

역해석 기법을 활용한 철도 소음·진동 예측에 관한 연구

A Study on the prediction of rail noise and vibration
using the Input identification.

신한철* 조신규** 양신추*** 최준성****
Shin, Han Chul-Cho, Sun Kyu-Yang, Shin Chu-Choi, Jun Seong

ABSTRACT

Recently the railway becomes principal transportation on account of the important role in mass transit and commute in urban area. However, rail noise and vibration raise a major problem for the residents living nearby railway track. At that point of view, the effective counterplan for the soundproofing and protection of vibration has to be considered in the process of railway design. Therefore, the reliable computation of load caused by running train on rail is very important to estimate vibration of structure adjacent to railway.

In this study, Input identification is used for the calculation of load and vibration, induced by high speed train on rail. The influence of railroad noise and vibration on structure is evaluated using the 3-D Finite element method and the reliability of the evaluation is discussed comparing with the results of the field measurements.

1. 서론

최근 철도는 대량수송 및 정시운행의 역할을 수행함으로써 산업을 위한 가장 중요한 운송수단이 되어왔으며 철도 교통량의 증가는 국가 발전과 국민의 편의를 위하여 많은 기여를 하고 있음을 반증하고 있다. 그러나 도시지역에서의 운행횟수 증가와 열차의 고속화 등으로 인하여 발생하는 소음·진동 문제는 철도에 인접한 거주민들에게서 종종 많은 민원을 불러일으키고 있다.

이러한 문제를 근본적으로 해결하기 위해서는 열차운행에 따른 소음·진동의 정확한 예측을 통하여 철도시설물의 건설단계에서부터 적절한 방음·방진 대책을 수립해야 한다. 또한, 운행중인 열차에 의해 인접한 구조계의 환경진동을 합리적으로 예측하기 위해서는 구조계에 작용하는 열차하중을 명확하게 산정하는 것이 매우 중요하다고

할 수 있다.

본 논문에서는 보다 신뢰성 있고 합리적인 결과를 얻기 위해 제작된 열차진동과 지반-구조물 상호작용해석을 통한 주파수 응답함수로부터 열차하중을 역산할 수 있는 역해석(Input identification) 기법을 적용하였다[1]. 이와 같은 역해석 기법을 통해 산정된 열차주행하중을 3차원 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS에 적용함으로써 인접한 구조계의 소음·진동 영향을 예측하였으며, 실제 열차주행으로 인한 계속응답과 비교를 통해 결과의 신뢰성을 검토하였다.

2. 이론적 배경 및 연구방법

2.1 이론적 배경

열차와 같은 레일이동차량에 의한 지반 진동은

* 서울시 행정국 시기관, 서울산업대학교 철도대학원 박사과정, 정회원

** 서울산업대학교 교수, 정회원

*** 한국철도기술연구원 수석연구원, 정회원

**** 한국유지관리(주) 대표이사, 정회원

차륜과 레일의 상호작용에 의해 발생하며 그 영향 인자로는 차륜과 레일의 굴곡도, 레도지시시스템, 표면 접촉강성의 극부적 변화 등을 들 수 있다. 특히 이같은 지반진동은 지반의 성질, 대차의 운동 특성, 궤도지시 시스템의 강성, 건물의 구조형식 등에 의해 보다 많은 영향을 받게된다[2]. 일반적으로 지반 진동의 에너지는 레일을 거쳐 체결구 그리고 터널 바닥과 벽면을 통하여 지반으로 전달되어지는데 지반으로 방사되는 진동 에너지는 압축과 전단 및 표면파의 형태로 건물의 벽이나 기초에 직접적으로 전달되거나 소음의 형태로 전파된다. 일반적으로 인간이 느낄 수 있는 지반 진동의 주파수 범위는 5Hz에서 40Hz 정도이며 그 이상의 주파수 범위의 진동은 건물벽이나 기초 진동의 영향으로 나타나는 소음의 형태로 더욱 심한 환경상의 피해를 나타내게 된다. 따라서 열차의 이동하중에 의해 발생하는 소음-진동은 인접구조물의 구조적인 안정성 문제 뿐만아니라 인체에 유해한 환경적인 문제로 까지 발전될 수 있으므로 본 논문에서는 수치해석적인 접근 방법을 사용하여 이같은 문제점들에 대하여 고찰하고자 한다.

2.2 연구방법

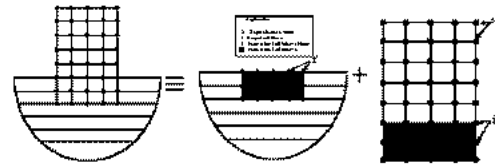
열차주행으로 인한 주변의 진동 영향을 평가하기 위해 수원선 및 분당선을 대상으로 열차하중으로 인한 소음-진동문제가 예상되는 지역을 선정하였고 해당 지역의 지반 조사자료를 통하여 전달매질의 특성을 파악하였으며, 선로의 중심으로부터 7.6m 떨어진 거리에서 진동가속도를 측정하였다. 본 논문에서는 이러한 일련의 데이터를 바탕으로 지반-구조물 상호작용해석 프로그램인 SASSI를 사용하여 지반 전달함수를 구하고 실제 계측한 자료를 사용하여 Input identification 기법으로부터 열차의 주행하중을 산정하였다. 산정된 열차하중을 사용하여 비교적 정확한 지반진동의 예측이 가능하다는 것을 실제 계측결과를 ABAQUS를 이용한 수치해석적인 결과와 비교하여 검증 하였다.

3. 열차 주행하중 산정을 위한 역해석기법

열차하중에 의한 인접한 구조계의 환경진동을 합리적으로 예측하기 위해서는 구조계에 작용하는 열차하중을 명확하고 신뢰성 있도록 산정 하는 것이

매우 중요하다. 그러나, 열차의 종량, 속도, 레일의 조도성분 등을 종합적으로 고려하여 동적 구조해석을 위한 시간이력 하중 $P(\omega)$ 를 산정 하는 작업은 각 성분의 불확실성으로 인하여 합리적이고 신뢰성 있는 결과를 산정하기가 매우 어려운 실정에 있다.

본 논문에서는 보다 신뢰성 있고 합리적인 결과를 산정하기 위하여 계측된 열차진동과 SASSI 프로그램을 이용하여 열차와 구조계의 주파수 응답함수로부터 열차하중을 역산할 수 있는 Input Identification 기법을 적용하였다. 본 논문에서 지반의 전달함수를 엄밀하게 산정하기 위해 사용한 3차원 동적 지반-구조물 상호작용해석 프로그램인 SASSI는 복소응답해석법(Complex Response Analysis Method)과 유연체적법(Flexible Volume Method, (Fig.1))에 근거한 주파수영역 해석법이 적용된 매우 정확한 프로그램이며, 실제로 이 해석 프로그램은 80년대 후반부터 90년대 초반까지 대만의 Lotung에서 수행된 내진시험 프로젝트를 통해 해석결과와 신뢰성이 충분히 검증된 바 있다.



(a) 전체 구조물 (b) 지반 및 기초 (c) 구조물

Fig. 1 SASSI에서의 지반-구조물 상호작용해석법 (유연체적법)

한편, 본 논문에서 적용한 Input identification 기법은 중첩의 원리가 적용될 수 있는 선형구조계에 한하며 식 (1)로부터 출발하게 된다.

$$U(\omega) = H(\omega) \cdot P(\omega) \quad (1)$$

여기서 $U(\omega)$ 와 $P(\omega)$ 는 각각 응답과 입력하중의 푸리에 스펙트럼이고 $H(\omega)$ 는 단위하중에 의한 구조계의 주파수 응답함수를 의미한다.

한편, 미지의 열차 하중 $P(\omega)$ 를 산정해야하므로 식 (1)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P(\omega) = U(\omega) / H(\omega) \quad (2)$$

식 (2)는 단위하중에 의한 구조계의 주파수 응답함수와 구조계에서 계측된 응답의 푸리에 스펙트럼

을 구할 수 있다면 구조계에 작용하게 되는 열차하중이 쉽게 계산될 수 있다는 것을 보여주고 있다.

4. 주행하중 산정 및 산정된 열차하중 검증

4.1 열차주행시 열차진동계측

열차진동에 의해 발생한 구조계의 응답을 구하기 위해 기존 열차 운행구간에서의 수직진동에 대한 가속도시간이력을 계측하였으며, 지반진동의 noise를 최소화하기 위해 계측지점에 장판을 설치하고 그위에 가속도계를 부착하는 방식으로 계측이 이루어졌다. 계측된 진동의 궤차수는 모두 열차이며, 정거장에서 상당히 떨어진 지역으로 열차가 최고속도로 달리는 구간이라고 생각되는 지점을 대상으로 선정하였다. 열차진동 계측시 계측위치와 계측 응답은 Fig. 2 및 Fig. 3과 같다.



Fig. 2 열차진동 계측위치

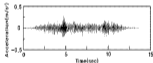


Fig. 3 계측위치에서 수직성분의 속도 시간이력

4.2 열차주행하중 산정

계측지점의 지반모형에 단위하중을 적용하여 계측지점에서의 주파수 응답함수를 산정하기 위해 지반의 반무한성을 고려할 수 있는 동적해석 프로그램인 SASSI(지반-구조물 상호작용해석 프로그램, Berkeley)가 사용되었다. Fig. 4는 주파수 응답함수 및 열차하중 산정에 대한 개념도이다. 해석에 사용된 모델은 Table 1에 정리하여 나타내었으며, SASSI를 사용한 동적응답해석을 통해 구해진 궤차지점의 주파수 응답함수는 Fig. 5와 같다.

Table 1 해석에 사용된 지반물성치

구분	탄성파속도 Vp(m/sec)	밀도 (kg/m ³)	동탄성계수 (kg/m ³)	점탄성비
대입층	758	1,830	3,730	0.43
중적층	939	1,910	7,514	0.42
중하층	1,101	2,430	19,230	0.38
연암	1,709	2,450	61,309	0.28
절암	2,627	2,570	155,499	0.23

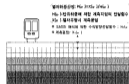


Fig. 4 주파수 응답함수 및 열차하중 산정 개념도

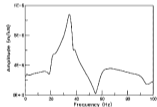


Fig. 5 계측지점의 주파수 응답함수

앞에서 설명한 방법으로 주파수응답함수와 계측된 응답을 상호역기법을 사용하여 Fig. 6과 같이 한 개의 내력축에 작용하는 열차하중을 모형화 할 수 있다.

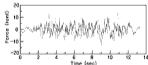


Fig. 6 산정된 열차하중 시간이력하중

4.3 산정된 열차하중의 검증

본 논문에서는 SASS와 계측된 가속도응답을 사용하여 얻어진 열차하중의 검증은 위해 범용유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 측정지점에 대한 응답을 구하고 실측값과의 비교 분석을 통해 그 적용성을 검증하였다. 해석에 사용된 ABAQUS 유한요소모델의 재인과 물성은 Fig. 2 및 Table 1에 나타내었다. 한편, 지반은 3차원 유한요소와 무한요소로 모델화하였으며 작용하중은 수직방향의 하중만 작용하는 것으로 단순화하였다. 해석결과는 Fig. 8 ~ Fig. 10에 보인바와 같다. Fig. 8에서는 진동기중에서 매우 중요한 주파수 대역인 10~60Hz에서의 속도응답을 비교하였고 Fig. 9에서는 환경소음진동기중인 1/3-옥타브밴드에 따른 dB(V)를 비교하여 나타냈다. 마지막으로 Fig. 10에서는 시간이력 가속도가 비교되었으며 그 결과 본 논문에서 예측된 결과가 계측된 결과와 비교할 때 매우 합리적인 결과를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

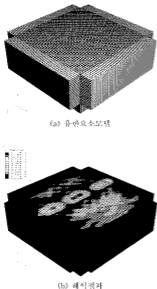


Fig. 7 유한요소해석을 통해 산정된 열차하중의 검증

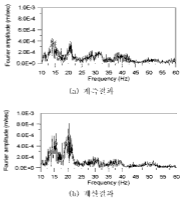


Fig. 8 중요 주파수 대역에서 플리에 응답의 속도 비교

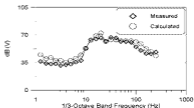


Fig. 9 1/3 옥타브 밴드 주파수대역에서의 dB비교

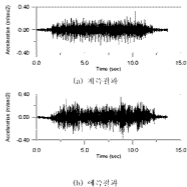


Fig. 10 수직성분에 대한 가속도 시간이력의 비교

5. 열차주행시 주변 건물의 소음진동 평가

역해석기법을 활용하여 실제 열차 주행으로 발생되는 진동에 따른 주변 건물에 대한 열차 소음진동 영향평가를 실시하였다.

5.1 녹원교회의 소음진동 평가

해석구간은 Fig. 11과 같이 교량구간으로서 교각 중심으로부터 35m 이격거리에 대상건물인 녹원교회 건물이 위치해 있으며, 열차 운행시 녹원교회에서 발생하는 소음진동 영향을 수치해석은 통하여 검토하였다. 해석시 사용된 하중은 역해석 기법을 통해 산정된 열차주행하중을 시카이리하중으로 적용하였으며, 상하행선 동시운행은 고려하여 양방향에 주행하중을 적용하였다. 수치해석은 빔용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 유한요소모델은 3차원 고체요소 34,520개와 3차원 부한요소모델 5,476개로 모델링하였다(Fig. 12). 지반 및 교량, 레일도상의 경계조건으로는 두꺼요소를 적용하였으며, 해석시 음향요소를 사용하여 소음도를 평가하였다.

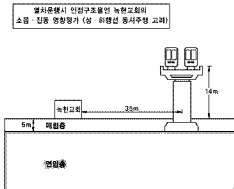


Fig. 11 녹원교회의 분과구간 단면도

Fig. 13은 전체 진동속도에 등고선도를 나타내고 있으며, Fig. 14 및 Fig. 15는 열차 운행시 녹원교회에서 발생하는 진동속도 및 건물내부에서의 분가 소음도를 보여주고 있다. 수치해석 결과 열차 운행시 녹원교회에서의 최대 진동과 소음 모두 환경규제 기준치 이내에 있음을 알 수 있었다.

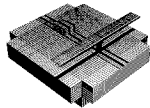


Fig. 12 녹원교회의 3차원 유한요소모델

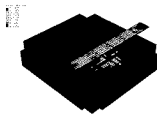


Fig. 13 전체 진동속도 분포도

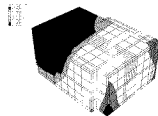


Fig. 14 진동속도 : 41 < 60 dB(V) (O.K)

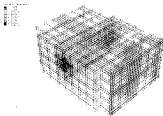


Fig. 15 소음레벨 : 25 < 60 Leq dB(A) (O.K)

5.2 터널 주행시 한양아파트의 소음진동 평가

해석구간은 Fig. 16과 같이 지상으로 아파트가 위치한 터널 구간으로 열차 운행시 한양아파트에서 발생하는 소음진동 영향을 수치해석은 통하여 검토하였으며 해석방법 및 절차는 녹원교회의 소음진동 영향평가와 대응 소이하다. Fig. 17은 전체 진동속도에 대한 등고선도를 나타내고 있으며, Fig. 18 과 Fig. 19는 열차 운행시 발생하는 진동속도 및 분가

소음도를 보여주고 있다. 복원교회의 해석에서처럼 모든 해석결과가 환경규제 기준치를 충족하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 설계시 특별한 방진 및 방음 대책은 요구되지 않음을 알 수 있었다.

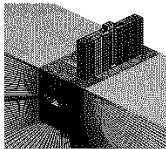


Fig. 16 현상아파트 구간의 유한요소해석모델

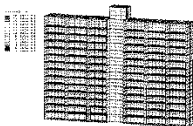


Fig. 17 진동속도 : $V_{max}=0.0084kine < V_a=0.3kine$ (O.K)



Fig. 18 진동레벨 : $50 \text{ dB(V)} < 65 \text{ dB(V)}$ (O.K)

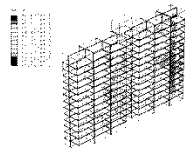


Fig. 19 소음레벨 : $66 \text{ dB(V)} < 70 \text{ dB(V)}$ (O.K)

6. 결론

본 논문에서는 Input identification 기법과 열차 진동에 의한 계측자료를 사용하여 열차하중을 산정

하고 산정된 열차하중의 적용성을 검증하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에 사용된 프로그램은 지반과 구조물의 상호작용을 모형화하여 지반의 입밀한 전달함수를 산정할 수 있는 SASSI 해석 프로그램을 사용하였으며, 열차하중의 검증을 위해서는 3차원 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS를 사용하였는데 계측 자료에 대한 응답을 구한 후 실측값과 비교 분석을 통해 사용된 하중의 신뢰성을 검증하였다. 이와 같은 역해석 기법을 통해 산정된 열차주행하중을 3차원 유한요소 해석프로그램인 ABAQUS에 적용함으로써 실제 열차주행으로 인한 인접한 구조체의 소음·진동 영향을 예측할 수 있었으며 해석 결과 모두 소음·진동 규준치 이내로 평가되어 특별한 방음 및 방진 대책은 요구되지 않음을 알 수 있었다.

한편, 대상지역의 정확한 지반자료가 부족하고 하중원의 모형화를 단순화했기 때문에 산정된 지반 전달함수의 오차가 상당히 클 것으로 판단되었으나 해석결과는 전달함수를 모형화 한 때의 오차가 비교적 크지 않았음을 보여주고 있다. 후속 연구를 통해 하중원의 모형화에 관한 면밀한 검토와 열차가 주행하는 지역의 지반 물성치를 조금 더 정확하게 파악하여 지반 전달함수의 오차를 최소화할 수 있다면 상당히 정확하고 신뢰성있는 해석이 수행될 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 이종범, 유장라, 주광호, 최준성(1998), "Prediction of Frequency Characteristics of Elast-induced Ground Vibration", 한국원자력공학회.
2. 김득성, 김형근, 장서일(2002), "지하철에 의한 거리별 지반진동 예측에 관한 연구", 한국철도학회, 국제학술대회 논문집 2002.05, pp.597-602.
3. 김계연(1995), "다중 파동함수를 가진 축대형 동적무한요소의 개발 및 이를 이용한 지반-구조물 상호작용해석", 공학박사 학위논문, 한국과학기술원.
4. 유장라외(1994), "안전관련 구조물 근접서공시 발파진동 허용기준의 적용성에 관하여", 터널과지하공간, Vol.4, pp.287-298.
5. 홍규선(1993), "봉착성 측정에 의한 구조물의 손상도 추정", 공학박사학위논문, 한국과학기술원.
6. S. Kunimatsu, et al.(1983), "Estimation of the Vibration level from Impulsive Velocity Waves", 일본 토목학회논문집, Vol.391, pp.134-141.