

타이어 공기압 모니터링 시스템의 판단 로직 설계에 관한 연구

김병우^{1*}

A Study on the Design of decision logic for a Tire Pressure Monitoring System

Byeong-Woo Kim^{1*}

요 약 자동차에 있어서 안전은 가장 중요한 설계 인자이다. 자동차 타이어 압력은 자동차 안전에 중요한 요소로 알려져 있다. 능동적 안전 측면에서, 타이어공기압감지장치(TPMS)는 아주 중요한 요소라 할 수 있다. RF 통신 기능을 갖고 타이어 내부에서 타이어 압력을 모니터링하는 장치는 광범위한 운전영역에서 정확한 압력을 검지하는 효과적인 방법이다. 본 논문에서는 타이어 압력 및 온도보상 특성 관계를 조사하였다. 본 연구를 통하여, 차량 조건과 주행 변수를 고려한 TPMS 제어 로직의 가이드 라인을 설정할 수 있었다.

Abstract In a Vehicle, Safety is the most important factor for drivers. It is well known that tire pressure lower than normal reduces the safety of the vehicle. In a consideration of active safety, tire pressure monitoring system is absolutely required. Tire pressure monitoring using in-tire pressure sensors with an RF data link have proven to be best approach to measuring tire pressure over the widest range of operating conditions. In this paper, we describe the parameters of TPMS, the characteristic of tire pressure and temperature compensation. These are the main factors to design the decision logic. We will show the guidelines for TPMS logic development considering environment variables and vehicle conditions.

Key Words : TPMS(Tire Pressure Monitoring System), NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)

1. 서론

자동차는 전자·통신의 발전에 따라 다시 진화하고 있다. 단순 주행하는 기능에서 운전자의 안전을 위한 여러 기능들이 추가되었고, 이에 더해 오늘날 자동차는 움직이는 사무실을 구현하기에 이르렀다. 정보통신 산업의 발전으로 운전자에게 필요한 많은 정보를 제공할 수 있게 되었고 또한 운전자에게 부가적인 정보만을 제공하는 기능에서 운전자의 안전을 위한 안전장치에도 정보통신 기술이 접목되고 있다. 타이어의 온도와 압력을 측정하여 무선 통신으로 측정값을 전송하여 운전자에게 타이어의 압력이 일정수준 이하로 내려갈 경우 경고를 수행하는 TPMS(Tire Pressure Monitoring System)가 대표적인 예라 할 수 있다.

자동차의 사고 방지를 위해 많은 장치들이 고안되었고 일부는 국가별로 장착 의무화를 추진하고 있다. TPMS는 국가별 전파법규의 차이 때문에 국제 규격으로 통일을 할 수 없는 특수성이 있어, 각 국가별로 주파수를 할당하여 사용하도록 하고 있다. TPMS는 압력센서를 타이어 안쪽에 장착하여 압력을 측정하는 직접방식과 휠 속도를 감지하여 타이어의 압력 감소를 측정하는 간접방식의 두 가지가 있다. 미국의 경우 정확도가 높은 직접방식을 채택하여 법규화가 마무리 단계에 있어 2005년 10월부터 일부 대상 차량에 장착이 의무화되고 2007년 9월 이후는 4,500Kg이하의 모든 차량에 100% 장착해야 한다.[5]

차륜센서 기반-TPMS(Wheel Speed Based TPMS)는 타이어 압력의 감소를 계산하기 위해서 ABS의 휠 속도 센서를 이용한다. 특히 이 휠 속도 센서는 타이어간 회전 속도를 측정하고 소프트웨어 알고리즘을 통해 어떤 타이어의 압력이 감소하였는가를 감지한다.[3]

차륜센서 기반-TPMS 방식은 2바퀴 혹은 4바퀴가 동

¹자동차부품연구원

*교신저자: 김병우(bwkim@katech.re.kr)

시에 압력이 감소하였을 경우 감지하기 어려운 단점을 갖는다. 타이어 안에 센서를 두지 않는 간편함 대신에 정확성의 문제로 인해 이 방식은 NHTSA(National Highway Traffic Safety Administration)에서 추천되지 않는 방식이다.[5]

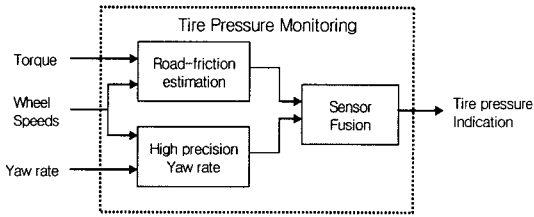


그림 1. WS-TPMS 센싱 원리

압력센서 기반-TPMS(Pressure Sensor Based TPMS)는 각 바퀴의 타이어 안에 온도·압력 센서가 장착이 된다. 압력센서 기반-TPMS의 종류에는 타이어 공기주입 밸브에 송신기가 장착되는 형태와 밴드를 이용하여 휠에 송신기를 장착하는 두 가지 형태가 존재한다.[4] 압력센서 기반-TPMS는 Fig. 2와 같이 휠에 장착되는 송신부와 차량 안에 장착되는 수신부 및 RF수신 안테나로 구성이 된다.

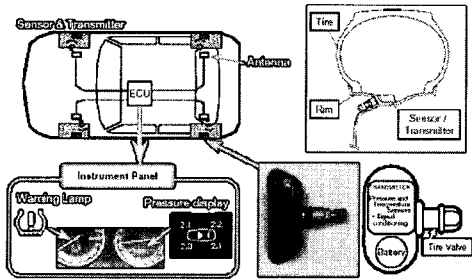


그림 2. PS-TPMS 구성도

차륜센서 기반-TPMS(TPMS)는 무선으로 데이터를 전송하기 때문에 송신부에 배터리를 포함하는데, 자동차의 수명을 10년으로 고려할 때 송신기의 배터리 수명을 10년이 되도록 설계해야 한다.[1] 이는 시스템 설계에 있어 송신기의 전력 소모를 최소화하는 방향으로 설계하도록 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 SAW소자를 이용한 Batteryless TPMS에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.[6]

2. 송신부 특성 분석

TPMS 송신부는 타이어 안에 온도·압력·가속도센서를 포함하는 송신기를 장착하여 주기적으로 센서에서 값을 측정하여 무선으로 수신부에 전송한다. 그림. 3은 TPMS의 구성을 기능별로 단순화 하여 나타낸 개념도이다. 타이어의 온도와 압력은 외부 환경과 차량 거동 및 노면의 영향을 받아 변화한다.

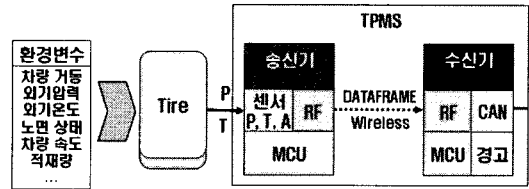


그림 3. TPMS 개념도

송신부는 이러한 외부 영향에 의한 타이어 내 공기의 온도와 압력을 측정하여 주기적으로 전송하는 것이 주요 기능이다.

2.1 타이어의 주행 시 압력 특성

타이어 내부의 압력 특성을 분석하기 위해서 본 연구에서는 악로 주행을 통한 실차 주행 시의 타이어 내의 압력 변화 특성을 분석하였다. 악로 주행 시 압력의 변화에 의한 TPMS의 오작동 방지를 위한 것으로 압력 변화의 범위 및 형상에 맞는 필터 설계가 요구된다.

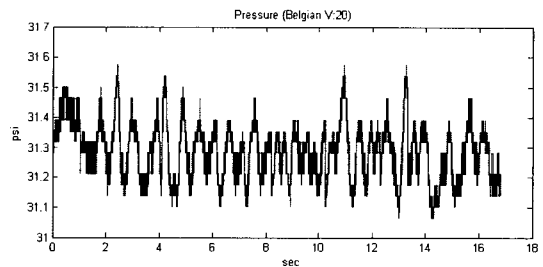


그림 4. 벨지안로 주행 시 압력 변화

그림. 4의 결과를 볼 때 표면이 불규칙한 악로 주행 시 타이어의 변형에 의해 타이어 공기압의 변화가 발생하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 그림. 4는 기준압력에서 압력 편차가 $\pm 1\%$ 이내에 있음을 말한다. 이 결과는 TPMS의 압력 센서 오차 범위 안에 포함되는 값으로 노면에 따른 압력의 보정은 필요치 않음을 보여준다.

2.1 타이어의 챔버 시험

압력별 타이어 안의 온도에 따른 압력 변화를 보기 위해 실차 시험을 위해 제작한 타이어 안의 온도 압력 시험 장비를 이용하여 온도 챔버에서 고온과 저온 영역에서의 압력 변화를 모니터링하였다.

그림. 5는 온도 -20℃에서 120℃까지의 변화를 주면서 타이어 안의 압력 변화를 모니터링한 결과이다. 이상적인 실험 결과는 일직선을 따라 압력이 내려갔다 올라가는 것이지만 실험적 세팅의 불완전으로 내려가는 직선과 올라가는 직선의 갭이 생겼다. 하지만 중요한 것은 내려갈 때와 올라갈 때의 기울기는 같다고 볼 수 있어 이에 대한 기울기는 온도 40도 증가 시 압력 50KPa 증가로 개형을 추정할 수 있다. 직선의 기울기는 1.25로 이론적인 계산을 통해 얻은 결과 값 1과 25% 차이가 있음을 확인할 수 있다.

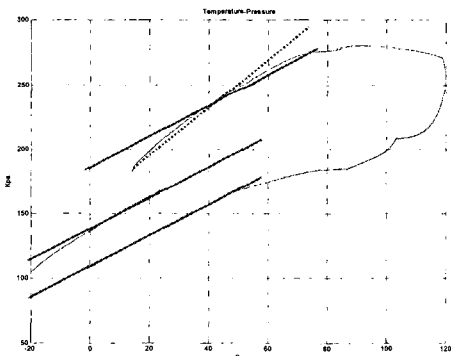


그림 5. 상온 24kPa 타이어의 온도 압력 곡선

이론적인 식을 통해 볼 때 초기 압력이 높을 경우 온도에 따른 변화의 폭이 더 크다. 이를 확인해 보기 위해 초기 압력을 35kPa로 하고 챔버 시험을 수행하였다. 상온 35kPa 압력으로 시험한 결과 그래프는 그림. 6과 같이 냉각과 가열에 의한 압력선이 거의 일직선으로 나타났다. 이는 24kPa의 시험 경우보다 적은 실험적 오차를 내포함을 나타낸다. 예상대로 직선의 기울기는 더 크게 나타남을 볼 수 있다. 대략 온도 60℃ 증가 시에 압력 100KPa 증가함을 볼 수 있다.

온도에 따른 압력 증가를 기울기는 1.67로 24kPa보다 33% 정도 증가하였음을 확인할 수 있다. 압력 24kPa에서 35kPa로의 증가는 약 45% 증가로 볼 때 상온 압력 증가에 대한 온도 압력 곡선의 기울기 증가율은 0.73배로 나타남을 볼 수 있다. 더욱 정밀한 실험값을 얻기 위해서는 실차 시험을 통한 온도 압력 곡선을 구하는 것이지만 단

기간에 구할 수 없는 시험으로 현실적으로 많은 제약을 받는다. 35kPa 압력으로 시작한 시험 곡선을 볼 때 350KPa 이상의 압력에서 압력이 더 이상 증가하지 않고 일정하게 유지되는 현상을 볼 수 있는데 이는 고온과 고압에 의한 타이어의 견딜 수 있는 압력의 한계에 도달한 것으로 볼 수 있다.

시험에 사용한 타이어의 최대 허용 압력은 300KPa로 350KPa는 허용 한계 압력을 넘어서는 수치로 타이어의 급격한 변형을 일으켜 더 이상 내압의 상승을 견디지 못하고 이후는 타이어 부피의 팽창으로 온도 상승에 의한 공기의 팽창을 흡수한다.

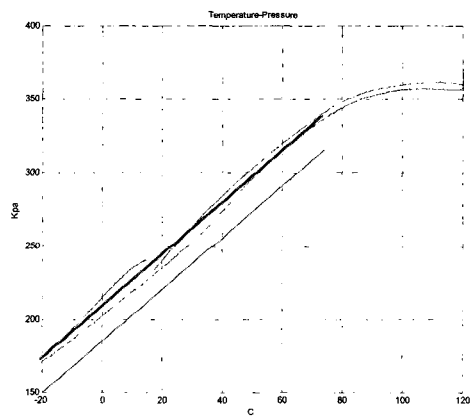


그림 6. 상온 35kPa 타이어의 온도 압력 곡선

이상적인 온도에 따른 압력 보상을 위해서는 상온기준 압력에 대한 보상 곡선의 기울기를 다르게 하여 보상하여야 좀 더 정확한 온도에 따른 압력 보상을 할 수 있다. 이는 판단 로직의 계산 량과 알고리즘의 효율성을 고려하여 로직에 반영할 필요가 있다.

3. 수신기 로직 설계

수신기는 송신기에서 전송한 센서값을 수신하여 값에 따른 타이어의 상태를 파악하여 운전자에게 알려주는 역할을 한다. TPMS 수신부는 RF 수신, 프로세서, 디스플레이 3부분으로 나눌 수 있다. RF 수신은 타이어의 안쪽에 장착된 센서로부터 무선으로 주기적인 온도·압력을 수신하기 위한 부분으로 주로 휠하우스쪽에 장착이 된다. 프로세서는 로직을 수행하여 현재 상태에 적절한 판단을 수행한다. 디스플레이는 운전자에게 타이어의 압력을 보여주고 경고를 수행하기 위한 부분으로 일반적으로 차량

의 클러스터 내에 하나의 경고램프로 위치하게 된다. 본 논문에서는 프로세서에서 수행하는 판단로직에 대한 내용을 주로 다루게 될 것이다.

3.1 온도 보상

타이어의 압력은 내부 온도의 영향을 받는다. 자동차 판매업체에서 권장하는 타이어 공기압은 상온을 기준으로 하여 25℃일 때의 압력 상태를 말한다. 하지만 여름철과 같이 기온이 증가하고 차량을 장기간 주행할 경우 타이어의 온도가 올라가고 이로 인해 타이어의 압력이 증가하게 된다.[2] 이 때 타이어의 허용 압력을 초과하게 되면 운전자의 안전을 해치는 일이 발생할 수 있다. 뿐만 아니라, 일정한 공기압 누출이 발생할 경우 타이어 공기 온도의 증가로 인하여 이를 감지하지 못하게 되어 사용자에게 저압력 경고를 보내는 시간이 길어질 수 있어 타이어의 공기압 상태를 정확하게 모니터링 하기 위해서 타이어 공기 온도에 따른 보정 압력의 계산은 TPMS에서 필수적이다.

일반적으로 타이어에 주입되는 공기는 대기중의 공기 상태로 간주한다. 타이어 내부에 주입된 공기를 이상기체로 간주할 때 기체상태방정식은 식(1)과 같다.

$$PV = mRT \quad (1)$$

초기에 주입된 공기의 질량은 압력, 온도와 부피의 변화 존재하더라도, 공기누수가 발생하지 않을 경우에는 일정한 상수값 m 을 갖게 된다. 초기 공기주입조건에 의하여 질량이 결정된다. 대상차량의 초기 상태를 다음과 같이 가정한다.

- ① 초기 타이어의 게이지 압력 : 32 kPa
- ② 공기의 초기 온도 : 25℃

타이어 내부의 공기 압력에 대한 온도와 부피에 대한 편미분 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{mR}{V} \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} = -\frac{mRT}{V^2} \quad (3)$$

온도와 부피의 변화에 따른 압력의 변화율을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\left. \frac{\Delta P}{P} \right|_{V=const} = \frac{\Delta T}{273.15 + 25} \quad (4)$$

$$\left. \frac{\Delta P}{P} \right|_{T=CONST} = -\frac{\Delta V}{V} \quad (5)$$

노면의 순간적인 충격에 의한 타이어의 부피변화를 고려하지 않을 경우, 즉 부피의 변화가 없는 정상상태를 가정할 때 온도 압력 곡선은 그림. 7과 같다.

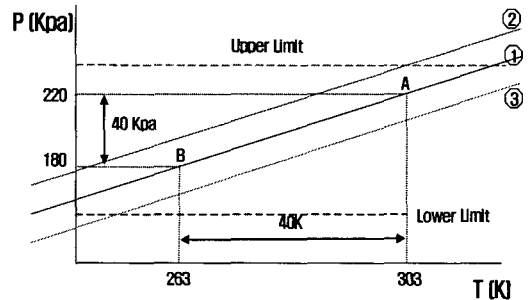


그림 7. 타이어 내의 온도 압력 곡선

그림. 7은 온도 40℃ 변화에 따라 압력이 0.4bar 변화하는 것을 나타낸다. 직선①은 303K에서 2.7Bar의 압력을 갖는 상태이다. 여기서 공기의 누출이 없다면 온도가 40K 내려가면 타이어의 압력은 직선①을 따라 A상태에서 B상태로 이동하게 된다. 직선②는 상온기준으로 직선①보다 더 높은 압력을 갖는 타이어의 공기압 변화 개형을 나타내며 직선③은 직선①보다 상온기준 더 낮은 초기 압력을 갖는 타이어의 온도에 따른 공기압 변화 선도를 나타낸다. 이론적인 공기의 온도 압력 곡선은 절대온도 0K에서 압력이 0이 되므로 상온 300K에서의 초기 압력에 의해 직선의 기울기가 바뀌는 개형을 갖게 된다.

3.2 판단로직 모델

판단로직은 수신부 ECU 프로그램의 일부분으로 송신부에서 받은 센서값을 기준으로 현재의 타이어 공기압 상태를 판단하게 된다. 의무장착이 진행 중인 미국의 경우 기준 공기압의 25% 감소에 대해서 저압 경고를 하도록 하고 있으며 TPMS의 고장에 대한 경고등을 표시하도록 하고 있다.[5]

수신부 판단로직은 타이어의 공기압이 정해진 수준의 압력에 도달하면 운전자에게 "Low Pressure Warning"을 수행한다. 또한 압력이 권장 압력을 넘어가는 과잉 압력 상태도 감지하여 운전자에게 고압에 의한 타이어 손상 위험을 알린다. 정상상태에서는 타이어의 압력 전송 시간 간격을 수십 초 정도로 길게 하며 압력이 빠진 상태인 경고 상황에서는 수 초 내에 압력을 전송하여 압력 감소 상태를 정밀하게 감지한다. 압력센서의 오작동 시 전송데이

터에 오작동 코드를 함께 전송하여 수신부에서 이를 판단할 수 있도록 한다. 허용 온도 범위를 벗어날 경우도 센서의 정상작동을 보장할 수 없어 센서의 값을 무시하고 고온 경고를 발생하여 운전자가 이를 조치하도록 하고 있다. 일정 온도 이하로 내려갔을 때 수신부에서 다시 온도·압력을 읽어 들여 판단을 수행한다. 이와 같은 알고리즘을 전방 우측 차륜, 전방 좌측 차륜, 후방 우측 차륜, 후방 좌측 차륜에 대해서 모두 수행한다.

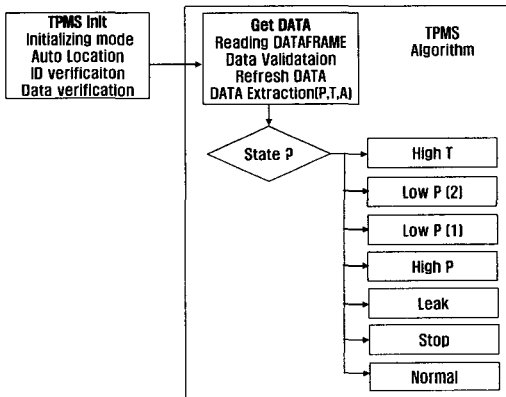


그림 8. 판단로직 개념도

그림. 8은 TPMS 수신부 판단 로직의 전체적인 흐름도이다. 초기화를 통해 각 송신기의 ID를 확인하고 초기 데이터를 수집하여 초기 상태를 판단한다. 이후 데이터를 주기적으로 읽어 들여 그에 맞는 상태 로직을 수행한다. 본 연구에서의 타이어 공기압 상태는 7가지로 표현한다. 그림. 9는 7가지 상태에 대한 우선 순위를 나타낸다. 이는 경고 로직의 효율성을 위해서 우선순위가 높은 상태에서는 하위 상태에 대한 경고나 상태 검지를 수행하지 않는다.

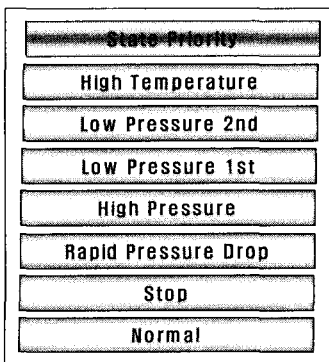


그림 9. 상태 우선순위

TPMS의 기준은 타이어의 현재 공기압이다. 하지만 센서 값을 수신하여 그 값을 직접 반영하여 판단을 할 경우 타이어의 순간적인 압력 변화에 의한 잘못된 경고를 수행할 수 있다. 이는 운전자에게 시스템의 신뢰도를 떨어뜨리는 경우로 피해야할 상황이다. 이를 피하기 위해서 최근 수개의 평균을 이용하거나 칼만 필터를 설계하여 압력 변화의 개형을 분석하여 경고를 수행하게 된다. 또한 공기압의 저하로 인한 발열에 의한 공기압 상승 혹은 유지 현상에 대한 검지를 위해 보정 압력을 사용한다. 보정 압력은 타이어의 공기압을 상온 기준으로 환산하여 공기 누출이 있는지 여부를 판단하는 것으로 3.1의 온도 보상 로직을 적용하여 수행한다.

3.3 판단로직 시뮬레이션

설계된 판단 로직의 실차 적용에 앞서 시뮬레이션을 통한 로직 검증을 수행하였다. Stateflow를 이용하여 7가지 상태에 대한 상태 전환 알고리즘을 분석하였다. 보정 압력(Pc)과 유효압력(Pe)을 통하여 기본 로직을 설계하였으며 상태 간 안정적인 전환을 위하여 Hysteresis를 두어 로직을 구현하였다. 여기서 유효압력은 평균값 혹은 필터링된 값을 이용한 판단 로직에 사용하는 압력을 나타낸다. 그림. 10은 구현된 주요 로직 흐름을 보여준다.

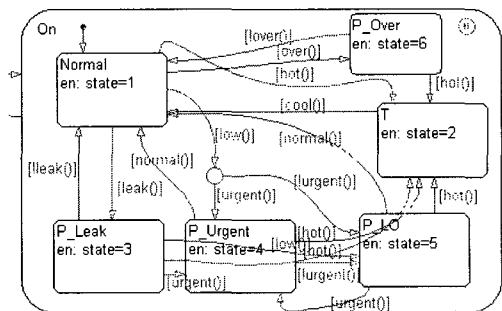


그림 10. 로직 시뮬레이션

이렇게 구현된 로직의 코딩 작업을 위해 Stateflow 로직 구성에서 RTW(Real-Time Workshop)을 통한 C-Code를 생성하였다. 좀 더 타이어의 환경을 적용한 시뮬레이션을 위해 본 연구에서는 그림. 11과 같이 TPMS를 위한 전용 시뮬레이션 툴을 제작하였다. 각 타이어에 대한 노면 특성 및 주위 온도 변화, 압력 변화, 공기 누수 등의 TPMS 모델을 통하여 단일 모드 및 복합 모드에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 타이어 특성뿐만 아니라 차량의 환경을 적용하여 로직의 실차 적용성을 높였으며 디스플레이부를 두어 시각적으로 공기압 상태를 확인할 수 있

으며 차량에서의 로직 테스트와 연계성을 두기 위해 수신부 조작 버튼을 구현하였다.

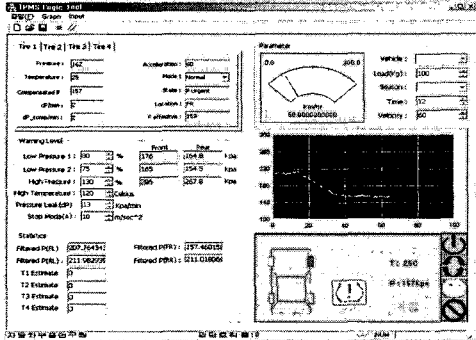


그림 11. TPMS 시뮬레이션 툴

시뮬레이션 툴을 통하여 타이어 특성을 반영한 송신부 로직을 설계하였고 이를 기반으로 수신부 판단로직의 타당성을 검증하였다. 추후 실차 장착을 통한 로직의 최종 검증 작업이 이루어져야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 TPMS 개발을 위한 타이어 환경 분석, 온도 보상, 로직 설계에 관해 논하였다. TPMS 관련 기술은 복합적이어서 본 고를 통해 모두 상세히 다루지는 못하였다. 하지만 중요한 설계 파라미터들에 대하여 거론하였고 기본 설계 방향을 제시하였다.

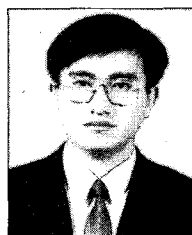
- 1) 타이어의 특성 분석을 통하여 타이어의 주행 시 압력 변화 및 온도에 따른 압력 변화를 파악하여 설계 대상에 대한 이해를 바탕으로 설계를 수행하였다.
- 2) 현재 공기압을 통한 경고 로직을 보완하기 위해 온도 보상을 적용한 보정 압력을 사용하여 공기 누출이 있는 경우에 대한 검지 정확성을 높였다.
- 3) Stateflow를 통한 로직 시뮬레이션을 통하여 로직의 상태 전환 알고리즘의 안정성을 확보하였으며 자동 코드 생성을 통하여 효율성을 높였다.
- 4) TPMS 시뮬레이션 툴을 개발하여 타이어 및 차량의 복합 환경에 대한 시뮬레이션을 통하여 로직의 차량 적용성을 높였다.

References

- 1) Mark L. Shaw, "Considerations to improve battery life in Direct Tire Pressure Monitoring", SAE 2002-01-1078, 2002년
- 2) G. Barnanti, M. Pellicciari, A. Andrisano, "On Tire Monitoring Systems Temperature Compensation", SAE2004-01-1110, 2004년
- 3) Niclas Persson, Stefan Ahlqvist and Urban Forssell, "Low Tire Pressure Warning System Using Sensor Fusion", SAE 2001-01-3337, 2001년
- 4) Glen S. Harm, Ronald Singer, Stephen Harris, "Tire Pressure Monitoring Systems and the Automotive Assembly Process", SAE 2002-01-1308, 2002년
- 5) NHTSA, "Federal Motor Vehicle Safety Standards; Tire Pressure Monitoring System; Controls and Displays", 49 CFR Part 571 and 585, [Docket No. NHTSA 2004-19054]
- 6) 고봉철, 윤현철, 천진민, 이인식, 범진욱, "SAW소자를 이용한 무전원 TPMS 개발에 관한 연구", 2004년도 한국자동차공학회 추계학술대회논문집, pp. 1295-1300, 2004년

김 병 우(Byeong-Woo Kim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 한양대학교 기계공학과 (공학사)
- 1990년 2월 : 한양대학교 정밀기계공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 한양대학교 정밀기계공학과(공학박사)
- 1994년 10월 ~ 현재 : 자동차부품연구원 전장기술연구센터 센터장

<관심분야>

자동차 전장부품, 임베디드시스템, ITS, 자동차 반도체