

논문 2010-6-15

## 타이어에서 발생하는 초음파 신호의 주기성 검출에 의한 손상 분별

### The Damage Classification by Periodicity Detection of Ultrasonic Wave Signal to Occur at the Tire

오영달\*, 강대수\*\*

Young-Dal Oh, Dae-Soo Kang

요 약 차량 주행 중에 타이어에서 발생하는 초음파를 이용하여 손상 물질에 의한 타이어의 손상을 검출하는 방법에 대해 연구하였다. 손상이 있는 타이어는 회전 주기성이 있는 초음파 신호가 발생하므로 주기성을 검출하기 위해 포락선 검출 전처리 과정을 거친 후 자기상관함수를 사용하였다. 실험에서는 손상된 타이어의 1회전 시간과 자기상관함수를 이용해 구한 주기가 같은 것으로 나타났다. 이로 인해 타이어의 손상 유무를 분별할 수 있는 결과를 도출하였다.

**Abstract** The damage of tire by damage material classification method is researched as used ultrasonic wave signal to occur at a tire during vehicle driving. Auto-correlation function after having passed through an envelope detecting preprocess is used for detecting periodicity because of occurring periodic ultrasonic waves signal with tire revolution. One revolution cycle time of a damaged tire and period that calculated auto-correlation function appeared equally in experiment. The result that can classification whether or not there was a tire damage is established.

**Key Words :** Ultrasonic Wave, Damaged tire monitoring, Periodicity detection using auto-correlation, Envelope detection

#### I. 서 론

주행하는 자동차에서 가속, 정지 조향장치를 조종하는 행위는 최종적으로 타이어를 제어하게 되므로 타이어의 상태는 자동차의 안전 및 성능과 직결된다. 한국도로공사의 고속도로 교통사고 통계연보(94~04실적)의 10년 자료에 의하면 고속도로 교통사고는 연평균 3,638건으로 이중 차량 결함에 의한 사고는 504건이다. 이를 다시 원 인별로 분석해보면, 타이어 결함이 297건으로 차량 결함에 의한 사고 504건 중, 58%를 차지하고 있다.<sup>[1]</sup>

타이어의 결함은 공기압 부족, 타이어의 내부 온도 상승, 스텐딩웨이브, 타이어 외부의 손상 물질 등이 있다.

특히 타이어 외부의 못이나 유리와 같은 날카로운 손상 물질에 의한 타이어 결함은 운전자가 직접 외부의 상태를 파악해야 하기 때문에 관리가 어렵고 주행 시 타이어 내부에 지속적으로 침투하여 문제가 발생한다면 자칫 대형사고로 이어질 수 있는 위험을 초래한다.

보편적으로 차량 주행 시 타이어와 노면 사이에 약한 초음파가 발생하고 손상 물질에 의해 초음파의 세기는 강해진다. 이러한 초음파는 단일 지향성의 특성을 가지고 있기 때문에 주변의 다른 잡음을 피하고 타이어 손상에 의한 신호만 획득하기 용이하여 초음파 신호의 회전 주기성을 검출하여 비접촉 방식으로 손상 물질에 의한

\*준회원, 공주대학교 대학원 정보통신공학과

\*\*정회원, 공주대학교 정보통신공학부(교신저자)

접수일자 : 2010.9.8, 수정완료일자 : 2010.11.2

게재확정일자 2010.12.15

손상을 검출하려 한다.

검출 방법으로는 손상 물질에 의한 손상이 초음파 센서의 특성상 주파수 특성 보다 진폭 특성을 추출하기 용이하므로 본 논문의 2장에서는 포락선을 검출하는 전처리 방법을 하였고, 3장에서 자기상관함수를 이용하여 회전 주기성과 타이어 손상 물질의 위치와의 관계를 산출함으로써 타이어의 손상을 분별하였다.

## II. 동기식 포락선 검출

보편적으로 초음파 센서를 이용하여 주파수 영역의 스펙트럼 특징을 분별하기에는 어려움이 따른다. 협대역의 초음파 센서는 중심 주파수에서만 신호를 수집할 수 있기 때문이다.

따라서 초음파 신호의 진폭 특성을 구분하는 것이 유효한 방법이 될 수 있다. 초음파 센서는 중심 주파수에서 감지된 신호가 진폭 변조된 형태의 신호가 발생한다. 그러므로 포락선 검출을 이용하여 획득된 신호의 진폭 특성을 구분하려 한다.

동기식 포락선 검출은 반송파 신호에 대한 정보를 알고 있으므로 BPF를 통과한 후 수신측에서 발생한 반송파 신호와 곱함으로써 기저 대역으로 신호 스펙트럼을 내려서 검출한다.

하지만 송신측과 수신측 반송파 신호의 위상이 어긋난다면 포락선 검출을 할 수 없다. 그러므로 동기식 포락선 검출은 반송파 신호의 동기화가 중요하다.

Carrier 신호의 위상을 동기화하기 위해서 위상차를 검출하는 방법을 이용한다. 위상차 검출은 상호상관함수를 이용할 수 있다.<sup>[6]</sup> 상호상관함수란 어떠한 이산 신호  $x[n]$ 에 관하여 이산 신호  $y[n]$ 의 위상을 변화시키면서 그 위상에 따른 상관 값을 나타내는 것을 말하고 다음 식 (1)과 같다.<sup>[3]</sup>

$$\varphi_{xy}[m] = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x[n+m]y^*[n] & \text{for } 0 \leq m \leq N-1 \\ \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x[n]y^*[n-m] & \text{for } -(N-1) \leq m \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)의  $\varphi_{xy}$ 는  $x$ 와  $y$  신호의 상호 상관 값을 말하고,  $N$ 은 샘플의 개수이며,  $m$ 은 위상의 변화,  $*$ 은 켈레복소수

를 의미한다.

만약  $x[n]$ 과  $y[n]$ 의 주파수가 같고  $x[n]$ 이  $y[n]$ 보다 위상이  $p$ 만큼 앞선다면 상관도는  $p$ 에서 가장 큰 값을 나오게 된다. 그리고  $x[n]$ 과  $y[n-p]$ 는 동기화 된다.

실제로 데이터를 수집하게 되면 어느 지점에서 파형이 시작되는지 알 수 없기 때문에 동기식 포락선 검출을 사용할 수 없게 된다. 하지만 위의 방법을 이용하면 반송파 신호의 위상을 알 수 있게 되어 동기식 포락선 검출을 사용할 수 있게 되어 반송파 신호의 위상을 찾아내 동기식 포락선 검출을 하였다.

이를 시뮬레이션하기 위해 40kHz의 공진형 초음파 센서를 이용하여 타이어와 노면 사이에서 획득한 데이터를 동기식 포락선 검출하여 아래에 그 결과를 나타내었다.

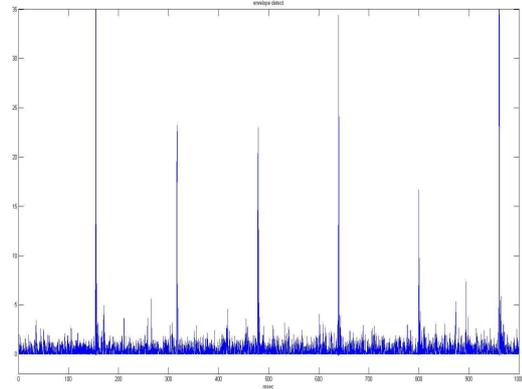


그림 1. 초음파 데이터의 동기식 포락선 검출 결과  
Fig 1. The result of the synchronous envelope detection of the ultrasonic wave data

그림 1은 손상된 타이어를 장착한 차량을 50km/h의 속력으로 주행하였을 때 타이어와 노면에서 발생하는 초음파를 획득하여 동기식 포락선 검출한 것이다.

실험차량의 타이어는 원주길이(225cm)를 이동 거리로 계산하였을 때 1초에 6.17번 회전하므로 1회전 시간은 약 162ms이다. 그리고 그림에서 보면 진폭 특징점들의 시간은 154ms, 317ms, 479ms, 639ms, 801ms, 962ms이고 시간 간격은 약 161ms이다. 이렇듯 동기식 포락선 검출을 이용하여 진폭 특징점이 확실하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

## III. 자기상관도를 이용한 주기성 검출

획득한 데이터의 동기식 포락선 검출을 거치면 2장에

서와 같이 타이어의 손상 물질과 노면이 마찰하는 시간에 진폭 특징점이 발생한다. 그 점들이 모여 진폭 특징점열을 만든다. 그리고 그 진폭 특징점열 형태의 주기성을 검출하기 위해서는 자기상관함수를 사용하였다. 자기상관함수는 다음 식 (2)와 같다.<sup>[3]</sup>

$$\varphi_{xx}[m] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1-|m|} x[n+m]x^*[n] \quad (2)$$

식 (2)의 변수의 의미는 식 (1)과 같고,  $\varphi_{xx}[m]$ 은 x와 x의 상관 값-자기상관값을 말한다.

주기가 없는 진폭 특징점들의 자기상관도는 불규칙적이기 때문에 주기성이 없다고 판별할 수 있다. 반면 주기가 있는 진폭 특징점들은 자신의 주기에서 상관도는 높아진다. 그리고 주기성이 없는 잡음열과 주기성이 있는 진폭 특징점열이 더해져도 주기성을 검출할 수 있고 주기 또한 구할 수 있다.

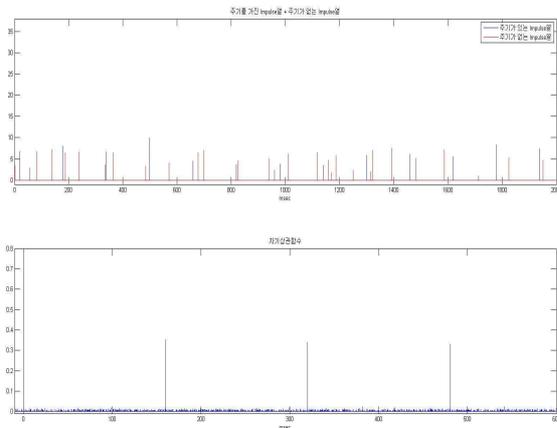


그림 2. 주기성이 있는 진폭 특징점과 주기성이 없는 잡음열의 자기상관함수

Fig 2. Auto-correlation function of the addition of the amplitude feature points with periodicity and the noise without periodicity

그림 2의 첫 번째 그림은 162ms의 주기를 가진 진폭 특징점열과 주기성이 없는 잡음 열을 더한 신호이다. 이 신호의 자기상관함수를 구하면 그림 2의 두 번째 그림과 같다. 이 상관도는 162ms를 주기로 최대값이 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

이는 등속도로 주행하는 차량의 타이어에 손상 물질이 있다면 손상부분과 노면이 마찰하면서 발생하는 주기

성을 가진 진폭 특징점과 주기성이 없는 잡음들이 더해진 상태에서 주기성을 검출하기 위함이다. 원운동을 하는 타이어의 손상부분은 주기적으로 노면과 마찰하기 때문에 신호에 주기성이 있다면 타이어의 손상되었다고 알 수 있다.

#### IV. 실험 결과 및 고찰

본 논문의 실험에서 사용한 초음파 센서의 주파수 특성은 40kHz(±1kHz)의 주파수에서 가장 큰 민감도를 나타내고 주파수대역은 약 3kHz이다. 초음파 센서는 지향하는 곳의 신호이득이 가장 크기 때문에 센서의 설치 위치가 중요하다. 배경잡음은 되도록 피하고 타이어와 노면 사이의 초음파만 수신하기 위해 그림 3과 같이 센서를 설치하였다.



그림 3. 초음파신호 획득을 위한 센서 설치  
Fig 3. Sensor installation for ultrasonic wave signal acquisition

이렇게 초음파 센서를 부착하여 156k sample/sec의 속도로 데이터를 sampling하였으며 sample당 bit는 8bit이다. 타이어의 손상 유무를 검출하기 표 1과 같은 실험 조건을 적용하여 데이터를 수집하였다.

표 1. 실험 조건  
Table1. Experiment conditions

항 목	실험 조건
차 종	코란도
타이어 둘레	225Cm
속 도	50km/h, 100km/h
도 로 환 경	아스팔트
타이어 손상 물질 발생	무/1개/2개
공 기 압	40psi

손상 물질은 타이어에 박힌 날카로운 유리나 못을 의미하고 실험에서는 나사못을 이용하였다.

우선 비교대상이 되는 손상이 없는 타이어의 신호를 획득하여 분석하였다. 분석 방법은 신호를 동기식 포락선 검출하여 진폭 특징점을 나타낸 후 자기상관함수를 이용하여 주기성을 파악하는 것이다.

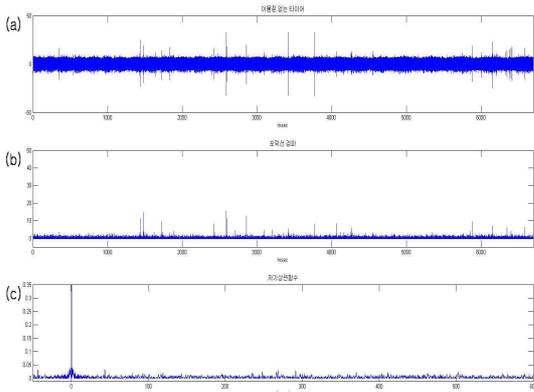


그림 4. 손상 물질이 없는 타이어 신호 분석(50km/h)  
Fig 4. The tire signal without damage material analysis (50km/h)  
(a) 초음파 신호 (b) 동기식 포락선 검출 신호  
(c) 자기상관함수 적용

그림 4는 손상 물질이 없는 타이어의 신호와 그 신호의 포락선 검출 신호, 그리고 자기상관도이다. 이 신호의 자기상관도를 살펴 볼 때, 시간 축이 0인 구간 이외에는 다른 특징점을 찾을 수 없기 때문에 이 신호는 주기성이 없다. 주기성이 없으므로 손상이 없는 타이어라는 것을 알 수 있다.

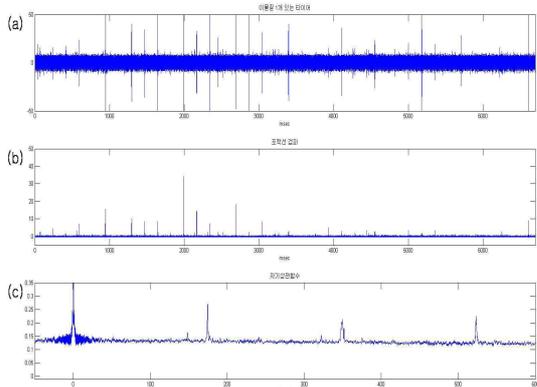


그림 5. 손상 물질이 1개 있는 타이어 신호 분석(50km/h)  
Fig 5. The tire signal with one damage material analysis (50km/h)  
(a) 초음파 신호 (b) 동기식 포락선 검출 신호  
(c) 자기상관함수 적용

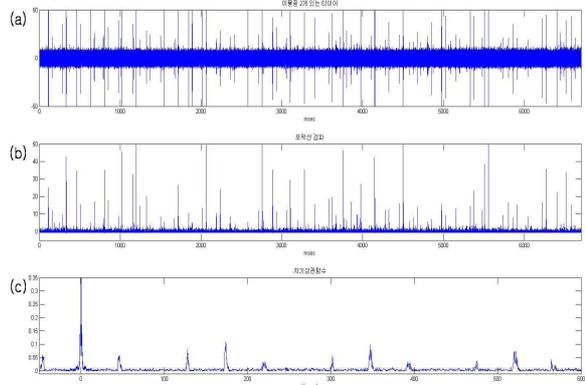


그림 6. 손상 물질이 2개 있는 타이어 신호 분석(50km/h)  
Fig 6. The tire signal with two damage materials analysis (50km/h)  
(a) 초음파 신호 (b) 동기식 포락선 검출 신호  
(c) 자기상관함수 적용

그림 5와 그림 6에서 손상 물질이 있는 데이터들의 자기상관도는 약 160~170ms의 주기를 나타내고 있다. 162ms는 실험차량이 약 50km/h로 주행 시 타이어의 1회 전 시간과 같다.

그림 5는 자신의 주기와 그의 배수에서만 값을 가지지만 그림 6은 손상 물질이 2개이기 때문에 자신의 주기 외에도 중간에 50ms와 112ms에도 상관도가 나타났다. 이것으로 손상 물질의 상대적인 위치를 파악할 수 있다. 이 상대적인 위치를 계산하면 100도와 260도이다.

신호의 주기와 타이어의 1회전 시간과 같다는 것을 증명하기 위해 손상 물질이 있는 타이어를 장착한 차량을 약 100km/h로 주행하여 데이터를 획득하였고 그것을 분석하였다.

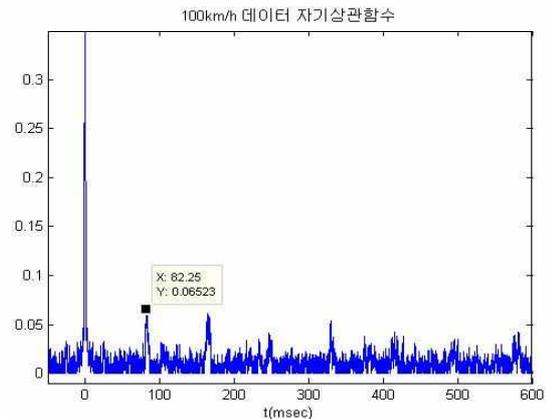


그림 7. 손상 물질이 1개 있는 타이어 신호의 자기상관도 (100km/h)  
Fig 7. Auto-correlation of the tire signal with one damage material (100km/h)

그림 7에서는 약 100km/h로 차량이 주행할 때 82.25ms의 주기가 검출되어 손상 물질에 의한 주기성을 찾을 수 있었다. 그리고 역 계산에 의해 타이어의 속도를 추정할 수 있다.

이상과 같이 주기성에 의하여 손상 물질에 의한 타이어 손상 유무를 분별할 수 있다.

수 있을 것이다.

본 논문을 시스템화 한다면 유지 보수 등 여러 측면에서 장점이 있는 초음파를 이용한 비접촉방식을 사용하므로 타이어 손상 모니터링 시스템의 보편화를 촉진시킬 수 있고, 주행 중 타이어 관련 사고를 예방하는 등 안전성 향상을 도모할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 손상 물질에 의한 타이어 손상 유무를 판별하기 위해 타이어와 노면사이에서 발생하는 초음파 신호를 이용하였다. 실험 대상으로는 손상 물질이 있는 타이어와 손상 물질이 없는 타이어를 대상으로 삼아 주기성을 검출하여 손상 물질 유무를 판별하였다. 전처리 과정으로 초음파의 주파수 대역을 낮추고 신호 대 잡음비를 높이기 위해 동기식 포락선 검출을 하였으며 주기성 검출을 위해서는 자기상관함수를 이용하여 손상 물질 유무에 따른 타이어 신호를 분별할 수 있었다. 등속운동을 하고 있는 차량의 손상 물질이 있는 타이어는 원운동을 하기 때문에 손상 물질과 노면이 반복적으로 마찰하고 주기를 가지고 있다. 하지만 손상 물질이 없는 타이어는 주기를 검출할 수 없으므로 이것으로 손상 물질에 의한 타이어의 손상 유무를 분별할 수 있었다.

제안된 방법은 운전자가 수시로 확인해야 하는 타이어의 손상 물질 유무를 주행 중에 판별하고 확인할 수 없었던 부분까지 확인이 가능하기 때문에 운전자에게 타이어의 손상 물질에 의해 발생하는 사고를 미연에 방지 할

## 참 고 문 헌

- [1] 김태호, "고속도로 교통사고에 미치는 타이어 결함 특성분석 연구", 교통안전연구논집, 제 26권, pp.129-144, 도로교통안전관리공단교통과학연구원, 2007.
- [2] 김진형, 조대승, 최대목, 문성호, 서영국, 박준석, 도천수, "포장노면 종류에 따른 타이어/노면 마찰소음의 실험적 평가", 한국소음진동공학회논문집, 제 16권, 제 10호, pp.1067-1073, 2006.
- [3] 양원경 외 7명, "Signals and Systems with MATLAB", 홍릉과학출판사, pp.31-36, 2008.
- [4] 윤철성, "Shearography를 이용한 타이어의 내부결함 정량평가", 조선대학교 대학원, 2003. 2.
- [5] 함명규 외 4명, "자기상관함수에서 위상 성분의 보존에 의한 피치 시점 검출에 관한 연구", 제 13회 신호처리 합동학술대회, 2000.
- [6] 김영환 외 3명, "위버구조 상향변환 혼합기의 스푸리어스 신호 제거 방법", 한국전자과학회논문지, 제 15권, 제 7호, pp.661-668, 2004.

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

## 저자 소개

### 오 영 달(준회원)



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