

단일 사각 레일 주행이 가능한 감시 로봇 설계

Development of an Inspection Robot Operating on a Single Square Rail Track

류우석¹, 이성온[†]
 Wooseok Ryu¹, Sungon Lee[†]

Abstract: This paper proposes an inspection robot that can operate on a single square rail. Various inspection robots have been developed to identify emergency situations in industrial environments, such as those involving fires or individuals with cardiac arrest. Because the robots must operate in wide areas and long tunnels, they are designed to move along a rail installed on the ceiling. Double rail track are typically used to ensure the stability of robot movement. However, the cost for installing a double rail track is nearly two times that for a single rail track. Moreover, it is challenging to install double rail tracks while ensuring the same curvature and interval between the two rails. Therefore, in this study, an inspection robot that operate on a single square rail track is developed. To ensure stable movement in the longitudinal and lateral directions, two passive guide parts are used, and the main active wheel is allowed to move on the upper side of the square rail. The prototype was manufactured, and experiments were performed for different robot velocities.

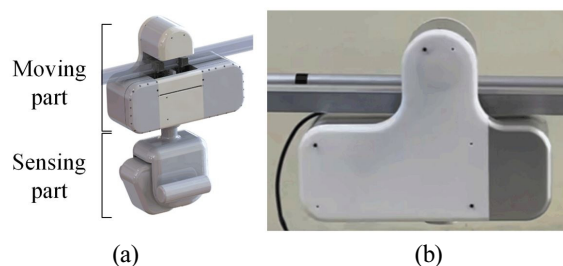
Keywords: Inspection Robot, Square Rail, Single Rail Track

1. 서 론

다양한 산업시설과 대형 편의시설이 증감함에 따라, 광대한 범위에서 발생하는 긴급사항에 대한 실시간 감시와 점검자가 수시로 점검이 불가능한 시설에 대한 산업 장비의 상태 점검을 위한 로봇에 대한 연구가 중요해 지고 있다. 특히, 이런 대형 시설과 터널 같은 사람이 직접 감시가 어려운 시설에서, 설치된 레일을 따라 반복적이고 안정적인 구동이 가능한 감시 로봇(inspection robot)은 다양한 형태로 개발되어 왔다. 예를 들어, 건축 구조물 상태 점검을 위한 H-beam 구조물에서의 감시 로봇^[1], 송전탑의 케이블 점검을 위한 감시 로봇^[2], 변전소 내부 시설 상태 점검을 위한 감시 로봇^[3] 등이 개발 되어 왔다. 또한, 통신 케이블과 인터넷 케이블 매장 터널에서의 화재 발생 여부와 케이블 상태 모니터링, 지하철 및 건물 환기 통풍구 상태 모니터링, 체육시설 이용자의 상태 모니터링 등에 적용

하기 위한 감시 로봇도 계속하여 개발되고 있다^[4-8].

레일 트랙(rail track)을 따라 구동되는 감시로봇의 구조는 크게 두 개의 파트로 구성된다. 먼저, [Fig. 1]에서 볼 수 있듯이, 레일에 고정되어 전후 구동을 위한 기계부품들과 배터리를 포함 하는 구동부(moving part)와 구동부에 장착되어 다양한 센서를 이용하여 목적에 맞는 여러 상태를 파악할 수 있는 센싱부(sensing part)로 나뉜다. 일반적으로, 레일 감시 로봇은 시설물의 천장 또는 상부에 레일이 설치되어 구동부가 상부에 위치하고 그 아래에 센싱부를 부착하여, 주기적으로 레일을 왕복하면서 시설의 상태 모니터링 또는 응급상황 알림용으로



[Fig. 1] (a) Developed inspection robot including the moving part and sensing part and (b) prototype of the developed inspection robot

Received : Mar. 25. 2022; Revised : Apr. 21. 2022; Accepted : Apr. 22. 2022

1. Research Assistant Professor, Hanyang University, Ansan, Korea (fbdntjr3@hanyang.ac.kr)

† Professor, Corresponding author: School of Electrical Engineering, Hanyang University, Ansan, Korea (Songon@hanyang.ac.kr)

[Table 1] Systems driven on double and single rail tracks

	Double rail track	Single rail track
System stability	Stable	Unstable
Installation expense	↑	↓
Installation difficulty	↑	↓
Control difficulty	↑	↓
Available weight	↑	↓

사용해 오고 있다.

개발 비용 면에서, 레일 감시 로봇의 경우, 감시 로봇 본체의 제작비용보다 광대한 범위에 설치되는 레일의 제작비용과 설치비용이 주를 이룬다. 기존 레일 감시 로봇들은 레일 위에서 안정적인 구동을 위해서, 이중 레일(double rail track)을 사용해왔다. [Table 1]에서와 같이 이 경우, 이중 레일을 사용함으로써, 단일 레일(single rail track) 설치비와 비교하여 제작 및 설치비용이 2배 이상 증가하게 된다. 또한, 상하좌우 이동을 위한 곡선 레일 제작 시에도, 외경과 내경 레일에 따라 곡률을 고려하여 제작하여야 하는 문제점이 있고, 설치 시에도 정확한 간격을 유지해서 설치해야하는 어려움을 가지고 있다.

제어 측면에서도, 이중 레일을 따라 이동하는 레일 감시 로봇의 경우 외경과 내경 레일에 따라 바퀴의 속도 차이가 있으므로, 정확한 위치 제어가 필요한 경우 상황에 맞게 바퀴속도를 조절해야하는 제어 알고리즘 개발이 필요하다. 기존 연구에서 H-beam 또는 원형 레일을 이용한 단일 레일 감시 로봇 개념^{9,10)}도 제안되었지만, 단일 H-beam과 원형 레일에 설치된 로봇 또한 좌우에 4개의 바퀴가 설치되어, 제어면에서 똑같은 문제를 해결해야만 한다.

본 논문에서는 사각 단일 레일 트랙을 따라 이동이 가능한 레일 감시 로봇을 제안한다. 단일 레일을 사용함으로써, 레일 제작과 설치단가를 낮추는 동시에, 하나의 구동 혈만을 통해서 상하좌우 이동을 원활히 수행할 수 있었다. 또한, 기존 H-beam 또는 원형 단일 레일 트랙을 사용한 감시 장비 로봇에서 시스템의 안정성을 높이기 위한 부수적인 설계 및 제어 방식도 단일 사각 레일 트랙을 사용함으로써, 단순화 시키면서, 시스템 안정성을 향상시킬 수 있었다.

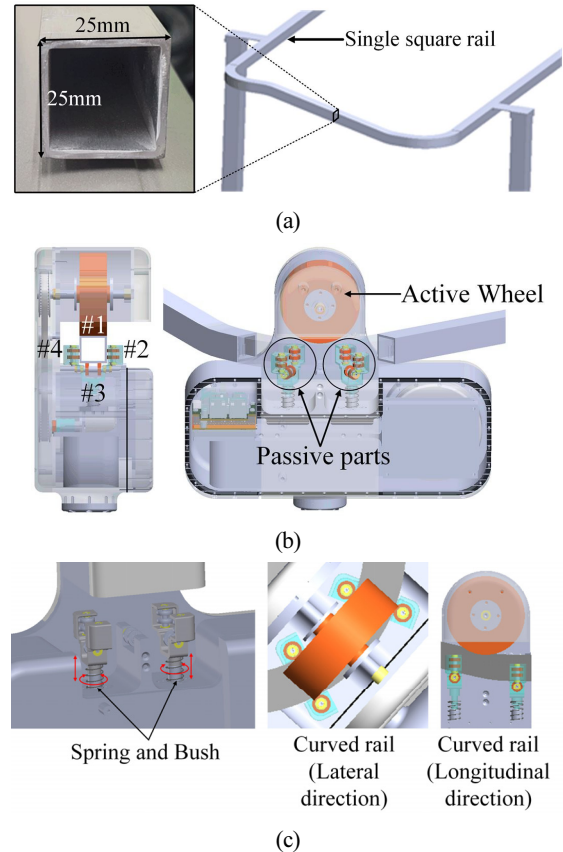
2. 감시 로봇 설계

2.1 설계 조건 및 레일선정

레이로봇의 기능을 원활히 수행하기 위한 설계 조건은 [Table 2]과 같이 설정되었다. 대형 시설과 터널을 주기적으로 문제없이 감시하기 위해서는 6m/s 이상의 주행속도를 가지도

[Table 2] Design conditions

Desired Velocity	over 6 m/s
Available weight (sensing part)	3 kg
Minimum radius of curvature (rail)	40 mm



[Fig. 2] (a) Single square rail, (b) moving part: active and passive wheels, and (c) motions of passive parts in the lateral and longitudinal directions

록 설정되었고, 레일의 설치 환경을 고려하여, 최소 곡률반경도 40 mm 이상으로 설정되었다.

또한, 단일 레일 선정을 위하여, ‘○’자(circle rail)와 ‘□’자(square rail)형태의 레일이 고려되었다. 우선, ‘○’자 형태 레일의 경우 단일 레일로 사용 시에 레일 방향을 회전축으로 하여 회전을 하게 되어, 안정적인 구동을 위해서는 구조적으로 해당 자유도를 제한하는 시스템을 추가로 개발하여야 한다. 이에 따라, 제안된 감시 로봇은 [Fig. 2(a)]와 같이 ‘□’자 형태의 단일 레일을 사용하였다.

2.2 구동 메커니즘 설계

사각레일의 4개의 면 중에서, [Fig. 2(b)]에 표시된 #2, #3, #4

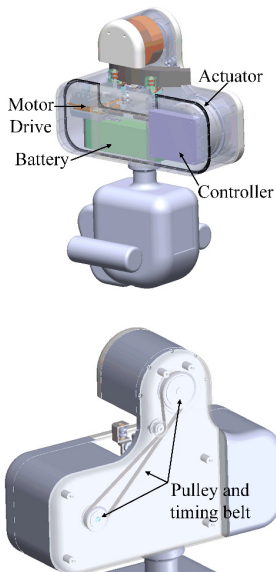
면에는 수동부(passive part)를 구성하고 있는 3면의 수동 휠이, 각 면으로 2개씩 접촉하도록 하여, 감시 로봇이 레일에서 회전을 하거나 벗어나지 않도록 구속시키고, 직선 및 곡선 레일을 따라 안정적으로 구동이 가능하도록 설계되었다. 그리고, #1 면에는 구동 휠(active wheel)을 위치시켜, 장치의 무게에 따른 마찰력을 이용하여, 레일위에서 원활히 구동 될 수 있도록 설계 되었다. 또한 #2면의 외형 프레임에 개방되도록 설계하여, 레일 고정을 위한 설치 프레임이 감시 로봇의 구동에 영향을 주지 않도록 하였다.

수동부는 레일과 접촉되는 부위에 수동 휠(passive wheels)이 레일 3면으로 배치 되어있고, 수동부는 아래에 스프링과 부시로 본체와 연결되어 있도록 설계 되었다. 이런 구조는 [Fig. 2(c)]에서와 같이, 수직 운동과 회전 운동이 가능하여, 수평 곡선 레일 및 수직 곡선 레일을 따라, 수동적으로 움직이며, 구동부가 레일에서 탈락되지 않도록 하는 역할을 하게 된다. 곡선 레일의 최소 곡률 반경은 40 mm가 되도록 수동부의 크기와 간격이 결정되었다.

구동 휠을 구동시키기 위한 메커니즘은 [Fig. 3]와 같이 구성되어 있다. 본체 안에 하나의 모터와 모터 드라이버, 제어기, 배터리가 배치되어 있고, 모터 축은 외부로 연장되어, 구동축(active wheel)과 풀리(pulley) 및 타이밍 벨트(timing belt)로 연결되어 동력을 전달한다. 사용된 풀리의 기어 비는 13:20이다.

감시 로봇의 주행 속도(V)는 모터의 회전 속도($RPM_{actuator}$)와 기어비(R_{gear}) 주행 휠의 지름(D_{wheel})에 의해서 다음과 같이 결정되어 진다.

$$V = \frac{RPM_{actuator}}{60} \times R_{gear} \times \pi D_{wheel} \quad (1)$$



[Fig. 3] Components of the moving part

또한, 식 (1)으로부터, 목표 주행 속도($V_{desired}$) 이상의 성능을 얻기 위해서 필요한 모터의 $RPM_{actuator}$ 은 다음과 같이 계산되어 진다.

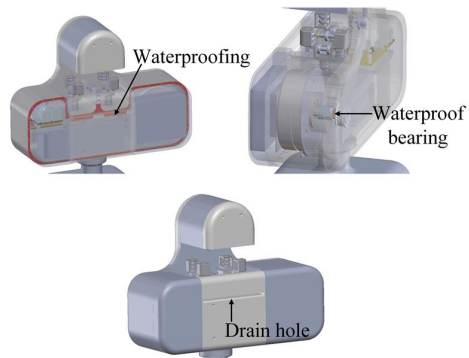
$$RPM_{actuator} = \frac{60 V_{desired}}{\pi R_{gear} D_{wheel}} \quad (2)$$

식 (2)을 고려하여, 모터 RPM은 선정되어 진다.

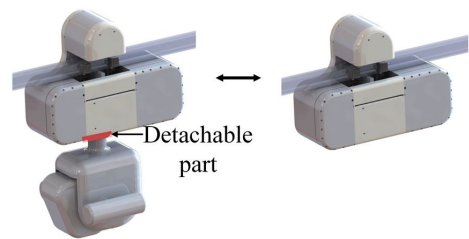
2.3 방수처리

감시 로봇이 운용되는 환경은 다양하고, 그런 운용 환경 중 에서 습기가 있는 환경은 구동부의 전자부품들의 고장 원인이 될 수 있다. 이에 따라, 개발된 감시 로봇의 본체는 하나의 파트로 가공되도록 설계되었으며, 해당 파트는 또 다른 하나의 커버와 결합되어 밀폐되도록 하였다. 두 파트가 결합되는 부위는 방수처리를 하였고[Fig. 4], 구동 휠로 동력 전달을 위하여 외부로 연결된 모터 축에는 방수 베어링을 사용하여[Fig. 4], 전체적으로 습기에 대한 영향을 최소화 하도록 설계하였다. 수동부를 설치하기 위해 설계된 공간은 습기로 인한 물이 저장되어, 구동에 영향을 미칠 수 있으므로, 배수구(drain hole)를 설치하였다.

또한, [Fig. 5]와 같이 구동부와 센싱부는 탈부착이 가능하도록 설계되어, 보수가 용이하도록 설계되었다. 또한, 부착 가용 범위가 360°로, 장착하는 센서의 종류와 목적에 따라 방향을 목적에 맞게 결정하여 장착이 가능하다.



[Fig. 4] Waterproofing, waterproof bearing, and drain hole



[Fig. 5] Detachable design of the moving and sensing parts

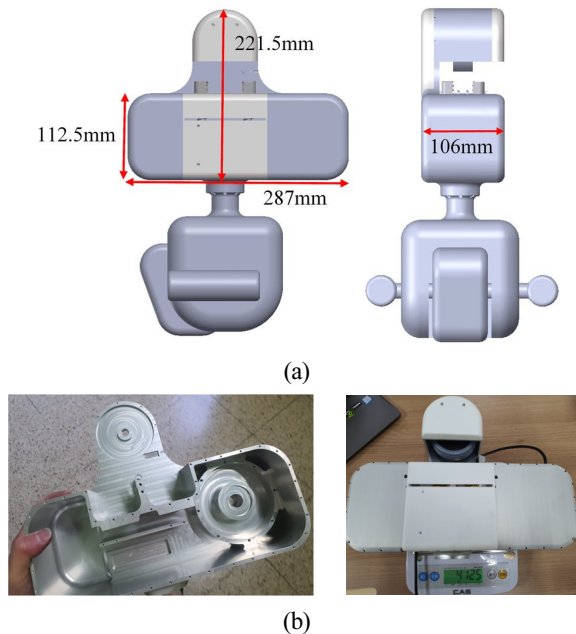
3. 제작 및 실험

제작된 감시 로봇의 프로토타입은 [Fig. 1]과 같고, 성능은 [Table 3]과 같다.

[Table 3]에서와 같이, 개발된 감시 로봇은 [Fig. 6(a)]와 같은 크기를 가지며, 구동부의 무게는 약 4 kg으로 제작되었다. ‘ㄱ’ 형태의 레일은 알루미늄 레일을 사용하였으며, 25 mm × 25 mm 크기를 가진다. 본체에 장착된 모터는 식 (2)를 통하여, 정격 토크와 RPM 성능이 각각 729 mNm와 2490 rpm를 지닌 모터로 선정되었으며, 구동 휠과 기어 비가 함께 계산되어 최종적으로 감시 로봇의 최대 속도는 8.0916 m/s를 가지도록 설계 되었다.

[Table 3] Specifications of the developed inspection robot

Size	287 mm × 106 mm × 221.5 mm	
Weight	About 4 kg (Only moving part)	
Spec. of rail	Aluminum square rail (25 mm × 25 mm)	
Spec. of actuator	Rated Voltage	24 V
	Rated Power	220 W
	Rated Torque	729 mNm
	Rated RPM	2490 rpm
	Max. RPM	3170 rpm
Diameter of active wheel	75 mm	
Gear ratio (of Pulley)	13:20	
Maximum velocity	8.0916 m/s	



[Fig. 6] (a) Size of the developed inspection robot and (b) the main part manufactured as a single part and the weight of the developed inspection robot (4.125 kg)

[Table 4] Results of experiment according to velocities

RPM	100	500	1000
Length of rail (m)	1.5		
time (s)	8.96	2.1	1.1
Motor RPM	Desired velocity (m/s)	Real velocity (m/s)	
100	0.2553	0.1674	
500	1.2763	0.7143	
1000	2.5525	1.3636	

계 되었다. 또한, 방수를 위해 설계된 본체 파트는 알루미늄 재질로 [Fig. 6(b)]와 같이 가공 제작되었으며, 해당 파트의 볼트 결합 부위에 방수 처리를 하여 커버를 덮을 수 있도록 제작 되었다.

개발된 감시 로봇의 운용을 위해서 레일에 로봇을 결합 시, 레일 끝단에서 레일의 축 방향으로 결합하면 쉽게 결합이 가능하다. 결합이 완료된 후, 사용자가 원하는 구동 속도를 입력 하여 구동을 시작할 수 있다. 설계 목적에 맞게 개발 감시 로봇은 하나의 레일에서 구동되기 때문에, 미끄럼(slip)이 일어나지 않는 가정 하에 위치 제어와 속도 제어를 매우 용이하게 할 수 있다. [Fig. 7]에서와 같이, 개발된 감시 로봇은 RPM의 변화를 다음 과 같이, 100 rpm, 500 rpm, 1000 rpm으로 변화 시키면서 주행 실험 테스트를 진행하였고, 큰 무리 없이 레일을 따라 구동이 원활히 되는 것을 증명하였다.

주행시간으로 계산된 실제 주행 속도 값은 [Table 4]같이 나타났으며, 설정 속도와 실제 속도의 차이는 감속 제력에 따른 에러가 반영된 것으로 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 정사각형 형태를 가지는 단일레일에서 구동이 가능한 레일 감시 로봇을 개발 하였다. 단일레일을 사용하는 형태이기 때문에, 기존 이중레일 설치 시 생겼던 두 레일의 곡률과 간격 일치 문제, 제작 단가 문제, 제어 문제 등을 해결 가능 하였고, 단순한 조작만으로 작은 곡률(최소반경 40 mm)에서도 구동이 원활히 되었다. 로봇의 어플리케이션으로는 레일로봇으로 모니터링이 필요한 통신케이블 터널, 지하철 및 건물의 환기구, 해저터널 등에 모두 적용이 가능할 것으로 예상되며, 추후 개발된 감시 로봇을 실제 현장에서 구동 실험해 보는 것을 계획하고 있다.

References

[1] J. H. Kim, M. Jeon, K. Jeon, S. H. Lee, and D. Hong, "Development of Horizontal Locomotion Robot using Rail Mechanism for



[Fig. 7] Experiment according to different robot velocities

H-beam Structure,” *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, vol. 30, no. 4, pp. 421-426, 2013, DOI: 10.7736/KSPE.2013.30.4.421.

[2] H. Wang, F. Zhang, Y. Jiang, G. Liu, and X. Peng, “Development of an Inspection Robot for 500 kV EHV Power Transmission Lines,” *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, Taiwan, pp. 5107-5112, 2010, DOI: 10.1109/IROS.2010.5651966.

[3] K. Jiang, Z. Sun, Y. Liu, J. Sui, C. Fu, and Y. Li, “Development and Application of the Rail-type Inspection Robot used in Substation Rooms,” *MATEC Web of Conferences (ICMITE 2017)*, 2017, DOI: 10.1051/mateconf/201713900210.

[4] J. Wang, A. Sun, C. Zheng, and J. Wang, “Research on a New Crawler Type Inspection Robot for Power Transmission Lines,” *2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry*, Montreal, QC, Canada, 2010, DOI: 10.1109/CARPI.2010.5624471.

[5] M. Cheng and D. Xiang, “The Design and Application of a Track-type Autonomous Inspection Robot for Electrical Distribution Room,” *Robotica*, vol. 38, no. 2, pp. 185-206, 2020, DOI: 10.1017/S0263574719000559.

[6] B. P. A. Silva, R. A. M. Ferreira, S. C. Gomes Jr., F. A. R. Calado, R. M. Andrade, and M. P. Porto, “On-rail solution for autonomous inspections in electrical substations,” *Infrared Physics & Technology*, vol. 90, pp. 53-58, May, 2018, DOI: 10.1016/j.infrared.2018.01.019.

[7] Y. Xiaoa, Y. Yan, Y. Yua, B. Wang, and Y. Liang, “Research on pose adaptive correction method of indoor rail mounted inspection robot in GIS Substation,” *Energy Reports*, vol. 8, no. 6, pp. 696-705, Sep., 2021, DOI: 10.1016/j.egy.2022.03.155.

[8] X. Jia, W. Yuan, H. Li, S. Jiang, and Y. Zhang, “Application of Environment-perception Intelligent Control Technology in the Inspection Robot of Coal Conveyance Corridor in Thermal Power

Plant,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 772, 202, DOI: 10.1088/1755-1315/772/1/012056.

[9] News1 Korea, [Online], <https://www.news1.kr/articles/?4266488>, Accessed: April 11, 2022.

[10] Asia Gyeongje, [Online], <https://cm.asiae.co.kr/article/2019122310011702133>, Accessed: April 11, 2022.



류우석
 2020 연세대학교 기계공학과(공학박사)
 2020~현재 한양대학교 연구조교수

관심분야: Design of mechanism and vibration system, Robotic hand, Medical robot



이성운
 1997 서울대학교 기계설계학과(공학사)
 1999 포항공과대학교 기계공학과(공학석사)
 2008 동경대학교 지능기계정보학과(공학박사)
 2012 하버드대학교 박사후 연구원
 1999~2015 한국과학기술연구원 선임연구원
 2015~현재 한양대학교 교수

관심분야: Vision based Control, Pose Estimation, Biomedical Systems