

# 삼각날개/LEX에서의 와류 상호작용 특성

## Vortex Interaction Characteristics of a Delta Wing/LEX

이 기 영\*      손 명 환\*\*  
 Lee, Ki-Young      Sohn, Myong-Hwan

### ABSTRACT

An experimental study of the vortex interaction characteristics of a delta wing/LEX configuration was conducted in a wind tunnel using the micro water droplet and laser beam sheet visualization technique. The main focus of this study was to analyze the effect of the angle of attack and sideslip angle on the vortex interaction and vortex breakdown. These tests were accomplished at angles of attack between 16° and 28° and sideslip angle between 0° and -15° at free-stream velocity of 6.2 m/s. Flow visualization data provide a description of the vortex interaction between LEX and wing vortices, and of the vortex breakdown. The introduction of LEX vortex stabilized the vortical flow, and delayed the vortex breakdown up to higher angle of attack. The vortex interaction and breakdown was promoted on the windward side, whereas they are suppressed on the leeward side.

주요기술용어 : Delta Wing(삼각날개), LEX(Leading Edge Extension: 연장된 앞전), Vortex Interaction(와류 상호작용), Vortex Breakdown(와류붕괴), Sideslip Angle(옆미끄럼각)

### 1. 서 론

초기동성을 갖는 현대 및 미래의 전투기는 기동성 및 민첩성을 향상시킬 수 있도록 높은 받음각 상태에서도 안정된 비행을 요구하고 있다. 이러한 요구에 의해 연장된 앞전을 갖는 삼각날개(F-22, F-35, 등), 이중 삼각날개 혹은 귀날개-삼각날개(Rafale, Typhoon, Su-37 등) 형상이 일반적으로 채택되고 있다. 그러나,

이러한 형상의 날개에 유동장 특성은 연장된 앞전, strake 혹은 귀날개 등에서 발생하는 와류와 삼각날개에서 발생하는 와류에 의한 복잡한 와류장이다. 와류들의 중심에서의 흐름방향 속도성분은 통상 자유유동속도의 2~3배 이상에 이르며, 높은 받음각에서는 와류에 의한 양력발생이 전체 양력의 30~60%에 이르게 된다. 이러한 와류의 특성과 구조는 날개전단의 기하학적 특성, 날개의 두께, 후퇴각 등과 같은 날개 특성변수와 받음각, 옆미끄럼각과 같은 유동조건들에 의해 영향을 받는다. 여러 유동 조건들 중에서도 특히 옆미끄럼각이 있는 높은 받음각 상태에서는 좌우 날

\* 공군사관학교 기계공학과 교수

\*\* 공군사관학교 항공우주공학과 교수

개 와류의 비대칭성으로 인한 비정상적인 톨링 모멘트의 발생 등 전투기의 조종성과 비행 안정성에 심각한 문제를 야기하기 때문에 지속적인 관심과 연구의 대상이 되고 있다.

이중 삼각 날개와 같은 날개 형상에서의 와류장 특성과 와류붕괴에 대한 물리적 현상 및 이의 제어방법에 대한 이론적, 실험적 혹은 수치해석적 연구결과들이 보고되고 있지만, 옆미끄럼각이 있는 경우에 대한 연구결과들은 매우 제한되어 있는 형편이다<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7</sup>. 여러 연구 결과들 중 Hebbar 등<sup>6</sup>은 76°/40° 후퇴각의 이중 델타익에서 와류장 구조에 대한 레이놀즈수의 영향을 규명하였다. Hebbar 등은 물감투입에 의한 가시화 연구를 통하여 상대적으로 작은 레이놀즈수에서는 스트레이크 와류와 날개 와류간의 강한 상호작용이 일어나며, 스트레이크 와류가 날개와류보다 먼저 와류붕괴가 일어남을 보여주고 있다. 반면에 레이놀즈수가 큰 경우에는 와류간의 상호작용이 매우 약화되어 코일링 현상이 없어지며, 날개와류가 스트레이크 와류보다 먼저 붕괴됨을 보고하고 있다.

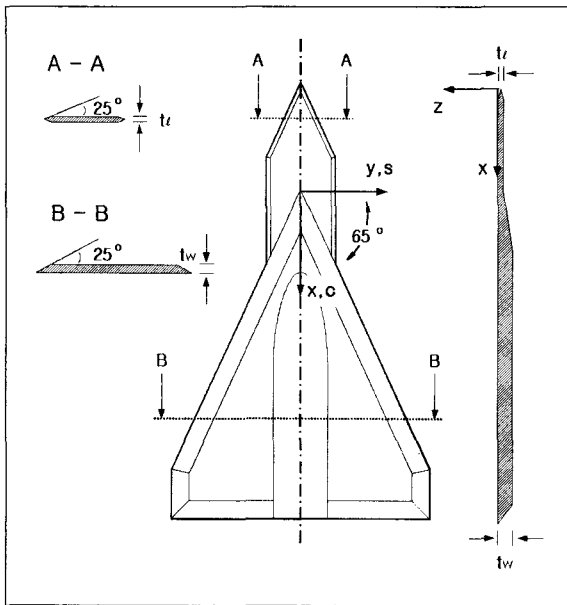
이중 삼각날개 와류 유동장에서 받음각의 영향을 중점적으로 규명한 것이 Ekaterinaris 등<sup>5</sup>의 연구결과이다. 이들은 마하수 0.22, 레이놀즈수  $4 \times 10^6$ 의 흐름에서 76°/40°의 이중 삼각날개에 대한 수치해석을 통하여 받음각 변화의 와류장에의 영향을 분석하였다. 받음각 10° 이하의 낮은 받음각에서는 와류붕괴없이 스트레이크 와류와 날개와류가 서로 결합되지 않으며, 중간 받음각인 19°에서는 날개의 뒷전에서 두 와류가 결합되면서 붕괴한다. 비교적 높은 받음각인 22.4°에서는 와류간의 결합과 와류붕괴가 날개 상류에서 발생됨을 보고하고 있다. 즉, 받음각의 증가와 함께 와류간의 상호작용이 더욱 강하게 발생하며, 와류붕괴가 촉진됨을 보여주고 있다.

옆미끄럼각은 이러한 와류 주도적인 흐름을 더욱 복잡하게 하는 유동변수이나, 이에 대한 연구결과는 매우 제한되어 있다. 따라서, 본 논문에서는 미세수적과 레이저 평면광을 이용한 와류장의 가시화 방법을 사용하여, 옆미끄럼각 조건 하에서 와류간의 상호작용과 와류붕괴 현상들을 분석하였다. 특히, 동적 가시화 자료에 의한 와류 중심의 궤적, 와류간의 거리 변화, 와류중심간의 상대적 각도변화 등을 분석함으로써, 주요 유동 변수들인 받음각과 옆미끄럼각이 와류의 상호작용과 와류붕괴에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 아울러, 연장된 앞전과 같이 변형된 삼각날개 형상이 옆미끄럼각이 있는 상태에서 와류장의 안정화 효과 정도를 분석하였다.

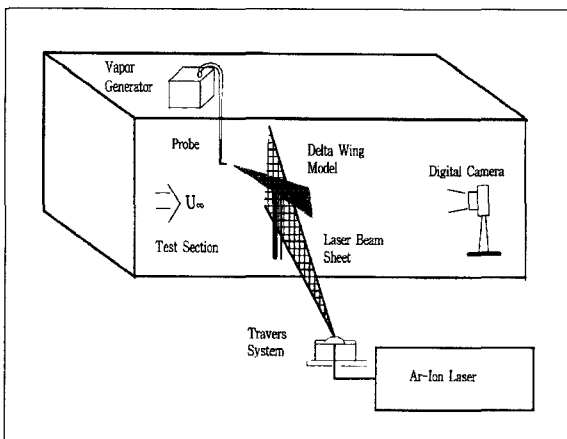
## 2. 실험장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 날개 모델은 그림 1과 같은 연장된 앞전(Leading Edge Extension : LEX)을 갖는 삼각날개로 65°의 후퇴각을 가지며, 날개의 뿌리시위는 100 mm, 뒷전에서의 스패น은 79.2 mm이다. 앞전은 윗면에서 25°의 경사각을 갖도록 날카롭게 가공되었으며, 86% 시위선에서 90°로 잘라낸 삼각날개이다. LEX는 삼각날개와 마찬가지로 65°/90°인 평판형 날개로, 날개 윗면과 아래면의 앞전은 모두 25°의 경사각을 갖도록 날카롭게 가공되었다. LEX의 날개면적은 날개의 15%이며, LEX의 정점으로부터 삼각날개 뒷전까지의 전체 길이는 132.5 mm이다.

와류장의 가시화는 초음파 가습기를 사용하여 비교적 간단하게 5~10 μm 크기의 미세수적을 발생시켜 유동장에 유동시키고, 이를 레이저 평면광을 이용하여 산란시킴으로써, 와류의 생성과 발달, 그리고 상호작



[그림 1] Delta Wing/LEX model



[그림 2] Schematic diagram of experimental set-up

용 과정을 관찰 할 수 있도록 하였다. 레이저 광원은 3 W 출력의 알곤 이온 레이저를 사용하였으며, 레이저 빔 이송장치를 이용하여 날개 상류로부터 하류에 이르기까지 순차적으로 이동하면서 디지털 카메라를 사용하여 연속적인 영상을 획득하였다. 그림 2는 가시화 장치의 개념도를 보인 것이며, 가시화 방법에 대한

보다 자세한 내용은 참고문헌 8에 기술되어 있다.

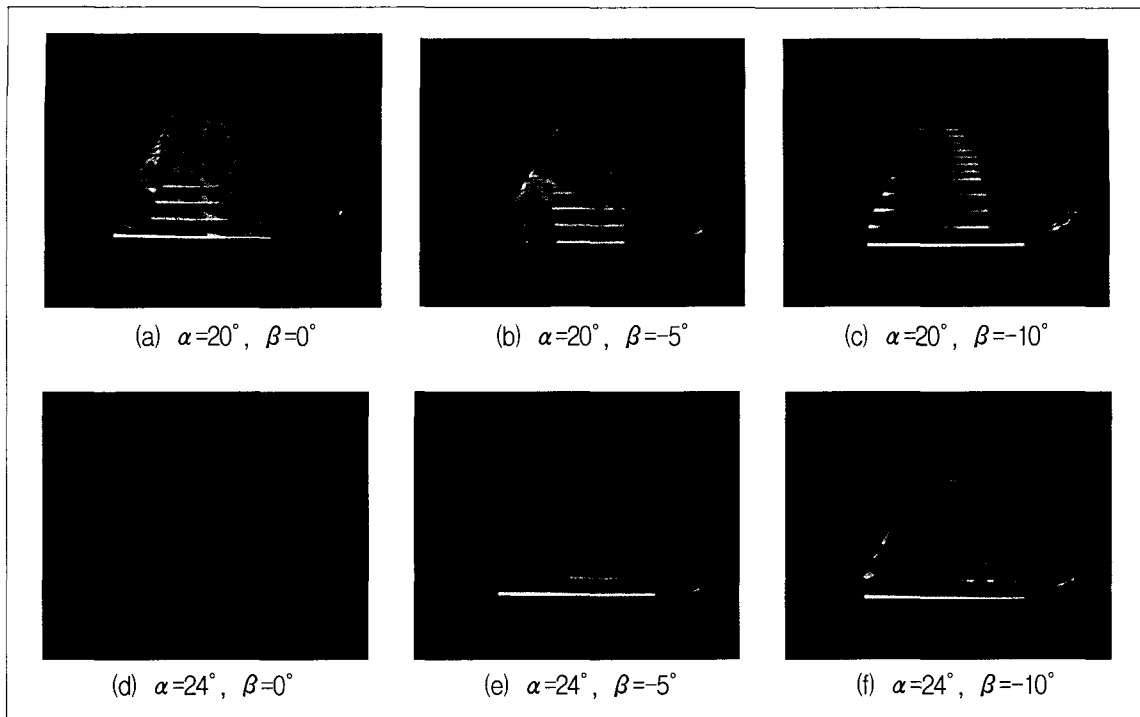
모든 가시화 실험은 측정부의 크기가 0.9 m(W)×0.9 m(H)×2.1 m(L)인 공군사관학교 소형 아음속 풍동에서 실시하였다. 본 풍동의 유속은 3.6 m/s~50 m/s로서, 이 속도 범위에서의 난류강도는 0.2% 이내이다. 받음각은 16° 부터와 28° 까지 4° 씩 증가시켜 네 가지 경우에 대하여, 그리고 옆미끄럼각은 -5° 부터 -15° 까지 5° 간격으로 세 가지 경우에 대하여 실시하였다. 실험유속은 6.2 m/s로 모델의 날개 뿌리시위를 기준으로 한 레이놀즈수는  $4.4 \times 10^5$ 이다. 그림 1에 보인 바와 같이 x는 날개의 정점으로부터 날개 중심 시위선을 따라 측정된 좌표이며, y는 날개의 중심 시위선으로부터 측정된 스패น 방향 좌표를, 그리고 z는 날개면에 수직인 좌표이다.

### 3. 실험결과 및 토의

#### 3.1 전체 와류장 특성

그림 3은 받음각 20° 와 24° 에서, 옆미끄럼각이 없는 경우와 옆미끄럼각 -5° 및 -10° 에서의 조감도 형식의 가시화 결과이다. 이러한 연속적인 영상은 와류장을 전체적으로 조망할 수 있도록 카메라를 날개 뒷전 하류 상방에 고정시키고, 레이저 평면광을 레이저 빔 이송장치를 사용하여 일정 속도로 이동하면서 획득한 결과이다.

그림 3에 보인 바와 같이 옆미끄럼각이 없는 경우 날개 상류에서 LEX 와류와 날개와류의 와류쌍이 좌우 대칭적으로 생성되는 것을 관찰할 수 있다(그림 3(a), (d)). 좌우 날개의 와류쌍은 날개 중간 부분에서 상호작용이 일어나기 시작하고, 날개 하류에서 하나의 와류로 결합된다. 옆미끄럼각이 없는 경우, 받음각 변

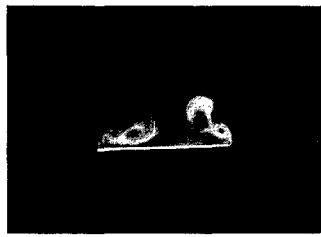


[그림 3] Perspective photos of the wake section

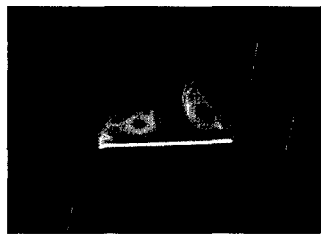
화가 작을 때에는 와류 구조의 변화가 미미함을 알 수 있다. 비교적 작은 옆미끄럼각인  $\beta = -5^\circ$  인 경우에는(그림 3(b), (e)), 바람쪽 날개의 중간 부분에서 LEX 와류와 날개와류가 하나로 결합되어 날개 하류로 이동한다. 이때 받음각이 상대적으로 큰  $\alpha = 24^\circ$  (그림 3(e))에서는 날개 하류에서 와류붕괴 현상을 보이고 있다. 바람반대쪽 날개의 와류쌍은 이러한 와류의 결합 없이 서로 회전하면서 대류되는 코일링 운동이 하류에까지 지속된다. 옆미끄럼각을 좀 더 증가시킨,  $\beta = -10^\circ$  에서는(그림 3(c), (f)), 바람쪽 날개에서의 와류간의 결합위치가 날개 상류로 이동되면서 와류붕괴 현상이 일어난다. 와류붕괴는 바람쪽 날개에서 받음각과 옆미끄럼각이 증가할수록 촉진되어 와류붕괴 위치가 상류로 이동함을 볼 수 있다. 그러나, 바람

반대쪽 날개는 와류붕괴가 비교적 높은 받음각에 이르기까지 발생하지 않지만 와류가 날개면에서 부양되며, 옆미끄럼각 증가에 따라 날개면 밖으로 밀려남을 관찰할 수 있다.

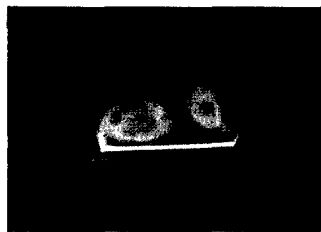
그림 4와 그림 5는 각각 받음각과 옆미끄럼각 변화에 따른 와류 구조 특성을 보다 상세하게 보인 것이다. 동일 시위위치인  $x/c=0.43$ 에서 비교적 작은 옆미끄럼각인  $\beta = -5^\circ$  에서 받음각 변화에 따른 와류 구조 특성을 보인 것이 그림 4이다. 받음각 변화에 따른 좌우 날개의 전체적인 와류 구조 특성은 크게 다르지 않으나, 받음각이 증가할수록 와류쌍이 날개면으로부터 부양됨을 관찰할 수 있다. 특히 바람 반대쪽 날개의 와류쌍보다 바람쪽 날개의 와류쌍의 부양정도가 더 크며, 날개와류보다는 LEX 와류의 부양정도가 더



(a)  $\alpha=16^\circ$



(b)  $\alpha=20^\circ$



(c)  $\alpha=24^\circ$

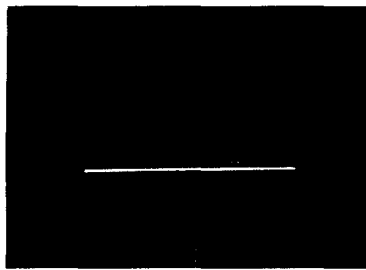
[그림 4] Effect of AOA on the vortex structure at  $x/c=0.43(\beta=-5^\circ)$

크게 된다. 또한, 받음각 증가와 함께 부양된 LEX 와류는 날개와류보다 날개 상류에서 와류가 붕괴됨을 알 수 있다. 바람 반대쪽 날개의 날개 와류는 받음각 증가에 따라 와류중심이 날개 바깥쪽으로 이동됨을 관찰 할 수 있다. 따라서, 동일 옆미끄럼각에서는 받음각 증가에 따라 바람쪽 날개에서는 와류의 부양과 와류의 붕괴로, 바람반대쪽 날개에서는 와류중심이 날개 바깥쪽으로의 이동으로 인하여 와류양력 발생 효과가 감소됨을 유추할 수 있다.

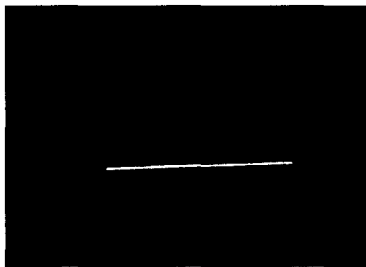
그림 5는 날개 중간 영역인  $x/c=0.6$ 에서 동일 받음각  $\alpha=24^\circ$  상태에서 옆미끄럼각 변화에 따른 와류구조 특성을 보인 것이다. 옆미끄럼각이 없는 경우에는 좌우 날개에서 거의 대칭인 와류쌍이 발생하지만, 옆미끄럼각이 부여되면 좌우 날개에서의 와류쌍이 비대칭적으로 발생하며, 이는 옆미끄럼각이 증가함에 따라 비대칭성이 더욱 증가함을 알 수 있다. 상대적으로 작은 옆미끄럼각인  $\beta=-5^\circ$ 와  $-10^\circ$ 에서는 바람쪽 날개의 LEX 와류가 날개 중간 영역에서 이미 붕괴되어 있으나, 날개와류는 붕괴 직전임을 관찰 할 수 있다(그림 5(b), (c)). 그러나, 옆미끄럼각을 더욱 증가시키면 LEX와류와 날개 와류 모두 붕괴된 모양을 볼 수 있다. 반면에 바람 반대쪽 날개에서는 옆미끄럼각의 증가에도 불구하고 LEX 와류와 날개와류가 서로 결합되지 않은 상태로 유지됨을 관찰할 수 있다. 다만, LEX 와류와 날개와류의 상대적 위치가 옆미끄럼각의 변화에 매우 민감하게 변화됨을 알 수 있다.

### 3.2 와류 중심 궤적

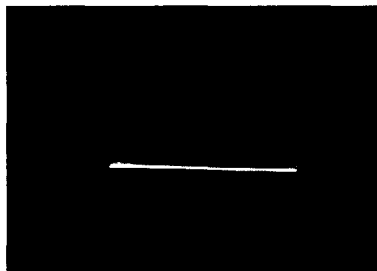
그림 6과 그림 7은 받음각  $20^\circ$ 에서 시위 위치에 따른 날개 와류와 LEX 와류의 중심 궤적을 가시화 사진으로부터 추출한 것으로, LEX와류와 날개와류의 시위방향으로의 상대적인 위치변화를 관찰할 수 있다. 옆미끄럼각이 없는 경우에는(그림 6(a)) 바람쪽 날개와 바람반대쪽 날개간의 차이가 거의 없는 대칭적인 중심 궤적을 보여주고 있다. 즉, 양쪽 날개에서 모두 삼각날개로 진입한 LEX 와류가 삼각날개에서 발생된 날개와류의 유도작용에 의해 날개의 바깥쪽으로 이동하며, 날개와류는 날개 안쪽으로 이동하게 된다. 두 와류쌍은 날개의 중앙부인 50~60% 시위위치에서 회전축을 중심으로 회전하듯 엇갈려, LEX 와류는 날개 바깥쪽으로, 그리고 날개 와류는 날개 안쪽으로 이동



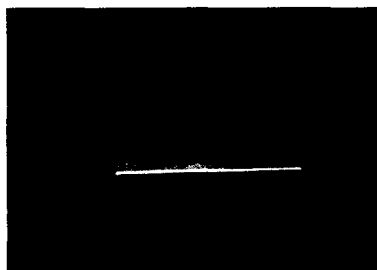
(a)  $\beta=0^\circ$



(b)  $\beta=-5^\circ$

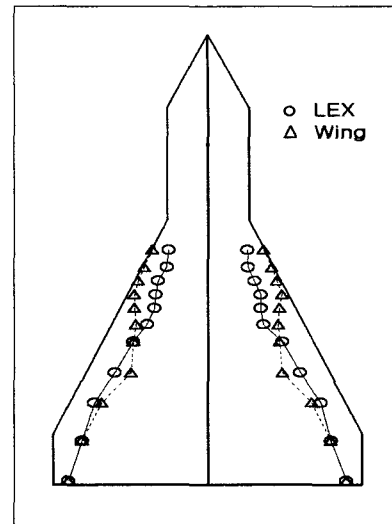


(c)  $\beta=-10^\circ$

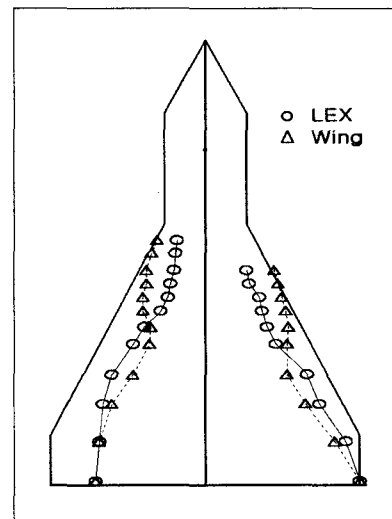


(d)  $\beta=-15^\circ$

[그림 5] Effect of AOS on the vortex structure at  $x/c=0.60(\alpha=24^\circ)$



(a)  $\beta=0^\circ$



(b)  $\beta=-5^\circ$

[그림 6] Vortex core trajectories at  $\alpha=20^\circ$

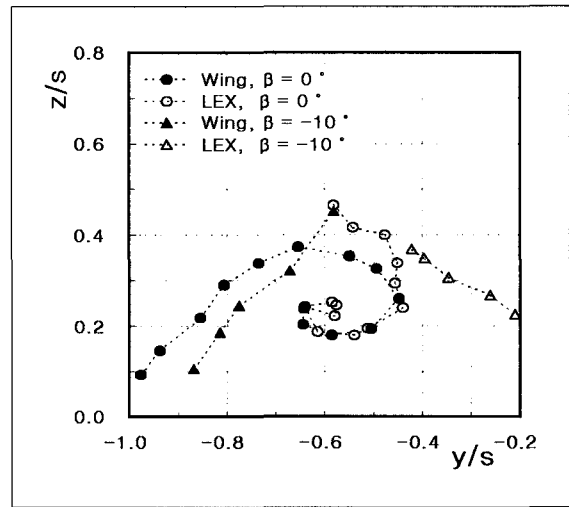
하면서 하류로 대류된다. 두 와류쌍의 간격은 이후 점차 근접되어, 약 85% 시위위치에서 결합된다. 와류쌍의 결합위치는 받음각의 증가와 함께 날개 상류로 이동하게 된다. 받음각  $20^\circ$ ,  $24^\circ$ 의 경우에는 결합된 와류쌍이 날개 뒷전에 이르기까지 와류붕괴 없이 대

류된다.

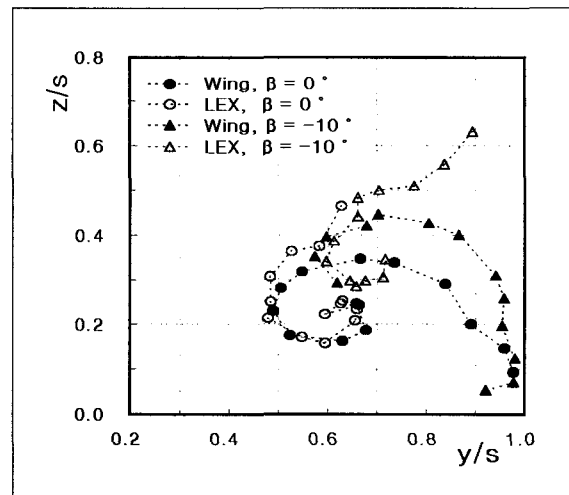
옆미끄럼각이  $-5^\circ$ 인 경우인 그림 6(b)에서는 좌우 날개에서 비대칭적인 와류중심 궤적을 보여주고 있다. 즉, 바람쪽 날개에서는 LEX와류와 날개와류가 서로 엇갈리는 지점이 옆미끄럼각이 없는 경우보다, 그리고 바람 반대쪽 날개보다 날개 상류에서 일어나고 있어 옆미끄럼각이 와류간의 상호 작용을 촉진하고 있음을 알 수 있다. 바람반대쪽 날개에서는 날개와류가 날개 바깥쪽으로 밀려나 있다가 점차 날개 안쪽으로 이동함을 알 수 있으며, 날개 와류와 LEX 와류가 결합되지 않은 상태로 날개 하류에 이르기까지 유지되어, 옆미끄럼각이 와류간의 상호작용을 억제함을 관찰 할 수 있다.

그림 7은 받음각  $24^\circ$ 에서 두 와류쌍이 하류로 이동하면서 날개 후류 단면에서 바람쪽 날개와 바람 반대 쪽에서 날개에서 날개와류와 LEX 와류의 중심 이동 궤적을 나타낸 것이다. 바람쪽 날개에서(그림 7(a)) 날개 와류의 중심은 날개면 가까이에서 앞전에서 출발하여 날개면으로부터 부양하고 스펀 안쪽으로 이동하며, LEX 와류의 중심은 날개면으로부터 멀리 떨어진 스펀 중간 위치에서 진입하여 날개면에 가까워지면서 스펀 안쪽으로 이동한다.

두 와류는 날개 중간에서 서로 시계방향으로 회전하면서 두 와류의 중심 위치가 서로 교차된다. 옆미끄럼각은 날개 와류와 LEX 와류의 중심을 스펀 안쪽으로 이동시킨다. 바람 반대쪽(그림 7(b))에서는 두 와류의 회전방향이 반시계 방향이며 시위 위치에 따라 중심이  $y$  방향과  $z$  방향으로 이동하는 경향은 동일하다. 그러나 바람쪽에 비하여 옆미끄럼각이 와류의 중심을 스펀 안쪽으로 이동시키는 정도가 더욱 크며, LEX 와류가 날개면으로부터 더욱 멀리 떨어져서 진입한다. 또한 옆미끄럼각이 있어도 날개 뒷전에 이르



(a) windward side



(b) leeward side

[그림 7] Trajectory of vortex cores at different chord positions and sideslip angle( $\alpha=24^\circ$ )

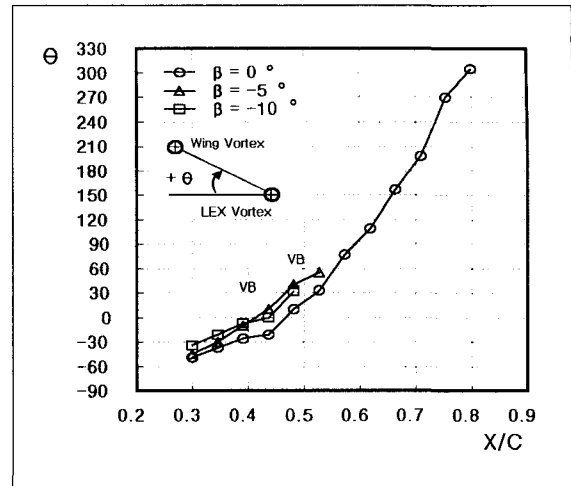
기까지 와류 붕괴가 발생하지 않으며 두 와류간의 코일링이 계속된다.

### 3.3 와류 상호작용

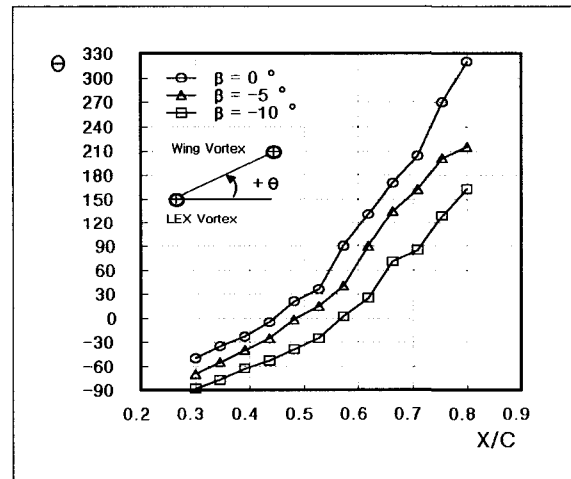
좌우 날개에서 발생하는 LEX 와류와 날개와류의

와류쌍이 여러 유동 조건 하에서의 상호작용 정도를 나타내는 일반적인 척도는 아직 없다. 그러나 날개 후류 유동장에서의 발생하는 와류는 동일 방향으로 회전하는 와류이기 때문에 각 와류의 중심축을 잇는 회전 중심으로 서로 회전하는 코일링 현상으로 와류 상호작용을 설명할 수 있다. 본 논문에서는 와류가 시위 방향으로 대류되면서 날개 상류로부터 하류에 이르기까지 코일링각의 증가 정도를 와류간의 상호작용의 척도로 사용하였다. 코일링각은 날개면에 평행한 기준선에 대해서 LEX 와류와 날개 와류 중심을 연결한 선이 이루는 각도로 정의하며, 바람쪽 날개에서의 코일링각은 기준선으로부터 시계방향으로 측정된 각으로, 그리고 바람반대쪽 날개면에서는 기준선으로부터 반시계 방향으로 측정된 값이다. 따라서, 시위 증가에 따른 코일링각의 증가율이 큰 경우를 와류간의 상호작용이 활발하다고 설명할 수 있다.

그림 8은 여러 옆미끄럼각에서 시위위치에 따른 와류쌍의 코일링각을 보인 것이다. 옆미끄럼각이 없는 경우, 바람쪽 날개에서의 코일링각은  $x/c=0.3$ 에서 약  $-49^\circ$ 에서 시작하여, 날개 하류인  $x/c=0.8$ 에서는 약  $300^\circ$ 가 된다(그림 8(a)). 이 코일링각은 옆미끄럼각의 증가와 함께 약간 증가한다. 바람반대쪽 날개에서는(그림 8(b)), 옆미끄럼각이 영이 경우에는  $x/c=0.3$  시위위치에서 코일링각이  $-50^\circ$ 에서 시작하여  $x/c=0.8$  시위위치에서  $320^\circ$ 가 된다. 옆미끄럼각이  $-5^\circ$ 에서는 코일링각이  $-70^\circ$ 에서 시작하여  $215^\circ$ 로 끝나며, 옆미끄럼각  $-10^\circ$ 에서는  $-88^\circ$ 에서 시작하여  $163^\circ$ 까지 코일링이 지속된다. 일정 시위 동안의 코일링각 증가는 날개와류와 LEX와류의 상호작용이 활발하다고 할 수 있으므로, 옆미끄럼각에 의하여 바람쪽 날개에서는 와류간의 상호작용이 촉진되는 반면, 바람반대쪽 날개에서는 와류간의 상호작용이 훨씬 억제됨을 알 수 있다.



(a) windward side



(b) leeward side

[그림 8] Coiling angle variation with chordwise position at  $\alpha = 20^\circ$

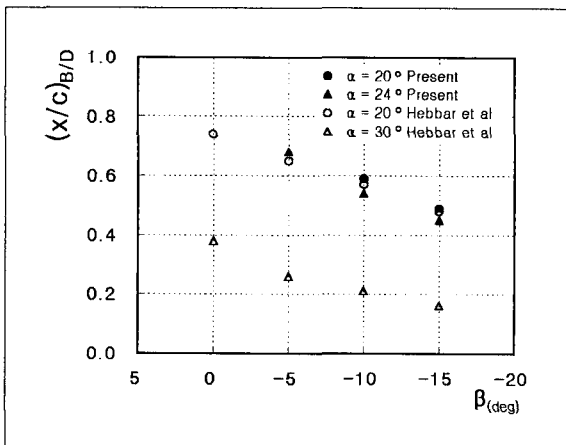
### 3.4 와류 붕괴

와류붕괴에 대한 보편적으로 신뢰할 만한 기준은 설정되어 있지 않았지만, 와류붕괴 위치를 결정하는 여러 가지 기준들이 제시되어 있다<sup>[9, 10, 11, 12, 13]</sup>. 일반적으로 와류붕괴가 시작되는 지점을 흐름방향 속도 성분과 선회속도가 급격하게 감소하고, 와류중심 크기가



급격하게 증가하는 것으로 특징지워진다. 그러나, 어느 정도로 속도가 감소되고, 와류중심 크기가 얼마나 빠르게 커지는 지점을 와류붕괴의 시작점으로 할 것인가에 대해서는 여전히 문제가 된다. 이와 같이 와류 붕괴 시점을 결정하는 방법에는 흐름방향 속도 등치 선도에 의한 방법, 최대선회각 추적방법 등이 있지만, 와류장의 가시화에서는 와류붕괴가 일어나는 상류에서는 관찰되는 태풍의 눈과 같이 스모크가 없는 와류 중심의 유무로 판단한다. 와류붕괴 지점은 유동의 정체와 혼합으로 인하여 검은 와류중심 부분이 사라지면서 스모크가 중심부로 유입되어 들어와 미세수적이 없이 확산된 지점을 와류붕괴 위치로 가정한다. 이와 같은 와류붕괴 위치 판정 방법은 비록 와류붕괴 위치의 비정상성에 의한 한계가 있기는 하지만, 다른 방법들에 못지 않게 비교적 정확하고 반복성이 있는 것으로 인정하고 있다<sup>[12]</sup>.

그림 9는 이와 같이 유동의 가시화에서 통상적으로 적용되는 와류붕괴 위치 판정 방법에 의해 구한 바람 쪽 날개에서 받음각과 옆미끄럼각에 따른 와류붕괴



[그림 9] Effect of the  $\alpha$  and  $\beta$  on the vortex breakdown location

위치를 보인 것이다. 본 실험조건에서 바람반대쪽 날개면에서는 와류붕괴가 일어나지 않기 때문에 별도로 표기하지 않았다. 와류붕괴 지점은 그림 9에 보인 바와 같이 받음각 혹은 옆미끄럼각이 증가함에 따라 날개 상류로 이동함을 알 수 있다. 본 연구 모델과 동일한 형상은 아니지만, 와류간의 유익한 상호작용을 유도하기 위한 날개 형상 중의 하나인 이중-삼각 날개의 경우인 Hebbbar et al<sup>[3]</sup>의 결과와 매우 유사한 경향을 보이고 있다. 와류붕괴는 받음각과 옆미끄럼각이 함께 증가하면 서로 상승작용을 일으켜서 와류붕괴 위치가 더욱 더 날개 상류로 이동하게 된다. 바람쪽 날개와는 달리 바람 반대쪽 날개에서는 작은 옆미끄럼각의 경우에는 비교적 높은 받음각에서도 와류붕괴가 일어나지 않는다.

#### 4. 결 론

미세수적과 레이저 평면광을 이용한 와류장의 가시화 기법을 사용하여 삼각날개의 와류 상호작용과 연장된 앞전의 와류제어 효과를 분석하였다.

옆미끄럼각은 날개 좌우에 비대칭적인 와류장을 형성시키며, 바람쪽 날개면에서는 와류상호작용을 촉진하고, 바람반대쪽 날개에서는 와류상호 작용을 억제하는 역할을 한다. 연장된 앞전은 작은 옆미끄럼각에서는, 좌우 날개 모두 비교적 높은 받음각에 이르기까지 와류붕괴를 억제하여 와류장을 안정시키는 효과를 보여주나, 옆미끄럼각이 큰 경우에는 좌우 날개 모두 급격하게 와류붕괴가 발생하므로 이를 제어하기 위해서는 날개 형상 변화와는 별도의 능동와류제어 메커니즘이 필요함을 알 수 있다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-00318) 지원에 의해 수행된 연구의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Sohn, M. H., and Lee, K. Y., "Experimental Investigation of Vortex Flow of a Yawed Delta Wing Having Leading Edge Extension," AIAA Paper 2002-3267, 2002.
- [2] Hsu, C. H., and Liu, C. H., "Navier-Stokes Computation of Flow Around a Round-Edged Double-Delta Wing," AIAA J., Vol.28, No.6, pp.961~968, 1990.
- [3] Hebbar, S. K., Platzer, M. F., and Chang, W-H, "Control of High-Incidence Vortical Flow on Double-Delta Wings Undergoing Sideslip," J. of Aircraft, Vol.34, pp.506~513, 1997.
- [4] Ericsson, L. E., "Vortex Characteristics of Pitching Double-Delta Wings," J. of Aircraft, Vol.36, No.2, pp.349~356, 1999.
- [5] Ekaterinaris, J. A., Coutley, R. L., Schiff, L. B., and Platzer, M. F., "Numerical Investigation of High Incidence Flow over a Double-Delta Wing," J. of Aircraft, Vol.32, No.3, pp.457~463, 1995.
- [6] Hebbar, S. K., Platzer, M. F., and Fritzelas, A. E., "Reynolds Number effects on the Vortical Flow Structure Generated by a Double Delta Wing," Experiments in Fluids, Vol.28, pp.206~216, 2000.
- [7] Olsen, P. E., and Nelson, R. C., "Vortex Interaction over Double Delta Wings at High Angles of Attack," AIAA Paper 89-2191-CP, pp.238~248, 1989.
- [8] 이기영, 손명환, "미세수직과 레이저 평면광에 의한 와류장의 가시화 연구," 한국추진공학회지 제 6권 제1호, pp.55~62, 2002.
- [9] Hall, M. G. "Vortex Breakdown," Annual Review of Fluid Mechanics, Vol.10, 1978, pp. 221~246.
- [10] Leibovich, S., "On Stationary and Travelling Vortex Breakdowns," J. of Fluid Mechanics, Vol.45, No.3, 1971, pp.545~559.
- [11] Derlery, J., "Aspects of Vortex Breakdown," Progress in aerospace Sciences, Vol.30, Grate Britain, Jan., 1994, pp.1~59.
- [12] O'Neil, P. J., Roose, F. W., Kegelmann, J. T., Barnett, R. M., and Hawk, J. D., "Investigation of Flow Characteristics of a Developed Vortex," NADC-89114-60, 1989.
- [13] O'Neil, P. J., Barnett, R. M., and Roose, F. W., "Numerical Simulation of Leading-Edge Vortex Breakdown Using an Euler Code," J. of Aircraft, Vol.29, No.3., 1992, pp.301~307.
- [14] Leibovich, S., "Vortex Stability and Breakdown: Survey and Extension," AIAA J., Vol.22, No.9, 1984, pp.1192~1206.