한국정보전자통신기술학회논문지(jkiiect)'23-6, Vol.16 No.3
논문 23-16-03-138 http://dx.doi.org/10.17661/jkiiect.2023.16.3.138

항만 인프라 재해와 노후화 관리를 위한 디지털 트윈 적용 절차에 관한 연구

장혜정*

A Study on the Procedure for Applying Digital Twin to Disaster and Aging Management of Port Infrastructure

Hye-Jung Chang*

요 약 우리나라 항만 인프라는 공용연수가 30년이 넘은 노후 항만시설물은 2019년 약 23%에서 2029년에는 47%로 증가하여 노후화가 빠르게 진행되고 있다. 오래된 기존의 항만은 경쟁력을 상실하고 항만 인프라의 발전을 저하하며 시설물에 대한 인적자원 기반 유지보수에 따른 인명사고가 증가한다. 이러한 문제를 디지털 트윈 기반의 체계적인 관리 기술 구축으로 해결하고자 한다. 본 연구는 항만 인프라의 재해와 노후화 현황과 스마트 항만의 사례를 살펴본 뒤 스마트 항만 기술이 반영된 디지털 트윈 구현 단계를 구체적으로 제시하고자 한다. 항만 인프라 연계 시스템을 분석하고 디지털 트윈 구현에 필수적인 시나리오를 작성하여 맵핑을 한다. 재해와 노후화 관리를 위한 3D 모델링과 시뮬레이션 데이터를 수집하여 디지털 트윈을 구현하며 항만 인프라에서 획득한 센싱 데이터, 영상 데이터 등의 데이터를 실시간으로 연동하여 상황별 항만 디지털 트윈 시뮬레이션 구현한다. 항만 인프라 재해와 노후화 관리를 위한 디지털 트윈 항만을 구현하는 경우 실시간 통합관제로 예지적인 항만 인프라 관리로 할 수 있을 뿐 아니라 재해에 관한 안전을 확보할 수 있다.

Abstract Korea's port infrastructure is rapidly aging, with old port facilities with more than 30 years of public life expected to surge from about 23% in 2019 to 47% in 2029. Traditional, aging ports lose competitiveness in logistics processing, reducing development around the port and increasing human casualties due to the human resource-based maintenance of the facilities. Therefore, it is necessary to solve this problem by establishing systematic management technology based on a digital twin. This research aimed to present the specific implementation steps of a digital twin reflecting smart port technology through cases of port infrastructure disasters, aging status, and smart ports. The study analyzed the port infrastructure linkage system and created and mapped scenarios essential for digital twin implementation. Three-dimensional (3D) modeling and simulation data for disaster and aging management among existing port infrastructure systems were collected. A digital twin port was implemented with 3D modeling. It implements a port digital twin simulation that links data such as sensing data and image data acquired from the port infrastructure in real time. Implementing a digital twin port for port infrastructure disasters and aging management can secure predictive port infrastructure management and disaster safety

Key Words : Disaster, Deterioration, Digital Twin, Prediction Simulation, Smart Port Infrastructure

1. 서론

우리나라 항만 인프라는 공용연수가 30년이 넘은 후 항만시설물은 2019년 약 23%에서 2029년에는 47%로 증가하여 노후화가 빠르게 진행되고 있다. 이러한 노후화에 대비하여 항만 인프라 관련 파손 사례를 줄이기 위하여 해양수산부나 지자체를 중심

This Paper was supported by research Fund of Seokyeong University in 2023.
*College of Multidicsiplinary Studies, SeoKyeong University (mschang@skuniv.ac.kr)
Received June 02, 2023 Revised June 07, 2023 Accepted June 12, 2023

으로 큰 노력을 하고 있다. 이렇게 오래된 기존의 항만은 경쟁력을 상실하고 항만 인프라의 발전을 저하하며 시설물에 대한 인적자원 기반 유지보수에 따른 인명사고가 증가하여 유지보수를 위한 체계적 관리 기술 구축 필요하게 되었다. 이러한 항만 관련 노후화 사고와 재난 재해가 반복되지 않도록 위험도를 정확하게 예측하고 모니터링하여 적용할 수 있는 사물인터넷과 인공지능을 결합하는 등 신기술 기반으로 항만 인프라의 효율과 생산성을 높이는 방안이 필요하게 되었다. 그러나 북유럽의 함부르크 항, 로테르담 항, 싱가포르의 스마트 항만 등 항만의 효율성을 높이고 생산성을 향상하기 위해 스마트 항만을 추진하고 있으나 우리나라는 그림 1과 같이 핵심 기반 시설에서도 스마트 항만 준비가 미흡한 상황이다[1][2]. 항만 인프라 시설물의 상태와 유지관리에 대한 부분을 디지털 트윈(Digital Twin) 기술로 시스템을 구축하고 조건에 따른 시뮬레이션을 적용하게 되면 언제 어디서든 효과적으로 상황 통제가 가능해진다. 항만 인프라 재해와 노후 관리에 필요한 정보는 지진정보, 진동 정보, 풍향과 풍속, 파도의 높이, 수심, 수중 속 항만 인프라 시설에 대한 이미지 영상, 외력, 시설물의 위치 등을 항만 인프라 시설에 설치된 센서로부터 수집하는 것이 일반적이다[3]. 디지털 트윈을 활용하면 재해와 노후화에 대한 다양한 대응 시뮬레이션을 가상 현장으로 구성할 수 있다. 그러나 지금까지 재난이 발생하면 항만을 운영할 것인가에 관한 의사 결정은 항만 인프라 시설에 설치된 센서 데이터를 중심으로 손상에 관한 판단을 할 수 있도록 객관적인 데이터 기반으로 하는 것이 아니어서 항만 인프라 시설 및 관제를 운용하는 담당자가 정확하고 신속한 의사 결정을 내리는데 한계가 있다. 이에 재해와 노후화를 관리하는 관제 시스템과 시설물 또는 설비시스템의 시뮬레이션을 도입하게 되면 신속한 의사 결정을 지원할 수 있게 된다[1][4]. 본 연구에서는 항만 인프라의 재해와 노후화 관리를 지원하는 디지털 트윈을 구축할 때 디자인사고의 맵핑기법을 적용하여 추진 범위를 시나리오로 산정하고 3D 모델링 구현을 통하여 실현화하는 단계별 절차를 제시하고자 한다. 또한 항만 인프라에서 취득된 센싱 데이터, 영상 데이터 등 빅데이터를 가지고 디지털 트윈 기반의 관제 시스템에 가시화하고 분석하는 인천 신항의 시뮬레이션 모형을 제시하여 재해 발생에 의한 항만 인프라 피해 및 미래 노후를 예측하고 안전 및 재산상의 피해를 예방하는 데 이바지하고자 한다.

그림 1. 국가별 스마트 자동화 항만 기술 수준
Fig. 1. Smart automation port technology level by country.

2. 본론

2.1 항만 인프라 재해와 노후화 현황

2.1.1 재난의 개념과 항만 재난

「재난 및 안전관리 기본법」제3조 제1호에서는 재난을 기존의 자연재해 개념(자연재해대책법 제2조)과 기존의 인적 재난 개념(구 「재난관리법」 제2조) 및 국가 기반 재난(국가기반체계 마비 등)을 모두 포함한 것으로 정의한다[5]. 재난으로부터 입은 피해를 '재해'라고 하고, '자연 재난'이란 태풍과 홍수, 폭설, 지진 등 자연 현상으로 발생하는 재해를 의미한다. '인적 재난'은 화재나 붕괴·폭발·교통사고· 환경오염 사고 등 대규모 이상의 피해를 의미한다. '국가 기반 재난'은 에너지·통신·교통·금융·의료·수도 등 국가 기반 체계의 마비와 전염병 확산 등으로 인한 피해를 의미한다. 현재의 재난은 그림 2와 같이 자연재해와 인적 재난, 국가 기반 재난이 복합적인 신개념으로 복합화되었다.

그림 2. 재난의 신개념
Fig. 2. A new concept of disaster.

항만에서의 재난은 자연 재난과 국가 기반 재난이 포함된다. 항만에서의 재난 발생 시 막대한 손실이 되므로 항만 인프라와 배후지역에 대한 재난피해를 줄이고 발생하면 상황을 복구하고 타 영역으로 파급되지 않도록 하는 것이 중요하다.

2.1.2 항만 재난 및 노후화 현황

2011년부터 국토해양부는 태풍의 내습 등에 따른 피해와 기후변화에 따른 항만피해에 대비하고자 국가 차원에서 대규모 항만 방재 구축사업 추진하고 있으며 기후변화에 따른 해수면 상승, 폭풍해일 등과 같은 재난 발생 빈도가 높아짐에 따라 항만에서의 대형 재난 발생 시 항만과 인근 배후도심권의 피해를 최소화하기 위해 예방 차원의 대응 방안을 마련하였다[6]. 이는 기존 항만에 설치된 방재시설의 취약점을 전면 강화하는 대규모 국가 방재사업으로 항만 재난은 항만 자체의 기능 마비에 머물지 않고 이와 연관된 배후물류 기능, 도심권 기능까지도 전면 중단시키는 심각한 사태를 일으킬 수 있어서 국가적으로 매우 중요하게 다루어져야 할 기간시설에 대한 방재계획을 수립하였다[6][7].

우리나라 항만 인프라 노후화 빠르게 진행되고 있으며 30년 이상 된 낡은 항만시설물의 비율은 표 1과 같이 높다.

표 1. 항만시설 유형별 노후화 현황
Table 1. Status of aging by port facility type

Classifi -cation	Outer facilities	Mooring facilities	Port transport -ation facilities	Sum
Sum	149	460	28	637
more than 30 years	38 (26%)	142 (31%)	4 (14%)	184 (29%)

노후화된 항만구조물의 경우 대형선박의 접안, 잦은 자연재해, 물량 증가로 인하여 해양 인프라 구조물이 파손되는 등 손상이 발생하고 있다[8].

항만 인프라의 크레인, 컨테이너와 같은 구조물의 경우 태풍과 같은 자연재해 발생 시 붕괴 및 쓰러짐과 같은 사고로 인해 항만 운영에 차질이 생겨 재산피해가 발생하고 있다. 해양수산부는 항만시설물 유지관리체계 개편방안 마련·시행하여 지금까지는 사고 후에 유지 관리에 중점을 두던 것을 센서와 디지털 트윈과 같은 신기술로 기존 항만 인프라 관련 시스템 기술을 융합하여 재난이나 사고를 예방하고 선제적으로 대응할 수 있는 항만 인프라 안전 강화 체계로 추진하고 있다[9].

2.2 디지털 트윈의 항만 인프라 적용

2.2.1 디지털 트윈과 항만 인프라

노후화된 재래 항만은 물류 처리 경쟁력을 상실하게 하고 항만 주변의 발전을 저하한다. 항만 시설물에 대한 인적기만 유지보수에 따른 인명사고 증대와 접근성의 한계를 극복하기 위하여 체계적 기술의 융합이 필요하다. 디지털 트윈 기술을 항만 인프라 시설물에 적용하면 시설물에 대한 유지보수 상태를 감시하고 실시간 센서로부터 수집된 데이터를 연결하면 조건에 따른 시뮬레이션이 가능해진다. 이러한 관제는 즉각적인 정책의사 결정으로 항만 관련 업무의 대응이 신속해진다. 예를 들어 강풍이 불면 계측 센서에서 이를 인지하고 항만 주변의 계측관리 서버로 전송을 하면 인터넷을 통하여 통합관리시스템 서버에 이상 신호를 저장하고 관리자에게 안내한다. 관리자는 계측시스템 관제 화면에 접속하여 관심/주의/경계/심각의 재난 문자를 송출할 수 있으며 관리주체로써 상황을 판단하여 항만 인프라를 통제할 수 있게 된다. 재난이 발생하면 항만의 운영 여부를 손상에 대한 객관적인 데이터를 기반으로 판단을 할 수 있어 항만 운영자가 신속한 결정으로 재난피해를 줄이는 데 이바지할 수 있다.

2.2.2 디지털 트윈과 스마트 항만 추진사례

우리나라의 최대 물류 항인 부산항은 디지털 트윈 플랫폼을 구축하여 해운과 항만, 물류에 관한 데이터를 분석하여 항만 운영에 최적화를 진행하고 있다[10]. 부산항의 경우 항만 운영 중에 발생하는 조건에 따라 운영사, 운송사 등 이해관계자들이 의사 결정을 지원하는 디지털 트윈 플랫폼을 구축하며 항만 배후물류 통합을 디지털 트윈 플랫폼으로 구축하고 있다[2].

스마트 항만의 추진은 북유럽을 중심으로 진행되고 있다. 이미 2014년부터 유럽은 스마트 항만 프로젝트인 'SMART-PORT' 프로젝트를 추진하여 정보기술을 통한 참여국 간의 해양 접근성 능력 향상과 선석 생산성 향상 등 최대 가용 능력과 사용률을 높이고 자동화 수준을 높이는 것을 세부 목표로 진행 중이다. 북유럽의 대표 국가인 네델란드, 독일, 영국, 스페인, 벨기에에 대한 스마트 항만 추진은 다음과 같다.

네델란드 로테르담 항은 스마트 자동화 항만의 대표주자로 완전 무인 자동화 터미널을 구현을 목표로 IBM과 함께 인공지능 기술 기반의 스마트 항만을 지원하는 디지털 트윈을 구축하고 있다. 로테르담항만은 '프론토(PRONTO)' 시스템을 개발하여 항만 인프라 관계자에게 필요한 정보를 수시로 제공하는 디지털 트윈 플랫폼을 개발하였다. 프론토 시스템은 입항하는 배에 사전에 수심을 알려주고 로테르만 항만의 입항 규정을 사전에 제공하고 기다린 선박의 상태와 계류 선박의 출항 가능한 시간을 알려주어 항만에 관계된 운송사와 선사, 터미널 운영회사에 필요한 정보를 수시로 원하는 때에 확인할 수 있도록 제공해 준다. 로테르담항만의 디지털 트윈 구현은 선박 물동량의 획기적인 증가와 항만 사용자에 대한 서비스 품질이 향상되었고 유럽에서 가장 안전하고 신속하게 항만에 접안이 가능하고 선사 비용이 투명한 항만으로 인정받고 있다[11]. 로테르담항만은 항만 관련 업무절차를 디지털 트윈으로 시각화하여 선박의 입출항 경로, 하역 장비, 부두 가로등 등에 사물인터넷 센서를 연결하여 진행 중이며 선박의 대기 시간을 최소화하기 위한 항행 정보와 기상정보, 조류파악, 파도 높낮이 정보, 바람량 등 해상의 기상정보를 파악하여 정확한 선박 계류 시간과 벙커링 시간, 승선 시간 및 출항 시간 등을 사전 계획하고 항만 내의 프로세스를 최적화를 진행하고 있다[3].

독일은 함부르크 항을 'smartPort' 프로젝트로 스마트 항만으로 추진하고 있다. 함부르크항만의 'smartPORT'는 에너지 절감과 친환경 에너지 전환을 목표로 하는 'smartPort Energy'와 공급 사슬(Supply Chain) 및 물류 네트워크의 최적화를 목표로 하는 'smartPort Logistics'를 추진하고 있다. 또한 'transPORT rail'과 'Port Road'로 항만과 연계하여 철도와 도로에

관한 연결이 가능하다[11].

영국은 2019년 'Maritime 2050'으로 스마트 항만의 기술개발 계획을 발표하여 2030년까지 '혁신 허브(innovation hub)'를 설립을 지원하여 2019년에 타인 항(Port of Tyne)에 해양 혁신 허브를 설립하였다. 런던 게이트웨이 터미널(London Gateway Terminal)을 시작으로 스마트 항만 시스템 도입하여 컨테이너의 위치를 제공하여 하역과 통관, 게이트 통과 등 정보를 제공하고 있다[11].

스페인의 바르셀로나항만은 물류, 모빌리티, 환경에 기술을 기반으로 한 스마트 항만을 추진하고 있다. 물류의 경우 실시간으로 화물을 추적할 수 있고 신기술 기반으로 유지보수를 할 수 있다. 모빌리티 추진은 스마트 교통관제, 첨단 주차, 자율 차 운송 등을 추진하고 있다. 환경 측면에서는 에너지 효율 관리, 배출물 관리, 물 관리, 대체 에너지 관리 등 광범위한 탄소 저감을 추진하고 있다. 항만의 다양성 확보를 위한 시민참여를 활성화하고 항만 배후 시설의 디지털 변화를 이해관계자의 참여와 협력을 끌어낼 수 있도록 거버넌스를 만들어 주도하고 있다. 'PortLink' 시스템으로 바르셀로나항만의 해상뿐 아니라 육로에 관한 서비스 연계도 진행하고 있다[11].

벨기에는 앤트워프 항(Antwerpen)을 중심으로 추진하고 있다. 앤트워프항만은 항만 이해관계자들의 정보 공유를 위한 'NxtPort' 플랫폼을 중심으로 스마트 항만을 추진하고 있다. 'NxtPort' 플랫폼은 마켓 플레이스 기능이 있어서 스마트 항만에 관련한 다양한 API 연동과 서비스를 마켓 플레이스를 통하여 팔 수 있어 스마트 항만 관련 신기술과 신사업에 대한 지원이 가능하다[11].

2.3 항만 디지털 트윈 적용 절차

2.3.1 항만 디지털 트윈 적용 절차

디지털 트윈 기반의 항만 인프라 시스템의 경우 개발 대상은 항만법의 항만시설 정의 중 외곽시설, 계류시설, 임항교통시설, 항만 배후부지로 유형을 설정할 수 있다. 각 항만시설은 표 2와 같이 외곽시설은 갑문, 방파제, 파제제, 방사제, 방조제, 도류제, 호안이 대상이 되고, 계류시설에는 안벽, 돌핀, 잔교(棧橋), 소형선 부두, 부잔교, 선착장, 램프가 대상이 된다.

각 항만시설은 표 2와 같이 외곽시설은 갑문, 방파제, 파제제, 방사제, 방조제, 도류제, 호안이 대상이 되고, 계류시설에는 안벽, 돌핀, 잔교(棧橋), 소형선 부두, 부잔교, 선착장, 램프가 대상이 된다. 임항 교통 시설로는 도로, 교량, 철도, 궤도, 운하가 대상이 되며, 항만 배후부지로는 매립 용지, 준설토투기장, 항만 유휴부지, 도시용지가 대상이 된다. 항만 인프라의 주요 시설물에 한정하여 노후도 및 재해위험도에 따라 시설유형, 중요도, 종류·규모 순으로 구분하여 필요한 시설을 정의한다.

표 2.디지털 트윈 구현에 따른 항만시설 유형
Table 2. Types of Port Facilities according to Digital Twin Implementation

Type	Target Facilities
Outer facilities	Lock gate, Breakwater, Wavebreaker, Groin,Tidal barrier, Training wall, Seawall
Mooring facilities	Quay, Dolphin, Landingpier,|Lighter's wharf, Floating pier, Dock, Lamp
Port traffic facilities	Roads, Bridges, Railways, Tracks, Canals
Port hinterland	Landfill, Dredged soil Dumping ground, Port idle land, Urban land

항만 인프라 재해와 노후화 관리를 위한 디지털 트윈의 전체적인 적용 절차는 그림 3과 같이 5단계로 적용할 수 있다.

(1) 기존 항만 시스템의 주요 내용과 외부연계 시스템을 확인한다.

(2) 기존 항만 시스템의 확인 내용을 기반으로 재해와 노후화 관리에 해당하는 주요 활동별 시나리오를 맵(Map)으로 작성하며 시나리오 맵 작성방식은 창의적 디자인 설계 방법 중 맵핑 기법

을 활용한다[12]. 이때 항만 인프라 관련 시스템 중에서 인프라 재해와 노후화 관리를 담당하는 시스템으로 범위를 줄여서 시나리오 맵을 작성한 뒤 맵 통합을 통하여 항만 시나리오를 확정한다. 이는 항만 인프라의 일부분에 대한 디지털 트윈을 구현하는 것이므로 통합된 시나리오에 대하여 재해와 노후와 부분의 필수 시나리오 여부를 디지털 트윈 추진 주체와 시스템 전문가들의 의견을 통하여 선정한다.

(3) 선정된 시나리오 맵에 관련한 정형 데이터를 기존의 항만에 연결된 유관 시스템 데이터베이스에서 수집한다. 부족한 데이터는 현장 실사를 통하여 디지털 트윈으로 구현하는데 필요한 비정형 데이터를 수집한다.

(4) 항만 디지털 트윈을 3D 모델을 구현한다. 기존의 항만 시스템 데이터를 활용하여 항만 디지털 트윈을 시각화한다.

(5) 항만 디지털 트윈의 시뮬레이션 여부를 결정한다. 시뮬레이션 구현을 하지 않으면 차후에 디지털 트윈 적용으로 연기한다. 시뮬레이션 구현이 확정되었으면 항만 디지털 트윈 추진 주체와 협의 하여 항만 인프라 재난과 노후화 관리 시 필요한 시뮬레이션 시나리오를 생성한다. 다양한 시나리오 중 확정은 프로젝트 기간과 주어진 자원 내에 디지털 트윈 적용 초기 목표를 달성할 수 있는지를 판단 기준으로 삼는다. 확정된 시나리오 기반으로 기존의 항만 시스템의 데이터를 연결하여 항만 인프라 재해와 노후와 관리를 위한 디지털 트윈 시뮬레이션을 구현한다.

2.3.2 항만 유관 시스템 구성 확인

해양수산부는 정보관리체계를 보완하기 위해 항만시설 정보일원화 및 항만시설물 유지관리시스템의 고도화에 관한 기술개발을 진행 중이며 항만시설 정보일원화 연구의 경우 항만시설물 유지관리시스템(POMS), 시설물 통합관리 시스템(FMS), 해운항만 물류 정보시스템 (PORT- MIS) 등 시설물 운영과 관련되는 각 기관의 항만시설 정보일원화를 통한 관리 효율성 향상을 목표로 하고 있다[13]. 항만시설물 유지관리시스템(PoMS)의 데이터베이스는 그림 4와 같이 항만시설 관리주체자의 협조를 통하여 유지보수사업 설계도서, 준공 도서(초기검측 결과), 정밀점검 및 정밀안전진단 보고서를 기반으로 데이터를 획득하고, 실사를 통하여 현장평가와 유지보수사업 계획을 기반으로 구성한다. 항만시설물 유지관리시스템(PoMS)의 주요 기능은 그림 5와 같다[14]. 첫째, 정기점검, 보수 및 이력정보, 안전시설 등의 시설물 정보, 둘째, 상태등급 현황, 보수우선순위, 시설물 통계, 점검 현황 등의 의사 결정 지원 부분, 셋째, 점검보고서, 계획평면도, 운영세칙 등 자료실 기능, 최종 사용자 관리, 시설물 관리, 보수 운영순위 산정 등 시스템 관리로 구분할 수 있다. 이중 특히 디지털 트윈 구현을 위해서는 주로 시설물 정보와 의사 결정을 지원하는 정보와 시설물관리, 보수 운영순위 등을 활용한다. 항만 인프라 관련 PoMS를 포함한 내부 연계 시스템은 그림 6의 왼쪽과 같이 항만시설물 유지 관리시스템(PoMS), 항만 지하 시설물 웹 정보시스템(portGIS), 항만 건설 사업 정보시스템 (port CALS), 전국 파랑관측 자료제공 시스템(WINK)이 대표적이다. 항만 내부 연계 시스템의 대표적인 정보는 지상 시설물 관리정보, 지하 시설물 정보, 건설 사업 정보, 파랑 정보가 있다. 항만 관련 외부의 다른 분야로부터 얻을 수 있는 정보는 그림 6의 오른쪽과 같이 시설물 정보관리 종합시스템(FMS), 국토 지반정보 포털시스템, 공공데이터 포털, 기상자료 개방 포털, 국토지리 정보원 등이 대표적이다[14].이러한 외부연계 시스템 각 각으로부터 시설물 및 점검정보, 지반정보, 지진정보, 날씨 정보, 항공사진 정보를 얻을 수 있다. 기존의 항만 운영시스템 기능을 분석하고 연계 가능한 시스템 분석하는 것 뿐만 아니라 새롭게 스마트 항만으로 인해 연동되는 장치와 새롭게 개발되는 시스템을 분석하는 것도 실행한다. 예를 들어 안전진단 보고서를 기초로 케이슨 구조의 항만시설에 대한 시설 유지 관리 데이터는 표 3과 같이 수집한다. 안벽 시설의 케이슨의 데이터 구조는 해역 위치, 규모, 연장, 준공연도, 수심, 사용 연수, 상태등급을 지니고 있다.

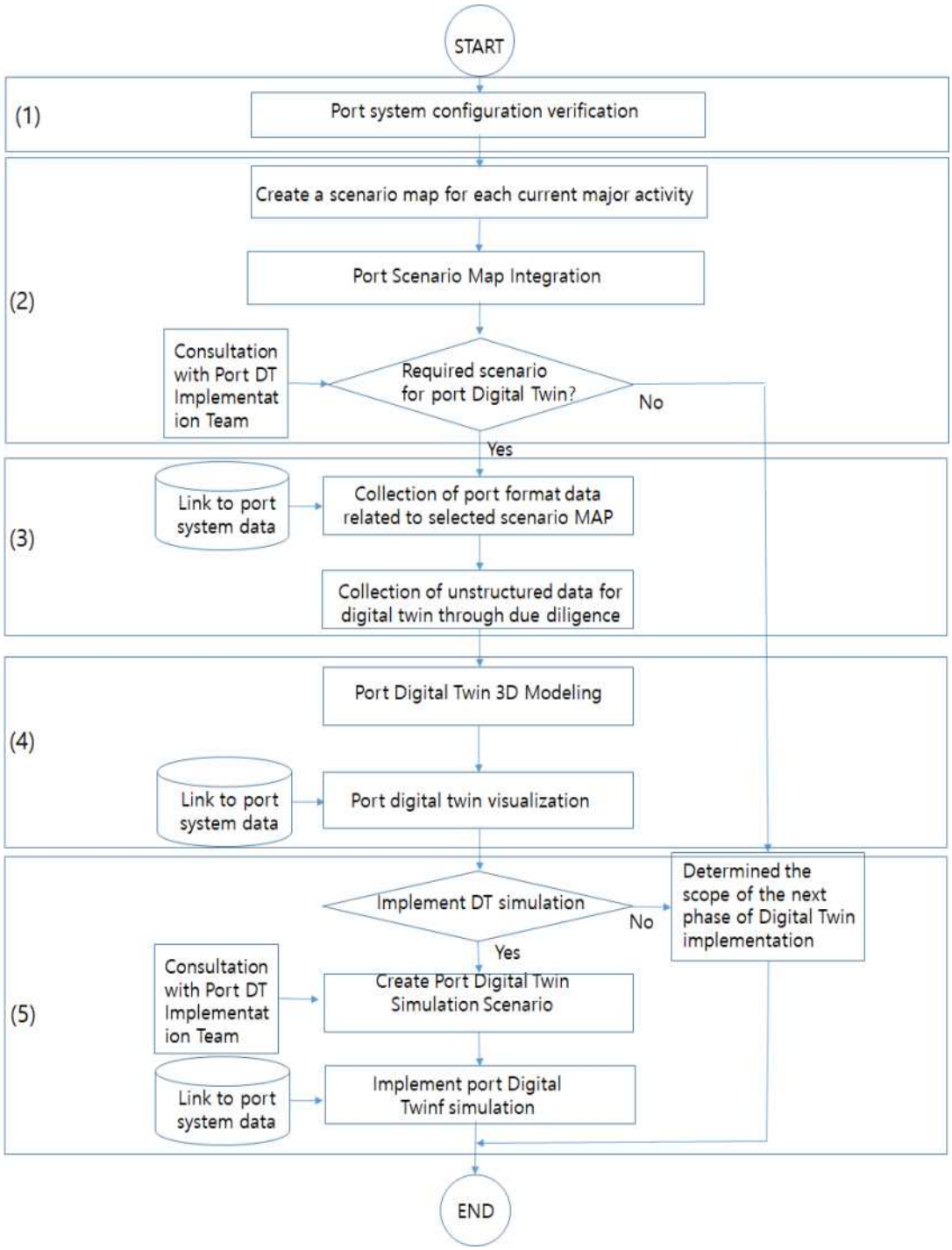

그림 3. 항만 디지털 트윈 적용 절차
Fig. 3. Procedures for Implementing Port Digital Twin

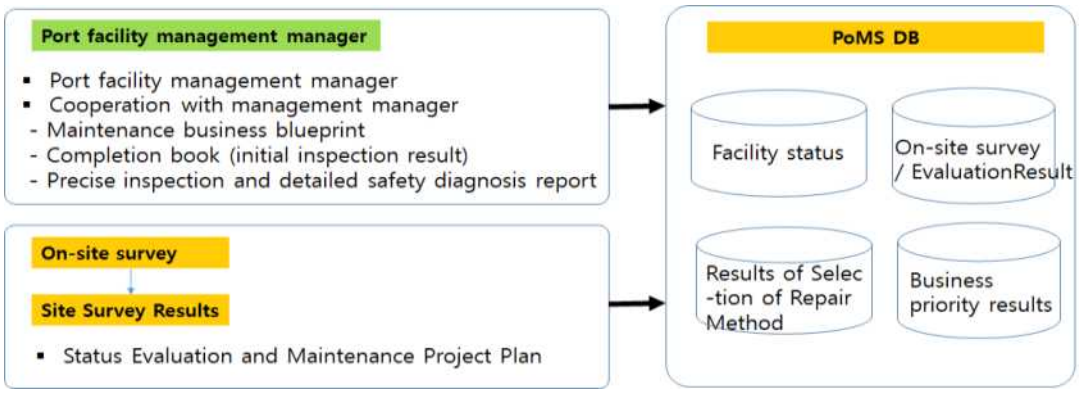

그림 4. 항만시설물 이력 및 DB 구축 흐름도
Fig. 4. Port Facilities History/DB Construction Fowchart

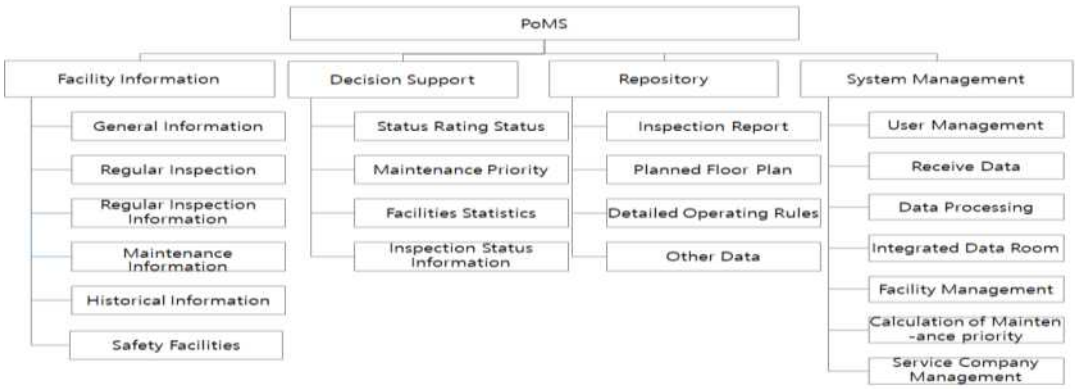

그림 5. 항만시설물 유지관리시스템(PoMS) 주요 기능
Fig. 5. Key Features of the Port Management System(PoMS)

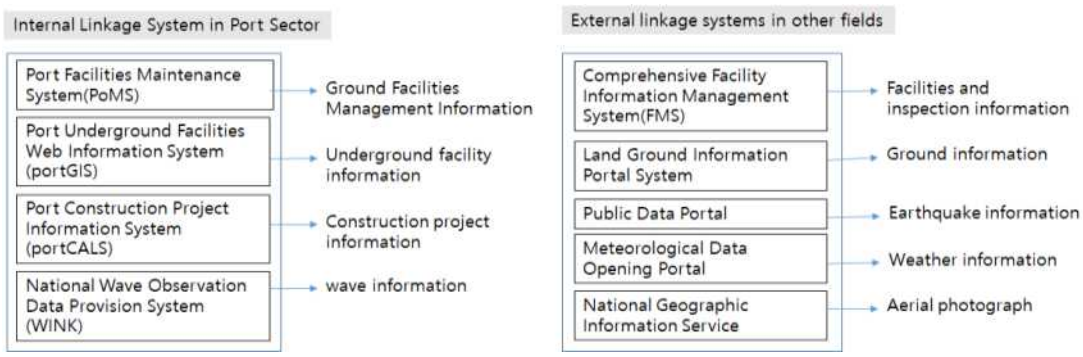

그림 6. 항만 분야의 내/외부 연결 시스템과 관련 데이터
Fig. 6. Internal/external connection systems and related data in the port sector

표 3. 항만시설 케이슨 손상 유형별 상태 데이터
Table 3. Condition data by member damage type of caisson port facilities

Sample No.	By Facility	Structure	Sea Area	Scale	Extension	Year of Completion	Depth of Water	Years of Use	Status Grade		
									mim	max	avg
#01	quay	caisson	South	40,000	400	2007	17	14	4.00	4.00	4.00
#02	quay	caisson	South	40,000	400	2007	17	14	4.00	5.00	4.75
#03	quay	caisson	South	40,000	400	2007	17	14	5.00	5.00	5.00
#04	quay	caisson	South	40,000	400	2007	17	14	4.00	4.00	4.00
#05	quay	caisson	South	12,000	1,100	2009	18	12	5.00	5.00	5.00
#06	quay	caisson	South	12,000	1,100	2009	18	12	5.00	5.00	5.00
#07	quay	caisson	South	12,000	1,100	2009	18	12	4.00	5.00	4.75
:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:	:
#230	quay	caisson	Southt	20,000	470	2013	12.5	8	4.00	5.00	4.08

2.3.3 재해와 노후화 관리용 시나리오 맵 작성

항만 인프라 관련 디지털 트윈에 필요한 시나리오를 주요 액티비티 중심으로 시나리오 맵을 작성할 때 해당 부서나 부분 간의 필수 정보에 대한 인식이 서로 다르므로 스프린트 방법론의 맵핑기법을 응용할 수 있다. 예를 들어 항만시설물 관리 관련 주요 액티비티를 각 부서나 부분에서 맵으로 작성을 하게 되면 시설정보(기본정보, 설계정보, 조사단위 정보, 평가단위 정보, 도면 및 사진 정보, 보수 관련 정보), 조사 결과(외관 조사, 측량 결과, 수중조사 결과, 사진 촬영 결과, 측정 자료), 분석결과(상태지수 결정, 보수필요성 평가, 보수공법 선정, 대략 보수비 산출, 보수 우선순위 결과), 보수공법 정보(공법목록/코드, 공법별 단가), 입출력 운영정보(시설물 현황, 현장 조사 결과, 시설물 평가 결과, 공법 선정 결과, 보수 우선순위 결과, 항만 CALS와 자료 공유), 시설물 유지 관리 정보(시설물 기본정보, 시설물 현장 조사. 시설물 평가, 보수공법 선정, 보수 우선순위 결정, 유지보수 사업예산 수립)의 정보가 각자 주요 액티비티로 그림 7과 같이 작성된다. 이에 대한 해당 부서 관계자와 디지털 트윈 추진 주체가 공동으로 맵핑 작업을 실시하여 재해와 노후화 관리를 디지털 트윈으로 구현할 때 필요한 정보만 그림 8과 같이 추리고 이

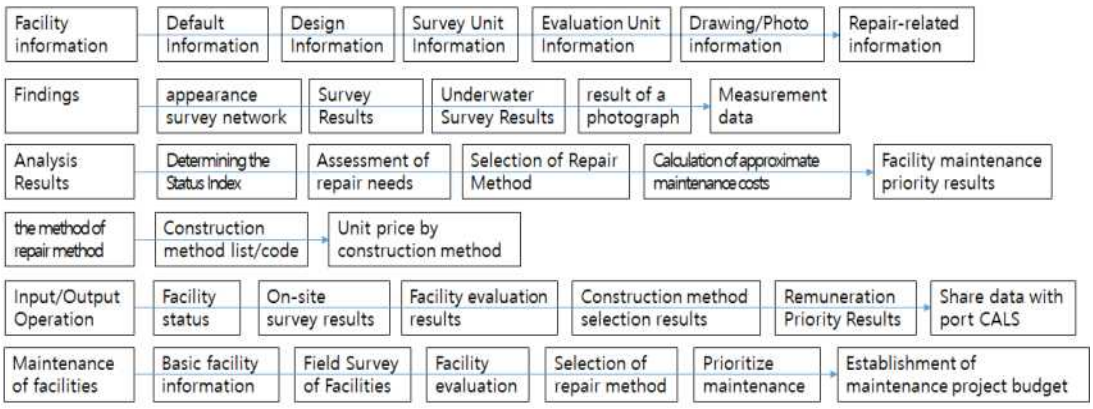

그림 7. 항만 시설물관리 주요 액티비티 맵 작성
Fig. 7. Creating a Major Activity Map for Port Facilities Management

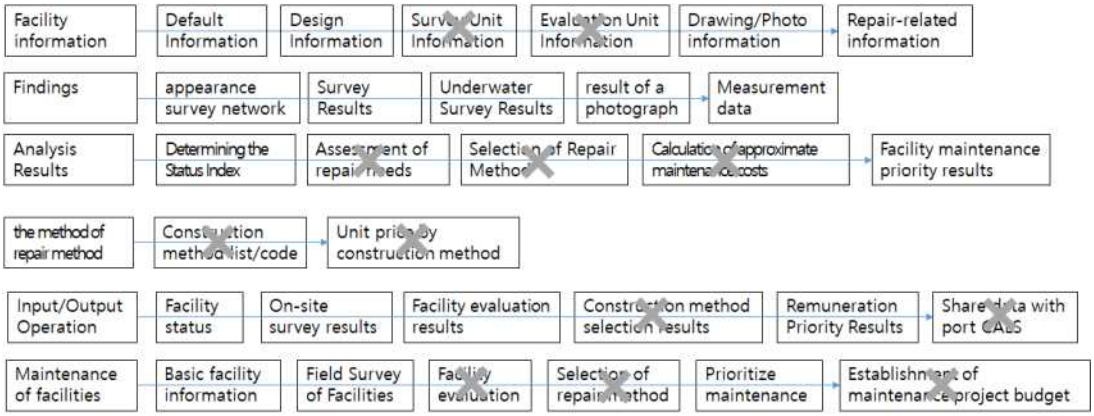

그림 8. 항만 시설물 관리 주요 액티비티 중 필수 액티비티 선정
Fig. 8. Selection of essential activities among the main activities of port facility management

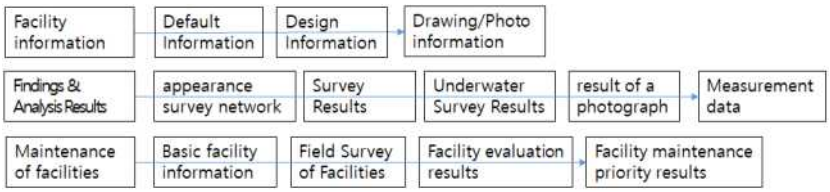

그림 8. 항만 시설물관리 디지털 트윈용 시나리오 맵 통합
Fig. 9. Integration of scenario maps for port facility management digital twin

러한 과정을 최적의 해당 맵이 작성되었다고 이해관계자들이 합의할 때까지 반복하여 최종적인 맵을 그림 9와 같이 완성한다. 항만 인프라 전체를 디지털 트윈 시나리오로 작성하는 것은 시간과 자원 부족으로 실현이 어려우므로 항만 인프라 재해와 노후화 관리에 해당하는 액티비티를 중심으로 맵을 완성한다. 각 기능에 관한 부서의 전문가들은 있으나 이를 융합하고 통합해서 필수 시나리오를 정하는 것이 중요하므로 디지털 트윈 추진 주체와 시스템을 실제 구현하는 전문가가 함께 공동 워크숍을 통하여 실행하는 것이 필요하다.

2.3.4 항만 디지털 트윈 데이터 수집

항만 디지털 트윈 구현을 위한 데이터 연동은 항만 인프라 노후화 실시간을 확인하고 상태평가 결과를 실시간을 확인하여 실시간 모니터링 관제를 위하여 필요하다. 자연재해를 모사한 항만시설물 노후화 상태에 따른 손상 발생 시뮬레이션을 하기 위하여 기존 항만 인프라 시스템의 DB 및 센서 데이터를 이용한다. 노후화 데이터, 안벽·크레인·수중 모니터링 센서 데이터를 연계하여 모니터링 내용을 시각화할 수 있다. 수중 구조물 정보, IoT 기반 재해/재난 대비 외곽시설, 드론 영상 기반 항만시설, 선박 계류시설 등 센서로 받은 데이터 모니터링 결과를 그림10과 같이 수집하여 디지털 트윈 3D 모델링과 시뮬레이션에 활용한다.

2.3.5 항만 디지털 트윈 3D 모델링

항만 디지털 트윈의 3D 모델링은 항만 관련 트럭, 크레인, 야드 크레인, 트럭, IOT 등 객체를 디자인하고 항만 배경을 디자인한 뒤 3D 모델링을 한다. 항만 전체 화면을 GIS 매핑을 하고 3D 모델을 배치한다. 데이터 연동을 항만 운영시스템과 데이터베이스 API 연동하고 디지털 트윈 플랫

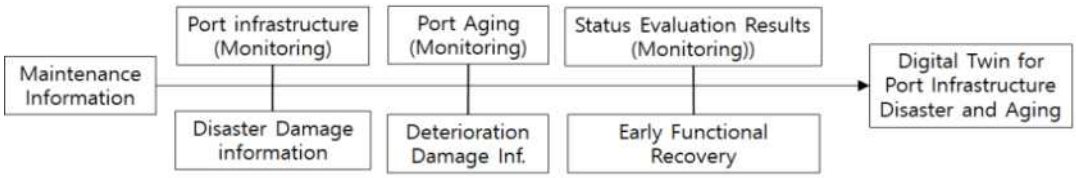

그림 10. 항만 디지털 트윈 데이터 수집
Fig. 10. Data Collection for Port Digital Twin

폼 실시간 데이터 연동시킨다. 3D 모델링 단계는 표 4와 같이 3개의 하위단계로 수행이 된다.

표 4. 항만 디지털 트윈 3D 모델링 구현 단계
Table 4. Port Digital Twin 3D Modeling Implementation Phase

Phase	Target Facilities
(1) 3D modeling	▪ 3D model production through drawing and due diligence ▪ Creating a Digital Twin Object ▪ Build 3D libraries for Port Digital Twin
(2) Zoning and Entering GIS Information	▪ Production and placement of 3D models according to drawings and due diligence ▪ Establishment of space management areas such as control areas and work areas ▪ GIS Information Settings for Location Information Display ▪ Settings to indicate sensor/camera position and status
(3) Implementing 3D Modeling	▪ Manage the location of equipment in real time using communication such as WiFi ▪ Check the condition of the building in real time using sensor data ▪ Implementation of event alarm function such as safety accident/failure using sensor data

(1) 도면 및 실사를 통한 3D 모델 제작 수행과 각 객체의 제작하고 항만 디지털 트윈 구현에 필요한 3D 라이브러리를 구축한다. 항만 인프라 재해와 노후화 관련 공간의 항만 도면을 기반으로 그림 11과 같이 작성하고 일반 도면만으로 부족한 부분은 항만 실사를 통하여 보강하여 실사를 통한 보강된 도면을 가지고 3DMax 도구를 활용하여 3D 객체를 그림 12와 같이 작성한다.

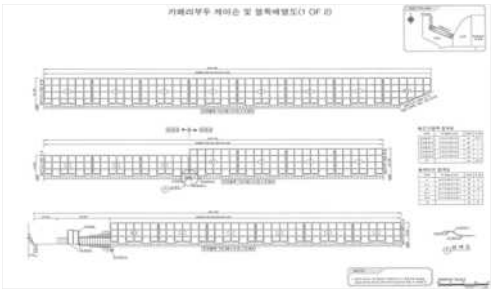

그림 11. 항만 도면 사례 (케이슨),
도면출처:녹원정보기술(주), “카페리 부두 케이슨 및 블록 배열도(1 OF 2)
Fig. 11. Port Drawings Example (Caisson),Drawing Source: Rockwon Information Technology Co., Ltd., "Cafely Pier Cason and Block Arrangement Diagram (1 OF 2)

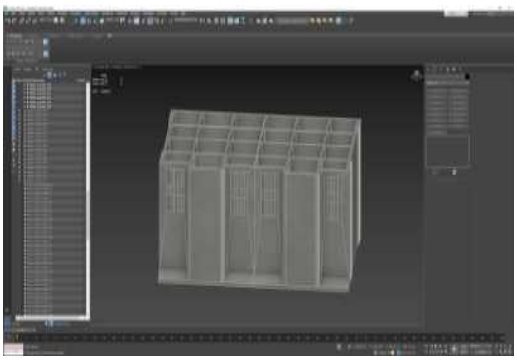

그림 12. 항만 오브젝트 3D 제작 사례 (케이슨)
그림 출처:녹원정보기술(주)
Fig. 12. Port Object 3D Production Example (Caisson)
Image Source: Rockwon Information Technology Co., Ltd.,

(2) 도면 및 실사에 따른 3D 모델을 제작 후 배치하고 관리구역을 설정한다. 공간 관리구역은 관제 영역과 작업영역으로 나누고 위치정보를 나타내기 위하여 GIS 정보를 설정한다. 센서와 카메라

의 위치를 설정하고 상태 표출에 대해 설정을 한다.

(3) WiFi 등 통신기술을 이용하여 실시간으로 장비의 위치를 관리하고 항만 인프라의 재난과 노후와 관련 센서 데이터를 이용하여 실시간으로 건물의 상태 확인한다. 센서 데이터를 이용하여 안전사고와 고장 등 이벤트 알람 기능을 그림 13과 같이 Unity 도구로 구현한다.

그림 13. 케이슨 디지털 트윈 제작 사례(안벽)
그림 출처:녹원정보기술(주)
Fig. 13. Port Infrastructure Digital Twin Prototype Case (Quay)
Image Source: Rockwon Information Technology Co., Ltd.,

2.3.6 항만 디지털 트윈 시뮬레이션

디지털 트윈 기반의 재해 발생 및 노후도 시뮬레이션은 재해 발생 시 피해 상황 및 노후도 변화를 시뮬레이션하여 예측할 수 있다. 재해 발생 시뮬레이션은 가상 공간상의 항만구조물에 태풍, 해일, 지진 등 가상의 재해 상황을 모사한 재해 하중을 항만구조물에 가하게 되고 이 재해 하중에 의해 현재 항만 인프라들의 거동이 어떻게 변화하는지를 예측할 수 있다. 시뮬레이션을 통하면 재해 및 노후가 발생하기 이전에 피해 발생 가능성이 큰 인프라 구조물들을 효율적으로 유지 관리하고 보수 보강할 수 있으며 실제 재해 및 노후화에 의한 항만 인프라 손상을 미리 예방할 수 있다. 항만의 계류시설에 대해서 디지털 트윈 모델링을 실시하고 구축된 디지털 트윈 모델상에 항만시설물 데이터 연동을 통해 각 시설물의 현재 상태 및 계측 데이터 등을 가시화하고 분석 데이터를 가시화하는 것이 가능하다. 항만 인프라의 설계정보, 구조 정보, 항만 환경 정보, 주변 시설물 정보 등을 활용하여 노후화 및 재해 발생 상황을 시뮬레이션하여 가시화가 가능하며 이를 바탕으로 유지 관리 우선순위 도출이 가능하다. 표 5는 케이슨과 안벽의 이벤트 발생 데이터를 기준으로 구역1의 지진 지진파 응답 스펙트럼에 대한 지반, 지역, 중요도를 설정하여 시뮬레이션을 10초간 실시한 기준 데이터로 X축의 모습을 시각화 한 결과는 그림 14로 나타난다.

표 5. 시설물 시뮬레이션 데이터
Table 5. Facility Simulation data

Event History	#	Name	Detail	Date
	1	quay01	overall grade E	2022.03.12
	2	quay04	overall grade E	2021.09.09
	3	crane09	Tilt	2019.02.03
Facility Simulation History	Requester	Condition	Request Date	Completion Date
	2022022	1	2022-01-15le22-20	2022-01-15152220
	Pre condition	6.Seismic Wave Response Spectrum	Analysis Time	10 sec.
Condition setting	Ground Coefficient	1.0	Regional Coefficient	Area1 0.11g
	Importance Coefficient	1.2	Axis	X

그림 14. 시설물 시뮬레이션 조건과 결과 사례(케이슨)
그림 출처:녹원정보기술(주)
Fig. 14. Examples of results according to facility simulation conditions(Caisson)
Image Source: Rockwon Information Technology Co., Ltd.,

재난 위험도에 관한 시뮬레이션 데이터는 표 6과 같이 케이슨과 안벽의 이벤트 발생 데이터를 기준으로 인천 신국제여객부두를 대상으로 일정한 시점에 대해 재해 조건을 지진으로 하여

지진 강도 4.6으로 시뮬레이션을 한 결과는 표 6의 시뮬레이션 결과 값 위험 정도 50%로 그림 15와 같이 확인할 수 있다.

표 6. 재난 시뮬레이션 조건과 결과 데이터
Table 6. Disaster simulation conditions and out come data

<table>
<tr><td rowspan="4">Event History</td><td>#</td><td>Name</td><td>Detail</td><td>Date</td></tr>
<tr><td>1</td><td>quay01</td><td>overall grade E</td><td>2022.03.12</td></tr>
<tr><td>2</td><td>quay04</td><td>overall grade E</td><td>2021.09.09</td></tr>
<tr><td>3</td><td>crane09</td><td>Tilt</td><td>2019.02.03</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Disaster Risk Simulation</td><td>Requester</td><td>Request Date</td><td colspan="2">Completion Date</td></tr>
<tr><td>20220222123</td><td>2022-01-15le22-20</td><td colspan="2">2022-01-15152220</td></tr>
<tr><td>Analysis Target</td><td>Start Analysis</td><td colspan="2">End of Analysis</td></tr>
<tr><td>Incheon New International Passenger Pier</td><td>2022-01-18 14:22:20</td><td colspan="2">2022-01-18 14:43:20</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Disaster Simulation Results</td><td rowspan="2">Disaster Conditions</td><td rowspan="2">Earthquake</td><td>Damage Intensity</td><td>4.6</td></tr>
<tr><td colspan="2">Risk level</td><td>50%</td></tr>
</table>

그림 15. 시설물 시뮬레이션 조건과 결과 사례(케이슨), 그림 출처:녹원정보기술(주)
Fig. 15. Examples of results according to facility simulation conditions(Caisson), Image Source: Rockwon Information Technology Co., Ltd.,

2.3.7 항만 인프라 디지털 트윈 추진 성공 요인

항만 물류 경쟁력 확보 방안 중 스마트 항만이 주목받고 있다. 스마트 항만 추진은 항만 인프라 및 배후단지의 경쟁력을 높이고 물동량의 증가로 신규 일자리와 관련된 기술 기반의 사업 활성화에 이바지한다. 그러나 지금까지의 디지털 트윈 구축은 제조, 항만, 스마트시티 등 영역별 사업으로 기술중심으로 별도로 진행되고 있어 사업 추진 주체에 따라 디지털 트윈 적용 절차와 범위 협의 등 지침이 불명확한 상태이다. 이런 상황은 향후 사업별 디지털 트윈이 호환되지 않아 데이터나 서비스의 통합관리에 어려움이 예상되므로 해양 인프라 관련 분야와 연관된 디지털 트윈 추진 시에는 추진 절차 적용과 3차원 객체로 모델링 된 해양 인프라 관련 객체에 대한 공유체계를 마련하여 디지털 트윈 활용도를 높이고 부문별 구축 추진 중인 디지털 트윈 간의 연계로 시장을 확대할 수 있는 장기적인 기반 조성이 필요하다.

3. 결 론

우리나라는 수출입 화물의 경우 대부분이 항만으로 운송되고 있고 수출입에 의존도가 높은 나라이다. 만일 항만 인프라에 재해가 발생하고 항만시설의 노후화로 안전에 위협을 받게 되면 국가 경제에 미치는 영향력은 심각하다. 노후화되고 재해에 취약한 항만 인프라를 디지털 트윈 기반의 스마트 항만으로 개선함으로써 첫째, 재해로 인한 항만 인프라의 공사로 항만 사용 중지와 같은 사고를 미리 방지함으로써 물류비용 감소 등의 효과를 볼 수 있고, 둘째, 디지털 트윈 접목한 유지 관리 기술을 개발함으로써 관련된 일자리 창출을 통해 고부가가치 산업 육성 및 경제 활성화에 이바지할 수 있으며, 셋째, 국민의 노후 항만 인프라에 대한 불안감을 해소하여 궁극적으로는 삶의 질 향상에 이바지할 수 있다.

본 연구에서는 항만 인프라 재해와 노후화의 현황에 따른 문제 해결 방안으로 항만의 디지털 트윈 적용 절차를 제시하였다. 상황별 시나리오 구축과 운영을 디지털 트윈 기반으로 구축하면 보다 세밀한 항만 인프라 재해와 노후화에 관한 실시간 통합관제 기술을 확보하여 예지적인 항만 인프라 관리 및 안전을 확보할 수 있다. 또한 항만 인프라 시설 센서로부터 실시간으로 받은 데이터를 모니터링하여 사전에 설계한 시뮬레이션 조건에 따라 데이터와 조건을 입력하여 시설과 재난에 대한 시뮬레이션의 시각화 과정을 제시하

였다. 현재 항만 관련 인프라에는 IoT 등 센서를 부착하여 스마트 항만의 개별적 기술을 중심으로 진행되고 있으나 초기 단계라 볼 수 있고 설치 항만과 그 범위가 한정적이다. 그런데도 기존 항만 인프라 시스템의 데이터와 새롭게 획득하게 되는 센서 데이터를 기반으로 예측 알고리즘이 연계되어 재난과 노후화에 대한 신규 예측 알고리즘을 디지털 트윈으로 통합하고 융합된다면 사전에 재난을 예방하고 안전사고에 대한 신속 대응이 가능해질 것으로 기대한다.

REFERENCES

[1] J. H. Yeon, "Busan Port Smart Logistics Present and Future," Busan Port Authority, 2020

[2] J. H. Yeon, "The direction of establ ishing a smart shipping port logistics system at Busan Port," National Territory 2020.11, pp19-26, 2020

[3] KIMST, "Announcement of a plan to select new tasks for ICT-based port infrastructure smart disaster response technology develop ment project in 2021", 2021

[4] J. Y. Kim, "Smart port maintenance technology is developed", the latest civil news, Journal of the Korean Civil Society, 69(8), pp89-93, 2021

[5] H. G. Kim, "A study on impacts of port accidents & disasters and responsive measures", 2012

[6] H. G. Kim, J. P. Lee, T. Y . Ha, J. W.Lee, "A study on impacts of port accidents & disasters and responsive measures", 2012

[7] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, "Aramir Project - Establishing a plan to prevent flooding of low-lying tsunami in the port and hinterland areas", 2011

[8] M. Y. Park, J. H. Lee, S. W. Park, J. K.Yim,"A Study on Maintenance Cost Model for Establishing a Strategies of Port facility maintenance", Journal of the Korean Society of Disaster Information, 16(2), pp.276 - 290, 2020

[9] Policy briefing, "The Ministry of Oceans and Fisheries prepares and implements a plan to reorganize the port facility maintenance system", https://www.korea.kr/briefing/pressReleaseView.do?newsId=156392755, 2020

[10] Busan Port Authority, "Busan Port will take the lead in smart port logistics with digital twin technology," press release, 2021

[11] S. H. Won, S. W. Cho, "A Study on the Implications of Smart Port Policy in Europe", EUResearch, No.56, pp253-291, 2020

[12] B. Kowitz, J. Zertsky, J. Knapp,"Sprint the bestselling guide to solving business problems and testing new ideas the Silicon Valley way", Transworld Pub lishers, 2016

[13] J. K. Kim, S. B. Hong, S. H. Park, "Development of Big-data and Digital Twin based Management System for Port Infrastructure", KSCE Magazine, No.70, Vol.6, 2022

[14] Ministry of Oceans and Fisheries,"Final Report on the Improvement of Port Facilities Maintenance System and Pilot Operation", 2016

저자 약력

장 혜 정 (Hye-Jung Chang) **(종신회원)**

- 1990년 8월 : 중앙대학교 대학원 SW공학(공학석사)
- 2017년 2월 : 성균관대학교 U-City Planer (공학박사)
- 2017년 3월 ~ 2019년 8월 : 청운대학교 창의융합대학 융합기술경영학부 조교수
- 2019년 9월 ~ 현재 : 서경대학교 융합대학 부교수

〈관심분야〉 스마트시티, 빅데이터, 디지털트윈, 산학융합기술, 디자인싱킹, 안전도시,