

論文

DOI:10.5139/JKSAS.2010.38.4.309

회전익 항공기의 기본설계 및 가격예측 연구

이충연*, 고광호*, 정성남**, 유영훈**

Preliminary design and cost estimation of helicopters

Choong Yun Lee*, Kwang Ho Ko*, Sung Nam Jung** and Yung Hoon Yu**

ABSTRACT

In this work, the helicopter price estimation formula from Harris & Scully is revised and updated for more accurate prediction of the current prices of helicopters which can be applied in the preliminary design stage. As many as 74 helicopter price and sizing data after the year 1997 are newly included to the out-dated coefficients in the cost estimation formula. In addition, the updated price estimation formula is added to Tishchenko's preliminary sizing method for price consideration in the preliminary design stage. Sikorsky's S-76C+ helicopter is used along with other various helicopters for comparison and validation of the sizing code as well as the new updated price estimation formula.

초 록

기본설계 단계에서 회전익 항공기의 가격을 보다 정확하게 예측하기 위해서 Harris & Scully에 의해 제시된 가격 예측 식을 최신의 추세식으로 수정하였다. 이를 위해 1997년 이후의 총 74개에 대한 회전익기 가격 및 제원 정보를 이용하여 가격 예측 식을 업데이트하였다. 업데이트 된 가격 예측식을 Tishchenko의 기본설계 기법과 통합하여 기본설계 단계에서 가격을 고려하도록 구성하였다. 본 기본설계 및 가격예측 프로그램을 현재 운용되고 있는 미국 Sikorsky사의 S-76C+를 비롯한 여러 기종의 헬리콥터에 적용하여 가격과 제원 결과를 도출하고 검증하여 본 연구의 유효성을 확인하였다.

Key Words : Helicopter preliminary design(회전익기 기본설계), Price Estimation(가격예측), Sizing code(제원 결정 코드)

1. 서 론

회전익 항공기는 수직이착륙 및 정지비행등의 특성으로 인해 군용, 준군사용 및 민간용 임무를 수행하는데 중요한 역할을 한다. 그러나 고정익 항공기에 비하여 회전익 항공기는 개인운송수단

이나 정기항공 운송수단으로 각광을 받고 있지 못하다. 이는 회전익 항공기의 가격과 운용비용이 고정익 항공기에 비하여 높기 때문으로 분석된다. 이는 고정익 항공기의 가격을 결정하는데 가장 큰 요소가 구조중량인 반면에 회전익기는 최대출력의 영향이 더 크기 때문이다[1,2]. 때문에 고정익 항공기와 같이 구조중량을 최소화하는 방향으로 설계된 회전익 항공기의 가격과 운용비용이 높다. 그러므로 보다 경제적인 회전익 항공기를 설계하기 위해 설계초기단계에서의 정확한 가격 예측이 필요하다.

† 2009년 12월 29일 접수 ~ 2010년 3월 24일 심사완료

* 정회원, 건국대학교 항공우주시스템공학과 대학원

** 정회원, 건국대학교 항공우주시스템공학과
교신저자, E-mail : snjung@konkuk.ac.kr
서울 광진구 화양동 1번지

정확한 회전익 항공기의 가격 예측을 위해 Harris & Scully[2,3]는 120여개의 회전익 항공기의 가격 및 제원 정보를 이용하였다. Harris & Scully에 의해 제시된 가격 추산 식은 회전익 항공기에 사용되는 엔진의 종류와 개수, 엔진의 출력 마력, 그리고 주 로터(main rotor)의 개수와 각 로터의 블레이드 개수 등의 설계변수를 이용한다. 그러나 15~20년 이전의 가격정보를 이용하여 구성된 식을 이용하여 현재의 회전익 항공기의 가격을 정확히 예측하기에는 다소 무리가 있다.

본 연구는 기본설계 단계에서 회전익 항공기의 가격을 보다 정확하게 예측하는 방법을 정립하고자 한다. 이를 위해 10여 년 전 Harris & Scully[2,3]에 의해 제시된 가격 예측 식을 수정·보완하도록 한다. 최신의 회전익기 설계 추세를 반영하기 위해 2007년도 이후에 발표된 총 74개의 회전익기 가격 및 제원 정보를 이용하여 가격 예측 식을 업데이트하였다. 업데이트된 가격 예측 식과 Tishchenko[5]의 기본설계 방법을 통합하여 기본설계 단계에서 가격을 예측할 수 있게 하였다. 이를 검증하기 위해 현재 운용중인 다수의 회전익기 자료들을 토대로 가격 예측 및 제원 결과를 도출하고 본 연구의 유효성을 확인하였다.

II. 본 론

2.1 모델 회전익기 선정

본 연구에서 사용된 Tishchenko의 기본설계 방법과 새롭게 업데이트된 가격 예측 식을 비교 검증하기 위한 모델 회전익기로 미국 Sikorsky사의 S-76C+, Eurocopter사의 EC-120B, 그리고 Bell사의 206B 헬리콥터(표 1)를 이용하였다. 위의 헬리콥터는 민간용 헬리콥터로 제원과 가격, 운용비용등이 공개되어 있어 본 연구의 모델 헬리콥터로 활용하기에 적합하다.

2.2 회전익기 가격 예측

회전익기의 가격은 각 항공기의 크기, 성능, 제조사에 따라 다르며, 회전익기의 임무에 수반되는 임무수행 장비에 따라 가격이 크게 변한다. 본 연구에서는 임무장비를 제외하고 항공기의 기본가격(base price)만을 고려하여 가격을 추산하였다. 가격정보로는 회전익기 블루북[6]의 자료를 이용하였으며, 비교를 위하여 Harris & Scully[2,3]가 사용한 회전익기들과 동일한 기종

Table 1. Specifications of model helicopter

	S-76C+	206B	EC-120B
Weights			
Max. Gross (kg)	5307	1452	1715
Empty (kg)	3245	725	960
Useful Load (kg)	2062	727	755
Fuel Weight (kg)	860	231	325
Power Rating			
Take Off (kw)	1197	236	375
Continuous (kw)	969	258	335
OEI (kw)	760	N/A	N/A
Performance			
Service Ceiling (m)	3871	4115	5182
HIGE (m)	1722	3444	2819
HOGE (m)	549	2073	2316
Economical Cruise Speed (km/hr)	257	215	191
$V_{N.E.}$ (km/hr)	287	226	278
Main Rotor System			
Number of Blades	4	2	3
Diameter (m)	13.41	10.15	10.0
Chord (m)	0.39	0.33	-
Tail Rotor System			
Number of Blades	4	2	8
Diameter (m)	2.44	1.58	-
Chord (m)	0.16	0.15	-
Range			
Max Fuel (km)	797	576	732
Endurance (hrs)	2.6	3.6	4.18

으로 구성되도록 하였다. 이때 단종된지 20년이 지난 30여개에 이르는 구형 회전익기들을 제외하고 총 74개의 기종 정보를 포함시켰으며, 결국 Harris & Scully와 차별화 한 최신의 추세식을 얻도록 하였다. 헬리콥터 블루북[6]에서 2007년 이전의 가격만 제시된 경우에는 소비자 물가지수(Consumer Price Index, CPI)[7]를 고려하여 업데이트 하였다.

Fig. 1은 각 항공기별 구조중량과 2007년도 미화 기준으로 환산한 기본가격 간의 관계를 보

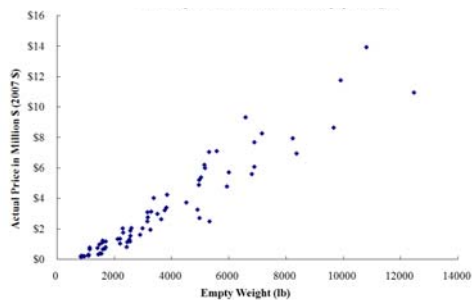


Fig. 1. Helicopter base price in relation with the empty weight

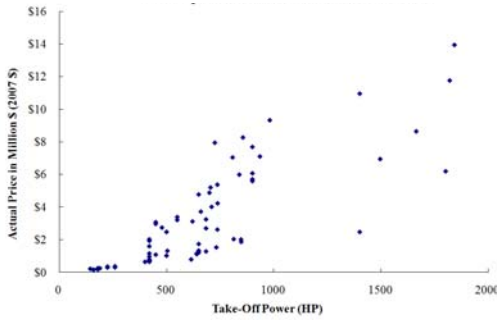


Fig. 2. Helicopter base price in relation with the take-off power

여준다. 항공기의 무게 1파운드(lb)당 US \$1,000로 계산 할 경우 대략적인 가격을 예측 할 수 있다 [2]. 그러나 Harris & Scully[4]는 각 항공기별 이륙출력과 2007년도 미화 기준으로 환산한 기본가격의 관계를 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 항공기의 가격이 무게뿐만 아니라 주요 설계변수들의 함수임을 보였다. Harris & Scully[2,3]에 의해 제시된 회전익기 가격 예측 경험식은 1994년도 기본가격을 기준으로 하였으며, 다음과 같이 표현된다.

$$Price = \$236.77 \times H \times B^{0.2045} \times W^{0.4854} \times P^{0.5843} \quad (1)$$

여기서 B는 주 로터의 블레이드 개수, W는 구조 중량(lb)이며, P는 제자리 비행 시 요구마력이다. H는 각 회전익기의 특성에 따라 정해지는 5가지 요소들의 곱이며, 각 요소들은 표 2에 제시되어있다.

Table 2. Factors for computing H

Engine Type	
Piston	1.000
Piston (Supercharged)	1.000
Piston (Converted to Turbine)	1.180
Gas Turbine	1.779
Number of Main Rotors	
Single	1.000
Twin	1.046
Number of Engines	
Single	1.000
Multi	1.352
Landing Gear	
Fixed	1.000
Retractable	1.104
Country	
U.S. Commercial	1.000
Russia	0.330
Europe	0.860
U.S. Military	0.838

그러나 미화 환산계수인 \$236.77은 1994년 당시의 항공기 가격을 고려하여 선정하였기 때문에 최신의 항공기 가격을 예측하는 데에는 부적합하다. 1994년부터 2007년까지의 평균 소비자 물가지수(CPI=1.397)[7]를 고려하여 식 (1)에 적용하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$Price = \$330.82 \times H \times B^{0.2045} \times W^{0.4854} \times P^{0.5843} \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)를 실제 항공기에 각각 적용하여 예측한 가격과 실제의 가격을 비교하여 보면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 여기에서는 기존의 Harris & Scully[2,3]식을 이용하여 예측한 회전익기 가격의 추세선과 CPI를 이용하여 업데이트한 식을 이용하여 예측한 가격의 추세 선을 함께 나타내었다. 그러나 CPI를 적용하여 얻은 결과도 실제 항공기의 가격보다 낮게 예측된다는 것을 알 수 있다. 이는 항공기의 가격 상승률이 평균 소비자 물가 지수의 상승률인 1.397 보다 높기 때문이다[4]. 그러므로 Harris & Scully의 가격 예측식의 미화 환산계수만을 업데이트 하는 방법은 적합하지 않다는 것을 알 수 있다.

보다 더 정확한 항공기 가격을 예측하기 위해서는 회전익기 설계 관련변수들을 Y라 할 때 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Y = H \times B^{X1} \times W^{X2} \times P^{X3} \quad (3)$$

각 변수들의 지수인 X1, X2과 X3을 미화 환산계수와 함께 계산하여야 한다. 실제 항공기의 가격과 비교하여 비선형 회귀분석을 수행한 결과, 새로운 회전익 항공기에 대한 가격 예측식은 다음과 같이 표현된다.

$$Price = \$341.50 \times H \times B^{0.2684} \times W^{0.4748} \times P^{0.5879} \quad (4)$$

위와 같이 여러 변수들을 고려한 회귀분석을 통하여 예측되는 가격의 유효성을 파악하기 위하여 다음과 같은 결정계수 (Coefficient of Determination) 식을 이용하였다.

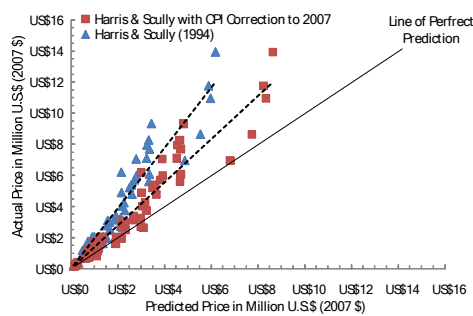


Fig. 3. Estimation of helicopter base price

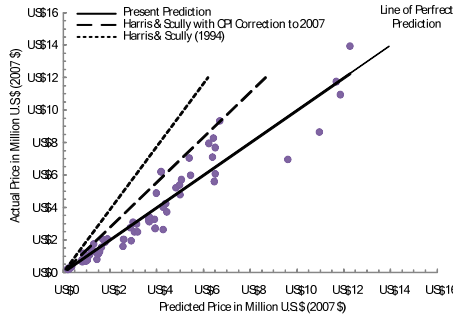


Fig. 4. The estimated price comparison

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} = 0.9255 \quad (5)$$

여기에서 분자인 $\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 은 회귀제곱합이라 부르며 회귀식에 접합시킨 값(\hat{y}_i)에서 종속변수의 평균(\bar{y}) 차를 제공하여 합한 것이다. 분모인 $\sum (y_i - \bar{y})^2$ 은 총제곱합이며 종속변수값(y_i)에서 종속변수의 평균(\bar{y}) 차를 제공하여 합한 값이다. 결정계수가 1에 가까울수록 보다 정밀한 예측결과를 얻음을 의미한다. Fig. 4는 신규로 작성한 회전의 항공기 가격 예측식으로부터 계산한 가격과 실제 항공기 가격을 함께 비교해 나타낸 것이다. 이전 버전에 비해 업데이트된 추세식이 실제 항공기의 가격을 보다 잘 예측하고 있음을 보여 주고 있다.

2.3 Tishchenko의 기본설계 방법

본 연구에서 업데이트된 가격 추세식을 Tishchenko의 기본설계 기법과 통합하여 설계변수에 따른 가격의 변화를 확인하도록 하였다. 여기서 사용된 Tishchenko의 기본설계 방법[5]은 Fig. 5과 같이 주어진 임무조건을 충족하도록 설계중량을 결정하는 방법으로 진행한다. 기본설계는 전체 하중과 기동거리 등 설계 조건을 고려하여 반복 계산으로 이루어진 설계 코드에는 설계조건뿐만 아니라 양항비(lift-to-drag ratio), 장점지수(figure of merit), 추진효율(propulsive efficiency), 동력전달효율(transmission efficiency)등과 같은 초기 변수들이 필요하다. 이러한 변수들은 반복 계산중에 갱신되는 값들을 사용하게 된다.

$$M_{TO} = \frac{M_{Payload} + M_{Crew} + M_{ME}}{\frac{L + t_{reserve} V_{cr}}{\epsilon_w} - 0.005 \epsilon_E} \quad (6)$$

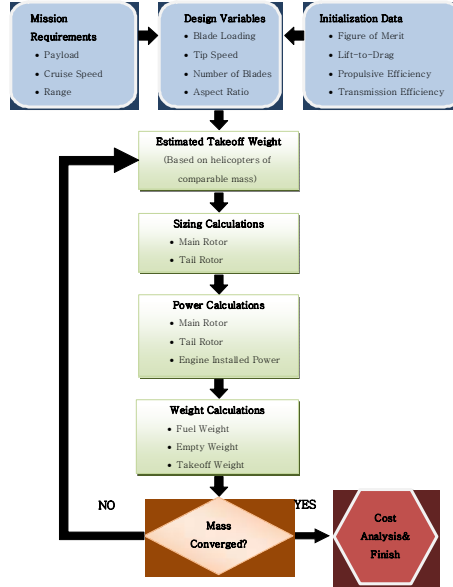


Fig. 5. Block diagram for the design code

초기 헬리콥터의 하중(최대이륙중량, M_{TO})은 식 (6)에서 볼 수 있듯이 설계 요구 조건과 변수들의 초기 값을 바탕으로 계산한 결과를 사용한다. 여기서 $M_{Payload}$ 는 탑재중량이며, M_{Crew} 는 조종사를 포함한 승무원의 무게이며, M_{ME} 는 임무장비 무게이다. L 은 항속거리이며, $t_{reserve}$ 는 예비 비행시간, V_{cr} 는 순항속도이다. ϵ_w 와 ϵ_E 는 각각 헬리콥터의 중량효율(weight efficiency)과 에너지효율(energy efficiency)이며, 이는 각각 식(7)과 식(8)로 나타낼 수 있다[5].

$$\epsilon_w = \frac{M_{load}}{M_{TO}} \quad (7)$$

$$\epsilon_E = \frac{M_{TO}}{M_{Fuel}} L \quad (8)$$

반복 계산의 기준은 헬리콥터의 이륙중량으로 결정한다. 헬리콥터의 이륙중량은 헬리콥터의 구조적 구성요소들의 하중의 합이며, 이는 헬리콥터 이륙중량을 이용하여 갱신된다. 계산 결과는 블레이드의 개수, 고형비(solidity), 익단속도(tip speed), 엔진형태(engine type)등을 반영한다.

Tishchenko의 기본설계 방법의 결과는 주 로터의 가로세로비(aspect ratio, AR)와 블레이드의 개수로 나타낼 수 있다. Fig. 6~8에는 각각 회전면 하중(disk loading)에 따른 최대 이륙중량(maximum take-off weight), 연료량(fuel weight), 이륙출력(take-off power)에 대한 결과

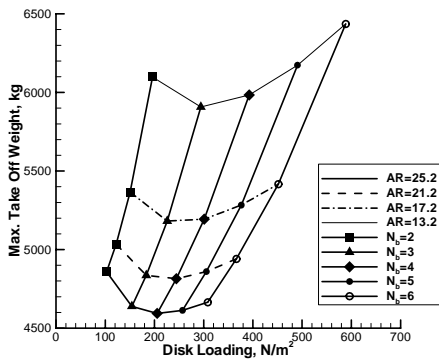


Fig. 6. Take-off weight vs. disk loading

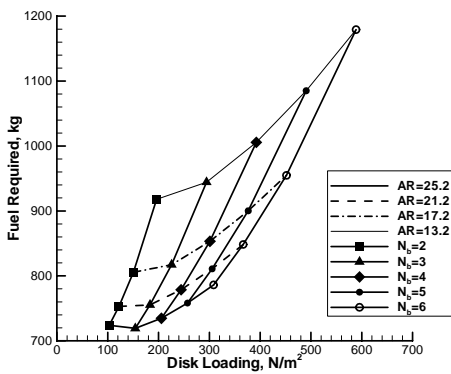


Fig. 7. Fuel required vs. disk loading

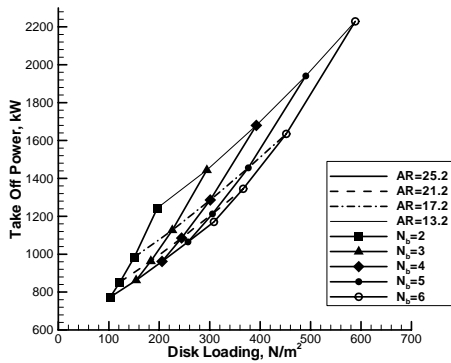


Fig. 8. Take-off power vs. disk loading

들을 가로세로비와 블레이드의 개수에 따른 함수로 나타내기 위해 카펫 선도(carpet plot)의 형태로 표시하였다.

2.4 기본설계 및 가격예측 결과

본 연구에서 업데이트된 헬리콥터 가격예측식과 Tishchenko의 기본설계방법을 통합하였다. 이

Table 3. Comparison of preliminary sizing and cost results

	S-76C+			Bell 206B			EC-120B		
	Actual	Present	Error(%)	Actual	Present	Error(%)	Actual	Present	Error(%)
Take off Weight (kg)	5307	5023	5.35	1451	1445	0.41	1715	1688	1.58
Empty Weight (kg)	3245	2965	8.63	777	774	0.39	990	976	1.41
Fuel Weight (kg)	860	836	2.79	275	272	1.09	321	308	4.05
Take off Power (kw)	1217	1197	1.67	313	304	2.87	376	376	0.00
Disk Loading (N/m ²)	348.9	365.8	4.48	174	172	1.15	214	211	1.40
Base Price, U.S.\$ (millions)	8.27	7.72	6.65	0.65	0.64	5.92	1.327	1.20	9.57

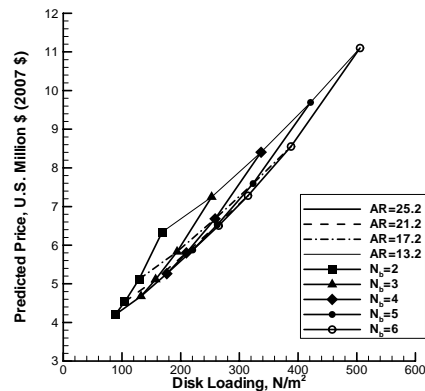


Fig. 9. Predicted price vs. disk loading

를 이용하여 헬리콥터의 가격을 블레이드의 가로세로비와 개수에 따라 볼 수 있다(Fig. 9). 계산결과 각 기종의 실제 구조무게와 요구마력 등과 근접한 제원의 헬리콥터가 설계되는지 확인하였으며, 예측된 가격이 실제 헬리콥터의 가격에 근접한지 확인하였다. 설계한 헬리콥터의 제원과 예측한 가격을 실제 헬리콥터와 비교하여 표 3에 나타내었다.

Tishchenko의 기본설계 방법을 이용한 설계 결과가 실제 헬리콥터와 비교하여 10% 이내의 오차를 갖는 근접한 결과를 보여주고 있다. 헬리콥터의 기본가격 또한 10% 이내의 오차를 갖는 아주 근접한 결과를 산출해 낼 수 있다. 이러한 결과는 본 해석에서 제시한 가격 추세식이 최신의 경향을 반영한 실제적인 예측 결과를 제공할 수 있음을 입증하는 것으로 판단된다.

III. 결 론

본 연구에서는 기본설계 단계에서 헬리콥터의 가격을 예측하기 위한 방법으로 Harris & Scully

에 의해 제시된 가격 예측 식을 바탕으로 총 74개의 2007년도 회전익기 가격 및 제원 정보를 이용하여 가격 예측 식을 업데이트 하였다. 헬리콥터 기본설계는 Tishchenko의 기본설계 방법을 이용하였다. 현재 사용되고 있는 민간용 헬리콥터인 Sikorsky사의 S-76C+, Bell사의 206B, 그리고 Eurocopter사의 EC-120B 헬리콥터를 기준으로 기본설계 및 가격예측을 수행하여 각 헬리콥터의 제원과 가격을 역 비교 검증하였다. 기본설계 결과는 최대 10% 오차 범위 내에서 헬리콥터의 제원과 성능을 예측하고 있음을 보였으며, 예측된 가격은 90% 이상의 정확도를 보였다. 본 연구결과를 이용하여 헬리콥터의 가격을 기본설계 단계에서 보다 정확하게 예측하고 이를 토대로 경제적인 신형 헬리콥터를 설계하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다(계약번호 UD070041AD).

참고문헌

- 1) Fradenburgh, E. A., "The First 50 Years Were Fine, But What Should We Do for an Encore?" The 14th Alexander A. Nikolsky Lecture, AHS 50th Annual Forum, Washington, May 1994.
- 2) Harris, F. D., Scully, M. P., "Helicopters Cost Too Much", AHS 53rd Annual Forum, Virginia, May 1997.
- 3) Harris, F. D., Scully, M. P., "Supplemental Appendix : Helicopters Cost Too Much", AHS 53rd Annual Forum, Virginia, May 1997.
- 4) Harris, F. D., Scully, M. P., "Rotorcraft Costs and Prices", AHS Vertical Lift Aircraft Design Conference, California, January, 1995.
- 5) Tishchenko, M. N., Nagaraj, V. T. and Chopra, I., "Preliminary design of transport helicopters", Journal of the American Helicopter Society, 2003.
- 6) HeliValue\$, Inc., "The Official Helicopter Blue Book®. The Official Helicopter Specification Book and Helicopter Equipment Lists & Prices (H.E.L.P.)", 2008.
- 7) U.S. Department of Labor, Consumer Price Index, Bureau of Labor Statistics, Washington, D.C., 2008.