

가속도 센서가 장착된 지능형 타이어를 통한 각 바퀴 하중 추정

정다솔*¹⁾·이종협¹⁾·최세범*¹⁾·김민태²⁾

한국과학기술원 기계공학과¹⁾ 한국타이어 연구3팀²⁾

Tire Load Estimation using Intelligent Tire with Accelerometer

Dasol Jeong*¹⁾ · Jonghyup Lee¹⁾ · Seibum Choi*¹⁾ · Mintae Kim²⁾

¹⁾ Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology,

291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Republic of Korea

²⁾ Research Team 3, HANKOOK TIRE CO.,LTD., 50, Yuseong-daero 935 beon-gil,

Yuseong-gu, Daejeon 34127, Republic of Korea

Abstract : 본 논문은 Intelligent tire에 장착된 가속도 센서를 기반으로 한 각 바퀴 하중 추정 알고리즘을 다루었다. 각 바퀴 하중의 경우 잠김방지제동장치(ABS), 차체자세제어장치(ESP), 능동현가장치 등 대부분의 차량 제어 시스템에 활용되는 정보이다. 대부분의 기존 논문들은 차량 모델과 차량 파라미터에 의존하여 하중을 추정하는 알고리즘에 대해 다루었다. 하지만, 이는 수식적으로 복잡하며 차량 파라미터에 크게 의존하기 때문에 강건성을 보장하지 못한다는 단점이 있다. 그렇기에 본 논문에서는 보다 직관적이며 차량 모델을 사용하지 않는 강건한 하중 추정 알고리즘을 제안하였다. 새로운 하중 추정 알고리즘은 intelligent tire를 통해 타이어-노면 간의 접지 길이를 추정하는 것에서 시작된다. 이러한 접지 길이는 실험적으로 속도에 의한 영향은 작고 하중과 압력에 지배적인 양상을 띠는 것을 검증했다. 그 후 실험 결과를 토대로 하중, 압력, 접지 길이 간에 3차원 함수를 구성하였으며, 이를 통해 하중을 추정하였다. 최종적으로, 개발된 하중 추정 알고리즘은 Flat trac을 활용하여 실험적으로 검증되었다.

Key words : Intelligent tire(지능형 타이어), Vehicle mass estimation(차량 무게 추정), Tire load estimation(타이어 하중 추정), Road-tire contact length(타이어-노면 접지 길이)

Nomenclature

F: Tire load, N
p₀: Tire inflation pressure, bar
CL: Contact length, degree (°)

1. 서론

차량의 각 바퀴에 걸리는 하중은 잠김방지제동장치(ABS), 차체자세제어장치(ESP), 능동현가장치(Active suspension) 등 차량 제어 시스템에 전반적으로 사용되는 매우 중요한 정보이다. 일반적인 차량 제어 시스템에서는 고정된 차량의 무게중심의 가속도, 무게 중심의 위치, 무게 등을 이용하여 각 바퀴에 걸리는 하중을 추정하며 이를 통해 제어 메

* 정다솔, E-mail: oiciaa@kaist.ac.kr

커니즘을 구성한다. 하지만 실제 차량 시스템의 경우 탑승자, 적재물에 따라 차량의 무게중심과 무게가 변화하며 가속, 감속, 선회 시 하중의 이동으로 인해 각 바퀴에 걸리는 하중은 시시각각 변화한다. 그러므로 차량의 안정성, 사고 회피 능력 등의 향상을 위해 각 바퀴에 걸리는 하중의 정확한 추정이 필요하다.

기존의 논문에서는 직접적으로 각 바퀴에 걸리는 하중을 추정하는 것이 아닌 차량의 전체 무게와 무게중심을 추정하여 각 바퀴에 걸리는 하중을 분석하는 방식의 연구가 많이 진행되었다.¹⁾³⁾ 무게 및 무게중심을 추정은 크게 차량의 중 방향 dynamics에 기반한 방법, GPS에 기반한 방법, 차량 모델링에 기반한 방법으로 나뉜다. 이렇듯 많은 논문들이 출판되었으나 기존의 논문은 각 바퀴에 걸리는 하중을 직접적으로 추정할 수 없으며, 알고리즘이 복잡하고, 차량 모델에 의존한다는 단점을 가지고 있다.

그렇기에 본 논문에서는 기존의 차량 센서가 아닌 intelligent tire의 sensor를 통해 각 바퀴에 걸리는 하중을 추정하였다. Intelligent tire는 기존 타이어 내부에 센서를 추가적으로 장착한 신개념 타이어로써 차량에 있어 매우 중요하지만 알아내기 힘든 여러 정보들을 추정하기 위해 고안되었다. Intelligent tire를 통해 마모, 하중, 노면, 차량상태(side slip, force) 등 차량 제어에 중요한 정보를 추정할 수 있다는 트렌드에 따라 intelligent tire를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁴⁾⁶⁾ 타이어 내부에 사용하는 센서의 경우 크게 가속도 센서, 스트레인 게이지(strain gage)

를 사용하며, 본 논문에서는 가속도 센서가 장착된 intelligent tire를 사용하였다. 실험의 경우 Flat trac 위에서 등속회전하는 타이어에 하중과 압력 속도 등 여러 인자를 변화시키며 타이어 내부의 가속도 센서 신호를 받아냈다.

본 논문에서는 intelligent tire의 센서를 분석하여 각 바퀴에 걸리는 하중을 추정하는 알고리즘을 소개한다. 이는 기존의 차량 모델과 파라미터에 의존한 하중 추정에 비해 직관적이며, 차량 파라미터에 영향을 받지 않기 때문에 보다 강건한 성능을 보일 것으로 기대한다.

2. 타이어-노면 접지 길이

타이어에 걸리는 하중이 변함에 따라 가장 크게 변하는 타이어의 특성은 노면과의 접지 길이이다. 본 절에서는 이를 추정하는 방법에 대해 설명하며, 이는 추후 각 바퀴 하중 추정에 사용된다.

2.1 타이어-노면 접지 길이 추정

타이어 접지 길이의 경우 intelligent tire의 가속도 센서 데이터를 통해 쉽게 추정해 낼 수 있다. 가속도 센서를 통해 추정된 축 방향 가속도의 미분값인 축 방향 저크(Jerk)의 경우 Fig. 2와 같은 모양을 갖는다. 이 때, 타이어-노면 사시의 접지 영역은 축 방향 저크의 최대 값과 최소 점 사이로 추정된다. 이는 축 방향 저크 크기가 최대인 지점이 접지의 시작과 끝 점으로 사용되었음을 의미한다. 물리적으로 타이어가 회전 할 때 접지의 시작과 끝에서 가장 큰 힘의 변화가 발생하기 때문에 축 방향 저크의 크기도 가장 클 것으로 분석된다.

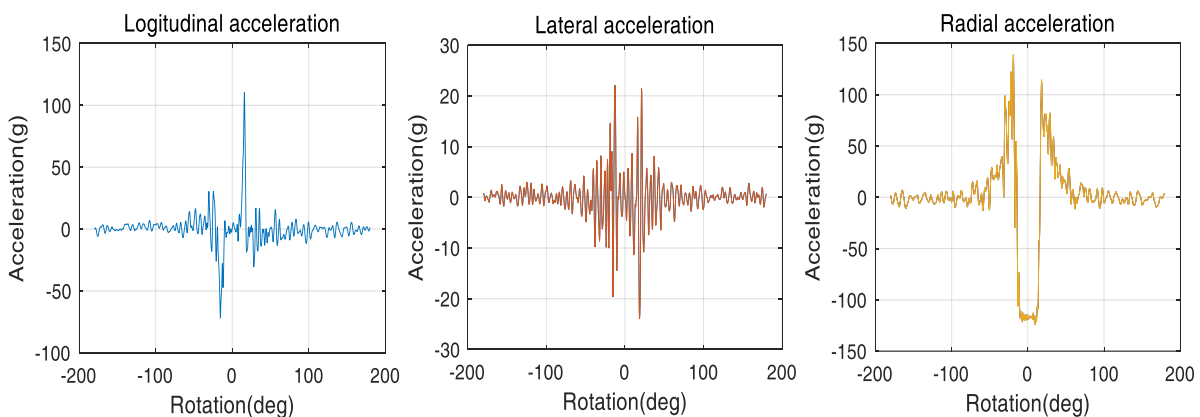


Fig. 1 Intelligent tire 가속도 센서 신호

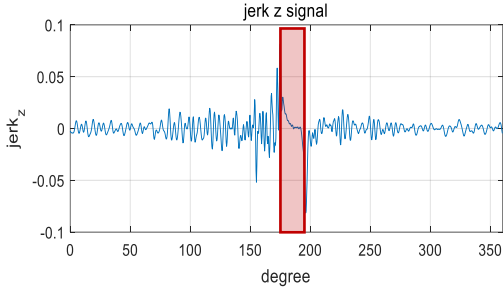


Fig. 2 타이어-노면 접지 영역 추정

2.2 타이어-노면 접지 길이의 경향성

타이어-노면 접지 길이의 경우 타이어에 걸리는 하중에 지배적으로 변한다. 더불어 타이어-노면 접지 길이의 경우 타이어의 공기압에도 많은 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다. 이를 검증하기 위해 Flat trac을 사용하여 실내 실험을 진행하였다. 실험 변수로써 하중(40%, 100%, 160% (100%=5000N)), 압력(1.3bar, 1.7bar, 2.1bar, 2.5bar), 속도(30kph, 65kph, 100kph)가 사용되었다.

Fig. 3에서 x축은 타이어-노면 접지 길이, y축은 하중을 나타내며 각각의 두꺼운 선은 압력에 따른 접지 길이-하중의 관계를 나타낸다. 두꺼운 선에서 나타나는 분산은 속도에 대한 타이어-노면 접지 길이 사이의 관계이다. 즉, 타이어-노면 접지 길이의 경우 여러 인자들 중 하중과 타이어 공기압에 지배적으로 영향을 받는 것을 확인하였다.

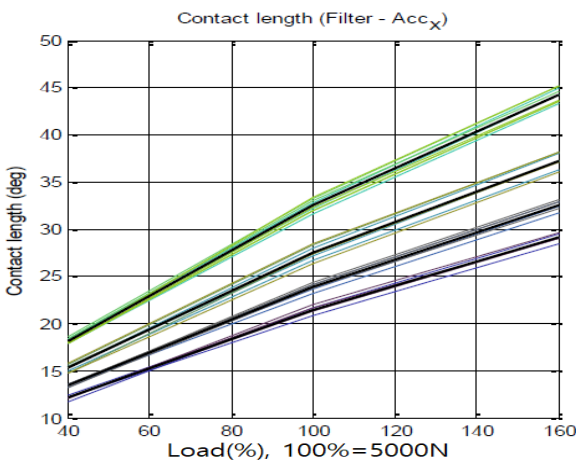


Fig. 3 하중, 압력에 따른 타이어-노면 접지 길이

3. 각 바퀴 하중 추정

3.1 각 바퀴 하중 추정 알고리즘

각 바퀴 타이어에 걸리는 하중의 경우 2.2에서 관찰한 접지-길이의 경향성을 이용하여 추정된다. 접지 길이의 경우 하중과 압력에 지배적이므로 아래와 같은 식이 성립한다.

$$CL = f(F, p_0),$$

where, $CL =$ 접지 길이(Contact length),

$F =$ 하중, $p_0 =$ 타이어 공기압

위의 수식에서 하중과 타이어 공기압에 대한 접지 길이는 총 12개의 컨디션(3개 하중 * 4개 공기압)을 토대로 fig. 4와 같이 3차원 함수로서 표현된다. 이는 하중과 공기압을 알고 있을 때, 접지 길이를 구하는 식으로써 사용된다.

반대로, 접지 길이와 타이어 공기압이 주어 있다면 타이어에 걸리는 하중은 다음과 같이 표현된다.

$$F = g(CL, p_0),$$

접지 길이와 공기압에 대한 하중의 함수도 $f(F, p_0)$ 와 마찬가지로 주어진 12개의 컨디션을 토대로 3차원 함수로 표현된다.

최종적으로 intelligent tire의 가속도 센서를 통해 얻어진 접지 길이와 공기압과 새롭게 정의된 $g(CL, p_0)$ 함수를 사용하여 각 바퀴에 걸리는 하중을 추정하게 된다.

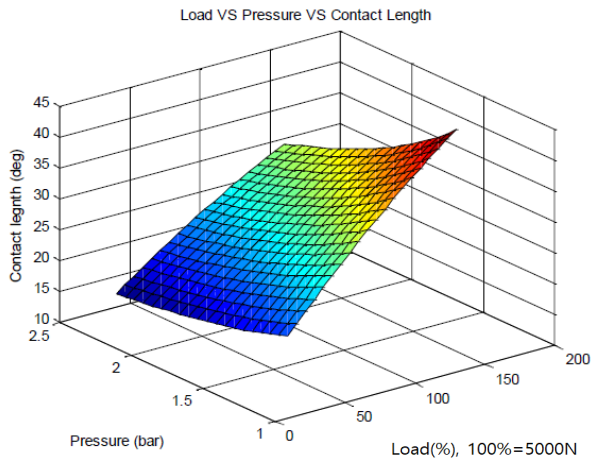


Fig. 4 하중, 압력에 따른 타이어-노면 접지 길이 함수

3.2 각 바퀴 하중 추정 성능 실험 검증

Intelligent tire를 이용한 하중 추정은 3.1에서 정의한 $g(CL, p_0)$ 기반으로 진행되었다. 하중 추정

알고리즘을 검증하기 위해 Flat trac를 이용하여 실험을 진행하였다. 실험 조건은 Table 1 과 같다. 총 9개의 상황에 대해 실험이 진행되었으며, 각각의 상황에 대해 2초간 하중을 추정하였다.

하중 추정의 결과는 Fig. 5와 같다. 속도나 하중이 변함에도 하중의 추정이 잘 이루어 지는 것을 확인 할 수 있다. 이 때 오차율은 5% 미만으로 좋은 성능을 보여준다. 결과적으로 intelligent tire를 이용한 각 바퀴 하중 추정 알고리즘을 실험적으로 검증되었다.

	조건
속도	30kph, 65kph, 100kph
압력	1.7bar
하중	40%, 100%, 160% (100% : 5000N)

Table 1 실험 조건

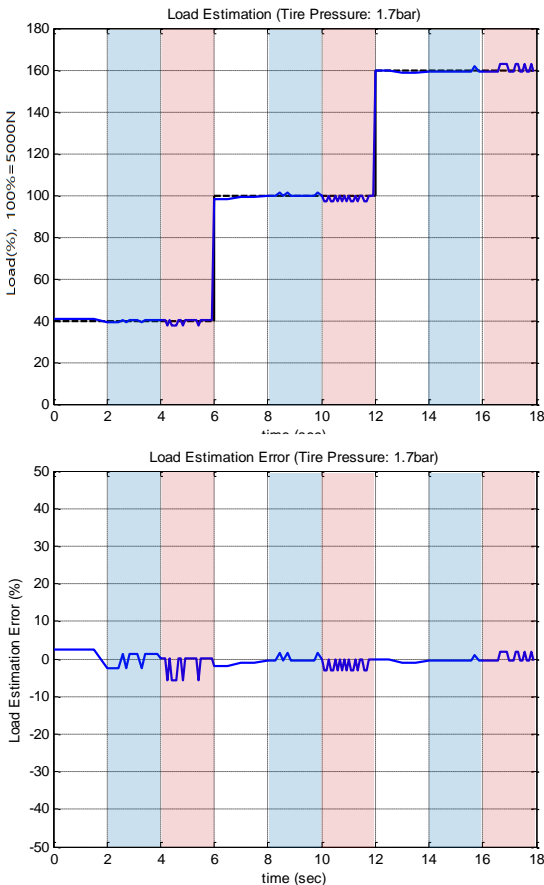


Fig. 5 하중 추정 결과, 흰색: 30kph, 파란색: 65kph, 빨간색: 100kph

4. 결론

본 논문에서는 intelligent tire를 이용한 새로운 하중 추정 알고리즘에 대해 소개했다. 하중 추정은 하중, 압력, 접지 길이를 변수로 갖는 3차원 함수를 만드는 것에서 시작한다. 그 후, intelligent tire를 통해 추정된 접지 길이와 공기압을 입력으로 사용하여 하중을 추정한다. 이러한 알고리즘은 Flat trac를 이용하여 실험적으로 검증하였다.

본 논문은 한국타이어의 지원으로 작성되었습니다

References

- 1) Daeil Kim, Mooryong Choi, Seibum Choi, "Integrated vehicle mass estimation for vehicle safety control using the recursive least-squares method and adaptation laws", Part D: Journal of Automobile Engineering, 2015
- 2) Myungsu Lee, Sang-sup Kim, "A Experimental Study on the Measurement and Estimation of Vehicle Center of Gravity", Transactions of KSAE, Vol. 18, No. 5, pp.91-99, 2010
- 3) I. KIM, H. KIM, J. BANG, K. HUH, "Development of Estimation Algorithms for Vehicle's Mass and Road Grade", International Journal of Automotive Technology, Vol. 14, No. 6, pp. 889-895, 2013
- 4) Hojong Lee, Saied Taheri, "Intelligent Tires? A Review of Tire Characterization Literature", IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, Volume: 9, Issue: 2, Summer 2017
- 5) Yi Xiong, Ari Tuononen, "Rolling deformation of truck tires: Measurement and analysis using a tire sensing approach", Journal of Terramechanics 61, 33-42, 2015
- 6) Arto Niskanen, Ari J. Tuononen, "Three Three-Axis IEPE Accelerometers on the Inner Liner of a Tire for Finding the Tire-Road Friction Potential Indicators", Sensors 2015, 15, 19251-19263