

화강암 지반에서 진동 및 크랙측정치 분석에 관한 연구

A study on analysis of vibration and crack measurement data on granite-bed rock

한동훈¹, 안명석*², 이광열³, 오병삼⁴, 강문구⁵

Han, Dong-Hun · Ahn, Myung-Seog · Lee, Kwang-Yeol · Oh, Byung-Sam · Kang, Moon-Gu

Abstract

Tunnel blasting has been performed with V-cut to investigate the characteristics. Blasting vibrations were measured at two directions, the proceed direction and side direction. Propagation characteristics were determined by regression analysis; square root scaled distance and cube root scaled distance with maximum charge per delay of the blast. Testing result, The cross point was 62m in the allowable vibration velocity of 3mm/sec and 46m in 5mm/sec. Also, vibration level with measuring point was highest and decayed fastest, adapting to cube root scaled distance, for the proceed direction on ground.

Keywords: Tunnel blasting, V-cut, regression analysis, cross point

요 지

터널 발파에 있어서 진동특성을 규명하기 위하여 브이-컷 심발패턴으로 시험발파를 수행하고, '터널 진행방향'과 '터널 진행직각방향'의 두 방향에서 발파진동을 계측하였다. 최대 지발당 장약량을 기준으로 지반의 진동 전달 특성을 확인하기 위하여 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리로 회귀분석을 수행한 결과 5mm/sec에서 교차점은 35~45m였으며 터널 진행방향에서 측정된 경우가 터널진행직각방향에서 측정된 경우보다 진동수준과 진동 감쇠가 더욱 크게 나타났으며, 근거리에서 이루어지는 터널발파의 경우 삼승근 환산거리 방식으로 설계하는 것이 더욱 바람직하였다. 또한 발파가 없었던 시기에 사전균열조사결과에서는 미소량의 균열이 진행되고 있었으며, 공사기간중 균열조사 결과는 옥외구조물의 균열허용기준치 0.33mm대비 51.5~81.8%였다.

주요어: 터널발파, 브이-컷, 회귀분석, 균열조사

1 정회원, 동서대학교 일반대학원 토목공학과
*2 정회원, 동서대학교 겸임교수 (amspeoff@chol.com)
3 정회원, 동서대학교 전임교수
4 정회원, 두산건설(주) 토목 영업팀 팀장
5 정회원, 두산건설(주) 토목 영업팀 차장

1. 서론

지하암반굴착은 대부분 화약을 이용한 발파작업으로 수행되는데, 터널발파설계를 양호하게 수행하기 위해서는 지반의 흙이나 암반과 같은 재료의 응력·변형률거동을 명확히 정의·응용하여야 한다. 발파굴착은 TBM 등 기계적 굴착 공법들에 비해 소음·진동 발생 측면에서 불리한 점도 있으나 공기 단축 및 경제성이 뛰어나 특수한 경우를 제외하고는 토목 및 광산 개발 분야에서 널리 사용되고 있다. 그러나 이러한 발파작업으로 인하여 예상되는 가장 대표적인 문제점으로는 진동·소음·비산 등의 환경문제를 야기하고 있다는 것이다.

본 논문에서는 계측위치별 적정 진동식을 추정하기 위하여 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리를 회귀분석(Regression analysis)을 통하여 신뢰구간 50%와 95%에서 비교·분석을 실시하였으며, 계측위치의 변화에 따른 주파수 대역의 영향을 확인하기 위하여 주 진동수와 PPV (peak particle velocity) 및 거리를 상호 비교하였다. 또한 계측 위치의 변화에 따른 우세 주파수 대역을 규명하여 적정 진동추정식을 유도하여 본 발파에 적용함으로써 보다 안전하고 경제적인 시공을 하며, 동시에 진동을 제어하여 민원 발생의 소지를 미연에 제거하는데 기여 할 것이다.

2. 발파 패턴의 종류 및 적용공법

2.1 발파패턴의 종류

터널 발파는 단일 자유면에서 행하여지는 극히 제한된 발파이기 때문에 발파공해인 진동 및 소음을 유발하게 된다. 벤치발파와 달리 터널 발파의 경우는 1자유면인 상태에서 2자유면을 형성시킨 다음 나머지는 벤치발파와 같은 형태로 발파가 진행된다. 이런 1자유면의 발파 과정을 ‘심빼기’라고 하는데 발파의 성공과 실패여부를 결정짓는 아주 중요한 과정이다. 심발이 성공적으로 진행되면 심발 (Cut), 주변공 (stopping), 외곽공 (lifler), 최외곽공 (Contour)의 순으로 발파가 진행된다. 일반적인 터널발파의 패턴은 Table 1과 같다.

2.2 적용 발파 공법

본 공사 현장은 V-cut 와 Burn-cut 심빼기 공법 등 6가지 패턴으로 구분하여 예정 설계되어 있었으나 민원으로 인한 진동절감효과 및 작업효율을 위해 두 공법의 비교 시험발파 결과 V-cut 심빼기 공법으로 시공을 실시하였다. 일반적으로 V-Cut은 경사천공의 대표적인 방법으로 적은 에너지로 많은 효과를 낼수 있다는 장점이 있지만, 정확한 각도의 경사천공이 어렵고, 터널 폭에 의해 굴진장에 제한이 가해진다는 단점이 있다. 굴진장은 보통 터널 너비의 45~50% 정도로 선택하며, 천공오차가 5% 이상이 될 경우 근접공의 장약부분이 너무 가까이 위치하게 되어 순폭의 위험이 있다. 공저 사잇각 (bottom angle)은 60° 이상으로 하는 것이 에너지 효율면에서 가장 좋다.

Table 1. 터널천공 패턴에 따른 공법분류

Wedge cut	Parallel cut	SUPEX cut	SA cut
V-cut	BURN-cut		
Pyramid-cut	Coromant-cut	SUPEX-cut	SAV-cut
Swing-cut	Michigan-cut		SAB-cut
Fan-cut	Spiral-cut		
Norway-cut			
Trianglecut			

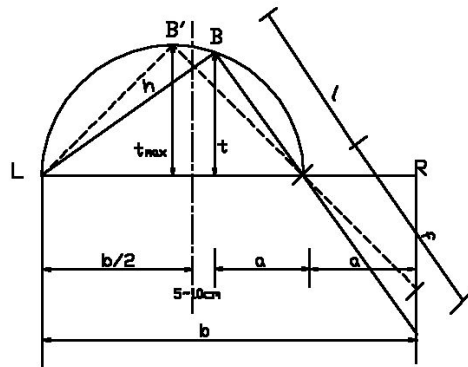


Fig. 1 V-Cut의 심발설계

3. 이론적 고찰

3.1 발파진동에 영향을 미치는 요인

발파진동의 크기는 궁극적으로 발파조건에 의해 좌우되며 발파조건은 다음과 같다.

- 사용화약의 종류 및 그 특성
- 장약량 (보통 지발당 장약량)
- 기폭방법 및 너관의 종류
- 폭원과 측정간의 거리
- 전색 상태와 화약의 장진밀도
- 자유면의 수
- 전파경로의 지반상태

발파진동에 의한 피해영향을 받을 것으로 예상되는 주변환경이 정해진 경우에는 장약량과 폭원으로 부터 대상 지역까지의 거리가 가장 중요한 영향요인이며 또한 이들 두 변수사이에는 다른 요인들보다 비교적 뚜렷한 함수관계가 있는 것으로 나타나고 있다. 즉, 발파진동을 예측하기 위해서는 전술한 요인들이 모두 고려되어야 하겠지만 보편적으로는 장약량과 거리가 진동치 예측에 가장 적절하게 부합하는 변수로 작용하고 있다.

3.2 발파진동의 허용기준

스웨덴의 Langefors (1958) 등은 암반위에 세워진 스톡홀름의 빌딩 철거작업 과정에서 수많은 시험발파를 실시하여 지반진동이 빌딩에 미치는 피해영향을 연구하였다. 그에 따르면 주파수 범위 50~500cps에서의 변위(수직성분)에 대한 분석에서 7.1cm/sec 이하에서는 건물에 아무런 피해가 나타나지 않은 것으로 보고하였다. 캐나다의 Edwards와 Northwood (1960)는 St. Lawrence Power의 빌딩 철거 시 실시한 시험발파 결과를 분석한 결과 피해정도는 진동의 가속도나 변위보다 속도에 연관이 깊고, 피해가 진동속도 10~12.7cm/sec에서부터 발생하였기 때문에 안전율을 고려하여 진동속도 허용한계로 5cm/sec가 적당하다고 보고한 바 있다.

본 사례연구는 한국터널공학회 권장 안전기준 중 실금이 있는 주택, 아파트의 진동안전기준 0.5cm/sec를 적용하였다.

3.3 자승근 및 삼승근환산거리의 비교

자승근과 입방근 환산관계의 실질적인 차이점을 다음 Fig. 2로 설명할 수 있다(Hendron and Oriad, 1972). Hendron의 입방근 환산관계와 Oriad의 자승근 환산관계를 사용하여 발파진동 속도가 51.4mm/sec가 되는 거리와 지발당 허용장약량의 관계를 결정할 경우, 6~31m 범위의 거리에서는 큰 차이가 없으나 31m 이상의 거리에서는 자승근 환산거리를 사용하면 입방근 환산거리를 사용할 때 보다 지발당장약량이 훨씬 작게 결정되어 안전율이 높게 나타나며, 6m 이하의 가까운 거리에서는 입방근 환산거리가 더 안전율이 크다. 일반적으로는 짧은 거리에서는 입방근, 먼 거리에서는 자승근이 더욱 잘 맞는 것으로 알려져 있다.

3.4 회귀분석이론

회귀분석 (Regression Analysis)은 변수 상호간의 관계를 표본으로부터 추정하는 방법이며 단순회귀분석과 다중회귀분석으로 나눌 수 있다. 여기서는 단순회귀

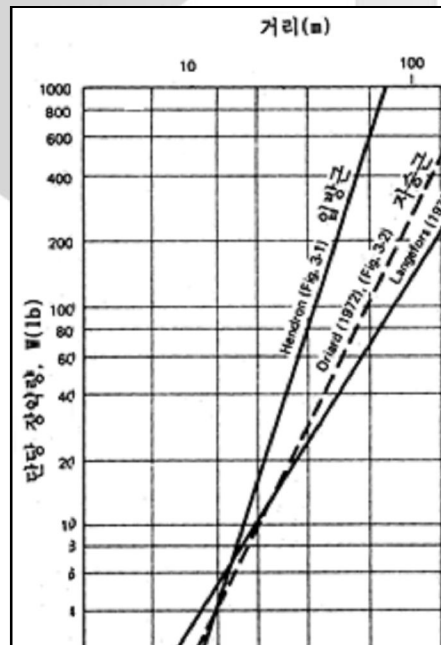


Fig. 2 자승근과 삼승근환산거리의 비교

분석을 통하여 상수를 구하였다.

이는 진동관계식 $V = K \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^n$ 을 이용하여 표본 회귀식으로 변환하고, 이때 양변에 log를 취하면

$$\text{Log } V = \text{Log } K + n \text{Log} \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)$$

여기서,

$$\text{Log } V = Y, \text{ Log } K = a, \text{ Log} \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right) = X, n = b$$

라 하면

$$Y = a + bX$$

상기 식을 모회귀 직선 (표본회귀식)이라 하며, 모회귀 직선을 생성할 때 발생하는 오차들의 자승합을 최소로 하게 하는 방법을 최소자승법 (Least Square Method) 이라고 하며, 이 방법을 사용하여 발파진동 상수를 산출 하였다.

최소 자승법에 의하여 구해지는 a, b를 최소 자승 추정 량이라 한다.

$$a = \frac{\sum y}{n} - b \frac{\sum x}{n}$$

$$b = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

$$n = b, K = 10$$

안전성과 신뢰를 높이기 위해서는 Data의 95%의 신뢰도의 발파 진동식을 산출하는 것을 요한다. 위에서 구해진 회귀 직선식의 기울기 b를 동일하게 한 상태에서 y절편을 이동시켜 새로운 y절편을 계산하여 구한다.

$$Se(a) = \left(\sqrt{\frac{1}{n} + \frac{x^{-2}}{\sum x^2 - (\sum x)^2}} \right)$$

절편 a는 t 분포에 따르며 95% 신뢰값은

$$a(95\%) = a \times t_a \times Se(a) \text{ 이다.}$$

3.5 충격진동이 건물의 균열발생에 미치는 영향

충격으로 인한 균열의 발생여부는 미세가시균열에 대한 육안관찰에 기초하고 있다. 일반적으로 모든 가옥은 많은 미세가시균열을 내포하고 있고 발파 혹은 향타로 인한 가시균열과 자연적으로 발생된 균열을 구분하기 위해서는 작업 직전과 직후에 미세가시 균열을 기록하는 것이 필수적이며 더욱 정확성을 기하기 위해서는 입자속도 (발파 혹은 향타 진동속도)를 측정함이 필요하다.

이러한 균열 발생여부에 대한 논란을 줄이기 위해 발파 실시 전에 개인 혹은 집단적으로 인근주민에 대해 다음과 같은 기본적인 사실의 전달에 주력해야 한다.

- ① 균열은 여러 가지 건축상의 하자 및 자연 발생적으로 약간의 균열이 발생한다.
- ② 구조물에는 주인이 인지하지 않고 있지만 균열이 많이 있으며 매년 증가하고 커진다.
- ③ 이들 균열은 대부분 미세 가시균열이고 구조물에 큰 피해는 없다.
- ④ 문을 소리내어 여닫는 일이나 교통수단이 발파보다 더 큰 진동을 일으킬 수 있다.
- ⑤ 사람은 건물보다 진동이나 소음에 더 민감하다.

건물의 균열은 여러 가지 원인으로 인해 발생한다. 특히 진동으로 인한 균열의 경우는 가정에서 문을 여닫을 때, 사람이나 물건이 움직일 때 발생하는 진동 등의 요인으로 인해 발생되기도 하는데 대체로 최소 0.16Kine에서 0.63Kine 혹은 그 이상에서 발생되기도 한다. 그리고 도로변의 가옥인 경우는 각종 차량통행으로 인해 소음진동이 발생되는데 보통 차량 진동치는 0.28~0.89 Kine이 되며 과적차량이나 경사진 곳을 운행할 때는 그 이상이 계측되기도 한다. 이러한 요인으로 평소에 발생된 미세균열은 충격진동, 차량진동, 일상 생활진동 등으로 인해 기존의 균열이 확대되거나 새로이 생성되고 있으며 건물의 하부기초가 특히 약하거나 지반 침하가 있는 경우는 보통의 구조물에 피해가 없는 진동수준으로도 균열이 확대되기도 한다.

3.6 공사전후 균열조사방법

3.6.1 균열조사방법

균열폭이라 함은 균열이 콘크리트 구조물에 미치는 영향을 판단하는데 이용되는 가장 중요한 요소이며, 일반적으로 콘크리트 표면에서 균열방향에 대하여 직각으로 측정된 폭을 말한다.

연속된 하나의 균열이라도 위치에 따라 폭이 다른 것이 보통이나 보수, 보강의 필요여부 판단자료로 중요한 것은 최대균열폭이다. 이러한 균열폭의 측정은 Crack gauge, Strain gauge 등을 사용한 여러 가지 균열 측정기를 이용하여 균열방향에 직각으로 측정하고, 수평 혹은 수직방향이 필요한 경우에는 그 값을 균열 방향의 각도로 보정한다. 또한 균열의 길이는 곡선자 혹은 줄자로 측정할 수 있다.

3.6.2 균열측정기의 종류별 측정방법

1) 3차원 균열측정기

건물이나 구조물, 도로 등의 표면균열이나 팽창지점에 적용하며 이 지점에서 세 개의 각각 방향에 대한 특수한 이동변위를 측정하기 위해 사용한다. Fig 3에서와 같이 3차원 균열측정기는 균열의 한쪽면에 한점씩 설치되는 2개의 접착물과 상부에 고정되는 게이지 그리고 휴대용 dial 지시계로 이루어진다. 설치가 용이하고, 재사용이 가능한 장점을 가진다.

2) 전자 균열측정기

건물이나 구조물, 도로 등의 표면균열이나 팽창지점에 흔히 적용하고, Fig. 4에서와 같이 전기저항의 원리로

측정이 이루어지며 표면균열이나 팽창지점의 이동변위를 측정하기 위해 사용한다.

3) 세라믹 균열측정기

건물이나 구조물, 도로에 표면균열이나 팽창지점에 적용하며 Fig. 5에서와 같이 균열지점을 중심으로 양쪽에 1개씩 1조의 Ceramic Point를 설치한 후 디지털 캘리퍼스로 측정한다. 장비비와 설치비가 저렴하고 일반인들의 이해가 빠른 장점을 가지고 있으나 단점은 측정 시 작업자의 숙련도가 필요하다.

4) 변형율 측정기

건물이나 구조물, 도로 등의 표면 균열이나 팽창지점에 적용하며 이는 전기식과 기계식으로 구분이 되며 시간대별 미소 변형율은 측정할 수 있는 장점을 가지고 있으나 설치비가 고가이다.

3.6.3 균열 보수 규정

콘크리트 구조물의 균열 허용치는 Table 2와 같이 보통의 기상조건과 일반적인 콘크리트 구조물의 경우 각국의 균열폭 허용값을 수치로 비교해 볼 때 일본, 영국, 구소련, 유럽공동체는 0.3mm, 한국, 미국, 프랑스, 스웨스 등은 0.4mm를 대체로 기준으로 하고 있다.

본 현장의 균열 규제기준은 우리나라의 경우 옥외 구조물의 균열 허용폭인 0.33mm를 적용함이 합리적인 것으로 판단되어 적용 해석하였다.

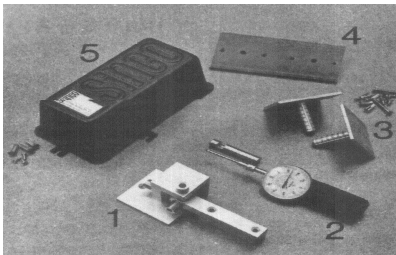


Fig. 3 3-Dimensional Crackmeter

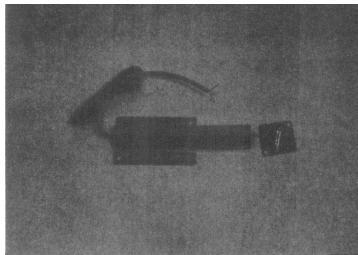


Fig. 4 Electrical Crack Gage

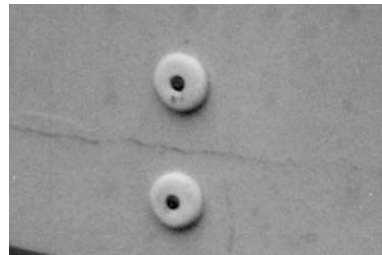


Fig. 5 Ceramic Point

Table 2. 국가별 균열허용폭

국 명	건물별 종류	균열 허용폭	비 고
한 국	콘크리트 표준 시방서 설계편 옥내 구조물 옥외 구조물 도로시방서 및 재설	0.4 0.33 0.22	대한 토목학회 도로협회
일 본	항만 구조물 원심력 철근 콘크리트 말뚝 (POLE) 설계하중시 설계휨모멘트 적용시 서계하중, 설계모멘트 개방시 보통의 기상조건	0.2 0.25 0.25 0.3	운수성 일반 공업규격
미 국	옥내부재 옥외부재	0.4	ACI 건축규정
영 국	BSI 규정 일반구조물 특히 신한 침식성의 환경	0.3 0.004d	CP-110 d : 주철근의 피복
프랑스		0.4	Brcard
구소련	비부식성 약·중부식성	0.3 0.2	철근콘크리트규정
스웨덴	도로교 사하중 사하중+활하중×0.5	0.3 0.4	도로규정
유럽공동체	상당한 침식작용을 받는 구조물의 부재 방호공이 없는 보통 구조물의 부재 방호공이 있는 보통 구조물의 부재	0.1 0.2 0.3	유럽콘크리트위원회

4.진동 측정을 위한 시험발파

4.1 지질조건

시험발파를 실시한 곳은 경상남도 일대의 도로개설을 위한 터널굴착 현장으로써 월등한 경제성과 안정성이 입증되어 도심지 및 산악지역의 대부분 터널에 적용되는 NATM (New Austrian Tunneling Method) 공법을 채택하여 V-cut 심빼기 공법으로 발파를 시행하였다. 터널 현장의 지질은 중생대 백악기 경상누층군의 신리층 군에 속하는 퇴적암류 및 화성암류와 백악기 불국사 층의 화강암으로 구성되어 있으며, 대상암석의 물성은 Table 3과 같다. 이 지역은 특히 경상분지의 퇴적암 중 함안층인 경우 남지에서 두께가 1400m로 확인되며 칠서 지방 산업공업단지 내 적색 세일에서는 공룡 족흔 화석이 발견되기도 한다. 지하 채굴이나 터널의 굴착, 기초

Table 3. 암석의 물성

암석 종류 : 화성암			
비중	2.63	인장강도 (kg/cm ²)	90
공극률 (%)	1.03	일축압축강도 (kg/cm ²)	1100
포와송 비	0.27	영률 (×10 ⁻⁵ kg/cm ²)	6.36
탄성파 (m/sec)	P-파	3780	내부마찰각 (°)
	S-파	1790	점착력 (kg/cm ²)
			220

암반 등의 설계 및 시공에서 암반을 공학적으로 다루는 데에는 암석의 강도와 변형특성 등의 역학적 성질과 암석내에 발달한 균열, 절리, 층리 등 역학적 결함은 공학적 분류에 큰 영향을 미치는 요소이다. 균질 신선암은 암석 자체가 역학적 결함을 가지고 있지 않은 균질하고 신선한 상태의 암석을 말하며, 일반적으로 시추코어 등 현장에서 채취한 작은 크기의 암석을 선별하여 균질 신

선암으로 취급한다. 균질암석은 주로 실험실에서 얻어지는 일축압축강도와 탄성계수비 등의 역학적 성질에 따라 분류할 수 있다.

4.2 진동측정 위치선정

시험발파는 지발당장약량과 발파원으로 부터 진동측정기의 설치지점까지의 거리를 조절하여 환산거리가 적당하여야 하며, 동일발파에 대해 여러 환산거리에서의 최대진동속도를 측정하기 위해서는 여러 대 (3~4대)의 발파진동측정기를 사용하는 것이 좋다.

그러나 현장사정상 환산거리의 분포를 기준으로 정밀하게 실시하지는 못하였고, Fig. 6에서와 같이 실측 지점의 거리를 기준으로 하여 터널 직상부 진행직각방향으로 30m, 60m, 100m 지점에 각각 3대의 계측기를 배열하였고, 마찬가지로 터널 진행방향에서는 30m, 60m, 100m를 기준으로 하여 계측기를 설치하였으며, 건물에는 크랙 게이지를 설치하였다.

4.3 진동측정 및 결과

계측현장 전체를 기준으로 '터널 진행방향'에서 9개, '터널 진행직각방향'에서 9개를 획득하여 총 18개의 DATA를 가지고 진동 안전기준 5mm/sec에서의 자승근 환산거리 및 삼승근 환산거리를 분석한 결과는 Fig. 6, Fig. 7과 같으며, 진동의 감쇠는 '터널 진행방향'에서 더욱 크게 나타났으며, '터널 진행직각방향'에서는 적게 나타났다.

이때 교차점은 35~45m 였다.

4.4 측정된 크랙 게이지 자료 분석결과

인근 주택에 대한 정확한 크랙측정을 위해서는 가옥 내부 벽체에는 가속도계와 변형률계를, 외부 벽체에는 가속도계와 입자속도 변환기 등을 설치·분석하여야 한다.

그러나 본 현장에서는 첨예한 민원 지역임을 고려하여 일반인들이 쉽게 이해 할 수 있는 Ceramic Point를 사용한 균열측정법을 적용하였으며, 이때 약 4개월 간의 균열측정 기간 중 균열의 최대확대를 보인 곳은 Fig 9에서와 같이 H지점으로써 +0.27mm의 균열확대가 측정

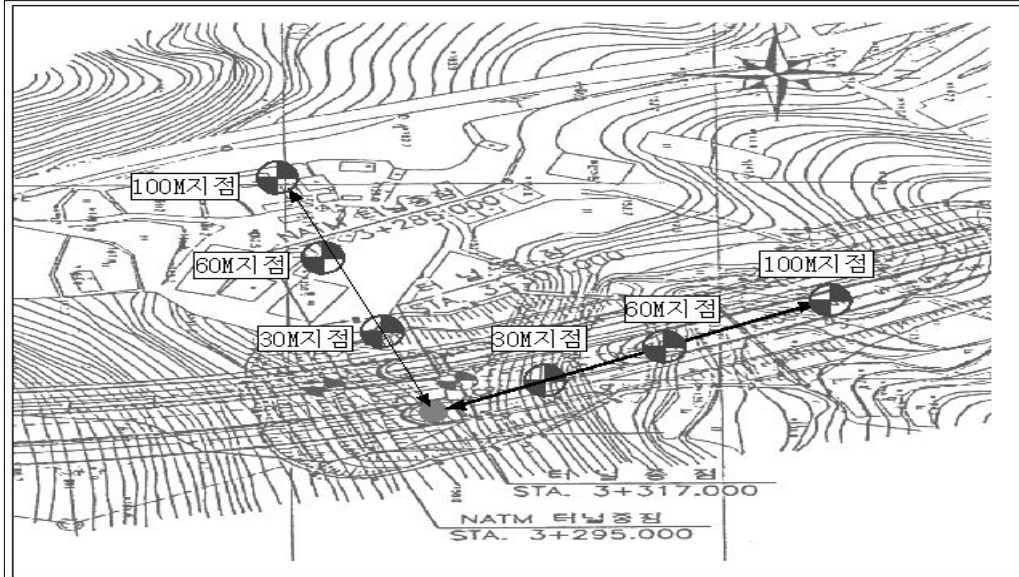


Fig. 6 계측기 설치위치

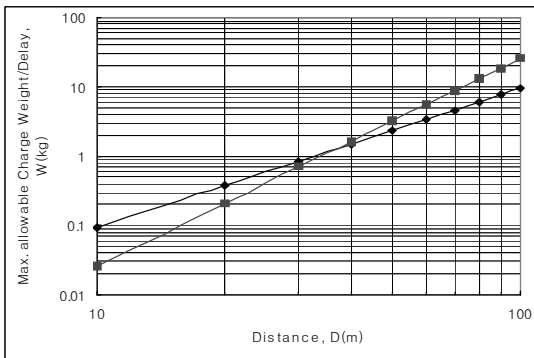


Fig. 7 5mm/sec 기준 진행방향 회귀분석

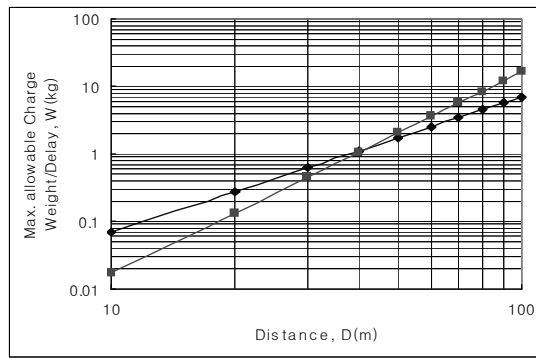


Fig. 8 5mm/sec 기준 직각방향 회귀분석

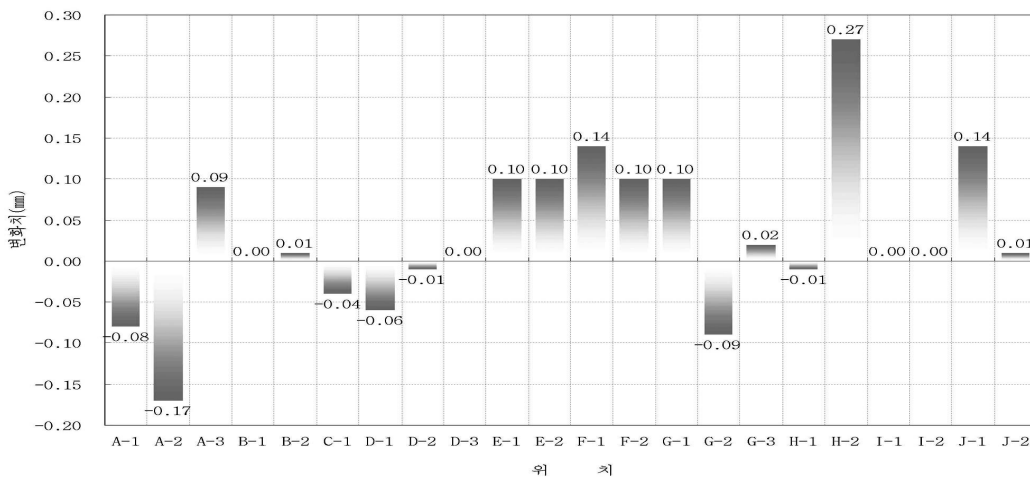


Fig. 9 기간중의 크랙의 최종변화치

되었고, 최대축소를 보인 곳은 A지점에 -0.17mm 의 균열의 축소가 측정되었다. 이는 우리나라의 옥외구조물의 균열허용기준치인 0.33mm 을 적용할 때 기준 대비 $51.5\sim 81.8\%$ 로써 보수가 필요치 않은 경미한 피해수치에 해당하였다.

4.5 주파수 특성 분석

발파진동의 주주파수는 대개 노천석탄광산이나 채석장 발파와 같이 대규모 발파에서는 저주파수 대역이 우세하고 도로발파나 터널발파와 같이 소규모 발파에서는 고주파수 대역이 우세하다고 알려져 있다. 측정된 진동

치를 계측위치별로 주진동수와 PPV를 비교한 결과 $20\sim 120\text{Hz}$ 이상의 넓은 분포대를 이루고 있었으며, 터널 진행 방향에서 발파진동 세 성분의 주파수 분포가 높게, 터널 진행 직각방향에서 상대적으로 저주파의 성분이 우세한 것으로 나타났다.

5. 결론

이상의 연구결과 측정된 진동치에 대해 삼승근 및 지승근 교차점분석을 실시하고, 주파수 특성분석 및 가옥의 균열변화를 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 진동전달특성은 최대 장약량을 적용한 삼승근 환산거리 기법을 적용하는 경우 감쇄 특성이 우세함을 알 수 있었고, 거리의 분포가 광범위한 터널외부에서 계측된 DATA는 주파수가 30~120Hz의 넓은 분포를 이루었으며, 근거리에서는 고주파의 성분이 우세하였고, 원거리에서는 저주파의 성분이 우세하였다. 그러므로 거리가 멀수록 진동대역이 저주파 쪽으로 편위한다는 연구와 유사한 경향을 나타냈다.
2. 진동전달 특성 및 주파수 특성을 비교 대상으로 하여 상호 비교·분석한 결과, 현장 상황 및 발파 조건에서 어느 정도 차이가 있으나, 적정 환산거리를 추정하여 발파현장에서 안전하게 적용하기 위해서는 한계허용 진동속도를 기준으로 자승근과 삼승근의 교차점을 분석하여 최대 지발당장약량을 적용하는 것이 바람직하며 터널발파에서 근거리인 경우 자승근 환산거리 보다는 삼승근 환산거리를 적용하여 설계하는 것이 바람직할 것으로 판단되며, 본 연구 결과에서 자승근 환산거리와 삼승근 환산거리로 허용진동속도 5mm/sec에서 교차점은 35~45m였다.
3. 본 연구기간 중 각 주턱에 대한 균열 변화 조사결과 공사 시행 전에도 미세한 균열이 진행되고 있었으며 공사 후에도 최대균열확대치는 +0.27mm였으며 최대균열축소치는 -0.17mm로써 균열보수 기준치 이내였다. 향후 본 연구 결과 미비점이었던 공사시작 전후의 변위 상태를 측정·관찰할 필요가 있었으며 측정방법 또한 더욱 공학적인 방법을 실용화해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김수석 (1986), "Mohr-Coulomb 항복기준에 지배를 받는 탄점소성체의 유한요소해석", 부산대학교 대학원 박사학위논문, pp. 3.
2. 안명석, 이광열, 윤성현, 정진교 (2002), "발파시공의 정밀도가 품질 및 유지관리에 미치는 영향", 한국터널공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 131.
3. 천병식, 오민열 (1995), "바닥발파에서 암질지수(RQD)와 발파진동상수 K, n의 관계", 한국지반공학회지, 제28권, 제3호, pp. 55-67.
4. 이정인, 류창하 (1979), "발파작업에 의한 지반진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구", 대한광산학회지, Vol. 16, pp. 41-50.
5. 김희창, 안명석, 김종현 (2000), "화약 및 화공품의 역사와 향후 전망에 관한 연구", 대한화학발파공학회지, Vol. 18, pp. 7-13.
6. 양형식, 주재성 (1992), "노천굴 발파의 진동특성과 입지상수 결정에 관한 연구", 한국자원공학회지, Vol. 27, pp. 316-323.
7. 안명석, 류창하, 박종남 (2001), "건설현장에서 안전성 향상을 위한 지반진동·소음·비산먼지 측정자료의 분석에 관한 연구", 대한화학발파공학회지, Vol. 19, pp. 99.
8. 류창하 (1995), "발파에 의한 지반진동의 수준 및 주파수 특성예측", 한국자원공학회 최신엔지니어링 발파 특별 심포지움 논문집, pp. 132-141.
9. 이광열 (2001), "이암계통 세일로 구성된 절취사면의 안정성분석 연구", 동서대학교연구센터논문집 제42집, pp. 179-194, (180).
10. 영남건설기술교육원 (1996), "암반분류법·파쇄공법 및 계측관리" pp. 58.
11. Amitava Ghosh, Jaak J. K. Daemen (1985), Statistics - A key to better blast vibration prediction, *Proc. 26th US Symp. on Rock Mech*, Rapid City, SD, pp. 1141-1149.
12. G. M. Friedman & J. E. Sanders (1978), Principles of Sedimentology, John Wiley & Sons, New York, pp. 187-189.
13. W. H. Twenhofel (1950), Principles of Sedimentation, Mc Graw-hill Book Co. Inc pp. 317.
14. Robert R. Campton (1985), "Geology in the Field", Jone wiley & Sone corp.
15. S. P. Singh (1993), Prediction and Determination of Explosive induced Damage, *Proc, 4th Int. Symp. on Rock Fragmentation by blasting*, Vienna, pp. 183-192.



한동훈

동서대학교 토목공학과
석사
easthun1@hanmail.net



안명석

동서대학교 겸임교수
amspeoff@chol.com



이광열

동서대학교 전임교수
civklee@gdsu.dongseo.ac.kr



오병삼

두산건설(주) 토목 영업팀 팀장
ohbsam@doosan.com



강문구

두산건설(주) 토목 영업팀 차장
moongu@doosan.com

K C I