

OSC 최적 설계를 위한 DfMA 적용 전략 벤치마킹 연구 - 국외 동향 고찰을 중심으로 -

정서영¹ · 이슬기² · 유정호^{3*}

¹한국건설기술연구원 건설정책연구소 박사후연구원 · ²광운대학교 건축공학과 교수 · ³광운대학교 건축공학과 교수

A Study on Benchmarking of DfMA Application Strategy for Optimum OSC Design - Focusing on considering overseas trends -

Jung, Seoyoung¹, Lee, Seulki², Yu, Jungho^{3*}

¹Post-Doctoral Researcher, Department of Construction Policy Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Kwangwoon University

³Professor, Department of Architectural Engineering, Kwangwoon University

Abstract : Unlike conventional construction production methods, OSC (Off-Site Construction) have many restrictions depending on the production environment and technology, so it is important to develop a design plan considering these restrictions and select the optimal design alternative considering the overall efficiency of the building production process. Accordingly, the construction industry is paying attention to DfMA (Design for Manufacturing & Assembly) to derive the optimal design plan for the OSC project. Leading OSC countries such as Singapore and the United Kingdom have recognized the need to apply DfMA and presented DfMA guidelines and application strategies suitable for the characteristics of the OSC industry, and several researchers are conducting research to integrate DfMA into the construction industry. However, in the case of Korea, the need for industrial application and industrial application of DfMA is recognized, but there are no methods and tools necessary to implement the concept of DfMA in the design of actual construction projects. Therefore, this study aims to present the basic direction of strategy for applying DfMA and developing tools for the development of the domestic OSC industry by analyzing the development and application of DfMA in overseas construction. The results of this study can be used as basic data for the development of DfMA tools suitable for the domestic OSC industry and the establishment of policies related to DfMA in the future.

Keywords : OSC, DfMA, Optimum Design, Benchmarking

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 현장 노무 중심의 전통적인 건축생산방식의 생산성 저하, 품질 및 안전 문제 발생 등의 문제점들이 부각됨에 따라, 건설업계는 OSC (Off-Site Construction)로 건축 생산 패러다임을 전환하고자 하는 노력을 진행 중이다. OSC는 기

존의 건축 생산 방식과는 달리 표준화·모듈화·반복생산을 통해 생산성을 향상시킬 수 있으며, 실외작업의 감소로 생산 품질 및 안전을 확보할 수 있다는 장점이 있어 기존 건축 생산 방식의 한계에 대한 해결책으로 주목받고 있다. 이에 전 세계적으로 OSC를 산업에 적극적으로 도입하고 이를 활용하고자 하고자 하는 노력이 진행되고 있다.

하지만, OSC의 도입 및 활용의 필요성과 다양한 이점에도 불구하고 생산환경 및 기술상 제약사항(Azhar et al., 2013; Park et al., 2016) 및 프로젝트 참여자들의 경험 및 전문지식 부족(Azhar et al., 2013; Blismas & Wakefield, 2009; Wuni & Shen, 2020a; Wuni & Shen, 2020b; Wu et al., 2019; Jung et al., 2021)으로 인한 설계 오류 및 완성도 저하(Blismas & Wakefield, 2009, Hyun et al., 2022)와 같은 저

* **Corresponding author:** Yu, Jungho, Department of Architectural Engineering, Kwangwoon University, 20 Kwangwoon-ro, Nowon-gu, Seoul, Korea

E-mail: myazure@kw.ac.kr

Received September 4, 2023; **revised** February 6, 2024

accepted February 19, 2024

해 요인들로 인해 OSC는 아직 건설시장 전반에 완전히 자리 잡지 못하였다.

OSC 방식은 기존 생산방식과 달리 생산환경 및 기술에 따른 제약사항들이 다수 존재하기 때문에 이와 같은 제약사항을 고려한 설계안을 개발하고, 건축 생산 과정의 전반적인 효율을 고려한 최적의 설계 대안을 선정하는 것이 중요하다. 만약 설계과정에서 이와 같은 제약사항들이 적절히 고려되지 않거나, 생산 효율 측면에서 최적의 대안을 선정하지 못할 경우에는 재설계 및 재작업으로 인한 제작 납기의 지연으로 인한 생산성 저하, 작업 안전 및 생산 품질의 저하 등의 치명적인 결과를 야기 할 수 있기 때문이다.

이에 건설업계에서는 OSC 프로젝트의 최적 설계안을 도출하기 위해 DfMA (Design for Manufacturing & Assembly)에 주목하고 있다. DfMA는 제조분야에서 설계 변경을 최소화하기 위해 개발된 개념으로 설계 단계에서 제품 생산 단계와 관련한 여러 상황들을 설계단계에서 미리 검토함으로써 생산 및 조립 단계에 발생가능한 오류를 사전에 방지하고, 생산 효율성을 향상시키기 위한 설계방식을 의미한다.

싱가포르, 영국, 미국, 등 OSC 선도국에서는 DfMA 적용의 필요성을 인정하여 OSC 산업 특성에 적합한 DfMA 가이드라인 및 적용 전략을 제시하였으며, 여러 연구자들이 건설업에 DfMA를 융합하는 연구를 진행 중에 있다. 하지만, 국내의 경우에는 DfMA의 산업 적용 및 산업 적용에 대한 필요성은 인식하고 있으나, DfMA의 개념을 실제 건설 프로젝트의 설계에 구현하는데 필요한 방법 및 도구가 부재하다.

이에 본 연구에서는 해외 건설분야 DfMA 개발 및 적용현황을 분석하여 벤치마킹하고 시사점을 도출함으로써 국내 OSC 산업 발전을 위한 DfMA 적용 및 도구 개발을 위한 전략 수립의 기본 방향을 제시하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 국외 DfMA 적용현황을 벤치마킹하여 국내 OSC 산업 발전을 위한 DfMA 적용 전략 수립의 기본 방향 설정을 연구목적으로 하며, 이를 달성을 위하여 다음과 같은 연구 절차를 거친다.

- (1) DfMA의 기본 개념을 확인하고 제조 분야의 대표적인 DfMA 설계 원칙 및 활용 현황에 대해 고찰함으로써 DfMA 활용 및 응용 형태를 파악한다.
- (2) 싱가포르, 영국, 미국, 중국 등 해외 건설 분야 DfMA 적용현황 및 건설분야 DfMA 관련 기존 연구 고찰을 실시한다.
- (3) 앞서 고찰한 결과를 기반으로 OSC 최적 설계를 위한 DfMA 적용 전략을 도출하고, 국내 OSC 관련 전문가들을 대상으로 심층 인터뷰를 실시하여 도출한 DfMA 적용 전략에

대한 전문가 의견수렴 과정을 거친다.

- (4) 연구 결과로 도출된 OSC 최적 설계를 위한 DfMA 적용 전략을 제시한다.

2. 제조분야 DfMA 고찰

2.1 DfMA의 기본 개념

DfMA가 도입되기 전 제조 분야의 설계는 ‘Over the wall’의 접근방식으로 이루어져왔다. 즉, 설계자들이 ‘We design it, you build it’의 사고를 가지고 설계와 생산 파트를 독립적으로 다루어왔다. 하지만, 이러한 접근방식은 설계 완료 후 제조나 조립 단계에서 설계 변경 문제가 발생할 시 재설계가 이루어져야 하는데 이때 발생하는 설계 변경의 비용이 과다하게 소요된다는 한계가 있어 왔다.

이러한 한계를 보완하기 위하여 탄생한 DfMA (Design for Manufacturing & Assembly)는 동시공학(Concurrent Engineering)적 개념을 사용하여 설계 단계에서 제품 생산 단계와 관련한 여러 상황들을 설계단계에서 미리 검토함으로써 생산 및 조립 단계에 발생가능한 오류를 사전에 방지하는 설계 접근방식을 의미한다. 즉, DfMA는 제품 설계에 Front-Loading 개념을 적용하여 설계 단계에서 설계 이후 후속 공정인 제작 및 조립 공정에 관한 정보를 포함시켜 제품을 구성하고 있는 부품들의 제작 및 조립의 효율성을 높이기 위한 설계방식을 뜻한다.

DfMA는 DfA (Design for Assembly)로부터 시작되었으며, 기본개념은 1910년대에 수작업에 의해 반복되는 표준조립시간을 산정하는 작업분석에서부터 출발하였다고 알려져 있다 (김인호, 1999). 1960년대에 들어서는 제조업의 조립자동화가 시작되면서 기존에 수작업에 의한 조립 위주로 되어 있던 제품설계가 기계 위주의 조립자동화 개념이 도입된 설계로 변화하면서 많은 문제가 발생되었다. 또한, 제품의 원가의 중요성이 인식되기 시작하였는데 특히, 기존제품의 최종비용을 분석한 결과 70% 이상의 비용이 설계단계에서 결정된다는 사실이 확인되어 설계단계의 중요성이 부각되기 시작하였다. 이처럼 설계 오류로 인한 문제를 해결하기 위하여 설계단계에서 제조 및 조립을 고려하는 DfM (Design for Manufacture), DfA (Design for Assembly) 등의 개념 및 방법론이 등장하였으며, 이를 혼합하여 DfMA라는 용어가 사용되기 시작하였다(Fig. 1).

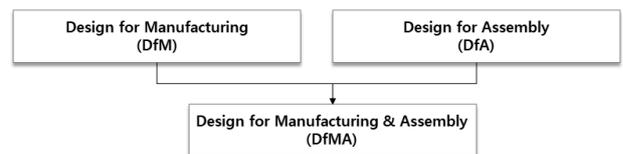


Fig. 1. Concept of DfMA

현재 DfMA는 A/S를 고려한 설계인 DfS (Design for Service), 환경 영향성을 고려한 설계인 DfE (Design for Environment) 등 다양한 영역으로 확대되고 있으며, 최근 모든 영역을 고려한 설계를 뜻하는 DfX (Design for Excellence)까지 확장되고 있다. DfMA를 통하여 얻을 수 있는 효과로는 조립/가공시간의 단축, 부품 수 감소, 제품개발기간의 단축, 품질향상, 신뢰성향상, 원가절감(부품비용, 조립/가공비용, A/S 비용, 자원재활용), 간접비용의 절감, Teamwork의 형성, A/S 향상, 환경 영향성 분석 및 폐자원의 효과적 활용 등으로 요약할 수 있을 것이다.

2.2 제조분야 DfMA 원칙

제조 분야에 DfMA가 도입된 이후 최적화된 설계를 통해 많은 기업들이 이윤을 남겼다. DfMA는 앞에서 고찰한 바와 같이 설계단계에서 제품 생산 단계와 관련한 여러 상황들을 설계단계에서 미리 검토함으로써 생산 및 조립 단계에 발생 가능한 오류를 사전에 방지하는 설계접근방식을 의미한다.

이와 관련하여 설계자가 제품을 제조하고 조립하는 과정에서 어려움을 줄이는데 도움이 되는 다양한 DfMA 원칙

이 개발되어 왔다. 이러한 원칙들은 원가 절감, 생산 기간 단축, 환경친화적 설계의 실현 등 다양한 관점에서 다양한 연구자 및 기관에 의해 개발되었다. 제조 분야에서 개발된 대표적인 DfMA 원칙을 살펴보면 다음 <Table 1>와 같다.

이 밖에도 다양한 DfMA 원칙이 존재하며, 제조 분야에서는 이와 같은 원칙을 설계 프로세스 전반에 반영함으로써 많은 기업이 제품 개발기간의 단축, 생산성 향상, 품질 향상, 설계에 대한 신뢰성 향상, 폐자원 감소, 수익성 향상 등의 효과를 보고 있다.

2.3 소결

DfMA는 제조 분야에서 설계 변경을 최소화하기 위해 개발된 개념으로 동시공학(Concurrent Engineering)적 개념을 사용하여 설계단계에서 제품 생산 단계와 관련한 여러 상황들을 설계단계에서 미리 검토함으로써 생산 및 조립 단계에 발생가능한 오류를 사전에 방지하는 설계 접근방식을 의미한다. 제조 분야에서는 대표적인 부품 수 최소화, 취급 방식의 단순화, 표준화 등의 DfMA 원칙들을 이용하여 다양한 방법으로 설계과정에서 활용되고 있다. 이와 같은 제조

Table 1. Typical DfMA Principles

DfMA principles	Benefits	ref.
Aim for mistake-proof design	Avoids unnecessary re-work, improve quality, reduce time and costs	Stoll (1986); Bogue (2012); Emmatty & Sarmah (2012); Swift & Brown (2013)
Design for ease of manufacture	Reduce manufacturing time and cost by avoiding complex assembly methods	Boothroyd & Dewhurst (1983); Stoll (1986); Bogue (2012); Swift & Brown (2013)
Simplified parts configuration and handling	Avoid manual intervention to save time and money for handling	Boothroyd & Dewhurst (1983); Bogue (2012); Stoll (1986); Swift & Brown (2013)
Design for ease of assembly	Reduce the time and cost of assembling	Boothroyd & Dewhurst (1983); Bogue (2012); Swift & Brown (2013)
Use of multifunctional and versatile parts	Reduce the time and cost of manufacturing	Stoll (1986)
Modular Design	Simplify design and reduce assembly time and cost	Boothroyd & Dewhurst (1983); Bogue (2012); Stoll (1986); Emmatty & Sarmah (2012); Swift & Brown (2013)
Minimize manual work	Ensuring product quality and efficiency of assembly process	Boothroyd & Dewhurst (1983); Bogue (2012); Emmatty & Sarmah (2012); Swift & Brown (2013)
Recurring use of standardized parts	Reduce purchasing lead time and cost	Boothroyd & Dewhurst (1983); Bogue (2012); Stoll (1986); Swift & Brown (2013)
Repeated use of similar materials	Reduce manufacturing processes and simplify assembly methods	Boothroyd & Dewhurst (1983); Bogue (2012); Swift & Brown (2013)
Use environmentally friendly materials and minimize waste	Minimize environmental risks to the environment and to nearby residents	Boothroyd & Dewhurst (1983); Emmatty & Sarmah (2012)
Minimize the part count	Simplified design implementation, Reduce manufacturing and assembly time and costs	Boothroyd & Dewhurst (1983); Bogue (2012); Stoll (1986); Emmatty & Sarmah (2012); Swift & Brown (2013)
Minimize and standardize connector types and quantities	Reduce manufacturing, assembly, repair and maintenance time and costs	Boothroyd & Dewhurst (1983); Bogue (2012); Stoll (1986); Emmatty & Sarmah (2012); Swift & Brown (2013)
Minimize the use of fragile parts	Reduced parts failure, ease of handling and assembly cost	Boothroyd & Dewhurst (1983); Bogue (2012); Swift & Brown (2013)
Minimize unnecessary additional work	Save time and money by minimizing unnecessary deadlines	Boothroyd & Dewhurst (1983); Bogue (2012); Swift & Brown (2013)

분야의 DfMA 원칙들이 OSC에 적용이 될 경우, 생산여건 고려, 작업의 위험요소 고려, 부품의 파손 최소화, 연결 부위 품질 확보, 부품 수 최소화, 부품의 표준화, 부품의 재사용성 고려, 추가작업의 최소화, 조립 및 취급 방식의 단순화 등으로 변환되어 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

제조분야 DfMA는 가이드라인 형식으로 개발되어 설계자에게 제공됨으로써 DfMA의 반영 설계 프로세스 전반에 반영됨으로써 설계안에 반영되어야 할 내용들을 제공하거나, 체크리스트 형식으로 개발되어 설계안에 반영되어야 할 DfMA 항목들의 반영 여부를 평가하는 방식으로 활용되고 있는 것으로 파악된다. 또한, 제안된 설계안이 생산과정에 적용되었을 때의 작업 효율성을 예측하여 평가하는 방법도 개발되고 있다.

이와 같은 점을 고려하였을 때, OSC 프로젝트의 최적 설계 여부의 판단을 위해 DfMA가 사용될 수 있을 것으로 판단된다. OSC 프로젝트의 최적 설계를 위한 DfMA를 실현하기 위해서는 OSC 프로젝트에 적합한 DfMA 원칙 수립이 필요하며, DfMA 원칙에 기반한 설계 가이드라인 개발과 더불어 설계안의 최적성 평가항목 및 평가 방법의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

3. 건설분야 DfMA 적용현황 고찰

3.1 국가별 건설분야 DfMA 적용현황

3.1.1 싱가포르

싱가포르는 공공주도 방식으로 건설산업의 생산성 제고를 추구하는 대표적인 국가 중 하나로, DfMA 방식의 공공발주사업 활용 의무화, 사업수행 기술에 대한 가이드라인 제시, 연구개발 지원 등을 통해 OSC사업 활성화를 위한 적극적인 노력을 기울이고 있다. 싱가포르 건설청(Building and Construction Authority, 이하 BCA)는 건설산업 구조전환계획(Construction Industry Transformation Map, 2017)에서 건설산업 혁신을 위한 3가지 핵심영역 중 하나로 DfMA를 선정하였다. 싱가포르 BCA는 모듈러가 현장 외 제조를 용이하게 하는 기술의 사용을 설명하기 위한 일반적인 건설용어라면, DfMA는 OSC를 촉진하고 건설 생산성을 향상시킬 수 있는 다양한 기술 및 방법론으로 정의하고 있다.

BCA에서 제시한 DfMA는 PC (Precast Concrete), PPVC (Prefabricated Prefinished Volumetric Construction), PBU (Prefabricated Bathroom Units), MET (Mass Engineered Timber), Prefabricated MEP (Prefabricated Mechanical Electrical and Plumbing) 및 Structural Steel 분야에 걸쳐 개별 구성 요소에서부터 완전히 통합된 조립품에 이르기까

지 다양한 기술 및 방법론을 포함한다.

BCA는 DfMA를 구성하는 각각의 기술에 대한 가이드라인을 마련하여 제공하고 있다. 각각의 가이드북에서는 현장 조립의 간편화, 현장 생산성 향상, 투입 노동력 감소, 품질 및 안전성 향상에 DfMA의 핵심 목표를 두고 있으며, 각 기술에 대해 계획부터 설계, 생산, 운송, 설치, 품질 검사, 유지보수에 관한 사항과 관련 제도 등 전반적인 내용을 포함하고 있다. 가이드북 이외에도 홈페이지를 통해 각 기술 관련 기업(공급사), 프로젝트 사례, 관련 교육 프로그램 등에 관한 정보를 제공하고 있다.

또한, 싱가포르에서는 DfMA 관련 요소의 원활한 공급을 위해 모듈러 공장인 ICPH (Integrated Construction and Prefabrication Hub)를 건설하여 운영하고 있으며 2012년 첫 ICPH 운영 이후, 현재 싱가포르 내 5개의 ICPH를 운영하고 있다. 또한, 싱가포르 공공부문에서는 DfMA 적용 확대를 위해 2015년 정부 조달기관(Government Procuring Entities; GPEs)이 DfMA를 포함한 첨단기술 채택, IDD (Integrated Digital Delivery) 활용 등을 통해 생산성을 높일 수 있는 조달 프로세스인 Productivity Gateway Framework를 개발하여 적용하고 있다. 한편, 민간부문에서는 2014년 11월부터 일부 주거 및 호텔 설립을 위한 정부 토지 매각의 조건으로 PPVC 현장 적용을 의무화하였으며, 2017년 2월부터는 일부 상업용 토지 매각 조건으로 structural steel의 적용을 의무화하고 있다.

3.1.2 영국

영국 RIBA (Royal Institute of British Architects)에서는 2013년 'RIBA Plan of Work 2013 Design for Manufacture and Assembly'를 발간하여 건설산업에 DfMA를 적용할 경우, 20~60%의 공기단축, 20~40%의 공사비 절감, 70%이상의 현장 노동력 감소, 품질향상, 안전성 확보, 건설 폐기물 감소 등의 효과가 있음을 제시하며 DfMA적용의 필요성을 시사하고, 이후 2016년 'DfMA Overlay to the RIBA Plan of Work'의 초판을 발행하고, 2021년 개정안을 발행함으로써 건설 생산 프로세스 단계별 DfMA 적용 전략을 제시하였다.

가장 최근 발행된 'DfMA Overlay to the RIBA Plan of Work 2nd edition'을 살펴보면 건설 생산 프로세스를 0부터 7까지의 8단계(Strategic Definition, Preparation and Briefing, Concept Design, Spatial Coordination, Technical Design, Manufacturing and Construction, Handover, Use)로 구분하여, 단계별 DfMA 전략을 제시하였다. 먼저, '0.Strategic Definition 단계'에서는 1~7까지 단계에서의 DfMA의 적용가능성을 검토하고, '1.Preparation and Brief' 단계에서는 프로젝트의 목표에 부합하는 DfMA 적용 범위에 대한 고려가 필요하다고 제시하였다. 또한, '2. Concept

Design 단계'에서는 생산성, 안전, 품질, 유지관리 측면에서 상위 수준의 DfMA 적용 전략을 고려하여 개념설계에 임할 것을 시사하였으며, '3. Spatial Coordination 단계'에서는 전 단계에서 수립한 DfMA 전략을 공급업체, 시공사 및 하도급 업체와의 협업을 통해 모듈의 설치 순서, 제조 기술 및 허용 오차 등을 고려하여 DfMA의 적용 전략을 수립할 것을 시사하였다. 그리고 '4. Technical Design' 단계에서는 앞에서 수립한 DfMA 적용전략을 보다 상세화하여 모듈의 제조, 양중, 운송 전략을 수립하고 제조 및 조립단계에서의 위험 요소를 미리 식별하여 건물의 접합 및 인터페이스에 관한 DfMA 전략을 수립할 것을 시사하였다. 한편, '5. Manufacturing and Construction', '6. Handover', '7. Use'의 각 단계에서는 시공 및 사용 과정에서의 DfMA 성과를 분석하고 모니터링하여 향후 피드백 정보로 활용할 수 있는 계획을 수립해야 함을 시사하였다.

또한, 해당 문서에서는 성공적인 프로젝트 관리를 위해 설계단계에서 설계업체, 제조 및 공급업체, 시공업체 간의 초기 협업을 통해 제조 및 시공 과정에서의 프로젝트 리스크를 줄여야 한다고 시사하였으며, 성공적인 DfMA 프로세스를 위해 설계 시 고려해야 할 사항들을 다음과 같이 제시하였다. 첫째, 설계과정에서 OSC 구성요소간의 연결성을 고려해야 한다. 둘째, 적절한 허용오차를 제시하여 제조 및 조립의 용이성을 확보해야 한다. 셋째, OSC 구성요소를 표준화하여 반복적인 사용을 고려한 설계를 통해 제조 및 조립에 소요되는 시간과 비용을 최소화해야 한다. 넷째, OSC 구성요소의 기능 및 최적 접합 방법을 고려하여 모듈의 배치를 최적화하여야 한다. 다섯째, OSC 구성요소의 조립 용이성을 고려한 설계를 통해 현장 노동력 및 현장 작업 시간을 최소화해야 한다. 여섯째, 유지보수 및 해체 과정에 발생하는 문제를 설계단계에서 미리 고려해야 한다.

3.1.3 미국

미국의 건축사협회(American Institute of Architects; AIA)는 미국 국립건축과학원(National Institute of Building Sciences; NIBS)와 협업을 통해 2019년 'Design for modular construction: An introduction for architects'를 발간하였다. 이 가이드에서는 성공적인 모듈러 건축의 성공적인 설계 사례들을 제시하면서, 모듈식 설계의 이점에 대해 제시하고 있다. 또한, OSC 생산방식에서는 설계, 제작, 운반 및 현장 조립 단계의 통합이 반드시 필요하며, 모든 생산 프로세스의 통합을 위해 DfMA를 도입해야함을 강조하고 있다. 이와 같은 관점에서 설계자는 모듈의 공장제작, 운반, 현장조립 프로세스에 대해 숙지하고 설계할 것을 권고하고 있으며, 설계 시 주요하게 염두해야 할 사항들을 다음과 같이 제시하고 있다. 첫째, 프로젝트의 목표를 달성하는데 OSC방

식의 도입이 필요한지 확인해야 한다. 둘째, 프로젝트 전 생산과정(공장제작, 운반, 현장조립 등)에 참여하는 이해관계자들의 통합이 염두 되었는지 확인해야 한다. 셋째, 현장 내 외작업간의 조화를 염두 해야 한다. 넷째, 설계 과정에서 공장 제조업체 및 시공업체와 협력하여 세부사항을 결정해야 한다. 다섯째, 설계변경을 최소화해야 한다. 여섯째, 제조업체와의 협력을 통해 제조과정에서의 리드 타임을 단축시켜야 한다. 일곱째, 모듈의 적시운반을 염두 해야 한다. 여덟째, 안전, 품질, 공기 및 공사비 측면에서 적절한 조립작업을 계획해야 한다.

또한, 미국은 1983년 모듈러 건축을 지원하는 MBI (Modular Building Institute)를 설립하였으며, MBI에서는 2019년 ICC (International Code Council)와 협력하여 ANSI 승인 및 ICC 합의 절차에 따라 운영되는 ICC/MBI IS-OSMC ICC/MBI Off-Site and Modular Construction Standard Consensus Committee) 를 설립하여 OSC 및 모듈러 건축의 계획, 설계, 제작, 조립, 검사 및 규정 준수에 관한 표준인 ICC/MBI 1200-2021 및 ICC/MBI 1205-2021를 제시하였다.

'ICC/MBI 1200-2021 Standard for Off-site Construction: Planning, Design, Fabrication and Assembly'에서는 설계자, 모듈러 제조업체, 건설관리자, 시공사의 역할을 규정하고 있으며, 건축 및 구조 설계부터 모듈의 제조, 운반 및 보관, 현장 설치과정에서 관리가 요구되는 핵심 사항들을 서술하고 있다. 특히, Chapter 3에서는 설계에 관한 사항들을 규정해두었는데, OSC 설계가 구조적 안전성 및 기능성(내화성, 단열성 등)을 확보해야 할 뿐만 아니라, 모듈의 운송 가능성 및 조립 가능성을 고려한 설계를 제시하고, 필요시 이에 대한 근거 및 설명자료를 제시해야함을 규정하고 있다.

또한, 'ICC/MBI 1205-2021 Standard for Off-site Construction: Inspection and Regulatory Compliance'에서는 OSC 방식으로 생산된 주거 및 상업용 건물의 구성요소에 대한 검사, 승인 및 규정에 관해 서술하고 있다. 해당 문서에서는 OSC 방식으로 생산된 건물의 품질을 확보하기 위한 구조적 안전성을 확인하기 위한 일반적인 구조계산에 관한 내용뿐만 아니라 공장 및 현장에서 구성요소간의 접합 검사 및 품질 보증에 관한 내용을 다루고 있다.

3.1.4 홍콩

홍콩 CIC (Construction Industry Council)에서는 홍콩의 MiC (Modular Integrated Construction) 프로젝트의 법적 요건 검토를 위한 가이드를 제공함으로써 사업의 원활한 추진을 도모하는 것을 목적으로 가이드라인을 제시하였으며, 홍콩의 7개의 정부기관(Buildings Department,

Fire Services Department, Water Supplies Department, Electrical and Mechanical Services Department, Transport Department, Environmental Protection Department, Customs and Excise Department)의 법적 규제에 대한 정보를 제공하고 있다. 또한, CIC에서는 정부 기관, 개발사, 건설사, 학계 및 무역협회와의 협력을 통해 DfMA Alliance를 조직하여 DfMA 관련 포럼 및 세미나 개최, Focus Hubs 조직 등을 통해 DfMA의 적용 및 확산을 위한 활동을 진행 중이다.

3.1.5 중국

중국 주택도시농촌개발부(Ministry of Housing and Urban-Rural Development)는 2017년 ‘Technical standard for assembled buildings with concrete structure (装配式建筑技术标准)’을 발표하였다. 이 표준에서는 콘크리트, 철골, 목재 구조의 조립식 건물에 대한 전반적인 생산 프로세스에 대한 기술을 제시하고 있다. ‘조립식 건물에 대한 기술 표준’에서는 직접적으로 DfMA와 같은 용어를 사용하고 있지는 않지만, DfMA의 기본 원칙에 상응하는 ‘표준화’, ‘모듈화’, ‘최소화’를 위한 설계, 제조, 운반, 조립 활동의 기준을 제시하고 있다. 조립식 건축 기술 표준은 일반 원칙, 용어, 기본 규정, 건축 설계 및 통합 설계, 건물 부품의 생산 및 운송, 건설 및 조립, 유지 보수로 구성되며, 각 장은 조립식 건물의 설계 혁신을 위한 조립식 부품의 생산, 설치 및 관리 방법으로 구성되어 있다.

또한, 중국 주택도시농촌개발부에서는 2019년 ‘Standard for design of assembled housing (装配式混凝土建筑技术体系发展指南-居住建筑)’을 제시하였다. 이 표준에서는 주거용 조립식 건물의 설계는 경제성, 안전성, 심미성 등을 종합적으로 고려해야 함을 강조하고, 조립식 주택의 설계 과정에서 고려해야 할 사항들을 제시하였다. 특히, BIM 및 지능형 응용 프로그램에 기반한 정보관리의 중요성을 강조하였으며, 이를 위한 모듈식 설계가 갖추어야 할 사항들을 제시하였다.

3.2 건설분야 DfMA 관련 선행 연구 고찰

학계에서 DfMA를 건설 분야에 적용하고자 하는 연구는 OSC가 주목받기 시작한 2010년대 후반부터 본격화되어 이와 관련된 연구들이 다수 수행되어오고 있다. 본 연구에서는 건설분야의 DfMA 관련 기존 연구를 연구 목적에 따라 ‘DfMA 효과 분석 및 적용 방향 관련 연구’, ‘DfMA 가이드라인 개발 관련 연구’, ‘DfMA 평가 방법 개발 관련 연구’, ‘BIM 기반 DfMA 적용 방법 관련 연구’로 분류하여 고찰을 실시하였다. 이와 관련한 세부 고찰 결과는 다음과 같다.

3.2.1 DfMA 효과 분석 및 적용 방향 관련 연구

먼저, DfMA가 적용된 사례를 분석함으로써 DfMA의 적용 효과를 검증한 연구들이 실시되었다. Banks et al. (2018)는 영국의 성공적인 DfMA 적용 사례인 영국 런던 중심부에 위치한 40층 규모의 “Two Fifty One project”를 구조설계/생산/안전/조립 측면으로 분석하여 해당 사례가 성공할 수 있었던 요인을 제시하고, DfMA의 적용 효과를 검증하는 것을 목적으로 연구를 진행하였다. 연구 결과, DfMA 적용을 통해 시공 속도의 향상, 비용 절감, 작업 안전 개선, 품질 향상, 폐기물 감소로 인한 지속가능성 확보, 프로젝트의 신뢰성 확보 등의 효과가 있음을 알 수 있었다.

또한, Chen and Lu (2018)는 기존 연구 고찰을 통해 커튼 월 시스템에 적용가능한 DfMA 원칙을 식별하고, 사례 연구를 통해 DfMA 적용 효과를 검증하였다. 이 연구에서 적용한 DfMA 원칙은 부품 수의 최소화, 커튼월 고정 부품의 최소화, 경제적인 재료의 사용, 취급이 용이한 부품 크기 및 무게의 구성, 자재 낭비 최소화이며, 이와 같은 원칙의 적용을 통해 자재 비용 감소, 현장 조립 시간 단축, 폐기물 감소, 품질 향상 등의 이점이 있음을 확인하였다.

한편, OSC 프로젝트에 DfMA의 적용방향을 제시한 연구들도 다수 수행되어 왔다. Fox et al. (2001)은 DFM (Design for Manufacturing)을 건물에 적용해야 하는 필요성을 제시하며, 제조업에서 시작한 DfM을 건설업에 즉시 적용할 수 없다는 점을 지적하고 건축 설계 정보 및 활동을 분석하여 DfMA 적용 전략을 제안하였다. 또한, Gao et al. (2018)는 싱가포르 DfMA의 채택에 영향을 미치는 요인을 식별하고 6가지 범주로 분류하였다. 이 연구에서는 각 영향 요인의 중요도를 식별하기 위하여 설문조사를 실시하고 이를 분석하였는데 가장 중요요인으로 공기단축과 관련한 요인이 식별되었으며, 정부 정책관련 요인이 가장 덜 중요한 요인으로 식별되었다.

그 외에도 Wasim et al. (2020)은 2020년까지의 건설 분야 DfMA의 연구 동향을 분석하여 발전 방향을 제시하였으며, Lu, W. et al. (2021)는 제조업에서의 DfMA와 건설업에서의 DfMA의 발전현황을 비교 분석하고, DfMA와 유사 개념들을 비교 분석함으로써 건설분야 DfMA의 방향성을 제시하였다. 이와 같은 연구들은 DfMA를 건설산업에 적용하기 위한 기반을 마련하였다는 점에서 의의가 있다.

3.2.2 DfMA 가이드라인 개발 관련 연구

건설산업에 DfMA를 적용하기 위한 연구로 DfMA 가이드라인을 제시한 연구들이 수행되어 왔다. Kim et al. (2016)는 교량 건설의 효율성 향상을 위하여 제조 분야 DfMA의 대표적인 4가지 설계 기준(설계의 단순화, 부품수 최소화, 부품 및 재료의 표준화, 부품의 취급 및 조립 작업의 단순화) 관점에서 파생된 교량건축의 DfMA 기반 설계 기준을 제시하고,

이를 적용한 사례연구를 진행하였다.

또한, Tan et al. (2020)은 기존의 DfMA 가이드라인을 분석하고 제조업과 건설업의 차이를 고려하여 건설업에 적용가능한 DfMA 가이드라인의 5가지 개발방향 (Context-based design, Technology-rationalized design, Logistics-optimized design, Component-integrated design, Material-lightened design)을 제시하였다.

Hyun et al. (2022)은 OSC 프로젝트에 대한 고려사항의 누락으로 인한 설계 오류를 OSC 프로젝트의 저해요인으로 지적하면서 이를 해결하기 위해 DfMA를 적용할 것을 강조하며, DfMA 원칙이 적용된 OSC 설계의 고려사항을 도출하고, 이에 기반한 설계 프로세스를 제안하였다. 또한, Jung and Yu (2022)는 기존 문헌 고찰 및 전문가 인터뷰를 통해 OSC 최적 설계 과정에서 활용가능한 DfMA 체크리스트를 도출하는 연구를 진행하였다.

이와 같은 연구들은 대부분 설계자가 최적의 설계안을 도출하는 과정에서 필요한 사항들에 대한 지침을 제공하는 것이 주된 목적인 것으로 파악된다.

3.2.3 DfMA 평가 방법 개발 관련 연구

DfMA에 기반한 설계 평가 방법을 개발한 연구들도 수행되어왔다. 대표적인 연구들을 살펴보면 다음과 같다. 먼저, Gbadamosi et al. (2019)은 DFMA 와 Lean Construction의 원칙 및 최적화를 위한 요소(구성 요소의 무게, 현장 작업자 수 및 부품 수 등)를 식별하고, 이를 이용하여 4가지 세부 지표(조립용이성, 취급 용이성, 조립 폐기물, 조립 속도)로 구성된 설계 대안 평가방법을 개발하였다.

다음으로 Safaa et al. (2019)은 사전 조립 기술을 적용한 교량 건설 방식인 ABC (Accelerated Bridge Construction) 방식에 적용가능한 PC 구성요소별 DfMA 충족도를 평가할 수 있는 DfMA 평가 방법을 제시하였다. 설계 대안평가를 위해 표준화 정도, 구성요소의 수, 설계의 단순성, 취급 용이성을 지표로 구성하였다. 또한, 정서영(2022)는 기존 문헌 고찰 및 전문가 인터뷰를 통해 OSC 최적 설계 과정에서 활용가능한 55개의 DfMA 평가항목을 도출하였으며, 해당 항목을 이용하여 OSC 설계안의 생산적합성과 생산효율성을 평가할 수 있는 통합평가모델을 제시하였다.

이와 같은 연구들은 설계안의 최적성을 평가할 수 있는 평가 방법과 관련한 연구들로서, DfMA 성과측정방법 개발의 기반을 마련하였다는 점에서 의의가 있다.

3.2.4 BIM 기반 DfMA 적용 방법 관련 연구

B. Qi (2023)의 연구 결과에 의하면 현재의 DfMA 기반의 OSC 설계는 정보 운용성 부족, 커뮤니케이션 효율성 부족, 갈등 관리 부족 등의 한계가 존재한다. 이에 그는 이와 같은 현재의 한계를 극복하고 OSC 생산방식에 DfMA를 효과적으

로 적용하기 위하여 BIM (Building Information Modelling)을 활용해야 함을 시사하였다. BIM은 건물을 구성하는 객체들을 중심으로 속성 정보를 관리할 수 있기 때문에 건물의 생애주기 동안의 모든 정보를 효과적으로 공유할 수 있다는 특징이 있다. 이와 같은 특징으로 인해 BIM을 객체 기반 설계 도구 및 통합 협업 환경으로 사용할 경우 DfMA 프로세스 진행이 효과적일 것이라고 예측되어 오고 있다(BCA, 2016; Lu, W. et al., 2021).

이와 같은 배경 속에서 BIM-DfMA 관련 연구들이 수행되어왔다. Alfieri et al. (2020)은 이탈리아 OSC 생산환경에 적합한 OSC 단계별 BIM-DfMA 적용 전략을 제시하였으며, Abrishami and M. Duran (2021)은 BIM과 DfMA의 융합을 강조하며, 건축물의 전체 수명주기에 따른 BIM기반의 DfMA 접근방식의 프레임워크를 제시하였다. 이 연구들은 OSC 프로세스별 BIM 기반 DfMA 적용의 방향성을 제시하였다는 점에서 의의가 있다.

3.3 소결

국의 건설분야 DfMA 적용현황을 고찰한 결과, 싱가포르, 영국 등 OSC 선도국에서는 정부차원에서 DfMA 개념을 적용한 설계 가이드라인을 제시하고 있는 것으로 파악되었다. 설계 가이드라인은 OSC 프로젝트의 최적 설계안을 개발하는 과정에서 활용 가능한 형태로 개발되어오고 있음을 확인할 수 있었다.

한편, DfMA 연구 동향을 고찰한 결과, DfMA 가이드라인 개발 외에도 사례연구를 통해 DfMA의 적용효과를 분석하거나, 설계안의 DfMA 개념에의 충족도를 평가하는 연구들이 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 DfMA 기반 설계 프로세스의 효율성을 제고하기 위해 BIM 활용을 제안한 연구들도 수행된 것으로 분석되었다. 이와 같은 고찰 결과를 종합하였을 때, 건설 분야에 DfMA는 건설 프로세스 실무에 적용된 역사가 길지 않아 실무적으로는 DfMA의 적용 방식이 한정적이지만, 여러 학자들에 의해 다양한 평가 기법 및 설계 프로세스에의 적용 방식 등이 개발되고 있는 것을 알 수 있었다.

4. 국내 OSC를 위한 DfMA 적용 전략 제언

4.1 DfMA 적용 전략 수립 방향 도출

본 연구에서는 국내 OSC 산업 발전을 위한 DfMA 적용 전략을 제언하기 위하여 앞에서 실시한 문헌고찰 결과를 기반으로 DfMA 적용 전략 수립 방향을 도출하였다. 도출한 DfMA 적용 전략은 'DfMA 개념 정립 및 확산', '최적 설계안 개발을 위한 DfMA 지침 수립', 'DfMA 평가지표 및 방법론

개발', 'BIM 기반 DfMA 방법론 개발', 'DfMA 성과 데이터의 축적·분석·보급', 'OSC 발주 및 조직 체계 개선'이다(Table 2).

Table 2. DfMA application strategies based on literature review results

No.	Strategies	ref.
1	Establishment and spread of DfMA concepts	BCA (2017); RIBA (2013); RIBA (2021); CIC (2021); Gao et al. (2018); Lu, W. et al. (2021)
2	Establishment of DfMA guidelines for optimal design development	BCA (2017); RIBA (2013); RIBA (2021); NIBS (2019); ICC (2021); MOHURD (2017); Gao et al. (2018); Kim et al. (2016); Tan et al. (2020); Hyun et al. (2022); Jung & Yu (2022)
3	Development of DfMA Evaluation Index and Methodology	RIBA (2013); RIBA (2021); Gbadamosi et al. (2019); Safaa et al. (2019); Jung (2022)
4	Development of BIM-based DfMA methodology	BCA (2017); RIBA (2013); RIBA (2021); B. Qi (2023); Lu, W. et al. (2021); Alfieri et al. (2020); Abrishami & M.Duran (2021)
5	Accumulation, analysis, and dissemination of DfMA performance data	RIBA (2013); RIBA (2021)
6	Improvement of project delivery system and organizational structure	BCA (2017); CIC (2021)

4.2 전문가 의견수렴을 위한 심층 인터뷰 실시

4.2.1 전문가 인터뷰 개요

본 연구에서는 국내 OSC 산업 발전을 위한 DfMA 적용 전략을 제언하기 위하여 해외 국가들의 DfMA 적용현황 및 OSC 분야 DfMA 선행 연구를 고찰한 결과를 기반으로 국내 OSC 전문가들과의 인터뷰를 실시하여 전문가 의견수렴 과정을 거쳤다.

의견수렴을 위한 전문가 인터뷰는 1:1 대면 방식으로 2022년 5월 17일 ~ 2023년 5월 13일에 걸쳐 8인의 관련 전문가들을 대상으로 진행되었다. 인터뷰 사전에는 전문가에게 2장과 3장에서 고찰한 결과를 제공하였으며, 4.1절에서 도출한 6가지 DfMA 적용 전략 수립의 필요여부 및 각 전략의 구체적인 내용에 대한 의견을 질문하는 방식으로 인터뷰를 진행하였다. 또한, 인터뷰 결과 해석의 타당성을 확보하기 위하여 인터뷰 내용은 복수의 연구자들이 질적으로 분석하였다.

인터뷰에 참여한 전문가들은 다음 (Table 3)과 같이 건설 관련 경력 발주 조직, 건축설계 및 구조 설계, PC 제조, 시공 및 학계 종사자로 구성된다. 인터뷰에 참여한 전문가들은 평균적으로 건설업 종사 경험이 16.8년, OSC 관련 프로젝트 참여 경력은 평균 4.2년(3.1회)이다.

Table 3. Overview of expert interview participants

	Categories	Frequency	%
Organizational type	Architectural Design	2	20%
	Structural design	2	20%
	Manufacture & Construction	2	20%
	Academic	2	20%
Experience	Construction related	16.8 years	
	OSC related	4.2 years (3.1 times)	
Sum		8	100%

4.2.2 전문가 인터뷰 결과

전문가 심층 인터뷰 결과, 4.1절에서 도출한 6가지 DfMA 적용 전략 수립 방향('DfMA 개념 정립 및 확산', '최적 설계안 개발을 위한 DfMA 지침 수립', 'DfMA 평가지표 및 방법론 개발', 'BIM 기반 DfMA 방법론 개발', 'DfMA 성과 데이터의 축적·분석·보급', 'OSC 발주 및 조직 체계 개선')에 모든 전문가가 동의하였다. 또한, 6가지 DfMA 적용 전략 수립 방향별 세부 의견에 대한 인터뷰도 실시하였는데, 6가지 DfMA 적용 전략 수립 방향별 전문가 의견은 다음 (Table 4)와 같이 요약된다.

4.3 국내 OSC를 위한 DfMA 적용 전략 도출 결과

4.3.1 DfMA 개념 정립 및 확산

국내 OSC 건설산업 전반에 DfMA를 적용하기 위한 첫걸음은 건설 프로젝트 참여자들의 DfMA 개념에 대한 명확한 이해다. 해외의 많은 국가들이 각국의 생산환경 및 프로세스를 고려하여 DfMA에 대한 개념 및 활용 프로세스를 정의하고 있음에도 불구하고, 국내의 경우 DfMA에 대한 개념이 보편화되어 있지 않다.

단순히 독립된 모듈로 건물을 설계하고 시공하여 OSC를 실현했다고 해서 DfMA를 적용한 것이 아님에도 불구하고, 아직 많은 건설인들이 DfMA의 개념을 OSC의 개념과 혼용하여 사용하는 경향이 있다. 또한, DfMA는 설계 오류를 최소화하기 위한 설계 개념이자 여러가지 기술을 적용하여 실현해야할 설계 목표임에도 불구하고, DfMA가 OSC를 구성하는 하나의 특정 기술로 오인하고 있는 경우도 있다. 이와 같은 개념 혼동을 방지하고, DfMA의 산업 적용을 적극 실현하기 위해서는 산업 전반에 DfMA 개념에 대한 이해도 향상을 위한 전략 수립이 필요하다. 이를 위해 DfMA 포럼, 세미나 및 교육 등의 개최 등의 기회를 확대해야 할 것이다.

4.3.2 최적 설계안 개발을 위한 DfMA 지침 수립

DfMA가 최적 설계를 지원하기 위해 탄생한 개념임을 고려했을 때, DfMA 개념을 반영한 설계 지침 개발은 필수적이다. DfMA 설계 지침은 OSC 설계의 각 세부 단계(기본설계, 실시설계, shop drawings)에서 무엇을 고려해야 설계 오류

Table 4. DfMA application strategies

No.	Strategies	Sub-strategies
1	Establishment and spread of DfMA concepts	- Preventing Confusion of the DfMA Concept - Conducting education to enhance understanding of DfMA
2	Establishment of DfMA guidelines for optimal design development	- Development of DfMA Application Guidelines - Precede the development of DfMA standard guidelines and customize them based on project types, scales, and characteristics for effective utilization
3	Development of DfMA Evaluation Index and Methodology	- Development of evaluation indicators and methods to assess whether a design proposal aligns with the principles of DfMA. - Development of evaluation indicators and methods for assessing production efficiency based on DfMA principles
4	Development of BIM-based DfMA methodology	- Development of standard BIM (Building Information Modeling) library for OSC module - Development of DfMA-related information extraction methods from BIM objects - Development of BIM-based DfMA analysis tool
5	Accumulation, analysis, and dissemination of DfMA performance data	- Establishment of absolute evaluation criteria for DfMA assessments using DfMA performance data - Identification of best practices from DfMA implementation cases - Derive effective management direction for OSC projects through DfMA performance analysis
6	Improvement of project delivery system and organizational structure	- Integration of design, manufacture, transport, construction, and maintenance information - Application of integrated ordering methods such as Integrated Project Delivery (IPD) - Establish an organic cooperation system between designers, module manufacturers, and contractors

를 최소화할 수 있는지에 대한 정보 제공을 목적으로 개발되어야 한다.

OSC 최적 설계안 개발 시 고려해야 할 사항들은 프로젝트의 유형, 규모, 생산 환경(공장 및 현장 생산 설비 등)의 조건에 따라 그 세부 내용이 상이해질 수 있다. 따라서, 정부 또는 공공 공사 발주청 및 공공 기관에서 먼저 일반적인 국내 OSC 생산환경에 적합한 DfMA 지침 표준안을 먼저 수립하는 것이 선행되어야 할 것이다. DfMA 표준 지침이 개발되면 프로젝트의 유형, 규모, 생산환경 등을 고려하여 세부 응용이 용이해질 수 있기 때문이다. 이와 같은 DfMA 지침이 개발된다면 OSC 최적 설계안 개발이 효율적이고 효과적으로 이루어질 수 있을 것이다.

4.3.3 DfMA 평가지표 및 방법론 개발

제조 분야에서는 설계안의 생산 환경(생산 설비 등)에의 적합성 및 생산 효율성을 검토하고 평가하기 위한 방법론 및 도구가 개발되어 활용되고 있음에도 불구하고, 아직 건설 분야에서는 이에 대한 연구가 미진한 실정이다. 하지만, 건설 산업에서도 프로젝트의 효율을 위해 설계안이 제시된 이후에는 제시된 설계안의 최적 여부(OSC 생산환경에의 적합 여부) 혹은 최적화 정도(OSC 생산환경에의 적합 정도 및 생산 효율성 정도)의 검토가 필요하다.

1) DfMA 기반 생산적합성 평가 방법론 개발

먼저, 개발된 설계안이 OSC 생산환경에 적합한지에 대한 검토 및 평가할 수 있는 방법론 개발이 필요하다. OSC 생산 방식의 경우 기존의 현장 생산방식(Site built) 방식에 비해 생산환경(공장 및 현장 생산 설비 등)에 의한 제약사항이 다

수 존재하여, 도출된 설계안이 생산환경에 적합한지에 대한 검토 및 평가가 필수적으로 수반되어야 하기 때문이다. OSC 생산이 DfMA 취지에 부합하여 이루어지기 위해서는 OSC 생산환경에 생산가능한 설계가 이루어져야 하고, 생산과정에서의 안전성이 확보되며, 중간 및 최종 생산물의 품질이 확보되어야 한다. 따라서, DfMA 취지에 적합한 OSC 설계의 생산적합성 도달 목표를 생산가능성, 생산안전, 생산품질 등으로의 설정이 필요하다.

한편, 설계안의 OSC 생산환경에의 적합성을 검토 및 평가하기 위해 적용될 수 있는 기법으로는 체크리스트 기법을 고려할 수 있다. OSC 생산조건에 대한 정보가 포함된 DfMA 체크리스트가 활용되면 설계자가 자신의 설계안이 DfMA 요건에 부합한지를 검토할 수 있으며, 발주자 또는 평가자가 DfMA 요건에 부합한 설계안을 선정하는 과정에서도 이를 활용될 수 있다.

2) DfMA 기반 생산효율성 평가방법론 개발

다음으로 다수의 설계 대안 중 생산 효율이 우수한 설계 대안을 선정할 수 있는 평가방법론 개발이 필요하다. OSC 생산방식은 기존의 현장생산 방식의 생산성 문제를 개선하기 위해 도입되었다는 취지를 생각했을 때, 다수의 설계 대안 중 생산 효율성이 가장 높은 설계 대안의 선정은 필수적이기 때문이다.

이와 같은 설계 대안 평가 기법의 개발 과정에서는 DfMA 원칙을 고려하여 모듈의 표준화 수준 및 몰드의 재활용 수준, 접합 작업의 표준화 수준, 현장 작업 비율, 운반 용이성 등의 평가지표가 고려되어야 할 것이다. 또한, 평가방법 개

발 과정에서 평가지표가 도출된 이후에는 지표별 평가 기준 개발이 수반되어야 한다. 현재 국내외 몇몇 연구자들에 의해 매트릭스(matrix) 기법을 활용하여 복수개의 설계안의 상대 비교를 할 수 있는 방법에 대한 연구가 진행되었고, DfMA 평가지표를 발굴하고 지표별 평가기준을 제시하여 설계안의 효율성을 점수화하고자 하는 시도가 있어 왔다. 하지만, 현재는 누적된 OSC 프로젝트의 수행 실적 데이터가 부족으로 인하여 표준화된 절대평가 기준 개발이 불가능한 상황이다. 따라서, 앞으로 수준 높은 DfMA 반영 수준 및 생산 효율 수준 평가방법론이 개발되기 위해서는 OSC 실적 데이터 누적도 필수적으로 이루어져야 할 것이다.

4.3.4 BIM 기반 DfMA 방법론 개발

앞에서 고찰한 바와 같이 DfMA를 적용하면 설계 오류의 감소로 인해 공기단축, 공사비 절감, 품질 및 안전 향상 등의 다양한 이점이 있음에도 불구하고, 현재의 DfMA 기반 OSC 설계는 정보 운용성 및 커뮤니케이션 효율성 부족, 갈등 관리 전략의 부재 등의 많은 한계가 존재한다(B. Qi, 2023). 이와 같은 한계를 극복하고 DfMA의 이점을 극대화하기 위해서는 DfMA 기반의 OSC 설계 및 생산 프로세스에 BIM을 적용하는 것이 필수적이다.

BIM은 건설 프로젝트의 효율적인 정보 운용과 건설 프로젝트 참여자들 간의 커뮤니케이션 및 협업을 지원하기 위해 활용되고 있다는 점을 고려했을 때, DfMA 기반의 OSC 설계의 한계를 개선하기 위한 도구로 활용해야 한다는 점에서는 이견이 없다. 특히, OSC와 DfMA는 공통적으로 최종 생산물의 구성요소의 모듈화 및 표준화를 추구한다는 점을 고려했을 때, BIM을 활용하여 객체 기반 설계를 실시한다면, 그 효과는 극대화될 수 있을 것이다.

이를 위해서 가장 먼저 OSC 모듈의 표준 BIM 라이브러리 개발이 필요하다. 이상적인 OSC 설계는 건물의 구성요소를 모듈 단위로 나누고 표준화하여 표준화된 모듈을 이용해 분할과 조합하는 방식으로 이루어져야 하기 때문에 국내외 많은 연구자들이 OSC의 표준 모듈을 개발하기 위한 노력을 진행 중이다. 이와 같은 OSC의 표준 모듈 개발 속도에 발맞춰 표준 BIM 라이브러리를 개발하고, 이를 실무에 적용한다면 설계 오류의 감소 및 설계 소요시간과 비용을 절감할 수 있을 것이다.

또한, BIM 객체로부터 설계정보를 추출하여 생산 및 시공에 적합한지 빠르게 검토할 수 있는 도구 개발도 필요하다. 이와 같은 도구의 개발은 앞에서 언급한 DfMA 평가의 효율성 및 신뢰도 향상으로 이루어질 것이며, 평가 결과 데이터의 축적도 효율적으로 이루어질 수 있을 것이다.

4.3.5 DfMA 성과 데이터의 축적·분석·보급

4.2.3절에서 언급한 DfMA 평가방법론이 개발된 이후에는

DfMA 성과 데이터를 축적, 분석, 보급하기 위한 전략 수립이 필요하다. DfMA 평가 데이터를 축적하고 이를 면밀히 분석하여 단일 프로젝트의 성과만을 측정하는 것이 아니라, 프로젝트 간 상대적 비교를 통해 DfMA 성과를 보다 객관적으로 분석할 수 있다. 이와 같은 분석을 통해 DfMA 성과의 개선 필요사항을 도출할 수 있으며, 축적된 데이터를 이용하여 DfMA 평가의 절대평가 기준을 수립함으로써, DfMA 평가 고도화를 실현할 수 있을 것이다. 또한, DfMA 수행 사례 중 우수 사례를 Best practice로 선정하고 이를 보급한다면, 차후 유사 프로젝트 수행 시 참고자료로 활용할 수 있을 것이다.

4.3.6 OSC 발주 및 조직 체계 정립

OSC 프로젝트에서 DfMA는 설계 이후 후속 공정인 모듈의 공장 제작, 운반, 현장 조립, 유지보수 각 단계에서 발생 가능한 위험요소 혹은 생산성 저해 요소들을 설계단계에서 미리 고려하여 설계함으로써 생산 전반의 생산성을 향상시키는 데 그 목표가 있다. 따라서, OSC 생산방식에서 DfMA가 효율적으로 적용되기 위해서는 설계, 제작, 운반, 시공, 유지관리 정보의 통합이 필수적이다. 이와 같은 정보를 통합하여 성공적인 DfMA 적용을 위해서는 분리발주 형식보다는 IPD(Integrated Project Delivery)와 같은 통합발주 방식의 적용이 요구된다. 또한, OSC 설계자를 비롯하여 모듈 제조업체 및 시공업체의 유기적 협력체계를 구축하기 위하여 프리콘(pre-construction) 및 빅룸(Big room) 등의 적용을 고려해야 할 것이다.

5. 결론

국내 OSC 기술의 선진화를 위해서는 DfMA 활용이 필요하다는데 전문가들은 의견을 모으고 있다. 하지만, DfMA가 국내 건설시장에 소개된 지 그 역사가 길지 않아 아직 산업 전반에 자리 잡지 못한 것이 현실이다. 이와 같은 현실을 타개하기 위해서는 OSC 산업에 적합한 DfMA 적용전략을 수립하는 것이 필요하다. 이에 본 연구는 DfMA 관련 문헌 고찰 및 전문가 의견수렴을 통해 국내 OSC 산업 발전을 위한 DfMA 적용 및 도구 개발을 위한 전략 수립의 기본 방향을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 국내 OSC 프로젝트를 위한 DfMA 적용 전략을 요약하면 다음과 같다.

(1) 건설산업에의 DfMA의 적용을 실현하기 위해서는 산업 전반에 DfMA 개념에 대한 이해도 향상이 필요하다. 이를 위해 DfMA 포럼, 세미나, 교육 등의 개최 등의 전략이 필요하다.

(2) 프로젝트 참여자가 OSC 설계안을 개발하는 과정에서 활용 가능한 DfMA 지침 개발이 필요하다. 이때, 싱가포르, 미국 등의 DfMA 관련 가이드라인을 참고할 수 있을 것이며,

정부 또는 공공 공사 발주청 및 공공 기관에서 먼저 일반적인 국내 OSC 생산환경에 적합한 표준 지침 수립이 선행이 필요하다.

(3) DfMA 평가지표 및 평가방법론 개발이 필요하다. DfMA 평가지표 및 평가 방법은 평가의 목적에 따라 다양한 형태로 개발될 수 있을 것이며, OSC 생산환경에 적합여부를 검토하기 위한 방법, 다수의 설계 대안 중 생산효율성이 높은 설계 대안을 선정하기 위한 평가 방법 등의 개발이 필요하다.

(4) DfMA의 이점을 극대화하고 설계단계의 효율성 향상을 위한 BIM 기반 DfMA 방법론 개발이 필요하다. 이를 위해 OSC 표준 라이브러리 및 BIM 기반 DfMA 평가 방법 개발이 필요하다.

(5) DfMA 평가 결과를 추적·분석·보급하기 위한 체계 개발이 필요하다. DfMA 성과 데이터 추적 및 분석을 통해 DfMA 평가체계를 고도화해야 하며, Best practice를 발굴하여 이를 신규 사업 추진 시 벤치마킹 자료로 활용할 수 있도록 해야 한다.

(6) 효과적인 DfMA 기반 설계 수행을 위해 OSC 발주 및 조직 체계를 정비해야 한다. 설계, 제작, 운반, 시공, 유지관리 정보의 통합을 위한 발주 및 조직 체계 정립이 필요하다.

본 연구의 결과는 향후 단·중장기적 국내 OSC 및 DfMA 적용 계획 수립과 OSC 프로젝트의 세부 관리방안 도출 과정에 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후 연구에서는 본 연구에서 제시한 전략적 시사점을 기반으로 DfMA의 활용 목적을 정의하고, 각 목적에 따른 평가 기법 및 도구 개발에 관한 연구를 진행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2023년도 광운대학교 우수연구자 지원 사업에 의해 연구되었음

References

Arashpour, M., Bai, Y., Aranda-Mena, G., Bab-Hadiashar, A., Hosseini, R., and Kalutara, P. (2017). "Optimizing decisions in advanced manufacturing of prefabricated products: Theorizing supply chain configurations in off-site construction." *Automation in Construction*, 84, pp. 146-153.

Azhar, S., Lukkad, M.Y., and Ahmad, I. (2013). "An investigation of critical factors and constraints for selecting modular construction over conventional stick-built technique." *International Journal of Construction*

Education and Research, 9(3), pp. 203-225.

Sepehr, A., and Rocio, M.D. (2021). "BIM and DfMA: A Paradigm of New Opportunities." *Sustainability*, 13(17), 9591.

Banks, C., Kotecha, R., Curtis, J., Dee, C., Pitt, N., and Papworth, R. (2018). "Enhancing high-rise residential construction through design for manufacture and assembly—a UK case study." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Management, Procurement and Law*, 171(4), pp. 164-175.

Bing Qi, and Aaron Costin (2023). "BIM and Ontology-Based DfMA Framework for Prefabricated Component." *Buildings*, 13(2), p. 394.

Blismas, N.G., and Wakefield, R. (2009). "Drivers, constraints and the future of offsite manufacture in Australia." *Construction Innovation*, 9(1), pp. 72-83.

Bogue, R. (2012). "Design for manufacture and assembly: background, capabilities and applications." *Assembly Automation*, 32(2), pp. 112-118.

Boothroyd, G. (1994). "Product design for manufacture and assembly." *Computer-Aided Design*, 26(7), pp. 505-520.

Boothroyd, G., Peter, D., and Winston, A. Knight (2010). *Product design for manufacture and assembly*, CRC press.

Building and Construction Authority (2016). *BIM for DfMA (Design for Manufacturing and Assembly) Essential Guide*.

Building and Construction Authority (2022). "Design for Manufacturing and Assembly (DfMA)." BCA, Singapore, accessed June 1, 2022, <https://www1.bca.gov.sg/buildsg/productivity/design-for-manufacturing-and-assembly-dfma>.

Chen, K., and Lu, W. (2018). "Design for manufacture and assembly oriented design approach to a curtain wall system: A case study of a commercial building in Wuhan, China." *Sustainability*, 10(7), 2211.

Construction Industry Council (2021). *About the DfMA Alliance* [Website], https://www.cic.hk/eng/main/dfma_alliance/about/ (Nov. 2, 2021).

Crowther, P. (1999). "Design for disassembly" Royal Australian Institute of Architects/BDP, Environment design guide.

Emmatty, F.J., and Sarmah, S.P. (2012). "Modular product development through platform-based design and DfMA." *Journal of Engineering Design*, 23(9), pp. 696-714.

Evandro, A., Elena, S., Michele, S., and Giuseppe, M.D.G. (2020). "A BIM-based approach for DfMA in building construction: framework and first results on an Italian case study." *Architectural Engineering and Design Management*, 16:4, pp. 247-269.

- Fox, S., Marsh, L., and Cockerham, G. (2001). "Design for manufacture: a strategy for successful application to buildings." *Construction Management and Economics*, 19(5), pp. 493-502.
- Gao, S., Low, S.P., and Nair, K. (2018). "Design for manufacturing and assembly (DfMA): a preliminary study of factors influencing its adoption in Singapore." *Architectural Engineering and Design Management*, 14(6), pp. 440-456.
- Gbadamosi, A.Q., Mahamadu, A.M., Oyedele, L.O., Akinade, O.O., Manu, P., Mahdjoubi, L., and Aigbavboa, C. (2019). "Offsite construction: Developing a BIM-Based optimizer for assembly." *Journal of Cleaner Production*, 215, pp. 1180-1190.
- Hyun, H., Kim, H., and Kim, J. (2022). "Integrated Off-Site Construction Design Process including DfMA Considerations." *Sustainability*, 14(7), 4084.
- International Code Council (2021). "ICC/MBI 1200-2021 Standard for Off-site Construction: Planning, Design, Fabrication and Assembly." ICC, Washington, D.C, USA.
- International Code Council (2021). "ICC/MBI 1205-2021 Standard for Off-site Construction: Inspection and Regulatory Compliance." ICC, Washington, D.C, USA.
- Jung, S., and Yu, J. (2022). "Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) Checklists for Off-Site Construction (OSC) Projects." *Sustainability*, 14(19), 11988.
- Jung, S. (2022). "DfMA Assessment Model for Selecting Optimum Design in OSC projects." Kwangwoon University, Doctoral dissertation.
- Kim, M.K., McGovern, S., Belsky, M., Middleton, C., and Brilakis, I. (2016). "A suitability analysis of precast components for standardized bridge construction in the United Kingdom." *Procedia Engineering*, 164, pp. 188-195.
- Lu, W., Tan, T., Xu, J., Wang, J., Chen, K., Gao, S., and Xue, F. (2021). "Design for manufacture and assembly (DfMA) in construction: the old and the new." *Architectural Engineering and Design Management*, 17(1), pp. 77-91.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development (2019). "Standard for design of assembled housing (装配式混凝土建筑技术体系发展指南-居住建筑)" China Construction Industry Press: China.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development (2017). "Technical standard for assembled buildings with concrete structure (装配式建筑技术标准)" China Construction Industry Press, China.
- National Institute of Building Sciences Off-Site Construction Council. accessed May 7, 2022, <https://www.nibs.org/oscc>.
- Royal Institute of British Architects (2021). "DfMA Overlay to the RIBA Plan of Work 2nd edition." RIBA, London, UK.
- Royal Institute of British Architects (2013). "RIBA Plan of Work 2013: Designing for Manufacture and Assembly." RIBA, London, UK.
- Yan, P.S., Jati, U.D.H., and Bambang, P. (2019). "Evaluation of the use of prefabricated bridge elements with Design for Manufacture and Assembly (DfMA) criteria." MATEC Web of Conferences 270, 05006.
- Stoll, H.W. (1986). "Design for manufacture: An overview." *Applied Mechanics Reviews*, 39(9), 1356.
- Swift, K.G., and Brown, N.J. (2013). "Implementation strategies for design for manufacture methodologies." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217(6), pp. 827-833.
- Tan, T., Weisheng, L., Gangyi, T., Fan, X., Ke, C., Jinying, X., Jing, W., and Shang, G. (2020). "Construction-Oriented Design for Manufacture and Assembly (DfMA) Guidelines." *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(8), 04020085.
- Wasim, M., Han, T.M., Huang, H., Madiyev, M., and Ngo, T.D. (2020). "An approach for sustainable, cost-effective and optimised material design for the prefabricated non-structural components of residential buildings." *Journal of Building Engineering*, 32, 101474.

요약 : OSC (Off-Site Construction) 생산방식은 기존의 건설 생산 방식과 달리 생산환경 및 기술에 따른 제약사항들이 다수 존재하기 때문에 이와 같은 제약사항을 고려한 설계안을 개발하고, 건축 생산 과정의 전반적인 효율을 고려한 최적의 설계 대안을 선정하는 것이 중요하다. 이에 건설업계에서는 OSC 프로젝트의 최적 설계안을 도출하기 위해 DfMA (Design for Manufacturing & Assembly) 에 주목하고 있다. 싱가포르, 영국 등 OSC 선도국에서는 DfMA 적용의 필요성을 인정하여 OSC 산업 특성에 적합한 DfMA 가이드 라인 및 적용 전략을 제시하였으며, 여러 연구자들이 건설업에 DfMA를 융합하는 연구를 진행 중에 있다. 하지만, 국내의 경우에는 DfMA의 산업 적용 및 산업 적용에 대한 필요성은 인식하고 있으나, DfMA의 개념을 실제 건설 프로젝트의 설계에 구현하는데 필요한 방법 및 도구가 부재하다. 이에 본 연구에서는 해외 건설분야 DfMA 개발 및 적용 현황을 분석하여 벤치마킹하고, 전문가 의견 수렴과정을 거쳐서 국내 OSC 산업 발전을 위한 DfMA 적용 및 도구 개발을 위한 전략 수립의 기본 방향을 제시하였다. 본 연구의 결과는 향후 국내 OSC 산업에 적합한 DfMA 도구 개발 및 DfMA 관련 정책 수립의 기초자료로 활용할 수 있을 것이다.

키워드 : OSC, DfMA, 최적 설계, 벤치마킹