

로드셀을 이용한 저속 회전체의 불균일 질량 보정 시스템 구현

김정수*, 박문수, 박민호, 홍석교
아주대학교 전자공학과

Implementation of an Adjustment System with Load Cells for Unbalanced Mass-Distribution of Low-Speed Rotating Bodies

Jung-Su Kim*, Mun-Soo Park, MinHo Park, Suk-Kyo Hong
Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University

Abstract - 이 논문에서는 저속 회전체의 불균일 질량측정을 위한 새로운 신호처리 방법을 제안하고 이를 이용한 자동차 타이어의 보정(balancing) 방법에 관해 설명한다. 타이어를 포함한 시스템의 동역학 모델을 기반으로 타이어의 불균일 질량에 의해 발생하는 진동과 이로 인해 로드셀에 작용하는 힘의 관계식을 유도하고, 센서의 측정계수(scale factor)를 포함한 매개변수를 실험 데이터로부터 계산한다. 또한, 기존 방법과 달리 불균일 질량의 크기와 위치를 정확하고 효율적으로 측정할 수 있는 방법을 소형 마이크로 프로세서를 이용하여 구현하고 실험을 통해 그 성능을 검증한다.

1. 서 론

회전체를 포함하는 시스템은 회전체의 질량 분포가 균일하지 않을 때 진동이 발생하게 된다. 회전체의 진동은 소음 뿐 아니라 시스템 고장으로 연결되기 때문에 세탁기, HDD, 선반, 자동차 타이어 등 많은 분야에서 회전체의 진동을 억제하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,2]. 특히 자동차가 고속으로 주행 할 때 타이어의 불균일 질량에 의해 스티어링 휠이 떨리는 쉬미(shimmy) 현상이 발생되어 승차감 저하와 안정적인 주행을 방해한다.

회전체의 진동을 최소화하기 위해서는 진동을 발생시키는 불균일 질량의 크기와 위치를 정확히 측정해야 한다. 기존의 소형 자동차용 타이어 밸런싱 시스템은 정밀한 측정과 정확한 보정 질량 계산을 위해 측정된 여러 주기의 신호를 사용하였다. 여러 주기의 신호를 처리하기 위해 많은 메모리와 고가의 신호해석 시스템, 그리고 복잡한 알고리즘이 요구되어 소형 마이크로 프로세서를 이용하여 구현하는데 많은 제약이 따른다[3].

이 논문은 회전체의 불균일 질량에 의한 진동을 최소화하기 위한 불균일 질량 보정 시스템을 구현하는 방법에 관한 것이다. 이 시스템은 회전체의 불균일 질량을 측정하는 하드웨어 부분과 소형 마이크로프로세서에 최적화된 스핀 보정질량 계산을 위한 신호처리 알고리즘으로 구성된다.

제한한 불균일 질량 측정방법을 이용하여 기존 소형 자동차용 타이어 밸런싱 시스템의 문제점을 해결하는 경제적인 타이어 보정 시스템을 구현하고 실험을 통해 그 성능을 확인한다.

시스템의 하드웨어 구성은 회전하는 타이어의 불균일 질량에 의한 진동을 측정하는 로드셀과 진동 신호의 고조파 성분을 제거하기 위한 저역통과 필터(low-pass filter), 타이어 회전에 동기된 샘플을 얻기 위한 엔코더로 구성된다. 그리고 회전수에 동기된 1주기 신호를 처리하는 DFT 연산 알고리즘으로 구성된다.

이 논문 각 장의 내용은 다음과 같다. 제2장에서는 회전체의 진동모델에 대해서 살펴본다. 제3장에서는 시스템의 개요를 제4장에서는 시스템 구현에 사용된 알고리즘에 대해 살펴보고, 제5장의 실험을 통한 시스템의 성능을 확인한다. 그리고 제6장에서는 결론을 제시한다.

2. 회전체의 진동모델

2.1 회전체 진동의 역학적 모델링

회전체 내의 불균일 질량 분포를 하나의 점점으로 가정하면 정적 불평형(static unbalance)상태와 동적 불평형(dynamic unbalance)상태로 나눌 수 있다[4].

그림 1은 정적 불평형상태와 동적 불평형상태를 나타내고 있다. d는 원점(Origin)에서부터 센서까지의 거리를 나타낸다. 정적 불평형상태는 회전체가 상하로 진동하는 형태이고, 동적 불평형상태는 상하진동과 좌우 진동이 동시에 나타나는 형태이다. 회전체의 반지름이 r, 질점의 질량이 m, 회전체의 회전속도가 ω 일 때 각각의 정적 불평형상태에 의한 힘 F_s와 동적 불평형상태에 따른 모멘트 M_c는 각각 식(1),(2)와 같다.

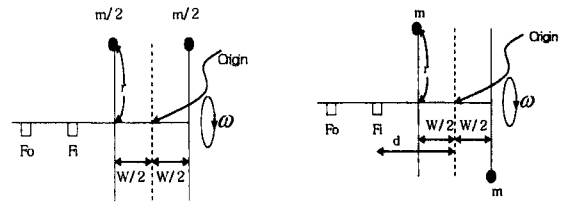
$$F_s = mr\omega^2 \tag{1}$$

$$M_c = dmr\omega^2 \tag{2}$$

3. 시스템 개요

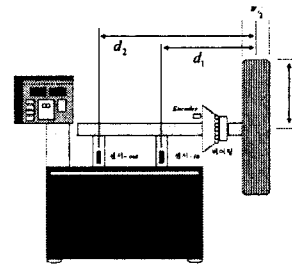
3.1 메카니즘 구성

시스템의 메카니즘 구성은 그림 2와 같다. 진동을 검출하는 센서가 안쪽



(a) 정적 불평형상태 (b) 동적 불평형상태

<그림 1> 회전체 진동의 역학적 모델링



<그림 2> 메카니즘 구성도

과 바깥쪽 각각 한 개씩 있고, 회전체가 잘 회전할 수 있도록 축과 회전체 사이는 베어링으로 연결되어 있다. 회전체의 회전위치를 측정하기 위한 64 펄스의 엔코더가 있으며, 이는 마이크로프로세서에서 4배 배 된다. 회전체의 폭(W)의 1/2지점에서 센서까지의 거리는 각각 d1, d2이다.

3.2 진동신호

회전체의 진동은 센서에 의한 전압 값으로 측정된다. 그림 3은 정적 불균일 질량이 10g 단위로 10g부터 150g 까지 증가 될 때 센서 신호를 측정된 결과이고, 그림4는 동적 불균일 질량을 같은 방법으로 측정된 결과이다. 그림3,4로부터 센서 신호와 질량 사이에는 다음과 같이 선형 관계가 있음을 확인할 수 있다.

$$V_{sensor} = \alpha F_s + \beta M_c \tag{3}$$

식(3)은 센서에서 출력되는 전압과 불균일 질량에 의한 힘에 대한 관계식이다. 여기서 V_{sensor}는 안쪽과 바깥쪽센서의 전압이고, α, β는 힘과 모멘트 가 갖는 계수이다.

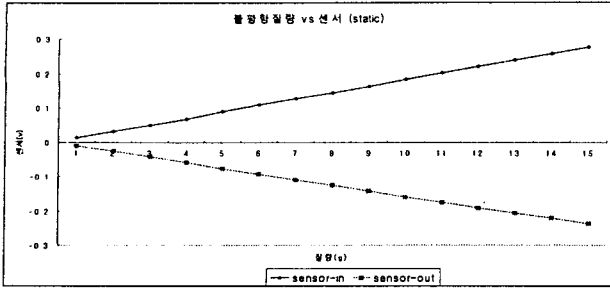
식(3)에서 센서신호에 포함된 진동 신호 F_s를 직교좌표성분으로 변환하면 식(4)와 같다.

$$F_x = X_0 + \sum_{n=1}^{\infty} X_n \cos(n\omega t + a_n) + m(t)$$

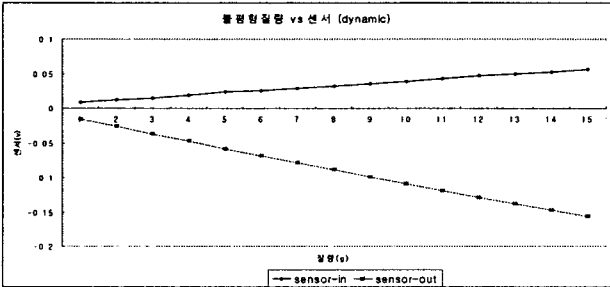
$$F_y = Y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \sin(n\omega t + b_n) + m(t) \tag{4}$$

여기서, X₀, Y₀는 신호에 포함된 DC성분이고, n은 n차의 고조파를 나타내며, a_n, b_n은 진동신호의 위상이고, m(t)는 진동신호 이외의 잡음을 나타낸다.

식(4)에 FFT를 적용하여 진동에 대한 기본주파수 성분을 찾는 데는 많은 연산량이 요구된다. 따라서 이 논문에서는 저역통과 필터를 이용하여 진동의 고조파성분을 제거하고 이를 AD변환한 후 DFT를 적용하여 연산량과 계산시간을 개선하였다.



〈그림 3〉 질량 vs 센서신호 (static)



〈그림 4〉 질량 vs 센서신호 (dynamic)

3.3 지역통과 필터설계

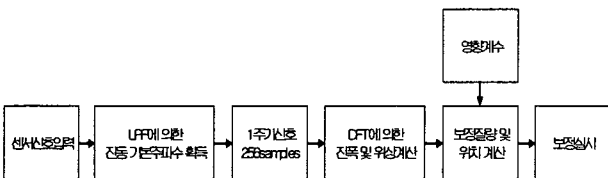
지역통과 필터의 차단 주파수 선정은 진동의 기본주파수 성분을 제외한 모든 고조파성분을 제외할 수 있도록 충분히 낮아야 한다. 실험에 사용된 회전체는 100RPM의 저속으로 항상 일정한 속도로 회전한다. 따라서 진동의 기본 주파수는 100RPM인 1.67Hz가 된다.

$$F = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \phi) \quad (5)$$

식(4)의 신호는 지역통과 필터를 거치면 식(5)의 신호와 같이 모든 고조파성분이 제거되고, 잡음신호m(t)는 차단 주파수 보다 훨씬 높은 주파수를 포함한다. 식(5)의 진폭과 위상에 의해 불균일 질량의 크기와 위치를 알 수 있다. 여기서, A_0 는 지역통과 필터를 통과한 DC성분이고, A_1 는 지역통과 필터의 증폭도, ϕ 는 안쪽과 바깥쪽 센서 신호의 위상차 이고, 지역통과 필터에 의한 위상지연(ϕ)은 일정한 값으로 쉽게 보상이 가능하므로 무시한다.

4. 알고리즘

회전체의 불균일 질량으로부터 발생한 진동신호에 대한 신호처리 알고리즘은 DFT에 의한 진폭과 위상을 계산하는 신호처리 부분과 진폭과 위상을 이용하여 보정질량의 크기와 위치를 구하는 불균일 질량 계산 알고리즘부분으로 구성된다. 알고리즘 처리의 흐름은 그림 5와 같다.



〈그림 5〉 보정질량 계산 흐름도

그림 5의 DFT에 의한 진폭과 위상계산 부분은 정확히 면분리가 된 불균일 질량 보정을 위해 중요하다. 면분리는 보정질량의 크기 뿐 아니라 위치가 회전체의 보정면 안쪽과 바깥쪽이 다를 경우에도 보정질량의 크기와 위치를 정확히 계산하는 것이다. 정확한 면분리를 위한 알고리즘은 영향계수를 통해 보정 질량의 크기와 위치를 계산하고, 계산된 값으로부터 다시 영향계수에 의한 센서신호를 역으로 계산한다. 계산된 센서신호와 측정된 신호가 같아질 때 까지 반복 계산하여 정확히 면분리가 된 보정질량의 크기와 위치를 구한다.

4.1 신호 처리(DFT)

진동의 기본 주파수를 지역통과 필터를 통해 얻었고, 다음에 DFT를 이용해 진동의 진폭과 기준점에 대한 위상을 계산한다.

DFT를 하기 위해 신호는 주기 신호 이어야 한다. 주기 신호가 아니면, 신호에 대하여 진처리 과정이 필요하다.[3] 이 논문에서는 엔코더를 이용하여 정확한 한주기를 $N=256$ 샘플링 하므로 1주기에 대해서만 DFT연산을 수

행할 수 있다.

$$F_x = \sum_{n=1}^N S_{sensor} \cos(2\pi(n-1)/N)$$

$$F_y = \sum_{n=1}^N S_{sensor} \sin(2\pi(n-1)/N)$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}, P = \tan^{-1}\left(\frac{F_y}{F_x}\right) \quad (6)$$

4.2 불균일 질량 계산 및 보정

불균일 질량에 의해 발생하는 진동과 센서에 인가되는 힘의 관계는 식(7)과 같이 매개변수 a,b,c,d로 표현된다. 이 매개변수들은 충분히 정확하게 측정된 불균일 질량의 크기와 위상으로부터 계산되고, 이를 이용하여 보정질량의 크기와 위치를 식(8)과 같이 계산한다.[4]

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2m_w \angle 0^\circ & 0 \angle 0^\circ \\ 0 \angle 0^\circ & W m_w \angle 0^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{is} \angle \theta_{is} & m_{ic} \angle \theta_{ic} \\ m_{os} \angle \theta_{os} & m_{oc} \angle \theta_{oc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} m_s \angle \theta'_s \\ m_c \angle \theta'_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} m_i \angle \theta'_i \\ m_o \angle \theta'_o \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서, m_s 와 m_c 는 불균일 질량의 정적 불평형상태와 동적 불평형상태의 불균일 질량의 크기이고, θ'_s 와 θ'_c 는 위상을 나타낸다. 아래첨자 i와 o는 안쪽센서와 바깥쪽센서를 나타내고, 아래첨자 s, c는 정적 불평형상태와 동적 불평형상태를 나타낸다.

5. 실험 결과

불균일 질량의 위상과 진폭을 DFT를 이용하여 구하였다. 진동 신호에서 고조파성분을 제거하기 위하여 회전체의 회전수를 고려한 지역통과 필터를 설계했으며, 필터출력 신호의 주기를 정확히 알 수 있도록 엔코더의 펄스에 동기 된 256샘플링을 하였다.

표1은 평형상태 타이어의 45도 간격 위치와 90도 간격 위치에 불균일 질량을 부착하여 실험을 통해 보정 질량의 크기와 위치를 산출한 실험 결과이다. 정적 불평형과 동적 불평형이 동시에 존재하고 불균일 질량의 위치가 타이어의 안쪽과 바깥쪽이 서로 다를 경우에도 보정 질량을 5g이내의 오차로 계산할 수 있었다.

〈표 1〉 불균일 질량 보정실험

실험	면적	질량(g)	50	50	50	50	50	50	50	
		위차(도)	0	0	0	0	0	0	0	0
실험	바깥쪽	질량(g)	50	50	50	50	50	50	50	
		위차(도)	0	45	90	135	180	225	270	315
보정	안쪽	질량(g)	48.704	48.743	49.028	48.300	48.339	47.942	46.662	46.757
		위차(도)	178.838	180.922	179.673	180.384	180.415	180.824	180.538	178.735
	바깥쪽	질량(g)	50.672	48.361	47.254	45.650	46.420	46.600	50.383	51.533
		위차(도)	179.365	223.642	267.916	315.433	1.492	49.292	94.381	135.620
실험	안쪽	질량(g)	30	30	30	30	50	50	50	50
		위차(도)	0	0	0	0	0	0	0	0
	실험	바깥쪽	질량(g)	50	50	50	50	30	30	30
			위차(도)	0	90	180	270	0	90	180
보정	안쪽	질량(g)	28.324	28.862	28.393	27.727	47.395	47.914	47.437	47.148
		위차(도)	176.974	183.032	183.409	182.106	179.081	182.498	181.614	180.031
	바깥쪽	질량(g)	51.851	47.714	46.325	50.567	32.077	27.630	26.591	31.195
		위차(도)	179.306	268.721	1.801	93.767	178.130	-93.428	3.945	94.475

6. 결론

이 논문에서는 타이어의 질량 불균형을 보정하기 위한 보정질량의 크기와 위치를 계산하는 시스템과 알고리즘을 제안하였고, 개선된 하드웨어와 알고리즘을 적용, 소형 마이크로프로세서기반의 경제적인 타이어 보정 시스템을 구현 할 수 있었다.

〈참고 문헌〉

- [1] 박정훈, 유홍희 "회전구조물의 진동 해석 및 실험", 대한기계학회, 제21권 제2호, pp 272-280, 1997
- [2] 김봉석, 김중수, 이수훈 "영향계수를 이용한 고속 추속시스템의 자동밸런싱 기법에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제8권 제 8호, pp 48-53, 2001
- [3] 박선호, "디지털 신호처리의 기초와 DSP응용실무", 동역메카트로닉스연구소, pp 99-129, 2002
- [4] 이기성, 정대원 "자동차용 타이어의 중량불균일 모델링 및 측정에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 2477-2479, 2003