키르기스스탄 Dead Lakes 암석 애벌런치의 운동 특성과 편년*

오정식** · 성영배*** · 알렉산더 스트롬**** · 유병용*****

Kinematic Characteristics and Timing of Dead Lakes Rock Avalanche in Kyrgyzstan*

Jeong-Sik Oh** · Yeong Bae Seong*** · Alexander Strom**** · Byung Yong Yu*****

요약: 암석 애벌런치는 산사태의 다양한 유형 중에서도 가장 빠른 속도로 이동하며 규모가 큰 것으로 넓은 지역에 걸쳐 막대한 피해가 발생한다. 본 연구는 키르기스스탄 Dead Lakes에서 발생한 암석 애벌런치의 지형과 운동특성을 밝히고, 우주선유발 ¹⁰Be을 이용하여 발생시기를 규명하였다. Dead Lakes 암석 애벌런치는 산정부 기반암의 붕괴로 시작되었으며, 이로부터 기인한 암설은 두부내벽 최상단(headscarp crown)으로부터 암설사면 말단까지 길이 7.5km, 비고차 1,750m에 걸쳐 이동했다. 암설 공급원의 규모는 평면상으로 폭 2.7km, 길이 2.5km 규모이다. 암설퇴적층의 두께는 평균 150m로 14.65km²의 면적에 걸쳐 분포하며 추정된 부피는 약 2.2km³이다. 4개의 구간에서 상이하게 진행된 고에너지 운동은 회전암체(toreva block), 암설능선(debris ridges), 제방 (levees), 선구조(linear structures), 단구(terraces), 암설구릉(hummocks)과 같은 독특한 산사태 지형들을 바탕으로 구분된다. ¹⁰Be 노출연대 측정을 통하여 밝혀진 Dead Lakes 암석 애벌런치의 발생시기는 48.3±2.4ka 무렵으로 확인되었으며, 단층 활동으로 인한 대규모 지진 발생이 발생원인으로 추정된다.

주요어 : 암석 애벌런치, 키르기스스탄, 지진, 우주선유발 동위원소 연대측정

Abstract : Rock avalanches are one of the fastest type of landslides and because of their magnitude and energy, can cause huge damage over large areas. The purpose of this study is to demonstrate the characteristics of morphology and kinematics of Dead Lakes rock avalanche, Kyrgyzstan and to provide the timing of its occurrence constrained by cosmogenic ¹⁰Be surface exposure dating. The Dead Lakes rock avalanche initiated with the collapse of the entire mountain slope up to its top, composed of bedrock, and moved for ca. 7.5 km with elevation decrease up to ~1750 m if measured from the headscarp crown to the deposit's tip. Its source zone is up to 2.7 km by 2.5 km in plan view. The deposits thickness is about 150 m on the average and its volume is ~2.2 km³ over the area of 14.65 km². Four different motion patterns evolved during high-energetic motion process can be revealed from the landslide-related landforms such as toreva block, debris ridges, levees, linear structures, terraces, and hummocks. The timing of occurrence of the Dead Lakes rock avalanche revealed by ¹⁰Be exposure dating was 48.3±2.4 ka, which was likely to be triggered by huge earthquake.

Key Words : Rock avalanche, Kyrgyzstan, Earthquake, Cosmogenic ¹⁰Be exposure dating

^{*}본 연구는 2018학년도 고려대학교 사범대학 특별연구비 지원을 받아 수행되었음(K1810581).

^{**}고려대학교 지리교육과 연구교수(Research Professor, Department of Geography Education, Korea University, ojs0201@korea.ac.kr)

^{***}고려대학교 지리교육과 부교수(Associate Professor, Department of Geography Education, Korea University, ybseong@korea.ac.kr)

^{****}러시아 지구역학연구센터 수문연구부 선임연구원(Chief Expert, Geodynamic Research Center, Branch of JSC, Hydroproject, Moscow, Russia, strom alexandr@yandex.ru)

^{*****}한국과학기술연구원 특성분석센터 가속기연구실연구원(Researcher, AMS Lab, Korea Institute of Science and Technology, injayu@gmail.com)

I. 서론

산사태(Landslide)는 중력 때문에 발생하는 암설의 집 단 이동 현상이며, 발생 원인과 운동 특성에 따라 다양한 유형으로 구분된다. 산사태는 한 가지 이상의 발생 인자 가 복합적으로 작용하는 경우가 많으나, 일반적으로 높 고 험준한 산악지역이나 몬순과 같은 강우의 영향이 큰 지역, 그리고 지각 응력의 축적과 해소로 인한 지진 발생 이 빈번한 지역에서 주로 발생한다(Keefer, 1984; Hewitt, 1988, Strom, 2013; Pánek, 2014). 이러한 관점에서 볼 때, 우리나라도 산사태의 발생가능성이 상당한 지역이 며, 2011년 7월 우면산과 춘천에서 동시 다발적으로 발 생한 산사태는 많은 인명과 재산 피해를 일으킨 대표적 인 예이다(기근도, 2012; 고석민 등, 2014).

산사태 중에서도 가장 빠른 속도로 이동하며 비교적 규모가 큰 형태의 운동은 암석 애벌런치이다. 물과 점토 와 같은 세립물질의 양이 적고, 수 m 이상 크기의 암설 이 주를 이루는 암석 애벌런치는 여러 가지 발생 인자 중에서도 주로 지진에 의한 강한 땅의 흔들림으로 발생 한다(Keefer, 1984; Havenith et al., 2003; Strom, 2013; Crosta et al., 2017). 또한 급속한 지반의 붕괴로 생성된 암설 내부에 다량의 공기가 갇히게 되면서 지표면과 암 설 사이의 마찰력을 감소시켜 이동 속도가 매우 빠르고, 비교적 먼 거리까지 이동하게 되므로 피해 범위가 큰 특 징이 있다(Shreve, 1959; Shea and van Wyk de Vries, 2008). 최근 한반도에서 더욱 빈번해지고 있는 여름철 극한강우(catastrophic rainfall) 현상과 함께 2016년 경주 (M, 5.8)와 2017년 포항(M, 5.4)에서 연이어 발생한 지진 의 관점에서 과거 산사태의 정확한 발생시기를 규명하 는 과정은 산사태 방재와 함께 예측이 어려운 지진 피해 예방 측면에서도 필수적인 연구이다. 그러나 과거에 발 생한 대규모 산사태의 발생시기 편년에 관한 연구는 여 전히 부족한 실정이다(Pánek, 2014).

산사태 연대측정에 관한 분석 기법은 21세기에 접어 들어 커다란 발전을 이루었으며, 세계 도처에서 발생한 산사태를 대상으로 현대적인 방식의 연대측정 결과물이 많이 누적되었다. Pánek(2014)에 따르면 950개 이상의 산사태 연대측정 데이터 가운데 700개(약 74%) 이상이 2000년대 이후에 발간된 결과물이다. 산사태 연대측정 에 활용되어온 분석 기법은 다양하지만 탄소연대측정법 이 전통적인 전략으로 주류를 이루고 있으며, 가장 최근 에 이르러서는 우주선유발 동위원소(cosmogenic nuclides: ³He, ¹⁰Be, ¹⁴C, ²¹Ne, ²⁶Al, ³⁶Cl, ⁴¹Ca, ⁵³Mn, ¹²⁹I)를 활용한 연대측정법이 크게 주목 받고 있다. 우주선유발 동위원 소를 이용한 지표면의 연대측정 기술은 방사성탄소 연대 측정, 광여기 루미네선스(Optically Stimulated Luminescene)와 함께 지구표면과학(Earth Surface Sciences)에서 가장 많이 사용되는 연대측정방법론으로 자리잡았다(Gosse and Phillips, 2001; Cockburn and Summerfield, 2004; 성영 배, 2007; Granger *et al.*, 2013; 성영배·유병용, 2014).

산사태 연대측정은 활용되는 방법에 따라 상이한 지 형을 대상으로 한다. 탄소연대측정은 산사태로 인하여 직·간접적으로 형성된 다양한 퇴적층(예: 암설퇴적층, 호수퇴적층) 내부에 존재하는 화석이나 유기물을 대상 으로 하며, 여기서 획득한 결과는 일반적으로 퇴적층의 매몰(형성) 시기를 지시한다(Pánek, 2014). 이 방법은 다른 연대측정법에 비해서 시료의 획득 가능 범위가 넓 고, 비교적 정밀한 연대측정 결과(수백~수십년 단위)를 획득할 수 있으나, 측정 가능 상한연대(5만년 이하)가 제 한적이라는 단점 또한 존재한다(Roux *et al.*, 2009; Pánek, 2014).

전통적인 방식의 탄소연대측정법과 달리 우주선유발 동위원소를 활용한 연대측정법은 측정 가능 상한연대 (¹⁰Be의 경우 최대 250만년)가 높아 보다 오래된 산사태 의 발생시기와 발생횟수(빈도), 고환경의 변화를 추적하 는데 유용하다(Cockburn and Summerfield, 2004; 성영 배·유병용, 2014; Pánek, 2014). 또한 연대측정결과가 산사태로 인하여 새롭게 노출된 기반암과 기반암으로부 터 분리·이동한 암괴의 노출연대를 지시하므로 산사태 의 실제 발생시기와 가장 가까운 연대를 획득할 수 있다 (Roux et al., 2009). 그러나 기반암이나 암괴로부터 획득 한 시료가 갖는 불확실성(예, 분석대상 암괴가 일시적으 로 피복되어 발생하는 노출연대의 과소 추정, 분석대상 암괴가 기반암으로부터 분리되기 이전에 우주선에 노출 된 시간으로 인한 노출연대의 과대 추정)이 항상 존재하 므로 분석 대상의 선정과 시료의 처리 과정에 상당한 주 의를 요한다(Seong et al., 2016).

본 연구는 판의 충돌로 인한 대규모(M 6.0 이상) 지진 이 빈번하게 발생하는 중앙아시아의 키르기스스탄 Dead Lakes에서 관찰되는 암석 애벌런치 지형과 운동 특성을 밝히고, 산사태 편년 연구에 있어서 최근 주목받는 우주 선유발 ¹⁰Be을 이용하여 산사태의 발생시기를 규명하였 다. 아울러, 지형학적 증거와 편년 자료를 기반으로 Dead Lakes 암석 애벌런치의 발생 원인을 추론하고자 하였다.

II. 연구지역

연구지역인 Dead Lakes 암석 애벌런치(Dead Lakes rock avalanche, 이하 DLR)는 키르기스스탄(Kyrgyzstan)의 수 도 비슈케크(Bishkek)로부터 남서쪽으로 약 200km 떨어 진 곳에 위치하며, 행정구역상으로 잘랄아바트주(JalalAbad Oblast)에 속한다. DLR 일대는 텐산(Tien Shan) 산 맥의 지맥이자 키르기스스탄 서부지역을 남동-북서 방 향으로 가로지르는 페르가나(Fergana) 산맥의 중심에 위치하여 해발 3,000m 이상의 높고 험준한 산악지형을 이루고 있다.

DLR은 연구지역 일대에서 발생한 가장 큰 규모의 산 사태 중 하나로 카라수(Kara-suu)강의 지류인 카라콜 (Karaköl) 계곡의 상류(41.50° N, 72.71° E)에서 발견되었 으며, 위성영상에서도 산사태 지형이 뚜렷하게 인지된 다(그림 1). 'Dead Lakes'라는 독특한 지명은 DLR의 대규



그림 1. 연구지역의 위치와 위성영상

^{*} Google Earth 위성영상을 활용하여 작성.

모 암설사면에 형성된 여러 개의 작은 호수에 물고기가 부족하여 현지인들이 '죽은 호수'라 부르게 되면서 만들 어진 명칭이다(Strom and Korup, 2006). 크고 작은 약 10여 개의 호수 중에서 큰 규모에 해당하는 호수는 Chongkiol dead lake(약 95,000㎡)와 Kichikiol dead lake(약 55,000㎡)라는 명칭으로 불린다(그림 1, 그림 2 의 C, D).

암체의 붕괴가 시작된 두부내벽(headscarp)을 포함하

는 산정부 일대의 기반암은 고생대 편암과 초고철질 화 성암으로 구성되어 있어 DLR을 둘러싼 주변의 기반암 (퇴적암류, 화성암류)과 국지적으로 상이하다. 따라서 두부내벽의 붕괴로 형성된 암설의 이동 방향과 범위는 연구지역의 지표를 피복한 사면 퇴적물(암설 또는 대형 암괴)의 분포 특징을 바탕으로 뚜렷하게 구분된다(그림 2의 E~G). DLR은 산사태로 형성된 대규모 암설사면에 서 주로 열을 이루며 발달하는 가로능선(transverse ridge)



그림 2. Dead Lakes 암석 애벌런치에서 관찰되는 주요 지형

출처 : 2018년 6월 필자 촬영.

* A는 암석애벌런치가 발생한 두부내벽과 이동방향, B는 암석애벌런치의 좌측부와 원거리부분, C는 작은 호수, D는 큰 호수, E는 DIR-2 시료, F는 DIR-4 시료, G는 하류부 하천을 매몰시킨 암설의 경계부. 과 세로능선(longitudinal ridge)이 잘 관찰되며(Shea and van Wyk de Vries, 2008; Wang et al., 2018), 능선 사이 에는 작은 호수와 우곡의 발달이 양호하다(그림 2의 A, B). DLR의 암설사면 표층에는 산사태 발생당시 두부내 벽의 기반암으로부터 떨어져 나온 수 m 이상 직경의 대 형 암괴(석영 암맥을 포함한 편암류)가 쉽게 관찰된다 (그림 2의 E, F). 이같은 암괴는 산사태의 발생 시기와 주기를 밝히고자 하는 최근의 연구에서 많은 관심을 받 고 있으며, 특히 우주선유발¹⁰Be을 이용한 암석의 노출 연대 측정에 유의미한 정보를 제공한다(Pánek, 2014). DLR의 암설사면 말단부를 통과하는 카라콜 강 양안에는 30m 내외의 하상비고를 갖는 단구와 협곡이 모식적으로 나타난다. 이 지형은 빠른 속도로 이동한 다량의 암설이 계곡을 막고, 이후 지속적인 하천침식으로 형성되었다. 단구면에 분포하는 동일한 유형의 암괴는 분리된 지표 면이 과거에는 하나로 이어져 있었음을 보여준다(그림 2의 G).

III. 연구방법

1. 현장조사 및 신사태 지형 동정

원지형의 보존성이 높은 암석 애벌런치의 경우 두부 내벽, 암설사면 표층의 대형 암괴, 소규모 능선과 단층, 그리고 습곡과 같은 다양한 지형학적 특징들을 잘 관찰 할 수 있다. 이러한 지형들은 암석 애벌런치의 발생 원 인과 발생 시기, 운동 특성 등을 규명하는데 있어서 중요 한 증거로 활용된다(Shea and van Wyk de Vries, 2008; Pánek, 2014; Wang et al., 2018). DLR에 분포하는 이러 한 지형을 분석하는데 있어서 DEM(Digital Elevation Model) 구축과 활용은 매우 효과적일 수 있으나, 연구지 역을 대상으로 제공되는 ASTER(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) 및 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 자료의 공간 해상도 (30m/pixel)는 암설사면에 발달한 소규모 능선과 선구조 (linear structure)와 같은 저기복(상대비고 30m 이하) 지 형의 정밀 분석에는 부적합하다. 따라서 본 연구는 구글 어스에서 제공하는 위성영상, Strom and Korup(2006)에 서 제시된 항공사진, 그리고 GPS를 활용한 현장 측량 결 과를 토대로 지형 동정과 분석을 진행하였다. 아울러,

DLR로 인해 발생한 대규모 암설의 이동 방향과 분포 범 위를 확인하기 위해 기반암으로부터 분리·이동된 암설 의 분포를 조사하였다.

2. 우주선유발 ¹⁰Be 연대측정

DLR의 ¹⁰Be 연대측정을 위해 산사태로 인하여 형성된 암설사면에 분포하는 대형 암괴(직경 3m 이상)의 표면 으로부터 연대측정용 시료(DLR-1~DLR-5)를 획득했다 (그림 1과 그림 2의 E, F). 암괴는 석영맥(quartz vein)이 풍부한 편암으로 이루어져 있으며, 시료는 암괴 최상부 의 신선한 표면으로부터 약 5cm 두께로 700g씩 획득했 다. 암괴 주변 지형에 의한 차폐 효과를 보정하기 위해 10° 간격으로 스카이라인을 측정하였으며, 연구지역의 기상 데이터를 사용하여 적설량 보정을 실시했다. 시료 채취에 활용한 암괴는 산사태 발생이후 매몰이나 재이 동의 발생 가능성이 낮고, 비교적 안정적인 지표상에 놓 인 것으로 선정했다.

획득한 시료는 고려대학교 우주선유발 동위원소 실험 실에서 다음과 같은 물리·화학적 전처리를 진행하여 가속기질량분석(Accelerator Mass Spectrometry, 이하 AMS) 타겟을 제작했다. 먼저 시료를 잘게 분쇄한 후 체 질을 통해 250~500µm의 입자를 분리 후, 6N 염산과 과산 화수소를 섞은 용액에 넣어 유기물과 탄산염 등의 이물 질을 제거했다. 이물질 제거가 완료된 시료는 5% 불산 과 1% 질산 혼합액을 사용하여 초음파 세척기에서 10시 간 이상 가열을 반복(불산의 농도를 1%까지 낮추어 가 면서 3~4회 반복) 실시하여 석영을 제외한 물질을 제거 했다. 이렇게 획득한 순수한 석영은 테플론 비커에서 불 산을 이용해 녹이며, 이때 석영에는 ⁹Be(carrier)이 존재 하지 않기 때문에 일정한 양(약 300~400µg)의 ⁹Be을 넣 어준다. 석영을 모두 녹인 후 이온 크로마토그라프(Ion chromatograph)를 이용하여 Be만 분리하고, 고온의 오 븐에 넣어 산화물 형태로 만들어 타겟(Be의 경우 Nb (Neobium)을 1:1 비율로 섞음)을 제작한다. 제작된 타겟 은 한국과학기술원 가속기연구동에서 AMS 측정(¹⁰Be/⁹Be) 하였다. AMS 측정 결과는 다음 식 (1)의 방정식을 이용 해 암괴 표면의 노출연대로 계산할 수 있다(Lal, 1991).

$$N_{t} = P_{0}(1 - e^{-(\lambda + \varepsilon/z^{*})t}) / (\lambda + \varepsilon/z^{*})$$
(1)

여기서 N_t는 장시간 노출된 후(t) 측정된 농도(atoms g⁻¹ yr⁻¹)이며, P₀는 암석 표면에서의 ¹⁰Be 생성량(atoms g⁻¹ yr⁻¹), λ는 ¹⁰Be의 붕괴상수(yr⁻¹), ε는 침식률(cmy⁻¹) 그리 고 z*은 깊이에 따른 생성량으로 Λ/ρ와 같이 정의되며 Λ는 감쇠계수(160 gcm⁻²), ρ는 암석의 밀도(2.7g/cm⁻³)를 의미한다.

IV. 결과

1. 암석 애벌런치의 규모와 주요 지형

DLR은 해발 3,000m 내외의 산정부와 능선의 기반암 붕괴로 시작되었으며, 이로 인해 거대한 말발굽 형태의 두부내벽이 형성되었다. 기반암의 붕괴와 함께 생성된 다량의 암설은 산정부 보다 최대 1,750m 이상 낮은 카라 콜 계곡을 향해 빠른 속도로 이동하며 길이 약 7km에 달하는 대규모 암설사면을 형성했다(그림 1과 그림 2의 A, B). 두부내벽의 규모는 둘레 6.6km, 최대폭(동서) 2.7km, 최대길이(남북) 2.5km이며, 최대 비고는 약 500m에 이른다. 암설사면의 면적은 14.65km²이며, 두께 는 평균 150m로 추정된다. 암설사면의 면적과 두께를 바탕으로 산출된 부피는 약 2.2km³이다.

총 4개의 측선으로부터 획득한 DLR의 단면에서는 암 설의 이동방향과 평행하거나 직교하는 주향의 소규모 능선과 급경사의 두부내벽, 그리고 완경사를 이루는 암 설사면 상단과 경사가 급격하게 변화(완경사→급경사) 하는 암설사면 말단부의 기복이 잘 나타난다(Hewitt *et al.*, 2008; Shea and van Wyk de Vries, 2008; Dufresne and Davies, 2009; Wang *et al.*, 2018)(그림 3). 특히, 종 단면 A-A'는 대규모 산사태의 암설사면 말단부에서 특징 적으로 발달하는 깊은 협곡과 단구(또는 잔류 암설사면: remnant debris slope)가 관찰되며(Hewitt, 2009), 종단 면 B-B'는 두부내벽 하단에 형성된 대규모 회전암체가 뚜렷하게 관찰된다(그림 3).

위성영상 분석과 현장조사 결과 앞서 언급한 것을 포 함하여 보다 다양한 유형의 산사태 지형이 분포하는 것 을 확인했다(그림 4). 이들 중 DLR의 운동특성을 잘 반 영하여 나타나는 주요 지형과 그 특징을 살펴보면 다음 과 같다.

1) 회전암체

회전암체(toreva block)는 암체의 내부구조가 변형되 지 않고 성층면을 따라 회전운동하여 형성된 독특한 산 사태 지형이다(Reiche, 1937; Wang *et al.*, 2018). 그 명 칭은 미국 애리조나주의 Toreva 지역에서 유래하였으 며, 초창기에는 하부 연암층의 침식으로 상부 경암층이 붕괴되면서 형성한 슬라이드 구조에 사용되었으나, 최 근에는 성인보다 형태를 강조하여 사용되었으나, 최 근에는 청인보다 형태를 강조하여 사용된다. DLR은 두 부내벽의 하단에 3개의 회전암체가 분포하며, 인장력이 우세한 환경(extension dominant)에서 정단층의 형태로 미끄러져 내린 특성이 나타난다(그림 3과 그림 4).

2) 암설능선

암설능선(debris ridge)은 암설의 이동방향과 이에 작 용하는 응력의 관계에 따라 상이한 유형으로 발달한다 (Shea and van Wyk de Vries, 2008; Dufresne and Davies, 2009; Wang *et al.*, 2018). DLR에서 관찰되는 암설능선 은 크게 세 가지 유형으로 구분된다. 암설의 이동 방향 과 능선의 주향이 일치하는 세로능선은 암설사면 중앙 부에 분포하며 대규모(장축 170~1,050m, 단축 35~300m, 비고 10m 내외)로 나타난다. 주향이 암설의 이동 방향과 직교하는 가로능선은 두부내벽과 인접한 암설사면 상단 에 소규모(장축 55~520m, 단축 17~120m, 비고 10m 내 외)로 밀집 분포한다. 암설사면 상단과 중앙부에는 소규 모의 안행상능선(echelon-like ridge 또는 oblique ridge) 이 관찰된다(그림 4).

3) 제방

산사태 제방(levee)은 세로능선과 형태가 흡사하지만 형성 원인과 분포 위치가 상이한 지형이다. 제방은 암설 사면의 좌우측 경계를 따라 긴 대상의 형태로 발달하는 것이 일반적이며, 발달 지점의 특성을 강조하여 'lateral ridge'로도 불린다(Dufresne and Davies, 2009; Wang *et al.*, 2018). DLR의 제방은 암설사면의 중앙부와 말단의 좌우측 경계를 따라 단속적인 분포를 보인다. 이러한 단 속적 형태는 제방 형성이후 진행된 침식과 삭박의 결과 물로 해석된다(그림 4).

4) 선구조

선구조(linear structure)는 DLR 암설사면의 전역에 걸 쳐 관찰되지만, 주로 두부내벽과 인접한 암설사면의 상



그림 3. Dead Lakes 암석 애벌런치의 지형 단면

* A는 A-A' 지형단면; B는 B-B' 지형단면; C는 C-C' 지형단면; D는 D-D' 지형단면.

단부에 집중적으로 분포하며, 1m 내외의 낮은 기복으로 수 미터에서 수십 미터 길이로 관찰된다. 선구조의 주향 은 암설의 이동 방향과 직교하거나 비스듬한 형태를 보 인다. 선구조의 형성 원인은 다양하나 주로 지진 활동으 로 인한 지표파열(surface rupture)과 같이 암설사면에 작용하는 응력과 밀접한 관련이 있다(Shea and van Wyk de Vries, 2008; Stumpf *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2018).

5) 단구

사면을 따라 이동해온 암설이 계곡을 막아 형성된 산



그림 4. 산사태 지형의 유형과 분포, 운동 특성

* ArcGIS 10.1을 활용하여 결과를 추출.

사태 댐은 비교적 느슨한 퇴적물의 특성으로 말미암아 하천에 의한 침식이 빠르게 진행된다(Korup, 2002; Strom, 2015). 이 과정에서 하천 양안에 침식되지 않은 잔존 암 설사면이 발달하는데, 그 형태와 형성 원인이 일반적인 충적단구와 매우 흡사하다. DLR의 암설사면 말단부는 카라콜 강의 빠른 침식으로 만들어진 10~30m의 깊고 가 파른 협곡이 발달했으며, 협곡 양안으로 단구(너비 30~70m, 길이 100~360m)가 단속적인 분포를 보인다. 산사태로 인하여 형성된 단구는 구성물질과 발달 특성을 반영하 여 '잔류 암설사면(remnant debris slope)' 내지 '잔류 산 사태 댐(remnant landslide dam)'으로 불리기도 한다.

6) 암설구릉

암설구릉(hummock)은 암설사면 말단에 주로 분포하

며, 두께(상대비고) 수 미터에서 수십 미터 규모의 암설 퇴적물로 이루어진 원형 내지 타원형의 구릉이다(Shea and van Wyk de Vries, 2008; Dufresne *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018). 암설구릉은 다양한 크기의 것들이 군집 분 포하는 것이 특징이다. DLR의 암설사면 말단에도 다양 한 규모의 암설구릉이 넓은 범위에 걸쳐 밀집 분포하는 것이 확인된다. 이들은 높이가 3~20m이며, 규모가 작을 수록 원형에 가깝고 규모가 큰 것은 타원형 내지 보다 불규칙한 형태를 보인다. 해당 지형은 주로 암설의 이동 이 종말 단계에 이르러 전진 속도가 급격히 감소하여 측 면으로 확산되는 속도가 상대적으로 빨라질 때 잘 형성 된다(Yoshida and Sugai, 2010; Dufresne *et al.*, 2016). 총 4개의 측선을 대상으로 획득한 지형 단면으로 A-A'

와 B-B'는 종단면, C-C'와 D-D'는 횡단면을 나타낸다(그



그림 5.¹⁰Be 노출연대의 확률밀도 분포 곡선

* A는 전체 시료로부터 획득한 ¹⁰Be 노출연대의 확률밀도 분포 및 평균 연대(n=5); B는 이상치(outlier)를 제외(10)한 나머지 시료의 확률밀도 분포 및 평균 연대(n=4).

림 3). a-a' 측선은 A-A'의 암설사면 말단부를 확대한 것 으로 암석 애벌런치에 의해 생성된 암설이 계곡의 반대 편 사면을 타고 올라간 흔적이 관찰되며, 카라콜 강의 침식으로 형성된 단구를 확인할 수 있다.

항공사진과 위성영상 판독 및 현장조사를 바탕으로 연구지역에 분포하는 산사태 지형의 유형과 분포를 지 도화하였다. 암석 애벌런치의 운동 특성은 두부내벽과 암설사면에 분포하는 지형에 고스란히 반영되어 있다. DLR의 운동 특성은 산사태 지형의 유형과 분포를 토대 로 크게 4개의 하위 구역과 운동 양상으로 구분된다.

2.¹⁰Be 노출연대

DLR의 암설사면에 분포하는 편암 내지 초고철질 화성 암 암괴는 두부내벽의 붕괴와 함께 생성된 암설이 이동 및 퇴적된 것으로 모두 동일한 기원지를 갖는다. 따라서 암괴의 노출연대(exposure age)를 밝히면, 암설사면의 형성시기(최소연대) 즉, DLR의 발생시기를 알 수 있게 된다. 암석 애벌런치는 갑작스러운 사면의 붕괴 그리고 이로 인하여 생성된 물질의 빠른 이동과 퇴적을 야기하 므로 현장에서 관찰되는 암괴의 노출연대는 곧 지형면 의 형성시기를 지시하는 것으로 볼 수 있다(Roux *et al.*, 2009; Pánek, 2014).

식 (1)에 제시된 분석에 기반하여 총 5개(DLR-1~DLR-5) 의 시료로부터 ¹⁰Be 노출연대를 측정하였으며, 그 결과는 다음과 같다. 암괴의 노출연대는 45.7±2.2ka에서 79.6±3.9 ka의 범위로 확인되며(표 1), 획득한 값의 평균은 56.9± 2.8ka(n=5)이다. 이상치(outlier)로 해석되는 DLR-5의 결과 값을 제외한 나머지 시료들의 노출연대는 45.7±2.2ka에서 59.9±2.4ka의 범위로 확인되며, 이들의 평균값은 보다 젊 은 51.2±2.0ka(n=4)를 지시한다(그림 5).

시료 채취에 활용한 암괴는 DLR 암설사면 중앙부의 세로능선상에 인접 분포(그림 1)하는 것들이므로 본 연 구에서 획득한 ¹⁰Be 노출연대는 시공간적으로 잘 조직된 결과로 볼 수 있다. 특히, DLR-2와 DLR-3가 1백년 단위 까지 일치하는 측정값을 나타내므로 연구지역 암괴의 실제 노출연대는 이들 값을 중심으로 가장 높은 신뢰도 를 갖는 것으로 해석된다. 이러한 해석은 그간 세계 각 지에서 실시된 다수의 연구 사례를 통해서도 확인 가능 하다. 대개 암설사면으로부터 획득한 ¹⁰Be 노출연대는 넓은 시간대(수 만년~수 십만 년 이상)에 걸쳐 분산 분 포하는 경우가 많다(Pánek, 2014). 이는 산사태로 인한 암설사면이 비교적 빠른 침식과 삭박을 경험하므로 원 지형의 보존이 쉽지 않기 때문이다(Hewitt *et al.*, 2008; Hewitt, 2009).

V. 논의

1. 암석 애벌런치의 운동 특성

DLR 암설사면의 특징 중 하나는 산사태로 발생한 암 설의 일부가 분수계를 이루는 능선을 넘어 반대편 계곡 까지 분포한다는 점이다(그림 4). 이러한 암설사면의 분

Sample	Latitude	Longitude	Elevation	Thickness*	Producti	ion Rate	Shielding	Quartz****	Be Carrier*****	¹⁰ Be/ ⁹ Be******,******	¹⁰ Be Conc.******, *******	Exposure Age*******,
	(°N, DD)	(W, DD)	(m)	(cm)	Spallation**	Muons***	Factor****	(g)	(g)	(10 ⁻¹³)	(10 ⁶ atoms g ⁻¹)	******** (ka)
DLR-1	41,503	72,703	2173.0	5.0	21,87	0.358	0.9967	20,811	1,179	5.292 ± 0.25	1.004 ± 0.048	45.7 ± 2.2
DLR-2	41.503	72,702	2176.0	5.0	21,92	0.359	0.9967	20,792	1.143	5.934 ± 0.29	1.092 ± 0.053	49.6 ± 2.4
DLR-3	41,503	72,702	2175.0	5.0	21,90	0.358	0.9967	22,631	1,143	6.448 ± 0.31	1.091 ± 0.052	49.6 ± 2.4
DLR-4	41,504	72,702	2171.0	5.0	21.84	0.358	0.9967	20,262	1,138	6.962 ± 0.27	1.309 ± 0.051	59.9 ± 2.4
DLR-5	41,504	72,702	2172.0	5.0	21,86	0.358	0.9967	21,165	1.146	9.56 ± 0.45	1.734 ± 0.082	79.6 ± 3.9

표 1. ¹⁰Be 연대측정 결과

* Tops of the boulders' exposed surfaces.

** Constant production rate model of Stone (2000) was used for calculating.

*** Constant production rate model of Heisinger et al. (2002a; 2002b) was used for calculating.

**** Factors for correcting geometric shielding measured on intervals of 10°.

^{******} Density of rock (2.7 g cm⁻³) was used.

******* Concentration of carrier was 501.3 ppm.

******* Ratios of ¹⁰Be/^bBe were normalized with 07KNSTD reference sample 5-1 (2.71E-11 ± 9.58E-14) of Nishiizumi *et al.* (2007) and 10Be half-life of 1.38E6 (Chmeleff *et al.*, 2010).

******** Uncertainties are calculated at the 1σ confidence level.

******** A mean value of process blank samples (4.8E-15 \pm 3.2E-15) was used for correction of background.

******** Ages are calculated assuming zero erosion with using CRONUS-Earth online calculator (2,3) of Balco et al. (2008).

포 양상은 암설이 매우 빠른 속도로 이동하였다는 것을 뜻한다. 아울러 카라콜 계곡의 반대편 급사면을 피복하 고, 계곡의 상하류로 넓게 퍼져 나간 암설의 분포 또한 빠른 이동속도로 인하여 형성되는 암설사면의 주요한 특징 중 하나이다(Strom and Korup, 2006; Hewitt, 2009).

암설사면에 발달한 지형 유형과 공간적 분포 양상은 DLR 발생 당시 암설의 운동 특성을 잘 반영하고 있다. 곡두내벽과 암설사면의 규모, 산사태 지형의 유형별 분 포를 바탕으로 DLR의 운동 양상은 크게 4개(Subzone I-Subzone IV)의 구간으로 분류된다.

Subzone I은 기반암으로부터 암체가 분리된 곡두내벽 에 해당하며, 암설사면을 구성하는 물질의 공급원이다. 기반암의 붕락으로 인하여 분리된 암체가 잘게 파쇄되 어 대량의 암설이 생성되는 1차 붕락이 발생하고, 이후 분리된 암체의 내부구조 변화없이 미끄러짐과 회전 운 동으로 이동하여 크기가 다른 3개의 회전암체를 형성한 2차 붕락이 발생했다(Reiche, 1937; Wang *et al.*, 2018). Subzone I의 물질 이동은 지표면과 수직 또는 수평 방향 으로 인장력이 작용한 환경(extension-dominated)에서 발생했다(Shea and van Wyk de Vries, 2008; Wang *et al.*, 2018)(그림 6의 A).

Subzone II는 두부내벽으로부터 발생한 암설이 사면 아래쪽으로 빠르게 이동하는 구간이다. 해당 구간의 암 설사면이 보이는 가장 큰 특징은 소규모의 가로능선과 선구조의 밀도 높은 분포이다(그림 4). 산사태로 인해 형성된 암설사면에서 관찰되는 가로능선은 일반적으로 압축력이 주도적인 환경(compression-dominated)을 의 미한다(Shea and van Wyk de Vries, 2008; Wang *et al.*, 2018). 급경사의 두부내벽으로부터 생성된 암설이 완경 사 사면을 만나면서 이동방향의 후면에 다량의 암설이 집적되고 강한 압축력이 작용한다. 이러한 응력의 영향 으로 암설 내부에 다수의 스러스트 구조가 발달하게 된 다(그림 6의 A).

Subzone III는 Subzone II와 마찬가지로 암설의 이동 구간에 해당한다. 그러나 해당 구역은 사면 경사를 따라 암설의 이동 속도가 현저히 빨라지고, 이에 따라 암설 내 부에 작용하는 응력은 인장력이 주도적인 환경(extensiondominated)으로 변화한다(Shea and van Wyk de Vries, 2008; Dufresne and Davies, 2009; Wang *et al.*, 2018)(그 림 6의 B). 세로능선은 빠른 속도로 암설이 이동하는 구 간에서 발달하는 지형으로 가로능선에 비해 규모가 크 고 연속성이 뚜렷한 것이 특징이다. DLR의 우곡 하계망 은 세로능선의 배열에 지배되고 있다.

Subzone IV는 DLR 암설사면의 말단부에 이르는 구간 으로 암설의 이동과 확산이 함께 진행되었다. 깊은 협곡 사면에서 발생한 DLR의 특성으로 말미암아 대개의 암석



그림 6. 구간별 응력과 운동 특성 개념도 * A와 B는 암설사면의 종단면에서 관찰되는 응력의 방향과 운동 양상, C는 암설사면에 작용한 응력의 방향을 평면상에 도해.

애벌런치에 비해 암설의 확산 면적은 좁은 편이다(Hewitt, 2015; Wang *et al.*, 2018). 해당 구역에서 암설의 운동 특성은 암설구릉 지형을 통해서 추론할 수 있다. 결과에 서 언급한 바와 같이 암설구릉은 암설의 전진 속도(사면 경사 방향) 보다 확산 속도(사면경사와 수직 방향)가 빨 라지고, 그로 인해 압축력이 주도하는 환경으로 변화하 는 과정에 형성된다(Yoshida and Sugai, 2010; Dufresne *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018). 암설사면의 좌우측 경 계에서 주로 관찰되는 제방은 암설의 확산과 동시에 마 찰력의 증가로 형성되는데, 형태적으로 세로능선과 흡 사하지만 작용하는 응력은 인장력이 아닌 압축력이 주 도 한다는 점에서 전혀 다른 지형으로 해석된다(Dufresne and Davies, 2009).

2. 발생시기와 원인

DLR의 암설사면에 분포하는 암괴로부터 획득한 ¹⁰Be 노출연대는 45.7±2.2ka에서 79.6±3.9ka의 범위를 보인 다. 이러한 결과는 산사태가 2차례 이상 다중발생(multiple occurrence)한 것으로 해석될 수도 있다. 그러나 암설사 면의 지형과 암괴가 위치한 능선의 형태를 고려할 때, 한 차례 이상의 산사태 발생 흔적이 나타나지 않으므로 다중발생을 지시하는 결과로 보기 힘들다.

연대측정 결과를 확률밀도분포곡선(그림 5)으로 표현 하면 DLR-4와 DLR-5의 시료에서 획득한 ¹⁰Be 노출연대 가 나머지 값(DLR-1~DLR-3)으로부터 떨어져 분포하는 것이 확인된다. 발생 기원이 동일한 암괴로부터 획득한 ¹⁰Be 노출연대가 이와 같은 차이를 보이는 이유는 DLR-4 와 DLR-5에 해당하는 암괴의 표면이 기반암으로부터 분 리되기 이전 햇빛에 노출되었던 시기가 있었음을 지시 한다. 따라서 가장 신뢰도 높은 DLR의 발생시기는 DLR-1~DLR-3에서 획득한 값(45.7±2.2ka~49.6±2.4ka) 의 평균인 48.3±2.4ka(MIS 3) 내외의 시기로 볼 수 있다.

신사태의 발생 원인은 다양하고 복잡하지만, 주로 극한 강우(catastrophic rainfall)나 지진으로 인하여 발생하는 것들이 많다(Keefer, 1984; Hewitt, 1988, Strom, 2013; Pánek, 2014). DLR이 발생한 무렵인 MIS 3 시기는 키르기스스탄 남부의 텐산 산맥을 포함한 중앙아시아 산악지대에서 한



그림 7. 키르기스스탄 및 인접지역 진앙 분포 및 지진 규모(1900.1.1-2018.6.1) * 지진관측자료(USCS)와 단층자료(USCS), Korjenkov et al.(2012)의 연구를 바탕으로 재구성.

** 좌측 상단 범례에서 M은 지진의 규모를 의미.

차례 이상 빙하의 확장이 있었으며, 전지구적으로는 소규 모 냉각기로 북반구 빙상의 확장이 발생한 시기이기도 하 다(Abramowski et al., 2006; Koppes et al., 2008). MIS 3 동안 진행되었던 키르기스스탄 텐산 산맥의 빙하 확장 은 지역적 기온 하강보다 강수량의 변화에 크게 반응했으 며, 당시 연구지역 일대의 해발 3,000m 이상 지역은 강수 의 대부분이 강설의 형태로 발생했다(Koppes et al., 2008; Havenith et al., 2015). 또한 산악지역에서 대규모 산사태 는 일반적으로 암설이 계곡을 가로막아 산사태 댐을 형성 하게 되고, 이로 인하여 일시적(또는 영구적)인 호소가 만 들어지는 경우가 많다(Costa and Schuster, 1988; Korup, 2002; Strom, 2015), 특히, 강수량이 많은 지역에서 산사 태 댐과 산사태 댐으로 인한 호수가 형성될 경우에는 댐 을 이루고 있는 퇴적물의 전단응력이 약한 상태이므로 갑 작스러운 댐의 붕괴와 홍수(Landslide-dammed Lake Outburst Flood, 이하 LLOF)가 빈번하게 발생한다(Costa and Schuster, 1988; Gupta and Sah, 2008) 그러나 DLR과 접한 카라콜 계곡 일대에서 호소의 형성이나 LLOF의 발 생 흔적은 관찰되지 않는다.

위와 같은 두 가지 근거를 토대로 볼 때, DLR의 발생 원인은 극한강우 보다 연구지역과 인접한 곳의 지진으 로 인한 산사태일 가능성이 높다. 대규모(M 7.0 이상) 지 진으로 인한 산사태는 진앙으로부터 400km 이상 떨어 진 곳에서도 발생한다(Bull and Brandon, 1998). DLR의 북동쪽으로 약 30km 떨어진 곳에는 N55°-66°W 주향의 Talas-Fergana 단층이 통과하는데, 이 단층은 우수향 주 향이동단층으로 수백 킬로미터에 걸쳐 키르기스스탄을 남북으로 가로지르는 대규모 활성단층이다(Korjenkov *et al.*, 2012; Korzhenkov *et al.*, 2014)(그림 7).

Talas-Fergana 단층은 홀로세 이후 최소 네 시기 이상 의 활발한 움직임이 있었던 것으로 확인되며(Korjenkov *et al.*, 2012), 계기관측이 시작된 1900년 이후 텐산과 페 르가나 산맥 일대에서 발생한 수백 건의 산사태는 지진 으로 인해 유발된 산사태로 진앙으로부터 수십 내지 수 백 km 이내에서 분포한다(Havenith *et al.*, 2003; Havenith *et al.*, 2015). 1900년 이후 연구지역으로부터 400km 이 내(M 7.0 이상 지진의 산사태 발생가능 범위: Bull and Brandon, 1998) 지역에서 발생한 M 7.0 이상의 지진은 총 9회에 달하며, 이들 중 1946년(M 7.5)과 1992년(M 7.3) 에 발생한 지진은 연구지역과 직선거리로 불과 100km 이내 지역에서 발생한 강진이다(USGS)(그림 7). 두 지진 으로 인해 진앙과 인접한 지역에서는 수십 건의 크고 작 은 산사태가 관측되었다(Havenith *et al.*, 2006; Havenith *et al.*, 2015).

따라서 DLR은 가장 인접한 활성단층인 Talas-Fergana 단층 또는 텐산 및 페르가나 산맥에 분포하는 활성단층

감사의 글

현장조사에 동행해서 많은 도움을 준 이수용 군에게 감사의 마음을 전합니다.

참고문헌

- 고석민·이승우·윤찬영·김기홍, 2014, "우면산 산사태 발 생 지점의 지형분석," 한국측량학회지, 32(1), 55-62.
- 기근도, 2012, "이상기후와 우리나라의 산사태," 기후연 구, 7(2), 119-135.
- 변종민·성영배, 2015, "인류세 이전 토양생성률과 20세기 후반 토양유실률 비교를 통한 토양경관 지속가능성 전망," 대한지리학회지, 50(2), 165-183.
- 성영배, 2007, "복수의 방사성 우주기원 동위원소를 이용 한 매몰 연대측정의 가능성 탐구: 전곡현무암과 백 의리층을 사례로," 한국지형학회지, 14(2), 1-7.
- 성영배·유병용, 2014, "우주선유발 동위원소를 이용한 지 표면의 연대측정: 국내사례를 중심으로," 암석학회 지, 23(3), 1-12.
- Abramowski, U., Bergau, A., Seebach, D., Zech, R., Glaser, B., Sosin, P., Kubik, P.W., and Zech, W., 2006, Pleistocene glaciations of Central Asia: Results from ¹⁰Be surface exposure ages of erratic boulders from the Pamir (Tajikistan), and The Alay-Turkestan range (Kyrgyzstan), *Quaternary Science Reviews*, 25, 1080-1096.
- Balco, G., Stone, J.O., Lifton, N.A., and Dunai, T.J., 2008, A complete and easily accessible means of calculating surface exposure ages or erosion rates from ¹⁰Be and ²⁶Al measurements, *Quaternary Geochronology*, 3, 174-195.
- Bull, W.B. and Brandon, M.T., 1998, Lichen dating of earthquake-generated regional rockfall events, Southern Alps, New Zealand, *Geological Society* of America Bulletin, 110, 60-84.
- Chmeleff, J., von Blanckenburg, F., Kossert, K., and Jakob, D., 2010, Determination of the ¹⁰Be half-life by multocollector ICP-MS and liquid scintillation counting, *Nuclear Instruments and Methods in*

중에서 48.3±2.4ka 무렵 발생한 지진에 의해 유발된 것 으로 해석 가능하다. 이러한 결과는 연구지역 일대의 단 충활동과 대규모 지진이 후기 플라이스토세까지 거슬러 올라가는 시기에도 활발히 진행되었음을 시사한다.

VI. 결론

지진에 의한 강한 땅의 흔들림은 산사태를 유발하는 중요한 요인 중 하나이다. 단층 운동이 활발하고 지진 발생이 빈번한 키르기스스탄은 지진으로 인해 발생한 대규모 산사태가 다수 분포하며, 본 연구의 DIR은 그 대 표적인 예로 볼 수 있다. DIR에 분포하는 회전암체, 암 설능선, 제방, 선구조, 단구, 암설구릉과 같은 산사태 동 시성 지형들은 DIR 발생 당시 붕괴된 암체와 암설의 운 동특성을 잘 나타내고 있다. 또한 암설사면에 분포하는 대형 암괴의 ¹⁰Be 노출연대를 통해 확인한 DIR의 발생 시기는 48.3±2.4ka 무렵으로 추정된다.

DLR 발생 무렵의 연구지역 일대는 키르기스스탄 남부 및 텐산 산맥과 더불어 산악빙하가 한차례 확장되던 시 기로서 극한강우에 의한 산사태 발생 가능성은 매우 희 박하다. 따라서 DLR의 발생 원인은 지난 홀로세 동안 활발한 움직임을 보인 Talas-Fergana 단층 혹은 텐산 산 맥과 페르가나 산맥에 분포하는 단층대의 움직임으로 유발된 지진에 의한 것으로 해석된다. 따라서 연구지역 일대의 단층 운동과 지진 활동은 그간 밝혀진 홀로세 활 동기 이전에 해당하는 후기 플라이스토세에도 활발하게 진행됐던 것으로 볼 수 있다.

산사태 지형의 동정과 우주선유발 ¹⁰Be을 이용한 산사 태 발생시기 편년은 과거 지진의 발생 시기와 규모, 발생 주기 등을 추적하고 복원하는데 매우 유용한 연구 방법 론이 될 수 있다. 과거 지진활동이 지표에 직접적인 흔 적(surface rupture)을 남기지 않는 경우가 많고, 지진으 로 인해 형성된 지형(earthquake-related landforms)이 지표의 지속적인 풍화·삭박으로 장시간 보존되기 힘들 다는 점을 고려할 때, 지진으로 인해 형성된 산사태 지형 을 대상으로 하는 이와 같은 연구 방법론은 지형을 활용 한 고지진연구(Paleo-seismology)라는 측면에 많은 시사 점을 가질 것으로 본다. *Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268(2), 192-199.

- Cockburn, H.A.P. and Summerfield, M.A., 2004, Geomorphological applications of cosmogenic isotope analysis, *Progress in Physical Geography*, 28(1), 1-42.
- Costa, J.E. and Schuster, R.L., 1998, The formation and failure of natural dams, *Geological Society of America Bulletin*, 100, 1054-1068.
- Crosta, G.B., Hermanns, R.L., Dehls, J., Lari, S., and Sepulveda, S., 2017, Rock avalanches clusters along the northern Chile coastal scarp, *Geomorphology*, 289, 27-43.
- Dufresne, A. and Davies, T.R., 2009, Longitudinal ridges in mass movement deposits, *Geomorphology*, 105, 171-181.
- Dufresne, A., Prager, C., and Bösmeier, A., 2016, Insights into rock avalanche emplacement processes from detailed morpho-lithological studies of the Tschirgant deposit (Tyrol, Austria), *Earth Surface Processes and Landforms*, 41, 587-602.
- Gosse, J.C. and Phillips, F.M., 2001, Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: Theory and application, *Quaternary Science Reviews*, 20, 1475-1560.
- Granger, D.E., Lifton, N.A., and Willenbring, J.K., 2013, A cosmic trip: 25 years of cosmogenic nuclides in geology, *Geological Society of America Bulletin*, 125, 1379-1402.
- Gupta, V. and Sah, M.P., 2008, Impact of the Trans-Himalayan landslide lake outburst flood (LLOF) in the Satluj catchment, Himachal Pradesh, India, *Natural Hazard*, 45, 379-390.
- Havenith, H.B., Strom, A., Jongmans, D., Abdrakhmatov, K., Delvaux, D., and Tréfois, P., 2003, Seismic triggering of landslides, Part A: Field evidence from the Northern Tien Shan, *Natural Hazards* and Earth System Sciences, 3, 135-149.
- Havenith, H.B., Torgoev, I., Meleshko, A., Torgoev, A., Danneels, G., 2006, Landslides in the Mailuu-Suu Valley, Kyrgyzstan: Hazards and impacts, *Landslides*, 3, 137-147.

- Havenith, H.B., Torgoev, A., Schlögel, R., Braun, A., Torgoev, I., and Ischuk, A., 2015, Tien Shan Geohazards Database: Landslide susceptibility analysis, *Geomorphology*, 249, 32-43.
- Heisinger, B., Lal, D., Kubik, P., Ivy-Ochs, S., Knie, K., and Nolte, E., 2002a, Production of selected cosmogenic radionuclides by muons: 2. Capture of negative muons, *Earth and Planetary Science Letters*, 200, 357-369.
- Heisinger, B., Lal, D., Kubik, P., Ivy-Ochs, S., Neumaier, S., Knie, K., Lazarev, V., and Nolte, E., 2002b, Production of selected cosmogenic radionuclides by muons: 1. Fast muons, *Earth and Planetary Science Letters*, 200, 345-355.
- Hewitt, K., 1988, Catastrophic landslide deposits in the Karakoram Himalaya, *Science*, 242(4875), 64-67.
- Hewitt, K., 2009, Catastrophic rock slope failures and late Quaternary developments in the Nanga Parbat-Haramosh Massif, Upper Indus basin, northern Pakistan, *Quaternary Science Reviews*, 28, 1055-1069.
- Hewitt, K., 2015, Massive rock slope failures and episodic landform development generate complex geohazards in the Northwest Himalayan, in Lollino, G., Giordan, D., Crosta, G.B., Corominas, J., Azzam, R., Wasowski, J., and Sciarra, N., eds., *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 2: Landslide Processes*, Springer, 909-913 (https://link. springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-09057-3 _157).
- Hewitt, K., Clague, J.J., and Orwin, J.F., 2008, Legacies of catastrophic rock slope failures in mountain landscapes, *Earth-Science Reviews*, 87, 1-38.
- Keefer, D.K., 1984, Landslides caused by earthquakes, Geological Society of America Bulletin, 95, 406-421.
- Korjenkov, A.M., Rust, D., Tibaldi, A., and Abdieva, S.V., 2012, Parameters of the strong paleoearthquakes along the Talas-Fergana Fault, the Kyrgyz Tien Shan, in D'Amico, S., ed., *Earthquake Research* and Analysis – Seismology, Seismotectonic and Earthquake Geology, InTech, 33-84 (https://www. intechopen.com/books/earthquake-research-and-a

nalysis-seismology-seismotectonic-and-earthquak e-geology).

- Korup, O., 2002, Recent research on landslide dams A literature review with special attention to New Zealand, *Progress in Physical Geography*, 26(2), 206-235.
- Korzhenkov, A.M., Rogozhin, E.A., Shen, X., Tian, Q., and Xu, Y., 2014, Strong paleoearthquakes along the Talas-Fergana Fault, Kyrgyzstan, *Geodesy and Geodynamics*, 5(1), 11-19.
- Lal, D., 1991, Cosmic ray labeling of erosion surfaces: Insitu nuclide production rates and erosion models, *Earth and Planetary Science Letters*, 104, 424-439.
- Nishiizumi, K., Imamura, M., Caffee, M.W., Southon, J.R., Finkel, R.C., and McAnimch, J., 2007, Absolute calibration of ¹⁰Be AMS standards, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 258, 403-413.
- Pánek, T., 2014, Recent progress in landslide dating: A global overview, *Progress in Physical Geography*, 39, 168-198.
- Reiche, P., 1937, The toreva block-a distinctive landslide type, *Journal of Geology*, 45(5), 538-548.
- Roux, O.L., Schwartz, S., Gamond, J.F., Jongmans, D., Bourles, D., Brausher, R., Mahaney, W., Carcaillet, J., and Leanni, L., 2009, CRE dating on the head scarp of a major landslide (Séchilienne, French Alps), age constraints on Holocene kinematics, *Earth* and Planetary Science Letters, 280, 236-245.
- Seong, Y.B., Dorn, R.I., and Yu, B.Y., 2016, Evaluating the life expectancy of a desert pavement, *Earth-Science Reviews*, 162, 129-154.
- Shea, T. and van Wyk de Vries, B., 2008, Structural analysis and analogue modeling of the kinematics and dynamics of rockslide avalanches, *Geosphere*, 4(4), 657-686.
- Shreve, R.L., 1959, Geology and Mechanics of the Blackhawk landslide, Lucerne Valley, California, Unpublished Ph.D. Dissertation, Department of Geological and Planetary Sciences, California

Institute of Technology.

- Stone, J.O., 2000, Air pressure and cosmogenic isotope production, *Journal of Geophysical Research*, 105(10), 23753-23759.
- Strom, A. and Korup, O., 2006, Extremely large rockslides and rock avalanches in the Tien Shan Mountains, Kyrgyzstan, *Landslides*, 3(2), 125-136.
- Strom, A., 2013, Use of indirect evidence for the prehistoric earthquake-induced landslides identification, in Ugai, K., Yagi, H., and Wakai, A. eds., *Earthquake-Induced Landslides*, Berlin: Springer, 21-30.
- Strom, A., 2015, Natural river damming: Climate-driven or seismically induced phenomena: basics for landslide and seismic hazard assessment, In Lollino, G., Giordan, D., Crosta, G. B., Corominas, J., Azzam, R., Wasowski, J., and Sciarra, N. eds., Engineering Geology for Society and Territory – Volume 2, Springer, 33-41 (https://link.springer.com/ chapter/10.1007/978-3-319-09057-3_3).
- Stumpf, A., Malet, J.P., Kerle, N., Niethammer, U., and Rothmund, S., 2013, Image-based mapping of surface fissures for the investigation of landslide dynamics, *Geomorphology*, 186, 12-27.
- Wang, Y.F., Cheng, Q.G., Lin, Q.W., and Yang, H.F., 2018, Insights into the kinematics and dynamics of the Luanshibao rock avalanche (Tibetan Plateau, China) based on its complex surface landforms, *Geomorphology*, 317, 170-183.
- Yoshida, H. and Sugai, T., 2010, Quantitative examination of hummock alignment in debris avalanche deposits: Zenkoji debris avalanche, Usu volcano, Japan, *Geographical Review of Japan Series B*, 83(1), 64-72.

Google Earth, https://www.google.co.kr/intl/ko/earth USCS (U.S. Geological Survey), https://earthquake.usgs.gov

교신 : 성영배, 02841 서울시 성북구 안암로 145, 고려 대학교 사범대학 지리교육과 (이메일: ybseong@ korea.ac.kr)

오정식·성영배·알렉산더 스트롬·유병용

Correspondence : Yeong Bae Seong, 02841, Anam-ro 145, Seongbuk-gu, Seoul, Korea, Department of Geography Education, College of Education, Korea University (Email: ybseong@korea.ac.kr)

> 투고 일: 2018년 7월 29일 심사완료일: 2018년 8월 6일 투고확정일: 2018년 8월 10일