

인간동력 항공기용 프로펠러 성능해석

박부민*

Propeller Performance Analysis for Human Powered Aircraft

Poo-Min Park*

ABSTRACT

Propeller is an important component of Human Powered Aircraft (HPA) propulsion system. HPA uses large diameter low rotational speed propeller to get high propeller efficiency. The propeller was designed by HPA propeller designing program. The propeller pitch is adjustable by rotating the blade axis angle at ground. Performance of the propeller for various parameters are analysed by the same program used for design. Off-design condition performance was also checked including pilot power change and flight speed change. The propeller was manufactured in ultra-light structure using carbon composite material down to 950g. The propeller was ground tested on ironbird and installed on KARI HPA. Finally the HPA flew 291m with this propeller.

초 록

프로펠러는 인간동력 항공기 추진시스템의 중요한 구성품이다. 높은 프로펠러 효율을 얻기 위하여 프로펠러는 큰 지름을 가지고 느리게 구동된다. 프로펠러는 인간동력 항공기용 프로펠러 설계 프로그램을 사용하여 설계되었다. 프로펠러의 피치는 지상에서 조정이 가능하다. 본 논문에서는 여러 가지 변수에 대하여 설계에 사용된 동일한 프로그램을 통하여 프로펠러의 성능 해석을 수행하였다. 또한, 파일럿의 체력이나 비행속도의 변화에 따른 탈 설계점 해석도 수행하였다. 설계된 프로펠러는 카본 복합재의 초경량 구조로 제작되어 총 950g의 무게로 제작되었다. 제작된 프로펠러는 아이언 버드에서의 지상 성능 시험을 통하여 속도 및 동력을 측정하고 튜닝을 수행하여 실기에 장착되어 최종적으로 291 m 비행에 성공하였다.

키워드 : Human Powered Aircraft(인간동력 항공기), 프로펠러 설계(Propeller Design), Ironbird Test (아이언버드 시험)

1. 서 론

하늘을 비행하고픈 인류의 열망은 오랜 역사를 가지고 있다. 수많은 시도에도 불구하고 최초의 비행은 1903년 동력을 이용한 라이트형제의 비행 성공이후 결실을 맺게 된다. 이후 전쟁을 거치면서 비행기는 큰 발전을 하게 된다. 하지만 동력장치를 이용하지 않고 인간의 힘으로만 비행하고자 하는 열망은 계속 되었다. 이 열망은 1959년 Kremer Prizes를 시작으로 본격적인 인간 동력비행기 개발이 시작되었다¹⁾. 이후, 세계 각국에서 인간 동력 비행기 개발이 이루어졌으며, 현재 여러 대회가 개최되고 있으며 하나의 축제와 문화로 자리매김해 나아가고 있다.

인간동력항공기에 의한 가장 장거리 비행 기록은 1988년 MIT의 Daedalus가 크레타에서 산토리니까지 비행한 115.1 km 이다. 가까운 일본에서도 1977년부터 오사카 근처의 비와호에서 인간 동력 비행기 경진대회가 개최되고 있으며, 2013년 7월27일과 28일에 제36회 대회를 진행하였다. 이 대회에서 2008년에 도호쿠대 윈드노트 팀이 36 km의 비행 기록을 수립하였다.



그림 1 항우연 인간동력 항공기

이에 발맞추어 항공우주연구원(이하 항우연)에서는 항공산업의 저변 확대와 항공분야 관심 제고 및 인력양성을 위하여 2012년에 시범경진대회를 개최한 데 이어, 2013년 10월 4일에 고흥항공센터에서 제1회 인간동력항공기 경진대회를 개최

하였다. 또한, 항우연에서는 제작성의 문제점과 어려움을 파악하기 위해 그림 1과 같이 시범기를 제작하여 대회에 참가하였다. 아울러, 동력전달장치 구성과 조종사의 훈련을 위하여 지상시험용 아이언버드를 제작하였다.

프로펠러는 인간동력 항공기 추진시스템의 중요한 구성요소 중 하나이다. 인간동력 항공기의 프로펠러는 90% 부근의 높은 추진 효율을 얻기 위하여 3m 전후의 큰 지름을 가진다. 대신 구동 RPM은 아주 낮다. 또한, 일반 프로펠러에 비하여 넓은 코드를 가지며, 무게도 허브 포함 총 1kg 이하의 초경량 특성을 가진다.

프로펠러의 설계는 인간동력 항공기의 프로펠러 설계 전용 프로그램인 Propeller Designer를 사용하여 수행되었다.²⁾ 이 프로그램은 공개 프로그램이며, 일본 등 많은 해외의 인간동력기 팀에서도 널리 사용되고 있다. 기본적으로는 Blade Element Theory를 사용하여 프로펠러의 성능을 해석한다. 설계된 프로펠러의 성능 해석도 동일한 프로그램을 사용하여 수행되었다.

한편, 파일롯의 체력 및 비행 속도가 달라질 수 있음에 대비하여, 프로펠러는 지상에서 블레이드가 허브에 설치되는 각도를 바꿈으로써 프로펠러의 피치를 바꿀 수 있도록 설계되었다. 프로펠러의 피치가 달라지면 별개의 프로펠러처럼 성능을 보이므로, 이러한 피치변화에 대하여 프로펠러 성능 변화에 대한 해석을 수행하여 변화 특성을 파악하였다. 아울러, 비행속도 및 파일롯 파워의 변화에 따른 프로펠러 성능의 변화에 대해서도 해석을 수행하여 특성을 파악하였다.

설계된 프로펠러는 경량 조건을 만족하기 위하여 카본 복합재 스파 및 스킨으로 제작되어, 허브 포함 총 중량이 950g 이다.

제작된 프로펠러는 프로펠러의 지상 성능 시험 및 구동 시스템 개발을 위하여 제작된 아이언 버드에서 파일롯에 의하여 구동 하면서 RPM 및 동력을 측정하였으며, 몇가지 수정 및 보완을 거쳐서 실기에 장착되었다.

2. 인간동력 출력 설정

인간 동력 항공기란 인간의 근력으로만 비행을 하는 항공기로서 인간의 근력이 가장 중요한 동력원이다. 표 1은 국내외에서 가장 널리 사용되고 있는 사이클링에 대한 인간 동력 표이다.³⁾ 표의 값은 몸무게 1 kg 당 출력을 나타낸다.

항우연에서 개척하는 인간동력 항공기 대회의 경진 방식이 400 m 거리를 가는 시간을 기준으로 함을 고려하면, 7~9 m/s 로 400 m를 가는데 약 1분 정도의 시간이 걸린다. 따라서, 1분 기준의 동력소모를 기준으로 할 때, 표 1로부터 트레이닝을 통해 약 7 W/kg 정도의 동력 출력이 가능할 것으로 예상할 수 있다. (표 1의 Fair)

이로부터, 몸무게 60 kg 의 파일럿의 경우, 약 420 W 의 동력을 1분간 유지할 수 있을 것으로 예상된다. 마진을 고려하여 400 W를 인간동력의 기준으로 하고, 여기서 구동시스템의 기계적 손실 10%를 가정하여 360 W를 프로펠러 축동

표 1 체중 1kg 당 인간동력 출력 (W/kg)

	Men				Women			
	5s	1 min	5 min	ET	5s	1 min	5 min	ET
World class	24.04	11.50	7.97	6.40	18.52	8.25	6.05	5.05
	23.77	11.39	7.50	6.31	18.20	8.20	6.02	5.01
	23.50	11.27	7.39	6.22	18.99	8.11	6.02	5.03
	23.22	11.16	7.29	6.13	18.77	8.02	6.03	5.04
	22.95	11.04	7.19	6.04	18.56	8.00	6.04	5.06
Exceptional	22.68	10.93	7.08	5.96	18.34	8.04	6.15	5.08
	22.41	10.81	6.98	5.87	18.13	8.75	6.05	5.20
	22.14	10.70	6.88	5.78	17.91	8.66	5.96	5.12
	21.86	10.58	6.77	5.69	17.70	8.56	5.87	5.03
	21.59	10.47	6.67	5.60	17.48	8.47	5.78	4.95
Excellent (e.g., cat. 1)	21.32	10.35	6.57	5.51	17.26	8.38	5.68	4.87
	21.05	10.24	6.46	5.42	17.05	8.29	5.59	4.79
	20.78	10.12	6.36	5.33	16.83	8.20	5.50	4.70
	20.51	10.01	6.26	5.24	16.62	8.11	5.41	4.62
	20.23	9.89	6.15	5.15	16.40	8.02	5.31	4.54
Very good (e.g., cat. 2)	19.96	9.78	6.05	5.07	16.19	7.93	5.22	4.46
	19.69	9.66	5.95	4.98	15.97	7.84	5.13	4.38
	19.42	9.55	5.84	4.89	15.76	7.75	5.04	4.29
	19.15	9.43	5.74	4.80	15.54	7.66	4.94	4.21
	18.87	9.32	5.64	4.71	15.32	7.57	4.85	4.13
Good (e.g., cat. 3)	18.60	9.20	5.53	4.62	15.11	7.48	4.76	4.05
	18.33	9.09	5.43	4.53	14.88	7.39	4.67	3.97
	18.06	8.97	5.33	4.44	14.66	7.30	4.57	3.88
	17.79	8.86	5.22	4.35	14.44	7.21	4.48	3.80
	17.51	8.74	5.12	4.27	14.22	7.11	4.39	3.72
Moderate (e.g., cat. 4)	17.24	8.63	5.01	4.18	14.00	7.02	4.30	3.64
	16.97	8.51	4.91	4.09	13.78	6.93	4.20	3.55
	16.70	8.40	4.81	4.00	13.56	6.84	4.11	3.47
	16.43	8.28	4.70	3.91	13.34	6.75	4.02	3.38
	16.15	8.17	4.60	3.82	13.12	6.66	3.93	3.31
Fair (e.g., cat. 5)	15.88	8.05	4.50	3.73	12.90	6.57	3.83	3.23
	15.61	7.94	4.39	3.64	12.74	6.48	3.74	3.14
	15.34	7.82	4.29	3.55	12.52	6.39	3.65	3.06
	15.07	7.71	4.19	3.47	12.31	6.30	3.56	2.98
	14.79	7.59	4.08	3.38	12.09	6.21	3.46	2.90
Untrained (e.g., non-racer)	14.52	7.48	3.98	3.29	11.88	6.12	3.37	2.82
	14.25	7.36	3.88	3.20	11.66	6.03	3.28	2.73
	13.98	7.25	3.77	3.11	11.45	5.94	3.19	2.65
	13.71	7.13	3.67	3.02	11.23	5.85	3.09	2.57
	13.44	7.02	3.57	2.93	11.01	5.76	3.00	2.49
13.17	6.90	3.46	2.84	10.80	5.66	2.91	2.40	
12.89	6.79	3.36	2.75	10.58	5.57	2.82	2.32	
12.62	6.67	3.26	2.66	10.37	5.48	2.72	2.24	
12.35	6.56	3.15	2.58	10.16	5.39	2.63	2.16	
12.08	6.44	3.05	2.49	9.94	5.30	2.54	2.08	
11.80	6.33	2.95	2.40	9.72	5.21	2.45	1.99	
11.53	6.21	2.84	2.31	9.51	5.12	2.36	1.91	
11.26	6.10	2.74	2.22	9.29	5.03	2.26	1.83	
10.99	5.99	2.64	2.13	9.07	4.94	2.17	1.75	
10.72	5.87	2.53	2.04	8.86	4.85	2.07	1.67	
10.44	5.76	2.43	1.95	8.64	4.76	1.98	1.58	
10.17	5.64	2.33	1.86	8.43	4.67	1.89	1.50	

력으로 설정하였다. 이를 인간 동력 비행기의 프로펠러 및 기체를 설계하는데 있어 기초 자료로 사용하였다.

그림 2는 NASA 등에서 인간 동력의 출력에 대하여 측정한 것을 정리한 자료인데,⁴⁾ 건강한 사람(Healthy Man)의 경우, 1분까지 400 W를 유지함을 보여주며, 이는 표1과 일치되는 결과이다.

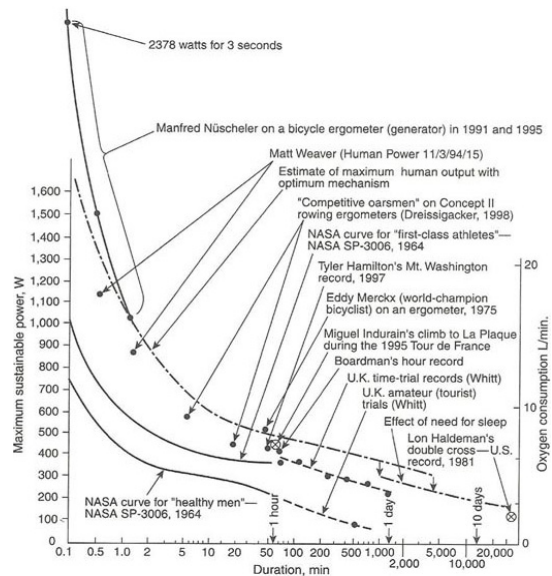


그림 2 시간 경과에 따른 인간동력 출력

3. 프로펠러 기본설계

프로펠러의 설계는 인간동력기 프로펠러 설계용 공개 프로그램인 Propeller Designer 를 사용하였다. 이 프로그램에는 성공적으로 비행한 이전의 인간동력기 프로펠러에 대한 데이터베이스가 들어 있으며, 일본의 버드맨 랠리 대회를 비롯한 해외의 많은 인간동력기 대회 출전 팀들이 이 프로그램을 사용하여 프로펠러를 설계한 것으로 알려져 있다.

프로펠러의 에어포일은 여러 기체에 사용되어 검증된 DAE51을 사용하였고, 2개의 블레이드를 적용하였다.

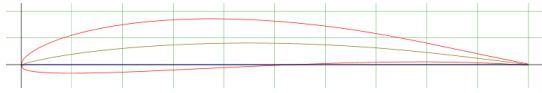


그림 3 DAE51 에어포일 형상

이론적으로 프로펠러의 지름이 클수록 효율이 좋아지나, 항우연 시범기의 기체 높이가 1.6 m 인 관계로, 지면과의 간섭을 피하기 위하여 지름은 3 m 로 설정하였다. Daedalus의 경우는 프로펠러의 지름이 3.4 m 로 본 프로펠러보다 크며, 2013년 인간동력기 경진대회의 참가팀 프로펠러 중 최대 지름도 3.4 m 였다.

앞서 말하였듯이 설계조건인 인간동력 출력은 400 W를 기준으로 하였고, 이때의 프로펠러 축동력은 360 W 이다. 프로펠러 설계를 위한 기준 속도는 속도 경기 임을 감안하여 장거리 순항기에 비하여 조금 빠른 9 m/s를 적용하였다.

 표 2 인간동력 400 W 시의 설계 프로펠러 성능 데이터 ($P_{shaft} = 360$ W)

V	RPM	J	η	T	P_{prop}	Q
m/s			%	N	W	Nm
4	166	0.48	41.7	37.5	150	20.7
5	155	0.65	64.3	46.3	231	22.2
6	139	0.87	81.1	48.7	292	24.8
7	136	1.03	86.2	44.3	310	25.3
8	141	1.14	88.7	39.9	319	24.4
9	146	1.23	90.0	36.0	324	23.5
10	153	1.31	90.7	32.7	327	22.5
11	160	1.37	91.1	29.8	328	21.4
12	169	1.42	90.8	27.3	328	20.4
13	177	1.47	89.9	24.9	324	19.4
14	186	1.50	88.3	22.7	318	18.4

최적화된 프로펠러에 대하여 속도별 추력 데이터가 표 2이고, 그래프로 나타낸 것이 그림 4

이다. V 는 기체의 비행속도, J 는 전진비 (Advance Ratio), η 는 프로펠러 효율, T 는 추력, P_{shaft} 는 축동력, P_{prop} 은 추진동력, Q 는 축의 토크이다. 이 변수들은 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$J = \frac{V}{nD} \quad (1)$$

$$P_{prop} = TV \quad (2)$$

$$P_{shaft} = Q\omega \quad (3)$$

$$\eta = \frac{P_{prop}}{P_{shaft}} = \frac{TV}{Q\omega} \quad (4)$$

식 1~4에서 n 은 초당 회전수 (RPS), D 는 프로펠러의 지름, ω 는 프로펠러의 각속도이다.

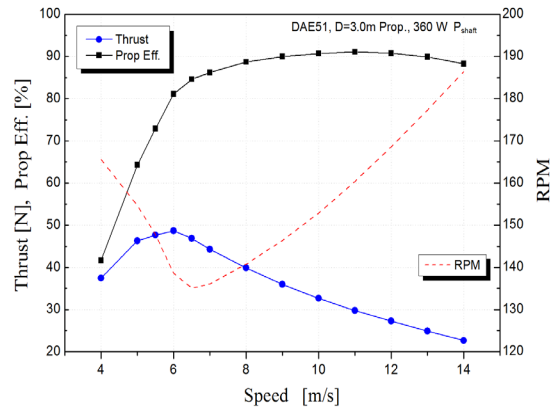


그림 4 인간동력 400 W (축동력 360 W) 시의 속도별 프로펠러 추력 데이터

프로펠러는 설계점인 9 m/s에서 90%의 효율을 가진다. 6 m/s 이하의 속도에서는 효율이 급격히 떨어지나 그 이상에서는 거의 평탄하다. 특히, 주 사용 영역으로 예상되는 8 ~ 10 m/s 정도에서는 대략 90% 정도의 효율을 보인다. 이는 경비행기의 사용되는 프로펠러의 효율이 70%대 임을 상기할 때 매우 높은 효율임을 알 수 있다.

6 m/s 이하의 저속에서는 효율이 급격하게 떨어지면서 RPM이 다시 증가 하는 것을 볼 수 있는데, 이는 블레이드에서 스톨이 일어나서 높

은 RPM에도 불구하고 동력만 소모되고 추진력이 발생하지 않는 것이다. 그러나, 인간동력기의 경우에 출발 시 저속에서는 프로펠러 자체의 추력보다는 보조자가 밀어서 가속을 하게 된다. 따라서 저속에서의 낮은 효율은 크게 문제가 되지 않는다.

이처럼 저속에서 프로펠러의 효율이 낮으므로, 조종사는 낮은 속도에서는 아이들만 하다가 충분한 속도가 붙은 다음에 프로펠러로 추진하는 것이 조종사의 체력 안배에 유리하다.

그림 5는 표 2 및 그림 3의 프로펠러 성능을 프로펠러 성능계수 (C_T , C_P)로 나타낸 것이다. 효율 곡선의 형태는 일반 프로펠러와 유사하나,^{5,6)} C_T 및 C_P 는 낮은 전진비에서 심하게 감소한다. 그리고, 효율이 최고점인 전진비가 일반 프로펠러에 비해 높게 나오는데, 이는 비행속도(전진비) 대비 추력이 낮은 고효율 프로펠러의 특징이다.

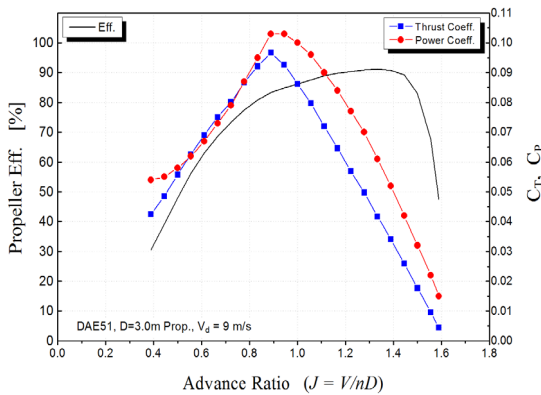


그림 5 프로펠러의 성능계수

4 프로펠러 변수 해석

설계된 프로펠러를 기준으로 하여, 여러 가지 설계변수를 변화시키면서 성능의 변화를 파악하였다.

4.1 프로펠러 지름 변화

프로펠러의 지름은 제작된 후에 변화 될 수 없

는 변수이나, 지름을 3 m 로 선정된 것이 적절 한지에 대해서 확인하기 위하여 변수해석을 수행 하였다. 그림 6은 프로펠러 지름변화에 따른 성능의 변화이다.

프로펠러의 지름이 작은 경우 저속에서 효율이 떨어지고, 13 m/s 이상의 고속에서는 효율이 높아진다. 그러나, 기체가 이보다 높은 속도를 사용할 가능성이 없으므로 낮은 속도 영역에서의 효율이 높은 지름이 큰 프로펠러가 유리하다. Daedalus가 3.4 m 의 큰 지름을 가지는 프로펠러를 사용한 것도 이 때문이다.

효율이 비슷하므로, 동일한 축동력에 대하여 추력도 유사하게 나타난다. 이에 비해 구동 RPM은 많이 차이 나며, 지름이 작을수록 높은 RPM을 가진다. 또한, 같은 축동력에서 RPM의 증가는 프로펠러 축에 걸리는 토크의 감소를 의미한다. 이러한 사용 RPM 차이는 크랭크와 프로펠러 구동부 사이의 증/감속비를 조절하여 해결 가능하다.

앞서 언급한 바와 같이 기체의 형상이나 구조적인 한계로 인하여 프로펠러의 지름은 3.0 m 로 결정 되었으며, 그림 5에서 보다시피 3.0 m 지름의 경우, 효율은 지름 3.44 m 와 2.7 m 의 중간 정도를 보이는데, 효율저하의 정도가 1~2% 정도로 그다지 크지 않으므로 지름 3 m 프로펠러를 적용하는데 큰 문제는 없다.

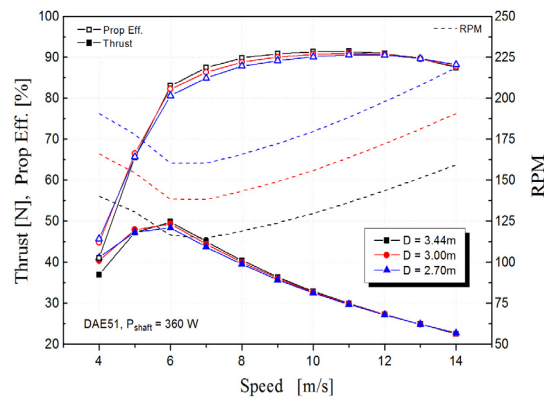


그림 6 프로펠러 지름에 따른 성능 변화

4.2 프로펠러 피치 변화

항우연 시범기의 프로펠러는 허브에 두 개의 블레이드가 장착되는 형태이다. 이때 허브에 각 블레이드가 장착되는 각도를 조절하여 프로펠러의 피치를 변화시킬 수 있다. 장착각도를 증가시키면 피치가 커지고, 장착각도를 줄이면 피치가 작아진다. 이러한 피치의 변화는 완전히 다른 프로펠러가 되게 하는 효과가 있으므로, 파일럿의 동력이나 비행 속도 등의 변화에 따라 피치를 바꾸으로써 프로펠러가 변화된 조건에서 최적의 성능을 내도록 할 수 있다. 제작이 되면 변경이 불가능한 프로펠러의 지름과 달리 피치의 변화는 제작된 후에 변화가 가능하므로, 비행 시험 현장에서 쉽게 활용 가능한 방법이다.

그림 7로부터, 프로펠러의 피치를 줄이면 최고 효율 및 전반적인 효율은 떨어지나, 낮은 속도 영역에서의 효율은 좋아지고, 효율이 높은 영역도 낮은 속도 쪽으로 확장됨을 볼 수 있다. 결과적으로 낮은 속도에서의 추력이 많이 증가하게 된다. 따라서, 저속에서 파일럿에 의한 가속시에 유리한 성능이다. 반면에 고속에서는 효율이 떨어지게 되어 불리하다.

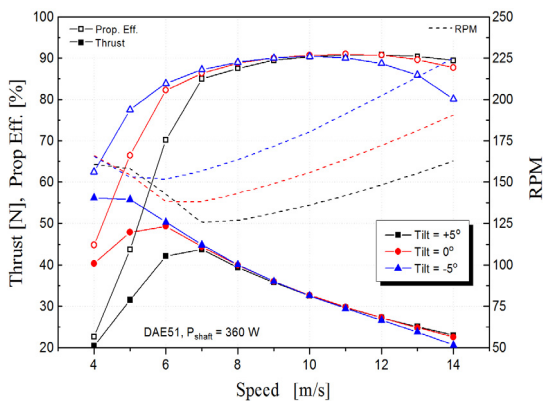


그림 7 블레이드 장착각도에 따른 성능 변화

설계 속도인 9 m/s 부근에서의 효율은 피치를 바꾸어도 크게 변화가 없는데, 피치 변경에 따른 구동 RPM의 변화가 발생하므로, 이는 구동 기어

비의 변화와 같은 효과를 가진다. 실제로 2012년 항우연 시범기의 경우, 비행시험에서 프로펠러의 구동이 힘에 부친다는 파일럿의 의견이 있어서 장착각도를 -5도로 조정하여 비행에 성공하였다.

피치를 낮추는 경우, 저속에서 효율이 좋아지므로 파일럿의 동력이 부족하여 기체의 속도가 낮게 설정하는 경우에도 피치를 낮추면 유리하다. 낮은 피치를 가지는 프로펠러의 경우, 구동 RPM은 높아지게 되는데, 높은 RPM은 낮은 토크를 의미하므로, 이 또한 힘이 부족한 파일럿에게 유리한 측면이다. 반대로, 파일럿의 파워가 충분하여 설계보다 높은 속도로 비행이 가능한 경우는 피치를 증가시키는 것이 유리하다.

그림 8은 프로펠러 장착각도의 변화에 따른 프로펠러 효율곡선의 변화를 본 것이다. 그래프의 마크는 그림 7의 각 장착각도에 대한 효율 커브상의 마크에 대응한다. 그림에서 보듯이 피치 장착각도 변화시키는 경우 프로펠러의 효율 곡선은 서로 달라진다. 다시 말해서 피치 변화만으로 여러 가지 다른 프로펠러를 확보하는 것과 같다.

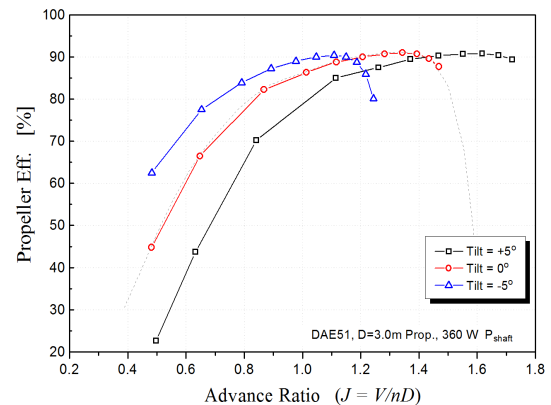


그림 8 장착각도에 따른 프로펠러 효율곡선

그림 8에서 마크들의 속도 구간은 동일하나, 같은 속도 구간에 대해 전진비로 표시한 구간은 다를 수 있다. 또한, 피치를 증가시키는 경우에 고효율 영역이 높은 전진비 쪽으로 이동하면서 최고 효율도 높아지게 되어 고효율 프로펠러의 특성을 보임을 알 수 있다.

낮은 피치의 경우, 최고 효율 값 자체도 낮지만, 속도가 증가함에 따라 최고효율 전진비를 지나게 되어 효율이 급격하게 감소하는 영역으로 들어가게 되므로 고속영역에서는 효율의 감소폭을 알 수 있다.

4.3 축동력 변화

파일롯에 의해서 발생하는 축동력을 360 W (인간동력 400 W) 로 두고 프로펠러가 설계되었는데, 이 프로펠러를 더 낮거나 높은 동력으로 구동하는 경우에 대하여 성능 해석을 수행한 것이 그림 9이다.

축 동력이 270 W (인간동력 300 W) 로 낮은 경우에는 낮은 속도 영역에서 효율이 높고, 축동력이 450 W (인간동력 500 W) 로 높은 경우에는 높은 속도 영역에서 효율이 높다. 저속에서는 필요 축동력이 낮고 고속에서는 높으므로, 이러한 축동력에 따른 성능 변화 특성은 실제 활용에서 유리한 특성이다.

동일한 프로펠러에 대해 축동력만 변화 시킨 것이므로, 낮은 동력의 경우에 프로펠러 구동 RPM도 낮고 추력도 떨어짐을 볼 수 있다.

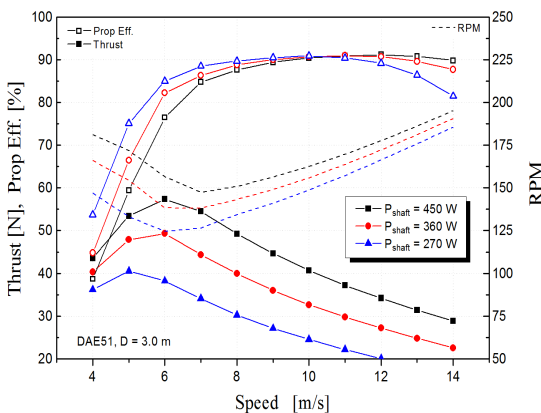


그림 9 축동력에 따른 성능 변화

낮은 동력으로 구동하는 경우에 같은 속도에서 당연히 추력이 낮게 나타나는데, 이 경우 기체의 항력이 추력보다 크다면 기체는 감속되게

된다. 감속하게 되면 동일한 동력에서 추력이 증가하고 감속에 의해서 항력이 감소하므로 어느 속도에서 기체는 평형을 이룬다. 이 지점에서 항력이 충분하다면 이 속도로 비행이 가능하나, 항력이 불충분 하다면 기체는 결국 착륙하게 된다.

그림 10은 축동력 변화에 따른 프로펠러의 효율곡선 변화를 보여준다. 그래프의 마크는 그림 9의 각 축동력에 대한 효율 커브 상의 마크에 대응한다. 그림 8의 피치에 따른 효율 변화 커브와 가장 크게 차이나는 점은 작동점들이 위치하는 효율 커브가 동일하다는 점이다. 다시 말해서, 동일한 프로펠러에서 사용 전진비의 범위가 달라짐에 따라 효율이 변한 것이라는 점이다. 동일한 프로펠러에서 동일한 비행 속도이지만, 동력이 달라짐에 따라 프로펠러의 구동 RPM이 달라지므로 사용 전진비 영역은 달라지게 된다.

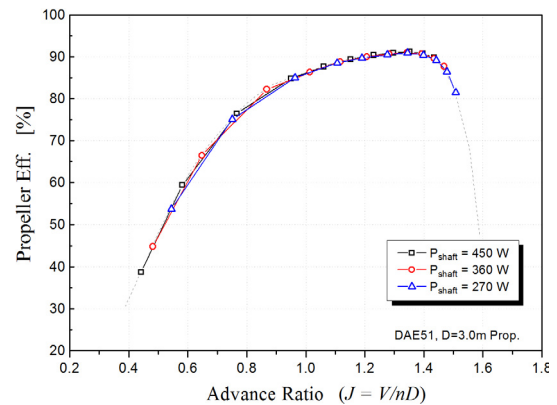


그림 10 축동력에 따른 프로펠러 효율곡선

높은 축동력을 사용하는 경우는 전진비가 상대적으로 낮아서 높은 비행 속도에서는 최고 효율점 부근에서 운영되나, 낮은 비행 속도에서 낮은 전진비까지 내려가므로 효율이 떨어지게 된다.

반면에 낮은 축동력의 경우에는 전진비가 상대적으로 높아서 높은 비행속도에서 최고 효율점을 지나 효율이 급격히 떨어지는 지점에 해당되어 효율이 떨어지게 되나, 낮은 속도 영역에서는 상대적으로 효율이 높다.

5. 아이언 버드 성능시험

제작된 프로펠러에 대하여 아이언버드에서 지상 성능 시험을 수행하였다. 아이언버드는 프로펠러의 지상 성능 시험 및 동력전달장치의 최적 설계를 위하여 제작된 것이다. 또한, 파일롯의 훈련에도 활용 가능하다. 지상정지 시험을 통하여 비행중의 프로펠러 성능은 확인할 수 없으나, RPM 에 따른 대략적인 부하는 확인 가능하다. 비행 상태에서의 정확한 프로펠러 성능을 확인하기 위하여 현재 항우연에서는 프로펠러 풍동 시험장치를 제작 중이다.

그림 11은 아이언버드의 개략도로 간단한 구성을 확인할 수 있다. 아이언버드는 토크미터와 rpm 센서를 사용하여 실시간 프로펠러 축동력의 측정을 가능하도록 구성하였으며, 의자의 각도, 의자와 크랭크 축간의 거리, 의자와 크랭크 축간의 각도를 변경할 수 있어 조종사의 최적 자세를 결정하기 위한 용도로 활용하였다. 당초 추력까지 측정 가능하도록 되어있으나, 파일롯의 구동 동작에 따른 충격량 대비 추력이 너무 작아서 유효한 추력 데이터는 얻지 못했다.

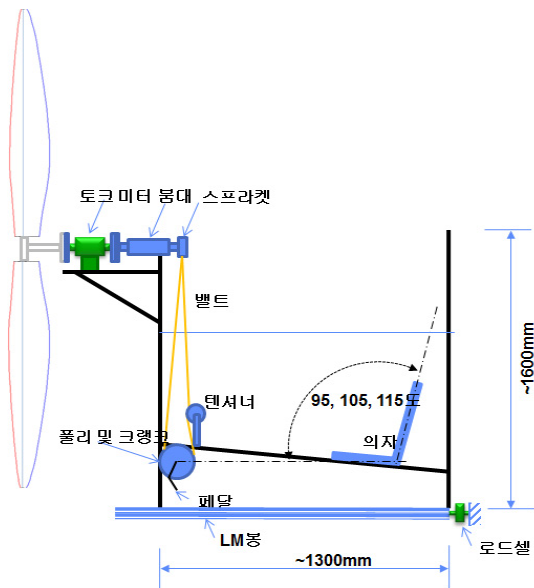


그림 11 아이언 버드 개념도

시험결과 최적의 의자각도는 115°로 파악되었으며, 축간의 거리는 파일롯에 따라 다르다.

그림 12는 아이언 버드에서 파일롯을 이용하여 프로펠러를 구동하면서 동력측정시험을 수행하는 모습이며, 그림 13은 1분간 구동하면서 측정된 결과이다.



그림 12 아이언버드에서의 프로펠러 지상정지 시험

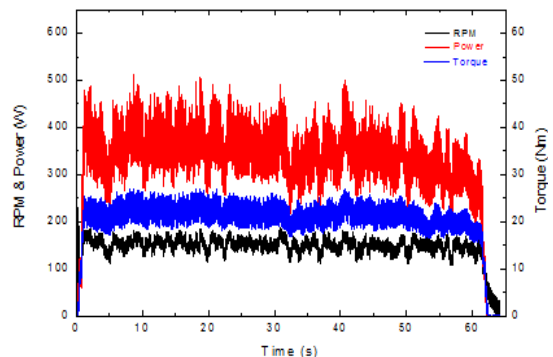


그림 13 지상 정지시험 측정 결과

시험시 파일롯은 프로펠러 속도 150 rpm을 유지하도록 프로펠러를 구동하였다. 시험 결과, 350 W 정도의 축동력이 발생하였으며, 이는 설계점에서의 축동력인 360 W 와 유사한 값이다. 따라서 아이언 버드는 파일롯에게 실제 비행과 유사한 RPM-부하 관계를 경험할 수 있도록 할 수 있으므로, 파일롯의 구동 훈련에 적합함을 알 수 있다. 시간이 감에 따라 출력이 줄기는 하였지만,

파일럿은 1분간 이 부근의 출력을 유지하였다.

아이언 버드에서 비행 조건의 모사가 안 되므로, 실제적으로 아이언 버드에서의 지상시험은 추진 성능보다는 프로펠러의 구조적인 검증을 위하여 실시되었다. 이 시험을 통하여 프로펠러의 변형 및 구조 파손 등의 문제가 발생되어 몇 차례 블레이드 루트 부분의 보완이 수행되었으며, 2013년도에 새로 제작된 프로펠러는 루트 부분의 강성이 크게 증가하여 성능에 영향을 주는 구동시의 변형이 줄어들었다.



그림 14 기체에 장착된 프로펠러

6. 결 론

항우연의 인간동력 항공기에 장착하기 위한 프로펠러를 설계하고, 이 프로펠러에 대하여 다양한 조건에 대하여 변수해석을 수행하여 활용성을 검증하였다. 그 결과, 프로펠러의 설계는 적절하며, 속도 변화나 파일럿 동력의 변화에 따른 탈설계점에서도 큰 성능 저하 없이 사용이 가능함을 파악하였다. 또한 블레이드 설치 각도의 변경을 통하여 기어비 변경과 같은 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

설계 형상 안을 바탕으로 경량구조로 제작된 프로펠러는 아이언 버드를 통한 지상 정지시험을 거쳐 일부 구조적인 보강을 거친 뒤 실기체에 장착되었다.

본 프로펠러가 장착된 항우연 시범기는 2012년 10월 14일 인간동력항공기 시범 경진대회에서 참가팀 중 유일하게 비행에 성공하여 240 m 비행의 한국 기록을 달성하였고, 2013년 10월 4일 제 1회 인간동력항공기 경진대회에서는 291m 비행에 성공하여, 재차 한국기록을 달성하였다.

참 고 문 헌

1. 이일우 "인력 비행기(Human Powered Aircraft) 이야기," KSAS 매거진 제3권 제1호, 2009, p. 23-31
2. <http://www.propdesigner.co.uk/>
3. Hunter Allen and Andrew Coogan, "Training and racing with a powermeter" 2nd Ed., Velopress, 2005
4. Wilson, D.G., "Bicycling Science" 3rd Ed., MIT Press, 2004
5. W. F. Durand, "Tests on thirteen navy type model propellers", NACA report No. 237, 1927
6. E. P. Hartman and D. Biemann, "The aerodynamic characteristics of four full-scale propellers having different plan forms", NACA report No. 643, 1938