

논문 2011-5-7

# 자동차 타이어 손상에 의한 초음파 신호 주기 측정에 관한 연구

## On the Study of the Period Measurement of Ultrasonic Signal in Damaged Vehicle Tire

박정임\*, 임승각\*\*, 강대수\*\*\*

Jung-Im Park, Seung-Gak Lim, Dae-Soo Kang

**요약** 본 논문에서는 주행 중 타이어와 노면이 마찰하면서 발생하는 초음파 신호에서 이물질로 인해 야기되는 우성 주기를 검출하여 타이어 손상 유무를 판별하는 알고리즘에 대해 연구하였다. 손상된 타이어에서 획득한 초음파 신호의 포락선에 대해 전력스펙트럼을 산출하고 통계적 처리에 의한 임계값을 설정함으로써 우성주기를 판별하는 알고리즘을 제안하였다. 모의실험 결과, 시속 80km/h로 주행 시 초음파 신호의 포락선에 대해 전력스펙트럼의 피크주기 97.6ms에 비해 제안된 알고리즘의 우성주기는 100ms로서 포락선 피크의 평균주기 101.24ms를 기준으로 하였을 때 더 정확한 주기 측정 결과를 보였다.

**Abstract** We studied about the damaged tire decision algorithm that measured dominant period of ultrasonic signal due to a foreign material on the friction between tire and road surface. We computed the power spectrum about the envelope of ultrasonic signal acquired from the damaged tire, then proposed the dominant period decision algorithm by statistical power threshold value. As the result of simulation, when driving by the speed of 80km/h, the 100ms of dominant period that measured in the proposed algorithm is more accurate than the 97.6ms of power spectrum peak period referenced on the average period of ultrasonic signal envelope peak, 101.24ms.

**Key Words :** Ultrasonic Signal, Dominant Period, Power Spectrum, Power Threshold, Period Measurement

### 1. 서 론

오늘날의 차량은 단순한 이동수단이 아닌 IT기술과 융합하여 사고를 미연에 방지하고 예방할 수 있는 능동적 안전 시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

자동차의 사고와 관련하여 한국도로교통공단의 교통사고종합분석센터에서 2009년에 발표한 자료를 보면 한

해 동안 차량적 요인에 따른 교통사고는 4164건이 발생하였고 이중 타이어 손상으로 인한 사고는 172건이었다. 이로 인한 사망자수는 23명으로 전체 교통사고 사망자의 20%를 차지하고 있어 높은 사망률을 보여준다.<sup>[1]</sup>

타이어에 손상이 발생하게 되면 자동차는 구동력 및 제동력이 감소하고 급기야는 사고의 위험성이 높아진다. 이런 손상을 일으키는 원인으로는 마모, 외부충격, 예리한 급속·유리조각 박힘, 노후, 공기압 부족 등이 있다. 특히 타이어 외부에 못이나 유리와 같은 날카로운 손상 물질이 침투한 상태에서 주행하게 되면 운전자는 이를 감지하기 어려울 뿐만 아니라 고속 주행 시 지속적인 내

\*준회원, 공주대학교 대학원 정보통신공학과  
\*\*정회원, 공주대학교 정보통신공학부  
\*\*\*정회원, 공주대학교 정보통신공학부(교신저자)  
접수일자 2011.8.22, 수정일자 2011.9.29  
게재확정일자 2011.10.14

부 침투로 펑크 혹은 파열의 대형 사고를 일으키게 된다.

본 논문은 이러한 손상 물질의 유무를 검출하여 사고를 예방하는데 주안점을 둔다.

손상 물질이 침투한 타이어는 도로를 주행할 때 회전 운동을 하며 속도에 따른 일정한 주기의 특징 신호를 발생시키는데, 이러한 신호에는 마찰음, 진동음, 스켈음 등 가청 주파수의 잡음이 혼합되어 있어 손상 물질에 의한 특징 신호를 효과적으로 추출하기 위하여 초음파 대역을 이용한다.<sup>[1]</sup> 하지만 초음파 대역에서도 잡음의 영향을 완전히 배제할 수 없어서 손상 물질에 의한 주기 신호 외에도 잡음 신호에 의한 후보 주기군이 추출될 가능성이 있으므로 이러한 신호 처리 환경에서 우성주기(Dominant Period)를 정확하게 추출해낼 필요성이 있다. 우성주기의 추출 방법으로는 손상된 타이어에서 획득한 초음파 신호의 포락선에 대해 전력스펙트럼(Power Spectral)을 산출하고 통계적 처리를 거친 전력 임계값(Power Threshold)을 설정함으로써 잡음 환경 속에서 정확한 우성주기를 추출할 수 있는 알고리즘을 연구하였다.

## II. 전력스펙트럼에 의한 주기성 측정

신호처리에서 시간영역의 표현은 신호의 특성을 파악하고 결정하는데 중요한 정보를 얻지 못하거나, 원하지 않는 간섭이나 잡음으로부터 신호를 파악하기에 어려움이 있다. 그러나 주파수 영역을 이용하게 되면 시간 영역에서 찾기 어려웠던 신호의 특징을 찾을 수가 있어 쉽고 효율적인 신호 처리와 분석이 가능하다. 따라서 시간 영역의 포락선 검출 신호를 주파수 영역에서 관찰하기 위해 식(1)의 전력스펙트럼을 사용한다.

$$PSD = \frac{1}{n} \left| \sum_{l=1}^n x_l e^{-j\omega l} \right|^2 \quad (1)$$

전력스펙트럼은 단위 주파수당 파워로 신호의 제곱값을 표현하기 때문에 진폭의 높고 낮은 차이가 두드러지게 나타나 잡음 신호는 더 작아지게 되어 원 신호를 쉽게 판별할 수 있다.

자동차 타이어에 손상 물질이 침투한 상태로 주행하면 타이어의 회전 운동과 자동차 속도에 따라 일정한 주기를 갖는 초음파 신호를 발생시키는데 이들의 관계는 식(2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_v = \left( \frac{V}{L} \times \frac{1000}{3600} \right)^{-1} \quad (2)$$

여기서  $T_v$ 는 손상 물질에 의한 주기,  $V$ 는 자동차의 주행 속도(km/h),  $L$ 은 타이어의 원주길이(m)이다. 이 수식에 의해 계산된 주기는 자동차의 주행 속도, 타이어의 직경, 미끄러짐 등의 오차에 의한 변동 요인을 갖고 있다. 따라서 주기성의 정밀도를 판별할 기준 주기를 구할 필요성이 있는데, 이러한 신호에 대해서는 전력스펙트럼 역시 오차를 갖고 있어 정확한 주기 추출이 어렵게 된다.

본 논문에서는 자동차 타이어의 손상 물질에 의한 신호의 주기를 시간 영역에서 측정하여 통계적 평균에 의해 기준 주기로 사용한다. 초음파 대역의 신호는 손상 물질에 의한 피크의 위치가 변동이 크므로 이동평균의 효과를 갖는 포락선의 피크 주기를 산출하여 기준 주기로 하였다. 획득한 초음파 신호는 초음파 센서의 공진 주파수 대역에서 진폭이 변화하는 특성을 갖고 있기 때문에 손상 특징 신호에 대한 포락선 검출이 용이하고 낮은 샘플링 주파수로도 신호 처리 및 분석이 가능한 특징이 있다.<sup>[2]</sup> 그래서 획득한 초음파 신호에 대해 포락선을 검출하고, 각 피크마다 주기의 변동이 있어 일정 개수의 피크 주기의 평균값을 식(3)을 적용하여 구한다.

$$T_{mean} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (t_{i+1} - t_i) \quad (3)$$

$t_i$ 는  $i$ 번째 피크의 주기이며,  $T_{mean}$ 는 포락선 피크사이의 주기 값들에 대해 평균을 취한 값이다.

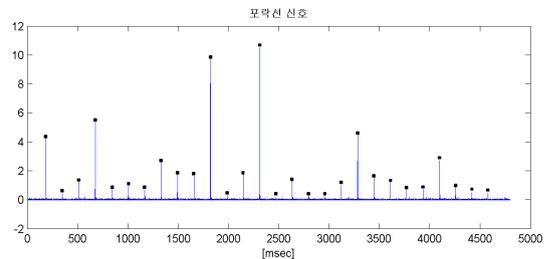


그림 1. 획득한 초음파 신호의 동기식 포락선 검출 신호  
Fig. 1. The synchronous envelope detection signal of acquired ultrasonic wave

위 그림 1은 초음파 센서를 통하여 획득한 초음파 신호에 대해 동식식 포락선 검출을 한 신호이다. 이 신호에 식(3)을 적용하여 포락선의 피크 주기를 구한 뒤 기준 주기로 정한다.

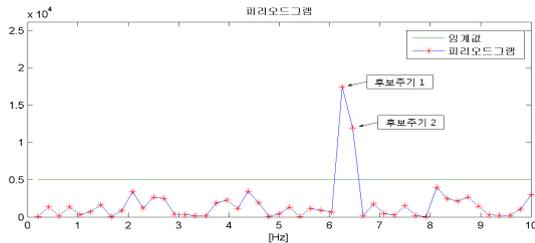


그림 2. 전력스펙트럼의 후보 주기군  
Fig. 2. Candidate period set of Power Spectral

그림 2는 포락선 신호의 전력스펙트럼을 나타낸 것으로 이 신호는 잡음의 영향으로 단일 주파수가 아닌 혼합된 주파수로 후보 주기군이 발생하여 정확한 우성주기를 검출하기에는 역부족이다.

따라서 본 논문에서는 제안하는 알고리즘을 통하여 전력스펙트럼이 갖는 단점을 보완하여 후보 주기군으로부터 우성주기를 정확하게 검출하고자 한다.

### III. 통계적 임계값에 의한 우성주기 결정

전력스펙트럼은 후보 주기군으로 인해 정확한 주기성을 찾기에 어려움이 있으므로 이를 해결하기 위해 통계적 처리를 거친 임계값을 기존의 전력스펙트럼에 적용해

줌으로써 정확한 주기성 검출을 한다.

그림 3은 본 논문에서 제안하는 방법의 알고리즘 흐름도를 나타내고 있다.

전력스펙트럼에서 우성주기를 추출하기 위한 임계값을 구하기 위해서는 우선 포락선 검출 신호를 랜덤 샘플링하고 전력스펙트럼을 구해 최대값을 저장한다. 이 과정을 100번 시행하여 저장된 100개의 전력스펙트럼 값에 대해 오름차순으로 99번째에 위치한 전력스펙트럼 값을 임계값으로 정한다. 이는 랜덤 배열을 통하여 99%의 신뢰 구간으로 정확한 임계값을 구하기 위함이다.<sup>[3]</sup>

이러한 과정으로 구해진 임계값을 II장에서 구한 전력스펙트럼에 대해 적용하여 임계값 이상의 크기를 갖는 신호에 대해 자기상관함수를 구한다. 자기상관함수는 시간영역에서 손상 물질로 인해 발생하였던 주기성의 확인 외에 개략적 주기가 반복되는 경우에도 상관도가 크게 되는 부분에서 우성주기를 판별할 수 있게 한다.

자기상관함수는 전력스펙트럼과 푸리에변환 쌍의 관계이기 때문에 전력스펙트럼을 역 푸리에변환 함으로써 얻을 수 있다.<sup>[4]</sup>

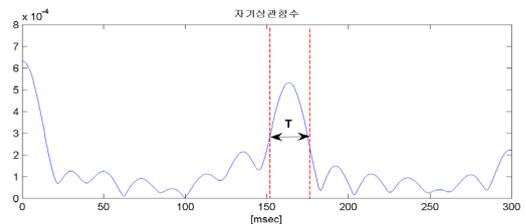


그림 4. 이차 미분을 이용한 후보 주기 구간 설정  
Fig. 4. Setting candidate period section by second derivative

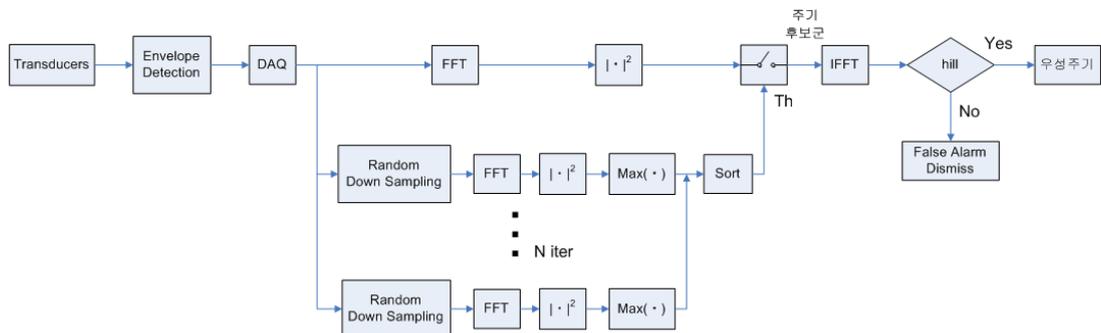


그림 3. 통계적 처리를 통한 주기성 검출 흐름도  
Fig. 3. Periodicity detection flow chart by statistical processing

그림 4는 전력스펙트럼의 임계값 이상의 신호에 대하여 자기상관함수를 구한 것으로 잡음의 영향으로 발생한 후보 주기군 사이에서 피크와 제일 근접한 후보 주기를 정확한 우성주기로 검출하게 된다. 본 논문에서 자기상관함수의 최대 구간(T)은 이차미분에 의해 변곡점 구간 내의 최대값이 있는 구간을 산출하였다.

#### IV. 실험 및 결과

자동차 타이어와 노면의 마찰로 인해 발생하는 초음파 신호를 획득하기 위해 40kHz의 공진주파수를 갖는 협대역 초음파 센서를 사용하여 비접촉 방식으로 타이어와 직접적인 영향 없이 수집하게 된다.

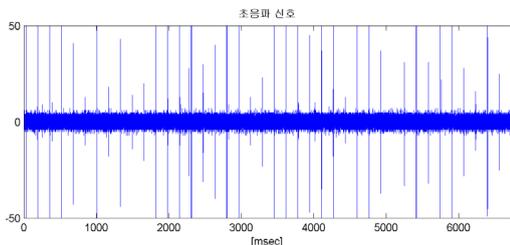


그림 5. 초음파 센서로 획득한 초음파 신호  
Fig. 5. The synchronous envelope detection signal of acquired ultrasonic wave

본 실험에서 사용된 초음파 센서는 중심 주파수가 40kHz( $\pm 1$ kHz)이고, -3dB 주파수 대역은 약 3kHz인 공간형 초음파센서 MA40R을 사용하였다. 또한 실험 조건으로는 타이어 원주 길이가 225cm인 차량을 아스팔트 도로환경에서 50km/h, 80km/h의 속도로 주행하여 데이터를 획득하였다. 이때 타이어의 공기압은 40psi이다. 손상 물질과 노면사이의 마찰음을 유도하고 실험 차량의 안전을 위해 충분히 길이가 짧은 나사못을 사용하여 타이어 펑크에 주의하며 실험하였으며 그림 6에 이를 나타내었다. 그림 6의 실제 환경에서 비접촉 방식으로 획득한 초음파 신호를 그림 3의 신호처리 과정을 통하여 주기를 추출하였다.

본문의 식 (2)을 통해 타이어가 갖는 회전 주기는 시속 50km/h일 때 162msec이었고, 시속 80km/h일 때는 101.25msec라는 것을 이론적 계산으로 구하였다. 이것은 계산에 의한 이론적인 주기일 뿐이며, 주행 속도나 공기

압, 타이어 직경 등이 변동하면 오차를 갖게 된다.



그림 6. 타이어의 손상 물질과 초음파 센서 부착  
Fig. 6. Attached damage material of tire and ultrasonic sensor

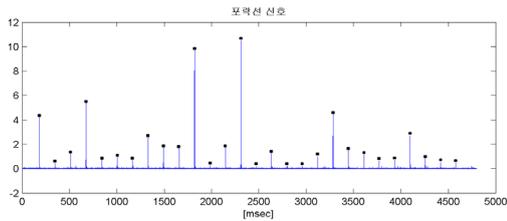
손상 물질 한 개가 발생한 상태에서 시속 50km/h로 주행 시 획득한 초음파 신호의 포락선 피크 주기 10개의 구간에서 구한 평균값은 163.56msec이었다. 같은 조건에서 시속 80km/h로 주행 시 획득한 초음파 신호의 포락선 피크가 갖는 주기 10개의 구간에서 구한 평균값은 101.24msec이었다.

이를 통해 위에서 언급한 주기 변동 요인들로 인해 이론적으로 계산된 주기 값과 실제 획득된 초음파 신호의 포락선 피크가 갖는 주기 평균값 사이에 오차가 발생됨을 확인할 수 있다. 그렇기 때문에 포락선 신호를 통해 구한 주기의 평균값을 기준 주기로 하였다.

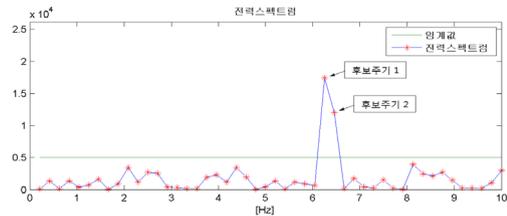
아래 그림 7과 8은 손상 물질 한 개가 발생하였을 때 각각 시속 50km/h, 80km/h에 따라 획득한 초음파 신호의 주기성을 추출한 것이다.

손상 물질이 한 개가 발생한 상태에서 시속 50km/h로 주행하게 되면 기준 주기가 되는 포락선 피크의 평균 주기는 163.56msec이었고, 전력스펙트럼의 피크 주기는 160msec로, 제안된 알고리즘을 통하여 구한 우성주기와 같은 값이었다.

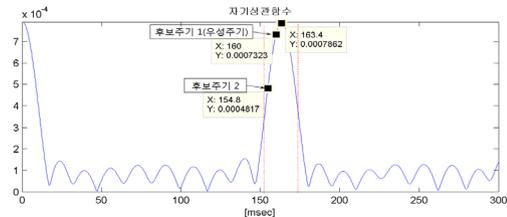
시속 80km/h로 주행할 경우에는 포락선 피크의 평균 주기값은 101.24msec이었고, 전력스펙트럼의 피크 주기는 97.6msec로 평균 주기값과 3.64msec의 오차를 보였다. 제안된 알고리즘을 통하여 구한 우성주기는 100msec로 평균 주기값과 1.24msec의 오차를 보이며 전력스펙트럼의 피크 주기보다 더 정확한 주기가 측정되었다.



(a) 50km/h, 포락선 검출 신호



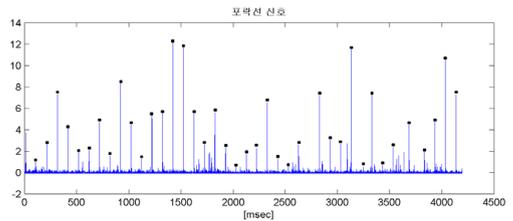
(b) 전력스펙트럼과 임계값 설정



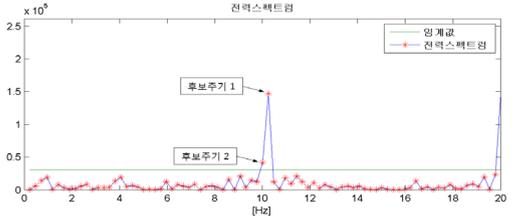
(c) 자기상관함수

그림 7. 타이어 손상이 있는 경우 주기성 검출 (50km/h)

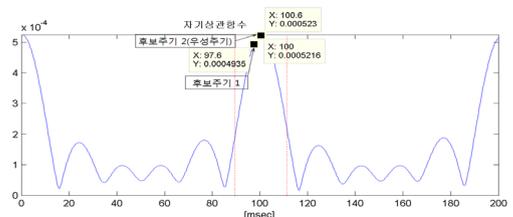
Fig. 7. Periodicity detection results of damaged tire(50km/h)



(a) 80km/h, 포락선 검출 신호



(b) 전력스펙트럼과 임계값 설정



(c) 자기상관함수

그림 8. 타이어 손상이 있는 경우 주기성 측정(80km/h)

Fig. 8. Periodicity detection results of damaged tire(80km/h)

## V. 결론

주행 중인 자동차 타이어와 노면사이에서 발생하는 초음파 신호에 대하여 주기를 측정함으로써 타이어의 손상 물질을 검출하였다.

주기 측정을 위하여 손상된 타이어에서 획득한 초음파 신호의 포락선에 대해 전력스펙트럼을 산출하고 통계적 처리에 의한 임계값을 설정함으로써 우성주기를 판별하는 알고리즘을 제안하였다.

포락선 피크의 평균 주기를 기준으로 비교하였을 때 제안된 알고리즘을 적용한 측정 주기는 시속 50km/h일 때 전력스펙트럼의 피크 주기와 일치하였으나, 시속 80km/h일 경우에는 제안된 알고리즘에 의해 측정된 주기는 100msec로서 1.24msec의 오차를 보였고, 전력스펙트럼 피크 주기와는 3.64msec의 오차를 가짐으로서 제안

된 알고리즘에 의해서 더 정확한 주기가 측정될 수 있음을 보였다.

다만 본 논문의 알고리즘에서는 손상물질이 한 개인 경우만을 고려하였고, 통계적 임계값을 설정하는데 랜덤 처리과정을 이용하였으므로 처리시간이 길어진다는 단점이 있다. 이를 보완, 개선하여 자동차 타이어의 손상 유무를 판별할 수 있는 능동적 안전시스템에 적용한다면, 주행 중 자동차 타이어의 손상으로 인해 발생하는 교통사고를 예방하는 독창적인 기반 기술로 발전할 수 있을 것으로 기대된다.

## 참고 문헌

- [1] 전재석, 김호연, 강대수, “스플릿 스펙트럼을 이용한 자동차 타이어 손상 검출에 관한 연구”, 한국인

- 터넷방송통신학회논문지, 제10권, 제 6호, pp.113-117, 2010.
- [2] 오영달, 강대수, “타이어에서 발생하는 초음파 신호의 주기성 검출에 의한 손상 분별”, 한국인터넷방송통신학회논문지, 제10권, 제6호, pp.107-111, 2010
- [3] Michail Vlachos, Philip Yu, “On Periodicity Detection and Structural Periodic Similarity”, SDM 2005, Newport Beach, California, USA
- [4] Zeppemick.H.J, “Pseudo Random Signal processing”, Wiley, 2005.11.1
- [5] 김태호, “고속도로 교통사고에 미치는 타이어 손상 특성분석 연구”, 교통안전연구논집, 제 26권, pp.129-144, 도로교통안전관리공단교통과학연구원, 2007.
- [6] 김진형, 조대승, 최태묵, 문성호, 서영국, 박준석, 도친수, “포장노면 종류에 따른 타이어/노면 마찰 소음의 실험적 평가”, 한국소음진동공학학회논문집, 제 16권, 제 10호, pp.1067-1073, 2006.

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 “기초연구사업 (No. 2010-0009957)” 으로 수행된 연구결과의 일부를 게재한 것임.

### 저자 소개

#### 박 정 임(준회원)



- 2010년 공주대학교 정보통신공학부 학사 졸업
- 2010년~현재 공주대학교 대학원 정보통신학과(공학석사과정)

<주관심분야 : 신호처리, 통신시스템>

#### 임 승 각(정회원)



- 1983년 숭실대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 경희대학교 전자공학과 석사 졸업
- 1997년 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2003년~현재 공주대학교 정보통신공

학부 교수

<주관심분야 : 통신/방송 시스템, 이동통신>

#### 강 대 수(정회원)



- 1983년 경희대학교 전자공학과 학사 졸업
- 1985년 경희대학교 전자공학과 석사 졸업
- 1992년 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2003년~현재 공주대학교 정보통신공

학부 교수

<주관심분야 : 디지털통신, 인지신호처리, 이동통신>