

# 전달경로분석법을 이용한 상용 전기 차량의 크립 그론 소음 저감 연구

## A Study on the Reduction of Creep Groan Noise in Electric Commercial Vehicle using Transfer Path Analysis

박우엽\* · 전주현\* · 유성호\*\* · 강연준†  
Uyeup Park\*, Ju Hyun Jeon\*, Sung Ho You\*\* and Yeon June Kang†

(Received February 28, 2022 ; Revised June 9, 2022 ; Accepted June 9, 2022)

**Key Words :** Creep Groan Noise(크립 그론 소음), Structural-borne Noise(구조 기인 소음), Stick-slip(스틱-슬립), Transfer Path Analysis(전달경로분석), Dynamic Vibration Absorber(동흡진기)

### ABSTRACT

Creep groan noise is a low-frequency, structure-borne noise that generally occurs when a vehicle starts moving from a standstill or comes to a gradual stop with minimal brake operation. It is generated by friction-induced vibrations from the stick-slip cycle of the brakes and are typically transmitted through the suspension. The investigations in this paper aim to reduce the creep groan noise by considering the frequency characteristics of the suspension. Transfer path analysis (TPA) is performed to identify the noise contribution of each suspension component. Thereafter, the cause of acoustic amplification and stick-slip cycle of creep groan are investigated through modal testing on the primary transfer path components. The noise level and trigger rate of creep groan noise are reduced by suppressing the behavior of the components using a dynamic vibration absorber (DVA). This shows the possibility of creep groan noise reduction from the perspective of the vehicle's transfer system.

### 1. 서 론

최근 자동차 산업 동향은 내연기관을 사용하는 방식에서 전기 동력을 이용하는 친환경 차량으로 급변하고 있다. 전기 차량은 엔진이 장착되지 않기 때문에, 주행 중의 파워트레인 소음이 큰 폭으로 감소했

지만, 이에 따라 타 소음들의 문제가 대두되고 있다. 특히, 제동 초기나 말기에 발생하는 크립 그론 소음은 저주파, 구조 기인 소음으로 전기 차량의 실내 소음 기여도에 많은 비중을 차지한다.

크립 그론 소음 원인을 규명하기 위한 이론 및 실험적 접근을 통한 많은 연구가 진행되고 있다. Wei 등<sup>(1)</sup>은 디스크와 패드의 법선 방향 모션 및 마찰이 고려

† Corresponding Author; Member, School of Mechanical Engineering /Institute of Advanced Machines and Design, Seoul National University, Professor  
E-mail : yeonjune@snu.ac.kr

\* Member, School of Mechanical Engineering/Institute of Advanced Machines and Design, Seoul National University, Student

\*\* Hyundai Motor Group, Commercial Vehicle Brake Engineering Design Team, Research Engineer

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2021 Annual Spring Conference

‡ Recommended by Editor Won Seok Yang

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

된 수학적 모델을 통해, 크립 그론 소음의 원인인 스틱-슬립 현상을 연구하였다. Zhao 등<sup>(2)</sup>은 bristle friction law를 이용하여, 스틱-슬립 발생 및 불안정성은 디스크와 패드의 상대 속도와 압력에 의해 결정되는 것을 확인하였고, Meng 등<sup>(3)</sup>은 vibro-impact effect를 고려한 이론 모델을 통해, 크립 그론 가진 특성은 multiple, half-order harmonics 주파수로 구성되며, 주파수 진이 현상에 대해 규명하였다.

한편, 크립 그론 소음 저감을 위한 연구는 크게 2가지로 나뉘게 되며, 첫 번째는 가진계 관점에서의 브레이크 시스템 변경이다. Fuadi 등<sup>(4)</sup>은 간이 모델을 대상으로 실험 계획법을 통해 여러 파라미터에 따른 크립 그론 발생 여부를 조사하였고, 소음 발생 빈도를 줄이기 위해 패드와 디스크 사이의 접촉 강성과 시스템 강성의 비율을 조정하였다. 스틱-슬립 사이클을 억제하기 위해 Zhao 등<sup>(5)</sup>은 in-plane 및 out-of-plane으로의 진동을 발생시키는 piezo actuator를 패드와 백플레이트 사이에 삽입하여 능동형 패드를 구성하였고, Jang 등<sup>(6)</sup>은 패드와 디스크의 상대 속도에 따른 마찰 계수가 작게 나타도록 마찰재의 원료 함유량을 변경하였다. 하지만, 크립 그론 소음은 브레이크 시스템에 국한되는 문제가 아닌, 샤시의 진동 특성에 의해 영향을 받기 때문에<sup>(7,8)</sup>, 최근에는 차량 시스템의 전달계 관점에서의 소음 저감 방안이 연구되고 있다. Jung and Chung<sup>(9)</sup>은 마찰재, 서브프레임 구조 및 결합부 변경 전/후에 따른 크립 그론 소음 측정을 통해, 전달계인 결합부 감쇠비를 변경했을 때 효과적으로 소음이 감소되는 것을 확인하였다. Woo 등<sup>(10,11)</sup>은 전달경로분석법을 이용하여, peak 주파수에서의 크립 그론 주 전달경로 부품을 선정하였고, 해당 부품의 질량 증대를 통해 진동 특성을 변경시킴으로써, 소음 저감을 실현하였다.

이 연구에서는 크립 그론의 peak 주파수뿐만 아니라 base 주파수를 고려하여 음향 증폭 원인 및 소음 발생 메커니즘을 규명하였고, 차량 현가계의 전달 특성 변경을 통한 소음 저감 방안을 제시하였다. 먼저, 전달경로분석을 통해, 타겟 주파수에서 각 경로별 소음 기여도를 확인하였다. 다음으로, 주 전달경로 부품과 제동계 부품을 대상으로 in-situ 모달 테스트를 진행하여, peak 주파수에서 구조 공진을 유발하는 주요 모드를 파악하였고, 크립 그론 스틱-슬립 사이클을 형성하는 현가계의 거동을 확인하였다. 마지막으로, 튜닝된 동흡진기를 부착하여 소음 레벨을 측정함으로써,

상용 전기 차량의 크립 그론 소음 개선 효과를 확인하였다.

## 2. 크립 그론 소음의 전달경로분석

### 2.1 전달경로분석법

전달경로분석(transfer path analysis, TPA)은 가진원으로부터 발생한 소음 및 진동의 경로를 측정하여, 각 부품의 소음 기여도를 파악하는 기법이다<sup>(12,13)</sup>. TPA는 classical TPA, component-based TPA, transmissibility-based TPA 등으로 분류할 수 있으며, 이 연구에서는 classical TPA의 full matrix inversion method를 이용하였다. 구조 기인 소음의 classical TPA는 가진원(source), 진동 및 소음이 전달되는 경로(path), 응답신호인 가속도, 변위 등의 반응점(indicator), 예측하고자 하는 수음점에서의 소음(target)으로 구분된다.

실험은 2단계로 구성되며, 첫 번째는 경로(path) 측정으로, 임팩트 해머, 가진기 등을 이용하여 식 (1), 식 (2)와 같이 이너턴스(inertia) 행렬 [H] 및 음향 전달 함수(noise transfer function) 벡터 {NTF}를 구할 수 있다.

$$H_{ij} = \ddot{x}_i^{impact} / F_j^{impact} \tag{1}$$

$$NTF_j = P_j^{impact} / F_j^{impact} \tag{2}$$

두 번째는 크립 그론 발생시의 반응점에서의 가속도 데이터 측정이다. 식 (3)과 같이 앞서 측정한 이너턴스의 역행렬 [H]<sup>-1</sup>과 가속도 데이터 {x<sup>oper</sup>}를 이용하여 각 결합 지점에서의 전달력 {F<sup>oper</sup>}을 계산할 수 있으며, 음향 전달 함수 벡터 {NTF}를 통해 각 지점에서 수음점에서의 경로별 음압을 각각 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} P_1^{oper} \\ \vdots \\ P_n^{oper} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} NTF_1 \\ \vdots \\ NTF_n \end{Bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} F_1^{oper} \\ \vdots \\ F_n^{oper} \end{Bmatrix} \\ &= \begin{Bmatrix} NTF_1 \\ \vdots \\ NTF_n \end{Bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_{11} & \dots & H_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & \dots & H_{nn} \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} x_1^{oper} \\ \vdots \\ x_n^{oper} \end{Bmatrix} \end{aligned} \tag{3}$$

### 2.2 TPA 실험 세팅

실험 대상인 상용 전기 차량에는 고중량의 무게를 견디기 위해, 판 스프링 서스펜션 시스템이 적용되어

있다. 판 스프링 서스펜션은 스테빌라이저(stabilizer), 댐퍼(damper), 판 스프링(leaf spring) 등으로 구성되어 있고, 브레이크 시스템의 스틱-슬립 현상으로 인해 발생한 가진력은 현가계 부품을 통해 승객에게 전달된다. 따라서, 반응점인 기속도계는 Fig. 1, Table 1과 같이 9개 결합부의 passive side 위치에 부착하였고, 마이크로폰은 운전자석 및 조수석 키 위치에 부착하였다.

크립 그론 소음은 온도, 습도, 경사로 등의 외부 조건에 많은 영향을 받기 때문에<sup>(14)</sup>, 이 연구에서는 측정 결과의 재현성 확보를 위해, 반 무향실 내 평지, 향운, 향습 환경 조건을 유지하였고, 마찰로 인한 패드의 열팽창 현상을 배제하기 위해 측정 시 충분한 시간 간격을 두며 실험을 진행하였다.

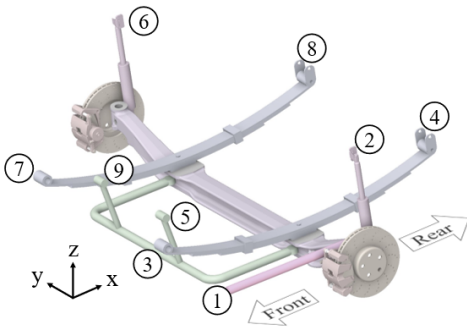
**2.3 TPA 결과**

크립 그론 발생 시, 운전석 위치에서의 소음 측정 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 크립 그론 소음은 패드와 디스크 사이의 가진 특성에 의해 기저 주파수와 고조파 성분으로 구성되고<sup>(3)</sup>, 2차 고조파에서 가장 소음 레벨이 나타났다. 따라서 이 연구에서는 크립 그론의 기저 주파수(base frequency)와 소음 레벨이 가장 높게 나타나는 피크 주파수(peak frequency)를 타

겟 주파수로 선정하였다.

TPA 결과의 적합성을 확인하기 위해, 크립 그론 발생 시 직접 측정된 음압  $P^{Measured}$ 와 식 (3)을 통해 구한 각 경로별 음압  $P_j^{Estimated}$ 을 합한 결과를 비교하였다. Fig. 3은 운전석 위치에서의 실측값과 추정값을 비교한 그래프로, peak 주파수뿐만 아니라, 대부분의 주파수 영역에서 정확히 예측됨을 확인할 수 있었고, 각 마이크로폰에서 추정 오차는 overall SPL 기준 1.13 %, 2.21 %로 나타났다.

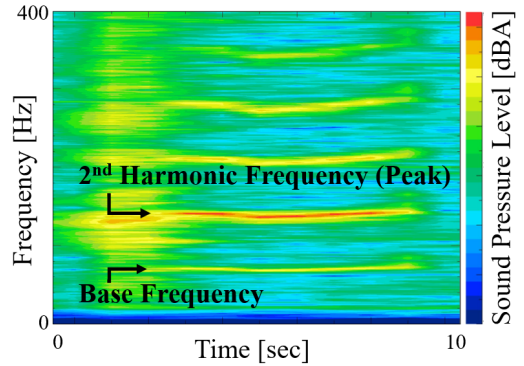
타겟 주파수에서 각 전달계 부품의 소음 기여도를 확인하기 위해, Fig. 4와 같이 운전석 및 조수석 위치에서의 각 경로별 음압  $P_j^{Estimated}$ 을 확인하였다. Base 및 peak 주파수에서 주 전달경로 부품을 Table 2에 정리하였고, 상용 전기 차량의 크립 그론 소음 대부분이 판 스프링을 통해 차량 내부로 전달되는 것을 확인하였다.



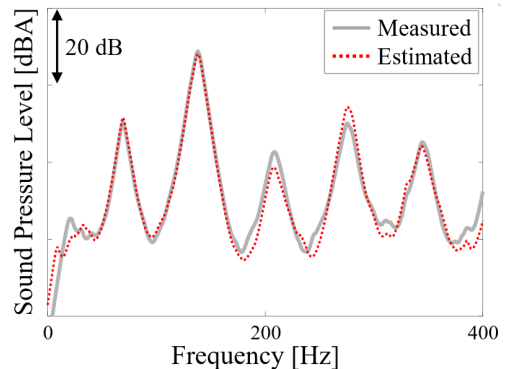
**Fig. 1** Position of accelerometer to estimate noise

**Table 1** Measurement point in the suspension system

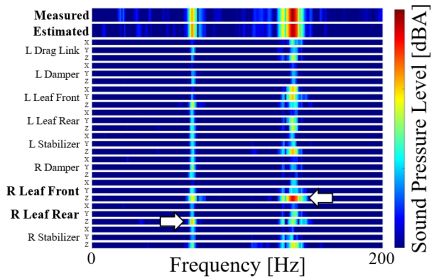
Components	Left side	Right side
Drag link	1	-
Damper	2	6
Leaf spring front	3	7
Leaf spring rear	4	8
Stabilizer	5	9



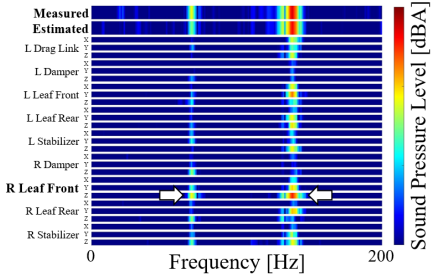
**Fig. 2** Spectrogram of creep groan noise



**Fig. 3** Comparison of the measured pressure with estimated pressure using TPA



(a) Result at driver



(b) Result at passenger

Fig. 4 Noise contribution results of creep groan

Table 2 Main transfer path of creep groan noise

Frequency	Mic 1 (driver)	Mic 2 (passenger)
Base	R leaf spring rear: Z axis	R leaf spring front: Z axis
Peak (2 <sup>nd</sup> harmonic)	R leaf spring front: Z axis	R leaf spring front: Z axis

### 3. 주요 부품의 모달 테스트

TPA 기여도 분석을 통해, 주 전달경로 부품이 판 스프링임을 확인했지만, 부품의 형상 변경, 동흡진기 부착 등을 통해 크립 그론 소음을 저감하기 위해 모드 형상 등의 정보가 필요하다. 따라서, 제동계에서 발생한 가진력이 판 스프링으로 전달되는 경로에 해당하는 부품(캘리퍼-액슬-판 스프링)에 대하여 in-situ 모달 테스트를 진행하였다. Fig. 5는 가속도계 및 가진 위치를 나타낸 것으로, 차량 현가 시스템을 가진하기 위해, B&K 4824 가진기를 이용하였고, 초록색 선으로 표시한 액슬은 비틀림 형상을 확인하기 위해, xz 단면에서 좌측 위, 우측 아래 부분에 각각 5 개의 가속도계를 부착하였다.

Base 주파수에서의 모드 형상은 Fig. 6과 같고, 액

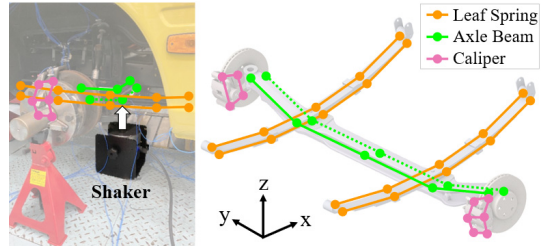
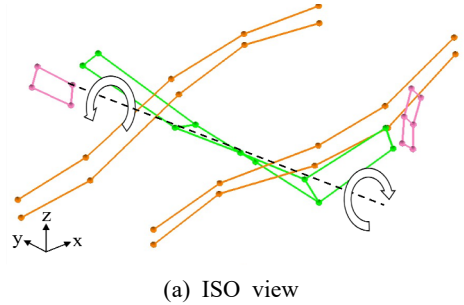
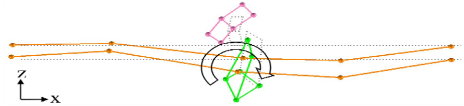


Fig. 5 Points of accelerometer for modal test



(a) ISO view



(b) Side view

Fig. 6 Mode shape of components at base frequency

슬을 중심으로 현가 시스템의 좌/우 위상이 반대인 비틀림 방향 모드가 나타났다. 또한, 액슬의 양 끝단에 결합된 제동계 부품인 캘리퍼는 현가계의 비틀림 모드로 인해, y축 회전 방향으로 거동하게 된다. 이 거동은 패드와 디스크의 접선 방향의 상대 운동을 유발하여, 제동 초기에 발생한 스틱-슬립 현상이 지속되도록 만든다. Fig. 7은 peak 주파수에서의 모드 형상으로, 회색으로 표시한 변형 전 형상과 비교했을 때, 타 부품에서는 모드가 나타나지 않고, 좌/우의 판 스프링에서 굽힘 모드를 확인하였다. 이를 통해, 스틱-슬립 현상으로 인한 2<sup>nd</sup> harmonic 주파수에서의 가진과 판 스프링 굽힘 모드의 공진 현상으로 인해, 크립 그론 소음이 증폭됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 8은 상용 전기 차량의 크립 그론 발생 메커니즘을 나타낸 것으로, 1) 페달 답력이 가해지면, 2) 패드의 수직 방향 압력과 디스크와 패드 사이의 접선 방향의 상대 운동 등으로 인해 스틱-슬립 현상이 발

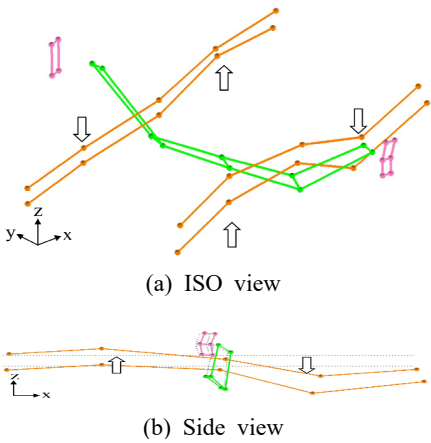


Fig. 7 Mode shape of components at peak frequency

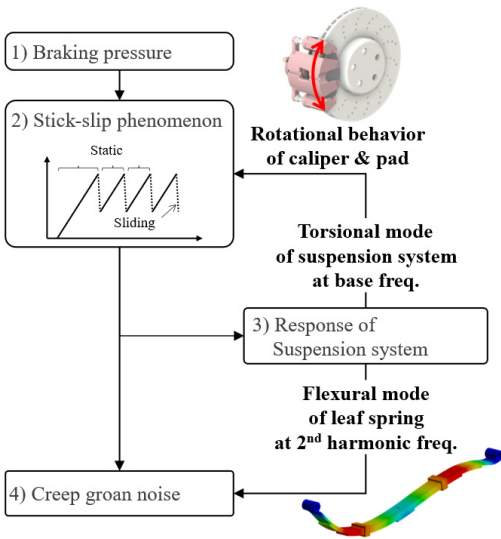


Fig. 8 Mechanism of creep groan in commercial electric vehicle

생하게 된다. 3) 이 현상에 의해 발생된 힘은 차량 샤시를 가진하며, base 주파수에서 액슬을 포함한 현가 시스템은 비틀림 방향으로 거동하게 된다. 또한, 액슬의 양 끝단에 결합된 캘리퍼는 y축 회전 방향으로 거동함으로써, 디스크와 패드의 상대 운동을 유발하며, 결국 스틱-슬립 현상이 지속되는 사이클이 형성된다. 4) 스틱-슬립의 2<sup>nd</sup> harmonic 주파수 가진과 판 스프링의 굽힘 모드의 공진에 의해, 크립 그론 소음이 증폭되어 최종적으로 실내 승객에게 전달된다.

#### 4. 동흡진기를 통한 크립 그론 소음 저감

##### 4.1 동흡진기 설계

동흡진기는 원래의 시스템을 변경하지 않고 별도의 질량을 부착하여 특정 주파수 대역의 진동을 효과적으로 감소시키는 장치로, 구조가 간단하고 비용이 작게 드는 장점을 가진다. 따라서, 설계 변경의 선행 단계로 동흡진기를 통한 전달계 부품의 진동 특성을 변경함으로써 크립 그론 소음 개선 효과를 검토하였다.

크립 그론 소음은 판 스프링의 굽힘 모드에 의해 증폭되고, 현가 시스템의 비틀림 거동으로 인해 스틱-슬립 사이클이 생성되는 것으로 규명되었다. Base 주파수의 동흡진기는 아래 부착점을 중심으로 y축 회전 방향 거동이 나타나도록 고무-질량으로 구성하였고, peak 주파수의 동흡진기는 z축 병진 방향의 거동을 하도록 스프링-질량으로 구성하였다. 각 동흡진기의 drive point Frequency Response Function(FRF) 결과를 Fig. 9에 나타내었고, 붉은색 점선은 base 주파수 동흡진기 질량 상부에 x 방향 가진 시, 푸른색 쇠선은 peak 주파수 동흡진기 질량 하부에 z 방향 가진 시의 FRF 결과이다.

Fig. 10은 각 동흡진기의 부착 위치로, base 주파수에서 현가계의 비틀림 거동을 억제하기 위해 액슬의 양 끝단에 동흡진기를 부착하였다. 또한, peak 주파수에서 판 스프링의 굽힘 거동을 억제하기 위해 모드 형상에서 변위가 가장 크게 나타나는 좌측 판 스프링 뒤쪽 및 TPA 결과 주 전달경로로 도출된 우측 판 스프링 앞쪽 위치에 부착하였다.

##### 4.2 실차 실험을 통한 개선 효과 검증

동흡진기 부착 전/후에 따른 개선 효과를 확인하기 위해, 반 무향실 내 평지 조건에서 운전자석 귀 위치에 마이크로폰을 부착하여 크립 그론 소음 레벨을 측정하였다. 결과를 Fig. 11에 나타내었고, 붉은색 점선은 base 주파수 동흡진기를 부착했을 때의 결과로 해당 주파수뿐만 아니라, 모든 harmonic 주파수에서 소음 레벨이 감소되었다. 푸른색 쇠선은 peak 주파수 동흡진기 부착 결과로, 해당 주파수에서 소음 레벨이 크게 감소하였다. Base 및 peak 주파수 동흡진기를 적용했을 때 overall SPL 기준 13 dBA, 6 dBA 감소되었고, 이 결과를 통해 동흡진기를 통한 크립 그론

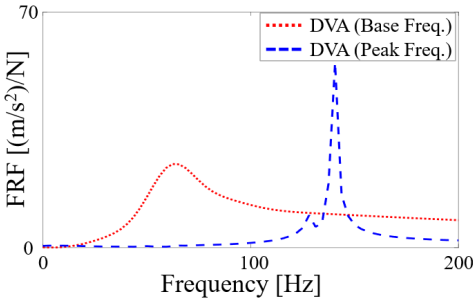


Fig. 9 FRF result of tuned DVAs

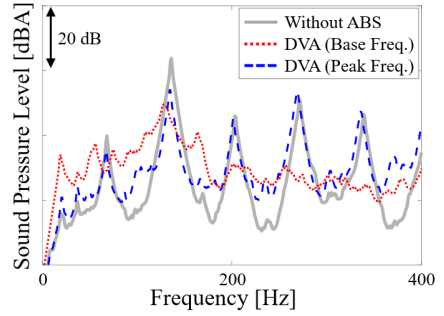


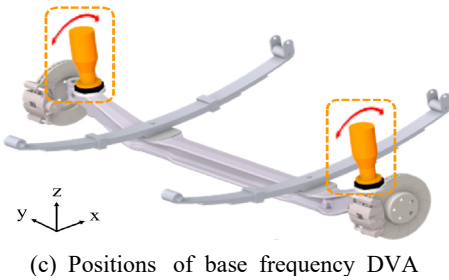
Fig. 11 Comparison of sound pressure level spectra with the use of DVAs



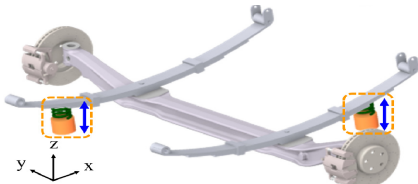
(a) Base frequency DVA composed of rubber-mass (b) Peak frequency DVA composed of spring-mass

Table 3 Comparison of noise generation rate with the use of base frequency DVA

	Without DVA	With DVA (base freq.)
Number of noise generations	17	1
Noise generation time	147 sec	4 sec



(c) Positions of base frequency DVA

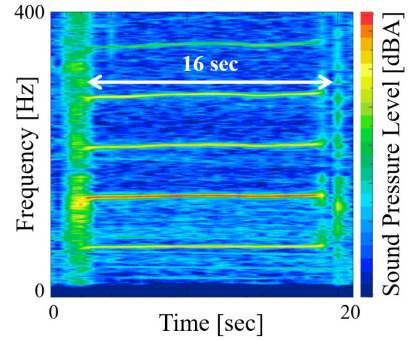


(d) Positions of peak frequency DVA

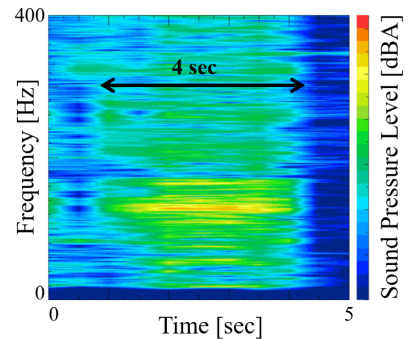
Fig. 10 Dynamic vibration absorber installed on a suspension system

소음 저감의 유효성을 확인하였다.

소음 레벨 측면 뿐만 아니라, base 주파수의 스틱-슬립 사이클 억제를 통한 개선 효과를 발생 시간 및 발생 횟수 측면에서 확인하였다. 동일한 실험 환경에서 10분 동안 크립 그론 소음 발생을 유도하였고, 실험



(a) Without DVA



(b) With base frequency DVA

Fig. 12 Waterfall plots of creep groan noise

결과는 Table 3과 같다. 크립 그론 발생 횟수는 17배 감소, 총 발생 시간은 약 37배 감소의 효과를 확인하였다. Fig. 12는 크립 그론 소음이 지속되는 시간을 나타낸 것으로, 동흡진기를 부착하기 전에는 최대 16초의 크립 그론 소음이 지속되었지만, base 주파수의 동흡진기 부착 시, 소음 지속 시간이 4초로 감소되었다.

두 가지의 동흡진기를 통해, 소음 레벨이 감소되었지만, peak 주파수 대비 base 주파수의 동흡진기를 부착했을 때, 더욱 효과적으로 크립 그론 소음이 저감됨을 확인할 수 있었다. 이 원인은 base 주파수의 동흡진기는 Fig. 8의 현가계 거동에 의한 스틱-슬립 사이클을 억제함으로써, base 및 harmonic 주파수에서의 소음 레벨 감소, 크립 그론 트리거 횟수 감소 효과를 확인할 수 있지만, peak 주파수의 동흡진기는 전달 경로상의 음향 증폭 원인인 판 스프링의 굽힘 거동만을 억제하기 때문에, peak 소음 레벨만이 감소될 뿐, 다른 harmonic 주파수에서의 소음 레벨은 일정하게 유지되기 때문이다.

### 5. 결 론

이 연구에서는 두 가지의 주파수를 타겟으로 선정하여, 상용 전기 차량의 크립 그론 소음 저감을 실현하였다. 첫 번째 단계로, 전달경로 분석을 통한 예측 값과 실측값을 비교함으로써 결과의 신뢰성을 확인하였고, 전달경로인 현가계 부품을 대상으로 실내 소음 기여도 분석 결과, 크립 그론 소음은 판 스프링이 주 전달경로임을 확인하였다. 두 번째로, 동흡진기 부착 위치를 선정하기 위해 체동계 및 현가계 부품을 대상으로 모달 테스트를 진행하였다. 이를 통해, base 주파수에서는 현가계 거동에 의한 스틱-슬립 사이클 현상, peak 주파수에서는 판 스프링의 공진에 의한 음향 증폭 현상을 규명하였다. 마지막으로, 두 가지 타겟 주파수에 대한 동흡진기를 튜닝하였고, 판 스프링과 액슬에 부착했을 때, 소음 레벨이 감소되었다. 특히 base 주파수의 동흡진기는 스틱-슬립 사이클을 끊어 줌으로써, 가진 발생을 억제하기 때문에 모든 harmonic 주파수에서 소음 레벨 감소, 트리거 횟수 감소, 소음 지속 시간 감소 등 크립 그론 소음을 개선하는데 효과적인 방법임을 확인하였다.

이와 같이 peak 주파수뿐만 아니라, base 주파수에서의 접근법은 상용 차량에 국한된 것이 아니라 전반

적인 디스크 브레이크 타입 차량에 적용 가능할 것으로 보인다. 또한, 이 연구에서는 동흡진기를 통해 소음을 저감했지만, 양산 차량에는 판 스프링의 형상 변경을 통한 공진 회피, 현가계 비틀림 방향 강성 증대를 통한 크립 그론 음색 변경 등이 필요할 것으로 사료된다.

### 후 기

이 연구는 현대자동차 및 서울대학교 공학연구원의 지원을 통해 진행되었으며, 2021년도 춘계 소음진동 학술대회에서 발표한 내용을 토대로 작성되었다.

### References

- (1) Wei, D., Ruan, J., Zhu, W. and Kang, Z., 2016, Properties of Stability, Bifurcation, and Chaos of the Tangential Motion Disk Brake, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 375, pp. 353~365.
- (2) Zhao, X., Gräbner, N. and von Wagner, U., 2018, Theoretical and Experimental Investigations of the Bifurcation Behavior of Creep Groan of Automotive Disk Brakes, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 56, No. 2, pp. 351~364.
- (3) Meng, D., Zhang, L., Xu, X., Sardahi, Y. and Chen, G. S., 2019, Sensing and Quantifying a New Mechanism for Vehicle Brake Creep Groan, *Shock and Vibration*, Vol. 2019, Article No. 1843205.
- (4) Fuadi, Z., Maegawa, S., Nakano, K. and Adachi, K., 2010, Map of Low-frequency Stick-slip of a Creep Groan, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, Vol. 224, No. 12, pp. 1235~1246.
- (5) Zhao, X., Gräbner, N. and von Wagner, U., 2019, Avoiding Creep Groan: Investigation on Active Suppression of Stick-slip Limit Cycle Vibrations in an Automotive Disk Brake via Piezoceramic Actuators, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 441, pp. 174~186.
- (6) Jang, H., Lee, J. S. and Fash, J. W., 2001, Compositional Effects of the Brake Friction Material on Creep Groan Phenomena, *Wear*, Vol. 251, No. 1-12, pp. 1477~1483.
- (7) Donley, M. and Riesland, D., 2003, Brake Groan

Simulation for a McPherson Strut Type Suspension, SAE Technical Paper, No. 2003-01-1627.

(8) Bettella, M., Harrison, M. F. and Sharp, R. S., 2002, Investigation of Automotive Creep Groan Noise with a Distributed-source Excitation Technique, Journal of Sound and Vibration, Vol. 255, No. 3, pp. 531~547.

(9) Jung, T. and Chung, S., 2012, Research for Brake Creep Groan Noise with Dynamometer, SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, Vol. 5, No. 4, pp. 1224~1229.

(10) Woo, J. H., Kim, J., Kim, K. Y. and Ko, D., 2014, A Study on the Transfer Path Analysis of Brake Creep Groan Noise, SAE Technical Paper, No. 2014-01-2510.

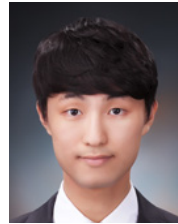
(11) Joo, K. H., Jeon, H. C., Sung, W. and Cho, M. H., 2013, Transfer Path Analysis of Brake Creep Noise, SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, Vol. 6, Article No. 3, pp. 1408~1417.

(12) Kim, B. Y., Shin, C. W., Jeong, W. T., Park, S. Y., Jang, H. K., Kim, S. J. and Kang, Y. J., 2008, Interior Noise Reduction of Wheel Loader using Transfer Path Analysis and Panel Contribution Analysis, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 8, pp. 805~815.

(13) van der Seijs, M. V., de Klerk, D. and Rixen, D. J., 2016, General Framework for Transfer Path Analysis: History, Theory and Classification of

Techniques, Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 68-69, pp. 217~244.

(14) Kang, K. M., Kang, Y. J., Jeon, H. C. and Cho, M. H., 2013, Experimental Investigation of Creep Groan Noise, Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A, Vol. 37, No. 5, pp. 673~678.



**Uyeup Park** received a B.S. and M.S. degree from Hongik University in 2018, 2020. He is currently a Ph.D. candidate in Acoustic and Vibration Lab. at Seoul National University. His research interests include road induced noise and brake

noise of automotive.



**Yeon June Kang** received a B.S. and M.S. degree from Seoul National University in 1998, 1990. He then received his Ph.D. degree from Purdue University in 1994. He is currently a professor at the department of mechanical engineering

at Seoul National University, South Korea, since 1997. His research interests include acoustical materials and automotive NVH.