

2차원 유한요소법을 이용한 지반의 진동에 대한 동적응답해석 Vibration Analysis on the Ground by 2D FEM

황 성춘¹⁾, Seong-Chun Hwang, 박 춘식²⁾, Chun-Sik Park, 정 성교³⁾, Sung-Gyo Chung

¹⁾경주대학교 건설환경 시스템공학부 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Kyong-Ju Univ.

²⁾창원대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Chang-Won Univ.

³⁾동아대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Dong-A Univ.

SYNOPSIS : In this paper, dynamic response analysis on the ground movement applied traffic load by 2D finite element procedure has been studied. In particular, The paper deal with pointing acceleration method that applied AFIMEX Code as like 2D-FLUSH using equivalent linear method. As the result, it is found that dynamic response analysis by pointing acceleration method expressed ground movement by traffic load exactly.

KEYWORDS : pointing acceleration method, traffic load, dynamic analysis, equivalent linear method

1. 서론

최근, 도로 교통이나 철도에 의해 발생하는 지반 진동이 근방의 주민들에게 그 영향의 정도는 별도로 하고도 관심의 대상이 되어지고 있음은 부인 할 수가 없다. 특히, 도시 주거 공간의 확보가 부족한 우리 나라에서는 도로 및 철도에 인접한 건축물의 축조는 피할 수 없는 사항이며, 따라서 어쩔 수 없이 발생하는 지반 진동은 현대 사회가 가지는 중요한 환경문제의 하나로 간주 할 수가 있다.

또한, 올해 일본에서는 기차 주행시 갑자기 철도 터널의 상부 콘크리트 라이닝이 떨어져 기차의 상부에 충돌하여 엄청난 인명 피해를 초래할 수 있는 사고가 발생하였다. 현재, 이 사고에 대한 조사 결과는 부실 공사 및 유지 보수의 부실, 기차의 터널 통과시 반복되는 기차의 진동에 기인하는 동적 영향등으로 정리되어지고 있다고 한다. 이와 같은 지반 진동 문제는 대부분의 원인 제공자가 차량에 기인한다. 선진 외국의 경우에 있어서는 이와 같은 진동 문제를 정량적, 정성적으로 분석 해석하기 위해 수많은 노력이 있어 왔다. 이들 노력중에서 대표적인 해석적 방법이 FEM을 이용하는 방법이다.(구체적으로는 FEM에 의한 점가진 해석법이라고 함.) FEM에 의한 동적 해석은 몇가지의 문제점을 제외하면 자유로운 모델링, 복잡한 지반에 있어서 표현의 우수함 및 결과의 다측면적 검토등과 같은 장점을 가지기 때문에 외국에서는 많은 적용예가 있으나 국내에서는 점가진에 의한 동적 FEM해석은 거의 그 예를 찾아 볼 수가 없다. 따라서 본 논문에서는 점가진에 의한 동적 FEM을 소개하는 입장에서 철도 터널에서 발라스트(BALLAST)의 유무에 따라 기차 차량 자체의 진동이 터널에 미치는 영향을 알아 보았다.

2. 해석에 이용한 알고리즘 및 지반조건

2.1 지반조건

그림 1.은 우리 나라 대표적인 열차인 xxx호에 대한 전형적인 진동 가속도 파형으로서 침목 위에서 계측한 것이다.(즉, 8량 편성의 보통 열차로서 해당 지점의 통과 속도는 약 100km/h이다.) 또한, 그림 2.는 해석 대상 지반의 모델도로서 우리 나라에서 흔히, 접할 수 있는 산악 터널의 일반적인 예라고 할 수 가 있다. 동시에 그림 2.는 발라스트를 부설하지 않은 경우의 모델을 나타낸 것이고, 또 하나의 해석 예인 발라스트를 부설한 경우는 전체적인 지반 조건은 그림 2.에서 나타낸 것과 동일하나, 발라스트를 40cm로 부설한 것이 다른 점이라고 할 수 있다. 그리고, 표-1.과 표-2.는 해석 대상의 지반부와 터널부의 물성값을 나타낸 것이다.

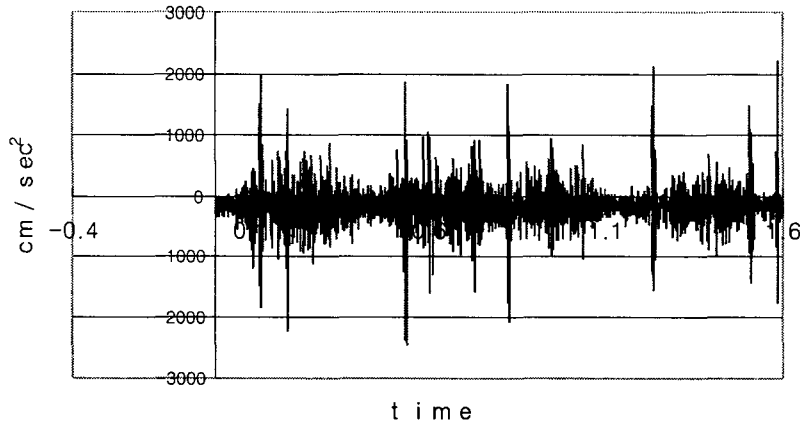


그림 1. 열차 진동 가속도 시각력

표 1. 해석지반 물성값

	단위체적중량 (t/m ³)	탄성계수 (t/m ²)	포아송비	내부마찰각 (각)	점착력 (t/m ²)
풍화토	1.9	3000	0.35	30	2
풍화암	2.0	70000	0.3	35	8
연 암	2.2	300000	0.3	35	50
경 암	2.4	500000	0.25	38	80

표 2. 해석터널부 물성값

	단위체적중량 (t/m ³)	탄성계수 (t/m ²)	포아송비	단면적 (m ²)	단면2차모멘트 (m ⁴)
라이닝	2.35	2300000	0.2	0.05	0.0000104
락볼트	7.85	21000000	0.15	0.0034	0.000000134

2.2 해석 알고리즘

본 연구에서 사용한 해석 기법은 등가 선형화 기법으로서 사실상 2차원 동적 FEM의 표준 해석 코드라고 할 수 있는 FLUSH에 상응하는 AFIMEX의 동적 옵션인 SAMBA를 사용하여 앞 절에서 설명한 실제의 열차 주행시의 가속도 파형을 철도 터널 속의 궤도 중심에 점가진시키는 알고리즘으로 진행되었다.

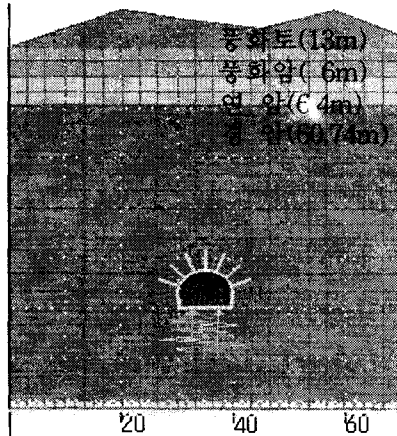


그림 2. 지반모델도

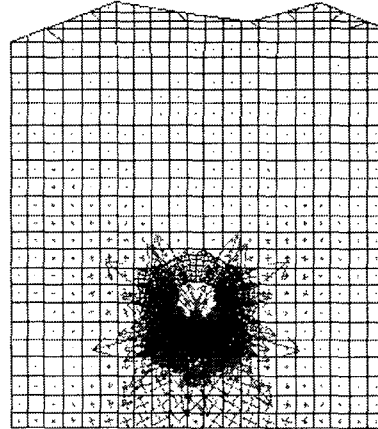


그림 3. 최대 전단응력도

2.3 해석 이론

2.3.1 기본식

지반과 구조물의 연성진동방정식은 아래와 같이 표현된다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = -(m)\ddot{y}(t) + \{F\} - \{T\} + \{B_b\}$$

여기서

- $\{u\}$: 절점의 상대변위
- $\ddot{y}(t)$: 지반에서의 입력가속도
- (m) : 각 좌표 성분방향에 대응하는 하중배수
- $[M]$: 질량매트릭스
- $[K]$: 강성매트릭스
- $\{F\}$: 자연지반에서의 구속력
- $\{T\}$: 반무한효과를 표시하는 경계력
- $\{B_b\}$: 저면 점성경계력

단, $\{F\}$, $\{T\}$, $\{B_b\}$ 는 다음식으로 표현된다.

$$\{F\} = [G]\{u\}_f$$

여기서, $[G]$: 복소강성매트릭스

$$\{T\} = ([R] + [L])(\{u\} - \{u\}_f)$$

여기서, $[R]$: 주파수에 의존하는 전달 경계 매트릭스(우변)

$[L]$: 주파수에 의존하는 전달 경계 매트릭스(좌변)

$$(B_b) = -[C_b](\dot{u}) - (u)_b$$

여기서, $[C_b]$: 저면 점성 경계 매트릭스

2.3.2 점성경계

파동에너지를 흡수하는 만족하는 경계응력조건은 다음으로 표현된다.

$$\begin{cases} \sigma = \rho V_p \cdot \dot{u} \\ \tau = \rho V_s \cdot \dot{u} \end{cases}$$

여기서, ρ : 밀도

V_p : P파의 속도

V_s : S파의 속도

주) 점성경계에 사용하는 V_p, V_s 는 복소강성을 사용하여 구한다.

기반으로부터의 상대속도를 고려하면 점성경계에서의 등가 절점력은 다음으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} F_{x_1} \\ F_{y_1} \\ F_{x_2} \\ F_{y_2} \end{Bmatrix} &= \frac{\rho l}{6} \begin{bmatrix} 2V_s & 0 & V_s & 0 \\ 0 & 2V_p & 0 & V_p \\ V_s & 0 & 2V_s & 0 \\ 0 & V_p & 0 & 2V_p \end{bmatrix} \\ &= [C_b](\dot{u}) \\ &= [C_b] \omega(u) e^{i\omega t} \end{aligned}$$

여기서, l : 수평방향의 요소의 길이

3. 해석결과 및 고찰

그림 4.는 발라스트를 부설한 터널 저면부(a)와 발라스트를 부설하지 않은 터널 저면부(b)의 Y방향 시간 응답 변위를 표시한 것이다.

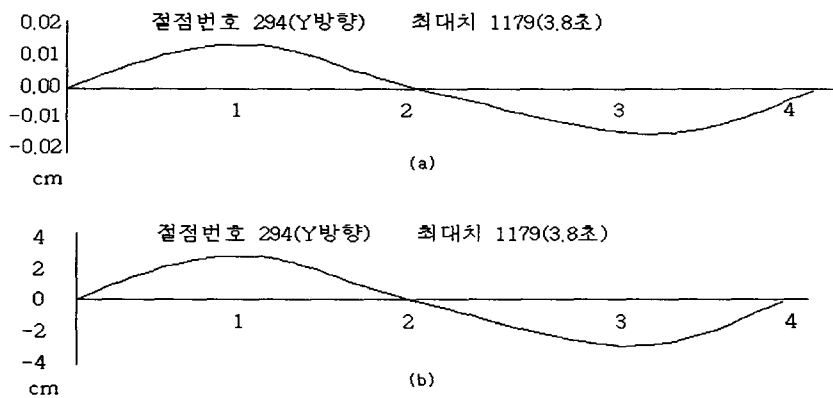
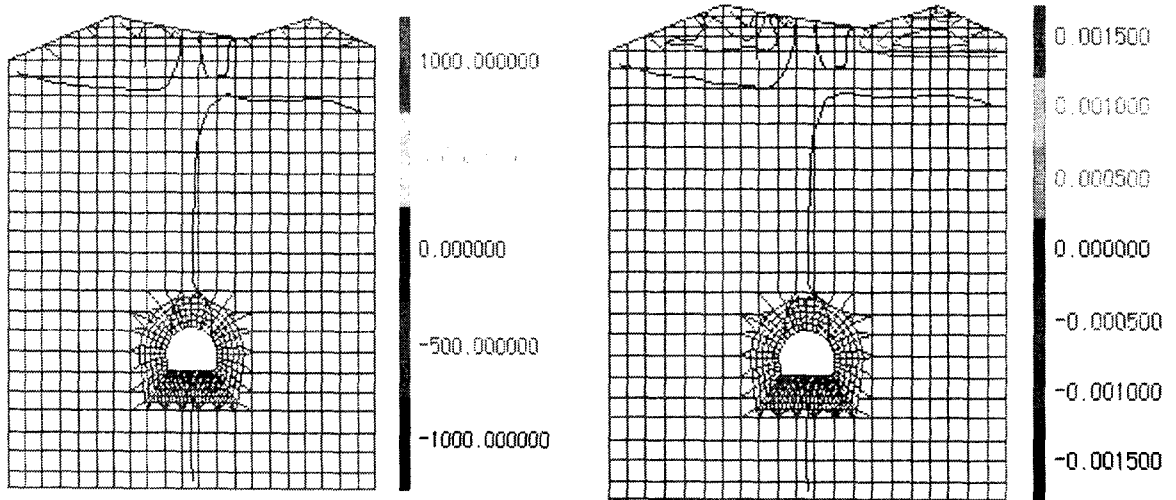


그림 4. Y방향 시간응답변위

또한, 그림 3. 및 그림 5.는 각각 최대 전단 응력도와 전단력도 및 전단 변형을 성분과 각 방향의 가속도를 보여 주고 있다. 그림 3.에서 알 수 있는 것과 같이 발라스트를 부설하지 않은 터널의 경우에 있어서, 특히 터널의 저면부에서 집중적으로 전단 응력이 발생하고 있는 것을 알 수 있다.

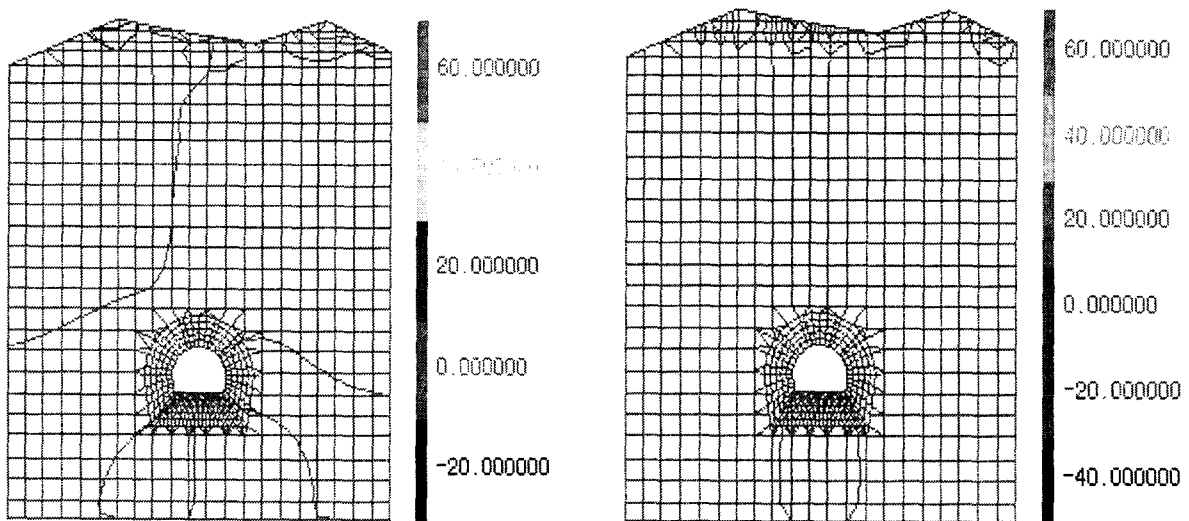
그림 4.에서는 발라스트 부설 터널의 저면부의 변위가 약 0.02cm인데 비하여 발라스트를 부설하지 않은 터널의 저면부는 변위가 약 4cm인 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터 터널에서의 진동 저감책이 얼마나 터널의 거동에 중요한 비중을 차지하는지를 여실히 알 수 있다.

그림 5.는 발라스트를 타설하지 않는 경우의 해석 예로서 전형적인 점가진 동적 변형을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 경우에 있어서도 그림 3.과 동일하게 모든 동적 거동이 터널 저면부에 집중적으로 나타남을 알 수 있다.



(a) 전단력도

(b) 전단변형률성분



(c) X방향 가속도

(d) Y방향 가속도

그림 5. 각종 콘터도

4. 결론

점가진 기법을 이용하여 철도 터널에 있어서 발라스트를 부설했을 때와 부설하지 않았을 경우의 동적 응답 해석을 수행하여 아래와 같은 일련의 결론을 도출하는 것이 가능했다.

(1) 철도 터널에 있어서 발라스트는 동적 하중에 기인하는 진동 혹은 변위의 저감책으로서 효과가 있다는 것을 확인할 수 가 있었다.

(2) 당연한 보고일 수도 있으나, 동적 전단응력은 터널 라이닝 둘레에 집중적으로 작용함을 알 수 있었다.

(3) 본 해석 결과로부터 철도 차량에 기인하는 터널의 동적인 거동도 터널의 설계 및 유지관리의 중요한 요소로서 취급할 필요성이 있음을 알았다.

참고문헌

1. Hardin, B.O. and Drnevich, V.P. (1970) "Shear Modulus and Damping in Soils. I. Measurement and Parameter Effects, II. Design Equations and Curves, " Technical Reports UKY 27-70-CE2 and 3, College of Engineering, University of Kentucky, Lexington Kentucky, July.[These reports were later published in the Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol, 98, No.6, pp 603-624 and No. 7, pp 667-691, in June and July 1972]
2. Roesset, J.M. and Whitman, R.V. (1969) " Theoretical Background for Amplification Studies, " Research Report No. R69-15, Soils Publications No. 231, Massachusetts institute of Technology, Cambridge.
3. Seed, H. Bolton and Idriss, I.M. (1970) "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis ", Report No. UCB/EERC-70/10, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 48p
4. Yoke, F.Y. (1992) "Effects of Subsurface Conditions on earthquake Ground Motions", Report No. NISTIR 4769, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, 85p