



타원형 에어포일의 항력 예측

김철완, 박영민, 권기정, 이장연^{*1}

Drag Prediction of Elliptic Airfoil

C. W. Kim, Y. M. Park K. J. Kwon and J. Y. Lee

Drag prediction is sought for the airfoil having laminar and turbulent flow characteristics with CFD code being unable to predict transition to turbulent flow. Laminar flow simulation presents some insight to the transition position. Separate simulations with laminar and turbulent flow and their combination estimate the drag of the airfoil containing laminar and turbulent flow characteristics.

Key Words: 전산유체역학(CFD), 항력예측(Drag Prediction), 층류(Laminar Flow), 난류(Turbulent Flow), 천이(Transition)

1. 서 론

CRW(Canard/Rotor/Wing) 항공기 등에 사용되는 상하좌우 대칭인 타원형 익형의 전산유체역학(CFD) 기법에 의한 항력 예측은 여러 측면에서 난이한 점들을 갖는다. 대표적인 예로 에어포일의 뒷전(trailing edge)이 날카롭지 않고 원형이기 때문에 항상 박리(separation)가 발생하고 받음각에 따라 뒷전 부근의 정체점(stagnation point)이 이동한다. 따라서 정체점 부근에 발생하는 후류의 형태도 일반적인 에어포일과 많은 차이를 보인다. 에어포일의 항력 예측에 있어 벽면 주위의 속도분포를 정확히 예측하는 것도 중요하지만 에어포일 후류의 형태 및 물성치를 정확히 예측하여 압력에 의한 항력의 증감을 예측하여야 한다. 이는 초기 계산 격자를 형성할 때 위에 언급한 점을 고려함으로써 어느 정도 해결할 수 있다.

타원형 익형의 항력예측에 있어 다른 어려운 점으로 에어포일 주위의 유동이 받음각의 크기에 따라

층류 및 난류의 특성을 동시에 갖는다는 점을 들 수 있다. 따라서 항력을 예측하는 CFD code는 난류 모델링 뿐 아니라 층류에서 난류로 전환하는 천이(transition)의 진행과정과 위치에 대해서도 정확한 예측이 필요하다. 그러나 현재 에어포일의 항력 예측에 사용되는 대부분의 CFD code들은 천이과정과 위치를 정확히 예측하지 못하고 심지어 대부분의 상용 code들은 유동 영역 전체를 층류나 난류로 가정하여 계산을 수행한다. 저자가 에어포일의 항력 예측에 사용하는 상용 software(FLUENT)도 유동장내의 층류와 난류 영역을 구분하지 못하고 유동 조건을 고려하여 계산 초기부터 층류나 난류로 가정하여 유동 해석을 수행한다.

따라서 본 논문에서는 에어포일에 대한 풍동시험 결과를 통하여 층류와 난류특성을 갖는 유동의 형태를 분석하고 동일한 유동 조건에서 수치실험을 수행하여 이를 확인하였다. 또한 천이의 진행과정 및 위치의 예측방법에 대해 간단하게 알아보고자 한다.

2. 에어포일의 풍동시험 결과

본 장에서는 항공우주연구원의 풍동에서 수행된 타원형 익형에 대한 시험 결과와 이미 널리 알려진

*1 정희원, 한국항공우주연구원 공력성능그룹
*E-mail : cwkim@kari.re.kr

NACA 64212의 풍동 시험 결과[1]를 보여주고 있다.

2.1 타원형 익형의 풍동시험 결과

항공우주연구원의 풍동실험실에서 시험이 수행된 타원형 익형은 chord 길이가 20cm이고 두께비는 16%이다. 또한 레이놀즈수는 500,000으로서 비교적 저속에서 실험이 수행되었다. 그림 1은 받음각의 변화에 대해 측정된 항력계수의 변화를 보여주고 있다. 받음각이 0° 일 때 매우 큰 값($C_D=0.0350$)을 나타내고 받음각이 4° 까지 증가할수록 항력은 감소한다. 따라서 항력은 4° 일 때 최소값($C_D=0.018$)을 갖고 받음각이 증가할수록 항력도 증가한다. 받음각이 약 12°일 때는 실속특성을 보여준다.

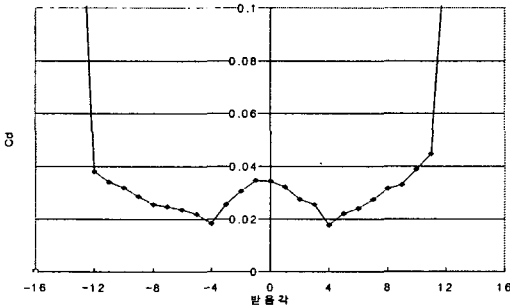


그림 1 두께비 16%인 타원형 익형의 항력계수

2.2 NACA 64212 항력계수 비교

그림 2는 NACA 64212 에어포일의 받음각에 따른 항력계수 분포를 나타낸 것이다. 이 결과는 널리 알려진 참고문헌[1]의 내용을 인용하였다. 레이놀즈수에 상관없이 받음각이 0° 근처일 때 거의 일정한 항력값을 갖고 받음각이 이 범위를 벗어나 증가하면 항력이 계속 증가한다.

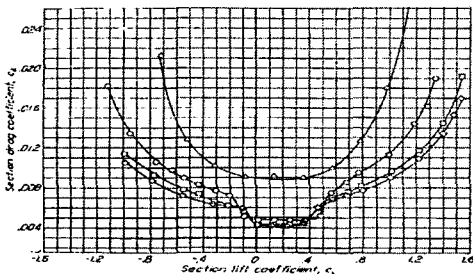


그림 2. NACA 64212 익형의 항력계수

3. 수치해석 결과

앞에서 보인 풍동실험 결과를 통하여 서로 다른 유동특성이 유동장을 지배하는 것을 알 수 있으므로 이의 확인을 위하여 풍동실험과 동일한 조건에서 수치실험을 수행하였다.

항공우주연구원의 풍동실험실에서 측정이 수행된 타원형 익형은 chord 길이가 20cm이고 두께비가 16%이다. 또한 레이놀즈수는 500,000으로서 자유류의 마하수는 약 0.066이다. NACA 64212 익형은 chord 길이가 1m 이고 자유류의 마하수는 0.263으로써 레이놀즈수는 약 3,000,000이다. 위의 두 에어포일의 수치해석에 사용된 CFD code는 FLUENT이고 계산 격자는 약 20층의 점성격자를 포함한 삼각 격자를 사용하였다. 난류 해석에는 Spalart-Allmaras 난류 모델링을 사용하였다.

3.1 타원형 에어포일의 수치해석

그림 3은 유동장을 층류로 가정하고 타원형 에어포일 주위의 유동장을 해석한 결과이다. 에어포일의 받음각은 각각 0°, 2° 그리고 4° 이다. 받음각이 0° 일 때, 그림 3(a), 뒷전 부근에서 유동이 불안정해지고 상하로 진동하는 후류가 발생한다. 천이에 대한 연구 결과에 의하면 층류의 흐름이 불안정해지면 천이가 발생하고 그 후류는 난류의 특성을 갖게 된다. 따라서 에어포일 뒷전 부근의 유동은 난류의 특성을 갖고 유동이 안정되어야 하지만 CFD code의 특성상 유동의 불안정성이 계속 증폭됨을 알 수 있다. 받음각이 증가하면(받음각=2°, 그림 3(b,c)) 익형 윗면의 천이점은 앞전으로 이동하고 아랫면은 거의 한 지점에 정지한다. 따라서 받음각이 증가할수록 익형 윗면의 난류 영역은 증가함을 알 수 있다. 받음각이 4° 이상일 때, 본 논문에 보이지는 않았지만 유동의 불안정성이 익형의 전 영역으로 확대되어 익형 주위의 유동을 더 이상 층류 유동으로 가정할 수 없다. 그림 4는 유동장을 각각 층류와 난류로 가정한 후 타원익형의 항력계수를 측정된 결과이다. 그림 3에 나타난 결과를 고려할 때 실제 항력계수는, 받음각이 0° 부근에서는 층류의 특성이 현저하므로 층류유동의 결과에 근접하고 받음각이 증가할수록 난류유동의 결과에 접근할 것으로 판단된다. 따라서 실제 유동의 항력계수 형태는 그림 1에 나타난 결과와 유사하다.

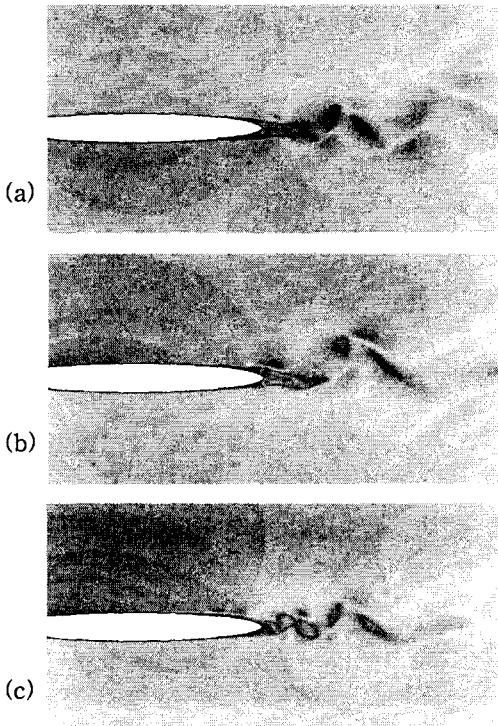


그림 3. 받음각에 따른 타원 익형 주위의 유동 속도 분포, (a) $\alpha = 0^\circ$, (b) $\alpha = 2^\circ$, (c) $\alpha = 4^\circ$.

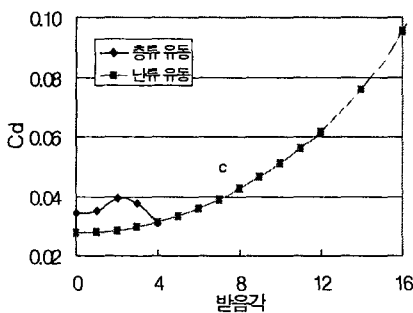


그림 4 충류와 난류로 가정한 타원익형의 항력계수.

4.2 NACA 64212 에어포일의 수치해석

그림 5는 유동장을 충류로 가정하고 NACA 64212 에어포일 주위의 유동장을 해석한 결과이며 받음각은 각각 -6° , -2° , 2° 그리고 6° 이다. 받음각

이, $-4^\circ \leq \alpha \leq 4^\circ$ 일 때(그림 5(b,c)) 뒷전 부근에서 유동이 약간 불안정해지고 상하로 진동하는 후류가 발생한다. 따라서 에어포일 뒷전 부근의 유동은 국소적으로 난류의 특성을 갖는다. 그러나 받음각이 증가하여 4° 이상이 되면 ($4^\circ \leq |\alpha|$) 익형의 윗면이나 아랫면 유동이 모두 불안정하므로 익형 주위의 유동을 더 이상 충류 유동으로 가정할 수 없다.

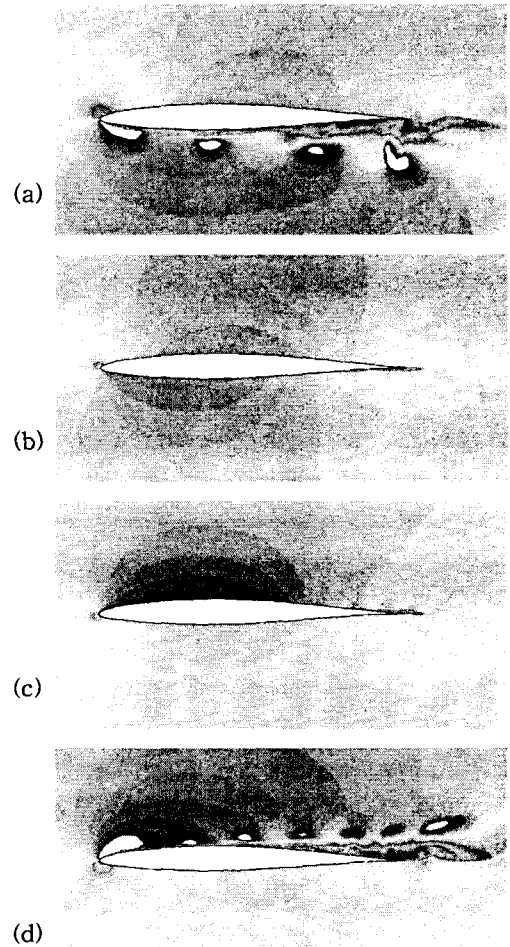


그림 5. 받음각에 따른 NACA 64212익형의 유동 속도분포, (a) $\alpha = -6^\circ$, (b) $\alpha = -2^\circ$, (c) $\alpha = 2^\circ$, (d) $\alpha = 6^\circ$

그림 6은 유동장을 각각 충류와 난류로 가정 후 NACA 64212 에어포일의 항력계수를 측정한 결과이다. 그림 5에 나타난 결과를 고려할 때 실제 항력계수는, 받음각이 0° 부근에서는 충류의 특성이 현저하므로, 충류유동의 결과에 근접하고 받음각이 중

가할수록 난류유동의 결과에 접근할 것으로 판단된다. 따라서 실제 유동의 항력계수 형태는 그림 2에 나타난 결과와 유사함을 알 수 있다.

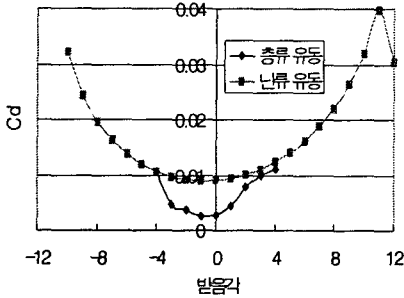


그림 6 층류와 난류로 가정한 NACA 64212 익형의 항력계수.

4. 난류로의 천이현상

층류가 난류로 천이되는 위치를 예측하는 것은 공학적으로 매우 중요한 일이다. 유동을 난류형태로 유지함으로써 열이나 모멘트의 전달을 매우 빠르게 할 수도 있고 에어포일의 박리를 지연시켜 실속을 방지하기도 한다. 반면, 순항 비행 시 항공기 날개위의 유동을 층류로 유지시켜 연료소모를 20%이상 줄일 수도 있다. 또한 캐노피 진입물체 주위의 유동을 층류로 유지시켜 열전달을 줄임으로써 보호타일의 수명을 늘릴 수도 있다.

이와 같이 천이의 발생과정과 위치를 예측하는 것은 공학적으로 매우 중요하지만 현재의 CFD 기법으로 이를 정확히 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 점성유동의 지배 방정식인 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 해석함으로써 천이에 대한 접근을 시도할 수 있지만 천이는 매우 규모가 작은 시공간의 운동과 관련이 있어 규모가 매우 큰 일반적인 유동현상과 함께 해석하기에는 컴퓨터 용량에 어려움이 있다. 따라서 공학적인 문제에 있어 천이의 위치를 예측하기 위해서 경험식을 이용하기도 하는데 천이의 과정이 매우 복잡하고 여러 가지 요소들에 의해 결정되기 때문에 경험식의 사용이 모든 경우의 천이과정을 정확히 설명하기에는 어려움이 많다.

현재까지 천이 과정을 설명하려는 많은 시도들이 있어 왔는데 최근에 Herbert[5]에 의해 시도된 PSEs(Parabolized Stability Equations)을 해석하는 방법은 매우 실제적인 방법으로 평가된다. 이는

Navier-Stokes 방정식을 이용하여 경계층 내에서 서서히 증가하는 상대적으로 작은 disturbance의 변화를 설명하였다. 그러나 이 방법도 급격한 천이의 발생과 같은 문제에는 적용하기가 어려움이 있다.

위에 언급한 천이과정의 예측에 대한 어려움에도 불구하고 천이과정을 포함한 유동장 해석에 대한 시도가 계속되고 있는데 이에 대한 내용은 참고문헌 [2-4]을 참조하기 바란다.

5. 결론

층류와 난류 유동특성을 모두 포함하는 에어포일 주위의 공력해석은 천이과정을 고려하지 않는 CFD code로는 해석이 용이하지 않고 천이과정에 대한 정확한 예측을 할 수 있는 방법을 포함한 code의 사용이 필수적이다. 그렇지만 천이과정을 포함하지 않는 CFD code도 유동장을 층류로 가정하여 해석함으로써 천이 과정과 위치에 대한 개략적인 판단을 할 수 있고 해석하고자 하는 에어포일에 대해 층류와 난류유동 해석을 각각 수행함으로써 그 공력특성을 파악할 수 있다.

후 기

이 논문은 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 연구사업(스마트무인기기술개발)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Abbott, I., and Doenhoff, A. "Theory of Wing Sections", Dover Publications.
- [2] Bowles, R. I., "Transition to Turbulent Flow in Aerodynamics," *The Royal Society, A* (2000) 358, pp. 245-260.
- [3] Krumbein, A., "Transitional Flow Modeling and Application to High-Lift Multi-Element Airfoil Configurations," *Journal of Aircraft*, Vol. 40, No. 4, pp. 786-794.
- [4] Crouch, J. D., Crouch, I. W. M., and Ng, L. L., "Transition Prediction for Three-Dimensional Boundary Layers in CFD Applications," *AIAA Journal*, Vol. 40, No. 8, pp. 1536-1541.
- [5] Herbert, T., "Parabolized Stability Equations," *A. Rev. Fluid Mech.* 29, pp. 245-283, 1997.