

# 패스트트랙 환경에서 FAB신축을 지원하는 BIM기반 AR 시스템 개발

## AR system for FAB construction management using BIM data under fast track condition

이상원<sup>1)</sup>, 이광수<sup>2)</sup>, 최성인<sup>3)</sup>, 류성찬<sup>4)</sup>, 박정서<sup>5)</sup>

Lee, Sang-Won<sup>1)</sup> · Lee, Kwang-Soo<sup>2)</sup> · Choi, Sung-In<sup>3)</sup> · Ryu, Seong-Chan<sup>4)</sup> · Park, Jung-Seo<sup>5)</sup>

Received May 30, 2022; Received November 02, 2022 / Accepted November 28, 2022

**ABSTRACT:** New Fabrication Facility (FAB) construction is performed with Building Information Modeling (BIM) based design. The BIM design data keep updated during the FAB construction. To improve fast-track construction management, a Fabrication Facility Augmented Reality (FABAR) was developed. This study introduces a FABAR system development process and shows performance evaluation results of the FABAR prototype system. The FABAR is implemented with three major modules: Augmented Reality (AR) visualization unit (Room-box) to transfer big BIM data to AR data, AR registration and tracking unit to match AR with real scape and to keep AR coordination in real, and AR data management unit to enhance usability. The prototype performance results were as follows: visualization of design BIM data via AR within 24 hours, precise AR registration and tracking registration, and appropriate usability to support FAB construction management at site. The results indicate that the FABAR is applicable for FAB construction management. Especially, the BIM data transformation method using Room-box in this study signifies a new construction management approach using fluctuating BIM design data in the fast track construction condition.

**KEYWORDS:** FAB(Fabrication Facility), AR(Augmented Reality), Building Information Modeling (BIM), Fast track Construction, Usability

**키 워 드:** 반도체 공장, 증강현실, BIM, 패스트트랙 공사, 사용성

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

AR(Augmented Reality)은 현실과 가상의 이미지를 겹쳐 볼 수 있는 그래픽기술로써, AECO(Architecture, Engineering, Construction, and Operation)산업분야에서 도입효과가 큰 기술로 인정받아왔다. AR은 설계정보를 적절한 시간에(적시), 적합한 사용자에게(적소), 정확한 정보(정확)를 전달할 수 있으므로 현장 정보 전달체계 구축에 효과적으로 활용 될 수 있다(Schiavi

et al., 2022). 특히 BIM(Building Information Modeling)데이터와 연계 활용될 경우에 활용효과가 더욱 배가될 수 있다. 최근에 평택 FAB 2기 (공사기간 2018.1~2022.3) 반도체 공장(Fabrication Facility, 이하 FAB)의 신축공사에 AR시스템도입이 추진되었다. FAB신축공사는 패스트트랙(Fast track)방식으로 진행되며 BIM이 설계저작도구로 사용된다.

그동안 BIM과 AR의 연계 활용(BIM-AR)관점에서 주목할 만한 메타 분석연구가 전개되었다. Adeeb Sidani는 건설 산업분야에서 BIM-AR 기술 집적 정도의 분석연구에서, 실용적 수준

<sup>1)</sup> 정회원, 삼성물산 Director (swfaab.lee@samsung.com) (교신저자)

<sup>2)</sup> 정회원, 삼성전자 Principal Professional (leek100@samsung.com)

<sup>3)</sup> 정회원, 삼성중공업 Senior Engineer (sungin.choi@samsung.com)

<sup>4)</sup> 정회원, 삼성SDS Senior Engineer (s.c.ryu@samsung.com)

<sup>5)</sup> 정회원, 삼성중공업 Senior Engineer (jungseo.park@samsung.com)

의 AR시스템 구현사례 부족을 지적했다(Sidani et al., 2021). 예를 들어, 비기하학 정보의 전달이 어렵고, 데이터 간 상호운용성(Interoperability)이 확보되지 않는다. 또한 현장에서의 데이터접속 어려움, 특히, 마커기반 AR 운용상의 어려움이 다수 사례에 나타난다. 이 연구에서는 사용자의 경험적 측면을 세심하게 고려한 AR 프레임워크개발이 후속 연구 과제로써 제안되었다(Steffen et al., 2019).

한편 소통정보관리 활용관점에서, 건설, 제조 등 다양한 산업 분야에 걸쳐 시설물 유지관리용 AR애플리케이션 개발사례가 분석되었다. Lingo Fernandez del Amo는 AR이 사용자 지식획득과 소통에 강력한 잠재력이 있음에도 불구하고, 바람직한 지식관리체계 구축에 이르지 못 함을 문제점으로 제시했다(Fernández del Amo et al., 2018).

이상의 기존연구들에서 AR은 시공단계에 소통채널로서 활용 잠재력이 큰 것으로 평가된다. 하지만, 건설 현장 사용 환경에 적합한 수준으로 구현된 AR연구사례는 부족하다. 이 같은 문제점은 대부분의 기존 AR연구가 특정 기술문제 해결에 치중하기 때문에 발생한다. 즉, BIM이 설계도구로 활발하게 운용되는 현장에서 데이터관리 프로세스 그리고 사용자의 사용성 등을 심층적으로 고려한 연구가 부족하다. AR의 바람직한 사용 환경 형성을 이끌어내는 목적의 통합적 연구가 필요하다.

일반적으로 FAB신축공사는 구조공사와 마감공사로 구분 진행된다. 마감공사는 각종 설비, 전기배관의 설치와 동시에 진행 경우가 많아 공종 간 간섭이 빈번하다. 더구나, 마감공사 중 BIM데이터가 수시로 변동되므로, BIM-AR 데이터 간 안정적인 통합 유지에 난점이 있다. 또한, 국가시설로서 상당한 수준의 데이터보안이 요구된다. 비록 이 같은 데이터관리의 어려움이 FAB 신축공사현장에 존재하기는 하나, 그럼에도 불구하고 AR이 소통채널로서 정착되면 FAB 신축 공사 관리에 적지 않은 활용효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 패스트랙 시공 활동에 AR의 활용잠재력을 구현하려 한다. 이를 위해서 '패스트랙 현장의 소통채널구축'을 시스템개발의 지향점으로써 채택한다. 본 연구에서 AR시스템 개발연구는 크게 3개의 분야로 압축되었다. 즉, 첫째, 데이터 일관성(Consistency)의 유지, 둘째, BIM-AR 데이터 상호운용성(Interoperability) 확보, 셋째, FAB에 적합한 사용성(Usability)의 획득이다. 본 연구의 성공적인 통합방법의 일환으로써 개발 중 각 문제의 해결안에 대해서 평가 및 개선피드백 그리고 통합적인 관점에서의 해결안 조정이 수반된다. 특히, 인간-컴퓨터 상호작용의 최적화를 위해 사용자 평가가 진행된다.

본 연구의 목적은 패스트랙현장에서 FAB신축을 지원하는 BIM기반 AR 시스템(이하 FABAR(Fabrication Facility Augmented Reality)) 개발 및 성능평가이다. FABAR 성능구현

목표는 다음과 같다. 실시간 변동하는 대용량 BIM데이터를 AR로 즉시 변환하여 설계-시공-운용 단계에 걸쳐 다양한 사용 양태를 지원하며 BIM As built 제작까지 BIM-AR데이터 일관성을 유지한다. FAB신축공사의 사용 환경 특징에 맞춰 정합-추적 한다. 궁극적으로 현장내 사용자와 유관 부서 간 시공단계 원활한 지식소통을 유지함으로써 시공생산성향상을 지원한다.

## 1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구의 범위는 2기FAB신축공사를 지원하는 FABAR의 개발 및 프로토타입 시스템을 활용한 성능평가와 사용성 평가이다. 세부적인 FABAR개발 범위는 다음과 같다. 첫째 공구분할구역 참조형식의 데이터 관리 프로세스 개발. 둘째 중립포맷 연계형 자동 변환 모듈 개발. 셋째 FABAR 사용성을 향상하는 인터페이스 개발. 본 연구 범위에서 FABAR과 기간계 시스템(Backbone System)과의 연계는 제외 된다. 즉, FABAR을 이용하여 4D, 5D, 6D, 7D영역을 관리하기 위해선 해당 분야에서 개별적으로 운용 중이거나 운용 예상되는 시스템과 밀접한 조정이 필요한데 본 연구에는 이 범위가 포함되지 않는다.

본 연구의 진행방법은 다음과 같다. 첫째, 선행연구를 고찰하며 FABAR의 차별점을 추론한다(2장). 둘째, FABAR의 사용 환경을 분석 하며 시스템통합방향을 설정한다(3장). 셋째, FABAR 시스템 개발 콘셉트 수립하며 핵심기능을 정의한다(4장). 넷째, FABAR시스템을 개발한다(5장). 다섯째, 성능테스트 및 사용성 평가를 실시하며 결과 분석 및 시사점을 논의 한다(6,7장). 본 연구에서 시스템 성능테스트실험은 4회 그리고 사용성 평가는 2회 실시되었다.

## 2. 선행 연구 고찰 및 차별점

본 연구는 선행연구의 경향성과 한계점을 크게 3개 범주로 분석했다. AR의 기술적 특징과 FAB현장의 사용맥락을 고려하며, 본 연구의 차별성을 다음과 같이 제시한다.

첫째, 프로세스 측면이다. 그간 BIM-AR 분야에서 프로세스관련 연구는 설계, 시공관리, 협업, 안전관리, 교육활용, 시설관리, 작업자의 생산성 분석(Davila Delgado et al., 2020)(Garbett et al., 2021)(Chen et al., 2021)(Zhou et al., 2017)등 프로세스 전반에 걸쳐 진척되었다. 이들 연구범위는 대부분 일반적인 시공 중심의 공사에서의 AR활용에 집중된다. 이 같은 연구결과들은 패스트랙 AR사용맥락 적용에 난점을 보인다. 예를 들어, FAB신축공사에서 이해관계자들은 상호 비대칭적인 BIM 데이터 상세수준 (Level of Detail, LoD)을 요구한다. 즉, 4D(공정), 5D(물량산출 또는 비용), 6D(조달 또는 에너지), 7D(시설관리), 8D(안전)에 필요한 LoD요구

수준이 각각 다르다(Wildenauer, 2020)<sup>6)</sup>. 비대칭적 요구로 인해 데이터 활용에 있어 활용 주체 간 이해충돌이 발생 한다. LoD 요구 비대칭은 BIM-AR 데이터의 관리체계구성에 어려움을 가중한다. 하지만, 현실적으로 패스트트랙공사 프로세스에서 BIM 데이터 LoD는 모든 이해관계자의 비대칭적 요구에 맞춰 각각 운용되기 어렵다. FAB신축에서 패스트트랙환경은 일시에 바뀌기 어렵다. 그러므로 FAB신축공사 AR은 BIM데이터 제작 및 활용 프로세스를 면밀하게 고려하여 비대칭적 BIM 데이터 LoD 요구수준을 합리적으로 조정하며 BIM-AR데이터 일관성 유지하는 개발방향이 바람직하다.

둘째, 데이터 측면이다. 기존의 BIM-AR데이터변환관련 연구는 BIM의 형상데이터 관리에 집중되었다(Schiavi et al., 2022). Keyu Chen은 BIM의 형상 정보를 AR로 변환하는 플랫폼을 제안했다(Chen et al., 2020). 이 연구는 형상정보 이외의 공사 관리 정보의 활용방안을 포함하지 않는다. 다른 연구에서 WBS기반의 BIM객체연계활용방식이 제시되었다(Singh, Gu and Wang, 2011). 이 연구에서는 BIM데이터 변동성에 대한 고려가 부족하다. 이상과 같이 기존연구에서는 실시간 변화하는 데이터를 대상으로 BIM-AR 변환 연구가 부족하다. FAB신축공사에서는 공사 중 BIM데이터 변동이 많다. 이 변동들은 다수의 공종이 혼재되며 상호 변동의 영향을 주고받는다. 이러한 변동 양상은 BIM-AR 데이터 상호 운용성 유지에 저해요소로 작용한다. 그러므로 BIM 데이터가 지속적으로 변경되는 FAB 신축 환경에 적합한 새로운 BIM-AR데이터 관리 방식 개발이 필요하다.

셋째, 사용성(Usability) 측면이다. 직관적 사용성은 AR기술의 장점이다. 사용자가 별도의 조작 없이도 현장-설계간 비교 화면에 무의식적으로 접근 및 열람이 가능하기 때문이다. Lingo Fernandez del Amo의 연구는 FAB신축에서 AR시스템의 사용성 개발방향에 있어 다수의 시사점을 내포한다. 이 연구는 AR에서 운용되는 정보들의 형태와 운용현황을 분석했다. 연구에서 "AR기술은 실제 객체와 상황별 정보를 사용자에게 제시함으로써 사용자의 실제 경험을 풍부하게 하는 인간-컴퓨터 상호 작용 기법 세트"로 정의된다(Fernández del Amo et al., 2018). 이러한 AR기술의 특징은 패스트트랙 환경에서 더욱 효과적 활용 가능성을 암시한다. 왜냐하면 패스트트랙 공사에는 빈번한 소통이 발생함에도 불구하고 소통채널이 충분하게 활용되지 못한 경우가 많기 때문이다. FAB신축현장에서는 설계자, 감리자, 시공사, 현장의 기술인 등이 도면과 BIM데이터를 기준으로 상호 소통하려는

니즈가 존재한다. 하지만 기존 연구에서 건설현장에서 사용자와 상호 작용하며 소통을 지원하는 AR개발 사례는 매우 드물다. 그러므로 AR의 직관적 사용성을 살려 현장소통니즈를 효과적으로 지원하는 AR 사용성(Usability)개발이 필요하다.

이상의 선행연구 동향 분석을 통해서 얻은 본 연구의 차별점은 다음과 같이 요약된다. 첫째, 선행연구들은 각 이해관계자의 BIM-AR데이터의 LoD에 대한 비대칭적 요구를 통합적으로 해결하지 못하였다. 본 연구는 프로세스 측면에서 데이터 LoD 비대칭 문제를 조절하며, BIM-AR데이터 일관성 유지하는 개발방향 전개한다. 둘째, 선행연구에서 BIM-AR데이터변환방식은 BIM의 형상데이터 관리에 집중되었으며 BIM데이터의 변동성을 반영하지 못했다. 본 연구는 BIM데이터가 지속적으로 변경되는 환경에서 운용하며, 공사정보를 관리 대상에 포함한다. 셋째, 선행연구는 AR의 직관적 사용성을 충분히 반영하지 못했다. 본 연구는 이해관계자들의 명시적 현장소통니즈를 반영하며, 사용자의 경험을 풍부하게 하는 직관적 소통채널 구축을 시도한다.

### 3. FABAR 사용 환경 분석 및 통합 방향 설정

#### 3.1 프로세스 현황 분석

FAB은 평균 1만평 규모로 건설되는 클린룸 4개 동과 그에 연관된 부속시설들로 구성된다. 통상 FAB마감공사는 4단계(Phase, 이하 Ph.)로 구분되어 진행되는데 경우에 따라 다수 Ph.가 동시에 건설되기도 한다. 1개 Ph.의 클린룸 마감공사에는 유틸리티 시운전시점(Turn on)까지 평균적으로 8개월가량 공기가 소요된다. 상당한 초단기 패스트 트랙이다. 이 같은 시공환경은 FABAR시스템 개발에 적지 않은 제한점을 준다. 예를 들어 BIM-AR 데이터 일관성 유지 난점이 패스트트랙에서의 설계-시공 병행 과정의 다양한 특징으로부터 비롯되는 경우가 많다. 현재 FAB신축현장에서 BIM-AR 데이터 일관성 유지 현황은 다음과 같이 파악된다.

첫째, BIM서버가 동시협력저작방식으로 운용된다. 설계사와 시공사는 공동으로 레빗(Revit)서버의 BIM데이터를 작성 및 수정 한다. 통상 각 이해관계자는 신속하게 BIM서버의 데이터를 수정함으로써 설계 변경에 대응한다. 이와 같은 동시 저작 방식은 BIM데이터의 변동을 가중한다. 상호 변경의 영향을 끼치기 때문이다. 공사가 진척됨에 따라 BIM서버의 사용자 증가와 더불어 상

<sup>6)</sup> BIM의 활용차원(nD)은 학계나 산업계에서 다양한 측면으로 제시 되고 있다. 본 연구에서는 시공현장의 비대칭적 요구 현황이 드러난 Amal(2018)의 주장이 재인용되었다.

호 동시작업이 증가하여 변동은 더욱 증가한다. 한편 시공관리에 사용되는 관련 정보는 BIM객체에 수기로 입력된다. 제작자, 제조사, 협력시공사, 설치일과 같은 정보이다. 그밖에 시공일정 및 품질 관리는 별도의 기간계 시스템 또는 전용 소프트웨어로 진행된다. 이처럼 BIM형상 이외의 공사 관리 정보는 각각 별도의 사용 환경에서 운용되므로 BIM객체와 이들 정보 간 정합 유지가 더욱 어렵다.

둘째, 설계변경(Revision)과 홀드(Hold)가 빈번하게 발생한다. 공사단계별로 발생현황은 다음과 같다. 공사 착수 단계에는 AFD(Approval For Design, 기본설계도면)가 출도 된다. AFD에는 홀드부위가 상당수 포함된다. 현장에서는 특정 공사 부위만을 시공 상세도(Shop Drawing)로 승인 받아 시공을 진행한다. 토목 및 골조 초기 공사는 대체로 이 같은 방식으로 공사가 진척된다. 이 같은 절차에서는 시공 상세도면(Shop Drawing, 상세시공도면 및 제작도면)이 AFC(Approval For Construction, 실시설계도면)의 역할을 겸한다. 시공 상세도는 서버의 BIM데이터로부터 직접 2D로 출도 되거나 또는 BIM에서 추출된 2D단면에 추가적인 정보를 기입하여 작성되어 발주처 승인 후 현장에 배포된다. 다소 변칙적인 패스트트랙의 설계도서 운용 특징이라 할 수 있다. 한편 공사 진척과 함께 홀드항목이 일부분씩 순차적으로 해제되는데 이때도 새로운 홀드가 발생하는 경우가 있다. 홀드 부위는 공사 진척과 함께 차기 출도 도서에 설계 변경(Revision)으로 전환된다. 홀드 부위에 대한 공사계획수립은 불가능하며 차후에 설계변경으로 변환 되므로, 홀드는 공사 관리에 있어 데이터의 일관성 유지를 방해하는 주요한 저해요인이다. 공사착수단계에서는 발주처 OR(Owner's Requirement)의 확정지연이 홀드의 주요 요인으로 꼽힌다.

공사 초기 및 중간 단계에 AFC가 여러 번 출도 된다. AFC 또한 홀드와 설계 변경을 다수 포함한다. 예를 들어 P2 FAB신축현장의 Ph1 공사에서, AFC의 설계 변경은 공사 초기 6개월 동안 총 636건이 발생했다. 설계 변경이 월평균 37건, 매일 1건 이상 상존 하는 수준이다. 이들 설계 변경 사항 중 정식출도는 223건 부분출도는 413 건으로 집계되었다. 부분출도의 건수가 정식출도 건수에 비해 2배수에 달한다. 부분출도는 비정기적으로 발생하여 설계변경의 예측이 어렵기 때문에 공사 관리에 영향을 크게 주며 재시공과 같은 공사 관리 리스크 발생 원인이 되는 경우가 많다.

시공 상세도작성 단계에서 시공이 용이하도록 AFC설계를 조정하는 과정에서 다소간의 설계변경이 추가되기도 한다. 이 같은 AFC설계의 조정과 변경은 매 공사마다 불가피하게 존재 할 것으로 예상된다. 왜냐하면 FAB설계 및 시공의 상당부분이 표준화 되어 있어 설계변경의 제한이 존재하지만 각 현장의 설계와 시공 여건은 매번 다르게 구성되므로 이에 맞춰 설계가 조정되기 때문이다. 공법기술 또한 발전하며 공사별로 다르게 적용되기도 하

로 설계조정이 발생하기도 한다. 이처럼 AFC의 조정은 매번 필요하다.

이상의 변경에 더하여 장비훅업(Hook Up)설계착수를 위한 As built(As built Drawing, 준공도면)작성에 따른 설계변경이 존재한다. 통상 FAB 신축 공사 중간 무렵부터 반도체 장비 설계가 착수된다. 장비설계를 조기 착수함으로써 장비 도입 시기를 앞당길 수 있기 때문이다. As built작성에는 MEP(Mechanical Electronic Plumbing) 부재 및 기둥이 3D 스캔 측량 데이터를 기준으로 보정된 설계 서버의 BIM 데이터가 사용된다. 이같이 공사 중 작성된 As built BIM 데이터가 장비훅업설계의 기준도서가 된다. 하지만 이러한 절차는 BIM데이터 일관성 유지에 어려움을 가중 한다. 예를 들어, 경우에 따라서 장비도입시점에 불가피하게 현장 사정에 의해서 재시공이 진행되거나 철거가 발생하기도 한다. 현장에서 발생한 변경사항이 모두 설계담당자에게 전달되어 BIM서버 데이터가 수정되기 어렵다. 간혹 정보전달누락이나 변경정보 전달 오류가 발생한다. 이 같은 프로세스에는 스캔 후 발생한 변경사항이 훅업설계용 As built BIM에 반영되지 못하는 한계가 존재한다. As built BIM확정 후 현장에서 발생한 변경사항에 대한 정확한 피드백을 주고받는 방법이 필요하다.

이상 살펴본 바같이 현재 FAB신축 패스트트랙 프로세스에서는 다양한 측면에서 BIM데이터 일관성 유지 어려움이 존재하는 것으로 파악된다. 이들 어려움의 주요원인은 발주처 OR의 변경, 동시협력저작방식에서 상호작용 특징, 이해관계자의 증가, Shop 작성 중 조정, As built의 공사 중 확정 및 현장 변경사항의 피드백 남점 등 이다. 이들 대부분은 프로세스의 특징으로써 관찰된다. 이들 남점들은 상호 영향을 끼친다. 즉 어떤 한 공종의 자재가 변경되면 해당 자재와 연계된 다른 자재 또한 함께 변경되어 BIM데이터의 설계 변경 수는 전체적으로 급수 적으로 증가한다. 동시저작 방식의 특징이다. 그렇다고 다수의 이해관계자가 상호 연관된 프로세스를 하나의 일관된 형태로 통일하기는 어렵다. 비록 가능하다 하더라도 한 개의 통일된 프로세스는 공종별 특징을 모두 수렴하기 어려우며 오히려 공사 관리 포인트의 가중만 초래할 여지가 많다. 그러므로 BIM데이터의 내용이 빈번하게 변경되는 패스트트랙 상황에서는 다양한 이해관계자 각각의 데이터 활용니즈를 효과적으로 조정하며 AR을 활용 할 수 있는 새로운 접근이 필요하다.

### 3.2 BIM 데이터 및 AR간 상호 운용성 분석

변동이 심하며 다양한 데이터 활용 니즈가 존재하는 데이터 운용 환경에서도 BIM-AR상호운용성은 확보되어야 한다. 본 연구에서는 현재 형성된 프로세스를 크게 훼손하지 않고 유지하면서도 데이터 상호 운용성 획득이 가능한 방안이 착안되었다. 먼저, 데이터형식 측면에서의 개발 방안이 검토되었다. FABAR

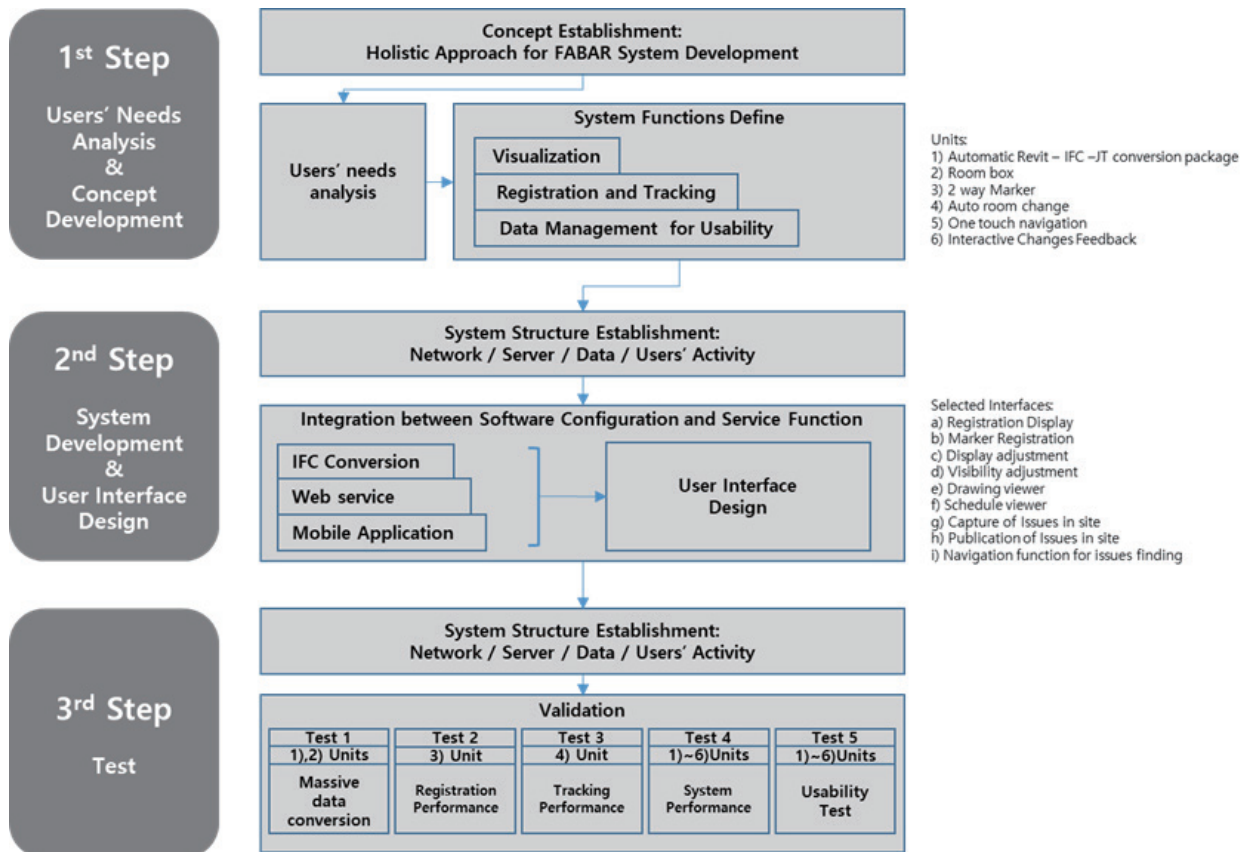


Figure 1. Flowchart of system development

은 ARCore SDK기반으로 제작된다. ARCore는 Android 및 iOS의 휴대기에서 증강 현실(AR) 애플리케이션을 빌드 할 수 있는 플랫폼으로써, JT(Jupiter Tessellation), OBJ(Wavefront Technologies 개발)와 같은 데이터 포맷을 활용 할 수 있다. FAB설계에는 Autodesk사(2017버전)의 레빗소프트웨어가 사용된다. FAB 2기 신축 공사 에서 Ph.별 BIM데이터는 9개 공종으로 구성되며 파일용량은 10GB(Giga bite)~15GB 정도로 운용된다. 4개 Ph. 현장이 동시에 개설되는 경우에 전체 BIM데이터는 50GB를 초과하기도 한다. 레빗 데이터포맷인 RVT 파일은 ARCore에서 바로 활용할 수 없으므로, 대용량 RVT파일을 JT또는 OBJ파일로 변환하는 별개의 모듈개발이 수반 되어야 한다.

이어서 프로세스측면이 검토되었다. FAB신축공사의 설계BIM데이터는 일반 공사의 경우와 같이 공사구역별로 분절되지 않는다. 왜냐하면 설계가 계속 진행되는 상황에서 BIM데이터를 분절하게 되면 출도도면의 버전 간에 불일치 발생이 불가피하기 때문이다. 이러한 이유로 배관과 같은 경우 제작단위이나 공사 부위별로 분절 하지 않고 AFC설계와 Shop 설계에 걸쳐 1개 객체로 유지한다. 또한 공사 착수일 과 같은 주요한 공사정보는 수기로 객체에 입력하나 이를 기간계 시스템이나 관리 시스템에 직접 연동하지 않고 있다. 예를 들어, 2기 FAB신축현장에서는 공정별 물량

관리에 WBS체계를 사용하는데 BIM의 속성데이터와 직접 연결되는 기간계 시스템을 사용하지 않고 있다. 이 같은 운용방식은 WBS체계를 토대로 BIM객체기반으로 공사 일정의 연동이 어렵기도 하거니와 공사 중 변동 추적 반영에 어려움이 크기 때문이다. 이 같은 상황은 당분간 계속될 가능성이 크다. 왜냐하면 BIM데이터의 변동성이 쉽게 감소되기 어렵기 때문이다. 반도체산업의 시황에 따라 장비의 제원이 AFC설계단계 중반에 도달해서야 확정될 가능성이 여전히 높기 때문에 장비설치에 영향을 크게 받는 마감설계확정이 쉽지 않다. BIM데이터가 이처럼 상시 변경 되는 상황에서 AR데이터로의 전환은 BIM-AR데이터 상호 운용성을 더욱 훼손 할 수 있다. 그러므로 FAB신축현장에서의 이 같은 패스트트랙에서 데이터 상호 운용성 관리의 한계를 신중히 고려하며 상호 운용성 확보 방법이 모색될 필요가 있다.

### 3.3 FAB 현장 내 사용성 분석

사용성은 실제 환경 속에서 발현 될 행동을 예상하고 잠재적 사용자로부터 피드백을 받은 인터페이스 보안을 통해서 바람직하게 개발 될 수 있다. 그러므로 바람직한 사용성 개발에는 사용자와 사용 환경 및 그들 간 상호작용이 동시에 고려되어야 한다. 사용 환경은 크게 물리적 환경과 사용행태로 나누어 볼 수 있다. FAB건물



은 단순한 형태를 띠며, 공사현장에는 다수 공종이 동시에 진척되면서 다양한 유형의 행동들이 존재한다. FAB 현장의 형태 및 행동 유형에 적합한 FABAR의 사용성 향상 방안이 검토되었다.

첫째, FAB현장의 형태적 특성을 고려한 AR 트래킹 방안이 모색되었다. 반도체 공장은 가로 529.2m, 세로 201.6m, 높이 85.6m의 단순한 사각 입방체형상으로 건설된다. 클린룸 내에는 정사각형기둥이 가로 10.8m, 세로 12m 간격으로 동일하게 반복되며 형태변화를 포착 할 수 있는 특징점이 적다. 이 같이 형태의 변화가 적은 환경은 AR정합추적에 난점이 있다. AR의 정합추적은 카메라에 인식되는 형태의 특징을 기준으로 하는데, 형태의 변화가 적은 환경에서는 형상 변별이 어렵기 때문이다. 반도체 현장의 물리적 특성에 적합한 트래킹 방법이 필요하다.

둘째, As built 정합도 향상을 위한 트래킹방법이 검토되었다. FAB 신축공사에서 구조체가 완성된 후에, 마감공사 기준점이 설정된다. 마감공사 기준점은 동전모양의 금속으로써 바닥에 영구적으로 설치된다. 이렇게 설치된 동전 기준점은 공사 기준점으로써 배관, 장비설치 등을 포함한 마감공사 및 장비축입배관공사에도 연계 활용된다. 따라서 동전기준점을 AR 트래킹에 활용 할 경우 As built의 정합성 유지에 상당한 잇 점이 있다. 마감공사의 기준점인 동전을 적극적으로 활용한 정합 방법 개발이 필요하다.

셋째, 사용자의 사용편의성 및 AR 활용 동기를 강화하는 방안이 검토되었다. FAB의 클린룸에는 보안 등의 이유로 BIM데이터 활용 채널이 운용되지 않는다. 현장 근무자는 3D형태의 도면에는 접근이 어렵다. 각 개인은 각자에게 내재된 경험 같은 비규정적인 정보로만 소통하려는 경우가 빈번하다(Lee, Alzoubi and Kim, 2017). 내재된 경험은 암묵적이며 주관성을 띠기 때문에 이해충돌 가능성이 크고 잠재적으로는 분쟁의 소지가 되어 생산성에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 하지만 개인의 내재된 정보는 현장 상황의 소통에 필수적이며 소통가치가 매우 크다. 이들 정보에 도면과 같은 명시적 정보가 더해지면 현장상황 이해에 더욱 명료한 소통이 형성될 수 있다. 그러므로 AR의 사용성 개발에는 명시적 정보와 암묵적 정보를 결합 사용함으로써 발생하는 이득을 사용자가 지속적으로 경험함으로써 자발적 재사용을 촉발하도록 활용시나리오 및 시스템이 함께 개발 될 필요가 있다.

### 3.4 개발 방향의 설정

본 연구는 각 개인의 암묵적 정보에 BIM, 2D도서, 시방서와 같은 명시적 정보를 결합 소통 할 수 있는 새로운 AR채널의 도입이 현장소통의 총량과 명료도를 크게 높일 것으로 기대한다. 본 연구는 FABAR개발에 있어 총체적인(Holistic) 개발 관점을 적용한다. 본 연구에서 총체적 개발관점은 시스템과 사용 환경 간에 연속되는 상호작용의 맥락에서 사용자의 지식들 간의 소통 잠재력이 충분히 발휘될 수 있도록 개발요소들을 종합하는 관점을 의미

한다. 이 같은 관점에 따라 본 연구는 FAB신축현장의 사용맥락에서 소통의 잠재력을 발휘 할 수 있도록 시스템을 결합한다. 다음은 이 같은 관점에 따른 본 연구의 개발 방향이다.

첫째, 핵심기능을 유지하며 니즈 비대칭성을 수용한다. 상호 이해관계가 밀접하게 얽힌 협력적 프로세스에서 시공사만 일시에 업무프로세스를 바꾸는 것은 거의 불가능에 가깝다. 따라서 사용효과가 가장 뚜렷한 핵심적 사용맥락은 유지하며, 다른 이해관계자의 비대칭적 니즈를 그 같은 사용맥락에 수용하는 개발 방향이 효과적 이다. 이러한 개발방향은 시스템 활용에 따른 사용자의 업무프로세스 변경 부담을 적게 하는 장점이 있다. 참여자는 적은 노력으로 본인의 사용 혜택을 받은 경험을 누적하기 때문에 시스템 사용동기 유발 및 지속의 가능성도 크다. 더구나 이 같은 개발방향은 시스템 런칭 초기부터 BIM-AR데이터의 일관성(Consistency) 유지 할 수 있는 장점이 있다. FAB신축현장에서 주요사용자는 공사 관리자, 협력사 공사리더, 품질 및 안전관리자등으로 예상되며 이들은 도면검토 및 현장과 비교 확인과 같은 기본적인 니즈가 우선 충족되기를 원한다.

둘째, BIM-AR 데이터변환을 자동화한다. FAB신축 공사 중 BIM데이터의 변경이 자주 발생하며, 변경 예측이 어렵다. 변경 예측이 어렵다는 점은 BIM-AR 호환성 유지를 위해서 수동 확인의 방법에는 발견 누락과 같은 한계가 언제나 존재함을 내포한다. 이해관계자간 설계변경이 가중되는 등 프로세스 특징에 의한 변경 증가는 통제가 매우 어렵다. 더구나 제원변경과 같은 외부적 요인에 의한 설계변경에 대해서는 변경의 수용자가 통제하기 어렵다. 이 같은 상황에서 데이터의 변환은 자동적으로 처리되어야 할 필요성이 크다. 이에 본 연구는 BIM-AR 자동변환기의 개발을 시도한다. 이 모듈은 AR시스템의 일부로 통합되며, BIM설계데이터를 AR로 자동 변환함으로써 데이터가 변동중인 상황에서도 BIM-AR상호운용성을 획득한다.

셋째, FAB 사용 환경에 적합한 인터페이스를 구축한다. FABAR은 기존의 삼성중공업AR를 참조하여, FAB 신축현장의 사용맥락에 맞춰 개발 된다(S. Choi, et al., 2019). 삼성중공업 AR은 FAB신축공사에서 곧바로 활용되기 어렵다. 사용 환경이 크게 다르기 때문이다. 본 연구는 FAB신축공사의 사용 환경에 적합한 새로운 인터페이스를 개발한다. 예를 들어, 동일한 구조체가 반복되며 동전기준점과 같은 물리적 특징에 적합한 새로운 정합 및 정합 추적 인터페이스, 주요 국가 보안정보인 BIM데이터 보안을 위한 기기 반출입 프로세스, 설계도서의 활용에 대한 적극적 활용 동기를 불러일으키는 직관적 인터페이스 등 이다. 이 같은 FABAR의 새로운 인터페이스는 실제 BIM객체와 현장의 현황을 비교 겹쳐서 사용자에게 보여 주며 사용자의 현장 경험을 명시적으로 풍부하게 함으로써 인간-컴퓨터 상호 작용 기법 세트로 작동 할 것으로 기대된다.

## 4. 개발 콘셉트 구축 및 핵심기능 정의

### 4.1 시스템 개발 콘셉트 구축

본 연구에서는 FABAR은 현장 내 소통 채널의 하나로써 정위된다. FABAR이 현장 소통채널로 원활하게 기능하기 위해선 현장내의 다양한 암묵적 소통정보의 명시화과정을 효과적으로 지원 할 수 있어야 한다. 본 연구는 인간-컴퓨터 상호작용을 최적화함으로써 FABAR을 새로운 소통채널로 개발한다(Hull et al., 2011)(Eklundh, 1988). Figure 1은 FABAR의 개발흐름도로서 시스템 개발 콘셉트 구축에서부터 잠재 니즈 분석, 핵심기능정의, 검증에 이르기까지 인간-컴퓨터 상호작용 최적화 과정을 보여준다.

Figure 2는 사용자의 지각에서 일어나는 각 채널로부터 전달되는 정보의 융합개념을 나타내는 다이어그램이다. 이는 AR이 암묵적 정보와 명시적 정보를 융합하는 본 연구의 관점을 묘사한다. 소통 분야의 연구에 의하면 명시적(explicit)채널은 형식을 갖추어 표현되고 전파와 공유가 가능한 지식의 통로를 의미한다. 이에 비하여 암묵적(implicit)채널은 학습과 체험을 통해 개인에게 습득돼 있지만 겉으로 드러나지 않는 상태의 지식의 통로를 의미한다(Dayton and Henriksen, 2007). FAB 신축 공사에서, 대표적인 명시적 채널은 BIM모델, 도면, 시방서, 공정표 등이다. 명시적 채널의 정보는 도면이나 문서로 고착된 정보이다. 현장에서 대표적인 암묵적 채널은 이해당사자간의 일상대화를 들 수 있다. 암묵적 채널의 정보는 일상대화화 같이 습관화된 지식으로써 고착되지 않은 지식이며 주관성이 높다. 대체로 현장에서 명시적 지식이 필요한 소통에 주로 암묵적 지식만 사용하는 경우에 이해충돌이 자주 발생한다. 본 연구의 FABAR은 소통오류가 빈번한 암묵적 소통에 명시적 채널을 지원함으로써, 소통 오류의 발생을 억제한다.

본 연구는 FABAR 활용 시 사용자 지각의 변화 과정을 다음과 같이 추정했다. 현장에서 사용자는 BIM과 현장이 겹쳐진 화면을 본다. 이때, 본인의 내재된 경험을 프라임(Priming)하여 의식적인 소통의 영역으로 이끌어낸다(Lee et al., 2017). 이상의 과정은 대부분 무의식적으로 진행된다. 사용자는 새로운 경험을 당시의 긍정적 또는 부정적 감정과 함께 기억한다. FABAR은 긍정적 경험을 줄 것으로 예상된다. 긍정적인 경험이 반복됨에 따라 사용자는 본인의 기존경험, 즉 BIM과 현장을 분리된 상태로 확인하며 겪은 기존의 부정적 경험을 BIM과 현장현황을 함께 겹쳐 보는 긍정적 경험으로 점차 대체한다(Eklundh, 1988). 한편 다른 사용자들도 이와 같은 경험을 반복 하며 출처 기반의 소통경험을 긍정적으로 누적한다. 시간이 지나 대부분의 사용자들에게 집단기억이 형성된다.

이상의 시나리오를 통해서 추정된 바와 같이 FABAR의 출처 확인 기능은 소통내용의 불확실성을 줄여, 현장에서 이해당사자간 이해충돌의 감소에 기여할 것으로 예상된다. 본 연구에서는 근거기반

소통의 빈도가 높아짐에 따라 소통오류로 인한 이해충돌이 감소되며 결과적으로 재시공 감소 효과가 수반될 것으로 기대된다.

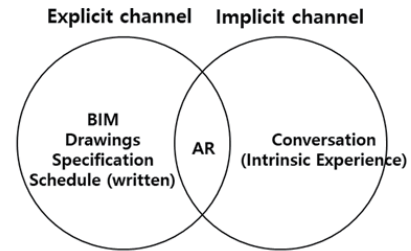


Figure 2. Augmented communication channel in users' perception

### 4.2 잠재 니즈 분석 및 핵심 기능 정의

FABAR의 개발 착수 시점에 잠재적 사용자의 잠재적 니즈를 분석되며 시스템 개발 요구사항이 도출되었다. 포커스 그룹 인터뷰(Focus Group Interview)와 개인별 심층인터뷰(Depth Interview)가 병행 실시되었다. 포커스 그룹 인터뷰에서는 삼성중공업의 기존 AR시스템이 활용되었다. FAB에서의 시공경험을 가진 잠재적 참여자들이 FAB에서의 활용시나리오를 모의 평가하였다. 각 잠재적 사용자는 본인의 예상 활용 시나리오 및 적정성을 제안 하였다. 한편 심층인터뷰는 공사팀 및 품질팀 인력(18명)을 대상으로 실시되었다. 참가자들은 구조적 설문지에 본인의 니즈를 각각 제안했다. Figure 3은 포커스 그룹 인터뷰현황과 개인별 심층인터뷰분석에 사용된 설문지를 보여준다.



이름	안승현
직급	선원
직종	설비
취업연도	5년
현장업무경력	N/A
주요업무	기초
현장업무시간	N/A

1. 지난 일주일 동안 일반적으로 몇번 본인의 업무는 무엇입니까?	- 공정관리, 공사 관리
2. 현재 본인의 업무 중 어떤 업무의 도움이 될 것으로 볼 수 있다면 어떤 도움이 필요로 예상하십니까?	- 현장에 설치 되는 정보에 설치되는 내용은 대부분 현장 실측하여 시공하는데, AR로 직관적으로 볼 수 있다면 많은 도움이 필요로 예상
3. 현재 가능 중 유용한 기능은 무엇입니까?	- 현장에서 시공현황 확인용으로 모바일 또는 기능 활용 가능 - 링크 등 장비로 현장 확인 시 날씨로 현장에 도착을 못하고 대신에 도착 정보가 있다면 활용 가능 할 것 같다
4. 현재 가능 중 개선이 되면 유용한 기능은 무엇입니까?	- 현장의 위치와 AR의 위치를 사전으로 찍어 정황을 하는것이 아닌 자동으로 위치를 찾아 주는 것을 반영 하면 좋겠다.
5. 현재 가능 중 추가기능을 통해 유용한 기능은 무엇입니까?	- 장비 위치와 AR의 위치를 사전으로 찍어 정황을 하는것이 아닌 자동으로 위치를 찾아 주는 것을 반영 하면 좋겠다. FRP 링크의 경우 재질 특성상 평탄하지 않아 깨지는 경우가 발생한다.
6. 현재 본인의 업무가 아닌 다른 추가기능을 통해 유용한 기능은 무엇입니까?	- 5번과 같음
7. 현재 본인의 업무는 아니지만, 본인의 업무에 도움이 될 것으로 예상하는 기능은 무엇입니까?	- Room BOX를 통해서 공기를 입력하게 되면 현장에서 바로 확인이 가능 할 것 같음

조사담당 : 안 소 현  
일자 : 19.10.17

Figure 3. Focus group interview and questionnaires

Table 1. System functions improved by usability units

Category	Functions	
Visualization	1) Automatic Revit - IFC - JT conversion package	Automatically Revit to be converted to IFC and then IFC to be converted to JT. JT is a neutral file format used in ARCore.
	2) Room box	The function of 'Section View' of Revit is to separate data based on 'Room Box' which is a minimum unit of construction management.
Registration and Tracking	3) 2 way Marker	Use concurrently fixation marker installed on column and mobile marker using coin indicator installed on the slab as a construction standard of MEP discipline.
	4) Auto room change	Directly access to the AR scene of the current location automatically recognizing user's location.
Data Management for Usability	5) One touch navigation	Directly access to the 3D data according to site issues and guide the location of issues.
	6) Interactive Changes Feedback	Mutual feedback between construction site and design office on site and design issues.

사용자 경험 분석 결과, 주요 사용 니즈는 다음과 같다. 1) 현재 층의 슬래브 아래 하부 층의 배관을 디스플레이 하고 싶다. 2) BIM과 현장 간 불일치를 자동으로 탐색하고 싶다. 3) 공정별로 화면을 on/off하고 싶다. 4) 3D설계 데이터만 움직일 수 있는 기능이 제공되면 좋겠다. 5) 사용자 본인의 공정관리 스케줄을 조정할 수 있으면 좋겠다. 이상의 잠재적 니즈 중 1), 2), 3), 4) 항목이 FABAR 기능요구사항으로 전개되었다.

이상의 분석결과를 토대로 사용 시나리오가 예측되었다(Hull, Jackson and Dick, 2011), 사용시나리오를 기반으로 개발아이디어가 구체적으로 도출되었다. 개발 아이디어 중에서 인간-컴퓨터 상호 작용이 효과적으로 발생할 것으로 예상되는 6개의 핵심 기능이 선택되었다. Table 1은 6개의 신규핵심기능을 보여준다. 본 연구는 핵심기능을 (1)시각화(Visualization), (2)장면정합 및 트래킹(Registration and Tracking), (3)사용자편의를 돕는 데이터관리(Data Management for Usability) 분야로 범주화 하였다. 일반적으로 AR시스템의 기능구성은 시각화, 정합, 추적의 3분야로 구분되는데, 본 연구는 정합과 트래킹을 묶고 변동성이 큰 데이터관리 기능을 사용성 범주에 포함하여 3개의 개발 분야로 정의했다.

1) RVT-IFC(Industry Foundation Classes)-JT 중립포맷 연계형 데이터 자동변환기능 이다. 이 기능은 현재의 동시협력 저작 프로세스를 유지한 상태에서 설계 데이터를 중립포맷으로 자동 연계 변환함으로써 BIM-AR 상호운용성(Interoperability) 획득한다. 본 방식의 운용가능성을 타진하기 위해서 수차례의 예비 테스트가 시행되었다. 예비테스트에서, RVT파일포맷은 IFC파일포맷으로 또한 IFC는 JT파일포맷으로 손실 없이 변환되었다. JT파일은 ARCore에서 안정적으로 작동 되었다. IFC파일이 JT파일로

변환되며 50%정도 수준으로 경량화 되는 데이터 용량 축소 효과가 발생했다.

2) 섹션뷰 기반 BIM데이터 분할(Room Box)변환 및 참조형 활용기능 이다. 이 기능은 설계BIM 데이터의 변환과정에서 공사관리단위 파일분할모듈을 사용함으로써 설계데이터의 일관성(Consistency)을 유지하며 시공관리활동을 지원한다. 데이터 분할모듈은 '룸박스(Room box)'로 명명된다. 레빗 서버의 원본데이터에 박스 형태로 설치되며 Revit 애플리케이션의 섹션뷰 기능을 이용하여 파일을 분할 변환한다. 1개 룸박스는 10.8m(w)\*52.8m(d)\*5.5m~8.15m(h) 육면체 형태이다.

룸박스의 크기는 다수의 이해관계자별 사용 환경을 다면적으로 충족하기 위해서 선택되었다. 룸박스에 포함되는 데이터용량은 BIM전체 데이터를 1일 이내 활용 할 수 있으며, 현장에서 1분 이내 실행 가능한 크기이다. 본 연구는 변동성이 심한 환경에서 1일 이내 모든 데이터의 변동이 확인되어야 할 것으로 판단했다. 또한, 로딩에 소요되는 대기시간 1분이 사용자가 인내할 수 있는 최대 데이터 로딩시간으로써 판단했다. 또한 룸박스는 모듈랙기반 공사 관리, 도면, 공정 스케줄 등 모듈외의 추가 정보와의 연계 단위로써 활용된다. 클린룸의 마감공사가 모듈랙 단위로 진행되는 점에 착안하여 모듈랙 공사단위와 데이터분할단위를 동일하게 규정했다. 룸박스를 이용한 데이터 관리모듈은 서버데이터를 분절하지 않은 상태를 유지하면서도 공사 관리를 지원하는 일종의 하이브리드 방식이다. 이 같은 방식에 따라 설계BIM데이터는 분절하지 않은 상태를 유지하며 AR에 활용되는 데이터로 분할 변환된다.

구체적인 데이터 변환 및 활용 프로세스는 다음과 같다. 먼저, 공용설계서버의 레빗파일에 공사단위별로 구현된 룸박스를 설치한다. 자동변환프로그램이 섹션뷰에 포함된 객체들만 IFC파일에서 JT파일로 연쇄적으로 자동 변환한다. 본 연구에서 설정한 1개 룸박스 JT파일 용량은 모든 공종을 포함하며 50MB(Mega byte) 내외이다. 룸박스는 클린룸구역에만 설치되는데, P2현장에서는 클린룸 전 공종에 걸쳐 총 557개의 룸박스가 운용된다. 변환된 중립포맷 데이터는 Private-LTE(또는 Private 5G)로 서버에서 현장으로 전송된다. 현장에서는 모바일 기기를 구동함으로써 AR에 탑재된 JT 파일을 현장 화면과 겹쳐 본다. 이들 데이터는 다양한 방식으로 공사 활동에 활용 될 수 있다. 예를 들어 클린룸의 마감 공사는 상당부분 모듈화공법으로 진행시, 1개 룸박스는 통상 3개의 모듈랙을 동시에 디스플레이 한다. 이 같은 방식으로 1개 룸박스를 활성화하여, 모듈랙의 양중 전 점검, 양중 후 확인 등 3개의 모듈랙 공사관리에 활용 된다.

3) 고정마커와 이동마커 병행 정합 및 추적정합(2 way Marker)기능이다. 이 기능은 AR 정합 특징 점을 찾기 어려운 FAB 환경에 맞춰 개발된 FABAR의 정합 및 트래킹 방식이다. 고



정마커와 이동마커가 정합 및 추적정합에 병행 활용된다. 고정마커는 기둥에 부착된 형식의 마커이다. 현장기둥에 실물 마커를 부착되며, BIM모델에도 동일한 위치에 고정마커모델이 설치되어 상호 식별 및 인식 포인트가 연동된다. 사용자는 현장에서 모바일 기기로 고정마커를 인식하는 행위만으로 BIM모델을 현재의 위치로 정확하게 정합할 수 있다. 고정마커를 이용하면, 마커를 소지하지 않고도 FAB 어디에서든 FABAR사용이 가능하다.

하지만, 반도체 공장은 길이가 수백 미터에 달할 만큼 넓어 공장 안에 실물마커를 조밀하게 부착하는 데에는 한계가 있다. 이에 정합 정밀도 향상을 위해 이동마커가 고안되었다. 이동마커는 사용자가 소지하며 현장 바닥에 설치된 동전토큰위에 올려둠으로써 정합에 활용된다. 동전기준점과 일치하는 3D모델을 재 호출되며 동전모델과 현장의 동전에 맞춰 AR모델이 재 정합 된다. 동전마커는 MEP 시공기준점인 동전토큰의 좌표를 사용하기 때문에, 사용자는 현장과 BIM간 정합성을 정밀하게 비교할 수 있다. 이상의 병행정합 방식은 기존의 중공업 AR과 완전히 차별된다. 이 방식은 사용자가 현장에 매번 마커를 등록하고 이동하는 번거로움을 제거한다. 중공업 AR은 매번 마커를 지참하는 방식을 사용한다. 고정마커와 이동마커를 병행한 정합 방식에 따라 사용자는 마커소지의 부담을 줄이며 BIM모델과 현장 간 부재 설치 위치 등을 정확하게 정합할 수 있다. 결과적으로 마감공사의 기준점과 설계데이터를 상호 비교 할 수 있기 때문에 마감공사 As built BIM의 정합도 향상에 도움이 된다.

4) 룸 간 룸박스 자동변환 (Auto room change)기능 이다. 이 기능은 사용자 위치를 추적하여 사용자의 위치에 맞는 룸박스를 자동적으로 동기화 한다. FAB은 같은 모양의 구조체가 계속 반복되기 때문에, 정위인식이 어려우며 길 찾기에 난점이 있다. 이 기능은 사용자가 특별한 주의를 기울이지 않고, 현재의 위치에 부합하는 룸박스 모델을 자동으로 정합한다. 룸박스를 여러 개 결합 할 경우에도 룸 간 자동변환이 가능하기 때문에, 공사 관리 구역의 변경 또한 적절히 지원 할 수 있다. 이 기능은 사용자 본인의 정확한 위치 파악에도 도움을 주는데, 같은 모양이 반복되는 환경에서 본인의 정위인식에 도움을 받을 수 있다.

5) 이슈와 길안내 자동연동(One Touch Navigation)기능 이다. 이 기능은 발행된 이슈와 네비게이션을 연동하여 FAB현장에서 이슈항목의 위치와 도달거리를 가시화하며 사용자를 이슈까지 안내 한다. FAB현장에는 수많은 장치물이 존재하며, 이들 속에서 이슈 대상을 찾기가 쉽지 않다. 이 기능은 사용자의 현재위치를 기준으로 밸브, 파이프 등 이슈객체의 위치, 떨어진 거리, 이동방향을 안내하기 때문에 사용자는 이슈부재까지 길 잃을 염려 없이 이동경로를 안내 받을 수 있다.

6) 상호 소통형 피드백 (Interactive Changes Feedback)기능 이다. 이 모듈은 이슈발생 및 변경점 가시화 기능으로 구성된다.

이슈발행 기능은 현장에서 발생한 이슈와 현재 설계데이터간 비교 정보를 생성할 수 있다. 예를 들어, 현장에서 이슈대상물의 조치결과를 해당 룸박스 및 객체의 위치정보를 포함하여 서버로 송신 할 수 있다. 한편, 변경점 가시화 기능은 AR화면에 객체의 추가, 삭제, 각도의 변경, 이동, 형태의 변화, 속성의 변경과 같은 설계 변동 현황을 가시화 한다. 이 모듈은 이슈발행기능과 함께 사용되며 As built의 정합도 향상을 지원한다. 예를 들어 사용자는 현장에서 발생한 변경사항 등을 설계관계자에게 이슈로 발행할 수 있다.

이처럼 AFC, 승인된 Shop과 현장의 현황을 교차확인 하는 등 증거기반의 소통에 상호작용이 가능하기 때문에, 명확한 소통을 통해서 정밀한 시공관리가 용이해진다. 이 기능은 암묵적 채널로 형성되기 쉬운 현장이슈의 소통을 명시적 단계로 이끈다. 이 기능은 As built도서와 현장간 세밀한 관리를 가능하게 함으로써 (Eklundh, 1988) As built의 정합도 향상을 지원 할 수 있다. 한편, 본 연구는 데이터는 변동 이력을 생성할 수 있다는 점에 착안하여 변경점을 구조적으로 모니터링하기 위해서 데스크톱에서의 관리 기능을 추가 개발했다. 설계관리자는 BIM데이터의 변동성을 참조하며 설계데이터관리에 활용한다.

이상 살펴본 FABAR의 주요기능 및 활용예상효과는 다음과 같이 요약된다. 1) RVT-IFC-JT 중립포맷 연계형 데이터 자동변환 기능은 BIM-AR 상호운용성(Interoperability)을 획득한다. 2) 섹션뷰 기반 BIM데이터 분할(Room Box)변환 및 참조형 활용기능은 설계BIM 데이터의 일관성(Consistency)을 유지하며 시공 관리활동을 지원한다. 3) 고정마커와 이동마커 병행 정합 및 추적정합(2 way Marker)기능은 형태변화가 적은 FAB 환경에서 FABAR의 정합 및 트래킹 기능을 최적화한다. 그밖에 4) 룸 간 룸박스 자동변환 (Auto room change)기능, 5) 이슈와 길안내 자동연동(One Touch Navigation)기능, 6) 상호 소통형 피드백 (Interactive Changes Feedback)기능은 현장 사용자에게 사용 동기를 돋구는 긍정적인 사용편리성을 제공하며 As built 정합의 정밀도를 높여 현장간의 정합성향상을 지원한다.

## 5. 시스템 개요

FABAR 시스템은 크게 실시간 변환 서버, 웹서비스 서버, 모바일 장비, 통신네트워크로 구성된다. FABAR의 서버군은 통합설계실의 서버실에 설치되며, 모바일 장비는 ARCore 플랫폼으로 구동된다. 기존 중공업AR에는 Project Tango 플랫폼이 적용되었다. 이는 장비 단종 등 확장성에 한계가 있는 반면에 ARCore는 신규 모바일 장비 대부분에서 채택하고 있는 방식으로 범용성이 크다. 웹서비스 서버와 모바일 장비간 데이터통신에는 데이터 보

안이 가능한 Private LTE(또는 Private 5G)가 사용된다.

Figure 4는 FABAR 시스템 구조도이다. 설계서버-IFC변환서버-JT변환서버가 연속적으로 작동함으로써 대용량 BIM설계데이터가 실시간 변환된다. 설계서버에는 Autodesk사의 레빗으로 작성된 RVT파일이 저장된다. IFC변환서버는 BIM설계내용을 룸박스별로 인식하여 이를 IFC파일로 변환한다. 한편 JT변환서버는 룸박스별로 저장된 IFC파일을 JT파일로 변환한다. WAS서버는 기준정보, 사용자정보, 도면파일등을 관리하고, 모바일 기능을 위한 수행명령을 처리한다.

Figure 5는 FABAR시스템의 소프트웨어 구성도이다. IFC변환서버 및 JT변환서버에는 각각 데이터 자동 변환 모듈이 탑재된다. 또한, 각 서버의 운용 상태를 모니터링하고, 제어할 수 있는 서버모니터링 SW가 운용된다. WAS서버는 모바일 서비스 운용과 FABAR시스템 운용을 위한 웹서비스를 제공한다. 이 같은 서버 분할 방식은 설계서버의 운용성능에 영향을 끼치지 않기 때문에, 설계데이터와 AR데이터를 각각 안정적으로 운용할 수 있는

환경을 제공한다.

Figure 6은 FABAR시스템의 각 서버별 기능 구성도이다. 각각의 변환서버는 각각의 원시파일(RVT파일,IFC파일)을 인식하고 변환을 담당하는 자동변환모듈과, 데이터베이스와 정보를 연계하는 인터페이스 모듈, 파일 전송을 관리하는 모듈, 작업결과를 로그로 관리하는 모듈로 구성된다. 웹서비스서버(WAS서버)는 모바일 장치의 서비스에 연동된 오픈API모듈과 FABAR시스템이 제공하는 서비스 운영 정보를 관리자가 관리할 수 있도록 웹서비스를 제공한다.

Figure 7은 FABAR의 주요 인터페이스 화면이다. 기본적인 인터페이스화면 구조는 직관적 업무연속성을 유도할 수 있도록 의도적으로 구성된다. 기능실행명령버튼 및 AR관리 메뉴는 디스플레이 좌우 측면에 배치된다. 실행버튼은 드롭다운형식으로 배열되는데 한 단계씩 트리구조를 확장할 수 있다. 이러 한 배치는 AR화면의 가시도를 최대한 확보하는 한편 양손 조작이 가능하도록 한다. 또한 사용자는 메뉴 바의 투명도를 설정할 수 있다. 이

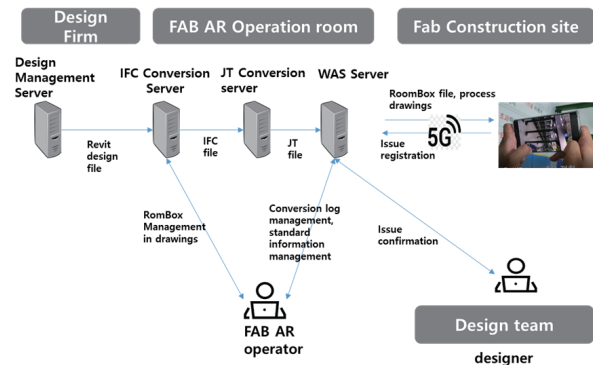


Figure 4. Structure of FABAR system

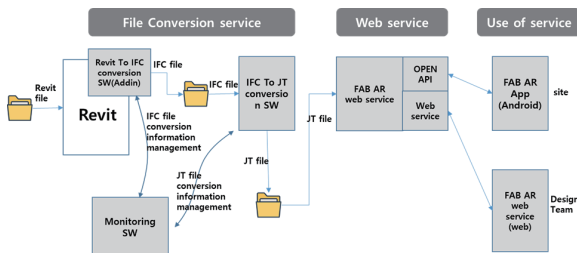


Figure 5. Software configuration diagram

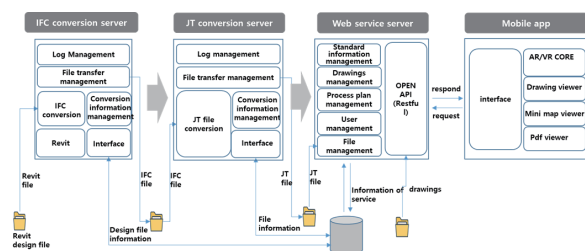


Figure 6. Service function diagram

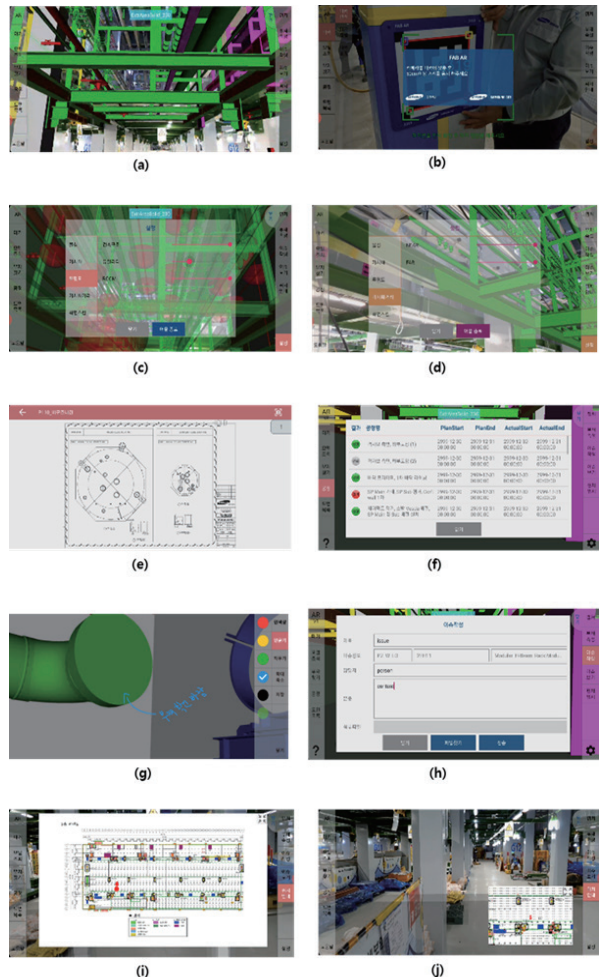


Figure 7. User interfaces

에 따라 사용자는 디스플레이 화면 전체 크기로 전환하여 모델정합 화면을 확장 할 수도 있다. 이상의 인터페이스특징은 사용자가 본인의 업무를 자연스럽게 연속 진행 할 수 있도록 유도한다. 예를 들어 사용자가 작동명령 조작하면 곧바로 하위단계의 실행 버튼이 드롭다운 형태로 펼쳐진다. 드롭메뉴가 자연스럽게 순차적으로 다음 행위를 유도함으로써, 사용자는 직관적으로 연관기능을 실행한다. 인터페이스 화면은 3개의 범주로 분류된다.

첫째, 3D모델 조회 기능 군으로 다음화면이 포함된다. (a) 모델 정합 화면: 사용자는 정합 후, AR모드에서 현장과 BIM간 정합상태를 상호 비교할 수 있다. 한편, VR 모드에서 핀치투줌(2-point pinch to zoom) 방식으로 3D의 모델을 자유롭게 확대, 회전, 이동 할 수 있다. (b) 고정 형 마커의 인식장면: 마커 정합여부가 사용자에게 즉시 피드백 된다. (c) 3D개체의 디스플레이 투명도 조정 화면: 사용자는 건축구조, MEP유틸리티, 룸박스별로 각각 투명도를 조정하며, 공중별로 BIM 설계를 확인 할 수 있다. (d) 가시거리 조정화면: 사용자는 3D데이터의 가시거리를 임의로 설정할 수 있다. 이 기능을 이용하여, 아래층 또는 위층의 배관설계를 볼 수 있다. 이들 기능들 외에 공중별 보기, 부재검색, 특정 부재까지 거리 안내와 같은 기능화면이 주 메뉴 및 드롭메뉴에 배치된다.

둘째, 2D도면조회 및 공사 관리 기능 군으로 다음 화면이 포함된다. (e) 도면조회 리스트보기 및 도면 확대조정 화면: 사용자는 PDF로 제공되는 AFC 및 Shop 도면을 조회 및 열람 할 수 있다. (f) 공사 진척 확인 화면: 사용자는 공정별 시공계획 대비 현재시공상태를 비교 및 확인 할 수 있다. 공정데이터는 P6로 운용되는 정보로써, Text파일로 업로드 된다. (e),(f) 기능은 룸박스에 연계되어 사용자에게 제공된다. 사용자는 룸박스별로 공정별 시공계획과 도면을 검색 및 열람 할 수 있다. (g) 이슈캡처화면: 사용자는 이슈 발생시, 캡처 및 코멘트를 기입하여 별도 파일로 서버에 저장 할 수 있다. (h) 이슈 발행 화면: 사용자는 메일을 이용하여, 서버로 이슈를 전송함으로써, 이슈조치 당사자에게 이슈내용을 공유 할 수 있다. 이상과 같이 룸박스 기반으로 도서 및 공정정보를 연계하여 실제 현장 공사 단위에 맞춰 공사 관리 정보가 현장에 제공될 수 있다. 한편, 레빗 서버의 BIM객체는 분절 없이 설계변경에 따라 일관성을 유지한다.

셋째, 현재위치 확인 기능 군으로 다음 화면이 포함된다. (i) 내비게이션 화면: 이슈를 수신한 사용자는 현재 위치에서 이슈발생위치까지의 거리 및 위치를 확인 할 수 있다. (j) 내비게이션의 작동 화면: 이슈 조치 자는 이슈발생 아이템까지 길 안내를 받을 수 있다. 이슈 조치 자는 이슈항목을 터치만 하여 해당 이슈의 내비게이션을 작동 할 수 있기 때문에 사용편의성이 크다. 이상의 FABAR 인터페이스는 FAB신축 현장 시공관리에 유용한 행동유도성(Affordance)을 제공한다. 즉, 사용자는 현장에서 특정 행동

의 목표에 적합한 처리절차를 무의식적으로 유도 받는다. 적합한 행동 유도가 반복되며 긍정적인 활용경험이 누적됨에 따라 사용자의 FABAR 사용동기가 점차 강화 될 수 있다.

## 6. 성능 테스트 및 결과

본 연구에서는 FABAR의 시스템성능확인을 위해서 개발 단계별로 각각 독립된 5개의 실험이 수행되었다. Table 2는 각 테스트별 실험방법 및 검증 목표를 보여준다. 실험 1~3에서는 시스템모듈별 성능이 검증되었다. AR데이터 시각화(Visualization) 성능 및 AR 장면정합 및 트래킹(Registration and Tracking) 그리고 데이터관리(Data Management for Usability) 성능이 검증되었다. 실험 4에서는 관리시스템 및 모바일 시스템의 연계 및 주요기능의 작동 성능이 검증되었다. 실험 5에서는 잠재적 사용자가 실제 사용 환경에 참여하며 서버시스템과 모바일 기기 및 이들 간의 연계성능이 검증되었다. 실험 5는 Private LTE 네트워크가 연결된 후 실시되었다.

Table 2. Summary of performance test

Exp.	Goal	Method	No
Exp.1	Massive data Conversion Method	Daily conversion time measurement and Data conversion logic design	1),2)
Exp.2	Registration Performance Validation	Pilot test in the FAB area	3)
Exp.3	Tracking Performance Validation	Pilot test in the FAB area	4)
Exp.4	System Performance Validation	Operation of prototype system	1)-6)
Exp.5	Usability Test	Pilot test by prospective users	1)-6)

### 6.1. (실험1) 데이터 변환(Rendering)

본 연구는 2개의 변환서버를 이용한 병렬처리 시나리오 로직을 개발했다. 실험 1에서는 BIM-AR데이터 변환 성능이 2 차례에 걸쳐 검증되었다. 1차 실험에서는 단일변환과 병렬변환 방식 간 변환 성능이 비교되었으며 서버의 운용방식이 결정되었다. Figure 8은 P2 Phase1의 Revit 파일 44개(9,075MB)에 설치된 4,900개 룸박스의 데이터를 대상으로 수행된 단일변환 방식과 병렬변환방식의 데이터 변환 성능 간 비교결과를 보여준다. 성능 실험에는 인텔 Xeon 3.2G/RAM 64G가 서버 CPU로 활용되었다. 실험결과에 의하면 단일변환(test 1)에서 Revit-to-JT의 데이터 변환에 총 649분이 소요되었으며, 병렬변환(test 2)에는 총 131분이 소요되어 단일변환 대비 519분이 감소되었다. 결과적으로 IFC

변환에 461분(단일)에서 109분(병렬)으로 352분 감소되었으며 JT 변환에 184분(단일)에서 18분(병렬)으로 166분이 감소되었다. 이처럼 병렬변환방식에서 전체적으로 79.8%의 소요시간이 단축되어 IFC변환에는 76.4%, JT변환에는 90.2%의 소요시간 단축된 성능을 보인다. 1차 실험결과는 FABAR의 병렬변환처리가 효과적으로 작동함을 보여준다. 이상의 실험결과에 따라 본 연구는 병렬변환 처리 방법을 채택했다.

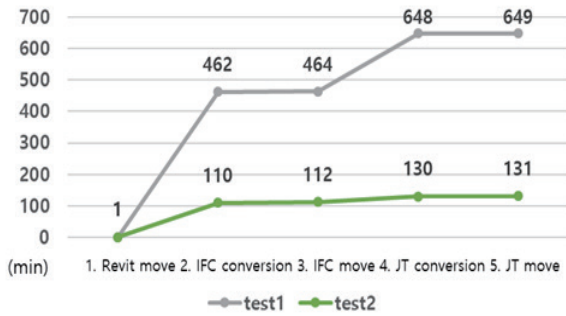


Figure 8. BIM data conversion time on operation sequence (Test 1: single processing, Test 2: parallel processing)

2차 실험에서는 도입예정인 하드웨어에 가장 적합한 병렬처리 방법이 선정되었다. 2차 실험은 상대적으로 시간소요가 큰 IFC서버의 변환과정을 대상으로 실시되었다. 병렬처리 방법을 3개의 시나리오로 나누어 이들 성능이 상호 비교되었다. P2의 Ph1,2,3,4의 전체 448개(45.4GB)설계파일을 대상으로 별도의 add-in 소프트웨어에 의해서 병렬처리가 수행되었다. 이들 데이터는 각각 20, 30, 40개의 파일 묶음별로 변환성능이 평가되었다. 성능검증결과에 의하면 20개 파일의 병렬처리는 110분 소요(메모리 50% 사용), 30개 파일의 병렬처리는 90분소요(메모리 70~90% 사용), 40개 파일의 병렬처리는 변환실패(메모리 98~100% 사용)의 결과를 보였다. 이 같은 성능검증 결과에 따라 20개 병렬처리 시나리오가 운용시나리오로 선택되었다. 20개 병렬처리 시나리오가 적절한 소요 시간 내에서 설계데이터의 변동에 가장 유연하게 대응 할 수 있기 때문이다.

한편 20개 RVT-IFC변환 병렬처리 시나리오 최적화를 위한 서버 운용 로직이 정의되었다. Figure 9 은 2개의 IFC서버(Server 01, Server02) 에 적용된 자동배정 로직 트리를 보여준다. 로직은 다음과 같다. 1) RVT파일별 IFC 변환 기록을 저장한다. 2) 변환 기록을 비교하여 변환시간이 큰 순서대로 정렬한다. 3) IFC 변환에 소요된 총 시간을 서버의 개수로 나눈평균값의 최솟값과 비교한다. 4)각 RVT파일별 변환 시간을 합산 배분하고, 합산된 값이 최솟값보다 크면, 해당 서버는 배분을 멈추고 나머지 서버에 RVT파일을 배분한다. 5) IFC 01서버 또는 IFC 02서버에 10개씩 배분하여 변환 한다.

이상 데이터 변환성능 검증 결과는 2개의 변환서버를 이용한

병렬처리 시나리오로직이 룬박스를 이용한 Revit-IFC-JT 중립포맷 연계형 데이터 자동변환방식에 적절하게 적용되었음을 나타낸다. FABAR의 예상 성능은 현재의 사용 환경에서 총 변환 속도는 3시간~5시간 정도로 형성되어 BIM데이터를 다음날 현장에서 활용 가능한 수준으로 판단된다.

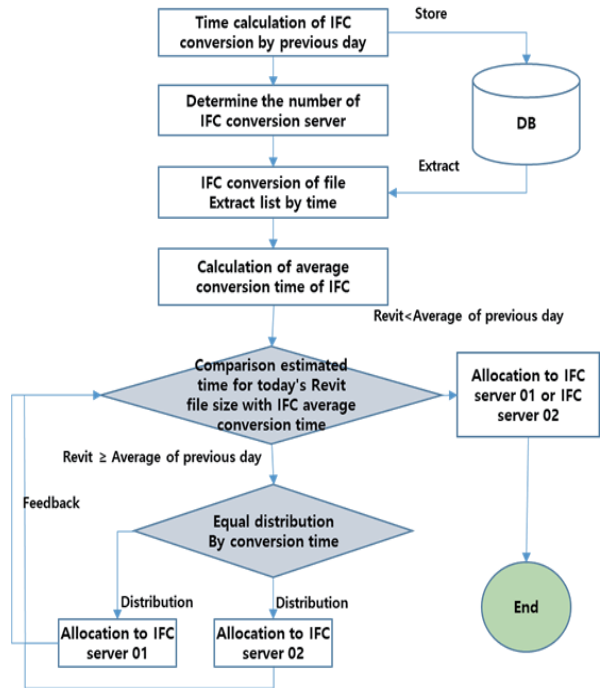


Figure 9. Flow chart of server allocation

## 6.2. (실험2) AR 장면 정합 (Registration)

본 연구는 마커를 이용한 AR화면의 정합 방법을 개발했다. 실험2에서는 마커를 이용한 정합성능을 테스트를 반복하며 최적의 마커형식과 운용방식을 결정하는 과정 및 결과를 보여준다. 성공적인 FABAR 애플리케이션을 개발하기 위해서는 BIM 데이터와 현실세계 사이의 정밀한 좌표계 정합이 반드시 필요하다. 본 연구에서는 Figure 10 과 같이 두 가지 형태의 마커를 이용하여 BIM 모델의 좌표계와 현실세계 사이의 변환 관계를 획득한다. (a)는 고정형 마커이며 (b)는 이동형 마커이다. 고정형 마커는 FAB 구조물의 기둥에 부착하여 사용하며, 이동형 마커는 FAB AR 사용자가 직접 휴대하면서 시준 하는 형태로 활용한다.

이동형 마커가 설치되는 바닥면은 회색의 도로로 도색이 되어 있어 트래킹을 위한 특징점이 거의 존재하지 않으며, 또 특유의 광택으로 인해 난반사가 심하다. 이러한 상황에서는 AR 카메라가 자세를 쉽게 잃어버리거나 미끄러짐이 자주 발생하게 되므로 원활한 애플리케이션 사용이 어렵게 된다. 이러한 점을 보완하기 위해 본 연구에서는 이동마커의 상단에 특징점이 될 수 있는 고유의 워드 아트를 설계하였다.



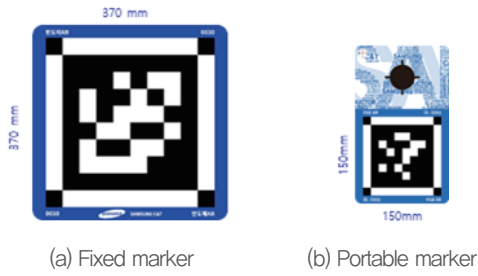


Figure 10. Design of markers

$$\hat{T} \leftarrow \operatorname{argmin}_T \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 \|K \Pi T^{-1} P_{ij} - p_{ij}\|^2 \right) \quad (1)$$

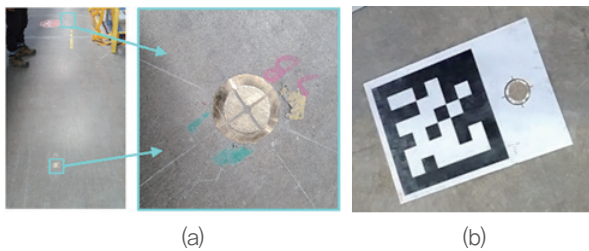


Figure 11. FABAR Registration using FAB Token in FAB  
(a) Tokens on FAB Slab, (b) Portable Marker installed on Token

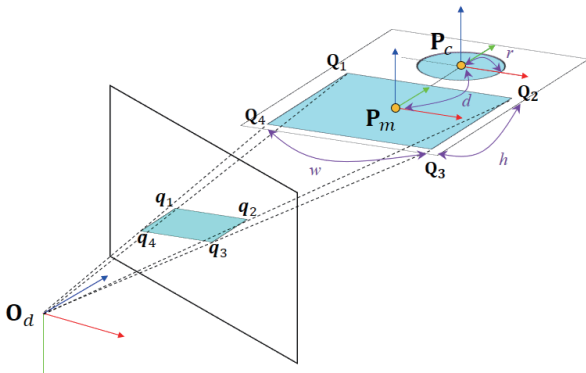


Figure 12. Scheme of FAB token pose recovery using portable marker

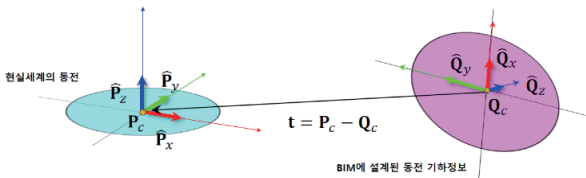


Figure 13. Concept of transformation matrix estimation using FAB token



Figure 14. Registration result using portable marker in FAB

마커 좌표계에서 카메라 좌표계로 마커의 3차원 점을 이동시키는 강제변환행렬(Rigid Transformation)이며 K는 3x3 카메라 내부 파라미터 (intrinsic parameters), 그리고 원근투영을 위한 3x4 정규행렬 [l|0]을 의미한다.

본 연구에서는 Figure 10에 제안된 이동형 마커를 이용하여 동전에 알려진 방식과 다른 새로운 형태의 AR 정합 방법을 제안했다. Figure 11는 이동형 마커를 활용한 정합 접근법의 예를 직관적으로 보여준다. 이동형 마커는 FAB 구조물의 계층과 정도 관리를 위해 사용되는 동전에 거치하여 사용한다. AR 사용자는 단지 마커에 각인된 시준형상에 맞춰 이동형 마커를 동전에 설치하고 FAB 건물 좌표계 기준으로 진북방향을 향하도록 방향을 조절해준 뒤 영상을 촬영하면 AR 장면 정합이 완료되는 방식이다.

고정형 마커는 갤럭시 노트10+의 27mm 카메라로 영상을 촬영했을 때 최대계측거리 3m를 기준으로 최소 30% 이상의 화소로 마커 패턴이 이미징 센서에 촬상이 되도록 370mm x 370mm의 크기로 제작하였다. 그리고 이동형 마커는 무엇보다 휴대성이 중요하기 때문에 현장 작업자의 작업복에 보관할 수 있는 최대 크기인 150mm x 250mm로 설계하였다. 고정형 마커는 주로 FABAR 사용자의 현재 위치를 전역적으로 인식 시키고 개략적인 AR 장면을 생성하기 위해 사용한다. 좌표계 변환 관계를 획득하기 위하여 본 연구에서는 Penate-Sanchez가 제안한 Perspective-n-Point 알고리즘을 아래와 같이 적용하였다 (Penate et al., 2013). 식 (1)에서 LP<sub>ij</sub>는 마커 좌표계 기준으로 네 모서리의 3차원 좌표를 의미하며, P<sub>ij</sub>는 이에 상응하는 영상 좌표계의 마커 네 모서리 점을 말한다. 그리고 T<sub>L</sub>은 이동형 마커를 활용한 장면정합의 핵심은 3D데이터에 설계된 동전의 3차원 기하정보와 실물 동전의 3차원 기하정보 사이의 정합 관계를 찾는 데 있다. 이때, 이동형 마커는 시준된 실물 동전에 대한 3차원 기하정보를 추출해 내는 역할을 한다.

Figure 12은 실물 동전마커의 3차원 기하정보를 복원하는 개념을 보여준다. O<sub>d</sub>는 카메라의 광축을 의미하며, P<sub>m</sub>와 P<sub>c</sub>는 각각 카메라 좌표계 기준 마커의 3차원 중심좌표, 그리고 동전의 3차원 중심좌표를 각각 의미한다. w, h, d, 그리고 r은 이동마커의 설계 시점에 이미 알려지게 되는 상수이다. 마커인식을 통해 {q<sub>i</sub>} (i=1,...,4)가 결정되면 식 (1)의 Perspective-n-Point 알고리즘을 이용하여 {Q<sub>i</sub>} (i=1,...,4)를 획득할 수 있고 이로부터 P<sub>m</sub>과 P<sub>c</sub>를 계산할 수 있다. P<sub>c</sub>가 결정되고 나면 Figure 13와 같이 실물 동전과 3D데이터 동전 사이의 변환 관계를 정의하는 4 x 4 강제변환 행렬 [R|t]를 획득한다. 회전행렬인 R은 복원된 카메라 좌표계의 동전 좌표축과 3D데이터 동전의 좌표축을 서로 정렬하여 획득한다. 먼저 두 좌표축을 모두 단위 벡터로 변환한다. 그리고 이 단위 벡터들을 Rodrigues 폼으로 변경시켜서 최소자승해 (Least Square Minimization)로 축 사이의 각도에 대한 차이를 풀어내

거나 PCA (Principal Component Analysis) 또는 NDT (Normal Distributions Transform) 알고리즘을 사용하여 계산하도록 한다. 병진 이동 t는 R이 획득되고 난 후 Pc와 RQm의 벡터차를 이용하여 계산한다.

Figure 14는 제안된 방법을 사용하여 AR 장면을 생성한 결과의 한 예를 보여준다. 결과에서 알 수 있듯이 3D데이터에 설계된 동전의 3D 모델이 실물동전 위에 매우 정확하게 정합된 것을 확인할 수 있다. 고정마커 또한, 고정마커의 위치로 3D 모델이 정확히 정합되었다.

이상 장면정합성능검증 결과는 다음과 같이 요약된다. 1) 고정 마커는 FAB의 반복되는 물리적 공간 특징에 적절하게 작동한다. 마커병행운용방식에 있어 마커관리 소지 및 이동의 불편을 감소시킨다. 2) 동전마커는 3D데이터에 설계된 동전의 3차원 기하정보와 실물 동전의 3차원 기하정보 사이의 정합 관계를 획득한다. 이동마커를 이용함으로써 마감공사의 기준점을 이용한 정밀한 정합이 가능하다.

### 6.3. (실험3) 추적 정합 (Tracking)

본 연구에서는 AR 카메라의 실시간 트래킹을 해결하기 위해 Google사의 ARCore(2018년)를 사용하였다. 실험 3에서는 FABAR이 실행되는 환경의 특성에 맞춰 ARCore의 기능 일부 최적화 과정 및 성능 검증 결과를 보여준다. FAB 내부는 공사 중 특성상 조도 확보가 원활하지 않다. 그래서 마커를 인식하거나 트래킹을 수행하는 시점에 잡음성분이 빈번하게 발생하게 되며 이는 결국 트래킹 미끄러짐 결과를 초래하게 된다. 본 연구에서는 ARCore가 영상 피라미드의 극점을 특징 점으로 사용하는 특성을 고려하여 원 영상에 양자 저대역 통과 필터 (Bilateral Low Pass Filter)를 적용하였다. 또한 모바일의 IMU가 저가 양산형 센서임을 고려하여 Low-latency IMU Integration이 진행될 수 있도록 ARCore 라이브러리 일부를 수정하여 트래킹이 보다 안정적으로 진행되도록 하였다.

또한 ARCore는 자체적으로 위치 자동복원 기능이 탑재되어 있으며 API 수준에서 이 기능을 임의로 비활성화 할 수 없다. FAB 구조물의 경우 특징이 없는 기둥이나 브라켓이 반복적으로 출현하게 되어 자동복원 기능이 잘못 실행되는 경우가 매우 잦다. 본 연구에서는 ARCore가 실행되는 상위 레이어의 스프레드에서 임의적으로 트래킹 미끄러짐이 발생하는지 실시간으로 모니터링 한 뒤 미끄러짐이 발생하면 자동적으로 ARCore를 초기화 하도록 하였다.

Figure 15은 Note10+를 이용한 본 연구의 ARCore 기반 트래킹 결과와 Project Tango 플랫폼을 사용하는 Zenfone AR(2017년)의 자세추정 결과를 비교하여 보여준다. 실험은 약 20m 거리 사이로 마커 두개(ID-1003, ID-1004)를 바닥에 배치한 뒤 closed-loop 테스트를 총 5회 수행하면서 마커를 3차원 복원하는 식으로 진행하였다. 시공 중인 FAB 구조물 내에서 mm단위로 카메라의 절대적인 위치 오차를 측정할 수 있는 도구가 존재하지 않아 반복 3차원 복원으로 상대적 오차를 측정하였다.

전반적으로 Project Tango 기반의 트래킹 성능이 좋은 것으로 나타났으나 제안된 ARCore 커스터마이징 결과 또한 충분히 FAB AR에 활용될 수 있음을 보여주었다. 약 20m 주황한 뒤 처음 위치로 돌아왔을 때 평균 25mm 수준의 위치 오차 수준을 보였다. Project Tango 플랫폼은 120FPS 속도로 작동하는 전용 광각 카메라와 IMU를 탑재하고 있으며, 감광도가 밝아 ARCore보다 성능이 좋은 것으로 알려지고 있다. 이 같은 결과는 ARCore 플랫폼의 특성을 고려할 때 FABAR의 트래킹 성능이 최적의 성능으로 가동됨을 보여준다.

이상 추적정합성능 검증결과는 FABAR의 추적정합기능이 반복되는 기둥, 시공 중 조도부족, 난반사와 같이 FAB 신축 물리적 환경에 AR트래킹 정합에 어려움 존재함에도 불구하고 무리 없이 유지되고 있음을 보여준다. 이 같은 결과는 FABAR의 트래킹 성능이 FAB신축공사의 관리에 유용한 수준으로 판단된다.

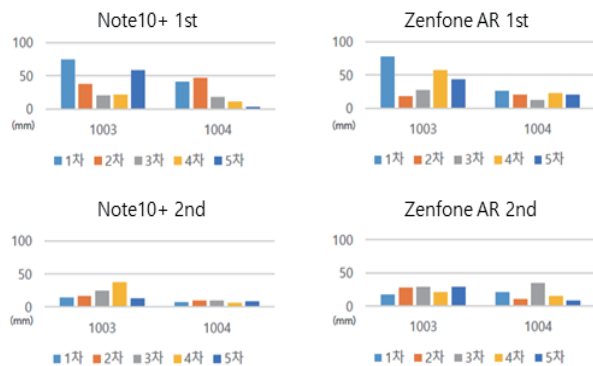


Figure 15. AR tracking performance comparison between ARCore and tango at FAB

### 6.4. (실험4) 시스템 연동 및 기능 구현 검증

실험 4에서는 실제 사용 환경을 구성하여 데이터변환 및 주요기능의 동작 성능이 검증되었다. 데이터 변환 기능은 다음과 같이 검증되었다. 실제 운영 상황에 맞춰, 업무 종료 시간인 23:00~다음날 08:00간 실시간 RVT-IFC-JT 변환 테스트가 P2 Ph1~4의 448개 레빗파일(45.4GB)을 대상으로 진행되었다. 변환시간 측정 결과, 총 242분(4시간 2분)이 소요되었으며, 각 단계 별로는 FTP파일 이전에 23분, IFC변환에 124분, JT변환에 95분이 소요되었다. 매일 모든 BIM데이터를 AR에서 활용하는데 문제가 없는 성능이다.

주요기능들의 기능 작동여부가 다음과 같은 모의 환경에서 테스트 되었다. 변환된 JT데이터와 FABAR운용시스템이 노트북 컴

퓨터에 탑재되었으며 모바일기기의 FABAR 애플리케이션이 구동되었다. 모바일기기와 PC의 운용체제간 데이터통신에는 Wifi가 사용되었다. 현장에서 AR정합이 무리 없이 수행되었다. FABAR의 주요기능 중 모델조회, 고정마크정합, 설정, 이슈작성 및 이슈부재 찾기, 2D도면보기, 부재속성 및 부재 찾기, 현재위치 보기, AR모드, VR모드, 투명도, 보기 옵션, 이동형 마커의 정합 등 모든 기능이 정상적으로 작동되었다.

FABAR 주요기능별 사용성 평가 다음과 같이 실시되었다. 잠재적 사용자인 공사팀과 설계팀인력이 각각 4명씩 참여했다. 실험참가자는 1층에서 2층 모델 확인하기, 2D도면과 3D도면 함께 보기 기능, 이슈발행 기능 등 현장업무의 일부를 수행하였다. 수행결과 참가자들은 실제 업무의 생산성 향상 효과가 있을 것으로 피드백 하였다.

이상 시스템 구현 검증 결과는 실제 설계데이터가 매일 사용이 가능 하도록 자동 변환되며 FABAR의 주요기능이 정상적으로 작동함을 나타낸다.

## 6.5. (실험5) 사용성평가

FABAR현장에서 잠재적 사용자를 대상으로 실제 사용 환경에서 사용성 테스트가 실시되었다. 데이터 통신에는 Private-LTE가 사용되었다. 실험 5에서는 2차례의 사용성평가가 실시되었는데 첫 번째 사용성 평가 후에 FABAR 인터페이스에 다소간의 보완이 있었다.

첫 번째 사용성 평가에서는 사용자 별로 부여된 테스트 수행여부가 평가되었다. 설계인력 9명을 대상으로 실시되었으며 주요 결과는 다음과 같다. 1) 최초 사용 시, 몇몇 사용자는 이슈발행기능의 수행에 어려움을 보였다. 이 문제는 사용자가 이슈발행 업무 자체에 익숙하지 않은 영향이 큰 것으로 판단되었다. 애플리케이션 사용 교육을 강화함으로써 이슈발행에 익숙하게 되었다. 2) 일부 사용자가 부재탐지 기능의 수행에 난점을 보였다. 모바일 폰의 작은 화면에서 부재를 찾기는 쉽지 않은 점이 문제 원인이다. 노즐 명으로 부재를 찾을 수 있도록 검색기능을 확장했다. 3) 대부분의 참가자는 도면보기기능에 높은 만족도를 보였다. 도면을 확대하여 볼 수 있기 때문에 화면의 크기에 대한 불만이 없었다. 4) AR화면에서 AR 동전을 인식하기 어려웠다. 사용자가 동전을 이용한 모델연계 방식에 대해서 개념적으로 익숙하지 않은 상태에서 기능 운용에 어려움을 겪어 발생한 문제였다. 동전 마커와 모바일 기기간의 연계 개념 교육 및 사용법 교육을 통해서 사용자가 기능 활용에 숙달하도록 했다. 5) 기둥의 열 번호 식별이 어려웠다. 이는 기둥과 열 번호의 색상이 유사하기 때문에 발생한 문제점이다. 디스플레이의 색상을 변경하여 상호 구별되도록 조정했다. 6) 1층에서 2층의 모델을 겹쳐 보려는 새로운 니즈가 발생했다. 이 같은 니즈는 개발 전에 파악했던 2층에서 1

층을 보고 싶다는 니즈와는 상반되게 오히려 반대의 방향으로 보려는 니즈이다. 실제 사용 환경에 필요한 니즈로 판단되었다. 이러한 니즈는 FABAR의 기능을 조합하여 충족할 수 있다. 예를 들어, 하부 층의 룸박스 명을 입력함으로써, 사용 가능하다. 기능설명을 강화하여 사용법에 익숙해지도록 했다. 이상의 1차 테스트 결과를 반영하여 인터페이스를 보완했다.

두 번째 사용성 평가에서는 보완된 기능이 탑재된 모바일 기기가 이용되었으며 1차 실험의 과제 및 사용자 본인 업무 중 발생하는 특정 상황에 대한 FABAR활용가능성이 추가로 평가되었다. 공사인력 8명에 대한 주요 실험 결과는 다음과 같다. 참여자들은 모델조회, 마커정합, AR기기 설정, 이슈작성 및 이슈 부재 찾기, 도면보기, 부재속성 및 부재 찾기, 현재위치 보기, VR로 전환하여 보기 같은 기능을 쉽게 작동했다. 또한 투명도 관리하며 공사 현황과 비교하기, 1층에서 2층 모델 확인하기와 같은 기능을 쉽게 작동했다. 한편 대부분의 사용자들은 현장과 겹쳐보기, 2D도면 확인, 이슈발행과 같은 현장에서 빈번하게 발생하는 수행과제를 원활하게 완수하였다.

이상 사용성 테스트 결과는 FABAR이 원활하게 작동하며 소정의 기능 교육 후 현장내의 개인별 활동에 활용 가능한 직관적 사용성을 갖추고 있음을 암시한다.

## 7. 논의

본 연구는 FABAR신축현장의 새로운 소통채널로서 FABAR을 제시했다. 시스템과 사용 환경 간에 연속되는 상호작용의 맥락에서 사용자의 지식들 간의 소통 잠재력이 충분히 발휘될 수 있도록 개발요소들을 종합하는 총체적 개발관점에 따라 시스템 기능을 종합했다. 즉, 현장 사용자가 명시적 정보와 암묵적 정보를 상호 융합하여 사용하는 사용환경모형을 제시하고 FABAR시스템 간의 상호작용이 유도될 수 있도록 개발요소를 통합 했다. 6개의 핵심기능이 다음과 같이 검증되었다.

첫째, BIM데이터가 AR에서 구동되는 포맷으로 자동 변환 된다. 기존 BIM데이터 활용연구에서는 BIM데이터의 변동성을 극복하는 대안적 고려가 부족했다(Schiavi et al., 2022)(Sidani et al., 2021) (Steffen et al., 2019)(Fernández del Amo et al., 2018). 성능실험결과에 의하면 FABAR의 RVT-IFC-JT 중립포맷 연계형 데이터 자동변환모듈은 데이터 변환에 4시간 소요되었다. 변환 모듈은 야간에 자동 운용되며 주간 BIM 공동저작 과정에는 영향을 끼치지 않으므로 설계 데이터는 일관성을 유지할 수 있다.

둘째, 룸박스 단위의 데이터 연계활용방식이 원활하게 작동된다. 기존 연구에서는 WBS기반으로 각 객체와 공정을 직접 연계

활용방식이 제안되었다(Singh et al., 2011). 하지만, 기존 연구는 BIM변동에 대한 고려는 부족한 한계가 있었다. 본 연구는 변동성이 큰 BIM데이터를 이용하기 위해서 룸박스 참조형 정보 활용방식을 제시했다. 이는 설계BIM데이터는 1개의 공유된 서버로 설계도서 출도를 지속하며, 분절 변환된 AR을 통해서 공사실적관리 등 현장시공업무 지원 기능을 병행 수행한다. 본 연구의 룸박스 참조형 정보 활용방식은 중공업의 AR시스템과 차이점이 있다. 중공업 AR은 각 선박생산 단위로 미리 분절된 데이터를 이용하며, BIM데이터와 공정진척사항은 객체의 고유아이디로 연동된다(Choi et al., 2019). FABAR은 룸박스를 공정관리 단위와 연결하여 진척을 가시화한다. 한편 공정관리는 프리마벨라와 같은 전용 프로그램을 이용하며 BIM데이터와 연계되지 않는다. 이는 건설 산업과 선박제조산업간 생산/시공프로세스의 차이를 반영한 결과이기도 하다. 예를 들어, 건설공사는 다양한 부재를 현장에서 직접 조합하는 경우가 많기 때문에 공장에서 대부분 제조되는 선박에 비해 관리가 상대적으로 어렵다. 설계데이터의 변동성 또한 선박제조에 비해서 큰 편이다.

이상의 논의를 종합하면 RVT-IFC-JT 중립포맷 연계형 데이터 자동변환모듈과 룸박스 참조형 정보 활용방식의 결합은 패스트트랙에서 BIM-AR간 상호운용성(Interoperability)을 확보하며 매일 AR사용 및 기타 공사에 활용을 지원한다. 이는 하이브리드형 데이터 관리 방식이라 할 수 있다. 즉 BIM제작은 분절 없이 유지하며 데이터 활용은 분절 변환된 데이터로 다양하게 확대할 수 있다. 특히 모듈화된 공사 적합한 관리기법으로써 활용도가 크다. 이 같은 어프로치는 현재 현장에서 사용하는 공정관리 방식을 크게 변경하지 않고 이용할 수 있으므로 즉시 적용 가능한 장점이 있다. 나아가 일반 공사에서 변동성이 큰 데이터 관리 방식으로도 확장 될 수도 있다.

셋째, FAB 신축현장에서 효과적인 AR정합과 추적정합이 가능하다. 기존 연구에서는 마커의 종류를 구별하여 사용하지 않았다(Choi et al., 2019). 본 연구에서는 고정마커와 이동마커 병행 활용(2 way Marker)방식을 개발했다. 이 같은 병행 방식은 FAB현장에서 모델 정합을 위한 새로운 시도이다. 실험결과에 의하면 고정마커 정합방식은 반복 패턴이 많은 FAB 구조물에서도 안정적인 정합 추적 성능을 보였다. 현장에서 평균 25mm 오차 수준의 정합성능을 보였는데, 이는 허용 가능한 수준으로 판단된다.

이동마커는 Perspective-n-Point 알고리즘을 이용하여 3D 동전의 3차원 기하정보와 실물 동전의 3차원 기하정보를 정합하는 새로운 방식으로 개발되었다(Penate et al., 2013). 이동마커는 As built의 정확도 향상에 효과적이다. 단, 반도체 장비의 노즐 정합에서 정밀한 확인을 위해서 3D스캔을 이용한 보정은 보완적으로 필요하다. 이상의 고찰에서 고정마커와 이동마

커 병행 활용(2 way Marker)방식은 특징점이 없는 FAB현장에 적합한 마커 운용방식으로 As built 정합성 및 공사 관리 효율을 향상할 것으로 기대된다.

넷째, FABAR의 주요기능들이 FAB신축환경에서 원활하게 작동된다. 본 연구에서 제안한 상호 소통형 피드백 (Interactive Changes Feedback)기능은 다양한 시공관리 활동에 활용 할 수 있다. 예를 들어 현장에서 어쩔 수 없이 변경이 필요한 경우 현장과 AR화면을 겹쳐서 이슈로 문의한다. 설계실의 이슈수신자는 현장변경 가능여부를 피드백 한다(Eklundh, 1988). 이처럼 설계와 현장 간 소통이 명시화 되므로 설계 일관성과 정합성이 동시에 향상될 수 있다. 한편, 룸 간 자동변환 (Auto room change)기능은 FABAR이 사용자 위치를 자동으로 디스플레이 한다. 이 기능은 사용자가 내비게이션 시 자신의 위치를 쉽게 확인 할 수 있도록 지원하기 때문에 운용단계에 특정 부재를 찾아 조치하는데 유용하다. 또한, 이슈와 길안내 자동연동(One Touch Navigation)기능은 이슈까지 사용자를 인도함으로써, 운용단계에 특정 부재를 찾아 조치하는데 유용하다.

이상의 논의를 통해서 볼 때, FABAR은 BIM데이터의 상호운용성(Interoperability)을 효과적으로 AR로 확장함으로써, 설계변동성에도 불구하고 현장 내 이슈의 해결 및 데이터의 보관, BIM 데이터와 현장간의 일치와 같은 현장관리에 효과적으로 활용 될 수 있다.

## 8. 결론

본 연구는 FAB신축공사의 패스트트랙환경에서 AR시스템 개발 및 성능평가를 목적으로 진행되었다. 본 연구는 FABAR 시스템을 현장에서 명시적 소통채널로써 제시함으로써, BIM데이터를 이용한 다양한 시공 관리활용을 시도했다. 본 연구의 프로토타입 FABAR 시스템은 다음과 같이 기존 AR시스템과 차별된 독창적인 성능을 보인다.

- 시공기간 중 설계변경이 빈번한 동시 협력형 저작 및 활용 프로세스에서, 섹션뷰기반의 BIM분할(Room Box) 변환방식에 기반을 둔 RVT-IFC-JT중립포맷 연계형 데이터 자동 변환모듈은 BIM-AR 데이터의 상호운용성(Interoperability) 및 일관성(Consistency)을 유지 하며, 매일 AR시각화(Visualization)성능을 보인다.
- 동일한 구조체가 반복되는 FAB신축환경에서, 고정마커와 이동마커 병행(2 way Marker)활용은 안정적 장면정합 및 추적정합(Registration and Tracking) 성능을 보인다.



- 룸 간 룸박스 자동변환(Auto room change) 및 이슈와 길안 내 자동연동(One touch navigation)기능은 현장사용자의 사용성을 향상한다.
- 상호 소통형 피드백(Interactive changes feedback)기능은 현장 내 변경과 As built 간 교차비교를 통해서 As built BIM-현장간 정합도를 향상한다.
- 룸박스와 연계된 시공도 리뷰, 공정관리 기능은 변동이 심한 BIM설계 데이터를 유지하며, BIM-AR데이터를 시공 관리활동에 활용 할 수 있도록 지원한다.

이상의 결과는 FABAR이 시공 업무에 직관적인 소통환경을 제공함으로써, 효과적인 현장 시공 지원 성능을 갖추었음을 의미한다. 본 연구는 '룸박스'로 명명된 참조형 BIM객체 및 섹션뷰를 이용하여 BIM형상데이터를 자동 변환하며 객체속성정보는 별도로 추출하여 데이터베이스를 구성했다. 이 방식은 객체 속성정보를 데이터베이스기반에서 운용 하며 BIM형상은 별도로 분할 활용하는 방식이란 점에서 BIM 애플리케이션에서 형상과 객체정보를 주로 이용하는 기존연구와 차별된다. 본 연구에서 소개된 룸박스를 이용한 BIM데이터 활용방식은 패스트트랙환경에서 설계 변경에 따른 재시공, 시공단절 등의 위험을 최소화하며 시공활동은 연속적으로 수행하는 새로운 시도로서 의의가 있다.

이동마커 병행방식(2 way Marker)은 3D데이터에 설계된 동전의 3차원 기하정보와 실물 동전의 3차원 기하정보 사이의 정합 관계를 획득하는 새로운 방법이다. 이 방식은 마감공사기준점으로 현장과 BIM을 비교 및 정합 할 수 있기 때문에 As built의 정합도 향상을 지원할 수 있을 것이다. 한편, 본 연구는 다양한 사용자 편의기능을 소개하였는데, 이들 기능은 현장에서 BIM데이터, 도면과 같은 명시적 정보 소통 경험 형성에 도움이 될 것으로 예상된다.

건설 산업의 프로세스에서는 설계와 시공의 이해관계자가 프로젝트마다 매번 새롭게 구성되는 특징이 있다. 특히 패스트트랙의 경우 설계와 시공이 병행되며 설계와 시공양측에서 새로운 니즈가 투사되기 때문에 BIM데이터의 변경 및 이해충돌이 일반 공사에 비해서 많이 발생한다. 본 연구의 FABAR은 매번 다수의 참여자가 단기간에 설계와 시공에 상호 협력 하는 패스트 트랙 건설 환경에 적합한 AR활용 시도로서 의의가 있다. 특히 본 연구에서 적용한 데이터 관리 방법은 일반 공사에도 확대 적용할 수 있는 방법으로서 기대된다. 설계는 BIM저작을 유지하되 변환된 중립포맷을 공사에 활용하기 때문에 BIM 데이터 변동성 대응이 요구되는 일반 공사에도 적용이 고려될 수 있기 때문이다.

본 연구는 WBS에 기반을 둔 개체단위 상호 운용성(Interoperability)측면에서 접근하지 못한 한계를 가진다. 추가 연

구가 필요 할 것 이다. BIM 데이터의 변환활용 방식에 대해서는 다양한 분야에서 확장 연구가 가능 할 것이다. 이번 연구에서 부족하게 진행된 FABAR의 실제 사용성 검증 및 운영단계의 활용성 연구 또한 후속연구로써 진행 될 수 있다.

## References

- Chen, H., Hou, L., Zhang, G. (Kevin), Moon, S. (2021). Development of BIM, IoT and AR/VR technologies for fire safety and upskilling. *Automation in Construction*, 125(January), 103631.
- Chen, K., Chen, W., Cheng, J. C. P., Wang, Q. (2020). Developing Efficient Mechanisms for BIM-to-AR / VR Data Transfer. 1(c), pp. 1-16.
- Choi, S., Park, J., Lee J., Park, I., Choi, D.. (2019). Development of Augmented Reality System for Productivity Enhancement in Offshore Plant Construction. *SAMSUNG Best Paper Award*.
- Davila Delgado, J. M., Oyedele, L., Demian, P., Beach, T. (2020). A research agenda for augmented and virtual reality in architecture, engineering and construction. *Advanced Engineering Informatics*, 45(April), 101122.
- Dayton, E., Henriksen, K. (2007). Communication failure: Basic components, contributing factors, and the call for structure. *Joint Commission Journal on Quality and Patient Safety*, 33(1), pp. 34-47.
- Eklundh, K. S. (1988). Explicit and Implicit Feedback in Computer-Mediated Communication. *Applications of Distributed Systems*, pp. 147-153.
- Fernández del Amo, I., Erkoyuncu, J. A., Roy, R., Palmarini, R., Onoufriou, D. (2018). A systematic review of Augmented Reality content-related techniques for knowledge transfer in maintenance applications. *Computers in Industry*, 103, pp. 47-71. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.08.007>
- Garbett, J., Hartley, T., Heesom, D. (2021). A multi-user collaborative BIM-AR system to support design and construction. In *Automation in Construction* 122(Issue Mvc).
- Hull, E., Jackson, K., Dick, J. (2011). *Requirements Engineering*.
- Lee, S., Alzoubi, H. H., Kim, S. (2017). The effect of interior design elements and lighting layouts on prospective occupants' perceptions of amenity and efficiency in living rooms. *Sustainability*, 9(7).

- Penate-Sánchez, A., Andrade-Cetto, J., Moreno-Noguer, F. (2013). Exhaustive Linearization for Robust Camera Pose and Focal Length Estimation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 35(10), pp. 2387–2400.
- Schiavi, B., Havard, V., Beddiar, K., Baudry, D. (2022). BIM data flow architecture with AR/VR technologies: Use cases in architecture, engineering and construction. *Automation in Construction*, 134(October 2021), 104054.
- Sidani, A., Matoseiro Dinis, F., Duarte, J., Sanhudo, L., Calvetti, D., Santos Baptista, J., Poças Martins, J., Soeiro, A. (2021). Recent tools and techniques of BIM-Based Augmented Reality: A systematic review. *Journal of Building Engineering*, 42(March).
- Singh, V., Gu, N., Wang, X. (2011). A theoretical framework of a BIM-based multi-disciplinary collaboration platform. *Automation in Construction*, 20(2), pp. 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.011>
- Steffen, J. H., Gaskin, J. E., Meservy, T. O., Jenkins, J. L., Wolman, I. (2019). Framework of Affordances for Virtual Reality and Augmented Reality. *Journal of Management Information Systems*, 36(3), pp. 683–729.
- Wildenauer, A. A. (2020). Critical Assessment of the Existing Definitions of Bim Dimensions on the Example of Switzerland. *International Journal of Civil Engineering and Technology (Ijciet)*, 11(4).
- Zhou, Y., Luo, H., Yang, Y. (2017). Implementation of augmented reality for segment displacement inspection during tunneling construction. *Automation in Construction*, 82, pp. 112–121.