

비폭파식 지뢰제거 시스템의 작업 깊이 제어

정해관^{*}·최현도^{*}·김상도^{*}·곽윤근^{**}

Clearance Depth Control of Non-explosive Demining System

Jeong Hae-Kwan, Choi Hyun-Do, Kim Sang-Do and Kwak Yoon-Keun

Key Words: Non-explosive(비폭파식), Clearance Depth(작업 깊이), Mechanical Sensor(기계식 센서)

Abstract

Up to now, non-explosive demining system adaptable to a mobile robot has been developed. This system has much smaller platform and consists of non-explosive mechanism. Brief experiment indoors showed that developed demining system can remove landmines well. But, out of doors, some problems are detected i.e. Inclination of overall system causes a suspension of rake rotation. In this research, a study on performance improvement of developed non-explosive demining system is mainly discussed. To compensate the inclination of the system, mechanical sensor composed of shaft and spring is used. This sensor gives a signal to a leadscrew motor and controls a rotating direction. From an experiment, it is confirmed that the mechanical sensor as stated is a good solution of the inclination of the system.

1. 서론

지뢰는 인류가 창조한 대표적인 살상 무기로, 제 1차 세계 대전부터 지금까지 꾸준히 사용되면서 그 기술이 비약적으로 발전해 왔다. 그러나 전쟁 이후에도 민간인과 군인을 포함하여 많은 인명 피해를 누적시키고 있고, 지역 재활용에도 많은 어려움을 주고 있어서 근래에는 지뢰의 적절한 사용보다는 반드시 제거해야 한다는 공감대가 형성되어 가고 있는 게 사실이다.

지뢰제거의 당위성과 더불어 많은 기계식 지뢰제거 장비들이 개발되어 왔다. 그러나 대부분의 장비들이 5톤 이상의 무게를 가지고 있어서 지형 적응성에 약점을 가지고 있고, 지뢰를 폭파시키면서 작업을 수행하기 때문에 지뢰에 내장되어 있던 화학 성분들이 유출되면서 토양을 오염시킨다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하고자 소형의 플랫폼을 가지는 비폭파식 지뢰제거 시스템이 개발된 바 있다.

개발된 비폭파식 지뢰제거 시스템의 공식적인 성능은 실내 실험으로만 검증된 상태로, 고운 모래로 이루어진 토양이 임의의 크기로 제작된 토양조 위로 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.

선행 연구에 이어, 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 시스템을 실용적으로 사용하기엔 무리가 있음을 시사한다. 따라서 실외 환

경에서의 지뢰제거 능력을 구비하고, 제안된 비폭파식 지뢰제거 개념을 실용화 단계까지 발전시키기 위해서는 현재의 시스템이 가지고 있는 문제점을 면밀히 분석하고 이를 해결하는 과정이 필요하다.

지뢰제거에 대한 요구가 확실하고, 기존 장비들의 한계점이 명백하기에 개발된 비폭파식 지뢰제거 시스템의 성능 향상은 반드시 필요하다. 그리고 성능 향상을 통해 제안된 실외 환경에서 지뢰제거가 가능하다는 것을 보일 수 있다면 현 시스템의 완성도는 훨씬 높아질 것이다. 따라서 본 연구에서는 현 시스템의 가장 큰 문제점이라 할 수 있는 전진 방향으로의 기울어짐 현상에 대해 적절한 해결책을 제시하고자 한다.

2. 작업 깊이의 제어

2.1 문제 분석

개발된 비폭파식 지뢰제거 시스템은 지뢰제거 작업과 관련하여 크게 3가지의 기본 상태를 가진다. 우선 주행 로봇과 지뢰제거부가 결합만 되어 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.

전후좌우로 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 약 100kg으로, 이를 구성하고 있는 주행 로봇과 지뢰제거부의 질량은 각각 80kg과 13kg이다. 이는 두 부분이 결합된 이후로 약 6 : 1의 무게비를 가지며 주행 로봇이 지뢰제거부를 지지하고 있음을 뜻하는데, 이 정도의 무게비는 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 주행성능을 낼 수

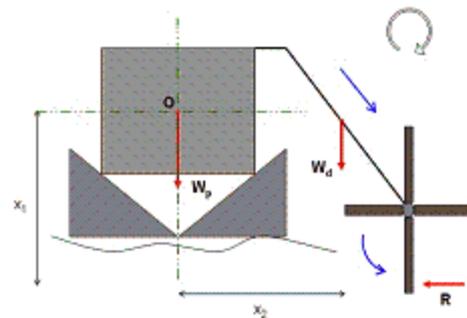


Fig. 1 Aggravation of Moment Disparity

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. 1에서 알 수 있듯이 W_d 에 의한 질량 불균형이 존재하는 상황에서 준비 상태가 되면 갈퀴 결합체와 토양이 접촉하여 반력 R 이 추가적으로 발생하게 된다. 발굴력이 충분하다는 가정 하에서 비폭파식 지뢰제거 시스템의 가장 이상적인 역학 조건은 주행 로봇의 무게중심을 기준으로 한 모멘트의 합이 0이 되는 것이다. 그러나 이미 초기 상태에서 $W_p \gg W_d$ 가 성립되지 않아 전체 시스템의 무게중심이 이동하게 되고, 준비 상태에서는 R 에 의한 모멘트까지 더해지면서 이상적인 조건과는 더욱 거리가 멀어지게 됨으로써 모멘트 불균형은 심화된다.

해결되지 않은 두 가지의 문제점을 안고 지뢰제거작업을 위한 작업 상태에 들어서면 또 다른 문제점이 발생한다. 주행 로봇이 평지에 놓인 다음 초기 상태와 준비 상태를 거치면서 지뢰제거부와 결합이 완료되고 적정 작업 깊이가 결정되면, 시스템 전반의 토양은 계속적으로 경운되는 상태에 이르게 된다. 이 때, 경운된 토양은 이 전보다 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 전진 방향으로 기울어지게 된다.

비폭파식 지뢰제거 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 3가지의 문제점들이 발견되었고, 각 문제점은 지뢰제거작업 단계에 따라 순차적으로 누적된다는 것을 알 수 있었다. 그러나 작업 상태 이전에 발생하는 문제점들은 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.

2.2 문제 해결 과정

앞서 언급한 바와 같이 초기 및 준비 상태에서의 모멘트 불균형은 길이 방향으로 비대칭인 기본 구조와 갈퀴 결합체의 회전을 이용하여 지뢰를 발굴하는 기본 메커니즘으로부터 필연적으로 발생하는 문제점들이다. 한편, 작업 상태에서의 내리막 효과는 갈퀴 결합체에 의해 경운된 토양의 경도가 기존보다 낮아져 발생하는 현상으로, 실외 실험을 통해 새로 발견된 문제점이라 할 수 있다.

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 지뢰제거작업이 수행될 때 더욱 심화될 수 있다. 따라서 이러한 현상을 막기 위해서는 작업 상태에 들어선 이후 일정 이상의 지지력을 보상해줄 수 있는 방안이 모색되어야 한다.

가장 쉽게 생각할 수 있는 것으로 지뢰제거부 좌우에 지지 바퀴를 달아서 기울어짐 현상이 일어날 때마다 토양으로부터 직접적으로 지지력을 받게 하는 방법이 있다. 이것은 원인 제공 요소가 나타날 때마다 즉시 제거해줌으로써 원래의 상태를 유지하는 방법으로, 실현될 경우 확실한

문제 해결이 보장된다. 그러나 평지에서 지뢰제거작업이 진행된다고 가정할 때, 경운된 토양은 이전 토양보다 경도가 낮고 불규칙한 지형을 갖게 되므로 설치된 바퀴는 지면과 면접촉을 하게 되어 전체 시스템의 주행 성능에 오히려 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 실외 환경과 같이 변수가 많은 지형에서 지지 바퀴로 내리막 효과를 해결하려는 것은 바람직하지 않다.

내리막 효과의 다른 해결 방안으로는 작업 깊이의 제어를 들 수 있다. 현재까지의 시스템은 조종자가 작업 환경을 살펴보고 임의로 작업 깊이를 결정할 수 있게 되어 있다. 또한, 한 번 결정된 작업 깊이는 다른 환경에서 조종자의 의사에 의해 변경될 때까지 그대로 유지된다. 내리막 효과에 의해 시스템이 전진 방향으로 기울어지면서 갈퀴 결합체가 땅속으로 더욱 깊이 삽입되는 것이 문제가 된다는 것을 감안할 때, 토양 정보에 대응하여 작업 깊이가 수시로 변할 수만 있다면 내리막 효과를 억제하는 결과를 가져올 수 있다는 결론을 내릴 수 있다. 즉, 내리막 효과에 의한 기울어짐 현상이 나타날 때 프레임을 위로 이동시켜 작업 깊이를 조절하면 토양의 반력을 줄임과 동시에 전체 시스템의 무게중심이 주행 로봇 쪽으로 이동하게 되어 지지력을 보상해주는 효과를 낼 수 있다는 것이다. 이 방법은 토양의 지지력 감소에 대한 직접적인 해결 방안이라고는 볼 수 없으나 전체 시스템의 주행 성능에 영향을 주지 않고, 굴곡이 있는 지형에 주행 로봇이 적응해가며 지뢰를 제거해야 하는 경우에 반드시 필요한 사항이다. 따라서 내리막 효과에 의한 기울어짐 현상을 해결하기 위해 작업 깊이의 제어를 해결책으로 제시하고자 한다.

갈퀴 결합체가 토양으로 깊이 삽입되면 토양과의 접촉 면적이 넓어지기 때문에 반력도 커지게 된다. 그러나 매설된 지뢰의 정확한 깊이를 모르기 때문에 반력의 영향을 고려하되 작업 깊이는 깊을수록 좋다. 그러므로 본 시스템이 지뢰가 매설된 토양을 충분히 경운할 수 있다고 가정할 때, 갈퀴 결합체는 가능한 한 깊이 토양 속으로 삽입되고 더 이상 경운이 불가능할 때에만 토양에서 빠져 나오는 과정을 반복해야 한다. 그리고

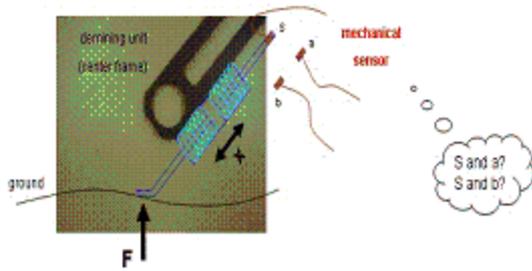


Fig. 2 Basic Concept of the Mechanical Sensor

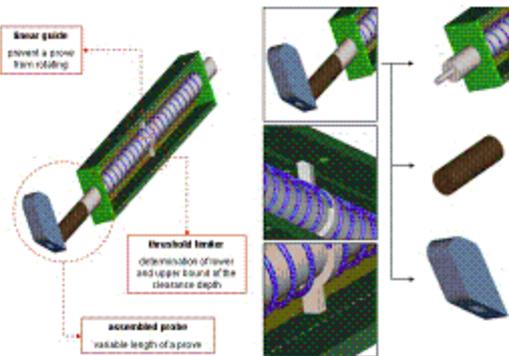


Fig. 3 Basic Structure of the Mechanical Sensor

이를 구현하기 위해서는 지형이나 토양 자체에 대한 정보를 습득하며 리드 스크루의 구동 모터를 제어해야 할 것이다.

따라서 작업 환경과 사용 목적에 적합한 Fig. 2와 같은 개념의 기계식 센서(Mechanical Sensor)를 직접 설계, 제작하는 것이 바람직하다. 이 센서의 기본 개념은 길고 가느다란 막대가 갈퀴보다 먼저 토양과 접촉하여 사전에 설정해 놓은 경계 범위(Threshold) 내에서 일정 구간을 왕복하고, 이에 따라 센서의 출력 신호가 달라진다는 것이다. 이는 토양 경도를 이용하여 작업 깊이를 가늠하는 방법으로, 예컨대 S와 a가 일치하면 막대가 토양에 의해 많이 눌러 있음을 뜻하므로 갈퀴 결합체가 상승하는 방향으로, S와 b가 일치하면 토양으로부터 힘을 거의 받지 않는다는 것을 뜻하므로 갈퀴 결합체가 하강하는 방향으로 각각 모터를 구동하여 작업 깊이를 제어하는 것이다.

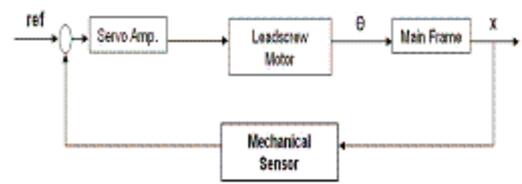


Fig. 4 Block Diagram for the Clearance Depth Control

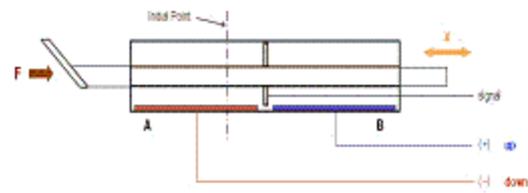


Fig. 5 Functional Structure of the Mechanical Sensor

2.3 작업 깊이 제어를 위한 기계식 센서

지뢰제거 시스템의 원활한 작업을 위해 Fig. 3과 같은 기계식 센서를 제작하였다. 이 센서는 토양과 직접적으로 접촉하는 탐침(Probe), 적당한 변위만큼 이동할 수 있는 원형 막대(Stick), 전기적으로 연결된 부분을 보호하는 케이스(Case)로 크게 나눌 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. 4의 블록선도(Block Diagram)로부터 알 수 있다. 즉, 서보 앰프(Servo Amp.)에서 리드 스크루 모터로 신호를 주면 리드 스크루 모터가 회전함으로써 프레임의 상승과 하강이 결정되고, 이러한 과정이 토양과 접촉하면서 이루어질 때 발생하는 상대적인 변위가 기계식 센서를 통해 감지되면서 작업 깊이가 결정되는 것이다.

이러한 기능을 위해 케이스 내부에 Fig. 5과 같은 구조를 추가하였다. 이는 ON/OFF 스위치

의 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 하였다. 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 때엔 프레임이 하강하도록 모터의 회전 방향을 설정해주면 되는 것이다.

한편, 고안된 기계식 센서가 실제 작업에서 원하는 성능을 내기 위해서는 사전에 몇 가지 사항을 실험적으로 결정해 줄 필요가 있다. 우선 초기 상태에서 준비 상태로 넘어가면서 갈퀴 결합체가 토양으로 삽입되기 위해서는 프레임이 하강해야 하므로 리드 스크루 모터의 회전 방향과 관련하여 리미터의 초기 위치(Initial Point)를 결정해줘야 하고, 따라서 케이스의 길이 방향으로 약간 편심되는 위치에 리미터를 두어야 할 것이다. 이 때 편심되는 양은 원형 막대 주위로 존재하는 스프링의 길이에 의해 결정되며 실험을 통해 작업이 진행되는 토양에 대한 최적화가 이루어져야 할 것이다.

센서의 민감도(Sensitivity) 역시 작업 전에 반드시 검토해야 할 사항이다. 센서의 민감도는 동일한 토양에 대해 여러 번 지뢰제거작업이 수행될 때, 탐침 및 원형 막대가 얼마나 잘 이동하는지 알아봄으로써 결정할 수 있다. 이를 위해서는 스프링 상수(Spring Constant)를 변화시켜주면 되는데 너무 높은 스프링 상수를 가진 스프링을 사용하게 되면 센서의 민감도는 떨어지고, 너무 낮은 스프링 상수를 가진 스프링을 사용하게 되면 필요 이상으로 지면 정보에 민감하게 반응하여 오히려 안 좋은 결과를 낼 수 있다는 것을 감안해야 한다.

3. 실험 결과

3.1 작업 깊이 제어의 확인

제작된 기계식 센서의 동작을 확인하기 위해 주행 로봇을 정지시킨 채로 지뢰제거부에 동력을 공급하고 탐침 부분에 힘을 가하여 보았다. 약간의 굴곡 지형에 대한 모의 실험(Simulation) 결과, 센서에 인가된 힘의 세기에 따라 프레임의 상승과 하강이 자연스럽게 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 실내 환경에서의 지뢰제거작업

새로 고안된 기계식 센서의 동작을 확인하고 시스템의 성능을 검토하기 위해 1차적으로 실내 실험을 수행하였다. 이 실험은 작업 깊이의 제어가 주행 로봇의 전진과 더불어 잘 동작하는지에 대한 확인 실험으로, 실내 토양조에 입자가 작고 습기가 없는 모래를 부어 잘 다진 뒤 3개의 M14 대인 지뢰를 매설한 환경 하에서 수행되었다.

실험 결과, 지뢰가 제거되면서 프레임이 상승과 하강을 반복하고 이에 따라 갈퀴 결합체가 적당한 깊이를 유지하는 것을 관찰할 수 있었다. 매설된 M14 대인 지뢰는 모두 제거되었으며 작업 도중 갈퀴 결합체의 회전에 무리가 가는 현상은 발생하지 않았다. 이로써 작업 깊이의 제어가 지뢰제거작업과 동시에 이루어짐을 확인하였다. 그러나 약 1m의 길이와 너비를 가지고 있는 실내 토양조는 시스템의 성능을 평가하기엔 너무 좁은 환경이었고, 토양조 내부에 갇춰진 환경은 토양이 지면 위로 쌓여있는 경우이므로 내리막 효과가 발생하지 않았으며 이에 대한 개선도 확인되지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 지뢰제거의 필요성과 더불어 이미 개발된 비폭파식 지뢰제거 시스템의 문제점에 대해 논하고 이를 해결할 수 있는 대안에 대해 설명하였다. 개발된 비폭파식 지뢰제거 시스템의 성능을 실험을 통해 평가해 본 결과, 실내에 간이적으로 설치된 환경 하에서만 지뢰제거가 가능하고 실외 환경에서는 전진 방향으로의 기울어짐 현상 등이 나타나며 원활한 작업이 진행되지 않

는다는 것을 확인할 수 있었다. 이는 지뢰제거라는 본연의 목적을 이루지 못함과 동시에 시스템의 실용성을 부각시키기에 무리가 있는 성능이다. 따라서 본 연구에서는 기제작된 비폭파식 지뢰제거 시스템의 실용화를 위한 성능 향상에 목표로 두고 몇 가지 문제점에 대한 해결책을 제시하였다.

가장 시급한 문제는 작업 도중 시스템이 전진 방향으로 기울어지면서 갈퀴 결합체가 땅속에 파묻힌다는 점이었다. 이는 시스템의 기본 구조 및 메커니즘으로 인한 모멘트 불균형에 토양의 지지력 감소로 인한 내리막 효과가 누적되면서 발생하는 현상이다. 그러나 성능 개선을 위해 시스템 구조와 메커니즘을 바꾸는 것은 기본 개념에 부합되지 않으므로 이를 고수한 채 내리막 효과만을 최대한 억제하여 기울어짐 현상을 해결하고자 노력하였다.

내리막 효과를 억제하기 위해서는 토양과 갈퀴 결합체의 상대적인 위치 정보를 감지할 수 있는 새로운 기계식 센서를 사용하였다. 이 센서는 프레임의 상승과 하강을 ON/OFF 스위치의 개념으로 제어하며 갈퀴 결합체가 땅속에 파묻히지 않도록 하는 것으로써, 이를 설치하고 평지에서 지뢰제거작업을 수행했을 때 내리막 효과로 인한 작업 정지 상황이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

향후에는 간단한 실외 실험을 통해 기울어짐 현상에 대한 해결 여부를 판정하고, 새로운 문제점이 발생할 시 이를 해결하는 데에 중점을 둘 것이다. 또한, 현재까지 개발된 지뢰제거 시스템이 약간의 굴곡이 있는 지형을 주행하면서 지뢰제거를 할 수 있는지에 대한 검토가 이루어질 것이다.

참고문헌

(1) Kim Sang-Do, 2004, "Analysis of Design Parameters for Inexplosive Demining System Adaptable to Tracked Mobile Robot", KAIST, Master's Thesis
 (2) Yoon Suk-June, 2001, "Anti-Personnel Mine Detection by Contact Force", KAIST,

Master's Thesis

(3) S.K.Lee, S.T.Kim, J.K.Woo, 2000, "Tillage Characteristics of the Single-Edged Rotary Blade", KSAM, Vol. 25, No. 5, pp. 369~378
 (4) Jeyong Lee, M. Yamazaki, A. Oida, H. Nakashima, H. Shimizu, 2000, "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
 (5) Takashi Kataoka, Sakae Shibusawa, 2002, "Soil-Blade Dynamics in Reverse-Rotational Rotary Tillage", Journal of Terramechanics, Vol. 39, pp. 95~113
 (6) K. S. Lee, S. H. Park, W. Y. Park, C. S. Lee, 2003, "Strip Tillage Characteristics of Rotary Tiller Blades for Use in a Dryland Direct Rice Seeder", Soil & Tillage Research, Vol. 71, pp. 25~32
 (7) V. M. Salokhe, N. Ramalingam, 2003, "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
 (8) Mootaz Abo-Elnor, R. Hamilton, J. T. Boyle, 2004, "Simulation of Soil-Blade Interaction for Sandy Soil using Advanced 3D Finite Element Analysis", Soil & Tillage Research, Vol. 75, pp. 61~73