계측결과 분석을 통한 석탄폐석 적치장 사면의 변형 특성

조용찬 · 송영석*

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Deformation Characteristics of a Slope at a Coal Waste Depot through Analysis of Monitoring Results

Yong-Chan Cho and Young-Suk Song*

Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

본 연구에서는 강원도 삼척시에 위치한 도계 석탄폐석 적치장 사면과 적치장 하부의 자연사면에서의 변형을 조사하고, 이를 분석하였다. 석탄폐석 적치장 사면과 하부 자연사면의 거동을 조사하기 위하여 폐석적치장 상부에 신축변위계와 강우계를 설치하고, 폐석적치장 하부 자연사면에 지중경사계를 설치하였다. 신축변위계를 이용하여 폐석적치장 상부의 변위를 측정된 결과 누적강우량이 증가함에 따라 석탄폐석 적치장 사면 정상부에서 변위는 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 지중경사계를 이용하여 폐석적치장 하부 자연사면의 변위를 측정된 결과 누적강우량이 증가함에 따라 적치장 하부 자연사면의 최대수평변위는 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 폐석적치장 하부 자연사면에서 지하수위는 강우에 따른 변화가 없는 것으로 측정되었다. 계측결과에 따르면, 석탄폐석 적치장의 변형은 강우와 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있다. 석탄폐석 적치장 사면은 강우침투로 인하여 단위중량이 증가하게 되고, 이는 석탄폐석 적치장 사면의 변형을 유발하였다. 그리고 적치장 하부 자연사면의 변형은 강우침투로 인한 석탄폐석 적치장의 하중증가에 의해 발생된 것으로 판단된다.

주요어 : 석탄폐석 적치장, 자연사면, 사면변형, 현장계측, 강우

Deformation of a slope at a coal waste depot and the natural slope under the depot was surveyed and investigated at Dogye village in Samcheock city, Gangwon Province. To investigate the behaviors of the slopes, wire sensors and a rain gauge were installed on the crest of the waste depot slope and inclinometers were installed in the natural slope. The results of deformation monitoring at the crest of the waste depot slope using wire sensors revealed increased deformation with increasing cumulative rainfall. The results of monitoring horizontal deformation of the natural slope revealed that maximum horizontal deformation was also affected by cumulative precipitation. However, the groundwater level at the natural slope showed no change with rainfall. These measurements confirm that deformation at coal mine waste depots is closely related to precipitation, indicating that self-loading at such depots increases with rainfall infiltration, thus causing deformation of the waste depot slope. In addition, increasing the self-load of the coal mine waste depot may cause deformation of the underlying natural slope.

Key words : Coal waste depot, Natural terrain, Slope deformation, Field monitoring, Rainfall

*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

© 2013, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

휴폐광산이 유발하는 광해에는 폐갱도 방치에 의한 지반침하, 산성광산폐수의 유출, 광미 및 폐석의 적치에 의한 주변 환경오염 및 적치사면 붕괴 등을 들 수 있다(Dorbry and Alvarez, 1967; Banks et al., 1997; Blight, 2000) 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(Blight et al., 1981; Lo and Kohn, 1996; Kang et al., 2004).

특히, 폐석적치장은 적절한 보수와 유지관리가 이루어지지 않고 자연 상태로 방치되어 있는데, 이로 말미암아 적치장의 법면 일부의 광미가 유실되고 표면침식 등의 문제가 발생되고 있다(Blight and Amponash-Da Costa, 2004; Ji and Im, 2009). 이와 같이 폐석적치장 사면의 구조적인 결함이 발생되면서 사면안정성에 대한 우려가 부각되고 있다(Kang et al., 2005; Alonso and Gens, 2006). 실제로 집중강우로 인한 적치장의 일부 법면이 유실되거나 적치장 사면의 변형이 발생되고 있으며, 폐석적치장의 하중으로 인하여 적치장 하부에 존재하는 사면의 변형이 발생되고 있다(Cho et al., 2011). 따라서 폐광산지역에 대한 환경공학적 측면에서의 안정성과 더불어 지반공학적 측면에서의 안정성을 확보할 수 있는 연구가 요구되고 있다.

폐석적치장에서 사면붕괴의 발생요인은 내적요인(잠재적 소인)과 외적요인(직접적 유인)의 두 가지로 크게 나눌 수 있으며 이들 두 요인이 함께 구비되었을 때 비로소 사면붕괴가 발생하게 된다. 즉, 내적으로 취약한 지형 및 지질구조를 가지고 있는 사면에 강우 및 절토 등의 외적요인이 가하여질 경우 사면붕괴가 발생되기 쉽다.

폐석적치장 사면의 안정성을 평가하기 위해서는 다양한 지질학적, 수리학적 요인들과 함께 폐석의 물리적, 역학적 특성을 파악하여야 한다. 일반적으로 폐석적치장의 사면형태는 사면하부지반 및 폐석의 전단강도에 따라 결정된다(Gens and Alonso, 2006). 폐석적치장 사면의 규모는 폐석량, 최대적치 높이 및 사면의 경사각에 의해 좌우된다. 또한 적치방법, 폐석적치장 하부사면의 형태

에 따라 사면의 형태가 달라진다(Upadhyay et al., 1990; Van Zyl, 1993).

본 연구에서는 강원도 삼척시 도계읍에 위치한 도계 석탄폐석 적치장 사면 및 적치장 하부사면에서의 변형을 조사하고, 이에 대한 원인을 분석하고자 한다. 먼저 석탄폐석 적치장 사면 및 주변지반의 거동을 조사하기 위하여 폐석적치장 상부에 신축변위계를 설치하고, 폐석 적치장 하부지반에 지중경사계를 설치하였다. 이들 계측 결과를 토대로 강우와 폐석 적치장 사면 및 하부 자연 사면 변형과의 상관관계를 분석하고자 한다.

현장개요

지형 및 지질

Fig. 1은 대상지역의 위치와 지형도를 나타낸 것이다. 대상지역은 강원도 삼척시 도계읍 홍전리 일대이며, 지리좌표로는 북위 37°13', 동경 129°02' 부근에 해당한다. 그림에서 보는 바와 같이 자연사면의 주능선은 북북서-남남동 방향으로 발달하고 있으나, 대상 석탄폐석 적치장 주변의 소능선은 대략 동서 방향으로 발달하고 있으며 이에 수반되는 계곡도 동일한 방향으로 발달하고 있다.

Fig. 2는 대상지역의 전경을 나타낸 것으로 자연사면의 능선부에는 석탄폐석 적치장이 조성되어 있음을 알 수 있다. Fig. 1 및 Fig. 2에서 보는 바와 같이 도계 석탄폐석 적치장 하부에는 주택단지, 도로, 철로 등 각종 사회기반시설이 위치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 석탄폐석 적치장의 붕괴 발생시 많은 인명 및 재산피해가 발생될 가능성이 높은 것으로 나타났다.

Fig. 3은 대상지역 주변의 지질도를 나타낸 것이다. 대상지역 위치한 지역의 지표지질은 함백산층에 해당하며 본 층은 층후가 150~250 m 내외이며, 유백색의 조립~극조립 사암과 역질 사암이 우세하고 암회색 사암 및 셰일이 협재한다. 함백산층은 전반적으로 역질사암 혹은 극조립사암을 시작으로 상향 세립화하는 사암체 조합층이며, 기저는 역질 석영질 사암으로서 장성층과는 점이적 관계로 나타난다. 역질 유백색의 기저부에 분포한 사암의 두께는 20 m 이상이나 부분적으로 얇은 역암층이 나타나기도 한다(Seo et al., 1979).

석탄폐석 적치장 하부의 자연사면에는 치밀하고 단단한 흑색사암이 발달하고 있으며, 본 사암층은 습곡작용을 받은 것으로 판단된다. 석탄폐석 적치장 상부는 주능선에서 가까운 부분으로서 토층두께가 30~40 cm 정도로

Fig. 1. Topographical map of the study area.

Fig. 2. Panoramic view of the study area.

넓은 편이며, 암반노두가 잘 관찰된다. 특히 이 구간에서 발달하는 노두의 층리주향은 N20W-NS이며, 경사는 30° W 방향이므로 석탄폐석 적치장 하부의 자연사면의 방향과 일치한다.

대상지역의 지층을 파악하기 위하여 석탄폐석 적치장 하부의 자연사면을 대상으로 시추조사를 실시하였다. 대상지역의 지층은 상부로부터 매립층, 풍화토층, 풍화암층 및 연암층으로 구성되어 있는 것으로 나타났다. 매립

Fig. 3. Geological map of the study area (after Seo et al., 1979).

토층은 1~4 m 범위의 두께를 가지며, 자연사면의 하부로 내려갈수록 두꺼워지는 경향을 보인다. 풍화토층은 5~25.4 m 범위의 두께를 가지며, 자연사면의 하부로 내려갈수록 얇아지는 것으로 나타났다. 즉 매립토 및 풍화토층을 포함한 토층의 두께는 석탄폐석 적치장 하부 자

Fig. 4. Tension crack at the crest of the coal waste depot.

Fig. 5. Cross-sectional view of the study site. (a) Satellite image of the site (from <http://map.naver.com>), (b) cross-sectional view.

연사면에서 매우 두껍게 존재하며, 자연사면의 하부로 내려갈수록 얇아지는 것으로 나타났다(Cho et al., 2011).

석탄폐석 적치장 현황

Fig. 4는 석탄폐석 적치장 사면 정상부에서 관찰된 인장균열을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 수조(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 사면 정상부 남쪽에서 주로 관찰되었으나, 조사 중반 이후에는 북쪽에서도 균열이 관찰되었다. 이들 인장균열은 남북으로 길게 연결되어 100 m 이상의 길이를 갖는 것으로 조사되었다. 인장균열에 의한 낙차는 평균 1-1.5 m로 나타났다으나 2 m를 넘는 경우도 관찰되었다.

Fig. 5는 석탄폐석 적치장의 인공위성사진과 지형단면도를 도시한 것이다. 인공위성사진에서 AA'구간의 단면도는 시추조사결과와 지형분석결과를 토대로 작성되었

Fig. 6. Plan view of the field monitoring system at the study site.

다. 석탄폐석 적치장의 경사각은 약 34° 이며, 적치장 경사면 하부(toe)로부터 정상부(crest)까지의 높이는 약 70 m, 수평거리는 약 200 m로 구성되어 있다(Cho et al., 2011).

현장계측

계측 개요

본 연구에서는 석탄폐석 적치장 및 주변지반의 거동을 파악하기 위하여 각종 계측기(지중경사계, 신축변위계, 지하수위계, 강우계)를 설치하였으며, 주기적으로 석탄폐석 적치장 및 주변지반의 거동을 측정하였다. 석탄폐석 적치장 사면의 변형을 측정하기 위하여 신축변위계를 석탄폐석 적치장 정상부에 설치하였으며, 대상지역의 강우량을 직접 측정하기 위하여 강우계를 설치하였다. 석탄폐석 적치장 하부지반에서의 변형을 측정하기 위하여 지중경사계를 석탄폐석 적치장 하부 인접지반에 설치하였으며, 대상지역의 지하수위를 측정하기 위하여 지하수위계를 설치하였다. Fig. 6은 본 현장에 적용된 현장계측 평면도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 석탄폐석 적치장 정상부에 강우계 및 신축변위계 2개(J-1, J-2)를 설치하였으며, 석탄폐석 적치장 하부 인접지반에 지중경사계 4개소(I-1, I-2, I-3, I-4)와 지하수위계 1개소를 설치하였다.

강우계와 신축변위계

석탄폐석 적치장 사면에 대한 강우량과 사면 정상부에서의 변형을 측정하기 위하여 1개의 강우계와 2개의 신축변위계를 설치하였다. Fig. 7은 석탄폐석 적치장 정상부에 설치된 강우계 및 신축변위계를 나타낸 것으로

Fig. 7. Wire sensors and rain gauge installed at the study site.

2개의 신축변위계가 함께 설치되어 있다. 그림에서 보는 바와 같이 강우계와 신축변위계는 데이터 수집 시스템에 연결되어 있으며, 데이터 수집 시스템은 태양열을 수집하여 필요한 전력을 보충하는 장치, 일정한 간격으로 측정되는 데이터를 저장하는 데이터 로거, 측정된 데이터를 전송하는 통신장치로 구성되어 있다. 강우계는 미국 Campbell Scientific Inc.의 TE525로, 버킷 타입(tipping bucket type)을 사용하였다. 이 장치는 0.2 mm의 강우량 단위로 측정이 가능하다. 즉, 강우계 내부에 버킷(bucket, 0.2 mm tip)이 한번씩 기울어질 때마다 횟수가 측정되어 강우량을 산정하게 된다. 신축변위계는 미국의 Celesco Transducer Products Inc.의 MT2A로, 와이어 타입(wire type)을 사용하였다. 설치방법은 먼저 기준점 및 측정점을 고정시키고, 기준점에 신축변위계를 설치한다. 그리고 기준점과 측정점을 와이어(wire)로 연결하며, 와이어(wire)의 신축변위를 측정한다. 자동측정 시스템을 갖춘 강우계와 신축변위계를 이용하여 실시간으로 강우량과 석탄폐석 적치장 사면의 변형의 측정이 가능하였다.

지중경사계와 지하수위계

석탄폐석 적치장 하부 주변지반의 거동을 측정하기 위하여 4개의 지중경사계를 설치하였다. 지중경사계는 적치장 사면의 끝단(toe)부분에 3개를 설치하였으며, 그 아래 자연사면에 1개를 설치하였다. 본 연구에서는 국내 Geonet Company의 MPI-SA를 사용하였다. 지중경사계는 지중에 소요깊이까지 경사계관(access tube)을 설치하고 프로브를 경사계관 속에 밀어 넣어 일정 간격으로 경사계관의 경사를 측정하여 중심축에 따른 수평변위량을 산정하였다.

Fig. 8. Precipitation records for the study site.

한편, 석탄폐석 적치장 하부 지반에서의 지하수위를 측정하기 위하여 1개의 지하수위계를 설치하였다. 지하수위계는 BH-5위치에 설치되었으며, 미국 Geokon Inc의 Model 4590을 사용하였다. 지하수위계는 지반내 천공 후 다공질 유공관을 관입하고 일정시간을 경과시킨 후 관내 지하수위가 형성되면 측정 프로브를 설치하여 지하수위 변화량을 측정하였다.

계측결과 및 분석

강우분석

강우시 발생하는 사면활동은 지하수위 상승에 의한 영향보다는 강우시 지중침투로 인하여 발생하는 포화깊이의 영향에 의해 발생되고 있다. 즉, 강우시 물이 지중에 침투되어 침윤전선(wetting front)을 형성하고, 이로 인하여 발생한 포화깊이에서 얇은 사면파괴를 초래하기도 한다. 사면파괴의 원인으로는 사면을 구성하고 있는 토질의 특성, 토질에 따른 침투수의 전달속도 및 포화깊이, 사면붕괴 발생이전 원지반의 함수조건 및 지하수위의 위치, 강우강도의 크기 및 지속성 여부 등을 들 수 있다. 앞에서 열거한 많은 요인들이 복합적으로 작용하여 사면을 불안정하게 조성하는 것이다.

대상현장에 대한 강우 측정기간 동안의 일별강우량을 살펴보면 Fig. 8과 같이 나타낼 수 있다. 약 6개월의 측정기간(2009년 8월 13일~2010년 2월 5일)동안 일일 강우량이 10 mm 이상인 경우는 7회, 20 mm 이상인 경우는 1회, 30 mm 이상인 경우는 2회, 40 mm 이상인 경우는 1회가 발생되었다. 이들 강우형태를 살펴보면 대상지역은 20 mm이상의 강우가 발생되기 전후일에 10 mm 이상의 강우가 함께 동반하는 단기간의 집중호우임을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 측정기간

Fig. 9. Deformation of the waste depot slope over time.

동안에는 30 mm 이상의 집중호우가 두차례 발생되었으며, 이는 사면지반에 대한 큰 변형을 초래한 것으로 판단된다. 2009년 9월 26일부터 28일까지 3일간 발생한 집중호우는 누적강우량이 54 mm이며, 최대강우강도는 8.5 mm/hr이다 그리고 2009년 11월 8일부터 13일까지 6일간 발생한 집중호우는 누적강우량이 113.5 mm이며, 최대강우강도는 4.5 mm/hr이다.

석탄폐석 적치장 사면의 거동

대상지역에 위치하고 있는 석탄폐석 적치장 사면의 거동을 측정하기 위하여 석탄폐석 적치장 정상부에 인접하여 2개의 신축변위계를 설치하였다. Fig. 9는 석탄폐석 적치장 사면의 시간에 따른 변형거동을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시간이 경과함에 따라 석탄폐석 적치장 사면의 변형은 점차적으로 증가하는 양상을 보이는 것으로 나타났다. 특히 석탄폐석 적치장 사면의 변형은 9월부터 11월까지는 지속적으로 증가하는 양상을 보였으나, 12월부터 2월사이에는 비교적 수렴하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 그리고 측정기간 동안 석탄폐석 적치장 사면의 J-1위치에서 약 700 mm, J-2위치에서 약 850 mm의 변형이 발생되었다.

석탄폐적 적치장 하부 인접지반의 거동

대상지역에 위치하고 있는 석탄폐석 적치장 하부지반에서의 변형을 측정하기 위하여 4개의 지중경사계를 석탄폐석 적치장 하부 인접지반에 설치하였다. Fig. 5 및 Fig. 6에서 보는 바와 같이 석탄폐석 적치장 사면 끝단의 북측에 I-1, 중앙에 I-2, 남측에 I-3의 지중경사계가 각각 설치되어 있으며, 이들 하부의 자연사면에 I-4의 지중경사계가 설치되어 있다.

Fig. 10. Horizontal displacement of the natural slope under the waste depot.

Fig. 10(a)는 석탄폐석 적치장 사면 끝단의 북측 지반에서 측정된 수평변위 거동을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시간이 경과함에 따라 지반의 수평변위는 증가하는 양상을 보이고 있으며, 측정된 최대수평변위는 8.3 mm로 지표면으로부터 1 m 아래의 매립층에서 발생되었다. 그리고 지반의 변형형상은 쉐일레버의 변형형상과 유사한 것으로 나타났으며, 매립층 및 풍화토층인 토사층에서 뿐만 아니라 풍화암층 및 연암층인 암반층에서도 수평변위가 미소하게 발생되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 10(b)는 석탄폐석 적치장 사면 끝단의 중앙부 지반에서 측정된 수평변위 거동을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시간이 경과함에 따라 지반의 수평변위는 증가하고 있으며, 측정된 최대수평변위는 29.2 mm로 지표면 부근의 매립층에서 발생되었다. 그리고 지반의 수평변위는 매립층과 풍화토층의 경계부에서 급격하게 감소하는 경향을 보이므로, 해당 깊이인 약 13.5 m에서 사면의 활동면이 형성되어 있음을 예상할 수 있다.

Fig. 11. Deformation at the crest of the waste depot slope in relation to rainfall.

Fig. 10(c)는 석탄폐석 적치장 사면 끝단의 남측 지반에서 측정된 수평변위 거동을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지반의 수평변위가 매우 크게 발생되고 있으며, 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다. 측정된 최대수평변위는 262.7 mm로 지표면 부근의 매립층에서 발생되었다. 그리고 지반의 수평변위는 지표면으로부터 11 m 깊이에서 급격하게 감소되며, 깊이 11 m 이하에서는 급격한 변형으로 인하여 측정 프로브 삽입을 이용한 수평변위 측정이 불가능하였다. 따라서 약 11 m 깊이의 봉적층에서 사면의 활동면이 형성되어 있음을 예상할 수 있다.

Fig. 10(d)는 석탄폐석 적치장 사면의 하부 자연사면 지반에서 측정된 수평변위 거동을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시간이 경과함에 따라 지반의 수평변위는 증가하고 있으며, 측정된 최대수평변위는 166.3 mm로 지표면 부근의 매립층에서 발생되었다. 그리고 지반의 수평변위는 지표면으로부터 21 m 깊이의 풍화토층에서 급격하게 감소하므로, 해당 깊이에서 사면의 활동면이 형성되어 있음을 예상할 수 있다.

지중경사계를 이용하여 측정된 석탄폐석 적치장 사면의 하부 주변지반의 수평변위를 분석한 결과 사면의 활동면은 사면 끝단의 중앙부와 남측지반에서 형성되어 있는 것으로 판단되며, 활동면의 깊이는 지표면으로부터 약 11-14 m 위치에 존재함을 알 수 있다. 그리고 적치장 사면의 끝단에서 하부 자연사면으로 갈수록 활동면의 깊이가 깊어지는 경향을 보이고 있다.

강우에 따른 거동 분석

Fig. 11은 누적강우량에 따른 석탄폐석 적치장 사면

Fig. 12. Maximum horizontal displacement of the ground under the waste depot in relation to rainfall.

정상부에서의 변형거동을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 누적강우량이 증가함에 따라 적치장 사면 정상부의 변위는 증가하는 것으로 나타났다. 특히 강우가 발생된 이후 강우의 지중침투에 의한 영향으로 인하여 적치장 사면 정상부의 변위는 일정기간동안 지속적으로 증가하다가 수렴하는 것으로 나타났다. 따라서 적치장 사면 정상부의 변위는 강우에 많은 영향을 받으며, 사면 정상부의 변위는 강우침투에 의한 영향으로 강우 발생 이후에도 일정기간동안 지속적으로 발생됨을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 누적강우량에 따른 석탄폐석 적치장 사면의 하부 주변지반에 대한 최대수평변위를 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 누적강우량이 증가함에 따라 적치장 사면의 하부 주변지반의 최대수평변위는 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 강우량이 적은 12월 이후에는 최대수평변위의 증가가 완화된 경향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 적치장 사면 끝단의 남측 지반(I-3) 및 적치장 사면 하부의 자연사면 지반(I-4)에서 큰 변위가 발생되고 있으며, 적치장 사면 끝단의 북측 및 중앙부 지반에서는 작은 변위가 발생되고 있다. 따라서 석탄폐석 적치장의 하층은 남서방향으로 집중되고 있는 것으로 예상할 수 있다.

Fig. 13은 누적강우량에 따른 석탄폐석 적치장 사면의 하부 주변지반에서의 지하수위 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 누적강우량이 증가하여도 지하수위는 일정하게 유지되거나 오히려 감소하는 것으로 나타났다. 이는 적치장 사면의 하부 지반에 지하수위는 깊이 존재하므로 강우량에 따라 변화하지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 13. Variation in groundwater level under the waste depot relative to rainfall.

결론

본 연구에서는 강원도 삼척시에 위치한 도계 석탄폐석 적치장 사면 및 하부 자연사면에서의 변형을 조사하고, 이를 분석하였다. 석탄폐석 적치장 사면 및 하부 자연사면의 거동을 조사하기 위하여 폐석적치장 상부에 신축변위계와 강우계를 설치하고, 폐석적치장 하부지반에 지중경사계를 설치하였다. 이를 토대로 강우와 석탄폐석 적치장 사면 및 하부 자연사면의 변형과의 상관관계를 분석하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 대상지역의 지질은 흑색 및 담회색 사암 및 셰일이 주로 분포하고 있으며, 지층은 상부로부터 매립층, 풍화토층, 풍화암층 및 연암층으로 구성되어 있다. 석탄폐석 적치장 사면 정상부에서는 수 조(set)의 인장균열이 발생되고 있으며, 이들 인장균열은 남북으로 길게 연결되어 100 m 이상의 길이를 가지며, 평균 1-1.5 m의 낙차가 관찰되었다.

2. 누적강우량이 증가함에 따라 석탄폐석 적치장 사면 정상부의 변형은 증가함을 알 수 있다. 석탄폐석 적치장 사면은 강우침투로 인하여 단위중량이 증가하게 되고, 이는 석탄폐석 적치장 사면의 변형을 유발한 것으로 판단된다.

3. 석탄폐석 적치장 사면의 변형은 강우발생이후 일정기간동안 지속적으로 증가하는 양상을 보인다. 그리고 누적강우량이 많은 9월부터 11월까지는 적치장 사면의 변형은 지속적으로 증가하는 양상을 보였으나, 누적강우량이 적은 12월부터 2월사이에는 수렴하는 경향을 보였다.

4. 누적강우량이 증가함에 따라 폐석 적치장 하부 자연사면의 변위는 증가하는 것으로 나타났으나 지하수위

의 변화는 없는 것으로 나타났다. 따라서 폐석 적치장 하부 자연사면의 변형은 강우침투로 인한 석탄폐석 적치장의 자중 증가에 의한 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “광산개발에 따른 지질환경재해 확산제어 기술개발” 과제의 일환으로 수행되었습니다. 그리고 본 논문을 세심하게 다듬어주신 익명의 심사위원들에게 감사드립니다.

References

- Alonso, E. E. and Gens, A., 2006, Aznalcollar dam failure. Part 1: Field observations and material properties, *Geotechnique*, 56(3), 165-183.
- Banks, D., Younger, P. L., Arnesen, R. T., Iversen, E. R., and Banks, S. B., 1997, Mine-water chemistry: the good, the bad and the ugly, *Environmental Geology*, 32(3), 157-174.
- Blight, G. E., 2000, Management and operational background to three tailings dam failures in South Africa, *Proc. Slope Stability in Mining*, Littleton, Colorado, U.S.A., 383-390.
- Blight, G. E. and Amponash-Da Costa, F., 2004, Towards the 1000-year erosion-free tailings dam slope - A study in South Africa, *Proc. Ground Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilization*, New Hampshire, U.S.A. 365-376.
- Blight, G. E., Rea, C. E., Caldwell, J. A., and Davidson, K. W., 1981, Environmental protection of abandoned tailings dams, *Proc. 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, Sweden, 1, 303-308.
- Cho, Y. C., Song, Y. S., and Kim, K. S., 2011, Investigation and analysis of ground deformation at a coal waste depot in Dogye, *The Journal of Engineering Geology*, 21(3), 199-212. (in Korean)
- Dobry, R. and Alvarez, L., 1967, Seismic failures of Chilean tailing dams, *Jour. of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 93(6), 237-260.
- Gens, A. and Alonso, E. E., 2006, Aznalcollar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism, *Geotechnique*, 56(3), 185-201.
- Ji, S. W. and Im, G. J., 2009, Mining hazards and its prevention technology (1) -focus on classification of mining hazards and domestic current situation-, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, 8(3), 21-26.
- Kang, G. C., Ahn, N. K., Oh, J. I., and Kim, T. H., 2005, Stability investigation of the large size heap of coal associated wastes, *The Journal of Engineering Geology*, 15(2), 133-144. (In Korean with English abstract)
- Kang, S. S., Cheong, Y. W., Choi, S. B., and Baek, H. J., 2004, Stability analysis of the coal mine waste dump, *Journal of Korean Society for Geosystem Engineering*, 41(4), 291-300. (In Korean with English abstract)
- Lo, R. C. and Klohn, E. J., 1996, Design against tailings dam failure, *Proc. Int. Sym. Seismic Environ. Aspects Dam Design*, Santiago, Chile, 1, 35-50.
- Seo, H. G., Kim, D. S., Park, S. H., Im, S. B., Cho, M. J., Bae, D. J., Lee, D. Y., Yoo, Y. S., Park, J. S., Jang, Y. H., 1979, *Geologic atlas of the Samcheog coalfield*, Korea Research Institute of Geoscience and Mineral Resources, 22p. (in Korean)
- Upadhyay, O. P., Sharma, D. K., and Singh, D. P., 1990, Factors affecting stability of waste dumps in mines, *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 4(3), 95-99.
- Van Zyl, D., 1993, Mine waste disposal, *Geotechnical Practice for Waste Disposal* (edited by Daniel, D. E.), 269-286.

원고접수일 : 2012년 12월 14일

수정본채택 : 2013년 1월 22일(1차)

2013년 1월 29일(2차)

게재확정일 : 2013년 2월 1일

조용찬

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

대전광역시 유성구 과학로 124

Tel: 042-868-3059

E-mail : choych@kigam.re.kr

송영석

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

대전광역시 유성구 과학로 124

Tel: 042-868-3035

E-mail : yssong@kigam.re.kr