

미세조직 분석을 통한 무인항공기 크랙 원인 분석

김대한*, 강주환
국방기술품질원

Analysis of the cause of crack in UAV through the microstructure analysis

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

요약 무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)는 비행형태에 따라서 고정익(Fixed Wing) 무인항공기, 회전익(Rotary Wing) 무인항공기, 가변로터형(Tilt Rotor) 무인항공기, 동축반전형(Co axial) 무인항공기, 멀티콥터형(Multi copter) 무인항공기로 나눌 수 있다. 현재 진행 중인 우크라이나 러시아 전쟁에서 사용되는 무인항공기도 주로 고정익 무인항공기로 장거리, 장시간 임무가 가능하고 감시/정찰 및 공격도 가능한 것이 특징이다. 민간에서는 주로 멀티콥터형 UAV를 많이 사용한다. 민간분야에서는 촬영용, 배송용, 방제용 등 일반적인 산업분야에서 두루 이용 중에 있다. 본 논문에서는 고정익 무인항공기에서 발생한 추진용 엔진 허브의 크랙 현상에 대해서 연구하였다. 무인항공기를 운용하기 위해서 사전 점검을 하던 중 해당 크랙이 발견되었으며, 미세조직 분석을 통해서 크랙의 원인을 검토하였다. 미세조직 분석은 광학현미경과 주사전자현미경을 사용하였으며, 크랙의 형상, 전파 매커니즘 등을 확인하였다. 최초 미세크랙이 단절된 형태로 발생하였으며, 그 크랙들이 합쳐져 최종파괴가 발생하였다. 또한 결함이 있는 시편과 없는 시편 간의 금속간화합물의 형상 및 분율차이가 나타나는 것을 확인하였다. 이러한 연구결과를 바탕으로 원자재의 성분 관리가 필요한 결론을 도출하였다. 그리고 이러한 결과는 향후 무인항공기 개발에 도움이 될 것이다.

Abstract Unmanned aircraft vehicles (UAVs) can be classified into fixed-wing, rotary-wing, tilt-rotor, co-axial, and multi-copter according to the type of flight method. UAVs are also used widely in the ongoing war between Ukraine and Russia, with fixed-wing UAVs mainly used. The advantage of fixed-wing UAVs is that they can operate longer hours and longer distances than other types of UAV. On the other hand, the commercial part mainly uses multi-copter UAVs. They are easy to fly and do not need a runway to take off and land. This study examined crack defects in engine hubs in fixed-wing UAVs. The defect was found during a pre-check to operate the UAV. The cause of cracks was examined through microstructure analysis. Microstructural analysis used optical microscopy and scanning electron microscopy, and the shape and propagation mechanism of the crack was confirmed. Initially, micro-cracks appeared in a disconnected shape, and the final fracture occurred when the cracks combined. In addition, there was a difference in shape and fraction between the intermetallic compound of a defective specimen and the non-defective specimen. Based on these results, the management of raw material components is necessary. The result of this study is expected to help develop UAVs in the future.

Keywords : UAV, Crack, Fixed Wing, Microstructure, Engine Hub

*Corresponding Author : Dae Han Kim(DTaQ)

email: dhkim23@dtaq.re.kr

Received May 4, 2023

Accepted July 7, 2023

Revised May 31, 2023

Published July 31, 2023

1. 서론

최근 무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle) 산업은 크게 발전하고 있다. 무인항공기는 비행형태에 따라서 고정익(Fixed Wing), 회전익(Rotary Wing), 가변로터형(Tilt Rotor), 동축반전형(Co axial), 멀티콥터형(Multi copter)으로 분류할 수 있다. 민간분야에서는 주로 멀티콥터형을 활용하여 영상 촬영, 방재, 택배 등에 사용하고, 최근에는 미래 운송 수단인 UAM(Urban Air Mobility)에도 적용되고 있다. 이러한 멀티콥터형의 장점으로는 비행이 쉽고, 이착륙을 위해서 넓은 공간이 필요하지 않은 점이 있다[1,2].

최근 우크라이나 러시아간 전쟁을 보면, 군사용 무인항공기로는 주로 고정익 무인항공기가 많은 활동을 하고 있다. 고정익 무인항공기의 장점으로는 장시간, 장거리 운용이 가능하고 필요에 따라서는 자폭, 폭격 등 공격형으로 전환도 가능하다[3,4]. Fig. 1은 국내 국방분야에서 무인항공기의 운용순서를 나타낸 것으로 송골매, 서처, 헤론 등 고정익 무인항공기가 운용되고 있으며, 향후 국내개발 될 무인항공기도 주로 고정익 무인항공기이다. 국방분야의 경우는 장거리, 장시간 임무가 필요하며, 대부분 활주로를 보유하고 있으므로 고정익 무인항공기가 더 적합할 것으로 판단된다.

본 연구에서 고정익 무인항공기의 결함 사례에 대해 분석을 수행하였다. 결함 사례를 살펴보면, 무인항공기 추진계통의 엔진 허브에서 크랙이 발견되었다. 엔진 허브는 프로펠러와 엔진을 연결해주는 핵심 구성품이며, 문제가 발생 할 경우 항공기가 추락할 수 있으므로 안전에 매우 중요한 구성품이다. 이러한 엔진 허브의 크랙 원인 검토를 위해서 결함품을 회수하여 시편의 성분분석, 광학현미경(OM, Optical Microscope), 주사전자현미경(SEM, Scanning Electronic Microscope)장비를 통한 미세조직 분석을 수행하였다. 그리고 image analyzer를 사용하여 금속간화합물의 분율을 확인하였으며, 경도시험을 통해서 기계적 특성을 확인하였다. 상기의 미세조직 및 기계적 특성 평가는 한국화학융합시험연구원(KTR)에 의뢰하여, 시험 결과를 받았으며, 시험 결과를 토대로 분석과 고찰을 통해서 크랙의 발생 원인을 도출하였다.



Fig. 1. History of military fixed wing UAV

2. 본론

2.1 결함현상

크랙이 발생한 부위는 엔진 허브로 프로펠러와 엔진 사이를 연결해주는 구성품이다. 크랙은 프로펠러 허브의 키 홈부위에서 Fig. 2와 같이 모두 발생하였다.

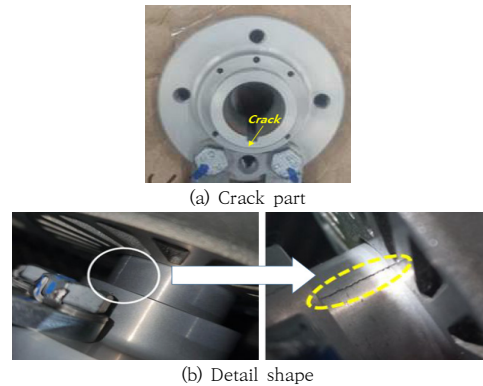


Fig. 2. Shape of crack part

Fig. 2의 (a)는 엔진 허브의 전체적인 사진이고, (b)는 크랙이 발생한 부분의 확대 사진이다. Fig. 2의 (b)를 보면 한 줄로 균열이 발생한 것을 확인 할 수 있다.

2.2 결함이 발생한 제품의 미세조직 분석

크랙의 전파 메커니즘, 성분의 차이, 조직적 특성 등의 결함 소재의 물리적 특성을 파악하기 위해서 미세조직 분석을 수행하였다. 미세조직 분석을 위해서 성분, 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM/EDS) 분석, 경도 측정을 수행하였다. 성분분석은 ASTM E 1251-17a 방법에 따라 수행하였으며, 미세조직 분석을 위해서 분석장비로 주사전자현미경(Scanning Electronic Microscope, JSM-6490, OXFORD X-MAXn)을 사용하였다. 그리고 경도측정은 KS B 0811의 방법에 따라서 Wilson VH3300 장비를 사용하여 진행하였다.

시편은 Fig. 3과 같이 A~D까지 총 4개를 준비하였다. A~C 시편은 크랙이 발생한 시편이고, D 시편은 대조군으로 크랙이 발생하지 않은 시편이다. Fig. 3에서 크랙은 잘 보이지 않을 수도 있으나, A~C 시편 모두 앞선 설명과 같이 키 홈부위에서 나타는 것을 확인 할 수 있었다.

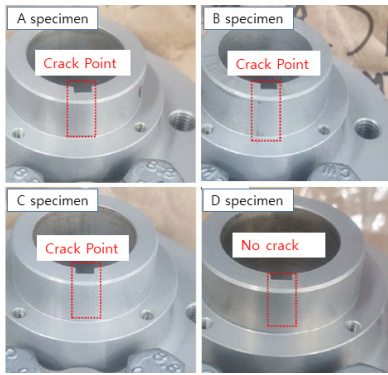


Fig. 3. Crack point of A, B, C, D specimens

2.2.1 Al합금의 성분분석

각 시편마다 성분의 차이를 확인해 보기 위해서 시편의 성분분석을 Spark emission 방법으로 수행하였다. Table 1을 보면 A~D 시편 모두 동일한 성분이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 합금의 주요한 성분으로는 Si, Fe, Mg, Mn으로 나타났다. A~C 시편은 각 성분 별 함량이 비슷한 수준을 나타내고 있으나, D 시편은 Si, Fe, Mn 함량 다소 작은 것을 확인하였다.

Table 1. Result of element analysis

Element	A spec (%)	B spec (%)	C spec (%)	D spec (%)
Si	0.98	0.98	0.99	0.81
Fe	0.49	0.48	0.49	0.25
Cu	0.09	0.09	0.09	0.03
Mn	0.81	0.80	0.80	0.50
Mg	0.78	0.78	0.78	0.71
Cr	0.03	0.03	0.03	0.11
Ti	0.03	0.03	0.03	0.04
Al	96.68	96.67	96.67	97.53

Si, Mn, Mg은 Al합금에서 기계적 특성을 향상시킬 수 있는 원소이며, Mg와 Si가 함께 첨가되게 되면 Mg₂Si의 이차상을 통해서 Al의 기계적 특성이 향상되게 되며, Mn은 소량으로도 내식성의 저하없이 기계적 특성을 향상시킬 수 있다. 하지만 각 원소의 함량 조절이 필요하며, 다량의 합금 원소가 첨가되면 오히려 기계적 특성을 감소시킬 수도 있다[5,6].

2.2.2 Al합금의 미세조직 관찰(OM 분석)

Fig. 4는 A~D 시편의 균열 발생 부위를 절단하여 마

운팅한 시편이다. 광학현미경(Optical Microscope) 관찰을 위해서 HF, HCl, 증류수를 사용하여 에칭 용액을 제조하였고, 전처리 처리를 하여 조직을 관찰하였다.

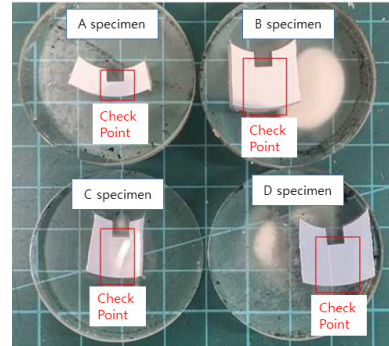


Fig. 4. four mounting specimens(A~D)

Fig. 5는 시편 A~D까지의 저배율 광학현미경 이미지다. ①~③ 구역은 크랙이 발생한 부위이며 ④구역은 크랙이 발생하지 않은 일반 조직 부위이다.

우선, Fig. 5를 보면 A~C 시편 모두 크랙을 명확하게 확인할 수 있으며 D 시편은 크랙이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 4개의 시편 모두 구역별로 광학현미경 이미지를 확인하였고, A~C 시편은 크랙의 형상이나 미세조직 형태가 유사하게 나타남에 따라 본 논문에서는 대표적인 C 시편과 대조군 D 시편의 미세조직 관찰 결과를 비교하였다.

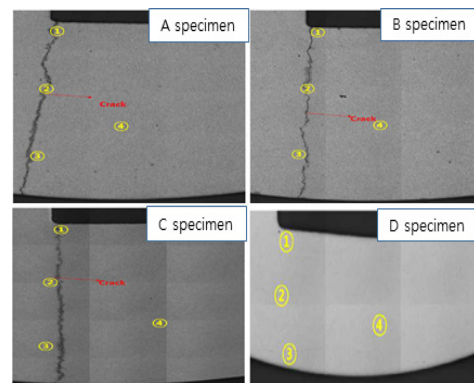


Fig. 5. Low magnification OM image of four specimens

Fig. 6을 보면 ①~③ 구역에서는 크랙이 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 모든 구역의 이미지에서 금속간화합물(Intermetallic compound)가 나타났다. ①~③ 구

역의 이미지를 자세히 보면 크랙이 연결된 것이 아니라 분리되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이러한 양상을 보면, 초기 크랙이 한 부분에서만 발생한 것이 아니라, 다수의 지역에서 발생하여 전파되고 합쳐진 것으로 추정할 수 있다. Fig. 7은 크랙이 발생하지 않은 D 시편의 광학현미경 확대 이미지다.

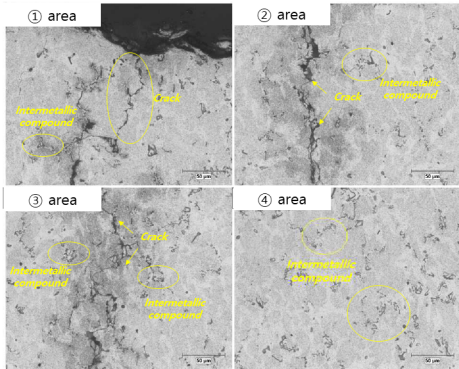


Fig. 6. High magnification OM image of C specimen

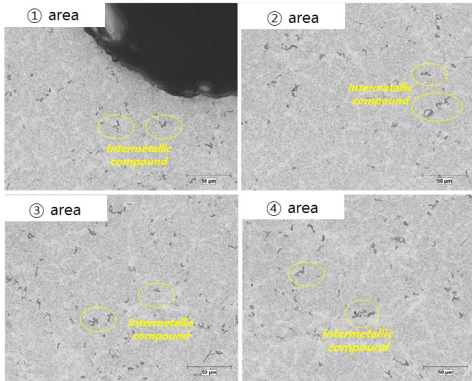


Fig. 7. High magnification OM image of D specimen

①~④ 구역 모두에서 크랙은 발견되지 않았다. 하지만 미세조직에서 약간의 차이가 있다. Fig. 6과 Fig. 7을 비교해서 보면 Fig. 6에서 금속간화합물의 양이 육안으로 식별될 정도로 D 시편보다 많이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 금속간화합물의 형상도 C 시편은 복잡한 형상이 많고 D 시편은 Rod-like 형상으로 나타났다. 이것은 앞서 성분분석에서 합금 성분 함량의 차이가 나타난 것과 연관성이 있다고 판단된다.

2.2.3 Al합금의 미세조직 관찰(SEM/EDS 분석)

조금 더 세밀하게 미세조직 및 금속간화합물 분석을

위해서 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope/Energy Dispersive x-ray Spectroscopy)을 사용하여 조직 분석을 수행하였다. 시편은 광학현미경 분석에서 사용하였던, C 시편과 D 시편을 사용하였다.

Fig. 8은 C 시편의 저배율 이미지다. OM 이미지에서 봤던 것과 유사하게 크랙이 단절되어 형성되어 있음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 9의 ① 구역 고배율 이미지를 보면 크랙이 나타나는 것을 확인할 수 있고, 그 크랙 또한 단절된 형상으로 나타났다. 즉, 모서리 부위에서 최초 크랙이 발생하여 일방향으로 연속적으로 전파된 것이 아니라, 여러 부위에서 동시에 크랙이 발생하여 크랙이 전파되고 합쳐져서 최종 균열이 발생한 메커니즘이라고 추정할 수 있다. D 시편에서는 광학현미경 이미지와 같이 크랙과 같은 특이사항이 발견되지 않았다.

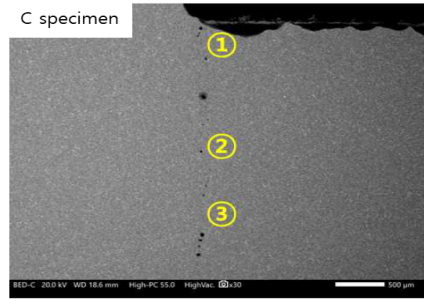


Fig. 8. Low magnification SEM image of C specimen

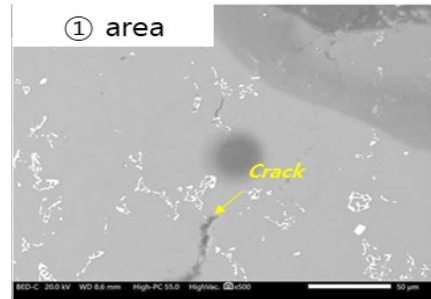


Fig. 9. High magnification SEM image of ① area of C specimen

추가적으로 금속간화합물 분석을 위해서 C, D 시편의 EDS 및 mapping 분석 자료를 제시하였다. 탄소, 산소 등의 피크는 제외하고 합금에 영향을 주는 원소를 위주로 EDS 성분분석 결과를 Fig. 10 및 Table 2, 3에 제시하였다.

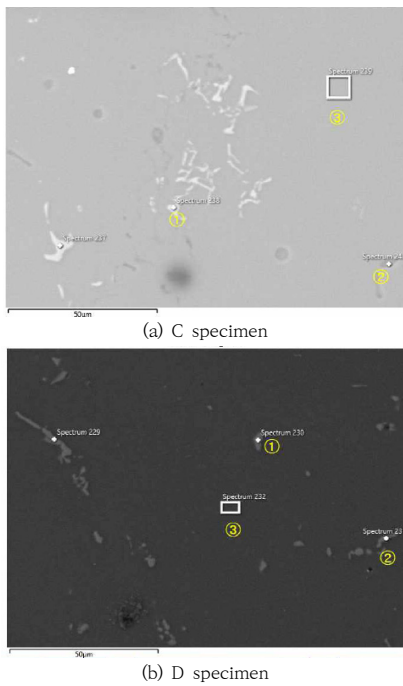


Fig. 10. SEM/EDS image of C, D specimen

Table 2. SEM/EDS analysis result of C specimen

Element	① Area (wt %)	② Area (wt %)	③ Area (wt %)
Mg	-	31.36	0.63
Al	62.73	46.84	98.50
Si	8.24	21.80	0.56
Mn	14.18	-	0.31
Fe	14.84	-	-

Table 2를 보면 현재 시편 ① 구역에서 Al-Si-Mn-Fe의 화합물이 생성된 것을 확인할 수 있고, ② 구역에서는 Mg-Si 화합물이 생성되었으며, ③ 구역은 기지상으로 나타남을 확인하였다. 하지만 Table 3을 보면 D 시편에서는 Mg-Si 화합물은 나타나지 않았다. 주로 Al-Si-Mn-Fe의 화합물과 기지상이 나타남을 알 수 있다.

Table 3. SEM/EDS analysis result of D specimen

Element	① Area (wt %)	② Area (wt %)	③ Area (wt %)
Mg	-	-	0.65
Al	75.95	64.59	98.77
Si	6.65	8.40	0.58
Cr	-	1.40	-
Mn	7.62	9.68	-
Fe	9.78	15.93	-

그리고 이러한 결과는 Fig. 11의 EDS mapping 분석에서도 확인할 수 있다. Fig. 11의 (b)를 보면 금속간화합물에서 Mg이 크게 검출되지 않는 것을 확인할 수 있으며, 이것은 D 시편에서는 Mg이 기지에 주로 고용된 것으로 추정된다.

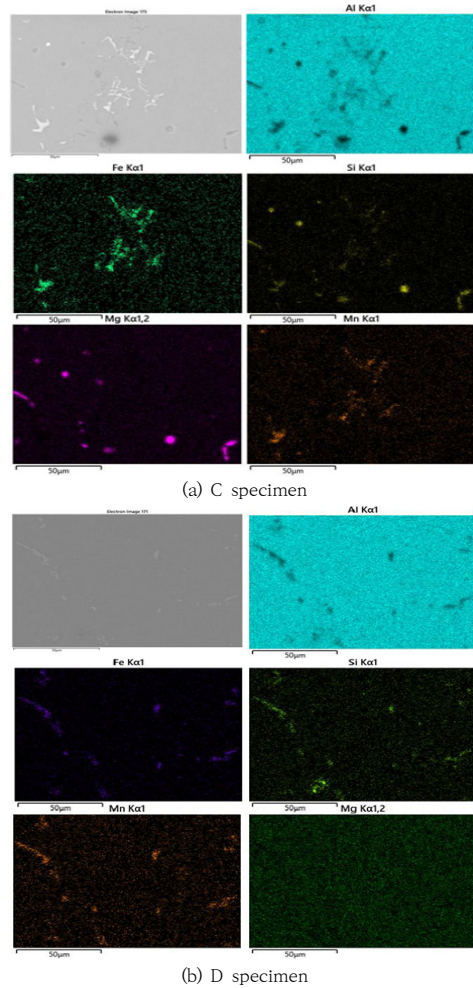


Fig. 11. SEM/EDS mapping image of C, D specimen

금속간화합물의 형상도 OM 분석 결과와 유사하게 나타나는 것을 SEM 이미지를 통해서 확인할 수 있다.

2.2.4 Al합금의 미세조직 관찰(분율 분석)

C, D 시편의 금속간화합물의 분율(fraction)을 확인하기 위해서 image analyzer를 사용하여 Fig. 12와 같이 분석하였다. C 시편에서는 약 4.93%, D 시편에서는 2.20%로 분율이 측정되었다. 즉 상대적으로 C 시편의 금속간화합물이 약 2배이상 높게 나타났다. A, B 시편도

C 시편과 유사하게 4% 이상으로 나타났다. A~C 시편의 경우 합금 성분의 함량이 높아 금속간화합물의 분율이 높게 나타난 것으로 사료된다.

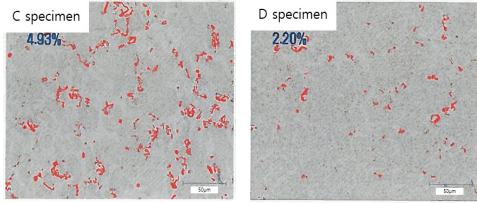


Fig. 12. SEM/EDS image of C, D specimen

2.2.5 Al합금의 비커스 경도 시험(Hv)

A~D 시편의 기계적 특성을 확인하기 위해서 경도 측정을 실시하였다. 정확한 기계적 특성 평가를 위해서는 인장시험을 수행해야 하지만 해당 시편에서 인장시험편 채취에 어려움이 있어, 경도 시험으로 대체하였다. Table 4는 각 시편 별 경도를 3회 측정하고 평균값을 나타낸 것이다.

Table 4. Result of Vickers Hardness

Specimen	Result 1 (Hv)	Result 2 (Hv)	Result 3 (Hv)	Average (%)
A	106	105	106	106
B	107	105	108	107
C	109	106	107	107
D	93	96	97	95

미세조직 분석 결과와 연계하여 보면, 금속간화합물의 분율이 높은 A~C 시편의 경도값이 D 시편에 비해서 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있다. A~C 시편의 금속간화합물이 다수 분포하면서 표면의 경도를 높인 것으로 추정된다.

2.3 미세조직 분석에 대한 고찰

파단이 발생한 부위를 보면 모두 키 홈부위로 모서리 부근에서 높은 수준의 응력이 집중적으로 부가되어 초기 균열이 발생된 것으로 판단되며, OM, SEM/EDS 분석을 통해서 크랙은 한 방향에서만 발생한 것이 아니라 여러 곳에서 동시에 미세균열이 발생하여 합쳐지면서 전파된 것으로 확인 할 수 있었다. 즉, 크랙이 발생한 시편과 발생하지 않은 시편 간의 합금 성분 함량 차이에 의한 미세조직 차이(분율, 형상)가 존재하였으며, 기계적 특성(경

도)에도 영향을 준 것으로 추정된다.

그리고 크랙이 발생한 A~C 시편의 경우, 금속간화합물(Al-Si-Mn-Fe, Mg-Si)이 조직에 다수 존재하며, 형상도 복잡한 형상을 나타내는 반면 D 시편은 금속간화합물(Al-Si-Mn-Fe)이 조직에 A~C 시편보다 적게 존재하며 rod-like 형상을 나타내었다. 레퍼런스 [5,6]에 따르면, 본 연구의 합금성분이 함유된 Al합금에서는 $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ 과 Mg_2Si 화합물이 생산된다는 연구결과도 있다. 본 연구를 통해서 관찰된 Al-Si-Mn-Fe 화합물이 $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$ 화합물이고 Mg-Si 화합물이 Mg_2Si 화합물일 수도 있으나 정확한 분석을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구에서는 무인항공기의 엔진 허브에서 발생한 크랙에 대한 원인을 미세조직 분석을 통해서 조사하였다.

- ① Al 합금의 성분분석을 통해서 Si, Fe, Mg, Mn이 주요한 합금의 성분으로 나타났으며, A~C 시편과 D 시편의 각 성분 별 함량이 차이가 있었고, D 시편의 Si, Fe, Mn 함량 다소 작은 것을 알 수 있었다.
- ② 크랙이 단절된 형상으로 나타남에 따라 여러 지점에서 미세 크랙들이 발생했으며, 이 크랙이 전파되고 합쳐지면서 최종 균열이 발생한 것으로 추정된다.
- ③ OM 및 SEM 분석 결과에 따라, A~C 시편과 D 시편은 미세조직의 차이가 나타났다. A~C 시편은 금속간화합물의 분율이 높으며, 형상도 복잡한 조직 형상으로 나타나나, D 시편은 금속간화합물의 분율이 낮으며 형상도 주로 rod-like 형상으로 나타났다.
- ④ 미세조직의 영향으로 A~C 시편과 D 시편의 경도 특성도 차이가 나타났다. A~C 시편의 경도가 D 시편의 경도보다 약 10 Hv 이상 높게 나타났다.

상기 분석을 통해서 크랙이 발생한 시편과 발생하지 않은 시편 간의 미세조직의 차이가 나타나는 것을 확인 하였다. 크랙이 발생한 시편이 조금 더 경도가 높게 나타났으며, 금속간화합물의 분포 및 분율차이에 의한 것으로 추정된다. 향후 구체적인 $Al_{15}(Fe,Mn)_3Si_2$, Mg_2Si 와 같은 금속간화합물 분석을 위해서는 XRD나 TEM 분석이 필요할 것으로 판단되며, 품질안정화를 위해서는 미

세조직의 차이가 나타나지 않도록 금속의 성분 함량 차이를 최소화한 원자재 관리가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구를 통해서 무인항공기에서 나타날 수 있는 결합 사례에 대해 미세조직 분석을 통해서 검토 하였고, 원인을 도출하였다. 향후 새로운 무인항공기가 개발된다면 이러한 연구의 경험이 많은 도움이 될 것이다.

References

- [1] H.J. Ahn, "A Study of Civil Unmanned Aerial System Category Classification", *J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.43, No.7, pp.657-667, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.7.657>
- [2] S.R. Jeong, S.M. LEE, "Research on quality improvement of damper assembly for unmanned aerial vehicles system launch machine", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.24, No.4, pp. 458-464, 2023
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.4.458>
- [3] S.R. Jeong, "A Study of Small UAV Throwing Take Off Standard Setting", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.24, No.4, pp. 458-464, 2023
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2022.23.11.86>
- [4] J.H. Jeong, H.S. Myung, D.W. Kim, H.S. Lim "Design of Decentralized Guidance Algorithm for Swarm Flight of Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles", *J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci.*, Vol.49, No.12, pp.981-988, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2021.49.12.981>
- [5] H.J. Kim, "Effect of Sc, Sr Elements on Eutectic Mg₂Si Modification and Castability of Al-4wt%Mg-0.9wt%Si-0.3wt%Mn-0.15wt%Fe Casting Alloy", *Journal of Korea Foundry Society*, Vol.35, No.6, pp.147-154, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2015.35.6.147>
- [6] J.M. Kim, K.C. Jung, C.Y. Kim, J.S. Shin "Effects of Fe and Cu Addition on the Microstructure and Tensile Properties of Al-Si-Mg Alloy for Compound Casting", *Journal of Korea Foundry Society*, Vol.41, No.1, pp.3-10, 2021.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7777/jkfs.2021.41.1.3>

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