

교각 원격·자동화 시공을 위한 거푸집 시스템의 구조적 안전성

최동호^{1*} · 이승혜² · 이혁진²

¹교수, 한양대학교, 건설환경공학과, ²석사과정, 한양대학교, 건설환경공학과

Structural Safety of Unmanned Smart Form System for Piers

Choi, Dong-Ho^{1*}, Lee, Seung Hae², Lee, Hyeok Jin²

¹Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

²Graduate Student (Master Course), Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

Abstract - For a decade, a number of fall accident in construction site is keep growing. Unmanned construction technology of pier by automated and remote form system is needed not only to avoid fall accident during construction of bridge from on high, but also to decrease construction duration. The purpose of this study is to analyze the structural stability of smart form system of pier for remotely controlled and automatic construction. A finite element model of the smart form system is modeled, and structural analysis is performed under expected loads including acceleration and braking load of manipulator with MIDAS Civil(2019). As a result, unmanned smart form system for piers have structural safety.

Keywords - System form, Pier construction, Construction automation, Unmanned construction, Auto-climbing form system

1. 서론

산업재해로 인한 인명피해 발생 시 처벌을 강화하기 위한 중대재해 처벌 등에 관한 법률이 시행됨에 따라 건설 현장에서 노동자 안전조치가 강화되고 있다. 산업안전보건공단의 통계에 따르면 지난 9년간(2011-2019) 건설업 사망자 중에서 추락으로 인한 사망 비율이 감소하지 않고 있다^[1]. 교량의 건설은 현대에 와서 보다 고소의 위치에 건설이 요구되나, 인력작업에 따른 추락 사고 위험이 해결되지 못하는 실정이다^{[2],[3]}. 이에 따라 고소 작업의 감소를 위하여, IT 기술의 발전과 더불어 국내외 건설 현장에서 원격 시공이 가능하게 하는 기술이 개발되고 있다^[4].

국내의 경우 스마트 건설기술 개발사업을 통해 건설공사에서의 인명사고의 위험과 생산성 저해 요인을 해소하

고자 교량과 터널의 원격·자동화 시공 기술을 개발하고 있다. 교량의 경우 VR, 로봇 및 머신러닝 등을 활용하여 거더의 거치와 교각의 원격·자동화 시공 시스템을 개발 중이다. 교각 시공을 위한 원격·자동화 시스템(이하 원격·자동화 시스템)은 작업자를 대체할 매니플레이터와 자동 상승 거푸집 시스템(ACS, auto-climbing form system)으로 이루어져 있다^[5]. 기존의 자동 상승 거푸집 시스템은 유압으로 스스로 충고를 높여 자립으로 인상 작업이 가능하게 하는 자동화 거푸집 시스템으로, 연직하중과 콘크리트 횡압에 저항하도록 개발이 이루어져 있다^{[6]-[8]}.

무인화를 위한 교각의 원격·자동화 시스템은 매니플레이터와 이동체가 레일을 통해 이동하며 인력을 대체하는 작업을 수행한다. 3개의 이동체가 레일 위를 같은 방향으로 이동할 때 시·제동으로 인한 수평 하중이 발생하여 거푸집 시스템에 수평 하중으로 인해 비틀림이 발생하게 된다. 교각의 원격·자동화 시스템을 구현하기 위해선 거푸집 시스템 시공 시 발생하는 수직 하중과 수평 하중에 대하여 구조적 안전성을 확보하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 거푸집 시스템에 작용하는 하중을 분석하고 MIDAS Civil을 통해 자동화 시공을 위한 거푸집 시스템의 유한요소모델을 작성하여 고정하중과 활하중뿐만 아니라 이동체의 시·제동 시 발생하는 수평 하중에 대

Note.-Discussion open until June 30, 2023. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 11, 2022; revised on November 28, 2022; approved on November 28, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-2220-0328 Fax. +82-2-2220-0399

E-mail. samga@hanyang.ac.kr

하여 구조물의 거동과 허용응력설계법(ASD)에 따른 구조적 안전성을 분석하고자 한다.

2. 원격·자동화 시스템의 구조 형상

Fig. 1은 원격·자동화 시스템의 구조 형상을 보여준다. Fig. 1(a)에서 제시한 거푸집 시스템은 4 lot(1회 콘크리트 타설 단위, 1m)까지 타설했을 경우로, 상부 작업 공간, 하부 작업 공간, 최하단 기동 지지부의 세 부분으로 나눌 수 있다. 상부 작업 공간은 L-1 브래킷, 안전 포스트로 구성되고, 하부 작업 공간은 수직 포스트, L-2 브래킷, 보수용 난간으로 구성되며, 최하단 기동 지지부는 수직 레일, 수평 커넥터와 유압실린더 및 스피들로 구성된다. 원격·자동화 시스템은 높이 10 m - 15 m, 직경 2 m 원형의 교각

시공을 목적으로 한다.

Fig. 1(b)는 6 lot을 타설할 경우 거푸집 시스템의 상세 치수를 나타냈다. 상부 작업 공간과 하부 작업 공간의 지름은 8,700 mm이고, 스피들-1의 길이는 1,494.7 mm, 스피들-2의 길이는 3,157.8 mm이다. 스피들은 L-2 브래킷에 45도 각도로 연결된다. 상부 작업 공간의 상세 치수는 Fig. 1(c)에 나타냈으며 하부 작업 공간의 평면도 및 상세 치수는 Fig. 1(d)에 나타냈으며 하부 작업 공간은 일정한 간격을 가지는 1,200 mm × 3,000 mm의 세 구역으로 나뉜다. 목표 시공 높이가 높아짐에 따라 시스템의 구조적 안전성 확보^[9]가 필요하여 Fig. 1(c), Fig. 1(d)에 나타난 수평 가새뿐만 아니라 수직 가새를 구성하였다.

구조 부재에 작용하는 재료는 탄성계수가 210 GPa인 강재 SM275를 사용한다. 구성요소 구조부재의 제원은 Table 1에 정리하였다.

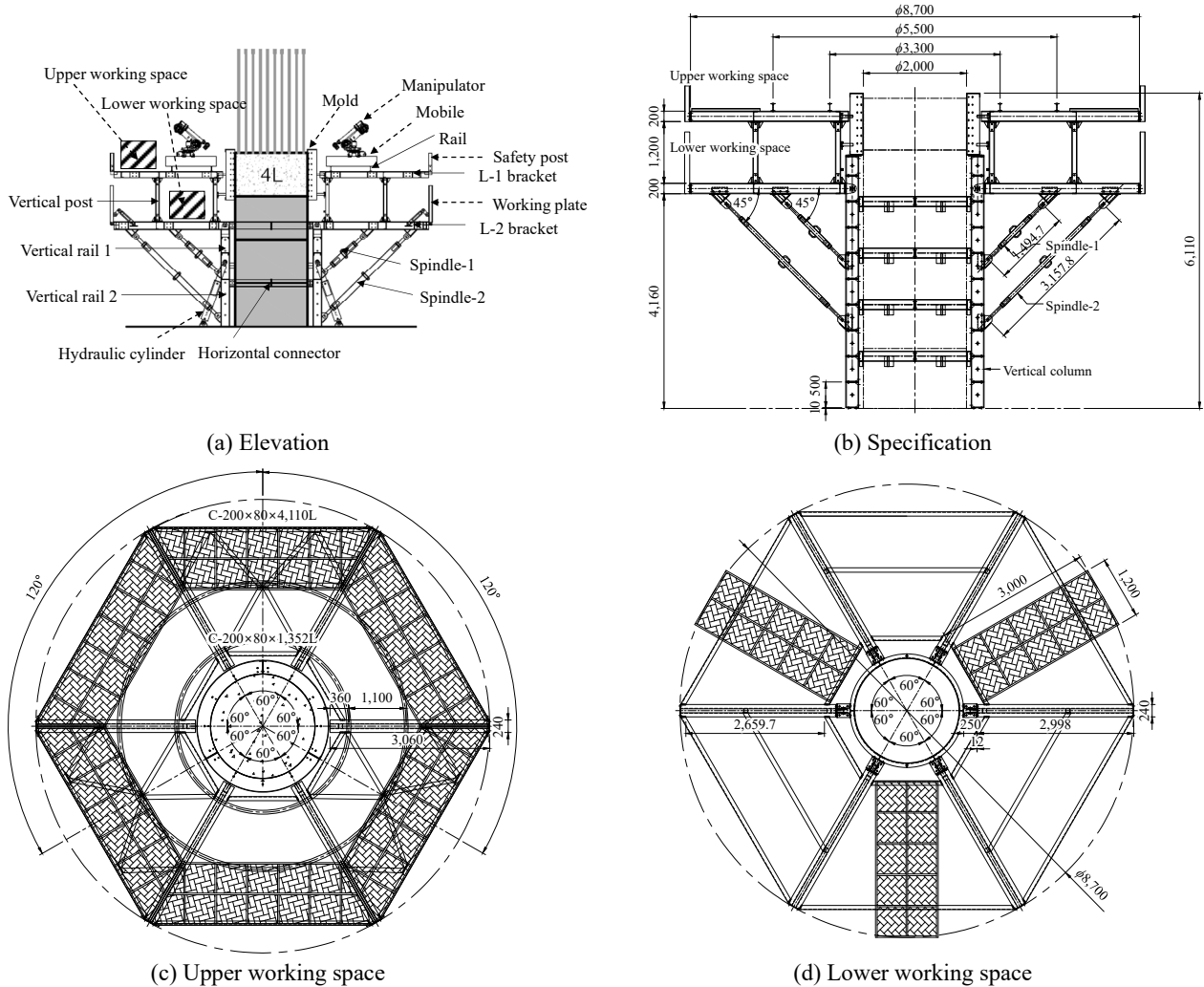

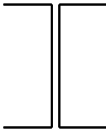

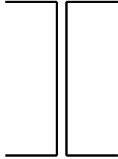
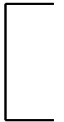



Fig. 1. Concept of system form^[10]

Table 1. Specification of structural members

Name	Specification	Cross-section shape	Aspect ratio (λ)
Spindle	Pipe Diameter: 88.9 mm Thickness: 4.5 mm		$\lambda = D/t = 20$ $\lambda_p = 0.11 \times F_y/E = 84$ $\lambda < \lambda_p \therefore$ non-slender
L-1 bracket L-2 bracket	2 \square -200 \times 80 Web thickness: 7.5 mm Flange thickness: 11 mm		$\lambda_f = b/t = 8$ $\lambda_{pf} = 0.56 \times \sqrt{F_y/E} = 15$ $\lambda_w = h/t = 27$ $\lambda_{pw} = 1.49 \times \sqrt{F_y/E} = 41$ $\lambda_f < \lambda_{pf}, \lambda_w < \lambda_{pw} \therefore$ non-slender
Vertical post	2 \square -100 \times 50 Web thickness: 5 mm Flange thickness: 7.5 mm		$\lambda_f = b/t = 7$ $\lambda_{pf} = 0.56 \times \sqrt{F_y/E} = 15$ $\lambda_w = h/t = 20$ $\lambda_{pw} = 1.49 \times \sqrt{F_y/E} = 41$ $\lambda_f < \lambda_{pf}, \lambda_w < \lambda_{pw} \therefore$ non-slender
Vertical rail 1 Vertical rail 2	2 \square -250 \times 90 Web thickness: 9 mm Flange thickness: 13 mm		$\lambda_f = b/t = 7$ $\lambda_{pf} = 0.56 \times \sqrt{F_y/E} = 15$ $\lambda_w = h/t = 28$ $\lambda_{pw} = 1.49 \times \sqrt{F_y/E} = 41$ $\lambda_f < \lambda_{pf}, \lambda_w < \lambda_{pw} \therefore$ non-slender
Horizontal connector Upper horizontal beam Lower horizontal beam	\square -200 \times 80 Web thickness: 7.5 mm Flange thickness: 11 mm		$\lambda_f = b/t = 8$ $\lambda_{pf} = 0.56 \times \sqrt{F_y/E} = 15$ $\lambda_w = h/t = 27$ $\lambda_{pw} = 1.49 \times \sqrt{F_y/E} = 41$ $\lambda_f < \lambda_{pf}, \lambda_w < \lambda_{pw} \therefore$ non-slender
Bracing	L-50 \times 50 Thickness: 6 mm		$\lambda_f = b/t = 9$ $\lambda_{pf} = 0.56 \times \sqrt{F_y/E} = 15$ $\lambda_w = h/t = 9$ $\lambda_{pw} = 1.49 \times \sqrt{F_y/E} = 41$ $\lambda_f < \lambda_{pf}, \lambda_w < \lambda_{pw} \therefore$ non-slender

3. 거푸집 시스템 구조해석

3.1 3D 모델링

원격·자동화 시스템은 자동 상승 거푸집 시스템 상단에 무인 교각 시공을 위한 매니플레이터와 이를 이동시키기 위한 이동체로 구성된 모바일 이동체가 배치된 시스템이다. 모바일 이동체를 지지하기 위해 레일을 설치하는데, Fig. 2와 같이 모바일 이동체는 교각 시공을 위해 교각 둘레를 120도의 균등한 범위의 3개의 구역으로 나누어 3개의 매니플레이터가 서로 일정 거리를 유지하며 동시에 움직이게 되므로 모바일 이동체의 하중이 레일에 균등하게 재하되는 경우를 검토하였다.

이때 MIDAS Civil(2019)을 이용한 유한요소모델을 Fig. 3에 작성하였다. Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)는 거푸집 시스템의 입면도이고, Fig. 3(c)는 정면도, Fig. 3(d)와 Fig. 3(e)는 상부와 하부 작업 공간의 평면도이다.

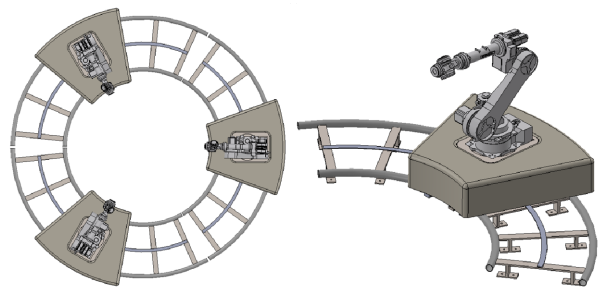


Fig. 2. Concept of manipulator^[10]

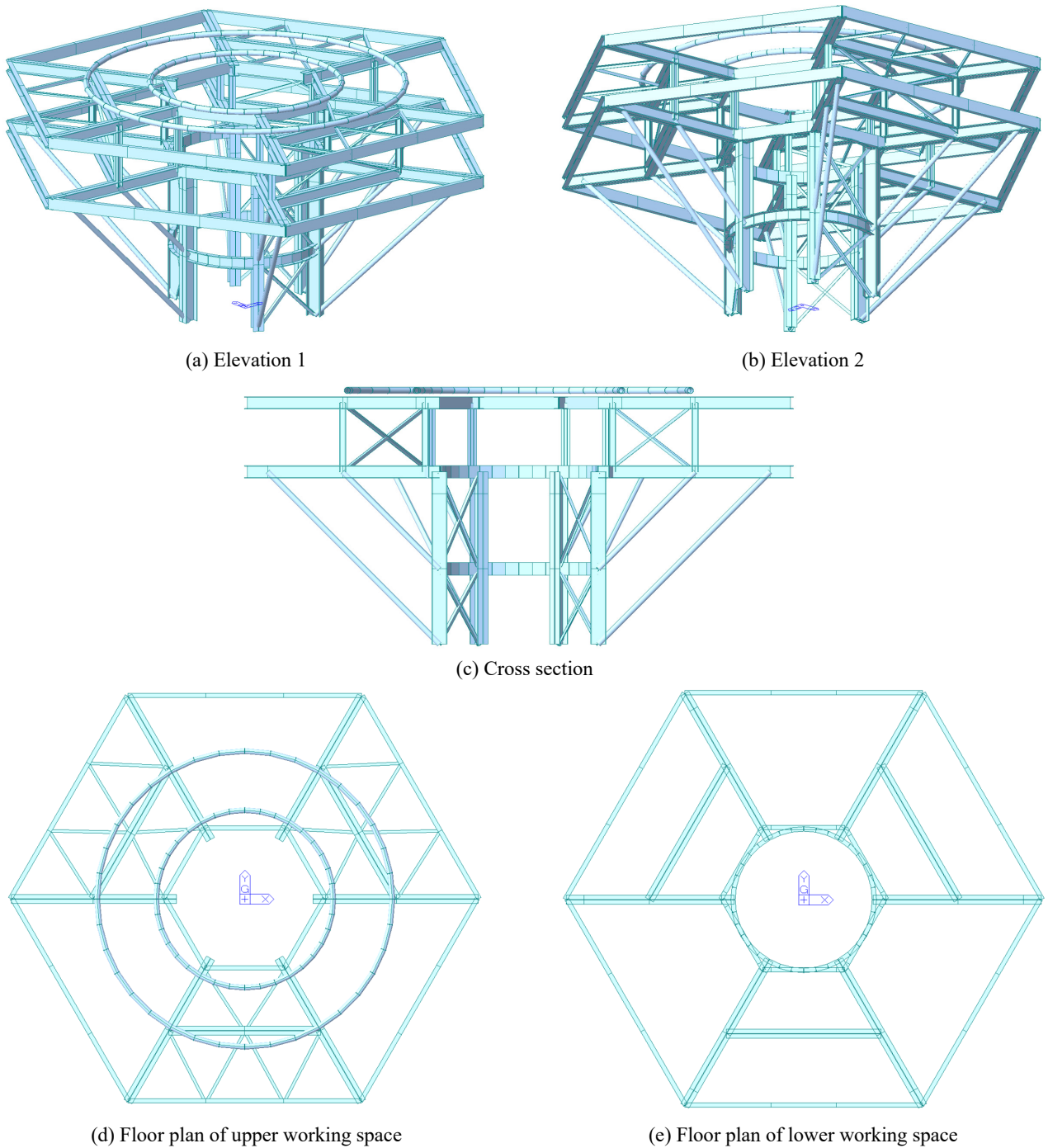


Fig. 3. 3D model of system form

3.2 적용 하중 산정

3.2.1 모바일 이동체 하중

매니플레이터 1개당 질량이 645 kg, 이동체 1개당 질량이 350 kg이므로 외측 및 내측 레일이 모바일 이동체의 형상(사다리꼴)에 따라 하중을 배분하여 지지한다고 가정

하여 Fig. 4에 나타냈다. 사다리꼴 형상에 따라 외측 레일에 $(645 \text{ kg} + 350 \text{ kg}) \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 1.18/2.18 = 5.283 \text{ kN}$, 내측 레일에 $(645 \text{ kg} + 350 \text{ kg}) \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 1/2.18 = 4.478 \text{ kN}$ 의 하중이 작용한다. 이때 각 모바일 이동체의 무게 절반이 각 외측 및 내측 레일에 집중하중으로 작용한다고 가정하였고, 유한요소모델을 Fig. 5에 나타냈다.

3.2.2 시·제동 하중

모바일 이동체의 시·제동 하중을 적용했을 때, 건축구조기준 설계하중 KDS 41 10 15: 2019의 크레인 하중을 적용하여 횡방향(주행 보에 직각 방향) 수평 하중과 종방향(주행 보와 평행) 수평 하중을 산정하였다. 횡방향 수평 하중은 매니플레이터 및 이동체 무게를 합한 값의 20%를 산정하여 외측 레일에 $5.283 \text{ kN} \times 0.2 = 1.057 \text{ kN}$, 내측 레일에 $4.478 \text{ kN} \times 0.2 = 0.896 \text{ kN}$ 을 각각 적용하였다. 종방향 수평 하중은 매니플레이터 및 이동체 무게를 합한 값의 10%를 산정하여 외측 레일에 $5.283 \text{ kN} \times 0.1 = 0.528 \text{ kN}$, 내측 레일에 $4.478 \text{ kN} \times 0.1 = 0.448 \text{ kN}$ 을 각각 적용하였다. 이때 유한요소모델을 Fig. 6에 나타냈다.

3.2.3 안전 포스트 및 보수용 난간 하중

안전 포스트 1개당 질량을 10 kg 으로 적용하여 안전 포스트 1개당 하중이 $10 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 98.1 \text{ N} = 0.098 \text{ kN}$ 으로 산출되었다.

보수용 난간 1개당 질량을 20 kg 으로 적용하여 보수용 난간 1개당 하중이 $20 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 196.2 \text{ N} = 0.196 \text{ kN}$ 로 산출되었다. 이때 유한요소모델을 Fig. 7에 나타냈다.

3.2.4 거푸집 하중

거푸집은 플랜지, 웨브, 보강재로 구성되어 있다. 플랜지의 무게 W_f , 웨브의 무게 W_w , 보강재의 무게 W_{st} 를 다음과 같이 산정하였다.

$$\begin{aligned} W_f &= \rho_{steel} \times A \times t \\ &= 78.5 \times \frac{\pi(2.265^2 - 2.000^2)}{4} \times 0.01 \\ &= 0.70 \text{ kN} \end{aligned} \quad (1a)$$

$$\begin{aligned} W_w &= \rho_{steel} \times \pi D \times H \times t \\ &= 78.5 \times 2\pi \times 1.4 \times 0.01 \\ &= 6.905 \text{ kN} \end{aligned} \quad (1b)$$

$$\begin{aligned} W_{st} &= \rho_{steel} \times B \times H \times t \\ &= 78.5 \times 0.265 \times 1.4 \times 0.01 \\ &= 0.291 \text{ kN} \end{aligned} \quad (1c)$$

여기서, W_f = 플랜지 무게,

W_w = 웨브 무게,

W_{st} = 보강재 무게.

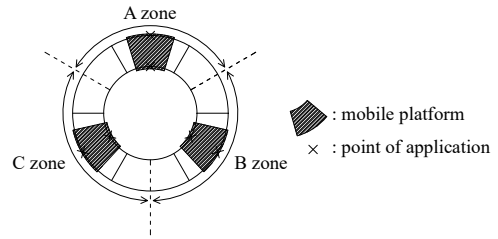


Fig. 4. Loading condition of mobile platform

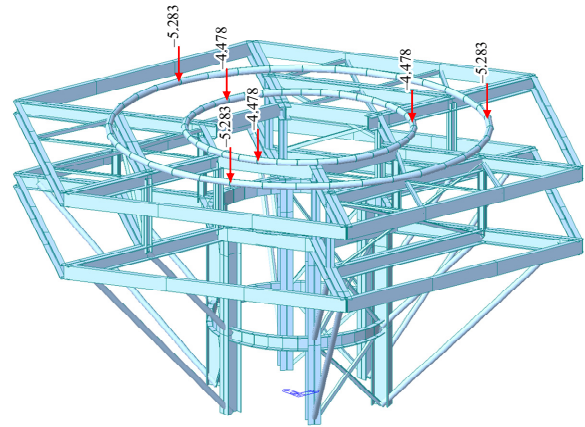


Fig. 5. 3D model under manipulator load

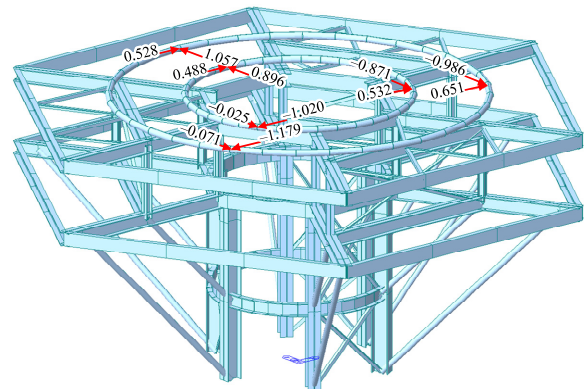


Fig. 6. 3D model under acceleration and braking load

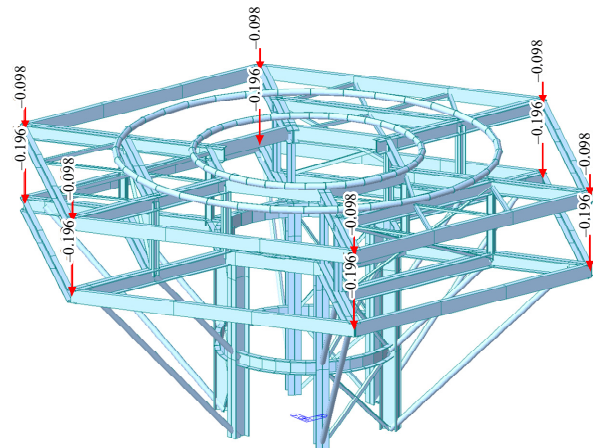


Fig. 7. 3D model under safety post and working plate load

총 거푸집 무게는 (상·하 플랜지 무게) + (웹브 무게) + (18개의 보강재 무게)이므로 다음과 같이 산정한다.

$$\begin{aligned}
 W_{form} &= 2W_f + W_w + 18W_{st} \\
 &= (2 \times 0.70) + 6.905 + (18 \times 0.291) \\
 &= 13.543 \text{ kN}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서, W_{form} = 총 거푸집 무게.

6개의 L-1 브래킷이 거푸집 무게를 균등하게 지지한다고 가정하였을 때, 하나의 L-1 브래킷이 지지하는 거푸집 하중은 $W_{form}/6 = 2.257 \text{ kN}$ 이다. 이때 유한요소모델을 Fig. 8에 나타냈다.

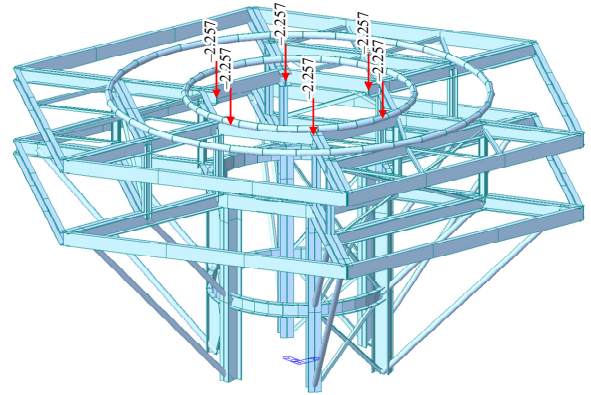


Fig. 8. 3D model under mold load

3.2.5 상부 작업 공간 하중

상부 작업 공간 1세트는 콘크리트 바이브레이터(50 kg), 철근 커플러 프레스(50 kg), 유압펌프(100 kg), 공압펌프(50 kg), 그리퍼(50 kg)로 구성되어 질량 300 kg로 산정했다. 상부 작업 공간 1세트당 무게는 $300 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 2,943 \text{ N} = 2.943 \text{ kN}$ 이므로 3세트의 무게는 $2.943 \text{ kN} \times 3 = 8.829 \text{ kN}$ 이다.

상부 작업 공간 3세트의 하중이 6개의 L-1 브래킷에 균등하게 분배된다고 가정하면 1개의 L-1 브래킷에 분배되는 상부 작업 공간 무게는 $8.829 \text{ kN} / 6 = 1.472 \text{ kN}$ 이다. 이 무게가 L-1 브래킷 요소의 외측으로부터 0 m - 1.525 m에 등분포하중으로 작용한다고 가정하면 등분포하중은 $1.472 \text{ kN} / 1.525 \text{ m} = 0.925 \text{ kN/m}$ 로 산출된다. 이때 유한요소모델을 Fig. 9에 나타냈다.

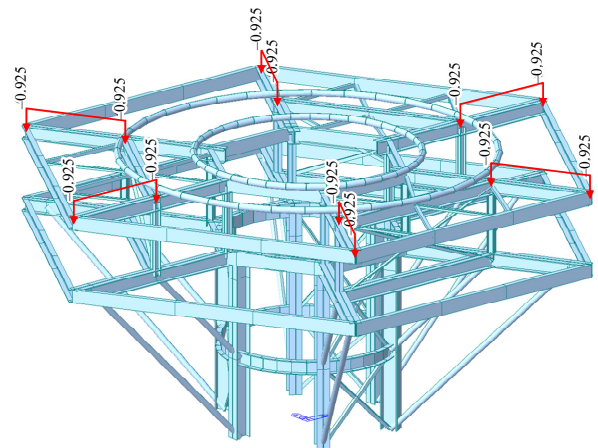


Fig. 9. 3D model under upper working place load

3.2.6 하부 작업 공간 하중

하부 작업 공간 1세트는 Tool Station 제어박스(50 kg)와 로봇 제어기(200 kg)로 구성되어 질량 250 kg으로 산정했다. 하부 작업 공간 1세트당 무게는 $250 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 2,452.5 \text{ N} = 2.453 \text{ kN}$ 이므로 3세트의 무게는 $2.453 \text{ kN} \times 3 = 7.359 \text{ kN}$ 이다.

하부 작업 공간 3세트의 하중이 6개의 L-2 브래킷에 균등하게 분배된다고 가정하면 1개의 L-2 브래킷에 분배되는 하부 작업 공간 무게는 $7.359 \text{ kN} / 6 = 1.227 \text{ kN}$ 이다. 이 무게가 L-2 브래킷의 두 수직 포스트 사이 길이 1.325 m에 등분포하중으로 작용한다고 가정하면 등분포하중은 $1.227 \text{ kN} / 1.325 \text{ m} = 0.926 \text{ kN/m}$ 로 산출된다. 이때 유한요소모델을 Fig. 10에 나타냈다.

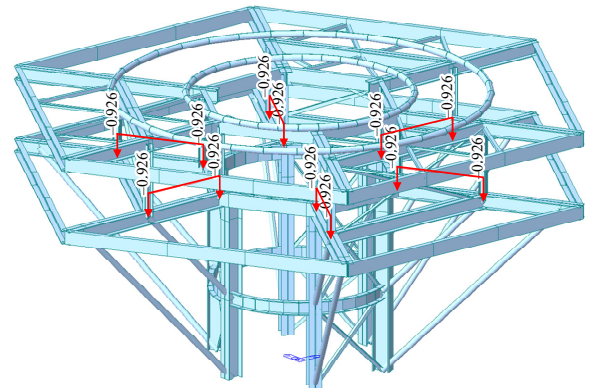


Fig. 10. 3D model under lower working place load

3.2.7 작업자 하중

부득이하게 매니플레이터 이상 발생 시 점검하는 작업자 2인 및 점검 장비의 무게는 $200 \text{ kg}^{[10]} \times 9.81 \text{ m/s}^2 = 1.962 \text{ kN}$ 이다. 작업자 하중은 외측 레일과 내측 레일에 균등하게 분배된다고 가정했을 때 각각 $1.962 \text{ kN} / 2 = 0.981 \text{ kN}$ 으로 작용한다고 산출된다. Fig. 11에 하중모델을 나타냈다.

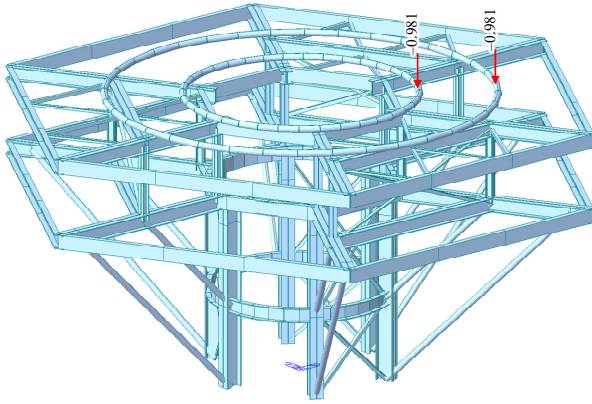


Fig. 11. 3D model under worker load

4. 구조해석결과

대상 거푸집 시스템에 대한 구조해석은 상용 유한요소해석 프로그램 MIDAS Civil(2019)을 이용하여 수행하였다. 최대 부재력 및 변위 산정 시 교각 세그먼트 4 lot 시공단계에서, 검토 부재별 하중 케이스에 따라 모델링하였다.

부재의 재료 및 단면 산정 과정에서 구조 부재의 강종은 SM275를 적용하여 설계하였으며 각 부조 구재의 단면은 상세에 따라 적용하였다. 하중 산정 시 원격·자동화 시스템의 비구조요소(DL)와 사용하중(LL)을 모델링하여 고려하였다.

변위를 분석하기 위해 대상 거푸집 시스템에 시·제동 하중을 포함한 상기 모든 하중을 적용하여 x, y, z 방향을 모두 고려하였다. 수평 가새 및 수직 가새를 설치하여 비틀림을 발생시키는 시·제동 하중의 영향으로 인한 수평 방향 처짐을 줄였다.

모든 부재는 비세장판으로 국부좌굴이 발생하지 않으며 AISC-ASD 설계기준(2016)에서 보-기둥 부재의 안전성을 평가하는 식 (3)과 식 (4)를 사용하였다.

$$\bullet \quad \frac{P_a}{P_n/\Omega_c} \geq 0.2 \text{인 경우,} \\ \frac{P_a}{P_n/\Omega_c} + \frac{8}{9} \left(\frac{M_{ax}}{M_{nx} + \Omega_b} + \frac{M_{ay}}{M_{ny}/\Omega_b} \right) \leq 1.0 \quad (3)$$

$$\bullet \quad \frac{P_a}{P_n/\Omega_c} < 0.2 \text{인 경우,} \\ \frac{P_a}{2P_n/\Omega_c} + \left(\frac{M_{ax}}{M_{nx} + \Omega_b} + \frac{M_{ay}}{M_{ny}/\Omega_b} \right) \leq 1.0 \quad (4)$$

여기서, P_a = 소요강도,

P_n = 공칭압축강도,

Ω_c, Ω_b = 안전율,

M_{ax}, M_{ay} = x, y축에 대한 사용하중 모멘트.

또한 모든 하중을 재하할 경우, AISC-ASD 설계기준(2016)으로 검토한 결과, 부재가 안전함을 확인했다.

5. 결론

본 연구는 무인으로 교각 시공이 가능한 원격·자동화 거푸집 시스템의 구조 부재를 결정하고 예상되는 하중에 대한 구조적 안전성을 분석하기 위하여 진행하였다. 이 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 예상되는 수직 하중은 크기가 매우 작아 구조물의 안전성에 크게 영향을 주지 않는다.
- (2) 수평으로 작용하는 시·제동 하중을 적용 시 최대 수평 변위가 과도하게 발생할 우려가 있어 수평 가새를 적용하여 수평 변위의 발생을 억제하였다.
- (3) 강구조 설계기준 중 허용응력설계법(ASD, allowable stress design)에 따라 평가하였을 때 예상되는 하중에 대하여 구조적으로 안전하였다.
- (4) 따라서 원격·자동화 거푸집 시스템은 예상되는 하중에 대해 충분히 구조적으로 안전하였다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 스마트건설기술개발사업의 지원(21SMIP-A157074-02)에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

[1] Park, J.G. (2022) *A Study on the Prevention of Fall Accident of the Domestic Construction Industry*, Master's Thesis, Hanyang University, Korea (in Korean).

[2] Hirokane, M., Miyamoto, A., Konishi, H., and Fujioka, Y. (2001) XML Based Database System for Accident Cases in Construction of Prestressed Concrete Bridges, *Creative Systems in Structural and*

- Construction Engineering (Proceedings of the First International Structural and Construction Conference)*, Routledge, USA, pp.393-398.
- [3] Yoon, K.J., Jung, Y.M., and Jung, J.S. (2022) Engineering Design of Robot Construction Automation System for Shearing Connectors, *Proceedings of the Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.221-222 (in Korean).
- [4] Lee, M.H., Chun, S.C., and Oh, B. (2009) Monitoring-Evaluation System for Lifting Heavy Structures Using 3D Location Data, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.21, No.4, pp.413-420 (in Korean).
- [5] Lee, S. (2021) Development and Application of Robotic Construction, *KSCE Magazine*, Korean Society of Civil Engineers, Vol.69, No.4, pp.34-42 (in Korean).
- [6] Shin, H.-W., Kim, G.-H., Kim, J.-Y., and Cho, H.-K. (2007) A Research on a Comparison Between the Strength and Weakness of Each Formwork Methods in the Core Wall Construction, *Journal of the Korean Institute of Building Construction*, KIC, Vol.7, No.4, pp.153-159 (in Korean).
- [7] Yang, S.-H., Cho, J.-Y., Cho, J.-W., Lee, J.-H., and Kim, Y.-S. (2012) A Study on the Development of Automated Gangform Climbing System for Apartment Housing Construction, *Korean Journal of Construction Engineering and Management*, Korea Institute of Construction Engineering and Management, Vol.13, No.1, pp.53-66 (in Korean).
- [8] Hong, G.-H., and Jung, S.-W. (2022) Development of Auto-Climbing Formwork System for Composite Core Walls, *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Taylor & Francis, Vol.21, No.2, pp. 511-520.
- [9] Jang, N.G., Lee, H.D., Shin, S.H., and Won, J.-H. (2019) Analysis of Ultimate Behavior of Wedge Type System Support Structure According to Bracing Installation, *Proceedings of the Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.73-74 (in Korean).
- [10] Lee, S. et al. (2021) *Development of Remote and Automated Construction Technologies for Road Structure*, Stage Report, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Korea (in Korean).

요 약: 지난 10년간 건설현장에서의 추락사고는 계속 증가하고 있다. 이에 고소에서 작업을 수행해야 하는 교각 건설에 있어 무인으로 시공이 가능한 원격 기술이 필요하다. 원격·자동화 거푸집 시스템은 자동 상승 거푸집 시스템의 상단부에 매니플레이터를 적용하여 무인으로 교각 건설이 가능하다. 본 연구에서는 원격·자동화 거푸집 시스템을 구현하기 위하여 거푸집 시스템의 구조 부재를 선정하여 3D 모델링을 하였다. 수치해석을 통해 매니플레이터의 시·제동 하중을 포함한 예상되는 하중을 산정하였고, 변위를 계산하여 거푸집 시스템의 구조적인 안전성을 확인하였다.

핵심용어: 거푸집 시스템, 교각 건설, 건설 자동화, 무인 시공, 자동 상승 거푸집
