



# 고층 건물 파쇄 작업을 위한 물 분사 로봇용 자율 미세먼지 발생원 추적 시스템

## Autonomous Fine Dust Source Tracking System of the Water Spray Robot for High-rise Building Demolition

정현경<sup>1</sup>, 박현빈<sup>1</sup>, 신재민<sup>1</sup>, 정현재<sup>1</sup>, 주백석<sup>2,#</sup>  
Hyeongyeong Jeong<sup>1</sup>, Hyunbin Park<sup>1</sup>, Jaemin Shin<sup>1</sup>, Hyeonjae Jeong<sup>1</sup>, and Baeksuk Chu<sup>2,#</sup>

<sup>1</sup> 금오공과대학교 대학원 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kumoh National Institute of Technology)

<sup>2</sup> 금오공과대학교 기계시스템공학과 (Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

# Corresponding Author / E-mail: bschu@kumoh.ac.kr, TEL: +82-54-478-7398

ORCID:0000-0002-3253-1506

KEYWORDS: High-rise building demolition (고층 건물 파쇄), Fine dust (미세먼지), Autonomous position tracking (자율 위치 추적), Water spray robot (물 분사 로봇), Sensor network (센서 네트워크), Mobile robot (이동로봇)

*This study reports an autonomous fine dust source tracking system of a water spray robot for high-rise building demolition. The core function of this system is performing a self-controlled fine dust tracking of the endpoint of the excavator, which is the fine dust generation point. The water spray robot has a lift with a parallelogram-shaped linkage to lift the water spray drum to 10 m from the ground. The sensor network system is connected to the robot and the excavator to calculate the relative position of the water spray drum and excavator endpoint using forward kinematics. RTK-GPS is attached to the robot and the excavator to calculate the relative distance. By sensor network, forward kinematics, and RTK-GPS, the water spray robot can autonomously track fine dust generation point and spray water to the endpoint of the excavator. The experiment was conducted to confirm the accuracy of kinematics calculation and tracking performance of the robot. The first experiment showed that the calculation result of forward kinematics was accurate enough to fulfill tracking operations. The second experiment showed that the tracking accuracy was precise enough, meaning that the robot could autonomously track fine dust generation point.*

Manuscript received: January 14, 2023 / Accepted: April 3, 2023

### 1. 서론

건물 파쇄 등이 수행되는 건설현장에서는 작업 과정 중에 다량의 미세먼지가 발생한다. 환경부 국가미세먼지 정보센터에 따르면, 국가에서 발생하는 미세먼지(Particulate Matter, PM10) 중 건설공사로 인해 발생하는 미세 먼지가 15%인 것을 알 수 있다 [1,2]. 그리고 대기 중에 부유하는 미세먼지에 장기적 지속적 노출 시 폐렴 등의 각종 질병이 유발될 수 있어 근로자와 인근 주민의 건강에 치명적인 영향을 끼칠 수 있다[3,4].

미세먼지를 억제하기 위해 현장에서는 Figs. 1(a)와 같이

사람이 직접 살수하거나 1(b)와 같이 물 분사 기계를 이용해 미세먼지를 저감하려는 노력을 기울이고 있다. 하지만 인력 살수는 Fig. 1(a)와 같이 근로자가 작업 현장 근처에서 물을 분사하기 때문에 사고에 노출되어 있으며 물 분사 기계는 분사 방향을 고정하여 물을 분사하므로 작업 현장에서의 효율이 떨어진다. 또한, 고층 건물을 파쇄할 경우 물을 높은 건물에 분사해야 하는데, 위 두 방법은 Fig. 1(c)와 같이 미세먼지 발생 지점까지 물이 닿지 않는 문제가 있다.

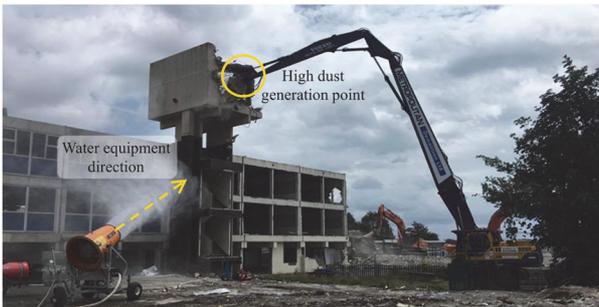
본 논문에서는 고층 건물 파쇄 작업을 위한 물 분사 로봇의 미세먼지 저감을 위한 위치 추적용 센서 네트워크, 자율 미세먼지



(a) Manual water spraying in a demolition site [5] (Adapted from Ref. 5 on the basis of webpage)



(b) Water spraying equipment shuttling in a demolition site



(c) Limitation of water spraying equipment for the high-rise building demolition [6] (Adapted from Ref. 6 on the basis of webpage)

Fig. 1 Examples of suppressing fine dust in demolition sites

발생원 추적 기술을 소개하고자 한다. 로봇은 약 10 m까지 물 분사 드럼을 들어올릴 수 있는 리프트를 장착하여 고소 작업에서 미세먼지를 효율적으로 저감할 수 있다. 물 분사 로봇이 미세먼지를 저감하기 위해서는 미세먼지 발생원인 굴착기의 작업장치와 물 분사 지점인 물 분사 드럼의 상대위치를 알아야 한다. 이를 위해 굴착기와 로봇의 각 링크에 센서를 부착하여 링크들의 각도값을 측정한다. 획득한 각 센서들의 값을 로봇의 중앙 제어기로 전달하기 위해 로봇과 굴착기에 센서 네트워크를 구성하였다. 로봇은 수신한 각도값들을 순기구학에 적용하여 굴착기 작업장치와 로봇 물 분사 드럼의 상대위치를 구한다. 굴착기와 로봇 사이의 상대거리를 계산하기 위해 RTK-GPS (Real Time Kinematic Global Positioning System)를 사용한다. 센서

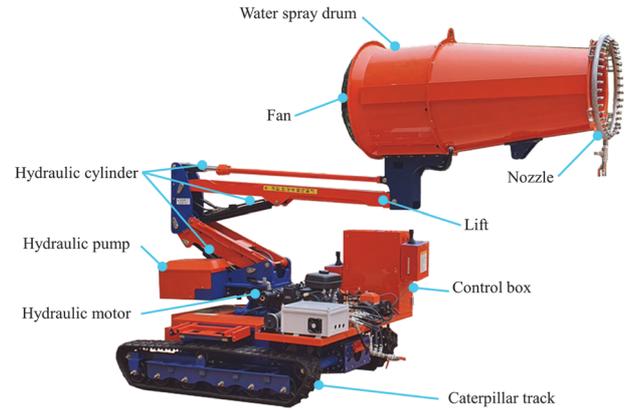


Fig. 2 Components of the water spray robot

네트워크와 순기구학, RTK-GPS를 통해 로봇은 굴착기 작업장치와의 상대위치와 상대거리를 파악하고 물을 분사하여 미세먼지를 저감할 수 있다. 마지막으로 물 분사 로봇의 고소 작업 미세먼지 발생원 추적 기술을 검토하기 위해 물 분사 로봇의 드럼 위치 추정 실험과 미세먼지 발생원 위치 추적 실험을 진행하였다.

## 2. 고층 건물 파쇄 작업을 위한 물 분사 로봇과 굴착기 구성

### 2.1 물 분사 로봇 시스템

#### 2.1.1 물 분사 로봇의 구성

로봇의 하드웨어 구성은 Fig. 2와 같다. 로봇은 무한궤도, 물 분사 드럼, 팬과 노즐, 리프트, 유압 실린더, 유압 모터, 유압 펌프와 컨트롤 박스로 구성되어 있다. 로봇의 바퀴는 건물 파쇄 현장과 같은 험지를 극복하여 이동할 수 있도록 무한궤도를 적용하였다. 물 분사 드럼은 내부에 대형 팬이 장착되어 있어 노즐에서 분사되는 미세한 물 입자를 멀리 날려 보낼 수 있다. 리프트는 유압 실린더를 사용해 물 분사 드럼을 상하로 들어올릴 수 있다. 리프트는 평행사변형 모양의 4절 링크 구조이며, 리프트 구조의 기계적 특성은 2.1.2절에서 자세하게 다룬다. 리프트 하단에는 리프트 상단 부분이 좌우로 회전할 수 있도록 유압 모터를 적용하였고, 유압 모터의 회전 각도를 획득하기 위해 엔코더를 장착하였다. 유압 모터와 유압 실린더의 유압은 유압 펌프를 이용해 제어한다. 컨트롤 박스에는 물 분사 로봇의 중앙 제어가 있다.

#### 2.1.2 물 분사 로봇 리프트의 기계적 구조

고층 건물 파쇄 작업을 위한 물 분사 로봇의 리프트 구조는 Fig. 3과 같다. 리프트의 링크 구조는 평행사변형 모양의 4절 링크 구조이다. 링크 1과 2는 베이스 링크와 중간부 링크 사이를 이어주는 평행사변형 모양의 연결 링크이며, 유압 실린더 1은 중간부 링크의 높이를 결정한다. 링크 3과 4는 중간부 링크와 드럼부 링크를 이어주는 평행사변형 모양의 연결 링크이다. 유압 실린더 2는 드럼 링크의 높이를 결정하고, 유압 실린더 3은

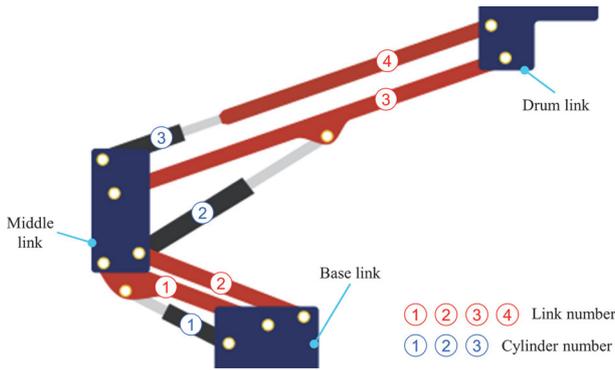


Fig. 3 Parallelogram-shaped linkage of the lift

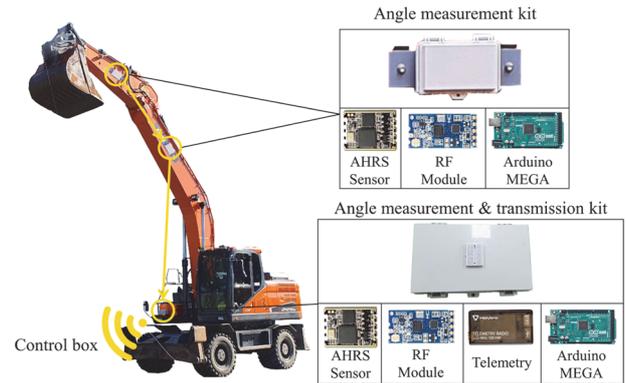


Fig. 5 Components of excavator's sensor network system

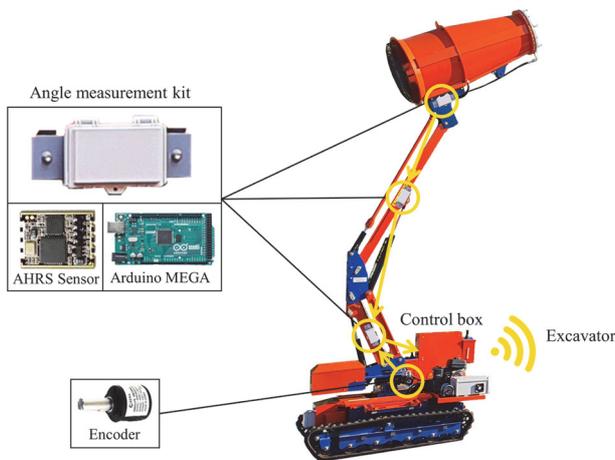


Fig. 4 Components of water spray robot's sensor network system

드럼 링크의 각도를 결정한다. 링크들의 평행사변형 구조를 통해 유압 실린더 1과 2의 구동 중에는 중간부 링크와 드럼부 링크의 각도가 일정하게 유지된다.

2.1.3 물 분사 로봇의 센서 네트워크

물 분사 로봇의 상단에 장착된 물 분사 드럼의 위치를 계산하기 위해 리프트 링크의 각도를 측정하고 전송할 수 있도록 로봇에 센서 네트워크를 구성하였다. 로봇의 센서 네트워크를 위한 시스템 구성은 Fig. 4와 같다.

로봇 리프트의 각 링크 각도 정보를 얻기 위해 3축 각도 정보를 측정할 수 있는 AHRS (Attitude and Heading Reference System)를 사용하였다[7,8]. 각도 측정 키트에 내장된 Arduino MEGA 프로세서는 유선으로 키트들의 각도값을 컨트롤 박스 내 중앙 제어기로 전달한다. 키트들은 Fig. 3의 링크 1, 링크 3, 그리고 드럼부 링크에 자석을 이용해 Fig. 4와 같이 부착한다. 로봇의 좌우 회전 각도를 측정하기 위해 물 분사 로봇의 상부를 회전 시키는 유압 모터에 엔코더를 추가했으며, 엔코더 센서 값은 컨트롤 박스 내 중앙 제어기로 전달된다. 제어기에 전달된 모든 센서 데이터는 3장에서 자세하게 설명할 순기구학 계산에 이용된다. 계산 결과를 통해 물 분사 로봇은 물 분사 드럼의 위치를 알 수 있다.

2.2 굴착기의 센서 네트워크

대부분의 건설 파쇄 현장에서 미세먼지는 굴착기의 말단부에 위치한 작업장치 주변에서 집중적으로 발생한다. 굴착기의 작업장치의 위치를 구하기 위해 굴착기에 센서 네트워크를 구성하였다. 굴착기의 센서 네트워크 구성은 Fig. 5에서 볼 수 있다. 굴착기 링크의 각도를 얻기 위해 자석을 이용하여 굴착기의 붐과 암에 각도 측정 키트를 부착했다. 이 키트는 각도 측정을 위한 AHRS 센서, 데이터 전송을 위한 Arduino MEGA 프로세서, 그리고 무선 통신을 위한 RF (Radio Frequency) 모듈을 포함한다. RF 모듈은 2개가 짝이며 서로 원거리 데이터 송수신이 가능하다. 굴착기의 암에서 측정된 각도값은 RF 모듈을 통해 붐에 달린 RF 모듈로 전송된다. 붐에서 RF 모듈로부터 수신한 데이터와 AHRS 센서로부터 측정된 데이터는 Arduino MEGA 프로세서에서 합쳐져 굴착기 본체에 부착된 각도 측정 및 전송 키트에 전달된다. 이 키트는 굴착기 본체의 Yaw 방향 회전 각도를 측정하고 전송받은 데이터와 결합한 후 Telemetry를 이용해 물 분사 로봇의 컨트롤 박스 내 제어기로 전달한다. 제어기에 모인 모든 센서 데이터는 순기구학에 이용되며, 순기구학 계산을 통해 로봇은 미세먼지 발생원인 굴착기의 작업장치 위치를 알 수 있다.

$$T_i^{i+1} = Rot_{z, \theta_i} Trans_{z, d_i} Trans_{x, a_i} Rot_{x, \alpha_i}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

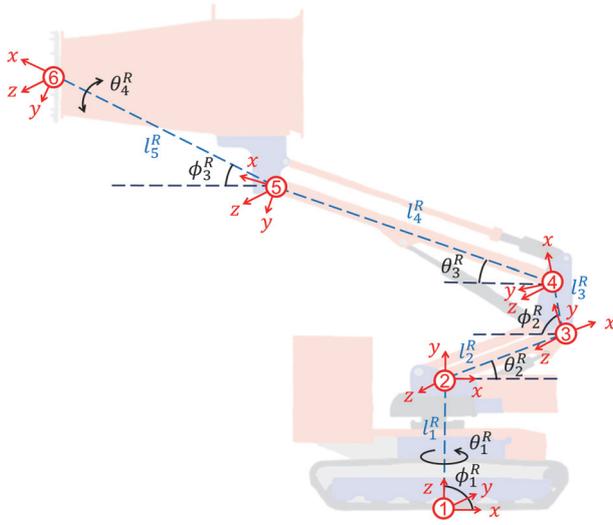


Fig. 6 Coordinate system for forward kinematics of the water spraying robot

$$T_1^6 = T_1^2 T_1^3 T_1^4 T_1^5 T_1^6 = \begin{bmatrix} R_1^6 & d_1^6 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

### 3. 순기구학과 센서 네트워크를 이용한 미세먼지 발생원 자율 위치 추적

미세먼지 발생원인 굴착기 작업장치 위치를 추정하기 위해서는 물 분사 로봇 드럼의 상대위치, 굴착기 작업 장치의 상대위치, 로봇과 굴착기 사이의 상대거리가 필요하다. 3.1장에서는 물 분사 드럼의 좌표를 구하고, 3.2장에서는 굴착기 작업장치의 좌표를 구한다. 3.3장에서는 물 분사 로봇과 굴착기의 상대위치를 구한다. 3장을 통해 로봇은 미세먼지 발생원인 굴착기 작업장치의 위치를 파악하고 추적할 수 있다.

#### 3.1 물 분사 로봇 드럼 추정

로봇 링크의 기구학적 계산은 순기구학을 통해 두 관절의 좌표계를 지정한 후 좌표계 사이의 각도와 길이 관계를 이용하여 연쇄적으로 구할 수 있다[9]. 계산 결과는 기준 좌표계로부터의 특정 좌표계의 위치를 반환 한다. 순기구학 계산을 위해 우선 계산할 대상의 기구적 특징을 이용하여 좌표계를 지정해야 한다. 본 연구에서는 로봇 응용에서 보편적으로 사용하는 DH (Denavit-Hartenberg) 규약을 통해 좌표계를 선정하고 이에 따른 DH 변환행렬을 사용하였다[10]. 물 분사 로봇에 DH 규약을 기반으로 선정한 좌표계는 Fig. 6에 표시하였다. 로봇의 회전중심 하단을 기준 좌표계를 선택하고 각 회전 관절마다 좌표계를 지정하였다. DH 규약에 따른 DH 변환행렬은 식(1)과 같다. 식(1)에서  $a_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $d_i$ ,  $\theta_i$ 는 링크  $i$ 와 관절  $i$ 에 연관된 4개의 DH 파라미터이며,  $a_i$ 는 길이,  $\alpha_i$ 는 비틀림,  $d_i$ 는 오프셋,  $\theta_i$ 는 각도이다. DH 변환행렬

Table 1 Denavit-Hartenberg parameters of water spraying robot

Link	$a_i$	$\alpha_i$ [°]	$d_i$	$\theta_i$
1	$l_1^R \cos \phi_1^R$	90	$l_1^R \sin \phi_1^R$	$\theta_1^R$
2	$l_2^R$	0	0	$\theta_2^R$
3	$l_3^R$	0	0	$180^\circ - \theta_2^R - \phi_2^R$
4	$l_4^R$	0	0	$\phi_2^R - \theta_3^R$
5	$l_5^R$	0	0	$-\phi_3^R + \theta_3^R - \theta_4^R$

$T_i^{i+1}$ 는 4개의 기본 변환행렬의 조합으로 표현 한다. 즉, 식(1)은  $z$  축 기준  $\theta_i$ 의 각도,  $z$  축 기준  $d_i$ 의 오프셋,  $x$  축 기준  $a_i$ 의 길이,  $x$  축 기준  $\alpha_i$ 의 비틀림을 결합한 변환행렬이다. DH 변환행렬은 단일변수의 함수 이므로 위의 4개의 파라미터 중 3개는 상수이고 1개만이 변수이다. 각 좌표계로 변환될 때의 DH 파라미터는 Fig. 6의 인접한 두 관절 사이의 기구적 특징에 따라 좌표계 1부터 좌표계 6까지 번호 순서대로 구해지며, 이때의 DH 파라미터는 Table 1과 같다. 식(1)에 Table 1의 파라미터들을 대입하면 식(2)와 같이 전체 변환행렬을 구할 수 있다. 여기서  $d_1^6$ 은 좌표계 1을 기준으로 좌표계 6의 위치 정보를 포함한다.

$$T_1^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1^R & 0 & \sin \theta_1^R & l_1^R \cos \phi_1^R \cos \theta_1^R \\ \sin \theta_1^R & 0 & -\cos \theta_1^R & l_1^R \cos \phi_1^R \sin \theta_1^R \\ 0 & 1 & 0 & l_1^R \sin \phi_1^R \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_2^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2^R & -\sin \theta_2^R & 0 & l_2^R \cos \theta_2^R \\ \sin \theta_2^R & \cos \theta_2^R & 0 & l_2^R \sin \theta_2^R \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$T_3^4 = \begin{bmatrix} \cos(180^\circ - \theta_2^R - \phi_2^R) & -\sin(180^\circ - \theta_2^R - \phi_2^R) & & \\ \sin(180^\circ - \theta_2^R - \phi_2^R) & \cos(180^\circ - \theta_2^R - \phi_2^R) & & \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ & & & 0 \ l_3^R \cos(180^\circ - \theta_2^R - \phi_2^R) \\ & & & 0 \ l_3^R \sin(180^\circ - \theta_2^R - \phi_2^R) \\ & & & 1 \ 0 \\ & & & 0 \ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T_4^5 = \begin{bmatrix} \cos(\phi_2^R - \theta_3^R) & -\sin \theta_2^R & 0 & l_4^R \cos(\phi_2^R - \theta_3^R) \\ \sin(\phi_2^R - \theta_3^R) & \cos \theta_2^R & 0 & l_4^R \sin(\phi_2^R - \theta_3^R) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T_5^6 = \begin{bmatrix} \cos(-\phi_3^R + \theta_3^R - \theta_4^R) & -\sin(-\phi_3^R + \theta_3^R - \theta_4^R) & 0 & 0 \\ \sin(-\phi_3^R + \theta_3^R - \theta_4^R) & \cos(-\phi_3^R + \theta_3^R - \theta_4^R) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & l_5^R \cos(-\phi_3^R + \theta_3^R - \theta_4^R) \\ 0 & l_5^R \sin(-\phi_3^R + \theta_3^R - \theta_4^R) \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$d_1^6 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \theta_1^R \times (-l_1^R \cos \phi_1^R - l_2^R \cos \theta_2^R + l_3^R \cos \phi_2^R) \\ -\sin \theta_1^R \times (-l_1^R \cos \phi_1^R - l_2^R \cos \theta_2^R + l_3^R \cos \phi_2^R) \\ l_1^R \sin \phi_1^R + l_2^R \sin \theta_2^R + l_3^R \sin \phi_2^R \\ + l_4^R \cos \theta_3^R + l_5^R \cos(\theta_4^R + \phi_3^R) \\ + l_4^R \cos \theta_3^R + l_5^R \cos(\theta_4^R + \phi_3^R) \\ + l_4^R \sin \theta_3^R + l_5^R \sin(\theta_4^R + \phi_3^R) \end{bmatrix} \quad (8)$$

변환행렬  $T_6^5$ 을 구하기 위한 변환행렬  $T_1^2, T_2^3, T_3^4, T_4^5, T_5^6$ 은 식(1)에 Table 1의 파라미터를 대입하여 구할 수 있으며 이는 식(3)부터 식(7)과 같다. 식(2)의 DH 변환을 이용한 순기 구학 계산 결과인  $d_1^6$ 의 요소  $x, y, z$ 는 식(8)에 나타난다. 식(8)의  $\phi_i^R$ 와  $l_i^R$ 는 링크의 고정된 각도와 길이이므로 상수이며, 변수는  $\theta_1^R, \theta_2^R, \theta_3^R, \theta_4^R$ 이다. 따라서, 해당 관절 변수들을 측정 하면 물 분사 로봇의 물 분사 드럼 끝점 좌표인 좌표계 6의 위치를 구할 수 있다. 이를 위해 물 분사 로봇에 Fig. 4와 같이 각도 측정 장치와 엔코더를 부착하여  $\theta_1^R, \theta_2^R, \theta_3^R, \theta_4^R$ 를 측정 했다.

### 3.2 굴착기 작업장치 위치 추정

굴착기 또한 각 회전 관절에 Fig. 7과 같이 DH 규약에 따라 좌표계를 선정하였다. 좌표계 1은 RTK-GPS가 설치된 굴착기 후방 위치이다. 선정한 좌표계 사이의 DH 파라미터는 Table 2와 같으며, 이를 이용하여 좌표계 1부터 4까지의 변환행렬을 구하는 수식은 식(9)와 같다.

$$T_1^4 = T_1^2 T_2^3 T_3^4 \quad (9)$$

변환행렬  $T_1^4$ 를 구하기 위한 변환행렬  $T_1^2, T_2^3, T_3^4$ 은 식(1)에 Table 2의 파라미터들을 대입하여 구할 수 있으며, 이 변환행렬들을 이용해 식(9)를 식(10)과 같이 표현할 수 있다. 식(10)에서  $d_1^4$ 는 Fig. 7에서의 좌표계 1을 기준으로 하는 좌표계 4의 위치 정보이며, 식(11)과 같이 계산한다. 굴착기는 회전 관절로만 이루어져 있어 굴착기의 DH 파라미터인 Table 2의 파라미터

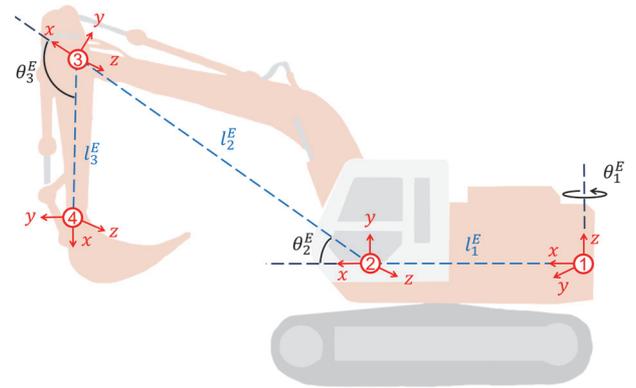


Fig. 7 Coordinate system for forward kinematics of the excavator

Table 2 Denavit-Hartenberg parameters of excavator

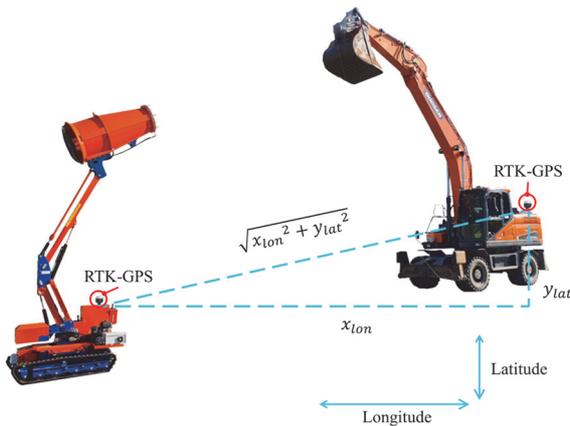
Link	$\alpha_i$	$\alpha_i$ [°]	$d$	$\theta_i$
1	$l_1^E$	90	0	$\theta_1^E$
2	$l_2^E$	0	0	$\theta_2^E$
3	$l_3^E$	0	0	$-\theta_3^E$

중 변수는  $\theta_i^E$ 이며, 나머지 파라미터는 상수이다. 굴착기 작업 장치의  $x, y, z$  위치 좌표 정보를 얻기 위해서 변수인  $\theta_1^E, \theta_2^E, \theta_3^E$ 의 값이 필요하다. 이 변수들을 지속해서 획득할 수 있으면 물 분사 로봇은 미세먼지 발생원인 굴착기 작업 장치의 위치를 연속 적으로 추적하고 미세 먼지를 저감할 수 있다. 따라서 Fig. 5와 같이 센서를 부착하여 변수인  $\theta_1^E, \theta_2^E, \theta_3^E$ 의 값을 획득할 수 있도록 하였다.

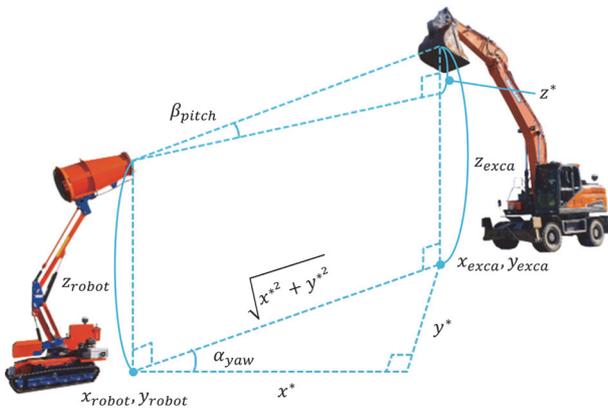
$$T_1^4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1^E & 0 & \sin \theta_1^E & l_1^E \cos \theta_1^E \\ \sin \theta_1^E & 0 & -\cos \theta_1^E & l_1^E \sin \theta_1^E \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2^E & -\sin \theta_2^E & 0 & l_2^E \cos \theta_2^E \\ \sin \theta_2^E & \cos \theta_2^E & 0 & l_2^E \sin \theta_2^E \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \cos(-\theta_3^E) & -\sin(-\theta_3^E) & 0 & l_3^E \cos(-\theta_3^E) \\ \sin(-\theta_3^E) & \cos(-\theta_3^E) & 0 & l_3^E \sin(-\theta_3^E) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1^4 & d_1^4 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$d_1^4 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1^E \times (l_1^E + l_2^E \cos \theta_2^E + l_3^E \cos(\theta_2^E - \theta_3^E)) \\ \sin \theta_1^E \times (l_1^E + l_2^E \cos \theta_2^E + l_3^E \cos(\theta_2^E - \theta_3^E)) \\ l_2^E \sin \theta_2^E + l_3^E \sin(\theta_2^E - \theta_3^E) \end{bmatrix} \quad (11)$$



(a) Relative distance calculation between excavator and water spray robot using RTK-GPS



(b) Angular goal calculation of water spray robot

Fig. 8 Relative distance calculation and angular goal calculation of water spray robot

변환행렬  $T_1^4$ 를 구하기 위한 변환행렬  $T_1^2, T_2^3, T_3^4$ 은 식(1)에 Table 2의 파라미터들을 대입하여 구할 수 있으며, 이 변환행렬들을 이용해 식(9)를 식(10)과 같이 표현할 수 있다. 식(10)에서  $d_1^4$ 는 Fig. 7에서의 좌표계 1을 기준으로 하는 좌표계 4의 위치 정보이며, 식(11)과 같이 계산한다. 굴착기는 회전 관절로만 이루어져 있어 굴착기의 DH 파라미터인 Table 2의 파라미터 중 변수는  $\theta_1^E$ 이며, 나머지 파라미터는 상수이다. 굴착기 작업 장치의  $x, y, z$  위치 좌표 정보를 얻기 위해서 변수인  $\theta_1^E, \theta_2^E, \theta_3^E$ 의 값이 필요하다. 이 변수들을 지속해서 획득할 수 있으면 물 분사 로봇은 미세먼지 발생원인 굴착기 작업 장치의 위치를 연속적으로 추적하고 미세 먼지를 저감할 수 있다. 따라서 Fig. 5와 같이 센서를 부착하여 변수인  $\theta_1^E, \theta_2^E, \theta_3^E$ 의 값을 획득할 수 있도록 하였다.

3.3 자율 미세먼지 발생원 위치 추적

GPS는 일반적으로 수 미터 이상의 위치 오차를 가지고 있기 때문에 정밀한 위치 측정이 어렵다[11,12]. 하지만 RTK-GPS는 GPS가 얻은 데이터와 기지국 으로부터 전송받은 보정 데이터를 같이 사용하기 때문에 수 cm 단위의 위치 오차를 가져 본

Table 3 Experiment conditions of water spray robot

Experiment	$\theta_1$ [°]	$\theta_2$ [°]	$\theta_3$ [°]	$\theta_4$ [°]
Condition 1	0	25	-25	-25
Condition 2	0	25	25	25
Condition 3	0	50	50	50

Table 4 Comparison between calculation position and measurement position of water spray robot drum

Experiment	Pos x [mm]	Cal x [mm]	Pos z [mm]	Cal z [mm]
Condition 1	-2622.75	-2622.87	795.74	795.70
Condition 2	-2000.52	-2000.60	3666.24	3666.24
Condition 3	-1072.44	-1072.54	4923.64	4923.61

연구에서는 RTK-GPS를 사용하였다[13].

로봇과 굴착기 사이의 상대거리는 각각에 부착된 RTK-GPS로 구할 수 있다. 로봇의 RTK-GPS는 Fig. 8(a)와 같이 로봇의 컨트롤 박스 상단에 부착하며, Fig. 6의 좌표계 1과 부착한 센서 사이의 거리는 Bosch 레이저 거리 측정기인 DLE 70 Professional을 통해 측정된 후 상대거리 계산에 추가하여 보정했다. 굴착기의 RTK-GPS는 굴착기의 후방에 부착하며, 이는 Fig. 7의 좌표계 1의 위치와 같다. 굴착기는 3.2절과 같이 굴착기 후방 위치로부터 작업장치까지의 좌표를 구한다. 센서 네트워크와 순기구학, RTK-GPS의 상대거리를 통해 구한 물 분사 드럼과 굴착기 작업장치의 좌표는 Fig. 8(b)와 같이 로봇 드럼이 목표로 하는 작업장치를 조준하기 위한 각도 계산에 사용된다.  $x^*$ 와  $y^*$ 는  $x_{robot} - x_{exca}$ 와  $y_{robot} - y_{exca}$ 로,  $\alpha_{yaw}$ 를 구하는데 사용된다.  $z^*$ 는  $z_{robot} - z_{exca}$ 로,  $\beta_{pitch}$ 를 구하는데 사용된다[14]. 로봇은 굴착기 작업장치를 추적하기 위해  $\alpha_{yaw}$ 와  $\beta_{pitch}$ 의 각도만큼 로봇을 회전시킨다. 이를 통해 로봇은 미세먼지 발생원을 추적하며 물을 분사할 수 있다. 로봇의 제어 주기는 1 ms로, 움직임은 굴착기를 연속적으로 추적할 수 있다.

4. 고소 작업 미세먼지 발생원 추적 시스템 검증

4.1 고소 작업이 가능한 물 분사 로봇의 드럼 위치 추정 실험

3.1장에서 순기구학을 통해 로봇 물 분사 드럼의 좌표를 구할 수 있었다. 그러나 이 계산 결과 좌표가 실제 좌표와 차이가 있으면 원활하게 미세먼지 발생원을 추적할 수 없다. 따라서 순기구학 계산을 검증하기 위해 물 분사 로봇의 드럼 위치의 실제 좌표와 계산 좌표를 비교하는 실험을 진행했다. 좌표는 Fig. 6의 좌표계 1을 기준으로 하고, 총 3개의 조건으로 실험을 진행하였다. 순기구학 계산 시의 변수인 각도  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 는 Table 3과 같다. 물 분사 로봇에 대한 순기구학 결과식인 식(8)에 Table 3의 변수들을 대입하여 구한 드럼의 계산 좌표와 레이저 거리 측정기 DLE 70 Professional을 통해 구한 드럼의 실제 좌표를



Fig. 9 Fine dust resource tracking experiment

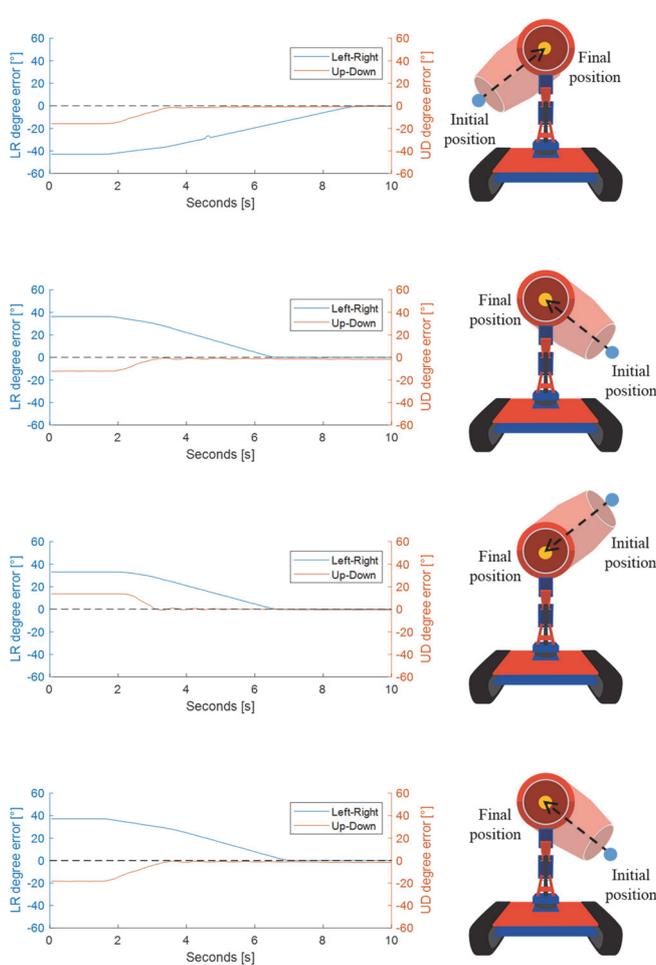


Fig. 10 Result of find dust resource tracking experiment and robot direction

Table 4에 정리하였다. Table 3의  $\theta_1$ 이  $0^\circ$ 이므로 드럼의 y 좌표는 0이다. Pos x와 z는 측정을 통해 구한 드럼의 좌표이며, Cal x와 z는 식(8)을 이용해 구한 드럼의 좌표이다. 계산 결과 오차가 로봇의 크기와 구동 범위에 비해 매우 작은 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 식(8)의 수식으로 물 분사 로봇이 드럼의 좌표를 성공적으로 계산할 수 있음을 확인했다.

Table 5 Result of experiment of water spray robot

Experiment	1 [°]	2 [°]	3 [°]	4 [°]	Avg [°]
LR error	0.05	0.08	0.05	0.01	0.0475
UD error	0.54	0.40	1.65	1.66	1.0625

#### 4.2 자율 미세먼지 발생원 추적 실험

물 분사 로봇은 순기구학과 센서 네트워크, RTK-GPS를 이용하여 물 분사 드럼과 굴착기 작업장치의 상대위치와 상대거리를 계산할 수 있으며, 목표 각도를 구하여 미세먼지 발생원을 추적할 수 있다. 물 분사 로봇이 얼마나 미세먼지 발생원을 정확하게 추적하는지 확인하는 자율 미세먼지 발생원 추적 실험을 진행하기 위해 물 분사 로봇과 굴착기에 Figs. 4, 5와 같이 센서들을 부착하였다.

굴착기의 작업장치를 향하지 않고 다른 방향을 보고 있던 물 분사 로봇이 자율적으로 굴착기의 작업장치를 추적하는 실험을 Fig. 9와 같이 진행했다. Fig. 10은 실험에 따른 각도 오차 변화 그래프와 로봇 드럼의 방향 변화를 나타낸다. 각도 오차는 Fig. 8을 통해 계산한 목표 각도와 센서 네트워크를 통해 구한 실제 각도의 차이이다. Fig. 10의 그래프 좌측은 좌우 각도 오차로 Fig. 8의  $\alpha_{yaw}$  오차에 해당하며, 그래프 우측은 상하 각도 오차로  $\beta_{pitch}$  오차에 해당한다. Fig. 10의 그림은 로봇이 초기 자세로부터 실험이 그래프와 같이 진행됨에 따라 목표를 추적하는 드럼의 방향 변화를 화살표로 표시한 것이다. 파란 지점은 로봇의 초기 방향이며, 노란 지점은 굴착기 작업장치를 추적한 후의 방향이다. 실험 각도 오차의 수치적 결과는 Table 5에 나와 있다.

실험 결과, Fig. 10 그래프의 오차가 줄어드는 것으로 로봇이 미세먼지 발생원인 굴착기 작업 장치를 원활하게 추적하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 추적 각도 오차는 좌우 각도 오차 최대  $0.08^\circ$ , 상하 각도 오차 최대  $1.66^\circ$ 인 것을 Table 5에서 볼 수 있다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 고층 건물 파쇄 작업을 위한 물 분사 로봇과 센서 네트워크, 순기구학에 대해 소개하고 자율 미세먼지 발생원 추적 시스템을 구현하였다. 물 분사 로봇은 리프트를 사용하여 높은 곳에도 물을 분사할 수 있으며, 건설현장의 협지를 극복할 수 있다. 물 분사 로봇 리프트의 링크는 평행사변형 모양의 4절 링크 구조로 물 분사 드럼의 각도를 일정하게 유지하며 들어올릴 수 있다. 물 분사 로봇과 굴착기에는 AHRS 센서를 부착하여 구성한 센서 네트워크를 통해 각 링크의 각도 정보를 얻어 물 분사 로봇과 굴착기의 순기구학을 계산한다. 이를 통해 물 분사 로봇은 로봇 물 분사 드럼의 좌표와 미세먼지 발생원인 굴착기 작업장치의 좌표를 알 수 있다. 물 분사 로봇과 굴착기에 부착된 RTK-GPS에서 얻은 경도와 위도 정보로 로봇은

들 사이의 상대거리를 획득할 수 있다. 물 분사 로봇은 계산한 상대위치와 상대거리 정보를 통해 굴착기 작업장치 추적을 위한 목표 회전 각도를 계산할 수 있다. 물 분사 로봇의 자율 추적 성능을 확인하기 위해 고소 작업이 가능한 물 분사 로봇의 드럼 위치 추정 실험과 자율 미세먼지 발생원 추적 실험을 진행하였다. 고소 작업이 가능한 물 분사 로봇의 드럼 위치 추정 실험 결과, 물 분사 로봇은 드럼의 좌표 위치를 충분히 정확하게 계산하는 것을 확인했다. 자율 미세먼지 발생원 추적 실험을 통해 물 분사 로봇이 상대위치와 상대거리 계산 결과를 바탕으로 목표 회전 각도에 따라 드럼을 회전하여 성공적으로 미세먼지 발생원인 굴착기 작업장치를 추적하는 것을 확인했다.

## ACKNOWLEDGEMENT

이 연구는 2023년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20018432).

## REFERENCES

1. National Air Emission Inventory and Research Center, Source of fine dust. <https://www.air.go.kr/contents/view.do?contentsId=9&menuId=41>
2. National Air Emission Inventory and Research Center, Emission statistics. <https://www.air.go.kr/article/view.do?boardId=10&articleId=159&boardId=10&menuId=32&currentPageNo=1>
3. National Air Emission Inventory and Research Center, Air pollutants. <https://www.air.go.kr/contents/view.do?contentsId=10&menuId=42>
4. Jang, A.-S., (2014), Impact of particulate matter on health, *Journal of the Korean Medical Association*, 57(9), 763-768.
5. The Kyoungyang Shinmun. <https://n.news.naver.com/mnews/article/032/0003079339>
6. Metropolitan Demolition, High-rise Demolition. <https://www.metrodemo.co.uk/highrise-demolition>
7. Kim, J.-H., Kim, M.-J., Moon, J.-H., Kang, D.-W., (2020), A study on AHRS position sensing accuracy for control of the traction spherical motor, *The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers P*, 69(4), 225-228.
8. Kim, M.-K., Kim, T. Y., Lyou, J., (2015), Performance improvement of an AHRS for motion capture, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 21(12), 1167-1172.
9. Kim, S., Kim, M., Jung, H., Chu, B., (2019), An automated tracking system of fine dust generating spot for building dismantlement sites, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 36(4), 383-389.
10. Spong, M. W., Vidyasagar, M., (1989), *Robot dynamics and control*, John Wiley & Sons.
11. Kim, Y.-H., Choi, B.-S., Lee, J.-M., (2006), Hybrid car navigation system using GPS and dual electric compass, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 12(2), 106-112.
12. Wing, M. G., Eklund, A., Kellogg, L. D., (2005), Consumer-grade global positioning system (GPS) accuracy and reliability, *Journal of Forestry*, 103(4), 169-173.
13. Jung, B. M., Yeo, I.-J., Cho, C.-S., (2009), Autonomous traveling of unmanned golf-car using GPS and vision system, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 26(6), 74-80.
14. Lee, S., Park, H., Chu, B., (2022), Excavator posture estimation and position tracking system based on kinematics and sensor network to control mist-spraying robot, *IEEE Access*, 10, 107949-107960.



**Hyeongyeong Jeong**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. Her research interest is robotics.

E-mail: hgjeong1014@gmail.com



**Hyunbin Park**

He is currently pursuing his Ph.D. degree in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interest is robotics.

E-mail: qkrgusqls500@gmail.com



**Jaemin Shin**

He received his M.S. in the Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interest is robotics.

E-mail: jaemin0830@naver.com



**Hyeonjae Jeong**

M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering Kumoh National Institute of Technology. His research interest is robotics.

E-mail: guswo1104@naver.com



**Baeksuk Chu**

Professor in the Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology. His research interest includes robotics, mechatronics, intelligent control and reinforcement learning.

E-mail: bschu@kumoh.ac.kr