

기어박스 시스템 형상 상쇄설계를 통한 로터크래프트 동력전달장치 경량화 연구

김수철^a · 이근호^{a,*} · 박영준^b · 조승제^b · 양계병^c · 박경수^c

Study on Weight Reduction of Rotorcraft Power Transmission System through Trade-off Design on Gearbox System Configuration

Suchul Kim^a · Geun-ho Lee^{a,*} · Young-jun Park^b · Seung-je Cho^b ·
Gyebyung Yang^c · Kyungsu Park^c

^aDepartment of System Reliability, Korea Institute of Machinery & Materials, Korea

^bDepartment of Biosystems & Biomaterials Science and Engineering, Seoul National University, Korea

^cAgency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: ghlee762@kimm.re.kr

ABSTRACT

Gearboxes for power transmission of a rotorcraft transfer power generated by an engine to the fan and the pusher for up, down and forward flight. The gearboxes are divided into the main gearbox and the sub-gearbox. The main goal of the gearbox design is to design the weight as light as possible within a range that satisfies all given requirements (transmission power, mounting space, etc.). In particular, the initial conceptual design is very important to reduce the weight of the gearbox, since the weight can vary greatly depending on the system configuration, even if it has the same function. In this study, various conceptual designs of the gearbox according to the installation position of the engine were presented. Also, the element parts such as gears and bearings in each concept design were designed by sizing for their life, and the estimated weights of the conceptual system configuration were compared.

초 록

로터크래프트의 동력전달장치용 기어박스는 엔진에서 생성된 동력을 승하강 및 전진 비행을 위한 팬 및 푸셔로 전달하며, 사용목적에 따라 메인기어박스, 보조기어박스로 구분된다. 로터크래프트 동력전달장치용 기어박스의 주 설계 목표는 주어진 요구사항(전달동력, 장착공간 등)을 모두 만족시키는 범위에서 가능한 경량화 설계를 하는 것이다. 특히 기어박스는 같은 기능을 하더라도 시스템 구성에 따라 전체 중량이 크게 달라질 수 있기 때문에 경량화를 위해서는 초기 개념 설계가 매우 중요하다. 본 연구에서는 엔진의 장착 위치에 따른 기어박스의 다양한 개념 설계를 수행하였다. 또한 각 개념 설계에 따른 기어, 베어링 등의 요소부품 설계를 수행하여 시스템 구성에 따른 예상 중량을 비교 검토하였다.

Key Words: Rotorcraft(로터크래프트), Gearbox(기어박스), Lightweight(경량화), Concept Design(컨셉 설계), Power Transmission(동력전달장치)

Received 2 June 2017 / Revised 13 July 2017 / Accepted 17 July 2017

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers

pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548

1. 서 론

로터크래프트의 동력전달장치용 기어박스는 엔진에서 생성된 동력을 승하강 및 전진 비행을 위한 팬 및 푸셔로 전달한다. 기어박스는 사용목적에 따라 메인기어박스, 보조기어박스로 구분되며, 보조기어박스는 장착 팬의 종류에 따라 구분할 수 있다. 엔진 동력은 가장 먼저 메인기어박스로 전달되고 이후 보조기어박스로 전달된다. 기어박스의 주요 요소부품으로는 기어, 베어링, 축, 하우징, 윤활시스템 등이 있다.

로터크래프트의 동력전달장치기술의 변천사는 크게 1~4세대로 나눌 수 있다. 동력전달장치기술은 1950년대의 1세대부터 2000년대 이후의 4세대에 이르기까지 세대별로 입력속도 및 토크 증가, 기어비 증가 등 많은 기술 발전을 이루었다. 이러한 기술의 발전 속에서 동력전달장치용 기어박스의 무게도 지속적으로 개선되어 경량화되었다. 기어박스의 경량화 지표는 주로 동력 대비 중량비(power to weight ratio)가 활용되고 있으며, 1세대의 0.32 kg/kW 로부터 4세대에는 0.23 kg/kW 까지 지속적으로 낮아졌다[1].

동력전달용 기어박스의 경량화는 로터크래프트가 보다 오래 비행하기 위해서 매우 중요하다. 이를 위한 로터크래프트 기어박스의 주 설계 목표는 주어진 요구사항(전달동력, 장착공간 등)을 모두 만족시키는 범위에서 최대한 경량화 설계를 하는 것이다. 기어박스는 같은 기능을 하더라도 시스템 구성에 따라 전체 중량이 크게 달라질 수 있기 때문에 비약적인 경량화를 위해서는 충분한 설계 검토 수행 후 초기 시스템을 확정해야 한다.

Sargisson[2]은 항공용 기어박스의 초기 설계를 위해 기어 종류에 따른 기어 무게를 분석하였으며, 다양한 컨셉의 기어박스를 대상으로 설계를 수행하고 각각의 무게를 구성요소에 따라 분석하였다. Howe 등[3]은 항공용 기어박스의 최적화를 위해 유성기어 방식에 따른 기어박스 개념 설계에 대한 연구를 수행하였으며, 이를 통해 차동 유성기어 방식이 가장 높은 잠재력을 가지고 있다고 하였다. White[4]는 헬리콥터의 동력전달장치를 유성기어가 아닌 평기어와 베벨기어 조합으로 구성하였으며, 이를 통해 기어박

스의 무게를 유성기어 대비 약 40% 저감했다고 하였다.

최근 로터크래프트용 동력전달장치는 높은 입력속도로 인해 높은 기어비가 요구된다. 이 경우 다양한 기어 배열로 요구 기어비를 만족시켜야 한다. 그러나 항공용 기어박스의 개념 설계에 대한 대부분의 연구는 유성기어 구성에 대한 내용이나, 기어박스 구성 방식에 대해 초점이 맞춰져 있어 엔진과 기어박스 구성에 대한 연구가 미흡한 형편이다. 본 연구는 주어진 체계에서 시스템 경량화를 위해 엔진 배치에 따라 기어박스가 어떻게 구성되어야 하는지 탐색하기 위해 수행되었다.

2. 동력전달장치용 기어박스 개념설계

2.1 설계 대상

설계 대상 로터크래프트는 수직 이착륙 및 제자리 비행이 가능한 덕티드팬 방식으로 Fig. 1과 같이 2개의 팬과 1개의 푸셔로 구성된다. 동력전달장치는 엔진으로부터 동력을 전달받는 메인기어박스와 덕티드팬으로 동력을 전달하는 보조기어박스 2개, 푸셔로 동력을 전달하는 보조기어박스 1개로 구성된다. 덕티드팬과 푸셔 기어박스는 서로 독립적으로 구성 및 작동되며, 본 연구에서는 시스템 단순화를 위해 독립적으로 구성된 푸셔의 보조기어박스를 제외하고 메인기어박스와

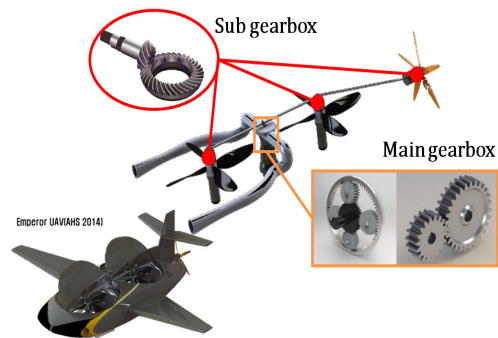


Fig. 1 Gearbox of fan-in-body type for unmanned aircraft.

Table 1. Specification of engine and gearbox.

Engine	Input Speed (rpm)	20,000
Gearbox	Req. Life (hr)	10,000
	Req. Gear ratio	15.4 : 1
	Req. Gear Contact Safety Factor	1.1
	Req. Gear Bending Safety Factor	1.3
	Gear Material	18CrNiMo7
	Shaft Material	
Gear & Shaft Density (kg/m^3)		7850

Table 2. Duty cycle for gearbox design.

Load case	Input Power (hp)	Req. life (hr)
1	444	6,000
2	156	4,000

덕티드팬의 보조기어박스를 대상으로 연구를 수행하였다.

2.2 설계 요구조건 및 하중

설계 대상 로터크래프트 기어박스의 주요 제한 및 설계 조건은 Table 1과 같다. 엔진의 최대 입력 속도는 20,000 rpm 이며, 기어박스는 덕티드팬 요구 속도를 만족시키기 위해 15.4:1의 기어비를 갖는다. 기어박스 설계를 위한 요구 수명은 10,000 시간으로 이에 대한 부하스펙트럼은 Table 2와 같다.

2.3 엔진 위치에 따른 기어박스 시스템

로터크래프트의 엔진 위치에 따라 기어박스 시스템은 크게 달라진다. 본 연구에서는 기어박스 개념설계를 위한 엔진 위치를 수직형, 교차형, 평행형의 3가지로 구분하였다. Fig. 2-4는 엔진 위치에 따른 기어박스 구성의 예를 보여준다. 수직형, 교차형의 경우에는 덕티드팬으로 동력을 전달하는 축과 교차되기 때문에 메인기어박스에

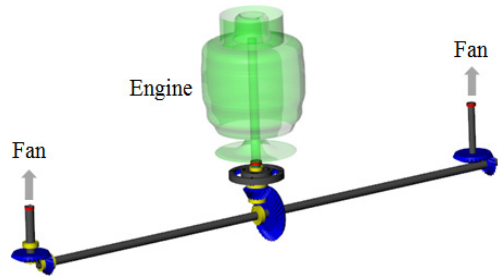


Fig. 2 Vertical shaft type.

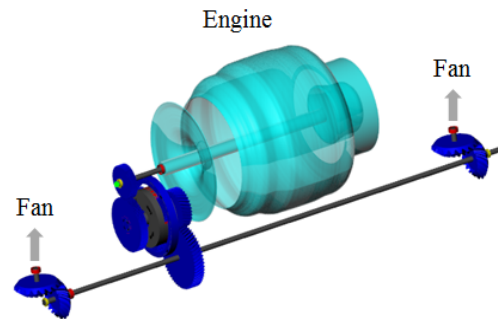


Fig. 3 Parallel shaft type.

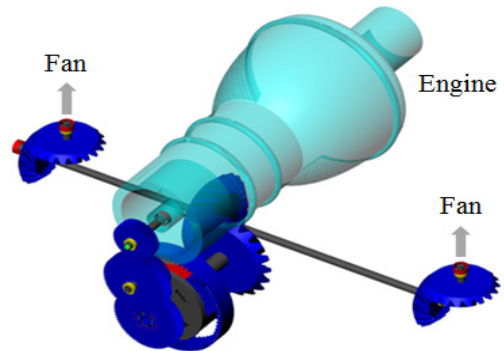


Fig. 4 Cross shaft type.

베벨기어와 같은 동력전달장치가 필요하지만, 평행형의 경우 평행기어만으로 덕티드팬 연결축으로 동력을 전달할 수 있다. 이러한 엔진의 구성은 로터크래프트 시스템의 구성에 따라 달라지기 때문에, 초기 로터크래프트 시스템 구성 시 기어박스 장착을 고려한 엔진 배치를 충분히 검토해야 한다.

2.4 기어박스 개념설계안

엔진의 동력을 직접 전달받는 메인기어박스는 엔진의 장착 위치에 따라 시스템 구성이 달라진다. 메인기어박스의 시스템은 Table 3과 같이 3가지 엔진 위치에 따라 설계된 총 9가지 설계안

Table 3. Concept design for main-gearbox.

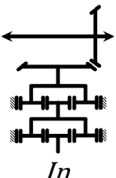
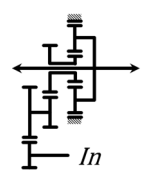
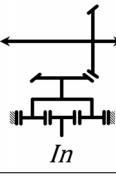
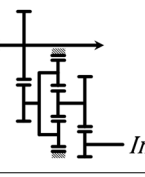
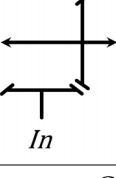
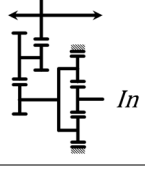
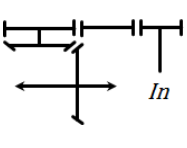
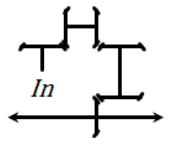
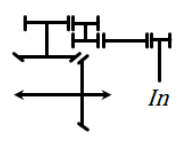
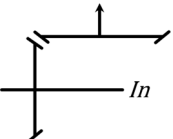
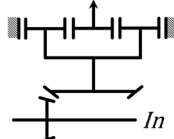
Vertical Type		Parallel Type	
#1		#4	
#2		#5	
#3		#6	
Cross Type			
#7		#9	
#8			

Table 4. Concept design for sub-gearbox.

#1		#2	
----	---	----	---

을 대상으로 하였다.

보조기어박스는 메인기어박스에서 전달된 동력을 덕티드팬으로 전달한다. 이때 보조기어박스는 메인기어박스의 기어비에 따라 덕티드팬의 요구 속도를 만족시키기 위해 베벨기어 한 쌍으로 구성되거나 유성기어를 추가로 장착한 방식으로 Table 4와 같이 구성할 수 있다. 그러나 유성기어를 장착한 보조기어박스 방식은 메인기어박스의 기어비가 작을 때에만 적합하다. 본 연구에서는 메인기어박스 3번과 9번을 제외한 나머지 메인기어박스는 보조기어박스 1번과 조합하여 시스템을 구성하였고, 메인기어박스 3번과 9번의 경우 보조기어박스 2번과 조합하여 시스템을 구성하였다.

3. 동력전달장치용 기어박스 상세 설계

3.1 설계 조건

앞서 결정된 시스템 구성에 따라 결정된 메인기어박스와 보조기어박스의 조합은 메인기어박스와 보조기어박스의 순서로 1-1, 2-1, 3-2, 4-1, 5-1, 6-1, 7-1, 8-1, 9-2이다. 시스템 비교를 위해서는 각 시스템이 동등한 성능을 만족시키는 조건에서 최적 설계되어야 한다. 기어박스의 성능은 수명, 소음, 효율 등 다양하지만, 본 연구에서는 개념설계 단계에서 시스템 중량을 단순 비교하기 때문에 복잡한 해석을 요구하는 소음, 효율 등은 제외하고 수명에 대한 성능만을 대상으로 설계하였다.

일반적으로 기어의 피로파손은 면압에 의해 발생한다. 따라서 목표 수명에 대해 최적 설계를 하기 위해서는 면압 강도를 최적화해야 한다. 굽힘 강도는 충격에 의한 파손과 밀접한 관계가 있으며 수명과 관계없이 적정한 최소 안전율을 이상이 되면 문제가 없다고 판단하는 경우가 많다. 따라서 기어는 요구 안전율이 면압의 경우 1.1~1.2, 굽힘의 경우는 1.3 이상이 되면 요구 안전율을 만족한다고 판단하였으며, 해당 조건에서 모듈이 최소가 되는 사양을 최종안으로 선정하였다. Fig. 5는 각 조합에 필요한 기어 쌍의 설계를

위해 수행한 기어 사이징의 예시를 보여주고 있다. 기어 사이징은 모듈, 치폭, 압력각 등 기어 설계인자의 다양한 조합을 반복적으로 검토하여 요구 조건을 만족하는 상세 사양을 찾는 과정으로, 이 과정을 통해 각 기어 쌍의 상세 사양을 선정하였다. 베어링의 경우에는 요구 하중에 따라 목표 수명을 만족하는 최소 사이즈의 표준 규격품을 선정하였다. 베어링의 표준 규격품에는 SKF, FAG 등 다양한 업체의 제품이 있지만, 본 연구에서는 FAG사의 제품을 이용하였다. 축은 베어링 내경에 따라 최소 안전율 1.0 이상이 되도록 설계하였다. 메인기어박스는 장착공간의 요구조건인 길이 650 mm, 폭 2,000 mm, 높이 900 mm를 만족하도록 설계되었으며, 보조기어박스의 경우 직경 250 mm, 높이 500 mm 안에 장착되도록 설계되었다. 메인기어박스의 기어비는 보조기어박스1과 조합되는 경우 13.4, 보조기어박스2와 조합되는 경우에는 1.2로 설계하였다.

각 시스템 별 무게 검토는 위 과정을 통해 동등 안전율을 갖도록 설계한 뒤, 선정된 기어박스 요소부품인 기어, 베어링, 축 중량의 총합을 비교하여 상대적으로 검토하였다. 일관된 기준으로 중량을 비교하기 위해 기어 림 두께 (Rim thickness)는 기어 모듈의 2배로, 웹 두께(Web thickness)는 0으로 하여 링 형태로 기어 중량을 고려하였으며, 축의 경우에는 중실축으로 고려하였다.

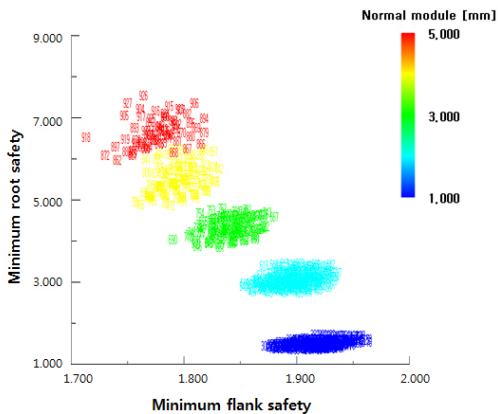


Fig. 5 Example of gear sizing.

기어박스 설계는 상용 기어설계 소프트웨어인 KISSSoft를 이용하여 진행하였다. 각 기어의 수명은 평행기어의 경우 국제 표준인 ISO 6336을 이용하여 평가하였고, 베벨기어의 경우 국제 표준인 ISO 10300을 이용하였다. 베어링은 ISO 281을 이용하였고, 축은 DIN 743을 이용하였다.

3.2 결과 및 분석

기어박스 설계 후 결정된 각 조합 별 기어, 베어링, 축 무게는 Table 5, 6, 7과 같다. 기어의 경우 베벨기어, 유성기어, 평행기어에 따라 별도

Table 5. Results of predicted gearbox weight for vertical shaft type.

Component	Weight (kg)		
	#1-1	#2-1	#3-2
Shaft	7.11	6.8	7.03
Bearing	17.08	13.1	16.73
Bevel gear	7.81	11.76	9.12
Planet gear	9.88	7.12	12.05
Parallel gear	0	0	0
Total	41.88	38.78	44.93

Table 6. Results of predicted gearbox weight for parallel shaft type.

Component	Weight (kg)		
	#4-1	#5-1	#6-1
Shaft	7.83	6.41	6.39
Bearing	10.06	10.22	9.8
Bevel gear	7.66	7.66	7.66
Planet gear	8.92	10.35	11.54
Parallel gear	7.45	6.87	6.5
Total	41.92	41.51	41.89

Table 7. Results of predicted gearbox weight for cross shaft type.

Component	Weight (kg)		
	#7-1	#8-1	#9-2
Shaft	7.84	8.19	7.57
Bearing	15.12	18.43	17.73
Bevel gear	14.21	11.87	16.38
Planet gear	0	0	12.05
Parallel gear	11.21	14.35	0
Total	48.38	52.84	53.73

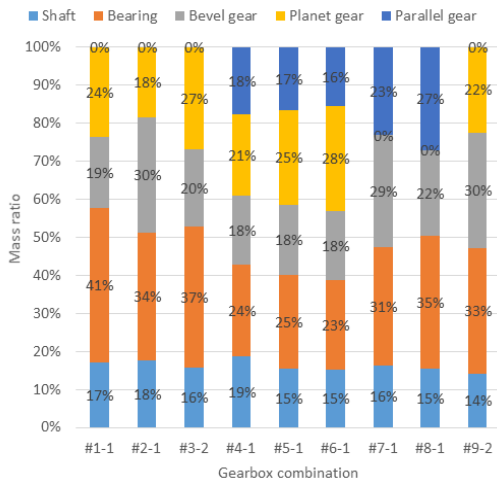


Fig. 6 Mass ratio of gearboxes for components.

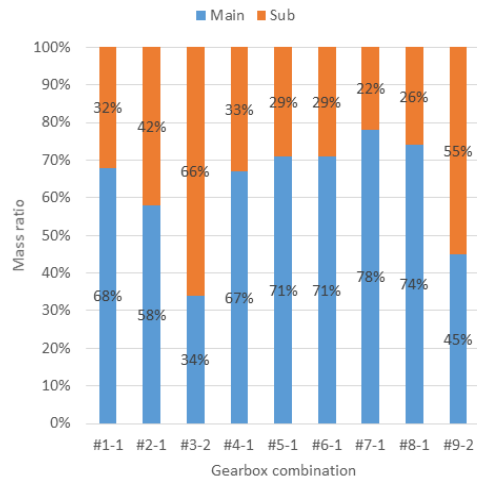


Fig. 7 Mass ratio of gearboxes of main and sub.

Table 8. Results of predicted main and sub gearbox weights.

Combination	Gearbox Weight (kg)		
	Main	Sub	Total
#1-1	28.48	13.40	41.88
#2-1	22.49	16.29	38.78
#3-2	15.28	29.65	44.93
#4-1	28.09	13.83	41.92
#5-1	29.47	12.04	41.51
#6-1	29.74	12.15	41.89
#7-1	37.74	10.64	48.38
#8-1	39.10	13.74	52.84
#9-2	24.18	29.55	53.73

로 구분하였다. Fig. 6은 조합 별 기어박스 총 중량과 내부 요소부품에 대한 중량비를 보여준다. 몸체는 엔진 장착 위치 별 평균 중량의 경우 수직형은 41.86 kg, 평행형의 경우 41.77 kg, 교차형의 경우 51.65 kg 으로 평행형이 가장 가벼운 결과를 보였고, 교차형이 가장 무거웠다. 수직형과 평행형은 큰 차이를 보이지 않았으나, 교차형의 경우 확연히 무거운 결과를 보였다. 이는 교차형의 경우 메인기어박스에서 요구되는 지지축의 수가 4개 이상으로 수직형 2개, 평행형 3개보다 많기 때문에 축 지지 베어링의 수가 증가

하고 평기어에 비해 상대적으로 무거운 베벨기어를 많이 사용하였기 때문으로 판단된다.

보조기어박스 조합에 따라서는 보조기어박스 1번을 사용한 조합보다 2번을 사용한 조합이 더 무거운 경향을 보였다. 이는 메인기어박스에 보조기어박스에 장착된 유성기어만큼 추가적으로 기어비를 확보할 경우 유성기어 1단이 필요하지만, 보조기어박스에 장착될 경우에는 2개의 유성기어가 필요하기 때문이다. 또한 보조기어박스에 유성기어가 장착될 경우 메인기어박스에 장착될 경우보다 작용하는 토크가 크기 때문에 유성기어 크기도 증가한다. 따라서 메인기어박스 기어비를 크게 설계하여 보조기어박스 1번으로 조합하는 것이 더 유리한 것으로 판단된다.

기어, 축, 베어링 부품 별 비중은 대부분의 조합에서 기어가 50% 정도를 차지하였고, 베어링이 23~41%, 축이 14~19% 정도를 차지하였다.

Table 8은 조합별 메인기어박스와 보조기어박스의 무게를 보여주고 있으며 Fig. 7은 조합별 기어박스 중량비를 보여준다.

보조기어박스 1번을 이용한 조합의 경우 메인기어박스와 보조기어박스의 중량비는 수직형의 경우 평균적으로 약 63%, 37%, 수평형의 경우 약 70%, 30%, 교차형의 경우 76%, 24% 정도였다. 보조기어박스 2번을 이용한 경우에는 평균적으로 약 40%, 60% 정도로 나타났다.

4. 결 론

로터크래프트용 기어박스의 기어, 축, 베어링 총 중량은 엔진 장착 구조에 따라 평행형이 가장 가볍고 교차형이 가장 무거운 것으로 나타났다. 수직형과 평행형의 무게 차이는 크지 않았으나 교차형은 확연히 무거운 결과를 보인 이유는 시스템 구성을 위해 필요한 지지축이 다른 방식보다 많기 때문인 것으로 판단되었다. 보조 기어박스 조합에 대해서는 보조기어박스 1번을 사용하는 조합이 2번을 사용하는 조합보다 무게 측면에서 유리한 결과를 보였기 때문에, 메인기어박스의 기어비를 높게 가져가는 것이 보조기어박스의 기어비를 높게 가져가는 것 보다 중량 측면에서 더 유리할 것으로 판단된다.

초기설계 시 이러한 특성을 고려하면 보다 경량화된 기어박스를 설계하는데 도움을 줄 수 있을 것이다. 그러나 본 연구는 한정된 조합으로 설계를 진행하였고 하우징, 윤활장치 등 부가 중량을 고려하지 않았기 때문에 추후 이러한 부가 중량의 영향을 고려한 추가 연구를 수행하여 실제 전체 시스템 설계 시 어떠한 경향을 보이는지 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소의 무인 복합형 헬기동력장치(엔진 및 동력전달장치) 기술분석(자료수집포함) 과제로 수행되었습니다.

References

1. Yin, Z.Y., Fu, B.B., Xue, T.B., Wang, Y.H. and Gao, J. "Development of Helicopter Power Transmission System Technology," *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 86, pp. 1-17, 2011.
2. Sargisson, D.F., "Advanced Propfan Engine Technology (APET) And Single Rotation Gearbox / Pitch Change Mechanism," NASA Contractor Report 168113, 1985.
3. Howe, D.C., Sundt, C.V. and Mckibbin, A.H., "Advanced Gearbox Technology - Advanced Counter Rotating Gearbox Detailed Design Report," NASA Contractor Report 180883, 1988.
4. White, G. "Design study of a split-torque helicopter transmission," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 212, Issue 2, pp. 117-123, 1998.