

자동차용 타이어의 중량불균일 모델링 및 측정에 관한 연구

이기성, 정태원  
한국타이어, 충남대학교 전기공학과

Tire Imbalance modeling and Measuring System

LEE KI SEONG, JEONG TAE WOON  
HANKOOK TIRE, CHUNGNAM UNIVERSITY

**Abstract** - 본 연구에서는 타이어의 중량 불균일 측정을 위한 메카니즘의 모델링 및 분석을 통해 로드셀에 의해 샘플링된 신호를 해석하여 불균일량을 측정하는 방법을 제안한다. 진동역학적인 모델을 근거로 신호의 변환과 영향계수의 산출을 통해 정확한 불균일량 측정을 가능하게 하였다.

1. 서 론

자동차용 타이어는 회전시에 진동을 하는데, 그 원인이 타이어 자체에 의한 것과 휠이나 기타 자동차의 설계상의 고유진동수등과 같이 타이어 외에 의한 것으로 구분해 볼 수 있다.

타이어 자체에 의한 진동은 크게 중량 불균일에 의한 진동과 타이어의 구조상의 탄성 불균일 즉, 강성 불균일에 의한 진동으로 나뉘어질수 있다. 본 연구에서는 타이어 중량 불균일에 의한 진동을 측정하고자 하므로 진동의 원인은 타이어 재질의 불균일한 분포에 의하여 발생한 질량의 불평형에 의해 나타나는 것으로 가정한다.

본 연구에서는 이와 같은 타이어의 질량 분포 불평형량이 로드셀 센서를 통해 감지되어 나온 신호를 취득하여 DC 성분을 제거하고 주파수 해석을 통해 1차성분인 회전 진동에 의한 정현파 성분을 추출 후, 스케일 조정과 스피들 보정을 한 후, 영향 계수를 적용하여 타이어의 불평형량을 산출해낼수 있는 시스템 설계 및 알고리즘 구현을 연구하고자 하였다.

2. 진동 모델

2.1 타이어의 진동

타이어의 중량 불평형에 의한 진동의 양상에 따라, 그림1.에서와 같이 수직 방향의 진동과 수평 방향의 진동으로 구분할 수 있다. 이 두가지의 진동은 불평형 질량이 배치된 구조에 의해 나타나며, 그림에서 타이어 표면에 두드러진 색으로 표시된 부분이 불평형 질량을 뜻한다. 불평형 질량이 타이어 트레드의 가운데에 하나만 있는 경우에, 타이어의 수직 방향의 진동을 일으키며, 불평형 질량이 타이어의 중심에서 대각선으로 트레드에 놓여 있는 경우에 수평 방향의 진동을 일으킨다.

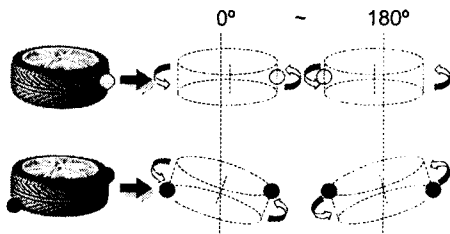


그림 1. 불평형량의 위치에 따른 진동

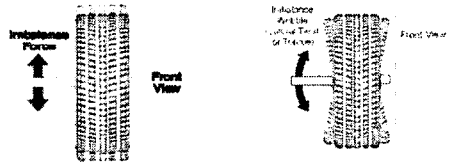


그림 2. 종방향 및 횡방향 진동형태

2.2 타이어의 진동 모델

타이어의 질량 불평형에 의한 수직과 수평 방향의 진동을 역학적 모델로 단순화 하여 표시하면, 수직 방향의 진동은 타이어를 중심으로 직선 방향의 힘 S가 작용하는 것으로 볼 수 있으며, 수평 방향의 진동은 타이어의 중심에서 회전 모멘트 M이 작용하는 것으로 생각할 수 있다. 여기서, 모멘트 M은 크기가 같은 두개의 직선 방향의 힘 Fc가 작용하는 것으로 볼 수 있다.

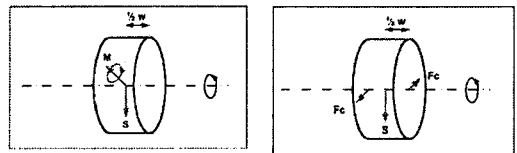
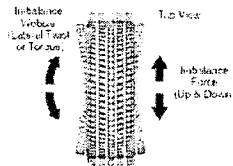


그림3. 진동의 역학적 모델링

그림3.에서 힘 S는 S방향에 있는 불평형 질량에 의한 현상으로서 타이어가 회전하지 않고 고정된 상태에서도 그 현상이 나타나고 관찰되므로 Static Unbalance(정적 불평형)이라 부른다. 그리고 모멘트 M은 타이어 중심으로부터 서로 대각선 방향에 있는 불평형 질량에 의한 두개의 힘 Fc가 짝을 이루어 발생하므로 Couple Unbalance(우력 불평형)라고 부른다. 타이어가 정적 상태(정지된 상태)에서는 Static Unbalance 현상만 나타나나 동적 상태(회전중인 상태)에서는 Static과 Couple Unbalance가 동시에 나타나므로 이 둘을 합쳐서 Dynamic Unbalance(동적 불평형)라고 부른다.

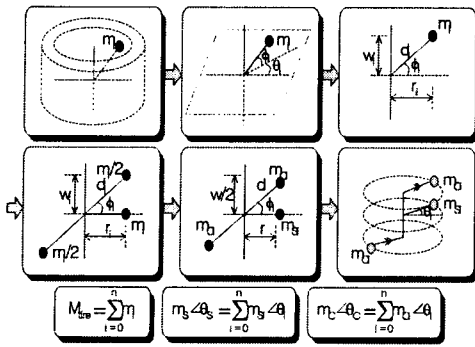


그림4. 질량의 역학적 변환

타이어를 수많은 작은 질량(점 질량)들로 이루어진 것으로 생각할 수 있다. 어떤 위치에 있는 한 질량을 위와 같은 방법으로 변환하면 세계의 원주상에 마치 세계의 질량이 있는 것으로 표현이 가능하며(표현이 가능하다는 뜻은 등가라는 뜻으로 해석가능하며 두가지의 경우가 물리적으로 동일한 결과를 낳는다는 뜻이다) 이 세계의 원주는 상부와 하부의 비드(정확하게는 림의 원주)를 원주로 하는 원통상에 위치한다. 타이어를 구성하는 모든 점질량들을 이 세계의 원주상에 변환 후 각 원주마다 모든 질량들을 병합하면, 세계의 원주상의 각각 단 하나의 점질량으로 변환된다. 이때, 위와 아래의 원주상의 두 동일 질량  $M_c$ 는 Couple 불평형 질량이고  $M_s$ 는 Static 불평형 질량이다. 결과적으로, 타이어의 질량 분포는 총 세계의 질량으로 표시가 가능하며, 이러한 표현 모델을 Static-Couple 모델이라 한다. 다음에는 타이어 질량 분포의 또 다른 모델인 Upper-Lower 모델을 도출해 낼수가 있다.

이 모델은 위와 아래의 두개의 원주상의 각각 하나의 점 질량으로 표현하는 방법이다. 타이어의 측정 결과를 표시할 때에도 Static-Couple 표현법과 Upper-Lower 표현법을 같이 사용하여 불평형 질량의 크기와 각도를 표시할 수가 있는것이다.

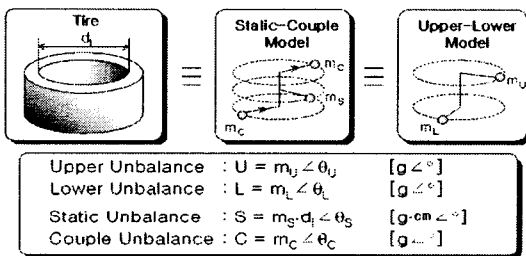


그림5. 불균일량별 상관 관계

타이어의 질량 분포 모델은 Static-Couple 또는 Upper-Lower 모델로 표현 가능하다는 것을 알았는데 이제는 이 두 모델간의 관계를 알아 본다. 이 두 모델은 그림5와 같은 변환 과정을 통해 서로 변환 가능하며 그 수식관계는 워치럼 단순한 관계를 갖는다. 이 두 모델은 결국 같은 타이어의 불평형량을 표시하나 물리적인 의미가 다르다. Static-Couple 모델의 경우 수직 방향의 진동과 수직 방향의 진동의 양을 이해하는데에 유리하며, 이에 비해 Upper-Lower 모델의 경우는 불평형량을 보정하기 위하여 림에 부착하는 보정 질량을 선정하는데에 유용하다.

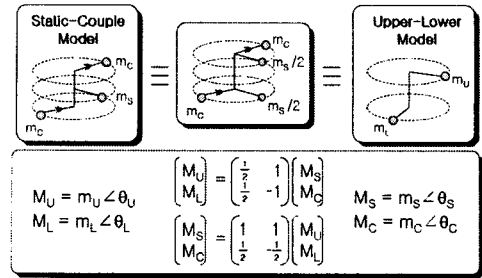


그림6. 모델 변환

현실적으로는 어렵지만 Static-Couple 모델의 불평형 질량에 의한 힘을 측정하는 센서가 있다면 그 신호의 파형은 타이어가 회전함에 따라 정현파 모양으로 나타나며, 이 정현파의 주파수는 회전 속도에 비례하고 진폭은 회전속도와 불평형 질량에 비례한다. 그 수식적 관계가 그림7.에 나와 있다. 이러한 측정 방식이 있다면 측정 분석이 매우 용이하나 현실적인 문제로 이러한 방식은 어렵고 간접적인 측정 방법에 의해 측정을 수행한다.

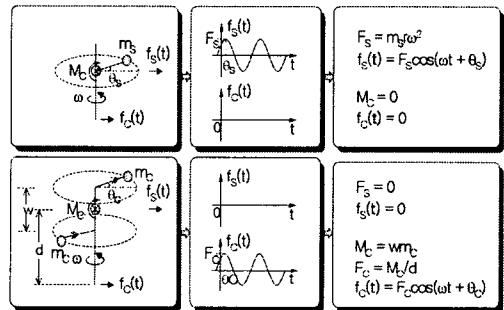


그림7. 불평형량의 수식적 도시화

### 3. 구성 및 측정알고리즘

#### 3.1 메카니즘 구성

본 시스템의 측정 메커니즘은 타이어로 부터 아래에 떨어진 곳에 설치된 두개의 힘 센서로부터 파형을 받게 되어 있으며, 타이어에서 직접 발생하는 힘(F와 M)과 간접적으로 측정되는 센서가 감지하는 힘( $F_T$ ,  $F_B$ )의 근사적인 관계는 그림8의 식과 같다. 이러한 관계는 이상적인 방법으로서 실제에서는 이와 다르며 그 정확한 관계를 알아내는 캘리브레이션 과정이 필요하다.

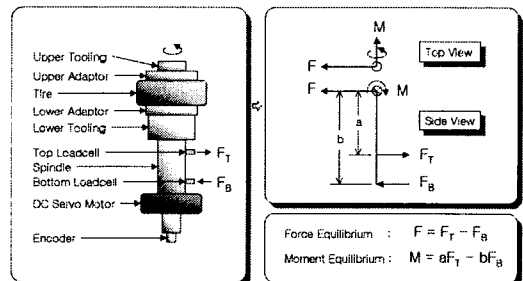


그림8. 메카니즘 구성

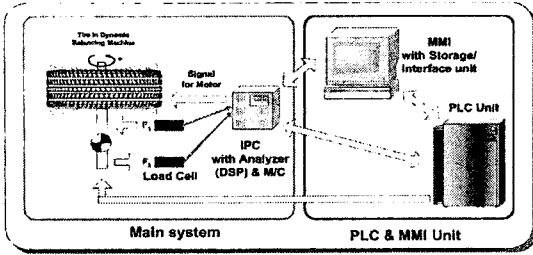


그림9. 측정시스템 구성

### 3.2 중량 불평형의 산출 과정

중량 불평형량의 분석과정을 표현하면 상부와 하부의 힘 센서에서 감지되어 나온 신호를 취득하여 DC 성분인 오프셋(Y 절편 값)을 제거하고 주파수 해석을 통해 1차 성분인 회전 진동에 의한 정현파 성분을 추출 후, 스케일 조정과 스핀들 보정을 한 후, 영향 계수를 적용하여 타이어의 불평형량을 계산해 얻어 출력한다.

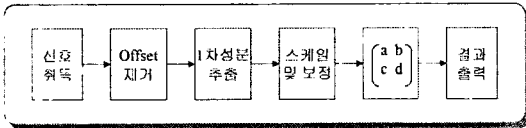


그림10. 불평형량 해석 과정

### 3.3 상,하 로드셀의 영향계수 산출

진동량을 측정하기 위해 메카니즘적으로 상부하 하부에 두 개의 로드셀이 위치하고 있다. 이는 위에서 설명된 중량 불균일량을 Upper와 Lower로 구분하여 측정하여야 한다는 것을 의미하며 상부측에서만 중량 불균일이 상부의 로드셀에만 진동을 주는 것이 아니라 하부에 설치된 로드셀에도 일정량의 진동을 전달하게 된다. 반대로 하부측의 중량 불균일역시 상부측에 진동을 주게 되므로 상,하 로드셀에서 발생하는 진동의 상관관계를 규명하는 영향계수를 산출하여야 한다. 영향계수란 타이어 상의 불평형 질량과 측정 센서에서 감지된 힘과의 관계를 선형적인 비례 계수로서 나타낸 것이다. 불평형 질량과 감지된 힘의 관계를 선형 연립 방정식으로 표현되며 이를 행렬 방정식으로 표현하게 되면 그림11.과 같다.

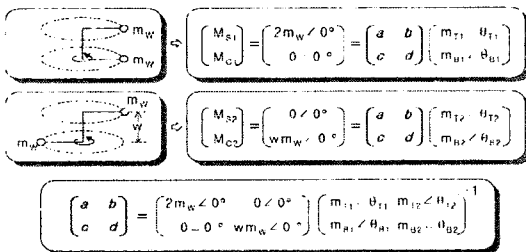


그림11. 상하 로드셀의 신호해석을 위한 영향계수

### 3.4 중량 불평형의 신호 해석

앞에서 설명된 바와 같이 타이어가 회전시 발생하는 중량 불평형에 의한 진동은 최종적으로 상부와 하부에 설치된 로드셀에 전달되게 된다. 통상적으로 진동을 발생시킬수 있는 회전속도인

200~600 rpm으로 고속회전을 시켜 1회전당 1024개의 샘플링 데이터를 취득하며 취득된 데이터는 질량 불균일은 한점으로 표현되기 때문에 일정한 정현파를 보이게 된다.

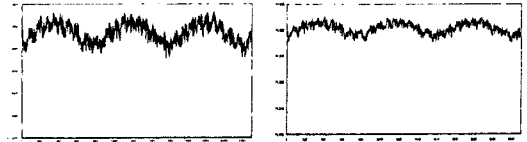


그림12. 취득된 상,하부 로드셀 파형

취득된 1024개의 샘플링 데이터를 FFT(Fast Fourier Transform)공식에 의해

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n) W_{N/2}^{kn} + W_N^k \sum_{n=N/2}^{N-1} x(2n+1) W_{N/2}^{kn}, k=0, \dots, N-1$$

DC성분 제거 및 1차주기성분인 1차 고조파를 산출하고 실제의 중량에 의해 조정된 스케일 보정 및 상하 로드셀 값에 영향계수를 적용 계산하여 최종적인 중량 불평형량을 산출할수 있었다.

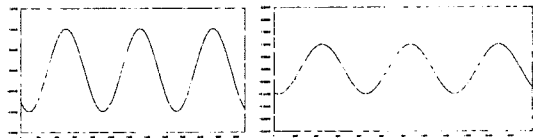


그림13. FFT에 의한 1차주기성분 추출

본 논문에서는 언급되지 않았지만 이 외에 기구적 구성 요소인 립의 편심량 추출 및 보정알고리즘도 정확한 불평형량 측정의 필수 요소이다.

## 4. 결 론

본연구를 통하여 자동차용 타이어의 진동발생의 두가지 요소인 타이어의 강성 불균일에 의한 진동과 질량 불평형에 의한 진동중 질량 불평형에 의한 진동의 해석과 질량 불평형량의 크기를 산출할수 있는 시스템 개발 및 분석과정의 신뢰성을 검증할수 있었다. 또한 측정 알고리즘의 구현 못지않게 메카니즘의 정밀도가 본 시스템의 성능지수에 중요한 인자임을 확인할수 있었다.

## (참 고 문 헌)

- [1] 이재욱 : " 디지털 신호처리 ", 청문각, 1994
- [2] 박규태 : " 디지털 신호처리 ", 문운당, 1992
- [3] Lloyd N. Trefethen : " Numerical Linear Algebra ", Slam, 1997
- [4] Ogata : " Discrete-Time Control Systems ", P.H International, 1992
- [5] Cadzow, J.A : " Discrete-Time and Computer Control Systems ", Prentice Hall, Inc., 1970
- [6] G.W. Stewart : " Introduction to Matrix Computations ", Academic Press, 1973