



Received: 2026/08/26
Revised: 2026/09/07
Accepted: 2026/09/15
Published: 2026/09/30

***Corresponding Author:**

Jun Jeong

20, Daewangpangyo-ro 851beon-gil, Sujeong-gu,
Seongnam-si, Gyeonggi-do, 13449, Republic of Korea
Fax: +82-31-288-9123
E-mail: jeongjun@ligdha.com

Abstract

본 연구는 반복 수심 변화 환경에서 운용되는 수중 센서 모듈 접속부의 수밀 고장 메커니즘과 신뢰도 영향성을 분석하였다. 접속부를 커넥터 체결부, 케이블 인입부, O-ring/실링부, 몰딩재 경계면 및 내부 전기접점부로 구분하고, 반복 수압, 유속·진동, 케이블 굽힘, 커넥터 미세 풀림 및 몰딩재 열화가 수분 침투 경로 형성에 미치는 영향을 검토하였다. 분석 결과, 접속부 수밀 고장은 단일 요인보다 구조·환경 하중과 재료 열화가 복합적으로 작용하여 발생할 가능성이 높으며, 수분 침투 이후에는 전기적 신뢰도 저하로 이어질 수 있다. 특히 커넥터 미세 풀림은 실링 압축률 저하를 통해 즉각적인 수밀 상실을 유발할 수 있는 핵심 고장유형으로 판단된다. 본 연구는 정수압 및 유속 항력의 공학적 기본식을 분석 배경으로 활용하고, 향후 반복 가압·감압 시험과 FMEA 기반 정량적 우선순위 평가 방향을 제시하였다.

This study analyzes watertightness failure modes and their effects on the reliability of underwater sensor module interfaces under repeated depth-cycling conditions. The scope of the interface analysis is considered in terms of connector fastening, cable inlet, O-ring/sealing section, molding-material interfaces, and internal electrical interfaces. The effects of cyclic hydrostatic pressure, flow-induced vibration, cable bending, connector micro-loosening, and molding degradation are reviewed. The analysis indicates that watertightness failure is likely to result from the combined effects of structural and environmental loading and material degradation rather than a single factor, while subsequent moisture ingress may lead to electrical reliability degradation. In particular, connector micro-loosening may immediately reduce sealing compression and cause rapid loss of watertightness integrity. This study uses basic engineering relationships for hydrostatic pressure and drag as analytical framework and suggests future cyclic pressure testing and FMEA-based quantification.

Keywords

수중 센서 모듈(Underwater Sensor Module), 수밀 고장 메커니즘(Watertightness Failure Mechanism), 반복 수심변화(Repeated Depth Cycling), 커넥터 미세 풀림(Connector Micro-Loosening), 신뢰도(Reliability)

반복 수심 변화 환경에서 수중 센서 모듈 접속부의 수밀 고장 메커니즘 및 신뢰도 영향 분석

Analysis of Watertightness Failure Mechanisms and Their Effects on the Reliability of Underwater Sensor Module Interfaces Under Repeated Depth Cycling

정준^{1*}, 이광민², 박문성², 송초아³, 신수민³, 강민수³

¹LIG Defense&Aerospace 미래전장IPS연구소 수석연구원

²LIG Defense&Aerospace 미래전장IPS연구소 선임연구원

³LIG Defense&Aerospace 미래전장IPS연구소 연구원

Jun Jeong^{1*}, Gwang-Min Lee², Moon-Sung Park², Cho-a Song³, Su-Min Shin³, Min-Su Kang³

¹Chief research engineer, Future Warfare Integrated Product Support R&D Lab, LIG Defense&Aerospace

^{2,3}Research engineer, Future Warfare Integrated Product Support R&D Lab, LIG Defense&Aerospace

1. 서론

1.1 연구 배경

수중 센서 모듈은 해양 환경에서 수압, 유속, 진동 및 온도 변화에 지속적으로 노출되므로, 센서부와 케이블 또는 커넥터가 결합되는 접속부의 수밀성은 체계 신뢰도 확보를 위한 핵심 설계 요소이다. 접속부는 센서 몰딩부, 케이블 인입부, 커넥터 체결부, O-ring/실링부 및 내부 전기접점부가 결합된 영역으로, 서로 다른 재료와 구조가 만나는 경계부라는 점에서 고장 취약성이 높다. 기존의 수밀 평가는 특정 수심 또는 정적 침수 조건을 중심으로 수행되는 경우가 많지만, 실제 운용 환경에서는 반복적인 수심 변화에 따른 압력 증감과 유속·진동, 케이블 굽힘 및 비틀림하중이 복합적으로 작용할 수 있다. 이러한 환경은 실링 상태와 체결 상태를 변화시켜 수분 침투 경로 형성으로 이어질 가능성이 있다.

1.2 연구 목적 및 범위

본 연구의 목적은 반복 수심 변화 환경에서 수중 센서 모듈 접속부에 발생 가능한 수밀 고장유형을 도출하고, 그 신뢰도 영향성을 구조·재료·환경·전기 신뢰도 관점에서 분석하는 것이다. 본 연구는 실험 데이터 기반의 수명예측 모델을 제안하는 것이 아니라, 확보된 선행연구와 공학적 기본식을 바탕으로 수밀 취약성 발생 메커니즘을 체계화하는 문헌 기반 분석 연구로 수행하였다.

- 분석대상: 수중 센서 모듈 접속부(커넥터 체결부, 케이블 인입부, O-ring/실링부, 몰딩재 계면, 내부 전기계면)

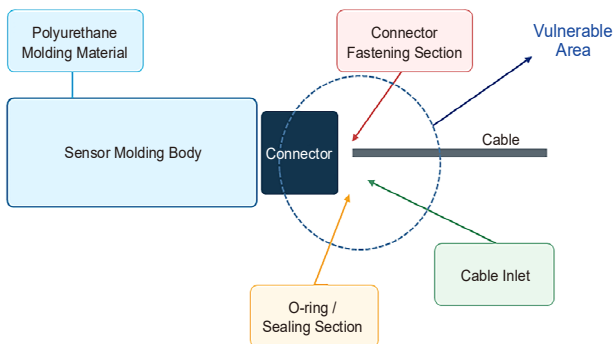


Fig. 1. Analysis scope of the underwater sensor module interface

- 주요 운용환경: 0~xxx m 수준의 반복 수심 변화, 유속·진동, 케이블 굽힘, 장기 해수 노출

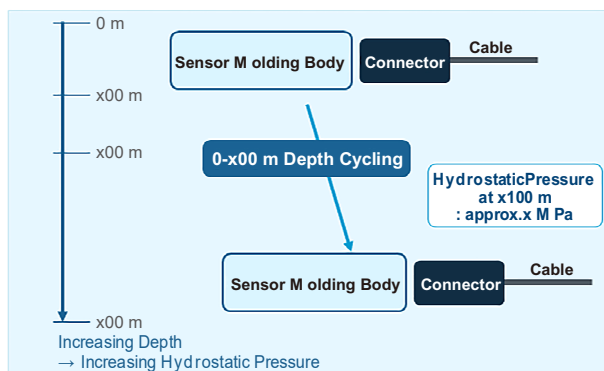


Fig. 2. Conceptual operating environment of the underwater sensor module under repeated depth cycling

- 주요 고장요인: 커넥터 미세 풀림, 실링부 접촉압 저하, 몰딩재 열화, 계면 박리, 수분 침투, 절

연저항 저하

- 제외범위: 실제 제품의 상세 치수, 특정 설계의 유한요소해석, 시험 기반 고장확률 산정 및 수명예측

2. 선행연구 고찰

수중 센서 모듈 접속부의 수밀 고장은 단순 누수 문제가 아니라, 재료 열화, 실링 구조, 체결부 거동, 계면 절연 성능 및 유속 하중이 결합되는 복합 고장이다. 본 장에서는 확보된 선행연구와 기술문헌을 중심으로 본 연구의 분석 근거를 정리하였다.

2.1 폴리우레탄 몰딩재 및 수분 침투 연구

Shin and Ahn은 폴리우레탄 엘라스토머의 수중 음향 특성을 분석하여 폴리우레탄 계열 재료가 수중 음향 환경에서 기능성 재료로 활용될 수 있음을 제시하였다[1]. Wang 등은 폴리우레탄 재료의 수분 이동 메커니즘과 성능 평가 방법을 종합적으로 정리하였으며, 수분 흡수와 이동이 폴리우레탄의 장기 성능 변화에 영향을 줄 수 있음을 검토하였다[2]. Josyula 등은 수분이 가교 폴리우레탄 접착재의 기계거동에 미치는 영향을 모델링 관점에서 분석하였고[3], Taourit 등은 chain scission 과정에서 폴리우레탄 네트워크 구조와 최종 기계적 특성의 관계를 제시하였다[4]. 이들 연구는 몰딩재 수분 흡수와 재료 물성 및 계면 특성의 변화가 접속부 수밀 취약성에 영향을 줄 가능성을 뒷받침한다.

2.2 수중 실링 및 커넥터 신뢰도 연구

Tran and Le는 수중 관측장치의 설계 및 제작에서 O-ring을 활용한 수밀 방안을 제시하고, 해수 환경에서 압력, 재료 선정, 조립 품질이 실링 성능에 중요함을 설명하였다[5]. An 등은 해저 클램프 커넥터를 대상으로 유한요소해석과 다중응답표면법을 결합하여 실링 고장 및 항복 고장 기준에 따른 신뢰도 분석을 수행하였다[6]. 비록 대상 구조는 본 연구의 수중 센서 모듈 접속부와 다르지만, 수중 접속 구조에서 실링 성능과 구조 신뢰도를 함께 고려해야 한다는 점에서 참고 가치가 있다.

Table 1. Previous studies and technical references related to the present study

No.	Study / Reference	Main Findings and Application to This Study
1	Study on the Underwater Acoustic Properties of Polyurethane Elastomer	Underwater acoustic properties of polyurethane elastomer → Basis for acoustic applicability of molding/protective materials
2	Water Transport Mechanism and Performance Evaluation in Polyurethane Materials: A State-of-the-Art Review	Water transport mechanisms and performance changes in polyurethane → Basis for moisture ingress and long-term performance analysis
3	Modelling the Influence of Moisture on the Mechanical Behaviour of Crosslinked Polyurethane Adhesives	Moisture-dependent mechanical behavior of crosslinked PU adhesives → Basis for interfacial property and adhesion assessment
4	Relationship Between Network Structure and Ultimate Properties in Polyurethane During a Chain Scission Process	Network structure and ultimate-property changes during chain scission → Basis for material-property changes associated with degradation
5	Research on a Sealing Solution Using O-Rings in the Design and Manufacture of Underwater Observation Devices	O-ring-based sealing design for underwater observation devices → Basis for watertight sealing and pressure-condition assessment
6	Analysis of the Reliability of Subsea Clamp Connector Based on Multiple Response Surface Methodology	Sealing and structural reliability of subsea clamp connector → Basis for integrated sealing/structural reliability assessment
7	Dielectric Strength of Polymeric Solid-Solid Interfaces under Dry-Mate and Wet-Mate Conditions	Factors affecting dielectric strength of solid-solid interfaces → Basis for dielectric degradation after moisture ingress
8	Fastener Design Manual	Fastener design, torque, locking, fatigue and corrosion considerations → Basis for connector fastening and micro-loosening assessment
9	IEC 60812:2018, Failure Modes and Effects Analysis (FMEA and FMECA)	Methodology for planning FMEA and identifying failure modes, effects, causes, and relative importance → Methodological basis for classifying connector-interface failure modes and qualitatively prioritizing key vulnerabilities

2.3 체결부 설계 및 전기적 경계면 연구

Barrett의 NASA Fastener Design Manual은 체결부 설계와 체결상태 유지를 위한 주요 고려사항을 제시하고 있다[8]. 이러한 설계 관점은 반복 하중이 작용하는 수중 센서 모듈의 커넥터 체결상태와 미세 풀림 가능성을 검토하는 데 참고할 수 있다. 또한 Kantar는 dry-mate 및 wet-mate 조건에서 고체-고체 절연계면의 절연성능에 영향을 미치는 접촉조건과 수분의 영향을 검토하였다[7]. 이는 수분 침투 이후 내부 전기계면의 절연성능 저하 가능성을 분석하는 근거가 된다.

2.4 선행연구의 한계 및 본 연구의 차별성

선행연구들은 폴리우레탄 재료의 수분 이동 및 물성 변화, 수중 O-ring 실링, subsea connector 신뢰도, 체결부 설계 및 전기계면 절연 성능을 각각 다루었다. 그러나 본 연구에서 검토한 선행연구 범위에서는 반복 수심 변화 환경의 수중 센서 모듈 접속부를

대상으로 이들 요인을 통합하여 수밀 고장유형과 신뢰도 영향성을 분석한 사례가 제한적이었다. 본 연구는 이러한 요소를 반복 수심 변화 환경에서의 접속부 수밀 고장 메커니즘이라는 관점으로 통합하고, 커넥터 미세 풀림을 직접적인 수분 침투 경로를 형성할 수 있는 주요 고장유형으로 고려한다는 점에서 차별성이 있다.

3. 수중 센서 모듈 접속부 구조 및 운용환경

3.1 접속부 구성요소

본 연구에서 접속부는 센서 모듈과 케이블 또는 커넥터가 결합되는 영역을 의미하며, 별크헤드 리셉터클, O-ring 실링부, 체결 너트, 케이블 플러그, 리테이닝 링, 케이블 몰딩부, 케이블 및 내부 전기접점으로 구분하였다. 별크헤드 리셉터클은 전기접점을 지지하고, O-ring 실링부는 접촉면의 해수 침투를 차단한다. 체결 너트는 리셉터클과의 결합상태를 유지하며, 리테이닝 링(retaining ring)은 체결 너트의 위치 유

지와 이탈 방지 역할을 한다. 케이블 몰딩부는 굽힘·인장 하중의 직접 전달을 완화하며, 내부 전기접점은 핀·소켓 접촉을 통해 신호와 전원을 전달한다. 수분 침투 시에는 절연저항 저하와 접점 부식이 발생할 수 있다. Fig. 3는 벌크헤드 리셉터클과 케이블 플러그의 구조 정보를 바탕으로 접속부 구성을 일반화해 도시한 것이다.

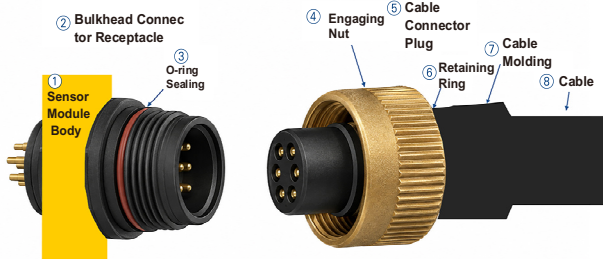


Fig. 3. Connector interface configuration of the underwater sensor module

접속부는 벌크헤드 리셉터클과 케이블측 플러그가 체결 너트를 통해 결합되는 구조이다. 리셉터클과 플러그의 접속부에는 O-ring 실링부가 적용되어 해수 침투를 방지하며, 케이블측 몰딩부는 케이블 굽힘 및 인장 하중이 접속부에 직접 전달되는 것을 완화하는 역할을 한다. 이러한 실제 커넥터 형상을 기준으로 각 구성요소의 기능과 수밀 성능에 영향을 줄 수 있는

주요 취약요인을 Table 2에 정리하였다.

3.2 반복 수심 변화 환경과 공학적 기본식

본 연구는 새로운 수밀 예측모델을 제안하지 않는다. 대신 반복 수심 변화에 따른 압력 변화와 유속 하중을 설명하기 위해 공학적으로 널리 사용되는 기본식만을 분석 배경으로 활용하였다. 이러한 식은 고장 확률을 산정하기 위한 것이 아니라, 접속부에 작용하는 압력 및 유속 하중의 변화를 논리적으로 설명하기 위한 것이다. 수심 변화에 따른 절대압력은 정수압 관계식으로 표현할 수 있다.

$$P(h) = P_0 + \rho_w g h \quad (1)$$

여기서 $P(h)$ 는 수심 h 에서의 절대압력, P_0 는 대기압, ρ_w 는 해수 밀도, g 는 중력가속도이다.

반복 수심 변화에 따른 압력 변동폭은 다음과 같다.

$$\Delta P = \rho_w g \Delta h \quad (2)$$

예를 들어 해수 밀도를 1025 kg/m^3 로 가정하면, 수심 $0 \sim x00 \text{ m}$ 반복 변화는 약 $x \text{ MPa}$ 수준의 게이지

Table 2. Actual connector geometry-based interface configuration and key vulnerabilities

Component	Function	Key Vulnerabilities
Sensor Module Body	Supports the bulkhead receptacle and transfers external loads to the sensor module structure	Molding cracking, metal-to-molding interfacial debonding, localized load concentration
Bulkhead Connector Receptacle	Mounted on the sensor-module side, mates with the cable plug, and supports electrical contacts	Damage to mating surfaces, load concentration at the fixed region, leakage risk due to reduced sealing compression
O-ring Sealing	Compressed at receptacle-plug interfaces to prevent seawater ingress	Compression set, surface damage, assembly defects, reduced compression ratio
Engaging Nut	Maintains engagement between the cable plug and bulkhead receptacle	Micro-loosening from vibration/cable loads, loss of clamping force, reduced sealing compression
Cable Connector Plug Body	Supports contacts and insulation and provides electrical/mechanical mating with the receptacle	Housing or mating-surface damage, contact misalignment, sealing-surface degradation
Retaining Ring	Retains the engaging nut and prevents axial displacement	Deformation, damage, or loss of retention can reduce connection stability
Cable Molding	Seals the cable termination and relieves bending/tensile loads	Cracking or interfacial debonding from repeated bending, degradation of strain-relief function
Cable	Transmits signals/power and can transfer external loads to the interface	Repeated bending/twisting, jacket damage, moisture migration along the cable

압력 변동을 발생시킬 수 있다. 이 압력 변동은 O-ring/실링부의 압축·이완, 커넥터 체결부 하중 변화 및 몰딩재 계면 응력 변화의 하중으로 작용한다.

유속에 의해 수중 센서 모듈과 케이블에 작용하는 외력은 항력식으로 개념화할 수 있다.

$$F_D = 1/2 \rho_w C_D A v^2 \quad (3)$$

여기서 F_D 는 유속에 의한 항력, C_D 는 항력계수, A 는 투영면적, v 는 유속이다. 본 식은 실제 접속부 고장을 직접 계산하기 위한 식이 아니라, 유속이 센서 본체 및 케이블에 외력을 부여하고 그 결과 접속부에 반복 굽힘·진동 하중이 전달될 수 있음을 설명하는 기초 식으로 사용하였다.

4. 수밀 취약성 분석 프레임

4.1 구조적 관점

구조적 관점에서는 접속부 형상, 체결 구조, 실링 구조 및 하중 전달 경로를 중심으로 수밀 취약성을 분석한다. 커넥터 체결부가 미세하게 풀릴 경우 O-ring 또는 실링재의 압축률과 접촉압이 감소하고, 접촉면 사이에 국부 틈이 형성될 수 있다. 이 경우 수밀 성능은 장기적인 재료 열화와 달리 비교적 빠르게 저하될 수 있다. 또한 케이블 인입부는 유연한 케이블과 강성이 큰 센서 본체가 만나는 형상/구조 변화부이므로 반복 굽힘, 인장 및 비틀림 하중이 집중되기 쉽다.

4.2 재료적 관점

재료적 관점에서는 폴리우레탄 몰딩재, O-ring, 케이블 피복 및 금속 하우징 간의 물성 차이와 장기 열화를 고려한다. 폴리우레탄 재료는 수분의 이동 및 흡수에 따라 물성과 계면 특성이 변화할 수 있으며 [2-4], 이러한 변화는 몰딩재 균열이나 계면 접착력 저하를 통해 수밀 성능에 영향을 줄 가능성이 있다. 또한 O-ring 또는 실링재의 변형이나 표면 손상은 실링 접촉압 저하로 연결될 수 있다. 따라서 몰딩재의 수분 흡수와 물성 변화는 향후 침지시험 및 반복 가압 시험을 통해 정량적으로 평가할 필요가 있다.

4.3 환경적 관점

환경적 관점에서는 반복 수압, 유속·진동, 케이블 굽힘 및 장기 해수 노출 조건을 고려한다. 반복 수심 변화는 접속부에 주기적인 압력 변동을 유발하며, 유속에 의한 외력과 케이블 움직임은 접속부에 반복적인 굽힘·인장 하중을 전달할 수 있다. 이러한 환경 하중은 체결부, 실링부, 케이블 인입부 및 몰딩재 계면에 복합적으로 작용하여 수밀 성능 저하 가능성을 증가시킬 수 있다.

4.4 전기 신뢰도 관점

전기 신뢰도 관점에서는 수분 침투 이후 내부 전기 계면에서 발생할 수 있는 절연저항 저하, 누설전류 증가, 점점 부식 및 신호 품질 저하를 고려한다. 내부 전기 계면은 수밀 성능 저하의 최초 원인이라기보다, 수분 침투 이후 전기적 신뢰도 저하가 기능 이상으로 나타날 수 있는 주요 결과 부위이다. 해수가 내부 접속부에 도달하면 염분에 의해 접촉저항 증가, 전기적 누설, 간헐 고장 및 신호 이상이 발생할 수 있다.

5. 수밀 고장 메커니즘 분석

5.1 반복 수압과 실링부 변형

수심 변화에 따른 반복 수압은 실링부의 압축·복원 거동에 영향을 준다. 조립상태가 적절하지 않거나 O-ring 손상, 압축률 부족 또는 체결상태 변화가 존재하는 경우, 반복 수압은 접촉면의 국부 틈 형성과 수분 침투 가능성을 증가시킬 수 있다. 따라서 반복 수압은 단독 요인이라기보다 실링 상태와 체결 상태에 따라 수밀 취약성을 증폭시키는 하중으로 볼 수 있다.

5.2 유속·진동 및 케이블 굽힘에 의한 하중 집중

유속에 의한 항력과 진동은 케이블에 반복 굽힘 및 비틀림 하중을 발생시킬 수 있다. 케이블 인입부는 유연한 케이블과 상대적으로 강성이 큰 센서 모듈이 만나는 부분이므로, 구조적 응력 집중이 발생하기 쉽다. 장기 운용 시 케이블 피복 손상, 스트레인 릴리프 기능 저하, 몰딩재 균열 또는 계면 박리가 발생할 수

있으며, 이는 수분 침투 경로로 이어질 수 있다.

5.3 커넥터 미세 폴림에 따른 수밀 저하 가능성

커넥터 미세 폴림은 본 연구에서 주요하게 고려한 구조적 수밀 고장유형이다. 커넥터의 체결상태가 변화하면 O-ring 또는 실링부의 압축률이 감소하고, 접촉면 사이에 국부적인 틈이 형성될 수 있다. 이 경우 몰딩재 열화나 계면 박리와 같이 장기간에 걸쳐 진행되는 고장과 달리, 수밀 기능이 비교적 빠르게 저하될 가능성이 있다. 진동 환경에서 체결상태 유지를 위한 잠금방법과 적절한 체결 설계는 체결부 설계의 주요 고려사항이며[8], 수중 센서 모듈 접속부에서도 유속 진동과 케이블 하중을 통해 유사한 위험이 발생할 수 있다.

5.4 몰딩재 열화와 계면 박리

폴리우레탄 몰딩재는 수분의 이동 및 흡수와 장기적인 재료 변화에 따라 물성과 계면 특성이 변화할 수 있으며[2-4], 반복 수압 및 외부 하중이 결합될 경우 몰딩재 균열이나 계면 접착력 저하로 이어질 가능성이 있다. 특히 몰딩재와 금속 하우징, 몰딩재와 케이

블 피복 사이의 계면은 재료 강성, 표면특성 및 수분 흡수율 차이에 의해 미세 박리가 발생하기 쉬운 영역이다. 초기 계면 박리는 외관검사만으로 확인이 제한될 수 있으며, 장기적으로 수분 침투 경로로 발전할 가능성이 있다. Table 3는 본 연구에서 도출한 주요 수밀 취약성 영향요인을 개념적으로 요약한 것이다.

5.5 통합 고장 발생 경로

반복 수심 변화 환경에서 예상되는 대표적인 수밀 고장경로는 구조적 경로와 재료적 경로로 구분할 수 있다.

• 구조적 경로

반복 수압·유속·케이블 하중 → 체결상태 변화 → 실링 압축률 및 접촉압 저하 → 수분 침투 → 절연저항 저하·부식·신호 이상

• 재료적 경로

장기 해수 노출·수분 흡수·반복 하중 → 몰딩재 물성 변화 및 계면 박리/균열 → 수분 침투 → 절연저항 저하·부식·신호 이상

이 경로에서 중요한 점은 수밀 고장이 항상 동일한 순서로 발생하는 것은 아니라는 점이다. 예를 들어 커넥터 미세 폴림은 중간 열화 단계 없이 직접적인 수분 침투 경로를 형성할 수 있으며, 몰딩재 열화와 계면 박리는 장기간 잠복 후 점진적으로 수밀 취약성을 증가시킬 수 있다.

Table 3. Major factors affecting watertightness vulnerability of the connector interface

Influencing Factor	Description
Flow and Vibration	• Drag and vibration induced by flow • Repeated load transmission to the connector interface
Cable Bending	• Stress concentration at the cable inlet • Fatigue damage and formation of leakage paths
Connector Micro-Loosening	• Reduction in clamping force • Decrease in sealing compression → rapid degradation of watertightness
Molding Material Degradation	• Hardening and embrittlement due to moisture and aging
Interfacial Debonding	• Reduction in adhesion at material interfaces • Formation of micro-gaps → moisture ingress paths
Cyclic Hydrostatic Pressure	• Repeated compression and recovery of the sealing section • Repeated loading on the fastening section and interfaces

6. 고장유형 및 주요 취약부 분석

본 연구에서는 IEC 60812의 FMEA 분석 절차를 참고하여 접속부의 고장유형, 발생 부위, 주요 원인, 고장 메커니즘 및 신뢰도 영향을 구분하였다[9]. IEC 60812는 분석대상을 구성요소 또는 기능 단위로 세분화하고 고장유형, 고장영향 및 고장원인을 식별하여 상대적 중요도를 평가하는 절차를 제시한다[9]. 다만 본 연구는 실제 고장률 및 시험 데이터가 없는 문헌 기반 정성 분석이므로, 발생도·심각도·검출도에 따른 RPN 정량평가는 수행하지 않고 설계·정비 관점의 정성적 평가에 한정하였다. 이러한 기준에 따른 점

Table 4. Qualitative FMEA of connector–interface failure modes associated with watertightness degradation

Failure Mode	Location	Main Cause	Failure Mechanism	Reliability Effect
Connector Micro-Loosening	Connector Fastening Section	Repeated vibration, cable bending, insufficient tightening torque	Reduced sealing compression and formation of gaps at contact surfaces	Rapid loss of watertightness and significant moisture ingress
Cable Inlet Damage	Cable–Sensor Interface	Flow-induced loads, repeated bending, tension and torsion	Jacket damage and degradation of strain-relief function	Moisture migration along the cable and intermittent failure
Interfacial Debonding	Molding Material–Metal/Cable Jacket Interface	Material–property mismatch, moisture ingress, repeated shear loading	Reduced interfacial adhesion and growth of micro-debonding	Formation of moisture ingress paths
Sealing Deformation	O-ring / Sealing Section	Compression set, surface damage, assembly error	Reduced contact pressure and localized leakage	Degradation of watertightness
Molding Material Cracking	Sensor Molding Body / Interface Area	Moisture absorption, hardening/embrittlement, repeated loading	Initiation and growth of micro-cracks	Degradation of protective function and acceleration of interfacial leakage
Internal Electrical Interface Damage	Pin–Socket Contacts and Insulation	Moisture ingress and salinity	Degradation of insulation performance and increased contact resistance	Signal anomalies, malfunction, and functional failure

속부의 주요 수밀 고장유형과 신뢰도 영향을 Table 4에 정리하였다.

6.1 주요 취약부 우선순위

본 연구에서는 실제 고장 및 시험 데이터가 확보되

지 않은 점을 고려하여 정량적인 RPN 평가는 수행하지 않고, 수밀 상실 속도, 탐지 난이도, 신뢰도 영향성 및 반복 하중 민감도를 기준으로 주요 취약부의 정성적 우선순위를 평가하였다.

이 우선순위는 수밀 상실 속도, 탐지 난이도, 신뢰도 영향성 및 반복 하중 민감도를 종합적으로 고려한 정성적 판단이며, 정량적 위험도 점수를 의미하지 않는다.

Table 5. Qualitative rank of key vulnerable areas and rationale

Rank	Vulnerable Area	Rationale
1	Connector Fastening Section	Micro-loosening can rapidly reduce sealing compression, increasing the likelihood of rapid watertightness loss.
2	Cable Inlet	Flow and bending loads are repeatedly concentrated, and damage may lead to moisture migration along the cable.
3	Molding Material–Metal/Cable Jacket Interface	Early-stage damage is difficult to detect and may develop into a long-term moisture ingress path.
4	O-ring / Sealing Section	A critical watertightness component manageable through proper compression, surface condition, and assembly inspection.
5	Internal Electrical Interface	Functional failure usually follows moisture ingress and is therefore a consequence, not a primary cause, of watertightness failure.

7. 신뢰도 영향성 고찰

7.1 기능 신뢰도 영향

수분 침투는 잡음 증가, 감도 저하 및 신호 왜곡을 유발할 수 있다. 초기에는 간헐적 신호 이상으로 나타나지만, 시간이 지나면 기능 저하 또는 기능 상실로 발전할 수 있다.

7.2 구조 및 재료 신뢰도 영향

물딩재 균열, 계면 박리 및 실링부 변형은 접속부의 구조 건전성을 저하시킨다. 반복 수심 변화 환경에서는 손상 부위가 압력 변화에 따라 반복적으로 열리고 닫히면서 수분 침투 경로가 확대될 수 있다. 재료 열

Table 6. Future test, evaluation and quantification plan

Test Item	Test Method	Evaluation Criteria
Cyclic Pressurization / Depressurization Test	Apply repeated pressure corresponding to the specified operating-depth range	Leakage, external damage, and changes in insulation resistance
Fastening Loosening Evaluation	Compare initial tightening torque with residual torque after repeated loading	Change in residual torque and effectiveness of the locking structure
Comparison of Mass, Hardness, and Mechanical Properties Before and After Immersion	Compare mass, hardness, and tensile properties before and after immersion in seawater or artificial seawater	Moisture absorption, hardening, cracking, and degradation of mechanical properties
Interface Observation	Cross-sectional observation after testing using microscopy or CT inspection	Identification of debonding at molding material-metal/cable jacket interfaces
Electrical Performance Evaluation	Measure insulation resistance and signal quality before and after cyclic pressure loading	Insulation resistance degradation, intermittent failure, and signal anomalies
FMEA Refinement	Assess Severity (S), Occurrence (O), and Detectability (D), and calculate RPN based on test results	Quantitative prioritization of vulnerable areas

화는 단독 고장보다는 구조적 하중과 결합되어 수밀 취약성을 가속하는 요인으로 보는 것이 적절하다.

7.3 전기 신뢰도 및 정비성 영향

해수가 내부 전기계면으로 침투하면 절연저항 저하, 누설전류 증가, 접점 부식 및 접촉저항 증가가 발생할 수 있다. 이러한 고장은 외관으로 즉시 확인하기 어렵고, 원인 식별과 정비가 지연될 수 있다. 몰딩 또는 밀봉 구조의 접속부는 현장 수리가 제한되어 교체 정비와 예비품 소요 증가로 이어질 수 있다.

8. 향후 시험평가 및 정량화 방향

본 연구는 문헌 기반 정성 분석이므로, 연구의 완성도를 높이기 위해서는 향후 시험 기반 검증이 필요하다. 향후 시험을 통해 고장 데이터를 확보한 후에는 IEC 60812에서 제시하는 심각도(severity), 발생도(occurrence) 및 검출도(detectability)를 기반으로 RPN을 산정하여 주요 취약부의 우선순위를 정량적으로 보완할 수 있다[9]. 제안하는 시험평가 항목은 Table 6와 같다.

9. 설계·정비 관점의 시사점

9.1 설계 관점

커넥터 체결부에는 풀림 방지 구조, 체결 토크 기

준, 잠금 상태 식별 방안을 적용할 필요가 있다. 케이블 인입부에는 스트레인 릴리프 구조를 적용하여 유속·진동·굽힘 하중이 접속부에 집중되지 않도록 해야 한다. O-ring/실링부는 압축률, 홈 형상, 표면 조도, 조립 공차 및 재료 경도를 함께 고려해야 한다. 몰딩재와 금속 또는 케이블 피복의 계면에는 접착성, 표면 처리, 수분 흡수 및 재료 물성 차이를 고려한 설계가 필요하다.

9.2 정비 관점

외관점사만으로는 초기 계면 박리, 실링 압축률 저하, 내부 수분 침투를 확인하기 어렵다. 정비 시 커넥터 체결상태, 체결 토크, 잠금장치 상태, 케이블 인입부 굽힘 흔적을 확인해야 한다. 절연저항 측정과 신호 품질 점검을 병행하면 초기 수분 침투 또는 내부 전기 계면 이상을 조기에 탐지할 수 있다. 반복 수심 변화 이력이 누적된 부품은 단순 사용시간뿐 아니라 압력 사이클 이력을 기반으로 관리할 필요가 있다. 또한 수중부 커넥터를 분리·재결합하는 경우 O-ring 및 실링면의 손상, 변형 및 오염 여부를 확인하고, 이상이 확인된 O-ring은 교환할 필요가 있다. 또한 제조사의 정비기준에 교환주기 또는 재사용 기준이 제시된 경우 해당 기준을 적용해야 한다.

10. 연구의 한계

본 연구는 문헌 기반의 정성적 분석 연구로서 다음

과 같은 한계를 가진다. 첫째, 실제 수중 센서 모듈 접속부의 치수, 재료 물성, 체결 토크, O-ring 압축률 및 운용 사이클 데이터가 반영되지 않았다. 둘째, 본 연구에서 사용한 정수압 및 항력식은 수심 변화와 유속 하중을 설명하기 위한 공학적 기본식이며, 실제 고장 확률이나 수명을 직접 예측하지 않는다. 셋째, 커넥터 미세 풀림에 따른 수밀 저하 메커니즘은 공학적 관점에서 제시하였으나, 체결력 또는 체결변위 변화와 누수 발생 간의 임계조건은 향후 시험 또는 해석을 통해 정량적으로 검증할 필요가 있다.

11. 결론

본 연구는 반복 수심 변화 환경에서 운용되는 수중 센서 모듈 접속부의 수밀 고장 메커니즘과 신뢰도 영향성을 분석하였다. 접속부는 커넥터 체결부, 케이블 인입부, O-ring/실링부, 몰딩재 계면 및 내부 전기계면으로 구분하였으며, 반복 수압, 유속·진동, 케이블 굽힘, 커넥터 미세 풀림, 몰딩재 열화 및 계면 박리를 주요 영향요인으로 설정하였다.

분석 결과, 접속부 수밀 고장은 단일 원인보다 구조·환경 하중과 재료 열화가 복합적으로 작용하여 발생하며, 수분 침투 이후에는 전기적 신뢰도 저하로 이어질 수 있는 복합 고장으로 판단된다. 특히 커넥터 미세 풀림은 실링부 압축률과 접촉압을 저하시켜 직접적인 수분 침투 경로를 형성할 수 있으므로, 우선적으로 관리할 필요가 있는 주요 수밀 취약요인으로 판단된다. 또한 케이블 인입부 손상, 몰딩재-금속/피복 계면 박리, O-ring 변형 및 내부 전기계면 손상은 수분 침투와 기능 고장으로 연결될 수 있다.

향후 연구에서는 반복 가압·감압 시험, 체결 토크 평가, 몰딩재 수분 흡수 및 물성 변화 시험, 계면 관찰, 절연저항 및 신호 품질 평가를 수행하여 본 연구에서 제시한 고장 메커니즘을 검증할 필요가 있다. 또한 시험 데이터를 FMEA와 연계하면 주요 취약부 우선순위를

정량적으로 보완하고, 수중 센서 모듈 접속부의 설계 개선 및 정비 기준 수립에 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] Hyun Dai Shin & Byung Hyun Ahn, 'Study on the Underwater Acoustic Properties of Polyurethane Elastomer,' *Elastomers and Composites*, VOL. 52, NO. 4, 2017, pp. 326-331.
- [2] Cuixia Wang, Zihan Xu, Yangyang Xia, Chao Zhang, Hongyuan Fang, & Kangyan Sun, 'Water Transport Mechanism and Performance Evaluation in Polyurethane Materials: A State-of-the-Art Review,' *Polymer Testing*, VOL. 138, 2024, Article 108554.
- [3] S. P. Josyula, M. Brede, O. Hesebeck, K. Koschek, W. Possart, A. Wulf, B. Zimmer, & S. Diebels, 'Modelling the Influence of Moisture on the Mechanical Behaviour of Crosslinked Polyurethane Adhesives,' *Computational Materials Science*, VOL. 246, 2025, Article 113442.
- [4] Sabrina Taourit, Pierre-Yves Le Gac, & Bruno Fayolle, 'Relationship Between Network Structure and Ultimate Properties in Polyurethane During a Chain Scission Process,' *Polymer Degradation and Stability*, VOL. 201, 2022, Article 109971.
- [5] Tran Xuan Tien & Le Van Hoang, 'Research on a Sealing Solution Using O-Rings in the Design and Manufacture of Underwater Observation Devices,' *Journal of Military Science and Technology*, VOL. 104, 2025, pp. 122-129.
- [6] Weizheng An, Yi Wang, Baijiang Chen, Menglan Duan, & Xiyang Zhang, 'Analysis of the Reliability of Subsea Clamp Connector Based on Multiple Response Surface Methodology,' *Journal of Marine Science and Engineering*, VOL. 11, NO. 7, 2023, Article 1378.
- [7] Emre Kantar, 'Dielectric Strength of Polymeric Solid-Solid Interfaces Under Dry-Mate and Wet-Mate Conditions,' *Energies*, VOL. 14, NO. 23, 2021, Article 8067.
- [8] Richard T. Barrett, *Fastener Design Manual*, NASA Reference Publication 1228, National Aeronautics and Space Administration, 1990.
- [9] International Electrotechnical Commission, *Failure Modes and Effects Analysis (FMEA and FMECA) (3rd ed.)*, IEC 60812:2018, 2018.