

외부음장해석에 의한 고속전철 벽면에서의 투과손실 목표치 계산 Calculation of transmission loss design values of a high speed train wall by acoustic analysis of exterior sound field

김관주 * 유남식 **
Kim, Kwan-Ju Yoo, Nam-Sik

ABSTRACT

Design target values of transmission loss in a high-speed train wall are suggested by calculating the difference between interior and exterior noise levels of it. Exterior noise level distribution on the boundary of train wall is calculated by Sysnoise, with sound source input prepared by experiments. Two kinds of exterior sound sources are considered, the rolling noise of train wheels on the rail and the aerodynamic noise from the pantograph. Interior noise level is provided by high-speed design target. Transmission loss characteristics according to the frequency band are examined.

1. 서론

시속 300km이상으로 운행하는 고속전철의 경우 환경 분야나 실제 전철 차량 설계에서 필요한 소음과 진동의 문제는 심각하게 고려되고 있으며, 국내에서도 이 분야에 많은 논문들이 발표되고 있다. 이러한 소음문제는 승객의 편의성과 쾌적한 환경을 위해 지대한 관심을 기울이는 분야로 고속전철관련 연구분야에서 필수적인 과제라고 할 수 있다. 일반적으로 수송기계에서의 소음문제는 소음원, 전달계, 반응계의 부위별로 해석을 시도한다. 본 논문은 전달계에 대한 해석으로, 고속전철의 벽면에서의 투과손실에 관한 설계안을 제시하는 것을 내용으로 한다. 이러한 전달계의 해석을 위해서 다음과 같은 소음원들을 고려하였다. [1, 2] 첫 번째로는 구조기인소음과 공기 전달 소음의 가장 큰 원인을 차지하는 구름소음(rolling stock noise)이고 이 입력자료는 실지 운행하는 프랑스의 고속 전철 소음을 측정하여서 계산하였다. 두번째는 공력 소음으로, 이 소음은 고속 주행 속도에서 중요한 소음원으로 작용한다. 공력 소음의 가장 큰 원인은 팬토그래프(pantograph)소음과 차체의 공력소음으로 알려져 있다. 이 입력자료는 실지 운행하는 프랑스의 고속 전철 소음의 자료에서 계산하였다. [3] 위에서 주어진 음원값에 대하여 상용음향해석프로그램 Sysnoise을 이용하여 철도차량의 외벽에서의 음압분포를 2차원으로 주파수대역별로 계산하였으며 이 결과를 실내소음의 목표치와 비교하여 차량벽면에서의 투과손실 설계 목표치를 계산하여 각 소음원별 특성을 검토하였다.

* 홍익대학교 교수
** 홍익대학교 석사과정

2. 본 론

2.1 구름소음에 의한 음향 투과손실의 계산

구름소음은 궤와 레일의 상호작용에 의하여 발생하는 소음을 말한다. 이러한 구름소음에 관한 연구는 P. Remington에 의해서 1980년대에 연구되기 시작하였고 1990년대에 D. Thomson에 의해 발전되었다. [4, 5] 구름소음(rolling noise)은 다음과 같은 구조를 따라 발생하는데 먼저 궤와 레일사이의 결함에 의해 달리는 상태에서 가진력이 생기게 된다. 그 결함은 마이크로 미터 단위의 peak-to-peak 크기를 가지고 있으며 몇십 센치 이내의 파장을 갖는다. 그리고 그 결함에 의하여 구조물의 움직임이 발생하는데 이때 주의해야 할 사항은 궤와 레일의 응답주파수가 여러 주파수에 대하여 연속적이지 않고 자기자신의 고유진동수의 조화 성분으로 나타난다는 사실이다. 그리고 마지막으로 이러한 움직임이 관찰자에게 음향에너지로 방사된다. 따라서 구름소음에 의한 음파의 전파를 알기 위해서 바퀴의 결함에 의한 진동 파워값이나 궤와 레일의 접촉면에서 발생하는 음향파워를 정확히 구해야 한다. 그러나 본 연구에서는 구름소음에 대한 입력자료를 구할 수 없어서 실험으로 구한 음압 피크(Peak)값을 궤와 레일의 접촉면에 집중된 소음이라고 가정하여 음향해석을 하였다.

그림 1은 2차원 해석을 위한 철도차량의 단면모델을 보여주는데 객차의 끝단의 절단면의 반을 보여준다. 이때 객차의 바닥부분인 스키트안쪽의 모델링은 할 수 없기 때문에 스키트 안쪽을 포함한 열차의 바깥쪽을 같이 모델링 하였다. 이때 점과 번호들은 외부 음압의 측정위치를 나타내고 있다. 객차 표면의 경계조건은 강제 조건으로 가정하였고 지면의 경계 조건은 흡음 경계 조건으로하였고 지면의 임피던스 값을 실험치를 이용하였다. 입력 음원의 위치는 궤와 레일사이의 접촉점인 지상 10cm로 하였다. 이론적으로 무지향성 선 음원의 경우 PWL과 SPL의 관계는 다음과 같은 식(1)로 구할 수 있고 [6] Sysnoise에 입력되는 음원의 크기는 음원에서의 거리가 1m인 크기로 입력하였다.

$$SPL = PWL - 10 \log(2\pi r) \dots\dots\dots \text{식 (1)}$$

여기서 $r = 1m$

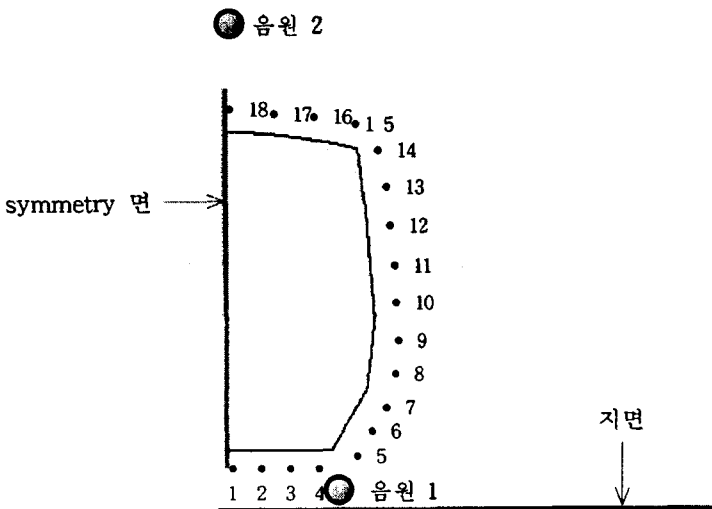


그림 1. 2차원 해석을 위한 절반 모델 : • 측정점

지면의 임피던스[7]는 표1과 같이 나타내었으며 주파수가 증가할수록 낮은 임피던스값을 가지게 되므로 반사가 적게 일어남을 알 수 있다. 그러므로 지면에서의 반사의 영향이 고주파로 갈수록 더욱 작아지게 되고 따라서 입사음과 반사음의 합성된 음압도 그 만큼 작게 나타나게 된다. 따라서 같은 크기의 입력이더라도 고주파영역에서는 작게 들린다. 그러나 반대로 A-보상을 주게 되면 2kHz주변의 음압이 크게 나타나므로 정확한 분석은 음장분석을 수행하여 알아보았다.

도표 1. 지표면의 임피던스 값 (단위 : Pa · s/m = rayls)

주파수(Hz)	임피던스	주파수(Hz)	임피던스	주파수(Hz)	임피던스
31.5	209492-25674i	250	4320.3-563.9i	2k	1313-1230i
63	12586-15457i	500	2967.9-3393.2i	4k	943-741i
125	7675.7-93680.8i	1k	1928-2043i	8k	731-446i

첫 번째로 그림 1의 음원 1 만이 전체소음을 발생시킨다는 가정으로 외부 음장 해석을 하였다. 이때 입력자료는 프랑스에서 수행한 300km로 주행하는 TGV외부소음도 측정에서 구한 PWL값을 이용하였다. 그림 2는 식1)을 이용하여 PWL값을 SPL값으로 환산한 크기를 보여준다.

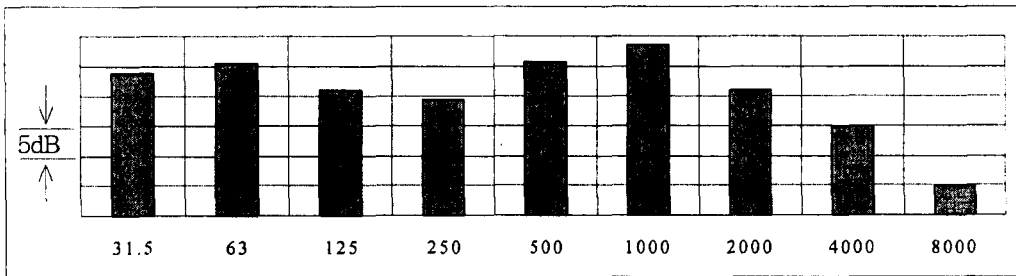


그림 2. 입력 음압 (구름소음)

이때 Sysnoise의 symmetry기능을 사용하였기 때문에 측정된 PWL의 값에서 3dB를 빼서 계산을 하였다. 음원을 선 음원으로 가정하였으며 폭과 높이에 비하여 길이가 매우 긴 열차의 해석은 2차원 해석이 가능할 것으로 예상이 되었다.

그림 3에서 6까지를 살펴보면 전체적으로 주파수가 높아짐에 따라 회절의 영향이 적어짐을 볼 수 있다. 그러나 음장의 변화가 주파수가 증가함에 따라 완전히 비례하여 일어나지 않는 이유는 반사 및 회절의 영향으로 설명된다. 즉, 지면의 반사와 각각의 모서리에서의 회절이 음장에 영향을 주어 복잡한 음장을 형성한다고 볼 수 있다. 하지만 전체적인 음장의 변화는 고주파로 갈수록 음압의 차이가 많이 나타나므로 일반적인 상식으로도 충분히 납득 할 만한 음장이라고 볼 수 있다. 따라서 열차 바닥 면에서의 음장이 제일 크게 나타나고 지붕 쪽으로 갈수록 점차적으로 낮은 음장을 형성한다.

이와 같이 외부 음장이 형성이 될 때 내부 음장과의 투과손실을 계산하여 보았다. 투과손실을 측정하는 표준적인 방법은 잔향실법[7]을 이용하여 음원실과 수용실의 평균음압 수준으로부터 계산되며, 실험실의 체적과 흡음력 그리고 시편의 면적으로부터 계산되는 보정 계수를 빼주는 방법이 있다. 그러나 일상적으로 실험값을 알지 못하는 경우에는 외부내부 벽에서 1m씩 떨어진 점에서 6dB를 보정해주는 방법이 사용되기도 한다.[5]

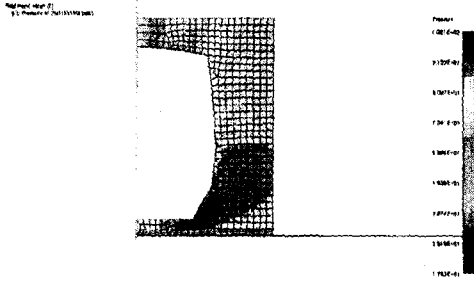


그림 3. 250Hz에서의 음압분포

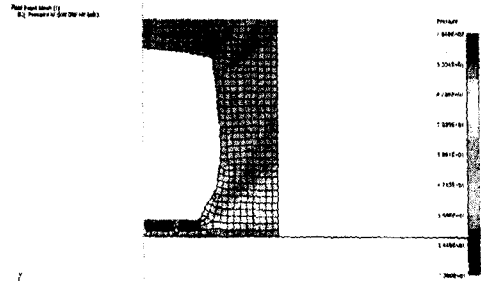


그림 4. 500Hz에서의 음압분포

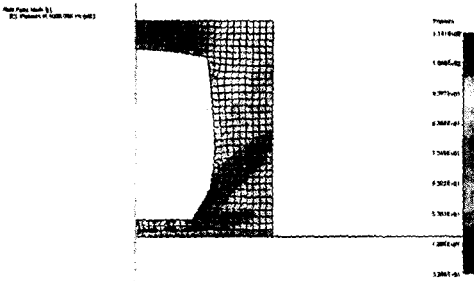


그림 5. 1kHz에서의 음압분포

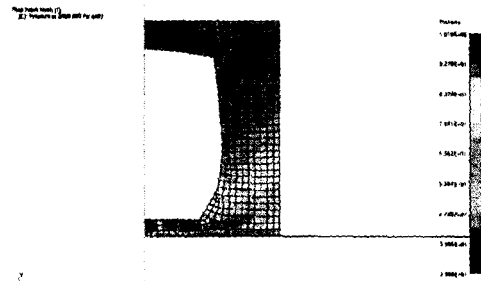


그림 6. 2kHz에서의 음압분포

본 해석에서는 바다 면에서 수직으로 1m 떨어진 곳의 음압을 알 수 없으므로 열차의 외부에서 계산된 음압과 350km 주행 시 객실 내부 음압의 요구사항[8, 9, 10, 11]을 이용하여 직접 그 차이를 아래 식과 같이 음압 손실을 투과손실로 동가 하였다. 이와 같이 하면 음이 수직 입사한다는 가정과 같이 되어 보정 계수를 빼주지 않은 투과손실이 생기게 된다. 따라서 보정을 한 투과 계수보다 높게 나타날 것으로 예측이 되는데 이는 안전을 차원에서 허용이 될 수 있다는 가정으로 다음의 식 (2)와 같이 내부와 외부의 음압 차이를 투과손실로 동가하여 나타내었다.

$$NR \approx TL = SPL_{(외부)} - SPL_{(내부)} \dots \dots \dots \text{식 (2)}$$

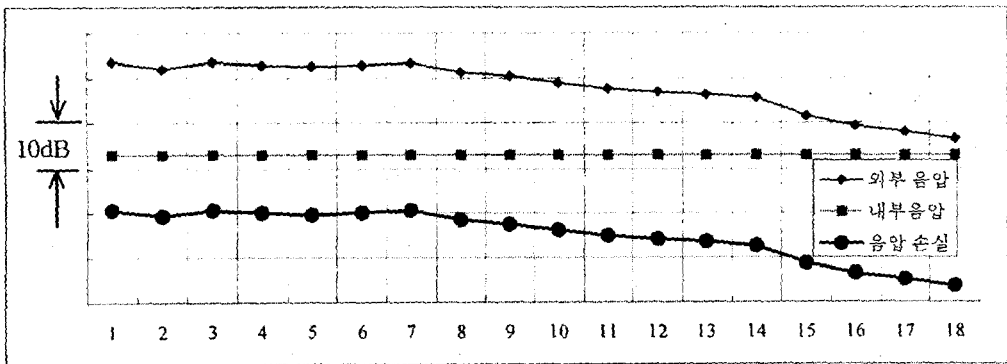


그림 7. 구름소음에 의한 투과손실

그림 7은 식 (2)를 이용하여 구한 투과손실을 도식한 것으로 가로축은 그림 1에서 측정점의 번호를 의미한다. 이때 각각의 위치에서의 결과를 살펴보면 바닥 면에서의 음압 차이가 40dB가량 나왔으며 열차측면의 음압이 약 35에서 30dB 가량 음압 차이가 나타나고 있고, 지붕은 20dB에서 15dB정도의 음압 차이가 있음을 보여준다.

2.2 팬토그래프 소음에 의한 투과손실의 계산

공력소음은 시속 300km이상으로 주행하는 고속열차에서 크게 대두되는 소음이지만 전반적인 소음의 양상에서는 그다지 심각한 소음은 아니다. [4, 12] 소음원은 보통 세가지로 분류되는데 방해물에 의한 소음(obstacle noise), 간극에 의한 소음(cavity noise), 그리고 열차주위의 난류에 의한 소음(boundary layered noise)으로 나뉘게 된다. 그러나 일반적인 견해는 공력소음 중 가장 큰 비중을 차지하는 것이 바로 방해물에 의한 소음 즉 팬토그래프 소음이라는 것이고[13] 나머지 두 소음은 그 원인이 매우 많고 속도와 형상에 매우 민감하고 특정한 위치에 국한된 것이라기보다는 여러 부위에서 동시다발적으로 발생을 하며 광대역의 주파수를 가지고 있다고 알려져 있으므로 소음원의 위치와 크기를 정의하기 어려운 점이 있다. 따라서 본 절에서는 공력에 의한 소음과 난류에 의한 소음을 제외한 나머지 소음인 팬토그래프소음에 대하여 예상실험식을 이용한 예상 PWL을 구하고 이를 이용하여 Sysnoise 입력자료를 만들었다. 실험식을 이용한 예상식[13]은 다음의 식 (3)와 같다.

$$L_A \approx L_{A,200} + 10 \times \alpha \times \log\left(\frac{v}{200}\right) \quad (\text{측정위치: 차량측면으로부터 5m거리}) \quad \dots\dots\dots \text{식 (3)}$$

- L_A = 차량속도 v km/h에서의 A-보상 음압레벨
- $L_{A,200}$ = 차량속도 200 km/h에서의 A-보상 음압레벨
- α = 측정 위치에 따른 상수 (2 ~ 7)

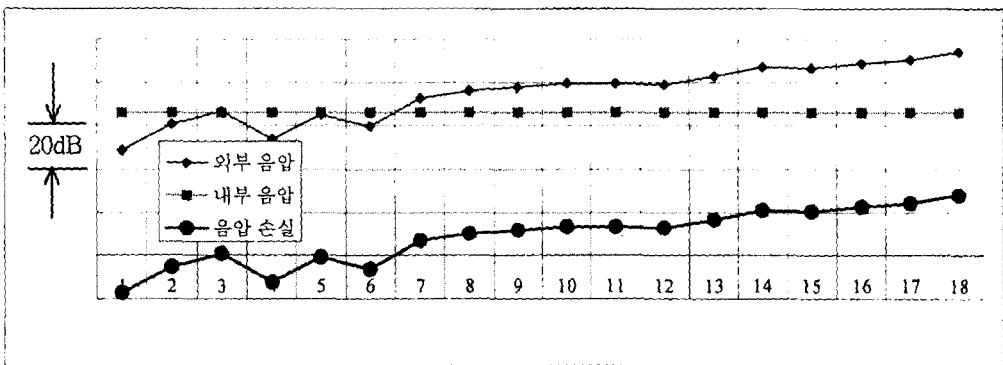


그림 8. 공력 소음에 의한 투과 손실

이때 구름소음에서와 같이 Sysnoise의 symmetry기능을 사용하였기 때문에 3dB를 뺀값의 300km/h의 속도에 대한 예측값을 보면 $L_{A,300} = 101.8\text{dB}$ 가 나온다. 식 (2)를 이용하여 $r=1\text{m}$ 에서의 음압의 크기로 환산하고 그림 1의 음원 2만이 작용한다는 가정으로 팬토그래프 소음을 집중시켜서 외부 음장의 분포를 알아보았다. 음원 2의 위치는 기존의 발표된 음원의 위치에 대한 논문을 이용하여 지상에서 4.5m로 설정하여었다. [14, 15] 이때 지표면 경계조건은 '앞 절에서 구름소음을 해석할 때와 같이 주었고 SPL의 입력은 1kHz가 전체 음압을 나타내도록 하였고 이를 기반으로 음장 해석을 실시하였다. 그림 8은 1kHz 소음에 의한 공력 소음의 영향을 차량외부의

음압을 역시 바닥 면부터 지붕까지 18등분하여 도식화 한 것인데 당연히 구름소음과는 반대로 지붕의 영향이 크고 바닥 면의 영향이 작게 나타남을 볼 수 있다. 이때 바닥부분에서 -부호의 음압 손실이 생기는 이유는 내부 음압보다 외부 음압이 더 작기 때문이다.

3. 결론

이상의 결과를 정리하여보면 다음과 같다.

1) 실제적으로 열차의 외부소음은 여러 가지 소음이 합성이 되어 일어나는 소음이지만 소리의 마스킹 효과를 고려하면 가장 영향이 큰 구름소음과 팬토히라프 소음만이 작용한다는 가정을 하였다. 따라서 이 두 가지가 동시에 작용한다는 가정으로 2.1결과 2.2결의 결과를 합성한 그래프를 그려보면 그림 9와 같이 나타낼 수 있다. 또한 이런 결과를 이용하여 표로 나타내보면 도표 2와같이 정리된다. 그림 9를 살펴보면 바닥 면에서 일정하게 약 42dB의 음압 손실이 예상이 되고 외벽 부분에서는 약 35~25dB의 음압 손실이 예상이 된다. 그리고 지붕 부분에서는 약 22~30dB의 음압 손실이 예상이 됨을 알 수 있다. 즉 지붕과 바닥면 사이의 음압 손실은 바닥쪽이 약 10~20dB 정도 크게 설계되어야 한다는 결과가 나타났다.

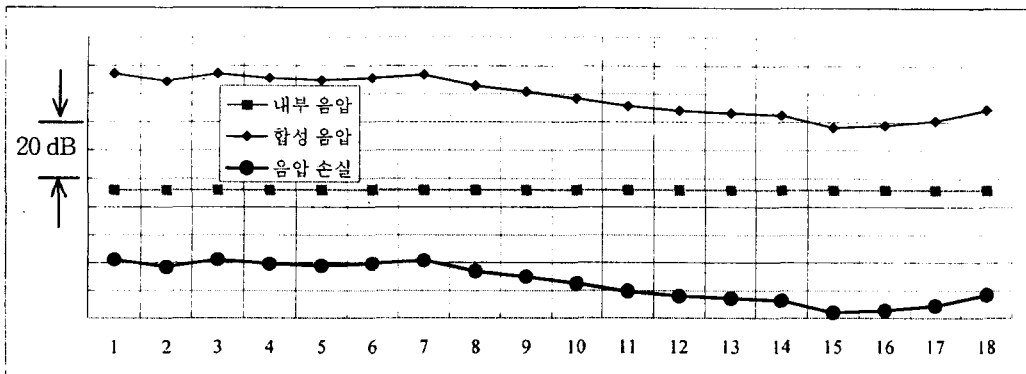


그림 9. 합성음의 투과손실

도표 2. 구름소음과 공력소음이 동시에 작용하는 경우의 투과손실 (dB)

위치	구름소음만 작용할 경우	공력 소음만 작용할 경우	두 가지가 동시에 작용하는 경우
바닥	42	0	42
창문(lower)	37	15	37
창문	32	16	32
창문(upper)	28	20	28
지붕	16	30	30

2) 500Hz~2kHz사이의 음압이 외부 음장의 해석에서 매우 중요하다는 결론을 내릴 수 있다. 첫 번째 이유는 외부 음장의 입력 값이 500Hz와 1kHz에서 가장 높다는 것이고, 두 번째로는 A-보상 시켰을 경우 1kHz주변의 경우가 음압에 대한 보정치가 거의 없다는 데 있으며 이 두 가지 모두에서 크게 영향을 나타내는 주파수가 바로 1kHz이고 여기에 주변의 주파수 즉 500Hz에서 2kHz까지

지의 주파수대의 음압이 외부 음장에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 주파수라는 점이다.

3) 각각의 위치별로 투과손실을 다르게 하여 표 2와같이 철도차량 설계시 바닥면은 42dB의 투과손실을 유도하고 벽쪽은 약 37dB를 가지게 하며 지붕쪽은 약 30dB를 유지할 수 있다면 300km로 주행하는 고속전철의 경우 실내 소음을 66dB로 유지할 수 있을 것이다.

4) 위와는 반대로 지면의 임피던스를 낮출 수 있다면 투과 음압을 낮추면서 실내의 음압을 유지할 수 있을 것이다. 그러나 이와 같은 방법은 현실적으로 매우 힘든 방법이다.

그런데 이와 같은 결과가 나오기까지는 많은 가정이 필요했고 외부 소음원으로 포함되지 않은 차체소음 등이 아직 그대로 남아있는 상태이기 때문에 요구되는 투과 손실량은 안전율을 계산하더라도 현재보다 더 크게 나타나리라고 쉽게 예상된다. 따라서 현재 우리 나라 업체와 비교를 통해서 어느 정도 차이가 생기는 지 알아볼 필요가 있는데 이를 위해 기존에 발표된 한국의 H기업의 상용속도 200km/h의 고속열차의 투과 손실량 [16] 과 비교를 해보면 도표 3에서와 같이 바닥면에서 약 1dB 창문에서도 약 1dB의 투과손실을 더 늘려야 한다는 결과가 나온다. 따라서 비록 200km/h를 달리도록 설계된 차량이지만 300km/h의 속도로 달리는 경우 적어도 67dB이상의 실내 음압이 생기게 되므로 설계사양에 맞추기는 어렵다. 창문과 바닥면에서의 개선작업이 필요하다 결론을 내릴 수 있다.

도표 3. 해석결과와 한국 기업자료와의 비교 (dB)

위치	해석결과에 의한 투과손실	한국 H기업의 투과손실 자료	차이 (H기업-해석결과)
바닥	42	41	-1
벽(lower)	37	38	1
창문	32	31	-1
벽(upper)	28	38	10
지붕	30	38	8

참고문헌

1. M. Heckl, M. Hauck, and R. Wettsschureck, 1996, "Structure-Borne Sound And Vibration from Rail Traffic", Journal of Sound and Vibration, Vol. 193, No. 2 pp. 175-184.
2. 한국 고속철도 관리공단, 1995. 3, "고속철도 환경소음 기준 및 진동기준에 대한 연구: 환경 기준 및 방음대책편".
3. 인하대학교, 1997, "진동소음 해석 및 저감 기술개발", 고속전철 기술개발사업(과제번호 II-I-5) 1차년도 연차보고서.
4. Defrot. Doc, 1996, "The Railway Noise", SYSTRA-SOFRETU-SOFRERAIL, no 1155/HSR /KR/24.
5. D. J. Thomson, B. Hemsworth, N. Vincent, 1996, "Experimental Validation of The TWINS Prediction Program for Rolling Noise", Journal of Sound and Vibration, Vol 193, No 1, pp. 123-135.
6. 정 일록, 1991, 소음·진동 (이론과 실무), 신광문화사.
7. 한국 소음진동 공학회, 1995, 소음진동 편람, pp. 501-503.
8. 생기원, 1996, "차량시스템 통합 및 총괄", 고속전철 기술개발사업(과제번호 II-0-0) 1차년도 연차보고서.
9. 생기원, 1996, "차량시스템 개념설계 및 평가기술 개발", 고속전철 기술개발 사업(과제번호

II- I -1) 1차년도 연차보고서.

- 10 한국고속철도공단, 1996, "차량시스템 엔지니어링 기술개발". 고속전철 기술 개발사업(과제번호 I-0-1) 1차년도 연차보고서.
11. 한국고속철도, 1996, "고속철도 차량시스템 엔지니어링 : 제 2권", 한국 고속철도, pp. 51-59.
12. B. Baskow, and B. Muller, 1993. "Relevant Sound Source Generated by the High Speed Railway Train ICE the Dutch Bundesbahn and How They Are Accounted for in Model Calculation of wayside Noise Prediction, "Proc. International Conference on Speed up Technology for Railway and Maglev Vehicles, Yokohama. Japan. pp. 49-54.
13. M. A. Pallas, K. P. Schmitz, B. Barsikow, P. Fodman, and G. Holzl, 1994, "DEUFRAO : Localized Sound Source on the High-Speed Vehicles ICE, TGV-A, and TR07, "WCRR '94, Paris , pp. 377-383, (also presented at Innoisise '94 , Yokohama, Japan).
14. B. Barsikow, 1996, "Experience with various configurations of microphone arrays used to locate sound sources on railway trains operated by the dB AG" Journal of Sound and Vibration Vol193, No 1, pp. 283-293.
15. J. D. Van der Toon, H. Hedriks, and T. C. van den Pool, 1996, "Measuring TGV Source Strength with Syntacan, "Journal of Sound and Vibration, Vol. 193, No 2, pp. 113-121
16. 이 용주, 1996, 상용속도 200km/h의 한진 고속열차 객실 내 소음 예측, 한국소음진동공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 76-72.