

## 유연성 방호책을 이용한 철도변 낙석방호사례 Flexible Barrier System for Rockfall Protection

최승일<sup>1)</sup>, CHOI SEUNG IL, 유병옥<sup>2)</sup>, YOU BYUNG OK, 김경석<sup>3)</sup>, KIM KYUNG SUK

<sup>1)</sup>(주)지오브루그코리아 차장, Assistant General Manage of GEOBRUGG KOREA, CO, LTD.

<sup>2)</sup>한국도로공사 도로교통기술원 사면유지관리연구센터 센터장, 수석연구원, Research Director of Korea Highway Corporation

<sup>3)</sup>한국도로공사 도로교통기술원 사면유지관리연구센터 연구원, Researcher of Korea Highway Corporation

**개요(SYNOPSIS)** : Rockfall protection fence is one of the most common rockfall protection methods in Korea. If rockfall protection fences are required along the road or railway, their location, height and capacity, in terms of the maximum kinetic energy that they can absorb, should be specified. Within this paper, the best practice of rockfall barrier is introduced. Modern rockfall simulations as a means to define risks, protection requirements, dynamic loading and height of potential structures and selection of appropriate placement is presented. Technical possibilities of rockfall barriers and their actual limits are presented. Safety concepts based on probabilistic approaches are proposed. Recent studies performed in other countries show that Flexible Barriers are also a feasible system to stop and retain debris flows. Finally an outlook onto further development is given.

**주요어(Key words)** : 유연성 방호책(Flexible System), 낙석운동에너지(Rockfall Kinetic Energy), 낙석 시뮬레이션(Rockfall Simulation), 토석류(debris flow)

### 1. 서론

낙석방지시설은 낙석으로 인해 발생하는 재해로부터 귀중한 인명과 재산을 보호하기 위한 목적으로 설치되는 시설이다. 그러나 낙석발생은 매우 복합적인 요소가 작용하여 발생하는 자연현상이므로 어느 곳에서 어느 정도의 낙석이 발생할 것인지를 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 낙석에 의한 피해를 최소화하기 위해서는 철저한 현장조사를 통해 그 메커니즘을 규명하고 적절한 성능의 방호시설을 설치하는 것이 그 관건이라고 할 수 있겠다.

일반적으로 낙석방지시설은 그 대응방식에 따라 2가지 형태로 나뉠 수 있다.

첫 번째는 능동적인 방법으로서 낙석이 우려되는 예상암괴를 아예 제거하거나, 락볼트, 앵커, 와이어 로프, 네트 등 적합한 보강공법을 적용하여 탈락가능암괴를 고정, 안정화시킴으로써 낙석의 발생자체를 억제시키는 방법이다.

두 번째는 수동적인 방법으로서 낙석의 발생은 용인하되 대상구조물을 이동시키거나 그 주위에 피암 터널이나 낙석방지책 같은 방호시설을 설치함으로써 사면으로부터 낙하하는 암괴의 유입을 막는 방법이다.

첫 번째 방법의 경우 위험요인을 영구적으로 경감시키고 안정화시키는 장점이 있으나 보강대상면적이 클 경우 막대한 공사비가 들어갈 소지가 있고 두 번째 방법은 초기 투자비가 적고 보호하려는 구조물에 피해가 가지 않도록 하는 장점이 있으나 유지보수비용 등 시공 후 관리를 해야 하는 부담이 있다.

국내 철도의 경우 산악지형을 통과하는 노선이 많아 암절개면 및 터널 주변의 낙석방지에 대한 기술적 대안이 요구되고 있던 중 충북선 동량~삼탄 구간 중 암사면에 낙석이 우려되는 지역 500여m 구간에 대해 낙석방호를 위해 첨단공법인 '링네트(Ring Net)' 공법이 적용되었다. 본 현장은 철로변 사면붕괴 및 상습적인 낙석사고가 우려되었으나 적절한 공법을 선택, 적용함으로써 대형 참사를 방지한 사례로 판단된다.

본 공사는 충북선 전철화에 따라 해빙기 및 우기시 낙석으로 인해 우려되는 대형열차사고의 미연 방지를 위한 낙석방지시설 설치공사로서 충북선 전철화에 따른 정밀안전진단 결과 동량~삼탄 간에 위치한 암사면에 낙석이 우려되는 바, 그에 대한 물리적, 기능적 결함을 적절히 조치하여 낙석을 방지하고 현행 시설물 보호와 열차 안전 및 이후에 개통될 전철의 안전운행을 확보하기 위한 효율적이고 경제적인 낙석대책공법을 찾던 중 최적의 대안으로 '링네트 공법'이 적용되었다.

## 2. 유연성 낙석방호책의 적용사례

### 2.1 공법적용 배경

본 대상지역은 최근 3년간 해빙기에 수차례의 낙석이 떨어졌던 점을 감안하여 조사한 결과 동결·융해의 반복 작용으로 인해 암반이 약화, 이완되었고, 주변의 열차통행, 복선화 공사시 건설장비 등에 의한 진동으로 사면이 불안정해졌으며, 주변에 나무가 자라고 이 나무의 뿌리가 암의 절리나 균열부를 파고들어 절리의 균열을 크게 하고, 바람이 불면 풍하중에 의하여 나무뿌리가 지렛대 역할을 하여 암사면을 파괴시키는 것으로 검토되었다.

이에 대한 안정성 확보대책으로 정밀안전진단에서는 락볼트 설치 및 철근콘크리트 보강, 위험암괴 제거를 위한 무진동 발파, 간접적인 방안으로는 낙반암괴로부터 인명보호를 위한 방호구조물 설치가 제시되었다. 그러나 위험 암괴 제거를 위한 무진동발파는 기존 낙석우려가 있는 개소의 발파에 의한 제거시 인근 낙석의 추락, 제거낙석이 Key Block일 경우 인근 암괴 등의 대규모 낙석이 우려되므로, 낙석의 규모가 크고 절리가 발달된 본 지역의 경우 낙석제거보다는 신선한 암에 고정시켜 추가 낙석의 발생이나 절리의 발달이 일어나지 않도록 하는 것이 타당할 것으로 최종 결론이 내려졌다.

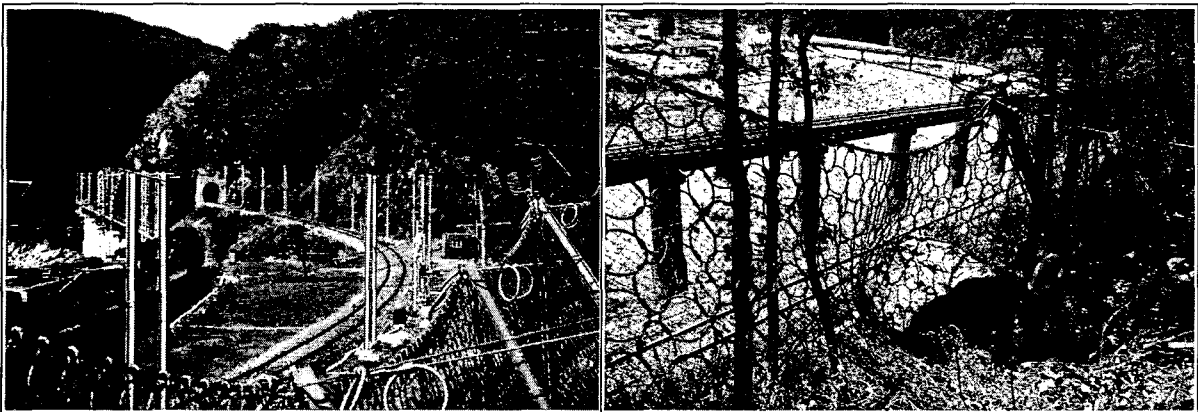


그림 1. 충북선 링네트 공법 설치 전경

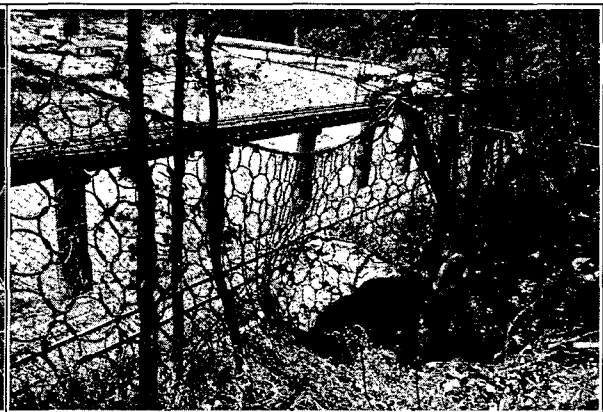
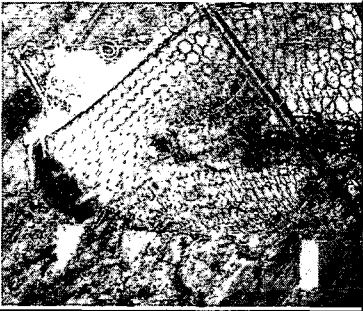
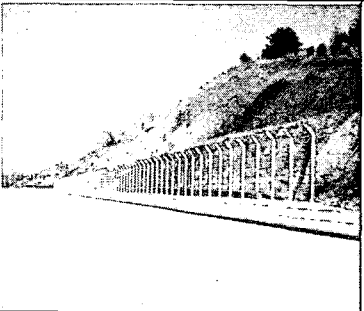
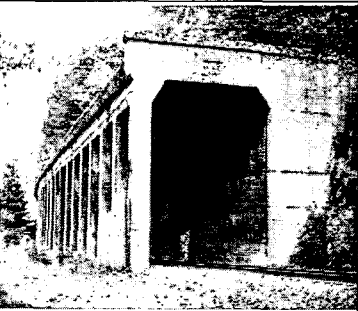


그림 2. 낙석 발생 현황

따라서, 대규모의 불안정한 암괴는 암부착망(TECCO 15)으로 감싸서 고정시켜 이완 및 이동을 방지하고, 또한 인근의 소규모 낙석 및 예기치 못한 대규모 낙석으로 인한 전철주 및 전차선의 파괴와 낙석에 의한 선로의 지장을 초래하여 열차운행이 중지되는 사태를 방지하며, 특히 상선의 삼천교량의 교각부분까지 낙석이 도달하지 않도록 하선 선로중심에서 약 12m 이격된 곳에 스위스 지오브루그(GEOBRUGG)사의 특허공법인 링네트 낙석방호책(RX-150)을 설치하였다.

즉, 링네트(Ring Net)공법, 낙석방지책, 피암터널의 3가지 안을 비교 분석하고 자문위원의 의견을 수렴하여, 그 중 안정성, 시공성, 시공비(경제성)측면에서 가장 우수한 링네트(Ring Net)공법을 채택, 시공하였다. (표 1. 낙석방지공법 비교(예) 참조)

표 1. 낙석방지공법 비교(예)

구 분	링 네 트 (Ring net)	낙 석 방 지 책	피 암 터 널
개 요 도			
특 징	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 타입별로 다양한 낙석방호책은 소~대규모 암석차단효과</li> <li>· 강체형 보다 유연성이 있어, 낙석의 충격에너지 흡수에 매우 유리</li> <li>· 공기가 짧음</li> <li>· 지형여건에 따라 자유롭게 설치가능</li> <li>· 공사비가 기존 방호책보다 고가</li> <li>· 케이블 타입으로 외국에서 수입된 공법임</li> <li>· 웹스는 와이어 로프 넷 형태</li> <li>· 경간이 비교적 김 (5~10M)</li> <li>· 낙석후 유지보수가 쉬우나, 정기적인 유지보수가 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 기존에 시행한 가장 보편적인 낙석방호 시설임</li> <li>· 탄력성이 없어 낙석 충격에 약하여 안전성에서 가장 취약</li> <li>· 웹스는 능형망 철선</li> <li>· 경간이 짧음 (2~4M)</li> <li>· 공기가 가장 짧음</li> <li>· 공사비가 가장 적음</li> <li>· 강재(POST)로 고레일 유용가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 시각적으로 가장 안전하며, 유지보수에 유리</li> <li>· 공사비 고가로 비경제적</li> <li>· 열차운행중 시공성 결여 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 운행선상 기초 굴착폭 협소로 기존선로 저축</li> <li>- 운행선상 동바리 및 거푸집 설치, 철거 곤란</li> <li>- 급사면 구간으로 굴착시 사면 유실 및 낙반붕괴 우려</li> </ul> </li> <li>· 공사 중 안전사고 우려 및 서행운전</li> <li>· 공기가 김</li> </ul>
에 너 지 흡수수준	250 - 3,000 kJ	50 kJ 이하	300 - 3,000 kJ

## 2.2 낙석발생 현황

본 현장은 철도청에서 지난 2001년 9월 시작, 지난해 4월 공사를 완료한 충북선 동량~삼탄간 낙석우려개소 보강공사중 낙석이 우려되는 500여m에 이르는 구간으로 2003년 2월 21일 하중 16톤 규모의 낙석(암괴크기 : 2.4m×1.8m×1.5m)이 발생했으나 이를 완벽하게 잡아냄으로서 바로 아래의 선로와 철도교량을 보호할 수 있었다. 이번 낙석발생지점은 노견이 거의 없고 선로와 바로 인접해 있어 낙석이 그대로 선로에 떨어졌을 경우 운행열차의 탈선은 물론 상선의 하단부 교각까지 막대한 피해를 안기고 대형 인명사고까지 발생했을 것으로 판단된다.

낙석충격에너지는 낙석 시뮬레이션 프로그램에 의한 역해석 결과 1,200kJ에 이르는 것으로 나타났고 조사결과 발생지점은 링네트 설치위치로부터 약 50m 상단부(선로에서 약 60m 이격지점)였으며 충격시

지주를 먼저 가격하고 링네트에 포획된 것으로 보여 진다.

## 2.3 적용공법 특징

### 2.3.1 공법개요

- (1) 링네트 낙석방호책은 낙석운동에너지를 강성구조(Rigid System)로 이루어진 힘으로 대항하는 것이 아니라 큰 변형성에 의해 에너지를 흡수하는 유연성(Flexible System)의 방호책이다. 특히, 기존공법에서는 찾아 볼 수 없는 충격완화기능을 보유한 링네트와 브레이크 링과 같은 부재로 구성되어 있으며, 각 부재에 의한 에너지흡수뿐 아니라 방호책을 구성하는 전(全)시스템에 의해 복합적으로 에너지 흡수성능을 향상시키어, 3,000 kJ에 이르는 극히 높은 낙석에너지에 대응가능한 공법이다.

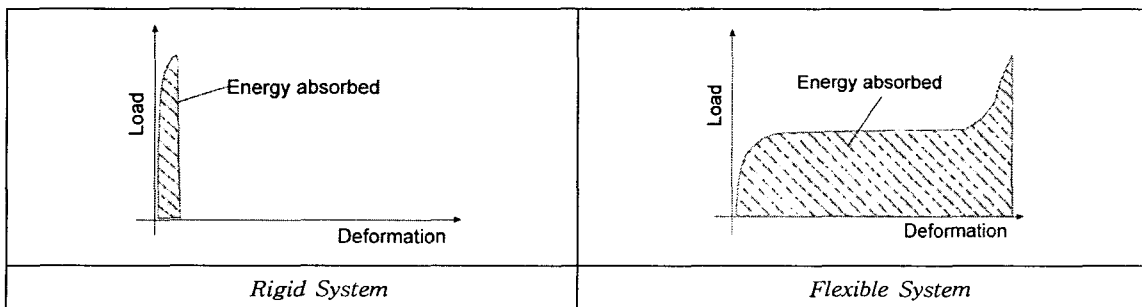


그림 3. 강성(rigid)구조물과 연성(flexible)구조물에 있어서의 하중-변형 특성

- (2) 운동에너지의 흡수량은 250~3,000 kJ (25~300 tfm) 이다.
- (3) 방호책 설치는 타공법에 비해 단기간에 가능하며, 높은 흡수능력을 고려할 때 경제적이다.
- (4) 온도변화, 기상조건, 부식 등에 대해 영향을 받지 않는 내구적인 부재를 사용한다.
- (5) 2스팬을 기본단위로 구성되며, 충격에 의한 파손시 부분교체에 의한 유지보수가 용이하다.
- (6) 기존 낙석 방호구조물에 비해 사면 내에서도 크게 눈에 띄지 않는 친환경적인 공법이다.

### 2.3.2 작동 메커니즘

- (1) 유연성 낙석방호책의 구성부재중 유일한 강성(剛性)체인 지주는 유연성(柔軟性)의 링네트를 수직과 수평방향으로 정확한 위치에 고정시킨다.
- (2) 링네트는 충격을 받는 최초의 부재로 암석이나 나무, 토석류(debris)를 방어하면서 링네트의 변형을 통해 충격에너지를 상쇄시킨다. 즉, 충격시 운동에너지의 대부분이 개개의 링네트 변형의 총합에 의해 상쇄되고 변형특성이 링네트와 지지구조가 골고루 반응할 수 있도록 작용한다.

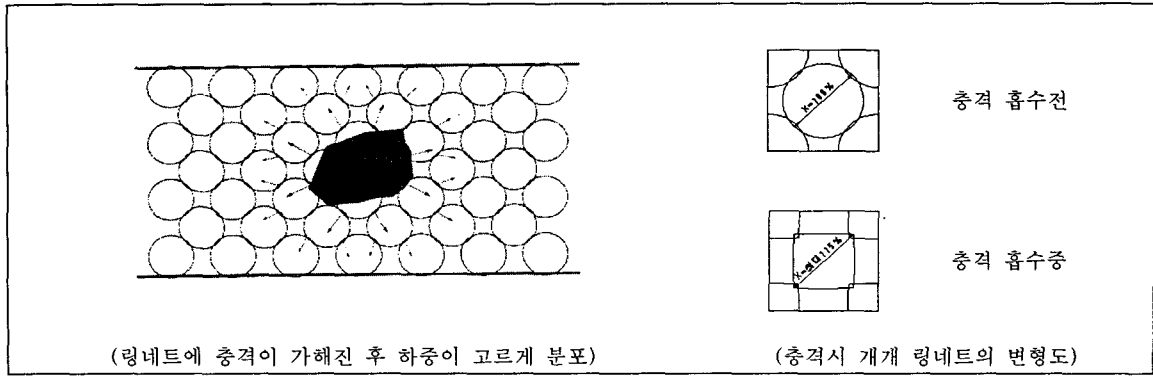


그림 4. 유연성 방호책의 작동 메커니즘(I)

(3) 일정수준을 초과하는 충격에너지는 지지로프 → 제동장치 → 측면 및 상부사면 앵커로프로 전달된다.

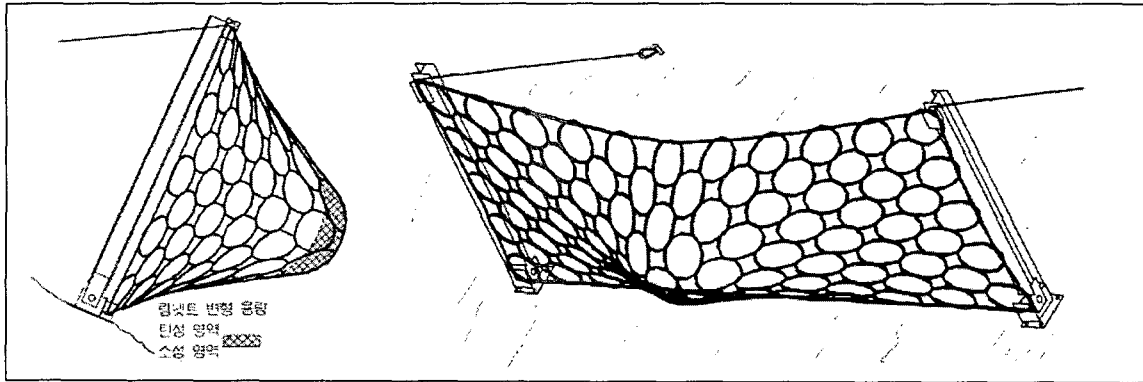


그림 5. 유연성 방호책의 작동 메커니즘(II)

(4) 제동장치(브레이크 링)는 충격이 전해지는 과정 중 두 번째로 힘을 받는 부분으로 나머지 운동에너지를 상쇄시킨다.

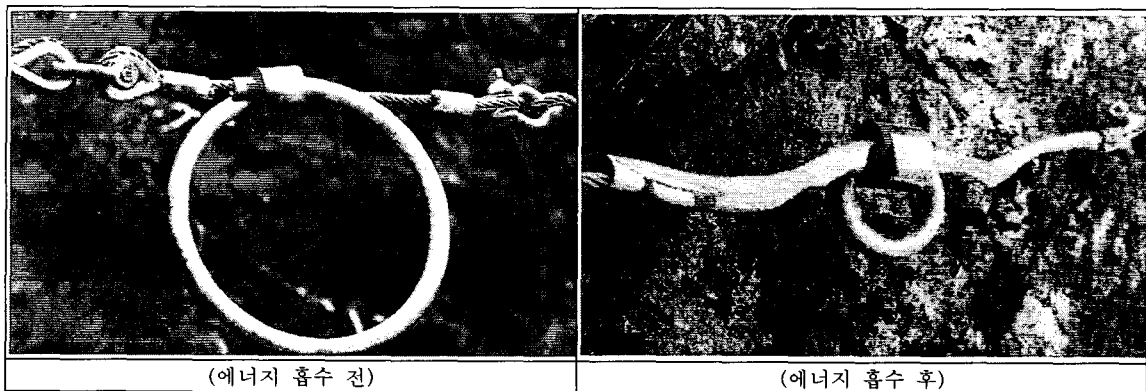


그림 6. 유연성 방호책의 작동 메커니즘(III)

(5) 제동장치(브레이크 링)의 변형특성은 앵커로 전해지는 최대하중을 제한하게 된다.

## 2.4 낙석하중 시뮬레이션

링네트 낙석방호책의 설계에 이용하는 낙석하중은 낙석의 운동에너지를 기본으로 설계 낙석에너지를 설정하여 이것을 기본으로 진행시키며 지중반력체의 안정계산은 낙석에너지를 받은 링네트로부터 각종의 부재를 통하여 지중반력체에 작용하는 하중을 기초로 하여 진행한다.

낙석방호책 위치에서의 낙석의 운동에너지를 산정하는 데는 다음과 같은 방법이 있다.

- ① 실험에 의해 입증된 낙석속도의 추정식으로부터 운동에너지를 구하는 방법
- ② 낙석시뮬레이션 프로그램을 이용하여 구하는 방법

운동에너지에 의해 계산할 경우, 예상되는 운동에너지는 낙석의 중량, 낙하경로, 낙하속도 등이 현장의 지형, 지질, 사면의 상태(구배, 풍화도, 식생) 및 그 외의 낙석 방지공법 혹은 방호공법과의 병용 유무에 따라서 현저히 차이가 나므로 이를 정확히 예측하기는 극히 어렵다. 그러므로 설계 낙석에너지의 설정시 일반적으로 방호대상 낙석의 최대에너지를 기준으로 하고 있다.

$$E_k = (1 + \beta) \left[ 1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right] mgH$$

$$\text{단, } (1 + \beta) \left[ 1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right] \leq 1$$

여기서,  $E_k$  : 낙석의 운동에너지 (J)

$\beta$  : 회전에너지계수 (보통 0.1)

$\mu$  : 등가마찰계수 (표 2. 참조)

$\theta$  : 사면구배 (°)

$m$  : 낙석의 질량 (kg)

$g$  : 중력가속도 (=9.8 m/s<sup>2</sup>)

$H$  : 낙석의 낙하고 (m)

표 2. 사면의 종류와 등가마찰계수  $\mu$ 의 값

구 분	낙석 및 사면의 특성	설계에 이용하는 $\mu$	실험에서 얻어지는 $\mu$ 의 범위
A	경암, 환(丸)상 : 요철 小, 입목 없음.	0.05	0~0.1
B	연암, 각(角)상~환(丸)상 : 요철 中~大, 입목 없음.	0.15	0.11~0.2
C	토사·애추, 환(丸)상~각(角)상 : 요철 中~大, 입목 없음.	0.25	0.21~0.3
D	애추·거력(巨礫)혼합애추, 환(丸)상 : 요철 大~中, 입목 없음~있음.	0.35	0.31~

### 2.4.1 개요

낙석이 발생할 가능성이 있는 경우, 이 낙석이 어떻게 사면을 낙하하는지 추정하여 낙석 방호시설의 설치 위치나 규모를 검토할 필요가 있다.

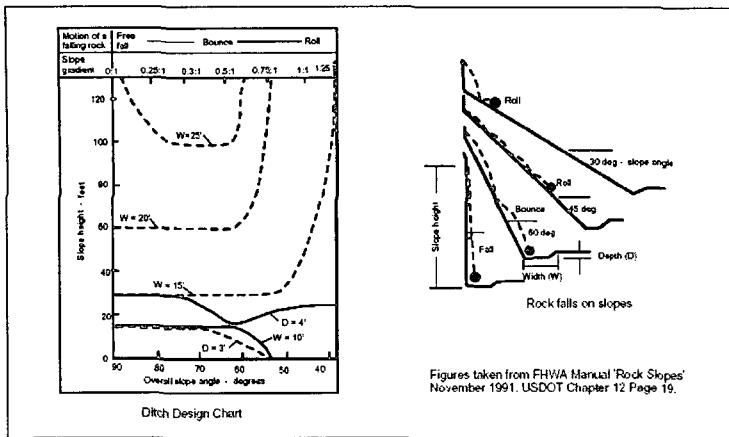


그림 7. Ritchie의 낙하모델 및 Ditch Design Chart

낙석이 사면위로 낙하하는 경우의 낙하 궤적 및 속도의 추정 방법을 최초로 제안한 것은 Ritchie이다. Ritchie는 (그림 7.)에 나타난 바와 같이 편의상 사면기본경사에 대한 3가지 이동형태를 상정하고, 낙석이 충돌할 때의 에너지 감쇠와 속도 성분의 감쇠를 낙석 크기마다 고려한 후, 다른 사면 구배가 조합된 일반 사면에 적용하는 방법을 고안하였다.

본 검토에서는 Dr. Spang 이 개발한 Rockfall Simulation Program 6.1을 이용하여 검토하였으며 이 프로그램의 특징은 다음과 같다.

- ① 10,000 개 이상 낙석의 이동 경로를 시뮬레이션 할 수 있다.
- ② 암과 사면의 재료학적 특성에 근거하여 낙석과 사면사이의 상호작용을 계산한다.
- ③ 낙석이 낙석방지책, 댐, 옹벽, 도랑 등과 같은 구조물에 충돌할 경우, 그 위치와 충격 에너지를 계산한다.
- ④ 횡단상에서 낙석의 충격에너지와 도약높이(bounce height)의 분포를 보여 준다.
- ⑤ 횡단상에서 10,000개에 이르는 각 낙석의 위치에너지와 도약높이의 envelope curves를 보여준다.
- ⑥ 10,000개에 이르는 각 낙석의 도약높이와 방호구조물에의 충격에너지를 통계학적으로 보여준다.

이에 따라 위험낙석에 의한 사면의 위험도 평가를 위한 낙석안정도 검토를 다음과 같이 실시하였으며, 사면형상과 낙석에너지에 따른 낙석방호시설의 위치와 크기를 결정하는데 활용하였다.

- ① 사면형태 입력 - 검토대상단면의 좌표 (x, y)
- ② 지반조건 입력 - 각 요소(slice)의 동적 마찰각, 정적 마찰각
  - 지표면에 수직 또는 평행으로 작용하는 충격력에 대한 damping값
  - 지표면의 rolling resistance
  - 단위 m당 경계면 거칠기의 진폭(amplitude) 및 주기(frequency)
- ③ 낙석조건 입력 - 낙석의 이동형태(sliding, rolling, free fall)
  - 낙석의 형상(sphere, cylinder)
  - 낙석의 단위중량, 반지름, 검토 낙석개수
  - 낙석 이동 시간간격, 속도
  - 낙석 발생 위치와 초기 발생 속도

- ④ 방호시설 입력 - 방호 구조물의 위치, 높이, 설치경사
- ⑤ 해석결과 산출 - diagram
  - path data
  - profile, energy and bounce heights distribution
  - statistics

## 2.4.2 적용물성치

국내에는 낙석시험 및 이에 따른 데이터의 축적이 미흡한 관계로 다음 <표 4.>에 나타난 바와 같은 물성치를 참고로 하여 현장시험 값을 토대로 물성치를 결정하였다. 국외사례에 의한 경험치에 대해서는 현장여건에 따라 변수가 크기 때문에 적절한 물성치의 선정이 필요하다.

표 3. Important Input Parameter for ROCKFALL (SPANG 1997)

Subject	Parameter	Abbreviation	Dimension	Order of Magnitude	Randomly varied	established by	Remarks
Program variables	calculation step	t	s	$0.01 \leq t \leq 0.05$	no	-	time step in which continuous movement is assumed
	lower speed limit	$V_N, V_T$	m/s	$V_N, V_T > 0$	no	-	calculation is stopped if these values are reached
	number of rocks	n	-	$1 \leq n \leq 10,000$	no	-	No. of rocks/run
Slope Qualities	slope geometry	X, Y	m	acc.to locality	no	surveying, aerial photogrammetry	-
	static friction	Rh	o	$12 \leq \phi_s \leq 45$	yes	direct shear tests, triaxial tests	important for rolling, impact
	dynamic friction	Rg	o	$10 \leq \phi_s \leq 35$	yes	direct shear tests, triaxial tests	important for sliding, impact
	normal damping	Dn	-	$0 \leq \epsilon \leq 1$	yes	field test, back analysis	important for impact
	tangential damping	Dt	-	$DF=1$ $0 \leq DF \leq 1$	yes	field test, back analysis	important for impact
Rockfall Qualities	rolling resistance	Rw	-	$0 \leq R_w \leq 1$	yes	field test, back analysis	important for rolling
	roughness amplitude	Oa	m	$O_a > 0$	yes	surveying	important for rolling, sliding, impact
	frequency	Of	m	$O_f > 0$	yes	surveying	-
	shape radius	R	m	$R > 0$	no	geotechnical mapping	-
	length	L	m	$L \geq 0$	no	geotechnical mapping	-
	density	$\gamma$	$t/m^3$	$2.0 \leq \gamma \leq 3.5$	no	laboratory test	-



표 4. Synopsis of Realistic Input Parameter for Rockfall Simulation (Spang & Sonser, 1995)

Description slope surface	Friction angle(°)		Damping		Rolling resistance	Roughness	
	dynamic	static	normal	tangential		Amplitude	Frequency
Rock, mainly smooth	29 - 32	38 - 42	0.05 - 0.07	0.86 - 1.04	0.02	0.10	1.00
Rock, rough surface	29 - 32	38 - 42	0.05 - 0.07	0.86 - 1.04	0.04 - 0.06	1.00	2.00
Rock debris covered, wooded	25	33 - 37	0.04 - 0.06	0.81 - 0.99	0.07 - 0.09	0.50	1.00
Rock with a thin soil cover	14 - 16	29 - 32	0.03 - 0.04	0.72 - 0.88	0.09 - 0.12	0.20	1.00
Rock debris with a thin soil cover	14 - 16	33 - 37	0.03 - 0.05	0.77 - 0.94	0.13 - 0.17	1.00	1.00
Residual soil, grass covered	14 - 16	29 - 32	0.03	0.68 - 0.82	0.10 - 0.14	0.10	1.00

표 5. 적용 물성치

구 분	Friction angle(°)		Damping		Rolling resistance	Roughness	
	dynamic	static	normal	tangential		Amplitude	Frequency
Rock with a thin soil cover	15±5%	30±5%	0.035±20%	0.8±10%	0.10±15%	0.20	1.00
Rock debris covered, wooded	25	35±5%	0.050±15%	0.9±10%	0.08±15%	0.50	1.00

### 2.4.3 검토단면 선정

낙석의 충격에너지를 산정하기 위해 실제 낙석발생지점으로부터 낙석을 발생시켜 낙석방호시설에 어떠한 영향이 미치는 지에 대하여 검토하였으며, 이를 위해 현장의 지형, 지질, 사면의 상태(구배, 풍화도, 식생)를 고려하였다.

표 6. 검토대상 낙석규모

구 분	낙석의 하중 (W, ton)	낙석의 환산반경 (r, m)	비 고
No. 9+7.0 지점	16.2	1.16	

주 1) 암괴의 하중 (W, ton) = B × H × L × γ = 2.4 × 1.8 × 1.5 × 2.5 = 16.2

2) 암괴의 환산반경 (r, m) =  $(\frac{3 \cdot W}{4 \cdot \gamma \cdot \pi})^{(1/3)}$  = 1.16

### 2.4.4. 검토결과

낙석의 충격에너지에 대한 검토결과 낙석의 충격에너지는 99~1,201kJ (Avg.385kJ), 낙석의 도약높이는 1.18m 정도인 것으로 나타났다. (본 현장에 설치된 링네트는 RX-150 Type으로 최대 흡수가능에너지는 1,500kJ 임)

표 7. 낙석에 의해 낙석방지책에 발생하는 충격에너지 (Impact Energy, kJ)

구 분	낙석의 충격에너지 (Impact Energy, kJ)			비 고
	Max.	Min.	Avg.	
No. 9+7.0 지점	1,201	99	385	

표 8. 낙석의 최대 도약높이 (Bounce Height, m)

구 분	낙석의 최대 도약높이 (Bounce Height, m)			비 고
	Max.	Min.	Avg.	
No. 9+7.0 지점	1.18	1.18	1.18	

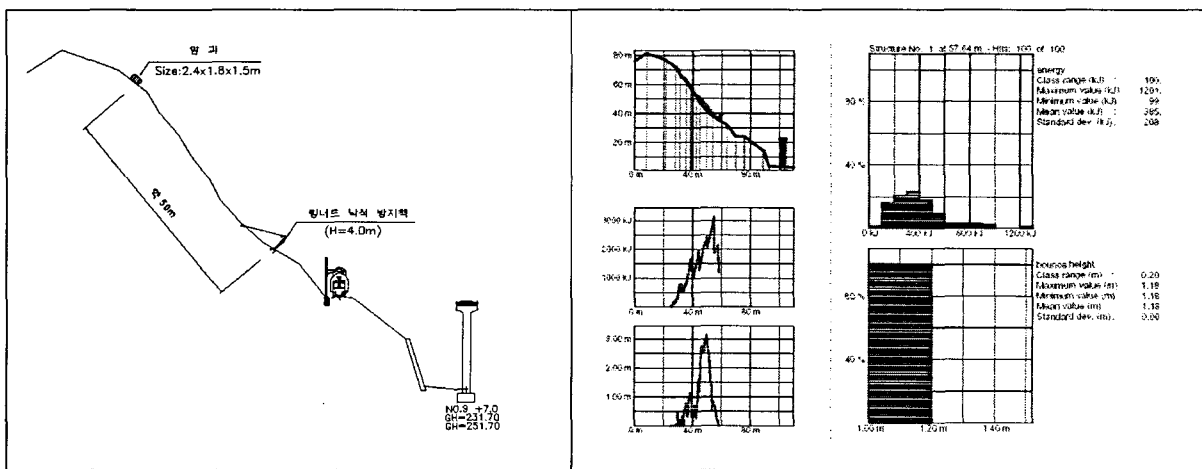


그림 8. 검토단면 및 Output

### 3. 낙석방호책 선정방법

#### 3.1 안전을 및 링네트 낙석방호책의 타입

낙석방호책 설계시 고려하는 Failure mode는 두 가지 형태이다.

첫 번째는 기하학적인 Failure이다. 이것은 구조물의 높이가 낮아서 낙석이 방호시설을 뛰어 넘는 경우이다.

두 번째는 구조적인 Failure이다. 이것은 구조물이 충격에너지를 받아낼 만큼 충분히 강하지 못함으로써 발생하는 기능상실이다.

따라서 낙석방호책은 충분한 높이로 설치되어 방호책 너머로 낙석이 도약하지 않도록 해야 하며 동시에 발생하는 낙석의 충격에너지를 흡수하여 낙석을 포착할 수 있어야 한다.

이러한 파괴모드에 대해 Stocker(1997)는 3가지 유형의 안전을 개념을 제시하였다.

- ① Safety factors as a lump sum : 낙석의 최대 충격에너지나 도약높이에 대해 안전을 1.5나 2.0을 적용하여 설계를 하는 것이다. 이는 매우 보수적인 접근방법으로 과다설계가 되기 쉬우며 비경제적이다.
- ② Application of partial safety factor : 모든 입력 자료에 부분안전율을 도입하는 것이다. 예를 들면 낙석의 규모, 단위중량, 마찰각, 감쇄계수 등에 부분안전율을 적용하는 것으로서 이 역시 비현실적이며 매우 보수적인 방법이다.

③ Probabilistic approach : 입력 자료에 확률론적인 기법을 적용하는 방법이다. 즉, 물성치에 일정한 평균과 분산을 주어 무작위로 변경시키면서 각각에 대한 발생가능성을 추정하는 방법이다. 이 경우 설계 값은 일반적으로 일어날 가능성을 염두에 두고 어느 정도 선에서 적용할 것인지를 결정하게 된다. 즉, 전체 생애 주기 동안 일정규모의 낙석이 어느 정도의 확률로 일어날 것인가를 예측하고 현장여건에 맞게 설계를 하는 것이다.

낙석방호책은 일종의 보안장치라 할 수 있다. 즉, 보전 대상물에 대해 낙석에 의한 피해가 미치지 않도록 하는 것이 주된 기능이다. 링네트 공법에서는 방호 가능한 낙석규모를 높은 수준에서 보증함과 동시에 낙석빈도를 고려한 경제성(설치와 유지보수)에 대하여 다음과 같은 사고방식을 취하고 있다. 즉, 개개의 구조부품이나 부재의 기능을 체크하여 그 성능을 확인하더라도 주된 기능이 만족되지 않는다면 보안장치로서의 의미는 없다. 역으로 낙석방호책에 요구되는 최대규모(설계 낙석에너지에 상당)에 가까운 낙석을 받았을 경우, 일부의 부품, 부재가 파손(소성변형을 포함)되어도 보전 대상물이 방호되도록 낙석을 포착할 수 있다면 낙석방호책의 기능은 발휘되었다고 할 수 있다.

따라서, 부품부재의 파손은 교환 혹은 수리의 대상이지만 설계낙석에너지에 필적하는 규모의 낙석이 발생하는 경우, 부재의 유지보수가 증가하여 방호공법으로서의 경제효율이 나빠질 수 있으므로, 낙석 발생후 유지보수 비용, 빈도, 현장접근성 등을 고려하여 적절한 타입을 선정하게 된다.

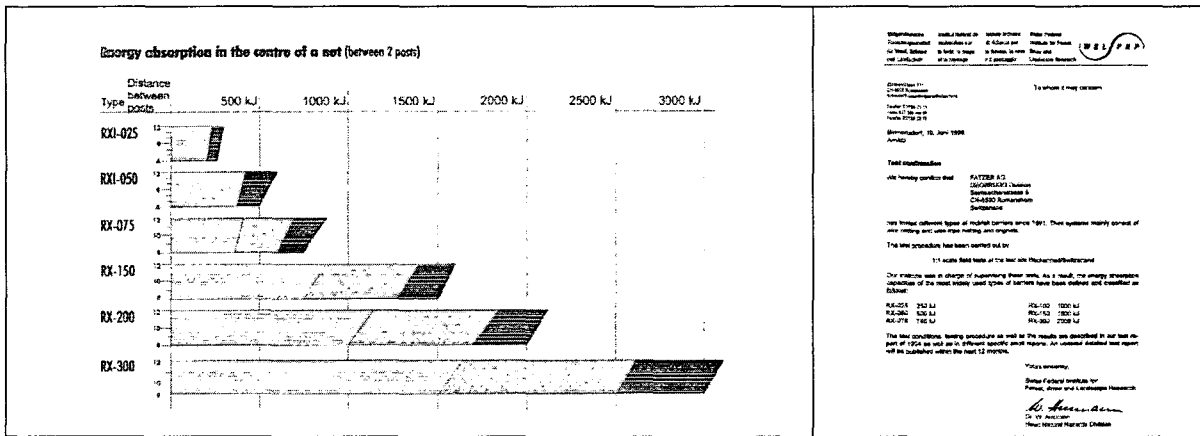


그림 9. 링네트 낙석방호책의 타입 및 인증서

### 3.2 국내실정 및 문제점

낙석방지울타리는 소규모 낙석에 효과적인 대책으로 전체 시공의 20%를 차지할 정도로 국내에서는 폭넓게 사용되고 있으나 절개면의 특성이나 낙석의 규모와 형상, 낙하높이 등과 같은 현장여건에 대한 고려 없이 동일한 형식의 울타리가 시공되고 있으며 흡수가능 에너지 수준에 대한 성능 인증이나 규정 등이 미비하여 일정 낙석규모에 대해 울타리의 효과여부를 판단할 수 있는 근거가 없는 실정이다.

반면, 선진국의 경우 현장실험을 통해 모든 낙석방지시설의 에너지 흡수정도에 대한 자료를 수집하여 현장여건에 따라 다르게 요구되는 흡수가능 에너지에 적합한 낙석방지시설이 설치될 수 있도록 하고 있어 낙석에 대한 효과적인 대응이 이루어지고 있다.

낙석방지시설의 경우 시설의 성능이 직접적으로 인명의 피해와 재산상의 손실과 연계되므로 시설의 성능을 확인하는 것이 매우 중요하다. 이런 이유로 선진국에서는 이미 다양한 성능시험이 이루어지고 이러한 시험의 결과로 각 형식의 흡수가능에너지를 평가하고 이를 이용하여 예상되는 낙석의 규모 등과 같은 현장상황에 적합한 시설을 설치하도록 하고 있다.

이와 같은 이유로 2000년 진주~통영간 고속도로현장내의 절개사면에서 낙석시험을 행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

당시 현장에서 제작된 콘크리트 볼을 절개면 상부로부터 절개면 하부에 설치된 낙석방지울타리로 낙

하시키 낙석방지울타리의 기능수행여부와 파손여부를 검토함으로써 국내에서 사용되고 있는 낙석방지울타리의 설치 적정성 여부와 문제점을 파악하였다.

이때 각각 다른 중량의 콘크리트 볼을 제작하여 약 20m 높이의 절개면으로부터 낙하시키고 낙석방지시설의 파손여부와 낙석의 도로유입가능성을 평가하였다.

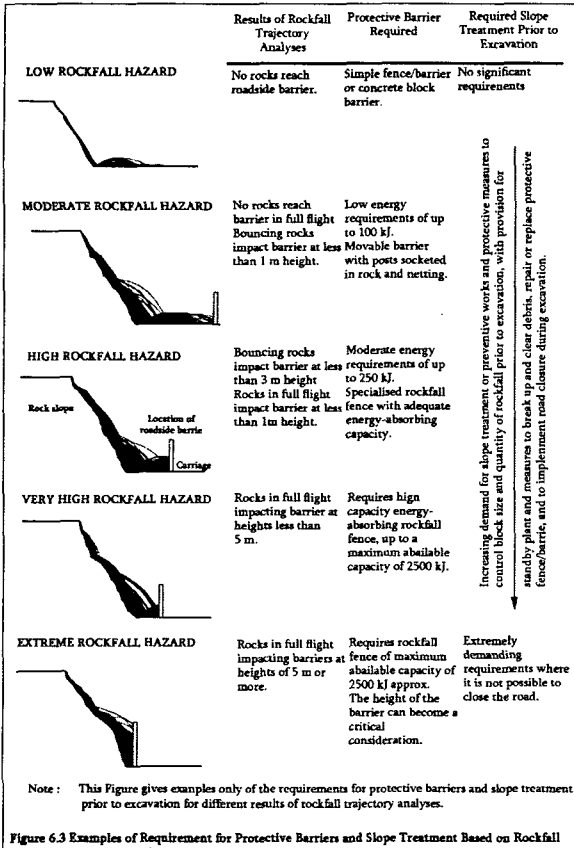


그림 10. examples of requirements for protective barriers and slope treatment based on rockfall (Hong Kong)

시공성 및 유지·관리 면에서 보다 유리한 획기적인 공법으로 판단되어 향후 낙석발생이 예상되는 지역에 적극적으로 대처할 수 있는 공법으로 전망된다.

링네트 공법의 우수성은 이미 2001년 6월에 스위스에서 열린 UEF(United Engineering Foundation) 국제 엔지니어링 학술발표회 현장실험에서도 입증되었는데, 이날 실험에서는 32m높이에서 9.6ton의 암석을 낙하시켜 발생하는 3,000kJ의 낙석파괴력을 흡수해 참관인들을 놀라게 한 바 있다. 당시 충돌되는 암석의 속도는 시속 90 km(초속 25m)에 달하였으나 링네트 낙석방호책은 여기서 발생하는 충격에너지를 골고루 분산, 흡수하는 완벽한 성능을 과시하였다.

실험현장은 진주~통영간 고속도로공사현장내의 절개면으로 높이 약 20m, 연장 30~40m 규모인 압반 절개면이 도로 양쪽으로 위치하고 있었다. 각 절개면은 경사도 1:0.5(65도)로 절취되어 있었으며 각 실험대상 절개면에 대하여 현장실험 후의 결과분석과 시뮬레이션을 위해 절개면의 경사, 상세 단면, 구성암석, 절개면 거칠기 등을 정밀하게 조사하였고 이러한 조사결과를 바탕으로 절개면의 단면과 각 단면의 특성을 검토하였다.

현장실험을 통해 파악된 국내 낙석방지울타리의 흡수가능에너지는 약 50kJ 이내인 것으로 나타났으며 이는 낙석대책편람(일본도로협회, 2000)에 제시된 낙석방지울타리의 흡수가능에너지 계산식을 이용하고 국내 낙석방지울타리의 형식과 재원을 적용하여 얻은 값과 동일하다.

참고로 미국의 경우 낙석방지울타리의 기본 흡수가능에너지로 200kJ을 요구하고 있으며 또한 울타리의 흡수가능에너지는 현장실험을 통해 입증되어야 한다.

홍콩에서는 낙석방지책의 설계시 적정위치, 높이, 그리고 성능 즉, 그 방지책이 흡수할 수 있는 최대 충격에너지양을 규정하도록 하고 있다.

본 현장에 설치된 링네트 낙석방호책의 경우는 10ton 정도의 암괴가 30m 높이에서 낙하하더라도 방어할 수 있는 최적의 낙석방호책으로서 동일에너지를 흡수하는 피암터널에 비해 시공비가 훨씬 저렴하며

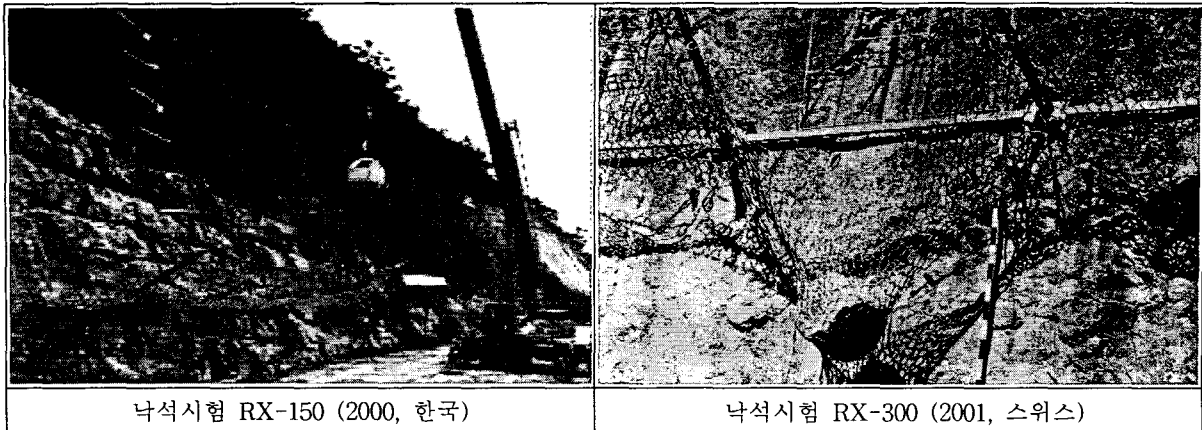


그림 11. 국내외 낙석시험 사진

#### 4. 기타 적용사례 (해외)

링네트 시스템은 일반적으로 낙석으로부터 시설물을 보호하기 위해 사용되어지나 링네트가 설치된 사면에서 눈사태나 토석류의 유입을 막아낸 사례가 종종 보고 되고 있다. 이러한 사실로부터 유연성의 원리를 이용한 방호시설이 상당한 양의 토석류의 이동을 억지시킬 수 있다는 것이 증명되었다. 일본, 오스트리아, 미국 등지에서는 유연성 방호책을 이용하여 토석류의 유입을 막아낸 사례가 종종 보고되고 있으며, 이를 근거로 토석류의 거동, 예를 들면 충격에너지, 유속, 파고(波高) 등과 이에 대응하는 방호책의 성능 및 설치기준 등에 관한 활발한 연구가 진행 중이다.

국내에서는 작년 여름 전국을 강타한 수해로 여의도 면적(298ha)의 9배에 해당하는 산이 유실된 것으로 집계됐다. 산림청에 따르면 작년 7월 제5호 태풍 '라마순'과 집중호우, 제15호 태풍 '루사' 등으로 산림부문에서는 2천700ha의 산이 무너져 내렸고 계곡 폭 100km, 사방댐 44개, 임도 622km 등이 피해를 본 것으로 보고되고 있다. 이러한 재해는 물의 흐름에 의해 발생하며 유속의 증가, 토사유실, 대구경 암반의 이동 현상 등으로 재해가 발생하게 된다. 이러한 물의 흐름에 의한 피해를 최소화하기 위해서 그 발생지에 링네트와 같은 재해방지시설을 설치함으로써 최소의 노력으로 최대의 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

링네트 공법은 유목, 토석류(debris) 등 부유물은 저장되고 물은 방류되는 구조로서 지천에서 유목, 토석류(debris) 등의 부유물이 본 하천으로 유입 퇴적되어 하도(河道) 및 수위(水位) 상승을 야기함으로써 발생하는 수해를 예방할 수 있어 사방시설로도 탁월한 효과가 있다. 즉, 산림 내의 계곡 또는 소하천 등을 횡단하여 폭 15~25m, 높이 3~5m 내외로 설치하는 방호책으로서 산에서 하천으로 흘러드는 유수에 포함된 토석류(debris), 유목 등의 부유물들을 걸러내는 필터링 기능을 통해 하부지역의 수해를 예방할 수 있다.

기존 콘크리트 형식의 사방댐은 하천을 막아서 설치되는데 집중호우에 의해 상류로부터 나무와 토사가 추가로 발생할 경우 하천을 막게 되어 물이 역류해 인근지역에 피해를 입혔으나 본 공법은 물은 빠져 나가고 부유물은 거르는 형식으로 설계되어 있어 하류지역에 발생 가능한 재해를 사전 예방하는 효과가 있다. 또한, 기존 콘크리트 형식의 사방댐이 기초시공시 부득이하게 하상(河床)굴착에 의한 환경과 파괴를 야기시키나 본 공법은 하상(河床)을 굴착할 필요가 없으므로 생태계 보존이 가능한 친환경적인 공법이다.

이밖에 지형여건에 따라 자유롭게 설치가 가능하며 유지보수가 용이하고, 특히 퇴적된 토석류를 쉽게 제거할 수 있으며 공기가 짧고 설치가 용이하여 콘크리트 형식의 사방댐과 비교할 때 경제적인 공법이다.

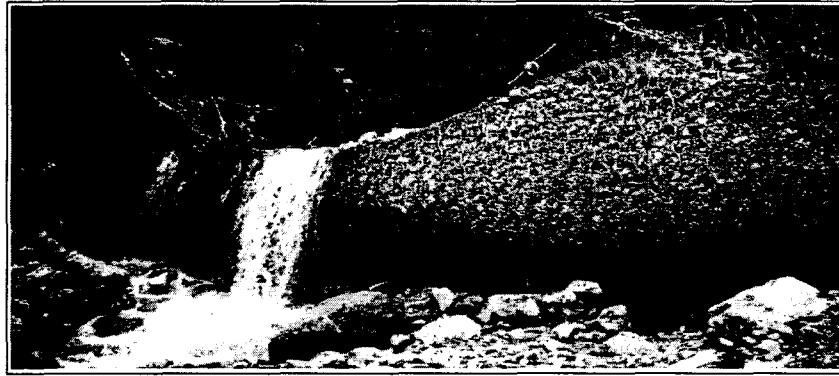


그림 12. Debris flow mitigation by Ring Net (1998, Japan)

## 5. 결론 및 전망

낙석에 의한 피해를 최소화하기 위해서는 철저한 현장조사를 통해 그 메커니즘을 규명하고 적절한 성능의 방호시설을 설치하는 것이 중요하다. 이를 위해 낙석방지시설의 설계시 절개면의 특성이나 낙석의 규모와 형상, 낙하높이 등과 같은 현장여건을 고려하고, 현장 성능실험을 통해 다양한 낙석방지시설의 에너지 흡수수준에 대한 자료를 수집하여 현장여건에 따라 다르게 요구되는 흡수가능 에너지에 적합한 낙석방지시설이 설치될 수 있도록 하여야 할 것으로 판단된다.

링네트 공법은 기존공법에서는 찾아 볼 수 없는 완벽한 충격완화 기능을 보유한 링네트와 브레이크 링과 같은 부재로 구성되어 있으며, 각 부재에 의한 에너지흡수뿐 아니라 방호책을 구성하는 전(全)체계에 의해 복합적으로 에너지 흡수성능을 향상시키어, 3,000 kJ에 이르는 극히 높은 낙석에너지에 대응토록 하였다.

따라서, 링네트 공법은 그 낙석에너지 흡수량의 크기를 고려할 때 종래의 피암티널(록셰드 공법) 등에 상당하는 공법이며, 타공법에 비해 시공기간이 짧고, 비용 면에서도 저렴하며, 더욱이 시공이 곤란한 지역에도 지형여건에 맞게 시공가능하다는 장점이 있어 낙석방지기술의 새로운 기준을 제시할 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. 건설교통부(2000), “도로안전시설 설치 및 관리지침 (낙석방지시설편)”.
2. 박혁진(2000), “현장실험을 통한 낙석방지울타리 설계기준 제시연구”, 사면안정학술발표회.
3. Dr. Spang, Raymund M.(2001), “From the timber fence to the high energy net in rockfall Protection from the Origins to the Present”, Geobruigg Jubilee Conference, Bad Ragaz.
4. Dr. Spang, Raymund M.(1995), “Optimized rockfall protection by ROCKFALL”, “Proc. 8th International Congress on Rock Mechanics”, Tokyo.
5. Wyllie, Duncan C. and Norrish, Norman I. (1996), “Landslides investigation and mitigation”, Transportation Research Board Special Report 247.
6. Kazuhito Shimojo(2002), “The New Wire net Dam for Debris Flow Control in Japan”, “International Conference on Numerical Modeling of Rockfall Protection Systems”, Walenstadt.
7. Salzmann, Hannes (2001), “Debris Flow Mitigation by means of Flexible Barriers”, “14th Southeast Asia Geotechnical Conference”, Hongkong.
8. The Government of the Hong Kong Special Administration Region(2000), “Highway Slope Manual”.
9. Gerber, Werner, Grassl Hans, Boll, Albert and Ammann, Walter (2001), “Flexible Rockfall Barriers Development”, “Standardization and Type-Testing in Switzerland”, “International Conference on landslides causes”, “impacts and countermeasures”, Davos.