

ORIGINAL ARTICLE

GMG 시간 사용 모델 및 핵심성과지표를 이용한 지하 광산 트럭 운반 작업 성능 평가

박세범¹, 최요순^{2*}

¹부경대학교 에너지자원공학과 박사수로, ²부경대학교 에너지자원공학과 교수

Performance Evaluation of Truck Haulage Operations in an Underground Mine using GMG's Time Usage Model and Key Performance Indicators

Sebeom Park¹ and Yosoon Choi^{2*}

¹Ph.D Candidate, Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

²Professor, Department of Energy Resources Engineering, Pukyong National University

*Corresponding author: energy@pknu.ac.kr

Received: July 21, 2022

Revised: August 2, 2022

Accepted: August 4, 2022

ABSTRACT

The performance of truck haulage operations in an underground mine was evaluated using the time usage model and key performance indicators (KPIs) proposed by Global Mining Guidelines Group (GMG). An underground mine that mainly produces iron and titanium iron was selected as a study area, and truck haulage data were collected using Bluetooth beacons and tablet PCs. The collected data were analyzed to identify unit operations, activities, events, and required time of truck haulage operations, and time categories were classified based on the time usage model. The performance of the haulage operations was evaluated using nine indicators in terms of availability, utilization, and effectiveness. As a result, in terms of availability, uptime was 33.9%, physical availability was 95.7%, and mechanical availability was 94.9%. In the case of utilization, use of availability was 83.1%, asset utilization was 28.1%, and operating and effective utilization were 79.6% and 77.7%, respectively. Also, in terms of efficiency, operating efficiency was high at 97.6%, and production effectiveness was found to be 49%.

Keywords: Key performance indicators (KPIs), Haulage operations, Availability, Utilization, Effectiveness

초록

본 연구에서는 GMG (Global Mining Guidelines Group)에서 제안한 시간 사용 모델과 핵심성과지표 (KPIs)들을 이용하여 트럭 운반작업에 대한 성과를 평가한 결과를 제시하였다. 이를 위해 철과 티탄 철을 주로 생산하는 국내 지하광산을 연구지역으로 선정한 다음 블루투스 비콘과 태블릿 PC를 이용하여 트럭 운반작업 데이터를 수집하였다. 수집된 데이터를 분석하여 트럭 운반작업의 단위작업, 활동 및 이벤트, 소요시간을 식별하였으며, 시간 사용 모델을 기반으로 시간 범주를 분류하였다. 트럭 운반작업의 성과는 가용률, 이용률, 효율성 측면의 9개 성과지표를 이용하여 평가하였다. 그 결과, 가용률 측면에서는 가동 시간이 33.9%, 물리적 가용률은 95.7%, 기계적 가용률은 94.9%로 나타났다. 이용률의 경우, 가용장



비 이용률은 83.1%, 자산 이용률은 28.1%, 운영 및 유효 이용률은 각각 79.6%, 77.7%로 나타났다. 또한, 효율성 측면에서는 운영 효율성이 97.6%로 높게 나타났으며, 생산 효율성은 49%로 나타났다.

핵심어: 핵심성과지표, 운반작업, 가용률, 이용률, 효율성

1. 서론

광업 분야에서는 친환경, 고효율, 저비용, 무재해 광산 현장을 구축하기 위해 스마트 마이닝 기술의 도입이 점차 확대되고 있다(Choi, 2018, Choi and Yi, 2020). 또한, 채굴 프로세스를 개선하여 광산 개발의 안정성과 생산성을 향상시키고, 비용을 절감하기 위한 노력이 지속적으로 이루어지고 있다(Kim et al., 2013, Lim et al., 2014, Kim, 2017, Yoon et al., 2018). 최근 몇 년 동안에는 사물인터넷, 빅데이터, 모바일, 인공지능과 같은 최첨단 정보통신기술을 광산에 적용하여 채굴 프로세스를 최적화하고 있으며, 자동화 및 무인화를 위한 새로운 정책과 기술을 구현하는 등 채굴 프로세스를 지원하기 위한 새로운 기회를 찾고 있다(Ralston et al., 2014, Sganzerla et al., 2016, Zhou et al., 2017, Singh et al., 2018, Gackowicz et al., 2020). 광업 분야에 첨단 기술을 도입하고 활용하기 위한 기술은 많은 연구자들에 의해 개발되고 있다. 또한, 이러한 기술들은 이미 탐사에서 채광 및 선광에 이르는 광산 개발의 전 공정에 도입되어 데이터 수집, 장비 추적 및 모니터링, 생산공정 최적화, 생산관리와 같은 다양한 목적을 달성하고 있다(Jung et al., 2016, Jung and Choi, 2017, Baek et al., 2017, Baek et al., 2018, Bellanca et al., 2019, Kim et al., 2021, Park and Choi, 2021a, 2021b, 2022a, 2022b, 2022c). 또한, 광산 회사는 운영 지연 감소, 비용 최소화, 인력 균형, 장비 가용성 극대화를 통해 채굴 프로세스를 최적화하고 생산성을 향상시키기 위해 끊임없이 노력하고 있다(Hague, 2021).

광산에 새롭게 도입되고 있는 정보통신기술들은 광산 개발 프로세스 및 자산에 대한 데이터를 수집하고 저장하는데 필요한 인프라와 시스템을 제공하며, 수집된 데이터는 자산 혹은 광산 개발 프로세스에 대한 모니터링 및 관리의 기반이 된다. 따라서, 광업의 점진적인 디지털 전환에 대응하고 광산 개발 프로세스의 포괄적이고 지속 가능한 관리 및 평가를 위해서는 광산에서 수행되는 프로세스에 적합한 핵심성과지표(Key Performance Indicator, KPI)를 식별할 필요가 있다(Gackowicz et al., 2020). 핵심성과지표는 목표를 성공적으로 달성하기 위해 핵심적으로 관리해야 하는 요소들에 대한 성과지표를 의미하며, 많은 산업 분야에서 매우 유익하게 활용되고 있다. 산업의 특정 요구사항에 맞게 채택된 핵심성과지표를 사용해 다양한 산업 분야에서 수행되는 프로세스를 평가함으로써 산업 혹은 회사 시스템의 전반적인 지속 가능성과 운영 관련 문제들을 개선할 수 있다.

광업 분야에서도 광업의 특수성에 맞는 측정(measures) 및 메트릭(metrics)을 이용하여 핵심성과지표를 식별하고, 이를 이용해 광산 개발 프로세스를 평가하기 위한 연구들이 수행된 바 있다. Arputharaj(2015)는 노천 광산의 생산 작업에 투입되는 쇼벨, 덤퍼, 도저와 같은 굴착 및 운송 장비의 사용률과 활용도를 계산하고 장비의 성능을 향상시키기 위한 기여 요인을 분석하였다. 또한, 수집된 정보를 바탕으로 산정한 장비의 이용률(availability)과 가용률(utilization)을 이용하여 생산 효율성과 광산의 전체적인 효율성을 분석한 결과를 제시하였다. Hague(2021)는 지하 광산의 작업 주기를 최적화하기 위한 모니터링 시스템을 제안하였으며, 드릴링, 발파, 적재 및 운반 작업에 대한 핵심성과지표를 사용하여 현재 운영 중인 지하 광산의 생산 공정을 진단하고 평가하였다. Gackowicz et al.(2020)은 광업의 점진적인 디지털화를 고려하여 광산의 포괄적이고 지속 가능한 관리를 가능하게 하는 광업 KPI의 중요성에 대해 언급하였으며, 광업 공정의 모니터링을 위한 주요 KPI와 관련한 연구들을 리뷰한 결과를 제시하였다.

글로벌 마이닝 가이드라인 그룹(Global Mining Guidelines Group, GMG)에서는 채광 프로세스와 관련한 상태 및 이벤트를 표준 시간의 범주로 일관되게 분류하기 위한 시간 사용 모델과 이를 기반으로 채광 프로세스에 투입되는 자산의 가용률, 이용률 및 효율성을 산정할 수 있는 핵심성과지표들을 체계적으로 정의한 바 있다(Global Mining Guidelines Group, 2020). 그러나 지금까지

GMG에서 제안한 시간 사용 모델과 핵심성과지표를 이용해 광산의 채광 프로세스 및 관련 자산의 성과(performance)를 평가한 사례는 없다. 따라서 본 연구에서는 GMG에서 제안한 시간 사용 모델과 핵심성과지표들을 이용하여 지하 광산의 트럭 운반 작업에 투입되는 트럭의 가용률과 이용률, 효율성을 산정하고 평가하였다. 이를 위해 철과 티탄 철을 주로 생산하는 대한민국의 지하 광산을 연구지역으로 선정한 다음 블루투스 비콘 및 태블릿 PC를 이용하여 트럭 운반 작업에 대한 데이터를 수집하였다. 또한, 시간 사용 모델을 기반으로 트럭 운반 작업의 단위작업, 활동 및 이벤트들을 식별하고 시간 범주를 분류한 다음 트럭의 성과지표를 산정하고 분석한 결과를 제시하였다.

2. 글로벌 마이닝 가이드라인 그룹의 시간 사용 모델 및 핵심성과지표

2.1 시간 사용 모델(Time usage model)

GMG에서는 광산에서 이루어지는 채광 프로세스, 상태 및 사건들을 표준 시간의 범주로 일관되게 분류하기 위한 권장사항과 시간 사용 모델(Time usage model)을 포함한 가이드라인을 제안하였다. 또한, 가이드라인에서는 광산 자산의 가용성과 활용성을 산정하기 위한 핵심 성과지표(KPI)도 함께 정의하고 있다(Global Mining Guidelines Group, 2020). 광산의 채광 프로세스를 설명하고 기록하기 위해 사용되는 기본 시간 요소(basic time elements)에는 일반적으로 활동 유형, 장비 상태, 지연 및 이벤트가 포함되며, 이러한 기본 시간 요소들은 운영에 미치는 중요성과 영향에 따라 시간 범주(time categories)로 기록되고 분류될 수 있다. Fig. 1은 채광 프로세스에서 발생하는 생산적 활동과 비생산적 활동, 상태 및 이벤트가 분류되는 방식을 나타낸 것이며, 시간 범주와 서로 간의 관계를 파악할 수 있다. 시간 사용 모델은 채광 프로세스의 모든 시간을 고려해야 한다는 전제를 기반으로 한다. 따라서 채광 프로세스에서 비생산적인 시간을 식별하고 제거함으로써 자산을 최대한 활용하고 장비의 효율성과 채광 프로세스의 생산성을 향상시킬 수 있다.

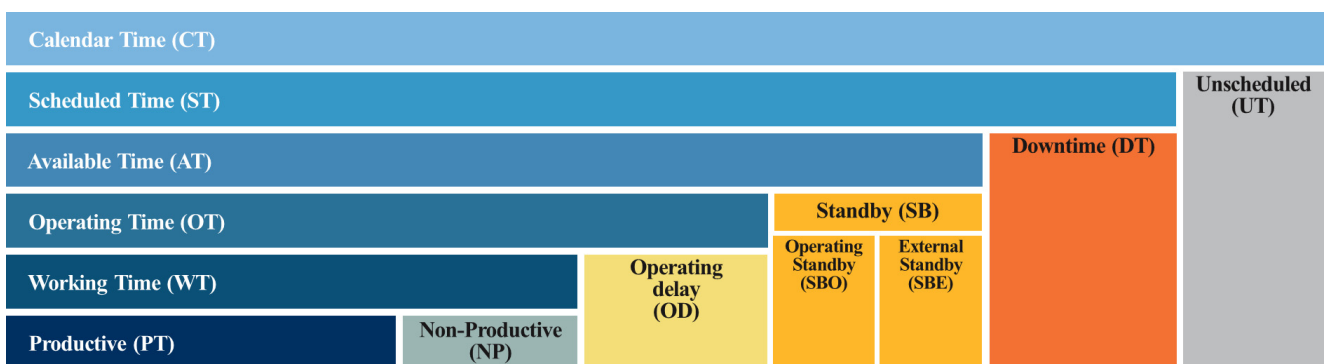


Fig. 1. Time usage model in GMG's guideline (Global Mining Guidelines Group, 2020)

2.2 시간 범주 및 기본 시간 요소

시간 사용 모델에서 제안하고 있는 시간 범주(time categories)는 일반적으로 달력 시간(calendar time), 예정된 시간(scheduled time), 예정에 없던 시간(unscheduled time), 휴지 시간(downtime), 이용 가능한 시간(available time), 대기(standby), 운영 시간

(operating time), 운영 지연(operating delay), 근무 시간(working time), 비생산적인 시간(non-productive time), 생산적인 시간(productive time)의 11개 범주로 구분하고 있으며, Table 1은 시간 범주의 정의와 서로 간의 관계에 대한 수식을 요약하여 정리한 것이다. 달력 시간은 명목 시간(nominal time)이라고도 하며, 장비(인원) 혹은 자산을 가용할 수 있는 총 시간을 의미한다. 일반적으로 1년을 기준으로 8,760시간(365 days × 24 hours)을 사용한다. 예정된 시간은 장비 혹은 자산이 광산의 운영 또는 채광 프로세스에 할당되어 활용되는 시간을 의미하고, 반대로 예정에 없던 시간은 장비 혹은 자산이 필요하지 않아 운영되지 않는 시간을 의미한다. 예정에 없던 시간에는 법정 공휴일이나 계획된 휴무, 장비 오버홀(overhaul) 등이 포함된다.

휴지 시간은 장비 혹은 자산이 광산의 운영에 필요하지만 의도한 기능을 수행할 수 없는 상태이며, 가동 중지 시간을 의미한다. 이용 가능한 시간은 장비가 필요하고 의도한 기능을 수행할 수 있는 상태이며, 가동 시간을 의미한다. 대기(standby)는 장비를 사용할 수 있지만 가동하고 있지 않은 상태를 의미하며, 대기는 다시 운영 대기(operating standby)와 외부 대기(external standby)로 구분할 수 있다. 운영 대기의 경우 장비를 사용할 수 있으나 가동되지 않는 상태이며, 경영진의 결정이나 경영권 내의 사유로 인해 즉시 가동할 의사가 없는 상태이다. 외부 대기는 장비가 광산 운영 혹은 채광 프로세스에 사용 가능하고 필수적이지만 운영 관리 통제의 직접적인 영향에 벗어난 이유로 운영할 수 없는 상태를 의미한다. 예를 들어, 지하수에 의한 침수, 천반 붕괴, 인력 부족 등의 이유로 작업을 진행할 수 없는 상태를 외부 대기로 분류할 수 있다.

운영 시간은 장비 혹은 자산의 가용이 가능한 상태이며, 사람 혹은 시스템의 제어 하에 있는 상태를 의미한다. 운영 지연은 장비가 작동 중인 상태이나 물리적 및 환경적 요인으로 인해 작업 수행이 일시적으로 중지되거나 방해받는 상태이다. 근무 시간은 장비가 의도한 기능을 수행하고 작동하고 있는 상태를 의미하여 생산에 직접적으로 기여하거나 기여하지 않는 활동을 하는 상태이다. 비생산적인 시간은 생산에 직접적으로 기여하지는 않지만 지속적인 안전과 효율적인 운영을 위해 필요한 활동을 수행하는 상태를 의미한다. 생산적인 시간은 장비가 의도한 기능을 수행하고, 생산에 직접적으로 기여하는 활동을 수행하는 상태를 의미한다.

Table 1. Summary of time category definitions (Global Mining Guidelines Group, 2020)

Term	Definition
Calendar Time (CT)	The total time available.
Scheduled Time (ST)	The equipment is required to meet business plan objectives and is assigned to an operation, project, or job. <i>Scheduled Time = Calendar Time – Unscheduled Time</i>
Unscheduled Time (UT)	The equipment is not scheduled or assigned in the system because it is not required due to external events.
Downtime (DT)	The equipment is required but is not in a condition to perform its intended function.
Available Time (AT)	The equipment is required and is in a condition to perform its intended function. <i>Available Time = Scheduled Time – Downtime</i>
Standby (SB)	The equipment is available but is not operating. <i>Standby = Operating Standby + External Standby</i>
Operating Standby (SBO)	The equipment is available but not operating, and there is no immediate intent to operate due to a management decision or reasons within management control.
External Standby (SBE)	The equipment is available, required, and committed to a project or site, but it cannot be operated for reasons that are out of the immediate influence of operating management control.
Operating Time (OT)	The equipment is available and under the control of a human or system. <i>Operating Time = Available Time – (Operating Standby + External Standby)</i>
Operating Delay (OD)	The equipment is operating but temporarily stopped or prevented from performing work due to delays that are inherent to the operation or the immediate physical and environmental conditions.
Working Time (WT)	The equipment is operating as assigned, performing its intended function, and carrying out activities that do and do not directly contribute to production. <i>Working Time = Operating Time – Operating Delay</i>

Table 1. Summary of time category definitions (Global Mining Guidelines Group, 2020) (continued)

Term	Definition
Non-Productive Time (NP)	The unavoidable activities that do not directly contribute to production but are required to enable continued safe and efficient operation.
Productive Time (PT)	The equipment is performing its intended function and is carrying out activities that directly contribute to production. <i>Productive Time = Working Time – Non-Productive Time</i>

기본 시간 요소는 활동 유형, 장비 상태, 지연 및 운영 활동을 설명하고 기록하기 위해 사용되는 이벤트들로 구성되었으며, Table 2는 기본 시간 요소들을 시간 범주로 분류하는 방법을 보여준다. 드래그라인, 쇼벨, 트럭, 로더, 도저 등 채광 프로세스에 투입되는 장비들의 단위작업이나 상태, 채광 도중 발생할 수 있는 이벤트들을 나열하고 있기 때문에, 표를 참고하여 시간 범주를 쉽게 분류할 수 있다.

Table 2. Basic time elements used to describe and record operational activities (Global Mining Guidelines Group, 2020)

Productive Time	Non-Productive Time	Operating Delay	Standby		Unscheduled Time
			Operating Standby	External Standby	
Dragline	· Training	· Fuelling	· No operator	· Not required	· Scheduled shutdown
· Fill	· Commissioning	· Lube	· Shift change	· Work suspended due to workforce shortage	· Statutory holiday not worked
· Swing	Dragline	· Blasting	· Lunch/coffee breaks	· Delayed crew arrival	· Inventory management shutdown
· Dump	· Rehandle	· Weather – if operator remains on unit	· Equipment checks	· Crew meeting	· Labour dispute
· Return	· Pad construction	· Incident – scene frozen (operator in unit)	· Safety meeting	· Training	· – No work
Shovel	· Reposition	· Stuck	· Stop work – public relations	· Site-wide weather outage	· Mobilization/demobilization
· Load	Shovel	· Power loss – due to blast specified cause)	· Re-route cable in pit – operator removed	· Primary power loss to site (<12 hours)	· Acts of God
· Swing	· Face prep and cleanup	· Re-route cable in pit – operator stays in unit	· Investigation – operators removed	· Site-wide loss of high voltage power (<12 hours)	· Force majeure
· Dump	· Cable reposition (by shovel)	· Change operator	· Spill cleanup – operators removed	· Loss of site access (<12 hours)	· Major site power interruption (>12 hours)
· Return	· Reposition	· Boarding machine/Receiving instruction	· Personal break	· Work suspension by owner	· Significant environmental event (>shift)
Trucks	· Stop at intersection	· Survey/ore control delay	· Prayer	· Loading unit out of digging	· Loss of site access
· Spot	· Rehandle	· Clean cab/windows	· Safety stand down	· Waiting for drill pad (not available for cleanup)	
· Load	· Wait for trucks	· Spill cleanup – operator on board		· Work area unavailable (geotechnical, water)	
· Haul loaded	Trucks	· Wait for assignment/instruction		· Loss of GPS	
· Dump	· Training	· Wait for shovel bucket cleaning		· Loss of site wireless network connectivity	
Loaders	· Stop at intersection	· Communications system delay			
· Load	· Reposition	· Loss of GPS			
· Position	· Travel empty	· Loss of site wireless network connectivity			
· Dump	· Wait at loading unit	· Stop work – safety			
Dozers	· Wait at ore dump/breaker	· Stop work – environmental			
· Production Push	· Wait at waste dump				
Drills	Loaders				
· Drilling	· Cleanup				
	· Trimming				
	· Rehandle				
	· Wait for trucks				
	Dozers				
	· Dump support				
	· Road work				
	· Cleanup				
	· Ripping				
	· Tow				

Table 2. Basic time elements used to describe and record operational activities (Global Mining Guidelines Group, 2020) (continued)

Productive Time	Non-Productive Time	Operating Delay	Standby		Unscheduled Time
			Operating Standby	External Standby	
	<ul style="list-style-type: none"> · Misc. assistance · Wait for trucks (dump) · Travel 				
	<p>Graders</p> <ul style="list-style-type: none"> · Road work · Pit floor cleanup · Spoil cleanup · Tow 	<p>Draglines</p> <ul style="list-style-type: none"> · Cable changeover · Bucket cleaning · Wait for pad cleanup/ prep · Move/walk 			
	<p>Drills</p> <ul style="list-style-type: none"> · Position · Move hole to hole · Redrill · Clean hole · Steel change · Bit change 	<p>Shovel</p> <ul style="list-style-type: none"> · Cable changeover · Bucket cleaning · Waiting for face cleanup equipment · Shovel move 			
	<p>Other</p> <ul style="list-style-type: none"> · Roads – sanding · Roads – dust suppression · Dewatering · Pit cleanup · Clearing · Grubbing · Ditching · Excavation · Equipment move 	<p>Trucks</p> <ul style="list-style-type: none"> · Shovel move · Cable move on loading unit · Shovel down · Box cleaning · Stopped for pit cleanup · Stopped for road cleanup · Tire overheat · Studies / tests · Wait for ground engaging tools (GET) change on shovel · Stop for object detected · Ore dump / breaker down 			
		<p>Loaders</p> <ul style="list-style-type: none"> · Move · Travel 			
		<p>Dozers</p> <ul style="list-style-type: none"> · Travel · Cleaning tracks · Cleaning blade · Wait at shovel (to do cleanup) · Manned – waiting for work · Move · Graders · Travel · Wait for work area · Drills · Water fill · Pattern cleanup · Wait for pad cleanup · Move for blast · Move between patterns · Other · Manned – waiting for work 			

2.3 시간 사용 모델 적용 및 핵심성과지표(KPI)

시간 사용 모델에서 분류되는 시간 범주 및 기본 시간 요소를 활용하면 채광 프로세스에 투입되는 장비들의 가용성과 활용성을 산정하고 평가할 수 있다. GMG에서는 Table 1에서 정의된 시간 범주를 이용하여 계산할 수 있는 성과지표들의 공식과 정의를 Table 3과 같이 정리하고 있다. 이러한 공식과 정의는 다양한 산업에서 일반적으로 사용하고 있으며, 일부 작업에 대해서는 이를 변형하여 활용하기도 한다.

GMG에서는 자산의 가용률(availability), 이용률(utilization), 효율성(effectiveness)의 세 가지 측면에서 성과지표를 제안하고 있다. 가용률의 경우 Surface mining (Pfleider, 1968, Kennedy, 1990)에서 제안된 가용률의 정의를 기반으로 설명하고 있으며, 가동시간(uptime), 물리적 가용률(physical availability), 기계적 가용률(mechanical availability)이 포함된다. 가동시간은 장비가 필요한지에 관계없이 장비를 작동할 수 있는 총 시간을 측정하는 지표이다. 물리적 가용률은 장비의 작동 여부와 관계없이 장비가 필요한 총 시간의 백분율을 의미하며, 장비를 사용할 수 있는 시간을 측정한다. 이 지표는 대기 시간의 영향을 반영하여 산정된다 (Kennedy, 1990). 기계적 가용률은 작업에 필요한 시간의 백분율로 장비를 사용할 수 있는 시간을 나타내고, 작업에 대한 유지 관리의 영향을 식별하는데 활용할 수 있다(Pfleider, 1968).

이용률은 자산 혹은 장비의 사용 정도를 측정한 것이며, 가용장비 이용률(use of availability), 자산 이용률(asset utilization), 운영 이용률(operating utilization), 유효 이용률(effective utilization)의 4가지 지표에 대해 산정한다. 가용장비 이용률은 작업의 측면에서 사용 가능한 장비를 얼마나 잘 활용하는지 측정하는 지표를 의미한다(Pfleider, 1968). 자산 이용률은 자산을 사용할 수 있는 총 시간인 달력 시간에 대한 백분율로 자산의 전체적인 사용을 측정하며, 자산이 얼마나 잘 활용되고 있는지에 대한 지표를 제공한다. 운영 이용률은 운영이 필요하거나 운영이 예정된 자산의 사용을 측정하고, 유효 이용률의 경우 자산이 의도한 기능을 위해 사용되는 시간을 측정한다.

효율성의 경우 운영 효율성(operating efficiency)과 생산 효율성(production effectiveness)의 2가지 지표로 산정한다. 운영 효율성은 운영 도중 발생한 지연의 영향을 반영하여 자산을 얼마나 효과적으로 사용하고 있는지를 측정하는 지표이다. 생산 효율성은 자산이 생산에 직접적으로 기여하는 시간을 측정한다.

Table 3. Key performance indicators suggested by GMG (Global Mining Guidelines Group, 2020)

Term	Definition	Formula
Availability KPIs		
Uptime*	The total time the equipment is capable of operating, whether it is scheduled or not	$\text{Uptime} = \frac{\text{Available Time}}{\text{Calendar Time}}$
Physical Availability	The percentage of time the equipment is available to perform its intended function over a defined period when it is required by the operation	Physical Availability = $\frac{\text{Available Time}}{\text{Scheduled Time}}$
		Or Physical Availability = $\frac{(\text{Operating Time} + \text{Standby})}{\text{Scheduled Time}}$
Mechanical Availability	The time the equipment is available as a percentage of the time it is required by the operation	$\text{Mechanical Availability} = \frac{\text{Operating Time}}{(\text{Operating Time} + \text{Downtime})}$
Utilization KPIs		
Use of Availability	The time the equipment is operated as a percentage of the available time	$\text{Use of Availability} = \frac{\text{Operating Time}}{\text{Available Time}}$
Asset Utilization	The time the equipment is being operated as a percentage of the total time available	$\text{Asset Utilization} = \frac{\text{Operating Time}}{\text{Calendar Time}}$

Table 3. Key performance indicator suggested by GMG (Global Mining Guidelines Group, 2020) (continued)

Term	Definition	Formula
Utilization KPIs		
Operating Utilization	The percentage of time the asset is being operated when it is required to operate	$\text{OperatingUtilization} = \frac{\text{OperatingTime}}{\text{ScheduledTime}}$
Effective Utilization	The time the equipment is used to perform its intended function as a percentage of the time that it is scheduled to work	$\text{Effective Utilization} = \frac{\text{WorkingTime}}{\text{ScheduledTime}}$
Effectiveness KPIs		
Operating Efficiency	The time the equipment is performing its intended function as a percentage of the time that it is operating	$\text{OperatingEfficiency} = \frac{\text{WorkingTime}}{\text{OperatingTime}}$
Production Effectiveness	The time the equipment is directly contributing to production as a percentage of the time that it is operating	$\text{Production Effectiveness} = \frac{\text{Productive Time}}{\text{OperatingTime}}$

*Calendar Availability is a suggested alternative to Uptime that eliminates the impact of unscheduled time. It is measured with the following formula: $(\text{Calendar Time} - \text{Downtime}) / \text{Calendar Time}$

3. 연구방법

3.1 연구지역

본 연구에서는 실제 개발 중인 지하 광산을 연구지역으로 선정한 다음 사례연구를 수행하였다. 광산은 대한민국 경기도 포천시에 위치하고 있으며, 갱내 채광을 기본으로 적용하여 철과 티탄 철을 주로 생산하고 있다. 중단채광법(sub-level stoping)을 주 채광법으로 적용하고 있으며, 생산된 원석은 로더와 트럭(15 ton, 25 ton)을 이용하여 파쇄장으로 운반되고 있다. 갱구로부터 350 m 지점에 6~8° 경사의 램프웨이(ramp-way)가 개설되어 있고, 각 편간 수직거리는 20~25 m, 운반 갱도의 규격은 평균 5 m × 4.5 m로 나타난다. 생산된 원석은 파쇄 시설에서 8~55 mm로 파쇄된 다음 자력 선별기에 의해 선별되고, 월 23,000톤의 정광이 생산되고 있다. 광산에서는 시추, 발파, 적재, 운반 및 보조 작업과 같은 지하 광산 작업의 단위 작업을 지원할 수 있는 장비들이 투입되어 운영되고 있다. 장비의 배차 계획은 생산된 원석의 납품 계획과 광석 생산의 필요성에 따라 매일 아침마다 배차 관리자에 의해 이루어지고 있다. Table 4는 연구지역에서 생산된 광석을 적재하고 파쇄장으로 운반하는데 투입되는 적재 및 운반 장비의 종류와 수를 나타낸 것이다. 일반적으로 하루 10시간(07:00~12:00, 13:00~18:00) 동안 생산 작업을 수행하며, 점심 및 휴게시간은 1시간(12:00~13:00)이다.

Table 4. Equipment of loading and haulage in study area

Equipment	Capacity	Units	Amount
Trucks	15	ton	3
	25	ton	4
Wheel loaders	CAT 962H	m ³	1
	Volvo L120F	m ³	1
	Volvo L120H	m ³	1

연구지역의 광석 및 폐석 운반 작업은 다음과 같이 총 7단계의 작업 주기를 따른다. 먼저, 1. 트럭 운전기사들은 오전 7시 작업이 개시되기 전 일일 생산 회의에 참석하여 배차 관리자의 작업 계획 및 지시사항, 주의사항 등을 하달 받는다. 2. 트럭 운전기사는 자신의 트럭이 주차되어 있는 구역으로 이동한 다음 차량 점검 체크리스트를 작성하거나 운반 작업을 준비한다. 3. 오전 7시 작업이 개시되면 트럭 운전기사는 자신에게 할당된 적재 구역으로 이동(travel empty) 한다. 4-1. 적재 구역에 도착한 트럭은 적재 가능 여부(로더 사용 가능 여부)를 확인한 다음 적재작업이 가능할 경우에는 로더에 바로 접근하여 광석 혹은 폐석을 적재한다(spot-load). 4-2. 적재 작업을 바로 수행할 수 없을 경우에는 대기 구역에서 대기를 하다가 적재 작업이 가능할 때 로더에 접근하여 적재 작업을 수행(wait at loading unit-spot-load)한다. 5. 적재 작업을 완료한 트럭은 파쇄장 혹은 폐석장으로 이동한다(haul loaded). 6. 파쇄장 혹은 폐석장에 도착한 트럭은 광석 혹은 폐석의 하역 작업을 수행한다(spot-dump). 파쇄기의 처리용량에 따라 호퍼에 광석을 바로 덩핑하지 못하는 경우에는 파쇄장 근처에 광석을 아적한다. 따라서 연구지역에서는 하역 작업에 대한 대기시간은 발생하지 않는다. 7-1. 광석 혹은 폐석의 하역 작업이 종료되면 다시 적재 구역으로 이동한 다음 일련의 작업들을 반복적으로 수행(단계 3-6)한다. 7-2. 만약, 운반 작업이 종료되었다면 작업자는 트럭을 주차구역으로 이동하여 트럭을 주차한다.

3.2 트럭 운반작업 데이터 수집

적재 및 운반 작업에 투입되는 트럭의 가용률 및 이용률, 효율성과 관련한 성능지표를 산정하기 위한 시간 데이터는 블루투스 비콘과 태블릿 PC를 이용하여 수집하였다. 블루투스 비콘은 다양한 응용 프로그램 개발을 통해 사용자에게 실내 위치 측위, 주변 환경 변화 감지, 광고, 자동 결제 등 다양한 서비스를 제공할 수 있는 특징을 지니고 있다. 본 연구에서는 블루투스 비콘을 파쇄장, 적재 지점, 로더와 같이 광석 및 폐석의 운반 작업을 수행할 때 트럭이 통과하게 되는 주요 지점에 설치하였다. 태블릿 PC는 25톤 트럭 4대에 설치하였다. Fig. 2는 블루투스 비콘과 태블릿 PC를 이용하여 트럭 운반 작업의 시간 데이터를 수집하는 방법을 모식도로 나타낸 것이다. 태블릿 PC를 탑재한 트럭이 블루투스 비콘이 설치된 지점을 통과할 때 체크포인트 측위 방법을 이용하여 트럭이 통과하는 시간을 기록할 수 있다. 태블릿 PC는 블루투스 비콘의 신호를 수신한 시간과 위치를 기록하게 되고, 이러한 방법으로 수집된 데이터를 이용하여 각 지점 간 트럭의 이동 소요시간을 계산할 수 있다. 트럭 운반 작업에 소요되는 시간을 제외하고 트럭 점검 및 정비, 개인 휴식 및 휴무와 같이 블루투스 비콘을 이용하여 기록할 수 없는 이벤트들은 트럭 운전기사가 태블릿 PC에 직접 메모의 형태로 기록할 수 있다.

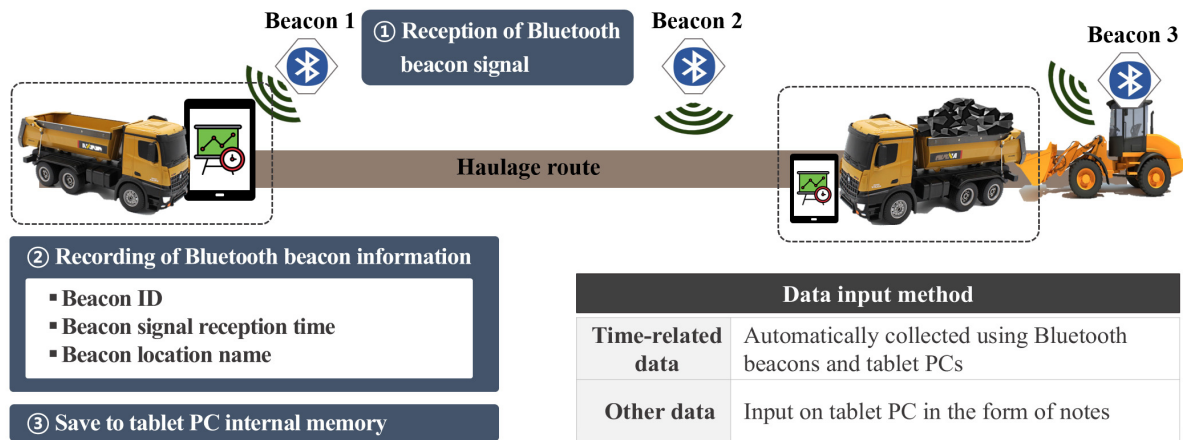


Fig. 2. Conceptual view of method to collect haulage operations data of trucks

본 연구에서는 트럭 운반 작업에 대한 성능지표를 산정하고 평가하기 위해 운반 작업에 투입되는 25톤 트럭 4대에 해당하는 데이터를 일주일의 기간 동안 수집하였다. 트럭 운반 작업과 관련한 데이터들은 태블릿 PC를 이용하여 수집하는 것을 기본으로 하고, 동시에 작업 일지(daily work report)를 이용하여 수집하였다. 작업 일지에는 적재작업을 수행한 장소 및 횟수, 상세 메모 및 정비내역과 같은 항목을 수기로 기록할 수 있으며, 기존에 연구지역에서 활용하고 있는 양식을 활용하여 수집하였다.

3.3 트럭 운반작업 시간 범주 분류 및 핵심성과지표 산정

블루투스 비콘과 태블릿 PC를 이용하여 수집되는 트럭 운반 작업 데이터는 태블릿 PC가 블루투스 신호를 수신한 시점을 기록하기 때문에 단위작업들의 소요시간을 산정하기 위해서는 데스크톱 환경에서 추가적인 데이터 처리가 필요하다. 태블릿 PC에 기록되는 원 데이터(raw data)는 CSV (comma-separated value) 파일 형식을 가지고 있으며, 블루투스 비콘이 설치된 장소의 유형, 신호 수신 시간, 블루투스 비콘 ID 혹은 작업 내용, 블루투스 비콘이 설치된 장소와 관련한 정보를 저장한다. 트럭 운반 작업을 구성하는 단위작업에 소요되는 시간을 산정하고 시간 범주를 분류하는 것은 다음의 절차에 따라 진행된다. 1. 원 데이터에서 연속된 두 개의 블루투스 신호를 이용하여 먼저 신호를 수신한 장소(1st signal reception)와 이후에 신호를 수신한 장소(2nd signal reception)를 결정한다. 2. 다음으로 블루투스 신호를 수신한 시각의 차이를 이용하여 단위작업에 소요된 시간을 산정한다. 기본 시간 요소와 시간 범주는 GMG 가이드라인에서 제시한 시간 범주 정의(Table 1, 2)를 이용하여 분류할 수 있다. 본 연구에서는 트럭 운반 작업에 투입되는 25톤 트럭 4대에 대한 성능지표를 산정하고 분석을 수행하였다. 트럭 운반 작업의 성능을 평가하기 위한 지표로는 Table 3과 같이 GMG에서 제안하고 있는 가용성 및 활용성, 효율성에 해당하는 9개의 성능지표를 활용하였다.

4. 연구결과

4.1 트럭 운반작업 데이터 수집 결과

광석 운반 작업에 투입되는 트럭의 성능지표를 산정하기 위해 블루투스 비콘과 태블릿 PC를 이용하여 일주일의 기간 동안 트럭 운반 작업 데이터를 수집하였다. Fig. 3은 태블릿 PC에 저장된 트럭 운반 작업 데이터의 예시를 보여준다. 광산의 운영 특성상 생산 작업이 이루어지지 않는 일요일과 개인 사유로 인한 휴무일에 대한 데이터를 제외하고, 트럭별 및 날짜별로 구분된 트럭 운반 작업 데이터를 수집할 수 있었다.

블루투스 비콘과 태블릿 PC를 이용하여 수집되는 트럭 운반 작업 데이터를 검증하고, 트럭 고장 및 수리, 작업 중지 등과 같이 태블릿 PC를 이용하여 기록하지 않은 데이터들을 수집하기 위해 트럭 작업 일지를 추가적으로 확보하였다. Fig. 4는 데이터 수집 기간에 작성된 트럭 B의 작업 일지 예시를 보여주며, 적재작업이 이루어진 장소 및 횟수, 트럭 정비 내역에 대한 내용을 포함하고 있다.

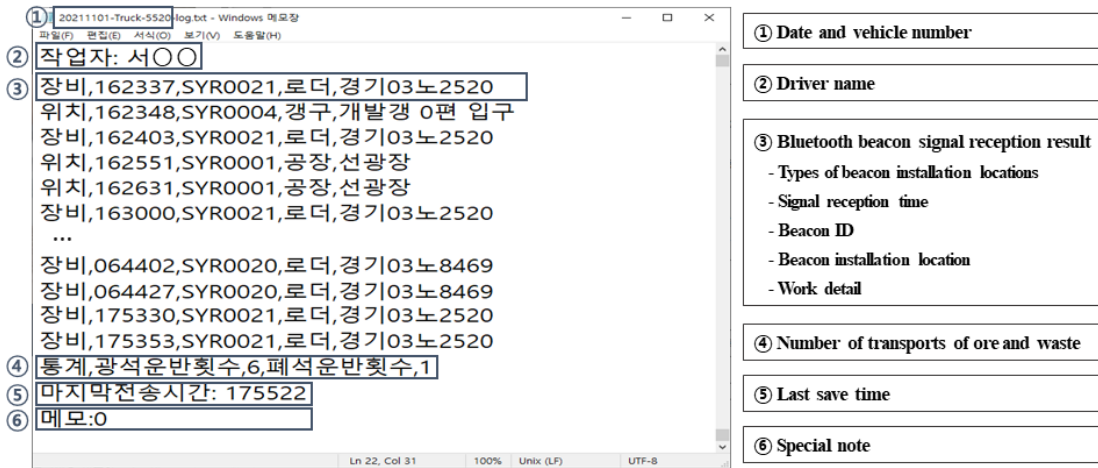


Fig. 3. Example of truck haulage data collected by Bluetooth beacon and Tablet PC

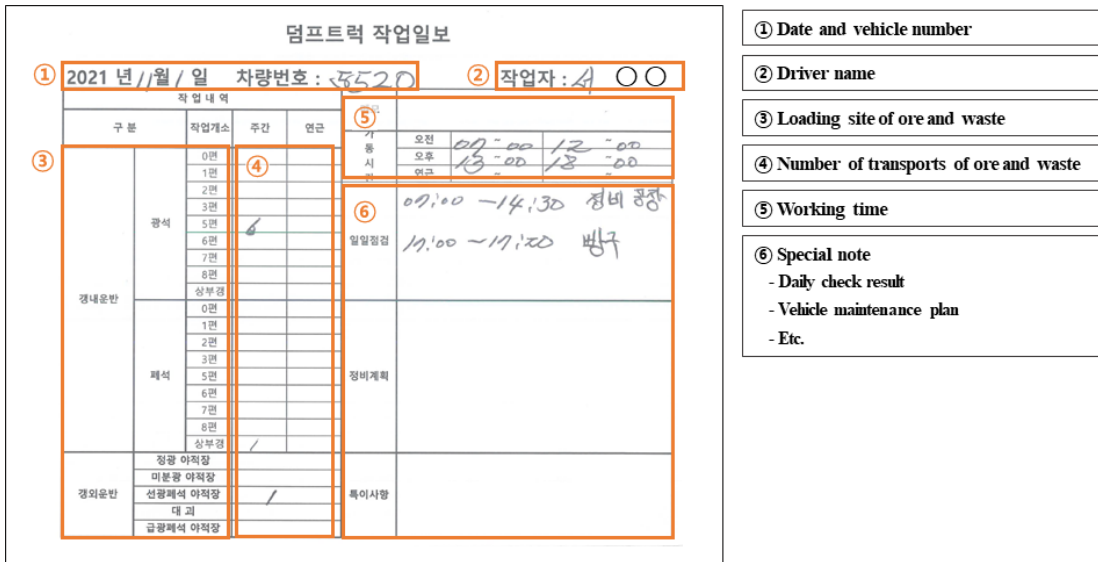


Fig. 4. Daily work report for truck used in study area

4.2 트럭 운반작업 기본 시간요소 및 시간 범주 분류 결과

일주일의 기간 동안 수집된 트럭 운반 작업 데이터를 트럭별, 날짜별로 구분하여 운반 작업의 단위작업별 소요시간을 계산하였으며, GMG에서 제안한 가이드라인을 참고하여 단위작업들의 기본 시간 요소와 시간 범주로 분류하였다. Table 5는 25톤 트럭 4대의 운반 작업 데이터를 GMG의 시간 범주로 구분하여 나타낸 결과이다. 달력 시간의 경우 672시간(트럭 4대 × 7 days × 24 hours)으로 산정되었으며, 예정된 시간은 약 238시간을 나타냈다. 연구지역의 경우 일요일(휴무일)에는 생산 작업을 진행하지 않으며, 광석 혹은 폐석의 운반 작업에 투입되는 트럭을 1교대(7 a.m.~6 p.m.)로 운영하기 때문에 예정에 없던 시간이 전체 달력 시간의 65%(약 434 시간)를 차지할 정도로 높게 나타나고 있다. 또한, 데이터 수집이 이루어진 기간 동안 개인적인 사유로 인한 휴무의 발생(트럭 2대)으로 평소보다 예정에 없던 시간이 더 높게 나타난 것으로 판단된다. 트럭 고장으로 인한 수리, 타이어 펑크와 같은

이유로 인해 휴지 시간이 10시간 정도 발생하였다. 광석 및 폐석을 운반할 수 있는 상태를 의미하는 이용 가능한 시간은 약 228시간으로 나타났으며, 대기, 운영 지연을 제외한 실제 운반 작업을 수행하기 위한 시간은 185시간으로 나타났다. 로더 혹은 파쇄기 접근, 적재 및 하역, 실차 운행 등의 단위 작업이 포함되는 생산적인 시간과 대기시간, 공차 운행과 같은 비생산적인 시간은 근무 시간 내에서 유사한 비율(생산적인 시간: 93 시간, 비생산적인 시간: 92 시간) 을 차지하는 것으로 나타났다.

Table 5. Results of time category classification of truck haulage operations data

Date	Calendar Time (CT)	Scheduled Time (ST)	Unscheduled Time (UT)	Downtime (DT)	Available Time (AT)	Standby (SB)	Operating Time (OT)	Operating Delay (OD)	Working Time (WT)	Non-Productive Time (NP)	Productive Time (PT)
21.11.01	96:00	44:49	51:10	7:59	36:49	5:37	31:11	0:22	30:49	15:07	15:41
21.11.02	96:00	31:46	64:13	0:00	31:46	5:56	25:50	1:01	24:48	13:28	11:20
21.11.03	96:00	43:50	52:09	2:09	41:40	6:14	35:25	0:20	35:04	17:46	17:17
21.11.04	96:00	44:57	51:02	0:00	44:57	8:09	36:48	0:13	36:34	17:04	19:30
21.11.05	96:00	43:32	52:27	0:00	43:32	7:56	35:36	0:47	34:48	17:14	17:34
21.11.06	96:00	28:44	67:15	0:00	28:44	4:28	24:16	1:41	22:35	11:14	11:21
21.11.07	96:00	0:00	96:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00	0:00
Total	672:00	237:41	434:18	10:09	227:31	38:23	189:08	4:26	184:41	91:56	92:45

Fig. 5는 데이터 수집 기간인 일주일(168 시간)의 기간 동안 운반 작업을 수행한 트럭들의 시간 범주가 어떻게 분류되는지 나타낸 것이다. 트럭 4대 모두 예정에 없던 시간은 전체 달력 시간에서 약 65% 정도의 비율을 차지하는 것으로 나타나고 있으며, 특히, 트럭 A와 B의 경우 각각 하루의 휴무로 인해 트럭 C와 D에 비해 다소 높게 나타난 것을 확인할 수 있다. 생산적인 시간과 비생산적인 시간으로 구성되는 근무시간은 트럭 C와 D가 각각 30% 정도의 비율을 차지하면서 트럭 A와 B에 비해 트럭을 더 많이 가용했다는 것을 알 수 있다. 그러나 트럭 C와 D의 경우 비생산적인 시간이 생산적인 시간에 비해 더 높은 비율을 차지하고 있기 때문에 실제로는 적재 혹은 하역을 위해 대기하는 시간이나 공차로 운행한 시간이 훨씬 많았다는 것을 유추할 수 있다. 트럭 B와 D의 경우, 트럭 고장 및 타이어 펑크로 인한 수리가 진행되었기 때문에 휴지 시간이 발생한 것을 확인할 수 있으며, 트럭 B의 경우 전체 달력 시간에서 5% 정도의 비율을 차지하는 것으로 나타났다. 대기의 경우, 평균적으로 약 6%의 비율을 차지하고, 운영 지연의 경우 트럭 A에서 2% 정도의 비율로 나타나는 것을 확인할 수 있다.

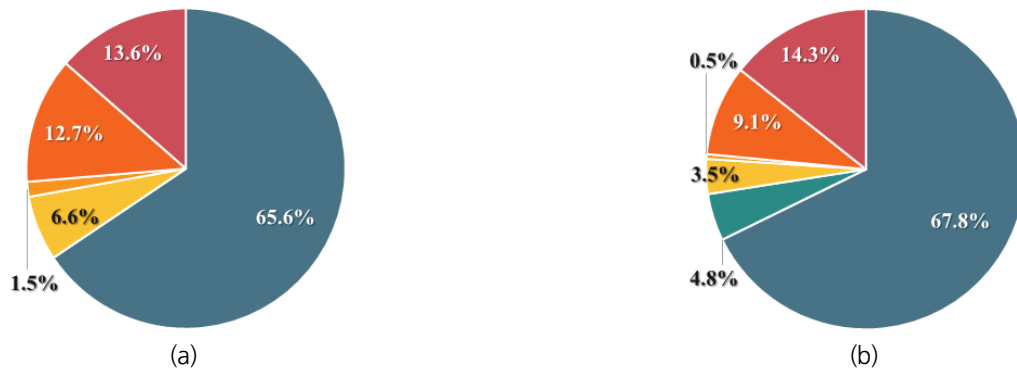


Fig. 5. Classification of time categories by truck in the study area (a) Truck A, (b) Truck B, (c) Truck C, (d) Truck D

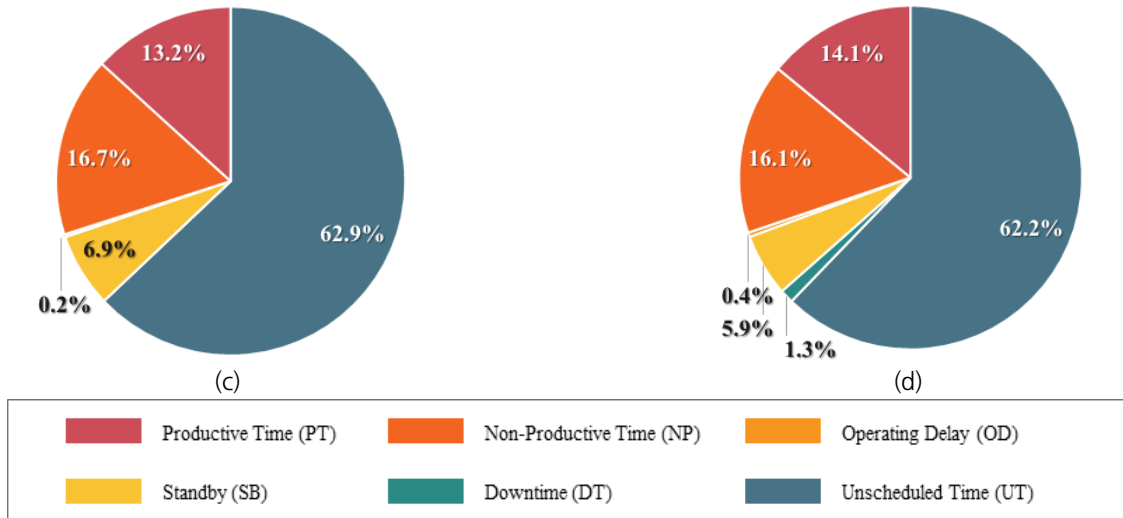


Fig. 5. Classification of time categories by truck in the study area (a) Truck A, (b) Truck B, (c) Truck C, (d) Truck D (continued)

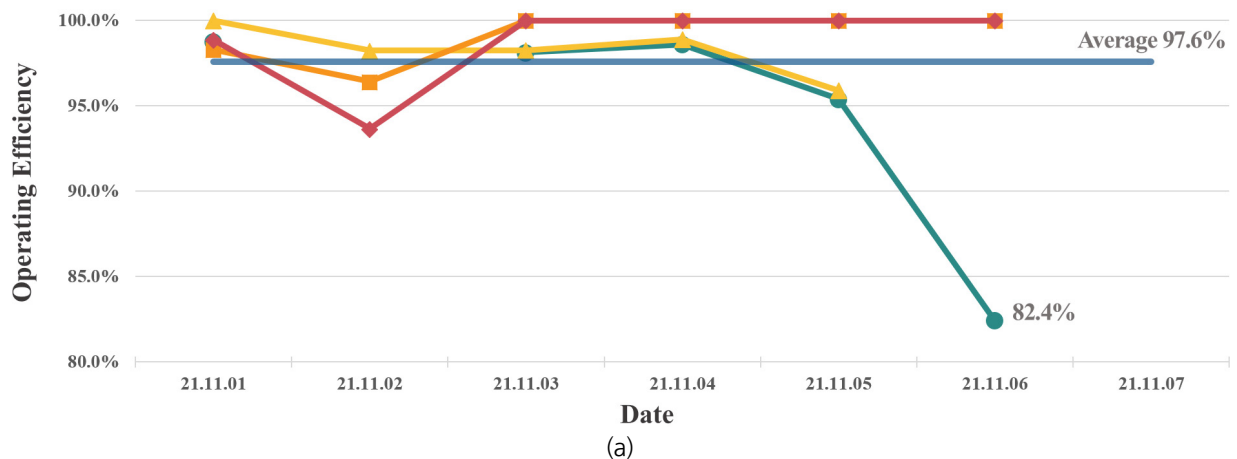
4.3 트럭 운반작업 핵심성과지표 산정 결과

블루투스 비콘 및 태블릿 PC를 이용하여 수집한 트럭 운반 작업 데이터를 GMG 가이드라인에 근거하여 시간 범주를 분류하고 운반 작업의 성과 지표를 산정하였다. Table 6은 일주일의 기간 동안 운반 작업에 투입된 25톤 트럭의 성과 지표를 날짜별로 구분하여 산정한 결과를 보여주고 있다. 트럭의 가용률과 관련한 성과지표는 트럭의 가동시간, 물리적 가용률, 기계적 가용률의 세 가지 지표를 산정하였다. 트럭의 필요 여부와 관계없이 트럭을 작동할 수 있는 총 시간을 의미하는 가동시간의 경우 일주일의 기간 동안 33.9%의 비율로 다소 낮게 나타나고 있다. 연구지역에서는 운반 작업을 1교대로 운영하고 있으며 야간에는 작업이 이루어지지 않고 있다. 또한, 일요일의 경우 휴무일이기 때문에 가동시간이 낮게 나타난다. 트럭의 작동 여부에 관계없이 트럭이 필요한 총 시간 대비 트럭을 활용할 수 있는 시간의 백분율을 의미하는 물리적 가용률의 경우, 트럭 B와 D의 고장 및 수리가 발생한 날(1일차: 82.2%, 3일차: 95.1%)을 제외하고는 모두 100%로 나타나고 있다. 운반 작업에 트럭이 필요한 시간 대비 트럭을 실제 사용할 수 있는 시간의 백분율을 의미하는 기계적 가용률도 마찬가지로 트럭의 고장 및 수리 작업이 있었던 1일차(21.11.01) 작업에서는 79.6%, 3일차(21.11.03) 작업에서는 94.2%로 나타나고 있다. 트럭의 이용률에서는 가용장비 이용률, 자산 이용률, 운영 이용률, 유효 이용률의 4가지 지표를 산정하였다. 가용장비 이용률은 운반 작업이 가용 가능한 트럭을 얼마나 잘 활용했는지 측정하는 지표로 일주일의 기간 동안 83.1%로 나타났다. 점심 식사, 차량 점검 등에 소요된 대기 시간을 제외하고는 트럭들을 잘 활용한 것으로 나타나고 있다. 자산 이용률은 자산을 사용할 수 있는 총 시간인 달력 시간 대비 자산을 실제로 가용한 시간인 운영 시간의 백분율로 표현되는 지표이며, 28.1%로 나타나고 있다. 운영 이용률과 유효 이용률의 경우 각각 79.6%, 77.7%로 나타나고 있다. 효율성 측면에서는 운영 효율성과 생산 효율성의 2가지 지표를 산정하였다. 운영 효율성은 97.6%로 매우 높게 나타나고 있으며, 운반 작업에서 대체적으로 트럭을 효율적으로 운영하고 있음을 알 수 있다. 그러나 장비가 광석의 생산 혹은 폐석의 운반에 직접적으로 기여하는 시간을 측정하는 생산 효율성 지표는 49%로 산정되고 있다. 생산 작업과 직접적인 연관이 없는 대기시간, 공차 운행에 소요된 시간이 다소 높게 나타나고 있기 때문에 생산 효율성 지표는 비교적 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

Table 6. Key performance indicators of trucks (4 trucks with a capacity of 25 tons) used for the transport of ore or waste

Date	Availability KPIs			Utilization KPIs			Effectiveness KPIs		
	Uptime	Physical Availability	Mechanical Availability	Use of Availability	Asset Utilization	Operating Utilization	Effective Utilization	Operating Efficiency	Production Effectiveness
21.11.01	38.4%	82.2%	79.6%	84.7%	32.5%	69.6%	68.8%	98.8%	50.3%
21.11.02	33.1%	100.0%	100.0%	81.3%	26.9%	81.3%	78.1%	96.1%	43.9%
21.11.03	43.4%	95.1%	94.2%	85.0%	36.9%	80.8%	80.0%	99.0%	48.8%
21.11.04	46.8%	100.0%	100.0%	81.9%	38.3%	81.9%	81.4%	99.4%	53.0%
21.11.05	45.4%	100.0%	100.0%	81.8%	37.1%	81.8%	80.0%	97.8%	49.4%
21.11.06	29.9%	100.0%	100.0%	84.5%	25.3%	84.5%	78.6%	93.1%	46.8%
21.11.07	0.0%	-	-	-	0.0%	-	-	-	-
Total	33.9%	95.7%	94.9%	83.1%	28.1%	79.6%	77.7%	97.6%	49.0%

본 연구에서는 트럭 운반 작업의 효율성과 관련한 2가지 지표인 운영 및 생산 효율성에 대해 트럭별, 날짜별로 구분하여 추가적인 분석을 수행하였다. Fig. 6은 운영 및 생산 효율성을 트럭별로 구분하여 나타낸 그래프이다. 운영 효율성의 경우 일주일의 기간 동안 평균 97.6%의 효율을 보이고 있으며, 트럭 A를 제외하고는 평균값과 유사한 운영 효율성을 보이는 것으로 나타나고 있다 (Fig. 6(a)). 그러나 트럭 A의 경우 6일차(21.11.06) 작업에서 운영 효율성이 82.4%로 매우 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 운영 효율성의 경우 근무 시간에 큰 영향을 받는 지표이며, 6일차 작업에서 트럭 A의 근무 시간은 7시간 53분(운영 시간: 9시간 34분)으로 나타나고 있다. 이때, 운영 지연은 1시간 41분으로 산정할 수 있으며, 평소보다 높게 나타나고 있다. 해당 작업일에 트럭 A는 운반 작업을 수행하던 도중 적재 지점 변경 및 로더의 이동에 의한 대기시간이 많이 발생하였으며, 이로 인해 운영 지연이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 6(b)는 생산 효율성에 대한 지표를 트럭별, 날짜별로 구분하여 나타낸 그래프이다. 전체 트럭에 대한 생산 효율성은 평균 49%로 나타나고 있다. 생산적인 시간에 영향을 많이 받는다는 것을 고려하면, 트럭 B(평균 59.9%)가 가장 효율적으로 운반 작업을 수행했다는 것을 확인할 수 있다. 앞에서 언급했듯이 운반 작업에 투입되는 트럭들은 효율적으로 운영되고 있으나, 트럭 B를 제외한 다른 트럭들은 생산 작업과 직접적인 연관이 없는 비생산적인 시간의 비율이 다소 높게 나타나고 있다.

**Fig. 6.** Efficiency of truck haulage operations by truck and by date (a) Operating Efficiency, (b) Production Effectiveness

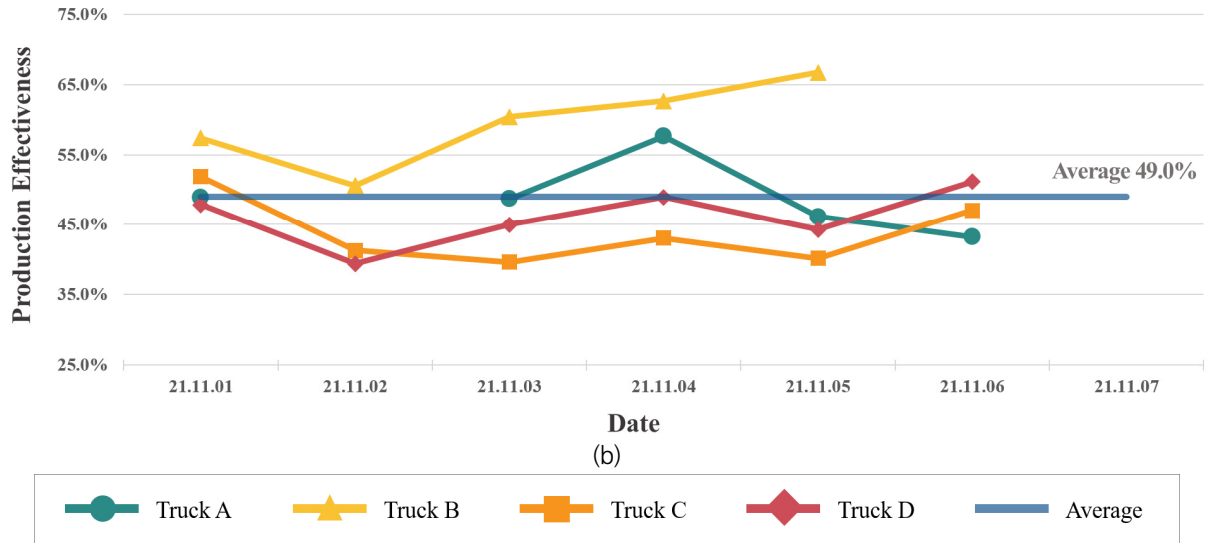


Fig. 6. Efficiency of truck haulage operations by truck and by date (a) Operating Efficiency, (b) Production Effectiveness (continued)

5. 토 의

본 연구에서는 장비의 이용률과 관련한 지표를 기준으로 연구지역에서 관련 지표와 운반 작업의 효율을 향상시킬 수 있는 방안을 제시하였다. 장비의 이용률과 관련한 4가지 지표들은 이용 가능한 시간, 운영시간, 근무시간의 세 가지 시간 범주에 영향을 받는다. 따라서, 연구지역에서 발생하는 대기과 운영 지연에 해당하는 시간 요소를 줄임으로써 장비의 이용률을 향상시킬 수 있을 것이라 판단된다. 대기는 다시 운영 대기과 외부 대기과 구분할 수 있으며, 연구지역에서 나타나는 대기는 대부분 점심 식사와 차량 점검과 같은 운영 대기과 발생하고 있는 것으로 나타나고 있다. 운영 대기과 경우, 운반 작업을 위해 필수적으로 수행되어야 하는 작업들의 소요시간이 대부분이므로 연구지역에서는 외부 대기과를 줄임으로써 장비의 이용률과 관련한 지표를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 외부 대기과는 일주일의 기간 동안 총 4시간 40분가량 측정되었으며, 운반 작업의 종료가 다가온 시점(18:00)에서 추가적인 운반 작업을 수행할 시간적 여유가 없을 때 운반 작업을 조기에 종료할 경우 발생하는 것으로 나타나고 있다. 따라서 로더 1대당 트럭 배차 수를 조절하거나 운반 작업에 투입되는 트럭들의 초기 배차시간 간격을 조절하는 방법으로 외부 대기과를 줄일 수 있을 것이다. 운영 지연의 경우 4시간 30분 정도의 시간이 소요된 것으로 나타났으며, 운반 작업 도중 적재 지점 변경 및 로더의 이동에 의해 지연되는 시간이 대부분인 것으로 나타났다. 따라서 운영 지연의 경우, 광석 혹은 폐석 운반 작업의 계획을 제대로 수립하여 낭비되는 시간을 줄이거나, 연구지역에 실시간 트럭 배차 방식을 적용하여 트럭이 적재 지점에 도착했을 때 대기하거나 지연되는 시간을 최소화하는 방법으로 운영 지연을 줄여야 할 것으로 판단된다.

이 외에도 연구지역의 생산성과 자산의 가용률, 이용률 및 효율성을 향상시키기 위해서 시뮬레이션을 통한 최적화 기법도 활용할 수 있을 것이라 판단된다. 트럭 운반 작업의 시뮬레이션을 통해 운반 작업에 투입되는 장비의 용량 및 수, 성능, 운반 작업 시작 시 트럭의 배차시간 간격을 결정하고 적용하는 방법으로 적재 및 하역을 위한 트럭의 대기시간을 최소화할 수 있다. 또한, 장비의 일일 점검 및 체크리스트 작성을 철저히 수행하여 장비의 고장을 사전에 방지하고, 장비 고장 및 운전기사의 부재로 인해 장비를 운영하지 못할 경우에는 대체 장비 및 인력을 투입하는 방안도 고려해야 할 것이다.

6. 결론

본 연구에서는 GMG에서 제안한 시간 사용 모델과 핵심성과지표를 이용하여 트럭 운반 작업에 투입되는 트럭의 가용률, 이용률 및 효율성을 산정하고 평가한 결과를 제시하였다. 이를 위해 대한민국 경기도 포천에 위치한 지하 광산을 연구지역으로 선정하고 블루투스 비콘 및 태블릿 PC를 이용하여 트럭 운반 작업과 관련한 데이터를 일주일 동안 수집하였다. 태블릿 PC를 25톤 트럭 4대에 설치한 다음 지하 광산 주요 지점에 설치된 블루투스 비콘의 신호를 수신하는 방법으로 시간 관련 데이터를 수집하였다. 그 외의 데이터는 트럭 운전기사가 직접 태블릿 PC에 입력하는 방법으로 수집하였다. 수집된 데이터를 이용하여 트럭 운반 작업을 구성하는 단위작업, 이벤트 및 활동들의 소요시간을 산정한 다음 시간 범주를 분류하였다.

트럭 운반 작업에 투입된 트럭들의 성과지표는 가용률, 이용률 및 효율성 측면에서 총 9개의 지표로 산정할 수 있었다. 트럭의 가용률을 살펴보면 가동시간의 경우 33.9%로 낮게 나타나고 있지만, 물리적 가용률과 기계적 가용률은 각각 95.7%와 94.9%로 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 장비의 이용률의 경우, 가용장비 이용률은 83.1%, 자산 이용률은 28.1%, 운영 이용률과 유효 이용률은 각각 79.6%, 77.7%로 나타났다. 효율성 측면에서는 운영 효율성이 97.6%로 매우 높게 나타나고 있는 반면, 생산 효율성의 경우 49%로 비교적 낮게 나타나고 있다. 연구지역의 경우 오전 7시부터 오후 6시까지 1교대로 운반 작업을 수행하고 있고 일요일의 경우 휴무일로 운반 작업이 이루어지지 않기 때문에 일부 지표가 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 연구지역에 투입되는 트럭들의 성능지표를 향상시키기 위해서는 외부 대기과 운영 지연으로 분류되는 시간을 줄여야 할 것이라 판단된다. 따라서 운반 작업에 투입되는 트럭들의 초기 배차시간 간격을 조절하거나 로더 1대당 배차되는 트럭의 수를 조절하는 방법으로 외부 대기를 줄이고, 실시간 트럭 배차 방식을 적용하거나 시뮬레이션 등의 최적화 기법을 이용하여 대기하거나 지연되는 시간인 운영 지연도 줄여야 할 것이다. 이 외에도 시뮬레이션 등 최적화 기법을 이용하여 트럭 운반 작업에 투입되는 장비의 용량 및 수, 성능을 결정한다면 트럭 운반 작업의 효율성을 향상시킬 수 있을 것이라 판단된다.

사사

본 연구는 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원 신산업 맞춤형 핵심광물개발활용기술개발사업의 지원을 받아 수행되었다(과제명: 음극재용 흑연광 스마트 탐사/개발 및 원료화 기술개발, 과제번호: 20227A10100040).

REFERENCES

- Arputharaj, M.M., 2015, Studies on availability and utilisation of mining equipment-an overview. *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology*, 6(3), 14-21.
- Baek, J., Choi, Y., Lee, C., Suh, J., and Lee, S., 2017, BBUNS: Bluetooth beacon-based underground navigation system to support mine haulage operations. *Minerals*, 7(12), 228-243.
- Baek, J., Suh, J., and Choi, Y., 2018, Analysis of reviewed signal strength index from bluetooth beacons to develop proximity warning systems for underground mines. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 55(6), 604-613.

- Bellanca, J.L., Orr, T.J., Helfrich, W.J., Macdonald, B., Navoyski, J., and Demich, B., 2019, Developing a Virtual Reality Environment for Mining Research. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 36(4), 597-606.
- Choi, Y. and Yi, H., 2020, Trend of mineral resource development technology using artificial intelligence. *IITP Weekly ICT Trends*, 1935, 13-24.
- Choi, Y., 2018, Analysis of patent trend for ICT-based underground mine safety management technology. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 55(2), 159-164.
- Gackowiec, P., Podobińska-Staniec, M., Brzychczy, E., Kühnbach, C., and Özver, T., 2020, Review of key performance indicators for process monitoring in the mining industry. *Energies*, 13(19), 5169.
- Global Mining Guidelines Group, 2020, A Standardized Time Classification Framework for Mobile Equipment in Surface Mining: Operational Definitions, Time Usage Model, and Key Performance Indicators, Retrieved April 5, 2022, from <https://gmgroup.org/guidelines-and-publications/>.
- Hague, K.P., 2021, Strategic Implementation of Digital Technologies to Optimize Operations in an Underground Mine, Doctoral Dissertation, The University of Arizona.
- Jung, J. and Choi, Y., 2017, Measuring transport time of mine equipment in an underground mine using a bluetooth beacon system. *Minerals*, 7(1), 1.
- Jung, J., Baek, J., and Choi, Y., 2016, Analysis of Features and Applications of Bluetooth Beacon Technology for Utilization in the Mining and Construction Industries. *Tunnel and Underground Space*, 26(3), 143-153.
- Kennedy, B., 1990, *Surface Mining*, Littleton, Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. (2nd Edition).
- Kim, H.T., 2017, The future values of natural resources. *EMRD*, 14, 20-23.
- Kim, S.S., Son J.Y., and Park, J.H., 2013, IT convergence technology trends based on big data analytics in the digital oil field. *ETRI*, 28(4), 1-9.
- Kim, Y., Baek, J., and Choi, Y., 2021, Smart Helmet-Based Personnel Proximity Warning System for Improving Underground Mine Safety. *Applied Sciences*, 11(10), 4342.
- Lim, J.T., Park, H.W., and Lim, J.S., 2014, Classification and application of digital oil field system. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 51(5), 750-756.
- Park, S. and Choi, Y., 2021a, Bluetooth Beacon-Based Mine Production Management Application to Support Ore Haulage Operations in Underground Mines. *Sustainability*, 13(4), 2281.
- Park, S. and Choi, Y., 2021b, Analysis and Diagnosis of Truck Transport Routes in Underground Mines Using Transport Time Data Collected through Bluetooth Beacons and Tablet Computers. *Applied Sciences*, 11(10), 4525.
- Park, S. and Choi, Y., 2022a, Development of Applications for Recording Ore Production Data and Writing Daily Work Report of Dump Truck in Mining Sites. *Tunnel and Underground Space*, 32(2), 93-106.
- Park, S. and Choi, Y., 2022b, Current State of Digital Information Gap in the Korean Mining Industry and its Mitigation Strategy: A Case of Daily Work Report App Development. *Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 59(2), 173-181.
- Park, S. and Choi, Y., 2022c, Analysis of International Standardization Trends of Smart Mining Technology: Focusing on GMG Guidelines. *Tunnel and Underground Space*, 32(3), 173-193.
- Pfleider, E., 1968, *Surface Mining* (1st Edition), New York: American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers.
- Ralston, J., Reid, D., Hargrave, C., and Hainsworth, D., 2014, Sensing for advancing mining automation capability: A review of underground automation technology development. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(3), 305-310.
- Sganzerla, C., Seixas, C., and Conti, A., 2016, Disruptive innovation in digital mining. *Procedia Engineering*, 138, 64-71.
- Singh, A., Kumar, D., and Hötzel, J., 2018, IoT Based information and communication system for enhancing underground mines

safety and productivity: Genesis, taxonomy and open issues. *Ad Hoc Networks*, 78, 115-129.

Yoon, D.W., Kim, S.M., Kim, J.S., Park, K.S., Park, H.W., Byun, J.M., Suh, J.W., Lee, C.W., Jang, I.S., Cho, S.J., and Choi, Y., 2018, Introduction to machine learning for natural resources development. CIR, Korea.

Zhou, C., Damiano, N., Whisner, B., and Reyes, M., 2017, Industrial Internet of Things:(IIoT) applications in underground coal mines. *Mining Engineering*, 69(12), 50.