

도시 지하철도 물류 시스템의 운영시나리오 분석을 통한 인터페이스 요구사항 보완 연구

황선우¹, 김학성¹, 김주욱¹⁺

¹한국철도기술연구원 첨단물류시스템연구실

Improvement Interface Requirements through Operation Scenario Analysis of Urban Railway Logistics System

Sunwoo Hwang¹, Hagseoung Kim¹, Joouk Kim¹⁺

¹Advanced Logistics System Research Department, Korea Railroad Research Institute

Currently, It is recognized as a high-cost inefficient logistics system that increases traffic congestion and environmental problems due to the increase in traffic volume caused by the activation of the online market. In order to improve inefficient problems such as inevitable traffic congestion and environmental problems due to increased traffic, it is necessary to develop cargo transportation system technology using existing urban railway infrastructure and cargo-only urban railways. The urban subway logistics system is a logistics system that requires a combination of various technologies to solve the rapidly increasing demand for urban logistics nationwide and road traffic problems. This paper recognized the existing traffic congestion and environmental pollution of road traffic as problems, identified the matters to be supplemented for each contact point at the subsystem and component level constituting the target system, and supplemented the contact requirements presented above. This study requires a plan to ensure the reliability and safety of operation from various perspectives as a complex system operated for one purpose by combining various technologies. The results of this study can contribute to the initial configuration and basic data to solve the interface bottleneck of the urban subway logistics system to be carried out in the future.

Keywords: Urban Railway Logistics, City Freight Transport, Operation Scenario, Systems Interface, Design Structure Matrix(DSM)

논문접수일 : 2021.10.13.

심사완료일 : 2021.12.16.

게재확정일 : 2021.12.21.

이 논문은 국토교통과학기술진흥원의 고부가가치 융복합 물류 배송·인프라 혁신기술개발 사업의 지원을 받아 수행되었음. (21HCLP-C163194-01)

† Corresponding Author: jookim@krri.re.kr

1. 서론

1.1 연구배경 및 필요성

대한민국 정부는 2016년 고부가가치 물류산업 육성, 물류시설 첨단화·효율화, 건전한 시장질서 확립, 친환경·안전 물류체계 구축이라는 4가지 전략을 바탕으로, 물류산업 일자리 및 미래 신성장동력 확충을 도모하고자, 「국가물류기본계획 2016-2025 (2016)」을 통하여 물류산업 비전을 제시하였다. 이는 도시 내 물류시설의 현황 및 문제점 분석을 통하여 생활밀착형 도시물류시설 확보방안 마련에 대한 내용을 포함하고 있다. 또한, 「제1차 철도물류산업 육성계획 (2018)」, 「제3차 물류시설개발 종합계획 (2018)」에서 도시철도 역사를 거점으로한 말단 배송시스템 구축, 도심 공동화 물류체계 구축방안, 도시 생활물류 인프라 확충 등 도시의 물류환경 개선을 위해 도시철도의 활용을 전략으로 제시하고 있다. 이러한 정부 정책에 부응하고자, 심각한 도심 진입 병목현상 및 도로혼잡을 통한 환경문제 등 국가적 사회적 비용의 상당한 부분을 차지하고 있는 수도권 물류 시스템을 도로 위주의 수송에서 비교적 친환경적인 철도시설 등을 활용한 물류 시스템으로의 변화가 필요하다. 기존의 도심 화물운송은 도로 중심으로 화물 트럭을 이용한 배송이 주를 이루었으며, 이에 따라, 도시 외곽 지역으로부터 도심으로 개별 화물 트럭에 의하여 화물 운송이 이루어졌다. 그러나, 물동량 증가에 따라 트럭 운행이 증가되어 교통혼잡과 환경문제 등을 발생시켰으며, 이에 따라, 사회적 비용이 함께 증가하는 고비용의 비효율적인 물류 시스템으로 인식되어가는 추세이다. 이렇듯, 물동량 증가에 따라 발생하는 불가피한 교통혼잡과 환경문제 등의 비효율적인 문제를 개선하고자, 기존에 구축된 도시철도 인프라와 화물전용 도시철도를 이용하는 화물운송 시스템 기술개발이 필요하다. 도시철도 시설을 활용한 도시물류 기술은 물류기술의 고도화, 유통채널의 다양화 등 변화하는 물류 패러다임에 맞게 기존에 도심 내 구축되어있는 도시철도 인프라인 차량기지과 도심역사 등의 지하공간을 활용하여, 화물전용 도시철도 차량으로 화물을 운송하는 기술이며, 이러한 기술은 초기 인프라 구축에 필요한 비용을 최소화하여, 투자 대비 효율성을 제고시키고, 이를 기반으로 지속적으로 증가하는 도심화물을 운송하고자 하는 목표를 가지고 있다.

1.2 선행연구 및 국내·외 도시철도 물류 인프라 운영사례 분석

본 절에서는 기존에 구축된 도시철도 인프라와 화물전용 도시철도를 이용하는 화물운송 시스템을 구현 하기에 앞서, 선행연구 및 국내·외 도시철도 화물 운영사례 분석을 수행하고자 한다. 먼저, 물동량 증가에 따라 발생하는 불가피한 교통량 증대로 인한 환경문제 측면에서 철도화물과 도로화물수송을 연구대상으로 선정하여 대기오염물질 및 온실가스 배출량 비교 연구가 수행된 바 있다 (Kim et al., 2016). 본 연구에서는 전 세계적으로 환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 도로중심의 운송체계에서 철도 등 친환경 교통체계로 전환하고자 하는 교통수단 전환의 움직임을 인지하여, 화물철도와 같은 친환경 수송수단에 대한 지원정책을 마련하기에 앞서, 도로운송 대비 철도의 친환경성에 대한 정량적 자료를 마련하고자, 화물수송 시 배출되는 환경오염물질 및 온실가스 배출 단위를 산정하고 비교 및 검토를 수행하여, 철도운송의 친환경성을 제시하였다. 연구수행 결과, 도로운송의 단위 수송 당 대기오염물질 배출량이 SO₂를 제외하고는 철도보다 7~15배 가량 높다는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 온실가스의 경우, 도로운송이 철도운송에 대비하여 약 4배 수준의 온실가스를 배출한다는 결과를 확인하였다. 이렇듯, 본 논문에서는 철도운송과의 비교 관점에서 수행되었지만, 도로운송의 환경오염에 대한 문제점을 인지하여 이를 해소하고자 하는 연구가 물류, 유통, 기계, 인공지능 등의 다양한 분야에서 융·복합적인 관점으로 수행되고 있는 시점이다. 도로운송의 교통혼잡 및 환경오염 등의 사회적 문제점을 인지하였으나, 현시점에서 다양한 물류, 유통 분야에서 운영되

고 있는 도로운송을 중단할 수는 없는 시점이다. 따라서, 도로운송과 철도운송의 연계를 통하여 운영기술의 관점에서 수송에 대한 효율성을 높이하고자, 도로 및 철도운송 교통연계를 통한 화물열차 운영기술 사례 연구가 수행된 바 있다 (Park et al., 2014; Han et al., 2019). 본 연구에서는 도로운송에 편중되어 교통혼잡에 대한 문제를 겪고 있는 우리나라 교통운영체계의 문제점을 인지하여, 신개념 화물수송 및 운영시스템을 도입하여 효율적인 교통운영체계를 구현하고자 수행되었다. 먼저, 정부에서 다양한 제도를 마련하여 친환경 교통수단 운영확대를 통한 교통수단 전환을 추진하고 있으나, 이러한 정부의 노력에도 불구하고 철도운송 분담률이 오히려 감소하고 있다는 점을 인지하였다. 이에 대한 요인으로서는 철도운송이 Door To Door 수송과 Just In Time 수송이 불가하다는 점과 철도운송은 환적 및 운송에 대한 절차가 복잡하여, 적재 및 대기 등에 불필요한 소요시간이 발생한다는 점이 도로운송 대비 철도운송 문제의 요인이라는 것을 파악했다. 이에, 기존 철도시설의 차량한계를 만족하는 대형 27톤급 탑재용 TOFC(Truck/Trailer On Flat Car) 기반의 Piggyback 수송방식의 확대 및 운영기술을 제안하였으며, 화물트럭 수송용 Piggyback 실용화를 위하여, 기술 및 시제품에 대한 인증시험 실시의 필요성을 제안하였다. 2010년 일본의 삿포로교통국(Sapporo City Transportation Bureau)은 도시철도를 기반으로 하여 이동형 캐리어를 활용한 택배 및 화물운송 시스템을 도입한 바 있다. 2011년 12월 프랑스의 파리교통공단(RATP, Regie Autonome des Transports Parisiens)은 도시 내에서 운송이 중단된 전차를 활용하여 여객수송 사이에 화물수송을 운용하였다. 주 6회를 운용하여, 4주 동안 17톤의 화물을 운반하는 수송 시스템을 운용한 바 있다. 2017년 우리나라의 서울교통공사는 한국철도기술연구원, C 물류社와 협업하여, 도시철도를 활용한 지하 화물운송 테스트를 수행하였다. 이는 인프라에 대한 제약조건과 이동동선 및 물류공간으로 활용가능한 유휴공간을 파악하여 개략적인 시스템 운영 가능성 도출을 목적으로 수행되었다. 본 사례는 기존에 구축된 도시철도 인프라와 도시철도 차량을 기반으로 한 물류 시스템의 개략적인 프로세스를 확인할 수 있다. 본 절에서는 선행으로 수행된 도시 지하철도 물류 시스템의 사례를 통하여, 대상 시스템 관점에서 본 연구와 관련있는 고려사항들을 파악하고자 한다. 해당 사례는 인프라에 대한 제약조건과 화물열차 이동동선 및 물류공간으로 활용가능한 유휴공간을 파악하여 개략적인 시스템 운영 가능성 도출을 목적으로 수행되었다. 먼저, 개략적인 물류 시스템 프로세스는 물류터미널, 도시철도 차량기지, 도시철도 차량, 지하역사, 고객의 순으로 수행되었다. 물류터미널은 택배 Hub에서 집하되는 화물 중 별도 코드가 부여된 화물을 분류하여 롤테이너에 적재하고, 이를 11톤의 차량으로 출고하였다. Figure 1은 택배 Hub에서 화물을 집하하는 과정을 보여준다. Figure 2와 같이, 도시철도 차량기지에 별도 코드가 부여된 화물을 담은 화물차량이 진입 후, 지게차를 활용하여 11톤의 화물차량에서 도시철도 차량(지하철)으로의 롤테이너 환적 절차가 진행되었다.



Figure 1. The process of collecting cargo at the Hub



Figure 2. Cargo Rolltainer transshipment process

이후, 도시철도 차량(지하철)은 지하역사(지하철 역)에 도착하게 되며, 수행 인력이 직접 롤테이너의 화물을 지역별로 분류하였다. 화물 분류 프로세스는 Figure 3과 같이 수행되었다. 다음의 절차로 분류된 화물은 비 자동식 컨베이어를 활용하여 이동되었고, 이후, Figure 4와 같이, 지상의 전동 카트에 적재되어 고객에게 배송되었다.



Figure 3. Cargo classification process



Figure 4. Cargo delivery through classification process

본 사례에서는 도시철도 차량기지, 도시철도 차량, 지하역사를 활용한 화물운송, 하역, 분류에 대한 실질적인 운영 방안을 검토한 사례였으며, 도시철도 차량기지 내 화물차량 진입로 및 행선지별 화물 분리, 적재, 적치 등 환적 작업공간의 필요성을 도출하였다. 또한, Figure 5와 같이, 차량기지에서 지하역사로 이동하는 도시철도 차량 내부의 화물 롤테이너는 급 가, 감속으로 인한 운송 환경에서 화물의 파손 문제를 발생시킬 수 있다는 점을 도출하였다. 따라서, 도시철도 차량에서 화물 롤테이너 환적 시, 반·출입 순서와 연계된 화물 롤테이너 배정, 결박의 필요성을 인지하였다. 화물 분류를 통한 고객까지의 배송 과정을 인력이 직접 수행해야 한다는 점이 문제점으로 나타났으며, 이러한 문제점은 차후, 시스템 운영 시 운용상 경제적인 관점에서 문제점으로 나타날 수 있다. 본 사례를 통하여, 기존에 구축된 도시철도 인프라와 도시철도 차량을 기반으로 한 물류 시스템의 개략적인 프로세스를 확인할 수 있다. 또한, 시스템 운영 시, 대상 시스템과 서브 시스템 수준에서 발생할 수 있는 문제점과 제약사항 및 추가 고려요소를 파악할 수 있다.



Figure 5. Derivation of need to bind a rolltainer due to the driving environment

1.3 연구 절차

본 논문 1장의 서론에서 기존에 활용되고 있는 도로운송의 교통혼잡 및 환경오염을 문제점으로 인지하여, 기존의 도시철도 인프라를 활용할 수 있는 도시철도 기반 물류 시스템에 대한 필요성을 제시하였다. 이에 대하여, 도로운송에서 철도운송으로의 전환을 관점으로 선행연구 분석을 수행하였고, 기존의 도시철도 인프라를 활용하여 물류 시스템을 구현한 외국의 사례를 조사하였으며, 국내 사례 분석을 통하여, 본 논문에서 제시하고 있는 도시 지하철도 물류 시스템 구현을 위한 기초적인 고려 사항을 도출하였다. 2장에서는 모델링 지원 도구인 EA(Enterprise Architect)를 활용하여 전체 시스템 관점에서 도시 지하철도 물류 인프라 시스템 구현에 필요한 운영시나리오를 제시하였다. 3장에서는 DSM(Design Structure Matrix)을 활용하여 전체 시스템 관점에서 운영시나리오 분석을 수행하였다. 이를 통해 시스템 운영 시 발생할 수 있는 문제점과 제약사항을 파악하였고, 서브 시스템 관점에서의 인터페이스 요구사항을 추가로 도출하였다. 4장에서는 이에 대한 결과를 정리하여, 도시 지하철도 물류 시스템 운영에 필요한 운영시나리오 및 절차와 시스템 인터페이스 요구사항을 보완하였다. 5장에서는 본 논문에서 수행한 연구 결과를 평가하여, 차후 수행할 과업의 방향을 제시하였다. 그림 6은 본 논문에서 수행한 연구 절차를 개략적으로 보여준다. 본 논문에서는 물동량 증가에 따른 도로운송의 교통혼잡 및 환경오염 등의 문제점을 인지하여, 이를 해소하기 위한 방안으로 제안된 도시 지하철도 물류 시스템을 연구대상으로 선정하였다. 도시 지하철도 물류 시스템은 다양한 분야의 서브시스템이 조합된 융·복합시스템으로, 이를 성공적으로 구현하기 위해서는 서브시스템 간의 인터페이스를 정확히 식별하는 것이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 대상 시스템의 운영시나리오를 분석하여 도시 지하철도 물류 시스템을 성공적으로 구현하기 위한 서브시스템 및 컴포넌트 수준에서 DSM 기반의 인터페이스 요구사항 보완 연구를 수행하였다.

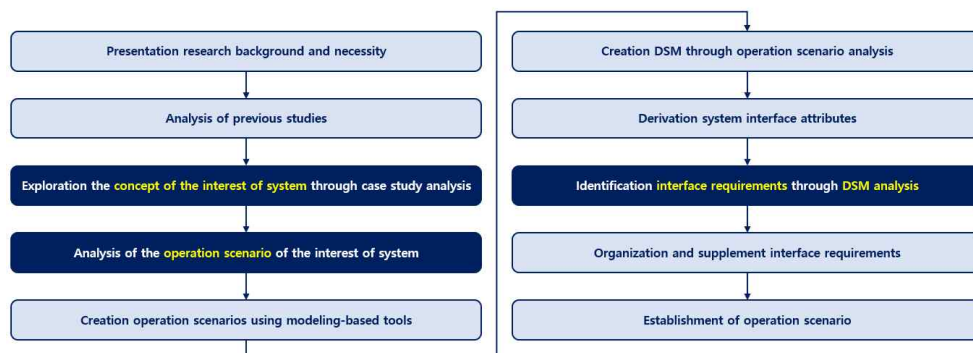


Figure 6. Schematic research procedure

2. 지하 도시철도 물류 시스템 분석

도시 지하철도 물류 시스템은 기존에 운영되고 있는 국가적으로 급증한 도시 내 물류 수요와 도로수송의 문제점을 해소하기 위해 제안된 물류 시스템으로 여러 가지 기술의 접목이 필요한 융·복합시스템이다. 먼저, 도시 내의 물류 수요를 고려하여, Hub 터미널에서 화물을 보관할 수 있는 차량기지과 주요 도심지 내에 화물을 취급할 수 있는 도심역사 화물 취급역 선정이 중요하다. 또한, 여객을 운송하는 여객열차 운행 사이에 화물을 운송하는 화물열차가 운영되기에, 운행 스케줄링 및 신호 시스템에 대한 검토 및 분석과 도심 내부의 물류 수요를 파악하여, 예상 물동량 예측을 통한 화물열차 편성에 대한 검토 및 분석이 필요하다. 다음으로, 도심 내의 예상 물동량 및 소포, 소화물 등의 화물 구성에 따라, 화물을 취급하기에 적절한 표준용기 구성 및 제작이 필요하며, 본 시스템에서는 출발공간 - 화물열차 - 도착공간 사이에 수행 인력을 최소화 할 수 있는 방안으로 AGV(Automated Guided Vehicle)를 활용할 예정이다. Figure 6은 도시 지하철도 물류 인프라 시스템에 대한 개념도를 도시한다. 본 연구에서는 도시 지하철도 물류 인프라 시스템을 대상 시스템으로 선정하였고, 화물 적재를 위한 물류공간(차량기지 및 도심역사 화물 취급역의 작업 수행 원 포함), 화물열차, 수평이송장치, 수직이송장치(화물운송 표준용기와와의 결박장치를 포함), 화물운송 표준용기(운송 데이터 전송을 위한 바코드 포함), 데이터를 관리하는 서버 등으로 주체와 객체를 선정하였다.

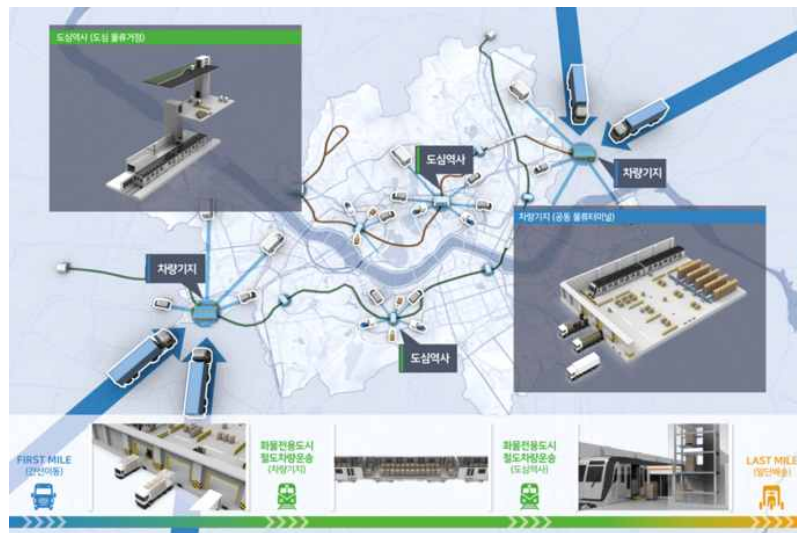


Figure 7. Schematic of urban railways logistics infrastructure

2.1 운영 절차에 따른 서브 시스템 수준의 분류

본 논문에서는 도시 지하철도 물류 시스템에 대한 개념을 재정립하기 위하여, 각각의 임무에 따라 서브 시스템 수준에서의 분류를 수행하였다. Figure 8 (a)는 차량기지 물류공간에서 AGV와 체결된 화물운송 표준용기가 화물열차로 이동하는 과정을 도시한다. 이때, 화물운송 표준용기는 차량기지 작업원에 의해 입고 되어 관제시스템의 제어 아래에서 이동된다. Figure 8 (b)는 관제시스템에서 제어하는 AGV와 화물운송 표준용기의 개념도를 나타낸다. AGV는 화물운송 표준용기 밑에 위치하여 차량기지 작업원에 의해 화물이 담긴 화물운송 표준용기와 체결되고, 관제시스템에서 제어된다. Figure 9 (a)는 화물을 운송하는 화물열차를 보여주며, Figure 9 (b)는 화물열차가 도시 역사 승강장에 도착한 후 관제시스템의 제어 아래에서 수직

이송장치로 이동하는 AGV 및 화물운송 표준용기의 반. 출입 시스템을 보여준다. Figure 10 (a)는 수직이송장치, Figure 10 (b)는 수직이송장치를 통하여 도시역사 물류공간에 도착한 화물들을 개략적으로 나타낸다. Figure 8부터 Figure 10까지 모든 개념도는 개략적인 설계를 나타내며, 형상 수정과 대상 시스템의 서브 시스템 및 구성요소등의 사양을 확정하기 위하여, 인터페이스 요구사항이 식별을 통한 검토가 필요하다.

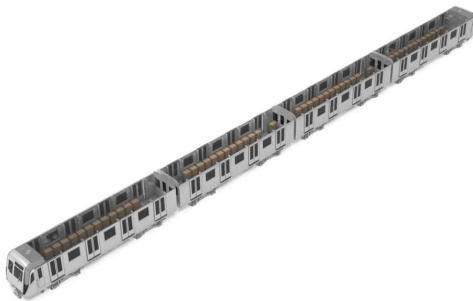


(a) Vehicle base logistics space



(b) AGV / standard container

Figure 8. Vehicle base logistics space and AGV / standard container



(a) The concept of a freight train

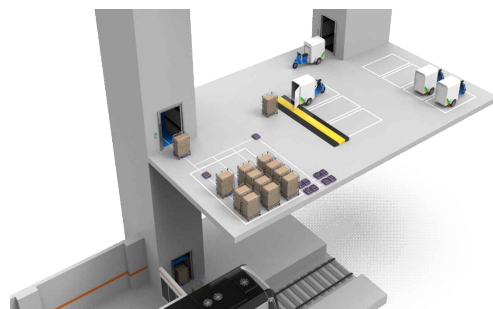


(b) The concept of freight transfer

Figure 9. The concept of a freight train and The concept of freight transfer



(a) Vertical transfer system



(b) Logistics space in the city station

Figure 10. Vertical transfer system and Logistics space in the city station

2.2 도시 지하철도 물류 시스템 운영시나리오 분석 및 모델링

본 절에서는 도시 지하철도 물류 인프라를 구현하기 위한 초기 절차로써, 전체 시스템 관점의 운영시나리오를 제시하고자 한다. 운영시나리오는 Subject, Objects 1 - 2, State 1 - 2, Activation으로 구분하여 제시하였다. 예를 들어, “시나리오 1. - 화물은 화물운송 표준용기에 담긴 상태로 차량기지의 보관공간에 위치되어야 한다. 시나리오 2. - 차량기지 작업 수행원은 핸드 스캐너를 활용하여 화물운송 표준용기의 운송 바코드를 스캔하여 화물의 입고 절차를 수행한다. 시나리오 3. - 차량기지 작업 수행원은 수평이송장치를 화물운송 표준용기 밑으로 위치시킨다.” 등으로 서술적인 관점으로 구분하였다. Figure 11은 전체 시스템 관점에서 도시 지하철도 물류 인프라 시스템의 운영시나리오를 나타낸다. 해당 운영시나리오는 각각의 서브 시스템별로 도메인에 따라 상세한 표현이 가능하나, 본 연구에서는 전체 시스템에 대한 개념을 정립하기 위한 연구로 개략적인 관점에서 운영시나리오를 분석하였다. Figure 12는 앞서 수행한 지하 도시철도 물류 인프라의 운영시나리오 분석 결과를 통하여 화물이 입고되어 데이터가 관제 시스템에 송, 수신되는 네트워크 과정을 보여준다. 처음 절차로, 화물이 표준용기에 담긴 상태로 차량기지 물류공간에 도착하면, 차량기지 작업원은 수평이송장치를 표준용기 밑에 위치 시킨 후 표준용기와 체결시킨다. 다음, 핸드 스캐너를 활용하여, 표준용기의 운송 정보 바코드를 스캔한다. 스캔된 데이터는 핸드 스캐너를 통하여, 이송장치 관제 시스템에 송신되고 관제시스템은 송신된 데이터를 분석 및 기록한다.

Scenario	Subject	Object_1	Object_2	State	Space_1	Space_2	Activation	Derivation of necessary matters
Sc_01		Stuff	Standard cargo container	Stationary		Vehicle base storage space	Located	
Sc_02	Vehicle base work attendant	Hand scanner	Standard cargo container / Stuff	Attention to handling		Inside the cargo transport standard container	Loading	
Sc_03	Vehicle base work attendant	Hand scanner	Barcode for transportation	Certainly			Scan	Need to analyze the scan method
Sc_04	Hand scanner	Server	Data				Send	Need to review how the data will be transmitted and frequently
Sc_05	Server	Data					Receive	to review how the data will be transmitted and frequently
Sc_06	Vehicle base work attendant	Hand scanner	Automated Guided Vehicle	Stationary		Under the cargo transport standard container	Move	Need to decide how to charge AGV
Sc_07	Hand scanner	Server	Data				Send	Need to review how the data will be transmitted and frequently
Sc_08	Server	Data					Receive	Need to review how the data will be transmitted and frequently
Sc_09	Automated Guided Vehicle				Vehicle base storage space	Under the cargo transport standard container	Move	
Sc_10	Automated Guided Vehicle	Server	Data				Send	Need to review how the data will be transmitted and frequently
Sc_11	Vehicle base work attendant	Automated Guided Vehicle	Standard cargo container	Certainly			Assemble	Need a quantitative value
Sc_12	Automated Guided Vehicle				Vehicle base storage space	Cargo train	Move	
Sc_13	Cargo train attendant	Automated Guided Vehicle	Standard cargo container			Cargo train	Check	
Sc_14	Cargo train attendant	Standard cargo container	Cargo train binding device	Certainly		Cargo train	Bind	Need a quantitative value
Sc_15	Cargo train attendant	Standard cargo container	Cargo train binding device			Cargo train	Check the bind	
Sc_16	Cargo train attendant	Cargo train driver				Cargo train	Deliver confirmation	
Sc_17	Cargo train driver	Cargo train	Cargo station				Going	
Sc_18	Cargo train driver	Cargo train	Cargo station	Attention to handling			Driving	
Sc_19	Cargo train driver	Cargo train	Cargo station				Arrive	
Sc_20	Cargo train attendant	Standard cargo container	Cargo train binding device				Check	
Sc_21	Cargo train attendant	Standard cargo container	Cargo train binding device				Release the bind	
Sc_22	Cargo train attendant	Scanner	Automated Guided Vehicle				Move	
Sc_23	Automated Guided Vehicle		Vertical transfer device				Move	
Sc_24	Cargo handling station attendant	Vertical transfer device	Standard cargo container			Vertical transfer device	Bind	Need a quantitative value / Need to be the subject of action
Sc_25	Cargo handling station attendant	Vertical transfer device	Standard cargo container			Vertical transfer device	Check	Need to be the subject of action
Sc_26	Cargo handling station attendant	Vertical transfer device	Standard cargo container				Move	Need to be the subject of action
Sc_27	Cargo handling station attendant	Vertical transfer device	Standard cargo container			Cargo handling station	Check	Need to be the subject of action
Sc_28	Cargo handling station attendant	Standard cargo container				Vehicle base storage space	Check	Need to be the subject of action
Sc_29	Cargo handling station attendant	Automated Guided Vehicle			Vertical transfer device	Vehicle base storage space	Move	Need to be the subject of action
Sc_30	Cargo handling station attendant	Automated Guided Vehicle	Standard cargo container			Vehicle base storage space	Unassemble	Need to be the subject of action
Sc_31	Vehicle base work attendant	Hand scanner	Automated Guided Vehicle	Stationary		Under the cargo transport standard container	Move	
Sc_32	Vehicle base work attendant	Hand scanner	Barcode for transportation	Certainly			Scan	Need to analyze the scan method
Sc_33	Vehicle base work attendant	Hand scanner	Barcode for transportation	Certainly			Scan	Need to analyze the scan method
Sc_34	Hand scanner	Server	Data				Send	Need to review how the data will be transmitted and frequently
Sc_35	Server	Data					Receive	to review how the data will be transmitted and frequently
Sc_36	Vehicle base work attendant	Stuff		Certainly	Vehicle base storage space	Vehicle base storage space	Move	
Sc_37	Vehicle base work attendant	Automated Guided Vehicle			Vehicle base storage space	Vehicle base storage space	Move	Need to decide how to charge AGV
Sc_38			Stuff	Stationary		Vehicle base storage space		

Figure 11. Operation scenario of railway logistics infrastructure

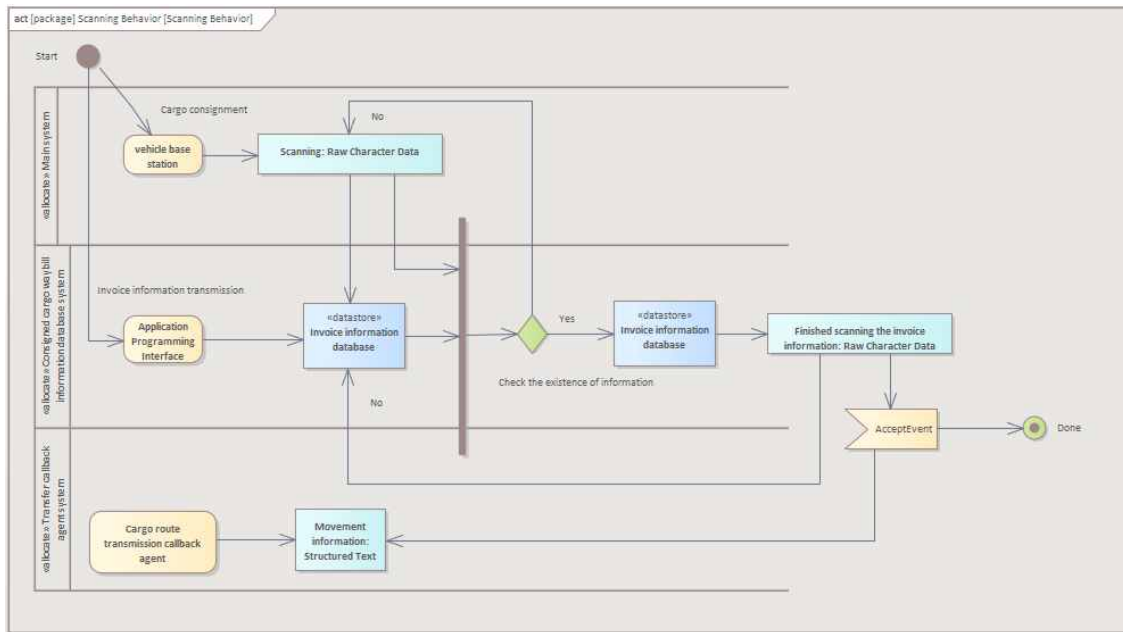


Figure 12. Operation scenario of railway logistics infrastructure

3. Design Structure Matrix 기반 인터페이스 요구사항 식별

3.1 Design Structure Matrix 개요

본 논문에서는 지하 도시철도 물류 시스템의 인터페이스 요구사항 식별을 위하여, DSM 방법론을 활용하였다. 설계에 관한 요구사항으로부터 개념설계를 이루기 위해서는 DSM, QFD(Quality Function Deployment), AHP(Analytic Hierarchy Process), KANO 분석 등 여러 가지 방법론이 활용될 수 있다. DSM 기법은 각 구성요소들의 관계를 표현하고 있으며, 이에 대하여 구성요소를 통합하는 시스템 모델링 도구로써 많이 활용되고 있다 (T.R. Browning, 2001). QFD 기법은 고객의 요구를 반영하여 제품을 설계하는 기법으로 제품 설계에 많이 활용되고 있으며 (Akao Y. 1997), KANO 모델은 제품의 속성과 관련 고객이 만족하는 방식의 차이에 초점을 두고 서비스의 속성을 매력, 단일차원, 필수, 무관심, 반전의 5가지 범주로 구분하여 분석하는 방식이다 (Kano N. et al., 1984). AHP분석은 분석적 계층화 과정이라 불리며, 다수의 대안에 대한 다면적 평가 기준을 통한 의사결정 지원 방법의 하나로 합리적인 의사결정을 위한 방법론으로 사용된다 (Hwang et al., 2021). 본 논문에서는 지하 도시철도 물류 시스템의 인터페이스 요구사항을 식별하기 위하여 DSM 방법론을 활용하였다 (Kim 2016). DSM기법은 DesignStructureMatrix의 약자로서 정사각형의 $n \times n$ 행렬로, 시스템 또는 프로젝트를 표현하는 방법이며, Dependency Structure Method, Dependency Source Matrix등으로 표현하기도 한다. (Eppinger S. D et al., 2012. DSM 기법은 행렬을 그래픽화하여 표현함으로써 간편하고, 확장이 용이하며, 직관적인 이해를 도울 수 있는 장점이 있다. DSM 행렬의 시스템 요소는 행렬의 첫 번째 행과 왼쪽 열에 표시되며, 제품 구성요소, 조직의 하부 팀, 또는 프로젝트 활동 등을 표현할 수 있다. 이렇게 시스템의 요소를 나열한 뒤 서로의 관계를 시스템 내부에 표현할 수 있다. 상관관계의 존재 또는 비존재로 나누어 '1' 또는 '0'과 도형으로 나타낼 수 있는 Binary DSM이 있으며, 각 요소들 간의 관계의 정도를 수치로 나타낼 수 있는 Numerical DSM이 있다. Figure 13은 Activity diagram 기반으로 DSM 구조를 생성하는 개념을 나타낸다.

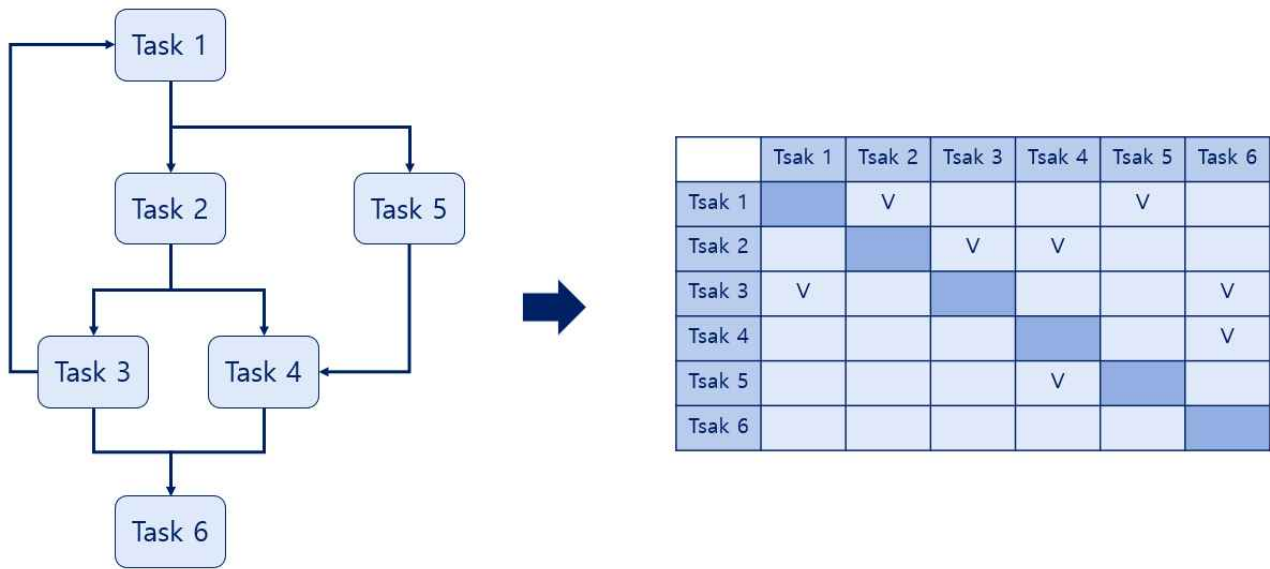


Figure 13. DSM concept and schematic diagram

3.2 운영시나리오 분석을 통한 Design Structure Matrix 분석

Figure 14는 지하 도시철도 물류 시스템을 대상 시스템으로 선정하여, 서브 시스템 및 컴포넌트 수준에서의 DSM을 보여준다. 화물이 차량기지 물류공간에 입고되는 시점부터 도심 내 역사의 물류공간까지 도착하는 과정에서 순차적으로 관련이 있는 서브 시스템 및 컴포넌트로 구성하였으며, 대상 시스템을 구성하는 서브 시스템 및 컴포넌트는 14가지로 식별되었다. 본 논문에서는 운영시나리오에서 각각의 서브 시스템 및 컴포넌트 별로 인터페이스가 있는 모든 조건을 한 가지의 인터페이스로 표현하였지만, 각각의 인터페이스 정도를 구분하는 방안이 필요하다. 예를 들어, 차량기지에서 화물의 입고 절차가 진행되는데, 예상 물동량이 없기에, 몇 명 정도의 차량기지 작업원 인력을 배치해야 할지에 대한 문제가 있다. 이를 해결하기 위해서는 실제로 활용 가능한 차량기지 물류공간의 유휴공간 예측과 예상 물동량 분석이 필요하다. 두 번째로, 차량기지의 차량기지 작업원이 화물을 입고하는 시나리오에서 화물운송 표준용기를 어떠한 방식으로 입고하여 관제시스템에 송신할지에 대한 문제가 있다. AGV - 화물운송 표준용기 - 화물열차 결박장치 - 화물열차의 인터페이스에서 AGV는 화물운송 표준용기와 체결되고, 화물운송 표준용기는 화물열차의 결박장치와 결박되는 방법이 있고, 화물운송 표준용기와 체결된 AGV 자체가 화물열차의 결박장치와 직접 결박하는 방식이 있다. 추가로, 결박방식을 어떻게 구성할지에 대한 인터페이스 구체화도 필요하다. 화물을 담은 화물운송 표준용기가 AGV와 체결되어 화물열차에 배치될 때, 화물열차 높이 차이로 인한 출입문과의 물리적 간섭이 발생할 수 있다. 회수 운영시나리오에서는 사용된 AGV와 화물운송 표준용기를 회수해야 하는 목적으로 수행되는데, 이를 효율적으로 수행하기 위한 방안이 필요하다. AGV의 전력공급 방식에 대한 운영시나리오 보완도 필요하다. 예를 들어, 화물운송 표준용기를 이동을 마친 AGV는 도시철도 역사 내 물류공간에 배치되어 회수 운영시나리오 전까지 보관되는데, 이에 대한 기준이 없으므로, AGV 방전의 우려가 있다. 비정상 운영시나리오 분석에서는 화물을 담은 화물운송 표준용기를 운송하는 과정에서 화물열차의 운행 환경에 따라, 파손의 우려를 예로 들 수 있으며, 이에 해당하는 조치를 취해야 한다. 하지만, 화물열차 작업원이 어떠한 방식으로 어떠한 기준을 만족하는 조치를 취할지에 대한 기준은 마련되지 않았다. 따라서, 이를 해결하기 위해서는 비정상 운영시나리오에 대한 분석과 검토를 통하여, 비상상황 대응 및 조치에 대한 매뉴얼 구성이 필요하다.

	Vehicle base work attendant 1	Hand scanner 1	Cargo control system	Automated Guided Vehicle	Cargo train attendant	Cargo train driver	Cargo handling station attendant	Vehicle base work attendant 2	Hand scanner 2	Cargo train control system	Standard cargo container	Vertical transfer device	Platform Screen Door	Cargo train entrance
Vehicle base work attendant 1			V						V	V		V		
Hand scanner 1						V	V					V		V
Cargo control system		V							V					
Automated Guided Vehicle		V				V		V		V			V	V
Cargo train attendant	V													V
Cargo train driver	V		V							V				
Cargo handling station attendant					V							V		
Vehicle base work attendant 2					V							V		
Hand scanner 2														V
Cargo train control system			V											
Standard cargo container						V			V				V	V
Vertical transfer device	V		V					V						
Platform Screen Door					V			V						
Cargo train entrance					V						V			

Figure 14. An example of DSM of an underground railway logistics system

4. 인터페이스 요구사항 식별을 통한 시스템 사양 구체화 및 개선방안 제시

도시 지하철도 물류 시스템의 운영시나리오 분석 및 DSM 기반 인터페이스 요구사항 식별을 수행하여, 기존에 제시된 시스템 사양과 인터페이스 요구사항을 보완하였다. 먼저, 각각의 인터페이스별로 다양한 관점에서 보완이 요구되는 사항들을 식별하였다. 회수 운영시나리오의 DSM 분석을 통하여 화물운송 표준용기와 AGV의 회수 방안에 대한 문제를 도출하였다. 본 논문에서는 DSM 기반 요구사항 식별을 통한 개선방안과 관련하여, AGV와 화물운송 표준용기를 회수하는 운영시나리오에 대한 방안을 제시하고자 한다. 화물 이송을 마친 화물운송 표준용기와 AGV가 도시철도 역사 물류공간에 배치된다. 회수를 수행하는 하절차는 있으나, 회수를 수행할 차량기지 물류공간 및 도시철도 역사의 작업원 배치의 한계가 있기에, AGV 및 화물운송 표준용기 회수 절차에 대한 효율적인 운영 필요성을 도출하였다. 이에 대한 방안으로 Figure 15와 같이 화물운송 표준용기를 접철 방식으로 구성하여, AGV로 회수를 하는 방안을 제시한다. 이에 대하여, Rolltainer 전문가의 자문을 구한 결과, 접철 방식으로 화물운송 표준용기를 제작할 시, 약 네 개 정도의 화물운송 표준용기를 한 번에 회수할 수 있다. 그러나, 화물운송 표준용기의 밑면이 변화하기에, 체결이 용이하도록 구조적인 관점에서 3D CAD를 활용하여 AGV의 형상에 대한 추가 개선방안이 필요하다.



Figure 15. Cargo transport standard container recovery using folding method

도심을 운행하는 열차를 활용하여, 물류 시스템을 구축하고자 하는 목적으로 도시 지하철도 물류 시스템 연구가 수행되고 있는 시점이며, 이를 위하여 기본적인 절차 및 운영시나리오가 정립되었다. 하지만, 여객 열차 운행과 간섭이 되지 않는 선에서 화물열차를 운행해야 하는 제약사항이 존재한다. 즉, 여객열차와 여객열차 사이에 화물열차를 운행할 수 있는 스케줄링 분석이 필요하다. 이러한 스케줄링 검토는 화물열차 및 여객열차의 운행 안정성을 확보하기 위하여 필요한 핵심 요소이다. 이에 대한 인터페이스 요구사항으로는 철도 관제 시스템 및 화물 관제 시스템, PSD(Platform Screen Door) 운영과 비정상 시나리오 발생 시, 화물열차 기관사의 조치가 가능하도록 대응 매뉴얼이 필요하다. Figure 16은 여객열차와 화물열차 혼용 운행을 위한 스케줄링 검토 과정을 보여준다. 차후, 수행할 연구에서는 「철도안전법 시행규칙 제11조, 제20조 등(“21. 8. 27. 시행)」과 「철도종사자 등에 관한 교육훈련 시행지침 (“21. 1. 1. 시행)」에서 제시하는 전기능동의 운전연습기(실제차량의 운전실과 운전 부속장치를 실제와 유사하게 제작하고, 영상 음향 진동 등 환경적인 요소를 현장감 있게 구현하여 운전연습 효과를 최대한 발휘할 수 있도록 제작한 운전훈련연습 장치) 등을 활용한 교육훈련 방법을 도시 지하철도 물류 시스템에 접목하여, 스케줄링 시뮬레이션 검토 및 분석을 통한 운행 안전성 확보연구를 수행하고자 한다.

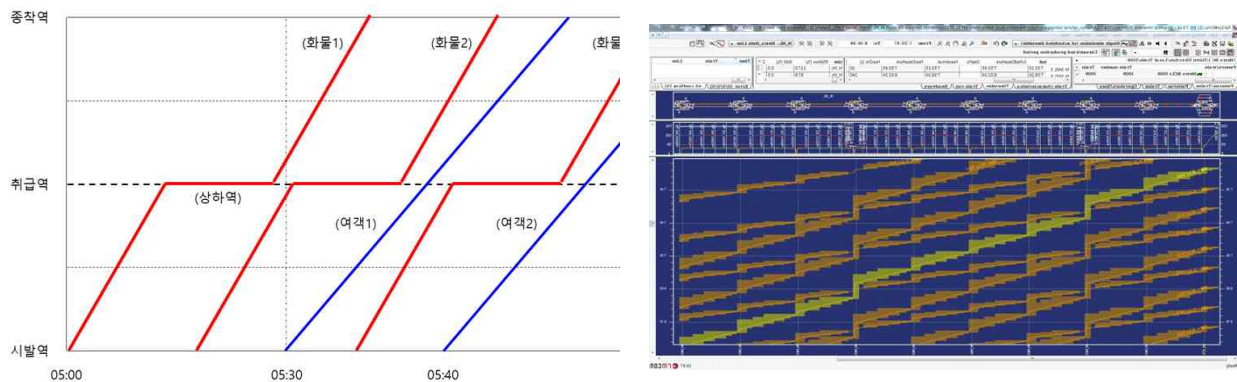


Figure 16. Schedule analysis of passenger trains and cargo trains

5. 지하 도시철도 물류 시스템 사양 도출

대한민국 정부는 2016년 고부가가치 물류산업 육성, 물류시설 첨단화 · 효율화, 건전한 시장질서 확립, 친환경 · 안전 물류체계 구축이라는 4가지 전략을 바탕으로, 물류산업 일자리 및 미래 신성장동력 확충을 도모하고자, 「국가물류기본계획 2016-2025 (2016)」을 통하여 물류산업 비전을 제시하였다. 이는 도시 내 물류시설의 현황 및 문제점 분석을 통하여 생활밀착형 도시물류시설 확보방안 마련에 대한 내용을 포함하고 있다. 기존의 도심 화물운송은 도로 중심으로 화물 트럭을 이용한 배송이 주를 이루었으며, 이에 따라, 도시 외곽 지역으로부터 도심으로 개별 화물 트럭에 의하여 화물 운송이 이루어졌다. 그러나, 물동량 증가에 따라 트럭 운행이 증가되어 교통혼잡과 환경문제 등을 발생시켰으며, 이에 따라, 사회적 비용이 함께 증가하는 고비용의 비효율적인 물류 시스템으로 인식되어가는 추세이다. 이렇듯, 물동량 증가에 따라 발생하는 불가피한 교통혼잡과 환경문제 등의 비효율적인 문제를 개선하고자, 기존에 구축된 도시철도 인프라와 화물전용 도시철도를 이용하는 화물운송 시스템 기술개발이 필요하다. 도시 지하철도 물류 시스템은 기존에 운영되고 있는 국가적으로 급증한 도시 내 물류 수요와 도로수송의 문제점을 해소하기 위해 제안된 물류 시스템으로 여러 가지 기술의 접목이 필요한 융 · 복합시스템이다. 본 논문은 기존에 활용되고 있는 도로 운송의 교통혼잡 및 환경오염을 문제점으로 인지하여, 기존의 도시철도 인프라를 활용할 수 있는 도시철도

기반 물류 시스템에 대한 필요성을 제시하였다. 이에 대하여, 도로운송에서 철도운송으로의 전환을 관점으로 선행연구 분석을 수행하였고, 기존의 도시철도 인프라를 활용하여 물류 시스템을 구현한 외국의 사례를 조사하였으며, 국내 사례 분석을 통하여, 본 논문에서 제시하고 있는 도시 지하철도 물류 시스템 구현을 위한 기초적인 고려 사항을 도출하였다. 또한, 모델링 지원 도구인 EA(Enterprise Architect)를 활용하여 전체 시스템 관점에서 도시 지하철도 물류 인프라 시스템 구현에 필요한 운영시나리오를 제시하였다. DSM을 활용하여 전체 시스템 관점에서 운영시나리오 분석을 수행하였으며, 이를 통해 시스템 운영 시 발생할 수 있는 문제점과 제약사항을 파악하였고, 서브 시스템 관점에서의 인터페이스 요구사항을 추가로 도출하였다. 이에 대한 결과를 정리하여, 도시 지하철도 물류 시스템 운영에 필요한 운영시나리오 및 절차와 시스템 인터페이스 요구사항을 보완하였다. 구체적인 연구수행은 대상 시스템을 구성하고 있는 서브 시스템 및 컴포넌트 수준에서 각각의 인터페이스별로 보완이 요구되는 사항들을 식별하였으며, 이에 기존에 제시된 인터페이스 요구사항을 보완하였다. 이에 대한 결론으로 1. 회수의 용이성을 고려하여, 화물운송 표준용기를 접철방식으로 설계 수정이 필요하다는 점을 식별하였고, 2. 이에 따라, 수평이송장치와 화물운송 표준용기와의 물리적 구조 측면에서 설계수정이 필요하다는 점을 확인하였다. 3. 또한, 화물열차 운행 측면에서는 여객열차와의 철저한 분리 운영을 통한 운행 안전성 확보를 위하여 스케줄링 기반의 검토 필요성을 도출하였으며, 4. 화물열차와 신호 및 통신 등 관제시스템과 인터페이스 측면에서 비정상 운영시나리오 발생 시, 시스템 운영자 및 사용자들을 위한 대응 매뉴얼이 필요하다는 도출하였다. 차후, 시스템 수준에서 인터페이스 분석의 완결성을 다진 후, 컴포넌트 하위 수준까지 DSM을 적용하여, 도출한 결과를 기반으로 전체 운영 시나리오를 수정 및 보완할 예정이다. 또한, 지하 도시철도 물류 시스템의 정합성을 검증하기 위하여, 시스템 운영 시나리오를 시뮬레이션화하는데 특화되어있는 MBSE 기반의 SysML을 활용하여 운영 시나리오를 검증할 예정이다. 본 연구는 여러 가지 기술이 접목되어 하나의 목적을 위해 운영되는 융·복합시스템으로 다양한 관점에서 운영 신뢰성과 안전성을 확보할 수 있는 방안이 필요하다. 본 연구 결과는 차후 수행될 도시 지하철도 물류 시스템의 인터페이스 병목현상 해소를 위한 초기 구성 및 기반 자료로 기여될 수 있다. ICT 기술의 접목으로 융·복합시스템의 발전은 자명한 사실로, 복잡한 구성 시스템 운영의 신뢰성과 안전성 확보를 위해서는 전체 시스템을 구성하고 있는 서브 시스템, 컴포넌트, 파트들 간의 체계적이고 과학적인 방법의 인터페이스 요구사항 식별 방법론이 필요하다고 사료된다.

참고문헌

- Akao Y. (1997), QFD : Past, Present and Future, In Proc. International Symposium on QFD, 1 ~ 12
- Eppinger S. D., T. R. Browning (2012), Design Structure Matrix Methods and Applications, MIT Press
- Kano N., Seraku N., Takahashi F., Tsuji S. (1984), Attractivequality and must-bequality, Journal of the Japanese Society for Quality Control, 14(2), 39-48
- J. U. Kim (2016), On the Design of Near - Surface Light Rail Transit Stopsby Utilizing DSM and QFD Methods, Ajou University, Ph. D dissertation
- I. H. Park, Y. G. Park, S. G. Kim, Y. K. Kim (2014), A Study on Railroad Yard Reform for Vitalizing Freight Movement by Railroad : Focused on the Introduction of Piggy BackSystem, Journal of Korean Society of Transportation, 32(3), 227 ~ 238
- S. H. Han, J. G. Son, S. Lee (2019), Review of case study of Freight operation technique through intermodal road and railway, In Porc. The Korean Institute of Electrical Engineer, 2121 ~ 2122
- S. W. Hwang, J. U. Kim, Y. M. Kim, H. C. Kim, S. H. Lee (2021), On the Improvement of Facility to Performance Evaluation and Security of Safety through the Application of AHP Method in Railroad Signal Control System, Journal of Korea Safety Management & Science, 23(1), 71 ~ 79
- T. R. Browning (2001), Applying theDesign StructureMatrixto System Decomposition and Integration Problems: A Review and New Directions, IEEE Transactionson Engineering Management, 48(3), 292-306
- Y. J. Kim, J. G. Park, Y. H. Oh (2016), Comparative Analysis on the Rail and Road Freight Transportation - Air contaminant and greenhouse gas emission, Korea Academy Industrial Cooperation Society, 17(9), 94 ~ 101
- Y. J. Kim, Y. J. Kwon, J. Hur, S. B. Jung (2015), International Comparison of Railway Freight Performance, Journal of Korean Society of Transportation, 33(5), 431 ~ 440