

## 매니플레이터를 이용한 지하 매설물 탐지의 효율적 탐지경로에 관한 연구

### A Study on the Effective Scanning Trajectory using Manipulator for Underground Object Detection

이 명 천\*                      신 호 철\*\*                      윤 중 훈\*\*\*  
Myungchun Lee              Hocheol Shin                  Jonghoon Yoon

#### Abstract

This paper shows an effective scanning trajectory for a mine detection device that is one of the mission equipments of unmanned ground vehicle. The mine detection device is composed of a mine-detection sensor, and a 4 DOF manipulator enabling sensor position control. There are three modes that manage the mine detection device: passive, semi-automatic, and automatic. The automatic mode is used the most. This paper suggests a scanning method that makes shape of 8. This method prevents missing target area and enhances scanning speed when the mine detection device scans the ground surface in automatic mode. The suggested method is verified by simulations and experiments.

Keywords : Mine-Detect Sensor(지뢰탐지 센서), Ultra-Sonic Sensor(초음파 센서), Manipulator(매니플레이터), Scanning Trajectory(탐지 경로), Unmanned Ground Vehicle(지상무인차량)

#### 1. 서 론

지하에 매설된 물질은 일반적으로 도시가스, 상/하수 도관, 송유관 등과 같은 인위적인 것과 자연적으로 매설된 각종 물질 등이 있을 수 있다. 본 논문에서는 인위적으로 지표면이나 지표면 아래에 매설된 물질 중에

서 인간이나 동물에 큰 재해를 가져다 주는 폭발물질 특히, 금속 및 비금속의 지뢰와 같은 물질을 효율적으로 탐지하는 방안에 대하여 연구하였다.

지뢰는 15세기 무렵 명나라 때 전쟁에 사용되었고, 그 후 방어무기로써 그 활용도가 점차 증대되어 왔다. 제 1, 2차 세계대전을 거치면서 지뢰의 개발기술이 급속도로 발전되었다. 1996년 유엔과 국제적십자위원회의 추산에 따르면, 여러 국가들의 전쟁으로 인해, 전세계 60여 개국에 약 1억 1천만 개의 지뢰가 잔존해 있다고 한다. 이러한 지뢰는 크게 대인, 대전차 지뢰로 구분되며 그 재질과 형태 또한 금속성, 비금속성, 원통형, 사각형 등으로 매우 다양하다<sup>[1]</sup>.

† 2011년 10월 21일 접수~2012년 1월 27일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

\*\* 한국원자력연구원(KAERI)

\*\*\* 대전대학교

책임저자 : 이명천(mchlee@add.re.kr)

현재 우리나라는 한국전쟁과 분단으로 인하여 비무장지대(DMZ)에 많은 지뢰가 매설되어 있다. 비무장지대의 지뢰는 우리가 앞으로 통일을 준비하면서 제거해야 할 대상 중 하나이다. 그렇기 때문에 지뢰를 설치, 매설하는 기술 못지않게 지뢰 및 폭발물질을 탐지하는 기술의 개발이 매우 중요하고 필요하다.

지뢰 및 폭발물질을 탐지하는 방법에 있어서 현재는 크게 두 가지로 구분할 수 있다, 먼저 사람이 직접 지뢰탐지센서가 부착된 탐지기를 휴대하고 센서감지신호를 청각 또는 시각으로 듣거나 보면서 탐지하고 제거하는 것이다. 또 다른 방법은 지뢰탐지센서가 기동장비의 전방에 탑재된 형태의 중/대형 탐지장치와 무인로봇의 전방에 지뢰탐지센서가 장착된 형태의 탐지장치를 운용하는 것이다.

세계적으로는 독일 Vallon사의 VMV8, 이스라엘의 EL/M-2190, 호주의 STMR Mark II 등과 같은 지뢰탐지장비들이 개발되어 운용 중에 있으나 이들은 주로 다중의 넓은 센서를 장착한 대형/고가의 탐지장비로써 넓은 면적을 탐지할 수 있는 장점이 있으나 고가의 장비이며 소형의 폭발물 탐지와 같은 정밀 탐지에는 부적합한 단점을 가지고 있다.

다음의 Fig. 1은 유인 조종 또는 원격조종에 의해 지뢰탐지 업무를 수행할 수 있도록 개발한 전동 실험장치대로써 비교적 소형이면서 저가로 제작이 가능하며 소형의 폭발물을 정밀하게 탐지할 수 있는 특징을 가지고 있다.



Fig. 1. 유/무인 지하 매설물 탐지장치

본 논문에서는 자하에 매설된 물체를 탐지함에 있

어서 탐지장치의 탐지 궤적을 최적화하여 탐지 효율을 높일 수 있는 방법을 제안하였다. 즉, 매설물 탐지를 위한 매니플레이터 구동에 있어서 이동 플랫폼을 선회 속도와 연동된 적절한 속도로 진행시켜 탐지 영역이 중복되지 않으면서 사각지대가 최소화되도록 하여 탐지 효율을 높일 수 있는 8자 구동방안을 제시하고 이를 시뮬레이션과 실험으로 검증하였다. 여기에서 탐지장치의 끝단에 장착되어 있는 탐지센서와 지면과의 높이는 약 10cm를 유지함이 바람직하다<sup>[2,3]</sup>.

## 2. 매설물 탐지장치의 구성

### 가. 개요

본 연구에서 적용한 탐지장치는 Fig. 2와 같으며 기동 차량에 장착하기 위한 베이스부와 좌우 선회를 위한 좌우 선회부, 상하 모션을 통해 매니플레이터의 끝단 위치를 조절하는 상부암, 하부암, 그리고 탐지센서, 이렇게 5개 부분으로 구성되어 있다. 각각의 부분들은 조인트로 연결되어 전체적으로 탐지장치의 매니플레이터는 총 4자유도를 가진다.

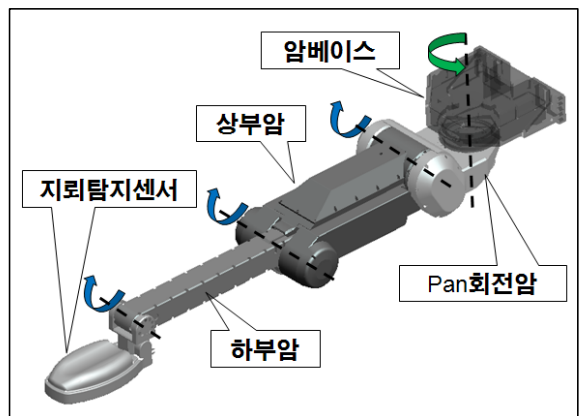


Fig. 2. 탐지장치 전체 구성도

### 나. 탐지로봇 기구학 및 자세결정 알고리즘

좌표계는 Fig. 3과 같이 설정하였고 기저에 대한 센서의 직선 및 회전 변위를 나타내는 로봇의 정기구학은 Denavit-Hartenberg 매개변수를 통해 제차좌표변환식 (homogeneous coordinate transformation)  $T_{ij}$ 을 이용하여 식 (1)과 같이 구할 수 있다<sup>[4~6]</sup>.

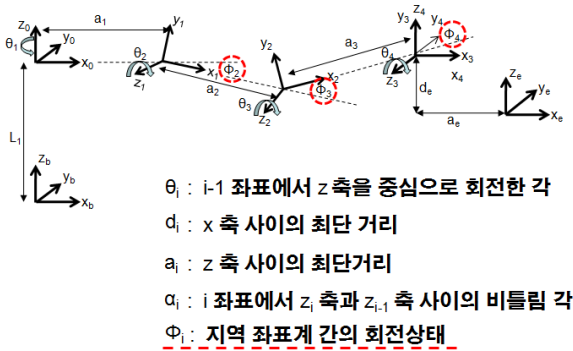


Fig. 3. 좌표계 설정

$$T = T_{01} T_{12} T_{23} T_{34} T_{4c} \quad (1)$$

여기서,

$$T_{ij} \equiv \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & p_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$= \begin{bmatrix} \text{Rotation} & | & \text{Position} \\ \text{---} & | & \text{---} \\ \text{Perspective} & | & \text{Scaling} \end{bmatrix}$$

$R$  : 기준 좌표계( $i$  좌표계)에 대해  $j$  좌표계의 3축 방향의 회전을 나타낸다.

$p$  : 기준 좌표계( $i$  좌표계)에 대해  $j$  좌표계의 3축 방향 위치벡터를 나타낸다.

$f$  : 기준 좌표계( $i$  좌표계)에 대해  $j$  좌표계의 3축 방향 원근 변환을 나타낸다.

탐지 센서로부터 신뢰성 있는 신호를 취득하기 위해서는 탐지 센서가 지면과 평행하며 항상 일정 높이를 유지하는 것이 필요하다. 로봇 주변의 지형데이터는 상위 체계로부터 주어지며, 상위 체계에서는 CCD/IR 및 GPS 영상 기반의 3D 월드모델링을 통해 지형 형상 데이터를 계산한다<sup>[7]</sup>. 먼저 탐지 센서 영역내의 지형 데이터로부터 지면의 평면 방정식을 최소자승법으로 구한다.

탐지 센서 바닥 면이 위치할 평면은 Fig. 4에서와 같이 탐지 센서 중심점  $C$ 를 지나며, 추정된 지면 평면에서 주어진 수직거리  $h$  만큼 떨어진 평행한 평면이 된다.

지면의 평면방정식( $\pi$ )을 다음과 같이 표현한다.

$$ax + by + cz = d \quad (3)$$

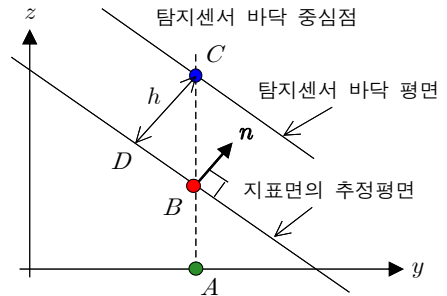


Fig. 4. 탐지센서 자세 결정 알고리즘 개념

지뢰탐지 센서 바닥 면이 위치할 평면은 Fig. 4에서와 같이 지뢰탐지 센서 중심점  $C$ 를 지나며, 추정된 지면 평면에서 주어진 수직거리  $h$  만큼 떨어진 지면과 평행한 평면이 된다.

따라서, 센서 평면의 법선 방향은

$$n = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix}, \quad \Delta = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \quad (4)$$

이며, 탐지 센서의 중심 기준 좌표  $x_s, y_s$ , 거리  $h$ , 그리고 법선벡터  $n$  및  $D$ 를 알고 있으므로 탐지 센서 중심점의  $z$  방향 성분  $z_s$ 는 다음 식으로 계산된다.

$$z_s = \frac{1}{n_z} (h - d - n_x x_s - n_y y_s) \quad (5)$$

여기서  $n_z \neq 0$ 이어야 한다.  $n_z = 0$ 인 경우는 지면이 수직면인 경우이다<sup>[8]</sup>.

### 3. 탐지장치의 메커니즘과 지면 스캔방식

#### 가. 개요

탐지장치는 지하매설물 탐지 임무 수행을 위해 크게 7가지의 모드를 가지고 있다. 상위 시스템에 장/탈착하거나 탐지장치를 사용하지 않는 자세인 탐지파킹모드, 탐지 임무를 수행하기 위해 기본자세를 생성하고 탐지센서를 작동시키기 위한 준비모드, 상위체계의 명령신호가 없는 동안 상태를 유지하고 있는 대기모드, 모션을 정지시키기 위한 정지모드, 그리고 탐지를 위해 탐지장치를 구동하기 위한 수동모드, 반자동모드,

자동모드로 되어 있다.

반자동모드와 자동모드의 경우, Fig. 4와 같은 기구적 메커니즘을 이용한 기구학적을 통해 각 축별 목표 조인트 각도와 탐지센서의 글로벌 직교좌표계 상에서의 위치 값을 계산해낸다. 원격조종을 통해 탐지임무를 수행함에 있어, 위와 같이 설정된 여러 모드 중에서 가장 많이 쓰이게 될 모드는 자동 모드이다.

다음의 Fig. 5는 탐지센서에 있어서 금속 탐지(MD : Metal Detection) 시 탐지 범위를 나타내는 데 Zone 1은 비교적 작은 조각의 금속 측정이 가능한 영역이고 Zone 2의 영역은 통상 대인지뢰 정도의 금속이 탐지가 가능한 영역이며, Zone 3는 대전차지뢰와 같은 비교적 큰 형태의 금속탐지가 가능한 영역을 나타내 주고 있다.

여기서 탐지 범위는 좌우 폭(a)보다 앞뒤의 탐지폭(b)이 상대적으로 큰 양상을 보여주고 있는데 이는 탐지센서를 좌우로 스캐닝하는 방법에 있어서 유리한 상황이라 할 수 있다.

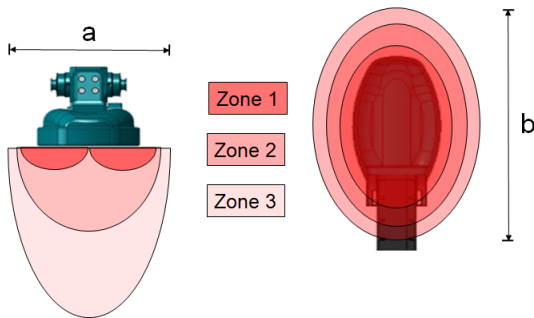


Fig. 5. 금속탐지(MD) 범위

Fig. 6은 탐지센서로 비금속 탐지(GPR)시 탐지 범위를 나타내는 데, 탐지 깊이에 있어서는 각 탐지 영역은 금속탐지의 경우와 비슷하나 탐지영역의 앞뒤 폭은 매우 좁음을 알 수 있다. 따라서 모든 폭발물에 있어서는 아무리 비금속의 재질이라 하여도 기폭작용을 하는 뇌관 부분은 소량의 금속재질로 이루어져 있기 때문에 먼저 금속탐지센서로 탐지를 한 다음 정밀 탐색을 하고자 할 경우에 비금속탐지센서로 탐지를 하는 것이 바람직하다 할 수 있다<sup>9)</sup>.

여기서는 기존에 자동모드에서 지면을 스캔하는 방법으로 사용하던 일반선회 스캔방식을 분석하고, 보다 효율적인 스캔 방법인 8자 모양으로 궤적을 형성하는 8자 선회 스캔 방법을 제시하고자 한다.

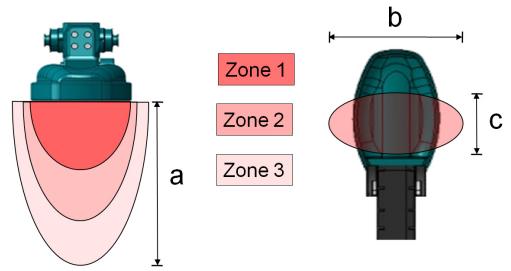


Fig. 6. 비금속(GPR) 탐지 범위

#### 나. 일반적인 선회 스캔방식

Fig. 7은 일반선회 스캔방식으로서 기존의 자동모드 시 사용하던 스캔방식이며 일정각도 이내에서 좌우로 선회구동을 하는 지면 스캔하는 방식을 말한다. 이 때, 상부암, 하부암, 센서부는 고정되어 있어 탐지 매니플레이터는 일정한 반경을 유지한다. Fig. 7. a는 기동차량이 정지해 있는 상태에서의 좌우 선회스캔을 보여주고 있고 Fig. 7. b는 기동차량이 탐지에 적합한 속도로 기동하고 있을 때의 매니플레이터가 단순 선회하는 모습을 보여주고 있다. 여기서, 좌우측의 청색 음양은 사각지대를 보여주며 탐지영역 내부의 짙은 음영부분은 중복 탐지된 부분을 보여주고 있다<sup>10)</sup>.

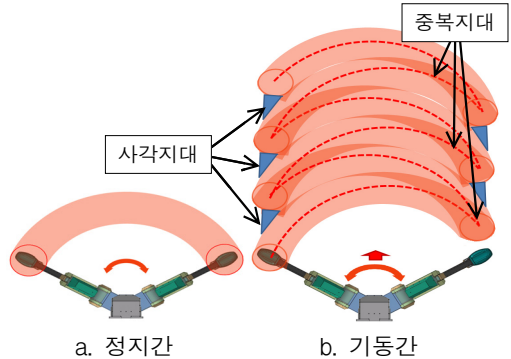


Fig. 7. 일반선회 스캔방식(원회전)

Fig. 7에서 보여주는 바와 같이 매니플레이터를 고정된 상태에서의 단순한 원형의 회전운동은 탐지센서의 과도한 회전운동과 함께 기동 간에도 비교적 많은 중복지대 및 사각지대를 유발하게 된다. 다음의 Fig. 8은 원형운동에서 매니플레이터의 구동으로 스캔동작을 보다 직선화 하는 경우이다. Fig. 8. b는 차량의 기동간에 스캔방법을 보다 직선화 회전으로 구현하면서 스캔하는 모습이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 단순 좌

우선회에 의한 직선화 스캔에서는 원회전 스캔보다 더 많은 사각지대와 중복지대를 보여주고 있으므로 스캔 경로를 직선화를 하는 것이 기동간에 비효율적이라 볼 수 있다.

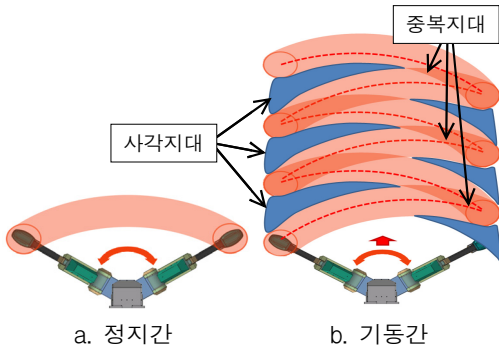


Fig. 8. 일반선회 스캔방식(직선화 회전)

다. 8자 스캔방식

자동 탐지모드에서 미 탐지 영역을 없애고 탐지영역이 중복되지 않도록 하기 위해서는 매니플레이터를 선회하는 동시에 탐지센서를 전후로 움직여주어야 한다. 이를 위해서 지뢰탐지장치가 장착된 차량은 탐지속도와 연동되어 주행제어(저속)가 가능하여야 하며 탐지장치가 탐지 가능한 최대 탐지속도와 탐지폭 등 탐지능력을 고려하여 차량의 속도를 결정하여야 한다.

Fig. 9는 정지상태에서의 8자 스캔형상을 보여준다. 여기에서 탐지센서가 선회 중에는 차량이 기동하는 속도만큼 동시에 후진을 하게 되는 데 최대 후진거리는 센서의 길이 방향 탐지 두께가 된다. 그리고 양 끝단에 도달하게 되면 선회하는 동안 후진한 거리만큼 빠른 속도로 센서를 전진시키게 된다.

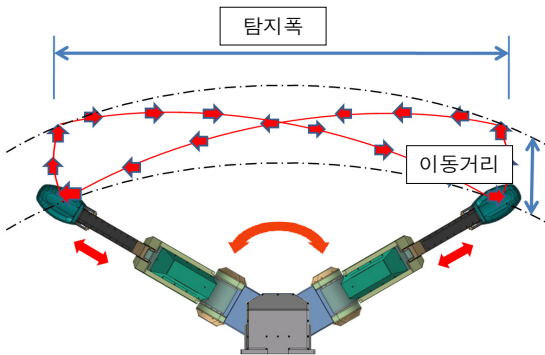


Fig. 9. 8자 선회스캔방식(정지간)

이러한 동작을 연속 동작으로 구현하게 되면 그 모양은 8자를 옆으로 눕혀 놓은 형상이 되므로 이러한 구동을 8자 구동이라 표현하였다. 센서의 길이방향 탐지 두께를  $l/2$ 이라 하고 스캔 탐지폭을  $w$ 라 했을 때 8자 선회스캔은 스캔탐지폭 왕복과 양 끝단에서 탐지 두께  $l/2$  만큼의 매니플레이터 전진이 한 주기를 구성한다. 미탐지 영역이 없도록 하기 위해서는 한 주기 동안 차량이 거리  $l$  만큼 이동해야 한다. 센서의 탐지 가능속도를  $v_s$ 라 하면 스캔 탐지폭 왕복에 걸리는  $2w/v_s$ 이고, 끝단에서 매니플레이터 전진에 소요되는 시간은  $t_{dl}$ 이라 하면 8자 선회스캔에 대한 차량의 이동속도  $v_v$ 는 다음의 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$v_v = \frac{l}{2w/v_s + 2 \times t_{dl}} \tag{6}$$

일반 선회스캔시 미탐지 영역이 없도록 거리  $l$ 을 이동하기 위해서 매니플레이터는 탐지폭을 총 3회 스캔해야 한다. 이때 소요되는 시간은  $3w/v_s$ 가 되며 차량의 이동속도  $v_v$ 는 다음과 같다.

$$v_v = \frac{l}{3w/v_s} \tag{7}$$

여기서, 탐지두께  $l/2$ 이 60cm, 탐지폭  $w$ 가 2m, 전진시간  $t_{dl}$ 이 0.5sec라 하면, 8자 선회스캔과 일반 선회스캔의 차량 이동속도  $v_v$ 는 각각 24cm/sec, 20cm/sec이다. 따라서 8자선회스캔 시 차량 이동속도가 일반선회스캔 시의 이동속도 보다 4cm/sec(20%) 향상된다. 그러나 실 구동 상황에서는 8자 선회스캔 방식이나 일반 스캔방식 모두가 좌우 왕복 선회를 하기 위해서는 양 끝단에서의 가감속 제어가 필요하며, 8자 선회스캔 방식에서는 가감속이 이루어지는 동안에 탐지범위 만큼의 구간 전진이 필요하게 된다. 이럴 경우 매니플레이터의 형상 및 탐지속도에 따라 다르지만 8자 선회스캔 방식의 탐지효율이 조금 더 향상될 것이다.

그러나 이 방법은 매니플레이터의 구동 측면에 있어서는 구동/제어가 다소 복잡해지는 단점도 지니고 있으며 Fig. 11과 같이 매니플레이터가 좌우로 움직일 때 양 끝 지점에서는 일반 스캔방식에 비해 매니플레이터의 신장 길이가 탐지두께와 비례하여 “증대거리” 만큼 길어져야 할 필요가 있다.

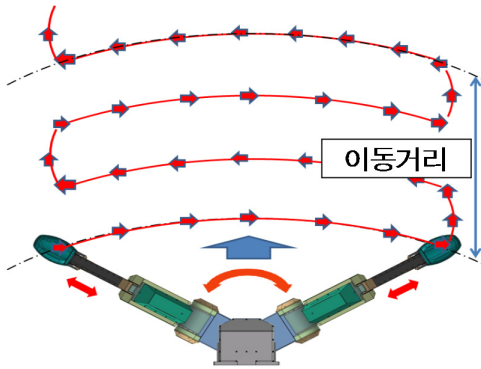


Fig. 10. 8자 선회스캔방식(기동간)

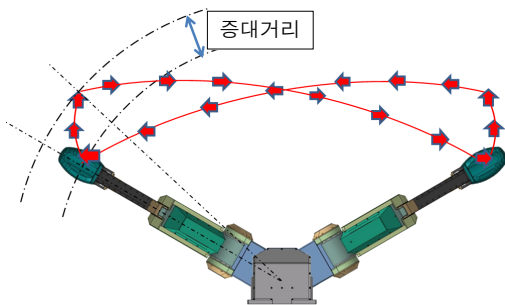


Fig. 11. 8자 스캔시 매니퓰레이터 증대 거리

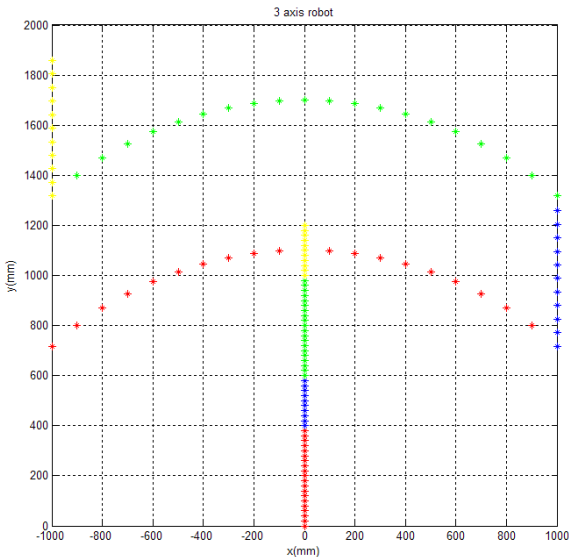


Fig. 12. 8자 스캔방식의 스캐닝 효과

Fig. 12는 수치해석 프로그램인 Matlab을 이용하여 [11,12] 차량이 기동하면서 8자 스캔방식을 적용하여 탐

지장치를 구동한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 하단부에 세로 직선으로 표시된 것은 기동차량이 진행한 것을 의미하며, 원호는 탐지센서의 궤적을 나타낸다.

다음의 Fig. 13은 일반 스캔방식과 8자 스캔방식의 차이점을 단순 도표화하여 비교한 그림이다. 이렇게 단순 도표 비교에서도 알 수 있듯이 거의 동일 면적을 탐지함에 있어서 28초 대 20초로 8자 스캔방식이 일반 스캔방식에 비하여 약 30% 정도 더 효율적인 탐지방식을 알 수 있다.

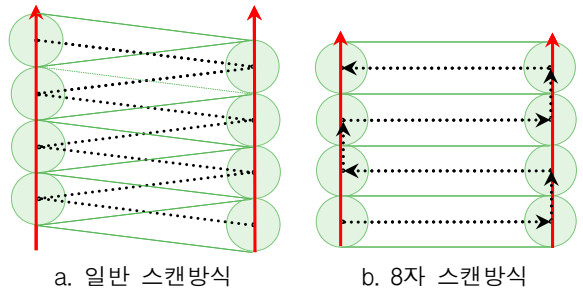


Fig. 13. 스캔방식 단순 도표화 비교

Fig. 14는 위에서 제시한 8자 선회스캔방식을 적용하여 탐지장치를 구동한 실험 모습을 나타낸다. Fig. 14. a는 탐지장치를 좌측 끝단으로 전진시킨 동작에서부터 점진적으로 당기면서 우측으로 회전하여 우측 끝단에서 탐지두께의 거리만큼 민 동작까지의 1Cycle의 구간 동작을 보여주고 있으며, Fig. 14. b는 탐지장치를 우측 끝단으로 전진 동작에서부터 점진적으로 당기면서 좌측으로 회전하여 좌측 끝단에서 탐지두께의 거리만큼 전진 동작까지의 1Cycle의 구간 동작의 실험 결과를 보여주고 있다.

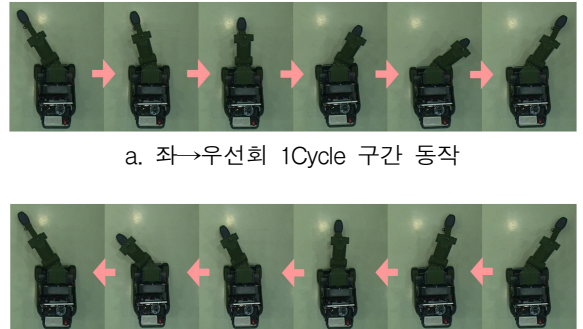


Fig. 14. 8자 스캔 구동 실험장면(정지간)



Fig. 15는 정지 간에 실시한 2Cycle 연속 선회 동작을 기동간 실시 동작으로 표현한 장면으로써 적색선은 탐지센서가 이동한 궤적을 나타낸다.

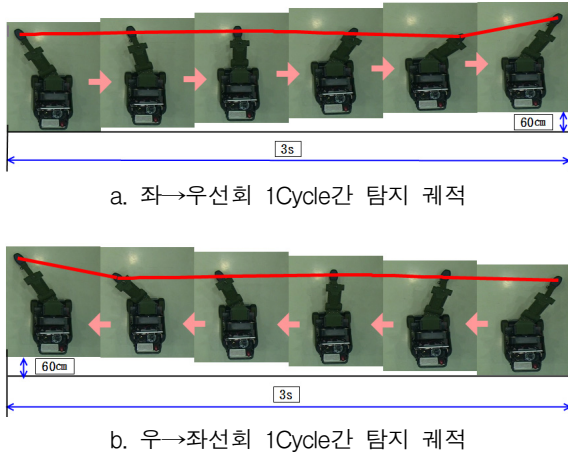


Fig. 15. 8자 스캔 탐지 궤적 합성(기동간)

#### 4. 결론

본 연구에서는 원격조종 및 유인조종이 가능한 이동 플랫폼의 전방에 매니플레이터를 장착하여 지하 매설물 탐지가 가능한 탐지장치의 효율적인 탐지스캔 경로를 제시하였다. 또한, 자동 탐지모드에서 일반 선회스캔방식보다 모션은 복잡하지만 이동 플랫폼의 기동속도를 높이고 탐지능력을 향상시킬 수 있는 8자 선회스캔방식을 제시하고 이를 시뮬레이션과 실험으로 검증하였다.

그러나 본 논문에서는 단일 탐지 플랫폼에 의한 지하매설물 탐지경로에 대하여 연구함으로써 지뢰가 통상적으로 넓은 지역으로 매설됨을 고려할 때 탐지 효율이 제한되는 경향이 있었다. 따라서 향후에는 여러 대의 다중 탐지 플랫폼 협업에 의한 광지역 지하매설물의 효율적 탐지경로에 대한 연구를 수행할 예정이다.

#### References

- [1] H. Aoyama, K. Ishikawa, J. Seki, M. Okamura, S. Ishimura and Y. Satsumi, "Development of Mine Detection Robot System", Int. J. of Advanced Robotic Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 229~236, 2007.
- [2] 이명천, 이석재, 강신천, 신호철, 김대제, "지뢰탐지장치용 초음파센서 및 지뢰위치 표시장치 개발/적용에 관한 연구", 2011 군사과학기술학회 종합학술대회, 2011.
- [3] 이명천, 이호주, 이영일, 신호철, 유동수, "3D 지형모델 및 초음파 센싱 기반의 지뢰탐지장치 노면추종 연구," 2010 군사과학기술학회 종합학술대회, 2010.
- [4] J. Duffy, "Analysis of Mechanisms and Robot Manipulators", John Wiley, 1980.
- [5] R. P. Paul, "Robot Manipulation", MIT Press, 1981.
- [6] K. S. Fu, "Robotics Control, Sensing, Vision and Intelligence", McGraw-Hill, 1988.
- [7] 김준, "CCD/IR 영상 기반의 3D 월드모델링과 클러스터링의 통합을 통한 주행영역 추출 성능 개선", 한국군사과학기술학회지, Vol. 11, No. 4, pp. 107~115, 2008.
- [8] 정승호, 정경민, 신호철, 이정엽, 김석환, 이명천, "지뢰탐지 로봇 개발", 2009 한국자동제어 학술대회, 2009.
- [9] MINEHOUND™ VMR2 Dual Sensor Mine Detector Operation Manual Ver.04/2007.
- [10] 신호철, 권정주, 이명천, 유동수, "지뢰탐지장치의 효과적인 지면 스캔 경로 연구", 2011 군사과학기술학회 종합학술대회, 2011.
- [11] Mc Graw Hill, "Matlab 공학 응용", 아진.
- [12] 정슬, "로봇공학, MATLAB 및 SIMULINK 응용", 충남대학교출판부.