

순항중인 틸트로터의 회전하는 블레이드에 대한 공력성능 수치해석

안 성 원^{*1}, 고 성 호^{*2}, 김 병 수^{*3}, 최 성 욱^{*4}

Numerical Analysis of Aerodynamic Performance for Rotating Blades of Tilt Rotor Aircraft in Cruise Mode

S. W. Ahn, S. H. Ko, B. S. Kim and S. W. Choi

Numerical analysis were made for the unsteady flow fields of the rotor system of a Tilt-Rotor aircraft in cruise mode. The Reynolds-averaged thin-layer Navier-Stokes equations were discretized by Roe's upwind differencing scheme and integrated in time by the LU-SGS algorithm. The computational domain of the rotor system was constructed by seven multi-block Chimera grids. Comparison of pressure coefficient on the surface of the main wing and blades were made for 3cases of advance ratio(0.325, 0.350, 0.375) and thrust and power coefficients for the rotor were compared with experimental data.

Key Words: 공력성능(Aerodynamic Performance), 결합격자(Chimera Grid), 무인기(UAV), 정렬격자(Structured Grid), 전산유체역학(CFD), 틸트로터(Tilt Rotor)

1. 서 론

21세기 프론티어 연구사업(과학기술부 지원)의 일환으로 수행중인 스마트무인기 개발 사업은 현재 수직 이착륙과 고속 순항비행이 가능한 틸트로터(tilt-rotor) 형태의 비행체에 대해 연구 중에 있다. 틸트로터의 개념은 회전중인 로터와 기어 박스로 구성된 날셀이 주익의 한 부분을 중심으로 90° 회전함으로써 수직 이착륙과 제자리 비행 및 순항운항이 가능한 비행체이다.

본 연구에서 사용되는 틸트로터 비행체는 항공우주연구원에 의해 설계된 스마트 무인기 중 TR-S1



Fig. 1 A simply analyzed TR-S1 model of the Smart UAV

모델로서 그림 Fig. 1은 고성호 등[1]에 의해 제시되었던 로터와 날셀의 공력해석에 추가적으로 기체 및 기타 부분을 포함하여 순항중인 TR-S1의 전기체에 대하여 정성적인 해석을 수행한 결과이다.

헬리콥터와 같이 회전하는 블레이드에 대한 공력성능 수치해석은 강희정 등[2]에 의해 비정렬 격자 및 적응격자 기법을 이용하여 계산되었으며, 해외에서는 실제 틸트로터기(V22)의 축소형 모델에 대해 정렬격자를 사용하여 연구가 진행되어 왔다.[3] 하지

*1 학생회원, 충남대학교 기계설계공학과 대학원
*2 정회원, 충남대학교 기계설계공학과
*3 정회원, 충남대학교 항공우주공학과
*4 정회원, 한국항공우주연구원 스마트무인기사업단
*E-mail: *1 urang76@empal.com
*2 sunghoko@cnu.ac.kr
*3 kbskbs@cnu.ac.kr
*4 wook@kari.re.kr

만 국내에서는 틸트로터의 회전하는 블레이드와 주익 및 기체와의 간섭 영향을 동시에 고려하여 수치 해석을 실시한 사례가 없었으며, 근래에 김철완 등 [4]은 TR-S1 모델에서 로터를 제외한 전기체의 수치 해석을 수행하였다.

본 논문에서는 3차원 틸트로터(TR-S1_1/4 스케일)의 고정익 모드에서 각 전진비(Advance ratio = M_{RS}/M_{Tip} , 이하 Ad로 표기)에서 회전하는 블레이드에 대하여 공력성능을 키메라(Chimera) 격자기법을 이용하여 해석하였다. 또한, 회전체를 고려하지 않은 상황에서의 주익과 회전체를 갖는 모델에서의 주익의 공력특성을 연구하였으며, 로터의 성능을 나타낼 수 있는 로터의 추력과 파워 계수를 계산하여 TRAM 보고서[5]와 비교하였다.

2. 전산해석 방법

로터 시스템을 갖는 비행체의 유동장 해석을 위한 지배 방정식으로 3차원, 비정상, 압축성, 난류에 대한 Reynolds-Averaged thin-layer Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 지배방정식의 좌변의 비점성항은 Roe의 풍상차분법을 사용하였고, 우변의 점성항은 중앙차분을 사용하였다. 시간적분으로는 LU-SGS의 내재적인 방법을 사용해 완전한 Navier-Stokes 방정식의 해를 구하였다. 난류 모델로는 Baldwin-Lomax 모델이 사용되었다.

키메라 격자기법에서 회전하는 로터의 전산해석 방법은 참고논문[1]에 자세하게 설명되어 있으므로 참고하기 바란다.

본 논문에서는 3 가지 경우(Ad = 0.325, 0.350, 0.375)에서 로터를 제외한 격자계(기체, 주의 그리고 날셀)와 로터(3열)를 포함하는 격자계에 대해 각각의

공력성능 특성을 연구하고 있다. Table 1은 본 연구에서 모사하는 틸트로터의 비행조건(3 Cases) 및 기초 형상에 관한 자료이며, 실제 계산에서는 모든 길이를 로터 반경 길이로 무차원화 하였다.

3. 격자 구성 및 격자기법

3.1 격자구성

본 연구에서 해석영역은, Fig. 2에 나타나 있듯이 TR-S1의 반구형(대칭면) 기체가 내부의 모든 격자를 감싸고 있는 형상으로, 블레이드의 회전면과 후위의 유동장을 균일하게 계산하기 위한 밀집된 실린더형(O-O type) 중간 배경격자, 주의(C-C type)격자가 있으며, 중간 배경 격자에 포함되는 날셀(O-O type) 격자와 3개의 블레이드 격자로 총 7개(2.4×10^6 격자점)의 정렬 격자로 구성되어 있다.(Table 2)

3.2 블레이드 및 주의 형상

로터를 갖는 비행체들은 경우에 따라서 각각의 블레이드에 비틀림을 주어 제자리 비행시에 로터 회전면에 동일한 유도속도를 얻게 하여 효율을 높이고 있다. 길이 방향으로 갈수록 비틀림 각도가 감소하는 것은 동일한 회전 속도에서 반경이 커질수록 블레이

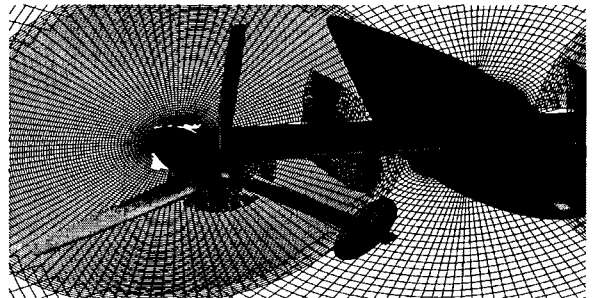


Fig. 2 Computational domain constructed by Chimera grids

Table 1 Flight condition for tilt rotor system

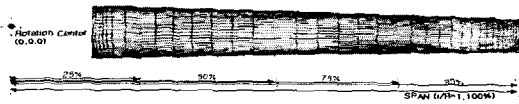
Parameters		Values
Flight Condition	Free stream velocity	65.252 m/s
		70.256 m/s
		75.289 m/s
	Blade tip speed	200.773 m/s
	Blade rotational speed	1324.246 rpm
Geometry	Air density	1.22145 kg/m^3
	Collective pitch angle	$20 \sim 30^\circ (r/R=0.75)$
	Blade radius	1.45 m
	Solidity	0.105

Table 2 Chimera grids for tilt rotor system

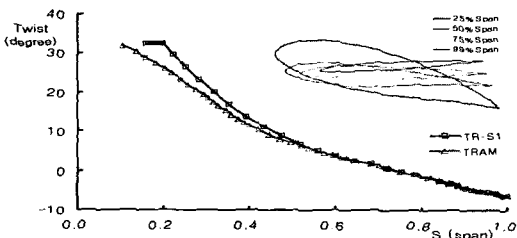
Remarks	Size($j \times k \times l$)
Main Body	$132 \times 64 \times 80$
Intermediate Background(cylinder)	$123 \times 50 \times 87$
3 Blades(O-O Grid)	$(107 \times 54 \times 43) \times 3$
Main wing(C-C Grid)	$161 \times 47 \times 43$
Nacelle(O-O Grid)	$72 \times 69 \times 39$
Total Grid Point	2,475,385

드에 적용되는 속도가 빨라져 실속이 생기기 쉽기 때문에 이를 방지하기 위함이다. TR-S1에서도 Fig. 3 (b)와 같이 비틀림이 적용되었다. (b)의 우측상단에는 (a)에서 나타낸 블레이드의 주요 4개소에 대한 단면 형상을 나타내고 있다.

주익의 형상은 Fig. 4에서와 같이 NACA -644221 과 유사한 형태를 갖고 있으며, 기체에 부착시 고정된 받음각은 약 2°이고 날셀 방향으로 날개 단면의 형상은 거의 변하지 않고 있다.



(a) Shape of the blade of the TR-S1 model



(a) Profile of the twist angle of the blade

Fig. 3 Characteristic data of the blade for the TR-S1 model

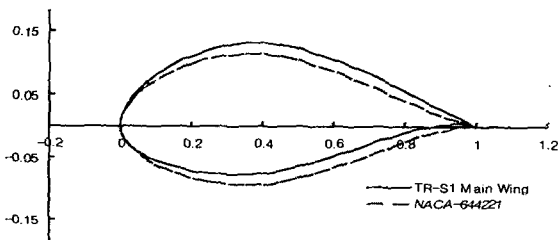


Fig. 4 Profile of the main-wing's airfoil of the TR-S1 model

3.3 격자기법

본 연구와 같이 3차원의 독립된 정렬 격자계 내에서 세 개의 블레이드만이 상대운동을 하고 있으므로, 이러한 모델의 수치적 해법은 겹침격자 기법을 사용함이 효율적이다. 독립된 격자의 모든 격자점에 정확한 값을 전달하기 위하여 DCF3D 코드를 사용하였다. 이외에도 많은 격자 연결 코드가 있지만, 대다수가 움직임이 없는 정적상태의 격자 연결에 비하여, DCF3D는 격자의 움직임에 따라 매 step마다 격자 연결을 수행하는 코드로서 본 연구에 아주 적합하다.

참고[1]에서 홀 컷팅 및 자체 개발 코드인 OGAP에 대해서 보다 자세하게 설명되어 있다.

4. 전산해석 결과 고찰

4.1 회전체에 의한 주익의 공력성능 해석

고정의 항공기의 양력과 항력에 대한 수치해석은 Fig. 5의 붉은색 점선과 같은 양상으로 일정 값에 도달하여 변하지 않는 반면에 로터를 고려한 상태에서는 양력과 항력이 로터의 영향으로 작게 나타나는 것이 확인 되었다.(1500 step 이전) 그러나 로터가 회전하는 경우(1500 step 이후)에는 그 값이 지속적으로 진동하며, 양력과 항력 계수가 평균적으로 로터를 고려하지 않았을 때보다도 높게 나타남을 알 수 있다. 또한 로터의 피치 각도에 따라서 양력계수의 값이 약간의 차이를 보이는 것도 확인되었다.

Fig. 6은 주익의 50% 스패ن(기체-날셀)에서의 압력 계수(Cp)의 분포를 나타낸 그래프이다. 음영으로 채워진 부분이 날개의 위쪽 표면을 나타내며, 로터가 회전하기 전에는 주익의 표면에서의 압력분포는 거의 같지만 아래 표면에서는 차이를 보이고 있다.

Fig. 7은 회전하는 로터의 성능을 나타내는 대표적인 계수로서 추력과 파워의 계수를 로터의 회전 각

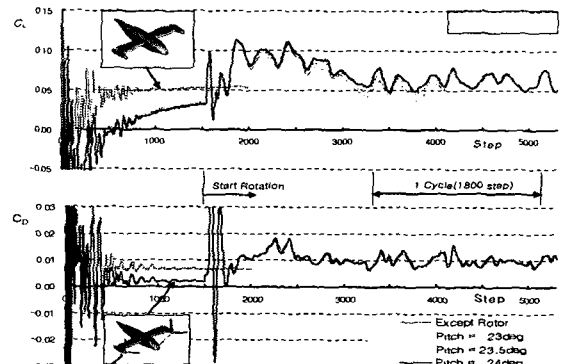


Fig. 5 Histograms of calculated CL and CD

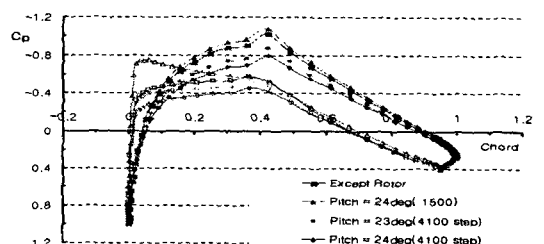


Fig. 6 Distribution of the Cp on the main-wing(50% span)

도에 따라 나타낸 것이며, 피치 각도가 1°만큼 변화에 따라 추력과 파워 계수의 부호가 바뀌는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 8은 3가지 경우의 전진비에 대해 Fig. 7에서와 같이 회전시킨 후 평균을 취하여 얻은 추력과 파워 계수에 대한 그래프이며, TRAM 보고서[5]와 그 값을 비교한 것이다. 본 계산에서 전체적으로 계산된 결과가 약간 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 하지만 각 계수 값이 시간 단계의 조정에 의해 약간의 차이를 보이고 있는 것이 확인되었다. 시간 단계를 0.006에서 반으로 감소시키면 C_Q 값이 C_T 보다 더 낮아져 전체적으로 그래프의 직선이 아래로 내려가는 것이 예상되어 진다.

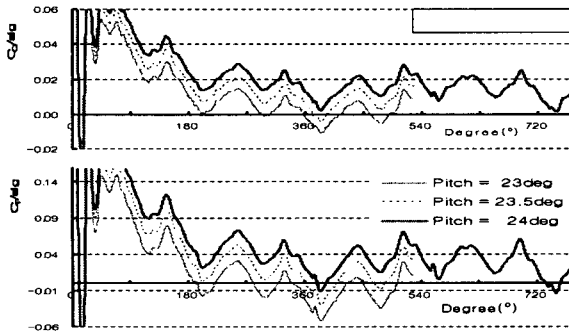


Fig. 7 Histograms of calculated C_T and C_Q

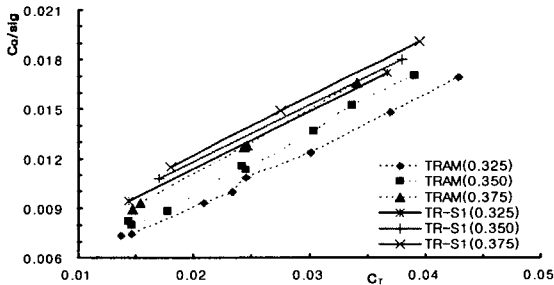


Fig. 8 Comparison of the C_T and C_Q of the rotor with those of the TRAM data

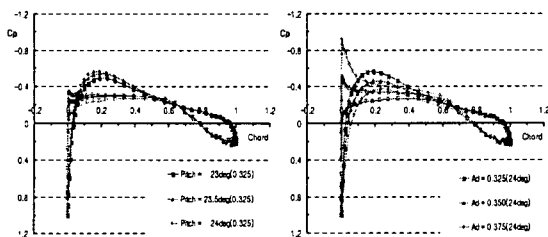


Fig. 9 Distribution of the C_p on the blade (75% span)

마지막으로, Fig. 9는 블레이드가 520°만큼 회전한 상태에서 전진비가 0.325일 경우 피치 각에 따른 블레이드의 표면(75% span)에서 표면 압력계수(C_p)를 나타낸 것이 좌측의 그림이며, 피치가 24°에서 각각의 전진비에 대한 블레이드 표면에서의 표면 압력계수를 나타낸 것이 우측의 그림이다.

5. 결 론

본 연구에서는 로터가 회전하며 순항 비행중인 틸트로터의 복잡한 3차원 유동현상에서 주익과 블레이드의 공력성능 및 간섭 영향을 연구했다. 특히 로터 비행체의 성능을 나타내는 추력과 파워 값은 작은 각도 변위에 대하여 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있었다. 안타깝게도 본 수치해석에서 시간단계의 변화에 따른 추력과 파워의 계산 결과 추이를 보이는 못했지만, 추력과 파워 계수 값이 시간단계가 작아짐에 따라 보다 안정적으로 진동하며 진행되어 가는 양상을 확인할 수 있었다.

후기

이 연구는 과학기술부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 사업(스마트 무인기 기술개발사업단)의 일환으로 수행되었음을 알리며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 고성호, 안성원, 김병수, 2004, "접침격자 기법을 이용한 틸트로터의 순항모드에 대한 공력성능 수치해석", 한국전산유체 공학회 2004년도 추계 학술대회 논문집, pp.86-90.
- [2] 강희정, 권오준, 2000, "비정렬 격자계에서의 점성 효과를 고려한 로터 정지 비행 해석", 한국항공우주학회 2000년도 추계 학술대회 논문집, pp.601-602.
- [3] Meakin, R.L., 1995, "Unsteady Simulation of the Viscous Flow About a V-22 Rotor and Wing in Hover", AIAA95-3463.
- [4] 김철완, 정진덕, 이장연, 2004, "CFD를 이용한 스마트 무인기의 공력특성 분석", 한국전산유체 공학회 2004년도 추계 학술대회 논문집, pp.105-109.
- [5] Johnson, W., 2000, "Calculation of Tilt Rotor Aeroacoustic Model (TRAM DNW) Performance, Airloads, and Structural Loads", American Helicopter Society Aeromechanics Specialists' Meeting, Atlanta, Georgia.