Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 25, No. 7 pp. 271-276, 2024

https://doi.org/10.5762/KAIS.2024.25.7.271
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

파면분석을 통한 무인항공기 결함 원인 분석 및 품질 개선

김대한*, 강주환
국방기술품질원

Quality Improvement and Analysis of the cause of defect in UAV through the fracture analysis

Dae-Han Kim*, Ju-Hwan Kang
Defense Agency for Technology and Quality

요 약 무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)는 전세계적으로 매우 중요한 무기체계로 각광받고 있다. 현재 진행 중인 우크라이나와 러시아의 전쟁에서도 무인항공기는 큰 성과를 달성하며, 핵심 전략 요소로 손꼽힌다. 이전의 국방분야 무인항공기는 감시 및 정찰의 임무를 주로 수행하였으나, 최근에는 공격형으로도 발전해 많이 사용된다. 국내 방산 분야도 이러한 무인항공기 발전 추세에 따라서 군단급, 사단급, 대대급 UAV 체계가 개발되어 운용 중에 있다. 그리고 추가적으로 해외 구매를 통해서도 Searcher, Heron과 같은 무인항공기를 확보하고 운용한다. 이렇듯 국내 방산에서도 UAV는 점진적으로 늘어나는 추세에 있다. 본 연구에서는 국내에서 운용 중인 무인항공기에 발생한 프로펠러 이탈 현상에 대한 원인을 검토하였다. 프로펠러가 이탈한 원인은 체결 볼트의 파단이었으며, 구체적인 볼트의 파단 원인 분석을 위해 파면분석을 수행하였다. 파면분석 결과를 토대로 볼트 파단의 원인이 체결 토크와 관련이 있다는 것을 확인하였고, 주기적인 체결 토크 확인 절차 및 수행이 부재하였다. 그에 따라 무인 항공기 운용 시, 프로펠러 체결 볼트의 토크를 주기적으로 확인할 수 있는 개선방안을 제시하였고, 이러한 연구 결과는 향후 새로운 무인 항공기를 개발할 때 좋은 사례가 될 것으로 판단된다.

Abstract Unmanned aircraft vehicles(UAV) are in the spotlight as a critical weapon system worldwide. UAVs are also achieving excellent results in the ongoing war between Ukraine and Russia. Previously, UAVs mainly performed surveillance and reconnaissance missions, but recently, they have developed into aggressive types. In Korea, corps, division, and battalion-level UAV systems have been developed and operated according to this trend. In addition, UAVs such as Searcher and Heron are operating through overseas purchases. Therefore, the number of unmanned aerial vehicles is gradually increasing, even in domestic defense distribution. In this paper, the cause of propeller fastening bolt damage that occurred in a UAV was analyzed, and an improvement plan was presented. Fracture analysis revealed the cause of bolt damage, and an improvement method was suggested. This study is expected to help develop UAVs in the future.

Keywords : UAV, Defect, Reconnaissance, Damage, Development

*Corresponding Author : Dae-Han Kim(DTaQ)
email: dhkim23@dtaq.re.kr
Received April 30, 2024 Revised May 29, 2024
Accepted July 5, 2024 Published July 31, 2024

1. 서론

최근 무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle) 산업은 크게 발전하고 있다. 국방 분야에서는 특히 무인항공기가 중요한 무기체계로 각광 받고 있다. 국방 분야에서 이전의 무인기는 감시 및 정찰이 주된 임무였다면, 현재는 감시 및 정찰은 물론이고 필요 시 공격도 가능한 무인항공기가 연구 개발되고 있다[1,2,6].

국내도 이러한 추세에 따라 국방 분야에서 지속적으로 무인항공기가 개발되고 있다. 군단급 무인항공기인 송골매를 시작으로 대대급 무인항공기, 그리고 사단급 무인항공기까지 국내개발되어 운용 중에 있다(Fig. 1)[3,4].

송골매의 경우는 국내 최초로 개발된 정찰용 무인항공기이며 1990년대 초반에 개발을 시작하여, 2004년부터 실전배치 되었다. 그리고 그 외에도 국외 도입된 Searcher, Heron 등이 실전배치 되어 운용 중이다.

본 연구에서 무인항공기의 결함 사례에 대해 분석을 수행하였다. 결함 사례를 살펴보면, 국내에서 운용 중인 무인항공기의 추진계통 프로펠러가 이탈하는 현상을 식별하였다. 프로펠러는 항공기 구동의 핵심 구성품이며, 문제가 발생 할 경우 항공기가 추락할 수 있으므로 안전에 매우 중요한 구성품이다. 이러한 프로펠러 이탈의 원인으로는 체결 볼트의 파단이 발생한 것으로 나타났다. 프로펠러를 체결하고 있던 볼트의 파단이 발생하면서 프로펠러의 이탈까지 발생하게 되었다.

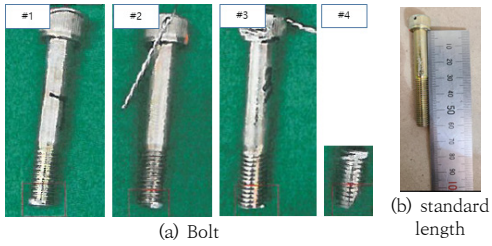
이러한 볼트의 파단 원인을 분석하기 위해서 파단면 분석[5,6]을 수행하였고, 분석은 한국화학융합시험연구원(KTR)에 의뢰하여, 분석 결과를 받았다. 분석 결과를 토대로 4가지의 볼트 파단 원인을 도출하였다. 4가지 원인 중 가장 영향이 높을 것을 판단되는 요소에 대해서 검토하였고, 해당 요소를 제거하는 방안으로 개선을 진행하였다.

Fig. 1. History of Military UAV developed in Korea

2. 본론

2.1 결함현상

결함이 발생한 부위는 엔진부분의 플랜지와 프로펠러가 체결되는 부위의 볼트이며 Fig. 2와 같다. 볼트의 정상제품의 길이는 6 cm 이고, 파단된 볼트의 길이 측정결과 Table 1과 같다.



(a) Bolt (b) standard length

Fig. 2. Shape of broken bolt

Table 1. Actual length of broken bolts

Bolt No.	Actual Length	Standard
# 1	4.4 cm	6 cm
# 2	4.4 cm	
# 3	4.4 cm	
# 4	1 cm	

Table 1을 보면 #1~#3의 볼트는 약 1.6cm가 파단되었으며, #4 볼트는 약 5cm 파단이 된 것을 확인할 수 있다. Fig. 3의 (a)는 일반적으로 볼트가 장착되었을 때의 모습이며, (b)와(c)는 문제가 발생된 허브와 엔진의 플랜지이다. Fig. 3의 (b)를 보면 프로펠러에서 볼트가 장착되는 홀 주변에 마모가 발생한 것을 확인할 수 있으며, 볼트의 부서진 파편이 프로펠러의 홀에 박혀있는 것도 확인할 수 있다. 또한 Fig. 3의 (c)와 같이 엔진 플랜지에서도 홀 주변에 변형이 상당히 발생한 것을 확인할 수 있다.

(a) Normal product (b) Propeller Hub (c) Engine Flange

Fig. 3. Shape of normal product and defective product

2.2 파손된 볼트의 파면분석

볼트 파단의 원인을 분석하기 위해서는 주사전자현미경(SEM) 장비가 필요하여, 한국화학융합시험연구원(KTR)에 의뢰하여 분석을 수행하였다.

파면 분석장비로 JEOL JSM-IT500(Scanning Electronic Microscope)을 사용하였다.

시편은 Fig. 4와 같이 총 4개(specimen A~D)를 준비하였고, 육안으로 파면을 확인했을 때는 단면이 거칠지 않고, 비교적 매끈하며 편평한 파면이 나타남을 확인할 수 있었다.

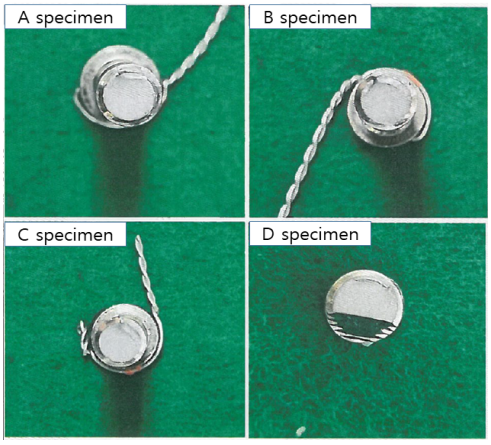
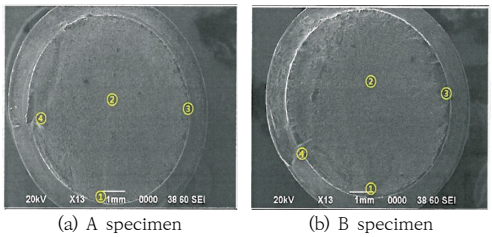


Fig. 4. four specimens of broken bolt

Fig. 5는 시편 A, B의 전체 파면 SEM 사진이다. ①, ③ 구역은 표면부 부근이며, ②구역은 중앙, ④구역은 변형이 많이 발생된 것으로 추정되는 부위이다.



(a) A specimen (b) B specimen

Fig. 5. SEM images of A and B specimens

Fig. 5의 전체 SEM 사진에서도 ① ~ ③ 구역은 비교적 표면이 매끄럽고 평편하게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 A시편의 ① ~ ④ 구역의 x 100, x 500, x 2000 배의 점진적인 확대 사진이다.

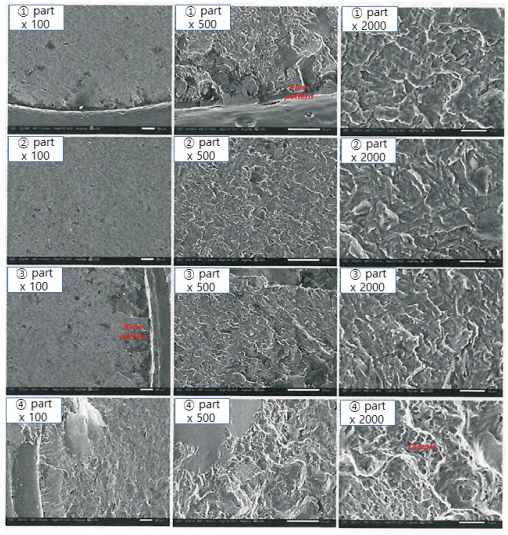


Fig. 6. SEM images of A specimen
(Low → High magnification)

Fig. 6의 확대한 SEM 사진을 보면 ① ~ ③ 구역은 일부 파괴시 단차에 의해 발생하는 River pattern이 관찰되며, Transgranular fracture와 Cleavage fracture의 형태가 동반되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 ④ 구역은 Ductile fracture에서 나타나는 특징인 Dimple 형상이 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

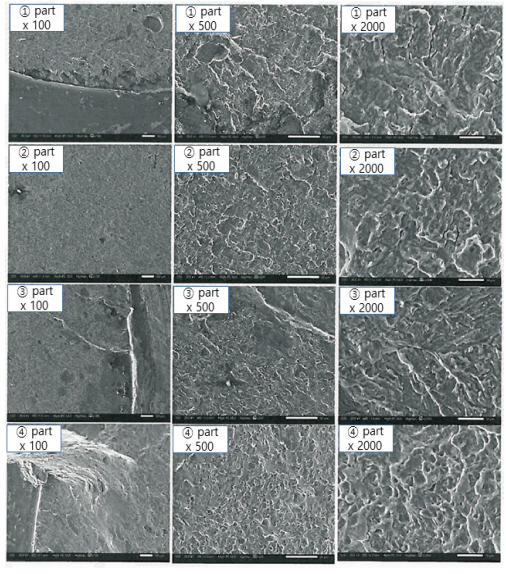


Fig. 7. SEM images of B specimen
(Low → High magnification)

Fig. 7은 B시편의 SEM 확대 사진이다. B시편 역시 A 시편과 마찬가지로 ① ~ ③ 구역은 Transgranular fracture와 Cleavage fracture 형태가 나타나며, ④ 구역은 Dimple 형상이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

나머지 C, D 시편도 Fig. 6와 7처럼 SEM을 통해서 확대한 사진을 확인하였으며, A, B 시편과 유사한 양상이 나타나는 것을 확인하였다. 총 4개 시편에서 모두 비슷한 경향성이 나타났다.

즉, 이러한 경향성이 나타나는 파면의 형태로 볼 때, Fig. 8처럼 볼트의 표면부에서 최초 크랙이 발생하였으며, 단시간에 파괴 및 균열 전파가 이루어지면서 최종파단부에서는 Dimple을 동반한 Ductile fracture가 나타난 것으로 판단된다.

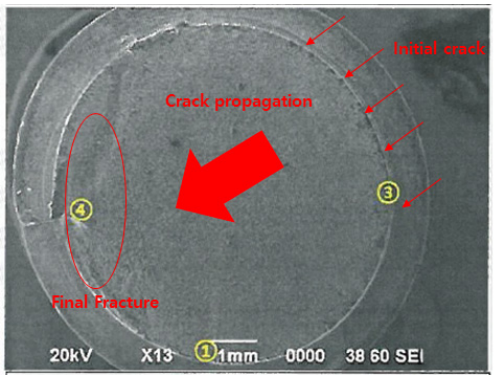


Fig. 8. The facture process of the bolt

2.3 볼트 파단 원인 분석

Table 2. Estimated cause and Check point of the defect

Defect	Estimated cause	Check Point
Bolt Fracture	Insufficient tightening	Suitability of propeller bolt and hole size
		Adequacy of propeller bolt grip
		Torque value applied to propeller bolts
		Maintenance and continuous check of propeller bolt torque

파면해석 결과를 보면, 일부 단차에 의한 River pattern이 나타나고 초기 크랙의 위치가 유사하며, 크랙 전파 패턴 또한 유사함에 따라 볼트 자체의 재질불량으로 볼트가 파손될 확률은 낮을 것으로 판단된다. 볼트의 표면에 지속적인 외력이 작용하였으며, 파단 시에는 순간적으로 파단이 발생하여 프로펠러가 이탈하는 현상까지 발생한 것으로 사료된다. 그리고 볼트의 파단원인에 대해 아래의 Table 2와 같이 Fault Tree를 작성하였다.

Table 2를 보면 추정되는 원인으로는 볼트 체결과 관련된 것이다. 그리고 그것과 관련하여 확인해야 할 사항으로 크게 4가지를 주목하였다. 첫 번째는 프로펠러 볼트와 홀 크기의 적합성, 두 번째는 프로펠러 볼트 그립의 적절성, 세 번째는 프로펠러 볼트에 적용된 토크값, 네 번째는 프로펠러 볼트 토크의 주기적인 점검여부이다.

2.3.1 프로펠러 볼트와 홀 크기의 적합성 검토

프로펠러 볼트와 홀 크기의 적합성을 확인하기 위해서 프로펠러 볼트의 직경과 프로펠러의 홀 크기를 검토하였다. 결함이 발생한 프로펠러의 경우 해당 홀이 훼손되어 있어 실측은 하지 못했으며, 도면과 작업공정서 등을 검토하였다. 프로펠러의 홀 크기는 직경 8.4mm 이고, 볼트의 직경은 8mm로 적정한 수준임을 확인하였다.

2.3.2 프로펠러 볼트 그립의 적절성 검토

Fig. 9를 보면 프로펠러 볼트 전체 길이는 60mm 이고, Max grip length 는 32mm이다. 프로펠러 홀에 나사산이 잠기는 부위가 약 13mm로 확인되었다. 볼트가 장착되게 되면 일부 나사산이 홀에 잠기게 되나, 볼트가 올바르게 체결되면, 볼트에 가해지는 Shear stress가 적어 볼트 파손의 원인으로 볼 수 없다고 판단된다.

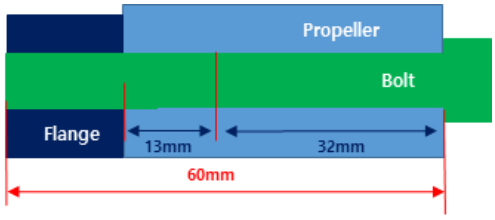


Fig. 9. The mounting cross-sectional view of the bolt

2.3.3 프로펠러 볼트에 적용하는 토크 값 검토

프로펠러를 볼트로 엔진에 체결 시, 프로펠러 제작사에서 요구하는 토크 값은 97-IN-LBS로 확인하였다. 도면 및 작업공정서 확인 결과, 해당 볼트의 토크 값도 요구도인 97-IN-LBS로 작업이 수행된 것을 확인하였다.

2.3.4 프로펠러 볼트 토크 값의 유지 및 지속적인 확인에 대한 검토

프로펠러의 재질은 목재이고, 이러한 목재 프로펠러의 구동개념은 Fig. 10 과 같다. 엔진 플랜지와 프로펠러가 볼트에 의해 체결되면, 볼트 장착토크에 의해서 볼트에 압축력이 작용하고 엔진 플랜지와 프로펠러간 접촉면에 마찰력이 발생하면서 엔진 동력이 프로펠러로 전달된다.

프로펠러 제작사의 조건에 따르면, 해당 프로펠러는 이렇게 엔진 플랜지와의 마찰력 보전을 위해서 토크의 유지 및 지속적인 확인이 필요하다. 하지만 해당 프로펠러는 최초 장착 후 토크를 유지하거나 확인하기 위한 절차가 없었다. 즉, 토크 손실이 발생하고 마찰력이 감소함과 동시에 프로펠러의 지속적인 회전운동으로 볼트에 의한 shear stress가 홀에 작용하면서 홀변형이 발생하고 프로펠러에 지속적인 진동이 가해지면서 볼트가 파손된 것으로 판단된다.

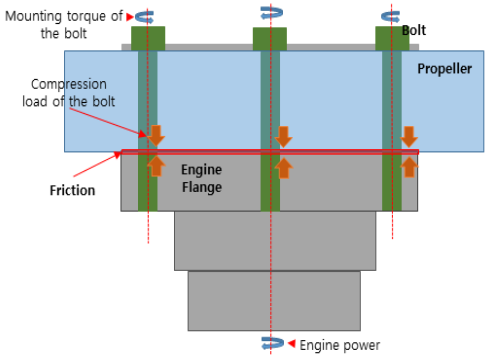


Fig. 10. The driving concept of a propeller

2.4 개선방안 및 결과

앞선 원인 분석을 통해서 볼트의 파단은 주기적인 볼트의 토크 확인이 부재하여 발생한 것으로 판된되었다.

Table 3. Improvement plan of the defect

Defect	Improvement Plan
Bolt Fracture	1. After the First Flight, recheck the bolt torque
	2. After the first 25 hours, recheck the propeller bolt torque
	3. Every 50 hours
	4. Environment change

이와 관련하여 개선방안을 Table 3과 같이 크게 4가지로 수립하였다. 해당 개선방안은 목재 타입 프로펠러 제조사의 실제 운용 경험에 따라 작성된 유지/보수 매뉴얼을 참고하여 수립하였다. 첫 번째로는 첫 비행 후 볼트의 토크를 확인, 두 번째로는 첫 25시간 비행 후 토크를 확인, 세 번째로는 매 50시간마다 토크를 확인, 마지막으로는 동/하절기 등 환경의 변화가 있다면 토크를 확인하는 것이다. 해당 개선방안을 운용환경에 적용하였고, 약 1년간 운용을 통해 모니터링을 해본 결과, 동일한 결함이 발생하지 않는 것을 확인하였다.

3. 결론

본 연구는 무인항공기의 추진계통 프로펠러 이탈 현상에 대해 원인을 분석하였다. 프로펠러 이탈의 원인으로는 체결의 볼트의 파단이 발생한 것을 확인하였다. 이러한 볼트 파단의 원인을 분석하기 위해 파면 분석을 수행하였고, 도출된 볼트 파단의 원인에 대한 개선방안을 제시하였다.

- 파단된 볼트의 파면분석을 통해서 볼트 파면에 단차에 의해서 발생하는 River pattern이 나타남을 확인하였고, Transgranular fracture와 Cleavage fracture의 형태가 동반되어 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- 볼트 파단의 원인 분석을 위해 프로펠러 볼트와 홀 크기의 적합성, 프로펠러 볼트 그립의 적절성, 프로펠러 볼트에 적용된 토크값, 프로펠러 볼트 토크의 주기적인 점검여부에 대해서 검토하였다.
- 해당결함은 프로펠러 볼트의 주기적인 토크 확인이 부재하여 발생한 것으로 확인되었으며, 이에 따라 볼트의 유지/보수와 관련하여 주기적으로 토크를 확인할 수 있도록 개선방안을 제시하였다.

본 연구를 통해서 볼트 파단의 원인을 재질, 구조적 문제보다 유지/보수와 관련된 문제로 판단할 수 있었다. 보통 항공기에 문제가 발생하면 유지/보수 측면에서의 검토는 소홀할 수 있으나, 이번 사례를 통해서 이러한 유지/보수도 무인항공기를 운용함에 있어 중요한 요소라는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 운용 측면의 품질개선을 통해서 무인 항공기의 사고를 사전에 예방 할 수도 있으며, 그로 인한 가동율 상승효과를 기대할 수 있다. 향후 새로운 무인항공기가 개발된다면, 본연구의 유지/보수 측면의 결과도 활용하여 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

References

[1] J.H. Kang, D.H. Lim, "A Study on the improvement of Air Vehicle Test Equipment(AVTE) stop by UAV Engine noise", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.21, No.1, pp.90-96, 2020.
DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.1.90

[2] John G. Grimes, Unmanned Systems Roadmap 2007-2032. p.5-15, Department of Defense, 2007.

[3] S.R. Jeong, J.H. Kang, "The study on structural vulnerability analysis of small fixed wing UAV with hard landing", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.20, No.7, pp.20-25, 2019.
DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.7.20

[4] D.H. Lim, G.H. Park, "A Case Study on Configuration Change for Preventing Propulsion Wire Fracture and Structural Deformation of Launch System of UAV", *Journal of Korean Society for Quality Management*, Vol.50, No.3, pp.533-543, 2022.
DOI: https://doi.org/10.7469/JKSQM.2022.50.3.533

[5] Y.I. Jeong, T.J. Lee, Y.H. Jang, S.S. Kim, "Fractographic Analysis Method to Estimate Aircraft Fatigue Life", *Korean Journal of metals and materials*, Vol.44, No.3, pp.155-162, 2006.
UCI: G704-000085.2006.44.3.010

[6] D.H. Kim, J.H. Kang, "Analysis of the cause of crack in UAV through the microstructure analysis", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.24, No.7, pp.208-214, 2023.
DOI: https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.7.208

김 대 한(Dae Han Kim) [정회원]

- 2012년 2월 : 부산대학교 재료공학부 졸업 (공학학사)
- 2014년 2월 : 부산대학교 재료공학부 대학원 졸업 (공학석사)
- 2014년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원 재직

〈관심분야〉
소재, 구조

강 주 환(Ju Hwan Kang) [정회원]

- 2013년 2월 : 한국과학기술원 전기전자학과 (학사)
- 2013년 2월 ~ 2016년 7월 : 현대중공업 조선사업부
- 2016년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원 항공센터

〈관심분야〉
국방품질