



콘크리트 포장의 소음 저감을 위한 임의 간격 타이닝 설계 및 적용

Noise Reducation of Concrete Pavement through Application of Random Transverse Tining

박진회* 최태희** 조윤호***
Park, Jin Whoy Choi, Tae Hui Cho, Yoon Ho

Abstract

This study suggests a suitable random transverse tining for reduction tire/road noise from concrete pavement. Through literature reviews, random transverse tining that can disperse the energy concentrated to the specific frequency was suggested using the LCG(linear congruential generators) algorithm. The spacing of tining from this study is applied to Daegu-Pohang express highway. For the purpose of comparison, two other random tining sections were included that are research products from Chung-Ang university and Wisconsin DOT. In result of pass-by noise measurement by car, though designed section is superior to the others as noise reduction by reducing pitch noise, the effectiveness is not large. In case of traffic noise measurement, lower noise was observed at random transverse tining sections than uniformly transverse tining section, too. But there are some differences between pass-by noise and traffic noise.

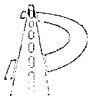
Keywords : *random transverse tining, tire road noise, pitch noise, LCG algorithm, frequency analysis*

요 지

본 연구에서는 콘크리트 포장에서 발생하는 소음을 저감시키기 위한 최적의 임의간격 횡방향 타이닝 설계 간격을 제안하였다. 기존 문헌조사를 바탕으로 소음 발생에 대한 원인을 규명하였고, LCG(linear congruential generators) 알고리즘 이론을 이용하여 특정 주파수에 집중되는 에너지를 효과적으로 분산시킬 수 있는 타이닝의 간격을 설계하였다. 실제 시뮬레이션 결과를 대구-포항 고속국도 현장에 적용하였고 기존 국내외에 적용된 임의간격 횡방향 타이닝 시공도 병행하여 실내·외 소음 및 교통소음을 비교하였다. 실내·외 소음 측정 결과, 피치 소음으로 인한 소음을 감소시킴으로써 임의간격 횡방향 타이닝 구간이 일반구간 보다 낮은 소음도를 보였으나, 그 효과가 크지 않았다. 교통 소음 측정에서도 전체적으로 일반 타이닝 구간에 비해 임의의 간격 횡방향 타이닝 구간에서 더 큰 소음저감 효과를 확인할 수 있었으나, pass-by 소음 측정과는 다소 차이를 보였다.

핵심용어 : 임의간격 횡방향 타이닝, 타이어/포장 소음, 피치 소음, LCG 알고리즘, 주파수 분석

* 정희원 · 중앙대학교 토목공학과 석사과정
** 정희원 · 중앙대학교 토목공학과 박사과정
*** 정희원 · 중앙대학교 건설환경공학과 부교수



1. 서론

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 30여 년 전부터 시작되었지만 국내의 경우는 미미한 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 제시하고자 한다.

2. 표면 처리를 통한 소음 저감 연구 사례

노스다코타(North Dakota)에서는 I-94에서 9가지 표면처리 방법을 적용하여 소음을 평가하였다. 횡방향 타이닝(13mm, 19mm, 26mm, 52mm, 78mm, 104mm), 26mm 횡방향 사선(skewed) 타이닝, 19mm 종방향 타이닝, 그리고 임의간격 횡방향 타이닝(26-52-78-104mm) 등을 이용하여 실외 소음을 측정할 결과, 사선 타이닝과 임의 간격 횡방향 타이닝에서 소음 저감효과가 나타났다. 그러나 실내 소음의 경우에는 각 구간에 대한 소음도 차이를 찾지 못했다. 타이닝 간격이 넓은 구간보다 타이닝 간격이 좁은 구간에서 소음도가 낮은 것을 볼 수 있었다(Wayson, 1998).

콜로라도 교통국에서는 덴버 동부지역 부근 I-70 시험구간에 각각 3가지의 일정간격 횡방향 타이닝(13mm, 19mm, 26mm), 횡방향 및 종방향 아스트로터프 마대깔기, 임의 간격 횡방향 타이닝, 19mm 종방향 아스트로터프 마대깔기, 그리고 임의 간격 횡방향 및 종방향 saw cut 등 9가지 종류의 표면형태를 시험 시공하였다. 가장 소음이 낮게 측정된 구간은 종방향 타이닝 구간이었다. 임의 간격 타이닝 구간의 경우, 노스타코다와 달리 소음이 타구간에 비해 높게 나타났다. 차량 내부에서 측정한 소음도는 구간별로 큰 차이를 보이지 않았다(Wisconsin, 2000).

미네소타는 Albert Lea 부근 I-90과 Willmar 부근 TH 12에서 소음 측정을 실시하였다. 시험 구간은 각각 횡방향 타이닝(26mm, 45mm, 52mm, 65mm, 78mm), 아스트로터프 마대깔기, 임의 간격 횡방향 타이닝(26-39-52-65mm), 그리고 아스팔트 구간이다. 실외 소음 측정 결과에서는 아스팔트 구간이 가장 낮은 소음도를 보였으며, 아스트로터프 마대깔기 구간에서도 소음이 적게 발생했다. 임의 간격 횡방향 타이닝의 경우, 일반 횡방향 구간과 큰 차이를 보이지 않았다.(Utah DOT, 2000).

위스콘신에서는 종방향, 횡방향 및 사선 타이닝, 골재 노출, 아스팔트 등에 대한 소음 비교 실험을 실시하였는데, 포장면에서 발생하는 whine은 임의 간격 횡방향 타이닝으로 제거할 수 있는 것을 확인하였다. 이들은 25mm를 초과하는 타이닝 간격을 50% 이하로 제한하고 10~40mm의 범위에서 임의 간격 횡방향 타이닝을 적용하는 것이 소음 저감 효과가 있는 것으로 보고했다(Wayson, 1998).

중앙대학교에서는 시험 도로에서 포장 표면에 따른 소음 감소에 관한 기초연구를 수행하였다. 소음 측정 실험은 18mm와 26mm 종방향 타이닝, 인조잔디 깔기, 임의 간격 횡방향 타이닝 구간이었다. 소음 측정 결과에서는 종방향 타이닝 구간에서 소음 감소 효과를 보였다. 그러나 임의 간격 타이닝 구간에서는 일반 구간과 큰 차이를 보이지 않았다(조윤희, 2004).

문한영은 골재노출, 그루빙, 종방향 및 횡방향 타이닝, 임의 간격 타이닝 등 다양한 표면 처리에 대한 소음 측정 실험을 실시하였다. 실험 결과 골재 노출과 종방향 그루빙 공법에서 소음이 적게 발생했고 임의 간격 타이닝 구간에서도 소음 저감 효과를 나타냈다(한양대, 2002).

임의 간격 타이닝을 적용했을 때 발생하는 소음도에 대해서 노스다코타, 위스콘신, 문한영 등의 연구에서는 일반 횡방향 타이닝 구간에 비해 소음 저감 효과를 보였다. 그러나 콜로라도와 미네소타, 중앙대 등의 연구는 임의 간격 타이닝의 소음 저감 효과가 나타나지 않았다. 이러한 결과들에 비추어볼 때, 각각의 연구에 적용된 임의 간격 배열에 따른 소음 저감 가능 여부를 살펴볼 시점이 되었다. 본 연구에서는 국내의 연구결과를 바탕으로 소음 발생 이론에 대한 고찰을 통해 최적의 임의 간격의 설계를 제안하고 이들의 현장 적용 가능성을 살펴보았다.

3. 소음 발생 메커니즘 및 소음 저감 원리

차량이 도로 주행시 발생하는 소음은 크게 엔진음과 같은 기계적인 소음과 타이어와 포장면 사이에서 발생하는 소음으로 구분된다. 그림 1은 속도에 따른 기계적 소음과 타이어/포장 사이의 소음 발생 관계를 나타내고 있는데, 차량 속도가 증가할수록 기계적인 소음보다는 타이어/포장 소음이 전체 소음에 있어서 점차 큰 비중을 차지하게 된다(Sandberg, 2002).

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 포장 표면과 충돌하며 발생하는 반복적인 충격음으로 피치 소

음(pitch noise)이라고도 한다. 피치 소음은 타이어의 재료물성(material properties), 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).

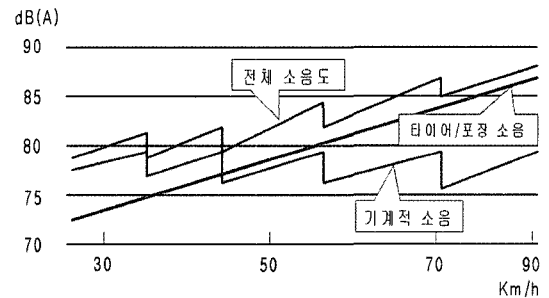


그림 1. 속도에 따른 기계적 소음과 타이어/포장 소음 관계 (Sandberg, 2002)

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 위해서는 포장 표면의 타이닝을 불규칙하게 배열함으로써 특정 주파수의 소음이 크게 발생하는 것을 억제해야한다.

즉, 충격음으로부터 형성되는 피크(peak)를 화이

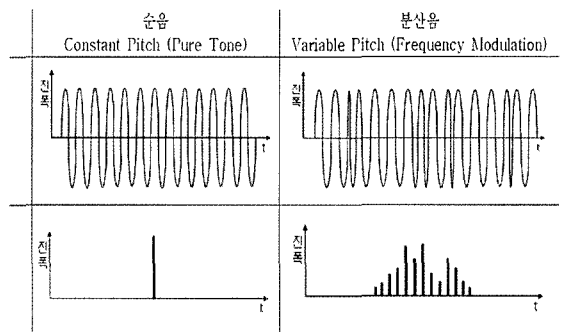


그림 2. 순음과 분산음에 대한 주파수 특성(www.tut.fi)



트 노이즈(white noise : 모든 주파수 형태를 가지며, 각 주파수 성분의 크기가 일정한 신호) 형태로 분산시켜서 피치 소음으로 인한 소음을 줄일 수 있는 표면 조직의 최적 설계가 요구된다. 그림 2는 순음과 분산음에 대한 주파수 특성을 나타내고 있다.

4. 패턴 시뮬레이션 모형

콘크리트 포장의 임의 간격 타이닝 적용에 따른 소음 저감 연구는 있었지만 임의 간격 도출 방법에 대한 연구는 거의 없었다. 그러나 소음 저감을 위한 타이어 트레드 패턴에 대한 논의는 자동차 관련 소음 분야에서 활발히 이루어져 왔으며 현재까지도 계속되고 있다. 이에 본 연구에서는 기존 타이어 트레드 패턴 연구 결과를 바탕으로 콘크리트 포장의 타이닝 랜덤화를 시도하였다.

타이닝의 최대 및 최소 간격, 간격 종류를 정하는 과정에는 몇 가지 고려할 사항이 있다. 우선 실제 시공에 사용하는 타이닝 빗살의 폭이 2m 정도로 비교적 좁다. 또한 타이닝 홈의 폭이 3mm 이므로 실제 타이닝 간격을 일정값 이하로 작게 할 수 없으며, 시공성을 고려하면 간격을 소숫점 단위로 설계할 수 없다. 또한 안전성을 고려할 때 타이닝 간격을 일정값 이상으로 크게 할 수 없는 한계도 있다.

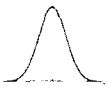
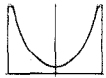

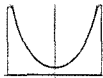
따라서 타이닝 최대 간격과 최소 간격, 간격의 종류, 간격 종류별 개수를 선정 후 타이닝 배열을 랜덤화하여 그 스펙트럼을 평가하였다. 또한 기존 일정 간격 타이닝 표면의 마찰력 수준을 유지하기 위하여 단위면적당 타이닝 수를 동일하게 하여 미끄럼 저항성을 기존의 경우와 같은 수준으로 유지하였다. 주어진 조건들을 만족시키고 동시에 주파수의 집중 현상을 막기 위하여 타이닝의 임의간격에 대한 합리적 변수를 도출하기 위한 방법으로 (0,1) 사이의 연속된 랜덤한 배열집합 $\{U_i\}$ 를 생성하는 LCG(linear congruential generators) 알고리즘을 사용하였다(Bowman, 1995).

먼저 0과 1사이의 값을 갖는 유니폼 랜덤 배열을 생성한 후 타이닝 간격의 종류와 동일한 수로 균등하게 구간을 나누어 각 구간의 범위 내에 있는 값들이 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, 차량의 실내의 소음특성 및 사람의 수음특성을 고려하여 주파수 범위를 정하고, 그 주파수 범위에서 피크비(peak ratio), crest factor, 그리고 분산(variance) 값을 계산하였다. 피크비는 일정간격 타이닝의 스펙트럼 최대값과 임의 간격 타이닝 모델의 스펙트럼 최대값의 비를 의미하는 것으로 특정 주파수에 집중된 에너지가 얼마나 낮아졌는지를 평가할 수 있어 타이닝 간격의 랜덤화 정도를 파악할 수 있다. crest factor는 스펙트럼의 평균값과 최대값의 비를 나타낸 것으로 이 값과 분산으로부터 스펙트럼의 평탄성을 평가할 수 있다. crest factor를 비교하는 이유는 평균값과 피크값의 차이가 많이 날수록 귀에 거슬리는 소음이 발생하기 쉽기 때문이다.

타이닝 패턴 변화에 대한 입력신호(input signal)의 스펙트럼 변화를 살펴보기 위해 다양한 경우의 타이닝 간격 랜덤화 모델의 시뮬레이션을 수행하였으며 그 스펙트럼 결과를 비교하였다. 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 역분포(정규 분포 반대의 구성비)(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 역분포(모델번호 44~47)로 구분

표 1. 본 연구에서 분석한 간격 모델 구분 예

구분	간격 종류 및 구성비	모델 예	간격 종류 및 구성비	비고
기존 일정간격	30mm 일정간격	-	-	일반구간
간격의 각각의 개수가 등 (uniform) 분포	최대간격과 최소간격을 변화시킨 모델 (모델번호 1~7)	1	28_30_32	2mm 간격
		5	20_30_40	10mm 간격
	간격 종류를 변화시킨 모델 (동일한 간격 차) (모델번호 8~11)	8	20_25_30_35_40	5종류
		10	10_20_30_40_50	5종류
		11	10_15_20_25_30_35_40_45_50	9종류
		간격 종류를 변화시킨 모델 (다른 간격 차) (모델번호 12~15)	12	20_23_27_32_40
14	10_17_26_37_50		5종류	
간격의 각각의 개수가 정규 (normal) 분포	정규 분포 (모델번호 16~27)	17	10_15_20_25_35_50_60 (1:2:2:2:2:1)	
		25	10_15_20_25_35_50_70 (1:2:3:3:3:2:1)	
		27	10_15_20_25_35_45_80 (1:2:3:3:3:2:1)	
	역분포 (정규분포 반대의 구성비) (모델번호 28~39)	29	10_15_20_25_35_50_60 (2:1:1:1:1:2)	
		37	10_15_20_25_35_50_70 (3:2:1:1:1:2:3)	
		39	10_15_20_25_35_45_80 (3:2:1:1:1:2:3)	
모델번호 10과 11의 타이닝 간격의 개수가 정규(normal) 분포	정규 분포 (모델번호 40~43)	40	10_20_30_40_50 (1:2:2:2:1)	
		43	10_15_20_25_30_35_40_45_50 (1:2:2:3:3:3:2:2:1)	
	역분포 (정규분포 반대의 구성비) (모델번호 44~47)	45	10_20_30_40_50 (3:2:1:2:3)	
		47	10_15_20_25_30_35_40_45_50 (3:2:2:1:1:1:2:2:3)	

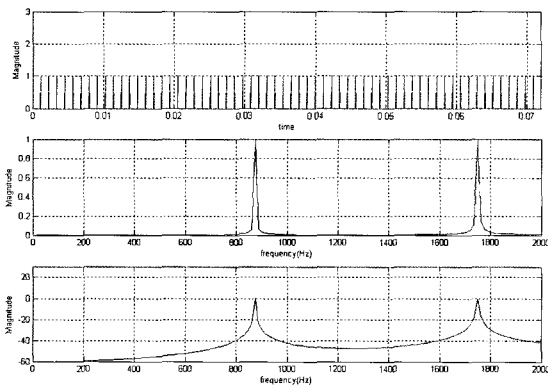


그림 3. 일정간격 입력 스펙트럼

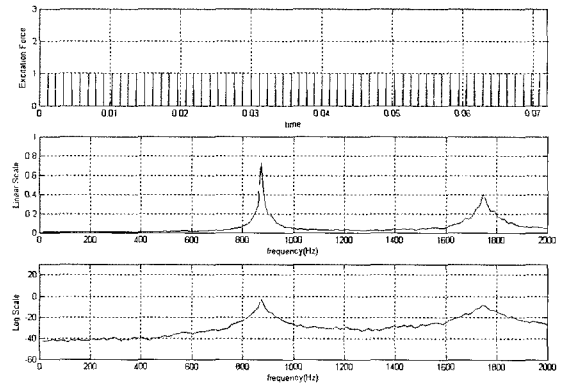


그림 4. 모델 1의 입력 스펙트럼

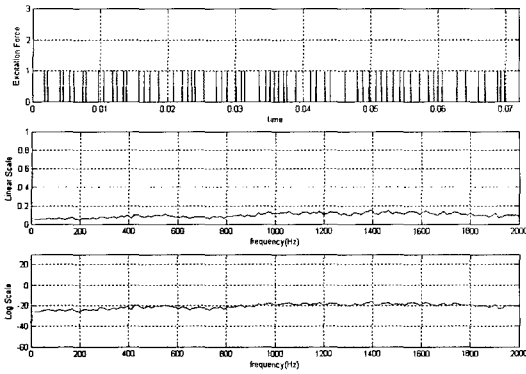


그림 5. 모델 17의 입력 스펙트럼

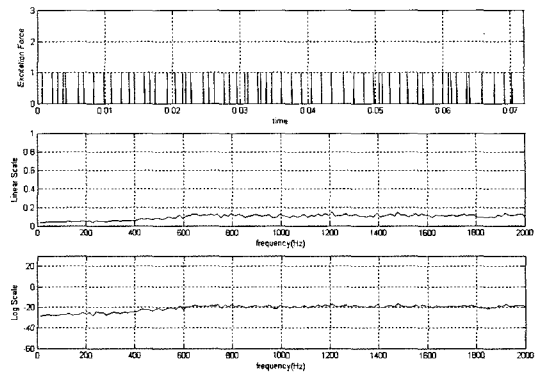


그림 6. 모델 40의 입력 스펙트럼

표 2. 모델 별 스펙트럼 분석 결과

구 분	모델 예	최대간격~최소간격	간격 종류 및 구성비	피크비 (peak ratio)	crest factor	분산 (variance)
기존 일정간격	-	-	-	1.0000	15.4224	0.0406
간격의 각각의 개수가 등 (uniform) 분포	1	28 ~ 32	28_30_32	0.7279	11.6815	0.0079
	5	20 ~ 40	20_30_40	0.1827	1.9697	0.0015
	8	20 ~ 40	20_25_30_35_40	0.1771	1.9495	0.0017
	10	10 ~ 50	10_20_30_40_50	0.1518	1.6131	0.0006
	11	10 ~ 50	10_15_20_25_30_35_40_45_50	0.1502	1.5732	0.0007
	12	20 ~ 40	20_23_27_32_40	0.1962	2.1286	0.0019
	14	10 ~ 50	10_17_26_37_50	0.1618	1.6610	0.0006
간격의 각각의 개수가 정규(normal) 분포	17	10 ~ 60	10_15_20_25_35_50_60 (1:2:2:2:2:2:1)	0.1569	1.6413	0.0006
	25	10 ~ 70	10_15_20_25_35_50_70 (1:2:3:3:3:2:1)	0.1711	1.8233	0.0007
	27	10 ~ 80	10_15_20_25_35_45_80 (1:2:3:3:3:2:1)	0.1739	1.8175	0.0007
	29	10 ~ 60	10_15_20_25_35_50_60 (2:1:1:1:1:1:2)	0.1650	1.7484	0.0004
	37	10 ~ 70	10_15_20_25_35_50_70 (3:2:1:1:1:2:3)	0.1812	1.9987	0.0007
	39	10 ~ 80	10_15_20_25_35_45_80 (3:2:1:1:1:2:3)	0.1801	2.0112	0.0006
모델번호 10과 11의 타이닝 간격의 개수가 정규 (normal)분포	40	10 ~ 50	10_20_30_40_50 (1:2:2:2:1)	0.1474	1.5431	0.0008
	43	10 ~ 50	10_15_20_25_30_35_40_45_50 (1:2:2:3:3:3:2:2:1)	0.1442	1.4819	0.0010
	45	10 ~ 50	10_20_30_40_50 (3:2:1:2:3)	0.1471	1.5870	0.0006
	47	10 ~ 50	10_15_20_25_30_35_40_45_50 (3:2:2:1:1:1:2:2:3)	0.1512	1.5703	0.0007

하여 스펙트럼을 분석하였다. 표 1에서는 본 연구에서 분석한 간격 모델의 구분과 각각에 대한 예를 나타내고 있으며, 그림 3~그림 6은 표 1에 제시된 모델에 대한 스펙트럼 예를 보이고 있다. 스펙트럼은 각각의 다른 시드넘버(seed number)를 이용하여 20개를 생성한 후, 평균을 나타낸 것으로 특정한 경우에 대한 것이다. 이때 차량의 주행속도는 100km/h를 적용하였으며, 각 그림 맨 위의 그래프는 노면에 의한 입력 임펄스를, 중간 그래프는 그에 대한 선형 스케일(linear scale)의 스펙트럼을 나타내며 입력 스펙트럼에 의한 출력 소음의 주파수대에 따른 소음도 차이를 예측하기 위하여 로그 스케일(log scale)의 스펙트럼을 맨 아래 그래프에 나타내었다.

표 2는 전술하였던 표 1에서 예로 들었던 각각의 모델에 대한 스펙트럼 분석 결과를 보여주고 있으며, 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 간격의 각각의 개수가 등분포의 형태로 동일한 경우 : 최대 타이닝 간격과 최소 타이닝 간격의 차가 크고 타이닝 종류가 많아질수록 노면 프로파일의 스펙트럼이 평탄하게 나타남
- 간격의 각각의 개수가 정규분포(역분포)를 따를 경우 : 최대 타이닝 간격과 최소 타이닝 간격의 차

와 타이닝 종류의 많고 적음에 대한 뚜렷한 연관성이 없었으나, 간격의 구성비가 정규분포일 때 역분포인 경우보다 스펙트럼이 평탄하게 나타남

- 간격 종류의 개수가 등분포인 경우에서 가장 평탄한 스펙트럼을 보였던 모델 10과 11을 정규분포와 역분포(정규분포의 반대 배열)로 구분하여 스펙트럼을 분석한 결과에서도 정규분포의 구성비에서 효과적인 결과를 나타내었음

결론적으로, 최대 타이닝 간격과 최소 타이닝 간격의 차가 크고 타이닝 간격의 종류가 많아질수록 노면 프로파일의 스펙트럼이 평탄하게 나타났다. 또한 노면 프로파일의 스펙트럼을 결정하는 중요한 요소는 타이닝 간격의 종류와 구성비임을 확인할 수 있었다.

다양한 노면 프로파일 모델을 선정하여 평가요소를 비교·분석한 결과 표 3에 제시된 5가지 조건이 타 모델에 비해 crest factor, 분산, 피크비 값이 작게 나타났으며 스펙트럼 또한 비교적 평탄함을 알 수 있었다.

위 결과로부터 선정된 5가지 노면 모델의 신뢰도를 평가하기 위해 각각의 경우에 대하여 1000개의 랜덤화 노면 프로파일을 생성하였다. 먼저 각 노면 프로파일의 스펙트럼에 대한 평균을 구했으며 또한 각 주파수에서의 표준편차를 구하여 평균 스펙트럼

표 3. 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_20_30_40_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_15_20_25_30_35_40_45_50 (1:2:2:3:3:3:2:2:1)	63	1.4819	0.0010	0.1442
45	10~50	10_20_30_40_50 (3:2:1:2:3)	63	1.5870	0.0006	0.1471
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
기존 일정간격	0	30mm 일정한 간격	63	15.4224	0.0406	1.0000

참값(true mean spectrum value)의 신뢰성 구간을 산정하였으며, 표 4는 95% 신뢰수준에 따른 피크값의 범위를 보여주고 있다.

스펙트럼의 크기를 비교하기 위하여 30mm 일정 간격일 때 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 18dB이 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 판단되었다.

표 4. 스펙트럼 피크값의 95%신뢰성 범위

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

5. 시험 시공 및 실내·외 소음 측정

실내 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 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 이용하여 3가지 설계 표면을 현장에 적용하였다. 그 밖에 비교를 목적으로 한국의 시험 도로에 시공되었던 임의 간격 타이닝 구간을 재현하였고, 위스콘신에서 제시한 임의 간격을 적용하였다. 표 5는 본 시험 시공에 적용된 타이닝 간격 배열을 나타내고 있으며 그림 7에서는 구간별 현황을 보이고 있다.

시험 시공 구간에 대한 소음 측정을 실시하였다. 소음 측정은 내부 및 외부 소음을 측정하였으며, 시험에 사용된 소음 측정기는 Rion사의 NA-27 모델이다. 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.

본 소음 측정에서는 차량에서 발생하는 소음을 최소화하기 위해 주행 거리가 2500km 미만이고 타이어의 상태가 양호한 차량을 적용하였다. 측정 속도는 각각 60km/h, 80km/h, 100km/h, 120km/h 등

표 5. 시험 시공 구간별 설계 타이닝 간격

구 분	타이닝 간격
1번 설계구간	40 30 15 35 10 35 30 40 20 20 30 45 45 45 35 15 20 15 25 40 15 40 40 50 30 45 25 35 25 25 40 50 10 45 35 30 35 30 30 35 25 40 25 30 10 25 30 30 15 10 15 20 30 30 30 25 50 45 45 35 15 40
2번 설계구간	20 20 35 15 10 15 30 45 15 25 15 40 20 45 15 20 40 25 45 45 40 30 45 35 15 50 30 50 20 10 45 20 30 35 40 35 45 45 30 40 50 50 40 15 45 25 25 15 10 20 30 50 40 20 35 30 20 10 10 50 40 35
3번 설계구간	25 40 25 30 35 35 40 35 35 30 50 40 50 10 45 10 15 50 45 20 30 25 40 15 40 10 20 30 30 20 10 35 10 25 40 30 35 30 20 10 30 40 40 15 25 15 10 50 40 35 10 30 20 10 15 35 15 20 50 45 20 15 15 40 15 20 45
국의 문헌 재현	16 25 22 16 32 19 25 25 25 25 19 22 25 22 10 25 25 25 32 38 22 25 22 25
시험 도로 재현	15 30 40 30 15 20 30 15 40 30 15 20 40 15 40 20 30 40 15

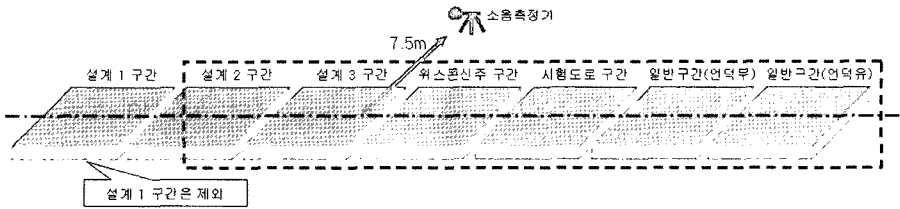


그림 7. 시험 시공 구간별 설계 표면 현황

으로 선정하여 다양한 속도에 따른 소음도를 비교하였다. 측정 횟수는 각 구간 및 속도에 따라 5회씩 측정하여 각 결과값에 대한 구간별 소음도 차이를 분석하였다. 표 6은 소음 측정 실험 조건 및 세부 사항을 나타내고 있다.

면 처리에 따른 뚜렷한 경향을 보이지 않았다. 속도에 따라 전체적으로 소음도가 증가하고 있지만, 구간별 소음도 차이는 1dB(A) 내외로 큰 차이를 나타내지 않았다.

5.1 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 7에서는 각 구간에서 측정한 속도별 평균 실내 소음도를 나타내고 있다.

실내 소음 측정 결과, 표 7에서 보인 바와 같이 표

5.2 실외 소음 측정

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

표 6. 소음 측정 조건 및 세부 사항

측정 조건	내 용	비 고
시험 차량	SM520 2004년식	주행 거리 : 2,500km
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 차이난 경우 1회씩 추가 측정
차량 속도	60km/h, 80km/h, 100km/h, 120km/h	

표 7. 실내 소음 측정 결과 (2004. 11. 8, 평균풍속 1m/s, 평균기온 14.6℃)

	설계 2 구간 (15:30~16:00)	설계 3 구간 (16:00~16:30)	국외 문헌 (16:30~17:00)	시험 도로 재현 (17:00~17:30)	일반 구간 (17:30~18:00)
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



소음 측정기를 지나는 시점에서의 소음을 측정하였다.

각 구간 및 속도에 따라 5회씩 측정하였고 측정 결과값의 편차가 크다고 판단될 경우 1회 더 측정하였다. 총 데이터에 대한 평균과 데이터 중 최대값 및 최소값을 제외한 나머지 측정값에 대하여 평균을 산출하여 비교하였다. 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 구간으로 일반 구간과 비교했을 때 약 2.3~3.9dB(A) 정도의 소음 감소를 나타냈다. 설계 2 구간의 경우에도 설계 3 구간에 비해 많게는 1.5dB(A) 정도 차이를 보였지만 100km/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 8에 제시되어 있다. 일반적으로 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 차이가 커짐을 확인할 수 있었다. 기초 설계 단계 없이 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

표 8. pass-by 소음 측정 결과 (2004. 11. 8, 평균풍속 1m/s, 평균기온 14.6℃)

	설계 2 구간 (09:00~10:00)	설계 3 구간 (10:00~11:00)	국외 문헌 (11:00~12:00)	시험 도로 재현 (13:00~14:00)	일반 구간 (14:00~15:00)
60km/h	68.8	67.3	68.9	69.6	70.4
80km/h	73.2	72.7	73.6	73.8	75.0
100km/h	76.1	75.9	76.6	77.2	78.7
120km/h	78.6	77.7	79.0	79.8	81.6

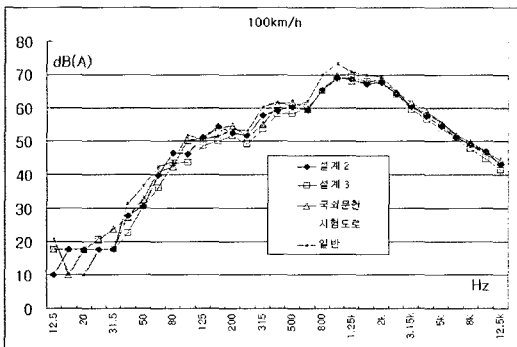


그림 8. 100km/h 주행시 발생 주파수 비교

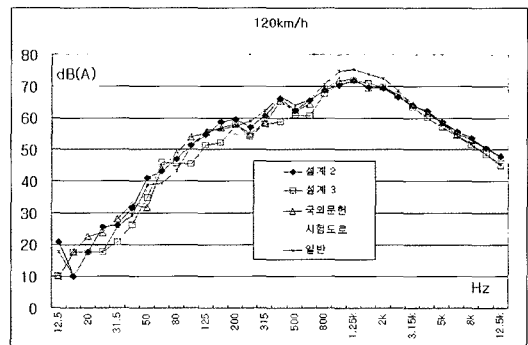


그림 9. 120km/h 주행시 발생 주파수 비교

타이어/포장 소음이 지배적인 역할을 하는 것으로 판단된다. 각 주파수대역에 대한 소음도를 구분하여 살펴보면, 엔진 등의 기계적인 소음이 발생하는 것으로 알려진 250~500Hz 범위에서는 전체적으로 속도가 증가할수록 소음이 높게 발생하고 있다. 일정 간격의 타이닝으로 시공되는 일반 구간의 경우 속도가 증가할수록 피크치가 1kHz 부근에서 높게 형성되는 것을 볼 수 있다. 그러나 임의 간격 타이닝 구간의 경우, 특히 가장 낮은 소음도를 기록했던 설계 3 구간과 설계 2 구간의 주파수 분포를 보면 일반 구간에 비해 1kHz 부근에서 형성되는 피크치가 고르게 분산된 것을 확인할 수 있다. 이는 120km/h의 고속 주행시 뚜렷하게 나타나고 있다. 그러나 임의 간격

타이닝 구간 중 가장 소음도가 높게 측정되었던 시험 도로의 임의 간격 타이닝을 재현한 구간에서는 120km/h로 주행했을 경우를 제외하고는 다른 임의 간격 구간에 비해 피크값에 대한 주파수 분산 효과가 크게 나타나지 않았다. 그림 8~그림 9에서는 100km/h와 120km/h일 때의 구간별 주파수에 대한 분포를 비교하고 있다.

표 9는 800Hz~2.5kHz 범위에서의 각 주파수별 소음도를 나타낸 것이다. 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.

표 9. 800Hz~2.5kHz 의 각 주파수별 발생 소음도
(2004. 11. 8, 평균풍속 1m/s, 평균기온 14.6℃)

속도	f(Hz)	설계 2 구간	설계 3 구간	국외 문헌	시험 도로	일반 구간
60km/h	800	60.2	58.5	59.7	60.1	61.8
	1k	63.3	59.6	63.3	64.2	62.2
	1.25k	60.7	59.9	60.9	61.9	61.4
	1.6k	58.7	60.1	58.6	58.6	63.5
	2k	58.4	59.1	56.6	56.5	61.4
	2.5k	54.1	55.2	53.9	54	57.5
80km/h	800	63.3	63.3	65.4	64.2	65.9
	1k	66.9	65.4	68.5	67.5	67.2
	1.25k	63.2	64.9	65.8	64.9	67.4
	1.6k	65.4	64.4	64.8	65.9	67.5
	2k	65.4	64.1	63.8	64.7	67.1
	2.5k	60.1	59.8	60.2	60.6	61.6
100km/h	800	65.5	65.2	65.9	66.4	69.9
	1k	69.1	68.7	69.8	72.1	73.2
	1.25k	68.6	69.4	70.1	68.7	70.9
	1.6k	67.2	68.1	67.1	68.1	69.9
	2k	67.8	67.6	67.5	68.9	69.4
	2.5k	64.2	64	64.3	64.2	65
120km/h	800	68.5	67.7	69.1	68.8	70.5
	1k	69.6	70.7	71.9	73.1	74.9
	1.25k	71.5	72	72.2	72	75.3
	1.6k	69.7	70.9	69.7	71.4	73.9
	2k	70	69.9	69.9	70.6	72.5
	2.5k	68.3	66.8	67.3	68	68.7



표에 나타난 각 주파수별 소음도를 비교해 보면 일반 구간에서의 주파수별 소음도가 전체적으로 높게 발생한 것을 알 수 있다. 대부분의 경우 피크값은 1~1.6kHz에서 발생했으며 임의 간격 구간들은 일반 구간에 비해 낮은 소음도를 보였다. 소음도가 가장 낮게 측정되었던 설계 3 구간을 일반 구간과 비교해보면 설계 3 구간에서 주파수가 분산되어 나타난 것을 볼 수 있다.

랜덤 변수를 도출하여 설계한 임의 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.

5.3. 실외 소음 측정 결과 분석

본 연구에서 수행한 실외 소음 측정 결과에 대해서 임의 간격으로 설계된 구간과 타 구간에서 측정한 소음도의 차이가 유의수준범위 내에 있는지 통계 분석을 실시하였다. 본 연구에서는 분산 분석(ANOVA)을 실시하기 위해서 통계 프로그램인 MINITAB을 사용하였다. 실험 결과에 따른 각 구간별 데이터를 표 10과 같이 도출하였다.

데이터들의 평균값들이 차이가 있는지를 결정하기 위해 P-value를 도출하였고, 유의수준은 0.05로 가정하였다. p-value가 0.05보다 큰 값이 나올 경우, 각각의 평균값들은 다르지 않다는 결론을 얻게 된다.

각 속도에 대해 구간별 소음 측정값을 이용하여 F-test를 실시한 결과는 표 11과 같으며, 모든 속도에서 p-value는 0.05보다 작은 값을 나타냈다. 따라서 각 구간에서 소음도 차이가 없다는 귀무가설은 기

표 10. 통계 분석을 위한 데이터 수집

구간	표본수	속도(km/h)	평균(dB(A))	표준편차
설계 2 구간	5	60	68.600	0.394
	5	80	72.800	0.354
	5	100	76.060	0.270
	5	120	78.580	0.277
설계 3 구간	5	60	67.780	0.807
	5	80	72.680	0.610
	5	100	75.540	0.826
	5	120	78.460	0.261
국외 문현	5	60	68.920	0.239
	5	80	73.620	0.829
	5	100	76.620	0.228
	5	120	78.980	0.444
시험 도로	5	60	69.620	0.311
	5	80	73.780	0.444
	5	100	77.220	0.311
	5	120	79.820	0.311
일반 구간	5	60	70.360	0.207
	5	80	74.980	0.487
	5	100	78.700	0.524
	5	120	81.640	0.288

표 11. 분산 분석표

	변동 근원 (source of variation)	제곱합(SS)	자유도(df)	평균제곱(MS)	검증 통계량 (F)	확률값 (P-value)
60km/h	처리(treatment)	19.366	4	4.841	24.11	0.000
	오차(error)	4.016	20	0.201		
	총(total)	23.382	24			
80km/h	처리(treatment)	17.098	4	4.275	13.21	0.000
	오차(error)	6.472	20	0.324		
	총(total)	23.570	24			
100km/h	처리(treatment)	29.750	4	7.438	31.52	0.000
	오차(error)	4.720	20	0.236		
	총(total)	34.470	24			
120km/h	처리(treatment)	34.402	4	8.600	82.38	0.000
	오차(error)	2.088	20	0.104		
	총(total)	36.490	24			

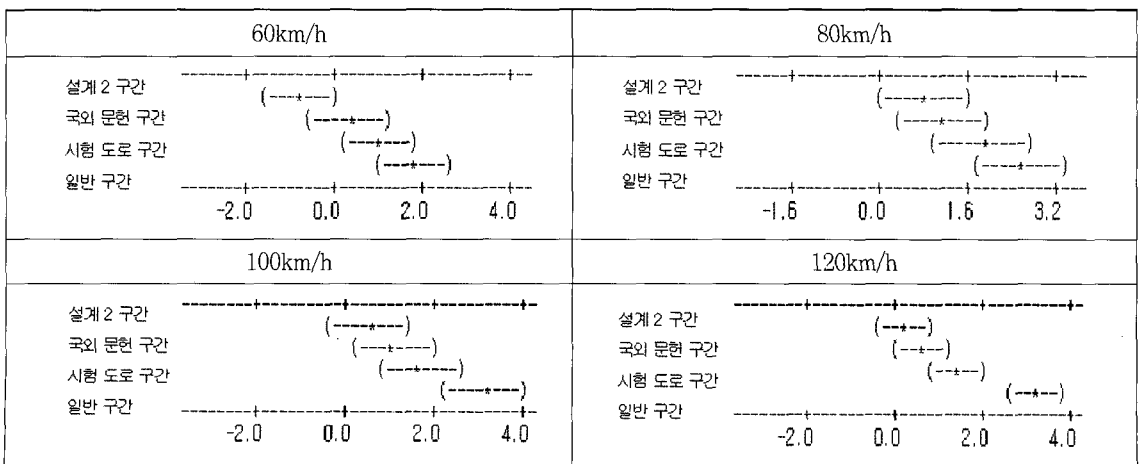
각될 수 있다. 즉, 각 구간에 대한 소음도의 평균값은 95% 신뢰구간에서 차이가 있다는 판단이 가능하다.

이에 따라 각 구간에 대한 차이를 조사하기 위해 tukey method를 이용하여 다중 비교를 실시하였다. tukey method는 데이터의 평균간의 차이에 대한 신뢰구간을 산출하여 각 값들이 통계적인 차이를 나타내는가를 조사하는 방법이다. 가장 소음도가 낮게 측정된 설계 3 구간을 기준으로 각 표면 처리별로 비교한 결과를 표 12에 제시했다.

먼저 설계 3 구간과 일반 구간을 비교하면, 각 속도에 따라 표 12에서 보인 바와 같이 0을 포함하는 경우가 없다. 또한 그 밖의 임의 간격 타이닝 구간과 일반 구간을 tukey method에 적용해도 0을 포함하지 않았다. 따라서 임의 간격 타이닝에서의 소음도는 일반 타이닝의 소음도와 통계적 차이가 있으며, 이는 임의 간격 타이닝이 소음 저감에 영향을 준 것으로 판단할 수 있다.

임의 간격 타이닝 구간들의 각각에 대한 비교도 실

표 12. 설계 3 구간에 대한 tukey method 적용 결과





시하였다. 본 연구에서 제시된 설계 표면의 경우 모든 속도에 대해서 설계 2 구간과 설계 3 구간은 통계적인 차이를 나타내지 않았다. 설계 3 구간과 국외 문헌 구간을 비교한 결과 80km/h, 100km/h에서 통계적인 차이가 발생하지 않았지만, 60km/h와 120km/h 일 경우에는 설계 3 구간이 신뢰 범위에서 소음도의 차이를 나타냈으며, 시험도로 구간과의 비교에서는 모든 속도에서 통계적 차이를 보였다.

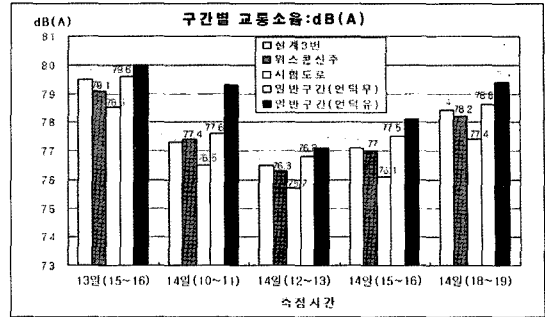


그림 10. 교통 소음 측정 결과

6. 교통 소음 측정

교통 개방 이후 각 표면 처리별 구간에 대한 교통소음을 측정(2005년 7월 13~14일)하였으며, 실험에 사용된 소음 측정기는 Bruel & Kjaer사의 다채널 소음분석기(B3560 : 5채널, N4-7771: CPB analysis)이다. 또한 pass-by(단일차량 : 승용차) 실외 소음 측정 결과와의 비교분석을 위해 동일지점에서 수행하였다. 교통소음을 측정할 구간은 일정 간격 횡방향 타이닝이 시공된 일반구간(언덕이 존재하는 구간, 언덕이 존재하지 않는 구간), 설계 3 구간, 국외문헌 구간, 시험도로 구간으로 총 5개 구간이었다. 소음진동공정시험방법의 도로소음측정법을 참고하여 각 구간에 대하여 등가 소음도(equivalent noise level; leq)를 동시 측정하여 비교분석하였다. 교통소음을 동시에 측정함으로써 동일한 차량특성 및 교통량에 따른 각 표면처리 별 구간에 대한 비교분석이 가능하도록 하였다. 측정현장의 길어깨부의 언덕의 영향을 분석하기 위해 언덕의 위치와 높이를 고려하였으며, 유사한 언덕이 존재하는 일반구간을 추가적으로 측정하였다.

본 실험에 대한 시간대 별 측정 결과는 그림 10에 제시하였다. 구간별 평균 교통량은 측정날짜와 시간대에 따라 다소 차이가 있었으며, 일반적으로 출퇴근 시간대에 교통량이 많았다. 등가 소음 레벨 측정 결과, 일반 타이닝 구간과 랜덤 타이닝 구간은 언덕이 존재하는 동일한 조건하에서 0.5~2.8dB(A)차이를

보였다. 이러한 결과로부터 pass-by 소음 측정시 0.8~3.9dB(A)의 차이를 보인 점과 비교할 때, 교통소음저감 효과가 있다고 판단할 수 있었다. 시험도로 구간의 경우 pass-by 소음 측정 결과와는 달리 임의의 간격 타이닝 구간 중에서 가장 낮은 교통소음이 측정되었으며, pass-by 측정 시 소음도가 가장 우수하였던 설계 3 구간은 국외문헌 구간과 유사한 수준의 소음 저감 효과를 나타냈다. 즉, 전반적으로 임의의 간격 타이닝 구간이 일반 타이닝 구간에 비해 교통소음 저감 측면에서도 효과가 있음은 확인할 수 있었으나, 임의의 간격 타이닝 구간들 간의 소음도는 pass-by 측정 결과와 다소 달랐다. 그 이유는 단일 차량의 바퀴가 타이닝 구간을 100km/h의 주행속도로 통과함을 가정했던 실내 모형을 통해 제시된 타이닝 구간에 다양한 소음 인자가 존재하는 교통상황을 그대로 적용되기에는 많은 무리가 따르기 때문이다.

표 13은 교통소음 측정을 실시한 각 구간에서의 설계 타이닝 간격에 따른 입력신호의 스펙트럼 분석을 실시한 결과를 나타내고 있다. 각 구간별 타이닝 간격에 따른 스펙트럼 분석 결과, 시험도로에서 피크 소음을 감소시키는 효과와 평탄성이 가장 우수하였

표 13. 각 구간에 대한 입력신호 스펙트럼 분석 결과

구분	Crest factor	Variance	Peak ratio
Wisconsin	2.8415	0.0023	0.1902
설계 3면	2.7900	0.0034	0.2981
설계 2면	2.0726	0.0025	0.2234
시험도로	1.7580	0.0049	0.0979



으며 다음으로 국외문헌 구간, 설계 2구간, 설계 3구간의 순이었다. 이는 교통소음 측정 결과와 다소 차이가 있는 결과이며, 교통소음 측면에서는 실내 모형에서 가정하였던 타이어의 가진에 의한 피치소음 이외에도 다양한 원인에 의해 소음 특성이 달라짐을 알 수 있다.

시험도로 구간의 경우, 나머지 구간에 존재하는 언덕에 비해 도로변으로부터의 이격거리가 상대적으로 멀었으며, 그 높이도 낮아 이에 대한 객관적인 비교는 불가능한 것으로 판단되었다.

7. 결론

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

1. 기존의 연구 결과에서와 같이 주행 중인 자동차에서 발생하는 소음은 속도가 증가할수록 타이어/포장 소음의 비중이 지배적으로 나타났으며, 특히 타이어와 노면과의 충돌에서 발생하는 피치소음이 전체 소음에 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 피치 소음은 타이닝 간격 배열에 대한 최적 설계를 통해 저감시킬 수 있다고 판단된다.
2. 타이어의 소음 저감 연구 방법을 임의 간격 타이닝 배열에 적용할 수 있다고 판단하고 LCG 알고리즘의 이론을 근거로 설계 변수를 도출하였다. 그 결과 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.

3. 실내 시뮬레이션 모형의 결과를 바탕으로 고속국도에 적용하였으며, 승용차를 대상으로 각각 실내·내외 소음을 측정(pass-by method)하였다. 측정 결과 피치 소음으로 인한 소음을 감소시킴으로써 임의간격 횡방향 타이닝 구간이 일반구간 보다 낮은 소음도를 보였으나, 그 효과가 크지 않았다. 그러나 차량의 속도가 증가함에 따라 임의 간격 횡방향 타이닝 구간의 소음저감 효과도 좋아짐을 확인할 수 있었으며, 그 중 설계 3구간에서 가장 낮은 소음도를 나타냈다.
4. 교통 소음 측정에서도 일반 타이닝 구간에 비해 임의 간격 타이닝 구간에서 더 큰 소음 저감 효과를 확인할 수 있었으나 승용차를 대상으로 실시한 pass-by 소음 측정과는 다소 다른 결과를 보였다. 이러한 결과로부터, 단일 차량의 바퀴가 타이닝 구간을 100km/h의 주행속도로 통과함을 가정했던 실내 모형을 통해 제시된 타이닝 구간들에 다양한 소음 인자가 존재하는 교통상황을 그대로 적용되기에는 많은 무리가 따름을 알 수 있었다.

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. Utah Department of Transportation, Final Report, Roadway Pavement Grinding Noise Study, 2000. 11
5. 문준범, 박진희, 권순민, 한승환, 조윤희, 콘크리트 포



- 장 표면처리 방법에 따른 소음 감소 방안 연구, 한국 도로학회 논문집 제6권 제4호, 2004
6. 한양대학교, 소음 및 배기가스 저감 환경 친화 콘크리트의 개발 연구, 한국건설기술연구원, 2002
7. 김병삼, 홍동표, 타이어와 소음, 한국소음진동공학회지 제4권 제4호, 1994
8. 성내경, 실험설계와 분석, 자유아카데미, 1997
9. Ulf Sandberg, Jerzy A. Ejsmont, "Texturing of Cement Concrete Pavement to Reduce traffic Noise Emission," *TRB*, 1998
10. Ulf Sandberg, "Tyre and Road Noise," www.chalmers.se/Hypertext/prof-E/Sandberg/Ulf-E
11. K. Hieronimus, G. Hellener, Reduction of car sound emission by means of systematic development work, *Unikeller conference 91*, 1991
12. John H. Varterasian, *Quieting Noise Mathematically-Its Application to Snow Tire*, Research Labs., General Motors Corp.
13. Tyre/Pavement Noise, www.tut.fi
14. Richard L. Bowman, Evaluating Pseudo-Random Number Generators, *Computer & Graphics*, vol.19 no.2, pp.315-324, 1995
15. James E. Gentle, *Random Number Generation and Monte Carlo Method*, springer, 2003
16. 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
17. ISO, *Acoustic - Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise*, International Standard ISO 11819-1, 1997
18. Douglas C. Montgomery, George C. Runger, "Applied Statistics and Probability for Engineers," Arizona State University, 1999

〈접수 : 2005. 8. 22〉