

개별요소법을 이용한 사면의 낙석운동해석

Rockfall Analysis on slopes using Discrete Element Method

김대상, 엄기영, 신민호

Dae-Sang Kim*, Ki-Young Eum**, Min-Ho Shin**

Abstract

2차원 개별요소법을 이용하여 철도사면에 있어서 낙석이 발생되었을 경우 낙석에 의한 운동에너지, 위치에너지 및 마찰에 의한 에너지변화를 사면과 낙석사이의 마찰계수를 매개변수로 하여 분석하였다. 낙석의 낙하양태(미끄러짐과 회전)에 따라 변화하는 1차지면 충돌시간, 2차지면 충돌시간, 2차충돌까지의 비산거리, 1차지면 충돌 후 도약높이, 사면 운동 동안의 낙석 회전횟수 등을 구하였다.

1. 서론

낙석은 많은 자연재해 중에서도 특히 발생 빈도가 높고 경우에 따라서는 인명피해를 유발하기도 하는 위험한 자연 현상이다. 우리나라의 경우 많은 철도노선이 급격한 경사지에 인접하여 건설되어 있는 것이 현실이다. 따라서 철도의 안전한 주행이나 선로의 안전을 위하여도 사면의 낙석에 대한 대책은 중요한 과제의 하나라고 할 수 있다.

낙석운동에 영향을 미치는 요소는 여러 가지가 있다. 이를 분류하여 보면 사면높이·경사등과 같은 지형조건, 풍화정도나 부석상황과 같은 지질조건, 사면의 강도나 용수상태와 같은 사면조건, 강우량등과 같은 기상조건 등으로 나눌 수 있다. 상기에 언급한 많은 변수를 동시에 고려하여 정확하게 낙석운동을 모사하기는 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 낙석운동해석에 대한 기초적연구로서 낙석의 거동에 크게 영향을 미칠 수 있는 낙석과 사면사이의 마찰계수를 매개변수로 하여 낙석의 운동양태를 검토하여 보았다.

2. 개별요소법의 응용

개별요소법(Discrete Element Method:이하 DEM으로 표기)은 P.A.Cundall이 개발한 불연속체의 시각영역 해석 기법이다. DEM은 집합체를 이루는 불연속한 개개의 입자가 운동방정식을 만족하면서 각각 독립적으로 운동하며 서로 접촉하게 되면 접촉점에 가정한 접촉 Spring의 작용으로 생긴 반발력을 계산하여 입자의 거동을 분석하는 방법이다(그림 1). 알고리즘 자체는 단순하지만, 많은 입자로 구성된 모델을 해석하는 경우에는 계산량이 커지기 때문에 개발 당시에는 취급할 수 있는 입자수가 제한되었었다. 그러나, 최근의 컴퓨터 성능의 향상과 함께 취급 가능한 입자수가 비약적으로 증가하여 현재는 불연속체의 수치해석수법으로서 많은 연구자에 의하여 이용되고 있다.

*한국철도기술연구원 선임연구원, ** 한국철도기술연구원 선임연구원, ***한국철도기술연구원 수석연구원

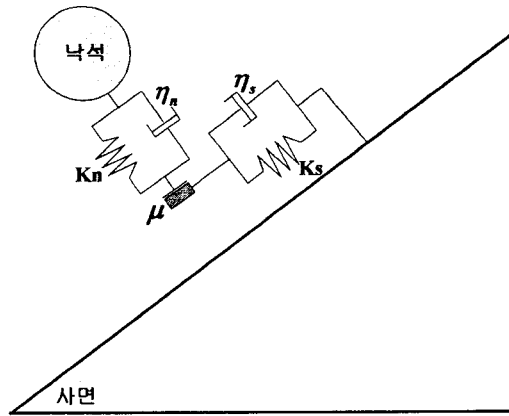


그림1. 개별요소법 접촉모델

DEM으로 낙석운동을 모사하기 위해서는 사면과 낙석을 모델링 할 필요가 있다. 사면을 모델링 하는 방법으로는 사면을 입상체로 모델링하는 방법과 강체벽으로 모델링하는 방법을 생각할 수 있다. 전자의 방법은 사면의 변형을 고려할 수 있는 장점이 있는 반면에 요소의 수가 많아질수록 해석에 필요로 하는 계산시간이 크게 증가하는 단점이 있다. 후자의 방법은 강체로 모델링하므로 사면에는 변형이 생기지 않아서 실제 사면에서 발생하는 사면변형이 낙석거동에 미치는 영향을 직접적으로 고려할 수가 없는 단점이 있는 반면에 접촉관정을 낙석요소와 사면사이에만 행하면 되므로 해석시간 및 계산량이 줄어드는 장점이 있다. 본 연구에서는 실용성을 고려하여 후자의 방법을 구현할 수 있는 원과 선분으로 구성된 2차원 개별요소법을 개발하여 사용하였다. 낙석 충돌 시의 사면의 변형과 나무 등의 영향을 고려하여 구해진 스프링 변수들을 이용함으로써 사면변형의 영향을 간접적으로 고려하였다.²⁾ 낙석은 접촉관정이 쉬운 원형 요소를 사용하였다. 원형요소를 사용하면 실제 낙석의 복잡한 형상을 충분히 표현할 수 없는 등의 단점이 있으나 낙석의 복잡한 형상에 대한 연구는 다음 단계로 미루고 본 논문에서는 원형 요소를 이용하여 낙석을 모델링하였다.

3. 선로사면 낙석의 모델링

낙석을 제대로 모델링하기 위해서는 3차원 모델링이 필요하나 본 연구에 이용한 프로그램은 2차원인 관계로 원으로 모델링 된 낙석은 구가 아니라 원형 디스크나 실린더 형이 된다. 낙석에 의한 운동을 물리학적인 관점에서 고찰하여 보면, 높이 h 에 정지되어 있던 낙석의 위치에너지가 낙석이 낙하함에 따라 운동 및 마찰 등으로 에너지를 소비하게 된다. 운동에너지(Kinetic Energy)는 병진 운동에너지(Translational Energy)과 회전 운동에너지(Rotational Energy)로 나눌 수 있다.

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 \quad 1)$$

(1)식의 운동에너지를 고찰하여 보면, 미끄러짐 운동이 지배적인 경우에는 (1)식의 첫번째 항이, 그리고 회전운동이 지배적인 경우에는 (1)식의 두번째 항이 지배적인 운동에너지 성분이 된다. 두 항의 비율은 낙석 및 사면의 마찰계수, 낙석의 무게 및 사면의 경사도 등의 영향을 받게 된다. 따라서 본 연구에서는 사면의 마찰계수와 사면의 낙하지점과 철도차량과의 이격거리(L)를 변수로 하여, 각 경우에 대한 운동에너지, 위치에너지, 스프링에너지, dashpot 및 마찰에 의한 손실에너지 등을 구하여 이들이 낙석운동 양태에 미치는 영향을 고찰하였다. 그림 2는 낙석운동의 모사를 하기 위한 선로사면 및 낙석 모델을 보여주고 있다.

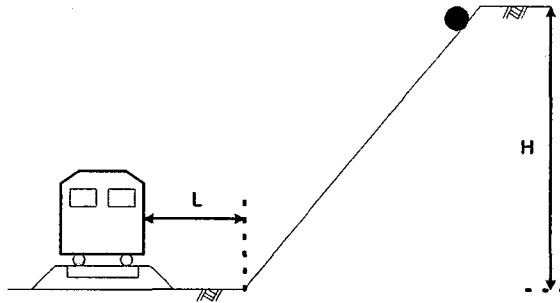


그림2. 선로사면 낙석 모델

도표 1은 해석에 사용한 변수를 정리한 것이다. 스프링 및 감쇠정수는 낙석충돌 시의 사면변형과 나무 등의 영향을 간접적으로 고려하여 역해석으로 구한 값을 사용하였다,²⁾ 다만, 지표면의 경우 낙석과의 충돌 시에 에너지 소산이 클 것으로 보고 마사토 감쇠정수의 10배에 해당하는 감쇠정수를 사용하였다. 낙석과 사면사이의 마찰계수는 $0^\circ \sim 30^\circ$ 사이에서 변화를 주었고, 철도차량과 사면 끝 단사이의 0~45m 사이에서의 변화를 관찰하였다. 사면경사와 높이는 각각 45° 와 20m로, 낙석의 직경은 1m로 고정하였다. 계산시간 증분은 스프링의 강성과 감쇠정수 및 대상모델의 질량을 고려하여 수치해석이 가능하도록 결정하였다. 낙석은 사면경사의 최상부 꼭지점에서 초기속도 0cm/sec 로 낙하시켰다. 그리고 미끄러짐은 전단방향 스프링에 발생하는 힘이 전단저항력을 초과할 때 발생하도록 하였다.

도표1. 해석에 사용된 변수

사용 변수	사용값
수직방향 스프링정수 ($k_n, g/sec^2$)	낙석:1.66E+09(콘크리트) 사면:3.13E+08(마사토) 지표면:3.13E+08(마사토)
전단방향 스프링정수 ($k_s, g/sec^2$)	낙석:6.69E+07(콘크리트) 사면:3.63E+06(마사토) 지표면:3.63E+06(마사토)

수직방향 감쇠정수 ($\eta_n, g/sec$)	낙석:2.23E+05(콘크리트) 사면:1.31E+05(마사토) 지표면: 1.31E+06(마사토)
전단방향 감쇠정수 ($\eta_s, g/sec$)	낙석:7.47E+04(콘크리트) 사면:6.11E+04(마사토) 지표면: 6.11E+05(마사토)
마찰계수 ($\phi, ^\circ$)	0, 10,20,30
철도차량과 사면 끝단과의 이격거리 (L, cm)	0~4500
사면경사($^\circ$)	45
사면높이 (cm)	2000
낙석직경 (cm)	100
계산시간간격 (sec)	1.0E-05

4. 낙석 운동에너지 분석

그림 3은 낙석과 사면사이의 마찰계수가 $\phi = 0^\circ$ 인 경우와 $\phi = 30^\circ$ 경우에 대한 낙석의 궤적을 묘사한 것이다. 미끄러짐 운동이 지배적인 마찰계수가 $\phi = 0^\circ$ 인 경우가 $\phi = 30^\circ$ 경우에 비하여 도약높이 및 비산거리가 크다는 것을 알 수 있다. 도표 2는 각각의 경우에 대하여 계산한 1차 지면 충돌시간, 2차지면 충돌시간, 2차충돌까지의 비산거리, 1차지면 충돌 후 도약높이, 사면 운동 동안 낙석의 회전횟수를 보여준다.

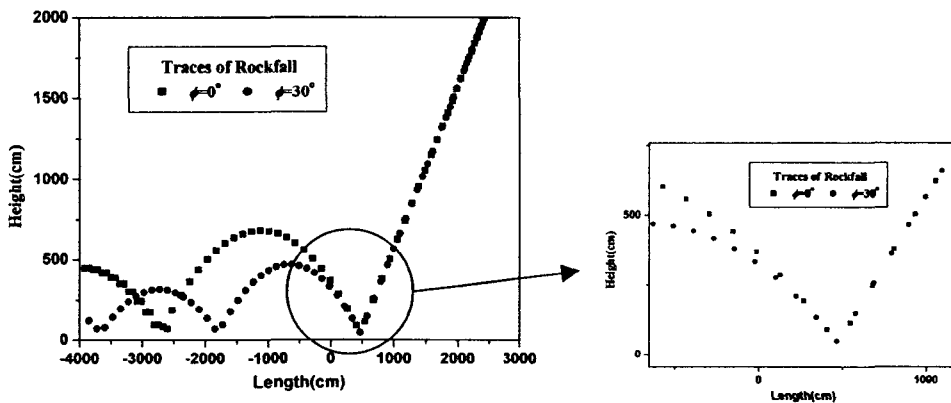


그림3. 낙석 경로

1차충돌시간, 즉 사면을 운동한 시간은 마찰이 증가함에 따라 2.9sec에서 3.5sec로 0.6sec 증가하였다. 사면과 낙석과의 마찰이 증가할수록 낙석은 미끄러짐 운동보다는 회전운동이 증가함을 확인할 수 있었다(0회에서 9회). 또한 마찰이 증가할수록 2차충돌 시까지의 비산거리는 점차 감

소(3165cm 에서 2224cm)하였으며, 도약높이도 함께 감소(680cm에서 468cm)됨을 알 수 있었다. 이는 미끄러짐 운동의 경우

도표2. 낙석의 사면운동 분석결과

Cases	1차충돌시간 (sec)	2차충돌시간 (sec)	2차충돌시까지의 비산거리(cm)	도약높이 (cm)	사면운동동안의 낙석회전횟수(회)
1($\phi = 0^\circ$)	2.9	5.2	3165	680	0
2($\phi = 10^\circ$)	3.2	5.3	2393	568	3.7
3($\phi = 20^\circ$)	3.5	5.4	2224	468	9
4($\phi = 30^\circ$)	3.5	5.4	2224	468	9

마찰에 의한 에너지 감소가 적고 회전운동의 경우 마찰에 의한 에너지 손실이 크게 발생하기 때문이라 판단된다. 비산거리와 도약높이의 절대값이 실제의 낙석운동보다 큰 것은 가정한 지표면의 스프링정수와 감쇠정수의 값이 상대적으로 적게 산정되었음을 의미한다. 도약높이의 상이에도 불구하고 2차 충돌 시까지 소요된 시간은 마찰계수의 증가에 크게 영향을 받지 않았다.

그림 4와 그림 5는 계산의 전 과정동안의 에너지 보존을 검토한 결과이다. 에러의 계산은 총에너지량의 보존을 검토하여 본 계산이 적절히 수행되었는지를 확인할 수 있는 좋은 척도가 된다. 그림으로부터 낙석의 지표면 1차 충돌과 2차 충돌 시에 운동에너지가 침투값을 갖게 되며 마찰계수가 증가함에 따라 충돌 시 속도가 감소함으로 인하여 감쇠에너지가 감소됨을 알 수 있다.

5. 결론

원과 선분을 모델링 할 수 있는 2차원 개별요소법을 개발하여 이를 이용하여 철도사면에서의 낙석운동을 분석하였다. 사면과 낙석사이의 마찰계수를 변수로 하여 낙석운동 시 낙석이 지표면에 도달하는 시간, 1차충돌 후 비산거리, 사면운동 동안의 낙석회전 횟수 등을 분석하였다,

- 1) 본 연구의 조건 하에서 1차 지표면 충돌시간, 즉 사면을 운동한 시간은 사면과 낙석과의 마찰이 증가함에 따라($\phi = 0^\circ$ 에서 $\phi = 30^\circ$ 로) 2.9sec에서 3.5sec로 0.6sec 증가하였다.
- 2) 사면과 낙석과의 마찰이 증가할수록 낙석은 미끄러짐 운동보다는 회전운동이 증가함을 확인할 수 있었다(0회에서 9회). 또한 마찰이 증가할수록 2차충돌 시까지의 비산거리는 점차 감소하였으며, 도약높이도 함께 감소됨을 알 수 있었다. 이는 미끄러짐 운동의 경우 마찰에 의한 에너지 감소가 적고 회전운동의 경우 마찰에 의한 에너지 손실이 크게 발생하기 때문이라 판단된다.
- 3) 총에너지량이 보존되었는지를 확인하기 위하여 계산의 전 과정동안의 에너지 보존을 검토하였다. 1차충돌과 2차충돌 시에 운동에너지는 침투값을 갖게 되며 마찰계수가 증가함에 따라 충돌 시 속도가 감소함으로 인하여 감쇠에너지가 감소됨을 확인할 수 있었다.

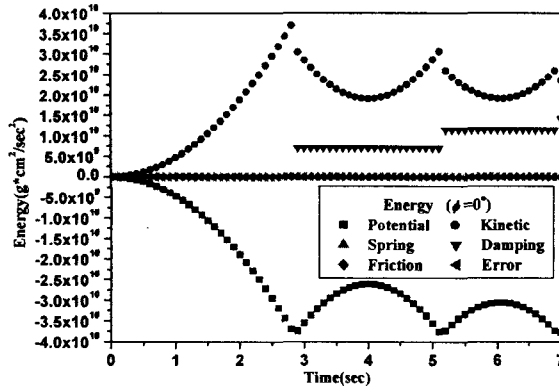


그림4. 낙석 운동 중의 에너지 보존($\phi = 0^\circ$)

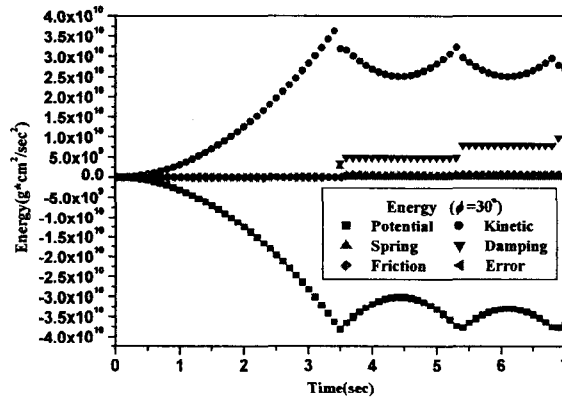


그림5. 낙석 운동 중의 에너지 보존($\phi = 30^\circ$)

참고문헌

1. 신민호, 황선근, 박영곤등(2002), “철도시설의 안전성 강화기술 개발 연구보고서”, ‘99건설교통기술혁신사업 제2차년도 연차보고서
2. Kazuyoshi Yokino, Takuo Yamagami(2002), “낙석운동해석에 필요한 개별요소법 변수의 동정법”, 일본토목학회논문집, No.701/III-58, pp.409~420
3. P.A.Cundall(1971), “A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems”, ISRM Symposium, Nancy, France, Proc.,Vol.2, pp.129~136,
4. Takashi Matsushima(1997), “입상체사면의 동적소성변형에 미치는 입자간상호작용의 영향”, 박사학위논문, 동경대학교, 일본