

## 1. 머리말

최초의 실용적 공기압 타이어는 1888년 Dunlop에 의해 발명되었고, 자동차 산업의 발전과 더불어 1895년 Michelin 형제에 의하여 자동차용 공기압 타이어가 등장하였다. 자동차 회사에서는 자동차의 연료효율을 높이기 위하여 효율이 높은 엔진의 개발과 더불어 자동차의 중량 저감에 노력하고 있다. 따라서 자동차는 이전 보다 NVH에 점점 민감해지고 있으며 한편으로는 자동차 실내소음 및 생활환경에 대한 소음의 규제치가 점점 강화되고 있어 타이어 소음에 대한 연구가 자동차 및 타이어 업체의 주요 관심사가 되고 있다. 특히 차량의 급속한 증가와 더불어 대두 되고 있는 것이 차량의 승차감과 소음이다. 특히 차량의 고급화에 따른 승차감의 개선으로 소음문제는 크게 부각되고 있다. 차량으로부터 발생하는 여러 소음원 중에서 타이어로부터 발생하는 소음의 비중이 점점 증가하고 있다. 따라서 이러한 타이어 소음에 대한 전반적인 내용과 연구 기술 및 대책 그리고 문제점에 대하여 소개하고 한다.

## 2. 타이어 소음의 종류

타이어 소음의 발생원인을 크게 분류하면 (1) aerodynamic, (2) air pumping, (3) tire vibration으로 나눌 수 있는데 aerodynamic과 air pumping은 타이어 트레드의 형상과 관련이 있으며(pattern noise), tire vibration은 타이어 소음 발생 요인들 중에서 가장 기본적이고 해결

되지 않는 부분으로 노면과 타이어의 상호 작용에 따른 가진에 의하여 발생하는 소음(road noise)이다. 타이어 소음은 타이어가 노면 위를 주행할 때 tread pattern, structure, 노면 등에 의해 발생하는 소음으로 측정위치나 발생원에 따라 (1) pattern noise, (2) road noise, (3) pass-by noise, (4) 이상소음으로 분류할 수 있다. Pattern noise는 타이어 트레드의 형상과 관련되며 차량 외부에서 측정되는 소음으로 차량의 영향이 배제된 타이어와 노면에 의하여 발생하는 소음을 말한다. 따라서 pattern noise는 타이어가 취부된 차량을 이용하는 것이 아니고 별도의 loading device를 이용하여 측정된다. Pattern noise는 타이어를 개발하는 단계에서의 몇 종의 트라이얼 타이어간의 비교 우위 분석이나 소음을 개선하기 위한 타이어 설계 방법 등을 제시하기 위한 연구 활동 등에 주로 활용되고 있다.

Road noise는 타이어 소음 발생 요인들 중에서 가장 기본적이고 해결되지 않는 부분으로 노면과 타이어의 상호 작용에 따른 가진에 의하여 발생하는 소음이다. road noise는 차량 내부에서 측정되며 실제 타이어/노면에 의해 발생하는 소음이 차체 및 차량의 하부구조를 지나 운전자에게 전달되는 소음이므로 동일한 타이어일지라도 취부되는 차량이 다르면 발생하는 소음이 달라질 수 있다. 따라서 road noise는 실제 자동차가 도로 위를 주행할 때 운전자에 의해 감지되는 소음이므로 품질문제와 직접적인 연관성을 가지게 된다.

Road noise와는 달리, 운전자의 입장이 아닌 도로 주변 거주자나 보행자의 입장에서 바라본 차량주행소음으

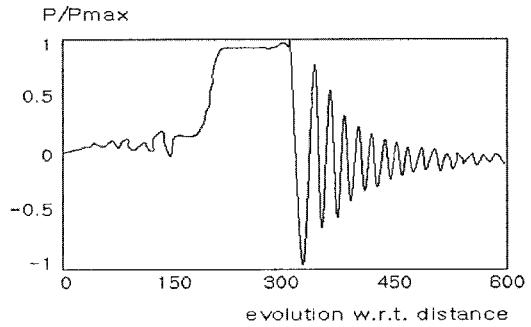
로 pass-by noise가 있으며 차량의 엔진/배기 소음 등이 모두 포함된 차량주행 소음을 말하는 일반적인 개념이 아닌, 타이어에 의해 발생하는 소음만을 pass-by noise로 한정시킨다. 이는 차량의 증가에 따라 차량주행소음이 환경문제로 대두되자 선진국을 중심으로 pass-by noise 측정방법 및 규제법이 마련됨으로써 road noise나 pattern noise와는 다른 한 분야로 자리잡게 되었다. 현재 pass-by noise 측정법(ISO 362)은 타이어 소음에 대한 규제가 아닌 차량 엔진/ 배기 소음 등이 포함된 차량주행 소음에 대한 규제이므로 타이어 제조업체와는 직접적으로 관련을 가지고 있지는 않다. 하지만 차량제조업체의 입장에서 볼 때 규제치를 만족하기 위해 차량 엔진/ 배기소음을 감소시키는 것보다는 타이어 소음을 줄이는 것이 경제적인 측면에서 훨씬 이득을 가질 수 있으므로 타이어 제조업체에 강력한 요구를 해오고 있다. 또한 유럽 등에서는 타이어 소음만을 별도로 규제하는 방안을 마련할 움직임을 보이고 있다. 따라서 타이어 업체에서는 이에 대처하기 위해 pass-by noise 측정시 타이어 소음이 차지하는 비중의 파악등 여러 각도에서 연구 활동을 진행시키고 있다. 이러한 타이어 소음은 크기와 주파수 특성이 조금씩은 다를지라도 모든 타이어에서 발생하는 불가피한 소음이다. 그러나 특수한 pattern이나 제조 불량또는 특별한 노면에서 상기 현상과는 다른 특이 소음이 발생하는 경우가 있는데 이를 이상소음으로 분류한다. 이러한 이상소음은 현상 파악이 쉽지 않으나 일단 현상파악이 명확히 이루어지면 원인 분석이 용이하여 비교적 쉽게 해결된다.

### 3. 타이어 소음 발생 기구

타이어 소음은 200~3(kHz)에 주로 분포되어 있어 인간에 민감하게 작용한다. 자동차에 장착된 타이어가 주행중에 어떤 원인으로 소음이 발생하는가는 주행속도에 의한 발생원의 기여율이 다르기 때문에 단적으로 표현하기는 어려우나 다음과 같이 분류할 수 있다.

#### (1) Air-pumping

Air pumping은 콜라병을 따거나 풍선이 터질 때 발생하는 것으로 갑작스럽게 공기가 외부로 방출 혹은 유입되는 현상으로 타이어가 일정한 무늬를 가지고 지면과



phase 1 : a rapid pressure increase  
 phase 2 : a rather stable (high) level with small oscillations ( the plateau phase )  
 Phase 3 : a damped oscillation

그림 1 Air-pumping 현상

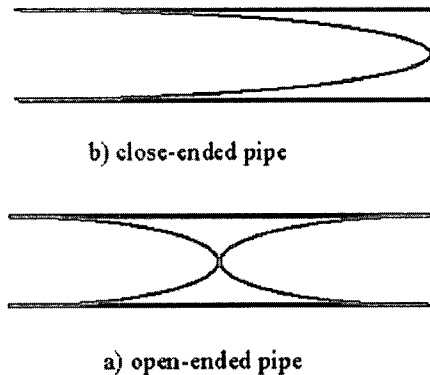


그림 2 서로 다른 형상에 따른 관의 공명현상

접지하는 트레드부가 지면과 접지할 때, 트레드 그루브와 그루브 사이의 에어 볼륨이 급격히 외부로 방출하면서 발생하는 압축 팽창음으로 약 800~2.5(kHz)의 주파수 분포를 갖는다. Hamet등은 road surface에 급속으로 만들어진 실린더를 삽입하고 실린더의 끝에서 음압의 변화를 측정, 공간영역(cavity)에 의해 발생하는 air-pumping 현상을 관측하였고 그림 1과 같이 3가지 phase를 가지고 있음을 알아내었다<sup>(4)</sup>.

#### (2) Pipe Resonance

Pipe resonance는 그림 2와 같이 한쪽 끝이 닫히거나 열린 파이프에 램덤한 음이 입사하면 파의 간섭원리에 의해 파이프 내에서는 특정 주파수 성분만이 형성되는 공명현상으로 콜라병에 입을 대고 볼 때 부웅하고 소리가 나는 것이 바로 이러한 공명현상 때문이다. 이때 공명

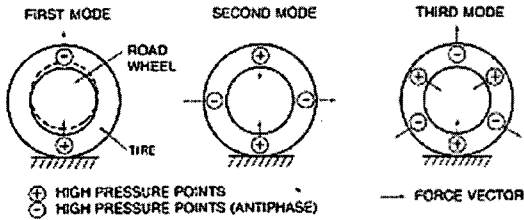


그림 3 공동의 고유 진동수에 따른 모드형상

주파수는 파이프의 길이와 밀접한 관계를 갖고 있고 파이프의 끝 모양에 따라서도 조금씩 변한다. 타이어에 있어서는 노면과 트레드 그루브사이에서 발생하는 빈 공간들이 이와 같은 파이프를 구성하므로 파이프길이에 따라 특정 주파수 대역에서 공명현상을 나타내게 된다. 이는 타이어의 속도가 증가함에 따라 소음도 일정하게 증가하지 않고 특정 속도대역, 즉 블럭 임팩트 주파수와 파이프 공명 주파수가 일치하게 되는 속도에 이르면 급격하게 소음이 증가하는 공명현상의 한 원인이 된다.

### (3) Cavity Resonance

Cavity resonance는 폐쇄된 공간영역(cavity)내에서 특정한 주파수의 음파가 형성되는 것으로 타이어의 경우 Rim과 결합된 타이어 내부의 공간이나 노면과 타이어에 의해 형성되는 공간 등이 이와 같은 공간영역을 형성하고 resonance 현상을 보이고 있다. 그림 3은 Rim과 타이어에 의해 형성되는 공간영역 내부에서 형성되는 resonance frequency 및 mode shape를 보여주고 있다<sup>2)</sup>. resonance frequency는 타이어의 원주, 즉 타이어의 반지름과 관련을 가진다, 예를 들어 P195/70R14 타이어와 5.5J × 14 wheel이 서로 결합될 때 타이어 반지름  $r$ 은 대략 23 cm 정도이므로 resonance frequency는 약 235 Hz이다. 따라서 대부분의 승용차용 타이어의 cavity resonance는 200~300 Hz 내에서 발생한다.

### (4) Block Impact

Block impact음은 air-pumping과 더불어 타이어 소음을 야기하는 가장 큰 원인 중의 하나로 타이어가 회전할 때 rubber block이 지면을 때리는 front edge부위에서 발생한다. 이때 임팩트음의 크기 및 방향성은 다음과 같이 여러 인자들이 복합적으로 작용하여 결정된다. 단순한 예로 slot(lateral groove)만 가지는 smooth 타이어

leading edge부위에서의 각 slot angle에 따른 발생소음은 slot angle이 footprint의 front shape과 일치하는 특정 부근에서 가장 높은 소음이 발생하게 된다.

### (5) Stick-slip

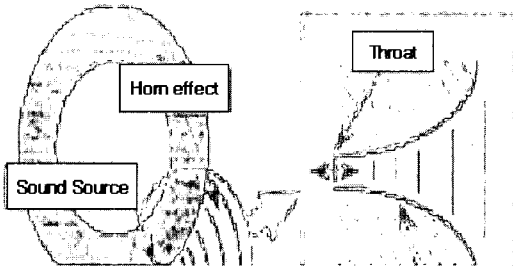
타이어는 도로면과의 상호작용에 의하여 마찰현상이 발생하며 마찰력이 최대로 되는 속도보다 작은 경우의 미끄럼 속도를 저속미끄럼, 클 경우를 고속 미끄럼이라고 한다. 그리고 고속 미끄럼과 저속 미끄럼이 서로 교대로 나타나는 현상을 stick-slip이라고 한다. 고무블럭을 최대마찰속도보다 작은 속도로 잡아당기는 경우, 횡력은 변위에 따라 선형적으로 증가한다. 그러나 변위가 커지면 노면과의 접점부의 미끄럼 속도가 증가하여 횡력은 미끄럼 마찰력에 근사하게 된다. 최대마찰속도보다 큰 속도로 잡아당긴 경우 위와 같이 직선적으로 증가하다가 최대미끄럼속도가 되면 급격히 고속 미끄럼이 생겨 마찰력이 감소하게 된다. 이때 고무의 댐핑이 크고 마찰의 속도에 대한 변화가 완만하면 횡력은 미끄럼 마찰력에 완만하게 근사하나 고무의 댐핑이 작고 마찰의 속도에 대한 변화가 급격한 발생하는 경우에는 stick-slip이 일어나 톱턱 거리며 미끄러지게 된다. 이와 같은 stick-slip현상은 소음의 경우 이상 소음의 한 원인이 된다.

### (6) Restoring

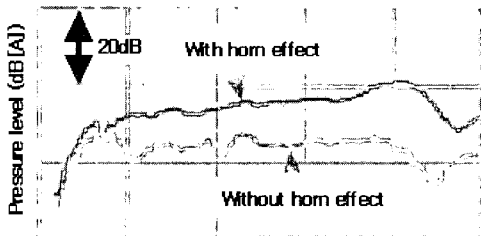
Tread block은 contact patch를 지난 이후에 하중 및 tread block과 노면과의 마찰로 인해 변형된 형태를 다시 복원하게 된다. 이를 restoring이라고 하며 복원력의 방향에 따라 radial, tangential, axial로 나누어진다. 특히 타이어의 회전 방향인 tangential 방향의 블럭 움직임은 매우 고주파 특성을 나타내며 타이어 소음과 밀접한 관련을 가지고 있는 것으로 알려져 있다<sup>4)</sup>.

### (7) Body Vibration Noise

타이어가 회전할 때 cacass나 sidewall 움직임과 같은 타이어 바디의 진동은 가진력에 따라 bending-restoring과 tread block에 의한 진동으로 나눌 수 있다. Bending-restoring은 하중에 의하여 contact patch에서 tread부가 굽혀졌다가 벗어날 때 퍼지는 과정을 말하는 것으로 패턴을 지니지 않은 스무스 타이어의 경우에도 나타난다.



(a) 접지면 형성



(b) 주파수 특성

그림 4 혼(horn) 효과

이 진동에 의한 타이어 소음은 매우 작은 크기이기 때문에 거의 대부분 무시할 수 있다.

#### (8) Horn Effect

혼 효과(horn effect)란 나팔모양의 끝단이 소음원에 부착되어졌을 때 음의 전파가 훨씬 효과적으로 이루어지는 것을 말하는데 산에 올라가 메아리를 만들 때 두 손을 입에 대고 외치거나 일부 악기들의 끝단이 나팔모양으로 되어 있는 것은 이와 같은 효과를 얻고자 하는 것이다.

K.Iwao 등은 타이어의 경우 그림 4(a)와 같이 타이어가 지면과 이루는 모양이 마치 나팔처럼 생겨 혼 효과가 나타남을 밝혔다<sup>6)</sup>. 그림 4(b)는 혼 효과가 있을 경우와 없을 경우에 대하여 음의 전파 특성을 살펴본 것으로 400 Hz 이상의 영역에서 약 10 dB 이상의 차이가 남을 알 수 있다.

### 4. 타이어 소음 연구 기술

#### (1) Sound Quality

소음 평가 방법은 주관적 평가와 객관적 평가로 나눌 수 있으며, 소음 품질에 대한 최종적인 평가는 소비자

의 주관적(subjective) 관점에서 절대적으로 결정되게 된다. 그러나 이러한 주관적 평가는 평가 기준이 모호하고 평가자의 자질과 상태에 따라 그 평가 결과가 크게 달라질 수 있다. 또한 평가자에 따라 평가 결과의 표현이 달라질 수 있어, 문제점 개선에 대한 정확한 정보를 얻기 곤란한 점 등 품질 평가 차원에서 한계가 있다. 이에 반하여 객관적(objective) 평가는 소음의 측정 및 분석을 수행함으로써 문제점 파악이 정량적으로 가능하며, 개선 효과 파악도 용이하다. 그러나 이 경우 인간의 청감 특성이 고려되지 않으면, 음질에 대한 절대적 평가가 어려워 시장에서 많은 문제 가능성을 절대적으로 판단할 수는 없다. 이러한 측면에서 객관적 측정 결과를 주관적 평가와 연결할 수 있는 분석 파라미터가 요구되어 최근 자동차를 비롯한 많은 NVH 관련 분야에서 음질(sound quality)에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

#### (2) Holography

음향 홀로그래피란 소음원에 인접한 어떤 2차원 평면의 음압을 측정 후 이에 소음원면으로의 전달함수를 곱하여 임의의 점에서의 음압을 예측하는 기법으로 단순 음압뿐만 아니라 음향 세기, 음향 파워, 입자 속도 등과 같은 물리량 등을 구할 수 있다. 따라서 소음원의 위치 및 전파 특성들을 유추해낼 수 있어 소음 특성 연구에 매우 유용하게 활용되는 기법중 하나이다.


위에서 기술된 음향 홀로그래피를 실제 측정으로 구현하는 방법은 소음원의 특성 혹은 측정 장치 등에 따라 여러 갈래로 분류될 수 있다. 대표적인 측정 방법 중의 하나가 STSF (spatial fourier transform)로 측정 음압의 동시성 문제를 극복하기 위해 소음원 부근에 기준 마이크로폰을 설치하고 측정 마이크로폰에 의해 얻어진 음압과의 cross spectrum을 이용하여 시간에 따른 음장 대신 평균적인 음장을 구하는 방법이다. 따라서 STSF는 시간에 따라 변화하지 않는 정상 상태의 소음만을, 그리고 공간적으로 정지하고 있는 소음원에 대해서만 적용할 수 있다. 따라서 이러한 단점을 보완하여 다중 마이크로폰 시스템을 이용한 음향 홀로그래피 방법론에 가장 충실한 측정법을 선보였다. 즉 다수의 마이크로폰들을 이용하여 2차원 측정면의 음압을 동시에 측정하는 것이다. 이 방법은 STSF에서는 불가능하였던 시간에 따라 변화하는 소음을 측정할 수 있기 때문에

TDH(time domain A/H)라고 명명되었다.

STSF로 적용할 수 없는 이동 소음원에 대해 음향 홀로그래피 분석을 실시하기 위해서 도플러 효과를 이용한 이동프레임 음향홀로그래피 측정법이 있다. 이 방법은 STSF와 달리 정지하고 있는 일렬의 마이크로폰들 측면으로 소음원이 지나갈 때 발생하는 소음을 측정한다. 특히 이러한 방법은 유럽을 중심으로 점점 강화되고 있는 자동차/타이어의 주행 소음을 연구하는데 유용할 것으로 여겨진다. 이와 같은 음장 가시화 방법은 속도에 따른 타이어 소음원의 변화를 예측하거나, 설계 인자에 따른 타이어 소음원의 변화, 또는 감속시의 타이어 소음원의 변화를 연구하기 위하여 활용되고 있다.

## 5. 타이어 소음에 대한 대책 및 문제점

차량의 경량화와 타이어의 inch-up 등에 따라 환경 소음 관점과 더욱 정숙하고 승차감이 좋은 차량의 개발 관점에서 지속적인 타이어의 소음성능을 향상시키기 위한 기술 개발에 대한 요구가 증가하고 있으며, 타이어 업계에서는 상기에 언급된 분석 방법 외에 여러 가지 NVH 측정 및 분석법을 통하여 타이어 단품과 타이어/차량에서 차량의 일부분으로서 타이어의 특성 파악 등에 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그리고 해석을 통한 타이어의 NVH 성능을 예측하고 효율적인 타이어 설계를 위한 방법들이 연구되고 있으며 현장에서 활용되고 있다. 그러나 이러한 노력에도 불구하고 현재의 타이어 기술로는 NVH 성능을 향상 시키는 데

는 한계가 있다. 즉 소음을 개선할 때, 부득이하게 다른 중요한 타이어의 성능이 악화된다는 것이다. 예를 들어 트래드 compound의 hardness는 타이어 소음 저감에 매우 효과적인 인자이나 연구 결과에 의하면 compound의 변화로만 pass by noise level을 1 dB 개선 할 경우, dry braking 성능은 1 m가량 떨어지는 경향을 보인다. 즉 성능의 상호 trade off가 발생하며, 이것은 타이어 업계의 해결해야 할 숙제로 남아 있다. 

## 참고문헌

- (1) Hamet, J., Deffayet, C., and Pallas, M., 1990, "Air-Pumping Phenomena in Road Cavities", Int. Tire/Road Noise Con., INTROCON 90, pp19-29.
- (2) Sakata, T. M., Motimura (Nissan), H., and Ide (Toyo), H., "Effects of Cavity Resonance on Vehicle Noise, 1990, "Tire Science and Technology, TSTCA, Vol. 18, No. 2, April-June, pp.68-79.
- (3) Scavuzzo, S. W., Charek, L. T., Sady (GY), P. M., and Shteinhauz, G. D., "Influence of Wheel Resonance on Tire Acoustic Cavity Noise," SAE 94533.
- (4) 酒井秀男, Tire 공학.
- (5) Jennewein, M. and Bergmann, M., 1984, "Investigations Concerning Tyre/road Noise Sources and Possibilities of Noise Reduction", IMechE, C150/84, pp.235-245.
- (6) Iwao, K. and Yamazaki(Nissan), I., "A Study on the Mechanism of Tire/road Noise", JSAE 9630246.