

터널 발파로 인한 아파트 인근지역에서의 지반진동 전파특성 및 영향 평가 연구

최병희¹⁾, 류창하¹⁾, 백승규¹⁾

Environmental Effects and Characteristics of Ground Vibration Caused by Tunnel Blasting in the Vicinity of an Apartment Byung-Hee Choi, Chang-Ha Ryu and Seung-Kyu Baek

ABSTRACT. Explosive blasting in tunnel excavation produces ground vibration and air blast as its side effects, which may cause complaints from nearby residents. This study was intended to investigate the propagation characteristics of ground vibration induced by tunnel blasting and to evaluate its effects on the residential structures near the site. We have conducted field measurements for 6 blasts and acquired vibration data from 70 measuring points, some of which were positioned inside the tunnel for comparative reason. Various documentation was reviewed to determine an allowable level of peak particle velocity for the residential structures in the area and the allowable limit was set to 0.5 cm/sec. Propagation equations for peak particle velocities were derived from regression analyses using the data acquired at both the surface and the underground tunnel. Finally we proposed appropriate predictive equations for the two areas and a safe blasting criterion.

Key words : ground vibration, allowable level, peak particle velocity, propagation equation, predictive equation

초 록. 화약발파를 이용한 터널굴착은 지반진동 및 소음과 같은 발파공해적 요소가 수반됨으로써 주위 환경조건에 따라 여러 가지 형태의 피해를 유발할 수 있으며 시공 중에 종종 발생하는 민원의 주요 원인이 되고 있다. 본 연구는 터널 건설과정에서 노선이 통과하는 직상부 지역에 위치한 민가들과 인근의 아파트를 대상으로 발파로 인한 지반진동의 영향여부를 검토함으로써 사전에 발파작업으로부터의 안전성을 확보할 수 있는 근거를 마련코자 실시되었다.

먼저, 대상지역에 위치한 건물들에 대한 발파진동 허용수준은 보수적인 관점에서 0.5 cm/sec를 관리수준으로 설정하였고, 터널 굴착과정에서 발생하는 발파진동 발생특성을 실측하기 위하여 총 6회의 굴진발파에 대하여 총 70개소 이상의 측정에서 현장계측을 실시하였다. 발파진동 영향평가에서는 현장계측으로부터 획득한 자료들을 처리하여 발파로 발생하는 최대진동수준을 예측하기 위한 전파식들을 지상과 지하의 계측장소별로 유도하였다. 지반진동의 영향여부를 결정하기 위한 진동예측식은 엄격한 기준을 적용하여 전체자료의 95%를 포함하는 식을 채택하였고, 지표 및 지하터널에 대해 각기 별도의 식을 사용할 것을 제안하였다.

핵심어 : 지반진동, 허용수준, 최대진동속도, 전파식, 진동예측식

1. 서 론

화약발파를 이용한 터널굴착은 지반진동 및 소음과 같은 발파공해적 요소가 수반됨으로써 주위 환경조건에 따라 여러 가지 형태의 피해를 유발할 수 있으며 시공 중에 종종 발생하는 민원의 주요 원인이 되고 있다. 본 연구에서는 터널건설에 있어서 발파진동과 같은 공해요소에 대한 영향권을 조

사하고 지반진동이 주위의 민가 등에 미치는 영향여부를 검토함으로써 사전에 발파작업으로부터의 안전성을 확보할 수 있는 근거를 마련코자 한다. 연구에서 대상으로 하고 있는 지역은 영동선 솔안터널이 통과하는 노선 직상부에 위치한 지역과 그 인접지역으로서 여기에는 산재된 민가들과 아파트가 위치하고 있어 구조물의 안전확보 및 민원예방을 위한 진동대책이 필요한 곳이다. 또한 설계단계에서 사용한 발파진동 예측식은 현장조건이 충분히 반영되지 못하여 실제 시공시의 지반진동 발생

1) 한국지질자원연구원
접수일 : 2004년 2월 20일

특성과는 차이가 있을 수 있으므로 시공단계에서 발파에 대한 영향평가 및 대책장구가 요구되고 있다.



그림 1. 터널 시점부



그림 2. 장약작업

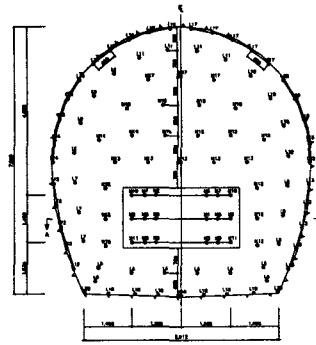


그림 3. 전형적인 발파패턴도

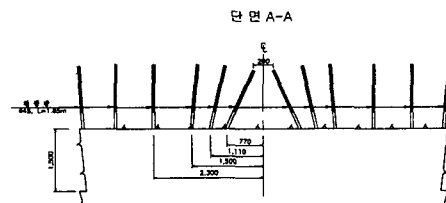


그림 4. 발파패턴 단면도

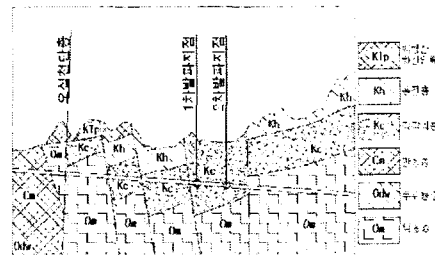


그림 5. 대상지역의 지질중단면도

2. 현장계측 및 결과

2.1 계측개요

대상지역에서 터널의 굴진발파로 발생하는 지반 진동의 전파특성을 파악하기 위하여 현행 발파조건 하에서 발파 및 계측작업이 실시되었다. 그림 1은 굴진 중인 터널 시점부의 모습이며, 그림 2는 장약작업 광경이며, 그림 3과 4는 대표적인 발파패턴도 및 단면도이다. 그림 5는 터널을 따라가는 종단면 상에서의 지질도로서 대상지역이 오십천 단층으로 대표되는 복잡한 지질조건을 갖고 있음을 시사해준다.

2.2 계측장비 및 계측방법

(1) 계측장비

진동측정에 사용된 장비는 캐나다 Instantel사의 MiniMate Plus, 미국 Geosonics사의 SSU2000DK, SSU3000LC 및 Microseis 등이었다. 본 기기들은 발파진동전용 측정장비로서 지반진동을 측정함과 동시에 발파에 의해 발생하는 발파풍압도 측정할 수 있는 계측장비이다. 기본적인 장비의 구성은 그림 6에서와 같이 폭원에서부터 진행되어 오는 진

동성분의 폭원방향에 대한 수직방향(vertical), 진행방향(longitudinal) 및 접선방향(transverse) 등 세 방향의 지반진동을 감지하는 삼축변환기(triaxial transducer)와 공기 중으로 전달되는 발파풍압을 감지하는 소음계 그리고 측정을 제어하고 기록하는 모니터로 구성되어 있다. 또한 발생된 각각의 진동에 대하여 세 방향성분에 대한 최대입자속도, 최대입자변위, 최대입자가속도, 최대속도에서의 주파수, 최대벡터합속도 및 최대발파풍압 (dB 또는 psi단위)에 대한 정보도 출력할 수 있다.

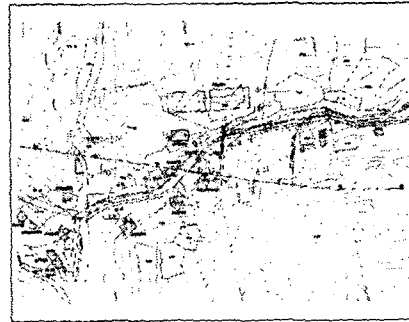
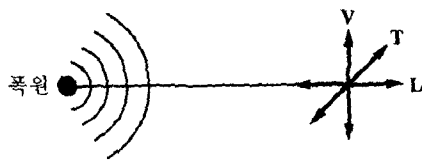


그림 7. 아파트 인근지역 계측현황도



L : Longitudinal (진행방향 성분)
 V : Vertical (진행방향과 수직성분)
 T : Transverse (진행방향과 접선성분)

그림 6. 진동의 측정성분

(2) 계측방법

계측장비는 관심의 대상이 되는 구조물과 가옥 부근의 여러 개소를 선정하여 발파진동의 전파양상을 분석할 수 있는 자료를 얻을 수 있도록 적절한 이격거리를 두고 설치하였다. 현장의 발파조건 및 지반조건이 동일하지 않으므로 가능한 한 다양한 조건을 반영할 수 있도록 몇 차례의 계측을 실시하여 계측자료를 획득하고자 노력하였다.

1차 계측은 2004년 1월중에 실시되었으며, 2차 계측은 2월중에 실시되었다. 1차 계측에서는 굴진 중인 터널 상부 지표면 부근인 아파트와 인근마을을 대상으로 2차례의 발파에 대해 발파 당 10여 개소의 측정점을 설치하고 계측을 실시하였다. 2차 계측은 터널의 굴진막장이 대상마을 직하부까지 도달함으로써 운행선 통과구간 중 폭원과 직상부 가옥간의 거리가 약 85m 정도가 된 상태에서 실시하였다. 그림 7은 1, 2차 계측에서 터널의 진행방향과 측정점들의 위치를 보여주는 계측현황도이다.

본 연구에서는 지반조건이 발파진동에 미치는 영향정도를 파악하기 위해 대상마을에서의 계측과 동시에 터널 내부에서도 진동계를 설치하고 동일 발파에 의해 발생하는 터널내부에서의 지반진동을 계측하였다. 전체적으로 1, 2차 계측을 통하여 총 6차례의 굴진발파에 대하여 총 70개소의 측정점에서 지반진동을 계측하였다.

한편, 진동센서의 설치 시에는 부득이한 경우를 제외하고는 지반 또는 암반 중에 핸드드릴로 적절히 천공한 후 스파이크를 사용하여 센서가 지반이나 암반에 단단히 부착되도록 하였다. 진동센서를 콘크리트 옹벽과 같은 구조물에 설치할 경우에도 마찬가지로 타설되어 있는 콘크리트에 천공한 후 스파이크를 사용함으로써 센서와 구조물이 일체화 되도록 하였다. 그림 8~11은 진동계측이 실시된 아파트 및 부근 민가의 모습과 현장에 설치된 계측기들의 모습을 보여준다.



그림 8. 계측대상 아파트 전경



그림 9. 계측기 설치작업



그림 10. 민가마당에 설치된 계측기

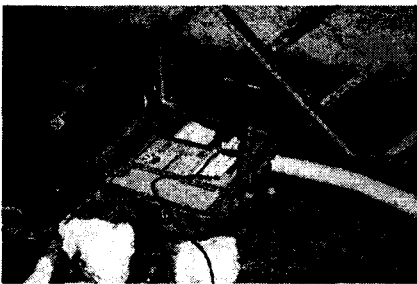


그림 11. 터널바닥에 설치된 계측기

2.3 계측결과

계측결과를 정리하면 표 1과 같다. 표에서 측정점은 계측지점으로서 그림 7에 표시된 번호와 같고 그림에 표시되지 않은 번호는 터널내부에 설치된 측정점이다. 거리는 폭원에서 측정까지의 직선거리(m)이고, 장약량은 계측이 이루어진 당해 발파에서 최대진폭을 기록한 지발당 최대장약량(kg)을 말한다. Long, Vert 및 Trans는 각각 계측된 진동치의 폭원방향성분, 폭원방향과 직교하는 연직방향성분,

폭원방향과 직교하는 수평방향성분의 최대치를 속도단위인 mm/s로 표시한 것이며, Vsum은 주어진 시각에서 이들 직교성분들의 최대벡터합성분을 나타낸다.

표 1. 아파트 인근지역 및 터널내부 계측결과

| 측점 | 거리 (m) | 장약 (kg) | Vert | Long | Trans | Vsum |
|----|-----------|------------|-------|-------|-------|-------|
| | | | mm/s | mm/s | mm/s | mm/s |
| 01 | 103 | 2.5 | 1.78 | 1.02 | 1.02 | 2.03 |
| 06 | 159 | 2.5 | 1.33 | 0.38 | 0.44 | 1.40 |
| 10 | 175 | 2.5 | 0.86 | 0.48 | 0.30 | 0.92 |
| 12 | 233 | 2.5 | 0.73 | 0.21 | 0.18 | 0.75 |
| 15 | 146 | 2.5 | 1.22 | 0.40 | 0.52 | 1.26 |
| 01 | 100 | 2.5 | 1.27 | 1.78 | 1.52 | 2.29 |
| 03 | 95 | 2.5 | 2.03 | 1.02 | 0.51 | 2.10 |
| 05 | 140 | 2.5 | 1.35 | 0.60 | 0.30 | 1.41 |
| 07 | 164 | 2.5 | 1.59 | 1.30 | 1.64 | 1.85 |
| 14 | 190 | 2.5 | 1.37 | 0.32 | 0.68 | 1.44 |
| 14 | 93 | 2.25 | 1.43 | 0.71 | 1.19 | 1.67 |
| 17 | 110 | 2.25 | 2.79 | 0.76 | 0.51 | 2.79 |
| 18 | 132 | 2.25 | 0.97 | 0.60 | 0.54 | 1.04 |
| 07 | 81 | 2.25 | 1.24 | 2.21 | 1.90 | 2.58 |
| 12 | 99 | 2.25 | 2.67 | 0.95 | 0.70 | 2.68 |
| 14 | 92 | 2.25 | 1.14 | 0.83 | 0.95 | 1.21 |
| 17 | 114 | 2.25 | 1.52 | 0.76 | 0.76 | 1.78 |
| 18 | 131 | 2.25 | 0.71 | 0.60 | 0.38 | 0.82 |
| 33 | 46 | 2.25 | 17.78 | 18.29 | 6.10 | 26.16 |
| 34 | 66 | 2.25 | 14.80 | 9.70 | 10.70 | 18.10 |
| 34 | 68 | 2.25 | 3.64 | 13.40 | 10.40 | 13.80 |
| 35 | 83 | 2.25 | 3.05 | 7.11 | 4.32 | 7.37 |
| 36 | 108 | 2.25 | 2.79 | 5.08 | 3.56 | 5.33 |
| 37 | 128 | 2.25 | 8.37 | 8.95 | 3.84 | 9.96 |
| 38 | 168 | 2.25 | 1.52 | 4.83 | 1.27 | 4.83 |
| 40 | 248 | 2.25 | 0.19 | 0.76 | 0.52 | 0.77 |
| 42 | 328 | 2.25 | 1.78 | 1.52 | 3.05 | 3.05 |
| 43 | 368 | 2.25 | 0.25 | 1.10 | 0.46 | 1.17 |
| 17 | 111 | 2.25 | 1.21 | 0.83 | 1.02 | 1.59 |
| 19 | 151 | 2.25 | 1.30 | 1.33 | 2.21 | 2.49 |
| 20 | 166 | 2.25 | 0.52 | 0.44 | 0.24 | 0.56 |

때로는 여러 가지 요인에 의해 설치된 계측기에서 진동이 측정되지 않는 경우도 있으나 이런 경우 대부분은 그 측정에서의 진동수준이 계측기에 설정된 트리거 수준보다 낮아 진동이 감지되지 않았기 때문으로 볼 수 있다. 따라서 이와 같은 경우

에는 해당 측정에서의 진동수준을 계측기의 트리거 수준, 여기서는 0.5 mm/s 이하인 것으로 간주할 수도 있다. 하지만 지반조건이 복잡한 경우, 즉 절리, 단층, 층리 등의 불연속면이 존재하거나 심한 풍화나 인위적인 성토작업 등으로 인하여 진동 전파를 방해하는 토양 등이 존재할 때는 진동의 전달이 중단되어 계측기에 의해 감지되지 않을 수도 있으므로 본 연구에서는 계측기에 의해 감지되지 않은 진동은 자료처리에 이용하지 않았다.

3. 자료처리

3.1 처리방법

(1) 발파로 인한 지반진동수준의 예측법

발파진동의 세기에 영향을 주는 변수들을 대별하면 i) 화약의 종류와 장약량, ii) 발파원에서 측정까지의 거리, iii) 암반의 역학적, 구조적 특성, iv) 천공패턴, 장약방법, 점화순서 등의 발파방법 등이며, 지역적인 특성과 발파조건에 따라서도 크기가 달라지므로 대상지역별로 발파조건에 따라 지반진동을 실측하여 그 전파특성을 도출하여야 한다.

가. 일반식

지반진동의 수준을 예측할 수 있는 전파식은 진동의 속도성분으로 표시할 때 일반적으로 장약량 및 발파원까지의 거리를 주요 변수로 하여 다음 식과 같은 유형으로 표현할 수 있다.

$$PPV = kD^a W^c \quad (1)$$

여기서

PPV = 최대진동속도(Peak Particle Velocity), cm/s 또는 mm/s

D = 폭원거리, m

W = 지발당 최대장약량, kg

k, a, c = 자유면 상태, 화약의 성질, 암질, 발파방법 등에 따르는 상수

나. 환산거리를 이용한 식

상기의 일반식은 거리를 장약량으로 환산한 형태로서 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$PPV = k \left(\frac{D}{W^{1/2}} \right)^n \quad (2)$$

$$PPV = k \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^n \quad (3)$$

여기서,

n = 감쇠지수

k = 화약특성, 발파방법, 암반특성 등에 따라 결정되는 상수

거리를 장약량의 자승근으로 환산한 형태의 것을 자승근 환산거리라고 하며 삼승근으로 환산한 형태의 것을 삼승근 환산거리라고 한다. 환산거리를 이용한 식은 log-log scale 상에서는 직선으로 나타나므로 매우 실용적이다.

(2) 진동수준 예측식

발파진동의 전파특성을 나타내는 예측식은 계측된 현장자료로부터 회귀분석을 통하여 각각의 상수를 구한 후 적합도가 높은 식을 선택하는 것이 일반적이다. 본 연구에서도 계측자료를 자승근 환산거리 및 삼승근 환산거리로 처리한 후 적합도가 높은 삼승근 환산거리식을 예측식으로 사용하였다. 지반진동의 전체성분에 대해 진동의 평균수준(50%)을 나타내는 식과 측정된 자료의 95%를 포함하는 식을 각각 도출하였다.

3.2 처리결과

(1) 아파트 인근지역에서의 계측결과

터널 굴진막장이 통과하고 있는 상부 아파트 및 인근지역의 지반진동의 전파특성을 평가하기 위하여 현장계측을 실시하였으며, 벡터합성분을 포함한 계측자료 전체를 대상으로 삼승근 환산거리로 처리하여 전파식을 구하면 그림 12와 같다.

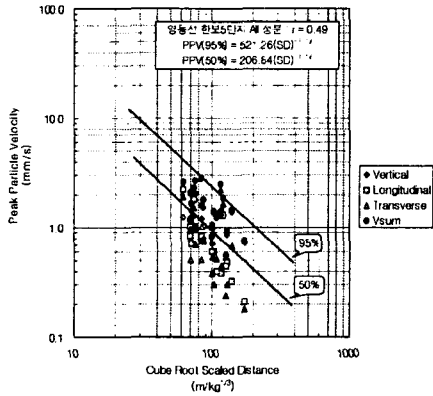


그림 12. 아파트 인근지역 계측자료 처리결과

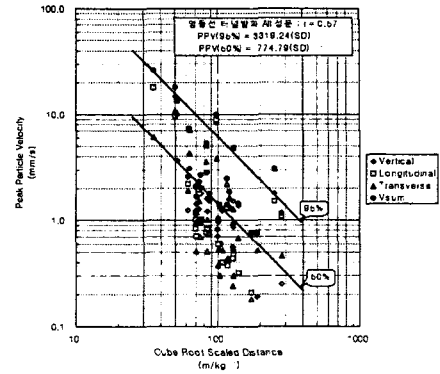


그림 14. 아파트 인근지역 및 터널내부 계측자료 처리결과

(2) 터널내부에서의 계측결과

동일한 발파에 대하여 터널내부에서 계측된 결과와는 지상에서의 계측결과와는 다른 양상을 보여주는 것으로 나타났다. 여기서도 벡터합성분을 포함한 전체자료를 대상으로 삼승근 환산거리로 처리하여 전파식을 구하면 그림 13과 같다.

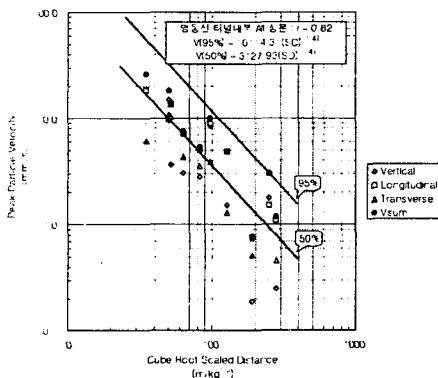


그림 13. 터널내부 계측자료 처리결과

(3) 계측결과 종합

지상 및 지하에서 계측된 모든 자료를 대상으로 하여 삼승근 환산거리로 처리하여 전파식을 구하면 그림 14와 같다.

4. 고찰

4.1 지상 및 지하에서의 지반진동의 전파특성

아파트 인근지역에 해당하는 지표상에서 계측된 자료와 굴착중인 터널내부에서 측정된 자료를 비교하여 도시하면 그림 15와 같으며, 지상 및 지하 계측자료로부터 구한 전파식들은 각각 식 (4) 및 (5)와 같다.

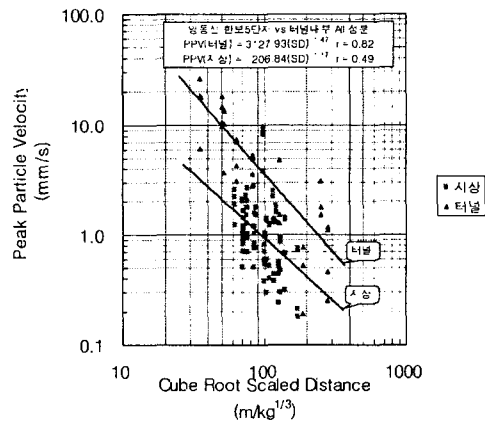


그림 15. 지상 및 지하 자료처리 결과대비

아파트 인근지역에서의 계측:

$$PPV(All)_{50\%} = 206.84 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.17} \quad (4)$$

터널내부에서의 계측:

$$PPV(All)_{50\%} = 3127.93 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.47} \quad (5)$$

그림에서 보듯이 동일한 발파라 하더라도 계측 지점에 따라서 지반진동의 세기가 크게 달라진다. 예로서, 동일한 삼승근 환산거리 $100 \text{ m/kg}^{1/3}$ 에 대하여 지반진동의 크기를 비교하면 터널내부에서는 지표에 비해 3.5 mm/s 정도 더 높게 측정된다. 이와 같은 진동속도의 차이는 거리가 멀어질수록 작아지지만 전체적으로 보았을 때 터널 내에서 측정된 수치가 지표에서 측정된 수치보다 훨씬 크게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이는 터널이 통과하는 지하심부에 위치한 암반 중에는 탄성파의 전파를 방해하는 불연속면의 수나 풍화의 정도와 같은 요소들이 지표부근의 암석에 비해 상대적으로 적기 때문인 것으로 보인다.

4.2 주거용 구조물에 대한 진동영향

일반적으로 주거용 구조물에 대한 발파진동 허용수준은 구조물의 종류에 따라 다르며 같은 종류의 구조물이라도 구조물의 상태나 지반조건에 따라 달라진다. 또한 국가별로도 다양한 기준을 설정하고 있는 것은 국민정서와 같은 사회·문화적인 특수성도 반영되어 있기 때문으로 추정된다. 관련 연구결과들도 다양하게 나타나고 있고 국내의 경우 국가적인 기준이 아직 마련되지 않아 대부분 발파처에 따라 프로젝트별로 허용기준을 채택해오고 있다.

본 연구의 대상지역에 속하는 아파트의 경우 5층의 중저층 아파트로서 터널시방서에는 3.0 cm/s 의 수준을 허용치로 제안하고 있으며, 독일은 주거용 및 이와 유사한 건물로 분류하여 진동의 주파수 대역에 따라 $0.5\text{-}2.0 \text{ cm/s}$ 의 수준으로 규정하고 있다. 많은 계측자료를 통계처리하여 허용수준을

제시한 미국의 광무국이나 노천채광청의 제안기준을 보면, 3 cm/s 이상의 수준에도 손상을 받지 않을 것으로 생각되나 보수적으로 관리한다는 관점에서 아파트를 포함한 주거용 건물에 대해 0.5 cm/s 를 관리수준으로 설정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다(참고: 허용수준으로 표현하기에는 너무 보수적인 수치라 관리수준으로 표현함).

4.3 터널 굴진발파 영향분석

(1) 진동수준 예측식

터널 굴착현장에서의 굴진발파시 발생하는 최대 진동수준을 평가하기 위하여 현재 발파작업이 진행되고 있는 터널내부와 인근 아파트 주변지역에서 각각 진동을 계측하여 측정된 자료로부터 이들 두 곳의 측정 장소별로 95% 및 50% 신뢰구간을 나타내는 식을 도출하였다. 계측된 자료를 처리한 결과 동일한 절대거리에 있어서도 이들 지상 및 지하의 계측치 사이에 큰 차이가 나타나고 있고 지상의 유사한 지점들 사이에서도 진동치가 크게 변화하는 등 서로 다른 전파경향을 보였는데, 이는 해당지역 지표부근에서 지반조건이 복잡하게 변화하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

▷ 아파트 인근지역 계측자료로부터 도출된 전파식

$$PPV(All)_{95\%} = 521.26 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.17} \quad (6)$$

$$PPV(All)_{50\%} = 206.84 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.17} \quad (7)$$

▷ 터널내부 계측자료로부터 도출된 전파식

$$PPV(All)_{95\%} = 10114.31 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.47} \quad (8)$$

$$PPV(All)_{50\%} = 3127.93 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.47} \quad (9)$$

▷ 전체자료로부터 도출된 전파식

$$PPV(All)_{95\%} = 3319.24 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.37} \quad (10)$$

$$PPV(All)_{50\%} = 774.79 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.37} \quad (11)$$

상기 식들로부터 지상에서의 계측결과와 지하에서의 계측결과를 비교하여 보면 진동의 수준과 감쇠특성의 측면에서 상당한 차이를 보이고 있는데, 이는 지표부근에서의 지질조건의 급격한 변화에 기인한 것으로 보인다. 또한 지상과 지하로부터 계측된 전체자료로부터 도출된 식 (10)과 (11)은 진폭 및 감쇠특성이 지상 및 지하 계측자료의 중간정도로 나타나고 있다.

(2) 진동영향 평가식

계측대상 아파트 및 인근지역에서의 영향평가용으로는 이 지역에서 계측한 결과로부터 도출된 전파식 중 95%의 자료를 포함하는 예측식인 다음 식을 사용할 수 있다.

$$PPV(All)_{95\%} = 521.26 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.17} \quad (12)$$

(PPV: mm/s, D: m, W: kg)

대상터널 건설현장에서 주로 적용되고 있는 발파패턴은 상황에 따라 몇 가지 기본 설계패턴을 적절히 적용할 수 있으므로 예를 들어, 아파트 구간 통과시의 지반진동 관리수준을 보수적인 기준에서 0.5 cm/s로 한다면 식 (12)를 사용할 경우, 이격거리 100m에 대해 안전을 확보할 수 있는 지발당 최대장약량은 6.7 kg으로 계산된다. 계측파형을 분석해 보면 최대진동수준은 주로 심발공이 기폭될 때 나타나고 있으므로 위 식에 의하면 심발공에서 확대공까지의 지발당 최대장약량만 적절히 제한한다면 현행 발파패턴으로 굴착하여도 아파트 인근지역을 0.5 cm/s 이내로 통과할 수 있을 것으로 판단된다.

한편, 터널 내부에 시공되어 있는 구조물이나 터

널입구 부근의 구조물, 가옥 등에 대한 영향평가를 위해서는 터널내부에서 계측한 결과로부터 도출된 전파식 중 95%의 자료를 포함하는 예측식인 다음 식을 사용할 수 있다.

$$PPV(All)_{95\%} = 10114.31 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.47} \quad (13)$$

(PPV: mm/s, D: m, W: kg)

5. 결론

본 연구에서 얻은 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 터널 통과구간에 인접한 아파트와 주변 민가의 경우 발파진동 허용수준을 보수적인 관점에서 0.5 cm/s를 관리수준으로 하여 설정하였다.

(2) 대상터널 현장에서 발생하는 발파진동 발생 특성을 평가하기 위하여 총 6회의 굴진발파에 대하여 총 70개소 이상의 측정에서 계측자료를 획득하였다. 계측자료들을 처리한 결과 발파로 발생하는 최대진동수준을 계측장소별로 예측하기 위한 식들이 유도되었다.

(3) 본 연구에서 영향검토를 위한 진동예측식은 보수적인 적용기준으로서 전체자료의 95%를 포함하는 식을 채택하였으며, 지표 및 지하터널에 대해 별도의 식을 사용할 것을 제안하였다.

▷ 계측대상 아파트 인근지역에서의 영향평가를 위한 진동예측식:

$$PPV(All)_{95\%} = 521.26 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.17}$$

(PPV: mm/s, D: m, W: kg)

▷ 터널 내부 및 입구부근에서의 영향평가를 위한 진동예측식:

$$PPV(All)_{95\%} = 10114.31 \left(\frac{D}{W^{1/3}} \right)^{-1.47}$$

(PPV: mm/s, D: m, W: kg)

(4) 아파트 인근구간 통과시의 진동의 관리수준을 0.5 cm/s으로 하면, 이격거리 100 m에 대해 안전을 확보할 수 있는 지발당 최대장약량은 6.7 kg로서 현행 발파패턴 범주 하에서 아파트 등에 별다른 영향 없이 시공이 가능할 것으로 판단된다. 계측과형을 분석해 보면 최대진동수준은 주로 심발공이 기폭될 때 나타나고 있어 심발공에서 확대공까지의 지발당 최대장약량을 위 수준 이내로만 제한한다면 이 구간을 0.5 cm/s 이하로 통과할 수 있을 것으로 판단된다.

(5) 암질조건이 비교적 균질한 터널내부에서의 계측치가 지표상에서의 계측치에 비해 훨씬 높은 것에서도 볼 수 있듯이 지반조건이 급변하면 진동의 전파특성 또한 크게 변화할 수 있으므로 주요 가옥이나 구조물에 접근할 때에는 실측을 통하여 지반진동의 발생양상을 수시로 점검할 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. 류창하 외, 2003, 영동선 터널굴착현장 발파진동 영향평가연구, 한국지질자원연구원 연구보고서
2. Dowding, C.H., 1996, Construction vibrations, Prentice Hall, pp.41-60.
3. Langefors, U., Kihlstrm, B., & Weterberg, H., 1958, Ground vibrations in blasting, Water Power, Vol. 10, pp.335-338.
4. Siskind, D.E., Stagg, M.S., Kipp, J.W. & Dowding, C.H., 1980, Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting, USBM RI 8507, p.74
5. Syskind, D.E., 2000, Vibrations from blasting, ISEE, pp.5-30.