KJCEM 15. 1. 101~110
January 31, 2014

www.kicem.or.kr (pISSN 2005-6095)
http://dx.doi.org/10.6106/KJCEM.2014.15.1.101

모듈러건축 벽체마감 석고보드 손실 최적화 알고리즘 개발

이동민[1] · 진상윤*
[1]성균관대학교 U-City공학과

An Optimization Algorithm of Gypsum Board Loss for Wall Finishing in Modular Construction System

Lee, Dong-Min[1], Chin, Sangyoon*
[1]Department of U-City Design and Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract : The ministry of Land, Infrastructure and Transport announced that they launched the pilot project to offer Happy House built with modular construction as part of the major projects of incumbent government in 2013. The market size of modular construction is getting increasingly enlarged together with strong will of government. The major challenges that current modular construction encounters can be summed up as lack of standardization of material on the stage of design and fabrication. The portion of material costs in modular construction marks 16 to 17% higher than the existing other construction method, and account for 60 % of total construction cost, which is why material management is the most important factor. However, the imperfect standardization and specification on design causes high loss of materials on fabrication, which makes the construction wastes and total construction cost increasing in accordance with the increase of material costs. This study has been conducted to verify major modules by developing optimization algorithm on gypsum board material among wall finishing materials. It is expected that this paper contributes not only to eco-friendly construction by minimizing the waste factors of materials through these efforts, but also to removing high cost issues which had been recognized as a setback of current modular construction.

Keyword : Modular Building, Optimization, Loss, Algorithm, Gypsum Board

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

2013년 5월 국토교통부에서는 오류, 가좌, 목동 등 총 7곳의 행복주택 시범지구를 발표했다. 행복주택 프로젝트는 서민들에게 보다 저렴하게 임대주택을 공급하고자 하며, 총 10,050호 건설을 목표로 하고 있다(MLIT 2013). 이때 가장 핵심적인 사항이 저렴한 임대비용으로 공급하는 것인데, 이를 위해서는 일반 건설비에 비해 저가로 건설할 수 있는 시스템이 필요하다. 이에 총 7곳의 시범지구 중 가좌지구에 들어서는 650가구 중 5층 이하 원룸형 주택 20가구를 조립식 건축시스템인 모듈러 주택으로 시범 공급한 뒤 차츰 적용범위를 넓혀갈 계획이라고 밝혔다. 이처럼 공업화 건축의 일환인 모듈러건축 시스템 적용에 대한 정부의 적극적인 의지와 함께 모듈러건축 시장의 확대를 예상할 수 있다.

모듈러건축 시스템은 기존 현장중심의 습식공법에서 벗어나, 공장중심의 건식공법을 적용함으로써 일정한 품질확보와 공기단축을 꾀할 수 있을 뿐만 아니라, 현장에서 발생하는 건설폐기물을 획기적으로 줄여 친환경 건축에도 기여할 수 있다(RIST and POSCO 2004, KICT 2008, MBI 2010, McGraw_Hill 2011). 하지만 이는 현장 공정 최소화에 따른 현장 건설폐기물 발생의 절감이며, 공장제작 공정에서 발생하는 자재의 손실율 절감은 해당하지 않는다.

RIST and POSCO (2004)의 학교 증축공사 사례에 대한 공법별 공사비 비교자료에 의하면 모듈러 공법이 기존의 철골조나 스틸하우스에 비해 재료비의 비중이 16~17% 증가해, 전체 공사비의 절반이상을 차지한다고 한다. 이처럼 기존 공법에 비해 재료비의 비중이 큰 만큼 공장제작 시 발생하는 자재 손실율을 절감함으로서 폐자재 발생을 줄이고 전체 공사비를 절감하는 노력이 필요하다. 하지만 현재 모듈러 설계와 제작에 있어 자재 및 부품의 표준화 또는 규격화 미비가 주요 문제로 거론되는데(Lee et al. 2012), 이러한 문제로 인해 자재의 낭비적인 요소가 발생하게 되고, 결론적으로 자재 폐기물 발생이 증가하게 된다.

따라서 본 연구의 목적은 철골 유닛 모듈러 하우스 사례를 대상으로 벽체 마감자재 중 석고보드 자재의 손실율을 최소화 할 수 있는 최적화 알고리즘 개발하는 것이다. 개발하고자 하는 알고리즘은 자재의 규격화 또는 표준화를 목

* Corresponding author: Chin, Sangyoon, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-746, Korea
E-mail: schin@skku.edu
Received November 25, 2013: revised December 31, 2013 accepted January 3, 2014

적으로 설치패턴화에 근거한 최적화 알고리즘이다.

현재 일반적으로 석고보드 자재의 손실율은 7~15%정도로 업체별로 일관성 없이 적용되고 있는데(Lim 2002, Lim 2009), 석고보드 손실 최적화 알고리즘은 자재의 낭비적인 요소를 최소화하여 공장제작 단계의 건설폐기물 발생을 절감할 뿐만 아니라 자재비 저감을 통한 전체 공사비도 줄일 수 있을 것으로 기대한다. 이는 대량생산이라는 규모의 경제가 전제된다면 현 모듈러건축의 단점으로 거론되고 있는 경제성 측면의 문제를 보다 효과적으로 대응할 수 있을 것이라 기대한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

본 연구는 국내 대형 건설사인 A사에서 수행한 철골 유닛 모듈러 하우스 사례를 대상(Project H)으로 한다. 대상 사례에 적용된 주요 모듈 중 단위세대를 구성하는 모듈(Module 1, Module2)을 표준 모듈로 가정하고, 각각의 표준 모듈에 대한 벽체 마감 중 실내부에 설치되는 석고보드 자재를 주요 연구 대상으로 한다.

이는 실을 구성하는 부위를 크게 천정, 벽, 바닥으로 구분하고, 출입구가 위치한 부위를 남측면(South)으로 기준을 설정하여 실제 시공하는 경우처럼 마감자재를 끊어서 모델링함으로서 알 수 있었다. 모델링 결과 코너부위와 창 및 문과 같은 개구부가 있는 벽체부위(South, North)에서 자재의 절단이 가장 많이 발생하며, 서로 다른 규격의 자재가 필요함을 확인할 수 있다(Fig. 1). 즉, 천정이나 바닥보다는 벽체부위에 시공되는 자재에서 손실이 많이 발생하고, 이에 대한 자재의 손실율을 줄일 수 있는 방법이 필요함을 의미한다. 그래서 연구의 주요 부위를 벽체로 제한하고, 프로젝트마다 공통적으로 적용되는 내장재인 석고보드 자재로 연구범위를 한정한다.

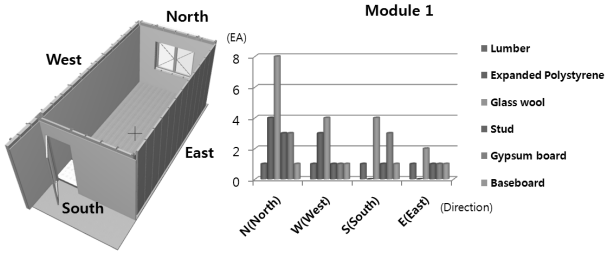


Fig. 1. Number of Different Size on the Wall Finish Models

또한 모듈러건축의 주요 공정을 크게 공장제작과 현장설치로 구분 할 수 있는데(Table 1), 본 연구의 주요 목표가 자재 손실율을 최소화 할 수 있는 설치패턴화에 근거한 알고리즘 개발인 점을 감안하여, 프로젝트별 가변성이 큰 현장설치 공종을 제외한 공장제작 공종을 중심으로 모델링 및 물량산출을 수행하고 연구하였다.

Table 1. Analysis of Project H's milestone

Plant-based		Site-based	
Works and Process	Selection	Works and Process	Selection
Steel structures	●	Site leveling	-
Slab (truss deck, ALC)	●	Foundation work	■
Dry heating panels	●	Scaffold work	-
Finishing materials (wall, ceiling)	●	Module Installation	■
Electric work	-	Rooftop parapet work	■
UBR (Unit Bathroom)	■	Exteriors work	■
Windows work	●	Electric work	-
Waterproof work	-	Steel stairs installation	■
Exteriors work	■	Wet work (waterproof, tile, etc.)	-
-	-	Interiors work (wall paper, molding, etc.)	-

■ : Modeling, ● : Modeling + Quantity take-off(QTO)

본 연구의 수행방법 및 프로세스는 Fig. 2와 같다. 대상 사례인 Project H의 단위세대를 구성하는 모듈의 마감상세에 따른 가시화와 물량산출의 정확성을 위해, 상용 BIM S/W인 G사의 Tool로 설계 및 물량산출을 수행하였다. 이후 전문가 인터뷰 및 최적화 알고리즘 개발의 기본 데이터 확보를 위해 석고보드 자재에 대한 규격 및 가격정보를 DB화하는 과정을 거쳤다. 또한, 기존의 전통적인 방식으로 물량산출시 적용되는 석고보드 자재의 할증율 및 규격선정 방법 도출을 위해 국내 대형 종합건설사 및 모듈러 전문업체 9개사의 견적담당자 9명을 대상으로 인터뷰를 수행하였다. 도출된 인터뷰 결과는 본 연구에서 제시되는 최적화 알고리즘의 비교 검증을 위한 대조군으로 활용한다. 최종적으로 설치패턴화에 근거한 최적화 알고리즘을 제시하고, 기존 전통적인 방식과의 손실율 및 비용비교를 통해 최적화 알고리즘의 유효성을 검증하는 것이 주요 연구 프로세스이다. 이때 제시하는 최적화 알고리즘은 설계 및 공장제작 단계의 pre-fabrication에 관한 것으로 철골구조의 비틀림 등에 의한 조립오차나 자재의 절단 및 설치 시 발생하는 시공오차는 없다고 가정한다.

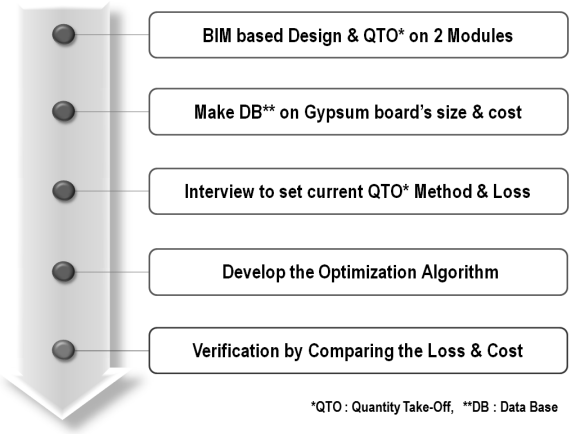


Fig. 2. Research Process and Method

2. 이론적 고찰

2.1 모듈러 건축 시스템

모듈러 건축 시스템이란 철골조 기반의 공업화 건축시스템으로 내/외장재, 창호, 기계 및 전기설비 등이 설치된 단위 모듈을 공장제작하여, 현장 운반 및 설치를 통해 건물을 완성하는 공법이다. 기존의 전통적인 현장 중심적 방식에 비해 공기를 약 50%이상 단축할 수 있다(RIST and POSCO 2004, Lee et al. 2011). 더불어 이동의 용이성, 우수한 단열성능 및 내진특성, 품질의 안정성까지 확보 가능한 시스템이다(Fig. 3). 하지만 공장생산 방식이기 때문에 초기투자비가 높아 비경제적이며, 아직까지는 수요가 많지 않아 대량생산을 위한 표준화 노력이 많지 않다고 볼 수 있다(Lee et al. 2011). 또한 서울 시내 아파트 분양 시세가 3.3m^{2}당 약 1,000만원인 점을 감안하면, 건축비의 경우 국내업체는 500만원 선, 일본업체는 900~1,000만원 선으로 다소 저렴하나 정부가 기대하는 300만원 수준으로 떨어뜨리기에는 대량생산과 재료 및 공법 등의 발전이 필요하다는 시각이다(Kim 2013).

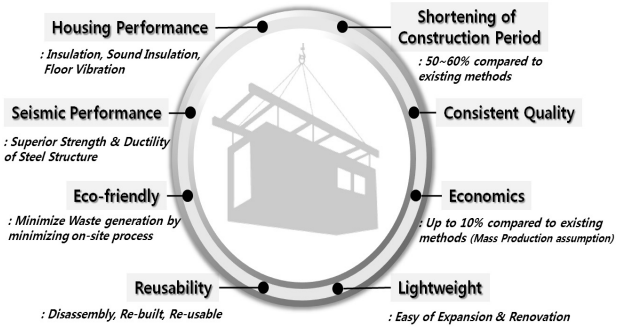


Fig. 3. Characters of Modular Construction System

2.2 석고보드 규격 및 단가

2.2.1 KS 규격

국가표준인증종합정보센터에 따르면, KS(Korean Industrial Standards)란, 산업표준화법에 의거하여 산업표준심의회의를 거쳐 기술표준원장이 고시함으로써 확정되는 국가표준이다. 이는 기본부문부터 정보부문까지 21개 부문으로 구성되며 크게 제품표준, 방법표준, 전달표준으로 분류할 수 있다(KATS 2012).

본 연구의 주요 대상이 되는 석고보드 제품에 관한 정보는 건설부문(F)의 표준번호 KS F 3504를 통해 알 수 있다. KS F 3504에서는 석고보드 제품의 적용범위, 종류 및 용도, 치수 및 허용오차 등에 관한 정보를 명시하고 있다. 특히, 이러한 정보들 중 본 연구에서 참고하고자 하는 정보는 석고보드의 두께 및 길이, 나비와 관련된 생산규격 정보이며, 이는 아래 Table 2를 통해 확인 할 수 있다.

Table 2. KS F 3504 Gypsum Board Size

(Unit : mm)

		Width		
		600	900	1200
Length	1800	-	●	-
	2400	●	●	●
	2700	-	●	-
	3000	-	●	-

Thickness : 9.5, 12.5, 15

2.2.2 제조사 규격 및 단가

KS에서 정의하는 석고보드 제품규격 정보는 일반적으로 생산 가능한 표준규격일 뿐, 실제 생산되어 활용되고 있는 규격이 아닐 수 있다. 그렇기 때문에 국내 주요 건자재 생산업체인 K사를 포함한 4개사의 실제 생산 및 판매 중인 석고보드 제품의 규격과 단가정보를 조사할 필요가 있었다. 석고보드 제품을 업체별, 종류별, 규격별로 DB화 하였으나, 본 연구에서 다루는 대상이 두께 12.5T의 일반 석고보드이므로 이에 대한 정보만 Table 3에 나타내었다. 단가정보는 생산업체의 제품 카탈로그 또는 현장 납품가를 기준으로 해당 업체별 평균값을 활용하였으며, 4개사 중 해당 규격을 생산하는 대상 업체수도 기재하였다. 조사 결과 대부분의 생산업체가 900x1800, 900x2400 규격을 공통적으로 생산하고 있었으며, 일부 대형 업체의 경우 KS F 3504에서 제시하는 표준규격을 모두 생산하고 있음을 알 수 있었다.

Table 3. Gypsum Board Size & Unit Price

(Unit : mm)

Size (Width x Leghth)	Unit Price (KRW)	Companies
900 x 1800	3,549.75	4
900 x 2400	4,670.67	3
900 x 2700	4,738.50	1
900 x 3000	5,265.00	1

Thickness : 12.5

2.3 알고리즘

알고리즘이란 프로그램 작성을 위한 예비단계로서 주어진 문제를 해결하는 작업 및 계산절차를 말한다. 기술방법은 순서도, 자연어, 프로그래밍언어, 의사언어(pseudo language) 등이 있다. 일반적으로 의사언어는 그 나라 언어(자연어)와 프로그래밍 언어를 혼합하여, 코딩하는 사람이 알기 쉽게 기술하는 언어를 말한다(Lee and Lee 2012).

본 연구에서 개발하고자 하는 최적화 알고리즘은 석고보드 자재의 설치패턴화에 기반하여, 연산과정을 순서도에 따라 단계적 절차로서 약속된 기호와 의사언어로 도식화하였다. 일반적으로 알고리즘 순서도 작성에 쓰이는 기호 중 본 연구에서 활용된 순서도의 기호와 의미는 Table 4와 같으며, 이는 국제표준화기구 ISO(International Standard Organization)의 권고안(97N90)에 근거하여 작성하였다.

Table 4. Definition of Flowchart Symbols

Symbol	Meaning	Symbol	Meaning
	Start and End of the Flowchart		Process Calculation or Data
	Array declaration and initial setup		Off-line process
	Print out		Symbol Connection and Show Flow line
	Compare and Determine		Annotation or Explanation
	Data Input or Output	-	-

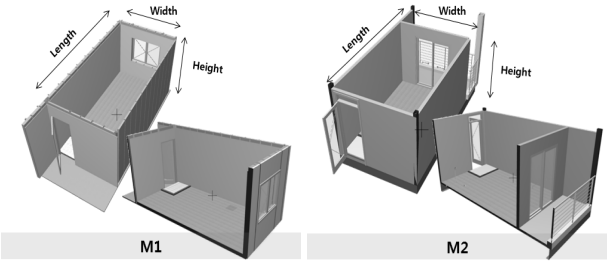
3. 최적화 알고리즘 개발

3.1 분석 대상 프로젝트

본 연구의 대상이 되는 프로젝트 정보는 Table 5와 같다. Project H의 단위세대를 구성하는 모듈은 크기 및 형태에 따라 M1와 M2 총 2가지로 구분된다. 전문가 인터뷰 결과, 단위 모듈에 대한 표준 모듈이라는 개념이 제작업체 또는 프로젝트마다 상이하거나 없기 때문에 본 연구에서는 이 2가지 모듈을 표준 모듈이라 가정한다.

또한 각각의 모듈에서 벽체를 구성하는 재료 중 본 연구에서 석고보드만 다루는 이유는 프로젝트별 가변성이 없이, 일반적으로 반드시 적용되는 재료가 석고보드와 글라스울인데, 글라스울의 경우에는 재료적 특성상 롤타입으로 반입되어 소요 크기만큼 절단해 작업하는 것으로서 자재 최적화를 수행할 의미가 크지 않다고 판단하여 제외한다.

Table 5. Project H's Information

Category	Contents
Building area	88.18 m²
Gross area	157.64 m²
Building size	Ground 2 floors
Maximum height	9.15 m
Size of unit modules : Width x Length x Height (Unit : mm)	(1) Module 1 (M1) : 3000 x 5750 x 3000 (2) Module 2 (M2) : 3000 x 5750 x 3000
	
Inside Installation Dimension of Wall Gypsum Board : Width x Length x Height (Unit : mm)	(1) Module 1 (M1) : 2800 x 5525 x 2500 (2) Module 2 (M2) : 2800 x 4375 x 2440 (Based on inside perspective dimension)
Wall finishing materials each module	▪ M1 and M2 have the same materials ▪ Cement siding* + EPS + Stud + Glasswool + Gypsum board + wall paper* * Cement siding and wall paper : works on site
Remark	▪ EPS and Stud are variable depending on projects. ▪ Glasswool is difficult to standardization because of material shape type and properties.

3.2 모델링 및 물량산출

마감상세에 따른 가시화와 물량산출의 정확성을 위해 기존의 2D CAD 도면을 바탕으로 상용 3D BIM SW 중 G사의 SW을 활용해 모델링 및 물량산출을 수행하였다(Fig. 4).

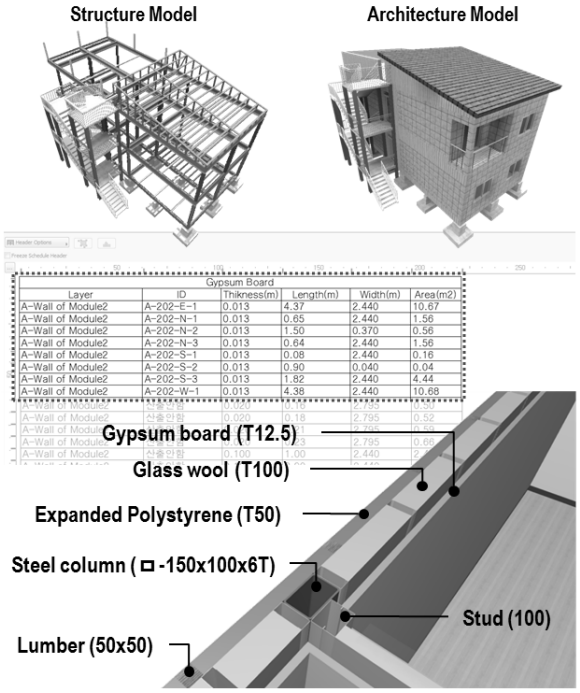


Fig. 4. 3D BIM Modeling & QTO on the Each Modules

3.3 전문가 인터뷰

3.3.1 인터뷰 개요

본 연구에서 제시되는 최적화 알고리즘을 통해, 석고보드 자재의 손실율이 얼마나 절감되는지를 검증하기 위한 기준 모델을 설정하고자 전문가 인터뷰를 수행하였다(Table 6).

Table 6. Overview of the Interview

Category	Contents
Title and purpose	Interview for investigating the Loss(%) and the size selection Method as QTO in the Modular Construction System
Respondent target / Persons	▪ General Contractor(G.C.) : 6 Companies / 6 persons ▪ Modular Company(M.C.) : 3 Companies / 3 persons
Period	SEP. 23. 2013 ~ OCT. 4. 2013
Main process and method	▪ Give the information about the Inside installation dimension of Wall Gypsum board by modules ▪ Respondent only write the Loss(%) and select the most appropriate gypsum board size for each module

기존 전통적인 방식으로 물량산출 시 적용하는 자재 할증율은 손실율 뿐만 아니라 날씨, 운반/적재 시 파손 등 외부 환경적 요인에 의한 할증도 포함한다. 하지만 본 연구에서는 모듈러건축이라는 외부 환경적 리스크요인이 최소화된 경우를 다루고자 하므로 할증율을 온전히 자재 손실에 따른 할증이라고 가정하였으며, 그 정의는 식(1)과 같다.

$$손실율(Loss\ Rate) = \frac{손실면적}{벽체면적} \times 100(\%) \quad (1)$$

손실면적($Loss\ Area$) : (벽체면적×할증율)－벽체면적
벽체면적($Wall\ Area$) : 개구부를 제외한 전체 벽체 면적

이때 할증율은 각 업체별로 산정비율이 다르기 때문에 전문가 인터뷰를 통해 평균 할증율 값을 도출하고, 이를 기준 모델의 손실율로 정의한 뒤 연구를 수행하였다.

3.3.2 인터뷰 결과

서로 다른 9개사 9명의 견적 및 모듈러 전문가를 대상으로 인터뷰를 수행한 결과, 기존 전통적 방식의 물량산출 시 모듈유형에 따른 석고보드 선정규격 및 할증율을 도출할 수 있었다. 규격선정은 모듈의 유형과 관계없이 900x1800 또는 900x2700 규격으로 일괄선정하고, 할증율은 각 업체별로 7~15%분포를 가지며, 평균적으로는 9.67%임을 알 수 있었다.(Table. 7) 이 결과에 따라 최적화 알고리즘 검증 단계에서 활용할 기준 모델의 손실율을 9.67%로 설정하였다.

Table 7. Results of the Interview

Respondents	Selection of size (Width x Length)		Extra Rate (%)
	M1	M2	
G.C. 1	900 x 2700	900 x 2700	7
G.C. 2	900 x 1800	900 x 1800	10
G.C. 3	900 x 1800	900 x 1800	12
G.C. 4	900 x 1800	900 x 1800	10
G.C. 5	900 x 1800	900 x 1800	12
G.C. 6	900 x 2700	900 x 2700	7
M.C. 1	900 x 1800	900 x 1800	15
M.C. 2	900 x 2700	900 x 2700	7
M.C. 3	900 x 2700	900 x 2700	7
Remark	• No special rules about the size selection • Select one size of the Gypsum board to take-off		Average : 9.67

3.4 벽체 마감자재 최적화 알고리즘 개발

3.4.1 알고리즘 해석모델 정의

본 연구에서 제시하는 최적화 알고리즘은 3차원 입면체상에 존재하는 실 내부 벽체 마감자재에 관한 것으로서, 자재 설치상에 발생하는 패턴을 분석하고 도출하기 위해 2차원 입면도를 수정하여 해석모델을 재정의 하였다(Fig. 5). 이는 최적화 알고리즘을 통해 도출하고자 하는 것이 일정한 패턴에 따라 손실면적을 최소화하는 석고보드의 총 수량이기 때문에 실제로 벽체 코너부위에서의 절단은 큰 의미가 없어 입면이 재정의 된 해석모델을 활용하였다.

석고보드 자재는 Fig. 5의 점선처럼 개구부 주변에서 수직방향으로 절단하여 설치된다고 가정한다. 또한 수직방향을 기준으로 볼 때, 개구부가 존재하지 않는 벽체는 파란색 면적인 A1, 개구부가 존재하는 벽체는 붉은색 면적인 A2로 구분하여 고려하였다. 이는 A1의 경우 벽체 길이(L)나 높이(1800+W)에만 영향을 받는 비교적 고정적인 면적이고, A2의 경우 개구부의 크기나 위치에 따라 추가적인 영향을 받아 상대적으로 가변적인 면적이기 때문에 두 유형의 면적에 대한 패턴을 달리 고려할 필요가 있었다.

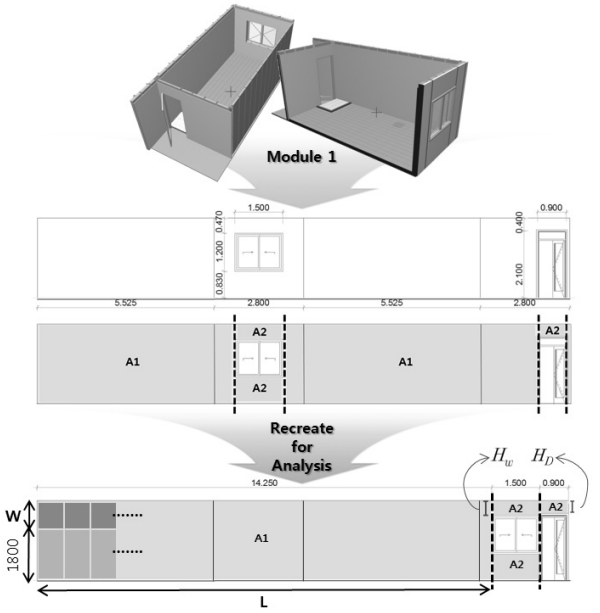


Fig. 5. Definition of Analytical Model of Optimization Algorithm

3.4.2 알고리즘 구성 식

Fig. 6의 최적화 알고리즘은 수행과정에 따라 크게 3단계로 구성된다. 1단계(Fig. 6의 STEP 1)는 개구부가 존재하지 않는 A1 면적에 대한 석고보드 설치패턴이다. 전문가 인터뷰 결과에 따르면, A1 면적의 경우 일반적으로 900x1800 규격의 석고보드를 길이방향으로 먼저 설치하고, Fig. 5의 W만큼 추가 설치한다고 한다. 이러한 설치패턴을 적용하려면 900x1800 규격의 석고보드 개수를 먼저 산정해야하는데, 이와 관련한 식은 식(2)과 같다.

$$\frac{L}{900} = N + \alpha \quad (2)$$

L : $A1$ 면적의 수평 길이
N : 900×1800규격 석고보드 소요매수(양의 정수)
α : 나머지($\alpha \geq 450$이면, $N+1$장 필요)

2단계(Fig. 6의 STEP 2)는 A1 면적에서 900x1800 규격이 설치된 이후 W 만큼의 수직 폭을 갖는 면적에 대한 설치패턴이다. 앞서 2.2장에서 제시된 석고보드 자재의 KS규격과 실제 시중에 납품되는 규격을 기준으로 할 때, 석고보드의 폭은 900으로 일정하고, 길이가 1800, 2400, 2700, 3000임을 알 수 있다. 이는 모든 길이 규격이 3으로 나누어진다는 것을 확인 할 수 있는데, 이 사실로부터 한 장의 석고보드를 3개로 절단하여 수평길이 900을 갖도록 설치하는 패턴을 설정하였다. 이와 관련한 식은 식(3), 식(4)과 같고, 내부 안목치수의 높이는 2300~2800mm 범위 내에 있다고 가정한다.

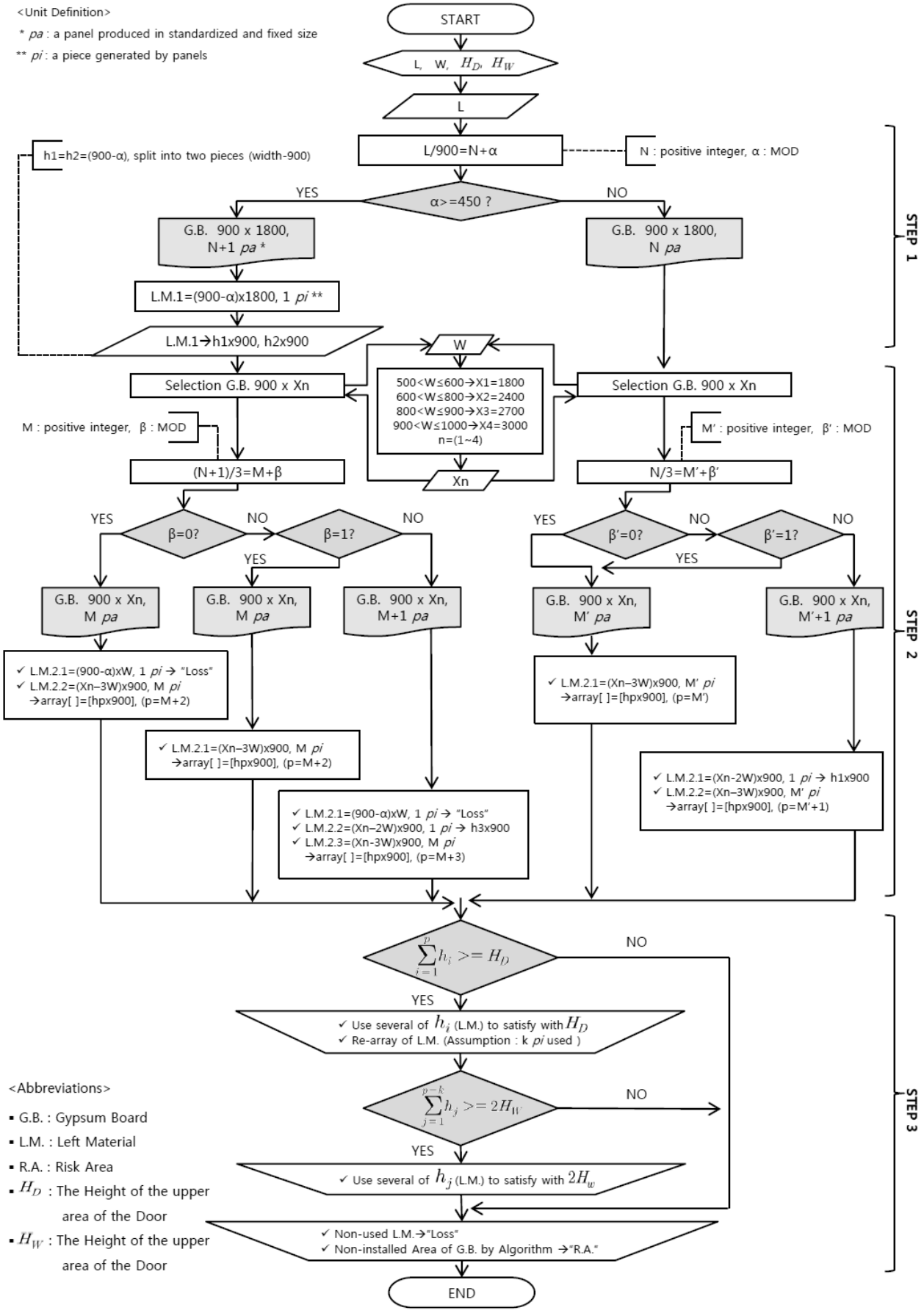


Fig. 6. Optimization Algorithm in Gypsum Board of Wall Finishing

$$\begin{aligned} 500 < W \leq 600 &\rightarrow X1 = 1800 \\ 600 < W \leq 800 &\rightarrow X2 = 2400 \\ 800 < W \leq 900 &\rightarrow X3 = 2700 \\ 900 < W \leq 1000 &\rightarrow X4 = 3000 \end{aligned} \quad (3)$$

W: (벽체높이 − 1800)
Xn: 900 × Xn 규격의 길이 값
n : 석고보드 규격 구분자(n: 1 ~ 4)

$$\frac{N+1}{3} = M + \beta \text{ or } \frac{N}{3} = M' + \beta' \quad (4)$$

M or M' : 900 × Xn 규격 석고보드 소요매수(양의 정수)
β or β' : 나머지(β = 2이면, M+1장 필요)

3단계(Fig. 6의 STEP 3)는 A2 면적에 대한 설치패턴 설정이다. A2 면적은 A1 면적과는 다르게 개구부의 형태에 따라 가변성이 많은 면적이다. 본 연구의 대상인 M1과 M2 모듈을 보자면, M2 모듈은 발코니가 있는 모듈이기 때문에 창이 바닥에서부터 설치되어, M1 모듈의 창과는 달리 창 하부에 석고보드를 설치할 소요면적이 발생하지 않는다. 그래서 A2 면적 중 고정적으로 발생하는 창과 문의 상단 면적에 대한 설치패턴을 설정하였다. 이 면적은 벽체의 높이에 따라 가변적이긴 하지만, 비교적 협소한 면적이기 때문에 A1 면적에 설치된 석고보드로부터 발생 할 수 있는 남은자재(L.M., Left Material)을 활용하는 패턴을 설정하였다. 이와 관련한 식은 식(5), 식(6)과 같다.

$$\sum_{i=1}^{p} h_i \geq H_D \quad (5)$$

H_D: *Door* 위 면적의 수직방향 길이(수평길이 900 일정)
h_i : $A1$ 면적에 설치 후 $L.M.$ (h_i × 900 규격)
p : h_i × 900 규격의 $L.M.$ 개수
i : $L.M.$ 구분자

$$\sum_{j=1}^{p-k} h_j \geq H_w \quad (6)$$

H_W: *Window* 위 면적의 수직방향 길이(수평길이 1500 일정)
h_j : 식(5) 과정 후 $L.M.$ (h_j × 900 규격)
k : 식(5) 과정에서 사용된 $L.M.$ 개수
j : $L.M.$ 구분자

식(2)부터 식(6)까지의 주요 과정을 통해 각 모듈의 실내부에 설치되는 석고보드 자재 손실율을 최소화 할 수 있는 최적화 알고리즘을 개발하였다. 하지만 최적화 알고리즘을 거쳐도 경우에 따라 A1 면적 중 석고보드가 설치되지 않은 면적이나, A2 면적 중에 창의 하단 부분은 일정한 패턴을 적용하기 어려운 면적이기 때문에 본 연구에서는 위험 면적 R.A.(Risk Area)라고 정의하였다. 이 R.A.는 작업자의 판단이나 상황에 따라 가변적인 경우라고 판단이 되므로 해당 면적은 기존의 전통적인 물량산출 방식과 동일한 할증율을 적용해 손실면적을 산정하고 검증 과정에 반영하도록 한다. 또한 각 단계에서 발생한 L.M. 중 폭이나 길이가 100mm 미만이라 더 이상 사용 불가능한 자재 또는 L.M.을 활용함에 있어 동일한 치수패턴인 900mm을 가지지 못한 자재는 폐자재로 간주하여, W.M.(Waste Material)로 정의하고, 이를 손실면적에 포함시켜 검증하였다.

3.5 최적화 알고리즘 검증

주요 대상이 되는 M1, M2에 대해 Fig. 6의 최적화 알고리즘을 적용하여 석고보드 자재의 규격별 소요수량과 손실면적(Loss Area)을 산출하고, 이에 따른 비용(Cost)까지 도출하였다(Table 8, Table9). 또한, 해당 결과를 기존의 전통적인 방식으로 산출된 값과 상대적 비교를 통해 최적화 알고리즘의 효과성을 검증하였다(Fig. 8).

검증결과 M1, M2 각각 손실면적은 31.95%, 25.65%씩 절감, 비용은 5.47%, 8.27%씩 절감되었다. 이때 손실면적 절감비율과 비용 절감비율의 큰 차이가 발생함을 알수 있는데, 이는 손실면적을 산정하는 대상의 차이에 기인한다.

다시 말해 Fig. 7의 M1에 대한 프로세스 비교와 같이 기존 전통적인 방식의 경우 개구부를 공제한 전체 벽체면적이 위험면적(R.A.)이 되어, 이 면적을 기준으로 손실면적을 산정한다. 하지만 최적화 알고리즘을 통해서는 석고보드가 설치될 전체 벽체면적에 석고보드의 규격 및 배치가 우선 설정되어, 기존의 전통적인 방식에 비해 R.A.가 최소화 된다. 이후 남은자재(L.M.), 폐자재(W.M.)의 합과 최소화된 R.A.에 대한 손실면적의 합이 최적화 알고리즘을 통한 전체 손실면적이 된다. 결국 두 방식간 손실면적 산정대상의 차이로 인해 손실면적 절감비율차가 커질 수 있었다.

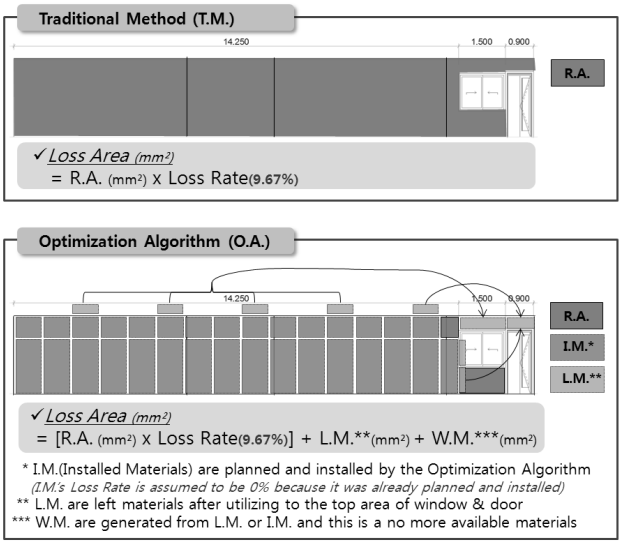


Fig. 7. Process Comparison of the T.M. and the O.A.

Table 8. Operation Process of the Optimization Algorithm and the Traditional Method

(Unit : mm)

Operation by Module Types			Variables						Derived Value			
			L	N, α	W	M, β (M', β')	H_D	H_W	Required Materials / Cut size for installation*	L.M.	W.M.	R.A.
M1	Optimization Algorithm (O.A.)	Step 1	14205	15, 750	-	-	-	-	900x1800-16pa** / -	150x900-2pi**	-	-
		Step 2	-	-	700	5, 1	-	-	900x2400-5pa / 900x700-10pi, 900x1000-5pi	300x900-5pi	-	750x700
		Step 3-①	-	-	-	-	400	-	150x900-1pi (L.M.), 300x900-1pi (L.M.)	-	50x900-1pi	-
		Step 3-②	-	-	-	-	-	470	300x900-4pi (L.M.)	-	150x300-4pi, 750x130-2pi	1500x830
		Sum	-						900x1800-16pa, 900x2400-5pa / 900x700-10pi, 900x1000-5pi	150x900-1pi,	50x900-1pi, 150x300-4pi, 750x150-2pi	750x700, 1500x830
		Result	• Required number of gypsum board : 900x1800-16pa, 900x2400-5pa • Required number of the 900x1800 gypsum board in the R.A.(Apply the Loss rate 9.67%) : 2pa • Loss Area (m^2) : L.M. + W.M. + (R.A. x 9.67%) = 0.135 + 0.420 + (1.770 x 1.0967) = 2.496									
	Traditional Method (T.M.)		• The wall area deducted the opening area : 37.935m^2 • The gypsum board area of 900x1800 size : 1.62m^2 • Required number of the 900x1800 gypsum board : 37.935 / 1.62 = 23.42pa • Required number of the 900x1800 gypsum board(Apply the Loss rate 9.67%) : 23.42 x 1.0967 = 25.68 → 26pa • Loss Area (m^2) : "The wall area deducted the opening area" x 9.67% = 37.935 x 0.0967 = 3.668									
M2	Optimization Algorithm (O.A.)	Step 1	11950	13, 250	-	-	-	-	900x1800-13pa / -	-	-	250x1800
		Step 2	-	-	640	4, 1	-	-	900x2400-4pa / 900x640-8pi, 900x1120-4pi	480x900-4pi	-	640x1150
		Step 3-①	-	-	-	-	340	-	480x900-1pi (L.M.)	140x900-1pi	-	-
		Step 3-②	-	-	-	-	-	370	480x900-2pi (L.M.)	-	150x480-2pi, 110x750-2pi	-
		Sum	-						900x1800-13pa, 900x2400-4pa / 900x640-8pi, 900x1120-4pi	480x900-1pi, 140x900-1pi,	150x480-2pi, 110x750-2pi	250x1800, 640x1150
		Result	• Required number of gypsum board : 900x1800-13pa, 900x2400-4pa • Required number of the 900x1800 gypsum board in the R.A.(Apply the Loss rate 9.67%) : 1pa • Loss Area (m^2) : L.M. + W.M. + (R.A. x 9.67%) = 0.867 + 0 + (1.186 x 0.0967) = 2.168									
	Traditional Method (T.M.)		• The wall area deducted the opening area : 30.124m^2 • The gypsum board area of 900x1800 size : 1.62m^2 • Required number of the 900x1800 gypsum board : 30.124 / 1.62 = 18.59pa • Required number of the 900x1800 gypsum board(Apply the Loss rate 9.67%) : 18.59 x 1.0967 = 20.39 → 21pa • Loss Area (m^2) : "The wall area deducted the opening area" x 9.67% = 30.124 x 0.0967 = 2.913									

* Cut size for installation : the actual cut size from Required Materials for installation
** Unit definition : (1) "pa" means a panel produced in standardized and fixed size (ex. 900x1800-1panel). (2) "pi" means a piece generated by panels.

Table 9. Results of the Verification

Module Type	Wall Area(m^2)	Method	Required Materials	LOSS			COST	
				Loss Area(m^2)	Loss Rate(%)*	Saving Rate(%)	Cost(KRW)**	Saving Rate(%)
M1	37.935	O.A.	900x1800-18pa, 900x2400-5pa	2.496	6.58	31.95	87,249	5.47
		T.M.	900x1800-26pa	3.668	9.67		92,294	
M2	30.124	O.A.	900x1800-14pa, 900x2400-4pa	2.168	7.19	25.65	68,379	8.27
		T.M.	900x1800-21pa	2.913	9.67		74,545	

* Loss Rate : Apply define of the Loss Rate of the Equation (1)
** Cost : Apply unit price by size of the Table 2

※ Saving Rate of the LOSS & COST mean the O.A. compared with the T.M.

이는 최적화 알고리즘을 통해 계획적인 요소가 많아져, 사전에 손실을 유발하는 부위(R.A.)를 최소화 할 수 있다는 의미지만, 이를 절대적인 자재 손실 절감량으로 판단하기에는 무리가 있다. 그래서 실제로 소요되는 자재와 관련된 비용을 비교해보았고, 이 비용절감 비율을 절대적인 손실율 절감량이라고 볼 수 있다. 결론적으로 최적화 알고리즘을 통해 벽체 석고보드 물량을 산출 시, 자재 손실면적 최소화에 따른 비용절감 및 손실율 절감효과가 기존의 전통적인 방식에 비해 약 5~8% 절감된다고 판단한다(Fig. 8).

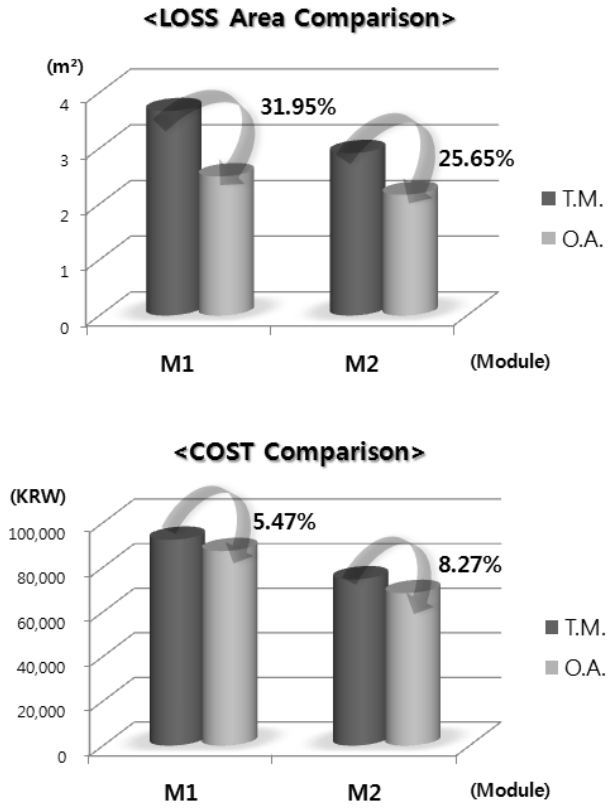


Fig. 8. Comparison on the Loss Area & Cost

4. 결론

본 연구에서는 모듈러건축이라는 특수성을 고려하여, 벽체 자재 중 석고보드 자재의 손실율을 최소화 할 수 있는 최적화 알고리즘의 개발과 검증에 관한 연구를 철골 유닛 모듈러 하우스 사례를 중심으로 다루었다. 대상 사례의 2가지 모듈에 최적화 알고리즘을 검증해 본 결과, 기존 전통적인 방식에 비해 손실면적 절감과 이에 따른 비용 절감에 있어 분명한 효과가 있음을 확인 할 수 있었다.

이때 적용한 최적화 알고리즘은 모듈의 실내부 안목치수를 기준으로 벽체의 길이 및 높이, 개구부 크기라는 변수에 따른 설치패턴화에 근거한다. 즉, 설치패턴화를 통해 손실면적을 최소화하는 최적의 석고보드 규격과 배치를 사전에 설정함으로서, 제작단계에서 발생하는 불필요한 자재의 낭비를 줄이고 폐기물 발생을 최소화하는 친환경 건설기술로 판단된다. 또한, 규모의 경제라는 대량생산이 전제 시 비용적인 측면에서도 효과적인 역할을 할 수 있음을 의미한다. 더불어 최적화 알고리즘을 통해 해당 모듈에 필요한 석고보드 자재의 커팅 및 설치정보까지 도출되므로, 이 정보를 BIM 설계정보와 연계하여 자재주문 시 석고보드 배치 및 석고보드 절단정보 자동화에 활용한다면 공장제작 단계의 조립 및 설치에 대한 작업시간을 효과적으로 단축할 수 있고, 전체 프로젝트 공기도 줄일 수 있는 전략으로 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

향후 모듈러건축 시스템의 활성화에 따른 표준화된 모듈이 개발되고 정의될 것으로 예상된다(Lee and Lim 2011). 이때 본 연구에서 검증된 최적화 알고리즘을 활용해, 자재 손실율을 최소화 할 수 있는 표준모듈을 개발하거나 이미 정의된 표준모듈을 대상으로 자재 손실율을 최소화하는 대안을 사전에 비교 및 도출할 수 있을 것이라 기대한다. 하지만 이 최적화 알고리즘은 시공단계에서 손실을 유발할 수 있는 요인에 대한 고려가 포함되지 않았기 때문에 실무 활용 시에는 숙련도, 현장여건 등을 고려하여 적용하는 것이 필요하다고 판단되며 시공단계 손실요인 분석 또한 추가 연구로서 가치 있을 것으로 기대된다.

또한 보다 다각적인 검토를 위해서는 본 연구에서 제한한 연구대상인 벽체 석고보드뿐만 아니라, 타 부위 및 타 자재의 손실율을 최소화 할 수 있는 최적화 알고리즘을 연구개발할 필요성이 있으며, 다양한 알고리즘을 개발하여 알고리즘 간의 상대적 비교를 통한 실질적인 검증 과정도 향후 연구로서 필요하다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부의 U-City 석·박사과정 지원사업으로 지원되었습니다.

References

Kim, M. J. (2013). "The House made in Plant-Modular House boom." Hankyung Magazine-Business-Industry, <http://magazine.hankyung.com> (OCT. 01, 2013)

Korea Institute of Construction Technology(KICT) (2008). “Study for Development of Resource Circulation Steel Frame Unit Modular Housing.”, Ministry of Land, Infrastructure and Transport.

Lee, G. K. and Lim, S. H. (2011). "A Study on Unit Modular Design Method of Urban-type Housing.", *Journal of the Korean Housing Association*, 22(5), pp. 101-110.

Lee, K. B., Kim, K. R., Shin, D. W., and Cha, H. S. (2011). "A Proposal for Optimizing Unit Modular System Process

to Improve Efficiency in Off-site Manufacture, Transportation and On-site Installation.", *Korean journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 12(6), pp. 14-21.

Lee, S. H. and Lee, S. K. (2012). Fundamental Algorithms for Creative Problem Solving Abilities, Jungil Publishing Co., Goyang-si, pp. 13-280.

Lee, Y. H., Lee, D. H., and Kim, K. T. (2012). "Consideration in the early stage of Designing the Unit Modular Building.", *Korean journal of Construction Engineering and Management*, KICEM, 13(6), pp. 133-142.

Lim, S. H., Park, K. S. and Lee, G. K. (2009). "A Study on the Standard Joint Material and Reference plane for the Standard of Construction in the Apartment- Joining Part between Gypsum board and Windows -.", *Journal of the Korean Housing Association*, 20(4), pp. 31-38.

Lim, S. H., Hwang, E. K. and Lee, K. H. (2002). "A Study on the Analysis of Construction Standardization Effect in Wall-slab Apartment which apply to the MC design method(Focus on Structure and gypsum board).", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 18(12), pp. 27-36.

Manufacturing Industry Standards Division, the Korean Agency for Technology and Standards (KATS) (2012) "Standard number - KS F 3504, Standard name - Gypsum Board", <http://www.standard.go.kr> (SEP. 15, 2013)

McGraw_Hill CONSTRUCTION (2011). "Prefabrication and Modularization : Increasing Productivity in the Construction Industry.", *SmartMarket Report*, 2011(10), pp. 21-40.

요약: 2013년 국토교통부에서는 현 정부의 주요 국정과제인 행복주택 사업의 일부를 모듈러건축 시스템으로 시범공급하겠다라고 밝혔다. 이처럼 모듈러 건축에 대한 정부의 적극적인 의지와 함께 모듈러 건축시장의 규모도 점차 확대되고 있다. 현재 모듈러건축의 주요 문제점으로 설계-제작단계에 있어 자재 및 부품의 표준화 또는 규격화 미비가 거론된다. 이때, 모듈러건축은 기존의 타공법에 비해 재료비의 비중이 16~17% 높은, 전체공사비의 60%를 차지 할 정도로 자재관리가 중요하다고 판단된다. 하지만, 설계상의 표준화 또는 규격화의 미비로 제작단계의 자재 손실율이 높아지게 되고, 이에 따른 건설폐기물 뿐만 아니라, 재료비 증가에 따른 전체 공사비도 증가하게 된다. 본 연구에서는 벽체 마감자재 중 석고보드 자재에 대한 손실율을 최소화 할 수 있는 최적화 알고리즘을 개발하여 대상 사례의 주요 모듈에 대해 검증하고자 한다. 이를 통해, 자재의 낭비적인 요소를 최소화하여 친환경 건축에 기여할 뿐만 아니라, 현 모듈러건축의 단점으로 인지되고 있는 고비용의 경제성 문제를 해소하는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

키워드 : 모듈러 건축, 최적화, 손실율, 알고리즘, 석고보드