

진동저감을 위한 터널발파기법의 수치해석적 연구

전병규¹⁾ · 전석원²⁾ · 나상민³⁾ · 위용곤⁴⁾ · 이상필⁵⁾

1. 서론

산업화와 더불어 도심지의 밀집화가 급속히 이루어지게 되었고, 이로 인해 지상 구조물과 교통망이 포화되어 더 이상의 지표공간을 사용하기에 어려움이 따른다. 이런 상황에서 지하 공간의 활용이 대안으로 부각되었으며, 그 공간 확보의 방안으로 주로 발파에 의한 지하 굴착 방법이 사용되고 있다. 특히 포화된 지상의 교통망을 보충하기 위해 도심지 터널이 건설되고 있다.

발파에 의한 터널 시공에서는 필연적으로 진동과 폭음 등의 발파공해가 발생하게 되며, 이러한 발파공해는 발파작업을 수행하는 과정에서 주변 구조물의 안정성 피해, 인근 주민으로부터의 민원야기 등의 문제를 발생시킨다.

이러한 문제를 해결하기 위해 국내 여러 연구에서 발파진동을 줄이기 위한 발파기법들이 제시되었고, 이러한 기법들은 특허 및 신기술과 관련한 내용으로 특허된 기술로 자리 잡고 있다. 터널발파에 관한 특허 및 신기술은 그 발파효율의 증대를 목적으로 하고 있으며, 발파효율과 발파공해의 상관관계를 고려하여 최적의 방법들을 제안하고 있다.

본 연구에서는 이러한 여러 가지 진동저감을 고려한 터널발파기법들 중에서 정량적인 기준 없이 경험에 의해 설계가 이루어지고 있는 라인드릴링이나 프리스플리팅과 같은 조절발파기법들에 대한 최적 공 배치 및 공 직경을 제시하여 진동 저감 효과를 높이는 방법에 대한 수치해석 결과를 도출하고자 한다.

해석에는 개별요소법을 이용한 상용 프로그램인 PFC2D를 이용하였고, 발파공의 천공 길이는 고려하지 않은 채 평면 상태에서의 2차원 해석을 수행하였다.

2. 수치해석을 위한 모델 산정

2.1 PFC2D 에서의 모델 생성

PFC2D에서 암반의 거동을 모사하기 위해서는 구성 입자의 물성값(미시변수)을 산정해야

-
- 1) 서울대학교 에너지시스템공학부 박사과정
 - 2) 서울대학교 에너지시스템공학부 교수
 - 3) GS건설(주) 기술연구소 연구개발팀 선임연구원
 - 4) GS건설(주) 지하공간팀 대리
 - 5) GS건설(주) 지하공간팀 부장

만 한다. 최근 정용훈(2006)이 발표한 논문에서는 이러한 미시변수 산정을 위해 암반의 물성과 구성입자의 미시변수 사이의 관계를 연구하여 PFC2D에서의 미시변수 결정법을 제시하였다. 본 연구에서는 제시된 결정법에 의해 해석 모델을 생성하였다. 해석에 필요한 암반의 물성은 기존의 연구에서 제안된 추정식을 사용하여 암반등급별 대표값을 산정하였다. 표 1과 표 2에서 볼 수 있듯이 다양한 형태의 식을 통하여 Q-system이나 RMR과 같은 암반분류기준과 변형계수, 일축압축강도와의 관계를 제안하고 있다. 이를 통해 암반의 변형계수와 일축압축강도를 산정하였으며, 암반등급 III에 해당하는 모델을 생성하여 해석을 수행하였다.

미시변수 결정법에 의해 결정된 암반등급별 모델을 생성하고, 각 모델에 대해 일축압축시험을 모사하여 생성된 모델의 거동 특성을 파악하였다. 그 결과는 표 3과 같으며, 결정된 암반의 물성값과 유사한 값을 나타내고 있다.

표 1. 암반분류법을 통한 암반의 변형계수 추정

Reference	Suggested formulae	Unit
Bieniawski, 1978	$E_m = 2 \times RMR - 100$	GPa
Serafim & Pereira, 1983	$E_m = 10^{(RMR - 10)/40}$	GPa
Barton, 1980, 1995	$E_m = 25 \log Q, Q > 1.0$ $E_m = 10 Q^{1/3}, Q \leq 1.0$	GPa
Aydan, 1996	$E_m = 0.0097 RMR^{3.54}$	MPa

표 2. 암반분류법을 통한 암반의 일축압축강도 추정

Reference	Suggested formulae	Unit
Singh, 1993	$\sigma_{cm} = 0.7\gamma Q^{1/3}$	MPa
Barton, 1995	$\sigma_{cm} = 18.2 Q^{1/3} (\gamma = 26 kN/m^3)$	MPa
Kalamaras & Bieniawski, 1995	$\sigma_{cm} = 0.005 \frac{(RMR - 15)}{85} RMR^{2.3}$	MPa
Aydan, 1996	$\sigma_{cm} = 0.0016 RMR^{2.5}$	MPa

표 3. 생성된 모델의 일축압축시험 결과

Rock mass class	Deformation modulus E_m (GPa)	Compressive strength σ_{cm} (MPa)	Poisson's ratio ν
III	9.8	31.3	0.24

2.2 발파압력의 모사

본 수치해석에서는 최대발파압력의 산정을 위해 NHI(National Highway Institute, USA)에서 제안한 추정식(식 1)을 사용하고, 발파압력의 감쇠특성으로는 감쇠함수(식 2)를 사용하였다. 디커플링효과를 고려한 발파압력(식 3)을 기준으로 해석을 수행하였다. 국내에서 생산되고 있는 화약 중에서 MegaMITE I의 제원을 바탕으로 화약의 발파압력을 산정하였다.

$$P_d = \frac{449.93}{1 + 0.8d_e} d_e D_c^2 \quad (1)$$

여기서, P_d : 최대발파압력 (Pa), d_e : 화약의 밀도 (g/cm^3), D_c : 화약의 폭속 (m/s) 이다.

$$F_{decay} = \frac{t}{t_r} e^{(1 - \frac{t}{t_r})} \quad (2)$$

여기서, t_r 는 최대압력 도달시간으로 그 값은 0.3361ms로 설정하였다.

$$P_b = P_d \left(\frac{d_e}{d_h} \right)^3 \quad (3)$$

여기서, d_e 는 폭약의 직경, d_h 는 장약공의 직경이다.

결정된 발파압력(표 4)을 해석영역을 구성하는 입자에 부여하기 위해서는 힘(force)의 형태로 변환해야 한다. 본 해석에서 사용되는 입자의 반지름은 최소 8mm로 비교적 큰 편이다. 이로 인해 45mm 직경의 발파공에 해당하는 입자의 수가 2~4개 정도 밖에 되지 않고, 공벽을 이루는 입자 또한 그 수가 적다. 이렇게 적은 수의 입자를 통해 발파압력을 가하는 경우 발파공벽에 일정한 압력을 작용시키기 힘들다. 이를 보완하기 위해 발파압력이 작용하는 범위를 넓게 산정하여 모사하였다. 실제 발파공은 직경 45mm이지만, 힘이 작용하는 영역은 이보다 3~4배 큰 영역으로 설정하여 보다 많은 수의 입자들이 반경방향으로 힘을 가하게 하여 보다 균일한 압력이 작용하도록 하였다.

표 4. MegaMITE I 의 제원과 발파압력

평균 폭속 (m/sec)	화약 밀도 (평균) (g/cm ³)	최대발파압력 (MPa)	디커플링 효과 고려	
			화약 지름 (mm)	발파압력 (MPa)
6,100	1.3~1.5 (1.40)	11,056	32	3,975

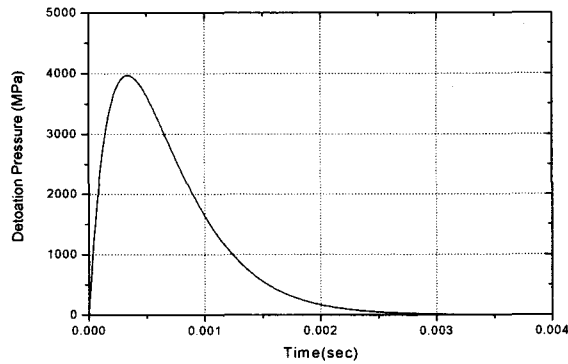


그림 1. 시간에 따른 발파 압력

3. 터널발파기법의 해석

3.1 단일 발파공에 의한 진동 특성 분석

진동 감소 효과를 비교하기 위해 라인드릴링이나 프리스플리팅 기법이 적용되지 않은 상태에서의 발파과정을 모사하고, 이 결과를 토대로 진동차단기법의 적용 후 진동의 감소정도를 파악하였다.

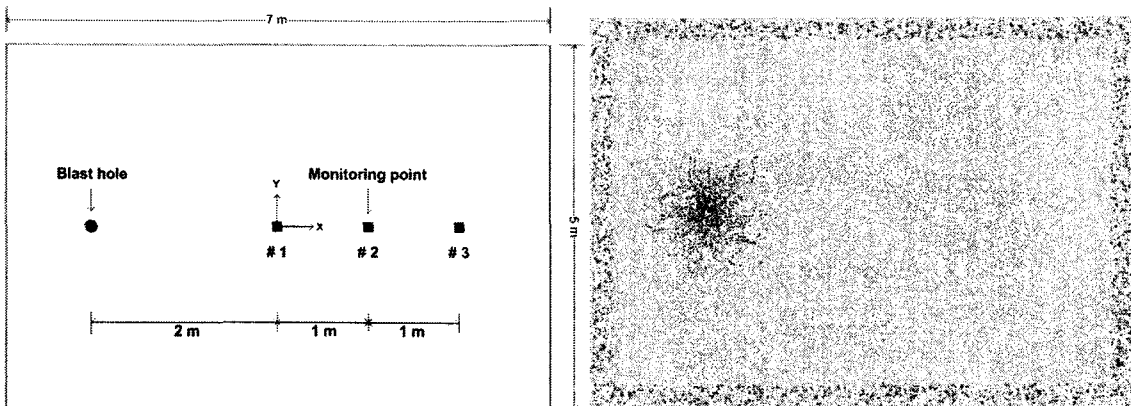


그림 2. 단일 발파공 발파의 모사를 위한 개념도 와 균열 양상

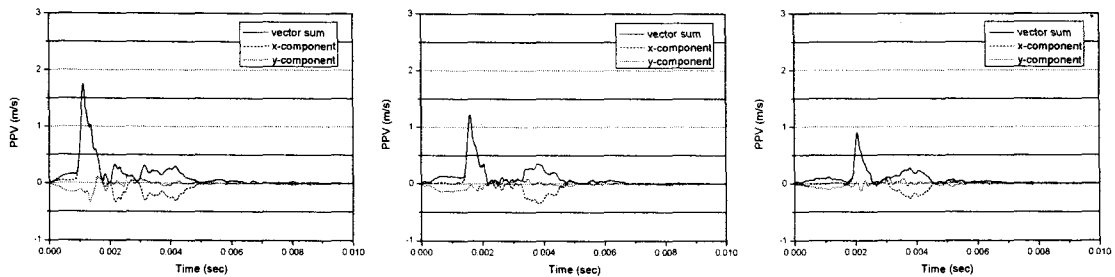
해석 단면은 가로 7m, 세로 5m 로 설정하였다(그림 2). 발파공은 단면 중심에서 왼쪽으로 2m 떨어진 지점에 하나를 설정하였고, 속도 측정지점은 총 3곳으로 발파공으로부터 2m, 3m, 4m 지점에서 최대입자속도를 측정하게 된다.

해석 결과를 살펴보면, 진동 크기(표 5)는 실제 설계에 비해 비현실적인 값을 보이지만 이는 발파공과 측정위치가 매우 가깝기 때문으로 해석의 목적을 고려할 때 비교 대상이 되는 기준 값으로 생각할 수 있다. 각 측정 위치별 진동 파형은 그림 3에서 볼 수 있듯이 초기에 최대값을 기록하고, 그 이후에는 감소하는 형태의 진동 곡선을 보인다.

표 5. 단일 발파공 발파에 의한 최대 진동 속도

PPV	# 1 (m/s)	# 2 (m/s)	# 3 (m/s)
vector sum	1.746	1.222	0.902
x-component	1.739	1.222	0.901
y-component	- 0.336	- 0.135	- 0.128

본 해석영역에서의 단일 발파공에 의한 발파균열 양상은 그림 2와 같이 나타나며 45mm 직경의 발파공에 비해 대략 1m 직경의 범위에서 균열이 발생하는 것을 알 수 있다. 균열의 양상을 보면 해석 영역의 경계부에서 많은 균열이 발생하는데, 이는 경계면에서의 반사파를 줄이기 위한 방편으로 해당 영역에 대해서 입자들의 damping ratio를 높게 설정한 결과이다. 그림 4는 시간에 따른 입자들 사이의 접촉력(ball contact force)을 나타낸다.

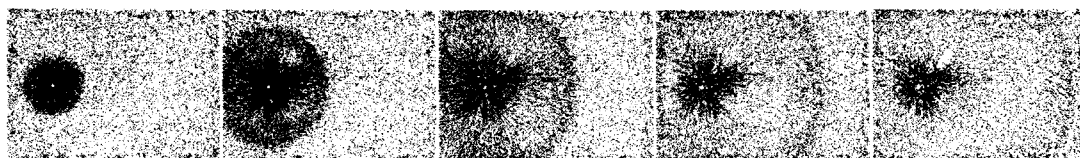


(a) 측정지점 #1

(b) 측정지점 #2

(c) 측정지점 #3

그림 3. 각 측정지점에서의 단일 발파공에 의한 진동 파형



(a) 0.5 sec

(b) 1.0 sec

(c) 1.5 sec

(d) 2.0 sec

(e) 2.5 sec

그림 4. 시간에 따른 접촉력(contact force)의 전파 양상

3.2 라인드릴링 공법의 효과 분석

해석에 적용되는 변수는 발파공과 라인드릴링 열의 이격거리(A), 라인드릴링 공의 간격(B), 공의 수(C), 공의 직경(D) 네 가지로 설정하였다(그림 5).

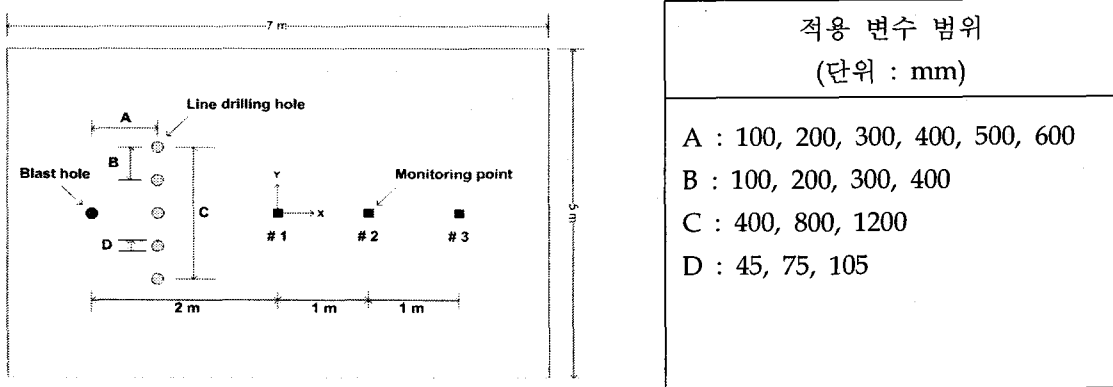


그림 5. 라인드릴링 공법의 효과 분석을 위한 모델 개념도

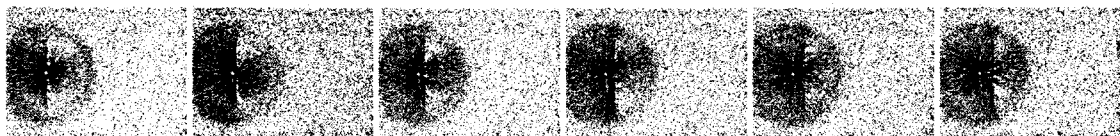
진동의 감소정도는 라인드릴링이 없는 경우의 진동속도에 대한 각 변수 조건하에서의 진동속도의 비(진동감소비, Reduction ratio)로 표시하였다(식 4).

$$Reduction\ Ratio = \frac{PPV_{drilling}}{PPV_{no\ drilling}} \quad (4)$$

여기서 $PPV_{drilling}$ 은 라인드릴링이 형성된 상태의 최대입자속도(PPV, peak partical velocity)를 말하며, $PPV_{no\ drilling}$ 은 라인드릴링이 없는 상태에서의 최대입자속도이다. 즉, 진동감소비(reduction ratio)가 작을수록 진동의 감소정도가 크다는 것을 의미하며, 그 값이 1.0 이상인 경우에는 진동감소효과가 없는 것으로 판단한다.

발파공과의 이격거리에 따른 영향

발파공과의 이격거리는 라인드릴링에 의한 진동 감소효과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 그림 6의 경우는 라인드릴링 공 간격(B)이 10cm인 경우의 결과이다.



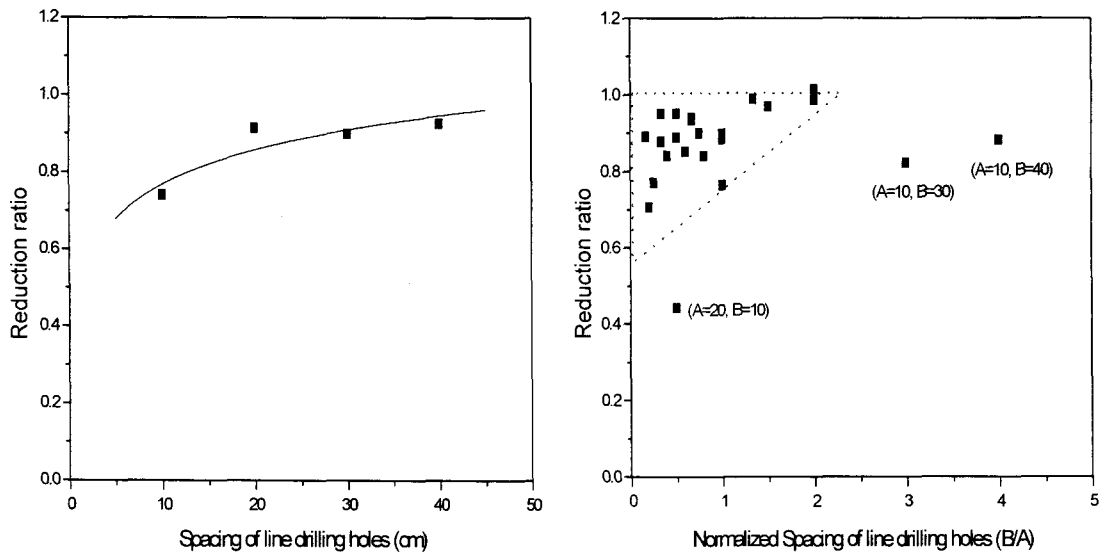
(a) A=10cm (b) A=20cm (c) A=30cm (d) A=40cm (e) A=50cm (f) A=60cm

그림 6. 발파공과 라인드릴링 공의 이격거리에 따른 접촉력 전파 양상

라인드릴링 공 간격의 영향

그림 7(a)와 같이 라인드릴링의 공 간격이 증가할수록 진동감소비가 커지는 경향을 보이는데, 이를 통해 라인드릴링의 공 간격 증가에 따라 진동감소효과가 줄어든다고 판단할 수 있다. 이 곡선의 회귀식을 추정하여 결정계수가 0.8에 해당하는 식 5의 상관관계를 도출하였다. 한편 이격거리에 대한 공 간격의 비를 통해서 진동감소비와 비교하였다. 그림 7(b)와 같이 비가 2.0 이하인 구간에서 진동 감소 효과를 보이고 있으며, 그 값이 작아질수록 진동 감소효과가 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

$$RR = 0.1283 \ln(S_h) + 0.4725 \quad (5)$$



(a) 공 간격과 진동감소비의 관계

(b) 이격거리에 대한 공 간격의 비의 영향

그림 7. 라인드릴링 공 간격에 따른 영향

라인드릴링 공 직경의 영향

해석 결과 라인드릴링의 공 직경(D)이 커질수록 진동 감소효과가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 이 결과를 공 직경에 대한 공 간격의 비로 표현하여 진동 감소효과를 살펴보았다. 그림 8과 같이 공 직경에 대한 공 간격의 비가 증가하면서 진동감소비가 증가하는 것을 알 수 있다. 이 회귀식은 식 6과 같으며, 결정계수는 0.94이다.

$$RR = -1.18616 e^{\frac{S_D}{-1.82136}} + 1.00925 \quad (6)$$

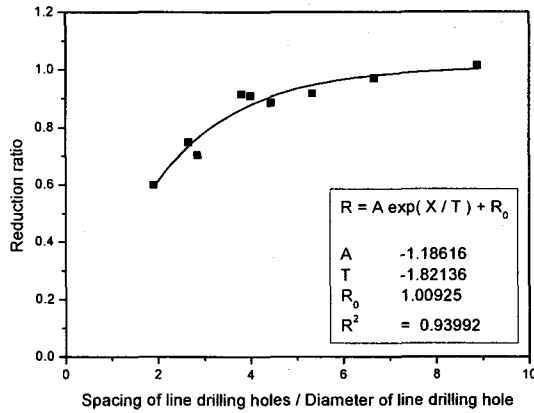


그림 8. 공 직경에 대한 공간격의 비의 영향

라인드릴링 공 수의 영향

라인드릴링 공 수를 변화 시키면서 발파공 주변 방향으로의 진동 차단효과를 검토하였다. 그림 9와 같은 모델을 생성하였으며, 그 결과는 그림 9의 오른쪽 그래프와 같다. 측정지점 #6에서 #10까지는 진동감소비가 1.0보다 큰 값을 보이고 있기는 하지만 라인드릴링 공이 증가하면서 감소하는 경향을 보이고 있다. 즉, 라인드릴링 공이 존재함으로 인하여 진동이 차단되는 효과를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

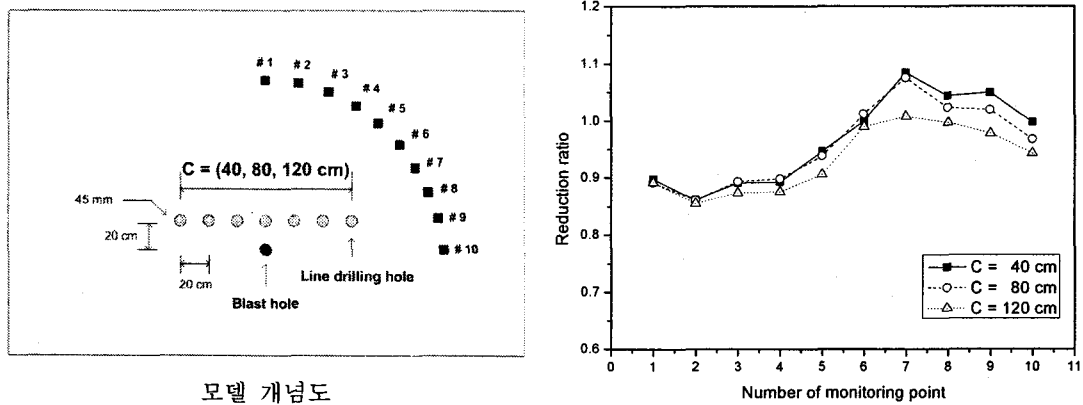


그림 9. 라인드릴링 공 수의 증가에 따른 각 측정지점에서의 진동 감소 효과

3.3 프리스플리팅 공법의 효과 분석

해석 대상은 라인드릴링과 같은 모델을 사용하였으며, 기준이 되는 본 발파공의 위치와 화약사용량을 라인드릴링과 같이 하였다. 따라서 라인드릴링 해석에서 사용된 라인드릴링 공의 위치에 세 개의 무장약공과 두 개의 균열유도공으로 대체하여 이들 간의 진동 감소율을 비교하였다(그림 10).

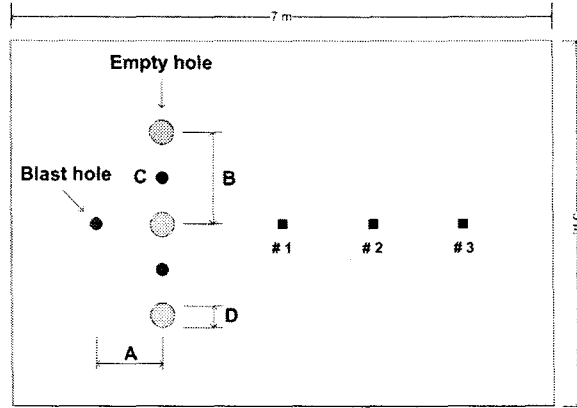
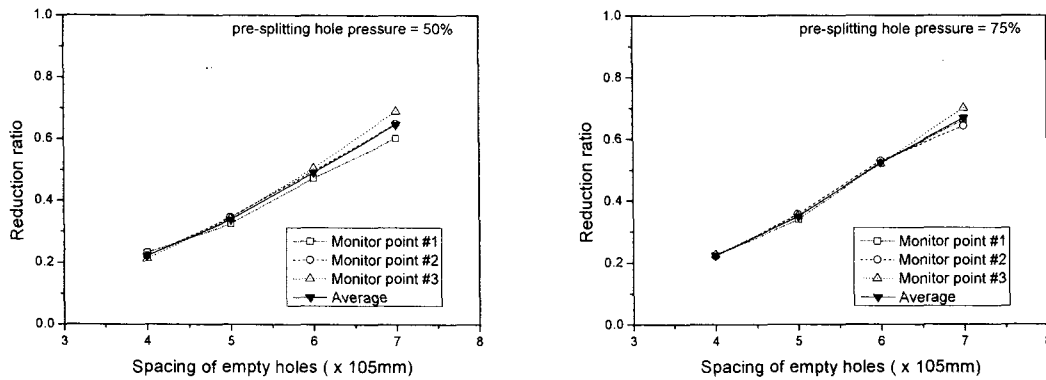


그림 10. 프리스플리팅 공법의 효과 분석을 위한 모델 개념도

무장약공의 간격에 의한 영향

프리스플리팅에 사용되는 무장약공 사이의 간격 변화에 따른 진동 감소 효과를 검토하였다. 무장약공 사이의 거리는 무장약공의 직경에 대해 4배~7배까지 변화시키며, 그 중심에 균열 유도공을 배치하여 발파하였다. 무장약공의 직경(D)은 105mm로 고정하고, 발파공으로부터 50cm 떨어진 지점(A)에 프리스플리팅 열을 형성하였다(그림 10).



(a) 선균열 발파압력이 50%인 경우

(b) 선균열 발파압력이 75%인 경우

그림 11. 무장약공의 간격에 따른 진동 감소비의 변화

그림 11에서 무장약공의 공 간격이 증가함에 따라서 진동 감소비가 커지는 것을 알 수 있다. 이는 무장약공의 중심에 위치한 선균열 유도공의 발파에 의한 균열영역이 작아지기 때문으로 생각된다. 또한 무장약공 자체의 진동 차단효과를 고려하면 라인드릴링의 효과 해석에서와 마찬가지로 공 간격이 증가하면서 진동차단 효과가 감소하기 때문이다.

프리스플리팅 발파공 압력의 영향

선균열을 위한 발파공(균열 유도공)의 발파압력을 25%, 50%, 75%, 100%로 변화시켜 그 효과를 비교하였다. 이격거리(A)는 50cm, 무장약공의 직경(D)은 105mm로 고정한 상태에서 해석을 수행하였다. 그림 12의 결과를 살펴보면 균열 유도공에 작용하는 발파압력이 증가하면서 진동감소비는 감소하는 것을 알 수 있다. 즉 발생하는 진동이 작아지는 경향을 보이고 있으며, 이는 진동 차단효과가 커지는 것을 의미한다. 하지만 발파압력이 50% 이상인 경우에는 뚜렷한 효과를 보이지 않고 있다. 결국 선균열을 통한 진동 차단효과에서 상대적으로 50%수준의 발파압력으로도 충분한 효과를 보인다고 말할 수 있으며, 선균열에 의해 발생하는 진동을 감소하기 위한 방법으로 25%~50% 수준의 에너지를 통해 그 차단 효과를 거둘 수 있을 것으로 생각된다.

발파공과의 이격거리에 따른 영향

발파공으로부터 프리스플리팅 열이 위치한 거리에 따른 효과를 검토하였다. 발파공으로부터 거리를 40cm, 50cm, 60cm, 70cm, 80cm로 변화시켜 해석을 하였으며, 변수 B, C, D는 각각 73.5cm, 50%, 105mm로 설정하였다.

그림 13의 결과와 같이 발파공과의 거리에 따른 영향은 거의 없는 것을 알 수 있다. 라인 드릴링의 경우와 마찬가지로 프리스플리팅의 역할은 본 발파에 의해 발생되어 전파되는 진동을 차단하기 위한 것으로 그 위치에 따라서는 크게 영향을 받지 않는다고 판단된다.

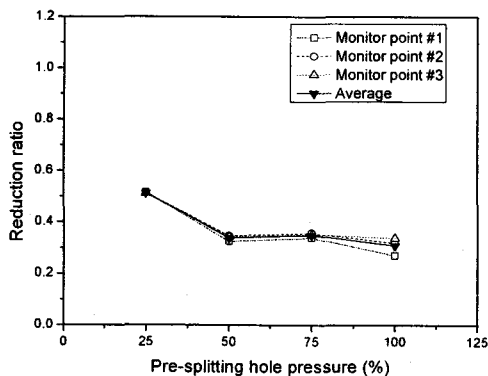


그림 12. 선균열을 위한 균열 유도공의 발파압력 변화에 따른 진동 감소 효과

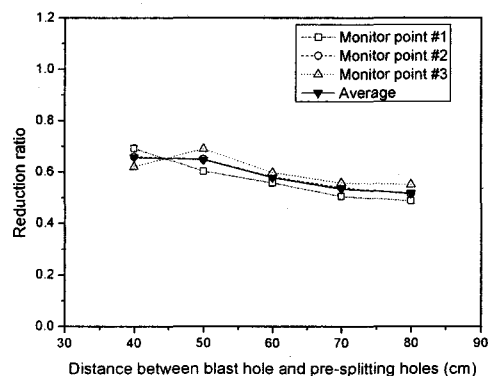


그림 13. 발파공과 프리스플리팅 열의 이격거리에 따른 영향

선균열 발파의 진동 수준을 고려한 영향

선균열 발파에 의해 본 발파의 진동을 감소시킬 수 있지만, 선균열 발파에서 발생하는 진동 또한 문제가 될 수 있기 때문에 그 진동 크기를 고려해야만 한다. 선균열 발파의 큰 에너지가 많은 균열을 생성하면서 큰 진동이 발생하는 반면 본 발파에서의 진동은 크게 감소하게 된다. 선균열 발파에 의한 진동수준과 본 발파의 진동수준 사이는 반비례의 관계를 가

지게 되는데, 두 관계를 고려한 최적의 선균열 발파압력을 두 곡선의 교차점으로 설정하다면, 무장약공의 간격이 무장약공 직경의 4배인 경우 27.8%, 5배인 경우 29.0%, 6배인 경우 33.6%, 7배인 경우 40.8%에서 최적값을 가지게 된다. 즉, 약 27~40% 수준의 발파압력에서 두 발파에 의한 진동을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

그림 14에 무장약공의 간격에 따른 최적 발파압력을 표현하였다. 이를 통해 무장약공의 간격이 설계된 경우 그 사이의 균열유도공에 작용하는 발파압력을 개략적으로 산정할 수 있을 것으로 생각한다.

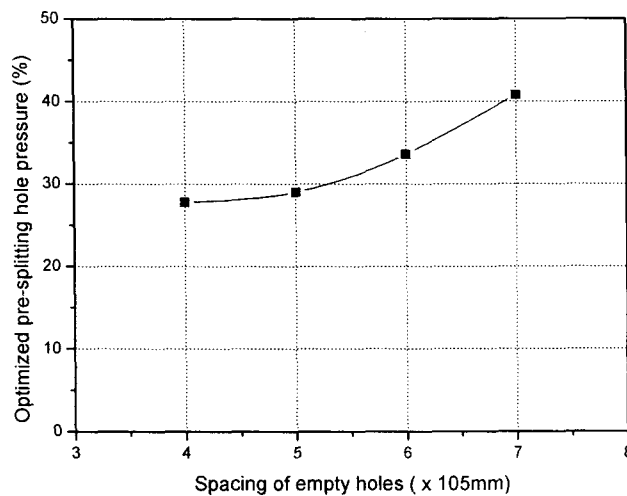


그림 14. 무장약공의 간격에 대한 균열 유도공의 최적 발파압력

4. 결론

본 연구에서는 수치해석적 방법을 통하여 터널발파에서의 조절발파기법으로 사용되는 라인드릴링 공법과 프리스플리팅 공법의 진동저감효과를 검토하였다. 입자결합모델을 사용하는 개별요소법으로 각 공법에 적용되는 변수들에 대한 영향 평가를 검토하고, 최적의 설계조건을 제시하기 위한 연구를 수행하였다. 이상의 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같으며, 결과로서 제시하는 정량적인 수치는 본 연구에서 사용한 조건에 부합하는 것이다.

- 1) 단일 발파공에 대해 라인드릴링을 적용할 경우 평균적으로 13%의 진동 감소효과가 있음을 확인하였다. 프리스플리팅의 경우 47%의 진동이 감소효과를 보이는 것으로 나타났지만, 이 감소효과는 다양한 조건하에서 수행된 결과의 평균값으로 그 효과의 편차가 비교적 큰 것을 알 수 있다.
- 2) 라인드릴링 천공에서 공 간격이 증가할수록 진동 저감 효과가 작아지는 것을 알 수 있었다. 그 결과 간단한 함수 형태의 회귀식을 추정할 수 있었으며, 약 10%내외의 진동 감소

효과를 보이는 것으로 판단된다. 또한 이격거리에 대한 공 간격의 비를 토대로 해석한 결과 그 값이 약 2.0이하에서 진동 감소효과가 발생하며, 그 값이 작아질수록 진동 감소 효과가 증가하는 경향을 파악하였다.

- 3) 라인드릴링 공의 직경에 대해서 해석한 결과 공 직경에 비례하여 진동 차단효과가 나타나는 것을 알 수 있었다. 특히 라인드릴링 공 직경에 대한 공 간격의 비는 진동 감소비(reduction ratio)와 높은 상관관계를 가지는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 공 간격과 공 직경에 대한 상대적인 비율을 예측할 수 있을 것으로 생각된다.
- 4) 프리스플리팅에 사용되는 무장약공 사이의 거리가 증가함에 따라서 진동 감소효과가 줄어드는 것을 확인하였다. 무장약공 사이의 거리가 증가하면서 중심에 위치한 균열 유도공에 의해 발생하는 균열의 전파가 감소하고, 이로 인해 진동 차단효과가 감소하기 때문으로 생각되며, 무장약공 자체의 차단효과를 고려할 때 그 간격 증가에 따라 진동 차단 효과가 저하되기 때문으로 판단된다.
- 5) 균열 유도공에 작용하는 발파압력에 의한 영향을 파악하였다. 발파압력이 증가하면서 진동 차단효과가 크게 나타난다고 볼 수 있다. 단일 발파공의 발파압력에 대한 비율로 균열 유도공에 압력을 작용한 결과 50% 이상에서는 그 차단효과가 더 이상 증가하지 않았다. 균열 유도공에 의해 발생하는 진동 수준을 고려하여 본 발파의 진동 차단효과를 검토한 결과 단일 발파공의 발파압력 대비 27%~40% 수준에서 최적값을 가지는 것을 알 수 있었다.
- 6) 발파공과 라인드릴링 사이의 이격거리, 라인드릴링 공 수는 진동 감소효과에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 결국 적절한 위치에 라인드릴링을 설계하여 천공 수를 줄이는 방안을 찾을 수 있을 것이다. 또한 프리스플리팅 공법의 경우에도 발파공과 프리스플리팅 열의 이격거리에 대해서는 큰 영향이 없었다. 즉, 발파 진동으로부터 보안이 요구되는 지역 부근에 본 공법을 적용하거나, 발파가 이루어지는 현장에서 적용하는 등 시공 상황에 적합한 위치를 선택할 수 있다.

참고문헌

1. 정용훈, 2006, 발파에 의한 굴착손상영역의 수치해석적 산정, 공학박사학위논문, 서울대학교 대학원.
2. Bieniawski. Z.T., 1978, Determining rock mass deformability: Experience from case histories, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, Vol. 15, pp. 237-247.
3. Barton. N., 2002, Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, Vol. 39, pp.

185-216.

4. Aydan. Ö., Ulusay. R., Kawamoto. T., 1997, Assessment of rock mass strength for underground excavations, International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, Vol. 34, paper No. 018.