

차량하중에 의한 주변지반의 진동해석

Dynamic analysis Ground using 2-D FEM

황성춘 Hwang Seong-Chun¹⁾, 강보순 Kang Bo-Soon²⁾, 심형섭 Shim Hyung-Seop³⁾,
오병헌 Oh Beong-Hun⁴⁾, 박성진 Park Sung-Jin⁵⁾

ABSTRACT

Dynamic response of ground due to train loads is analyzed. A numerical procedure based on finite element method is used to solve two-dimensional ground response. Dynamic train loads assumed in analysis is the point acceleration on train rail with magnitude of 2330 gal and thickness of surface of soil layer assumed is 60cm. In order to consider the effect of acceleration point, dynamic responses such as response acceleration and displacement are computed as a function of distance from acceleration point on rail. In addition, simple methods which reduce dynamic effects on ground are also proposed.

1. 서론

도로나 철로 주변에 위치한 건물에 있어서 교통진동하중에 대한 영향은 치명적이라고는 할 수 없지만 무시할 수 없는 문제로, 특히 '쾌적한 주거환경'이라는 관점에서 심각하게 고려되어 지고 있다. 따라서 그 영향을 미리 파악하고 그 영향을 경감시키는 노력이 필요하게 된다. 하지만 자동차나 철도 등의 진동하중이 지반을 통하여 전달되는 과정을 파악하고, 그 영향을 경감시키는 대책을 세우는 것은 매우 어려운 일이다. 특히 지반이 균일하지 않고 복잡하게 형성되어 있다면, 진동하중이 지반을 통하여 전달되는 과정을 파악하는 것은 더욱 어려워진다. 하지만 FEM을 이용하면 균일한 지반이나 복잡한 층 구조를 가지는 지반을 표현하는 것이 용이하고, 응답결과를 구하는 것이 용이하다.

따라서 본 연구에서는 철도에서 전달되는 진동하중에 대한 영향을 평가하기 위하여 2차원 유한요소 프로그램을 이용하여 지진응답을 실시하였다. 진동이 철도 레일의 한 점에서 발생하므로 점가진 해석에 의한 방법을 사용하였다. 그리고 그 결과를 하중작용점에서의 거리에 따른 응답가속도와 응답변위를 산출하여 거리에 따른 영향에 대하여 고찰해 보고자 한다. 또, 간단한 방법으로 진동전달의 영향을 감소시킬 수 있는 방법을 제안해 보고자 한다.

2. 적용이론

2.1 유한요소 모델

- 1) 경주대학교 건설환경시스템공학부 전임강사
- 2) 경주대학교 건설환경시스템공학부 전임강사
- 3) 경주대학교 건설환경시스템공학부 전임강사
- 4) 한국수자원공사 선임연구원
- 5) 창원대학교 토목과 겸임교수

유한요소법은 연속체를 이산화한 유력한 수법으로, 특히 기초 주변의 물성 및 기하학적으로 복잡하게 변화하는 지반의 모델화에 용이하게 대응하는 것이 가능하다.

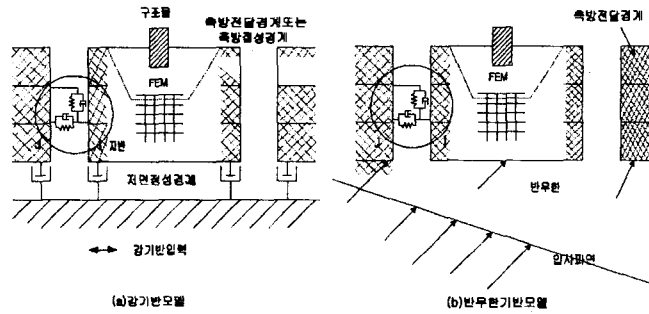


Fig.-1 Boundary condition for FEM

2.1.1 영역의 이산화

지반과 기초의 동적상호작용장의 지배방정식은 가상 일의 원리를 적용하여 구한다. 탄성체에 가상변위 δu 를 부여했을 때, 관성력, 표면력에 의한, 외부일과 내부 변형률 에너지의 증가가 같은 것으로부터 다음 식 (1)를 얻을 수 있다.

$$\int_V \delta \epsilon^T \sigma dv = \rho \int_V \delta u^T \ddot{u} dv + \int_S \delta u^T t dv \quad (1)$$

여기서, u 는 변위, σ 는 내부응력, ϵ 는 내부 변형률, t 는 경계상의 표면력, ρ 는 밀도를 정의하고 있다.

해석대상영역을 매쉬분할하여 각 요소내의 변위, 속도 및 가속도를 동일 내삽함수를 이용하여 절점 변위, 절점속도, 절점가속도로부터 나타낸다. 그 결과 식 (1)은 이산화된 다자유도계 (多自由度系)의 지배방정식으로 치환하여 대상영역의 물성치를 내부감쇠효과로 인해 이력 감쇠정수를 도입하고 등가점성감쇠계로 치환하면 식 (2)가 된다.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + KU = P \quad (2)$$

단, 경계조건을 명확히 규정할 필요가 있다.

2.1.2 가상경계

(1) 점성경계

파동에너지를 흡수한 점성경계를 만족하는 경계 응력조건은 다음 식 (3)로 표현된다.

$$\begin{cases} \sigma = \rho V_p \cdot \dot{u} \\ \tau = \rho V_s \cdot \dot{u} \end{cases} \quad (3)$$

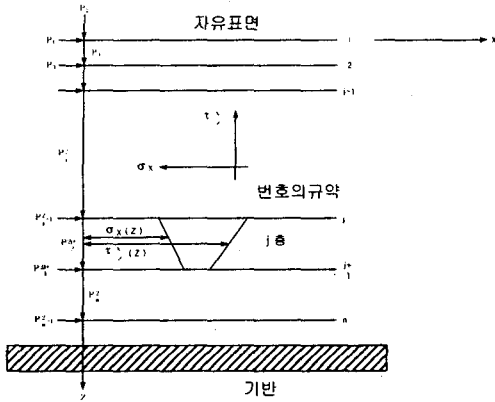
여기서, ρ : 밀도, V_p : P파의 속도, V_s : S파의 속도이다. 기반으로부터의 상대속도를 고려하면 점성경계에서의 등가 절점력은 다음 식(4)과 같이 표현된다.

$$\begin{Bmatrix} F_{x1} \\ F_{y1} \\ F_{x2} \\ F_{y2} \end{Bmatrix} = \frac{\rho l}{6} \begin{bmatrix} 2V_s & 0 & V_s & 0 \\ 0 & 2V_p & 0 & V_p \\ V_s & 0 & 2V_s & 0 \\ 0 & V_p & 0 & 2V_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \\ \theta \end{Bmatrix} = [C_b] \dot{u} = [C_b] \omega \dot{u} e^{i\omega t} \quad (4)$$

여기서, l : 수평방향의 요소의 길이이다.

(2) 전달 경계

오른쪽 영역에서 Fig.-2에 작용하는 힘은 이산 화하여 표현할 수 있다. 절점력 $\{P\}_s$ 는 지층내의 응력과 변형율을 고려하여 계산한다. 변형율은 변위 u, v 및 틀 w 미분하여 다음과 같이 구한다.



$$\begin{aligned} \epsilon_x &= -ik_s u(z) \\ &= -\frac{ik_s}{h_j} \{ (z_{j-1} - z) v_{2j-1} + (z - z_j) v_{2j+1} \} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\epsilon(z) = -\frac{dw(z)}{dz} = \frac{1}{h_j} (v_{2j+2} - v_{2j}) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \gamma_{xz} &= -\frac{du(z)}{dz} = -ik_s w(z) = \frac{1}{h_j} [v_{2j+1} - v_{2j-1} \\ &\quad - ik_s \{ (z_{j+1} - z) v_{2j} + (z - z_j) v_{2j+2} \}] \end{aligned} \quad (7)$$

Fig.-2 Schmetic Transmitting boundary

2.2 점가진 해석 기법

점가진은 하중 또는 가속도를 입력진동으로서 해석하는 것이다.

하중입력의 경우 기준이 되는 파형과 크기가 다른 파형을 복수의 절점에 작용시킬수 있고, 가속도 입력의 경우는 각 절점의 X, Y방향의 가속도를 절점에 작용시킬 수 있다.

가속도를 입력진동으로서 해석하는 경우에는 주파수 영역에 가속도를 변위로 변환하고, 변위를 기지량으로서 해석을 수행한다. 변위를 기지량으로한 가속도 입력의 점가진 해석의 경우, 전달계수를 직접 계산하지 않기 때문에 이론상 주파수 영역에의 보간기능은 이용하지 않는다. 그 이유는 전달계수는 주파수를 X축으로 그래프화하여 비교적 부드러운 곡선이 되지만, 응답치를 전달계수와 동일한 형태로 그래프화한 경우에는 부드러운 곡선이 만들어지지 않는다. 한편, 하중입력의 점가진의 경우에는 전달계수를 계산하는 수법으로써, 보간기능을 사용할 수 있다.

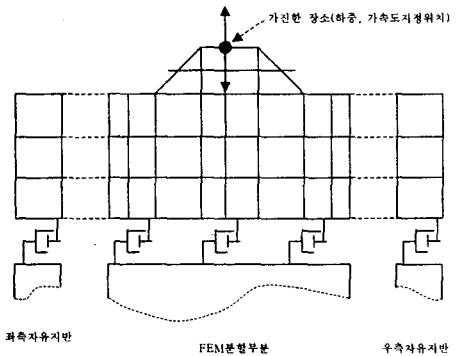


Fig.-3 Schmetic point loading

2.3 본 논문에 이용한 전산 프로그램

본 해석에서 사용한 프로그램은 캘리포니아대학에서 개발한 'FLUSH'를 발전시킨 펌키지인 'super FLUSH'와 동일한 해석 결과를 가지는 AFIMEX(동적 옵션명 SAMBA)를 사용하였다.

이 프로그램의 특징은 등가선형화법을 이용하는 것이 가능한 것으로하므로, 본 해석에서는 재료의 비선형성을 고려했다. 또, 정적하중에 대한 해석은 AFIMEX의 정적 FEM 해석 옵션인 SANC를 이용하여 실시하였다.

3. 해석 모델

본 연구에서 해석 대상단면은 Fig-4.과 같고, 입력 물성값은 Table-1과 같다. 이때의 절점수는 361절점이고, 요소수는 321개이다. 그리고 좌우대칭이므로 반단면만 모델링하였으며, 성토체 하부로 9.5m, 측방으로 30m를 해석 대상에 포함시켰으며, 지하수위는 지표면과 동일한 것으로 가정하였다. 그리고 좌우 측방의 경계는 전달경계로 하였으며, 저면은 완전고정으로 지정하였다.

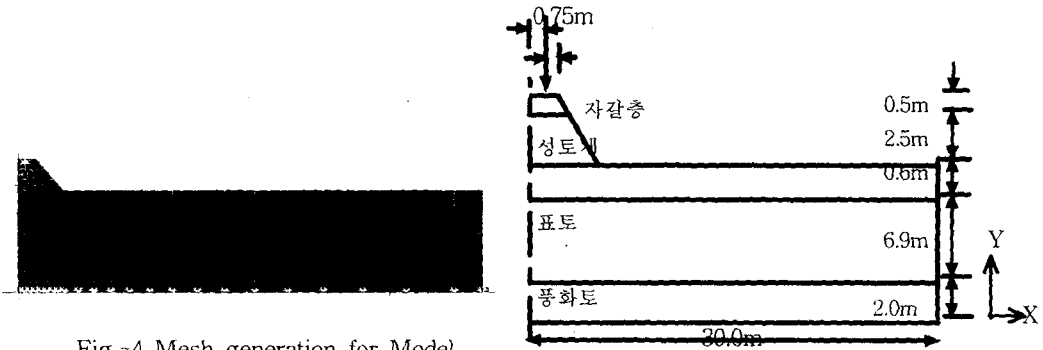


Fig.-4 Mesh generation for Model

Table-1 Ground properties

지반	정수	포아손 비	단위체적중량 (t/m^3)	전단탄성계수 (t/m^2)	감쇄비 (%)	점착력 (t/m^2)	내부마찰각 ($^{\circ}$)
풍화암		0.49	1.9	10250	10	20	40
풍화토		0.45	1.7	5000	10	5	35
표토		0.43	1.6	2350	10	1	30
성토체		0.43	1.6	2350	10	1	30
자갈층		0.33	1.8	10000	10	0	36

적용지진파는 Fig.-5와 같으며, 최대 가속도는 -2337.60gal이고, 지속시간은 17초이다.

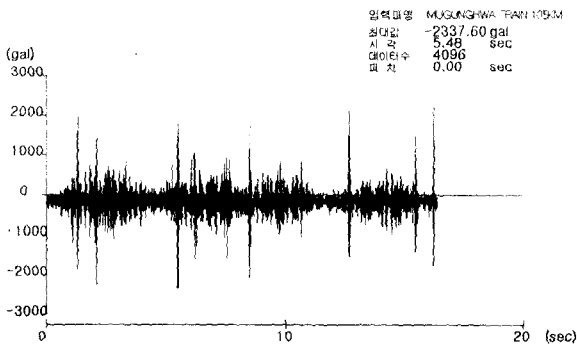


Fig.-5 Original acceleration curve

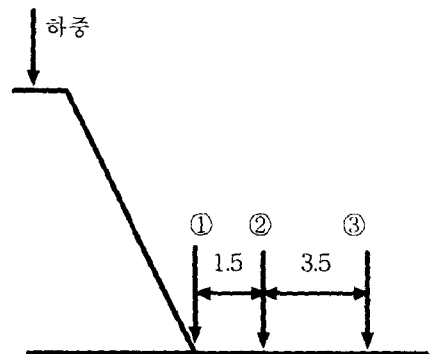
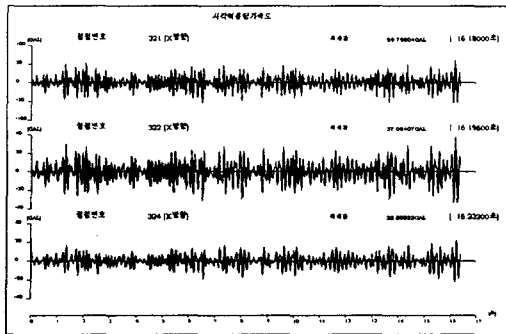


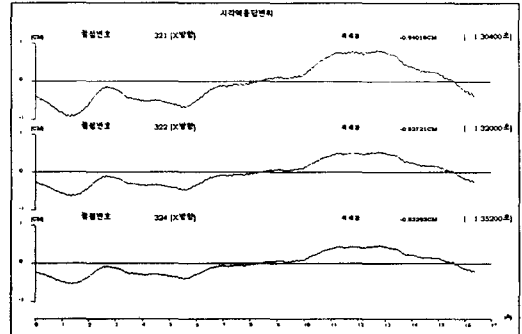
Fig.-6 Considering point location for result

4. 해석결과

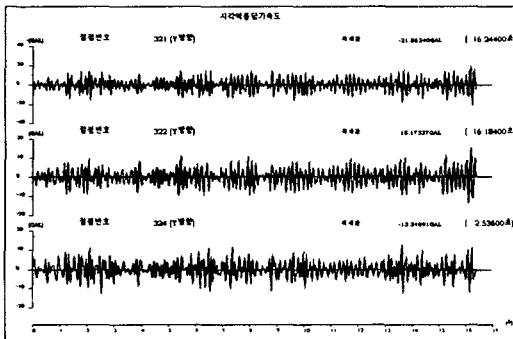
모델도에서 나타난 것과 같이 표토층의 두께가 0.6m 일 때, Fig.-6의 ①, ②, ③지점에서의 응답결과는 다음과 같이 나타났다.



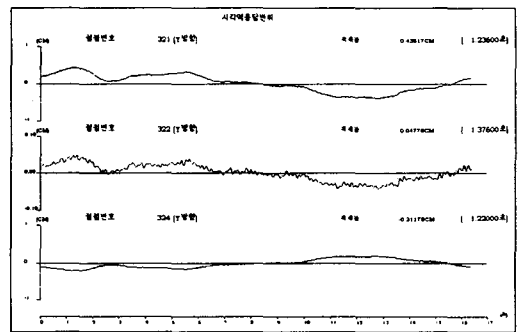
(a) X direction



(a) X direction



(b) Y direction



(b) Y direction

Fig.-7 Time history of acceleration

Fig.-8 Time history of displacement

5. 지층 두께에 따른 진동감감효과

본 연구에서는 철도진동의 영향을 경감시키기 위한 방법으로 표토층의 두께를 조정하여 해석을 반복으로 실시하여 보았다. 그 결과 Table-2에서 보듯이 표토층의 두께가 두꺼워 질수록 응답가속도는 커지는 경향을 나타내었으며, 이 때의 응답변위도 Table-3에서 나타내었듯이 표토의 높이가 커질수록 응답변위는 늘어나는 것을 확인할 수 있었다.

Table-2 Acceleration result for X-direction due to distance (gal)

표토두께 위치	0.0m	0.2m	0.4m	0.6m	0.9m	1.2m	1.5m
①번 위치	42.972	43.811	52.759	59.798	66.372	70.196	71.324
②번 위치	31.233	32.818	32.581	37.094	42.025	44.419	47.474
③번 위치	18.534	25.915	-19.291	22.855	24.743	25.031	24.103

Table-3 Acceleration result for Y-direction due to distance (gal)

표토두께 위치	0.0m	0.2m	0.4m	0.6m	0.9m	1.2m	1.5m
①번 위치	16.533	15.303	-17.001	-21.562	-25.574	-28.865	-31.989
②번 위치	12.515	11.571	-12.893	15.173	17.457	19.675	21.599
③번 위치	13.260	12.503	-13.785	13.349	-14.362	15.510	16.030

Table-4 displacement result for X-direction due to distance (mm)

표토두께 위치	0.0m	0.2m	0.4m	0.6m	0.9m	1.2m	1.5m
①번 위치	-7.63	-8.27	-8.75	-9.40	-10.18	-10.77	-12.06
②번 위치	-6.29	-6.32	-6.02	-6.27	-6.76	-7.19	-7.67
③번 위치	-5.43	-4.68	-5.33	-5.33	-5.34	-5.41	-4.73

Table-5 displacement result for Y-direction due to distance (mm)

표토두께 위치	0.0m	0.2m	0.4m	0.6m	0.9m	1.2m	1.5m
①번 위치	4.01	4.38	4.29	4.35	4.47	4.62	4.60
②번 위치	0.19	1.05	0.43	0.48	0.54	0.57	0.86
③번 위치	-2.28	-1.55	-2.17	-2.12	-2.04	-1.18	-1.20

6. 결론

본 연구에서 철도진동하중에 대한 영향을 평가하기 위하여 2차원 동적 유한요소해석을 실시하여, 그때의 응답결과를 고찰하였다. 그리고 응답 영향을 감소시키기 위한 방법에 대하여 몇 가지 방법을 적용하여 보았으며, 그 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 본 연구 사례에서 확인하였듯이 표토의 두께가 60cm이고, 진동의 크기가 2330gal 정도일 때, 성토체에서 1.5m 떨어진 지점에서 X방향 최대응답가속도는 약 37gal, Y방향 최대응답가속도는 약 15gal이었다. 그리고 이때의 최대응답변위는 X, Y방향으로 각각 -6.7cm, 0.48cm이었다.
- 2) 본 연구에서 적용한 사례에서와 같은 지층구조를 가지는 단면에 대해서 진동전달의 영향을 경감시키기 위해서는 표토층의 두께를 얇게 하는 것이 유리한 것으로 나타났다. 하지만 Y방향의 변위는 성토체와 근접한 부분에서는 표토층의 두께를 얇을수록 작아지지만, 성토체에서 멀어 질수록 표토층의 두께가 얇을수록 커지는 경향을 보이고 있다.

참고문헌

1. J.S.Li & K. C. Li, FE analysis of dynamic response for railway roadbed under train loads, A.A.Balkema, 1997
2. 연엔지니어링, AFIMEX manual(동적해석, 이론 매뉴얼), 연엔지니어링
3. 沢田健吉, 谷口宋一, 道路交通振動の距離減衰(第1報), 土木技術資料 Vol. 20, 1978