

터널라이닝 안전관리를 위한 발파제한영역 평가

신종호^{1*}, 문훈기², 최규철³, 김태균⁴

Evaluation of the blast-restriction zone to secure tunnel lining safety

Jong-Ho Shin, Hoon-Ki Moon, Kyu-Cheol Choi, Tae-Kyun Kim

Abstract In urban areas, blast excavation adjacent to tunnels is carried out frequently. It is generally required to secure static and dynamic stability of nearby tunnel structures for any such activities. Although there is some national guidelines for static safety, there is little guides to risk zoning controlling the dynamic behavior of the underground structures. In this study, impacts on the blast-induced vibration are investigated using numerical study. An attempt to define the restricted area of blast adjacent to subway tunnels was also made. Particular concerns were given to tunnel depth and ground types. By carrying out the parametric study on depth and ground patterns, the envelope of blast distance of which dynamic response on the lining is controlled under 1 cm/sec, is established. It is shown that the increase in depth has increased the required safety distance slightly until the distance of 3.5 times of the tunnel diameter. Despite small changes in safety distance, it can be generally said that the effects of depth and stiffness of the ground is not significant in controlling the particle velocity of the tunnel linings.

Keywords: Tunnel, blast vibration, dynamic numerical analysis, vibration velocity

요 지 도심에서 지하구조물, 고층빌딩의 건설은 기존 지하철 터널의 근접시공이 수반되는 경우가 많다. 이 경우 지하철 구조물의 정적·동적인 안정성이 동시에 확보 되도록 하여야 하며 국내에서는 일반적으로 정적인 관리 기준만 제시되었다. 하지만, 도심지 근접시공이 많은 굴착 제약 조건하에서도 발파를 수행되는 경우가 대부분이므로 동적 가이드라인 또한 필요하다. 본 연구에서는 수치해석을 활용하여 발파진동에 따른 영향을 검토하고, 발파 제약영역을 추정하고자 하였다. 특히, 지하철 터널의 토피고 및 지반특성을 변화시켜 구조물의 최대진동속도 변화를 분석하였다. 해석결과 토피가 증가할수록 진동속도가 감소하는 결과를 보였다. 지반강성 변화 파라미터 스터디 결과 직경의 1~2배 이격 시 풍화암, 연암, 경암의 순서로 라이닝 진동속도가 더 커지는 결과를 보였지만, 이격되는 거리가 직경의 3.5배의 경우는 지반과 무관해지는 경우를 보였다. 진동규제속도인 1 cm/sec를 만족하는 발파위치 포락선 분석결과 전반적으로 지반특성이나, 심도의 차이에도 그 영향은 현저하지 않음을 보였다.

주요어: 터널, 발파진동, 동적수치해석, 진동속도

1. 서 론

도심권에서 흔하게 발생하는 지하철 노선과 근접한 건물의 신축이나 증축 시에는 정적인 안정성과 동적인 안정성이 동시에 만족되어야 한다. 그러나 일반적으로 정적인 관리 기준만 선정하여 운영하고 있는 실정이다. 도심지에서 근접시공은 사회적 여건상 제약된 조건에서 수행해야 하므로 발파 굴착을 수반하는 근접시공에 대해서는 동적 가이드라인이 필요하다.

문훈기와 신종호(2008)에 의하면 동적인 안정영역은 타원과 유사한 형태로 지하구조물을 기준으로 수평방향

2D(D는 터널직경), 수직방향 1D 정도의 구간에서는 진동제어가 필요한 것으로 분석되었다. 해석결과는 서울 지하철의 대표적인 경우로 토피고 2D의 연암지반에 대한 연구이며, 실제 근접시공을 계획해야 하는 경우에는 조건이 상이한 경우가 대부분일 것이다. 발파진동이 구조물에 미치는 영향은 구조물의 상태, 진동의 지속시간과 성질, 지반 및 구조물 재료의 진동에 대한 전파성질에 따라 다르다고 알려져 있다. 본 논문에서는 구조물의 상태, 진동의 지속시간과 성질은 선행된 연구와 같은 허용진동속도 1 cm/sec, 지발당장약량 0.125 kg의 조건에서 지하철 터널의 토피조건과 지반특성을 변화시키면서

*1정회원, 건국대학교 토목공학과 부교수, 공학박사 (E-mail: jhshin@konkuk.ac.kr)

²정회원, 건국대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail: mhk@ymeng.co.kr)

³건국대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail: hajimemashite@hanmail.net)

⁴건국대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail: ttlcolor@naver.com)

파라미터 스터디를 수행하여 조건변화에 대한 구조물의 최대진동속도의 변화를 파악 하고자 하였다.

터널과 인접하여 굴착을 수행하는 근접시공과 관련한 통일된 지침은 아직 마련되어 있지 않으나 국내외 몇몇 기관에서는 자체적으로 안전영역을 설정하여 운영하고 있다. 문훈기와 신종호(2008)는 심도 14.6 m이고 연암 일때의 진동영향 대표포락선은 그림 1과 같이 나타남을 확인 하였다.

국내의 근접시공에 관한 터널의 안전영역기준은 터널의 정적 안정성을 토대로 하여 안정 및 주의영역 등으로 구분하고 있다. 동적검토방법은 진동추정식을 사용하여 결정된 진동속도를 허용진동속도와 비교하는 방법을 주로 이용하고 있으나 이는 경험적 방법으로 다양한 요소를 정확히 고려하여 평가하는데 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 문훈기와 신종호(2008)의 확인 결과를 일반화 하고 이를 진동관리의 예비평가 개념으로 활용하여 대표포락선의 변화 및 지반변화에 따른 발파하중의 영향을 분석하고자 한다.

상기의 선행 연구에서는 실제발파현장에 인접한 지하철 구간의 진동계측치를 수치해석결과와 비교하여 수치해석의 적정성을 검토하였다. 동적수치해석 결과, 라이닝의 절점에 작용하는 진동속도의 영향원으로부터 허용값을 만족하는 영역을 제시하였다.

이에 본 논문에서는 선행 연구결과로부터 추가적인 해석을 수행하여 지하철 터널의 토피조건과 지반특성의 변화에 따른 구조물의 최대진동속도 변화를 분석하고자 한다. 수치해석에 적용된 기본조건은 선행 연구와 마찬

가지로 진동제어기준을 안전측인 1 cm/sec로 적용하였으며, 지발당 장약량은 0.125 kg로 설정하였다.

2. 발파진동의 수치해석적 모델링

본 연구에서는 시간이력해석(time history analysis)을 이용 하였으며 적용된 동적평형방정식은 식 (1)과 같다.

$$[M]\ddot{u}(t) + [C]\dot{u}(t) + [K]u(t) = P(t) \quad (1)$$

여기서, $[M]$: 질량행렬, $[C]$: 감쇠행렬, $[K]$: 강성행렬, 그리고 $P(t)$: 동적하중이며, $u(t)$, $\dot{u}(t)$, $\ddot{u}(t)$ 는 각각 변위, 속도, 가속도를 나타낸다.

시간 이력해석은 구조물에 동하중이 작용할 경우에 구조물의 동적특성과 가해지는 하중을 사용하여 임의의 시간에 대한 구조물의 거동(변위, 부재력 등)을 동적평형방정식의 해를 이용해 계산하는 것이며, 본 해석에서는 시간이력해석을 위하여 모드중첩법(modal superposition method)을 사용하였다. 본 논문에서 사용한 수치해석프로그램인 MIDAS/GTS에서 비감쇠 자유진동 조건 하의 모드형상(mode shape)과 고유주기(natural periods)를 구하기 위해 사용된 특성방정식은 식 (2)와 같다.

$$K\phi_n = w_n^2 M\phi_n \quad (2)$$

여기서, K : 구조물의 강성행렬, M : 구조물의 질량행렬, w_n^2 : n 번째 모드의 고유치, 그리고 ϕ_n : n 번째 모드의 형상이다.

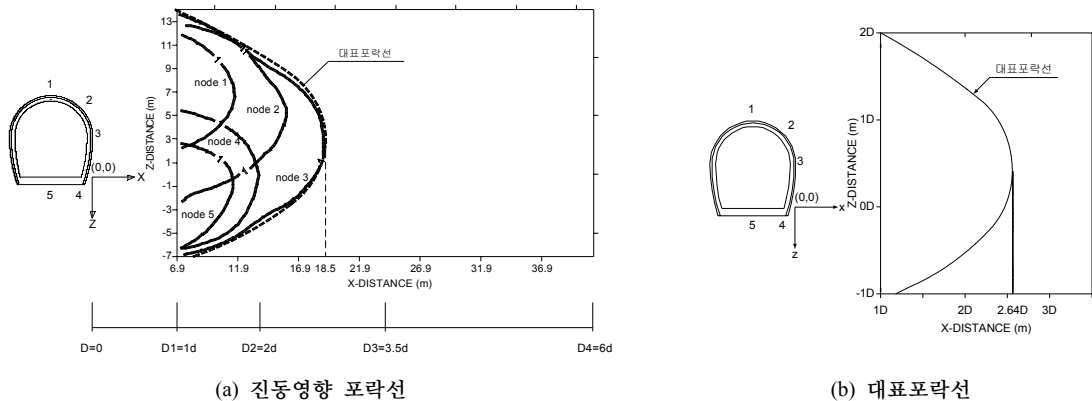


그림 1. 진동영향 포락선

일반적인 경계조건을 설정할 경우에는 파가 반사되는 효과가 발생하게 되는데, 본 해석에서는 Lysmer and Wass(1972)가 제안한 점성경계(quiet boundary)를 사용하였다(식 (3) 및 (4)).

- x 방향 점성경계(P파, C_p)

$$C_p = \rho A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = WA \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{9.81 W}} = c_p A \quad (3)$$

- y 방향 점성경계(S파, C_s)

$$C_s = \rho A \sqrt{\frac{G}{\rho}} = WA \sqrt{\frac{G}{9.81 W}} = c_s A \quad (4)$$

여기서, ρ : 질량(tf), W : 단위중량(tf/m^3), λ : 체적탄성계수(tf/m^2), G : 동전단탄성계수(tf/m^2), A : 단면적(m^2), E : 동탄성계수(tf/m^2), ν : 동포아송비이다.

시간이력해석은 모드형상과 고유주기를 구하기 위하여 자유진동해석(free vibration analysis)을 수행한 후 Natural frequency를 결정한다. 결정된 모드형상과 고유주기를 시간이력해석 시 입력값으로 적용하고, 파의 감쇠효과(damping)를 모사하기 위해서 Rayleigh 감쇠비를 5%로 적용하였다.

3. 수치해석 모델링 및 결과

3.1 해석모델

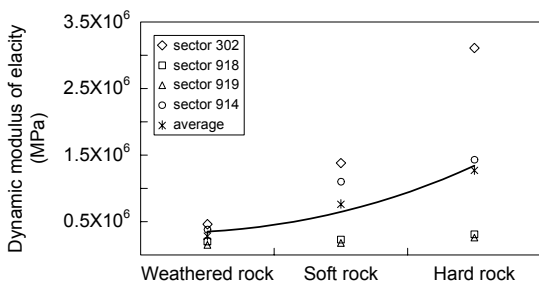
발파하중에 따른 터널구조물의 진동영향을 동해석으

로 검토할 경우 동적지반계수는 매우 중요한 인자이다. 본 연구에서는 근접시공에 따른 기존구조물의 진동의 영향을 검토하기 위하여 기반암을 풍화암, 연암, 경암으로 설정하여 시간이력해석을 수행하였다. 지반의 동적 물성치는 그림 2의 서울시 지하철의 동적물성을 분석하였다. 분석 결과, 적용 물성치는 풍화암의 경우 동탄성계수(E_d)는 300,000 MPa, 동포아송비(ν_d)는 0.43, 연암의 경우 E_d 는 734,000 MPa, ν_d 는 0.41 그리고 경암의 E_d 는 1,285,000 MPa, ν_d 는 0.39로 적용하였다.

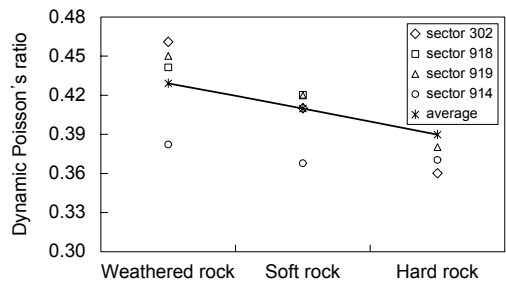
터널에서 이격된 여러 위치에서 발파진동을 발생시키는 경우 발파현상을 프로그램 내에서 정확하게 모사할 수 없으므로 모델경계면에 발파하중을 가하는 형태로 수행하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 Siskind(2000)의 제안식을 이용하여 폭굉압력(detonation pressure)을 산정하였다. 실제로 발파에 의해 공벽에 작용하는 폭굉압력은 시간경과에 지배되는 함수이며, 통상적으로 적용되는 감쇠함수는 Starfield & Pugliese(1968) 등이 제안한 창함수(window function)로 폭굉압력에 대한 시간이력을 산정하게 된다. 본 연구에서는 비중 1.2, 폭속 5,900 m/sec의 국내산 에멀전 계열의 폭약으로부터 폭굉압력을 산정하였고, 수치해석에 적용한 발파하중은 그림 3과 같다. 최대 발파하중은 50.7 MPa, 하중지속시간은 0.001 sec, 그리고 해석시간은 0.25 sec를 적용하였다. 본 해석은 발파공의 연직상태를 모델링하였으므로 산정된 폭굉압력의 50%에 해당하는 압력을 발파하중으로 사용하였다.

3.2 해석케이스

본 해석에 적용한 모델은 서울지역에 건설된 일반적

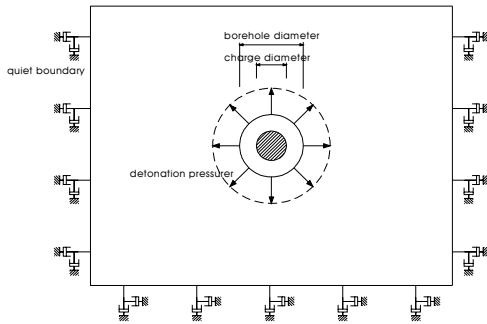


(a) 동탄성계수

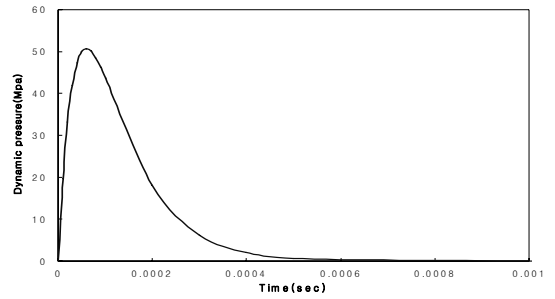


(b) 동포아송비

그림 2. 해석적용 동적물성치(서울지하철 건설본부, 2008)

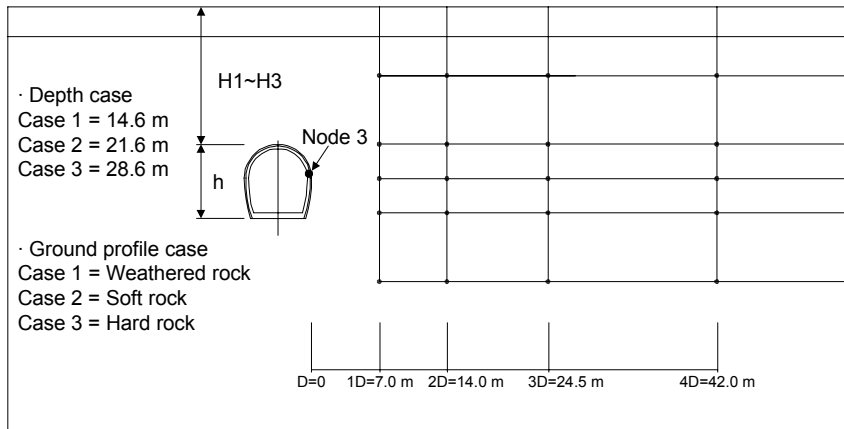


(a) 점성경계 모식도

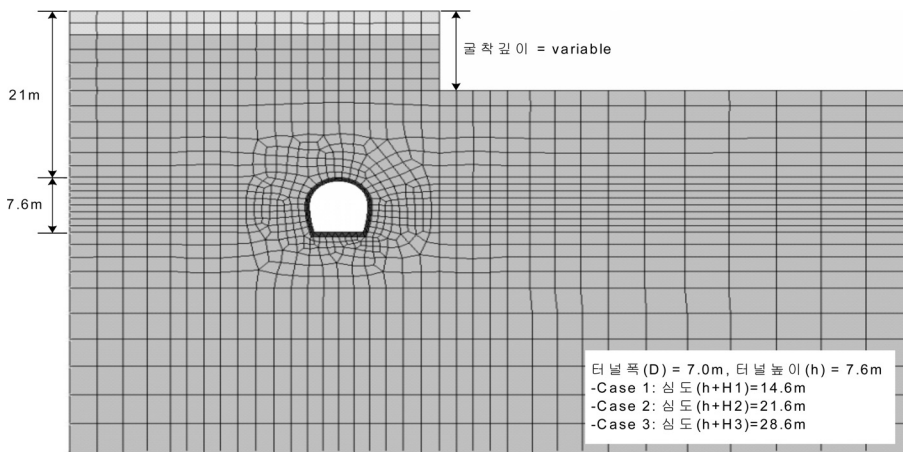


(b) 입력하중

그림 3. 발파하중



(a) 지반 및 터널 단면



(b) Case 3(심도=28.6 m) 유한요소망 예시

그림 4. 해석모델

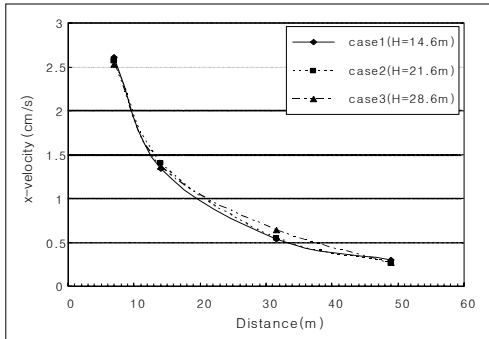
인 지하철 터널자료를 기초로 하였다. 서울 지하철의 평균심도는 약 13.7~22.6 m의 분포로 나타나는데, 본 해석의 목적은 토피 및 지반조건에 따른 터널구조물의 최대진동속도 변화를 파악하기 위함으로 파라미터 스터디를 위한 터널의 심도는 Case 1=14.6 m, Case 2=21.6 m, Case 3=28.6 m로 설정하였다. 또한, 본 해석에 적용한 굴착이격거리는 $D1=7.0$ m, $D2(D1+1d)=14.0$ m, $D3(D1+3.5d)=31.5$ m, $D4(D1+6d)=49.0$ m로 설정하였으며, 각 해석결과에 굴착이격거리(distance)로 나타내었다. 그림 4(a)는 해석에 적용한 모델 및 해석케이스를 나타낸 것이며, 기반암을 풍화암, 연암, 경암의 세 가지로 변화를 주어 해석을 수행하였다. 또한, 그림 4(b)는 해석케이스별 유한요소망(mesh)을 나타낸 것이다. 선행연구(신중호와 문훈기, 2008)에서 가장 영향도가 가장 큰 위치인 Node 3을 관찰점으로 선정하였다.

4. 해석결과

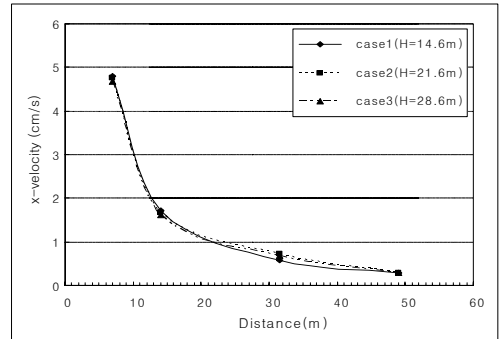
해석결과는 터널심도와 지반특성에 따라 구분 하였으며 거리와 x방향 진동도 관계로 분석하였다. 영향도가 큰 Node 3을 관찰점으로 하였다. 이러한 분석은 발파위치가 터널상부 혹은 하부일 경우 최대치가 아닐 수 있으므로 결과 이해에 주의가 필요하다.

4.1 터널심도의 영향

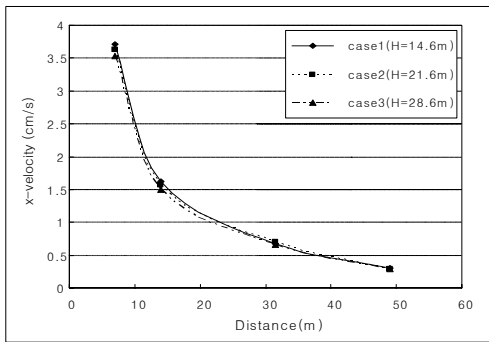
기존 지하철의 토피조건에 따른 근접발파의 영향을 분석하기 위하여 발파위치를 각각 크라운, 스프링라인, 바닥부, 바닥하부 1D에 두고 수치해석을 수행한 결과 토피고의 변화에 따른 진동속도로 그림 5에 보였다. 선행연구결과 라이닝에서 가장 큰 수평 진동속도를 보인 절점은 터널 우측 스프링라인(Node 3)이었으므로 Node 3의 결과를 중점 분석하였다.



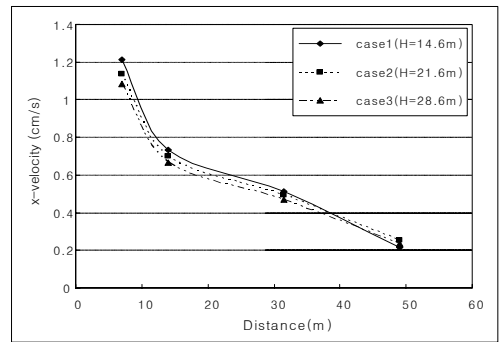
(a) 크라운부 발파하중 적용 시



(b) 스프링라인부 발파하중 적용 시

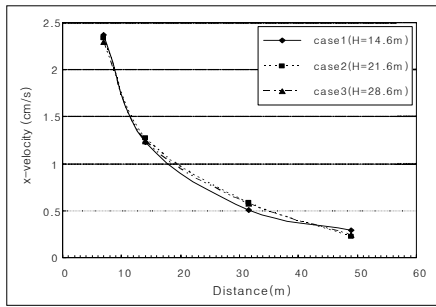


(c) 바닥부 발파하중 적용 시

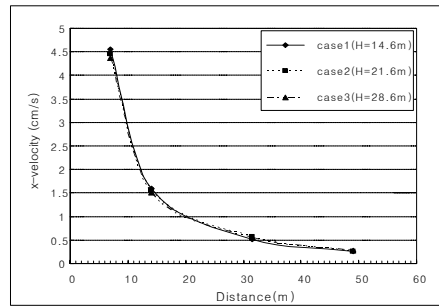


(d) 바닥하부 1D 발파하중 적용 시

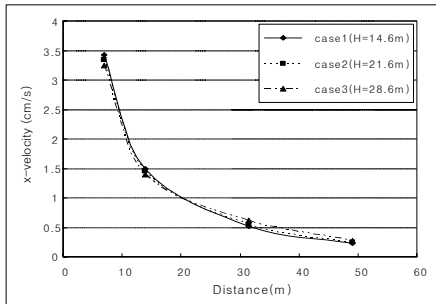
그림 5. 토피변화에 따른 거리별 진동속도(풍화암)



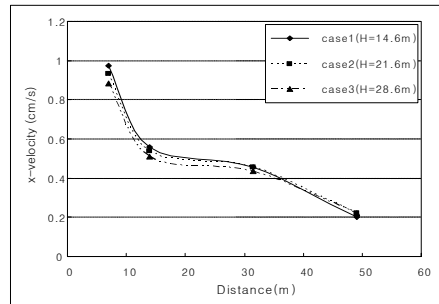
(a) 크라운부 발파하중 적용 시



(b) 스프링라인부 발파하중 적용 시

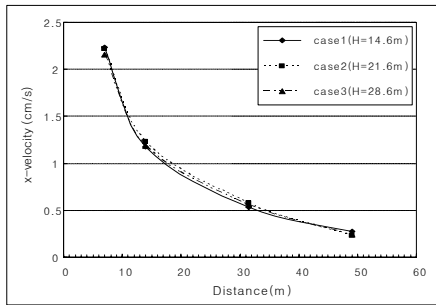


(c) 바닥부 발파하중 적용 시

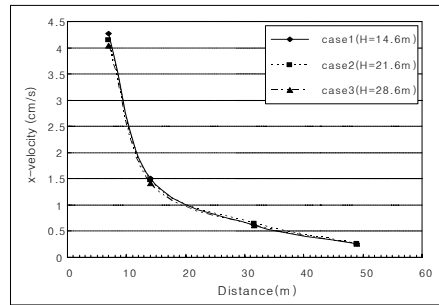


(d) 바닥하부 1D 발파하중 적용 시

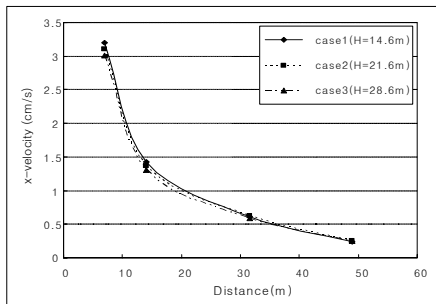
그림 6. 토피변화에 따른 거리별 진동속도(연암)



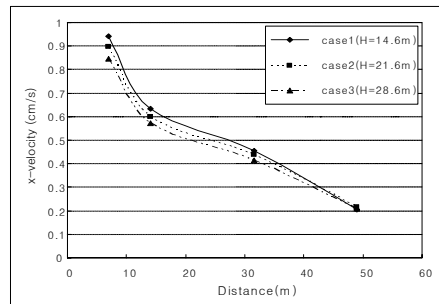
(a) 크라운부 발파하중 적용 시



(b) 스프링라인부 발파하중 적용 시



(c) 바닥부 발파하중 적용 시



(d) 바닥하부 1D 발파하중 적용 시

그림 7. 토피변화에 따른 거리별 진동속도(경암)

풍화암의 경우 크라운부에 발파하중 적용 시 1D 이격한 거리에서의 진동속도는 Case 1=2.611 cm/s, Case 2=2.570 cm/s, Case 3=2.526 cm/s, 연암의 경우 그림

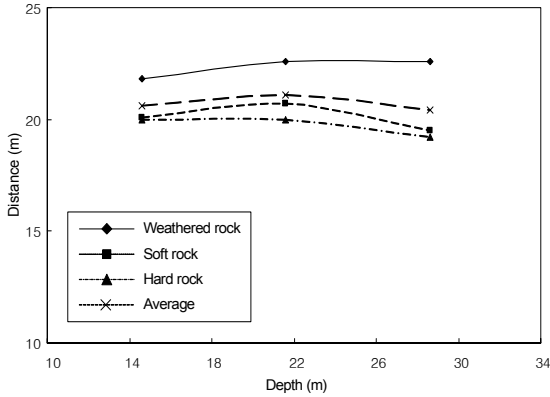
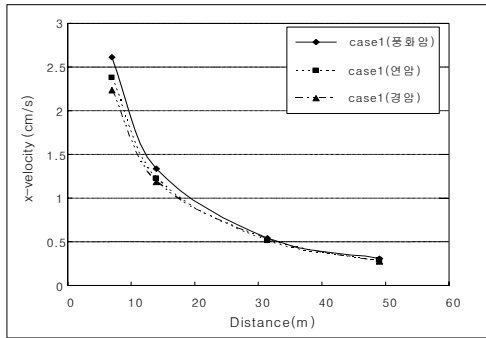


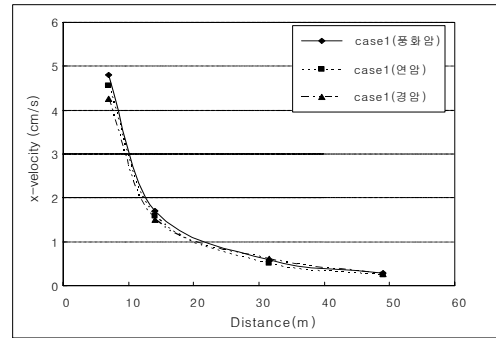
그림 8. 진동속도 1 cm/sec일 때의 심도에 따른 굴착이격거리 (스프링라인부)

6과 같이 크라운부에서 발파하중 적용 시 1D 이격한 거리에서의 진동속도는 Case 1=2.375 cm/s, Case 2=2.339 cm/s, Case 3=2.293 cm/s 그리고 경암의 경우 그림 7과 같이 크라운부에서 발파하중 적용 시 1D 이격한 거리에서의 진동속도는 Case 1=2.235 cm/s, Case 2=2.213 cm/s, Case 3=2.160 cm/s로 나타났다. 해석결과 모든 케이스에서 토피가 증가할수록 진동속도가 감소하는 결과를 보였으며, 이는 스프링라인부, 바닥부, 바닥 하부 1D도 동일한 결과를 보였다. 하지만 이격거리가 증가할수록 토피고와 진동속도는 거의 무관함을 보였다.

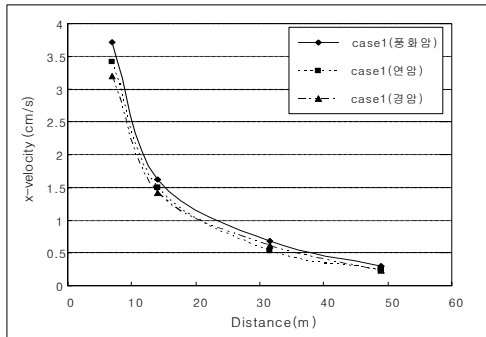
그림 8과 같은 스프링라인부의 진동속도 1 cm/sec일 때의 심도에 따른 발파하중 적용시의 굴착이격거리의 평균값은 심도 14.6 m이 20.6 m, 심도 21.6 m이 21.1 m, 심도 28.6 m이 20.4 m로 크라운부 발파하중 적용시와 동일한 양상으로 나타났다. 이러한 결과는 발파하중의 영향이 터널심도에 민감하지 않음을 보인 것이다.



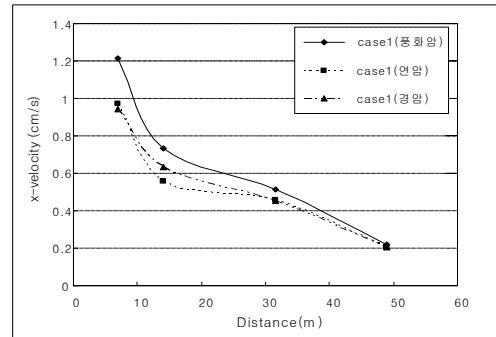
(a) 크라운부 발파하중 적용 시



(b) 스프링라인부 발파하중 적용 시



(c) 바닥부 발파하중 적용 시



(d) 바닥하부 1D 발파하중 적용 시

그림 9. 지반변화에 따른 거리별 진동속도(Case 1, h1=14.6 m)

www.kci.go.kr

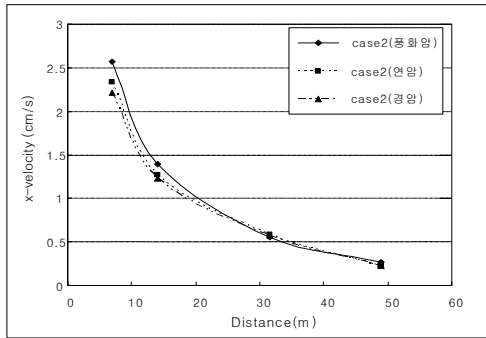
4.2 지층특성의 영향

지반조건을 풍화암, 연암, 경암으로 적용하였을 경우, 터널 라이닝의 진동속도 변화를 분석하였다. 해석결과는 다음 그림 9에 나타내었다. 해석시 강성의 차이는 있으나 연속체 해석이므로 감소비는 동일한 것으로 가정하였다.

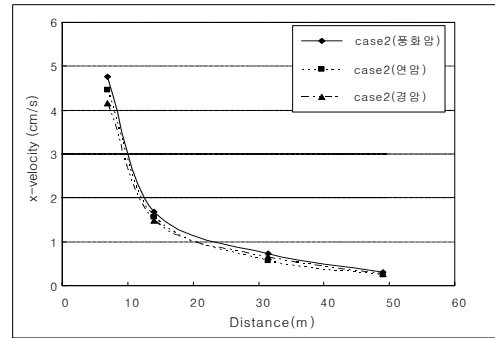
터널 크라운부에 발파하중을 적용하였을 경우 라이닝 Node 3에서의 진동속도는 1D 이격 시 풍화암 2.611 cm/s, 연암 2.375 cm/s, 경암 2.235 cm/s로 나타났고, 2D 이격 시에도 풍화암에서의 진동속도가 더 큰 결과를 보였지만 3.5D 이상 이격될 경우는 지반과 거의 관계없는 경향을 보였다. 스프링라인부, 바닥부에 발파하중을 적용하였을 경우도 크라운부와 마찬가지로 1D~2D 이격 시에는 풍화암, 연암, 경암의 순서로 진동속도가 더 큰 결과를 보였지만 3.5D 이상 이격되는 경우는 지반과 관계없는 경향을 보였다. Case 2는 토피고가 21.6 m인 경우로 해석결과는 그림 10과 같고, 터널 크라운부에 발

파하중을 적용하였을 경우 라이닝 Node 3에서의 진동속도는 1D 이격 시 풍화암 2.57 cm/s, 연암 2.339 cm/s, 경암 2.213 cm/s로 나타났다. 또한, 그림 11과 같이 Case 3의 경우 터널 크라운부에 발파하중을 적용하였을 경우 라이닝 Node 3에서의 진동속도는 1D 이격 시 풍화암 2.526 cm/s, 연암 2.293 cm/s, 경암 2.16 cm/s로 나타났다.

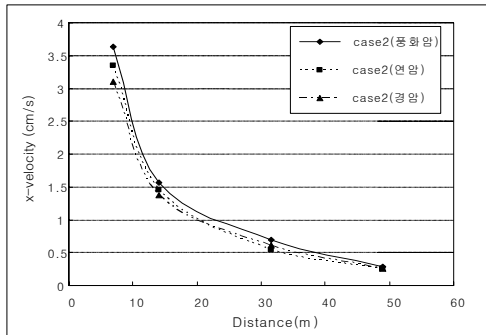
해석결과 Case 1, 2 및 3 모두 2D 이격 시에도 풍화암에서의 진동속도가 더 큰 결과를 보였지만 3.5D 이상 이격될 경우는 지반과 관계없는 진동속도의 경향을 보였다. 스프링라인부, 바닥부에 발파하중을 적용하였을 경우도 크라운부와 마찬가지로 1D~2D 이격 시에는 풍화암, 연암, 경암의 순서로 진동속도가 더 큰 결과를 보였지만 3.5D 이상 이격되는 경우는 지반과 관계없는 경향을 보였다. 그러나 바닥 1D 하부에 발파하중을 적용하였을 경우는 풍화암에서는 모든 거리에서 진동속도가 컸지만 연암, 경암의 경우는 두드러진 경향은 나타나지



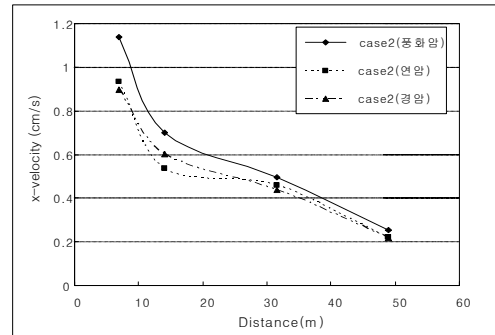
(a) 크라운부 발파하중 적용 시



(b) 스프링라인부 발파하중 적용 시

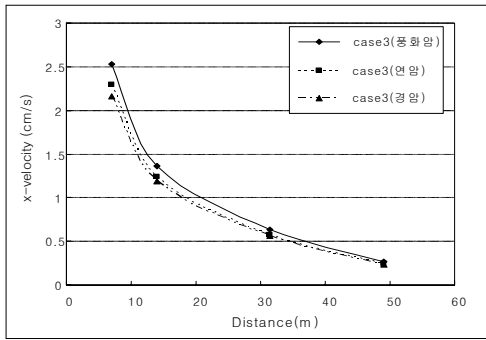


(c) 바닥부 발파하중 적용 시

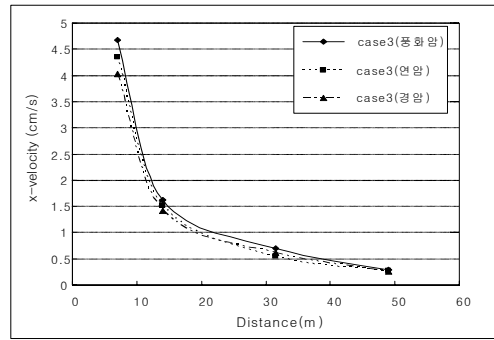


(d) 바닥하부 1D 발파하중 적용 시

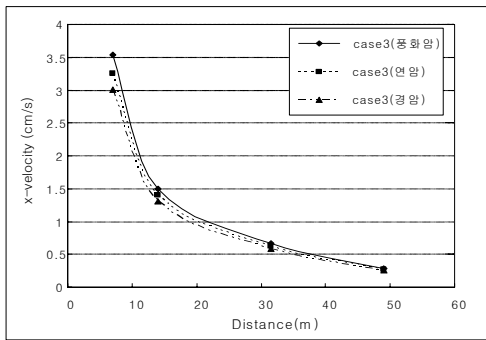
그림 10. 지반변화에 따른 거리별 진동속도(Case 2, h2=21.6 m)



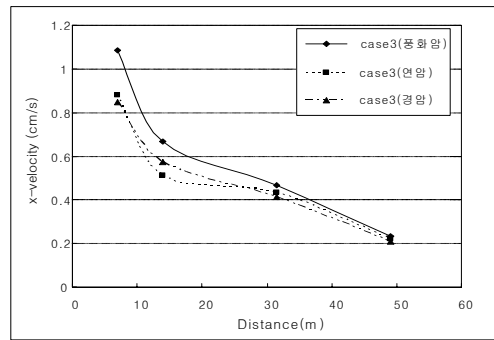
(a) 크라운부 발파하중 적용 시



(b) 스프링라인부 발파하중 적용 시



(c) 바닥부 발파하중 적용 시



(d) 바닥하부 1D 발파하중 적용 시

그림 11. 지반변화에 따른 거리별 진동속도(Case 3, h2=28.6 m)

않았다.

지반강성이 증가함에 따라 1 cm/sec 진동속도를 보이는 발파위치 거리가 다소 감소함을 보였다. 라이닝 콘크리트의 진동속도는 풍화암이 연암, 경암의 경우보다 더 큰 결과를 보였는데, 이는 탄성조건의 동해석을 수행한 결과로 판단된다. 발파진동을 점하중으로 환산하여 작용하였으므로 기반암이 풍화암인 경우 동탄성계수가 작아 변형이 증가하고 속도는 변위의 미분 값이므로 진동속도가 크게 발생한 것으로 판단된다. 또한, 감쇠비를 지반별로 동일하게 적용한 결과도 작용한 것으로 판단된다. 고결도가 낮은 풍화암은 경우는 절리 등에 의한 재료감쇠에 의해 낮은 탄성파속도를 나타내는 것으로 추정되나, 지반별 동일한 감쇠비를 적용한 것이 풍화암에서 높은 진동속도를 나타내는 결과로 나타난 것으로 판단된다. 현장시험에 의한 지반물성치 산정방법으로는 감쇠비를 구할 수 없으므로 신뢰성 있는 지반진동해석을 수행하기 위해서는 실내시험에 의한 지반특성별 감쇠비를 산정하

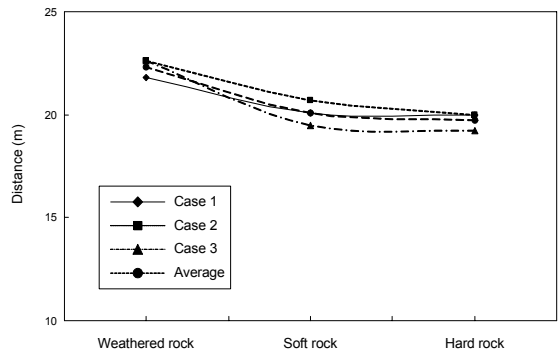
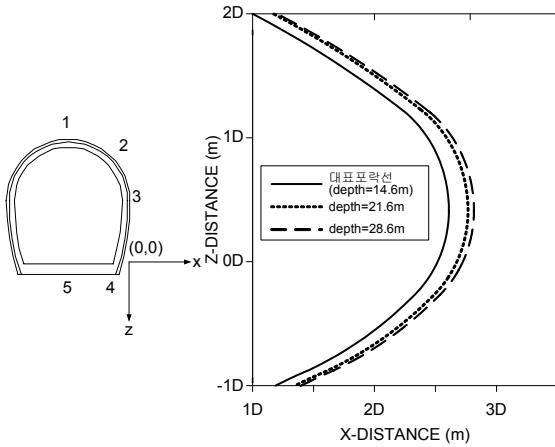
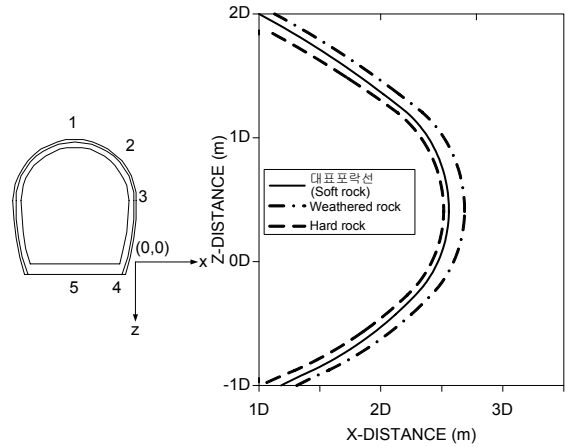


그림 12. 진동속도 1 cm/sec일 때의 지반에 따른 굴착이격거리 (스프링라인부)

여 적용하는 것이 타당할 것이다. 이상에서 살펴본 지반별 진동속도 변화 그래프를 바탕으로 하여 본 논문에서 적용한 진동제어기준인 진동속도 1 cm/sec인 경우의 굴착이격거리를 나타내면 그림 12와 같이 나타난다.



(a) 심도에 따른 포락선의 변화



(b) 지반에 따른 포락선의 변화

그림 13. 심도와 지반에 따른 포락선의 변화

4.3 터널심도 및 지반강성에 따른 진동영향특성

본 논문에서 적용한 진동제어기준인 진동속도 1 cm/sec 인 경우의 발파위치 포락선(그림 1)에 심도 및 지반강성의 영향을 포함하여 정리하면 그림 13(a)에서와 같이 심도에 따라서는 약간 증가함을 보였다. 한편 지반에 따라서는 그림 13(b)에서와 같이 풍화암이 가장 크고 연암 경암에서 이보다 작아 짐을 보였다.

5. 결 론

운영중인 지하철 터널과 근접하여 발파굴착을 수행하는 경우에 대해 터널라이닝에 미치는 동적영향(진동속도)을 수치해석기법을 이용하여 분석하였다. 본 연구에서는 국내의 기준을 토대로 하여 터널구조물의 진동속도를 1 cm/sec로 가정하여 수치해석 결과를 분석하였으며, 터널심도 및 지반특성에 대한 파라미터 스터디를 실시하여 진동영향특성을 분석하였다. 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 운영중인 지하철 터널구조물의 심도를 감안하여 터널의 심도와 지반조건을 변화시켜 파라미터 스터디를 수행한 결과, 1D 이내에서는 심도증가에 따라 진동속도는 감소하는 결과를 보였지만, 1D 이상 이격되면 심도증가와 무관하고 지반의 고유진동수의

영향을 받는 것으로 나타났다.

2. 탄성해석 수행시감쇠비를 일정하게 두면 지반강성이 커질수록 라이닝 진동속도가 작게 나타날 수 있으므로 발파진동해석시 지반특성에 부합하는 감쇠비 적용이 중요하다.
3. 본 해석에서 적용한 진동제어기준 1 cm/sec에 대한 발파이격거리는 토피 및 지반 강성에 따라 크게 차이가 나지 않는 것으로 확인되었다. 특히 이격거리가 3.5D 이상이면 변화영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 건설핵심기술 연구개발사업(C104A1010001-05A0501-00210)으로 연구되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 문훈기, 신종호 (2008), “발파진동이 터널구조물에 미치는 영향”, 한국터널공학회논문집, Vol. 10, No.3, pp. 207-219.
2. 서울지하철 건설본부 (2008), “서울지하철 지반조사 보

고서’.

3. Lysmer, J. and Wass, G. (1972), “Shear waves in plane infinite surface”, *Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol.98, No.1, pp. 351-358.
4. Siskind, D. E. (2000), *Vibrations from blasting*. International Society of Explosive Engineers. Cleveland, OH (USA).
5. Starfield, A. M. and Pugliese, J.M. (1968), *Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charge: a comparison between a computer model and field measurements*. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 5, pp. 65-77.