

# 비폭파식 지뢰제거 무한궤도형 주행 로봇의 작업 깊이 제어

정해관\*, 최현도\*, 김상도\*\*, 곽윤근#

## Clearance Depth Control for the Non-explosive Demining System of a Tracked Mobile Robot

Hae Kwan Jeong\*, Hyun Do Choi\*, Sang Do Kim\*\* and Yoon Keun Kwak#

### ABSTRACT

Up to now, a lot of unmanned demining systems have been developed. However, some inferiority surely exist by reason of their large platform and explosive mechanism. To settle this inferiority, non-explosive demining system adaptable to a mobile robot already has been developed. Brief experiment indoors showed that developed demining system can remove landmines well. But, out of doors, several problems are detected. In this research, a study on the performance improvement of developed non-explosive demining system is mainly discussed. To overcome downhill effect, mechanical sensor composed of shaft and spring is used. It is confirmed that clearance depth control using the mechanical sensor is a good solution for the inclination of the system.

**Key Words** : Non-explosive(비폭파식), Demining(지뢰제거), Tracked Mobile Robot(무한궤도형 주행 로봇), Anti-Personnel Landmine(대인 지뢰), Downhill Effect(내리막 효과), Clearance Depth(작업 깊이), Mechanical Sensor(기계식 센서)

### 1. 서론

지뢰는 인류가 창조한 대표적인 살상 무기 중 하나으로써, 제 1 차 세계 대전 이후 지금까지 각종 분쟁 지역에서 지속적으로 사용되어 왔다. 그러나 21 세기에 들어 전세계적으로 팽배해 있는 화합과 상생의 이념 아래 현대 사회는 지뢰의 적절한 사용보다 현재까지 매설된 지뢰를 제거하는 데에 더욱 초점을 맞추고 있는 게 사실이다. 특히 대인 지

뢰는 전쟁 이후, 지뢰매설지역 근방에 거주하는 민간인에게까지 피해를 주고 있어서 지역 재활용의 필요성과 함께 반드시 제거해야 하는 요소로 여겨지고 있다.<sup>1</sup>

지뢰제거의 당위성과 더불어 많은 지뢰들이 탐침을 이용한 수작업에 의해 제거되어 왔다. 그러나 지뢰제거작업은 다른 여타의 작업보다 인간이 직접 하기에 매우 위험하고 시간도 많이 소요된다는 단점이 있다. 이러한 이유로 근래에는 다

\*\*\* 접수일: 2005 년 02 월 15 일; 게재승인일: 2005 년 06 월 29 일

\* 한국과학기술원 기계공학과

\*\* 육군 5 사단

# 교신저자: 한국과학기술원 기계공학과 교수

E-mail ykkwak@kaist.ac.kr Tel. (042) 869-3212

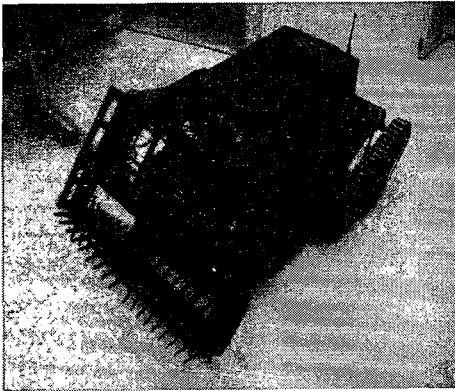


Fig. 1 Non-explosive Demining System

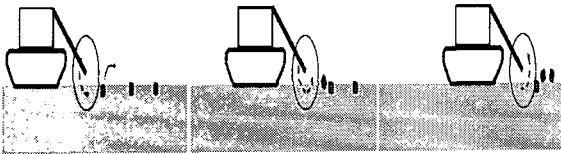


Fig. 2 Basic Concept of Non-explosive Demining System

양한 지뢰제거 장비들이 개발되어 인간을 대신해 왔으나 거의 대부분의 장비들이 5 톤 이상의 무게를 가지는 대형 장비들이어서 지형에 대한 적응성이 떨어진다는 문제점을 가지고 있다. 또한, 이러한 장비들은 인위적으로 지뢰를 폭발시킴으로써 제거하는 방식을 취하고 있기 때문에 지뢰에서 유출되는 화학 성분으로 토양이 오염되어 지역 재개발에도 어려움을 주고 있다. 예컨대, 경의선 철도 복구 사업에 이용된 Minebreaker2000 은 99%의 높은 작업성공률을 자랑하나, 작업 시 기계 전반부에 장착된 드럼으로 매설된 지뢰를 폭발하여 제거하기 때문에 인근 토양 오염의 주원인이 된 바 있다. 한편, 수십 톤에 달하는 자체 무게 때문에 산악 지형에 매설된 대인 지뢰를 제거하는 데에는 사용할 수 없었던 사례가 존재한다.

따라서 능선과 같이 기틀기를 가지는 지형에서도 지뢰제거가 가능하며, 지뢰제거작업 이후에 있을 토양의 재활용에 어려움이 없도록 하기 위해서는 경량의 무한궤도형 주행 로봇을 이용하여 비폭파식으로 지뢰제거작업을 수행할 수 있는 새로운 개념의 비폭파식 지뢰제거 시스템이 필요하다고 할 수 있다.

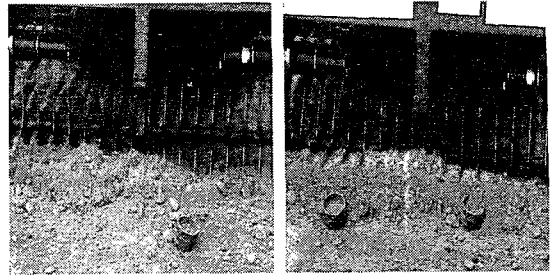


Fig. 3 Inclination of Non-explosive Demining System

이에 본 논문에서는 기존의 지뢰제거장비들의 단점을 보완할 수 있는 비폭파식 지뢰제거 시스템을 소개하고 실외 작업 시 반드시 고려되어야 하는 작업 깊이 제어에 관해 논하고자 한다.

## 2. 비폭파식 지뢰제거 무한궤도형 주행 로봇

### 2.1 시스템 구조

현재까지 개발된 지뢰제거 장비들의 문제점을 극복하고자 Fig. 1 과 같이 무한궤도형 주행 로봇에 적용 가능한 비폭파식 지뢰제거 시스템이 개발되었다. 이 시스템은 험로 주행이 가능한 주행 로봇에 갈퀴 결합체(Rake Assembly)로 이루어진 지뢰제거부(Demining Unit)가 결합된 구조를 가지고 있고, 갈퀴 결합체가 회전함과 동시에 주행 로봇을 전진시켜서 일정 구간 내에 매설된 지뢰를 발굴하여 제거한다는 Fig. 2 와 같은 기본 개념을 채택하고 있다.

주행 로봇의 전반부에 결합되는 지뢰제거부는 크게 케이스(Case)와 프레임(Frame)으로 구성되어 있다. 케이스는 프레임과 리드 스크루(Leadscrew)로 연결되고, 프레임에는 갈퀴 결합체가 장착되어 있어서 갈퀴가 회전함과 동시에 프레임의 선형적인 이동이 가능하게 하였다. 갈퀴는 총 4 개의 날이 90°의 등 간격으로 배치되어 있고, 갈퀴 결합체는 총 18 개의 갈퀴와 이를 지지하는 축으로 이루어져 있다. 일정 구간에 매설된 지뢰를 모두 제거하기 위해 갈퀴 간의 거리는 제거하고자 하는 지뢰의 너비보다 작게 설계되었으며, 축방향으로는 위상차를 부여하여 회전 시 갈퀴에 가해지는 토양의 반력을 분배하고 제거된 지뢰는 시스템 정중앙에 모일 수 있도록 하였다.

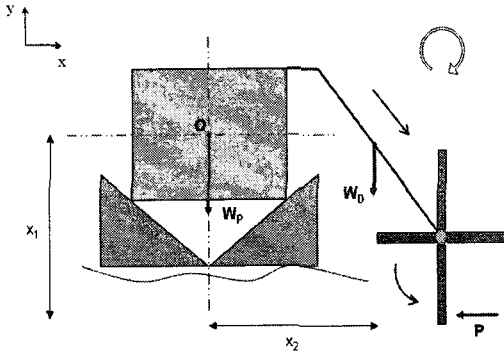


Fig. 4 Aggravation of Moment Disparity

## 2.2 시스템 성능 평가

개발된 비폭파식 지뢰제거 시스템의 공식적인 성능은 실내 실험으로만 검증된 상태로, 고운 모래로 이루어진 토양이 임의의 크기로 제작된 토양조에 채워져 있고, 이 곳에 수 개의 지뢰가 매설되어 있을 때 이를 모두 제거할 수 있는 정도이다. 그러나 이 경우는 실제 지뢰매설지역과 비교했을 때, 토양 경도가 실내 실험에 사용된 모래보다 훨씬 높다는 점과 토양은 지면 아래로 존재한다는 점을 간과한 경우이다.

시스템의 성능을 보다 객관적으로 평가하기 위해 실외 환경에서 지뢰제거작업을 수행해보았다. 수 차례의 실험을 반복한 결과, 실내 실험의 결과와는 달리 일정 구간에 매설된 지뢰를 모두 제거하지 못한 채 시스템이 전진 방향으로 기울어지고 갈퀴 결합체가 땅속에 파묻혀 지뢰제거작업이 정지되는 현상이 관찰되었다. 이는 시스템 본래의 목적을 달성하지 못한 성능으로, 아직은 이 시스템의 실용화를 논하기엔 무리가 있음을 시사한다. 따라서 실외 환경에서의 지뢰제거 능력을 구비하고 제안된 비폭파식 지뢰제거 개념을 실용화 단계까지 발전시키기 위해서는 기존의 시스템이 가지고 있는 문제점을 면밀히 분석하고 이를 해결하는 과정이 필요하다고 할 수 있다.

## 3. 비폭파식 지뢰제거 시스템의 성능 개선

### 3.1 작업 깊이의 제어

#### 3.1.1 문제 분석

개발된 비폭파식 지뢰제거 시스템은 지뢰제거

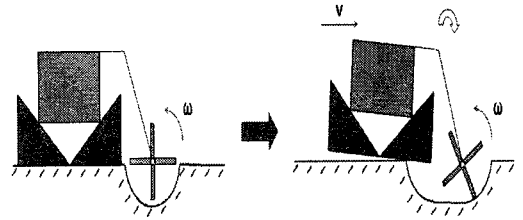


Fig. 5 Downhill Effect

작업과 관련하여 크게 3 가지의 기본 상태를 가진다. 우선 주행 로봇과 지뢰제거부가 결합한 뒤 있고 아무 작업도 수행되지 않는 ‘초기 상태’가 존재한다. 그 다음으로 지뢰제거부의 갈퀴 결합체가 회전하면서 토양으로 삽입되는 ‘준비 상태’가 존재하고, 주행 로봇이 전진하면서 본격적으로 지뢰제거작업이 진행되는 ‘작업 상태’가 이어진다.

전후 좌우로 질량이 균등한 주행 로봇에 새로 제작한 지뢰제거부를 결합한 본 시스템의 구조는 필연적으로 몇 가지 문제점을 야기시킨다. 우선 초기 상태에서는 기울어짐 현상의 가장 근본적인 원인이라 할 수 있는 질량 불균형이 발생한다. 비폭파식 지뢰제거 시스템의 총 질량은 기타 소모품을 포함하여 약 100kg 이고, 이를 구성하고 있는 주행 로봇( $W_p$ )과 지뢰제거부( $W_D$ )의 질량은 각각 80kg 과 13kg 이다. 이는 두 부분이 결합된 이후로 약 6 : 1의 질량비를 가지며 주행 로봇이 지뢰제거부를 지지하고 있음을 뜻하는데, 이 정도의 질량비는 주행 로봇에게 무시할 수 없을 만큼의 부하를 제공하여 정역학적으로 불안정한 상황을 초래하게 된다. 즉, 지뢰제거부 방향으로 모멘트가 발생하여 일반 주행 시나 혹은 지뢰제거작업 시에 기존의 주행 성능을 낼 수 없는 요인으로 작용하게 되는 것이다.

준비 상태는 지뢰제거부에만 동력이 전달되어 갈퀴 결합체가 회전하면서 적절한 작업 깊이를 결정하는 과정으로, 초기 상태의 질량 불균형을 그대로 유지한 채 토양의 반력으로 인한 모멘트 불균형이 심화되는 단계이다. Fig. 4 에서 알 수 있듯이  $W_D$  에 의한 질량 불균형이 존재하는 상황에서 준비 상태가 되면 갈퀴 결합체와 토양이 접촉하여 반력  $P$  가 추가적으로 발생하게 된다. 따라서 토양의 반력이  $x$  방향으로만 작용한다면 주행 로봇의 무게중심을 기준으로 한 모멘트의 합은 다음과 같다.

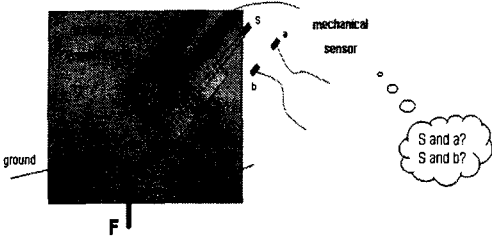


Fig. 6 Basic Concept of the Clearance Depth Control

$$\sum M_O = W_D x_2 + P x_1$$

발굴력이 충분하다는 가정 하에서 비폭파식 지뢰 제거 시스템의 가장 이상적인 역학 조건은 주행 로봇의 무게중심을 기준으로 한 모멘트의 합이 0 이 되는 것이다. 그러나 이미 초기 상태에서  $W_p \gg W_D$  가 성립되지 않아 전체 시스템의 무게중심이 이동하게 되고, 준비 상태에서는 P 에 의한 모멘트 까지 더해지면서 이상적인 조건과는 더욱 거리가 멀어지게 됨으로써 모멘트 불균형은 심화된다.

해결되지 않은 두 가지의 문제점을 안고 지뢰 제거작업을 위한 작업 상태에 들어서면 또 다른 문제점이 발생한다. 주행 로봇이 평지에 놓인 다음 초기 상태와 준비 상태를 거치면서 지뢰제거부와 의 결합이 완료되고 적정 작업 깊이가 결정되면, 시스템 전반의 토양은 계속적으로 경운되는 상태에 이르게 된다. 이 때, 경운된 토양은 이전보다 경도가 매우 낮아져 있는 상태로, 이후 주행 로봇이 전진하여 경운된 토양 위를 지나가게 될 경우 토양으로부터 최대의 지지력을 받지 못하게 된다.

즉, 주행 로봇이 진행한 만큼의 무게를 사전에 경운된 토양이 지지해주지 못함으로써 마치 내리막길을 내려가는 듯한 ‘내리막 효과(Downhill Effect)’가 발생하게 되고, 따라서 전체 시스템은 Fig. 5 와 같이 전진 방향으로 기울어지게 된다.

비폭파식 지뢰 제거 시스템의 기울어짐 현상은 일정 구간에 매설된 지뢰를 모두 제거하기 위해 반드시 해결해야 할 과제이다. 이에 시스템이 가질 수 있는 모든 상태에 대해 기울어짐 현상의 원인을 분석해 본 결과 위에서 언급한 3 가지의 문제점들이 발견되었고 각 문제점은 지뢰 제거작업 단계에 따라 순차적으로 누적된다는 것을 알 수 있었다. 그러나 작업 상태 이전에 발생하는 문제점들은

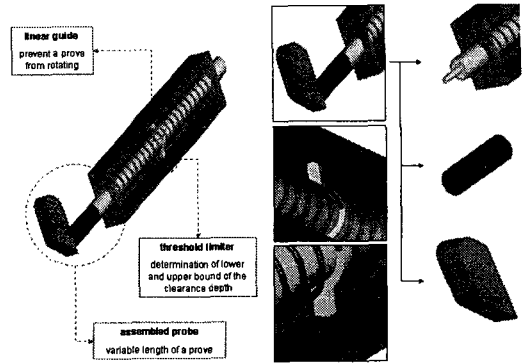


Fig. 7 Mechanical Sensor

시스템의 기본 구조와 메커니즘에 기인한 것으로, 이를 해결하기 위해서는 시스템의 기본 개념부터 수정해야 하는 번거로움이 있다. 따라서 기본 개념은 그대로 유지한 채 작업 상태에서의 성능을 향상시킬 수 있는 방법을 제시하는 것이 가장 합리적인 대안이라 생각된다.

### 3.1.2 작업 깊이 제어를 위한 기계식 센서

본 연구에서는 작업 상태에서 나타나는 내리막 효과를 해결하는 데에 초점을 맞추고자 한다. 내리막 효과는 토양 경도의 약화 현상과 더불어 나타나는 지지력 감소가 그 주된 원인으로, 실제 내리막길이나 매우 단단한 토양에서 지뢰 제거작업이 수행될 때 더욱 심화될 수 있다.

위 문제점에 대한 해결 방안으로는 작업 깊이의 제어를 제안한다. 이는 내리막 효과에 의한 기울어짐 현상이 나타날 때 프레임을 위로 이송시켜 작업 깊이를 조절하면 토양의 반력을 줄임과 동시에 전체 시스템의 무게중심이 주행 로봇 쪽으로 이동하게 되어 지지력을 보충해주는 효과를 낼 수 있다.

작업 깊이 제어를 위해서는 제작된 지뢰 제거 시스템에 적합한 기계식 센서를 제작하여 활용한다. 이 센서의 기본 개념은 Fig. 6 과 같이 길고 가느다란 막대가 갈퀴보다 먼저 토양과 접촉하여 사전에 설정해 놓은 경계 범위(Threshold) 내에서 일정 구간을 왕복하고, 이에 따라 센서의 출력 신호가 달라진다는 것이다.

기계식 센서는 Fig. 7 과 같이 토양과 직접적으로 접촉하는 탐침(Probe), 적당한 변위만큼 이동할

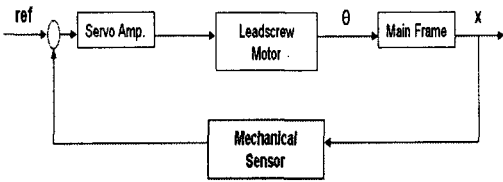


Fig. 8 Block Diagram for the Clearance Depth Control

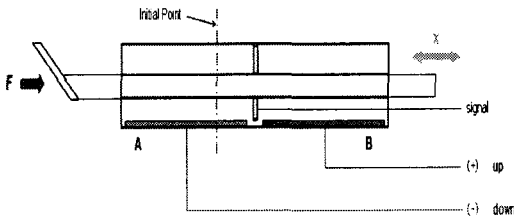


Fig. 9 Functional Structure of the Mechanical Sensor

수 있는 원형 막대(Stick), 전기적으로 연결된 부분을 보호하는 케이스(Case)로 크게 나뉠 수 있고, 케이스 내부에는 막대의 회전을 방지하는 선형 가이드(Linear Guide)와 변위에 대한 신호를 감지하는 리미터(Threshold Limiter)가 막대로부터 돌출되어 있다. 또한, 리미터를 기준으로 좌우에는 스프링이 삽입되어 원형 막대의 부드러운 운동을 유도한다. 이러한 기계식 센서는 갈퀴가 회전하는 데 지장을 주지 않도록 알맞은 크기로 프레임의 중앙에 설치된다.

기계식 센서의 기능적 구조는 Fig. 8의 블록 선도(Block Diagram)으로부터 알 수 있다. 즉, 서보 앰프(Servo Amp.)에서 리드 스크루 모터로 신호를 주면 리드 스크루 모터가 회전함으로써 프레임의 상승과 하강이 결정되고, 이러한 과정이 도양과 접촉하면서 이루어질 때 발생하는 상대적인 변위가 기계식 센서를 통해 감지되면서 작업 깊이가 결정된다. 이러한 기능을 위해 Fig. 9와 같은 구조를 구비하였다. 이는 ON/OFF 스위치의 개념과 일치하는 것으로, 케이스 하단부에 좌우대칭으로 금속판을 붙이고 리미터와 접지할 수 있도록 한 다음 하나의 금속판에는 양의 전압을, 다른 하나의 금속판에는 음의 전압을 인가하여 리미터가 각각의 금속판과 접지할 때마다 다른 신호를 내보낼 수 있게 하

였다. 그리고 각각의 신호는 리드 스크루 모터의 회전 방향을 결정하게 된다. 예컨대, A에 음의 전압을 인가하고 B에 양의 전압을 인가한다고 가정하면 리미터가 A와 접지한 경우는 이전 상태보다 탐침에 힘이 덜 가해져 원형 막대가 하강한다는 것을 뜻하고, 반대로 프레임은 상승한다는 것을 뜻하므로 프레임이 하강할 수 있도록 리드 스크루 모터의 회전 방향을 결정해줘야 한다. 따라서 음의 전압이 리미터에 인가되었을 때 프레임이 하강하도록 모터의 회전 방향을 설정해주면 되는 것이다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 실내 환경에서의 지뢰제거작업

새로 개발된 기계식 센서의 동작을 확인하고 시스템의 성능을 검토하기 위해 1차적으로 실내 실험을 수행하였다. 이 실험은 작업 깊이의 제어가 주행 로봇의 전진과 더불어 잘 동작하는지를 확인하는 실험으로, 실내 토양조에 입자가 작고 습기가 없는 모래를 부어 잘 다진 뒤 3개의 M14 대인 지뢰를 매설한 환경 하에서 수행하였다. 제거하고자 하는 M14 대인 지뢰는 5.5cm의 지름과 4cm의 높이를 가지는 원기둥 모양을 기본으로 한다. 재질은 플라스틱으로 구성되어 있어서 금속 탐지기로 탐지가 불가능하며 약 10kg의 하중이면 접촉으로 발생했을 때 폭발하는 방식을 취하고 있다.

실험 결과, 지뢰가 제거되면서 프레임이 상승과 하강을 반복하고 이에 따라 갈퀴 결합체가 적당한 깊이를 유지하는 것을 관찰할 수 있었다. 매설된 지뢰는 모두 제거되었으며 작업 도중 갈퀴 결합체의 회전에 무리가 가는 현상은 발생하지 않았다. 이로써 작업 깊이의 제어가 지뢰제거작업과 동시에 이루어짐을 확인하였다.

### 4.2 실외 환경에서의 지뢰제거작업

실내 실험에서 사용된 간이 환경은 시스템의 성능을 평가하기엔 너무 좁은 환경이었으므로 내리막 효과가 발생하지 않았으며 이에 대한 개선도 확인되지 않았다. 따라서 작업 깊이 제어를 통한 내리막 효과의 억제 효과를 확인하기 위해서 실외 실험을 실시하였다.

#### 4.2.1 평지에서에서의 지뢰제거작업

우선 평평한 지형에서 지뢰제거작업을 수행해 보았다. 본 연구에 앞서 실시한 실외 실험에서는 내리막 효과 등으로 인한 기울어짐 현상 때문에 일정 구간에 매설된 지뢰를 모두 제거하지 못하고 작업이 정지되는 것을 관찰할 수 있었다. 이전 실험과 동일하게 총 3 개의 지뢰를 매설한 뒤 작업을 진행한 결과, 내리막 효과로 인한 기울어짐 현상을 제작된 기계식 센서가 감지하여 갈퀴 결합체의 삽입 정도를 조절해줌으로써 매설된 지뢰를 모두 제거하는 것을 관찰할 수 있었다. (Fig. 10)

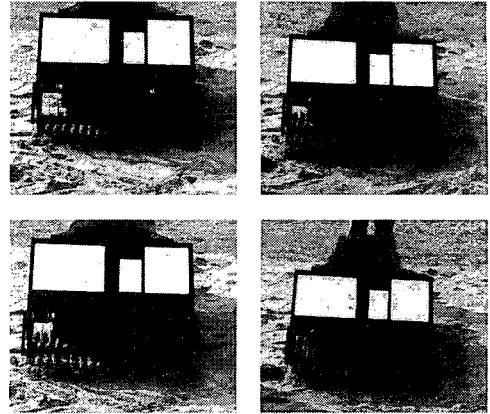


Fig. 10 Outdoor Experiment (Plain Terrain)

#### 4.2.2 굴곡 지형에서의 지뢰제거작업

이번에는 현재의 시스템 크기와 관련 지어 생각해 볼 때 평지보다는 굴곡 지형에 가깝다고 관찰할 수 있는 환경을 조성하고 지뢰제거작업을 수행해보았다. 이는 목표로 두었던 평지에서의 지뢰 제거 외에 추가적으로 요구될 수 있는 시스템 성능으로, 주행 로봇의 힘로 주행 능력이 지뢰제거부가 결합되었을 때에도 변함없이 유지되는지를 관찰하고자 함이다.

지형은 평지부터 시작하여 내리막 지형 이후 오르막 지형으로 구성되도록 하였고 기타 다른 조건은 평지에서의 지뢰제거작업과 동일하게 하였다. 실험 결과, 평지 및 내리막 지형에서는 갈퀴 결합체의 상하 이동에 의해 별 무리 없이 작업이 이루어졌고 오르막 지형에서는 기계식 센서가 동작하는 와중에도 작업 깊이가 제어가 원만하게 이루어지지 않아 예전처럼 작업이 정지되는 현상이 나타났다. (Fig. 11)

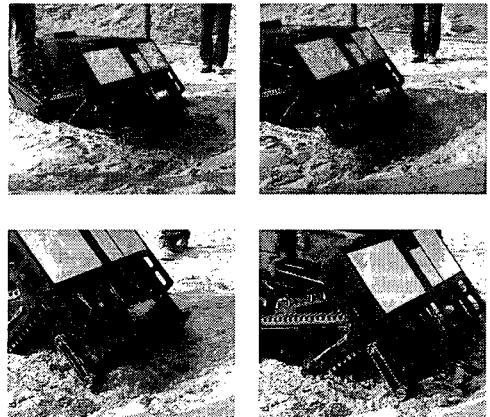


Fig. 11 Outdoor Experiment (Bent Terrain)

### 5. 결론

본 연구에서는 기계작된 비폭파식 지뢰제거 무한궤도형 주행 로봇의 실용화를 위한 성능 향상에 목표를 두고 몇 가지 문제점에 대한 해결책을 제시하였다. 가장 시급한 문제는 작업 도중 시스템이 전진 방향으로 기울어지면서 갈퀴 결합체가 땅속으로 파묻히는 현상이었다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 ON/OFF 스위치의 개념으로 제작된 기계식 센서를 이용하여 작업 깊이 제어를 수행하였고 이를 통해 평지에서의 지뢰제거작업이 무난히 수행됨을 알 수 있었다.

향후에는 제작된 기계식 센서의 성능에 대해 좀 더 면밀히 분석하고 프레임의 이송 길이를 변화시켜 굴곡 지형에서도 일정 깊이로 토양을 경운

하며 지뢰를 제거할 수 있는 시스템이 고안되어야 할 것이다.

### 참고문헌

1. Mootaz Abo-Elnor, R. Hamilton, Boyle, J. T., "Simulation of Soil-Blade Interaction for Sand Soil using Advanced 3D Finite Element Analysis," *Soil & Tillage Research*, Vol. 75, pp. 61-73, 2004.
2. Lee, K. S., Park, S. H., Park, W. Y., Lee, C. S., "Strip Tillage Characteristics of Rotary Tiller Blades for Use in a Dryland Direct Rice Seeder," *Soil & Tillage Research*, Vol. 71, pp. 25-32, 2003.
3. Salokhe, V. M., Ramalingam, N., "Effect of Rotation Direction of a Rotary Tiller on Draft and Power Requirements in a Bangkok Clay Soil," *Journal of Terramechanics*, Vol. 39, pp. 195-205, 2003.
4. Mootaz Abo-Elnor, R. Hamilton, Boyle, J. T., "Simulation of Soil-Blade Interaction for Sand Soil using Advanced 3D Finite Element Analysis," *Soil & Tillage Research*, Vol. 75, pp. 61-73, 2004.
5. Lee, K. S., Park, S. H., Park, W. Y., Lee, C. S., "Strip Tillage Characteristics of Rotary Tiller Blades for Use in a Dryland Direct Rice Seeder," *Soil & Tillage Research*, Vol. 71, pp. 25-32, 2003.
6. Salokhe, V. M., Ramalingam, N., "Effect of Rotation Direction of a Rotary Tiller on Draft and Power Requirements in a Bangkok Clay Soil," *Journal of Terramechanics*, Vol. 39, pp. 195-205, 2003.
7. Takashi, Kataoka, Sakae, Shibusawa, "Soil-Blade Dynamics in Reverse-Rotational Rotary Tillage," *Journal of Terramechanics*, Vol. 39, pp. 95-113, 2002.
8. Lee, Jeyong, Yamazaki, M., Oida, A., Nakashima, H., Shimizu, H., "Field Performance of Proposed Foresight Tillage Depth Control System for Rotary Implements mounted on an Agricultural Tractor," *Journal of Terramechanics*, Vol. 37, pp. 99-111, 2000.
9. Nicoud, J. D., Machler, P., "Robots for Anti-Personnel Mine Search," *Control Eng. Practice*, Vol. 4, No. 4, pp. 493-498, 1996.