

# 임의 간격 타이닝의 설계를 통한 콘크리트 포장의 소음 저감 연구

## Noise Reduction of Concrete Pavement Through Design of Random Transverse Tine Spacing

박진회\* · 조윤호\*\*

Park, Jin Whoy · Cho, Yoon Ho

### 1. 서 론

콘크리트 포장은 아스팔트 포장에 비해 강도 및 내구성이 우수하고 설계 수명이 길기 때문에 중차량이 통행하는 고속국도 등에 적용되고 있다. 강도 및 내구성 등 구조적인 측면에서 우수한 이 포장은 아스팔트 포장에 비해 타이어와 포장면에서 발생하는 소음이 크기 때문에 주민들의 민원을 야기시킬 수 있으며 운전자의 피로감을 높일 수 있다.

일반적으로 도로에서 발생하는 소음은 크게 자동차 엔진 소음과 포장/타이어 소음으로 나눌 수 있다. 이 중 포장면과 타이어 사이에서 발생하는 소음에 대한 연구는 국외에서는 이미 30여년 전부터 시작되었지만 국내의 경우 표면처리에 대한 소음 저감 연구는 미비한 실정이다.

콘크리트 포장에서 발생하는 소음 중에서 도로 주변 및 운전자에게 가장 큰 영향을 미치는 것이 일정한 간격으로 시공되고 있는 횡방향 타이닝에서 비롯되는 Whine현상이다. 본 연구에서는 콘크리트 표면 처리에 적용되고 있는 횡방향 타이닝의 최적 배열을 통해 소음을 저감시키는 표면 설계를 제시하였다.

### 2. 소음 발생 메커니즘 및 소음 저감 원리

차량이 도로 주행 시 발생하는 소음은 크게 엔진음과 같은 기계적인 소음과 타이어와 포장면 사이에서 발생하는 소음으로 구분된다. 차량 속도가 증가할수록 기계적인 소음보다는 타이어/포장 소음이 전체 소음에 있어서 점차 큰 비중을 차지하게 된다.(www.chalmers.se)

타이어/포장 소음은 200Hz~3kHz에 걸쳐 분포되어 있어 인간에게 민감하게 작용한다. 이 소음은 크게 타이어 진동에 의한 소음, 공기 역학적인 소음, 타이어와 표면과의 충격에 의한 소음으로 구분되며 대부분의 소음은 타이어와 표면과의 충격에 의해 발생된다.(김병삼·홍동표, 1994) 이것은 타이어의 원주방향으로 배열된 타이어의 패턴홈들이 표면과 충돌하며 발생하는 반복적인 충격음으로 피치 소음(pitch noise)이라고도 한다. 피치 소음은 타이어의 재료물성, 패턴의 모양, 노면 형상(profile) 등에 의해 영향을 받는다. 여러 소음원 중에서 차량의 속도가 증가할수록 트레드 패턴(Pattern Vibration Noise)에 의한 피치 소음의 비율이 지배적인 것으로 나타났다.(김병삼·홍동표, 1994)

현재 콘크리트 포장에는 일정한 간격의 횡방향 타이닝이 시공되고 있다. 피치 소음의 경우 반복적인 충격으로 인해 발생하는 것으로 트레드 패턴과 도로 표면과의 충격이 주기적으로 발생하게 되면 일정한 주기를 형성하면서 사람에게 불쾌감을 유발시키는 순음(pure tone)을 발생시킨다. 따라서 소음을 감소시키기 위해서

\* 정회원·중앙대학교 건설환경공학과 석사과정· 02-816-0251(E-mail : kapac@hanmail.net)

\*\* 정회원·중앙대학교 건설환경공학과 부교수· 02-820-5336(E-mail : yhcho@cau.ac.kr)

는 포장 표면의 타이닝 불규칙하게 배열함으로써 특정 주파수의 소음이 크게 발생하는 것을 억제해야 한다. 즉, 충격음으로부터 형성되는 피크(peak)를 여러 개로 분산시켜서 피치 소음으로 인한 소음을 줄일 수 있는 표면 조직의 최적 설계가 요구된다. 그림 1은 순음과 분산음에 대한 주파수 특성을 나타내고 있다.

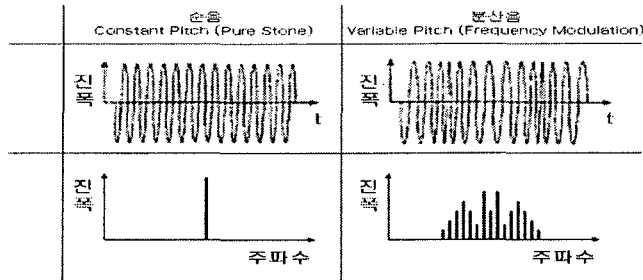


그림 1. 순음과 분산음에 대한 주파수 특성

### 3. 패턴 시뮬레이션 모형

콘크리트 포장의 타이닝 랜덤화에 따른 소음도 결과에 대한 내용은 있었지만 랜덤화 방법에 대한 연구는 거의 없었다. 그러나 타이어 관련 기계 공학적 연구의 경우, 소음 저감을 위한 타이어 트레드 패턴 배열에 대한 논의는 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 기존 타이어 트레드 패턴 연구 결과를 바탕으로 콘크리트 포장의 타이닝 랜덤화를 시도하였다.

타이닝 최대 간격과 최소 간격, 간격의 종류, 간격 종류별 개수를 선정 후 타이닝 배열을 랜덤화하여 그 스펙트럼을 평가하였다. 또한 기존 등간격 타이닝 노면의 마찰력 수준을 유지하기 위하여 단위면적당 타이닝 수를 동일하게 하여 미끄럼 저항성을 기존의 경우와 동일하게끔 노력하였다. 타이닝의 랜덤 변수를 도출하기 위한 방법으로 (0,1) 사이의 연속된 수  $\{U_i\}$ 를 생성하는 LCG(linear congruential generators) 알고리즘을 사용하였다.(Bowman, 1995)

먼저 (0, 1)의 값을 갖는 유니폼 랜덤 배열을 생성한 후 타이닝 간격의 종류와 동일한 수로 균등하게 구간을 나누어 각 구간의 범위 내에 있는 값들은 특정한 타이닝 간격 값을 갖게 하였다. 즉 20mm, 30mm, 40mm의 타이닝 간격을 랜덤 배열할 경우 (0, 1]의 값을 갖는 랜덤 배열을 생성 후, 배열의 값이  $0 < \text{배열의 값} \leq 1/3$ 이면 20mm를,  $1/3 < \text{배열의 값} \leq 2/3$ 이면 30mm를,  $2/3 < \text{배열의 값} \leq 1$ 이면 40mm를 배정하였다.

생성한 노면을 평가하기 위하여, 피크비(peak ratio), crest factor, 그리고 분산(variance) 값을 계산하였다. 피크비는 등간격 노면 스펙트럼의 최대값과 임의의 간격 타이닝 간격 모델의 스펙트럼 최대값의 비를 의미하는 것으로 특정 주파수에 집중된 에너지가 얼마나 낮아졌는지를 평가할 수 있다. crest factor는 스펙트럼의 평균값과 최대값의 비를 나타낸 것으로 이 값과 분산으로부터 스펙트럼의 평탄성을 판단할 수 있다. crest factor를 비교하는 이유는 평균값과 피크값의 차이가 많이 날수록 귀에 거슬리는 소음이 발생하기 쉽기 때문이다.

타이닝 패턴 변화에 대한 입력신호의 스펙트럼 변화를 살펴보기 위해 다양한 경우의 타이닝 간격 랜덤화 모델을 생성하였다. 먼저 간격 종류에 대한 각각의 개수가 등분포인 경우를 최대간격과 최소간격을 변화시킨 모델(모델번호 1~7)과 간격 종류를 변화시킨 모델(모델번호 8~15)로 나누어 살펴보았다. 다음으로 간격 종류의 개수가 정규 분포를 이루는 경우를 정규 분포(모델번호 16~27)와 역정규 분포(모델번호 28~39)의 형태로 나누어 조사하였다. 마지막으로 앞서 간격 종류의 개수가 등분포인 경우에서 가장 평탄한 스펙트럼을 나타냈던 모델 10과 모델 11을 정규 분포(모델번호 40~43)와 역정규분포(모델번호 44~47)로 구분하여 스펙트럼을 분석하였다.

위의 과정을 통해 분석을 실시한 결과 최대 타이닝 간격과 최소 타이닝 간격의 차가 크고 타이닝 간격의 종류가 많아질수록 노면 프로파일의 스펙트럼이 평탄하게 나타났다. 또한 노면 프로파일의 스펙트럼을 결정



하는 중요한 요소는 타이닝 간격의 종류와 구성비임을 알 수 있었다.

다양한 노면 모델을 선정하여 비교한 결과 표 1에 제시된 5가지 조건이 타 모델에 비해 crest factor, 분산, 피크비 값이 작게 나타났으며 스펙트럼 또한 비교적 평탄함을 알 수 있었다. 그림 2과 그림 3은 5가지 모델 중 모델 40과 모델 43에 대한 스펙트럼 분석 결과를 보이고 있다.

표 1. 선정 모델별 조건 비교

모델 No.	최대 간격과 최소 간격	간격 종류 및 구성비	2m당 타이닝 개수	crest factor	분산	피크비
10	10~50	10_15_20_25_30_35_40_45_50 (uniform)	62	1.5732	0.0007	0.1502
40	10~50	10_20_30_40_50 (1:2:2:2:1)	62	1.5431	0.0008	0.1474
43	10~50	10_20_30_40_50 (3:2:1:2:3)	63	1.5870	0.0006	0.1471
45	10~50	10_15_20_25_30_35_40_45_50 (1:2:2:3:3:2:2:1)	63	1.4819	0.0010	0.1442
47	10~50	10_15_20_25_30_35_40_45_50 (3:2:2:1:1:1:2:2:3)	63	1.5703	0.0007	0.1512

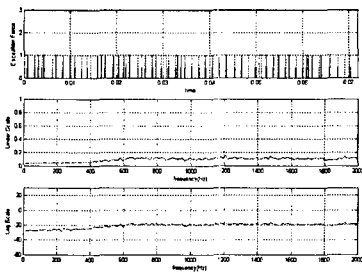


그림 2. 모델 40의 입력 스펙트럼

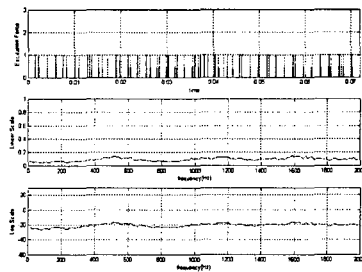


그림 3. 모델 43의 입력 스펙트럼

위 결과로부터 선정된 5가지 노면 모델의 신뢰도를 평가하기 위해 각각의 경우에 대하여 1000개의 랜덤 화 노면 프로파일을 생성하여 분석하였다. 먼저 각 노면 프로파일의 스펙트럼에 대한 평균을 구했으며 또한 각 주파수에서의 표준편차를 구하여 평균 스펙트럼 참값(true mean spectrum value)의 신뢰성 구간을 산정 하는데 사용하였다. 평균값의 표준편차를 데이터수가 유한한(N) 단일 데이터로부터 구하는 경우 그 값은 다음과 같이 구할 수 있으며 student-t 분포(distribution)를 갖는다.

$$S_x = \frac{S_x}{N^{1/2}} : \text{평균의 표준편차} \tag{식 1.}$$

여기서  $S_x$ 는 단일 데이터 세트의 표준 편차이다. 따라서 평균값의 참값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$x' = \bar{x} \pm t_{v, P} S_x \tag{식 2.}$$

여기서 t-estimator  $t_{v, P}$ 는 자유도( $v = N - 1$ )와 확률(probability) P의 함수이다. 그러나 이 경우처럼 데이터수가 많은 경우에는 student-t distribution은 정규 분포(normal distribution)를 갖게 된다. 피크가 발생



하는 주파수와 그 지점에서 피크값을 표 2에 나타냈다.

스펙트럼의 크기를 비교하기 위하여 30mm 등간격 일때 840Hz에서 발생한 스펙트럼 피크 값과 비교해보면 모든 경우에 그 크기가 약 87~88% 감소한 것을 볼 수 있으며(피크비 0.12~0.13) 이를 환산하면 약 18dB가 감소한 것을 볼 수 있다. 물론 이것은 소음도가 18dB 감소한다는 의미가 아니며 특정 주파수에 집중되어 있던 타이어를 가진하는 입력신호의 최대 크기가 18dB 감소했다는 의미이다. 모델 40이 가장 낮은 피크비와 평탄한 스펙트럼을 나타내어 가장 좋은 노면 모델이라 볼 수 있다. 그러나 모델 43와 모델 45도 신뢰성 구간을 고려해볼 때 비교적 우수한 노면 모델이라고 판단된다.

표 2. 스펙트럼 피크값의 95% 신뢰성 범위

노면모델	피크값의 주파수	1000개 평균 피크값±신뢰성 구간
10	1724Hz	0.1283 ± 0.0021
40	1212Hz	0.1210 ± 0.0020
43	515Hz	0.1248 ± 0.0020
45	1751Hz	0.1265 ± 0.0020
47	1728Hz	0.1311 ± 0.0022

#### 4. 시험 시공 및 소음 측정 실험

실내 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 현재 시공 중인 대구-포항간 고속국도 제 1공구에 본 설계 표면을 적용하였다. 본 연구를 통해 설계된 3개 구간을 포함하여 총 5개 구간을 각각 100m씩 시공하였다. 앞서 제시했던 5가지 간격 배열 중에서 비교적 우수한 스펙트럼 분포를 보인 모델을 적용하여 3가지 설계 표면을 현장에 적용하였다. 그 밖에 비교를 목적으로 시험 도로에 시공되었던 임의의 간격 타이닝 구간을 재현하였고, 위스콘신에서 제시한 임의의 간격을 적용하였다.

소음 측정은 교통 개방 이전의 승용차 한대에 대한 내부 및 외부 소음을 측정했고, 교통 개방 후의 도로 변 소음을 측정하였다. 측정 구간은 본 연구 결과에서 제시된 3개 구간 중 첫 번째 구간을 제외한 2개 구간과 위스콘신 제시 구간, 시험 도로 재현 구간, 그리고 일반 횡방향 타이닝 구간 등 총 5개 구간이다. 표 3와 표 4에서는 소음 측정 실험 조건 및 세부 사항을 제시하였다.

표 3. 승용차 한대에 대한 소음 측정 실험 조건

측정 조건	내 용	비 고
시험 차량	SM520 2004년식	주행 거리 : 2500km
측정 소음	Pass-by method (측정거리 - 7.5m)	설계 1번 구간을 제외한 전체 구간
	실내 소음	설계 1번 구간을 제외한 전체 구간
측정 횟수	각 5회	결과값이 현저하게 차이나는 경우 1회씩 추가 측정
차량 속도	60km/h, 80km/h, 100km/h, 120km/h	

표 4. 교통 소음 측정 조건

조건	규정 내용	본 연구에서의 실험 조건
측정점	측정 높이 : 1.2~1.5m	1.2m
	청각 보정 회로 : A 특성	A 특성
소음측정기 조건	동특성 : 빠름(Fast)	빠름(Fast)
	소음자동분석계 사용시	샘플주기 : 200ms
	샘플 주기 1초이내, 5분 이상 측정	회당 측정시간 : 5분씩 5회 측정



#### 4.1 실내 소음 측정

각 표면 처리 구간에서 주행 중인 차량 안에서의 소음도를 측정하였다. 속도가 일정하게 유지되었을 시점에서 기어를 중립으로 한 후 실내 소음도를 조사하였다. 표 5에서는 각 구간에서 측정된 속도별 평균 소음도를 나타내고 있다.

실내 소음 측정 결과 표면 처리에 따른 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 속도에 따라 전체적으로 소음도가 증가하고 있지만, 구간별 소음도 차이는 1dB(A) 내외로 큰 차이를 나타내지 않았다. 주파수 분석 결과 대부분 비슷한 분포를 보이고 있지만 120km/h의 고속 주행시 일반 구간의 경우 1kHz 부근에서 임의 간격 구간에 비해 높은 소음도를 보였다. 따라서 실내 소음의 경우 전체적인 소음도에서는 비슷한 결과를 보였지만 주파수별 소음도에서는 고주파수 영역에서 임의 간격 구간에 대한 소음 분산 효과가 있다고 판단된다.

표 5. 실내 소음 측정 결과

	설계 2 구간	설계 3 구간	국외 문헌	시험 도로 재현	일반 구간
60km/h	60.0	61.0	59.7	60.4	60.5
80km/h	63.7	64.1	63.9	63.9	62.7
100km/h	66.5	67.3	66.6	66.8	66.8
120km/h	68.7	69.9	70.3	69.3	69.3

#### 4.2 실외 소음 측정

임의 간격 횡방향 타이닝에 대한 소음 저감 효과를 조사하기 위해 시험 시공 구간에 대해서 실외 소음을 측정하였다. 차량은 실험 조건은 ISO 11819-1에서 제시한 조건을 바탕으로 실험을 진행하였다. 소음기의 위치는 차량 주행 차로의 중앙을 기준으로 7.5m 떨어진 지점이었으며 차량이 일정 속도를 유지한 후 기어를 중립으로 하여 소음 측정기를 지나는 시점에서의 소음을 측정하였다.

실외 소음에 대한 측정 결과를 보면 전체적으로 일정 간격의 횡방향 타이닝 구간(일반 구간)에 비해 임의 간격 횡방향 타이닝 구간에서 소음 저감 효과를 보이고 있다. 가장 소음도가 낮게 측정된 구간은 설계 3 구간이다. 일반 구간과 비교했을 때 약 2.5~3dB(A) 정도의 소음 감소를 나타냈다. 설계 2 구간의 경우에도 설계 3 구간에 비해 많게는 1dB(A) 정도 차이를 보였지만 120km/h의 고속으로 주행한 경우에는 거의 비슷한 소음도를 기록했다. 위스콘신주 연구 결과에서 제시된 간격을 바탕으로 시공된 국외 문헌 구간의 경우 설계 2 구간과 비슷한 결과를 보이고 있으며 일반 구간과 비교했을 때에도 100km/h 이상의 고속 주행시 소음 저감 효과가 나타났다. 시험 도로 재현 구간의 경우, 저속에서는 효과가 뚜렷하게 나타나지 않았지만 속도가 증가할수록 점차 일반 구간과의 소음도 차이를 볼 수 있었다. 본 실험에 대한 측정 결과는 표 6에 제시되어 있다.

표 6에서 보듯듯이 속도가 증가할수록 발생 소음도 증가하고 있다. 60km/h에서 80km/h로 속도가 증가하는 과정에서 가장 소음 차이가 많은 것으로 나타났으며 속도가 증가할수록 소음도의 증가치는 점차 완만해짐을 알 수 있다. 설계 3 구간의 경우 모든 속도에 대해서 일반 구간에 비해 소음 감소치가 뚜렷하게 나타나고 있다. 그 밖의 임의 간격 구간에서도 속도가 점차 증가할수록 일반 구간과의 소음도 차이를 볼 수 있다. 기초 설계 단계없이 임의로 시공되었던 시험 도로 재현 구간의 경우, 임의 간격 타이닝 구간 중에서 소음 저감 효과가 가장 떨어지는 것으로 나타났다.

측정된 소음도에 대한 주파수를 분석하였다. 전체적으로 1~2.5kHz 범위에서 피크치를 보였다. 따라서 60km/h 이상의 속도에서 발생하는 소음에서는 타이어/포장 소음이 지배적인 역할을 하는 것으로 판단된다. 그림 4~그림 5에서는 100km/h와 120km/h일 때의 구간별 주파수에 대한 분포를 비교하고 있다.



표 6. Pass-by 소음 측정 결과

	설계 2 구간	설계 3 구간	국외 문헌	시험 도로 재현	일반 구간
60km/h	68.6	67.5	68.9	69.6	70.3
80km/h	73.0	72.7	73.9	73.8	74.9
100km/h	76.1	75.6	76.6	77.3	78.8
120km/h	78.6	78.3	79.1	79.8	81.6

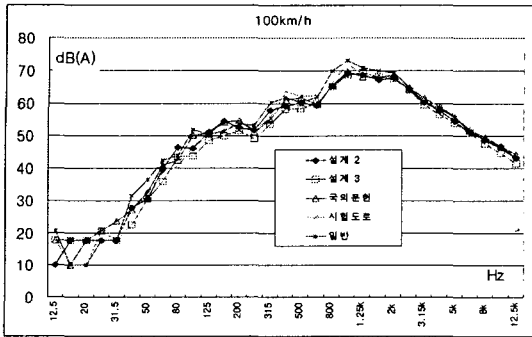


그림 4. 100km/h 주행시 발생 주파수 비교

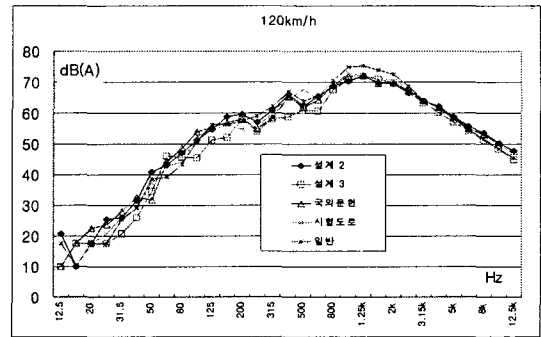


그림 5. 120km/h 주행시 발생 주파수 비교

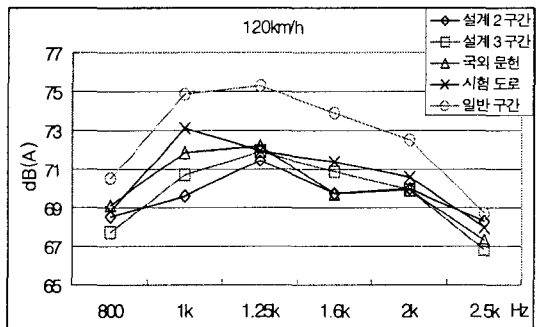
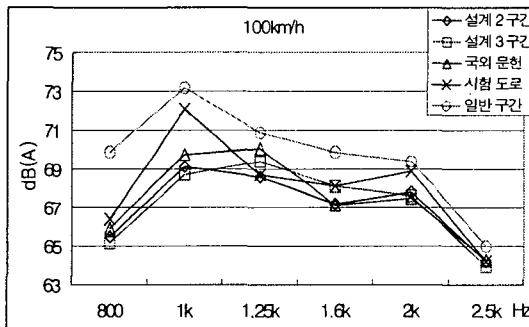


그림 6. 800Hz~2.5kHz 의 각주파수별 발생 소음도(좌 : 100km/h, 우 : 120km/h)

인간이 가장 민감하게 들을 수 있는 소리는 1kHz 이상이고 고주파수 범위에서 크게 발생하는 음은 불쾌하게 느낄 수 있으며 이를 소음이라 할 수 있다. 따라서 1kHz 및 주변 주파수에 대한 각 구간별 음압을 비교하는 작업도 필요하다. 그림 6에서는 800~2500Hz에서의 주파수 분포를 나타내고 있는데 이를 비교해 보면 일반구간에서의 주파수별 소음도가 전체적으로 높게 발생한 것을 알 수 있다. 대부분의 경우 피크값은 1~1.6kHz에서 발생했으며 임의의 간격 구간들은 일반 구간에 비해 낮은 소음도를 보였다. 소음도가 가장 낮게 측정되었던 설계 3 구간과 일반 구간을 비교해보면 임의의 간격 타이닝에서 주파수가 분산되어 나타난 것을 볼 수 있다.

### 5.3 교통 소음 측정

교통 개방 이후 각 구간에 대한 교통 소음을 측정하였다. 본 실험에 대한 측정 결과는 그림 7에 제시하였다. 구간별 평균 교통량은 53~68대로 나타났다. 등가 소음 레벨 측정 결과, 일반 타이닝 구간과 랜덤 타이닝 구간은 1~1.7dB(A)차이를 보였다. 가장 낮은 소음이 측정된 구간은 국외문헌 구간으로 80.0dB(A)가 측정되었다. 설계 3 구간의 경우 Pass-by 소음 측정 결과와는 달리 임의의 간격 타이닝 구간 중에서 가장 높은 소음



이 측정되었다. Pass-by 소음 측정 결과에서와 마찬가지로 일반 타이닝 구간에 비해 임의간격 타이닝 구간에서 낮은 소음을 기록했다. 그러나 Pass-by 소음 측정시 최고 3dB(A)의 차이를 보인 점과 비교할 때 교통소음에 대한 효과가 다소 떨어지는 것으로 나타났다.

랜덤 변수를 도출하여 설계한 임의의 간격 구간에서의 소음 측정 결과, 소음 저감 효과를 보였을 뿐 아니라 1kHz 부근에서 발생하는 피크(peak)를 분산시킴으로써 결과적으로 피치 소음으로 인한 소음을 감소시킨 것으로 판단된다. 그러나 중차량이 포함된 교통 소음의 경우에는 트럭과 버스 등에서 발생하는 기계적인 소음이 전체 소음에 영향을 준 것으로 볼 수 있다.

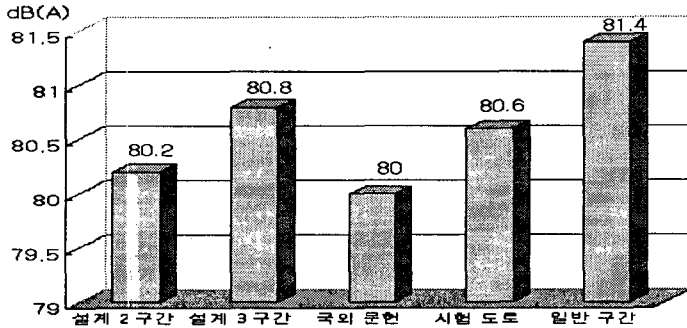


그림 7. 교통 소음 측정 결과

## 7. 결 론

소음 발생의 기본 메커니즘을 바탕으로 소음 저감을 위한 타이닝 패턴 랜덤화 설계를 실시하였다. 임의의 간격 타이닝 설계 방법을 제안하였으며, 생성된 노면 프로파일에 대한 스펙트럼을 평가하는 방법을 제시하였다. 현장 시험 시공을 통한 소음 측정 분석을 통해 임의의 간격 타이닝에 대한 소음 저감 효과를 살펴본 본 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 주행 중인 자동차에서 발생하는 소음은 속도가 증가할수록 타이어/포장 소음의 비중이 지배적으로 나타났으며, 특히 타이어와 노면과의 충돌에서 발생하는 피치소음이 전체 소음에 큰 영향을 주는 것으로 조사되었다. 피치 소음은 타이닝 간격 배열에 대한 최적 설계를 통해 저감시킬 수 있다고 판단된다.
2. 타이어의 소음 저감 연구 방법을 임의의 간격 타이닝 배열에 적용할 수 있다고 판단하고 LCG 알고리즘의 이론을 근거로 설계 변수를 도출하였다. 단, 현장 시공성을 고려하여 타이닝 빗살(rake)의 길이는 2m로 가정하였고 기존 포장에 가진 단위 면적당 타이닝 수를 동일하게 하여 유사한 마찰저항을 갖게 하였다.
3. 최대 타이닝 간격과 최소 타이닝 간격의 차가 크고 또한 타이닝 간격의 종류가 많아질수록 노면 프로파일의 스펙트럼이 더 우수하게 나타났다. 또한 노면 프로파일의 스펙트럼을 결정하는 중요한 요소는 타이닝 간격의 종류와 구성비임을 알았다.
4. 실내 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 고속국도에 시험 적용하였으며, 승용차를 대상으로 각각 실내외 소음을 측정하였고 교통 상태에서의 소음을 측정하였다. 실내 소음의 경우, 구간별로 뚜렷한 차이를 보이지 않았지만 승용차를 대상으로 한 실외 소음은 임의의 간격 타이닝 구간이 일반 구간에 비해 낮은 소음도를 보였고 그 중 설계 3 구간에서 가장 소음 저감 효과가 큰 것으로 나타났다. 그러나 교통 소음 측정의 경우 임의의 간격 타이닝에 대한 소음 저감 효과가 크지 않았다. 이는 중차량에서 발생하는 기계적인 소음이 전체 소음에 영향을 미친 것으로 판단된다.



## 참고 문헌

1. Dominick Billera, Bela Schmidt, Wayne Miller, **Stop the Whine! Narrow Band Level Measurements of Three Highway Pavements**, January. 1997
2. Roger L. Wayson, **Relationship Between Pavement Surface Texture and Highway Traffic Noise**, NCHRP Synthesis 268, 1998
3. Wisconsin Department of Transportation, **Noise and Texture on PCC Pavements**, June. 2000
4. 문준범, 박진희, 권순민, 한승환, 조윤희, **콘크리트 포장 표면처리 방법에 따른 소음 감소 방안 연구**, 한국도로학회 논문집 제6권 제4호, 2004
5. 한양대학교, **소음 및 배기가스 저감 환경 친화 콘크리트의 개발 연구**, 한국건설기술연구원, 2002
6. Ulf Sandberg, Jerzy A. Ejsmont, **Texturing of Cement Concrete Pavement to Reduce traffic Noise Emission**, TRB, 1998
7. [www.chalmers.se/Hypertext/prof-E/SandbergUlf-E](http://www.chalmers.se/Hypertext/prof-E/SandbergUlf-E)
8. 김병삼, 홍동표, **타이어와 소음**, 한국소음진동공학회지 제4권 제4호, 1994
9. K. Hieronimus, G. Hellener, **Reduction of car sound emission by means of systematic development work**, Unikeller conference 91, 1991
10. John H. Varterasian, **Quieting Noise Mathematically-Its Application to Snow Tire**, Research Labs., General Motors Corp.
11. Richard L. Bowman, **Evaluating Pseudo-Random Number Generators**, Computer & Graphics, vol.19 no.2, pp.315-324, 1995
12. James E. Gentle, **Random Number Generation and Monte Carlo Method**, springer, 2003
13. Ziad S. Saad, John R. Jaeckel, Yosef Z. Becker, David Kuemmel, Alex Satanovsky and Kristina Ropella, **Design of a Randomized Tining Rake for Portland Cement Concrete Pavements Using Spectral Analysis**, Transportation Research Record 1702, Paper No. 00-1136, pp.63-68, 2000
14. ISO, **Acoustic - Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise**, International Standard ISO 11819-1, 1997
15. 성내경, **실험설계와 분석**, 자유아카데미, 1997
16. Douglas C. Montgomery, George C. Runger, **Applied Statistics and Probability for engineers**, Arizona State University, 1999