Check for updates
Journal of Korea Robotics Society (2021) 16(3):207-215
https://doi.org/10.7746/jkros.2021.16.3.207 ISSN: 1975-6291 / eISSN: 2287-3961

교각 기둥시공을 위한 매니퓰레이터 엔드 이펙터 설계

Design of Manipulator End Effectors for Pier Column Construction

정 태 일† · 이 상 원[1] · 이 상 윤[2] · 유 지 환[3]
Taeil Chung†, Sang-Won Lee[1], Sang-Yoon Lee[2], Jee-Hwan Ryu[3]

Abstract: There is a risk of serious injury to workers who work at height in pier construction process. By using auto climbing formwork system that does not need to dismantle and reinstall formworks, it is possible to improve work efficiency and safety of workers. However, auto climbing formwork system still requires workers to work on a pier for rebar connection works and so on. In order to eliminate works by workers on the pier, robot manipulators with special end effectors are proposed. Through analysis of works on the pier, three specialized end effectors which are a gripper, a rebar coupler press, and a concrete vibrator, are suggested. Also, new pier construction scenario by the suggested system is confirmed using 3d modeling. It is expected that the proposed system and method enables pier construction without workers on piers. It will increase safety and efficiency of pier construction.

Keywords: Pier Construction, Construction Robot, Manipulator, End Effector

1. 서 론

교각은 교량 상부구조물의 하중을 지반에 전달해 주는 구조물로 교각기초, 기둥, 코핑(copying)으로 구성된다. 산악지대의 고속도로 구간이나 해상 교량의 경우 교각의 높이가 수십 미터에 달하며 시공해야하는 교각의 수도 상당히 많다. 일반적으로 적용되는 콘크리트 교각은 철근을 연결하고 거푸집을 설치한 후 내부에 콘크리트를 타설하여 시공을 하는데, 한번에 시공할 수 있는 높이는 약 2~6 m 로 교각의 높이에 따라 일정한 간격으로 나누어 타설한다. 이때, 거푸집의 해체 및 설치, 철근 연결 작업 등 교각 위에서 작업자에 의한 고소작업이 요구되는데 추락 등으로 인한 중대 재해가 빈번하게 발생하고 있다. 높은 위치에서 이루어지는 거푸집 설치 및 해체 과정의 위험성을 줄이고 시공 효율을 높이기 위해 거푸집을 자동으로 상승시킬 수 있는 자동 상승 거푸집 시스템(ACS, Auto-Climbing form System)과 거푸집을 천천히 올리면서 연속적으로 콘트리트를 타설하는 슬립폼 시스템(Slip Form System) 등이 활용되고 있다[1]. 이러한 이동식 거푸집 시공 방식은 거푸집의 반복적인 해체와 설치에 대한 번거로움을 줄여주고 공기단축, 노동력 절감, 품질 향상, 작업 안전성 향상 등의 이점이 있으나, 장비의 설치 및 운전, 철근 연결 작업 등을 위해서는 작업자가 높은 곳으로 올라가 작업을 해야 하는 문제가 여전히 남아 있다. 따라서 로봇을 이용하여 작업자가 높은 곳에 올라가지 않고도 시공을 할 수 있는 방안이 검토 되고 있다.

교각 시공에 있어서 로봇을 직접적으로 적용한 사례는 찾아보기 어려우나, 작업자에 의해 수행되어야할 대표적인 작업인 철근 연결 작업을 자동화한 사례는 찾아 볼 수 있다. 자동 철근 결속기를 활용한 형태의 로봇을 개발한 사례로 일본의 Chiba Institute of Technology와 미국의 Advanced Construction Robotics가 있으며 각각 형태는 다르지만 모두 평면에 놓인 격자형 철근 연결 작업을 수행할 수 있도록 개발 되었다[2,3]. 그러나 교각 철근 연결 작업은 고정되어 있지 않은 상부의 철근을 하부의 철근과 수직 방향으로 연결해야하기 때문에 이러한 방법의 철근 연결 방식을 교각 시공에 적용하기에는 한계가 있다.

Received : Apr. 27. 2021; Revised : Jun. 8. 2021; Accepted : Jun. 9. 2021
※ This research was conducted with the support of the "National R&D Project for Smart Construction Technology (No.20SMIP-A158708-01)" funded by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement under the Ministry of Land, Infrastructure and Transport, and managed by the Korea Expressway Corporation
1. Post-doctoral Researcher, KICT, Goyang, Korea (sangwonlee@kict.re.kr)
2. Senior Researcher, KICT, Goyang, Korea (sylee@kict.re.kr)
3. Associate Professor, KAIST, Daejeon, Korea (jhryu@kaist.ac.kr)
† Research Specialist, Corresponding author: KICT, Goyang, Korea (taeilchung@kict.re.kr)

Copyright ⓒKROS

본 연구에서는 매니퓰레이터를 이용하여 교각을 시공하기 위한 매니퓰레이터 엔드 이펙터에 대한 설계를 수행하였다. 자동 상승 거푸집을 사용하여 교각을 시공하는 경우 작업자가 수행하는 작업 분석을 하였으며, 이를 통해 그리퍼(gripper), 철근 커플러 압착기(rebar coupler press), 콘크리트 바이브레이터(concrete vibrator) 등 3종의 로봇 매니퓰레이터 엔드 이펙터(end effector)를 제안하였다. 또한, 제안한 로봇 시스템을 이용하여 교각 시공을 수행하기 위한 시나리오를 제시하고 이를 3D 모델로 구현하여 작업 시나리오에 따른 설계 검토를 수행하였다.

2. 교각 기둥 시공 작업 분석

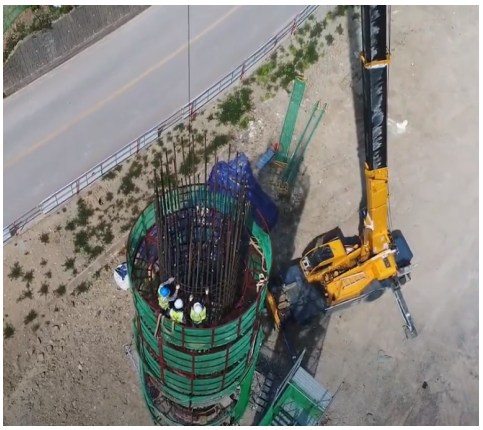
로봇을 이용한 교각 시공을 위해서 작업자가 교각 위에서 어떤 작업을 하는지 정확히 알고 있어야 로봇으로 그 작업을 대신할 수 있다. 일반적인 교각 시공은 기초공사를 완료한 뒤에 작업대 설치, 철근 연결, 거푸집 설치, 콘크리트 타설, 콘크리트 바이브레이팅, 거푸집 해체, 작업대 해체 등의 과정으로 이루어진다. 한 번에 타설하는 교각의 높이는 약 2~6 m 로 시공해야 할 전체 교각의 높이를 고려하여 한 단의 시공높이를 결정하며 여러 단으로 나누어 시공하게 된다. 교각 시공을 위해서는 반복적인 거푸집의 설치와 해체 작업이 필요하기 때문에 고 교각을 중심으로 거푸집의 설치/해체 작업이 필요 없는 자동 상승 거푸집 시스템이 활용되고 있다. 일반적인 교각 시공 방법에서는 인력에 의한 복잡한 거푸집 탈/부착 과정이 필요하며 이는 로봇 적용에 많은 어려움을 야기할 것으로 예상된다. 따라서 자동 상승 거푸집 시스템을 사용하여 시공 프로세스를 단순화하여 로봇 적용이 용이하도록 고려하였다. 본 연구에서는 자동 상승 거푸집 시스템을 사용하여 교각 시공을 수행하는 경우 작업자의 작업 분석을 진행하였다.

작업자가 교각위에서 수행하는 대표적인 작업은 철근을 연결하는 작업으로 수십 가닥의 무거운 철근을 교각 연결부의 철근과 연결하는 작업이다. 다양한 철근 연결 방법이 존재하지만 가장 일반적인 철근 연결 방법은 겹침 이음 방법으로 일정 길이 이상의 철근을 서로 겹쳐서 결속선으로 묶는 방법이며, 이러한 철근 연결을 보다 쉽게 하기 위한 다양한 방식의 철근 커플러(rebar coupler)가 존재한다[4]. 기존의 철근 연결 방법은 철근을 한 가닥씩 연결하는 것으로 상단의 철근을 잡고 있는 상태에서 하단의 철근과 연결해야 하므로 하나의 팔을 가진 매니퓰레이터로 수행하기에는 복잡한 작업이다. 따라서 철근을 사전에 철근망 형태로 제작하여 하단의 철근망과 효율적으로 연결할 수 있도록 고려하는 것이 필요하다. 또한 다양한 철근 커플러 중에서 로봇에 적용하기 용이한 철근 연결방법을 선택해야 할 필요가 있다.

철근 연결 이후에는 자동 상승 거푸집을 상승 시키고 콘크리트를 거푸집 내부로 타설한다. 콘크리트 타설용 호스의 위치 조정이 필요한 경우 작업자가 호스를 움직여 콘크리트가 거푸집 내부로 고르게 채워질 수 있도록 한다. 콘크리트 타설 중이나 타설 뒤에 진동봉을 타설된 콘크리트 내부로 넣어 콘크리트를 빈 공간 없이 채워지게 하고 내부의 공기방울을 제거하여 콘크리트 품질을 높이는 과정이 필요한데 이러한 과정을 콘크리트 바이브레이팅(concrete vibrating)이라고 한다. 콘크리트 품질 향상을 위해서는 콘트리트 바이브레이팅이 타설 부위에 고르게 이루어져야 하는데, 작업이 번거롭지만 결과를 눈으로 확인하기 어려워 현장에서는 작업이 소홀하게 이루어지는 경우가 많다. 바이브레이팅 작업이 자동화 된다면 콘크리트 시공 품질 향상에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

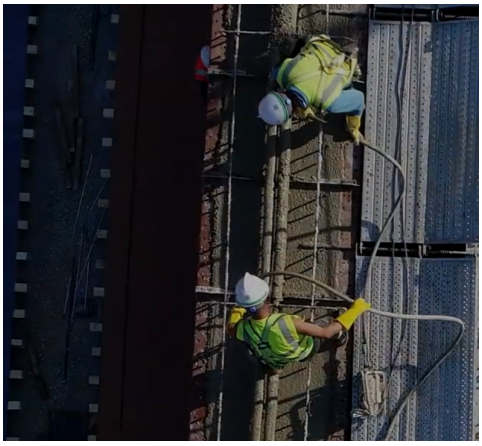
작업에 대한 이해를 돕기 위해 [Figs. 1~3]에 철근 연결 작업, 콘크리트 타설 작업, 콘크리트 바이브레이팅 작업 모습을 제시하였다. [Figs. 1~3]는 자동 상승 거푸집을 사용하지 않은 일반적인 교각 시공 작업의 모습이지만, 자동 상승 거푸집을 사용하는 경우에도 작업자가 수행하는 작업은 유사하다.

본 장에서는 자동 상승 거푸집 시스템 사용을 고려하여 작



[Fig. 1] Rebar connection task by workers on pier construction[5]

[Fig. 2] Concrete pouring task on pier construction[5]



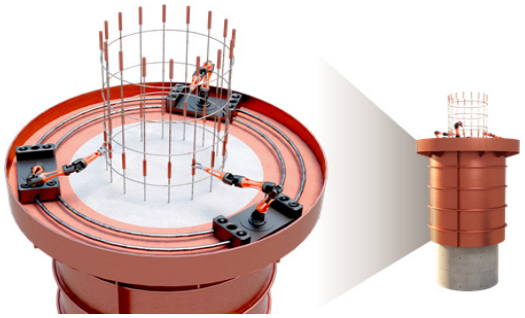
[Fig. 3] An example on concrete vibrating task[5]

업자가 교각 위에서 수행하는 작업 분석을 하였다. 자동 상승 거푸집을 사용하는 경우 작업자에 의해 수행이 요구되는 작업은 철근 연결 작업, 콘크리트 타설시 콘크리트 호스 위치 조정 작업, 콘크리트 바이브레이팅 작업으로 분석되었으며, 로봇으로 작업자의 작업을 그대로 수행하는 것이 아니라 로봇이 작업하기 용이하도록 작업 프로세스를 만들고 작업 툴을 개발해야 할 것으로 생각된다. 또한, 건설 작업 특성상 규격화된 작업이 쉽지 않으므로 완전 자동화 작업이 아닌 원격 작업을 기반으로 하고 일부 반복적이고 적용이 쉬운 작업에 대핸 자동화 작업 개발이 필요하다고 판단된다. 아울러 일반적인 자동 상승 거푸집 시스템의 경우 작업자가 교각 위에서 시스템을 조정하고 운영하지만, 작업자의 고소작업을 제거하기 위해서는 자동 상승 거푸집 시스템의 운영을 교각 아래에서 가능하도록 시스템의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

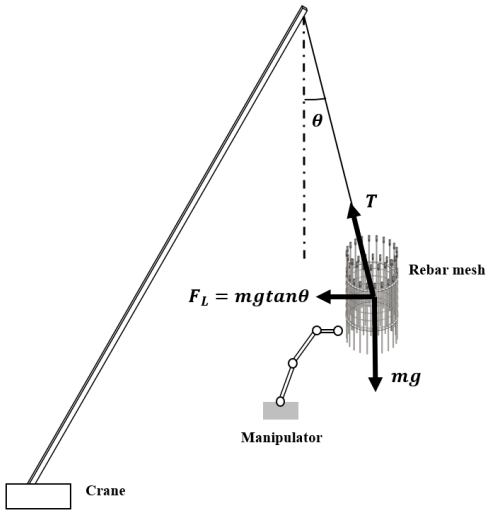
3. 교각 기둥 시공을 위한 엔드 이펙터 설계

교각 기둥 시공을 위해서 본 연구에서는 자동 상승 거푸집 시스템을 사용하고 3대의 로봇 매니퓰레이터를 이용하여 시공할 수 있는 시스템을 제안하였다[Fig. 4]. 제안된 시스템은 기존의 자동 상승 거푸집 시스템 상단에 로봇이 움직일 수 있도록 레일을 설치하고, 레일 위에 모바일 플랫폼과 매니퓰레이터를 설치하여 교각 기둥 시공에 필요한 작업을 수행할 수 있도록 하였다.

교각 시공 작업 분석을 통해 로봇에 의해 수행이 필요한 작업은 철근망 잡기, 철근망 연결하기, 콘크리트 타설 호스 잡기, 콘크리트 바이브레이팅 작업 등으로 도출되었다. 이러한 작업 수행을 위해서 그리퍼(gripper), 철근 커플러 압착기(rebar coupler press), 콘크리트 바이브레이터(concrete vibrator) 등 3종의 엔드 이펙터를 설계하기로 하였다.



[Fig. 4] Concept design of robot system for pier construction



[Fig. 5] Manipulator load when rebar mesh position adjustment

매니퓰레이터의 선정을 위해서 시공 작업 범위와 필요한 가반 하중을 고려하였다. 우리나라에서 널리 시공되는 직경 2 m 규모의 원형 교각을 고려하였으며, 매니퓰레이터 3대를 이용하여 영역을 나누어 원활히 작업을 할 수 있도록 2 m 이상의 작업 범위를 가진 매니퓰레이터를 선정하기로 하였다. 또한, [Fig. 5]에 표현된 그림과 같이 1~2 tonf 무게의 철근망을 크레인으로 7 m 높이에서 들고 있는 상태에서 매니퓰레이터를 이용하여 수평 방향으로 약 30 cm 정도의 미세 위치 조정이 가능하도록 가반하중 50~100 kgf 의 매니퓰레이터를 고려하였다.

최종적으로 예산과 성능을 종합적으로 검토하여 수평 작업 범위 2.239 m, 가반 중량 80 kgf 인 현대로보틱스 6축 매니퓰레이터 YS080 모델을 선정하였으며, 건설 현장의 거친 작업 환경에서 매니퓰레이터를 보호하기 위하여 커버 제작을 고려하기로 하였다.

선정된 매니퓰레이터의 작업범위와 능력을 바탕으로 엔드 이펙터를 설계하였으며, 엔드 이펙터의 교체를 쉽게 하기 위한 툴 교체 모듈(tool changer)과 툴을 보관하고 쉽게 교체하기 위한 툴 스테이션(tool station)을 고려하였다.

3.1 그리퍼(gripper)

그리퍼는 가장 일반적인 로봇 툴로서 교각 시공에 필요한 철근 잡기, 콘크리트 호스 잡기 이외에도 다양하게 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 그리퍼의 가장 중요한 역할은 상단의 철근망을 잡아 하단의 철근 커플러와 조립하는 것으로 이러한 필요에 초점을 맞추어 그리퍼를 설계하였다.

그리퍼는 다양한 종류와 방식이 존재하며, 본 연구에서는 외부의 거친 환경에서 철근과 콘크리트 호스 잡기를 수행할 수 있는 유압식 2-핑거(2-finger) 방식을 채택하였다.

본 연구에서 제안한 철근망은 직경 35 mm, 길이 2.75 m의 철근 42개를 원형의 철근망 형태로 제작한 것으로 무게는 약 1000 kgf 이다. 철근망의 무게는 매니퓰레이터의 가반중량을 넘기 때문에 크레인을 통해 철근망의 조립지점에 대략적으로 위치시키고, 매니퓰레이터를 이용하여 미세 위치 조정을 하기로 하였다.

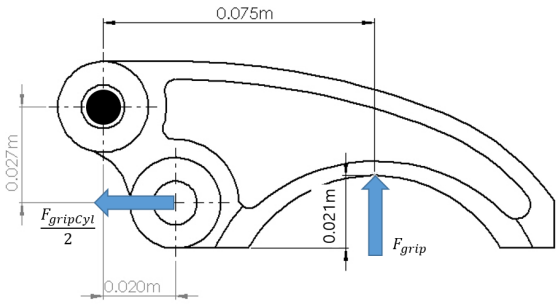
3대의 매니퓰레이터를 이용하여 철근망을 흔들리지 않도록 잡고 커플러와 결합위치에 상세 조정을 해야 한다. 매니퓰레이터 1대에만 철근망의 하중이 집중되는 경우 매니퓰레이터의 가반하중 80 kgf를 고려하였을 때 약 4.57도의 각도 조정이 가능하며, 크레인 와이어의 길이가 7 m라고 가정하면 약 56 cm 의 위치 조정이 가능하다. [Fig. 5]에 로봇을 이용하여 철근망의 위치 조정시 철근망의 무게(mg)와 매니퓰레이터가 받는 힘(F_LL)의 관계를 그림으로 표현하였으며, 이러한 관계를 고려하여 그리퍼를 설계 하였다.

그리퍼 앞부분의 형상은 직경 35 mm 철근을 잡기에 적합하도록 디자인 하였으며, 수십 다발의 철근을 연결한 철근망의 무게는 매니퓰레이터의 가반중량보다 무겁기 때문에 수평방향으로만 위치조정이 가능하고 수직방향으로는 움직임을 허용하도록 그리퍼 내부를 라운드 형상으로 디자인 하였다. 또한 그리퍼가 닫힘 상태에서도 철근을 꽉 잡지 않도록 철근과 그리퍼 사이 간격에 양쪽으로 3.5 mm의 유격을 주었다.

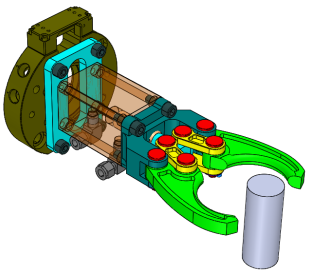
그리퍼는 내경 40 mm, 사용압력 140 kgf/cm^2 인 복동형 유압 실린더를 사용하여 설계하였다. 실린더에 의한 최대힘($F_{gripCyl}$)은 약 1,759 kgf이며, 그리퍼가 닫힌 상태에서의 최대 파지력(F_{grip})은 약 317 kgf 이다. 그리퍼 앞부분의 상세한 설계 치수는 [Fig. 6]에 제시하였으며, 최종적인 그리퍼의 형상을 [Fig. 7]에 나타내었다.

3.2 철근 커플러 압착기(rebar coupler press)

철근 연결방법은 매우 다양하며 철근 연결을 효율적으로 하기 위한 다양한 철근 커플러가 존재한다[4]. 다양한 철근 연결 방법 중에서 사람이 작업하기에 용이한 것과 로봇이 작업하기에 용이한 것은 다르다. 예를 들면 사람은 다른 도구 필요 없이 커플러를 회전하여 철근을 연결할 수 있는 스레드(threaded) 타입이나 힘으로 눌러서 끼워 맞추는 원터치 타입의 커플러가 작업하기에 용이하나, 로봇으로 이러한 방식의 커플러를 시공하기에는 정밀한 위치 제어 및 힘 피드백이 요구되어 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 [Fig. 8] 과 같이 슬리브(sleeve) 내부에 2개의 철근을 넣고 슬리브를 압착하여 시공하는 방식을 채택하여 엔드 이펙터를 개발하기로 하였다.



[Fig. 6] Grip force design model



[Fig. 7] 3D model of the gripper for rebar assembly

(a)

(b)

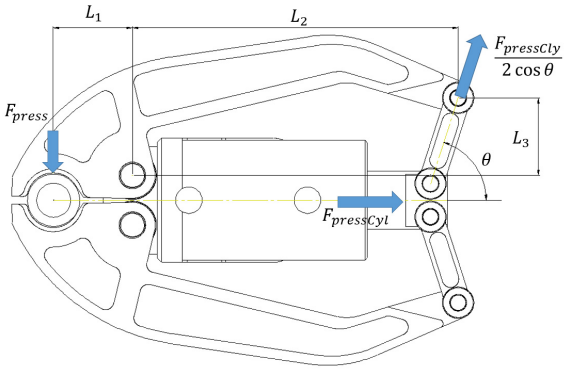
[Fig. 8] Rebar connection by sleeve pressing: (a) before sleeve pressing, (b) after sleeve pressing

매니퓰레이터에 부착 가능한 압착기 개발을 위해 현장에서 사용되고 있는 커플러 압착기중 하나인 OCEPO 사의 제품을 참고 하였다[6]. 이 제품을 이용한 작업 모습을 [Fig. 9]에서 나타내었으며, 수동으로 프레스 몰드를 반대쪽에 결합하는 폐회로 방식으로 슬리브와 철근이 조립된 상태에서 압착기를 사용하기 위해서는 몰드를 빼서 압착기 내부로 슬리브를 위치시키고 몰드를 결합한 후 압착해야 하기 때문에 이러한 구조를 그대로 사용하여 엔드 이펙터로 개발하기에는 불편함이 있다. 따라서 로봇 매니퓰레이터를 이용하여 쉽게 시공가능한 개회로 방식의 새로운 슬리브 압착기를 설계하기로 하였다.

교각에 사용되는 철근은 SD 300, SD 400, SD 500 등이 주로 사용되며, 철근의 기계적 결합 부분의 인장강도는 철근 항복강도의 125% 이상을 만족하도록 요구하고 있다[7,8]. 본 연구에서는 SD 400(항복 강도 400 MPa 이상, 인장강도 460 MPa 이상)[9] 철근을 사용하는 것을 고려하였으며, 철근 이음 요구조건을 만족시키기 위해서 슬리브 재질로 SM35 C(항복강도 392 MPa 이상, 인장강도 569 MPa 이상)[10]을 사용하는 것을 고려하였다.

철근과 슬리브가 조립된 상태에서 쉽게 슬리브 압착 작업을 할 수 있도록 니퍼나 커터 등에서 사용하고 있는 개회로 방식의 지렛대 구조를 채용하여 설계하였다. OCEPO 사의 제품 사양으로 제시된 압착력 80 tonf을 기준으로 역설계 하였으며, 무게를 낮추면서 압착력을 유지하기 위해 지렛대 구조를 사용하고 기존 유압실린더 보다 낮은 힘의 알루미늄 유압 실린더를 사용하였다.

[Fig. 9] Rebar cold stamping machine from OCEPO



[Fig. 10] Press force design model

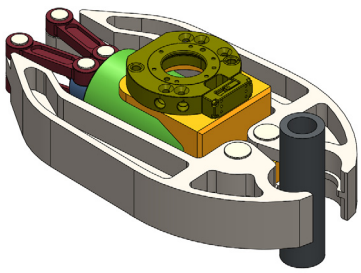
[Fig. 10]에 새롭게 제안한 커플러 압착기 형상과 실린더 힘, 압착력 사이의 관계를 도시하였다. F_{press}는 슬리브 압착력, $F_{pressCyl}$은 실린더 힘, θ는 압착시 실린더 힘을 전달하는 링크와 실린더 힘 방향사이의 각도, L_1은 회전 중심점으로부터 압착면 중심과의 거리, L_2, L_3는 회전 중심점으로부터 힘점 사이의 거리를 나타낸다. [Fig. 10] 에 나타난 관계로부터 커플러 압착력 F_{press}는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{press} = F_{pressCyl}\left(\frac{L_2\tan(\theta) - L_3}{2L_1}\right) \tag{1}$$

각 링크의 길이는 압착력 뿐만 아니라 압착기를 열었을 때 슬리브의 외경보다는 크게 열려야 하고, 압착기를 닫았을 때 슬리브를 효과적으로 압착시킬 수 있어야 한다. 3D 모델을 통해 압착기의 움직임과 압착력을 종합적으로 고려하여, 최종적으로 L_1= 0.095 m, L_2 = 0.461 m, L_3 = 0.145 m, θ = 56.11° 로 설계하였다. 실린더 힘($F_{pressCyl}$)은 30 tonf 인 알루미늄 유압 실린더를 선정하였고, 이러한 설계 정보를 식 (1)에 대입하면 압착력(F_{press}) 85.4 tonf을 얻을 수 있다. 이는 상용 제품과 유사한 압착력으로 실제 현장에서도 유사한 성능을 가질 것으로 기대된다.

[Fig. 11]에 최종적으로 설계된 커플러 압착기의 3D 모델을 제시하였다. 이는 철근과 슬리브가 결합된 상태에서 압착을 할 수 있도록 개발된 것으로 매니퓰레이터에 적용하여 시공하기에 용이할 것으로 판단된다.

커플러 압착기는 매우 큰 힘으로 작동이 되기 때문에 이를 매니퓰레이터에 부착하여 사용하는 경우 예상치 못한 큰 힘이 매니퓰레이터에 가해질 수 있다. 따라서 슬리브 압착 시 압착기의 위치 변화를 최소화하기 위해 비전 센서 등을 활용한 슬리브



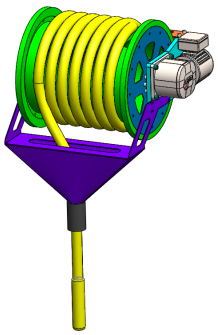
[Fig. 11] 3D model of the rebar coupler press

와 압착기의 정렬 문제에 대한 고려가 필요하다. 또한 압착 시 매니퓰레이터의 수평방향 위치 제어에 대한 강성(stiffness)을 약하게 조절하여 작업시 매니퓰레이터에 가해질 수 있는 순간적인 충격에 대응이 필요하다.

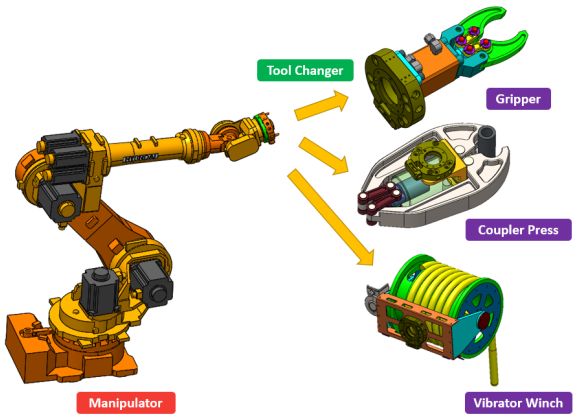
3.3 콘크리트 바이브레이터(concrete vibrator)

콘크리트 타설 후 품질 향상을 위해서 콘크리트 내부의 빈 공간이나 기포를 제거하기 위한 바이브레이팅 작업이 필요하다[11]. 기존의 콘크리트 바이브레이팅 작업은 진동봉이 달린 긴 호스를 작업자가 타설 부위 내부로 넣어서 시공하며, 진동봉과 호스의 무게는 10 kg 이상으로 작업자가 타설 부위에 고르게 시공하기에는 상당히 힘이 들고 번거로운 점이 많았다. 바이브레이터는 플렉서블 샤프트 식(flexible shaft type), 유압식, 공압식, 고주파식 등이 있으나, 윈치(winch) 형태로 연결 호스를 감고 풀기 용이하고, 호스가 감긴 상태에서도 사용이 가능한 고주파식 바이브레이터를 사용하여 설계하였다. 또한, 윈치가 감기고 풀리면서 진동봉의 위치가 변화는 것을 막기 위한 가이드와 작업 중 진동봉에 묻은 콘크리트를 제거하기 위한 브러쉬를 고려하였다. 바이브레이터 장치와 윈치와 연결은 슬립링(slip-ring)을 사용하여 회전하는 경우에도 전기적 연결이 가능하도록 하였다. 최종 설계된 윈치형 바이브레이터 형상을 [Fig. 12]에 제시하였다.

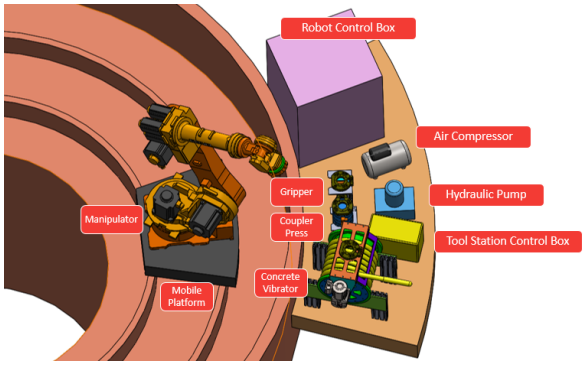
바이브레이터 끝의 진동봉이 가장 무게가 무거운 부분으로 시공하고자 하는 위치에 매니퓰레이터를 위치시키고 윈치를 감고 푸는 방식으로 수직 방향의 바이브레이팅 시공이 가능하다. 타설된 콘크리트 내부의 상태를 알기 어려우므로 타설 부위에 고르게 바이브레이팅 시공이 필요하다. 진동봉의 영향 범위를 고려하여 타설 부위를 가로, 세로 약 50 cm 의 격자로 나누고, 약 10 cm/s 의 속도로 진동봉을 타설 바닥면 부근까지 풀었다가 감는 방법으로 시공하는 것을 고려하였다. 보다 정확한 시공 방법은 실제 실험을 통하여 보완될 수 있을 것을 판단된다.



[Fig. 12] 3D model of the concrete vibrator



[Fig. 13] End-effector and robotic tool changer



[Fig. 14] Tool station

3.4 툴 체인저(tool changer) 및 툴 스테이션(tool station)

로봇 매니퓰레이터를 이용한 교각 시공을 위해서 개발된 3가지의 엔드 이펙터를 효율적으로 교체, 사용하기 위해 ATI 사의 로보틱 툴 체인저(robotic tool changer, QC-76)[12] 를 적용하였다[Fig. 13]. 이 제품은 마스터(master) 모듈과 툴(tool) 모듈로 이루어져 있으며, 이를 매니퓰레이터와 툴에 각각 부착하여 사용한다. 마스터 모듈에 공압을 주입하면 기계적인 결합과 분리가 가능하도록 되어 있고, 기계적인 결합을 유지할 수 있는 허용 하중은 100 kgf, 허용 모멘트는 542 Nm 이다. 또한, 작업대 뒤쪽에 툴 스테이션을 설치하여 툴 및 툴 거치대, 유압 펌프, 공압 펌프, 제어반 등을 보관할 수 있도록 하였다[Fig. 14].

4. 교각 무인 시공 시나리오 3D 모델링

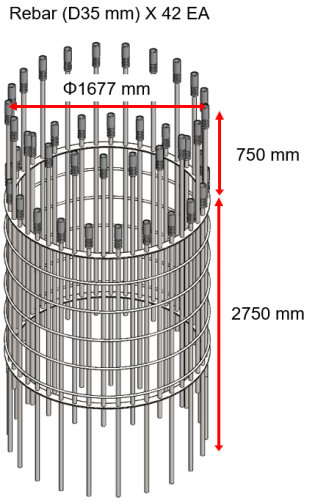
제안한 시스템을 이용하여 무인 교각 시공 가능성을 확인하기 위해 설계된 로봇 시스템과 엔드 이펙터를 이용하여 실제 크기의 교각에 대하여 시공시나리오에 따른 3D 모델링 작업을 진행하였다.

4.1 시공 대상 교각 선정 및 제원

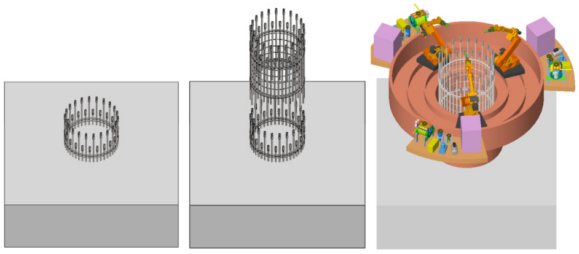
로봇 매니퓰레이터를 이용한 교각 시공을 위해서 구체적인 시공 대상 교각을 선정하였다. 대상 교각은 우리나라에서 가장 널리 시공되는 교량 중의 하나인 고속도로 교량에 적용된 것으로 지름 2 m 의 원형 교각으로 선정하였다. 교각 시공에 사용되는 철근망 설계를 위해 국토교통부에서 발간된 "국도 건설공사 설계실무 요령"을 참조하였다[7]. 철근망은 [Fig. 15]에 제시된 것과 같이 지름 35 mm 철근 42개를 원형으로 배치하였으며, 인접하는 철근 이음부와의 간격이 750 mm 가 되도록 엇갈려 설계하였다. 1단 시공 높이는 2750 mm로 철근 연결과 콘크리트 타설 과정을 반복하면서 높이 20~30 m 의 교각을 시공하는 것으로 하였다.

4.2 시공 시나리오 3D 모델링

교각 기둥 무인 시공을 위해서 실제 시공되는 교각의 제원과 제안된 시스템을 기반으로 3D 모델을 구현하였다. 교각 시공 순서는 기초 공사, 철근망 조립, 철근 커플러 연결, 콘크리트 타설, 콘크리트 바이브레이팅 등으로 철근망 조립부터 콘크리트 바이브레이팅 과정을 반복하여 교각 시공을 하게 된다.



[Fig. 15] Rebar mesh specifications for 2 m-diameter pier column



(a) (b) (c)

[Fig. 16] (a) Pier foundation, (b) 1st rebar mesh connection, (c) System installation for pier construction

4.2.1 기초 공사 및 시스템 설치

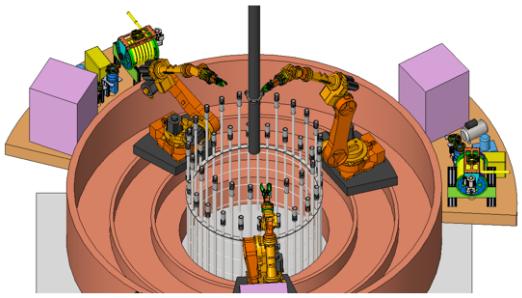
교각 시공의 처음 단계는 지반 위에 교각 기초 시공 후, 첫 번째 철근망을 연결하고 교각 시공을 위한 자동 상승 거푸집 시스템과 로봇 시스템을 설치하는 것으로 [Fig. 16]에 3단계로 표현하였다.

교각 기초 시공은 단단한 지반위에 기둥과 연결되는 기초를 만드는 것으로 작업자에 의한 기존의 시공방법을 따른다. 다만 본 연구에서 제안한 철근망과 연결을 위해서 철근 커플러를 기초 철근 상부에 사전에 설치하여 상부 철근망과 연결을 용이하게 한다. 아직 교각 시공을 위한 시스템과 로봇이 설치되기 전 단계이므로 작업자가 철근망 조립과 압착기를 이용한 철근 커플러 시공을 수행한다.

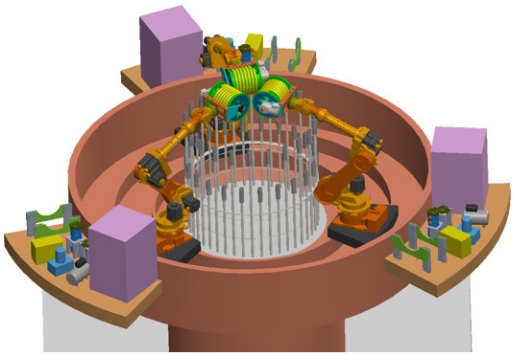
1단 철근망과 기초 철근의 연결이 완료가 되면 자동 상승 거푸집 시스템과 로봇 매니퓰레이터 등을 설치한다. 시스템 설치 완료이후 부터는 작업자가 교각 위에 올라가지 않고, 단을 높여가면서 교각 기둥 시공을 수행하게 된다.

4.2.2 콘크리트 타설 및 바이브레이팅

시스템 설치가 완료되면 본격적으로 교각 시공을 수행하게 되는데, 이미 철근망이 연결되었으므로 이후 공정인 콘크리트 타설과 콘크리트 바이브레이팅 작업을 수행한다.



[Fig. 17] Concrete pouring



[Fig. 18] Concrete vibrating

콘크리트 타설 작업시 타설을 고르게 하기 위해 콘크리트 호스의 위치를 조절해야 하는 경우가 있으며, 이를 위해 콘크리트 호스에 매니퓰레이터 그리퍼로 잡을 수 있도록 지그를 설치한 뒤 그리퍼를 이용하여 원하는 위치로 조절한 한다[Fig. 17].

콘크리트 타설 이후에는 매니퓰레이터 툴을 윈치형 바이브레이터로 교체하여 콘크리트 바이브레이팅 작업을 수행한다. 바이브레이팅 작업은 약 50 cm 간격으로 고르게 이루어져야 하므로 작업의 효율성을 위해 3대의 매니퓰레이터가 영역을 나누어 작업을 수행한다[Fig. 18].

4.2.3 철근망 조립 및 철근 커플러 시공

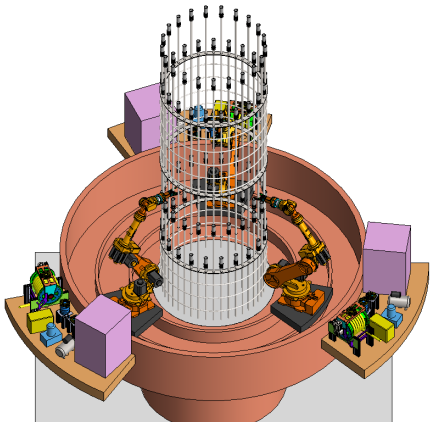
철근망 연결과 콘크리트 타설 과정이 끝나면 교각 1단의 시공이 완료된다. 이후에는 교각 시공 시스템을 이용하여 본격적으로 교각을 시공하게 된다.

2단 교각 시공을 위해 새로운 철근망을 하단의 철근망과 연결하는 작업이 필요하다. 철근망의 무게가 매니퓰레이터의 가반중량보다 크기 때문에 크레인으로 철근망을 들고 있게 되며, 매니퓰레이터의 그리퍼를 이용하여 상부의 철근망이 하부 철근망 슬리브 사이에 정확히 들어가도록 위치를 조정한다[Fig. 19]. 상부 철근망의 위치가 조정되었으면 크레인 와이어를 내려서 상부 철근망이 하부 철근망의 슬리브 사이로 정확히 조립시킨다. 상부 철근망과 하부 철근망이 조립이 되었으면, 매니퓰레이터의 툴을 압착기로 교체하고 슬리브를 압착하여 철근망이 단단하게 결합되도록 한다[Fig. 20].

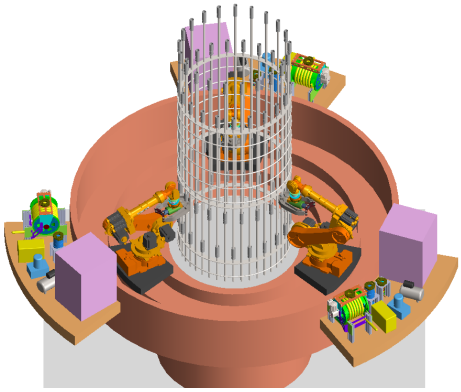
철근망 연결이 완료되면 자동 거푸집 시스템을 상승 시키고 거푸집 내부로 콘크리트 타설 및 콘크리트 바이브레이팅 과정을 반복한다. 철근망 연결, 거푸집 상승, 콘크리트 타설 및 바이브레이팅 과정을 반복하면서 [Fig. 21]과 같이 교각 기둥을 시공을 수행할 수 있으며, 시공이 완료되면 시스템을 아래로 하강 시켜 시공을 완료하게 된다.

5. 결 론

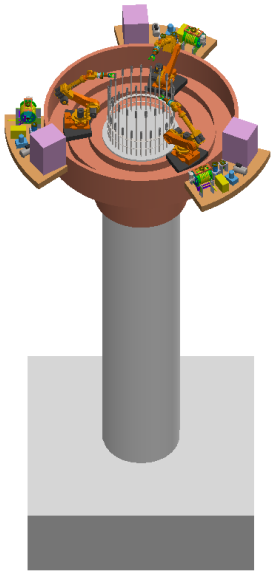
본 논문에서는 교각 무인 시공을 위해 자동 상승 거푸집 시스템과 3대의 매니퓰레이터를 이용한 시공 방법을 제안하였다. 교각 위에서 작업자에 의해 수행되는 작업을 분석하여 그리퍼, 철근 커플러 압착기, 콘크리트 바이브레이터 등 3종의 매니퓰레이터 엔드 이펙터를 설계하였으며, 엔드 이펙터의 교환을 쉽게 하기 위한 툴 교환 모듈과 툴 스테이션을 제시하였다. 또한 교각 시공 시나리오에 따른 3D 모델을 구현하여 제시된 시스템의 기능 및 설계 검토를 수행하였다. 향후 시스템의 제작과 테스트를 위해서는 작업 환경 인식, 센싱, 매니퓰레이터 제어 등 구체적인 작업 수행을 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.



[Fig. 19] Rebar mesh position adjustment



[Fig. 20] Rebar mesh connection



[Fig. 21] Pier column constructed by the proposed robot system

본 연구에서 제안한 시스템과 방법을 통해 작업자의 고소작업 없이 교각 기둥 시공을 할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 시스템 제작을 통해 실제 교각 시공에 대한 테스트 및 기능 검증을 수행할 예정이다.

References

[1] H. Yoon, W. J. Chin, H. S. Kim, and Y. J. Kim, "Development of an Efficient Tapered Slip-Form System Applying BIM Technology," *Engineering*, vol.5 no. 9, pp. 693-699, Sep., 2013, DOI: 10.4236/eng.2013.59082.

[2] *T-iROBO Rebar*, [Online], https://furo.org/en/works/t_irobo_rebar/t_irobo_rebar.html, Accessed: Feb. 9, 2021.

[3] C. A. Cardno, "Robotic Rebar-Tying System Uses Artificial Intelligence," *Civil Engineering Magazine*, vol. 88, no. 1, pp. 38-39, Jan., 2018, DOI: 10.1061/ciegag.0001260.

[4] D. V. Bompa and A. Y. Elghazouli, "Ductility considerations for mechanical reinforcement couplers," *Structures*, vol. 12, pp. 115-119, Nov., 2017, DOI: 10.1016/j.istruc.2017.08.007.

[5] *PSC Beam Bridge Construction Process (1)*, [Online], https://www.youtube.com/watch?v=GD8hW0N503E&t=138s, Accessed: Apr. 21, 2021.

[6] *Rebar Cold Stamping Machine*, [Online], http://www.ocepo.com/rebar_cold_stamping_machine/483.html, Accessed: Apr. 22, 2021.

[7] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, *National highway construction design practice handbook*, [Online], http://www.molit.go.kr/USR/I0204/m_45/dtl.jsp?gubun=3&search=&search_dept_id=&search_dept_nm=&old_search_dept_nm=&psize=10&search_regdate_s=&search_regdate_e=&srch_usr_nm=&srch_usr_num=&srch_usr_year=&srch_usr_titl=&srch_usr_ctnt=&lcmspage=1&idx=16788, Accessed: Apr. 22, 2021.

[8] *Method of Inspection for Mechanical Splicing Joint of Bars for Concrete Reinforcement - KS D 0249*, [Online], https://standard.go.kr/KSCI/portalindex.do, Accessed: Mar. 4, 2019.

[9] *Steel Bars for Concrete Reinforcement - KS D 3504*, [Online], https://standard.go.kr/KSCI/portalindex.do, Accessed: Oct. 29, 2019.

[10] *Carbon Steels for Machine Structural Use - KS D 3752*, [Online], https://standard.go.kr/KSCI/portalindex.do, Accessed: Oct. 29, 2019.

[11] B. A. Suprenant, "Concrete vibration," *Concrete Construction*, pp. 563-568, 1988, [Online], https://www.sefindia.org/forum/files/c880563_206.pdf.

[12] *Robotic Tool Changers*, [Online], https://www.ati-ia.com/products/toolchanger/robot_tool_changer.aspx, Accessed on Apr. 22, 2021.

정 태 일

2007 성균관대학교 기계공학부(학사)
2009 한국과학기술원 로봇공학학제전공(석사)
2009~2016 삼성중공업 연구원
2020~현재 한국과학기술원 로봇공학학제전공(박사과정)
2017~현재 한국건설기술연구원 전임연구원

관심분야: Construction robots, Telerobotics, Cooperative manipulation

이 상 원

2010 연세대학교 토목환경공학과(학사)
2017 연세대학교 토목환경공학과(박사)
2020~현재 한국건설기술연구원 박사후 연구원

관심분야: Construction robots, Telerobotics, Cooperative manipulation

이 상 윤

2001 한양대학교 토목공학과(학사)
2003 한양대학교 토목환경공학과(석사)
2013 고려대학교 사회환경시스템공학과(박사)
2003~현재 한국건설기술연구원 수석연구원

관심분야: Construction robots, Automated construction, Prefabricated structures

유 지 환

1995 인하대학교 기계공학과(학사)
1997 한국과학기술원 기계공학과(석사)
2002 한국과학기술원 기계공학과(박사)
2005~2019 한국기술교육대학교 교수
2019~현재 한국과학기술원 건설및환경공학과 부교수

관심분야: Construction robots, Haptic/Telerobotics, Soft continuum growing robot, Soft and flexible actuator and its application to soft exo-suit, Autonomous vehicle