

타이어 소음에 대한 연구 동향

김 병 삼
(한국타이어 중앙연구소)

1. 머리 말

바퀴는 인류역사에 있어 가장 위대한 발명품 가운데 하나로 꼽히고 있다. 미끄럼 마찰을 굴림 마찰로 변화시켜 물체가 이동할 때의 저항을 줄이는 역학적 원리를 이용한 바퀴의 발명은 육상교통과 수송의 급속한 발전을 가져와 인류문명에 크게 기여하였다. 최초의 실용적인 공기압 타이어는 1888년 Dunlop에 의해 발명되었고, 자동차 산업의 발달과 더불어 1895년 Michelin 형제에 의해 자동차용 공기압 타이어가 등장하였다. 두차례의 석유파동을 계기로 자동차회사에서는 자동차의 연료효율을 높이기 위하여 자동차의 중량을 감소시키면서 효율이 높은 엔진 개발에 노력하였고, 타이어 업계에서는 타이어의 회전저항을 감소시키기 위하여 많은 노력을 해왔다. 결국 자동차는 이전보다 진동에 민감해졌고, 진동감쇠력도 떨어지게 되었다. 한편, 자동차 실내소음 및 생활환경에 대한 소음의 규제치가 점점 강화되고 있어 타이어 소음에 대한

연구가 자동차 및 타이어 메이커의 관심사가 되고 있다. 차량의 급속한 증가와 함께 대두되고 있는 문제가 차량의 승차감과 소음이다. 특히 차량의 고급화에 따른 승차감의 개선으로 소음문제는 크게 부각

되고 있다. 차량으로 부터 발생하는 여러 소음원 중에서 타이어로부터 발생하는 소음의 비중이 차량 전체 소음원중에서 점점 증가하고 있다. 그림 1은 노면과 타이어간의 상호작용으로 인해 발생하는 Road

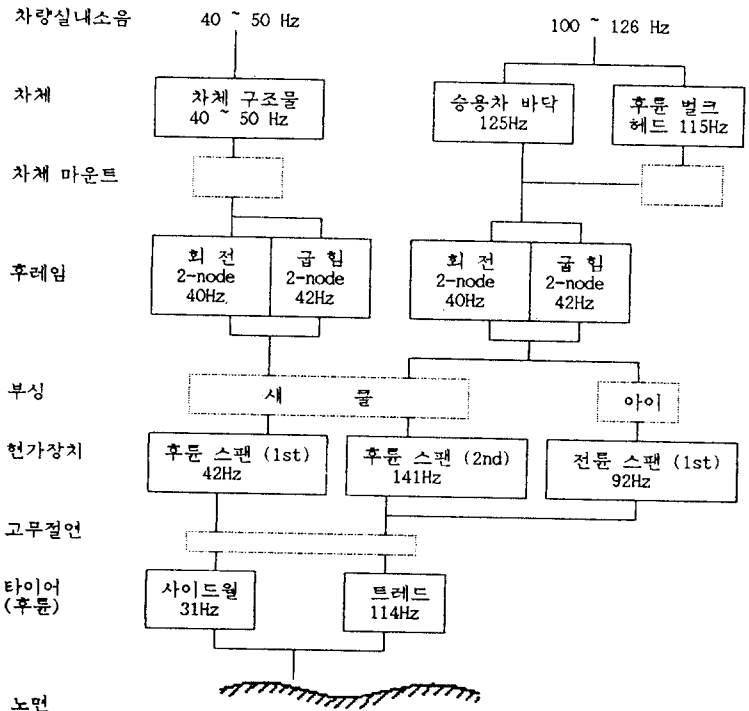


그림 1 노면소음(road noise) 전달 경로

noise의 전달 경로로 타이어는 노면으로부터 가진되는 진동특성을 전달하는 부분으로서 차량의 승차감에 중요한 역할을 하고 있고, 차량 실내소음 특성을 변화 시켜줄 수 있는 중요한 인자로 작용하고 있다.

타이어 소음의 발생요인을 크게 분류해 보면 (1) Aerodynamic, (2) Air puming, (3) Tire vibration으로 나눌 수 있는데 (1) Aerodynamic 과 (2) Air pumping은 타이어 트레드의 형상(pattern)과 관련이 있고 타이어 트레드 형상에 의해 발생하는 소음이라고 하여 pattern noise라고 하며, (3) Tire vibration은 타이어 소음 발생 요인들 중에서 가장 기본적인이고 해결되지 않는 부분으로 노면의 가진에 의해 발생하는 소음이라고 하여 road noise라고 한다. 이 요인들 중 pattern noise는 타이어 트레드 형상의 길이를 변화하여 타이어 pattern noise의 주파수를 변조 시키거나 블럭 강성을 변화시켜 해결하고 있으며 road noise는 타이어의 진동특성을 변화시켜 타이어가 노면으로부터 가진되어질때 차량 실내소음에 미치는 영향을 최소화하여야 하는데 이를 위해서는 타이어의 진동특성을 파악하여야 하고 타이어 진동특성과 소음방사와의 상관관계를 파악하여야 한다. 또한, 이에 따른 소음발생 원리 및 소음발생에 영향을 미치는 인자들에 대해 조사하고 각 인자의 변화에 따라 진동특성과 소음특성이 어떻게 변화하는지에 대해서도 실험적 방법을 통해서 해석되어야 할 것이다.

타이어의 역학적 특징은 자동차의 운동특성을 측정하는 중요한 인자이다. 따라서, 타이어의 역학적 특성에 관한 연구는 자동차의 연구와 같이 1933년경부터 시작되었

다. 특히, 타이어의 진동에 관한 연구는 1965년 Tielking의 공기압 타이어의 평면진동에 관한 연구⁽¹⁾를 시작으로 1966년 Böhm은 Radial tire의 운동방정식⁽²⁾을 유도하였다. 1970년대 초 Potts는 홀로그래피를 이용한 타이어의 진동특성과 전달율을 구하였고⁽³⁾ Richard N. Dodge & Robert는 타이어의 Dynamic stiffness에 관하여⁽⁴⁾, Samuel K. Clark는 하중을 받고 회전하는 타이어에 대해 해석적인 연구⁽⁵⁾를 하였다. Tsuneo Kamitamari & Hideo Skaii는 타이어를 기초강성이 있는 beam, ring, cylindrical shell로 가정하여 해석적인 연구를 하고 있다. 1981년 Keltie는 트럭 타이어의 vibration sound mechanism에 대해 타이어를 무한히 길고 완전하지 않은 circular cylindrical shell로 가정한 모델을 제시⁽¹⁰⁾하였고, Peng등도 보에 하중이 작용할 때의 소음방사에 대해서 연구⁽¹¹⁾하였다. 이외에 Soedel⁽¹²⁾, Walker⁽¹³⁾등도 타이어의 road noise에 대한 많은 연구를 하고 있으며 Eberhardt⁽¹⁴⁾, Reiter⁽¹⁵⁾는 타이어의 진동에 의한 소음 발생 mechanism과 상호관련성에 대해 실험적으로 증명하였다.

2. 타이어의 트레드 패턴과 구조

타이어는 차량의 안전한 운행을 확보하기 위해 기본적인 성능으로 내하중성, 구동제동력의 전달성, 직진선회성, 내마모성, 진동충격에 대한 완충성등이 충분히 발휘할 수 있어야 하는 필수조건과 최근에는 저연비, 경량화, 고속주행시 안정성등 그 사용목적과 용도에 따른 설계가 되고 있다. 타이어 트레드의 패턴과 구조가 타이어 소음에 큰 영향을 미치고 있으므로 트레드 패턴과 구조에 대하여 간단하게 설

명하면,

2.1 트레드 패턴

트레드 패턴(pattern)은 타이어의 제 성능 가운데 제동, 구동력의 증가, 조종안정성의 향상, 타이어 내부발열의 발산등에 영향이 있으므로 사용목적과 용도에 따라 트레드 패턴의 형상이 결정되면 표 1은 기본적인 패턴과 그 특징이다.

2.2 타이어의 구조

타이어의 구조의 종류는 bias와 radial로 대별되며, 그림 2는 radial 타이어의 구조로 타이어를 구성하는 각 부분에 대한 역할은 다음과 같다.

(1) 트레드(tread)

트레드는 카카스와 벨트의 외측을 덮는 고무층이며, 마모, 절상, 충격등에 대하여 강한 고무가 사용되고 있다.

(2) 카카스(carcaass)

타이어의 골조라고 할 수 있는 것으로 세로 각도로 코오드천을 번갈아 겹친 천으로 타이어가 받는 하중, 충격, 공기압을 견디는 역할을 하고 있다.

3. 타이어 소음의 종류와 발생기구

타이어 소음은 200~3(kHz)에 주로 분포되어 있어 인간에 민감하게 작용한다. 자동차에 장착된 타이어가 주행중에 어떤 이유에서 소음을 발생하는가는 주행속도에 의해 발생원의 기여율이 다르기 때문에 단적으로 표현하는 것은 어렵지만 대표적인 것으로는 다음과 같은 것들이 있다.

(1) Air pumping

타이어가 지면과 접지하는 부분인 트레드는 일정한 무늬(pattern)를 갖고 있고, 이 부분이 노

패턴 형상	패턴 특징	기본 패턴 예
Rib형 트레드의 골(Groove)이 원주 방향으로 배열된 패턴	[장점] 1. 구름저항이 적고, 발열이 낮다. 2. 조종안정성이 좋다. 3. 진동이 적고, 승차감이 좋다. 4. 소음이 비교적 적다. [단점] 1. 제동력, 구동력이 결여.	
Lug형 트레드의 골이 원주방향에 대하여 직각으로 배열된 패턴	[장점] 1. 제동력, 구동력이 좋다. 2. 비포장도에 적합. [단점] 1. 구름저항이 크다. 2. 소음이 비교적 크다. 3. 단활동이 일어나기 쉽다.	
Rib-Lug형 Rib와 Lug형을 병행시킨 패턴	[장점] 1. 중앙부에 Rib로 조종안정성을 높인다. 2. 양어깨(Shoulder)부에 Lug로 제동력, 구동력을 준다. [단점] 1. Rib의 골에 균열이 발생한다.	
Block형 독립된 Block으로 구성된 패턴	[장점] 1. 제동력, 구동력이 우수하다. 2. 조종안정성이 우수하다. [단점] 1. 마모가 빠르다. 2. 회전저항이 크다. 3. 연비가 높다.	

표 1 트레드 패턴의 종류와 특징

는 음향파위는 타이어의 재료물성, 패턴의 모양, 노면의 profile 및 지반구조에 의해 결정되며 발생주파수(f_p)는 다음과 같다.

$$f_p = \frac{nv}{\pi r} \quad (2)$$

여기서, n 은 원주방향으로 배열된 pitch의 갯수, v 는 속도, r 은 타이어의 동하중 반경이다. 이 Pitch noise는 일반적으로 차속 60km/h 이상의 고속에서 air pumping과 공명을 일으켜 1(kHz) 부근에서 peak를 일으킨다.

(3) 진동음

자동차가 주행하고 있을 때에는 대개 타이어의 트레드부가 충격적으로 노면에 부딪히게 되고, 이 충격력에 의해 타이어의 측면(sidewall)이 진동하여 음으로 방사되는 진동음(그림. 5)이다. 따라서, 타이어의 회전방향에 대하여 불연

면과 접지할 때, 트레드 groove와 groove 사이의 air volume(그림. 3)이 급격히 외부로 방출하면서 발생하는 압축팽창음으로 약 800~2.5(kHz)의 주파수 분포를 갖는다. 이때, 음향파위(P)와 방출량(q)에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$P = \frac{\rho_0}{4\pi C_0} \left(\frac{\partial q}{\partial t}\right)^2 \quad (1)$$

여기서, ρ_0 는 공기밀도이고, C_0 는 음속이다. 또한 방출량(q)은 차속(U)에 비례하고, air pumping에 의한 음향파위는 차속(U)의 4제곱에 비례한다.

(2) Pitch noise

원주방향으로 배열된 타이어의 패턴 groove들이 노면과 충돌하며 발생하는 충격음으로 이때, 발생하

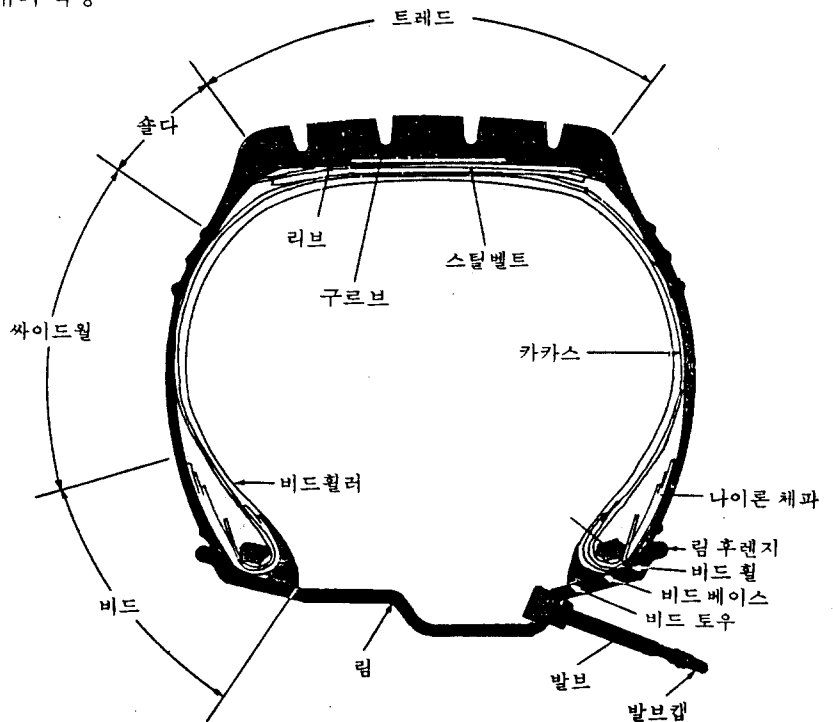


그림 2 레이얼 타이어 구조

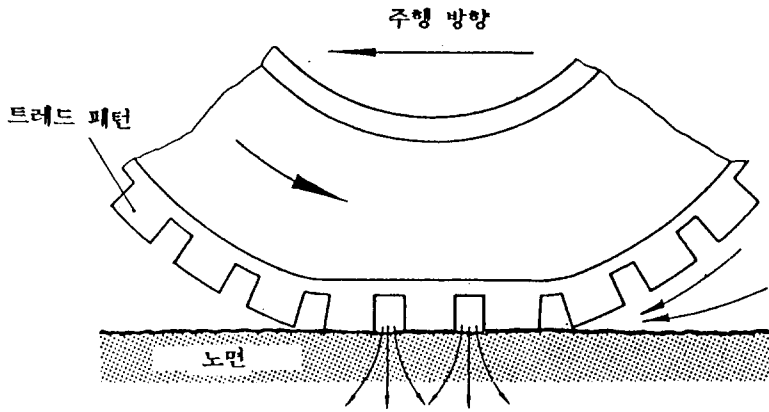


그림 3 공기 펌핑(air pumping)현상

속의 groove가 있으면 기주공명음은 크게되고, 노면의凹凸이 크게 되면 진동음이 크게 된다.

4. 타이어 소음에 대한 대책

4.1 Pitch Variation

타이어 소음의 대책으로 많은 연구가 있지만 pattern noise에 대해서는 본질적으로 트레드의 형상에 의해 거의 결정 되어지기 때문에 문제가 많다. 현재 고속주행하는 승용차, 상용차용 타이어에서는 pitch variation법이 대책으로 채택되고 있다. Pitch variation법은 pattern을 구성하는 최소단위인 pitch의 길이를 2개 이상의 크기로 나누고 적당히 타이어 원주상에 배열하는 것이다. 이 배열에 의해 일정한 pitch로 배열하였을 때 발생하는 하나의 큰 peak를 여러개의 peak로 분산시킬 수 있다. 패턴의 1 pitch의 groove로부터 배출되어 압력을 단위 pulse $\delta(t)$ 라 하고, 각 pitch마다 부분 적분을 하면 주파수와 상대진폭의 계산을 간단히 할 수 있다.

4.2 Stiffness Variation

트레드 패턴의 모양에 따른 힘 함수를 계산한 것으로 트레드의 패

턴을 $N \times N$ 인 요소들로 나누고, 트레드 패턴이 만들어내는 소음은 각 요소들이 노면과 닿을 때 그 요소들이 노면으로부터 받는 충격들의 합으로 나타낼 수 있으므로, 단위요소를 $P(i)$ 로 나타내고 타이어/노면 상호작용을 고려하여 1 pitch에 대한 가진력을 구한 후 타이어가 1회전할 때의 가진파형으로부터 주파수와 상대진폭을 계산할 수 있다.

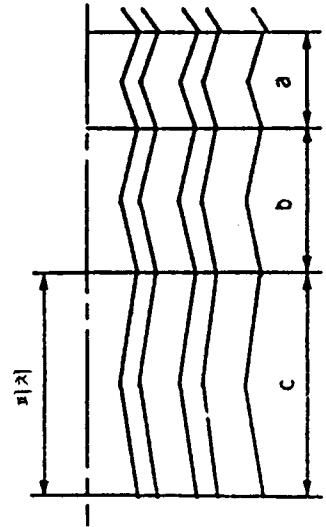
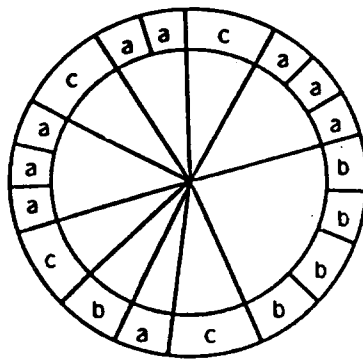


그림 4 타이어 pitch 배열

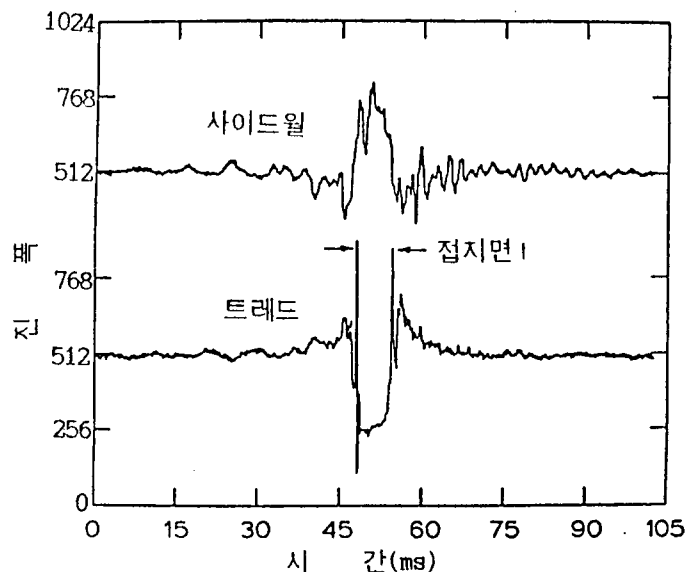


그림 5 타이어 회전시 트레드와 사이드월의 가속도

5. 현재의 기술 및 문제점

1980년대 이후 각국의 타이어업체를 중심으로 타이어 소음저감을 위해 많은 연구가 이루어져 타이어 소음에 영향을 미치는 설계인자가 거의 밝혀졌고, 승용차용 타이어는 어느정도 수준에 도달한 것으로 본다. 그러나, 고무가 갖는 비선형성, 다자유도 특성등으로 인하여 정확한 이론적 계산이 어렵기 때문에 정확한 측정을 통한 경험측적이 매우 중요하다. 최근에는 인텐시티 기법이나 레이저 홀로그래피, 라디오 텔레메트리등 비접촉 측정을 많이 이용하고 있으나, 타이어가 환경에 직접 노출되어 ANC나 차음 기술의 적용이 어렵고 단지 방사에너지를 원천적으로 줄여야 하며, 타이어가 주행하는 도로의 형상 및 지반구조에 따라 소음특성이 변하기 때문에 측정 및 분석이 용이한 실내 드럼 테스트 결과를 직접 적용할 수 없으며, 회전중인 타이어 주위에 생기는 바람의 영향으로 근접 측정이 곤란하고, 소음저감을 위하여 조종안정성등 타이어의 기본 요구성능을 저하시켜서는 않되므로 설계인자 변경에 제약을 받는 등의 어려움을 지니고 있다.

6. 맺음말

도로소음의 주 원인중 하나인 차량의 소음문제가 크게 대두되고 있다. 특히, 차량전체의 소음중에서 타이어 소음이 차지하는 비율이 점점 증가하고 있는 실정을 고려해 볼 때, 앞으로 타이어 소음이 문제시 될 것으로 예상되어진다. 특히, 승차감을 향상시키는 차원을 넘어서 환경공해 측면에서 다루어져야

하고, 차외소음을 줄일 수 있는 방사에너지 감소를 위한 연구가 활발히 진행 되어야 할 것으로 사료되어진다.

참고 문헌

- (1) Tielking, J. T., 1965, "Plane Vibration Characteristics of a Pneumatic Tire Model", SAE Paper 650492, Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pa.
- (2) Böhm, F., 1967, "Zur Statik und Dynamik Des Gurtelreifens", ATZ 69.
- (3) G. R. Potts, C. A. Bell, L. T. Charek, T. K. Roy, 1977, "Tire Vibration", Tire Science and Technology, Vol. 5, No. 4, pp.202~225.
- (4) Richard N. Dodge, Robert, "The Dynamic Stiffness of A Pneumatic Tire Model".
- (5) Samuel K. Clark, 1965, "The Rolling Tire Under Load", Paper Presented at SAE Mid-Year Meeting, Chicago.
- (6) T. Kamitamari, H. Skaii, 1985, "A Study on Radial Tire Vibration", SAE 852195.
- (7) M. Takyama, K. Yamagishi, 1984, "Simulation Model of Tire Vibration", Tire Science and Technology, Vol. 11, Nos. 1~4, January~December, pp.38~49.
- (8) Hayden, R. E., 1971, "Roadside Noise from the Interaction of a Rolling Tire with the Road Surface", Proceedings of the Purdue Noise Control Conference.
- (9) Willett, P.R., 1975, "Tire

Tread Pattern Sound Generation", Tire Science and Technology, TSTCA Vol. 3, No. 4, pp.252~266.

(10) Richard F. Keltie, "Analytical Model of the Truck Tire Vibration Sound Mechanism", Center for Sound and Vibration, Mechanical and Aerospace Engineering Department, North Carolina State University, P.O. Box 5801, Raleigh, North Carolina 27650.

(11) R. F. Keltie, H. Peng, 1985, "On the Acoustic Power Radiated by Line Forces on Elastic Beams", Journal of Acoustical Society of America, Vol. 77, No. 6, pp.2033~2037.

(12) L. E. Kung. W. Soedel, T. Y. Yang, 1986, "On the Dynamic Response at the Wheel Axle of a Pneumatic Tire", Journal of Sound and Vibration, Vol. 107, No. 2, pp.195~213.

(13) J. K. Walker, 1981, "Noise Generated at the Tire-Road Interface", Aston University, Birmingham.

(14) A. C. Eberhardt, 1977, "The Truck Tire Vibration Sound Mechanism", North Carolina State University at Raleigh, Ph. D.

(15) W. F. Reiter, 1973, "Investigation of Vibration in Truck Noise Generation", North Carolina State University at Raleigh, Ph. D.

(16) 酒井秀男, タイヤ工学—入門から應用まで—, グラソプリ出版.