천연기념물 제415호 포항 달전리 주상절리의 사면안정성 평가 및 낙석 위험 범위 설정

A Study on Evaluation of Slope Stability and Range of Rockfall Hazard of Daljeon-ri Columnar Joint in Pohang, Korea

김재환¹, 강무환², 공달용³, 좌옹주^{4,*}

¹국립문화재연구소 자연문화재연구실, ²거창화강석 연구센터, ³문화재청, 국제협력과, ⁴경상국립대학교 지질학과

Jae Hwan Kim¹, Mu Hwan Kang², Dal-Yong Kong³, Yong-Joo Jwa^{4,*}

¹Natural Heritage, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 35204, Korea

²Geochang Granite Research Center, Geochang, 105-10, Korea

³International Cooperation Division, Cultural Heritage Administration, Daejeon, 35208, Korea

⁴Department of Geology, Gyeongsang National University, Jinju, 52828, Korea

Received August 4, 2021
Revised August 31, 2021
Accepted September 23, 2021

*Corresponding author
E-mail: jwayji@gnu.ac.kr
Phone: +82-55-772-1475

Journal of Conservation Science
2021;37(5):505-515

<https://doi.org/10.12654/JCS.2021.37.5.08>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of
Conservation Science for Cultural
Heritage

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.

초 록 포항 달전리 주상절리(천연기념물 제415호, 이하 주상절리)에 대한 사면안정성 평가 및 낙석 시뮬레이션을 통하여 낙석의 최대 에너지, 도약높이, 이동거리를 산출하였으며, 낙석 위험 범위를 설정하였다. 주상절리가 분포하는 사면의 경우 왼쪽(SW)에서 오른쪽(NE)에 이르기까지 93.79°, 131.99°, 165.54°, 259.84°의 경사방향을 가지며 전체적으로 부채꼴의 형상을 하고 있다. 이러한 사면의 경사방향을 따라 4구간으로 구분하였으며, 각 구간별 노출되어 있는 주상절리의 단면에서 개별적인 불연속면의 방향성을 측정한 결과 1구간은 125개, 2구간은 261개, 3구간은 262개, 4구간은 43개로 확인된다. 평사투영법을 이용한 각 구간별 사면 안정성 평가 결과, 평면 및 전도파괴 영역에 해당되거나 이는 노출된 주상절리면의 개별 방향성에 대한 해석 결과로 주상절리에 대하여 평면 및 전도파괴의 가능성을 진단하기 어렵기 때문에 현재에도 발생되고 있는 낙석으로부터 위험 가능성을 평가하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 또한 낙석 시뮬레이션을 통해 측정된 낙석의 최대 이동거리는 약 66 m이며, 낙석 위험 범위는 사면 아래 전 영역이 해당됨을 알 수 있다. 따라서 이러한 낙석의 거동은 지형학적 요인에 의해 다양한 방향으로 굴러떨어져 낙하지점을 예측하기 힘들기 때문에 낙석으로부터 안정성 확보를 위한 낙석 방지시설 설치를 제안하고자 한다.

중심어 천연기념물, 포항 달전리 주상절리, 평사투영법, 낙석 시뮬레이션

ABSTRACT In this study, we evaluated the slope stability of the Pohang Daljeon-ri columnar joint (Natural Monuments # 415) and calculated the maximum energy, jumping height and moving distance of rockfalls using a simulation. Based on the results, we established the range of rockfall risk. The slopes of the Pohang Daljeon-ri columnar joint have dip directions of 93.79°, 131.99°, 165.54° and 259.84° from left (SW) to right (NE). Furthermore, they have a fan-like shape. The Pohang Daljeon-ri columnar joints are divided into four sections depending on the dip direction. The measurement results of the discontinuous face show that zone 1 is 125, zone 2 is 261, zone 3 is 262, zone 4 is 43. The results of slope stability analyses for each section using a stereographic projection method correspond to the range of planar and toppling failure. Although it is difficult to diagnose the type of failure, risk evaluation of currently falling rocks requires further focus. The maximum movement distance of a rockfall in the simulation was approximately 66 m and the rockfall risk range was the entire area under slope. In addition, it is difficult to forecast where a rock will fall as it rolls in various directions due to topographic factors. Thus, the installation of measures to prevent falling is suggested to secure the stability based on the results of the rockfall simulations and its probabilistic analysis.

Key Words Natural monument, Pohang Daljeon-ri columnar joint, Stereographic projection method, Rockfall simulation

1. 서론

포항 달전리 주상절리(이하, 주상절리)는 경북 포항시 남구 연일읍 달전리에 위치하고 있으며, 학술적, 지질학적 가치를 인정받아 2000년 4월 24일에 천연기념물 제415호로 지정되었다. 포항 달전리 주상절리는 신생대 마이오세에 분출한 현무암질 마그마에 의해 형성되었으며, 수직 한 방향으로 주상절리가 잘 발달하고 있다. 규모는 높이 20 m, 길이 약 100 m에 달하고 있으며, 마치 병풍을 펼쳐 놓은 형상을 보인다(Kim *et al.*, 2018). 전체적으로 북동 주향에 남동쪽 방향으로 70°이상 경사져 있으나, 북동 경계부에서는 수평에 가까운 경사를 보이기도 한다. 이러한 주상절리는 과거 채석 과정에서 발견된 이후로 많은 양의 낙석이 발생하였으며, 현재까지도 지속적으로 낙석 발생이 확인되고 있다.

낙석은 암종, 지질구조에 따라 형상, 체적, 중량 등 규모가 다양하고 발생 조건에 따라 미끄러짐, 회전, 도약 등 여러 가지 운동 형태를 보이며, 비탈면의 경사, 요철, 식생 등 지형학적 요인에 따라 불규칙한 거동을 보인다(Ritchie, 1963). 주상절리 암반 사면으로부터 약 50 m 이내에는 통행로가 인접하고 있고, 관람객이 수시로 방문하고 있어 관람객에 대한 안정성 확보가 요구되며, 산사태 위험 지도(산림청, 2019)를 살펴보면 주상절리가 분포하는 암반 사면의 경우 산사태 위험 등급이 1, 2등급에 해당된다.

최근 국내외 지질학적으로 가치가 있는 지질유산에 대하여 보호 및 관리뿐만 아니라 관광자원으로 활용을 위한

많은 연구가 진행되어 있다(Hose, 1995; 2003; Stueve *et al.*, 2002; Koh *et al.*, 2005; Dowling and Newsome, 2006; 2008; Heo and Choi, 2007; Hwang and Kim, 2009; Jin and Kim, 2010; Kim *et al.*, 2018). 대부분의 지질유산은 자연환경에 노출되어 있어, 오랜 시간에 걸친 암석의 풍화작용, 지진 등과 같은 자연현상, 인위적인 요인 등에 의해 훼손되어진다. 이러한 지질유산에 대한 장기적인 보존 및 안정성을 확보하기 위해서는 다양한 관리대책이 요구된다.

지금까지 주상절리에 대한 연구로는 주로 국내에 분포하고 있는 주상절리의 분포 및 이들 주상절리의 생성원인, 형태학적 및 암석학적 연구 등으로 이루어진 반면에 거동과 변형에 따른 안정성에 관한 연구는 미흡한 실정이다(Koh *et al.*, 2005; Hwang and Kim, 2009; Jin and Kim, 2010; Ahn, 2010; 2014; Ahn *et al.*, 2014; Ko *et al.*, 2016). 이번 연구에서는 포항 달전리 주상절리를 대상으로 사면 안정성 평가 및 낙석 시뮬레이션을 통하여 낙석의 위험 범위를 설정하여 적절한 관리 방안을 모색하고자 하였다.

2. 연구방법

이번 연구에서는 천연기념물로 지정된 포항 달전리 주상절리에 대한 사면안정성 평가 및 낙석 거동 특성을 살펴보고자 한다. 지질조사에 있어 불연속면 조사는 보편적으로 클리노미터기 등을 이용한 수작업에 의하여 이루어져왔다. 포항 달전리 주상절리의 경우 구배가 1:0.7 이상의 급경사이고, 높이가 10 m 이상이므로 접근이 거의 불가능하

Figure 1. Flowchart of the study process.

기 때문에 이번 연구에서는 드론(Phantom 4 Pro, DJI社, CHN)을 이용하여 정사영상 이미지를 확보하였다. 3차원으로 모델링한 결과로부터 JMX Analyst software를 이용하여 불연속면의 경사방향 및 경사 등의 정보를 획득하였으며, Dips 프로그램을 이용하여 사면 안정성 평가를 하였다(Figure 1).

낙석은 사면에서 암석이 아래로 떨어지면서 발생하는 재해로서, 암반에 발달한 절리, 편리, 층리 등의 균열이 확장되어 낙하하는 현상이다. 암석이 중력에 의하여 낙하할 때에는 위치에너지가 운동에너지로 변하게 되며, 이때 가속도에 의해 더욱 빠르게 낙하하고, 원거리까지 이동하게 됨으로써 피해범위 및 규모가 확대된다. 이에 iRockfall 프로그램을 이용하여 총 200회의 낙석 시뮬레이션을 실시하여, 낙석 거동 특성을 살펴보았다. 낙석 시뮬레이션에서는 지형의 횡단면 정보뿐만 아니라 낙석의 크기, 단위중량, 등가마찰계수가 요구된다.

이번 연구에서 낙석의 크기(직경)는 주상절리의 절리면 간격을 고려한 0.30 m와 모니터링을 통해 확인된 최대 크기인 0.80 m로 설정하였다. 실내시험을 통해 달전리 현무암의 단위중량을 2.5 kN/m²를 적용하였으며, 낙석의 중량은 0.353 kN, 0.6702 kN이다. 낙석의 형상은 구형으로 가정하였으며, 등가마찰계수(μ)의 경우에는 도로안전시설 설치 및 관리지침(국토교통부, 2019)을 참고하여 0.05를 적용하였다.

3. 지질 개요

포항 달전리 주상절리는 한반도 남동부에 위치하고 있으며, 포항분지에 해당한다 (Figure 2). 한반도 남동부 지역은 올리고세 말부터 마이오세 동안 동해의 확장에 따른 북북서-남남동 방향의 우수향 주향이동단층운동에 기인한 다수의 신생대 마이오세 분지들이 발달한다. 이러한 퇴적분지들은 지리적 위치와 퇴적물의 특징에 따라 포항, 장기, 와읍, 어일, 하서, 정자, 울산분지 등으로 구분된다 (Kim, 1970; Lee *et al.*, 1992; Son and Kim, 1994; Son, 1998; Son *et al.*, 2000; 2005; Kim *et al.*, 2011).

달전현무암이 분포하는 포항분지는 전기 마이오세 말 (17 Ma)부터 중기 마이오세에 걸쳐 퇴적물이 충전된 분지로서, 대규모 단층운동에 따라 빠른 분지의 침강으로 분지 서쪽 경계를 따라 선상지-삼각주계 퇴적물이 먼저 퇴적한 후 분지 동쪽이 깊어짐에 따라 해침이 발생하여 해양성 부유 퇴적물이 그 상부를 덮게 두껍게 피복하였다. 포항분지 충전물은 전체적으로 화산물질을 포함하고 있지 않으며, 초기의 일부 육성 퇴적물을 피복하는 다량의 천해성 퇴적물로 구성되어 있어 전기 마이오세 분지의 충전물과는 뚜렷이 구별된다(Song *et al.*, 2015; Kim *et al.*, 2018). Song *et al.*(2015)에 의하면 달전지 일대에 분포하고 있는 달전현무암은 3매의 주 암체와 여러 매의 암맥(dike)과 암상(sill)으로 구성되어 있다고 보고된바 있다. 이들은 모두 동일한 기원의 현무암으로, 세립질의 기질에 감람석

Figure 2. Regional geologic and structural map of the Miocene basin in southeast Korea. (a, b) Geological map of the Pohang basin with location of the Pohang Daljeon-ri columnar joint (●).

과 침상의 사장석 반정을 포함하고 있으며 관입암체의 규모가 작을수록 구성 광물의 입자 크기가 작아지는 특징을 보인다. 포항 달전리 주상절리는 달전현무암에 해당하며, 이들과 접하고 있는 암석은 대부분 포항분지 내 연일층군의 미고결된 사암 또는 실트암이며 데사이트질 암석과 접하기도 한다(Figure 2). 달전현무암은 알칼리 현무암으로서 층서적으로 연일층군을 관입한 포항분지 충진물에 해당하며, 포항분지의 발달사 해석에 중요한 의미를 지닌다.

4. 야외지재학적 특성

주상절리가 분포하는 사면의 경우 왼쪽(SW) 방향으로 부터 오른쪽(NE)에 이르기까지 93.79°, 131.99°, 165.54°, 259.84°의 경사방향을 가지며 전체적으로 부채꼴의 형상을 하고 있다. 관찰 방향에 따라 사면의 경사방향이 다르기 때문에 이러한 사면의 경사방향에 따라 4개 구간으로 구분하였으며, 구간별로 암석의 풍화 정도 및 지재적인 특성을 살펴보았다(Figure 3). 특히 암석의 풍화 등급의 경우 암석의 변색 정도, 장석 및 운모류의 풍화 상태, 절리면의 발달 상태, 그리고 슈미트해머의 반발 정도를 이용하여 구분하였다.

zone 1 구간은 암회색이며, 신선~약간풍화 상태를 보이며 수직으로 주상절리가 발달하고 있다. 사면의 경사 방향과 반대 방향으로 저각의 전단절리가 발달하고 있으며, 절리의 간격은 매우 좁게 나타난다. 상부에 수목 및 식생에 따른 절리면이 확장되어 있으며, 절리 틈 사이로

토사가 충전되어 있다. zone 2 구간은 암회색이며, 신선~약간풍화 상태를 보이며, 정면은 수직, 상부는 경사를 가진 주상절리가 발달하고 있다. zone 1 구간과 마찬가지로 동일한 방향을 가지는 저각의 전단절리가 발달하고 있다. 상부 경사를 가지는 주상절리 부분에서는 낙석 발생 후 토사가 붕적되어 있는 양상을 보인다.

zone 3에서는 담회색 내지 담황색을 보이며, 심한 풍화 상태를 보인다. 좌측은 와상, 우측은 경사-수직으로 주상절리가 발달하고 있다. 좌측 상부는 토사 유실로 인한 오버행이 관찰되며, 하부에서는 유수에 의한 골이 발생하고 있다. zone 4는 암회색 내지 담회색이며, 약간~심한풍화 상태를 보인다. 상부에서 수직으로 발달한 주상절리가 미약하게 관찰된다(Figure 4).

5. 불연속면 측정 결과

주상절리 암반 사면을 대상으로 사면의 경사방향을 기준으로 4개 구간으로 설정한 후 각 구간별 불연속면의 방향성을 측정하였다. 주상절리의 경우 조사자의 접근이 불가능하기 때문에 드론을 활용하여 이미지 촬영을 실시하여, 3D 모델링 및 좌표보정 후 암반 사면에 나타나는 불연속면의 방향성을 측정하였으며, 각 구간별로 살펴보았다. 각 구간별로 측정된 불연속면은 zone 1은 123개, zone 2는 211개, zone 3은 255개, zone 4는 43개로 측정되었으며, 이를 동일 방향성을 가지는 절리군으로 그룹화하여 방향성을 살펴보았다(Figure 5).

Figure 3. The section according to dip direction and dip of slope of Pohang Daljeon-ri columnar joint.

Figure 4. The photograph by section.

Figure 5. Rose diagram for discontinuities of Pohang Daljeon-ri columnar joint.

zone 1의 경우 N8° E~N28° E(30~84° SE), N1° W~N49° W(66~85° NE)로 향하는 전면부 절리와 N2° W~N36° W(8~74° SW), N2° E~N36° E(4~85° NW)로 향하는 전단절리가 우세하게 나타난다.

zone 2의 경우 N62° E~N88° E(37~87° SE), N61° W~N89° W(06~88° SW), N8° E~N60° E(18~80° SE), N1° E~N3° E(62~75° NE)로 크게 4방향으로 향하는 주상절리와 N2° E~N73° E(19~76° NW)로 향하는 전단절리가 우세하게 나타난다.

zone 3의 경우 N73° W~N89° W(26~85° SW), N75° E~N86° E(49~86° SE), N6° E~N° 40E(54~88° SE), N41° E~N72° E(08~90° SE), N1° E~N85° E(08~89° NW), N1° W~N38° W(19~89° NE)로 다른 구간에 비해 다양한 방향으로 향하는 주상절리와 N41° W~N81° W(19~89° NE), N29° W~N76° W(08~90° SW)로 향하는 전단절리가 우세하게 나타난다.

zone 4의 경우 N9° E~N28° E(09~36° SE), N13° W~N25° W(59~73° SW), N5° E~N37° E(67~79° NW), N38° W~N66° W(66~88° SW)로 향하는 절리가 우세하게 나타난다.

6. 사면 안정성 평가

암반에서 사면의 파괴형태는 원호파괴, 평면파괴, 전도파괴 및 켜기파괴로 구분되며, 원호파괴를 제외한 세 가지 유형은 불연속면의 경사방향과 경사를 분석하여 평사투영법으로 파괴가능성을 알아볼 수 있다. 이번 연구에서는 드론과 입체사진측량기법을 활용하여 불연속면의 방향성을 파악하였으며, 평사투영 해석을 통해 주상절리의 파괴 유형 및 가능성을 알아보았다. 평사투영 시 내부 마찰각의 경우 Barton(1974)이 제시된 현무암에 대한 최대 전단강도를 참고하여 40°로 설정하여 작도하였다.

zone 1의 사면의 경사방향과 경사는 각각 93.79°/56.24°로 극점투영으로 살펴본 결과, 평면파괴 영역에서는 확인되지 않으나, 불연속면의 극점이 전도파괴 영역에서는 일부 확인되어 전도파괴의 가능성이 보인다. 켜기파괴의 경우 우세한 세 방향 절리의 경사방향과 경사를 살펴보면 J1(141°/72°), J2(75°/69°), J3(111°/67°)로서, 절리의 경사각이 사면의 현재 경사각보다 높으며, 파괴영역 외부에서 극점을 기준으로 작도한 대원이 교차하고 있어 발생 가능성은 낮아 보인다.

zone 2의 사면의 경사방향과 경사는 각각 131.99°/56.35°로 극점투영으로 살펴본 결과, 일부 절리의 경사각이 내부마찰각(40°)보다 높고 사면 경사각보다 낮은 절리 극점이 평면파괴 영역에 해당된다. 켜기파괴의 경우 우세한

Figure 6. Stability analysis of Pohang Daljeon-ri columnar joint using Dips.

세 방향 절리의 경사방향과 경사를 살펴보면 J1(172°/75°), J2(090°/66°), J3(120°/62°)로서, 절리의 교차점이 zone 1과 마찬가지로 파괴영역 외부에 위치하고 있어 켜기파괴 가능성은 낮아 보인다.

zone 3 사면의 경사방향과 경사는 각각 165.54°/56.98°로 극점투영으로 살펴본 결과, 일부 절리의 극점이 평면 및 전도파괴 영역에 해당된다. 켜기파괴의 경우 우세한 세 방향 절리의 경사방향과 경사를 살펴보면 J1(139°/62°), J2(223°/77°), J3(173°/60°)로서, 절리의 교차점이 켜기파괴 영역 인근에서 확인되나, 현재의 사면 경사각에서는 파괴 가능성이 낮아 보인다.

zone 4의 사면의 경사방향과 경사는 각각 259.84°/46.75°로 극점투영으로 살펴본 결과, 절리의 극점이 평면 및 전도파괴 영역에 해당되지 않는다. 켜기파괴의 경우 우세한 네 방향 절리의 경사방향과 경사를 살펴보면 J1(294°/74°), J2(212°/78°), J3(245°/70°), J4(275°/68°)로서, 절리의 교차점이 켜기파괴 영역 외부에 위치하고 있어 파괴 가능성은 낮아 보인다(Figure 6).

7. 낙석 시뮬레이션 결과

주상절리 암반 사면 내에서 낙석 운동 가능성이 있는 블록을 대상으로 낙석평가를 실시하였으며, 총 200회의 시뮬레이션을 통해 낙석 궤도와 도약높이, 에너지 등을 정량적으로 산출하였다. 낙석 평가의 검토 단면은 드론을 활용하여 평면촬영 이미지, 3차원 모델링 및 이로부터 수치표면모델(Digital surface model)을 제작하고, 주상절리 암반사면에 대한 등고선도와 10 m 간격의 횡단면도를 작성하였으며, 각 지점에서 낙석 시뮬레이션을 실시하였다. 이때 3개 지점을 선정한 후 암석이 각 지점을 통과할 때의 도약높이, 에너지를 산출하였다(Figure 7).

낙석 시뮬레이션 결과를 살펴보면 0 + 010.00 위치에서는 최대 도약높이는 1.404 m, 에너지는 3.391 kJ로 산출되었으며, 최대 이동거리는 약 52 m이다. 0 + 040.00 위치에서는 에너지가 먼저 증가하는 경향을 보이며, 이후 지형이 갑자기 바뀌어 도약이 시작되며, 도약 이후 운동특성은 회전이 우세하며 도약높이는 2.088~3.680 m로 높고, 에너지는 0.265~4.247 kJ로 시작 위치로부터 직선거리로 약 42 m 정도 이동하였다.

주상절리 단면이 확인되고, 심한 풍화 양상을 보이는 0 + 060.00에서는 최대 도약높이는 10.582 m, 에너지는 10.774 kJ로 산출되었으며, 최대 이동거리는 약 52 m이다. 0 + 070.00에서는 0 + 060.00과 달리 하부에 이르기까지 회전운동이 지속한다는 점에서 차이를 보이며, 최대 도약높이는 13.729 m, 에너지는 17.127 kJ에 이르는 것으로 산출되며 시작 위치로부터 직선거리로 약 65 m 이상 이동할 것으로 판단된다.

0 + 090.00에서는 사면을 따라 비행이 우세하고, 하부 환경사에서는 회전운동 특성을 보이며 최대 도약높이는 12.228 m, 에너지는 17.355 kJ로 나타났다. 이동거리는 약 52 m로 나타났지만, 일부 잔여 에너지를 가진 낙석들은 회전운동에 의해 더 멀리 이동할 것이라 판단된다. 0 + 100.00에서는 암석의 풍화 및 절리 내 충전물로 인해 낙석 발생 가능성이 높은 곳으로 추정된다. 최대 도약높이는 11.554 m이며, 에너지는 15.742 kJ로 이동거리는 약 66 m로 나타났다. 0 + 110.00에서는 최대 도약높이는 14.3064 m이며, 에너지는 14.682 kJ로 이동거리는 약 66 m로 나타났다. 0 + 140.00에서는 최대 도약높이는 1.886 m이며, 에너지는 3.138 kJ로 이동거리는 약 66 m로 나타났다(Figure 8).

Figure 7. Nvestigated cross section of Pohang Daljeon-ri columnar joint for rockfall simulation.

Figure 8. The results of Jumping height, maximum energy, distance of rockfall through rockfall simulation.

8. 고 찰

이번 연구에서는 주상절리 암반 사면에 대한 안정성 평가 및 낙석 시뮬레이션을 실시하여 낙석으로부터 위험 구간을 설정하여 적절한 관리 방안에 대해 모색하고자 하였다. 주상절리 암반 사면에서 나타나는 불연속면의 방향성과 사면 경사방향을 고려한 평사투영 해석 결과, 일부

구간에서 평면 및 전도파괴가 예상된다. 일반적인 평사투영 해석은 사면 전체에서 대규모 파괴가 예상되는 주요 절리면의 방향성을 고려하게 되는데, 주상절리의 경우 노출된 주상절리면의 개별 방향성에 대한 해석 결과로 파괴 유형이나 가능성을 언급하기에는 다소 무리가 있어 보인다. 그러나 주상절리의 경우 단일 방향으로 형성되기도 하나, 다양한 분출 방향으로 나타나는 형태의 주상절리 암반 사면은 어느 한 방향으로 특정할 수 없다.

따라서 현재에도 발생되고 있는 낙석으로 인한 위험 가능성 평가에 초점을 맞추는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 주상절리 내 암반 사면에서 발생하고 있는 낙석 발생에 대하여 지속적인 모니터링이 필요하다. 낙석 시뮬레이션 결과를 바탕으로 최대 에너지 및 낙석 이동거리를 계산하여 달전리 주상절리의 낙석위험 범위를 작도해보면, 현재 발생하고 있는 낙석으로부터 관람객의 안정성 확보가 필요한 것으로 판단된다(Figure 9). 이에 낙석 위험 범위가 교차하는 최외곽 지점을 연결하여 낙석 방지시설 설치 구간을 제안하고자 한다. 낙석 방지시설 설치 시에는 낙석 크기, 낙석 방지시설 한계저항치, 경관훼손 등을 고려하여야 할 것으로 판단된다(Figure 10).

9. 결 론

천연기념물 제415호 포항 달전리 주상절리 암반사면에 대한 붕괴 및 낙석 위험 가능성이 예상되는 저짐을 대상으로 사면 안정성 평가 및 낙석 시뮬레이션을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 포항 달전리 주상절리는 평면상 부채꼴 형태의 모양으로 지표에 노출되어 있으며, 왼쪽(SW)에서 오른쪽(NE) 방향에 이르기까지 사면의 경사방향은 각각 93.79°, 131.99°, 165.54°, 259.84°로 나타나며, 이러한 사면의 경사 방향에 따라 4개 구간으로 구분된다.

2) 포항 달전리 주상절리에 대한 각 구간별 암석 풍화 상태를 살펴보면 zone 1과 2는 대체로 신선~약간풍화, zone 3은 심한풍화, zone 4는 약간풍화~보통풍화를 보이며, 일부 심한풍화를 보인다. zone 1의 좌측과 zone 4의 우측에서 절리 틈 사이에 습윤 상태의 충전물이 채워져 있으며, zone 3은 토사가 유실되면서 오버행 형태로 나타나며, 심한풍화 상태를 보이는 주상절리의 틈 사이를 메우고 있는 충전물이 제거된 상태로 하부 지지력에 의해 자립하고 있는 것도 확인된다.

3) 드론과 입체사진측량기법을 활용한 포항 달전리 주상절리 불연속면의 방향성 측정 결과, zone 1은 125개, zone 2는 261개, zone 3은 262개, zone 4는 43개의 불연속

Figure 9. Rockfall risk range through rockfall simulation.

Figure 10. The management plan according to the risk range of rockfall.

면이 측정된다. 평사투영 결과, 평면 및 전도파괴 영역에 해당되나, 이는 노출된 주상절리면의 개별 방향성에 대한 해석 결과로, 평면 및 전도 파괴의 가능성을 진단하기에는 다소 무리가 있으나, 현재에도 진행되고 있는 낙석으로 인한 위험 가능성 평가에 초점을 맞추는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 지속적인 모니터링이 요구된다.

4) 낙석 시뮬레이션 결과를 바탕으로 살펴본 낙석 위험 범위는 현재 지속적으로 발생하고 있는 낙석으로부터 안정성 확보가 요구되며, 시뮬레이션을 통한 낙석의 최대 이동거리는 약 66 m로서, 낙석의 위험 범위는 사면 아래 전 지역에 해당한다. 따라서 약 60 m의 낙석 방지시설을 제안하였으며, 향후 낙석 방지시설을 고려할 경우 낙석 크기, 낙석 방지시설의 한계 저항치, 경관훼손 등을 고려하여야 할 것이다.

사 사

이 연구를 위해 현지조사에 많은 도움을 주신 포항시청과 포항시청 김진규 선생님께 감사드립니다. 그리고 심도 깊은 논문이 될 수 있도록 유익한 조언을 해주신 익명의 심사위원님께도 감사드립니다.

REFERENCES

- 국토교통부, 2019, 도로안전시설 설치 및 관리 지침 -낙석방지시설 편-. 12.
- 산림청, 2019, 산사태위험지도, <https://sansatai.forest.go.kr>.
- Ahn, K.S., 2010, Geology and landscape of Mt. Mudeung Province Park, Korea. The Journal of the Petrological Society of Korea, 19(2), 109-121. (in Korean with English abstract)
- Ahn, K.S., 2014, Research strategy on columnar joint in South Korea. Journal of The Korean Earth Science Society, 35(7), 501-517. (in Korean with English abstract)
- Ahn, K.S., Hun, M. and Son, J.M., 2014, Geological history and landscape of Mudeungsan National Park. Journal of the Geological Society of Korea, 50(1), 91-105. (in Korean with English abstract)
- Barton, N.R., 1974, A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. Norwegian Geotechnical Inst. Publ., Oslo, 105.
- Dowling, R. and Newsome, D., 2006, Geotourism. Elsevier, Cornwall, 260.
- Dowling, R. and Newsome, D., 2008, Global Geotourism Conference Proceedings, 478.
- Heo, C.H. and Choi, S.H., 2007, A Study on the development of geological and geomorphological landscape resources to promote tourism geology: A case study in Taean Seashore National Park. Journal of the Korea Earth Science Society, 28(1), 75-86. (in Korean with English abstract)
- Hose, T.A., 1995, Telling the story of Britain's stone. Environmental Interpretation, 10, 16-17.
- Hose, T.A., 2003, Geotourism in England: A two-ression case study analysis. Unpublished thesis, Birmingham: Department of Ancient History and Archaeology, University of Birmingham.
- Hwang, S.K. and Kim, J.H., 2009, Topographical landscapes and their controlling geological factors in the Juwangsang National Park: Welding facie and columnar joints. Journal of the Petrological Society of Korea, 18(3), 195-209. (in Korean with English abstract)
- Jin, K.M. and Kim, Y.S., 2010, Study on development and value for geotourism of horizontal columnar joints at the Jeongja beach area, Ulsan and Eupchon beach area, Gyeongju. Journal of the Geological Society of Korea, 46(4), 413-427. (in Korean with English abstract)
- Kim, B.K., 1970, A study on the Neogene Tertiary deposits in Korea. Journal of Geological Society of Korea, 6, 77-96. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.H., Yu, Y.W., Jung, S.H., Kim, T.H., Moon, D.H. and Kong, D.Y., 2018, Petrological study on Basaltic rocks of the Daljeon-ri Columnar Joint and the Noeseongsan Noerok Site in Pohang. Korea. Journal of the Petrological Society of Korea, 27(4), 185-194. (in Korean with English abstract)
- Kim, M.C., Kim, J.S., Jung, S.H., Son, M. and Sohn, Y.K., 2011, Bimodal volcanism and classification of the Miocene Basin Fill in the northern area of the Janggi-myeon, Pohang, Southeast Korea. Journal of the Geological Society of Korea, 47(6), 585-612. (in Korean with English abstract)
- Ko, C.S., Kim, M.R.C., No, J.D., Kang, S.S., 2016, Physical and mechanical properties on Ipseok-dae columnar joints of Mt. Mudeung National Park. The Journal of Engineering Geology, 26(3), 383-392. (in Korean with English abstract)
- Koh, J.S., Yun, S.H. and Hong, H.C., 2005, Morphology and petrology of Jisagae columnar joint on the Daepodong basalt in Jeju Island, Korea. Journal of the Petrological Society of Korea, 14(4), 212-225. (in Korean with English abstract)
- Korea Forest Service, 2019, Landslide hazard map, <https://sansatai.forest.go.kr>.
- Lee, H.K., Moon, H.S., Min, K.D., Kim, I.S., Yun, H. and Itaya, T., 1992, Paleomagnetism, stratigraphy and

- geologic structure of the Tertiary Pohang and Changgi basins: K-Ar ages for the volcanic rocks. Journal of the Korean Institute of Mining Geology, 25, 337-349. (in Korean with English abstract)
- Ritchie, A.M., 1963, Evaluation of rockfall and its control, Highway Research Board Record, Washington, 17, 13-28.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport 2019, Road safety facilities installation and management guidelines -Rock prevention facilities-. 12.
- Son, M. and Kim, I.S., 1994, Geological structures and evolution of the Tertiary Chongja basin, southeastern margin of the Korean peninsula. Economic and Environmental Geology, 27, 65-80. (in Korean with English abstract)
- Son, M., 1998, Formation and evolution of the Tertiary Miocene basins in southeastern Korea: Structural and paleomagnetic approaches. Ph. D. Thesis, Pusan National University, Busan, 233. (in Korean with English abstract)
- Son, M., Seo, H.J. and Kim, I.S., 2000. Geological structures and evolution of the Miocene Eoil Basin, southeastern Korea. Geosciences Journal, 42, 73-88.
- Son, M., Kim, I.S. and Sohn, Y.K., 2005. Evolution of the miocene waup basin, SE Korea, in response to dextral shear along the southwestern margin of the East Sea (Sea of Japan). Journal of Asian Earth Science, 25, 529-544.
- Song, C.W., Kim, H.J., Kim, J.S., Kim, M.C. and Son, M., 2015, Stratigraphic implication of the Daljeon Basalt in the Miocene Pohang Basin, SE Korea, Journal of the Petrological Society of Korea, 24(4), 323-335. (in Korean with English abstract)
- Stueve, A.M., Cock, S.D. and Drew, D., 2002, The Geotourism study: Phase I Executive Summary. National Geographic, Washington. D.C.