

전방향 이동 메커니즘을 적용한 콘크리트 폴리싱 로봇의 성능평가

조강익^a, 주백석^{a*}Performance Evaluation of Concrete Polishing Robot
with Omnidirectional Mobile MechanismGangik Cho^a, Baeksuk Chu^{a*}^a Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology,
61, Daehak-ro, Gumi, Gyeongbuk-do, 39177, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	12	February	2016
Revised	30	March	2016
Accepted	6	April	2016

Keywords:

Concrete polishing robot
Construction robot
Automatic tool change
Mecanum wheel
Omnidirectionality

ABSTRACT

In the construction industry, concrete polishing is used to grind and rub the surface of concrete grounds with polishing machines to increase the strength of the concrete after deposition. Polishing is performed manually in spite of the generation of dust and the requirement of frequent replacements of the polishing pad. The concrete polishing robot developed in this research is a novel polishing automation system for preventing the workers from being exposed to poor working environments. This robot is able to change multiple polishing tools automatically; however, the workers can conveniently replace the worn-out polishing pads with new ones. The mobile platform of the polishing robot employs omnidirectional wheels to enable a flexible motion even in small and complicated workspaces. To evaluate the performance of the developed concrete polishing robot, extensive experiments including square trajectory tracking, automatic tool changing, actual polishing, and path generation simulation were performed.

1. 서론

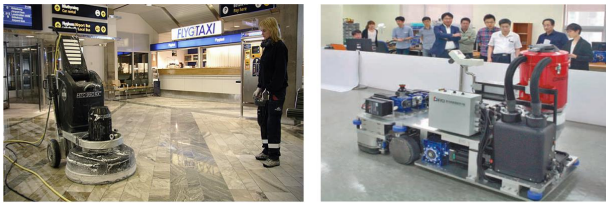
건설 및 토목 작업 시 타설된 콘크리트의 강도는 내부에 비하여 표면이 상대적으로 낮은 특성을 갖는다. 따라서 콘크리트 바닥면을 효율적으로 유지, 보수하기 위해서는 내부의 콘크리트를 표면으로 노출시켜 강도를 높일 필요가 있다. 콘크리트 폴리싱(polishing)은 표면 콘크리트를 제거하여 내부 콘크리트를 외부로 노출시키는 작업을 말한다. 또한 바닥의 광택도를 높여 미관을 향상시켜주는 역할을 수행한다. 폴리싱 작업은 처음에는 거칠기가 큰 폴리싱 패드를 사용하여 많은 양의 콘크리트를 연마하고 점차 거칠기가 작은

폴리싱 패드로 교체하여 표면의 광택도를 높이는 순서로 진행된다. 또한, 이 과정에서 폴리싱 패드가 자주 마모되기 때문에 폴리싱 패드를 자주 교체해 줄 필요가 있다. 그런데 현재 폴리싱 패드의 교체 작업은 작업자의 수작업에 의해 이루어지고 있어 많은 불편함이 수반된다. 한편, 기존 폴리싱 장비는 양쪽에 두 개의 바퀴가 장착되어 좌, 우 바퀴의 회전방향에 따라 전진, 후진, 회전운동이 결정되는 이동 메커니즘을 사용하고 있다 (Fig. 1 참조). 그런데 이러한 일반적인 이동 메커니즘은 이동 플랫폼 자체의 전체적인 회전이 없는 좌, 우 방향으로의 이동이 불가능해 바닥면의 가장자리를 폴리싱하거나 복잡한 형상을 가지는 부분을 폴리싱하는 등 특정 영역

* Corresponding author. Tel.: +82-54-478-7398

Fax: +82-54-479-7319

E-mail address: bschu@kumoh.ac.kr (Baeksuk Chu).



(a) Concrete polishing robot designed in HTC (b) Concrete polishing robot designed in Korea Institute of Robot and Convergence

Fig. 1 Conventional concrete polishing robots

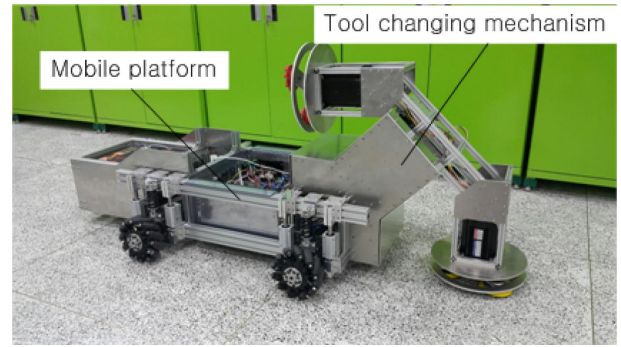


Fig. 2 Concrete polishing robot system

의 작업이 어렵거나 불가능한 단점이 있다^[1].

본 연구에서는 작업자가 편리하게 폴리싱 패드를 교환할 수 있도록 하는 자동공구교환 메커니즘과 이동 유연성을 높여주는 전방향 이동 메커니즘을 장착한 폴리싱 로봇 시스템을 소개한다. 이 연구에서 개발된 로봇의 성능을 확인하기 위하여 직진도, 사각형 프로파일 주행성능실험을 통해 이동 메커니즘의 이동성을 평가하고, 공구교환 속도를 측정하여 자동공구교환장치의 효율성을 확인하였다. 또, 폴리싱 작업을 직접 수행하고 광택도를 측정함으로써 폴리싱 작업 능력을 평가하고, 기존의 이동 메커니즘과 전방향 이동 메커니즘 각각의 경우에 대하여 폴리싱 작업 경로생성 시뮬레이션을 수행하여 전방향 이동 메커니즘의 작업효율을 평가하였다.

2. 공구교환장치 메커니즘

Fig. 2는 이 연구에서 개발된 콘크리트 폴리싱 로봇의 시작품을 보여준다. 그 중에서 자동공구교환장치는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 툴 리프트(tool lift), 툴 체인저(tool changer), 그리고 두 개의 툴이 부착된 툴 파트로 구성되어있다. 이 장치의 공구교환 순서는 다음과 같다. 우선 툴 리프트가 툴 체인저와 툴을 45도 방향으로 상승시켜 툴을 지면으로부터 분리시킨다. 상승이 완료되면 툴 체인저가 툴을 180도 회전시켜 공구를 교체한다. 회전이 완료되면 툴 리프트가 툴 체인저와 교환된 툴을 45도 방향으로 하강시켜줌으로써 공구교환 과정이 완료된다.

공구교환이 완료되면 바닥면에 밀착되어있던 툴이 Fig. 3의 tool 1과 같이 외부로 노출되어 작업자가 폴리싱 패드를 쉽게 교환할 수 있다. Fig. 4는 툴 리프트의 내부구조를 보여준다. 툴 리프트는 LM액추에이터(LM actuator), LM가이드(LM guide), 툴 리프트 리밋 센서(tool lift limit sensor)로 구성된다. 툴 리프트는 양쪽 벽면에 위치한 LM가이드를 따라 툴 체인저를 상하운동 시키는 역할을 한다. 이 때 LM가이드는 폴리싱 작업 시 LM액추에이터에 가해지는 하중을 분산시켜주는 역할 또한 수행한다. 툴 리프트 리밋 센서는 툴 리프트의 상승완료를 감지하고 상승이 완료되었을 때 툴 체인저가 더 이상 상승하지 못하도록 한다. Fig. 5는 툴

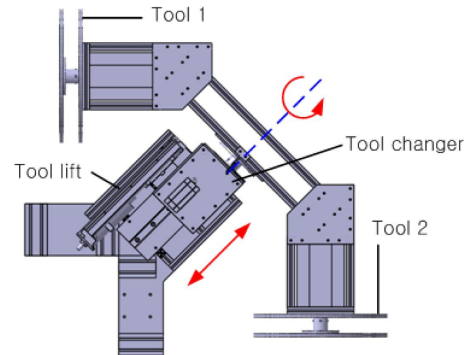


Fig. 3 Configuration of the automatic tool changing mechanism

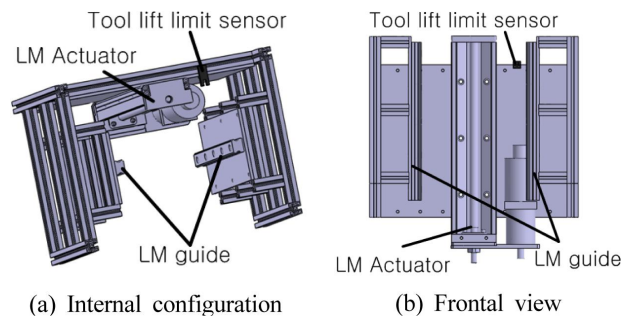


Fig. 4 Tool lift

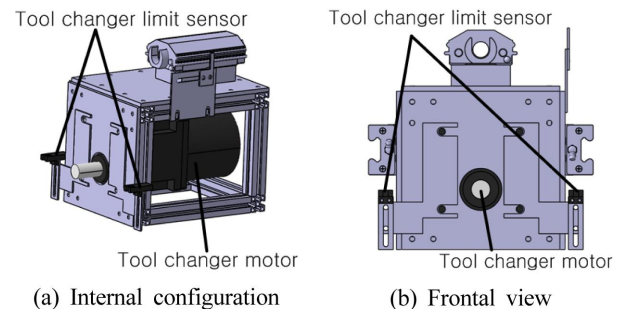


Fig. 5 Tool changer

체인저의 내부구조를 보여준다. 툴 체인저는 툴 체인저 모터(tool changer motor)와 툴 체인저 리밋 센서(tool changer limit sensor)로 구성된다. 툴 체인저 모터는 두 개의 툴을 교환하는 역할을 하고, 툴 체인저 리밋 센서는 툴 체인저 회전 완료 여부를 감지

하여 톨 파트의 회전을 정지하도록 한다.

3. 전방향 이동로봇 시스템

3.1 전방향 이동메카니즘

평면 상에서 물체는 가로, 세로의 위치와 방향으로 구성된 총 세 개의 자유도를 가지지만 일반적인 이동 메카니즘은 전/후진과 회전을 포함하여 두 개의 컨트롤 자유도를 가진다. 이와 같이 물체의 자유도보다 컨트롤 자유도가 적은 non-holonomic한 상황에서 특정 위치와 방향으로 이동하기 위해서는 다소 복잡한 경로생성 과정을 거쳐야 한다²⁾. 일반적인 이동 메카니즘을 가지는 폴리싱 장비의 경우에는 가로방향으로 이동하기 위해서는 회전, 직진, 회전의 세 번의 운동을 거쳐야 하기 때문에 경로생성이 복잡해진다. 본 연구에서는 폴리싱 로봇에 메카넘휠을 이용한 전방향 이동 메카니즘을 적용하여 이동 시스템을 holonomic하게 구성하고, 폴리싱 로봇의 이동 경로생성을 간편하게 하였다.

Fig. 6(a)는 이 연구에서 사용된 메카넘휠의 모습을 보여준다. 중앙의 림휠이 모터에 부착되어 있고, 림휠을 주변으로 수동 회전하는 서브롤러들이 45°방향으로 부착되어 있다. 메카넘휠이 지면에서 회전할 때 발생하는 힘은 Fig. 6(b)와 같이 서브롤러의 축 방향과 그 축에 수직인 방향으로 분산된다. 이 때 서브롤러의 축에 수직인 방향의 힘은 서브롤러의 회전에 의해 소멸되고, 서브롤러의 축 방향 힘만 남게 된다. 네 개의 메카넘휠이 Fig. 7과 같이 폴리싱 로봇에 부착되고 각 메카넘휠에서 발생한 힘의 합력이 이동 플랫폼의 전/후/좌/우 방향 병진운동과 회전운동을 만들어낸다. 이 때 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 는 각 바퀴의 각속도를 나타낸다³⁾.

3.2 이동로봇 제어시스템

이동 플랫폼의 제어는 이동 로봇에 부착된 초음파센서를 이용하여 이동 플랫폼의 위치와 방향을 측정하고 이 정보를 제어에 활용하는 closed-loop 제어와 실제 위치와 방향정보 없이 제어 입력을 생성하는 open-loop 제어 두 가지를 선택적으로 사용할 수 있도록 개발되었다. Open-loop 제어를 이용하여 구동할 때에는 이동 플랫폼

폼과 바닥 사이의 슬립에 의해 발생하는 위치오차를 보정할 수 없다. 따라서 이동 플랫폼을 정확한 좌표로 이동시키기 위해서는 현재 이동 플랫폼의 좌표를 측정하고 피드백 하는 closed-loop 제어가 사용된다. Fig. 8은 closed-loop 제어에서 초음파센서를 사용하여 현재 로봇의 위치를 인식하는 방법을 설명한다⁴⁾. 측면에 위치한 두 개의 센서로부터 획득한 거리정보 d_1 과 d_2 를 활용하여 이동 플랫폼의 방향 θ 와 x방향 위치를 계산하고, 후면에 위치한 센서로부터 얻은 거리정보 d_3 를 결합하여 y방향 위치를 계산한다. 식 (1)~(3)에 이동 플랫폼의 위치와 방향정보에 관한 식이 주어져 있다. Fig. 9는 closed-loop 제어 시스템의 블록선도를 보여준다. 입력된 지령에서 각 위치와 방향을 빼준 값인 오차는 P제어기로 입력되고 P게인과 오차가 곱해져 이동 플랫폼의 속도 역기구학으로 입력된다. 이 값들은 속도 역기구학에서 각 모터의 속도로 변환되고 변환된 속도는 모터드라이브로 입력된다.

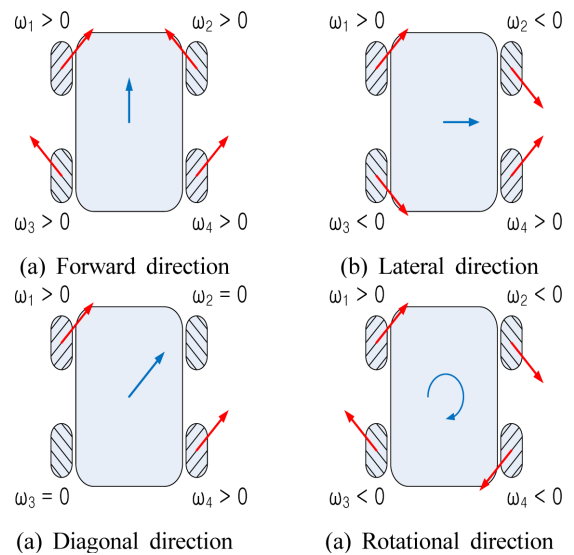


Fig. 7 Motion generation mechanism using Mecanum wheels

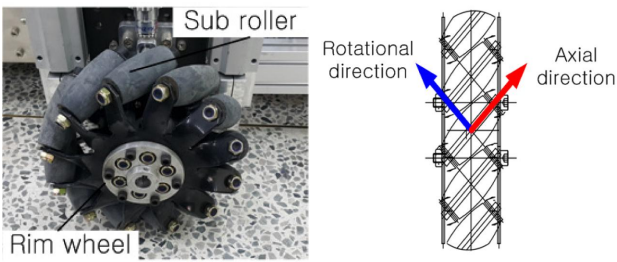


Fig. 6 Mecanum wheel used in this research

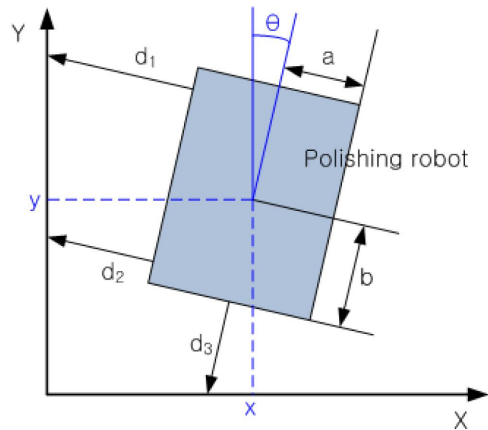


Fig. 8 Geometry to calculate the position and orientation of the polishing robot using ultrasonic sensors

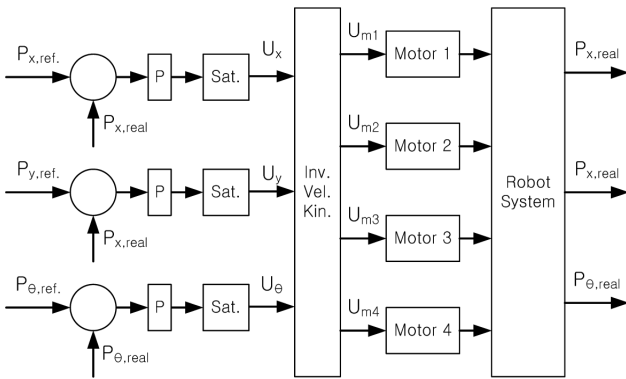


Fig. 9 Closed-loop control block diagram

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{d_1 - d_2}{2b}\right) \quad (1)$$

$$x = \left(\frac{d_1 + d_2}{2} + a\right)\cos\theta \quad (2)$$

$$y = (d_3 + b)\cos\theta \quad (3)$$

4. 폴리싱 로봇 성능실험 및 시뮬레이션

4.1 이동 플랫폼 직진도 실험

폴리싱 로봇 이동 플랫폼의 이동성능을 평가하기 위한 첫 번째 방법으로 전/후/좌/우 각 방향으로의 직진도를 측정하였다^[5]. 초음파센서의 피드백정보를 이용하지 않는 open-loop 제어 방법을 사용하여 로봇을 각 방향으로 1.5 m만큼 이동시킨 후 발생한 각도 오차를 측정하였다. x방향 직진도 실험에서 발생한 각도 오차 ϕ 는 Fig. 10과 같이 측정된다. 직진도 실험에서 측정된 각 방향으로의 각도 오차는 Table 1과 같이 최대 0.77° 이하로 측정되었다.

4.2 사각형 프로파일 주행성능 실험

사각형 프로파일 주행성능 실험에서는 가로, 세로 1.6 m 크기의 사각형 궤적을 입력지령으로 하여 로봇을 구동하고, 입력지령 궤적과 실제 이동궤적을 비교하였다. 초음파센서의 보상을 받지 않는 open-loop 제어와 초음파센서로부터 현재 로봇의 위치를 보상받는 closed-loop 제어 두 가지 방식으로 진행하였다. Open-loop 제어 구동실험에서 획득한 로봇의 궤적을 Fig. 11에 표시하였다. 점선은 지령 궤적을 나타내고, 실선으로 표시된 사각형과 화살표는 로봇의 실제 위치와 방향을 나타낸다. y방향으로는 지령 궤적과 유사한 이동 양상을 보이지만 x방향으로는 바닥과 바퀴 사이에서 발생하는 슬립과 메카닉휠에서 발생하는 에너지 손실에 의해 지령만큼 이동하지 못하는 모습을 확인할 수 있다. 그리고 x방향 이동 평균속도는 144 mm/s이고 y방향 이동 평균속도는 180 mm/s로

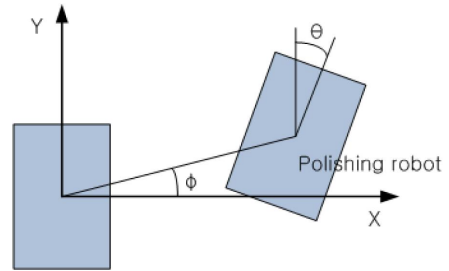


Fig. 10 Measuring method of straightness

Table 1 Straightness experiment results for four directions

Direction	f , Error (deg)	Avg. velocity (mm/s)	Time (sec)
Forward	-0.31	187	8
Backward	-0.42	188	8
Left	-0.36	162	8
Right	0.77	163	8

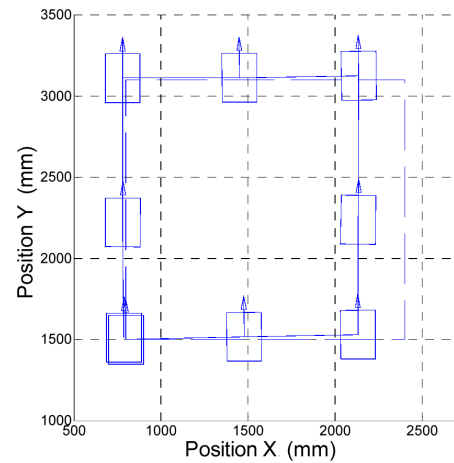


Fig. 11 Square trajectory using open-loop control

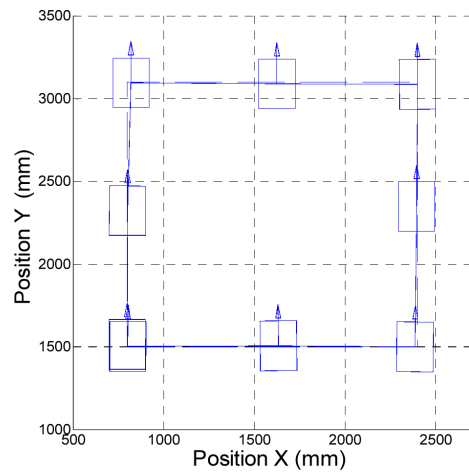


Fig. 12 Square trajectory using closed-loop control

측정되었다. Open-loop 제어에서 발생한 오차를 줄이기 위해 초음파센서를 이용한 로봇의 위치보상 알고리즘을 적용한 closed-loop

제어를 이용하여 구동한 결과를 Fig. 12에 표시하였다. x방향과 y 방향의 두 방향으로 지령계적을 잘 추종함을 확인할 수 있다. 이때 x방향 이동 평균속도는 130 mm/s이고 y방향 이동 평균속도는 170 mm/s로 측정되었다.

4.3 자동공구교환 실험

개발된 자동공구교환장치의 유용성을 검증하기 위해 공구교환에 소요되는 시간을 측정하였다. 실험결과 소요시간은 약 50초로 측정되었으며 기존의 폴리싱 장비에서 작업자가 직접 폴리싱 패드를 교환하는 경우와 비교하였을 때 두 방법에서 소요되는 시간은 유사하다는 결론을 획득하였다. 그러나 기존의 장비에서 폴리싱 패드를 교환하기 위해서는 장비 전체를 기울이는 대단히 번거로운 작업을 수행해야 하는 반면, 개발된 자동공구교환장치를 이용할 경우 폴리싱 패드 부착부가 외부에 손쉽게 노출되어 교환 작업이 매우 간편하게 이루어지는 장점이 확보된다. Fig. 13은 실제 자동공구교환 과정을 보여준다.

4.4 폴리싱 작업 광택도 실험

개발된 폴리싱 로봇의 폴리싱 작업 능력을 확인하기 위해 콘크리트 바닥면의 폴리싱 작업을 수행하였다. 폴리싱 작업 시 로봇은 약 30 mm/s의 속도로 이동하도록 제어하였다. 거칠기에 따라 구



(a) Tool lifting (b) Tool changing by rotation

Fig. 13 Tool changing process

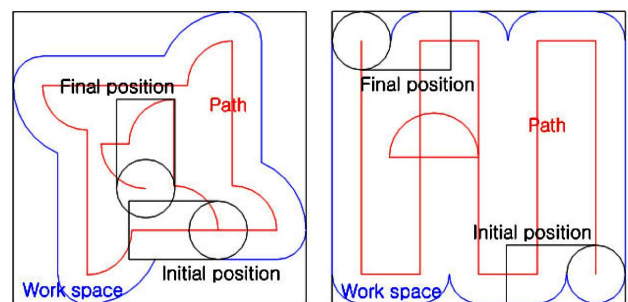
Table 2 Polishing experiment results using four polishing pads

No.	Before Polishing	336 μm	30.5 μm	12.6 μm	6 μm
1	7.7	1.7	2.2	19.0	24.3
2	7.6	2.3	4.2	7.4	23.7
3	10.3	2.1	4.3	10.7	20.7
4	17.6	3.1	8.6	9.7	17.0
5	12.7	2.3	3.2	8.6	22.3
6	11.0	3.7	10.8	39.8	15.5
7	9.9	2.3	6.8	13.2	21.5
8	5.6	2.0	12.3	18.9	20.0
9	10.1	5.0	9.5	11.0	16.3
10	17.6	3.1	4.1	10.5	28.6
Avg.	11.0	2.8	6.6	14.9	21.0

분되는 평균 입자 지름이 각각 336 μm , 35.0 μm , 12.6 μm , 6 μm 인 네 종류의 폴리싱 패드를 순차적으로 사용하여 폴리싱 작업을 수행하고 작업하기 전과 각 폴리싱 패드로 작업한 후의 광택도를 측정하였다. 광택도 측정을 위한 광택계로는 AG-106B (Amitari design) 모델을 사용하였다. 폴리싱 작업을 하기 전과 각 폴리싱 패드로 작업을 한 후 무작위로 위치를 선정하여 10회씩 측정 후 평균을 산출하였다. 광택도의 단위는 GU(gloss unit)로, 유리표면의 광택도를 100 GU, 광택이 전혀 없는 표면의 광택도를 0 GU로 한 상대적인 값을 의미한다. 측정된 광택도를 Table 2에 나타내었다. 입자 지름 336 μm 의 거친 폴리싱 패드를 사용하여 폴리싱한 후의 광택도는 2.8 GU로 작업 전보다 오히려 광택도가 감소하였지만 부드러운 폴리싱 패드로 바꾸며 작업할수록 광택도가 높아져 작업 전보다 약 두 배 가량 개선된 것을 확인할 수 있었다.

4.5 경로생성 시뮬레이션

전방향 이동 메커니즘이 적용된 이동 플랫폼의 효율성을 검증하기 위하여 가로 1 m, 세로 2 m의 폴리싱 로봇이 5 m \times 5 m의 공간을 폴리싱 작업하는 상황을 가정하고 경로생성 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 14(a)는 기존의 일반 바퀴를 사용하는 전통적인 이동 메커니즘을 이용하여 폴리싱 작업을 수행한 경우에 대한 이동 플랫폼의 이동궤적과 작업영역을 나타낸다. 일반적인 바퀴를 이용하여 회전운동을 할 때에는 벽과의 간섭이 발생하기 때문에 벽면 주변의 폴리싱 작업이 불가능함을 확인할 수 있고, 이 경우 폴리싱이 가능한 작업영역은 전체 공간 크기의 약 63.7%로 확인되었다. Fig. 14(b)는 이 연구에서 제안하는 메카닉 기반의 전방향 이동 메커니즘을 이용하여 폴리싱 작업을 수행한 경우에 관한 이동 플랫폼의 이동궤적과 작업영역을 나타낸다. 대부분의 주행이 이 메커니즘을 활용한 결과 직선운동으로 이루어져 이동 플랫폼의 회전반경에 의해 작업이 불가능한 영역이 일반 바퀴 메커니즘과 비교했을 때 대폭 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 그 결과 작업영역은 전체 방 크



(a) Conventional wheel (b) Omni-directional wheel

Fig. 14 Path planning simulation

기의 약 97.4%로 확인되었다.

5. 결론

본 연구에서는 자동공구교환 메커니즘이 적용되어 폴리싱 패드의 교환이 용이하고 메카넘휠을 활용하여 전방향 이동이 가능한 폴리싱 로봇을 소개하고, 그 성능을 평가하였다. 성능평가는 로봇의 직진성, 사각형 프로파일 주행성능, 자동공구교환 시간, 폴리싱 작업 능력, 이동 유연성 다섯 개의 항목으로 수행되었다. 로봇의 직진성은 모든 방향으로 0.77° 이하의 오차를 가짐을 확인하였고, 사각형 프로파일은 초음파센서의 피드백을 이용하여 지령궤적을 정확하게 추종할 수 있음을 확인하였다. 자동공구교환에 소요되는 시간은 약 50초 정도로 측정되었다. 폴리싱 작업 수행 후 바닥면의 광택도를 측정된 결과 바닥 면의 광택도는 작업 전 광택도 11.0 GU에서 최종 작업 후 21.0 GU로 약 두 배 가량 향상됨을 확인하였다. 전방향 이동 메커니즘 적용으로 인한 이동 유연성은 경로생성 시뮬레이션을 통하여 확인하였고, 작업영역이 63.7%에서 97.4%로 향상되었음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교학술연구비에 의하여 연구된 논문임.

References

- [1] Cho, G., 2016, The Development of an Automatic Tool Changing Concrete Polishing Robot Applying Mecanum wheel, A Thesis for a Master, Kumoh National Institute of Technology, Republic of Korea.
- [2] Doroftei, I., Grosu, V., Spinu, V., 2007, Omnidirectional Mobile Robot - Design and Implementation, I-Inspiration and Robotics: Walking and Climbing Robots, I-Tech Education and Publishing, Vienna, 511-528.
- [3] Muir, P. F., Neuman, C. P., 1987, Kinematic Modeling for Feedback Control of an Omnidirectional Wheeled Mobile Robot, In Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1172-1178.
- [4] Chu, B., Cho, G., Sung, Y. W., 2015, Position Control Algorithm and Experimental Evaluation of an Omni-directional Mobile Robot, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 24:2 141-147.
- [5] Chu, B., Sung, Y. W., 2013, Mobile Performance Evaluation of a Mecanum Wheeled Omni-directional Mobile Robot, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 23:4 374-379.