

전동차 브레이크 스킨소음 현상 및 개선에 대한 연구

Study on the brake squeal noise of rolling stock on tracks and improvements for reducing squeal noise

정 수영*
Chung, su young

김 성결**
Kim, Seong Keol

ABSTRACT

In this study, experimental and theoretical methods were applied to understand brake squeal noise VVVF rolling stock on tracks. Trailer cars needed to payed a particular attention, because they were the major source of brake noise. VVVF rolling stocks for lines no 1 of the subway system in Seoul were used for experimental analyses.

In order to study brake squeal noise, a dynamometer test at the S&T Brake, Co., which was a manufacturer of brake pads had performed. For measuring vibration and noise, vibration tests of brake parts (brake lining, brake lining head, back plates, etc.) at the SNUT were executed. Also, vibration tests of disc assembly and lining block at the heavy maintenance shop of the Gunja depot were performed. The modal analyses by using an ANSYS which was one of the CAE commercial program were simulated to know the relationship to the mechanism of brake noise. On the based of the tests and the simulations it was found that specific frequencies of the brake parts affected squeal noise, and improvements for reducing squeal noise were proposed.

1. 서 론

본 연구는 서울특별시 1호선에서 운행되고 있는 VVVF 차량 중에서 마찰제동을 주로 사용하는 운전차와 부수차를 대상으로 제동시 발생하는 스킨소음 발생 현상을 파악하고 그 개선안을 제시하고자 한다.

연구절차는 우선 실험적인 방법에 의하여 스킨소음에 영향을 줄 수 있는 각 제동부품의 (Brake lining, Brake lining head, Back plate) 모달해석을 통해 고유진동수를 서울산업대학교 기계역학실에서 측정하였고, 단품으로 측정이 어려운 부품(Disc assembly와 Lining block)은 군자차량사무소 내 대차공장에서 차축에 조립된 상태로 측정한다. 제동력 작용시의 디스크 조립체와 라이닝 블록의 진동실험은 군자차량사무소 검수고에서 1호선 VVVF 전동차를 이용하여 측정하고자 한다.

또한, 제륜자 (Brake lining) 제작사인 S&T 브레이크의 다이내모미터(Dynamometer) 시험기를 이용하여 VVVF 및 초파 전동차 주행시의 조건과 동일한 상태에서 속도와 제동력을 조정하여 제륜자 재질 및 형상을 변경시켜 가면서 시험을 진행한다. 실제 전동차에서 발생하는 스킨소음 측정은 군자차량사무소 검수고로 진입하는 1호선 VVVF 전동차를 대상으로 스킨소음을 측정하고자 한다. 그리고 동역학 해석프로그램인 ANSYS를 이용하여 모달해석을 수행하며, 본 해석을 통해 제동부품의 고유진동수가 스킨소음에 영향을 주는 여부를 파악하고자 한다. 궁극적으로 전동차 브레이크 스킨소음의 개선안을 제시한다.

* 서울산업대학교 철도전문대학원생, 회원

** 서울산업대학교 교수, 회원

2. 제동 스켈소음 해석

제동 스켈소음 해석은 서울특별시지하철공사에서 사용중인 2가지 제륜자(Chopper차용, VVVF차용)를 대상으로 하였으며, 실제 제동 스켈소음 발생 조건을 측정하여 해석을 수행하였고 해석에 사용된 제륜자의 물성치 및 시험결과는 표 1과 표2와 같다.

표 1 제륜자 물성치

시험항목 (kgf/mm ²)	Chopper차 DH2004NA	VVVF차 SBK14
압축강도	3.3	5.1
굴곡강도	94	131
인장강도	44	67
전단강도	9	12
충격강도	17.8	9.6

표 2 제작사 (S&T)시험결과^[3]

시험항목	Spec	Chopper차 재질 DH2004NA	VVVF차 재질 SBK14
소음발생	없어야함	없음	없음
마찰 계수	50℃	0.290	0.367
	200℃	-0.370	0.32
마모량 10 ⁻² mm ²	A	30-100	32.7
	B		15.4
최고온도	400℃이하	255	280

(1) 차종별 형상

차종별 제륜자 및 제륜자 헤드(head)의 형상은 아래와 같다

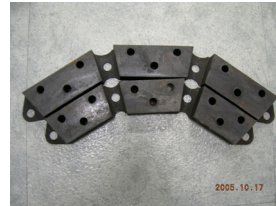


그림 1 VVVF차용 제륜자 및 헤드 형상

그림2 Chopper차용 제륜자 및 헤드 형상

VVVF차량에서는 초과차와 달리 구동차의 회생제동으로 부수차의 제동력을 확보하기 때문에 회생제동력은 크나 최종 정차단계에서는 라이닝슈에 의한 공기제동을 사용하기 때문에 근본적으로 스켈소음 발생 현상은 동일하다고 할 수 있다. 단지 제륜자의 재질차이와 취부용 제륜자 헤드 조립체의 형상차이에 따라서 스켈소음 발생 현상이 달라진다고 할 수 있다.

(2) 소음 실험 결과

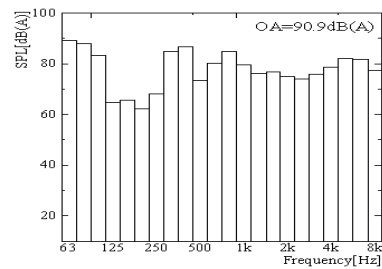
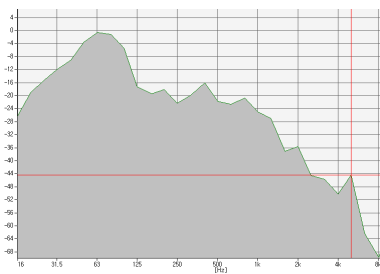


그림 3 Brake squeal noise level (0.4kHz, 0.8kHz, 2kHz, 5kHz)

3. 모달해석

지하철 브레이크 시스템의 진동해석을 위해 ANSYS 상용 프로그램을 이용하여 브레이크 디스크의 반 모델(Half model)의 모달해석을 수행하였다. 본 해석의 목적은 2004에 발표된 디스크의 반 모델 실험해석 결과^[6]와 비교하여 이론 해석 모델의 타당성을 제시하며, 이와 같이 검증된 모델을 사용하여 다양한 모달해석을 수행하고자 한다. 해석에 사용된 디스크의 재질은 회주철이고, 경계치 조건은 실험해석과 동일하게 자유단으로 계산하였다.. 본 해석결과와 실험해석 결과 비교는 표 3에 나타내었다.

표 3 모달해석과 실험해석 결과 비교

Number of natural frequencies	Results of modal analysis (Hz)	Results of experimental analysis (Hz)
1	478.69	460
2	665.87	-
3	967.59	956
4	1337.3	1,338
5	1,862.9	1,800
6	2,224.1	2,200
7	3,026.7	3,000
8	3,250.6	3,200
9	3,276.4	3,300
10	3,981.0	3,800

표 3에서도 알 수 있듯이 이론 모달해석 결과와 실험해석 결과가 거의 일치하여 본 이론 해석 모델의 타당성을 가질 수 있었으며, 차후에 여러 가지 다양한 해석이 가능하다. 그리고 실험해석에서 알 수 없었던 각 고유진동수의 운동도 규명을 할 수 있었다. 즉, 1차 모드는 1차 비틀림 모드이고, 2차 모드는 1차 굽힘 모드, 3차 모드는 2차 굽힘 모드, 4차 모드는 3차 굽힘 모드, 5차 모드는 4차 굽힘 모드, 6차 모드는 5차 모드와 동일하나 위상차가 있는 4차 굽힘 모드, 7차 이상의 모드들은 차례로 5차, 6차, 7차, 8차 굽힘 모드를 나타내었다. 그림 4 ~ 그림 5는 각 모드의 형상을 보여주고 있다.

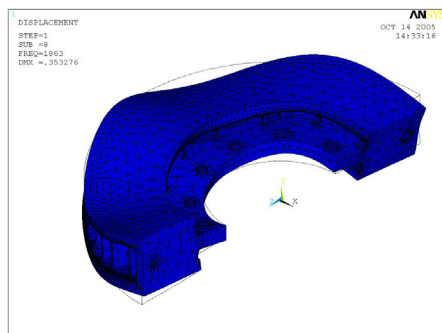


그림 4 디스크 반 모델의 5차 모드 형상

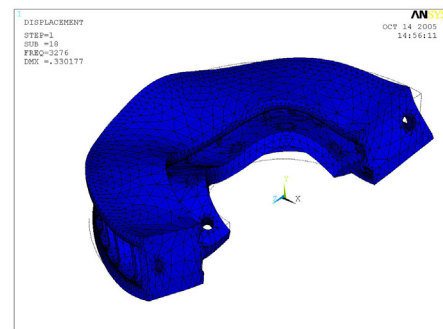


그림5 디스크 반 모델의 9차 모드

4. 진동 실험 해석

제륜자 및 제륜자 헤드 형상 차이에 따른 제동 스킵소음 발생 현상을 측정하기 위하여 다이나모미터, 제동단품, 디스크 조립체, VVVF 전동차에 제동력 체결에 의한 시험을 B&K사의 Pulse Tool과 NI사의 Labview Tool을 사용하여 시행하였다.



그림6 다이나모미터 시험장비



그림7 제륜자 진동시험



그림8 라이닝 블록 시험



그림9 디스크 조립체 시험

4.1 제동 단품별 진동실험

(1) 시험결과

제륜자를 오토 스펙트럼 함수와 주파수 응답 함수로 측정된 진동 실험 결과는 공진 주파수가 0.944khz 이하의 저주파수 대역에서 주도적으로 형성되고 있으며, 백플레이트(Back plate)는 1.248khz,에서 제륜자 헤드는 1.792khz에서 공진주파수가 형성되었다..

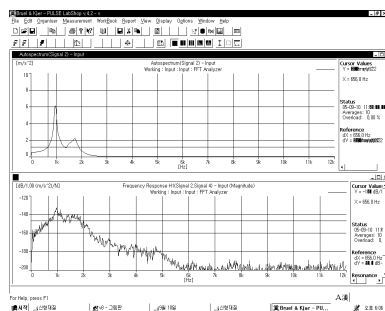


그림10 제륜자 진동 주파수
0.944khz, 1.744khz

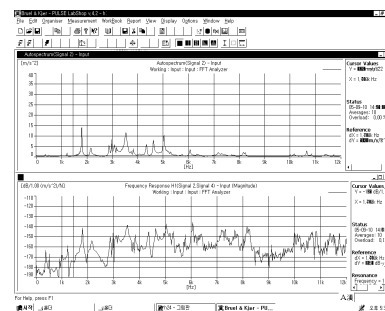


그림11 제륜자 헤드 진동 주파수
0.352khz, 1.792khz, 3.520khz, 5.024khz

4.2 다이나모미터에 의한 제륜자 진동실험

다이나모미터를 이용하여 스킵소음 발생 현상을 측정하기 위하여 시험을 실시하였다. 시험방법은 서울특별시지하철공사 제륜자 표준규격서의 시험기준에 의해 실시하였다.

(1) 시험조건

시험은 공사에서 사용중인 제륜자 2개종 및 제륜자 헤드 2개종 총 4개종으로 초기온도 100℃ 이하에서 제동력 4KN, 8KN, 12KN, 17KN(최대사용제동력의 100%), 제동 초기속도 20, 40, 60, 80, 100km/h를 조합하여 실시하였다. 제륜자는 디스크와의 균일한 접촉을 위하여 갈아 맞춤(Bedding)을 하여 90% 이상 접촉되도록 예비시험을 하였다, 그리고 가속도계(Accelerometer)는 제륜자 헤드 취부용 홀더(Holder) 외부에 밀랍(Beeswax)으로 고정시켜 측정하였다.

(2) 시험결과

신형 브라켓에 취부된 SBK14 재질은 대표 주파수가 0.428khz이고 구형 DH2004NA는 1.800khz이며, 신형 브라켓에 취부된 SBK14 재질에서는 스킵소음이 거의 발생 되지 않으며 그 강도도 SBK14는 1-2정도인 반면 DH2004NA는 4-9정도로 현저히 강한 편임. 또한 구형 브라켓에 취부된 SBK14에서도

신형 브라켓에 취부된 것과 유사하게 그 진동주파수 발생빈도나 강도에서는 약한 편임. 따라서 동일 브라켓 일지라도 재질 차이에 따라서 소음 발생빈도나 그 강도의 차이가 크다고 할 수 있다.

(3)신형 브라켓에 취부된 제륜자 재질별 진동 주파수

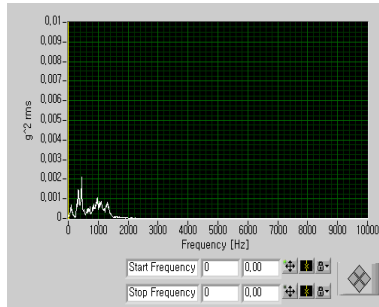


그림12 SBK14의 진동주파수
0.428, 0.805kHz

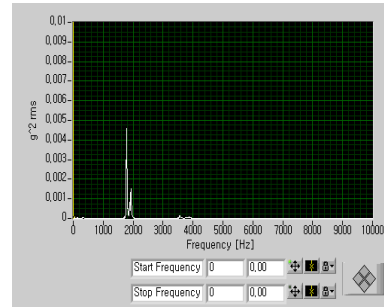


그림13 DH2004NA의 진동주파수
0.368, 1.216, 1.800kHz

(4)구형 브라켓에 취부된 제륜자 재질별 진동 주파수

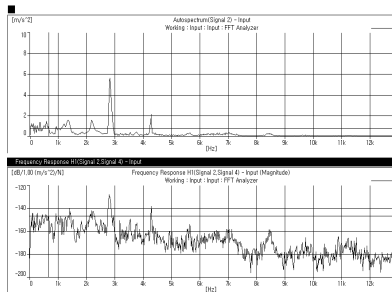


그림14 SBK14의 진동 주파수
0.240, 0.384 0.576, 1.568, 2.896kHz

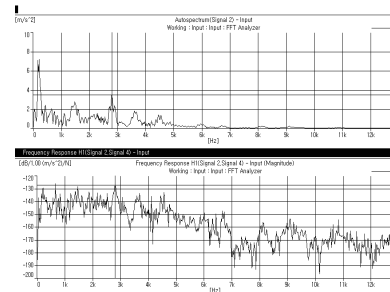


그림15 DH2004NA의 진동주파수
0.384, 0.688, 0.912, 1.296, 2.640 3.120kHz

4.3. 디스크 조립체와 라이닝 블록의 진동실험

(1) 시험조건

- 디스크 조립체 : VVVF 차량의 차축, 차륜 및 디스크 조립체를 크레인으로 자유단 구현후 디스크를 가진하고 디스크 후면에 가속도계를 부착하여 측정하였다.
- 라이닝 블록 : VVVF차량 대차 조립체에 신형제륜자와 신형 라이닝 블록이 조립된 상태에서 제륜자를 가진하여 홀더 후면에 가속도계를 부착하여 측정하였다.

(2) 시험결과

운행차량에서 실험한 값과는 유사하나 다이내모미터에 의한 실험값과는 상이한데, 이는 디스크 조립체와 라이닝 블록은 동일한 것이나 이를 부착한 조립체가 상이하기 때문인 것으로 판단된다.

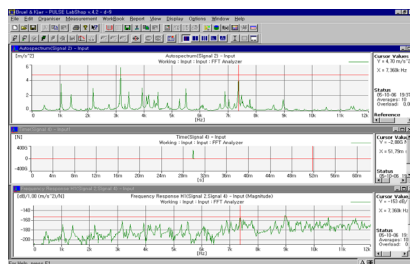


그림16 디스크 조립체 진동 주파수
1.040kHz, 2.176kHz, 3.152kHz,
3.920kHz, 5.488kHz, 7.360kHz

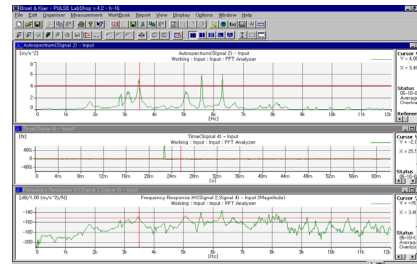


그림17 라이닝 블록 진동 주파수
1.792kHz, 3.472kHz, 5.056kHz,
5.584kHz, 6.304kHz

4.4 제동력 작용시 디스크 조립체와 라이닝 블록의 진동실험

(1) 시험조건 및 시험결과

1호선 VVVF 전동차 106편성에서 제동력이 작용할 때의 디스크 조립체와 라이닝 블록은 스켈소음이 주도적으로 발생할 때의 제동 3스텝과 제동 압력 1.5[kg/cm²]에서 측정된 진동 실험 결과는 1.8kHz, 3.0kHz, 3.6kHz, 4.0kHz, 5.0kHz, 5.8kHz 부근에서 공진 주파수가 분포되는 것을 알 수 있었다.

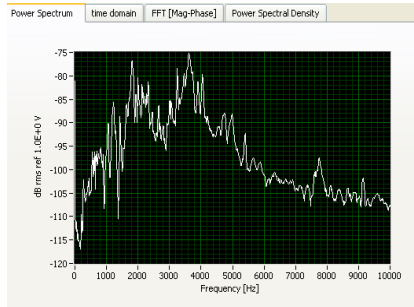


그림18 제동력 작용 시 진동주파수



그림19 제동력 작용 시 진동주파수 측정

5. 결 론

본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 스켈소음 측정 결과, 서울특별시지하철공사 1호선 VVVF 전동차의 스켈소음 주파수는 0.4kHz, 0.8kHz, 2.0kHz, 5.0kHz에서 발생됨을 알 수 있었으며, 신형 브라켓에 신형 재질 SBK14를 취부한 것, 구형 브라켓에 신형 재질 SBK14를 취부한 것, 구형 브라켓에 구형 재질 DH2004NA를 취부한 것의 순으로 스켈소음 발생 빈도나 그 강도가 적은 것으로 파악되었다.
- (2) 브레이크 디스크의 모달해석을 통해 실험 결과와 거의 일치함을 보여주었다.
- (3) VVVF 차량의 제동 스켈소음은 제륜자 재질 및 제륜자 헤드의 형상이 초과 차량과 상이하고, 전기 제동에 의한 회생제동을 최대한 활용하기 때문에 제동시 발생하는 스켈소음이 그 발생빈도나 강도가 초과 차량에 비해 훨씬 약한 것으로 파악되었다.
- (4) VVVF 차량에 대한 다이내모미터 시험에서 개선된 브라켓에 구형 슈 재질을 사용한 스켈소음 시험과 구형 브라켓에 신형 슈 재질을 사용한 스켈소음 시험 비교에서 재질의 변경 즉 신형 슈의 재질을 사용한 것이 스켈소음 향상에 더 큰 효과를 나타내었다.
- (5) 초과 차량의 스켈소음을 개선하기 위해 스켈소음이 거의 발생되지 않은 VVVF 차량의 슈 재질을 초과 차량에 맞게 제작하여 다이내모미터 시험을 수행한 결과 스켈소음이 현저히 감소되었다.

참 고 문 헌

1. 서울대학교 부설 정밀기계설계공동연구소(1995) "브레이크 스켈노이즈 개선에 관한 연구" pp1~139
2. 현대정공(1998) "서울특별시지하철공사 AD VVVF 전동차 정비지침서" V장 대차 및 VII장 공기제동장치
3. 서울지하철공사(1994) "디스크 라이닝슈 표준규격서" NO 2530-0003
4. 임경화(2005) "진동제어 및 실험" 한국기술교육대학교 제어시스템공학과
5. Masaaki Nishiwaki(1989) "Brake Squeal, 自動車技術" No.12, Vol.43, pp88~97
6. 양용준(2005) "전동차 브레이크 스켈소음 현상에 대한 연구"
7. 김재철, 문경호, 유원희, "지하철 스켈소음에 관한 연구, 한국철도학회 논문집" 제6권 제3호 2003, pp209~ 214