한국지반공학회논문집 제26권 5호 2010년 5월 pp. 49 ~ 55 Technical Note

설악산국립공원 천불동 계곡에서 발생된 낙석 거동분석

Analysis for Behavior of Rockfall Movement by Cheonbuldong Valley of Seoraksan National Park

조 용 성[1] Cho, Yong-Sung
김 유 성[2] Kim, You-Seong

Abstract

The large scale rock falling had occurred on 22nd February, 2007 in the Cheongbuldong valley area of Seoraksan National Park, and the visiting pass had been closed for a while. Similar cases of rock falling have occurred in the latest years according to a great variety of crack, joint, weathering of solid rock and surface water caused by a recent climatic change in the Seoraksan National Park. In this study, rock falling energy was estimated and the movement of rockslide was analysed based on detailed investigation on large scale rockslides occurring at the spot 80 m high from the bottom of the valley. From analysing results, the effective management method for rock falling was proposed. The method could minimized the dangerous factors with no change of natural environment of the National Park.

요 지

2007년 2월 22일 설악산국립공원 천불동계곡 병풍교 부근에서 대규모 낙석이 발생하였고, 탐방로가 한동안 폐쇄되었었다. 설악산국립공원내에서는 기후변화로 인한 암반의 절리, 풍화와 지표수 등의 급격한 변화로 유사한 낙석사고 빈도가 잦아지고 있다. 이 연구에서는 계곡바닥에서 높이 80m 부근에서 발생한 대규모 낙석의 정밀조사에 근거하여 낙석의 거동을 분석하였고, 낙석에너지를 산정하였다. 분석결과로부터 설악산국립공원내의 자연환경을 훼손하지 않고, 위험요소를 최소화할 수 있는 효과적인 낙석관리방법을 제안하였다.

Keywords : Cheonbuldong valley, Joint, Rock fall, Seoraksan National Park

1. 서 론

우리나라에서는 지리산이 제 1호 국립공원으로 지정되면서 제도도입이 이루어져 현재 20개의 국립공원이 지정·관리되고 있다. 설악산국립공원은 1970년 우리나라에서 다섯 번째 국립공원으로 지정되었고, 1965년 천연보호구역으로 지정되었다. 국제적으로도 그 보존가치가 인정되어 1982년 유네스코로부터 생물권보전지역으로 지정·관리되고 있는 지역이다(이우평, 2007). 설악산국립공원은 주봉인 대청봉을 비롯하여 화채봉, 한계령 등 30여개의 높은 산봉우리가 웅장하게 펼쳐져 있다. 외설악의 비선대에서 대청봉에 오르는 계곡은 마치 천개의 불상이 꽉 들어차 있는 모습 때문에 천불동계곡이라 부른다. 이러한 뛰어난 자연경관의 천불동계곡을 형성하고 있는 암반은 절리상태가 매우 불량하여 해마다 크고 작은 낙석이 발생하고 있다.

1 정회원, 국립공원관리공단 국립공원연구원 (Member, K.N.P., National Park Research Institute, machoys@hotmail.com, 교신저자)
2 정회원, 전북대학교 공과대학 토목공학과 (Member, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National Univ.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

낙하하는 낙석의 에너지를 추정하는 수학적 모델이 현재 많이 제시되고 있으며, 수학적 모델들은 크게 두 가지 종류로 나누어질 수 있다. 중량을 고려하지 않거나 암체 중심부의 한 점에 질량이 집중되어 있는 것으로 가정하여 낙하운동을 고려하는 모델(Pfeiffer와 Bowen, 1989)과 암체가 질량, 부피 및 특정 형상을 갖는 것으로 가정하는 모델(Spang과 Soner, 1995)이 있다. 낙석 시뮬레이션을 이용한 방법은 낙석방지대책의 적절한 위치 선정과 효율적인 대책공법 수립을 위한 최적의 기법이라 할 수 있다(이종윤 등, 2004). 또한 최근에는 경험적으로 얻은 데이터를 활용하여 낙석 시뮬레이션 프로그램과 연계하여 낙석의 충격에너지 등을 산정하고 있다(구호본 등, 2001). 최근에 많이 사용하고 있는 낙석을 분석하는 기법은 'Colorado Rockfall Simulation Program (CRSP)'으로 낙석의 형상을 구와 원통 모양 등으로 다양하게 구현할 수 있고, 낙석의 거동을 낙하(free fall), 튐(bounce), 구름(roll), 미끄러짐(slide) 등의 4가지로 나누어 현실적으로 낙석을 분석할 수 있는 기법이다(정남수, 2000; Bozzolo 등, 1988).

2007년 2월 설악산국립공원 천불동계곡 병풍교에서 대규모 낙석이 발생되었으며, 발생된 낙석으로 인하여 기 설치된 철재교량이 파손되어 탐방로가 전면 폐쇄되었다. 본 논문은 설악산국립공원 천불동계곡에서 높이 80m 내외에서 발생된 대규모 낙석에 대한 현장조사 및 낙석에 대한 거동분석을 실시하였으며, 이러한 정밀조사를 바탕으로 자연을 훼손하지 않고 안정성을 확보할 수 있는 사후 관리대책 등에 대하여 서술하고자 한다.

2. 낙석발생 현황

낙석이 발생한 현장은 설악산국립공원 천불동계곡의 병풍교에 위치하고 있으며, 계곡을 가로질러가는 철재교량이 위치하고 있었다. 2007년 2월 24일 06~07시경 대형낙석이 발생하였으며, 발생된 낙석에 의하여 병풍교 교량 약 40~50m 가 파손된 상태이다. 낙석이 발생한 암반지대는 수직절벽의 지형으로 조사대상 암반은 총연장 약 50m, 높이 약 90m 내외의 대규모 암반으로 구성되어 있는 수직절벽이다. 수직절벽 구간의 경사는 대체적으로 70~90° 내외의 급경사를 이루고 있으며, 상부는 -50~80° 내외의 역경사로 형성되어 있다. 그림 1은 낙석이 발생된(병풍교) 전경을 보여주고 있으며, 수직절벽 상부 약 80m 지점에서 발생된 대형낙석은 1차적으로 높이 약 50m 부근의 소단에서 3~4개의 낙석으로 분리되어 하부(계곡부)로 이동된 상태였다. 또한 최초 지점에서 발생된 낙석크기는 높이 약 2.0m, 폭 3.0m 내외로 추정될 수 있으며, 계곡에서 관찰되는 3개의 낙석크기는 평균적으로 높이 0.9~1.0m, 폭 0.9~1.0m 내외였다. 그림 2는 낙석발생 전·후의 병풍교 철재교량의 모습을 보여주고 있다.

3. 현장 정밀조사

낙석발생 지역인 병풍교 일대는 화강암류 중 흑운모 화강암이 분포하는 지역으로 관입화강암의 특성상 고

그림 1. 낙석이 발생된 현장(병풍교 주변)

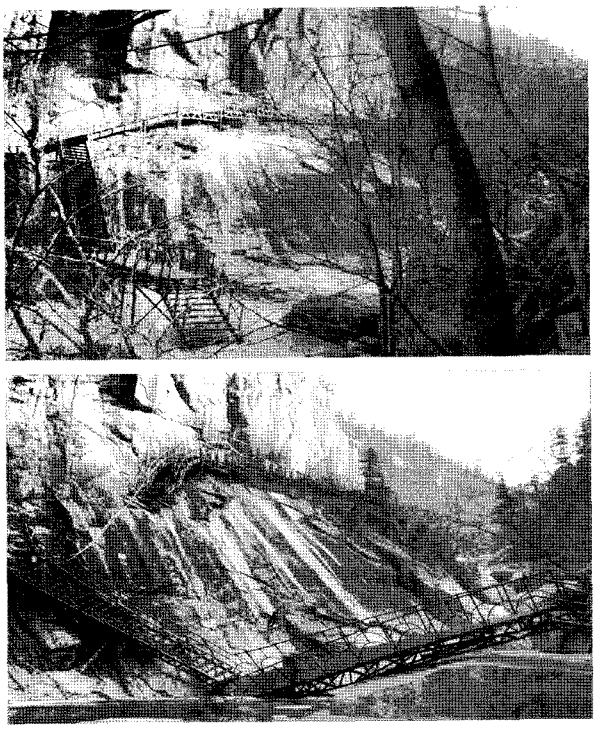

그림 2. 낙석발생 전·후의 병풍교 교량 상태

각도의 인장절리와 수평절리들이 발달하고 있다. 수평·수직으로 발달된 절리는 암반의 풍화 및 침식 등이 지속적으로 발달하고 있어 항상 낙석발생의 위험요소를 가지고 있는 것이 특징이다. 그림 3은 조사지역 암반은 조립질 흑운모화강암으로 구성광물은 정장석, 각섬석, 흑운모, 석영 등으로 되어 있다. 특히 암반 전체적으로 분홍색 장석을 많이 포함하고 있어 대체적으로 분홍색을 띄고 있다. 또한 발생된 낙석의 화강암 표면은 풍화가 심하게 발달되어 있었으나, 내부는 다소 강한 형태의 암괴를 형성하고 있는 것이 특징이다.

지표에 노출되어 있는 암석들은 다양한 형태의 불연속면이 존재한다. 조사지점에 대한 암반의 역학적 특성을 규명하기 위하여 현장에서 직접 불연속면의 방향과 경사 등을 조사하였다. 현장조사는 지형여건상 수직암반에서 직접 측정할 수 없었으나, 최대한 하단부 및 최고 상단부에 밀착하여 주요 절리를 측정하였다. 현장조사는 주요 불연속면에 대하여 조사를 실시하였으며, 주향 N56E 경사 80SE, N8E 경사85SE, 주향 N10W 경사 45SW로 조사되었다. 또한 사면은 주향 N64W 경사 85NE로 조사되었다(그림 4 참조).

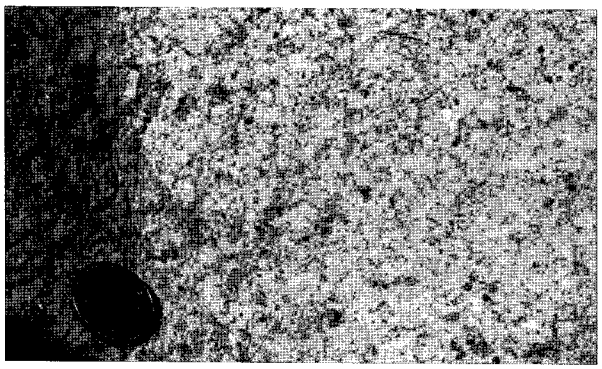

그림 3. 조사구간 구성암종

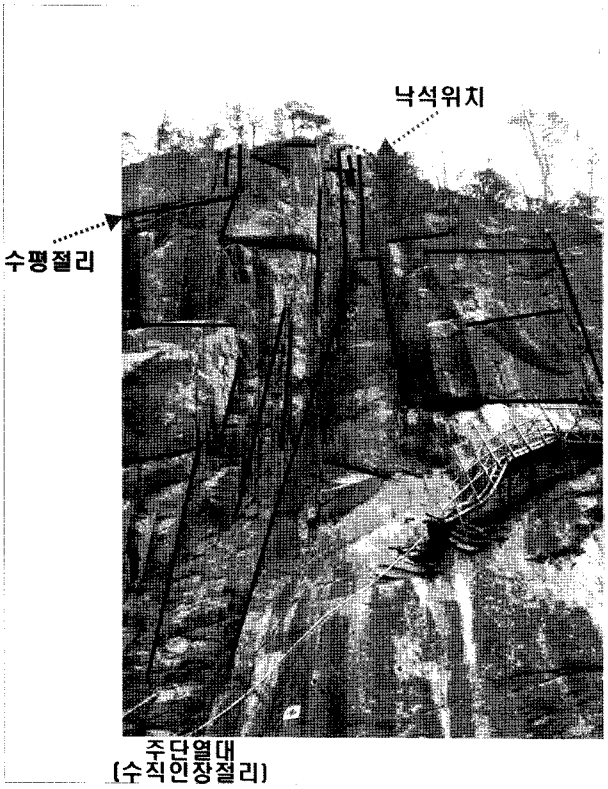

그림 4. 낙석 발생부근에 발달된 절리

조사지역의 절리구조는 주 단열대인 수직절리와 수평절리들이 교차하며 노두와 분리된 암괴들을 형성하고 있다. 이러한 암괴들 중 경사각이 90° 이상인 암반의 절리 틈사이로 이동하는 지표수 및 지하수가 해빙기의 동결융해에 의한 팽창, 수축의 반복에 의해 풍화가 가속되었으며, 급격한 기온변화의 해빙기에 암반(이완암괴)이 지탱될 수 있는 지지력이 상실되어 자연스럽게 이완된 암괴가 하부로 이동되어 낙석이 발생된 것으로 판단된다. 또한 조사지역은 지형 및 지질구조상 낙석의 위험성이 상시 존재하고 있으며, 이러한 낙석은 인위적인 환경으로 인해 발생된 것이라기보다는 자연적인 현상으로 설악산의 지형 변화과정의 일부분으로 판단된다.

조사과정에서 1차 낙석이 발생된 높이 50m 지점을 직접 올라가 현장조사를 실시하였다. 현장 여건상 최초 발생지점을 직접 올라가 관찰할 수 없었으나, 낙석발생 주변에서는 지속적인 누수현상 등의 흔적이 관찰되었다. 또한 1차 낙석이 발생한 지점의 주위에는 몇 개의 참나무 및 소나무가 부러져 있었으며, 많은 암석 파편들이 관찰되었다(그림 5, 6 참조). 2차 낙석의 흔적은 철제교량, 하천바닥 등에서 관찰되고 있으며, 1차 낙석에서 분리된 3~4개의 낙석에 의하여 철제교량이 파손된 상태이다. 또한 하천에서도 낙석이 발생되면서 깨진 암괴

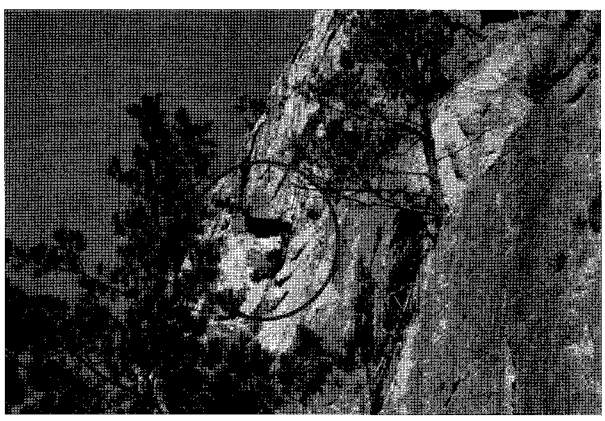

그림 5. 최초 낙석발생 지점(높이 약 80m 지점)

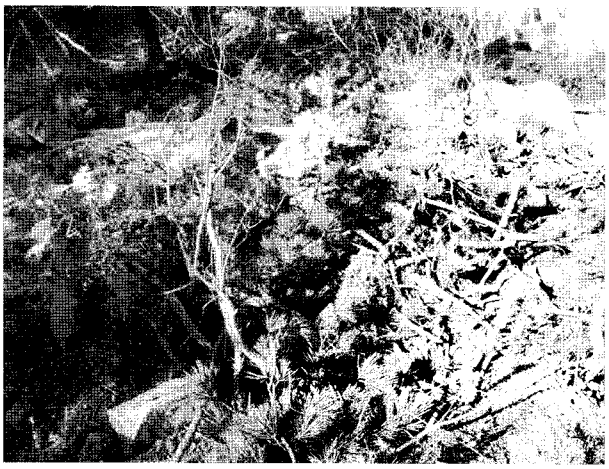

그림 6. 1차 낙석발생 지점의 주변상황(높이 약 50m 지점)

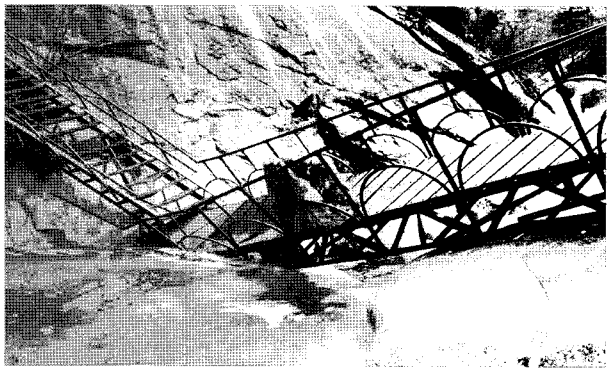

그림 7. 교량에 떨어진 낙석

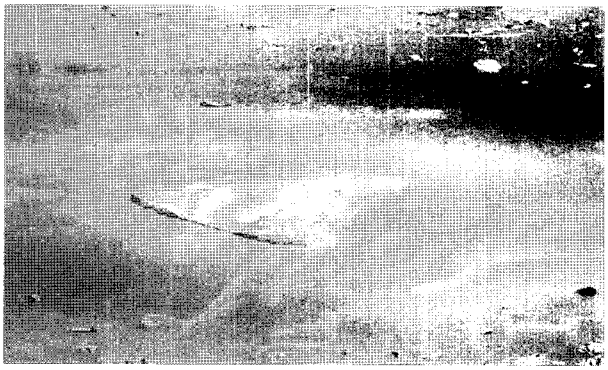

그림 8. 계곡에 떨어진 낙석

및 잘려진 나무들이 관찰되었다(그림 7, 8 참조).

현장에서 발생된 낙석의 일축압축강도를 추정하기 위하여 슈미터해머시험(Schmidt hammer test)을 철제교량위에 떨어져 있는 낙석에 대하여 실시하였다(그림 9 참조). 슈미터해머시험은 암반의 풍화정도 및 타격위치에 따라 다소 차이가 크지만 대체적으로 61~244MPa의 강도를 보여주었고, 평균 110MPa로 조사되었다. 그림 10은 낙석발생 지점의 정면부의 암반은 수평 및 수직절리의 발달정도가 매우 크며, 부분적으로 상부에 이완암

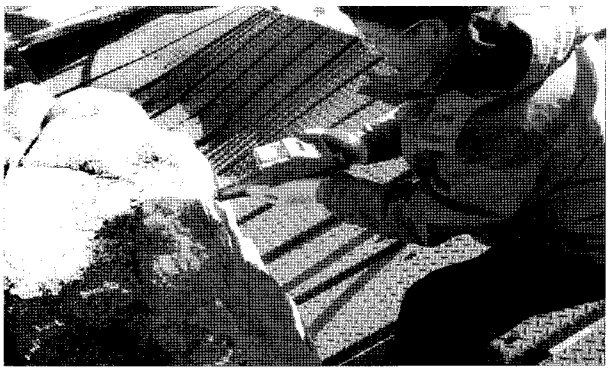

그림 9. 슈미터해머시험(schmidt hammer test)

그림 10. 조사지역 정면의 암반상태

괴(뜬돌)가 관찰되었다.

4. 발생낙석에 대한 거동분석

낙석발생 현장에서 조사한 다양한 자료를 바탕으로 발생된 낙석에 대한 거동을 분석하기 위하여 평사투영망(stereo-net) 분석을 수행하였으며, 현재 상용화되어 있는 Dips(ver. 5.10) 프로그램을 이용하여 해석하였다. 표 1은 현장에서 조사된 주향과 경사를 경사(dip)와 경사방향(dip-direction)으로 변화시킨 데이터이다. 해석프로그램에서는 수집된 절리의 경사(dip) 및 경사방향(dip direction)의 주요 불연속면을 각각 set1, set2, set3으로 설정하였다. 해석프로그램을 이용하여 쐐기파괴(Wedge failure) 및 평면파괴(Plane failure), 전도파괴(Toppling failure)에 대한 안정성 해석을 실시하였다. 그림 11은 쐐기파괴에

표 1. 조사지점의 경사 및 경사방향

	주향	경사	Dip	Dip-direction
set 1	N56E	80SE	80	146
set 2	N8E	85SE	85	262
set 3	N10W	45SW	45	80
slope	N64W	85NE	85	206

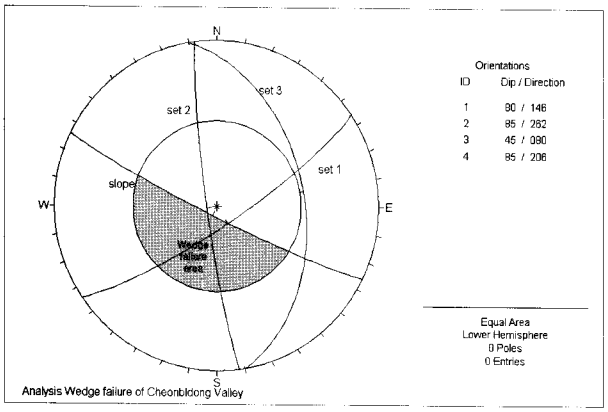

그림 11. 쐐기파괴(Wedge failure)에 대한 안정성 해석결과

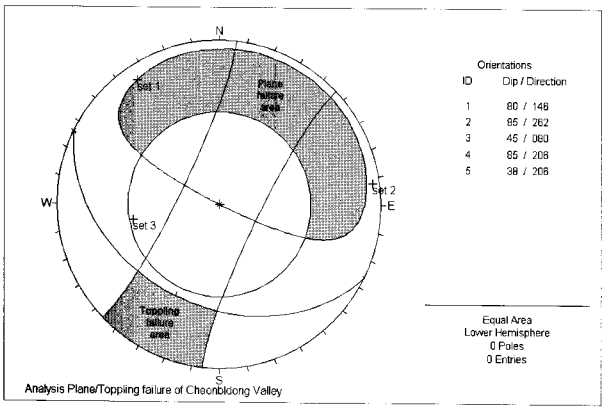

그림 12. 평면파괴(Plane failure), 전도파괴(Toppling failure)에 대한 안정성 해석결과

대한 해석결과로 set1과 set2의 불연속면이 쐐기파괴 가능영역에서 교선방향으로 나타나고 있어 쐐기파괴의 발생가능성이 크게 나타나고 있다. 실제 현장에서 발생한 낙석의 경향에서도 쐐기파괴 형태로 나타나고 있었다. 그림 12는 평면 및 전도파괴에 대한 해석결과이며, set1이 평면파괴 영역에 나타나고 있어 평면파괴에 대하여도 불안정상태로 해석되었다. 그러나 전도파괴 발생가능 영역에서는 어떠한 절리군도 포함되어 있지 않아 전도파괴에 대해서는 다소 양호한 것으로 나타나고 있다. 따라서 조사지역의 암반은 쐐기파괴 및 평면파괴에 대하여 매우 불안정한 상태로 해석되었다.

낙석에너지 산정시에는 낙석의 크기 및 형태, 절개면의 거칠기, 반발계수 등 많은 매개변수를 고려해야 하는데, 절개면의 특성 및 낙석의 운동형태 등 낙석에너지에 영향을 줄 수 있는 요소를 고려할 수 있는 Simulation Program RocFall-ver4.0 을 이용하여 보다 정확한 낙석이력 및 낙석에너지를 해석하였다. 그림 13은 RocFall 프로그램을 이용하여 100회 시행결과와 낙석에너지를 보여주고 있다. 해석결과로부터 높이 50m 내외에 존재하는 소단부에서 1차 낙석이 나타나고 있으며, 하단부 경사부에 2차로 낙하가 되는 것으로 나타나고 있어 현

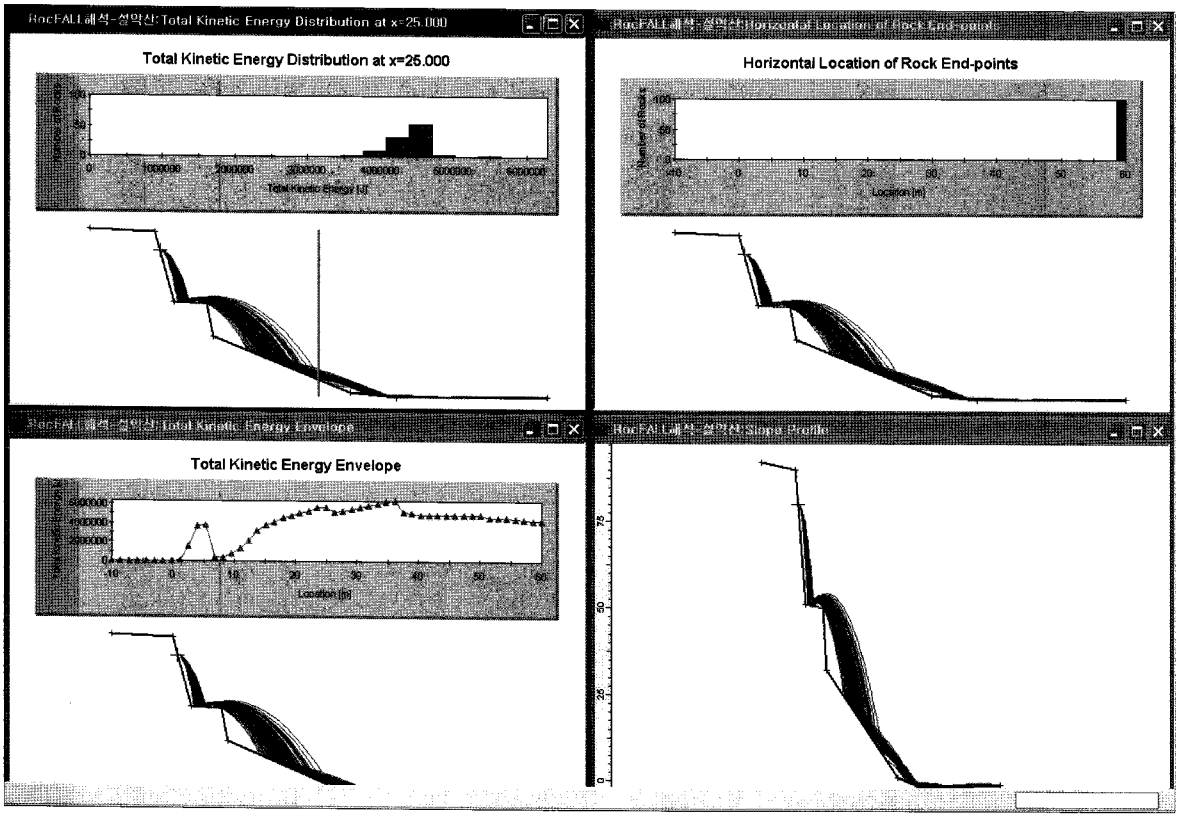

그림 13. RocFall 해석결과

그림 14. 붕괴된 교량(좌) 및 새롭게 복구된 교량(우) 상태

장에서 조사된 내용의 낙석이력과 일치되었다. 이러한 결과로부터 낙석의 최대에너지는 수평거리 30m 내외에서 4,000~6,000kJ로 나타났다. 낙석은 소단에서 1차로 3~4개로 낙석이 분리되어 하부로 이동되어 추가 낙석이 발생한 상황에서도 최종점에서의 최대 낙석에너지는 4,000kJ로 나타날 수 있을 것으로 판단된다. 본 조사 현장은 설악산 대청봉구간의 주 탐방로로 많은 탐방객이 이용하는 곳으로 향후 추가낙석에 대비하기 위한 구조물 설치에는 환경적 측면에서 많은 문제가 발생할 것으로 판단된다. 따라서 자연현상에 대하여 인위적인 낙석방지에 대한 시설물 설치보다는 교량을 우회하여 설치한다면 추가낙석에 교량의 파손을 방지할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 14는 붕괴된 교량상태와 추가낙석이 발생할 경우 피해를 최소화할 수 있도록 새롭게 설치된 교량 모습을 보여주고 있다. 교량설치 후 약 2년 동안 추가 낙석은 발생되지 않아 탐방객이 안전하게 탐방을 할 수 있었다. 낙석은 예기치 못하게 발생할 수 있다. 따라서 향후 국립공원 내에서 발생할 수 있는 낙석을 방지하기 위해서는 정밀조사를 바탕으로 다양한 자연경관과 어우러진 관리대책이 선행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

대규모 낙석이 발생된 설악산국립공원 천불동 계곡의 병풍교에 대한 현장조사 및 낙석의 거동분석 등을 통하여 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

(1) 설악산국립공원의 암반에 존재하는 절리는 발달정도가 해빙기 및 여름철 집중호우 시에 매우 발달하여 낙석의 발생빈도가 매우 높게 나타난다. 따라서 사전에 과거 낙석이 발생한 지점 및 가능성이 매우 큰 지점에 대하여 정밀조사(사진자료, 암반절리 변화상태, 풍화진행속도 등)를 실시하여 위험요소를 5단계(극히위험, 위험, 안정하나 위험요소 증가, 안정유지, 안정)로 점수화하여 위험지구에 대하여 집중적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

(2) 천불동계곡의 낙석발생 지역은 발달된 수평·수직절리, 지표수, 지하수 및 나무의 뿌리, 풍화 등의 다양한 변화에 의하여 지속적인 낙석발생 가능성이 크게 상존하고 있는 상태로 구성된 암반 전체에 존재하는 위험요소를 인위적으로 제거하거나 방지시설물의 설치는 자연경관을 훼손할 수 있는 소지가 있어 바람직하지 않은 것으로 판단된다.

(3) 낙석이 발생된 곳에 대하여 현장 정밀조사 및 수치해석 등의 다양한 조사를 바탕으로 절리가 발달된 구간을 피하고 위험요소가 적은 부분으로 탐방로를 개설하였으며, 추후 발생될 수 있는 낙석으로 인하여 탐방로를 훼손시키지 못하게 새롭게 선형을 변경하여 교량을 설치하였다. 교량설치 후 추가 낙석은 발생하지 않았으며 많은 탐방객이 자유롭게 이용하고 있다.

다양한 기암괴석으로 이루어진 설악산국립공원은 낙석 등 자연재해 발생가능성이 매우 크게 존재하고 있다. 낙석은 극히 자연적인 변화과정으로 이는 설악산국립공원의 경관자원을 이루는 하나의 과정이라고 할 수 있다. 따라서 낙석발생 가능성이 크게 상존하고 있는 지역은 암반의 절리상태 등 지속적인 모니터링 및 정밀조사가 필요하며, 낙석위험지구에 대한 안내간판 등을 설치하여 탐방객에게 낙석의 위험을 사전에 인지시켜 추후에 발생될 수 있는 낙석에 대비해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 구호본, 박혁진, 백영식 (2001), "현장낙석시험을 통한 낙석방지 울타리 특성 및 성능평가", *한국지반공학회논문집*, Vol.17, No.6, pp.111-121.
2. 정남수 (2000), "낙석의 발생형태에 따른 거동 분석", 석사학위 논문, 연세대학교, pp.29-31.
3. 이종윤, 박형동 (2004), "경주 남산 냉골 상선암 마애여래대좌상부 암반사면 낙석의 위험성 분석", *한국지구시스템공학회지*, Vol.41, No.1, pp.26-38.
4. 이우평 (2007), "지리교사이우평의 한국지형산책-백두산에서 독도까지", 푸른숲, pp.73-86.
5. Bozzolo, D., Pamini, R. and Hutter, K. (1988), "Rockfall Analysis-a Mathematical Model and its Test with Field Data", *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, Vol.1, pp.555-563.
6. Pfeiffer, T. J. and Bowen, T. D. (1989), "Computer Simulation of Rockfalls", *Bulletin Association Engineering Geology*, V26, N1, pp.135-146.
7. Spang, R. M. and Soner, T. H. (1995), "Optimized Rockfall Protection by 'ROCKFALL'", *International Congress on Rock Mechanics*, 8th, Vol.3, pp.1233-1242.

(접수일자 2009. 10. 19, 심사완료일 2010. 5. 18)