

도계 석탄폐석 적치장 주변지반의 지형변화 조사 및 분석

조용찬 · 송영석* · 김경수

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Investigation and Analysis of Ground Deformation at a Coal Waste Depot in Dogye

Yong-Chan Cho, Young-Suk Song*, and Kyeong-Su Kim

Geologic Environment Hazards Division, Korea Inst. Geoscience and Mineral Res

강원도 삼척시에 위치한 도계 석탄폐석 적치장 주변지반에서 지반변형이 발생되었다. 대상지역에서의 지반변형 원인을 조사하기 위하여 시추조사 및 현장조사를 통한 지반조사와 기존 발간된 지형도를 이용한 지형분석을 실시하였다. 시추조사결과 상부에 토층이 9-28.5m로 존재하고 있으며, 대상지역에 발생된 주요 균열을 조사한 결과 240~250° 방향으로 지반이 변형되고 있음을 알 수 있다. 또한 기존 발간된 지형도를 이용하여 비교분석한 결과 대상지역에서는 지속적으로 석탄폐석이 적치되었음을 확인 할 수 있다. 지반조사 및 지형분석결과를 토대로 대상지역의 지형변화 원인을 분석한 결과 대상지역에 존재하는 두꺼운 토층이 내적요인이며, 석탄폐석의 지속적인 적치로 인한 하중증가 및 하단부에서의 사면절취가 외적요인으로 나타났다.

주요어 : 석탄폐석 적치장, 지반변형, 지반조사, 지형분석, 인장균열

To investigate the causes of ground deformation around the Dogye coal waste depot in Samcheok city, Gangwon Province, we undertook a field survey and performed boring tests and a topographic analysis using maps compiled in various years. The results of boring tests and analyses of ground fractures indicate that the thickness of the soil layer ranges from 9 to 28.5 m and that ground deformation has occurred to the 240-250° direction. The topographic analysis revealed that the topography of the site has changed continuously due to the dumping of coal waste. The causes of ground deformation, investigated by both field surveys and the topographic analysis, were the thick layer of soil at this site, the loading weight of coal waste, and the excavation at the lower part of the slope.

Key words : Coal waste depot, Ground deformation, Ground exploration, Topographic analysis, Tension crack

1. 서 론

국내 광산은 2006년 기준으로 총 2,006개이며, 이중 가행 광산 730개이며, 폐광산이 1,276개 존재하고 있다 (Table 1). 가행 광산의 대부분인 669개가 비금속광산이며, 금속광산과 석탄광은 90% 이상이 휴광 또는 폐광된 상태이다.

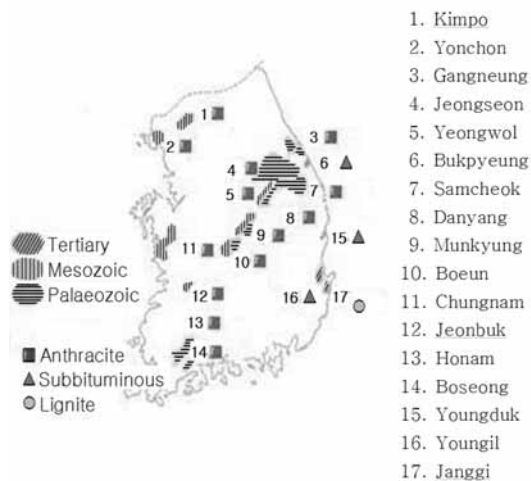
국내 석탄자원은 거의 무연탄으로 주로 고생대의 평안계 지층에 풍부하게 매장되어 있다. Fig. 1은 국내(남한) 석탄자원 주요 분포지역을 나타낸 것이다(지상우, 2004).

그림에서 보는 바와 같이 크게 17개 탄전으로 분류되며, 삼척, 정선 등 평안계층 탄전이 전체의 90%를 차지하고 있다. 또한 평안계층과 대동계층에 속하는 13개 탄전이 경제성이 있어 개발되어 왔다. 전체 탄전 중에서 정선탄전은 부존면적이 약 560 km²로 가장 광범위하게 분포하고 있으나 매장량에 있어서는 삼척탄전이 전체 매장량의 39.3%인 약 3억 1,000만 톤으로 가장 크다(대한광업진흥공사, 1990, 1992). 국내 석탄광산은 1989년부터 시작된 석탄산업합리화사업에 의해 2005년 말 기준으로 340개가 폐광되었고, 9개 광산만이 가행 중에 있다.

*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

Table 1. The number of domestic mines (Kwon et al., 2007)

type	coal mine	other mines			total
		metal mine	non-metal mine	sub-total	
operating mine	9	52	669	721	730
abandoned mine	340	936	0	936	1,276
total	349	988	669	1,657	2,006

**Fig. 1.** Locations of the main coal resources in south Korea.

휴폐광산이 유발하는 광해에는 폐광도 방치에 의한 지반침하, 산성광산폐수의 유출, 광미 및 폐석의 적치에 의한 주변 환경오염 및 적치사면 붕괴 등을 들 수 있다. 광산들은 대부분 험준한 산골에 위치하고 정상부근의 노두에서부터 하부로 수평갱을 개설하면서 채굴하므로 채광 초기에는 소규모의 폐석적치장을 계곡을 따라 축대를 쌓고 설치하여 운영하지만, 사갱이나 수갱을 개착해서 채굴하면서 대규모의 폐석적치장을 설치하게 된다. 석탄광산의 폐쇄로 인하여 방치되는 폐석사면들은 미관상 좋지 않을 뿐만 아니라, 불안정한 사면의 경우에는 집중호우시 인명과 재산피해를 유발할 수 있으므로 이에 대한 철저한 보완대책이 필요하다(강상수 외, 2004).

특히, 폐석적치장은 적절한 보수와 유지관리가 이루어지지 않고 자연 상태로 방치되어 있는데, 이로 말미암아 적치장의 법면 일부의 광미가 유실되고 표면침식 등의 문제가 발생되고 있다(지상우와 임길재, 2009). 이와 같이 폐석적치장 사면의 구조적인 결함이 발생되면서 사면안정성에 대한 우려가 부각되고 있다(강기천 외, 2005). 실제로 집중강우로 인한 적치장의 일부 법면이 유실되거나 적치장 사면의 변형이 발생되고 있으며, 폐석적치장의 하중으로 인하여 적치장 하부에 존재하는 사면의

변형이 발생되고 있다(조용찬 외, 2010). 따라서 폐광산 지역에 대한 환경공학적인 측면에서의 안정성과 더불어 지반공학적인 측면에서의 안정성을 확보할 수 있는 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 강원도 삼척시 도계읍에 위치한 도계 석탄폐석 적치장 주변지반에서 발생한 지반변형을 조사하고 이에 대한 원인을 분석하고자 한다. 먼저 석탄폐석 적치장 및 주변지반에 대한 지질 및 지반조사를 실시하고 균열조사를 수행하였다. 그리고 고지형도와 현지형도를 활용하여 대상지역에 대한 지형고도 및 지형단면 변화를 검토하였다. 이들 결과를 토대로 석탄폐석 적치장 주변지반의 변형양상 및 원인을 분석 및 규명하고자 한다.

대상현장

지형

대상지역은 강원도 삼척시 도계읍 흥전리 일대이며, 지리좌표로는 북위 37°13', 동경 129°02' 부근에 해당한다. Fig. 2는 대상지역의 위치와 지형도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 도계 석탄폐석 적치장이 위치하고 있는 자연사면의 하단부에는 주택단지와 도로 및 철로가 개설되어 있다. 대상지역에 위치한 자연사면의 주능선은 북북서-남남동 방향으로 발달하고 있으나, 도계 석탄폐석 적치장 주변의 소능선은 대략 동서 방향으로 발달하고 있으며 이에 수반되는 계곡도 동일한 방향으로 발달하고 있다.

Fig. 3은 대상지역의 전경을 나타낸 것으로 자연사면의 능선부에는 석탄폐석 적치장이 조성되어 있으며, 석탄폐석 적치장의 우측 하부에 절취사면이 위치하고 있다. 그리고 절취사면의 하부에는 주택, 아파트, 도로, 철로 등이 위치한다. 먼저 주택과 인접한 자연사면에서 소규모 붕괴가 발생되었으며, 이에 대한 사면안정대책공법으로 사면경사완화공법을 적용하였다.

붕괴상황

Fig. 4는 석탄폐석 적치장 하부의 사면경사완화공법이 적용된 절취사면을 시기별로 촬영한 모습이다. Fig. 4(a)는

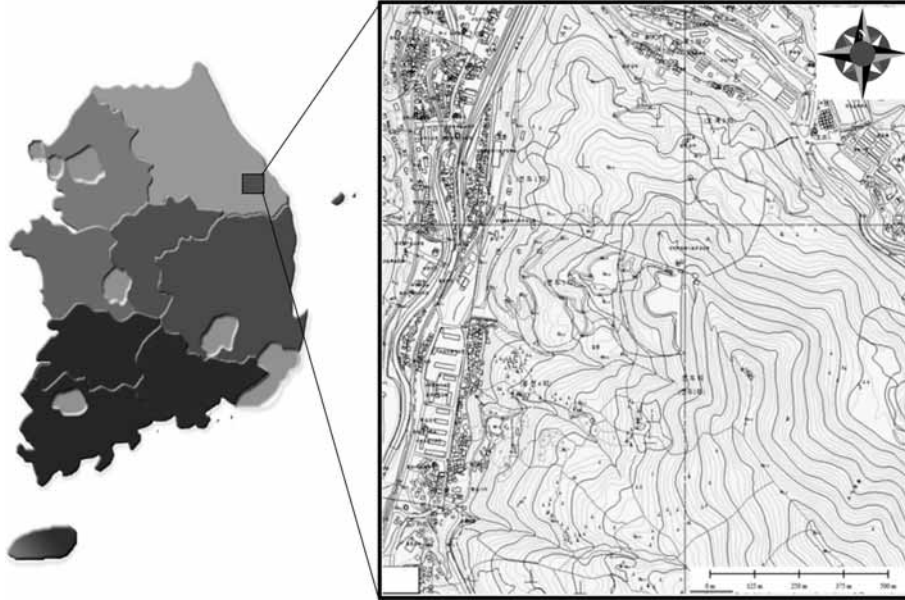


Fig. 2. Topographic map of the study area.



Fig. 3. Panoramic view of the study area.

대상사면 상부에 대한 사면절취공사를 완료하고 하부에 대한 사면절취공사를 수행하고 있는 모습이다. 그리고 Fig. 4(b)는 2개월 후 절취사면의 상부를 확장하기 위하여 추가적으로 사면절취공사를 수행하고 있는 모습이다. 절취사면의 규모를 확장한 이유는 새롭게 개설된 절취사면에서 지속적으로 지반변형이 발생되어 사면경사를 1:2로 보다 완만하게 조성하여 안정성을 확보하기 위함이었다.

사면경사를 더 완화시켜 절취사면을 조성하였음에도 불구하고 절취사면 내에서는 인장균열이 지속적으로 발생되고 이로 인하여 지반의 변형이 지속적으로 증가하는



(a) April 2009



(b) June 2009

Fig. 4. Cutting work at the lower part of slope.

양상을 보였다. 절취사면의 변형 양상을 살펴보면 사면 하부와 절취사면 우측의 계곡방향으로 계단상으로 발달하고 있는 것으로 나타났다.

지질

Fig. 5는 대상지역 주변의 지질도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 북서쪽에 위치한 하부 고생대의 조선누층군에 속하는 석회암을 기반으로 상부 고생대 평안층군의 만항층, 금천층, 장선층, 함백산층 및 도사곡층이 동쪽에 분포하고 있으며, 오십천 단층을 중심으로 그 서부에는 중생대 상부 백악기에 형성된 흥전층과 이를 관입한 산성암맥들로 구성되어 있다. 이 지역의 주된 지질 구조로는 평안층군내에 발달하는 트러스트(Thrust) 단층과 북북동-남남서 방향으로 오십천을 따라 발달하는 오십천 단층이 있다.

대상지역의 지층은 함백산층에 해당하며, 흑색 및 담회색 사암 및 셰일이 주로 분포하고 있다. 함백산층은 대상지역에 중심부에 분포하며 서쪽으로는 오십천 단층으로 흥전층과 경계를 이루고 있다. 주 암석은 굵고 흰 석영립으로 구성된 극조립 사암층으로 구성되어 있으며 하부에는 백색 내지 담회색의 조립질 사암, 박층의 암회색 셰일층이 존재하고 있다. 그리고 장성층과 접하는 부분은 부분적으로 부정합의 특징을 보이는 세역질 사암이 나타나는 경우도 있으며 일부 백색 조립질 사암은 변성작용을 받아 거의 규암화된 것으로 판단된다. Fig. 6은 함백산층에 해당하는 조립질 사암의 현장노출 상태이다. 박층의 흑색 셰일은 사암 위에 퇴적된 이후 세류에 의해

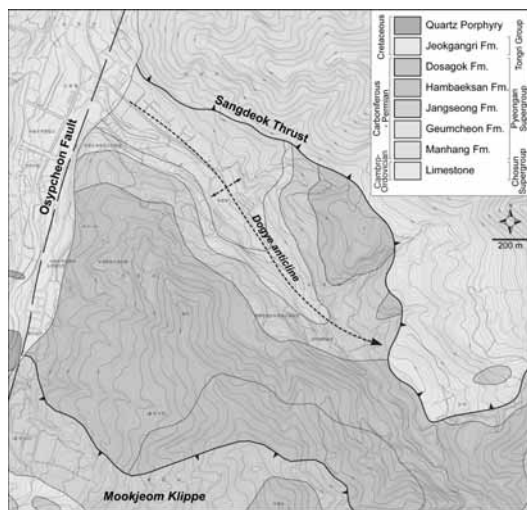


Fig. 5. Geological map of the study area (Seo et al., 1979).



Fig. 6. Coarse-grained sandstone of the Hambaeksan formation.

침식된 사암이 다시 쌓여 펠렛(Pellet)상으로 나타난다.

석탄폐석 적치장 하부의 자연사면에 위치한 절취사면의 남쪽 계곡부에는 치밀하고 단단한 흑색사암이 발달하고 있으며, 본 사암층은 습곡작용을 받은 것으로 판단된다. Fig. 7은 사암층에 발달하는 횡외습곡을 나타낸 것으로 습곡축의 방향과 계곡방향이 평행하게 발달하고 있다. Fig. 8은 절취사면의 상부 계곡부에 있는 하부날개에 해당하는 부분을 나타낸 것으로 이 지층의 층리방향 또한 계곡방향과 아평행하게 발달하고 있다.

석탄폐석 적치장 상부는 주능선에서 가까운 부분으로 토층두께가 30-40 cm 정도로 얇은 편이며, 암반노두가 잘 관찰된다. 특히 이 구간에서 발달하는 노두의 층리주향은 N20W-NS이며, 경사는 30W 방향이므로 석탄폐석 적치장 하부의 자연사면의 방향과 일치한다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 석탄폐석 적치장 하부 자연사면에서는 사암이 관찰되며, 일부일부구간에서는 완만한 습곡의 형태가 관찰된다.



Fig. 7. Recumbent fold in black sandstone.



Fig. 8. layered strata of the cutting face in the valley.



Fig. 9. Sandstone in a natural slope above the coal waste depot.

지층구성

Fig. 10은 대상지역의 지층을 파악하기 위하여 수행된 시추조사 위치를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 총 7공의 시추조사를 실시하였다. 시추조사를 통하여 대상지역의 지층분포현황을 파악하였다. Fig. 11은 석탄폐석 적치장 하부에서의 횡방향 지층구성을 조사하기 위하여 수행된 BH-1~BH-4사이의 시추조사결과를 함께 도시한 것이다. BH-1구간은 상부로부터 매립층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층의 순서로 구성되어 있으며, BH-2구간은 상부로부터 매립층, 붕적토층, 풍화토층, 연암층의 순서로 구성되어 있다. BH-3 및 BH-4는 상부로부터 전석층, 붕적토층, 풍화토층, 풍화암층 및 연암층으로 구성되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 횡방향으로 매립층, 붕적토층 등의 토사층이 13~28.5m 범위로 두껍게 존재하고 있음을 알 수 있다. 그러나 풍화암층은 얇게 존재하거나 존재하지 않는 것으로 나타났다. Fig. 12는 석탄폐석 적치장 하부로부터 절취사면까지의 종방향 지층구성을 조사하기 위하여 수행된 BH-7~BH-3사이의 시추조사결과를 나타낸 것이다. BH-7~BH-5구간은 상부로부터 매립층, 풍화토층, 풍화암층 및 연암층으로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 매립토층은 1~4m범위로 절취사면으로 갈수록 두꺼워지며, 풍화토층은 5~25.4m범위로 절취사면으로 갈수록 얇아지는 것으로 나타났다. 즉 매립토 및 풍화토층을 포함한 토층의 두께는 석탄폐석 적치장 하부구간에서 매우 두껍게 존재하며 절취사면으로 갈수록 얇아지는 것으로 나타났다.

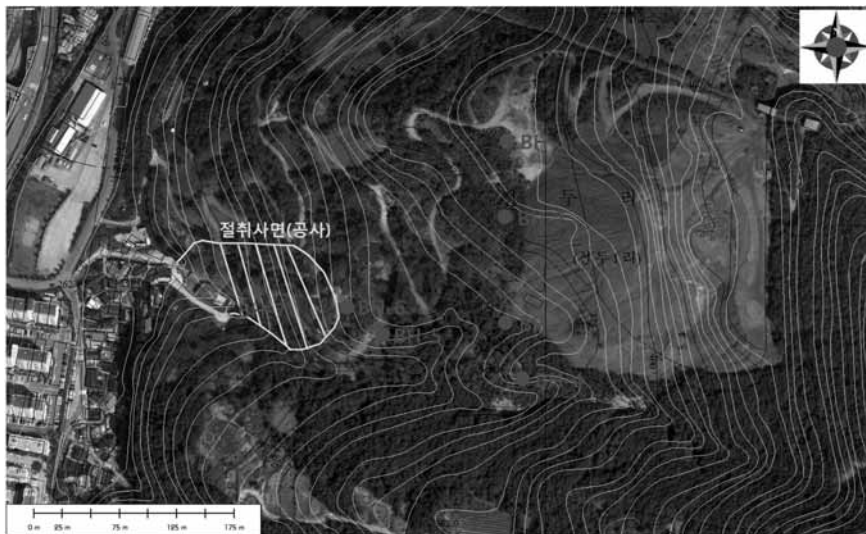


Fig. 10. Location of the borehole.

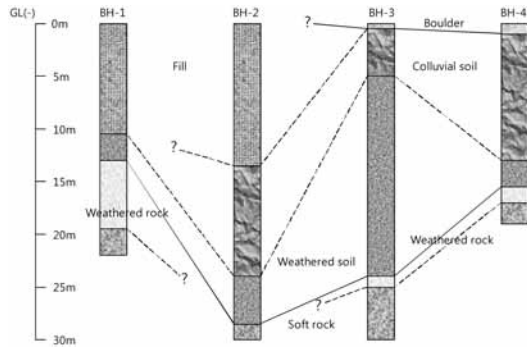


Fig. 11. Crossed ground layer in the lower part of the coal waste depot.

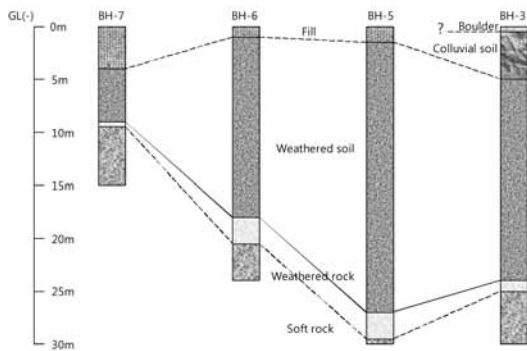


Fig. 12. Longitudinal ground layer in the lower part of the coal waste depot.

균열조사

지표면 균열분포

조사개요

대상지역에 형성된 석탄폐석 적치장과 석탄폐석 적치장 하부의 자연사면 및 절취사면을 대상으로 지표에서 관찰되는 균열의 분포와 발달 상태를 조사하였다. 조사방법은 대상지역을 4개의 소구역으로 나누고, 각 구역별로 발달하는 주요 균열을 시기별로 관찰하였다. Fig. 13은 대상지역에서 발달하는 균열을 측정하기 위하여 4개의 소구역으로 구분한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 석탄폐석 적치장 상단부 구간(A구역), 석탄폐석 적치장 중앙부 북측구간(B구역), 석탄폐석 적치장 하부 자연사면 구간(C구역), 그리고 절취사면 및 절취사면주변 구간(D구역)으로 구분하였다.

균열분포의 조사는 현장 지표조사를 통해 실시되었으며, 조사항목은 균열의 위치, 주향, 경사, 길이, 낙차 등이다. 특히, 균열의 규모, 균열의 방향(주향 및 경사), 낙차 방향 등을 통하여 사면의 전체적 이동방향을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

조사결과

A구역은 석탄폐석 적치장 상단부 구간으로서 주로 경

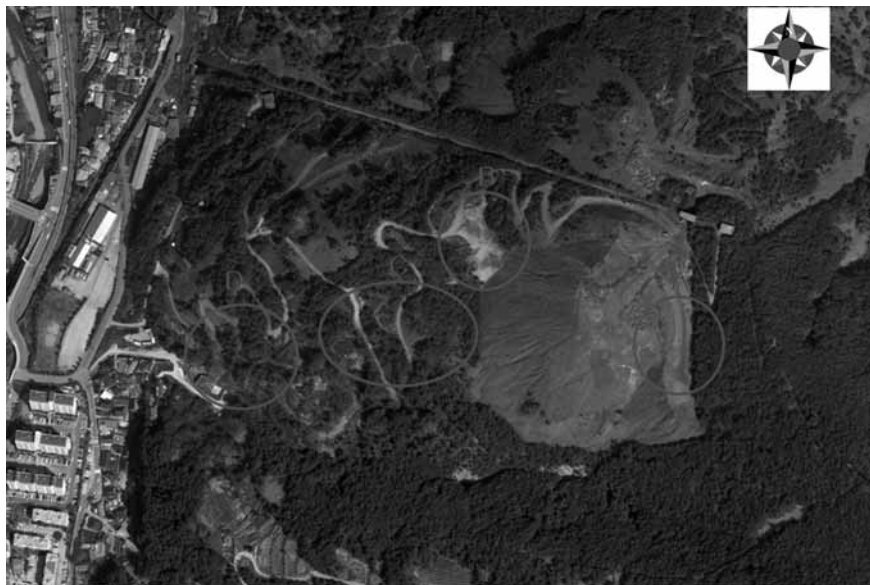


Fig. 13. Sections along which tension cracks were analyzed.

석터미 내에서 인장균열이 발달하였다. Fig. 14는 석탄 폐석 적치장 상단부에서 관찰된 인장균열을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 수 조(set)의 인장균열은 남북방향 또는 북북서-남남동 방향의 주향을 가지며 평행하게 발달하고 비교적 큰 낙차를 가진다. 균열의 방향을 토대로 석탄폐석 적치장 사면은 전체적으로 250°~260° 방향으로 움직이고 있음을 알 수 있다.

인장균열은 조사 초기에는 석탄폐석 적치장 상단부 남쪽에서 주로 관찰되었으나, 조사 중반 이후에는 북쪽에서도 균열이 관찰되었다. 이들 인장균열은 남북으로 길게 연결되어 100 m이상의 길이를 갖는 것으로 조사되었다. 인장균열에 의한 낙차는 평균 1-1.5 m로 나타났으나 2 m를 넘는 경우도 관찰되었다.

B구역은 석탄폐석 적치장 중앙부 북측구간으로서 넓은 평지를 이루고 있다. Fig. 15는 석탄폐석 적치장 중앙부 북측구간에서 발생된 사면활동의 흔적을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 일부 지형이 북측에서 남측으로 약 8-10 m 정도 내려앉은 것으로 판단되며, 이와 함께 지반에 인장균열이 발생하였다. 이후 본 구간에 경석을 추가적으로 피복하였으나 수 조의 인장균열이 다시 발달하였다. Fig. 16은 본 구간에서 경석피복이후 새롭게 형성된 인장균열의 모습을 나타낸 것이다. 인장균열의

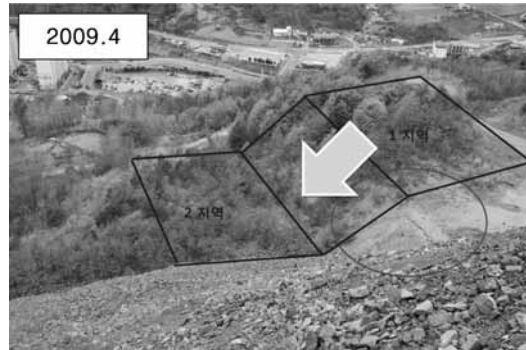


Fig. 15. Evidence of sliding.



Fig. 16. Tension cracks after covering work.

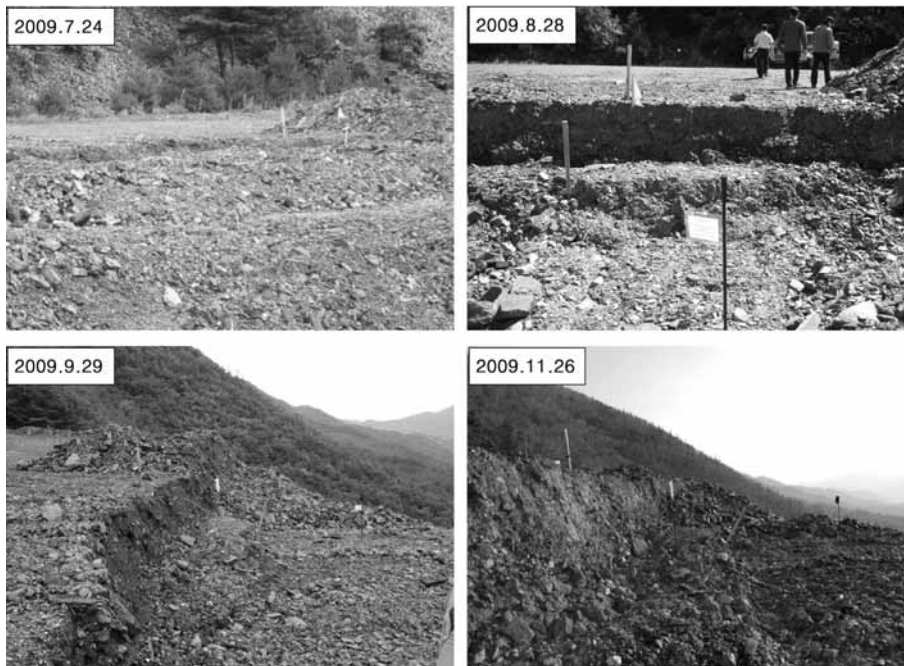


Fig. 14. Tension cracks at the crest of the coal waste depots.

경사방향은 284°이며, 낙차는 남남서방향이다. 인장균열의 길이는 15 m 이상이며, 최대 25 m 정도로 길게 발달되었다. 인장균열의 폭은 최대 50 cm, 낙차는 40 cm, 깊이는 70 cm 이상인 것으로 조사되었다. 인장균열들은 계속해서 발달하고 있으며, 서쪽방향으로 인장균열이 지속적으로 확대되었다.

C구역은 석탄폐석 적치장 하부 자연사면 구간으로서,



Fig. 17. Terrace-type tension cracks.



Fig. 18. Inclined trees.

나무와 식생이 비교적 높은 밀도로 분포하고 있으며, 대부분의 인장균열이 소규모로 발달하고 있는 것이 특징이다. Fig. 17은 본 구역에서 발생된 다수의 인장균열과 이로 인한 단차의 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 다수의 인장균열이 발생되어 지표면이 계단 형태를 보이고 있다. 그리고 Fig. 18은 사면활동으로 인하여 나무가 기울어져 있는 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 나무가 사면방향으로 기울어져 있으며, 인장균열과 이에 수반되는 낙차가 발생되고 있다. 본 구역에서 관찰되는 인장균열의 경사방향은 대체로 280°~300° 방향으로 북서-남동방향의 주향과 남남서 방향의 변위와 낙차를 보인다. 인장균열의 길이는 평균 5-6 m이며, 폭은 10-35 cm, 낙차는 8-27 cm의 범위이다.

D구역은 절취사면 및 절취사면 주변 구간으로서, 절취사면 내에서 다수의 표층붕괴와 인장균열이 발생되었다. 절취사면의 시공 중에도 절취사면 내에서 원호파괴와 대규모 인장균열이 나타나기 시작하였다. 절취사면이 조성된 직후 절취사면 내에 길이가 10 m 이상이고, 폭이 약 15 cm인 인장균열이 발달하였다. 이러한 인장균열의 주향은 동북동-서남서방향과 북서-남동방향의 두 방향으로 나타나고 있다. 약 4개월이 경과한 후 인장균열은 역 50 m 이상으로 발달하고, 폭도 20-30 cm로 확장되었다. 그리고 다른 위치에서도 추가적인 인장균열이 발생되기 시작하였으며, 사면의 형상이 변형되기도 하였다.

Fig. 19는 절취사면이 조성된 직후 사면 내 형성된 소단을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 소단은 큰 변형 없이 시공 당시의 형태를 유지하고 있는 것으로 나타나고 있다. 그러나 일부 인장균열이 소단을 횡단하며 발달하는 것으로 나타났다. Fig. 20은 절취사면 조성되고 약 4개월이 경과한 후 사면내 소단의 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 소단의 형태가 뒤틀어지는



Fig. 19. Completion of cutting work at the lower part of the slope.



Fig. 20. Deformation of the cutting slope after 4 months.

변형이 발생되었으며, 인장균열의 확장으로 인하여 소단의 붕괴가 진행되고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 21은 절취사면의 남측부분에 위치한 계곡부의 개비온 옹벽에 대한 변형을 나타낸 것이다. 개비온 옹벽은 절취사면 조성시 시공된 것으로 시공직후부터 전도파괴가 진행되기 시작하였다. 그림에서 보는 바와 같이 약 6개월 후 개비온 옹벽은 방향이 뒤틀어지고 완전하게 전도파괴가 발생되었다. 그리고 일부 개비온 옹벽은 변형으로 인하여 철망이 파손되고 내부 암편이 노출되어 있는 상태이다.

조사결과 분석

대상지역에 형성된 석탄폐석 적치장과 석탄폐석 적치장 하부의 자연사면 및 절취사면을 대상으로 4개의 소구역으로 나누고, 각 구역별로 발달하는 주요 균열을 시기별로 관찰하였다. 각 시기별 조사결과를 비교하여 균열의 발달상태 및 진행상황을 분석할 수 있으며, 이를 토대로 대상지역의 석탄폐석 적치장, 자연사면 및 절취사면의

전체적인 이동방향을 도출하였다.

A구역은 석탄폐석 적치장 상단부 구간으로서 인장균열은 남북 내지 북북서-남남동 주향과 서남서 방향의 낙차가 발생되었다. 이를 통하여 서남서 방향의 사면변형이 발생하는 것으로 해석할 수 있다. B구역은 석탄폐석 적치장 중앙부 북측구간으로서 인장균열은 서북서-동남동 방향의 주향과 남서방향의 낙차가 발생되었다. 이를 통하여 남서방향의 사면변형이 발생하는 것으로 해석할 수 있다. C구역은 석탄폐석 적치장 하부 자연사면구간으로서 인장균열은 대부분 북서-남동방향의 주향과 남서방향의 낙차가 발생되었다. 나무의 기울어진 방향과 인장균열을 통하여 남서방향의 사면변형이 발생하는 것으로 해석할 수 있다. D구역은 절취사면 및 절취사면 주변구간으로서 석탄폐석 적치장 하중으로 인하여 발생한 인장균열은 동북동-서남서방향의 주향을 가지며, 절취사면 조성으로 인하여 형성된 인장균열은 북서-남동방향 주향을 갖는 것으로 나타났다. 이러한 두 방향의 인장균열 발생과 지반변형양상을 토대로 남서방향의 사면변형이 발생하는



(a) Toppling failure of gabion walls

(b) Internal failure of gabion walls

Fig. 21. Deformation of gabion walls.

것으로 해석할 수 있다.

Fig. 22는 인장균열 분포를 토대로 대상사면의 소구역별 사면변형 방향과 전체적인 지반변형 방향을 해석한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 대상지역의 동쪽에 위치한 경석의 하층과 그 하부 자연사면 및 절취사면의 변형은 $240^{\circ}\sim 250^{\circ}$ 정도의 남서방향으로 발생되고 있음을 알 수 있다.

지형변화 분석

지형고도 분석

지형변화 양상을 직접적으로 분석하는 방법 중에서 국토지리정보원에서 발간하는 지형도를 이용하는 방법이 있다. 국토지리정보원에서는 일정한 주기로 지형도를 수정 재발간 하기 때문에 시기별 지형도를 비교해서 지형이 변화되는 양상을 파악할 수 있다. 최근에는 인쇄된 지형도와 더불어 전자지도 형태로 수치지형도를 제공하고 있으므로 이를 GIS프로그램과 연계한 분석이 가능하다.

대상지역에 대한 지형도는 1987년과 1999년에 발간된 종이형태의 지형도와 1999년 및 2007년에 발간된 1:5,000 축척의 수치지형도가 있다. 대상지역이 석탄폐석 적치장으로 사용되기 이전의 지형은 1987년에 발간된 지형도를 활용하였으며, 석탄폐석 적치장으로 사용된 이후의 지형변화는 1999년 및 2007년에 발간된 수치지형도를 활용하였다.

지형변화를 정량적으로 파악하기 위하여 ArcGIS 프로그램을 이용하였으며, DEM의 격자크기는 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 로 하였다. 특히 1987년 발간된 종이형태의 지형도는 CAD를 이용한 수작업을 통하여 수치지형도로 변환하였다. 대상지역의 지형고도 변화를 정량적으로 살펴보기 위하여 1987년에 발간된 지형도와 2007년에 발간된 수치지형도를 중첩시켜 변화량을 계산하였다. Fig. 23은 1987년 및 2007년도에 발간된 지형도를 이용하여 지형고도변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지형고도의 변화가 가장 크게 나타난 부분은 석탄폐석 적치장 위치로서 약 20-49m 정도 고도가 상승한 것으로 분석되었다. 그리고 석탄폐석 적치장 남측의 계곡지역과 북측의 일부 지역도 고도가 약간 상승한 것으로 나타났다. 이와 같은 지

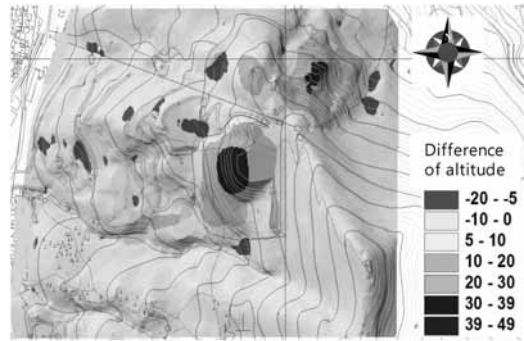


Fig. 23. Altitude change in the study area.



Fig. 22. Direction of ground deformation as determined from the analysis of tension cracks.

형고도의 변화는 짧은 기간에 발생된 것이 아니라 지속적인 석탄폐석 적치로 인하여 발생된 것으로 판단된다.

지형단면 분석

대상지역의 3개 단면을 선정하고 각각의 단면에서의 지형단면의 변화양상을 파악하였다. 이를 위하여 1987년, 1999년 및 2007년에 발간된 지형도를 서로 중첩하여 동일한 구간에 대한 지형변화를 조사하였다. 지형단면도를 작성하기 위하여 앞서 이용한 지형도를 2m×2m 크기의 격자로 나누어 고도값을 추출하였다. 지형 단면도를 추

출하기 위하여 Global Mapper 프로그램을 활용하였다.

지형분석을 위한 3개 단면은 석탄폐석 적치장 상부에서 자연사면의 하부까지의 종단면인 A-A' 단면에, 석탄폐석 적치장 하부 자연사면의 횡단면인 B-B' 단면에, 그리고 석탄폐석 적치장의 횡단면인 C-C' 단면이다. Fig. 24는 대상지역의 지형변화 분석을 위하여 선정된 3개 단면을 나타낸 것이다.

Fig. 25는 대상지역의 종단면인 A-A' 단면에 대한 지형변화 분석결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 석탄폐석 적치장은 1987년 지형도에서 나타나지 않

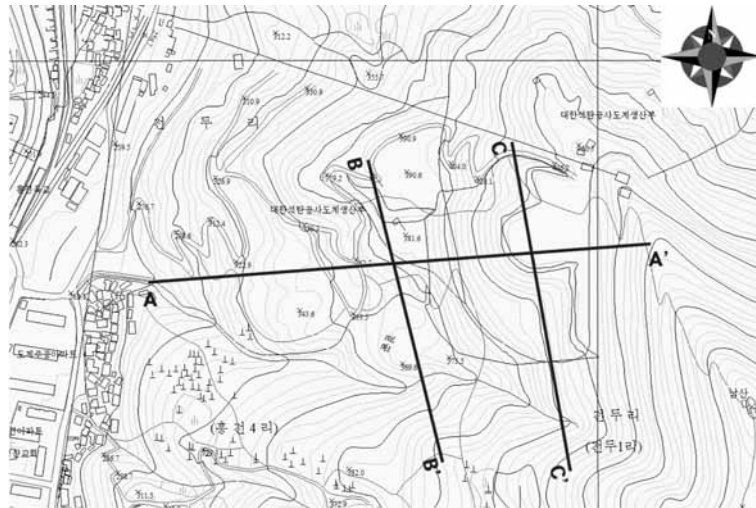


Fig. 24. Cross-sections of the topography analysis.

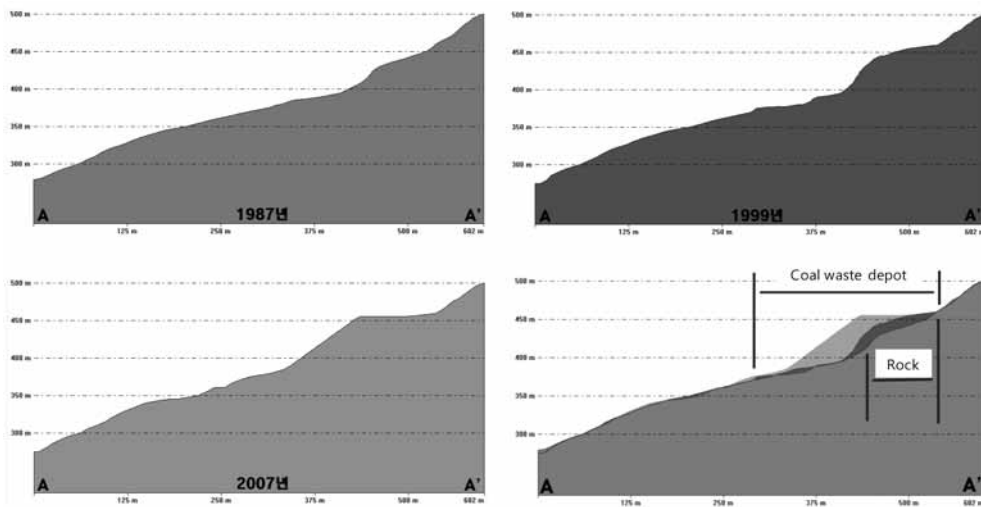


Fig. 25. Topographic changes along section A-A' over time.

았으나 1999년 지형도에서 나타나기 시작하였고 2007년 지형도에서는 상당한 규모를 갖는 것으로 나타났다. 또한 석탄폐석 적치장 하부지역의 경우 1987년 및 1999년 지형도에서는 지형변화가 없는 것으로 나타났으나 2007년 지형도에서는 지형변화가 많은 것으로 나타났다. 석탄폐석 적치장 하부지역의 지형변화는 석탄폐석 적치장의 규모와 관련이 있으며 사면붕괴, 지반밀림 등에 의한 것으로 판단된다. 한편, 그림에서 '암반구간'으로 표시된 부분은 야외조사결과와 원래 지형단면의 형상을 고려하였을 때 암반이 지표에 노출된 것으로 추정되는 구간이다.

Fig. 26은 석탄폐석 적치장 하부 자연사면의 횡단면인 B-B' 단면에 대한 지형변화 분석결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 중앙부(200 m 지점)에 위치한 골짜기 구간에서의 지형변화가 크게 발생되었다. 1987년 및 1999년에 발간된 지형도에서는 골짜기의 지형을 그대로 유지하고 있으나 2007년에 발간된 지형도에서는 해당 골짜기가 사라진 것으로 나타났다. 즉 골짜기 구간의 지

형은 약 10 m 정도 높아진 것으로 나타났다. 한편 골짜기로부터 좌측구간(80 m 지점)은 지형고도가 오히려 낮아진 것으로 나타났다. 이러한 원인은 석탄폐석 적치장 하중의 증가로 인하여 사면능선부에서 사면활동이 발생되었기 때문이며, 붕괴된 토사가 골짜기 구간으로 유입되어 지형고도를 상승시킨 것으로 판단된다.

Fig. 27은 석탄폐석 적치장의 횡단면인 C-C' 단면에 대한 지형변화 분석결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 석탄폐석 적치장의 규모가 시간이 지남에 따라 증가하고 있음을 알 수 있다. 석탄폐석 적치장 횡단면의 지형변화를 토대로 석탄폐석 적치장은 20 m-270 m 구간에 위치하고 있는 것으로 나타났다.

지형변화 원인

일반적으로 산사태를 일으키는 요인은 내적요인(잠재적 소인)과 외적요인(직접적 유인)의 두 가지로 크게 나눌 수

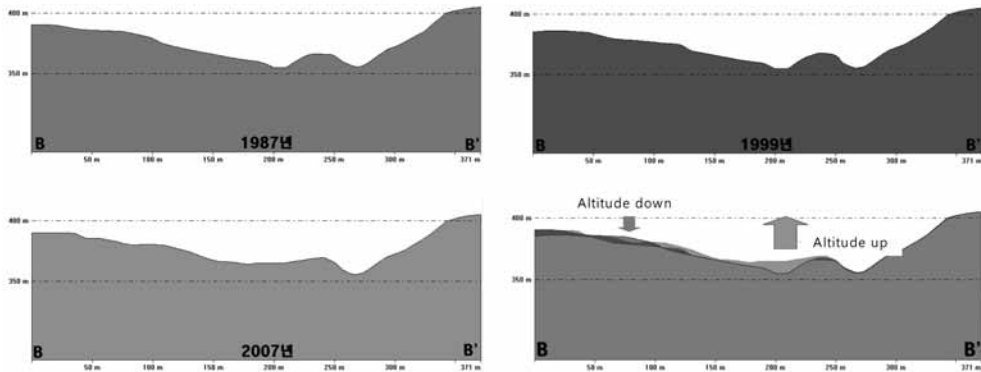


Fig. 26. Topographic changes along section B-B' over time.

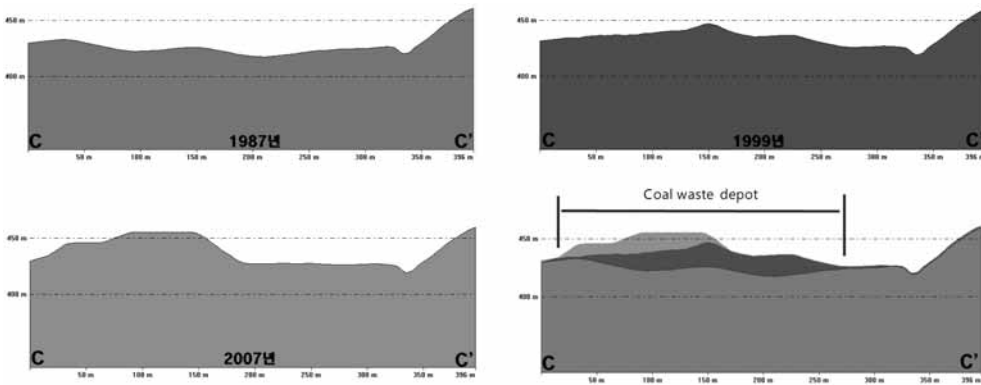
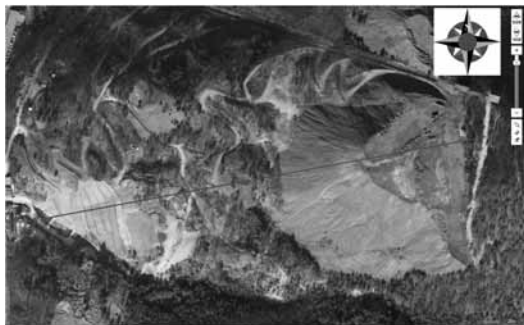


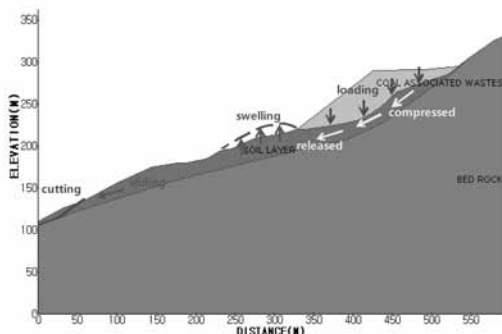
Fig. 27. Topographic changes along section C-C' over time.

있으며, 이들 두 요인이 함께 구비되었을 때 비로소 산사태가 발생하게 된다(송영석과 홍원표, 2007). 즉, 내적으로 취약한 지질구조를 가지고 있는 사면에 강우, 절토 등의 외적요인이 가하여 질 경우 산사태가 발생되기 쉽다. 그러므로 대상지역에서 발생된 지형변화도 내적요인과 외적요인으로 구분하여 설명할 수 있다.

Fig. 28은 대상지역의 석탄폐석 적치장의 인공위성사진과 지형변화 원인을 모식도로 나타낸 것이다. 그림에서 A-A' 단면의 모식도는 시추조사결과와 지형분석결과를 토대로 작성한 것이다. 석탄폐석 적치장의 경사각은 약 34°이며, 적치장 경사면 하부(toe)부터 정상부(crest)까지의 높이는 약 70m, 수평거리는 약 120m로 구성되어 있다. 앞서 설명한 바와 같이 대상지역의 지형변화 원인은 크게 내적요인과 외적요인으로 구분할 수 있다. 먼저 내적요인으로는 층적층, 매립층, 풍화토층 등으로 구성된 두꺼운 토층을 들 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 시추조사결과 대상지역의 토층두께는 약 10-30m정도로 매우 두껍게 구성되어 있다. 그리고 외적요인으로는 석탄폐석의 적치로 인한 하중과 사면절취를 들 수 있다.



(a) Satellite image of this site from (<http://map.naver.com>)



(b) Causes of ground deformation

Fig. 28. Causes and results of ground deformation at the study site.

그림에서 보는 바와 같이 대상지역의 상단부에 석탄폐석의 적치장이 존재함으로써 상부에 존재하는 토층에 하중이 전달되며, 이로 인하여 토층은 압축(compressed)되고 적치장 경사면의 하부로 방출(released)되는 지반밀림현상이 발생된다. 즉, 석탄폐석의 적치하중으로 인하여 적치장 경사면의 하부에서는 지반용기(swelling)가 일어나고, 인장균열, 나무의 쓰러짐 등의 현상이 일어나게 된다(Fig. 17 및 Fig. 18). 한편 대상지역의 하단부에 사면절취공사로 인하여 압성토 역할을 하고 있던 일부 토사가 제거됨에 따라 사면활동(sliding)을 가속화시킨 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 강원도 삼척시 도계 석탄폐석 적치장 주변지반에서 발생하는 지반변형을 조사하고, 대상지역에 대한 지질 및 지반조사를 실시하였다. 그리고 고지형도 및 현지형도를 활용하여 대상지역에 대한 지형고도 및 지형단면 변화를 검토하였다. 이러한 결과를 토대로 도계 석탄폐석 적치장 주변지반에서 발생되고 있는 지형변화의 원인을 분석한 결과 다음과 같다.

1. 대상지역의 지층은 상부로부터 매립층 혹은 붕적층, 풍화토층, 풍화암층 및 연암의 순서로 구성되어 있으며, 매립층 혹은 붕적층, 풍화토층을 포함한 토층의 두께는 9~28.5m로 매우 두껍게 존재하고 있음을 알 수 있다.
2. 대상지역의 석탄폐석 적치장과 주변지역을 소구역 별로 구분하고 발생된 주요 균열을 조사한 결과 균열발생으로 인한 지반변형의 방향은 240~250°의 남서방향으로 예상할 수 있다.
3. 지형도를 이용한 분석결과 석탄폐석 적치장의 지형고도가 약 20-49m로 가장 크게 상승하였으며, 적치장 하부지역의 지형변화는 지속적인 석탄폐석 적치로 인한 것으로 판단할 수 있다.
4. 대상지역의 지형변화에 대한 원인은 분석한 결과 대상지역에 존재하는 두꺼운 토층이 내적요인이며, 석탄폐석의 지속적인 적치로 인한 하중증가 및 하단부에서의 사면절취가 외적요인임을 알 수 있다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “금강사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발”과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 강기천, 안남규, 오재일, 김태형, 2005, 석탄광산에서 발생된 대규모 폐광석 더미에 대한 안정성 검토, 지질공학, 15(2), 133-144.
- 강상수, 정영욱, 최성범, 백환조, 2004, 석탄광산 폐석사면의 안정성 해석, 한국지구시스템공학회지, 41(4), 291-300.
- 권현호, 심연식, 이진수, 김태혁, 김정아, 윤석호, 남광수, 2007, 광해의 원인과 방지대책, 광해방지기술, 1(1), 5-25.
- 국립지리원, 1987, 장성(012) 및 장성(013)도엽(1:5000).
- 국립지리원, 1989, 장성(012) 및 장성(013)도엽(1:5000).
- 국립지리원, 2001, 장성(012) 및 장성(013)도엽(1:5000).
- 대한광업진흥공사, 1990, 한국의 석탄광(상), 410p.
- 대한광업진흥공사, 1992, 한국의 석탄광(하), 621p.
- 서해길, 김동숙, 박석환, 임순복, 조민조, 배두중, 이돈영, 유양수, 박정서, 장윤환, 1979, 탄전지질도; 삼척탄전, 자원개발연구소, 22p.
- 송영석, 홍원표, 2007, 퇴적암지역에서의 산사태 원인 및 특성분석에 대한 사례연구, 지질공학, 17(1), 125-133.
- 조용찬, 채병근, 송영석, 박삼규, 2010, 석탄폐석 적치장으로 인한 허부 자연사면의 지형변화, 2010 추계지질과학연합 학술발표회 논문집, 143.
- 지상우, 2004, 국내 산성광산배수 자연정화시설의 분석과 갭내환산염 환원시설 모형실험 연구, 한양대학교 박사학위 논문, 154p.
- 지상우, 임길재, 2009, 광해와 광해방지기술 (제1편) -광해의 종류와 국내 현황을 중심으로-, 한국토목섬유학회회지, 8(3), 21-26.

2011년 6월 8일 원고접수, 2011년 8월 24일 게재승인

조용찬

한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실
350-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3059
Fax: 042-868-3414
E-mail: choych@kigam.re.kr

송영석

한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실
305-350, 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3035
Fax: 042-868-3414
e-mail: yssong@kigam.re.kr

김경수

한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실
305-350 대전광역시 유성구 과학로 92
Tel: 042-868-3054
Fax: 042-861-9723
E-mail : kks@kigam.re.kr