

# 지하공간에서 노무자의 위치 인식을 위한 RTL 시스템 개선

송기일<sup>1\*</sup> · 임진선<sup>2</sup> · 이항로<sup>3</sup>

<sup>1</sup>정회원, 인하대학교 토목공학과 부교수

<sup>2</sup>비회원, 삼우아이엠씨 기술연구소 선임연구원

<sup>3</sup>비회원, 인하대학교 토목공학과 석사과정

## Improvement of RTL system for location monitoring of multi-laborers in the underground space

Ki-Il Song<sup>1\*</sup>, Jin-Sun Lim<sup>2</sup>, Hang-Lo Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Inha University, Dept. of Civil Eng., Associate Professor

<sup>2</sup>SamwoolMC CO., LTD, R&D Center, Senior Researcher

<sup>3</sup>Inha University, Dept. of Civil Eng., Graduate Student

**ABSTRACT:** Real time location (RTL) system which can control the safety of laborers in the underground space is developed in this study. This innovative system can monitor the location and history of movement of multiple laborers in real time. To accommodate constrains of the underground space, the system is portable and composed with low-battery mode. Since conventional method to detect the location of laborer with radio signal strength indicator (RSSI) contains high errors, new measurement system using accelerometers and correction method are suggested in this study. Field test is performed to validate the developed system. The error for moving laborer was 0.4 m and for non-moving laborers was 0.2 m. Thus, it is found that the new RTL system can be used to monitor the location of laborers in the underground construction space.

**Keywords:** Underground space, RTL system, RSSI, Accelerometer

**초 록:** 본 연구에서는 터널 및 지하건설현장에서 노무자의 안전을 관리할 수 있는 실시간 위치정보 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 다수의 노무자들에 대한 실시간 위치 탐색 및 이동 이력을 확인할 수 있다. 이 시스템은 지하공간에서 다양한 노무자들의 이동 특성을 손쉽게 파악하기 위하여 저전력의 이동이 용이한 시스템으로 구성하였다. RSSI를 이용한 삼각측량으로 위치 인식을 하는 과거의 방법은 매우 큰 오차를 가지는 이유로 가속도계를 이용한 새로운 거리측정 방법 및 보정 방안을 제시하였다. 지하건설현장에서 개발한 시스템을 평가한 결과 움직임이 없는 경우 약 0.2 m 오차를 나타내었고, 움직임이 있는 경우 약 0.4 m의 오차가 발생하였으며, 현장에서 충분히 활용할 만한 결과를 나타내었다.

**주요어:** 지하공간, 실시간 위치정보 시스템, 라디오주파수강도, 가속도계

## 1. 서 론

건설산업은 점차 대형화 및 복합화 되고 있으며, 이에 따라 건설관리 및 안전분야에 효율적인 체계가 필요한 상황이다. 특히, 터널 및 지하시설물과 같이 열린 공간이 아닌 제한된 공간에서의 장비 및 인력의

안전은 무엇보다도 중요시 되고 있다. 최근 들어 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 시도가 있었으며, 이중 IT 및 센서기술을 건설분야에 적용하여 현장의 자재, 장비 혹은 인력을 효율적으로 관리하는 방안이 활발하게 연구되고 있다(Kim et al., 2011).

다양한 IT 및 센서기술 중 RTL (Real Time Location) 시스템 기술은 관리하고자 하는 물체(혹은 사람)에 RFID(Radio Frequency Identification) 태그(Tag)를 부착하여 이에 대한 위치정보를 관리하고 실시간으로

\*Corresponding author: Ki-Il Song  
E-mail: ksong@inha.ac.kr

Received May 18, 2016; Revised May 27, 2016;  
Accepted May 30, 2016

모니터링 할 수 있는 시스템이다.

건설현장의 경우 복잡하고 다양한 공간 및 구조물이 산재하여 열린 공간에서만 활용 가능한 GPS 무선 통신이 불가능하기 때문에 RTL 시스템을 활용하려는 방안이 다양하게 시도되고 있다. Park et al. (2009)는 건설현장용 RTL 시스템 구축을 위해 다양한 환경의 현장에서 이에 대한 기초적 평가를 수행하였다. Kim et al. (2011)는 터널현장에 Wifi 무선통신 기반의 RTL 시스템을 구축하여 노무자의 안전관리시스템을 개발하기 위해 단일 태그에 대한 위치를 추적하여 활용 가능성을 평가하였다. Lee et al. (2013)는 건축 현장에 CSS (Chirp Spread Spectrum)기반 RTL 시스템을 실내 및 실외에서 적용하여 그 활용 가능성을 평가하였다. 하지만 위의 대부분의 연구는 건설현장에서 단일 센서 기반의 RTL 시스템에 대하여 현장 적용성을 평가하는 수준이었으며, 멀티 태그 즉 여러 명의 노무자에 대한 실시간 위치탐색 및 행동패턴에 관한 연구는 전무한 상황이다.

본 연구는 터널 혹은 지하공간 구조물 건설 시 여러 명의 노무자의 행동 패턴을 동시에 실시간으로 모니터링하고 안전 여부를 평가할 수 있는 연구용도의 RTL 시스템을 구축하기 위해서 적절한 센서 등의 하드웨어의 구축, 위치결정방법의 개선, 행동패턴의 판단 등에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. RTL 시스템의 구축

### 2.1 RTL System 기술 개요

RTL 시스템은 Fig. 1과 같이 태그가 일정 주기로 리더기(이후 고정노드)에게 자신의 ID 및 위치 등의 정보를 전송하면 고정노드가 이를 수신하여 서버로 신호를 송신한다. 서버는 고정노드로부터 수집된 각 태그에 대한 정보를 기반으로 응용프로그램으로 위치 등의 정보를 처리하여 DB에 저장 및 관리하고 다양한 기기에 그 결과를 송출한다(Kwon et al., 2007).

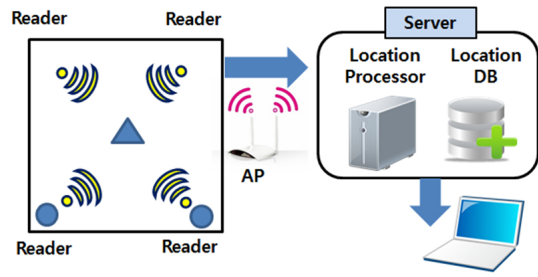


Fig. 1. Schematic diagram of RTL System

### 2.2 무선 네트워크 방법의 선정

무선 네트워크는 대표적으로 Wifi, Bluetooth, Zigbee, UWB (Ultra Wide Band)등의 방법이 있으며, RTL 시스템을 구성하는데 있어서 각각의 특성을 파악하는 것은 무엇보다 중요하다(Fig. 2). Table 1은 무선 네트워크 기술의 특징을 비교한 것이다(Lee et al., 2009).

위 무선 네트워크의 특성을 살펴보면 Wifi의 경우 최대 전송거리가 가장 긴 반면에 전력의 소비량이 매우 크기 때문에 배터리를 통한 시스템의 구축이 쉽지 않다. Bluetooth 방법은 최대전송거리가 가장

Table 1. Comparison of wireless network technologies

Contents	Wifi	Bluetooth	Zigbee	UWB
Frequency Band , Ghz	2.4 / 5	2.4	868/915 (MHz) 2.4	3.1~10.6
Max. transfer rate , Mbps	11~54	1	0. 25	480
Max. transfer distance , m	100	10	10~75	20
Power Consumption , mW	800~1600	50 / 80	1/75	~200
Network Configuration	P2P, Star	P2P, Star, Adhoc	P2P, Star, Mesh	P2P, Mesh
Standardization	IEEE 802.11 WiFi Alliance	IEEE 802.15.1 Bluetooth SIG	IEEE 802.15.4 Zigbee Alliance	IEEE 802.15.3a WiMedia Alliance

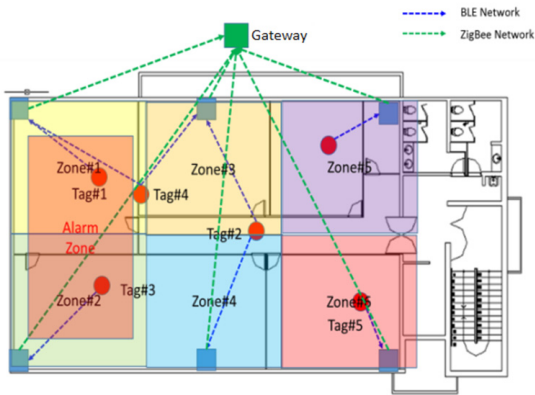


Fig. 2. Configuration of Network

적은 반면에 가정 전력의 소모가 적은 수준이었다. Zigbee의 경우 전송속도가 매우 느려 많은 양의 정보를 전달하기에는 한계가 있지만, 최대전송거리 및 전력의 소비측면과 격자로 구성된 네트워크 측면에서 우수한 특징을 가지고 있다. UWB는 데이터 전송속도가 가장 빠른 방법이지만 전송거리가 길지 못하며 가장 고가의 장비이다.

위와 같이 장기간 대규모로 비용적인 측면을 고려하지 않을 경우 위 무선 통신 방법 중 성능이 출중한 RTL 통신시스템을 구축할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 태그 및 고정 노드의 전력 사용을 최소화 하고 고정 노드의 이동 및 설치가 자유로운 시스템을 구축하기 위해 태그와 고정 노드의 무선 통신은 Bluetooth로 구성하였다. 또한 Bluetooth 방법은 여러가지 센서 신호를 통합적으로 보내기에 수월하다. 위치정보의 데이터 크기는 음성 및 동영상 파일에 비하여 그리 크지 않은 관계로 몇 고정 노드에서 서버로 정보를 보내는 통신 시스템은 네트워크 확장성이 비교적 좋은 Zigbee로 구성하였다.

### 3. 위치결정 방법의 개선

#### 3.1 RSSI를 이용한 위치결정

라디오주파수강도를 의미하는 RSSI (Received

Signal Strength Indication)는 수신된 신호의 강도 지표로 Bluetooth기반의 거리측정 알고리즘에서 주된 매개변수이다. 이론적으로 라디오 신호의 강도는 거리의 제곱에 반비례하고, RSSI는 라디오 신호 강도를 임의로 정한 기준에 Log로 비례한 단위이며 다음 식 (1)인 Ferris의 공식을 통해 설명된다(Oskar, 2014; Yoon, 2015).

$$L = 201 \log_{10} \left( \frac{4\pi d}{\lambda} \right) \text{ (dB)} \quad (1)$$

여기서, L은 라디오신호의 강도, λ는 전파의 파장, d는 거리이다. 식 (1)을 두 지점간의 거리 d로 나타내면 다음 식 (2)와 같다.

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot 10^{\frac{L}{20}} = \frac{c}{4\pi f} \cdot 10^{\frac{L}{20}} \quad (2)$$

여기서, c는 전파 속도이며, f는 주파수를 나타낸다.

만약 송신된 RSSI를 3개의 고정 노드에서 읽을 수 있다면 Fig. 3과 같이 식 (3)을 이용하여 삼각측량 방법으로 위치를 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 &= d_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 &= d_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 &= d_3^2 \end{aligned} \quad (3)$$

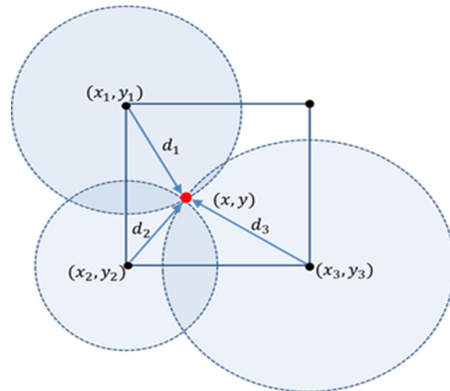


Fig. 3. Triangulation method in RTL System

하지만 RSSI는 라디오 안테나의 방향 및 각도, 송수신기간에 장애물, 전파방해 등에 매우 민감하여 위치 측정에 큰 오차를 가지게 되며, 실제 수신 신호의 오차는 다음 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} (x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 &= d_1^2 - er_1 \\ (x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 &= d_2^2 - er_2 \\ (x-x_3)^2 + (y-y_3)^2 &= d_3^2 - er_3 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $er_1, er_2, er_3$ 은 실제 수신 신호의 오차를 나타낸다. 특히 움직이는 태그의 경우 오차가 누적되어 매우 좋지 못한 결과를 나타낼 수 있다. RSSI을 이용한 위치추적에 대한 과거 학술연구에서는 이러한 이유로 위치를 추정하는데 있어 다양한 알고리즘을 적용하여 이를 극복하려 하였다(Noh and Lee, 2010; Kim et al., 2012)

본 연구에서는 위치추적에 대한 연속적인 이력자료를 근거로 하여 오차를 최소화 하는 방법 중 그 유효성이 충분히 입증된 최소제곱법을 이용한 칼만 필터를 사용하여 오차를 최소화 하였다. 칼만 필터는 노이즈를 정규 분포인 가우시안 분포로 가정하여 평균 및 분산으로 그 특성을 충분히 표현 가능하며 다음 식 (5)와 같이 표현할 수 있다(Kim et al. 2012).

$$\begin{aligned} x_k &= Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1} \\ z_k &= Hx_k + v_k \\ p(w) &\sim N(0, Q) \\ p(v) &\sim N(0, R) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $x_k$ 는 특정 시간  $k$ 의 상태 벡터,  $x_{k-1}$ 는 특정 시간  $k-1$ 의 상태 벡터,  $u_k$ 는 사용자의 입력 값,  $w_{k-1}$ 는  $k-1$ 의 잡음,  $v_k$ 는 특정 시간  $k$ 에서 계측 잡음,  $z_k$ 는 잡음을 포함하고 있는 위치 벡터,  $A$ 는 해당 시간에서 이전 시간에 기반한 상태 전이 행렬,  $B$ 는 사용자 입력에 의한 상태전이 행렬,  $H$ 는 해당 시간에서 측정에 관계되는 행렬,  $Q$  및  $R$ 은 공분산 행렬이다.

삼각측량의 경우 리더기가 만약 3개라면 최소 9회의 이상의 자료를 축적한 이후 칼만 필터를 적용할 수 있다.

### 3.2 가속도 센서를 이용한 위치정보 결정

RSSI의 이러한 부정확한 위치추정 한계를 극복하기 위해 추가적으로 BLE (Bluetooth Low Energy) 환경에서 사용 가능한 3축 가속도 센서를 이용하였다. 3축 가속도 센서는 3방향의 가속도를 일정 시간간격으로 측정하는 센서로 3 방향의 가속도를 측정하여 태그의 이동 거리, 태그의 기울기, 태그의 이동 방향 등을 결정할 수 있다(Yeom et al., 2009; Kim and Yu, 2013).

가속도계의 경우에는 임의의 물체에 대하여 3축 중 2축이 중력방향과 수직이고, 나머지 1축이 중력방향일 경우 1G 즉, 9.8 m/s 가속도가 측정된다. 가속도계가 만약 중력가속도 방향과 일치하지 않는다면 중력가속도로 인하여 출력이 변화한다. 이는 중력가속도계로 위치를 추정하는데 있어 오류를 발생시키는 한 원인이다. 중력가속도계만으로는 이에 대한 오류를 제거하기가 쉽지 않으나 GPS 혹은 RTL 시스템 기술과 혼합하여 태그의 이동이 없는 경우를 기준으로 합성가속도 중에서 중력에 의한 가속도와 순수 이동가속도를 분리할 수 있으며 이를 통해 이동거리에 대한 추정의 오차를 보다 저하 시킬 수 있다(Yeom et al., 2009).

3축 가속도의 X, Y, Z방향의 가속도를  $a_x, a_y, a_z$ 라고 하고, Z축이 중력방향을 가리킨다고 가정하자. Y축을 기준으로 회전한 각도는  $\theta_y$ 라 할 때, 중력가속도 영향을 제거한 가속도  $a_{xz}$ 는 다음 식 (6) 및 식 (7)로부터 구할 수 있다.

$$\theta_y = 90 - \cos^{-1} \left( \frac{a_x}{1G} \right) \quad (6)$$

$$a_{xz} = \sqrt{(a_x - 1G \cdot \sin \theta_y)^2 + (a_z - 1G \cdot \sin \theta_y)^2} \quad (7)$$

중력가속도 영향을 제거한 가속도  $a_{xz}$ 와 수평방향과의 각은 식 (8)과 같으며 결국 중력으로 인한 진행방향의 가속도  $a_{Hx}$ 는 다음 식 (9)와 같다.

$$\theta_{xz} = \theta_y - \cos^{-1} \left( \frac{a_x - G \cdot \sin \theta_y}{a_{xz}} \right) \quad (8)$$

$$a_{Hx} = \cos \theta_{xz} \cdot a_{xz} \quad (9)$$

위와 동일한 방법으로 X축을 기준으로 하여  $\theta_x$ ,  $a_{yz}$ ,  $\theta_y$  그리고  $a_{Hy}$ 를 구할 수 있다. 그리고  $H_x$ 방향의 순수 이동가속도  $a_{mHx}$ 와  $H_y$ 방향 순수 이동가속도  $a_{mHy}$ 는 다음 식 (10) 및 식 (11)과 같다.

$$a_{mHx} = a_x \theta_y - a_{Hx} \quad (10)$$

$$a_{mHy} = a_y \theta_x - a_{Hy} \quad (11)$$

이를 시간에 대하여 2중 적분하면 단위시간 동안  $H_x$ 방향의 이동거리  $S_x$  및  $H_y$ 방향의 이동거리  $S_y$ 를 알 수 있고 수평방향 총 이동거리  $s$ 는 다음 식 (12)와 같다.

$$s = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (12)$$

그리고 연속적인 이벤트에 대하여  $n-1$ 에서의 위치벡터가  $S_{n-1}$ 이고,  $n$ 번째 이동할 때의 위치벡터가  $S_n$ 이라고 한다면, 단위 시간 동안 이동식 태그가 이동한 방향의 각도  $\phi_n$ 는 다음 식 (13)과 같다.

$$\phi_n = \phi_{n-1} + \cos^{-1} \frac{s_n \cdot s_{n-1}}{\|s_n\| \|s_{n-1}\|} \quad (13)$$

### 3.3 순차적 스캔을 통한 다중 태그 위치추적

본 연구에서 사용한 BLE 태그는 평균 20 Hz로

신호를 송출하는데 한 개의 고정 노드가 만약 20개 정도의 다중의 태그에서 송출하는 신호를 각각 읽어 들일 경우 약 2초 정도의 시간이 지연된다. 이는 20개의 태그를 사용하는 환경에서 RSSI 방법으로 3각 측량을 적용하려면 최소 매 2초 마다 스캔을 하여 위치 정보를 업데이트하게 되는 것을 의미하며, 임의의 태그가 0.5 m/s의 속도로 이동할 경우 위치정보에 오차가 없다고 하더라도 실시간의 개념으로 볼 때 실제 위치와 1 m의 오차가 발생할 수 밖에 없다. 장기간의 노무관리라는 관점에서는 이러한 지연은 큰 의미가 없지만 안전 및 긴급상황에서의 2초라는 시간은 매우 큰 의미가 있다.

RSSI만을 이용할 경우 별다른 대안이 없지만 본 연구는 가속도계를 같이 사용하는 연유로 고정 노드 한 개만으로도 RSSI 신호 및 가속도계 정보를 이용하여 위치정보를 업데이트 할 수 있다.

본 연구에서는 4개의 고정 노드를 기반으로 각 고정 노드가 0.5초 간격으로 시간차를 두며 스캔 하여 이동식 노드를 순차적으로 스캔 하는 방법을 적용하였다. 그리고 이 방법을 적용하기에 앞서 RSSI 신호의 오류로 인한 데이터 손실을 최소화 하기 위해 최대 이동 가능 거리(Max Allowable Movement Distance 이하 MAMD)를 위치측정 시스템에 적용하였다. 본 연구에서 정의한 MAMD란 건설현장의 노무자가 단위 시간 동안 최대로 움직일 수 있는 절대적 거리를 의미한다. 또한 MAMD는 단위 시간에 영향을 받기 때문에 고정 노드의 스캔시간이 짧을수록 보다 거리 측정에 대한 오류를 줄일 수 있다. 터널 및 지하 건설공간은 외부의 평지에서 보다 이동이 비교적 수월하지가 않은 이유로 초당 0.5 m이상의 속도로 움직이지 않는다고 가정하였고, 0.5초 간격에서 MAMD 거리는 0.25 m로 간주하였다.

다음 Fig. 4는 4개의 노드가 0.5초 간격으로 RSSI, 가속도 센서 그리고 MAMD를 이용하여 위치를 찾는 개념을 도시한 것이다.

초기에 이동식 태그를 위치정보가 정확한 위치에

놓고 충분한 초기 셋팅을 수행한 후 4개의 고정 노드가 0.5초 간격으로 각각 RSSI 신호를 감지하여 거리를 추정한다.

그리고  $n-1$  회에서 붉은점의 위치가  $n$ 에서 푸른색 삼각형의 위치로 이동하였다고 가정할 때,  $(x_{n-1}, y_{n-1})$ 을 원의 중심으로 하고 MAMD를 반지름으로 하는 원과 고정노드 4의 위치를 기준으로  $n$ 에서 RSSI를 통해 태그의 위치를 얻어 반원을 그린 것을 비교할 수 있다. 만약 서로 만날 경우 Fig. 4의 사각형의 위치

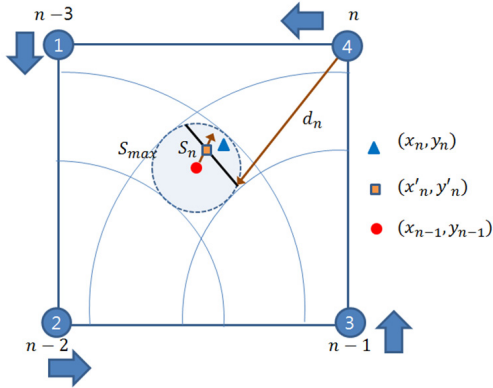


Fig. 4. Method of location tracking

$(x'_n, y'_n)$ 와 같이 최적의 해를 결정하고, 서로 만나지 않을 경우 가속도 센서만으로 위치를 결정하여 데이터 베이스를 업데이트 한다.

다음 Fig. 5는 RSSI, 가속도센서, 그리고 MAMD를 이용하여 위치를 추정하는 알고리즘을 도시한 것이다.

#### 4. 지하공간에서의 적용성 검토

본 연구는 RSSI와 가속도계가 함께 구성된 BLE 기반 RTL 시스템의 현장 성능을 평가하기 위해 인천 중구 신흥동 인근의 제2외곽 순환고속도로 지하건설 현장에서 현장실험을 수행하였다. 다음 Fig. 6은 실험을 수행한 지하건설공간의 전경이고, 다음 Fig. 7은 현장실험 장치 및 실험 전경을 나타낸 것이다.

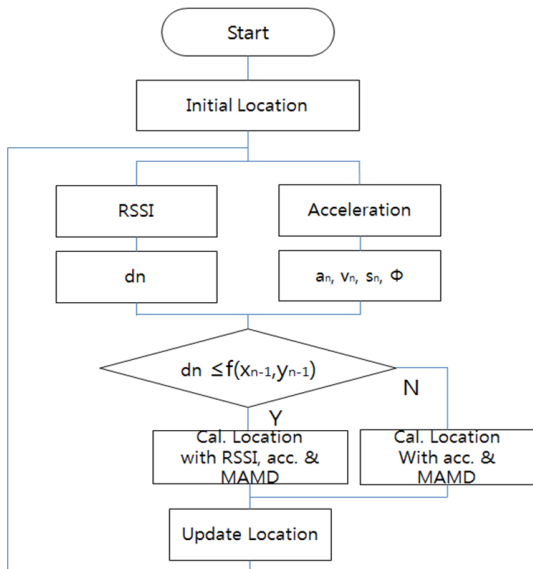


Fig. 5. Flow of proposed positioning algorithm

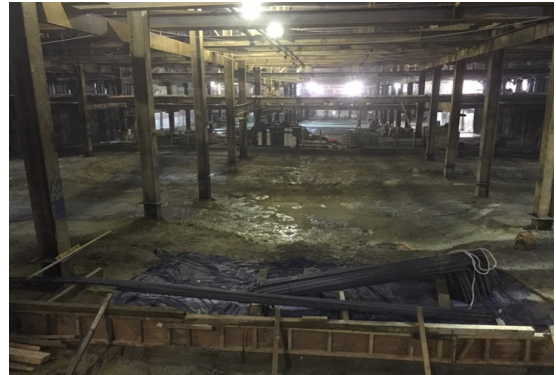


Fig. 6. Underground construction field

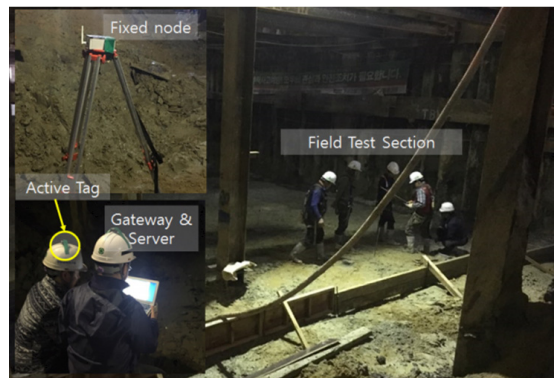


Fig. 7. Experiment device and section

현장실험은 닫힌 공간에서의 본 연구에서 제안한 위치추적 방법의 성능을 평가하는 것을 주목적으로 하였다. 첫째로 고정된 태그에 대하여 Bluetooth를 이용한 RSSI 삼각측량의 성능과 칼만필터 및 최대 이동 거리를 적용하였을 때의 오차를 평가하였다. 두 번째는 태그 1개를 정해진 경로로 이동시키며 그 경로를 기반으로 위치추적 데이터가 벗어나는 지에 대한 평가를 수행하였다.

#### 4.1 고정된 태그의 위치탐색

고정된 태그에 대한 제안된 위치탐색 능력을 평가하기 위해 가로세로 5 m × 5 m에 4개의 노드를 설치하였고, 좌표 2.5 m, 2.5 m 위치에 태그를 부착한 헬멧을 얹어 놓았다. Fig. 8은 0.5초 간격으로 위치정보를 계산한 결과를 나타낸 것이다.

RSSI만으로 삼각 측량할 경우 평균오차는 1.6 m이고 최대 3.0 m까지 오차가 발생하였다. 이동식 태그가 움직이지 않았음에도 기존 연구와 유사하게 기대치에 비해 큰 오류를 나타내었는데, 이로써 실질적으로 현장에서 RSSI만으로 삼각측량을 실시하여 위치탐색 및 이동경로에 대해 추정하는 것은 쉽지 않음을 확인할 수 있었다. 칼만 필터를 사용한 경우 최초 약 20회가

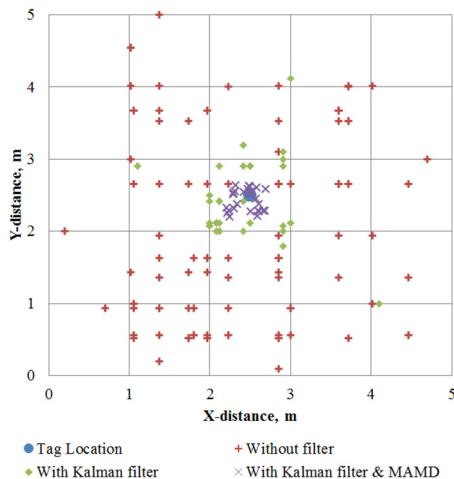


Fig. 8. Results of fixed tag test

지는 다소 큰 오류를 나타내었으나 자료가 축적될수록 오차의 범위를 현격하게 줄여 평균 거리오차가 0.55 m 수준까지 나타났다. 마지막으로 칼만 필터 및 MAMD를 고려한 경우 평균 오차는 0.21 m로 현격하게 줄일 수 있었다. 이는 MAMD가 0.25 m로 고정되었기 때문에 부정확한 RSSI는 사전에 모두 필터링이 되고, 칼만 필터가 지속적으로 해를 찾아가므로 안정화되기 때문이다.

#### 4.2 이동하는 태그의 위치탐색

앞서 고정된 태그에 대하여 본 연구에서 제안한 위치탐색 알고리즘을 충분히 적용할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이동하는 태그에 대한 위치 탐색 능력을

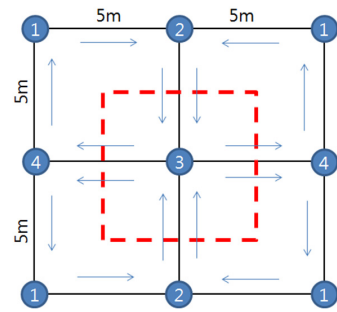


Fig. 9. Scanning methods and moving path

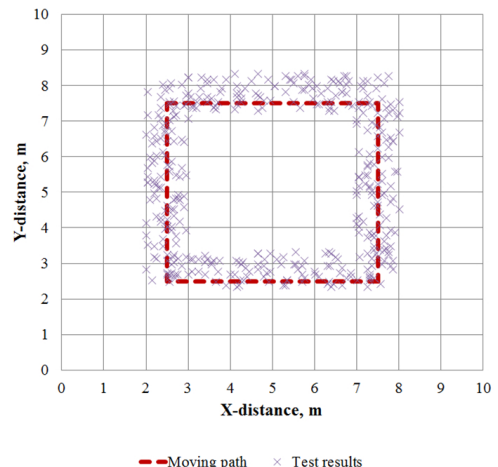


Fig. 10. Results of position scanning of moving tag

평가하기 위해 10 m × 10 m 크기의 평면환경에서 총 8개의 노드를 사용하여 정해진 경로를 10회 정도 왕복할 때의 위치탐색 능력을 확인하였다. 고정식 노드의 배치 및 각 고정식 노드의 0.5초 간격의 탐색 순서는 Fig. 9와 같다.

Fig. 10은 본 연구에서 개발한 위치탐색 알고리즘을 통해 주어진 이동 경로에 대한 움직이는 태그의 위치 탐색 결과이다. 이동 태그의 평균 오차는 0.47 m를 나타냈는데, 이는 고정된 상태에서 태그의 오차인 0.21 m보다 다소 큰 수준으로 나타났다. 이는 이동 태그가 부착된 헬멧을 쓴 노무자의 가속도센서로부터 유입되는 오차의 영향이라 판단된다. 대체로 주어진 이동 경로를 따라서 위치탐색 이력결과가 도시되었으며, 이를 통해 본 연구에서 제안한 위치추적 방법이 대략 0.5 m 오차 범위를 인정할 경우 현장에서 충분히 적용가능 할 것으로 판단된다.

더불어 5개의 이동식 노드에 대한 동시 추적을 수행하였다. 5개의 이동식 노드는 Fig. 9의 이동 경로를 순차적으로 한 방향으로 각각 이동 시키면서 위치를 추적하였다. 본 연구의 목적은 제안 알고리즘에 대한 다중 이동식 노드의 성능을 평가하는 것으로 기준선에서 벗어난 정도를 측정하여 이에 대한 평가를 수행하였다. 다음 Fig. 11은 5개의 태그를 사용할 때 각각 태그의 오차를 나타낸 것으로 태그가 증가하여도 오차의 변화는 뚜렷하게 나타나지 않았다.

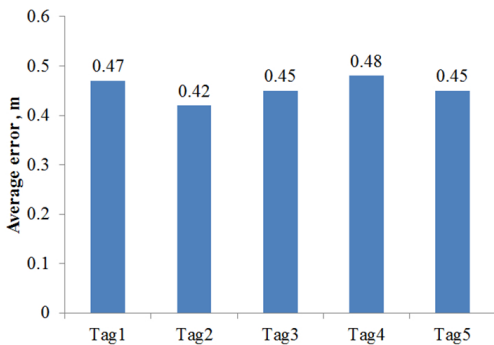


Fig. 11. Error evaluation of each tag

## 5. 결론

본 논문은 터널 및 지하건설 공간에서 노무자의 안전을 효율적으로 관리하기 위해 기존의 RTL 시스템 기술의 개발현황 및 각 기술간의 특성을 살펴보고, 이를 개선하기 위하여 센서를 이용한 보다 효율적인 위치탐색 알고리즘을 제시하였다. 이를 지하건설현장에서 실험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

Bluetooth는 Wifi에 비하여 거리측정을 할 수 있는 범위가 작고, UWB에 비하여 자료 송신량이 크지는 않으며, RSSI신호를 통한 거리측정에는 한계가 있으나, BLE를 지원하는 가속도 센서를 적용할 경우 지하 공간에서 위치정보를 충분히 판단할 수 있었다.

RSSI만을 이용한 삼각측량의 오차는 최대 3 m까지 발생하였고, 칼만 필터를 사용할 경우 일정 시점 이후부터 상당한 오차를 줄일 수 있었다.

본 연구에서 제시한 최대 허용 이동 거리인 MAMD를 이용할 경우 오차를 보다 더 줄일 수 있었고 또한 이동하는 태그의 위치정보를 충분히 탐색할 수 있었다.

최대 5개의 태그를 동시에 추적하였으며 각각의 오류는 1개의 태그를 추적하였을 때와 비교하여 큰 차이를 나타내지 않았다.

지하건설현장에서 개발한 시스템을 평가한 결과 움직임이 없는 경우 약 0.2 m 오차를 나타내었고, 움직임이 있는 경우 약 0.4 m의 오차가 발생하였으며, 현장에서 충분히 활용할 만한 결과를 나타내었다.

본 연구를 통해 제안된 위치추적 방법을 이용하여 지하건설공간에서 충분히 노무자의 위치이력을 탐색할 수 있었으며, 향후 유전자 알고리즘 등과 같은 최적화 알고리즘을 적용하여 보다 정밀한 위치 추적에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 가속도계 이외 타 센서를 연계하여 노무자의 행동 특성을 평가를 통한 안전 및 노무관리가 가능할 것으로 사료된다.



## 감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 국토교통 기술  
촉진연구사업(14CTAP-C078804-01)의 지원을 받아  
수행되었고 이에 감사드립니다.

## References

1. Kim, D.W., Moon, S.M., Cho, H., Kang, K.I. (2011), "An application of safety management for tunnel construction using RTLS technology", Korea Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 12, No. 2, pp. 12-20.
2. Park, J.S., Lim, S.B., Pyeon, M.W., Hong, T.M., Lee, B.K. (2009), "Experiment of propagation for development of the RTLS to the construction site", The Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography, Vol. 27, No. 4, pp. 505-513.
3. Lee, J.K., Lee, T.H., Byun, J.H., Noh, Y.J. (2013), "A basic study on the applicability of the RTLS technology to construction site based on CSS", Journal Of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 29, No. 5, pp. 61-68.
4. Lee, H.S., Lee, K.P., Park, M.S., Kim, H.S., Lee, S.B. (2009), "A construction safety management system based on Building Information Modeling and Real-time Locating System", Korea Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 10, No. 6, pp. 135-146.
5. Oksar, Irfan. (2014), "A bluetooth signal strength based indoor localization method", Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP), 2014 International Conference on IEEE.
6. Yoon, C.P., Hwang, C.G. (2015), "Efficient indoor positioning systems for indoor location-based service provider", J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng., Vol. 19, No. 6, pp. 1368-1373.
7. Kim, J.H., Joo, Y., Lee, S.G., Park, S.S., Seo, D.H. (2012), "Improvement of multilateration using vector prediction algorithm and kalman filter", The Korea Institute of Information and Communication Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 2792-2799.
8. Nho, A., Lee, W.J. (2010), "Accuracy evaluation of ZigBee's indoor localization algorithm", Korea Society for Internet Information, Vol. 11, pp. 27-43.
9. Yeom, J.N., Lee, G.B., Park, J.J., Cho, B.J. (2009), "Position estimation system of moving object using GPS and accelerometer", Journal of Korea Multimedia Society, Vol. 12, No. 4, pp. 600-607.
10. Kwon, S.R., Jung, K.J., Park, S.S., Kim, J.H., (2007), "RTLS technologic application for ubiquitous port management efficiency", Korea Information Science Society, Vol. 13, No. 6, pp. 371-377.