

불연속체 동해석 기법을 이용한 발파진동 영향평가

Assessment of Blast-induced Vibration Using Dynamic Distinct Element Analysis

박 병 기* · 전 석 원† · 박 광 준** · 도 덕 수** · 김 태 훈** · 정 두 섭***

Byung-Ki Park, Seokwon Jeon, Gwang-Jun Park, Deog-Soo Do,
Tae-Hoon Kim and Du-Seop Jung

(2005년 9월 30일 접수 ; 2005년 11월 2일 심사완료)

Key Words : Blast-induced Vibration(발파진동), Rock Joint(암반 절리), DEM(개별요소법), Estimated Vibration Waveform(추정 진동속도파형), Dynamic Analysis(동해석)

ABSTRACT

Since blast-induced vibration may cause serious problem to the rock mass as well as the nearby structures, the prediction of blast-induced vibration and the stability evaluation must be performed before blasting activities. Dynamic analysis has been increased recently in order to analyze the effect of the blast-induced vibration. Most of the previous studies, however, were based on the continuum analysis unable to consider rock joints which significantly affect the wave propagation and attenuation characteristics. They also adopted pressure curves estimated by theoretical or empirical equations as input detonation load, thus there were very difficult to reflect the characteristics of propagating media. In this study, therefore, we suggested a dynamic distinct element analysis technique which uses velocity waveform obtained from a test blast as an input detonation load. A distinct element program, UDEC was used to consider the effect of rock joints. In order to verify the validity of proposed method, the test blast was simulated. The predicted results from the proposed method showed a good agreement with the measured vibration data from the test blast. Through the dynamic numerical modelling on the planned road tunnel and slope, we evaluated the effect of blast-induced vibration and the stability of rock slope.

1. 서 론

최근 암반터널 굴착과 지하공간 개발 및 건물발파 해체 등 여러 분야에서 화약류를 이용한 발파작업이 광범위하게 이루어지고 있다. 특히 도심지 발파와 같

이 인체나 기존 구조물에 직접적인 영향을 미칠 수 있는 발파작업 시에는 발파진동의 영향성 평가 작업이 필수적으로 선행되어야 한다.^(1,2) 발파진동의 측정 은 시험발파를 통한 직접적 계측이나 수치해석을 통한 예측으로 이루어지게 되는데, 후자의 경우 주로 현장조건이 여의치 않아 대상지역에서의 시험발파가 곤란한 경우나 혹은 사전 영향성 평가를 위해 적용 된다. 수치해석은 또한 시험발파로부터 구해진 발파 진동식을 비교, 검증하기 위한 목적으로 이용될 수 있다.

일반적으로 발파진동에 의한 주변 구조물의 영향을 평가하기 위한 수치해석의 경우 프로그램 내에서 발

† 책임저자 : 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부

E-mail : sjeon@snu.ac.kr

Tel : (02) 880-8807, Fax : (02) 871-8938

* 서울대학교 지구환경시스템공학부

** (주)대정건설인터

*** (주)대우건설

파현상을 모사하기가 매우 어려우므로 모델 경계면이나 해석모델의 내부에서 발파하중을 가하는 형태로 수행되어 왔다. 이 경우 입력 자료로 사용되는 발파하중은 주로 이론적인 계산식 및 경험식에 의해 추정된 압력파형을 적용하여 왔는데^(3,4) 이 방법은 동해석에서 매우 중요한 입력자료인 실제 발파압력 및 지속시간을 정확히 추정하기 어렵고, 발파로 인한 지반진동을 제대로 모사할 수 없는 단점을 가지고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근 시험발파에서 측정된 발파진동파형을 기초로 하여 발파지점에서의 진동속도 파형을 추정한 뒤 이를 동해석의 입력자료로 이용하는 방법이 개발 및 적용되었다.⁽⁵⁻⁷⁾ 이와 같이 발파진동파형을 수치해석의 입력자료로 이용하는 것이 단순한 발파압력을 사용하는 것보다 실제의 발파현상 및 지반진동을 더 정확하게 반영하게 된다. 그 이유는 구조물의 안정성을 평가하는 기준이 주로 지반의 진동속도를 근거로 하고 있으며, 입력자료인 발파진동속도파형은 발파진동이 전달되는 지반의 특성을 반영하고 있기 때문이다. 그러나 이상에서 언급한 수치해석 기법들은 현장 암반의 진동 전파 특성에 큰 영향을 미칠 수 있는 암반절리의 영향을 고려하지 못하는 연속체 해석기법이다.

Pyrak-Nolte⁽⁸⁾는 탄성파가 암반 절리면을 지날 때 발생하는 파형의 특성변화를 연구하였으며, 그 결과 건조한 상태의 절리면은 변위에 대해 불연속적인 특성을 보이고 포화된 절리면의 경우 속도에 대해 불연속적인 특성을 보임을 관찰하였다. 일반적으로 자연 상태의 절리면은 두 가지 특성이 동시에 나타날 수도 있으며 절리면을 따라 미끄러짐이 일어나는 경우 에너지 흡수(energy absorption)가 발생할 수 있다. Myer 등⁽⁹⁾은 건조한 자연 절리면이 고주파 성분의 감쇠와 도달시간의 지연에 영향을 미침을 실험적으로 규명하였다. 전석원 등⁽¹⁰⁾도 절리에 의한 진동속도의 감쇠를 수치해석적으로 검토하였으며 절리의 존재유무와 물성, 빈도 등이 파형의 감쇠에 영향을 미친다고 보고하였다. 이러한 연구결과들을 종합하면 절리의 강성, 방향, 길이, 빈도 등 절리의 여러 특성들이 진동파형의 전파나 감쇠 특성에 상당한 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 특히 절리의 방향은 암반 내에서 균등하게 분포하지 않은 경우가 대부분이며 특정한 2~3개의 방향으로 집중되어 분포하는 경우가 많기 때문에 이러한 경우 절리면의 방향 분포가 발파로

인한 진동파형의 전파에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

이에 Chen 등⁽¹¹⁾은 암반절리의 영향을 고려하기 위해 개별요소 해석 프로그램인 UDEC(universal distinct element code)을 이용하여 발파진동의 전파와 감쇠특성을 연구한 바 있으나 폭원의 입력파형에 대한 실측자료와의 검증이 부족하였다.

따라서 이 연구에서는 대상 현장에서 시추공 시험 발파를 통해 계측된 발파진동파형을 폭원의 진동속도 파형으로 변환하여 입력하는 기법을 적용하는 한편 암반 내 절리의 영향을 고려하기 위해 불연속체 해석 프로그램인 UDEC을 사용하여 발파진동 수치해석을 수행하였다. 불연속체 동해석의 적정성을 검토하고 필요한 입력변수를 산정하기 위해 대상부지에서 시행된 시추공 시험발파를 수치모사하여 계측치와 해석결과를 비교하였다. 또한 제안된 기법의 현장적용을 위하여 발파가 예정된 터널노선 인근에 위치한 마을과 비탈면을 모델링하고 발파진동 영향분석과 안정성 평가를 수행하였다.

2. 불연속체 발파 동해석 기법

발파가 수행되는 암반 내에는 수많은 절리가 내포되어 있으며, 이러한 절리들은 발파로 인한 진동파형의 전파에 영향을 미치게 된다.

기존의 연속체 해석 프로그램을 이용한 발파 동해석에서는 절리의 영향을 고려할 수 없기 때문에 2차원 단면상에서 거리에 따라 등방적인 진동 전파특성을 나타내게 된다면, 불연속체 해석에서는 개별절리

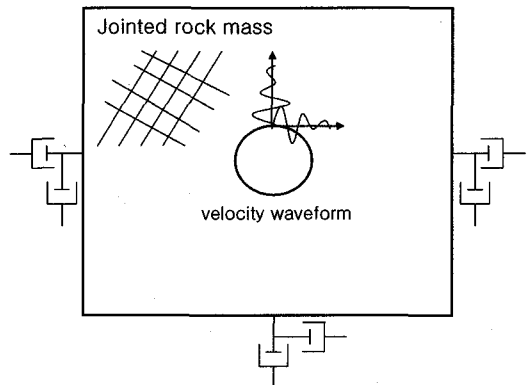


Fig. 1 Concept for dynamic analysis considering rock joints

에 대한 고려가 가능하므로 절리의 방향에 따른 발파진동 전파의 이방성 특성을 표현할 수 있다. 이러한 불연속체 동해석 기법은 연속체 해석에 비해 현장지반의 절리분포를 포함한 지질구조 특성을 보다 실제에 가깝게 모사할 수 있으며, 현장조건에 더 부합하는 발파진동의 전파특성을 획득할 수 있을 것으로 판단된다.

절리를 고려한 발파 동해석 모델링의 개념은 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있으며, 동해석 절차는 Fig. 2에 제시되어 있다. 이 연구에서 제안된 UDEC을 이용한 발파 동해석 과정을 간단히 설명하면 다음과 같다. 먼저 대상지역의 시험발파를 통해 얻어진 발파진동식을 이용하여 지표에서 측정된 진동속도파형을 수치해석의 입력자료로 이용할 폭원의 진동파형으로 증폭, 재생성한다. 수치해석의 입력변수를 구하고 해석기법의 타당성을 검토하기 위해 시험발파를 모델링한다. 이때 UDEC에서 필요한 절리자료를 획득하기 위해 대상부지의 절리조사자료를 통계적으로 분석하여 3차원 절리망을 생성하고 시험발파가 수행된 2차원 단면에서의 절리 트레이스를 추출한다. 감쇠계수를 변화

시켜가며 시추공 시험발파를 모델링하고 해석 결과와 실측된 결과를 비교하여 두 값이 가장 근접할 때를 지반 매질의 감쇠계수로 선정한다. 수치해석의 입력자료가 구해지면 실제 관심영역에 대한 동해석을 수행하고 그 결과를 분석한다.

3. 시험발파 모델링

3.1 폭원의 진동속도파형 추정

발파 동해석에 입력자료로 이용될 진동속도 파형을 획득하기 위하여 지표에서 측정된 진동속도데이터를 대상지역의 시험발파에서 얻어진 발파진동식을 이용하여 폭원에서 2m 떨어진 거리에서의 진동파형으로 증폭하였다. 발파지점이 아닌 2m 이격된 지점에서의 진동파형을 구한 이유는 발파로 인한 주변 암반의 소성영역 발생을 고려하여 순수히 진동파 전달에만 에너지가 소모되는 탄성구간으로 여겨지는 지점이기 때문이다. 증폭에 이용된 지표측정 데이터는 비교적 교란이 덜 된 파형을 얻기 위해 최단거리 수진기에서 측정된 진동속도 데이터를 사용하였다. Fig. 3은 보정 과정을 통해 획득된 폭원에서 2m 떨어진 지점에서의 세 방향 진동속도 데이터이며, 장약량이 0.2kg일 때의 결과이다.

3.2 통계적 절리망 생성 및 절리트레이스 추출

대상 현장의 절리특성을 고려하여 발파진동해석을 수행하기 위해서는 해당지역의 절리분포 특성 파악이 필수적이다. 그러나 조사단계에서 획득되는 절리자료는 매우 제한적이며, 실제 터널 단면 부근의 불연속면 특성에 대해서는 시추공 조사 자료만으로 추정해야 한다. 통계적 절리망의 생성은 조사된 절리자료의

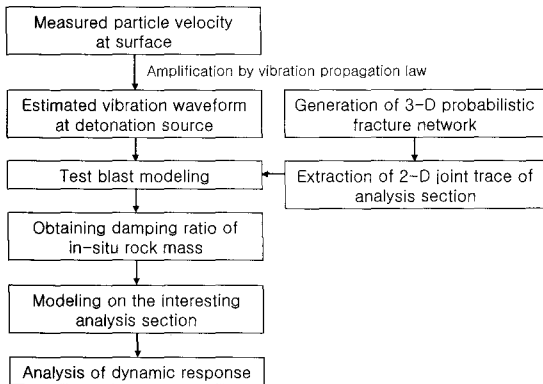


Fig. 2 Dynamic analysis procedure using DEM

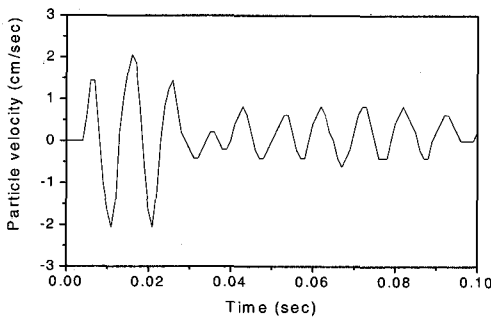
Table 1 Joint characteristics by site investigation

Weighted pole plot of joint direction	Joint set		K (fisher constant)	Spacing (cm)	Length (m)
	#	Orientation			
	#1	337/74	37.23	372.92	5.07
	#2	226/71	44.59	428.30	4.69
	#3	221/32	21.14	283.88	7.21
	#4	175/70	20.89	893.21	5.20

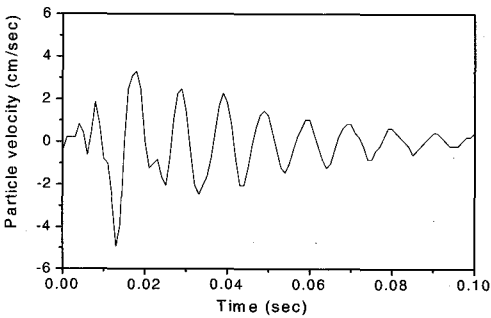
분포 특성을 확률적으로 반영하여 불연속면의 기하 형상을 3차원적으로 재생성하는 것으로서, 현장 불연속면의 분포 특성을 최대한 정확히 반영하기 위해서는 조사 자료의 통계적 특성을 먼저 구해야 한다. 대상 부지의 불연속 암반을 대표하는 절리망을 생성하기 위해 암반절리 조사 자료들을 분석하고 통계적 특성들을 산출하여 Table 1에 정리하였다.

Table 1에서 분석된 통계적 변수들, 즉 방향, 간격, 연장성, 밀집도 등을 바탕으로 FRACMAN 프로그램을 사용하여 대상 부지를 대표하는 통계적 3차원 절리망을 생성하였고 이를 Fig. 4에 나타내었다. 절리망

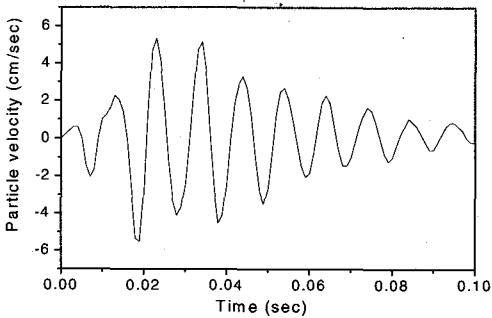
의 생성 시 불연속면의 형상은 Enhanced Baecher 모델을 이용한 원형 디스크를 사용하였으며, 불연속면의 중심은 푸아송 분포를 따르는 것으로 모사된다.



(a) Longitudinal component



(b) Vertical component



(c) Transverse component

Fig. 3 Estimated vibration waveform at blast source

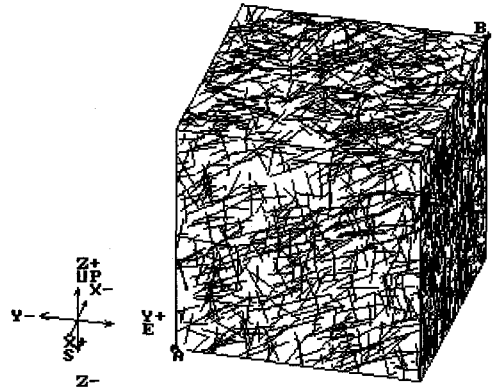
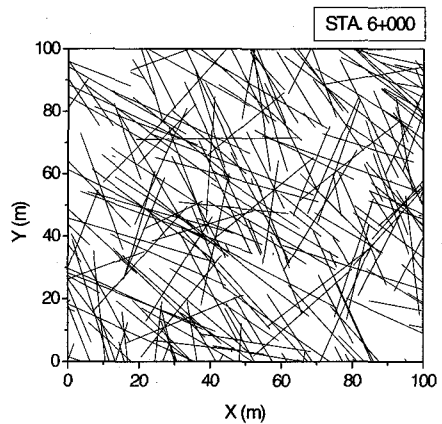
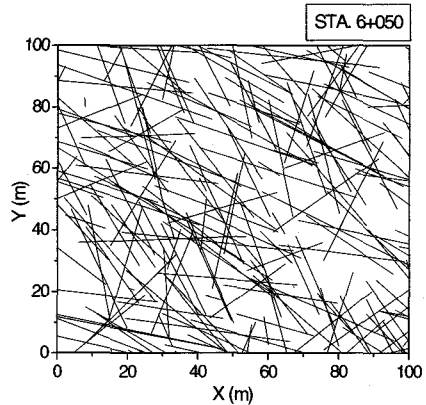


Fig. 4 3-D probabilistic joint network



(a) At test blast site



(b) At village

Fig. 5 Joint trace of 2-D cutting plane for UDEC simulation

불연속면의 밀집도는 체적에 대한 크기 의존성이 없는데 P_{32} (=절리면적/체적)를 사용하였다. 불연속면의 크기 분포는 지표지질 조사자료를 참고하여 절리군별로 대수정규분포, 정규분포, 음지수분포 등으로 가정하였으며, 평균 반경은 10m에서 20m 사이로 가정하였다.⁽¹²⁾

3차원적으로 생성된 확률 절리망을 2차원 개별요소 해석 프로그램인 UDEC에 이용하기 위해서는 해석대상 단면에 대한 2차원 절리 트레이스 추출이 필요하다. 왜냐하면 3차원적으로 생성된 절리들은 절단하는 방향에 따라서 각기 다른 절리 트레이스 분포를 가지게 될 것이기 때문이다. 따라서 각 해석단면에서의 2차원 절리 트레이스 정보를 얻기 위해 터널의 굴진방향에 직각을 이루는 방향으로 확률 절리망을 절단하였으며, 이 때 얻어진 각 단면의 2차원 절리 트레이스를 Fig. 5에 제시하였다.

3.3 시험발파 모델링

관심 해석영역에 대한 동해석을 실시하기에 앞서 매질의 감쇠계수를 산정하고, 추정된 진동속도 파형이 적절한지 등을 검토하기 위하여 실제 대상지역에

서 시행된 시추공 발파를 수치해석적으로 모사하고 그 해석결과를 살펴보았다.

실제 수행된 시험발파는 Fig. 6에 도식적으로 표현되어 있다. TB-24공에서 총 6회의 시험발파가 수행되었는데 이 가운데 UDEC을 이용하여 모사된 발파는 지표면과 가장 가까운 17.5m 하부에서, 장약량 0.2kg으로 수행된 발파이다. 시추공 시험발파를 모사하기 위한 UDEC 격자망이 Fig. 7에 제시되어 있다. 해석의 효율성을 위해 지표에서 15m, 30m, 45m 떨어진 수진점만 포함되도록 격자망을 구성하였고 해석치와 측정치를 비교하였다.

발파하중 입력자료는 Fig. 3에 제시된 추정 발파진동속도파형을 사용하였고, 지반의 동적물성과 절리면의 물성은 실내시험 및 현장시험으로부터 획득한 결과를 적용하였으며 각각 Table 2와 Table 3에 정리하였다.

지반의 감쇠계수를 산정하기 위해 감쇠계수를 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 실제 해석 지반은 풍화암, 연암, 경암 등으로 이루어져 있으나 층서를 고려하여 해석할 경우 절리면과 지반과의 강성 차이는 물론 각 지반 층서에서의 강성 차이가 크므로 해석시간이 너무 오래 걸리게 된다. 또한 실제 해석단면의 경

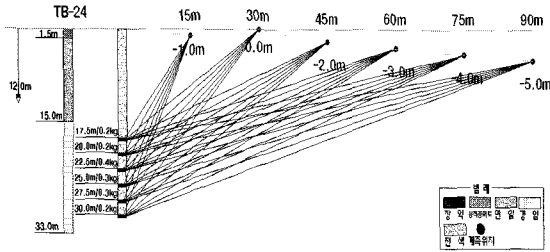


Fig. 6 Schematic view of test site and equipment placement

Table 2 Dynamic properties of rock mass

Rock mass grade	Density (tf/m ³)	Shear modulus (tf/m ²)	Young's modulus (tf/m ²)	Bulk modulus (tf/m ²)
I	2.7	2.32×10 ⁶	5.79×10 ⁶	3.85×10 ⁶

Table 3 Joint properties for UDEC analysis

Cohesion (kgf/cm ²)	Friction angle (°)	Normal stiffness (MPa/mm)	Shear stiffness (MPa/mm)
0.26	31.5	14.6	0.99

Table 4 Peak particle velocity at various damping ratio in test blast simulation

Measuring point	Measured PPV (cm/s)	Simulated PPV at various damping ratio (cm/s)			
		1%	3%	5%	6%
# 1	0.21	0.58	0.38	0.22	0.19
# 2	0.08	0.25	0.16	0.10	0.07
# 3	0.04	0.14	0.09	0.05	0.03

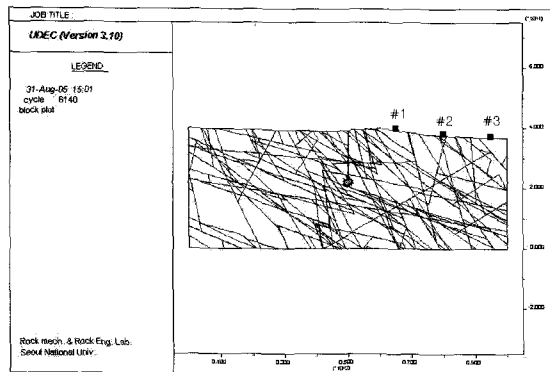


Fig. 7 UDEC mesh for test blast simulation

우 예상 터널의 위치가 지표로부터 비교적 깊게 위치하고 있고 경암 부분의 비율이 상대적으로 크므로 감쇠계수를 적절히 조절하여 지표 근처의 풍화토나 연암의 영향을 반영할 수 있다는 가정 하에 층서를 구분하지 않고 해석하였다.

감쇠계수의 변화에 따른 지표 측정점에서의 진동속도 백터합 최대값을 Table 4에 나타내었다. 해석된 최대 입자속도 결과를 살펴보면, 5%보다 작은 감쇠계수를 적용한 경우 전체적으로 측정결과보다 최대 입자속도가 크며, 5%부터 측정값에 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 5%보다 큰 감쇠계수를 적용하여도 해석결과에 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 보인다. 일반적으로 지반의 역학적 감쇠 계수의 범위가 5%를 넘지 않는다는 점과 5% 감쇠계수를 적용한 해석결과가 대체적으로 측정결과보다 안전측에 있다는 점도 함께 고려하여 해석하고자 하는 지반의 감쇠계수는 5%가 적절하다고 판단된다.

4. 현장적용 모델링 및 동해석

4.1 현장 개요

국도개설공사의 과업구간중 OO터널의 시점부 인근에 마을이 위치하고 있어, 터널발파 작업시 야기되는 발파진동의 영향을 검토하고자 한다. 또한 터널 상부의 비탈면에 간간히 노출된 기반암의 층상절리가 비교적 고각을 이루며 마을을 향하고 있어 발파작업시 낙석의 우려가 있으므로 이에 대한 검토도 아울러 수행하고자 한다.

4.2 허용진동기준 선정

해석 대상 구조물에 대한 허용진동기준을 설정하기에 앞서 먼저 국내의 진동관련 기준을 조사하였으며 이를 바탕으로 OO터널 시점부 마을 인접 구간에서의 허용 발파진동기준을 0.3 cm/sec로 결정하였다. 이는 국내외에서 인체에 대해 보편적으로 적용되고 있는 기준이며, 해석하고자 하는 단면이 주거지임을 고려하여 선정된 보수적 기준이다.

4.3 해석모델 구성

UDEC 모델에서 블록의 구성모델은 탄성모델로 하였고 절리면의 구성방정식은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 블록의 구성모델을 탄성모델로 한 이유는 이 해석이 발파로 인한 균열의 발생이나 전파에

관심이 있는 것이 아니라 인근 구조물의 영향평가에 필수적인 발파진동의 전달 및 지반진동속도에 주안점을 두고 있기 때문에 블록의 소성거동으로 인한 에너지의 소산을 방지하기 위함이다.

마을 인근의 발파진동 해석을 위해 구성된 UDEC 모델이 Fig. 8에 제시되어 있다. 임의로 형성된 외부 경계면에서 일어날 수 있는 파의 반사를 방지하기 위해 좌우 및 하부 경계부에 점성 경계조건을 적용하였다.

동해석에 사용된 발파진동원은 대상지역의 시추공 발파로부터 추정된 발파진동파형(Fig. 3 참조)을 설계 발파패턴에서 제시된 최대 지발당 장약량에 맞도록 적절하게 변환시킨 파형이다. 일반적으로 발파압력과 장약량간의 관계에서는 장약량이 증가하는 만큼 발파압력을 증가시키는 선형 비례값을 적용하는 반면, 발파진동속도와 지발당 장약량간의 관계는 비선형 관계를 보인다. 따라서, 이 연구에서는 대상지역의 발파진동식을 이용하여 발파진동속도파형의 최대크기와 지발당 장약량간의 상관관계에 따라 그 계수만큼 폭원의 진동파형을 증폭하였다. 폭원의 위치는 예상 터널 단면의 발파위치 가운데 지발당 장약량이 가장 크며 지표와 가까운 지점을 선택하였으며, 이 터널구간에 적용되는 발파패턴 I의 경우 최대 지발당 장약량은 7 kg이다. 시추공 발파를 통해 얻어진 대상부지의 발파진동식은 다음과 같다.

$$v_{50\%} = 57.079 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.467} \quad r^2 = 0.89 \quad (1)$$

여기서, $v_{50\%}$ 는 50% 신뢰도의 지반진동속도, D

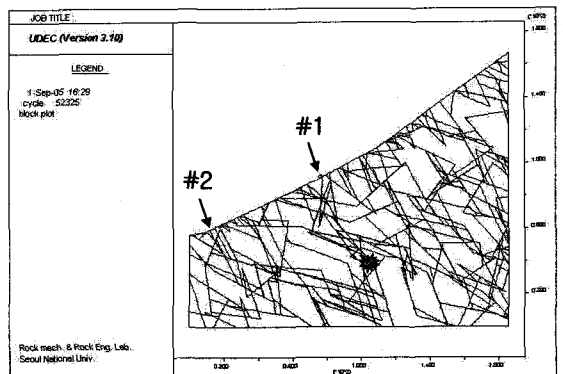


Fig. 8 UDEC model for evaluating blast-induced vibration at village

는 폭원으로부터의 거리, W 는 지발당 장약량이다.

한편 동해석에서는 전파하는 파의 수치적인 왜곡이 나타날 수 있는데, 입력파의 주파수 성분이나 시스템의 탄성과 속도 특성이 파형 전파의 정확도에 영향을 미칠 수 있다. Kuhlemeyer와 Lysmer⁽¹³⁾는 매질의 정확한 파형 전파를 위해 요소 크기(Δl)가 입력파의 최대주파수 성분에 해당하는 파장(λ)의 1/10 이하가 되어야 한다고 하였다.

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \quad (2)$$

매질을 전파하는 탄성파의 속도(C_p)는 불연속면의 간격과 강성에 의해 식 (3)과 같이 계산된다.

$$C_p = \sqrt{\frac{sk_n}{\rho}} \quad (3)$$

여기서, s 는 절리 간격, k_n 은 절리의 수직강성, ρ 는 매질의 밀도이다. 계의 자유 진동 모드와 관련이 있는 기본 주파수는 다음의 식으로 표현된다.

$$f = \frac{C}{\lambda} \quad (4)$$

파형의 왜곡이 일어나지 않는 모델의 최대 zone 크기는 식 (2), (3), (4)에 의해 계산할 수 있다. 먼저 식 (3)에 절리의 평균간격과 수직강성, 밀도 등을 대입하면 $C_p = 1.590 \text{ m/s}$ 이며 시험발파에 의한 폭원의 탁월 주파수(predominant frequency) 범위는 대략 100 Hz 부근이므로, 최대 요소 크기는

$$\Delta l \leq \frac{C_p}{10f} \approx 1.6 \text{ (m)} \quad (5)$$

가 된다. 따라서 이 해석에서는 이보다 작은 1m를 최대 요소 크기로 설정하였다.

UDEEC 해석을 위한 지반의 동적물성치와 절리면의 강도정수들은 각각 Table 2와 Table 3에 제시된 값

Table 5 Peak particle velocity at each measuring point

Measuring point	Distance (m)	Peak horizontal velocity (cm/sec)	Peak vertical velocity (cm/sec)	Peak vector sum (cm/sec)
# 1	57	0.68	0.87	0.95
# 2	95	0.26	0.22	0.28

을 이용하였다. 지반의 감쇠는 Rayleigh 감쇠조건을 사용하였고, 감쇠계수는 5%를 적용하였다.

4.4 해석 결과

이 해석단면의 경우 민가가 위치한 마을에서의 진

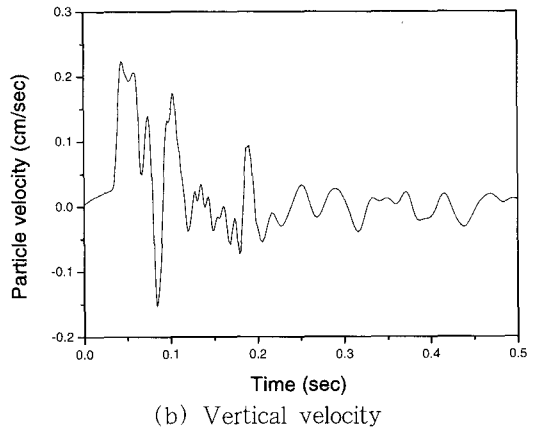
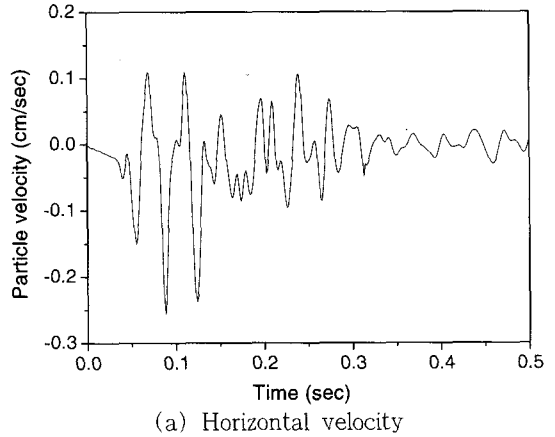


Fig. 9 Particle velocity history at measuring point #2

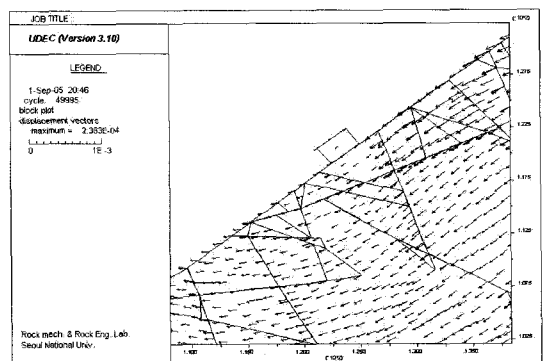


Fig. 10 Blast-induced displacement at the slope near village

동영향 평가가 우선적인 관심대상이므로 최단거리 지표 측정지점인 #1에서의 결과가 아니라 마을이 위치하는 측정점 #2에서 기록된 수평 및 수직방향 진동속도 이력을 Fig. 9에 제시하였다. 또한 각 관측지점에서의 수평 및 수직 최대진동속도의 벡터합을 구한 결과를 Table 5에 나타내었다. 여기서 벡터합은 시간에 따른 수평진동속도이력과 수직속도이력의 벡터합중에서 가장 큰 값을 의미한다.

마을이 위치하는 측정지점 #2에서 측정된 진동속도 벡터합의 최대값이 0.28 cm/sec로 나타나 이 해석에서 인체에 대해 설정된 진동속도 허용기준인 0.3 cm/sec를 만족하는 것으로 보인다. 이는 터널 발파패턴 설계가 적절히 이루어졌다고 볼 수 있다.

한편, 비탈면에서 발파로 인한 낙석의 발생여부를 알아보기 위해 블록의 변위를 측정하였다. 변위측정은 비탈면을 구성하는 블록과 임의로 급경사 비탈면에 놓아둔 블록(측점 #1)에 대하여 수행되었다. 비탈면을 구성하는 블록의 최대변위는 0.26 cm 정도로 나타나 발파로 인해 사면의 붕괴나 안정성의 저하가 발생하지는 않을 것으로 보인다. 또한 임의로 비탈면에 올려진 블록의 경우 역시 발파진동으로 인한 블록의 변위가 1 mm 이하인 것으로 나타났다. 따라서 기반암의 층상절리에 의해 형성된 블록의 낙석 발생가능성은 희박한 것으로 보인다. Fig. 10에 급경사 비탈면에서 발파에 의한 암석 블록의 변위발생 양상을 나타내었다.

5. 결 론

이 연구에서는 발파진동에 의한 영향성 검토를 위하여 발파현상을 모사하는 동적 수치해석을 수행하였으며, 암반 내에 존재하는 절리의 영향을 고려하기 위해 개별요소법에 기반한 불연속체 해석 프로그램인 UDEC을 사용하였다. 발파 동해석에서 중요한 입력자료의 하나인 발파하중은 기존에 제안된 압력식의 형태가 아니라 최근에 적용되어 타당성과 정확성을 인정받고 있는 시험발파 측정자료를 이용한 추정 진동속도파형을 이용하였다. 이 연구를 통해 얻어진 주요한 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

(1) 제안된 불연속체 동해석 기법의 적합성을 검토하고 필요한 입력변수를 산정하기 위해 대상부지에서 시행된 시추공 시험발파를 수치모사 하였는데 시

험발파 모델링에 의해 예측된 발파진동속도는 실측된 데이터와 대체로 일치하는 결과를 보였으며, 동해석 시 현장 지반의 감쇠계수는 5%가 적정한 것으로 나타났다.

(2) 불연속체 동해석 기법의 현장적용을 위하여 발파가 예정된 터널노선 인근에 위치한 마을과 비탈면을 모델링한 결과, 인체에 대한 진동속도기준을 설정한 마을 인근에서 측정된 발파진동속도가 허용기준치인 0.3 cm/sec를 넘지 않는 것으로 나타나 설계 장약량이 적정한 것으로 보인다.

(3) 마을 인근 비탈면에서 암석블록의 낙석발생가능성을 평가하기 위해 블록의 변위를 측정하였는데, 사면을 구성하는 암석 블록과 사면 위에 임의로 올려진 블록의 최대변위 모두 수 mm 이하로 미미하여 발파로 인해 사면이 붕괴되거나 불안정해질 위험은 없어 보인다. 따라서 이 대상현장에서의 터널발파 패턴설계는 적절한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) 이연수, 장서일, 2004, "도심지 발파공사장의 발파진동 특성", 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 7 호, pp. 632~638.
- (2) 김남수, 양형식, 2001, "발파진동의 예측기법과 환경규제 기준으로의 변환 연구", 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 제 11 권, 제 1 호, pp. 14~19.
- (3) Liu, Q. and Tidman, J. P., 1995, "Estimation of the Dynamic Pressure Around a Fully Loaded Blasthole", MRL 95-014 Technical Report, CANMET/MRL Experimental Mine.
- (4) Jiang, J. J., Blair, D. P. and Baird, G. R., 1993, "Surface Vibrations due to a Buried Explosive Source", Proc. 4th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting, pp. 89~96.
- (5) 전석원, 박의섭, 김현우, 박병기, 2001, "발파진동에 의한 구조물 동적영향 평가, 연구보고서", 서울대학교 암반공학연구소.
- (6) 최성웅, 박의섭, 선우춘, 정소걸, 2004, "실측진동파형을 이용한 발파 동해석 기법에 관한 연구", 한국암반공학회지, 터널과 지하공간, 제 14 권, 제 2 호, pp. 108~120.
- (7) Park, B. K., Jeon, S., Kim, H. W., Park, E.

S., Lee, D. H., Lee, H. W. and Cho, T. C., 2005, "A Numerical Method for Estimating Blast-induced Vibration Using Particle Velocity Measurement", Proceedings of EUROCK 2005, pp. 433~439.

(8) Pyrak-Nolte, L. J., 1998, "Seismic Visibility of Fractures", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley.

(9) Myer, L. R., Pyrak-Nolte, L. J. and Cook, N. G. W., 1990, "Effects of Single Fractures on Seismic Wave Propagation", Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Rotterdam, pp. 413~422.

(10) 전석원, 박의섭, 김현우, 박병기, 2001, "제어

발파기법을 이용한 구조물 발파해체기술 개발 - 제어발파 설계모델 개발, 위탁연구보고서", 한국지질자원연구원.

(11) Chen, S. G. and Zhao, J., 1998, "Technical Note-a Study of UDEC Modelling for Blast Wave Propagation in Jointed Rock Masses", Int. J. Rock Mech. Sci., Vol. 35, No. 1, pp. 93~99.

(12) Golder Associates, 1998, "Fracman-user Documentation", Program Manual.

(13) Kuhlemeyer, R. L. and Lysmer, J., 1973, "Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems", J. Soil Mech. & Foundation Div., ASCE, 99(SM5), pp. 421~427.