

고속철도소음예측 : 공력소음의 속도민감성

High Speed Rail : Prediction of Aerodynamic Noise

김정태* 김정수** 김석현***
Kim, Jeung-Tae Kim Jung-Soo Kim, Suk-Hyun

ABSTRACT

Noise pollution from a high speed train has been a serious social issue nowadays. Especially when a train speed exceeds 300km/hr, an aerodynamic noise level has been known to be increased based on 4-6th power laws. In this paper, a simple approach to evaluate the sensitivity effect on noise due to the speed change has been examination.

1. 서 론

시속 350 Km가 넘는 구간에서는 속도향상에 따른 소음발생정도가 급격히 증가하여 공력기인소음의 영향이 구조기인소음보다 커지는 구간에 해당된다. 따라서 본 논문에서는 차량의 설계개발단계에서 소음의 영향을 예측하고 분석하기위한 공학적 방법의 일환으로 주행속도가 시속 300 km를 초과하는 구간에서의 공력소음에 대한 속도민감도를 검토하였다.

2. 공력기인 소음의 속도민감성

고속철도가 시속 280 km, 300 km, 330 km로 주행할 경우, 소음도를 측정소음과 공력소음, 차륜기인소음으로 구분하여 표시한 예는 표 1에 보여져있다. 저주파에서 고주파영역으로 갈수록 각 주행속도에 대한 공력소음과 차륜기인소음의 영향을 주파수 별로 살펴보면 63 Hz에서는 공력소음의 영향이 차륜기인소음에 비해 거의 영향을 미치지 못한다. 이에 반해 주파수성분이 1 kHz로 올라가면 난류소음이 차륜기인소음에 비해 4.5~5 dB의 높은 소음도를 가지게 된다. 1 kHz 이상의 영역에서는 저주파영역과 같은 경향으로 돌아가 공력소음의 영향보다는 차륜기인소음의 영향이 두드러짐을 알 수 있다. 이렇게 주파수별로 공력소음과 차륜기인소음의 영향이 다름에도 불구하고 overall 값으로 비교하면, 각각의 주행속도별로 두가지 소음원에서 발생된 소음이 서로 거의 같은 값을 보임을 알 수 있다. 또한, 주파수별로 비교했을 때 나타나는 이러한 양상과는 달리, 같은 주파수에서 주행속도별 소음원에 따른 소음

* 홍익대학교, 교수, 정회원

E-mail :Jeunk11@yahoo.co.kr

TEL : (02)320-1467 FAX : (02)320-1113

** 홍익대학교, 교수

*** 강원대학교, 교수

도를 분석해보면 속도의 증가에 따른 난류소음 영향의 변화에도 불구하고 속도별로 거의 마찬가지로 소음도를 가진다는 점을 알 수 있다. 표 2 에는 overall값으로 요약된 속도별 각 소음원에 따른 소음도가 나타나 있으며, 이를 통해 볼 때 시속 280 km에서 시속330 km로의 속도변화조건에도 불구하고 차륜기인소음은 88.6 dBA 공력소음은 88.0 dBA의 비슷한 overall값을 가진다고 결론지을 수 있다.

2.1 공력소음의 속도비례 특성

공력소음 연구의 중요한 부분은 속도변화에 따른 공력소음 예측 시 어떠한 이론식을 사용해야 할 것인가이다.

일반적으로 공력소음에 의한 소음도는 주행속도의 변화에 따라 다음과 같은 이론식이 적용된다.

$$\text{Sound Pressure Level (dB)} \propto 10\log(\text{주행속도}^a) \quad (1)$$

이 때, a값을 어떻게 산정하느냐에 따라 공력소음도는 큰 차이를 보이게 된다. 이러한 a값에 따라 공력 소음도를 예측하는 방법은 다음과 같은 몇가지 이론이 존재한다.

표 1. 주파수·주행속도별 난류소음과 차륜기인소음의 영향

	63	125	250	500	1k	2k	4k	O/A	O/A(dBA)	
280km/h	외부측정	92.8	86.9	83.0	85.2	85.6	85.9	81.4	95.8	91.0
	난류소음	80.6	83.0	84.9	85.8	84.4	79.8	72.7	91.4	88.2
	차륜소음	92.5	84.6	82.7	82.7	79.4	84.7	80.8	94.7	88.8
300km/h	외부측정	92.8	86.9	83.0	85.2	85.6	85.9	81.4	95.8	91.0
	난류소음	80.4	82.8	84.7	85.6	84.3	79.6	75.2	91.3	88.0
	차륜소음	92.5	84.8	83.0	83.0	79.7	84.7	80.8	94.8	88.9
330km/h	외부측정	92.8	86.9	83.0	85.2	85.6	85.9	81.4	95.8	91.0
	난류소음	80.2	82.5	84.5	85.3	84.0	79.4	72.2	91.0	87.7
	차륜소음	92.6	84.9	83.2	83.2	80.5	84.8	80.8	94.9	89.0

표 2. 주행속도별 난류소음과 차륜기인소음의 영향(dBA)

등가조건 (차륜 vs 공력)	280 km/hr	300 km/hr	330 km/hr
난류소음계수 (α)	8.0	7.7	7.2
차륜소음도 (dBA)	88.8	88.9	89.0
난류소음도 (dBA)	88.2	88.0	87.7
O/A (측정결과)	91	91	91

2.2 주행속도의 6승에 비례하는 조건

기존, 고속철도의 속도에 따른 공력소음 추이를 예측할 경우에 주로 적용되어 온 이론은 공력소음도가 주행속도의 6승에 비례($\alpha=6$)한다는 식이다. 공력소음은 열차표면의 경계층(boundary layer)에서의 와류현상과, mixing 및 shear 영역 등의 존재에 의해서 발생한다. 이러한 소음발생의 메카니즘으로 인해 바퀴/레일간의 마찰로 인한 소음과 달리 공력소음은 열차의 표면형태와 재질이 주어지면 이론적으로 상당히 정확하게 예측할 수 있다. 특히, 바퀴/레일간의 소음을 무시할 수 있는 자기부상열차에 이론식을 적용하는 경우에 비교적 쉽게 실측치와의 비교가 가능하며 이를 토대로 공력소음이 속도의 6승에 비례한다는 식이 도출되었다. 그림 1에서는 실질적으로 공력소음의 영향만을 받고 있는 독일의 자기부상열차인 MAGLEV의 이론예상 소음도와 실측 소음도를 도시하고 있다. 이론 예측소음도와 실측 소음도가 모두 속도의 6승에 비례함을 알 수 있다.

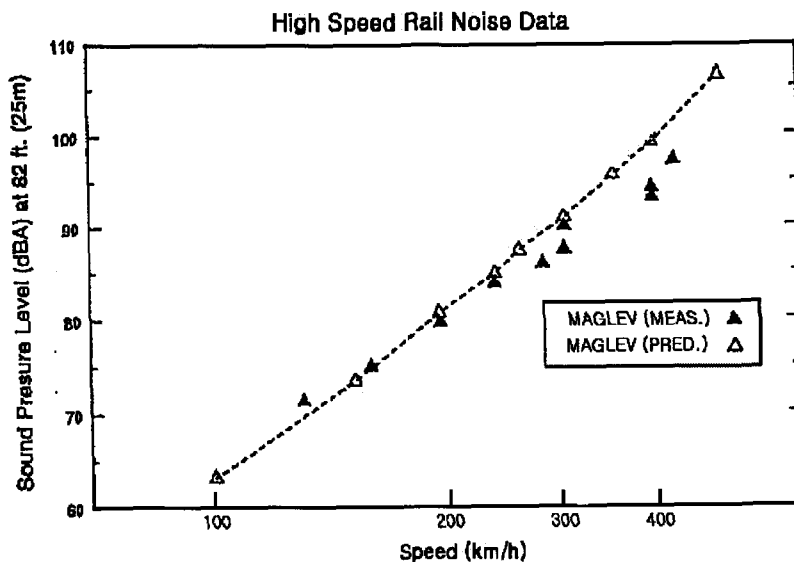


그림 1 자기부상열차의 소음도의 이론예측값과 실험값 (25 m 지점)

2.3 주행속도의 3~8승에 비례하는 조건

독일의 자기부상열차인 MAGLEV의 실험값에서 도출된 속도 6승 비례식과 달리 기존 고속철도 보유국들은 각국에서 보유하고 있는 고속철도를 가지고 차량의 각 부분별로 속도에 따른 공력소음도의 추이를 알 수 있는 데이터를 도출하였다. 표 3에서는 각각의 고속철도에 대한 속도에 따른 공력소음도의 추이를 보여주고 있으며 한국형 고속철도의 기본 모델인 TGV-A의 각 부분에 대한 공력소음도의 추이도 함께 나타나 있다.

표에 의하면 공력소음도가 TGV의 경우는 속도의 3~7.5승, TGV-A의 경우 속도의 2.9~5.2승, ICE의 경우 속도의 6~8승, 신간선의 경우 속도의 6승에 비례하여 증가한다는 이론식이 사용되고 있음을 알 수 있다.

표 3 기존고속철도의 속도변화에 따른 공력소음 추이 이론식

소음구분	고속전철명		소음도추이 ($\propto v^a$)
Aerodynamic Noise	TGV	동력차	3 (300km/h까지)
			7~7.5 (350km/h이상)
		객차	3 (300km/h까지)
			6 (350km/h이상)
	* TGV-A		4.3
	ICE		6~8
	TR70 (MAGLEV)		6 (유동박리)
	신간선		6

소음원 (TGV-A)		a
차륜	중간객차	2.9
	앞동력차	3.2
	뒤동력차	3.0
판토그래프(뒤동력차)		5.7
냉각팬	앞동력차	4.7
	뒤동력차	4.6
앞창문부위 (앞동력차)		5.1
객차간 사이		4.2
대차(보기)부위		6.1
난류경계층(평방미터당)		4.3

3. 제안하는 이론식

본 연구에서 제안하는 이론식은 다음식을 기초로 유도된 공력소음 예측식이며, 결과를 보면 공력소음도가 주행속도의 4승에 비례($a=4$)한다는 것을 알 수 있다.

$$\text{밴드소음} : p_w^2(f) = 8.7 \times 10^{-8} \rho^2 \delta^* U_0^3 [1 + (\pi S)^2]^{-\frac{3}{2}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{전대역소음} : p^2(f) &= \int_0^\infty p^2(f) df \\ &= 8.7 \times 10^{-8} \rho^2 \delta^* U_0^3 \int_0^\infty [1 + (\pi S)^2]^{-\frac{3}{2}} df \quad (3) \\ &= 8.7 \times 10^{-8} \rho^2 \delta^* \left[\frac{U_0^4}{\pi \delta^*} \right] \end{aligned}$$

밴드별 소음도를 계산하는데 있어 8.7×10^{-8} 은 철로변 25 m에서 측정된 데이터로부터 도출한 상수이며, ρ 는 공기밀도, δ^* 는 등가 경계면 두께, S 는 Strouhal수 이다. 이를 주파수에 대해 적분하면 전대역 소음도가 도출되며, 도출된 공력소음도는 차량의 주행속도 U_0 의 4승에 비례함을 알 수 있다.

앞서 제안된 이론식들 검증하기 위해 이미 수행된 속도변화에 따른 공력소음도의 추이를 역으로 계산한 결과가 그림2에 도시되어 있다. 속도변화별 공력소음의 추이를 역으로 계산한 결과, 공력소음도는 속도의 4.4승에 비례($a=4.4$)하는 것으로 나타났으며, 이로 볼 때 기존의 속도변화별 공력소음도 추이를 예측시 주로 적용되어온 소음도가 속도의 6승에 비례한다는 이론식은 수정되어야 한다는 결론에 이를 수 있다. 따라서 본 연구의 결과를 토대로 보면, 오히려 주행속도의 4.4승에 비례한다는 이론식이 적용되어야 올바른 공력 소음도를 예측할 수 있다고 판단된다.

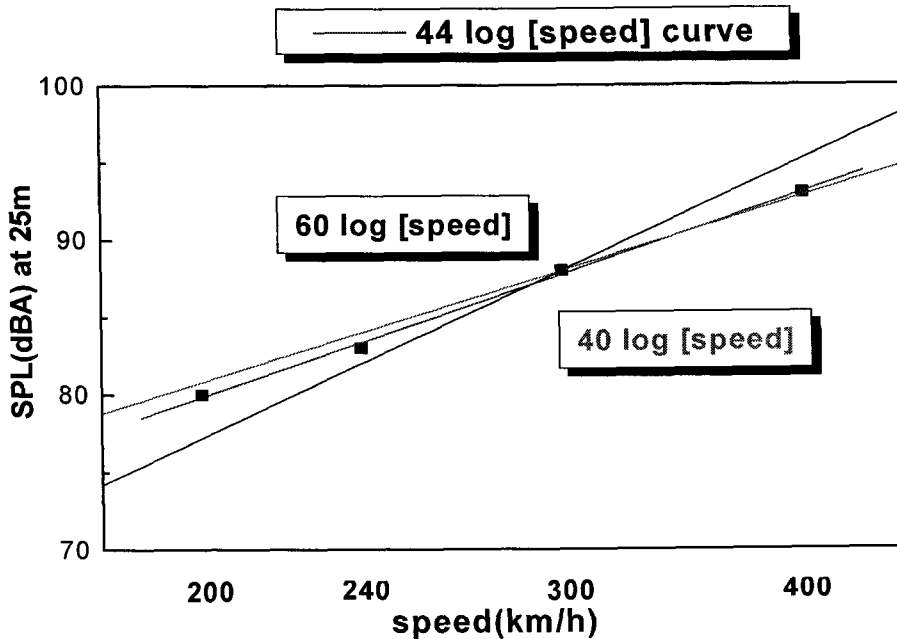


그림 2. 주행속도 변화시 소음도변화추이

4. 결 론

공력소음의 민감도를 검토한 결과 시속 330km의 속도조건에서는 공력소음은 88.0dBA의 overall 값을 가지게 된다. 공력소음의 속도비례특성에 대해 살펴본 결과 본 연구에서는 속도변화별 공력소음도의 추이를 예측할 경우 SPL값은 차량주행속도의 4.4승에 비례하여 증가하게 된다. 이 이론식을 근거로 고속철도 운행속도가 시속 300 Km/h에서 시속 400 Km/h 로 100 Km/h 높게 운영될 경우의 소음증가효과는 5.5 dB로 예상된다. 이러한 크기는 환경소음측면에서 상당한 크기의 소음증가량으로 판단되어 소음저감이 요구되고 있다.

후 기

본 자료는 차세대 고속철도 기술개발사업(사업명: 분산형 차량성능 및 운용기반기술개발과제)연구결과의 일부입니다.

참고문헌

1. Self R.H., etc, " Proceeding of the Queen Anniversary Prize Workshop on aircraft and Broadband Noise", Jan 2007.
2. 김정태, 은희준, 1996, "고속철도 소음특성과 전파현상", 소음진동공학회지 제6권 3호, pp349-355
3. 전형욱, 1998, "철도차량의 내부소음 예측에 관한 연구", 석사논문, 홍익대학교, 서울
4. M. Heckl, 1996, "Structure-Borne Sound and Vibration from Rail Traffic", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.193, No.1, pp175-184
5. R. D. Ciskowski and C. A. Brebbia, 1991, "Boundary Element Methods in Acoustics", CMP
6. Mani, R, : A moving source problem relevant to jet noise", JSV, 25, 3377, 1972.