TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol. 26, No. 4, 2016, pp. 253-265
http://dx.doi.org/10.7474/TUS.2016.26.4.253
ISSN: 1225-1275(Print)
ISSN: 2287-1748(Online)

Reverse RFID 시스템을 이용한 지하광산에서의 장비 이동시간 측정

정지후, 최요순*

Collecting Travel Time Data of Mine Equipments in an Underground Mine using Reverse RFID Systems

Jihoo Jung, Yosoon Choi*

Abstract In this study, travel time data collection of mine equipments was conducted in an underground mine using a reverse Radio Frequency IDentification (RFID) system. In the reverse RFID system, RFID readers and antennas are mounted on mine equipments, and RFID tags are attached to the underground mine gallery. Indoor experiments were performed to analyze how RFID reader transmission power levels affect tag readable area and tag recognition rates. The results showed that travel time measurement become precise when the reader transmission power was reduced, however tag recognition rates were reduced. The field experiments indicated that setting the reader transmission power to 28 dBm maintained the tag recognition rate while minimizing the tracking location error. In addition, the results revealed that the reverse RFID system can be used successfully in an underground mine to collect the travel time data of haulage trucks.

Key words RFID system, Travel time, Transmission power, Tag recognition, Underground mine

초 록 본 연구에서는 reverse RFID 시스템을 이용하여 지하광산 현장에 투입되는 장비들의 이동시간을 측정하였다. Reverse RFID 시스템에서는 리더기와 안테나가 광산 장비에 탑재되며 태그는 지하광산의 갱도에 부착된다. 실내 모사실험을 통해 장비에 설치되는 RFID 리더기의 송출 전력 크기에 따라 상이하게 나타나는 태그 인식범위와 태그 인식률의 변화를 파악하였다. 그 결과 리더기의 송출 전력 크기가 작아질수록 태그 인식 범위가 좁아져 정밀한 이동시간 측정이 가능해졌으나, 태그 인식률은 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 현장실험 결과 본 연구에서 사용한 RFID 장비의 경우 송출 전력을 28 dBm으로 설정하는 것이 태그의 인식률을 유지하면서 측정오차를 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 현장 실험 결과를 통해 reverse RFID 시스템이 지하광산에서 운반 트럭의 이동시간 측정자료 수집을 위해 성공적으로 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

핵심어 무선식별시스템, 이동시간, 송출 전력, 태그 인식, 지하광산

1. 서 론

전 세계적으로 지표에 부존된 광상이 고갈되어감에 따라 광업계에서는 부존자원을 효율적으로 채굴하기 위한 노력을 기울이고 있다. 생산성을 향상시키기 위해 광산에 투입되는 장비들의 조합 및 성능을 최적화하여 효율적인 생산 공정을 설계하기 위한 프로그램들이 개발되어 활용되고 있으며, 특히 전체 채광비용에서 상당 부분을 차지하는 운반 작업공정의 비용을 절감하기 위한 연구들이 활발히 수행되고 있다.

최근까지 국내외 많은 연구자들이 광산 장비들의 이동시간 측정자료를 이용하여 장비의 조합, 작업순서, 배차방식, 이동경로 등을 최적화하기 위한 연구를 수행하였다(Blackwell, 1999, Alarie and Gamache, 2002, Oraee and Asi, 2004, Yan and Lai, 2007, Zhang, 2008, Choi et al., 2009, Choi, 2011, Choi and Nieto, 2011a, Choi and Nieto, 2011b, Park et al., 2014, Park and Choi,

Received: Jun. 24, 2016
Revised: July 18, 2016
Accepted: July 21, 2016
***Corresponding Author:** Yosoon Choi
Tel) +82516296562, Fax) +82516296553
E-Mail) energy@pknu.ac.kr; yspower7@gmail.com
Dept. of Energy Resources Engineering, Pukyong National University, 45 Youso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Korea

2015). Ercelebi와 Bascetin(2009)은 노천광산의 운반 작업 공정에 투입되는 장비들의 작업 대기시간을 측정하여 운반장비의 수에 따른 적재장비의 가동율, 광석 생산량, 수익률 등을 분석하였고, 투입되는 장비의 수와 조합을 최적화할 수 있는 모델을 제시하였다. Park과 Choi(2013)는 실제 광산현장에서 측정한 장비들의 단위작업 시간을 입력자료로 활용하여, 지하광산에 투입해야할 최적의 장비의 숫자와 하루 생산량을 계산할 수 있는 지하광산 운반시스템 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 또한, Park 등(2015)은 지하광산 현장에서 운반작업을 수행하는 덤프트럭의 이동시간 측정결과를 활용하여 광석 운반과정에서 발생하는 탄소배출량을 정량적으로 산정하는 방법을 제시하였다. 그러나 기존의 연구에서는 장비의 이동시간 측정을 위해 주로 스톱워치를 이용하였기 때문에, 이동시간 측정자료의 정확도가 떨어지는 단점이 있었다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 최근 광업분야에 도입되고 있는 정보통신기술 중의 하나인 무선식별(Radio Frequency IDentification, RFID) 시스템을 활용하여 광산 장비들의 이동시간을 객관적으로 측정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

RFID 시스템은 무선주파수와 전자 칩을 이용하여 대상물을 식별할 수 있는 기술로서 사물의 고유정보를 저장할 수 있는 태그(tag)와 태그 정보를 인식할 수 있는 리더기(reader), 리더기의 전기신호를 무선주파수로 변환해주는 안테나(antenna)로 구성된다. 또한, 국제 표준으로 권고되고 있는 RFID 주파수는 고주파 대역(13.56 MHz), 극초단파 대역(400MHz, 900MHz), 마이크로파 대역(2.4 GHz)으로 구분할 수 있다(Preradovic et al., 2009). RFID 시스템은 리더기와 태그가 직접적인 접촉 없어도 원거리에서 서로 정보를 교환할 수 있으며, 한 대의 리더기가 다수의 태그들을 동시에 인식할 수 있다는 장점이 있기 때문에 현재 물류, 교통, 건설 등 다양한 산업 분야에서 광범위하게 활용되고 있다(Sezaki and Konomi, 2006).

광업계에 도입되고 있는 RFID 기술은 주로 광산 안전관리, 물류시스템 개선 등을 위해 활용되고 있다. 대표적인 사례로서 호주 Dendrobium 석탄광산에서는 2003년 광산장비와 작업자의 위치추적을 위해 RFID 시스템을 도입하였다. 지하광산의 주요 지점마다 RFID 리더기와 안테나를 설치하였고, 이들 지점들을 지나가는 장비와 작업자들에 부착된 태그를 인식하여 현장의 작업상황을 스크린을 통해 실시간으로 확인할 수 있었다(Swedberg, 2011). Mishra 등(2012)은 RFID 시스템을 활용하여 광산에서 발파작업에 이용되는 화약류의 체계적인 관리방법을 제시하였다. Chae와 Yoshida(2010)는 RFID 기반의 중장비 충돌 방지 시스템을 개발하였다. 중장비에는 무선 LAN이 내장된 리더기, 태그, 경고알림시스템이 설치되었다. 중장비들이 서로 접근하게 되면 경고음이 울리게 되고, 태그 정보들은 에드혹 네트워크(ad-hoc network)를 통해 관리서버로 전송되어, 관리자는 전체적인 작업관리를 할 수 있었다.

RFID 시스템은 설치방법에 따라 크게 두 가지 유형으로 구분할 수 있다(Lionel et al., 2011, Mishra et al., 2014). Tag-based RFID시스템은 리더기를 적용 공간에 위치시키고, 인식하고자 하는 타겟(target)에 태그를 부착하는 방법이다. 반면 reader-based RFID(reverse RFID)시스템은 태그를 적용공간에 설치하고, 인식하고자 하는 타겟에 리더기를 부착하는 방법이다. Tag-based RFID의 장점은 다양한 태그 배치법 및 데이터 처리 방법이 개발되어 있기 때문에 태그 정보를 이용하여 비교적 신뢰도가 높은 결과물을 얻을 수 있다. 반면 전력 및 통신망을 구축해야하고 고가의 리더기를 많이 설치해야하기 때문에 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 따라서 Tag-based RFID 시스템은 한정적인 공간 내에 인식하고자 하는 타겟이 많은 경우에 적합하다. Reverse RFID의 경우 저가의 태그 가격으로 인해 필요한 만큼 태그를 설치할 수 있고, 전력 및 통신망 설치 없이도 시스템을 작동시킬 수 있다. 또한 공간 내에 태그가 부착되기 때문에 지하광산과 같이 습기나 먼지가 많은 극한 환경에서도 사용이 가능하다. 반면 리더기를 부착한 타겟들이 접근하는 경우 전파 간섭현상이 심해지며, 인식하고자하는 타겟의 숫자에 비례하여 리더기가 필요하다는 단점이 있다. 따라서 넓은 공간에서 인식하고자 하는 타겟의 수가 적은 경우에 적합한 기술이다. 지하광산의 경우 점점 자동화 및 기계화가 진행되어 가는 추세이기 때문에 작업공간에 비해 갱내에서 운행되는 장비의 숫자가 작다. 따라서 reverse RFID 시스템을 활용하면 갱내 전력 및 통신망 설치 없이 장비의 이동시간 측정이나 위치추적과 같은 작업을 수행할 수 있을 것이라 판단된다.

다양한 산업분야에서 reverse RFID 시스템을 활용하기 위한 연구들이 수행되었다. Defazio 등(2011)은 reverse RFID 시스템을 적용하여 실내 위치 추적시스템을 개발하였다. 태그가 설치된 공간에 휴대용 리더기를 소지한 사람이 들어가게 되면, 단말기 화면을 통해 본인의 위치를 실시간으로 확인할 수 있었다. Vivec(2012)은 reverse RFID 시스템을 활용하여 버스 도착 알림 시스템을 개발하였다. 태그는 버스 노선 주요지점에 부착되었고, 리더기와 무선 모뎀은 버스 내부에 설치되었다. 버스가 지나가면서 인식한 태그의 좌표 및 시간정보는 무선모뎀

을 통해 서버로 실시간 전송되고, 서버로부터 각 버스 정거장마다 설치된 안테나로 전송된 태그 정보는 LED 화면을 통해 확인할 수 있었다. 그러나 광업 분야에서는 reverse RFID 시스템과 관련한 연구가 거의 수행되지 않았다.

본 연구의 목적은 reverse RFID 시스템을 이용하여 지하광산 현장에 투입되는 장비의 이동시간을 정량적으로 측정하는 것이다. 먼저 리더기 송출 전력에 따라 상이하게 나타나는 태그 인식 범위(readable area)와 태그 인식률의 변화를 파악하기 위해 지하광산 갱도 환경을 모사한 실내 실험장에 태그를 설치하고 리더기와 안테나가 부착된 무인 자율주행 자동차를 투입하여 리더기 송출 전력 크기에 따른 태그 인식 범위와 인식률을 비교하는 실험을 수행할 것이다. 다음으로 국내 석회석 지하광산을 연구지역으로 설정하여, 지하광산 갱도 주요 지점에 태그를 부착하고 실제 광석 운반작업에 투입되고 있는 15톤 덤프트럭에 리더기와 안테나를 설치하여 덤프트럭의 이동시간과 태그 인식률을 측정한 후, 그 결과를 논문에 제시하고자 한다.

2. 연구 장비

본 연구에서는 reverse RFID 시스템 구성을 위해 미국 Alien사의 ALR-9900^{+} 리더기, MT-92 안테나, ALN-9629 수동형 태그를 사용하였다(Fig. 1). 이 장비들은 전 세계 RFID 네트워크의 구성요소에 대한 국제표준인 EPC Global, International Electrotechnical Commission (IEC) 등의 인증을 획득한 장비로서 전 세계적으로 광범위하게 활용되고 있다. ALR-9900^{+} 리더기는 안테나로 송출되는 전력의 크기를 32-1000 mW 범위에서 제어할 수 있으며 리더기 한 대당 최대 네 개의 안테나를 연결할 수 있다. 안테나 포트별로 송출되는 전력의 크기를 각기 다르게 설정할 수 있어 전파 간섭 및 태그 인식 오류 문제를 최소화할 수 있다. 또한, 태그 데이터를 자동으로 수집하고 모니터링 할 수 있으며 네트워크 상의 여러 대의 리더기가 보내는 데이터를 하나의 호스트 컴퓨터를 운용하여 처리할 수 있다.

MT-92 안테나는 902-928 MHz ISM(Industrial Scientific Medical-band) 주파수 대역에서 최적화되어 있으며, 안테나 편파(전자기파의 진행방향에 대한 전기장의 극성 방향)는 원형타입(circular polarization)이다. 안테나 이득(입력받은 전력을 이용하여 특정 방향으로 전파를 모아서 보낼 수 있는 기능)은 최대 6 dBi이며, 입력 임피던스(input impedance)는 50 ohm이다. ALN-9629 수동형 태그는 별도의 전원 공급이 필요 없으며, 온도나 습도 변화가 큰 환경에서도 반영구적으로 사용이 가능하다. Table 1은 본 연구에서 사용된 장비의 상세 제원을 보여준다.

3. 실내 모사 실험

본 연구에서는 현장실험에 앞서 지하광산 갱도 환경에 대한 실내 모사실험을 통해 reverse RFID 시스템의 리더기 송출 전력과 장비 이동속도에 따른 태그 인식 범위 및 태그 인식률을 관계를 분석하였다. 태그 인식 범위는 리더기가 설치된 무인 자율주행 자동차가 이동하면서 태그를 처음 인식한 시간과 마지막으로 인식한 시간의 차이에 무인 자동차의 속도를 곱해서 계산한 오차거리를 이용하여 비교하였다. 만약 리더기의 태그 인식 범위가 좁을 경우 무인자율 자동차가 이동하면서 태그 설치 지점과 가까운 위치에서 태그를 인식하게 되어 오차거리가 작게 계산될 것이고, 태그 인식 범위가 넓

Fig. 1. Views of the ALR-9900^{+} RFID reader, MT-92 antenna and ALN-9629 passive tags used in this study

Table 1. Specifications of the ALR-9900 RFID^{+} reader, MT-92 antenna and ALN-9629 passive tags (http://www.alienasia.com/index.php)

Model	Properties
Alien ALR-9900+ (Reader)	- Frequency: 902-928 MHz - Transmit Channels: 50 - Channel Spacing: 500 KHz - Communications: LAN TCPI/IP, RS-232(Serial) - RF Power Capability: 31.6 dBm, 4watts EIRP - Supported RFID Tag Protocols: EPC Generation 2: ISO 18000-6C
Alien MT-32 (Antenna)	- Frequency: 902 MHz-928 MHz - Input Impendence: 50 ohm - Polarization: Circular Type - Antenna gain: Maximum 6 dBi - Beam Width(3 dB): 70 degrees - Size: 213 mm × 213 mm -Weight: 405 g
ALN-9629 (Tag)	-Operating Frequency: 840-960 MHz - Total memory: 512 bits - Maximum EPC memory: 128 bits - Maximum user memory: 128 bits - Unique TID code : 64 bits - Sensitivity: -18.5 dBm - Read range: 11 m (normal environment)

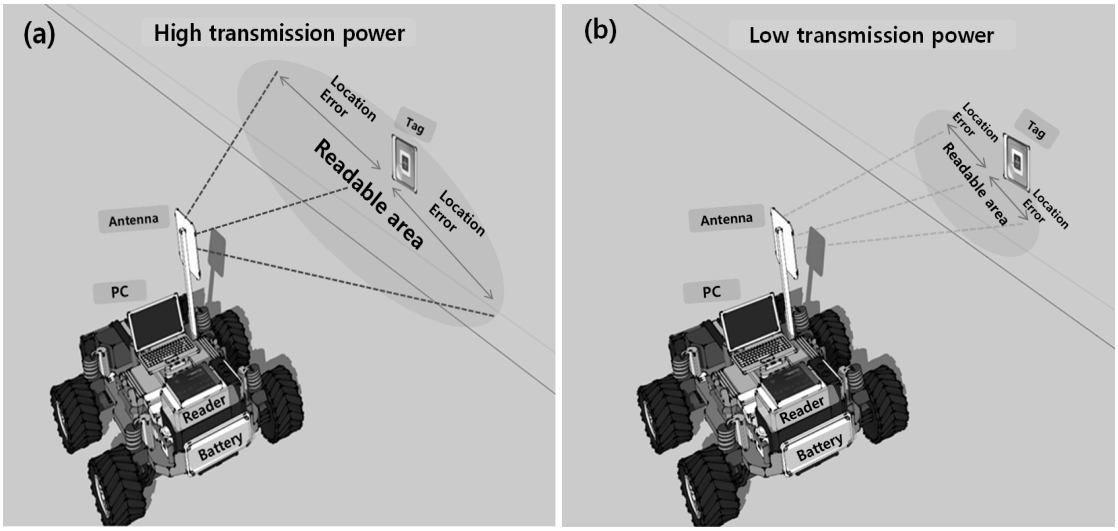


Fig. 2. Comparison of reverse RFID systems for collecting travel time data when the reader antennas have (a) high and (b) low transmission powers

을 경우에는 큰 오차거리를 가질 것이라 가정하였다 (Fig. 2). 이를 위해 본 연구에서는 리더기 송출 전력을 제어하여 태그 인식 범위를 조정하였다.

3.1 실내 실험장 구성

실내 실험장은 가로폭 2.5 m, 높이 2.6 m, 총 길이 25.0 m 규격의 공간에 설계하였다. 실내 실험장에 ALN-9629 수동형 태그 네 개를 6 m 간격으로 부착하였고, 무인 자율자동차에는ALR-9900^{+} 리더기, 시스템을 제

어하는 PC, 전력을 공급하는 배터리를 설치하였다. 한국의 석회석 지하광산에서 주로 사용되고 있는 갱도 규격(높이: 7.0 m)과 15톤 덤프트럭 운전석 창문에 RFID 리더기가 부착되는 위치(높이: 2.5 m)를 고려하여, 이를 약 2.7:1 비율로 축소 모사할 수 있도록 리더기에 연결된 안테나를 무인 자율주행 자동차의 0.9 m 높이에 설치하였다. 태그는 리더기 안테나와 정면으로 마주볼 수 있도록 안테나가 설치된 높이와 동일한 0.9 m 지점에 부착하였다. Fig. 3은 실내 실험장의 모식도를 보여준다.

3.2 실내 실험방법

태그가 설치된 실내 실험장에 reverse RFID 시스템이 설치된 무인 자율주행 자동차를 투입하여 리더기의 송출 전력 크기에 따라 상이하게 나타나는 오차거리와 태그 인식률을 측정하였다. 리더기의 송출 전력의 크기는 최대치인 30 dBm(decibels above 1 milliwatt)에서 2 dBm 단위로 감소시키면서 총 5가지 경우(30 dBm, 28 dBm, 26 dBm, 24 dBm, 22 dBm)로 설정하였다. 최소치를 22 dBm으로 설정한 이유는 22 dBm보다 출력이 작을 경우에는 안테나에서 방사되는 전파 세기가 약하기 때문에 태그가 제대로 인식되지 않을 가능성이 높기 때문이다. 여기서 사용된 dBm 단위는 전기 통신에서 사용되는 전력의 절대 측정 단위로서 0 dBm이 1 mW에 상응하며, Eq. (1)를 이용하여 와트 단위를 데시벨 단위로 환산할 수 있다. 데시벨 단위를 쓰는 이유는 전기 통신에서 변동이 큰 전파 감쇄나 증폭의 정도를 상용 로그식을 통해 간단히 나타내기 위함이다.

$$10\log(input\,power_{(mw)}/1mw) = dBm \quad (1)$$

무인 자율주행 자동차의 이동속도는 총 4가지(0.5 m/s, 1.0 m/s, 1.5 m/s, 2.0 m/s)로 설정하였으며, 속도별로 각각 3회씩 반복 운행하여 리더기가 이동하면서 인식한 각 태그의 인식 시간과 그 시간 동안 인식된 횟수를 측정하였다. 각 실험 조건별로 차량을 3회씩 운행한 결과 4개의 태그로부터 총 12개의 태그 인식시간 및 인식횟수 데이터를 얻을 수 있었다. 태그 인식 범위를 비교하기 위해 각 실험에서 태그가 처음 인식된 시간과 마지막으로 인식된 시간의 차이에 무인자동차 속도를 곱하여 오차거리를 계산하였고, 태그 인식횟수를 이용하여 태그 인식률을 계산하였다. 태그 인식률은 무인 자율주행 자동차가 태그 옆을 지나갈 때 한 번이라도 인식되었으면 성공, 인식되지 않았으면 실패한 것으로 간주하여 총 12회의 실험 결과중 성공한 횟수의 비율을 백분율로 나타내었다.

3.3 실내 실험결과 및 해석

Reverse RFID시스템이 설치된 무인 자율주행자동차를 투입하여 5가지 경우의 리더기 송출 전력 크기와 4가지 경우의 이동속도에 따른 오차거리, 태그 인식횟수, 태그 인식률을 측정한 결과를 Table 2에 제시하였다. 제시된 결괏값은 조건별로 얻은 총 12회의 데이터 값들을 평균한 것이다. 리더기 송출 전력이 30 dBm일 때, 0.5 m/s로 이동한 무인 자율주행 자동차의 오차거리는 2.6 m, 인식횟수는 28회, 인식률은 100%로 측정되었다. 리더기의 송출 전력이 22 dBm, 무인 자율주행 자동차의 이동속도가 0.5 m/s인 경우에는 오차거리가 1.2 m 인식횟수는 13회, 인식률은 100%로 나타났다. 리더기의 송출 전력이 최소치인 22 dBm인 경우 최대치인 30 dBm이었을 때와 비교하면 오차거리가 줄어들고 인식횟수는 낮아진 것을 확인할 수 있다. 오차거리가 줄어든 것은 리더기의 태그 인식범위가 좁아진 것을 나타내고, 태그가 설치된 지점에서 좌우로 보다 가까운 위치에서 태그가 인식되었음을 의미한다. 따라서 리더기의 송출 전력이 작아질수록 정밀한 이동시간 측정 결과를 얻을 확률이 높아진다는 것을 알 수 있다.

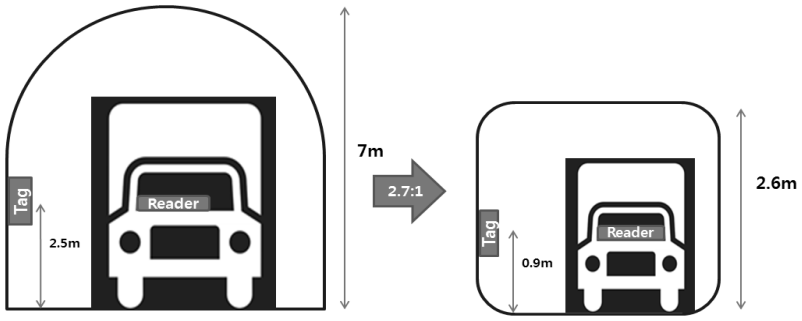
Fig. 4는 reverse RFID시스템이 설치된 무인 자율주행 자동차를 운행하여 얻은 실험결과를 그래프로 표현한 것이다. 리더기의 송출 전력 크기가 작아질수록 무인 자율주행 자동차의 이동속도와 관계없이 오차거리와 태그 인식횟수의 수치가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 또한 리더기의 송출 전력이 같을 경우 무인 자율주행 자동차의 이동속도가 빨라질수록 태그의 인식횟수는 줄어들었지만, 오차거리에는 큰 변화가 없는 것을 확인할 수 있었다.

4. 현장 실험

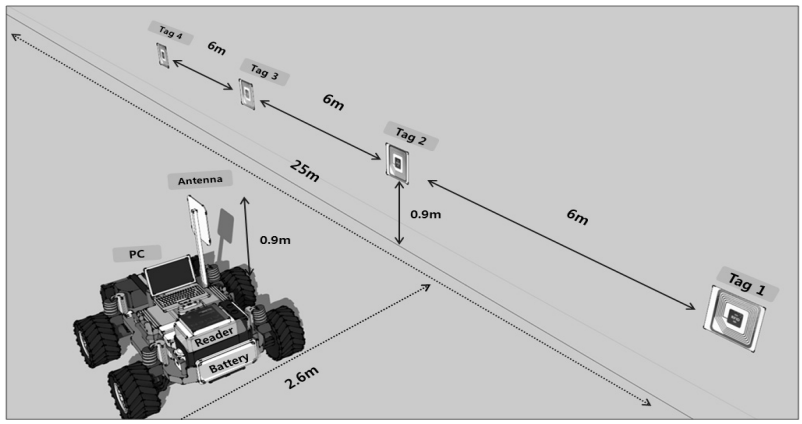
4.1 연구지역

본 연구에서는 ㈜대성MDI에서 운영하고 있는 동해사업소 대평지구를 현장 검증 실험을 위한 장소로 선정하였다. 이 광산은 대한민국 강원도 삼척시 신기면 대평리에 위치하고 있으며 고품위 석회석이 풍부하게 매장되어 있다. 이곳에서 생산되는 석회석은 내구성, 보강성, 균일성 등이 우수하여 주로 제철 및 제강용으로 사용되고 있으며, 연간 약 150만 톤 가량의 석회석 광석이 생산되고 있다.

갱내에서 채굴된 석회석 원석은 덤프트럭을 통해 파쇄장으로 운반되며 두 차례의 선광과정을 거쳐 완제품으로 출하된다. 현장에서는 3곳의 채굴적에서 석회석 광석이 채광되고 있으며(470, 540, 590갱), 15톤 덤프



(a)



(b)

(c)

Fig. 3. Design of indoor experimental area. (a) Sectional view. (b) 3D view. (c) Photo

Table 2. Experimental data measured by the reverse RFID system with an autonomous car

Velocity \ Attenuation		30 dBm	28 dBm	26 dBm	24 dBm	22 dBm
0.5 m/s	Location error (m)	2.6	2.3	2.1	1.9	1.2
	Tag recognition count	28	26	23	15	13
	Tag recognition success rate (%)	100	100	100	100	100
1.0 m/s	Location error (m)	2.6	2.1	2.1	1.9	1.5
	Tag recognition count	27	21	20	13	11
	Tag recognition success rate (%)	100	100	100	100	100
1.5 m/s	Location error (m)	2.2	2.1	1.7	1.5	1.2
	Tag recognition count	21	18	14	12	9
	Tag recognition success rate (%)	100	100	100	100	100
2.0 m/s	Location error (m)	2.6	2.2	1.8	1.8	1.4
	Tag recognition count	17	14	13	13	8
	Tag recognition success rate (%)	100	100	100	100	100

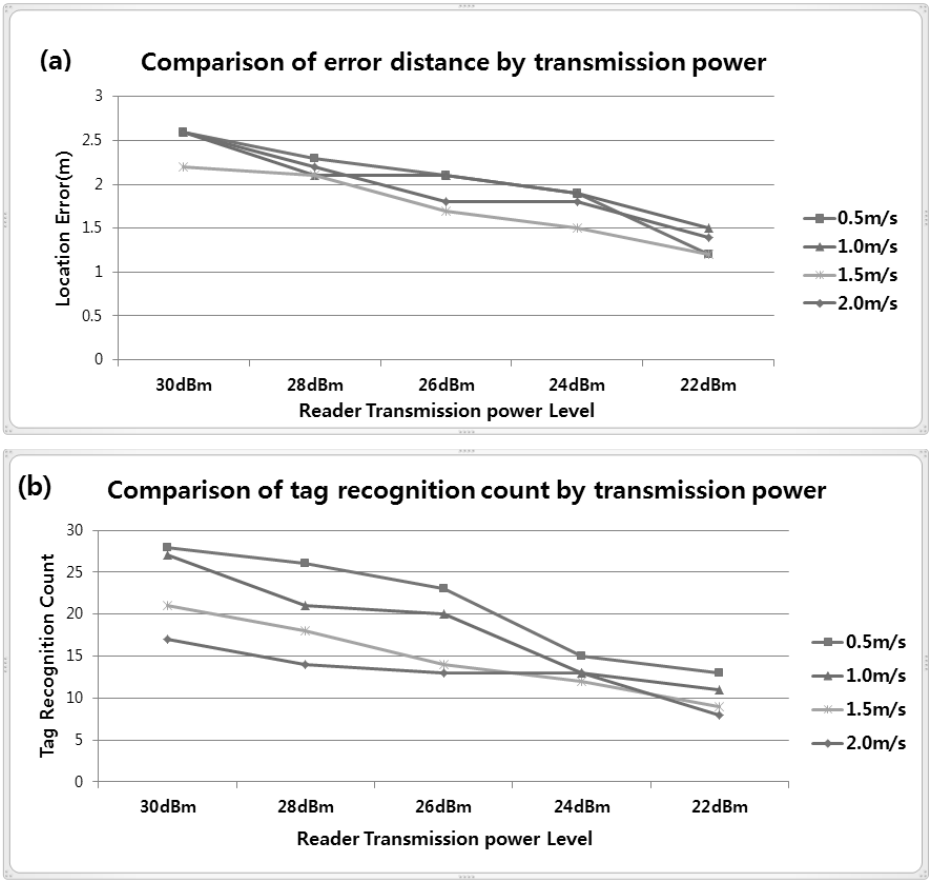


Fig. 4. Experimental results for a autonomous car equipped with the reverse RFID system

트럭에 적재되어 갱도 밖에 위치한 파쇄장으로 운반된다. 각 작업지점에 투입되는 덤프트럭들은 지정된 적재지점과 파쇄장을 왕복하는 방식으로 광석을 운반하고 있으며, 주로 광석이 적재되는 지점과 좁은 갱도 내의 차량이 마주치는 지점에서 차량 대기시간이 발생하게 된다.

본 연구에서는 reverse RFID 시스템을 적용하여 지하광산에서 운행되는 덤프트럭의 이동시간을 측정하기 위해, 실제 작업현장에 투입되는 15톤 덤프트럭에 reverse RFID 시스템을 설치하여 적재지점과 파쇄장을 왕복하는 덤프트럭의 이동시간을 정량적으로 측정하였다.

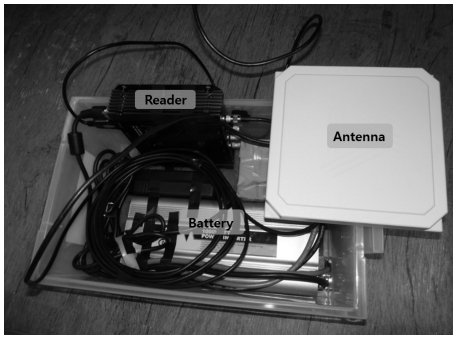


Fig. 5. View of the reverse RFID system used in this study

4.2 사전 테스트

실내 실험장에서는 리더기의 송출 전력이 30 dBm에서 22 dBm으로 작아짐에 따라 오차거리가 줄어들어 정밀한 이동시간 측정 결과를 얻을 가능성이 높아지는 것으로 나타났다. 인식횟수 또한 리더기 송출 전력 감쇄량에 비례하여 줄어들었지만 인식률은 모두 100%로 측정되어 실내 실험에서의 최적의 리더기 송출 전력은 22 dBm으로 나타났다. 그러나 실내 실험장과 실제 지하광산 현장은 장소 규격 및 환경이 다르기 때문에 태그 인식의 결과도 다르게 나타나게 된다. 따라서 현장 실험을 통해 실제 광산 현장에 적합한 리더기의 송출 전력으로 설정할 필요가 있다. 연구지역에 최적화된 리더기의 송출 전력으로 설정하기 위해, 2016년 2월 현장을 방문하여 실제 운반작업에 사용되는 15톤 덤프트럭에 reverse RFID 시스템을 설치하여 사전테스트를 수행하였다.

덤프트럭에 설치되는 reverse RFID 시스템은 ALR-9900^{+} 리더기, MT-92 안테나, 배터리, 노트북으로 구성되며 (Fig. 5), 전파를 방사시키는 안테나는 덤프트럭 오른쪽에 위치한 조수석 창문에 고정시켰다(Fig. 6). 연구지역 지하 광산의 규격은 높이 7 m, 넓이 10 m이며, 태그는 지하 광산 갱도 내에 10 m간격으로 2.5 m 높이(15톤 덤프트럭 운전석 창문에 안테나가 설치되는 지점)에 부착하였다. 덤프트럭은 광산 규정에 따라 평균 30 km/h 속도로 운행되었고, 리더기의 송출 전력의 크기는 최대치인 30 dBm에서 2 dBm 단위로 감소시키면서 총 4가지 경우(30 dBm, 28 dBm, 26 dBm, 24 dBm)로 설정하였다. 각 실험 조건별로 오차거리와 인식률을 3회씩 측정하여 계산한 평균값을 Table 3에 제시하였다.

리더기의 송출 전력이 28 dBm일 때, 태그 1이 설치된 지점을 평균 30 km/h로 이동한 덤프트럭의 오차거리는 2.6 m, 인식횟수는 5.3회, 인식률은 100%로 측정되었고, 태그 2가 설치된 지점을 통과할 때 오차거리는 2.7 m, 인식횟수 4.3회, 인식률은 100%로 분석되었다. 실내 실험 결과와 유사하게 리더기의 송출 전력이 낮아짐에 따라 오차거리가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그러나 인식횟수와 인식률의 경우 실내 실험결과에 비

Fig. 6. Reverse RFID system mounted on dump trucks in the study area

Table 3. Pre-test data measured by the reverse RFID system in the study area

Tags \ Attenuation		30 dBm	28 dBm	26 dBm	24 dBm
Tag1	Location Error (m)	3.4	2.6	1.1	Fail
	Tag recognition count	7.5	5.3	1.5	Fail
	Tag recognition success rate (%)	100%	100%	33.3%	0%
Tag2	Location Error (m)	2.8	2.7	2.5	0.6
	Tag recognition count	6.3	4.3	2	1.5
	Tag recognition success rate (%)	100%	100%	66.6%	33.3%

해 크게 떨어져 리더기의 송출전력을 28 dBm보다 낮게 설정했을 때는 태그를 인식하지 못하는 경우가 다수 발생하였다. 이러한 결과의 원인은 지하광산의 경우 거친 갱내 벽면에 의해 전파의 회절이나 산란이 잘 발생하고, 금속으로 이루어진 중장비나 각종 장애물에 의해 주파수 신호 손실이 증가하여 신호 전달이 원활하기 않기 때문인 것으로 추정된다. 또한 실내 공간에 비해 상대적으로 먼 리더기와 태그 거리 때문에 전파 감쇄현상이 심해지고, reverse RFID 시스템을 설치하고 이동하는 차량의 빠른 속도로 인해 태그 인식률이 떨어진 것으로 추정된다. 따라서 리더기 송출 전력을 28dBm으로 설정하는 것이 광산 현장에서 인식률 100%를 유지하면서 정밀한 이동시간 측정 결과를 얻을 확률이 높아지는 것으로 판단된다.

4.3 트럭 이동시간 자료 수집

광석 운반작업을 위해 투입되는 15톤 덤프트럭에 reverse RFID 시스템을 설치하여 현장 테스트를 수행하였다. 덤프트럭에 탑승하여 오전 작업 시간 동안(오전 9시부터 12시까지) 3회의 왕복 운행 시간을 측정하였다. Fig. 7

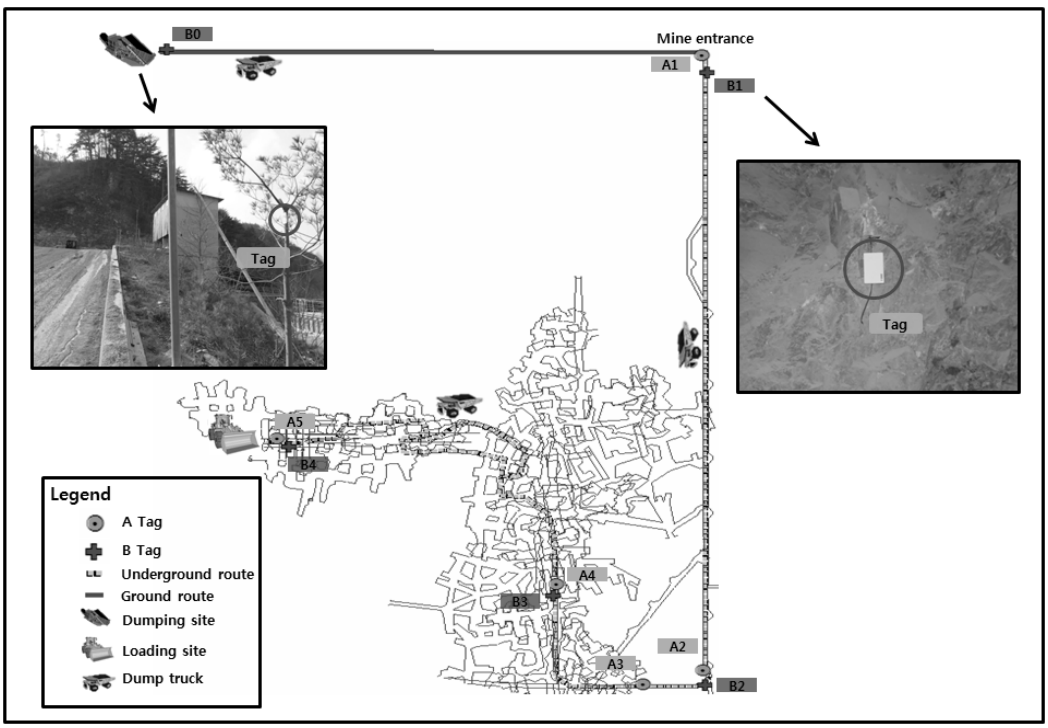


Fig. 7. Mine map showing the positions of RFID tags installed in the study area

Table 4. Field experimental data measured by the reverse RFID systems in the study area

Tags (Mine entrance → Loading point)		1st	2nd	3rd	Tags (Loading point → Mine entrance)		1st	2nd	3rd
A1	Tag recognition time (in)	09:19:08.1 AM	10:11:53.4 AM	11:01:36.5 AM	B4	Tag recognition time (in)	09:44:25.2 AM	10:36:12.6 AM	11:20:28.1 AM
	Tag recognition time (out)	09:19:08.5 AM	10:11:53.7 AM	11:01:36.8 AM		Tag recognition time (out)	09:44:25.6 AM	10:36:12.9 AM	11:20:28.4 AM
	Tag recognition count	7	5	4		Tag recognition count	14	12	11
A2	Tag recognition time (in)	09:26:59.6 AM	10:16:16.9 AM	11:06:12.4 AM	B3	Tag recognition time (in)	09:49:00.8 AM	10:41:13.0 AM	11:24:06.4 AM
	Tag recognition time (out)	09:27:00.1 AM	10:16:17.0 AM	11:06:12.6 AM		Tag recognition time (out)	09:49:01.5 AM	10:41:13.2 AM	11:24:07.0 AM
	Tag recognition count	5	3	3		Tag recognition count	7	4	8
A3	Tag recognition time (in)	09:27:35.0 AM	10:16:57.8 AM	11:06:38.6 AM	B2	Tag recognition time (in)	09:52:24.7 AM	10:44:02.0 AM	11:27:23.3 AM
	Tag recognition time (out)	09:27:35.3 AM	10:16:58.6 AM	11:06:39.0 AM		Tag recognition time (out)	09:52:25.0 AM	10:44:02.2 AM	11:27:23.8 AM
	Tag recognition count	5	7	5		Tag recognition count	5	4	9
A4	Tag recognition time (in)	09:29:18.3 AM	10:20:20.3 AM	11:09:23.7 AM	B1	Tag recognition time (in)	09:59:30.0 AM	10:50:00.6 AM	11:34:34.0 AM
	Tag recognition time (out)	09:29:18.5 AM	10:20:20.7 AM	11:09:24.2 AM		Tag recognition time (out)	09:59:30.2 AM	10:50:00.9 AM	11:34:34.3 AM
	Tag recognition count	6	5	7		Tag recognition count	4	4	3
A5	Tag recognition time (in)	09:32:42.5 AM	10:24:33.5 AM	11:12:32.3 AM	B0	Tag recognition time (in)	10:07:31.8 AM	10:56:25.6 AM	11:42:25.9 AM
	Tag recognition time (out)	09:32:42.8 AM	10:24:33.8 AM	11:12:32.5 AM		Tag recognition time (out)	10:07:32.2 AM	10:56:26.3 AM	11:42:26.6 AM
	Tag recognition count	7	8	6		Tag recognition count	8	12	9
Total travel time							48:23.7	44.32.6	40:49.2

은 태그의 위치를 나타낸 광산 도면이며, 광산 주요지점과 갱내에 태그가 설치된 모습을 보여준다. 사전 테스트 결과에 따라 리더기의 송출 전력은 28 dBm으로 설정하였으며, 덤프트럭은 광산 규정에 따라 평균 30 km/h 이하의 속도로 운행 되었다. 덤프트럭은 광산 입구를 통과하여 갱내 교차로를 지나 적재지점에 정차하여 광석을 적재한 뒤, 다시 교차로와 광산입구를 지나 광산 밖에 위치한 파쇄장으로 향하는 코스를 반복해서 운행하게 된다.

본 연구에서는 공차상태로 광산 입구를 통과할 때를 시작 시점으로 설정하고 광석을 적재한 뒤 광산 밖에 위치한 파쇄장에 도착할 때를 종료 시점으로 설정하여 광산입구에서 파쇄장까지를 1회 운행으로 설정하였다. 지하갱도 한쪽 벽면에는 A1, A2, A3, A4, A5의 아이디가 입력된 태그가 부착하였고, 반대쪽 벽면에는 B0, B1, B2, B3, B4의 아이디가 입력된 태그가 부착되었다. 덤프트럭이 공차상태로 광산입구에서 적재지점까지 이동할 때는 A1-A5 태그가 인식되고, 적재지점에서 광석을 적재하고 광산입구 방향으로 돌아올 때는 B4-B1 태그가 인식된다. 파쇄장의 경우 광산 외부에 위치하기 때문에 B0의 아이디를 입력한 태그를 부착하였다. 따라서 덤프트럭이 광산입구에서부터 파쇄장까지 1회 운행하면 A1-A2-A3-A4-A5-B4-B3-B2-B1-B0의 순서로 태그가 인식되게 된다. 덤프트럭이 태그가 설치된 지점을 지나가면서 태그를 인식한 시간, 태그 인식횟수, 1회 운행 동안 소요된 총 운행시간은 Table 4에 제시하였다.

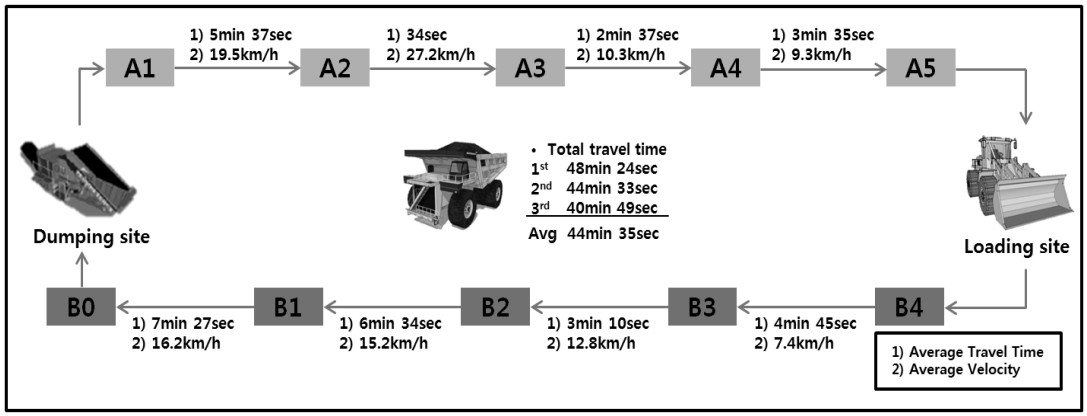


Fig. 8. Analysis of travel time data collected by the reverse RFID systems in the study area

Reverse RFID 시스템이 설치된 덤프트럭이 첫 번째 운행에서 A1 태그가 설치된 광산입구지점을 통과할 때의 시간은 오전 9시19분08초로 기록되었다. 이때, A1 태그가 처음 인식된 시간(in)과 마지막에 인식된 시간(out)의 차이는 약 0.4초이며, 0.4초 동안 태그가 인식된 횟수는 7회로 측정되었다. 교차로 지점인 A2, A3, A4 태그가 부착된 지점을 지나 적재지점인 A5 태그가 부착된 지점을 통과할 때의 시간은 9시 32분 42초로 기록되었고, 적재작업을 마친 후, 적재지점을 빠져나갈 때 B4 태그가 인식된 시간은 9시 44분 25초로 측정되었다. 따라서 A5와 B4 태그가 인식된 시간의 차이인 약 11분 43초는 적재지점에서 덤프트럭에 광석을 적재하는 데 걸린 시간이 된다. 광석을 적재한 덤프트럭이 B3, B2 태그가 부착된 지점을 지나 광산 입구에 설치된 B1 태그를 인식한 시간은 9시 59분 30초이며, 지하광산 밖에 위치한 파쇄장에 도착하여 B0 태그를 인식한 시간은 10시 7분 32초로 기록되었다. 덤프트럭이 첫 번째 운행에서 공차상태로 광산입구를 통과하여 적재지점에서 광석을 적재하고 최종 목적지인 파쇄장까지 1회 운행하는데 걸린 총 시간은 A1 태그가 인식된 시간(9시 19분 8초)과 B0 태그가 인식된 시간(10시 7분 32초)의 차이인 약 48분 24초 가량으로 측정되었다. 첫 번째 운행과 마찬가지로 두 번째, 세 번째 운행에서 태그가 설치된 주요지점을 통과할 때의 시간은 Table 4에서 확인할 수 있으며, 1회 운행하는데 걸린 총 시간은 두 번째 운행에서는 44분 33초, 세 번째 운행에서는 40분 49초로 측정되었다.

Fig. 8은 reverse RFID시스템을 설치한 덤프트럭이 태그가 설치된 각 지점 사이를 지나갈 때 걸린 시간과 속도를 보여준다. 구간별로 소요된 시간과 속도는 3회의 운행동안 획득한 데이터들의 평균값이며, 속도는 각 구간 사이의 거리를 소요된 시간으로 나누어서 계산하였다. 공차상태로 적재지점으로 향하는 A1~A5 태그가 설치된 구간과 적재지점에서 광석을 적재하고 실차상태로 파쇄장으로 향하는 B4~B1 태그가 설치된 구간에서 소요된 시간과 속도를 비교해보면, 공차상태로 적재지점으로 향할 때 더 빠른 속도로 이동하여 소요된 시간이 적은 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 reverse RFID 시스템을 적용하여 실제 광산현장에서 운반작업에 투입되는 덤프트럭의 이동시간을 정량적으로 측정하였다. 실내 모사실험을 통해, 운행 장비에 설치되는 리더기의 송출 전력 크기에 따라 달라지는 태그 인식 범위와 태그 인식률의 변화양상을 파악하였고, 그 결과 리더기의 송출 전력이 작아질수록 정밀한 이동시간 측정 결과를 얻을 확률이 높아지는 것으로 분석되었다. 그러나 리더기 송출 전력 감쇄량에 비례하여 태그 인식률 또한 떨어지기 때문에 적용 장소에서의 현장 실험을 통해 그 현장에 맞는 출력으로 조정할 필요가 있었다. 따라서 연구지역에서 사전 테스트를 수행하였고, 그 결과 연구지역 지하광산 현장에서는 송출 전력을 28 dBm으로 설정하는 것이 적합한 것으로 분석되었다.

연구지역 지하광산 주요지점에 태그를 부착하고, 광석 운반작업에 투입되는 15톤 덤프트럭에 reverse RFID 시스템을 설치하여 운행한 결과. 적재지점과 파쇄장을 왕복하는 덤프트럭의 이동시간을 정량적으로 측정할 수 있었으며 각 태그가 인식된 시간차를 계산하여 운반작

업 주요 구간별로 소요된 시간을 정량적으로 분석할 수 있었다. 현장 검증 실험을 통해 지하광산 장비의 이동시간 측정을 위해 스톱워치를 활용했던 기존의 방법보다 편리하고 정확한 이동 시간측정이 가능함을 증명하였다.

RFID 시스템을 도입하고 있는 국내외 대부분의 지하광산에서는 리더기를 광산 갱도에 설치하고 태그를 장비에 부착하는 tag-based RFID 시스템을 활용하고 있다. 그러나 기존의 설치방법에서는 전력 및 통신망을 구축해야하기 때문에 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 또한, 최근 광산 운영에 고도로 기계화된 장비가 투입됨에 따라 넓은 작업 공간에 비해 운행되는 장비의 숫자가 비교적 작다. 따라서 광산현장에서 reverse RFID 시스템을 적용한다면 전력 및 통신망 구축 없이도 활용이 가능하고, 적은 수의 광산장비에 리더기를 설치하면 되기 때문에 경제적인 시스템 구축이 가능하다는 장점이 있다. 반면, 리더기를 부착한 장비들이 서로 접근하면 전파 간섭현상이 발생할 수 있으며, 금속 장비나 금속 광석으로 인한 전파 차단 효과 등의 문제들도 존재할 수 있으므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것이다. 또한, 지하광산 내에서 비교적 빠르게 이동하는 장비들의 인식률을 제고시키기 위해 해당 광산의 구조와 특징에 맞도록 태그의 설치 지점, 개수 및 안테나의 각도 등을 최적화하는 것에 관한 연구들도 필요할 것이라 판단된다. 향후 광업분야에서 reverse RFID의 활용에 대한 연구가 지속적으로 이루어진다면 본 연구에서 수행한 운행장비 이동시간 분석뿐만 아니라, 응용프로그램 개발을 통해 지하광산 내 실시간 위치트래킹과 같은 다양한 기능도 수행할 수 있을 것이라 기대한다.

사 사

본 연구는 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 이공학 개인기초연구지원사업(2015R1D1A1A01061290)의 지원을 받아 수행되었다. 또한, 일부저자는 산업통상자원부 2단계 자원개발특성화대학사업 산학협력연구단(연구과제: 광물자원 탐사·개발)의 지원을 받았다. 이에 감사한다.

References

Alarie, S. and Gamache, M., 2002, Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines, *International Joural of Surface Mining, Reclamation and Environment,* Vol. 16, No. 1, pp. 55-76.

Blackwell, G.H., 1999, Estimation of large open pit haulage truck requirements, *CIM Bulletin*, Vol. 92, No. 1028, pp. 143-149.

Chae, S. and Yoshida, T, 2010, Application of RFID technology to prevention of collision accident with heavy equipment, *Automation in Construction,* Vol. 19, No. 3, pp. 368-374.

Choi, Y., 2011, New Software for Simulating Truck-Shovel Operation in Open Pit Mines, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 48, No. 4, pp. 448-459.

Choi, Y. and Nieto, A., 2011a, Optimal haulage routing of off-road dump trucks in construction and mining sites using Google Earth and a modified least-cost path algorithm, *Automation in Construction*, Vol. 20, No. 7, pp. 982-997.

Choi, Y. and Nieto, A., 2011b, Software for simulating open-pit truck/shovel haulage systems using Google Earth and GPSS/H, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol. 48, No. 6, pp. 734-743.

Choi, Y., Park, H.D., Sunwoo, C. and Clarke, K.C., 2009, Multi-criteria evaluation and least-cost path analysis for optimal haulage routing of dump trucks in large scale open-pit mines, *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 23, No. 12, pp. 1541-1567.

Defazio, D., Rhodes, M. and Tuero, B., 2011, Reverse RFID Tracking System, http://www.eecs.ucf.edu/seniordesign/su2011fa2011/g07/SD1_Documentation.pdf (accessed on 1 Jun 2016).

Ercelebi, S.G. and Bascetin, A., 2009, Optimization of shovel-truck system for surface mining, *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy,* Vol. 109, pp. 433-439.

Lionel, M.N., Dian, Z. and Michael, R., 2011, RFID-Based localization and tracking technologies, *IEEE Wireless Communications,* Vol. 18, No. 2, pp. 45-51.

Mishra, P.K., 2012, RFID technology for tracking and tracing the explosives and detonators in mining services, *Journal of Applied Geophysics,* Vol. 76, pp. 33-43.

Mishra, P.K., Stewart, R.F., Bolic, M. and Yagoub, M.C.E, 2014, RFID in underground-mining service applications, *IEEE Pervasive Computing,* Vol. 13, No. 1, pp. 72-79.

Oraee, K. and Asi, B., 2004, Fuzzy model for truck allocation in surface mines, In: Hardygora, M., Paszkowska, G. and Sikora, M. (eds), *Mine Planning and Equipment Selection 2004*, Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 585-591.

Park, S. and Choi, Y., 2013, Simulation of shovel-truck haulage system by considering truck dispatch methods, *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering,* Vol. 50, No. 4, pp. 543-556.

Park, S., Choi, Y., 2015, Development and Utilization of Mine Management Software: A Review, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 25, No. 3, pp. 221-230.

Park, S., Lee, S., Choi, Y., Park, H.S., 2014, Development of a Windows-based Simulation Program for Selecting Equipments in Open-pit Shovel-Truck Haulage Systems, *Tunnel and Underground Space*, Vol. 24, No. 2, pp. 111-119.

Park, B., Park, S., Choi, Y. and Park, H.S., 2015, Calculation of a diesel vehicle's carbon dioxide emissions during haulage operations in an underground mine using GIS, *Tunnel and Underground Space,* Vol. 25, No. 4, pp. 373-382.

Preradovic, S., Balbin, I., Karmakar, N.C. and Swiegers, G.F., 2009, Multiresonator-based chipless RFID system for low-cost item tracking, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 57, pp. 1411-1419.

Sezaki, K. and Konomi, K., 2006, RFID-based positioning systems for enhancing safety and sense of security in japan, Proceedings of the 2nd international workshop on ubiquitous pervasive and internet mapping, Tyoko, Japan, Oct 22-24, pp. 194-200.

Swedberg, C., 2011, Australian Coal Mine Tests RFID's Ability to Prevent Collision, *RFID Journal*, http://www.rfidjournal.com/articles/pdf?8774 (accessed on 16 2016).

Vivec, R., 2012, Reverse RFID based tracking of public transport, *Journal of Engineering Science and Technology,* Vol. 4, No. 7, pp. 3107-3010.

Yan, S. and Lai, W., 2007, An optimal scheduling model for ready mixed concrete supply with overtime considerations, *Automation in Construction,* Vol. 16, No. 6, pp. 734-744.

Zhang, H., 2008, Multi-objective simulation-optimization for earthmoving operations, *Automation in Construction*, Vol. 18, No. 1, pp. 79-86.

정 지 후

2014년 부산대학교 자연과학대학 지질학과 이학사

Tel: 051-629-6550
E-mail: haksu8874@gmail.com
현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 석사과정

최 요 순

2004년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 공학사
2009년 서울대학교 대학원 에너지시스템공학부 공학박사
2010년 미국 펜실베니아 주립 대학교 에너지자원공학과 Post-Doc

Tel: 051-629-6562
E-mail: energy@pknu.ac.kr
현재 부경대학교 환경해양대학 에너지자원공학과 부교수