LHI Journal of Land, Housing, and Urban Affairs
pISSN: 2093-8829, eISSN: 2234-1765
LHI Journal 2023;14(2):97-107 | http://doi.org/10.5804/LHIJ.2023.14.2.97

재난 지원을 위한 DfMA 모듈러주택 모델 제안*

Proposing a DfMA Modular Housing Model for Disaster Relief Support

이지은**
Ji-Eun Lee**

Abstract

This study examined how to better provide quality temporary housing for people in the event of natural and social disasters. Design for Manufacture and Assembly (DfMA) is suitable for creating an efficient planning model for the mass production and transport of a modular house. The proposed DfMA model has the following three characteristics. First is the division of the modular house into service modules and functional modules and to create diversity by developing standard parts and multi-functional parts. Second is a flexible layout suitable for various site conditions. Such flexible layouts would allow identical homes to be mass produced and deployed to a variety of locations, both nationally and internationally. Third is to simplify and minimize the automation process with dry construction to increase production efficiency. Application of this DfMA design method can lead to reduced construction time and cost and improve housing quality.

Keywords: DfMA (Design for Manufacture and Assembly), Modular housing, Disaster Assistance, Mass Production, Relocatability

1. 서 론

2022년 2월 발표한 기후 변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 6차 보고서에서는 탄소 배출이 산업화 이전 대비 약 1°C의 지구 온난화를 유발하고, 온도가 상승할수록 가뭄, 강수량이 크게 증가하여 극단적인 날씨가 잦을 것이라 예견했다(The United Nations, 2022). 최근 전 세계가 재난 대응이 필요한 상황에 직면했다. 2022년 6월 파키스탄은 폭우로 국토의 30% 이상이 물에 잠기고, 3,300만명이 피해를 입었으며 집 90만호가 파괴되고 210만명이 노숙자가 되었다. 2023년 2월에는 튀르키예 및 시리아에서도 지진이 발생하여 2023년 3월 1일 기준 전체 인구의 27%인 2,300만명의 이재민이 발생하고, 건물은 26만채 이상 파괴되고 사망자는 55,000명 이상 인 것으로 보도되고 있다. 이 외에도 2022년 2월 24일 이후 1년 이상 지속되는 우크라이나와 러시아의 전쟁으로 2023년 3월 6일 기준 800만 명 이상의 난민이 발생하고, 50만호 이상의 주택이 신축되어야 하는 상황이다.

2022년 국내에서도 최대 규모의 피해를 남긴 울진 산불 1년 후 올해도 대형 산불이 10건 이상 발생했다. 산불 외에도 최근 1년 동안 작년 6~8월에는 '중부권 폭우'로 2,280명의 이재민 발생, 8~9월에는

*이 논문은 재난지원을 위한 모듈러주택 사업모델연구(2022) 수정·보완하여 작성하였음.

**LH 토지주택연구원 수석연구원(jee@lh.or.kr)

Received: March 24, 2023 / Revised: June 5, 2023 / Accepted: June 5, 2023

'힌남노' 등 태풍, 약한 강도의 지진 등 다양한 자연재해로 발생한 이재민도 있었다. 지자체에서는 재난 발생 시 「임시주거용 조립주택 운영지침 별표1」에 의거하여 '임시주거용 조립주택'과 동일한 평면으로 제작하여 조달청 나라장터에 물품 등록을 한 업체의 제품을 구입하여 이재민에게 제공하고 있다. 제작업체는 보관비용을 줄이기 위해 주문을 받은 후에 제작하는 것이 일반적이고, 한 가지 모델로 주문하여 공급하므로 가구원수에 맞는 공간을 제공하기 어려운 상황이다.

이와 같이 자연재해 및 사회재난 발생으로 주거권의 보장을 위한 임시주거시설의 수요가 증가하고 있는 상황에서 보다 지속가능한 대응이 필요하다. 재난 발생시 자원의 낭비 없이 보다 신속한 이재민의 주거안정을 위해서는 건축 자재를 최대한 합리적으로 사용할 수 있도록 설계해야 하고, 거주자의 수에 맞춰 주택이 제공되도록 공급모델을 확대해야 한다. 이에 본 논문은 대규모 재난 발생 시 이재민에게 신속하게 양질의 주택을 공급하기 위해 대량 생산 및 운반에 효율적인 모델 즉 DfMA(Design for Manufacture and Assembly)방식을 적용한 모듈러주택 모델을 제안하였다.

2. DfMA(Design for Manufacture and Assembly)방식에 대한 이론적 고찰

2.1 DfMA방식의 특징과 장점

현대 건축가 르 꼬르뷔지에는 '집은 살기 위한 기계'라며 건축의 공업화를 주장했다(Le Courbusier, 1923). 100년이 지난 현재까지 지속적인 발전은 이루어지지 않았지만, 최근 건설업의 현안을 해결하기 위한 대안으로 건축설계에 활용되기 시작했다. 건축은 제품과 달리 대지의 여건과 문화·경제적인 조건 등이 더 중요하게 고려되어 표준화되기 어려웠기 때문이다. 그러나 건설업에서 현장 중심의 생산방식과 생산성에 문제가 제기되기 시작하고, 2010년대부터 제조업 즉 OSC(Off-Site Construction)의 방식을 건축에 활용하며 기존의 방식을 개선하기 시작했다. 영국의 RIBA(Royal Institute of British Architects) 보고서(2021)에 따르면 DfMA설계 방식은 생산효율성을 높이고 노동력을 저감하는 설계 및 시공방식이며, 현대의 건설방식 즉 MMC(Modern Methods of Construction)를 주도한다. 영국 RIBA에서 DfMA를 활용한 건설 방식을 0~7단계로 한 주요 업무와 건축 계획안을 디지털화하는 방식을 제안했으며, 주요한 특징과 기존 방식과 비교하여 얻을 수 있는 장점(Benefits)을 비교하면 다음 Table 1과 같다.

미국 및 싱가포르도 이러한 설계방식의 도입에 대해 고려하고 건설과정의 일부 과정은 공장에서 해결하는 것을 고려한다. 미국의 경우 DfMA를 도입하기 위한 고려사항으로 프로젝트 목표를 달성하는데 OSC(Off-Site Construction)방식의 도입이 필요한지, 프로젝트 전 과정 즉 공장제작, 운반, 현장조립 등에 참여하는 이해관계자들의 통합이 반영되었는지, 안전, 품질, 공기 및 공사비 측면에서 적절한 조립작업이 계획 되었는지를 검토한다(The American Institute of Architects, 2019).

DfMA의 설계를 적용하기 위해서는 생산자동화가 큰 효과를 갖지만, 자동화 생산설비가 없더라도 공장에서 수작업으로 생산하는 경우에도 생산효율성을 높이기 위해 Table 1에서 제시한 장점이 활용될 필요가 있다. 그리고 재난을 지원하는 주택의 경우 이동성이 필요하므로 제품을 생산하는 방식으로 1960년대부터 사용되어 온 DfMA설계방법을 차용할 필요가 있다. 임시주거 주택을 처음부터 매입하여 주택 복구를 할 경우 김인한 외(2022)에서 제시하는 절차와 같이 건축주의 요구사항을 반영하는 설계 방식을 활용하는 것도 가능하다. 이때 DfMA설계의 장점은 온라인 플랫폼을 활용하여 초기부터 건축주의 요구사항이 반영된 설계를 진행하는 것이다.

Table 1. DfMA Overlay to the RIBA Plan of Work* and Benefits

Stage	Core DfMA Tasks*	Benefits**
0. Strategic Definition	• How DfMA might impact on the business case or client requirements (repurposing of a building and reuse of components)	-
1.Preparation and Briefing	• Initiate DfMA: opportunities for repeatability, how to incorporate the seven MMC categolies • Set up the responsibility Matrix	-
2. Concept Design	• Concept: cost plan, construction, sustainability, plan for use, health and safety strategies • Strategic engineering: floor to floor heights, space requirements, spans, foundation design • Develop DfMA content & digital library for stage 4	• Reduce time and costs due to simplified design and assembly
3. Spatial Coordination	• Update the construction strategy and the cost plan • Check the buildability: manufacturing techniques, tolerances etc.	• Use as similar materials as possible and reduce time with fewer manufacture processes and simplified jointing • Minimize precast component types and connector types, and reduce time and cost with simplified design, manufacture, assembly, repair and maintenance • Reduce purchasing lead time and costs • Use as environmentally friendly materials as possible and reduce harm to the environment
4. Technical Design	• Consider how DfMA impacts on building systems • Develop the DfMA components more accurately • Consider manufacturing and assembly risks	• Minimize the use of fragile parts and reduce costs due to fewer part failures, and easier handling and assembly • Improve assembly efficiency, quality and security • Reduce time and costs when assembling
5. Manufacturing · Construction	• Update the construction strategy(+logistics plan) • Monitor quality of offsite manufacturing	• Do not over-specify tolerances or surface finish and reduce costs with easier manufacture • Reduce time and costs by eliminating complex fixtures and avoiding non-value adding manual effort
6. Handover	• Provide feedback on defects and DfMA process for future projects	• Avoid unnecessary re-work and reduce time and costs
7. Use	• Monitor the performance of standardised components • Provide feedback for reuse and recycling at the end of the building	• Consider configuration management techniques to update digital asset information and use of digital twin and smart BD technologies

Source: * Summarized with reference to "DfMA overlay to the RIBA plan of work (2nd edition, 2021)"
** Summarized with reference to "Lu (2020); Swift and Brown (2013); Bogue (2012); Emmatty and Sarmah (2012)"

이로써 비스포크(Bespoke) 즉 소비자 요구에 맞춘 모델을 대량 생산 방식과 같이 시간과 비용을 줄여 생산효율성을 향상 시킬 수 있다.

2.2 재난지원 주택에서 DfMA 계획 전략

일반 주택과는 달리 재난 주택의 경우 중요하게 고려되어야 하는 부분이 제작 및 설치속도, 이동 용이성, 유지관리 용이성이다. 이지은 외(2022)에서는 이외에도 장기 사용과 용도전환의 필요성을 사업성 분석을 통해 주장했으며 재활용성, 평면 유형 확장성, 주택 품질을 고려요소로 제시했다.

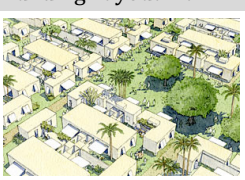
대규모 재난 발생으로 진행된 다수의 프로젝트가 있지만, 정해진 크기의 단위 공간으로 공간의 가변성 및 확장성을 만들어 수요에 대응한 사례를 비교하여 분석하였다. 즉, Table 1에서 제시한 DfMA의 장점을 갖고 있는 사례를 수집하였으며, 재난 주택과 규모가 비슷하고 이동성이 있는 주택의 사례를 함께 조사하여 4가지 사례에 대해 분석하였다.

첫째, 두아니(Duany)가 계획한 아이티 지진의 이재민을 위한 주택으로 , 1인 가구 및 확장형 평면을 Table 2와 같이 제시하였다. 확장형 평면은 장변을 연결해 블록을 만드는 방식으로 제시하고, 1인 가구의 주택은 중정을 가운데 두고 ㅁ자형으로 배치했다. Table 2와 같이 배치한 이유는 영구적인 주택이 아니어도 단지를 구성하고 마을과 같이 배치하여 정신적 안정감과 소통을 촉진하여 재해에 대한 트라우마를 완화하는 것을 의도 했다. 2017년 11월 15일에 발생한 포항 지진에 의해서도 심리적으로 고위험군이 2017년 11월 30일 기준 전체 9.7%가 불안감 등의 증세가 있으며 전체 이재민 8,138명 중 1.7% 약 125명이 정신과 치료를 받은 것으로 나타났다(포항시장, 2019).

둘째, 주택의 전용면적을 확장한 사례로, 오나가와(Onagawa)의 지진으로 발생한 이재민을 위해 야구장에 공동주택 형태로 재난지원 주택을 공급한 사례가 있다. 재난의 규모는 큰 데 주변에 가용용지가 없어 야구장을 활용해 가급적 많은 세대를 수용하는 계획을 하여 3층의 구호주택을 시공하였다. 2.44m×6.1m 장변을 붙여 확장하여 3가지 타입의 평면을 공급하였다. 각각의 평면은 Table 3의 상단과 같이 전용면적이 22.5m^2, 30m^2, 45m^{2}이며, 수용하는 가구원수에 따라 규모를 다르게 공급할 수 있다.

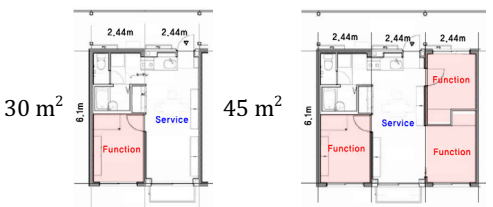
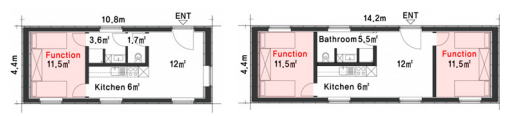
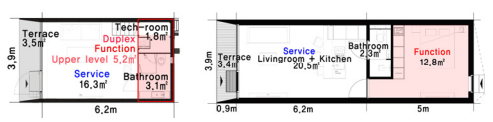
셋째, Table 3 중간의 독일 위넨든(Winnenden)

Table 2. Design to Rebuild Haiti by Andrés Duany

Building Layout Plan 1*	Building Layout Plan 2**
	

Source: * ArchDaily (March 4, 2010), “Shelter for Haiti”
** Architectural Record (March 31, 2010), “Andrés Duany hopes to Build Prefab Houses in Haiti”

Table 3. Area Expansion Case of Relocatable Housing

Onagawa House (JP, 2011)*

Aktiv-Haus (GE, 2016)**

KODA (Estonia, 2019)***


Source: * Shigeru Ban (2012)
** SVEN (2017)
*** KODA (2022)

시의 시리아 난민 지원 주택(Aktiv-Haus)의 경우에는 단변을 확장하는 방식으로 두 가지 타입의 평면을 계획했다. 공간을 넓히기 위해 방을 하나 더 붙여 시공했다. 넷째, Table 3 하단의 제품처럼 판매하는 '에스토니아 코다(Koda)' 주택의 경우에도 이와 유사하게 단변의 길이를 확장하는 방식으로 모델을 확장했다.

Table 3의 모든 사례가 중심 공간 즉 서비스(Service) 공간 주변에 침실과 같은 기능(Function) 공간을 덧붙여 수요에 대응하는 방식으로 계획했다. 모두 완성된 제품처럼 공장에서 외장재까지 시공하여 이동하는 방식을 갖는 주택이다. 모든 사례가 골조는 달라도 건식화 된 공법을 활용했으며 일반적인 공법에 비해 제조 및 조립에 소요되는 시간과 비용을 최소화했다. 그리고 고객의 취향과 필요에 맞게 공간 유닛을 조합하여 주택을 제작하는 비스포크(Bespoke)디자인이 적용되었다. 본 연구의 계획안은 이러한 계획 방식을 참조하여 설계하였다.

3. 대량 생산 및 운반을 고려한 건축계획

3.1 대량 생산 및 운반을 고려한 모듈러주택 평면 및 배치계획

Table 1에서 제시한 DfMA설계를 적용하기 위해서는 필수적으로 건축가, 엔지니어, 제조업자 및 시공업자를 포함한 DfMA 지향적인 팀을 구성해야 한다. 이들은 제조 및 조립의 용이성을 위해 해결해야 할 디자인 문제를 공유하고 DfMA원칙을 사용하여 건물 디자인을 최적화 해야 한다. DfMA방식이 현재 건설업의 문제를 해결할 수 있는 가능성을 갖고 있지만, 이해 관계자에게 익숙한 기존의 설계, 생산, 건설방식이 지배적이고, 새로운 프로세스를 시도하고 적응하는 과정이 필요하기 때문에 이러한 방식이 적용된 사례가 매우 적다. DfMA는 BIM(Building Information Modeling), VDC(Virtual Design and Construction), MiC(Modular Integrated Construction), OSC(Off-Site Construction), IoT(Internet of Things) 및 스마트건설과 같은 다양한 도구와 기술을 활용하며 발전할 수 있다. 이러한 기술을 프로젝트에 도입하는 전략이 매우 중요하며, 본 연구에서는 평면의 구조와 생산효율성 및 운반용이성을 최우선으로 고려하여 평면 및 배치계획을 결정하고, 관련 DfMA 장점을 제작 및 시공계획에 반영했다.

재난지원 주택의 경우 가구원수가 1인 가구부터 4인 가구까지 다양하지만 국내에서 현재 공급하고 있는 '임시주거용 조립주택'의 경우 약 26m^{2}면적의 1~2인 사용하기 적합한 모듈이 공급되고 있으며(국토교통부, 2011), 가구원수가 많아 넓은 주택이 필요한 경우 침실 1개와 거실 및 주방이 포함된 동일한 2개 모듈을 공급한다. 이러한 방식은 동일한 유형의 반복되는 작업을 수행하여 생산성을 높일 수 있지만, 침실의 수와 면적 증축을 위해 거실 및 주방을 함께 공급해야 한다. 그러나 본 연구에서는 가구원수에 따라 주택 모델을 확장하는 방안을 평면과 배치 계획안으로 제안코자 한다.

본 연구에서 제시하는 계획안은 가구원 수가 증가할 경우 주택 두 동을 연접하여 한 세대로 구성하는 방식 보다는 별동의 방을 추가로 인접 배치하여 활용하는 방안을 제시했다. 이유는 파손 우려가 있는 부분을 줄여 하자를 줄이고 접합부의 형태와 가짓수를 줄여 생산효율성을 높이고자 했기 때문이다. 그리고 주택 공급의 융통성을 극대화 하고자 했기 때문이다.

계획안은 Fig. 1과 같이 크게 세 부분으로 구성했다. 방을 구성하는 별도의 기능모듈, 주방과 화장실 등 집의 핵심적인 서비스를 담당하는 모듈, 그리고 전면부의 디자인을 결정하고 출입구를 두는 전이공간모듈로 계획했다. 기능(Function) 모듈과 서비스(Service) 모듈은 공장에서 각각의 모듈로 제작하고 전이(Front) 공간 모듈은 지붕과 날개벽만 제작하여

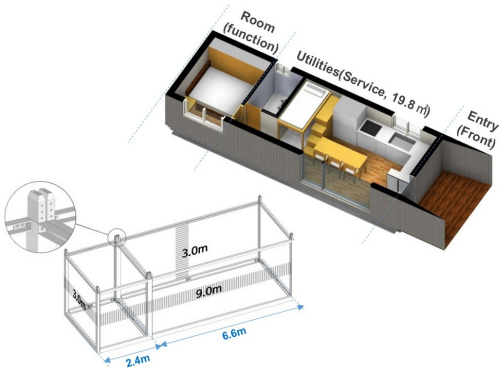
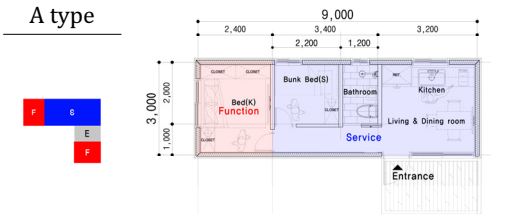
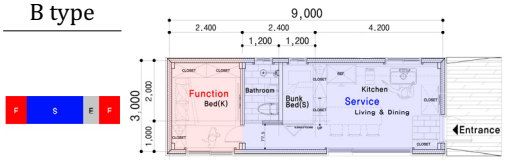


Fig. 1. Design of Modular House
Source: Lee et al. (2022) (in Korean)

Table 4. Alternative Floor Plan and Expansion Options

Expansion	Plan
A type	
B type	

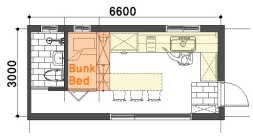
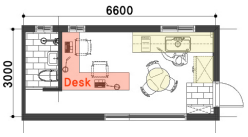
Source: Lee et al. (2022) (in Korean)

결합할 수 있도록 계획했다.

Table 4와 같이 출입구의 계획에 따라 증축과 배치 방식이 달라질 수 있다. 출입 부분은 전이 공간으로 활용하여 별동의 방, 창고 또는 추가 공간을 붙일 수 있다. 출입구 위치에 따라 일자형 또는 병렬형 배치가 될 수 있다. A타입과 B타입의 출입구 계획은 평면 전체 구조를 바꾸는 중요한 계획이다. 그러므로 서비스 모듈도 출입구의 방향에 따라 선택할 수 있도록 최소 2가지 모듈을 계획하는 것이 다양성을 확대할 수 있다.

동일한 구조 모듈 내에서도 Table 5와 같이 가구

Table 5. Plan Alternatives Depending on Furniture Layouts

B-1 Type	B-2 Type
	

Source: Lee et al. (2022) (in Korean)

배치만 바꿔 다른 레이아웃을 만들 수 있다. B타입 평면의 3m×6.6m 서비스 모듈 내에서도 B-1과 B-2와 같이 다른 모델이 만들어질 수 있다. B-1은 가족 구성원이 3인 이상일 경우 2층 침대를 활용하여 침대의 개수를 늘린 계획이고, B-2는 1~2인이 침실을 공유하고, 서비스모듈은 취침 외의 일상생활을 위한 공간으로 계획했다.

이러한 계획으로 현재 '임시주거용 조립주택'의 계획안과 같은 방식을 개선할 경우 서비스 모듈 만 농막 등으로 매각하는 것도 용이하다. 이유는 20m^2 미만인 경우 「농지법 시행규칙」 제 3조의2에 의거 '농막'으로 인정받아 건축신고로 축조 가능하다(농림축산식품부, 2022).

재난지원 주택의 경우 불특정 다수가 거주하기 때문에 수요를 융통성 있게 수용하며 이동성 및 재활용성을 갖추고 있는 것이 중요하다. 이재민들은 통상 기존 거주지 부근에 임시 주택을 마련하는 것을 선호한다. 그리고 이재민에게 제공되는 주택의 경우 Table 2의 사례에서 나타난 바와 같이 커뮤니티 형성이 트라우마를 극복하는데 매우 중요하다. 이러한 이유로 주택의 형태는 동일하더라도 지역의 여건과 수요에 맞춰 융통성 있게 배치계획을 결정한 후 효율적인 양중 계획을 세워 이동하고 설치해야 한다. 즉 DfMA 설계 방식으로 모델을 단순화하고 조합의 방식으로 수요에 맞춰 공급할 수 있다. 그리고 내부의 구성요소, 예를 들면 가구 등도 규격품으로 바로 구매할 수 있도록 제작해야 하지만, 본 연구에서 내

부 요소의 표준화 설계에 대해서는 연구범위에서 제외하였다.

2.2절에서 설명한 배치계획 사례들은 공간 유닛(Unit)을 연접하여 실내 공간을 확장한 형태이지만, 본 연구에서는 필요한 개별 공간을 별동으로 제작한 후 조화롭게 배치하는 방식을 고려했다. 이러한 배치계획은 정형화된 원칙없이 분산 배치할 수 있으며 사용자의 요구에 맞춰 임대하여 사용할 수 있다. 이와 유사한 배치계획 및 임대 운영사례는 Table 6의 니시자와 류에(Nishizawa Ryue)가 일본에 설계한 모리야마(Moriyama) 주택이며, 3세대가 필요한 공간만큼 임대하도록 되어 있다. 이러한 디자인은 공용 공간과 사적 공간 사이의 경계를 약하게 하여 이웃과의 사회적 연대감을 강화할 수 있다. 본 연구의 유대감 강화형(Strengthening bonds) 배치계획도 Table 7 상단과 같이 중정을 중심으로 소그룹을 형성하여 정신적인 안정감과 소통을 촉진할 수 있도록 계획했다. 그리고 Table 7 하단과 같이 부정형 대지에 방향을 통일하여 배치할 경우 사생활이 좀더 보호되는(Enhancing privacy) 방법으로 평시 숙박시설로 활용하는데 유리할 수 있다. 이와 같이 동일한 주택 모듈로 배치 계획에 따라 다른 목적을 달성할 수 있다.

Table 6. Moriyama House Site Plan Example

Plan	Photo

Source: Architecturaviva (2022)

Table 7. Layout Plan of Modular Housing

Strengthening Bonds	
Enhancing Privacy	

Source: Lee et al. (2022) (in Korean)

4. DfMA를 적용한 모듈러주택 시공계획

본 연구에서 제안하는 재난지원을 위한 모듈러주택 모델은 생산효율성 극대화를 위해 제작 용이성 및 수작업을 최소화하는 건식 공법을 활용했다. 이러한 DfMA설계로 제품 설계부터 최소한의 시간 및 비용으로 품질 저하 없이 주택을 생산할 수 있다. DfMA설계를 적용하기 위해 다음과 같은 기준이 고려되었다. (1) 부품수의 최소화 (2) 생산과정의 간소화와 부품간 조립의 용이성 (3) 재료의 생산부터 폐기까지 친환경성과 균질성 (4) 교체 용이하도록 규격화 및 모듈화된 자재 사용

먼저 구조 제작은 Table 8과 같은 방식으로 기초모듈, 서비스 모듈, 기능 모듈 각각을 철골조로 제작하여 볼트 접합하는 방식으로 계획했다. 다양한 단면의 골조가 가능하지만 본 연구에서 기둥은 각형강관, 보는 C형강을 사용하여 기둥 측면에 보를 접합하는 것으로 제안했다. Table 8과 같은 시스템은 이지은(2021)에서 제안한 구조 방식과 동일하다. 구조

Table 8. Concept of Steel Structure Assembly

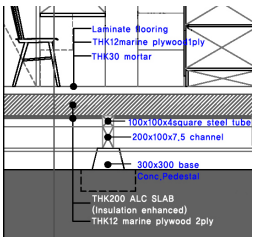
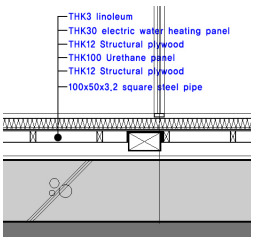
The 1st Phase	The 2nd Phase

Source: Lee (2021); Lee et al. (2022) (in Korean)

적인 안정성과 점검을 고려했을 때 강도가 약한 스크류 접합은 배제하고 볼트 접합 또는 용접으로 각 부재를 연결시킨 후 각형강관을 기둥으로 하고 보는 C형강으로 하는 것을 선택했다. 각각의 접합 방식을 비교하면 일반적인 모듈러주택의 경우 부재간의 접합은 용접 방식이지만 세심히 신경 쓰지 않으면 부재 변형과 오차가 클 수 있다. 볼트 접합은 균질한 품질로 제작 가능하고, 자동화 생산을 고려하면 위치에 맞춰 고정하는 방식은 기계로 반복하는 것이 가능한 장점이 있지만 볼트 체결 부분에 요철이 생기는 단점이 있다. 장변이 9m모듈인 경우 가새(bracing)이 필요하지만 6m로 분절할 경우 가새가 불필요하여 장변을 연접할 경우 공간 확장이 용이하다. 다만 접합부가 증가하므로 건축물 이용 방식 또는 생산 여건에 따라 분절 또는 하나로 제작하는 합리적인 선택이 필요하다.

둘째 모듈러주택의 바닥판은 일반적으로 데크플레이트를 깔고 콘크리트를 타설하는 방식으로 제작하지만, 이재민을 위해 다량의 주택을 신속하게 제작하기 위해서는 규격화 및 모듈화된 재료를 사용하는 건식공법을 활용하는 것이 용이하다. 건식 바닥 패널로 철골조에 적합한 방식으로 할로우 코어(Hollow core)슬래브 또는 AAC블럭(Autoclaved Aerated Concrete)을 고려할 수 있다. 할로우 코어 슬래브의 경우 콘크리트에 구멍을 내서 경량화한 자재이며 구멍의 크기 등에 따라 무게가 달라지지만 철근 콘크리트의 단위 중량이 2,400kg/m^{3}인데 반해 AAC블럭은 500~900kg/m^{3}정도로 가볍다. 이에 본 연구에서는 Table 9 왼쪽과 같이 AAC블럭을 계획안에 적용했으며, 단열 및 방수 성능이 일체화 되어 있고 공장에서 자동화 된 방식으로 대량 생산되는 자재인 것도 고려했다. 그리고 규석 분말(53%), 시멘트(29%), 생석회(13%), 석고(5%)를 주 원료로 생산하여 생산시 발생하는 잔여 자재를 다시 재활용하고 환경 파괴를 최소화하는 특성도 고려했다. 일반적으로 모듈러주택의 경우 바닥 무게가 가장 많은 부분을 차지하며, 3m×9m×3m 정도의 상자 형태가 30톤 가량 소요된다. 이에 반해 AAC블럭을 사용한 모듈러주택은 약 12톤 정도로 바닥 무게를 크게 줄일 수 있고 보다 간단한 양중장비로 주택을 이동할 수 있다. 이와 같이 이동성이 필요한 주택은 무게를 저감하면, 운반과정에서 사용되는 양중 장비도 간단해지고 트럭에 적재하여 이동하는 것도 용이해지며, 생산 중 배출되는 온실 가스도 줄일 수 있다. 행정안전부·국립재난연구원(2023)에서 제시한 '임시주거용 조립주택'의 바닥도 Table 9 오른쪽과 같이 콘크리트가 아닌 구조용 합판 즉 패널 형태의 자재로 계획안을 제시하였으며, 콘크리트보다 가벼운 자재이다.

Table 9. Floor Section Comparison

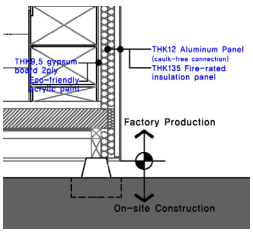
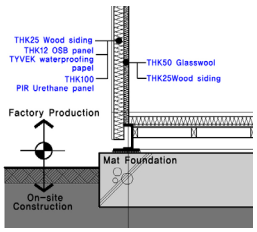
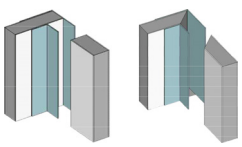
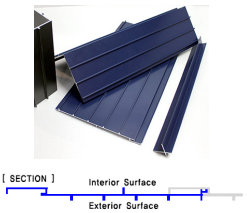
Section of this study*	Prefabricated housing for temporary housing**
	

Source: * Lee et al. (2022) (in Korean)
** Ministry of the Interior and Safety·National Disaster Management Research Institute (2022) (in Korean)

박상현 외(2018)에서 기존 임시 거주용 조립주택의 경우 바닥의 울림에 대한 불만이 제기된 것을 고려하여 본 연구에서 제시하는 계획안은 보행감을 개선하기 위해 AAC블럭을 적용했다.

셋째 바닥 및 벽의 다양한 요구 성능을 갖는 마감재를 포함한 패널을 가급적 일체화하거나 일체화된 패널 형태로 선제작하여 벽에 부착하는 방식으로 제안했다. 이러한 벽에 설비 배관도 부착하여 벽과 같이 설치하도록 고려했다. 자재와 인력은 특정 위치에 고정되고 대차 등을 통해 모듈이 이동되면서 생산되는 방식을 고려했다. 내·외장재도 단열·차음 및

Table 10. Exterior Section Comparison

Section of this study*	Prefabricated housing for temporary housing**
	
Assembly of fire-rated panels utilizing profiles***	Aluminun panel caulk-free connection****
	

Source: * Lee et al. (2022) (in Korean)
** Ministry of the Interior and Safety·National Disaster Management Research Institute (2022) (in Korean)
*** Chungbuk University Industry-Academia Cooperation Office (2019) (in Korean)
**** Mega Panel (2020) (in Korean)

방수성능을 갖는 패널에 일체화시켜 제작공정을 단순화하도록 고려했다. DfMA에 의한 제작공정 단순화는 부재 개수 및 접합부를 최소화 하여 제작 시간 및 비용을 낮출 수 있다. 그리고 오차 관리를 해야 하는 부재의 개수가 감소하므로 오차 및 접합부 처리가 비교적 간단해진다. 벽체간 결합은 프로파일(Profile)을 사이에 두고 끼워서 스크류로 결합하는 것을 계획했다. Table 10 하단과 같은 프로파일 사용 결합 방식은 충북대학교 산학협력단(2019)에서 복합 패널로 벽식 구조 재난 대응 주택을 만드는 방법을 제시할 때 사용된 방식이다. 이와 같이 접합부 부품의 종류를 최소화 하고, 생산, 조립, 유지관리를 고려하여 접합 방식을 결정하는 것이 중요하다.

Table 10 상단 왼쪽과 같이 본 연구 계획안의 벽체는 내구성이 강하고 오염성이 적고 유지관리가 용이한 성능 등을 고려하여 알루미늄 압축패널과 같은 금속재를 외장재로 적용했다. 그리고 코킹(Caulking) 사용 없이 끼워 맞춘 후 스크류로 고정하는 시공방식을 갖는 패널을 제안했다. 이러한 외장재는 방수성능을 갖기 때문에 단열재와 일체화된 비내력 벽체로 만들 수 있으며, 측면 풍압과 지진 하중에 대해 적절한 저항 성능을 갖추는 것을 고려했다. 내장재는 1회 사용 후 교체를 고려하여 석고보드에 아크릴 페인트 또는 벽지 마감으로 계획했다. 부품수 및 자재의 종류를 최소화하기 위해 지붕을 포함한 외장재는 동일한 재료로 계획했다. Table 10 상단 오른쪽은 「국토교통부 공고 제 2022-997호」에 제시된 '임시주거용 조립주택' 표준 모델이며, 시공방법은 상이해도 재료 구성은 유사하다.

5. 결 론

제조업 방식에 기반을 둔 DfMA 방법을 적용하여 높은 건설원가, 공사기간의 불확실성, 낮은 생산성 등의 문제를 개선할 수 있다. 본 연구는 이재민에게 공급되는 '임시주거용 조립주택'의 대량생산, 운반 그리고 모델 확장성을 개선하기 위해 DfMA를 활용한 모듈러주택 모델을 제안하였다. DfMA를 적용하면 건축자재를 합리적으로 사용하면서 거주자 수와 요구에 맞춘 여러 유형의 주택을 생산할 수 있는 시스템을 만들 수 있다.

제조 및 조립기반 설계 즉 DfMA방식을 적용한 계획안의 특징은 다음과 같다. 첫째, 모듈러주택의 고정 부분과 변동 부분을 구분, 즉 서비스(Service) 모듈과 기능(Function) 모듈로 구분하여 기능 모듈 부분은 증축 또는 축소하여 수요에 효율적으로 대응하고 매각 등의 관리에도 용이하도록 계획 하였다. 이러한 모듈러 디자인 적용으로 한 가지 형태의 주택이 아닌 몇 가지 종류의 주택을 효율적으로 생산할 수 있

으며, 중장기적 관점에서 지속적으로 발전시키기에도 용이하다. 둘째, 제품과 같이 이동하여 편리한 위치에 놓고 사용할 수 있도록 계획했다. 세대수, 대지형태, 거주자의 성향 등에 맞춰 공급면적 및 배치계획을 결정하고 거주 기간 동안 편안한 생활을 영위할 수 있도록 융통성 있게 임대하는 시스템을 제안했다. 동일한 주택 모델을 활용하지만, 세대의 프라이버시 강화, 유대감과 정신적 안정감 회복 등 주택단지의 지향점에 따라 배치는 크게 달라질 수 있도록 계획했다. 셋째, 생산효율성을 높일 수 있도록 건식 공법을 활용한 제작 계획을 제안했다. 공정을 단순화하고 최소화하는 방식으로 내외장재 및 바닥재를 계획하고, 가급적 가벼운 재료를 적용하여 운반과 양중을 편리하게 하도록 고려했다. 기초 구축을 위한 현장 공사를 최소화하는 방식으로 구조 계획을 하였으며, 주택이 해체 또는 분해되고 수명이 남은 자재 특히 구조부는 재활용 하는 것을 고려했다. 이와같이 DfMA를 적용한 제작 및 시공계획으로 생산, 조립 그리고 유지관리에 소요되는 시간과 비용을 줄일 수 있으며, 디자인에 맞게 부재간 조립 전략 및 주택 생산 전략을 결정하는 것이 성과를 높일 수 있다.

DfMA 즉, 제조 및 조립 기반의 디자인을 완성하기 위해 BIM, OSC, VDC, MiC 등과 같은 현재 발전하고 있는 건축기술을 활용할 수 있으나 시간과 비용 절감 및 품질 면에서 우수한 사례는 적다. DfMA의 편익을 극대화하기 위해서는 이해관계자들이 프로젝트에 적합한 수행 전략을 함께 마련하고, 건축 설계부터 시공까지 신기술을 적극 활용하는 새로운 업무방식에 적응하려는 노력이 필요하다.

참고문헌

1. 국토교통부(2011.5.27), “최저주거기준” 별표.
2. 김인한·김지영·이아진·최중식(2022), “건축주 요구조건 맞춤형 DfMA기반 모듈러 단독주택 설계안 제작을 위한 온라인 플랫폼 구축 방안 연구”, 「한국 CDE학회 논문집」, 27(3):269~279.
3. 농림축산식품부(2022.5.18.), “농지법 시행규칙” 제3조의2.
4. 박상현·이지향·권진석·손명환·이효정·임혜선·남동엽·정태웅·한소영(2018), 「재산피해자 모니터링 및 생활밀착형 구호정책·기술 개발(IV)」, 울산: 국립재난안전연구원.
5. 이지은(2021), “생산시스템을 고려한 모듈러주택의 가변형 평면계획 연구”, 「LHI저널」, 12(3): 67~78.
   Lee, J. E. (2021), “Flexible Unit Floor Plan of a Modular House Considering the Production System”, *Journal of Land, Housing, and Urban Affairs*, 12(3): 67~78. (in Korean)
6. 이지은·문지연·강기연·정권영·박서경(2022), 「재난지원을 위한 모듈러주택 사업모델 연구」, 대전: LHI 토지주택연구원.
   Lee, J. E., J. Y. Moon, K. Y. Kang, K. Y. Jung and S. K. Park (2022), *A Study of Business Model for Disaster Modular Housing*, Daejeon: Land&Housing Research Institute. (in Korean)
7. 충북대학교 산학협력단(2019), 「1톤 미만 경량구조 일체형 재난대응 다목적 주거시스템 기초 연구」, 경기도: 국토교통과학기술진흥원.
   Chungbuk University Industry-Academia Cooperation Office (2019), “Fundamental Research on Lightweight Integrated Disaster Response Multi-purpose Housing System for Less than 1-ton Weight Class”, Gyeonggi-do: Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement. (in Korean)
8. 포항시장(2019), 「1115지진백서」, 포항: 포항시.
9. 행정안전부·국립재난안전연구원(20222.7.29), “임시주거용 조립주택 실시설계 도면”, 국토교통부 공고 제2022-997호.
   Ministry of the Interior and Safety·National Disaster Management Research Institute, “Detail Design Drawing of Temporary Residential Prefabricated Housing”, Ministry of Land, Infrastructure and Transport Notice No. 2022-997.
10. Bogue, R. (2012), “Design for Manufacture and Assembly: Background, Capabilities and Applications”, *Assembly Automation*, 32(2): 112~118.
11. Emmatty, F. J. and S. P. Sarmah (2012), “Modular

Product Development through Platform-Based Design and DfMA", *Journal of Engineering Design*, 23(9): 696~714

12. Le Courbusier (1923), *Towards a New Architecture*, Melbourne: Hassell Street Press.
13. Lu, W., T. Tan, J. Xu, J. Wang, K. Chen, S. Gao, and F. Vue (2020), "Design for Manufacture and Assembly (DfMA) in Construction: The Old and The New", *Architectureal Engineering and Design Manangement*, 17(1-2): 77~91.
14. RIBA (2021), *DfMA Overlay to the RIBA Plan of Work*, London: Royal Institute of British Architects.
15. Swift, K. G. and N. J. Brown (2013), "Implementation Architectureal Engineering and Design Manangement Strategies for Design for Manufacture Methodologies", *Proceeding of the Institution of Machanical Engineers Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 217(6): 827~833.
16. 메가패널(Mega Panel), "상세도 & 시공 방법", 2020. 7.22. 읽음. http://www.megapanel.co.kr/character/?p_url=character_1.
Mega Panel, "Detail & Construction Method", Accessed July 22, 2020. http://www.megapanel.co.kr/character/ ?p_url=character_1. (in Korean)
17. ArchDaily, "Shelter for Haiti", Accessed July 17, 2022. http://archdaily.com/51578/shelter-for-haiti-andres-duany?ad-medium=gallery.
18. Architectural Record, "Andrés Duany hopes to Build Prefab Houses in Haiti", Accessed July 17, 2022. http://architecturalrecord.com/articles/5448-andrés-duany-hopes-to-build-prefab-houses-in-haiti.
19. Architecturaviva, "Moriyama House, Tokyo", Accessed July 17, 2022. http://architecturaviva.com/works/casa-moriyama-tokio-3.
20. KODA, "Koda loft extended", Accessed August 15, 2022. http://kodasema.com/us/koda-loft-extended.
21. Shigeru Ban, "Onagawa Container Temporary Housing", Accessed April 30, 2012. http://world-architects.com/en/architecture-news/reviews/onagawa-container-temporary-housing.
22. SVEN, "Aktivhaus:Mit Nachkaltigen Gagäuden gegen die Wohnungsnot", Accessed January 20, 2017. http://greengadgets.de/2017/01/20/activhaus-mit-nachhaltigen-gebaeuden-gegen-die-wohnungsnot .
23. The American Institute of Architects, "Design for Modular Construction: an Introduction for Architects", Assessed April 1, 2019, http://content.aia.org/sites/default/files/2019-03/Materials_Practice_Guide_Modular_Construction.pdf.
24. The United Nations, "Climate Change 2022: Impact, Adaptation and Vulnerability", Accessed February 28, 2022, http://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGⅡ_FullReport. pdf.

요 약

본 연구는 자연 재해 및 사회 재난 발생으로 주거권의 보장을 위한 임시주거 시설의 수요가 증가하는 추세에 대비하여 이재민에게 신속하게 양질의 주택을 공급코자 수행되었다. 대량 생산 및 운반에 효율적인 계획 모델을 만들기에 적합한 DfMA 설계 방식, 즉 제조 및 조립 기반 모듈러주택 모델을 제시하였으며, 특징은 다음 세 가지이다. 첫째, 모듈러주택을 서비스 모듈과 기능 모듈로 구분하여 고정성과 변동성을 발전시켜 다양성을 만들도록 계획했다. 둘째, 제품과 같이 이동하여 편리한 위치에 놓고 사용할 수 있도록 계획하여 대지 여건 및 수요에 맞춰 융통성 있는 배치계획을 하는 시스템을 제안 했다. 이러한 계획은 동일한 주택을 대량 생산하여 국내외의 다양한 위치와 사업에 활용할 수 있다. 셋째, 생산효율성을 높일 수 있도록 생산의 자동화를 염두해 두고 건식 공법으로 공정을 단순화하고 최소화하는 방식으로 계획했다. 이러한 DfMA설계방식 적용으로 제작 및 시공기간 단축, 공사비 절감, 주택 품질 제고를 도모하여 건설 생산성을 향상시킬 수 있다.

주제어: DfMA, 모듈러주택, 재난지원, 대량생산, 확장성