

논문 2010-6-16

# 스플릿 스펙트럼을 이용한 자동차 타이어 손상 검출에 관한 연구

## A Study of the Vehicle Tire Damage Detection using Split Spectrum Processing

전재석\*, 김호연\*, 강대수\*\*

Jae-Seok Jeon, Ho-Yeon Kim, Dae-Soo Kang

요 약 주행 중인 자동차 타이어의 손상을 검출하기 위해 타이어에서 발생하는 초음파 신호에 대한 스플릿 스펙트럼 처리 알고리즘을 연구하였다. 스플릿 스펙트럼의 최대값을 추정하는 알고리즘을 사용하여 정상적인 타이어와 손상 물질에 의해 손상된 타이어에 대한 처리 결과를 비교하였다. 자기상관함수를 이용한 결과, 실험에 사용된 손상된 타이어에서는 주행속도 50km/h 일 때 162.9ms, 100km/h 일 때 84.81ms 주기로 손상 특이점을 검출 할 수 있었으며, 이에 의해 자동차 주행속도에 따른 손상 특징 점의 주기성을 이용하여 손상 물질에 의한 타이어의 손상 판단이 가능하였다.

**Abstract** The split spectrum processing algorithm of an ultrasonic wave on the tire was studied for the damage detection of a driving vehicle's tire. The processing results of normal and damaged tire was compared using the split spectrum algorithm to estimate the maximum value. The result that used Auto-correlation in case of damaged tire, the damage feature point is detected during 81ms intervals at a speed of 100km/h and during 162ms periodicity at a speed of 50km/h. This results was meant the possibility for the tire's damage decision by damaging material with using periodicity feature point of tire damage according to vehicle speed.

**Key Words :** Ultrasonic wave, Damaged tire monitoring, Split-spectrum processing, Periodicity detection using auto-correlation

### I. 서 론

자동차 안전기술이 첨단화되고 다양해지면서 운전자의 편의와 안전을 위한 차량전장시스템이 다변화 되고 있다. 그 중에서도 자동차 타이어는 차량 운전의 직접적인 영향을 주고 차량 주행 시 예기치 못한 결함으로 인해 사고가 발생할 수 있다.

한국도로공사의 고속도로 교통사고 통계연보 자료에

의하면 전체 고속도로 교통사고 중 차량 결함에 의한 사고가 14%를 차지했고, 그 중에서 타이어 결함으로 발생한 사고가 57%를 차지했다<sup>[1]</sup>.

스플릿 스펙트럼 처리(split-spectrum processing)기술은 1970년대 레이더 시스템을 위해 제안되었고 1981년 미국의 N. M. Bilgutay는 이 기술을 초음파 신호처리 분야와 비파괴검사 분야 등에 적용시키기 위한 연구를 시도하였으며<sup>[2]</sup>, 초음파를 이용하는 신호처리 분야에서 어떤 물질의 손상 및 내부결함이 발생하였을 때 그 결함을 검출하기 위한 처리기법으로 주로 이용된다.

본 논문에서는 손상 물질이 있는 자동차 타이어와 노

\*준회원, 공주대학교 정보통신공학과

\*\*정회원, 공주대학교 정보통신공학부(교신저자)

접수일자 : 2010.9.8, 수정완료일자 : 2010.11.8

게재확정일자 2010.12.15

면사이에서 발생하는 초음파를 대상으로 비접촉 방식으로 수신하고 스플릿 스펙트럼 알고리즘을 적용한다. 여기서 손상 물질이란 나사못, 유리파편, 날카로운 금속조각 등으로 타이어를 손상시킬 수 있는 원인이 되는 물질을 의미하고, 타이어 손상이란 손상 물질이 침투한 상태에서 타이어가 파손되기 이전의 상태를 말한다.

주행하는 자동차 타이어에 손상 물질에 의한 손상이 발생할 경우 주기성을 갖는 신호의 특징점이 지속적으로 나타나므로 그 주기성에 착안하여 손상 물질에 의한 타이어 손상 검출 방법을 제안한다.

## II. 스플릿 스펙트럼 처리

본 논문에서는 자동차 타이어와 노면사이에서 발생하는 초음파를 대상으로 비접촉 방식으로 수신하고 획득한 신호에 스플릿 스펙트럼 알고리즘을 적용한다.

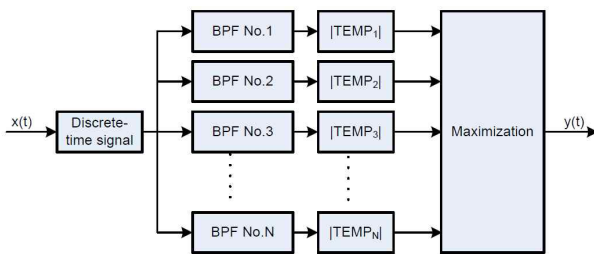


그림 1. 스플릿 스펙트럼 처리기법  
Fig. 1. Signal processing technique with Split Spectrum Processing (SSP)

보편적인 스플릿 스펙트럼 처리방법은 FFT(Fast Fourier Transform)처리 후 필터를 사용하여 N개의 협대역 주파수 스펙트럼으로 나누고 각각의 IFFT한 결과에 비선형 연산하는 과정으로 이루어진다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 타이어에서 획득한 이산 시간신호를 가우시안 대역통과 필터를 사용하여 N개의 협대역 주파수 스펙트럼으로 나누어 대역별 주파수 스펙트럼을 산출하고 각각 필터링을 거친 신호의 절대값을 취하여 최대값 알고리즘을 사용하여 결과를 도출하였다. 이 때 스플릿 처리하기 위해서 사용된 윈도우 전체의 수는 식 (1) 및 식 (2)에 의해서 결정 된다<sup>[3]</sup>.

$$N = BT \quad (1)$$

$$\Delta f = \frac{1}{T} (Hz) \quad (2)$$

여기서,  $N$ 은 스플릿 처리하기 위해서 사용된 필터의 개수로 24채널을 사용하였고,  $B$ 는 초음파 센서의 주파수 대역폭으로 3kHz,  $T$ 는 처리된 신호의 전체 주기로 8ms,  $\Delta f$ 는 인접 필터간의 중앙 주파수 차로써 125Hz이다.

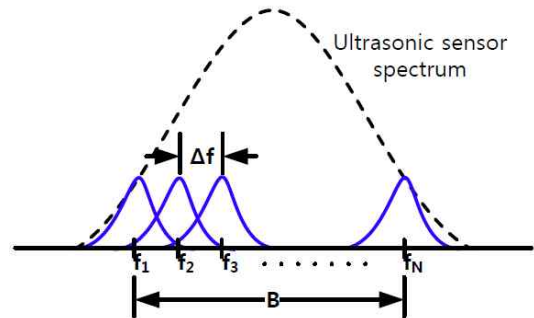


그림 2. 주파수 대역폭과 필터와의 관계  
Fig. 2. Relationship between frequency bandwidth and filter

그림 2는 초음파 센서의 대역폭과 필터와의 관계를 주파수 영역으로 나타낸 것이며, 대역별 주파수 스펙트럼을 얻어 최대값을 취했을 때 초음파신호의 특징점이 나타나게 되고 이 신호의 주기성을 이용하여 타이어 손상 여부를 판단할 것이다.

## III. 주기성에 의한 타이어 손상 검출

자동차가 도로면을 주행하게 되면 타이어와 노면사이에서 마찰음이 발생하게 된다. 정상적인 타이어와 손상된 타이어로 각각 주행하였을 때 그 차이점을 검출할 수 있다면 이는 곧 타이어 손상과 밀접한 관련이 있을 것이다.

단일 지향성을 갖는 초음파 신호는 주변잡음으로부터 영향이 적기 때문에 자동차 타이어와 노면사이에서 발생하는 초음파 신호를 효과적으로 획득할 수 있고 보편적으로 타이어 손상이 없는 부분의 마찰음과 손상 물질에 의한 타이어 손상부분의 마찰음은 다르기 때문에 손상 물질과 타이어 손상과의 관계를 규명하기 용이하다.

그림 3에서  $f_2$ 는 손상이 있는 부분으로서  $f_1$ 과  $f_2$ 지점의 스펙트럼을 살펴보면 주파수와 진폭특성이 다르게

나타난다.  $f_1$  지점의 레퍼런스 신호에 대해  $f_2$  지점의 손상 신호를 검출하기 위해 스플릿 스펙트럼 알고리즘을 적용하여 두 신호의 차이점을 판별하였다.

자동차의 타이어는 회전체이므로 주행 중일 때  $f_2$  지점의 의해 발생하는 신호는 주기성을 가지므로 이에 착안하여 타이어의 손상을 검출하였다.

이러한 주기성은 자동차의 주행속도, 타이어의 직경, 둘레에 의존하므로 스플릿 스펙트럼 처리 결과에 대해 자기상관함수를 산출함으로써 주기성을 측정하였다.

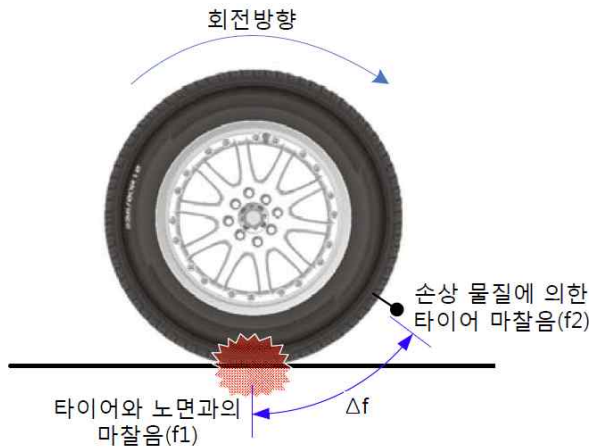


그림 3. 손상 물질에 의한 초음파 신호 검출  
Fig. 3. The ultrasonic wave detection by damaging material

자동차 주행속도에 따른 손상 특이점 시간 간격은 식 (3)에 의해 반비례적으로 나타난다.

$$T_v = \left( \frac{V}{L} \times \frac{1000}{3600} \right)^{-1} \quad (3)$$

여기서,  $T_v$ 는 타이어 1회전 시간,  $V$ 는 자동차의 주행속도(km/h),  $L$ 은 타이어의 원주길이(m)이다. 주행속도 100km/h, 원주길이 2.25m일 때, 손상에 의한 특이점은 타이어 1회전 시간과 동일한 81ms의 주기성을 가진다.

따라서 스플릿 스펙트럼 결과의 특이점과 타이어 1회전 간격시간이 일치함으로써 자동차 주행속도에 따른 손상 특징점의 주기성이 보이므로 손상 물질에 의한 타이어 손상 판단이 가능하다.

#### IV. 실험 및 결과

초음파 센서는 지향하는 방향에 따라 감도가 다르게 나타나므로 센서의 부착위치가 중요하다. 자동차가 주행하는 동안 발생할 수 있는 배경잡음은 되도록 피하고 타이어와 노면사이의 초음파 신호만 수신하기 위해 그림 4와 같이 타이어의 자동차 진행방향 전면부를 지향하여 초음파 센서를 장착하였고, 센서로부터 입력된 신호는 증폭기를 거쳐 데이터 로거(Data Logger)장치에 수집하였다.



그림 4. 초음파 신호 획득을 위한 센서부착  
Fig. 4. Sensor adhesion for ultrasonic wave acquisition

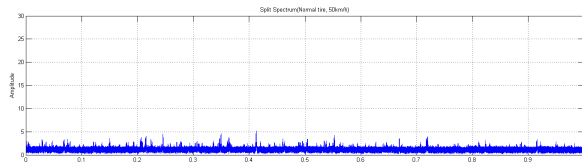
본 실험에 사용된 초음파 센서의 중심주파수는 40kHz(±1kHz)이고, 약 3kHz 주파수 대역의 공간형 초음파 센서 MA40R을 사용하였다. 또한, 그림 5의 8-bit, 156 kSPS(Sample/Sec)인 데이터 로거 장치를 설계 및 제작하여 대상 신호를 획득하였다.



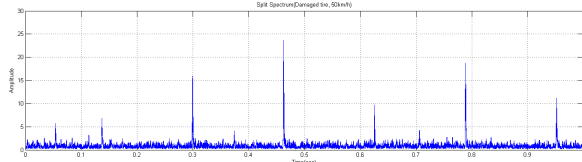
그림 5. 실험용 데이터 로거 장치  
Fig. 5. Data Logger unit for experiment

손상 물질에 의한 타이어 손상 유무를 검출하기 위한 실험 조건은 타이어 원주길이 225cm인 차량을 아스팔트 도로환경에서 50km/h, 100km/h의 속도로 주행하여 데이터를 획득하였다. 이 때 타이어 공기압은 40psi 이다.

타이어의 손상 잡음을 유도하고 실험차량의 안전을 위해 충분히 길이가 짧은 나사못을 사용하여 타이어 펑크에 주의하면서 실험하였다.

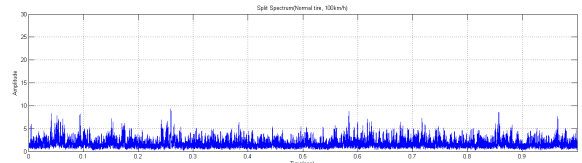


(a) 주행속도 50km/h, 타이어 손상이 없는 경우

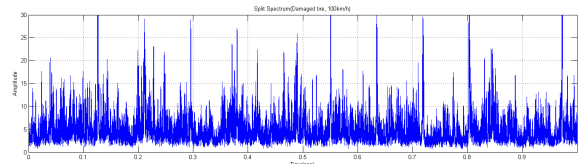


(b) 주행속도 50km/h, 타이어 손상이 있는 경우

그림 6. 타이어 손상이 있는 경우와 없는 경우의 스플릿 스펙트럼 결과(50km/h)  
Fig. 6. Split spectrum results of normal and damaged tire(50km/h)



(a) 주행속도 100km/h, 타이어 손상이 없는 경우



(b) 주행속도 100km/h, 타이어 손상이 있는 경우

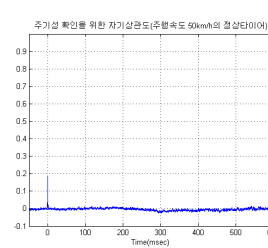
그림 7. 타이어 손상이 있는 경우와 없는 경우의 스플릿 스펙트럼 결과(100km/h)  
Fig. 7. Split spectrum results of normal and damaged tire(100km/h)

자동차 주행속도 50km/h, 100km/h에서 타이어 손상이 있을 때와 없을 때의 초음파 신호를 획득하여 스플릿 스펙트럼 처리한 결과를 그림 6 및 그림 7에 나타내었다. 획득한 초음파 신호는 1초구간의 데이터로서 주행속도

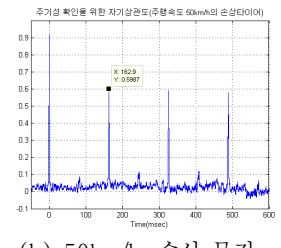
50km/h일 때 6회전 주기에 해당되는 시간이다.

그림 6에서 실험차량의 주행속도 50km/h일 때, 타이어 손상이 있는 경우에는 약 162ms의 주기성이 관찰되었으나 타이어 손상이 없을 경우에는 주기성이 관찰되지 않았다.

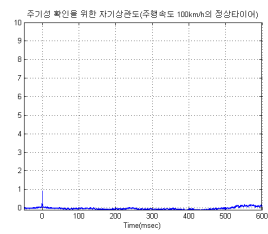
그림 7은 실험 차량의 주행속도 100km/h에서 타이어 손상이 없을 때와 있을 때의 스플릿 스펙트럼 처리 결과를 나타낸 것인데 그림 6의 50km/h 실험결과와 마찬가지로 타이어 손상이 있을 때에만 약 84ms의 주기성을 관찰할 수 있다.



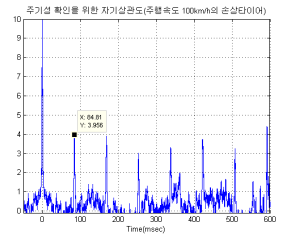
(a) 50km/h, 손상 물질 無



(b) 50km/h, 손상 물질 有



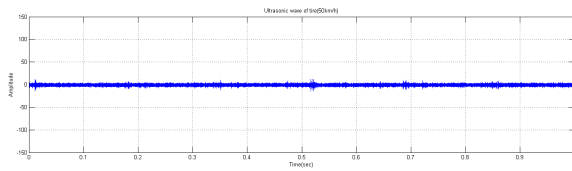
(c) 100km/h, 손상 물질 無



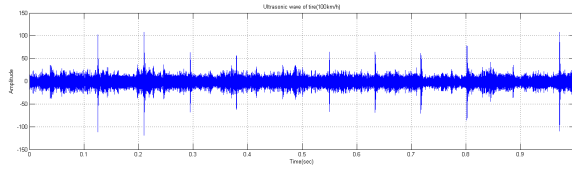
(d) 100km/h, 손상 물질 有

그림 8. 자기상관함수에 의한 주기성 측정  
Fig. 8. Periodicity measure using auto-correlation

그림 8은 타이어 손상 특이점의 주기를 측정하기 위해 스플릿 스펙트럼의 자기상관함수를 산출한 결과이다. 상단 (a), (b) 그래프는 주행속도 50km/h일 때 타이어 손상이 없는 경우와 있는 경우를 나타낸 것이고 (b) 그래프에서 보이듯이 타이어 손상이 있는 경우 자기상관값의 제1주기성은 162.9ms이다. 그림 8의 (c), (d) 그래프는 주행속도 100km/h일 때의 자기상관값을 나타낸 것이고 (d) 그래프에서 보이듯이 타이어 손상이 있는 경우 자기상관값의 제1주기성은 84.81ms이다. 위 그림에서 볼 수 있듯이, 타이어 손상이 없는 경우에는 주기성이 측정되지 않았다.



(a) 타이어 손상 초음파신호 강도, 50km/h



(b) 타이어 손상 초음파신호 강도, 100km/h

그림 9. 속도에 따른 타이어 손상의 초음파 신호강도 비교 (50km/h, 100km/h)

Fig. 9. Ultrasonic wave amplitude was compared of tire damage according to vehicle speed.(50km/h, 100km/h)

그림 9는 주행속도 50km/h와 100km/h일 때 획득한 시간영역의 초음파 신호이다. 2개의 파형을 비교해 보면 100km/h일 때 수신된 초음파 신호의 강도가 전반적으로 커졌기 때문에 상대적으로 시간영역에서 나사못에 의한 특이점을 관찰하기 어렵다. 비록 스플릿 스펙트럼 처리에 의해서 타이어 손상을 검출하는데 큰 영향을 미치지 않았으나 신호강도에 따른 정규화 등의 처리 과정이 필요하다.

## V. 결론

본 논문에서는 주행 중인 자동차에 대해 손상 물질에 의한 타이어의 손상을 분별하기 위해 타이어와 노면사이에서 발생하는 초음파 신호에 대한 스플릿 스펙트럼 처리 알고리즘을 연구하였다.

스플릿 스펙트럼 처리 결과에 대해 자기상관함수에 의한 크기를 산출한 결과 손상 물질에 의한 주기성을 측정할 수 있었으며 결과적으로, 타이어 손상이 있는 경우 주행속도에 반비례하는 주기성이 검출 되었고, 타이어 손상이 없는 경우에는 어떠한 주기성도 검출 되지 않으므로써 타이어 손상유무를 분별할 수 있었다.

주행하는 자동차 타이어에서 나사못과 같은 손상 물질은 다양한 형태로 빈번하게 발생할 수 있으며 특히, 고속 주행 시 이러한 손상 요소는 자칫 대형사고의 원인이 된다. 본 연구의 내용을 임베디드 시스템화하여 자동차

전장 안전시스템에 적용한다면 타이어 손상으로 인한 자동차사고 감소에 크게 기여 할 것으로 기대 된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김태호, “고속도로 교통사고에 미치는 타이어 결합 특성분석 연구”, 교통안전연구논집, 제 26권, pp.129-144, 도로교통안전관리공단교통과학연구원, 2007.
- [2] 고대식, “스플릿-스펙트럼 처리의 자동화를 위한 가용대역폭의 결정방법”, 한국음향학회, 제14권, 제6호, pp.27-31, 1995.
- [3] 허형, 구길모, 김진중, “초음파 신호해석의 신뢰도 개선을 위한 하이브리드 스플릿-스펙트럼 신호 처리 기술에 관한 연구”, 비파괴검사학회지, 제 16권, 제1호, pp.1-9, 1996.
- [4] 박경태, 임승각, 정영화, 장두봉, “기초통신공학”, 삼보, pp.101-103, 2002.
- [5] 양원경, 장대규, 송익소, 조용수, 허준, 전원기, 이정우, 김재권, “Signals and Systems with MATLAB”, 홍릉과학출판사, pp.31-36, 2008.
- [6] 윤철성, “Shearography를 이용한 타이어의 내부결함 정량평가”, 조선대학교 대학원, 2003. 2.
- [7] 김진형, 조대승, 최태목, 문성호, 서영국, 박준석, 도천수, “포장노면 종류에 따른 타이어/노면 마찰소음의 실험적 평가”, 한국소음진동공학회논문집, 제 16권, 제 10호, pp.1067-1073, 2006.
- [8] Kwong Ki Yau, “Split-Spectrum Processing for Nondestructive Testing”, NDTnet, Vo.2 No.08, August 1997.

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

저자 소개

전 재 석(준회원)



- 2009년 공주대학교 정보통신공학부 학사 졸업
- 2009년~현재 공주대학교 대학원 정보통신공학과(공학석사과정)

<주관심분야 : 신호처리, 임베디드 시스템>

강 대 수(정회원)



- 1983년 경희대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 경희대학교 전자공학과 석사 졸업
- 1992년 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2005년 ~현재 공주대학교 정보통신

공학부 교수

<주관심분야 : 디지털통신, 인지신호처리, 이동통신>

김 호 연(준회원)



- 2009년 공주대학교 정보통신공학부 학사 졸업
- 2009년 ~ 현재 공주대학교 대학원 정보통신공학과(공학석사과정)

<주관심분야 : 생체 신호처리, 임베디드 시스템, 디지털로직 설계>