



Received: 2026/08/06
Revised: 2026/08/18
Accepted: 2026/09/04
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

Ok-Hee Kim

1 Jungwon-ro, Jinhae-gu, Changwon-si,
Gyeongsangnam-do, 51704, Republic of Korea
Tel: +82-55-907-5350
Fax: +82-55-907-5231
E-mail: koh0715@navy.ac.kr

Abstract

본 연구는 공개자료 기반 시나리오를 통해 디젤-전기, AIP·리튬이온전기 및 원자력추진 잠수함의 전개시간, 현지 작전시간과 스노클 노출을 비교하였다. 분석 결과, AIP는 저속 초기 중 스노클 노출을 줄였으나 원거리 전개의 시간적 제약은 남았다. 반면 원자력추진은 전개시간을 단축하고 현지 작전시간을 확대하는 것으로 나타났다. 또한, 쉬프랑급 사례를 통해 이러한 시간적 이점을 실제 운용 효과로 전환하려면 저소음 추진, 체계통합, 핵연료 관리 및 정비·인력 기반이 함께 확보되어야 함을 시사하였다.

This study compared the transit time, on-station time, and snorkeling exposure of diesel-electric-powered, AIP-lithium-ion battery-powered, and nuclear-powered submarines using scenarios based on publicly available data. The results showed that AIP reduced snorkeling exposure during low-speed patrols but did not eliminate the time constraints of long-range transit. By contrast, nuclear propulsion shortened the transit time and increased the on-station time. The Suffren-class case further indicated that translating these time advantages into operational benefits requires low-noise propulsion, system integration, nuclear-fuel management, maintenance infrastructure, and a trained workforce.

Keywords

원자력추진 잠수함(Nuclear-Powered Submarine), 디젤-전기 추진 잠수함(Diesel-Electric Submarine), 스노클비(Indiscretion Ratio), 쉬프랑급(Suffren Class), 임무 지속능력(Mission Endurance)

원자력추진 잠수함 도입의 작전적 효과: 디젤-전기 잠수함의 한계와 프랑스 사례

Operational Effects of Introducing Nuclear-Powered Submarines: Limitations of Diesel-Electric Submarines and the French Case

정재훈^{1†}, 김승재^{2†}, 김옥희^{3*}

¹해군 중령/해군사관학교 교학처장

²해군 대위/해군사관학교 항해운용학과 조교수

³해군 중령/해군사관학교 기초과학과 교수

[†]정재훈과 김승재는 본 논문에 동등하게 기여한 공동 제1저자임.

JaeHun Jeong^{1†}, Seungjae Kim^{2†}, Ok-Hee Kim^{3*}

¹CDR, ROK Navy/Dean of Academic Affairs, Republic of Korea Naval Academy

²LT, ROK Navy/Assistant professor, Dept. of Navigation and Ship Handling System, Republic of Korea Naval Academy

³CDR, ROK Navy/Professor, Dept. of Natural Science, Republic of Korea Naval Academy

[†]These authors contributed equally to this work.

1. 서론

국방부는 2026년 5월 「대한민국 핵추진잠수함 개발 기본계획」을 발표하고, 20% 미만의 저농축 우라늄(LEU, low-enriched uranium) 사용, 핵연료 교체 최소화 및 국내 개발·건조를 기본 원칙으로 제시하였다. 또한, 2030년대 중반 초도함 진수와 후반 전력화를 목표로 사업을 추진할 계획이다[1]. 이에 따라 한국형 원자력추진 잠수함 개발에 필요한 작전적 효용과 핵심기술을 구체적으로 검토할 필요가 있다.

현재 우리 해군이 운용·개발 중인 디젤-전기 추진 방식의 재래식 공격잠수함(SSK, conventionally powered attack submarine)은 리튬이온전기(LIB, lithium-ion battery)와 수소연료전기 기반의 공기불요추진(AIP, air-independent propulsion) 체계를 통해 잠항 지속능력을 향상하고 있다. 그러나 함내에 저장할 수 있는 전력

량과 AIP 구동을 위한 수소·산소 등 반응물의 양이 물리적으로 제한되므로 장기간 고속 기동을 지속하기 어렵고, 축전지 충전을 위한 스노클링(snorkeling)도 완전히 제거할 수 없다. 반면 공격형 원자력추진 잠수함(SSN, nuclear-powered attack submarine)은 외부 공기 공급 없이 지속적으로 추진동력을 생산하므로 장기 잠항과 고속 전개가 가능하다[2].

한국형 SSN에 관한 국내 연구는 잠수함체계의 기술 수준과 핵심기술 분석[2,3], 임무기반 작전요구성능 도출[4]을 중심으로 수행되었다. 국외에서는 Costa와 Proença가 SSN과 AIP 잠수함의 전개시간, 초계구역 및 등가 함대 소요를 비교하였고[5], Stapersma와 Prins는 재래식 및 AIP 잠수함의 에너지체계와 스노클 노출시간 비율을 정량적으로 분석하였다[6]. 그러나 한국형 SSN 개발 논의에 적용하여 일반 SSK, AIP-LIB 적용 고성능 SSK, 그리고 SSN의 전개시간, 현지 작전시간 및 누적 스노클링 시간을 동일한 공개자료 기반 시나리오에서 비교한 연구는 제한적이다.

이에 본 연구는 객관적인 수치 산정이 제한되는 피탐확률이나 임무성공률 대신, 공개자료로 계산할 수 있는 전개시간, 현지 작전시간 및 누적 스노클링 시간을 비교지표로 설정하였다. 본 연구의 목적은 원자력추진 잠수함의 속력 우위 자체를 확인하는 데 있지 않고, 동일한 임무기간에서 이동속력과 스노클 독립성의 차이가 전개거리와 운용조건에 따라 현지 작전시간과 스노클 노출의 차이로 어느 정도 전환되는지를 공개자료의 범위에서 정량화하는 데 있다. 이를 위해 임무기간, 전개거리, 이동속력 및 스노클비를 적용한 시나리오를 구성하여 세 추진체계의 전개시간과 작전 가용성을 일 단위로 비교하였다. 또한 AIP가 현지 저속 초계 중 스노클 노출을 줄이는 효과와 원거리 전개시간의 제약을 해소하지 못하는 한계를 구분하여 분석하고, 원자력추진의 시간적 이점이 전개거리와 운용조건에 따라 어떻게 달라지는지를 검토하였다.

기술적 비교사례로는 프랑스 쉬프랑급(Suffren-class)을 선정하였다. 쉬프랑급은 비교적 제한된 선체 규모에 LEU 기반 원자로와 펌프제트 추진체계를 통합한 SSN으로, 원자로·선체·추진체계의 독자 개발을 추진해 온 프랑스의 경험을 반영하고 있다[7,8]. 이는 LEU 사용과 국내 개발·건조를 기본방향으로 설정한 한국형 SSN의 핵심기술 및 체계통합 방향을 검토하는 데 유용한 사례이다.

2 연구설계 및 분석방법

2.1 연구문제와 비교대상

본 연구는 AIP 및 LIB 체계가 재래식 잠수함의 운영상 한계를 어느 범위까지 보완할 수 있는지 분석하고, 원자력추진체계가 추가로 제공하는 작전적 효과를 비교한다. 이를 위해 비교대상을 세 유형으로 구분하였다. 첫 번째 유형은 디젤 발전기와 축전지를 중심으로 운용되는 일반적인 재래식 잠수함이다. 두 번째 유형은 AIP와 LIB를 적용하여 저속 잠항 지속시간과 고속 기동능력을 향상한 고성능 재래식 잠수함으로, 우리 해군이 운용·개발하는 잠수함체계의 특성을 반영한다[9]. 세 번째 유형은 추진을 위한 스노클링 없이 지속적으로 동력을 생산할 수 있는 SSN이다.

본 연구는 이러한 세 추진체계의 단순한 제원상 우열을 가리는 데 그치지 않고, 동일 임무 조건 하에서 전개 시간과 스노클 노출 수준이 작전 가용성에 미치는 영향을 정량적으로 규명하는 데 주안점을 둔다. 이를 위해 추진체계별 운용특성을 토대로 임무 시나리오 및 민감도 분석을 수행하고, 쉬프랑급 사례를 통해 분석결과와 기술적 구현조건을 검토하였다.

2.2 임무 시나리오와 입력변수

디젤-전기 추진 잠수함의 스노클 운용 부담은 스노클 노출시간 비율(IR, indiscretion ratio, 이하 스노클비)로 나타내었다. 스노클비는 전체 운용시간 중 축전지 충전을 위해 스노클링을 수행한 시간의 비율로 정의한다[6].

$$IR(\%) = \frac{T_{snorkel}}{T_{operation}} \times 100 \quad (1)$$

여기서 $T_{snorkel}$ 은 스노클링 시간, $T_{operation}$ 은 해당 임무 단계의 전체 운용시간이다. 스노클비가 25%이면 해당 운용단계의 전체 시간 중 25%를 스노클링 상태로 운용한다는 의미이다. 이후 누적 스노클링 시간을 계산할 때에는 스노클비를 백분율이 아닌 소수 형태로 환산하여 적용하였다. 예를 들어 25%는 0.25로 입력하였다.

스노클비는 특정 잠수함의 고정된 성능값이 아니

Table 1. Mission-scenario inputs and their methodological bases

Parameter	Conventional diesel-electric	AIP-LIB	Nuclear-powered	Basis or assumption
Total mission duration	40, 50, and 70 days	40, 50, and 70 days	40, 50, and 70 days	Common scenario; 70-day upper bound based on Suffren-class endurance [10]
One-way transit distance	1,000, 2,000, and 3,000 NM	1,000, 2,000, and 3,000 NM	1,000, 2,000, and 3,000 NM	Scenario values representing increasing mission range
Transit speed	9 kts (8–10 kts)	9 kts	20 kts (15–25 kts)	SSK range from [11]; AIP-LIB assumed equal; SSN upper bound from [10]
Patrol speed	4 kts	4 kts	Not separately specified	Low-speed patrol condition from [11]
Transit indiscretion ratio	25% (20–30%)	25% (20–30%)	0%	SSK range from [11]; AIP effect modeled by operating duration
Patrol indiscretion ratio	8.5% (7–10%)	0% during AIP operation; 8.5% thereafter	0%	SSK range from [11]; 0% during AIP operation
Available AIP duration	Not applicable	10, 15, and 20 days	Not applicable	Scenario range based on published endurance of up to ~20 days [11]

라 운항속력, 축전지 용량과 충전상태, 함내 전력부하, AIP 운용 및 충전전략에 따라 달라지는 운용변수이다. 스노클비는 통상 피탐확률과 일부 연관이 있으나, 피탐확률을 직접 나타내는 값이라기보다는, 잠수함이 외부 공기 흡입을 위해 잠망경 심도에서 운용되는 시간적 부담을 의미한다. 본 연구에서는 이동단계와 현지 초계단계의 운용조건이 서로 다르므로 각 단계에 별도의 스노클비를 적용하였다.

Table 1에 나타난 본 연구의 입력변수는 공개자료에 근거한 문헌 기반 변수와 비교분석을 위해 설정한 시나리오 변수로 구분하였다. 공개문헌에서 범위로 제시된 값은 중앙값을 기준조건으로 사용하고, 전체 범위는 민감도 분석에 반영하였다. 공개되지 않은 지속 이동속력과 임무거리 등은 특정 함급의 실제 성능으로 간주하지 않고, 연구자가 설정한 시나리오 값으로 명시하였다. 따라서 분석결과는 특정 함급의 실제 성능값이 아니라, 동일한 임무조건에서 추진체계의 차이가 전개시간, 현지 작전시간 및 스노클 노출에 미치는 영향을 비교한 계산값이다. 입력변수 변화에 따른 결과의 변동성과 본 분석의 세부적인 한계는 제5장에서 검토한다.

전체 임무기간은 세 추진체계에 동일하게 적용하였으며, 40일, 50일 및 70일을 분석조건으로 설정하였다. 이 중 50일은 재래식 잠수함의 장기 임무를 대표하는 기준 시나리오로 사용하였다. 40일은 기준보다 짧은 임무조건에서 이동시간의 영향을 검토하기

위한 하한조건으로, 70일은 쉬프랑급의 공개 항해 자립기간을 반영한 상한조건으로 설정하였다[10]. 30일 조건은 3,000 NM 원거리 시나리오에서 재래식 잠수함의 현지 작전시간이 약 2일에 불과하여 정상적인 임무 시나리오라기보다 이동시간이 지배하는 극단조건에 해당하므로 제외하였다. 이상의 동일한 임무기간을 각 추진체계에 적용하여 분석함으로써 항해 자립기간 자체의 차이보다는 이동속력과 스노클 의존성이 전개시간 및 현지 작전시간에 미치는 영향을 비교하였다. 편도 전개거리는 특정 작전계획이나 작전해역을 의미하지 않으며, 거리 증가에 따른 추진체계별 효과를 비교하기 위해 1,000 NM, 2,000 NM 및 3,000 NM로 설정하였다. 이 중 3,000 NM는 특정 작전해역이 아니라 광역 원거리 임무를 대표하는 시나리오 상한값이다.

일반 디젤-전기 추진 잠수함의 이동속력은 공개문헌에 제시된 8–10 kts의 중앙값인 9 kts를 기준으로 하였다. 이동단계 스노클비는 20–30%의 중앙값인 25%, 4 kts 저속 초계 시 스노클비는 7–10%의 중앙값인 8.5%를 적용하였다[11].

AIP-LIB 적용 잠수함의 평균 이동속력과 스노클비에 관한 공개 운용자료는 제한적이므로, 이동속력은 일반 디젤-전기 추진 잠수함과 동일한 9 kts를 적용하였다. AIP의 효과는 스노클비를 임의로 낮추는 대신, 외부 공기 없이 운용할 수 있는 기간으로 반영하였다. 공개자료에서 AIP 잠수함의 수중 운용기간이

최대 약 20일로 제시됨에 따라, AIP 사용 가능기간을 10일, 15일 및 20일로 설정하였다[11]. AIP 사용기간은 저속 초계단계에 우선 배분하고, 소진 이후에는 일반 디젤-전기 추진 잠수함과 동일한 스노클비를 적용하였다.

원자력추진 잠수함의 기준 이동속력은 20 kts로 설정하고, 15–25 kts 범위를 민감도 분석에 적용하였다. 20 kts는 공식 순항속력이 아니라 쉬프랑급의 공개 최대 수중속력 25 kts보다 낮게 설정한 시나리오 값이다[10]. 원자력추진 잠수함은 추진을 위한 외부 공기 공급이 필요하지 않으므로 스노클비를 0%로 적용하였다.

왕복 전개시간은 다음과 같이 계산하였다.

$$T_{transit} = 2D / (24V) \quad (2)$$

여기서 $T_{transit}$ 은 왕복 전개시간(day), D 는 편도 전개거리(NM), V 는 이동속력(kts)이다. 분모의 24는 시간을 일 단위로 환산하기 위한 계수이다. 현지 작전시간은 전체 임무기간에서 왕복 전개시간을 제외하여 산출하였다.

$$T_{on-station} = T_{mission} - T_{transit} \quad (3)$$

여기서 $T_{on-station}$ 은 현지 작전시간(day), $T_{mission}$ 은 전체 임무기간(day)이다.

일반 디젤-전기 추진 잠수함의 누적 스노클링 시간은 이동단계와 현지 초계단계의 스노클링 시간을 합산하여 다음과 같이 계산하였다.

$$T_{snorkel} = T_{transit} IR_{transit} + T_{on-station} IR_{patrol} \quad (4)$$

여기서 $IR_{transit}$ 과 IR_{patrol} 은 각각 이동단계와 현지 초계단계의 스노클비이며, 계산 시 백분율을 소수로 환산하여 적용하였다.

AIP·LIB 적용 잠수함은 AIP 사용 가능기간을 현지 초계단계에 우선 배분하고, AIP 운용기간이 종료된 이후의 잔여 초계기간에만 스노클비를 적용하였다.

$$T_{snorkel, AIP} = T_{transit} IR_{transit} + \max(0, T_{on-station} - T_{AIP}) IR_{patrol} \quad (5)$$

여기서 T_{AIP} 는 AIP를 이용하여 외부 공기 공급 없이 운

용할 수 있는 기간(day)이다. $\max(0, T_{on-station} - T_{AIP})$ 는 AIP 사용 가능기간을 초과한 잔여 현지 작전시간만을 계산하기 위한 함수이다. 평가 지표는 왕복 전개시간, 현지 작전시간 및 누적 스노클링 시간으로 설정하였다.

Table 2에 정리된 추진체계별 운용 특성을 바탕으로 Table 1의 기준조건을 설정하고, 이를 식 (2)–(5)에 적용하여 왕복 전개시간, 현지 작전시간 및 누적 스노클링 시간을 산출하였다. 기준조건의 분석결과는 제4장의 Table 3에, 주요 입력변수의 변화에 따른 민감도 분석결과는 제5장의 Table 4에 제시하였다.

3. 추진체계별 에너지 및 운용 특성

3.1 일반 디젤-전기 추진 잠수함

일반 디젤-전기 추진 잠수함은 완전 잠항 상태에서 축전지에 저장된 전력으로 추진전동기와 함내 장비를 운용한다. 축전지 운용 중에는 디젤기관을 정지할 수 있어 낮은 음향신호를 유지할 수 있으며, 이러한 특성은 연안과 근해에서의 저속 매복 및 감시 임무에 유리하다. 반면 축전지에 저장할 수 있는 에너지가 제한되어 있어 속력과 잠항 지속시간 사이에 직접적인 절충이 발생한다. 속력이 증가하면 추진에 필요한 출력 또한 증가하여 축전지가 빠르게 소모되며, 재충전을 위해서는 잠망경 심도에서 스노클 마스트를 노출하고 디젤 발전기를 가동해야 한다. 공개자료에서는 재래식 잠수함의 스노클비를 8–10 kts의 이동 항해에서 20–30%, 약 4 kts의 저속 초계에서 7–10%로 제시한다[11].

스노클링 중에는 스노클 마스트와 수면 항적이 레이더 및 전자광학 센서에 노출될 수 있으며, 디젤기관과 발전기의 기계적 진동은 수중 음향신호를 증가시킬 수 있다. 또한, 배기가스와 열적 흔적은 적외선 탐지의 원인이 될 수 있다. 다만 이러한 신호가 실제 피탐으로 이어지는 정도는 해상상태, 기상조건, 적 탐지자산의 성능과 배치 및 잠수함의 운용전술에 따라 달라진다. 따라서 본 연구에서는 개별 센서에 의한 피탐확률을 산정하지 않고, 스노클링에 따른 시간적 노출을 나타내는 스노클비를 비교지표로 사용하였다.

Table 2. Energy and operational characteristics of the three submarine propulsion categories

Characteristic	Conventional diesel-electric SSK	Advanced SSK with AIP and LIB	Nuclear-powered SSN
Primary underwater energy source	Stored battery energy	Battery energy and onboard AIP reactants	Nuclear reactor
Low-speed submerged endurance	Limited by battery capacity	Extended by AIP operation	Not directly limited by propulsion energy
Sustained high-power operation	Short duration	Improved by LIBs but still finite	Long-duration operation possible
Propulsion-related snorkeling	Periodically required	Reduced but not eliminated	Not required
Principal operational advantage	High quietness during battery operation	Extended patrol endurance and improved short-term mobility	Rapid long-range transit and extended on-station time
Principal constraint	Battery depletion and snorkeling exposure	Finite AIP reactants and stored battery energy	Reactor safety, acoustic management, cost, and support infrastructure
Representation in this study	Literature-based speed and indiscretion ratio	Same transit speed as the conventional SSK; AIP duration modeled separately	Higher transit-speed range and zero indiscretion ratio

3.2 AIP·LIB 적용 고성능 재래식 잠수함

AIP와 LIB는 일반 디젤-전기 추진 잠수함의 에너지 제약을 서로 다른 방식으로 보완한다. 연료전지 등의 AIP 체계는 함내에 저장된 연료와 산화제를 사용하여 외부 공기 없이 전력을 생산하므로, 저속 초계 중 축전지 소모와 스노클링 빈도를 줄일 수 있다[11,12]. LIB는 기존 납축전지(lead-acid battery)보다 수중 지속항해와 고출력 기동에 유리하며, 충·방전 성능과 운용수명 측면에서도 장점을 갖는다[9,13].

두 기술은 상호보완적 특성을 보이며, AIP는 저출력 장기 운용에 유리하며, LIB는 고속 기동 및 회피와 같은 고부하 상황의 전력 요구를 감당하는 데 적합하다. 장보고-III Batch-II는 기존의 AIP 체계에 LIB를 결합한 추진·에너지 체계를 적용하며, 이를 통해 잠항시간과 고속 수중항해 능력을 향상하도록 개발되었다[9]. 그러나 제한된 함내 공간에 탑재할 수 있는 AIP용 연료와 산화제의 양도 제한된다. 또한, LIB는 고율 충·방전이나 이상상태에서 열 발생과 열폭주(thermal runaway) 위험이 있으므로, 폐쇄된 함내 환경에 적합한 열관리 및 안전체계가 요구된다[13]. 따라서 AIP·LIB는 저속 초계 지속시간과 단기 고출력 기동능력을 크게 향상하지만, 원거리 전 구간에서 높은 속력을 유지하거나 스노클링을 완전히 제거하지는 못한다.

본 연구에서는 이러한 특성을 과도하게 수치화하지 않기 위해 고성능 재래식 잠수함에 별도의 이동속력 증가율을 부여하지 않았다. 대신 AIP가 제공하는 공기불요 운용기간을 현지 초계단계에 우선 배분하고, AIP 사용기간이 종료된 이후에만 일반 디젤-전기 추진 잠수함의 스노클비를 적용하였다.

3.3 원자력추진 잠수함

원자력추진 잠수함은 원자로에서 발생한 열에너지를 추진동력과 함내 전력으로 전환한다. 임무 중 추진을 위한 외부 공기 흡입이나 주기적인 축전지 충전이 필요하지 않으므로, 화학에너지 저장량에 의해 수중 지속시간이 직접 제한되지 않는다. 이로 인해 장기 잠항뿐 아니라 높은 이동속력을 비교적 장시간 유지할 수 있다.

원자력추진체계의 주요 작전적 효과는 최대속력 자체보다 지속성에 있다. 높은 속력으로 원거리 작전해역에 전개하면 이동시간을 단축할 수 있으며, 동일한 전체 임무기간 중 현지에서 임무를 수행할 수 있는 시간이 증가한다. 또한 스노클 충전을 위한 주기적인 잠망경 심도 운용이 필요하지 않아 충전시점과 해역에 따른 전술적 제약이 감소한다.

다만 원자로 냉각계통과 터빈·발전기, 추진전동기 및 축계에서 발생하는 진동과 소음을 억제하지 못하

면 원자력추진의 지속성에도 불구하고 음향 피탐 가능성이 증가할 수 있다. 따라서 저소음 냉각계통, 진동절연, 저소음 전기추진과 추진기 설계는 원자로와 함께 확보해야 할 핵심기술이다. 그뿐만 아니라 원자로 안전, 방사선 차폐, 핵연료 관리, 정비시설 및 전문 인력 양성에 상당한 기술적·제도적 기반이 요구된다.

3.4 추진체계별 차이와 분석적 함의

Table 2에 정리한 추진체계별 차이는 정량모형에서 이동속력, 스노클링 및 AIP 사용 가능기간으로 반영하였다. 일반 디젤-전기 및 AIP·LIB 잠수함에는 동일한 이동속력을 적용하고, AIP의 효과는 현지 초계 중 공기불요 운용기간으로 나타냈다. 원자력추진 잠수함에는 상대적으로 높은 이동속력과 0%의 추진 목적 스노클링을 적용하였다. 이들 값은 특정 함급의 실제 성능이 아니라 운용시간과 스노클 노출을 비교하기 위한 대표조건이다. 쉬프랑급 사례는 이러한 운용특성이 실제 체제에서 구현되기 위한 기술적 조건을 검토하는 데 활용하였다.

4. 임무 시나리오별 작전효과 분석

4.1 기준조건과 분석결과

제2장의 계산방법과 제3장의 대표조건을 적용하여

세 추진체계의 왕복 전개시간, 현지 작전시간 및 누적 스노클링 시간을 산출하였다. 전체 임무기간은 50일로 고정하고, 편도 전개거리는 1,000 NM, 2,000 NM 및 3,000 NM로 구분하였다. 그 결과는 Table 3에 나타내었다.

일반 디젤-전기 추진 잠수함과 AIP·LIB 적용 잠수함에는 동일한 이동속력 9 kts를 적용하였다. 이는 LIB 적용에 따른 평균 이동속력 증가를 뒷받침할 공개 운용자료가 부족하기 때문이다. 따라서 두 유형의 전개시간과 현지 작전시간은 동일하며, AIP의 효과는 현지 초계 중 스노클링 시간을 줄이는 방식으로만 반영하였다. AIP 사용 가능기간은 기준값인 15일을 적용하였다. 원자력추진 잠수함에는 20 kts의 이동속력과 0%의 스노클링을 적용하였다.

4.2 전개거리와 현지 작전시간

편도 전개거리 1,000 NM에서 재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함의 현지 작전시간은 각각 40.74일과 45.83일로, 원자력추진 잠수함이 5.09일 길었다. 이는 재래식 잠수함 대비 약 12.5% 증가한 값이다. 2,000 NM에서는 현지 작전시간이 각각 31.48일과 41.67일로 산출되어, 그 차이가 10.19일, 약 32.4%로 확대되었다. 3,000 NM에서는 재래식 잠수함의 현지 작전시간이 22.22일인 반면, 원자력추진 잠수함은 37.50일로 산출되었다. 이는 15.28일, 약 68.8%

Table 3. Mission-scenario results for a 50-day mission

One-way transit distance (NM)	Submarine category	Round-trip transit time (days)	On-station time (days)	Cumulative snorkeling time*(days)
1,000	Conventional diesel-electric SSK	9.26	40.74	5.78
	AIP-LIB SSK	9.26	40.74	4.50
	Nuclear-powered SSN	4.17	45.83	0
2,000	Conventional diesel-electric SSK	18.52	31.48	7.31
	AIP-LIB SSK	18.52	31.48	6.03
	Nuclear-powered SSN	8.33	41.67	0
3,000	Conventional diesel-electric SSK	27.78	22.22	8.83
	AIP-LIB SSK	27.78	22.22	7.56
	Nuclear-powered SSN	12.50	37.50	0

*Cumulative snorkeling time is included within the transit and on-station periods and should not be added to the total mission duration.

증가한 값이다.

이러한 결과는 원자력추진체계의 작전적 이점이 단순한 잠항 지속시간의 연장에 그치지 않음을 보여 준다. 이동속력의 차이는 전개거리에 비례하여 누적되므로, 작전해역이 멀어질수록 이동시간 절감과 현지 작전시간 확대 효과가 커진다. 반대로 비교적 가까운 해역에서는 원자력추진체계의 시간적 이점이 상대적으로 작으며, AIP·LIB 적용 잠수함도 상당한 현지 작전시간을 확보할 수 있다.

4.3 누적 스노클링 시간

일반 디젤-전기 추진 잠수함의 누적 스노클링 시간은 편도 전개거리 1,000 NM에서 5.78일, 2,000 NM에서 7.31일, 3,000 NM에서 8.83일로 증가하였다. 전개거리가 늘어날수록 스노클비가 높은 이동단계의 비중이 커지기 때문이다.

AIP·LIB 적용 잠수함은 15일의 AIP 사용기간을 현지 저속 초계에 우선 배분함으로써 각 거리조건에서 일반 디젤-전기 추진 잠수함보다 누적 스노클링 시간이 약 1.28일 감소하였다. 편도 3,000 NM에서는 8.83일에서 7.56일로 약 14.4% 감소하였다. 다만 이동단계에는 두 잠수함에 동일한 속력과 스노클비를 적용하였으므로, 전개거리가 길어질수록 AIP가 줄일 수 있는 스노클링 시간에는 한계가 나타났다.

LIB는 고출력 기동시간과 충전성능을 향상할 수 있으나, 이를 평균 이동속력이나 스노클비 감소량으로 환산할 공개자료가 부족하여 정량모형에 직접 반영하지 않았다. 따라서 AIP·LIB 적용 잠수함의 결과는 LIB의 추가 효과를 포함하지 않은 보수적 추정이다. 원자력추진 잠수함의 추진 목적 스노클링은 모든 거리조건에서 0일로 산정하였으나, 통신과 정보수집 등 임무상 필요한 잠망경 심도 운용까지 배제한 것은 아니다.

4.4 작전적 함의

일반 디젤-전기 추진 잠수함은 연안·근해의 저속 매복과 감시에, AIP·LIB 적용 잠수함은 현지 저속 초계의 지속성과 스노클 노출 감소에 강점이 있다. 그러나 원거리 임무에서는 이동단계의 비중이 커지므로 AIP만으로 전개시간과 스노클 노출을 동시에 줄이기 어

렵다. 본 분석에서도 AIP·LIB 적용 잠수함은 편도 3,000 NM 조건에서 누적 스노클링 시간을 8.83일에서 7.56일로 줄였지만, 이동속력을 동일하게 적용했기 때문에 현지 작전시간은 증가하지 않았다.

원자력추진의 차별성은 비교적 높은 이동속력을 지속하면서 추진 목적의 스노클링을 제거할 수 있다는 점이다. 이에 따라 편도 3,000 NM 조건에서 현지 작전시간은 재래식 잠수함보다 15.28일 증가하였다. 따라서 원자력추진 잠수함의 도입 필요성은 모든 임무에서의 일률적인 우위보다, 장거리 신속전개와 장기간 현지작전이 요구되는 임무의 중요성을 중심으로 판단할 필요가 있다.

다만 Table 3의 시간적 이점이 곧바로 임무성공률이나 생존성의 향상을 의미하지는 않는다. 실제 작전적 우위로 이어지려면 제6장에서 검토한 저속음 추진체계와 정비·인력 기반이 함께 확보되어야 한다.

5. 민감도 분석 및 연구의 한계

5.1 민감도 분석조건

민감도 분석은 주요 입력변수의 변화가 제4장에서 산출한 운용시간 및 스노클 노출에 미치는 영향을 확인하기 위해, 원거리 조건인 편도 3,000 NM 시나리오를 기준으로 수행하였다. 각 변수에는 하한조건, 기준조건 및 상한조건을 설정하였으며, 개별 변수의 영향을 구분하기 위해 분석 대상 변수만 하한값 또는 상한값으로 변경하고, 나머지 변수는 기준값으로 유지하였으며, 결과는 Table 4에 제시하였다. 이 분석은 제3장에서 정량변수로 반영한 추진체계별 운용조건의 불확실성을 다룬다.

재래식 잠수함과 원자력추진 잠수함의 이동속력은 각각 8–10 kts와 15–25 kts로 설정하였다[10,11]. 전체 임무기간은 40일, 50일 및 70일로 구분하였다. 50일은 제4장과 동일한 기준 임무기간이며, 40일은 기준보다 짧은 임무에서 이동시간의 비중이 증가하는 영향을 확인하기 위한 하한조건으로 설정하였다. 70일은 쉬프랑급의 공개 항해 자립기간을 반영한 상한조건이다[10]. 이동·초계단계 스노클비는 각각 20–30%와 7–10%, AIP 사용 가능기간은 10일, 15일 및 20일로 구분하였다.

Table 4. Sensitivity results for the principal mission-scenario variables*

Sensitivity variable	Lower-bound condition	Baseline condition	Upper-bound condition
Conventional SSK transit speed	8 kts: 18.75 days on station, 9.41 days snorkeling	9 kts: 22.22 days on station, 8.83 days snorkeling	10 kts: 25.00 days on station, 8.38 days snorkeling
SSN transit speed	15 kts: 33.33 days on station	20 kts: 37.50 days on station	25 kts: 40.00 days on station
Total mission duration	40 days: 12.22 days on station for SSK; 27.50 days for SSN	50 days: 22.22 days on station for SSK; 37.50 days for SSN	70 days: 42.22 days on station for SSK; 57.50 days for SSN
Transit/patrol indiscretion ratio	20%/7%: 7.11 days snorkeling	25%/8.5%: 8.83 days snorkeling	30%/10%: 10.56 days snorkeling
Available AIP duration	10 days: 7.98 days snorkeling	15 days: 7.56 days snorkeling	20 days: 7.13 days snorkeling

*Unless the total mission duration is varied, the analysis assumes a 50-day mission and a one-way transit distance of 3,000 NM.

5.2 이동속력과 임무기간의 영향

재래식 잠수함의 이동속력을 8 kts에서 10 kts로 변화시키면 왕복 전개시간은 31.25일에서 25.00일로 감소하고, 현지 작전시간은 18.75일에서 25.00일로 증가하였다. 이동속력이 증가하면 스노클링 비용은 이동단계의 비중도 감소하므로 누적 스노클링 시간은 9.41일에서 8.38일로 줄어들었다.

원자력추진 잠수함의 이동속력을 15–25 kts로 변화시키면 현지 작전시간은 33.33–40.00일로 산출되었다. 가장 보수적인 조건인 원자력추진 잠수함 15 kts와 재래식 잠수함 10 kts를 비교하더라도 현지 작전시간은 각각 33.33일과 25.00일로, 원자력추진 잠수함의 작전시간이 8.33일 더 길었다. 반대로 원자력추진 잠수함 25 kts와 재래식 잠수함 8 kts를 비교하면 그 차이는 21.25일로 확대된다.

따라서 이동속력의 불확실성은 정량적 차이의 크기에는 영향을 주지만, 편도 3,000 NM의 원거리 임무에서 원자력추진 잠수함이 더 긴 현지 작전시간을 확보한다는 결과 자체를 바꾸지는 않았다. 이는 원자력추진체계의 효과가 공개되지 않은 특정 순항속력 하나에만 의존하지 않음을 보여준다.

전체 임무기간을 40일, 50일 및 70일로 변화시켜도 동일한 속도조건에서는 두 추진체계 간 전개시간 차이가 일정하므로, 현지 작전시간의 절대 차이는 모두 15.28일로 유지되었다. 다만 재래식 잠수함의 현지 작전시간에 대한 상대적 증가율은 40일 임무에서 125.0%, 50일 임무에서 68.8%, 70일 임무에서 36.2%로 감소하였다.

이는 전체 임무기간이 짧을수록 이동시간 단축의 상대적 가치가 커진다는 것을 의미한다. 반대로 장기간 임무에서는 두 추진체계 모두 현지 작전시간이 증가하므로, 원자력추진체계의 절대적 시간 이점은 유지되지만 상대적 차이는 작아진다.

5.3 스노클링비와 AIP 운용기간의 영향

일반 디젤-전기 추진 잠수함의 누적 스노클링 시간은 적용한 스노클링비에 민감하게 반응하였다. 이동단계와 초계단계에 각각 공개범위의 하한인 20%와 7%를 적용하면 누적 스노클링 시간은 7.11일이었다. 기준조건인 25%와 8.5%에서는 8.83일, 상한인 30%와 10%에서는 10.56일로 증가하였다.

따라서 스노클링비의 불확실성을 고려하면 편도 3,000 NM, 50일 임무에서 일반 디젤-전기 추진 잠수함의 누적 스노클링 시간은 약 7.1–10.6일의 범위를 갖는다. 이는 기준값 8.83일을 단일한 실제 운용값으로 해석해서는 안 되며, 속도, 함내 전력부하, 충전지 상태 및 충전전략에 따라 달라질 수 있는 대표값으로 보아야 함을 보여준다.

AIP 사용 가능기간을 10일에서 20일로 늘리면 AIP·LIB 적용 잠수함의 누적 스노클링 시간은 7.98일에서 7.13일로 감소하였다. 일반 디젤-전기 추진 잠수함의 기준값 8.83일과 비교하면 감소량은 각각 0.85일, 1.28일 및 1.70일이며, 감소율은 약 9.6%, 14.4% 및 19.2%이다.

AIP 사용기간이 5일 증가할 때마다 누적 스노클링 시간이 약 0.43일 감소한 것은 초계단계 스노클링

8.5%를 적용했기 때문이다. 즉, 본 모형에서 AIP의 정량적 효과는 AIP 운용기간과 대체되는 초계단계의 스노클비에 의해 결정된다. 다만 AIP 운용기간이 증가하더라도 이동단계의 스노클링 시간은 변하지 않는다. 본 연구는 AIP를 출력요구가 낮은 현지 초계에 우선 사용하도록 설정했기 때문이다. 이에 따라 원거리 전개거리가 길어질수록 이동단계의 스노클 노출이 전체 누적시간에서 차지하는 비중이 커지고, AIP 운용기간 연장만으로 줄일 수 있는 스노클링 시간에는 한계가 나타난다. LIB는 고출력 기동과 충전성능을 향상할 수 있으나, 이러한 효과를 평균 이동속력 또는 스노클비 감소량으로 환산할 공개자료가 부족하여 본 정량모형에는 직접 반영하지 않았다. 따라서 이 결과는 LIB의 추가 효과를 포함하지 않은 보수적 추정이다.

5.4 결과의 강건성과 해석

개별 속력변수의 민감도 분석에서 두 추진체계 간 현지 작전시간 차이는 11.11–18.75일로 나타났으며, 양 추진체계의 속력범위를 교차 적용한 경계조건 비교에서는 8.33–21.25일의 범위를 보였다. 따라서 기준조건에서 산출된 15.28일은 고정된 성능값이 아니라 설정한 속력조건에 따른 시나리오 결과로 해석해야 한다. 누적 스노클링 시간도 스노클비와 AIP 운용기간에 따라 변동했으나, AIP는 현지 초계의 스노클 노출을 줄이고 원자력추진은 전개시간과 추진 목적 스노클링 제약을 함께 완화한다는 해석은 유지되었다. 이러한 민감도 분석은 이동속력, 임무기간 및 스노클 운용조건에 따른 정량결과의 변동범위를 보여주지만, 제6장에서 검토하는 저소음성과 기술·지원체계의 확보 가능성까지 검증하는 것은 아니다. 이들 조건은 제4장의 시간적 이점을 실제 작전효과로 전환하기 위한 전제조건으로 해석되어야 한다.

5.5 연구의 한계

본 연구는 공개자료에 기반한 시나리오 분석으로, 적용한 이동속력, 스노클비 및 AIP 운용기간은 특정 함급의 실제 운용값이 아니다. 실제 운용값은 임무긴급도, 위협수준, 해양환경, 축전지 상태, 함내 전력부하 및 운용전술에 따라 달라질 수 있다. 또한 AIP 체계

는 사용 가능기간으로 단순화하였으며, LIB의 충전성능과 고출력 기동효과는 공개자료 부족으로 정량모형에 직접 반영하지 못하였다. 그리고 분석 대상은 단일 잠수함의 1회 임무에서 발생하는 운용시간과 스노클 노출로서, 수중방사소음, 실제 피탐확률과 임무성공률, 함대 가용도, 정비주기, 획득·수명주기비용, 원자로 안전, 핵연료 관리 및 국제적 제도조건은 분석범위에 포함하지 않았다. 따라서 본 결과는 특정 시나리오하에서 추진체계의 물리적 한계가 전술적 운용에 미치는 영향을 제한적으로 도출한 것이며, 실제 작전에서의 종합적인 비용·효과성을 대변하지는 않는다.

6. 쉬프랑급 사례를 통한 정량분석 결과의 기술적 해석

제4장과 제5장의 분석은 원자력추진이 원거리 전개시간을 줄이고 현지 작전시간을 확대할 수 있음을 보여준다. 그러나 이러한 시간적 이점이 실제 작전효과로 이어지려면 원자로의 지속적인 출력뿐 아니라 저소음 추진, 원자로·선체 통합 및 안정적인 정비지원 기반이 함께 확보되어야 한다. 본 장에서는 이러한 기술적 조건을 프랑스 쉬프랑급 사례를 통해 검토한다.

6.1 사례 선정과 분석 범위

프랑스는 원자로, 선체 및 추진체계를 자체 개발하고, 연구개발부터 건조·운용·정비에 이르는 원자력추진 잠수함 산업기반을 구축해 왔다. 특히 저농축 우라늄 기반 추진체계를 중형급 SSN에 적용해 왔다는 점에서 한국형 개발에 참고할 가치가 있다[7]. 본 장에서는 쉬프랑급의 제원을 직접 적용하기보다, 원자력추진의 지속적인 고출력과 스노클 독립성이 저소음 추진, 체계통합 및 정비지원 기반과 결합되는 방식을 검토한다.

프랑스의 Barracuda 사업은 기존 루비급을 대체하는 쉬프랑급 SSN 6척을 건조하는 사업으로, 2026년에는 4번함 De Grasse가 인도되었다[8]. 쉬프랑급은 수중배수량 약 5,200 t, 전장 99 m, 승조원 65명 규모이며[14], 최대 수중속력은 25 kts, 항해 자립기간은 70일이다[10]. 다만 25 kts는 지속 순항속력을 의미하지 않고, 70일도 식량과 승조원 운용 등을 포함한 값이므로 본 연구에서는 각각 이동속력과 임무

기간의 민감도 분석 상한으로만 활용하였다.

6.2 원자로 및 추진체계의 특성

프랑스는 상용 원자력 산업의 핵연료 공급체계와 연계할 수 있는 LEU 기반의 해군 원자로를 운용해 왔다[7]. LEU는 핵 비확산 측면에서 고농축 우라늄보다 상대적으로 수용성이 높지만, 동일한 출력과 노심 수명을 확보하기 위해서는 핵연료 이용률, 출력밀도, 노심 크기 및 재장전주기를 함께 최적화해야 한다. 따라서 LEU 사용 여부만으로 원자로의 크기나 노심수명이 결정되는 것은 아니다.

Naval Group은 쉬프랑급 원자로를 르 트리옹팡급 전략 원자력추진 잠수함과 샤를 드골 원자력추진 항공모함에 적용된 기술에서 파생된 가압수형 원자로로 설명한다[14]. 이는 약 150 MWt급 K15 계열로 추정되지만, 공식 명칭과 열출력은 공개되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 K15 원자로의 탑재 여부와 열출력을 확정하지 않았으며, 공개되지 않은 원자로 출력도 제2장의 입력변수에서 제외하였다.

쉬프랑급은 원자로에서 생산된 에너지를 기계적 추진과 전기추진에 활용하는 하이브리드 추진구조를 적용하며, 터빈발전기와 전동기를 통해 전기추진을 병행한다[8,14]. 이러한 구조는 운항조건에 따라 추진동력 전달방식을 선택하고, 저속 운항에서는 전기추진을 활용하여 기계적 소음과 진동을 관리하는데 유리하다. 원자력추진 잠수함의 은밀성은 원자로의 존재 자체가 아니라 원자로 냉각계통, 터빈·발전기, 추진전동기, 축계 및 추진기의 통합설계에 의해 좌우된다. 프랑스 원자력청은 함정용 원자로의 주요 설계조건으로 소형화, 신속한 출력변화, 높은 가동률, 안전성과 함께 음향신호 개선을 제시하고 있다[15]. 따라서 원자로가 지속적인 고출력을 제공하더라도 냉각계통과 추진계통에서 발생하는 진동·소음을 충분히 억제하지 못하면 고속 기동이 오히려 피탐 가능성을 증가시킬 수 있다.

또한, 쉬프랑급에는 덕트 내부에 로터와 스테이터를 배치한 펌프제트 추진기(pump-jet propulsor)가 적용되었으며, Naval Group의 건조자료에서도 쉬프랑함에 펌프제트 모듈이 탑재된 사실이 확인된다[16]. 펌프제트는 일반적으로 공동현상 개시를 지연시키고 수중 방사소음을 줄이는 데 유리하지만[17],

실제 성능은 추진기 형상과 선체 후류의 통합설계에 좌우되므로 본 연구에서는 별도의 정량변수로 사용하지 않았다.

6.3 한국형 개발에 대한 시사점

한국형 원자로의 설계는 핵연료 농축도보다 목표 임무기간, 지속속력, 선체 크기와 정비주기에서 출발해야 한다. 핵연료 교체를 최소화하는 것은 필요하지만, 지나치게 긴 노심수명은 노심과 차폐구조의 크기 및 중량을 증가시킬 수 있다. 반대로 지나친 소형화는 재장전주기를 단축하여 가동률과 경제성을 저하시킬 수 있다.

원자로와 추진·음향체계도 분리하여 개발하기 어렵다. 원자로의 지속적인 출력은 원거리 전개와 장시간 고속 기동을 가능하게 하지만, 이러한 능력을 실제 작전적 우위로 전환하려면 저소음 냉각계통, 전기추진, 진동절연, 축계 및 추진기 설계가 함께 확보되어야 한다. 따라서 한국형 개발에서는 원자로 출력이나 최대속력보다 임무속력별 수중 방사소음과 지속 운항능력을 핵심 성능지표로 설정할 필요가 있다.

이러한 체계를 안정적으로 운용하려면 전 수명주기 산업기반도 함께 구축해야 한다. 프랑스에서는 CEA가 원자로와 핵연료 연구를 주도하고, TechnicAtome이 원자로와 노심의 설계·제작을, Naval Group이 함정 체계통합과 원자로 압력계통의 제작 및 운용유지를 담당한다[15]. 한국형 SSN 사업에서도 원자로 개발, 함정 설계, 핵연료 관리, 정비시설, 방사선 안전, 시험평가 및 전문인력 양성을 분리된 과제로 추진하기보다 하나의 수명주기 체계로 통합해야 한다.

프랑스 이외의 원자력추진 잠수함 후발국들의 경우 국내 개발과 국제협력을 병행하고 있다. 인도는 러시아 잠수함의 임차 운용을, 브라질은 프랑스의 비핵 부문 설계지원과 기술 이전을, 호주는 AUKUS를 통한 버지니아급 도입과 SSN-AUKUS 공동개발을 활용하고 있으며[18-20], 이는 한국도 국내 개발 원칙을 유지하되 운용경험·인력양성·특정 비핵 기술 분야에서 선택적 국제협력을 검토할 필요가 있음을 시사한다.

따라서 쉬프랑급은 한국형 잠수함의 단순한 제원상 기준이라기보다, LEU 기반 원자로와 저소음 추진체계 및 전 수명주기 지원기반이 결합된 통합사례로서 의미가 있다. 제4장에서 산출한 전개시간 단축, 현

지 작전시간 확대 및 스노클 노출 감소의 효과도 단순한 플랫폼 확보만으로 구현되는 것이 아니라, 이러한 핵심기술이 유기적으로 통합되고 지원기반이 함께 구축될 때 실질적인 작전효과로 이어질 수 있다.

7. 결론

본 연구는 일반 디젤-전기 추진 잠수함, AIP·LIB 적용 잠수함 및 원자력추진 잠수함의 전개시간, 현지 작전시간 및 누적 스노클링 시간을 공개자료 기반 시나리오로 비교하고, 프랑스 쉬프랑급 사례를 통해 LEU 기반 원자로와 기술·지원체계가 작전적 효용으로 연결되기 위한 조건을 검토하였다.

분석 결과, AIP는 저속 초계 중 스노클링 시간을 감소시켰으나, 원거리 전개 시 이동속력의 한계로 인한 시간적 제약은 해소하지 못하였다. 반면 원자력추진 잠수함은 상대적으로 높은 이동속력과 추진 목적의 스노클링 제거를 통해 전개시간을 단축하고 현지 작전시간을 확대하였으며, 이러한 이점은 전개거리가 증가할수록 커졌다. 본 연구는 이와 같은 추진체계별 차이를 일 단위의 운용시간으로 정량화하여 전개거리와 임무기간에 따른 작전 가용성의 변화범위를 구체적으로 제시하였다. 또한 쉬프랑급 사례는 원자력 추진의 작전적 효과가 단순한 원자로 탑재를 넘어 저소음 냉각·추진체계, 전기추진, 펌프제트 및 전 수명주기 지원체계의 통합을 통해 구현됨을 시사한다.

따라서 한국형 원자력추진 잠수함의 도입 필요성은 재래식 잠수함에 대한 일률적인 우위보다 원거리 신속전개와 장기 현지작전의 전략적 가치를 기준으로 판단할 필요가 있다. 아울러 개발단계부터 원자로, 추진·음향체계, 핵연료 관리 및 정비 기반을 전 수명주기 관점에서 함께 확보해야 한다. 본 연구는 공개자료 기반의 단순화된 시나리오 분석이라는 한계가 있으므로, 향후에는 한반도 주변 해역의 위협환경과 함대 가용도를 반영한 구체적인 작전 모의 및 비용·효과 분석이 필요하다.

참고문헌

- [1] 국방부, '2030년대 중반 '핵추진잠수함' 1번함 진수...국방부, 기본계획 발표,' 대한민국 정책브리핑, 2026.05.26.
<https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=1489>

65136 (accessed 2026.07.27.)

- [2] 강기식, 우승민, '한국형 핵추진 잠수함 도입의 기술동향 분석,' 국방과 기술, NO. 566, 2026, pp. 78-91.
- [3] Woo Young Jeon, 'Analysis of Technology Level by Component Technologies of a Submarine System and Recommendations,' Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, VOL. 27, NO. 3, 2026, pp. 169-176.
- [4] Won Dug Kim & Ji Young Kang, 'A Study for Mission-Based Requirements Analysis of Korea Nuclear-Propulsion Submarines (K-SSN),' Journal of the KNST, VOL. 7, NO. 2, 2024, pp. 130-136.
- [5] Eugenio Pacelli Lazzarotti Diniz Costa & Domício Proença Jr., 'Comparing the Effectiveness of Nuclear and Air-Independent Propulsion Submarine Fleets: A Methodology for Alternative Force Design Choices Applied to the Brazilian Case,' Estudos Internacionais, VOL. 10, NO. 2, 2022, pp. 42-58.
<https://doi.org/10.5752/P.2317-773X.2022v10n2p42-58>
- [6] Douwe Stapersma & Carel Prins, 'The Importance of Submarine Air-Independent Power for Operational Agility,' in Proceedings of the 15th International Naval Engineering Conference & Exhibition (INEC 2020), 2020.
<https://doi.org/10.24868/issn.2515-818X.2020.020>
- [7] Alain Tournyol du Clos, 'France's Choice for Naval Nuclear Propulsion: Why Low-Enriched Uranium Was Chosen,' Federation of American Scientists, 2016.12.06.
<https://fas.org/publication/frances-choice-for-naval-nuclear-propulsion-why-low-enriched-uranium-was-chosen/> (accessed 2026.07.27.)
- [8] Naval Group, Naval Group Delivers the Fourth Barracuda-Class Nuclear Attack Submarine (SSN), 2026.06.26.
<https://www.naval-group.com/en/naval-group-delivers-fourth-barracuda-class-nuclear-attack-submarine-ssn> (accessed 2026.07.27.)
- [9] 방위사업청, '조선시대 과학기술을 선도한 '장영실', 3,600톤급 잠수함으로 부활,' 2025.10.22.
<https://www.dapa.go.kr/dapa/doc/selectDoc.do?bbsSeq=326&docSeq=57611&menuSeq=3069> (accessed 2026.07.27.)
- [10] Marine Nationale, 'Sous-Marin Nucléaire d'Attaque: Rubis Versus Suffren,' Ministère des Armées.
<https://www.defense.gouv.fr/sites/default/files/marine/SNA.pdf> (accessed 2026.07.27.)
- [11] Geoff Slocombe, 'Air Independent Propulsion Is a Must for Australia's Next Submarines,' The Strategist, 2015.06.18.
<https://www.aspistrategist.org.au/air-independent-propulsion-is-a-must-for-australias-next-submarines/> (accessed 2026.07.27.)
- [12] TKMS Group, HDW Class 214 Next Generation,
<https://www.tkmsgroup.com/submarines/submarine-classes/hdw-class-214> (accessed 2026.07.27.)
- [13] N. H. D. Gartner, 'Thermal Behaviour of Lithium-Ion Batteries and the Implications on Submarine System Design,'

Master's thesis, Delft University of Technology, 2021.

<https://resolver.tudelft.nl/uuid:f102aa75-fa6a-48d2-83c9-92c9e632ff6a> (accessed 2026.07.27.)

[14] Naval Group, Naval Group Delivers the Suffren to the French Defence Procurement Agency (DGA), 2020.11.06. <https://www.naval-group.com/en/actualites/naval-group-delivers-suffren-french-defence-procurement-agency-dga> (accessed 2026.07.27.)

[15] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, 'La propulsion nucléaire: Quelques notions,' IRESNE.

<https://www.cea.fr/energies/iresne/Pages/L%27institut/Nos%20recherches/Le%20soutien%20%C3%A0%20la%20d%C3%A9fense/Notions.aspx> (accessed 2026.07.27.)

[16] DCNS, 'Rapport Financier 2016,' 2016, p. 9.

<https://www.naval-group.com/sites/default/files/2020-09/dcn-s-rapport-financier-2016-FR.pdf> (accessed 2026.07.27.).

[17] Xiuchang Huang, Shuaikang Shi, Zhiwei Su, Wanghao Tang, & Hongxing Hua, 'Reducing Underwater Radiated Noise

of a SUBOFF Model Propelled by a Pump-Jet Without Tip Clearance: Numerical Simulation,' Ocean Engineering, VOL. 243, 2022, Article 110277.

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110277>

[18] Ministry of Defence, Government of India, 'Antony Commissions Nuclear Submarine 'INS Chakra' into Indian Navy,' Press Information Bureau, April 2012.

<https://www.pib.gov.in/newsite/erecontent.aspx?relid=82089> (accessed 2026.07.27.).

[19] PROSUB (Programa de Desenvolvimento de Submarinos), Transferência de Tecnologia, 2015.12.17. updated March 2022.

<https://www.marinha.mil.br/prosub/transferencia-de-tecnologia> (accessed 2026.07.27.)

[20] GOV.UK, 'Joint Leaders Statement on AUKUS: 13 March 2023,' 2023.03.13.

<https://www.gov.uk/government/publications/joint-leaders-statement-on-aukus-13-march-2023/joint-leaders-statement-on-aukus-13-march-2023> (accessed 2026.07.27.).