

## 광해방지 지반침하방지 기술개발 추진 현황 및 주요 성과

양인재\*, 이승아

## A Study on the Status and Major Achievements on Mine Subsidence Prevention Technology

In Jae Yang\*, Seung Ah Lee

**Abstract** The mine subsidence prevention technology has been promoted based on the field test for design, construction, automation measurement and monitoring optimized for investigation, design and mine-filling efficiency customized in Korean mining environment. Based on the R&D roadmap ('07~'16) of the 1st and 2nd stage, mine reclamation technology development has been focused on developing method of evaluating subsidence stability, development of filling material and optimum filling technology, and development of measuring instrument. In the future, in order to systematic management for the subsidence risk areas, we intend to enhance technological capabilities and strengthen the technological infrastructure for business promotion in parallel with the discovery and introduction of new technology to prevent subsidence in the 4th Industrial Revolution era.

**Key words** R&D roadmap, Mine subsidence, Ground Monitoring system, Mireco Eye 3.0

**초 록** 광해방지 기술개발사업은 한국의 광산지역 특성에 최적화된 조사 및 설계, 충전효율화를 위한 설계 및 시공, 자동화 계측 및 모니터링을 위한 현장실증을 토대로 기술상용화 기반의 연구를 추진하여 왔다. 1, 2단계 광해방지 기술개발 로드맵('07~'16)에서는 지반침하 안정성 평가방법, 충전재 및 충전기술 개발, 계측장비 개발의 성과목표를 달성하였다. 향후에는 지반침하 위험지역에 대한 체계적인 관리를 위하여 4차 산업혁명 시대에 걸맞은 지반침하방지 신기술 발굴 및 도입을 통해 기술력을 향상시키고 이와 병행한 사업추진 기술인프라를 강화시켜 나가고자 한다.

**핵심어** 기술개발 로드맵, 지반침하, 지하 모니터링 시스템, 지하공동 형상화 장비

## 1. 서 론

광산지역의 지반침하방지 기술개발사업은 폐광산의 지하공동이 시간경과에 따라 공동 천반이 붕괴되고 그 붕락이 점차 상부로 발달하면서 지표까지 전이되는 지표붕괴 및 지반의 균열의 발생을 예측·평가하고 대책을 마련하기 위한 것으로 노후광로나 근접시공영향에 의한 도십지 싱크홀 및 도로함몰현상에 비하여 복잡한 메

카니즘 규명 및 예방 등 폭넓은 연구가 필요하다(한국광해관리공단, 2016). 광해방지 기술개발사업 1, 2단계 성과분석 결과, 지반침하분야 기술개발 기술수준은 선진국대비 83.71%로서, 최고기술보유국과의 기술격차는 4.65년인 것으로 파악된다(한국광해관리공단, 2017). 지반침하방지 기술은 크게 조사/평가, 설계/지반보강, 계측/모니터링의 3가지 목표를 토대로, 현장중심 실용화 기술개발을 달성하고자 노력하여 왔다. 개발된 광해방지기술의 상용화를 위하여 전문광해방지사업자 등 중소기업과 공동연구를 통해 가행 및 폐광산에 대한 현장기술 적용 및 성과검증은 지속적으로 이루어지고 있다. 본 논문은 1, 2단계 기술개발 로드맵 연구 성과를 소개하고, 선진국 수준의 기술개발을 완수하기 위한 발전 방향을 제시하기 위한 기초연구에 관한 것이다.

**Received:** Nov. 30, 2017

**Revised:** Dec. 26, 2017

**Accepted:** Dec. 27, 2017

**\*Corresponding Author:** In Jae Yang

Tel) +82339026731, Fax) +82339026739

E-Mail) ygloria@mireco.or.kr

Mine Reclamation Corporation, 2, Segye-ro, Wonju-si, Gangwon-do, KOREA

## 2. 광해방지 지반침하 기술개발 현황 및 성과

### 2.1 지반침하 기술개발사업 정의 및 범위

광해실태조사(한국광해관리공단, 2015)에 따르면, 전국의 총 개발광산은 5,544개이며, 휴폐광산 4,843개, 가행광산 701개 광산 중 1,973개소의 지반침하가 확인되어 안정성 평가와 복원 효율화 연구는 지속적으로 필요한 상황이다. 광산지역에 대한 한국형 지반침하 현상의 특징은 광종 및 개발방법 등에 따른 침하형태와 발생시기가 큰 편차를 보이며, 침하지 및 폐광도의 복원 설계를 위한 정밀한 백데이터는 해석이 매우 난해하다는 점이다. 지반침하 기술개발사업은 지반침하방지사업 수행에 요구되는 기초자료(채굴적 규모, 지층성상, 안정성평가)에 대한 정확도와 신뢰성을 향상시킴으로써 효율적인 복원이 이루어지도록 기술적 기반을 마련하는데 목적이 있다. 그러므로 광산별, 채광법별 침하원인 규명과 개발이론의 신뢰도를 평가하고 광산지역의 조사기법 개선을 위한 장비개발 등의 연구를 수행하여 왔으며 이에 대한 기본적인 연구체계를 Table 1에 제시하였다.

### 2.2 국내의 기술개발 동향분석 및 광산지역 지반침하방지 기술개발 방향설정

1993년 이후 342개 폐탄광을 대상으로 한 지반침하방지사업 시행에 따라, 지하채굴에 따른 지반안정성 평가연구(KIGAM, 1994), 폐광지역 지반침하 메카니즘 및 침하공법 연구(석탄합리화사업단, 1997), 지반침하재해 저감기술(KIGAM, 1998) 등 기초 연구가 수행되었다. 이외에도 탄성파 및 지하투과레이터를 이용한 지반영상 정보 취득, 레이저를 응용한 지하공동 측정기술, LIDAR 기술을 이용한 지하광산안전관리 등 지반침하분야의 다양한 기술이 연구되어 왔다. 미국 노천광업청(OSMRE)과 미국 국립산업안전보건연구소(NIOSH)은 석탄광산 모니터링을 통한 안전 어플리케이션 개발연구를 수행하여 갑작스런 탄광의 위험신호를 해석할 수 있는 연구를 진행하고 있다. 일본 석유천연가스금속광물자원기

(JOGMEC)는 미쓰비시와 공동으로 광산 충전의 효율화 기술개발 연구를 수행하고 있다(한국광해관리공단, 2017). 우리나라의 지반침하방지 기술개발은 복잡한 지질구조와 다양한 맥폭과 경사도를 갖는 국내 광산 실정에 맞도록 다양한 응용기술과 이론을 접목하여, 광해방지사업 현장수요를 반영한 연구과제를 발굴하고 이의 실용화 기술개발을 통한 현장직용을 목적으로 추진되었다. 대표적인 사례로는 한국형 지반침하 위험도 평가 기법, 산악 등 험지에 위치한 광산지역 효과적 침하모니터링을 위한 자동화 측정기술, 지하채굴 공동 3차원 형상화 시스템, 공동충전 설비 최적화 기술, 슬라브 국부보강 기법 등이 있으며, (가)서초정리, 성하마로 등 폐광속 및 폐석탄광 28개 광산에서 현장기술 적용을 통한 상용화 가능성을 확인하여 왔다. 또한, 이러한 기술개발 성과가 국내에서 가행중인 대규모 광산의 갱도분락 위험도 평가 및 지반침하 예측 및 예방분야에 효과적으로 활용될 수 있도록 기술의 완성도를 높여나가고 있다.

3단계 광해방지기술개발 로드맵 수립에 따라 향후에는 조사평가 분야의 지반침하 최적화 설계 DB 구축 및 모델링 기법, 위험도 평가 체계적 기준정립, 지반침하위험지역 조사효율화, 지반보강 분야의 침하지역인근 광업부산물 활용 침하제어, 지하수 포화 석회석 공동 충전효율화, 측정모니터링 분야의 미소진동, 암반응력평가, 위성레이더 등 융합측정기술, 광섬유센서 케이블 온도, 변위계측을 기반으로 하는 다양한 응용기술 및 이론의 접목을 통한 기술의 발전을 추진하여 나갈 예정이다.

## 3. 1단계('07~'11) 지반침하 기술개발 현황 및 성과

### 3.1 다양한 요소기술 및 처리공법에 대한 기술개발

#### 3.1.1 한국형 광산지역 지반침하 예측 및 평가 기초 기술개발

본 연구는 국내외 침하관련 연구동향 및 지반침하 사례 분석(석탄광 5,148건, 금속광 66건)을 토대로 주요 침하

**Table 1.** MIRECO's Technology Status of Ground Subsidence in Mine Sites

Investigation/Evaluation	Design/Reinforcement	Measurement/Monitoring
<ul style="list-style-type: none"> <li>Development of underground joint 3-D modeling equipment (Mireco-Eye)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Customized goaf reinforcement design (slab method)</li> <li>Economic design of underground mine stabilization by local reinforcement</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Micro-seismic ground measurement (ICT automation measurement)</li> <li>Automatic ground measurement system using optical fiber</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Risk evaluation method and assessment software for Korean mine subsidence model</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feasibility study of mine voids filling material</li> <li>Technical efficiency improvement of Hydraulic Filling Method</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Development of automatic settlement measurement</li> <li>Integrated ground measurement management software</li> </ul>

No.	Coordinates		Depth (m)	Width (m)	Height (m)	Hazard (%)
	X	Y				
1	282411	388900	70	10	20	66.16
2	282604	389012	60	20	5	62.27
3	282615	388768	70	3	5	45.32
4	282655	388900	40	10	10	65.39
5	282889	389012	50	5	5	52.57
6	282889	388758	53	6	7	56.01
7	283052	388921	50	2	2	38.32
8	283103	388849	60	2	2	36.66

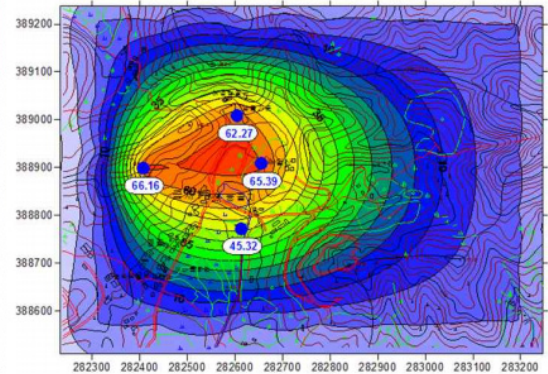


Fig. 1. Probabilistic ground subsidence prediction for mine and developed evaluation software

영향인자(탄층경사, 두께, 채굴적 심도 등) 다변량 분석을 통한 정량적인 안정성 평가기법을 수립하기 위해 수행되었다. 이는 불규칙한 한국형 지반침하 특성에 관한 핵심인자를 도출하고, 무극광산과 한보광산 등 실증 현장에 대한 조사 및 평가를 실시하여, 연속체 및 불연속체 조건별 모형시험과 수치해석을 통한 최대침하량 및 상호인자 영향해석을 실시하여, 지반침하 안정성 평가법을 개발하였다(한국광해관리공단, 2008). 평가등급은 채굴적 심도>상반조건>채굴적 폭>채굴적 높이>채굴적 경사>강우>동적하중>침수상태로 결정하였고, 미래코 지리정보시스템(MGIS) 과 연계된 평가표를 제공함으로써, 5단계 위험등급(I~V)분류를 토대로 한 체계적 관리방안이 마련되었다. 연구의 최종 목표인 평가기법 및 평가용 소프트웨어 개발을 통해 지반침하가 예상되는 광산지역 지하정보 DB를 활용하여 체계적인 안정성 평가를 수행한 후, 평가결과를 정량적이고 객관적인 지표로 제시함으로써 설계자의 판단오류와 주관성을 배제하고 지반침하 위험성에 대한 객관적이고 합리적인 예측 및 평가 인터페이스를 제공하였다는 점에서 큰 의의가 있다. Fig. 1은 지반침하 발생 위험도 평가를 토대로 한 위험지도 변화 분석 사례이다.

**3.1.2 채굴적 충전재료 및 방법 효율화 기술개발**

광산지역 지반침하 보강공사 대상은 채광 압박조건외 다양성, 굴진심도, 주입방법, 보강효과 등 다양한 시공 조건을 고려하여 정량적이고 정성적인 분석 및 평가가 이루어져야 한다. 광산 지하채굴적에 대한 효율적 충전을 위해서는 공동의 위치, 규모, 채광방법, 채굴상태, 지질 및 지하수 조건 등 다양한 요인을 분석하여 공법 및 재료를 선정하여야 한다. 국내의 복잡한 지질환경과 채

탄법은 다수의 급경사 채굴적을 형성하고 있어 수평 채굴적에 주로 적용되었던 외국의 공법을 그대로 적용할 경우 효율적인 보강효과를 기대하기 어렵다. 이에 국내 광산 특성에 부합하는 그라우팅 시스템, 급경사지 채굴적 대상 주입장치, 친환경 무수축 그라우팅 재료를 개발하기 위하여 주입방법별 기존 주입재의 문제점을 점검하고 반복시험시공을 통한 개선방안을 도출하였다. 폐광이후 오랜 시간이 지나 지하수가 충수된 채굴적에 대한 충전효율화를 연구의 일환으로 수중불분리성 혼화제, 초급결성 급결제, 알칼리탄산염, 폴리카본 유동화제, 급결보조제 등 다양한 시험조건을 현장에서 모사하여 최적의 그라우팅 재료개발이 이루어졌다. 아울러 공사중 배출수에 대한 수질오염 모니터링을 통하여 수질오염 등 환경친화적인 복원 가이드라인을 제시하였다. 급경사지 보강을 위한 급결 그라우팅 보강의 경우, 주입량, 주입부피, 뒤채움 재료의 주입량, 뒤채움 재료의 밀도 및 안전계수 등의 변수를 현장여건에 적합하게 산정할 수 있는 사용자 중심의 소프트웨어를 Fig. 2와 같이 개발하였다.

**3.1.3 광산지역 지하수 유동 및 지반변위 계측기법 개발**

지하 채굴적 및 갱도와 지반침하의 연계성 규명을 위한 3차원 안정성 평가를 지원하기 위한 복합 ICT기반의 자동화 계측기술개발이 추진되었다. 복합 텔레뷰어(Borehole shutter) 시스템자료를 활용한 3차원 절리구조 영상화 기법, 시추공내 온도센서 케이블을 삽입하여 동시 모니터링을 실시하여 3차원 지하수 유동해석(Fig. 3) 및 지반침하 징후 사전예측이 가능한 기술과 광케이블을 이용한 변형률 계측기법을 활용하여 시추공내 지중변위 측정/지반 거동 계측기술을 포함한다. 온도센서 및 광케이



**Table 2.** Economic comparison of MIRECO’s rockbolt system with foreign products

Issue of Construction		MRB-1	S bolt system
Procedure		•Drill→Inject→Swell→Rupture→Grouting bolt	•Drill→Inject→Swelling bolt
Reinforcement Effect		•Drill hole stabilization/Surrounding Grout ⇒ Permanent Reinforcement effect	•Drill hole stabilization effect ⇒ Relaxation possible
Application		•Weathered fractured rock mass (Quartzite)	•Domestic limestone mine
Economic aspect	Bolt (L=4 m)	•KRW 69,000 per each (L=4 m)	•KRW 75,000 per each (L=4 m)
	Cost	•KRW 117,000 per each (L=4 m)	•KRW 125,000 per each (L=4 m)
	Total cost	•KRW 186,000 per each (L=4 m)	•KRW 200,000 per each (L=4 m)
Accomplishment		•MRB-1 method is stable and economical in mine area, is more effective than foreign products, especially for immediate and semi-permanent reinforcement	

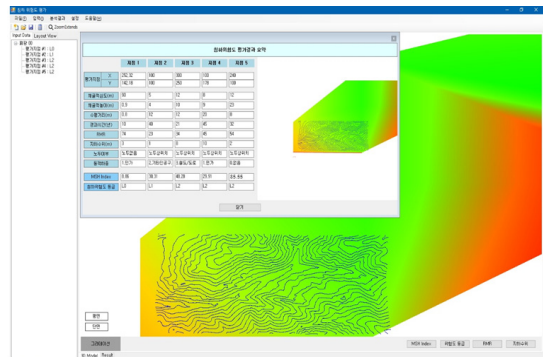
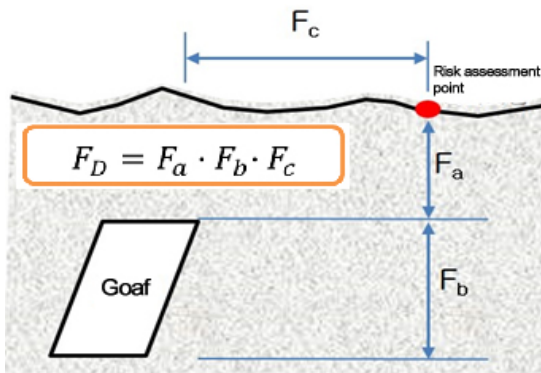
가능성을 평가하였다. 총 14개 현장에 대한 시험시공을 통해 말뚝지지 슬라브 형식검토, 기초형식 검토(선단지 지형, 마찰형), 구조체 검토(구조체 지반반력 신뢰성)를 토대로 설계기준 및 지침을 제시하였다. 노천채굴적 등 급경사지 암반취약부에 대한 록볼트 수압-팽창-파열-주입 단계적 과정에 대한 반복실험을 실시하고, 출수지역 등 불량암반 지역에 적합한 미래코록볼트(MRB-1)을 시험생산(제조기술)하는데 성공하였다. 록볼트 인발성능 평가(인발하중)결과 4.65 ton(비그라우팅)~5.12 ton(그라우팅)로서 앵커형 록볼트보다 효과적이며, 시공성, 안정성, 효율성 비교분석을 토대로 시공이 간편한 개량형 고효율 록볼트 개발의 성과를 인정받아 NET 신기술 (2010 3회) 인증을 완료하였다. 추가적인 연구를 통하여 자동화된 생산시스템 구축이 가능하다면, 독자적인 파쇄대 안정화 기술 확보 및 외국산 S 설비 등의 기술 대체로 그에 따른 수입대체 효과가 클 것으로 기대된다.

## 4. 2단계('12~'16) 지반침하 기술개발 현황 및 성과

### 4.1 개발기술 효율향상 및 실증을 통한 현장 적용성 강화

#### 4.1.1 지반침하 위험도 평가모델(AI) 및 전문가 시스템 개발

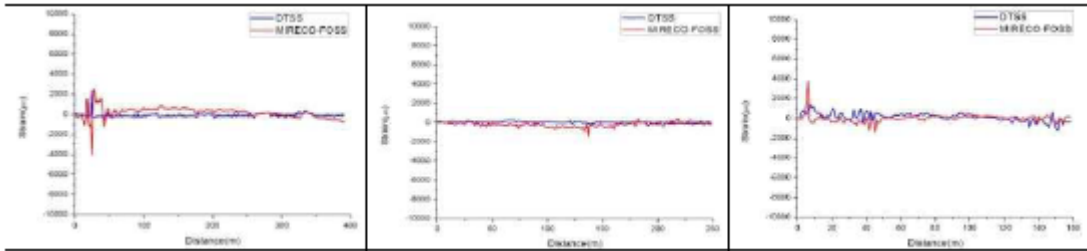
그간의 폐광지역 지반침하 위험도 평가는 인공신경망 활용 및 회귀분석을 통한 평가모델이 주를 이루어왔다. 본 연구는 평가모델 플랫폼 기반조성을 목표로 공단에서 수행한 폐광산 침하지 조사보고서 자료 중 총 38개 광산의 388개 침하지중 데이터의 일관성이 확보된 287개소 광산에 대한 자료조사를 실시하고, 이를 토대로 지반침하 영향인자 선별(4개 분야 19개 인자)후 변수분석(parametric analysis)을 통해 8가지 영향인자에 대한 원데이터를 환산하여 침하가능 여부분석을 위한 인공신경망 구조를 설계하였다. 또한, 폐광 지표면 임의 지



**Fig. 4.** Basic concept of risk assessment factoring and developed software implementation

**Table 3.** Mine-filling efficiency verification methods and review of results

Issue of Construction	Factor of Design	Utilization of tests result
Effective filling	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Optimum slope analysis of mine filler</li> <li>•Diffusion radius analysis of mine filler</li> <li>•Material properties analysis before and after mine-filling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Estimation of filling efficiency under groundwater flow conditions → Economical analysis based on aggregate characteristics</li> <li>•Mine filling conditions due to groundwater saturation and flow → Particle size, consistency, groundwater flow influence</li> </ul>
Grout column	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Grout column diameter analysis</li> <li>•Strength test for core sampling specimens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Verification of shape and properties of Grout Column → Calculation of bearing capacity by numerical analysis</li> </ul>
Post-monitoring	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Groundwater level and flow rate according to filling material/filling pressure</li> <li>•Turbidity / water quality, pH monitoring</li> <li>•Analysis on polluted water quality criteria : As, Cd, Pb, Cu, Zn, Fe, Mn, Al</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Countermeasures for scenarios according to groundwater change conditions before and after mine-filling construction</li> <li>•Analysis of water pollution diffusion before and after mine-filling construction</li> </ul>

**Fig. 5.** Comparison of optical fiber measurement results of domestic and foreign equipment

점에서 침하위험도를 분석하기 위하여, 직접영향인자  $F_D$ (채굴적 심도, 채굴고, 수평거리 침하위험도)와 간접영향인자  $F_I$ (폐광경과시간, RMR, 지하수위, 노두여부, 동적하중)의 Matrix 분석을 통해 침하위험지수(MSH index)에 대한 포트폴리오를 평가하고, 폐광침하위험도 평가 프로그램을 개발하였다. MSH 평가를 통해 침하/비침하 영역에서 위험도 등급을 3단계로 분류하고, 산정한 위험도 등급별 지표 및 지중침하 변위 추이를 기초로 신뢰성 해석을 실시하고 현장 계측자료와 비교분석을 통해 최종 계측관리기준치를 산정하였다. 금번 연구성과를 기반으로 지반침하 위험도 평가모델을 지반침하방지 단계별 판별기준, 폐광지역 부지활용/사업 시급성 척도, 거시적 위험도 표준지표를 발굴하고 상세설계 등 현장실무 기초자료로 활용할 예정이다.

#### 4.1.2 지반 충전기술의 현장 실증시공을 통한 충전 효율 검증 및 안정성 검토

지반침하방지 보강공사에서는 주로 수압식 충전법을

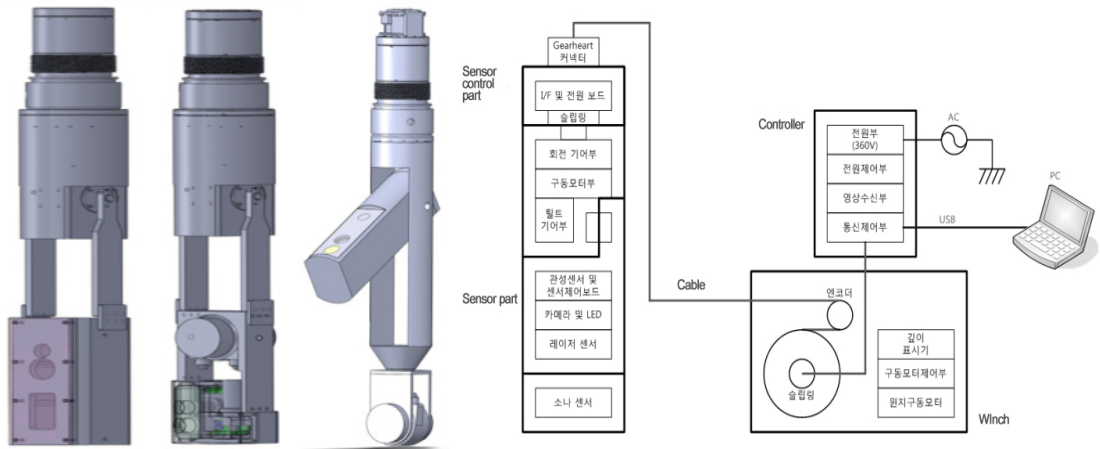
활용하여 모래, 시멘트, 몰탈, 시멘트 밀크 등 비교적 고가의 재료들을 충전재로 사용하여 왔다. 본 연구의 목표는 수질오염 등 환경친화적 조골재, 현장토, 폐석, 순환골재 등 다양한 재료에 대한 현장실증 및 최적 충전기법 기술개발을 통해서 충전효율성을 높이고 지반침하 안정성을 확보하기 위한 것이다. 재료수급이 용이하지 않은 광산지역의 현장토를 이용한 쇄석골재, 혼합골재, 현장토를 이용한 충전재 기동형성 시험을 실시하고, 충전효율 모니터링(안식각, 확산성, 물성검토)을 통한 채굴규모별 보강방안을 목표로 하였다. 폭 6.0 m (안식각 35) 컨테이너 수조내에서 4가지 case(조골재, 혼합골재, 현장토, 그라우트기동)에 대한 실험형 모형실험을 실시하고, 지하수 이동의 억제 및 충전재 유실을 최소화하기 위한 비교안을 검토하고 경제성 및 안정성 측면에서 최적설계안을 마련하였다.

#### 4.1.3 국산 광섬유 계측기 개발

한국광해관리공단은 2009년 광섬유 계측 시스템에

**Table 4.** Micro vibration measurement management criteria (sample of a specific mine)

Stages	Event depth	Degree of risk	Safety measures
1 <sup>st</sup> stage	●Deep mine (under GL. 60 m)	Caution	●Observation for future trend
2 <sup>nd</sup> stage	●Near Goaf (GL. 20~60 m)	Warning	●Site investigation for the results ●Analysis, Ground Stability Assessment
3 <sup>rd</sup> stage	●Near surface (GL. 0~20 m)	High risk	●Access control measures ●Detail field survey based on the analysis results ●Cause Analysis and Precision Ground Safety Diagnosis



**Fig. 6.** Modification of MIRECO EYE and general system configuration diagram

대한 이론 및 예비실험 기초연구를 시작으로 2014년 순수 국내기술을 바탕으로 한 광섬유센서 계측기인 MIRECO-FOSS(MIRECO Fiber Optical Strain Sensor)를 개발하였다. MIRECO-FOSS는 가격은 독일 DMT 등 외산장비의 70% 수준이나 변위측정 정확성은 비슷한 것으로 분석되어 2014년부터 현장에 투입되어 성능을 검증하였다. 본 장비는 측정간격을 최소 0.5 m 정도로 조절할 수 있어 1.0 m인 외산 장비 보다 좀 더 세밀한 측정이 가능하며 측정시간도 외산장비의 절반 정도로 빠른 장점을 가지고 있다. 현장 실증을 통해 Tight buffered cable의 경우는 압력변화에 따라 Brillouin 역산란 광의 파장 변화가 선형적인 변화를 보여주었다. 이러한 결과는 본 광섬유케이블이 압력 센서로서 활용될 수 있음을 입증하였다. 이러한 자체개발 장비의 성능을 지속적으로 검증하기 위해 외산장비와 함께 현장 모니터링을 실시하고 결과를 분석하였다(Fig. 5). 계측결과는 최초 설치시의 값을 기준으로 다음 측정시의 변위의 정도를 기준으로 정확도 산정이 기준으로 활용하였다. 금곡 등 3개 광

산현장의 광섬유센서 모니터링 결과 자체개발 장비(MIRECO-FOSS) 계측결과가 수입장비(DTSS) 계측결과와 거의 유사하게 나타났다. 이러한 결과로 미루어 공단의 기술로 자체 생산한 장비가 외산장비와 거의 비슷한 측정 정확성을 확보하고 있음을 확인하였다. 또한 자체 생산 장비의 경우 외산장비 대비 측정 시간이 절반정도이며 가격이 저렴한 장점이 있어 활용성 측면에서는 우위를 점할 것으로 판단한다.

**4.1.4 미소진동(GMO) 모니터링 기술개발**

2단계 연구개발에서는 4차년에 걸쳐, 다양한 지반침하 모니터링 방법의 현장 적용성 평가를 통한 온도변위 측정, 광섬유계측 및 미소진동 모니터링 시스템 효율성 평가를 위한 연구가 수행되었다. 이중 미소진동 모니터링 정확도 향상을 위한 분석기법 연구는, ① P파의 도달 주시를 이용한 역산(P파의 초동주시 추출 및 P파 속도 도출), ② 편극 필터를 통한 S파 도출, ③ S파 초동에 대한 유효범위 설정 ④ PS시를 이용한 침하지 위치 역

산, ⑤ 위치결정 정확도 향상을 위한 반복 역산 및 수렴치의 정밀성 향상의 절차로 수행하였다. 미소진동 모니터링 정확도에 영향을 미치는 인자는 설계영향인자와 수진기 성능인자로 구분할 수 있다. 먼저 설계영향인자로는 수진기 설치배열 및 설치위치, 수진기와 진원과의 거리, 계측장비의 샘플링 간격 및 시간동기화 등이 있으며, 수진기 성능인자로는 수진기의 주파수 범위, 감도 및 수진기 설치위치의 주변 잡음 등이 있다. 본 연구에서는 이러한 조건들에 대한 민감도 분석을 실시하여 광산현장에서 지반침하 평가를 위한 시스템을 설계하였다. 아울러 역산위치의 신뢰성을 향상시키기 위하여 S파를 증폭시키면서 노이즈를 감쇠시키는 편극 필터를 사용하여 S파를 추출하고 S파의 속도를 도출하였다. 실증현장에 대한 미소진동 모니터링 결과 P파 초동을 이용할 경우 발파 신호에 대해 10 m 오차범위 내에서 위치를 정확히 역산할 수 있음을 확인하였다. 신호의 파형 및 스펙트럼 분석값으로 지하공동에서의 지반침하 신호의 발생 원인을 예측할 수 있는 위치분석 수행여부 결정 흐름도가 마련되었다. 하지만 P파 초동 피크를 통한 역산법은 초기 변수값의 정확도에 따라 오차 발생확률이 큰 것으로 평가되었다. 모니터링 방법의 개선은 관리기준 수립에 필수 요소로서, 장심도에서 붕괴나 낙반 등이 발생할 경우 침하 범위가 빠르게 지표로 확대되어 지반침하가 발생할 가능성이 높아지는 원리를 이용한 것이다. 반면, 천부에서 일어나는 이벤트는 침하가 즉시 침하형태로 발생할 수 있어 위험도가 매우 크다는 전제조건이 수립된다. 따라서 이벤트가 천부에서 발생할 경우 즉각적인 발생위치 주변의 출입통제 조치 후 원인분석 및 지반안정성 평가가 이루어져야 한다. 채굴적 주변(20 m~60 m)에서 붕괴나 낙반이 발생할 경우에는 지반침하로 연결될 때까지의 시간이 천부에서 발생되었을 때보다 다소 길리기 때문에 천부에서 이벤트가 발생한 경우보다는 위험도가 낮다고 판단할 수 있다. 심부(60 m 이하)에서 붕괴나 낙반 등이 발생할 경우에는 채굴적 주변 및 천부에서 발생할 때 보다는 위험도가 더 낮은 것으로 보고 관리기준을 Table 4와 같이 분류하였다.

#### 4.1.5 지하공동 형상화 장비 개발(Mireco Eye 3.0)

기존의 레이저 3D 스캔기법을 응용한 측정 장비는 정밀도와 효율성은 우수하지만, 폐광산의 특수한 환경(접근성 낙후, 분진 및 낙수, 수중조건 등)에서 활용이 어려운 실정이다. 한국광해관리공단은 낙반 등 위해요인으로 인하여 직접조사가 불가능한 광산지역 채굴적 정밀 조사에 적합한 장비를 개발하고자, '09년 초기모델

(V.1.0) 제작을 시작으로 모형연구, 현장실험 등을 통해 성능 보완 및 형상화 소프트웨어 개발을 추진해왔다. 이러한 노력에 힘입어 공단은 레이저와 소나 센서를 통해 각도에 따라 거리를 측정하고 지하공동의 형상을 파악할 수 있는 지하공동 3차원 형상화 장비(Mireco-eye)의 개발 및 신기술(NET) 인증에 성공하였다. 본 장비는 시추공을 통하여 삽입하여 정밀한 지하공동의 수치정보 및 영상정보의 취득을 통해서 3차원적인 지하공동 및 채굴적의 측량이 가능하다. 폐광된지 오래된 광산은 도면이 없거나 불확실한 지반정보 등으로 인하여, 조사 및 설계가 어려웠으나 Mireco-eye를 활용하여 지반충전 및 보강후 효율 확보 전과정에 대한 모니터링이 가능하게 되었다. 슬림화, 일체화, 고속화된 V3.0 은 장비의 상용화를 위한 첫 단계로서 부산시 도로지반 함몰탐사 장비 개발에 참여하고 있으며, 지반침하 정밀안전진단은 물론 전방 군사지역 땅굴징후 확인, 출수피해지역 수갱조사, 가행광산 글로리홀 안전진단 등에 대한 활용도를 높여나갈 계획이다. 또한 광산 채굴적은 지하수로 채워져 있을 가능성이 많으므로, 일체화된 센서부의 방수성을 강화하고, 지반 범용해석 프로그램인 GTS 연동을 통한 지하구조의 비교도면 작성도 용이하게 할 계획이다.

## 5. 결론

광해방지 기술개발사업은 한국의 광산지역 특성에 최적화된 조사 및 설계, 외산 계측장비의 국산화, 현장실증을 통한 설계 및 시공방법의 효율화를 도모하고자 지난 10여년간 꾸준히 추진되어 왔다. 지반침하방지사업을 효율적으로 수행하기 위해서는 붕락구간에 대한 안전한 복구, 침하위험지역에 대한 안정성 평가 시뮬레이션은 물론 나아가 침하 발생규모, 위치에 대한 예측 기술의 확보가 중요하다. 다점온도 센서 및 광섬유 분포 계측을 포함, 무선 네트워크 기술을 활용한 원격 자동화 계측 및 IoT 통합관리 시스템 등 첨단 기술을 접목한 계측기술의 상용화를 토대로 실시간 원격 지반침하 모니터링이 가능하여졌다. 3단계 로드맵('17~'21)을 통해 향후 4차 산업혁명 시대에 걸맞은 지반침하방지 신기술 발굴 및 도입을 통해 기술력을 향상시키고 이와 병행한 사업추진 기술인프라를 강화하여 보다 신속하고 안전하게 국민의 소중한 생명과 재산을 보호하는데 기술의 진보를 이룰 것으로 판단된다. 이와 동시에, 조사부터 설계시공 및 사후관리까지 완결형 지반침하방지 기술개발을 적극 추진함으로써, 지속가능한 안정적 광산개발의 유도 및 자연친화적 광해관리에 대한 효율성을 확대하여 나아갈 예정이다.



**References**

1. 한국자원연구소, 1998, 한국자원연구소 연구보고서, 지반침하 안정성 평가기법 및 대책연구, KR-98(C)-47.
2. 석탄산업합리화사업단, 2004, 폐광지역 지반침하 방지사업 종합분석 및 발전방향에 관한 연구보고서, 113-225.
3. 한국광해관리공단, 2008, 한국형 광산지역 지반침하의 안정성 평가기법 및 소프트웨어 개발, 152-153.
4. 이병윤, 전석원, 김태현, 조정우, 김관일, 김태혁, 김수로, 2009, 채굴적 경사에 따른 그라우팅 주입량 결정에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제19권 제2호, pp.107-122.
5. 한국광해관리공단, 2009, 지반침하억제를 위한 상부보강 기술개발, 137:193-197.
6. 한국광해관리공단, 2009, 지하공동의 효율적 충전을 위한 급결 충전 그라우트공법개발에 관한 연구.
7. 한국광해관리공단, 2011, 고효율 충전기술 개발.
8. 한국광해관리공단, 2011, 광산 지하 채굴적 및 공동 3차원 형상화 장비 개발, 한국광해관리공단 기술총서 2011-142.
9. 한국광해관리공단, 2011, 지반침하억제를 위한 수압식 충전법 효율화 방안연구.
10. 한국광해관리공단, 2011, 팽창-파열 주입식 록볼트 실용화 장비 개발, 151-161.
11. 한국광해관리공단, 2013, 지하공동 충전소재 개발.
12. 한국광해관리공단, 2013, 삼성석회석광산 지반침하 정밀조사 및 자동계측기 설치·모니터링 정밀조사 보고서.
13. 한국광해관리공단, 2013, 고효율 지반보강 기술 개발 보고서.
14. 한국광해관리공단, 2014, 폐광지역 지반침하 위험도 평가 기술 개발.
15. 한국광해관리공단, 2016, 지반침하 현장 모니터링 기법 개발, 52-127.
16. 한국광해관리공단, 2017, 2016 광해통계연보, 187-189.
17. 한국광해관리공단, 2017, 2016 광해관리백서.

**양인재**



1991년 서울대학교 자연과학대학 지질학과 이학사  
 1993년 서울대학교 대학원 지질과학과 이학석사

Tel: 033-902-6731  
 E-mail: ygloria@mireco.or.kr  
 현재 한국광해관리공단 기술연구센터 지반안정기술팀 팀장

**이승아**



1995년 호서대학교 재료공학과 공학사

Tel: 033-902-6733  
 E-mail: salee@mireco.or.kr  
 현재 한국광해관리공단 기술연구센터 지반안정기술팀 과장