

발파에 의한 암반 굴착 시 콘크리트 구조물에 미치는 영향 분석



채희문
DL 이앤씨
토목사업본부 부장



구성제
DL 이앤씨
토목사업본부 부장



어준
DL 이앤씨
토목사업본부 상무

1. 서론

발파는 건설현장에서 암반의 굴착공사를 진행하는 주요 공법이며 발파로부터 발생한 에너지는 지반진동 및 소음을 발생시킨다. 발파작업 중 발생한 탄성파는 각 방향으로 전파되면서 인근 구조물에 영향을 미친다(Ak et al., 2009; Elevli and Arpaz, 2010; Nateghi, 2011). 그러므로 발파를 이용한 굴착 작업 시 구조물의 안정성 검토는 필수적인 고려 사항이며 지질조건, 발파 패턴 설계, 발파지점과 구조물간 거리 및 장약량 등의 요소들이 진동에 영향을 미치게 된다(Elevli and Arpaz., 2010; Liang et al., 2011). 발파로 인한 손상은 최대진동속도(Peak Particle Velocity)와 진동주파수(Frequency)를 이용하여 정량화될 수 있다(Siskind et al., 1980; Dowding, 1985; BS 7385, 1993; Khandelwal and Singh, 2006; Ozer, 2008). 파키스탄 굴푸르 수력발전 사업은 파키스탄 카슈미르 지역에 연간 465 Gwh의 전력을 생산할 수 있는 수력발전소를 건설하는 프로젝트이다. 공사 초기 발생한 큰 수해와 용지보상의 문제로 공사 지연에 따른 공기를 단축시킬 수 있는 방안이 검토되었다.

본 기술기사는 저자가 공동저자로 참여한 IFCEE 2018 논문(Sheikh et al., 2018)의 내용을 재구성한 내용으로 굴푸르 수력발전 프로젝트에서의 댐 및 부대시설 건설을 위한 암반 굴착 시 발파와 구조물 본체의 병행시공에 따른 발파진동이 타설된 콘크리트 구조물에 미치는 영향을 검토하여 안전이격거리를 확보하고 공기를 단축한 사례를 소개하고자 한다.

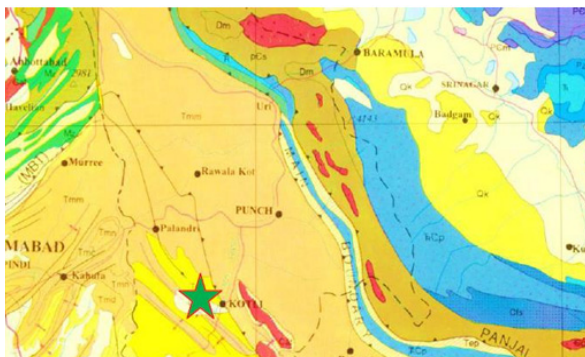
2. 이론적 배경

발파진동은 화약의 폭발압력이 암반의 진동을 유발한다. 진동의 전파속도는 지반 매질을 통해 이동하며, 진동은 점차 감소하는데 이를 진동 감쇠(Seismic attenuation)라고 한다. 지표면의 입자들은 입자속도로 측정되는 진동파로 인해 진동하게 되며, 이때 입자 움직임의 최대치를 입자의 최대진동속도는(PPV)라고 한다. 발파진동은 크게 압축파, 전단파, 표면파로 나눌 수 있다. 세 개의 파형은 암석이나 토사 속을 통과하는 물체파(Body waves)와 표면파(Surface waves)로 구분할 수 있다. 파동의 움직임을 측정하기 위해서는 (1)접선성분(Transverse), (2)수직성분(Vertical), (3)종방향성분(Longitudinal)의 3가지 요소로 측정해야 한다.

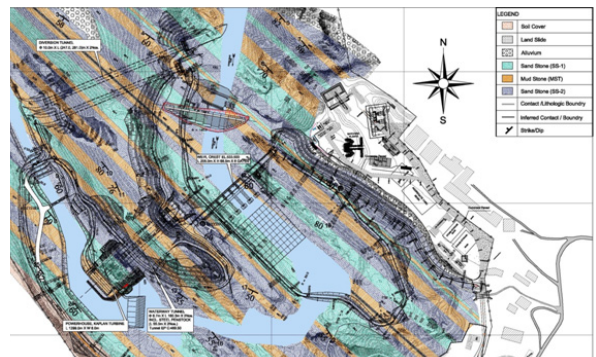
물체파 또는 P파는 운동 방향의 압력으로 매질을 통과한다. S파는 파동이 움직이는 방향과 직각으로 움직이는 횡방향 파동으로 지반매질을 통과한다. 물체파는 구형으로 외부로 향해서 이동하며 경계에 도달했을 때 표면파 및 S파를 생성한다. 표면파는 암석의 외부 표면을 따라 이동하며, 물체파보다 파동이 크지만, 이동속도가 느리다. 표면파는 러브파(Love waves)와 레일리파(Rayleigh waves)로 구성된다. 러브파는 다른 매체의 상부표면을 이동하는 횡방향파이다. 진동예측 및 발파진동 제어를 위해서는 환산거리(Scaled distances)가 사용된다. 환산거리는 발파지점과 수신기 사이의 거리를 지발당장약량(MIC)의 제곱근으로 나눈 값으로 나타낸다. 지발당 최대장약량(MIC)은 한 번의 지연 간격동안 폭발하는 최대 폭약의 양(kg)이다.

3. 현장의 지질구조 및 현황

프로젝트 대상 지역의 기반암은 시와릭(Siwaliks) 지층으로 마이오세에서 플라이오세의 사암, 실트암 및 이암으로 구성되어 있다. 5,000m 두께의 시와릭 지층은 무리에(Murree)에서 시와릭 지층을 분리하는 주 경계 단층을 따라 분포하고 있다. 파키스탄 지질조사국에서 작성한 현장 주변의 1:50,000의 지질도는 그림 1에 나타내었다.



〈그림 1〉 대상 지역의 지질도



〈그림 2〉 굴푸르 수력발전 프로젝트 현황도

대상 지역의 기반암은 3가지의 암종으로 분류 할 수 있으며 다음과 같다. 단단한 사암(SS-1)은 녹색을 띤 회색이며 대규모의 블록형태의 사암이며 층상의 가파른 절벽 형태로 분포한다. 연약한 사암(SS-2)은 현장에서 회색의 빛나는 색과 중간~세립의 입자로 층상구조이며 SS-1과 접촉하고 있다. 점토층이 섞여있는 실트질 사암(SS-3)은 연한 녹색을 띤 회색이고 중간~세립정도의 입자로 구성되어있다.

실트질 사암은 점토층의 연한 분홍색이고 표면이 풍화되고 균열이 심한 상태이다. 프로젝트 대상 지역은 강한 강도의 사암과 연약한 실트암, 이암, 사암 층들이 순서적으로 분포하며, 중간~급한 정도의 경사도(50~60°)로 분포하고 있다. 프로젝트 구간의 현황측량, 시추조사, 3차원 지질학적 모형의 결과를 그림 2에 나타내었고, 현장 전경은 그림 3과 같다.



〈그림 3〉 굴푸르 수력발전 프로젝트 현장전경

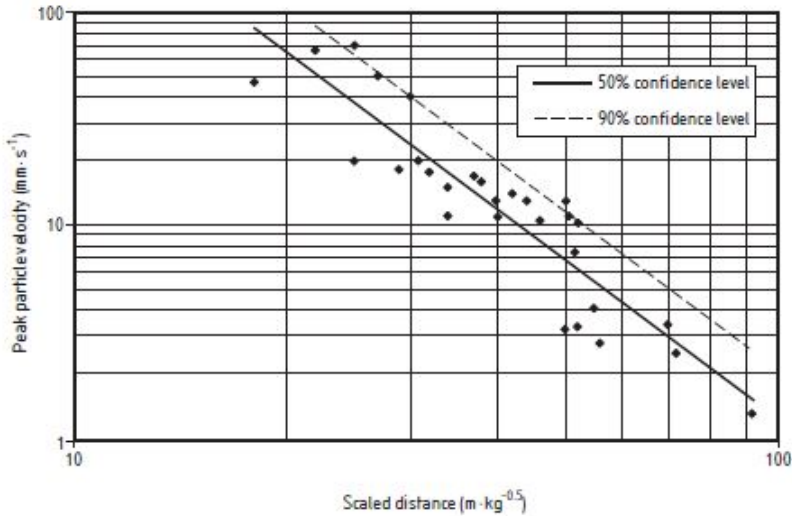
4. 발파진동의 측정 및 예측

발파진동은 충격파라는 특징을 지니고 있으며 약해지면서 빠르게 정점에 도달한다는 시간적 특성이 있다. 지하 발파 작업에서 한 번의 발파 진동 발생 시 다수의 충격이 발생할 수 있다. 발생한 충격의 지속시간은 지연 간격의 수, 장약량, 발파 방식, 이격거리 및 발파원 및 측정사이의 지질 구조에 따라 달라지며 이에 따라 발파 규모가 결정된다. 일반적인 발파는 필요한 폭약을 포함하여 다수의 시추공으로 구성되며 밀리초 간격의 지연에 따라 폭발한다.

발파진동과 같은 충격은 일반적으로 3가지 구성의 입자 속도의 시간 이력을 통해 최대값을 확인할 수 있다. 진동측정은 속도 측정기를 이용하여 측정하며, 최대진동속도(PPV)를 확인할 수 있다. 진동측정 장비는 다양한 범위의 속도를 측정할 수 있으며 진동주파수는 4.5Hz에서 250Hz이다. 발파진동의 진동주파수는 일반적으로 5Hz에서 40Hz이다. 진동속도의 예측을 위한 진동 데이터를 구축하기 위하여 여러 번의 시험 발파가 수행되어야 하며 지형조건, 장비 및 지질구조 등에 따라 차이가 있을 수 있다. 3방향에서 측정된 최대진동속도(PPV)가 기록되며, 최대 진동 요소들이 각 측정 시마다 고려되어야 한다. 환산거리 s 는 다음 식 (1)과 같다.

$$s = d / \sqrt{c} \tag{1}$$

여기서, d : 발파지점으로부터의 거리(m), c : 지발당 최대장약량(kg)을 나타낸다. 최대진동속도(PPV)를 이용하여 환산 거리를 표시하는 경우 90% 및 50%의 신뢰도의 선형 회귀 분석을 통한 결과를 그림 4에 나타내었다. 회귀분석에 의한 관계식은 발파패턴 및 암반의 지질학적 특성에 따라 달라지며 발파 설계 시 특정거리에서의 진동을 제어하는데 매우 유용하다. 또한, 허용 진동치 및 환산거리를 알면, 지발당 장약량(MIC)을 산정할 수 있다.



〈그림 4〉 대상 지역 최대 진동속도와 환산거리의 관계

현장의 발파진동식을 산정하기 위해 다음과 같은 단계를 수행하였다.

1. 각 발파시 지발당 최대 장약량, 발파패턴, 지질자료와 발파지역의 좌표의 기록
2. 진동 및 소음 측정기기를 이용하여 각 발파마다 최대진동속도(PPV) 측정
3. 각 발파지점으로부터의 측정간의 거리 측정
4. 환산거리 $s = d / \sqrt{c}$ 와 최대진동속도(PPV)와 관계식 산정
5. 도출된 발파진동 추정식을 이용하여, 이격 거리에 따른 허용 지발당 장약량(Safe MIC)산정
6. 현장 발파 작업 시, 발파 위치에서 구조물까지의 거리 측정, 관계식에 따른 지발당 장약량 결정
7. 예상 진동 수준과 실제 진동 수준을 비교할 수 있도록 진동 측정

5. 발파진동에 의한 손상 가능성

발파에 의한 진동의 주요 요소는 장약량, 구조물과 발파지점 사이의 거리, 두 위치 사이 지질학적 조건 및 발파패턴 등이 있다(Siskind et al., 1980; Dowding, 1985). 최대 진동속도(PPV)는 구조물의 손상과 연관이 있고(Edwards and

Northwood, 1960; Duvall and Fogelson, 1962) 최대 진동속도(PPV)와 주파수(Frequency)가 함께 구조물에 영향을 미칠 수도 있다(Siskind et al., 1980; Dowding, 1985; Khandelwal and Singh, 2006; Ozer, 2008). 구조물에 대한 허용 진동속도(PPV)는 다음 관계식을 사용하여 결정할 수 있다.

$$SV_p = \frac{f_{ct}}{\rho V_c} \times 10^3 \quad (2)$$

여기서, SV_p 는 허용 진동속도(PPV), f_{ct} 는 인장강도(MPa), V_c 는 압축파속도(km/s), ρ 는 밀도(kg/cm^3)이다. 진동 데이터는 세 성분(종방향, 횡방향 및 수직방향)의 벡터합으로 측정된다. 만일 세 가지 성분 중 한 군데에서 안전 한계가 초과하는 경우, 구조물의 손상이 발생할 수 있다. 최대 진동속도(PPV)의 최대값을 측정하기 위해서는 실 벡터합(TVS)과 유사 벡터합(PVS)이 사용된다. TVS는 다음 식 (3)과 같다.

$$|V_{TVS}(t)| = \sqrt{V_L^2(t) + V_V^2(t) + V_T^2(t)} \quad (3)$$

여기서, $V_L(t)$, $V_V(t)$, $V_T(t)$ 는 각각 움직임의 방향과 직각방향으로 가해지는 지표면에 진동이 시간에 따라 변화하는 시간 이력이다. 최대값에서 $V_{TVS}(t)$ 상 결과 최대 진동속도(PPV)를 도출할 수 있으며 이는 일반적으로 세 방향에서의 최대 진동속도에 영향을 받는다. 지하 발파 작업에서, PVS 상의 결과 최대 진동속도(PPV)는 세 방향에서의 최대 속도 절댓값으로부터 도출된다.

$$V_p = \sqrt{V_{Lmax}^2 + V_{Vmax}^2 + V_{Tmax}^2} \quad (4)$$

여기서, V_{Lmax} , V_{Vmax} 및 V_{Tmax} 는 각각 종파, 수직파 및 횡파의 최대 속도이다. V_{Lmax} , V_{Vmax} 및 V_{Tmax} 가 꼭 동시에 나타나는 것은 아니며 일반적으로 V_p 는 $V_{TVS,max}$ 보다 16% 크다. 기존 연구자들에 의해 제안된 대부분의 최대진동속도(PPV)의 기준은 주거용 건물에 적합하였으며 광산 발파에 기반하고 있었기 때문에 작은 진폭, 낮은 주파수 및 긴 지속시간으로 분류되는 반면 건설 현장에서의 경우는 높은 주파수, 더 큰 진폭 및 짧은 지속시간의 특징이 보인다. 현장에서 발파진동 속도 추정식을 효과적으로 적용하기 위해서는 허용 진동치를 산정해야 한다.

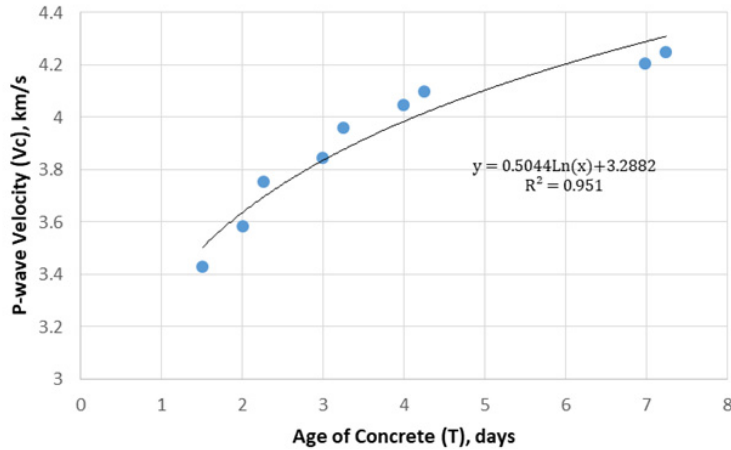
대부분의 기준에서 제안한 허용 진동치는 50~100mm/s 범위이다. 댐과 부대시설의 안전성을 고려해 볼 때 가장 보수적인 값을 적용하여 경화된 콘크리트의 허용 진동치(PPV)은 50mm/s를 적용하였다. Kwan과 Lee(2000)는 콘크리트의 양생기간에 따른 손상 PPV의 관계를 제시한 바 있다.

$$V_{PD} = 160 V_c \quad (5)$$

여기서, V_{PD} 는 손상 PPV값이며, V_c 는 콘크리트 양생기간에 따른 P파 속도를 의미한다. V_c 는 식 (6)으로 산정할 수 있다.

$$V_c = 0.5044 \ln(T) + 3.2882 \quad (6)$$

여기서, 콘크리트를 통해 전달되는 V_c 는 P파 속도(km/s)이며, T 는 콘크리트 타설에 대한 시간이다. 그림 5는 P파 속도(V_c)와 콘크리트 양생기간의 관계를 나타내고 있다(Tripathy et al., 2016).



〈그림 5〉 콘크리트 양생기간과 P파속도의 관계 곡선(Tripathy et al., 2016)

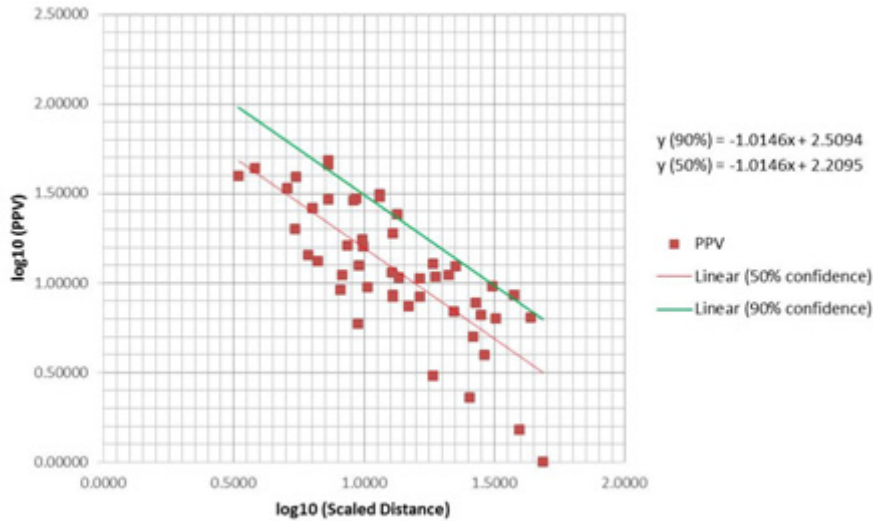
식 (5)와 식 (6)을 사용하여 콘크리트의 손상 수준 PPV를 확인할 수 있다. 이 관계는 1.25일에서 7일 사이의 콘크리트 양생기간에 적용할 수 있다(Tripathy et al., 2016). 콘크리트 타설 후 몇 시간 지나지 않아, 콘크리트는 100까지의 최대 진동속도(PPV)를 견딜 수 있다(Oriard and Coulson, 1980; Hulshizer and Desai, 1984; Olofsson, 1988). 그러나 11~16시간 정도의 양생기간 동안에 콘크리트는 손상에 더욱 취약하다(Estevés 1978).

식 (5)와 (6)을 이용하여 안전율(FS) 20을 식 (5)에 적용하여 양생기간이 짧은(1~7일) 콘크리트(green concrete)의 허용 진동속도기준을 산정하였다. 표 1은 콘크리트 양생 기간에 따른 허용 진동속도기준을 제시하였다.

〈표 1〉 콘크리트 타설후 양생기간에 따른 허용진동속도(PPV)기준(Tripathy et al., 2016)

콘크리트 타설 후 경과시간	허용 진동속도(mm/s)
0~1.5 hrs	10
1.5~24 hrs	5
1~2 days	25
2~7 days	30
>7 days	35

지발당 최대 장약량(MIC), 경사거리 및 측정된 진동속도(PPV) 간의 상관관계는 관계식을 형성하는 기본 요소이다. X축은 \log_{10} (환산거리), Y축은 \log_{10} (최대 진동속도, PPV)의 상관식을 결정하기 위해 회귀분석이 수행되었고, 그림 6에 제시하였다. 최대진동속도와 환산거리와의 관계식은 신뢰 수준 90%와 50%의 수준에서 산정되었다.



〈그림 6〉 최대 진동속도와 환산거리과의 그래프(굴푸르현장)

$$y(90\%) = -1.0146x + 2.5094 \quad (7)$$

$$PPV = 323.15 * \left(\frac{R}{\sqrt{MIC}}\right)^{-1.0146} \quad (8)$$

$$y(50\%) = -1.0146x + 2.2095 \quad (9)$$

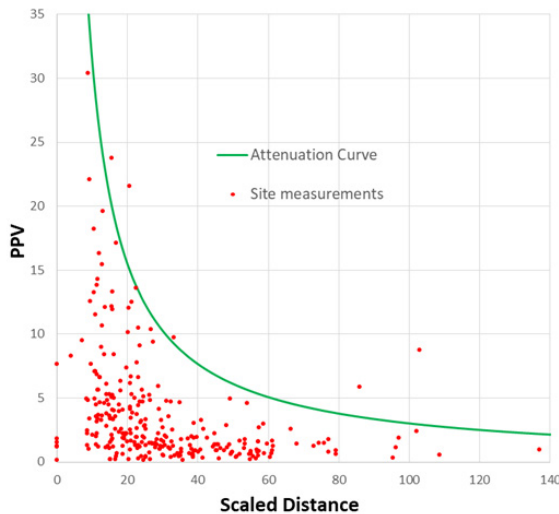
$$PPV = 162 * \left(\frac{R}{\sqrt{MIC}}\right)^{-1.0146} \quad (10)$$

식 (8)은 발파원으로부터 이격거리별 측정된 최대 진동속도(PPV)는 지발당 최대장약량(MIC)을 산정하는데 사용한다. 측정된 최대 진동속도(PPV)는 대상 지역의 발파원과 측정점간의 지질 구조 영향을 반영한 측정 결과이다. 지발당 최대장약량의 산정은 5~35mm/s와 50mm/s의 허용 진동기준을 각각 양생기간이 짧은(1~7일)콘크리트와 양생기간이 경과된(28일이상) 콘크리트에 적용하였고, 식 (8)을 이용하여 콘크리트 양생 기간에 따른 지발당 최대장약량(MIC)을 산정하였다. 표 2는 콘크리트의 양생 기간에 따른 지발당 장약량 및 허용진동속도(Safe PPV)를 제시하였다.

〈표 2〉 콘크리트의 양생기간에 따른 지발당 최대 장약량 및 허용진동 속도

콘크리트 양생시간	허용 진동속도 (mm/s)	지발당 최대장약량(Kg), 거리(m)									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
0~1.5hrs	10	0.11	0.42	0.95	1.69	2.65	3.81	5.19	6.77	8.57	10.58
1.5~24hrs	5	0.03	0.11	0.24	0.43	0.67	0.97	1.32	1.73	2.19	2.70
1~2 days	25	0.64	2.58	5.80	10.31	16.11	23.19	31.57	41.23	52.19	64.43
2~7 days	30	0.92	3.69	8.31	14.77	23.07	33.23	45.22	59.07	74.76	92.29
7~28 days	35	1.25	5.00	11.26	20.01	31.27	45.02	61.28	80.04	101.30	125.06
>28 days	50	2.53	10.10	22.74	40.42	63.16	90.94	123.79	161.68	204.62	252.62

그림 7은 현장에 측정된 진동속도(PPV)와 측정자료를 통해 산정된 관계식을 보여주며, 측정된 진동속도가 허용진동치 이내로 분포하는 것으로 나타났다. 또한, 대상 지역에서 안전이격거리는 최소 30m까지 콘크리트 타설과 발파를 병행할 수 있는 것으로 분석되었다.



〈그림 7〉 환산거리와 최대 진동속도(PPV)의 그래프(현장측정 결과)

6. 결론

- 1) 발파 굴착은 화약 발파로 인해 진동을 발생시키고 전파된 진동은 주변 구조물 등에 피해를 유발할 수 있으며, 이러한 진동은 발파지점에서 멀어짐에 따라 감소하고 현장의 지질 조건에 따라 달라진다.
- 2) 타설된 콘크리트 구조물에 발파진동에 의한 손상 유무를 판단하기 위한 허용진동치는 콘크리트의 강도와 양생 기간에 따라 결정된다. 그러므로 콘크리트 양생기간에 따른 허용 진동치를 제시하였다.

- 3) 현장발파 자료 분석을 통해 암반 특성을 반영한 진동 추정식을 산정하고 이를 통해 허용 진동치를 만족시킬 수 있는 안전이격거리를 산정하여 발파진동으로부터 이미 타설된 콘크리트에 영향이 없도록 안전하게 시공될 수 있도록 하였다.
- 4) 본 연구는 발파진동이 타설된 콘크리트 구조물에 미치는 영향을 검토하여 안전이격거리 확보를 목적으로 수행되었으며, 대상은 사암과 이암층이 교차하는 유사한 지질 구조에 국한된다. 그러나 본 연구에서 제시된 방법은 향후 다른 현장 및 프로젝트에서 발파진동에 따른 손상유무를 판단하기 위한 방법으로서 실무에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Ak H, Iphar M, Yavuz M, Konuk A. (2009). "Evaluation of ground vibration effect of blasting operations in a magnesite mine." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(4):669-76.
2. BS 7385. (1993). "Evaluation and measurement for vibration in buildings, Part-2, Guide to damage levels from ground borne vibration." London: British Standard Institution.
3. Dowding CH. (1985). "Blast vibration monitoring and control." Englewood Cliffs: Prentice Hall Inc.
4. Duvall WI, Fogelson DE. (1962). "Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations." US Bureau of Mines.
5. Edwards AT, Northwood TD. (1960). "Experimental studies of the effects of blasting on structures." *The Engineer*, 210:538-46.
6. Elevli B, Arpaz E. (2010). "Evaluation of parameters affected on the blast induced ground vibration by using relation diagram method." *Acta Montanistica Slovaca*, 15(4):261-8.
7. Esteves JM. (1978). "Control of vibrations caused by blasting." Memoria 409. Lisbon, Portugal: Laboratorio de Engenharia Civil, Ministerio de Habitacao e Obras Publicas.
8. Khandelwal M, Singh TN. (2006). "Prediction of blast induced ground vibrations and frequency in opencast mine: a neural network approach." *Journal of Sound and Vibration*, 289(4-5):711-25.
9. Kwan AKH, Lee PKK. (2000). "A study of the effects of blasting vibration on green concrete." Geo Report No. 102, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, the Government of the Hong Kong Special Administrative Region.
10. Nateghi R. (2011). "Prediction of ground vibration level induced by blasting at different rock units." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 48(4): 899-908.
11. Olofsson SO. (1988). "Applied explosives technology for construction and mining." APPLEEX, p. 158-65.
12. Oriard LL, Coulson JH. (1980). "TVA blast vibration criteria for mass concrete: In minimizing detrimental construction vibrations." *American Society of Civil Engineers (ASCE)*, p. 80-175.
13. Sheikh KA, Masood MM, Chae HM, Tanoli AY, Lee DH, Moon EM, Akhtar K. (2018). "Gulpur Hydropower Project: Influence Zone of Blast Vibrations on Concrete Structure." *IFCEE*, p. 494-505.
14. Siskind DE, Stagg MS, Koop JW, Dowding CH. (1980). "Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting." US Bureau of Mines, p. 74.
15. Tripathy, G.R., Shirke, R.R., Kudale, M.D. (2016). "Safety of engineered structures against blast vibrations: A case study." *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8, 248-255.

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 한국터널지하공간학회의 공식입장과는 무관합니다.]