

고속전철 도심 진입시 소음평가

나희승*, 김재철*, 최성훈*, 류영준**, 박홍순**

Noise Effects of High Speed Train into the Urban Center

H. S. Na, J. C. Kim, H. S. Choi, Y. J. Ryu, H. S. Park

ABSTRACT

As the delay of the Kyungbu High Speed Railroad, HST should use conventional line through Daegoo to Pusan until the new railroad build. High speed railroad noise is one of the main causes of environmental impact. Whenever HST on conventional railroad line is planned or HST service into the urban center is proposed, an estimate of the relevant noise levels is usually required. For this, it is necessary to quantify those parameters that affect the railroad noise. This paper deals with an estimation of high speed railroad noise in urban center.

1. 서론

소음 및 진동공해는 일상생활중에서 가장 빈번히 접하는 환경오염으로 도시인의 심리적, 정신적, 신체적 피로를 가중시키고 있다. 따라서 도시의 정온한 생활환경 유지는 시급히 해결해야 할 과제로 대두되고 있다.

경부고속철도는 1단계 사업으로 서울-대구 구간은 신선을 대구-부산구간은 기존 경부선 철도를 전철화하여 우선 영업운전을 실시하고, 향후 2단계 사업으로 대구-부산구간도 신선을 건설할 계획이다. 전체노선 중 대전·대구는 도시를 통과하게 된다. 기존의 통과방안은 독립된 지하노선을 이용하려 하였으나 경제성, 효율성과 같은 여러 가지 문제점으로 인해 여러 가지 대안방법들이 제시되고 있다. 이러한 대안방법 중 기존 경부선과 병행하는 지상노선과 고가 노선에 대하여 환경 영향 예측 및 평가를 수행하여 환경규제를 만족하도록 저감방안을 제시함으로써 주변지역의 정온한 생활환경을 유지시킬 수 있어야 한다. 따라서 본 논문에서는 고속철도의 도심 진입시의 소음을 평가하기 위해 고속철도의 속도에 따른 소음도에 대하여 측정자료

비교, 검토하고, 이를 기초로 선로변의 소음도를 예측, 분석한다. 또한 소음피해를 방지하기 위한 방음시설물의 저감효과를 평가한다.

2. 고속철도의 소음도 평가

열차주행시 최고소음도 L_{max} 는 마이크로 폰과 같은 계측기를 이용하여 측정하며, 측정데이터를 이용하여 예측식을 모델링할 수 있다. TGV의 속도 및 이격거리에 따른 L_{max} 소음예측식(GEC Alstom사 제공, 개활지조건)은 다음과 같다.

$$L_{max} = 80 + 28 \log \frac{V}{100} - 14 \log \frac{d}{25} \quad [dB(A)] \quad (1)$$

여기서, L_{max} 는 최고소음도, V 는 열차속도, d 는 노선중심에서 수음점까지의 거리이다.

등가소음도 L_{eq} 는 실측 및 예측된 최고소음도 L_{max} 로 계산할 수 있다. 철도소음에 사용되는 등가소음도 L_{eq} 의 계산식은 다음과 같다. 등가소음도 L_{eq} 는 최고소음도 L_{max} , 소음노출시간, 소음노출의 빈번도를 모두 고려한 종합적인 소음평가도이다.

$$L_{eq} = 10 \log \left(\frac{t}{T} 10^{\frac{L_{max}}{10}} \right) + 10 \log(n) \quad (2)$$

* 철도기술연구원, 선임연구원

** 철도기술 연구원, 연구원

여기서, L_{eq} 는 등가소음도, t 는 열차통과시 소음노출시간, T 는 자유음장에서 등가소음도 계산을 위해 주어진 시간, n 은 주어진 시간 T 에서의 열차 통과 횟수이다.

다음은 경부고속철도 시험선구간에서 소음시험 측정을 수행하였다. GEC Alstom사에서 제공한 식 (1)과 비교하기 위하여, 회귀모형을 $Y = \beta_0 + \beta_1 \log X_1 + \beta_2 \log X_2 + \epsilon$ 로 설정하고 오차들의 제곱의 합을 최소화 하여 회귀계수들의 값을 구하는 최소제곱법을 사용하였다. 국내 고속철도 시험선구간 방음벽이 설치되지 않은 평지에서 측정한 결과를 이용해서 속도 및 이격거리에 따른 소음예측식을 도출한 결과는 다음과 같다.

$$L_{max} = 71.6 + 41 \log \frac{V}{100} - 21.5 \log \frac{d}{25} \quad (dBA) \quad (3)$$

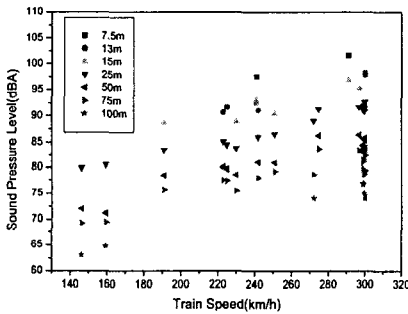


그림 1. 평지구간에서의 전두부 L_{max}

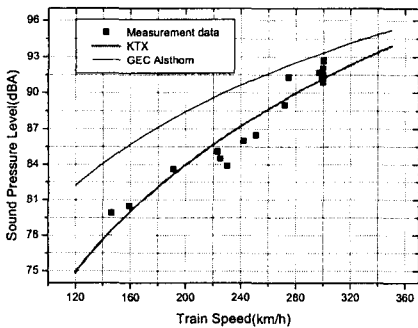


그림 2. 이격거리 25m일때의 L-V선도

계산 결과 실측치에 의한 예측식 (3)이 예측식 (1)보다 낮은 소음도를 보이고 있다. 이는 경부고속철

도 시험선의 궤도 및 차량이 노후되어 있지 않고, 승객이 탑승하지 않아 무게가 다소 가벼운데서 기인하는 것으로 추정된다.

3. 소음평가를 위한 소음해석

음향학에서 음장을 해석하는 방법은 파동음향학, 기하음향학, 통계음향학으로 나눌 수 있다. 환경소음과 같이 음파의 파장이 대상공간에 비해 상대적으로 작은 경우, 소리의 파동성 보다는 기하학적인 고찰에 의해서 해석하는 것이 보다 효율적이다. 소리를 음선으로 고려하는 경우 음선은 일정 위상면에 대해서 수직인 선으로 정의되며, 음속은 공간의 함수이며 소리를 파장으로 고려하는 것보다는 해석이 쉽다. 그러나 이는 파에 대한 엄밀한 표현이 아니고 근사적으로 유용하다. 다음은 파동방정식으로 $c=c(x,y,z)$ 이다.

$$\nabla^2 p = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (4)$$

균일 매질 (homogeneous fluid)이나 비균일 매질 (inhomogeneous fluid)을 지나는 한정된 구경의 빔에서는 음파의 크기가 위치에 따라 달라지고 일정위상면도 공간의 복잡한 함수가 되므로 식(4)의 해를 식(5)로 가정하면 식(4)은 식(6)과 같다.

$$p(x, y, z, t) = A(x, y, z) e^{j\omega[t - \Gamma(x, y, z)/c_0]} \quad (5)$$

$$\frac{\nabla^2 A}{A} - \left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 \nabla \Gamma \cdot \nabla \Gamma + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - j\frac{\omega}{c_0} \left(2\frac{\nabla A}{A} \cdot \nabla \Gamma + \nabla^2 \Gamma\right) = 0 \quad (6)$$

여기서 A 는 압력의 단위, Γ 는 길이 단위, 그리고 c_0 는 위상속도에 대한 상수값이다. 만약 $|A^{-1} \nabla^2 A| \ll \left(\frac{\omega}{c}\right)^2$, $|\nabla^2 \Gamma| \ll \frac{\omega}{c}$, 그리고 $|A^{-1} \nabla A \cdot \nabla \Gamma| \ll \frac{\omega}{c}$ 가 되도록 A 와 $\nabla \Gamma$ 가 천천히 변한다면 식(6)은 식(7)과 같이 될 수 있다.

$$\nabla \Gamma \cdot \nabla \Gamma = n^2 \quad (7)$$

여기서, $n(x, y, z) = \frac{c_0}{c(x, y, z)}$ 이다. 식(4)는 Eikonal 방정식으로 (a) 음파의 진폭이 파장에 비해 거리당 변화가 미소하고 (b) 음속도 파장에 비

해 거리당 변화가 미소할 때 만족한다. 유체를 지나가는 음향빔의 경우 첫 번째 조건으로부터 Eikonal 방정식은 음향 빔의 중심부에서 잘 적용될 수 있지만, 진폭이 급격히 감소하는 빔의 가장자리에서는 음의 회절(diffraction)현상으로 인하여 오류가 발생한다. 이를 보완하기 위하여 Kurze-Anderson은 다음식을 제안하였다.

$$\Delta L_B = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tan \sqrt{2\pi N}} \quad (\text{dB}) \quad (8)$$

여기서 ΔL_B = 스크린 방해로 인한 저감량, N = Fresnel 수 = $2\left(\frac{a+b-d}{\lambda}\right)$, a = 회절 끝단(diffraction edge)에서 음 원까지의 거리, b = 회절 끝단(diffraction edge)에서 수음자까지의 거리, d = 음원에서 수음자까지의 직선거리, λ = 파장을 나타낸다.

두 번째 Eikonal식의 조건으로부터 음속은 공간을 따라 천천히 변해야하고 음파의 공간적 확산은 지나친 국부적 변화를 가져오지 않아야 한다. 이는 짧은 파장을 가지는 고주파에 한정된다. 고주파의 파장에 대한 정보를 보완하기 위하여(Raynoise에서는) coherent source를 식(9)과 같이 정의하였으며, 이를 위상레이추적기법(Phase Ray Tracing)이라 한다.

$$P_n = \sum_{i=0}^n \sum_{k=0}^{N_i} A_{ik} e^{i\phi_{ik}} e^{-jkd_n} \quad (9)$$

여기서 n = 반사치수, N_i = i 번째 차수의 이미지 음원의 수, P_n = 압력, d_{ik} = 수음자와 이미지 음원 ik 사이의 거리, ϕ_{ik} = 벽면 반사에서의 위상 지연과 음원의 초기위상의 합, k = 파수, A_{ik} = 반사 ik 의 크기를 나타낸다.

소음영향 평가를 위해 계측된 데이터와 앞에서 설명한 소음예측기법을 이용하였다. 그림 3은 고속철도 및 재래선 철도차량으로 부터의 음압 분포를 개활지에서 3차원 시뮬레이션한 결과이다. 그림 4는 향후 적용하여 할 방음벽의 소음저감 효과를 보여 주고 있다.

표 1은 평지에서의 시뮬레이션 결과값 L_{max} 를 나타낸 것이다. 평지의 경우 소음도는 거리에 따라 감소하며, 거리가 2배 멀어지면 3~4dB(A)감소하는 선음원의 특성을 보이고 있다. 표 2는 교량에서의 시뮬레이션 결과값 L_{max} 를 나타낸 것이다. 교량의 경우 교량상판의 영향으로 Shadow Zone이 발생하여 25m이내의 근접장에서 소음도가 낮으며, 25m이상의 경우 평지와 같은 특성을 보이고 있다.

특히 교량의 경우 방음벽의 성능은 25m지점에서 평지보다 우수하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 5~그림 10은 이러한 소음전파특성을 잘 보여 주고 있다.

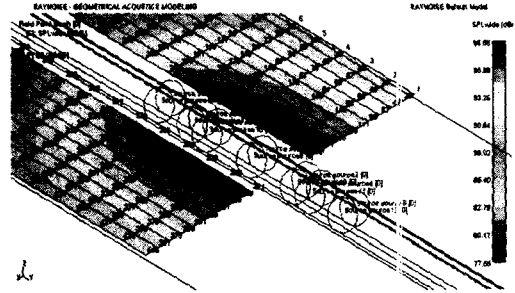


그림 3. 고속철도변에서의 소음예측

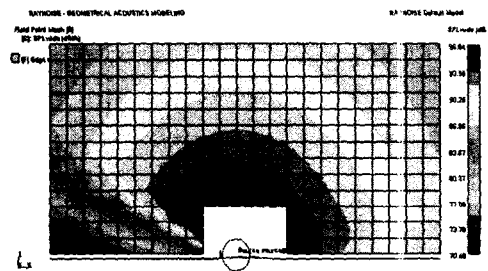


그림 4. 고속철도변에 방음벽 설치 후 소음저감예측

등가소음도는 표 3과 같이 운행횟수에 따라 Case 1.과 Case 2.로 다음과 같이 구별하였다. 표 4~표 7에서 평지는 10m, 25m에서, 교량은 25m에서 기존철도 소음기준(주거지역)을 초과하고 있음을 알 수 있다. 또한 이를 방지하기 위하여 2.0m 방음벽 설치 시 기존철도 소음기준(주거지역)을 만족한다. Case 2.는 대전에서 재래선 철도의 운행횟수가 절반으로 줄어드는 경우이며, 등가소음도가 2dB(A)감소함을 알 수 있다.

본 시뮬레이션의 문제점은 국내에서 고속철도의 재래선에 대한 운행경험이 없다는 점인데, 이를 해결하기 위하여 TGV의 속도 및 이격거리에 따른 소음예측식(GEC Alsthom사 제공, 개활지조건)을 활용하였다.

표 1. 평지에서에서의 시뮬레이션 결과값 (Lmax)

방음벽 높이	10m			25m			50m		
	대구 (TGV)	대전 (TGV)	새마을	대구 (TGV)	대전 (TGV)	새마을	대구 (TGV)	대전 (TGV)	새마을
0m	84.8	85.7	90.9	81.5	82.4	87.6	77.3	78.2	83.4
1.9m	73.1	74.0	79.8	70.7	71.6	77.2	67.1	68.0	73.6
2.0m	72.4	73.3	82.2	70.0	70.9	80.1	66.3	67.2	76.8
2.4m	69.9	70.8	77.3	67.2	68.1	74.4	63.5	64.4	76.2
4.0m	63.4	64.3	70.5	60.2	61.1	67.3	56.2	57.1	63.3

표 2. 교량에서의 시뮬레이션 결과값 (Lmax)

방음벽 높이	10m			25m			50m		
	대구 (TGV)	대전 (TGV)	새마을	대구 (TGV)	대전 (TGV)	새마을	대구 (TGV)	대전 (TGV)	새마을
0m	73.2	74.1	79.8	80.8	81.7	86.9	77.4	78.3	83.5
1.9m	65.9	66.8	73.0	65.9	66.8	72.9	64.1	65.0	70.9
2.0m	65.5	66.4	72.5	65.3	66.2	72.3	63.3	64.2	70.2
2.4m	63.9	64.8	71.0	63.1	64.0	70.2	60.6	61.5	67.7
4.0m	59.6	60.5	66.7	57.6	58.5	64.7	54.4	55.3	61.5

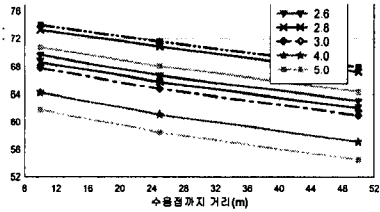


그림 5. 평지에서에서의 이격거리별 최대소음도 (대구; Lmax)

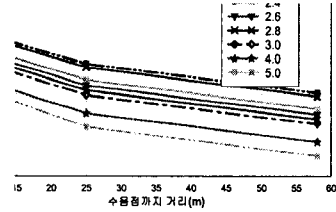


그림 7. 평지에서에서의 이격거리별 최대소음도 (새마을호; Lmax)

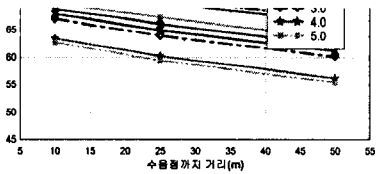


그림 6. 평지에서에서의 이격거리별 최대소음도 (대전; Lmax)

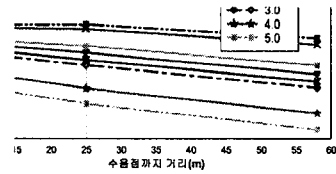


그림 8. 교량에서의 이격거리별 최대소음도 (대구; Lmax)

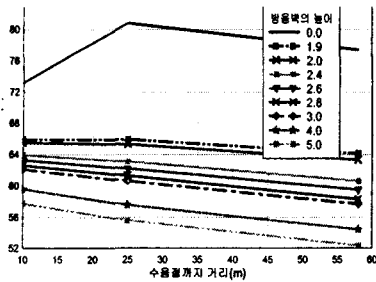


그림 9. 교량에서의 이격거리별 최대소음도 (대전; Lmax)

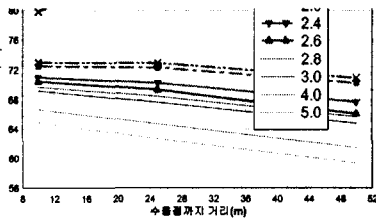


그림 10. 교량에서의 이격거리별 최대소음도 (새마을호; Lmax)

표 3. 시간당 운행 횟수

	구간	TGV	재래철도
Case 1.	대전	11	10
	대구	10	9
Case 2.	대전	11	5
	대구	10	9

검토결과 새마을호가 고속철도보다 5dB(A) 높은 것으로 나타나고 있으며, 도심진입시 고속선보다 선로상대 및 선형이 좋지 못하므로 고속철도를 새마을호의 소음도로 가정하여 다시 계산할 경우 평지는 10m, 25m, 50m에서, 교량은 25m, 50m에서 기존철도 소음기준(주거지역)을 초과하고 있지만 2.0m 방음벽 설치시 기존철도 소음기준(주거지역)을 만족함을 알 수 있다. 하지만 이는 모두 지상 1.5m기준이며, 향후 고층구간에 대한 영향 평가 및 분석이 필요하다.

표 4. 평지에서 등가소음합 (Case 1.)

방음벽 높이	10m		25m		50m	
	대구	대전	대구	대전	대구	대전
0m	75.9	76.5	72.6	73.2	68.4	69.0
1.9m	64.7	65.3	62.1	62.7	58.5	59.1
2.0m	66.6	67.1	64.4	64.9	61.1	61.6
2.4m	62.0	62.6	59.2	59.7	55.1	55.7
4.0m	55.3	55.9	52.1	52.7	48.1	48.7

표 5. 교량에서 등가소음합 (Case 1.)

방음벽 높이	10m		25m		50m	
	대구	대전	대구	대전	대구	대전
0m	64.7	65.3	71.9	72.5	68.5	69.1
1.9m	57.8	58.4	57.7	58.3	55.8	56.3
2.0m	57.3	57.9	57.1	57.7	55.0	55.6
2.4m	55.8	56.4	55.0	55.6	52.5	53.1
4.0m	51.5	52.1	49.5	50.1	46.3	46.9

표 6. 평지에서 등가소음합 (Case 2.)

방음벽 높이	10m		25m		50m	
	대구	대전	대구	대전	대구	대전
0m	75.9	74.5	72.6	71.2	68.4	67.0
1.9m	66.7	64.8	64.5	62.6	61.2	59.2
2.0m	64.5	62.9	62.0	60.4	58.4	56.8
2.4m	62.0	60.4	59.2	57.6	55.4	53.8
4.0m	55.3	53.7	52.1	50.5	48.1	46.5

표 7. 교량에서 등가소음합 (Case 2.)

방음벽 높이	10m		25m		50m	
	대구	대전	대구	대전	대구	대전
0m	64.7	63.2	71.9	70.5	68.5	67.1
1.9m	57.8	56.2	57.7	56.2	55.8	54.2
2.0m	57.3	55.8	57.1	55.6	55.0	53.5
2.4m	55.8	54.2	55.0	53.4	52.5	50.9
4.0m	51.5	49.9	49.5	47.9	46.3	44.7

표 8. 평지에서 새마을호 시뮬레이션 결과값 (Leq; Case1)

방음벽 높이	10m		25m		50m	
	대구	대전	대구	대전	대구	대전
0m	77.9	78.4	74.6	75.1	70.4	70.9
1.9m	66.8	67.3	64.2	64.7	60.6	61.1
2.0m	69.2	69.7	67.1	67.6	63.8	64.3
2.4m	64.3	64.8	61.4	61.9	57.2	57.7
4.0m	57.5	58.0	54.3	54.8	50.3	50.8

표 9. 교량에서의 새마을호 시뮬레이션 결과값 (Leq; Case1)

방음벽 높이	10m		25m		50m	
	대구	대전	대구	대전	대구	대전
0m	66.8	67.3	73.9	74.4	70.5	71.0
1.9m	60.0	60.5	59.9	60.4	57.9	58.4
2.0m	59.5	60.0	59.3	59.8	57.2	57.7
2.4m	58.0	58.5	57.2	57.7	54.7	55.2
4.0m	53.7	54.2	51.7	52.2	48.5	49.0

표 10. 평지에서의 새마을호 시뮬레이션 결과값 (Leq; Case2)

방음벽 높이	10m		25m		50m	
	대구	대전	대구	대전	대구	대전
0m	77.9	77.2	74.6	73.9	70.4	69.7
1.9m	69.2	68.5	67.1	66.4	63.8	63.1
2.0m	66.8	66.1	64.2	63.5	60.6	59.9
2.4m	64.3	63.6	61.4	60.7	57.6	56.9
4.0m	57.5	56.8	54.3	53.6	50.3	49.6

표 11. 교량에서의 새마을호 시뮬레이션 결과값 (Leq; Case2)

방음벽 높이	10m		25m		50m	
	대구	대전	대구	대전	대구	대전
0m	66.8	66.1	73.9	73.2	70.5	69.8
1.9m	60.0	59.3	59.9	59.2	57.9	57.2
2.0m	59.5	58.8	59.3	58.6	57.2	56.5
2.4m	58.0	57.3	57.2	56.5	54.7	54.0
4.0m	53.7	53.0	51.7	51.0	48.5	47.8

4. 결론

본 논문은 고속전철의 도심진입시 발생하는 소음을 평가하였다. 시뮬레이션결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 평지의 경우 소음도는 거리에 따라 감소하며, 거리가 2배 멀어지면 3~4dB(A)감소하는 선음원의 특성을 보임
2. 교량의 경우 교량상판의 영향으로 Shadow

Zone이 발생하여 25m이내의 근접장에서 소음도가 낮으며, 25m이상의 경우 평지와 같은 특성을 보임

3. 교량의 경우 방음벽의 성능은 25m지점에서 평지보다 우수하게 나타나고 있음
4. 등가소음도는 운행횟수에 따라 Case 1.과 Case 2.로 구별하였으며, 평지는 10m, 25m에서, 교량은 25m에서 기존철도 소음기준(주거지역)을 초과하고 있음
5. 2.0m 방음벽 설치시 기존철도 소음기준(주거지역)을 만족
6. Case 2.는 대전에서 재래선 철도의 운행 횟수가 절반으로 줄어드는 경우이며, 등가소음도가 2dB(A)감소 함
7. 본 시뮬레이션의 문제점은 국내에서 고속철도의 재래선에 대한 운행경험이 없다는 점인데, 이를 해결하기 위하여 TGV의 속도 및 이격거리에 따른 소음예측식(GEC Alsthom사 제공, 개발조건)을 활용하였음
8. 검토결과 새마을호가 고속철도보다 5dB(A) 높은 것으로 나타나고 있으며, 고속철도를 새마을호의 소음도로 가정하여 다시 계산할 경우 평지는 10m, 25m, 50m에서, 교량은 25m, 50m에서 기존철도 소음기준(주거지역)을 초과하고 있음
9. 2.0m 방음벽 설치시 기존철도 소음기준(주거지역)을 만족

참고 문헌

- (1) Hugh J. Saurenman, James T. Nelson, George P. Wilson, Handbook of UrbanRail Noise and Vibration Control, Wilson, Ihrig & Associates, Inc., 1982.
- (2) User's Manual, LMS International, Raynoise Rev. 3.0, 1998.
- (3) Kinsler, Frey, Coppens, Sanders,. Fundamentals of Acoustics, Wiley International, Inc. 1980.
- (4) 소음진동편람, 한국소음진동공학회, 1995
- (5) 나 회승, J.P.Clairbois, " 고속열차(TGV) 주행시 연변에서의 소음예측 및 방음시설 설계," 한국소음진동공학회, 1999.