

오픈소스 CFD 코드 SU2를 이용한 VR-12 에어포일 유동 해석

이유림^{*†}

*청주대학교 항공기계공학과

Flow Analysis of VR-12 Airfoil Using Open-Source CFD Code SU2

Yurim Lee^{*†}

*Department of Aeronautical and Mechanical Engineering, Cheongju University

Key Words: VR-12 Airfoil(VR-12 에어포일), Aerodynamic Characteristics (공력특성), Computational Fluid Dynamics (전산유체역학), Stanford University Unstructured (SU2 소프트웨어)

Abstract

This study numerically investigates the aerodynamic characteristics of the VR-12 airfoil, a profile specifically designed for advanced rotorcraft applications. Rotorcraft main rotors must satisfy inherently conflicting performance requirements: maintaining a high drag-divergence Mach number on the advancing side and managing dynamic stall on the retreating side during high-thrust maneuvers. To evaluate the performance of the VR-12 airfoil under these conditions, steady RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes) simulations were performed using the open-source CFD code SU2 with the Spalart-Allmaras turbulence model. A C-type structured grid of 401x145 was generated to accurately capture the boundary layer and wake flow. Numerical simulations were conducted at Mach 0.3 and a Reynolds number of 2.6×10^6 , with the angle of attack(AOA) ranging from 0° to 20° . The computed pressure distributions (C_p) and integral aerodynamic coefficients (C_l , C_d , C_m) were validated, demonstrating high computational reliability and consistent agreement with reference data.

기호 설명

- α : 받음각 (Angle of Attack)
 C_d : 양력 계수 (Lift Coefficient)
 C_l : 항력 계수 (Drag Coefficient)
 C_m : 모멘트 계수 (Moment Coefficient)
 C_p : 압력 계수 (Pressure Coefficient)
 CFL : Courant-Friedrichs-Lowy 조건
 $Mach$: 마하 수
 Re : 레이놀즈 수
 c : 코드 길이
 Tu : 난류 강도
 y^+ : 첫 번째 수직방향 격자 크기
 ν : 동점성 계수

1. 서 론

회전의 항공기(Rotorcraft)의 비행 성능은 메인 로터 블레이드의 위치에 따른 공력 변화에 매우 민감하게 반응한다. 특히 고속으로 회전하는 블레이드의 전진부(Advancing side)에서는 압축성 효과로 인한 항력 급증을 억제해야 하며, 반대 편인 후퇴부(Retreating side)에서는 실속을 방지하면서 전진부와 대등한 양력을 생성하여 양력 균형을 유지해야 한다. 이러한 공학적 요구사항을 충족하기 위해 개발된 VR-12 에어포일은 높은 항력 발산 마하수와 우

수한 최대 양력 성능을 동시에 갖춘 형상으로 알려져 있다. 본 연구에서는 오픈소스 CFD 코드인 SU2를 활용하여 VR-12 에어포일 주변의 유동을 수치적으로 시뮬레이션하고, 받음각 변화에 따른 공력 계수 및 압력 분포의 변화를 분석하여 계산의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 수치해석 방법 및 조건

2.1 VR-12 에어포일 및 격자 생성

VR-12 에어포일은 얇은 앞전(Leading edge) 곡률과 특유의 뒷전(Tailoring edge) 형상을 가지고 있어 유동 박리와 후류를 정밀하게 포착하는 것이 중요하다. 이를 위해 본 연구에서는 C-type 구조 격자를 채택하였다. 격자 수는 401×145 (에어포일 표면 및 수직 방향 해상도 확보)이며, 격자 특징으로는 에어포일 표면 근처의 점성 효과를 정확히 포착하기 위해 첫 번째 격자 간격을 $y^+ \leq 1.0$ 수준으로 조절하였다. 경계 조건은 원방 경계(Far-field)는 코드 길이(c)의 약 50배 거리 위에 위치시켜 유동 교란을 최소화하였다.

2.2 수치 해석 조건 및 물리 모델

수치 해석을 위해 다음과 같은 지배 방정식 및 수치 기법을 적용하였다. 해석 조건으로는 Mach Number (M)은 0.3, Reynolds Number (Re)는 2,600,000, Angle of Attack (α)는 $0^\circ \sim 20^\circ$ (2도 간격)이다.

$$C_l = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 c}, C_d = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 c}, C_m = \frac{M_{1/4c}}{\frac{1}{2} \rho V^2 c^2} \quad (1)$$

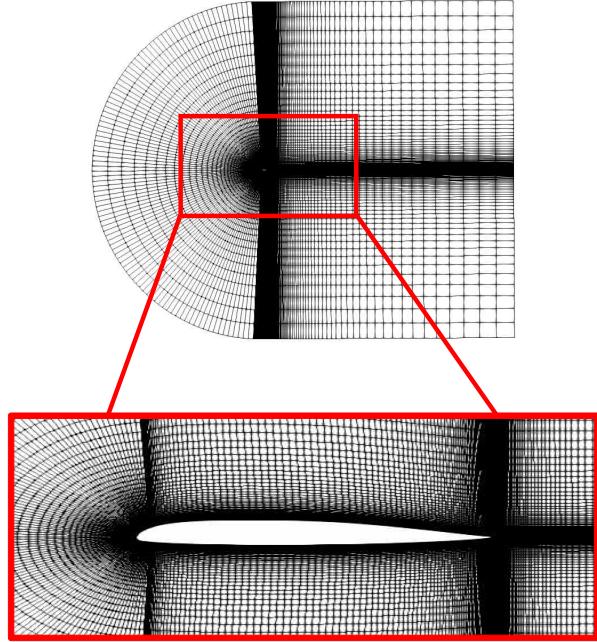


Fig. 1. 에어포일 해석을 위한 C-type 410x145 구조 격자계 및 앞전 상세 격자 분포

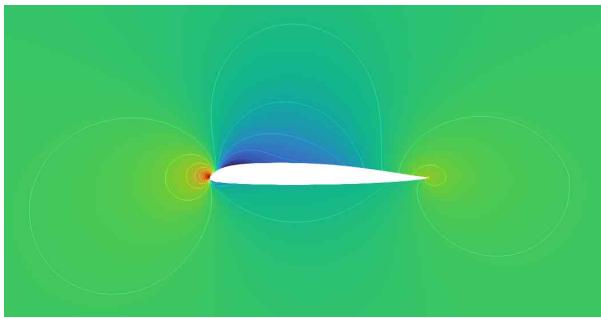


Fig. 2. VR-12 에어포일 주변의 Pressure Contour 분포 및 유동 가시화 결과

3. 수치해석 결과 및 분석

수치해석 결과 VR-12 에어포일 주변의 유동 현상이 물리적으로 타당하게 형성됨을 확인하였다. 우선 에어포일 표면의 압력 분포인 압력 계수를 받음각 0도, 8도, 12도, 16도, 20도에서 분석한 결과 받음각 증가에 따른 앞전 흡입 피크의 발달과 압력 회복 과정이 명확하게 관찰되었다. 특히 고받음각 영역으로 갈수록 윗면의 부앞 면적이 넓어지며 양력이 증가하다가 특정 각도 이상에서 유동 박리가 발생하는 과정을 압력 분포 그래프를 통해 확인할 수 있었다. 계산된 압력 계수 값들은 기존의 참조 데이터 및 실험값과 매우 일치하는 경향을 보였으며 이는 본 연구에서 생성한 C-type 격자와 SU2의 수치 알고리즘이 VR-12 에어포일의 압력장을 정확하게 예측하고

있음을 입증한다.

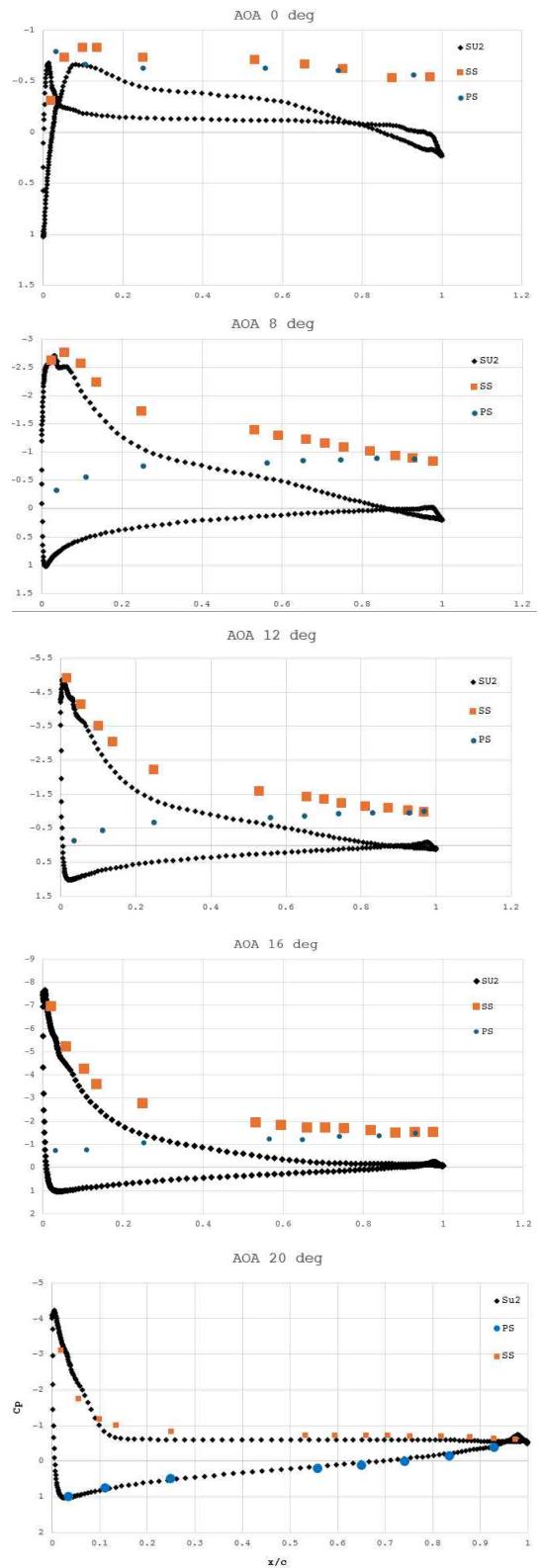


Fig. 3. 받음각(AOA) 0도, 8도, 12도, 16, 20도에서의 VR-12 에어포일 표면 압력 계수(Cp) 분포 참조 데이터와의 비교

반음각 변화에 따른 통합 공력 계수인 양력 계수, 항력 계수, 모멘트 계수의 변화를 분석한 결과에서도 매우 유의미한 일치성이 발견되었다. 양력 계수는 반음각이 증가함에 따라 선형적으로 증가하는 전형적인 특성을 보였으며 실속 각도 부근에서의 비선형적인 변화 역시 안정적으로 수치 해석에 반영되었다. 항력 계수의 경우 저반음각 영역에 변화에 따른 압력 중심의 이동을 적절히 표현하고 있다 모든 공력 계수 그래프에서 해석 결과와 실험 데이터가 일치하는 것은 수치 해석 모델의 신뢰성을 보여주는 핵심적인 지표이며 이를 통해 SU2를 활용한 해석 기법이 VR-12 에어포일의 성능 평가에 충분히 활용될 수 있음을 확인하였다.

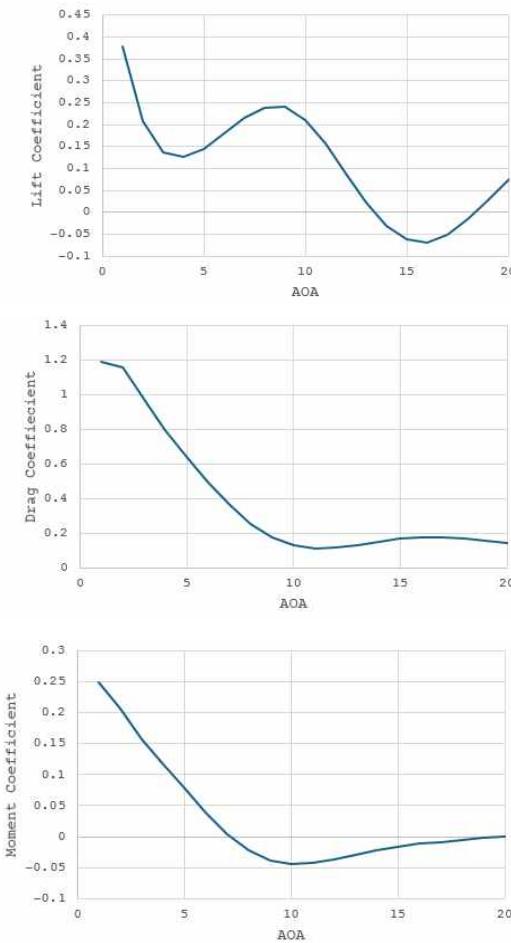


Fig. 4. 반음각 변화에 따른 VR-12 에어포일의 양력 계수(Cl), 항력 계수(Cd), 모멘트 계수(Cm) 변화 그래프

3. 결 론

본 연구에서는 고속 회전익 항공기 블레이드 단면에 주로 사용되는 VR-12 에어포일을 대상으로 SU2 소프트웨어를 활용한 유동 해석을 수행하였다. C-type 형태의 조밀한 격자계를 구성하여 에어포일 주변의 복잡한 유동 특성을 효과적으로 포착하였으

며 정상 상태 RANS 해석을 통해 다양한 반음각 조건에서의 공력 데이터를 확보하였다. 연구 결과 마하수 0.3과 레이놀즈 수 2,600,000 조건에서 계산된 양력, 항력, 모멘트 계수는 기존 데이터와 일치하는 높은 정확도를 보여주었다. 특히 고반음각에서의 실속 특성과 표면 압력 분포의 변화를 정밀하게 모사함으로써 VR-12 에어포일이 가지는 독특한 공력 성능을 수치적으로 검증하는 데 성공하였다. 본 연구의 결과는 향후 블레이드의 동적 실속이나 3차원 회전 효과를 고려한 상위 연구의 기초 데이터로서 높은 가치를 지니며 오픈소스 CFD 코드를 활용한 공력 설계 프로세스의 효율성을 다시 한번 확인시켜 주었다.

참고문헌

- (1) McAlister, K. W., & Tung, C. (1987). Airfoil Sections for Rotorcraft Applications. NASA Technical Memorandum.
- (2) Palacios, F., et al. (2013). Stanford University Unstructured (SU2): An open-source integrated computational environment for multi-physics simulation and design. AIAA Paper 2013-0287.
- (3) Spalart, P. R., & Allmaras, S. R. (1992). A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. AIAA Paper 1992-0439.
- (4) Roe, P. L. (1981). Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes. Journal of Computational Physics.
- (5) Bousman, W. G. (2003). The Aerodynamic Characteristics of Airfoils for Rotorcraft. NASA/TM-2003-212790.
- (6) Economou, T. D., et al. (2016). SU2: An open-source suite for multiphysics simulation and design. AIAA Journal.
- (7) CFL3D User's Manual (2017). A Multigrid Navier-Stokes Code of Structured Grids. NASA Langley Research Center.
- (8) Anderson, J. D. (2016). Fundamentals of Aerodynamics. McGraw-Hill Education.