

# 터널 심도에 따른 발파 진동 영향 및 최적 발파 이격거리 연구

공석민<sup>1</sup> · 최상일<sup>2</sup> · 김영배<sup>3</sup> · 노원석<sup>4</sup> · 김창용<sup>5</sup> · 이성원<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 박사후연구원

<sup>2</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 수석연구원

<sup>3</sup>정회원, 미래이엔씨(주) 대표이사

<sup>4</sup>정회원, 미래이엔씨(주) 부사장

<sup>5</sup>정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 선임연구위원

## A study on the effect of blasting vibration and the optimal blasting offset according to the depth of tunnel

Suk-Min Kong<sup>1</sup> · Sang-Il Choi<sup>2</sup> · Yeong-Bae Kim<sup>3</sup> · Won-Seok Noh<sup>4</sup> · Chang-Yong Kim<sup>5</sup> · Seong-Won Lee<sup>5\*</sup>

<sup>1</sup>Post-Doctoral Researcher, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>2</sup>Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>3</sup>President, Mirae E&C

<sup>4</sup>Vice-President, Mirae E&C

<sup>5</sup>Senior Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

\*Corresponding Author : Seong-Won Lee, swlee@kict.re.kr

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association  
24(6)483-494(2022)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2022.24.6.483>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received September 16, 2022

Revised October 14, 2022

Accepted October 27, 2022



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2022, Korean Tunnelling and Underground Space Association

### Abstract

Owing to the saturation of ground spaces in downtown areas, underground spaces are being developed increasingly. Underground spaces are utilized for transportation, water supply and sewerage, communication zones, electric power zones, and various cultural complexes. In Korea, for excavating underground spaces, blasting methods using gunpowder such as the New Austrian Tunneling Method (NATM) are mainly used. However, the blasting method causes vibration and noise during tunnel excavation, generating many complaints from residents in the vicinity of the excavation site. To address this problem, various methods have been developed, and recently, vibration and noise have been reduced using deep excavation. This study predicts blast vibration changes according to the depth, under the same blasting and tunnel conditions, using numerical analysis based on the blast vibration measurement data of the GTX-A route, the tunnel cross-section drawings, and ground investigation reports. Furthermore, the necessary separation distance from densely populated areas such as residential areas is suggested by analyzing the trend of decreasing blast vibration

according to the distance from ground surface directly above the blasting location.

**Keywords:** Tunnel excavation, Blasting method, Blast vibration, Deep excavation, Numerical analysis

## 초 록

도심지 지상공간의 포화로 인한 지하공간 개발은 지속적으로 증가하고 있으며, 지하공간은 교통, 상하수도, 통신구, 전력구 및 각종 복합 문화 공간으로 활용되고 있다. 지하공간을 굴착하는 대표적인 방법으로 국내에서는 NATM (New Austrian Tunneling Method)과 같은 화약을 이용한 발파 공법이 주로 사용되어왔다. 하지만, 발파 공법은 터널 굴착 시 진동과 소음을 유발하기 때문에 굴착 인근 지역 주민들의 민원이 많이 발생한다. 최근 도심지 도심도 지하공간 굴착공사가 증가하고 있어 발파 진동과 소음 저감을 위한 근본적인 노력과 기술이 필요로 되고 있는 상황이다. 본 연구에서는 GTX-A 노선 일부구간의 현장 발파 진동 계측자료 및 지반조사자료와 설계자료를 활용하여 동일 발파, 터널조건에서 심도에 따른 발파 진동 변화를 수치해석을 통해 예측하고자 한다. 또한 발파 위치 직상부로부터의 이격거리에 따라 발파 진동의 감소 경향을 분석하여 주택가와 같은 인구 밀집 지역으로부터 필요한 이격거리를 제시하고자 한다.

**주요어:** 터널 굴착, 발파 공법, 발파 진동, 지하공간, 수치해석

## 1. 서론

지하공간은 교통, 상하수도, 통신구, 전력구 및 각종 복합 문화 공간으로 다양하게 활용되고 있으며, 이에 따라 수 많은 지하 터널 굴착 공법 개발 및 관련 연구가 끊임없이 발표되고 있다. 이와 더불어 건설공사의 안전관리에 대한 관심과 노력은 꾸준히 증가하고 있으며, 지하굴착공사에서의 안전문제는 중요한 이슈가 되고 있다. 또한, 2018년부터 지하굴착공사에 설계 및 시공단계에서 안전 영향을 의무적으로 검토해야하는 지하안전특별법을 제정하고 지하안전영향평가를 수행하도록 하고 있다(Kim, 2020). 설계 및 시공사에서는 자체적으로 침하, 진동, 소음 등의 국내 계측 기준 보다 엄격한 관리 기준을 적용하여 주변에 미치는 영향 및 인근 지역 민원 문제를 해결하고자 노력해왔다. 실제로 Tables 1~3과 같은 국내외 발파 진동 허용치 기준보다 낮은 자체 기준을 적용하여 관리하고 있다. 하지만 이러한 노력에도 불구하고 지하 터널 발파 시 진동 및 소음에 대한 민원이 끊이지 않고 있는 실정이다. 이에 따라 발파로 인한 민원 저감을 위해 많은 발파기술이 연구되고 있으며 더불어 발파와 관련한 이론적, 수치해석적 연구도 활발히 진행돼 왔다. Choi et al. (2006)은 현장의 단순한 발파압력을 사용하기보다는 실제의 발파현상 및 지반진동을 더욱 정확히 반영할 수 있도록 역해석 기법과 시험발파에 의한 자료 비교를 바탕으로 발파하중을 산정하였다. 이를 통해 폭약에 의한 폭발 상태를 이상적인 것으로 가정하고 폭발에너지를 구하는 기존의 발파압력 추정식들은 실제 폭발압력보다 약 50~60% 높은 압력이 계산됨을 알 수 있었으며, 지반의 특성을 반영한 진동파형을 모사할 수 있는 역해석 기법을 통한 발파하중 산정을 제안하였다. Jeon et al. (2007b)는 터널 상부 재개발로 인한 발파 굴착 시 허용진동속도를 만족하는 발파 이격거리를 이론식과 수치해석을 이용하여 산정하였으며, 터널의 안정성을 검토하였다. 이론식에 의해 산정된 발파 이격거리를 기준으로 이격거리를 증가시켜

허용진동속도가 1.0 cm/sec를 만족하는 허용이격거리를 산정하였다. Moon (2010)은 기존의 라인드릴링과 프리스 플리팅의 진동저감 효과에 대하여 현장시험과 수치해석을 수행하였으며, 결과를 비교하여 수치 해석방법에 의한 결과의 유사성을 검증하고 각각 10%와 50%의 저감효과를 보임을 분석하였다. 또한, 외곽공 제어발파에 적용하는 일반화약과 폭속이 다른 이중화약류를 조합하여 터널 발파 진동을 저감 할 수 있는 외곽공 제어발파 공법의 타당성을 검토하였다. Son et al. (2019)은 유한차분법 기반의 수치해석 프로그램을 이용하여 V-cut 공법 및 단평행의 심발공법을 모사하였다. 또한, 실제 터널 시공현장의 시험발파 계측 자료와 수치해석을 비교하여, 단평행 심발공법의 최대입자속도가 V-cut 대비 최대 46.25% 감소하는 것을 분석하였다. Kong et al. (2022)은 진동 저감을 위한 TBM & NATM 병행 공법 사용 시 암반종류, 장약량 조건에 따라 터널 주변에 미치는 발파 진동의 영향을 3D수치해석을 통해 예측하였다. 이를 통해 밀도가 높은 암반의 경우 토사지반보다 진동 속도가 증가함을 확인하였으며, 국내 진동규제치와 비교하여 암반과 장약량에 따라 발생하는 진동 속도를 정리하였다. 이처럼 지하 터널 발파로 인해 발생하는 진동을 감소시키기 위한 다양한 연구는 끊임없이 발표되고 있다(Jeon et al., 2007a). 본 연구는 지표면에서 느껴지는 발파 진동을 최소화 시키기 위해 대심도에서 터널 굴착 시 발생하는 진동을 현장 계측을 실시하였으며, 수치해석을 통해 중·저심도와 비교하여 대심도 굴착이 어느정도 진동 감소효과가 있는지 확인하였다. 또한 동일 심도에서 발파지점과의 이격거리에 따라 발파 진동 값이 얼마나 줄어드는지 예측하였으며, 이에 대한 적정 이격거리를 제시하였다.

**Table 1.** Tunnel standard specification (MOLIT, 2016)

| Building type   | Permissible vibration (cm/sec) |
|---|--------------------------------|
| Vibration-sensitive structures and cultural heritage  | 0.2~0.3                        |
| Structures with masonry infill walls and timber ceilings (traditional houses and low-rise general houses) | 1.0                            |
| Masonry buildings with underground foundations and concrete slabs (row houses)                            | 2.0                            |
| Medium and small buildings with reinforced concrete framework and slabs (low-rise apartments)             | 3.0                            |
| Large buildings with reinforced concrete, reinforced framework, and slabs (high-rise apartments)          | 5.0                            |

**Table 2.** Blasting vibration standards for subway construction in Seoul and Busan (MOLIT, 2002)

| Classification | Building type  | Permissible vibration (cm/sec) |
|----------------|--|--------------------------------|
| Seoul subway   | Cultural heritage and buildings with precision machinery | 0.2                            |
|                | Houses and apartments                                    | 0.5                            |
|                | Shopping complexes, offices, and public buildings        | 1.0                            |
|                | Reinforced concrete and steel frame factories            | 4.0                            |

**Table 2.** Blasting vibration standards for subway construction in Seoul and Busan (MOLIT, 2002) (continued)

| Classification | Building type                                     | Permissible vibration (cm/sec) |
|----------------|---|--------------------------------|
| Busan subway   | Cultural heritage such as relics or ancient sites | 0.2                            |
|                | Nearby computer facilities                        | 0.2                            |
|                | Houses and apartments                             | 0.5                            |
|                | Shopping complexes                                | 1.0                            |
|                | Reinforced concrete buildings and factories       | 1.0~4.0                        |

**Table 3.** Overseas blasting vibration standards (MOLIT, 2002)

| Classification | Building type  | Permissible vibration (cm/sec) |
|----------------|--|--------------------------------|
| United Kingdom | Tunnel blasting in densely populated areas   | 1.0                            |
|                | Tunnel blasting in areas with low population density                                   | 2.5                            |
|                | Open-pit blasting at a frequency of 12 Hz or less                                      | 1.2                            |
|                | Other  | 0.5                            |
| United States  | Vibration with a frequency of 40 Hz or more  | 5.0                            |
|                | Vibration with a frequency of 15 Hz or more  | 1.0                            |
|                | Vibration with a frequency of 1 Hz or less   | 0.5                            |
| Austria        | Vibration with a frequency of 15 Hz or more  | 1.9                            |
|                | Vibration with a frequency below 15 Hz   | 0.02                           |
| Switzerland    | Historical relics or sensitive structures at 10 to 60 Hz                               | 0.762                          |
|                | Historical relics or sensitive structures at 60 to 90 Hz                               | 1.27                           |
| Japan          | No damage caused   | 0.2                            |
|                | Vibration can be detected, but no structural damage occurs                             | 0.2~0.5                        |
|                | Microscopic damage occurs only in areas where the structure is particularly vulnerable | 0.5~1.0                        |

## 2. 현장 진동 계측

대심도 지하터널 굴착 시 발생하는 발파 진동을 측정하기 위해 GTX-A 노선 굴착 공사가 진행중인 현장 인근에 계측기를 설치하였다. 대상 지반은 매립층, 풍화토, 풍화암, 경암으로 구성되었으며, 터널은 심도 40 m 아래에서 굴착되었다(Fig. 1). 심발공1과 2는 Fig. 2와 같은 패턴으로 발파되었으며, 심발공 중심 700~800 mm 간격으로 확대공이 설치되어 발파가 이루어졌다. 계측기는 Fig. 3과 같이 발파지점 중심부에서 20 m 떨어진 지점 지표면에 설치되어 있으며, 24시간 동안 1분 단위로 측정하였다. Fig. 4는 발파 진동 계측 결과를 나타내고 있다. 측정된 최대진동치는 0.11 cm/sec이며, 계측기 설치 지점과 멀어질수록 진동 계측치가 감소함을 확인하였다. 측정된 결과 값은 문화재, 정밀기계 설치 건물에 해당하는 국내 기준 및 피해가 발생하지 않는다고 보는 일본 기준 0.2 cm/sec 보다 작은 값이 측정되었으며 실제로 사람이 지표면에서 체감할 수 있을 정도의 진동은 느껴지지 않았다.

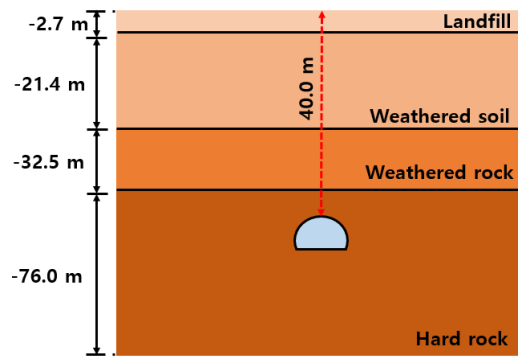


Fig. 1. The ground conditions and tunnel depth

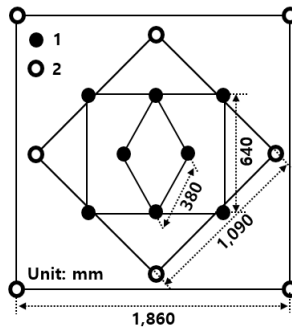


Fig. 2. Blasting pattern



Fig. 3. The location of blasting vibration measurement

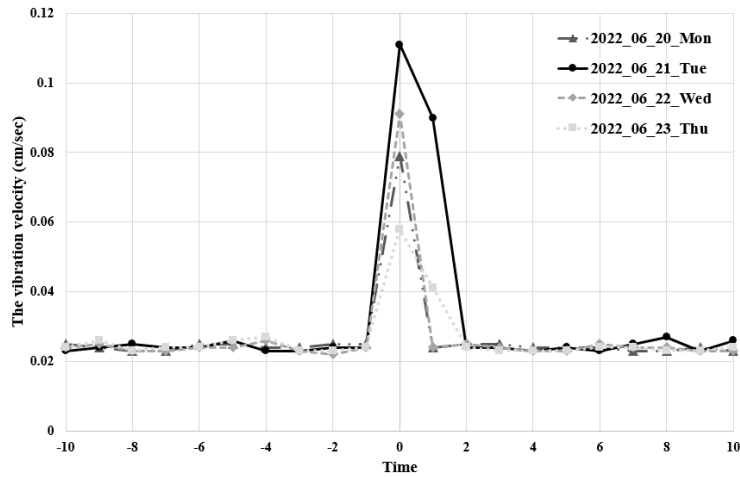


Fig. 4. The results of field blasting vibration measurement

### 3. 수치해석을 이용한 심도에 따른 발파 영향 검토

현장 계측과 같은 결과를 얻기 위해 동일 지반 조건, 터널 형상, 발파 조건을 수치해석을 통해 모델링하였다. 수치해석은 유한차분법 기반의 FLAC 3D를 사용하였으며, FLAC 3D는 암반, 흙, 구조물의 역학적 해석을 위한 3차원 연속체 해석 프로그램으로 특히 운동방정식을 매시간 단계마다 적분하여 해를 구하는 방식으로 시간 진행에 따른 거동 해석(시간이력해석)에 용이하다(Itasca Consulting Group Inc., 2017). Fig. 5는 모델링 된 지층 및 터널 발파 패턴을 보여주고 있다. 모델링 된 지반의 X방향(양측면)과 Y방향(굴진방향), Z방향(지반 모델링 하단면)은 FLAC 3D 프로그램 상에서 점성경계(quiet boundary)로 경계조건을 설정하여 모든 방향에서 반사파의 영향이 없도록 하였다.

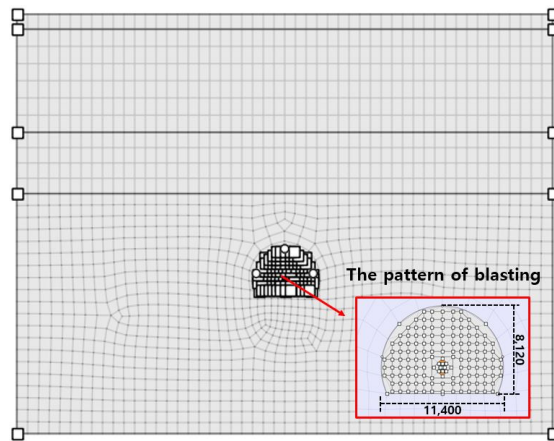


Fig. 5. The tunnel blasting patterns and modeling for ground

### 3.1 지반 물성치 및 발파하중 산정

본 해석의 지반 물성치는 해당 지역 지반조사결과와 기존문헌을 참조하여 적용하였으며, 지반구성 모델은 Mohr-coulomb 모델이다. 적용된 물성치는 아래 Table 4와 같다(Jeon et al., 2007b; Oh, 2008; Itasca Consulting Group Inc., 2017) 수치해석 시 발파하중 산정 경험식은 다양하지만 본 연구에서는 Table 5와 같이 Hino (1959)에서 제안한 계산식을 사용하여 발파하중을 산정하였으며, 장약공에 따라 장약량은 2.80~0.75 kg로 전색에 대한 발파하중을 계산하였다. 계산된 발파하중을 통해 Starfield and Pugliese (1968)가 제안한 식을 이용하여 등가 발파하중( $P'$ )을 계산하였으며, 발파로 인해 발생하는 진동의 시간이력을 고려하기 위해 Starfield and Pugliese (1968)의 이론식을 통해 이력곡선을 구하였다. 계산된 시간이력곡선은 Fig. 6과 같으며, 본 해석에서 장약량 2.20 kg (심발공1), 2.80 kg (심발공2), 0.75 kg (확대공)에 대한 등가환산 한 발파하중은 각각  $150.58 \text{ kg/cm}^2$ ,  $191.65 \text{ kg/cm}^2$ ,  $119.78 \text{ kg/cm}^2$ 로 산정하였다(Jeon et al., 2007a). 산정된 발파 하중은 심발공1 → 심발공2 → 확대공 순서로 0.001초 간격으로 발파를 실시하였다. 또한, Ahn et al. (2014)을 참고하여 830 Hz 등가주파수와 지반의 1% 감쇠비를 적용하였다.

**Table 4.** The material properties of the ground

| Classification | Unit weight (kN/m <sup>3</sup> ) | Cohesion (kN/m <sup>2</sup> ) | Angle of shearing resistance (°) | Young's modulus (Mpa) | Poisson's ratio |
|----------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------|
| Landfill       | 18                               | 0                             | 31                               | 1,300                 | 0.3             |
| Weathered soil | 19                               | 15                            | 31                               | 3,500                 | 0.3             |
| Weathered rock | 20                               | 30                            | 33                               | 30,000                | 0.3             |
| Hard rock      | 27                               | 1,890                         | 40                               | 1,290,000             | 0.2             |

**Table 5.** The empirical equations for blasting load

| Classification                            | Equations  |
|---|--|
| Hino (1959)                               | $P_D = 0.000424 \cdot V_e^2 \cdot p_e (1 - 0.543 \rho_e + 0.193 \rho_e^2)$<br>$P_D$ : Blasting load (kg/cm <sup>2</sup> ), $V_e$ : Average velocity of explosion (m/sec),<br>$\rho_e$ : Average of specific gravity (g/cm <sup>3</sup> ) |
| Tamping                                   | $P_A = (2 \cdot \rho_a \cdot C_a) / (\rho_a \cdot C_a + \rho_e \cdot V_e) \cdot P_D$<br>$\rho_a$ : Tamping density of sand (g/cm <sup>2</sup> ), $C_a$ : Velocity of shock wave (sand) (m/sec)   |
| Starfield and Pugliese (1968)             | $P' = P_a \cdot W \cdot 2 \pi \cdot \text{Diameter of boring} / \text{Length around the blast hole}$<br>$W$ : Explosive charges (kg)   |
| The empirical equations with time history | $P(t) = 4 \cdot P' \cdot \{ \exp(-B \cdot t / \sqrt{2}) - \exp(-\sqrt{2} \cdot B \cdot t) \}$<br>$P(t)$ : Pressure according to time $t$ (kg/cm <sup>2</sup> ), $B$ : Constant for load (16,338),<br>$t$ : Time (0.06 $\mu\text{sec}$ )  |

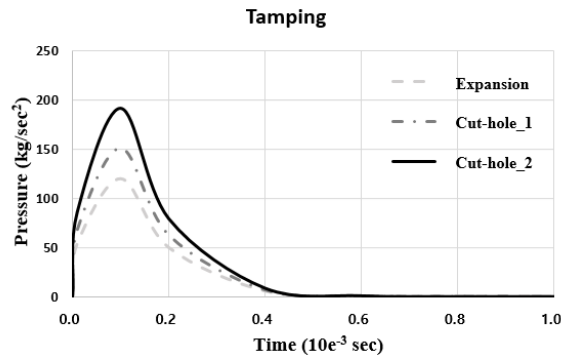


Fig. 6. Time series of blast loading

### 3.2 해석 Case 및 계측 위치

본 연구는 심도 40 m 깊이에서 터널 굴착을 실시한 기존 현장 자료를 바탕으로 동일한 지반 및 터널, 발파조건으로 수치해석을 실시하였으며, 심도에 따른 발파 진동의 영향을 알아보기 위해 Fig. 7과 같이 20 m, 30 m (중심도),

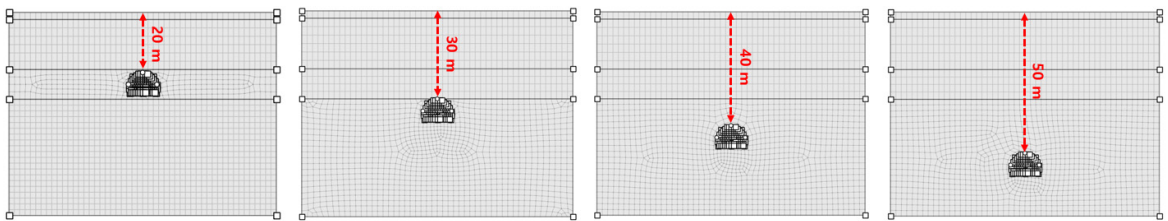


Fig. 7. Different numerical models according to tunnel depth

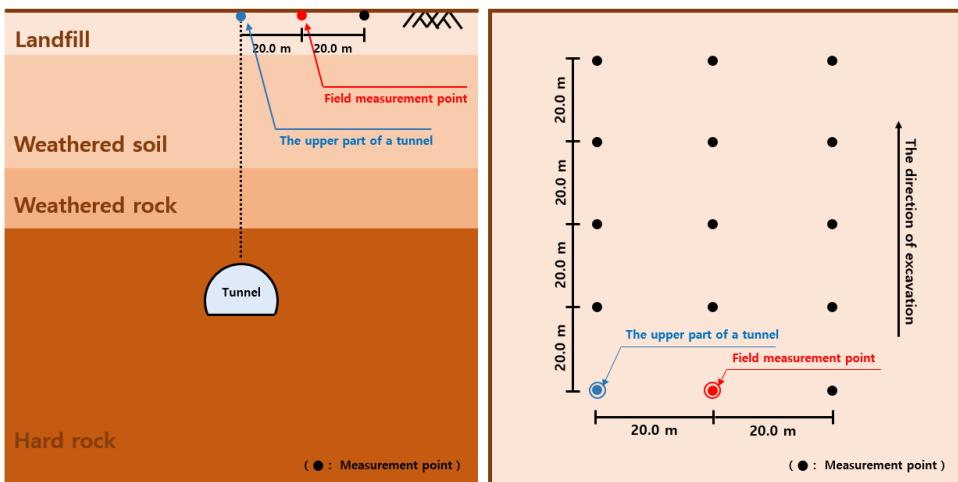


Fig. 8. Blasting vibration measurement point using numerical analysis



50 m (대심도)의 터널 심도 조건을 추가적으로 해석하였다. 지표로부터 5 m 이내의 천심도는 동일조건에서 파괴가 발생하여 해석에서 제외하였다. 수치해석을 통해 예측된 발파 진동 예측지점은 Fig. 8과 같이 현장 계측 지점 (터널 직상부에서 20 m 떨어진 지점)을 포함하여 20 m 간격으로 총 15지점에서 측정하였다.

### 3.3 수치해석 결과

현장 및 수치해석을 이용한 발파 진동 예측의 결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 9(c)에 표시된 현장 계측 데이터는 0.11 cm/sec로 현장에서 목표로 하고 있는 0.2 cm/sec 보다 작은 값이 측정되었다. 현장 계측 결과값을 국내 기준 MOLIT (2016)와 비교하면 문화재 및 진동 예민 구조물 기준치의 범위 내에 속한다. 현장 계측 데이터와 동일한 지반, 터널, 발파 조건을 가지고 해석하여 동일 위치에서 유사한 진동 측정값이 발생함을 확인하였으며, 40 m 심도에서 굴착 시 굴착터널 직상부에서는 0.204 cm/sec의 발파 진동이 측정됨에 따라 심도를 40 m로 설계한 것은 타당한 것으로 판단된다. 또한, 동일한 조건에서 심도를 달리하여 추가적인 해석을 실시한 결과 40 m 이하의 심도(20 m, 30 m)에서는 각각 최대 0.502 cm/sec, 0.323 cm/sec가 측정되었다. 이는 MOLIT (2016)에서 규정하고 있는 조적식 벽체와 목재로 된 천장을 가진 구조물의 허용진동치 범위 안에 들어오나 실제 현장에서 목표로 하는

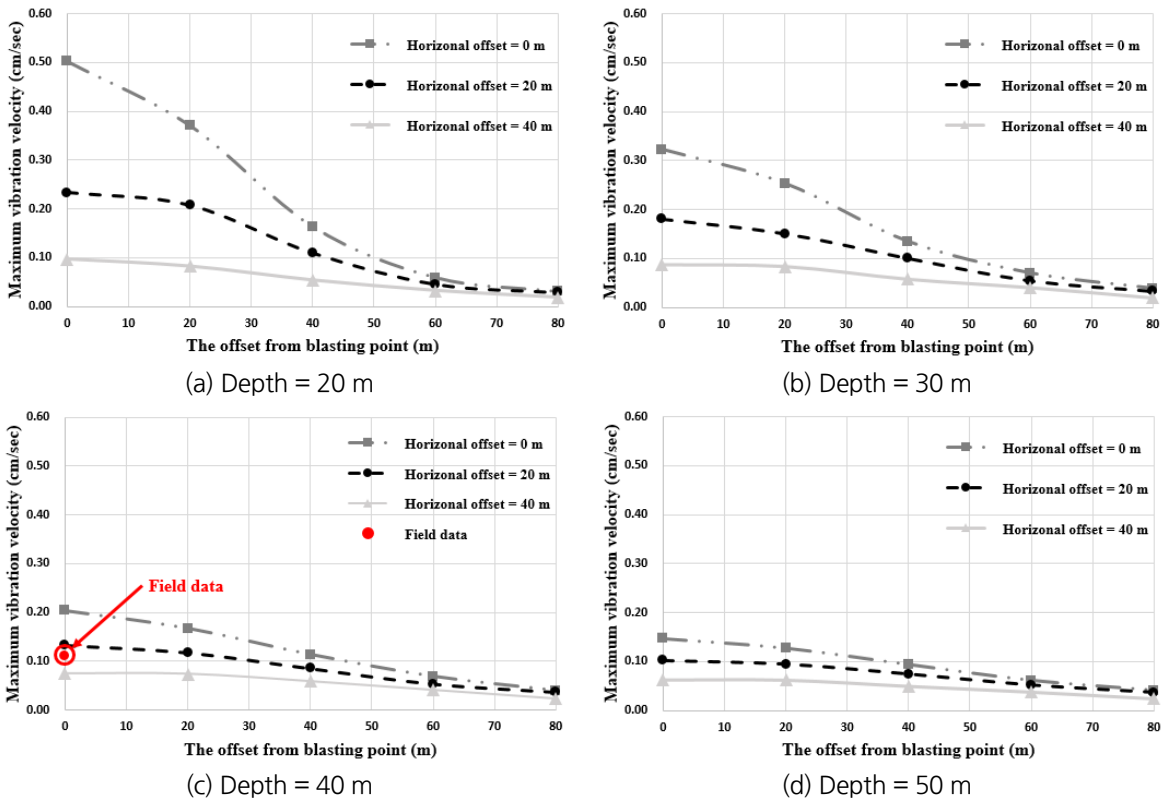


Fig. 9. The vibration velocity according to depth and offset

진동치 0.2 cm/sec 보다 높은 값을 보여 40 m 이상에서 굴착을 설계한 것은 합리적인 것으로 판단된다. 본 해석에서 가장 지표면에 가까운 20 m 심도에서 발파를 실시할 때, 직상부 지표면에서 수평으로 20 m 떨어진 곳에서 측정된 결과는 문화재 및 진동 예민 구조물 기준치 범위 내에 들어오는 것으로 예측되었다. 따라서 현장 요건에 따라 중, 저심도에서 발파 굴착을 실시할 경우, 주택지역 및 유동인구가 많은 지역으로부터 충분한 거리를 가진다면 이에 대한 주민들의 민원이 감소될 것으로 보인다. Fig. 10은 발파지점 직상부에서 측정되는 터널 심도에 따른 진동치를 지수곡선을 통해 예측한 결과이다. 지수곡선은 99.5%의 정확성을 보이며 본 곡선을 통해 유사 지반 및 발파조건에 대해 심도별 진동 예상 값을 구할 수 있을 것으로 보인다.

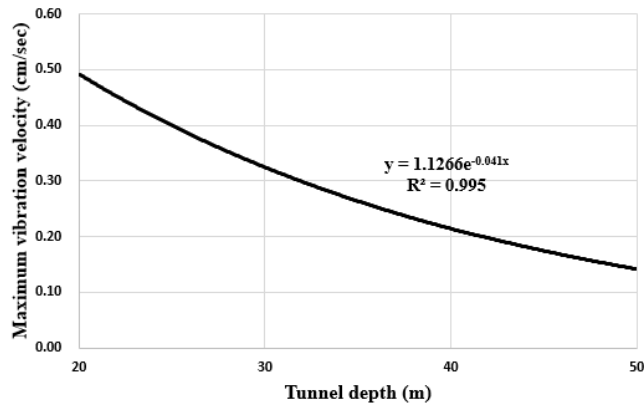


Fig. 10. The prediction curve for vibration at the blasting point according to tunnel depth

터널 굴착면 직상부 지표면에서 측정된 결과 심도 20 m 대비 30 m, 40 m, 50 m에서 각각 35.76%, 59.37%, 70.74%의 진동 감소율을 보였다(Fig. 11). 또한 현장 계측 위치와 동일하게 수평으로 20 m 떨어진 지점에서의 결과 값은 각각 22.73%, 43.09%, 56.19%로 심도에 따라 진동이 감소함을 알 수 있다. 이보다 멀리 떨어진 수평이격

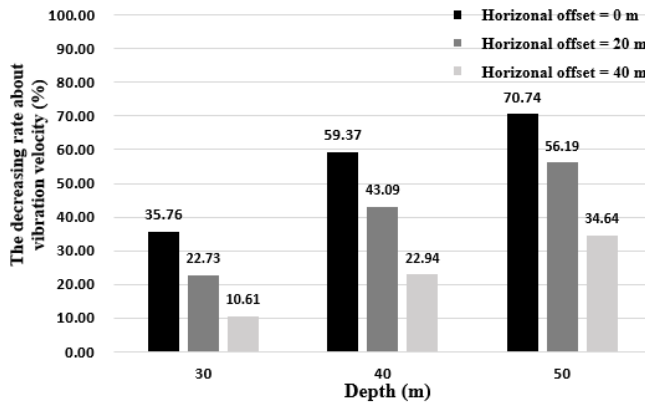


Fig. 11. The decreasing rate for vibration velocity

거리 40 m에서 측정된 결과 값은 각각 10.61%, 22.94%, 34.64%로 수평이격거리가 증가함에 따라 심도에 따른 진동 감소율 폭이 줄어드는 것을 확인하였다. 따라서, 심도를 깊게 굴착하지 못하는 경우에는 발파지점과의 20 m 이상의 이격거리를 갖는 것이 효과적일 것으로 보인다.

## 4. 결론

본 연구에서는 현장 계측 데이터와 수치해석을 이용하여 터널 심도 및 발파지점과의 수평이격거리에 따라 진동 속도가 얼마나 감소되는지를 분석하였다. 또한 허용진동치 기준과 비교하여 발파 진동에 대한 영향을 최소화할 수 있는 적정 이격거리를 제시하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 현장 계측과 동일한 지반, 터널, 발파 조건을 가지고 수치해석을 수행한 결과 굴착 방향으로 발파지점과 멀어질수록 진동 속도는 감소하며, 진동 속도의 감소폭은 터널 심도가 얕을수록 커짐을 확인하였다. 또한 40 m 이하의 심도(중심도)에서 발파하는 경우 MOLIT (2016)에서 규정하고 있는 조적식 벽체와 목제로 된 천장을 가진 구조물의 허용진동치 범위 안에 들어오나 실제 현장에서 목표로 하는 진동치 0.2 cm/sec 보다 높은 값이 측정 되는 반면 40 m 이상의 심도(대심도)인 경우 MOLIT (2016)에서 규정하고 있는 문화재 및 진동 예민 구조물 기준치 범위 내로 진동 속도가 측정되어 본 시공현장 설계 시 대심도 굴착을 계획한 것은 합리적인 것으로 판단된다.
2. 본 연구 수치해석 Case 중 지표면과 가장 가까운 심도인 20 m에서 발파를 수행한 결과 직상부에서 발파한 경우보다 수평이격거리가 20 m 떨어진 지점에서 발파할 경우 약 53.45% 진동속도가 감소하는 경향을 보였다. 또한, 심도가 깊어짐에 따라 수평이격거리에 따른 진동감소율의 폭이 줄어드는 것으로 보아 얕은 심도에서 발파를 실시할 경우 주택 및 유동인구가 많은 지역으로부터 충분한 거리를 두고 발파를 한다면, 진동으로 인한 피해 및 민원이 감소될 것으로 판단된다.
3. 본 연구는 특정 지반, 터널, 발파조건에서의 현장 계측 데이터를 기반으로 수치해석을 이용하여 다양한 심도 및 수평이격거리에 따른 진동 속도 감소 효과를 예측해보았다. 따라서, 연구의 신뢰성을 높이기 위해 다양한 조건(지반, 발파, 등가주파수, 감쇠비 등)의 영향에 따른 수치해석을 실시할 예정이며, 발파로 인한 진동뿐만 아니라 발파 소음에 대해서도 측정하여 발파 시공 시 인근 주민들에게 영향을 최소화 할 수 있는 방안을 마련하고자한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 지원(과제명: 도심 지하 교통 인프라 건설 및 운영 기술 고도화 연구, 과제번호: 22UUTI-C157788-03)으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

## 저자 기여도

공석민은 수치해석 및 원고 작성을 하였고, 최상일은 데이터 분석 및 정리 작업을 하였고, 김영배와 노원석은 데이터 수집 및 데이터 분석을 하였고, 김창용과 이성원은 연구 개념 설계 구체화 및 원고 검토를 하였다.

## References

1. Ahn, J.K., Park, D.H., Shin, Y.W., Park, I.J. (2014), "Generation of blast load time series under tunneling", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 16, No. 1, pp. 51-61.
2. Choi, J.S., Lee, J.M., Jo, M.S. (2006), "A calculation of blasting load using input identification method & evaluation of structure's vibration in numerical analysis", *Tunnel and Underground Space*, Vol. 16, No. 3, pp. 232-240.
3. Hino, K. (1959), *Theory and Practice of Blasting*, Nippon Kayaku Co., Ltd., Tokyo, Japan, pp. 1-11.
4. Itasca Consulting Group Inc. (2017), "FLAC 3D 6.0 manual: examples (An excerpt from FLAC3D help)", Itasca Consulting Group Inc.:St. Paul, Minneapolis, United States, pp. 39-52.
5. Jeon, S.S., Jang, Y.W., Jung, D.H. (2007a), "Estimation of the blasting distance satisfying allowable peak particle velocity - analytical & numerical analysis approach", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 7, No. 1, pp. 39-46.
6. Jeon, S.S., Kim, D.S., Jang, Y.W. (2007b), "Stability assessment of concrete lining and rock bolts of the adjacent tunnel by blast-induced vibration", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 23, No. 10, pp. 33-45.
7. Kim, Y.G. (2020), "Review on underground safety management in Korea", *Magazine of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 22, No. 1, pp. 4-19.
8. Kong, S.M., Kim, A.R., Byun, Y.S., Shim, S.B., Choi, S.I., Lee, S.W. (2022), "Analysis of stability and required offset with vibration velocity considering conditions of bedrock and explosive charges using the TBM and NATM extension blasting method", *Applied Sciences*, Vol. 12, No. 7, pp. 3473-3490.
9. MOLIT (2002), "Blasting noise review of vibration tolerance standards", Office of the Inspector General of the Ministry of Construction and Transportation, Korea, pp. 9-29.
10. MOLIT (2016), *Tunnel Standard Specification*, Human Culture Arirang, Korea, pp. 1-11.
11. Moon, H.N. (2010), A study on the vibration propagation characteristics of controlled blasting methods and explosives in tunnel, Master Thesis, Hanyang University, pp. 1-98.
12. Oh, W.K. (2008), A study on the ground reinforcement for constructability of tubular roof construction method, Master's Thesis, Hanyang University, p. 45.
13. Son, J.H., Kim, B.R., Lee, S.J., Kim, N.S., Lee, H., Choi, S.O. (2019), "A numerical study on the reduction effect of blasting vibration with cut method", *Explosives and Blasting*, Vol. 37, No. 1, pp. 1-13.
14. Starfield, A.M., Pugliese, J.M. (1968), "Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: A comparison between a computer model and field measurements", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol. 5, No. 1, pp. 65-77.