

드론 FC의 IEMI 영향 평가 및 차폐 소재 성능 분석

Evaluation of IEMI Effects on Drone Flight Controllers and Performance Analysis of Shielding Materials

조규현¹ · 김수현² · 장종태^{3*} · 이재욱⁴

Kyu-Heon Cho¹ · Soo-Hyun Kim² · Jong-Tai Jang^{3*} · Jae-Wook Lee⁴

요약

본 논문에서는 드론 FC에 고출력 전자파를 방사하여 IMU 데이터를 직접 교란하는 IEMI의 주파수와 수신 전계를 측정하고 이를 차폐하기 위해 현재 개발 중인 나노 소재 기반 전자파 차폐함의 소재별 전자파 내성을 측정했다. 1 GHz 이하 대역에서 FC의 취약 조건을 분석한 결과 390 MHz 대역, 750 V/m 세기에서 가속도계와 각속도계의 교란이 확인됐다. 취약 조건을 검증한 뒤 동일 조건에서 FC에 차폐함을 적용해 소재별 IMU 데이터 교란 발생 차이를 비교하며 소재별 전자파 내성에 대한 유의미한 분석이 가능함을 확인했다.

Abstract

This study measures the frequency and electric field intensity of intentional electromagnetic interference that directly disrupts inertial measurement unit (IMU) data in drone flight controllers (FCs) and evaluates the material-specific shielding performance of nano-material-based electromagnetic enclosures. FC vulnerability analysis in the sub-1 GHz band revealed accelerometer and gyroscope disruptions at 390 MHz with 750 V/m. Applying the shielding enclosures under identical conditions confirmed material-specific electromagnetic immunity by observing differences in IMU disruption, enabling meaningful analysis based on disruption patterns.

Key words: Drone, Inertial Measurement Unit (IMU), Intentional Electromagnetic Interference (IEMI), Radiated Immunity, Shielding Materials

I. 서론

최근 드론의 중요성이 증가하면서 5G 통신과 같은 초고주파 환경이나 전파 방해가 큰 지역, 고출력 전자기파

(HEPM, high power electromagnetic), 의도적 전자기 간섭(IEMI, intentional electromagnetic), 고고도 전자기 펄스(HEMP, high altitude electromagnetic pulse) 등에 의한 특수한 상황에서도 드론이 전자파의 영향 없이 안정적으로

†이 연구는 대한민국 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 국가과학기술연구회(NST)의 지원을 받았음(CRC22031-000).‡

한국항공대학교 항공전자정보공학과(Department of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University)

*한국항공우주연구원(Korea Aerospace Research Institute)

1: 학부연구원(<https://orcid.org/0009-0009-9009-3768>), 2: 석사과정(<https://orcid.org/0009-0000-3054-2394>)

3: 책임연구원(<https://orcid.org/0000-0002-4677-9270>), 4: 교수(<https://orcid.org/0000-0003-2903-5904>)

· Manuscript received July 4, 2025 ; Revised July 30, 2025 ; Accepted August 21, 2025. (ID No. 20250704-023S)

· Corresponding Author: Jae-Wook Lee (e-mail: jwlee1@kau.ac.kr)

임무를 수행하는 능력이 요구되고 있다. 드론의 IEMI에 의한 영향을 확인하는 연구는 활발히 진행되고 있으며 [14-16], 그중 드론의 핵심 부품인 비행 제어기(FC, flight controller)의 전자파 영향을 분석할 필요가 있다.

본 연구에서는 FC에 고출력 전자파를 방사해 내부의 관성 측정 장치(IMU, inertial measurement unit)에서 데이터 교란이 발생하는 정도를 확인하여 FC의 방사 내성(radiated susceptibility)을 파악한다. 1 GHz 미만 대역에서 IMU 센서를 직접 교란하는 IEMI의 주파수와 수신 전계 강도를 측정해 FC의 취약 조건으로 특정한다. 그리고 현재 개발 중인 나노소재 기반 전자파 차폐재를 적용한 차폐함을 이용해 동일 환경에서 실험을 진행하여 소재별 전자파 내성을 확인한다.

II. FC 취약 조건 분석

2.1 취약 주파수 대역 탐색

FC 내부 회로에서 EMI 신호가 많이 발생하는 주파수 대역이 IEMI에 취약할 것으로 예상하여 EMI scanning을 수행하였다.

스펙트럼 분석기를 사용해 30~600 MHz 대역을 대상으로 FC의 취약 주파수 대역 후보를 선정했다. 본 논문에서 사용된 FC 기종은 Pixhawk 사의 Pixhawk 2.1 모델이다. 시험 결과 FC의 취약 주파수 대역으로 366~397 MHz 사이 대역이 추정되었다. 그림 1에 EMI scanning 시험 구성과 스캐닝 결과를 나타내었다.

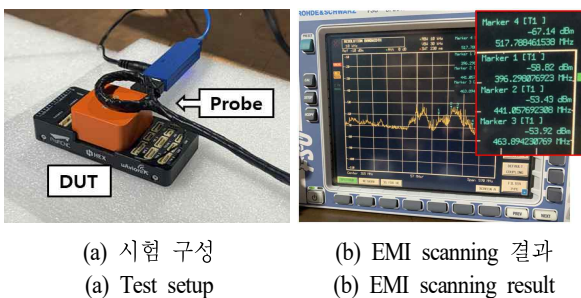


그림 1. EMI scanning 구성 및 결과
Fig. 1. EMI scanning setup and result.

2.2 IEMI 영향 평가 실험

1절에서 추정된 취약 주파수 대역을 대상으로 FC에 IEMI를 인가하는 실험을 구성했다. 실험은 RS(radiated susceptibility) 챔버에서 log-periodic 안테나를 사용하였고, 편파에 의한 영향을 고려하기 위해 안테나의 방향과 FC가 안테나를 바라보는 배치 방향을 바꿔가며 실험을 진행했다. DUT와 안테나 간 거리는 20 cm이고, IEMI 신호는 정현파(sinusoidal continuous wave)를 약 3 MHz 간격으로 10초 동안 인가하여 IMU 센서의 이상 데이터와 수신 전계 강도를 측정 후 편파 방향을 바꿔 동일 과정을 반복했다. FC 기체의 면적이 가장 넓은 네 방향에 대해 모두 실험을 진행했고 실험 구성을 그림 2에 나타냈다.

실험 결과 FC 기체의 케이블 연결 단자가 있는 면으로 전자파를 인가할 때 360~400 MHz 주파수 대역, 760 V/m 이상의 수신 전계에서 IMU 센서의 이상 현상을 확인했다. 수직/수평 편파 모두 이상 현상이 발생했다. 390 MHz에서 이상 현상이 발생한 IMU 센서의 가속도계와 각속도계 데이터를 그림 3에 나타내었다.

전자파가 인가된 시점에서 불연속적인 피크가 발생했음을 확인할 수 있다. FC의 나머지 면에 대한 전자파 방사 실험에서는 IMU 센서 데이터에 이상 현상이 발생하지 않았다. 이는 IMU 센서를 덮고 있는 알루미늄 케이스에 의해 차폐 효과가 발생했기 때문으로 예상되며, 이상 현상이 발생한 FC 케이블 연결 단자 방향 면의 경우 FC 케이블 연결 단자 틈으로 전자파가 침투했을 것으로 추측한다.

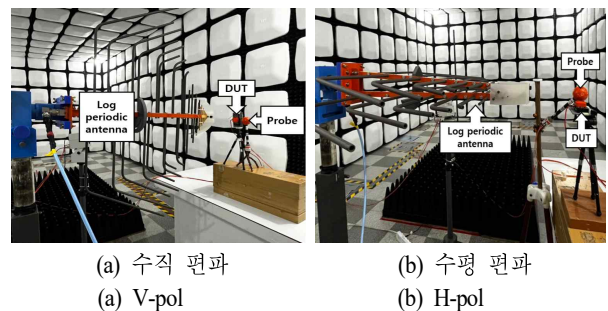
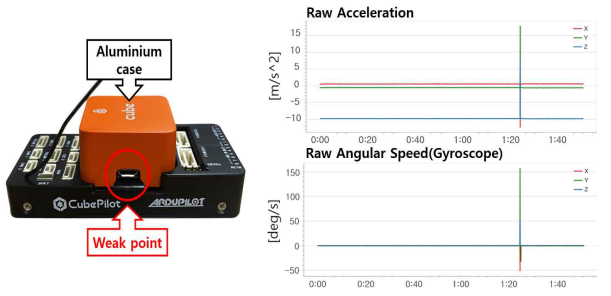


그림 2. RS 챔버 시험 구성
Fig. 2. RS chamber test setup.



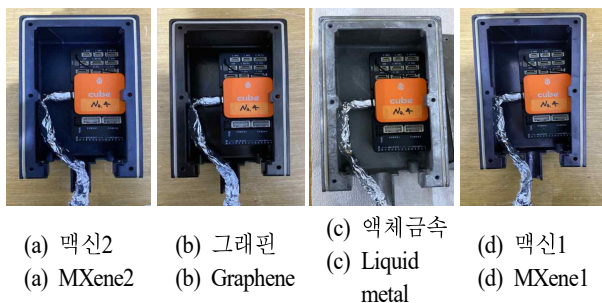
(a) 전자파 취약 부위 (b) 가속도계, 각속도계 이상 현상
 (a) Weak point under ele- (b) IMU data anomalies in accelero-
 ctromagnetic exposure meter and gyroscope

그림 3. IEMI 영향 평가 실험 결과
 Fig. 3. Results of IEMI impact test.

III. 차폐함 소재별 전자파 내성 분석

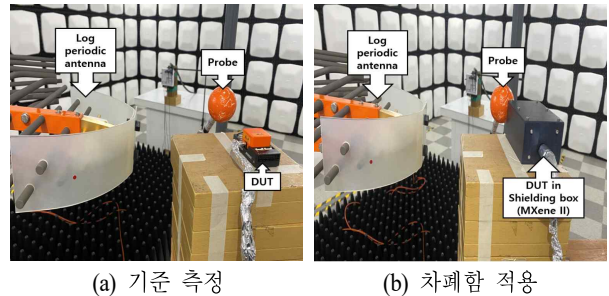
II장에서 밝힌 FC 취약 조건에 대해 여러 소재의 서로 다른 차폐함을 적용하며 소재별 전자파 내성을 측정했다. 시험 구성은 그림 2(b)와 같고 FC 수신 전계는 800 V/m, 안테나는 수평 편파만을 사용했다. 측정 대상 차폐 소재는 맥신(MXene) 2종과 그래핀(Graphene), 액체 금속(liquid metal)이며 측정 전 성능이 검증된 상용 알루미늄 테이프 로 도배된 차폐함을 이용해 시험 환경을 검증했다.

차폐함에 FC를 탑재한 모습을 그림 4에 나타냈다. 시험은 기준 측정, 시험 환경 검증, 차폐함 내성 시험 순서로 진행했다. 기준 측정을 통해 II장의 취약 조건의 유효성을 확인했다. 실험 구성을 그림 5(a)에 나타냈고, FC에 전자파를 3회 인가한 결과 3회 모두 가속도계와 각속도계에서 피크가 발생했고 자기계의 동작이 중단됐다. 이를



(a) 맥신2 (b) 그래핀 (c) 액체금속 (d) 맥신1
 (a) MXene2 (b) Graphene (c) Liquid metal (d) MXene1

그림 4. 차폐함에 탑재된 FC
 Fig. 4. FC mounted inside the shielding enclosure.



(a) 기준 측정 (b) 차폐함 적용

그림 5. 차폐함 차폐 성능 시험 구성
 Fig. 5. Test setup for the enclosure's shielding performance.

그림 6에 나타냈다.

이어서 기준 측정의 결과가 IMU 센서의 영향이 아닌 다른 시험 구성의 오류로 인한 결과인지 검증을 위해 상용 알루미늄 차폐재를 적용한 차폐함에 FC를 탑재하여 기준 측정과 동일하게 시험을 구성한 뒤 전자파를 5회 인가했다. 그 결과 5회 모두 이상 현상이 발생하지 않았고 이를 통해 시험 환경이 IMU 센서에 주는 영향 없이 올바르게 구성됨을 검증했다.

FC를 탑재한 차폐함을 대상으로 전자파 내성 시험을 진행했다. 그림 5(b)와 같이 FC에 차폐함을 적용해 기준 측정과 결과를 비교했다. 차폐함 대상 시험에서는 전자파를 소재

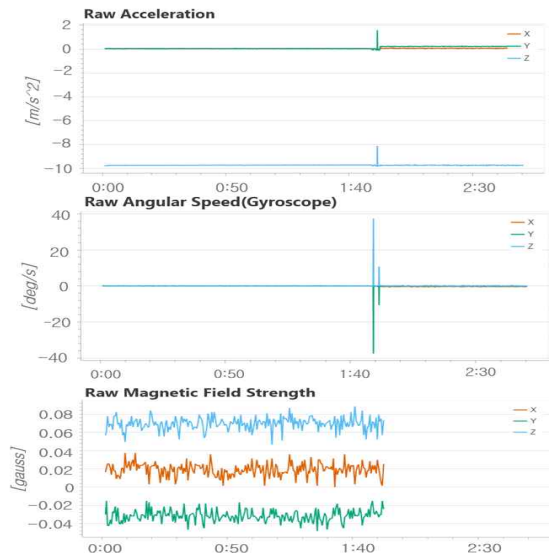


그림 6. 기준 측정 가속도, 각속도, 자기계 로그 데이터
 Fig. 6. Reference log data of accelerometer, gyroscope and magnetometer.

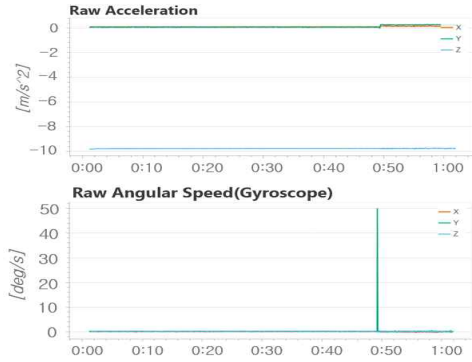


그림 7. 액체 금속 차폐함 시험 가속도계, 각속도계 로그 데이터

Fig. 7. Accelerometer and gyroscope log data from the liquid metal shielded enclosure test.

별로 5회 인가했다. 시험 결과 액체 금속 차폐함에 탑재한 FC에서 가속도계 및 각속도계 이상 2회, 통신 오류 5회가 발생했고 이를 그림 7에 나타내었다. 액체 금속 차폐함을 제외한 다른 차폐함에서는 모두 이상 현상이 발생하지 않았다.

본 시험을 통해 FC의 취약 조건과 시험 환경에 대한 유효성을 검증했고 IMU 센서에 발생하는 이상 현상을 기준으로 소재별 전자파 내성을 측정했다. 맥신과 그래핀 차폐함은 외부 전자파에 우수한 내성을 보였지만 액체 금속 차폐함은 IMU 데이터 이상 현상과 통신 오류가 발생하며 효과가 미흡함을 확인했다. 전체 소재에 대한 시험 결과를 표 1에 나타냈으며, 향후 해당 대역에서 소재의 전기 전도도를 측정해 시험 결과를 검증하고 신뢰도를 향상시킬 계획이다.

IV. 결 론

본 논문을 통해 드론 FC 내 IMU 센서에 직접 오류를 일으키는 취약 조건을 특정하고 이를 차폐하기 위한 차폐 소재들의 성능을 분석했다. IMU 센서의 이상 현상을 기준으로 FC의 취약 주파수 및 수신 전계 강도를 390 MHz 대역 부근에서 평균 750 V/m 이상으로 특정했다. 각 차폐함의 소재별 전자파 내성을 IMU 데이터에 나타나는 이상 현상을 기준으로 분석했다. 해당 주파수 대역에서의 전도도 등 소재별 물성을 측정 결과와 비교하여 평가의 신뢰도를 높이고자 한다. 이처럼 소재에 대한 현상적 평

표 1. 차폐함 소재별 내성 시험 결과

Table 1. Results of endurance test for shielding materials.

Test no.	Material	Repetitions	Avg.E-field strength[V/m]	Results	Notes
1	No shielding	3	797	Accelerometer, gyroscope, magnetometer abnormality (3 occurrences)	Reference
2	Aluminum tape	5	803	No abnormality	-
3	MXene2	5	817	No abnormality	-
4	Graphene	5	826	No abnormality	-
5	Liquid metal	5	829	Accelerometer, gyroscope, abnormality (5 occurrences)	Communication error (3 occurrences)
6	MXene1	5	810	No abnormality	-

가와 정량적 평가를 모두 고려하는 측정 방법을 마련하여 해석하고자 하는 장비와 드론 전체로 적용 범위를 확대한다면 실제 현장과의 연계성이 뛰어난 취약성 분석 방법이 될 수 있을 것으로 기대한다.

References

- [1] J. Jang, M. Cho, J. Kim, D. Kim, and Y. Kim, "Paralyzing drones via EMI signal injection on sensory communication channels," in *Network and Distributed System Security (NDSS) Symposium 2023*, San Diego, CA, Feb. 2023.
- [2] S. G. Kim, E. Lee, I. P. Hong, and J. G. Yook, "Review of intentional electromagnetic interference on UAV sensor modules and experimental study," *Sensors*, vol. 22, no. 6, p. 2384, Mar. 2022.
- [3] Y. Chen, D. Zhang, E. Cheng, and X. Wang, "Investigation on susceptibility of UAV to radiated IEMI," in *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility(EMC/APEMC)*, Suntec City, May 2018, pp. 718-722.