

LEX를 갖는 삼각날개의 와류동 가시화

손명환[†] · 장조원^{*}

Visualization of Vortex Flow over a Delta Wing with LEX

Myong Hwan Sohn[†] and Jo Won Chang^{*}

Abstract. The development and interaction of vortices over a delta wing with leading edge extension (LEX) was investigated through off-surface flow visualization using micro water droplets and a laser beam sheet. Angles of attack of 20° and 24° were tested at sideslip angles of 0°, -5°, and -10°. The flow Reynolds number based on the main-wing root chord was 1.82×10^5 . The wing vortex and the LEX vortex coiled around each other while maintaining comparable strength and identity at a zero sideslip. The increase of angle of attack intensified the coiling and shifted the cores of the wing and LEX vortices inboard and upward. By sideslip, the coiling, the merging and the diffusion of the wing and LEX vortices were increased on the windward side, whereas they were delayed significantly on the leeward side. The present study confirmed that the sideslip angle had a profound effect on the vortex structure and interaction of a delta wing with LEX, which characterized the vortex-induced aerodynamic load.

Key Words : Visualization(가시화), Delta wing(삼각 날개), Vortex flow(와류동), LEX(연장된 앞전), Micro water droplet(미세수적)

1. 서 론

스트레이크(strake)와 연장된 앞전(LEX; leading edge extension)을 가진 삼각날개는 높은 받음각에서 공력성능을 향상시키는 것으로 알려졌다. 이러한 공력성능 향상은 스트레이크 또는 연장된 앞전에서 발생한 와류가 삼각날개의 하류(downstream)에 발생한 와류와 상호작용하여, 양력발생을 증가시키며 와류의 붕괴를 억제함으로써 유발된다. 그러나 옆미끄럼각이 영이 아닐 경우 와류의 간섭 현상은 더욱 복잡해지고 항상 더 향상된 공력성능을 나타내는 것은 아니다.

삼각날개에서 옆미끄럼각은 와류의 비대칭적인 붕괴와 동적 불안정성을 유발하는 것으로 알려져 있다. 옆미끄럼각이 있을 때 효과적인 후퇴각과 스트레이크와 날개 와류의 상호작용 상태는 바람쪽(windward side)과 바람 반대쪽(leewardside)이 상당히 다르게 된

다. 스트레이크와 삼각날개 와류는 바람쪽에서 더 낮은 받음각에서 붕괴된다.

스트레이크나 연장된 앞전(LEX)을 가진 삼각날개의 와류동에 관한 많은 연구가 진행 되어 왔다. Grismer와 Nelson⁽¹⁾은 받음각 40°까지 스트레이크 및 날개 후퇴각이 80°/60°인 이중 삼각날개에서 요우각이 있을 때 공력특성을 조사하였다. 옆미끄럼각의 효과와 동적 피칭율은 날개주위 유동가시화 및 힘과 모멘트 측정을 통하여 조사되었다. 그들은 이중 삼각모델은 낮은 받음각에서 정적 롤(static roll) 안정성을 나타냈으나, 높은 받음각에서는 실험한 모든 옆미끄럼각(0°, -3°, -6°)에서 상당한 음(-)의 롤링 모멘트가 발생된다고 하였다. Hebbbar 등⁽²⁾은 수동(water tunnel) 흐름 가시화를 통하여 이중 삼각날개의 옆미끄럼에서의 와류 붕괴 특성이 날개연결부의 적절한 변형에 의해 어떠한 영향을 받았는지 조사하였다. 그들은 일정한 받음각에서 옆미끄럼각이 증가 할수록 바람쪽 스트레이크 와류의 궤적의 붕괴점이 상류쪽으로 움직이면서 날개 안쪽으로 이동한다고 하였다. 또

[†]공군사관학교 항공우주공학과
E-mail : myongsohn@hanmail.net
^{*}한국항공대학교 항공운항학과

한, 바람반대쪽은 스트레이크 와류의 궤적은 봉괴점이 하류로 움직이면서 날개 외측으로 이동된다고 하였다. Verhaagen⁽³⁾은 스트레이크와 날개의 후퇴각이 76°/40°인 이중 삼각날개의 와류동에서의 레이놀즈수의 영향에 대하여 조사 하였다. 그는 레이놀즈수는 스트레이크 부분에 대한 와류동에 대해 거의 영향을 주지 않지만, 스트레이크와 날개와류사이의 간섭이 있는 날개주위에서 특히 레이놀즈수가 10⁵이하일 때 강한 영향을 준다고 보고하였다.

Ericsson⁽⁴⁾은 피칭운동하는 이중 삼각 날개와 이와 관련된 와류동의 롤링 모멘트 특성에 대해 분석하였다. 그는 높은 받음각일 때 가로방향의 공기역학은 스트레이크 및 날개와류들의 간섭과 관련된 와류 봉괴에 의해 지배된다고 하였다. 옆미끄럼각이 있을 때 삼각날개 형상의 피칭 및 롤링 모멘트 불안정성을 유발하는 날개표면의 흡입압력(suction pressure) 분포는 시위(chord) 및 스패 양방향으로 아주 크게 바뀐다. 스트레이크가 있는 삼각날개의 옆미끄럼에서의 복잡한 와류동은 와류에 의한 양력을 최대한 활용하기 위해 더 많은 연구가 필요하다.

본 연구는 미세수적(micro water droplets)과 레이저 빔 시트(laser beam sheet)을 이용한 가시화 기법을 통하여 옆미끄럼각이 있을 때 연장된 앞전(LEX)를 가진 삼각날개의 와류(vortical flow)를 조사하는 것이다. 주 날개의 뿌리시위 길이(wing root chord: c)를 기준으로 레이놀즈수는 1.82×10^5 이며, 옆미끄럼각이 0°, -5°, -10°일 때 받음각은 20°, 24°에서 실험을 수행하였다. 이때 받음각은 Grismer와 Nelson⁽¹⁾의 이중 삼각날개 모델에 관한 연구결과를 참조하여 선정하였다. 특히 본 연구에서는 연장된 앞전(LEX)을 갖는 삼각날개의 와류 구조와 간섭이 하류위치와 옆미끄럼각에 따라 어떻게 전개되는지 이를 규명하는데 중점을 두었다.

2. 실험 장치 및 방법

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 연장된 앞전(LEX; Leading-Edge Extension)을 갖는 삼각날개 모델을 나타낸 것이다. 삼각날개 모델은 아랫면에서 25°만큼 사선으로 잘린 날카로운 앞전을 갖고, 후퇴각이 65°이며, 삼각날개 앞전 및 뒷전 역시 동일한 25°의 경사각(bevel angle)을 갖고 있다. 본 연구에서 사용한 시험모델은 베이클라이트(bakelite)로 만들어진 평판

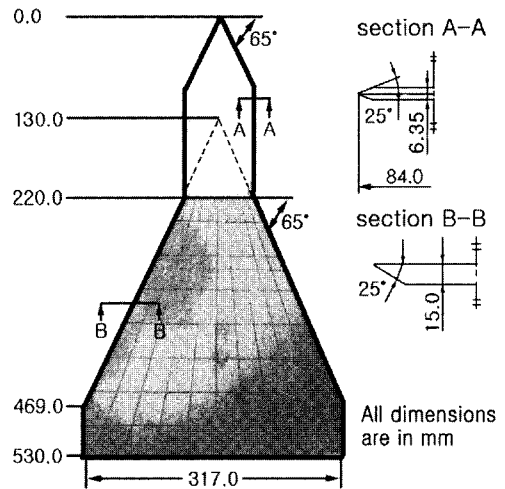


Fig. 1. Delta wing model with LEX.

날개로 뿌리시위는 LEX를 포함해 530 mm이고, 날개의 스패는 317 mm, 날개 두께는 15 mm이다. 모델의 연장된 앞전(LEX)은 6.35 mm의 두께를 가지는 알루미늄 판이며, 앞과 옆면에서 25°만큼 대칭되게 사선으로 자른 날카로운 면을 갖는다. 모델은 주날개 끝에서 0.62c와 0.82c에 위치한 풍동저울 지지대로 시험부에 장착된다. x는 날개 정점에서부터 측정된 날개 중심선을 따른 축이고, y축은 날개 중심선으로부터 측정된 날개 스패를 따른 축이며, z는 날개 윗면에서부터의 높이이다.

Fig. 2는 아음속 풍동시험부에 장착된 off-surface 유동 가시화 기법의 실험장치를 나타낸 것이다. 미세수적(micro water droplets)은 초음파 가습기에서 5~10 μm의 크기로 생성된다. 미세수적은 모델정점 바로 아래에서 공급되고, 다른 외적인 힘없이 공기와 함

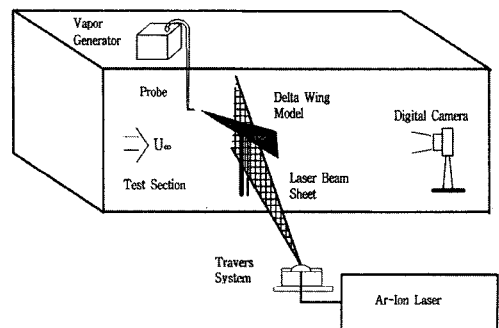


Fig. 2. Off-surface flow visualization experimental set-up.

게 흘러간다. 가시화 입자의 침강거리는 시험모델의 뒷전 위치에서 0.256 mm가 되도록 조절되었다. 광원으로는 출력이 3W의 아르곤 이온 레이저 광을 사용하였으며, 레이저광을 원통형 렌즈와 convex-focusing 렌즈를 이용하여 레이저 빔 시트(laser beam sheet)로 만들었다. 레이저 빔 시트는 날개 윗 표면과 날개 중심선에 수직이 되도록 조절하였다. 조명을 받는 촬영장면들은 초당 30프레임을 찍을 수 있는 고해상도 디지털 카메라(SONY DCR-VX 2000 NTSC)로 촬영되었다. 카메라는 모델의 뒷전에서 후방으로 165.8 cm에 위치해 있으며, 카메라의 촬영선은 z방향의 왜곡을 피하기 위해 날개 윗면과 평행이 되도록 하였다. 미세수적을 이용한 와류의 가시화 기법이 참고문헌⁽⁵⁾에 자세히 기술되어 있다.

본 가시화 연구는 시험부 크기가 0.9 m(높이) × 0.9 m(폭) × 2.1 m(길이)인 공군사관학교 아음속 풍동에서 수행되었으며, 시험부의 난류 강도는 3.6~50.0 m/sec의 속도범위에서 약 0.3%정도이다. 본 가시화 연구의 레이놀즈수(Reynolds number)는 자유흐름 속도인 6.2 m/sec와 주날개의 뿌리시위 c 를 기준으로 1.82×10^5 이고, 주날개의 뿌리시위는 400 mm이다.

3. 결과 및 토론

Fig. 3은 옆미끄럼각 $\beta=0^\circ$ 이고 받음각 $\alpha=24^\circ$ 일 때 날개 좌우측에 발달하는 LEX 와류쌍과 날개 와류쌍이 시위 뒤쪽으로 이동하면서 전개되는 과정을 나타낸 것으로 날개의 양쪽에서의 와류는 대칭성을 지닌다. 여기서 옆미끄럼각(sideslip angle) β 는 삼각날개 중심축을 기준으로 하여 바람방향과 만드는 각이라 정의하며, 날개 중심축에서 시계방향을 +로 정하였다. $x/c=0.30$ 일 때(Fig. 3a) LEX와류가 완전히 발달되고, 날개와류는 앞전근처에서 발달되기 시작하는 초기단계를 나타낸다. 하류로 이동할 때 날개와류는 Hoeymakers 등⁽⁶⁾이 제안한 것과 같이 날개와 날개 앞전과 관련된 전단층을 통하여 유입된 와류강도로 인해 와류 강도가 세어지고, 크기가 증가한다. 그러나 LEX와류의 강도는 Sohn과 Lee⁽⁷⁾가 전체 압력장 측정으로 확인하였듯이 하류로 가면서 감소한다. $x/c=0.38$ 에서 LEX와류는 날개 안쪽으로 이동하였고, 날개와류는 성장하여 그 크기가 증가하였음을 알 수 있다.

$x/c=0.49$ 에서(Fig. 3c) 날개와류가 많이 성장하였으며, LEX와류보다 날개표면에서 약간 더 높은 위치에

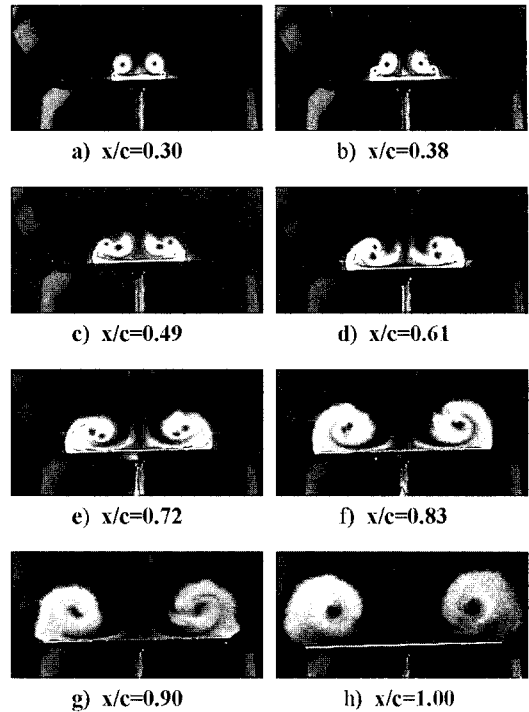


Fig. 3. Chordwise development and interaction of the wing and LEX vortices($\alpha=24^\circ$, $\beta=0^\circ$).

위치한다. 삼각날개 주위의 흐름이 하류로 흘러감에 따라 날개 좌측에서의 LEX와류 및 날개와류의 시계방향으로 돌아가는 흐름과 날개 우측의 반시계 방향으로 돌아가는 흐름이 지속되는 것을 관찰할 수 있다.

$x/c=0.61$ 일 때(Fig. 3d), 삼각날개 와류의 중심은 LEX와류의 중심 바로 위에 위치한다. 따라서 LEX와류와 날개와류는 각각 $x/c=0.38$ 에서 $x/c=0.61$ 까지 흐르는 동안 90° 이상 회전한다. $x/c=0.61$ 인 경우 LEX에서 발생한 와류 및 삼각날개에서 발생한 와류의 크기는 서로 크기를 비교할 수 있을 정도로 삼각날개에서 발생한 와류가 성장한 것을 관찰할 수 있다. Fig. 3의 마지막 사진은 LEX 및 날개와류가 뒷전 위치($x/c=1.0$)에서 붕괴되지 않고 단일 와류로 합쳐졌음을 보여 준다. LEX 및 날개와류는 Fig. 3에서 관찰할 수 있듯이 단일 와류로 되기 전에 비슷한 강도와 구조를 유지하는 것을 관찰할 수 있다. 이와 같은 결과는 Olsen과 Nelson⁽⁸⁾이 $80^\circ/60^\circ$ 의 이중 삼각날개에서 강한 스트레이크 와류와 약한 날개와류를 관찰한 연구 결과와 다르다.

Fig. 4는 받음각 $\alpha=20^\circ$ 일 때 각기 다른 옆미끄럼각($\beta=0^\circ$, -5° , -10°)과 4개의 시위지점($x/c=0.30$, 0.43 ,

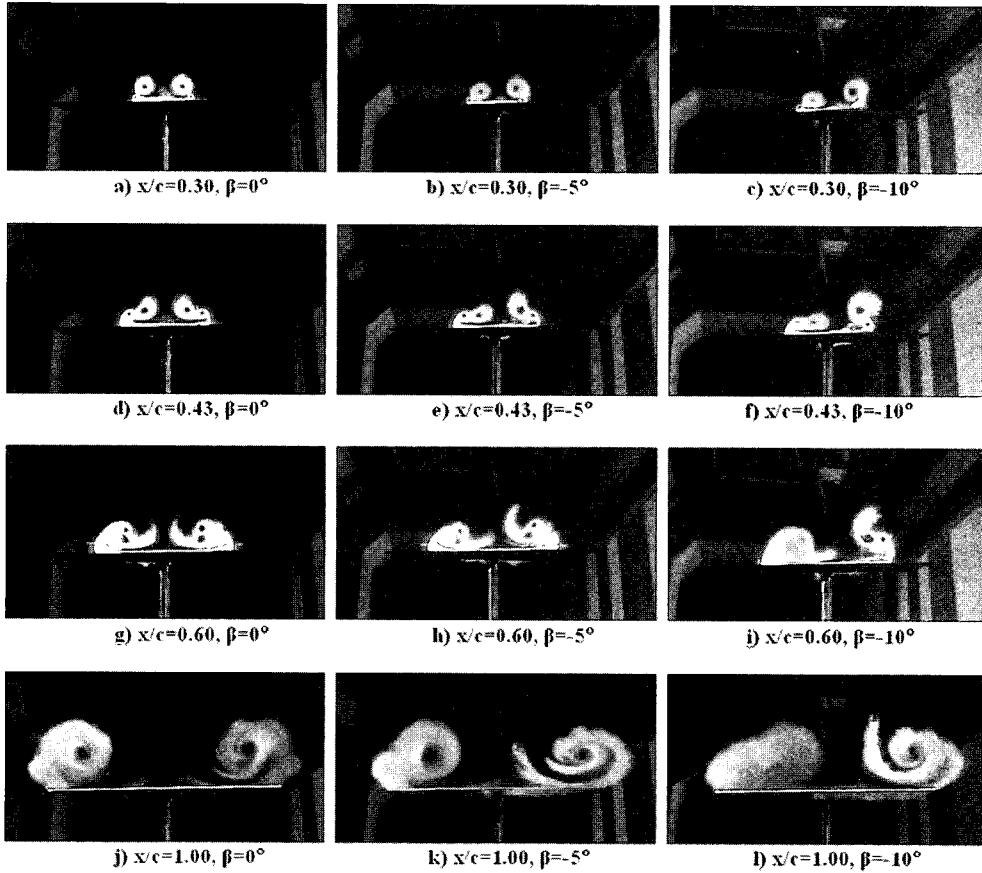


Fig. 4. Effect of sideslip angle on the vortex development and interaction ($\alpha=20^\circ$).

0.60, 1.0)에서의 단면사진을 보여준다. $x/c=0.30$ 일 때 바람쪽 LEX와류의 중심은 날개 안쪽으로 이동하고 날개표면에 가까워진다. 그에 반해 바람 반대쪽 LEX와류의 중심은 옆미끄럼각이 $\beta=0^\circ$ 에서 -10° 로 변화함에 따라 날개 바깥으로 이동하고 날개 표면에서 멀어진다. 바람 반대쪽의 LEX와류의 중심은 $\beta=-10^\circ$ 일 때 상당히 바깥쪽과 윗방향에 위치한다. 이 위치에서 바람 반대쪽의 LEX와류는 날개 윗면의 흡입압력(suction pressure)에 영향을 거의 미치지 못한다.

$x/c=0.43$ 에서 바람쪽 LEX와류 및 날개와류는 날개 표면에서 거의 비슷한 수직 거리에 위치하고 있다. LEX와류의 내측 및 아랫방향으로의 움직임과 LEX와류 및 날개와류의 회전은 바람쪽으로 약간 증가하는 반면에 바람 반대쪽으로는 크게 지체된다. 예를 들어 바람 반대쪽에 있는 LEX와류 및 날개와류의 중심을 연결한 선은 $\beta=0^\circ$ 일 때(Fig. 4d) 날개 표면과 거의 평행하지만, $\beta=-10^\circ$ 에서(Fig. 4f) 약 60° 의 각을 이

룬다. 즉, $\beta=-10^\circ$ 의 옆미끄럼각에 의해 바람 반대쪽으로 LEX 및 날개와류의 반시계방향 회전이 60° 만큼 지체되었다고 볼 수 있다. $x/c=0.60$ 일 때, 바람쪽 날개와류는 옆 미끄럼이 없을 때(Fig. 4g) LEX와류 바로 위에 위치하는데 이것은 참고문헌⁹⁾의 Fig. 4e에서 제시되었듯이 날카로운 흡입압력 최대치를 다시 생성한다.

$\beta=-10^\circ$ 일 때(Fig. 4i) 바람쪽 날개와류 및 LEX와류는 합쳐지고 퍼지는 반면에, 바람 반대쪽 LEX 및 날개와류는 각각의 중심을 가지고 날개 표면에서부터 떨어져 나간다. $x/c=1.0$ 에서 바람쪽 날개 및 LEX와류 쌍은 $\beta=0^\circ$ (Fig. 4j)에서 붕괴됨 없이 하나의 와류로 합쳐지지만, $\beta=-10^\circ$ (Fig. 4l)에서 갑자기 붕괴된다.

Grismer와 Nelson¹¹⁾은 이중 삼각날개 모델이 받음각 $\alpha=-6^\circ$ 에서 20° 까지 양(+)의 롤링 모멘트 계수를 가지고, $\alpha=24^\circ$ 이후 음(-)의 롤링 모멘트 계수 값을 가지며, 이것은 높은 받음각에서의 정적 롤링 불안정성을 나타낸다고 하였다. 본 연구에서는 바람쪽 와류의

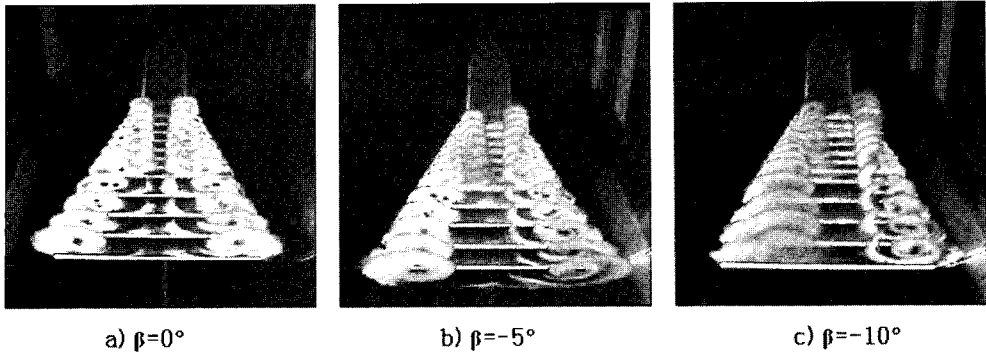


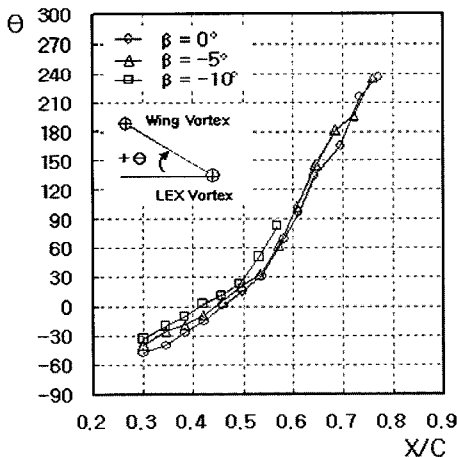
Fig. 5. Stereographic section photographs of the wing leeward flow region ($\alpha=20^\circ$)

내측과 아랫방향으로의 이동, 바람 반대쪽에서의 와류의 외측과 윗 방향으로의 이동, 그리고 Fig. 4에서 관찰된 바람쪽 와류의 이른 확산(earlier diffusion)과 붕괴를 관찰할 수 있었다. 이와 같이 본 연구에서 사용된 LEX를 갖는 삼각날개 역시 참고문헌⁽¹⁾에서 보고되었던 것처럼 정적 롤 불안정성을 가지고 있을 가능성이 있다.

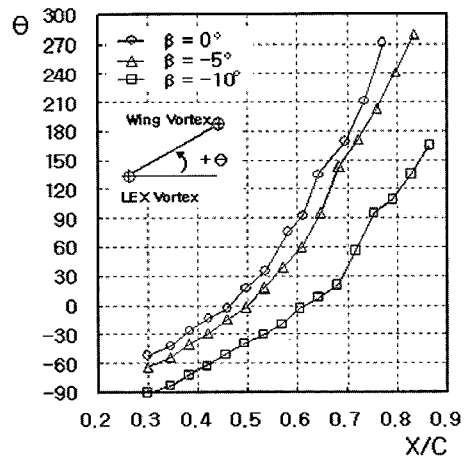
Fig. 5는 받음각 $\alpha=20^\circ$ 일 때 3개의 다른 옆미끄럼각에서($\beta=0^\circ, -5^\circ, -10^\circ$) 다른 여러 시위 단면사진을 겹쳐서 입체적으로 표현한 것이다. 이러한 사진은 날개 뒷전 하류에 위치한 카메라(카메라의 촬영 위치는 날개표면과 평행하지 않음)와 일정한 속도로 조명 위치를 하류로 움직이는 자동이송장치를 이용하여 찍은 동영상으로부터 얻었다. 옆미끄럼각이 영일 때(Fig. 5a) 상류부분은 날개 양 옆에서 유사하게 발달되는 두 쌍의 와류에 의해 지배 받는다. 그러나 하류로 가면

서 LEX와류 및 날개와류 중심은 각각 서로에 대해 나선형으로 회전하다가 마지막 위치에서 뚜렷한 하나의 와류로 합쳐진다. $\beta=-5^\circ$ (Fig. 5b)일 때 바람쪽 LEX와류 및 날개와류는 더욱 날개 안쪽으로 이동하고 와류의 간섭과 합쳐짐(merging)은 바람 반대쪽보다 더 심하다. 바람쪽 LEX와류 및 날개와류는 마지막 영역에서 완전히 하나의 뚜렷한 와류로 합쳐진 것을 확인할 수 있다. 바람 반대쪽의 LEX와류 및 날개와류는 날개 바깥 방향과 윗방향으로 이동하고, 와류 간섭 및 합쳐짐은 크게 지연된다. $\beta=-10^\circ$ 일 때(Fig. 5c) 바람쪽 LEX와류 및 날개와류는 중간부분에서부터 합쳐지고 확산되는 반면에, 바람 반대쪽의 LEX와류 및 날개와류는 합쳐짐과 확산이 지체되며, 그 와류 중심은 모든 위치에서 확인된다.

Fig. 6은 받음각 $\alpha=20^\circ$ 일 때 날개시위방향으로 와



a) windward side



b) leeward side

Fig. 6. Coiling angle variation with chordwise distance($\alpha=20^\circ$).

류 중심의 회전각(coiling angle)을 나타낸 것이다. 회전각은 날개표면에 평행한 기준축과 LEX와류 중심과 날개와류 중심을 연결한 선과의 각도로 정의된다. 양(+)의 회전각은 Fig. 6에 제시된 바와 같이 바람쪽은 기준축에서 시계방향으로, 바람 반대쪽은 기준축에서 시계반대방향으로 정의하였다. Fig. 6a에서와 같이 옆미끄럼각 $\beta=0^\circ$ 일 때 바람쪽 회전각은 $x/c=0.3$ 에서 약 -48° 이고 $x/c=0.77$ 에서 약 240° 이다. 회전각은 바람쪽에서 $\beta=-5^\circ$ 와 -10° 일 때 약간 증가하였다. Fig. 6b에서와 같이 옆미끄럼각 $\beta=0^\circ$ 일 때 바람 반대쪽 회전각은 $x/c=0.3$ 에서 약 -52° 이고, $x/c=0.77$ 에서 약 270° 이다. 옆미끄럼각 $\beta=-10^\circ$ 일 때 바람 반대쪽 회전각은 $x/c=0.3$ 에서 약 -90° 이고, $x/c=0.79$ 에서 약 109° 이다. 회전각은 바람 반대쪽에서 옆미끄럼각이 있을 때($\beta=-5^\circ$ 와 -10° 일 때) 상당히 감소하였다. 이와 같이 옆미끄럼각이 있을 때 회전각 변화의 특성으로부터 LEX와류와 날개와류의 상호간섭이 바람쪽에서는 약간 증가하고, 바람 반대쪽에서는 상당히 억제되었다는 것을 관찰할 수 있었다.

4. 결 론

본 가시화 연구는 연장된 앞전(LEX)을 가진 요우된 삼각날개에서의 와류 발달 및 간섭을 규명하기 위하여 수행되었다. 옆미끄럼각이 영일 때 날개 양쪽 두개의 LEX와류 및 날개와류는 각각 비슷한 강도와 특성을 유지하면서 회전한다. 옆미끄럼각이 있을 때 LEX 및 날개와류는 바람쪽에서 합쳐짐과 확산이 증가하였지만, 바람 반대쪽으로는 두드러지게 지체된다. 본 연구를 통해 LEX를 갖는 삼각날개에서의 옆미끄럼각은 공력하중에 대해 특징짓는 와류구조와 간섭에 큰 영향을 준다는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- 1) Grismer, D. S., and Nelson, R. C., 1995, "Double-Delta-Wing Aerodynamics for Pitching Motions With and Without Sideslip," *Journal of Aircraft*, Vol. 32(6), pp. 1303-1311.
- 2) Hebbar, S. K., Platzer, M. F., and Chang, W., 1997, "Control of High-Incidence Vortical Flow on Double-Delta Wings Undergoing Sideslip," *Journal of Aircraft*, Vol. 34(4), pp. 506-513.
- 3) Verhaagen, N. G., 2002, "Effects of Reynolds Number on Flow over 76/40-Degree Double-Delta Wings," *Journal of Aircraft*, Vol. 39(6), pp. 1045-1052.
- 4) Ericsson, L. E., 1999, "Vortex Characteristics of Pitching Double-Delta Wings," *Journal of Aircraft*, Vol. 36(2), pp. 349-356.
- 5) Lee, K. Y., and Sohn, M. H., 2002, "Investigation of Vortical Flow field Visualization by Micro Water Droplet and Laser Beam Sheet," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 6(1), pp. 55-62.
- 6) Hoeijmakers, H. W. M., Vaatstra, W., and Verhaagen, N. G., 1983, "Vortex Flow Over Delta and Double-Delta Wing," *Journal of Aircraft*, Vol. 20(9), pp. 825-832.
- 7) Sohn, M. H., and Lee, K. Y., 2002, "Experimental Investigation of Vortex Flow of a Yawed Delta Wing Having Leading Edge Extension," *AIAA Paper* 2002-3267.
- 8) Olsen, P. E., and Nelson, R. C., 1989, "Vortex Interaction over Double Delta Wings at High Angles of Attack," *AIAA Paper* 1989-2191.
- 9) Sohn, M. H., and Lee, K. Y., 2003, "Effects of Sideslip on the High-Incidence Vortical Flow of a Delta Wing with the Leading Edge Extension," *AIAA Paper* 2003-1107.