한국소음진동공학회 창립10주년 기념 소음진동학술대회논문집, pp.949~954.

교통하중에 인접한 콘크리트 건축물의 진동예측 프로그램 개발

○전 호 민* · 홍 갑 표**

A Development of Prediction Program for Vertical Transfer Vibration of R/C Structure due to Traffic Loads

Ho-Min Chun and Kap-Pyo Hong

ABSTRACT

In terms of vibration damage and the serviceability for occupants in buildings, the purpose of vibration study lies in the reduction of vibration damage. However, only when vibration level of buildings is available, measures of vibration control and base isolation can be taken. The purpose of this paper is to provide a fundamental analysis method to estimate structural vibration. After analysing by using two methods, infinite model, combination method, a comparison between analysed results and the results of previous studies was performed to prove the validity of the prediction on the vibration of building structure. Thus, if the material property of soil and quantity of load sources are known before construction being started, the vibration level could be predicted by using these methods.

1. 서 론

1.1 연구목적

철도 및 도로교통에 의해 유발되는 교통하중은 지반을 통해서 인접건물에 전달되며 최종적으로 건물에 미치는 영향이나 거주자가 느끼는 진동수준에는 지반특성, 교통하중의 가진 특성, 건물의 진동특성 등 많은 변수가 있다. 현재 국내에서는 교통하중에 의해 발생하는 진동이 건물로 전달되었을 때, 건물의 진동레벨을 파악하는 방법은 대부분 현장에서의 실측에 의존하고 있으며 진동레벨을 예측하는 방법은 거의 사용되고 있지 않다. 그러나 시공예정 건물에 대한 진동레벨은 직접 실험을 실시하여 측정할 수 없으므로 이에 대한 예측을 할 수 있는 진동예측 프로그램에 대한 연구가 필요한 실정이다. 이에 본 연구의 목적은 외부 진동원에 의해 건물이 가진될 때 구조물에 미치는 영향을 평가할 수 있는 프로그램을 작성하여 교통하중에 인접한 건물에 발생할 수 있는 진동레벨을 예측할 수 있는 방법을 제시하는 것이다.

1.2 연구방법

본 연구에서는 수직진동 예측 프로그램을 개발하고 이에 대한 검증은 기존의 연구 자료와의 비교를 통하여 건물의 진동예측에 대한 평가를 실시한다. 해석 프로그램은 지반의 종류, 건물의 동특성, 구조형식, 건물의 층수 등에 따라 외부에서 건물로 전달되는 진동의 크기를 예측할 수 있도록 구성된다.

* 정회원, 초당대 건축학과 전임강사, 공학박사
** 정회원, 연세대 사회환경건축공학부 부교수, 공학박사
이 논문은 1998년도 한국학술진흥재단의 연구비에 의하여 지원되었음.(KRF-98-001-E02102)

2. 수직진동 예측프로그램

2.1 해석방법

구조물의 동적해석을 현재까지 유한요소법을 이용한 해석법, 동강성행렬을 이용한 해석법, 유한요소법과 경계요소법을 조합한 해석법이 연구되었다. 이 가운데 본 연구에서는 동강성행렬을 이용한 해석방법과 조합법을 이용한 해석방법을 사용하였다.

2.2 대상건물의 모형화

2.2.1 동강성행렬을 이용한 프로그램

D. P. Cryer[5]에 의해서 제안된 2차원의 건물모형화 기법이론을 사용하였으며 이 모형화 기법은 건물을 동강성 행렬을 이용하여 보 요소로 모형화하고 있다. 절점과 절점사이의 결합이나 행렬의 합성 부분은 매트릭스 구조해석의 개념을 이용하여 프로그램하였다. 그림 1에 나타낸 예는 5층 건물에 19개의 절점과 19x3 즉 57개의 자유도를 가지고 있으며 기초를 고려한 모형이며 5번 자유도에 단위 변위를 주어 가진하여 5번 자유도에 대한 다른 절점의 상대변위를 구한다.

46,47,48	49,50,51	52,53,54 5th floor
37,38,39	40,41,42	43.44.45 4th floor
28,29,30	31,32,33	34,35,36 3rd floor
19,20,21	22,23,24	25,26,27 2nd floor
10,11,12	13.14.15	16,17,18 1st floor
1,2,3	4,5,6	7,8,9

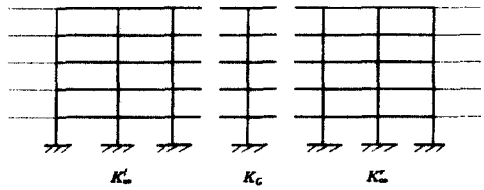
Fixed joint

Fig 1. Unit frame modelling

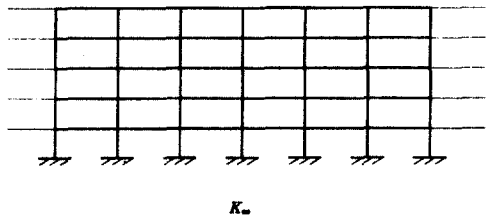
(1) 무한건물모형

많은 건물이 반복 유닛으로 반복되고 있는 평면의 형태를 취하고 있는 점을 감안하여 무한건물모형을 유도한다. 그림 2 (a)의 중앙부에 해당하는 것이 무한모형에 사용되는 반복 유닛이 된다. 이 유닛의 행렬을 내부절점(i), 왼쪽절점(l), 오른쪽 절점(r), 구속절점(c)별로 구성하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{pmatrix} \overline{F_i} \\ \overline{F_l} \\ \overline{F_r} \\ \overline{F_c} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} [k_{ii}] & [k_{il}] & [k_{ir}] & [k_{ic}] \\ [k_{li}] & [k_{ll}] & [k_{lr}] & [k_{lc}] \\ [k_{ri}] & [k_{rl}] & [k_{rr}] & [k_{rc}] \\ [k_{ci}] & [k_{cl}] & [k_{cr}] & [k_{cc}] \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \overline{U_i} \\ \overline{U_l} \\ \overline{U_r} \\ \overline{U_c} \end{pmatrix} \quad (1)$$



(a) Sub-structures for infinite building



(b) Infinite building model

Fig. 2 A concept of infinite building

파일에 대한 동강성 행렬은 Novak의 파일모형[10]을 이용하여 구성하였으며 파일의 행렬을 건물의 행렬성분과 합성하여 파일-건물에 대한 무한건물모형을 구성하였다.

(2) 프로그램 흐름도

프로그램은 그림 3의 흐름도와 같이 작성하여 해석하였다.

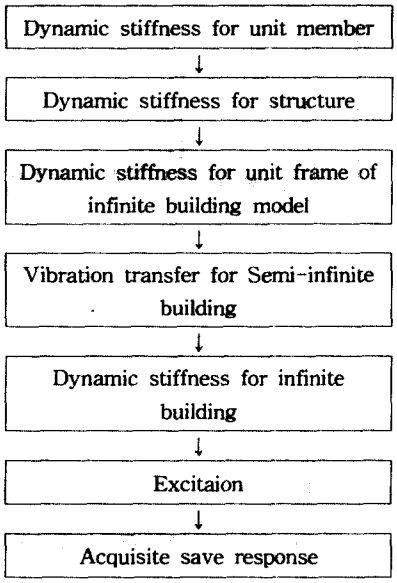


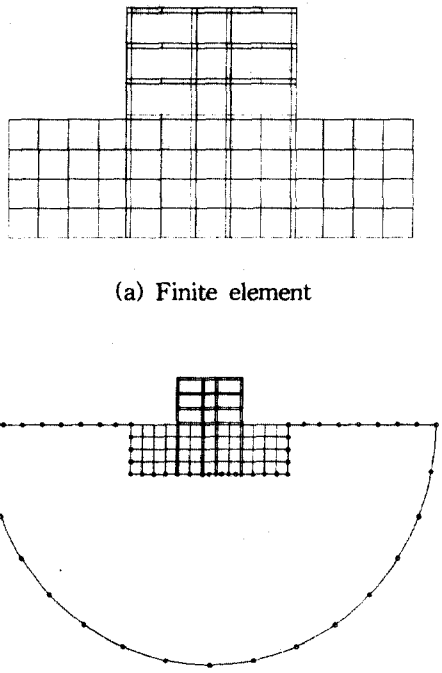
Fig. 3 Flow chart for program

2.2.2 조합법에 의한 프로그램

지반-구조물 상호작용(soil-structure interaction)을 고려하기 위해 건물과 기초 그리고 기초 주위의 지반은 유한요소법(Finite Element Method)을 이용하고 반무한체(half-space)인 지반은 경계요소법(Boundary Element Method)을 이용하여 모형화 하였다.

상부구조물과 기초 그리고 기초 주위의 지반은 2차원 평면 8절점 유한요소를 이용하였으며 306개의 절점과 74개의 요소를 가진 구조물로 모형화하였다. 지반-구조물 상호작용의 효과를 고려하기 위해 지반은 경계요소법을 이용하여 66개의 절점과 33개의 요소를 이용하여 모형화 하였으며 유한요소법과 경계요소법이 만나는 부분은 35개의 절점과 17개의 요소를 이용하여 모형화 하였다.

그림 4에 구조물과 지반의 모형을 나타내었다. 직접법을 이용할 때 반무한영역인 지반의 경계요소는 실제 경계가 아닌 가상의 경계이다. 본 연구에서는 가진원의 위치를 모형에 포함하기 위해 건물 중심에서 반경 50m내의 영역을 이산화 하였으며 이 가상의 경계에서 방사감쇠가 일어난다고 가정하였다.



(a) Finite element

(b) Boundary element

Fig 4. Finite element and boundary element

3. 해석모델의 비교 검증

3.1 대상 건물

예측 프로그램의 적용가능성을 검증하기 위하여 기존의 교통진동 측정자료를 이용하였다.[14] 이 건물은 가진원과 대상건물 사이에 진동 전달에 영향을 미칠 장애물이 없어 가진원의 진동이 대상건물에 바로 전달 될 수 있다. 대상건물의 제원은 표 1과 같으며 그림 5에 측정위치를 나타내었다.

Table 1. Target Buildings[14]

Location	Structural type	Plan type	Story
Karibong, Seoul	R/C rahmen	Repetitive unit frame	3

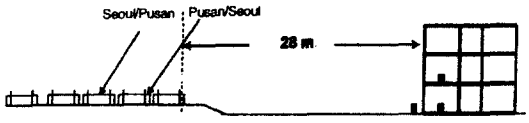


Fig. 5 Building section and measurement point

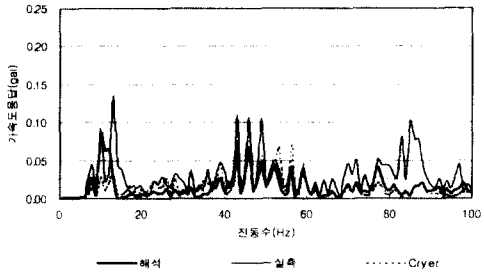
3.2 실측자료와 해석결과 비교

각 실험에서 측정된 결과와 해석으로 구해진 결과를 비교하였다. 이 때 이론모형의 검증을 위해 한 점에서의 실제 응답을 가진력으로 입력하여 해석을 하였으며 비교 대상이 되는 지점은 모형의 1층과 2층의 지점이다.

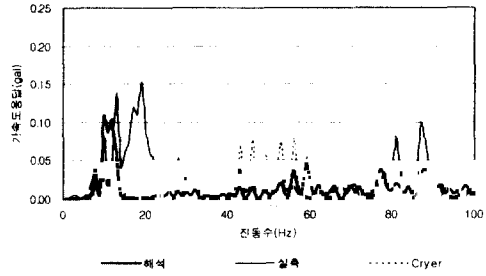
실험과 해석 모두 normal band 에서는 진동수 1 ~ 100 Hz 영역에서 비교하였으며 1/3 octave band 에서는 1 ~ 200 Hz 영역에서 비교하였다. 그래프를 살펴보면 실험과 해석 양쪽에서 대부분의 피크 대역과 응답의 크기가 일치하고 있으며 이런 경향은 1/3 octave band 에서는 보다 명확하게 나타난다. 각 열차의 응답은 대개 16 Hz를 전후하여 최대 최대값을 보이며 80Hz 이후로는 점차 소멸되어 가는 경향을 보인다.

모형 해석을 통한 각 층의 응답은 조합법이 Cryer 모형의 해석에 비해 보다 실측자료와 가까운 결과를 보이고 있다. 이러한 경향의 원인은 조합법은 지반의 실제 모형화를 통해 지반과 구조물의 상호작용의 영향을 반영하였지만 Cryer의 모형은 기초나 파일부분만을 모형화 함으로써 지반의 방사감쇠와 유사한 결과를 얻는데 기인하는 것으로 판단된다. 그림 6에서 그림 9까지 실측과 해석의 응답을 나타내었으며 표 2에 전체 진동레벨 영역으로 전환하여 나타내었다.

본 연구에서는 한 점에서 실제 측정된 가속도 응답을 입력하중으로 하여 나머지 절점에서의 상대 응답을 구한 것으로 가속도 응답을 dB로 환산하였을 경우 실측의 결과와는 0.94~1.21% 정도의 오차를 보이고 있다.

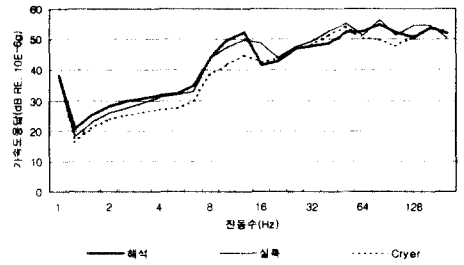


(a) 1st floor

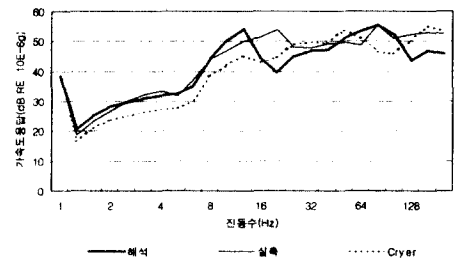


(b) 2nd floor

Fig 6 Normal band response(case 1.)

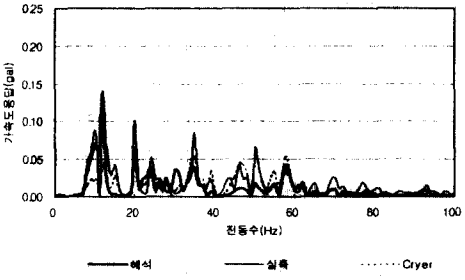


(a) 1st floor

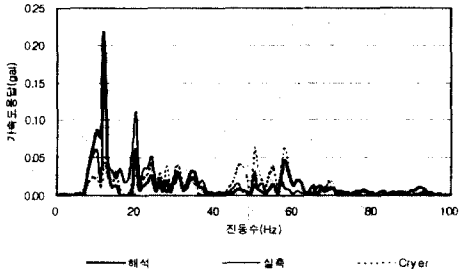


(b) 2nd floor

Fig 7 1/3 Octave band response(case 1)

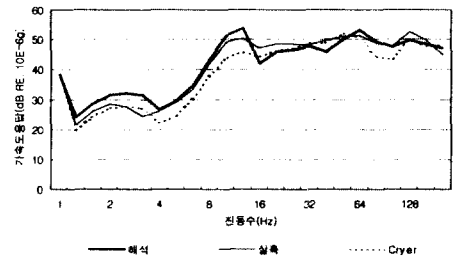


(a) 1st floor

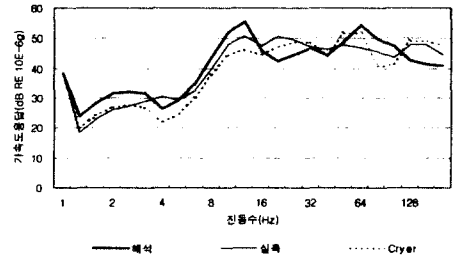


(b) 2nd floor

Fig 8 Normal band response(case 2.)



(a) 1st floor



(b) 2nd floor

Fig 9 1/3 Octave band response(case 2)

Table 2. Results of experiment and analysis : Overall vibration level (dB)

case	Frequency range	Combination (dB)		Dynamic stiffness (dB)		Experiment (dB)		train type*
		Story		Story		Story		
		1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	
1	1~200Hz	62.71	62.03	61.52	61.76	63.71	63.03	M
	1~100Hz	61.31	61.71	59.47	59.30	62.20	61.65	
2	1~200Hz	61.02	60.97	59.51	59.52	61.03	59.47	S
	1~100Hz	60.22	60.81	58.25	58.27	59.84	58.67	
3	1~200Hz	61.67	61.30	60.12	60.04	62.67	61.76	E
	1~100Hz	61.15	61.28	58.65	58.50	61.43	61.07	
4	1~200Hz	63.10	62.23	61.85	61.75	64.03	62.97	M
	1~100Hz	61.32	61.85	58.80	59.10	61.48	61.94	
5	1~200Hz	62.31	62.11	60.66	60.68	62.54	62.47	M
	1~100Hz	61.42	61.93	59.22	59.17	61.39	61.56	
6	1~200Hz	60.82	59.97	59.94	59.89	61.89	61.20	E
	1~100Hz	59.47	59.68	58.12	58.14	60.22	60.29	
7	1~200Hz	63.00	62.68	61.18	61.23	62.94	62.18	M
	1~100Hz	61.88	62.45	59.16	59.07	61.72	61.48	
8	1~200Hz	61.53	61.38	60.08	60.21	61.97	61.55	M
	1~100Hz	60.81	61.23	58.97	59.03	60.95	60.50	

* S: Saemaul, M: Mookoongwha E: Electric train

4. 결 론

교통하중과 같은 외부의 진동원에 의한 건물의 수직진동 응답을 예측하기 위해 본 연구에서는 동강성 행렬에 의한 방법과 경계요소법과 유한요소법의 조합에 의한 해석방법에 의해 철도에 인접한 건물에 대한 진동예측 가능성을 검증하였다. 본 연구를 통해 구한 연구결과는 다음과 같다.

1. 교통하중과 같은 비교적 큰 가진원에 의해 건물이 가진 될 때에는 동강성 행렬에 의한 방법과 조합법은 실측에 의한 자료와 비교하여 이 해석법의 타당성을 확인하였다.
2. 건축물을 신축하는 경우 신축 예정지의 지반 진동량을 입력하중으로 사용할 경우 예측 프로그램을 이용하여 신축예정 구조물의 진동레벨을 예측할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

1. A. Aprile, A. Benedetti, T. Trombetti, "On Non-linear Dynamic Analysis In The Frequency Domain : Algorithms And Applications", Earthquake Engineering And Structural Dynamics, Vol. 15, pp. 815-829, 1987
2. A. Bedford, D. S. Drumheller, Elastic Wave Propagation, John Wiley & Sons, 1996
3. C. A. Brebbia, J. C. F. Telles, L. C. Wrobel, Boundary Element Techniques - Theory and Applications in Engineering, Springer-Verlag, 1984
4. C. Madshus, B. Bessason & L. Harvik, "Prediction model for low frequency vibration from high speed railways on soft ground", Journal of Sound and Vibration, 193(1), pp. 195-203, 1996
5. D. P. Cryer, "Modeling of vibration in buildings with application to base isolation", PhD Dissertation, University of Cambridge, 1994
6. H. E. M. Hunt, "Prediction of Vibration Transmission from Railways into Buildings using Models of Infinite Length", Vehicle system dynamics Supplement, Vol. 24, pp. 234-247, 1995
7. John P. Wolf, Soil-Structure Interaction Analysis in Time Domain, Prentice Hall, 1988
8. Klaus-Jurgen Bathe, Finite Element Procedures In Enginnering Analysis, Prentice-Hall, 1996
9. Mario Paz, Structural Dynamics Theory And Computation, Van Nostrand Reinhold, 1991
10. Milos Novak, "Dynamic Stiffness and Damping of Piles", Carnadian Geotechnical Journal, Vol. 11, No. 4, pp. 574-598, 1974
11. 김문겸외 3인, "유한요소-경계요소 조합에 의한 다층 지반-구조물 상호작용 해석", 대한토목학회논문집 제 18권 제1-3호, 1998, 5, pp. 323~333
12. 김유석, 철로변 인접건물의 진동예측을 위한 Cryer모형의 적용성에 관한 연구, 연세대학교 석사학위논문, 1997
13. 윤정방외 3인, "지하철 운행하중에 대한 인접 구조물의 진동해석", 대한토목학회논문집 제17권 제1-1호, 1971, 1, pp. 25~34
14. 윤현욱, 콘크리트 건물의 진동전달예측에 관한 연구, 연세대학교 석사학위논문, 1998
15. 전호민, 철도 인접건물의 진동예측 모형에 관한 연구, 연세대학교 박사학위논문, 1997
16. 전호민, 홍갑표, 철근콘크리트 건축물의 수직진동전달에 관한 실험적 연구, 대한건축학회논문집 제15권 제11호 pp. 37-44, 1999. 11