

CFD 분석을 통한 농용 무인헬리콥터 로터익형(SW05)의 적용성 검토

정한경 구영모

Adoptability Review of a Rotor Airfoil (SW05) to an Agricultural Unmanned Helicopter Using CFD Analysis

H. K. Jung Y. M. Koo

Abstract

The task of chemical spraying has been seriously considered as an irritating and annoying job for Korean rice farmers. An agricultural unmanned helicopter was suggested to solve this problem so as the farmers to have more decent farming condition. The objectives of this study were to analyze the adoptability of an experimental rotor blade (SW05) using the CFD simulation and also to compare the simulation results with experimental results.

The simulation results showed that the induced power of this rotor reached to 57~63% of total power and the profile power was about 37~43% of total power. Therefore it can be concluded that this rotor's performance characteristics were not so efficient for the size of unmanned helicopter due to the low induced power and high profile power relatively compared with ones of conventional rotors. The comparison with experimental results showed that the tested lifts were less than 70% of simulated ones at the grip pitch of 12° and decreased to 40% at the 18° grip pitch. Therefore, it can be concluded that the rotor was too oversized to be used for a 15.4 kW (21 PS) engine.

Keywords : Rotor lift, Drag, Induce power, Profile power, CFD analysis, Unmanned helicopter

1. 서론

FTA의 확대에 따라 우리나라의 농산물 시장의 개방은 급속도로 진행되고 있다. 특히 쌀에 대한 수입개방 압력으로 벼 농사를 위한 생산비 절감과 노동력 투하량 저감을 위한 생산 기술의 개발과 기계화가 지속 적으로 요구되고 있다. 그러나, 농촌 인력의 부족과 고령화로 인해 기존의 호스플기식 방제 작업은 매우 귀찮고 해로운 작업으로 인식되어지고 있어 방제작업의 획기적인 생력화가 절실히 요구된다.

차세대 방제 작업 형식으로 가장 기대 되는 것은 소형 무인 헬리콥터를 이용하는 방식이다. 이는 대형 유인 헬리콥터를 이용하는 방제 방식에 비해 안전하고 소규모 지역의 정밀 방

제가 가능하며, 관행적 방법에 비하여 비용이 비교적 저렴하다(Koo 등, 2006). 또한 저투입 살포방식이므로 관행적 방제 작업에 비해 환경 친화적이며 무인 방제이므로 안전성이 높아 인간 친화적라 할 수 있다. 가격, 안정성, 성능, 조작성 등 여러 가지 측면에서 한국형에 적합한 소형 농용 무인헬리콥터를 보급하기 위해서는 관련 기술 이론의 확립과 실기 설계 기술의 축적이 무엇보다 선행되어야 한다.

로터는 헬리콥터의 구성 요소 중 양력 및 항력 등을 결정하는 주요 요소 중의 하나인데 효율적인 로터는 익형의 세장비, 캠버의 위치, 천이구역을 형성하는 두께의 위치 등에 의해서 결정되며 또한 상용 선속도의 범위에도 영향을 미친다(Leishman, 2006). 또한 로터 세로길기와 가로 폭의 비(aspect ratio)에 의

The research was supported by the MOCIE, Korea under the IUPL (Industry-University Partnership Laboratory) support program supervised by SMBA. The article was submitted for publication on 2008-07-21, reviewed on 2008-09-05, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2008-09-23. The authors are Han Kyung Jung, KSAM member, Graduate Student, and Young Mo Koo, KSAM member, Professor, Bio-industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University. Corresponding author: Y. M. Koo, Professor, Dept. of Bio-industrial Machinery Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea; E-mail: <symkoo@knu.ac.kr>.

해 영향을 미치며 적절한 양력과 항력의 비가 최적 범위 안에 있도록 설계되어야한다(Wagtendonk, 2006).

본 연구에서는 시용로터의 익형에 대한 유동 역학적 성능을 시뮬레이션 하였다. 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션은, 실제 규모의 실험에서의 과도한 비용을 피하여 광범위한 정보를 얻을 수 있기 때문에 큰 장점이 있으나 실증시험과 수치해석에서 나온 결과를 비교하여 최적의 결과를 찾아야 한다. 따라서 Seok 등(2006)의 CFD 시뮬레이션에서 검증되어 사용된 바 있는 CFD-ACE(+) (ESI US R&D Inc. huntsville, AL, USA) 모델을 이용하였다.

본 연구의 공시 로터인 농용 무인헬리콥터용 로터(SW05)의 익형(airfoil) 단면의 다양한 받음각에 대한 CFD 시뮬레이션을 실행하여 이론적 양력과 항력 그리고 유도동력과 형상동력 등을 검토하고 실측 시험 결과(농림부, 2007)와 비교 분석을 통해 공시로터(SW05)의 농용 무인헬리콥터에 대한 적용 가능성과 적합성을 알아보는데 연구의 목적을 두었다.

2. 헬리콥터의 로터 역학

가. 양력과 항력

로터의 익형(airfoil)은 큰 양력과 작은 항력을 가지도록 설계된 길고 얇은 2차원 단면이다. 익형 표면의 임의 한 점에서 압력의 크기는 표면에 수직으로 표시된다. 일반적으로 익형 윗면의 압력은 자유유동압력(free-stream pressure)보다 낮은 음 압력이며, 아랫면은 양의 압력이다. 전단응력은 익형 표면과 평행하게 나타나며 익형에 대한 순 힘은 익형 표면의 압력과 전단력을 적분함으로써 구할 수 있다. 따라서 실험이나 계산으로부터 물체 표면 위의 압력과 전단응력의 분포를 알 수 있다면 공기 역학적 힘들은 이들의 적분으로 구해질 수 있다. 항력과 양력은 물체 표면에서의 압력과 전단응력으로부터 발생하는 힘의 적분값이다(부 등, 1997).

Seok 등(2006)은 결론적으로 양력은 익형(airfoil) 주위에 형성된 압력의 수직성분과 전단력의 수직 성분의 합으로 표시하였고, 항력은 압력과 전단력의 수평성분의 합으로 계산하였다.

나. 로터의 소비동력

로터의 동력은 양력과 항력등 힘에 유동속도를 곱하여 얻을 수 있다. 즉 그림 1로부터 동력은 식 (1)로 계산할 수 있다(정, 2008).

$$P = N \int_0^R u dD + N \int_0^R v dL \quad (1)$$

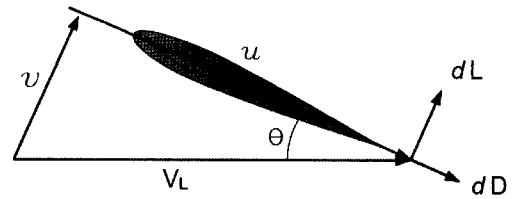


Fig. 1 Flow velocity of airfoil (V_L : linear velocity, θ : pitch angle, $v = V_L \sin\theta$, $u = V_L \cos\theta$, dL : derivative of lift, dD : derivative of drag).

여기서 u 는 상대풍의 수평 방향 속도 성분, v 는 상대풍의 수직방향 속도 성분, D 은 항력, L 은 양력, N 은 깃의 수, R 은 로터 길이이다. 상기 식(1)의 각 식의 첫 번째 항은 깃의 항력으로 발생하기 때문에 형상동력(profile power)이며, 두 번째 항은 유도동력(induced power)이라 한다. 유도동력은 로터의 추력을 얻는데 필요한 동력으로 제자리 비행할 때 주 로터 총동력의 60~85%정도를 차지하고 형상동력은 메인 블레이드의 마찰항력을 극복하는데 필요한 동력으로 제자리 비행 시 메인 로터 동력의 15~40%에 이른다(이 등, 2003).

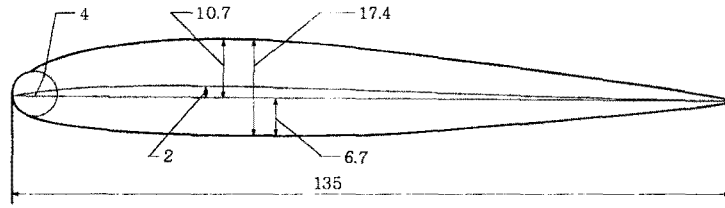
3. 시뮬레이션 방법 및 재료

가. 공시 로터

공시로터(SW05)는 S사가 제작한 시용품으로서 블레이드 길이 1,350 mm이고 회전 반경이 1,507 mm으로써 블레이드 안쪽의 피치가 바깥쪽 보다 큰 비틀림각 6°의 워시 아웃(wash out)형 로터이다. 익형의 시위길이(chord length)는 135 mm, 캠버는 상면이 하면보다 2 mm가 돌출되어 시위길이의 1.5% 정도의 매우 적은 양의 상면 캠버 구조로 거의 대칭에 가까운 익형이다. 본 연구에 사용된 공시로터(SW05)의 익형은 그림 2와 같으며 상기의 제원을 근거로 NACA(National Advisory Committee for Aeronautics) 규정으로 표기한다면 NACA 15313에 해당한다.

나. CFD 시뮬레이션 방법

본 연구에서는 CFD 시뮬레이션을 위한 전처리 과정으로 공시 익형의 격자구조 형성을 위해 CFD-GEOM 프로그램을 사용하였다. 익형의 표면에서 일어나는 유동의 영향이 미치지 않는 유동장의 범위를 설정 하기위해 익형의 전방과 상, 하 방향으로 시위길이(chord length)의 12배 정도의 반경을 가진 반원으로 유동장의 유입부(inlet)를 형성하였고 익형의 후방으로 시위길이의 25배의 거리를 두어 원격장(far field)를 형성하였다.



Chord	Thickness	Max upper camber	Max lower camber	Camber	Leading edge radius
135	17.4	10.7	6.7	2	4

Fig. 2 Dimensions of the experimental airfoil and its profile (unit: mm).

격자 형성은 비정렬 형태(unstructured)로 삼각 메시(triangular mesh)를 사용하였고 이웃하는 격자 크기의 차이가 원만하도록 그리드 포인트를 설정하였다. 비정렬 메시는 메시 배치계의 불규칙성으로 인하여 원하는 유동영역에 대한 격자 적응성이 매우 용이하여 끝단 외류가 존재하는 영역에 대해서도 국부적으로 해상도를 증가시킬 수 있는 이점이 있다(강 등, 2001). 그림 3은 본 공시 익형의 비정렬 격자 형성의 결과로 익형의 근접한 격자 구조들이 국부적으로 조밀하게 나타났음을 알 수 있다.

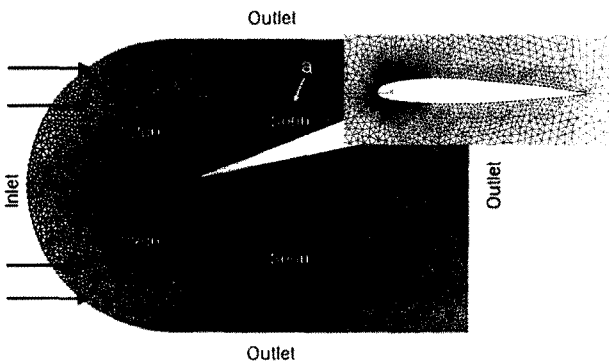


Fig. 3 Unstructured triangular mesh near airfoil and far field (a: number of mesh in each field).

CFD-ACE를 이용한 시뮬레이션에서 원격장(far field)의 경계면 조건(boundary condition: BC)으로 먼저 inlet과 outlet에 대한 상대풍 속도(relative wind velocity)는 식 (2)로부터 로터 블레이드의 각 구간에 대한 로터의 직경과 회전속도를 이용하여 계산한 선속도를 구한 후 식 (3) 및 (4)로부터 로터의 각 구간의 받음각(본 연구에서는 피치각과 동일)에 대한 선속도의 수평 성분(u)과 수직 성분(v)을 구하여 입력하였다.

$$V_L = \frac{\pi D_R n}{1000 \times 60} \quad (2)$$

여기서, V_L 은 로터 각 구간에서의 선속도(m/s), D_R 은 각 구

간에서의 로터 직경(mm), n 은 로터 블레이드의 분당 회전 속도(rpm)이다.

$$u = V_L \cos \theta \quad (3)$$

$$v = V_L \sin \theta \quad (4)$$

여기서, u 는 V_L 의 피치각 θ 에 대한 x 방향 속도 성분이며 v 는 V_L 의 y방향 속도 성분이다.

Seok 등(2006)이 사용한 $k-\epsilon$ 난류 모델을 사용하였으며 자유 흐름의 난류 강도는 통상 속도 성분에 의한 위치에너지의 1%로 가정하고 층류에서의 공기의 점도에 대한 난류에서의 공기의 점도의 비(μ_t/μ)는 0.2로 가정하였다. 따라서 입력 변수인 난류 소산에너지 계수(K) 및 소산율(D)을 산정하여 적용하였다(CFD-ACE, 2004).

그림 4는 본 연구에 사용된 공시로터(SW05)의 형상과 각 구간별 반경을 나타낸다. 본 로터는 비틀림각(wash out)이 6°인 블레이드로 그림에서 블레이드가 편에 의해 고정된 로터 허브의 힌지 지점 즉, 그림부의 피치 각이 로터 끝의 피치각에 비해 6°만큼 크며 본 연구에서는 편의상 로터의 그림부에서의 피치를 기준으로 시뮬레이션을 공칭(公稱)하였고 이를 그림 피치(grip pitch)라 칭하였다. 또한 블레이드 끝부분이나 뿌리부분의 라운드 부를 제외하고 로터의 끝으로부터 10 cm

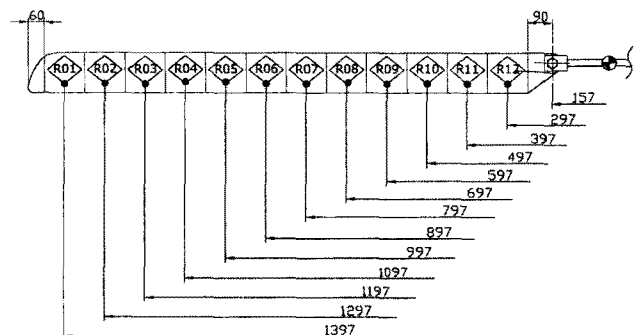


Fig. 4 Rotor blade sections allocated for the CFD simulation and their mean radii of the SW05 blade (unit: mm).

단위로 R01~R12의 12개의 구간으로 나누어 그립피치(grip pitch)가 각각 12°, 14°, 16° 및 18°인 경우에 대해 시뮬레이션 실시하였다.

다. 시뮬레이션 결과의 해석 방법

익형 벽면에 가해지는 압력의 계산을 위해 익형의 상하면 위의 각 노드에서 발생한 압력 힘의 y 성분을 각 해당 노드의 길이로 나눔으로써 익형 벽면에 형성된 압력 분포를 계산하였다. 즉, 로터의 종방향 단위길이에 대한 힘의 개념인 N/m를 다시 횡방향 노드 거리로 나누어 줌으로써 N/m²(Pa), 즉 압력의 개념으로 변환하였다.

또한, 시뮬레이션 결과를 토대로 양력을 계산하기 위해 전술한 바와 같이 익형의 노드와 노드 사이에서 발생한 압력힘 (pressure force)에 대한 y 성분의 힘과 익형 표면에 발생한 전단력의 y 성분을 모두 합산하였다. 익형의 상면에는 익형을 아래로 누르는 힘 즉 음의 방향의 힘이, 익형 하면에는 익형을 위로 떠받치는 힘의 발생할 것이며 이들 값을 합산하면 최종 양력을 계산할 수 있다. 이같이 익형 주변의 압력과 전단력에 의한 단위 길이당 양력(N/m)이 계산되므로 길이가 10 cm인 블레이드 한 구간에 대한 힘으로 환산하였다. 각 구간에서 구해진 양력들을 모두 합산하면 블레이드 전 길이에 대한 양력이 계산되며, 이를 다시 블레이드 수(2)로 곱하여 두 장의 블레이드가 발휘할 수 있는 최대 양력을 계산하였다.

항력을 계산하기 위해서 전술한 바와 같이 시뮬레이션 결과치 중 압력힘에 의해 발생한 힘의 x 성분과 전단력에 의해 발생한 힘의 x 성분을 취하여 블레이드 전체에 대한 항력을 구하기 위해서 상기의 양력 계산 방식과 같은 절차로 계산하였다. 유도동력과 형성동력은 전술한 식 (1)로부터 로터의 각

구간에서의 양력에 수직방향속도 성분(v)을 곱하고 항력에 대해서는 각 구간에서의 수평방향 속도 성분(u)을 곱하여 각각의 동력으로 산출하여 PS로 환산하였다. 시뮬레이션 결과에 대한 검증은 Seok 등(2006)에 의한 다른 익형들의 연구에서 확인된바 있으므로 본 연구에서는 중복된 검증 과정을 생략하였다.

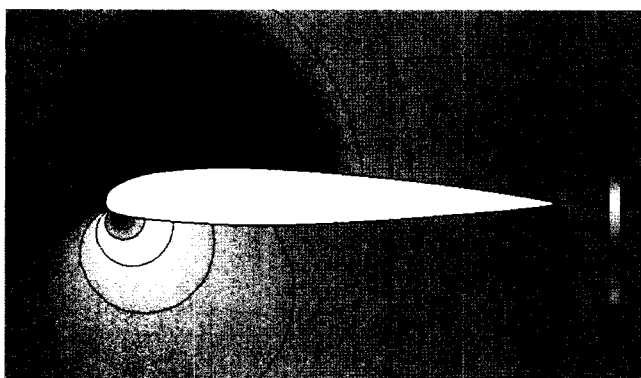
4. 결과 및 고찰

가. 압력 및 속도 분포

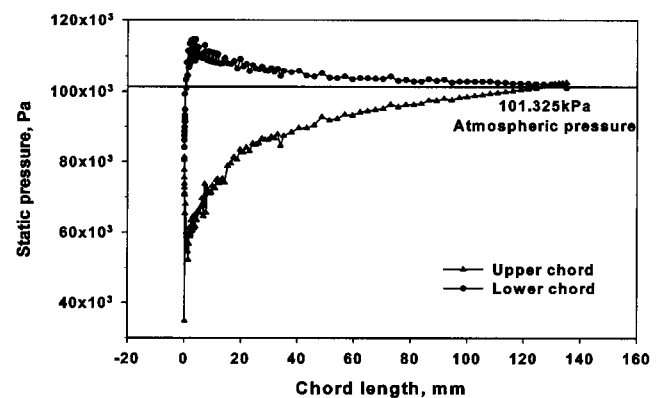
그림 5와 6은 로터의 그립피치(grip pitch)가 18°에서 로터의 가장 바깥쪽 블레이드 단면 즉, R01 구간에서의 시뮬레이션 결과이다. R01 구간의 중심은 로터 중심으로부터 1,397 mm의 거리에 있으며 로터의 적정 회전수에서 회전 선속도는 130 m/s였으며, 또한 그립피치가 18°이므로 R01 구간에서의 받음각(AAT)은 비틀림각(wash out)에 의해 12.5°의 조건을 갖고 있다.

그림 5(a)는 R01 구간의 익형 주변에 형성된 정압력의 분포를 보였다. 익형(airfoil)의 상면은 전반부로부터 압력이 급격히 낮아졌다가 후단으로 갈수록 상승하여 대기압에 근접하고 있으며 익형의 하면의 경우 전반부에서 급격히 상승하였다가 후단으로 갈수록 낮아져 대기압에 근접함을 알 수 있다. 익형 상면과 하면의 압력차는 속도차에 의한 것으로 베르누이 정리에 의해 양력의 원리가 된다.

그림 5(b)는 로터의 그립부에서의 피치가 18°일 때의 익형의 상·하면의 압력 분포로 상면의 경우 전단 부근에서 절대압력이 약 60 kPa까지 하락하나 후단으로 갈수록 상승하여 본 시뮬레이션의 기본 입력값인 원격장(far field)의 절대 대기압(absolute atmospheric pressure)인 101 kPa 부근까지 상



(a) static pressure contour



(b) wall pressure

Fig. 5 Static pressure contour plot and wall pressure distribution along blade surface at the R01 section ($V_L = 130$ m/sec, $R = 1,397$ mm, grip pitch = 18°, AAT = 12.5°).

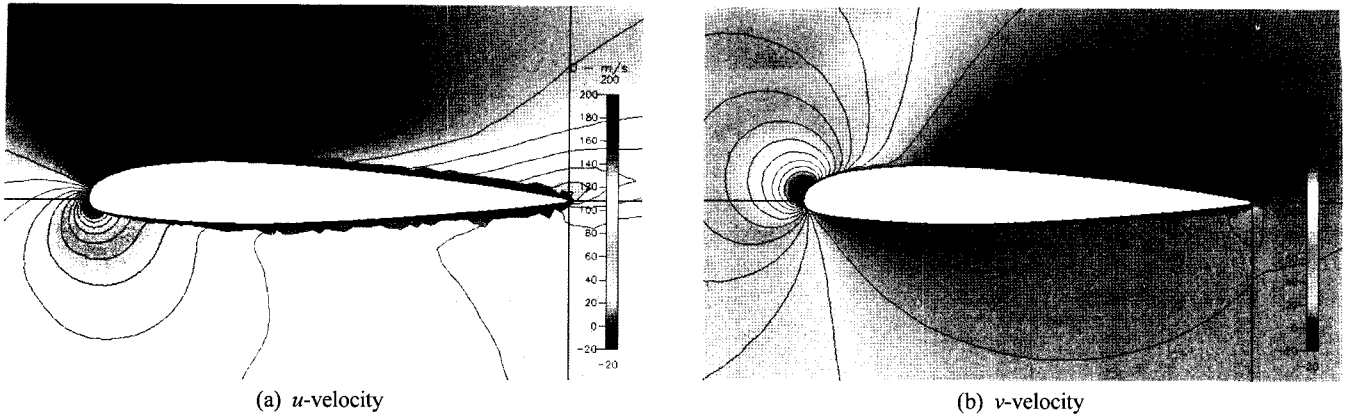


Fig. 6 Velocity contour plot of u- and v-velocity at the R01 section ($V_L = 130$ m/sec, $R = 1,397$ mm, grip pitch = 18° , AAT = 12.5°).

승하였다. 반면 하면의 경우는 전단 부근에서 압력이 110 kPa 까지 상승하였다가 후단으로 갈수록 하락하여 대기압에 이르렀다.

그림 6(a)와 (b)는 그립피치 18° 에 대한 R01 구간에서의 x 방향 속도 성분(u)과 y방향 속도 성분(v)의 CFD 해석 결과이다. 선속도 130 m/s의 수평성분(u)는 127 m/s($130 \text{ m/s} \cdot \cos 12.5^\circ$), 수직성분(v)는 28 m/s($130 \text{ m/s} \cdot \sin 12.5^\circ$)로 사용하였다. 그림 6(a)에서 공기 흐름의 x방향 속도(u)는 익형 전단(leading edge)을 기준으로 상면에서는 국부적으로 200 m/s에 달하는 고속이, 하면 역시 국부적으로 영(0)에 가까운 저속의 공기흐름이 발생함을 알 수 있다. 따라서 그림 5(a)를 함께 고려할 때 유속이 빠르면 저압이 형성되고 느리면 고압이 형성되어 베르누이 정리를 따르고 있음을 알 수 있었다.

그림 6(b)에서 익형 주변의 공기 흐름의 y방향 속도(v)는 익형의 전단부에서 국소적으로 빠르게 나타났고 후단부로는 대부분 느리게 나타나며 특히 익형 상면의 후단부에서 쪽이 매우 느리게 나타났다. 이는 익형 표면의 각 노드점의 접선의 각도에 기인한 것으로 익형의 형상적 특성에 의한 것으로 판단된다. 즉, 익형 표면의 각 노드에 접하는 선이 수직에 가까워질수록 익형 표면을 타고 흐르는 공기의 y방향 성분 즉, (v)이 증가하고 익형 표면에 접하는 선이 수평에 가까워지면 익형 표면을 타고 흐르는 공기의 y 성분은 거의 영(0)에 가까워지는 것이다.

그립피치 16, 14 및 12° 에 대하여 같은 방법으로 R01~R12 각구간의 시뮬레이션이 행하여졌을 때, R01 구간에서 시뮬레이션 조건은 받음각(AAT)이 10.5, 8.5 및 6.5° 로 감소한 것 외에는 그립 피치 18° 의 조건과 동일하다. 시뮬레이션의 결과는 그립 피치가 감소함에 따라 압력 분포에서 저압 및 고압 영역의 면적이 줄어들었고, 익형의 단면의 상면과 하면에 작용하는 압력 곡선이 그리는 삼각형의 면적 또한 줄어들었다. 같은 경향으로서 x방향 속도 성분(u)과 y방향 속도 성분(v)

역시 최고 및 최저 속도의 영역의 넓이가 줄어들었음을 확인하였다(세부 그래프의 게재는 생략되었음).

나. 양력과 항력

그림 7은 그립 피치가 18° , 16° , 14° , 12° 일 때의 양력과 항력의 차이를 비교하였는데 그립피치가 커질수록 양력과 항력이 커지고 로터의 각 구간 반경이 커질수록 양력과 항력의 증가율도 커졌다. 분석한 바 그립 피치 12° 의 경우는 R01과 R02 구간에서의 양력과 항력이 현저히 감소하여 R03에서 R12 구간까지와는 다른 경향을 보였다. 즉 그립 피치가 12° 일 때 R01과 R02 구간의 중심에서의 받음각은 각각 6.5° , 6.9° 로 SW05로터는 받음각 또는 피치 각이 7° 이하가 되면 양력이 거의 발생하지 않았다.

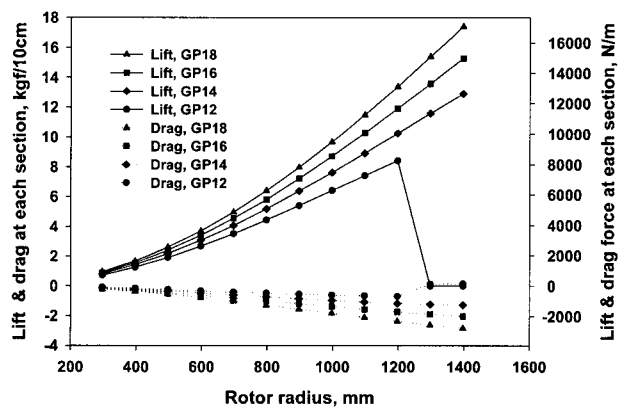


Fig. 7 Lift and drag forces for the grip pitches of 12, 14, 16 and 18° .

그림 8은 그립 피치가 각각 12° , 14° , 16° 및 18° 일 때의 로터 블레이드 12 단면에 걸리는 모든 양력과 항력을 각각 총합한 후 블레이드 수(2)로 곱한 값을 나타내었다. 즉, 이는 그림 7에서 양력과 항력 곡선이 만드는 면적을 각각 x축에 대해

적분 후 블레이드 수(2)로 곱한 값과 일치한다.

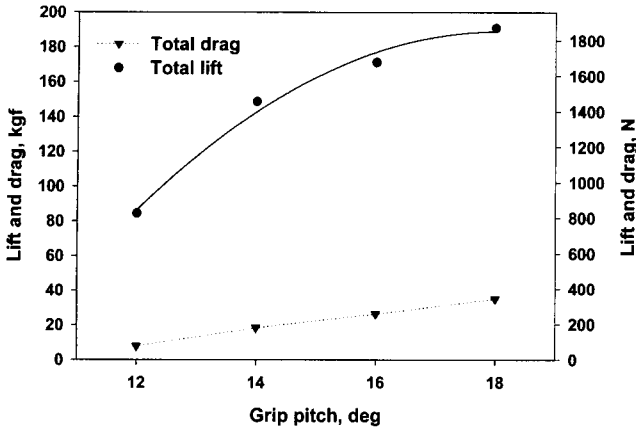


Fig. 8 Total lift and drag for SW05 different grip pitches.

다. 유도동력(induced power)과 형상동력(profile power)

그림 9는 공시 로터(SW05) 각 로터 구간에서 구한 양력과 항력에 대한 유도동력과 형상동력을 구하여 모든 구간에 대해 합산 한 후 블레이드 수(2)를 곱하여 얻어진 로터의 총 유도동력과 형상동력이다.

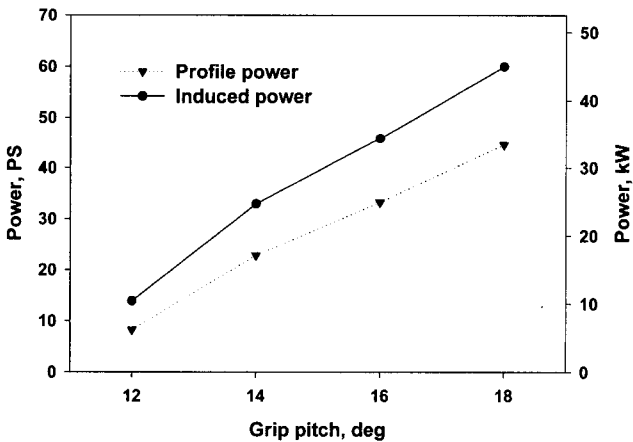


Fig. 9 Total induced power and profile power for SW05 at different grip pitches.

표 1로부터 SW05의 형상동력은 총 동력의 37~43%를, 유도 동력은 총 동력의 57~63%를 차지하고 있음을 알 수 있었다. 로터 피치각이 증가할수록 총 동력에서 양력이 차지하는 비중은 적어지고 항력이 차지하는 비중은 커짐을 알 수 있다. 일반적으로 헬리콥터의 제자리 비행 시 유도동력은 메인 로터 동력의 60~85% 형상동력은 15~40% 차지하므로(이 등, 2003) 본 공시로터(SW05)는 공기의 저항은 상한선에 이르고 효율은 떨어지고 적용에 불리한 조건을 갖고 있는 로터익형

임을 알 수 있었다. 따라서 시용로터(SW05)의 성능을 개선하기 위해서는 익형의 시위 길이를 줄임으로써 로터의 항력과 형상동력을 줄이고, 양력 성능 및 유도 동력을 개선하기 위하여 익형의 하면을 현재 보다 더 평편하게 만들어서 캠버를 증가시킬 필요가 있다.

Table 1 Percent share of profile and induced powers (kW) at different grip pitches for a pair of blades

Grip pitch (°)	12	14	16	18
Profile power	6.1 (37.2%)	16.8 (40.9%)	24.4 (42.0%)	32.7 (42.6%)
Induced power	10.0 (62.8%)	24.2 (59.1%)	33.7 (58.0%)	44.1 (57.4%)
Total power	16.1	41.0	58.1	76.8

라. 실측 양력과 시뮬레이션 양력의 비교

그림 10에는 선행 논문(농림부, 2007)에서 실측된 공시로터 SW05의 실측양력과 본 연구의 시뮬레이션 양력을 비교하여 나타내었다. 논문에 의하면 양력 실측 시험과 본 연구의 시뮬레이션은 비슷한 로터회전속도에서 이루어졌다.

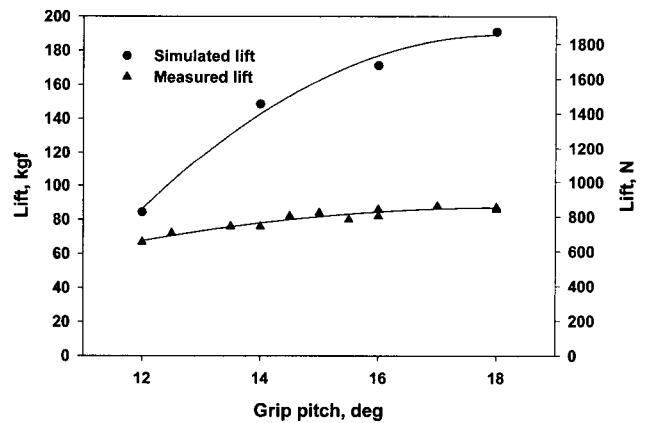


Fig. 10 Comparison of simulation results and measured lifts (농림부, 2007).

그림에서 알 수 있듯이 실측된 양력과 시뮬레이션의 양력은 상당한 차이를 보였다. 특히 각 그립 피치별 양력의 실측치와 시뮬레이션 결과를 비교한 결과 그립 피치가 12°일 때는 실측치가 시뮬레이션 양력에 약 70%에 달하였으나 그립 피치 18°에서는 약 40%정도로 서로 합치하지 않는 결과를 보였다.

따라서 실측 로터를 구동하는 엔진의 출력(15.4 kW) 및 토크의 특성이 SW05 로터가 잠재적으로 발휘할 수 있는 최대 양력을 지원하기에 충분하지 못하기 때문으로 생각되었다.

역으로, 본 공시로터(SW05)는 농용 무인헬기용 21마력 급 엔진에 비해 과도하게 항력이 크고 비효율적이므로 본 시용로터는 소형 농용무인 헬리콥터에는 비효율적이며 불리하다고 생각된다. 그 이유로는 시위길이가 비교적 길어 저항이 많고 캠버량이 적어 고속 회전 시 양력 효율이 떨어지기 때문인 것으로 보인다(Leishman, 2006; Wagtenonk, 2006).

5. 요약 및 결론

시뮬레이션 결과 SW05 로터의 양력은 그림 피치가 12°에서 18°로 점차 증가함에 따라 784.8 N(80 kgf)에서 1,864 N(190 kgf)로 상승하고 유도 동력은 11 kW(15 PS)에서 44 kW(60 PS)로 증가하였으나 총 동력에 대한 유도동력의 비율은 57~63%로 일반적으로 인정되는 헬리콥터의 제자리 비행 시 메인 로터의 유도 동력 비율 60~85%에 비해 낮게 분석되었다. SW05의 시뮬레이션 형상동력은 총 동력의 37~43%를 차지하여 통상적으로 인정되는 헬리콥터의 제자리 비행시의 형상동력 비율 15~40%에 비교 높은 것으로 분석되었으므로 본 공시로터(SW05)는 공기의 저항은 크고 효율은 떨어지므로 소형 농용 무인헬기에는 적합하지 않음을 결론내릴 수 있었다.

또한 양력 실측치와 시뮬레이션 결과를 비교한 결과 그림 피치가 12°일 때는 실측치가 시뮬레이션 양력에 약 70%에 달하였으나, 그림 피치 18°도에서는 약 40%로 떨어졌다. 이는 실측시 사용된 엔진의 동력 공급이 충분하지 않았기 때문으로 역으로 본 공시로터(SW05)는 농용 무인헬기용 15.4 kW(21 PS)급 엔진에 비해 과도한 동력을 요구하며 비효율적이었다.

본 공시로터의 개선을 위한 차기 연구 과제로서 익형의 시위 길이와 익형의 캠버를 조정함으로써 양력 효율을 향상시키고 항력을 줄여야 한다. 또한 비틀림 각을 줄임으로써 과도한 washout에 의해 양력이 발생하지 않는 구간이 생기지 않도록 해야 한다.

참고 문헌

1. CFD-ACE V2004. Modules Manual. ESI US R&D Inc., Huntsville, Alabama.
2. Koo, Y. M., C. S. Lee, T. S. Soek, S. K. Shin, T. G. Kang, S. H. Kim and T. Y. Choi. 2006. Aerial application using a small RF controlled helicopter (I) -status and cost analysis-. Journal of Biosystems Engineering 31(2):95-101. (In Korean)
3. Leishman, J. G. 2006. Principles of Helicopter Aerodynamics (2nd ed.). Cambridge University Press, NY, NY.
4. Seok, T. S., Y. M. Koo and C. H. Sohn. 2006. Aerial application using a small RF controlled helicopter (IV) -CFD simulation of rotor lift-. Journal of Biosystems Engineering 31(4): 343-348. (In Korean)
5. Wagtenonk, W. J. 2006. Principles Helicopter Flight (2nd ed.). Aviation Supplies & Academics Inc., Newcastle, WA, USA.
6. 강희정, 권오준. 2001. 로터 정지비행 점성유동 해석을 위한 비정렬 격자기법. 한국항공우주학회지 29(8):37-44.
7. 농림부. 2007. 저투입 정밀농약살포용 농용무인헬기 개발. 농림 기술개발사업 연구보고서.
8. 부정숙, 서용권, 송동주, 김경천. 1997. 유체역학. 반도출판사. 서울.
9. 이수갑, 최기영, 장세명(S. Newman 원저). 2003. 헬리콥터공학. 도서출판 인터비전. 서울.
10. 정한경. 2008. 농용 무인헬리콥터 로터익형(SW05)의 CFD 시뮬레이션. 경북대학교 석사학위논문. 대구.