

# 지하철 운행에 의한 인접건물의 진동영향 평가 연구

## Reduction and Evaluation of Subway Induced Vibration Effects on Surrounding Buildings

박지훈\*      민경원\*\*      이루지\*\*\*      최석주\*\*\*\*      염성곤\*\*\*\*\*  
Park, Ji-Hun, Min, Kyung-Won Lee, Roo-Jee Choi, Seok-Joo Yum Sung-Kon

**Key Words** : Ground Vibration, Vibration Acceleration Level(VAL), Subway

### ABSTRACT

Ground vibration at Gil-dong in Seoul induced by the 5th line of Seoul Subway is predicted using various prediction methods and compared with measured vibration. Also, several issues on the improvement of prediction methods are discussed. Furthermore, as an alternative vibration source, measured vibration acceleration level(VAL) on the tunnel wall of the Bundang line of Seoul Subway is applied to the prediction of the VAL at the location mentioned previously. Then requirements accompanied to the suggestion of the new vibration source appropriate to the condition of Seoul Subway.

### 1. 서 론

대도시의 점증하는 대중 교통난을 해결하기 위한 수단으로 사용되는 지하철은 점차 노선을 확장하고 있다. 그러나 인구 및 건물이 밀집한 대도시에서 건설된 지하철은 인접 건물과 충분한 거리를 확보하기 힘들기 때문에 진동 및 소음 피해를 발생시켜, 지하철 인접건물에 거주하는 주민들에 의해 제기되는 가장 빈번한 민원들 중의 하나이다 또한 점차 높아져 가는 주거환경에 대한 요구조건으로 인해 소음 및 진동에 대한 각종 기준들이 제정되고 있는 실정이다. 국내도 예외는 아니어서 도로 및 철도 소음 규제법이 제정되어 적용되고 있는 실정이며 2010년부터는 보다 강화된 규제치가 적용될 예정이다.<sup>1)</sup> 지하철에 의해 발생하는 진동의 예측방법은 크게 유한요소해석에 의한 예측과 경험식에 의한 방법으로 나눌 수 있다. 이 가운데 유한요소해석에 의한 예측은 지반의 비선형 동특성의, 구조물 지지조건의 불확실성 등으로 인해 신뢰도가 저하되며 및 고차 모드의 진동을 반영하기 위한 요소수의 증가는 해석시간의 증가를 가져오므로 효

율성도 낮다는 단점이 있다. 반면에 경험식에 의한 예측법은 유한요소해석에서 고려하기 힘든 점들이 통계적인 데이터에 반영되어 있다는 장점이 있으며 적용하기가 간편하다. 다만 외국에서 개발된 경험식이기 때문에 국내 실정과 다소 차이가 있을 수 있다는 단점이 있다.

본 연구는 지하철로 인해 발생하는 건물 실내의 진동 및 소음을 예측하기 위한 기초단계로서 지표면에 전달되는 진동을 다양한 예측법을 통해 예측하고 실측치와 비교한다. 또한 외국의 기준진동 대신에 국내 지하철 터널에서의 실측된 진동가속도레벨(VAL)을 사용하여 지표면에 전달되는 진동 예측을 수행하고 예측법의 개선점 및 새로운 지하철 기준진동의 제안의 기초를 마련하는 것을 목표로 한다.

### 2. 경험적 예측법

경험식에 기초한 지하철 진동 예측법은 크게 기준진동, 기준진동의 보정 및 전달경로에서의 손실 예측으로 구성된다. 기준진동은 실측 결과의 통계를 이용해서 제시된 것으로서 차량, 선로 및 터널 구조물 등에 관한 기준상태와 함께 제시된다. 기준진동의 보정은 차량, 선로 및 터널 구조물에 관한 실제 조건과 기준상태의 차이를 고려하기 위한 것으로서 열차운행속도, 레도지지강성계수, 선로에 적용된 방진기법, 터널구조 형식 및 두께 등을 고려한다. 전달경로에서의 손실은 지반손실, 지반-구조물 커플링 손실, 구조체 내부의 전달 손실로 분류할 수 있

\* 단국대학교 건축대학 건축공학과 연구전임강사  
\*\* 단국대학교 건축대학 건축공학과 부교수  
\*\*\* 단국대학교 건축대학 건축공학과 석사과정  
\*\*\*\* 세이빈 엔지니어링 대표이사, 공학박사  
\*\*\*\*\* 삼성물산 건설부문 담당과장, 공학박사

다. 이 가운데 지반손실은 진동의 기하학적 분산손실, 토질의 감쇠손실 및 이중지반의 커플링 손실로 구성된다. 구조체 내부의 전달 손실은 일반적으로 층간의 전달 손실 및 슬래브에서의 증폭으로 구성되며 최종적으로 얻어진 VAL로부터 소음레벨을 계산하기 위한 변환식이 제시되어 있다.

일반적으로 잘 알려진 지하철 진동 예측법에는 Wilson, Ungar & Bender, Kurzweil, Tokita 및 뉴욕지하철의 예측법이 있다. 이 가운데 Wilson, Ungar & Bender 및 Kurzweil의 예측법은 옥타브밴드(octave band) VAL을, Tokita 및 뉴욕지하철 예측법은 O.A.(overall) VAL을 예측한다.<sup>2),3),4)</sup>

### 3. 해석예제구성

진동예측 해석예제는 허영<sup>5),6)</sup>, 김응록<sup>4)</sup>에 의해서 측정된 서울 지하철 5호선 주변의 길동 현장에서 측정된 자료를 활용하였다. 터널 단면 및 지반의 구성은 그림1과 같이 연암, 풍화암, 사질토의 순서로 이루어져 있다.

Wilson 예측법은 진동원을 선로 최상부 중심으로 가정하고 있으며 터널 주변이 암반인 경우에 진동원으로부터 7.63m 떨어진 위치의 VAL을 기준진동으로 제시하고 있다. 지반전달손실 결정은 진동원과 수신점 사이의 직선 전달경로를 기준으로 결정되었으며 경로의 길이는 그림 1(a)에 표시하였다. Wilson은 지반전달 손실을 암반과 토질로 구분하여 제시하고 있으며, 암반에서는 분산손실만을 가정하고 있는 반면에 토질에서는 분산 및 감쇠손실이 동시에 일어나는 것으로 가정하고 있다. 사질토에서의 손실은 전체 전달경로를 사질토로 가정한 손실량에서 암반 전달경로에 해당되는 부분의 손실량을 뺀 값으로 산정하였다.

Ungar & Bender의 예측법에서는 터널 벽체에서의 VAL을 기준진동으로 사용하고 있으며 분산손실의 계산에 있어서 진동원을 터널 중앙으로 가정하고 있다. 감쇠손실이 발생하는 거리를 산정하기 위해서 그림1(b)와 같이 복선박스형의 터널 구조를 등가의 원형터널로 치환하였으며 그 외경은 단면적이 박스형 터널 단면적의 1/2과 동일하도록 결정하였다. 따라서 풍화암에서의 감쇠손실은 등가원형터널의 외벽에서 사질토와의 경계면까지의 거리를 기준으로 산정하였으며 사질토에서의 감쇠손실은 풍화암과의 경계면에서 수신점까지의 거리를 기준으로 산정하였다. Ungar & Bender 예측법은 다음 식과 같은 감쇠손실의 산정식을 제시하고 있다.

$$L_d = -27.3 \frac{f r h}{C_d} \quad (dB) \quad (1)$$

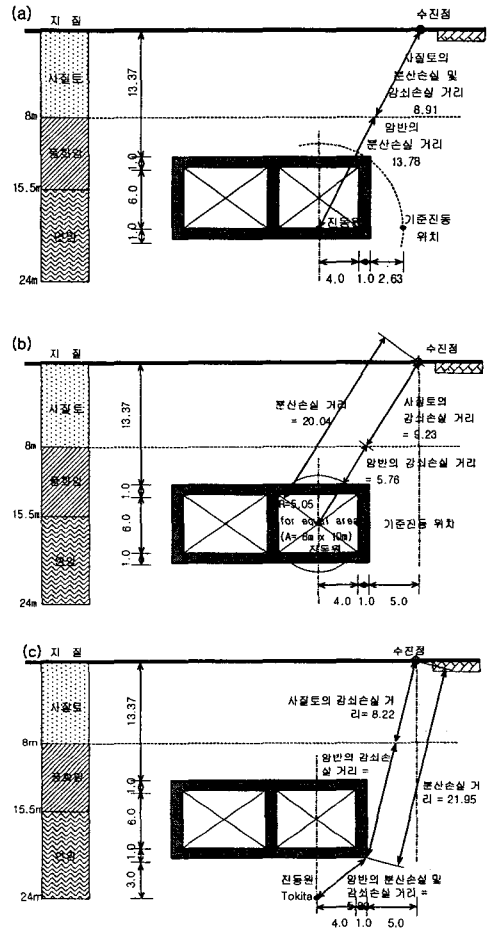


그림1 지하철진동의 진동원 및 전달경로

여기서  $f$ 는 옥타브밴드 중심주파수,  $r$ 은 전파거리이다.  $h$ 는 토질의 감쇠정수로서 사질토에 대해서는 0.1, 풍화암에 대해서는 0.01을 사용하였고  $C_d$ 는 압축파의 전파속도로써 사질토는 250m/sec, 풍화암은 950m/sec를 사용하였다. Kurzweil 예측법의 경우에 기준진동이 옥타브밴드 중심주파수 31.5Hz에서 1000Hz 사이에서 제시되었으며 4Hz에서 16Hz까지는 Wilson의 기준진동을 참고해 외삽하여 사용하였다. 진동원, 기준진동의 위치, 전달 경로 및 분산손실의 산정법은 Ungar & Bender 예측법과 동일하며 감쇠손실은 Wilson 예측법과 동일한 방식으로 산정한다.

New York 지하철 역시 터널 벽체에서의 VAL을 기준진동으로 사용하고 있으며 전달경로의 길이에 대한 함수로 제시된다. 또한 지반의 종류를 암반, 사질토, 점토로 분류하여 기준진동을 제시하고 있으며 본 예제에서는 암반에 대한 기준진동을 사용하고 사질토에 대한 기준진동은

해당 경로상의 손실량 계산에만 사용하였다. Tokita의 예측법은 지하철티널 바닥의 중심으로부터 연직하방으로 3m 떨어진 점을 가진원으로 가정하며 터널이 장애물 역할을 하여 최단 경로는 그림2(c)와 같이 터널 모서리에서의 회절을 고려한 두 직선으로 구성된다. 거리에 비례하는 감쇠손실 산정식을 제시하고 있지만 비례상수의 값을 0.35와 0.43(dB/m) 사이의 값으로 모호하게 제시하고 있어서 다른 예측법과 마찬가지로 암반에 대해서는 무시하고 사질토에 대해서는 중간값인 0.39를 사용하였다.

#### 4. 해석결과

O.A. 진동레벨의 예측치는 그림2와 같다. 뉴욕지하철 예측법에 의한 결과를 제외하고는 전반적으로 과대평가를 하고 있음을 알 수 있고 Kurzweil 예측법이 가장 오차가 작다. 이는 Kurzweil의 기준진동이 상한, 하한 및 평균치로 3가지를 제시하고 있으며 이 가운데 본 예제에서는 평균치를 적용했기 때문에 타 예측법에 비해 상대적으로 오차가 적은 것으로 보인다. 반면에 Wilson 및 Ungar & Bender의 예측법은 발생 가능한 진동의 상한치를 규정하고 있다는 점이 과대평가의 원인으로 보인다. Tokita 예측법은 기준진동의 보정이 항목이 적고 감쇠손실 산정계수가 모호한 점 등에서 오차가 발생한 것으로 보이며, 뉴욕지하철은 유일하게 실측치보다 낮은 예측치를 보이고 있다.

다음으로는 옥타브밴드 예측결과를 그림3에 나타냈다. 세 가지 예측법이 모두 500 Hz 이상에서 과소평가되고 있다. 이는 감쇠손실의 산정식 (1)에서도 볼 수 있듯이 고주파수 영역으로 갈수록 감쇠손실이 증가하며 옥타브밴드해석에서 중심주파수는 2의 지수승으로 증가하기 때문에 고주파수 영역의 감쇠 손실이 과다하게 평가되는 데 기인한 것이다. 감쇠손실의 산정을 그래프로 제시하고 있는 Wilson의 예측법도 예외가 아니며 Kurzweil의 경우에도 Wilson과 Ungar & Bender의 손실 산정법을 혼용하고 있으므로 동일한 경향을 보인다. 따라서 실제로는 지반의 감쇠정수가 식 (1)에서와 같이 일정하지 않고 주파수가 증가함에 따라서 점차 감소하는 특성이 있다고 사료된다.

250Hz 이하에서의 분포를 살펴보면 Kurzweil 예측법은 전반적으로 계측치와 잘 일치한다. Ungar & Bender 예측법은 경향은 잘 일치하지만 전반적으로 25dB 정도가 과대평가 되고 있다. 이 경향이 기준진동에 의한 오차인지 손실량 산정에 사용된 물성치의 부적절성에서 발생한 것인지 알아보기 위해 사질토의 감쇠정수  $h$ 를 0.1부터 0.4까지 0.1씩 증가시켜 보았으며 그 결과는 그림4와 같다. 감쇠계수를 증가시켜도 저주파수 대역에서는 큰 변화가 없고 고주파수 영역에서만 과도한 손실량이 산정됨

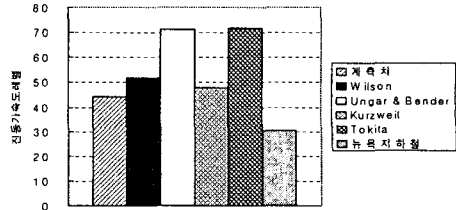


그림 2 지표면의 O.A. VAL

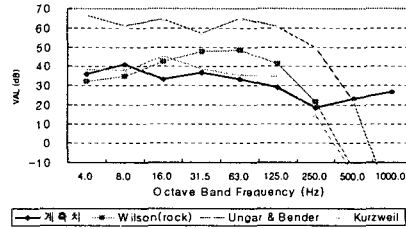


그림 3 지표면의 1/1옥타브밴드 VAL

을 알 수 있다. 따라서 주된 오차 발생 원인은 손실량 산정보다는 기준진동이 지나치게 안전측이기 때문인 것으로 보인다. Wilson의 경우에 전반적인 오차는 Ungar & Bender에 비해 상당히 작지만 전반적인 분포경향은 실측치와 상당한 차이가 있다. 터널 주변의 풍화암은 상당히 무른 암반이므로 기준진동에서 암반기초 대신에 복합지반에 대한 기준진동을 사용하여 예측치를 산정해 보았으며 그 결과는 그림5와 같다. 오히려 125Hz 및 250Hz에서의 VAL이 지나치게 증폭되는 것을 볼 수 있으며 풍화암은 기준진동 선정에 있어서 암반으로 평가하는 것이 더욱 적절하다고 할 수 있다. 이는 허영에 의한 결과와는 반대의 경향이며 전달경로에 관한 가정 등에서 차이가 발생한 것으로 보인다. 결과적으로 전반적인 경향을 볼 때에 Kurzweil의 예측법을 사용하는 것이 가장 정확한 결과를 산출한다고 할 수 있다.

#### 5. 실측치를 이용한 예측

앞서 적용된 다섯 가지 지하철 진동 예측법은 개발된 국가의 지하철 진동에 대한 통계치를 기준진동으로 사용하고 있으므로 국내의 실정과 차이가 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 국내 지하철에서 측정된 VAL을 기준진동으로 사용하여 지하철 운행으로 인한 지반진동을 예측할 수 있는지 살펴보았다. 기준진동으로 사용된 실측 자료는 (주)삼성물산의 분당 로얄팰리스 현장 부근에 위치한 분당선 백궁-초림 구간에서 실측된 터널 벽체의 VAL로서 로얄팰리스 현장 부근의 발파작업에 의한 터널 벽체의 안전성 비교검토를 위해 측정된 것이다.7) 옥타브밴드 VAL이 31.5Hz 이상의 중심주파수에 대해서만

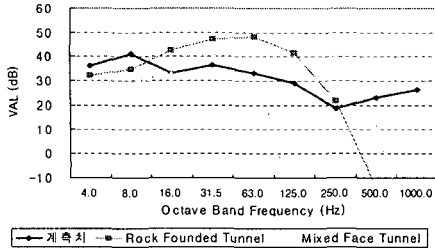


그림 5 사질토의 감쇠정수 별 예측결과 (Wilson)

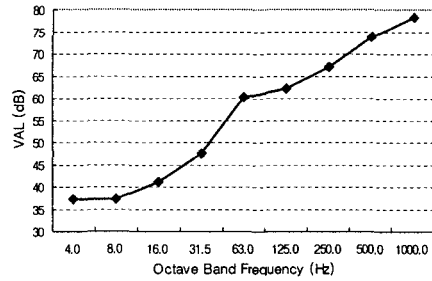


그림 6 분당선 터널 벽체의 1/1 옥타브밴드 VAL

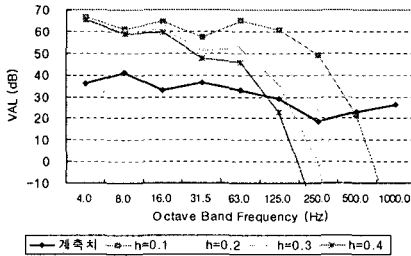


그림 4 사질토의 감쇠정수 별 예측결과 (Ungar & Bender)

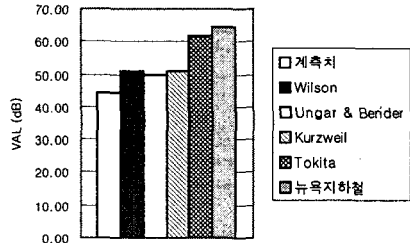


그림 7 지표면의 O.A. VAL

측정되었기 때문에 16Hz 이하의 대역에 대해서는 Wilson의 기준진동을 참조하여 외삽하였으며 결과적인 기준진동은 그림6과 같다. 지하철 5호선과 비교하면 터널을 둘러싼 지반이 연암 및 경암으로서 길동 주변 지하철 5호선의 지반 구성과 유사하며 터널 벽체의 평균 두께는 86cm로서 이를 기준 두께로 하여 뉴욕지하철의 벽체두께 보정식을 적용하였다. 또한 분당선 측정데이터가 터널벽체의 VAL이므로 기준진동위치가 이와 다른 Wilson 및 Tokita의 예측법의 전달손실량 산정에 반영하였다.

그림7은 분당선 실측치를 적용해서 예측한 길동 측정 현장의 O.A. VAL이다. O.A. VAL의 예측치는 Ungar & Bender 및 Tokita 예측법의 경우에 상당히 감소하였으며 뉴욕지하철의 경우에는 크게 증가하였다. Wilson 및 Kurzweil의 경우에는 기준진동의 변화로 인한 O.A. VAL의 변화폭은 크지 않았다. 결과적으로 Wilson, Kurzweil 및 Ungar & Bender의 예측법이 서로 유사하면서 나머지 두 예측법에 비해 가장 실측치에 가까운 결과를 산출하였다. 또한 각 예측법의 고유한 기준진동을 사용한 경우에는 Kurzweil 예측법에 의한 결과가 가장 실측치와 가까웠으나 분당선 실측 기준진동을 사용하면 Ungar & Bender 예측법이 가장 실측치에 가까웠으며 전자의 경우에 비해 오히려 오차의 크기는 증가하였다. 그림8은 옥타브밴드 VAL의 예측결과이다. Wilson,

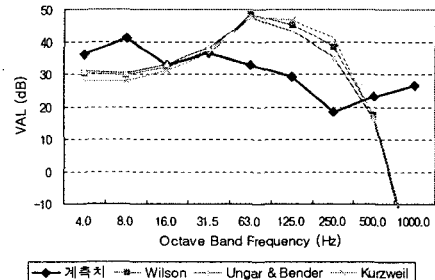


그림 8 분당선 터널 벽체 VAL로부터 예측된 지표면의 1/1옥타브밴드 VAL

Ungar & Bender 및 Kurzweil 예측법이 모두 서로 유사한 결과를 보임을 알 수 있다. 저주파수 및 고주파수 영역의 예측치는 실측치보다 낮았고 중간대역에서는 실측치보다 높았다. 고주파수 대역에서 VAL이 급격히 줄어드는 것은 앞서 예측법 고유의 기준진동을 사용해서 얻은 결과와 유사한 양상을 보이므로 감쇠정수의 주파수의존성을 무시하는 데서 온 결과로 보인다. 반면에 중간대역에서의 오차는 분당선과 서울 지하철 5호선의 차이를 고려한 보정이 이루어지지 않은 데서 기인한 것으로 추측된다. 예를 들어서 Ungar & Bender의 예측법을 참조하면 레일지지강성계수의 차이에 의한 보정치가 가칭 주파수 대역에서는 그 보다 낮은 주파수 대역의 4배이므로 이와 같은 점을 고려하면 기준진동 보정에 의해 중간

대역의 예측치가 저감될 수 있을 것으로 보인다. 따라서 국내 지하철의 실측 VAL을 기준진동으로 사용한다고 하여도 보다 광범위한 자료 수집을 통해 이와 같은 항목에 대한 적절한 보정식을 개발할 필요가 있을 것으로 보인다.

## 6. 결론

본 연구에서는 5종의 지하철 진동 예측법을 적용하여 서울 지하철 5호선 주변의 지반진동을 예측하고 실측치와 비교함으로써 각 예측법의 정확도 및 개선사항을 파악하였다. 결과적으로 적용된 지하철진동 예측법 가운데 Kurzweil의 예측법이 가장 정확한 결과를 산출하였다. 그러나 Kurzweil의 예측법을 포함하여 옥타브밴드 VAL의 예측법들은 전반적으로 고주파수 대역에서 지반에서의 감쇠손실이 과다하기 때문에 토질의 현장 테스트 또는 광범위한 데이터베이스 구축을 통해 감쇠정수를 진동수 대역별로 정량화할 필요가 있다.

또한 국내고유의 지하철 기준진동 작성의 예비 단계로서 동일한 실측치를 예측하기 위해 분당선의 터널벽체 VAL 측정 결과를 적용하였다. 분당선에서의 실측결과를 기준진동으로 적용한 경우에는 O.A. VAL는 오히려 오차가 소량 증가하였으며 옥타브밴드 VAL의 분포에 있어도 큰 차이가 있음을 확인하였다. 따라서 국내지하철 터널에서 직접 측정된 데이터를 적용하더라도 적용현장별로 상이한 조건들에 대한 보정법을 개발하는 것이 필요함을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 삼성물산(주) 건설부문의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- (1) 안정공학협회, 박상규 역, 2001, "소음·진동학", 해문당.
- (2) James T. Nelson, Hugh J. Saurenman, 1983, "State-of-the Art Review: Prediction and Control of Groundborne Noise and Vibration from Rail Transit Trains", UMTA Technical Assistance Program.
- (3) 허영, 1999.7월, "지하철 운행에 의한 진동 예측 및 대책", 한국소음진동공학회 도심지 환경소음·진동 저감대책 세미나.
- (4) 김용록, 1996, "지하철의 진동 예측에 관한 연구", 서울시립대학교 학위논문.
- (5) 허영, 1999, "지하철 진동 예측식 개발(수원대논문집)", 수원대학교 논문집 자연과학편 제17집, pp.253-263.
- (6) 허영, 1996, "지하철 진동 예측식 개발", 수원대학교 산업기술연구소 논문집, 제11집, pp. 215-220.
- (7) 삼성물산, 2000, "분당 정자동 로얄팰리스 현장의 터널 내 진동 계측관리 보고서(2)", 세이빈엔지니어링.