

암반사면 사태의 원인규명을 위한 지질조사
및 전기비저항 탐사

Geological and Geophysical Surveys for Determining
Causes of Rock Slides

황 학 수 (Hak Soo Hwang)	한국지질자원연구원 탐사개발연구부
기 원 서 (Weon-Soo Kee)	한국지질자원연구원 지질연구부
이 태 섭 (Tai Sup Lee)	한국지질자원연구원 탐사개발연구부
박 종 오 (Jong-Oh Park)	충남대학교 지질학과
최 정 환 (Jeong Hwan Choi)	한국고속철도공단
문 창 규 (Chang Kyu Moon)	충남대학교 지질학과

요약 / ABSTRACT

서울~부산간 경부고속철도 왕림터널 개착구간의 서측 사면에서 발생한 암반사면 사태의 발생원인을 파악하기 위하여 정밀지질조사와 물리탐사를 실시하였다. 지질구조에 대한 물리탐사 및 기하학적 분석 결과, 집중강우 시 다량의 지하수가 N60° E 방향의 주단열대로 유입되면서 단열공극 내의 유체압력이 상승하여 사면암반의 거동이 유발되었으며, 개착터널의 사면쪽으로 경사하는 편마암의 엽리면을 따라 변위가 진행되어 결과적으로 대규모 사태가 야기되었던 것으로 해석되었다.

주요어: 암반사면사태, 지질구조

Table 4. Basic statistics of fracture frequency. T means televiewer data and C means core log data.

Geological and geophysical surveys were performed to examine the cause of the rock-mass slide occurred at the opening site of the Wanglim tunnel of the Seoul-Pusan High Speed Railway. The results of geophysical survey and geometrical analysis for the geological structures indicate that the rock-mass slide was triggered by the heavy rainfall which increases the groundwater level and results in high pore pressure in the N60° E-trending major fractured zone of the slope, and that the foliation dipping toward the vertical open face of the slope acted as a main sliding plane during movement.

Key Words: rock-mass slide, geological structures

서론

서울~부산간 경부고속철도의 총 연장길이는 411.5 km이며, 대부분의 노선은 터널(tunnel)과 다리(elevated bridge)로 구성되어 있다. 그러므로 터널과 같은 지하 구조물 시공에 따른 지질환경 및 지하수 유동환경 등의 변화가 발생하여 구조물의 안정성의 문제가 야기될 수 있다.

이 논문은 경부고속철도 왕림터널의 개착구간에서 발생한 암반사면 사태에 대한 원인규명을 위한 지질조사 및 지구물리조사의 적용 사례이다. 국내에서 지반조사를 포함한 지질구조 파악을 위하여 주로 사용되는 경제적이고 효율적인 물리탐사법은 굴절법 탄성파탐사와 전기비저항 탐사법이다. 특히, 전기비저항 탐사법은 단층과쇄대 그리고 해수침투영역 탐지와 같이 주변지질과 탐지대상체의 전기비저항 대비가 있는 지질구조 탐사에 매우 효과적이다(손호용 등, 1999; 이기화 등, 2000; 황학수 등, 2000; Chang, 2001; Hwang et al., 2001; Ward, 1990).

조사지역은 경기도 화성군 봉담읍이며, 서울-반안간 43번 국도와 인접하고 있다(Photo 1). 원래 터널의 개착구간과 인접한 도로가 위치한 곳은 계

곡으로서, 도로 시공시 산을 절토하고 계곡을 성토하여 도로를 건설하였다. 개착터널의 서쪽 측면에서 일어난 암반사면 사태는 이 지역에 내린 집중강우 후 2주일 이내에 점진적으로 발생하였으며, 인접한 도로 상의 절토부와 성토부의 경계에서 도로와 거의 수직한 방향으로 형성된 여러개의 균열들을 확인할 수 있었다.

암반사면 사태는 사면을 구성하고 있는 지질매체와 사면의 경사각에 따라서 그 거동이 달라진다. 즉, 일반적으로 사면을 구성하는 암석의 종류, 풍화정도, 암석 내에 발달한 층리, 엽리, 절리, 단층 등과 같은 불연속면과 사면의 경사각과의 관계에 따라서 사면의 붕괴현상이 각각 달라진다. 따라서, 주로 암반사면으로 구성된 조사지역의 지질상황을 예측, 판단하기 위해서는 상기한 불연속면의 물리적 특성 및 파쇄대의 존재를 정확히 파악하는 것이 필요하다.

이 연구의 목적은 지질조사와 지구물리조사를 수행하여 터널의 개착부에서 발생한 암반사면 사태의 원인을 규명하고, 또한 암반의 예상 활동 파괴면을 파악하여, 이를 구조물의 보강설계시 기초자료로서 제공하는 것이다.



Photo 1. A view of the survey area

지질조사

조사지역은 지체구조적으로 한반도 중부지역에 분포하는 경기육괴 내에 위치한다. 이 지역의 지질은 소위 경기변성암복합체에 속하는 선캄브리아시대의 흑운모 편마암으로 주로 구성되어 있으며, 이에

석영장석질 편마암이 얇은 층으로 협재된다. 흑운모 편마암은 주로 흑운모로 구성된 우회질대와 석영-장석으로 구성된 우백질대가 서로 분리되어 교호하는 호층구조를 약하게 보인다. 흑운모의 영향으로 암회색을 띠는 이 암석은 편상의 흑운모나 신장변형된 석영 입자들이 엽리면에 평행한 방

향으로 면적인 정향배열 (dimensional preferred orientation)을 이루어 형성된 엽리구조가 잘 발달하여 있다. 조사지역의 암석에 발달한 엽리구조는 흑운모 편마암의 형성과 관련된 변성작용의 산물이며, 절리나 단층은 이 암석이 형성된 이후에 발생한 조구조적 응력에 의해 비교적 지각의 상부에서 생성된 단열면으로서, 이들 구조요소들은 모두 암석 또는 암반내에서 전형적인 물리적 불연속면을 이룬다.

Fig. 1은 조사지역의 엽리, 절리, 소규모 단층 등과 같은 불연속면들의 방향성을 터널사면의 방향과 함께 등변적 입체투영법에 도시한 것이다. 기존에 발간된 1/50,000 축척의 남양도폭 (박노영과 김정환, 1972)에 의하면, 흑운모 편마암체가 조사지역을 중심으로 남-북 방향으로 협장하게 분포하고 있으며, 그 엽리의 방향성은 큰 변화를 보이지 않고 대략 남-북 내지 북북동 방향의 주향과 남동향으로 30° -50° 의 경사각을 이루고 있는 것으로 보고되어 있다. 조사지역에서 관찰되는 흑운모 편마암역시 모두 일관되게 동쪽으로 경사를 이루는 엽리구조를 갖고 분포하는 것으로 확인되었다 (Photo 2). NATM방법으로 시공된 왕림터널을 기준으로 그 북쪽 지역에서는 엽리가 N20° E/40° SE 방향으로 발달하고 있으나, 그 남쪽 지역에서는 N10° W/40° NE 방향을 보이고 있어, 약간의 주향 변화를 보인다 (Fig. 1).

현장에서 직접 관찰할 수 있는 노두가 매우 한정되어 있어 전체적인 단열구조의 발달빈도, 방향, 기하학적 분포 및 구조적 특성 등을 종합적으로 해석하기는 어려우나, 관찰된 단열구조들의 재반 특성을 간략하게 기술하면 다음과 같다.

조사지역의 편마암체내에는 절리 및 소규모 단층들이 빈번하게 발달하고 있는 것이 관찰된다. 조사지역 북쪽의 개착터널 출입구의 양측사면 하단에 노출되어 있는 노두에는 소규모 단층 또는 전단단열들이 엽리면에 평행하게 발달하고 있는 것이 관찰된다 (Photo 3). 단층의 틈을 따라서는 단층각력암(fault breccia)과 단층비지(gouge)로 구성된 단층파쇄암들이 수 mm 또는 10 cm 내외의 폭으로 발달하고 있으며, 활면조선 (slickenside striae)을 수반하는 단층면은 단층대와 보암사이의 경계를 매우 예리하게 구획하고 있다. 그리고 이들 주단열면

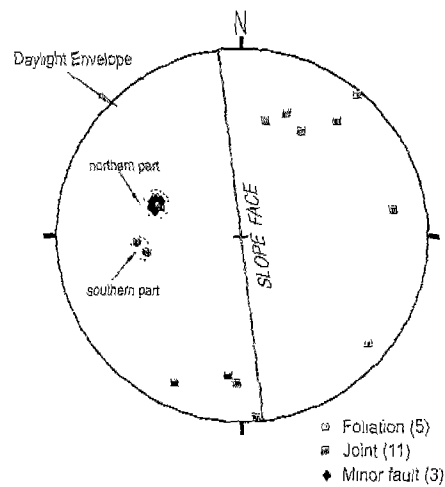


Fig. 1. Equal area stereographic projection showing the orientation of structural elements and western side slope of tunnel, and daylight envelope.

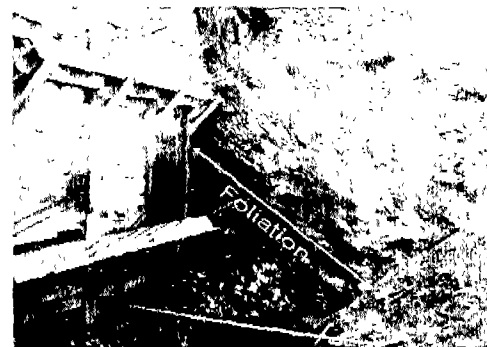


Photo 2. Eastward dipping foliation of biotite gneiss at the western side slope of tunnel.



Photo 3. Minor fault parallel to the foliation plane of gneiss at the eastern side slope of tunnel.

주변에 발달하는 절리의 틈을 따라서는 간혹 황철석을 포함하는 방해석 세맥들이 충전 또는 피복되어 있음이 확인된다.

이 지역에 발달하는 절리구조는 동북동 내지 동서 방향의 주향과 남쪽 또는 북쪽으로 70° 이상의 고각의 경사를 이루는 것들이 매우 우세하다 (Fig. 1). 특히 터널 동측사면의 42K353m 지점에서 상당량의 지하수가 누출되고 있는 것이 확연하게 관찰되는데, 이러한 현상은 이 지점이 지하수의 동로 역할을 하는 주 파쇄대가 지나고 있음을 간접적으로 지시한다. 터널 양측 사면에서의 지하수 누출 지점을 근거로 하여 그 방향을 추적한 결과, 이 파쇄대는 대략 N60° E 방향으로 발달하고 있는 것으로 예측되었다. 이러한 단열대의 존재는 물리탐사 결과와 매우 잘 일치하며, 이에 대해서는 다음 절에서 자세히 언급한다.

물리탐사

조사지역은 차량통행이 많은 국도와 인접한 지역으로 물리탐사법 선정과 측선 설정에 있어서 매우 제한적이다. 그 예로서, 조사지역내에 분포하는 성토부에서 기반암의 심도를 파악하기 위해서는 굴절법 탄성파탐사를 수행해야 하나, 통행하는 차량에 의해 발생하는 과도한 진동잡음으로 탄성파탐사를 수행할 수 없었다. 또한, 탐사측선에 있어서 터널과 평행한 측선과 더불어 터널을 가로 지르는 측선에서도 물리탐사가 수행되어야 하나, 이 또한 차량통행이 많은 국도 때문에 수행할 수 없었다.

왕립터널을 포함한 주변부에 분포하는 파쇄대를 파악하기 위하여 선정된 물리탐사법은 쌍극자배열 전기비저항 2차원탐사이며, 대체적으로 터널과 평행한 총 5개의 측선(Fig. 2)에서 물리탐사를 수행하였다. 각 측선의 길이는 250m이며, 측정시 쌍극자의 길이와 최대 전극간 전개수를 각각 10m, n=6으로 하였다. 특히, 측선 E의 경우는 터널의 개착구간에 설치하였다.

Fig. 3은 조사지역의 측선 A, B, C, D, E에서 수행한 물리탐사에 대한 결과들을 종합적으로 도시한 것이다. 각 측선에 대한 전기비저항 단면도는 전기비저항 2차원 역산(inversion)으로 산출된 것으로서, 조사지역에 대한 전기비저항값은 최저 10

ohm-m 내외에서 최고 수천 ohm-m까지 분포한다. 그러나 전기비저항 단면도 상에서는 20 ohm-m 이내의 전기비저항값들은 파랑색 그리고 500 ohm-m 이상의 값들은 빨강색으로 도시하였다. 즉, 각 전기비저항 단면도에서 전기비저항값은 파랑색으로부터 노랑색을 경유하여 빨강색으로 갈수록 차차 높아짐을 의미한다.

물리탐사에 의해 확인된 조사지역 내에 존재하는 매우 낮은 전기비저항 이상대(전기비저항 단면도 상에서 파랑색부분)의 주향 방향은 N60° E이고 터널부근(42K353m 부근)에서 이상대의 폭은 50m 내외이며, 심부까지 발달한 것으로 해석된다. 특히, 터널의 서쪽 사면 중 전기비저항 이상대가 존재하는 구간에서 상당량의 지하수 유출이 관찰된다. 또한, 이 구간에서 실시한 시추조사에 의하면 소규모의 단층과 이에 수반된 단열면들로 인해 암석이 심하게 파쇄되었으며, 이들 중에는 철산화물에 의해 착색된 상당수의 단열면들도 관찰된다. 그러므로, 조사지역에서 물리탐사로부터 해석된 낮은 전기비

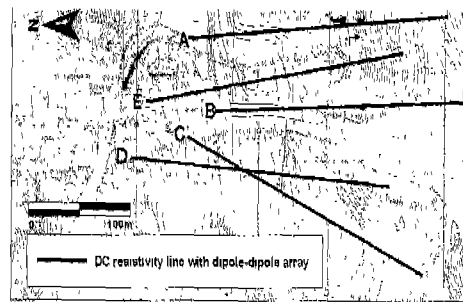


Fig. 2. Survey map including geophysical survey lines

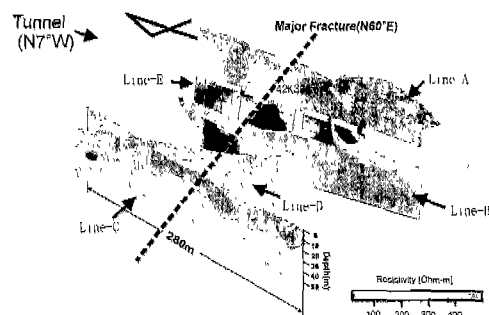


Fig. 3. Fence diagram of geo-electrical sections obtained with DC inversion.

서향 이상대는 지하수 유동의 주 통로가 되는 파쇄대인 것으로 판단된다.

종합검토

암반사면 사태에 의한 변위 발생구간을 포함한 터널부근에 분포하는 흑운모 편마암은 우혹질대의 두께가 보통 수 mm 정도이나 부분적으로는 3 cm 정도로 상당히 두껍게 발달하고 있다. 흑운모 편마암에 발달된 엽리구조는 일종의 물리적인 불연속면으로서, 특히 흑운모가 농집된 우혹질대는 석영과 장석으로 구성된 우백질대에 비하여 전단 강도가 상대적으로 훨씬 낮아 암반의 전체의 강도를 현저히 떨어뜨리는 부분이다. 조사지역에서 엽리구조는 대략 N20° E/40° SE 방향으로 발달하고 있다. 이러한 엽리구조의 방향은 N07° W/90° 방향으로 절개된 터널의 서쪽 사면과 관련한 Daylight Envelope 영역내에 존재하고 있어(Fig. 1) 이 지역에서는 엽리면을 주활동면으로 하는 암반사태가 발생한 것으로 판단된다. 실제로 왕림터널의 남쪽 입구부의 서쪽 사면에서 사태가 발생하고 있는데, 이곳 역시 암반의 변위가 엽리면을 따라 진행되었음을 현장에서 직접 확인할 수 있었다.

조사지역 주변의 노두 및 시추코아에서 엽리면에 평행하게 발달된 소규모 단층 또는 전단단열들이 빈번하게 관찰되는데, 이러한 지질구조의 존재는 사태 발생을 보다 촉진시킨 것으로 해석된다. 특히, 암반사태가 발생한 변위구간(42K320m~42K400m)에 존재하는 주 파쇄대(N60° E) 내의 지하수 유입은 암반의 유효응력을 감소시켜 암반의 강도를 약화시킨다. 조사지역의 경우 일단 개착터널 구간을 절개하는 과정에서 기존 암반이 제거됨으로서 그동안 안정상태에 있던 지반이 교란되어 불안정하게 되었을 것이다. 이러한 상태에서 집중강우로 인해 다량의 지하수가 주 파쇄대를 따라 유입되면서 단열공극내의 유체압력이 상승하여 암반의 거동을 유발시켰던 것으로 판단되며, 이 때 이 암체의 대표적인 불연속면인 엽리면을 따라 암반의 변위가 진행되어 결과적으로 사태가 야기되었던 것으로 해석된다.

Fig. 4(a)는 조사지역 내에 발달하는 지질구조요

소들의 공간적 분포를 나타낸 것으로서, 엽리면, 주 파쇄대면, 서쪽 사면, 그리고 터널에 수직인 단면의 방향성과 이들 사이의 각 관계를 등면적 입체투영망을 이용하여 도시하였다. 이를 바탕으로 최대 변위 발생구간을 중심으로 서쪽 사면을 이루는 암반 내의 엽리구조와 주 파쇄대의 공간적 분포를 Fig. 4(b)에 모식적으로 표현하였다. 여기서, 높이가 25m인 사면에서 엽리면을 따라 암반의 사태가 발생할 경우 잠재적으로 활동가능한 최대 영역을 각 방향별로 계산하였다. 주 파쇄대가 지나서 서쪽 사면 42K353m 지점을 기준으로 그 북쪽 지피에서는 사면과 예상 활동면이 이루는 각은 37° 정도이며, 터널을 따라 북쪽 방향으로 약 65m 거리(42K288m 지점까지), 그리고 서쪽 사면 42K371m 지점에서 서쪽으로 최대 42.7m 거리 내에 있는 암반이 활동가능 영역에 포함된다. 그러나 주 파쇄대에서 북쪽으로 멀어져 감에 따라 그 폭과 두께가 점점 좁아지니, 따라서 상대적으로 사태의 발생 가능성도 점진적으로 줄어날 것으로 판단된다. 주 파쇄대의 남측 지피에서의 활동가능 영역은 북쪽지피와 비교하여 상대적으로 좁은 범위이다. NATM터널 구간에서는 개착터널 구간에서처럼 암반을 절개하지 않아 비교적 안정상태에 있기 때문에 사태의 발생 가능성이 매우 낮을 것으로 판단되나, 개착터널 구간 중 주 파쇄대와 인접한 지역은 사태의 발생 가능성이 상대적으로 훨씬 높을 것으로 예상된다. 이러한 판단을 기준으로 주 단열대가 위치한 서쪽 사면 42K353m 지점에서부터 NATM터널 입구 즉, 42K410m 지점까지 잠재적으로 활동가능 영역으로 분류되며, 그 폭은 북측 지피에서와 같이 42.7m로 산정함이 적절하다고 판단된다.

결론

서울~부산간 경부고속철도 왕림터널의 개착구간 중 42K320~42K400m에서 발생한 암반사면 사태의 원인과 암반사태의 예상 활동 파괴면을 파악하기 위하여 수행한 정밀 지반물리탐사 및 지표지질조사로부터 다음과 같은 결론을 얻었다:

첫째, 조사지역에서 관찰되는 흑운모 편마암의 엽리구조는 NATM공법으로 시공된 왕림터널을 기

준으로 그 북쪽 지역에서는 N20° E/40° SE 방향으로 그 남쪽 지역에서는 N10° W/40° NE 방향으로 발달하고 있다.

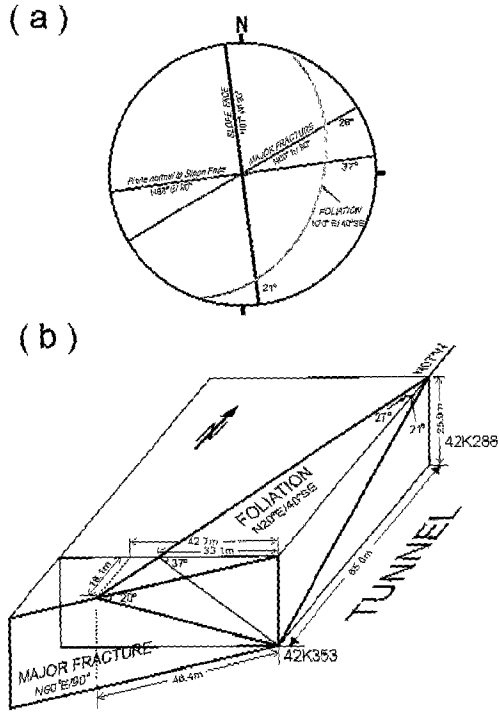


Fig. 4. (a) Stereographic projection for the orientation of structural elements, foliation, major fracture zone, western side slope of tunnel, and plane normal to slope of tunnel, (b) Schematic diagram showing the spatial distribution of structural elements and the area of possible rock-mass slides.

둘째, 조사지역 북쪽의 개작터널 출입구의 양측 사면 하단에 노출되어 있는 노두에는 소규모 단층 또는 전단단열들이 열리면에 평행하게 발달하고 있으며, 이 같은 단층의 틈을 따라서는 단층각력암과 단층비지로 구성된 단층파쇄암들이 수 mm 또는 10cm 내외의 폭으로 발달하고 있다. 또한, 단열면 주변에 발달하는 절리의 틈을 따라서는 간혹 황철석을 포함하는 방해석 세맥들이 충전 또는 피복되어 있다.

셋째, 물리탐사, 지질조사 및 시추조사에 의해 파악된 주 파쇄대의 방향은 N60° E이고 터널부근

(42K353m 부근)에서 파쇄대의 폭은 50m 내외이며 심부까지 발달되었다. 특히, 시추코어의 단열면들이 철산화물에 의해 착색된 것으로 보아 이 같은 파쇄대는 조사지역의 지하수 유동의 주 통로로 판단된다.

넷째, 집중 강우에 따른 다량의 지하수가 42K353m 부근에 존재하는 주 파쇄대(N60° E/90°)에 유입되면서, 단열공극 내의 유체압력이 상승하여 암반의 거동이 유발되었다. 이와 더불어 암반사면 사태에 의한 변위는 주활동면으로 작용한 편마암의 열리면을 따라 진행되었던 것으로 해석되었다.

다섯째, 주 파쇄대가 통과하는 서쪽 사면 42K353m 지점을 기준으로 그 북쪽 지피에서는 사면과 예상 활동면이 서로 이루는 각은 37° 정도이며, 터널을 따라 북쪽 방향으로 약 65m 거리(42K288m 지점까지), 그리고 서쪽 사면 42K371m 지점에서 서쪽으로 최대 42.7m 거리 내에 있는 암반이 활동가능 영역에 포함된다. 또한, 주 파쇄대를 중심으로 남측 지피에서의 활동가능 영역은 북쪽지피와 비교하여 상대적으로 좁으며, 그 범위는 주 파쇄대가 위치한 서쪽 사면 42K353m 지점에서 NATM터널 입구 즉, 42K410m 지점까지 잠재적으로 활동가능 영역으로 분류되며, 그 폭은 북쪽 지피에서와 같이 42.7m이다.

참고문헌

- 박노영, 김정환, 1972, 한국지질도 (1:50,000) 남양도폭 (Sheet 6525-I), 국립지질조사소 13p.
- 손호웅, 윤혜수, 오진용, 1999, 전기, 전자탐사에 의한 경주남부 (입실지역)의 울산단층 심부구조: 자원환경지질학회지, 32권, p.161-175.
- 이기화, 권병두, 임형래, 양준모, 2000, 난지도 매립장의 안정화에 따른 지질환경 변화조사를 위한 지구물리 탐사: 지구물리학회, 3권, p. 113-126.
- 황학수, 이상규, 고동찬, 김양수, 박인화, 2000, 전기 비저항 모니터링을 이용한 해수침투 파악: 물리탐사학회지, 3권, p. 1-6.
- Chang, H.S., 2001, Geophysical mapping of soil contamination by waste disposal: 2001

International Symposium on Application of Geosystem Engineering for Optimal Design of Underground Development and Environment, p. 129-144.

Ihwang, H.S., Lee, T.S., Song, W.K., Choi, J.H., and Moon, C.K., 2001, Application of geophysical methods for understanding the change of geological environments due to underground structures: 2001 International Symposium on Application of Geosystem Engineering for Optimal Design of Underground Development and Environment, p. 163-168.

Ward, S.H., Resistivity and induced polarization methods: In Ward, S.H. (Ed.) Geotechnical and Environmental Geophysics, v. 1, Soc. of Expl. Geophys., Tulsa, p. 147-190.

문창규

충남대학교 지질학과

대전광역시 유성구 궁동 220번지

Tel : 042-868-3163

E-mail : moon0903@hanmail.net

박종오

지구물리기술사, 일신엔지니어링, 대전대학교 겸임 교수

황학수

한국지질자원연구원 탐사개발연구부

305-350 대전광역시 유성구 가정동 30번지

Tel : 042-868-3163

E-mail : hhsid@kigam.re.kr

기원서

한국지질자원연구원 연구부

305-350 대전광역시 유성구 가정동 30번지

Tel : 042-868-3346

E-mail : wskce@kigam.re.kr

이태섭

한국지질자원연구원 탐사개발연구부

305-350 대전광역시 유성구 가정동 30번지

Tel : 042-868-3155

E-mail : tslee@kigam.re.kr

최정환

한국고석철도건설공단

서울특별시 봉래동2가 122번지

Tel : 02-3149, 8466

E-mail : jhchoi@ktx.or.kr