

TECHNICAL NOTES

무선센서 네트워크를 이용한 지하광산 내 환경 모니터링과 통신 시스템의 연구 동향 분석 및 고찰

이승준, 박요한, 이학경, 김진*

인하대학교 에너지자원공학과

Review of Environmental Monitoring and Communication System in Underground Mines Using Wireless Sensor Network

Seungjun Lee, Yohan Park, Hakkyung Lee, and Jin Kim*

Department of Energy Resources Engineering, Inha University

*Corresponding author: jinkim@inha.ac.kr

Received: June 4, 2018

Revised: June 11, 2018

Accepted: June 11, 2018

ABSTRACT

Severe mine disasters have continued to occur around the world. To ensure worker's health and safety and enhance the productivity, a number of studies have been conducted for the development of wireless sensor network (WSN), environmental monitoring, and communication system in underground mines. An increase in development and application of these systems has just begun with the introduction of information and communication technology into the mining industry in Korea, and yet there have been only a few studies that considered the underground mine ventilation system. This study presented the literature review on the development of WSN and environmental monitoring in underground mines, and especially, on 7 subjects in terms of underground mine ventilation. Moreover, studies that especially conducted real-time environmental monitoring were reviewed and categorized by each commercial software commonly utilized for the ventilation network analysis. For the application in domestic underground mines, further issues were discussed regarding research subjects that may be needed in the future and domestic environmental standards that has been used in the underground mine operation. This paper is expected to be useful for the development of WSN-based environmental monitoring and communication system, as well as for related studies in the future.

Keywords: Environmental monitoring, Communication system, Wireless sensor network, Underground mine, Mine ventilation

초록

지하광산 내 심각한 사고가 전 세계적으로 끊임없이 발생하고 있다. 작업자의 생명과 건강을 확보하고 생산성을 향상시키기 위해서 최근 갱내 무선센서 네트워크 기반 환경 모니터링 및 통신 시스템의 구축을 위한 수많은 연구가 진행되고 있다. 국내에서도 최근 정보통신기술의 도입으로 이러한 시스템의 개발 및 구축 사례가 증가하기 시작했지만 갱내통기를 고려한 환경 모니터링에 대한 국내연구는 미비하다. 본 연구에서는 갱내 무선센서 네트워크의 구축 및 환경 모니터링에 관련한 해외의 다양한 연구 동향을 분석하였고, 특히 환경 모니터링 시스템의 갱내통기와 관련한 7가지 세부 주제에 대하여 고찰하였다. 또한 실시간 모니터링을 수행한 연구의 동향을 통기 네트워크 해석에 활용되는 상용 소프트웨어 별로 정리하여



고찰하였다. 본 연구를 통해 국내광산에 적용하기 위해 추후 연구가 필요한 주제와 국내에 적용 중인 갱내환경 기준에 대해 논의하였다. 본 논문은 국내 지하광산 내 무선센서 네트워크 기반의 환경모니터링과 통신 시스템의 구축과 관련한 향후 연구에 도움이 될 것으로 기대된다.

핵심어: 환경 모니터링, 통신 시스템, 무선센서 네트워크, 지하광산, 광산 통기

1. 서론

지하광산 내 작업장의 환경에서 안전을 확보하는 것은 작업자의 생명 및 건강과 직접적으로 관련되므로 아주 중요하다. 최근까지도 국내의 광산에서 폭발사고 및 매몰사고 등으로 인해 사상자가 생기는 안타까운 사고가 발생하고 있다. 세계에서 갱내 사고가 가장 많이 발생하는 중국에서는 해마다 수천 명이 사망하는 일이 지속적으로 발생하고 있다(Wu et al., 2011). 갱내 작업환경에서 건강에 해를 미치거나 사고를 일으킬 수 있는 위험 요인은 아주 다양하다. 특히 갱내 통기와 관련한 주요 위험요인으로는 유해 가스, 폭발성 가스, 분진, 온도, 습도, 그리고 방사선 등이 있다. 이와 같은 요인들이 갱내에서 사고 혹은 재난으로 이어지는 것은 여러 작은 사건들이 다발적으로 발생하면서 예측 불가능한 상황을 초래하는 것으로 볼 수 있다(Griffin et al., 2010). 만약 작업자들과 장비의 위치와 수에 대한 자료, 가스와 같은 환경 자료, 통기 장비의 가동상태와 관련한 자료, 갱내 풍속 자료, 그리고 갱내 온·습도 자료를 실시간으로 파악할 수 있다면 작업 환경의 효과적이고 효율적인 개선이 가능할 것이며 나아가 심각한 사고를 미연에 방지할 수 있을 것이다. 이에 따라, 갱내광산 운영에서 건강과 안전을 확보하기 위해 정보통신기술이 광범위하게 활용되고 있다.

최근 정보통신기술의 발전으로 갱내 모니터링에 무선센서 네트워크(WSN; Wireless Sensor Network)를 활용하고 있다. 무선센서 네트워크는 저전력 기반의 작은 센서들이 노드를 이루어 노드 사이의 무선통신을 구축하여 측정하는 자료를 처리하는 기술이다(Queiroz et al., 2017; Ranjan et al., 2016; Yick et al., 2008). 미국에서는 Mine Improvement and New Emergency Response Act가 시행되어 지하 석탄광산에서 무선통신시스템과 추적시스템의 운영을 의무화 하여 비상 시 매몰된 작업자의 위치를 파악할 수 있도록 하였고, 이와 같이 호주, 캐나다 및 중국에서도 의무화하고 있다. 무선지하센서 네트워크(wireless underground sensor network)를 적용하기 위한 연구가 이루어지면서(Akyildiz & Stuntebeck, 2006; Li & Liu, 2007), 센서로 측정하는 자료를 통해 갱내 차량의 충돌방지, 채굴적 불량, 그리고 화재와 폭발과 같은 사고를 탐지하거나, 미연에 예측하고, 작업자에게 경보를 울리는 시스템에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다(Bhattacharjee et al., 2012; Minhas et al., 2017; Furuno et al., 2015; Huang et al., 2010). 이와 같이 안전을 확보하기 위한 시스템의 구축은 광산운영을 최적화하며 인적·장비의 손실 비용을 감소하는 효과를 불러 일으킬 수 있으며 결과적으로 생산성 향상과 직결된다. 해외 광산에서는 지하 와이파이(Wi-Fi) 네트워크를 통해 장비와 운영시스템을 통합하여 생산량을 두 배로 늘리고 비용을 44%로 절감한 사례가 있으며(Dassault Systèmes, 2013), 작업자가 상황실에서 원격조정을 하거나 혹은 자동화 기술을 통해 지하광산이 운영됨으로써 작업 환경의 가시성과 안전 그리고 신뢰성을 높이고 있다. 특히 광산운영 비용에서 통기 시스템이 차지하는 비용은 60%까지 달할 수 있으며(Reddy, 2009) 이는 갱내 통기의 최적화된 운영이 중요하다는 것을 알려준다. Kocsis & Hardcastle(2003)은 통기 네트워크 시뮬레이션을 수행하여 원격조정 채굴방식과 기존의 채굴방식에 대해 같은 생산량 기준 통기시스템 운영비용을 비교하였고, 원격조정 채굴방식은 심도가 낮은 경우(240 m)에는 운영비용이 80% 감소할 수 있고, 1,500 m 심도에서는 50%까지 감소할 수 있음을 분석하였다. 이러한 해외의 기술 동향과 같이 국내에서도 이러한 시스템을 구축하기 위한 연구가 점차 확대되고 있다.

최근 국내에서도 정보통신기술의 도입의 중요성이 언급되고 있으며(Cho et al., 2017; Choi, 2017), 현재 가행중인 지하 광산에

서 통신 네트워크를 구축한 사례가 이미 있는 것으로 보인다. 국내 석회석 광산에서 덤프트럭의 위치를 추적하고 이동시간을 알아내기 위해 RFID(Radio Frequency Identification) 기술이나 블루투스(Bluetooth) 비콘을 이용하여 지하 내비게이션 시스템(Navigation system)이 개발되기도 하였다(Jung & Choi, 2016; Baek et al. 2017). 하지만 환경 모니터링을 갱내에 구축하는 것과 관련한 연구는 현재까지 찾아볼 수 없었으며, 지하철 역사 및 승강장과 도로터널에서는 WSN 기반의 모니터링 시스템이 구축된 바 있다(Kwon et al., 2009; Lee et al., 2009; Min et al., 2012; Park et al., 2007; Park et al., 2008). Joo & Kim(2013)의 연구에서는 WSN의 구현을 활용하여 터널 내 환경 모니터링을 구축하였으며 또한 효율적인 통신 방법을 제안하였다. Kwon et al.(2010)는 지하터널과 같은 환경에서 통신은 전파장애로 인해 자료의 전송 실패 등의 문제점이 발생할 수 있으며 이에 따라 충분한 실험적 경험 이 요구 된다고 하였다. 가행 광산의 환경에서는 분진, 습도, 온도, 채광작업으로 이동하는 작업장의 위치, 차량장비, 송수신 안테나의 위치 선정의 어려움, 채광방법에 따른 다양한 갱도 구조 등의 요인으로 인해 성공적인 무선통신을 구축하기 어려운 점이 있다.

그러므로 본 연구는 지하광산에서 무선통신 시스템 구축에 대한 해외 연구의 동향을 파악해 보도록 한다. 또한 통기와 관련한 위험요인 대상과 목적에 따른 갱내 환경 모니터링의 연구 동향을 파악하여 국내 광산에서 환경 모니터링 시스템을 구축할 때에 도움이 되고자 한다. 환경모니터링을 통해 취득한 실시간 자료를 통계 네트워크 분석에서 활용할 수 있는 통계해석 소프트웨어의 소개와 소프트웨어를 활용한 연구를 고찰하고자 한다. 그리고 본 연구를 통해 WSN 기반의 환경 모니터링과 통신시스템의 국내광산 적용에 대해 고찰하고자 한다.

2. 갱내 무선센서 네트워크 연구 현황

갱내 WSN를 적용을 위해 다양한 연구가 이루어지고 있다. WSN는 센서 노드, 중계 노드(relay node)와 싱크(sink)로 구성된다(Muduli et al., 2017). Fig. 1은 석탄광에서의 WSN 사례를 나타내고 있다. 센서 노드는 온도, 습도, 가스농도 등의 자료를 감지하고 처리하여 전송을 하고, 중계노드와 싱크를 통해 자료를 지상 통제실까지 전달한다. 센서 노드는 제한적인 처리 능력과 작은 에너지

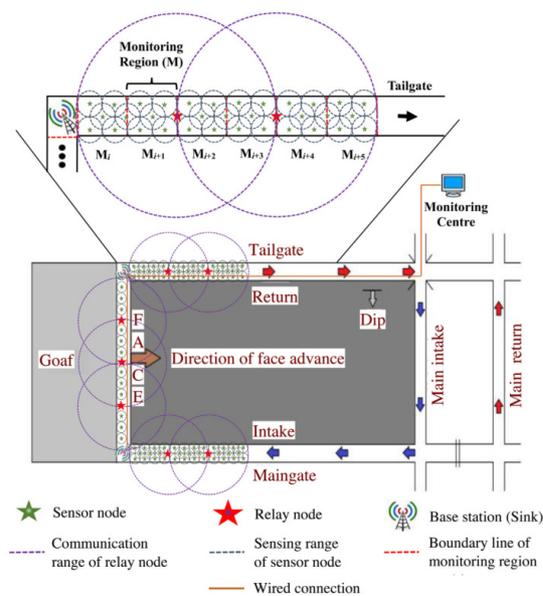


Fig. 1. ZigBee node positions in WSN (Muduli et al., 2017)

지소비, 낮은 복잡도, 그리고 저렴한 가격의 특징이 있다. 노드에서 자료를 전송하기 위해 사용되는 무선통신규격으로 Wi-Fi, Bluetooth, 그리고 ZigBee가 활용되고 있다. 이 통신규격에 대한 일반적인 특징은 Table 1(Moridi et al., 2014; Bluetooth SIG Inc., 2018)에 요약하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 갱내 환경 모니터링의 목적으로는 센서 노드의 특징에 적합한 IEEE 802.15.4 ZigBee 네트워크가 주로 구축되고 있다. 최근 BLE(Bluetooth Low Energy) 기술은 지속적으로 발전하여 유연한 네트워크 토폴로지(topology)를 지원하며(Samosuyev, 2010) WSN 노드의 특징을 잘 나타내고 있다. Dementyev et al.(2013)의 연구에 따르면 BLE 기술이 ZigBee보다 전력 소모가 작을 수 있으며, 이에 따라 갱내 WSN 구축의 활용 가능성이 있을 것으로 판단된다.

Kennedy & Bedford(2014)는 통신규격 IEEE 802.15.1 블루투스 V2.1과 IEEE 802.11x 와이파이(802.11g, 2.4 GHz와 5 GHz 802.11n, 그리고 802.11ac)를 이용하여 두 광산과 하나의 철도터널, 그리고 결과비교를 위한 지상에서 현장 실험을 수행하였다. 갱내 터널환경은 터널 자체가 전파를 전달하는 도파관 효과(waveguide effect)로 인해 이들의 실험에서 통신 규격의 스루풋(throughput) 최대 거리가 블루투스 60 m, 2.4 GHz 802.11 g 400 m, 5 GHz 802.11n 250 m에 달했고 이는 지상에 비해(일반적으로 100 m) 터널환경이 이점으로 작용하는 것을 나타내었다. 하지만 갱내 단면적이 작아지면 스루풋의 감소율이 더 커질 수 있으며 주방식 채굴법 갱내 구조에서는 위치에 따른 스루풋의 변동이 상당할 수 있음을 보여주었다. 또한 주방식 채굴법으로 굴착된 갱내에서는 가시선에서 벗어난 전파경로인 non-LOS(line of sight) 조건 하에 실험된 통신규격 중 IEEE 802.11 g가 가장 좋은 성능을 나타내었다. 특히 이러한 결과는 많은 국내 광산이 주방식 채굴법으로 굴착되고 있기 때문에 향후 WSN 구축에 도움이 될 것으로 판단된다.

Table 1. Wireless communication standards commonly used in underground mines (modified from Moridi et al., 2014; Bluetooth SIG Inc., 2018)

Parameters	Bluetooth	Bluetooth Low Energy	Wi-Fi	ZigBee
Communication distance (m)	10	100	50-100	50-500
Frequency range (GHz)	2.4	2.4	2.4 or 5	2.4
Data rate (Mbps)	1	0.125–2	11	0.25
Network capacity (nodes)	7	32,767	32	65,536
Power consumption (mW)	1-100	1-100	500-1000	20-40
Complexity	High	Low	High	Low

또한 갱내에 WSN를 설계할 때 고려해야 할 추가적인 사항이 있다. WSN는 주로 라우터를 이용한 멀티 홉(multi-hop) 토폴로지 및 작업장의 위치가 수시로 변하는 환경에 적합한 에드 혹(ad hoc) 네트워크를 통해 구축이 될 수 있으며, 배터리의 충전이나 교체가 어렵기 때문에 센서 노드의 적절한 설치 위치와 에너지소비가 효율적인 네트워크를 구성하는 것이 중요하다. 하지만, 적절한 네트워크 구축을 현장에서 적용하는 것은 비용과 시간 및 노력이 상당히 크기 때문에 많은 연구들이 효율적인 네트워크를 시뮬레이션을 통해 연구를 수행하고 있다. Chehri et al.(2010)의 연구에 따르면 수평갱도(mine gallery)에서 토폴로지가 수신 신호세기에 상당히 영향을 미칠 수 있다. Chehri et al.(2011)은 멀티홉 토폴로지의 홉 개수가 늘어나면 스루풋이 감소하고 데이터 전송 지연이 증가할 수 있음을 도출하였다. Chen et al.(2012)은 단거리 멀티홉 무선통신을 이용하거나 혹은 노드의 절전시간을 늘림으로써 통신 모듈의 전력소모를 줄일 수 있을 것이라 하였다. Chen et al.(2010)의 연구는 직선으로 배치되는 토폴로지에 비해 클러스터 기반의 체인형(chain-type) 토폴로지가 WSN에 더 적합하다는 것을 보여주었다. Sun et al.(2011)은 노드의 잔류 에너지와 네트워크의 평균 에너지를 고려한 트리형 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 라우팅은 네트워크 내 노드 사이 자료를 보내기 위한 통신통로를 결

정하는 절차이다(Moridi et al., 2018a). Moridi et al.(2018a)의 연구에서는 지하 공간 모니터링과 통신 시스템을 위한 ZigBee 네트워크의 토폴로지에 대해 클러스터 트리 토폴로지에 비해 스루풋, 패킷 전달율, 그리고 네트워크 안정성 면에서 메쉬형 토폴로지가 더 적절하다는 것을 보여주었다.

그리고 네트워크의 성능과 수명, 통신영역(coverage), 그리고 노드간 연결성의 측면에서 노드의 배치(deployment) 역시 중요하다. Stolkin et al.(2007)은 물체의 움직임에 대한 확률적 모델인 전산강물모델(computational river current model)을 이용하여 요구되는 센서의 수를 줄이고, 탐지율은 증가시키면서 센서의 설치위치를 최적화하는 이론적 연구를 수행하였다. Muduli et al.(2017) 장벽식 채굴법의 석탄광에서 확률적 사건탐지 알고리즘(probabilistic event detection algorithm)을 이용하여 Fig. 2와 같이 최적화된 노드의 배치에 대하여 제안하였다. Moridi et al.(2018b)는 갱내 ZigBee 기반의 WSN의 성능에 대한 현장실험을 수행하여 노드의 배치 및 높이에 대한 영향과 LOS 조건의 영향에 따른 통신 거리를 평가하였다. Table 2에 나타난 이들의 연구 결과를 통해, 실제 현장에서 통신모듈을 터널 중심부에 설치하는 것이 가장 좋은 것으로 판단되며, 이동차량과 같은 여러 상황으로 인해 불가피하게 통신모듈을 벽면 압반에 설치하는 경우에는 바닥보다는 높은 위치와 또한 대각 위치에 배치하는 경우에 보다 나은 통신 거리를 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

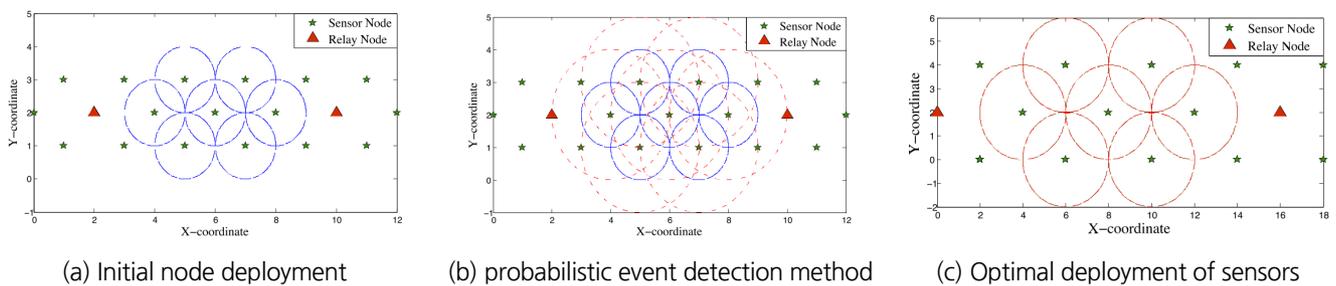


Fig. 2. Probabilistic event detection algorithm based on virtual force (Muduli et al., 2017)

Table 2. Field experimental results based on LOS effect, tunnel wall effect, height effect, and nodes arrangement effect of ZigBee communication (modified from Moridi et al., 2018b)

Classification	Test line view	Tunnel layout	ZigBee node level	Test line position	communication distance (m)
Line of sight		Straight	On a tripod with 1.5 m height	In the tunnel axis	380
Non-line of sight		Curved and inclined	On a tripod with 1.5 m height	In the tunnel axis	120
Tunnel wall effect		Straight	On a tripod with 1.5 m height	On the tunnel wall	180
Height effect		Straight	Located on the floor	In the tunnel axis	120
Node arrangement effect		Straight	On a tripod with 1.5 m height	On the opposite tunnel walls	240

반면, WSN를 실제로 적용할 때에는 분진 및 높은 습도 등의 통신이 저해되는 심각한 환경과 갱도 벽면의 난반사, 그리고 금속물 질 등으로 인해 예상치 못한 간섭(interference)이 발생할 수 있으며 자료 전송이 매우 취약할 수 있음을 여러 연구에서 언급하고 있다(Griffin et al., 2010; Misra et al., 2010). 이와 더불어 최근에 진행되고 있는 무선센서 네트워크 구축, 모니터링, 위치추적 및 안전 시스템에 대한 적용 연구 사례를 Table 3에 정리하였다.

Table 3. Classification of studies based on wireless sensor network in underground mines

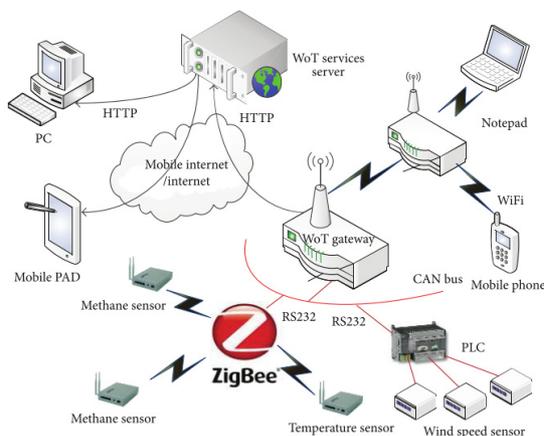
Category	Application	Approach	Reference
Wireless Sensor Network	Development of WSN in coal mine	Experiments of developed topology similar to peer-to-peer topology, and routing algorithm	Bai et al. (2007)
	Implementation and evaluation of IEEE801.15.4/ZigBee network	Field experiment in underground mine gallery	Chehri et al. (2010)
	Performance of WSN topology using ZigBee	Simulation of point-to-point communication compared to multihop communication	Chehri et al. (2011)
	Cluster-based chain-type topology	Simulation of optimized topology suitable for transmission, connectivity, and life cycle	Chen et al. (2010)
	Wireless mesh communication in coal mine	Modeling of the propagation of wireless communication and field test	Griffin et al. (2010)
	Performance evaluation of communication standards in underground mine and tunnel	Both field test and theoretical analysis using modal theory and ray-tracing model	Kennedy & Bedford (2014)
	Evaluation of stable communication ranges between ZigBee nodes at straight and curved tunnels	Experimental and theoretical approach on a stable communication based on the attenuation of radio waves	Moridi et al. (2014)
	Performance analysis of ZigBee network between mesh topology and cluster-tree topology	Simulation of ZigBee network to compare throughput, packet delivery ratio, end-to-end delay, energy consumption, and network security	Moridi et al. (2018a)
	Node deployment scheme of WSN in longwall coal mines	Simulation of different sensor node deployment and a probabilistic event detection approach incorporating virtual force method	Mulduli et al. (2017)
Monitoring	Energy efficient clustering protocol for WSN	Simulation of clustering protocol based on node's residual energy and average energy of the networks	Sun et al., (2011)
	Web of things-based remote monitoring system in coal mine	Experiment of remote monitoring system using controller area network bus technology and representational state transfer application	Bo et al. (2014)
	Web-based lightweight remote monitoring and control platform with representational state transfer application	Implementation of three scenarios and analysis of the system performance	Cheng et al. (2015)

Table 3. Classification of studies based on wireless sensor network in underground mines (continued)

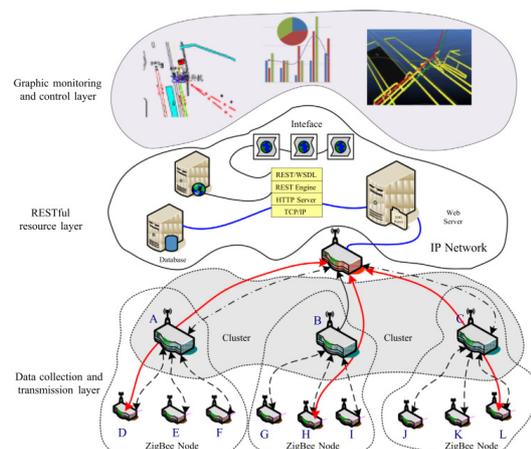
Category	Application	Approach	Reference
Monitoring	Monitoring systems using WSN	Design of hardware and software for ZigBee WSN	He & Wang (2012)
	Safety monitoring system using WSN	Implementation of real-time monitoring using ZigBee network and controller area network bus technology	Kumar et al. (2013)
	Design of monitoring system using ZigBee WSN	Hardware and software for monitoring systems	Li-min et al. (2008)
	Monitoring, emergency communication, and ventilation control integrated ZigBee network and GIS	ZigBee nodes to sense temperature, humidity, and gases concentration, and a trigger action plan programmed in GIS management system	Moridi et al. (2015)
	Monitoring and communication, and control system using ZigBee network	Field experiment for the system performance of data reading, text messaging, and controlling ventilation fans	Moridi et al. (2018b)
Tracking	Design of WSN based communication and location sensing system in gold and copper mine	Field test of sensor deployment using WSN	Misra et al. (2010)
	WSNs nodes correlation in coal mine tunnel	Simulation of minimum error and risk Bayesian decision for the network efficiency	Chen et al. (2013)
Safety	Event detection and alarming system using ZigBee with cluster tree network in coal mine	Real-time implementation of event classification, state-automata detection algorithm, and alarming disposal process	Bo et al. (2012)

3. 환경 모니터링 시스템

WSN를 통해 얻는 자료는 갱내풍속 및 통기량, 가스, 분진과 DPM(Diesel Particular Matter)과 같은 입자상 물질, 대기, 온·습도, 통기제어를 위한 통기장비 자료, 레귤레이터(regulator), 인원 및 운반 및 굴착 장비 자료 등이 될 수 있다. 이러한 자료에 대한 갱내 모니터링을 수행하여 건강, 생명, 그리고 안전을 확보하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있다. Fig. 3는 ZigBee기반의 WSN



(a) Bo et al. (2014)



(b) Cheng et al. (2015)

Fig. 3. WoT monitoring platforms

과 CAN(controller area network) bus 기술을 결합한, 사물 웹(WoT; Web of Things) 기반의 모니터링 시스템 플랫폼을 보여주는 최근 연구사례를 나타내고 있다(Bo et al., 2014; Cheng et al., 2015). WSN는 갱내 통신만을 대상으로 하기 때문에 무거운 HTTP 혹은 IP의 프로토콜 형태를 적용하지 않는 것이 일반적이다. 대신, WSN에서 얻어지는 자료는 REST(representational state transfer) 층에서 웹 서비스 제공이 가능한 프로토콜 변환이 이루어지고, 이에 따라 원격 통제실에서는 웹서비스를 통해 갱내의 상황에 대한 자료에 접근이 가능해질 뿐만 아니라 사용자가 자료를 통해 위급상황과 같은 비상시 상황을 사전에 인지할 수 있는 다양한 정보로 해석이 가능해진다. 이러한 전체적인 시스템을 구성하기 위해서는 세부적인 모니터링 주제에 대하여 고찰할 필요가 있으며 본 연구에서는 특히 통기 시스템과 관련한 국외 연구에 대하여 검토해 보고자 한다.

3.1 갱내 풍속

갱내 풍속 모니터링의 목적은 갱내 작업장의 소요통기량과 관련 있다. 소요통기량은 작업장에서 발생하는 유해 가스 및 폭발성 가스를 희석하거나, 분진 및 DPM(Diesel Particular Matter)과 같은 입자상 물질을 배출하거나, 그리고 작업장의 열 환경을 개선하기 위한 각각의 최소 통기량 중 가장 큰 값의 통기량을 의미한다. 작업장에서 소요통기량을 만족하는 통기량이 입기되기 위해서는, 우선 전체 통기 네트워크에서 광산 외부의 신선한 공기가 작업장까지 도달하고 오염된 공기가 광산외부로 배출되는 경로가 확보되어야 한다. 하지만 갱내 통기 네트워크는 굉장히 복잡한 경우가 많고 이로 인해 적절한 통기 시스템의 해석과 설계가 이루어지지 않으면, 광산 내부로 유입되는 신선한 공기가 다른 경로로 이탈(leaking)되거나 혹은 공기재순환(recirculation) 현상으로 오염된 공기가 재유입되는 등 작업장에 실제로 유입되는 신선한 통기량과 다른 경우가 발생할 수 있다. 또한, 대기의 변화로 인해 광산 내·외부의 온·습도 차이가 변화하게 되고 자연통기력이 일 시간별 및 계절별로 달라지므로 지속적으로 갱내 풍속의 변화가 발생할 수 있다. 그리고 갱내 화재와 같은 비상시 상황에서도 풍속 및 방향에 크게 영향을 미칠 수 있다. 이러한 측면에서, 갱내 풍속은 사실상 건강과 위험을 관리하기 위한 핵심적이고 본질적인 인자이다(Belle, 2013). 갱내 풍속 모니터링은 통기 시스템이 악화되는 상황을 파악할 수 있게 하고, 변화하는 환경에서 통기 시스템의 최적화에 활용할 수 있으며, 응급 상황 시 통제실의 적절한 대처에 기여할 수 있다.

하지만 갱내 풍속 모니터링을 적용할 때 센서 노드에서 갱내 풍속을 측정하는 방법 측면에서 어려움이 발생할 수 있다. 통기 실측에서 갱내 풍속을 측정하는 방법은 단일점 측정(single point), 다중 고정점 측정(fixed-point traverse), 연속이동 측정(continuous traverse)이 있으며(Kim et al., 2017) 이 중 연속이동 측정이 주로 단면의 평균 갱내 풍속을 측정하는 방법으로 사용 된다(Zhou et al., 2017). 하지만 센서 노드에 설치되는 통기량 측정기는 이동하면서 측정을 수행하여야 하는 연속이동 측정을 할 수 없기 때문에 단일점 측정의 값을 나타내게 된다. 측정기가 읽는 값과 연속이동 측정으로 얻는 평균 갱내 풍속의 값 사이에 오차 10% 이내를 얻어내기 위해서는 현장에서 적절한 측정기 위치를 선택하기 위한 다양한 실험 및 측정 혹은 보정치(correction factor)를 활용하여 신뢰도를 확보하여야 할 필요가 있다. 특히 센서 장비의 선택을 위해서는 현장 실험을 통해 정확도, 비용, 설치의 용이성, 분진의 영향 등을 종합적으로 평가하여 분석하여야 한다(Mcdaniel et al., 1996). Zhou et al.(2017)은 현장의 다양한 측정 장소에서 보정치를 얻기 위한 연구를 수행하였고, 갱내 풍속의 분포는 덕트 내 유체 속도가 중심부에서 최대 및 벽면부에서 최소가 되는 속도분포와 다르게 나타날 수 있는 점과 속도 분포가 공기가 분기되고 합류되는 지점에서 상당히 달라질 수 있는 점으로 인하여, 일반적으로 사용할 수 있는 보정치는 얻을 수 없었다. 그러므로 갱내 풍속 모니터링에서는 현장의 센서 설치 이후 측정값과의 신뢰도를 확보하는 것에 대한 현장 노하우가 요구되는 것으로 판단된다.

3.2 가스

갱내에서 모니터링의 대상이 되는 가스상 오염물질은 대표적으로 메탄과 같은 폭발성 가스, 일산화탄소, 질소산화물, 그리고 이산화황과 같은 독성가스, 이산화탄소 및 산소, 그리고 라돈과 같은 방사성 가스이다. Gaware et al.(2011)는 습도가 높은 갱내 환경에서도 신뢰성을 확보할 수 있고 우리나라 광산의 라돈 모니터링 시스템에 활용될 수 있는 정전기 수집과 신틸레이션(scintillation) 기술에 기반한 센서 장비를 개발하였다. Baishun et al.(2010)는 각각 메탄가스를, 그리고 Yang et al.(2010)는 메탄, 부탄, 그리고 수소가스를 모니터링하기 위해 ZigBee에 기반한 센서를 개발하기도 하였으며, 에너지 소비, 비용 및 신뢰성과 같은 요소를 고려하였다. 특히 두 연구에서는 WSN에 사용되는 센서의 배터리 사용량을 최적화하기 위해 소프트웨어가 기능을 수행하지 않는 동안 절전기능이 활성화되도록 설계 하였다. 반면, Yang et al.(2010)은 온도와 습도의 변화로 인해 가스를 측정하는 센서의 출력전압이 변하므로 측정값을 보정하였다. 이와 같이 가스 모니터링을 위한 센서는 종종 측정 시 보정이 필요한 경우가 있으며, 대표적인 예는 일산화탄소와 수소가스의 경우이다. 광산에서 배터리를 이용하는 차량 장비들에서는 주로 납축전지(lead acid battery)가 쓰이고, 납축전지에서 충전 시 수소가스가 발생한다. 이 수소가스는 일산화탄소를 측정하는 전기화학식 센서의 측정값에 간섭을 일으키기 때문에 보정을 해야 한다(Rowland et al., 2018). 측정된 가스의 값은 가스 모니터링을 통해 작업자에게 상황의 위험 정보를 미리 제공하는 정보시스템에 활용될 수 있다.

가스 모니터링의 측정값을 통해 경보에 대한 의사결정을 수행하는 방법으로 통계적인 방법이 이용되고 있다. Osunmakinde (2013)는 실내의 실험을 통해 측정 위치, 시간, 온도, CO₂, NO₂, 그리고 CH₄의 실시간 자료를 획득하였고, 이러한 자료를 사용자가 상황인식을 할 수 있도록 하며 시간에 따른 통계적 처리를 활용하여 종합적으로 경보 시스템과 같은 의사결정을 수행할 수 있는 원격 모니터링 시스템을 제안하였다. Niu et al.(2007)은 메탄의 농도를 모니터링하기 위해 최소한의 센서 데이터를 선택하고 활성화하는 방식으로 광산 안전 모니터링을 위한 효율적인 WSN 시스템을 제안하였다. WSN에서는 활성화되는 센서의 수가 네트워크의 에너지 소비와 직접적으로 관련되기 때문에 메탄의 확산에 대한 시간적 공간적 상관관계를 활용한 데이터 수집 알고리즘과 샘플링 간격을 최적화하는 기법을 적용하였다. 또한, WSN에서 배터리 기반의 센서의 에너지소모의 최소화를 위해 모니터링 데이터에 따라 샘플링 간격을 Table 4에 나타난 바와 같이 결정하는 것도 대안이 될 수 있다(Moridi et al., 2015). 반면, 경보에 대한 의사결정을 수행할 때는 오경보로 인해 생산량의 손실로 이어질 가능성이 있기 때문에 이를 적절하게 방지하는 시스템도 필요하다. Wang et al.(2008)은 비지도학습(unsupervised learning) 기법 중 하나인 베이지안 네트워크(Bayesian network)를 활용하여 가스의 농도에 대한 주기적 자료를 WSN에 학습시킴으로써 오경보를 줄일 수 있음을 보여주었다.

Table 4. Plan of monitoring interval change (Moridi et al., 2015)

Variables	Safe	Transient	Unsafe
Reading time interval (min)	30	15	5
Temperature (°C)	≤ 28	28 < Temperature < 40	40 ≤
Humidity (%)	≤ 75	75 < Humidity < 85	85 ≤
CO ₂ concentration (ppm)	≤ 2000	2000 < CO ₂ < 5000	5000 ≤

3.3 분진 및 DPM

분진 및 DPM과 같은 입자상물질은 광부의 직업병으로 알려진 진폐증과 같이 건강과 관련이 있을 뿐만 아니라, 메탄가스와 함께

갱내 폭발을 일으키는 원인이 된다. 건강과 안전에 미치는 영향은 분진의 입도 크기에 따라 달라지며, 10 μm 이하인 호흡성분진(respirable dust)의 경우에는 통기량이 중요한 반면 입도 크기가 큰 분진은 갱내 풍속이 통기의 효율에 지배적이다(Mcpherson, 1993). 분진제어에 관한 특성으로 인하여 시간에 따라 갱내 풍속을 변화하는 통기 시스템을 통해 에너지 소모를 감소시키는 효율적인 통기 시스템이 연구되기도 하였다(Liu et al., 2017). 하지만 분진 및 DPM의 모니터링 목적에서는 입자상물질을 센싱하는 것 자체에 대한 문제가 발생할 수 있으며 또한 농도 및 크기를 함께 고려해야 할 필요가 있다.

일반적으로 분진 및 DPM과 같은 입자상물질의 측정은 펌프로 흡입한 공기 내 입자상 물질을 필터를 이용하여 걸러내어 무게를 측정하는 중량식 측정방식으로 수행된다. 그러나 현장에서 측정값을 실시간 내지 비교적 짧은 시간에 따라 얻기 위해서는 기존의 실험실에서 수행하는 중량식 측정방식이 아닌 접근 방법이 요구된다. Barone et al.(2017)은 광산란 이론인 RTDF(ray tracing with diffraction on facets)를 이용하여 74 μm 이하인 가연성분진(combustible dust)의 입도 분포를 실시간으로 측정하는 것이 가능하다는 것을 보여주었다. Mahdavi-pour et al.(2015)는 갱내에서 WSN에 연결이 가능한 저전력 고정형 장비를 개발하였으며, 센서는 분진의 TIC(total incombustible content)의 연속측정이 가능할 뿐만 아니라 새로운 측정을 위해 표면이 주기적으로 세척되도록 설계되었다. 또한, DPM의 실시간 측정 장비는 배터리를 부착한 휴대용 장비로 개발되고 있는 사례들이 있으며(Noll et al., 2013; Takiff & Aiken, 2010; Wu & Gillies, 2008), 휴대용 장비들은 미국 광산안전보건국(MSHA)에서 규정하고 있는 quartz-fiber 필터에 sampling한 DPM을 optical analyzer로 EC(element carbon)량을 분석하는 NOISH 5040 분석 방법을 적용하고 있다. DPM의 값을 직접 읽는 것은 정확하지 않을 수 있으므로 이 휴대용 장비를 통해 EC를 측정하고 1.3배로 계산하여 TC(total carbon) 값을 얻어내는 간접적인 방식을 적용하고 있다. 그러나 이와 같이 본 연구에서 조사한 바에 따르면 입자상물질에 대해서는 실시간 측정 장비 개발에 대한 연구는 이루어지고 있으나 아직까지 통기 목적의 환경 모니터링 시스템에 적용한 연구의 사례는 찾아볼 수 없었다.

3.4 온·습도 및 대기

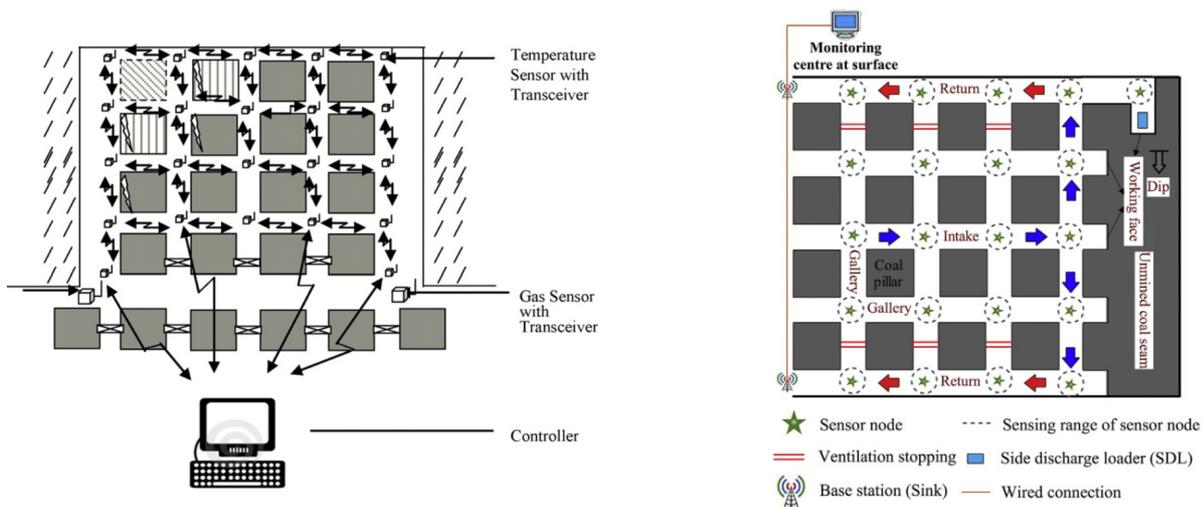
온도 및 습도와 대기 모니터링 시스템은 쾌적한 작업장 환경의 유지 및 개선의 목적, 비상시 환경 및 대기 파악을 통한 적절한 대피 경로 굴착 및 구출작업 계획의 목적, 그리고 시간별, 일별 및 계절별로 변화하는 자연통기력(natural ventilation pressure)을 파악하기 위한 목적을 위해 운영될 수 있다. 갱내·외 온도 및 습도와 대기압 자료는 전체 통기 네트워크 해석에 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 특히 지하광산의 심도가 깊어짐에 따라 발생하는 열 문제의 해결에 적용될 수 있다. 최근 이러한 모니터링 시스템을 적용하기 위한 여러 연구가 수행되고 있다(Agioutantis et al., 2014; Carpenter et al., 2015; Griffin et al., 2012; Roghanchi et al., 2017a; Roghanchi et al., 2017b). Agioutantis et al.(2014)은 모니터링 시스템에서 얻어내는 가스, 온도 및 습도, 그리고 대기 자료를 저장, 관리, 그리고 분석하기 위한 데이터베이스를 구축하였고, 실시간 자료는 짧은 시간에 따른 변동(fluctuation)이 매우 큰 폭으로 나타날 수 있음을 보여주었다. 데이터의 큰 변동은 Roghanchi et al.(2017a; 2017b)의 연구에서도 나타나고 있고, 이들은 환경 데이터가 허용 기준보다 높게 나타나는 피크 값의 경우에 치명적일 수 있음을 지적하였다. 특히, 이들의 연구에서 온도 값은 시간에 따른 변화가 센서 노드의 위치에 따라 지연되어 나타나는 현상이 나타났으며, 이를 댐핑 효과(damping effect)와 비정상 열전달(transient heat exchange)로 설명하였다. 통기갱의 상부와 하부 사이의 시간에 따른 온도 변화가 시간 간격을 두고 발생하는데, 이때 통기갱이 열에너지의 감쇠시키는 댐핑 효과를 나타낸다는 것이다. 비정상 열전달은 국부 통기팬을 가동하였을 때 시간에 따른 열전달로 인해 작업장 주변에서의 온도 변화가 센서 노드 간 시간 간격을 두고 발생하는 것을 설명한다. 이는 실시간 자료의 값과 정상상태로 계산하는 시뮬레이션의 결과와의 차이를 발생시킬 수 있으며, 이에 따라 dynamic VTH(Ventilation-Thermal-Humidity)

모델이 개발되어야 함이 언급되고 있다(Carpenter et al., 2015).

3.5 화재

갱내 화재 모니터링의 구축은 안전과 사고예방을 위해 핵심적으로 중요하며, 가스와 온·습도 자료를 통해 가능하다. Bhattacharjee et al.(2012)은 Fig. 4(a)와 같이 주방식 채굴 광산에 대하여 WSN 기반 화재 탐지, 경보, 모니터링, 그리고 예방 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 이 연구에서 제안된 시스템은 센서 노드에서 측정된 CO 가스 및 산소 농도의 비율을 허용한계와 비교하여 경고를 울리도록 하였으며, 그 이후 온도를 측정하여 정확한 화재 발생지를 탐지하도록 하였고, 자동적으로 물로 화재 지점에서 소화하도록 하였다. 또한, 갱내 화재와 같은 상황에서는 센서 노드에 문제가 발생하여 통신이 끊어질 수 있기 때문에, 이 연구에서는 비활성의 노드를 활성화하며, 새로운 경로를 탐색하고, 전송 지연을 최소화하는 데이터 통신의 최적 경로를 설정하여 화재 모니터링이 지속적으로 이루어지도록 하는 알고리즘과, 그리고 시나리오에 따른 전송 지연을 평가한 시뮬레이션의 결과를 보여주었다.

반면, 환경 모니터링으로부터 화재의 예측 및 발생에 대한 의사결정은 지체 없이 신속한 처리가 이루어져야 하고, 의사결정에 대한 신뢰성을 확보해야하는 점이 중요하다. 센서 노드에서 측정되는 자료를 통해, 허용한계와 비교하는 이진법의 의사결정은 복잡한 갱내 환경에서 적용하기에는 한계성이 있다. 이러한 한계성을 해결하기 위해 많은 산업분야에서 퍼지 로직(fuzzy logic)이 이용되고 있으며, 갱내 화재 모니터링에도 적용이 가능하다. Muduli et al.(2018)의 연구에서는 Fig. 4(b)와 같은 개념의 WSN 기반 화재 모니터링 시스템에 대한 연구를 퍼지 로직을 적용하여 수행하였다. 이들의 연구에서 의사결정을 위한 자료는 CO, CO₂, 및 O₂의 농도와 온도 값을 입력받도록 하였고, 퍼지화(fuzzification), 퍼지로직제어기(fuzzy logic controller), 그리고 비퍼지화(defuzzification)로 이루어진 맘다니형(Mamdani) 추론 구조에 따른 절차를 거치고, 그 결과로 화재강도가 출력되도록 하였다.



(a) Bhattacharjee et al. (2012)

(b) Muduli et al. (2018)

Fig. 4. WSN-based fire monitoring system

3.6 위치추적

갱내 작업자와 장비의 위치추적 시스템은 평상시 생산성향상 및 안전의 확보에 기여할 뿐만 아니라 비상시 구출작업에도 활용될

수 있다. 생산성 향상은 운영 장비의 관리 및 생산 일정을 최적화함으로써, 안전의 확보는 차량 장비의 충돌방지시스템을 운영함으로써, 그리고 구출작업은 매몰된 작업자의 신원정보 및 인원수, 그리고 장비의 종류와 수, 또한 매몰위치를 정확하게 파악함으로써 가능하다. Bandyopadhyay et al.(2008)은 IEEE 802.15.4 기반 메쉬 WSN 구축을 위한 하드웨어를 개발 하였고, RFID 기술을 통한 위치추적, 충돌방지, 환경모니터링, 경보시스템, 그리고 자료기록을 위한 소프트웨어를 개발하였다. Huang et al.(2010)의 연구에서는 ZigBee 기반 WSN를 클러스터 트리 토폴로지로 구성하였으며, 센서 노드에서 취득하는 위치정보 자료는 싱크노드에서 이더넷으로 연결하였고, 웹기반 지리정보시스템(WebGIS)을 이용하여 갱내 작업자와 차량의 위치를 유저 인터페이스에서 볼 수 있는 시스템을 개발하였다. 웹기반 지리정보시스템의 활용은 동기 네트워크의 정보, 동기 장비의 정보 등과 함께 보여줄 수 있기 때문에, 위치추적시스템을 통한 인력 및 장비의 정보를 활용하여 동기 최적화에도 활용될 가능성이 있는 것으로 판단된다. 반면, 이러한 위치추적 시스템이 움직이는 개체의 정확한 위치를 나타내기 위해서는, 위치를 추적할 때 이미 위치정보를 알고 있는 anchor 노드의 효율적인 설치위치가 중요하다. Wang et al.(2011)은 ZigBee 기반 위치추적 시스템을 위한 anchor 노드의 위치 선정에 대한 연구를 수행하여 anchor 노드 위치의 최적화 전략에 대하여 제안하였다. Chen et al.(2013)은 움직이는 물체의 현재 위치가 다음 위치에 시간적 상관성이 있는 점을 착안하였고, 이에 따라 터널의 분기부에서 경로를 예측하기 위해 통계적인 방법인 베이시안 의사결정을 활용하는 방법에 대해 제안하였다. WSN 노드의 상관성을 이용한 통계적인 접근법을 통해 위치추적 모니터링의 효율을 증가시킬 수 있으며 네트워크 수명을 연장할 수 있다.

3.7 통기제어

갱내 작업환경을 모니터링 하며 동시에 통기장비의 제어가 가능해지면 실시간으로 쾌적한 작업환경을 관리할 수 있으며 또한 광산 운영에 소모되는 에너지를 최적화할 수 있다. Benedetto et al.(2008)은 국부팬의 원격제어를 위한 기류모델과 가스농도 모델의 수학적 모델을 제시하였고 다음과 같은 제어 전략을 이용하였다. 국부팬의 속도는 2단계(높은 속도 및 낮은 속도)로 전환하여 운영이 가능하고, 센서 노드에서 측정하는 가스 농도의 값이 허용농도를 초과하는 경우에 국부팬의 속도단계를 조절하도록 하였다. 그리고 갱내 발파작업 등으로 인해 센서가 손상될 수 있다는 점을 고려하여 네트워크의 설계가 측정되는 값에 대해 추정된 오차 범위 내로 영향을 받으며 또한 통신과 장비 작동으로 인한 지연 시간에 대해 고려되도록 하였다. Wang et al.(2016)는 통기 네트워크를 고려하여 기류와 가스 농도를 제어하기 위한 수학적 이론 및 실험연구를 수행하였다. 이들의 연구에서는 주파수에 따른 특성곡선을 LSM(least square method) 보다 결정계수가 더 높은 정확한 접합을 보여주는 CIM(Chebyshev interpolation method)를 이용하여 나타내었고 통기 네트워크의 브랜치에 대해 주파수의 민감도 분석을 수행하였다. 그리고 이들의 연구에서는 통기제어를 위해 주파수-가스농도 서보 제어(f-w servo control)와 특성곡선탐색제어(curve search method)의 알고리즘을 제시하였고, 실험을 수행하여 특성곡선탐색제어가 현장적용에 적합하다고 제시하였다. 하지만 현장적용을 위한 통기제어를 위해서는 통기 네트워크 해석이 같이 이루어져야 할 필요가 있다.

4. 실시간 통기 네트워크 시뮬레이션 연구 동향

WSN 기반 환경 모니터링과 통신 시스템의 구축을 통해, 광산운영을 최적화하고 위급 상황을 예측하고 통기장비를 제어하는 것이 실효를 발휘하기 위해서는 적절한 갱내통기 네트워크 설계 및 해석이 기본적으로 이루어져야 한다. 갱내통기 네트워크 내 통기

량과 압력은 square 법칙에 의해 지배되기 때문에($P = RQ^2$), 통기량과 압력을 풀기 위해서는 반복법으로 계산해야 한다. 통기 네트워크 해석에 널리 사용되는 대부분 상용 소프트웨어는 1차원 정상상태의 조건에서 하디크로스(Hardy-Cross) 법 계열의 알고리즘을 적용하고 있다(Acuña & Lowndes, 2014). 통기네트워크 해석은 공기방향, 속도, 통기량, 온·습도, 압력분포, 오염물질 농도 분포와 같은 해석의 결과와, 그리고 센서 노드의 위치 등과 같은 WSN 정보를 함께 유저인터페이스에서 그래픽을 통해 작업이 가능하도록 GUI(Graphical User Interface)가 지원되면 더욱 효과적이다(Şalap et al., 2009).

통기 네트워크 시물레이션에서는 지리정보시스템(Geographic Information System) 기반의 분석이 중요하다(Liu & Yang, 2004). 갱내 모니터링을 통해 화재를 감지하게 되었을 때 그래픽을 통해 위치를 파악하고, 통기 네트워크 해석 결과에 따라 연기의 이동경로를 예측하고, 작업자에게 최단 대피 경로를 골든타임 내 위치추적을 병행하여 안내할 수 있다. Massanés et al.(2015)은 GIS 데이터베이스에서 전체 통기 네트워크와 국부통기 네트워크를 구분하여 각 통기 네트워크에 갱내 풍속과 온도, 그리고 가스농도의 시계열 자료를 얻어냈고 이를 통해 변수들의 관계를 분석하였다. 이들의 후속연구(Bascompta et al., 2016)에서는 통기 네트워크의 재순환현상(recirculation)을 GIS를 통해 효과적으로 분석하였다. 재순환현상은 배기 공기가 입기 공기와 같이 섞여 다시 작업장으로 입기되는 것을 의미하며, 주로 전체 네트워크 내 공기 경로 혹은 국부통기시스템에서 발생한다. Moridi et al.(2015)의 연구에서는 Fig. 5와 같이 ZigBee 기반 WSN과 GIS를 통합하여, 실시간 온도·습도·가스 모니터링과 통기 제어, 그리고 텍스트 통신이 가능한 통합시스템을 개발하였다. 최근 통기 네트워크 해석에 이용되는 소프트웨어들은 이러한 시스템들을 지원하기 시작했으며 이들을 활용한 관련 연구에 대해 검토할 필요가 있다.

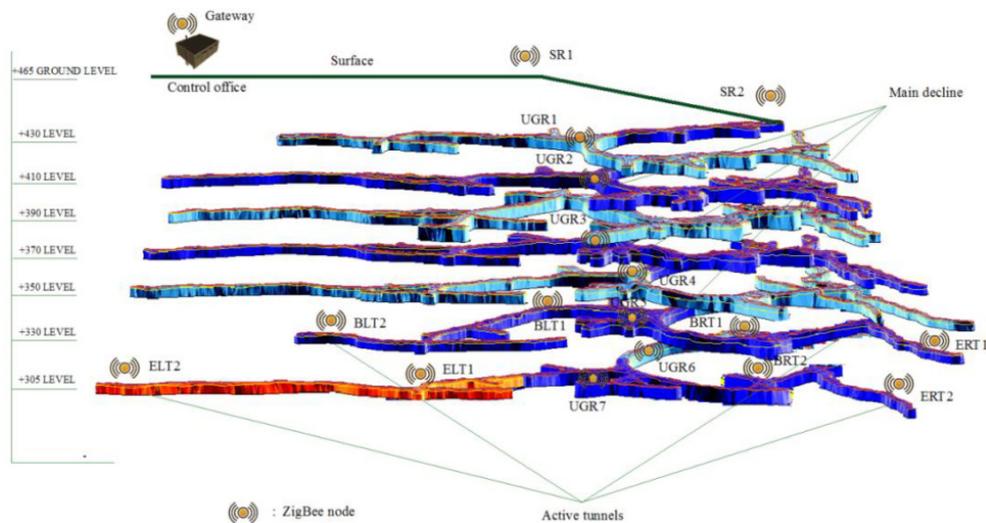


Fig. 5. An integrated system of ZigBee-based WSN and GIS

4.1 VentSim

호주에서 개발된 VentSim™ 소프트웨어는 GUI를 지원하며 전 세계적으로 활용되고 있다. 최근 LiveView™ 모듈이 개발되어 VentSim™에서 WSN를 통해 얻는 실시간 자료를 통기 네트워크에 입력받을 수 있게 해주고, 이를 통해 실시간 시물레이션을 지원한다. 또한 VentLog™는 통기실측(ventilation survey) 시계열 자료에 대한 데이터베이스를 지원하며 VentSim™과 연동이 가능하다. 과거에는 이러한 모듈이 지원이 되지 않았으며 많은 연구에서 실시간 자료를 입력받아 시물레이션을 할 수 있도록 수정 작업

을 거쳐 소프트웨어가 활용되었다(Gillies et al., 2004; Gillies et al., 2002a; Gillies et al., 2002b; Gillies et al., 2003; Wu & Gillies, 2005). 이들의 프로젝트에서는 초기 적절한 센서를 선택하고 구입하여 수정된 소프트웨어에 사용할 수 있도록 센서의 설계를 수행했고, 레귤레이터(regulator)의 종류에 따른 특성을 나타내는 수학적 모델을 나타내고자 하였다. 여러 현장 실험을 통해 압력을 측정하는 센서가 레귤레이터에서 새는 공기(leaking)를 설명할 수 있음을 알아내었고, 레귤레이터의 개구비(opening ratio)를 조절하여 통기량을 실시간으로 원격 제어하는 것이 가능함을 보여주었다. 또한 이를 수정된 VentSim™에서 시뮬레이션을 수행하여 갱내 레귤레이터의 제어로 통기 네트워크의 실시간 변화를 감지해낼 수 있음을 보여주었다.

반면, Roghanchi et al.(2017a)의 연구에서 VentSim™과 ClimSIM™의 알고리즘에서 통기갱에서 댐핑 효과를 나타내지 못하고 있음을 센서 측정결과와 비교하여 보여주었다. 실제로는 계산된 갱내 풍속 결과에 의해 온도 및 습도가 변화하게 되는데, 하디크로스 알고리즘은 오직 통기량과 압력에 대한 네트워크 회로를 계산하는 것이며 이것을 포함하지 못하는 한계가 있다. MULTIFLUX는 비정상 상태의 조건에서 열유체 네트워크 유동을 계산하여 댐핑 효과를 시뮬레이션을 할 수 있는 모듈이며, 현재 개발되고 있는 중이다(Danko, 2013).

4.2 WIPPVENT

미국에서 개발된 VnetPC PRO는 정상 상태 유동의 네트워크 회로 계산으로 제한되어 있으며(Griffin et al., 2012) 하디크로스 법 계열의 알고리즘이 적용되고 있다. VentSim™은 여러 시뮬레이션이 함께 지원되는 대신 라이선스에 따라 기능 여부가 제한되어 있는 반면, VnetPC Pro는 열역학적인 계산은 ClimSIM™으로 덕트 설계는 DuctSIM™으로, 그리고 화재와 가스 시뮬레이션은 MineFire Pro로 분리되어 있다. 또한, 실시간 데이터를 입력받고 시뮬레이션 할 수 있는 엔진은 아직 지원이 되지 않는 것으로 확인된다. 실시간 데이터를 입력받아 시뮬레이션이 가능하도록 소스코드가 수정된 WIPPVENT가 개발되어 여러 연구에서 이용되었다(Mcdaniel et al., 1996; McDaniel, 1988; McDaniel & Wallace, 1997; Ruckman & Prosser, 2010). WIPP(Waste Isolation Pilot Plant)는 미국 New Mexico주에 위치한 중준위 방사성 폐기물 처분장이다. 이 연구 프로젝트는 3단계로 수행되었으며, 첫 번째는 본 연구에서 분류한 온·습도 대기 모니터링을 위한 광산기상관측소(Mine Weather Stations) 개발 프로젝트, 두 번째는 갱내 풍속 모니터링, 위치추적 시스템, 그리고 통기제어를 위한 지하통기 원격모니터링과 제어시스템(Underground Ventilation Remote Monitoring and Control System) 개발, 그리고 마지막 프로젝트가 실시간 시뮬레이션이 가능한 WIPPVENT의 개발의 목적으로 수행되었다.

5. 국내 적용에 대한 고찰

본 연구에서는 환경 모니터링 및 통신시스템과 관련한 해외 연구의 동향을 검토하였다. 본 연구를 통해 국내에서 앞으로 필요한 연구 및 기술개발 내용에 대해 살펴보고자 하며, 이는 국내 광산의 환경 현황과 특성을 통해 수행하는 것이 중요하다고 볼 수 있다. 국내 많은 지하광산은 주방식 채굴방법을 통해 생산이 이루어지고 있는 한편, 점점 심도가 깊어지면서 환경 문제가 심각해지고 있다(Song et al., 2016). Yu et al.(2013)의 연구에 따르면 통기 경로가 일정하지 않은 광산의 심도가 300 m 이상이 되면, 하부 구간에서 자연통기가 원활하게 이루어지지 않을 수 있다. 또한 생산성을 높이기 위해 디젤 장비가 가동되고 있지만 오히려 디젤장비에서 발생하는 오염물질로 인해 작업환경은 더욱 악화되고 있다(Kim et al., 2012; Kim et al., 2017). 이에 따라 작업장 주변의 소요

통기량을 만족하기 위한 국부통기 시스템이 활용되고 있지만 공기재순환 현상이 관측되는 등(Kim et al. 2016; Nguyen et al., 2018) 그 효율 측면에서 여러 문제점들을 직면하고 있다. 또한 국내 광산은 대단면으로 굴착되는 경우가 많으며 이런 갱도에서는 갱내 풍속의 측정이 현실적으로 어려운 문제가 있다. 이런 문제로 인하여 Kim et al.(2016)과 Nguyen et al.(2018)의 연구에서는 추적가스를 활용하여 갱내 풍속 및 통기효율을 측정하였다. Kim et al.(2012)의 연구에서도 국내 석회석 광산에서 통기현황을 조사하였다. 이들의 측정 결과에 따르면 규제 기준을 초과하는 가스 농도가 측정이 되고 있었고, 이들은 가스의 효율적인 확산을 위해 디젤 장비의 이동 경로를 면밀히 검토해야 한다는 점을 지적하였다. 또한 이들의 현장 측정 결과에서 습도가 90%를 상회하고 있는 결과를 보여주었다. Park et al.(2014)의 연구에서도 국내 석탄광에서 90%이상의 높은 습도가 측정되었으며, WBGT(Wet Bulb Globe Temperature) 기준 33°C에 근접하는 결과를 보이기도 했다. 열과 습도 측면에서 갱내 쾌적한 작업장 환경을 위해서는 최적 갱내 풍속 1.5m/s가 요구된다(Sunkpal et al., 2017)는 점을 고려할 때, 대단면 갱도에서 심부화로 인한 열문제가 발생하면 충분한 갱내 풍속을 제공하기 어려울 수 있다. 이와 같은 국내의 연구를 종합하여 다음과 같은 연구개발 사항에 대하여 정리해볼 수 있다.

- 주방식 채굴 형상과 같이 갱내 굴착 구조를 고려한 WSN 설계 필요
- WSN 설계 시 갱내 환경을 고려하여(특히, 습도 및 분진) 충분한 현장 통신실험이 요구됨
- 통기네트워크 해석을 고려한 센서 설치위치 선정 필요
- 환경 모니터링 구축 시 각 측정값에 대한 정확도 확보 필요
- 저속 기류로 인한 갱내 풍속 측정 센서 선정 문제 혹은 추적가스기반 센서 개발 필요
- 공기재순환 현상을 감지하기 위한 가스 센서 배치 및 알고리즘 개발 필요
- 입자상물질(분진 및 DPM) 측정을 위한 고정형 또는 휴대용 센서 장비 개발 필요
- 대단면 갱도에 적합한 국부팬 혹은 방재팬의 원격 혹은 자동 제어기술 개발 필요
- 디젤장비 및 작업인원 위치추적을 활용한 통기 전략 개발 필요

추가적으로, WSN 기반 환경 모니터링의 구축과 동시에 국내에서 갱내통기와 관련하여 논의되고 있는 주요 사안에 대한 검토도 이루어져야 한다. 최근 국내 지하광산에서는 특히 디젤 장비로 인한 작업장의 환경악화에 대한 문제점이 주목을 받고 있다(Park et al., 2017). 이와 관련하여 디젤 장비에 대한 소요통기량 설계에 관한 논의가 필요한 것으로 판단된다. 디젤 장비에서는 유해 가스인 DPM이 발생하기 때문에 내연기관 정격 출력을 기준으로 소요통기량을 설계하게 규정되어있다. 국가별로 적용하고 있는 기준을 Table 5에 정리하였으며(Darling, 2011; Halim, 2017; KORES, 2017), 이 규정 값은 주마다 상이하게 적용되기도 하지만 $0.06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kw}^{-1}$ 을 적용하는 것이 일반적이다. 국내에서는 기존 $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kw}^{-1}$ 에서 $0.025 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kw}^{-1}$ 이상을 장비별 가동률을 고려하여 적용하도록 2017.6.30. 부로 개정되어 2019.6.30.까지 시행하도록 변경되었다. 이 변경은 우선 장비별 가동률을 적용하기 시작하였다는 점에서 디젤장비의 위치추적에 따른 가동률 자료를 활용한 통기전략을 적용할 수 있게 되었다고 볼 수 있는 반면, 허용기준 값이 변경된 점에서 광산선진국에서 적용하고 있는 값에 비해 환경규제 기준을 완화한 것일 수 있다는 지적을 받을 수 있어 보인다. 하지만 이 기준은 디젤 장비에서 발생하는 유해 가스와 관계된 것인지 DPM과 관계된 것인지 모호한 것으로 보인다. 이와 관련하여 Halim(2017)의 연구에서 이 규제 기준에 대한 기원을 조사하였으며, 분석한 내용을 다음과 같이 요약할 수 있다. 1942년 미국의 USBM(the United States Bureau of Mines)은 Delaware 수로 터널 굴착에 사용된 디젤 장비에 대해 실험을 수행하였고 당시의 가스농도 허용 기준을 만족하기 위한 소요통기량이 $0.041\text{-}0.048 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kw}^{-1}$ 이었음을 측정하였으며, 7년 후 $0.048 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kw}^{-1}$

이 권고 기준으로 사용되었다. Halim(2017)의 연구에서는 이 권고기준이 호주, 캐나다, 남아프리카에서 받아들여지면서 지금까지 최신화 되지 않고 사용했을 수 있음을 언급하고 있다. 중장비에서 배출되는 배기가스에 대한 수십 년에 걸친 관심으로 인해, 최근에는 Tier 배기가스 기준과 같은 광산용 차량에 대한 환경규제가 시행되고 있다. 현재 사용되고 있는 규제 기준에 대한 기원을 고려하였을 때, 국내광산에서 사용되는 최근 광산용 차량의 배기가스를 검토하여 소요통기량 설계 기준을 마련하기 위한 추후 국내연구가 필요한 것으로 판단된다. 반면, DPM 기준은 이와 같은 광산용 차량의 내연기관 정격출력에 따른 소요통기량과 분리가 되고 있는 것으로 보인다. 최근 미국에서는 8시간 평균농도 TC 기준 $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (MSHA, 2001)의 허용농도로, 호주에서는 8시간 평균농도 EC 기준 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (Government of Western Australia, 2013)의 허용농도로 각각 권고되기 시작하였고, 국내에서도 역시 이와 관련한 추후 연구가 필요한 것으로 판단된다.

Table 5. Regulatory ventilation requirements for diesel vehicles (modified from Darling, 2011)

Country	Minimum required ventilation rate standard ($\text{m}^3/\text{s}/\text{kw}$)
South Korea	0.025 ^(b)
Canada	0.05 – 0.06 0.047 – 0.097 ^(a)
US	0.032 – 0.094 (commonly 0.06)
Chile	0.063
South Africa	0.06 – 0.063
Indonesia	0.067
China	0.067
Australia	0.05 (WAMSIR) 0.05 – 0.06 (NSW) ^(a)

(a) Halim (2017); (b) KORES (2017)

마지막으로, 갱내가스의 허용기준 값에 대해서도 논의될 필요가 있다. 작업장에서 발생하는 다양한 가스는 작업자의 건강과 생명 및 안전에 치명적이기 때문에 작업시간에 대한 평균값의 형태로 법적으로 규제된다. 이 값을 TLV(Threshold Limit Value)라고 하며, TLV의 종류로는 일반적인 작업 시간인 8시간을 기준으로 TLV-TWA(Time-Weighted Average)의 허용기준 값이 있으며, 일부 가스는 짧은 시간 내 치명적인 영향을 미칠 수 있으므로 15분을 기준으로 하는 TLV-STEL(Short-Term Exposure Limit) 값이 있으며, 어떠한 시간에도 초과하지 말아야 하는 기준인 TLV-C(Ceiling)가 있다. 각 기준 분류에 따라 일반적으로 알려진 허용농도 값을 문헌을 참고하여 Table 6에 정리하였다. 그러나 국내의 광산안전기술기준에 따르면 TLV-TWA만을 기준으로 하고 있기 때문에, 추후 갱내 환경 모니터링 및 통신시스템이 구축되고 나면 Table 6의 TLV-STEL 혹은 TLV-C 기준을 관리 기준으로 활용할 수 있을 것이다.

Table 6. Exposure limit of mine gases

Gases		TLV-TWA (ppm)	TLV-STEL (ppm)	TLV-C (ppm)
Carbon dioxide (CO ₂)		0.5% ^(a,b,c) 1.0% ^(d)	3.0% ^(a,c) 1.5% ^(b)	-
Carbon monoxide (CO)		2.5 ^(a) 5 ^(b) 30 ^(d) 50 ^(c)	400 ^(a,b,c)	-
Methane (CH ₄)		1.0-1.25% ^(b) 2.0% ^(c)	-	-
Sulfur dioxide (SO ₂)		2 ^(a,c,d)	5 ^(a,c)	5 ^(b)
Oxide of Nitrogen	NO	3 ^(a) 25 ^(b,c,d)	-	5 ^(a) 35 ^(b)
	NO ₂	3 ^(a,c,d)	-	5 ^(a,c) 50 ^(b)

(a) Hartman et al. (2012); (b) Vutukuri & Lama (1986); (c) Mcpherson (1993); (d) KORES (2017)

6. 결론 및 시사점

지하광산의 작업환경은 다른 어떤 산업에 비해서 위험요소가 많다. 대부분의 위험요소는 가스, 온도, 분진, 기류속도 등 갱내통기와 관련된 인자들이다. 과거의 갱내통기는 정적인 작업이었다. 통기실측(ventilation survey)를 통해 자료를 확보하고, 이를 연구실에서 연구광산의 모델링을 수행하고 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 통기 네트워크 분석을 하여 통기설계를 제안하거나 개선방안을 도출하는 절차가 일반적이었다. 그러나 이제 WSN 기반 모니터링을 통해 실시간 자료의 접근이 가능해지면서 통기 설계 및 해석이 실시간으로 이루어지는 동적인 영역으로 전환되고 있다. 광업기술과 정보통신기술의 융합으로 갱내 안전을 확보할 뿐만 아니라 생산성 향상의 가능성까지 많은 연구에서 나타나고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 국내·외 문헌검토를 수행하였고 주요 내용에 대하여 요약하면 다음과 같다.

1. 무선센서 네트워크를 구축할 때는 통신 규격선정, 갱내 채굴법에 따른 갱도구조 고려, 최적화된 노드배치, 에너지효율성·스루풋·패킷전달률 등을 고려한 토폴로지 구성 및 라우팅 프로토콜, 그리고 현장 실험적 경험이 중요한 것으로 조사되었다.
2. 환경 모니터링 및 통신시스템에 대해 갱내 풍속, 가스, 분진 및 DPM, 온·습도 및 대기, 화재, 위치추적, 그리고 통기제어에 관한 7가지 주제에 대한 연구동향을 통해 주요 목적, 발생 가능한 문제, 적용 기술 및 알고리즘 등에 대하여 분석하였다.
3. 통기 네트워크 시뮬레이션에 활용되는 주요 소프트웨어의 소개와 소프트웨어 별로 수행된 관련 연구프로젝트에 대하여 검토하였다.
4. 국내 지하광산의 현황에 대한 검토를 통해 환경 모니터링 및 통신시스템을 적용할 시 앞으로 필요한 연구주제에 대한 논의와 통기와 관련된 국내 기준에 대한 논의를 함께 검토하였다.

사사

본 연구는 에너지기술평가연구원 2017년 자원개발기술개발의 ‘국내광산 생산성 향상을 위한 실시간 웹기반 광산안전 통합관리 시스템 개발(20172510102310)’ 연구단의 지원을 받아 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

REFERENCES

- Acuña, E.I., and I.S. Lowndes, 2014, A review of primary mine ventilation system optimization, *Interfaces*, 44.2, 163-175.
- Agioutantis, Z., K. Luxbacher, M. Karmis, and S. Schafrik, 2014, Development of an atmospheric data management system for underground coal mines, *J. South Afr. Inst. Min. Metall.*, 114.12, 1059-1063.
- Akyildiz, I.F. and E.P. Stuntebec, 2006, Wireless underground sensor networks: Research challenges, *Ad Hoc Networks*, 4.6, 669-686.
- Baek, J., Y. Choi, C. Lee, J. Suh, and S. Lee, 2017, BBUNS: Bluetooth beacon-based underground navigation system to support mine haulage operations, *Minerals*, 7.11, 228.
- Bai, M., X. Zhao, Z.G. Hou, and M. Tan, 2007, A wireless sensor network used in coal mines, In *Networking, Sensing and Control*, 2007 IEEE Int. Conf., 319-323.
- Baishun, S., P. Zhengduo, and M. Guoying, 2010, Design of the mine gas sensor based on Zigbee, In *The Third International Symposium Computer Science and Computational Technology (ISCSCCT 2010)*, 77.
- Bandyopadhyay, L.K., S.K. Chaulya, P.K. Mishra, and A. Choure, 2008, Wireless information and safety system for underground mines, *Proceedings of the International Union of Radio Science (URSI) General Assembly*, Vol. 68, 9-16.
- Barone, T.L., E. Hesse, C.E. Seaman, A.J. Baran, T.W. Beck, M.L. Harris, P.A. Jaques, P. Gao, D.E. Schwegler-Berry, and S.E. Mischler, 2017, Real-time sizing of airborne coarse coal dust, In *16th North American Mine Ventilation Symposium*, Golden, Colorado, Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Vol. 6, 11-18.
- Bascompta, M., A.M. Castañón, L. Sanmiquel, and J. Oliva, 2016, A GIS-based approach: Influence of the ventilation layout to the environmental conditions in an underground mine, *J. Environ. Manage.*, 182, 525-530.
- Belle, B., 2013, Real-time air velocity monitoring in mines - a quintessential design parameter for managing major mine health and safety hazards, In *13th Coal Operators' Conference*, University of Wollongong, The Australasian Institute of Mining and Metallurgy & Mine Managers Association of Australia, 184-198.
- Benedetto, M.D., A. D'Innocenzo, E. Serra, and E. Witrant, 2008, Automatic verification of wireless control in a mining ventilation system, In *4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering*, CASE 2008, 858-863.
- Bhattacharjee, S., P. Roy, S. Ghosh, S. Misra, and M.S. Obaidat, 2012, Wireless sensor network-based fire detection, alarming, monitoring and prevention system for Bord-and-Pillar coal mines, *J. Syst. Softw.*, 85.3, 571-581.
- Bluetooth SIG Inc., 2018, Radio Versions | Bluetooth Technology Website, Retrieved May 10, 2018, from <https://www.bluetooth.com/bluetooth-technology/radio-versions>.
- Bo, C., C. Xin, Z. Zhongyi, Z. Chengwen, and C. Junliang, 2014, Web of things-based remote monitoring system for coal mine safety using wireless sensor network, *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, 10.8, 1-14.
- Bo, C., Z. Peng, Z. Da, and C. Junliang, 2012, The complex alarming event detecting and disposal processing approach for coal mine safety using wireless sensor network, *Int. J. Distrib. Sens. Netw.*, 8.11, 1-12.

- Carpenter, K., P. Roghanchi, and K.C. Kocsis, 2015, Investigating the importance of climatic monitoring and modeling in deep and hot US underground mines, Proceedings of 15th North American Mine Ventilation Symposium, Virginia Tech, Virginia, 1-4.
- Chehri, A., H. Mouftah, P. Fortier, and H. Aniss, 2010, Experimental testing of IEEE801.15.4/ZigBee™ sensor networks in confined area, Communication Networks and Services Research Conference (CNSR), 2010 Eighth Annual. IEEE, 244-247.
- Chehri, A., W. Farjow, H.T. Mouftah, and X. Fernando, 2011, Design of wireless sensor network for mine safety monitoring, In Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2011 24th Canadian Conference on IEEE. 001532-001535.
- Chen, S., J. Yao, and Y. Wu, 2012, Analysis of the power consumption for wireless sensor network node based on ZigBee, Procedia Eng., 29, 1994-1998.
- Chen, W., X. Jiang, X. Li, J. Gao, X. Xu, and S. Ding, 2013, Wireless sensor network nodes correlation method in coal mine tunnel based on Bayesian decision, Measurement (IMEKO), 46.8, 2335-2340.
- Chen, W., Y. Sun, and H. Xu, 2010, Clustering chain-type topology for wireless underground sensor networks, Intelligent Control and Automation (WCICA), 2010 8th World Congress on. IEEE, 1125-1129.
- Cheng, B., X. Cheng, and J. Chen, 2015, Lightweight monitoring and control system for coal mine safety using REST style, ISA Transactions, 54, 229-239.
- Cho, S.H., H.S. Lee, H.G. Chung, and J.H. Shin, 2017, 지하 심부 정보획득·통신 기술 [Deep underground information acquisition and communication technologies], The Korean Institute of Electrical Engineers, 66.9, 18-26.
- Choi, Y., 2017, The roles and technology trends of ICT in mines, J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng., 54.1, 66-78.
- Danko, G.L., 2013, Subsurface flow and transport process model for time dependent mine ventilation simulations, Min. Technol., 122.3, 134-144.
- Darling, P., 2011, SME Mining Engineering Handbook (3rd ed.), Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Denver, CO.
- Dassault Systèmes., 2013, Dassault Systèmes' Geovia Customer Dundee Precious Metals Recognised With 2013 Ingenious Award For Innovative Use Of Technology, Retrieved April 11, 2018, from <http://suppliersandequipment.mining.com/2013/11/28/dassault-systemes-geovia-customer-dundee-precious-metals-recognised-with-2013-ingenious-award-for-innovative-use-of-technology/>
- Dementyev, A., S. Hodges, S. Taylor, and J. Smith, 2013, Power consumption analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT sensor nodes in a cyclic sleep scenario, Wireless Symposium (IWS), 2013 IEEE International. IEEE, 1-4.
- Furuno, Y., P. Walshe, D. Noble, and M. Kitai, 2015, Global Deployment of Mining Solution Business Powered by ICT, Hitachi Rev., 64.7, 377-382.
- Gaware, J.J., B.K. Sahoo, B.K. Sapra, Y.S. Mayya, R. Physics, A. Division, and B. Atomic, 2011, Indigenous development and networking of online radon monitors in the underground uranium mine, Radiat. Prot. Environ., 34.1, 37-40.
- Gillies, A., N. Tuffs, and T. Sartor, 2003, Real time integrated mine ventilation monitoring, Proc. Proceedings, Queensland Mining Industry Health and Safety Conference, 133-140.
- Gillies, A.D.S., H.W. Wu, and T.I. Mayes, 2002a, Mine regulators to allow real time ventilation monitoring, In Proceedings, Queensland Mining Industry Health and Safety Conference, Townsville, 145-150.
- Gillies, A.D.S., H.W. Wu, N. Tuff, T. Sartor, 2004, Development of a real time airflow monitoring and control system, In Tenth US Mine Ventilation Symposium, Anchorage, Balkema, The Netherlands, 145-155.
- Gillies, A.D.S., H.W. Wu, T.I. Mayes, and A. Halim, 2002b, Measurement of airflow through regulators and real time integrated monitoring, Proceedings North American Ninth US Mine Ventilation Symposium, 301-308.

- Government of Western Australia, 2013, Guideline on management of diesel emission in Western Australian mining operations.
- Griffin, K.R., K.D. Luxbacher, S.J. Schafrik, and M.E. Karmis, 2012, Comprehensive ventilation simulation of atmospheric monitoring sensors in underground coal mines, 14th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, 509-516.
- Griffin, K.R., S.J. Schafrik, and M.E. Karmis, 2010, Designing and modeling wireless mesh communication in underground coal mines, In SME Annual Meeting, 1-4.
- Halim, A., 2017, Ventilation requirements for diesel equipment in underground mines – Are we using the correct values?, 16th North American Mine Ventilation Symposium, Golden, Colorado, June 17-22 2017. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, 1-7.
- Hartman, H.L., J.M. Mutmansky, R.V. Ramani, and Y.J. Wang, 2012, Mine ventilation and air conditioning, John Wiley & Sons.
- He, X. and Y. Wang, 2012, The design of tungsten mine environment monitoring system based on wireless sensor networks, Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA), 2012 Second International Conference on. IEEE, 1319-1322.
- Huang, X., W. Zhu, and D. Lu, 2010, Underground miners localization system based on ZigBee and WebGIS, Geoinformatics, 2010 18th International Conference on. IEEE, 1-5.
- Joo, Y.I. and J.W. Kim, 2013, A study on environment management system in tunnel using wireless sensor networks, J. Korea Multimed. Soc., 16.10, 1196-1203.
- Jung, J., and Y. Choi, 2016, Collecting travel time data of mine equipments in an underground mine using reverse RFID systems, Tunnel and Underground Space, 26.4, 253-265.
- Kennedy, G.A., and M.D. Bedford, 2014, Underground wireless networking: A performance evaluation of communication standards for tunnelling and mining, Tunnelling and Underground Space Technology, 43, 157-170.
- Kim, D., S. Lee, K. Jeong, and C. Lee, 2012, A case study on the ventilation and heat environment in a underground limestone mine with rampway, Tunnel and Underground Space, 22.3, 163-172.
- Kim, S., S. Kim, Y. Kim, and Y. Jang, 2017, A study on mine ventilation network. Tunnel and Underground Space, 27.4, 217-229.
- Kim, Y., J. Roh, and J. Kim, 2016, Ventilation efficiency evaluation of domestic limestone mine using tracer gas method, Tunnel and Underground Space, 26.4, 274-282.
- Kocsis, C.K. and S. Hardcastle 2003, Ventilation system operating cost comparison between a conventional and an automated underground metal mine, Min. Eng., 55.10, 57-64.
- KORES, 2017, 광산안전기술기준 [Mine Safety Technology Standards].
- Kumar, T.A. and K.S. Rao, 2013, Integrated mine safety monitoring and alerting system using Zigbee & Can Bus, IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), 8.3, 82-87.
- Kwon, J., H. Kim, G. Kim, J. Kim, and J. Park, 2010, Development of machine intelligent communication module for remote air quality management monitoring system in underground tunnel, In Information and control symposium, 173-174.
- Kwon, J., J. Kim, G. Kim, and H. Kim, 2009, Air quality monitoring system using NDIR-CO2 sensor for underground space based on wireless sensor network, The Institute of Electronics Engineers of Korea - System and Control, 46.4, 28-38.
- Lee, S., S. Jeong, and Ch. Kim, 2009, Design and development of monitoring system for subway station based on USN, J. Korea Multimed. Soc., 12.11, 1629-1639.
- Li, M. and Y. Liu, 2007, Underground structure monitoring with wireless sensor networks, In International Symposium on Information Processing in Sensor Networks, 69-78.
- Li-min, Y., L. Anqi, S. Zheng, and L. Hui, 2008, Design of monitoring system for coal mine safety based on wireless sensor network, In Mechatronic and Embedded Systems and Applications, 2008. MESA 2008. IEEE/ASME International Conference, 409-414.

- Liu, H., and D. Yang, 2004, GIS-Based mine ventilation network and safety analysis, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings*, 5.199, 2945-2948.
- Liu, H., X. Wu, S. Mao, M. Li, and J. Yue, 2017, A time varying ventilation and dust control strategy based on the temporospatial characteristics of dust dispersion, *Minerals*, 7.4, 59.
- Mahdavi-pour, O., T. Mueller-Sim, D. Fahimi, S. Croshere, P. Pillatsch, J. Merukh, V.Z. Baruffa, J. Sabino, K. Tran, G. Alanis, P. Solomon, P. Wright, R.M. White, L. Gundel, and I. Paprotny, 2015, Wireless sensors for automated control of total incombustible content (TIC) of dust deposited in underground coal mines, *2015 IEEE SENSORS*, 3-6.
- Massanés, M.B., L.S. Pera, and J.O. Moncunill, 2015, Ventilation management system for underground environments, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 50, 516-522.
- McDaniel, K., I.J. Duckworth, and B.S. Prosser, 1996, Evaluation of Different Airflow Sensors at the WIPP Facility, In *Proceedings of the 8th U.S. mine ventilation symposium*, Rolla, Missouri. SME, 519-525.
- McDaniel, K.H., 1988, Real-time psychrometric data collection, *Min. Eng., Trans. Soc. Min. Metall. Explor. Inc.*, October, 74-77.
- McDaniel, K.H., and K.G. Wallace, 1997, Real-time mine ventilation simulation, *Min. Eng., Trans. Soc. Min. Metall. Explor. Inc.*, August, 71-75.
- McPherson, M.J., 1993, *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*, Springer Science & Business Media.
- Min, B., Y. Kim, G. Kim, and D. Shin, 2012, Implementation of sensor network for subway air-quality monitoring system, In *Information and control symposium*, 326-327.
- Minhas, U.I., I.H. Naqvi, S. Qaisar, K. Ali, S. Shahid, and M.A. Aslam, 2017, A WSN for monitoring and event reporting in underground mine environments, *IEEE Syst. J.*, 12.1, 485-496.
- Misra, P., S. Kanhere, D. Ostry, and S. Jha, 2010, Safety assurance and rescue communication systems in high-stress environments: A mining case study, *IEEE Commun. Mag.*, 48.4, 66-73.
- Moridi, M.A., M. Sharifzadeh, Y. Kawamura, and H.D. Jang, 2018b, Development of wireless sensor networks for underground communication and monitoring systems (the cases of underground mine environments), *Tunnelling and Underground Space Technology*, 73, 127-138.
- Moridi, M.A., Y. Kawamura, M. Sharifzadeh, E.K. Chanda, and H. Jang, 2014, An investigation of underground monitoring and communication system based on radio waves attenuation using ZigBee, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 43, 362-369.
- Moridi, M.A., Y. Kawamura, M. Sharifzadeh, E.K. Chanda, M. Wagner, and H. Okawa, 2018a, Performance analysis of ZigBee network topologies for underground space monitoring and communication systems, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 71, 201-209.
- Moridi, M.A., Y. Kawamura, M. Sharifzadeh, E.K. Chanda, M. Wagner, H. Jang, and H. Okawa, 2015, Development of underground mine monitoring and communication system integrated ZigBee and GIS, *Int. J. Min. Sci. Technol.*, 25.5, 811-818.
- MSHA (Mine Safety and Health Administration), 2001, 30 CFR Part 72 Diesel Particulate Matter Exposure of Coal Miners; Proposed Rule, *Fed. Regist.*, 68, 5526.
- Muduli, L., P.K. Jana, and D.P. Mishra, 2017, A novel wireless sensor network deployment scheme for environmental monitoring in longwall coal mines, *Process Saf. Environ. Prot.*, 109, 564-576.
- Muduli, L., P.K. Jana, and D.P. Mishra, 2018, Wireless sensor network based fire monitoring in underground coal mines: A fuzzy logic approach, *Process Saf. Environ. Prot.*, 113, 435-447.
- Nguyen, V., D. Kim, W. Hur, and C. Lee, 2018, Experimental and CFD study on the exhaust efficiency of a smoke control fan in

- blind entry development sites, *Tunnel and Underground Space*, 28.1, 38-58.
- Niu, X., X. Huang, Z. Zhao, Y. Zhang, C. Huang, and L. Cui, 2007, The design and evaluation of a wireless sensor network for mine safety monitoring, In *Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM'07. IEEE*, Vol. 12, 1291-1295.
- Noll, J., S. Janisko, and S.E. Mischler, 2013, Real-time diesel particulate monitor for underground mines, *Analytical Methods*, 5.12, 2954-2963.
- Osunmakinde, I.O., 2013, Towards safety from toxic gases in underground mines using wireless sensor networks and ambient intelligence, *Int. J Distrib Sens Netw.*, 9.2, 159273.
- Park, D., H. Kang, and C. Lee, 2017, A comparative study on the auxiliary fan pressure and the ventilation efficiency in large-opening limestone mine airways, *Tunnel and Underground Space*, 27.1, 1-11.
- Park, D., Y. Cho, S. Kwon, E. Park, and M. Ok, 2008, Study of air quality monitoring based on wireless sensor network, *Proceedings of the KSR Conference. Korean Society for Railway*, 1756-1760.
- Park, D.S., Y.M. Cho, S.B. Kwon, and E.Y. Park, 2007, Air pollution monitoring of subway using wireless sensor network, *Proceedings of the KSR Conference. Korean Society for Railway*, 984-988.
- Park, S., J. Roh, and J. Kim, 2014, A study on evaluation of thermal environment using heat stress indices for deep coal mine in Korea, *Tunnel and Underground Space*, 24.2, 166-175.
- Queiroz, D.V., M.S. Alencar, R.D. Gomes, I.E. Fonseca, and C. Benavente-Peces, 2017, Survey and systematic mapping of industrial wireless sensor networks, *Journal of Network and Computer Applications*, 97, 96-125.
- Ranjan, A., H.B. Sahu, and P. Misra, 2016, Wireless Sensor Networks: An emerging solution for underground mines, *International Journal of Applied Evolutionary Computation*, 7.4., 1-27.
- Reddy, A.C., 2009, Development of a coal reserve GIS model and estimation of the recoverability and extraction costs, Master of Science Thesis, Department of Mining Engineering, West Virginia University.
- Roghanchi, P., K.C. Kocsis, and A. Powell, 2017b, Evaluation of the atmospheric and underground environmental conditions by means of continuous climatic monitoring systems – Lessons learned, In *16th North American Mine Ventilation Symposium*, Golden, CO, June 17-22, 9-16.
- Roghanchi, P., K.C. Kocsis, G. Danko, and A. Powell, 2017a, Underground climatic monitoring and modeling: Are we missing something?, In *7th International Multidisciplinary Symposium*, Vol. 18, 133-139.
- Rowland, J.H., L. Yuan, R.A. Thomas, and L. Zhou, 2018, Evaluation of different carbon monoxide sensors for battery charging stations, In *SME Annual Meeting*, 1-6.
- Ruckman, R. and B. Prosser, 2010, Integrating Ventilation Monitoring Sensor Data with Ventilation Computer Simulation Software at the Waste Isolation Pilot Plant Facility, In *13th United States/North American Mine Ventilation Symposium*, Vol. 96, 237-242.
- Şalap, S., M.O. Karslıoğlu, and N. Demirel, 2009, Development of a GIS-based monitoring and management system for underground coal mining safety, *Int. J. Coal Geol.*, 80.2, 105-112.
- Samosuyev, V., 2010, Bluetooth Low Energy compared to Zigbee and Bluetooth Classic, Mikkeli University of Applied Sciences.
- Song, D., Y. Kim, T. Kim, and S. Kim, 2016, A study of efficient ventilation system in deep mines, *Clean Technology*, 22.3, 168-174.
- Stolkin, R., L. Vickers, and J.V. Nickerson, 2007, Using environmental models to optimize sensor placement, *IEEE Sens. J.*, 7.3, 319-320.
- Sun, Y., Y. He, B. Zhang, and X. Liu, 2011, An energy efficiency clustering routing protocol for WSNs in confined area, *Min. Sci. Technol. (China)*, 21.6, 845-850.

- Sunkpal, M., P. Roghanchi, and K.C. Kocsis, 2017, A Method to Protect Mine Workers in Hot and Humid Environments, *Safety and Health at Work*, 1-10.
- Takiff, L. and G. Aiken, 2010, A real-time, wearable elemental carbon monitor for use in underground mines, 13th United States/North American Mine Ventilation Symposium, 137-141.
- Vutukuri, V.S. and R.D. Lama, 1986, *Environmental Engineering in Mines*, Cambridge University Press.
- Wang, D., H. Feng, T. Xing, and J. Sun, 2011, Optimized anchor nodes placement for underground mine localization system based on ZigBee technology, *Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*, 2011 International Conference on. IEEE., 478-481.
- Wang, K., S. Jiang, X. Ma, L. Hu, Z. Wu, H. Shao, W. Zhang, X. Pei, Y. Wang, 2016, An automatic approach for the control of the airflow volume and concentrations of hazardous gases in coal mine galleries, *J. Loss Prev. Process. Ind.*, 43, 676-687.
- Wang, X., J. Lizier, and O. Obst, 2008, Spatiotemporal anomaly detection in gas monitoring sensor networks, *Proceeding EWSN'08 Proceedings of the 5th European Conference on Wireless Sensor Networks*, 90-105.
- Wu, H.W. and A.D.S. Gillies, 2005, Real-time airflow monitoring and control within the mine production system, *Proceedings, 8th Int. Mine Vent. Congress, Brisbane, QLD. 2005*, 383-389.
- Wu, H.W. and A.D.S. Gillies, 2008, Developments in real time personal diesel particulate monitoring in mines, 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium, 629-636.
- Wu, L., Z. Jiang, W. Cheng, X. Zuo, D. Lv, and Y. Yao, 2011, Major accident analysis and prevention of coal mines in China from the year of 1949 to 2009, *Min. Sci. Technol. (China)*, 21.5, 693-699.
- Yang, D., Y. Chen, and K. Wang, 2010, Design of environmental monitoring node of coal mine based on CC2530, *Computer Application and System Modeling (ICCA SM)*, 2010 International Conference on. IEEE, Vol. 14, 418-421.
- Yick, J., B. Mukherjee, and D. Ghosal, 2008, Wireless sensor network survey, *Computer Networks*, 52.12, 2292-2330.
- Yu, Y., J. Roh, and J. Kim, 2013, A study on thermodynamic natural ventilation analysis by the field survey of underground mines in Korea, *Tunnel and Underground Space*, 23.4, 288-296.
- Zhou, L., L. Yuan, R. Thomas, and A. Iannacchione, 2017, Determination of velocity correction factors for real-time air velocity monitoring in underground mines, *Int. J. Coal. Sci. Technol.*, 4.4, 322-332.