Journal of the KNST

2025; Vol.8, No.3; pp.515-522

ISSN: 2635-4926 https://doi.org/10.31818/JKNST.2025.9.8.3.515

Check for updates

Received: 2025/08/25
Revised: 2025/09/04
Accepted: 2025/09/28
Published: 2025/09/30

*Corresponding Author:
Kisung Ko
Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Cheongju University
298 Daeseong-ro, Cheongwon-gu, Cheongju-si, Chungcheongbuk-do 28503, Republic of Korea
Tel: +82-43-229-7842
E-mail: kogilove03@cju.ac.kr

Abstract

본 연구는 프로펠러형 기계식 WMIS(wind measuring and indicating system)의 운용상 한계를 분석하고, 초음파식 디지털 WMIS의 기술적 적용성과 감항성 기반 운용 기준 수립 가능성을 검토하였다. 기존 장비는 회전부의 마모, 구조물 간섭에 따른 와류 영향, 응답 지연 및 진단 기능 부재 등으로 인해 SHOL 운용 제한과 항공작전 연동에서 신뢰도 저하 문제가 반복되어 왔다. 초음파식 WMIS는 회전부 없는 고정밀 센서로서, 실시간 자동 보정, 자가진단, 고속통신 인터페이스 등을 통해 항공·항해·사격통제 연동에 적합한 데이터를 제공할 수 있다. 본 논문에서는 미군 합동군사규격(JSSG)에 명시된 WMIS 시스템의 기술 기준과 적용 사례를 분석하고, 우리 해군에 필요한 성능 요구사항, 장착 위치 기준, 보정 절차(APE) 등을 정립하여 실질적 운용 기반 마련 가능성을 제시하였다.

This study examines the limitations of mechanical propeller-type Wind Measuring and Indicating Systems (WMIS) and the feasibility of adopting ultrasonic digital WMIS under airworthiness-based standards. Mechanical WMIS face recurring issues such as component wear, vortex effects, response delays, and lack of diagnostics, reducing reliability in SHOL and aviation integration. Ultrasonic WMIS, with non-rotating high-precision sensors, provide auto-compensation, self-diagnostics, and fast data links suitable for aviation, navigation, and fire control. This paper reviews U.S. JSSG technical criteria and proposes performance requirements, installation standards, and correction procedures (APE) tailored for the Republic of Korea Navy.

Keywords

풍향풍속계(Wind Measuring and Indication System),
풍향풍속계 위치오류(Anemometer Position Error),
함정 감항(Seaworthiness),
함정헬기운용제한(Ship-helicopter Operating Limits),
항공기 감항(Airworthiness),
모듈식 개방형 시스템 접근(Modular Open Systems Approach)

함정 감항성 기반 풍향·풍속 지시계 운용 고려 요소에 관한 분석

Analysis of Operational Considerations for Wind Measuring and Indicating System Based on Airworthiness and Seaworthiness

장영현[1], 권종광[2], 고기성[3*]

[1]해군전력분석시험평가단 감항인증실 전문군무경력관
[2]국방과학연구소 제1기술연구원 감항인증팀 수석연구원
[3]청주대학교 항공기계공학과 조교수

YeongHyeon Jang[1], Jongkwang Kwon[2], Gisung Ko[3*]

[1]Senior manager, Office of Airworthiness, Force Analysis Test & Evaluation Group, ROK Navy
[2]Chief principal researcher, Airworthiness Certification Team, 1st Technology Research Institute, Agency for Defense Development
[3]Assistant professor, Dept. of Aerospace and Mechanical Engineering, Cheongju University

1. 서론

함정 및 함탑재 항공기 운용과 승조원의 안전을 보장하기 위하여 함정 주위의 기상 변화를 정밀하게 관측하고 예측하는 업무는 필수적이다. 함정에서 운용되는 무기체계의 성능은 기상 및 해양 조건에 따라 향상되거나 저해될 수 있기 때문에 해양환경에 대한 정밀한 관측 및 측정의 필요성이 대두되었다. 특히, 유인 함정에 탑재된 항공기뿐만 아니라 자율운항 기반 무인수상정에서도 실시간 해상환경 정보는 항법 보조, 경로 최적화, 전투체계 연동의 핵심 운용 자료로 활용된다[1].

해양환경 중 바람 정보는 무기체계 정확도와 함탑재 항공기 운용에 중요한 고려 요소이며, 포탄이나 유도탄 발사 시 탄도 및 명중률에 영향을 주어 사격통제체계(fire control system, FCS)에서 사격 오차를 예측하고 탄착점을 보정한다. 또한 항해 경로 결정, 부두 접근 및 도킹 시 조타 보정 등 정밀 기동에 활용된다. 헬기를 운용하는 함정에서는 이·착함 시 풍향 및 풍속 변화가 조종성, 엔진 추력, 착함 산포(landing scatter)에 영향을 미치며, 헬기함정운용제

© 2025 Korea Society for Naval Science & Technology

한(ship-helicopter operating limits, SHOL) 기준을 벗어날 경우 함정 및 항공기 사고로 이어질 수 있다. 바람 정보는 헬기 조종사뿐 아니라 함정의 헬기 통제실에서도 SHOL 적합 여부 판단의 핵심 기준으로 활용된다.

함정 내에서 바람의 방향과 속도를 측정하는 풍향풍속계(wind measuring and indication system, WMIS)는 기상관측 및 시설관리, 선박 항해관리 등 다양한 용도로 사용되고 있다. 그러나 기존 기계식 풍향풍속계는 회전체의 기계적 마모로 인한 잦은 부품 교체, 부품 특성 차이에 따른 데이터 불일치, 유지보수 비용 증가, 해양환경 및 극저온 조건에서의 운용 제약 등 한계가 있다[2].

현재 한국 해군에서 운용되는 WMIS는 프로펠러식(propeller-WMIS, p-WMIS)이며, 미 해군에서는 초음파식(ultrasonic-WMIS, u-WMIS)을 운용한다. 초음파식 풍향풍속계는 기존 기계식 장비의 단점인 싱크로(synchro) 및 리졸버(resolver, 회전 변위 변환기)의 사용으로 인한 기계적 마모 문제가 발생하지 않는다. 초음파 센서 사이의 펄스 전송 시간을 측정하여 풍향 및 풍속을 계측하기 때문에, 고속에서도 정밀한 측정이 가능하다는 장점이 있다[3].

본 논문에서는 WMIS 기술적 특성, 한국 해군의 p-WMIS 운용 한계성 극복 방안, 함정 감항을 위한 WMIS 시스템 요구사항을 분석하고, 향후 감항기준 정립을 위한 u-WMIS 운용 고려 요소들을 제시한다.

2. WMIS 운용 및 감항성

회전식 프로펠러로 풍속을 계측하고 꼬리날개를 통해 풍향을 감지하는 방식으로 작동하는 p-WMIS는 구조물 간섭에 따른 와류(recirculation) 발생, 히스테리시스(hysteresis), 응답 지연, 자가진단 기능 부재 등의 기술적 한계를 지니고 있다. 이러한 한계는 SHOL 운용정보의 정확성 저하, 센서 전환 오류, 항공기 착함 불가와 같은 운용상 제약으로 이어질 수 있으며, 센서 감응 속도 저하로 인한 유지보수 비용 증가 문제도 발생한다.

반면, 송수신 초음파와 바람 간섭의 메커니즘을 기반으로 작동하는 u-WMIS는 무(無)회전부 구조, 고정밀 실시간 계측, 자가진단 기능, 모듈화 설계 등을 통해 감항성 기준에 부합하는 주요 기술 요소를 보유하고 있다. 특히 풍향풍속계 위치 오류(anemometer position error, APE) 분석 기반의 장착 위치 최적화, 정량화된 성능 요구 준수, 풍동시험 및 전산유체해석(computational fluid dynamics, CFD)을 통한 보정계수 도출 과정을 통해 실제 해상작전 환경에서 정밀하고 신뢰성 있는 운용이 가능하다. 이로써 유지보수 비용이 크게 감소하는 장점도 확보된다.

대표적인 u-WMIS 시스템인 MWS(Moriah Wind System)는 풍향·풍속뿐 아니라 해수 온도, 습도, 대기압 등의 환경 요소와 SHOL 정보까지 통합 제공하며, FCS 및 항해 정보체계와 실시간 연동을 구현한다. 이를 통해 감항성 요건과 체계 통합 운용성을 동시에 충족할 수 있는 고신뢰 운용장비로 평가된다[4].

2.1 p-WMIS

p-WMIS는 구조가 단순하고 장비 단가가 저렴하여 한국 해군 함정에 널리 채택되었으며, 설치와 운용이 비교적 간편하다는 장점이 있으나 회전체 기반의 계측 구조는 여러 운용상 한계를 수반한다. 회전부의 마모가 빠르게 진행되고 저속 영역에서 감응도가 낮아 미세한 바람 변화 감지에 한계가 있다. 또한, 바람이 급격하게 변화할 때 회전자의 과잉 회전 또는 감속 지연이 발생할 수 있으며, 풍향 변화에 대한 응답 속도 역시 제한적이다.

p-WMIS는 시스템적으로 함정에 장착되는 위치에 따라 오차가 클 수 있는데 특히, 함정 높은 위치에 장착되는 마스트·레이더돔·안테나 등 인근에 설치될 경우, 와류(airflow vortex)에 의해 계측값 정확도에 영향을 미친다. 이런 경우, 정비를 위해 빈번한 고소작업이 필요하며, 안전성과 운용 효율성에서도 부담이 된다. 90일 주기점검을 통해 장비 장·탈착 회전체 점검 등의 확인이 필요하며, 180일 주기점검 시 회전자, 기어박스, 베어링 등의 확인과 부품 교체가 필요하다. 또한, 자체 고장모니터링 기능이 없어 이상 발생 여부를 즉시 확인하기 어렵기 때문에 미 해군과 해양경비대는 2000년 초부터 u-WMIS를 운용하고 있다. Fig. 1에는 p-WMIS, u-WMIS 형상을 나타냈다.

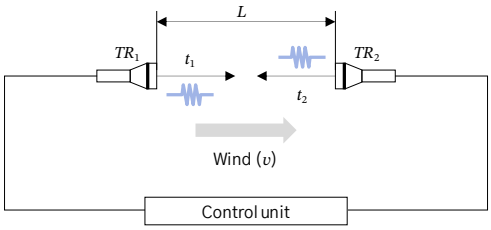
2.2 u-WMIS

u-WMIS는 송신기와 수신기 간의 초음파 전파 시

(a) p-WMIS

(b) u-WMIS

Fig. 1. Configurations of WMIS



$$T_2 = \frac{L}{C - V} \text{ and } T_1 = \frac{L}{C + V}$$

$$V = \frac{L}{2}\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)$$

$$C = \frac{L}{2}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

L: distance between transducer faces
C: speed of sound
V: velocity of airflow
T_1: transit time of ultrasound (downwind)
T_2: transit time of ultrasound (upwind)
TR_1, TR_2: ultrasonic transducers (transmitter/receiver pair)

Fig. 2. Operating mechanism of u-WMIS[3]

간(time-of-flight)을 측정하여 바람의 속도와 방향을 실시간으로 산출하는 비회전식 정밀 계측 장비이다. 회전부가 없어 기계적 마모가 발생하지 않으며, 응답 속도가 빠르고 고·저속 영역 모두에서 높은 정밀도를 유지할 수 있어 함정 운용환경에 적합한 계측 성능을 제공한다[5].

마스트, 레이더 돔, 안테나 등 구조물이 밀집한 함정 환경에서는 유동 왜곡과 와류가 쉽게 발생하는데, 이러한 영향은 CFD를 통한 센서 장착 위치 최적화와 내장형 자동 보정 알고리즘을 통해 최소화할 수 있다. 이를 통해 설치 오차 및 구조적 간섭으로 인한 영향을 실시간으로 제거하여, 감항 기준에 부합하는 정확한 풍향·풍속 데이터를 안정적으로 제공할 수 있다. 이러한 데이터는 상대풍 기준 착함 가능 여부 판단, 사격통제 오차 보정, 자율항법 경로 산출 등 복합 운용환경에서 효과적으로 활용된다.

Fig. 2는 u-WMIS 센서의 작동 메커니즘을 나타낸 것이다. 초음파 풍향풍속계는 동·서와 남·북 방향으로 마주 보는 네 개의 초음파 센서로 구성되며, 초음파 송·수신 간 도달 시간의 차이를 이용해 풍향과 풍속을 산출한다. 예를 들어, 동풍이 불 때는 동쪽 송신기로부터 서쪽 수신기로 전달되는 초음파의 도달 시간이 서쪽으로부터 동쪽으로 전달될 때보다 짧아지며, 남·북 방향에서는 변화가 나타나지 않는다. 이러한 원리는 Doppler 효과와 시간차 측정을 결합하여 적용된다[6].

u-WMIS는 MOSA(modular open systems approach, 모듈식 개방형 시스템 접근)를 적용하여 다양한 함급 및 센서 플랫폼과의 통합 운용이 용이하도록 설계되었다. 센서 모듈 단위의 유지보수가 가능하여 고장 발생 시 신속한 교체가 가능하며, 내장형 자가진단(built-in test, BIT)과 오류 코드 출력 기능을 통해 이상 상태를 조기에 탐지하고 상위 관리체계에 실시간으로 전파할 수 있다. 또한 RS-422, Ethernet 등 다양한 고속 데이터 인터페이스를 지원하여 항공운용 통제체계, FCS, 항해 보조 시스템 등과 실시간 연동이 가능하며, 이를 통해 바람 정보를 기반으로 한 운용 결정을 지연 없이 수행할 수 있다.

u-WMIS는 함정뿐만 아니라 육상 기상 관측망에서도 활용이 가능하다. 예를 들어, 육상 ASOS(automated surface observing system)의 대체 센서로 사용할 수 있을 정도의 정밀도와 신뢰도를 갖추고 있다. 동일 계열 장비를 해상과 육상에서 함께 운용함으로써 대량생산에 따른 경제성뿐 아니라 정비·교육·운용 편의성 측면에서도 일관된 이점을 제공한다. 이러한 장점으로 인해 미국 해군은 항공모함, 이지스함, 육상 항공기지 등 다양한 플랫폼에 동일 계열의 u-WMIS를 도입하여 계측 정밀도, 운용 안정성, 감항성, 체계 통합성을 동시에 충족하는 차세대 바람 정보 시스템으로 운용하고 있다. 이는 단순 센서 수준을 넘어, 해군 무기체계 운용 전반에서 핵심적인 플랫폼 요소로 자리매김하고 있다.

2.3 WMIS 감항성

감항성의 측면에서 u-WMIS는 단순한 기상 계측기가 아니라 air and seaworthiness critical equipment로 분류된다. 이 장비는 함정 항공작전과 전투체계 운용을 직접 지원하기 때문에, 신뢰성과 환경 내구성이 확보되지 못하면 안전성 보장에 중대한 제약이 발생할 수 있다.

미 해군이 과거 운용한 Type-F WMIS(한국 해군의 p-WMIS와 구조적으로 유사한 기계식 장비)는 프로펠러와 꼬리날개 기반의 계측 구조로 인해 마모, 진동, 응답 지연 등의 한계를 지녔다. 이러한 문제를 해소하기 위해 미 해군은 Moriah Wind System를 개발·배치하였다. MWS는 무회전부 초음파 센서를 채택하여 기계적 마모 문제를 제거하였으며, 내장형 자가진단과 모듈 단위 교체 설계를 통해 정비성과 운용 연속성을 크게 향상시켰다. 또한 RS-422, Ethernet 등 다양한 고속 데이터 인터페이스를 지원하여 항해 보조체계, 사격통제체계(FCS), 전투체계와 실시간 연동이 가능하며, 이를 통해 전투·항법 의사결정의 신속성과 정확성 및 감항성을 동시에 보장한다.

감항성 보증을 위해 u-WMIS는 함정 환경에 특화된 군사표준을 충족해야 한다. 대표적으로 MIL-STD-167(함정 기계 진동), MIL-STD-810(온도, 습도, 염분 등 환경 내구성), MIL-STD-461(전자기 적합성) 등이 있으며, 이러한 규격은 해상 운용 중 발생하는 진동·환경·전자파 간섭 조건에서 장비의 신뢰성과 생존성을 검증하는 기준으로 활용된다. 실제로 MWS는 이러한 요구를 충족하는 COTS(commercial-off-the-shelf) qualified 장비로서, 기존 Type-F WMIS를 대체하여 전 함급 공통 표준 장비로 운용되고 있다.

따라서 u-WMIS는 감항성 확보를 위한 군사 규격 충족과 함께 장비 단일화·표준화를 통해 안전성, 운용 효율성, 정비성, 경제성을 동시에 달성할 수 있는 핵심 플랫폼 요소로 자리매김하고 있으며, 이는 향후 한국 해군 WMIS 체계 발전에도 중요한 시사점을 제공한다.

3. 한국 해군 운용 WMIS 체계 한계성

한국 해군은 고속정부터 이지스 구축함에 이르기까지 대부분의 함정에서 p-WMIS를 운용하고 있다. 일부 함정에서는 CFD 분석 등을 활용해 최적 장착 위치를 선정하여 오차를 보완하고 있으나, 기계식 회전 센서 구조에 기인한 근본적 한계는 여전히 존재한다. 풍향·풍속 지시 오차는 항해 시운전 평가, SHOL 시험, 장비 성능 보고 등 다양한 운용 과정에서 반복적으로 확인되었으며, 특히 일부 함정에서는 풍향·풍속의 이상 지시 현상이 발생하더라도 이를 '함정 고유 특성'으로 인식하거나, 자가진단 기능의 부재로 고장 인지가 지연되어 개선 활동에 소극적인 사례가 보고되었다.

실제 사례로, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 군수지원함(AOE-II)의 항해 시운전 평가에서 우현 40° – 90°, 좌현 270° – 320° 방위에서 풍향·풍속 검출기의 비정상 동작이 관찰되었다. 검출기는 바람의 실제 방향과 다른 방향을 지시하거나, 360° 지속 회전 또는 회전 정지 현상을 보였으며, 이는 마스트 구조물 후류에 형성된 와류 기류로 인해 유입 공기의 방향성이 왜곡된 결과로 분석되었다[8].

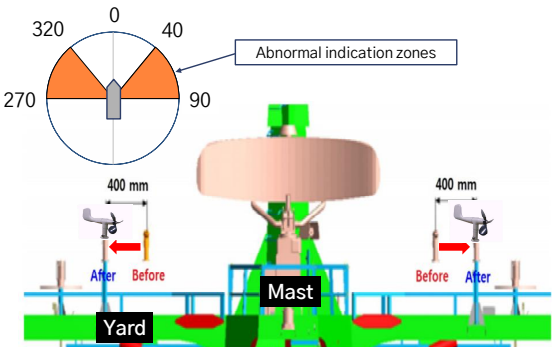


Fig. 3. Abnormal indication zones and sensor relocation for wind detectors on AOE class ships[8]

상륙함정에 대한 SHOL 시험에서는 풍동시험 결과와 실제 계측값 간에 명확한 차이가 Fig. 4와 같이 드러났다. 변침 중 풍향 지시가 0°로 고정되거나 30° 이상 급변하는 현상이 반복적으로 확인되었으며, 자동 모드를 선택했을 때에도 풍속 기준 선택 로직이 정상적으로 작동하지 않아 반대측 센서의 풍향이 시현되는 오류가 발생하였다.

이와 같은 지시 오차 현상은 주로 다음 세 가지 기술적 요인에서 기인한다.

첫째, 응답 지연(response lag) 문제이다. 기계식 회전체의 관성과 마찰로 인해 급격한 풍향·풍속 변화에 즉각적으로 반응하지 못하고 지연된 계측값을 출력

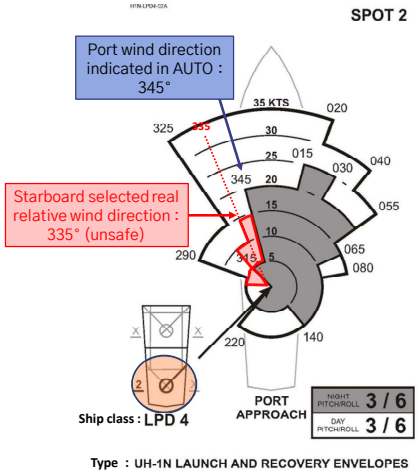


Fig. 4. Effect of wind sensor selection on SHOL safety

한다. 이는 실시간 대응이 요구되는 항공작전 환경에서 운용 안정성을 저해할 수 있다.

둘째, 구조물 간섭(structural interference) 영향이다. WMIS가 마스트, 레이더 돔 등 상부 구조물 인근에 설치된 경우, 구조물 후방에 형성되는 와류로 인해 유동이 왜곡된다. 그 결과 특정 방위에서 계측값이 실제 바람 정보와 불일치하게 나타나며, SHOL 판단 기준을 왜곡시켜 착함 안전성을 저해할 수 있다.

셋째, 히스테리시스 특성이다. 히스테리시스 특성은 동일한 입력 조건에서도 장비의 과거 상태에 따라 출력이 달라지는 비선형 응답 특성으로, 계측값의 지연 또는 과보정이 발생한다. 회전체 마모나 내부 기계 마찰이 증가할 경우 이러한 현상은 더욱 두드러지며, 장비 신뢰성을 저하시키는 요인으로 작용한다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 실제 상대풍이 345° 방향에서 유입되는 상황에서 WMIS가 자동모드로 우현 센서(SB)를 선택할 경우, 풍향은 335°로 지시된다. 표기상으로는 SHOL 운용 한계 내 '안전(safe)' 조건처럼 보이지만, 실제로는 기준을 10° 초과하여 착함 불가(unsafe) 조건에 해당된다. 이처럼 센서 선택에 따른 지시 오차는 SHOL 판단을 왜곡하여 항공작전의 안전성에 직접적 위협이 될 수 있다.

또 다른 예시로, 육안 기반 관측과 WMIS 지시값 간의 불일치도 확인된 사례가 있다. 태극기의 펄럭임 정도로 추정한 풍속이 보퍼트 스케일 기준 약 21노트인 상황에서 WMIS는 8.5노트를 지시한 사례가 보고된 바 있다. 이는 60 % 이상의 계측 오차에 해당하며, SHOL 판단이나 전투체계 입력값으로 활용할 경우 심각한 오판으로 이어질 수 있다.

이와 같은 반복적인 오차 현상은 식 (1) – 식 (3)을 통해 정량적으로 설명할 수 있다. 식 (1)은 센서가 시현한 풍속과 실제 외기 기준 풍속 간의 차이를 나타내며, 정적오차(ϵ_v)와 센서 응답 지연 항의 합으로 표현된다. 식 (2)는 와류 영향과 히스테리시스에 의해 발생하는 풍향 오차를 나타낸다. 식 (3)은 센서 전환 로직에서의 전기적 지연이나 선택 오류로 인해, 출력된 풍향값이 실제 측정값과 불일치하게 되는 현상을 정식화한 것이다.

$$\Delta V = V_m - V_a = \epsilon_v - \gamma_v \cdot \frac{dV_a}{dt} \tag{1}$$

$$\Delta\theta = f_w(\theta, r) + H(t) \tag{2}$$

$$\theta_{displayed} = \theta_{opposite} + \epsilon_{switch} \tag{3}$$

여기서, 식 (1) – 식 (3)의 기호에 대한 설명을 Table 1에 나타냈다.

Table 1. Key variables related to wind sensor indication errors

Category	Symbol	Description
Actual wind speed	V_a	True wind speed (external reference)
Measured wind speed	V_m	Wind speed indicated by sensor
Wind speed error	ΔV	Difference between indicated and true
Static error	ϵ_v	Installation/position deviation
Response delay	$\gamma_v \cdot \frac{dV_a}{dt}$	Sensor reaction delay error
Direction error	$\Delta\theta$	Difference between measured and true
Vortex effect	$f_w(\theta,r)$	Wake deviation (azimuth, distance)
Hysteresis	$H(t)$	Time-history output lag
Sensor indication	$\theta_{displayed}$	Displayed direction of selected sensor
Switching error	ϵ_{switch}	Switching or sensor fault

이들 오차 항목은 SHOL 기준에서 요구하는 ±5° 이내의 풍향 오차 또는 ±2노트 이내의 풍속 오차 허용 범위를 초과할 경우 항공기 이·착함 불가(unsafe) 상태로 직접 연결될 수 있다. 따라서 WMIS의 성능에 대

한 정량적 평가 기준 마련과 더불어, 구조적·기계적 한계를 극복할 수 있는 기술적 대체 방안의 적용이 요구된다.

p-WMIS는 감항성 측면에서 요구되는 계측 정밀도 및 신뢰성을 충족하기 어려운 구조적 제약을 내포하고 있으며, 항공작전의 정밀 운용성과 감항인증 기준의 객관성을 확보하기 위해서는 고성능 대체 계측체계인 u-WMIS로의 전환이 필요하다.

4. p-WMIS 한계성 극복방안

4.1 장비적 관점 접근

p-WMIS의 기계적·물리적·위치적 한계를 극복한 u-WMIS를 수용하고 검출기의 위치 선정 및 WMIS 시스템 전반의 신뢰성 확보를 위하여 필요한 절차를 수립하여 운용할 필요가 있다. 이를 위해 함정의 대략적인 외형 및 형태를 고려한 솔리드 모델을 구축하여 APE, CFD 시뮬레이션을 통해 검출기 위치에 최적인 장소를 선정하고, 측정된 자료들의 신뢰성을 확보할 수 있는 검증체계(verification and validation, V&V)를 구축하여야 한다.

구축된 시스템에서 계측된 고정밀 성능 파라미터는 단순한 기상 정보 수집 수준을 넘어서 항공기 이·착함 판단, 사격통제 보정, 무인함정 자율항법 등의 핵심 운용 요소와 연동될 수 있는 운용 기반 요소를 반영하여 신뢰성을 보장하여야 한다. MWS와 같은 선진 장비는 풍향·풍속 외에도 습도, 외기온도, 해수온, 조타각, 프로펠러각 등 다양한 항해·기상 정보를 통합 측정하며, 자가진단 기능과 고장 코드(fault code) 출력 기능을 통해 정비성과 감항성 요건을 동시에 만족시킨다. 따라서 u-WMIS는 단순한 장비 대체를 넘어 감항성 기반의 센서 성능 고도화 및 통합 전투체계와의 연동 신뢰도를 동시에 충족할 수 있는 핵심 플랫폼 구성요소로서, 체계적인 설계 및 감항 기준 하에 개발 및 도입이 이루어질 필요가 있다.

4.2 운용적 관점 접근

WMIS 센서의 장착 위치는 APE를 최소화할 수 있도록 구조물 간섭 회피에 최적화된 지점으로 지정해야 한다. 함정 상부 구조물은 바람의 흐름을 교란시켜 와류를 유발하여 센서 위치에서의 풍속과 풍향 측정 정확도를 크게 저하시킬 수 있다. 따라서 CFD를 통해 바람의 영향을 최소화한 최적의 위치를 확보하고 최소한의 검출기로서 최대의 효과를 도출할 수 있도록 WMIS를 구축하여야 할 것이다. 또한, 바람 정보를 실시간으로 확인할 수 있도록 체계적인 시현 정보 확보도 필요하다.

이러한 영향을 정량화하기 위해, 구조물 회피 설계와 센서 설치 거리 결정에 활용할 수 있는 근사 모델은 식 (4)와 같다. 식 (4)는 자유기류 속도에 대해, 센서 위치에서의 유효 풍속과 구조물 간섭에 의해 감쇠되는 양을 근사적으로 나타낸 것이다. 이 식은 CFD 해석 전 단계에서 구조물 회피 설계와 센서 설치 거리 산정에 활용될 수 있다. 이러한 모델은 CFD 수행 전 설치 위치 선정 및 오차 범위 추정에 유용하며, 실시간 보정 알고리즘에도 적용 가능하다.

$$V_{sensor} = V\infty \cdot \left(1 - \frac{A_{proj}}{\pi R^2} \cdot f(\theta)\right) \tag{4}$$

여기서, 식 (4)의 기호에 대한 설명을 Table 2에 나타냈다.

Table 2. Variable definitions for wind speed approximation

Category	Symbol	Description
Free-stream velocity	V_∞	True wind speed without structural influence
Sensor wind speed	V_{sensor}	Effective wind speed at sensor position near structure
Projected area	A_{proj}	Projected area of structure relative to wind direction
Structure distance	R	Horizontal distance between structure center and sensor
Azimuth function	$F(\theta)$	Disturbance function by relative wind azimuth

마지막으로, WMIS 속도 및 방향 지시에 대한 함정 구조물 영향을 정량화하고, 계획된 초음파 센서 장착 위치가 모든 방위각에 대해 보정 가능한지를 확인하는 절차인 APE 시험이 수행되어야 한다. 이 절차에서는 실제 대기 경계층 조건을 적용하고, 바람의 방위각을 세밀히 변화(보통 2° 간격)시키며 함정 형상을 모델링한 CFD 또는 풍동 실험 결과와 비교·보정한다.

이 과정을 통해 WMIS 속도 및 방향 편차를 정량적으로 분석할 수 있으며, SHOL 기준과 무장 바람보정에 필요한 공기 유동의 자유도(free-stream flow condition)를 대표값으로 산정하여 보정요소로 적용할 수 있다.

APE 시험을 수행하는 가장 중요한 목적은, 모든 바람 방향 조건에서도 적어도 하나의 센서가 반복 측정 시 동일한 바람 정보를 안정적으로 시현할 수 있도록 보정 체계를 수립하는 데 있다. 이러한 APE 기반 장착 위치 최적화 및 보정계수 설정은 감항성 평가 기준을 충족하고 정밀 운용지원 체계로 연계되기 위한 핵심 기술 기반이라 할 수 있다.

4.3 감항성 고려요소 분석

u-WMIS를 국내 함정에 적용하는 과정에서 단순한 장비 교체를 넘어 감항성을 확보하고 운용 신뢰성을 향상할 수 있도록 관련 기준 수립이 병행되어야 한다. 이를 위해서는 설계 초기 단계에서부터 성능 요구사항과 운용 조건을 명확히 정의하고, 감항성 평가기준과 연계된 기술 요소를 일관되게 반영하는 체계적 접근이 이루어져야 한다.

특히, u-WMIS는 자가진단 기능을 통해 장비 상태를 상시 점검하고, 그 결과에 따라 정상(normal), 성능저하(degraded), 비작동(fault) 상태로 자동 전환되어야 한다. 이러한 단계적 상태 관리 기능은 감항성 보증 장비 설계의 필수 요소로, 이를 확보함으로써 고장 시 오류 데이터의 지속적 송출을 방지하며, 운용자에게 경보를 제공하거나 출력을 차단하여 항행 안전을 확보해야 한다. 또한, 이중(dual) 센서 구성과 자동 전환 기능은 단일 센서에 이상이 발생했을 때에도 연속적인 데이터 제공을 보장해야 한다.

감항성 요소를 충족하기 위해서는 장비의 요구 성능을 정량화해야 한다. JSSG-2011에 제시된 기준은 풍향·풍속 측정 장비의 성능을 정의하는 대표적 근거가 된다. 예컨대 풍속 측정 범위는 0 kts – 125 kts로 설정되어야 하며, 저속 영역(50 kts)에서는 ±1.5 kts, 고속 영역(51 kts – 125 kts)에서는 ±4.0 kts(임계) 또는 ±2.0 kts(목표)의 정확도가 유지되어야 한다. 풍향 정확도, 측정 시작 속도, 분해능, 전시 응답시간 등의 세부 성능 항목 역시 임계값(threshold)과 목표값(objective)에 따라 충족되어야 한다.

이러한 정량적 성능 기준은 항공작전과의 연동, 사격통제 체계의 보정, 자율 플랫폼의 항법 정밀도 확보를 위해 반드시 반영되어야 한다. 주요 성능 요구사항과 변수는 Table 3에 제시되어 있으며, 이는 국내 함정 적용 시 u-WMIS가 충족해야 할 최소 감항성 기준을 규정하는 근거가 된다.

Table 3. Performance requirements for WMIS[4]

Parameter (system/sensor requirement)	Threshold	Objective
Speed range (first)	0 m/s – 25.7 m/s (0 kts – 50 kts)	
Speed range (second)	26.2 m/s – 64.3 m/s (51 kts – 125 kts)	
Speed accuracy (first)	± 0.77 m/s (±1.5 kts)	± 0.5 m/s (± 1.0 kts)
Speed accuracy (second)	± 2.1 m/s (± 4.0 kts)	± 1.0 m/s (± 2.0 kts)
Starting speed maximum	1.0 m/s (2.0 kts)	0.25 m/s (0.5 kts)
Direction range	0° – 360°	
Direction accuracy	± 2.5°	± 2.0°
Starting speed for direction at > 5 kts (maximum)	2.5 m/s (5.0 kts)	2.5 m/s (5.0 kts)
Starting speed for direction at < 5 kts (maximum)	0.25 m/s (0.5 kts)	0.25 m/s (0.5 kts)
Speed resolution	0.05 m/s (0.1 kts)	0.5 m/s (0.1 kts)
Direction resolution	1.0°	0.5°
Speed response (1st order time constant)	3.9 sec.	3.2 sec.
Direction response (minimum slew rate)	10.0°/sec.	10.0°/sec.

5. 결론

본 연구는 한국 해군 함정에 적용 중인 p-WMIS의 구조적 한계와 운용상의 문제점을 분석하고, 이를 극복하기 위한 대안으로 u-WMIS의 장점과 함정 적용 타당성을 검토하였다. 특히 SHOL, FCS, 무인수상정 등 자율 플랫폼 운용에서 요구되는 정밀 항법 정보 제공 측면에서 u-WMIS가 감항성 확보와 안전 운용에

기여할 수 있음을 제시하였다.

분석 결과, p-WMIS는 기계식 회전부 구조에 따른 계측 오차, 구조물 간섭, 히스테리시스 등의 한계를 내포하고 있으며, 감항성 측면에서 요구되는 계측 정밀도와 신뢰성을 충족하기 어렵다. 반면, u-WMIS는 무회전부 구조, 자가진단 기능, 모듈화 설계, 고속 데이터 연동 등을 통해 함정 감항성 기준에 부합하는 운용 성능을 보유하고 있음을 확인하였다.

향후 연구에서는 JSSG-2011, NAEC-91-8050 등 국제 기술기준을 기반으로 국내 함정 구조와 해양 환경을 반영한 실증 기반 운용기준을 수립할 필요가 있다. 이를 위해 요구 성능 정의, 운용시험, 장착 기준, 정비 계획 등 절차를 체계화함으로써, 한국 해군에 적합한 정밀 운용지원 체계를 구축하고 감항성 기반의 안전 운용 신뢰도를 향상시킬 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] NAVAIR, “Navy Training System Plan for the MORIAH Program,” Chief of Naval Operations(OPNAV) Publication, P-751-1-9-97, 2002.

[2] S. G. Lee, Y. S. Moon, S. Y. Choi, “The Ultrasonic Type Wind Sensor with Piezoelectric Actuator,” J. Sensor Sci.Tech., Vol. 22, No. 4, pp. 292-296, 2013.

[3] W. J. Lee, J. H. Yim, Y. G. Kang “Implementation of Ultrasonic Anemometer & Anemoscope Data-Logger System,” J-KICS, Vol. 39C, No. 02, pp. 184-189, 2013.

[4] AGI, “MORIAH: The US Navy’s Digital Wind System,” https://www.agiltd.co.uk/naval-products/ship-meteorological/moriah-wind-system/

[5] D. H. Park, Y. H. Yeh, “Characterization of Three-dimensional Ultrasonic Anemometer Using Phase Measurement,” J.Sensor Sci. Tech., Vol. 15, No. 6, pp. 442-448, 2006.

[6] J. H. Kim, D. H. Park, K. Y. Kim, Y. H. Yu, “A Study on NMEA 2000 Based Two-dimensional Ultrasonic Anemometer,” Journal of Advanced Navigation Technology, Vol. 15, No. 1, pp. 25-31, 2011. 2.

[7] Department of Defense, Joint Service Specification Guide (JSSG)-2011: Air Vehicle/Ship Integration, U.S. Department of Defense, Washington D.C., 1998.

[8] Dong-Young Kim, Hae-Jin Park, “A Study on the Improvement of the Mast Design for Wind Detector”, KAIS Journal, Vol. 22, No. 5, 2021, pp. 98-107.