

콘크리트 포장 타이닝 간격 랜덤화에 관한 연구

정순철* · 우종원* · 김용수* · 이재응**

A study on randomization of tining space for concrete pavements

Soon Chul Jung, Jong Won Woo, Yong Soo Kim and Jae Eung Lee

Key Words : tining space, whine noise, mechanical frequency modulation, LCG algorithm, probability density function

abstract

In concrete pavements with uniform tining space, the whine noise which has high frequency spectrum related to the uniform tining space exist.

In this paper, randomization procedure of tining space for concrete pavements is proposed. The proposed procedure developed based on the LCG(Linear Congruential Generator) algorithm. And the factor concerned in the procedure are drag span length, number of different tining space, ratio of each tining space, total tinings of each size, sequence of actual tining

1. 서 론

차량이 주행시에 발생하는 소음은 크게 엔진, 흡기계, 배기계 등에서 발생하는 차량의 기계적 소음과 타이어와 노면의 상호작용에 의하여 발생하는 타이어 소음으로 나눌 수 있는데 차량의 주행 속도가 증가할수록 타이어/노면 소음의 비중이 높아지게 되며[1], 타이어/노면 소음중에서도 타이어와 노면과의 주기적인 충돌에 의하여 발생하는 피치노이즈(pitch noise)의 비율이 지배적이다[2].

콘크리트 포장의 경우 노면의 마찰력 문제와 배수 문제 등으로 인하여 일정간격의 타이닝 홈을 파서 표면처리를 한다. 그러나 기존과 같이 타이닝 간격이 일정한 경우 타이어 트레드 패턴과 도로

표면과의 충격이 주기적으로 발생하게 되어 특정 주파수의 소음이 크게 되는 화인 노이즈(whine noise)가 발생한다. 이런 현상은 주파수 변조(mechanical frequency modulation) 이론[3]을 이용하여 넓은 범위의 주파수 대역으로 그 에너지를 분산시키면 화인 노이즈의 소음을 줄일 수 있다.

기존의 도로포장 노면 패턴에 관한 연구를 살펴 보면 콘크리트 포장의 타이닝 랜덤화에 따른 소음도 결과에 대한 내용[4][5]은 다소 있으나 랜덤화 방법에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 논문에서는 LCG 알고리즘을 이용하여 콘크리트 포장의 타이닝 간격 랜덤화 방법에 대한 연구를 수행하였다. 이 과정에서 고려한 사항들은 시공시의 드래그 스펜(drag span) 길이, 타이닝의 최대 간격 및 최소 간격, 타이닝 간격 종류, 각각의 간격 종류 개수, 그리고 실제적인 타이닝 배열이다.

* 중앙대학교 기계공학부 대학원

** 중앙대학교 기계공학부

2. LCG(linear congruential generators) 알고리즘

LCG(linear congruential generators) 알고리즘이란 [0,1) 사이의 연속된 수 $\{U_i\}$ 를 생성하는 알고리즘으로써 1948년에 D. H. Lehmer에 의해 제안되었으며 다음과 같은 식으로 표현된다[6].

$$\begin{aligned} X_i &= (aX_{i-1} + c) \bmod M \\ U_i &= X_i/M \\ 0 &\leq a, c, X_0 \leq M-1 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 a 는 multiplier, c 는 increment, M 은 modulus, X_0 는 seed를 의미한다. $a \bmod b$ 의 의미는 a 를 b 로 나누었을 때의 나머지를 나타내며, 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$a = bk + (a \bmod b) \quad a, b, k \text{는 정수} \quad (2)$$

c 가 '0'일 경우를 "Multiplicative congruential generator"라 하고 $\{U_i\}$ 는 (0,1)의 값을 가지게 되며, $c \neq 0$ 인 경우를 "Mixed congruential generator"라 하고 $\{U_i\}$ 는 [0,1)의 값을 가지게 된다. 또한 나머지의 가짓수는 M 개가 되므로 $M+1$ 번째의 수는 처음 수와 동일하게 되는데 이것 때문에 주기성을 가진다[7].

LCG 알고리즘에 의해 생성된 배열수는 겉으로 보기에는 랜덤처럼 보이지만 계수(a, c, M)의 선택에 따라 랜덤화가 잘 될 수가 있고, 그렇지 못할 수도 있다. 계수 선택에 대한 기존의 연구 결과를 살펴보면 여러 경우의 계수들을 볼 수 있는데 $a=7^5, m=2^{31}-1$ 인 경우에 좋은 랜덤 배열을 생성하여 일반적으로 널리 사용되고 또한 상용프로그램에서도 적용하고 있다[8].

3. LCG 알고리즘을 적용한 타이닝 패턴 설계 및 시뮬레이션

소음 저감을 위한 최적의 타이닝 패턴 설계를 위하여 LCG 알고리즘을 적용한 랜덤 간격 타이닝 노면 모델의 입력 스펙트럼에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

타이닝 패턴에 의한 스펙트럼을 결정짓는 요소는 타이어 트레드 패턴에 관한 변수와 마찬가지로 다음과 같이 5가지가 있다[9].

- (1) Total number of pitch
- (2) Actual pitch arrangement

(3) Number of different pitch

(4) Ratio for each pitch size

(5) Total pitches of each size

따라서 각각의 변수들을 변화시키면서 각 변수들이 타이닝에 의한 스펙트럼에 미치는 영향을 해석하였다.

3.1 타이닝 간격 랜덤화 방법

본 연구에서 제안하는 타이닝 시퀀스 랜덤화 방법은 (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.

3.2 해석 노면의 모델의 선정

각 노면 모델의 선정시 제한 조건으로는 기존 등간격 타이닝 노면의 마찰력 수준을 유지하기 위하여 단위면적당 texture를 기존의 경우와 같게 하였다. 따라서 타이닝 최대 간격의 증가로 마찰력의 감소가 예상될 경우 간격 종류 및 간격 종류의 분포를 조정하여 단위면적당 texture를 일정 수준으로 유지하였다.

타이닝 패턴 요소들의 변화에 대한 입력신호의 스펙트럼 변화를 살펴보기 위하여 다음과 같이 여러 가지 경우의 타이닝 간격 랜덤화 모델을 선정하였으며, Table 1은 그 중 몇 가지 모델의 타이닝 간격 종류와 간격비를 나타낸다.

(1) 각각의 간격 종류 개수가 등(uniform) 분포

① 최대간격과 최소간격을 변화시킨 모델(모델번호 1~7)

② 간격 종류를 변화시킨 모델(모델번호 8~15)

(2) 각각의 간격 종류 개수가 정규(normal) 분포

① 정규 분포(모델번호 16~27)

② 역정규 분포(모델번호 28~39)

(3) 모델번호 10과 11의 정규(normal) 분포

① 정규 분포(모델번호 40~43)

② 역정규 분포(모델번호 44~45)

Table 1 Each timing space of pavements

모델 번호	간격종류와 구성비
10	10-20-30-40-50
40	10-20-30-40-50(1:2:2:2:1)
43	10-20-30-40-50(3:2:1:2:3)
45	10-15-20-25-30-35-40-45-50(1:2:2:3:3:3:2:3:1)
47	10-15-20-25-30-35-40-45-50(3:2:2:1:1:1:2:2:3)

3.3 노면 모델의 스펙트럼 분석

생성한 노면을 평가하기 위하여, 피크비(peak ratio), crest factor, 그리고 분산(variance) 값을 계산하였다. 피크비는 등간격 노면 스펙트럼의 최대값과 랜덤 타이닝 간격 모델의 스펙트럼 최대값의 비를 의미하며, crest factor는 스펙트럼의 평균값과 최대값의 비를 나타낸다.

Table 2 The result of spectral analysis

모델번호	crest factor	분산	피크비
10	1.6131	0.0006	0.1518
40	1.5431	0.0008	0.1474
43	1.5870	0.0006	0.1471
45	1.4819	0.0010	0.1442
47	1.5703	0.0007	0.1512

각 노면 모델의 스펙트럼 분석 결과 모델번호 10, 40, 43, 45, 47이 타 노면 모델에 비하여 crest factor, 분산, 피크비 값이 작으며 그에 따라 스펙트럼이 다른 모델에 비하여 평탄함을 알 수 있으며 따라서 이와 같은 경우 타이닝을 랜덤하게 배열했을 때 노면과 타이어에 의한 소음을 가장 효과적으로 저감시킬 수 있다. Fig. 1은 모델번호 40, 43, 45의 스펙트럼을 나타낸다.

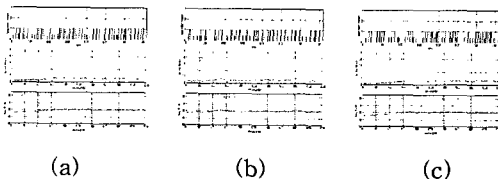


Fig. 1 Exciting force and spectrum of model no.40(a), model no.43(b), model no.45(c)

3.4 선정된 노면 모델의 신뢰도 평가

위 결과로부터 선정된 5가지 노면 모델의 신뢰

도 평가를 위하여 먼저 각각의 경우 대하여 1000 개의 랜덤화 노면 프로파일을 생성하여 정밀 분석하였다. 먼저 각 노면 프로파일의 스펙트럼을 averaging하여 구했으며 또한 각 주파수에서의 표준편차를 구하여 평균 스펙트럼 참값(true mean spectrum value)의 신뢰성 구간을 구하는데 사용하였다.

평균값의 표준편차를 데이터수가 유한한(N) 단일 데이터 셋으로부터 구하는 경우 그 값은 다음과 같이 구할 수 있으며 student-t 분포(distribution)를 갖는다.

$$S_x = \frac{S_x}{N^{1/2}} : \text{평균의 표준편차} \quad (3)$$

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

$$x' = \bar{x} \pm t_{\nu, P} S_x (P\%) \quad (4)$$

여기서 t-estimator $t_{\nu, P}$ 는 자유도($\nu = N - 1$)와 확률(probability) P의 함수이다. 그러나 이 경우처럼 데이터수가 많은 경우에는 student-t distribution은 정규 분포(normal distribution)를 갖게 된다.[10]

Fig. 2는 모델번호 40의 스펙트럼 평균과 95%의 신뢰성 구간을 나타내는데, 가운데 실선은 평균을 나타내며 점선은 95%의 신뢰성 범위를 의미한다.

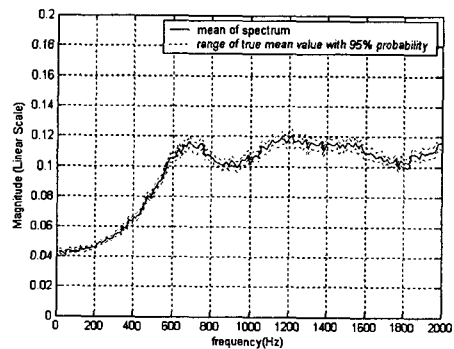


Fig. 2 Mean of spectrum and range of true mean value with 95% probability

또한 피크가 발생하는 주파수와 그 지점에서 피크값을 Table 3에 나타냈다.

Table 3 Range of true mean value with 95% probability of spectrum peak

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

먼저 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. 실제 소음 크기의 감소량은 전달경로의 동특성에 따라 그 영향이 다르게 나타나게 되는데 이 부분은 계속해서 연구할 부분이다.

그래프와 Table 3으로부터 모델번호 40이 가장 낮은 피크비와 또한 평탄한 스펙트럼을 갖고있어 가장 좋은 노면 모델로 선정 할 수 있다. 그러나 모델번호 43와 모델번호 45도 신뢰성 구간을 고려해볼 때 역시 좋은 노면 프로파일 후보라 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 소음의 소음 저감을 위한 타이닝 패턴 랜덤화 설계에 관한 연구를 수행하였다. 이를 위하여 특정의 확률밀도함수(probability density function)를 갖는 랜덤 신호로부터 랜덤 패턴의 타이닝 시퀀스 설계(노면 프로파일 설계)를 할 수 있는 방법을 제안하였으며, 또한 생성된 노면 프로파일의 스펙트럼을 평가하는 방법도 제안하였다.

(1) LCG 알고리즘을 적용한 타이닝 랜덤 배열 결과 등간격 타이닝에 비하여 훨씬 평탄한 스펙트럼을 얻을 수 있었다.

(2) 최대 타이닝 간격과 최소 타이닝 간격의 차가 크고 또한 타이닝 간격의 종류 많아질수록 노면 프로파일의 스펙트럼이 더 우수하게 나타났다.

(3) 최적의 도로표면 프로파일(타이닝 간격 설

계)은 본 연구에서 제안한 평가지표(피크비, 크레스트팩터, 분산)를 다양한 시뮬레이션 결과에 적용하여 5가지 경우를 선정하였다.

References

- [1] K. Hieronimus, G. hellener, "Reduction of car sound emission by means of systematic development work", Unikeller conference, pp.15/1~15/38. 1991
- [2] 김병삼, 홍동표, "타이어와 소음", 한국소음진동 공학회지 제4권 제4호, pp.404~412, 1994
- [3] John H. Varterasian, "Quieting Noise Mathematically-Its Application to Snow Tire", Research Labs., General Motors Corp.
- [4] David A. Kuemmel and John R. Jaeckel, "Noise Characteristics of Pavements Surface Texture in Wisconsin", Transportaton reaserch record 1544, pp.24~35, 2000.
- [5] 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
- [6] Richard L. Bowman, "Evaluating Pseudo-Random Number Generators", Computer & Graphics, vol.19 no.2, pp.315~324, 1995
- [7] James E. Gentle, "Random Number Generation and Monte Carlo Method", springer, 2003
- [8] P. Lewis, A. Goodman, and J. Miller, "A Pseudo-Random Number Generator for the System 360," IBM Syst. J., 8, 136 ,1969
- [9] Thomas A. Williams, "Tire Tread Pattern Noise Reduction Through the Application of Pitch Sequencing", Noise and vibration conference, vol.2 no.291, pp.955~960, 1995
- [10] Richard S. Figliola and Donald E. Beasley, "Theory and Design for Mechanical Measurements", John Wiley & Sons, 2000