

발파에 의한 터널 굴착시 RMR값에 따른 인접구조물의 동적 영향

Dynamic Influence of Tunnel Blasting on Adjacent Structures for Various RMR Values

허재록¹⁾, Jae-Rok Heo, 황의석²⁾, Eui-Seok Hwang, 이봉열³⁾, Bong-Youl Lee 김학문⁴⁾, Hak-Moon Kim

¹⁾ (주)한구 Eng. 지반공학부 사원, Engineer, Han-Gu Engineering Co., Ltd.

²⁾ 단국대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dankook University

³⁾ 시지 E&C(주) 기술연구소 소장, General Manager, R&D center, C.G E&C Co., Ltd.

⁴⁾ 단국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dankook University.

SYNOPSIS : This study presents the influence of blasting-induced vibration on the adjacent structures in rocks of various RMR values. 3D finite element analysis was performed to simulate the behaviour of tunnel and adjacent structures during rock excavation. The blast loadings were evaluated from the blasting pressure which is depending on the type and amount of explosive charges.

Influencing factors for the stability of adjacent structures and ground conditions were reviewed in terms of structural dimensions and RMR values. The stiffness and load of adjacent structures are modeled in the numerical analysis to investigate blasting effects of the size of adjacent structures.

The vibration velocity and maximum particle velocity was increase sharply when the RMR value changed from 30 to 50. The effect of particle velocity was minimized at the width of structure become 2 times of tunnel diameter.

Key words : blasting, blasting vibration, tunnel, RMR, dynamic influence

1. 서론

발파 진동을 추정하기 위한 지금까지의 경험적인 방법은 여러 가지 조건 중 발파원으로부터 측정지점까지 거리와 장약량 및 개략적인 지반조건(일축압축강도)을 변수로 사용하였다. 이러한 경험적인 방법은 지반 조건 중 일축압축강도를 대표값으로 사용하였으나 실제의 암반의 거동 분석은 절리가 고려되어 평가가 이루어져야 할 것이다.

본 연구에서는 발파에 의한 터널 굴착시에 인접건물의 동적진동영향을 현장의 지반조건이 고려된 RMR값을 평가, 적용하여 다양한 RMR조건에 따른 진동영향을 3차원 동적 유한요소해석을 실시, 비교 분석하였으며, 발파하중은 폭약이 발파할 때 발생하는 발파압력으로 산정하였고 압력하중의 방향은 3차원 해석의 장점을 이용하여 굴진방향과 방사형 방향으로 최대한 실제와 가깝게 모사하였다. 또한 건물 형상에 따른 지반의 영향을 예측하고자 건물 폭, 층수의 변화에 따른 발파하중에 의한 최대 지반 진동 속도, 최대 지반 진동가속도 및 최대 지반변위값을 비교, 분석하였다. 수치해석을 수행하여 얻은 결과는 지표면에 작용하는 진동파의 주 성분은 표면파임을 감안하여 x, y, z 세 방향의 벡터 성분을 스칼라량으로 합성하여 적용하였다.

2. 해석조건

2.1 발파파괴 메커니즘

발파공법이 산업에 적용된 후 발파가 주변구조체에 미치는 영향에 대해 많은 연구가 진행되어왔다. 그 중 Hino(1956)와 Duvall 등(1957)은 암반이 장약으로부터 구형형상으로 전파되어나가는 충격파의 반사에 의해서 주로 파괴가 되어진다고 제안하였으며 이 연구는 Starfield 등에 의해 검증되었다. Fourney (1981)는 기존의 일차원응력과 전달에 대한 인장 파괴 메커니즘을 이차원에서의 응력과 파괴메커니즘으로 제안하였으나, Langefors & Persson등(1960)은 응력파를 무시하고 발파공에 가해지는 기체압을 파괴현상의 원인으로 재조명하였고 Coursen(1979)은 실험을 통하여 장약공에서의 높은 기체압력으로 장약공 주면의 파괴현상이 발생된 것임을 검증하였다.

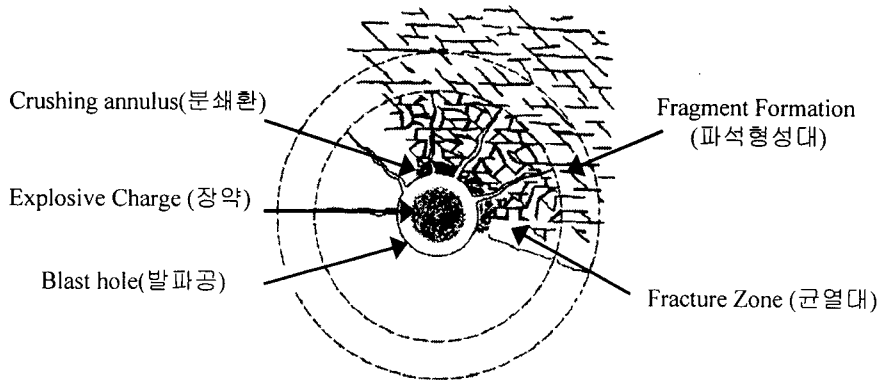


그림 1. Coursen 에 의해 제안된 기체압 파괴메커니즘 형상

이와 같이 기존연구에 의해 발파하중은 장약공에서 높은 기체압력으로 장약공을 파괴시키는 것으로 판단되며, 따라서 본 연구에서는 발파하중을 기체압력으로 모사하였다.

2.2 Mohr-Coulomb의 파괴조건계수(C_m , ϕ_m)

수치적 모델링을 통한 암반구조물 해석 또는 안정성 평가에서 암석의 파괴식으로, Mohr-Coulomb의 조건식(이하 MC조건식)을 많이 사용한다. MC조건식은 암석의 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)이. 파괴변수이다. 이러한 파괴식들을 수치해석에 적용하기 위해서는 원위치 암반에 대한 현장시험을 통하여 파괴조건계수를 결정하거나 실내실험치를 현지암반조건으로 변환하여 적용하여야 한다.

암석의 점착력과 내부마찰각은 RMR과 연계한 변환 방법들이 많이 이용되고 있다. 그러나 이러한 방법들은 암석의 종류와 관계없이 암반공학적 분류 또는 현장실험값과 실내실험값을 비교 분석하였기 때문에 암석별로 신선암에 대한 점착력과 내부마찰각의 크기가 조사되어야 한다. Trueman은 기 발표된 감소지수(Reduction factors)들을 분석한 후 RMR에 기초한 현지암반의 점착력(C_m)과 내부마찰각(ϕ_m)의 관계를 식 (1), 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$C_m \text{ (MPa)} = 0.25 \exp(0.05 \cdot \text{RMR}) \quad (1)$$

$$\phi_m \text{ (}^\circ\text{)} = 0.5\text{RMR} + 5^\circ \quad (2)$$

2.3 암반의 변형계수

현지암반에 대한 변형계수를 RMR을 이용하여 현지암반값으로 변환하기 위한 연구가 Serafim(1983), Bieniawski(1978)등에 의하여 수행되었다. 이들식 중 Serafim 등의 식 (3)은 RMR이 50 이하일 때, Bieniawski의 식 (4)는 RMR이 50 이상인 현장에서만 적용할 수 있다.

$$E_m = 10 \left(\frac{RMR - 10}{40} \right) \quad (3)$$

$$E_m = 2 RMR - 100 \quad (4)$$

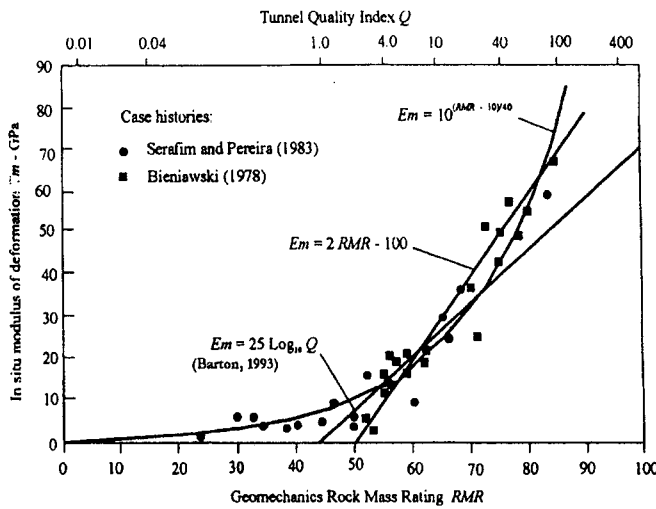


그림 2. RMR에 따른 암반의 변형계수 추정 그래프

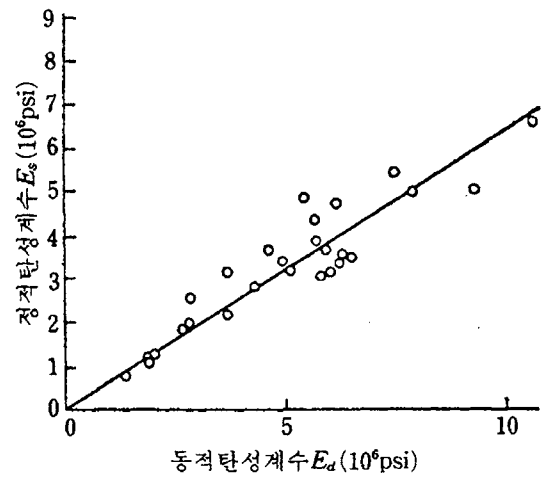


그림 3. 동적 변형계수 E_d 와 정적 변형계수 E_s 와의 관계

대부분의 시험이 제한된 범위에 대해서만 측정되는 단점이 있고 탄성과탐사는 국부적인 암반의 변화를 파악하기엔 곤란하다. 그리고 육안 조사에 의해서 구하는 변형계수 값은 RQD나 RMR 점수와 암석 시험자료로부터 추정하는데, 이는 실내시험 수치와 정확도와 기존 경험치가 지질특성에 부합되는가는 의문시 되는 점이다. 그리고 $E_{dynamic}$ modulus와 E_{static} modulus는 신선암에서는 비슷하나 풍화되면 $E_{dynamic}$ modulus가 E_{static} modulus 보다도 커지는 경향이 있다. 이에 Avendissian - Wood(1968)는 동적 변형계수 E_d 와 정적 변형계수 E_s 의 관계를 식 (5), 그림 3과 같이 제안하였다.

$$E_d = \frac{E_s - 0.209 \times 10^6}{0.595} \quad (5)$$

3. 해석방법

3.1 수치해석의 개요

본 연구는 암반 지반에서의 터널 굴착시 발파에 따른 상부구조물의 진동영향을 예측하기 위하여 최대 진동속도가 발생될 것으로 예상되는 막장의 위치(1.5D)와 터널심도(1.5D)를 고정시킨 3차원 탄소성 모델에 상부 구조물의 형상을 높이 2층에서 8층까지, 폭 10m에서 60m까지 변화시켜 RMR등급에 따른 매개변수의 변환연구를 수행하였다. 또한, 표 1과 같이 수치해석을 위한 암반의 물성치를 입력하였고, 동적 변형계수 E_d 에서 Lamé 상수를 고려하여 압축파 속도, 전단파 속도를 산정하였다.

표 1. 지반 물성치 산정

RMR 등급	I	II	III	IV	V
점착력 c (MPa)	22.5	8.3	3.05	1.12	0.041
내부마찰각 ϕ (°)	50	40	30	20	10
동적탄성계수 E_d (GPa)	130.94	63.71	13.29	3.16	1
동적 전단탄성계수 G_d (GPa)	52.38	24.89	5.11	0.68	0.37
동적 체적변화계수 K_d (GPa)	87.29	48.27	11.08	1.77	1.11
포와송비 ν	0.25	0.28	0.3	0.33	0.35
단위중량 (t/m^3)	2.7	2.6	2.5	2.3	2.3

3.2 발파하중 산정

본 해석에 사용된 발파하중은 매질이 공기임을 감안하여 하중을 압력으로 표현하였다. 발파하중을 압력으로 변환하는 식은 Jones, Hino(1956)가 제안한 식(6)과 식 (7)을 사용하였다.

$$P_D = 0.000424 \nu^2 \rho_e (1 - 0.153 \rho_e + 0.193 \rho_e^2) \quad (6)$$

$$P_D = (2.325 \times 10^{-7}) \rho_{\text{vod}}^2 \quad (7)$$

여기서, ρ_e : 폭약밀도
 ν_e : 폭속

표 2. 폭약의 종류에 따른 폭핑압력

폭약 종류	폭약 밀도 (g/cc)	폭속 (m/s)	폭핑압력 (g/cm ²)	비고
Gelatin Dynamite	1.35	5,500	1,071,272	적용
Emulan	1.24~1.27	6,000	1,982,912	
ANFO	0.9	3,300	423,304	

세계 화약류 사용추세를 볼 때 GD(Gelatin Dynamite)를 가장 많이 쓰며, 폭속이 크고 폭약밀도의 크기가 장약이 밀장전된다는 본 연구의 가정에 부합하여 GD(Gelatin Dynamite)의 폭약밀도 및 폭속 값을 사용하였다.(표 2. 참조)

$$P_a = \frac{2\rho_a C_a}{\rho_a C_a + \rho_e v_e} \times P_D \quad (8)$$

여기서, P_a : 최대 압력(정적상태)

ρ_a : 현재의 공기밀도

C_a : 공기중의 충격파(P 파)의 전파속도

이 값을 Starfield가 1968년에 제안한 압력하중식을 사용하여 동적하중(P_t)으로 환산하면 식 (9)와 같다.

$$P_t = 4 \times P_a \times [\exp(-\frac{Bt}{\sqrt{2}}) - \exp(-\sqrt{2} Bt)] \quad (9)$$

여기서,

B : 16338(하중상수)

t : 발파에 의한 하중지속시간(sec)

이 동적압력하중으로 변환한 값은 매질에 전달시 5~15%정도 전달된다. 이는 Langefors가 파괴대상물이 암반인 경우에 폭약이 갖는 에너지 중 폭속으로 대표되어지는 동적효과는 약 15%라는 데에 기인한다. 그러므로 최대값 15%정도의 진동발생에너지로 가정하여 1194 t/m²를 입력자료로 적용하였다.

발파하중이 터널 막장면에서 전달되는 형태는 시간이력에 따라 그림 4와 같이 증가하였다가 감소하는 형태로 하중을 가하였으며 그림 5.과 같이 방사형과 Z방향으로 동시에 주는 것으로 나타내었다. 또한 그림 5에서 시간이력 해석시 시간간격은 정적해석 조건에서 eigen value 1st mode 값이 주기(T)가 0.62, 10th mode 주기가 0.15 임을 감안하여 10th mode 주기의 약 1/150인 0.001초로 하고 해석시간은 발파시수 micro-sec초 정도 걸리므로 시간간격 100로 두어 0.1sec안에 발파가 일어나는 것으로 가정하였다.

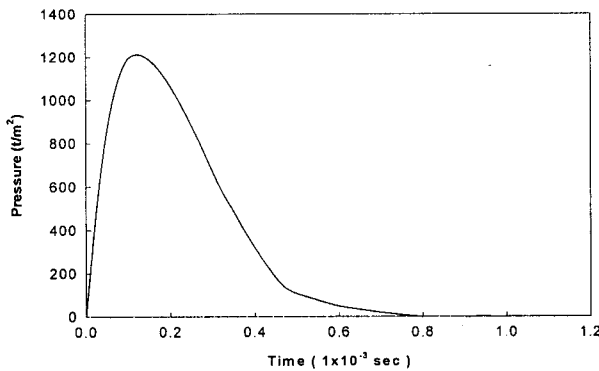


그림 4. 시간이력에 따른 발파하중 입력값

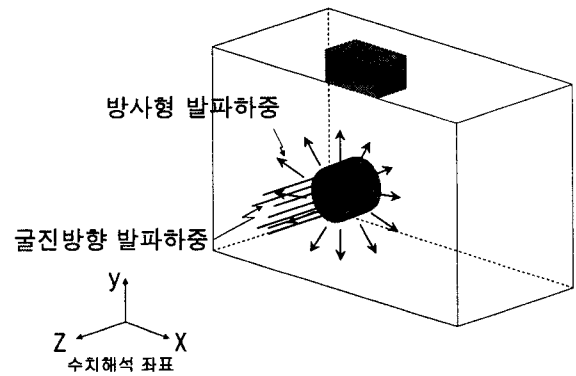


그림 5. 터널내의 발파점에서 발파하중 작용방향

3.3 수치해석 모델링

그림 6.은 본 연구에서 수행한 3차원 유한요소 해석 요소망으로 터널 굴착으로 인한 영향에 대한 고려는 중, 횡으로 약 10D를 해석영역으로 하고 심도는 4D를 해석영역으로 설정하였다.

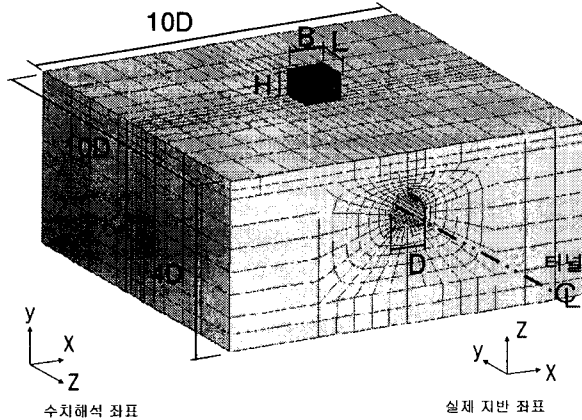


그림 6. 수치해석을 위한 3차원 유한요소망
(터널직경 : D, 10m)

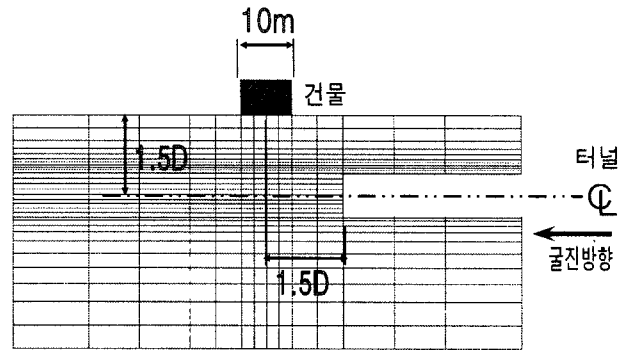


그림 7. 횡방향 단면도 (yz평면)

터널 굴착방법은 발파시 진동 및 하중이 방사형으로 전달되는 것으로 표현하기 위해 전단면 굴착에 의한 발파압력을 가하였다.

또한, 터널의 주 지보재인 슛크리트와 락볼트는 발파시에 영향이 미치는 내부라이닝범위가 약 100m이므로 고려하지 않았다.

3.4 상부 구조물의 모델링

상부 구조물은 파의 반사와 전달을 고려하여 지반과 같은 요소로 모델링하여 콘크리트 물성치를 사용하였다. 또한, 건물전체에 중력을 주어 발파진동이 전달시 영향을 보고자 하였다. 건물은 층당 3m로 일반적으로 지반에 작용하는 하중을 층당 $1.5t/m^2$ 로 적용하였다.

4. 해석에 의한 진동 영향 결과 및 분석

4.1 건물 폭의 변화에 따른 최대진동속도

그림 8은 건물 폭을 변화시켰을 때 건물 하부의 최대진동속도를 나타낸 것으로 전체적으로 RMR이 증가함에 따라 진동속도가 증가하며 건물이 없을 경우에는 상당히 큰 진동속도값을 나타내고 있으나, 건물이 상부에 존재할 경우 50%이하로 감소하였다.

건물이 상부에 존재할 경우 건물의 강성과 하중으로 인하여 지반의 진동속도가 작게 나타났다. RMR이 30까지는 진동속도가 작게 나타남을 알 수 있었으며, RMR이 30에서 50으로 증가함에 따라 진동속도가 급격히 증가하고, RMR이 50이상에서는 RMR이 증가함에 따라 진동속도값이 수렴함을 알 수 있었다.

RMR이 50이상에서는 건물 폭이 증가함에 따라 진동속도값의 변화가 작게 나타났으며 특히, 건물 폭 10m를 기준으로 하여 건물 폭 20m, 40m, 60m의 진동속도 값은 각각 87%, 85%, 83%로 나타났다.

4.2 건물 높이의 변화에 따른 최대진동속도

그림 9는 건물 폭을 변화시켰을 때 건물 하부의 최대진동속도를 나타낸 것으로 전체적으로 RMR이 증가함에 따라 진동속도가 증가하며 건물이 없을 경우에는 상당히 큰 진동속도값을 나타내고 있으나, 건물이 상부에 존재할 경우 40%이하로 감소하였다.

RMR이 30까지는 진동속도가 작게 나타남을 알 수 있었으며, RMR이 30에서 50으로 증가함에 따라 진동속도가 급격히 증가하고, RMR이 50이상에서는 RMR이 증가함에 따라 진동속도값이 수렴함을 알 수

있었다.

RMR 50이상에서는 건물 폭이 증가함에 따라 진동속도값의 변화가 작게 나타났으며 특히, 건물 높이 2층을 기준으로 하여 건물 높이 4층, 6층, 8층의 진동속도 값은 각각 89%, 86%, 81%로 나타났다.

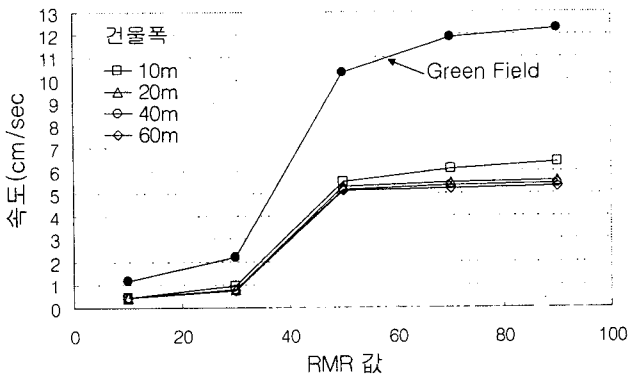


그림 8. 건물 폭과 RMR값의 변화에 따른 건물 하부의 최대진동속도

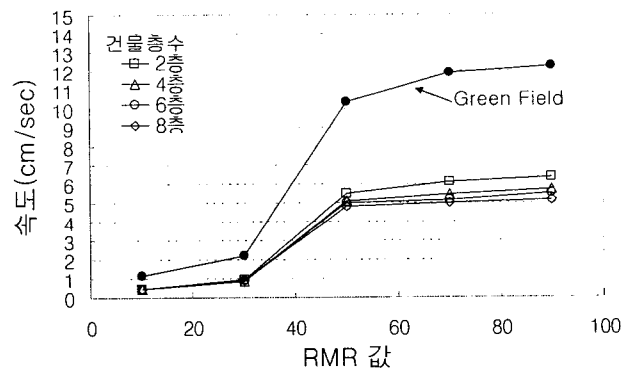


그림 9. 건물 높이와 RMR값의 변화에 따른 건물 하부의 최대진동속도

4.3 건물 하부의 진동영향 분포

그림 10, 11은 RMR III등급에서 건물의 폭, 높이의 변화에 따른 건물 하부의 진동속도를 나타낸 것으로 그림 10.과 같이 건물 폭이 변화할 경우 건물 중심에서는 건물이 없을 경우 보다 있을 경우 작은 진동속도를 나타내었으며, 건물 폭 10m에서는 건물 중심에서 외곽으로 갈수록 진동 속도가 증가하였다. 또한 건물 폭 20m에서는 중심에서 외곽으로 일정한 진동속도를 나타내었고, 그 이상에서는 Green Field와 유사하게 나타나고 있다. 그림 11과 같이 건물의 높이를 변화시켰을 경우는 건물 중심에서의 진동속도는 건물이 없을 경우보다 작았으며, 건물 외곽으로 갈수록 점차적으로 커지나, 그 이후에는 Green Field와 비슷한 진동속도를 나타내었다. 곡선 형태는 건물의 높이와 관계없이 유사한 형태를 나타내고 있다. 또한 두 그림에서 폭 10m, 2층인 건물에 지하 1층 고려한 경우의 진동속도는 그 외의 경우보다 작게 표시되는데 이는 건물의 하중으로 인한 것으로 판단된다.

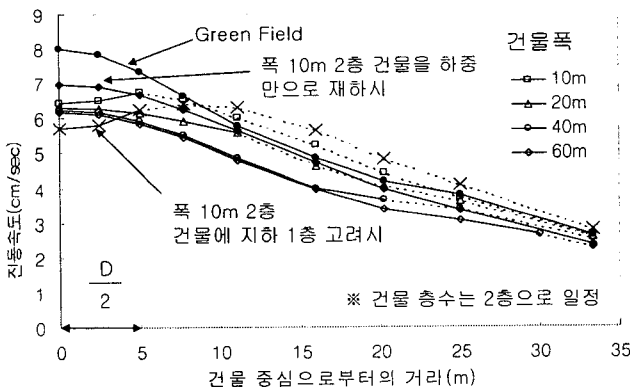


그림 10. 건물의 폭에 따른 건물 하부의 진동속도

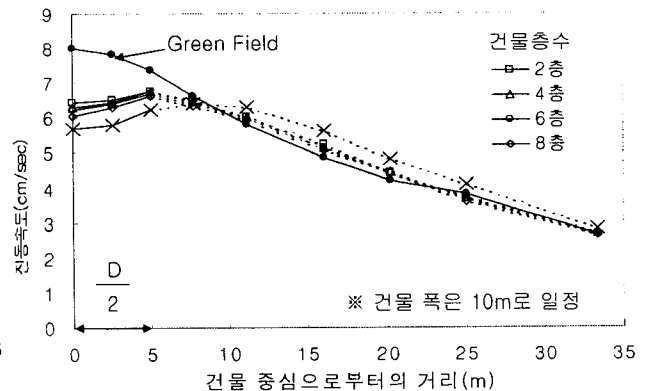


그림 11. 건물의 높이에 따른 건물 하부의 진동속도

그림 10에서 건물 폭 10m일 때 중심에서 외곽으로 갈수록 진동속도가 증가하는 이유는 건물 중심으로부터 외곽으로의 거리가 상대적으로 짧아서(5m) 발파진동의 영향이 건물 바깥으로 미친 것으로 판단되며, 건물 폭 20m이상에서는 건물의 끝까지 완만하게 감소하다 건물 바깥으로 급격히 감소하는 것으로

보아 건물 폭이 터널 직경의 2배 이상의 건물에서는 중심으로부터 건물 외곽으로 진동속도가 감소함을 알 수 있었다. 또한 폭 10m, 2층 건물을 하중만으로 작용 시켰을 경우에는 강성과 하중으로 작용시킨 경우보다 중심에서의 진동속도는 크게 발생하였고 전체적인 경향은 Green Field와 유사하게 나타났다. 또한, 그림 11에서와 같이 건물의 높이는 건물 하부의 진동 속도에 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다.

5. 결 론

- (1) 터널 굴착시 발파에 의해 건물에 전달되는 진동속도, 진동가속도 및 변위는 건물이 없는 지반에서의 값 보다 작게 나타남을 알 수 있었다. 그러므로, 설계시에 상부 건물의 강성과 하중을 동시에 입력시킴으로서 보다 정확한 해석이 수행될 것으로 사료된다.
- (2) RMR 등급에 따른 건물에 작용하는 최대진동속도 및 최대진동가속도는 RMR값이 30에서 50으로 변화함에 따라 급격히 증가하는 경향을 나타내었으며, 50 이상의 비교적 강성이 큰 지반에서는 진동속도 및 진동가속도가 일정한 값으로 수렴됨을 알 수 있었다.
- (3) 건물 폭 10m일 때 중심에서 외곽으로 갈수록 진동속도가 증가하였으며, 건물 폭이 터널 직경의 2배 이상일 경우에는 건물에서는 건물중심으로부터 건물외곽으로 갈수록 진동속도가 급격히 감소함으로써 폭이 작은 건물이 보다 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

1. 김문겸, "지중발파하중의 2차원 및 3차원 모형화의 비교연구", 대한 토목학회논문집, 2000
2. 박재훈, "3차원 터널해석시 인접구조물에 미치는 발파진동", 단국대학교 석사학위 논문, 2001
3. Charles. H. Dowding (1996), "Construction Vibrations", Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, 1996
4. Carlos Lopez Jimero, "Drilling and Blasting of Rock", Willey
5. U. Langefors, B. Kihlstrom "The modern technique of Rock Blasting"
6. Duvall WI, Fogelson DE. Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibration. Report of Investigations 5968, U. S. Bureau of Mines, Washington DC, 1962