

# 터널내 열차주행시 절리영향을 고려한 지반진동 Groundborne Vibration from Moving Train Loads in Tunnels Considering the Effect of Joints

이 종 세\*      최 기 석\*\*  
Lee, Jong Seh      Choi, Gi Seok

---

## ABSTRACT

The groundborne vibration from moving train loads in tunnels could cause damages on structures and make people uneasy. With an aim at developing basis for effective screening measures, this paper attempts to study the characteristics of propagation and attenuation of groundborne vibration from moving train loads in tunnels considering the effect of joints. The wave propagation problem is modeled by a commercial code FLAC and the results are compared to those from using a finite-element-based code DIANA. It is shown that the groundborne vibration is affected significantly by the location and direction of joints.

---

### 1. 서론

열차는 대량수송이 가능하고 경제적이므로 대도시의 교통문제를 해결하기 위해서 아주 효율적인 대중교통수단이다. 그러나 열차가 터널을 주행할 때 상당한 진동을 유발하며, 크기가 커질 경우 터널내 과도한 응력 및 변위가 발생하여 철도구조물이 파손될 뿐만 아니라, 심한 경우 인접 구조물에 균열을 일으키고 주민들의 생활에도 불편을 주게 된다. 더욱이 최근에는 고속철도를 포함해 열차의 고속화로 인하여 열차주행에 따른 지반진동이 증가하고 있으며, 환경에 대한 사회적 관심의 증가로 지반진동에 의한 구조물의 파손 및 주민들의 불편에 대한 민원사례가 국내외적으로 빈번히 보고되고 있는 실정이다. 따라서 터널내 열차주행시 발생하는 지반진동에 대한 적절한 방진대책이 요구되고 있으며, 이를 위해서는 터널내 열차주행에 따른 지반진동전파의 특성이 파악되어야 한다.

열차운행으로 인한 지반진동에 관한 연구는 간헐적으로 보고되고 있으나(Chau et al., 1992;

---

\* 정회원 · 한양대학교 토목환경공학과, 교수  
\*\* SK건설사원

Hung and Yang, 2001) 문제의 특성상 대부분의 연구가 실험과 계측에 의존하고 있다. 수치해석적 연구도 종종 보고되고 있으나(변재양 등, 1998), 대부분의 연구가 지반내에 존재하는 불연속면은 고려하지 않았다. 그러나 실제 터널이 시공되는 지반 특히 암반은 불연속면이 존재하는 경우가 많으며 이러한 불연속면이 존재하는 암반내에서의 응력파의 전파거동에 대한 명확한 규명이 이루어지지 않은 상태이다. 이에 본 연구에서는 터널내 열차주행시 불연속면, 즉 절리면의 영향에 따른 응력파의 전파특성을 파악하고 지반진동에 대한 절리면의 영향을 고찰하기 위해 수치해석을 수행하였다. 지하구조물의 동적거동해석에 널리 사용되는 상용프로그램인 FLAC(Itasca Consulting Group, 1996)을 사용하여 반무한영역을 모형화 하였으며, 열차하중과 터널은 고속철도의 열차하중과 터널단면을 사용하였다.

## 2. 대상구조의 모형화

지반해석 문제에 많이 사용되는 FLAC을 이용하여 지반을 2차원으로 모형화하고 동적해석을 수행하여 응력파의 전파와 지반진동에 관해 연구를 수행하였다. 먼저 수치모형의 타당성을 검증하기 위하여 FLAC에 의한 결과를 유한요소법 및 경계요소법에 의한 결과와 비교하였다. 터널내 열차주행시 절리영향을 고려한 지반내 응력파의 전파형상을 고찰하기 위해 FLAC에서 제시하고 있는 계면요소를 사용하여 절리면을 구현하였으며, 수치해석 결과를 유한요소해석 프로그램인 DIANA에 의한 수치해석 결과와 비교하였다.

### 2.1 지하구조물 수치모형의 검증

수치모형의 검증을 위해 FLAC을 이용하여 구한 지반진동 값을 유한요소법 및 경계요소법을 이용하여 구한 지반진동 값과 비교하였다. 대상구조는 그림 1과 같으며, 이때 지반은 등방성 탄성지반으로 가정하였다.

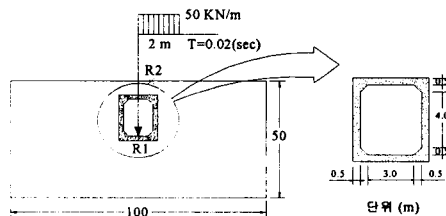


그림 1 검증을 위한 대상구조

표 1 지하구조물 검증해석 물성

	밀도 ( $kg/m^3$ )	탄성계수 ( $MPa$ )	포아송비 $\nu$
지반	2000	266	0.33
터널	20000	6000	0.25

열차에 의한 충격하중은 그림 1과 같이 폭 2 m의 터널 바닥면 위에 50 KN의 수직하중이 0.02 초 동안 재하된 후 제거되는 것으로 단순화 하였고, 요소망의 크기는 주어진 최소 파장의 1/10인 0.5 m로 가정하였다. 지반진동 측정은 R1 및 R2 수신점에서의 Y방향 변위를 측정하였다. 다음 그림 2, 그림 3 및 표 2는 해석방법별 지반진동값을 비교한 것이다.

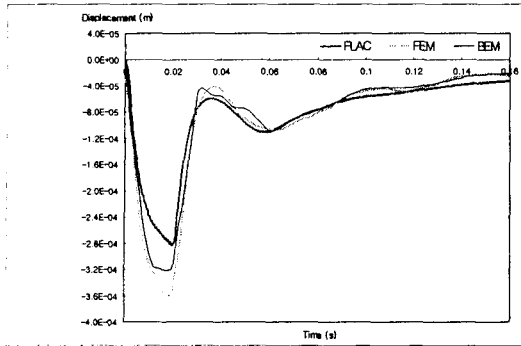


그림 2 터널 하부(R1)에서의 수직변위

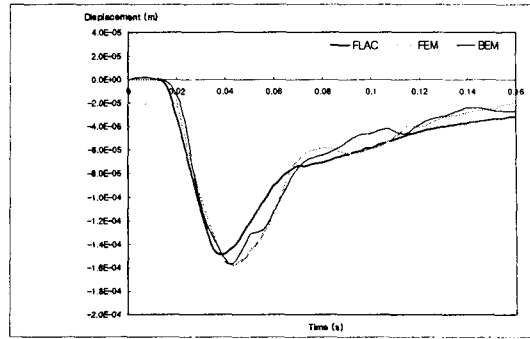


그림 3 지표면(R2)에서의 수직변위

표 2 해석방법에 따른 결과값 비교

Method	R1			R2		
	BEM	FEM	FLAC	BEM	FEM	FLAC
Displacement (mm)	0.321	0.364	0.2829	0.157	0.158	0.1489
Error (%)	0	13.40	13.47	0	0.64	5.44
Accuracy (%)	100	88.19	88.13	100	99.37	94.84

해석결과로부터 터널바닥면(R1)에서의 거동은 하중작용 직후 응답하지만 지표면(R2)에서의 응답은 파의 전파에 따른 시간의 소요로 인하여 반응이 늦어짐을 알 수 있다. 위의 그림과 표에서 보는 바와 같이 유한차분 프로그램인 FLAC에 의한 지반내 터널 모형의 해석결과는 경계요소법이 나 유한요소법에 의한 최대변위값과 거의 유사하게 나타남을 알 수 있고 동적해석에 의한 전체거동의 형태가 유사함을 알 수 있다. 이로부터 FLAC에 의한 동적해석모형이 타당함을 확인할 수 있다.

## 2.2 절리모형의 검증

일반적으로 터널 굴착대상인 암반은 불균질하고 절리, 단층 등의 불연속면이 존재하는 경우가 많으며 이때 주변지반의 거동은 불연속면의 분포형태 및 특성에 의해 달라진다. 따라서 절리 등의 불연속면을 배제한 지반의 해석시 불연속면이 터널 및 주변지반에 미치는 영향을 정확히 파악할 수 없어 부적절한 설계를 초래 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 불연속면을 고려한 해석을 수행하기 위하여 FLAC에서 제공하는 계면요소를 사용하여 불연속면인 절리를 모형화 하였고, 모형에 사용한 요소의 타당성을 검증하기 위해 유한요소해석 프로그램인 DIANA의 결과값과 비교하였다. 그림 4는 절리의 기하학적 분포를 나타내며(유충식 등, 1999), 그림 5는 FLAC에서의 수치모형을 나타낸다. 해석 모형에서 바닥면은 X, Y방향으로 구속하였고, 0.01 GPa의 수평압을 좌·우측에서 작용시켰으며, 0.01 GPa의 수직압이 쉐기형 블록 부분에만 작용하고 있는 것으로 간주하였다. 이때 암반 및 절리를 선형 탄성 재료로 가정하였으며, 사용된 물성은 표 3과 같다.

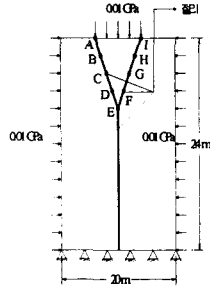


그림 4 절리 분포도

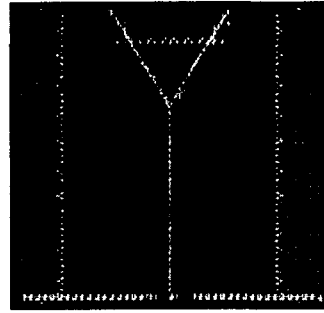


그림 5 절리 FLAC 모형

표 3 절리블록 해석에 사용된 암반 및 절리의 역학적 특성

	$E$ (GPa)	$\nu$	$\gamma$ (KN/ $m^3$ )	$K_n$ (GPa/m)	$K_s$ (GPa/m)
암 반	10	0.2	23	—	—
절 리	—	—	—	100	0.1

그림 6, 7 그리고 표 4는 각 수신점에서의 X방향, Y방향 변위를 나타낸다. 그림과 표에서 FLAC의 X변위 결과는 DIANA와 거의 일치함을 알 수 있고, Y변위 결과는 약간의 차이가 나지만 거동 형상이 아주 유사하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 차이는 각각의 수치해석 프로그램상에서 절리면을 형성하기 위한 방법들의 차이로 판단되며 FLAC에서의 결과가 DIANA의 결과에 비교적 잘 일치하는 경향을 보이고 있으므로, 본 연구에서 사용한 절리 요소는 타당한 것으로 판단된다.

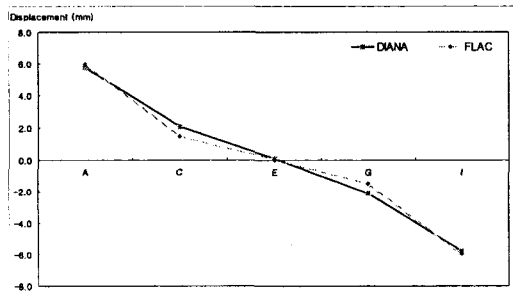


그림 6 절리블록 X 방향의 변위 비교

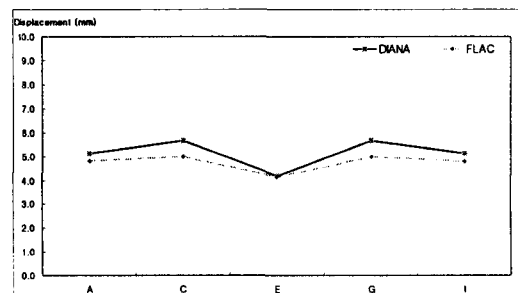


그림 7 절리블록 Y 방향의 변위 비교

표 4 절리블록 측정별 변위

	DIANA		FLAC	
	X 방향의 변위	Y 방향의 변위	X 방향의 변위	Y 방향의 변위
A	5.77	5.14	5.96	4.83
C	2.13	5.69	1.49	5.01
E	0.10	4.20	0.03	4.15
G	-2.13	5.69	-1.50	5.01
I	-5.77	5.14	-5.97	4.82

### 3. 수치해석 및 결과분석

본 장에서는 터널내 열차주행시 절리영향을 고려한 지반진동 해석을 수행하였다. 실제 고속철도 터널의 경우 대부분이 암반터널이며 암반터널의 경우 절리면이 존재할 수 있어 절리면이 없는 경우의 지반진동과는 많은 차이를 보일 수 있다. 이는 응력파가 절리면에서의 반사 및 굴절을 통해 진동의 증감이 유발될 수 있기 때문이다. 본 연구에서는 FLAC을 이용하여 절리면이 존재하는 지반내 터널을 모형화 하였으며 절리면 생성시 두가지 방향을 고려하여 해석을 수행하였다. 이때 절리면의 존재 유무에 따른 진동의 차이를 분석하여 절리면이 지반진동에 미치는 영향을 고찰하였다.

#### 3.1 하중 및 해석 모형

본 연구에서 사용된 하중은 그림 8의 K-TGV 고속열차하중(양신추 등, 1999)을 그림 9와 같이 단순화하여 사용하였다.

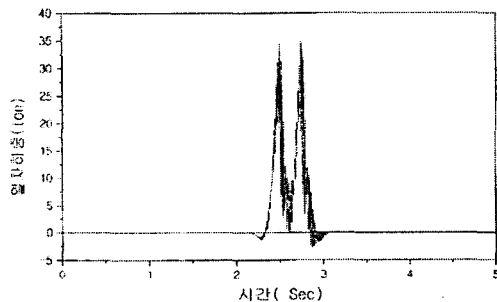


그림 8 노반이 받는 단위길이당 열차하중

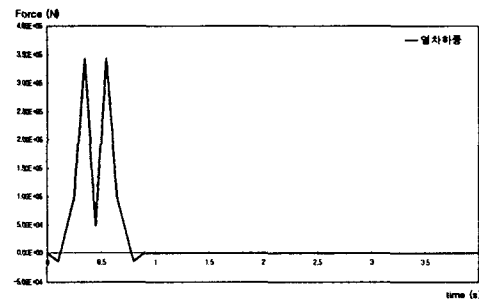


그림 9 수치해석시 사용된 고속열차 하중

현재 우리나라에서 시공중인 고속철도 터널의 대부분은 암반터널이고 암반중에서도 가장 많이 존재하는 것은 경암이다. 따라서 본 연구에서는 경암으로 지반을 모형화 하여 수치해석을 수행하였다. 터널의 모형은 한국 고속철도 건설공단에서 시공중인 복선터널의 단면으로부터 모형화하였으며, 터널의 매립깊이는 터널폭의 3배가 되는 40 m로 하였다. 절리면은 수평과 수직으로 단순화시켜 하나의 절리면만을 생성하여 절리가 없을 경우와 값의 차이를 비교하였다. 해석시 두가지 방향을 고려한 것은 암반내 절리면은 그 방향과 수에 있어 상당히 불규칙하게 존재하고 있고 이를 실제로 모형화하기란 불가능하기 때문에 수평절리와 수직절리라는 이상적인 모형을 해석하여 절리면이 진동에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 그림 10은 위의 조건들을 고려한 모형이고, 네 개의 수신점을 선정하였다. R1은 터널 바로위의 지표면, R2, R3 및 R4는 R1에서 각각 15 m, 50 m, 100 m 떨어진 지점에 위치시켜 Y방향 변위를 측정하였다. 해석시 사용된 물성은 표 5 및 표 6(Bardet & Scott, 1985)과 같다.

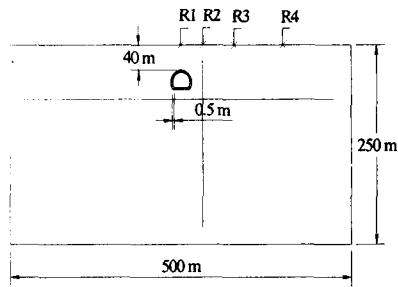


그림 10 수치해석을 위한 지반모형

표 5 지반 수치해석 모형에 사용된 물성

	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$E$ (MPa)	포아송비
지반	2550	11767.2	0.2
터널	2000	6000	0.25

표 6 절리 모형에 사용된 역학적 특성

	$K_n$ (GPa/m)	$K_s$ (GPa/m)
절리	0.2	0.075
	$\tan \theta$ (마찰각)	$c$ (점착력)
	1	0

### 3.2 지반진동응답

그림 11~14는 거리에 따른 각 수신점 R1, R2, R3 그리고 R4에서의 수직변위이다. 그림에서 절리면의 모형화 여부에 따라 지반진동은 최대변위나 최대변위가 발생하는 시간 등 전체적인 거동이 현저히 달라짐을 알 수 있다. 즉, 절리가 존재하는 지반내 열차하중으로 인해 발생하는 응력파는 절리면으로 인해 진동이 증감되어 전파되는 현상을 일으키고 있다.

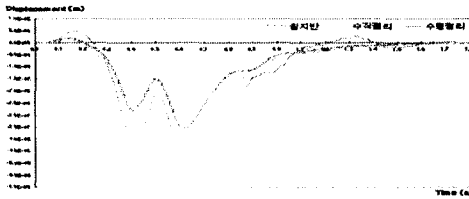


그림 11 수신점 R1 에서의 수직 변위

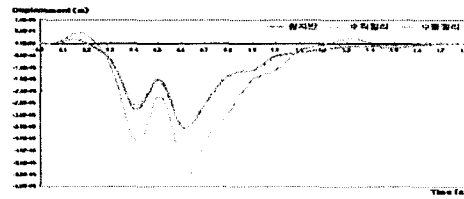


그림 12 수신점 R1 에서의 수직 변위

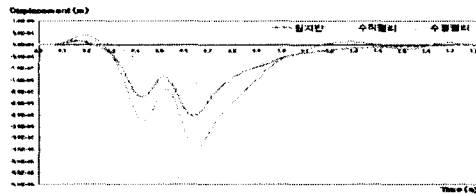


그림 13 수신점 R1 에서의 수직 변위

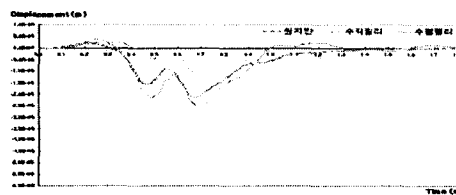


그림 14 수신점 R1 에서의 수직 변위

### 3.3 수치해석결과 고찰

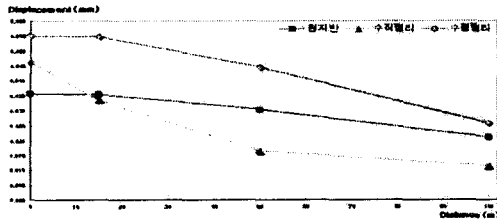


그림 15 절리암반내 수신점별 최대 수직변위

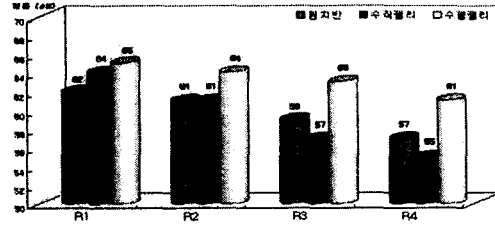


그림 16 절리암반내 수신점별 진동레벨

그림 15는 거리에 따른 최대수직변위를 나타내며, 이로부터 거리가 멀어질수록 모든 암반에 대하여 지반진동영향은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 절리면의 방향에 따라 지반진동이 증가 또는 감소됨을 볼 수 있는데, 이는 절리면에서 응력파가 반사되기 때문이다. 그림 15에서 수평절리면이 존재하는 경우 원지반에 비해 변위가 상대적으로 큼을 볼 수 있는데, 이는 응력파가 지표면과 수평절리 사이에서 반사를 일으키며 변위가 증폭되기 때문이며, 수직절리 존재시 15m이후 변위가 상대적으로 작은 것을 볼 수 있는데 이는 15m지점에 위치한 수직절리에서 응력파가 진행하지 못하고 반사되기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 터널내 열차주행시 수평 및 수직 절리영향을 고려한 응력파의 전파특성과 인근 지역의 거리에 따른 지반진동에 대해 수치해석을 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. FLAC의 Interface 요소를 사용한 절리암반모형의 해석결과를 유한요소(DIANA)모형의 결과와 비교함으로써 수치해석모형의 타당성을 입증하였다.
2. 수평절리가 존재하는 경우 절리면과 지표면에서의 응력파의 반사로 인해 지반진동이 증가됨을 볼 수 있었고, 수직절리가 존재하는 경우 절리의 방진효과로 인해 절리면 뒤의 수신점에서는 지반진동이 상대적으로 작게 발생하고 최대 지반진동이 나타나는 시간 역시 늦음을 알 수 있었다. 이로부터 응력파의 전파거동은 절리면의 방향에 있어 현저하게 달라짐을 확인할 수 있었다.
3. 실제 암반내에는 절리면이 방향과 수에 있어서 상당히 불규칙하게 존재하고 있고, 이를 현실적으로 모형화 하는데는 상당한 어려움이 따르기 때문에 보다 실제조건을 반영하여 유사하게 모형화 할 수 있도록 추가적인 연구가 필요하다 하겠다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실 사업과 교육인적자원부의 BK21 사업의 재정지원에 의해 이루어졌으며 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. 변재양, 이희현, 양신추, "터널내 고속철도 주행에 의한 지반진동의 예측", 한국고속철도건설공단, 1998.
2. 양신추, 황선근, "고속전철 궤도 및 노반개발(3차년도 연차보고서)", 한국건설기술연구원, 1999.
3. 유충식, 김종석, 이호, 이광명, "불연속 암반내 시공되는 터널의 유한요소모델링", 한국지반공학회 논문집, 제15권, 제4호, 1999, pp.221-234.
4. Bardet, J. P. and Scott, R. F., "Seismic Stability of Fractured Rock Masses with The Distinct Element Method", 26th US Symposium on Rock Mechanics, 1985, pp.26-28.
5. Chau, K. H., Balendra, T. and Lo, K. W., "Groundborne Vibrations due to Trains in Tunnels", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.21, 1992, pp.445-460.
6. Hung, H. H. and Yang, Y. B., "A Review of Researches on Ground-Borne Vibration with Emphasis on those Induced by Trains", Proc. Natl. Sci. Council. ROC(A), Vol.25, No.1, 2001, pp.1-16.
7. Itasca Consulting Group, "FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua", Version 3.3, Mineapolis, MN., 1996.