

터널 내 주행소음 저감을 위한 포장표면처리공법에 관한 조사연구

Investigation of the surface treatment method for silent pavement in tunnels

박태순*¹, 고석범²

Park, Tae-Soon · Ko, Seok-Beom

Abstract

The tunnels that longer than 2km which have been recently constructed have serious noise problems resulting from the friction of vehicle wheels and pavement. In special, concrete pavement inside tunnels with a closed characteristic increases discomfort due to the traffic noise and the dust of pavement pollutes the air in tunnels. Therefore, it is urgent that we find out ways to cope with. This study purported to reduce noise inside tunnels covers the investigation of various pavement surface treatment methods adapted in developed countries, the analysis of the effect in noise reduction and construction methods and cases. The surface treatment method for silent pavement in tunnels reduced noise to 5dB (A)~10dB (A). Aggregate treatment method is evaluated the most appropriate method in that, related with other surface treatment method, it reduces noise and improves skid resistance. It is necessary for us to introduce equipments and design and rearrange of specification for the development of the silent pavement method in Korea.

Keywords: Tunnel pavement, noise reduction, silent surface treatment method

요 지

최근 시공되고 있는 터널은 2Km 이상의 장대 터널로서 자동차 바퀴와 포장면의 마찰로 인한 주행 소음이 매우 심각한 실정이다. 특히, 터널 내부의 콘크리트 포장은 터널의 폐쇄적인 특성으로 주행 소음의 불쾌감이 가중되고 포장에서 발생하는 분진은 터널 내 환경을 오염시키는 요인이 되고 있어 이에 대한 대책이 시급하다. 본 연구는 터널 내부에서 발생하는 주행 소음을 줄이기 위한 방안으로 선진 외국에서 채택하고 있는 각종 포장표면처리공법을 조사하여 각 공법에 대한 소음 저감 효과와 시공 방법 및 사례를 조사 분석하였다. 터널 내 각종 표면처리공법을 콘크리트포장에 이용할 경우 5dB~10dB까지 소음을 감소시킬 수 있다. 골재노출표면공법은 소음저감 및 미끄럼 저항성 향상 측면에서 기타 다른 포장표면처리공법에 비해 가장 적절한 공법으로 평가되었다. 그러나 국내 실정에 적합한 저소음 포장공법의 개발을 위해서는 장비의 도입, 설계, 시방규정의 재정립이 필요한 것으로 분석되었다.

주요어: 터널포장, 소음감소, 저소음 표면처리공법

*1 서울산업대학교 토목공학과 교수 (tpark@snut.ac.kr)

2 서울산업대학교 건설기술연구소 박사

1. 서론

산악 지형이 대부분을 이루고 있는 국내 실정에서 도로 현장 여러 곳에서 터널 공사가 수행되고 있다. 최근 시공되고 있는 터널은 2Km 이상의 장대 터널로서 자동차 바퀴와 포장면의 마찰로 인한 주행 소음이 매우 심각한 실정이다. 도로와 터널내부에서 발생하는 주행 소음은 도로이용자 및 주변생활 환경에 직·간접적인 영향을 미치고 있다. 터널 내 콘크리트 포장도로의 경우 유지관리 측면에서 유리한 점은 있으나 타이어와 포장면에서 발생하는 소음이 심하기 때문에 도로 주변에 주거단지가 형성되어 있거나 도로가 계곡에 위치 해 있을 경우 굉음은 수 Km 까지 전파되어 듣기에 매우 괴로운 음을 발생시키고 운전자의 피로를 가중시켜 사고의 간접원인을 제공하는 것으로 보고되고 있다. 또한 터널 내부의 콘크리트 포장은 터널의 폐쇄적인 특성으로 주행 소음의 불쾌감이 가중되고 포장에서 발생하는 분진은 터널 내 환경을 오염시키는 요인이 되고 있다 (박태순 외, 2001).

터널 내 주행소음 저감을 위한 포장표면처리공법에 대한 선진각국의 연구는 매우 다양하게 수행되어 왔으며 현재는 성공적인 효과를 거두고 있다. 그러나 국내에서는 터널 내 주행소음을 줄이기 위한 표면처리 방법이 시도되고 있지 않으나 표면조각 처리를 적절하게 실시함으로써 주행 중에 타이어와 포장사이에서 발생하는 소음을 줄이고 안전을 확보 할 수 있다는 선진외국의 연구보고와 실제 시공사례가 미국연방도로국 (FHWA, 1995), 유럽의 PIARC회의 (Sandberg, 1996) 등을 통하여 보고되고 있는 실정이다. 현재 국내에서는 유지관리의 편의성을 목적으로 터널 포장을 콘크리트로 시공하고 있다. 그러나 과거 아스팔트 포장에 비하여 터널 내부는 물론 갱구부에서의 소음은 매우 심각한 실정이어서 이에 대책이 시급하다.

본 연구에서는 터널 내부에서 발생하는 주행 소음을 줄이기 위한 방안으로 미국, 유럽 등 선진외국에서 채택하고 있는 각종 저소음 포장공법을 조사하여 각 공법에 대한 소음 저감 효과와 설계 및 시공 방법을 조사 분석하고자한다. 이러한 분석자료를 바탕으로 국내 실정에 적합하다고 판단되는 저소음 포장표면처리 공법에 대하여 검토 소개하고자 한다.

2. 터널 내 도로포장의 소음발생 이론

2.1 터널 내외부의 소음 예측 방정식

2.1.1 터널외부

소음레벨의 중앙치 L_{50} 의 예측에는 소음시뮬레이션법을 적용하여 자동차 1대로부터의 순간시간에서의 소음레벨식을 식 (1)로 나타낸다.

$$L_u = L_w - 8 - 20 \log_{10} l + \Delta Ld + \Delta Lg + \Delta Li \quad (1)$$

여기서,

L_u : 한 대의 자동차에 대한 임의지점에서의 소음레벨 (dB(A))

L_w : 한 대의 자동차로부터 발생하는 음향파워레벨 (dB(A))

l : 음원으로부터 예측점까지의 거리 (m)

ΔLd : 회절감쇠에 의한 보정치 (dB(A))

ΔLg : 지표면성상의 영향에 의한 보정치 (dB(A))

ΔLi : 그 외의 보정치 (dB(A))

다음에 각 자동차로부터의 소음레벨을 합성하여 임의지점 순간시간에서의 소음레벨을 구한다.

$$L_u' = 10 \cdot \log \left[\sum_{i=1}^n 10^{(L_{ui}/10)} \right] \quad (2)$$

여기서, L_u' : 임의지점에서의 소음레벨 (dB(A))

n : 소음수

2.1.2 터널부

터널갱구로부터의 소음레벨은 토목연구소제안식 (S59.3 : 도로터널의 소음전파특성)을 기초로 등가점원위치를 구하고, 갱구에 의한 회절감쇠를 고려하여 터널외부와 동일하게 시뮬레이션법에 의한 예측을 실시한다.

터널내의 실음원 (實音原)에 의해서 갱구로부터 방사되는 음향파워와 등가음원의 음향파워가 일치하는 등가점음원위치를 식 (3)으로 나타낸다.

$$Z_s' = \frac{r_o(1-AT)}{\sqrt{1-(1-AT)^2}}$$

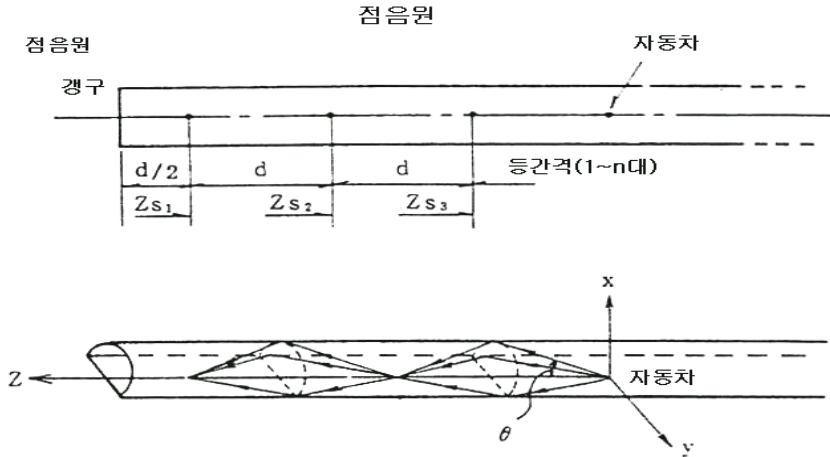


그림 1. 터널 내·외부에서의 소음 예측 (澤田 康夫 외, 1988)

$$AT = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\bar{\alpha}(1-\bar{\alpha})^m Z_s}{\sqrt{(2m+1)^2 r_o^2 + Z_s^2}} \quad (3)$$

여기서, AT : 감음율

Z_s' : 등가점음원과 갱구의 거리 (m)

Z_s : 터널내의 자동차와 갱구의 거리 (m)

r_o : 터널반경 (m)

α : 평균흡음율

(조건)

- 자동차로부터 발생한 음향파위는 터널중에서 반사해 가며 갱구방향으로 전달된다.
- 터널벽면의 흡음효과에 의해 감음된다. 단, 노면은 완전반사
- 방사되는 각도 θ 는 무수의 각도를 갖고 있다.

2.1.3 지표면성상의 영향에 의한 보정치 (ΔL_d)

지표면성상의 영향에 의한 보정은 음 전파시의 지면의 흡음효과이며, 음원과 수음점간의 평균전파경로높이와 지표면의 종류 (아스팔트·콘크리트, 흙, 초지)에 의해 설정한다. 본 검토에서는 일본음향학회제안에 의한 보정을 실시하는데 예측을 실시한 후에 지표면성상의 영향 중 지표면의 종류의 차이에 의한 영향이 크기 때문에 예측지점에 적합한 운용을 할 필요가 있다.

2.1.4 그 외의 보정치 (ΔL_i)

그 외의 보정치는 다음에 같은 보정을 필요에 따라 선택하여 실시한다.

- 도로종단구배에 의한 보정 ($0.3i + 0.1i^2$, i :구배)
- 공기흡수효과에 의한 보정 (도로주변에서 1dB (a) 이내)
- 반사효과에 의한 보정 (건축물의 보정은 완전반사 (반사율=1)로 예측)

2.2 포장소음의 발생 현황

우리 나라 고속도로의 경우 1980년대 들어 아스팔트콘크리트 포장에서 시멘트 콘크리트포장으로 일부 전환되었다. 시멘트콘크리트 포장은 아스팔트 콘크리트포장에 비해 소음이 심하여 전형적인 문제점으로 지적되어 왔으며 선진 각국에서는 시멘트콘크리트 포장표면 처리를 통한 소음 발생저감 방안을 지속적으로 연구한 결과 현재 좋은 결과를 얻고 있다. 표 1은 중부고속도로에서 현장 소음도를 측정했던 결과를 보여주고 있으며 도로의 구조, 수음점과의 이격거리 그리고 높이에 따라 발생하는 실제적인 소음 정도를 알 수 있게 해준다. 터널내부에서 직접 측정된 소음 자료의 부재로 도로에서 측정된 소음 자료를 근거로 터널내부의 소음 정도를 예측해 볼 수 있다. 구체적인 수치로 환산할 수 없으나 터널 내부에서는

벽면의 반사와 소음의 회절로 인하여 더 큰 소음이 발생할 것이라는 것을 예측할 수 있다.

도로교통소음의 발생은 소음원인 주행차량의 엔진, 타이어 마찰음 및 배기음 등에 의하여 이루어지며 발생 소음의 특성으로는 주행차량의 속도와 엔진회전수, 도로의 포장상태와 구배 및 운행차량의 하중 등에 따라 변하게 된다. 그림 2는 도로교통소음의 발생 상관도를 나타낸 것이다. 예를 들어 대형 트럭이나 버스 등의 중차량의 발생 소음도는 승용차와 같은 경량차에 비해 크며, 동일 차량의 경우에도 발진시 또는 가속시 더 큰 소음을 발생하게 된다. 또한 타이어 음과 엔진음을 비교하면 일반적으로 경량차량의 경우 저속주행시 엔진음쪽이 크며, 고속주행시에는 타이어음쪽이 더 큰 것으로 알려져 있다.

즉 차량의 소음은 크게 구동계통(엔진, 냉각팬, 배기장치, 공기역학적소음등)과 주행소음(타이어/포장의 상호작용, 차량진동등)으로 나뉘게 된다. 구동계통의 소음은 소음진동규제법시행규칙(표 2)에 나타난 소음 허용

기준에 따라 적용하고 있으므로 이 글에서는 주행소음에 관해서만 고찰하도록 한다.

2000년 1월 1일부터 2001년 12월 31일까지 제작되는 자동차는 도로에서 발생하는 소음의 원인중의 하나인 차량소음을 차량 제작과정에서 허용기준치를 설정하여 단



그림 2. 도로교통소음의 발생상관도

표 1. 중부고속도로 소음측정 결과

구 조	방음벽	구 분		기 리					
성 토 구 초	유	위 치 별		도로끝단	방음벽 前1m	방음벽 上 (4.1m)	방음벽 後10m		
		소음도 (dB(A))	L50	79-82	79-80	79-81	55.6-56.6		
			Leq	83.6-84.7	80.8-81.4	82.5-83.9	56.6-59.2		
		구 초	유	거리 별		도로끝단	방음벽 上 (5.9m)	10m	20m
				소음도 (dB(A))	L50	83-84	84-85	66-67	63.4-64.6
					Leq	84.7-86.5	84.9-85.7	66.4-67.3	64.1-65.2
위 치 별				도로끝단	상	APT 상 (27.2m)			
소음도 (dB(A))	L50	82-83	67-69	75-76					
	Leq	86-87.6	68.7-70.9	76.1-77					
구 초	방음	위 치 별		도로끝단	방음 上 (6.5m)	방음 下	APT 상 (16.1)		
		소음도 (dB(A))	L50	85-87	79-80	56-57	75.2-76		
			Leq	87.7-89	79.7-80.6	56.7-58.1	75.8-76.5		

) ① L50 : 상 소음의 기 50% 과
 ② Leq : 소음 기

계적으로 강화해가고 있으나 이는 기술적인 한계가 있어 일정한 수준에 도달하게 되면 차량소음 에너지는 더 이상 감소시킬 수 없는 문제점이 있다.

2.3 주행소음 발생 메커니즘

구동계통의 소음과 주행소음의 결합은 소음전파효과를 고려함으로써 전체주행 소음을 결정한다. 낮은 속도에서

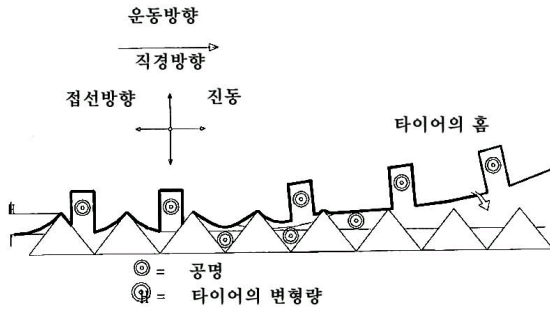


그림 3. 타이어/도로소음 발생 메커니즘 (Brite Euram 외, 1994)

도 타이어 소음은 자동차 주행소음에 중요한 부분을 차지한다. 연구에 의하면 80km/hr 이상의 속도에서 포장면과 타이어간의 소음은 매우 크게 작용한다고 알려졌다.

그림 3은 소음 발생에 관한 몇 가지 메커니즘 개념을 보여주는 것으로 타이어 진동은 직경방향, 접선방향 그리고 축방향으로 복잡한 형태를 갖는다. 타이어 진동은 1차적으로 작은 접촉면부근의 직경방향으로 뻗어나간다. 진동은 타이어 재료의 높은 감쇠효과로 인하여 접촉면

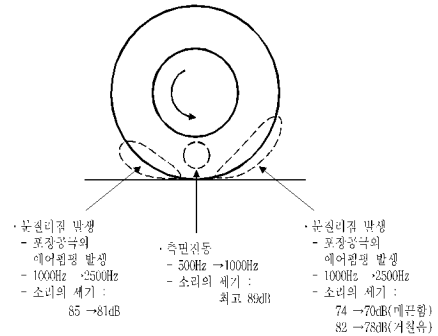


그림 4. 공간이 있는 홈을 가진 트럭타이어의소음발생 메커니즘 (Donavan, 외, 1980)

표 2. 소음·진동 규제법에 따른 차종별 소음 허용기준치

차 동 차 종 류		소 음 항 목	가속주행 소음 (dB(A))	배기소음 (dB(A))	강직소음 (dB(A))
경차동차		가	74이하	100이하	110이하
		나	76이하		
승용차동차		승용 1	74이하	100이하	110이하
		승용 2	76이하		
		승용 3	77이하		
	승용4	원동기 출력 195마력 이하	80이하	103이하	112이하
원동기 출력 195마력 초과		80이하	105이하		
화물차동차		화물 1	76이하	100이하	110이하
		화물 2	77이하		
	화물3	원동기 출력 97.5마력이하	79이하	103이하	112이하
		원동기출력 97.5마력초과 195마력이하	79이하	103이하	
	원동기출력 195마력초과	80이하	105이하		
이륜차동차		총배기량 500cc초과	77이하	105이하	110이하
		총배기량 500cc이하·125초과	74이하		
		총배기량 125이하	71이하	102이하	

주) 소음·진동 규제법 시행규칙 (2000. 5. 4 개정판)

가까이에서 주로 발산한다.

타이어의 회전 중에 중요한 순간은 타이어 홈이 접촉면을 통과하면서 떨어지는 순간으로 타이어 홈이 접촉면에 들어갈 때는 큰 가속을 받고 떨어지는 순간에는 감속이 발생한다. 이러한 연속과정으로 타이어의 진동은 크게 유발되며 소음이 발생하게 된다.

포장표면의 타이어 미끄러짐에 의해 발생된 마찰효과, 문질러짐은 포장조직이 증가함에 따라 증가하는 것으로 leading 접촉면과 trailing 접촉면에서 발생하여 더 높은 범위의 주파수에서 소리를 발생시키는 것으로 그림 4와 같다.

2.4 타이어와의 관계

타이어 홈의 모양과 깊이는 소음발생에 중요한 영향을 미친다. 타이어 홈의 모양과 깊이는 전체적인 소음발생에 있어서 포장표면과 비교할 때 영향이 비교적 작다는 사실이 발견되었으나 여전히 중요한 변수이다. 타이어 공기 펌핑 메커니즘은 타이어 홈의 형상, 타이어 마모, 포장의 중간조직 (ma-crotexture)과 관계가 깊다. 타이어 측면부 (siedwall)의 유연성은 타이어 접촉면에서 발생하는 소음의 정도를 결정한다. 그림 5는 A-I에 등록되어 있는 9개 타이어 홈패 형상에 대한 바퀴자국을 보여

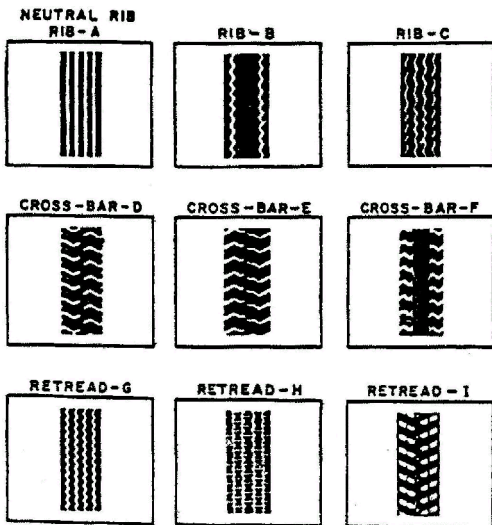


그림 5. 타이어 홈형태

주고 있다. 표 3은 측정결과를 보여주고 있으며 A-I에서 지정한 문자로 홈의 형태를 나열하였다.

그림 5와 표 3에서 알 수 있는 것은 리브형 타이어 (rib tire)가 가장 소음이 적게 발생했으며 D와 I같이 매끄러운 콘크리트상의 포켓형 타이어가 소음이 가장 크게 발생했다는 점이다. 소음이 적게 발생하는 타이어 홈 설계는 홈이 포장표면과 접촉할 때 홈 그루브 내의 공기가 빠져 나갈 수 있도록 한 설계이다. 공기가 쉽게 빠져나갈 수 없을 때 공기주머니 (air pocket) 소음이 급격히 증가하여 타이어에서 소음이 발생한다. 타이어가 마모됨에 따라 타이어 홈 형태 높이가 낮아지기 때문에 쉽게 공기가 빠져나가지 못하며 그리하여 소음은 일반적으로 증가한다.

그림 6은 타이어 형태와 도로표면에 따른 소음 변화를 나타낸 것이다. 그림 5에서 볼 수 있는 것처럼 타이어의 형태와 포장 표면은 결합에 따라 소음도 달라진다는 것이다. 즉 타이어 홈 설계는 포장 형태에 따라 다른 결과를 가져오며, 어떤 표면상에서 가장 시끄러운 타이어는

표 3. 타이어 홈형태에 따른 소음 정도

홈 형태	도로표면	세타이어 (dB(A))	중간마모 (dB(A))	얕은마모 (dB(A))
A	콘크리트	73		
	아스팔트	75		
B	콘크리트	77	81	
	아스팔트	77	79	
C	콘크리트	76		
	아스팔트	77		
D	콘크리트	84	91	87
	아스팔트	83	86	85
E	콘크리트	84		
	아스팔트	82		
F	콘크리트	81	88	
	아스팔트	81	86	
G	콘크리트	73		
	아스팔트	75		
H	콘크리트	81	86	86
	아스팔트	82		
I	콘크리트	96	94	
	아스팔트	88	90	

타이어형태와 도로표면에 따른 소음변화

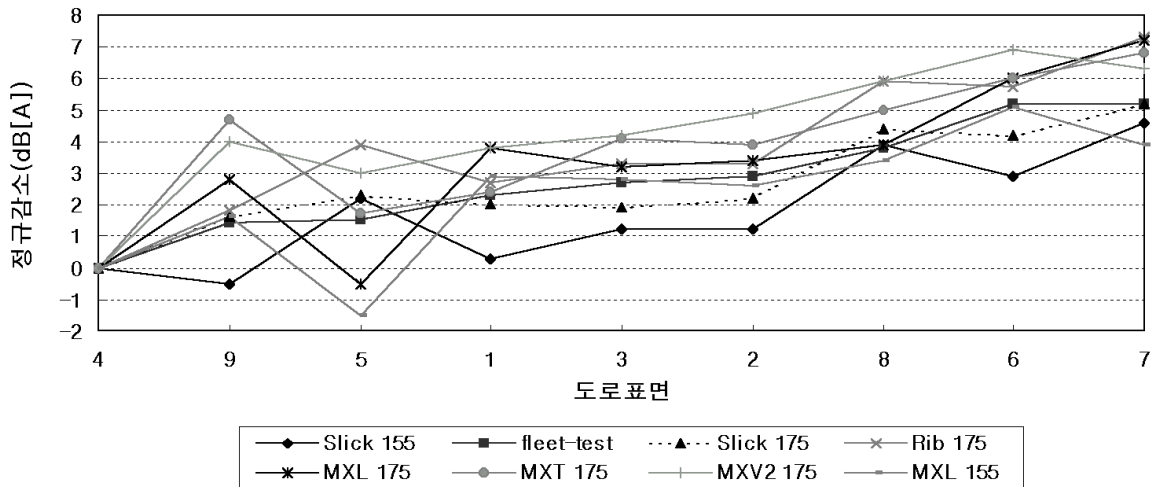


그림 6. 120km/시간과 20°C에서 다양한 타이어 형태와 도로표면에 따른 소음변화 비교

다른 표면에서는 소음을 많이 내지 않을 수도 있다 (G. J. van Blokland, 1997).

번호	아스팔트포장종류
1, 2, 3	타공성 (porous) 아스팔트
4, 5	밀입도 아스팔트
6	타공성아스팔트, 6cm 두께
7	타공성아스팔트, 8cm 두께
8	타공성아스팔트, 4cm 두께, 4-8mm chipping
9	타공성아스팔트, 6cm 두께, 16mm chipping

2.5 포장 (조직)과의 관계

표면특성에 대한 PIARC (World Road Association's Permanent International Association of Road Congresses) 기술위원회는 표면의 불규칙성 (요철)에 대한 여러 파장을 다음과 같이 정의하고 있다.

파장	조직의 분류
0.5mm 이하	미세조직 (microtexture)
0.5 ~ 50mm	중간조직 (macrotexture)
50 ~ 500mm	거대조직 (megatexture)
0.5 ~ 50m	거칠기 (roughness)

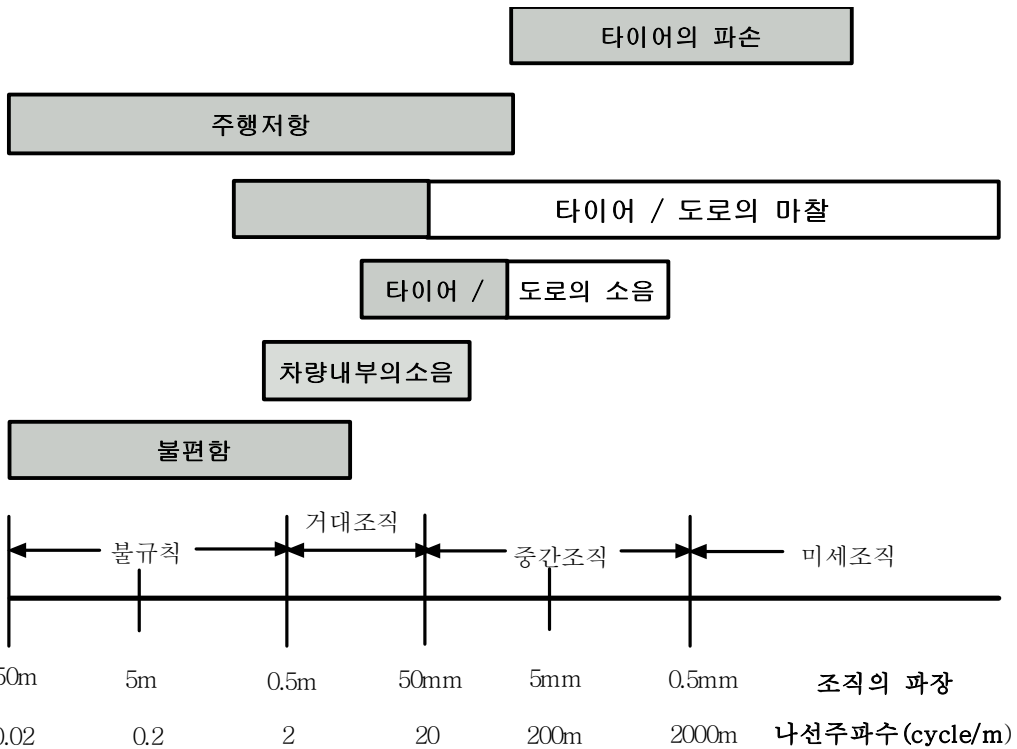
여러 공용 인자에 대해 이들 조직 범위의 상대적 중요성에 대한 비교는 국제표준기구에서 보고하였으며 이것은 그림 7에 나타나 있다. 그림 7에서 볼 수 있는 것처럼, 미세조직은 안전에 있어서는 중요한 역할을 하지만 소음 발생에 있어서는 중요한 영향을 주지 못한다.

중간조직 (macrotexture)과 거대조직 (megatexture)은 소음발생 및 안전에 있어서 중요한 역할을 한다. Sandberg는 교차 (cross-over) 주파수의 중요성을 강조하였다 (Sandberg, 1996).

포장된 표면의 표면조직은 중간조직을 형성하며 물을 제거할 수 있지만 타이어의 직경방향 진동을 유발한다. 여러 종류의 표면처리 기술이 있으며 표면처리의 종류는 포장의 종류와 국부적인 조건에 따라 변한다. 콘크리트 표면에 대한 표면처리방법은 다음과 같다. 즉, 타이닝 (종방향, 횡방향, 대각선방향); 끌기 (dragging), (Hessian 또는 burlap); 골재노출방법; 적용된 골재; 다공성 조직의 사용; 이들 방법의 결합 등이 있다.

아스팔트포장 표면 형태는 다음과 같다. 즉, 밀입도, 개립도 (중중 배수, 다공성 또는 팍콘 아스팔트라고 불림), 스톤 메스틱이다. 기타 지역적인 표면, 블럭포장과 같은 포장의 소음충격도 평가하였다.

미세조직 및 중간조직은 타이어 홈 형태의 변형을 일으



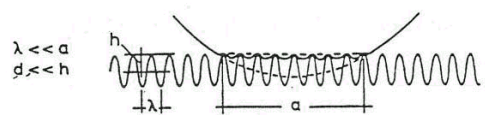
※ 밝은 면은 전 범위에 걸쳐 좋은 효과를 의미하며 반면에 어두운 면은 불리한 효과를 나타낸다.

그림 7. 조직 및 표면의 불규칙성의 범위 및 주요 예측 결과

키고 타이어 진동을 일으키게 한다. 도로의 거칠기는 차체 현가 장치의 변형을 발생시킬 뿐만 아니라 타이어의 변형이 최소로 된다. 거칠기는 차량의 승차감이 떨어지기 때문에 피해야만 한다. 거대조직 파장은 타이어 변형을 최대로 하는 범위 내에 있다. 타이어 변형에 대한 이들 영향은 그림 8에 제시되었다.

표면 소음발생에 있어서 80mm (거대조직) 파장에 따른 불규칙함 (irregularity)의 증가는 타이어 소음을 증가시키고 1차적으로 저주파수의 범위 (< 1kHz)에 있다. 중간조직 파장이 증가할 때 (약 3mm) 타이어 소음은 감소하며 1차적으로 고주파수 (> 1kHz)의 범위에 있다. 이것은 위에서 설명한 것처럼 에어 펌핑 (air pumping)과 연관되는 것으로 생각된다. 이것이 의미하는 바는 매우 매끄러운 표면은 고은 중간조직 과 개립도 표면에 비하여 소음이 더 발생될 수 있다는 것이다.

중간조직



거대조직



거칠조직

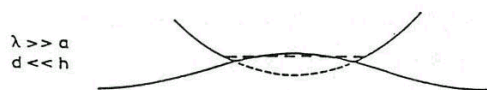


그림 8. 타이어 변형에 대한 표면 단면의 영향

그림 9는 앞에서 설명했던 통계적 통행에 의한 방법을 사용하여 얻었다. 콘크리트포장은 아스팔트포장과 비교할 경우 조직깊이와 소음레벨의 관계와 기울기가 다르다는 점에 주목하여야 한다. 포장표면 특성은 소음발생에 있어서 중요한 변수라는 것을 알 수 있으며 타이어, 차량 종류, 소음의 전파특성 역시 또한 고려되어야 한다. Sandberg (1997)는 또 다른 변수가 소음발생 메커니즘에 중요한 역할을 한다고 보고하였다. 또 다른 변수들이란 도로표면의 강성 또는 역학적 임피던스, 대기온도, 그리고 심지어 포장의 색깔을 포함한다.

강성은 바인더와 직접적으로 관련이 있으며 소음발생에 약간의 영향을 주는 것으로 생각된다. 온도는 특히, 아스팔트 포장에서 강성과 직접적으로 관련이 있다. 색깔로 인해서 포장온도는 10℃까지 변할 수 있다. Sandberg의 연구보고에 의하면 자동차운전자는 검정색 표면이 소음이 덜 나는 것으로 인식하고 있다는 것이다. 덴마크에서는 이러한 이유 때문에 새로운 콘크리트포장 표면에 검정색 실코트를 사용하였는데 Sandberg는 이것을 “placebo 효과”라고 불렀다.

3. 저소음 포장표면처리공법 비교분석

선진외국에서는 터널 내 도로포장의 전형적인 문제점인 소음을 저감시키기 위한 기법은 매우 다양하게 시도되어 왔으며 현재 사용하고 있는 방법은 포장의 종류와 지역적 조건에 따라 변화하기도 하지만 주로 저소음 포장표면처리공법 등을 사용하고 있는 것으로 조사되고 있다.

도로의 소음을 줄이고 마찰력을 확보하기 위하여 여러 종류의 포장표면처리공법이 사용되고 있다. 표면처리공법은 포장의 종류와 포장이 시공되는 지역의 지역적 조건에 따라 변화하게 된다. 현재 주로 사용하고 있는 표면처리의 대표적인 공법은 타이닝 (중방향, 횡방향)공법, 마대끝기공법이 주로 사용되고 있으며 유럽에서는 이미 오래 전부터 골재노출공법, 다공성 콘크리트포장공법 등이 사용되어 왔다. 기존 문헌·자료로부터 신설콘크리트포장도로에서의 소음저감 포장공법을 정리하여 표 4에 나타내었다. 본 장에서는 저소음 포장표면처리 공법 중 횡방향 타이닝공법, 중방향 타이닝공법, 골재노출공법, 다공성 콘크리트 공법의 특징 및 시공법에 대해 조사한 연구결과를 서술하였다.

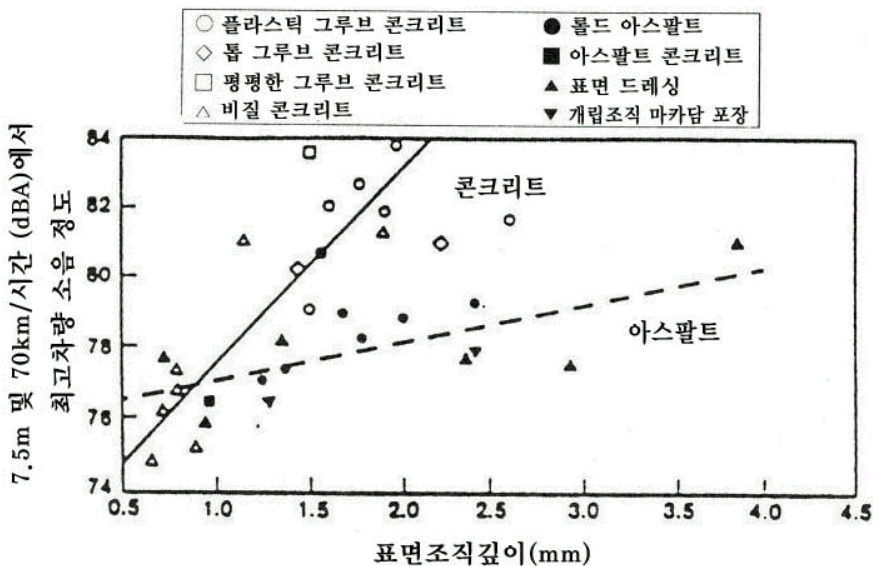


그림 9. 각종 아스팔트 및 콘크리트표면에 대한 경차량으로부터 발생된 소음과 표면조직깊이와의 관계

표 4. 신설콘크리트포장의 표면처리 공법

미감방법		방 법	사용국기	특 장
조 작 면 마 감	횡 방 향	브리쉬, 빗자루로 조작면마감, 일본은 횡방향마감으로, 독일에서는 종방향마감, 스페인은 얇한 플라스틱 브리쉬를 이용하여 종방향마감을 실시	일 본	<ul style="list-style-type: none"> • 간단한 미감방법임. 소음이 그루빙보다 작음. 국내 및 일본의 경우, 조작면이 비교적 소기에 평활하게 되는 경향이 있음. • 스페인, 독일에서는 약 30%의 실의를 사용하여 리의향을 하 있음.
	종 방 향		스 페 인 독 일	
· 사 소 경	작 에 면 연 제 를 하 여 시 는 방 법	기 에 스 로	일 본 (소 경)	리 에 서 시 작 한 방 법 의 소 음 에 서 소 경 (8~4mm)의 방 법이 스 에 서 되 었 음.
			스 (소 경)	
타	타 면 (5cm)로 시 는 방 법	스	일 본 ()	소 음, 리 에 가 기 되 는 시 시 달 에 있 음.

3.1 횡방향 타이닝 공법

지금까지 콘크리트포장 표면처리에 가장 널리 사용하 온 방법으로 유럽의 경우 브러싱 또는 그루빙의 깊이를 깊게 하는 방법을 사용하고 있으며, 미국에서는 버랩 (마 대의 일종) 끌기 방법을 많이 사용하고 있는 것으로 알려 져 있다. 횡방향 타이닝 처리한 포장 표면은 약 78dB (A)~85dB (A)의 소음도가 측정되어 가장 크게 소음을 유발하는 것으로 측정되었다.

횡방향 타이닝 표면처리 공법은 도로의 횡방향으로 그루 빙을 발생시키는 방법으로 특수한 기술이 필요치 않으며 소음 저감보다는 우천시 표면수를 배수하여 타이어와 포장 면의 수막두께를 줄여줌으로써 미끄럼마찰 저항을 증대시 켜 고속에서의 안전을 확보하는데 보다 큰 목적이 있다.

횡방향 타이닝을 사용할 때, 임의의 횡방향 타이닝과 타이닝의 간격은 시험결과로 확인할 때까지 반드시 명기 하여야 한다 (최소간격 10mm, 최대간격 40mm, 이때 25mm를 초과하는 간격이 50% 이상이 되어서는 안 된 다). 실제 타이닝의 폭은 3mm±0.5mm가 되어야 하며 깊이는 최소 3mm, 최대 6mm가 되어야 하는데 골재입 자의 밀림이 발생할 경우 최대 6mm로 시공한다.

폭이 4mm보다 작은 좁고, 깊은 그루빙이 넓고 얇은 그루빙에 비하여 소음을 줄이는데 효과적이다. 평균조직 의 깊이는 sand patch test (ASTM E 965)로 측정했을 때 0.8mm가 되어야 하는데 각각의 시험결과는 0.5mm

이상이어야 한다.

3.2 종방향 타이닝 공법

콘크리트포장의 소음저감을 위한 방법으로 시도되고 있 는 종방향 타이닝도 횡방향 타이닝과 마찬가지로 굳지 않은 포장표면의 몰탈을 부러쉬, 버랩 (burlap), 빗 (combs)과 같은 도구를 사용하여 도로의 종방향으로 그루빙을 발생시 키는 것으로 소음측정 결과 약 72dB (A)~76dB (A) 정 도로 측정되어 횡방향 타이닝에 비해 소음저감 효과 있는 것으로 보고되었으나 우천시 표면수의 배수가 원활치 못 할 경우 미끄럼저항성에 다소 문제가 발생하여 소형승용 차와 같이 타이어 홈의 폭이 좁은 경우 종방향 타이닝 폭 에 의한 영향을 받게되므로 차량의 안전운행에 문제가 될 수도 있으므로 적용시에는 충분한 사전조사가 필요하다.

종방향 타이닝공법이 필요한 경우, 특히 소음 발생 우 려지역 또는 매우 건조하고 동결이 없는 기후 지역, 타이 ning 간격은 20mm, 폭은 3mm±0.5mm 그리고 각 타이 ning 깊이는 3mm에서 6mm로 한다. 타이닝의 깊이는 ASTM E 965 sand patch test를 사용하여 측정했을 때 평균 표면의 조직깊이는 0.8mm 그리고 각 시험결과 는 0.5mm 이상 되어야 한다.

조사자료에 의하면 버랩 또는 인조 터프 끌기를 사용하 여 발생시킨 20mm간격의 종방향 타이닝이 안전하고, 내구성 있는 포장을 제공한다고 한다. 이때 이러한 조건

을 만족시키기 위해서 최소 25%의 규토질 모래가 포함되어있는 미세조직으로 이루어진 품질이 우수한 표면배합 콘크리트를 사용하여야 한다.

종방향 표면조직을 사용할 경우, 횡방향 타이닝에 비하여 표면배수가 느리고 물방울이 튀는 현상이 발생하게 된다는 것을 고려해야 한다. 영국에서 연구한 결과에 의하면 130km/시간 이상의 속도로 주행할 경우 종방향 표면조직은 마찰특성에 만족한 결과를 주지 않는다고 한다. 호주의 뉴사우스 웨일스(New South Wales)의 콘크리트포장 매뉴얼 역시 종방향 그루빙공법이 정지거리와 고속에서 브레이크를 밟은 차량의 회전 안전성이 불만족스럽다고 서술하고 있다.

3.3 브뤼싱/그루빙 공법

콘크리트 포장의 미끄럼 저항을 증대시키기 위해 몇 가지 방법을 이용할 수 있는데 가장 대표적인 방법으로는 콘크리트 포장이 아직 소성(plastic) 상태일 때 포장 표면에 시공해야 한다. 이러한 포장표면은 브러쉬나 비질 마감 또는 버랩 끌기 마감을 사용하여 시공하여 완수할 수 있다. 와이어 빗질 또는 와이어 타이닝 시공을 하면 표면에 뛰어난 조직마감을 할 수 있다. 굳어진 콘크리트포장에 대해서는 쏘컷(saw cut) 기법을 사용하여 그루빙을 만들 수 있다.

3.3.1 브러쉬 또는 빗질 마감

포장 표면 조직에 브러쉬 또는 비질 마감을 실시할 경우, 그 포장 표면에 물기가 사라졌을 때 실시하여야 한다. 포장 표면을 가로질러 균일한 모양의 0.5~1.0mm 깊이의 주름을 만들어야 한다. 중요한 것은 조직을 내기 위해서 장비가 작동하는 동안 포장 표면이 망가지거나 비정상적으로 거칠게 되어서는 안된다는 것이다. 표면 조직 시공 중에 발생한 콘크리트의 모든 흠은 콘크리트가 굳기 전에 교정되어야 한다.

3.3.2 그루빙 방법

기존 또는 새 포장에서 그루빙을 만드는 것은 미끄럼 저항을 향상시켜서 비가 올 때 수막현상을 방지하기 위한 것으로 그 효과가 증명된 기법이다. 기존 아스팔트

및 콘크리트포장에서 그루브를 만들려면, 톱이나 컷타날을 사용하여 잘라야 한다. 새 콘크리트포장에서 그루브를 만들려면, 콘크리트가 아직 소성상태일 때 만들어야 한다.

콘크리트 포장의 그루빙 방법에는 두 가지 방법이 사용되고 있다. 하나는 소성 그루빙(plastic grooving)이고 다른 하나는 쏘컷 그루빙(saw cut grooving)이다.

가. 소성 그루빙

- 진동 리브 평판(vibrating ribbed plate): 콘크리트가 소성상태일 때 그루브를 만드는 하나의 방법은 페이퍼를 가로질러 뻗어 있는 다리에 부착된 진동 리브 평판을 사용하는 것이다. 그 평판은 진동하고 있어서 골재를 콘크리트에 재분배하는데 쓰인다. 이것은 평판이 포장 슬래브를 가로로 가로질러 진행할 때 찢김과 전단(tearing and shearing)을 방지한다. 포장에 형성된 그루브는 폭과 깊이가 약 6mm, 중심과 중심의 공간이 40mm이다.
- 리브 롤러: 다른 방법은 돌출부 또는 리브가 있는 롤러를 사용하여 소성 콘크리트에서 그루브를 만드는 것이다. 이 방법을 사용하면 진동 리브 평판 방법과 같은 마감을 해서는 안 된다. 롤러는 진동하지 않기 때문에 필요한 6mm 깊이까지 침투하지 못한다.

나. 쏘컷 그루빙(saw cut grooving)

이미 굳은 기존 또는 새 콘크리트 포장에는 톱을 사용하여 그루브를 만들 수 있다. 그 시기는 현장에서 감독이 정한다.

3.4 칩 스프링클

콘크리트 포장의 칩-스프링클링(같은 크기의 골재 뿌리기)은 1970년대 중반에 벨기에에서 개발되었다. 이 방법은 아스팔트 칩셀에서 아이디어를 얻은 것으로 아스팔트의 칩셀링 방법과 유사하다. 칩핑에 사용하는 골재는 10mm~14mm 또는 14mm~20mm의 범위이고 1m² 당 6~7kg을 포설한다. 칩핑에 사용되는 골재는 형상, 청결도, 저항성 및 닦음치(polished stone value-psv)가 설계기준을 반드시 만족하여야 한다. 칩스프링 클링 방

법은 굳지않은 콘크리트에 골재를 균등하고 일정하게 칩핑시키는 것이 매우 어려웠기 때문에 벨기에에서는 시험 시공으로만 실시하였다. 그 후에는 프랑스로 이 공법이 전해지면서 방법이 발전하여 많은 량은 아니지만 현재에도 이 공법을 사용하고 있다.

3.5 골재노출 공법

표면 골재 노출공법은 콘크리트 포설 직후 표면에 지연제를 살포하여 슬래브 최상부 콘크리트의 양생을 지연시키고 하루 경과 후 최상부의 미양생된 모르터를 부러쉬 등으로 제거하여 굵은 골재를 표면에 노출시키는 공법을 말한다.

표면 골재노출 공법은 노출된 골재를 통해 충분한 조면조직 (macro texture)을 확보하여 강우시 노면 위의 수막 현상을 효율적으로 차단할 수 있을 뿐만 아니라 소음을 줄여주는 특성 때문에 저소음 포장으로 알려져 있다. 골재 노출공법은 유럽 각지에서 사용 중이며 콘크리트포장 기술의 선두격인 벨기에의 경우 신설되는 모든 콘크리트 포장에 적용하도록 하고 있다.

골재노출 공법은 콘크리트 포장의 소음저감 방법 중 매우 큰 장점을 가지고 있는 공법으로 평가되고 있으나 기술적으로 쉬운 공법이 아니므로 시공자는 충분한 경험을 가지고 있어야 한다. 그 이유는 소음 감소와 미끄럼 저항을 동시에 얻어야 하기 때문에 소음과 미끄럼 저항에 가장 우수한 표면조직 형태를 표면상에 형성시키기 위해서는 포장콘크리트의 생산방법, 시공순서, 시공장비 사용 등 여러 가지 공사시방을 철저히 따라야 하기 때문이다. 포장표면조직에 따른 소음정도를 파악하기 위해 골재노출공법, 임의간격의 종방향 타이닝공법, 횡방향 타이닝공법, 균일한 간격의 횡방향 타이닝공법에 따른 주행시험결과, 소입경 골재인 경우 골재노출공법과 임의간격의 종방향 타이닝공법이 약 70dB (A)~74dB (A)로 측정되어 다른 표면처리공법에 비해 소음이 낮게 발생하는 것으로 나타났다 (Han Young Moon 외, 2003). 하지만 임의간격의 종방향 타이닝공법은 횡방향 타이닝공법에 비하여 소음을 저감시킬 수 있으나 미끄럼 저항이 줄어들기 때문에 표면이 젖어 있을 경우 안전에 대한 우려가 발생하고 타이어 홈의 폭이 작은 소형 승용

차의 경우 운전대의 조작 및 승차감에 많은 불편을 제공할 수 있다 (박태순, 2000). 따라서 국내에서 터널 내 콘크리트포장의 소음저감을 위해서 골재노출공법을 추천한다. 골재노출 공법은 시공방법과 시공경험이 매우 중요한 변수로 작용하기 때문에 아래와 같은 사항을 고려하여야 한다.

- 가. 콘크리트에 사용하는 골재 시방준수
- 나. 노출깊이, 노출골재 개수 시방준수
- 다. 시공후 소음 및 미끄럼저항을 측정하여 결과확인
- 라. 지연제의 종류, 사용량, 몰탈 노출기의 시공속도, 콘크리트 품질저해 유무 등 시공상의 세부적인 사항은 시험시공을 통해 확인한다.

3.6 다공성 포장공법

배수성포장은 노면에서 빗물을 신속히 포장체 밖으로 배수하는 것을 목적 외에 소음저감 특성을 보유한 공법으로 차량 및 기후변화에 저항할 수 있는 포장구조 조건을 갖추어야 한다. 배수성포장은 미끄럼사고 방지, 수막현상 및 물튀김현상 방지, 야간 시인성 향상, 소음의 감소를 장점으로 기대할 수 있는 반면 공용중 차량하중에 의한 다짐작용으로 공극율이 감소하여 배수성과 흡음 성능이 저하되는 단점을 갖고 있어 배수성포장의 기능적 특성을 유지하기 위해 10^{-2} cm/sec 정도의 투수계수를 유지할 수 있도록 구조적 안정성을 확인할 수 있는 혼합물의 설계와 시공 그리고 유지관리를 철저히 하는 노력이 요구된다.

3.7 각종 표면처리공법의 소음측정결과 비교 분석

그림 10은 각 포장표면 조직의 주행시 발생하는 소음을 측정하여 비교한 자료이다. 횡방향 조직의 경우 78dB (A)~85dB (A)로 소음이 가장 크게 측정되었으며 잔골재 노출 포장은 70dB (A)~74dB (A)로 소음이 가장 작게 발생하는 것으로 측정되었다. 한편, 종방향 비질로 표면 조직을 처리한 포장은 72dB (A)~76dB (A)로 측정되어 소음이 낮게 발생하는 것으로 나타났으나 미끄럼 저항이 다른 표면 조직 방법에 비하여 낮기 때문에 안전

을 중요시되는 포장에서는 실제 적용을 재검토해야 한다. 측정 결과를 분석하면 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 동일한 방향의 같은 조직이라 하더라도 조직을 내는 방법에 따라 소음도가 달라지며 골재노출 공법의 경우 노출 골재의 크기에 따라 소음도에 차이가 발생한다는 것을 본 소음 측정 결과로부터 알 수 있어서 조직을 발생시키는 방법에 대하여도 고려를 해야 한다.

현재 국내 콘크리트 포장의 노면 마찰력 확보 및 소음 저감 대책은 대부분 타이닝 (tining) 공법에 의존하고 있다. 타이닝공법은 공용 후 수년 내에 마모되어 지속적인 마찰력 확보에 어려움을 주고 있다. 또한 타이닝공법으로 형성된 표면 조직은 차량주행시 고유의 소음을 유발하는 것으로 알려져 있다.

표면골재노출공법은 현재까지 콘크리트 포장의 주행소음을 줄이는데 가장 큰 장점을 가지고 있는 공법으로 평가되고 있다. 또한, 골재노출공법은 새로운 콘크리트 포장뿐만 아니라 기존 콘크리트 포장에 사용 할 수 있는 방법이다. 그러나, 골재노출공법은 기술적으로 쉬운 공법은 아니다. 시공자는 이 공법에 대하여 충분한 시공 경험을 쌓아야 한다. 그 이유는 소음과 미끄럼 저항을 동시에 얻어야 하기 때문에 소음과 미끄럼 저항에 가장 우수한 표면 조직 형태인 중간조직을 표면에 형성시키기 위해서는 콘크리트의 제조 방법, 시공순서, 시공장비

사용 등 여가가지 공사 시방을 철저히 따라야 하기 때문이다.

4. 골재노출 공법 시공사례 분석

노출골재 포장은 현재 소음의 감소와 미끄럼 저항을 동시에 향상시키는 가장 적절한 방법으로 평가되고 있는 것으로 나타났다. 이 공법에서 콘크리트포장은 골재를 노출시키기 위해 굳지 않은 콘크리트의 표면을 긁어내어 중간조직을 증가시킴으로써 완성된다. 이러한 표면은 최종 코팅 단계에서 습식 스크리빙 (wet scrubbing) 이나 크기 일정한 작은골재 (통상 chip 이라고 부름)를 첨가하여 완성시킬 수도 있다.

본 공법은 국내에서도 시도 할 만한 공법으로 오스트리아 시멘트협회 연구소의 연구 결과로서 특히, 입자가 작은 (8~10am) 골재를 표면에 사용하여 소음 발생을 줄이고 있다. 이 공법은 유럽의 각국은 물론, 미국, 호주, 일본에서도 시험시공을 실시하여 좋은 효과를 거두고 있는 것으로 보고되었다. 특히 벨기에에서는 콘크리트포장의 95%를 골재노출포장으로 시공하고 있는데 그림 11은 벨기에와 프랑스의 골재노출포장 시공실적이다. 그림 11에서 볼 수 있는 것처럼 골재노출포장이 매년증가하고

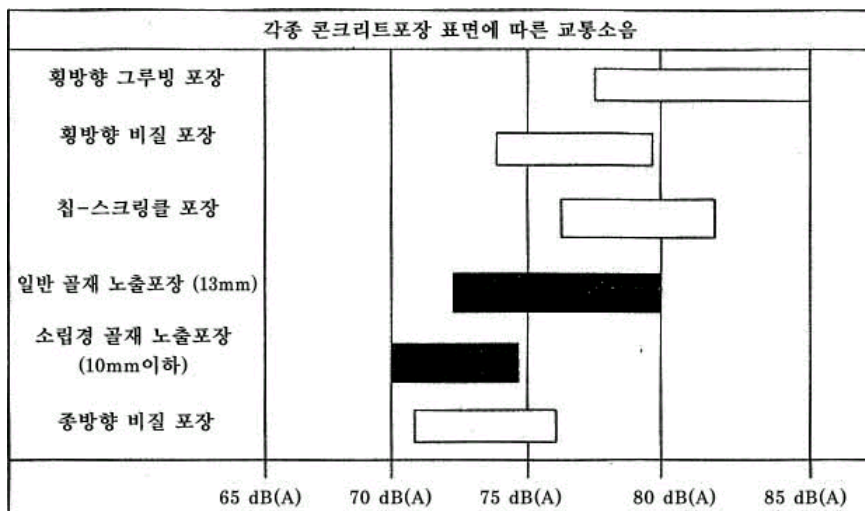


그림 10. 각종 표면처리공법의 소음 측정 결과

있는 것을 알 수 있다.

4.1 호주

노출골재 콘크리트 표면의 첫 번째 시험 구간이 1993~1994년에 건설되었다 (Monazewska, 1996). 이 부분은 습식 빗질로 표면 골재의 노출을 조절할 수 있도록 표면 세트 지연제를 사용하여 건설하였다. 14mm 골재 단층이 이용되었으며 모래패치법으로 측정된 조직 깊이의 범위는 1.46mm였다. 조직의 주요 요소는 지연제 스프레이와 빗질 기법인 것으로 언급되어 있다. 표면마찰은 우수하며, 개립도 아스팔트보다 우수한 것으로 보고되었다. 통과법을 이용하여 차량 내부와 외부에서 소음을 측정하였다. 내부에서 소음은 가장 조용한 표면으로 간주되는 개립도 아스팔트와 비슷하였다. 그러나 외부 통과측정 결과 노출골재 표면이 두 번째로 소음이 많은 포장표면으로서 타이닝된 표면을 훨씬 능가하는 것으로 밝혀졌다. 이러한 결과의 원인은 골재입경이 14mm인 큰 표면골재를 사용했기 때문인 것으로 분석되었다. 이렇게 큰 골재가 트럭의 경우에는 조용하지만, 승용차의 경우에는 유럽에서 실시된 시험 결과와 같이 골재가 작은 8mm이 보다 바람직한 결과를 산출한다는 결론이 도출되었다. 그렇지만 이후 해당 포장부분에 대한 Dash의

시험 (Dash, 1995)을 통해 측선소음이라는 관점에서 밀입도 아스팔트와 동등하다는 점이 밝혀졌다.

4.2 미국

표면골재노출공법 (복층 콘크리트 혼합, 독일/오스트리아 설계의 혼합)에 대한 미시간의 연구가 미간주의 표준 25.4mm 횡방향 타이닝과 비교되었다 (Smiley, 1995). 1993년에서 1994년까지 2년이 넘는 기간동안 노출골재 표면에 대한 소음 발생은 거의 변화를 보이지 않았다. 표면조직이 이러한 북부 환경에서 1년이 넘도록 지속적으로 유지되었다는 결론을 내릴 수 있다. 그러나 시공자의 유럽 방법에 대한 무지로 인해 기대보다 낮은 마찰수치를 야기하는 것으로 기록되었다. 이것은 두 가지 이유에서 발생하는 것으로 분석되었다. 먼저 덧마감 (over finishing)이 다소 울퉁불퉁한 가장자리 위에 평평한 측면을 만들기 위한 4~8mm의 입자를 유발하였다. 그 다음 사용한 모래가 오스트리아에서 권장된 0~1mm가 아닌 0~4mm로 지나치게 컸다.

표준 콘크리트 배합과 비교할 때 통과법을 이용하여 측정된 측선값 (차량마귀 자국에서 17m, 최소 1.5m 높이)은 사실 동일하였다 (유럽의 노출골재 = 75.9dB (A), 미시간 표준 = 75.7dB (A)). 미시간의 노출골재 콘크리트

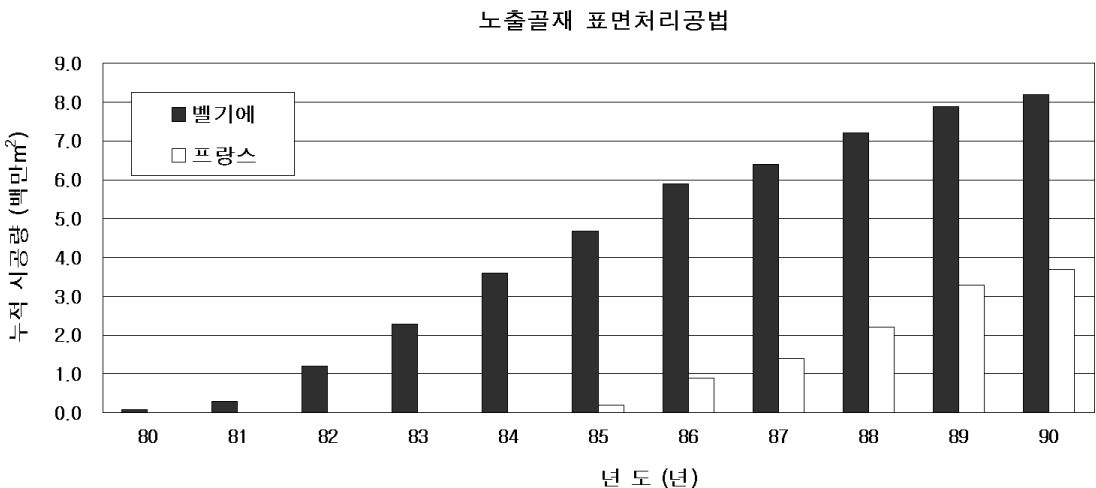


그림 11. 벨기에와 프랑스의 년도별 골재노출 포장 시공 실적

트 포장은 내구성이 있지만 유럽의 연구와 같이 나타나지는 않은 것으로 증명되었다. 노출골재 시공과정은 아주 세심한 시공법을 요구한다. 시공과정과 골재크기의 변화는 최종적인 도로소음 발생에 커다란 영향을 미칠 수 있다. 또한 예폭시수지와 콘크리트의 결합이 우수하고, 건조한 표면에 칩을 배치할 때 수지층에 있는 골재 입자의 깔기를 적합하게 하는데 문제가 있다는 것이 보고되었다. 우수한 결합은 시공기법에 의한 것이다.

콜로라도주, 아이오와주, 미시간주, 미네소타주, 노스 다코타주, 위스컨신주 및 여러 주에서 수행한 타이어/포장면 간의 소음 및 미끄럼 저항 연구 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- ① 일정간격으로 시공한 횡방향 타이닝의 경우 특히, 간격이 26mm 이상인 타이닝이 가장 듣기 싫은 소음을 발생시켰다. 이러한 사실은 미네소타주의 시험결과에서는 65mm와 78mm 간격에서, 노스다코타주에서는 52mm, 78mm 및 104mm 간격에서 위스컨신주에서는 39mm의 간격에서 재확인되었다.
- ② 미시간주 시험시공에서는 미시간 표준 26mm 횡방향 타이닝포장과 유럽의 골재노출표면포장의 소음이나 주파수 분포에서 그다지 크게 다른 점이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 한편, 골재노출표면포장의 마찰수치가 미시간 표준 횡방향 타이닝 조직에 비하여 약 10정도가 낮았다.
- ③ 미네소타 연구에서는 밀입도 아스팔트 포장이 콘크리트 포장에 비하여 전체소음을 기준으로 할 때 3dB (A) 이상 낮았다는 것을 발견하였다. 그러나, 아스팔트표면의 깊이는 콘크리트 포장 표면 깊이에 비하여 매우 낮다는 것을 알아야 한다. 깊이의 차가 아스팔트 포장과 콘크리트 포장의 소음을 발생시키는 다른 점이다. 또한 소음주파수 스펙트럼 연구에 의하면 전소음 (total noise)은 소음이 귀에 거슬리는 소음인지 아닌지를 평가할 수 있는 참된 척도가 아니라는 사실을 알게 되었다.
- ④ 차량내부소음 연구에서는 여러 다른 종류의 표면조직에서 발생하는 전소음 정도가 커다란 폭으로 변화하지 않는 것으로 나타났다. 어떤 특정한 표면 조직이 듣기 싫은 타이어/포장 소음을 발생시키는지 결정

하는데 있어서 가장 중요한 역할을 하는 것이 바로 좁은 밴드 주파수의 분포 (순수음)이기 때문이다.

- ⑤ 종방향과 횡방향 타이닝을 함께 사용하는 것은 매우 소음을 크게 발생시킨다는 것이 위스컨신 연구 결과와 TRR 보고서 652에 보고된 버지니아의 경험에서 나타났다.
- ⑥ 타이어/포장간의 소음은 차량의 속도가 변함에 따라 변화하게 된다. 96km/시간의 속도로 주행할 때 위스컨신 시험구간에서는 횡방향 플라스틱 비질 마감이가장 조용하였다. 그러나 횡방향 타이닝 (13mm간격)과 skidabrader 표면조직이 112km/시간에서 가장 소음을 적게 발생하였다.

4.3 일본

본 공사 개소는 일반도로 41호인 나고야시 동구에 위치하며, 주택이나 오피스빌딩이 밀집해 있는 지역이다. 건설중인 도시고속도로의 고가아래에 있어 현재 교통량도 27,500대/일로 교통량이 매우 많은 편이다. 그래서 내구성의 확보라는 면에서 콘크리트포장을 채용하더라도 가능한 한 타이어·노면소음의 저감을 꾀하는 것을 목적으로 유럽의 저소음화 기술 가운데서도 소립경골재 노출공법을 선정, 시험시공을 거쳐 현재 14,000m²의 본 시공을 실시하였다. 골재노출포장공법에 대한 시공 후 현장조사한 결과를 정리하면 아래와 같다.

- ① 배합은 최대입경 10mm, s/a=28~30%로 충분한 강도와 노면성상을 얻을 수 있었다.
- ② 골재노출방법은 표면의 응결지연처리와 브러싱공법 (원통모양의 회전브러쉬: 스틸 $\varphi=0.4\text{mm}$)으로 한다.
- ③ 노면성상의 목표값은 결깊이 0.7~1.0mm·입자수 55 이상이 바람직하다.
- ④ 습윤 시에는 아스팔트포장보다 저소음이 됨을 실증할 수 있었다.
- ⑤ 타입줄눈의 생략과 횡수축 줄눈폭 3mm의 시공이 가능하다.
- ⑥ 소립경 골재노출공법에 맞는 시공기계의 도입 및 개발이 필요하다-목적에 맞는 시공기계의 사용과 선정이 본 공법의 성공을 좌우한다.
- ⑦ 진공양생을 실시함으로써 실시하지 않은 경우와 비교

했을 때 골재를 균일하게 배열하는 효과가 있고, 결 깊이를 약간 작게 하는 효과를 나타냈다.

4.4 스웨덴/이태리/영국/기타국가

스웨덴에서 근사법을 이용한 노출골재표면의 소음수준을 스웨덴에서 가장 보편적인 포장 형태인 스톤 매스틱(stone mastic)표면과 비교하였다(Sandberg, 1998). 두 개의 스톤 매스틱 표면 소음레벨을 측정하는 한편, 네 개의 노출골재 표면을 연구하였다. 도로가 차량에 노출되기 전에 (새 표면), 스톤 매스틱 표면은 속도 70km/시간에서 93.7~101.9dB (A), 90km/시간에서 97.5~105.4dB (A) 범위에 있었다. 한 가지 타이어 종류를 제외하고 소음레벨이 크기가 16 mm 이하인 노출골재 포장의 소음이 더 낮았다. 최대 골재크기가 8mm와 16mm인 표면이 시험대상이 되었다. 노출골재로 인한 소음은 70km/시간에서 90.2~102.4dB (A), 90km/시간에서 94.0~104.7dB (A)이었다.

도로를 사용하기 시작하고 나서 일년 후에도 유사한 값이 측정되었다. 현재 노출골재는 70km/시간에서 99.7~102.2dB (A), 90km/시간에서 97.1~104.4dB (A)의 범위에 있었다. 최대 22mm의 골재를 이용하여 2년과 4년에 노출골재 표면을 대상으로 시험을 실시하였는데 대략 최대 22mm인 골재가 이용된 경우 도로는 근사법으로 측정된 대로 최대 16mm 골재를 이용된 경우보다 소음을 많이 발생시켰다. 골재가 더 작은 노출골재는 일년 후 스톤 매스틱 표면의 값과 아주 비슷하였다. 노출골재의 최대 크기를 8mm로 더 줄이면, 신설 도로일 때에는 스톤 매스틱보다 소음이 덜했으며, 일년 후에도 약간 더 낮았다.

오스트리아의 연구에서도 이 결론은 확인되었다(Stinglhammer 외, 1994). 최대 8mm의 골재를 포함하고 있는 노출골재 표면은 트레일러를 이용한 측정에서 5dB (A) 감소한 것으로 나타났다. 주파수 분석을 통해 가청 주파수 범위인 500~2,000Hz에서 상당히 감소한 것으로 나타났다.

영국에서 수행된 한 연구(Franklin 외, 1994)는 밀입도 아스팔트(Hot Rolled 아스팔트)와 붓질, 붓질/횡방향 타이닝, 노출골재 콘크리트포장 아스팔트를 비교하였

다. 세 가지 콘크리트 표면에 250mm 두께로 적용되어, 지속적으로 콘크리트 포장을 보강하였다. 콘크리트 표면의 타이닝 간격은 무작위 적이었으며, 간격에 대한 세부 사항은 제시되지 않았다. 노출골재는 쇄석골재(조직깊이 요건이 $1.5 \pm 0.25\text{mm}$ 인 10~6mm 조골재)를 포함한 AE 콘크리트를 이용하였다. 통계적 주행 측정법을 이용하여 다양한 표면을 평가하였다. 노출골재 표면은 밀입도 아스팔트와 비교해도 소음레벨이 낮았으며 빗질된 표면의 소음이 가장 높게 측정되었다.

이후에 영국에서 수행된 연구(Hewitt 외, 1997)도 과거의 결과를 되풀이하였다. 주행 측정이 실시되었으며 그 결과는 노출골재 콘크리트의 소음레벨이 아스팔트보다 가벼운 차량의 경우에는 2.2dB (A)까지, 무거운 차량의 경우에는 1.1dB (A)까지 낮은 것으로 나타났다. 측정위치는 차량 바퀴 자국에서 7.5m 떨어진 곳으로서 차량 속도는 90km/시간이었다. 노출골재 상층은 두께가 40mm인 공기유입 콘크리트 혼합물이었다. 조골재 크기는 10mm였으며, 조직의 깊이는 1.5mm였다. Hot Rolled 아스팔트의 조직 깊이는 평균 1.5mm 였지만 1.2mm 이하는 아니었다. 노출골재 도로표면은 상당한 주의를 기울여서 시공되었으며, 세부사항이 보고서에 제시되어 있다. 32개월 후에도 소음레벨은 거의 변하지 않아 내구성 역시 확인되었다. 이 연구(Hewitt 외, 1997)에서 횡방향으로 타이닝된 콘크리트도 측정되어, Hot Rolled 아스팔트보다 낮은 소음을 발생시키는 것으로 밝혀졌지만, 콘크리트포장 중에서 빗질된 포장은 소음이 더 컸다. 빗질된 부분과 타이닝된 부분의 깊이는 10mm~0.25mm 였으며, 조골재는 20mm였다. 타이닝된 포장은 무작위적으로 3mm 간격을 두었으며, 두께는 0.8mm였다.

영국의 연구에서 주파수 스펙트럼도 조사되었다. 연구팀은 “노출골재 표면이 보다 우수한 소음품질 특성을 제공하는 것으로 생각된다.”고 결론지었다. 수집된 스펙트럼들은 대부분의 주파수에서 감소된 수준을 보여주고 있다. 노출골재 표면과 비교할 때 타이닝 표면에서 수집된 스펙트럼이 1.6kHz 이상의 상당히 높은 소음레벨을 나타내고 있다는 결론이 주목을 끌었다. 유럽지역의 타이어/포장 소음과 관련된 연구를 면밀하게 조사해 보면 다음과 같은 두 가지 특징이 있다.

- ① 안전보다는 소음저감에 더 큰 관심을 보이고 있다.
- ② 표면조직의 배수 효과를 고려하지 않고 있다. 이는 도로의 구배를 2.5%로 사용하기 때문이라고 생각된다.

5. 결론 및 추천사항

터널 내 콘크리트포장도로는 터널의 폐쇄적인 특성으로 소음의 불쾌감이 가중되고 타이어와 포장면에서 발생하는 소음이 심하기 때문에 도로이용자에게 많은 불편과 거부감을 유발하는 요인으로 오래 전부터 문제시 되어왔으나 선진국에서는 도로에서 발생하는 소음을 발생단계에서 저감시키는 방안을 지속적으로 연구하여 좋은 성과를 거두고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 도로포장의 소음발생이론과 선진외국에서 사용하고 있는 다양한 소음저감 포장표면처리공법에 대해 고찰해 보았으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 우리나라에서는 터널 내 콘크리트포장 공법 적용시 미끄럼저항 증대에 역점을 두고 소음발생 저감을 위한 특별한 대책을 반영하지 않고 있으나 향후 다양한 저소음 포장표면처리공법에 관한 연구와 시험시공이 이루어져 도로이용자 및 주변 생활환경의 향상을 도모한다.
2. 저소음 포장표면처리공법에 대한 외국의 연구사례를 분석한 결과, 각종 저소음 표면처리공법을 터널 내 콘크리트포장에 이용할 경우 5dB (A)~10dB (A)까지 소음을 감소시킬 수 있는 것으로 조사되었다.
3. 종방향 타이닝공법은 횡방향 타이닝에 비하여 소음을 저감시킬 수 있으나 미끄럼 저항이 줄어들기 때문에 표면이 젖어 있을 경우 안전에 대한 우려가 발생하고 타이어 홈의 폭이 작은 소형 승용차의 경우 운전대의 조작 및 승차감에 많은 불편을 제공할 수 있다.
4. 현재 터널 내 콘크리트포장 표면 마무리에 사용하고 있는 규칙적인 간격의 횡방향 타이닝공법은 외국의 연구사례를 볼 때 가장 큰 소음을 유발하므로 불규칙적인 간격의 횡방향 타이닝간격 조정공법이나 골재노출공법 등을 국내에도 적극 도입하여 적용할 것을 추천한다.
5. 골재노출표면공법은 소음저감은 물론 미끄럼 저항성 향상 측면에서 기타 다른 표면처리공법에 비해 가장 적절한 공법으로 평가되었다. 그러나 국내 실정에 적합한 저소음 포장공법의 개발을 위해서는 장비의 도입, 설계, 시방규정의 재정립이 필요한 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. 박태순, 고석범 (2003), “터널 내 주행소음 저감을 위한 포장표면처리공법에 관한 조사연구”, 제4차 터널기계화 시공기술에 관한 심포지엄, pp. 207- 230.
2. 박태순, 이웅세 (2001), “도로포장의 소음발생에 관한 고찰”, 도로포장공학회지, 제3권, 제1호, pp. 86- 95.
3. 박태순 (2000), “콘크리트포장 표면처리공법 조사연구”, 서울산업대학교 건설기술연구소논문집, pp. 6- 130.
4. Han Young Moon, Sang Wook Ha and Byoung Kwon Kim. (2003), “Tire/Pavement Noise and Texture on PCC Pavement”, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 7, No. 3, May 2003, pp. 323- 331.
5. Hewitt, A. P., P. G. Abbott and P.M. Nelson. (1997), “Alternative Textures for Concrete Roads: Results of M18 and A50 Trials”, TRL Report 291, United Kingdom.
6. Franklin, R. E., D. P. Jones, and j. Mercer (1994), “Surface Characteristics of a Recently Constructed Concrete motorway in the United Kingdom”, Seventh International Symposium On Concrete Roads, Austria: CIMEUROPE s.a.r.l, pp. 91- 96.
7. Federal Highway Administration. (1995), “Highway Traffic Noise Analysis and Abatement, Policy and Guidance”, Office of Environment and Planning, Washington, D. C.
8. Sandberg, U. (1998), “Texturing of Cement Concrete Pavements to Reduce Traffic Noise Emission”, Proceedings of Transportation Research Board, Washington, DC.
9. Stinglhammer, H. and H. Krenn. (1994), “Noise Reducing Exposed Aggregate Surfaces Experience and Recommendations”, Seventh International Symposium On Concrete Roads, Austria: CIMEUROPE s.a.r.l, pp. 137- 140.

-
10. Monazewska, M. (1996), "Surface Criteria for Exposed Aggregate Concrete Surface (Low Noise Surface for Roads)", Proceedings, of the Third International Symposium on Pavement Surface Characteristics, Christchurch, New Zealand.
 11. Dash, D. (1995), "Investigation of Noise Levels in Pavement Wearing Surfaces and Development of Low Noise Concrete Roads", Road Transport Research, Vol. 4, No. 3.
 12. Smiley, D. L. (1995), "First Year Performance of the European Concrete Pavement on Northbound I-75", Michigan Dept. of Transportation, Detroit.
 13. Brite Euram. (1994), "State-of-the-Art Report and Recommendations for Practice and Further Developments", Contract No ; BREU-CT 90-0331.
 14. Donovan, P. R, and L. J. Oswald. (1980), "The Identification and Quantification of Truck Tire Noise Sources under On-Road Operating Conditions", Inter-Noise 80, Miami, Florida.
 15. Sandberg. (1996), "Proceedings of the Third International Symposium on Pavement Surface Characteristics", Christchurch, New Zew Zealand.
 16. 澤田 康夫 (1988), "トノネル坑口周邊部の騒音豫測方法について", 第42回 建設省技術研究會報告, pp. 617-621.



박태순

서울산업대학교 토목공학과 교수
tpark@snut.ac.kr



고석범

서울산업대학교 건설기술연구소 박사
koseokbeom@empal.com