Check for updates

Trans. Korean Soc. Noise Vib. Eng., 36(5) : 431~438, 2026
https://doi.org/10.5050/KSNVE.2026.36.5.431

한국소음진동공학회논문집 제 36 권 제 5호, pp. 431~438, 2026
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

타이어 속도 및 사이즈에 따른 공명주파수 분석

Cavity Noise Frequency Analysis According to Tire Size and Velocity

황 성 욱† · 이 충 현* · 조 용 범** · 지 용 휘***
Sungwook Hwang†, Choonghyun Lee*, Yongbum Cho** and Younghwi Ji***

(Received June 23, 2026 ; Revised July 22, 2026 ; Accepted September 9, 2026)

Key Words : Tire Cavity(타이어공명음), Tire Size(타이어 사이즈), Tire Structure(타이어구조), Tire Pattern (타이어패턴)

ABSTRACT

Tire cavity resonance frequency is a type of road noise band that is caused by air resonance noise between the rim and the tire. The internal air resonance noise corresponding to road excitation can be predicted in frequency based on the circumference length; however, recently, predictions can be made depending on tire size and velocity, which can be induced by two resonance frequencies, occurring by forward and reverse rotation of air flow in a complex manner because of rotational components. For this study, tires' sizes were first selected at a fixed speed for indoor NVH testing, and frequency analysis was conducted in vertical and longitudinal directions, to confirm the resonance frequency for each size in specific speed ranges. Doing so also revealed that different frequency characteristics appeared at different speeds, and that the two resonance frequencies showed different patterns both on road surface input and on smooth road driving conditions. Structural factors in the tires' circumferential direction also affect the tire OD, and in combination with the tire's rotational speed, frequency components are dispersed in a proportion related to velocity.

1. 서 론

일반적으로 타이어에 기인하는 대표적인 소음으로는 로드노이즈(road noise)와 패턴노이즈(pattern noise)가 있다. 로드노이즈는 노면 가진에 의한 타이어의 구조 진동과 공명이 현가계를 통해 차실 내로 전달되는 중저주파 대역의 소음이며, 패턴노이즈는 트레드 패턴 형상에 기인하여 공기를 매체로 투과 전달되는 500 Hz 이상의 공기 전달음(air-borne noise)으로 블락 충격, 스틱-슬립, 에어 펌핑, 기주공명 등 복합적인 메커니즘으로 발생한다. 이 연구의 범위는 이 중 중저주파 로드노이즈 대역, 특히 저주파수 대역의 부밍(booming) 노이즈와 중주파수 대역의 타이어 공명음(cavity noise)에 한정한다.

최근 연비 및 핸들링 성능 강화 설계에 따라 로드노이즈 성능 저하 이슈가 증가하고 있다. 로드노이즈는 차량 특성과 노면 거칠기에 민감하고 전달 경로가 복잡하여, 전달경로해석(TPA)을 활용한 기여도 분석과 부싱 강성 최적화 등 전달계 둔감화 연구[2~3], 고

† Corresponding Author ; Member, Member, NEXEN TIRE Corporation, NVH Adviser
E-mail : ukhwang@nexentire.com
* NEXEN TIRE Corporation, Assistant Research Engineer
** NEXEN TIRE Corporation, Senior Research Engineer
*** NEXEN TIRE Corporation, Research Engineer

A part of this paper was presented at the KSNVE 2026 Annual Spring Conference
‡ Recommended by Editor Sang Wook Kang
ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

급 차량의 공명음 저감 연구 등이 진행되어 왔다[1]. 타이어 공명음은 림과 타이어 사이 공기 기둥의 기주 공명에 기인하는 소음으로, 원주 길이에 기반한 공명 주파수 예측과 회전에 따른 공명 주파수 분기 메커니즘이 보고되었으며[4-6], 최근에는 FEM 기반 예측의 모델링 및 해석 비용을 줄이기 위하여 ANN, CNN 등 AI 기법을 활용한 소음 예측 연구가 활발히 진행되고 있다[7].

이 연구의 목적은 타이어 사이즈 및 구조 인자가 로드노이즈에 미치는 영향을 정량화하고, 이를 속도 영역까지 확장하여 타이어-차량 매칭성 검토에 활용할 수 있는 설계 가이드를 제시하는 것이다. 이를 위하여 첫째, 기본 사양을 변경한 타이어를 제작하고 실차 NVH 시험으로 목표 dB값을 생성하여, 구조 인자와 사이즈를 입력 변수로 하는 ANN 학습을 일반적인 중속 60 km/h 구간에서 수행하였다. 구축된 예측 모델은 시제작 이전 단계에서 설계안의 NVH 성능을 예측하고 설계 인자별 민감도를 검토하는 데 활용된다. 둘째, 연비형 타이어에서 중요성이 커지고 있는 고속(주로 80 km/h 부근) 공명음에 대하여 속도 대역별 공명 주파수의 분기 양상을 시험적으로 분석하였다. 고속 공명음은 60 km/h의 일반적인 공명음과 분기 주파수가 달라져 차량 매칭성에 불리하게 작용할 수 있다.

이 연구의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 설계 인자 영향도, ANN 학습 프로세스 및 상관도 검증 결과를 기술하고, 3절에서는 속도와 사이즈에 따른 공명 주파수 변화의 시험 분석 결과를 제시하며, 4절에서 결론을 맺는다.

2. 로드노이즈 예측

2.1 설계 인자 영향도

(1) 설계 인자 영향도

타이어는 사이즈와 구조인자에 따라 중저주파수 대역에서 진동 모달 특성에 따라 영향도가 다르게 나타난다. 사이즈는 사이드부의 높이가 저주파수의 강성에 영향을 미치고 트레드부의 구조 강성은 중주파수에 따라 변하게 된다.

Fig. 1은 타이어 사이즈 치수의 개략도이다. 림부에서 트레드부 끝단까지의 높이인 단면 높이(section height, SH)는 시리즈(series, 단면폭 대비 단면 높이의 비인 편평비)와 연관된 치수 인자로서 전체 구조 강성, 특히 사이드부 강성에 영향을 준다. 트레드 두께(tread gauge)는 타이어 중량에 가장 큰 영향을 주는 치수로 연비 특성과 밀접하며, 얇을수록 연비에는 유리하지만 노면 가진에 대한 민감도가 증가하여 NVH 특성에는 불리할 수 있다.

따라서, SH가 낮을수록 사이드 강성이 강화되어 저주파수 부밍을 포함한 전반적인 NVH 특성이 불리해지는 경향을 보인다.

또한, 비드필러 높이(bead filler height)가 높을수록 사이드 강성이 강화되어 핸들링 성능에는 유리하지만 NVH 특성에는 불리하므로, 타이어 설계 시 두 성능 간의 트레이드오프를 고려할 필요가 있다.

(2) 타이어 제조 및 ANN 예측

AI 분석을 위한 입력 사양과 NVH 목표값을 확보하기 위하여 Table 1과 같이 구조 사양을 변경한 타이어를 제조하였다.

V1은 기본 사양(ref.)이다. V2는 스틸벨트 폭을 8 mm 증대하여 트레드부 강성을 약화하고, V3은 스틸벨트 각도를 4° 높여 원주 방향 강성을 약화하였으며, V4는 반대로 각도를 4° 낮추어 원주 방향 강성을 강화하

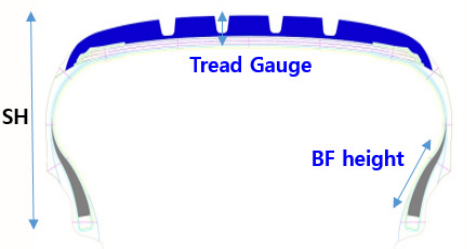


Fig. 1 Tire size

Table 1 Structure of tire

Version	Concept	Structure
V1	Ref.	Base
V2	Tread	Belt width +8 mm
V3	Tread	Belt angle +4 degree
V4	Tread	Belt angle -4 degree
V5	Tread	Cap ply 2 full wrap
V6	Side	Bead filler height +20 mm
V7	Side	Bead compound hardness ↑

였다. V5는 벨트 상부 보강재를 2 full wrap으로 적용한 강성 강화 사양이다. V6과 V7은 사이드부 강성 강화 사양으로, V6은 비드필러 높이를 20 mm 높였고 V7은 이에 더하여 비드 컴파운드 경도를 높였다.

Table 2는 각 사양의 실차 소음 시험 결과로, 실내 전석 기준 V1 대비 음압레벨(sound pressure level, SPL) 변화량을 부밍음과 공명음의 최대값 및 RMS 값으로 나타낸 것이다(타이어 사이즈 245/45R18). 트레드 강성을 약화한 V2, V3은 공명음이 ref. 대비 낮게, 트레드 강성을 강화한 V4는 높게 측정되어 이론적 경향과 일치하였다. 보강재로 트레드 강성을 크게 높인 V5는 공명음이 가장 불리하였으며, 사이드부 강성을 강화한 V6, V7은 저주파수 부밍음이 높게 나타났다.

상기의 이론적 근거와 시험 결과를 바탕으로 Fig. 2와 같은 프로세스로 ANN 학습을 진행하였다. 입력층은 총 12개의 설계 변수로 구성하였다. 입력 변수는 사이즈 인자 3종(림 직경(rim diameter), 시리즈, 단면폭(section width, SW))과 구조 인자 9종(플라이 수, 턴업 높이(turn-up height), 비드필러 높이(bead filler height, BF), 보강벨트(1st steel belt, SB1) 각도와 폭, 비드필러 폭, 캡플라이 사양, 센터 스텝, 게이지(G.D), 흡음폼 적용 여부)이다.

Table 2 Noise test result (SPL)

Version		Vehicle Test [SPL, dB(A)]		
		Boom 20 Hz ~ 150 Hz	Cavity peak 200 Hz ~ 250 Hz	Cavity 200 Hz ~ 250 Hz
V1 (ref.)		60.4	52.2	58.2
V2	Δ	0.9	-2	0
V3		1.6	-3	-0.7
V4		-0.1	2	3
V5		-0.6	5.6	3.4
V6		1.2	0.7	0.8
V7		1.5	0.3	0.9

출력층은 실차 NVH 시험으로 취득한 부밍(20 Hz ~ 150 Hz)과 공명음(200 Hz ~ 250 Hz) 대역의 음압레벨(SPL) 2개 항목이다. 네트워크는 단일 은닉층의 전방향 신경망(feed-forward MLP) 구조로 은닉층은 시그모이드 계열, 출력층은 선형 활성화 함수를 사용하였으며, 입력 변수별 민감도(sensitivity) 분석이 가능하도록 구성하였다. 학습된 모델의 상관도는 Fig. 3과 같이 산출하였다[2].

ANN 학습은 MATLAB 환경에서 수행하였으며, 은닉층은 1개 층에 뉴런 40개로 구성하고 학습 알고리즘은 levenberg-marquardt(LM) 기법을 적용하였다. 학습 데이터는 Table 1의 사양 변경 타이어에 대한 실차 시험 결과(Table 2)를 기반으로 각 구조 인자의 민감도 경향을 반영하여 4개 규격에 대해 구조인자 조합 600 버전으로 보강 및 구축하였으며, 실차 시험으로 취득한 부밍과 공명음의 음압레벨(SPL)을 학습 목표값으로 사용하였다. 전체 데이터는 학습 70 %, 검증 15 %, 테스트 15 %의 비율로 분할하여 활용하였다.

이 학습은 동일 차량과 동일 노면 조건에서 취득한 데이터로 한정하여 트레드부와 사이드부의 강성 민감도별로 데이터를 구축하였다. Fig. 3은 ANN 예측값(가로축)과 실차 시험 결과(세로축)의 상관도로, 부밍

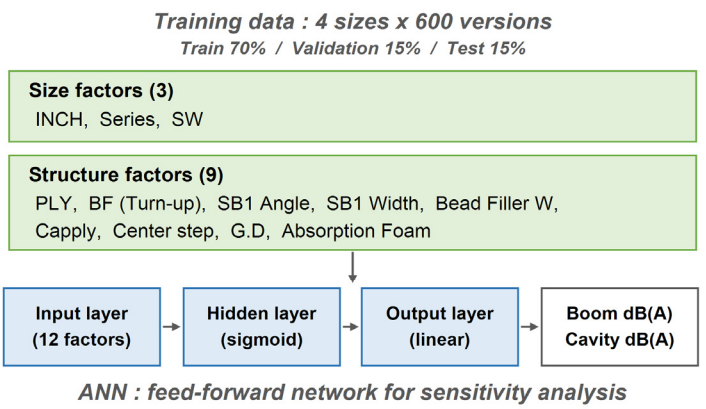
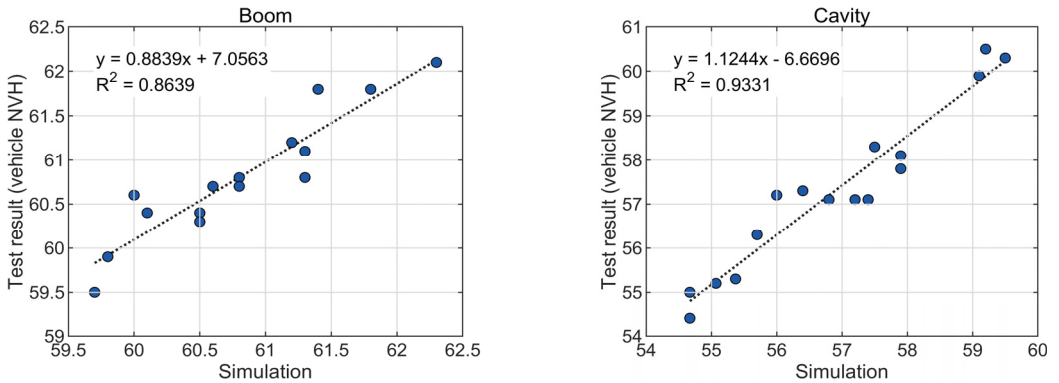


Fig. 2 ANN prediction process



(a) Boom noise correlation (b) Cavity noise correlation

Fig. 3 Correlation of cavity and boom noise

은 회귀 기울기 0.88, 결정계수(R^2) 0.86이고, 공명음은 회귀 기울기 1.12, 결정계수(R^2) 0.93으로 두 항목 모두 높은 상관성을 확보하였다. 두 항목 모두 회귀 기울기가 1에 근접하여 예측 경향이 시험 결과와 정합하며, 이는 개발 초기 설계 방향 설정에 활용될 수 있을 것이다.

구축된 ANN 모델은 신규 설계안에 대하여 시제작 이전에 부밍과 공명음 레벨을 예측하고, 입력 변수별 민감도 분석을 통해 목표 성능 달성에 유효한 설계 인자의 우선순위를 도출하는 데 활용된다. 이를 통해 시제작 및 실차 시험 횟수를 절감하고 개발 초기 단계에서 설계 방향을 신속하게 결정할 수 있다.

이러한 타이어 구조 및 사이즈 인자에 대한 NVH 성능 예측 프로세스를 구축할 수 있었고 초기 타이어 설계 시 설계 방향 설정에 도움이 될 수 있을 것이다. 다만 이 절의 ANN 모델은 60 km/h 정속 조건에서 취득한 음압레벨(SPL)을 목표값으로 학습한 것으로, 속도 변화에 따른 공명 주파수의 이동과 분기 현상은 아직 입력 변수에 포함되어 있지 않다.

이에 3장에서는 최근 저연비 타이어의 차량 매칭성 연구 요구 증대를 고려하여, 2장의 ANN 학습에 사용한 규격 체계와 동일한 타이어를 대상으로 속도를 변수로 추가한 별도의 확장 시험을 수행하였다. 즉 2장이 고정 속도(60 km/h)에서 사이즈·구조인자에 따른 공명음 레벨(dB)을 예측하는 단계라면, 3장은 동일한 공명 현상(200 Hz ~ 250 Hz 대역)에 대하여 속도에 따른 공명 주파수의 변화를 시험적으로 규명하는 단계이며, 공명 최대값 피크 성분에 대한 가이드 확보와 향후 속도 인자를 ANN 입력에 포함하기 위한 물리적 근거 확보에 목적이 있다.

3. 고속 공명음

3.1 속도 대역 별 공명음 영향도

앞 절에서는 60 km/h 정속 주행 조건에서 부밍음과 공명음의 레벨을 예측하였으며, 이는 개발 초기 단계의 설계 방향 설정에 활용할 수 있다. 그러나 세부 성능을 개선하기 위해서는 고속 영역에서 발생하는 이상 소음에 대한 대응이 추가로 요구된다. 이에 이 절에서는 앞 절의 결과를 속도 영역으로 확장하기 위한 별도의 추가 시험을 수행하였다. 대상 규격은 2장의 ANN 학습에 사용한 규격 체계와 동일하며, 분석 대상 주파수 대역(200 Hz ~ 250 Hz)과 공명음의 물리적 발생 기구 역시 2장과 같다. 시험은 실내 주행 시험(55 km/h ~ 45 km/h, 65 km/h ~ 55 km/h, 75 km/h ~ 65 km/h coast up)과 실내 무향실 단품 시험(20 km/h ~ 120 km/h coast down)의 두 가지로 구성하였다. 이를 통해 속도 증가에 따른 공명 주파수의 이동과 분기 양상을 시험적으로 분석하였다. Fig. 4는 타이어 내부 공기 유동에 따른 공명음 발생 메커니즘을 나타낸 것이다. 타이어가 회전하면 내부 공기의 전진파와 후진파의 전파 속도가 달라져 공명 주파수가 2개의 피크 성분으로 분기된다[5,6]. 고속 주행 시에는 노면 가진이 증폭되고 노면 거칠기의 주기성도 가진원으로 작용한다. 회전 속도가 증가할수록 회전 방향 성분의 주파수는 높아지고 반대 방향 성분은 낮아져, 두 피크의

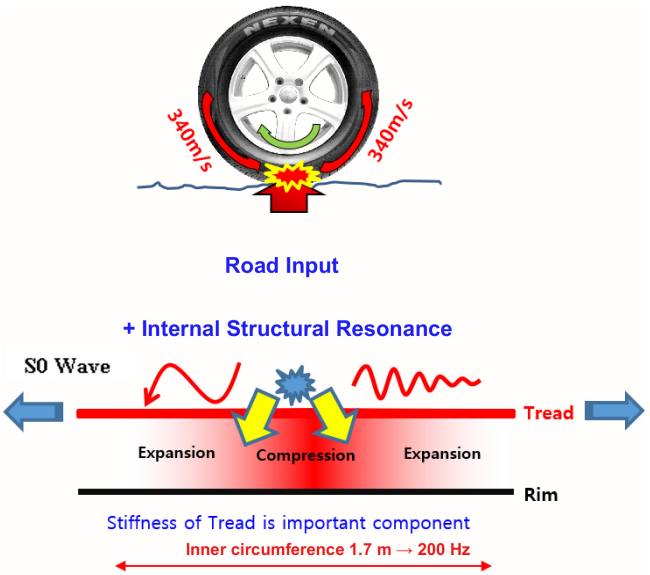


Fig. 4 Cavity noise mechanism

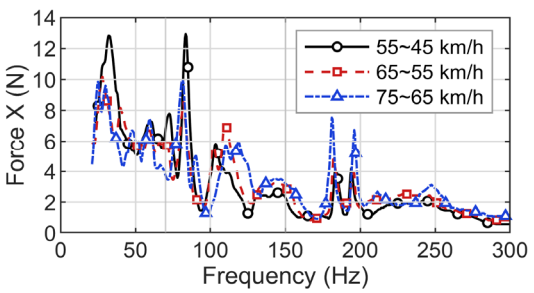


Fig. 5 Force-x (55 km/h ~ 45 km/h, 65 km/h ~ 55 km/h, 75 km/h ~ 65 km/h)

간격은 속도에 비례하여 확대된다.

이러한 이론을 검증하기 위하여 Fig. 5와 같이 세 가지 속도 대역(55 km/h ~ 45 km/h, 65 km/h ~ 55 km/h, 75 km/h ~ 65 km/h)에서 종방향(x) 가진력의 주파수 변화를 측정하였다. 저속(55 km/h) 대역보다 고속(76 km/h) 대역에서 1차와 2차 공명 주파수의 간격이 더 크게 벌어짐을 확인할 수 있으며, 이는 차량의 공명 특성 및 노면 조건에 따라 전반적인 NVH 특성 차이로 이어질 수 있다[3].

이 절의 시험에 사용한 시편은 네 가지이며, 기준 사양인 0 버전과 이를 기준으로 규격 또는 구조를 한 가지씩 변경한 A 버전 ~ C 버전으로 구성하였다. A 버전은 규격을 달리한 사양으로 단면폭과 편평비를 변경하여 외경을 키운 것이고(225/45R17 → 215/50R17), B 버전은 0 버전과 동일 규격에서 비드필러 높이를 5 mm 높여 사이드부 강성을 강화한 사양이며, C 버전은 동일 규격에서 보강벨트 각도를 4° 낮추어 원주 방향의 트레드부 강성을 강화한 사양이다. 즉 A 버전은 규격 영향, B, C 버전은 각각 사이드부와 트레드부의 강성 영향을 확인하기 위한 시편이며, B, C버전의 변경 방향은 2장 Table 1의 V6(비드필러 높이 증대)및 V4(보강벨트 각도 감소)와 동일하다.

Fig. 6은 사이즈가 다른 두 타이어(0 버전: 225/45R17, A 버전: 215/50R17)의 공명 주파수 평가 결과이다. 내부 원주 길이 차이로 인해 사이즈별 공명 주파수가 다르게 나타나며[4], 외경(outer diameter, OD) 633 mm인 0 버전의 공명 주파수는 217 Hz와 233 Hz, OD가 652 mm로 증가한 A 버전은 213 Hz와 229 Hz로 하향됨을 알 수 있다. 이 때, A 버전과 같이 2차 주파수가 낮아지는 경우, 그 주파수가 차량의 음향 공동 공명 대역과 중첩되면 공명음 특성이 불리해질 수 있다.

이는 일반적으로 OD를 키워 공명 주파수를 낮추는 설계 방향이 차량에 따라서는 오히려 공명음에 불리하게 작용할 수 있음을 의미하므로, 속도에 따른 원주 특성과 차량의 공명과 주행 속도 영향을 함께 고려해야 한다. 원주가 짧은 0버전의 경우 두 피크 성분의 크기가 상대적으로 균등하게 분포하여, 특정 피

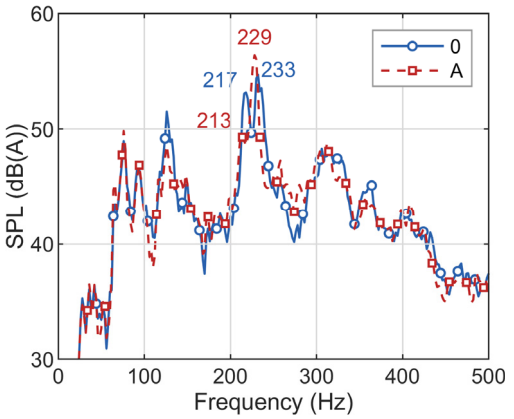


Fig. 6 Size effect on cavity noise

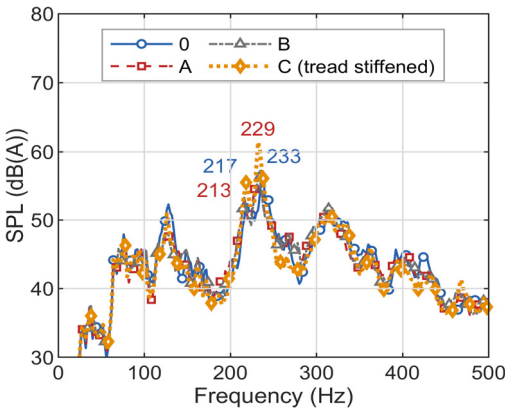


Fig. 7 Stiffness effect on cavity noise

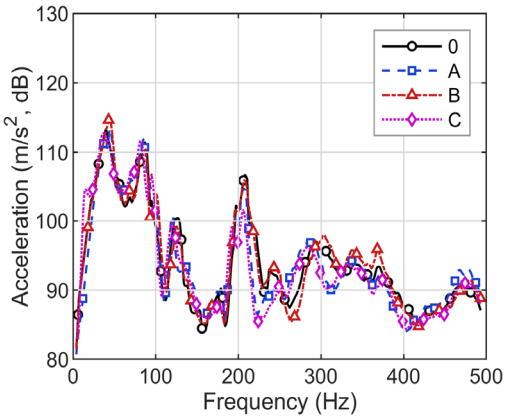


Fig. 8 Velocity effect on cavity noise (60 km/h)

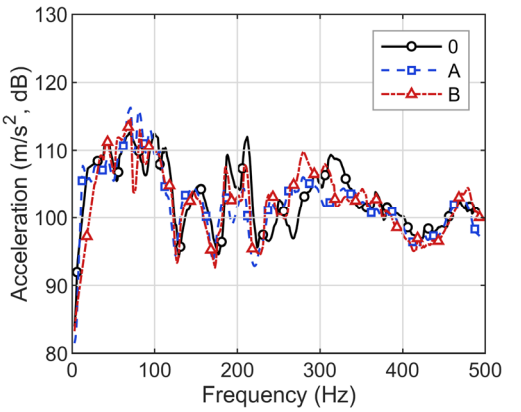


Fig. 9 Velocity effect on cavity noise (80 km/h)

크 성분이 두드러지지 않는 경향을 보였다.

추가로 Fig. 7에서 타이어 강성 강화 버전으로 공명음 변화 양상을 파악한 결과 C 버전에서 공명음 2차 피크 성분이 강하게 변화함을 알 수 있다. 이는 2절에서 트레드부 강성 강화 버전(V4, V5)의 공명음이 불리하게 나타난 경향과 동일한 방향의 결과로, 중속에서 확인된 트레드 강성과 공명음의 관계가 고속 영역에서도 유지됨을 의미한다. 따라서 고속에서도 타이어 개선 방향은 원주 방향의 강성을 약화하는 것이 유효하며, 고속 성분은 노면과 차량 공명 특성을 함께 고려해야 한다.

3.2 속도 대역 별 가속도 영향도

3.1절에서는 실차 주행 시 실내 소음 기준의 공명 주파수 영향도를 확인하였다. 이 절에서는 노면에서 너클부로 유입되는 가속도와 실내 무향실에서의 속도 대역별 coast down 시험을 통하여 가진 측면의 영향도를 상세히 분석한다.

Fig. 8과 Fig. 9는 실차 주행 시 타이어 너클부의 진동을 측정하여 노면 가진력을 확인한 결과로, 동일 사이즈의 구조 사양 버전(0, A, B, C)을 속도 대역별로 비교한 것이다. 너클부 진동은 차체를 거쳐 실내로 유입되어 공명음 가진에 영향을 주는 전달 경로상의 주요 인자이다. 중속 60 km/h 구간(Fig. 8)에서는 공명음 피크 성분이 220 Hz 대역에서 단일하게 나타나는 반면, 고속 80 km/h에서는 223 Hz 부근에서 두 성분으로 분기되어 다른 주파수 양상을 보이며(Fig. 9), 이러한 분기가 구조 버전 차이가 아닌 속도에 의해 지배됨을 알 수 있다. 이러한 속도별 주파수 분포는 차량의 음향 공동 공명 대역과의 중첩 여부를

Table 3 Cavity frequency of size

Velocity	OD [mm]	Rim diameter [mm]	Cavity frequency – 1st [Hz]	Cavity frequency - 2nd [Hz]
60 km/h	578	406.4	235	251
80 km/h	578	406.4	230	256
60 km/h	633	431.8	217	233
80 km/h	633	431.8	215	235
60 km/h	652	431.8	213	229
80 km/h	652	431.8	211	231
60 km/h	718	457.2	197	211
80 km/h	718	457.2	195	213

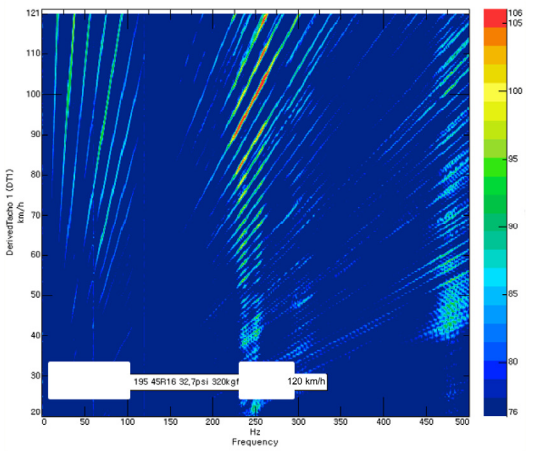


Fig. 10 Colormap of on cavity noise (120 km/h ~ 20 km/h)

사전에 검토하는 데 활용할 수 있으며, 너클부 가진이 공명음 주파수 대역과 연관됨을 보여준다.

고속 주행 시 공명음 피크 성분은 더욱 명확하게 나타나며, 저연비·저중량 타이어에서는 고속 공명음의 영향도가 더 커질 것으로 판단되므로 이에 대한 지속적인 연구와 개선이 필요하다.

상기 시험을 포함하여 사이즈별 시험 결과를 종합하면 Table 3과 같이 타이어 외경과 림 사이즈에 따른 공명음 1차·2차 주파수를 속도별로 정리할 수 있다. 이는 속도에 따른 사이즈별 공명 주파수 피크 성분으로 차량과의 매칭성을 설계 초기에 검토할 수 있는 기초 자료이며, 향후 속도 인자를 포함한 ANN 학습을 통해 속도 영역별 소음 주파수 예측으로 확장할 수 있을 것이다.

Fig. 10은 가속시 진동데이터를 속도에 따라서 확인한 시험 결과이다. OD가 작은 사이즈의 공명음 주파수가 250 Hz 근처에서 분기됨을 확인할 수 있으며, 이는 속도에 따른 공명 주파수 분석의 유효성을 뒷받침한다.

4. 결 론

이 연구에서는 타이어 사이즈 및 구조 인자에 따른 NVH 성능을 ANN으로 예측하는 프로세스를 구축하고, 속도 대역에 따른 타이어 공명 주파수의 변화 양상을 시험적으로 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 사이즈·구조 인자 18개를 입력 변수로 하는 ANN 학습을 통해 부밍은 $R^2 = 0.86$, 공명음은 $R^2 = 0.93$ 수준의 예측 상관도를 확보하였으며, 트레드 강성은 공명음에, 사이드 강성은 부밍 소음에 주로 영향을 미침을 확인하였다.

(2) 타이어 공명음 피크 주파수는 속도와 사이즈에 따라 변화하며, 회전에 의한 두 피크 성분의 분기 간격은 속도에 비례하여 확대된다. 고속에서의 공명 주파수는 노면 가진 및 차량 공명 매칭성에 영향을 주므로 설계 초기 단계의 검토가 필요하다.

(3) 너클부 진동 특성의 속도 대역별 분석 결과는 실차 실내 소음의 주파수 대역과 연관성이 높아, 전달 경로 관점의 영향도 파악에 활용할 수 있다.

(4) 이 연구의 ANN 예측 프로세스와 사이즈·속도별 공명 주파수 데이터(Table 3)는 타이어-차량 매칭성의 사전 검토와 NVH 성능 개선 가이드로 활용될 수 있으며, 향후 속도 인자를 포함한 예측 모델로 확장할 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 현대자동차의 협조로 수행되었으며, 시험 및 데이터 사용을 허락해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

(1) Jung, C. W., Joo. J. K., Kim, H. S. and Park, H., 2019, Reduction of Tire Cavity Noise in Luxury Cars,

Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 29, No. 2, pp. 230~235.

(2) Oh, J. E., Park, S. G., Kang, K. H., Hwang, S. W., Oh, K. S. et al., 2008, Transfer Path Analysis and Interior Noise Estimation of the Road Noise using Multi-dimensional Spectral Analysis Method, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 11, pp. 1206~1212.

(3) Jung, C., Kim, H. S., Oh, H., Hwang, K. H. and Park, H., 2017, Optimization of Bushing Stiffness Using Numerical Approximation Model to Improve Automotive NVH Performance, SAE International, 2017-01-1804, PA, United States.

(4) Sakata, T., Morimura, H. and Ide, H., 1990, Effects of Tire Cavity Resonance on Vehicle Road Noise, Tire Science and Technology, Vol. 18, No. 2, pp. 68~79.

(5) Liu, Y., Liu, X., Shan, Y., Hu, X. and Yi, J., 2021, Research on Mechanism and Evolution Features of Frequency Split Phenomenon of Tire Acoustic Cavity Resonance, Journal of Vibration and Control, Vol. 27, No. 3~4, pp. 343~355.

(6) Hu, X., Liu, X., Shan, Y. and He, T., 2023, Research on Split and Evolution of Acoustic Cavity Resonance Frequency of Rotating Loaded Tire, Journal of Vibration and Control, Vol. 29, No. 1~2, pp. 466~478.

(7) Lee, S. K., Lee, H., Back, J., An, K., Yoon, Y. et al., 2021, Prediction of Tire Pattern Noise in Early Design Stage Based on Convolutional Neural Network, Applied Acoustics, Vol. 172, 107617.