

## 시공단계 구조해석을 통한 적층형 모듈러주택의 시공조건 검토

### A Study on Construction Condition of Modular System by Structural Analysis of Construction Stage

조민주<sup>1)</sup>  
Min-Joo Jo

김종성<sup>2)</sup>  
Jong-Sung Kim

유성용<sup>3)</sup>  
Seong-Yong Yu

최기봉<sup>4)\*</sup>  
Ki-Bong Choi

#### Abstract

At present, the actual condition is that Korean modular structures are limited to a low rise detached house and military barracks. And there is no standardized structural design method of stacked modular structure. Accordingly, in general, they don't review impact force in the stage of stacking and installing a module, the effect which wind load has on a structure in the stage of lifting, and inertial force occurring in the stage of lifting or transporting a module in the process of constructing a structure.

Therefore, this study investigated the construction method of modular system to be studied in stages, and decided on the position to which load was applied and boundary condition in structural analysis at each construction stage. Besides, inertial force according to each speed was calculated in the lifting and wheeled transport of module. And we calculated impact load according to lifting speed in module stacking and installation work and wind load due to instantaneous wind speed in the installation work by lifting. On the basis of the suggested method, in the modular system to be studied, it carried out review of structure by changing determining conditions of load being applied by construction stage, such as in the stage of lifting, in the stage of transport, and in the stage of installation, and drew construction conditions securing stability structurally.

Keywords : Test project, Modular system, Construction stage, Construction condition

#### 1. 서론

최근 우리사회의 인구구성 특징은 저출산 고령화 시대에 접어들었으며 향후 이러한 사회적 현상에 맞추어 주거모델의 변화도 불가피할 것으로 예상된다. 특히 주거 취약계층을 위한 주거는 공급량이 절대적으로 부족하고 사회초년생 및 대학생, 신혼부부 등 1~2인 가구에 대한 수요가 급증하고 있어 정부에서는 다양한 주택 공급 및 시장 창출을 위한 해결책으로 저층 공동주택 위주의 공업화 (조립식)주택공급을 추진하고자 조립식주택에 관한 기술개발 및 실증단지 구축 연구개발 사업을 시행하고 있다.

과거 공장에서 단위부재를 생산하고 현장에서 부재를 조립하여 완성하는 현장 조립식주택은 저생산성 및 고비용으

로 인하여 건설시장에서 확산·보급되지 못하였다. 이에 최근 연구개발 사업의 조립식주택은 공장생산 기반의 주택으로서 사용되는 3차원 입체 모듈의 공장제작율이 70% 이상인 주택으로 정의하고 있다. 또한 구조적인 측면에서는 공장에서 생산된 개별 구조모듈이 수평, 수직으로 적층되고 연결되어 하나의 건축물을 형성하게 되는 적층형 모듈러 구조물을 대상으로 하고 있다.

적층형 모듈러 구조물은 Fig. 1과 같이 일반구조물과 달리 개별모듈이 공장에서 생산되어 차량 등에 의해 현장까지 운송되며, 양중장비에 의해 각 모듈이 적층되고 모듈간 접합이 이루어지면서 전체구조물이 형성된다. 전체 모듈러 구조물이 완공되기 전 각 시공단계에서 부재에 발생하는 응력은 구조물이 완공되고 점유되어 사용되면서 건물로서 제 기능을 할

1) 정희원, ㈜와이즈구조연구소 대표이사

2) 정희원, ㈜와이즈구조연구소 이사

3) 정희원, ㈜와이즈구조연구소 대리

4) 정희원, 가천대학교 건축공학과 교수, 교신저자

\* Corresponding author : kbchoi@gachon.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2015년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 2015년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

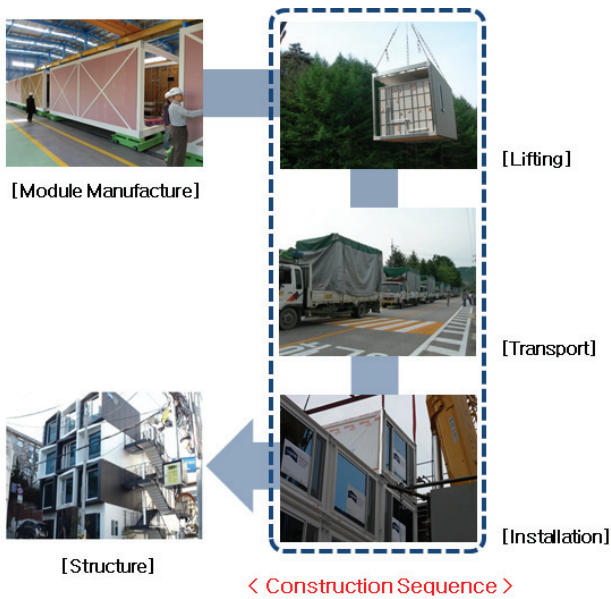


Fig. 1 Construction Process of Modular Structure

수 있도록 구조체에 영향이 없어야 한다. 그러나 현재 국내 모듈러 구조물은 저층의 단독주택 및 군 병영생활관에 한정되어 있는 실정이며, 적층식 모듈러 구조물에 대한 표준화된 구조설계 방법의 부재로 인해 구조물의 시공과정 중 모듈의 양중, 운송, 설치시에 대한 고려가 체계적으로 이루어지고 있지 않다.

따라서 본 연구는 대상 모듈러 시스템의 단계별 시공방법을 구조적인 측면에서 면밀히 살펴보고, 기존의 구조설계 방법을 검토하여 시공단계에서 발생하는 하중 및 지점조건을 고려한 구조설계 방안을 제시하고자 한다. 또한 제시된 설계 방안을 토대로, 양중 시와 운송 시, 설치 시 등 시공단계별 하중크기 결정조건을 변화시켜 구조검토를 수행하고 구조적으로 안전성이 확보되는 시공조건을 도출하고자 한다.

## 2. 검토대상 모듈러 시스템

검토대상 적층형 모듈러 시스템은 단위모듈을 공장에서 제작하고 운반하여 건설현장에서 조립 시공한다. 이때 공장에서 제작되는 단위모듈은 Fig. 2와 같이 각형강관 기둥과 모듈의 상·하부 바닥에 C-형강 보가 각각 설치된 육면체의 철판프레임이 제작된 후 모듈의 하부바닥에 콘크리트 슬래브를 타설하고 내·외부 마감을 시공하여 완성된다.

일반적으로 3×6×3m (가로×세로×높이)의 단위모듈이 하나의 세대를 구성하는 경우, 모듈의 장변방향 벽면에는 양중과

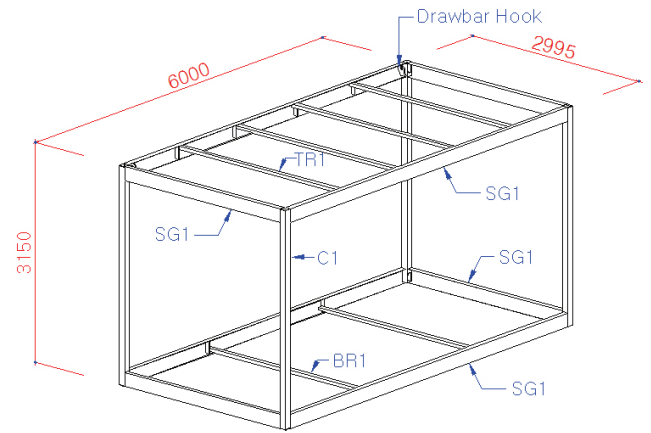


Fig. 2 Modular System

Table 1 Material Property

Category	KS Designation	Yield Stress
Steel	SPA-H	$F_y = 325MPa$
	SS400	$F_y = 235MPa$
	SPSR400	$F_y = 235MPa$
High Strength Bolt	F10T	$F_y = 900MPa$
Anchor Bolt	SS400	$F_y = 235MPa$

Table 2 Member Section

Name	Size	Steel Group
SG1	C-200×75×5.7t	SPA-H
TR1	B-75×45×2.3t	SPA-H
BR1	B-25×25×1.6t	SPA-H
C1	B-125×125×9t	SPA-H

Table 3 Vertical Load

Load Type		Dead Load	Live Load (after construction / under construction)
Area Load [kN/m <sup>2</sup> ]	Upper	0.3	-
	Lower	4.7	2.0 / 1.0
Line Load [kN/m]	Lower Long Dir.	1.0	-
	Lower Short Dir.	0.6	-

정에서 과도한 처짐으로 인한 마감재의 파손을 방지하기 위하여 V형의 브레이스가 설치되지만, 필요시 평면을 확장하 두 개 이상의 단위모듈이 하나의 세대로 사용되는 경우는 모듈의 장변방향 벽면에 브레이스가 설치되지 않는다. 검토대상 모듈러 시스템에 사용되는 부재사이즈 및 재료강도, 시공 단계에 대한 연직하중을 Table 1, 2, 3에 각각 나타내었다.

### 3. 시공단계 구조성능 평가방안

검토대상 모듈러 시스템에 대하여 양중 시 연직하중에 충격계수가 적용된 보의 수직처짐 검토는 일반적으로 이루어지고 있으나, 양중 및 운송 시 발생하는 관성력과 양중 시 풍하중의 영향, 모듈의 적층 설치 시 충격력에 대한 검토는 일반적으로 이루어지고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 시공단계에 따른 구조물의 경계조건 및 발생하중을 고려한 구조설계방안을 제시하고자 한다.

#### 3.1 양중작업 시 급제동에 의한 관성력 고려방안

대상 모듈러 시스템은 Fig. 3과 같이 양중 시 모듈의 각 기둥상부에 설치된 견인고리에 양중 로프를 연결하여 크레인인에 의해 양중되어 좌우운동을 하게 된다. 양중에 의한 좌우운동 중에는 급제동에 의하여 관성력이 발생될 수 있으며, 모듈의 상부바닥과 하부바닥에서 각 질량에 해당하는 크기가 다른 관성력이 각각 발생하게 된다. 이때 발생된 크기가 다른 관성력으로 인해 질량이 작은 바닥은 수평변위가 작고 콘크리트 슬래브가 설치되어 질량이 큰 바닥은 수평변위가 크게 발생되어 결국 상하 바닥간에는 상대변위가 발생하게 된다. 따라서 모듈의 양중 시 급제동에 의한 구조적 영향은 질량이 작은 바닥부분을 지점으로 두 관성력의 크기 차이만

크의 관성력이 질량이 큰 바닥부분에 작용하는 것으로 간주될 수 있다.

속도의 변화가 일정한 것으로 가정되는 등가속도이론 (Halliday et al., 2004)에 관한 식 (1)을 적용하여 제동 시 속도에 따른 가속도를 산정하고, 산정된 가속도와 모듈의 질량을 이용하여 관성력을 산정할 수 있다. 급제동 시 발생된 관성력은 모듈에 짧은 시간동안 발생하는 펄스하중 형태로서 모듈을 검토하기 위한 등가정적하중은 구조 동역학적으로 산정된 관성력의 최대 2배 (Chopra, 2007)를 적용 가능하므로 다음 식 (2)와 같다. 수식에서  $A_E$ 는 제동 시 발생가속도,  $V_E$ 는 제동전속도,  $V_0$ 는 제동후 속도,  $S_E$ 는 제동거리,  $F_E$ 는 관성력,  $P_E$ 는 등가정적하중을 나타내며, 질량  $m$ 은 하부바닥과 상부바닥의 질량차이를 적용한다.

$$A_E = (V_E^2 - V_0^2) / 2S_E, F_E = m \times A_E \quad (1)$$

$$P_E = 2 \times F_E \quad (2)$$

대상 시스템의 구조모델은 양중 시 시공방법 및 관성력 발생 위치를 고려하여 모듈의 기둥 상부를 지점으로 하고, 산정된 등가정적하중을 모듈의 하부바닥에 적용하여 해석할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 3.2 양중 설치작업 시 풍속에 따른 고려방안

건설현장에서 모듈을 크레인으로 양중 시 강풍이 불 경우 작업이 매우 위험해질 수 있다. 산업안전기준에 관한 규칙 제 117조의 3에서는 순간풍속이 20m/sec를 초과할 시 운전작업을 중지하도록 하고 있으며, 실제 건설현장에서는 일반적으로 순간풍속이 10m/sec를 초과시 양중작업이 위험하여 운행을 중지하고 있다. 모듈 시스템은 바람에 대한 수압면적이 크기 때문에 일반 건축자재 보다 풍속에 따른 영향이 크게 작용할 것으로 판단되므로 풍속에 대한 별도 제한이 필요할 것으로 사료된다.

양중 설치작업 시 바람이 작용하면 모듈은 Fig. 4와 같이 양중포인트를 중심으로 흔들림이 발생하게 되며, 모듈을 목적인 위치에 정확히 설치하기 위해서는 작업인부들이 인력으로 직접 모듈의 흔들림을 제어해야 한다. 따라서 순간풍속에 의해 모듈에서 발생하는 하중을 산정하고 인력으로 안전하게 모듈을 제어할 수 있는 순간풍속을 초과할 시에는 작업을 제한할 필요가 있다.

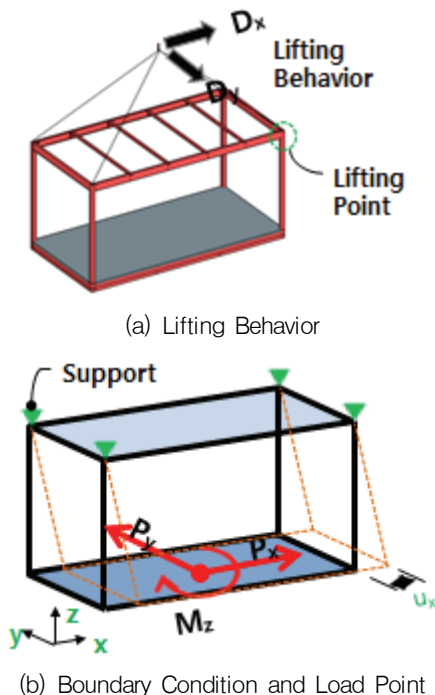
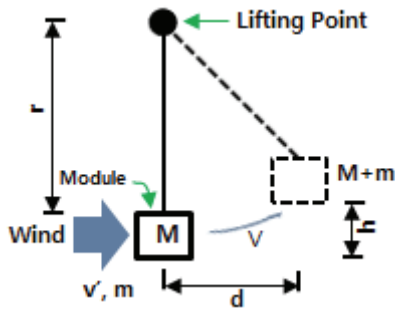


Fig. 3 Lifting Behavior and Analysis Model



(a) Displacement due to Wind

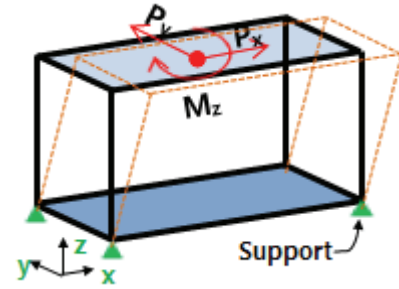


(b) Installation of Unit Module

Fig. 4 Wind Displacement and Installation



(a) Transport Behavior



(b) Boundary Condition and Load Point

Fig. 5 Transport Behavior and Analysis Model

을 적용한다.

$$A_S = (V_S^2 - V_0^2) / 2S_S \quad (3)$$

$$F_S = m \times A_S, \quad P_S = 2 \times F_S \quad (4)$$

대상 시스템의 구조모델은 운송 시 시공방법 및 관성력 발생 위치를 고려하여 모듈의 기둥 하부를 지점으로 하고, 산정된 등가정적하중을 모듈의 상부바닥에 적용하여 해석할 수 있을 것으로 판단된다

### 3.4 모듈설치시 발생하는 충격하중 고려방안

공장에서 생산된 모듈은 Fig. 6과 같이 건설현장에서 양중되어 적층 설치될 때 충격하중이 발생하게 되며, 일반적으로 충격하중은 적층되는 모듈의 중량보다 큰 하중으로 하부 모듈에 전달되게 된다. 충격하중은 다음 식 (5)과 같이 물체의 운동속도 ( $v$ )와 질량크기 ( $m$ ), 충돌 시 두 물체의 접촉시간 ( $t$ )에 의하여 결정된다 (Halliday et al., 2004). 모듈의 적층 시 발생 충격하중은 상부모듈의 연직하중 반대방향으로 상부모듈에 작용하기 때문에 Fig. 6의 (b)와 같이 대상시스템의 구조모델은 하부모듈의 기둥 하부를 지점으로 하고, 산정된 충격하중을 기둥 상부에 작용시켜 해석을 수행하였다.

현재 우리나라 건축구조기준 (KBC, 2009)에서는 건축물이 준공되어 사용되는 기간동안 발생하는 풍하중의 최대크기를 확률적으로 결정하기 위하여 기본풍속에 의한 설계속도압을 산정하고 있으나, 본 연구의 대상 모듈검토 시에는 모듈 설치작업 시 매순간 변동하는 풍속에 대한 속도압의 영향을 평가하고자 기본풍속 대신 순간풍속을 적용하였다.

### 3.3 운송시 급제동에 의한 관성력 고려방안

공장에서 생산된 모듈의 차량운송은 Fig. 5와 같이 로프를 아래로 당겨 차량에 고정시킴으로서 모듈하부와 적재 바닥에 마찰력을 증가시키는 방법으로 이루어지고 있다. 따라서 차량에 의한 운송 중 발생하는 관성력 고려 시 모듈하부는 차량에 고정되었다고 가정하고 발생된 관성력은 모듈 상부바닥의 질량 크기에 의하여 산정된다.

양중 시와 마찬가지로 제동 시 발생되는 관성력은 등가속도이론을 적용하고, 모듈을 검토하기 위한 등가정적하중은 산정된 관성력의 2배를 적용하면 다음 식 (3) 및 (4)와 같다. 수식에서  $A_S$ 는 제동시 발생가속도,  $V_S$ 는 제동전 속도,  $V_0$ 는 제동후 속도,  $S_S$ 는 제동거리,  $F_S$ 는 관성력,  $P_S$ 는 등가정적하중을 나타내고 있으며 질량  $m$ 은 모듈 상부바닥의 질량

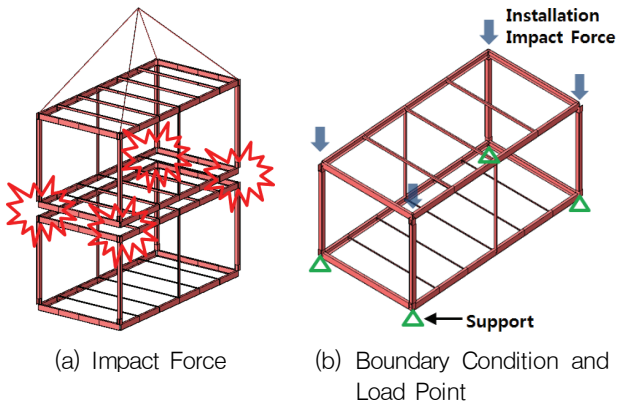


Fig. 6 Installation Impact Force and Analysis Model

$$P_I = \frac{\Delta mv}{\Delta t} \quad (5)$$

### 3.5 시공단계에 대한 부재 안전성 및 변형검토

양중, 운송 및 설치 시 발생된 하중에 대한 부재 안전성 검토는 구조물이 완공되고 점유되어 사용되면서 구조설계 시 목적된 성능을 발현하는데 있어 영향이 없도록 하여야 한다. 따라서 시공단계에서 발생된 하중에 대하여 부재가 파괴될 때의 단면강도를 검토하는 한계상태 설계법은 목적상 맞지 않으며, 부재의 발생응력이 안전율을 고려한 허용응력 내에 있도록 설계하는 탄성설계 기반의 허용응력 설계법을 사용하여 검토를 수행하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

또한 각 시공단계에서 부재의 안전성과 더불어 모듈 내부 건축마감재의 파손방지를 고려하여 부재의 처짐 및 모듈의 변위를 제한하여야 한다. 따라서 대상 모듈러시스템에 대한 변형검토 시 건축구조기준에서 제시하는 부재의 수직처짐 및 모듈의 수평변위에 대한 제한값 1/300 및 1/400을 각각 적용하였다.

### 4. 검토대상 모듈러 시스템의 시공조건 검토

대상 모듈러 시스템에 대한 시공단계 검토에 앞서, 단위모듈에 대한 완공시 연직하중에 대한 수직처짐 검토결과 모듈의 장변방향 하부바닥에 설치되는 SG1 보의 수직처짐이 건축구조기준에서 제시하는 부재의 수직처짐 제한값 L/300을 만족하지 못하는 것으로 나타나 Fig. 7과 같이 모듈의 상부 및 하부에 설치되는 SG1을 수직으로 연결하는 강관기둥 C0 (B-75×45×2.3t)가 설치되었다. 또한 Fig. 8의 (a)와 같이 개

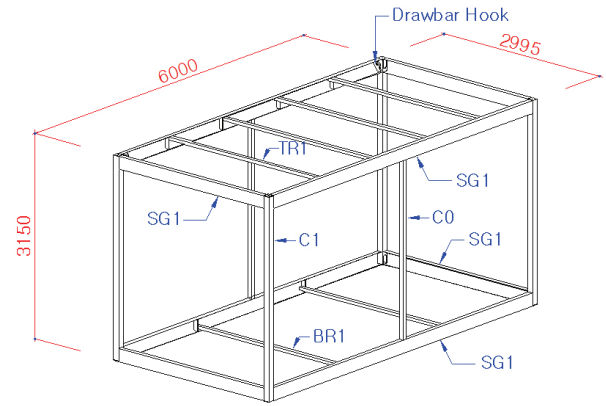
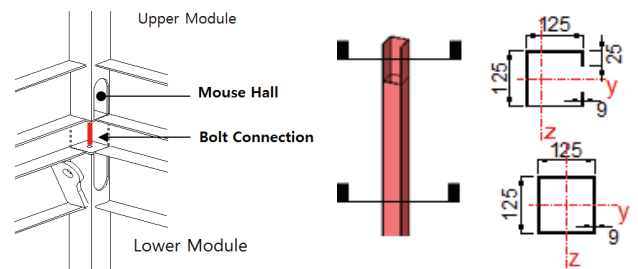


Fig. 7 Description of Modular System



(a) Connection of Modules (b) Cross section of Columns  
Fig. 8 Analysis Model of Column associated with Connections

별 모듈의 수직 및 수평 연결시 볼트접합을 하기 위하여 기둥에 설치되는 Mouse Hall로 인한 기둥 단면결손은 구조해석시 Fig. 8의 (b)와 같이 기둥의 단면변화를 직접해석모델에 적용하여 구조해석을 수행하였다. 본 연구에서 제안된 시공단계별 구조성능 평가방안을 토대로 각 시공단계에서 발생 하중의 크기를 결정하는 조건 변화에 따른 부재 안전성 및 변형 검토를 수행하여 각 시공단계에 대한 적정 시공조건을 도출한 결과는 다음과 같다.

#### 4.1 구조해석모델의 수립

각 시공단계에 대한 구조해석모델 수립은 국내에서 구조실무시 범용적으로 사용되는 MIDAS Gen (2015)이 사용되었으며, 모듈내 각 부재는 2개의 절점에 의해 정의되는 선형요소로서 Fig. 9와 같이 각 절점당 세 개의 이동변위 성분과 회전변위 성분을 갖는 Beam Element로 모델화되었다.

각 시공단계에 대한 해석모델 형상 및 지점조건, 하중작용 위치를 Fig. 10에 나타내었으며, 각 부재간 접합부에 적용된 단부 지점조건은 Table 4와 같다.



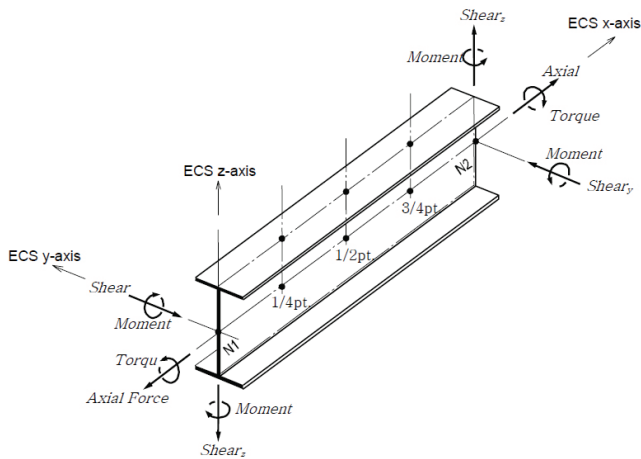


Fig. 9 Beam Element

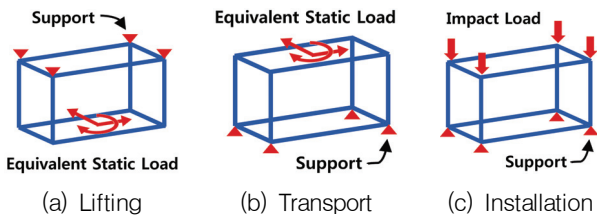


Fig. 10 Analysis Model for Each Process in Construction

Table 4 Boundary Condition for Joints

Joint	Boundary Condition	
	END-I	END-J
C1-SG1	Fix	Fix
C0-SG1	Pin	Pin
TR1-SG1	Pin	Pin
BR1-SG1	Pin	Pin

#### 4.2 양중작업 시 적정 양중속도 검토

양중작업 시 급제동에 따른 영향을 평가하기 위하여, 타워 크레인의 고속양중속도에 해당하는 분당 80m 속도 (Lee and Kim, 2006)를 기준으로 분당 80~50m 범위에 대한 제동가속도를 각각 산정하고, 그에 따른 등가정적하중 및 비틀림 하중 산정결과를 Table 5에 나타내었다.

제동가속도 산정식 (1)에서 제동거리는 짧을수록 가속도가 커지므로 0.1m로 짧게 가정하였으며, 비틀림하중은 우발편심을 고려하기 위하여 모듈의 하중중심으로부터 평면치수 5%를 적용하여 산정되었다. 산정된 하중을 양중 시 구조해석모델에 적용하여 부재안정성 및 모듈의 수평변위를 검토하였으며, 검토결과를 Table 6 및 Table 7에 나타내었다.

분당 80~50m 범위의 양중 시 속도에 따른 부재안정성 검

Table 5 Static Force and Torsional Load during Lifting

Lifting Velocity [m/min]	Equivalent Static Force [kN]	Torsional Load [kN.m]
80	20.0	6.3
70	15.3	4.8
60	11.2	3.5
50	7.8	2.5

Table 6 Member Safety of Lifting Velocity

Member	Member stress/Allowable Stress			
	80m/min	70m/min	60m/min	50m/min
C1	0.94	0.86	0.79	0.74
C0	0.15	0.15	0.15	0.15
SG1	1.125	1.02	0.93	0.90
SB1	0.21	0.21	0.21	0.21
TR1	0.29	0.29	0.29	0.29
BR1	0.07	0.07	0.07	0.07

Table 7 Displacement due to Lifting Velocity

Direction	Horizontal Displacement [mm]			
	80m/min	70m/min	60m/min	50m/min
Long Direction	18.3	14.0	10.2	7.1
Short Direction	12.4	9.5	6.9	4.8

토결과 분당 70m 이상의 속도에서 SG1 부재응력이 허용응력을 만족하지 못하였으며, 분당 60m 이하에서는 모든 부재응력이 허용응력을 만족하는 것으로 나타났다. 또한 양중속도에 따른 모듈의 수평변위 검토결과 분당 50m에서 수평변위는 장변방향에서 7.1mm로 나타나 건축구조기준에서 제시하는 허용수평변위 7.5mm (=H/400)를 만족하는 것으로 검토되었다. 따라서 대상 모듈러시스템의 양중작업 시 양중속도는 분당 50m가 적절한 것으로 사료된다.

#### 4.3 양중작업 시 적정 순간풍속 검토

양중에 의한 설치작업 시 순간풍속에 따른 발생하중을 산정하고 인력에 의하여 안전하게 모듈을 제어할 수 있는 수준의 순간풍속을 판단하고자, 건설현장에서 일반적으로 적용하는 양중작업한계 순간풍속인 10m/sec를 기준으로 초당 10~5m 범위에 대한 모듈의 장·단변방향에 발생하는 하중을 각각 산정하여 Table 8에 나타내었다. 이때 적용된 계수는 Table 9에 나타내었다.

설치작업 시 바람에 의하여 발생하는 모듈의 변위를 인력으로 제어 가능한 한계를 인당 0.5kN으로 가정하고 모듈 1

Table 8 Load due to Instantaneous Wind Velocity

Direction	Wind Force [kN]			
	10m/sec	8m/sec	6m/sec	5m/sec
Long Direction	1.65	1.05	0.59	0.41
Short Direction	3.89	2.49	1.40	0.97

Table 9 Coefficient of Wind Force Calculation

Category	Exposure Category	Importance Factor	Height	Speed Up Multiplier
Factor	B	1.0	30m	1.0

Table 10 Static Force and Torsional Load during Transport

Transport Velocity [km/h]	Equivalent Static Force [kN]	Torsional Load [kN.m]
60	2.84	0.9
50	1.97	0.6
40	1.26	0.4
30	0.71	0.2

개 설치 시 풍하중의 한계 작업가능하중은 2인 작업 기준 1kN으로 설정하였다. 순간풍속에 따른 발생하중 산정결과 수압면적이 큰 단변방향이 장변보다 약 2배가량 크게 발생하였으며, 초당 5m에서 단변방향 발생하중은 0.97kN으로 산정되어 한계작업가능하중을 만족하는 것으로 검토되었다. 따라서 대상 모듈러시스템의 양중에 의한 설치 작업시 순간 풍속은 초당 5m가 적정한 것으로 사료된다.

#### 4.4 차량 운송시 적정 속도 검토

차량에 의한 모듈의 운송 시 고려하는 급제동은 차량의 주행 중 신호변화와 같이 일반적으로 발생할 수 있는 차량의 정지동작 중 다소 짧은 정지시간과 거리가 발생하는 제동을 대상으로 한다. 따라서 차량의 급제동에 따른 영향을 평가하기 위하여, 시내도로로 주행 규정속도인 60km/h를 기준으로 시간당 60~30km 범위에 대한 제동가속도를 각각 산정하고 그에 따른 등가정적하중 및 비틀림 하중 산정결과를 Table 10에 나타내었다. 제동가속도 산정 시 차량제동거리는 노면포장별 차량의 제동거리에 대한 실험논문 (Lee and Choi, 2010)을 토대로 가장 짧은 제동거리에 해당하는 10m를 적용하였다. 산정된 하중을 운송 시 구조해석모델에 적용하여 부재안전성 및 모듈의 수평변위 검토결과를 Table 11 및 Table 12에 나타내었다.

시간당 60~30km 범위의 운송속도에 따른 부재안전성 및

Table 11 Member Safety of Transport Velocity

Member	Member stress/Allowable Stress			
	60km/h	50km/h	40km/h	30km/h
C1	0.67	0.66	0.65	0.64
C0	0.15	0.15	0.15	0.15
SG1	0.89	0.89	0.89	0.89
SBI	0.21	0.21	0.21	0.21
TR1	0.29	0.29	0.29	0.29
BR1	0.07	0.07	0.07	0.07

Table 12 Displacement due to Transport Velocity

Direction	Horizontal Displacement [mm]			
	60km/h	50km/h	40km/h	30km/h
Long Direction	2.6	1.8	1.2	0.6
Short Direction	1.8	1.2	0.8	0.4

Table 13 Force and Member Stability of Installation Velocity

Installation Velocity [m/min]	Impact Force [kN]	Member stress/Allowable Stress
5	278	1.18
4	223	1.11
3	167	1.04
2	111	0.96

모듈수평변위 검토결과 시간당 60km이하의 속도에서 모든 부재응력이 허용응력을 만족하였으며, 모듈의 수평변위 또한 건축구조기준에서 제시하는 허용수평변위 7.5mm (=H/400)를 만족하는 것으로 검토되었다. 따라서 대상 모듈러시스템의 차량운송 시 속도는 시간당 60km가 적정한 것으로 사료된다.

#### 4.5 설치작업 시 적정 설치속도 검토

모듈의 적층설치 시 분당 5~2m 범위의 설치속도를 대상으로 충격하중을 각각 산정하고, 산정된 충격하중을 설치 시 해석모델에 적용하여 부재안전성을 검토하였으며, 검토결과를 Table 13에 나타내었다. 충격하중 산정식에서 충돌시간은 충돌하는 물체의 재료적인 특성과 형상, 속도 및 각도 등 여러 가지 변수에 따라 달라지며 매우 짧은 시간동안 발생하는 현상이기 때문에 충돌시간을 정확히 알아내는 것은 매우 어렵다. 따라서 모듈의 적층설치 시 발생하는 충격력을 산정하기 위한 충격시간은 0.001초로 가정되었다.

설치속도에 따른 부재안전성 검토결과 분당 2m 이하에서 부재응력이 허용응력을 만족하는 것으로 나타나 대상 모듈러시스템의 적층설치 시 속도는 분당 2m가 적정한 것으로

사료된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 대상 모듈러시스템의 단계별 시공방법을 살펴보고, 시공단계에서 발생하는 하중 및 지점조건을 고려한 구조설계 방안을 제시하였다. 또한 제시된 설계방안을 토대로 시공단계별 하중크기 결정조건을 변화시켜 구조검토를 수행하고 구조안전성이 확보되는 시공조건을 도출하였다. 시공조건을 도출하는 과정에서 양중 시 제동거리를 0.1m로 가정하였으며, 양중에 의한 설치작업 시 인력으로 제어 가능한 풍하중 한계를 0.5kN/인으로 가정하였다. 또한 설치작업 시 충격시간을 0.001초로 가정하였는데, 이는 구조물을 안전측으로 검토하기 위하여 보수적으로 가정된 수치이다. 본연구에서 대상 모듈러 시스템에 대하여 도출된 시공조건은 다음과 같다.

모듈 양중 시 급제동에 따른 영향을 평가하기 위하여 분당 80~50m 범위의 양중속도에 따른 관성력을 산정하고, 대상 모듈러시스템의 부재안전성 및 수평변위 검토결과 양중속도는 분당 50m가 적절한 것으로 판단된다.

모듈의 양중에 의한 설치작업 시 바람에 의하여 발생하는 풍하중에 대하여 2인 작업기준 한계하중을 1kN으로 가정하고, 초당 10~5m 범위의 순간풍속에 따른 풍하중 산정결과 대상 모듈러시스템의 설치작업이 가능한 순간풍속은 초당 5m가 적절한 것으로 판단된다.

모듈의 차량에 의한 운송 시 급제동에 따른 영향을 평가하기 위하여 시간당 60~30km 범위의 운송속도에 따른 관성력을 산정하고, 대상 모듈러시스템의 부재안전성 및 수평변위 검토결과 운송 시 속도는 시간당 60km가 적절한 것으로 판단된다.

모듈을 양중하여 적층설치 할 때 발생하는 충격하중에 대한 영향을 평가하기 위하여 분당 5~2m 범위의 설치속도에 따른 충격하중을 산정하고, 대상 모듈러시스템의 구조안전성 검토결과 설치속도는 분당 2m가 적절한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 주거환경 연구사업의 연구비지원(과제번호 14AUDP-C068788-02)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## References

1. Anil k. Chopra. (2007), Dynamics of Structures, Prentice Hall, New Jersey.
2. Architectural Institute of Korea (2009), Korean Building Code and Commentary, Architectural Institute of Korea (in Korean).
3. Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. (2004), Fundamentals of Physics, John Wiley and Sons, New Jersey.
4. Lee, C. S., Kim, I. T. (2006), Tower Crane, Golden Bell, Seoul (in Korean).
5. Lim, C. S., Choi, Y. W. (2010), The Experimental Study on the Transient Brake Time of Vehicles by Road Pavement and Friction Coefficient, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 30(6D), 587-597 (in Korean).
6. MIDAS (Modeling, Integrated Design & Analysis Software) (2015), <http://kor.midasuser.com/building>.

Received : 11/19/2014

Revised : 12/29/2014

Accepted : 02/12/2015

## 요 지

현재 국내 모듈러 구조물은 저층의 단독주택 및 군 병영생활관에 한정되어 있는 실정이며, 적층식 모듈러 구조물에 대한 표준화된 구조 설계 방법이 없으므로 구조물의 시공과정에서 모듈의 양중이나 운송 시 발생하는 관성력, 양중 시 구조물에 대한 풍하중의 영향, 모듈의 적층 설치 시 충격력 등에 대한 검토가 일반적으로 이루어지고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 대상 모듈러 시스템에 대한 단계별 시공방법을 살펴보고, 각 시공단계에 대한 구조해석 시 경계조건 및 하중 작용 위치를 결정하였다. 또한 모듈의 양중 및 차량운반 시 각각의 속도에 따른 관성력을 산정하였으며 모듈의 적층설치 작업 시 양중속도에 따른 충격하중과 양중에 의한 설치작업 시 순간풍속에 의한 풍하중을 산정하였다. 제안된 방법을 토대로 대상 모듈러 시스템에서 양중 시와 운송 시, 설치 시 등 시공단계별 하중크기 결정조건을 변화시켜 구조검토를 수행하였으며 구조적으로 안전성이 확보되는 시공조건을 도출하였다.

**핵심 용어** : 적층식 모듈러 시스템, 양중시, 운송시, 설치시, 시공조건