자원환경지질, 제34권, 제2호, 193-204, 2001
Econ. Environ. Geol., 34(2), 193-204, 2001

안동시 위리의 사면파괴 지역에 대한 지표 물리탐사

김지수[1]* · 한수형[1] · 정교철[2]
[1]충북대학교 지구환경과학과, [2]안동대학교 지구환경과학과

Surface Geophysical Investigations of a Slope-failure Terrane at Wiri, Andong, Korea

Ji-Soo Kim[1]*, Soo-Hyung Han[1], and Gyo-Cheol Jeong[2]
[1]Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Chongju, Korea, 361-763
[2]Department of Earth and Environmental Sciences, Andong National University, Andong, Korea, 760-749

A geophysical survey was undertaken at Wiri area, Andong, to delineate subsurface structure and reveal the fault zone nearby which heaving of road and subsidence of slope occurred in 1997, especially in the heavy rainy season. Electrical resistivity methods of dipole-dipole array profiling and Schlumberger array sounding and seismic methods of refraction and reflection were performed for the mapping of clay layer, which was interpreted to be the major factor among the reasons of slope deformation. The clay layer was characterized by lower electrical resistivities (<100Ω · *m*) and lower seismic velocities (<400 m/s), respectively. The results of electrical and seismic surveys showed that subsidence of slope was probably associated with sliding of wet clay on 18SW/NNW trending fault plane, while heaving of road was probably caused by upward movement of the wet clay through subvertical NNE trending fault.

Key words : surface geophysical survey; electrical resistivity; seismic velocity; slope-failure terrane; fault

1997년 집중호우 때 지반 침하와 융기 현상이 발생했던 안동시 위리 지역의 지하구조와 사면활동의 기구가 된 단층대를 규명하기 위해 전기비저항 수직 및 쌍극자탐사, 탄성파굴절법 및 반사법탐사를 실시하였다. 사면 변형의 가장 주된 원인으로 알려진 점토층은 탐사 결과 100Ω · m 이하의 전기비저항, 400 m/s 이하의 탄성파속도로 특징되며, 사면침하와 관련된 북북서 단층은 약 18°의 경사로 비교적 완만하게 나타나고, 지반 융기와 관련된 도로 인근의 북북동 단층은 거의 수직으로 나타난다. 사면활동 당시 사면에서 일어난 침하 현상은 북북서 단층면을 따라 점토가 거동하며 생긴 반면 도로 지반의 융기는 북북동 수직 단층을 통하여 점토가 올라 온 현상으로 해석된다.

주요어 : 지표물리탐사, 전기비저항, 탄성파속도, 사면파괴 지역, 단층

1. 서 론

산사태(landslide)는 기반암체, 표토 또는 이 둘의 혼합체가 인지될 수 있을 정도로 경사면 아래로 운동하는 경우를 말하는데 이것은 산사면 뿐만 아니라 강둑, 호수, 바다 등지에서도 일어날 수 있는데 이 때 지하의 지질 및 수리학적인 환경이 중요한 역할을 하게 된다(Murck *et al.*, 1995).

사면안정에 영향을 주는 요인에는 여러 가지가 있는데 주로 중력과 사면구배, 물과 사면의 수리학적 성질, 지하 매질의 구성물질, 유발사건 등을 들 수 있다. 이들 요인 중에서 한 두개 조건만 만족해도 사면의 안정성이 감소되고 더 진행하면 사면의 붕괴까지 일어날 수 있다. 어떤 경우에는 그 요인의 변화가 지진이나 폭발과 같은 갑작스런 유발사건의 형태가 되기도 하지만 그 원인이 집중 강우와 같은 자연적이거나 도로 건설, 댐의 축조와 같은 인간활동에 기인한 것도 있다. 따라서 지질학적인 관점에서 사면활동의 정도를 파악하기 위해서는 지형의 경사도, 수리학적 조건과 같은 지표에 나타나는 현상 외에 기반암의 종류, 파쇄대의

*Corresponding author: geop22@chungbuk.ac.kr

분포, 점토층의 존재, 지하수의 유동과 같은 지하구조 및 매질에 대한 평가를 가장 먼저 정확히 규명해야 한다.

지구물리탐사는 이와 같은 지하구조 및 매질의 특성을 짧은 기간 안에 정량적으로 파악할 수 있는 대표적인 비파괴 조사방법으로 경우에 따라서 2차원 단면도 또는 3차원 입체도 까지 재건할 수 있는 장점이 있다. 또한 모든 자연 재해 현상이 한정된 범위에서의 단순화된 모형에 대한 결과가 아니고 넓은 범위에 걸친 복합적인 지하매질의 반응이라고 볼 때 지구물리탐사 만큼 광역적이고 효과적인 분석 방법도 없다.

사면활동 지역에 대한 지구물리학적 연구는 주로 전기비저항 수직탐사 및 탄성파 굴절법탐사를 이용하여 기반암의 두께 및 경사, 지하수면의 분포를 파악하는데 중점을 두고 수행되어 오고 있으며(Bogoslovsky and Ogilvy, 1977; Caris and Van Ash, 1991; Mauritsch *et al.*, 2000) 국내에서도 최근 이에 대한 연구결과가 발표된 바 있다(김지수 등, 2000; 황학수 등, 2000).

이 연구에서는 1997년 집중호우 때 발생한 경북 안동시 위리 지역의 지반 침하 및 융기와 관련된 지하구조를 보다 정량적이고 복합적으로 해석하고자 전기비저항수직탐사, 탄성파 굴절법탐사 외에 전기비저항 쌍극자탐사와 탄성파 반사법탐사를 추가 수행하였다. 연구 방법은 수직탐사 자료의 전기비저항으로부터 단층 점토의 깊이를 확인하고 이를 토대로 재건한 전기비저항 입체도를 쌍극자탐사 자료에서 얻은 2차원 단면과 서로 상관 해석하여 단층 점토의 구조 및 이와 관련된 단층 구조를 해석하였다. 또한 전기탐사에서 얻은 전기비저항구조를 사면활동 분석에 가장 효과적으로 알려진 탄성파 굴절법탐사에서 얻은 속도구조와 비교하고 수직 단층의 영상을 탄성파 반사법으로 인지하고자 하였다(Fig. 1).

2. 연구 지역

연구지역인 안동시 임동면에 위치한 위리(Fig. 2)는 1997년 6월과 7월 사이에 계속된 폭우로 인해 999번 지방도로가 유실되고 사면이 파괴되는 등 큰 지질 재해가 발생한 지역이다 (정교철, 1998). 주변의 임하댐 건설에 발맞추어 고개 마루를 절취하여 999번 지방도로가 1989년에 건설된 이후 이 지역은 사면 활동을 지지하고 있던 응력이 제거되어 동쪽 산측이 침하하고 서쪽 도로변이 융기하는 등 주변 지반이 불안정하게 활동하다가 1997년 집중 호우 때 도로가 크게 파괴되고 (Fig. 3a) 평균 20 cm/day의 속도로 점토층이 도로의 가장자리에 계속하여 올라오는 현상을 보였다 (Fig. 3b).

경상분지의 북단에 위치하는 연구지역의 지질은 영양소분지의 서측단에 퇴적된 퇴적암류로서 주로 알코스 사암과 적색 이암 및 세일 등으로 구성되어 있다. 연구지역인 위리 부근의 암석은 중생대 백악기에 형성된 것으로 추정되는 경상누층군중 하산동층에 대비되는 동화지층의 상부에 해당하는 층으로서 사암, 미사암 및 세일 등의 암석들이 교호하면서 나타난다(장현식과 장보안, 2000). 지질도상의 가송동층은 동화지층 위에 정합적으로 놓여있다(Fig. 2).

주요 지질구조로는 도로 서측을 경계면으로 하는 경사가 급한 NNE 방향의 단층(이하 "NNE 단층"으로 일컬음)과 연구지역 북단에서 도로를 가로지르면서 경사가 비교적 완만한 NNW 방향의 단층(이하 "NNW 단층"으로 일컬음)이 서로 사교하고 있다. 이들 두 단층 사이에 발달 · 분포하는 퇴적지반의 활동은 층간단층으로 발달된 NNW 단층을 따라 남서방향으로 일어난다. 남서방향으로 이동된 지반은 도로 서측의 N20E, 75SE 방향의 층리와 거의 평행하게 발달된 NNE 단층과 만나면서 단층 점토가 도로 서측의 단층경계면을

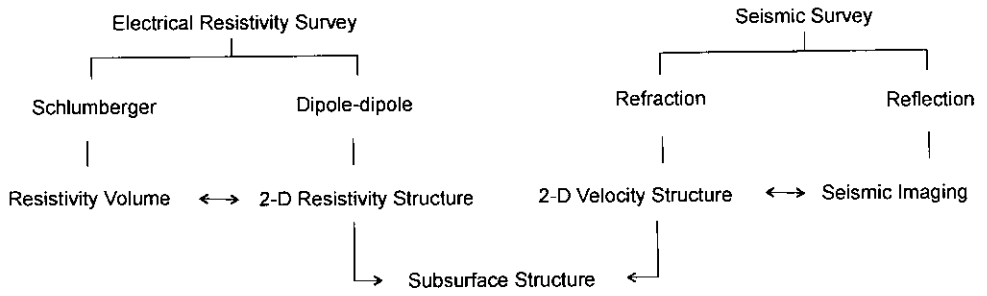

Fig. 1. Research for investigation of subsurface structures using electrical resistivity and seismic surveys.

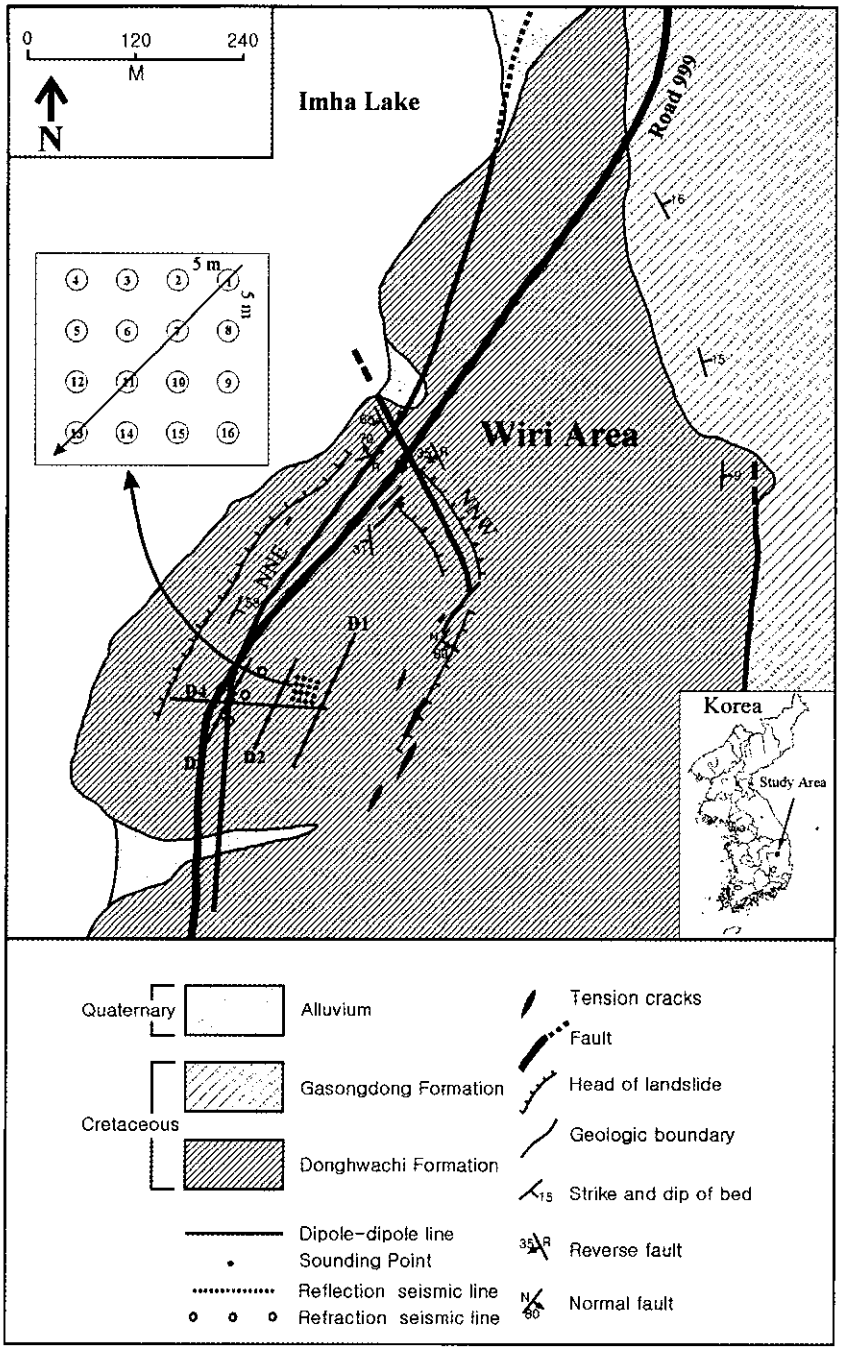

Fig. 2. Geological map of study area. Electrical dipole-dipole lines (D1, D2, D3, D4) and seismic lines are deployed to examine NNE- and NNW-trending faults.

따라 지표위로 미끄럼선(slicken line)을 형성하면서 올라온 것으로 해석된다(정교철, 1998; 김지수 등, 2000). 크게 볼 때 활동면 위에 놓여있는 지반 중 상대적으로 하중이 작은 도로측에서는 융기가 발생하고 하중이 큰 도로 동측 산부에서는 침하가 일어났고 NNW 단층면에는 작게는 수 mm, 크게는 5~20 cm 정도의 두께를 갖는 단층 점토대가 수십 곳에서 관찰되었다(정교철, 1998).

현재 이 지역은 토질 및 암반의 역학적 특성 및 물성을 알기 위한 각종 현장투수시험, 수위강하시험 및 실내 역학 실험 등의 자료를 참고하여 사면 활동부분을 계단으로 절취, 제거하고 도로 하부를 쇄석으로 치환하고 배수로를 설치하여 안정화가 이루어진 상태이다(Fig. 4) (정교철, 1998; 장현식과 장보안, 2000). 이 연구는 기존의 연구보고서에서 사면파괴의 원인으로 정성적으로 제시된 점토 단층 파쇄대를 각종 지표물리탐사를 수행하여 동쪽의 지반침하와 서쪽 도로변의 융기현상과의 관계, 지하수면과의 관계, 점토층을 지표까지 이동시킨 지하불연속면의 구조(단층, 파쇄대) 등을 확인하여, 앞으로 이와 유사한 환경에 대한 각 탐사의 적용성을 살펴보고자 하는데 주된 목적이 있다.

(a)

(b)

Fig. 3. During the 1997 landslide, (a) the road 999 was fractured and (b) clay material heaved on the road at the rate of approximately 20 cm/day.

3. 전기비저항 탐사

연구 지역에 대한 전기비저항탐사는 사면의 주된 변형이 지하수에 의한 단층 점토의 전단강도 감소에 의해 일어난다는 해석(정교철, 1998; 장현식과 장보안, 2000)을 참조하여 점토층 및 이와 관련된 단층 구조를 규명하는데 초점을 두고 실시하였으며 측선의 방향 및 길이도 지표지질조사에서 확인된 NNW 단층과 NNE 단층이 확인되도록 설계하였다. 먼저 지하수 유동과 관련된 점토층의 깊이에 따른 전기비저항 특성을 국부적으로 정밀하게 파악하고자 총 16개의 수직탐사점을 설정하였고 또한 2차원 단면도를 얻고자 도로와 평행한 방향으로 3개의 측선 D1, D2, D3와 이를 가로질러 도로를 횡단하는 측선 D4에서 각각 쌍극자 탐사를 실시하였다(Fig. 2).

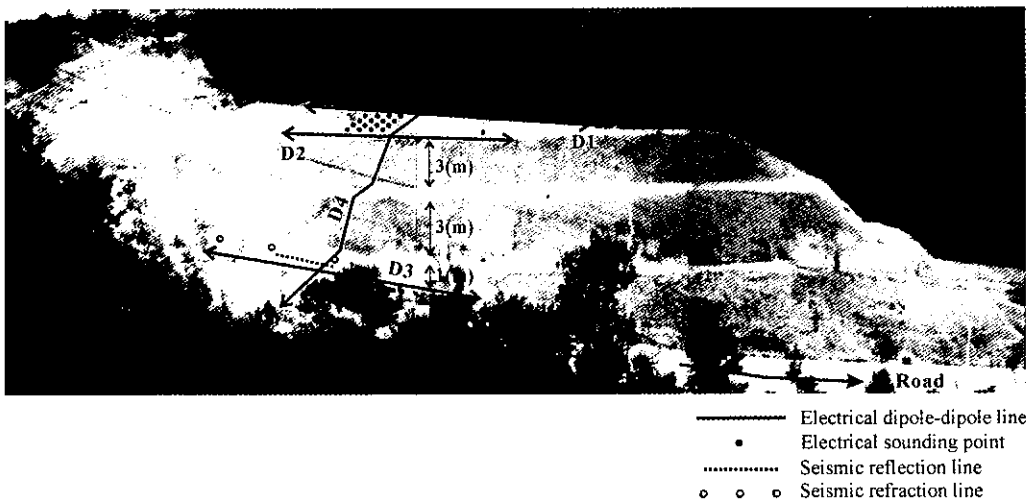

Fig. 4. Site vies for electrical resistivity and seismic lines.

3.1. 점토의 전기비저항 특성

토양의 전기비저항은 포화도, 포화 공극, 공극 유체의 비저항, 입자의 크기 및 배열에 따라 큰 차이를 보이는데 예를 들어 모래의 경우 건조한 상태에서는 10^5 Ω · m, 젖어 있을 때에는 10 Ω · m까지 큰 편차를 보인다(Fukue *et al.*, 1999). 점토의 경우에는 더욱 복잡한 양상을 띠게 되는데 이는 입자상 또는 입자들 사이에 매우 높은 전기전도도를 나타내는 분산이중층(diffuse double layer)이 폭넓게 형성되기 때문이다(Jackson *et al.*, 1978). Reynolds(1997)의 통계에 의하면 점토의 전기비저항은 함수비에 따라 크게 달라져 수분이 30~40% 포함된 점토는 1-100 Ω · m으로서 250-1700 Ω · m의 표토, 100-200 Ω · m의 마른 점토에 비해 훨씬 낮다. Table 1은 나이지리아의 칸토 지방의 현장자료에서 해석된 각 매질의 전기비저항 자료이다.

3.2. 자료수집 및 처리

자료수집은 ABEM Terrameter SAS 300C 및 Booster를 이용하였고 전류는 신호대 잡음(S/N)을 최대한 높이기 위해 250 mA를 투입하였다. 깊이에 따른 전기비저항분포를 규명하기 위한 수직탐사자료는 최대 전류전극 간격을 100 m로 하여 총 16점에서 수집하였고 자료처리는 각 층의 두께와 전기비저항을 추정 변수로 작성된 자료처리 소프트웨어 Soundpro(1996)를 사용하였다. 쌍극자배열 탐사는 전개조건과 측점간의 거리를 고려하여 5 m와 10 m의 전극 간격, 100 m와 200 m의 측선 길이를 결정하여 이에 따른 가탐심도(available target depth)가 각각 25 m와 50 m가 되도록 하였다. 획득한 자료들은 역산을 위해 각 면적 셀과 이에 대한 전기비저항을 추정 변수로 작성된 자료처리 소프트웨어인 Dipro(1996)를 사용하였다.

Table 1. Material types and their respective resistivity ranges for Kano State, Nigeria (Reynolds, 1997).

Material	Resistivity range (Ω · m)
sandy soil with clay	60-100
clayey sand soil	30-60
clay	10-50
weathered biotite granite	50-100
weathered granite	50-140
fresh granite	750-8000

3.3. 수직탐사 자료

1997년 당시 동쪽의 사면 변형이 서쪽의 도로 방향으로 일관되게 일어났던 점을 고려하고, 이와 관련된 것으로 알려진 NNW 단층과 지하 매질의 전기비저항 구조를 정확히 파악하기 위해 쌍극자탐사 측선 D1과 D2 사이의 평탄한 지역(15 m×15 m) 안에 16점을 설정하여 수직탐사를 실시하였다(Fig. 2).

이 중에서 점토 단층의 방향성을 조사하기 위해 발췌한 NE 방향에 걸쳐 있는 4점(inset in Fig. 2; VES 1, 7, 11, 13)의 수직탐사 자료(Fig. 5)는 모두 H형 곡선(Burger, 1992)으로 특징된다. 전기비저항이 최소가 되는 깊이를 서로 연결하여 계산한 기울기는 약 15°로서 이 층이 사면 활동의 원인이 되는 점토층으로 해석된다.

수직탐사 자료의 역산 결과에서 얻어진 16점의 자료를 주어진 깊이에서 모두 내삽하여 얻은 비저항단면을

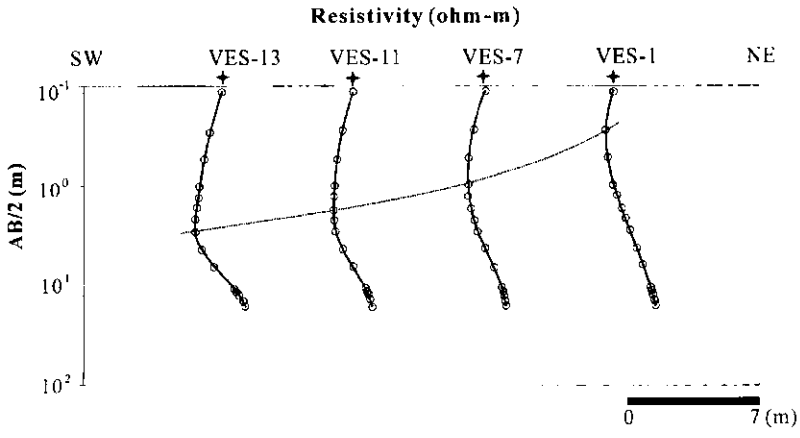

Fig. 5. 1-D electrical resistivity profile from four sounding points VESs 1, 7, 11, 13. Peaks representative for the clay layer dips approximately 15SW.

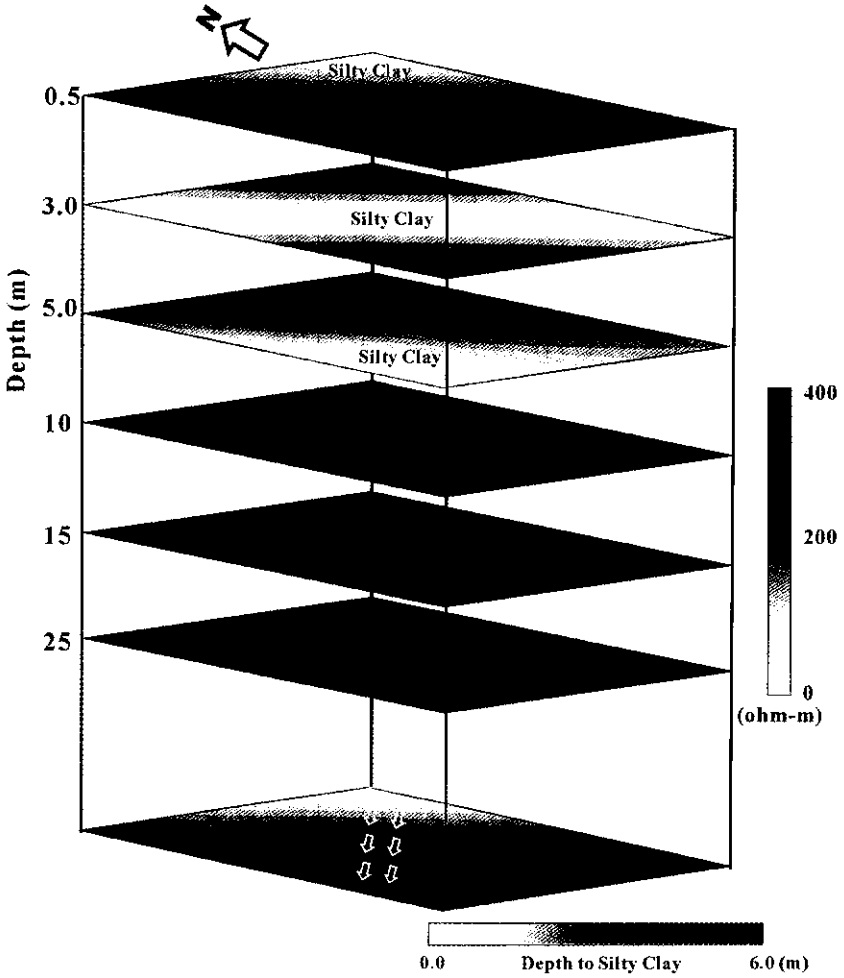

Fig. 6. Electrical resistivity volume constructed by interpolation of electrical sounding data. The lighter-toned band is represented for the clay layer which dips southwestward. Southwesterly dipping layer is clarified in another section of depth-to-silty clay, as shown by arrows.

중첩시켜 3차원적인 입체도를 작성하였다. 우선 역산 자료에서 얻어진 1차원 비저항을 임의 심도에서 내삽시켜 2차원 단면을 만들고 자료구현 소프트웨어 IDL (1996)을 사용하여 3차원 전기비저항 입체도를 재건하였다(Fig. 6).

점토층으로 해석되는 저비저항대(<100 Ω·m)는 0.5 m 깊이의 평면에서는 북동 모서리에, 3 m 깊이의 평면에서는 대각선 띠에, 5 m 깊이의 평면에서는 남동 모서리에 나타나 이들을 연결할 경우 Fig. 5에서 해석된 15SW의 점토층으로 생각할 수 있다. 이와 같이 남서방향으로 경사진 실트질 점토층의 분포는 가장 낮은 전기비저항을 보이는 깊이를 발췌하여 작성한 바닥 단면도에서도 화살표 방향으로 다시 확인된다.

3.4. 쌍극자탐사 자료

수직탐사 자료를 통해 지반의 침하의 원동력으로 해석된 단층 점토의 분포양상을 파악하고 이를 주요 단층들이 포함된 2차원 단면에서 다시 확인하고자 보다 넓은 범위에서 쌍극자탐사를 실시하였다. 지반침하를 수반한 점토층을 규명하기 위해 측선 D1, D2, D3는 도로와 나란하게 설계하였고, 융기현상과 관련된 서쪽 도로 인근의 수직단층을 확인하기 위해 측선 D4는 도로를 가로질러 전개하였다(Fig. 2).

역산결과 4개의 전기비저항대를 구분할 수 있었다: 실트질 점토(<100 Ω · m), 사질 실트스톤 (100-200 Ω · m), 사암(200-400 Ω · m), 풍화암(>400 Ω · m) (Fig. 7a, b, c, d).

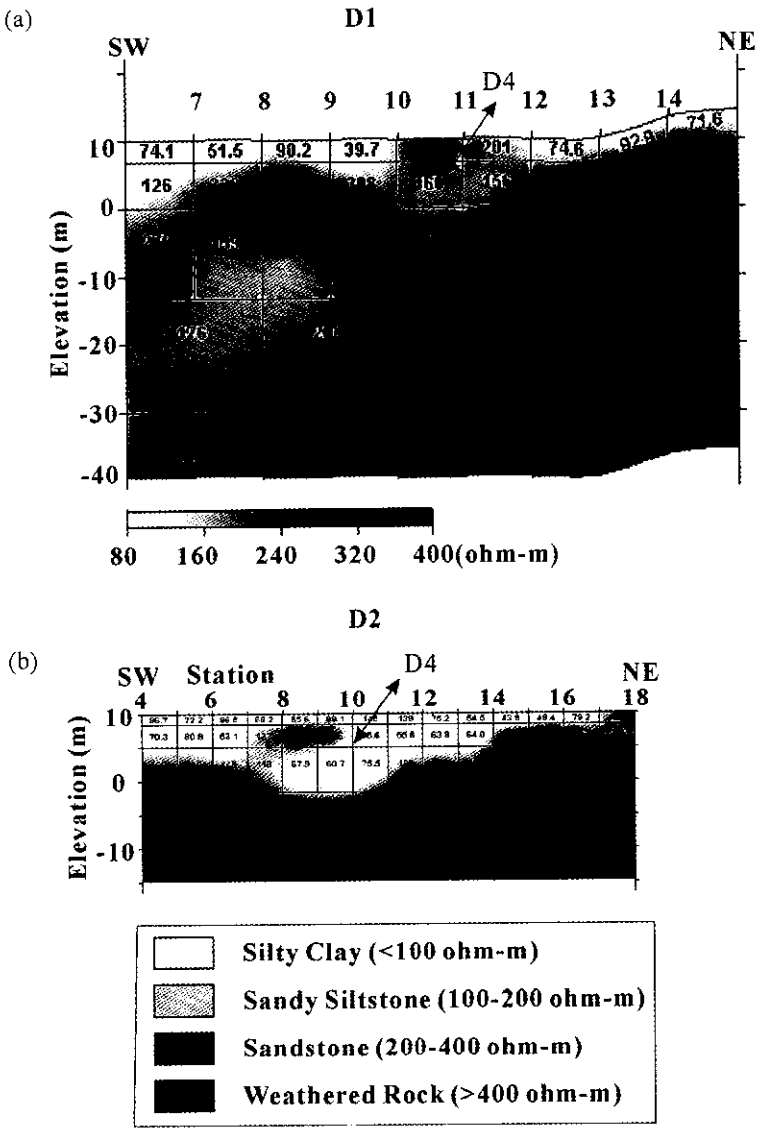

Fig. 7. Dipole-dipole resistivity section for lines of (a) D1, (b) D2, (c) D3, and (d) D4. Seismic velocity structures are also drawn to correlate them to resistivity structures.

실트질 점토층은 D1 단면도(Fig. 7a)에서 측점 12-14에서 약 5 m에 깊이에 분포하고 D2의 경우(Fig. 7b)에는 측점 10-14에(Fig. 7b)서 약 10 m의 깊이까지 연장되어 있다. 약 12SW의 경사를 갖는 이 실트질 점토층들이 1997년 집중 호우 때 일어났던 지반침하의 현상의 주된 역할을 한 것으로 판단된다.

D1, D2에 비해 고도가 약 7 m 낮은 도로에 인접한 D3에서 얻은 자료의 경우(Fig. 7c) 점토층은 약 25 m까지 연장되고 있으며 이를 침하가 시작된 D1으로 연장할 경우 약 18°의 경사를 보여 도로에 근접할수록 점토층의 경사각이 증가함을 알 수 있다. 또한 측점 8을 기준으로 고비저항대(풍화암)와 경계가 되는 저비저항대가 보이는데 그 경계선을 도로 인근에서 점토의 융기현상을 일으켰던 수직 단층으로 해석하였다. 여기서 주목할 것은 저비저항대의 점토층이 도로 인근에서는 남서 방향으로 더 이상 발달하고 있지 않다는 점인데 이것은 1997년 사면 활동이 실제로 일어났을 때 남서 방향으로는 점토가 올라오지 않았던 기록과 일치

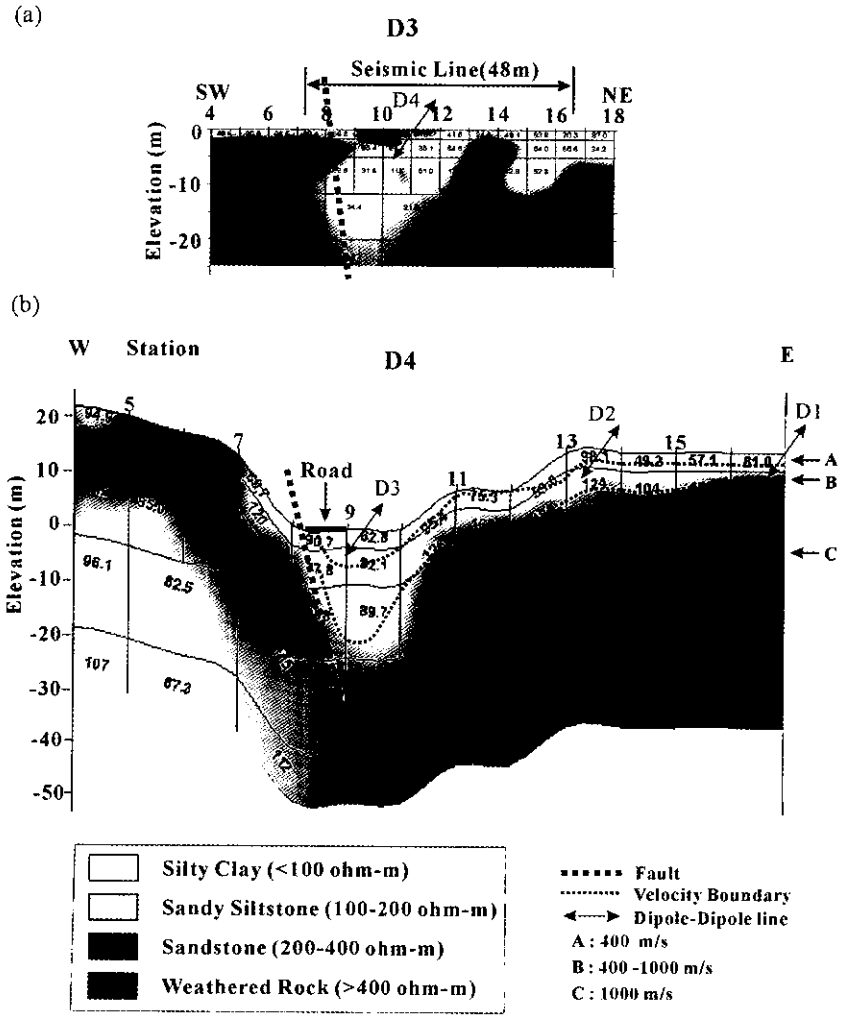

Fig. 7. Continued.

한다.

남서 방향으로 발달된 점토층 및 D3에서 확인된 수직 단층은 도로를 횡단하는 D4에서도 그 방향 및 경사가 비교적 일치하는 점으로 보아(Fig. 7d) 동쪽에서 시작된 사면활동으로 미끄러져 내려온 단층 점토가 도로 인근에서는 더 이상 남서쪽으로 이동하지 않고 수직 단층의 파쇄대가 많이 발달하고 있는 도로 건너의 서쪽 방향으로 연장된 것으로 해석할 수 있다.

사면활동의 영역은 대상지역의 남쪽 방향에서 투영한 합성단면도(Fig. 8)에서 더욱 효과적으로 확인된다. 사면의 점토층은 남서 방향의 완만한 경사를 보이고 있으며 도로 인근의 NNE 단층은 거의 수직으로 나타난다. 1997년 발생한 도로 지반의 융기 활동은 동쪽 사면으로부터 시작된 점토층의 거동이 도로 인근에서 약면(weak zone)의 역할을 하는 NNE 수직 단층을 통하여 도로 지반 위로 나타난 현상으로 해석된다.

4. 탄성파 탐사

점토 지반의 융기 현상과 관련된 NNE 수직단층의 반사 영상과 도로 주변 지하의 탄성파 속도 분포를 전기비저항 구조와 비교 · 상관시키기 위하여 NNE 단층선과 교차하는 쌍극자 측선 D3의 일부 구간에서 굴절법 탐사(24 m×2 측선)와 반사법 탐사(2 m×1 측선)를 실시하였다(Fig. 2).

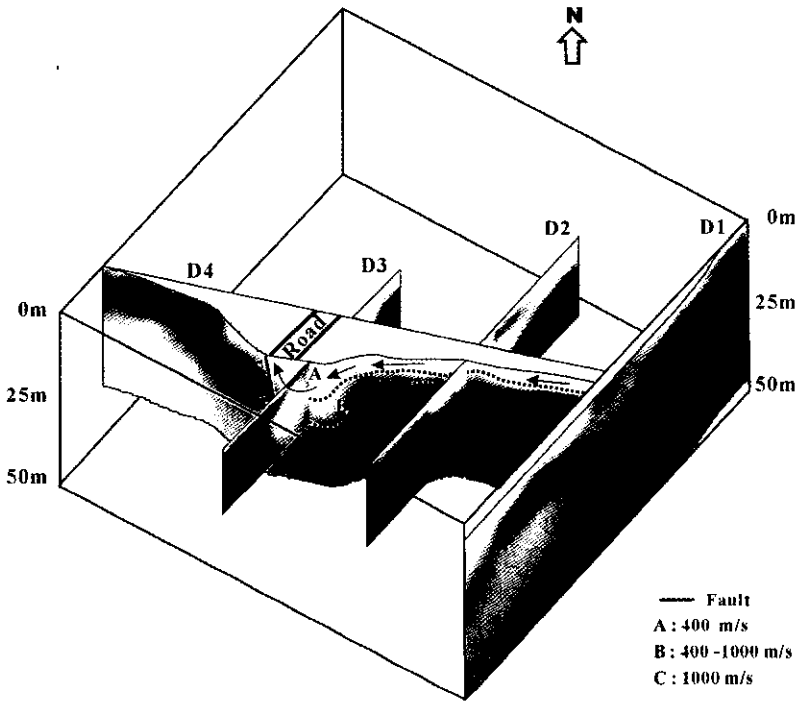

Fig. 8. Resistivity fence-diagram projected toward the north direction. Silty clay is southwesterly dipping and is heaving nearby the subvertical fault, as shown by the arrows.

4.1. 자료 수집 및 처리

자료 수집은 24 채널 ABEM Terraloc Mark 6를 사용하였다. 파원으로는 4.7 kg 해머를 선택하였으며, 굴절법과 반사법 탐사에 사용된 지오폰 규격은 각각 100 Hz 및 10 Hz로서 모두 1 m 간격으로 설치하였다. 자료의 S/N을 높이기 위해 기록당 6회 연속 타격하여(반사법의 경우 10회 타격) 수직 중합(stack) 하였으며, 샘플링 간격은 0.5 ms, 저주파제거 필터(low-frequency cut filter)는 10 Hz로 설정하였다.

굴절법탐사 자료는 일반화된 선형역산법(generalized linear inversion)을 적용한 교육용 프로그램 GLI3D (1998)를 이용하여 처리하였는데 이것은 파선추적법을 이용하여 초기모형을 재구성하는 일반화된 선형역산법(GLI: generalized linear inversion)과 파면법을 이용하여 속도모형을 재구성하는 토모그래피 그리드-기반 역산법(TGI: tomographic grid-based inversion)으로 구성되어있다.

반사법탐사 자료를 위해서는 개방형 프로그램 SU (1995) 및 상업용 소프트웨어 VISTA(1999)를 사용하였으며, 처리는 S/N 향상 단계에서 수반되는 인공잡음을 최대한 억제하기 위하여 기본적인 처리과정(트레이스 편집, 대역 필터링, AGC, CDP 분류, NMO 보정, 스트레치 뮤팅, 중합, 대역 필터링)만을 거쳤다.

4.2. 자료 해석

단층 점토의 융기 지역으로 예상되는 수직 단층 부근에서 얻어진 자료(Fig. 9)에 대한 시간절편, 굴절파 및 직접파의 기울기로부터 간단히 계산된 상부층과 하부층의 속도는 각각 450-520 m/s, 800-920 m/s의 분포를 보인다. 보다 연속적인 지하구조는 24개의 전체 자료에 대한 역산 결과(Fig. 10a)에서 효과적으로 확인된다. 역산 결과 얻어진 굴절 경계면은 오프셋 10 m 부근에서 약 18 m 깊이까지 연장되며 불연속대의 위치는 전기비저항 측선 D3에서 해석된 단층의 위치(Fig. 7c)와 거의 일치하며, 굴절면 상·하부의 속도 또한 각각 490 m/s와 840 m/s로서 앞서 기울기에서 구한 속도의 범위에 든다.

불연속면 구조를 더욱 강조하기 위해 수직적 속도변화가 심한 지역에 잘 적용될 수 있는 토모그래피 그리드-기반 역산(tomographic grid-based inversion)을 실시하였다. 역산 결과(Fig. 10b) 전기비저항 자료에서 구분된 4개 불연속면은 속도 분포에서도 실트질 점토

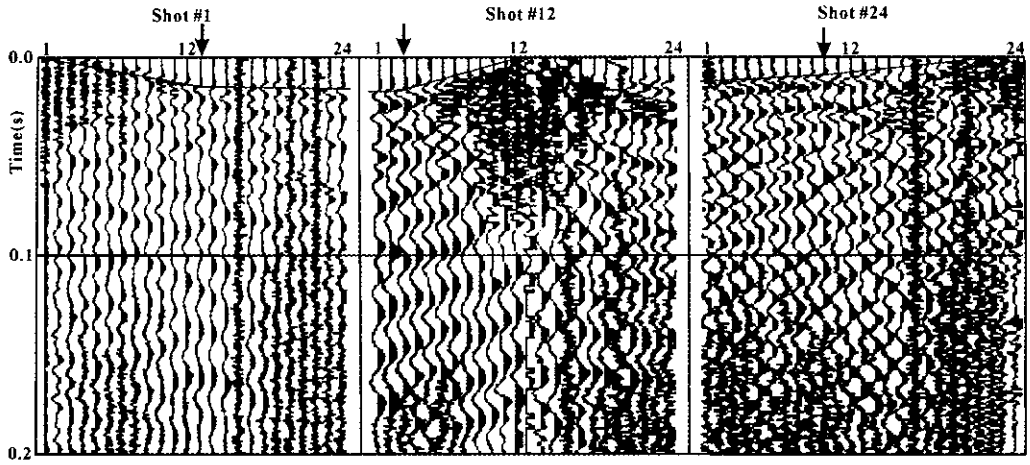

Fig. 9. Three shot gathers selected from seismic refraction data. The arrows represent the crossover distance.

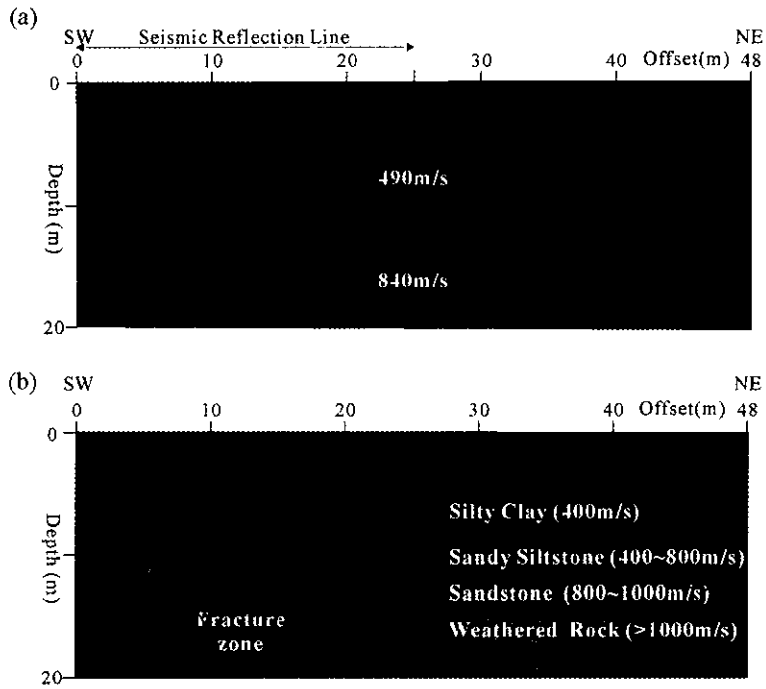

Fig. 10. Seismic refraction results using (a) GLI and (b) TGI. Vertical fault zone is shown as a valley at the offset of 10 m.

(400 m/s), 사질 실트스톤(400-800 m/s), 사암(800-1000 m/s), 풍화암(>1000 m/s)으로 구분되고 있으나 사질 실트스톤과 실트질 점토의 경계는 전기비저항 단면도에 비해 명확하지 않다(Fig. 10b). 이것은 함수비가 증가할수록 점토의 밀도 또한 증가하여 그만큼 속도가 증가하기 때문일 것이다(Fukue *et al.*, 1999). 또한 단층 파쇄대는 2층 구조에 대한 GLI 역산결과(Fig. 10a)와 마찬가지로 오프셋 10 m 부근의 깊이 19 m 에서 확인된다.

탄성파 굴절법탐사 자료에서 해석된 점토 단층대의 위치는 반사법탐사 자료에서도 파악된다. 개괄단면도 (brute stack)(Fig. 11a)에서는 표면파 및 천부 잡음들이 많이 섞여 있어 반사 영상을 확인할 수 없으나 CDP #24 부근의 화살표로 표시된 꼭지점은 회절 이벤트를 야기하는 좁은 폭의 수직 단층의 상부로 유추되는데 이것은 각종 S/N 향상 단계를 거

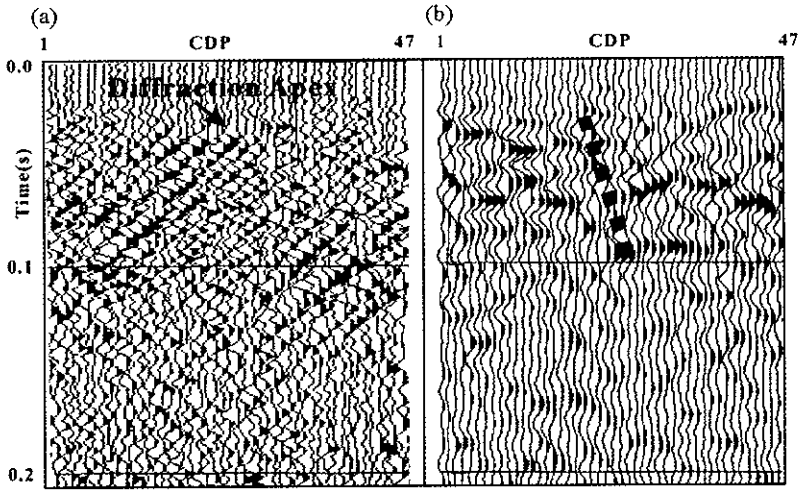

Fig. 11. Seismic reflection mapping: (a) brute stack; the inclined feature is related to the surface wave and scattered energy from vertical inhomogeneity and (b) final stack.

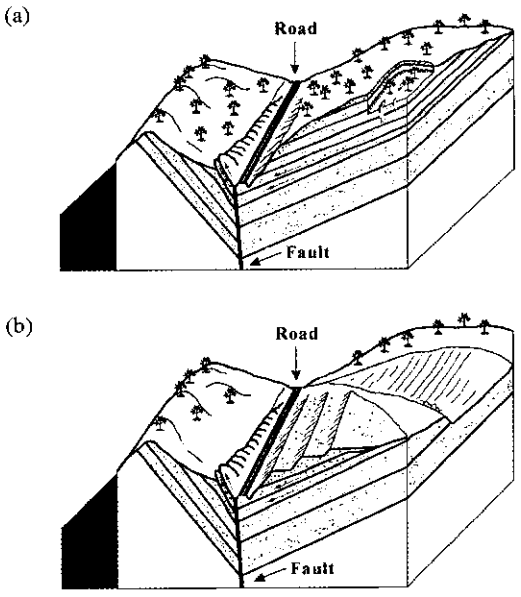

Fig. 12. Schematic geometric depiction of the subsurface structures at the Wiri area: (a) before slope stabilization and (b) after slope stabilization.

쳐 작성된 최종 단면도(Fig. 11b)에서 효과적으로 나타나고 있다.

5. 토 의

이번 탐사가 사면 활동 부분을 계단으로 제거 절취하고 도로 하부를 쇄석으로 치환하고 배수로를 설치하는 등 사면 안정화가 이루어진 상태에서 실시된 점을 미루어 볼 때 집중 강우에 따른 효과를 직접 관찰할 수는 없었다. 그러나 주어진 전기비저항탐사와 탄성파 탐사자료를 종합 해석하여 작성한 지반침하 · 융기 모형(Fig. 12)과 이에 대한 물성 정보(Table 2)를 참고할 때 연구지역의 사면파괴는 NNW 단층의 자세와 집중 강우로 인한 지하수위의 상승이 활동면에 존재하는 단층점토를 포화시켜 결과적으로 활동면에서의 전단강도를 감소시킨 것이 가장 큰 원인이었고, 도로에서의 지반 융기는 도로 동측 산부에서 남서쪽으로 활동된 지반이 급경사인 NNE 배향 단층과 만나면서 상대적으로 하중이 작은 도로부분을 따라 올라온 점토의 거동과 관련된 것으로 판단된다.

이 지역은 우기의 포화상태에서 자연 함수비가 약 61%로서(정교철, 1998) 활동면에서의 전단강도를 충분히 감소시킬 수 있다고 해석된다(Fukue *et al.*, 1999). 또한 탐사자료를 종합해 볼 때도 사면활동을 촉진시키는 점토, 그리고 활동면이 되는 단층대가 지표 가까이

Table 2. Electrical resistivity and seismic velocity of the layers for the slope-failure terrane.

	silty clay	sandy siltstone	sandstone	weathered rock
electrical resistivity (Ω · m)	<100	100-200	200-400	>400
seismic velocity (m/s)	<400	400-600	600-1000	>1000

분포하는 것으로 볼 때 집중 강우로 인한 지질 재해를 간과할 수는 없다. 그러나 집중 강우에 따른 지하수위 상승으로 인한 사면파괴 효과는 이미 안정화를 위해 절취 및 응력의 제거 효과로 인해 점토의 활동성은 크게 감소될 것으로 보여 이에 따른 사면 파괴 현상은 발생하지 않을 것으로 보인다.

6. 결 론

지반침하와 융기 현상의 원인이 되었던 점토 및 관련 단층을 규명하기 위한 전기비저항탐사와 탄성파탐사의 결과는 다음과 같다.

1. 연구지역에서 지반침하 및 융기의 발생 원인이 되었던 활동면은 지구물리탐사자료(전기비저항탄사, 탄성파탐사)의 이상대와 일치한다.

2. 사면활동 지역의 지하 구조는 단층 및 4개의 불연속면으로 특징되는데 특히 실트질 점토층의 전기비저항과 탄성파 속도는 각각 100, 400 m/s 이하로서 이들의 거동이 단층과 관련되어 지반 침하와 융기의 주된 원인이 된 것으로 해석된다.

3. 침하현상과 관련된 NNW 단층은 전기비저항쌍극자 입체도 및 탄성파자료에서 10-20NW 의 경사로 비교적 완만한 반면 도로 인근의 NNE 단층은 거의 수직으로 나타난다.

4. 사면활동 당시 사면에서 일어나는 침하 현상은 NNW 단층면을 따라 점토가 거동하며 발생한 반면 도로의 융기는 NNE 수직 단층을 통하여 점토가 지표에 올라온 현상으로 해석된다.

5. 점토의 물성에 대한 지하수위의 영향은 앞으로 강우 직후의 탐사를 수행하여 비교 분석할 것이 권장된다.

사 사

이 연구는 '97 대학부설연구소 과제와 부분적으로 한국과학재단 특정기초과제(98-0703-02-01-3)에 의한 결과이며 이에 감사한다. 특히 논문을 심사하면서 좋은 의견을 주신 서울대학교 권병두 교수, 강원대학교 조인기 교수께 감사드린다.

참고문헌

김지수, 한수형, 정교철 (2000) 사면활동으로 인한 지반융기 · 침하지역의 지질 및 지구물리탐사. 대한지질학회 학술발표회, p. 23, 대전.

장현식, 장보안 (2000) 999번 지방도로 경상북도 안동시 위리 지역의 사면 변형 및 안정성 분석. 대한지질공학회지, 10권, p. 1-12.

정교철 (1998) 마령-위리간 수해복구지역에서의 지질조사. 안동대학교기초과학연구소, p. 128p

황학수, 이태섭, 기원서 (2000) 암반사면사태 규명에 대한 물리탐사 및 구조지질조사의 적용. 대한지구물리학회 학술발표회, p. 31, 서울.

Bogoslovsky, V.A., and Ogilvy, A.A. (1977) Geophysical methods for the investigation of landslides. Geophysics, v. 42, p. 562-571.

Burger, H.R. (1992) Exploration geophysics of the shallow subsurface. Prentice Hall, New York, 489p.

Caris, J.P.T, and Van Asch, T.W.J. (1991) Geophysical, geotechnical and hydrological investigations of a small landslide in the French Apls. Engineering Geology, v. 31, p. 249-276.

Dipro (1996) Electrical resistivity dipole-dipole processing software. Hisong Ltd.

Fukue, M., Minato, T., Horibe, H., and Taua, N. (1999) The micro-structures of clay given by resistivity measurements. Engineering Geology, v. 54. p. 43-53.

GLI3D (1998) Hampson and Russell Software Services Ltd.

IDL (1996) Research System Inc.

Jackson, P.D., Taylor, S.D., Stanfords, P.N. (1978) Resistivity porosity particle shape relationships for marine sand. Geophysics, v. 43, p. 1250-1268.

Mauritsch, H.J., Seiberl, W., Arndt, R., Romer, A., Schneiderbauer, K., and Sendlhoefer, G.P. (2000) Geophysical investigations of large landslide in the Carnic Region of southern Austria. Engineering Geology, v. 56. p. 372-388.

Murck, B.W., Skinner, B.J., and Porter, S.C. (1995) Environmental geology. John Wiley and Sons, New York, p. 531.

Reynolds, J.M. (1997) An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley and Sons, New York, p. 789.

Soundpro (1996) Electrical resistivity sounding processing software. Hisong Ltd.

SU (1995) Seismic Unix. Colorado School of Mines.

VISTA (1999) Seismic processing software. SIS.

2001년 2월 17일 원고접수, 2001년 3월 30일 게재승인.