

# 지뢰제거작업을 위한 가변 형상 무한궤도형 주행 로봇

정해관<sup>†</sup> · 김상도\* · 이청희\*\* · 곽윤근\*\*\*

## Variable Configuration Tracked Mobile Robot for Demining Operations

Hae-Kwan Jeong, Sang-Do Kim, Cheong-Hee Lee and Yoon-Keun Kwak

**Key Words** : Mobile Robot(주행 로봇), Adaptability(적응성), Passivity(수동성), Demining(지뢰제거), Inexplosive(비폭파식), Rake(갈퀴)

### Abstract

This paper introduces a link-type tracked vehicle which is developed for demining operations. The vehicle consists of three parts - front frame, rear frame and body. The front frame is connected to the rear frame by a rotational passive adaptation mechanism which is a driving mechanism of the vehicle. Additionally, the demining system which is adaptable to mobile robot is developed to clear small Anti-Personnel(AP) mines with inexplosive method. In other words, assembled rakes unearth mines by their opposite rotation to the direction of the robot. Finally, the motions of demining rakes and design parameters of the demining system are analyzed.

### 1. 서론

주행 로봇(Mobile Robot)은 최근의 로봇 연구 경향 중의 하나로, 정지된 상태로 특정한 위치에서 특정 작업만을 수행하던 로봇에게 하체의 이동 기능을 부가하여 작업과 동시에 이동이 가능하게 한 것이다. 이러한 주행 로봇의 응용 분야는 건물 내부 감시 및 정찰, 화재 지역에서의 구조 인원 확인 등과 같은 민간용 분야와 지뢰 탐지 및 제거, 적지 정찰 등과 같은 군사용 분야, 건물 내부의 청소와 같은 가정용 분야, 우주 탐사와 같은 항공우주 분야에 이르기

까지 매우 다양하게 확대되고 있다.

본 논문에서는 주행 로봇의 군사적 응용 분야로 분류될 수 있는, 지뢰제거작업을 위한 가변 형상 무한궤도형 주행 로봇에 대해 언급하고자 한다. 현재 지구상에는 65개국에 8천 발에서 1억 발 정도의 지뢰가 매설되어 있고 1년에 26000명, 1일에 65명이 지뢰로 인한 피해를 입고 있는 것으로 보고되고 있다. 이러한 지뢰로 인한 피해를 방지하기 위하여 많은 국제적인 노력이 이루어지고 있으며 지뢰 탐지 및 제거 작업도 꾸준히 진행되고 있으나 매설된 지뢰를 제거하는 데 있어서는 여전히 인력에 의한 방법이 고수되고 있어서 인명 피해를 감수할 수밖에 없는 실정이다. 따라서 지뢰로 인한 인명 피해를 줄이기 위해서는 로봇을 활용하는 지뢰제거 시스템의 개발이 불가피하다고 할 수 있다.

본 논문은 지뢰제거 시스템을 장착할 수 있는 가변 형상 무한궤도형 주행 로봇의 설계 개념 및 구성에 대한 설명과 로봇 전반

<sup>†</sup> 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : [hothip29@kaist.ac.kr](mailto:hothip29@kaist.ac.kr)

TEL : (042)869-3252

FAX : (042)869-5201

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 삼성전기 광디바이스 사업부 테크그룹

\*\*\* 한국과학기술원 기계공학과 교수

부에 장착된 지뢰제거 장치에 대한 분석으로 구성되어 있다. 개발된 주행 로봇은 지형에 대한 적응성(adaptability)과 구동적 측면에서의 수동성(passivity)의 두 개념을 적용하여 설계되었다. 또한, 무한궤도형 주행 로봇의 단점 중의 하나인 평지에서의 주행 능력을 향상시키기 위해 지형에 따른 주행 모드의 전환을 제안한다. 주행 로봇 전 반부에 장착된 지뢰제거 장치는 로봇이 전진할 때 갈퀴 결합체가 회전하면서 매설된 지뢰를 지표면 위로 밀어 올리는 방법으로 지뢰를 제거하게 된다. 이 때 회전하는 갈퀴의 운동을 분석하고, 갈퀴가 토양에 삽입되었을 때 토양으로부터 받는 저항력에 대해 논한다. 마지막으로 제거된 지뢰의 용이한 수거를 위해 필요한 갈퀴 결합체의 배열에 대해 분석한다.

## 2. 무한궤도형 주행 로봇의 설계

### 2.1 설계 개념

본 연구에서는 기존의 무한궤도형 주행 로봇의 에너지 효율 문제 등을 개선하고자 수동성(passivity)과 적응성(adaptability)을 기본 개념으로 로봇을 설계하였다. 수동성은 메커니즘의 에너지 효율을 높이기 위한 개념이고, 적응성은 계단과 같은 평탄치 않은 지형에 대한 로봇의 주행 능력을 향상시키기 위한 것이다.

개발된 로봇은 평지와 같은 평탄한 지형뿐 아니라 건물 내의 계단이나 외부의 산악 지형 같은 환경을 주행해야 하므로 지형에 대한 적응성이 매우 중요하고, 주행 시간과 관련해 에너지 효율 문제 역시 중요하다. 이를 위해 지형에 따른 무한궤도의 형태에 별도의 구동원에 의존하지 않고 외부에서 가해지는 힘에 의해 수동적으로 변화하는 수동성의 개념을 도입한다. 구동부의 수동적 형상 변형은 다음과 같은 장점을 가진다.

- 지형에 따라 구동부의 형상이 스스로 적응해 가므로 비평탄 지형에 대한 주행 성능

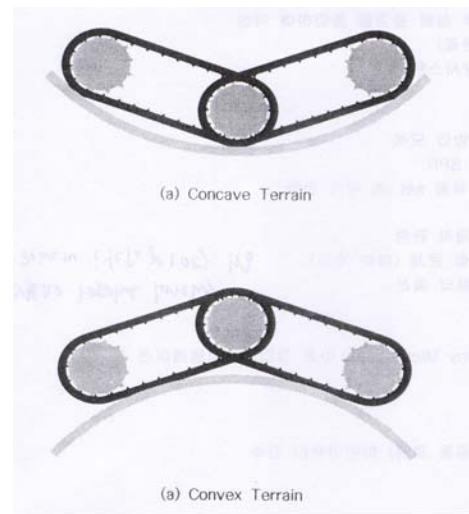


Fig. 1 Terrain Adaptation of Link Track

을 향상시킨다.

- 구동부의 형상 변형을 위한 구동원이 필요치 않아 에너지 효율을 높인다.
- 수동적 구동으로 로봇의 주행과 구동부의 형상 변형이 동시에 진행되므로 비평탄 지형에서의 주행 속도를 높인다.

따라서 위의 기본 개념을 바탕으로 로봇의 각 부분이 수동적 링크 구조로 연결되는 가변 형상 무한궤도형 주행 로봇을 설계하였다.

### 2.2 프레임 설계

개발된 로봇이 험로를 주행한다고 가정하였으므로 이를 고려한 프레임 설계가 필요하다. 기본 구조는 앞, 뒤로 분리된 2개의 프레임이 링크 형태로 연결된 구조로, 두 트랙이 하나의 바퀴를 공유하면서 링크 구조로 연결되어 있어 한 프레임이 다른 프레임에 대해 자유로이 회전할 수 있는 형태이다. 이러한 링크 구조에 의한 프레임의 수동적 회전은 Fig.1과 같이 로봇의 지형에 대한 적응성을 높일 뿐 아니라 프레임 회전에 대한 별도의 구동원이 필요치 않아 에너지 소비를 최소화할 수 있다.

따라서 위의 기본 구조를 토대로 하고, 험로 주행의 대표적인 예라 할 수 있는 벽

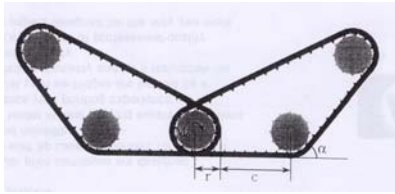


Fig. 2 Triangle Track

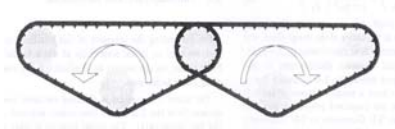


Fig. 3 Frame Rotation of Triangle Track

등반에 대한 해석을 통하여 프레임을 결정한다. 몇 가지 형태의 프레임이 제안된 가운데 벽 등반 마찰 계수의 범위를 넓힐 수 있는 삼각 프레임이 구동부 메커니즘으로 선정되었다. 특히 삼각 프레임은 구동부와 지면의 접촉 면적을 조절할 수 있는 장점을 가진다. Fig.3과 같이 양쪽의 프레임을 회전시켜 구동부를 변형시키면 지면과의 접촉 면적이 감소하게 된다. 이러한 형태는 로봇의 회전 시나 평지 주행 시 접촉 면적을 바뀌 수준으로 최소화할 수 있으므로 에너지 효율을 향상시킬 수 있고 비평탄 지형에 대한 적응성을 높일 수 있다.

### 3. 무한궤도형 주행 로봇의 구성

위의 설계 개념을 바탕으로 제작된 로봇은 크게 구동부와 제어부로 구성되어 있으며 구동부는 다시 앞쪽 프레임(front driving part), 뒤쪽 프레임(rear driving part)으로 구분될 수 있다. 제어부는 위 두 프레임과 링크 구조로 연결되어 있는 본체(body)에 내장되어 있다. 전체적인 로봇의 형상은 Fig.4와 같다.

구동부는 2개의 삼각 프레임이 링크 구조로 연결되어 있어 수동형 회전 메커니즘을 구성한다. 이러한 링크 구조와 프레임의 형상을 이용하여 지면과 프레임의 접촉 면적을 조절함으로써 주행 모드를 비평지 모드와 평지 모드로 분리하였다. 제어부 역시

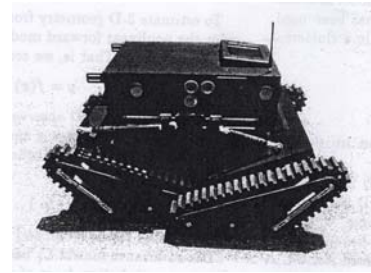


Fig. 4 Fabricated Variable Configuration Tracked Mobile Robot



Fig. 5 Basic Concept of Demining System

구동부와 링크 구조로 연결되어 있어 구동부와 지면의 충돌로 인한 충격을 흡수하고 구동부에 대해 수평적 자세를 유지한다. 구동부에는 구동 모터와 전원 공급을 위한 배터리 등이 내장되며 제어부는 로봇의 속도와 방향에 대한 제어 모듈을 포함한다.

로봇의 조종은 유선과 무선 조종이 모두 가능하도록 제작되었다. 무선 조종 시 로봇과 조종자 간의 정보 교환은 무선 랜을 이용한다. 로봇은 각종 센서를 통해 얻어진 정보를 조종자에게 전송하고, 조종자는 로봇의 진행 방향 및 속도 명령을 전달한다.

### 4. 지뢰제거 시스템의 개념

#### 4.1 가정

제작된 주행 로봇의 전반부에 지뢰제거 장치를 추가로 장착함으로써 지뢰제거 시스템을 구성한다. 실제 작업 환경에 적용이 가능하고, 현재 실시되고 있는 지뢰제거 작전 목표에 부합되는 지뢰제거 장치를 개발하기 위해 다음의 가정을 한다.

- 제거 대상 지뢰는 금속 탐지기로 탐지가 불가능한 M14 대인 지뢰로 한다.
- 지뢰의 제거는 비폭파식 발굴 방법으로

한다.

- 지뢰가 매설된 환경은 입자가 균일한 사질토이다.
- 지뢰의 매설상태는 최초 매설된 직립상태를 유지하고 있으며, 지뢰 상부에 토사, 바위 등의 장애물은 없다.

#### 4.2 시스템 개념

위에서 제시된 가정을 바탕으로 구상한 지뢰제거 시스템의 개념은 Fig.5와 같다. 지뢰제거 원리는 로봇이 진행할 때 로봇 전반부에 장착된 갈퀴 결합체가 회전하면서 지뢰를 지표면 위로 밀어 올려 발굴해 내는 것이다. 즉, 갈퀴의 회전방향은 로봇이 좌에서 우로 진행한다고 가정했을 때 반시계 방향으로 회전하게 된다. 이는 회전하는 드럼을 이용한 폭파식 지뢰제거 장비와 지뢰를 폭파시키지 않고 갈퀴로 긁어내는 방식을 혼합 응용한 방식이라 할 수 있다.

M14 대인 지뢰는 9~15kg의 수직압력이 상부의 압력판에 작용하면 내부의 스프링이 작동하여 공기가 기폭관에 충격을 가하고, 이로 인해 주장약이 터지게 되어 있으므로 지뢰제거 갈퀴가 M14 대인 지뢰의 하부 또는 측면에 접촉하여 밀어 올리게 되면 직접적으로 상부의 압력판에 압력을 가하지 않기 때문에 지뢰가 폭발하지 않고 지표면 위로 발굴된다.

지뢰제거 갈퀴 결합체는 로봇의 전반부에 일정한 각도를 가지며 장착되고, 자체적인 병진운동을 통해 지뢰제거에 용이한 깊이로 토양에 삽입될 수 있다.

### 5. 지뢰제거 시스템의 분석

#### 5.1 지뢰제거 갈퀴의 운동

지뢰제거 갈퀴에 의한 지뢰의 발굴은 지뢰제거 갈퀴의 운동에 따른 지뢰의 운동으로 나타나기 때문에 우선 갈퀴 끝점의 궤적을 분석해 보았다. 이 때, 이상적인 운동상태를 고려하여 갈퀴의 각가속도 및 갈퀴 결합축의 가속도가 0인 상태를 가정한다. 갈퀴의 길이를  $r$ , 갈퀴의 회전 각속도를  $\omega$ ,

그리고 갈퀴 결합축의 전진속도를  $v_0$ 라 하면, 갈퀴 결합축의 위치를 원점으로 하는 갈퀴 끝점의 위치는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$x = r \cos \omega t + v_0 t \quad (1)$$

$$y = r \sin \omega t \quad (2)$$

여기서  $x$ ,  $y$ 는 갈퀴 끝점 궤적의 위치이다. 한편, 갈퀴 끝점의 속도와 방향은 위 두 식에 시간에 대한 미분을 취해주면 얻어진다.

$$v_x = \frac{dx}{dt} = v_0 - r\omega \sin \omega t \quad (3)$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = r\omega \cos \omega t \quad (4)$$

지뢰는 갈퀴가 운동 궤적의 최저점을 지나 지표 밖으로 드러나는 회전구간에서 발굴된다. 즉, 갈퀴가 토양에 삽입되는 깊이를  $a$ 라 하면 지뢰제거가 가능한 구간은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{3}{2}\pi \leq \omega t \leq \frac{3}{2}\pi + \cos^{-1} \frac{r-a}{r} \quad (5)$$

갈퀴의 회전에 의해 지뢰가 발굴되는 구간을 작업구간으로 정의하면, 한 주기 동안의 작업구간의 크기  $P$ 는 식 (1)을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P &= x(t+T) - x(t) \\ &= v_0 T \\ &= \frac{v_0}{\omega} 2\pi \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $T$ 는 주기이다. 따라서 갈퀴의 개수가  $n$ 개일 경우 작업구간의 크기  $P$ 는 다음과 같다.

$$P = \frac{v_0}{n\omega} 2\pi \quad (7)$$

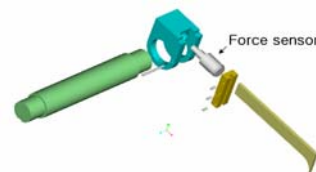


Fig. 6 Instrument for Measuring Resisting Force

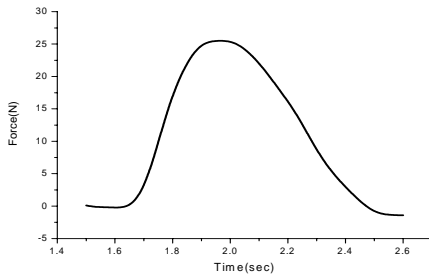


Fig. 7 Resisting Force on the Rake

### 5.2 지뢰제거 시 저항력

지뢰제거 갈퀴는 토양에 삽입되어 지뢰를 발굴하는 전 과정에 걸쳐 지면으로부터 지속적인 저항을 받게 된다. 지뢰제거 시 갈퀴에 작용하는 저항력을 확인하기 위해 다음과 같은 실험을 하였다.

Fig.6과 같은 실험장치를 설치하고 Force 센서로 측정되는 힘  $F_s$ 를 측정한다. 이때, 갈퀴의 각속도는 0이므로 모멘트 평형에 의해 갈퀴에 작용하는 저항력의 합  $\Sigma F$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Sigma F = \frac{d}{l} F_s \quad (8)$$

이 때, 갈퀴의 회전구간에 따른 저항력의 크기의 변화는 Fig.7과 같다. 실험 결과 갈퀴가 최저점에 도달했을 때 최대 저항력이 작용함을 알 수 있었다.

### 5.3 지뢰제거 갈퀴의 배열

갈퀴 결합체에는 총 18개의 갈퀴가 축에 고정되어 있다. 발굴된 지뢰의 사후 처리 및 지뢰제거 시스템의 원활한 진행 등을 위하여 갈퀴의 배열을 고려해야 할 필요가 있다. 크게 갈퀴 간의 간격과 위상차에 대해 생각해 보았다.

갈퀴 간의 간격은 우선 M14 대인 지뢰를 발굴하지 못하고 통과하는 경우가 발생하지 않도록 M14 대인 지뢰의 최소폭 이하가 되도록 하여야 한다. 그러나 지나치게 간격이 좁을 경우에는 절삭되는 토양으로부터의 저항력이 증가하게 된다. 또한, 절삭된 토양의 퇴적량이 증가하여 지뢰제거 작업이 진행될 수록 저항력이 증가하는 현상을 유발

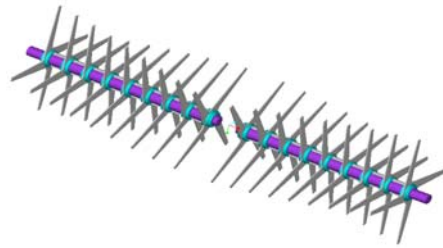


Fig. 8 Rake Assembly

하게 된다. 따라서 가장 적절한 갈퀴 배치 간격은 M14 대인 지뢰의 최소폭으로 하는 것이 적당함을 알 수 있다.

갈퀴 간의 위상차는 발굴된 지뢰의 최종 위치와 관계가 있다. 우선 갈퀴 결합체 좌, 우로 작용하는 저항력이 모멘트를 발생시키지 않도록 좌우 대칭으로 설계한다. 또한, 지뢰제거 시스템이 주행을 마치고 난 뒤 발굴된 지뢰를 용이하게 수거하기 위해서는 진행방향의 전방 중앙에 모이도록 하는 것이 바람직하다. 이상을 고려하여 제작된 갈퀴 결합체는 Fig.8과 같다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 링크 구조의 트랙을 이용한 가변 형상 무한궤도형 주행 로봇의 기본 설계 개념을 제시하고, 이 로봇의 힘로 주행 능력을 군사적 활용 분야에 이용한 비폭파식 지뢰제거 시스템에 대해 분석하였다.

주행 로봇의 구동부는 수동성(passivity)과 적응성(adaptability)이라는 두 가지 개념을 바탕으로 설계되었다. 이러한 링크형 메커니즘은 지형에 따라 구동부의 형상이 스스로 적응해 가므로 비평탄 지형에 대한 주행 성능을 향상시키고, 구동부의 형상 변형을 위한 구동원이 필요치 않아 에너지 효율을 높이며, 수동적 구동으로 로봇의 주행과 구동부의 형상 변형이 동시에 진행되므로 비평탄 지형에서의 주행 속도를 향상시키는 장점을 가진다.

한편, 개발된 로봇의 전반부에 갈퀴 결합체를 장착함으로써 비폭파식 지뢰제거 시스템을 구성하였다. 이 시스템의 특징은 주행 로봇이 진행함과 동시에 결합된 갈퀴가 회

전함으로써 매설된 지뢰를 비폭과식으로 제거한다는 데에 있다. 지뢰제거 갈퀴는 토양에 삽입되어 회전할 때 궤적의 최저점부터 지표면으로 나올 때까지 작업을 하게 된다. 이 구간을 작업구간으로 정의하였고, 작업구간은 갈퀴의 개수가 변함에 따라 변하게 됨을 수식적으로 유도하였다.

지뢰제거작업이 진행된다면 갈퀴가 필시 토양과 접촉하게 되므로 토양으로부터 오는 저항력에 대한 분석이 필요하다. 간단한 실험 결과, 갈퀴 궤적의 최저점에서 최대 저항력이 발생함을 알 수 있었다. 마지막으로, 제거된 지뢰의 처리 및 주행 로봇의 진행 방향을 위한 갈퀴 배열에 대해 분석하였다. 우선 로봇의 직진성을 보장하기 위해 갈퀴 결합체는 좌우 대칭이어야 하고 갈퀴간의 간격은 제거하고자 하는 지뢰의 폭으로 규정하였다. 또한, 제거된 지뢰가 로봇의 전반 중앙에 모이도록 갈퀴간의 위상차를 설정하였다.

향후에는 보다 실용적인 면을 고려하여 전체 지뢰제거 시스템의 무선화를 구비해야 할 것이며 실제 지뢰가 매설된 토양에서 작업이 가능하도록 다양한 설계 변수의 재설계가 진행되어야 할 것이다.

## 참고문헌

- (1) J.F. Derry, 1982, "Roving Robots", Robotics Age, Vol. 4, No. 5, pp. 18~23
- (2) Taro Iwamoto, Hiroshi Yamamoto, 1985, "Stairway Travel of a Mobile Robot with Terrain Adaptable Crawler Mechanism", Journal of Robotic System, Vol. 2, No. 1, pp. 125~134
- (3) Taro Iwamoto, Hiroshi Yamamoto, 1990, "Mechanical Design of Variable Configuration Tracked Vehicle", Journal of Mechanical Design, Vol. 112, pp. 289~294
- (4) J.D. Nicoud, 1997, "Vehicles and Robots for Humanitarian Demining",

Industrial Robot, Vol. 24, No. 2

(5) William E. Green, 1999, "The Case for the Flail : Mechanical Landmine Clearance for the Humanitarian Application", Journal of Mine Action

(6) Maki K. Habib, 2003, "Mechanical Mine Clearance Technologies and Humanitarian Demining : Applicability and Effectiveness", Society for Counter Ordnance Technology