강우 침투 특성 분석을 위한 전기비저항 모니터링 탐사

Analysis for Rainfall Infiltration Using Electrical Resistivity Monitoring Survey

김 성 욱¹ Kim, Sung-Wook

최 은 경² Choi, Eun-Kyeong

박 덕 근³ Park, Dug-Keun

윤 여 진⁴ Yoon, Yeo-Jin

이 규 환⁵ Lee, Kyu-Hwan

Abstract

During rainfall period, to identify the characteristics of the infiltration of moisture, electrical resistivity monitoring survey was carried out to weathered zone. Four regions of geophysical exploration areas with different rock types, four regions were selected. An area consists of mafic granite and three areas are composed of sedimentary rocks (Sandstone, Shale, Unconsolidated Mudstone). Survey was conducted from June (rainy season) to November (dry season), and during the period the change in resistivity was observed. According to the result of monitoring exploration on Geumjeong and Jinju areas, for the estimation of the standard rainfall, it is necessary to estimate the effects of the antecedent rainfall during the rainy season based on the overall rainfall from June till October and also necessary to consider this for the estimation of the half period. Also, the vertical distribution of the low resistivity anomaly zone does not show that the infiltration of moisture does not occur uniformly from the surface of the ground to the lower ground but shows that it occurs along the relaxed gap of the crack or soil stratum of the weathering zone. In Pohang area, the type of moisture infiltration is different from that of the granite or sedimentary rock. Since, after the rainfall, the rate of infiltration to the lower ground is high and the period of cultivation to the lower bedrock aquifer is short, it has similar effect to that of the antecedent rainfall applied for the estimation of the standard rainfall being presently used. In Danyang, due to the degree of water content of the ground, the duration period of the low resistivity anomaly zone observed in the lower ground of the place where clastic sedimentary rock is distributed is similar to that in Pohang area. The degree of lateral water diffusion at the time of localized heavy rain is the same as that of the sedimentary rock in Jinju. According to the above analysis results, in Danyang area, the period when the antecedent rainfall has its influence is estimated as three weeks or so.

요 지

강우에 수반된 급경사지의 붕괴는 지반에 수분이 침투하여 평형상태에서 중력방향으로 지반이 이동하는 현상으로 지형과 지질 등에 의한 내적 요소와 강우, 지진 등에 의한 외적요인에 따라 붕괴의 정도가 달라진다. 암종에 따른 수분의 침투특성을 파악하기 위해 백악기말 고철질화강암이 분포하는 부산 금정산 지역과 퇴적암이 분포하는 지역 중 단양지역(사암), 진주지역(세일), 포항지역(이암-미고결퇴적암) 등 4개 지역을 시범지역으로 선정하여 전기비저항 모니터링탐사를

1 정회원, (주)지아이 대표 (Member, CEO, Gi Inc.)

2 정회원, (주)지아이 부장 (Member, General Manager, Gi Inc.)

3 정회원, 국립방재연구원, 시설연구관 (Member, Senior Analyst, National Disaster Management Institute)

4 정회원, 건양대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate professor, Dept. of Civil & Environment Engineering, Konyang Univ.)

5 정회원, 건양대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate professor, Dept. of Civil & Environment Engineering, Konyang Univ., Tel: +82-41-730-5633, Fax: +82-41-730-5765, khlee@konyang.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

실시하였다. 탐사기간은 우기가 시작되는 6월부터 하절기를 지나 건기에 해당하는 11월까지 수행하였다.

모니터링 결과 금정 지역과 진주 지역은 표준 강우량 산정 시 우기 동안의 선행강우량의 영향은 6월에서 10월까지의 전체 강우를 대상으로 산정할 필요성이 있고 반감기의 산정 시 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 또한 저비저항 이상대의 수직적인 분포는 수분의 침투가 지표에서 하부 지반으로 균일하게 발생하는 것이 아니라 풍화대의 균열이나 토층의 이완된 간극을 따라 발생하고 있다. 포항지역 미고결퇴적암은 수분의 침투 형태가 화강암 및 쇄설퇴적암과는 상이하며, 강우 이후 하부지반으로 침투되는 속도가 빠르고 하부의 암반대수층으로 함양되는 기간이 짧아 현재 사용되는 표준강우량 산정 시 적용하는 선행강우량의 영향기간과 유사한 시간을 보인다. 지반의 함수 정도에 의해 단양의 쇄설성 퇴적암 분포지의 하부 지반에서 관찰되는 저비저항 이상대의 유지 기간은 포항지역과 유사하며, 집중호우 시 측방으로 수분이 확산되는 정도는 진주의 쇄설성 퇴적암과 같은 형태를 보인다. 이상의 분석결과에서 단양 지역은 선행강우량이 미치는 기간이 3주 정도로 추정된다.

Keywords : Electrical resistivity monitoring survey, Felsic granite, Sandstone, Shale, Unconsolidated mudstone, Weathered zone

1. 서 론

급경사지 붕괴 유형 중 강우에 수반된 표층의 붕괴는 지반에 침투된 수분에 의해 모관흡수력이 증가하고 평형상태에서 중력방향으로 지반이 이동하여 발생하며, 지형과 지질 등의 내적 요소와 강우, 지진 등에 의한 외적요인에 따라 붕괴의 정도가 달라진다. 지하로 침투되는 강우는 표층부의 침식과 함수량 증가 및 간극수압을 상승시키고 동시에 토양 강도가 저하되어 국부적인 파괴가 발생하고 지속적으로 평형상태가 깨어져 급경사지의 붕괴로 이어진다. 지난 수년간 강우 조건과 표층부 지반이 하부로 이동하는 현상의 상관성을 파악하기 위한 연구가 지속되었고 우리나라에서 발생하는 산사태는 강우강도와 작용강우량, 지역적 강우특성 등이 붕괴를 유발하는 주요 요인으로 보고되고 있다[NIDP(2006, 2007)]. 1999년부터 2011년까지 축적된 급경사지 붕괴 이력에서 자연사면에서 인위적인 요인을 제외하면 대부분의 산사태는 강우에 의해 발생하고 있다[NDMI(2011)].

소방방재청의 급경사지 붕괴 예·경보시스템은 누적강우량[Lumb(1975)]과 강우강도[Brand 등(1984)]의 상관성을 이용한 방법이 이용되며, 이를 위해 실시간 강우에 따른 예·경보 기준설정을 위해서는 합리적인 표준강우량 산정이 필요하다. 정보시스템에서 실시간 강우량의 산정은 Table 1과 같이 일본에서 개발된 작용강우량을 이용한 표준강우량 산정기법 중 Method C를 적용하고 있다[國土交通省(2004, 2005)]. 표준강우량 산정을 위한 강우자료는 선행강우량, 초기강우량, 유효강우량, 연속강우량, 작용강우량, 유효기간으로 구분되며, 이 중 선행강우량은 연속강우가 발생하기 2주(14일) 동안의 누적 강우량으로 최소 이 기간 동안의 강우는 급경사지 붕괴에 영향을 미치는 것으로 고려하고 있다. 본 연구는 분포 암석별로 풍화대가 발달하는 대표 지역을 선정하고 전기비저항 모니터링 탐사를 실시하여 강우 전 후 지반의 전기비저항 변화를 관찰하고 이로부터 지반으로 침투한 수분의 영향을 관찰하여 표준강우량 산정 시 적용되는 선행강우량의 영향 기간을 분석하였다.

Table 1. Standard precipitation estimation method

Method	Special feature	Utilization (%)	
		Slope	Debris
Method A	<ul style="list-style-type: none"> - Set up a straight standard line using working rainfall and rainfall intensity - Is easy to apply, but occurs when it is difficult to apply - In case of long-term rainfall or frequent rainfall, it is difficult to set the standard for the turn off the alert. 	9	38
Method B	<ul style="list-style-type: none"> - Method A problem of improving by change the setting of the standard line - low frequency of use 	1	12
Method C	<ul style="list-style-type: none"> - Improved the problem by changing working rainfall calculation (apply the half-life) - Turn off the alarm and evacuation may be issued 	90	50

2. 연구방법

2.1 전기비저항 모니터링

지구물리탐사는 자성, 밀도, 전기전도도와 같이 측정하고자 하는 매질의 고유한 성질에 따라 자력탐사, 전기탐사, 중력탐사, 탄성파탐사, 지하레이더탐사 등으로 구분되며, 지반탐사에 적용되는 탐사 방법으로 얻어지는 자료는 상이한 매질의 특성을 반영하는 것이므로 탐사에 앞서 수행 목적과 지반조건 그리고 경제적 비용을 고려하여 가장 효과적인 탐사방법을 선택하는 것이 중요하다.

지반을 구성하는 암석은 종류에 따라 고유한 범위의 전기비저항을 가지며, 이러한 전기비저항은 암석의 공극률(porosity), 투수성, 유체의 함량, 공극의 연결성(pore connectivity), 이온 농도와 온도 등에 따라 좌우된다[Mussett and Khan(2000)]. 암반에 발달하는 단층과 파쇄대 등의 지질구조도 지하수의 통로 역할을 하므로 전기비저항을 낮추게 된다. 전기비저항탐사는 암석 단열과 공극에 포함된 유체의 특성을 효과적으로 반영하여 지하수 조사에 널리 이용되며, 연약대의 위치와 규모를 파악하기 위한 목적의 지반조사에도 적용된다.

수리시설물의 누수현상이나 지반의 수분침투를 탐지하기 위한 방법으로 다양한 물리탐사법이 적용되고 있으나, 국내의 경우 토양의 간극이나 암석의 공극의 포화도에 기초한 전기비저항탐사가 주로 이용되고 있다[Chung 등(1992), Song 등(2000, 2001), Park 등(2002)]. 지하 공간에서 일시적인 수분의 분포는 전기비저항탐사로 확인할 수 있으나 연속적인 수분의 이동을 판단하기 위해서는 장기적인 모니터링탐사가 필요하다.

강우 시 지하로 침투되는 수분은 수맥상으로 존재하는 경우가 많고[Park and Kim(1999)], 강우강도와 누적강우량이 증가하면 지표 부근의 토양과 풍화대 지반은

포화되어 수맥상에서 층상으로 변화된다. 포화되는 과정에서 풍화대 지반에서 지하수위는 누적강우량과 강우강도, 지형의 형태에 따라 달라지며, 토양의 함수특성에 따라 달라지므로 암석의 종류별로 풍화대의 심도가 깊은 지점을 선정하여, 강우분석과 지하수 침투능에 의한 수위변화를 모니터링 함으로써 수분의 이동과 지하수위의 변화를 확인할 수 있다. 한편 암반층의 경우도 지하로 함량 되는 지하수는 파쇄대 등의 단열을 따라 맥상으로 하부로 침투되므로 이에 대한 정보를 제공한다. 이러한 점을 기초로 강우 사상 전후로 측정 지점의 전기비저항을 모니터링하고, 그 결과를 분석함으로써 강우 시 침투되는 수분의 유동 통로에 대한 규모와 범위를 파악하고 아울러 지반에 침투한 수분이 풍화대 지반의 전기비저항에 변화를 유발하는 기간을 산정함으로써 선행강우량의 영향 기간 산정에 활용할 수 있다.

전기비저항 모니터링탐사는 동일한 위치에서 반복적으로 비저항을 측정해야하므로 측선과 전극이 지중에 매설되어야 한다. 그래서 내구성이 큰 재질로 측선을 제작하였다. 현장탐사를 위해 제작된 측선을 20cm 깊이로 굴착하고 굴착면 하부에 2m 간격으로 전극을 설치한 후 탐사측선과 전극을 연결한 후 토양에 침투된 수분에 의한 부식과 야생 동물로부터 시설을 보호하기 위해 실리콘과 열압축고무튜브로 방수 처리하였다. 전극을 설치한 후 되메움 하였고, 측선의 한쪽 끝부분은 측정용 전극박스를 설치하였다. Figure 1은 지중 전극설치에 대한 모식도를 나타낸 것이다.

현장 전기비저항탐사는 SuperSting(Advanced Geosciences Inc) 탐사기와 전극배열은 쌍극자배열법(dipole-dipole array)을 이용하여 지층의 전기비저항을 측정하였고, 탐사자료로부터 지하의 전기비저항구조를 해석하는 방법은 반복적(iteration) 시행착오법(trial and error)에 의한 역산법(inversion)을 이용하였다. 역산 프로그램은 DIPRO 소프트웨어[Kim(2003)]를 이용하였고, 계산된 비저항 결

Fig. 1. Schematic of the electrical resistivity monitoring survey

과를 2차원 지하 전기비저항 구조의 계산법으로 1차 및 2차 미분연산자를 이용한 평활화제한(smoothness constraint)이 적용되었다. 시간에 따라 지속적으로 측정된 여러 측선의 전기비저항 결과를 비교하기 위해 측선별 탐사 결과를 ASCII 자료로 변환한 후 Surfer프로그램의 크리깅 보간법을 이용하여 일정 간격의 전기비저항을 계산하고 동일한 축적의 2차원 전기비저항 단면도를 작성하였다.

2.2 탐사위치

암석 종류별 수분의 침투 특성을 파악하기 위해 퇴적 암 분포 지역(진주, 포항 단양)과 고철질 화강암(불국사 관입암류) 분포지역에 해당하는 부산 금정산 지역을 대상 지역으로 선정하였다. 모니터링탐사는 우기가 시작 되는 6월부터 건기에 해당하는 11월까지 수행하였으며, 동절기 동안 지표수의 지반 침투 경로와 영향 범위를 확인하기 지속적인 모니터링탐사를 계획하였다. Table 2와 Figure 2, Figure 3은 모니터링탐사 측선의 위치와 설치 전경을 나타낸 것이다.

Fig. 2. Location map of monitoring survey

Fig. 3. Installation of the electrodes

Table 2. Location information of monitoring survey

Location	Coordinates of the center (Bessel)			
Jangjeon-dong, Geumjeong-gu, Busan	longitude	129° 03' 50.3"	X	205,560
	latitude	35° 13' 25.6"	Y	191,957
Samgye-ri, Naedong-myeon, Jinju-si, Gyeongsangnam-do	longitude	128° 01' 42.4"	X	111,200
	latitude	35° 08' 02.14"	Y	182,421
Umok-ri, Heunghae-eup, Buk-gu, Pohang-si, Gyeongbuk	longitude	129° 25' 20.7"	X	237,775
	latitude	36° 05' 47.7"	Y	288,868
Byeolgok-ri, Danyang-eup, Danyang-gun, Chungbuk	longitude	126° 21' 25.6"	X	142,513
	latitude	36° 59' 04.5"	Y	387,511

3. 연구결과

3.1 강우 및 기온자료

지반의 전기비저항은 풍화대와 파쇄대에 존재하는 간극수와 유체포화물에 따라 달라지며, 온도, 밀도, 함수비 등에 의해서 영향을 받는다. 따라서 모니터링탐사 기간 중 환경변화에 따른 전기비저항 변화를 파악하기 위해서 기상청의 지역별 상세 관측자료(<http://www.kma.go.kr/>)로부터 모니터링탐사 지점별로 탐사가 수행된 기간별로 기온과 강우량 자료를 구축하였다. 모니터링탐사기간의 기온은 일 최고 기온은 10℃ 내외에서 최고 30℃ 이상까지 분포하였으며, 기온에 의한 전기비저항의 영향 정도를 파악하기 위한 실험을 별도로 수행하였다. Figure 4는 현장 모니터링지점의 기온과 강우량의 변화를 나타낸 것이다.

금정산 지역의 모니터링탐사는 6월 7일부터 11월 9일 사이 기간에 측정되었고 기상 자료는 6월 1일부터 11월 15일까지 정리하여 탐사 시간과 기상 조건을 비교하였다. Figure 4의 (a)와 같이 평균기온은 10-30℃의 범위를 보이며, 건기가 시작되는 9월 중순부터 기온이 낮아지며, 11월은 중순이후 평균기온이 10℃로 감소한다. 탐사기간 중 3번의 태풍이 직간접적으로 영향을 미쳤으며, 2차 탐사일(6월 27일)은 집중호우에 있어 함수비가 높은 시기에 해당한다. 진주 지역은 6월 7일 - 11월 9일까지 탐사를 수행하였고, Figure 4의 (b)와 같이 기온 변화는 금정산 지역과 유사하며, 11월 중순 평균기온이 10℃ 이하로 떨어지는 것을 볼 수 있다. 1-3차 모니터링 탐사가 수행된 6월에서 8월까지 3번의 태풍과 강우가 집중되었으며, 4차에서 7차 조사는 강우량이 적은 건기에 해당한다. 포항 지역은 6월 28일부터 11월 11일까지 7차에 걸쳐 수행하였고, 다른 지역에 비해 6월의 기온변화가 크게 나타난다(Figure 4의 c). 3번의 태풍이 영향을 미쳤으나, 우기에 해당하는 6월에서 8월의 강우량은 타 지역에 비해 적고, 9월 중순 기온이 하강하면서 건기가 시작되는 것으로 판단된다. 1차, 2차, 5차 탐사는 강우발생 직후에 실시하였으며 3차, 4차, 6차, 7차 탐사는 강우 사상이 발생한 이후 건기에 실시하였다. 단양 지역의 전기비저항 모니터링 탐사는 우기에 속하는 7월 22일부터 11월 11일까지 7차에 걸쳐서 수행하였다. Figure 4의 (d)와 기온은 0-30℃의 범위로 상기의 3개 지역에 비해 넓게 나타나고, 10월의 평균 기온이 10℃내외로 다른 지역에 비해 1달 정도 빠른

분포를 보인다. 우기는 6월에서 8월까지 해당하며, 2차, 5차 탐사는 강우발생 직후 수행하였다.

3.2 환경에 따른 전기비저항 변화

전기비저항의 변화는 모니터링탐사의 전극이 접지되는 토양층 시료에 대하여 물리적, 화학적 조건을 변화시켜가면서 전기비저항의 변화를 관찰하였다. 실험은 현장에서 채취한 시료로부터 자연 상태의 함수비와 비중, 밀도 및 전기비저항을 측정된 후, 105℃에서 24시간 동안 건조시킨 다음, 시료의 함수비를 증가시켜가면서 전기비저항을 측정하였다.

밀도 변화에 따른 전기비저항의 변화를 관찰하기 위해 일정 용적의 측정용기에 토양 시료의 양을 변화시켜가면서 가비중(밀도)을 계산하였다. 밀도의 변화는 일축으로 다져 주어 일정 용적(측정용기의 체적)에 대한 무게의 비로 계산하였으며, 측정되는 전기비저항이 거의 일정해질 때까지 실시하였다.

온도변화에 대한 전기비저항의 변화를 파악하기 위하여 일정량의 용액과 토양시료를 섞은 다음, 그 혼합물을 전기비저항 측정용기(soil box)에 채워서 -30℃까지 냉동시킨 후, 실온에서 서서히 냉각시키면서 온도 변화에 따라 비저항을 측정하였다. 토양의 온도는 측정용기의 두 곳에 -50℃~150℃의 측정범위를 가진 디지털 온도계를 설치하여 온도 변화를 측정하였다.

토양의 함수비에 의한 전기비저항은 함수량의 증가에 따라 감소하였다. 함수비가 낮을수록 비저항은 급격하게 증가되었으며, 함수량이 포화상태에 이르면 비저항의 변화는 거의 나타나지 않았다. 함수비가 약 15%에 이르기까지는 급격한 감소를 보여주며, 약 25%까지는 감소되는 기울기는 점점 완만해졌으며, 그 이상에서 완전히 포화상태가 될 때까지는 더욱 완만한 감소 경향을 나타내었다(Figure 5의 a). 이상의 결과로 볼 때 토양 함수량이 일정 비율 이상인 우기시는 함수량에 의한 비저항의 변화는 작을 것으로 예상되며, 건기 시와 같이 토양 함수량이 감소하는 시점은 비저항의 크기가 높게 측정될 수 있어 이에 대한 고려가 필요하다.

밀도(건조단위중량, 가비중 또는 밀도) 변화에 따른 전기비저항은 밀도의 증가(용적비중의 증가)에 따라 전기비저항이 감소하였으며 포화 밀도 하에서는 거의 일정한 값을 보였다(Figure 5의 b). 암석의 경우 밀도가 증가하게 되면 이에 비례하여 비저항도 증가하는 것이 일반

(a) Temperature and precipitation of Geumjeong area

(b) Temperature and precipitation of Jinju area

(c) Temperature and precipitation of Pohang area

(d) Temperature and precipitation of Danyang area

Fig. 4. Temperature and precipitation of monitoring survey areas

적이나, 토양의 경우 지나치게 낮은 밀도에서는 간극이 포화되지 않고 빈 공간으로 남게 되어 비저항이 증가되는 것으로 판단된다. 일반적인 토양의 밀도는 1.5 내외로 실험의 결과에서 볼 때 밀도가 전기비저항에 미치는 영향은 적을 것으로 판단된다.

토양의 온도에 의한 전기비저항 변화는 전기전도도를 향상시키기 위해 건조 토양에 자연 함수비와 동일하게 염화나트륨 용액을 첨가하여 실시하였다. 토양의 온도변화에 따른 전기비저항의 변화는 빙점 이하에서는 전기비저항이 급격히 감소하다가 그 이상이 되면 서서히 감소하는 특성을 나타내었다(Figure 5의 c). 용액의 종류에 따라 측정 가능한 온도 범위가 다양한데 담수 조건에서는 -5°C 이하의 온도에서 전기비저항의 측정이 불가능하였고, 염화나트륨 용액을 함유한 토양은 자연수를 함유한 시료에 비해 매우 낮은 온도에서부터 전기비저항의 측정이 가능하였다. 담수(증류수)의 경우 온도에 대한 전기비저항의 변화가 빙점부근에서 크게 변곡되는 것에 비해 염수는 빙점에서 정도가 완만한 특징을 보여준다. 토양의 전기적 성질은 간극유체의 전기전도도에 민감하게 반응하며 온도변화 역시 간극유체의 활성도의 차이로 생각할 수 있다. 토양의 동결은 간극유체, 토양비열과 밀접한 관련성이 있는바 토성 등 물리적 성질에 따라 달라질 수 있다.

이상의 실험에서 환경적인 영향에 의해 전기비저항의 변화가 나타나며, 전기적 특성에 기초한 측정 방법에 공통적으로 적용된다. 따라서 정기적으로 모니터링이 수행되는 탐사와 현장 조사에서 전기적 계측 방법은 합리적인 해석을 위해 현지 토양의 특성을 파악하고 그 결과에 기초한 보정이 필요하다.

3.3 전기비저항 모니터링

3.3.1 금정산 지역(화강암 풍화토)

부산 금정산 지역 모니터링 지점은 금정산 휴정암 주변 계곡부를 이루고 있는 경사면으로 경사면의 주향과 경사는 대략 N35E/35SE이다. 탐사지역에 분포하는 암종은 지질공학적인 암반분류에서 고철질 화강암에 해당하며, 토사심도는 0.5-2.0m이며, 노출된 노두에서 관찰되는 풍화대의 심도는 측방으로 불규칙하다.

모니터링 탐사는 건기와 우기에 걸쳐 7차 반복 수행하였고, 그 결과는 Figure 6과 같다. 금정산 지역은 산 정상부에 위치하고 급경사 지형으로 화강암의 핵석풍화와 단열이 발달하여 수분의 배출이 용이한 특성을 보인다. 그림에서 보는 바와 같이 전기비저항은 심도에 비례하여 증가하는 경향을 보이며, 파쇄대가 발달하지 않는 기반암은 수분 침투와 계절적 변화와 무관하게 전기비저항이 일정하며, 출현심도는 단면의 중앙부에서 3m이며, 양단으로 이동할수록 심도가 깊어지는 것으로 판단된다(그림의 [2]). 지표면에 해당하는 최상부의 전기비저항은 중앙부(그림의 [1]지점)에서 저비저항 이상대가 관찰되고 있어 함수능에 차이를 보인다. 지표 부근의 저비저항 이상대는 주변으로 확대되는 모양을 보이며, 강우가 거의 없었던 11월에는 이상대의 규모가 감소하며, 주변의 전기비저항과 유사한 특성을 보인다. 이러한 특징은 지표수가 증상으로 침투하는 것이 아니라 균열이나 흐름이 용이한 구조를 따라 발생하는 것을 의미한다. 지하로 침투한 수분은 하부 지반을 포화시키며, 강우가 중단된 이후에도 일정 기간 지반내부에 잔류하게 되는데, 그림의 [3], [4]지점에서 관찰되는 저비저항 이상대가 여기에 해당한다. 최대 강우는 6월 말경에서 7월 초에 집

Fig. 5. Electrical resistivity changes due to Moisture content/density/temperature changes

Fig. 6. Distribution of the electrical resistivity of weathered granite (Geumjeong area)

중되었고 강우가 오랜 기간 중단된 9월 1일 전기비저항 단면의 ③지점에서 저비저항 이상대가 지속되는 것을 볼 수 있다. 10월 12일 단면의 ④지역은 저비저항 이상대가 수직방향으로 발달하며, 이는 대부분 파쇄대나 수직 방향 단열에 해당하며, 진기가 시작된 10월까지 주변과 구분되는 저비저항을 보인다. 이상의 결과로 볼 때 강우 시 지하로 침투한 수분은 상당기간 지표 하부 10m 미만의 심도에 잔류하며, 금정산 지역의 경우 11월 9일 측정된 비저항에서 천부지역 저비저항 이상대가 감소된다. 따라서 우기동안 내린 선행 강우는 지하로 침투하는 과정과 일정 심도에서 지속적으로 잔류하여 급경사지 붕괴에 영향을 미치는 것으로 판단되며, 침투된 강우의 대부분은 11월 이후 하부 지반으로 함양된다. 따라서 금정산

지역이 산악지형과 화강암 지역을 대표하는 시범지역인 것을 고려하면 이와 유사한 조건의 지역에서 표준 강수량 산정 시 우기 동안의 선행강우량의 영향은 6월에서 10월까지의 전체 강우를 대상으로 산정할 필요성이 있고 반감기의 산정 시 이에 대한 고려가 필요하다. 여기서 반감기는 강우량이 반으로 줄어드는 일수를 의미한다.

3.3.2 진주 지역(사암 풍화토)

진주지역의 모니터링 지점은 진주시 내동면 삼계리 가화천 주변 구릉지로 경사면의 끝단은 도로와 인접하며 1-5m 정도 절취된 사면의 상단에 위치한다. 사면의 주향과 경사는 N40E/39NW로 북서 방향으로 경사진 급경사

지에 해당하나 자연사면의 하부가 평탄지의 농경지로 이어져 수분의 배출이 용이하지 않다. 암종은 경상누층군의 자색세일과 사암의 호층으로 구성되며, 토사심도는 1.0-2.0m이고, 일부는 기반암의 풍화에 의한 풍화잔류토와 풍화암이 노출되어 있다. 6월 29일부터 11월 9일까지 7차에 걸쳐 수행한 전기비저항 모니터링탐사의 결과는 Figure 7과 같다. 진주 지역은 구릉성산지에 해당하며, 탐사지역은 저각의 층리가 발달하는 퇴적암으로 구성되어 있다. 측정된 전기비저항의 범위는 $1000\Omega\cdot m$ 이하로 금정산 화강암에 비해 낮게 나타난다. 전기비저항은 심도에 비례하여 증가하는 경향을 보이며, 한편 전기비저항이 층상의 배열을 보이고 있어 층리에 의한 전기비저항 분포를 지시한다. 전기비저항이 일정한 기반암(그림의 [2]

부분)은 단면 중앙부에서 4-5m의 심도를 보이며, 표층(그림의 [1])은 하부 지반에 비해 높은 비저항으로 나타나는데, 이것은 강우 후 수분이 하부로 빠르게 침투하고 표면은 하부 지층에 비해 낮은 함수능에 의한 결과로 추정된다. 그림의 [3], [4]는 수분 침투에 의해 형성된 저비저항 이상대로 주변보다 전기전도도가 높은 영역을 지시한다. 단면 좌측부의 [3]은 우기 시 수분의 침투가 빠르게 진행되고 강우 후 점진적으로 비저항이 감소하는 경향을 보이며, 그림의 [4]는 우기에 해당하는 8월 뿐 아니라 건기에 속하는 10월까지 지속적으로 저비저항 이상대로 남아 있고, 11월의 비저항에서 주변과 유사한 저항을 보인다. 지하 5m 이상의 심도에서 형성되는 저비저항 이상대 중 [3]번 지점은 강우 정도에 따라 규모의 크기가

Fig. 7. Distribution of the electrical resistivity of weathered sandstone (Jinju area)

변하는 반면 ④번 지점은 우기를 거쳐 10월 초까지 저비저항대의 규모가 지속적으로 확장되며, 이러한 특징은 급경사 화강암의 단열에서 관찰되는 모니터링 결과와 유사하다. 급경사지 붕괴는 대체로 토석류 형태로 발생하며 활동면의 심도는 10m 미만의 얕은 심도에서 발생하며, 전기비저항 모니터링탐사 결과로 볼 때 강우 시 지하로 침투한 수분은 건기에 해당하는 9월과 10월초까지 붕괴 발생이 빈번한 심도에 잔류하는 것으로 해석된다. 또 저비저항 이상대의 수직적인 분포는 수분의 침투가 지표에서 하부 지반으로 균일하게 발생하는 것이 아니라 풍화대의 균열이나 토층의 이완된 간극을 따라 발생하는 것을 보여준다. 화강암 지역과 같이 구릉성 산지의 경우도 표준 강우량 산정 시 우기 동안의 선행강우량의

영향은 건기에 해당하는 10월까지 지속적으로 영향을 주므로 반감기의 산정 시 이에 대한 고려가 필요하다.

3.3.3 포항 지역(미고결 이암)

포항 지역의 모니터링 지점은 포항시 북구 흥해읍 우목리 부근 20번 지방도에 위치한 절취사면으로 20번 지방도의 이설에 의해 만들어진 절취사면으로 상부에 탐사측선을 설치하였다. 절취사면은 미고결 사암으로 이루어져 있고, 도로측 사면의 주향과 경사는 N16E/45SE로 급경사에 해당하며, 자연사면은 20° 내외의 완경사에 해당한다. 사면표면에서 관찰되는 미고결퇴적층의 암편은 사면 시공 시 발파에 의해 파쇄 되어 있고, 모니터링탐사 당시 법면에 대한 보강공사가 진행 중에 있었다. Figure 8은

Fig. 8. Distribution of the electrical resistivity of weathered mudstone (Pohang area)

모니터링탐사 결과를 나타낸 것이다. 탐사에서 관찰되는 전기비저항은 $500\Omega\cdot m$ 이하의 낮은 비저항을 지시한다. 이러한 비저항은 금정산 화강암이나 진주의 쇄설퇴적암에 비해 매우 낮은 것으로 전기비저항에 암석 강도와 밀접한 상관성이 있고, 미고결된 암반의 강도가 낮아 상대적으로 낮은 전기비저항을 보이는 것으로 판단된다. 단면의 최상부(그림의 ①)는 강우 시 비저항이 감소하며, 강우가 종료된 후 수분이 증발하여 하부 지반보다 높은 비저항을 보인다. 이러한 특징은 진주 지역 탐사와 같이 토양층에서 관찰되는 일반적인 현상이다. 그림의 ②지점에서 암석의 균열이나 풍화대 지반의 간극이 완전히 포화된 정도를 지시하는 저비저항 이상대가 관찰된다. 포항지역은 1차(6월 28일) 모니터링탐사가 수행되기 직전 태풍 메아리에 수반된 집중호우가 있었고, 비저항의 분포는 전체 탐사 단면 중 가장 낮은 비저항을 지시한다. 집중호우는 6월 25일부터 2일간 발생하였고 강우 종료 후 2일 후 단면에서 저비저항 이상대가 넓게 관측되는 것으로 볼 때 집중 호우 시 수분의 지반 침투 속도는 상당히 빠른 것을 알 수 있다. 그림의 ③은 소규모 강우 시 암석의 균열을 따라 지하로 침투하는 수분의 경로를 나타내는 것으로 지반내로 침투되는 수분이 이미 형성된 균열을 따라 진행됨을 보여준다. 그림의 ④지점에서 강우 침투로 저비저항이었던 부분이 전기 동안 침투되었던 수분이 지하로 함량되고 주변과 유사한 고비저항으로 변화되는 것을 볼 수 있다. 모니터링 결과에서 포항의 미고결퇴적암 분포지역은 암반의 강도가 연약한 암반으로 구성되어 있고, 수분의 침투와 확산이 매우 빠른 것으로 판단된다. 화강암과 쇄설퇴적암 지역에서 침투한 수분이 지하로 함량 되기까지 상당한 시간이 소요된 것에 비해 미고결퇴적암은 강우 종료 후 10m 내외의 심도까지 침투한 수분이 비교적 단시간에 지하로 함량 되어 붕괴가 빈번한 심도에 체류하는 기간이 상대적으로 짧은 것으로 파악된다. 또한 소규모 강우 시 수분의 침투는 균열이나 이동이 용이한 간극을 통해 발생하나 집중호우 시 측방으로 확산 속도가 빨라 층상에 가까운 침투를 일어나는 것으로 추정된다. 포항 지역 미고결퇴적암은 수분의 침투 형태가 화강암 및 쇄설퇴적암과는 상이하며, 강우 이후 하부지반으로 침투되는 속도가 빠르고 하부의 암반대수층으로 함양되는 기간이 짧아 현재 사용되는 표준강수량 산정 시 적용하는 선행강수량의 영향기간과 유사한 시간을 보인다. 급경사지 예·경보시스템의 한계선 도출을 위한 강우데이터 분석에서 산정하는 표준강수량은

포항지역 미고결퇴적암과 같이 강우 침투 시 측방으로 확산이 용이하고, 침투된 수분이 하부 암반으로 함양되는 기간이 짧은 지역에 선택적으로 사용할 수 있을 것으로 해석되며, 이에 대한 지속적인 모니터링이 요구된다.

3.3.4 단양 지역(사암)

단양 지역의 모니터링 지점은 단양군 단양읍 별곡리에 위치한 눈썰매장 맞은편 야산에 위치하며, 경사면의 하부에 작은 수계가 발달해 있다. 사면의 주향과 경사는 N48E/35SE이다. 탐사 지점 주변으로 노두는 발달하지 않으나, 전석의 대부분이 사암이며 화학적 풍화와 함께 기계적 풍화작용의 산물인 테일러스(talus)가 발달한다. 전기비저항 모니터링탐사 결과는 Figure 9와 같다.

모니터링은 7월 22일부터 11월 11일까지 7차에 걸쳐 실시되었고, 이 중 1차(7월 22일)에서 5차(9월 16일)까지가 우기에 해당하며, 6차와 7차 탐사기간 동안은 소규모 강우를 제외한 집중호우는 발생하지 않았다. 그림에서 ①지점은 지표면의 표토층에 해당하며, 강우가 발생한 후 지표면의 수분이 증발하여 하부 지반보다 높은 비저항을 보인다. 특히 단양 지역은 표층에 테일러스가 발달하고 있어 수분이 하부지반으로 침투되기 용이한 조건을 갖추고 있어 표층부의 저비저항은 강우 발생시점을 경계로 단기간에 걸쳐 한시적으로 나타날 것으로 예상된다. 우기에 해당하는 1차(7월 22일) 탐사에 비저항은 표층 하부로 저비저항이 층상으로 분포하며, 태풍 무이파가 통과한 후 수행된 2차(8월 22일) 탐사에서 단면의 중앙 하부로 저비저항 이상대가 뚜렷하게 관찰된다(그림의 ②지점). 균열 내지 이완된 간극의 함수정도가 높은 저비저항대 이상대는 9월 7일 4차 탐사 단면까지 지속되며, 9월 16일 5차 탐사에서 태풍 무이파의 영향으로 형성된 이상대는 주변과 유사한 저항대로 변화된 것을 볼 수 있다. 즉 단양지역에서 하부로 침투한 수분은 3주 정도의 기간 동안 10m 이내의 심도에 영향을 미치며 이 기간은 화강암이나 진주 지역 쇄설성 퇴적암에 비해 단기간에 해당하고, 포항지역 미고결퇴적암 보다는 길게 나타난다. 단양 지역은 4차 모니터링 이후 집중호우가 발생하지 않았고, 9월 16일 5차 전기비저항 단면에서 탐사 수행 4일전 강우로 침투한 수분에 의한 지표 부근 2~4m 심도에서 저비저항 이상대(그림의 ③지점)가 관찰된다. 6차(10월 13일)는 소규모 강우 기간에 수행되었고, 단면의 좌측부에 ③지점의 저비저항 이상대가 관찰된다. 지반의 함수 정도에 의해 단양의 쇄설성 퇴적암분포지의

Fig. 9. Distribution of the electrical resistivity of weathered sandstone (Danyang area)

하부 지반에서 관찰되는 저비저항 이상대의 유지 기간은 포항지역과 유사하며, 집중호우 시 측방으로 수분이 확산 되는 정도는 진주의 쇄설성 퇴적암과 같은 형태를 보인다. 이상의 분석결과에서 단양 지역은 선행강우량이 미치는 기간이 3주 정도로 추정된다.

4. 결 론

강우 시 암석 종류 따른 수분의 침투 특성을 파악하기 위해 백악기말 고철질 화강암이 분포하는 부산금정산 지역과 퇴적암이 분포하는 지역 중 단양 지역(사암), 진주 지역(셰일), 포항 지역(이암-미고결퇴적암) 등 4개 지역을 대상으로 전기비저항 모니터링탐사를 실시하였

다. 탐사기간은 우기가 시작되는 6월부터 하절기를 지나 건기에 해당하는 11월까지 수행하였다.

모니터링 결과에서 금정산 지역과 진주 지역은 표준 강우량 산정 시 우기 동안의 선행강우량의 영향은 6월에서 10월까지의 전체 강우를 대상으로 산정할 필요성이 있고 반감기의 산정 시 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 또한 저비저항 이상대의 수직적인 분포는 수분의 침투가 지표에서 하부 지반으로 균일하게 발생하는 것이 아니라 풍화대의 균열이나 토층의 이완된 간극을 따라 발생하는 것을 보여준다. 포항 지역 미고결퇴적암은 수분의 침투 형태가 화강암 및 쇄설퇴적암과는 상이하며, 강우 이후 하부지반으로 침투되는 속도가 빠르고 하부의 암반대수층으로 함양되는 기간이 짧아 현재 사

용되는 표준강우량 산정 시 적용하는 선행강우량의 영향 기간과 유사한 시간을 보인다. 지반의 함수 정도에 의해 단양의 쇄설성 퇴적암분포지의 하부 지반에서 관찰되는 저비저항 이상대의 유지 기간은 포항지역과 유사하며, 집중호우 시 측방으로 수분이 확산되는 정도는 진주의 쇄설성 퇴적암과 같은 형태를 보인다. 이상의 분석결과에서 단양 지역은 선행강우량이 미치는 기간이 3주 정도로 추정된다.

참 고 문 헌

1. National Institute for Disaster Prevention (2006), "A study on the Monitoring & Detection of Slope Failure (III)- Focusing on the Estimation Methodology of Standard Precipitation", NIDP-ER-2006-01, p.124.
2. National Institute for Disaster Prevention (2007), "A Study on the Early Warning System for Damage Mitigation of Geotechnical Disasters", NIDP-ER-2007-01, p.168.
3. National Disaster Management Institute (2011), "GIS-Based Stability Analysis System for Steep Slope", NDMI-PR-2011-14-03, pp.184.
4. Kim, J. H. (2003), "Dipro for Windows v. 4.0".
5. Park, S. G. and Kim, H. J. (1999), "Delineation of Water Seepage in a Reservoir Embankment from Ground Temperature Measurements", Econ. Environ. Geol., Vol.32, No.2, pp.169-175.
6. Park, S. G., Song, S. H., Choi, J. H., Choi, B. G. and Lee, B. H. (2002), "Applicability of Geophysical Prospecting for water leakage detection in water utilization facilities", Korea Society of Earth and Exploration Geophysicists, 4rd special symposium, pp.179-195.
7. Song, S. H., Lee, K. S., Kim, J. H. and Kwon, B. D. (2000), "Application of SP and Pole-pole Array Electrical Resistivity Surveys to the Seawater Leakage Problem of the Embankment", Econ. Environ. Geol., Vol.33, No.5, pp.417-424.
8. Song, S. H., Kwon, B. D. Choi, J. H. and Kim, K. M. (2001), "Application of Hydrogeological and Geophysical Methods to Leakage Problem of Dike", J. of Mineral and Energy Resources, 38, pp.292-300.
9. Chung, S. H., Kim, J. H., Yang, J. M., Han, K. E. and Kim, Y. W. (1992), "Delineation of water seepage in earth-fill embankments by electrical resistivity method", The Journal of Engineering Geology, Vol.2, No.1, pp.47-57.
10. Brand, E. W., Premchitt, J. and Phillipson, H. B. (1984), "Relationship Between Rainfall and landslide in Hong Kong", Proceedings of the 4th International Symposium on Landslides, Vol. I, Toronto, pp.377-384.
11. Lumb, P. (1975), "Slope Failures in Hong Kong", Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol.8, pp.31-65.
12. Mussettm A. E. and Khan M. A. (2000), "Looking into the Earth: An Introduction to Geological Geophysics", Cambridge University Press, p.470.
13. 國土交通省 (2004), (社)國際建設技術協會, "Guidelines for Development of Warning and Evacuation System Against Sediment Disaster in Developing Countries", 建設技術移轉指針, p.116.
14. 國土交通省 (2005), (社)國際建設技術協會, "Procedure and Setting Standard for Critical Rainfall for Warning and Evacuation from Sediment-related Disasters", p.12.

(접수일자 2012. 5. 15, 심사완료일 2012. 7. 11)