

충격흡수용 낙석방지 울타리의 동역학적 거동

김학수 · 양경택*

호남대학교 토목공학과 · *대림대학 메카트로닉스학과

I. 서론

현재 국내에서 사용중인 낙석방지용 울타리는 낙석의 낙하운동에너지를 낙석방지망과 와이어 로프 및 지주에 의한 결합으로 흡수하는 역할을 하고 있으며 이중 와이어로프는 커다란 인장강도로 인하여 대형 낙석의 도로유입을 차단하는 중요한 역할을 하고 있다. 정력학적 관점에서는 와이어 로프는 인장강도가 큰 이유로 인하여 큰 하중을 지지할 수 있으나 그 변형량이 제한되는 이유로 인하여 낙석의 운동에너지를 흡수하는 측면에서 효율성이 저하되는 것이 일반적인 특성이다. 반면 본 연구에서 제안하는 스프링이 부착된 와이어로프는 인장강도는 유지하고 있는 상황에서 스프링의 탄성변형으로 인한 커다란 탄성변형을 유발하여 상대적으로 많은 에너지를 흡수할 수 있으며 또한 동력학적 관점에서는 부착된 스프링의 감쇠(damping)로 인하여 케이블의 최대하중을 줄일 수 있는 좋은 방법이며 상대적으로 많은 낙석의 운동에너지를 흡수할 수 있다고 판단된다. 본 연구에서는 스프링이 부착된 충격흡수형 낙석방지울타리와 기존의 낙석방지울타리의 에너지 흡수효과를 이론적으로 해석하고 상대비교를 통하여 충격흡수형 낙석방지울타리의 동적특성 및 우월성을 보이하고자 하며 현장상황 및 시공에 따른 다양한 형태에 대한 변수의 영향을 배제하기 위하여 단일모듈(3m 기준)을 기준으로 비교·분석하였다.

II. 이론

1. 충격흡수형 울타리의 동적 에너지 흡수기능

1.1 정력학적 이론

그림.1과 같이 낙석이 와이어 로프에 충돌하여 변형을 일으키면 와이어로프 및 낙석방지망은 변형을 일으키며 와이어로프는 주로 탄성변형을 유발시키고 낙석방지망은 소성변형을 주로 발생시킨다.

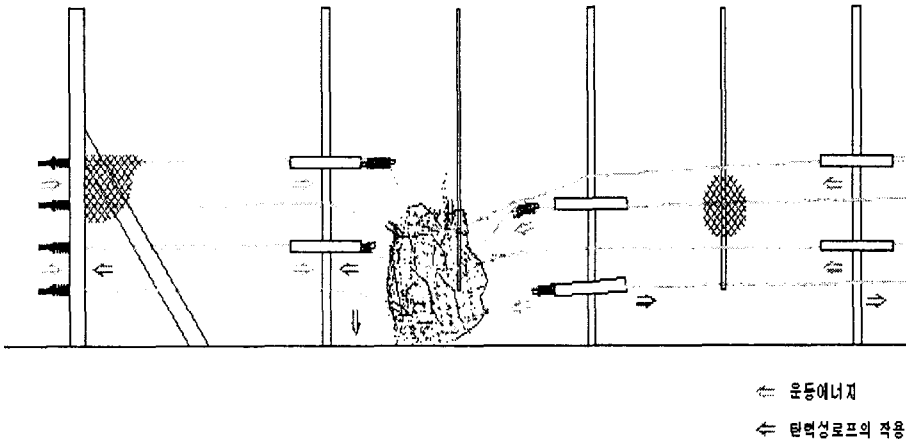


그림.1 낙석발생 시 운동에너지와 탄력성ワイ어로프의 작용 모식도

이때 초기장력 T_0 을 받고 있는 케이블에 발생되는 장력 T 는 흡수되는 에너지 E 와 식(1)의 관계에 있으며 식(1)로부터 케이블 장력의 변화량을 구할 수 있다.

$$E = (T^2 - T_0^2) / 2K + \sum (T^2 - T_0^2) / 2K_i \quad (1)$$

여기서 K 는 와이어로프의 스프링상수이며 K_i 는 단부 및 중앙스프링의 스프링 상수이다. 장력의 변화량으로부터 와이어로프의 변형량을 식(2)로부터 계산할 수 있으며

$$\sigma = (T - T_0) / K + \sum (T - T_0) / K_i \quad (2)$$

하중과 변형의 기하학적 관계로부터 식(3)을 유도할 수 있다

$$\frac{(l/2 + \sigma/2) \cos(\theta) = l/2}{x} \quad (3)$$

또한 낙석의 충돌이 발생시 충돌방향의 최대변위 x 는 다음의 식으로부터 구한다.

$$x = (l/2) \tan(\theta) \quad (4)$$

1.2 동력학적 이론

앞의 정력학적 이론에서와 같이 낙석의 하중이 충돌하여 발생하는 와이어의 변형량 및 하중 방향의 변위는 기하학적 비선형성을 보이고 있으며 이를 이용하여 낙석이 충돌시 와이어에 발생하는 동적변위 및 인장력을 계산하는 것은 비선형 동력학문제로 귀착되며 특히 접촉문제

(contact problem)의 성격을 지니고 있어 해석이 매우 어렵게 된다.

이를 위하여 본 연구에서는 비선형 연속계를 선형 집중질량모델로 변경하여 계산을 수행하였으며 그 절차는 그림.2와 같다.

일반적으로 질량 m kg의 낙석이 울타리에 부딪혀 탄성에너지로 변화될 경우에 발생하는 울타리의 변위 x 는 다음과 같다

$$\frac{m}{2} V^2 = \frac{k_{eq}}{2} x^2 \tag{5}$$

여기서 K_{eq} 는 울타리의 등가강성이며, 발생변위(x)는 식(6)와 같이 속도에 비례하고 고유진동수(ω_n)에 반비례하게 되며,

$$x = \sqrt{\frac{m}{k_{eq}}} V = \frac{V}{\omega_p} \tag{6}$$

최대하중 F 는 아래의 식(7)에서처럼 낙석의 속도에 비례하고 K_{eq} 의 1/2승에 비례하게 된다. 따라서 스프링을 강선에 부착함으로써 전체의 등가강성계수 K_{eq} 를 저하시키면 충격하중의 발생량이 줄어들게 되는 효과가 있어 동일한 굵기의 케이블로써 많은 에너지를 흡수할 수 있다.

$$F = k_{eq} x = \sqrt{mk_{eq}} V \tag{7}$$

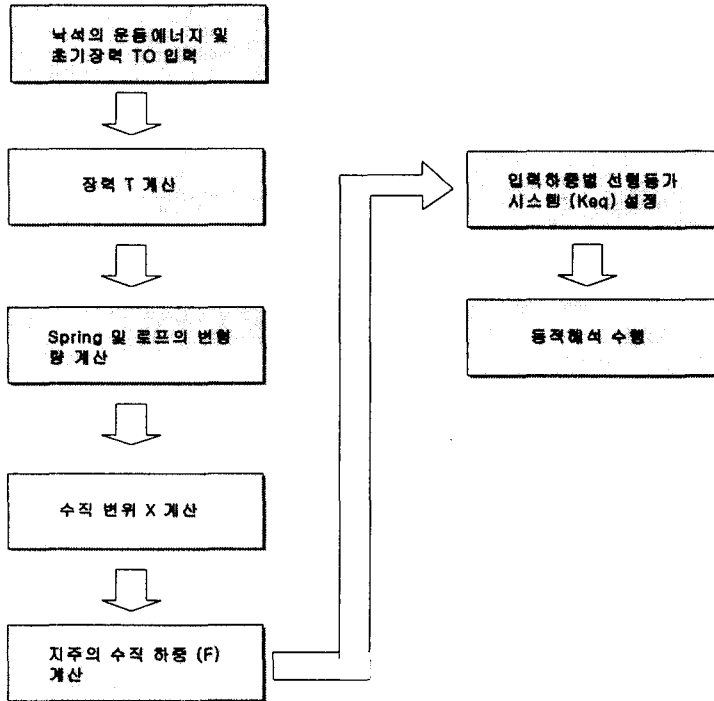


그림.2 비선형 해석의 flowchart

1.3 비교해석 모델

스프링이 장착된 충격흡수형 울타리의 동적 효과를 정량적으로 입증하기 위하여 3m 길이의 단일 와이어 로프가 양쪽 지주에 설치되어 있는 경우와 동일 길이의 와이어 로프 양단에 단부스프링 (K1) 및 중앙스프링(K2)이 설치되어 있는 경우에 대한 충격에너지 흡수효과를 상대적으로 비교하였다.

낙석의 입력에너지를 변화시키면서 두 경우에 대하여 아래의 사항을 비교·분석하였다.

- 1) 케이블의 장력
- 2) 충격하중에 의한 발생 변형량
- 3) 등가스프링 상수
- 4) 인장 케이블의 동적응답

낙석이 지니고 있는 총운동에너지는 로프, 스프링, 지주 및 철망이 흡수하게 되는데 지주와 철망은 해석하고자 하는 두 경우 모두 차이가 없으므로 스프링의 유무에 따른 와이어의 동적거동을 중심으로 비교한다.

(8)

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$$

: 와이어 로프의 흡수에너지

E_1 : 중앙 및 단부스프링의 흡수에너지

E_2 : 지주의 흡수에너지

E_3 : 철망의 흡수에너지

E_4 외부에서 낙석에 의한 충격하중이 울타리에 작용될 때, 울타리에서는 와이어 및 스프링의 변형에 의한 기하학적 비선형성이 발생하여 지배방정식이 비선형으로 표현되므로 이를 수직하중 및 수직변위에 의한 등가 선형시스템(K_{eq})으로 변환하여 해석을 수행하여야 하며 해석의 결과는 입력에너지의 크기에 따라 변하게 되므로 이를 그래프를 통하여 표시하였다.

해석에 사용된 물성치는 다음과 같으며 와이어의 초기장력, 스프링상수등의 입력된 물성치에 따라 해석결과의 부분적인 차이가 예상되나 본 연구의 주된 목적은 와이어에 스프링이 결합되어 나타나는 동적 에너지의 흡수성의 차이를 비교분석하기 위한 것이므로 비교분석을 위한 두 경우의 공통데이터를 동일하게 사용할 경우 문제점이 발생하지 않는다.

와이어로프의 단면적 : 0.000127 M2 (d=12.7mm)

와이어로프의 단위 길이 : 3M

와이어로프의 초기장력 : 5000N

단부스프링 (K1)의 스프링상수 : 87.4Kg/mm = 800000N/m

중앙스프링 (K2)의 스프링상수 : 9.18Kg/mm = 90000N/m

III. 실험

2. 해석 결과

2.1 등가강성의 변화

앞서 언급한 정적, 동적 이론에서와 같이 낙석의 충격에 의한 울타리의 강선와이어의 거동은 기하학적 비선형 거동을 하므로 지주와 결합된 시스템의 충격흡수 메커니즘은 비선형 거동을 하게 된다. 따라서 단위모듈(3m 기준)을 기준으로 입력에너지에 따른 케이블의 등가강성(K_{eq})을 구하면 그림.3과 같고 그림에서 보듯이 스프링이 없는 경우의 등가강성은 입력하중에 따라 크게 증가하고 있으나 스프링이 부착된 경우에는 상대적으로 등가강성이 낮음을 알 수 있다.

이는 식(7)에서처럼 케이블에 발생하는 최대장력은 등가강성의 1/2승에 비례하므로 스프링을 결합한 경우가 동일한 충격하중에도 더 작은 케이블의 장력을 유발함을 알 수 있다.

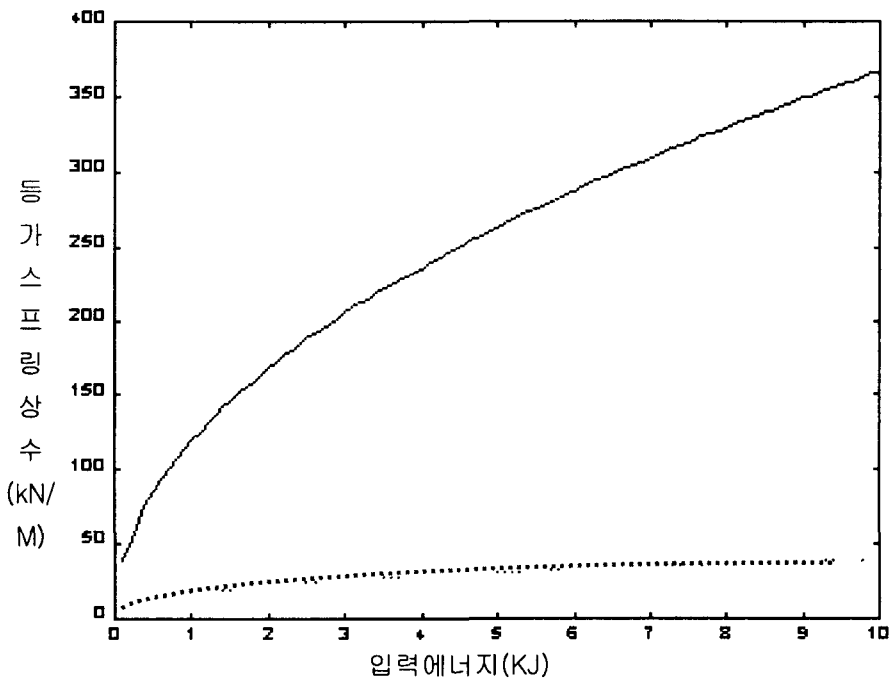


그림.3 낙석의 입력에너지에 따른 울타리의 등가스프링상수 (K_{eq})
;상선(강선만 있는 경우), 하선(강선 + 스프링)

2.2 낙석의 충격에 의한 수직 변위

그림.4에 단위모듈을 기준으로 낙석의 충격력에 의해 발생하는 두 시스템의 수직변위를 비교하였다. 동일한 충격력에 대하여 스프링이 부착된 낙석방지 시스템은 약 4배 이상의 수직변위를 보이고 있으며 이는 동일한 경우의 강선와이어를 사용한 경우보다 더욱 많은 에너지를 흡수할 수 있음을 나타내고 있다. 물론 사용된 스프링의 허용변위를 초과하면 그 이상의 에너지흡수는 일어날 수 없지만 적어도 스프링의 탄성범위내에서는 에너지 흡수효과가 탁월하며 본 연구에서는 고려하지 못하였지만 스프링의 대 변형시 발생하는 감쇠에 의한 에너지 흡수까지도 기대할 수 있다.

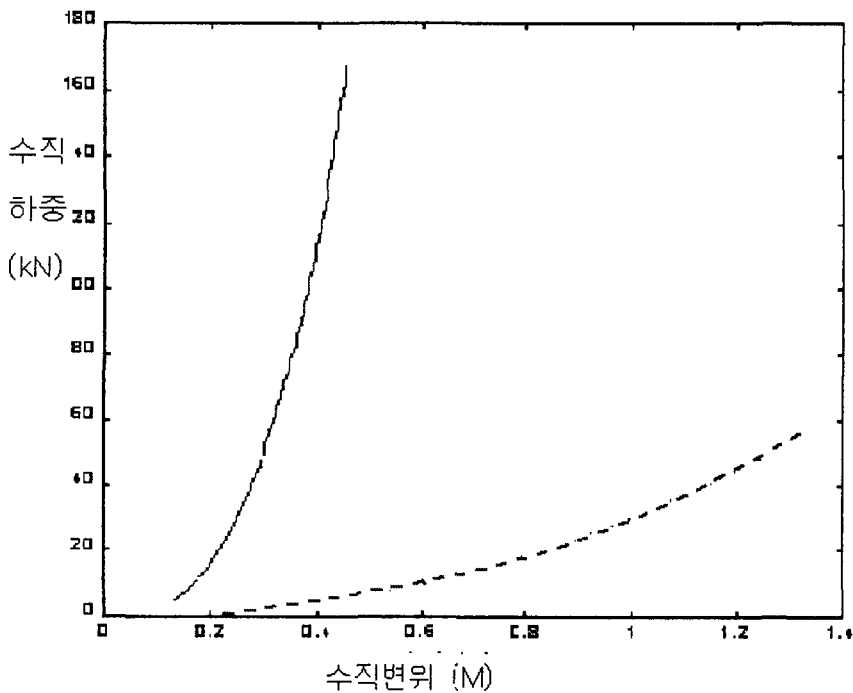


그림.4 수직충격하중에 따른 수직변위 비교
;상선(강선만 있는 경우), 하선(강선 + 스프링)

2.3 낙석의 입력에너지에 따른 신장량 및 장력

그림.5와 그림.6에 낙석의 입력에너지에 따른 케이블 및 스프링결합체의 신장량 및 장력을 표시하였다. 케이블과 스프링이 결합된 시스템에서는 상대적으로 많은 변형을 허용하면서 대신 발생장력이 저감됨을 알 수 있다.

이는 동일한 낙석의 입력에너지에 대하여 스프링이 결합된 케이블은 커다란 변형을 유발하기

위하여 접촉시간(contact)을 길게 유지하게 되므로 상대적으로 충격에 의한 하중을 줄일 수 있으며 대신 변형량을 증가시키어 내부의 탄성에너지 흡수량을 늘리게 된다.

이는 에너지평형과 더불어 공학에 사용되는 운동량의 보존 원리를 이용하면 쉽게 설명되는데 질량 $m(\text{Kg})$ 의 낙석이 $V(\text{m/sec})$ 의 속력으로 와이어에 충돌시 운동량보전의 법칙에 의하여 식 (9)의 관계가 성립하며 동일한 충격량에 대하여 변형량이 클 경우 Δt 가 증가하게 되어 충격 하중(F) 및 장력(T)이 감소하게 된다.

$$MV = F_1 \Delta t_1 = F_2 \Delta t_2 \tag{9}$$

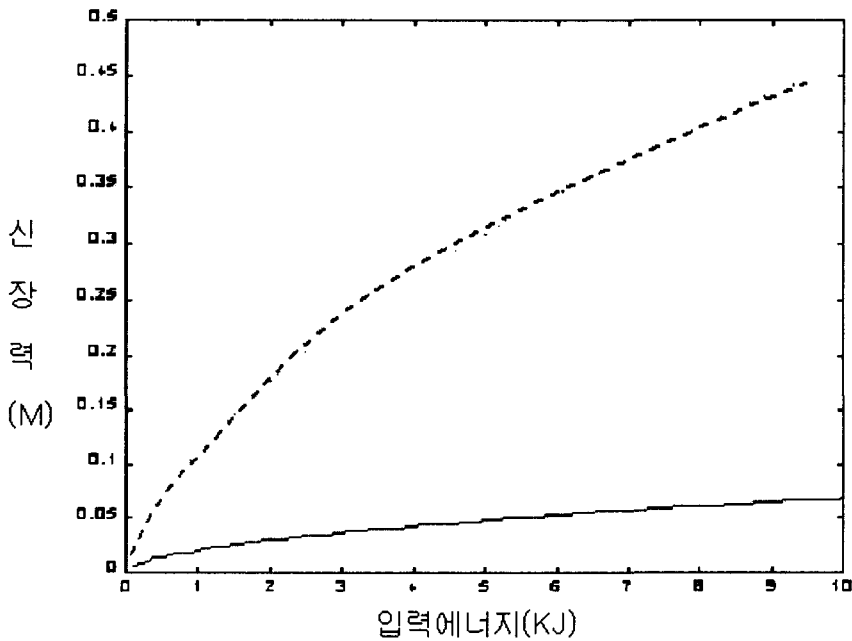


그림.5 낙석의 입력에너지에 따른 신장량
;상선(강선만 있는 경우), 하선(강선 + 스프링)

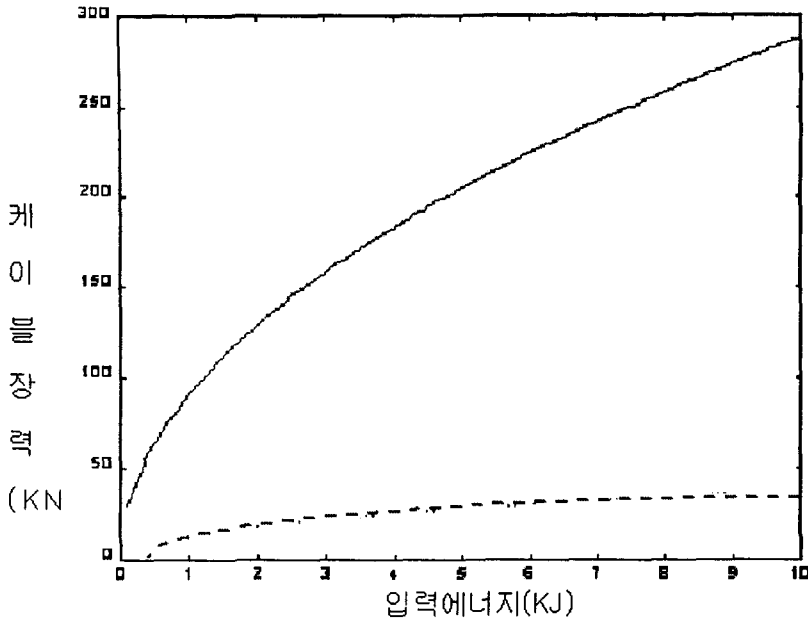


그림.6 낙석의 입력에너지에 따른 케이블의 장력
;상선(강선만 있는 경우), 하선(강선 + 스프링)

2.4 낙석이 충돌시의 동적 거동비교

앞서 언급한 바와 같이 하중 대 변형량이 기하학적 비선형성을 보이는 낙석방지 시스템을 선형화하여 낙석이 충돌시의 동적 거동을 시간영역에서 미분방정식을 상태방정식으로 변환하여 구하여 보면 그림.7과 같은 전형적인 형상을 볼 수 있다. 즉 스프링이 결합된 와이어는 등가강성이 작아 대변형을 일으키며 또한 낙석이 충돌직후 저주파의 고유진동수를 지니고 있는 반면 와이어만으로 구성된 낙석방지 시스템은 변형이 작고 고주파성분을 지니고 있으며 앞절에서처럼 많은 장력을 발생시키므로 충격에너지의 흡수면에서 불리함을 알 수 있다.

일반적으로 질량 m kg의 낙석이 V m/sec의 속력으로 울타리에 부딪혀 탄성에너지로 변화될 경우에 발생하는 울타리의 변위 x 는 다음과 같다

$$\frac{m}{2} V^2 = \frac{k_{eq}}{2} x^2$$

여기서 K_{eq} 는 울타리의 등가강성이며, 발생변위(x)는 다음식과 같이 속도에 비례하고 고유진동수(ω_n)에 반비례하게 된다.

$$x = \sqrt{\frac{m}{k_{sp}}} V = \frac{V}{\omega_n}$$

그림.6에서처럼 스프링이 결합된 와이어는 고유진동수(ω_n)가 작기 때문에 대 변형을 일으키며 다음의 운동량보존의 법칙을 고려할 때 대변형에 의한 접촉시간의 증가(Δt_1)로 최대하중을 줄일 수 있다

$$F_1 = MV / \Delta t_1$$

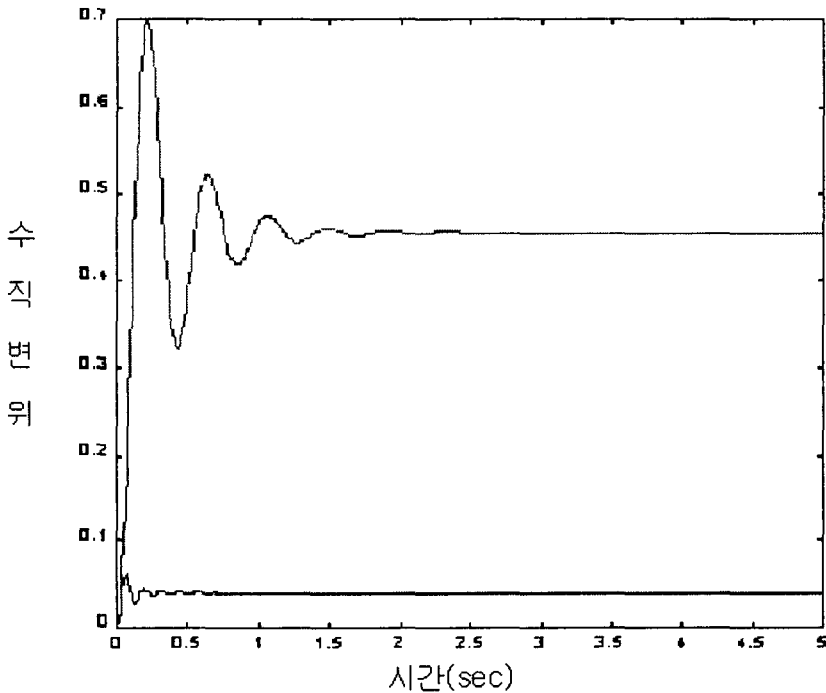


그림.7 낙석의 충돌시 시간에 따른 수직변위의 동적응답
;상선(강선만 있는 경우), 하선(강선 + 스프링)

IV.결 론

3. 공학적 고찰 및 결론

동력학적으로 충격흡수형 낙석방지 울타리의 효과를 정성적으로 묘사하면 다음의 그림.8에서 처럼 충격흡수형 낙석방지울타리는 스프링의 효과에 의하여 강선에 초기장력(T0)이 작용하고

있는 상황에서 전체 구조계의 등가강성계수를 저하시키기 때문에 낙석에 의한 충격하중이 발생할 경우 많은 변형을 유발시켜 충격흡수에너지를 증대시키는 효과가 있으며 특히 커다란 변형에 따른 접촉시간이 증가하게 되어 많은 에너지를 흡수할 수 있음에도 불구하고 케이블의 최대장력을 줄일 수 있다.

1. 와이어 및 스프링의 인장강도가 정해진 상황에서 충격흡수형 울타리는 커다란 변형에 의한 에너지 흡수효과의 상승을 기대할 수 있다.

(K_{eq} 의 저하효과 : 해석그림참조)

- 스프링을 부착하여 대변형을 유발함으로써 낙석의 충격시 접촉시간의 증대에 따라 최대하중을 줄일 수 있을 뿐 아니라 동일한 와이어를 사용할 경우에도 많은 에너지를 흡수할 수 있으며 특히 대변형에 따른 스프링의 감쇠효과도 기대할 수 있다.

2. 부착된 스프링에 의해 전체시스템의 등가강성계수를 저하시키므로 최대발생장력의 저하효과를 기대할 수 있다. (해석그림 참조)

- 케이블에 발생하는 최대 장력은 등가강성(K_{eq})의 1/2승에 비례하는데 충격방지형 울타리의 와이어의 등가강성은 스프링이 없는 경우의 1/4이하이므로 동일한 낙석의 충격량에 대하여 기존의 시스템보다 최대장력을 50%이하로 줄일 수 있다.

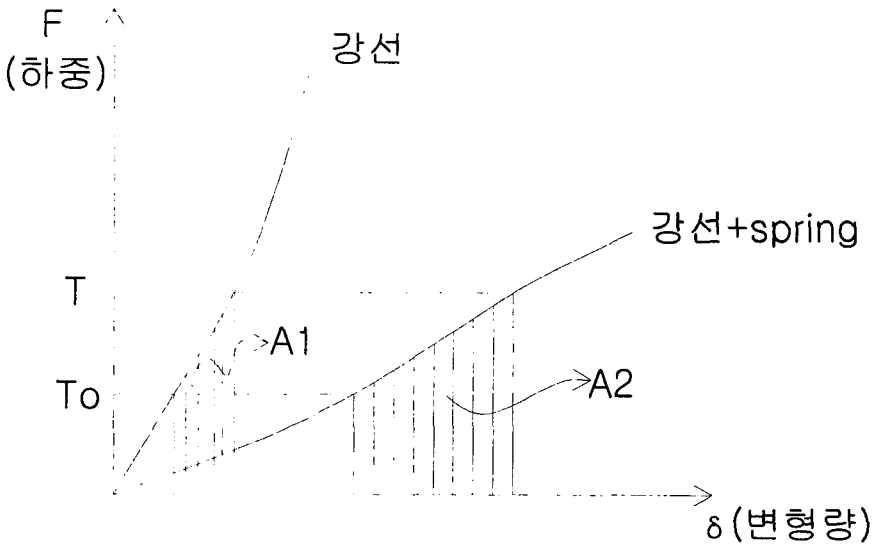


그림.8 전체시스템의 등가강성차이에 의한 에너지흡수

A1 : 와이어만 있는 경우의 에너지 흡수량

A2 : 스프링과 와이어가 결합된 경우의 에너지 흡수량

참고문헌

1. 도로안전시설 설치 및 관리 지침 - 낙석방지시설편(2000), 건설교통부, pp.1-84
2. 도로안전시설 설치 및 관리 지침 연구 - 낙석방지시설, 도로반사경, 장애인 안전 시설 편 작성(2000), 건설교통부, pp.7-94
3. 박혁진, 구호본, 이경미, 김규한(2000), “현장실험을 통한 낙석방지울타리 설계기준 제시 연구”, 한국지반공학회 2000년 사면안정 학술발표회, pp.139-151
4. 구호본, 박혁진, 백영식(2001. 12), “현장 낙석실험을 통한 낙석방지울타리의 특징 및 성능 평가”, 한국 지반공학회 논문집, 제17권 6호, pp.111~121.
5. 落石防止防護工法, 理工図書, 三上善藏
6. 日本道路協會(2000), 落石對策便覽
7. Ritchie, A. (1963), “The evaluation of rockfall and its control”, Highway Research Record 17, pp.13-28
8. Paronuzzi, P.(1986), “Probabilistic approach for design optimization of rockfall protective barrier”, Quaterly J. Engineering Geolgy, 22. pp.135-146