

자동차 타이어 패턴소음 예측에 관한 연구

김병삼*

(논문접수일 2005. 8. 2, 심사완료일 2005. 9. 26)

A Study on the Pattern Noise Prediction of Automobile Tire

Byoung-Sam Kim*

Abstract

Tire manufactures have dealt with noise problem by varying the pitch of the tread. The various formulas for the variations are generally determined differently, however. Often these variations are based on a combination of trial and error, intuition, and economics. Some manufactures have models and analogs to test tread patterns and their variations. These efforts, however practical, do not determine the best variation beforehand or guarantee the best results. For this reason it was felt that a general mathematical approach for determining the best variation was needed. Moreover, the method should be completely general, easy to use, and sufficiently accurate. This paper discusses a mathematical method called Mechanical Frequency Modulation(MFM) which meets the above requirements. Thus, MFM pertains to computing an irregular time sequence of events so that the resulting excitation spectrum is shaped to a preferred form. The first part of this paper treats the theoretical basis for computing an optimum variation ; the second part discusses experimental results and simulation program which corroborate the theory.

Key Words : Frequency Modulation(주파수변조), Groove(그루브), Lug(러그), Pattern Noise(패턴소음), Rib(리브), Sound Pressure level(음압레벨), Tread(트레드)

1. 서론

자동차 기술의 발달과 환경공해에 대한 관심의 증가로 자동차 엔진 및 공기역학적인 소음의 획기적인 감소가 이루어졌으며 이에 따라 자동차 타이어 소음은 그 중요성이 더욱

증가되고 있다. 이러한 측면에서 타이어 소음의 가장 큰 비중을 차지하고 있는 패턴소음은 타이어 제조업체의 중요 연구 과제가 되고 있다. 그러나 국내의 경우 이에 대한 연구는 초기 단계로써 실제 타이어에 적용하기에는 미흡한 실정이다. 자동차 타이어 패턴소음에 대한 종래의 연구를 살펴 보

* 순천제일대학 자동차기계과 (anvkbs@suncheon.ac.kr)
주소: 540-744 순천시덕월동 산9-3

면 다음과 같다. F. M Weiner⁽¹⁾가 공기 전파음에 대하여 실험을 실시하여 패턴소음의 발생원리를 제시한 바 있으며 J. H. Varterasian⁽²⁾에 의하여 저울용 타이어를 대상으로 공기 전파음에 대한 수학적 분석과 이를 통한 소음감소에 대하여 연구를 실시한 바 있다. E. Hyden⁽³⁾이 실험에 근거하여 휠 축의 가속도와 타이어 트레드의 가속도를 검토하여 소음레벨에 대한 실험식을 유도하였으며, T. R. Wick⁽⁴⁾ 등이 소음 발생기구를 이론적으로 체계화하였고, M. Richard⁽⁵⁾는 타이어 패턴의 리그(lug)에 의한 소음 발생원리를 제시하였다. 또한 패턴 형상에 대한 실험적 측면에서 J. A. Ejsmont⁽⁶⁾등은 다양한 패턴을 설계하여 타이어 패턴과 소음의 관계조사를 통한 패턴 요소의 소음에 대한 영향을 밝힌 바 있다.

그러나 종래의 연구들은 타이어 패턴소음에 대한 발생원리에 관한 연구 또는 타이어 패턴의 1차원적 단순화에 의한 소음예측을 제시할 뿐 실제 타이어 패턴소음 저감을 위한 응용에는 부족한 점이 많다. 따라서 이 논문에는 실제 타이어를 대상으로 타이어 패턴소음을 예측할 수 있는 시뮬레이션 프로그램 개발하였다. 이 연구에서 제시한 패턴소음의 예측 기법은 타이어 설계 과정에서 저소음 패턴을 개발하는데 유용하게 이용될 것으로 예상된다.

2. 패턴소음 발생 기구

패턴소음 발생의 물리적 과정을 이해하기 위하여 타이어 구조를 몇 단계의 음향학적 모델로 단순화하였다. 이 같은 모델의 타당성은 비슷한 구조를 갖는 물리적 기구에 수반되는 물리현상에 대한 추측을 바탕으로 하고 있으며, 모델을 설정하는 여러 인자들의 상관관계를 설명하는 실험 데이터를 추적함으로써 이 모델의 타당성을 확인할 수 있다. 타이어 패턴의 기본요소인 그루브(groove)는 타이어가 지면과 접촉하는 순간에 일종의 공명 파이프 역할을 한다. Fig. 1

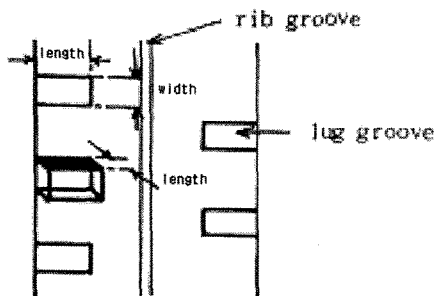


Fig. 1 Tire pattern

은 타이어 트레드 표면에 있는 리브의 유무에 따른 그루브 파이프의 두가지 형태를 보여준다.

Fig. 1은 리브가 없는 경우로, 그루브 하나는 한쪽 입구가 막힌 한 방향 파이프로 볼 수 있다. 반면에 리브와 리그 그루브가 연결된 경우에는 양쪽 입구가 뚫린 양방향파이프로 볼 수 있다. 파이프 내부의 공기 체적은 일종의 탄성 진동계로 볼 수 있다. 따라서 외부에서 충격이 가해질 때 이 진동계는 공진주파수로 반응한다. 공명 파이프 이론에 의하면 그루브의 주어진 기하학적 치수(길이, 폭, 깊이)에 대해서 공진주파수는 일차적으로 길이에 의해서 결정되고 폭과 깊이는 공명의 체적을 결정하여 발생소음의 크기와 관계된다. 위에서 언급한 두가지 형태의 파이프 내부에 존재하는 일차 공진음의 파형은 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 2에서 파이프의 막힌 벽에 의한 경계조건으로 일차 공진음의 파장이 파이프 길이의 네 배로 주어지고, 벽이 없이 양쪽이 대칭으로 뚫려 있는 경우에는 일차 공진음의 파장은 파이프 길이의 두 배로 주어진다. 실제 타이어의 경우에 그루브 파이프 내부의 공기 진동계에 가해지는 충격은 그루브가 노면에 접지한 순간에 발생하는 경우로 생각할 수가 있다. Fig. 3은 이러한 가정을 뒷받침하는 한 예로서 하나의 리그 그루브가 지면을 통과하는 순간의 시간 신호 특성을 보여준다.

리그 그루브가 노면에 접지하기 전까지는 타이어 개방면에 평행한 방향으로 속도가 발생하며, 이 결과 베루누이 정리에 의해서 그루브 내부의 압력은 외부 대기 압력보다 낮게 된다. 따라서 그루브가 노면에 접지하여 파이프 시스템이 구성된 직후에는 압력이 높은 외부로부터 압력이 낮은 파이프 내부로 공기가 흡입되는 과정이 일어난다. 파이프 내부 공기

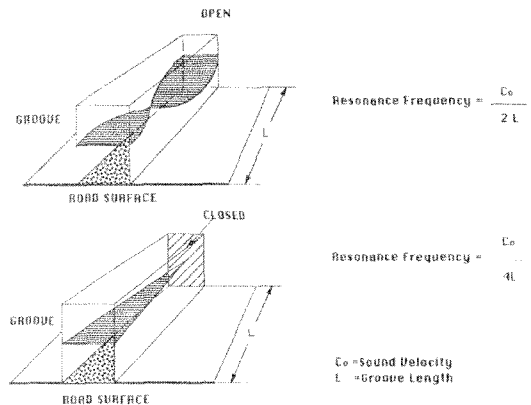


Fig. 2 Pipe resonator

의 공진은 시스템에 존재하는 감쇠(damping)에 의해서 감쇠되어 감쇠 자유진동 특성을 나타낸다. 감쇠의 크기는 감쇠율을 측정함으로써 결정할 수 있다. 감쇠가 클수록 그루브 진동계의 주파수특성은 공진 주파수를 중심으로 넓게 퍼지는 경향을 보인다. 반면에 감쇠가 작은 경우는 상대적으로 좁은 주파수 특성을 나타낸다.

Fig. 4는 Fig. 3의 시간 신호에 대응하는 주파수 특성으로서 1,575Hz의 공진 주파수를 중심으로 원만한 분포형태를 보여준다. 그루브 진동계의 공진 주파수에 대한 이상의 이론은 실제 실험결과와 비교함으로써 확인할 수 있다.

Table 1은 러그 그루브의 길이 변화에 따른 공진 주파수의 이론치와 실측치를 비교한 것이다. Table 1에서는 세 개의 각기 다른 러그 그루브의 길이변화에 대한 공진 주파수를 여러 개의 속도에서 각각 측정된 것을 이론치와 비교하고 있다. 대체로 실측치가 이론치보다 낮게 나타나고 있는데 그 이유는 그루브가 노면과 접할 때 변형에 의해서 등가 파이프의 길이가 정지 상태에 비해서 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 이론과 실험사이에 존재하는 이 같은 차이를 감안할 때 Table 1의 결과는 만족스러운 것으로 이 연구에서 제시하는 그루브 진동계의 이론을 뒷받침하고 있다. 더욱이 여러 개의 다른 속도에서 측정된 공진 주파수에 별다른 차이가 없다는 사실은 그루브 진동계의 반응이 속도와 무관한 것임을 의미하며, 이 사실은 패턴소음 발생기구에서 그루브 진동계가 기본 요소 중의 하나로서 이용될 수 있음을 의미한다.

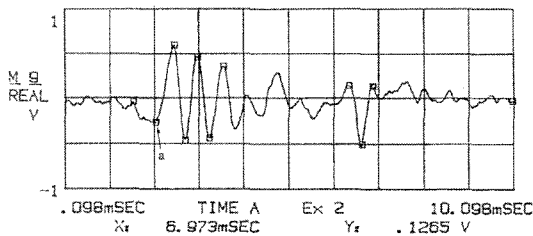


Fig. 3 Time signal property of single lug groove

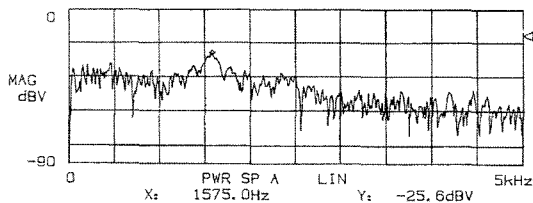


Fig. 4 Frequency property of single lug groove

Table 1 Natural frequency due to lug groove length

Length of groove (mm)	Theoretical value by pipe model (Hz)	Measurement value	
		Tire rotational velocity(km/h)	Resonance frequency(Hz)
40	2,125	50	1,900
		70	1,900
		90	1,850
		110	1,890
30	2,833	2,649	
20	4,250	4,094	

타이어 소음은 타이어 진동계의 가진에 대한 반응과 이 진동계에 가해지는 입력 신호 $x(t)$ 를 정함으로써 결정할 수 있다. 거시적인 관점에서 볼 때 타이어 진동의 일차적인 모드는 셸(shell) 진동이며, 이를 $s(t)$ 라고 표시하면 셸 진동계에 가해지는 입력신호는 패턴에 의해서 결정되는 러그 그루브 의한 신호가 될 것이다. 러그 그루브 하나의 반응이 이상적인 가진이라고 가정할 때, 타이어 회전시에 발생하는 연속적인 가진 신호는 가진 사이의 시간 간격(T) 패턴에 따른 러그 그루브 사이의 간격과 타이어 회전속도에 의해서 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = \frac{2\pi r \times 3,600}{v \cdot N} \quad (1)$$

식 (1)에서 r 은: 타이어의 동하중 반경, v 는 회전속도, N 은 러그 그루브의 수이다. 러그 그루브 진동계의 반응을 이상적인 가진이라고 가정한다면 셸 진동계에 가해지는 입력 신호는 $s(t)$ 와 $I(t)$ 의 convolution으로 구할 수 있다. 여기서 $s(t)$ 는 셸 진동모드에 대한 실험결과로부터 유도할 수 있다. 그러나 실제 러그 그루브의 반응은 위에서 가정한 바와 같이 이상적인 가진이 아니고 그 자체가 또 하나의 고유진동계를 나타낸다. 러그 그루브 진동계의 가진에 대한 반응을 $g(t)$ 로 표시할 때 셸 진동계에 가해지는 입력신호 $x(t)$ 는 $g(t)$ 와 $I(t)$ 의 convolution으로 주어진다.

$$x(t) = g(t) * I(t) \quad (2)$$

식 (2)에서 입력신호 $x(t)$ 의 형태는 Fig. 3과 같이 단일 러그 그루브의 반응함수 $g(t)$ 와 $I(t)$ 를 이용해서 Fig. 5와 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 5에서는 러그 그루브 반응함수가 중첩되지 않게 나타나 있으나 실제의 경우에는 패턴에 의해서 결정되는 러그

그루브 간격 및 타이어 회전속도에 의해서 결정되는 가진 간격에 따라서 중첩되는 경우가 발생할 수 있다. 시간신호의 신호처리 이론에 의하면 시 공간에서 convolution으로 주어지는 함수의 스펙트럼은 개개 함수의 스펙트럼 곱으로 주어진다. 따라서 입력 신호 $x(t)$ 의 스펙트럼은 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다.

타이어 소음의 시간 신호는 입력 신호와 타이어 진동계의 반응함수의 convolution에 의해서 식 (3)과 같다.

$$y(t) = s(t) * x(t) = s(t) * (g(t) * I(t)) \quad (3)$$

식 (3)과 같이 표현되는 타이어 소음의 시간 신호 $y(t)$ 로부터 소음의 크기와 주파수를 예측할 수 있다. Fig. 7과 Fig. 8은 저속과 고속 회전시 타이어 패턴소음의 발생 주파수 대역을 나타내고 있다.

3. 패턴소음의 측정 및 분석

3.1 실험방법 및 장치

타이어 패턴소음 측정방법인 JASOC606-81에서는 실험 타이어의 측면 방향 한 곳에서만 소음 측정하도록 규정하고

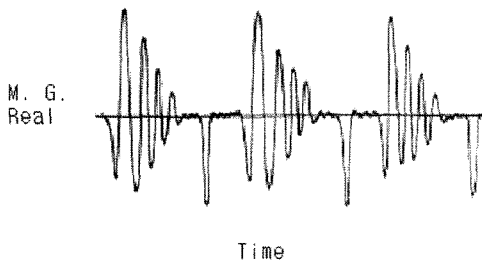


Fig. 5 Time signal property of input signal

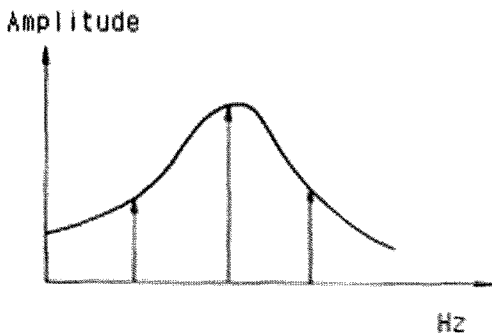


Fig. 6 Spectrum property of input signal

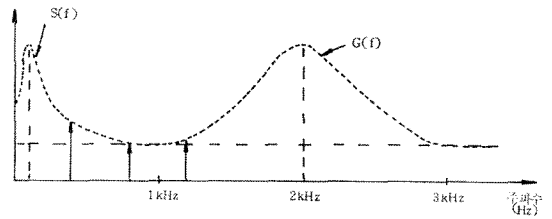


Fig. 7 Tire pattern noise concept in low speed rotation

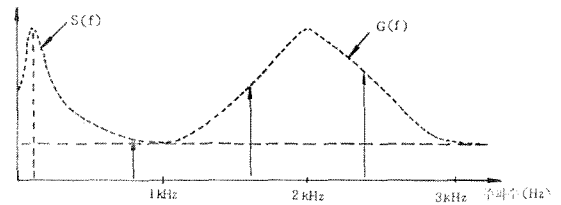


Fig. 8 Tire pattern noise concept in high speed rotation

있다. 따라서 이 연구에서는 측정결과와 신뢰도를 고려하여 마이크로폰의 위치를 타이어로부터 최대한 가까운 지점에 위치하도록 설치하였다. 타이어의 패턴소음은 마이크로폰 (B&K, 4188)에 의해 수집되고 증폭기(B&K, 2673)를 통하여 증폭된 후 디지털 기록기(Sony, PC 208A)에 기록된다. 기록된 패턴소음신호는 주파수 분석기(B&K, 3556)를 이용하여 분석하였다.

Fig. 9, 10은 이 연구에 이용된 실험장치 중 마이크로폰의 부착 위치와 실험장치이다.

3.2 타이어 소음과 러그 그루브 개수의 관계

타이어 원주방향에 직각으로 조각된 러그 그루브의 개수와 타이어 소음의 관계를 규명하기 위하여 Fig. 11에서 보는 바와 같이 치수가 (30, 6, 6)인 러그 그루브의 수(m)를 달리 하여 차량속도(v)에 따른 소음도를 측정하였다. 러그 그루브의 치수는 (l, ω, d)로 표시하며 여기서 l 은 그루브의 길이, ω 는 그루브의 폭, d 는 그루브의 깊이를 나타내며 이들의 단위는 (mm)이다.

타이어의 패턴소음을 발생한 인자는 여러 가지가 있으나 러그 그루브에서 발생하는 소음의 비중과 영향도가 가장 크므로 타이어 패턴소음을 예측하기 위한 인자를 러그 그루브에 한정하였다. 러그 그루브에 의한 소음은 주로 진동과 공기 방출 작용에 기인하여 발생하는 것으로 진동은 타이어 트레드에 조각된 러그 그루브가 접지면을 통과할 때 발생하며, 공기 방출음은 러그 그루브가 노면에 접지되어 압축되

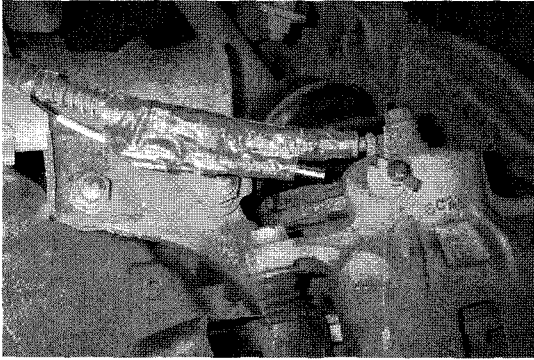


Fig. 9 Position of microphone

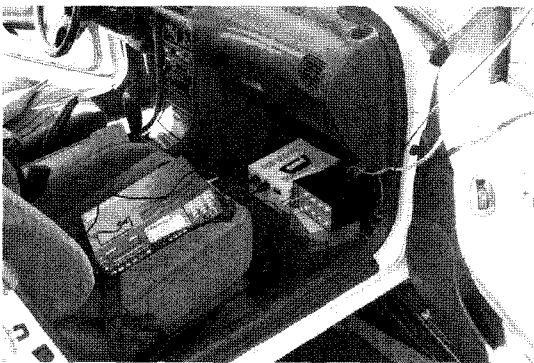


Fig. 10 Experimental equipment

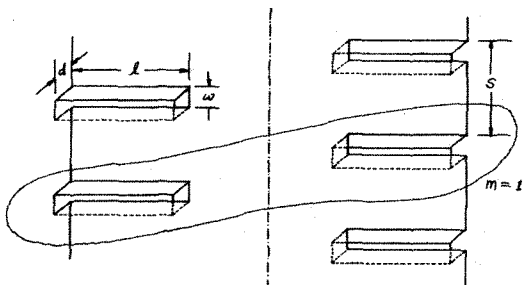


Fig. 11 Lug groove(l, ω, d)

때 그루브 내에 갇혀 있던 공기가 밀려나면서 발생하는 배출음과 그루브가 노면에서 떨어질 때 그루브 내로 공기가 빨려 들어가는 흡입음으로 구성된다. 러그 그루브가 접지면내에 놓여지는 시간인 Δt 는 차량속도 v 와 접지길이 L 의 관계로 식 (4)와 같다.

$$\Delta t = \frac{L}{v} \quad (4)$$

여기서 접지길이 L 은 하중과 타이어 공기압에 따라 달라질 수 있다. 러그 그루브가 노면에 접지되면서 발생하는 배출음의 특성은 러그 그루브의 크기에 크게 영향을 받는다. 그루브의 개수(m)가 증가하면 타이어 소음의 시간신호는 그루브 사이의 간격에 해당하는 시간지연을 갖고서 합성된다. 어떤 주어진 속도에서 치수가 (30, 6, 6)인 단일 러그 그루브의 음향파위를 W_1 이라 하면 그루브 개수가 m 일때의 소음도는 식 (5)와 같다.

$$L_p = 10 \log \frac{m W_1}{W_0} = 10 \log \frac{W_1}{W_0} + 10 \log m \quad (5)$$

여기서 m 개의 그루브가 동시에 소음을 발생시킨다고 가정하면 m 이 2배로 늘어날 때 증가하는 소음도를 C_m 으로 나타내면 식 (5)는 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$L_p = C_{m0} + C_m \frac{\log m}{\log 2} \quad (6)$$

여기서, C_{m0} 는 (30, 6, 6)인 러그 그루브 한 개에만 기인되는 소음도를 나타내며 m 개의 그루브가 동시에 음을 발생시키면 C_m 은 3dB 정도이다.

4. 실험결과 및 고찰

Fig. 12는 이 연구에서 제안한 실험방법 및 장치를 이용하여 측정한 타이어 패턴소음 측정결과이다. Fig. 13은 러그 그루브의 개수가 16, 32, 48, 64개인 경우, 차량속도의 증가에 따른 소음레벨을 나타낸 것이다. 차량속도가 100km/h인 경우 러그 그루브의 개수가 32개에서 64개로 증가하였을 때 C_{m0} 는 87.3dB(A), C_m 은 2.7dB(A) 정도로 식 (6)에서 제시한 예상치에 근접하고 있음을 알 수 있다.

5. 패턴소음 예측 프로그램

패턴소음 발생 기구에 대한 이론적 배경을 바탕으로 타이어 패턴소음도 및 그 주파수 특성을 예측하고자 하였다.

러그 그루브의 크기나 피치배열 등 실험용 타이어의 정보를 입력하면 주어진 정보에 의해 실험용 타이어의 패턴에서 발생할 것으로 예상되는 소음의 시간을 합성한다. 이 합성된 시간 신호를 주파수 분석하기 위하여 FFT 알고리즘을 통해

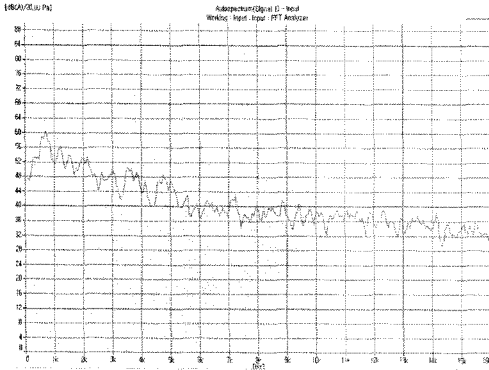


Fig. 12 Pattern noise measurement result in outdoor test

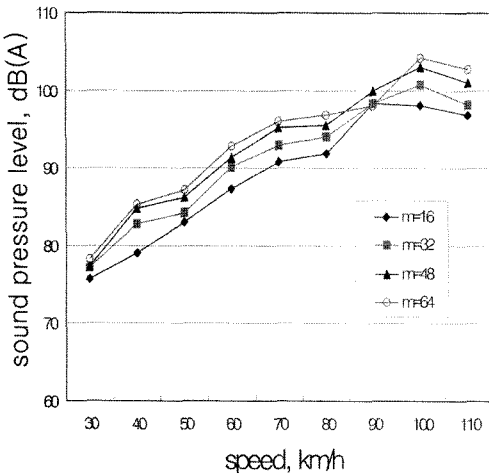


Fig. 13 Sound pressure level between lug groove number and automobile speed

파워 스펙트럼으로 변환시킨 후 동특성 및 암소음 등의 보정 인자들을 보완한 후 최종적인 스펙트럼을 구하게 된다.

6. 결론

본 연구에서는 타이어 패턴소음의 발생 기구 규명과 그에 따른 저소음 패턴 개발에 관한 연구이다. 본 연구로부터 타이어 패턴소음 발생인자 중 그루브의 영향을 파악할 수 있었다. 또한, 연구결과를 저소음 패턴 타이어 설계를 위한 실제 목적에 사용하기 위해서는 컴퓨터 시뮬레이션에 의해서 주

어지는 예측소음 특성에 대한 올바른 이해가 필요하다. 저소음 타이어의 첫째 조건은 전체 소음도가 낮은 값을 갖는 것이다. 접지율을 전체 타이어 트레드 면적에 대한 실제 접지 가능한 비로 정할 때 접지율이 클수록 소음도가 낮아진다. 이 연구결과를 기초로 저소음 타이어 설계를 위한 몇 가지 제안을 하면 다음과 같다.

- (1) 전체 타이어 트레드 면적에 대한 실제 접지 가능한 면적의 비를 정할 때 접지율이 클수록 소음도가 낮아진다.
- (2) 그루브 부피를 감소시키면서 그루브수를 증가시키거나 그루브 길이를 짧게하고 폭을 증가시킨다.
- (3) 그루브의 부피를 가능한 범위 내에서 작게하고, 자동차의 성능에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 주어진 접지율에 대하여 가능한 리그보다는 리브 그루브를 사용하도록 한다.

참고 문헌

- (1) Weiner, F. M., 1970, "Experimental Study of Airborne Noise Generated by Passenger Automobile Tires," *SAE Paper 700027*
- (2) Varterasian, J. H., 1969, "Quieting Noise mathematically: Its Application to Snow Tire," *SAE 690520*.
- (3) Hyden, R. E., 1971, "Road Noise from the Interaction of a Rolling Tire with the Road Surface," *Proceedings of the Noise Control Conference, Purdue University, Lafayette, Indiana, pp.59~64*.
- (4) Wick, T. R., 1972, "Mechanics of Tire Noise Generation," *SAE 720924*.
- (5) Richard, M., 1976, "Ross Lug Tire Noise Mechanics," *SAE 762024*.
- (6) Ejsmont, J. A., 1984, "Influence of Tread Pattern on Tire/Road Noise," *SAE 841238*.
- (7) Kim, B. S., 2005, "Pass by Noise Test Site Variability," *Transactions of The Korea Society of Machine Tool Engineers, Vol. 14, No. 3, pp. 116~121*.
- (8) Kim, B. S., 2005, "An Study on Vibration Characteristics of Automobile Al-alloy Wheel," *Transactions of The Korea Society of Machine Tool Engineers, Vol. 14, No. 3, pp. 122~127*.