

환경 소음 규제 대응을 위한 고무 재료 설계 인자

임 원 우

Design factors of Rubber Materials for Correspondence to the Environmental Noise Regulation

Won Woo Lim

요 약

본 연구에서는 고무 재료의 설계 인자 중 어떤 것이 소음에 주된 영향을 주는지 검토하였고, 저소음 타이어 개발을 위한 고무 재료의 설계 방향을 제시하였다. 소음은 무향실 타이어 소음과 고무 시편의 충격 소음을 측정하였고, 고무 시편의 물성은 경도, 인장 물성 및 동적 점탄성을 측정하였다. 타이어 소음에 영향을 주는 고무 재료의 주된 설계 인자는 경도 또는 300% 모듈러스이고, 양자간에는 정의 상관관계가 있다. 따라서 고무 재료의 경도 또는 300% 모듈러스를 낮게 설계하면 소음을 저감시킬 수 있다.

ABSTRACT

We investigated which is major one in rubber materials design factors affecting on noise and showed the design guide for low noise tire development in this study. Tire noise and impact noise for rubber sheets were tested at anechoic room. Hardness, tensile and dynamic mechanical properties were also measured using the rubber sheets. A major design factor of rubber materials affecting on the tire noise was hardness or 300% modulus. There was also positive correlation between two properties. Therefore, designing rubber materials to have low hardness or 300% modulus can reduce noise.

KEYWORDS: NOISE, DESIGN FACTORS, RUBBER, TENSILE PROPERTIES, AND DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES.

1. 서 론

교통 소음을 줄이기 위하여 차량의 소음 저감을 위한 기존의 많은 연구에 의해서 엔진 및 흡배기 소음 등은 획기적으로 줄어들었으나, 상대

적으로 타이어 소음은 증가하게 되었다. 과거에는 차량의 전체 소음 중에서 타이어 소음이 차지하는 비중이 그다지 크지 않았으나, 차량 개발 기술의 발전에 의해 타이어에 의한 소음이 최대 50%까지 차지하고 있다. 또한 인간의 삶의 수준

• 2002년 6월 3일 접수(received), 2002년 7월 25일 채택(accepted)

• 금호산업주식회사 타이어사업부 R & D Center(Kumho Research and Development Center, Kwangju 506)

† 주저자(Corresponding author): e-mail: wwlim@swan.kumho.co.kr

이 높아지면서 소음도 환경 규제 대상이 되고 있다. 현재 유럽에서는 차량 소음 뿐만 아니라 타이어 단품에 대한 소음 규제 범규화를 추진하고 있다.

이러한 소음 규제에 대응하기 위하여 타이어 산업에서는 소음을 줄이기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 타이어 구조 해석을 통해 지진동 타이어를 설계하기도 하고,^[1] 트레드 패턴 설계의 최적화로 소음을 줄이기도 하며,^[2,3] 고무 재료 인자 연구로 지진동 및 저소음용 재료를 개발하고 있다.^[4,5] 또한 각종 시험법 개발 및 분석을 통해 소음 발생 원인을 진단하고 개선책을 제시한다.^[6-10]

일반적으로 타이어에서의 소음 발생은 노면으로부터 가진된 진동이 트레드를 거쳐 솔더 부근을 진동시키면서 일어난다. 이런 타이어 소음 발생에 영향을 주는 인자로서는 타이어 구조 인자, 트레드 패턴 인자 및 트레드 고무 재료 인자 등이 있다.

본 연구에서는 고무 재료의 설계 인자 중 어떤 것이 소음에 주된 영향을 주는지 파악하고, 저소음 타이어 개발을 위한 고무 재료의 설계 방향을 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1. 고무 시편의 인장 물성 및 동적 점탄성

소음에 영향을 주는 고무 재료의 인자 특성을 파악하기 위하여 다양한 범위의 인장 물성을 가지는 7종류의 고무 시편을 사용하였다. 각각의 고무 조성 및 가류 조건은 본 시험 목적에 크게 중요하지 않기 때문에 여기에서는 생략하기로 하였다. 각 고무 시료의 인장 시험은 ASTM D-412에 준하여 온도 25℃, R.H. 65 ± 5% 조건에서 실시하였다.

고무 시편의 동적 점탄성은 Gabo Qualimeter (Gabo Co., Germany)을 이용하여 질소 분위기 하에서 주파수 11 Hz, 승온 속도 3℃/min.로 -80℃~70℃의 온도 조건에서 측정하였다.

2.2. 무향실 타이어 소음 시험

타이어의 소음은 Figure 1과 같이 무향실에서

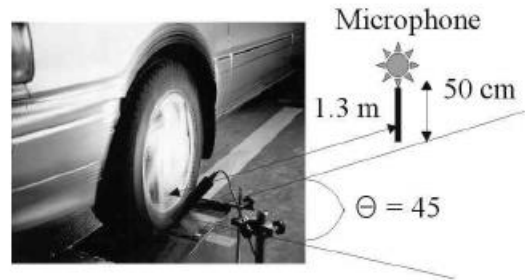


Figure 1. Scheme of tire noise measurement at anechoic room.

차량에 타이어를 취부하여 시속 80 km/h의 주행 조건에서 소음계로 측정하였다. 단, 무향실의 온습도는 각각 25℃, R.H. 65 ± 5%이었다. 소음계는 휠 축 중심에서 후방으로 45°, 지면으로부터 높이 50 cm, 거리 1.3 m 위치에 설치하였다. 무향실 소음 측정에는 175/70R13 규격의 타이어를 사용하였고, 구조는 동일하게 하고 트레드 고무만 상기의 7종류의 고무로 변경하여 시험용 타이어를 제조하여 시험하였다.

2.3. 충격 소음 시험

고무 시편의 소음을 평가하기 위하여 Figure 2와 같은 자체 시험법을 고안하였다. 우레탄 폼 위에 고무 시편(가로×세로×두께=150 mm×150 mm×3 mm)를 올려놓고 직경 10 mm의 금속 구슬을 높이 450 mm 위치에서 자유 낙하시킨 후, 고무 시편에 충격시 발생하는 충격 소음의 최대치를 소음계로 측정하였다. 소음계의 위치는 고무 시편 중심에서 240 mm 떨어진 곳에 설치하였다. 단, 충격 소음은 상기와 동일한 온습도 조건의 무향실에서 측정하였다.

3. 결 과

3.1. 소음 관련 고무 재료 설계 인자 선정

소음 발생은 기본적으로 재료의 진동에 의해서 발생된다. 일반적으로 재료의 질량(m), 스프링 상수(k), 및 감쇄 계수(c)를 가진 1자유도계의 자유 진동에 대한 운동 방정식은 식1과 같다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

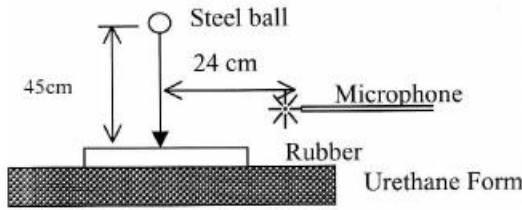


Figure 2. Scheme of impact noise test for rubber sheets.

강제 진동의 경우는 식 (1)의 우변을 $F=F_0 \sin \omega t$ 와 같은 가진력을 주면된다. 즉, 식 (2)와 같이 된다.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (2)$$

여기서 x 는 변이이고, 재료의 질량과 가진 조건이 일정할 경우, 주어진 계의 진동은 스프링 상수 k 와 감쇄 계수 c 에 의존하게 된다. 따라서 소음과의 상관성을 분석하기 위하여 고무 재료의 인자는 이 두 계수와 관련이 있는 인자를 선정하여 시험하였다. 스프링 상수 k 와 관련이 있는 인자로 경도와 300% 모듈러스를, 감쇄 계수 c 와 관련이 있는 인자로는 반발 탄성(rebound)와 손실 계수($\tan \delta$)를 선정하였다.

3.2. 고무 재료 설계 인자와 소음과의 상관성

본 시험에 사용된 7종류의 고무 시편의 인장 물성, 점탄성 및 소음 결과를 Table 1에 나타내었다. 각 시편은 재료 물성이 다양한 범위에 존재하도록 설계되었다. 소음과의 상관성을 분석하기 위하여 고무 재료 설계 인자 중 경도, 모듈러스, 반발 탄성 및 점탄성 인자를 선정하여 비교 분석하였다.

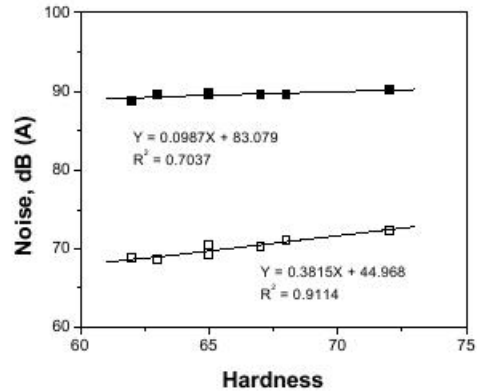


Figure 3. Correlation between noise and hardness (■: Tire noise measured at anechoic room, □: Impact noise of rubber sheet).

Figure 3에는 소음과 경도와의 상관성을 나타낸 것이다. 무향실 소음 및 충격 소음 모두 경도와의 상관성이 높다. 즉 경도가 낮을수록 소음이 낮아지는 것을 알 수 있다. 이것은 타이어가 노면 충격시 노면으로부터 가진되어 온 1차 충격이 소음 발생의 주요한 원인이 된다는 것을 입증하고 있다. 물론 1차 충격 진동을 타이어 내부에서 감쇄시켜 2차적으로 타이어의 전체 진동을 감소시키는 것도 소음 저감을 위해서 중요한 일이다. 타이어의 진동과 소음과의 상관성에 관한 연구 결과를 보면, 식 (3)과 같이 트레드 중앙부를 부드럽게 하여 노면으로부터의 접지압(또는 충격력)을 줄이고, 동시에 타이어 슬더부를 딱딱하게 하여 2차 진동을 억제함으로써 소음을 줄일 수 있다고 한다.⁽¹⁰⁾

$$P \propto \frac{F_{ct}}{K_{sh}} \quad (3)$$

Table 1. Tensile Properties and Noise Results for Various Rubber Materials

	A	B	C	D	E	F	G
Tire noise,dB(A)	89.53	88.88	90.23	89.74	89.56	89.60	89.60
Impact noise,dB(A)	69.4	68.8	72.4	70.5	68.6	70.3	71.1
Hardness(shore A)	65	62	72	65	63	67	68
300%Mod, kgf/cm ²	101.6	94.3	119.4	106.1	86.4	131.5	121.4
Rebound, %	27	22	14	17	27	23	27
$\tan \delta$ (0℃)	0.135	0.171	0.263	0.204	0.162	0.192	0.168
$\tan \delta$ (70℃)	0.14	0.131	0.18	0.148	0.145	0.143	0.144
Tg, ℃	-43	-30.8	-14.2	-26.7	-34.7	-30.7	-36.5

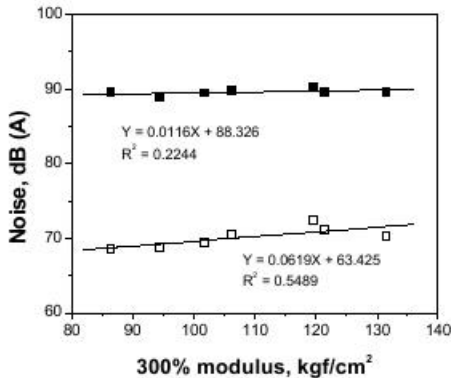


Figure 4. Correlation between noise and 300% modulus (■: Tire noise measured at anechoic room, □: Impact noise of rubber sheet).

여기서 P , F_{ct} , 및 K_{sh} 는 각각 소음 레벨, 트레드 중앙부 접지압(contact pressure, 또는 충격력) 및 솔더부의 굽힘 강성(bending stiffness)이다.

식 (3)에서 K_{sh} 는 주로 구조적 인자에 의해서 영향을 받고, F_{ct} 는 구조 인자의 영향도 있지만, 트레드 고무 재료 인자의 영향도 많이 받는다. 즉, 고무 재료 인자가 관여하는 F_{ct} 값을 줄임으로써 소음을 감소시킬 수 있는 것이다.

Figure 4는 소음과 300% 모듈러스(300% 인장시의 응력으로 고무 재료 공학에서 탄성율의 대응으로 주로 사용됨)와의 상관성을 나타낸 것이다. 경도와와의 상관성과 유사하게 탄성율이 낮을수록 소음이 낮아진다. 그러나 그 상관 계수는 경도와와의 상관 계수 만큼 크지 않다. 하지만 경도와 300% 모듈러스는 일반적으로 상관성이 높기 때문에 이 두 인자는 소음에 직접적으로 영향을 주는 주인자라고 생각된다.

유리 전이 온도(T_g)와의 상관성에서도 T_g 가 낮을수록 소음이 감소되는 것을 Figure 5에서 알 수 있다. 즉 T_g 가 낮은 고무 재료일수록 더욱 부드럽기 때문에 소음에는 유리하게 작용된 것으로 판단된다. 이 결과는 상기의 결과와 일맥상통한 것이다.

Figure 6은 소음과 반발 탄성(rebound)와의 상관성을 나타낸 것이다. 반발 탄성은 일반적으로 재료의 댐핑값에 반비례한다. Figure 6에서는 반발 탄성이 클수록 소음이 낮아지는 경향을 보이고 있다. 즉 재료의 댐핑값이 작을수록 소음

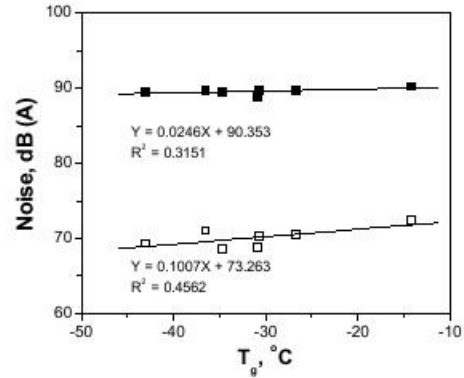


Figure 5. Correlation between noise and T_g (■: Tire noise measured at anechoic room, □: Impact noise of rubber sheet).

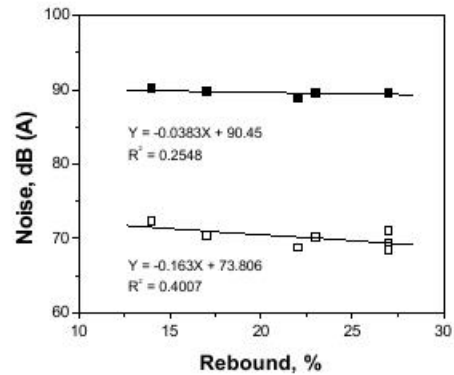


Figure 6. Correlation between noise and rebound (■: Tire noise measured at anechoic room, □: Impact noise of rubber sheet).

이 낮아진다는 것인데, 이 결과는 댐핑값이 커져야 진동 억제 능력이 우수하여 소음을 저감할 수 있는 일반적인 사실과 상반된다. 댐핑에 의한 진동 억제는 이미 발생된 진동을 억제하는 능력이 아니라, 초기 충격력을 감소시키는 능력이 아니다. Figure 6에서는 경도가 낮은 부드러운 고무일수록 반발 탄성이 높지만, 또한 1차 충격력을 감소시키는 효과가 크기 때문에 소음이 줄어드는 것이다. 따라서 소음 저감을 위해서는 댐핑보다 1차 충격력을 감소시키는 것이 더욱 효과적이라고 말할 수 있다.

Figure 7과 8은 손실 계수인 $\tan \delta$ 와의 상관성을 나타낸 것이다. 이들 결과와 원인은 상기의 반발 탄성의 경우와 유사한 것으로 $\tan \delta$ 가 증가할수록 소음이 증가되는 것은 손실 계수의 영향보

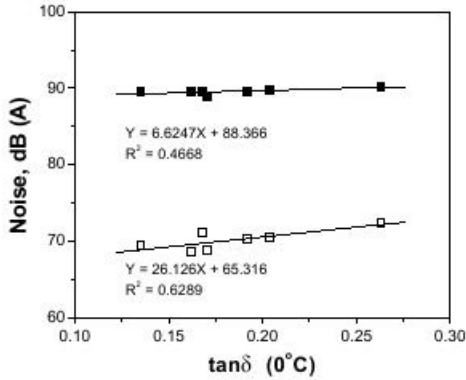


Figure 7. Correlation between noise and $\tan \delta$ at 0°C (■: Tire noise measured at anechoic room, □: Impact noise of rubber sheet).

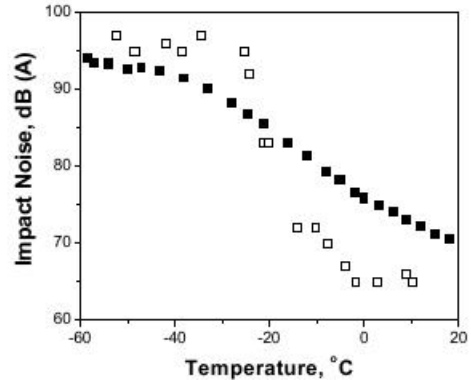


Figure 9. The temperature dependence of impact noise and hardness (■: Impact noise, □: hardness).

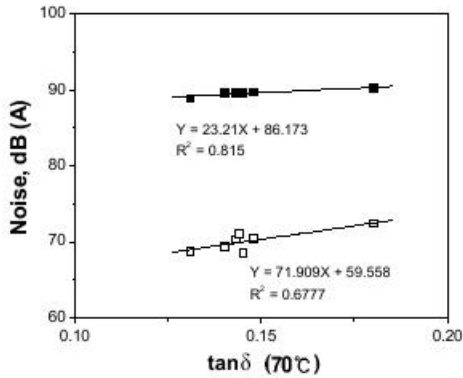


Figure 8. Correlation between noise and $\tan \delta$ at 70°C (■: Tire noise measured at anechoic room, □: Impact noise of rubber sheet).

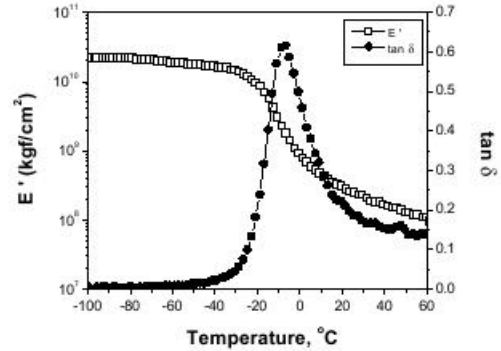


Figure 10. The temperature dependence of dynamic mechanical properties (●: $\tan \delta$, □: storage modulus, E').

다 초기 충격력의 직접적인 원인이 되는 정도 또는 300% 모듈러스의 영향이 더 크기 때문이다.

이것에 대한 보다 자세한 것은 아래의 충격 소음의 온도 의존성 시험 결과로 설명하고자 한다.

3.3. 충격 소음의 온도 의존성.

고무 시편의 온도를 $-60^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ 범위 내에서 변화시키면서 충격 소음을 측정하고, 동시에 경도도 측정하였다. 그 결과를 Figure 9에 나타내었다. 동 그림에서 알 수 있듯이 충격 소음과 경도는 유사한 온도 의존성을 보여주고 있다. 즉 경도가 클수록 소음이 커진다. Figure 10은 고무의 동적 점탄성 결과인데, 저장 탄성률(E')은 소

음과 정도의 온도 의존성 결과와 유사한 경향으로 온도가 낮을수록 탄성율이 증가하였다. 반면에 $\tan \delta$ 는 특정 온도에서 최대치를 가지는 경향을 보였다. 이 결과로부터 소음은 $\tan \delta$ 보다는 정도 또는 탄성율에 크게 의존하고 있는 것을 알 수 있다. Figure 7과8에서 소음이 $\tan \delta$ 에 비례하여 증가하는 것처럼 보이게 된 것은 $\tan \delta$ 가 최대치를 나타내는 T_g 이상의 온도 영역에서 $\tan \delta$ 나 탄성율 또는 정도가 같은 온도 의존성을 보였기 때문이다.

4. 결론

타이어 소음에 영향을 주는 고무 재료의 주된 설계 인자는 정도 또는 300% 모듈러스이고, 양

자간에는 정의 상관 관계가 있다. 따라서 경도 또는 300% 모듈러스를 낮게 설계하면 소음을 저감시킬수 있다. 이런 설계 방향의 기본 개념은 노면으로부터 전달되는 1차 충격력을 최소화하여 소음을 줄이고자 하는 것에서 출발된다. 그러나 이미 발생된 진동에 대해서는 손실 계수가 큰 재료를 사용하는 것이 유리하나, 일반적으로 동일한 구조 조건에서는 손실 계수보다 경도 또는 300% 모듈러스가 소음 저감을 위한 주인자로 작용한다.

참 고 문 헌

1. T. L. Richards, J. of Sound and Vibration, 149, 235-243, (1991).
2. Li-Jun Chen et al., Proceedings of IRC '99 Seoul, pp. 223-226, (1999).
3. Y. Nakajuma et al., SAE, Paper No. 960997, (1996).
4. H.Brusset et al., ACS 129th meeting, Paper No. 70, (1986).
5. P. M. Nelson, Wear, 113, 171-174, (1986).
6. F. E. Timmons, SAE, Paper No. 762020, (1976).
7. M. Jennewein et al., ImechE, C150/84, (1984).
8. J. S. Bolton, SAE, 951355, (1995).
9. J. Bushmann, Tire Science and Technology, Vol. 24, No. 1, pp. 2-10, (1996).
10. T. F. Dunlap et al., SAE, 810855, (1981).
11. V. Q. Doan, Tire Technology International, pp. 28-35, (1996).