

## 시변주파수 분석을 이용한 저소음 타이어 설계

### The Reduction of Tire Pattern Noise Using Time-frequency Transform

황 성 욱\* · 방 명 제\* · 노 국 희\* · 김 선 주\*

S. W. Hwang, M. J. Bang, K. H. Rho and S. J. Kim

(2006년 2월 21일 접수 ; 2006년 5월 28일 심사완료)

Key Words : Time-frequency Transform(시변 주파수 분석), Pattern Noise(패턴노이즈), Pitch Sequence(피치 배열), Short Time Fourier Transform(STFT)

#### ABSTRACT

The tire is considered as one of the important noise sources having an influence on vehicle's performance. The Pattern noise of a tire is the transmission sound of airborne noise. On smooth asphalt road, Pattern noise is amplified with the velocity. In recent, the study on the reduction of Pattern noise is energetically processed. Pattern noise is strongly related with pitch sequence. To reduce the pattern noise, tire's designer has to randomize the sequence of pitch. The FFT is a traditional method to evaluate the level of the randomization of the pitch sequence, but gives no information on time-varying, instantaneous frequency. In the study, we found that Time-Frequency transform is a useful method to non-stationary signal such as tire noise.

#### 1. 서 론

타이어는 우리 생활에서 없어서는 안 되는 존재로 보다 안전하고 편안한 운송을 위해 110여년 동안 개발되어 왔다. 오늘날 타이어라 하면 공기 주입식 래디얼(radial) 타이어로 널리 이용되고 있다.

타이어 소음은 크게 전달 경로에 따라 구조전달음(structure-borne noise)와 공기전달음(air-borne noise)로 두 가지로 나뉜다. 구조전달음은 노면의 거칠기에 의해 가진되어 타이어, 현가계, 차체로 전달되는 소음으로 타이어에 있어 구조적 설계 및 노면에 많은 영향을 받는다. 공기전달음은 타이어 원주상의 패턴 형상에 의해서 블럭(block)과 그루브(groove)들이 노면에 접지, 마찰되면서 발생하는 소음이다. 이러한 타이어 소음은 고속도로 주행 시 속

도가 높아짐에 따라 차지하는 비율이 점점 커지고 있는 실정이다.<sup>(1)</sup>

이 논문의 연구 분야인 패턴 노이즈는 500 Hz 이상의 고주파 투과음으로 패턴 형상과 관련이 있다. 패턴 노이즈의 발생 메커니즘은 상당히 복잡하다. 블럭이 노면을 가릴 때 충격음<sup>(2)</sup>, 그루브가 압축되면서 공기압출음(air-pumping)<sup>(3)</sup>, 블럭이 이탈되면서 진동음이 발생된다.<sup>(4)</sup> 이러한 일련의 과정들이 트레드 원주상으로 배열된 각 피치(pitch)들의 주기성에 밀접히 관련되어 있다. 그러므로 피치들을 불규칙하게 즉, 한 주기에 밀집하지 않게 배열함으로써 소음의 집중화를 막을 수 있다.<sup>(5, 6)</sup>

중전의 패턴 노이즈 저감 기법은 타이어 트레드면의 원주방향으로 서로 길이가 다른 피치들을 배열, 설계하고 주파수 분석(FFT)를 하여 특정 주파수에 밀집되는 것을 막아 소음 레벨을 감소하는데 있다.

그런데 이러한 패턴 노이즈는 타이어 1회전을 주기로 가지는 충격음 특성의 랜덤신호이므로 정상신호와 달리 비정상 신호로 분류된다. 그러므로 이 연

† 책임저자; 정회원, 넥센타이어(주)

E-mail : ukhwang@nexentire.com

Tel : (055) 370-5309, Fax : (055) 383-2313

\* 넥센타이어(주)

구에서는 이러한 신호에 대한 효과적인 분석으로써 시변주파수 분석 기법(time-frequency transform)의 일종인 STFT(short time Fourier transform)을 적용하였다.

## 2. 타이어 패턴 설계

### 2.1 타이어 패턴

타이어 패턴은 타이어 회사의 고유의 트레이드 마크로써 트레드(tread) 원주 상으로 블럭과 그루브들이 형성되어 있다. 이러한 미적인 관점보다도 물리적 특성인 배수, 마찰, 제동, 슐림 등과 같은 성능에 많은 영향을 미친다. 그러므로 차량의 용도 및 도로 주행 조건에 따라 당연히 패턴 형상은 달라지게 된다.

#### (1) 피치 비율

타이어 원주상으로 형성이 되어 있는 패턴은 각 소단위를 피치(pitch)라고 부른다. 각각의 피치들은 주로 3, 5종류의 길이로 구성되며 Fig. 1은 3종류의 피치 크기의 한 예이다.

#### (2) 피치 배열

피치 크기 종류가 3개 있는 경우 가장 작은 피치를 1, 중간 크기의 피치를 2, 가장 큰 피치를 3으로 하여 Fig. 2와 같이 타이어 원주 상으로 배열을 할 수 있다.

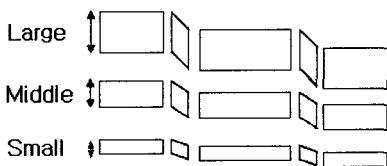


Fig. 1 Pitch variable

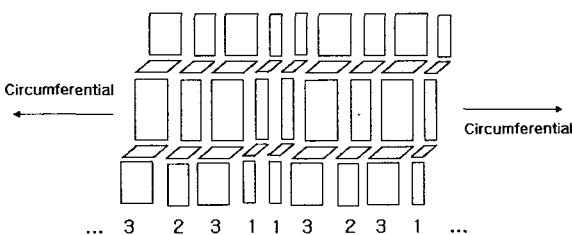


Fig. 2 Pitch sequence

### (3) 피치 배열 시뮬레이션

위와 같이 배열된 피치들의 주기성이 소음에 많은 영향을 미치므로 발생하는 소음을 예측하기 위해서 72개의 각각의 피치들의 선단부를 임펄스 함수(delta function)로 가정하여 Fig. 3과 같이 매트랩(MATLAB)으로 간략하게 프로그램 하였다.

배열된 피치 배열 시뮬레이션을 주파수 변환하면 Fig. 4와 같이 1회전당 주기성을 알 수 있는 오더도메인(order domain)으로 변환된다.

## 3. 피치 배열 상관성

### 3.1 피치 주기성 영향도 검증

피치의 주기성이 실제 소음에 미치는 영향도를 알기 위해서 피치길이를 동일하게 배열하였다. Fig. 5의 왼편은 피치배열과 관계없는 원주방향의 종그루브(longitudinal groove)가 된 경우이고 오른편은 피치들이 동일 길이로 횡그루브(lateral groove)된 타이어이다. 횡그루브 간격이 3 cm으로 일정하게 이루어져 있고 실험 속도가 60, 80 kph일 때 식 (1)을

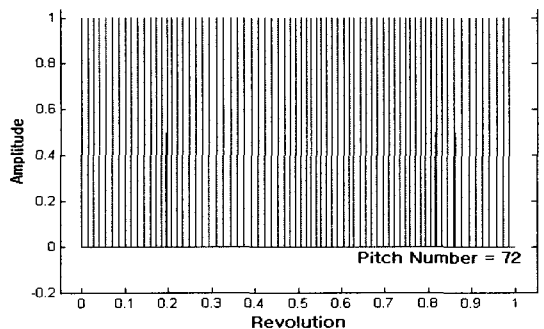


Fig. 3 Pitch sequence's simulation

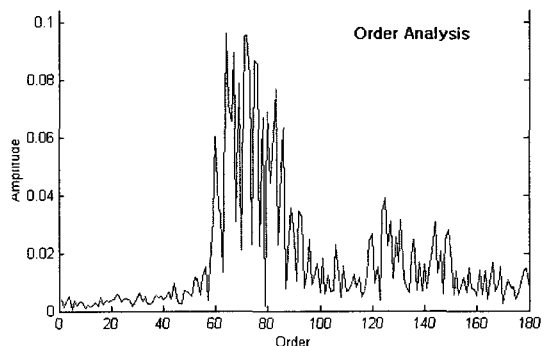


Fig. 4 The FFT of pitch sequence

참조하면 1차 가진 주파수가 대략 540, 720 Hz가 된다.

평탄한(smooth) 아스팔트 노면에서 실험한 결과, Fig. 6와 같이 종그루브된 타이어의 소음은 점선과 같이 나타나고 있다. 이에 비해 동일 간격의 횡그루브가 추가된 타이어는 굵은 실선으로 특정 주파수에서 피치 가진음이 발생되고 있다. 그리고 피치 가진음의 주파수는 수식의 결과와 거의 일치함을 확인할 수 있다.

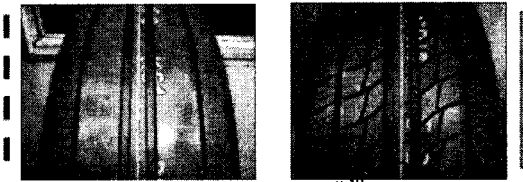
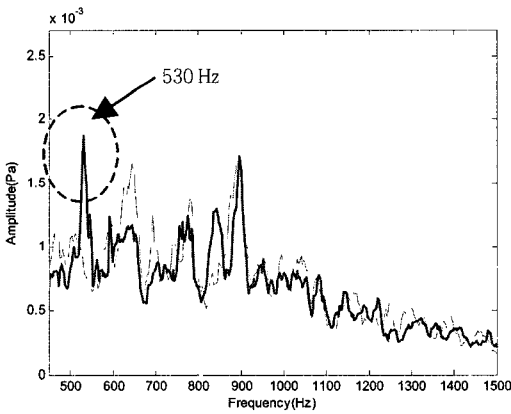
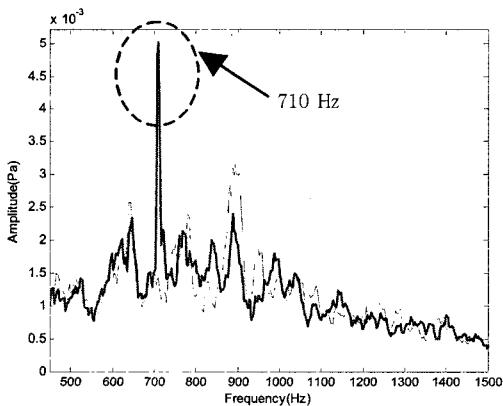


Fig. 5 Grooved tire's picture



(a)



(b)

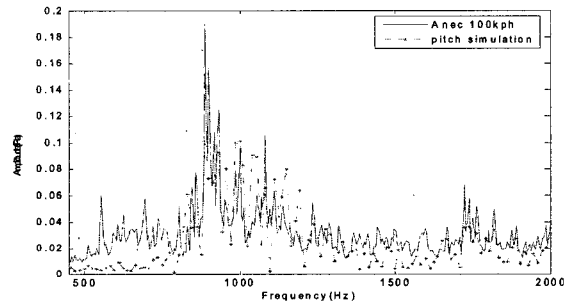
Fig. 6 FFT of field test. 60 kph(a), 80 kph(b)

이와 같이 피치 배열의 주기성이 소음에 많은 영향을 미치고 상관도가 높음을 알 수 있다. 이로 인해 소음을 분산시키기 위해서 서로 길이가 다른 피치들을 어떻게 배열하느냐가 타이어 소음 저감에 관건이 된다.

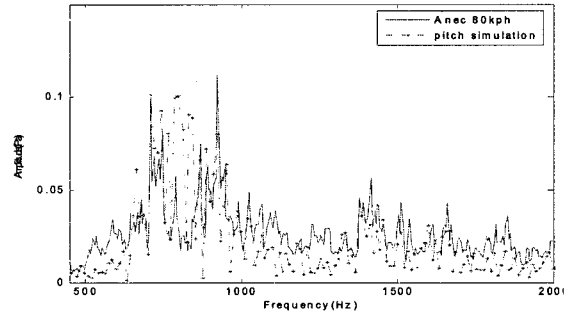
$$\text{Fundamental\_freq.} = \frac{\text{velocity(kph)}}{\text{pitch\_length(m)}} \times \frac{1000\text{m/km}}{3600\text{sec/hour}} \quad (1)$$

### 3.2 무향실 실험과 피치 배열 시뮬레이션 비교

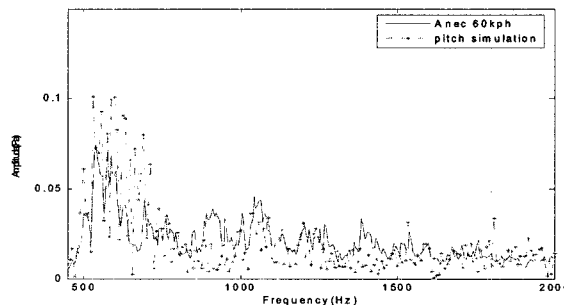
타이어는 구조적으로 고무와 같은 여러 복합체로



(a) 100 kph



(b) 80 kph



(c) 60 kph

Fig. 7 FFT of anechoic noise test & simulation

이루어져 있기에 도로 조건, 온도, 차량 중량과 같은 외부요인에 영향을 많이 받는다. 이러한 외부요인을 최소화하기 위하여 무향실 소음 측정하고 피치 배열 시뮬레이션과 비교, 분석하였다. 정속 주행을 하고 패턴 노이즈는 주로 500 Hz 이상의 고주파 성분이기 때문에 고주파 통과 필터링(high pass filtering) 후 결과를 비교하였다.

Fig. 7(a) ~ (c)는 정속 주행 100, 80, 60 kph에서의 무향실 타이어 근접 소음 측정 결과와 피치 배열 시뮬레이션과의 비교이다. 속도가 감소함에 따라 그 음압의 크기와 주요 가진 주파수가 감소하며 피치 배열 시뮬레이션과 상당히 잘 일치하고 있다.

#### 4. 시변주파수 분석

##### 4.1 STFT(Short Time Fourier Transform)

###### (1) STFT 변환

기존의 주파수 분석 기법인 푸리에 변환(FFT)은 정상적인 신호(stationary signal)에 대한 주파수 분석에 주로 사용되며, 비정상적인 신호(non-stationary signal)에 대한 주파수분석기법에는 많은 오차를 수반하고 있다.

이러한 비정상 신호에 대한 주파수 분석으로 시변주파수 분석이 도입되었다. STFT, 웨이블릿(Wavelet transform), 위그너 빌(Wigner-Ville transform) 등과 같은 시변주파수 분석이 많이 소개가 되었고 이러한 기법은 현재 구조물의 안전진단에 많이 적용되고 있다.

특히 타이어 패턴 노이즈는 1회전을 주기로 가지지만 원주 상의 피치들이 1회전 내에서는 비정상적인 소음 발생이 되므로, 이러한 신호에 대하여 각 피치들의 충격음 발생시기 및 순간 주파수 성분에 대한 STFT와 같은 고차원적인 분석이 필요하다. 이를 위하여 1946년에 Gabor는 시간-주파수 표현 방법을 처음으로 도입하였고, 유사한 시기에 스펙트로그램(spectrogram)이 Koenig에 의해서 미국 음향학회에 소개되었다.<sup>(7)</sup>

다음은 피치 배열 랜덤화의 한 예로써 Landers(US P.N: 4,327,792)는 1 2 3 2 1 1 2 2 3 3 2 2 1 과 같이 대, 중, 소 피치가 순서대로 변하는 주기를 천천히 바꾸거나 빨리 바꿈으로써 불규칙화를 꾀하였다. 즉, Fig. 8(a)와 같이 순차적으로 배

열함으로써 급작스런 피치 크기의 변화로 인한 마모도 방지할 수 있고 소음도 감소시킬 수 있다.

Fig. 8(a)의 Landers의 피치 배열을 주파수 분석하면 Fig. 8(b)로 나타낼 수 있다. 종래의 주파수 분석을 통해서서는 각 원주 상의 순간 피치들의 주파수 분포를 알 수 없지만 Fig. 8(c)에서의 STFT분석은 피치 배열이 원주상에서 어떻게 바뀌는지 쉽게 확인할 수 있다. 즉, 대피치에서 소피치로 천천히 바뀌는 것과 빨리 바뀌는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 그러므로 순간 피치들의 배열이

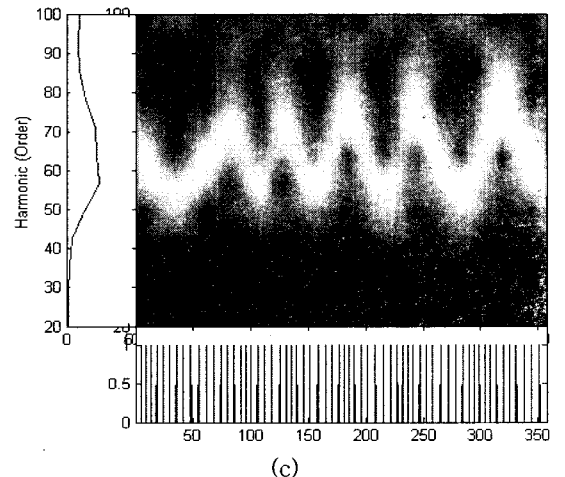
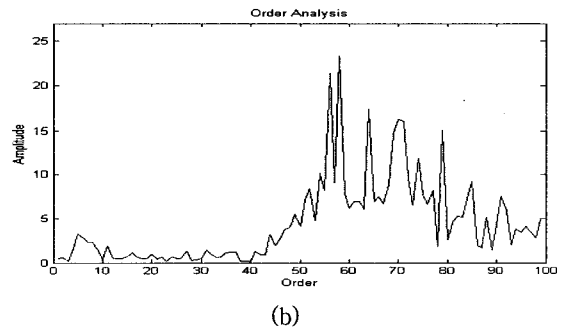
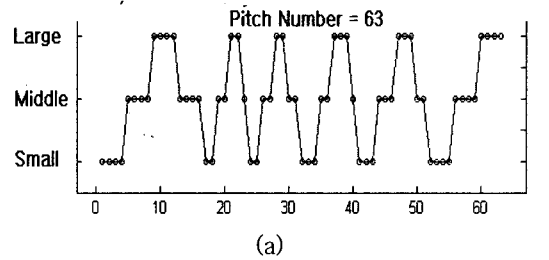


Fig. 8 Pitch sequence method of landers pitch sequence (a), FFT (b), STFT (c)

어느 주파수 대역에 밀집되었는가에 대한 분석이 가능하다.

### 5. 시변 주파수 적용

#### 5.1 타이어 패턴 노이즈 분석

##### (1) 타이어 패턴 노이즈 적용

위와 같이 피치 배열에 대해 STFT를 적용한 사례는 미국특허 U.S 6,112,167에 있지만 패턴 형상을 적용하지는 못하고 있다. 실제 타이어가 Fig. 9 과 같이 회전할 때, 차량 하중에 의해서 노면과 접지면을 가지면서 회전하게 된다. Fig. 10은 하중이 가해진 상태에서 노면에 나타나는 접지 형상이다. 이러한 접지면의 패턴 형상에서 선단부에 블럭의 충격이 가해지면서 소음이 크게 발생하게 된다. 그러므로 1차원적인 피치 배열 시뮬레이션보다 Fig. 11과 같이 접지선단부로 패턴 형상을 스캔(scan) 하면서 가진 데이터를 생성하여, 즉 2차원적인 형상을 추가하여 좀더 정밀한 소음 시뮬레이션을 프로그램화 하였다.

임의로 피치 배열된 타이어를 실차 반무향실의 타이어 측면에서 30 cm 떨어진 거리에서 소음 측정하였고 패턴 형상에 대하여 image scanning simulation을 적용한 후 STFT을 통해 분석하였다.

Fig. 12(a)는 타이어가 5회전하는 동안 측정 결과의 STFT 분석이다. 점선을 기준으로 하여 비슷한 양상의 주파수 분포가 5회 반복됨을 알 수 있다. Fig. 12(b)는 1회전할 때의 실제 측정된 소음 결과의 STFT 분석이다. Fig. 12(c)는 1회전 image scanning simulation의 STFT 분석 결과이다.

시뮬레이션 상의 STFT 분석에서 원주상의 50도 부근에 65오더 성분에 집중되었음을 알 수 있다. 실제 무향실 측정 실험에서도 Fig. 12(b)의 65오더 근처에서 소음이 집중되고 있음을 알 수 있다. 그러므로 이 부분의 피치배열을 불규칙하게 수정하여 패턴 노이즈 저감을 피할 수 있다.

##### (2) STFT를 이용한 소음 개선

실제로 소음이 문제가 되었던 타이어의 피치 배열 설계에 대하여 적용하였다. Fig. 13의(a)는 기존의 소음이 문제가 많이 되었던 피치 배열을 가진 타

어 image scanning simulation의 STFT분석 결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 점선 원 내에 거의 전 원주대역에서 75오더 부근에 음압이 집중되고 있음을 확인할 수 있다. 하지만 동일 패턴 형상의 개선 피치배열을 적용한 타이어 image scanning

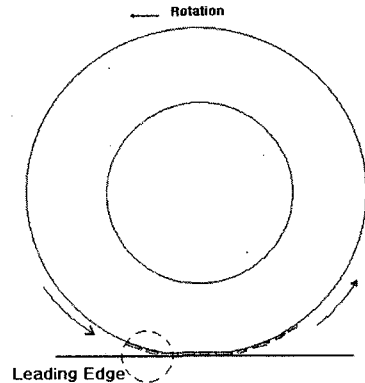


Fig. 9 The tire of rolling state



Fig. 10 Loaded pattern shape

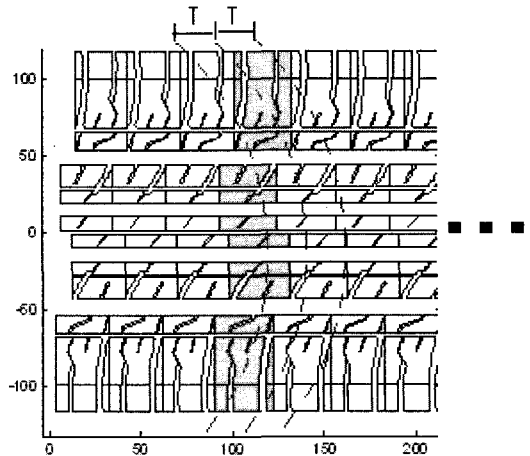


Fig. 11 Image scanning simulation

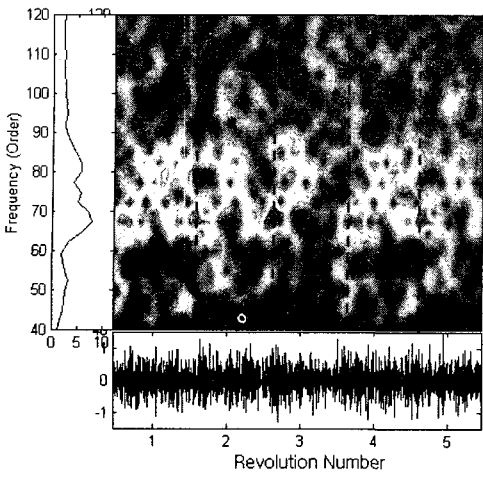
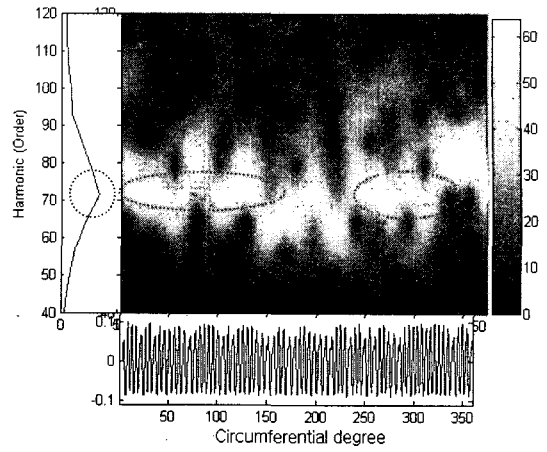


Fig. 12(a) STFT of test in 5 revolution



(a)

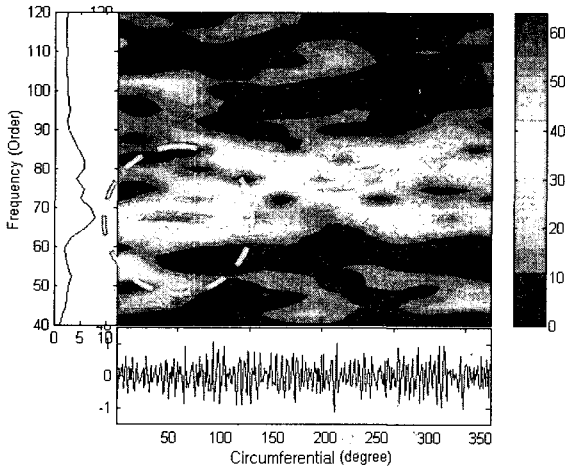
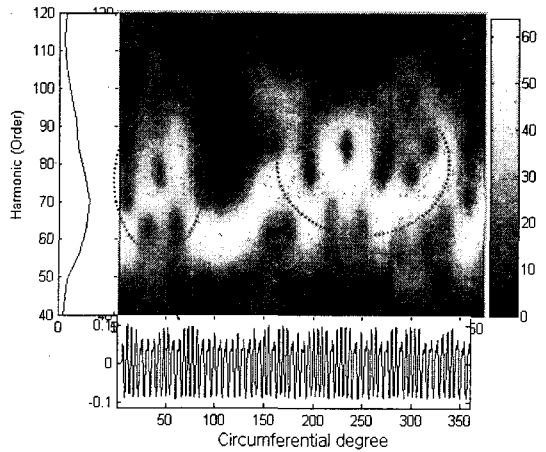


Fig. 12(b) STFT of test in 1 revolution



(b)

Fig. 13 The comparison of STFT of simulation problemed sequence(a), improved seq.(b)

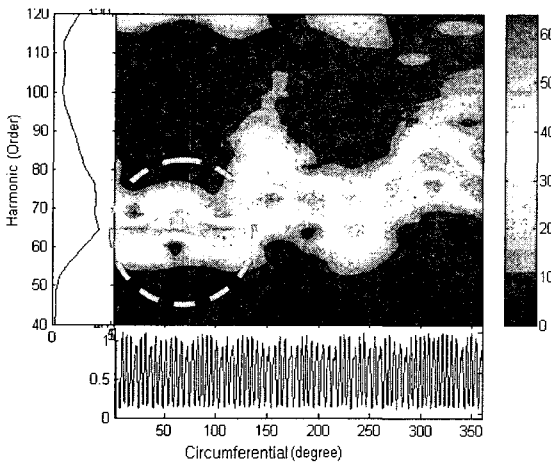
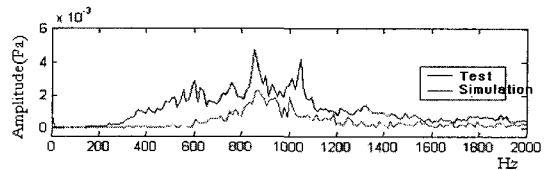
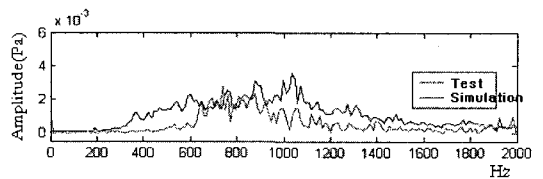


Fig. 12(c) STFT of image scanning simulation in 1 revolution



(a)



(b)

Fig. 14 The comparison of FFT of field test problemed sequence(a), improved seq.(b)

simulation의 STFT분석은 Fig. 13(b)의 점선 원을 보면 오더 방향으로 많이 분산되어 있다.

실제 실차 실험 결과 Fig. 14(a)와 같이 850 Hz 부근에서 소음이 집중되어 있어 많이 문제가 되고 있다. 하지만 개선 피치배열의 타이어를 실험한 결과 Fig. 14(b)는 많이 분산되어 있고 피치 배열 시 물레이션과의 상관성도 떨어지고 850 Hz의 소음 집중이 많이 해소되었음을 확인 할 수 있다.

## 6. 결 론

(1) 타이어의 패턴 노이즈는 500 Hz 이상 고주파 대역의 차질 투과음으로 패턴 형상, 특히 피치배열과 많은 상관성이 있다.

(2) 피치 배열의 주기성을 불규칙하게 배열함으로써 패턴 노이즈를 많이 저감할 수 있다.

(3) 기존의 주파수 변환을 통한 불규칙화는 어느 정도 한계를 가지고 있다.

(4) 시변 주파수 분석을 통하여 특정 원주상의 소음발생 주파수 및 크기를 확인할 수 있다.

(5) STFT를 적용하여 이러한 순간접지상태의 주기성을 불규칙화하여 더욱 더 소음의 저감을 꾀할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- (1) Heckl, M., 1986, "Tyre Noise Generation," *Wear*, 113, pp. 157 ~ 170.
- (2) Kim, E. B., 2001, "A Study on the Prediction of Tire Pattern Noise Considering the Impact Force at Contact Edges," KAIST Master thesis.
- (3) Kim, S. T., 2005, "Numerical Method for Prediction of Air-pumping Noise by Car Tyre," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15 No. 7, pp. 788 ~ 798.
- (4) El-Sebai, N. A., Watany, M. and Saad, "Tire/Road Interface Airborne Noise Characteristics Generation," SAE1999-0.1-1731.
- (5) Jung, S. C., 2005, "A Study on Randomization of Tining Space for Reducing Road Noise," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 15 No.8, pp. 897 ~ 903.
- (6) Ulf Sandberg, Jerzy A., 2002, Ejsmont, "Tire/Road Noise Reference Book," pp. 222 ~ 226.
- (7) Gabor, D., 1946, "Theory of communication," *Journal of IEE*, Vol. 93, pp. 429 ~ 457.