



Received: 2026/04/16
Revised: 2026/04/29
Accepted: 2026/05/20
Published: 2026/06/30

***Corresponding Author:**

Ok-Hee Kim

1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyungsangnam-do, 51704, Republic of Korea
Tel: +82-55-907-5236
Fax: +82-55-907-5231
E-mail: koh0715@navy.ac.kr

Abstract

미래 해양작전에서 해양무인체계(UMS)의 운용 범위 확대 및 임무 장기화에 따라 기존 동력원의 구조적 한계를 극복할 차세대 에너지 기술의 필요성이 증대되고 있다. 본 연구는 군사용 UMS의 작전적 요구를 기준으로 고에너지 밀도 이차전지, 연료전지, 해양 재생에너지 및 도킹 인프라 등 주요 차세대 에너지 기술의 적용 가능성과 한계를 비교 및 분석한다. 이러한 검토를 통해 향후 UMS의 작전 지속성 확보와 자율성 고도화를 위한 통합적 에너지 아키텍처 발전 방향을 제시한다.

As the operational scope and mission duration of unmanned maritime systems (UMS) expand, next-generation energy technologies that can overcome conventional power limitations are increasingly required. This study evaluated the applicability and limitations of major advanced energy technologies, including high-energy-density batteries, fuel cells, marine renewable energy, and docking infrastructure, based on military operational requirements. Accordingly, this paper proposes strategic directions for developing integrated energy architectures to secure operational endurance and advance the autonomy of future UMS.

Keywords

해양무인체계(Unmanned Maritime System),
차세대 에너지 기술
(Next-Generation Energy Technology),
다중 에너지 하이브리드(Multi-Energy Hybrid),
상시체류형 운용(Resident Operation),
작전 지속성(Operational Endurance)

Acknowledgement

이 논문은 2026년도 해군사관학교 해양연구소
학술연구과제 연구비의 지원으로 수행된 연구임.

군사용 해양무인체계의 차세대 에너지 신기술 전망

Prospects of Next-Generation Energy Technologies for Military Unmanned Maritime Systems

김옥희*

해군 중령/해군사관학교 기초과학과 교수

Ok-Hee Kim*

Commander, ROK Navy/Professor, Dept. of Science, Republic of Korea Naval Academy

1. 서론

미래 해양작전에서 해양무인체계(UMS, unmanned maritime system)는 감시·정찰, 기뢰전, 대잠전, 통신 중계, 해양환경 감시 및 정보 수집 등 다양한 임무를 수행하는 핵심 전력으로 부상하고 있다[1]. 특히 수상 및 수중 영역에서 운용 범위와 자율성이 확대됨에 따라, 플랫폼의 군사적 효용은 센서나 알고리즘 자체보다 장시간 임무를 지속할 수 있는 에너지 체계의 성능에 의해 실질적으로 규정되는 경향이 강해지고 있다. 특히 해양 및 수중 환경에서는 전파 운용 제약, 소음·열 방출, 외부 보급 제한이 플랫폼의 생존성과 직결된다. 따라서 동력원은 단순한 추진 수단이 아니라, 작전 지속성·은밀성·생존성을 결정하는 핵심 체계로 보아야 한다.

현재 다수의 UMS, 특히 무인잠수정(UUV, unmanned under-sea vehicle)은 높은 출력밀도와 기술적 범용성을 지닌 리튬이온 전지(LIB, lithium-ion battery)를 주 에너지원으로 사용하고 있으며, 무인수상정(USV, unmanned surface vehicle)은 디젤 기반 추진계 또는 배터리·내연기관 하이브리드 체계를 폭넓게 채택하고 있다. 그러나 LIB는 에너지 밀도와 안전성 측면에서, 디젤 기반 체계는 배출가스, 소음, 적외선 신호 및 외기 의존성 측면에서 각각 구조적 한계를 지닌다[2]. 따라서 UMS의 에너지 기술 발전 방향은 단순한 저장 용량 증대가 아니라, 에너지 밀도와 시스템 신뢰성의 동시 확보, 기저 부하와 순간 부하의 복합 대응, 그리고 극한 해양 환경에서의 장기 운용성까지 포함하는 체계 수준으로 접근하여 재정의될 필요가 있다.

이러한 배경에서 최근에는 전고체전지(ASSB, all-solid-state battery)와 리튬황(Li-S)전지와 같은 고에너지 밀도 이차전지, 고분자 전해질막 연료전지(PEMFC, polymer electrolyte membrane fuel cell), 직접 해수 수전해(DSE, direct seawater electrolysis) 및 담수화-연계형 수전해, 해양 재생에너지(MRE, marine renewable energy) 하베스팅, 수중 무선전력전송(WPT, wireless power transfer), 나아가 초소형 원자로(micro-SMR)까지 다양한 기술이 대안으로 논의되고 있다. 그러나 기존 논의는 개별 기술의 원리나 단편적 적용 사례를 소개하는 수준에 머무는 경우가 많았으며, 군사용 UMS의 운용 특성을 전제로 이들 기술을 공통 기준 아래 비교·평가한 검토는 상대적으로 부족하였다. 특히 탑재형 주동력원, 외부 보급·현장생산 인프라, 보조전원 기술이 실제 운용 개념에서 어떻게 결합될 수 있는지에 대한 통합적 해석이 충분히 정리되지 않았다.

따라서 본 연구는 군사용 UMS의 차세대 에너지 기술을 에너지 밀도, 장기 운용 신뢰성, 임무 지속성, 은밀성, 군수지원 독립성, 해양환경 적합성, 기술성숙도 및 체계통합 난도를 기준으로 재검토하고자 한다. 이를 위해 기존 동력원의 구조적 한계와 차세대 시스템의 평가 기준을 정리한 뒤, 주요 기술들을 기능별로 분류하여 적용 가능성과 한계를 분석하고, 최근 실증 사례를 통해 현실적 발전 방향을 고찰한다. 이를 통해 향후 대한민국 UMS의 장기 자율성과 작전 지속성 확보를 위한 기술적 시사점을 제시하고자 한다.

2. 기존 동력원의 한계와 차세대 에너지 시스템의 요구조건

2.1 기존 동력원의 구조적 한계

현재 UMS에 가장 널리 적용되는 동력원은 LIB와 디젤 기반 내연기관 체계이다. 이 기술들은 높은 기술 성숙도와 운용 경험을 바탕으로 UMS의 초기 실용화를 가능하게 했지만, 미래 해양작전이 요구하는 장기 체류성, 은밀성, 독립성 측면에서는 구조적 한계를 가진다[2].

UUUV의 주 동력원인 LIB는 우수한 출력 특성과 체계통합의 용이성을 제공하나, 장기 임무 수행에는 에너지 밀도의 근본적 제약이 따른다. 현재 LIB 시스템

의 전기화학적 에너지 밀도는 이론적 상한값인 약 800 Wh/L 수준에 이미 근접해 있으며, 이는 디젤의 약 9,940 Wh/L에 비해 10% 미만이다. 이러한 격차는 플랫폼의 체류 시간을 수일에서 길어야 수주 수준으로 제한하며, 센서·통신·항법 및 탑재 연산 자원의 지속적인 운용이 요구될수록 그 제약은 더욱 커진다. 또한, 밀폐된 수중 환경에서 발생할 수 있는 열폭주에 따른 화재 및 폭발 위험은 체계의 생존성과 직결되는 중대한 취약점이다[3].

한편 USV에 주로 적용되는 디젤 기반 체계는 높은 에너지 밀도와 장시간 연속 운전 능력을 보장하나, 배기·소음·진동·적외선 신호로 인해 은밀성이 낮아 중요한 임무에 불리하다. 더구나 연소 반응의 특성상 수중 환경에서 독립적으로 운용될 수 없고, 기계적 구동부와 보급망 의존성 역시 장기 분산 운용 개념과 상충한다. 결국 기존 동력원의 한계는 개별 성능 부족이 아니라 장기체류성, 은밀성, 생존성, 군수지원 독립성을 동시에 충족시키지 못한다는 데 있다. 따라서 차세대 에너지 시스템은 기존 기술의 보완을 넘어 에너지 밀도와 시스템 신뢰성을 함께 향상하는 방향으로 재설계될 필요가 있다.

2.2 군사용 UMS 관점의 차세대 에너지 시스템 평가기준

차세대 에너지 시스템은 더는 단일 전원의 성능 향상만으로 평가될 수 없다. 미래 UMS는 모함의 지속적인 군수지원 없이도 수개월 이상 임무를 수행할 수 있어야 하며, 고수압·저온·고염분과 같은 극한 해양 환경에서도 안정적으로 작동해야 한다. 따라서 군사용 UMS에 적용될 차세대 에너지 기술은 저장 용량 자체보다 작전 지속성과 체계 운용성을 포괄하는 다양한 기준 관점에서 평가될 필요가 있다.

핵심 평가 기준은 다음과 같다. 첫째, 에너지 밀도는 체류 시간·작전 반경·탑재체 운용 여유를 직접 규정한다. 둘째, 장기 운용 신뢰성은 성능 열화·부식·누설, 열폭주·계면 불안정성 등을 억제할 수 있는가와 관련되며, 수중 체계에서는 이러한 요소들이 수상에서보다 더욱 중요하다[3]. 셋째, 임무 지속성은 순항·대기·감시와 같은 저전력 구간에서 기저 부하(base load)를 안정적으로 공급할 수 있는 능력이다. 넷째, 은밀성 혹은 저탐지성은 배출가스·소음·진동·열 신호를 최소화하여 탐지 가능성을 낮출 수 있는가의 문제

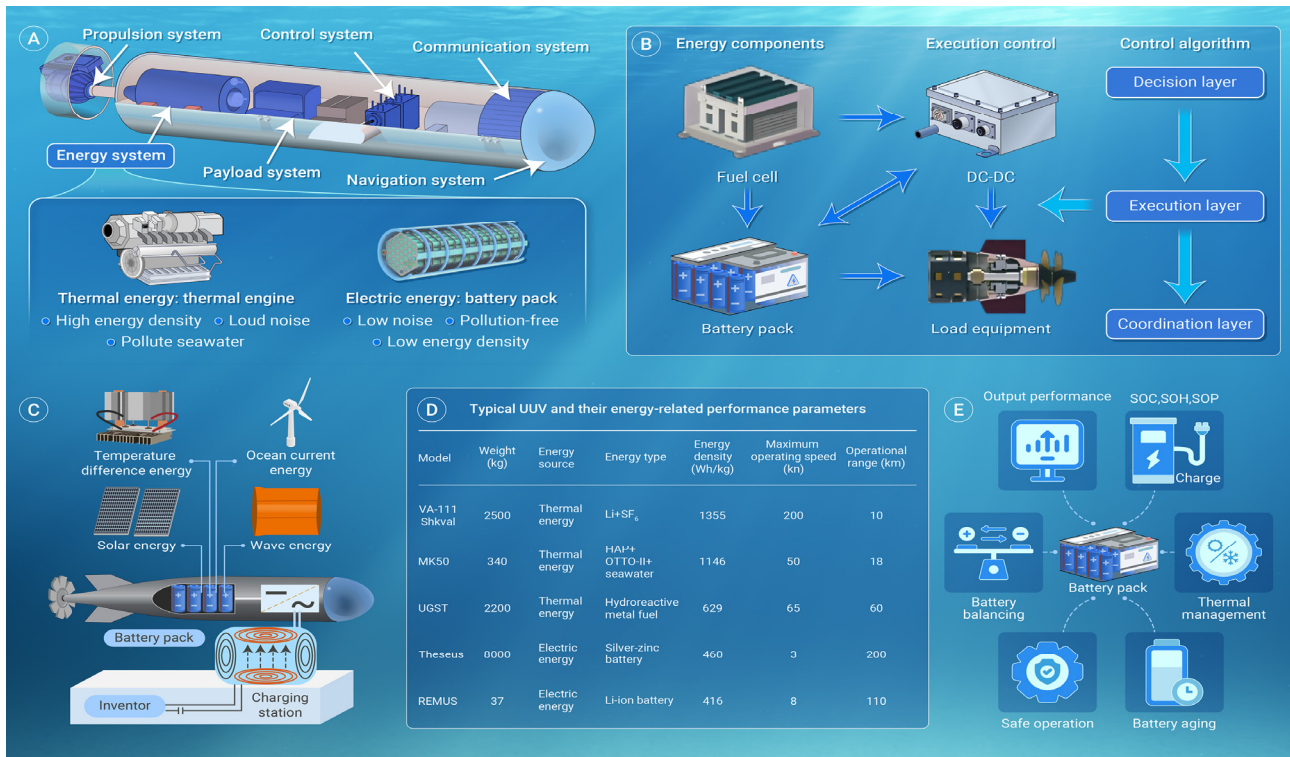


Fig. 1. Next-generation energy systems for UUVs (a) Primary modules of an UUV and classification of UUV energy systems. (b) Technical roadmap of hybrid energy system. (c) Energy resources available for UUV use and the conceptual diagram of underwater wireless charging technology. (d) Typical UUV and their energy-related performance parameters. (e) The functions of battery management system (reprinted with permission from Open Access article [2])

이다. 다섯째, 군수지원 독립성은 외부 보급 없이 장기간 임무를 지속하거나, 도킹 스테이션·현장생산 수전해·보조 충전 인프라와의 연계를 통해 보급 부담을 줄일 수 있는가를 의미한다. 여섯째, 해양환경 적합성은 고수압·저온·염분·생물오손 등 해양 특유의 조건에서 시스템이 기능을 유지할 수 있는가를 평가하는 기준이다. 일곱째, 기술성숙도 및 체계통합 난도는 실험실 수준의 성능이 아니라 실제 플랫폼에서의 검증 정도와 다른 전원·센서·제어 계통과의 통합 가능성을 함께 고려하는 항목이다[2].

이상의 기준은 이후 장에서 다룰 ASSB, Li-S 전지, PEMFC, 해수 기반 수전해, MRE 하베스팅, WPT, micro-SMR 등의 기술을 공통된 틀 아래 비교·검토하기 위한 분석 프레임으로 기능한다.

3. 차세대 에너지 기술의 기능별 분류와 적용 가능성 평가

본 장에서는 2장에서 제시된 요건들을 적용하여 차세대 기술들을 고에너지 밀도 저장기술, 장기체류

형 저탐지 주동력원, 군수지원 독립성 향상 기술, 초장기·고출력 동력원으로 구분하여 적용 가능성과 한계를 검토하고자 한다. Fig. 1은 UUV의 주요 모듈과 에너지 시스템의 기본 구성을 비롯하여, 연료전지-배터리 기반 하이브리드 에너지 관리 구조, 활용 가능한 외부 에너지원 및 수중 무선충전 개념, 대표 플랫폼의 에너지 성능 지표, 그리고 배터리 관리시스템의 핵심 기능을 종합적으로 보여준다. 이는 차세대 UUV 에너지 체계가 개별 전원의 고도화에 그치지 않고, 저장장치, 전력변환, 충전 인프라, 제어 알고리즘 및 상태관리까지 포함하는 체계 수준의 문제임을 시사한다.

3.1 에너지 밀도와 안전성의 동시 확보: ASSB

ASSB는 액체 전해질을 고체 전해질로 대체함으로써 에너지 밀도 향상과 안전성 제고를 동시에 추구하는 대표적 차세대 저장기술이다. ASSB의 고체 전해질은 전기화학적 안정창 확대와 리튬 금속 음극 적용 가능성을 통해 고에너지 밀도 설계 여지를 제공하며, 비휘발성·비유동성 특성으로 누액 및 가연성 용매 기

인 열폭주 위험을 완화할 수 있다. 이러한 특성은 체적·중량 기준 에너지 밀도 향상뿐 아니라, 누액성과 열적 불안정성의 구조적 저감이라는 측면에서 UUV 적용 가능성을 높이는 요인으로 평가할 수 있다[4]. 그러나 실제 해양환경에서는 저온에서의 이온전도도 저하, 전극- 전해질 계면 저항 증가, 반복 충·방전에 따른 전기화학·기계적 열화가 주요 제약으로 작용한다. 따라서 ASSB는 에너지 밀도와 안전성 측면에서 유망하지만, 군사용 UMS에 적용되기 위해서는 저온·고압 환경에서의 장기 신뢰성과 제조 안정성 확보가 선행되어야 한다.

3.2 에너지 밀도 상한의 돌파 가능성: Li-S

Li-S는 비원자력계 저장기술 중 가장 높은 수준의 에너지 밀도 잠재력을 갖는 후보군이다. 특히 이론 체적 에너지 밀도는 약 2,800 Wh/L 수준으로 제시되며, 이는 기존 LIB 대비 현저히 높은 수치이다[5]. 이러한 특성은 동일 체적에서 더 긴 체류 시간과 더 큰 임무 탑재 여유를 요구하는 UUV에 매력적이다. 그러나 상용화의 핵심 병목은, 방전 중 생성된 용해성 리튬 폴리설파이드(polysulfide)가 전해질 내에서 이동·재분포하는 폴리설파이드 셔틀 현상에 따른 활물질 손실과 쿨롱 효율 저하, 그리고 S_8/Li_2S 전환에 수반되는 부피 팽창 및 기계적 응력 축적으로 인한 전극 구조 안정성 저하이다. 따라서 Li-S는 에너지 밀도 측면에서는 매우 유망하지만, 장기 운용 신뢰성과 수명 안정성 측면에서는 아직 체계 적용까지 상당한 간극이 존재한다[5].

3.3 장기체류형 은밀성 주동력원: PEMFC 기반 하이브리드 체계

장기체류형 UUV에 적용 가능한 차세대 에너지 시스템 가운데 PEMFC 기반 체계는 유력한 대안 중 하나로 여겨진다[2]. PEMFC는 저온 구동, 저소음, 무연소 전력 생산, 공기 비의존적 운용이 가능하다는 점에서 수중 플랫폼의 은밀성 요구에 부합한다. 특히 순항, 대기, 감시와 같은 장시간 저전력 운용에서 기저 부하를 안정적으로 담당할 수 있다는 점이 강점이다. 다만 체계의 성능은 스택 자체보다 산소 공급, 물 관리, 열 관리, 수소 저장 방식에 크게 좌우된다. 특히 폐

쇄계로 운용되는 수중 플랫폼에서는 생성된 물이 기공을 막는 플러딩(flooding) 현상으로 인해 산소 전달 저항이 증가할 수 있으므로 이를 억제하는 물 관리가 필수적이다.

PEMFC의 실질적인 체적 에너지 밀도는 고압 저장, 액화수소, 금속수소화물 등 저장 방식에 의해 결정된다[6]. 이러한 이유로 PEMFC는 단독 전원보다는 이차전지 또는 슈퍼커패시터와 결합한 하이브리드 체계로 접근하는 것이 더 합리적일 수 있다. 즉, PEMFC가 장시간 기저 부하를 담당하고, 급가속, 회피 기동, 센서 집중 운용과 같은 순간 최대 부하(peak load)는 보조 저장장치가 담당하도록 구성함으로써, 임무 지속성과 동적 응답성을 동시에 확보할 수 있다. 따라서 PEMFC 기반 하이브리드 체계는 에너지 밀도만으로는 설명하기 어려운 군사용 UMS의 작전 요구, 즉 저탐지성, 기저 부하 지속 공급, 부하 분산 대응이라는 측면에서 가장 실용적인 중기 대안으로 평가될 수 있다.

3.4 군수지원 독립성 향상 기술: 도킹 연계형 수전해, MRE 하베스팅 및 수중 WPT

UMS의 장기체류 능력을 실질적으로 확대하기 위해서는 탑재형 전원의 성능 향상뿐 아니라, 외부 보급 없이 임무를 연장할 수 있는 에너지 인프라가 병행되어야 한다. 이러한 관점에서 도킹 연계형 수전해, MRE 하베스팅, 수중 WPT는 모두 군수지원 독립성을 높이는 기반기술로 이해될 수 있다.

먼저 수전해 기반 접근은 수소 기반 UUV의 연료 고갈 문제를 완화하는 방안이다. 이상적으로는 직접 해수 수전해를 통해 수소와 산소를 동시에 확보하는 방식이 가장 단순하다. 그러나 실제로는 산소발생반응(OER, oxygen evolution reaction)과 경쟁하는 염소발생반응(CER, chlorine evolution reaction)이 수반되며, 이에 따른 염소 생성은 전해조 부식과 전극 열화를 유발하는 주요 제약요인으로 작용한다. 따라서 현 단계에서는 역삼투압(RO, reverse osmosis) 기반 담수화 모듈과 음이온 교환막 수전해(AEMWE, anion exchange membrane water electrolysis)를 결합하여 염소 발생을 원천적으로 억제하는 방식이 더 현실적인 대안으로 평가된다[7].

한편 MRE 하베스팅은 장기체류 플랫폼의 센서, 통

신, 저전력 유지 부하를 외부 해양환경으로부터 직접 생산, 보완할 수 있다는 점에서 의미가 있다. 그러나 파력·조류·온도차 기반 에너지는 본질적으로 출력밀도가 낮고 시간적 변동성이 커, 이를 주 추진원으로 사용하기 위해서는 전력 공급의 간헐성을 극복해야만 한다. 따라서 보다 현실적인 적용 형태는 도킹 스테이션, 해저 센서 노드, **resident subsea drone**의 유지 전원 또는 자가발전형 보조 전원으로 한정되며, 핵

심 가치는 추진 전력 공급보다는 장기체류 체계의 자립성 향상과 저전력 임무 지속성 확보에 있다[8]. 즉, **MRE**는 에너지 밀도 자체보다는 군수지원 독립성과 유지 전원 확보 측면에서 강조될 필요가 있다.

수중 **WPT** 역시 자체적으로 에너지를 생산하는 동력원이 아니라, 외부 전력을 비접촉 방식으로 전달하는 에너지 인프라 기술이다. 특히 접촉식 충전 방식에서 문제가 되는 커넥터 부식, 정렬 오차, 반복 결합에

Table 1. Comparison of major energy technologies for military unmanned maritime systems

Technology	System-Level Role	Energy Density (theor.)	Practical / System-Level	TRL* (est.)	Expt. Endurance	Critical Limitation(s)
LIB	Baseline onboard energy storage	~800 Wh/L	Commercial high-energy cells are typically ~550-730 Wh/L; lower at the pack level	9	Days to weeks	Thermal runaway risk, limited energy-density ceiling, constrained long-endurance submerged operation
ASSB	Next-generation onboard energy storage	Potentially >900~1,000 Wh/L	Recent stack/pouch-level reports are around ~670 Wh/L	4-6	Weeks to months	Reduced ionic conductivity at low temperature, interfacial resistance, manufacturing and stack-pressure dependence
Li-S battery	Ultra-high-energy onboard storage	~2,800 Wh/L	Recent pouch-cell reports are ~555-985 Wh/L	3-5	Weeks to months	Polysulfide shuttle, volumetric expansion, limited cycle life and long-term stability
PEMFC with H ₂ storage	Low-signature primary power source for long-endurance operation	Not directly comparable*	System-level values of ~400 Wh/L have been reported, but strongly depend on hydrogen storage and balance-of-plant configuration	6-7	Weeks to months	H ₂ /O ₂ storage burden, water and thermal management, system complexity
Docking-coupled RO-AEMWE / DSE	In situ refueling and logistics-support infrastructure	N/A	More appropriately assessed in terms of logistics independence rather than onboard energy density	3-5	Can support months-scale resident operation through repeated docking	Chlorine evolution reaction, chlorine-induced corrosion, desalination burden, maintenance complexity
MRE harvesting	Auxiliary / maintenance power source	N/A	Better suited for low-power maintenance loads than for primary propulsion because of low and intermittent power density	5-7	Long-duration support under low-load conditions	Low power density, environmental dependence, intermittent output
Underwater WPT	Energy transfer infrastructure	N/A	Inductive underwater charging efficiency is commonly reported at ~88-93%	6-8	Can support months-scale operation through repeated docking	Sensitivity to alignment, seawater-induced losses, dependence on external infrastructure
RTG	Ultra-long-endurance low-power source	Not directly comparable	Power output is typically on the order of ~110 W	2-3**	Months to years for low-power loads	Insufficient output for primary propulsion of large UMS platforms
micro-SMR	Potential ultra-long-endurance, high-power source	Not directly comparable*	Conceptual designs suggest >10 years of autonomous operation without refueling	2-3	Months to years	Shielding mass, safety and regulatory constraints, lack of platform-level integration and demonstration

*TRL values are approximate and inferred from publicly available literature and demonstration cases. Expected endurance may vary depending on mission load, platform size, and hybrid system configuration.

**Direct comparison in Wh/L with electrochemical batteries should be interpreted with caution, because the system volume of PEMFC and micro-SMR architectures is dominated by fuel storage, shielding, and balance-of-plant components rather than by the conversion unit alone.

***The TRL shown for RTG refers specifically to its applicability to military UMS, not to the general maturity of RTG technology itself.

따른 기계적 마모를 완화할 수 있다는 점에서 *resident* 운용 개념을 구현하는 핵심 기반기술로 평가된다[9]. 결국 수전해, MRE, WPT와 같은 기술은 고에너지 저장기술과 동일한 범주로 분류되기보다는, 장기체류형 운용을 지원하는 외부 에너지 보급·유지 인프라를 구현한다는 점에서 기술적 가치가 있다.

3.5 초장기·고출력 잠재 동력원: Micro-SMR

초대형 무인잠수정(XLUUV, *extra-large unmanned underwater vehicle*)과 같은 대형 플랫폼에서는 에너지원의 개선만으로 작전 요구를 완전히 충족하기 어려울 수 있으며, 이 경우 화학계 에너지원을 넘어서는 다른 차원의 고밀도 동력원이 검토 대상이 된다. 이러한 맥락에서 *micro-SMR*은 수개월에서 수년 수준의 체류 시간과 수십 kW급 이상의 지속 출력을 동시에 제공할 수 있는 잠재 동력원으로 평가받는다[10]. 특히 수동형 열파이프 냉각시스템의 적용은 시스템 신뢰성과 저소음성을 동시에 확보할 수 있다는 점에서, 수중 플랫폼용 동력원으로서의 적용 잠재력을 높이는 요소로 여겨진다.

그러나 *micro-SMR*은 아직은 잠재력의 차원에서 이해되어야 한다. 실제 적용에서는 차폐 중량, 열관리, 사고 안전성, 규제·보안 문제, 체계 통합 복잡도 등 전지나 연료전지와는 차원이 다른 제약이 존재하며, 현재 미 해군의 대표적 XLUUV 사업인 Orca 역시 디젤-전기 체계를 채택하여 “신뢰성 우선” 기조를 보여주고 있다[11]. 따라서 *micro-SMR*은 현시점에서 조기 전력화 기술이라기보다, 초장기 체류·고출력 임무를 상정한 원시일의 기술 옵션으로 보는 것이 타당하다.

한편 RTG(*radioisotope thermoelectric generator*)는 방사성동위원소의 붕괴열로 형성된 온도차를 접합부에서 기전력으로 변환하는 *Seebeck effect*를 이용해 전기를 생산하는 기술로, 장수명·무정비 특성을 가지지만 출력이 약 110 W 내외에 머물기 때문에 대형 UMS의 주 추진원으로는 적합하지 않다[12]. 즉, 원자력 기반 에너지원 중에서도 RTG와 *micro-SMR*은 적용 대상과 역할이 구분되어야 하며, 전자는 저전력 장기 감시체계, 후자는 대형 플랫폼의 고출력 장기 운용 가능성 검토라는 서로 다른 범주에서 논의되어야 한다.

이상의 논의를 바탕으로, 군사용 UMS 적용 관점에서 주요 에너지 기술을 에너지 밀도, 기술성숙도, 예상 체류 기간 및 핵심 한계 측면에서 비교·정리하면 Table 1과 같다.

4. 실증 사례를 통한 차세대 에너지 기술의 적용 가능성 검토

3장에서 정리한 비교 결과를 바탕으로, 본 장에서는 각 기술이 실제 플랫폼 수준에서 어떠한 방식으로 구현되고 있는지를 대표적 실증 사례를 통해 검토하고자 한다.

4.1 USV: 다중 에너지 통합과 은밀 운용의 실증

최근 USV 분야의 핵심 경향은 단일 에너지원의 고도화보다, 서로 다른 전원을 결합하여 장기체류성과 임무 유연성을 동시에 확보하는 데 있다. 이는 현재 단계에서 단일 저장기술만으로 장기 해상 운용, 은밀성,



(a) Saildrone 'Surveyor'[13]



(b) Ocean Aero 'Triton'[14]



(c) XOCEAN 'XO-450'[15]

Fig. 2. Multi-integrated energy source-based USV[13–15]

고출력 대응을 모두 만족시키기 어렵기 때문이다.

대표적으로 Saildrone의 ‘Surveyor’는 풍력 기반 wing sail, 태양광, 디젤 발전 시스템을 결합한 다중 전원 구조를 채택하고 있으며, 2024년 북대서양 심해 케이블 경로 조사에서 외부 지원 없이 26일간 4,500 km 이상 주행하고 100일 이상의 연속 운용 능력을 제시한 바 있다[13]. 이는 현재 USV의 실용적인 해법으로 초고에너지 저장기술의 단독 적용보다는 환경 에너지 활용과 보조 동력원의 복합 운용이라는 기조를 보여준다. 특히 풍력 추진 시 자기 소음이 거의 없다는 점은 저탐지성 측면에서 군사적 함의를 가진다.

Ocean Aero의 ‘Triton’은 수상과 수중 운용을 결합한 AUSV(autonomous underwater and surface vehicle) 개념으로, 수면에서는 sail과 태양광 기반으로 30일 이상 자율 항해하고, 잠항 모드에서는 5일 이상 수중 운용이 가능한 것으로 알려져 있다[14]. 이는 정보·감시·정찰(ISR), 대기뢰전(MCM), 대잠전(ASW)과 같은 복합 임무 수행을 목적으로 개발되어, 장기 체류성과 은밀 기동 능력을 동시에 지향하는 수상·수중 겸용 UMS의 발전 방향을 제시하는 대표적 사례이다. 다만 수중 체류 시간은 여전히 제한적이므로, 완전한 장기 잠항 체계보다는 수상 중심 하이브리드 플랫폼의 성격이 강하다.

XOCEAN의 ‘XO-450’ 역시 태양광, LIB, 마이크로 디젤 발전기를 결합한 하이브리드 체계를 통해 24시간 원격 운용을 수행하는 것으로 보고된다[15]. 이 사례는 초장기 체류 그 자체보다 체계 신뢰성과 운용 경제성을 함께 입증했다는 데 의미가 있다. 한편

SEA-KIT International의 ‘Maxlimer’에 Bramble Energy의 PCB(printed circuit board, 인쇄 회로 기판)를 탑재하여 기존 디젤 엔진을 수소 체계로 전환하는 실증 프로젝트를 진행하였다. 이는 엔진 특유의 소음과 진동을 최소화하여 민감한 음향 센서 운용에 최적화된 환경을 제공하며, 차세대 UMS의 무배출 운항 및 저소음 운용 가능성을 검토하는 주요 사례로 평가받고 있다[16].

종합하면, USV 사례군은 차세대 동력 기술의 현실적 발전 방향은 단일 초고밀도 전원의 적용보다는 다중 에너지원 통합과 저탐지성의 최적화로 나아가고 있음을 시사한다.

4.2 UUV: 장기체류와 도킹 기반 에너지 인프라

UUV 및 resident subsea drone 분야에서는 외기 의존적 연소가 불가능하고 회수·재보급 비용이 높기 때문에, 에너지 기술의 핵심 평가축이 장기체류성과 군수지원 독립성에 집중된다. 이에 따라 최근 수중 플랫폼의 실증은 배터리 자체의 성능 향상보다, 외부 환경으로부터의 에너지 보완과 도킹 인프라 기반 재충전 체계 구축에 초점을 맞추는 경향을 보인다.

Seatrec의 ‘infiniTE™’ profiling float는 해양 온도구배를 활용한 열에너지 하베스팅의 대표적 사례이다. 2025년 미 해군대학원(NPS, Naval Postgraduate School)과의 협력 임무에서 하와이 코나 해역에서 1,000회 이상의 프로파일링과 6시간 간격의 해양·음향 데이터 수집을 실시한 사례가 보고되었다[17]. 이는 MRE 하베스팅이 고출력 추진용 전원보다는 저전

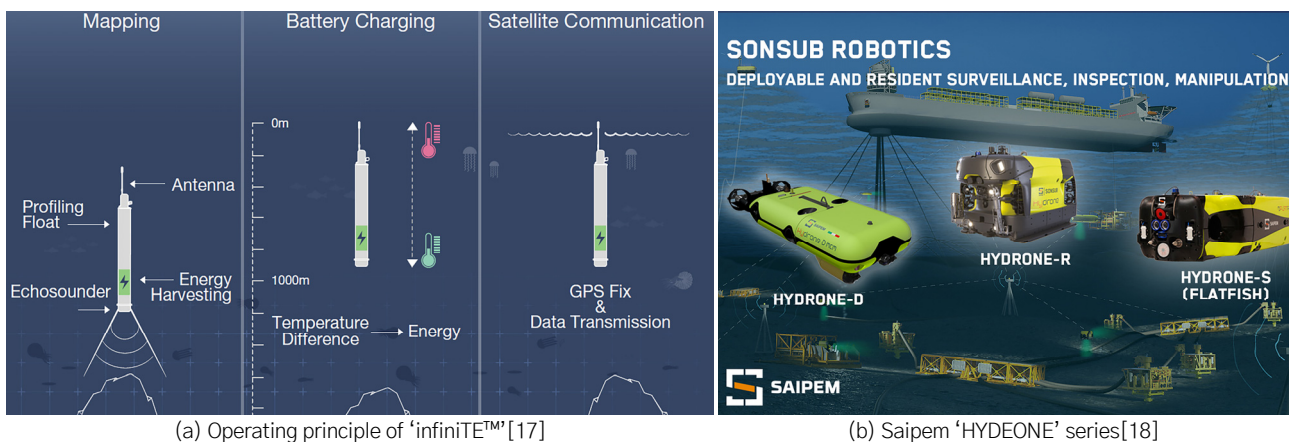


Fig. 3. Representative energy-support and resident operation concepts for long-endurance UUVs: (a) thermal energy harvesting-based profiling float and (b) resident subsea drone platform [17,18]

력 장기 관측 플랫폼의 유지 전원으로 더 실용적임을 보여준다.

한편 Saab Seaeye의 ‘Sabertooth’는 도킹 스테이션을 통한 배터리 재충전과 양방향 통신을 구현하여 resident 운용 개념을 제시하였고, 6개월 이상의 무정비 체류가 가능하도록 설계된 것으로 알려져 있다[9]. 이는 수중 플랫폼의 장기체류가 단순히 더 큰 배터리를 탑재하는 문제가 아니라, 반복적 재충전과 임무 연속성을 보장하는 인프라의 문제로 전환되고 있음을 의미한다.

이러한 흐름은 Equinor와 Saipem의 ‘HYDEONE-R’ 사례에서도 확인된다. 해당 플랫폼은 2023년 165일 연속 운용을 달성한 데 이어, 2025년에는 240일 연속 체류 기록을 보고하였다[18]. 또한 Equinor의 ‘Eelume S’ 도입과 Hydromea의 해저-위성 간 통신(subsea-to-satellite link) 시연은 향후 해저 무인체계의 실효성을 입증하는 주요 사례이다. 이는 단순한 전력 충전을 넘어 전력 공급, 데이터 회수 및 실시간 통신을 아우르는 통합 인프라 구축 가능성을 시사하는 것으로, 특히 수중 유도식 WPT 효율이 통상 88~93% 수준으로 보고된다는 점은 비접촉식 도킹 기반 에너지 전달이 실용적 수준의 전달 효율에 접근하고 있음을 나타낸다[9,18]. 결국 UUV 분야에서는 개별 전원의 절대 성능보다, 도킹-충전-통신-재임무화를 포함하는 체계 수준의 에너지 아키텍처가 경쟁력을 좌우한다고 볼 수 있다.

4.3 종합 논의

이상의 실증 사례는 수상과 수중 플랫폼에서 차세대 에너지 기술이 서로 다른 방향으로 발전하고 있음을 보여준다. USV 분야에서는 풍력, 태양광, LIB, 디젤, 연료전지 등을 조합한 다중 에너지 통합 체계가 장기 운용과 저탐지성의 현실적 해법으로 자리잡고 있다. 반면 UUV 분야에서는 고에너지 밀도의 단일 전원보다, 도킹 스테이션, 에너지 하베스팅, WPT, 데이터 연계 인프라를 포함하는 resident 운용 체계가 장기체류성 확보의 중심축으로 부상하고 있다.

따라서 현시점에서 가장 실현 가능성이 큰 경로는 1) USV에서는 다중 에너지 하이브리드 기반 장기 운용, 2) UUV에서는 연료전지 또는 고성능 저장기술과 해저 도킹 인프라를 결합한 resident 운용 개념의 고

도화라고 볼 수 있다. 반면 ASSB, Li-S, micro-SMR과 같은 기술은 높은 잠재력에도 불구하고 체계 수준의 성숙도와 실증 범위 측면에서는 중장기적 검토 대상에 가깝다. 따라서 차세대 에너지 기술의 군사적 가치는 개별 기술의 성능 우열보다, 실제 플랫폼 수준에서 임무 지속성, 은밀성, 군수지원 독립성을 어떠한 방식으로 구현할 수 있는가에 의해 평가되어야 한다.

5. 결론

본 연구는 군사용 UMS의 장기체류성과 작전 지속성을 제약하는 기존 동력원의 구조적 한계를 검토하고, 이를 보완할 차세대 에너지 기술의 적용 가능성을 분석하였다. 현재 가장 현실적인 발전 방향은 USV에서는 다중 에너지 하이브리드 체계, UUV에서는 연료전지와 도킹 기반 에너지 인프라를 결합한 resident 운용 개념의 고도화에 있다. 반면 ASSB, Li-S, micro-SMR은 높은 잠재력에도 불구하고 기술성숙도와 체계통합 측면에서 중장기 검토가 필요하다. 향후에는 개별 전원의 성능 향상보다 임무 유형에 부합하는 에너지 아키텍처 최적화가 핵심 과제가 될 것이다.

참고문헌

- [1] Young-Wook Kim, So Yeon Kim, Jae-Yong Lee, & Ok-Hee Kim, ‘Analysis of Propulsion Power Sources for Unmanned Maritime Systems: Optimal Energy Sources by Mission Type,’ Journal of the KNST, VOL. 8, NO. 2, 2025, pp. 141-148.
- [2] Juchen Li, Yuli Hu, Silun Luo, Chengyi Lu, Yongchen Song, & Hongsheng Dong, ‘Toward the Next-Generation Energy Systems for Unmanned Underwater Vehicles: Status, Challenges, and Solutions,’ The Innovation Energy, VOL. 2, 2025, Article 100106.
- [3] Ok-Hee Kim, ‘Risk Management of Lithium-Ion Batteries for Safe Navigation: Overcoming Thermal Runaway and Enhancing Safety,’ Journal of the KNST, VOL. 7, NO. 3, 2024, pp. 290-297.
- [4] Yang Wang, Zhen Chen, Kai Jiang, Zexiang Shen, Stefano Passerini, & Minghua Chen, ‘Accelerating the Development of LLZO in Solid-State Batteries Toward Commercialization: A Comprehensive Review,’ Small, VOL. 20, NO. 35, 2024, Article 2402035.
- [5] Yuanyuan Li, Jianwei Li, Yuqi Xu, Yuxiao Wang, Xiaojun Wang, Peng Wang, Tao Liu, Zhiming Liu, & Guanglei Cui, ‘Insight Into All-Solid-State Lithium-Sulfur Batteries: Challenges and Interface Engineering at the Electrode-Sulfide

Solid Electrolyte Interface,' *Advanced Energy Materials*, VOL. 16, NO. 7, 2026, Article e04926.

[6] Laeun Kwon, Jong-Gu Kang, Kyung Don Baik, Kiyoul Kim, & Changsun Ahn, 'Advancement and Applications of PEMFC Energy Systems For Large-Class Unmanned Underwater Vehicles: A Review,' *International Journal of Hydrogen Energy*, VOL. 79, 2024, pp. 277-294.

[7] Shanshan Li, Kaixin Wang, Guoqiang Wang, Liming Liu, Dong Liang, Yu Xie, & Xiaojun Lv, 'Chlorine Evolution Suppression in Seawater Electrolysis: From Mechanistic Insights and Catalyst Design to Device-Level Innovations,' *ChemSusChem*, VOL. 19, NO. 3, 2026, Article e202502005.

[8] Habilou Ouro-Koura, Hyunjun Jung, Diana-Andra Borca-Tasciuc, Andrea E. Copping, & Zhiqun (Daniel) Deng, 'Modeling and Optimization of a PCM-Based Ocean Thermal Energy Harvester for Powering Unmanned Underwater Vehicles,' in proceedings of the ASME 2023 17th International Conference on Energy Sustainability collocated with the ASME 2023 Heat Transfer Summer Conference, Washington, DC, July 2023.

[9] Abishek Pandey Chettri & Narayanamoorthi R, 'Comprehensive Review of Wireless Power Transfer for Autonomous Underwater Vehicles: Technological Innovations, Challenges, and Future Prospects,' *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, VOL. 13, 2025, Article 101079.

[10] M. Hadid Subki, "Advances in Technology Developments of Small Modular Reactors-Including Microreactors," in proceedings of 21st INPRO Dialogue Forum on the Deployment of SMR Projects and Technologies to Support the

Sustainable Development Goals, Sankt Petersburg, Russian Federation, August–September 2023.

[11] U.S. Government Accountability Office, Extra Large Unmanned Undersea Vehicle: Navy Needs to Employ Better Management Practices to Ensure Swift Delivery to the Fleet, GAO-22-105974, September 2022.

[12] Muhammad Bilal Naseem, Junho Lee, & Su-Il In, "Radioisotope Thermoelectric Generators (RTGs): A Review of Current Challenges and Future Applications," *Chemical Communications*, VOL. 60, 2024, pp. 14155-14167.

[13] Saildrone, Surveyor. <https://www.saildrone.com/technology/surveyor> (accessed 2026.03.27.)

[14] Ocean Aero, The TRITON. <https://www.oceanaero.com/the-triton> (accessed 2026.03.27.)

[15] XOCEAN, Technology. <https://xocean.com/technology/> (accessed 2026.03.27.)

[16] SEA-KIT International, CMDC Project. <https://www.sea-kit.com/cmdc-project> (accessed 2026.03.27.)

[17] Seatrec, Seatrec's infiniTE™ Float Surpasses 1,000 Dives for Naval Postgraduate School, 2025.08.21. <https://seatrec.com/seatrecs-infinite-float-surpasses-1000-dives-for-naval-postgraduate-school/> (accessed 2026.03.27.)

[18] Equinor, From Pioneer Diving to Autonomous Drones, 2025.06.25. <https://www.equinor.com/magazine/a-deep-dive-into-emission-cuts> (accessed 2026.03.27.)