

오일러 방정식과 자유 후류법을 이용한 헬리콥터 로터의 비정상 공력 해석 연구

이재훈,^{1*} 위성용,¹ 권장혁,² 이덕주,² 김대희³

A STUDY ON THE UNSTEADY AERODYNAMIC ANALYSIS OF HELICOPTER ROTOR USING EULER EQUATIONS AND FREE WAKE METHOD

Jaehun Lee,^{1*} Seongyong Wie,¹ JangHyuk Kwon,² Duckjoo Lee² and Dahee Kim³

In this study the unsteady aerodynamic analysis of a hovering helicopter rotor is performed. For the accurate flow field analysis Euler equations and the free wake method are coupled. The Euler equations are solved to find the pressure distribution around the rotor, and free wake method is used to give the boundary condition for the solution of Euler equations. Also, vortex strength and wake motion after the rotor are simulated by the free wake method. The accuracy of the present method is compared with the source sink model. The present method is applied to the hovering Caradonna-Tung rotor and compared with experimental results.

Key Words : 오일러 방정식(Euler Equations), 자유 후류법(Free Wake Method), 비정상유동(Unsteady Flow)

1. 서 론

헬리콥터 로터 해석의 경우에는 물리적으로 타당한 경계조건을 설정하기 어려우며 수치 소산(numerical dissipation)으로 인해 로터 주위의 와류장이 빨리 소산해 버린다. 여러 연구자들에 의해 이를 극복하기 위한 연구가 있어왔다.

Srinivasan 등은 용출 흡입(source-sink) 모델을 사용해 전산 유체기법에 원방 경계에서 사용 가능한 흡입 유동조건과 배출 유동조건을 제안했다[1]. 그러나 이는 정지비행에만 적용 가능하고 전진비행에는 적용할 수 없는 단점이 있다. Berkman 등은 후류(wake) 모사에 뛰어난 성능을 보이는 자유 후류법과 전산유체기법을 연계시켜 정지비행 중인 로터 주위의 유동장을 해석하였다[2]. 이들은 로터에 근접한 작은 영역은 Navier-Stokes 방정식으로 해석했으며, 로터에서 원방까지의 음향파와 압력파의 계산을 위해 포텐셜 방정식을 풀었으며, 점성영역과 원방에 걸쳐 존재하는 후류의 모사를 위해 자

유 후류법을 사용하였다. Zhao 등은 Navier-Stokes 방정식, 포텐셜 방정식, 자유 후류법을 연계한 것은 Berkman 등의 연구와 같지만 중첩 격자계를 사용해 점성 영역과 포텐셜 영역 간의 정보 교환을 용이하게 하였다[3].

본 연구에서는 전산유체기법과 자유 후류 기법을 연계하여 로터의 비정상 공력해석을 수행하였다. 로터 주위의 유동장 해석을 위해서 압축성 오일러 방정식을 사용했으며 로터 주위의 후류의 포착을 위해 시간 전진 자유 후류법을 사용하였다. 현재 연구에서는 이전 연구자들과는 달리 포텐셜 영역은 없으며 비점성의 영역과 후류 영역 만을 고려하였다. 압축성 오일러 해석자(solver)의 계산 영역은 그 크기를 로터 길이의 5배, 2배 등으로 달리해 이에 따른 비정상 공력 해석에 대한 영향을 살펴보았다.

2. 해석 기법

2.1 유동장 해석

로터 주위의 유동장 해석을 위해서 사용된 코드는 본 연구실에서 개발된 KFLOW로써 이는 정렬 격자계를 기반으로 한 다중 블록과 다중 프로세싱이 가능한 압축성 유동장 해석자

1 학생회원, 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공

2 정회원, 한국과학기술원 대학원 항공우주공학전공

3 정회원, Carnegie Mellon University

* Corresponding author, E-mail: jaehun.lee@gmail.com

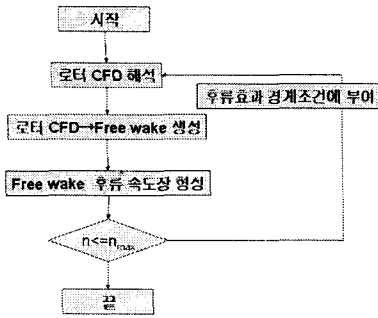


Fig. 1 Procedure of the coupled analysis of CFD and freewake

(solver)이다[4]. 해석에 사용된 지배방정식과 수치해석 기법들은 아래와 같다.

2.1.1 지배방정식

3차원 오일러 방정식은 식 (1)과 같이 표시될 수 있다[5,6].

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial f_i}{\partial x_i} = \alpha^F \vec{H} \quad (1)$$

식 (1)에서 q 는 보존 변수(conservative variable), f_i 는 i 방향의 비점성 유속(inviscid flux), \vec{H} 는 비관성력(noninertial force)에 의한 원천항을 의미한다.

$$q = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho u_1 \\ \rho u_2 \\ \rho u_3 \\ \rho E \end{pmatrix}, f_i = \begin{pmatrix} \rho U \\ \rho u_1 \vec{U} + \delta_{i1} p \\ \rho u_2 \vec{U} + \delta_{i2} p \\ \rho u_3 \vec{U} + \delta_{i3} p \\ (\rho e + p) \vec{U} + p \vec{U}_g \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\vec{H} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vec{h} \cdot \hat{i} \\ \vec{h} \cdot \hat{j} \\ \vec{h} \cdot \hat{k} \\ \vec{h} \cdot \vec{u} \end{pmatrix}, \vec{h} = -\rho \Omega \times \vec{u} \quad (3)$$

\vec{U} 는 격자점의 운동에 대한 유동의 상대속도이며 식 (4)와 같다.

$$\vec{U} = n_x u + n_y v + n_z w - \vec{U}_g \quad (4)$$

식 (1)에서 α^F 는 관성좌표계에서는 0이 되고 비관성 좌표

계에서는 1이 된다. 관성좌표계의 비정상 유동에서 식 (4)의 \vec{U}_g 는 격자의 운동속도(grid velocity)가 되고, 이때 \vec{U} 는 격자점의 운동에 대한 유동의 상대속도가 된다. 그러나 비관성 좌표계의 정상 유동에서 \vec{U}_g 는 좌표계속도(frame velocity)가 되고 \vec{U} 는 회전좌표계의 속도에 대한 유동의 상대속도가 된다[5].

2.1.2 수치해석 기법

공간 이산화를 위해서 식 (1)의 미분형의 지배방정식은 유한 체적법을 사용하여 준이산화(semi-discretized) 방정식으로 변환된 후 이를 시간 전진 기법으로 적분되었다. 유한 체적법에는 격자 중심 방법이 사용되었다. 비점성 유속의 계산을 위해서는 압축성 유동에서 많이 사용되는 Roe의 FDS(Flux Difference Splitting)와 고해상도 기법의 일종인 van Leer의 MUSCL(Monotone Upstream Scheme for Conservation)이 사용되었다. 해석의 안정성을 위해 van Albada의 제한자가 적용되었다. 시간 전진에는 DADI(Diagonalized Alternating Direction Implicit)가 사용되었다. 비정상 유동 해석에서의 시간 정확도를 높이기 위해 이중 시간 전진법(dual time stepping)이 적용되었다. 수렴 가속을 위해서 다중격자(multigrid) 기법과 국소 시간 전진(local time stepping)이 사용되었다.

2.2 자유 후류 기법

비압축성 비점성의 포텐셜 유동의 지배방정식은 식 (5)와 같은 라플라스(Laplace) 방정식을 만족한다[7,8].

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (5)$$

식 (5)에 Green의 정리를 적용하면 포텐셜 유동은 용출(source)과 더블레(doublet)의 합으로 표현될 수 있다. 용출과 더블렛을 이용해 패널을 구성한 후 적분방정식을 수치적으로 표현하면 각 패널에 대한 N 개의 대수 방정식이 구해진다.

$$\sum_{k=1}^N A_k u_k + \sum_{m=1}^N B_m \sigma_m = 0 \quad (6)$$

식 (6)의 대수방정식을 풀면 후류의 물성을 구할 수 있게 된다.

와선(vortex filament)에 의해 유도되는 속도는 식 (7)의 Biot-Savart law를 통해 구한다.

$$d\vec{V} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \quad (7)$$

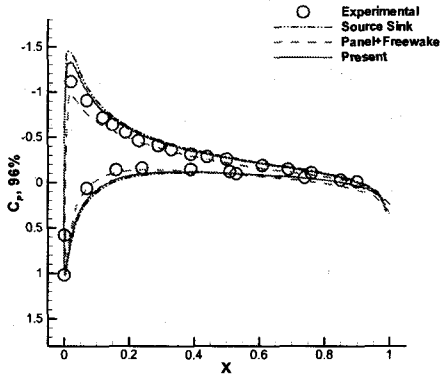


Fig. 2 Cp at 96% of span at Mtip=0.439, 5R

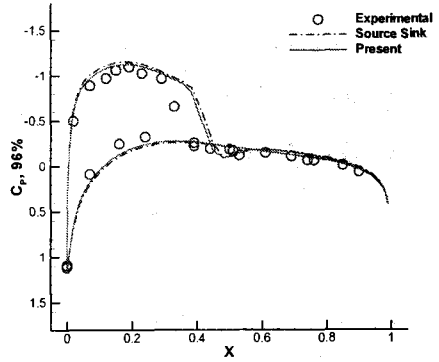


Fig. 4 Cp at 96% of span at Mtip=0.877, 5R

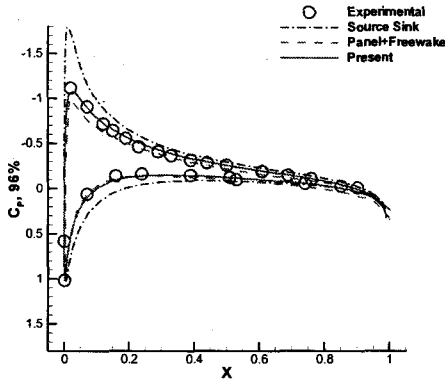


Fig. 3 Cp at 96% of span at Mtip=0.439, 2R

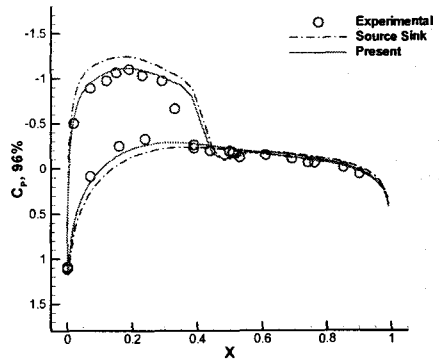


Fig. 5 Cp at 96% of span at Mtip=0.877, 2R

식 (7)에서 $r=0$ 은 특이점이 존재하는 곳이므로 이 부근에서는 와류모델을 사용해 강제 회전으로 모사한다. 대표적인 와류모델은 Scully 모델과 Vastias 모델이 있다. 본연구에 사용된 자유후류법은 위의 방법을 이용하여 블레이드의 전 영역에서 생성된 trailed vortex filament로 모사되며 시간 전진 기법은 4차 Adams-Bashforth-Moulton method 를 사용하였다. 본 방법은 일반적인 수치 적분보다 안정하다[8].

2.3 CFD와 자유 후류 기법의 연계

본 연구에서 사용된 CFD와 자유 후류법의 연계 순서도는 Fig. 1과 같다.

순서도에서와 같이 비점성 유동장 해석의 결과로 나오는 로터 위의 압력분포는 후류의 속도장 형성을 위해 자유 후류법의 입력으로 들어가며 자유 후류법을 통해 계산된 속도장은 비점성 유동장 해석의 경계조건으로 입력된다.

3. 로터 수치 해석 적용

유동장 해석과 자유 후류법의 연계 해석의 성능을 검증하기 위해 Caradonna-Tung의 정지비행 로터의 비정상 해석을 수행하였다.

3.1. 수치 실험 개요

Caradonna-Tung의 실험에 사용된 로터는 세장비(aspect ratio)가 6이고 비틀림이 없는 단순한 형상이다. 수치 실험에는 받음각 8도에 끝단 마하수(tip Mach number)가 0.439인 경우와 0.877인 경우가 사용되었다. 연계 해석의 결과는 실험치와 용출 흡입 경계조건의 결과를 비교하였다. 끝단 마하수가 0.439인 경우는 패널 기법과 자유 후류법으로 해석한 경우를 추가하여 비교하였다. 계산에는 총 4개의 CPU가 사용되었고 원방의 길이가 로터 길이의 5배인 경우와 2배인 경우에 대해 계산하였다. 각각의 격자수는 85만개, 55만개 정도 된다. 비정상 해석에서는 로터의 1회전을 120개의 간격으로 나누었고

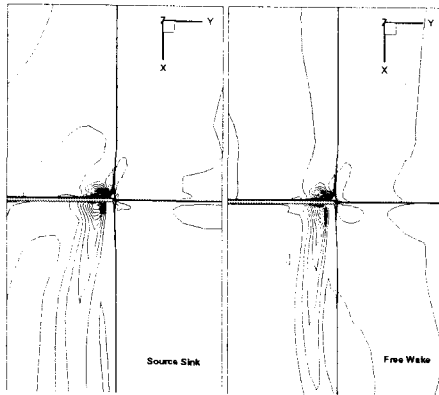


Fig. 6 Vorticity contour at Mtip=0.877, 2R

따라서 한 번의 시간 전진에 대해 로터는 3도를 회전한다.

3.2 결과

Fig. 2-5은 로터의 96% 스패에서의 압력 계수를 나타낸다. Fig. 2과 Fig. 3는 끝단 마하수가 0.439인 경우이고, Fig. 4와 Fig. 5은 끝단 마하수가 0.877인 경우이다. Fig. 2와 Fig. 3을 보면 원방 경계의 크기가 작아짐에 따라 연계 해석의 결과가 앞전에서의 suction peak을 잘 따라감을 알 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5에서도 비슷한 경향을 확인할 수 있다. 이는 자유 후류법을 사용해 경계조건을 부여했을 때 로터 아래에서 발생하는 후류 모사의 우수성으로 인한 것으로 보인다. Fig. 6은 vorticity contour를 나타낸 것이다. 왼쪽은 용출 흡입 경계조건을 사용한 것이고 오른쪽은 자유 후류법을 이용한 경우인데 이를 통해 로터 아랫면의 후류의 모사가 차이남을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 압축성 오일러 방정식 해석자(solver)와 자유 후류법의 연계 해석을 통해 헬리콥터 로터의 비정상 공력 해석을 수행하였다. Caradonna-Tung의 정지비행 로터의 해석 결과에서 오일러 해석자의 계산 영역이 줄어들음에 따라 로터 단면에서의 압력 계수가 실험치에 근접함을 확인하였다. 향후에는 전진비행으로 해석 기법을 확장하고 난류 모델을 추가해 점성의 효과를 알아보고자 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 한국형헬기 민군겸용구성품개발사업 (KARI주관) 위탁연구결과 중 일부입니다. 관계자 열분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Srinivasan, G.R., Raghavan, V., and Duque, E.P.N., 1993, "Flowfield Analysis of Modern Helicopter Rotors in Hover by Navier-Stokes Method," *Journal of the American Helicopter Society*, Vol.38, No.3, pp.3-13.
- [2] Berkman, M.E., Sankar, L.N., 1997, "Navier-Stokes/Full Potential/Free-Wake Method for Rotor Flows," *Journal of Aircraft*, Vol.34, No.5, pp.635-640.
- [3] Zhao, Q.J., Xu, G.H., and Zhao, J.G., 2006, "New Hybrid Method for Predicting the Flowfields of Helicopter Rotors," *Journal of Aircraft*, Vol.43, No.2, pp.372-380.
- [4] Kim, Y.S., Park, S.H., and Kwon, J.H., 2003, "Drag Prediction Workshop Results Using the Parallel Multigrid Solver KFLOW3D," Proc. of 2nd AIAA CFD Drag Prediction Workshop.
- [5] 박수형, 2003, "Navier-Stokes 방정식을 사용한 동안정 기계수 예측 기법," 한국과학기술원 박사학위 논문.
- [6] Park, S.H., Kim, Y.S., and Kwon, J.H., 2003, "Prediction of Damping Coefficients Using the Unsteady Euler Equations," *Journal of Spacecraft and Rockets*, Vol.40, No.3, pp.356-362.
- [7] Lee, D.J. and Na, S.U., 1999, "Numerical Simulations of Wake Structure Generated by Rotating Blades using a Time Marching, Free Vortex Blob Method," *European Journal of Mechanics- B/Fluids*, Vol.18, pp.147-159.
- [8] Chung, K.H., Kim, J.W., Ryu, K.W., Lee, K.T. and Lee, D.J., 2006, "Sound Generation and Radiation from Rotor Tip-Vortex Pairing Phenomenon," *AIAA Journal*, Vol.44, No. 6, pp.1181-1187.