

http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.1.251

JIIBC 2013-1-34

타이어 손상에 의해 반복적으로 발생하는 랜덤성 초음파 신호의 주기검출

Period Detection of Randomness Ultrasonic Signal Occurred Repeatedly by a Tire Damage

정선용*, 강대수**

Sun-Yong Jung, Dae-Soo Kang

요약 주행 중인 자동차의 타이어와 노면이 마찰하면서 반복적으로 발생하는 랜덤성 초음파 신호에 대하여 타이어의 손상을 검출하는 방법에 대해 연구하였다. 먼저 단구간 에너지 함수를 도입한 전처리 과정을 통해 랜덤성질을 감소시키고, 랜덤성질의 정규화 표현으로 코히어런스 함수의 평균값을 사용하였다. 코히어런스 임계값을 사용하여 신호의 우성주기를 결정할 수 있는가에 대한 처리한계를 분석하였고, 전력스펙트럼의 최댓값에 대해 -3dB 임계값을 설정함으로써 우성주기를 판별하는 알고리즘을 제안하였다.

Abstract We studied it about ways to detect damage of a tire about randomness ultrasonic signal which occurs repeatedly while rub a tire of driving car and a road surface. The signal randomness is decreased through the preprocess of short-time energy calculation and the average value of coherence function is used by the normalization expression of the signal randomness. The process limit that can be decide on the dominant period of a signal using the coherence threshold is analyzed and the algorithm to decide the dominant period is proposed by setting up the -3dB threshold of the maximum value on the power spectrum.

Key Words : Tire Damage, Short-time energy function, Coherence, Power Spectrum Threshold, Period Detection

1. 서 론

현대의 자동차는 여러 기술의 융합을 통하여 이동수단의 목적만 가지고 있는 것이 아니라 통신, IT기술과 같은 여러 기술들의 융합으로 편의성뿐만 아니라 운전자와 보행자의 안전성을 향상시키는 지능형 자동차로 발전하고 있으며, 사고를 미연에 방지하고, 교통사고 사상자를 줄이기 위한 능동제어시스템이 개발되고 있다.

교통사고는 운전자나 보행자에 의한 원인, 환경적 원인, 차량 자체에 의한 원인으로 나눌 수 있으며 이중 차량 자체에 의한 교통사고는 차량의 브레이크, 타이어 등의 결함에 의해 발생하는 경우이다. 교통안전공단 발표 자료에 따르면, 2009년~2011년까지 타이어 파손으로 인한 교통사고는 482건, 사망자는 43명으로 집계됐다. 특히 타이어 파손사고의 사망자는 사고 100건당 8.9명으로 전체 교통사고의 사망자인 2.4명보다 3.7배나 높다.

*준회원, 공주대학교 대학원 정보통신공학과

**정회원, 공주대학교 정보통신공학부

접수일자 2012년 12월 31일, 수정완료 2013년 1월 30일
게재확정일자 2013년 2월 8일

Received: 31 December 2012 / Revised: 30 January 2013 /

Accepted: 8 February 2013

*Corresponding Author: ds kang@kongju.ac.kr

Dept. of Information and Communication, Kongju National University, Korea

타이어의 상태는 운전자의 안전과 직접적인 관련이 있지만, 현재는 타이어의 공기압과 온도 상태 등을 감지할 수 있는 타이어 공기압 모니터링 시스템(TPMS : Tire Pressure Monitoring System)이 유일하다.

타이어의 결함에는 타이어의 온도 상승, 스탠딩 웨이브, 타이어 외부의 손상물질, 공기압 부족 및 과다, 크랙 등이 있다. 이 중 타이어 외부의 손상 물질은 운전자가 이를 감지하는데 어려움이 있고, 지속적인 주행으로 인해 손상 물질이 타이어에 더 깊숙이 침투하게 되면, 타이어의 펑크로 인한 사고를 초래한다. 따라서 타이어의 손상물질에 의한 사고를 방지하기 위해서는 타이어의 결함을 감지할 수 있는 장치가 필요하다.

주행하는 자동차 타이어에 손상 물질이 존재한다면, 타이어가 갖는 회전운동으로 인해 손상 물질과 노면이 지속적으로 마찰하여 속도에 따른 일정한 주기의 특징 신호가 발생한다. 이 신호는 손상물질이 노면에 마찰할 때의 노면상태와 배경잡음 등에 따라 파형이 다르고 서로 상관도가 낮은 랜덤성의 특성을 가지므로 자기상관(Auto-Correlation)함수로는 정확한 주기측정에 어려움이 따른다. 따라서 적절한 전처리 과정을 통해 랜덤성질을 감소시키는 과정이 필요하다.

본 논문에서는 랜덤성질을 감소시키기 위해 진폭에 민감한 단구간 에너지(Short-time energy) 함수를 사용하였으며, 단구간 에너지 함수의 window size를 가변함에 따라 코히어런스(Coherence) 함수의 평균값이 변동하는 추이를 분석하였다. 전처리 정도에 따른 코히어런스 함수의 평균값을 정규화 된 임계값 설정 방법으로 제안하고, 이를 이용하여 타이어의 손상 물질에 의해 발생하는 초음파 신호에 대해 우성주기를 검출함으로써 타이어의 손상을 검출하려 한다.

II. 신호의 랜덤성과 코히어런스

주행 중 손상이 있는 타이어와 노면 사이의 초음파 신호는 타이어의 1회전 시간마다 손상 물질과 노면이 마찰하면서 손상에 의한 신호가 주기적으로 발생된다. 하지만 손상에 의한 신호는 변화하는 노면의 상태와 주변의 잡음과 간섭 등에 따라 모두 다른 형태의 파형이므로 각각의 이 파형은 서로간의 상관도가 낮은 랜덤성질을 갖게 된다. 그러므로 손상에 의한 신호들의 상관도를 높이고 랜

덤성질을 감소시키는 전처리 과정이 필요하다. 2장에서는 신호의 랜덤성에 따른 상관도의 정량적 검증을 위해 손상된 타이어에서 발생한 초음파 신호와 유사하게 주기적으로 반복되어 발생하는 랜덤신호(Periodic Random Burst) 신호를 사용한다. 이 신호는 듀티비(Duty Ratio)가 일정한 구형파 신호와 가우시안 분포의 랜덤신호를 곱한 신호이다.

1. 단구간 에너지 함수에 의한 랜덤성 감소

신호의 주기적 상관도를 높이는데 있어 보편적인 전처리과정에서 사용하는 저역통과필터 처리를 하게 되면, 신호의 진폭이 감소함에 따라 신호의 상관도가 크게 증가하지 못 하므로 정확한 주기를 검출하는데 어려움이 따른다. 따라서 본 논문에서는 전처리 방법으로 단구간 에너지 함수를 제안하였는데 이는 입력신호를 제공하여 창함수와 곱함으로써 신호 진폭을 감소시키지 않고 랜덤성질을 낮출 수 있기 때문이다.

단구간 에너지 함수는 다음과 같이 정의 된다.^[1]

$$E(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} [x(m)w(n-m)]^2 \quad (1)$$

$$= \sum_{m=-\infty}^{\infty} x^2(m)h(n-m)$$

여기서, $w(n-m)$ 은 창함수(window function)를 나타낸다. 본 논문에서 사용되는 창함수는 해밍 윈도우(Hamming window)이다. 그 이유는 여러 가지 창함수 중 성능이 가장 우수하고, 창함수로 구분된 신호와 원래 신호와의 스펙트럼 차이가 Rectangle window보다 작아 누설 주파수를 줄여주기 때문이다.

그림 1은 Random Burst 신호와 Rnadam Burst 신호에 단구간 에너지 함수의 창함수인 window size를 20과 30으로 적용한 결과이며, 오른쪽의 파형은 해당 신호의 한 파형을 확대한 결과이다. 이처럼 단구간 에너지 함수를 적용하면 신호의 랜덤성질이 감소되지만, window size가 20으로 짧으면 직관적으로 랜덤성이 많이 관찰됨을 확인할 수 있으며, 또한 진폭편이가 커져 어떠한 특성을 찾는 파라미터로 사용되기 어려워지므로 적당한 window size의 선정이 필요하다.

따라서 랜덤성질의 정량적 평가로서 상관함수가 사용될 수 있으나 본 논문에서는 신호의 일치성을 0과 1사이

의 값으로 정규화하여 판별할 수 있는 코히어런스 함수를 사용한다.

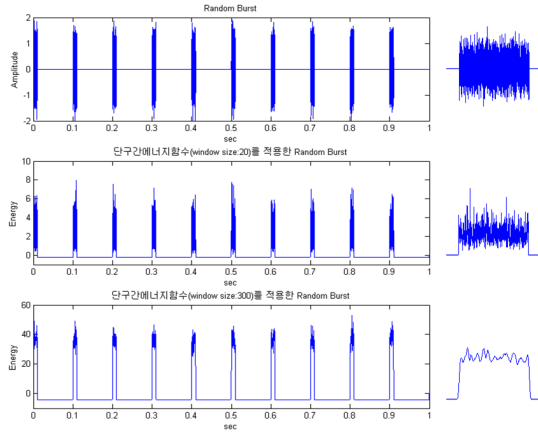


그림 1. Random Burst 신호의 window size에 따른 단구간 에너지 함수 적용 결과와 관찰된 신호파형
Fig. 1. The short-time energy function applied results by window size of a Random Burst Signal and observed signal wave.

2. 코히어런스에 의한 신호의 랜덤성 측정

코히어런스는 시스템에서 입력과 출력 사이의 관계를 규명하고, 신호의 일치성을 평가하는 파라미터이며, 신호의 관계를 주파수 영역에서 분석하는데 사용되는 함수로서 상관함수의 푸리에 변환식들로 표현된다.

코히어런스 함수는 식 (2)와 같이 정의된다.^[2]

$$r_{xy}^2(w) = \frac{|P_{xy}(w)|^2}{P_x(w)P_y(w)} \quad (2)$$

식에서 $P_{xy}(w)$ 는 입력신호 $x(t)$ 와 $y(t)$ 의 상호 전력스펙트럼이고, $P_x(w)$ 는 $x(t)$ 의 전력스펙트럼, $P_y(w)$ 는 $y(t)$ 의 전력스펙트럼이다. 코히어런스는 신호 $x(t)$ 와 $y(t)$ 가 정확히 일치할 때, 1이라는 최댓값을 가지며, 두 신호 사이의 상관이 없을 때는 0이라는 최솟값을 갖는다. 따라서 두 개의 입력 신호가 완전히 일치하지 않고 배경잡음이나 주변 환경, 외부 신호에 영향을 받았다면, 코히어런스는 최솟값인 0과 최댓값인 1 사이의 값으로 나타나며, 코히어런스의 범위는

$$0 \leq r_{xy}^2(w) \leq 1 \quad (3)$$

이다. 따라서 본 논문에서는 코히어런스 함수의 평균값을 산출하여 코히어런스 값으로 사용하였다.

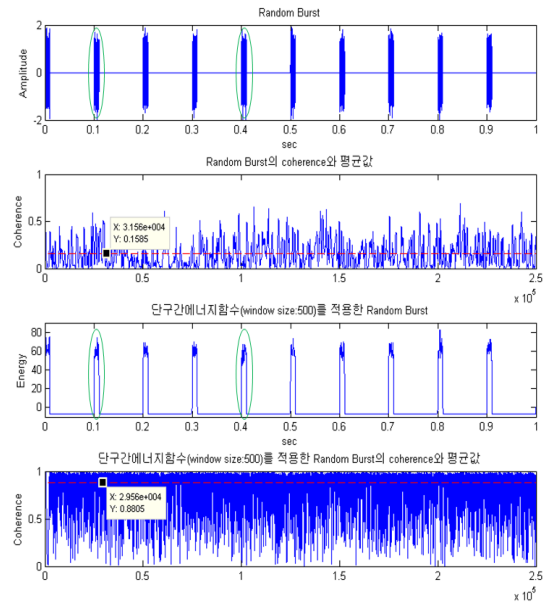


그림 2. Random Burst 신호의 전처리 유무에 따른 코히어런스 비교
Fig. 2. The coherence comparison along preprocess or non-preprocess of Random Burst Signal

그림 2는 Random Burst 신호의 전처리 과정이 없을 때와 단구간 에너지 함수의 window size가 500일 때의 결과와 그에 따른 코히어런스의 결과 그래프이다. 먼저, 전처리 과정이 없는 Random Burst 신호의 파형 두 개를 선택하여 코히어런스의 평균값을 구해보면 약 0.16으로 낮은 일치도를 보이는 반면, 전처리 과정 후의 코히어런스의 평균값은 약 5.5배 증가한 0.88이라는 값을 얻을 수 있었다. 따라서 신호가 단구간 에너지 함수의 전처리 과정을 거치게 되면, 랜덤성질이 감소하여 신호의 상관도가 높아지므로 주기를 검출하는데 좀 더 용이해진다.

III. 코히어런스 임계값 설정과 주기검출 방법

자동차가 주행할 때, 손상된 타이어의 손상된 부분이 노면과 마찰하면서 발생하는 초음파 신호는 타이어의 1

회전 시간에 따른 주기를 가지며 이 주기를 이용하여 타이어의 손상을 검출할 수 있다.

그림 3은 본 논문의 주기 측정 전체 블록도이다.

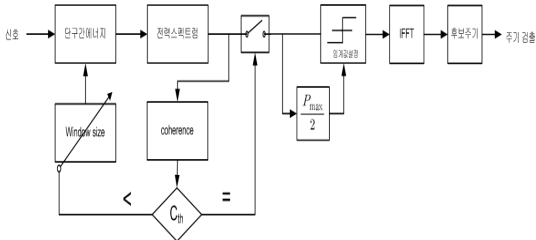


그림 3. 코히어런스 임계값에 의한 주기검출 블록도
Fig. 3. Period detection block diagram by coherence threshold

손상된 신호의 랜덤성질을 감소시키고, 서로간의 상관도를 높이기 위해 단구간 에너지 함수를 적용하고, 단구간 에너지 함수의 window size를 가변하여 적당한 코히어런스 임계값을 설정한다. 코히어런스 임계값이 설정되면, 주기를 구하는 대표적인 방법인 자기상관함수의 과정을 통해 잡음성분을 좀 더 배제해 주기 위한 전력스펙트럼 임계값을 적용하여 임계값 이상의 후보주기에 따른 우성주기를 검출한다.^[6]

1. 타이어 초음파 신호의 코히어런스 임계값 설정

자동차 타이어 신호의 손상된 부분에서 발생하는 초음파 신호는 주행하는 도로의 노면 상태에 따라 각각 다른 파형을 가지므로 각각의 파형들은 서로간의 상관도가 낮을 것이라고 추측할 수 있으며, 그림 4와 5를 통해 이를 확인해 볼 수 있다.

손상물질이 1개인 타이어로 50km/h, 100km/h로 주행하였을 때 신호의 진폭크기가 비슷한 두 신호의 코히어런스를 구해보고, 같은 신호에 단구간 에너지 함수의 window size를 500으로 적용하여 코히어런스를 비교해 보았다.

주행속도가 50km/h와 100km/h 모두 단구간 에너지 함수를 적용하면 코히어런스가 증가하며, 이처럼 단구간 에너지 함수의 전처리 과정이 타이어의 손상된 부분에서 발생하는 신호간의 상관도를 높여줄 수 있다. 그러나 신호의 랜덤성질이 얼마나 감소해야 주기가 잘 검출되는지 확인해 볼 필요가 있다. 이를 확인해 보기 위해

window size를 변화시켜가며 그에 따른 코히어런스 값을 구하여, 실험적으로 코히어런스 임계값을 설정한다.

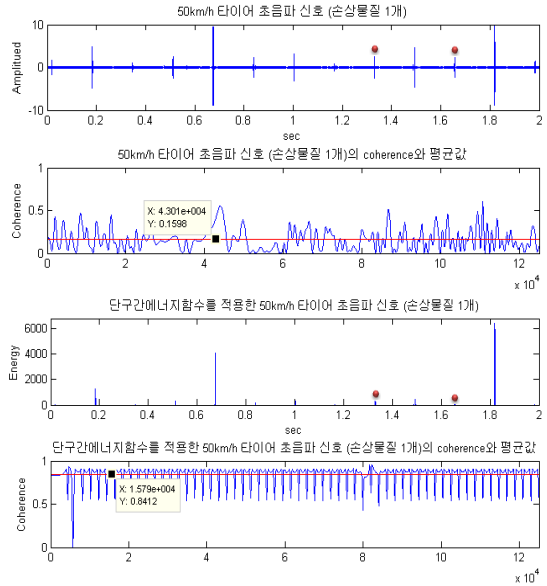


그림 4. 전처리에 따른 코히어런스 비교 (50km/h)
Fig. 4. Coherence classified by preprocess (50km/h)

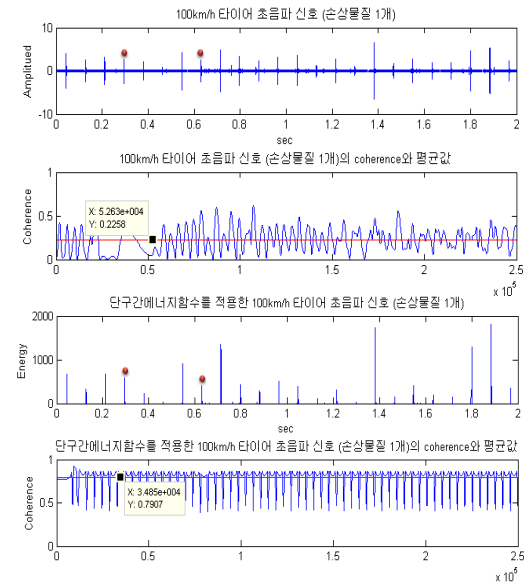


그림 5. 전처리에 따른 코히어런스 비교 (100km/h)
Fig. 5. Coherence classified by preprocess (100km/h)

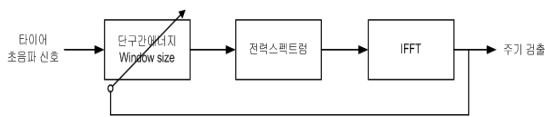


그림 6. 코히어런스 임계값 산출을 위해 자기상관함수를 사용한 주기 검출

Fig. 6. Period detection using auto-correlation function for coherence threshold calculation

자동차 타이어 초음파 신호에 대한 코히어런스 임계값 설정을 위해 그림 6과 같은 과정으로 window size를 변화시켜 가며 자기상관함수를 통한 주기검출 신호의 왜곡이 사라지기 시작하는 window size와 코히어런스를 구해보았다. 주행속도가 50km/h일 때는 각각 350, 0.7052이고, 100km/h일 때는 400, 0.7126의 결과를 얻을 수 있었다. 따라서 코히어런스가 최소 0.72 이상이면, 주기를 검출함에 있어서 신호의 왜곡이 사라지게 되므로 타이어 초음파 신호에 대한 코히어런스 임계값은 0.72로 정한다.

그림 7과 8은 속도에 따른 window size와 코히어런스, 전력스펙트럼 최댓값의 관계 그래프이며, 각 그래프에 코히어런스 임계값인 0.72와 근접한 값을 표시해 주었고, 각각의 값들은 표 1과 같다.

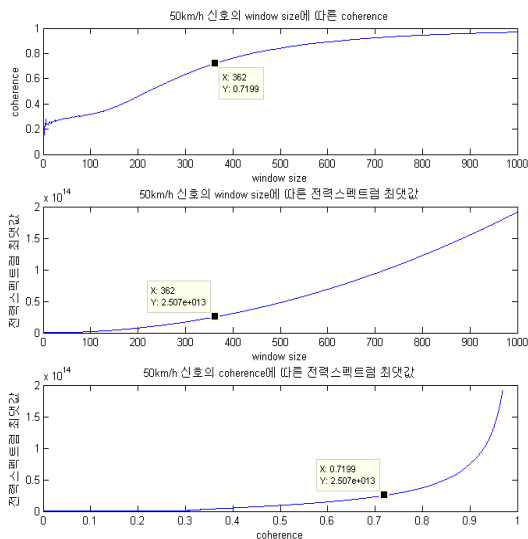


그림 7. window size, 코히어런스, 전력스펙트럼 최댓값 관계 (50km/h)

Fig. 7. Relation of window size, coherence, and maximum value of power spectrum (50km/h)

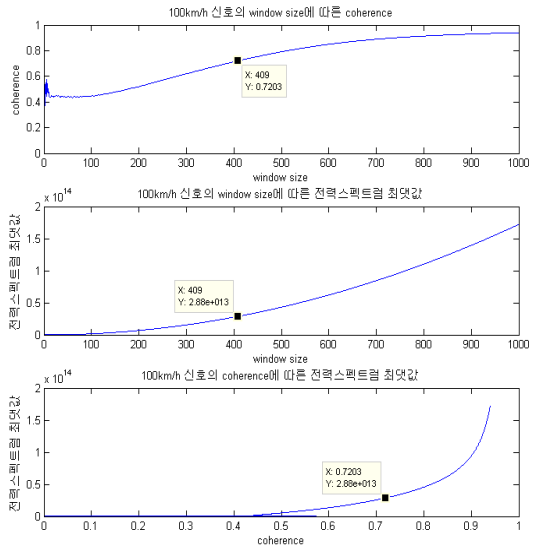


그림 8. window size, 코히어런스, 전력스펙트럼 최댓값 관계 (100km/h)

Fig. 8. Relation of window size, coherence, and maximum value of power spectrum (100km/h)

표 1. 주행속도에 따른 코히어런스 임계값

Table 1. Coherence threshold classified by driving speed

주행속도	50km/h	100km/h
window size	362	409
코히어런스	0.7199	0.7203
전력스펙트럼최댓값	2.507×10^{13}	2.88×10^{13}

코히어런스 임계값이 설정되면, 잡음신호를 배제하고 주기검출 신호의 크기를 선별하는 과정이 필요하다. 따라서 전력스펙트럼의 최댓값(P_{max})을 통해 전력스펙트럼 임계값을 설정하고 임계값 이상의 후보주기에 대해 우성주기를 검출할 필요가 있다. 본 논문에서 사용한 전력스펙트럼 임계값은 전력 신호에 대한 $-3dB$ 차단주파수를 설정하는 $P_{max}/2$ 로 설정한다.

2. 타이어 초음파 신호의 주기검출

본 논문의 실험에서 사용한 초음파 신호는 공진주파수가 40kHz인 MA40L1R을 사용하여 타이어와 노면 사이에서 발생하는 신호를 비접촉으로 획득한 신호이다. 40kHz의 신호는 나이퀴스트(Nyquist) 샘플링 정리에 의

해 최소 80kHz의 주파수로 샘플링해야 하지만 랜덤성 신호의 특징을 분석하기 위해 250kHz의 샘플링 주파수를 사용하였으며, 그림 9에 데이터 획득 장치를 나타내었다. 또한 데이터 획득 조건은 손상물질이 1개이고, 타이어의 원주길이가 225cm인 차량을 이용하여 50km/h, 100km/h로 주행하여 데이터를 획득하였다.^{[3][4][5][6]}

자동차가 주행하면서 타이어의 손상된 부분과 노면이 마찰하면서 발생하는 초음파 신호를 이용하여 그림 3의 전체 블록도를 통해 타이어 신호의 손상을 판별하였다.



그림 9. 데이터 획득 장치
Fig. 9. Data acquisition system

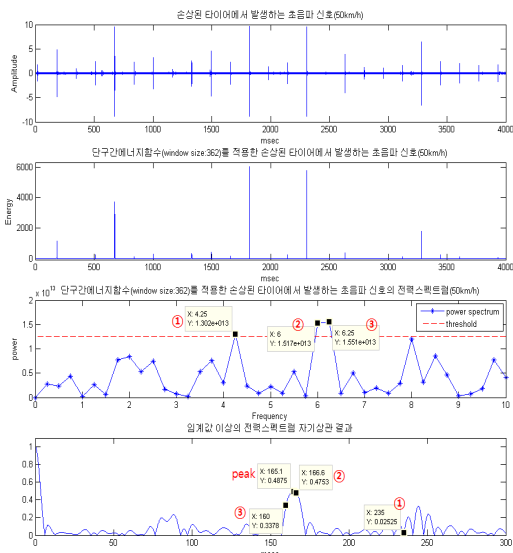


그림 10. 손상된 타이어에서 발생하는 초음파 신호의 주기 검출 (50km/h)
Fig. 10. Period detection of ultrasonic signal occurs at damaged tires (50km/h)

그림 10은 주행속도 50km/h의 주기검출 결과이다. 초음파 센서로 수신된 신호에 코히어런스 임계값과 근접하게 되는 window size(362)의 구간간 에너지 함수를 적용하여 신호의 랜덤성질을 감소시켜 주고, 이 신호의 전력스펙트럼에 전력스펙트럼 임계값을 설정하여 임계값 이상의 전력스펙트럼 값인 후보주기에 대한 우수주기를 검출하였다. 후보주기 1은 235msec, 후보주기 2는 166.6msec, 후보주기 3은 160msec이며, 자기상관함수의 피크주기는 165.1msec이다. 이때 후보주기 1은 자기상관함수 결과의 첫 번째 주기 과정에서 벗어났으므로 후보주기라 할 수 없으며, 후보주기들 중 자기상관함수 피크주기와 가장 근접한 후보주기 2가 우수주기이다.

그림 11은 주행속도 100km/h의 주기 검출 결과이다. 표 2의 코히어런스 임계값에 해당되는 window size(409)의 구간간 에너지 함수를 적용하여 전력스펙트럼 임계값을 설정해주고 후보주기에 대한 우수주기를 검출하였다. 100km/h의 주행속도에 대한 후보주기는 83.33msec로 1개이며, 자기상관함수의 피크주기는 83.66msec로 이는 후보주기1과 근접한 값이다. 따라서 후보주기 1이 우수주기가 된다.

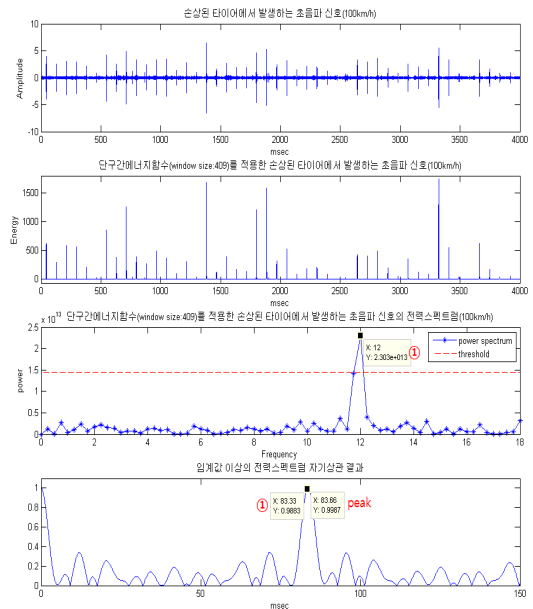


그림 11. 손상된 타이어에서 발생하는 초음파 신호의 주기 검출 (100km/h)
Fig. 11. Period detection of ultrasonic signal occurs at damaged tires (100km/h)

IV. 결 론

타이어의 손상된 부분에서 발생하는 신호는 타이어가 회전하며 노면에 닿는 상태에 기인하여 랜덤성질을 가지는 신호가 반복되며, 반복되는 신호는 상호상관도가 낮아 주파수영역 기반의 방법으로는 주기 검출에 어려움이 있음을 실험하였다.

신호의 랜덤성질을 감소시키기 위해 진폭특성에 민감하고 처리시간이 빠른 단구간 에너지 함수를 사용하였으며, 단구간 에너지 함수의 window size를 가변하여 신호의 랜덤성질과 코히어런스 함수의 평균값의 관계를 도출하였다. 특히 코히어런스 함수는 0과 1사이의 값을 가지므로 주파수 대역 평균값을 산출하여 신호의 랜덤성질을 정규화 하는데 사용하였고, 이와 함께 전력스펙트럼의 크기를 측정함으로써 신호의 랜덤성질에 따른 주기측정 임계값으로 사용할 수 있음을 제안하였다.

본 논문에서는 자기상관함수를 이용한 실험으로 코히어런스 임계값을 0.72(72%의 일치성)로 설정하여 후보주기를 검출하였고 검출된 후보주기를 대상으로 우성주기를 결정할 수 있었다.

이상의 결과로부터 반복적으로 발생하는 랜덤성 신호의 반복주기를 산출함에 있어서 신호의 랜덤성질을 감소시키는 전처리방법을 정량화 할 수 있을 뿐 아니라 코히어런스가 얼마가 되면 신호의 우성주기를 결정할 수 있는가에 대한 처리한계를 결정함으로써 신호처리의 효율성을 향상시키는 기준으로 사용 될 수 있다.

하지만, 랜덤성 신호를 처리함에 있어 단구간 에너지 함수에 따른 코히어런스의 임계값은 처리하려 하는 신호의 진폭 및 혼입된 잡음에 대한 영향에 따라 달라지며, 추후 신호대잡음비(S/N : signal-noise ratio)가 코히어런스 임계값을 구함에 있어 어떤 관련성이 있는지에 대한 연구가 필요하다. 이러한 연구를 통해 최적의 코히어런스 임계값을 산출한다면, 타이어의 손상에 의한 교통사고를 미연에 방지할 수 있는 타이어 손상 검출 시스템을 구현하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] T.S.Kim, J.C.Chang, "A Study on Speech Period and Pitch Detection for Continuous Speech Recognition", Journal of KMMS, vol.8, No.1, pp.56-61, 2005.
- [2] S.W.Park, S.K.Ryu, Y.C.Park, D.H.Youn, "A New Objective Speech Quality Measure Over Mobile Communication Using Bark Coherence Function", Journal of KICS, vol.26, No.4B, pp.437-446, 2001.
- [3] S.Jeon, H.Y.Kim, D.S.Kang, "A Study of the Vehicle Tire Damage Detection using Split Spectrum Processing", Journal of IWIT, vol.10, No.6, pp.113-118, 2010.
- [4] Y.D.Oh, D.S.Kang, "The Damage Classification by Periodicity Detection of Ultrasonic Wave Signal to Occur at the Tire", Journal of IWIT, vol.10, No.6, pp.107-111, 2010.
- [5] S.G.Shin, D.S.Kang, "The Tire Damage Classification by Pulse Interval Time Density Function of Ultrasonic Wave Envelope on Driving", Journal of IWIT, vol.11, No.3, pp.41-46, 2011.
- [6] J.I.Park, "A Study on the Period Measurement of Ultrasonic Signal Generated by Damaged Vehicle Tire", Kongju University Graduate School, 2011.
- [7] Murat Kunt, "Digital signal processing", Artech House, 1986.

저자 소개

정 선 용(준회원)



- 2011년 : 공주대학교 정보통신공학부 학사 졸업
 - 2011년 ~ 현재 : 공주대학교 대학원 정보통신공학과(공학석사과정)
- <주관심분야 : 신호처리, 임베디드시스템>

강 대 수(정회원)



- 1983년 : 경희대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 : 경희대학교 전자공학과 석사 졸업
- 1992년 : 경희대학교 전자공학과 박사 학위
- 2003년 ~ 현재 : 공주대학교 정보통신공학부 교수

<주관심분야 : 디지털통신, 인지신호처리, 이동통신>