 결정하는 블레이드 방위각에 대한 정보는 로터 축과 타이밍 벨트로 연결되어진 1회전 당 3600빈(bins)의 높은 분해능으로 0.1° 까지 위상평균이 가능한 엔코더(encoder)를 사용하여 얻었다.

실험장치의 구성은 Fig. 1에 도시하였으며 실험 결과에 대해 후류시기는 회전중인 블레이드 코드 1/4지점음 기준점 0° 로 설정하였고 해석의 편의를 위해 로터 기준 좌표계와 끝와류 좌표계로 분리하여 적용하였다. 그리고, 끝와류의 형상을 변형시키고 강도를 약화시키기 위한 슬롯블레이드는 내경 5mm 의 4개의 플라스틱 튜브열을 이용하여 블레이드 끝 중심면에 $5.6\text{cm}(0.5c)$ 이내에서 슬롯을 Fig. 2와 같이 1/4 원주곡면 형태로 설치하여 블레이드 전방 주유동의 일부를 측면으로 불어내도록 설계하였다.

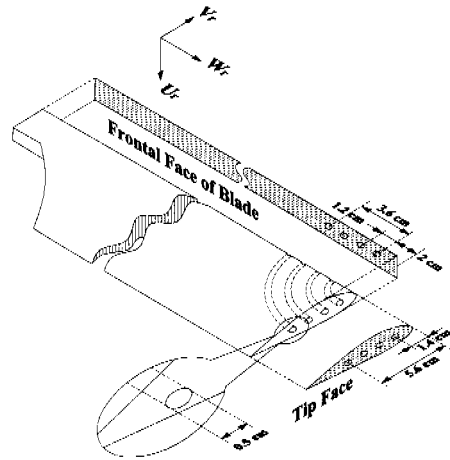


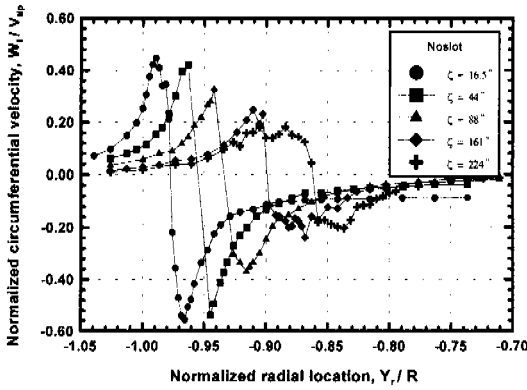
Fig. 2 The geometry of slotted blade

2.2 준3차원 실험기법

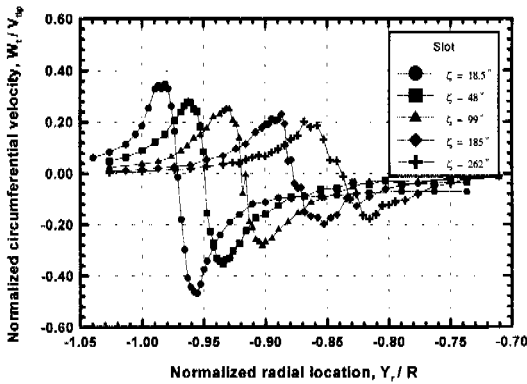
배황과 한용운⁽¹⁰⁾에 의하여 제안된 준 3차원 기법을 본 실험에서도 적용하였으며 여기에 대한 신뢰성은 불확실성(uncertainty)에 대한 오차의 검증으로 확인해 볼 수 있다. 측정 체적부를 지나 는 산란입자의 속도(V_1, V_2)는 도플러 주파수와 간섭부리 사이의 간격의 곱에 비례하며, 이것의 오차 또한 두 변수의 오차의 곱에 비례한다. 특히, 도플러 주파수의 오차는 내부발전기(clock generator)의 불확실성(uncertainty)과 직접적인 관계가 있으며, 본 실험에 사용된 LDV장치(DANTEC)의 경우에는 대부분의 실험조건에서 $\delta(V_1, V_2, V_{green}) = \pm 0.001\text{m/s}$, $\delta\beta = \pm 0.5^\circ$ 이다. 결국, $\delta(V_1, V_2)$ 는 $\delta(V_{Blue})$ 의 특성에 종속된다. 따라서, 주어진 속도 영역에서의 각 방향 속도성분의 우연오차를 계산한 결과, $\delta U_i = 0.1\%$, $\delta V_i = 0.27\%$, $\delta W_i = 0.073\%$ 이다.

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 동일 측정 영역에서 2차원 및 준 3차원 측정된 각 지점에서의 상대적 오차로 평가가 가능하게 되는데, 슬롯이 장착된 경우의 후류시기 44° 에 대하여 결과들은 평균값에 대해 2%, 난류성분에 대해 5%의 상대적 오차폭을 가진다.

2차원 LDV장치에 적용된 준 3차원 기법에서 발생할 수 있는 오차들에 대한 분류와 총괄, 그



(a)



(b)

Fig. 3 Profiles of circumferential velocity components of the tip vortex for (a)the plain and (b)the slotted blade

리고 상대적 비교를 통해, 주어진 조건하에서 수행된 본 실험은 각 성분의 평균속도값과 난류성분값들은 비교적 안정된 오차범위에 있으며 정량적으로는 미흡하나, 정성적인 특성을 관찰하기에는 준 3차원 측정 기법도 충분하다고 평가할 수 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 회전방향 속도성분

슬롯의 유무에 따른 로터 1회전 내에서의 위상 평균된 회전 속도성분을 측정하여 Fig. 3에 나타내었으며 순수 와류 형상을 파악하기 위해 회전방향 속도성분에서 합성된 유도 속도를 제하여 그 잔여 성분을 도시하였다.

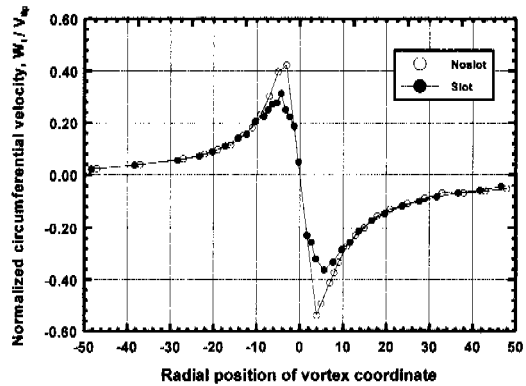


Fig. 4 Comparison of circumferential velocity components at the same wake age 44°

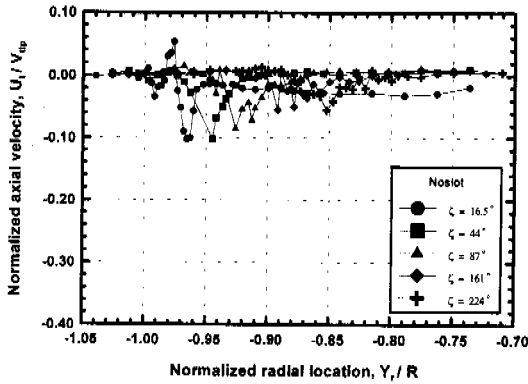
두 경우 모두 20°이내에서 성장하여 후류시기가 진행됨에 따라 초기에는 끝와류에 대하여 블레이드 회전면 내부(*slipstream* 영역)의 최대값이 외부의 최대값보다 크게 나타나며 점차 대칭을 이루며 지수적인 감소를 보인다. 끝단케이블 기준으로 한 5구간에서 측정된 회전 속도성분은 단순블레이드와 슬롯블레이드에 대해 각각 다른 후류시기를 보이고 있으며 하류로 갈수록 두 블레이드의 후류시기의 차가 점점 더 커지고 있다.

보다 정확한 비교를 위해 끝와류의 이동속도를 후류시기와 해당 Xr 좌표를 통해 추적하여 슬롯의 유무에 따른 동일 후류시기를 찾아 후류시기 44°에서의 회전 속도성분을 측정하여 Fig. 4에 도시하였으며 슬롯블레이드가 단순블레이드보다 최대값에서 약 30%정도 약화되어 나타난다. 즉 블레이드 끝면에서 말림현상(*roll-up*)을 통해 형성되는 끝와류가 슬롯을 통해 로터 끝단에서 분출되는 유동에 의해 영향을 받아 완화되었다고 여겨진다.

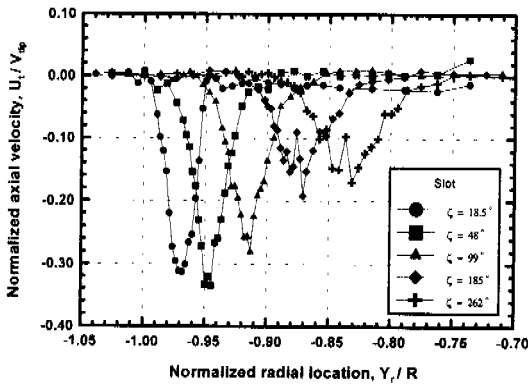
3.2 축방향 속도성분

축방향 속도성분도 회전 속도성분에서와 같이 순수값을 얻기 위해 큰 신뢰력의 영향력을 배제시킨 위상평균값을 사용하였다. 회전익에서의 축방향 속도성분은 유체의 점착 조건을 따르며 블레이드 표면에서는 블레이드 회전속도와 동일한 속도를 가진다.

축방향 속도성분은 Fig. 5에서와 같이 두 경우 모두 와류 중심에서 최대값을 가지며 후류시기가 증가함에 따라 분포 영역이 넓어지면서 감소함은



(a)



(b)

Fig. 5 Axial velocity components of the tip vortex for (a)the plain and (b)the slotted blade

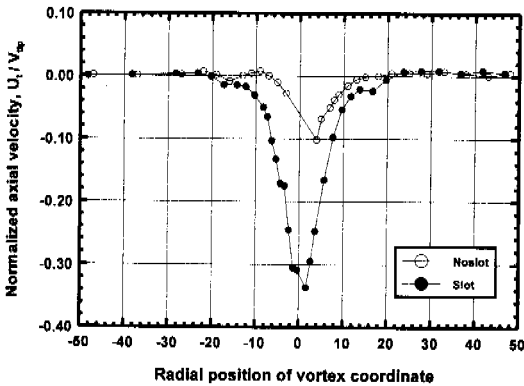


Fig. 6 Comparison of axial velocity components at the same wake age 44°

보이고 전반적으로 슬롯블레이드가 단순블레이드

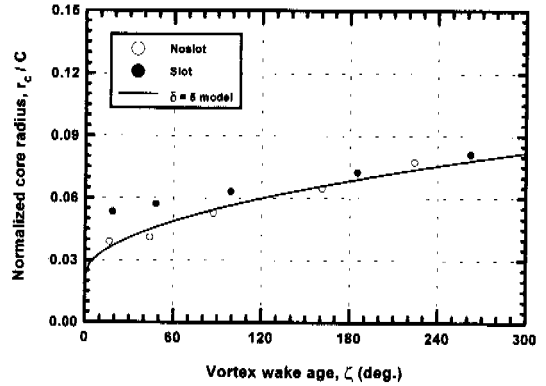


Fig. 7 Estimated vortex core growth versus wake age

보다 상당히 큰 값을 보인다. 특이할 만한 것은 단순블레이드의 초기 생성, 성장 단계에서는 고정익에서처럼 축방향 속도성분의 가속 구간이 있음을 알 수 있다.

동일한 후류시기인 44°에서의 축방향 속도성분의 비교를 나타내는 Fig. 6에서는 슬롯블레이드의 최대값이 단순블레이드의 최대값에 비해 약 3배 이상 크게 나타나는 변화가 있는데 이것도 슬롯을 통한 로터 끝단에서 분출되는 측면 유동의 영향으로 결국 끝와류 중심의 이동 속도를 단순블레이드에 비해 지연시키는 결과를 유도한다.

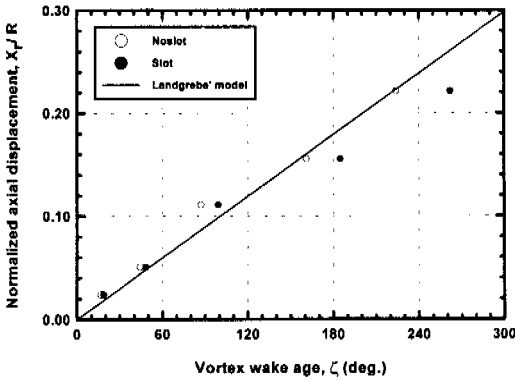
3.4 와류 핵의 성장 및 이동

와류 핵 중심으로부터 회전 속도성분이 최대가 되는 지점까지의 거리를 핵 반경(r_c)으로 한 슬롯의 유무에 따른 와류 핵 반경의 성장은 Fig. 7에 도시한 바와 같으며 선행 연구⁽⁴⁾에서 실험적으로 얻어진 다음 식을 따른다.

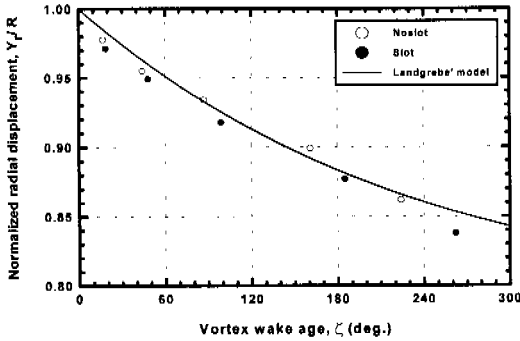
$$r_c(\zeta, \delta) = r_0 + 0.00855\sqrt{\delta \frac{\zeta}{\Omega}} \quad (1)$$

여기서 r_0 는 초기 와류 핵 크기이며 얻어진 결과들을 위 식에 적용한 결과 높은 종횡비에서 실험한 김영수와 한용운⁽⁵⁾의 $\delta=10$ 결과와는 달리 낮은 종횡비의 단순블레이드는 $r_0=0.022$, $\delta=5$ 의 값을 만족하며 슬롯블레이드의 경우, 단순블레이드보다 초기에 큰 와류 핵이 생성되어 이후 완만하게 성장함을 보이고 있다.

와류 핵 중심의 이동을 축방향과 반경방향으로 Fig. 8에 도시하였으며 두 경우 모두 핵 중심의 이동이 축방향으로는 선형적으로, 반경방향으로



(a)



(b)

Fig. 8 (a)Axial and (b)Radial displacements of tip vortex core for the plain and the slotted blade

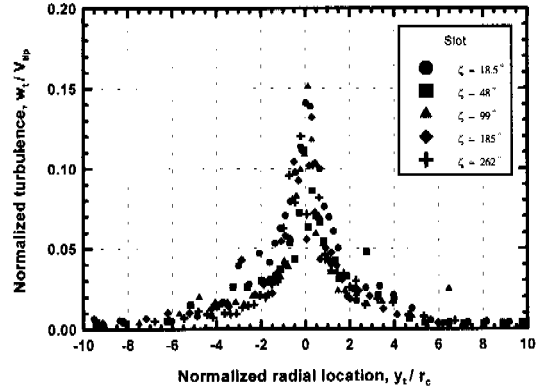
는 비선형적인 이동을 보인다. 이 중에서 단순블레이드를 기준으로 아래식과 같은 Landgrebe⁽³⁾ 모델에 적용했을 때 식 (2), (3)을 이용하여 $A=0.78$, $k_1=0.057$, $\lambda=0.24$ 의 결과들을 얻었으며 그림과 같이 두 경우 모두 근접함을 보였다.

$$\frac{Y_v}{R} = A + (1 - A)e^{-\lambda\zeta} \quad (2)$$

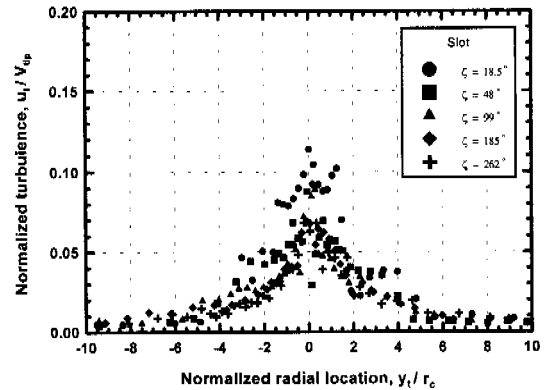
$$\frac{X_v}{R} = k_1\zeta \quad 0 \leq \zeta \leq \frac{2\pi}{N} \quad (3)$$

$$= \left(\frac{X_v}{R}\right)_{\zeta=\frac{2\pi}{N}} + k_2\left(\frac{\zeta-2\pi}{N}\right) \quad \zeta > \frac{2\pi}{N}$$

앞에서 언급한 바와 같이 축방향 속도성분에서 큰 차이를 보임으로써 주도적인 영향이 되어 슬롯블레이드의 와류 핵 중심이 단순블레이드에 비해 느리게 이동한다.



(a)



(b)

Fig. 9 (a)swirl and (b)axial components of turbulence in the tip vortex of the slotted blade

3.5 난류특성 및 난류에너지 분배

회전익의 끝와류는 초기 생성단계에서 높은 회전 속도를 가지고 있기 때문에 LDV를 이용한 측정에서는 핵 중심으로 부유물질의 삼입이 적절해야 하며, 재순환 효과와 하류로 갈수록 커지는 와류 중심의 불규칙적인 운동을 배제하기 위하여 초기 1회전 내에서의 측정이 유리하며 난류 특성을 제시할 수 있는 유효 샘플을 얻기 위하여 장시간의 실험을 필요로 한다. Fig. 9는 슬롯블레이드에 대한 두 성분의 난류강도 변화로서 대체적으로 와류 핵 반경 내부에서 난류는 매우 활동적이며 초기 생성단계에서 보이는 두 개의 극대값이 나타나지 않고 하나의 극대값이 나타나며 난류강도의 쇠퇴율이 작음을 볼 수 있다.

배황과 한용운⁽¹⁰⁾의 연구에 의하면 제한적 조건

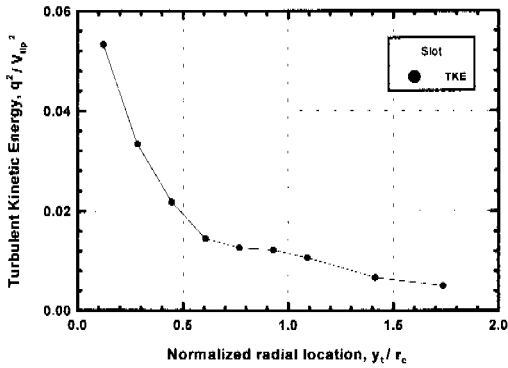


Fig. 10 Turbulence kinetic energy profiles for the slotted blade at wake age 44°

에서 직접 측정이 가능하고 비교적 영향이 큰 속도의 3차 상관항만으로 확산항을 평가하기 위해 간략화시키고 크기 비교 기법(*order of magnitude*)을 사용하여 난류 운동에너지 방정식(*Turbulence Kinetic Energy, TKE*)을 정리하면 식 (4)와 같이 간략화시킬 수 있다.

$$0 = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial r} \overline{wq^2} + \frac{\overline{wq^2}}{r} \right) - \left(\overline{uw} \frac{\partial V_z}{\partial r} + \overline{vw} \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \overline{vw} \frac{V_\theta}{r} - 2 \overline{v^2} \frac{V_\theta}{r} \right) - \epsilon \quad (4)$$

여기서 $\overline{q^2}$ 는 다음 식 (5)로 정의되는 난류 운동에너지이다.

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

슬롯블레이드에 대해 준3차원 기법으로 측정된 난류성분을 이용하여 난류 운동에너지를 Fig. 10에 나타내었다. 끝와류의 핵반경의 안쪽에서 난류 운동에너지는 활발하며 와류핵 외부에서는 그 성분이 약화되거나 거의 나타나지 않고 있다. 이것은 각 성분에 대한 난류강도와 유사하며 난류 운동에너지가 난류 운동에너지 방정식에서와 같이 핵 반경내에서 생성, 확산, 소산하면서 그 균형을 유지하고 있음을 나타내고 있다.

Fig. 11은 확산항의 압력/속도 상관항과 점성항을 무시한 조건에서 직접 측정된 생성항과 확산항의 속도 3차상관항을 평형식 (3)에 대입하여 미지수인 소산항에 대하여 정리하고 간접계산을 통해 소산항을 평가하여 끝와류의 난류 운동에너

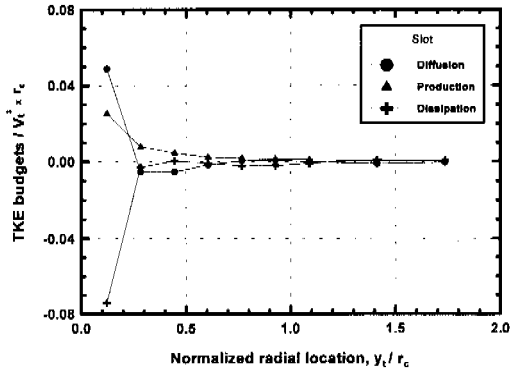


Fig. 11 TKE budget along the radial direction

지의 반경방향분배를 나타낸 것이다. 끝와류의 난류 운동에너지 분배는 주로 와류 핵의 안쪽 영역에서 형성되며 고정익을 통한 배황⁽¹⁰⁾ 등의 실험결과와 비교하면 생성항에 비해 확산항이 큼을 볼 수 있는데 이는 후류시기 44°가 고정익의 2c보다 더 먼 하류에 위치하여 와류의 확산이 상당히 진행된 상태이며 이는 바로 소산항의 증가를 유발하게 된다. 즉, 끝와류의 점선방향의 속도성분이 와류핵의 경계부근에서 급격하게 변하며, 슬롯을 통한 반경방향의 속도성분의 증가와 그에 따른 반경방향의 난류성분의 증가로 vw 성분의 레이놀즈 응력항이 와류의 안쪽영역에서 활발하게 활동함으로써 확산항이 주도적인 역할을 하며 난류에너지의 분배가 이루어지고 있다고 판단된다.

4. 결론

2차원 LDV를 이용하여 NACA 23012의 단면을 가지는 단일 회전 블레이드에 대해 와류 강도를 약화시키고 슬롯 장치의 이점을 제시하고자 슬롯의 유무에 따른 끝와류의 영향과 변형을 로터 1회전내에서 측정하고 자료를 분석, 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 슬롯의 유무에 따른 끝와류의 속도분포에서 회전방향 속도성분은 일부 유동이 슬롯을 통해 측면으로 불어 나오는 슬롯의 효과에 의해 슬롯 블레이드가 최대값에서 약 30% 감소를 보이고 있다.

(2) 축방향 속도성분은 슬롯블레이드의 경우 정규 분포 형태의 대칭성이 더 뚜렷하며 단순블레이드에 비해 상대적으로 약 3배 이상 크게 측정

되었으며 이를 통해 와류 핵 중심이 단순블레이드에서 생성된 와류보다 느린 이동을 한다.

(3) 단순블레이드에서의 와류 핵은 $\delta=5$ 에 근접하여 성장하지만 슬롯블레이드의 경우는 초기에 보다 크게 생성되어 완만한 성장을 보인다. 와류 중심의 이동은 슬롯의 유무에 크게 영향을 받지 않으며 Landgrebe가 제시한 바와 같이 로터 축방향으로는 선형적으로, 반경방향으로는 비선형적으로 이동하고 슬롯블레이드의 경우는 축방향 속도성분이 크게 나타남으로써 그 이동속도가 단순블레이드에 비해 느리다.

(4) 회전익의 유동장에서 두 경우 모두 난류강도는 와류 핵의 중심에서 활발하며 전반적으로 난류성분의 쇠퇴율이 작게 나타났다. 난류 운동에너지는 핵반경 안쪽에서 활발하며 평균속도의 변화율과 레이놀즈 응력항이 난류 생성의 주도적인 역할을 하면서 생성, 확산, 소산의 에너지 평형을 이루고 있다.

참고문헌

- (1) Cook, C. V., 1972, "The Structure of the Rotor Blade Tip Vortex," Paper 3, *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) Landgrebe, A. J., 1972, "The Wake Geometry of a Hovering Helicopter Rotor and Its Influence on Rotor Performance," *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 17, No. 4, pp. 2~15.
- (4) Leishman J. G., Bagai, A., and Coyne A. J., 1996, "Measurement of Rotor Tip Vortices Using Three-Component Laser Doppler Velocity," *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 41, No. 4, pp. 342~353.
- (5) 김영수, 한용운, 1999, "회전익 끝와류의 초기 난류 구조에 관한 실험적 연구," 대한기계학회논문집 B권, 제23권 제5호, pp. 661~669.
- (6) Kim, J. M., Komerath, N. M., 1995, "Summary of the Interaction of a Rotor Wake with a Circular Cylinder," *AIAA Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 470~478.
- (7) Muller, R. H. G. and Staufienbiel, R., 1987, "The Influence of Winglets on Rotor Aerodynamics," *Vertica*, Vol. 11, No. 4, pp. 601~618.
- (8) 이봉준, 유상신, 1981, "날개 끝에서의 흡입 또는 취출이 날개의 양·항특성에 미치는 영향," 한국항공우주학회지, 제9권, 제1호, pp. 13~19.
- (9) 배황, 한용운, 1999, "슬롯 효과에 의한 고정익 끝와류의 변형 특성," 한국항공우주학회지, 제27권, 제5호, pp. 1~7
- (10) 배황, 한용운, 1999, "고정익 끝와류의 난류 운동에너지 분배 특성," 대한기계학회논문집, B권, 제23권, pp. 1444~1452.
- (11) Leishman J. G., Han, Y. O., 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.