

선박 및 해양플랜트 환경에서 작업자 위치 모니터링 시스템 개발을 위한 시스템엔지니어링 접근 방법

박종희¹⁾ 김한준¹⁾ 윤재준¹⁾ 김형민¹⁾ 홍대근^{2)*}

1) ㈜에이치랩, 2) 포항공과대학교

A Systems Engineering Approach to Development of a Worker's Location Monitoring System in Ship and Offshore Plant

Jong Hee Park¹⁾, Han June Kim¹⁾, Jae Jun Yoon¹⁾, Hyoung Min Kim¹⁾,
Dae Geun Hong^{2)*}

1) H Lab Co., Ltd

2) POSTECH

Abstract : The shipbuilding and offshore industry is a large and complex assembly industry, which causes many safety accidents. The major accidents in the shipbuilding and offshore industry workplaces are stenosis, falling objects, dust, fire, explosions, and gas poisoning. The accident by worker in this industry mainly has three factors: frequent movement, narrow work space, and increased use of subcontractors. To control these factors, it is necessary to monitor the worker's location and work status. In this paper, a worker location monitoring system using inaudible sound wave was designed that can be used in environments with many metal barriers. The process included deriving stakeholder requirements, transforming to system requirements, designing system architecture, and developing prototype. The prototype was validated by third-party testing agency. As a result, it satisfied the designed performance and verified its feasibility.

Key Words : Worker accidents, Worker's location, Safety management, Real-time location system(RTLS), Indoor positioning system(IPS), Health-safety and environment(HSE), Ship and offshore plant

Received: April 29, 2020 / **Revised:** June 3, 2020 / **Accepted:** June 16, 2020

* 교신저자 : Dae Geun Hong, dghong@postech.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

선박 및 해양플랜트 산업은 야드와 도크에 많은 인원을 투입해 대형 선박과 해양플랜트를 건조하는 과정이다. 대형 철골 구조물, 협소한 작업 공간, 수많은 밀폐공간, 크레인, 지게차 등이 혼재한 고위험 작업환경이기 때문에 조선소에서는 중대 사고(충돌, 추락, 화재, 폭발 사고)가 빈번하게 발생한다[1]. 이 작업 환경은 다양한 산업재해 유형이 모두 발생하고 있고, 산업재해율이 전체 산업군 중에서 높은 편이다[2]. 한국 안전보건공단에서 공개한 조선해양 산업에서 2010년부터 2017년까지의 사고 유형을 집계한 결과는 추락 49건, 협착 24건, 물체에 맞음 14건, 충돌 12건 등 8년간 총 140건이다[3]. 안전 사고는 인명의 손실뿐만 아니라 작업 중단으로 인한 생산성 저하도 일으키기 때문에, 주요 조선소의 안전 관리 방안에 대한 관심이 증가하고 있다.

산업 현장의 안전은 HSE(Health, Safe, and Environment) 분야에서 관리한다. HSE는 관련 법과 국제 표준 규격(ISO14001, OHSAS 18001, ISO50001)의 규정 문서를 통해 안전사고에 대한 예방 및 사후 관리를 한다. 특히, 열악한 작업환경으로 많은 사고가 발생하고 안전관리 미흡이 다수 지적된 조선소는 수주 경쟁력 약화나 사업주, 법인의 처벌로 이어질 수 있다. 하지만 현실적으로 넓은 야드에서 안전관리를 위해 매번 작업 현장을 확인, 감독하는 것은 비효율적이다. 따라서, 조선소에 ICT 기술을 도입하고 시간과 공간의 한계 없이 주요 안전 관리 업무(자료 입력, 조회, 현장 모니터링)를 수행하여 투자 대비 높은 생산성을 얻는 것이 사업주의 관심 사항이다[4].

조선소 안전 관리에 있어서 가장 중요한 정보는 작업자의 위치 정보이다. 위치 기반 서비스를 통해 조선소 내 환경 및 공간적 특성으로 인한 사고를 방지하고, 현장의 상황에 따라 작업자와 감독자가 필요한 조치를 신속하게 통보 및 대처할 수 있기 때문이다[5]. 그러나, 야외 작업자는 기존의 위성항법시스템(GPS; Global Positioning System)에 의한 위

치 기반 서비스가 가능하지만, 실내 작업자의 경우는 작업자의 위치를 추정할 수 있는 측위 솔루션이 부족하다[6]. 또한, 선박 내 작업 현장은 금속 격벽 때문에 전자기파 기반 무선 통신의 감쇠가 심해서 밀폐 구역에서 측위 신뢰성이 낮다. 게다가 기기증설 및 변경이 잦은 선박 내 작업환경에서 이 솔루션들은 현장에 맞춰 유연하게 변경하는게 어렵다.

따라서 본 연구는 조선소 작업 현장에 적합한 무선 네트워크 기반의, 격벽 이동에 대해 유연한 위치 추정 기술을 적용하여 작업자 위치 모니터링 시스템을 설계한다. 제안된 시스템의 핵심 기능을 포함한 프로토타입을 개발하고 제안된 시스템의 효과성과 현장 적용 가능성을 확인한다. 다양한 기술 대안 중 제안 시스템에 적합한 기술을 선정하고 관리하기 위해 시스템엔지니어링 방법론에 따라 접근한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 조선소 작업 환경에서 안전과 측위 기술 관련 이슈를 살펴보고 3장에서는 작업자 안전 관리 시스템을 설계하기 위한 연구 체계를 설명한다. 4장에서는 작업자 위치 모니터링 시스템 설계 및 개발 사례를 설명한다. 5장에서 프로토타입 구현 결과에 대한 결론을 정리한다.

2. 문헌 연구

2.1 선박 및 해양플랜트 산업의 HSE 관리

선박 및 해양플랜트 산업의 작업 환경은 강판을 주재료로 하는 기계 및 설비를 장착하는 과정이 주를 이룬다. 이 공정은 설계, 절단, 조립, 도장, 탑재, 진수, 인테리어, 시운전, 인도의 단계를 가진다. 이러한 작업을 완료하는데 대체로 1년 이상의 긴 시간이 필요하다[7]. 선박 건조 작업은 선박의 발주량에 따라, 그리고 다양한 선종에 따라 작업량의 변화가 심한 특징을 가지고 있다. 특히 다른 산업에 비해 어렵고 위험한 작업이 많은 복합적인 공정을 가지고 있다. 한국의 경우, 선박 건조는 전 산업 평균 재해율에 약 1.7배 정도로 위험도가 높다[8].

이 작업 환경은 절단, 조립, 탑재, 도장, 인테리어

와 같은 여러 공정 때문에 다양한 유형의 사고가 발생한다[8]. 재해 사고의 유형은 협착, 낙하물, 분진, 소음, 화재, 충격, 충돌, 넘어짐, 감전, 폭발, 추락, 가스중독, 비산, 근골격계 질환 등이 존재한다. 안전 사고의 발생 요소는 세 가지로 정리될 수 있는데, 첫 번째는 잦은 인적, 물적 이동으로 인한 충돌 및 추락 등의 유형이 있다. 작업장에서의 잦은 이동으로 설비와 사람의 이동을 모두 포함한다. 두 번째는 좁은 공간으로 인한 화재, 폭발, 가스 중독 등 밀폐 사고와 비산 사고가 있다. 좁은 공간 내 서로 다른 업체의 작업으로 유해 가스, 비산, 소음, 분진에 작업자가 노출되는 위험이 있다. 세 번째는 협력업체 안전관리 소홀로 인한 연쇄 사고와 대피 사고, 그리고 보건 사고 유형이 있다. 안전 관리 투자 능력이 부족한 협력업체는 공기 단축에 대한 압력으로 인해 사고에 대한 사전/사후 관리에 소홀할 수 있기 때문이다.

앞서 얘기한 것처럼, 조선해양산업의 특성으로 인해 작업 현장에서의 산업재해율은 여전히 높은 실정이다. 이를 줄이기 위해, 작업 절차와 방법을 체계화하고 안전보건 관리를 강화해야 한다. 안전 관리를 위해서는 앞서 제시된 세 가지 위험 요인을 효율적으로 관리할 수 있어야 하고 그 해결방안은 작업자의 위치를 모니터링하는 것으로 시작한다. 그 모니터링이 가능하면, 작업자의 위치를 파악하고 공유하여 그 세 가지 위험 요인의 결과인 작업자의 충돌이나 추락, 유해물질 노출, 작업자 대피나 구조의 어려움은 예방하고 용이하게 대응할 수 있다. 최근 들어 선박 및 해양플랜트 업체들은 ICT 기술을 활용한 안전관리 및 모니터링에 관심을 갖는 추세인데, 이는 투자 비용보다 큰 효과를 얻을 수 있기 때문이다.

2.2 선박 및 해양플랜트 환경의 RTLS 기술

ICT 기반의 안전 관리 시스템 도입 시, 선박 및 해양플랜트 환경의 문제는 격벽 등 금속 차폐 구조물이다. 용접으로 설치되는 금속 격벽 때문에, 전자 기파의 감쇠와 왜곡이 심하다. 이를 해결하기 위한

다양한 측위 방법 연구가 있었다. 이러한 환경에서의 측위 기술 연구는 RF 방식, 비가청 음파 방식, 가시광 방식 등이 있었다. Wifi, LoRa, UWB, 비콘 등 무선 장비를 활용하는 RF 방식은 작업 현장의 금속으로 인한 신호 왜곡을 극복하기 위해 음영 지역에 무선 중계기를 추가한다. 하지만 이는 근본적인 음영 지역 발생 문제의 해결이 어렵고 많은 중계기를 필요로 한다[9].

비가청 음파 기반 측위 방식은 음파의 회절성으로 인해 금속체에 의한 감쇠, 왜곡 문제가 없다. 18~22kHz의 비가청 대역을 사용하기 때문에 발신 출력을 높여 발신기의 수를 줄일 수 있지만, 공기 중 전파 속도의 편차로 인해 위치 정확도를 높이기 어렵다. 고정된 음파 발신기의 위치 정보로 인한 누적오차를 개선하기 위해서는 시간 동기화를 위한 추가적인 센서를 필요로 한다[10].

가시광 방식은 빛을 정보 전달에 사용하는 무선 통신이기 때문에, 선박 내에서 초래되는 전파 간섭 및 회절 문제가 없는 대안 기술이다. LED 기반의 가시광 통신은 385~789THz의 광대역 특성을 활용한 실내위치 인식 기술로 연구됐다. 그러나 선박에 설치된 전등을 활용하여 통신하기 때문에, 격벽 변화에 유연하지 못하고, 조명원이 설치되기 이전에는 사용하기 어려우며, 다른 광원에 의한 방해가 발생한다[11].

선박 및 해양플랜트 작업 현장에 적용할 수 있는 다양한 측위 및 통신 기술이 시도되었으나 금속 환경의 영향을 극복할 수 있는 범용의 기술이 표준화된 상황은 아니다. 따라서, 각 작업 현장의 상황에 맞는 기술을 선정하고 환경 변화에 대응하는 조정 기능을 강화할 필요가 있다. 이러한 특성으로 비추어 선박 및 해양플랜트 작업 현장에 적용해야 할 작업자 위치 모니터링 시스템은 다양한 대안 기술을 환경에 따라 선정하되 이해관계자의 요구사항을 바탕으로 유연한 설계 및 기능을 갖추어야 한다. 비용 대비 최대의 효과를 내야 하는 가치공학적 측면을 고려할 때 시스템엔지니어링의 접근 방법이 적합하다고 볼 수 있다.

3. 연구 체계

3.1 연구 범위

시스템 엔지니어링(SE, Systems Engineering)은 새로운 시스템의 개발 시행착오를 줄이고 개발된 시스템의 형상을 관리하는 측면에서 장점이 있다[12]. 본 연구에서는 작업자 위치 모니터링 시스템 설계하기 위해 SE 방법론을 적용한다. SE를 기반으로 한 일반적인 시스템의 생명주기를 그림 1과 같이 정의하고 타당성 조사로부터 기본설계 단계인 V-model 상의 Component Testing 일부까지를 본 연구 범위로 선정한다. 본 논문의 연구 결과는 IT 시스템으로써 소프트웨어 개발 프로세스의 MVP (Minimally Viable Product) 프로토타입 및 검증 과정을 도입한다. 이는 비용 절감 및 개발 기간 단축을 위한 것이다.

3.2 이해관계자 요구사항 정의 프로세스

이해관계자 요구사항 정의 프로세스는 기존의 조선해양산업 작업 현장에서 사용된 안전 관리 시스템 및 네트워크의 문제점을 파악하는 것으로부터 시작한다[13]. 이 프로세스는 세 가지 단계를 요구한다. 첫 번째는 대상 시스템(SoI)을 정의하고 개발에 직간접적으로 영향을 미치는 이해관계자를 식별하는 것이다. 이해관계자 식별에는 컨텍스트 다이어그램(Context Diagram)을 이용한다. 두 번째는 개발과 관련된 전문가 인터뷰와 설문 방식을 통해 이

해관계자 요구사항을 도출한다. 요구사항은 대상 시스템(SoI, System of Interest)이 할 일을 정의한다. 세 번째는 개발될 SoI의 운영 시나리오를 설명한다. 이 운영 시나리오는 시스템이 작동하는 환경과 상황을 정의하고 외부 시스템과 인터페이스를 고려하여 설계하기 위해 필요하다. 본 논문에서는 선박 및 해양플랜트 건조 작업 중에 발생하는 문제들을 식별하는 과정에서 데이터의 획득 및 흐름, 그리고 활용 현황에 초점을 두고 문제 식별 및 운영 시나리오를 개발한다.

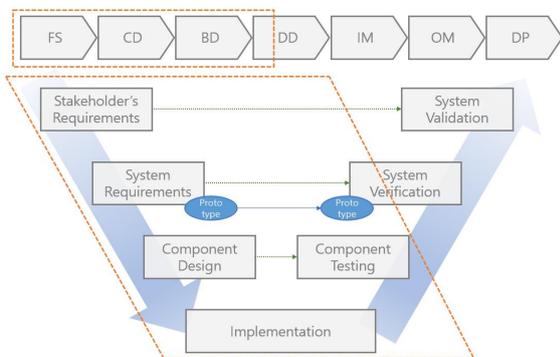
3.3 시스템 요구사항 정의 프로세스

이해관계자 요구사항은 당사자가 직면한 문제를 일반적인 언어로 작성되기 때문에 설계에 적용할 수 있는 기술적인 언어로 변환하는 과정이 필요하다. 이 과정에서 변환된 시스템 요구사항은 해당 시스템이 직접 수행하는 기능 요구사항과, 그 외의 비기능 요구사항으로 구분하여 관리한다. 이러한 변환 작업의 수행은 전문가 판단에 따른 QFD(Quality Function Deployment) 기법에 의해 이루어진다.

그리고 기능 요구사항에 대한 MOP(Measure of Performance)를 도출하고 평가 기준에 활용하였다. 대상 시스템과 상호작용하는 외부 시스템을 식별하고 그 사이에 존재하는 데이터 또는 신호를 DFD(Data Flow Diagram)으로 표현한다. 특히, 이해관계자 요구사항과 도출된 시스템 요구사항은 그 포함 여부를 확인하여 요구사항 추적 매트릭스(Requirement Traceability Matrix)로 관리함으로써 요구사항 및 형상 변경 시 누락이나 오류를 줄일 수 있도록 한다.

3.4 시스템 아키텍처 정의 프로세스

시스템 아키텍처 설계 프로세스는 시스템을 구성하는 컴포넌트(Component)의 속성(Attribution)과 관계(Relationship)를 정의하고 컴포넌트 간의 인터페이스를 규격화하는 단계이다. 시스템 아키텍처는 시스템 논리 아키텍처와 시스템 물리 아키텍처, 내부 인터페이스로 나눌 수 있다. 논리 아키텍



[Figure 1] The scope of researching life-cycle and SE process

처는 IDEF0[14]와 eFFBD(enhanced Functional Flow Block Diagram)를 이용해 설계한다. 또한, HID(Hierarchy Diagram)를 활용해 하위 컴포넌트를 정의하고 IBD(Internal Block Diagram)을 활용해 각 컴포넌트 간의 인터페이스를 정의한다.

컴포넌트 수준으로 분해된 시스템은 각 기능 요구사항을 할당하여 MOP 성능을 기반으로 각 컴포넌트의 TPM(Technical Performance Measurements)을 도출한다. 시스템의 물리적 특성에 해당하는 비기능 요구사항도 각 컴포넌트에 할당하는 작업이 이루어진 후 요구사항과 아키텍처 간의 시스템 추적성을 검증한다[15].

3.5 프로토타입 및 검증

컴포넌트 수준의 아키텍처까지 설계가 완료된 시스템은 본격적인 개발에 앞서 핵심 기능을 포함한 프로토타입의 제작을 통해 기능 및 성능을 검증하는 과정을 거친다[16]. 이 과정에서 우리는 이해관계자와 논의하여 운영 시나리오와 TPM에 따라 프로토타입에 적용된 핵심 기능을 검증하고 개선한다. 프로토타입에 반영된 개선점과 이해관계자의 피드백 사항은 추적 관리하여 누락되는 일이 없어야 한다. 이 과정에서 작업자 위치 모니터링 시스템 프로토타입의 핵심 기능의 시험은 독립적인 시험평가기관에 의뢰하여 평가를 수행한다.

4. 사례 연구

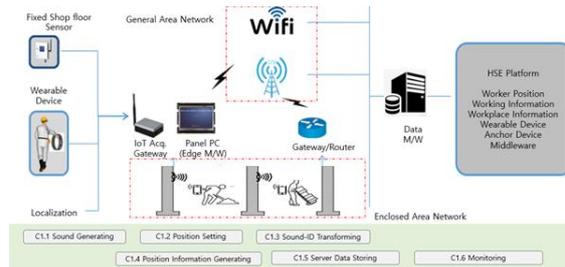
4.1 대상 시스템(SoI) 및 임무 정의

본 연구에서는 국내 선박 건조 업체인 H사의 작업 현장에서 수행하기 위한 작업자 위치 모니터링 시스템 구축 프로젝트에 SE 설계 방법을 적용한 사례를 제시한다.

대상 시스템은 실제 조선소에서 작업 중인 선박 내에 작업자의 위치를 추정하고 이를 관리자가 실시간으로 모니터링할 수 있도록 하는 시스템이다. 이 환경에 관련된 내부 및 외부 시스템을 배열하면 그림 2와 같다. 이 시스템을 앞서 설명한 연구 체계



[Figure 2] System context



[Figure 3] Operation scenario

에 따라 설계 및 개발을 진행하였다.

4.2 이해관계자 요구사항 정의 프로세스

그림 3의 시나리오는 사례 업체의 조선소에서 작업자 위치 모니터링 시스템이 동작하는 운영 시나리오를 표현한 것이다. 무선 통신 네트워크를 구성하기 위한 격벽에 고정하는 기기가 작업장 내에 설치되고 각 기기에 포함된 음파 발신기가 비가청 음파를 생성한다. 작업자는 비가청 음파를 수신하는 어플이 설치된 스마트폰 혹은 스마트 기기를 소지하고 있다. 수신기를 통해 확인된 음파 정보는 금속체 통신 무선 네트워크를 통해 운영 서버로 전달된다. 운영 서버에서는 음파 정보를 확인하여 각 작업자의 작업 상황 및 이동 상황을 추정하고 이를 관리자에게 제공한다.

운영 시나리오를 바탕으로 작업자 위치 모니터링 시스템의 이해관계자 요구사항을 추출했다. 선박 및 해양플랜트 건조 작업 환경에서 필요한 요구사항은 작업자 인터뷰 및 설문지 방식, 문헌 조사를 통해 수집했다. 주요 이해관계자 요구사항은 다음 그림 4와 같다.

관리번호	이해관계자	도출문제 명칭	시도 내용
SR001	관리자	직접적 호출	언제든 해당시스템 내 작업자를 가용적으로 호출할 수 있어야 한다.
SR002	작업자	관리자 호출	언제든 해당시스템 내 작업자를 가용적으로 호출할 수 있어야 한다.
SR003	안전관리자	상황 관찰	언제든 해당시스템 내 작업자의 위치를 실시간으로 관찰할 수 있어야 한다.
SR004	관리자	실시간 추적	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR005	관리자	활동 여부	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR006	관리자	작업 상황	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR007	안전관리자	경고 발생	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR008	안전관리자	위험 상황	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR009	안전관리자	위험 회피	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR010	안전관리자	활동 추적	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR011	안전관리자	근로 상황	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR012	안전관리자	근로 기록	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR013	안전관리자	근로 관리	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR014	안전관리자	근로 분석	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR015	안전관리자	근로 평가	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR016	안전관리자	근로 기록	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR017	안전관리자	근로 관리	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR018	안전관리자	근로 분석	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR019	안전관리자	근로 평가	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR020	안전관리자	근로 기록	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR021	안전관리자	근로 관리	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR022	안전관리자	근로 분석	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.

[Figure 4] Stakeholder's requirements

4.3 시스템 요구사항 정의 프로세스

앞서 정리한 현장의 문제점을 분석함으로써, 작업자 위치 모니터링 시스템이 갖춰야 할 기능 및 비기능 설계 고려사항들을 도출하였다. 도출한 시스템 요구사항은 다음 그림 5와 같다. 이를 통해 시스템의 논리적, 물리적 아키텍처 개발한다. 시스템 요구사항은 이미 수행한 이해관계자 요구사항과의 추적성을 관리한다[17].

시스템 요구사항 도출은 본 사례연구에서 채택한 QFD(Quality Function Deployment) 방법에 의해 그림 6과 같이 진행하였다. 이는 MOP(Measure of Performance)에 의해 관리된다.

요구사항	기술적 요구사항	비기술적 요구사항	기술적 요구사항	비기술적 요구사항
SR001	실시간 호출	언제든 해당시스템 내 작업자를 가용적으로 호출할 수 있어야 한다.	실시간 호출	언제든 해당시스템 내 작업자를 가용적으로 호출할 수 있어야 한다.
SR002	작업자 호출	언제든 해당시스템 내 작업자를 가용적으로 호출할 수 있어야 한다.	작업자 호출	언제든 해당시스템 내 작업자를 가용적으로 호출할 수 있어야 한다.
SR003	상황 관찰	언제든 해당시스템 내 작업자의 위치를 실시간으로 관찰할 수 있어야 한다.	상황 관찰	언제든 해당시스템 내 작업자의 위치를 실시간으로 관찰할 수 있어야 한다.
SR004	실시간 추적	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	실시간 추적	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR005	활동 여부	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	활동 여부	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR006	작업 상황	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	작업 상황	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR007	경고 발생	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	경고 발생	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR008	위험 상황	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	위험 상황	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR009	위험 회피	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	위험 회피	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR010	활동 추적	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	활동 추적	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR011	근로 상황	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	근로 상황	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR012	근로 기록	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	근로 기록	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR013	근로 관리	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	근로 관리	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR014	근로 분석	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	근로 분석	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR015	근로 평가	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	근로 평가	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR016	근로 기록	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	근로 기록	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR017	근로 관리	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	근로 관리	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR018	근로 분석	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	근로 분석	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR019	근로 평가	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	근로 평가	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR020	근로 기록	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	근로 기록	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR021	근로 관리	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	근로 관리	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.
SR022	근로 분석	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.	근로 분석	실시간에 작업자의 위치를 실시간으로 추적할 수 있어야 한다.

[Figure 5] System requirements

기술적 요구사항 (SR)	비기술적 요구사항 (MOP)									
	실시간 호출	작업자 호출	상황 관찰	실시간 추적	활동 여부	작업 상황	경고 발생	위험 상황	위험 회피	활동 추적
SR001	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR002	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR003	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR004	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR005	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR006	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR007	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR008	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR009	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR010	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR011	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR012	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR013	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR014	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR015	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR016	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR017	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR018	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR019	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR020	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR021	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR022	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

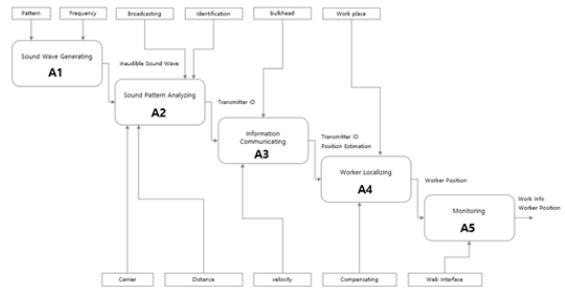
[Figure 6] MOP requirements by QFD method

4.4 시스템 아키텍처

시스템 요구사항과 운영 시나리오를 이용하여 시스템 논리 아키텍처 개발을 수행하였다. 시스템이 수행해야 하는 기능을 순차적으로 배치하고 각 기능을 물리적 구성 요소에 배분함으로써 이상 여부를 확인하기 위한 이 과정은 그림 7과 같이 IDEFO 다이어그램을 활용하여 모델링하였다.

시스템 요구사항과 논리 아키텍처를 바탕으로 비가청 음파를 활용한 작업자 안전 모니터링 시스템의 물리 아키텍처를 도출하였다. 두 아키텍처 사이의 연계 과정은 그림 8과 같이 TPM(Technical Performance Measurement)에 의한 추적 테이블을 따라 할당되었다.

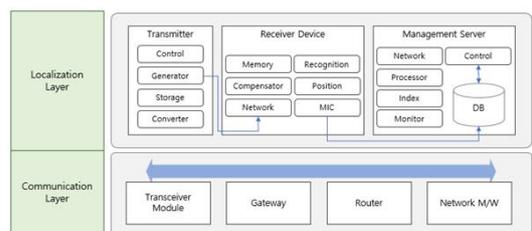
그림 9의 물리 아키텍처는 측위 계층과 통신 계



[Figure 7] System logical architecture

기능적 요구사항 (SR)	물리적 요구사항 (MOP)									
	실시간 호출	작업자 호출	상황 관찰	실시간 추적	활동 여부	작업 상황	경고 발생	위험 상황	위험 회피	활동 추적
SR001	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR002	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR003	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR004	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR005	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR006	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR007	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR008	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR009	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR010	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR011	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR012	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR013	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR014	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR015	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR016	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR017	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR018	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR019	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR020	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR021	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SR022	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

[Figure 8] Logical-physical traceability table



[Figure 9] System physical architecture



[Figure 10] Inaudible sound wave transmitter

층으로 이루어져 있다. 측위 계층은 송신기, 수신기 디바이스 및 관리 서버로 구성되어 있다. 통신 계층은 송수신 모듈, 게이트웨이, 라우터 및 네트워크 미들웨어로 구성되어 있다. 두 계층은 와이파이 네트워크 프로토콜에 의해 인터페이스하고 있다.

4.5 프로토타입 및 검증

H사의 선박 건조 작업 현장에 이 시스템을 구축하기 위해, 무선 통신 네트워크를 기반으로 한 작업자 위치 모니터링 시스템의 프로토타입을 개발하였다. 프로토타입은 앞서 수행한 시스템의 논리 아키텍처의 정보 통신 부분과 음파 송신, 음파 분석, 작업자 위치 추정, 모니터링 부분을 포함하고 있다. 물리 아키텍처에서의 위치 추정과 통신 부분을 포함하고 있으며, 시험인증 기관인 KOIST를 통해 그 기능과 성능을 검증하였다.

비가청 음파는 사람의 귀에는 들리지 않으나 수신 장치의 마이크로는 인식할 수 있는 18~22kHz의 대역에 해당하는 음파를 말한다. 이 대역에서 음파의 주파수 패턴을 형성하여, 수신기 장치가 발신기의 정보를 식별할 수 있다. 그림 10의 발신기는 안드로이드 기반이고 4Ω의 스피커를 이용해 비가청 음파를 발신한다. 발신기는 Li-Po 배터리를 탑재하고 자석을 이용해 금속 격벽에 부착하여 독자적으로 운용할 수 있다. 이 장치는 3.5m 이내의 범위에서 95% 이상의 음파 수신 성능을 가지고 있다.

비가청 음파를 활용한 작업자 위치 모니터링 서비스는 수신기로부터 전송 받은 신호를 로그에 기록한다. 이를 바탕으로 그 시스템의 서버는 추정 위치를 그림 11과 같이 맵 상에 표시하여 서버에 접속한 클라이언트가 확인할 수 있도록 한다. 이 서버의 프로토타입은 Tomcat 서버와 MySQL 데이터베



[Figure 11] Worker location monitoring screen



[Figure 12] Test bench

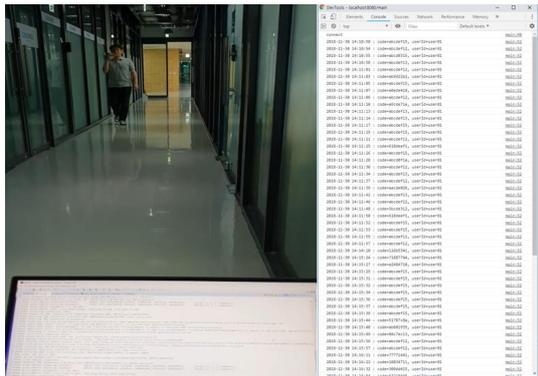
이스를 이용해 구축했다.

선박 및 해양플랜트 작업 현장과 비슷한 환경에서 네트워크 및 모니터링 시스템의 테스트를 진행한다. 테스트벤치는 그림 12와 같이 40ft와 20ft의 두 개의 컨테이너이며, 12×3.5×4m, 6×3.5×4m의 크기를 가진 금속 차폐 환경이다. 두 컨테이너로 막힌 금속벽을 격벽으로 가정하고 바깥 벽에 금속 전도체 통신 송수신기를 설치해 네트워크를 구성한다. 40ft 컨테이너 안쪽 벽에 3.5m 간격, 1.5m 높이에 4개의 비가청 음파 발신기를 설치해 위치 추정 테스트를 진행하였다.

프로토타입 테스트는 그림 13의 시나리오에 따라 수행되었다. 작업자가 휴대하는 안드로이드 기반 음



[Figure 13] Prototype test scenario



[Figure 14] Prototype test

파 수신기는 작업 공간에 설치된 음파 발신기의 음파 패턴을 고속체 통신 단말에 전송한다. 작업 공간에 설치된 고속체 통신 단말은 격벽이나 파이프 등 고속체를 통해 정보를 측위 서버에 전송한다. 측위 서버는 작업자 위치 모니터링을 수행하여 UI를 통해 작업 관리자에게 시각화하고 고속체 통신으로 작업자가 휴대한 안드로이드 단말기에 작업 정보를 보여준다.

테스트 환경에서 수행된 비가청 음파 송수신 테스트는 그림 14처럼 위치 추정 정밀도 3.5m, 수신율 95%의 정량적 목표를 달성했다. 이는 TPM 척도에 따른 프로토타입 평가 결과로 그림 15와 같이 정리하였다. 이를 통해 시스템의 음파 송수신, 고속체 통신 및 위치 모니터링의 핵심 기능 수행 성능을 검증하는 목적을 달성하였다. 한편, 테스트 과정에서 안드로이드 기반 음파 수신기의 사양은 영향이 없음을 확인하였다.

테스트벤치 적용을 위한 기술 개발 과정 중, 두 개의 비가청 음파 발신기의 신호가 모두 미수신되

TPM 기준	요구사항	측정 결과	
		요구도 대비 여유율	
위치 측정 거리	≤3m	≤3.5m	17%
음파 수신율	≥95%	≥95%	0%
서버 전송 속도	<0.1s	<0.96s	10%
발신기 당 측위 수신기 수	≤ 5개	≤ 6개	20%
발신 시 소음	< 0.1dB	< 0.1dB	0%

[Figure 15] Test result table

거나 두 발신기의 신호가 모두 수신되는 영역에서의 신호처리가 문제되었다. 이를 해결하기 위해 모니터링 시스템의 작업자 이동 이력을 기반으로 경로를 예측하여 발신기의 음파 출력 값을 계산하는 알고리즘을 추가하였다. 이 절차는 국내 특허(10-2019-0005720)로 출원되었다.

5. 결론

본 연구는 SE 방법론에 따른 접근 방식으로 작업자 위치 모니터링 시스템을 설계하고 이를 기반으로 비가청 음파를 이용한 프로토타입을 개발하였다. 이 작업자 위치 모니터링 시스템은 기존의 선박 및 해양플랜트 작업장 내 통신 및 측위 시스템의 문제점을 극복하고 안전 관리 업무의 생산성을 향상시킬 수 있는 방안이다. 기존 RF 기반의 통신 및 측위 기술은 고속 차폐 환경에 의한 감쇠, 왜곡 문제로 인해 사용하기 어려웠다. 이에 비해 음파는 회절을 통해 격벽의 추가와 이동에 대한 대응성이 높았다. 이 시스템은 기술적인 효과를 제공할뿐만 아니라 선박 및 해양플랜트 건조 비용에 대한 이점을 제공할 수 있기 때문에 작업자의 안전 사고 예방을 효율적으로 수행할 수 있었다.

본 연구에서는 시스템 정의를 위한 이해관계자 요구사항을 50개 항목을 도출하였다. 도출된 요구사항은 시스템 요구사항으로 추적해 관리했다. 추적 관리된 이해관계자 요구사항은 일 년에 두 번 조정을 협의하여 20개 항목 가량의 변경하였다. 이 과정

을 통해 시스템의 사양을 결정하는 요구사항을 추적하고 누락 없는 형상 관리를 할 수 있었다. 본 연구의 시스템은 60개 항목의 시스템 요구사항과 300개 항목의 컴포넌트 요구사항을 도출하였다. 시스템 요구사항은 기능, 비기능으로 나누어 논리적, 물리적 구성요소에 반영되었다.

본 연구에서 개발된 시스템은 H사의 도크를 모사한 테스트벤치에서 실증 시험을 진행하여 3.5m 이내의 작업자를 분당 20회 이상 추적하는 결과를 얻었다. 이를 통해, 작업자와 관리자, 그리고 사업주 측면에서 기존 시스템에 비교한 장점을 확인하였다. 다만, 선박 모든 구역에 적용하려면 방수 및 방진 설계개선의 필요성이 있음을 확인하였다. 본 연구 결과는 구조와 환경 상의 문제로 인해 일반적인 RF 기반 무선 네트워크와 측위 기기의 사용이 힘든 곳에 응용할 수 있다. 지하공사장, 터널 작업장과 같은 현장은 이 시스템을 작업 상황을 모니터링하고 응급 상황을 전파하는 솔루션으로 활용할 수 있다. 또한, 차후로 시스템 컨텍스트의 다른 시스템과 연계한 다양한 서비스를 개발할 수 있다. 환경 모니터링 콘텐츠와 연동하여 유해가스 및 폭발 감지 상황을 주변 작업자에게 알리는 서비스나 건강 모니터링 콘텐츠와 연동해 심박, 호흡에 이상이 발생한 작업자를 긴급 후송하는 서비스가 있다.

사 사

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신산업진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(S0510-20-1005, 금속체 통신을 활용한 선박해양플랜트 내 작업자 환경 모니터링 및 인원 안전관리 무선화 플랫폼 구축).

References

1. Joe, T., Chang, H, A Study on User-Oriented and Intelligent Service Design in Sustainable Computing: A Case of Shipbuilding Industry

Safety. Sustainability, 9(4), 2017.
 2. D. S. Yoo, T. H. Yoon, W.-S. Jung and B. T. Jang, Real-time Smart HSE System in Shipbuilding. Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences, 2017.
 3. Qing Zhang, Liang Hua, Xiaojie Tian, Zijun Tang, Lubing Nian, Development of shipbuilding safety information monitoring and management system. International Journal of Computer Applications in Technology, 61(4), pp. 297-305, 2019.
 4. Stanić, V., Hadjina, M., Fafandjel, N., Matulja, T, Toward Shipbuilding 4.0 - an Industry 4.0 Changing the Face of the Shipbuilding Industry. Brodogradnja, 69(3), 111-128, 2018.
 5. Fernandez-Carames, T. M., Fraga-Lamas, P., Suarez-Albela, M., Diaz-Bouza, M. A, A Fog Computing Based Cyber-Physical System for the Automation of Pipe-Related Tasks in the Industry 4.0 Shipyard. Sensors (Basel), 18(6), 2018.
 6. Huh, J.-H., Koh, T., Seo, K, Design of a Shipboard Outside Communication Network and Its Testbed Using PLC: For Safety Management during the Ship Building Process. Processes, 6(6), 2018.
 7. Kwon, Y., Jeong, Y.-k., Woo, J.-h., Oh, D., Kim, H., Shin, I.-S., Jung, C., Korean Technical Innovation: toward Autonomous Ship and Smart Shipbuilding to Ensure Safety. International Seminar on Safety and Security of Autonomous Vessels, 83-94, 2019.
 8. Ye, J. H., Jung, S. R., Chang, S. R., A Case Study on the Potential Severity Assessment for Incident Investigation in the Shipbuilding Industry. Journal of the Korean Society of Safety, 34(1), 62-69, 2019.

9. Jung, W. S., Yoon, T. H., Yoo, D. S., Park, J. H., Choi, H. K., Limitation of LoRaWAN in the Smart HSE System for Shipbuilding and Onshore Plant. Paper presented at the IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), 2018.
10. Zho, B., Kwon, S., Cheon, S., Indoor Positioning System Using Ultrasonic and RF. The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences, 42(2), 413-423, 2017.
11. S. Hong, Indoor Location-based Emergency Call Service System for Ships using VLC Technology. Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering, 19(12), 2836-2843, 2015.
12. Wiley, INCOSE Systems Engineering Handbook. John Wiley and Sons, 2015.
13. Jiao, J. and Chen, C., Customer requirement management in product development: a review of research issues. Concurrent Engineering, 14(3), 173-185, 2006.
14. Mayer, R., IDEF1 Information Modeling—A Reconstruction of the Original Air Force Wright Aeronautical Laboratory Technical Report AFWAL-TR-81-4023, Texas: Knowledge Based Systems Inc., 1992.
15. Jeon, B. W., Shin, K. Y., Hong, D. G., Suh, S. H, A Study on Application of Systems Engineering Approach to Design of Smart Manufacturing Execution System. Journal of the Korea Society of Systems Engineering, 11(2), 95-106, 2015.
16. International Organization for Standardization, Systems and Software Engineering - System Life Cycle Processes, ISO/IEC 15288:2015., 2015.
17. Lee, T. K., Lee, J. Y., A Systems Engineering Process Refinement: Focused on Technical Process. Journal of the Korea Society of Systems Engineering, 13(1), 41-50, 2017.