

# 철도차량의 운행 중 소음 저감을 위한 휠업소버의 해석 및 실험적 고찰

## The Analysis and Experimental Study on the Wheel Absorber for Reduction of Noise Emission during the Train Operation

손영진\*

Son, Young-Jin

정수영\*\*

Chung, Su-Young

장원락\*\*\*

Jang, Won-Rak

최상춘\*\*\*\*

Choi, Sang-Chun

---

### ABSTRACT

The noise to be considered as the most important in railway systems is the noise generated from the wheel/rail interaction. Such noise can be divided into three categories; that is, the rolling noise, the squeal noise and the wheel howling noise. Especially in metro systems, this type of noise has been considered seriously in recent years, and the diversified studies on the mechanism and solutions of such noise are in progress by many railways and researching bodies.

In this study, a specially designed wheel absorber is installed in the wheel, and FEM analysis and laboratory tests are executed for the two cases, i.e. with wheel absorber and without wheel absorber, to check the effect of the wheel absorber in noise reduction. For the FEM analysis, the frequency response functions for respective cases are compared. And, for the laboratory test, following four cases are tested and compared; that is, i) with wheel only, ii) installation of ring damper only, iii) installation of damping material and cover, iv) installation of complete absorber system.

---

### 1. 서 론

지하철 차량의 소음에 있어서 가장 중요한 소음은 차륜 및 레일 상호작용에 의해 발생하는 마찰소음과 추진장치에서 발생하는 공력소음이 있다. 이 소음들은 지하철 차량의 실내 음향환경에 영향을 주고 있다. 트레일러 차량의 경우에는 차륜 및 레일의 상호작용에 의한 마찰소음이 주된 원인이 되고 있으며, 모터 차량의 경우에는 추진장치에 의한 공력소음 또한 주된 소음원이 되고 있다. 추진모터와 같은 추진장치의 공력소음은 기기 자체에서 그 저감대책을 세우는 것이 바람직하고, 차륜 및 레일 상호작용에 의한 마찰소음의 경우는 매우 다양한 방법이 적용되고 있다.

차륜 및 레일 상호작용에 의한 소음은 크게 세 분야로 나눌 수 있다. 즉, 전동음(Rolling Noise), 곡선부에서의 스켈소음(Squeal Noise) 및 레일 답면의 주름에 의한 차륜 하울링소음(Wheel Howling Noise)이 그것이다. 도시의 지하철에는 많은 곡선부가 존재하고 있다. 그래서 스켈소음과 차륜 하울링소음이 상당히 많이 발생하고 있다. 따라서 차륜 및 레일의 상호작용에 의한 소음을 감소시키기 위해 휠업소버를 차륜에 설치하는 방법을 적용하여 진동저감효과에 대해 해석을 수행하였다. 해석은 유한요소법을 이용하여 휠업소버를 설치한 경우와 그렇지 않은 경우 두 가지 경우 주파수 응답함수를 비교하였다. 실내시험은 i) 차륜 단독인 상태, ii) 링댐퍼만 설치, iii) 댐핑재와 커버만 설치, iv) 전체 휠업소버 시스템을 설치하여 시험하고 그 결과를 비교하였다.

---

\* 서울메트로, 기술본부장, 정회원

E-mail : [ceoson@korea.com](mailto:ceoson@korea.com)

TEL : (02) 6110-5011 FAX : (02) 6110-5047

\*\* 서울메트로, 기술연구센터장, 정회원

\*\*\* 서울메트로, 토목팀, 비회원

\*\*\*\* 서울메트로, 기술연구센터, 비회원

## 2. 본 문

### 2.1 휠업소버의 구성

휠업소버의 진동 저감성능을 확인하기 위하여 그림 1의 일반 차륜과 그림 2의 휠업소버가 설치된 차륜에 대하여 각각 유한요소법을 이용하여 해석을 진행하였다.

휠업소버는 그림 3와 같이 링댐퍼, 댐핑재, 커버로 구성되어 있다. 링댐퍼는 차륜 내측 경사면과 마찰에 의하여 진동에너지를 감소시키는 기능을 하고, 댐핑재는 점탄성 재질로 감쇠계수가 0.1~1.0정도로 일반 강재의 0.01에 비하여 아주 큰 감쇠성능을 나타낸다. 또한 커버는 댐핑재를 보호하고 차륜과 상대변위를 발생시켜 댐핑 효과를 증가시키는 기능을 한다. 여기에서 해석에 적용된 차륜 및 댐핑재의 물리적 성질 및 사양은 표 1과 같다.



그림 1. 일반 차륜

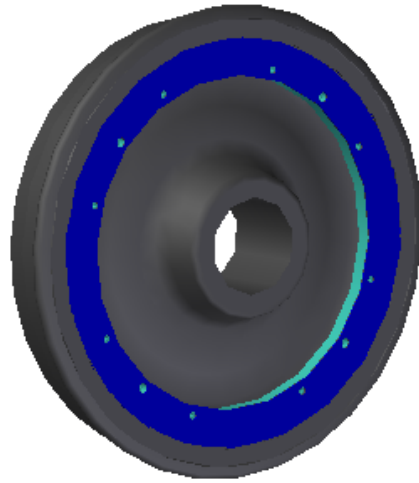


그림 2. 휠업소버를 장착한 차륜

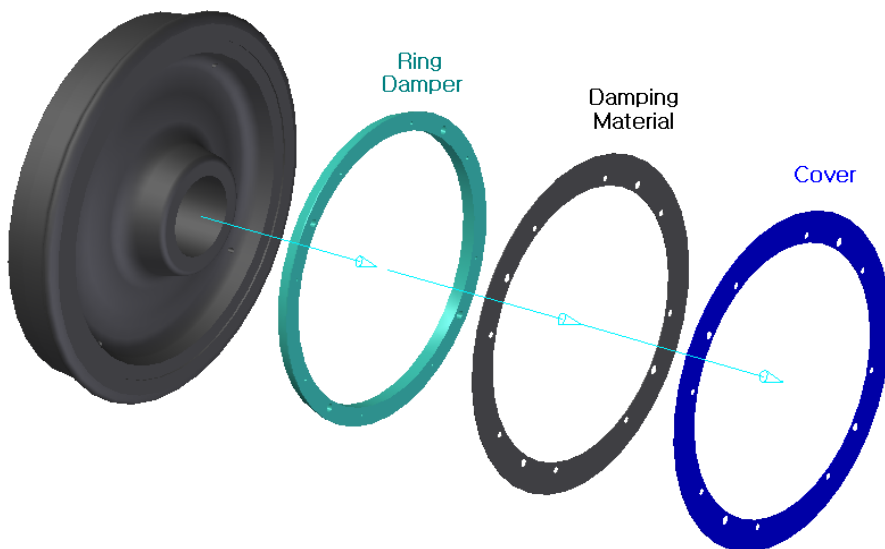


그림 3. 휠업소버의 구성

표 1. 물리적 성질

일 반 차 른		휠업소버	
차륜	SSW1	링댐퍼	SS400(STS304)
		댐핑재	Butylene Rubber
축	SSW1	커버	SS400

## 2.2 유한요소해석을 위한 휠업소버의 모델

유한요소법을 이용하여 휠업소버에 의한 차륜의 진동저감 효과를 해석하였다. 그림 4와 그림 5는 유한요소해석을 위한 모델이다.



그림 4. 일반 차륜 해석 모델

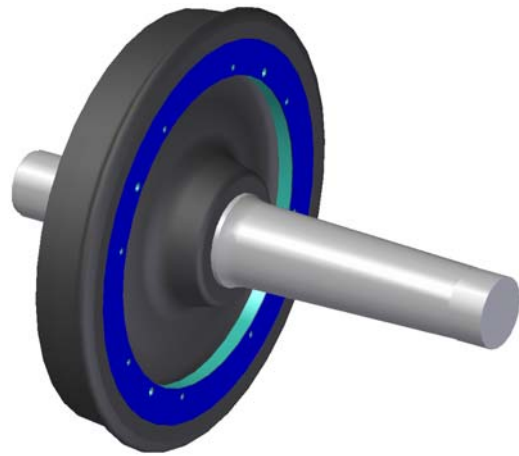


그림 5. 휠업소버 차륜의 해석모델

위의 모델을 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 그림 6과 그림 7은 유한요소해석을 수행하기 위한 모델을 보여주고 있다.

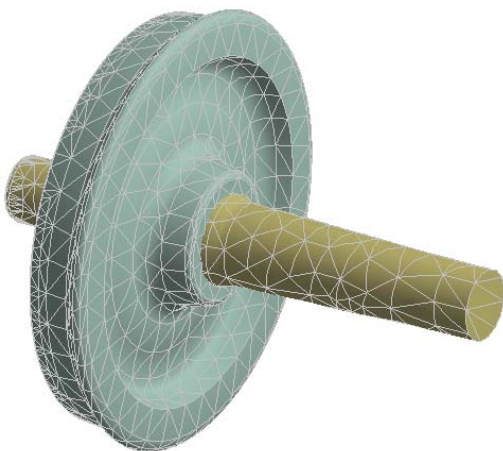


그림 6. 일반 차륜의 유한요소해석 모델

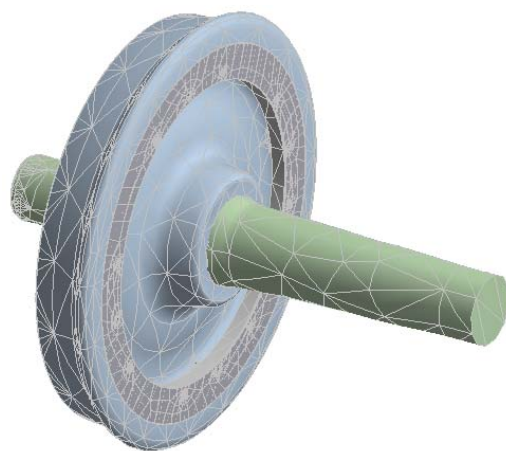


그림 7. 휠업소버 차륜의 유한요소 해석 모델

해석의 경계조건은 그림 8 및 그림 9와 같이 윤축의 단면을 고정하고 차륜과 레일의 접촉면을 정현

과 가진(1000N)하여 수행하였다.

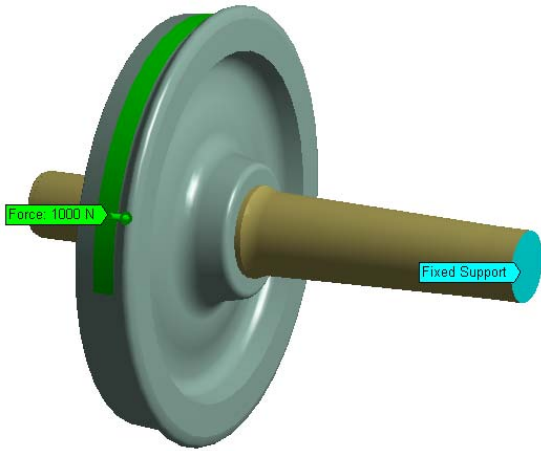


그림 8. 일반 차륜의 해석 경계조건

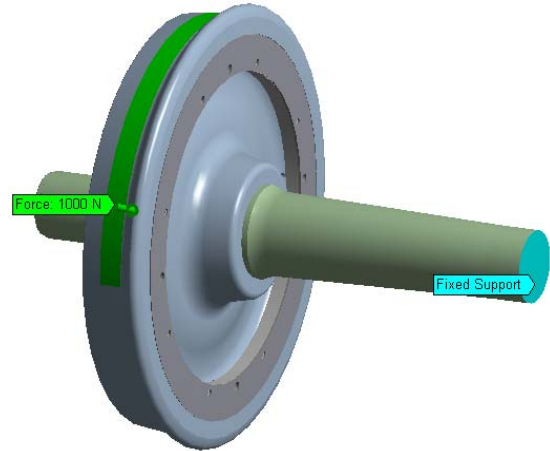


그림 9. 휠업소버 차륜의 해석 경계조건

### 2.3 해석 결과 및 분석

해석결과는 그림 10 및 그림 11과 같이 차륜의 옆면의 가속도 레벨을 추출하였다. 또한 이 두 경우의 고유진동수를 비교하였다. 표 2는 각각의 경우 고유진동수를 정리하였다. 휠업소버를 설치하지 않은 경우와 그렇지 않은 경우 고유진동수의 차이가 약간 나타났다. 이것은 휠업소버의 질량이 추가되어 고유진동수가 약간씩 커진 것으로 보인다. 그림 12와 같이 휠업소버를 설치한 경우와 그렇지 않은 경우 주파수에 따른 가속도를 비교하였다. 50Hz 부근에서는 주파수응답 레벨이 25%정도의 감쇠를 보이거나 215Hz대역에서는 76.6%의 감쇠를 보인다. 이처럼 휠업소버는 고주파수 대역에서 탁월한 성능을 나타낼 수 있다.



그림 10. 일반 차륜의 해석 결과 예측 지점

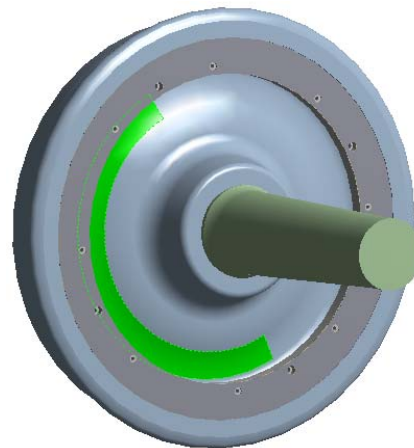


그림 11. 휠업소버 차륜 해석 결과 예측 지점

표 2. 일반 차륜과 휠업소버 차륜의 고유진동수 비교

	휠업소버를 설치하지 않은 경우	휠업소버를 설치한 경우
	주파수 (Hz)	주파수 (Hz)
1	43.7	47.3
2	43.8	47.4
3	68.3	71.8
4	204.7	213.4
5	205.3	214.6
6	324.9	326.4
7	461.7	496.0
8	461.9	498.4
9	666.8	684.9
10	668.3	687.2

표 3. 일반 차륜과 휠업소버의 피크레벨 비교

피크에서의 레벨		
주파수 (Hz)	일반 차륜	휠업소버 차륜
	dB(ref 10 <sup>-6</sup> )	dB(ref 10 <sup>-6</sup> )
47.3	107.9	105.4
214.6	116.9	104.3
326.4	98.1	83.4
684.9	105.2	91.5

여기서 보면 알 수 있듯이 저주파수 구간에서의 감쇠는 떨어지나 고주파수 구간에서의 감쇠는 탁월함을 알 수 있다. 표 3은 그림 12와 그림 13의 각 피크에서의 레벨이다. 그림 13과 표 3에서 알 수 있듯이 휠업소버는 저주파수 보다는 고주파수 영역에서 큰 효과를 기대할 수 있다. 그림 13은 그림 12의 결과를 dB(ref 10<sup>-6</sup>)로 나타낸 결과이다.

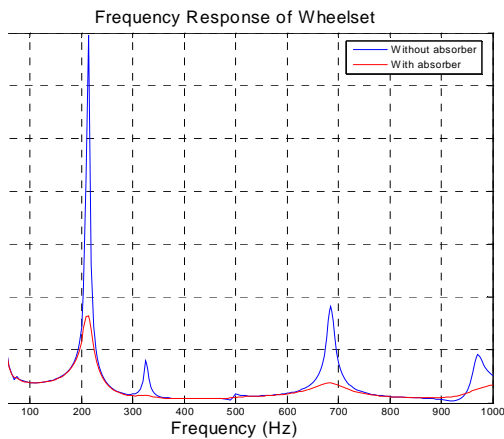


그림 12. 일반 차륜과 휠업소버 차륜의 주파수응답함수 비교

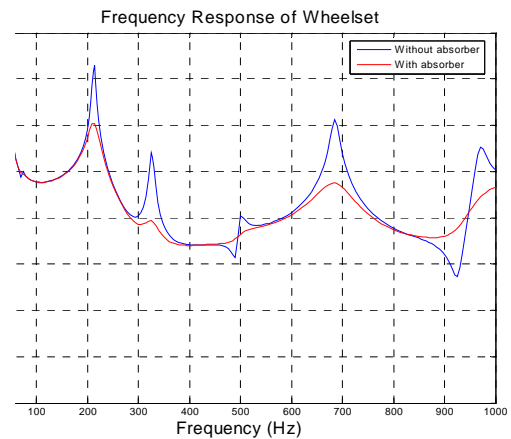


그림 13. 일반 차륜과 휠업소버 차륜의 주파수응답함수 비교

## 2.4 휠업소버의 실내 시험

실제 차륜 및 휠업소버를 가공하여 아래 그림 14 및 그림 15와 같이 i) 차륜 단독인 상태, ii) 링댐퍼만 설치, iii) 댐핑재와 커버만 설치, iv) 전체 휠업소버 시스템에 대한 충격시험 및 음압시험을 수행하여 주파수별 감쇠효과를 확인하고 분석하였다.



그림 14. 휠업소버 충격시험



그림 15. 휠업소버 음압시험

그림 14와 같이 센서를 측면에 부착하고 일정한 속도로 상부에 충격을 주어 진동가속도를 측정하고 그 데이터를 추출하여 정리하였으며 그림 15와 같이 음압레벨도 같은 충격시험과 같은 방식으로 시험을 수행하여 데이터를 추출하여 정리하였다.

그림 16 및 표 4는 설치 방법에 따른 진동가속도 측정 데이터를 정리한 것으로 전체 휠업소버 시스템을 설치할 경우 차륜 단독 일 때 보다 97.1%의 감소율을 보이고 있다.

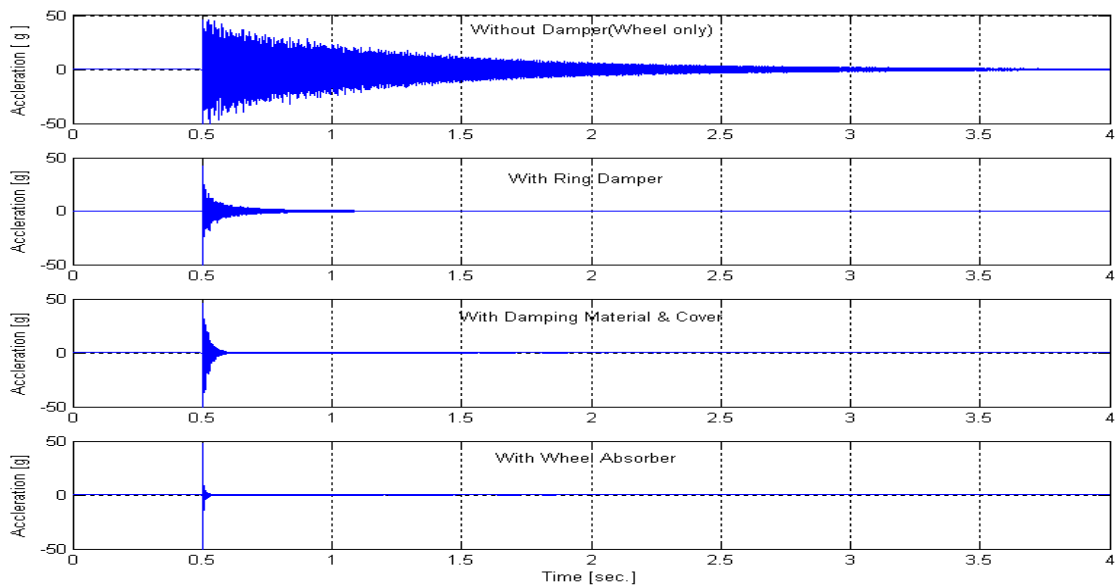


그림 16. 설치방법에 따른 충격시험 진동가속도 데이터 비교

표 4. 차륜 단독 대비 진동 감소시간 비교표(95% 감소 소요시간)

시험방법	소요시간	감소율	비고
차륜 단독	3.5 sec.	-	
링댐퍼 설치	0.8 sec.	77.0%	
댐핑재 & 커버 설치	0.2 sec.	94.2%	
휠업소버 설치	0.1 sec.	97.1%	

그림 17은 설치방법에 따른 차륜 단독과의 비교 선도로 전체 휠업소버 시스템은 고주파에서 탁월한 저감효과를 보여주고 있다.

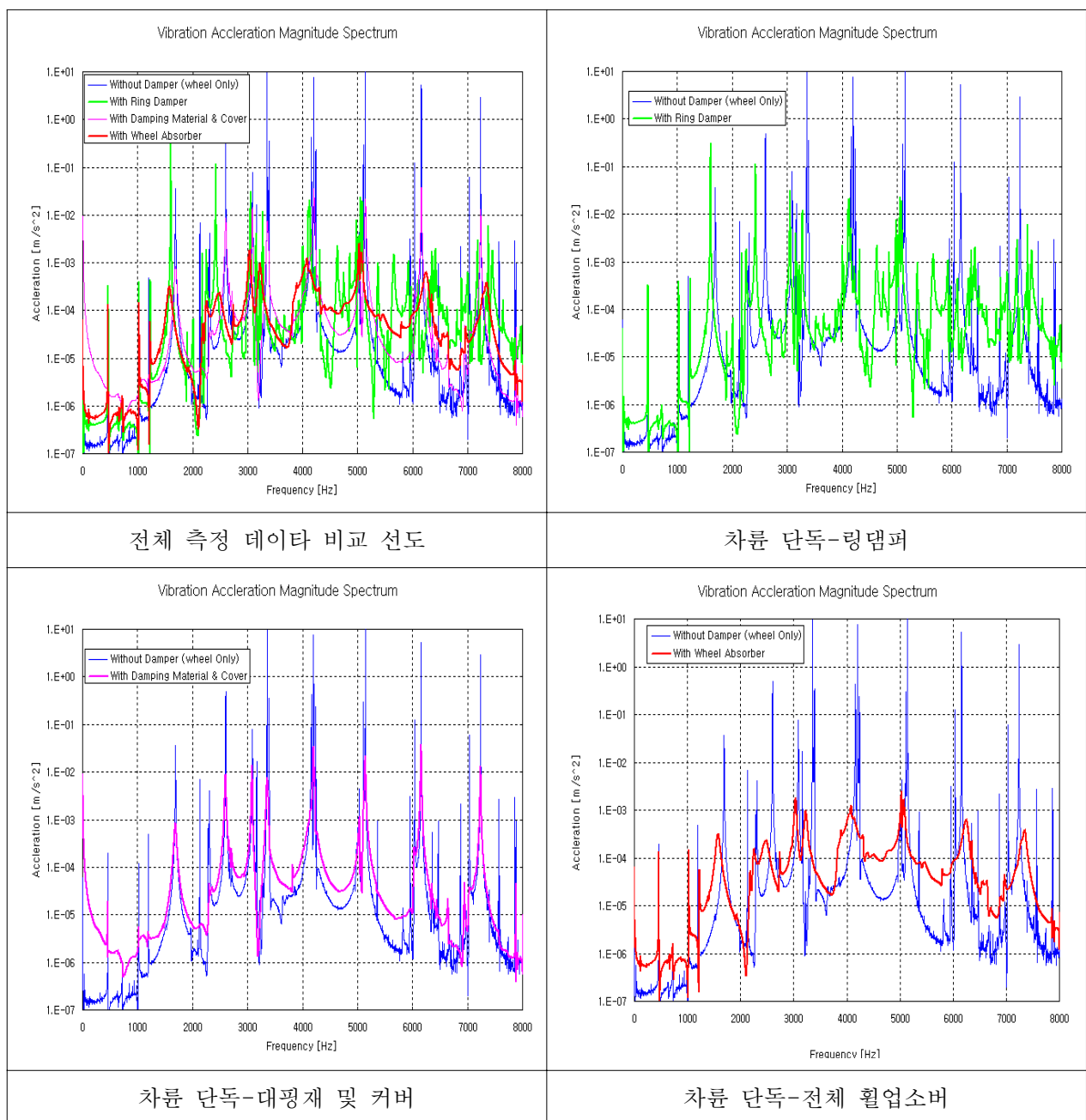


그림 17. 차륜 단독 대비 주파수별 진동가속도 그래프 선도

그림 19은 설치방법에 따른 음압시험을 옥타브밴드로 정리한 것으로 표 5에서 보는 바와 같이 전체 휠업소버 시스템이 차륜 단독일 때 보다 10.2dB(A) 감소되는 것으로 나타난다.

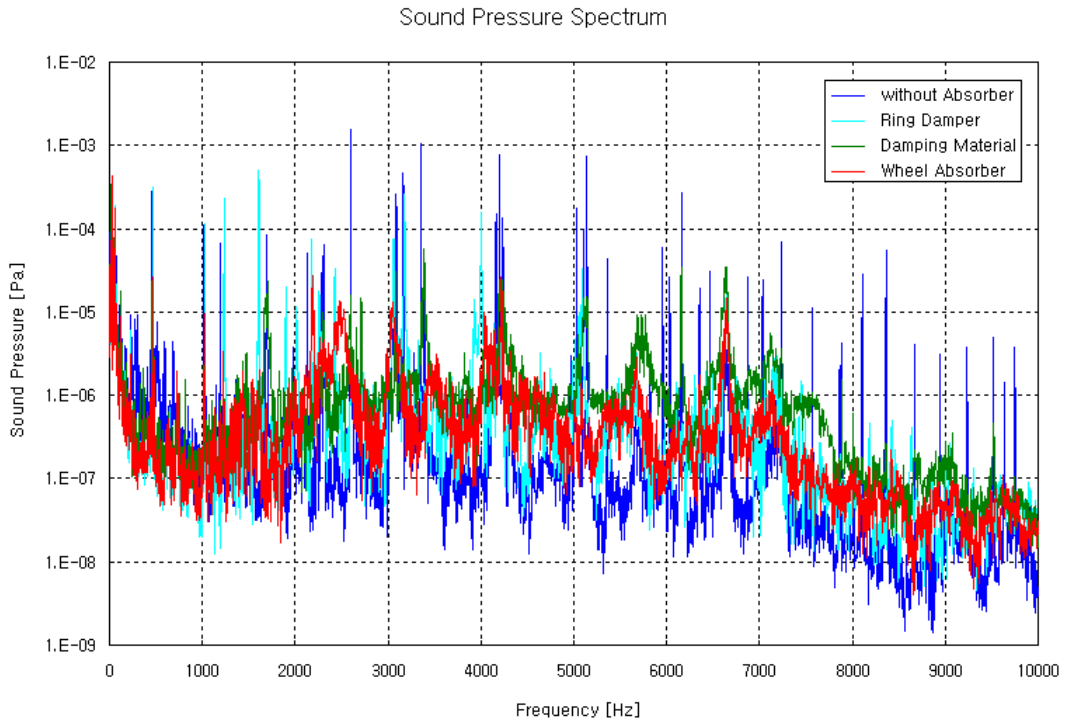


그림 18. 음압시험에 의한 전체측정 데이터 비교 선도

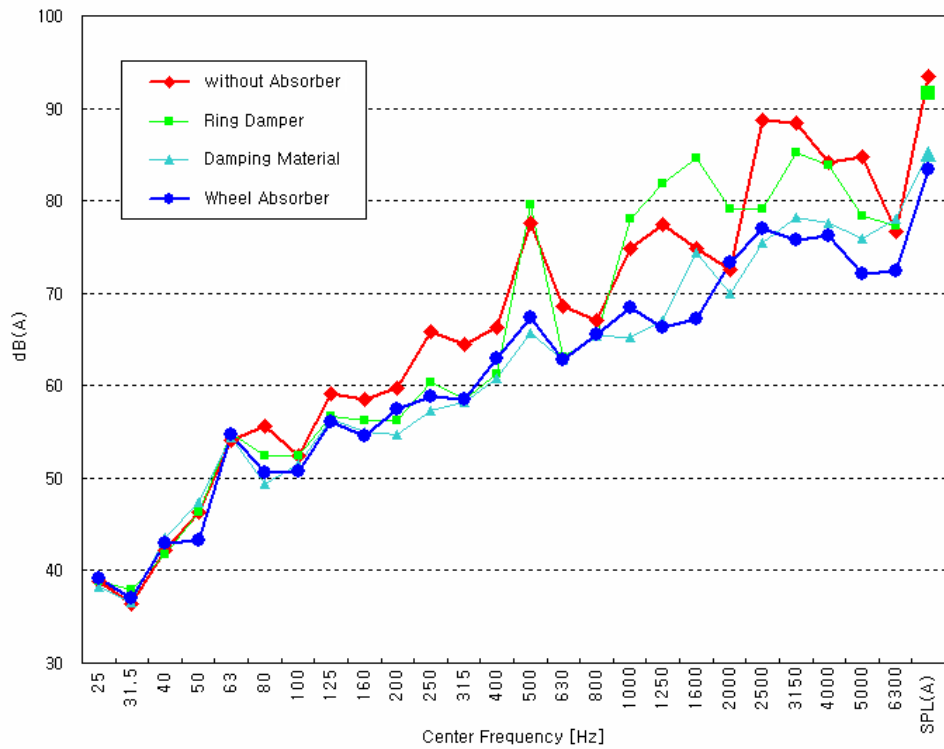


그림 19. 설치방법에 따른 1/3 옥타브밴드 비교 그래프



표 5. 설치방법에 따른 주파수별 음압 비교표

주파수 [Hz]	차륜 단독 [dB]	링댐퍼 [dB]	댐핑재 + 커버 [dB]	전체 휠업소버 [dB]
32	44.6	44.6	45.3	45.2
63	58.3	57.2	56.2	56.3
125	62.3	60.2	59.4	59.1
250	68.8	63.5	61.8	63.1
500	78.3	79.7	68.3	69.7
1,000	79.6	83.5	70.8	71.7
2,000	88.9	86.6	78.6	78.8
4,000	91.0	88.0	82.1	79.8
6,300	76.7	77.3	78.0	72.3
SPL(A)	93.5	91.6	85.1	83.3
저감 효과	0	-1.9	-8.4	-10.2

그림 20은 설치방법에 따른 음압레벨을 그래프로 비교한 것이다.

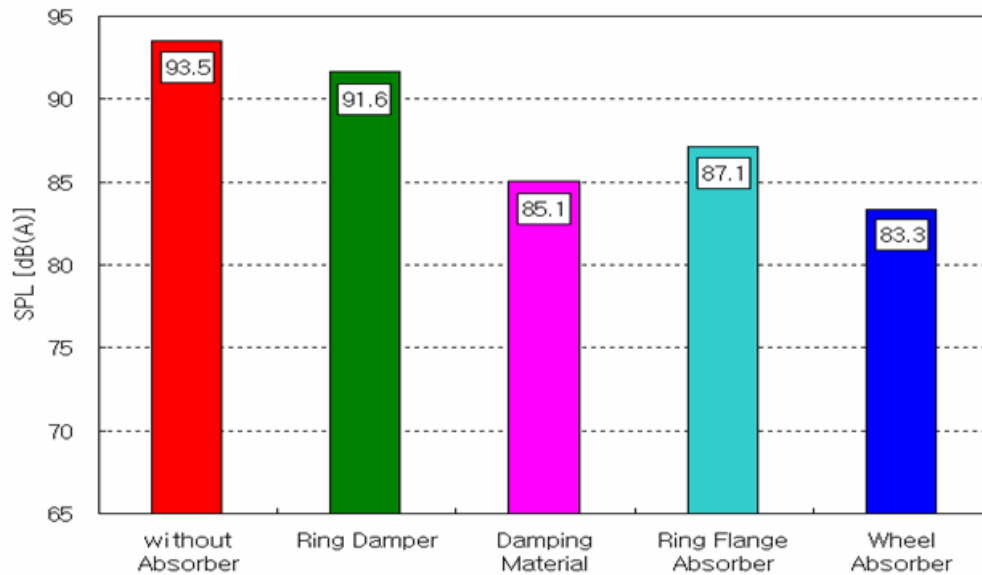


그림 20. 설치 방법에 따른 음압 레벨 [dB(A)]

### 3. 결 언

휠업소버를 설치한 차륜과 설치하지 않은 차륜에 대한 유한요소법 해석에 의한 모델 결과를 토대로 시험용 제품을 제작하여 실내시험을 수행하였으며 그 결과 진동가속도는 97% 감소되는 것으로 나타났으며 소음은 10dB(A) 저감되는 것으로 나타났다. 또한 유한요소법 해석에 의한 모델 결과와 같이 휠업소버는 저주파보다는 고주파에서 탁월한 저감효과가 있는 것으로 나타났다.

휠업소버는 열차 운행중에 발생하는 스퀸노이즈(Squeal Noise,) 차륜 하울링노이즈(Howling Noise)를 저감할 수 있는 혁신적인 제품으로 차륜 에서 발생하는 진동을 빠른 시간 내에 감소시키고, 진동

소산능력(Damping 계수)을 증가시키며, 소음을 효과적으로 감소시킬 수 있다.

또한 민원적인 측면을 고려할 경우 열차의 주행 소음을 감소시켜 승객에게 편안함을 주고, 선로 주변에서 발생하는 민원을 해결하며 설치 및 유지보수가 용이한 장점이 있다.

#### 참고문헌

1. James T. Nelson(2001), "Wheel Squeal Noise Control with Wheel and Rail Vibration Absorbers", Inter noise 2001
2. James T . Nelson(1997), "Wheel/Rail Noise Control Manual", National Academy Press