

## 근접발파에 따른 비탈면 보강공법의 손상도 평가를 위한 연구 A Study for Damage Evaluation of Slope Stabilization due to Blasting



**김낙영**  
한국도로공사  
선임연구위원



**이상래**  
한국도로공사  
수석연구원



**이강현**  
한국도로공사  
수석연구원



**정지희**  
한국도로공사  
책임연구원

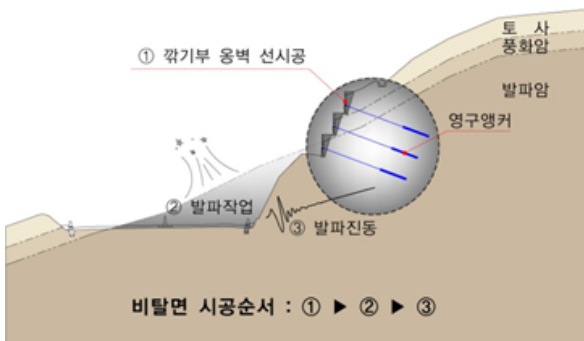


**황범식**  
한국도로공사  
책임연구원

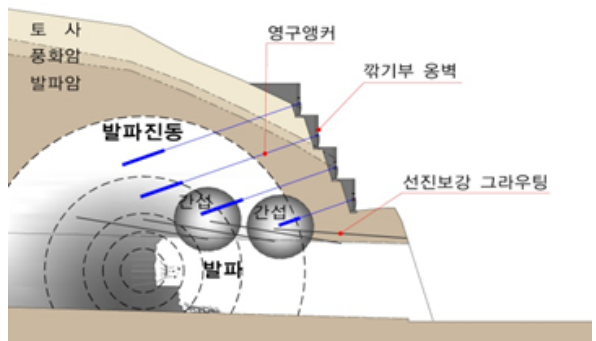
### 1. 서론

최근 대규모 절토 비탈면 지양 등의 정책에 따라 비탈면 보강이 설계 시부터 활발히 적용되는 추세이다. 비탈면 보강시 설물은 암반층에 시공되지만 시공 후 충격(지진, 발파 등) 발생 시 성능저하가 발생하여 사용수명 및 시설물의 안정성에

깎기 비탈면 구간



터널 갱구부 구간



〈그림 1〉 발파로 인한 기존 시설물의 문제점

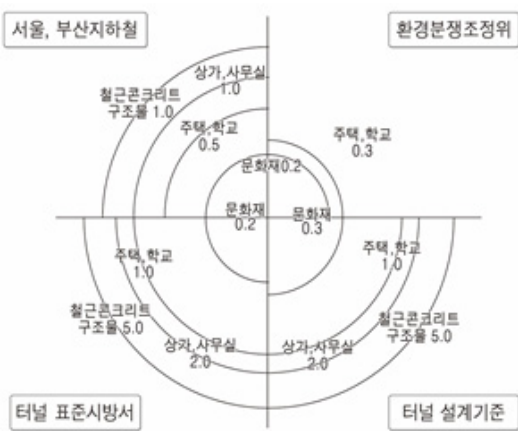
영향을 미칠 수 있다. 특히 Top-Down방식의 보강공법은 시공 절차로 인해 선 시공된 시설물에 발파진동으로 인한 손상 가능성을 내포하고 있지만 현재 발파설계는 인근 시설물(축사 등) 손상만을 반영하고 있어 영향범위 이내의 발파진동으로 인한 보강공법의 손상을 반영하지 못하는 한계가 있다.

비탈면 보강공법(패널식 옹벽, 앵커 등)은 강연선 등 구조체를 시멘트 그라우트를 통해 암반과 일체화하는 보강원리를 가진다. 이러한 보강공법은 역학적 원리에서 충격 등에 따른 구조체 손상이 장기성능에 미치는 영향이 크기 때문에 근접 발파 등에 따른 영향범위와 손상도를 평가하여 장기성능을 확보해야 한다. 근접 발파 시 진동은 지질학적 요인(암종, 용수 등)에 따라 영향이 다를 수 있으나 현실적으로 연구가 진행된 사례가 없으며, 현행 설계 및 품질관리에서 영향을 고려하지 못하는 실정이다.

이에 본 기술시사에서는 Top-Down 방식으로 주로 시공되는 구조물에 대한 근접발파 영향에 따른 문제점과 손상 사례를 조사하고 수치해석을 활용하여 터널 굴착 등 근접발파가 기존의 보강시설물에 미치는 영향을 검토한 사례를 소개하고자 한다.

## 2. 깎기부 비탈면 발파설계 일반사항

발파설계에서는 발파진동으로 인한 문제점에 대한 고려가 선행되어야 하며, 대표적인 검토사항으로 [1] 발파에 의한 풍압전달로 인한 소음공해 유발, [2] 파쇄물의 비산으로 인한 주변시설물의 피해, [3] 발파 진동에 따른 기존시설물(비탈면 보강공법)의 손상이다.



기관	건물종류	허용진동치 (cm/sec)
도로공사	가옥(RC)	0.5
	철골구조	5.0
국토부(도로)	주택	0.3~0.5
	철근콘크리트	5.0
국토부(터널)	예민구조물	0.2~0.3
	철근콘크리트	5.0
서울, 부산지하철	문화재	0.2
	철근콘크리트	1.0~4.0
LH	주택	0.3
	철근콘크리트	5.0

〈그림 2〉 발파 시 진동속도 허용기준

국내의 경우, 그림 2에서와 같이 보안물건에 대한 발파설계가 일반적으로 검토되나 비탈면 상부 보강 후 하부공사로 이어지는 Top-Down공사의 경우에는 기존에 설치된 시설물에 대한 발파진동 영향에 대한 검토는 이루어지지 않는다. 다만, 대부분의 공사에서 기존 보강시설물의 성능유지를 위하여 개별적으로 허용기준을 검토하여 적용하고 있는 실정

이며, 대부분의 경우 깎기부 옹벽에 대해 한정하여 적용하였다. 표 1은 국내의 주요 건설공사 구간에서 실시한 보강공법의 간섭영향을 고려한 발파진동 허용기준 검토사례이다.

〈표 1〉 국내의 건설 중 발파진동 허용기준 검토사례(깎기부옹벽 위주)

구분	과업명	발파허용기준	적용 현황
1	부지조성	1.0~5.0 cm/sec	- 소규모 진동제어발파 이하로 적용 추천
2	고속국도 1	5.0 cm/sec	- 감독원의 판단하에 허용진동기준 5.0cm/sec
3	고속국도 2	3.0 cm/sec	- 깎기부 옹벽으로 현장 시험발파를 통해 3.0 cm/sec
4	국도 1	1.0~5.0 cm/sec	- 깎기부 옹벽 3~5미터까지 일반 및 중규모 발파 - 옹벽 인근 정밀~소규모 진동제어발파
5	국도 2	10 cm/sec	- “발파진동이 흙막이 구조물 및 배면지반에 미치는 영향” 연구결과 적용 (대한화약발파공학회, 2008년)
6	철도	5.0 cm/sec	- 구조물 손상기준 발파진동 허용치 사용 - 옹벽과 이격거리 4m 이내 미진동 굴착 적용

발파와 관련된 기존의 연구는 가시설 흙막이 구조물의 단별설치에 따른 손상영향을 검토하는 연구가 주로 진행되었으며, 비탈면 보강공법의 손상에 대한 연구는 극히 한정적이며, 최근 실시된 연구에서 그라운드앵커의 하중감소와 발파진동과의 상관성을 연구하였다. 관련된 주요 연구결과는 다음과 같다.

(1) 지중진동 측정을 통한 흙막이 근접발파 연구(조래훈 외, 2015)

근접발파진동이 흙막이 안정성에 미치는 영향을 알아보기 위해 3개 현장에서 시험발파를 시행하였다. 시험결과, 동일거리의 지중에서 측정된 진동은 지표에서 측정된 진동의 10~52% 수준으로 작아 어스앵커 정착장 등 지중에 설치된 구조물은 지표에 있는 구조물에 비해 상대적으로 발파진동에 안전함을 확인하였다.

(2) 근거리 발파진동이 흙막이 구조물에 미치는 영향(황현주 외, 2008)

흙막이 구조물에 대한 발파진동 허용기준을 설정하고 10 m 이내 근거리 발파를 실측하여 흙막이 구조물에 전달되는 진동규모를 확인하였다. 연구결과 0.5~2.0 kg 범위의 발파작업은 흙막이 구조물과 배면지반에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었으나 발파압력에 의한 암반블록의 이동 영향을 고려하여 최소저항선의 2배 정도를 이격하여 발파할 것을 추천한다. 재료 및 구조적 결함이 없는 흙막이 구조물에 대한 허용 진동기준은 슬러리월과 같은 콘크리트는 25.4 cm/s, 어스앵커나 쏘일네일 정착부는 10 cm/s, 강재는 114 cm/s 정도가 적절한 것으로 판단되었다.

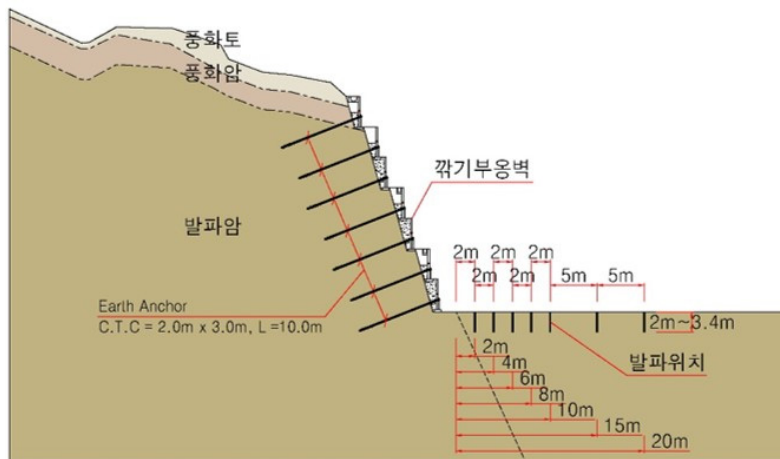
(3) 지진 및 발파에 따른 Anchor의 진동저항특성에 관한 연구(최경집, 2018)

발파진동에 의한 그라운드앵커 긴장력의 변화특성을 관찰하기 위하여 시험부지에 앵커를 시공 후 7일간의 충분한 양생 후 발파시험을 실시하였다. 장약량 및 이격거리를 다르게 한 현장실험을 통한 발파진동에 대한 안정성 평가결과, 진동속도는 이격거리 4m인 경우에 약 23cm/sec가 측정되었다. 암반에 정착된 그라운드앵커의 경우에도 장약량에 따라 진

동속도가 커질수록 정착하중의 감소가 발생하는 것으로 나타났다. 특히, 마찰형 앵커의 경우 정착하중 대비 약 22%의 하중감소율이 나타났다. 발파차수, 화약사용량, 진동속도가 증가할수록 앵커의 하중감소율이 커짐을 알 수 있었고 계측 지점과의 거리가 가까울수록 커지는 것으로 나타났다.

### 3. 수치해석을 통한 발파영향 분석

수치해석을 통한 깎기부 옹벽의 발파진동 영향검토를 위해 터널 갱구부에 위치한 비탈면의 깎기부 옹벽과의 이격거리, 지발당 장약량을 변수로 하여 수치해석을 실시하였다. 해석단면은 아래 그림 3과 같이 적용하였으며, 깎기부 옹벽과의 이격거리는 2~20m까지 7개의 이격거리를 적용하였으며, 지발당 장약량은 아래 표 2와 같이 6가지 조건으로 해석을 수행하여 총 42 case의 수치해석을 수행하였다.



〈그림 3〉 해석 모델링 및 발파진동 해석조건

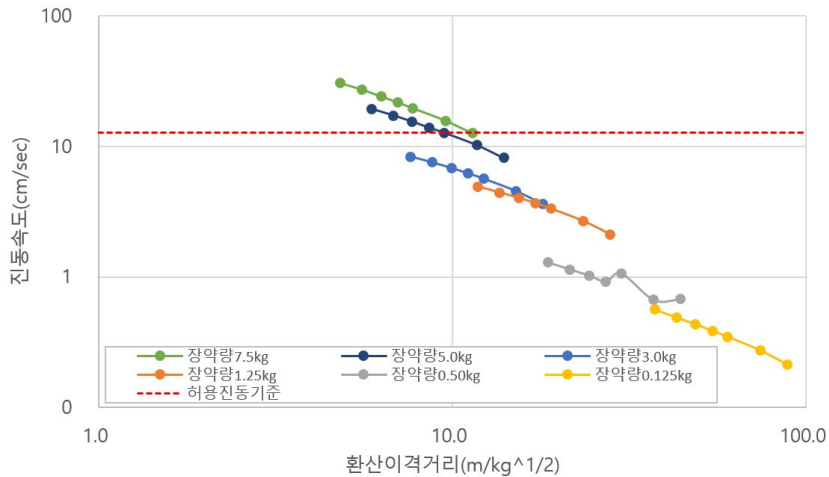
〈표 2〉 지발당 장약량

구분	미진동	정밀진동	소규모	중규모	일반발파 I	일반발파 II
지발당 장약량(kg)	0.125	0.500	1,250	3,000	5,000	7,500

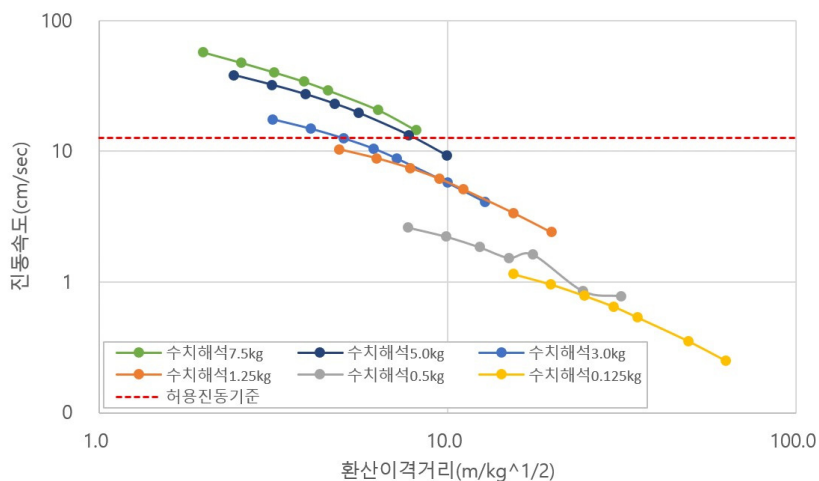
각 단(1~7단)의 앵커두부 및 앵커정착장에서 발파에 따른 진동속도 발생 경향을 측정하였으며, 결과는 다음과 같다. 발파원과의 거리가 가장 가까운 1단에서 진동속도가 가장 크게 발생 하였으며, 2~7단으로 갈수록 진동속도가 감소하는 경향으로 나타났다. 각 단의 앵커 두부에서 발파에 따른 인장력 변화 경향을 측정하였으며, 진동속도 발생경향과 같이 1단에서 인장력의 감소가 가장 크게 나타났으며, 2~7단으로 갈수록 인장력 감소량이 감소하는 것으로 나타났다.

앵커정착장 기준 지발당 장약량 5.0kg (중규모 발파) 적용시 환산 이격거리 9.5m 이내 부터 허용진동속도 12.7cm/sec

를 초과하는 결과로 나타났으며, 7.5kg (일반 발파) 적용시 환산 이격거리 9.6m 이내부터 허용진동속도를 초과하는 결과를 보였다. 앵커두부 기준 지발당 장약량 3.0kg (중규모 발파 하한) 적용시 환산 이격거리 4m 이내 부터 허용진동속도 12.7cm/sec를 초과하는 결과로 나타났으며, 5.0kg (중규모 발파 최대) 적용시 환산 이격거리 7.7m 이내부터 허용진동속도를 초과하였다. 7.5kg (일반 발파) 적용시 환산 이격거리 2~20m 전 구간에서 허용진동속도를 초과하는 결과를 보였다. 동일한 비탈면과의 이격거리에서 앵커 정착장에서 발생하는 진동속도는 앵커두부에 비하여 47.5~87.9%의 값으로 나타났으며, 이 결과는 발파지점으로부터의 거리 차이에 기인한 것으로 판단된다.



〈그림 4〉 환산 이격거리에 따른 발파진동속도 경향(정착장)



〈그림 5〉 환산 이격거리에 따른 발파진동속도 경향(두부)

### 4. 맺음말

본 기술기사에서는 근접발파가 수행되는 터널 및 깎기부 옹벽 공중에 대해 Top-Down 시공 시 발파진동이 기존시설물에 미치는 영향을 검토한 연구 사례를 소개하였다. 터널 갱구부 및 깎기부 옹벽의 특성 상 보강구조물 시공 후 정착성능(마찰력 등)이 발휘되는 지점과 인접하여 발파가 이루어져야 하기 때문에 기존 보강구조물의 성능저하에 대한 우려가 크고 실제 성능 저하 사례가 보고되고 있으나, 현행 기준에서는 이를 반영하지 못하는 실정이다. 그러나 이에 대한 연구 결과가 부족하고 발파에 의한 손상을 규명하기 매우 어려운 현실적인 한계로 인해 대부분의 설계에서 가정치를 사용하고 있다. 향후에는 적극적인 시험발파 및 수치해석 등의 검토를 통해 발파 손상의 영향을 최소화하는 설계법의 도입이 필요할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 한국도로공사 연구보고서(2021) “근접발파에 따른 비탈면 보강공법의 손상도 평가 연구”.

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 한국터널지하공간학회의 공식입장과는 무관합니다.]