

궤도구조 변경에 따른 열차 진동 추정식 제안

Suggestion for Train Vibration Equations based on Change in Track System

김응록¹ · 박연수² · 강성후³ · 박선준⁴ · 김홍기⁵

Eung-Rok Kim, Yeon-Soo Park, Sung-Hoo Kang, Sun-Joon Park and Hong-Ki Kim

Keywords : track(궤도), ballast track(자갈도상), concrete track(콘크리트 도상), vibration equation(진동추정식), reliability index(신뢰성지수)

Abstract

This research estimated decreased vibration level as quantitative according to change of track system on Seoul Subway Line No. 1 from existing ballasted track system(Pandrol type clip) to concrete track system(Youbgdan type isolation rubber clip). Following change to concrete system, vibration level at tunnel floor decreased between 4-8dB(V). Vibration equations suggested in this paper consider the velocity of train and can estimate quantitative vibration response. These are divided by ultimate limit state($\beta=0$), serviceability limit state($\beta=1.28$) and safety state($\beta=3$), respectively. The reliability index, $\beta=0$, means 50% data line obtained by least squares best-fit line. The reliability index $\beta=1.28$ and 3 represent boundaries below 90% and 99.9% respectively.

1. 서론

최근 국내에서 도심 밀집지역에 지하교통시설물 및 철도 등과 같이 과다 상시진동을 유발하는 시설물이 증가하고 이로 인해 발생하는 진동 및 소음에 대한 관심이 높아지고 있다. 열차하중에 의한 진동은 지진 및 바람에 의한 진동에 비하여 일반적으로 크기가 미소하여 그 중요성이 과소평가 될 수 있으나 사용자의 측면에서 볼 때 구조적인 안전성과 사용성의 확보는 절대 필요한 사항이라 할 수 있다. 특히 지하철의 경우 궤도가 인간 생활환경에 밀접하게 설치되어 있어 이로 인해 발생하는 진동·소음 문제가 심각한 실정이며, 현재까지 설계 및 시공 시에 열차의 운행으로 인한 지반진동의 예측과 진동을 저감시키기 위한 사항은 주요 설계인자로 취급되지 않고 있다. 그

러나 진동 및 소음에 대한 중요성이 크게 강조되는 현 시점에서 이에 대한 저감 대책 연구는 반드시 필요한 실정이다.

본 연구의 목적은 지하철 궤도에서 발생하는 진동을 저감시키기 위한 방법으로 서울지하철 〇호선 구간의 궤도구조를 기존의 자갈도상 구조(팬드릴형 코일 스프링클립)에서 콘크리트도상 구조(영단형 방진 고무클립)로 변경함에 따라 변경 전후의 각 궤도 구조별 진동을 측정하고 이를 면밀하게 검토, 분석하여 진동추정식을 제시하고 자료화함으로써 향후 지하철의 유지관리 및 궤도의 진동 대책 및 연구개발 자료로 활용하기 위함이다. 이를 위하여 본 연구에서는 진동치의 분석 및 진동추정식을 제시하였으며, 여기에는 신뢰성 이론을 새롭게 도입하였다.

1 정회원, 송원대학 철도시설토목계열 교수
2 비회원, 전남대학교 공과대학 건설지구환경공학부 교수
3 비회원, 동신대학교 이공대학 토목환경공학부 교수
4 비회원, 동신대학교 공업기술연구소 전임강사
5 비회원, 광주광역시 지하철건설본부 공사계획과 과장

2. 문헌연구

2.1 열차 진동 추정방법

열차의 운행으로 인한 진동을 추정하기 위한 Wilson 기법은 BART와 TTC(Toronto)에서 수행한 측정자료(Wilson, 1971)를 기초로 하였으나 그 후 암반 기초와 흙기초 지반에서 진동을 예측 할 수 있도록 개정되었다. 이 기법은 안전한 계측을 대상으로 하였기 때문에 평균치가 아닌 진동의 최대 예측치를 측정하는 방법으로서 진동영향을 엄격히 평가할 수 있도록 하였다. Wilson기법은 8량의 WMATA Metro 열차가 110~120km/h로 운행할 때 선로 중심선으로부터 7.5m~10m 떨어진 곳의 예상 진동치(진동가속도 레벨)를 하부 기초지반에 따라 토사지반, 암반과 토사지반, 암반지반으로 구분하여 예측하였다(Fig. 1). 그러나 Wilson의 기법은 진동원의 위치나 궤도 기초지반의 coupling은 고려하지 않았고 예측시 레일의 지지력 계수를 약 4000lb/in², 궤도는 표준탄성체결궤도, 운행속도는 110-120km/h, 터널은 Double Box 터널 단면으로 가정하였다[1].

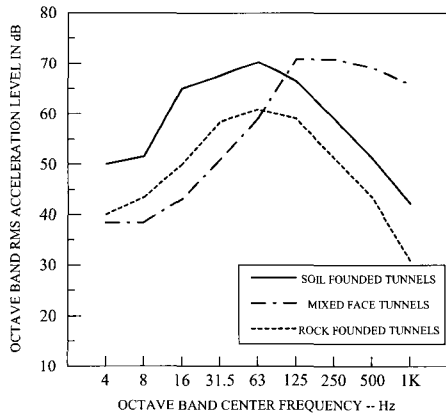


Fig. 1. Acceleration Level according to Type of Foundation (positions 7.5-10m from track center)

그러나 Wilson의 열차 운행으로 인한 지반 진동 응답 예측 과정에서는 열차의 속도에 대한 인자가 생략되어 있으므로 이에 대한 보정이 필요하다. 열차의 속도에 따른 보정은 기준속도인 120km/h를 기준으로 실제 열차 운행 속도의 차이만큼 보정하게 되는데 Table 1은 기존 지하철구간에서 측정한 자료를 근거로 제시한 보정치이다.

Table 1. Correction Values for Train Velocity

열차속도 (km/h)	상대적인 진동레벨 (dB) (모든 터널에 대하여)
120	0
97	-2
80	-3.5
72	-4
64	-5
곡선구간	+3 ~ +5 (Guardrail)

2.2 진동 추정식

진동발생원으로부터 여러 거리에서 지반진동의 크기를 예측하기 위해서는 진동발생원으로부터 방출되는 에너지가 여러 가지 형태의 실체파와 표면파로 주변지반으로 전파된다고 가정하는 것이 바람직하다. 이렇게 전파되는 진동의 크기는 전달 지반 내의 흡입자들 사이의 마찰과 방사면의 증가 등의 요인으로 인해 점차 감소하게 된다. 지반 진동속도를 추정하기 위한 일반식은 다음 식(1)과 같다[2].

$$V_s = K (D / E^b)^n \tag{1}$$

- V_s : 지반의 진동속도(cm/s),
- D : 진동 발생원에서 진동 측정지점까지의 거리(m)
- E : 진동에너지
- K : 진동상수
- n : 지반감쇠지수
- b : scaling 지수(1/2 혹은 1/3)
- D/E^b : 환산거리(Scaled Distance : SD)

2.3 신뢰성 지수(β)

신뢰성지수(β)는 열차의 운행으로 인한 진동 발생상황에 따라 일정한 값으로 선택함으로써 진동기준치(저항력)와 하중(지반진동)의 가변성에 상관없이 요구되는 신뢰도(파괴확률)를 갖도록 하기 위하여 사용하였다. 신뢰성지수(β)는 다음 식(2)와 같이 정의되며, 열차 운행에 의한 지반 진동측정치의 분포는 가우스의 정규분포로 가정하였다[3]. Fig. 2는 하중 분포와 저항분포, 신뢰성 지수를 설명하고 있다[4, 5].

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2)$$

β : 신뢰성 지수,
 m_R, σ_R : 진동규준치와 표준편차
 m_S, σ_S : 진동분포의 중앙값과 표준편차

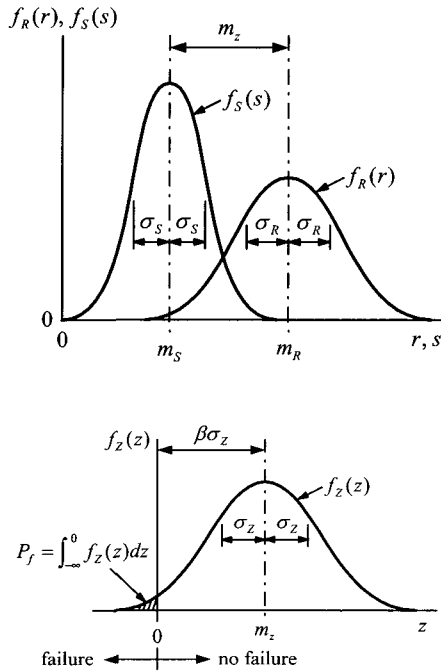


Fig. 2 Distribution of Load vs Resistance and Reliability Index

2.4 안전성상태, 사용한계상태, 극한한계상태에 대한 정의

본 연구에서는 신뢰성지수(β)를 3, 1.28, 0으로 구분하였다. 각각의 신뢰성지수(β)에 대한 진동치와 진동식은 안전성 상태($\beta=3$), 사용한계 상태($\beta=1.28$), 극한한계상태($\beta=0$)로 새롭게 정의하였으며, 본 연구에서 규정하는 각각의 상태에 대한 정의는 다음과 같다[6].

- 안전성상태 : 강도설계법에서는 설계하중을 초과하는 하중이 구조물에 재하될 확률을 0.1%(신뢰도 99.9%)를 목표로 하고 있다. 열차의 운행으로 인한 지반진동을 구조물에 작용하는 하중의 개념으로 본다면 신뢰성지수(β) 3을 사용하여 제시한 진동식에 기준하여 진동응답을 추정할 경우 진동규준치를 초과하는 확률이 0.1%에 해당하여 모든 측정치를 포함하는 진동추정식이라 할 수 있다. 즉, 안전성 상태의 진동추정식을 사용하면 발생가능한 최대 진동 값이 예측된다.

- 사용한계상태 : 한계상태 설계법(BS8110)에서는 설계시에 포함되는 변동 요인들을 적절히 고려하기 위한 개념에서 강도의 시험치가 특성강도(characteristic strength)에 미치지 못할 확률 5%, 특성하중(characteristic load)보다 큰 하중이 작용할 확률 5%를 각각 사용하고 있다. 본 연구에서는 위의 두 가지 변동요인을 규합하여 불확실량 10%를 목표로 규정한 상태를 사용한계 상태로 정의하고 이에 해당하는 신뢰성지수(β)를 선택하였다. 이러한 구조설계시의 사용한계상태 개념을 도입하여 사용한계상태의 신뢰성지수(β)를 1.28로 제시하였으며 여기에 해당하는 신뢰도는 90%

Table 2. Domestic Vibration Criteria

대상 지역	구 분	한 도			
		2000년1월1일~ 2009년12월31일		2010년 1월1일부터	
		주간 (06:00~22:00)	야간 (22:00~06:00)	주간 (06:00~22:00)	야간 (22:00~06:00)
주거지역, 녹지지역, 준도시지역중 취락지구 및 운동·휴양지구, 자연환경보전지역, 학교(병원, 공 원도서관의 부지경계선으로부터 50m 이내)지역	소음 L_{eq} dB(A)	70	65	70	60
	진동 dB(V)	65	60	65	60
상업지역, 공업지역, 농업지역, 준농림지역 및 준 도시지역중 취락지구 및 운동·휴양지구외의 지역, 미고시지역	소음 L_{eq} dB(A)	70	65	70	60
	진동 dB(V)	65	60	65	60

를 갖게 된다. 즉, 사용성 상태의 진동추정식을 사용하면 일반적인 경우 신뢰성과 사용성을 동시에 확보할 수 있는 신뢰수준의 진동 값이 예측된다.

· 극한한계상태 : 진동측정치 2회중 1회가 진동추정식에 의한 진동치를 초과하는 신뢰도 50%의 확률을 갖는 상태를 의미한다. 따라서 단순히 진동측정치들을 회귀분석하여 얻은 진동추정식을 사용하여 진동을 추정할 경우 진동규준치를 초과할 확률이 50%에 해당한다고 볼 수 있다. 즉, 평균적인 진동 값이 예측된다.

2.5 국내의 열차 진동 평가 기준

현재 우리나라에서 철도 주변의 진동영향 평가를 위해 사용하고 있는 진동 기준치는 Table 2와 같다. 이러한 기준은 1997년 1월 1일부터 적용되고 있다[2].

3. 열차진동 측정

열차의 운행으로 인해 발생하는 진동은 기존의 자갈도상 구조(팬드롤형 코일 스프링클립)와 콘크리트도상 구조(영단형 방진 고무클립)로 구분하여 개량전·후에 터널 내부와 지상부의 동일한 위치에서 각각 측정하였다. Table 3에는 진동 측정에 대한 일반사항을 정리하였다.

열차가 통과할 때 발생하는 진동을 측정하기 위한 가속도계 설치 위치를 Fig. 3에 콘크리트 도상 궤도구조(영단형 방진 고무클립)와 함께 나타내었다. 기존의 자갈도상 궤도 구조에서도 Fig. 3과 동일한 위치에서 진동을 측정하였다. 열차 운행으로 인한 터널 내 (○○역에서 ○○○역 방향으로 100m, 260m 지점) 궤

도 및 지반 진동 응답은 레일, 침목 중앙부, 레일로부터 140cm 이격된 바닥에서 측정하였다. 그리고 지상부에서는 Fig. 4와 같이 ○○역에서 ○○○역 방향으로 260m 지점에 3개의 가속도계 센서를 부착하고 측정하였다. Fig. 5는 진동을 측정하기 위한 측정시스템을 설명하고 있다.

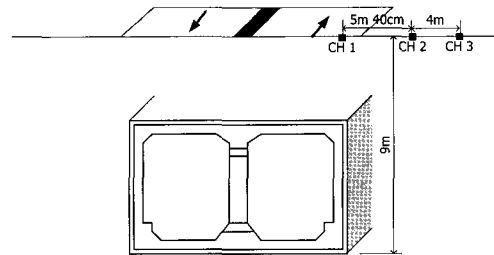


Fig. 4. Sensor Positions on Ground

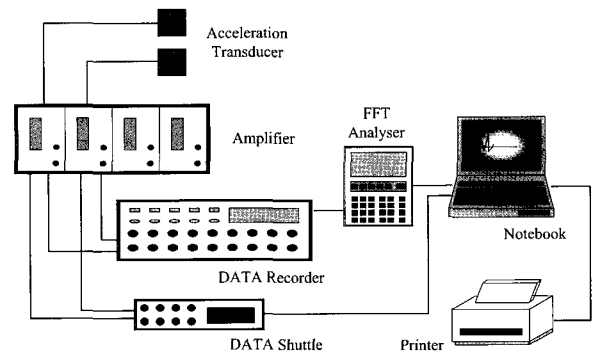


Fig. 5 Sensor and Analysis System

Fig. 6은 궤도 중심에서부터 140cm 이격된 터널 바

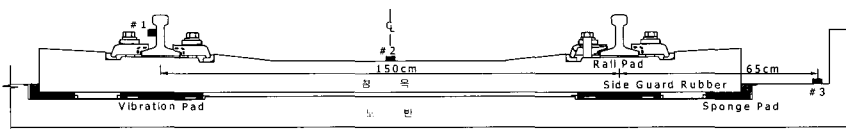


Fig. 3 Cross-section of Concrete Track System incl. Positions of Sensors(after change)

Table 3. General Contents for Vibration Measurement

구분	측정일	궤도구조	레일클립	침목	레일	측정위치
1차	1999. 9	자갈 도상	팬드롤형 코일 스프링	PC침목 (프리텐션)	50kg 장대	서울 지하철 ○호선 ○○-○○○ 구간, 터널 내 100m지점, 260m지점 지상부
2차	2000. 2	콘크리트 도상	영단형 방진고무클립	PC침목 (포스트텐션)	60kg 장대	

탁에서 열차 운행시 발생된 진동 가속도 시간이력을 기존 자갈도상인 경우와 콘크리트 도상인 경우로 구분하여 나타낸 것이다.

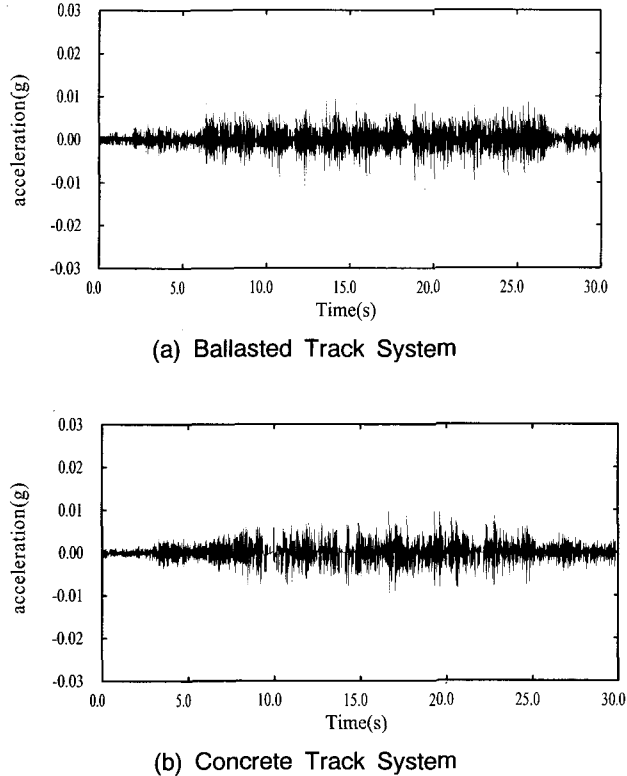


Fig. 6. Time History for Acceleration Response

4. 진동측정 분석 및 진동 추정식

4.1 진동측정치 분석

열차 운행으로 인한 터널 내·외부에서의 진동속도

와 진동레벨을 기존 자갈도상 궤도구조와 콘크리트 도상 궤도구조로 구분하여 측정위치에 따라 Table 4에 정리하였다[7]. 측정거리는 궤도 중심을 기준으로 수직 이격거리를 의미한다. 진동속도와 진동레벨은 실측한 연직방향 진동 가속도 응답 시간이력을 1회 수치 적분하여 구하였으며, 수치적분을 위하여 미국의 Strawberry사에서 개발하여 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 상용화된 진동 분석 프로그램인 Workbench를 사용하였다. Workbench 진동 분석 프로그램은 실측한 가속도 시간이력파형을 입력하면 실시간으로 적분을 수행하여 속도 시간이력파형으로 변환하여 제시한다.

Table 4에서 진동의 발생과 직접적으로 관계되는 환산거리 계산시 열차의 무게는 실험대상 열차의 무게로써 420tonf(10량)를 사용하였다. 열차의 운행으로 인한 진동은 궤도, 궤도지지 구조물, 지반, 수진구조물의 측면으로 나누어 생각할 수 있는데 직접 열차의 하중을 지지하는 레일 및 침목에서의 진동레벨은 실험치를 기준으로 볼 때 콘크리트 도상이 기존의 자갈도상에 비해 3-11dB(V) 감소하는 경향을 보이고 있다. 레일부에서 측정된 진동레벨은 9-11dB(V), 침목 중앙부에서는 3-7dB(V)의 진동감소를 보여, 최대 11dB의 진동레벨이 감소함을 알 수 있었다. 궤도 지지구조물인 터널 BOX 구조물 바닥면에서의 진동레벨은 4-8dB(V) 정도 감소하였고, 지상부에서 측정된 진동레벨 감소량은 최소 3dB(V), 최대 14dB(V)로 측정되었다. 진동치 분석결과 콘크리트 도상 궤도구조(영단형)에서는 본 측정조건의 경우 가장 근거리에서도 열차의 통행으로 인한 진동은 허용진동치 60dB(V)의 범위 내에 있음을 알 수 있다.

Table 4. Measurement and Analysis Results

측정 위치	자갈도상 궤도			콘크리트 도상 궤도(영단형)			환산거리 (D/W ^{1/2})	측정거리 (m)
	가속도 (g)	속도 (cm/s)	진동레벨 (dB)	가속도 (g)	속도 (cm/s)	진동레벨 (dB)		
터널 내부	5.305	10.30	111	2.376	3.80	102	0.00244	0.05
	0.523	2.20	97	0.969	1.60	94	0.037	0.7
	0.011	0.04	64	0.010	0.018	56	0.112	1.4
지상부	0.096	0.30	81	0.015	0.03	57	0.461	9.5
	0.012	0.04	63	0.010	0.028	60	0.597	12.2
	0.006	0.03	60	0.002	0.006	46	0.743	15.2

4.2 진동속도 응답 추정식

Table 4의 진동 분석 값을 사용하여 열차의 운행으로 인한 진동속도 추정식과 감쇠정도를 Fig. 7에 나타내었다. 기존 자갈도상 궤도구조의 경우 감쇠지수(n)는 -0.116 으로, 콘크리트도상 궤도구조에서의 감쇠지수(n)는 -0.128 로 분석되어 콘크리트도상 궤도구조가 거리가 멀어짐에 따라 진동이 보다 빠르게 감쇠됨을 알 수 있다.

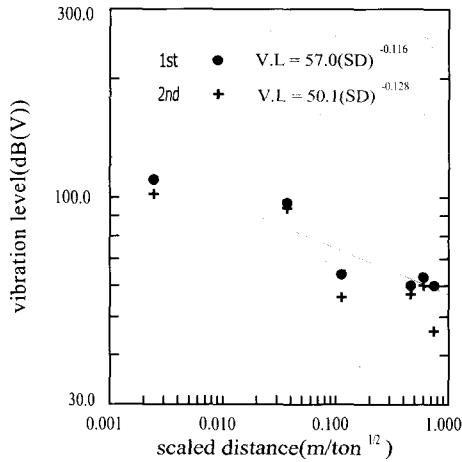
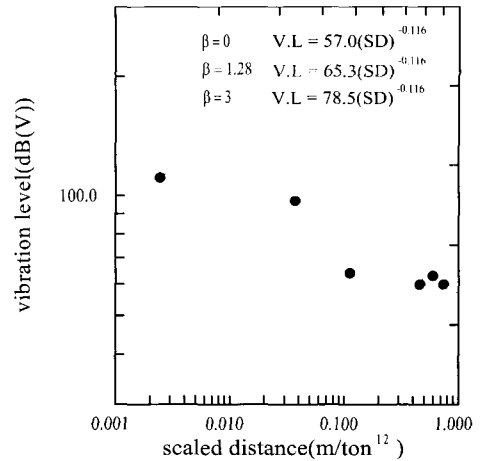
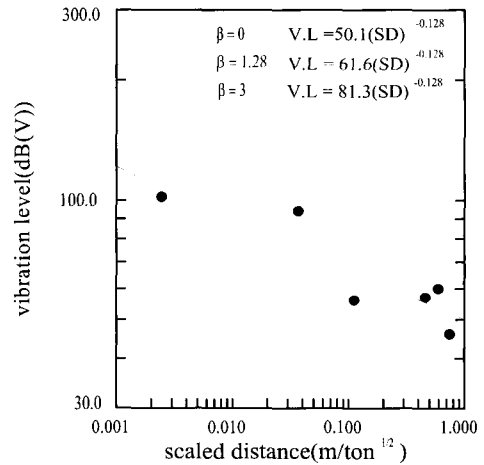


Fig. 7. Relation between Vibration Level and Scaled Distanced

위의 Fig. 7에서 진동측정치의 평균값을 추정하는 기본적인 진동추정식과 각 측정치들 사이에서 발생하는 추정의 표준오차를 분석한 후, 여기에 신뢰성 이론을 도입하여 신뢰도를 갖는 진동 속도 응답 추정식을 Fig. 8과 Table 5에 각각 제시하였다. 여기에서 V.L은 진동레벨(dB)을, SD는 2.2절에서 정의한 환산거리(Scaled distanced)를 각각 의미한다. 진동 속도 응답 추정식에는 신뢰성 지수(β)를 0, 1.28, 3으로 선택함에 따라 각각 50%, 90%, 99.9%의 신뢰도를 갖게 되며 이는 2.4절에서 정의한 극한한계 상태, 사용한계 상태, 안전성 상태에 각각 해당하게 된다. 본 연구에서 제시된 진동레벨 추정식을 사용하여 사용자가 요구하는 신뢰도를 갖는 진동레벨의 크기를 정량적으로 예측할 수 있게 된다.



(a) Ballasted Track System



(b) Concrete Track System

Fig. 8 Equations for Vibration Level by Subway Train

4.3 수정 열차 진동추정식

Fig. 8과 Table 5에서 제안된 진동 추정식은 열차의 운행속도, 매질인 지반조건에 대한 변수가 고려되어 있지 않은 상태이다. 그 중 열차의 운행속도를 고려하기 위한 방법으로 Table 1을 기준으로 열차의 운행속도에 따른 진동레벨의 보정값을 Fig. 9와 같이 α 의 항으로 일반화시켜 식(2)에서 제시한 열차의 진동 추정식의 일반적인 형태를 식(3)과 같이 진동레벨을 구할 수 있는 수정된 형태로 제시하였다. 앞으로의 연구에서는 지반 조건에 대한 고려와 보다 많은 측정자료를 확보하여 본 연구의 결과를 보완해나가는 것이 필요하다.

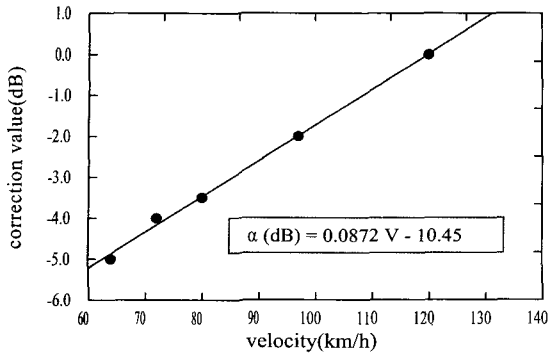


Fig. 9 Relation of Correction Value and Train Velocity

$$V.L = K (SD)^{-0.116} + \alpha \quad (3)$$

여기서 V.L : 진동레벨(dB)

K : 진동상수(Table 5 참고)

SD : 환산거리(m/ton^{1/2})

α : 열차속도에 따른 보정 값

(α = 0.0872V - 10.45)

V : 열차의 운행 속도(km/h)

식(3)과 Table 5를 사용하여 궤도 구조에 따른 진동레벨을 추정해 볼 수 있다. 본 연구대상의 조건에서 열차가 80km/h로 운행한다고 가정할 때 레일로부터 10m 떨어진 위치의 진동레벨을 90%의 신뢰도를 갖도록 추정해 볼 수 있다.

- 자갈도상 궤도구조의 경우

$$V.L = 65.3(0.488)^{-0.116} + (0.0872 \times 80 - 10.45) = 67.49\text{dB(V)}$$

- 콘크리트도상 궤도구조의 경우

$$V.L = 61.6(0.488)^{-0.128} + (0.0872 \times 80 - 10.45) = 64.05\text{dB(V)}$$

5. 결론

서울지하철 ○호선 구간에서 기존의 자갈도상 궤도구조(팬드롤형 코일 스프링클립)를 콘크리트도상 궤도구조(영단형 방진 고무클립)로 변경함에 따라 감소되는 진동의 정도를 측정을 통하여 정량적으로 평가한 결과 터널 BOX 구조물 바닥면에서의 진동레벨은 4-8dB(V), 지상부에서의 진동레벨은 최소 3dB(V)에서 최대 14dB(V)까지 감소함을 알 수 있었다. 또한 궤도구조에 따른 진동레벨의 추정이 가능한 진동 추정식을 열차의 운행속도를 고려하여 평가할 수 있도록 제시하였으며, 연구결과로 제시된 진동 추정식은 사용자가 요구하는 신뢰도를 만족할 수 있도록 신뢰도 정도(50%, 90%, 99.9%)에 따라 3가지로 구분하였다.

참고 문헌

1. 이종득 역, "철도궤도역학", 노해출판사 2000.
2. 한국소음진동공학회, "소음·진동편람", 한국소음진동공학회, 1995.
3. 박정식, 윤영선, "현대통계학", 다산출판사, 1997
4. E. R. Dougherty, "Probability and Statistics for the Engineering, Computing and Physical Sciences", Prentice-Hall, 1990.
5. S. S. Rao, "Reliability-Based Design", McGraw-Hill, 1992.
6. 변동균, 신현목, 문제길, "철근콘크리트 공학", 동명사, 2001.
7. 清水信行, "パソコンによる 振動解析", 共立出版株式会社, 1989.

Table 5. Vibration Equations as Foundation of Trackform(application of Theory of Reliability)

신뢰성 지수(β)	신뢰도 (%)	상 태	진동추정식		상관계수(r)	
			자갈도상 궤도	콘크리트도상 궤도	자갈도상 궤도	콘크리트도상 궤도
0	50	극한한계	57.3(SD) ^{-0.116}	50.1(SD) ^{-0.128}	-0.936	-0.890
1.28	90	사용한계	65.3(SD) ^{-0.116}	61.6(SD) ^{-0.128}		
3	99.9	안전성	78.5(SD) ^{-0.116}	81.3(SD) ^{-0.128}		