

한국의 광산 지반침하방지기술 연구개발 동향

김수로*, 박주현

Research and Development Trends for Mine Subsidence
Prevention Technology in Korea

Soo Lo Kim*, Joo Hyun Park

Abstract The collapse of the underground cavities and voids, which were made for developing mineral resources, can cause the subsidence of the ground surface in the residential areas. During the Japanese colonial era and the 1960's mining boom period, lots of mines had been developed indiscriminately in Korea. Due to complicated geological conditions and mining methods, many of dangerous underground mine cavities with steep slopes had been generated at the shallow surface. Due to such conditions, it is difficult to directly apply valid foreign reclamation practice for the cavities in Korea environments. It is necessary to develop the efficient ground stabilization technologies for the Korea underground mine conditions to solve abandoned mine reclamation properly. Therefore, MIRECO and Korea government have been carrying out practical researches and technical developments together with other academic researchers and reclamation business partners, and various practical solutions such as surveying and exploration methods, proper cavity filling materials and reinforcement methods have been developed with application in the mine field. In this article, up to date technologies and R&D trends in the field of mine subsidence prevention technology are broadly reviewed to establish the future direction of a research and development.

Key words Mine cavities & voids, Mine Subsidence prevention technology, R&D trends

초 록 광물자원 채굴을 위한 지하 채굴공동의 붕괴는 인간이 생활하고 있는 지역의 지반침하 피해를 유발할 수 있다. 한국은 일제강점기 및 1960년대 광산 황황기에 수많은 광산이 무질서하게 개발되었다. 복잡한 지질학적 여건 및 광산개발 방식으로 인하여 한국에서는 지표 천부에 급경사의 위험한 채굴적이 발생되었으며, 이러한 여건으로 인하여 외국의 광해방지기술을 광산 채굴공동 현장에 그대로 기술을 적용하기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 한국의 지하 채굴적 및 공동에 효과적인 지반안정화 기술을 개발이 필요하다. 한국 정부 및 한국광해관리공단은 대학 연구자 및 전문광해방지사업자 등 관련자들과 함께 지속적으로 실용화 연구개발을 수행해오고 있으며, 다양한 실용화 조사 및 탐사기술, 공동 충전재료 및 보강방법이 개발되어 현장에 적용되고 있다. 본 보고에서는 향후 연구 및 기술개발 방향을 수립하기 위하여 과거와 현재의 지반침하분야 기술개발 동향을 검토하였다.

핵심어 광산 채굴적 및 공동, 지반침하방지 기술, R&D 기술동향

1. 서 론

한국은 5,396개 폐광산과 가행광산이 산재하며, 광산 개발로 인한 지하공동의 존재가 예상되는 광산은 2,137개로 추정된다(한국광해관리공단, 2014). 지하 채굴적으로 인한 지반침하는 광업이 발달한 선진국에서도 50년 이상 경과한 후에도 다수 발생하고 있으며, 심지어 100년이 경과한 후에도 발생하는 사례가 있다. 국내에

Received: Oct. 8, 2015

Revised: Oct. 28, 2015

Accepted: Oct. 28, 2015

***Corresponding Author:** Soo Lo Kim

(Tel) +82339026733, (Fax) +82339026733

E-Mail) kimsoolo@mireco.or.kr

Institute of Mine Reclamation Technology (MIRECO), 2, segae-ro, wonju-si, Gangwon-do, Korea

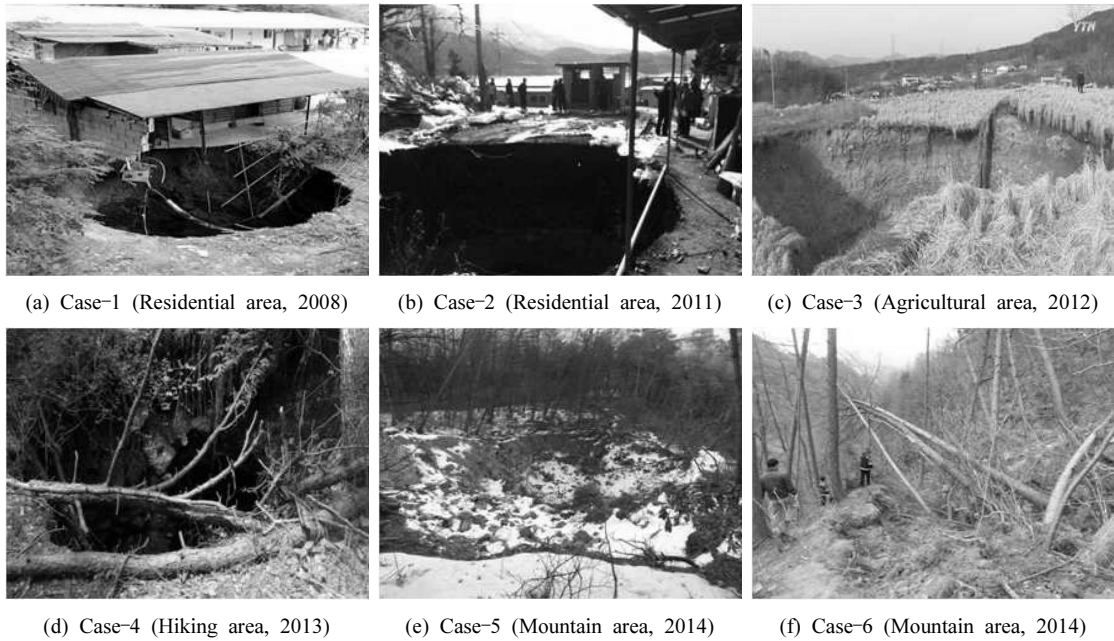


Fig. 1. Recent mine subsidence and damage pictures in Korea

서도 그동안 채산성 위주로 광산 개발이 진행되어 폐광 지역에서 발생하는 지반침하 대책 수립이 미흡했기 때문에 가행 중 혹은 폐광 이후 지반침하로 인한 안전사고가 발생할 우려가 높다(권현호 등, 2007).

한국광해관리공단은 2007년부터 학계 및 전문사업자와 함께 지반침하방지 실용화 기술을 연구해 오고 있다. 본 보고에서는 그동안 축적되어 온 지반 침하 방지 실용화 기술개발 동향을 고찰해보고, 이를 통해 향후 연구개발 방향 및 시사점을 정리하였다.

2. 광산 지반침하방지사업 동향 및 연구환경

2.1. 최근 지반침하 동향 및 기술 수요

인간의 정주지역이 과거 광산지역으로 확대됨에 따라 광해방지에 대한 국민적 관심이 증가되고 있다. 인간의 생활공간 인근에서 광산으로 인한 지반침하 관측 빈도 증가가 예상되며, 이는 인명 및 재산 피해 동반 가능성의 증가를 의미하기도 한다. 이러한 기술수요에 효과적으로 대응키 위해 적절한 대응 기술, 위험상황을 적시에 관측하는 기술, 지형 및 환경 변화에 대한 정밀한 조사기술, 보다 객관적인 평가기법, 현장 밀착형 응급조치수단이 필요하다. Fig. 1은 최근 주거지 인근에서 발생한 광산 지반침하 및 피해 사례이다.



Fig. 2. Concept diagram of research & development environment in the mine subsidence prevention

2.2. 광산 지반침하방지 사업 및 연구개발 환경 변화

광산의 “지반침하”라 함은 지하광물의 채굴로 형성된 지하 공동이 시간의 경과에 따라 붕괴되고 그 붕락이 점차 상부로 발달되면서 지표까지 전이되어 발생하는 지표 붕괴 및 지반의 균열을 의미한다.

2.1절에서 서술한 사회적 변화 및 고효율화 요구 등 연구환경 변화로 인하여, 향후 지반침하방지분야 연구개발도 변화가 필요하다. 세부적으로 광산도면의 부재 및 불명확성, 지반침하 판단기준의 정립, 다양한 광산 환경에 적합한 대책 마련, 사회적 변화 및 방재개념의 필요성 등이 연구 환경변화의 요인이 되고 있다. 이에 대한 지반침하방지 연구개발 대응방안은 Fig. 2와 같다.

3. 광산 지반안정화 기술개발 동향

3.1 정밀한 지반조사 및 탐사 기술의 변화

일제 강점기 및 국내 광산 황황기(1960~1970년대)에 개발된 광산은 갱내 도면이 없거나 자료가 불명확하여 지반침하방지사업의 저해 요인이 되고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하고, 지반침하 방지사업을 리버스 엔지니어링(Reverse Engineering) 개념으로 정립하기 위해서는 정밀한 조사 및 탐사 결과가 필요하다(김수로 등, 2009).

조사 및 탐사기술 연구는 기존의 다양한 물리탐사 기법을 활용하여 광산 지반에 대한 조사 신뢰도 향상을 목표로 수행되고 있으며, 간접 조사방식에서 실측방식으로 변화도 나타나고 있다. Fig. 3에 그간의 기술개발 동향을 요약하였다.

전기비저항탐사 기술의 경우, 금속광산에 대한 쌍극자 배열법의 적용성, 비저항이 낮고, 전기적 노이즈가 많은 광산에 대한 변형된 단극자 배열법 등 광산 및 광해방지현장에 적합한 배열법이 주로 연구되었다. 탄성파탐사 기술의 경우, 탄성파 발생 장치 등 기초 연구, 지반내 풍화대 및 불균질대, 과거 함몰지역 추정, 필러

링 및 해석기술 등 해석 오류 최소화 방법 및 고품질 단면 취득 연구를 수행하였다(한국광해관리공단, 2010).

현재, 보다 쉽고 정밀한 단면 정보 취득을 위하여 지하투과레이더(GPR) 기술이 연구되고 있다. GPR(Ground Penetration Radar) 기술은 전자파를 지하로 방사시켜, 전기적 특성이 다른 매질 간 경계면에서 반사되어 지상으로 되돌아온 전자파를 해석하여 정밀한 지하 반사파 영상단면(Reflection Image)을 획득하는 탐사기법이나, 투과심도 등 조사가능 범위에 기술적 제한성이 있다.

조사 및 탐사기술은 간접적 탐사기법에서 직접적 측정방식으로 변화되고 있다. 지하공동 및 채굴적 형상을 직접 측정하는 기술이 그 사례이다. “MIRECO EYE” 기술은 시추공에 삽입하여 지하 공동 형상을 실측하는 장비로서 지반안정성 정밀조사에 활용이 기대된다(Fig. 4). 해당 기술은 “경량화”, “정밀화”, “자동화”를 3대 기본 목표로 기술 개발 중이다.

3.2 지반안정성 평가 기술개발

3.2.1 지반 침하 평가 연구(2007년 이전)

지반침하 평가기술은 침하사례 및 계속 경험을 토대로 지속적으로 보완되고 있다. 해외의 경우, 19세기 말

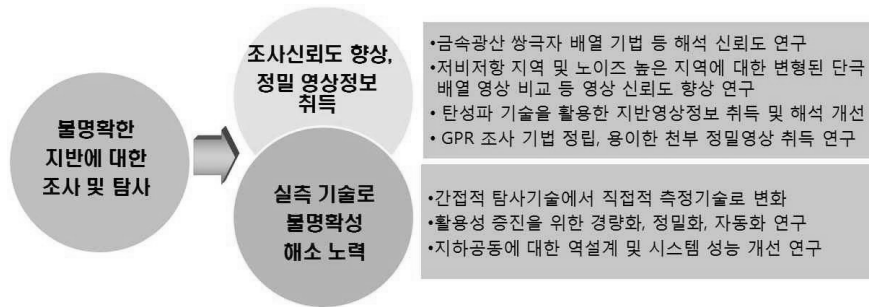
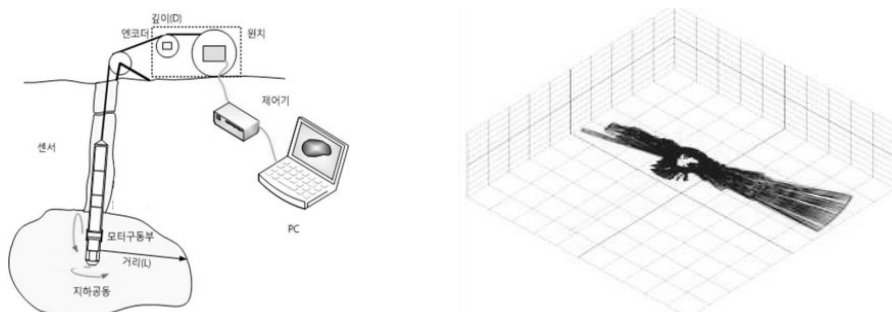


Fig. 3. Technical development trends in the mine subsidence surveying and exploration



(a) Basic concept of “MIRECO EYE” (b) An abandoned mine measured example [Jeongeup]

Fig. 4. Basic concept of MIRECO EYE and measuring example (MIRECO, 2014)

부터 영국, 프랑스, 네덜란드 등에서 자료 분석 및 예측 기법을 통해 기본 개념이 정립되기 시작하였다. 석탄광산의 경우, 1966년부터 영국 NCB(National Coal Board)를 중심으로 침하이론 및 예측을 통한 보완 연구가 시작되었다. 미국은 1977년부터 침하예측, 예측장비 및 지상구조물 영향을 연구하였다(한국광해관리공단, 2014).

국내는 1986년부터 지반침하에 대한 연구를 시작하였고, 1987년부터 석탄합리화 조치에 따라 폐석탄 광산에 대한 조사가 시작되었다.

1990년대는 국내 현장을 중심으로, 다양한 현장사례 분석을 통해 석탄광산에 대한 침하이론이 정립되고, 안정성 평가에 전산기법의 도입이 시도하였다.

석탄산업합리화사업단(1994)은 합리화 조치 321개 석탄광산에 대한 현장별 지반안정성 평가 및 대책 제시를 시작하였고, 지반침하 현장 연구, 전산해석 기법 등 다양한 시도가 있었다. 이러한 석탄광에 대한 연구는 침하이론과 지반침하 메커니즘으로 정립되고, 대책수단으로서 침하방지 공법을 정리하였다(석탄산업합리화사업단, 1997).

2000년대 이후에는 금속광산 침하이론의 정립, 전산해석 기법 및 검증연구의 다양화, 다양한 평가방법 등 연구 범위가 확대가 이루어졌다(한국광해관리공단, 2014).

3.2.2 객관적인 지반안정성 평가 및 활용성 증진(2007년 이후)

국내의 광산 지반안정성 평가 기술은 외국의 침하이론을 바탕으로 우선 석탄광산에 대하여 평가기법이 정립되었고, 지반침하 사례에 대한 경험의 축적, 물리적 모형 연구, 다양한 전산해석 기법의 적용, 모형 고안 및 영향인자 연구 등을 통해 금속광산 및 일반광산으로 일반화되고 있다(Fig. 5).

국내 600건의 지반침하 사례를 근거로 국내 침하특성을 고려한 침하 예측 평가기법이 연구되었다(Table 1). MiSH(Assessment of Mine Subsidence Hazard) 평가기법은 채굴적(심도, 폭, 높이, 경사), 암반조건, 침수조건, 보정요소(강우)로 영향인자를 단순화하고, 평가인자에 대한 위험도 배점을 통해 경험적인 요소를 수치(점수)화하여 지반침하 위험성을 평가하였다(한국광해관리공단, 2008). 또한 MiSH 평가기법은 채굴적 심도, 채굴적의 높이, 채굴적의 폭 인자를 기하학적 삼각뿔 부피로 환산하여 침하 위험도를 정량화하고, 지하수 상태에 대한 수치적 보정, 경과시간에 따른 침하발생 확률 보정 등 지속적인 보완이 있었다(한국광해관리공단, 2010). 지질특성, 상부암반의 전산해석 결과 및 영향인자 가중치 연구를 통해 MiSH Ver3.0은 평가기법의 신뢰도를 개선코자 하였다(한국광해관리공단, 2011).

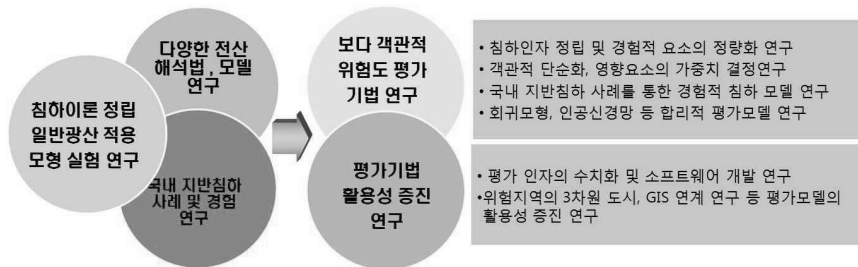


Fig. 5. Technical development trends in the mine subsidence rating and assessment

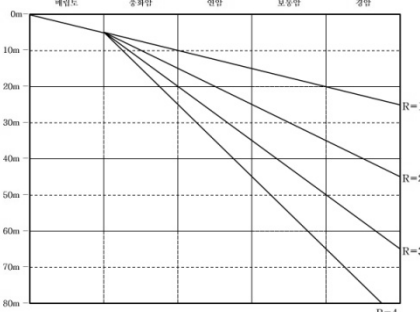
Table 1. Characteristics of the mine subsidence rating and assessment (MIRECO, 2014)

Assessment methods		General overview of assessment methods
지반 침하 위험도 평가 기법	한국광해관리공단 (2008년도)	□ 영향인자 배점 범위에 따른 평가 결과의 민감도와 RMR점수 적용 □ 석탄광에 한정된 평가기법이며 8개의 평가항목에 정보 확보 난해
	한국광해관리공단 (2010년도)	□ 평가 대상지역 암반조건이 빠짐, 위험도 결과에 대한 판단기준 없음 □ 영향인자(채굴적의 심도, 폭, 높이) 신뢰성 필요, 보정 점수 근거 미흡
	한국광해관리공단 (2011년도)	□ 일반화된 RMR점수를 이용한 암반조건적용 □ 침하 위험도 기준 미흡, 단순화 단일 채굴적과 연속형 침하에 국한됨
	한국광해관리공단 (2014년도)	□ 불확실 자료의 합리적 추론, 주관관을 배제하여 영향인자 가중치 결정 □ 다양한 사업에 적용하여 검토 필요

Table 2. Subsidence risk assessment model (MIRECO, 2014)

$$FS(\text{안전율}) = \left(2.05 \left(\frac{D}{R} \right)^{0.646} \left(\frac{1}{HW} \right)^{0.263} \sin(A) - GW \right) \times (1 - T) \quad [\text{식-1}]$$

여기서, R : 암반모델 생성 Chart에 의한 암반조건(Type)
 D : 채굴적의 심도(m),
 H : 채굴적의 높이(m),
 W : 채굴적의 두께(m),
 A : 채굴적의 경사(°),
 GW : 지하수위 조건에 대한 보정지수(채굴적 침수상태 : 0.7 ~ 채굴적 건조상태 : 0.0)
 T : 폐광 후 경과시간에 대한 보정지수(10년 단위로 구분 작용)

<p>[별표 1.] 암반모델 Chart에 의한 암반조건(Type) 결정</p>	 <p>4개의 기준 직선(R=1, 2, 3, 4)에 해당하는 값 혹은 내삽 및 외삽 적용하여 R값 결정</p>																						
<p>[별표 2.] 폐광 후 경과시간에 대한 보정지수 결정</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>폐광 후 경과시간(y)</th> <th>0~10</th> <th>11~20</th> <th>21~30</th> <th>31~40</th> <th>41~50</th> <th>51~60</th> <th>61~70</th> <th>71~80</th> <th>81~90</th> <th>91~100</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>보정지수</td> <td>0.015</td> <td>0.024</td> <td>0.057</td> <td>0.165</td> <td>0.359</td> <td>0.174</td> <td>0.094</td> <td>0.052</td> <td>0.027</td> <td>0.015</td> </tr> </tbody> </table>	폐광 후 경과시간(y)	0~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60	61~70	71~80	81~90	91~100	보정지수	0.015	0.024	0.057	0.165	0.359	0.174	0.094	0.052	0.027	0.015
폐광 후 경과시간(y)	0~10	11~20	21~30	31~40	41~50	51~60	61~70	71~80	81~90	91~100													
보정지수	0.015	0.024	0.057	0.165	0.359	0.174	0.094	0.052	0.027	0.015													
<p>[별표 3.] 다중 채굴적에 의한 중첩영역 위험도 결정</p>	<p>중첩된 영역에 속한 다수의 안전율(FS) 중에서 가장 낮은 값의 90%에 해당하는 값</p> $FS_M = \min(FS_1, FS_2, \dots, FS_n) \times 0.9$																						

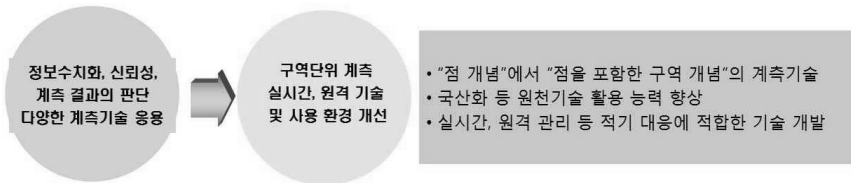


Fig. 6. Technical development trends in the mine subsidence monitoring technology

지반침하 위험지역에 대한 평가기술 개발 과정은 Table 1 과 같으며, 연구성과인 SRA3D(Subsidence of ground Risk Assessment 3D) 프로그램은 인공신경망 연구를 통해 불확실성에 대한 합리적 추론과정과 영향인자의 객관적인 가중치 결정 등을 통한 회귀모형 기반 평가모델이며(Table 2), 3차원 형태로 지반침하 위험도를 도 시하여 사업 활용성을 개선하였다(한국광해관리공단, 2014).

3.3 광산 지반 계측기술의 변화

3.3.1 기존 광산침하 계측기술

광산 지반 모니터링에 적용된 상용 계측기술은 지표 침하, MPBX, 경사계, TDR 등이며, 측정 결과는 지반침하 우려지역의 안정성, 보강 필요성 검토에 활용되었다.

기존 계측기술은 위치를 알고 있는 “점(Point)”에 대한 수치 변화로 지반상태를 검토하였으나, “점(Point)을 포함한 구역”에 대한 정보가 종합적인 지반상태 검토에 보다 유리한 경우가 있으므로 넓은 지역을 효율적으로 관리할 수 있는 기술도 연구되고 있다(Fig. 6).

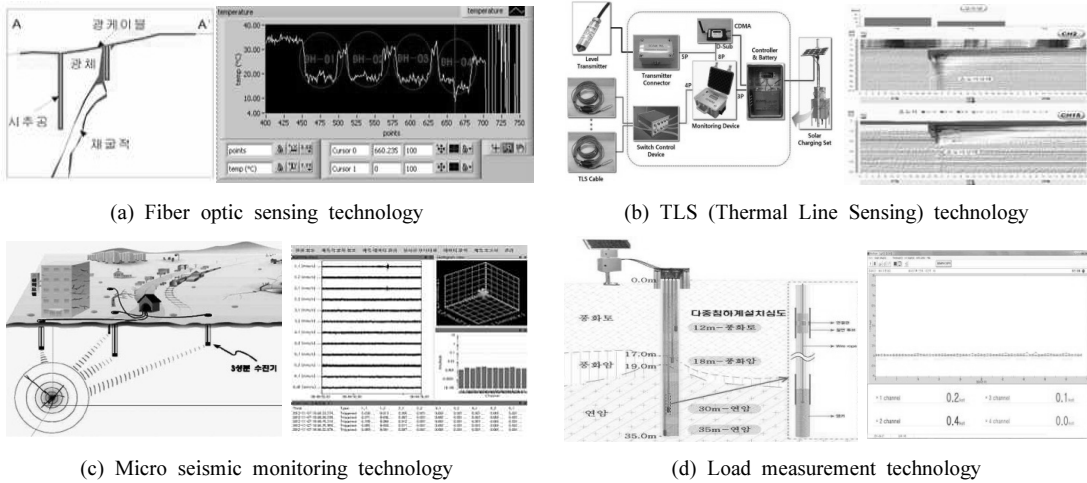


Fig. 7. Enhanced measurement technology in abandoned mine site

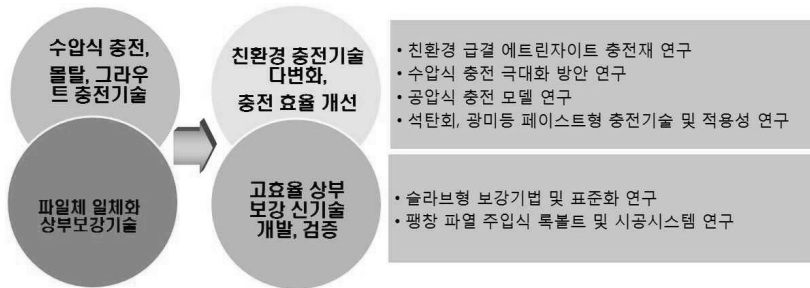


Fig. 8. Technology development trends in the mine filling and reinforcement method

3.3.2 계측기술의 사용환경 변화

광산 지반침하 및 전이형상을 관측할 수 있는 물리량은 상당히 제한적이다. 지반진동은 광산 천반의 파괴 및 붕락과 함께 발생되므로 현장에서 관측 가능한 물리량 중 하나이다. 진동 계측시스템은 진동 발생원에서 지반을 통과하여 수신기에 수신된 진동의 주시 정보를 취합하고, 이를 역산하여 궁극적으로 진동원의 위치를 추정하고, 지반침하 및 전이 진행을 검토하는 개념이다. Fig. 7은 최근의 지반침하 현상 계측용으로 연구된 다양한 계측 시스템이다.

Fig. 7(a)에 설명된 바와 같이 광섬유 계측기술은 계측 목적물에 광섬유를 포설하고 광섬유 자체를 센서로 활용하는 분포형 계측 기술이다. 광섬유 케이블에 입사된 pulse laser는 온도 및 변형 등 물리적 변화에 따라 역산란광의 진폭 및 주파수가 변화되며, 이러한 변화로 케이블 주변의 물리적 변화를 간접적으로 측정하는 기술이다. 국산화 연구를 통해 10~20 km의 광섬유케이블을 1 m 거리 분해능으로 변형을 측정이 가능하여 광산지역과 같은 넓은 지역 및 연속 구조물의 계측에 유리하다.

다점온도 계측시스템(Fig. 7(b))은 정밀한 온도센서를 통해 지반내 온도 변화를 실시간으로 계측한다. 시추공을 활용하여 등간격으로 온도센서를 설치하며, 심도별 미세한 온도변화를 계측함으로써, 지표수 침투 및 지하수 유동 변화를 계측하는 기술이며, CDMA 기술과 연계되어 실시간 원격계측이 가능하도록 개선되었다.

광산 지반 계측기술은 안정성 검토 및 평가를 위한 수치 활용개념에서 인명 및 재산 피해 예방을 위한 적기 대응수단으로 변화되고 있다. 실시간 원격 통합계측 관리시스템 구축 연구를 통해 신속한 상황전파가 이루어지는 동시에 정량적 수치자료 정보화 연구를 수행하였다(김중열, 2012).

3.4 충전, 지반보강기술의 효율성 개선을 위한 노력

변화되는 외부 환경에 대하여 적절하게 대처하기 위해서는 국내 현장 조건에 부합되는 다양한 재료의 경제성 및 환경성 연구 등 기술 노하우 축적이 필요하며 이와 관련된 검증 연구들이 진행되어 왔다. Fig. 8은 광산

Table 3. General classifications of the filling material (MIRECO, 2011)

Material classification	Purpose of the material	Material
비활성물질(Inert)	광산 충전재료의 “주체(主體)”	모래, 광미, 자갈, 폐석 등
고결재(Binder)	광산 충전재료의 “물성 결정자”	O.P.C., 슬래그미분(G.S.), 석탄회 등
화학첨가제(Chem add)	광산 충전재료의 “특수성능 부여자”	응결제, 축진제, 지연제

Table 4. Basic concept model with slab for different type of reinforcements (MIRECO, 2010)

basical SLAB-type	SLAB and pile-type (I)	SLAB and pile-type (II)
<ul style="list-style-type: none"> • 국부적 침하지역 • 충전된 후 추가침하 발생지역 • SLAB의 지지층이 상부하중을 충분히 지지할 수 있는 경우 	<ul style="list-style-type: none"> • 국부적 침하지역 • 충전된 후 추가침하 발생지역 • SLAB의 지지층이 상부하중을 충분히 지지할 수 없는 경우 - 지지층까지 10~15 m 이내 	<ul style="list-style-type: none"> • 국부적 침하지역 • 충전된 후 추가침하 발생지역 • SLAB의 지지층이 상부하중을 충분히 지지할 수 없는 경우 - 지지층까지 15 m 이상

충전재 및 보강 방법에 대한 기술 경향을 요약한 것이며, Table 3은 충전재료의 일반적인 분류 및 기능을 요약한 것이다.

모래 및 골재를 기질로 하는 수압식 충전기술은 충전관 선단부 개선 연구(선단부 방향성 개선)를 통해 시추공당 충전량을 증진하고, 시추비용 절감 등의 효과를 확인하였다(양인재 등, 2014).

공압식 충전기술은 수해발생 가능성 및 수질 환경 등 2차 오염 가능성이 낮아 수압식 충전이 어려운 소규모 광산 충전에 적합한 공법이나, 국내 적용사례가 전무하다. 따라서 해외 공압식 충전 사례를 조사하고, 실용화 가능한 공압식 충전 모델을 연구하였다. 그러나 토출각, 재료특성, 선단 장치 구조, 노즐 배열 등 다양한 조건을 연구하였으나, 실규모 검증이 필요하다(양인재 등, 2014).

페이스트형 충전기술은 충전 목적 및 유동성 범위에 따라 현장에 적합하도록 조절 가능한 충전 기술이며, 다양한 광산 환경에 적용할 것으로 기대되는 기술이다.

페이스트형 충전기술은 수력식 충전 후 완전 충전, 유지관리 수단, 선택적 국부 충전, 대규모 공동의 경제성 있는 충전, 지하수면 아래 충전환경, 유속 발생구간에 위치한 공동의 충전 혹은 보강, 접근 불가능한 갱도의 펜스(댐) 설치 그리고 가행 광산의 지반안정화 및 부산물의 처분 등 다양한 목적으로 활용 가능한 기술이다. 페이스트 충전재 연구를 통해 석탄회 혼합 페이스트형,

석탄회(혼합애쉬) 광물찌꺼기 혼합 페이스트형 등 다양한 충전재료의 물리적 특성, 시공성을 검증코자 하였다. 석탄회 혼합 페이스트형 재료는 사용 목적에 적합한 다양한 강도설계가 가능하고, HPPD(High Pressure Positive Displacement) 장비를 적용하여 페이스트형 충전재료의 이송 능력을 확인하였다(한국광해관리공단, 2011). 광물찌꺼기 혼합형 충전재료는 수질오염 배출허용기준을 만족하는 수준으로 조절가능한 기술임을 확인하였고(이호은 등, 2013), 실규모 석탄회 갱내충진실험을 통해 충전시공 향상 방법도 연구되었다(이상은 등, 2014).

보강기술 분야도 다양한 광산 조건에 대한 적용성을 연구하였다. 소규모 공동에 대한 SLAB 구조는 다양한 지반 및 공동 유형에 적용 가능하도록 3가지 모델로 개발되었으며(Table 4), 침하 진행 혹은 완료, 추가 하중 여부, 채굴적 위치, 채굴적 형상 등 현장 조건을 감안하여 매뉴얼화되었다.

보강기술 중 MRB(Mireco Rock bolt)기술은 팽창-파열주입을 일원화한 록볼트 기술이며, 매달림효과, 마찰효과, 내압효과, 지반개량효과를 확인하였다. 시멘트 밀크그라우트 재료의 주입 및 경화에 따라 파쇄 암반의 보강효과와 더불어 공내 썩기효과로 지반보강 성능이 개선되었다(김수로 등, 2010).

광산 지반안정화 대책은 다수의 요인이 복합적으로 적용된다. AHP(Analytic Hierarchy Process)기법 연구

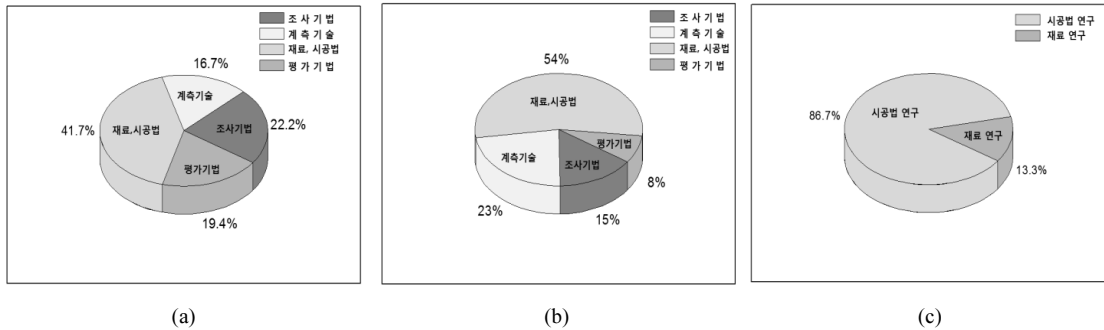


Fig. 9. Classification of research papers and patents on mine subsidence technology (a) Technical papers (b) Patent registrations (c) Types of prevention technology

를 통해 광산전문가의 경험과 주요 요인들을 체계적으로 분류하였고, 신속하고 합리적인 의사 결정을 위한 방법도 연구되었다(MIRECO, 2011).

4. 지반침하방지 기술개발 동향 및 시사점

지반침하 방지기술 동향 검토를 위하여 연구논문 및 특허등록 기술을 조사기법, 평가기법, 재료 및 시공기술, 계측기술로 분류하고, 구성 비율을 통해 시사점을 검토하였다. 지반침하 방지분야 논문은 재료 및 시공기술 분야가 41.7%로 큰 비중을 차지하며, 조사기술 분야 22.2%, 평가기술 분야 19.4%, 계측기술 분야(16.7%)의 순서로 나타났다. 특허등록 기술도 재료 및 시공기술 분야가 54%로 나타났으며, 계측기술 분야 23%, 조사기술 분야 15%, 평가기술 분야 8% 순서이다(Fig. 9).

재료 및 시공 분야에 대한 논문비율은 41.7%이며, 특허등록 실적비율은 54%로서 상대적으로 높은 비율이다. 수치상으로 편중된 연구로 판단될 수 있으나, 다양한 실용화 대책공법 도출을 위한 다각화 연구결과로 판단된다. 그러나 시공법 관련 연구비율이 86.7%이고, 재료 연구 비율은 13.3% 수준으로 미진하다. 따라서, 지반침하방지사업에 적합한 재료 연구 활성화가 필요한 것으로 판단된다.

조사기법 및 평가기법 연구는 각각 약 20% 정도로서 상대적으로 낮은 비율이다. 연구과제를 세분화하고, 연구방법의 다각화가 필요한 분야로 판단되며, 특히 등 기술확보에 주력할 필요가 있다.

조사기법 분야는 광산의 불명확성 해소를 위한 지반침하방지사업 분야의 기본 분야이고, 사업 수행에 활용도가 크므로 광산 지반환경을 세분화하고 지반환경에 따른 조사기법 연구로 체계를 재정립하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 평가기술 분야 연구는 지금까지

기초 이론 정립 및 평가모델 개발 위주로 연구를 수행하였다. 향후에는 정립된 평가모델을 바탕으로 쉽게 사업에 활용 가능한 방법에 대한 후속 연구가 필요한 것으로 판단된다. 평가기술은 단독적으로 실용화는 한계성이 있으므로 조사기술, 광산 GIS 등 타 연구분야와 함께 실용화하고, 그 기초 기술로써 활용됨이 바람직하다.

계측기술 분야 연구는 16.7%의 낮은 비율을 나타내며 활성화가 가장 필요한 분야이다. 시급한 일부 핵심요소기술에 편중된 연구 추진의 결과로서 다각화 연구가 필요하다. 우선 다양한 형태의 계측자료 수용 및 활용할 수 있는 통합 관리 체계를 구축하고, 지반침하방지사업에 쉽게 다양한 sensing기술이 접목될 수 있도록 연구환경 변화가 필요한 것으로 판단된다.

5. 결론

지금까지 광산 지반침하방지를 위한 연구개발 동향을 살펴보았으며, 이를 토대로 향후 효율적인 지반침하방지 기술개발을 위한 개선방향은 다음과 같다.

최근 땅꺼짐 등 사회적 관심이 유발되고, 주거환경 확대 등 국민의 광산지역에 대한 기대수준이 증대되고 있다. 또한 다양한 지반침하방지사업 환경변화에 대응하기 위하여 연구개발 환경도 변화되고 있다. 세부적으로 광산도면의 부재 및 불명확성, 지반침하 판단기준의 정립, 광산 개발 환경 변화, 사회적 변화, 방재개념의 필요성 등이며, 이에 대응하기 위하여 기술개발은 좀 더 체계화되고, 세분화되어야 한다. 또한 연구성과의 적용성 증진을 위한 실규모 검증을 보편화하고, 국내 기술이 미흡한 연구분야는 해외 기술을 조속히 도입하여 한국의 광산환경에 적합하도록 보완연구를 활성화하는 것이 바람직하다.

광해방지기술개발은 기초 기술보다 실용화 기술 확보가 목적이다. 따라서 전자, 제조 등 첨단 산업 분야의 기술이 지반침하방지 분야에 쉽게 수용될 수 있도록 기술개발 환경을 확대하고, 광해기술연구소의 플랫폼화 등 기술개발 참여 환경의 점진적 개선이 요구된다.

References

1. 권현호, 남광수, 2007, 광해방지공학, pp.92-203.
2. 김수로, 장항석, 최광수, 김태혁, 권현호, 2009, 효율적인 광산 지반안정화 대책수립을 위한 광산 지하 채굴적 정밀 조사기법에 관한 기초 연구, 한국암반공학회 학술발표회, pp.181-186.
3. 김태혁, 장항석, 권현호, 김유성, 김중열, 2008, 광섬유센서를 이용한 광산지역 지반침하계측기법 연구, 광해방지집포지움 논문집, pp.131-145.
4. 산업자원부, 2004, 금속광산 지역 지반침하 위험도 평가 연구, pp.14-19.
5. 석탄산업합리화사업단, 1995, 지하채굴에 따른 지반안정성평가 및 대책 연구, pp.1-3.
6. 석탄산업합리화사업단, 1997, 탄광지역 지반 침하 메커니즘 및 침하 방지공법에 관한 연구, pp.1-292.
7. 한국광해관리공단(MIRECO), 2007, 광종별 지반변위계측 기술개발, pp.3-41.
8. 한국광해관리공단(MIRECO), 2010, 지반침하 위험지역 물리탐사기법 개발-탄성파 반사법 탐사, pp.21-25.
9. 한국광해관리공단(MIRECO), 2010, 지반침하 억제제를 위한 상부보강기술 개발, pp.3-137.
10. 한국광해관리공단(MIRECO), 2011, 고효율 충전기술 개발, pp.165-168.
11. 한국광해관리공단(MIRECO), 2011, 광산 지하 채굴적 및 공동 3차원 형상화 장비 개발, pp.131-132
12. 한국광해관리공단 (MIRECO), 2011, 광해방지기술기준, pp.104-168.
13. 한국광해관리공단(MIRECO), 2014, 지하공동 형상화 장비를 이용한 지반안정성조사기법 개발, pp.72-73.
14. 한국광해관리공단(MIRECO), 2013, 지반침하 통합 계측 기술 개발 및 상용화, pp.135-137.
15. 한국광해관리공단(MIRECO), 2014, 지반침하 현장 모니터링 기법 개발, pp.4-17.
16. 한국광해관리공단(MIRECO), 2014, 폐광지역 지반침하위험도 평가기술 개발, pp.126-196.
17. 한국광해관리공단(MIRECO), 2014, 광해관리백서, pp.30-77.
18. 한국광해관리공단(MIRECO), 2015, 지반침하방지 및 복원사업 시행 세칙, pp.1-13.
19. Soo-Lo Kim, Jong-Tae Kim, Seong-Cheol Park, Tae-Heok Kim, Hyun-Ho Kwon and Gyo-Cheol Jeong, 2010, Development of Improved Rock Bolt for Reinforcement of Fracture Zone in Slope and Tunnel, The Journal of Engineering Geology, Vol.20, No.1, March, 2010, pp. 101-109.
20. Ho-Woon Lee, Jae-Dong Kim, Sung-Kon Yu and Tae-Heok Kim, 2013, Property Evaluation of Tailings as the Mining Paste Backfill Material, Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 50, No. 1. pp.124-133.
21. In-Jae Yang, Dong-Choon Shin, Byung-Sik Yoon, Jin-Ho Mok, Hak-Sung Kim and Sang-Eun Lee, 2014, A Study on the Model Test for Pneumatic Mine-Filling, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol. 24, No. 6, 2014, pp. 449-463.
22. In-Jae Yang, Nam-Soo Choi, Chul-Soo Jeon, Sang-Eun Lee and Dong-Choon Shin, 2014, Study on High-efficiency Hydraulic Filling Field Experiment for Subsidence Protection, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol. 24, No. 5, 2014, pp. 373-385.
23. Jungyul Kim, Yoosung Kim, Sungil Kwon, Hyoungil Kwon, Jeehyun Kim, Shinwon Kang, Hangseok Jang, Taeheok Kim and Hyunho Kwon, 2012, Integrated Instrumentation Management System for Prediction and Alarm of Ground Subsidence, Journal of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers, Vol. 49, No. 6. pp.822-834.
24. Sang-Eun Lee, Se-Jun Park, Hak-Sung Kim, Hang-Suk Jang and Tae-Heok Kim, 2012, A Study on the Model Test for Mine Filling Using Coal Ash, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE Vol. 22, No. 6, pp. 449-461.
25. Soo-Lo Kim, Tae-Heok Kim, Dong-Chun Shin and Hyun-Ho Kwon, 2009, A Study on the Development of Rapidly Hardening Grouting Method for the Effective Filling in the Underground Cavity, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 19, No. 6, 2009, pp. 534-544.

김수로



2001년 조선대학교 공과대학 자원공학과 공학사
2003년 조선대학교 대학원 자원공학과 공학석사

Tel: 033-902-6733
E-mail: kimsoolo@mireco.or.kr
현재 한국광해관리공단 선임연구원

박주현



2005년 경북대학교 자연과학대학 지질학과 이학사
2008년 서울대학교 대학원 지구시스템학과 이학석사

Tel: 033-902-6734
E-mail: pjh3816@mireco.or.kr
현재 한국광해관리공단 선임연구원