터널 내 콘크리트포장 표면처리공법 별 탑승자의 주행쾌적성 평가

Evaluation on Riding comfort of A Passenger with Various Surface Textures of Concrete Pavement in Tunnels

이 경 배	Lee, Kyungbae	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 과제연구원 · 교신저자 (E-mail : kblee6078@ex.co.kr)
이 재 훈	Lee, Jaehoon	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (E-mail : ranian74@ex.co.kr)
손 덕 수	Sohn, Duecksu	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 선임연구원 (E-mail : mgsds@ex.co.kr)
권 순 민	Kwon, Soonmin	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 (E-mail : soonmini2@ex.co.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The purpose of this article is to compare and evaluate the riding comfort of a passenger in tunnels depending on different surface textures of concrete pavement.

METHODS : Evaluation of riding comfort is conducted at 17 sections, which have different surface texture such as transverse tinned(TT), longitudinal tinned(LT) and diamond grinded(DG). A triaxial accelerometer was set up on the passenger seat surface of the test vehicle to measure vibrations of an occupant, then the effects of vibration on comfort and health were evaluated by ISO 2631. And microphones were installed at passenger's ears height to measure sound pressure level(SPL) in the test vehicle. Additionally, a surface microphone was installed on the inside of wheel arch to evaluate noise between tire and pavement by NCPX method. All tests were conducted cruising at 100km/h.

RESULTS : The results of all tests are as follows. First, both vibration magnitudes for comfort and for health in LT and DG sections are almost same and they represent lower than those in TT sections. Second, the average SPL of DG shows the lowest decibels among them. And third, it is founded that interior noise is significantly affected by noise between tire and pavement.

CONCLUSIONS : It may be concluded that DG can provide more excellent riding comfort to passenger than LT or TT. Therefore, it is necessary to consider applying DG to existing pavement surface to improve surface condition when the driving environment especially requires riding comfort like a long tunnel.

Keywords

riding comfort, surface texture, concrete pavement, tunnel, vibration, noise

Corresponding Author : Lee, Kyungbae, Contract Researcher
Pavement Research Division, Korea Expressway Corporation
Research Institute, 208-96, Dongbu-daero 922 beon-gil,
Dongtan-myeon, Hwaseong-Si, Gyeonggi-Do, 445-812, Korea
Tel : +82.31.371.3360 Fax : +82.31.371.3479
E-mail : kblee6078@ex.co.kr

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Aug. 7, 2014 Revised Aug. 8, 2014 Accepted Sep. 26, 2014

1. 서론

콘크리트 포장에는 우천 시 표면수를 신속히 배출하고 타이어와 노면의 마찰력을 증대시켜 미끄럼 저항성

을 확보하기 위해 표면처리를 실시한다. 국내 고속도로에 사용되고 있는 콘크리트 포장의 표면처리 공법으로는 횡방향 및 종방향 타이닝, 다이아몬드 그라인딩, 종방향 그루빙 등이 있다. 이 중 타이닝 공법은 굳지 않은

콘크리트에만 적용이 가능하기 때문에 신설 콘크리트 포장에 적용한다. 반면 그루빙 공법은 터널 진·출입부, 곡선부 등 주행 시 안전성 확보를 위해 미끄럼 저항성이 더욱 요구되는 구간에 주로 적용하는데 일반적으로 종방향(차량 진행방향)으로 노면에 일정간격의 홈을 시공하여 신속한 배수를 도모하는 공법이다. 다이아몬드 그라인딩 공법은 헤드에 장착된 수백개의 절삭날을 이용해 표면의 일부를 서로 다른 깊이로 제거함으로써 새로운 조직을 형성해주는 공법으로 주로 평탄성 회복과 소음저감을 위해 시공한다.

표면처리공법을 결정하는 요소 중 차량의 안전성과 관련된 미끄럼 저항성의 확보가 가장 중요하나 최근 들어 도로이용자의 만족도 향상을 위해 주행쾌적성(riding comfort)의 비중이 점차 높아지고 있다. 특히 터널 내 포장은 토공부와 달리, 강우, 강설 등 대기환경에 직접적으로 노출되지 않기 때문에 표면수 배출에 대한 부담이 상대적으로 작은 반면, 탑승자가 느끼는 주행소음은 터널 벽면 등을 통해 반향되어 토공부에 비해 더욱 커지게 된다. 소음 외에도 차량의 진동, 어두운 조명, 좁은 시거 등 복합적인 영향으로 인해 주행쾌적성은 토공부에 비해 나빠지게 되며 터널 내 체류시간이 길수록 주행쾌적성이 저하됨을 예상할 수 있다. 따라서 터널과 같이 특수한 주행환경에서는 안전성과 더불어 차량 탑승자의 쾌적성도 중요하다 할 수 있으며, 이로 인해 콘크리트 포장의 표면처리공법 결정 요소 중 주행쾌적성의 중요성이 더욱 부각되고 있는 상황이다.

차량 내 탑승자의 주행쾌적성은 시각, 청각, 전신 진동 등 신체의 다양한 감각에 의존하여 결정되기 때문에 주관적인 성향이 뚜렷한 특성을 갖고 있다. 이 중 표면처리공법에 따라 변화가 예상되는 감각은 청각과 전신 진동으로 예상할 수 있기에 본 연구에서는 탑승자의 진동과 소음을 바탕으로 주행쾌적성을 평가하였다. 이를 바탕으로 장대터널과 같이 주행쾌적성 확보가 중요시되는 주행환경에서 표면처리공법을 합리적으로 선택할 수 있도록 유도하는 데 본 연구의 최종 목적이 있다.

2. 시험방법

주행쾌적성에 관한 연구는 일반적으로 자동차에서 발생하는 진동에 의해 탑승자가 느끼는 진동정도를 정형화하는데 중점을 둔다. 주행쾌적성이라는 용어는 주로 자동차 공학에서 많이 사용되며 승차감(ride), 주행성(ride-quality) 등으로 표현되기도 한다(Gillespie,

T.D, 1992, Dukkipati, R.V. et al., 2008). 하지만 주행쾌적성의 어휘적 의미상으로는 ‘운전, 또는 탑승 시 느끼는 쾌적함’ 정도가 적합하며, 탑승자의 진동 또는 승차감으로는 주행쾌적성의 범위를 모두 충족시키지는 못한다. 이는 서론에서 언급한 바와 같이 쾌적함에 대한 판단은 탑승자의 주관적인 성향에 큰 영향을 받기 때문이며 쾌적성 판단에는 진동 외에 소음, 시인성, 좌석 형상, 온도, 내부공간 등과 같은 많은 요소들이 영향을 주기 때문이다. 특히 소음의 경우, 차량내부에서 청취할 수 있는 다양한 소음형태와 크기는 다른 진동들과 서로 얽혀있기 때문에 승차감을 인지하는 데 있어 소음의 영향을 분리하기가 어렵다(Gillespie, T.D, 1992). 따라서 본 연구에서는 콘크리트 포장의 표면처리공법별 주행쾌적성을 평가함에 있어 가장 중점적으로 다뤄야 하는 항목인 진동과 소음에 대해 평가하였으며 그 외의 요소들은 동일한 시험차량 및 주행여건을 가정하여 평가 항목에서 제외하였다.

2.1. 진동측정 및 분석

Fig. 1은 운전자의 진동 인지과정을 나타낸 것이다. 가진원은 크게 차량과 도로로 구분할 수 있으며 차량의 가진원으로는 휠 및 타이어의 회전운동, 엔진 등 동력구동계의 회전과 기타 부품의 회전운동이 있다. 도로의 가진원으로는 노면의 거칠기가 대표적이며 차량의 수직방향 진동에 영향을 주게 된다. 차량이 움직이면 차체와 서스펜션의 동역학적 반응에 의해 차량의 시트, 핸들, 차량 바닥 등에 진동이 전달되며 최종적으로 이들 부위와 닿아있는 손, 발, 엉덩이, 등 부분에 진동이 가해지게 된다. 특히 시트를 통해 전달되는 진동은 앉아 있는 탑승자의 무게중심에 근접해 있기 때문에 신체의 전신진동을 유발할 수 있다.

Fig. 1 Vibration Perception of a Driver

진동이 발생하는 부위에 신체가 접촉해 있더라도 진동의 크기와 주파수 등 진동 특성에 따라 진동의 인지 여부와 진동에 의한 불쾌감 인지 여부가 결정된다. 이와 관련하여 Gillespie는 ISO(International Organization for Standardization) 2631: 1978 등 인체 허용진동과 관련된 기준과 연구들을 조사하여 인체의 진동방향 별 안락함을 느끼는 한계주파수 대역을 비교하였으며, 그 결과 수직진동은 약 4~8Hz, 전후진동은 약 1~2Hz 대역이 인체에 가장 민감한 주파수 대역임을 기술하였다(Gillespie, T.D, 1992). 이후 개정된 ISO 2631: 1997에서는 전신진동을 평가하기 위하여 가속도를 측정하고 분석하는 방법에 대해 기술하고 있으며 각 진동방향 별 주파수 대역에 대해 인체민감도에 따라 가중치(weighting factor)를 변경하여 적용하는 평가방법을 제시하고 있다. 주파수 가중방법은 측정대역 내 모든 주파수에 대해 각각 다른 가중치를 적용하기 때문에 인체에 민감한 특정 주파수 대역만 추출하여 분석하는 방법보다 세밀한 분석이 가능하다. 또한 전신진동에 의한 쾌적성 평가방법 외에 건강위험도 평가방법을 함께 제시하고 있어 보다 광범위한 진동분석을 수행할 수 있다. 이에 본 연구에서는 ISO-2631: 1997 Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration의 평가기준을 적용하기 위해 탑승자의 시트바닥(seat-surface)에 3축 가속도 센서를 부착하여 진동을 측정, 분석하였다. 3축 진동방향의 정의는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2 Basicentric Axes for a Seated Position (ISO, 1997)

측정된 가속도 신호는 FFT(Fast Fourier Transform) 및 CPB(Constant Percentage Bandwidth) 분석을 통해 1/3 옥타브 밴드의 중심주파수 별로 RMS(root mean square) 가속도 값으로 나타낸 후, Eq. (1)에 의해 주파수 가중된 가속도 값(rms)으로 변환하였다.

$$a_w = [\sum_i (W_i a_i)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

여기서, a_w : 주파수 가중 가속도(rms)

a_i : i번 째 주파수의 가속도 스펙트럼(rms)

W_i : i번 째 주파수에 해당하는 가중치

W_i 는 동일한 주파수 대역에서도 가속도의 방향에 따라 수평방향(x, y축 방향)과 수직방향(z축 방향)으로 구분하여 적용하며 주파수 대역 별 가중치 곡선은 Fig. 3과 같다.

Fig. 3 Frequency Weightings in 1/3 Octaves (redrawn from ISO 2631)

Eq. (1)에 의해 각 방향 별 a_w 값을 산출할 수 있으며 다음 Eq. (2)에 의해 각 방향의 가속도 값을 하나의 총 가속도 값으로 조합할 수 있다.

$$a_v = (k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

여기서, a_v : 조합된 총가속도(rms)

k : 조합계수

Eq. (2)에서 조합 계수 k 는 쾌적성평가, 건강평가에 따라 Table 1과 같이 구분하여 적용된다. 본 연구에서는 Eq. (2)를 이용해 현장 가속도 측정결과를 총가속도로 환산하였으며 그 결과를 이용해 콘크리트 포장 표면 처리공법별 진동 정도를 상대비교하였다.

Table 1. Multiplying Factors

Subject	k_x	k_y	k_z
Comfort	1.0	1.0	1.0
Health	1.4	1.4	1.0

2.2. 소음측정 및 분석

차량 내 탑승자의 소음인지과정을 정리하면 Fig. 4와 같다. 소음원의 위치에 따라 엔진구동, 흡기 및 배기 등 차량 자체적으로 발생하는 소리와 타이어-노면 간 소리, 타 차량 통행 등 차량 밖에서 발생하는 소리로 구분할 수 있다. 소음원으로부터 발생한 공기의 진동으로 인해 소리가 귀로 전달되며 개인적, 주관적 성향에 따라 소음으로 인지하게 된다.

Fig. 4 Noise Perception of a Passenger

일반적으로 터널 내에서 소음이 더 심하게 발생하는 원인은 터널의 폐쇄적인 구조적 특성에 의해 소음원로부터 직접 귀로 전달되는 소음 외에도 터널 벽면, 천장 등에 반사, 굴절되어 전달되는 소음이 함께 존재하기 때문이다. 김철환 등은 콘크리트 포장 터널 내부의 등가 소음도가 터널 외부에 비해 약 14dB(A) 가량 더 높으며, 벽면에 흡음재를 시공한 터널은 외부와의 소음도 차이가 7dB(A) 정도로 감소함을 발표하였다(김철환 등, 2013). 이는 터널 내부에서 발생하는 소음 중 벽면에서 반향되는 소음도가 많은 비중을 차지하고 있음을 간접적으로 나타내는 결과라 할 수 있다. 따라서 표면처리공법에 직접적인 영향을 받는 타이어/노면 간 소음을 측정함에 있어 터널 환경에 의한 소음 요인을 최대한 제외시키기 위해서는 소음원과 마이크로폰의 위치를 최대한 가까이 두는 것이 유리하다. 또한 탑승자가 느끼는 전체적인 소음도를 평가하기 위해서는 반대로 소음원이 아닌, 탑승자의 인접위치에 마이크로폰을 두는 것이 보다 현실적인 데이터를 얻을 수 있는 방법이다.

Fig. 5는 특정 트럭의 가속 및 정속주행 시 발생하는 소음을 타이어/노면 소음과 속도 별로 비교한 결과를 나타낸 것이다(Sandberg, 2001). 30km/h의 속도에서는

타이어/노면 간 소음이 가속 및 항속주행 시보다 3dB(A) 이상 낮지만 50km/h의 속도부터 소음 차이가 점차 줄어들며 90km/h에 도달하면 가속 및 항속주행 시 소음과 유사한 것을 알 수 있다. 이는 고속으로 주행할수록 차량에서 발생하는 소음 중 타이어/노면 간 소음이 차지하는 비중이 점차 증가한다는 사실을 나타낸다.

Fig. 5 Overall Vehicle Noise at Constant Speeds and Acceleration for a Volvo F12 Truck (Sandberg, 2001)

최근 들어 많이 활용되고 있는 타이어/노면 간 소음측정방법은 주행차량의 타이어 인접부위에 마이크로폰을 설치하는 NCPX(Noble Close ProXimity)계측방법이다(조대승, 문성호, 2008). 이 방법은 센서 탈부착이 비교적 용이하여 다양한 차량과 노면조건에서 신속히 소음을 측정할 수 있다. 마이크로폰의 위치 상 차량 자체의 소음이 타이어/노면 간 소음측정 결과에 영향을 줄 우려가 있으나 한봉구 등은 NCPX 방법으로 도로교통소음을 측정할 경우 엔진소음은 타이어/노면 간 소음에 비해 1% 이하의 매우 적은 영향을 주는 것으로 보고하였다(한봉구 외, 2013). 따라서, 본 연구에서는 표면처리공법 별 타이어/노면 간 소음을 측정하기 위해 NCPX 계측방법을 활용하여 타이어 인접위치에서 음압레벨(SPL, Sound Pressure Level) 값을 측정하였으며, 차량 내부에도 탑승자의 귀와 유사한 위치에 동일한 마이크로폰을 설치하여 실내 음압레벨 값을 측정하였다.

2.3. 시험대상 및 방법

콘크리트 포장의 표면처리공법에 따른 주행패적성 평가를 위하여 공용 중인 고속도로 상에 위치한 9개 터널, 17개 구간을 선정하였다. 터널의 크기에 따라 반향되는 소음정도가 달라질 수 있기 때문에 유사한 제원을 갖는 터널을 위주로 구간을 선정하였다. 9개 터널은 모두 2

개 차로 터널로 폭원 10.0~12.8m, 높이 6.6~7.4m의 제원을 갖고 있으며 각 구간 별 연장과 표면처리 종류는 Table 2와 같다.

Table 2. Sections for Evaluating Riding Comfort of a Passenger

Section No.	Route No.	Tunnel	Length(km)	Surface Texture
1	45	A	1.4	TT ⁽¹⁾
2			1.4	TT
3	55	B	0.4	TT
4	50	C	0.6	DG ⁽²⁾
5			0.4	TT
6			0.6	DG
7			0.6	DG
8			0.4	TT
9			0.6	DG
10	40	D	0.2	TT
11			0.2	DG
12	35	E	0.4	TT
13			0.4	TT
14	27	F	1.1	LT ⁽³⁾
15		G	0.5	LT
16		H	1.3	DG
17		I	1.1	LT

⁽¹⁾ Transverse Tinned ⁽²⁾ Diamond Grinded ⁽³⁾ Longitudinal Tinned

과거 고속도로 콘크리트 포장에는 미끄럼 저항성을 우선적으로 고려해 횡방향 타이닝을 적용했으나 최근에는 소음발생을 감안하여 종방향 타이닝을 시공하고 있다. 다이아몬드 그라인딩의 경우, 콘크리트 포장의 기능성 회복을 위해 주로 노후된 포장을 중심으로 시공되고 있다. 각 공법의 노면조직 형성기준은 Table 3과 같다 (한국도로공사, 2012).

Table 3. Guide Specifications of Surface Texturing

	TT	LT	DG
Cross-section
Spacing(mm)	20~30(uniform)	19±1(uniform)	5~6.5
Cutting depth(mm)	-		3.5~5.0
Depth(mm)	3±1.5		1.5
Width(mm)	3±0.5		3~4

진동과 소음을 측정하기 위해 시험차량을 100km/h

의 속도로 정속주행하였으며, 각 구간 별 최소 2회 이상 주행하여 측정결과에 영향을 줄 수 있는 외부요인이 발생한 경우 그 측정값은 결과분석에서 제외하였다. 외부 요인으로서는 교통상황에 따른 속도변화, 인접차선의 차량 통행 및 경음기 사용 등이 있다.

현장시험에 사용된 차량의 주요제원은 Table 4와 같다. 시트에서의 진동은 승차감과 관련이 있기 때문에 차량 중량 및 서스펜션 구조, 축거 등의 제원에 영향을 받으며 타이어/노면 간 소음은 타이어 접지면적, 타이어 종류(패턴)에 많은 영향을 받기 때문에 동일한 제원의 시험차량을 통해 데이터를 측정하는 것이 중요하다. 시험차량의 모습과 타이어 패턴은 Fig. 6 및 Fig. 7과 같다.

Table 4. Specification of Test Vehicle

Gross Weight	2,005 ~ 2,070kg
Engine Displacement	2,497cc
Wheel Base	3,200mm
Driven Wheels	2WD
Suspension	MacPherson Strut (f) / Leaf Suspension (r)
Tire size	P215/70R16

Fig. 6 Test Vehicle (HYUNDAI GrandStarex van)

Fig. 7 Test Pattern (NEXEN CP521)

Fig. 8과 Fig. 9는 시험에 사용된 가속도 센서와 소음 센서의 장착모습이다. 가속도 센서는 시트에서의 진동측정에 최적화되어 있는 패드형 3축 가속도계를 사용해 조수석 시트 위에 설치하였으며 센서 위에 탑승자가 착석한 상태에서 진동을 측정하였다. 소음 센서는 타이어/노면 간 소음측정을 위해 차량외부 전륜 패널 내측에 1개를 설치하였으며 탑승자의 소음도 측정을 위해 탑승자의 목받침 좌·우 측면에 1개씩 설치하였다.

Fig. 8 Triaxial Accelerometer (B&K 4515-B) Set-up for Measuring Seat Vibrations

(a) Tire/Pavement Noise

(b) Interior Noise

Fig. 9 Surface Microphones (B&K 4949) Set-up for Measuring Noise

3. 평가결과 및 고찰

3.1. 진동분석결과

3.1.1. 쾌적성

Eq. (2)와 Table 1의 쾌적성 적용 지수에 의해 산출된 17개 구간의 총 가속도($a_{v(comfort)}$) 결과는 Table 5와 같다. 총 가속도는 $0.218\sim0.549\text{m/s}^2$ 의 분포 범위를 보이고 있으며 횡방향 타이닝 구간에서 가장 높은 0.549m/s^2 , 다이아몬드 그라인딩 구간에서 가장 낮은 0.218m/s^2 의 값을 보였다. 표면처리공법 별 평균 값을 보면 횡방향 타이닝 구간이 0.384m/s^2 로 가장 높은 것으로 나타났으며, 종방향 타이닝 구간과 다이아몬드 그라인딩 구간은 각 0.256 , 0.249m/s^2 로 비교적 유사한 것을 알 수 있다.

Table 5. Results of Vibration Total Value for Comfort

Section No.	Surface Texture	$a_{v(comfort)}$ rms(m/s ²)	Surface Texture	$a_{v(comfort)}$ rms(m/s ²)
1	TT	0.408	TT	Range 0.258~0.549
2	TT	0.382		
3	TT	0.287		
4	DG	0.230		Average 0.384
5	TT	0.360		
6	DG	0.218		
7	DG	0.283	LT	Range 0.233~0.291
8	TT	0.319		
9	DG	0.226		Average 0.256
10	TT	0.258		
11	DG	0.298		
12	TT	0.549	DG	Range 0.218~0.298
13	TT	0.508		
14	LT	0.291		Average 0.249
15	LT	0.233		
16	DG	0.240		
17	LT	0.245		

Table 5의 결과는 탑승자가 시트를 통해 전달받는 진동의 정도를 의미한다. 수치적으로 볼 때 횡방향 타이닝, 종방향 타이닝, 다이아몬드 그라인딩 구간 순으로 평균적인 진동 세기가 낮아지지만 탑승자가 느끼는 쾌적함의 정도도 동일한 순서로 우수하게 느낀다고는 볼 수 없다. 그 이유는 각 수치가 갖는 진동의 세기에 대해 인체가 인식하는 쾌적함이 어느 정도인지를 추가적으로 판단할 수 있어야 하기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 ISO에서 제시하고 있는 총 가속도 별 쾌적성 반응자료를 활용하여 표면처리공법에 따른 일반적인 쾌적성 반응정도를 Fig. 10과 같이 분류

하였다. 여기서, 제시하고 있는 ISO의 쾌적성 반응자료는 대중교통 탑승자들이 느끼는 개략적인 반응이지만 승용차에 대한 별도의 기준 자료가 없는 관계로 ISO의 자료를 현장시험 결과에 적용하여 분석하였다(ISO, 1997). ISO에서는 총 가속도 값의 범위에 따라 Not uncomfortable(전혀 불편하지 않음)~Extremely uncomfortable(극도로 불편함)까지 6단계로 쾌적함 정도를 구분하고 있다. 그 결과, 종방향 타이닝과 다이아몬드 그라인딩 구간은 Not uncomfortable 등급의 반응에 해당하는 것으로 나타났으며, 횡방향타이닝 구간은 A little uncomfortable(약간 불편함) 등급의 반응에 해당하는 것으로 나타났다.

Fig. 10 Comfort Reactions to Vibration Environments

3.1.2. 건강위험도

진동에 의한 건강위험도 평가는 쾌적성과 데이터를 분석하는 방법은 유사하나 평가방법이 다르다. 따라서 본 연구의 목표인 주행쾌적성 평가와는 다소 거리가 있으나 Table 1과 같이 일부 적용계수만 다를 뿐 측정 데이터의 분석과정은 동일하기 때문에 추가적으로 수행하였다. Table 1의 건강위험도 평가를 위한 조합계수를 살펴보면 수직방향 가속도보다 x축과 y축에 해당하는 수평방향 가속도에 더 많은 가중치가 부여되는 것을 알 수 있다. 이는 탑승자의 신체가 전신진동할 때 동일한 크기라도 전후방향 또는 좌우방향의 진동이 수직방향의 진동보다 건강에 더욱 민감한 영향을 준다는 것을 의미한다.

Table 6은 건강위험도 평가를 위한($a_{v(health)}$) 총 가속도 값을 정리한 결과이다. 쾌적성 분석결과와 마찬가지로 횡방향 타이닝이 시공된 구간 12에서 가장 높은 0.596m/s²의 총 가속도 값이 산출되었으며, 다이아몬드 그라인딩 공법이 적용된 구간 6에서 가장 낮은 0.230m/s²의 값이 산출되었다. 표면처리공법 별로 평균 값을 비교하면 횡방향 타이닝 구간이 0.409m/s²로

다른 두 공법보다 높게 나타났으며, 종방향 타이닝과 다이아몬드 그라인딩 구간이 0.272m/s²로 동일하게 분석되어 쾌적성 분석결과와 유사한 양상을 나타내었다.

Table 6. Results of Vibration Total Value for Health

Section No.	Surface Texture	$a_{v(health)}$ rms(m/s ²)	Surface Texture	$a_{v(health)}$ rms(m/s ²)
1	TT	0.425	TT	Range 0.281~0.596
2	TT	0.409		
3	TT	0.312		Average 0.409
4	DG	0.251		
5	TT	0.371		
6	DG	0.230		
7	DG	0.314	LT	Range 0.254~0.305
8	TT	0.328		
9	DG	0.244		Average 0.272
10	TT	0.281		
11	DG	0.337	DG	Range 0.230~0.337
12	TT	0.596		
13	TT	0.550		Average 0.272
14	LT	0.305		
15	LT	0.256		
16	DG	0.257		
17	LT	0.254		

전신진동에 의한 건강위험도는 진동에 노출된 시간과 총 가속도 값을 바탕으로 평가할 수 있다. ISO에서 인용하고 있는 가속도와 일일 노출시간의 관계는 다음과 같다(ISO, 1997).

$$a_{w1} \cdot T_1^{1/2} = a_{w2} \cdot T_2^{1/2} \tag{3}$$

$$a_{w1} \cdot T_1^{1/4} = a_{w2} \cdot T_2^{1/4} \tag{4}$$

여기서, a_{w1} : 노출시간 T_1 동안의 총 가속도(rms)
 a_{w2} : 노출시간 T_2 동안의 총 가속도(rms)

두 식은 신체건강에 영향을 주는 진동에너지가 동일하다고 가정할 경우 일일 노출시간과 진동 세기의 관계를 의미한다. 하지만 탑승자 관점에서의 진동 노출시간은 주행시간을 의미하며, 본 연구에서 수행한 시험과 같이 등속주행을 한 경우 노출시간은 주행거리와 비례하기 때문에 17개 시험구간의 연장 차이로 인한 노출시간 차이는 큰 의미가 없다. 따라서 총 가속도 값($a_{v(health)}$)으로 산출된 진동의 세기가 신체건강에 영향을 주기 시작하는 노출시간을 바탕으로 진동에 의한 탑승자의 신체건

강도를 평가하였으며 그 결과를 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11의 각 식은 상한선과 하한선을 바탕으로 주의 구역을 형성하고 있다. 측정된 가속도와 노출시간이 주의구역 아래에 위치할 경우 진동이 건강에 미치는 영향이 없으며, 주의구역 안에 위치할 경우 건강에 영향을 줄 잠재적인 위험이 있는 것으로 판단한다. 또한 주의구역 위쪽에 존재할 경우에는 건강에 위험을 줄 확률이 큰 것으로 판단한다. 사선처리된 4~8시간의 노출기간은 두 식의 주의구역들이 교차하며 직업적 관측 데이터가 가장 많이 존재한 구역임을 의미한다(ISO, 1997). 시험결과를 적용할 경우, 횡방향 타이닝 구간의 진동정도는 약 8시간 이상 노출되면 주의구역에 포함되며 종방향 타이닝과 다이아몬드 그라인딩 구간의 진동정도는 약 24시간 이상 노출되면 주의구역에 포함되는 것을 알 수 있다.

Fig. 11 Health Guidance Caution Zones

3.2. 소음분석결과

3.2.1. 타이어/노면 간 소음

Table 7은 17개 구간의 타이어/노면 간 소음을 음압레벨(SPL, Sound Pressure Level)로 정리한 것이다. 가장 높은 음압레벨을 보인 구간은 횡방향 타이닝 구간인 3번 구간으로, 105.2dB(A)의 overall 값을 보였다. 반대로 소음이 가장 낮은 구간은 다이아몬드 그라인딩 공법이 적용된 7번, 9번 구간으로 96dB(A)의 음압레벨을 보였다. 표면처리공법 별 평균 음압레벨을 비교하면 횡방향 타이닝 구간이 103.1dB(A)로 가장 높은 것을 알 수 있으며, 종방향 타이닝과 다이아몬드 그라인딩 구간은 각 98.5, 97.9dB(A)로 나타나 유사한 소음수준을 보였다.

음압레벨 값은 20μPa의 실효음압에 대한 측정음압(Pa)의 비율을 로그함수인 dB로 표현한 결과이며 약 6dB의 차이는 2배의 음압차이를 나타낸다. 음압의 차이를 보다 쉽게 비교하기 위해 100km/h의 주행속도에

Table 7. Results of Tire/Pavement Noise Test

Section No.	Surface Texture	Tire/pavement noise, dB(A)	Surface Texture	Tire/pavement noise, dB(A)
1	TT	102.8	TT	Range 100.4~105.2
2	TT	100.9		
3	TT	105.2		Average 103.1
4	DG	101.3		
5	TT	104.1		LT
6	DG	98.7		
7	DG	96.0		Range 96.7~100.4
8	TT	100.4		
9	DG	96.0		Average 98.5
10	TT	103.1		
11	DG	98.3	DG	Range 96~101.3
12	TT	104.2		
13	TT	104.2		
14	LT	96.7		Average 97.9
15	LT	100.4		
16	DG	96.8		
17	LT	98.4		

대응하는 엔진의 분당회전횟수로 공회전시켜 정지상태에서의 음압측정결과와 비교하였으며 그 결과를 표 8에 나타내었다. 분석결과, 종방향 타이닝과 다이아몬드 그라인딩 구간은 정지상태 음압에 비해 각각 4.8, 4.4배 높은 음압을 나타냈으며 횡방향 타이닝 구간은 약 8.1배 높은 음압을 발생시키는 것으로 나타났다.

Table 8. Comparison of Sound Pressure (Tire/Pavement Noise)

Surface Texture	Sound Pressure			Test speed (km/h)	Throttle opening (RPM)
	dB(A)	Pa	Ratio (texture/control)		
TT	103.1	2.862	8.1	100km/h	1,900
LT	98.5	1.683	4.8		
DG	97.9	1.561	4.4		
Control	84.9	0.352	1.0	0km/h	

정지상태의 측정결과(control)는 타이어/노면 간 소음을 완전히 배제한, 엔진소음 및 환경소음의 측정결과로 볼 수 있으며 주행 중 측정한 결과(TT, LT, DG)는 타이어/노면 간 소음이 가장 크게 작용한 결과로 볼 수 있다. 따라서 정지상태 음압에 대한 각 표면처리공법의 주행 중 음압비율의 차이는 타이어/노면 사이에서 발생하는 소음차이가 결정적인 역할을 한다고 볼 수 있으며, Table 8의 결과는 엔진 소음을 동일하게 제어함으로써 보다 합리적으로 도출된 결과라는 점에서 의미가 있다. 다만 고속주행으로 인한 공기흐름(와류), 주변환경 및

차량의 소음, 차량 엔진 외 구동계 소음 등은 정지상태에서의 측정조건과 차이가 있기 때문에 Table 8의 결과가 순수히 타이어/노면 간 소음만을 나타낸다고 보기에 는 무리가 있다.

3.2.2. 차량 내부 소음

Table 9는 탑승자의 좌·우 귀 부분에서 측정한 차량 내부 음압레벨의 평균 값을 정리한 결과이다. 다이아몬드 그라인딩 구간의 70.7dB(A)을 기준으로 종방향 타이닝 구간은 약 2.7dB(A), 횡방향 타이닝 구간은 약 4.1dB(A)의 음압레벨 차이를 보여 다이아몬드 그라인딩, 종방향 타이닝, 횡방향 타이닝 순으로 소음이 크게 측정된 것을 알 수 있다.

Table 9. Results of Interior Noise Test

Section No.	Surface Texture	Interior noise, dB(A)	Surface Texture	Interior noise, dB(A)
1	TT	74.4	TT	Range 71.9~76.8
2	TT	73.7		
3	TT	76.3		Average 74.8
4	DG	71.8		
5	TT	74.4		LT
6	DG	71.0		
7	DG	68.8	LT	
8	TT	71.9	Range 73.0~74.0	
9	DG	69.2		
10	TT	74.2	Average 73.4	
11	DG	70.7		
12	TT	76.8	DG	Range 68.8~72.5
13	TT	76.5		
14	LT	73.0		Average 70.7
15	LT	74.0		
16	DG	72.5		
17	LT	73.1		

Table 10. Comparison of Sound Pressure (Interior Noise)

Surface Texture	Sound Pressure			Test speed (km/h)	Throttle opening (RPM)
	dB(A)	Pa	Ratio (texture/control)		
TT	74.8	0.110	3.6	100km/h	1,900
LT	73.4	0.093	3.1		
DG	70.7	0.068	2.3		
Control	63.6	0.030	1.0	0km/h	

Table 10은 Table 8과 같이 정지상태의 측정결과를 토대로 표면처리공법 적용에 따른 차량 내부 음압의 변

화정도를 분석한 결과이다. 탑승자 입장에서 가장 큰 소음을 발생시키는 표면처리공법은 횡방향 타이닝이며, 정지상태의 약 3.6배에 해당하는 음압이 발생함을 나타낸다. 반면 다이아몬드 그라인딩 구간은 가장 낮은 2.3 배의 음압을 발생시켜 탑승자의 소음저감에 가장 유리한 것으로 나타났다.

Fig. 12 Comparison Interior Noise with Tire/Pavement Noise

Fig. 12는 타이어/노면 간 소음과 차량 내부 소음을 표면처리공법 별로 함께 도시한 결과이다. 타이어/노면 소음에 비해 차량 내부 소음은 약 24~30dB(A) 정도 낮 아지며, 두 소음의 구간 별 전반적인 양상이 유사하여 타이어/노면 간 소음이 탑승자의 소음에도 지배적인 영 향을 주는 것을 알 수 있다.

진동과 마찬가지로 차량 내부 소음에 따른 탑승자의 주행쾌적성 기준이나 규격은 없다. 소음과 관련된 대부 분의 기준은 신체건강을 기반으로 한 근로자들의 소음 환경에 관한 내용이며 본 연구에서는 국내 고용노동부 (MEL, Ministry of Employment and Labor)와 미 국의 산업안전보건국(NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health)에서 제안한 내용 을 검토하여 Table 11에 정리하였다. 동일한 노출시간 에 대해 제한하고 있는 소음기준을 비교하면 NIOSH의 기준이 국내 기준보다 엄격히 적용되고 있음을 알 수 있 다. 하지만 Table 9의 탑승자의 소음 범위로 분석된 68.8~76.8dB(A)은 두 기준 모두 해당사항이 없는 것 을 알 수 있으며, 일일 노출시간에 관계없이 건강에 영 향을 줄 정도의 소음도는 아닌 것으로 판단할 수 있다.

Table 11. Recommended Exposure Limit of Noise (MEL, 2013, NIOSH, 1998)

Exposure time (hour/day)		16	8	4	2	1	0.5	0.25
Exposure level, dB(A)	MEL	—	90	95	100	105	110	115
	NIOSH	82	85	88	91	94	97	100

4. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 터널 내 콘크리트 포장의 주요 표면 처리공법인 횡방향 및 종방향 타이닝, 다이아몬드 그라인딩 공법에 대해 각 공법이 시공된 구간을 주행하면서 탑승자의 진동과 소음에 의한 주행쾌적성을 비교·평가하였다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

1. 탑승자가 느끼는 진동을 측정하기 위해 시트 바닥에서의 3축 가속도를 측정하였으며, ISO 규격에 의거하여 전신진동에 의한 쾌적성 평가를 실시하였다. 그 결과, 종방향 타이닝과 다이아몬드 그라인딩 구간은 평균적으로 “Not uncomfortable” 등급에 해당하는 진동정도를 보인 반면, 횡방향 타이닝 구간은 약간 더 불편한 “A little uncomfortable”에 해당하는 수준의 진동을 유발한 것으로 평가되었다.
2. 전신진동에 의한 탑승자의 건강위험도 분석결과, 횡방향 타이닝 구간의 진동수준은 약 8시간 이상, 종방향 타이닝 및 다이아몬드 그라인딩 구간의 진동수준은 약 24시간 이상 노출될 경우 건강에 영향을 줄 수 있는 잠재적인 위험이 있는 것으로 분석되었다.
3. 터널을 고속주행하는 여건을 고려하여 타이어/노면 사이에서 발생하는 소음을 NCPX 측정방법으로 음압레벨을 측정하였다. 타이어/노면 간 소음은 횡방향 타이닝, 종방향 타이닝, 다이아몬드 그라인딩 구간 순으로 높게 측정되었으며, 각 구간은 정지상태의 음압에 비해 각각 8.1배, 4.8배, 4.4배 높은 음압을 발생시키는 것으로 나타났다.
4. 탑승자가 느끼는 소음도를 측정하기 위해 차량 내부에서 음압레벨을 측정하여 각 구간 별로 비교하였다. 횡방향 타이닝 구간에서 평균 74.8dB(A)로 가장 높은 음압레벨이 측정되었으며 종방향 타이닝, 다이아몬드 그라인딩 구간은 각 73.4, 70.7dB(A)의 음압레벨이 측정되었다. 이는 정지상태의 음압에 비해 각각 3.6, 3.1, 2.3배 더 높은 음압이 측정되었음을 나타낸다.
5. 타이어/노면 간 소음과 차량 내부 소음을 구간 별로 검토한 결과 타이어/노면 소음이 탑승자의 소음에 지배적인 영향을 주는 것으로 나타났다. 또한 약 69~77dB(A)의 범위로 측정된 차량 내부의 음압레벨은 탑승자의 건강에 영향을 주지는 않을 것으로 판단되었다.

이상 결론을 종합하여 볼 때 탑승자의 주행쾌적성은 다이아몬드 그라인딩 표면처리가 이루어진 콘크리트 포장이 타이닝 공법이 적용된 콘크리트 포장에 비해 더욱 우수한 것을 알 수 있다. 따라서 장대터널과 같이 주행쾌적성이 더욱 고려되어야 하는 주행여건에서는 다이아몬드 그라인딩 공법을 적용하는 것이 도로이용자에게 더욱 쾌적한 주행여건을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

다만 제한적인 시험차량을 이용해 도출된 결과이므로 다양한 차량을 대상으로 보다 광범위한 데이터의 조사, 분석이 필요할 것으로 판단된다. 또한 각 표면처리 공법의 마모도에 따른 기능성 및 주행쾌적성 변화, 마모수명과 연관된 생애비용 분석 등의 연구를 통해 보다 합리적인 표면처리공법의 선정이 가능할 것으로 판단된다.

References

- Cho, D-S, Mun, S, 2008, Determination of the sound power levels emitted by various vehicles using a novel testing method, *Applied Acoustics*, Vol. 69. 185-195
- Dukkipati, R.V. et al. 2008, *Road Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers International, ISBN 978-0-7680-1643-7
- Expressway Construction Guide Specification, 2012, Korea Expressway Corporation
- Gillespie T.D., 1992, *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, ISBN 1-56091-199-9
- Han, B-K et al., 2013, A study of eliminating the vehicle noise of engine RPM from the friction noise between tire and road pavement by using a NCPX method, *International Journal of Highway Engineering*, Vol. 15. No. 4. 31-42
- ISO 2631-1, 1997, *Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration Part 1 : General requirements*, International Organization for Standardization
- Kim, C et al., 2013, Analysis of Tunnel Noise Reduction by the Pavements and Wall Absorption, *Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Annual Autumn Conference* 717-718
- MEL, 2013, *Occupational Safety and Health Act*, Ministry of Employment and Labor, Korea
- NIOSH, 1998, *Occupational Noise Exposure, Criteria for a recommended standard*, National Institute for Occupational Safety and Health, Department of Health and Human Services, U.S.
- Sandberg, Ulf, 2001, *Tyre/Road Noise - Myths and Realities*, VTI sättryck 345, Swedish National Road and Transport Research Institute