

<응용논문>

# 타이어 공명소음 저감을 위한 레조네이터 구조 개발 및 검증

박정원<sup>1)</sup> · 김성수<sup>\*2)</sup>

한국자동차연구원 플랫폼안전기술부문<sup>1)</sup> · 충남대학교 메카트로닉스공학과<sup>2)</sup>

## Development and Verification of Resonator Structure for Reducing Tire Cavity Noise

Jung-won Park<sup>1)</sup> · Sung-soo Kim<sup>\*2)</sup>

<sup>1)</sup>Chassis & Materials Research Laboratory, Korea Automotive Technology Institute, 303 Pungse-ro, Pungse-myeon, Dongnam-gu, Cheonan-si, Chungnam 31214, Korea

<sup>2)</sup>Department of Mechatronics Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

(Received 11 September 2023 / Revised 25 September 2023 / Accepted 25 September 2023)

**Abstract** : The resonator product, which was made via the blow molding method and is currently used to reduce tire resonance noise in the frequency range of 200 ~ 300 Hz, has many issues due to its soft material. To address these problems, we have developed a new resonator structure. The new resonator structure uses injection molding techniques, and is designed to mitigate noise effectively, including frequency separation and variation phenomena that occur with increasing vehicle speed. Ultimately, the developed product underwent real-world driving tests to validate its noise reduction effectiveness and feasibility. Through these tests, we were able to verify the noise reduction effects and the effectiveness of the proposed new resonator structure. Furthermore, this study provides research directions in designing the new structure.

**Key words** : Tire noise(타이어 소음), Tire resonance noise(타이어 공명소음), Resonator(공명기), Frequency separation(주파수 분리), Frequency variable type(주파수 가변형)

### 1. 서론

#### 1.1 자동차의 소음

자동차 소음은 파워트레인 소음, 차체형상에 따른 공력 소음, 그리고 타이어에서 발생하는 소음으로 크게 3

가지로 분류될 수 있으며, 타이어에 의한 소음은 전체소음의 80% 이상으로 인식<sup>1)</sup>(Fig. 1)되고 있을 만큼, 중요성이 크다 할 수 있다. 특히, 전기자동차는 파워트레인에 의한 소음이 현격하게 줄어들면서, 타이어에 의한 소음저감의 중요성 더 커지고 있다.

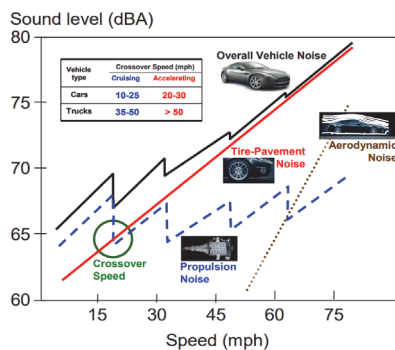


Fig. 1 Classification of automotive noise<sup>1)</sup>

#### 1.2 타이어 공명소음

타이어-노면에서는 전주파수 영역의 소음이 발생하는데, 다른 영역 대비하여 180 ~ 300 Hz 영역에서 약 10 dB 높게 음압이 발생<sup>2,3)</sup> 하는데(Fig. 2), 이 주파수 영역의 소음을 타이어 공명소음이라 한다.

타이어 공명소음은 노면과의 접촉 소음원으로부터 타이어 내부 공간(Cavity)에 있는 공기의 공명현상으로 인해 발생하는 것으로 알려져 있으며, 타이어 공명소음은 소음으로만 존재하지 않고, 휠에 고주파 진동성분으로 전달되고, 새시시스템과 차체로 전달되며, 최종적으로,

\*Corresponding author, E-mail: sookim@cnu.ac.kr

<sup>1)</sup>This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

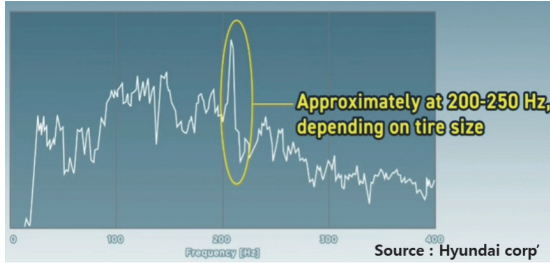
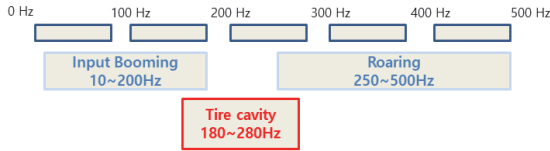


Fig. 2 Tire cavity noise<sup>2,3)</sup>

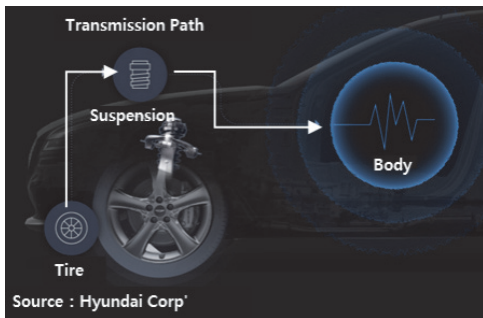
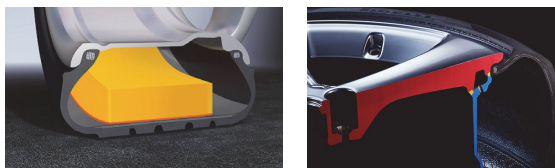


Fig. 3 Transmission path of tire resonance noise<sup>3)</sup>

차체의 진동이 소음으로 전환되어 운전자에게 전달된다<sup>3)</sup> (Fig. 3).

### 1.3 타이어 공명소음 저감 기술

타이어 공명소음을 저감하는 기술로는 폴리우레탄 소



(a) Sound absorber by Foam<sup>4)</sup> (b) Resonance wheel<sup>5)</sup>



(c) Attached resonator<sup>6)</sup>

Fig. 4 Structures of tire cavity noise reduction products

재로 제작된 흡음재 타이어 접착 방식(Fig. 4(a))<sup>4)</sup>과 헬름홀츠 원리를 이용한 공명휠 방식(Fig. 4(b))<sup>5)</sup> 및 공명기 휠 부착 방식(Fig. 4(c))<sup>6)</sup>의 3가지 방향에서 연구되고 있다.

#### 1.3.1 흡음재 타이어 부착 방식 특징

타이어 공명소음을 줄이기 위한 첫 번째 방법으로, 흡음재 타이어 접착 방식은 타이어 제조업체를 통해 가장 많이 적용되고 있으며, 공명소음 영역 외 주파수 영역에서도 일정 부분 소음저감 특성이 있는 장점을 가지고 있으나, 공명소음 주파수 대역에서 다소 부족한 소음 저감 성능(~ 4 db)과, 중량 및 회전관성이 크게 증가되기 때문에, 연비 증가, 스프링 하중량 증가로 인한 단점이 크며, 타이어의 코니시티(Conicity, 주황중 쏠림) 현상을 발생시키는 원인이 되기도 한다. 뿐 만 아니라, 흡음재는 타이어교체 시, 타이어와 함께 전량 폐기물로 처리되는 등 여러가지 단점이 있다.

#### 1.3.2 공명 휠 방식 특징 및 원리

##### 1.3.2.1 헬름홀츠(Helmholtz) 원리

타이어 공명소음을 저감하는 두 번째 방식인 공명 휠과 세 번째 방식인 공명기 휠 부착 방식은, 헬름홀츠 원리를 공통적으로 이용하는 방식이며, 공명 휠을 설명하기에 앞서, 헬름홀츠 원리를 설명하고자 한다.

헬름홀츠 공명기 원리는 소통관(Communication hole)에 있는 기체 질량이 공명기 내부 공간을 막고 있는 닫힌 공간이라 정의 하였으며(Fig. 5), 이러한 구조를 이용하

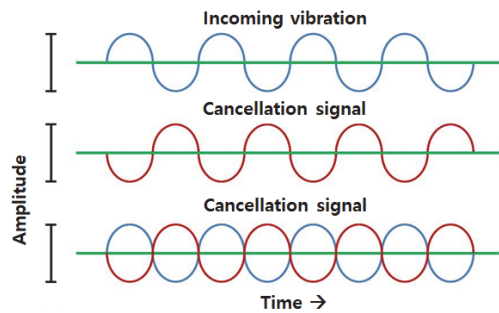
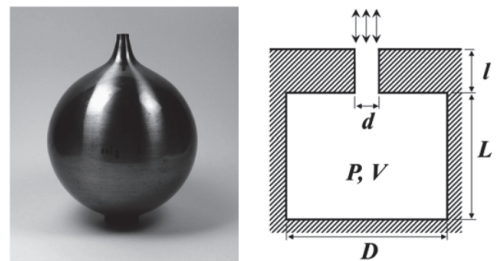


Fig. 5 Structure and principle of Helmholtz resonator<sup>7)</sup>

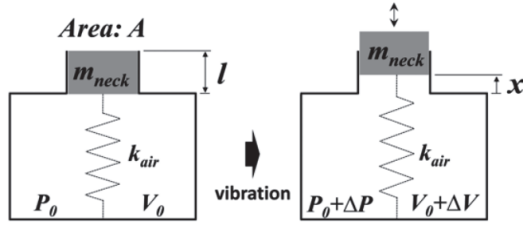


Fig. 6 Helmholtz resonator represented by mass-spring system( $P_0, V_0$ ) : pressure at equilibrium(Volume)<sup>7)</sup>

여 복합음에서 단일음을 분리해 내고, 배음 및 중첩음에 대한 메커니즘을 밝힌 바 있다.<sup>7)</sup>(Fig. 6)

헬름홀츠 공명기는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 일반적으로 1 자유도 질량-스프링 계로 표현된다. 이 경우 개구부에서의 공기가 질량의 역할을, 공동 내부의 공기가 스프링의 역할을 하게 되며, 헬름홀츠 공명기의 공명 주파수  $\omega_n$  (rad/s)은 다음과 같다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_{air}}{m_{neck}}} = \sqrt{\frac{kP_0A^2}{V_0\rho_0Al}} = \sqrt{\frac{kP_0}{\rho_0}} \sqrt{\frac{A}{V_0l}} \quad (1)$$

where  $P_0, V_0$  : pressure, volume in resonator  
 $w$  : resonance frequency (Hz)  
 $k$  : equivalent spring constant

위의 식을 실용적으로 사용하기 위해 선형 음향 파동 방정식에 파동의 위상 속도  $c$ 에 대한 식( $c = \sqrt{B/\rho_0}$ )을 이용하여, 다음과 같이 Hz 단위로 표현된 공명 주파수식을 얻게 된다.

$$f_n = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{V_0l}} \quad (2)$$

where  $c$  : speed of sound (m/s)

### 1.3.2.2 공명 휠 방식 소음 저감

타이어 공명소음을 저감하는 두 번째 방식인 금속 소재의 공명 휠 제품(Fig. 4(b))은 헬름홀츠(Helmholtz's) 원리를 이용한 방식으로, 타이어 공명소음 저감 효과가 높고, 주행성능에 영향을 미치지 않고 경량이라는 장점이 있다.

반면, 주조, 가공 등 생산 공정에서 휠 내부에 공동 체적을 확보하는데 어려움이 있어, 생산성 및 원가 경쟁력에서 불리하며, 더 나아가, 주조 불량이나 발생할 가능성이 높으며, 최종 제작된 휠 내부의 빈 공간이 구조적 강도에 악영향을 미치는 경우가 발생할 가능성도 높다.

### 1.3.3 공명기 휠 부착 방식 특징

#### 1.3.3.1 공명기 휠 부착 방식 소음 저감

타이어 공명소음을 저감하는 두 번째 방식인 공명기 휠 부착 방식(Fig. 4(c)) 제품은 공명 휠 방식과 동일하게 헬름홀츠(Helmholtz's) 원리를 이용한 방식으로, 공명 휠 제품과 동등 수준의 공명소음 저감 성능을 발휘하며, 타이어의 주행성능에도 영향을 미치지 않으며, 흡음재 부착 방식에 대비하여 중량 및 회전관성의 증가량이 낮은 장점이 있다. 반면, 현재 상용화 및 양산 적용되고 있는 공명기 휠 부착 방식 제품은 블로우 몰딩 공법<sup>8)</sup>으로 제조되고 있는데, 이로 인한 여러가지 단점이 발생할 수 있다.

#### 1.3.3.2 블로우 몰딩 공명기의 단점

블로우 몰딩 공법으로 만들어지는 공명기 제품은 제조 공법의 특성 상, 구조강도에 취약한 연질의 플라스틱 소재를 적용하고 있어, 사소한 환경적 변화 요인에 영향을 받아 제품의 두께가 일정하지 않는 등 품질 편차가 심하고, 더불어, 하절기 타이어 내부의 높은 온도 환경에서 고속주행 상황이 겹쳐지면서 관성력의 영향으로 제품 체적 변형이 발생하여, 공명기 부품으로써 기능을 충분히 하지 못하는 현상이 발생할 수도 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결할 수 있는 방안으로 경질 소재를 적용한 사출형 제품 개발을 위한 새로운 구조를 제안하고, 소음저감 성능평가를 통하여 효과를 검증하였다.

### 1.4 차속 증가에 따른 공명주파수 변동

헬름홀츠 원리를 이용한 공명소음 저감 기술을 적용한 공명 휠 및 공명기 휠 부착 방식 제품은 타이어-휠 규격에 따라 고정된 단일 주파수로 설계되어 있어 특정 주행속도(50 ~ 60 Km/h) 영역에서만 공명소음 저감 효과가 있다. 타이어 공명소음은 Fig. 7과 같이 자동차 주행속도에 따라 주파수 분리(Separation) 및 천이(Transition)가 발생하게 되는데 수평 모드와 수직 모드, 두 개의 모드로 분리되는 특성을 나타낸다. 이로 인하여, 고속주행에서는 공명소음 저감 성능이 현격히 저하되는 현상이 발생하게 된다.<sup>2)</sup>

본 연구에서는 차량 주행속도 증가에 따른 주파수 분리와 천이 현상에 대응이 가능하도록, 1차 질량-강성 모델을 추가 적용한 주파수 가변형 제품을 제안하고 구현하여 저음저감 효과를 확인 하였다.

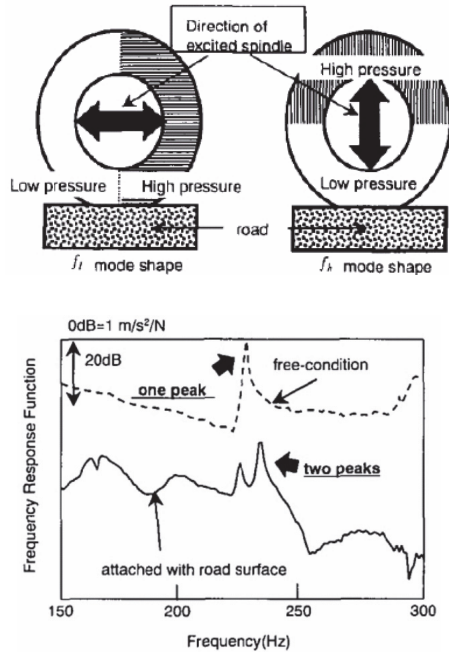


Fig. 7 Frequency separation & transition of resonance<sup>2)</sup>

### 1.5 연구내용 및 범위

본 논문에서는 성능과 경제적 이점이 많은 기존의 공명기 휠 부착 방식에 있어서 단점을 개선할 수 있는 새로운 구조의 공명기 모델을 제안하고 실험적 검증을 통해서 그 타당성과 효과를 검증한다.

이를 위하여, 2장에서는, 기존 블로우 몰딩 제품의 단점을 개선할 수 있는 사출 몰딩 공법을 적용한 새로운 구조의 공명기 모델을 제안하고 새로운 구조의 공명기 모델의 제작과 함께, 다이내모미터를 활용한 소음저감 성능평가를 수행함으로써, 사출 몰딩 공법을 적용한 제품의 가능성을 확인하였다. 3장에서는, 차속의 증가에 따른 중심주파수 분리 및 천이 발생에도 효과적인 소음저감 성능을 발휘할 수 있도록 질량-스프링 구조를 추가하여 최종 제품을 제작하였으며, 실차 단위에서의 성능시험평가를 통하여 공명음 소음저감 효과와 유효성을 검증하였다.

## 2. 구조개선 공명기 개발 및 효과검증

### 2.1 경질 소재 적용 사출형 공명기 설계

공명기 휠 부착 방식 제품의 장점은 유지하면서도 단점을 보완하기 위하여, 원가 경쟁력 및 구조적 안전성과 품질 신뢰성을 확보할 수 있는 경질의 플라스틱 재질을 적용하기 위하여 사출형 제품을 설계하였다. 이를 위해, 상하(Top & Bottom)판을 나누어서 제작하고, 접합하는 방식으로 공명기(Resonator, Fig. 8)를 설계하였다.

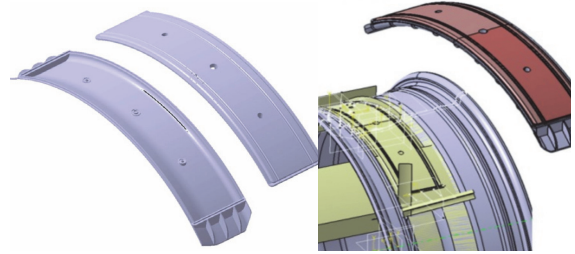


Fig. 8 Structure and design of injection resonator

한편으로는, 소통관이 일단부에 설치되는 기존의 제품과 달리 개발품의 소통관은 제품 중앙에 위치하고, 내부로 함몰된 형태를 하고 있어 레조네이터 내부 공간에 추가적인 장치를 설치할 수도 있다.

### 2.2 사출 방식 제품 제작 및 어셈블리

경질 소재와 사출공법을 적용한 제품을 제작하기 위

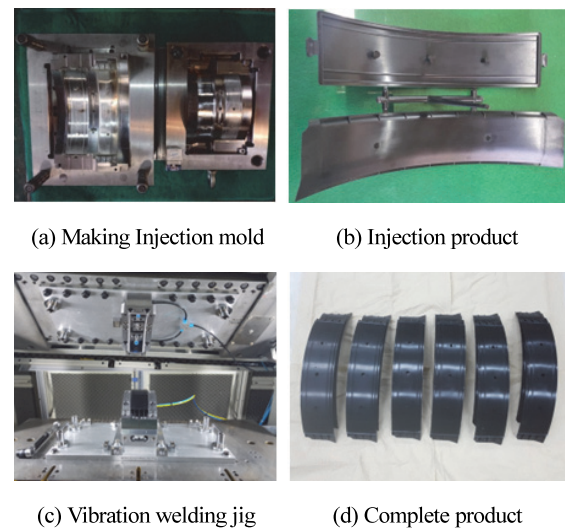


Photo 1 Injection resonator manufacturing process and products

Table 1 Wheel & resonator for test

	Without resonator	Resonator assembly
Vehicle	SONATA	
Rim size	8J × 18	
Tire size	235 / 45 18 R	
Note	Wheel	Wheel + Resonator



하여, 금형을 제작하고, 사출기를 이용해 부품을 상하판으로 사출한 이후, 진동용착 공정을 거쳐 완성품을 완성하였으며(Photo 1), 접합 후 누설 검사를 통해 제품의 이상 유무를 확인하였다.

Table 1에 나타낸 바와 같이 휠-레조네이터 어셈블리를 구성하고, 사전 주파수 시험을 통하여, 중심 주파수는 215 Hz로 확인하였으며, 레조네이터의 공명 주파수도 사전에 215 Hz로 설계, 제작되었다.

### 2.3 다이노미터 기반 성능시험 평가

#### 2.3.1 다이노미터 시험 평가 환경

다이노미터 시험 평가에서는 레조네이터 장착 여부에 따른 공명소음 저감효과는 마이크로폰 소음과 휠에서의 가속도데이터를 비교하여 확인하였으며 다이노미터에 대한 상세 사양정보는 Photo 2 및 Table 2에 나타내었다.



Photo 2 Noise test by chassis dynamometer

Table 2 Information equipment

Information equipment	
Drum drive/speed	4WD(3.183 m, 1.592 m) / 280 km/h
Drum surface	Hard metal, Shell, Cleat
Max. air speed	150 km/h
Background noise	- No running : ≤ 20 dBA - Only running ventilation : ≤ 30 dBA - Only running exhaust : ≤ 40 dBA - Max 65 dBA @ 200 km/h, 4 WD

#### 2.3.2 다이노미터 시험 평가

다이노미터의 드럼에 Cleat를 장착하여 타이어에 인위적인 진동 가진이 되도록 하였으며, 주행속도는 30 ~ 60 kph에서 진행하였다. 또한, 휠 센터에 가속도계를 설치하여 휠에서 발생하는 주파수를 측정하였으며, 소음 측정을 위한 마이크로폰은 휠 센터에서 회전축 방향 1,000 mm 지점에 설치하였다(Fig. 9).

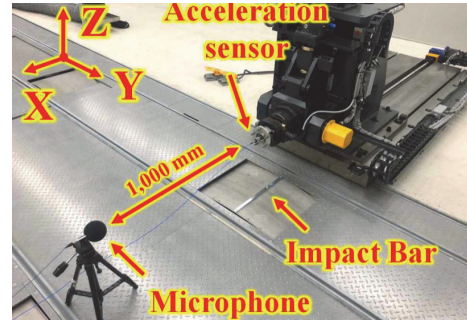


Fig. 9 Dynamometer test settings

다이노미터 성능시험 조건은 다음과 같다.

#### 1) 주행 조건

- ① Cleat 규격 : 20 mm (폭) × 10 mm (높이)
- ② 주행속도 : 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60 kph
- ③ 하중조건 : 100 kgf

#### 2) 측정 조건

- ① 측정 시간 : 10 sec
- ② 측정 주파수 범위 : 0 ~ 1,024 Hz
- ③ 분석 주파수 범위 : 190 ~ 235 Hz
- ④ 분석 주파수 범위에 대한 RMS 값 비교
- ⑤ 측정 위치

가. 가속도계 위치 : Wheel center

나. 마이크로폰 위치 : 휠 센터에서 X축으로 1,000 mm 지점

#### 2.3.3 다이노미터 시험 평가 결과

다이노미터 소음저감 성능평가를 통해 확보된 속도별 방사소음과 가속도 데이터에 대하여 FFT(Fast Fourier Transform) 처리 후, RMS 값으로 개발품 적용 전후의 변화량을 비교하였다.

분석 결과, 마이크로폰 측정 결과(Table 3)에서는 충분한 소음저감 효과를 확인할 수는 없었다. 이는 다이노미터 자체 소음과 타이어 소음 발생을 위해 설치된 Cleat의 충격진동에 의한 소음 등 타이어 소음외의 외부적 소음에 가려져 소음저감 효과를 별도로 추출하는 것이 불

Table 3 Result of wheel microphone.

Vehicle speed	30 kph	35 kph	40 kph	45 kph	50 kph	55 kph	60 kph
General wheel	47.48	49.06	50.66	49.34	52.33	54.15	55.29
Resonator wheel	47.55	47.78	50.49	49.63	52.15	55.65	55.06
Sound variation	+0.07	-1.28	-0.17	+0.29	-0.18	+1.5	-0.23

가능한 것으로 사료된다. 이 결과로부터, 다이내모미터 소음성능 평가에서 변별력 있는 결과를 확보하기 위해서는 타이어 내부의 소음을 측정하는 방안을 검토해야 할 것으로 사료된다.

반면에, Table 4, Fig. 10, Fig. 11에 나타난 것과 같이 휠 센터에서의 가속도 성분에 대한 제품의 적용 효과를 분석하였으며, 모든 속도 시험에서 진동량이 저감된 결과

를 확인할 수 있었다.

결과 값의 검토는 속도별로 190 ~ 230 Hz 공명주파수 범위에서 RMS 기준으로 비교하였으며, 최소 1.17 dB, 최대 4.79 dB 진동이 저감되는 효과를 확인할 수 있었고, 타이어 공명소음이 새시 및 차체를 통해 전달되는 점을 고려하면 충분한 소음저감 성능을 갖는 것으로 사료된다.

Table 4 Result of wheel acceleration

Vehicle speed	30 kph	35 kph	40 kph	45 kph	50 kph	55 kph	60 kph
General wheel	95.90	93.31	95.78	98.90	100.18	100.26	100.03
Resonator wheel	92.91	91.85	92.56	94.15	95.54	97.63	96.76
ACC <sup>2</sup> vibration	-2.99	-1.46	-3.22	-4.75	-4.64	-2.63	-3.27

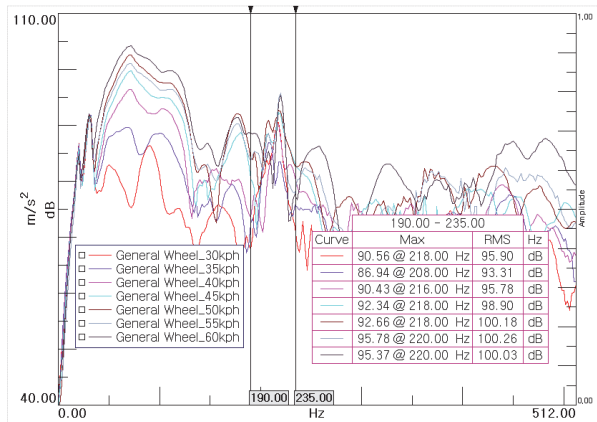


Fig. 10 Acceleration result of general wheel

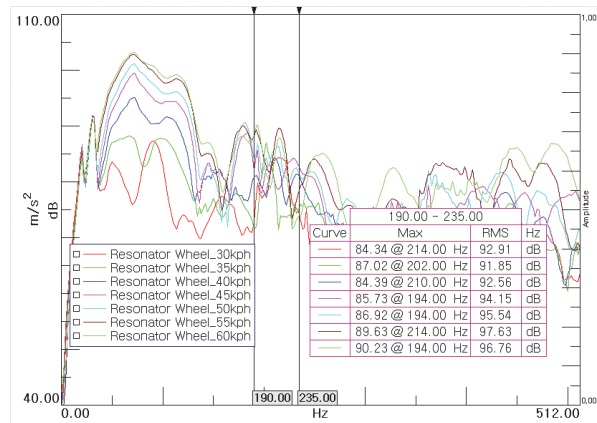


Fig. 11 Acceleration result of resonator wheel

### 3. 주파수 가변형 공명기 개발 및 실차성능 평가

#### 3.1 주파수 가변형 공명기 개발

차량의 속도가 증가함에 따라 공명 주파수가 분리되는 현상에도 충분한 소음저감 효과를 발휘할 수 있는 공명기 구조를 Fig. 12와 같이 고안하였으며, 차량의 속도 증가에 따른 관성력 변화에 따라 소통관 내에 설치된 질량 요소(이하, 밸브)의 위치가 상하로 이동하면서 소통관 개구부의 단면적이 변화되는 구조를 갖도록 설계되었다.

휠 회전에 의한 원심력으로 개구부에 설치된 스프링이 압축되고, 밸브가 상승하며 개구부의 면적이 증가 또는 감소하는 원리를 사용하였다. 식 (2)를 다시 살펴보면 소통관 개구부의 단면적이 증가할 때, 헬름홀츠 공명기의 주파수가 상승한다. 이에 따라, 차량의 속도가 상승할 때 분리되는 공명 주파수를 상쇄하여 기존에 단일 주파수로 설계된 레조네이터 보다 타이어-휠 공명 소음을 효과적으로 감소시킬 것으로 예측하였으며, 실제작 제품을 Photo 3에서 보여준다.

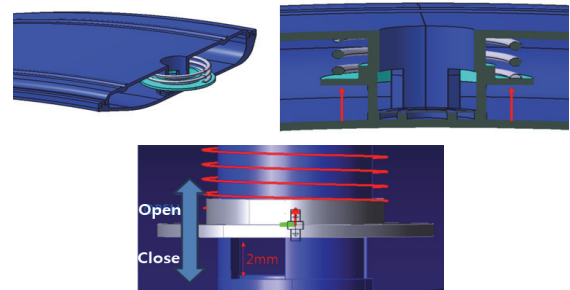


Fig. 12 Frequency variable resonator structure



Photo 3 Cross-sectional photograph of the variable resonator

3.2 주파수 가변형 공명기 적용 실차 시험 평가

실차 시험은 H사(社) 중형차량에, 레조네이터 미장착 휠, 2장에서 개발된 고정형 레조네이터, 3장에서 개발된 주파수 가변형 레조네이터를 각각 장착하고 자동차 전 용도로에서 시험을 진행하였다.

3.2.1 시험 준비 및 실차 시험 평가

시험조건을 정확성을 담보하기 위해 GPS를 통하여 차량 속도를 획득하고, 데이터 확보를 위해 Fig. 13에서 색깔로 표시된 것과 같이 전석 좌측, 전석 중앙, 후석 중앙에 마이크를 설치하였으며, 데이터 측정 및 분석은 ‘2) 측정 조건’에 나타내었다.

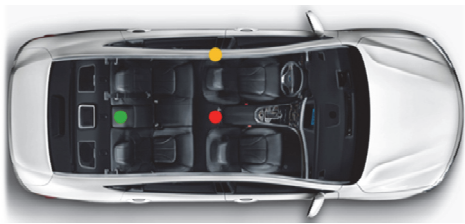


Fig. 13 Microphone installation location

- 1) 시험조건
  - ① 주행 속도 : 30 ~ 120 kph, 10 kph 단위
  - ② 주행 시간 : 120 sec/속도별
- 2) 측정 조건
  - ① 측정 시간 : 120 sec
  - ② 측정 주파수 범위 : 150 ~ 400 Hz
  - ③ 분석 주파수 범위 : 190 ~ 235 Hz
  - ④ 분석 주파수 범위에 대한 RMS, Contour 값 비교
  - ⑤ 측정 위치 : 전석 좌측, 전석 중앙, 후석 중앙

3.2.2 실차 시험 평가 결과 분석

레조네이터 미장착 차량의 시험 결과 200 ~ 250 Hz 영

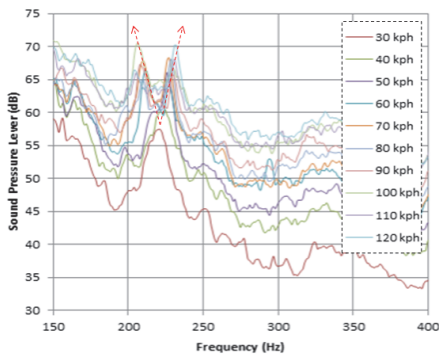


Fig. 14 General wheel cavity noise and frequency separation

역에서 타이어 공명소음이 강하게 발생하였다. 최대 소음은 차량 속도 120 Km/h 조건에서 약 70 dB 수준이며, 속도가 증가함에 따라 공명 주파수가 2개의 피크로 분리 되는 현상을 확인할 수 있었다(Fig. 14).

3.2.2.1 전석 좌측 측정 결과

전석 좌측에서 공명 소음을 측정한 결과를 분석해 보면, Fig. 15(a)에 나타난 레조네이터 미장착 차량 대비하여 Fig. 15(b), Fig. 15(c)에 나타난 고정형 레조네이터와 가변형 레조네이터의 공명 소음 감소 효과를 확인할 수 있었지만, 고정형과 가변형 결과는 비슷한 수준으로 나타났다. 이는 소음 측정 위치가 창문과 가까워 풍절음 등 외부 유입 소음의 영향이 크기 때문인 것으로 사료된다.

소음 저감 효과를 정량적으로 상세하게 살펴보면, 주파수 고정형 레조네이터 장착시, 최대 소음기준 4.1 ~ 9.8 db가 저감되었고, RMS 기준으로 1.1 ~ 5.6 dB이 저감되는 효과를 확인할 수 있었다. 또한 주파수 가변형 레조네이터 장착시 최대 소음기준 기준 4.6 ~ 9.5 dB이 저감되었고, RMS 기준으로 0.9 ~ 4.6 dB이 저감되는 효과를 확인할 수 있었다.

저속영역에서는 고정형 레조네이터 장착시 공명소음 저감효과가 높았으나, 고속영역에서는 주파수 가변형 레조네이터의 저감효과가 근소하게 우수한 것으로 확인되었다(Table 5).

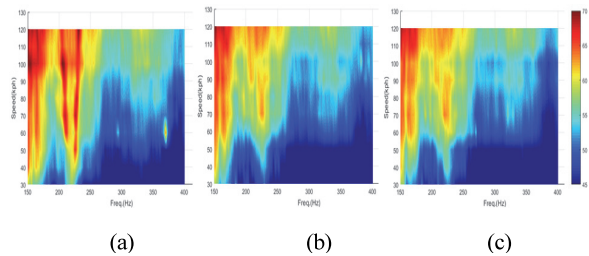


Fig. 15 Measurement result of cavity noise of (a)general wheel, (b) fixed resonator wheel, (c) variable resonator from the left side of the front seat

Table 5 Cavity noise reduction of fixed and variable resonator from the left side of the front seat

Velocity (kph)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	
Reduction of fixed resonator	peak	6.96	7.44	9.82	7.85	5.06	5.71	4.88	8.15	4.13	5.31
	rms	3.97	5.61	5.60	3.43	2.62	2.22	1.39	4.80	1.41	1.14
Reduction of variable resonator	peak	5.95	4.61	9.56	5.87	4.68	5.62	5.10	8.80	4.77	6.27
	rms	2.84	3.83	4.68	2.14	2.13	1.90	0.94	5.10	1.60	1.80

3.2.2.2 전석 중앙 측정 결과

전석 중앙에서의 결과를 분석해 보면, Fig. 16(a)에 나타난 레조네이터 미장착 차량 대비하여 Fig. 16(b), Fig. 16(c)에 나타난 고정형 레조네이터와 가변형 레조네이터의 공명 소음 감소 효과를 확인할 수 있었고, 특히, 주파수 고정형 레조네이터 적용 결과인 Fig. 16(b) 대비하여 Fig. 16(c)에 나타난 주파수 가변형 제품의 성능이 다소 우수한 것으로 나타났다.

소음저감 효과를 정량적으로 상세하게 살펴보면, 주파수 고정형 레조네이터 장착시, 레조네이터 미장착 제품에 대비하여 최대 소음기준 -0.36 ~ 11.06 dB가 저감되었고, RMS 기준으로 0.81 ~ 5.64 dB이 저감되는 효과를 확인할 수 있었다. 또한, 주파수 가변형 레조네이터 장착시, 미장착 제품에 대비하여 최대 소음 기준 0.90 ~ 9.43 dB 저감되었고, RMS 기준 1.73 ~ 5.53 dB 저감되는 효과를 확인할 수 있었다.

특별히, 30 ~ 60 Km/h의 저속영역에서는 주파수 고정형 레조네이터 장착시 공명소음을 저감효과가 근소하게 높은 것으로 평가되었으나, 80 Km/h 이상의 고속영역에서는 주파수 가변형 레조네이터 장착시 탁월한 소음 저감효과가 있는것을 확인하였다(Table 6).

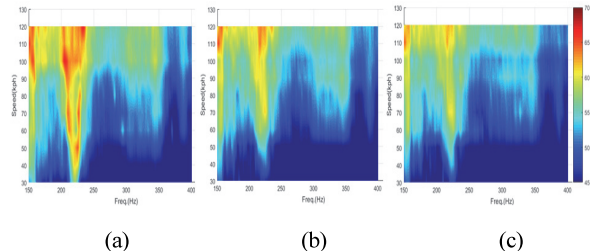


Fig. 16 Measurement result of cavity noise of (a) general wheel, (b) fixed resonator wheel, (c) variable resonator from the front seat center

Table 6 Cavity noise reduction of fixed and variable resonator from the front seat center

Velocity(kph)		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Reduction of fixed resonator	peak	11.06	10.02	9.43	4.62	3.24	2.57	2.94	5.72	-0.36	3.20
	rms	4.06	5.59	5.64	2.68	2.31	1.58	0.81	4.29	1.65	1.22
Reduction of variable resonator	peak	9.43	8.22	8.89	4.92	4.09	3.52	4.68	7.63	0.90	4.47
	rms	3.89	4.96	5.53	2.55	2.66	2.31	1.73	5.29	2.08	2.28

3.2.2.3 후석 중앙 측정 결과

후석 중앙에서의 결과를 분석해 보면, Fig. 17(a)에 나타난 레조네이터 미장착 차량 대비하여 Fig. 17(b), Fig. 17(c)에 나타난 고정형 레조네이터와 가변형 레조네이터의 공명 소음 감소 효과를 확인할 수 있었고, 특히, 주파수 고정형 레조네이터 적용 결과인 Fig. 17(b) 대비하여 Fig. 17(c)에 나타난 주파수 가변형 제품의 성능이 우수한 것으로 나타났다.

공명 소음이 발생하는 200 ~ 250 Hz 주파수 영역에서 주파수 고정형 레조네이터 장착시 최대 소음기준 1.23 ~ 9.96 dB가 저감되었고, RMS 기준으로 1.40 ~ 6.18 dB이 저감되는 효과를 확인할 수 있었다. 또한 주파수 가변형 레조네이터 장착시 최대 소음 기준 1.55 ~ 7.07 dB이 저감되었고, RMS 기준으로 0.18 ~ 6.60 dB이 저감되는 효과를 확인할 수 있었다.

저속영역에서는 고정형과 가변형의 공명소음 저감효과가 유사한 것으로 확인되었으나, 고속영역에서는 가변형 레조네이터 장착시 공명소음 저감효과가 우수한 것으로 확인되었다(Table 7).

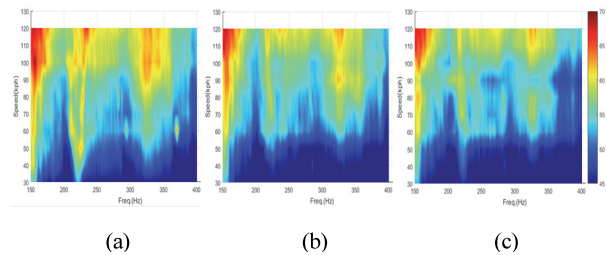


Fig. 17 Measurement result of cavity noise of (a) general wheel, (b) fixed resonator wheel, (c) variable resonator from the rear seat center

Table 7 Cavity noise reduction of fixed and variable resonator from the rear seat center

Velocity(kph)		30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Reduction of fixed resonator	peak	8.99	9.96	9.54	4.85	3.02	3.31	2.42	4.92	1.23	3.63
	rms	2.90	6.18	6.02	2.34	1.52	1.51	1.44	4.78	1.68	1.40
Reduction of variable resonator	peak	7.07	6.43	10.04	4.72	2.27	4.16	2.10	5.55	1.55	4.67
	rms	3.48	5.59	6.60	2.72	1.89	1.55	0.18	5.17	1.87	2.31

4. 결론

본 논문에서는 기존 타이어 공명소음 저감장치의 단점을 보완한 새로운 구조의 공명소음 저감장치를 제안



하고 소음저감 효과 및 타당성을 검증하였으며, 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 헬름홀츠 공명기의 원리를 살펴보고, 기존 적용되고 있는 공명소음 저감 기술 중, 블로우 몰딩 방식이 적용되고 있는 공명기 휠 부착 방식 제품의 단점을 보완하기 위하여 사출 몰딩 방식을 적용하는 새로운 구조의 공명기를 제안하였다.
- 2) 제안된 공명기 설계안에 대하여 금형제작 및 사출 과정을 거쳐 주파수 고정형 공명기를 제작하였다.
- 3) 더불어, 차량의 속도 증가에 따른 공명 주파수 분리 및 천이 현상에도 능동적으로 소음을 저감할 수 있도록 주파수 가변형 제품으로 확장 하였다.
- 4) 공명소음 저감장치의 다이내모미터 시험에서는 주변 소음의 영향으로 인해, 마이크로폰 데이터로는 공명소음 저감효과를 확인하는 것에 어려움이 있었으나, 휠 센터에서 측정된 가속도 데이터로 간접적인 공명소음 저감 효과를 확인할 수 있었다.
- 5) 차량의 속도가 증가할수록 타이어 공명소음 주파수가 변화하는 현상에 대응 할 수 있도록, 관성력에 따라 소통관의 단면적이 변화되어 고유주파수가 변하는 구조의 가변형 제품을 제안하고 실차 주행 시험평가를 수행하였으며, 주파수 고정형과 주파수 가변형 공명기 모두 소음저감 효과가 확인되었으며, 특히, 고속 주행에서 주파수 가변형 공명기 제품의 효과가 더 좋은 것으로 평가되었다.

향후, 본 논문의 결과물과 추가적인 연구를 통하여 주파수 가변형 제품의 설계 최적화 뿐 만 아니라, 타이어 내부온도 변화에도 대응 가능한 온도 가변형 제품으로의 확장 연구를 진행할 계획이다.

## References

- 1) R. O. Rasmussen, R. J. Bernhard, U. Sandberg and E. P. Mun, The Little Book of Quieter Pavements, Report No.FHWA-IF-08-004, 2007.
- 2) H. Yamauchi and Y. Akiyoshi, "Theoretical Analysis of Tire Acoustic Cavity Noise and Proposal of Improvement Technique," JSAE Review, Vol.23, No.1, pp.89-94, 2002.
- 3) HMG Journal Management Team, The Secret to Genesis G80 Quietness, Hollow Sound-absorbing Wheels, <https://www.hyundai.co.kr/story/CONT00000000003396>, 2020.
- 4) Continental, ContiSilent – Less Interior Noise, <https://sa.continental-me.com/en/pages/technology/contisilent>, 2023.
- 5) Joe Clifford, Lexus Says, Quiet Please, <https://mag.lexus.co.uk/lexus-says-quiet-please/>, 2023.
- 6) Honda, Noise-reducing Wheels, <https://global.honda/innovation/technology/automobile/Noise-reducing-wheel-picturebook.html>, 2023.
- 7) C. H. Lee, Development of a Resonator to Reduce Resonance Noise of Wheel & Tire, Ph. D. Dissertation, Ajou University, Gyeonggi, 2020.