

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.6.291>

IIBC 2015-6-40

# 타이어에서 발생하는 초음파펄스신호의 시간밀도함수에 의한 손상 분별

## Damage Classification by Time Density Function of Ultrasonic Pulse Signal occurred at Tire

강대수\*

Dae-Soo Kang\*

**요 약** 주행 중인 차량의 타이어와 노면 사이에서 발생하는 랜덤성 초음파신호의 주기성을 검출하여 타이어의 손상을 분별하는 방법에 대하여 연구하였다. 잡음으로부터 타이어손상에 의한 유효한 펄스를 검출하기 위해 적응 임계치를 설정하는 방법을 제안하였고, 이를 위한 전처리로서 신호의 랜덤성을 감소시키는 저역통과필터를 사용하였다. 자동차의 속도에 따라 검출된 펄스의 시간간격을 밀도함수화하고 피크점의 시간을 측정하여 타이어 손상물질을 검출하는 방법을 제안하였다. 손상물질이 한 개이고, 주행속도가 50km/h, 80km/h, 100km/h 일 때, 시간밀도함수의 제 1 피크시간 측정 결과는 각각 169.8ms, 97.9ms, 81.8ms로 주행속도에 따라 계산한 타이어 회전주기의 오차범위내로 측정되었으며, 한 개 이상의 손상물질의 경우에는 각 피크시간의 합이 타이어 회전주기의 오차범위내로 측정되는 결과를 얻을 수 있었다.

**Abstract** The tire damage classification method is researched on the periodicity detection of randomness ultrasonic signals to occur at the driving vehicle tire. Setting method of adaptive threshold is proposed in order to valid pulse detection by tire damage in ultrasonic noise on the road and used low pass filter for decrease signal randomness as preprocessing. Time interval of detected pulse is setted the density function depend on the vehicle's speed and the method of tire damage detection is proposed that measuring the first peak's time of time density function. The result of time density function in case of one damage material, the first peak's time is measured within the error limit of tire's rotation period, 169.8ms and 97.9ms and 81.8ms, about the speed of 50km/h and 80km/h and 100km/h. In case of more than one damage material, the sum of each peak's time is measured within the error limit of tire's rotation period about the speed.

**Keywords :** Tire Damage, Dominant Period Detection, Adaptive threshold, Pulse Interval time, Time Density Function

### 1. 서 론

현대의 자동차는 여러 기술의 융합을 통하여 이동수단으로서의 편의성뿐만 아니라 운전자와 보행자의 안전성을 획기적으로 향상시키는 지능형 자동차로 발전하고 있다. 최근에는 미연에 방지하고 예방하는 능동적 안전

시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

고속 주행 시 운전자에 의한 사고가 아닌 차량의 결함에 의해 발생하는 사고의 대부분은 타이어의 결함이 원인이다.<sup>[1]</sup> 이와 같은 타이어에 의한 사고를 방지하기 위해서는 타이어의 결함을 감지할 수 있는 장치가 필요하

\*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학전공  
접수일자: 2015년 10월 30일, 수정완료: 2015년 11월 30일  
게재확정일자: 2015년 12월 11일

Received: 30 October, 2015 / Revised: 30 November, 2015 /  
Accepted: 11 December, 2015

\*Corresponding Author: dskang@kongju.ac.kr  
Dept. of Information and Communication, Kongju National  
University, Korea

지만 현재는 타이어의 공기압만을 감시할 수 있는 타이어 압력 모니터링 시스템(TPMS : Tire Pressure Monitoring System)이 유일하다.

여러 타이어의 결함원인 중 타이어 외부의 손상 물질은 그 증상이 바로 나타날 수도 있지만 손상 물질이 타이어 내부에 지속적으로 침투하여 급작스런 펑크를 유발하고 자칫 대형사고로 이어질 수 있는 위험을 초래한다. 또한 타이어의 공기압 부족은 타이어 외부의 손상 물질에 의해 발생하는 경우가 대부분이다.

주행하는 자동차 타이어에 손상 물질에 의한 손상이 발생할 경우 타이어가 갖는 회전운동으로 인해 손상 물질과 노면이 지속적으로 마찰하여 속도에 따른 일정한 주기의 특징 신호가 발생한다. 특징신호에는 노면과 타이어의 마찰음, 차체 진동음 등 사람 귀에 들리는 가청 주파수 대역의 음부터 초음파 대역의 음까지 여러 배경잡음이 혼합되어 있어<sup>[2]</sup> 초음파 센서를 이용하여 이러한 배경잡음을 피하고 손상 물질에 의한 특징 신호만을 효과적으로 추출하고 주기성을 검출하여 손상 물질에 의한 타이어의 손상을 검출하려 한다.

손상물질이 침투한 타이어는 주행 속도와 타이어의 원주길이에 의해 주기적인 신호를 발생시키고 그 주기성은 타이어의 1회전 시간과 일치한다는 점에 착안하여 손상 물질에 의해 발생하는 신호를 검출하고 검출된 신호의 시간 간격을 밀도함수화하여 우성 주기를 검출하는 타이어의 손상 분별알고리즘을 제안한다.

## II. 적응 임계값에 의한 펄스 신호 검출

주행 중 타이어에 나사못이나 압정과 같은 손상물질이 침투하면 초음파 신호에는 손상물질에 의한 진폭 특징점이 주기적으로 발생하게 된다. 이 같은 특징을 검출하기 위해서는 진폭의 임계값(Threshold)이 필요하다.

그러나 획득한 초음파 신호는 노면의 상태에 의해 배경잡음의 변화가 심하여 처리하기에 용이하지 않기 때문에<sup>[3]</sup> 초음파 신호를 평활화 하기 위한 전처리과정을 거친 후 임계값을 산출한다.

전처리 과정과 임계값 산출 과정에서 각각 저역통과필터(LPF)를 사용하게 되는데 그 목적에 따라 1차와 2차로 표기한다. 전처리 과정에서 초음파 신호를 평활화하기 위해 사용하는 차단주파수가 1kHz인 저역통과필터를

1차 저역통과필터로 사용하였고, 이에 대해 적응 임계값 산출 과정에서 교류 적응 임계값을 산출하기 위한 차단 주파수가 100Hz인 저역통과필터를 2차 저역통과필터로 표기하여 각각의 저역통과필터를 구분한다.

그림 1에 주행속도 100km/h, 손상물질이 1개 있는 초음파신호의 경우 전파정류한 신호와 1차저역통과필터 처리한 결과를 나타내었다. 평활화한 신호는 전파 정류한 신호보다 개략적으로 표현되어 특징신호의 검출 및 처리에 편리하며 적응 임계값 산출에도 용이하다. 또한, 낮은 샘플링 주파수로도 처리할 수 있다는 이점이 있다.

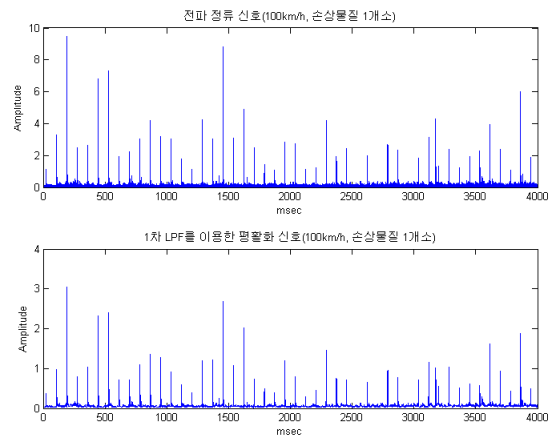


그림 1. 전파정류신호 및 1차 LPF 처리 신호  
Fig. 1. Full-rectified signal and 1st LPF signal

평활화한 신호에서 특징신호를 검출하기 위한 적응 임계값은 배경잡음의 진폭보다는 커야 하며 손상물질의 특징신호보다는 작아야 한다. 하지만 배경잡음은 주행속도와 노면의 상태에 따라 그 크기가 달라지므로 고정적인 임계값이 아닌 현재의 배경잡음과 특징신호의 상태에 적응하도록 평활화한 신호를 이용해 적응적으로 산출한다. 적응 임계값을 얻기 위해서는 평활화한 신호를 통해서 배경잡음의 진폭보다 큰 적응 임계값의 직류 성분을 산출한 후 2차 저역통과필터를 이용하여 산출된 직류 성분보다 큰 배경잡음을 걸러낼 수 있으며 또한, 손상물질에 의한 특징신호를 검출할 수 있는 교류 성분의 적응 임계값을 산출하여 식 (1)과 같이 적응 임계값의 직류 성분과 교류 성분의 적응 임계값을 더하여 최종적인 적응 임계값을 산출하는 방법을 사용하였다.

$$v_{th} = V_{DC_{th}} + v_{AC_{th}} \quad (1)$$

여기서,  $v_{th}$ 는 적응 임계값이며,  $V_{DC_{th}}$ 는 적응 임계값의 직류 성분이고,  $v_{AC_{th}}$ 는 교류 성분의 적응 임계값이다. 손상물질이 있는 평활화 신호에는 배경잡음과 손상물질에 의한 특징신호가 합쳐져 있지만 손상물질에 의한 특징신호는 배경잡음에 비해 매우 적게 분포한다. 따라서 평활화 신호의 평균전압은 배경잡음의 평균전압과 거의 일치하므로 식 (2)와 같이 평균전압에  $2\sqrt{2}$ 배를 해줌으로써<sup>[6]</sup> 보편적인 배경잡음보다는 큰 적응 임계값의 직류 성분을 얻을 수 있으며 그 결과를 그림 2에 나타내었다.

$$V_{DC_{th}} = \left( \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_{sm}[n] \right) \times 2\sqrt{2} \quad (2)$$

여기서,  $x_{sm}[n]$ 는 1차 저역통과필터로 평활화한 신호를 나타내며  $N$ 은 신호의 길이이다.

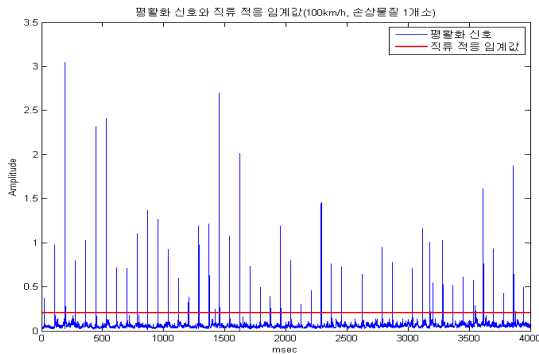


그림 2. 평활화 신호와 적응 임계값의 직류 성분  
 Fig. 2. The LPF signal and DC component of adaptive threshold value

적응 임계값의 직류 성분은 배경잡음의 평균값으로써 이 값보다 큰 배경잡음은 고려하지 못하게 된다. 따라서 배경잡음에 대해 교류적으로 적용할 수 있는 교류적인 적응 임계값이 필요하게 된다. 교류적인 임계값은 1차 저역통과필터를 통과시킨 초음파 신호를 2차 저역통과필터를 통과시켜 얻는다.

2차 저역통과필터의 차단주파수는 100Hz로 설정하여 초음파 신호의 변화처럼 날카롭지는 않지만 변화에 적응적일 수 있는 교류 성분의 적응 임계값( $v_{AC_{th}}$ )을 산출하였고 이를 그림 3에 나타내었다.

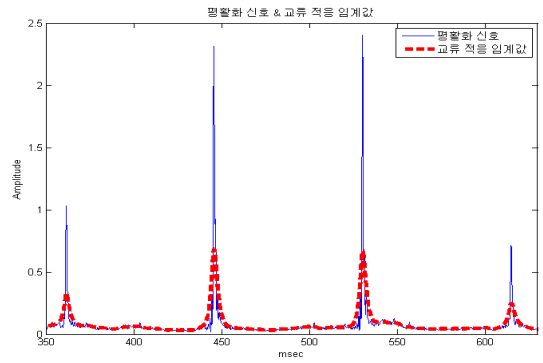


그림 3. 평활화 신호와 적응 임계값의 교류 성분  
 Fig. 3. The LPF signal and AC component of adaptive threshold value

이와 같은 과정을 통해 얻은 적응 임계값의 교류 성분과 직류 성분을 더해줌으로써 배경잡음에 적응적이며 손상물질에 의한 특징신호를 검출할 수 있는 적응 임계값을 산출하여 그림 4에 나타냈다.

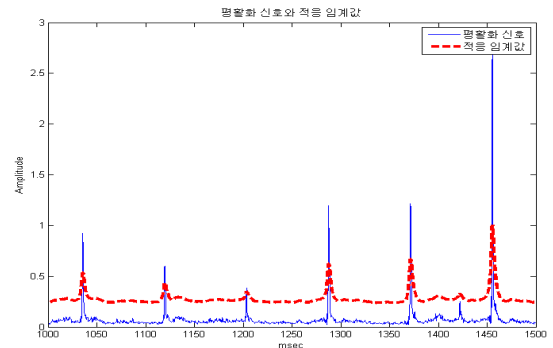


그림 4. 평활화 신호와 적응 임계값  
 Fig. 4. The LPF signal and adaptive threshold value

적응 임계값을 평활화 신호와 비교하여 적응 임계값보다 작은 평활화 신호는 배경잡음으로 간주하여 제거하며 그 밖에 손상물질에 의한 특징신호로 간주되는 평활화 신호는 타이어가 규칙적으로 회전하면서 손상물질에 의한 특징신호가 주기성을 갖게 된 결과이므로 그 시간 간격이 타이어의 1회전 시간과 같게 된다. 따라서 적응 임계값보다 큰 평활화 신호의 시간 간격을 측정하여 타이어 1회전 시간과 비교를 통해 손상을 판별하게 된다.

### III. 펄스 시간 간격의 시간밀도함수

노면이 고르지 못한 환경에 의해 배경잡음이 불규칙하게 되어 적응임계값의 직류 값을 상승시키기 때문에 손상물질에 의한 특징신호가 임계값보다 작아지게 되어 특징신호가 제거되거나 증가한 배경잡음이 손상물질에 의한 특징신호로 간주되는 에러가 발생할 수 있다. 따라서 펄스의 시간 간격을 시간밀도함수화 하여 발생확률이 가장 높은 피크 점을 검출하고 이 점이 해당되는 시간 축과 주행속도에 의한 타이어의 1회전 시간과의 일치여부를 통해 타이어의 손상을 판별한다. 이와 같이 시간밀도함수의 시간 축에서 주행속도에 의한 타이어의 1회전 시간과 펄스의 시간 간격을 비교하기 위해서 초음파 신호를 수집한 샘플링 주파수를 통해 시간밀도함수의 시간 축 간격을 나타내고 타이어의 손상 판별이 가능한 차량의 주행속도를 통해 시간밀도함수의 시간 축을 제한한다.

법정 주행속도는 도로 종류 및 차종에 따라 다르지만 타이어 결함이 주된 사고의 원인이 되는 고속도로를 기준으로 타이어 손상 판별의 대상이 되는 주행속도를 30km/h ~ 110km/h로 제한한다. 이에 의해 시간밀도함수의 시간 축은 최저 속도인 30km/h의 타이어 1회전 시간인 270ms를 검출할 수 있는 300ms로 제한한다. 그리고 본 실험에서는 나이퀴스트 샘플링 정리에 의거하여 40kHz의 초음파 신호를 수집하고 처리하기 위해 250kHz의 충분한 샘플링 주파수를 사용하였기 때문에 이에 해당하는 시간 간격인 0.004ms 단위로 시간밀도함수의 시간 축을 나타낸다.

시간밀도함수를 통해서 타이어의 손상을 판별하기 위해서는 밀도함수의 우성빈도시간을 산출해야 하지만 시간밀도함수 시간 축의 설정에 따라 오차가 있고 특정 시간 구간에 밀집되어 분포하게 된다. 따라서 이 분포가 가지는 중심을 산출하기 위해 식 (3)과 같은  $L$ -point 이동평균법을 이용한다.

$$tdf_{mv}[n] = \frac{1}{L} \sum_{k=0}^{L+k-1} tdf[n-k] \quad |_{k=0 \dots N-k-1} \quad (3)$$

여기서,  $tdf[n]$ 은 시간밀도함수이고  $L$ 은 이동 평균의 길이이며  $N$ 은  $tdf[n]$ 의 길이,  $tdf_{mv}[n]$ 은 이동 평균된 시간밀도함수이다.  $L$ 은 시간밀도함수 2.5ms에 해당

하는 데이터를 설정하여 이동평균하였다.

결과는 그림 5에 나타나었는데, 히스토그램 분포의 1 피크는 82.6ms이고 2피크는 이에 2배인 165.2ms에서 발생한다. 이는 1피크의 실편 에러(missing error)로 인해 2 피크가 발생한 것을 짐작할 수 있다. 한편 타이어 손상을 판별하기 위해 1피크 시간인 82.6ms와 표 1에서 제시한 주행속도 100km/h에 대해 계산한 타이어 1회전 시간 81ms를 비교한 결과 일치하지 않는데, 이러한 원인은 실험차량의 실제 주행속도가 100km/h에 일치하지는 않았거나 타이어공기압 등 원인에 기인한 오차이다. 따라서 이 같은 원인을 해결하기 위해 실험차량의 주행속도에  $\pm 3$ km/h의 오차를 적용하여 이를 고려한 타이어 1회전 시간을 산출하여 표 1에 나타냈다.

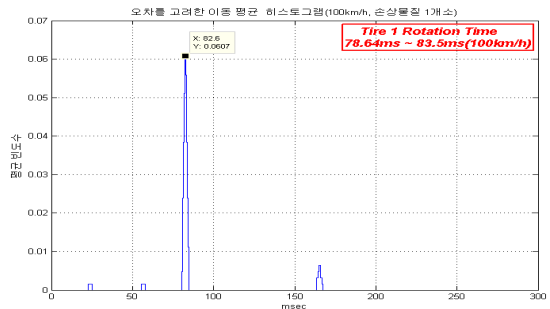


그림 5. 이동 평균한 펄스 시간 간격 밀도함수  
Fig. 5. Moving averaged pulse interval time density function

표 1. 실험차량의 타이어 1회전시간 오차범위  
Table 1. The single turn time error limit of test vehicle tire

주행속도	타이어의 1회전시간 계산값	주행속도의 오차범위 (km/h)	타이어 1회전 시간 오차환산값
50km/h	162ms	47~53(±3)	152.83ms ~ 172.34ms
80km/h	101.25ms	77~83(±3)	97.59ms ~ 105.19ms
100km/h	81ms	97~103(±3)	78.64ms ~ 83.5ms

### IV. 시간밀도함수 및 타이어 손상 판별

시간밀도함수의 결과로부터 손상물질이 있는 손상된 타이어에서 발생하는 초음파 신호는 손상물질에 의한 특징신호가 타이어의 회전에 의해 일정한 시간 간격으로

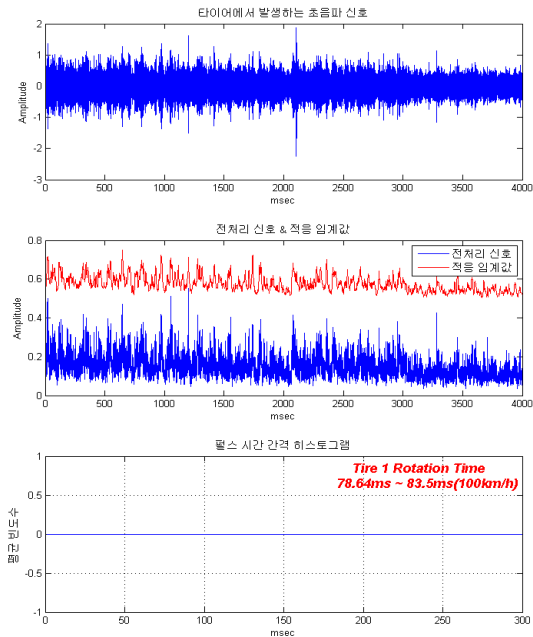


그림 6. 타이어 손상 판별 결과(주행속도 100km/h, 손상물질 0개소)  
 Fig. 6. Detection result of tire damage(driving speed 100km/h, no damage material)

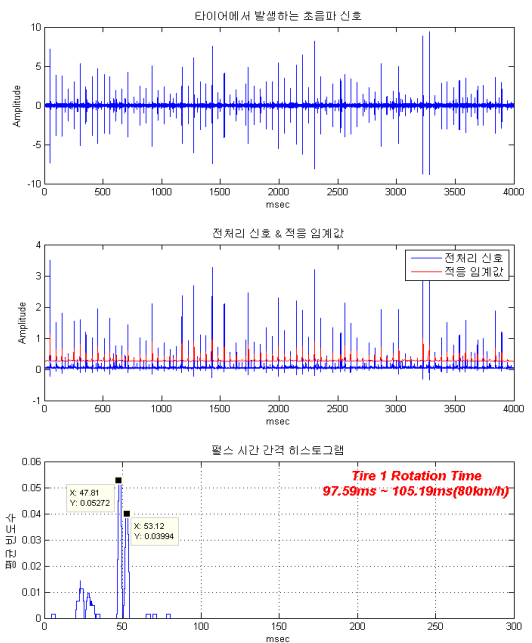


그림 8. 타이어 손상 판별 결과(주행속도 80km/h, 손상물질 2개소)  
 Fig. 8. Detection result of tire damage(driving speed 80km/h, two damage material)

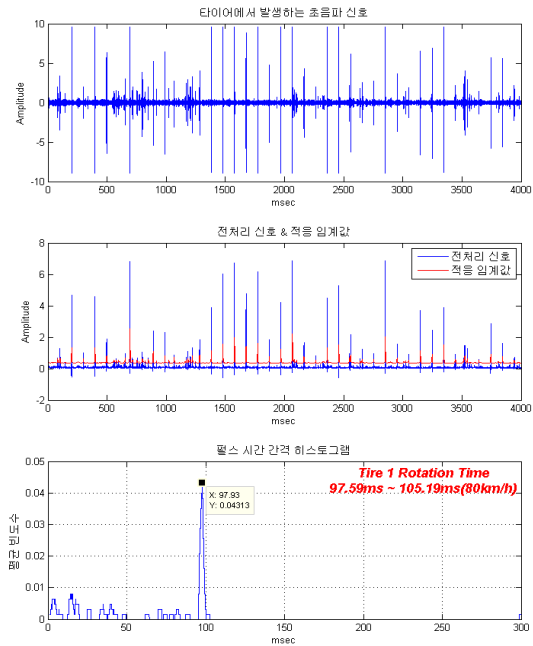


그림 7. 타이어 손상 판별 결과(주행속도 80km/h, 손상물질 1개소)  
 Fig. 7. Detection result of tire damage(driving speed 80km/h, one damage material)

표 2. 시간밀도함수 피크값에 의한 타이어 손상 판별법  
 Table 2. The tire damage classification by time density function peak value

1피크 빈도 = 0	1피크 빈도 > 0		
정상 타이어	1피크시간 > 타이어 1회전시간	1피크시간 = 타이어 1회전시간	1피크 시간 < 타이어 1회전 시간
	정상 타이어	손상 타이어 (손상물질 1개)	1, 2피크 시간 합 = 타이어 1회전 시간 손상 타이어 (손상물질 2개)
			1, 2, 3피크 시간 합 = 타이어 1회전 시간 손상 타이어 (손상물질 3개)

발생하게 되지만 손상물질이 없는 정상 타이어의 경우는 노면에 의한 초음파 신호만이 발생하게 된다. 차량의 주행속도에 의한 타이어의 1회전 주기와 타이어의 원주 길이를 알고 있다면 시간밀도함수의 결과로부터 타이어의 손상을 판별할 수 있게 된다.

이러한 과정은 표 2에 나타내었는데 시간밀도함수의 빈도수 결과가 0이면 정상 타이어로 판별하고 1이상이면 1피크의 시간과 표 1에서 제시한 속도 오차를 고려한 타

이어의 1회전 시간과 비교하여 손상을 판별한다. 비교한 결과가 일치하면 손상된 타이어로 판별하며 이때, 손상물질은 1개가 되고 비교 결과가 일치하지 않으면 다음 피크 시간과 더하여 다시 비교하게 된다. 이 같은 방법으로 손상물질이 2개 이상인 타이어의 손상을 판별한다.

#### IV. 결론

주행 중 타이어의 손상을 검출하기 위해 손상물질이 있는 타이어에서 발생하는 신호의 주기성에 착안하여 타이어의 손상을 판별하는 방법을 연구하였다.

주행하는 자동차의 타이어와 노면 사이에서 발생하는 초음파 신호를 비접촉방식으로 수집하였고 주행 환경에 적용할 수 있는 임계값을 산출하여 손상물질에 의한 주기적인 특징 신호를 검출하였다. 검출한 특징 신호의 시간 간격을 밀도함수로 나타낸 결과 손상물질이 1개이며 50km/h의 속도로 주행하는 타이어는 시간밀도함수의 1 피크 시간이 169.8ms로 실험차량의 속도 오차를 고려한 타이어의 1회전 시간 152.83ms ~ 172.34ms에 포함되어 타이어의 손상을 판별할 수 있었으며 다른 주행속도 80km/h, 100km/h에서도 시간밀도함수의 1 피크 시간이 97.93ms와 81.81ms로 타이어의 1회전 시간에 포함되어 타이어의 손상을 판별할 수 있었다.

손상물질이 2개인 경우에는 타이어 1회전 시 손상물질에 의한 특징 펄스가 2번 발생하여 그 결과 시간밀도함수의 1피크와 2피크 시간의 합이 타이어의 1회전 시간에 포함되는 결과를 통해 손상된 타이어를 판별할 수 있었으며 이를 통해 시간밀도함수의 피크와 손상물질의 개수에 대한 상관관계를 유도하여 손상물질이 2개 이상인 타이어의 손상과 손상물질의 개수를 판별할 수 있다. 또한, 손상이 없는 타이어에서 발생하는 비주기적인 초음파 신호에 의해 나타나는 시간밀도함수의 빈도수와 피크시간의 특징을 통해서 손상이 없는 타이어를 판별할 수 있었다.

본 실험에 사용된 나사못이나 유리와 같은 물질은 고속으로 주행하는 차량의 사고를 유발하기 때문에 본 연구의 내용을 시스템화한다면 타이어 결함에 의한 사고를 예방할 것으로 기대되며 실용화를 위한 일반화 및 주행속도의 변화에 맞춰 타이어의 회전 주기 시간을 검출할 수 있는 연구가 앞으로 진행되어야 할 것이다.

#### References

- [1] Soo-II lee, Hee-Seung Lee, Je-Moo Won, "An Analysis of The Vehicle Characteristics to Effect on Highway Traffic Accidents", Journal of the Korean Society of Civil Engineers, Vol.27, No.4D., pp.405~412, 2007.
- [2] Jae-Seok Jeon, "A Study on the Ultrasonic Signal Processing by Non-Contact Method for the Damage Detection of a Driving Vehicle Tire", Graduate School of Kongju University, 2010.
- [3] Jung-Im Park, Seung-Gak Lim, Dae-Soo Kang, "On the Study of the Period Measurement of Ultrasonic Signal in Damaged Vehicle Tire", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication, VOL.11., No.5, pp.47~52, 2011
- [4] Jae-Ung Cho, Moon-Sik Han, "Stress Analysis of Automotive Tire at Contact on Road Surface", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, VOL.8, No.2., pp.40~45, 2009.
- [5] Seok-Tae Seo, In-Keun Lee, Hye-Cheon Jeong, Soon-Hak Kwon, "Multilevel Threshold Selection Method", Proceedings of KFIS Spring Conference 2007 Vol. 17, No. 1., pp.283~286, 2007.
- [6] Michele Basseville, Igor V. Nikiforov, "Detection of Abrupt Changes : Theory and Application"

#### 저자 소개

##### 강 대 수(정회원)



- 1983년 경희대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1992년 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2005년 ~ 현재공주대학교정보통신

공학부 교수.

<주관심분야 : 디지털통신, 이동통신, 인지신호처리>