

열차하중에 의한 지반 및 인접구조물의 진동 계측과 예측 해석

°이주호*, 박광순**, 박경래***, 양신추****

Measurement and Prediction Analysis of Ground and Structural Vibration Induced by Train Load

°Joo-Ho Lee*, Kwang-Soon Park**, Kyoung-Lae Park***, Sin-Chu Yang****

ABSTRACT

In this study, the method of analysis which is developed for calculating dynamic train loads and ground vibration by Shin-Chu Yang is verified comparing measurements of real structure. The results of analysis are agreed well with measurements of ground and structural vibration induced by passing train. The vibration level of analyzed results which is more than that of measured gives conservative result. To analyze frequency characteristics, the analyzed results are applied to the ISO environmental vibration regulation and reveal the possibility of application in analysis of frequency characteristics.

1. 서론

열차주행에 의한 진동의 전파는 진동원에서 열차의 특성 및 노반 구조에 의한 영향, 전파하는 탄성파의 형태, 주변 구조물과의 상호작용에 의한 역학적 거동 등에 많은 영향을 받으므로 이들을 모두 고려하여 진동을 예측하는 것은 많은 어려움이 있다. 또한, 구조물과 지반의 물리적 특성에 대한 정확한 이해가 필요하나 실제로 이에 대한 정보를 얻는 것은 매우 한정되어 있다. 이런 이유로 지금까지 진동 영향에 대한 검토는 직접적인 계측이나 간단한 경험식을 통해서 이루어지고 있다[1]. 그러나 계측의 경우 이미 완성된 구조계에 대해서는 정확한 평가가 이루어질 수 있으나 구조계의 변경이 이루어지는 경우에는 정확한 예측이 불가능하며 경험식의 경우 많은 제한 조건이 존재하므로 모든 구조계에 임의로 적용하는데

는 많은 문제가 있는 실정이다. 따라서 진동의 예측에는 해석적 방법에 의한 합리적인 평가가 필요하다.

해석적인 진동의 예측 방법은 열차하중의 평가와 이를 이용한 지반에서의 진동전파해석으로 나눌 수 있다. 열차 하중의 평가는 차량-궤도 상호작용문제의 해석을 통해서 해석할 수 있으며[2], 지반과 구조물에서의 진동전파해석은 원역지반을 모형화할 수 있는 방법을 이용한 지반-구조물 상호작용해석을 통해서 이루어질 수 있다[3].

열차에 의해 유발된 지반진동문제와 관련하여 외국에서는 실제 계측을 통한 지반진동의 평가에 대해서 다수의 연구성과가 발표되었으며, 차량-궤도 상호작용문제를 이용한 궤도해석방법에 대해서도 많은 연구성과가 발표되고 있다. 국내에서 관련분야에 대한 연구는 아직 초기단계로서 몇 건의 연구성과가 발표되었다[4-6]. 본 연구에서는 열차가 통과하는 인접지반과 구조물에서의 진동 계측을 통해서 기 개발된[2,3] 해석방법에 대한

* 롯데건설 기술연구소 수석연구원
** 롯데건설 기술연구소 선임연구원
*** 롯데건설 기술연구소 연구원
**** 한국철도기술연구원 책임연구원

검증을 실시하고 이 방법을 통해서 다른 구조계의 진동 수준을 예측 하도록 한다. 또한 기존 환경진동기준과의 비교를 통해서 환경진동기준에의 적용방법에 대해서도 연구하였다.

2. 해석방법

2.1 하부구조물에 전달되는 열차하중의 PSD 산정

하부 바닥면의 강성이 상대적으로 궤도 지지강성보다 매우 클 때 궤도를 통하여 단위길이당 바닥면에 전달되는 하중, $F_p(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_p(t) = K_b^* y_{ts}(t) \quad (1)$$

여기서 K_b^* 는 자갈도상의 복소강성이고 $y_{ts}(t)$ 는 침목의 변위로서 이동축중에 의한 처짐과 조도성분에 의한 처짐의 합으로 주어진다. 식(1)로부터 하부구조에 전달되는 단위길이당 동하중의 PSD는 다음과 같이 구해진다.

$$\hat{F}_p(\omega) = |k_b^*|^2 \hat{Y}_{ts}(\omega) = |k_b^*|^2 \left\{ \hat{Y}_{qs}(\omega) + \hat{Y}_{rs}(\omega) \right\} \quad (2)$$

여기서 $\hat{Y}_{qs}(\omega)$ 는 Fig. 1과 같이 모형화한 이동축중에 의한 침목변위의 PSD 이고, $\hat{Y}_{rs}(\omega)$ 는 조도성분하중에 의한 침목변위의 PSD이다. 식(2)에서 이동축중에 의한 침목의 변위의 PSD는 축간격이 d 인 2축대차를 고려할 경우 침목의 처짐이 다음 식으로 주어지므로,

$$y_{qs}(r) = y_{qs}(r - d/2) + y_{qs}(r + d/2) \quad (3)$$

식(4)를 Fourier 변환 시킴으로서 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{Y}_{qs}(\omega) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\left| \int_{-T/2}^{T/2} y_{qs}(t) \exp(-in\bar{\omega}_0 t) dt \right|^2}{2\pi T} \\ &= \frac{|\bar{Y}_{qs}(\omega)|^2}{2\pi T} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 T 는 주기이고, $\bar{\omega}_0 = 2\pi/T$, $\bar{Y}_{qs}(\omega)$ 는 침목변위의 복소응답이다.

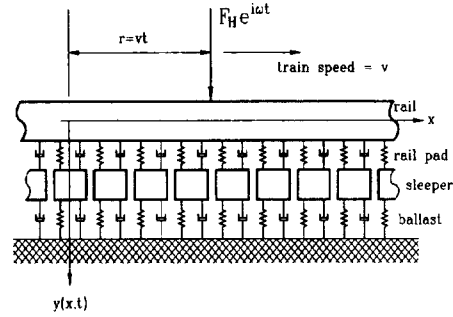


Fig. 1 Modelling of moving axle load on the ballast

일반적으로 차륜하중은 점진동원으로 모형화하여 3차원으로 해석을 수행하여야 하지만 궤도로부터 해석영역거리가 열차길이의 $1/\pi$ 보다 작으면 차륜/레일 접촉면을 따라 작용하는 점진동원의 행렬은 선진동원으로 가정할 수 있다[7]. 따라서 본 해석에서는 지반을 평면변형률상태로 가정하여 2차원해석을 수행하였다.

2차원 해석시 사용할 수 있는 2차원 등가평면하중의 PSD는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{F}_{plane}(\omega) = \left(\frac{\text{Number of wheel axes per train}}{\text{Length of train}} \right)^2 \hat{F}_{point}(\omega) \quad (5)$$

여기서 $\hat{F}_{point}(\omega)$ 는 1개 차륜에 의한 점하중의 PSD로서 식(2)로 주어진다[2].

2.2 유한 및 무한요소의 병합방법에 의한 지반

진동 해석

지반진동의 해석을 위하여 구조물과 지반을 모형화할 경우 가장 주의해야 할 것은 발생된 진동이 충분히 외부영역으로 전파될 수 있도록 지반을 모형화 하는 것이다. 이를 위해서 일반적으로 구조물과 하층원에 가까운 지반은 유한요소(Finite Element, FE)를 이용하여 모형화하고 외부지반은 에너지를 발산시킬 수 있는 경계로 모형화 한다. 외부경계를 모형화하는 방법으로는 경계요소법, 점성경계법, 전달경계법, 무한요소법 등이 있다[8]. 본 연구에서는 기 개발된 2차원 동적무한요소(Dynamic Infinite Element, IE)를 사용하여 외부지반

을 모형화 한다[3].

Fig. 2는 무한요소를 사용하여 지반을 모형화하는 것을 나타내고 있다. 지반은 평행층상으로 가정하며, 그림과 같이 수평무한요소와 방사무한요소를 사용하여 지반을 모형화 한다.

지반으로 전파되는 진동을 모형화 하는 경우 외부영역으로 전파해 가는 파동형상에 따라서 균질 반무한지반, 무한강성의 기저압반위에 적층된 지반, 그리고 유한강성의 기저압반위에 적층된 지반 등 3가지 유형의 지반으로 분류할 수 있다. 각 경우에 지반진동은 지반의 적층 형상에 따라서 Rayleigh 파 등의 표면파와 전단파, 압축파와 같은 물질파의 형태로 전파하게 된다. Table 1.은 각 경우에 있어서의 외부영역함수를 나타내고 있다.

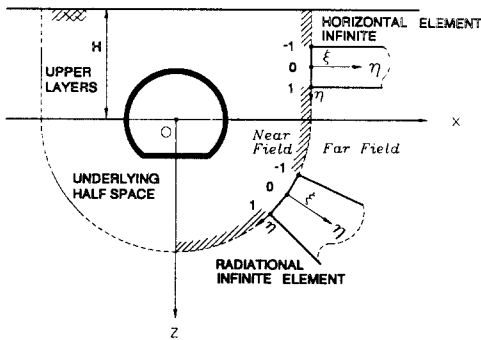


Fig. 2 Modelling of Soil Media using Infinite Elements

Table 1. Far Field Wave Function of Halfspace and Layered Media

지반유형	요소이름	Rayleigh 파	전단파	압축파
반무한지반	수평무한요소	$e^{-\rho_1 \sqrt{1-\beta_1^2} \omega z}$	$\sqrt{\frac{1-\beta_1^2}{1-\beta_1^2}}$	$\sqrt{\frac{1-\beta_1^2}{1-\beta_1^2}}$
	방사무한요소	$e^{-\rho_1 \sqrt{1-\beta_1^2} \omega z}$	$\sqrt{\frac{1-\beta_1^2}{1-\beta_1^2}}$	$\sqrt{\frac{1-\beta_1^2}{1-\beta_1^2}}$
무한강성의 기저압반 위의 지반	수평무한요소	$e^{-\rho_i \sqrt{1-\beta_i^2} \omega z}$ $i=1,2,3$	-	-
유한강성의 기저압반 위의 지반	수평무한요소 (상부수평층)	$e^{-\rho_i \sqrt{1-\beta_i^2} \omega z}$ $i=1,2,3$	-	-
	방사무한요소 (최하부 지반)	$e^{-\rho_i \sqrt{1-\beta_i^2} \omega z}$ $i=1$ 또는 2	$\sqrt{\frac{1-\beta_i^2}{1-\beta_i^2}}$	$\sqrt{\frac{1-\beta_i^2}{1-\beta_i^2}}$

계산된 동적무한요소의 질량 및 강성행렬은 주파수에 종속인 형태로 나타나므로 주파수영역에서 해석을 실시한다. 주파수영역에서 운동방정식

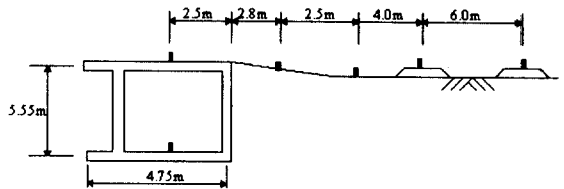
은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[-\omega^2 \mathbf{M}(\omega) + i\omega \mathbf{C}(\omega) + \mathbf{K}(\omega)] \mathbf{U}(\omega) = \mathbf{P}(\omega) \quad (6)$$

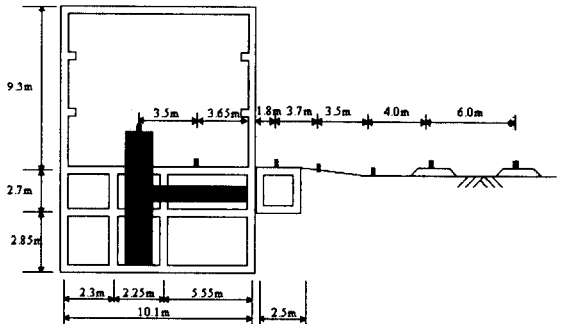
여기서 $\mathbf{M}(\omega)$, $\mathbf{C}(\omega)$, $\mathbf{K}(\omega)$ 는 각각 전체시스템의 질량, 감쇠 및 강성행렬이고 $\mathbf{P}(\omega)$ 는 하중벡터의 Fourier 변환이며 $\mathbf{U}(\omega)$ 는 시스템 주파수응답이다. 식(6)으로부터 $\mathbf{U}(\omega)$ 가 구해지면 시계열 응답은 Fourier 역변환을 통해서 구할 수 있다.

3. 계측

진동의 계측은 경부선 철도와 경수선 지하철이 근접하여 통과하는 시흥빛물펌프장 및 인접지반에서 실시하였다. 계측은 B&K의 가속도계를 사용하였으며 16채널 DAT를 사용하여 각 계측위치에서 동시에 신호를 기록하였다. 계측된 신호는 ASCII 파일로 변환하여 PC 상에서 분석을 수행하였다. Fig. 3은 계측한 위치에서의 단면을 나타낸다. 이때 (a)는 계측과 해석결과의 비교를 위해서 선정된 단면이며 (b)는 펌프장건물에서의 계측 위치를 나타내고 있다. 이때 열차는 각 그림의 오른쪽 두 곳에서 통과하며 열차 종류는 경수선 전철이다.



(a) Section for comparing between measurement and analysis (Section 1)



(b) Section of pumpig building (Section 2)

Fig. 3 Location of sensor

Fig. 4는 Fig. 3 (a)에서 계측된 결과의 시간이력이며 Fig. 5는 각 위치에서의 1/3 옥타브밴드 해석 결과이다. Fig. 6은 Fig. 4 (b)에서의 1/3 옥타브밴드 해석결과를 나타내고 있다.

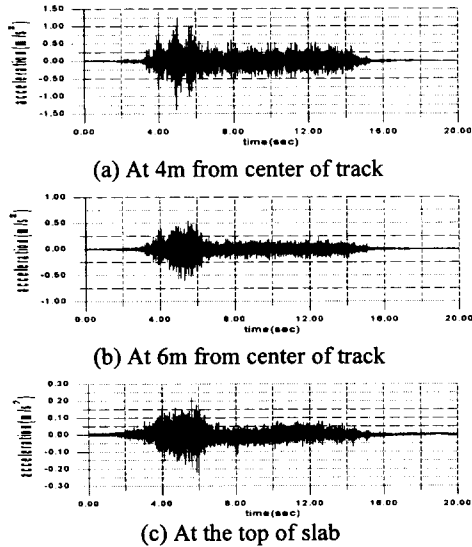


Fig. 4 Measured time history at section 1

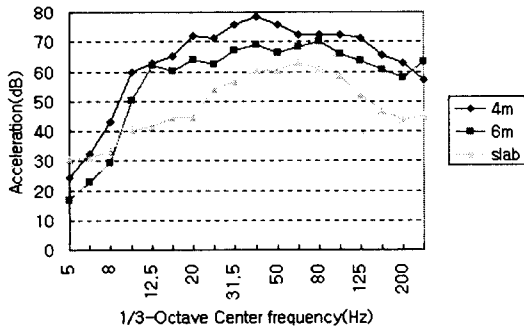


Fig. 5 Result of 1/3-octave analysis (Section 1)

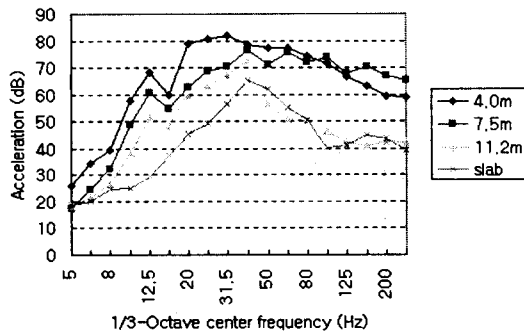


Fig. 6 Result of 1/3-octave analysis (Section 2)

4. 실측 및 해석결과의 비교

열차에 의해서 가해지는 하중을 구하기 위해서 먼저 도상계획도에서 전철 통과시의 PSD를 구한다. 이때 전철계획도와 차량의 제원은 국내에서 사용되는 전철에 준해서 사용하며 가정된 물성은 Table 2에 수록하였다. Fig. 7은 해석을 통해서 구해진 전철에 의해서 유발되는 하중의 PSD이다.

Table 2. Assumed material properties of rail track

레일	탄성계수	2.06×10^{11} (N/m ²)
	단위중량	60.8 (kg/m)
	단면적	7.75×10^{-3} (m ²)
	단면2차모멘트	3.09×10^{-5} (m ⁴)
레일패드	스프링계수	8.17×10^7 (N/m)
	점성감쇠계수	8.17×10^4 (N-sec/m ²)
침목	중량	120 (kg/m ³)
	간격	0.6 (m)
침목패드	스프링계수	5.11×10^7 (N/m)
	점성감쇠계수	4.28×10^4 (N-sec/m ²)
	히스테레틱 감쇠상수	0.5
차량	스프링하중량	1000.0 (kg)
	Hertzian 스프링강성	1.4×10^9 (N/m)
	대차간거리	9.5 (m)
	열차길이	195 (m)
	열차속도	65 (km/hr)

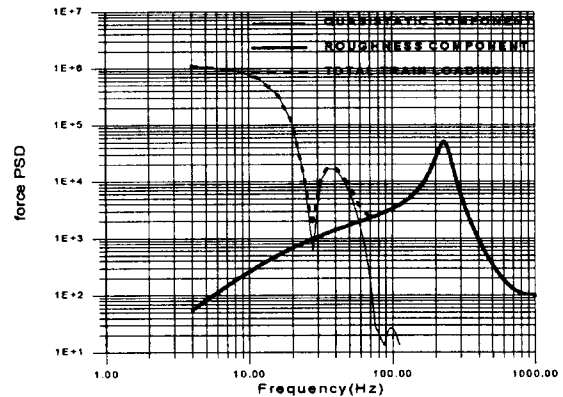
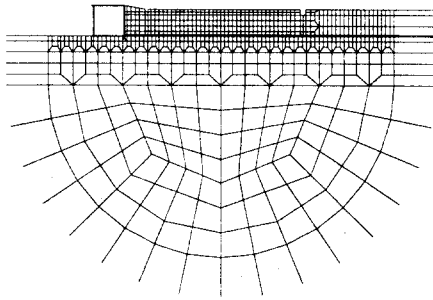


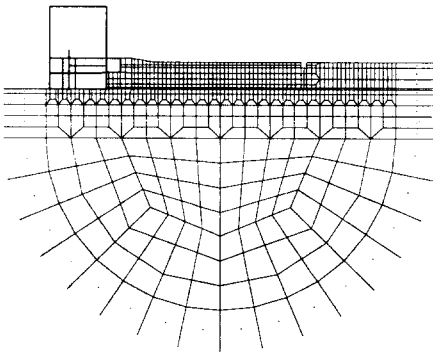
Fig. 7 PSD of Equivalent plane loading of subway train

해석은 Fig. 3에 나타난 단면을 각각 모형화한 후 Fig. 7에서 계산된 하중을 재하하여 수행한다. Fig. 8은 해석단면을 유한요소 및 무한요소로 모형화한 것을 나타내고 있다. 이때 구조물과 지반의 재료적 성질은 콘크리트구조물의 일반적인 물성과 구조물 인접 위치에서의 지반조사결과를 이용하였다. 구조모형화시 지반은 2차원 평면변형률요소(2-D Plane strain solid element)를 사용하였으

며 구조물은 보요소를 이용하였다.



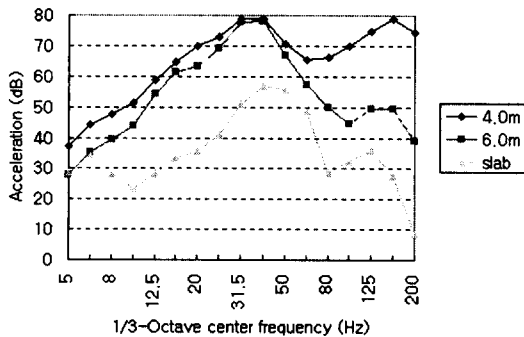
(a) Modelling of Section 1



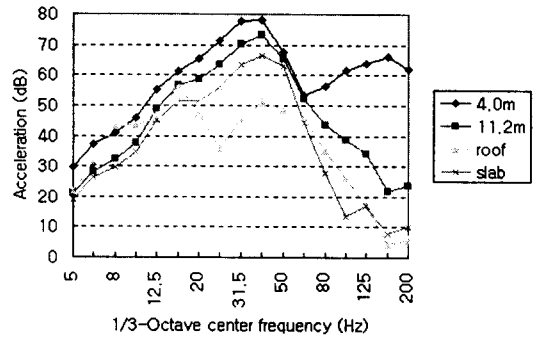
(b) Modelling of Section 2

Fig. 8 Modelling using FE and IE

Fig. 9는 해석결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 하중원에서 거리가 멀어질수록 전체적인 진동수준은 급격히 감소하며 고주파성분이 먼저 감소하는 것을 알 수 있다.



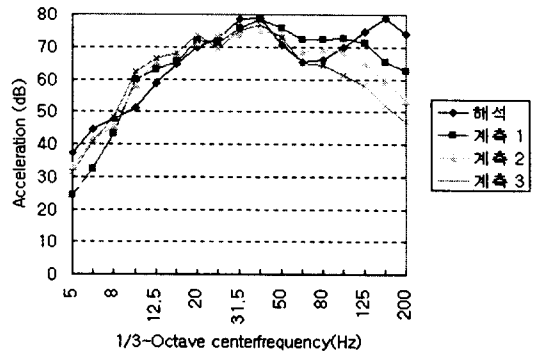
(a) Section 1



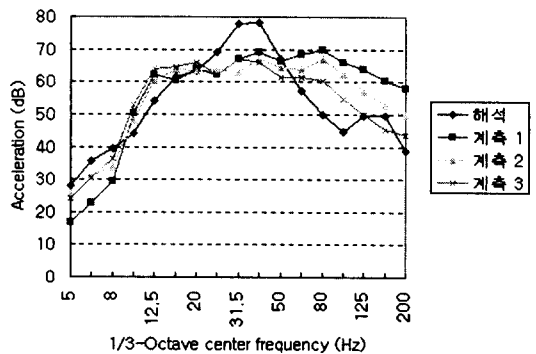
(b) Section 2

Fig. 9 Results of analysis

해석결과와 계측결과와의 비교는 Section 1에서 계측된 임의의 3개의 결과와 비교하였다. Fig. 10은 두 위치에서의 비교 결과를 나타내고 있다. 계측결과보다 해석결과가 조금 더 큰 결과를 나타내고 있지만 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.



(a) At 4.0m (Section 1)



(b) At 6.5m (section 1)

Fig. 10 Comparison between measurement and analysis

5. 환경진동기준과의 비교

현재 국내의 환경기준은 대체로 **Over-all** 값만을 비교하고 있다. 실제로 사람이 느끼는 진동은 주파수 대역별로 다르므로 보다 정확한 진동평가를 위해서는 주파수 대역별로 정해진 진동기준을 사용하는 것이 바람직하다. 따라서 본 연구에서는 주파수 대역별로 정해진 ISO 환경진동기준을 사용하여 진동을 평가하였다. Fig. 11 은 Section 2 에서의 해석결과를 1/3-옥타브밴드 레벨로 나타낸 후 ISO-2631 진동기준과 비교한 결과이다. Fig. 11 의 결과로 부터 대체로 해석결과들이 15-30m 이격지점의 전형적인 열차진동보다는 상회함을 알 수 있는데, 이것은 구조물이 공진 특성 및 실제거동이 3 차원인 것을 2 차원으로 모형화함에 따라 진동이 과대 평가된 것으로 판단된다. 비록 이 해석결과가 일부의 주파수대역에서 거주한계를 초과하고 있지만 건물손상기준은 물론 24 시간 진동한계 이하의 적은 진동수준임을 알 수 있다.

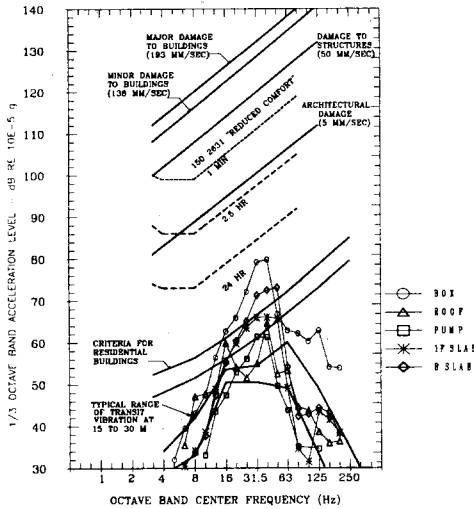


Fig. 11 Comparison between results and ISO regulation

6. 결론

본 연구에서는 개발된 열차통과시 인접지반 및 구조물에서의 진동 예측방법에 대한 검증을 계측을 통해서 실시하였으며 그 결과를 환경진동기준에 적용하였다. 연구 결과는 다음과 같다.

1. 열차-궤도 상호작용을 고려한 열차하중의 산정과 무한요소를 이용한 지반진동 전파해석을 통해서 지반 및 구조물에서의 진동을 해석한 결과는 계측과 합리적인 범위에서 일치하여 적용성을 검증할 수 있었다.
2. 해석결과는 실제 계측결과보다 큰 값을 나타내고 있는데, 이것은 구조모형화시 3 차원인 구조계를 2 차원 평면변형률모형으로 모형화하는 과정에서 실제보다 구조물이 유연하게 모형화되어서 생긴결과로 판단되며, 이는 안전측의 결과를 보여준다.
3. 해석결과를 ISO 환경진동기준에 적용한 결과 진동기준을 만족하였고, 주파수 대역별로 엄격하게 평가한 결과, 본 연구의 해석방법이 진동을 과대평가함을 고려하면 대상구조물의 손상은 없을 것으로 판단된다.

7. 참고문헌

- (1) 한국고속철도건설공단, 1995, 고속철도 환경소음 기준 및 진동기준에 대한 연구 (진동대책편).
- (2) 양신추, 1997, “차량과 궤도의 상호작용해석을 통한 하부구조물에 작용하는 동하중의 산정”, 대한토목학회논문집, 제 17 권, 제 1-1 호, pp79-88.
- (3) 양신추, 1996, “무한요소를 이용한 터널의 동적 해석”, 대한토목학회논문집, 제 16 권 제 3-6 호, pp517-528.
- (4) 롯데건설(주), 1997, 교량, 터널 및 복합 건축구조물의 진동저감 신공법 개발, 과학기술처.
- (5) 이주호 외 3 인, 1997, “열차하중에 의한 인접지반의 진동감쇠 특성 분석”, 한국소음진동공학회 1997 춘계 학술대회 논문집, pp.223 ~ 228.
- (6) 롯데건설(주), 1997, 시흥 빗물펌프장에 대한 열차진동의 영향 평가, 한국철도기술공사.
- (7) K.H.Chau, et. al., 1992, “Groundborne Vibrations due to Trains in Tunnels”, Earthquake Engng. and Str. Dyn. Vol.21, pp 445-460.
- (8) 윤정방, 1993, 직접법에 의한 지반-구조물 시스템 내진해석 모델링방법 연구(I), 한국원자력안전기술원.