

## PLC의 PID 제어에 의한 자동차용 타이어 하중제어에 관한 연구

이기성, 정태원  
한국타이어, 충남대학교 전기공학과

### Development for Tire Load Control System using PLC PID function

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

**Abstract** - An apparatus and method for imposing a desired average radial force on tire by calculating the current average force between the tire and load wheel based on the average radial force and radial distance between the tire load wheel over the last previous complete revolution of the tire, the spring constant of the tire and the current radial distance between the tire and the load wheel

#### 1. 서 론

자동차용 타이어의 고유의 스프링 상수(kgf/mm)를 가지고 있으며 원주 방향으로 각각의 강성불균일성이 존재하고 있다. 제조공정에서 품질 평가를 위한 강성 불균일성을 측정하여 품질평가를 하는 설비가 운영중에 있으며 이 강성불균일 측정을 위해서는 실제 주행조건과 비슷한 하중을 타이어에 가한후 회전하여 각 부위의 강성을 측정, 불균일량을 측정하게 되는데 본 연구에서는 회전하는 불균일한 강성체에 설정하중에 오차없이 도달하게 하는 제어장치로서 PLC를 이용한 모터의 PID제어 및 제어과정에서 별도의 시간손실 없이 스프링상수를 PLC에 의해 산출할수 있는 방법을 구현하고자 하였다.

#### 2. 자동차용 타이어의 강성 불균일

자동차용 타이어는 고무, 합성 FIBER, STEEL CORD등과 같은 각기 다양한 재료를 겹쳐서 만들기 때문에 각종 불균형 성분이 존재하기 마련이다.

각 원주방향의 스프링들의 강성이 서로 균일하지 못하면 타이어가 지면과 접지시 힘의 변화가 발생하게 된다. 이때 힘의 변화는 매 회전 주기마다 반복되는 힘의 변화를 가져오게 되며 이는 자동차의 주행시 타이어에 의한 진동발생 원인이 되기도 한다.

강성의 변화의 발생은 각 방향별로 종방향, 횡방향, 진행방향의 강성 변화가 각각 발생한다. 이때의 강성의 변화의 크기를 FV(Force Variation)라 하며 이는 타이어의 1회전시 강성의 변화의 최대(Maximum)값과 최소(Minimum)값의 차이를 kgf(kg force) 단위로 표현한다.

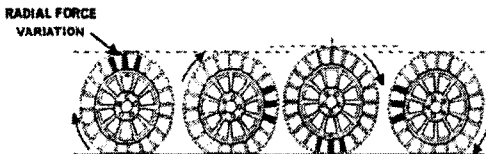


그림1. 타이어의 강성불균일성

이러한 타이어의 강성을 측정하기 위한 장치의 주요 구성은 타이어를 장착하여 정해진 압력(통상 30psi)으로 팽창하여 회전시켜주는 장치와 타이어와 적정하중으로 밀착하여 강성을 변화를 측정할수 있게 해주는 드럼으로 되어 있다. 타이어와 로드셀이 부착된 드럼(drum)을 밀착하여 회전시켰을 경우 타이어 1회전시 변화하는 강성의 변화량이 로드셀로 전달되어 A/D 컨버터를 통해 데이터로 취득한다. 타이어를 그림3.에서 보는 바와 같이 실제 자동차에 장착된 상태와 같이 적정압력의 공기압을 가하고 로드셀(Load-cell)이 장착된 원통형 드럼을 밀착 시키며 이때 밀착시키는 압력은 타이어가 자동차의 하중을 지지 하는데 필요한 적정 압력을 가하여 밀착 시킨후 타이어를 회전시킨다. 이때 타이어의 각 원주 방향의 강성의 변화가 드럼에 전달되며 드럼(Drum)에 장착된 로드셀은 이때의 강성 변화의 크기를 측정하는 것이 가능하다.

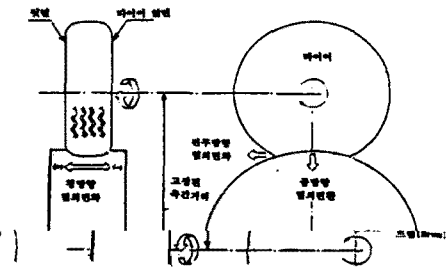


그림2. 강성측정기 주요 구성

여기에서 강성측정의 정밀도에 중요한 영향을 미치는 것이 앞에서 언급된 타이어와 드럼간에 정해진 하중을 가하는 것이다.

정해진 하중이란 장착된 자동차의 하중과 관련된 타이어의 설계상의 적정하중을 말하며 승용차용 타이어의 경우 차체 자중 및 승용인원을 네 개의 바퀴로 분산된 중량을 감안하여 산출된 값이다. 예를들어 400kgf 하중을 가진 타이어에 강성 테스트시 하중의 변화가 있다고 실제 주행조건시 승용인원의 변화를 생각하면 문제되지 않을 것 같지만 타이어의 강성은 접지면에 대해 종방향의 힘뿐만 아니라 횡방향의 힘도 발생하게 된다. 따라서 종방향의 힘이 일정치 않다면 횡방향의 힘은 하중에 따라 선형적으로 변화하기 때문에 큰 오차를 가지게 된다. 그러므로 하중제어의 정밀도가 요구되며 일반적으로 모터의 단순한 속도제어에 의해서는 1000kg의 하중제어시 표준편차( $\sigma$ ) ≤ 1.2kgf의 정밀도밖에는 이루지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 강성측정장치의 정밀도와도 밀접한 관계가 있는 하중제어의 정밀도 향상을 이루고자 하였다.

### 3. PLC의 PID 제어 기능

산업용 설비제어에 많이 사용되는 PLC(Programable Logic Controller)는 초기에는 단순 시퀀스제어를 주로 하였으나 거듭된 발전에 따라 다른 여타의 컨트롤러가 가진 기능을 모두 가지다시피 하였으며 또한 현장내에서의 신뢰성과 접근의 용이성등으로 인해 사용 범위(즉 사용기능상의 범위)가 넓어지고 있다. 본 연구에서는 일본 미쯔비시 일렉트로닉스사의 범용 PLC인 A2USH CPU를 이용하여 하중제어시 PID제어를 실행하도록 하였다.

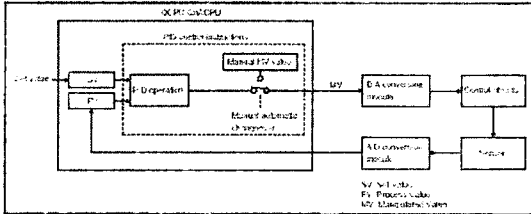


그림3. PLC의 Loop 제어 블록도

PID제어 즉 비례,적분,미분제어는 가장 고전적인 페루프제어이면서 가장 많이 쓰이는 제어방식중 하나다. 본 연구에 쓰인 PLC의 PID 제어 방식은 다음과 같다.

$$EV_n = PV_{nf} - SV$$

$$\Delta MV = Kp \left\{ (EV_n - EV_{n-1}) + \frac{T_s}{T_i} EV_n - \frac{T_d}{T_s} (2PV_{nf-1} - PV_{nf} - PV_{nf-2}) \right\}$$

$$MV_n = \sum \Delta MV$$

MV : 조작량 출력

EV<sub>n</sub> : 현재 샘플링시의 편차

EV<sub>n-1</sub> : 1주기 전의 편차

PV<sub>nf</sub> : 현재 현재 샘플링시의 측정치(필터링후)

PV<sub>nf-1</sub> : 1주기전의 측정치

PV<sub>nf-2</sub> : 1주기전의 측정치

MV<sub>n</sub> : 조작량

Kp : 비례정수

Ti : 적분정수

Td : 미분정수

Ts : 샘플링 주기

PV : 측정치

SV : 설정치

여기에서 PV<sub>nf</sub>는 입력 신호의 데이터를 식에 따라 설정된 필터계수에 의해 계산된 데이터를 의미한다. D제어에서 외란에 의한 수렴속도가 늦어지는 것을 방지하기 위해 다음과 같이 필터링을 하게 된다.

$$PV_{nf} = PV_n + \alpha (PV_{nf-1} - PV_n) \quad \alpha : \text{필터 계수}$$

위와 같이 PLC에서 구현할수 있는 페루프제어가 일반적으로 구현하는 제어기의 시스템과 동일함을 알수 있다 따라서 본 연구에서는 PLC의 기능을 이용하여 타이어의 강성 측정에 주요 인자인 하중제어의 정밀도 향상에 어느정도 기여할수 있는지 테스트를 하여, 적용시 어느 정도의 향상을 가져오는지 알아보고자 하였다.

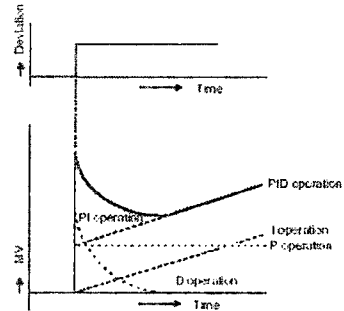


그림4. PLC의 PID 제어 특성

### 4. 하중제어 및 스프링상수 산출

타이어는 회전시 강성의 변화(Force Variation)을 가지고 있다. 이 변화의 크기는 일반 승용차용 타이어의 경우 4kgf ~ 15kgf의 변화를 갖게되며 이는 400kgf의 설정하중으로 제어를 할 때 회전을 시키지 않으면 10kgf의 FV를 갖는 타이어의 경우 395 또는 405kgf 위치에서 하중제어를 할 가능성이 높다. 따라서 타이어를 회전시켜 주기동안의 평균치에서 하중제어를 완료하여야 하는 문제점을 가지고 있다. 이는 일반적인 온도, 위치, 유량제어등과 차이가 있다는 것을 의미한다.

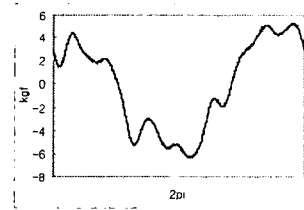


그림5. 회전 1주기동안의 Force Variation

따라서 주기동안의 평균 하중위치에 위치결정이 이루어져야 한다는 것이다. 타이어마다 스프링상수와 강성의 변화량(FV)이 각각 다르기 때문에 정해진 시퀀스에 의한 하중제어는 정밀도의 저하를 가져올 수밖에 없다.

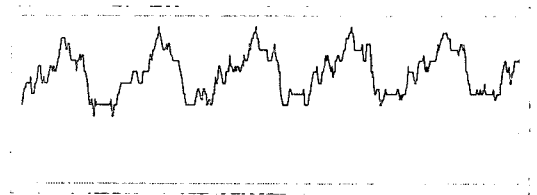


그림6. 매주기마다 포함되는 FV

목표치인 설정하중은 정해져 있지만 그림9와 같은 FV 신호가 매주기마다 발생하기 때문에 하중제어를 위한 모터의 위치제어가 정지되어 있더라도 하중변화량이 계속 발생하고 있고 이럴 경우 일정위치에 하중제어를 할수 없는 상태에 빠지고 만다. 먼저 타이어 마다의 각각의 다른값을 가지고 있는 스프링 상수를 계산하는 방식을 아래 식과 같이 하였다. 여기서 샘플링 시작점은 하중을 가하다 설정하중의 2/3를

넘는 지점부터 3주기간의 하중변화량과 드림의 위치 변화량을 측정하여 계산할수 있었다.

$$k = \frac{\sum_{n=0}^{2N} |f(n) - f(n-1)|}{\sum_{n=0}^{2N} |d(n) - d(n-1)|}$$

$k$  : 스프링상수 (kg/mm)

$d(n)$  : 위치(mm),  $f(n)$  : 하중(kgf)

즉 하중제어를 하는도중에 변화하는 두 개의 변수인 하중과 위치의 변화를 측정함으로써 스프링상수 산출을 위한 별도의 시퀀스 작업을 없앨수 있었다.

첫 번째로 하중제어를 위해 PLC를 이용한 일반적인 펌프 제어방식중 하나인 다음의 루프제어를 실행 하여 응답특성을 관찰하여 보았다.

$$\text{제어 출력 } y = A X_1 + B X_2 + C$$

$A, B, C$  : 상수

$X_1, X_2$  : 아나로그 입력채널 1과 2

이 방법은 간단히 구현이 가능하고 목표치에 도달하는 범위에 따라 상수 A,B,C를 가감하여 최적의 수치를 적용할 경우 비교적 단순하지만 빠른 응답을 얻을수 있는 시스템을 구현할수도 있다.

$X_1$ 을 매 샘플링마다 변화하는 하중의 크기이고  $X_2$ 는 한주기 동안의 샘플링 평균값을 이용하였다. PLC에서 아나로그 컨버터의 설정기능상의 시간평균 또는 횡수 평균설정이 가능한데 여기서는 회전주기가 일정하므로 시간평균(1sec)로 하였고 하중이 설정치에 근접할 때 범위를 지정 ( $\pm 2\text{kgf}$ ,  $\pm 5\text{kgf}$ )의 구간에서 제어 출력의 응답성을 더디게 할 목적으로 상수값을 가변하며 하중제어를 하였다.

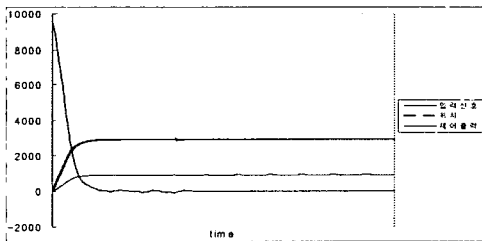


그림7. 하중제어 실행시 파형(PID)

두 번째 방법은 본 연구에서 구현하고자 하였던 PLC의 PID제어기능에 의한 하중제어를 실험하였다. 앞에서 설명된바와 같이 타이어의 하중제어시 타이어마다의 FV의 크기와 스프링 상수가 다르므로 PID제어를 실행하였을 경우 목표치에 신속하게 근접하나 FV의 성분에 따라 하중 입력과 제어 출력은 지속적으로 오실레이션을 하게 된다. 즉 목표치에 근접하여 하중제어용 서보모터가 정지하였다더라도 FV성분에 의한 진폭의 변화를 하중변화로 받아들여 제어기는 제어출력을 지속적으로 발생시키기 때문이다. 따라서 설정된 하중과 FV의 주기 평균치와 일치시켜 강제적으로 위치결정을 해야할 필요가 있게된다. 여기에서는 PID제어 구간중 근접구간에서의 하중의 평균치  $F_{AVG}$ 와 제어 위치의 평균값  $D_{AVG}$ 를 구할수 있으므로 설정치  $SV$ 에 근접시키기 위해서

$$\text{목표위치} = \{(SV - F_{AVG}) \times k\} - SV \times k + D_{AVG}$$

를 이용하여 오실레이션에서 탈출하여 강제 위치결정을 하였다.

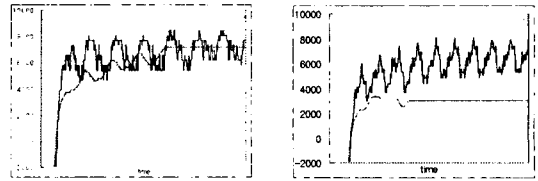


그림8. 일반루프 제어와 PID제어의 응답특성

위의 그림 (a)에서 기존에 이용하던 루프제어의 응답특성을 나타내었고 (b)에서는 PLC의 PID기능을 적용한 응답특성을 보였다. 위에서 알수 있듯이 PID제어의 수렴 속도가 약 2배정도 빠른 약 3.2초에서 수렴함을 알수 있었다.

LOAD [Kgf]	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th	AVG	RANGE
1	447.7	448.0	448.2	447.9	448.2	448.4	448.2	448.2	448.1	448.4	448.1	0.7
2	447.9	448.2	448.0	448.3	448.2	448.2	448.0	448.3	448.3	448.5	448.2	0.6
3	448.5	448.6	447.7	448.0	447.8	448.9	448.6	448.2	448.6	448.3	448.3	1.2
4	448.2	448.4	448.1	448.4	448.2	448.3	448.5	448.6	448.4	448.2	448.3	0.5
5	448.5	448.1	448.4	448.4	448.2	448.3	448.3	448.2	448.1	448.3	448.3	0.4
6	449.0	448.6	448.2	448.5	448.6	449.1	448.7	448.0	448.5	448.5	448.6	0.9
7	448.1	448.0	448.3	448.1	448.3	448.2	448.2	448.1	448.3	448.2	448.2	0.3
8	447.9	448.1	448.2	448.0	448.2	448.2	448.2	448.0	448.2	448.1	448.1	0.3
9	448.7	448.4	448.1	448.0	448.0	448.7	449.0	449.1	448.0	448.6	448.7	1.8
10	448.1	447.8	448.3	447.9	448.2	448.3	448.4	448.3	448.0	447.8	448.0	0.5
AVG	448.3	448.2	448.1	448.3	448.3	448.3	448.4	448.4	448.3	448.3		

OneWay-Layout (원래배치 표준편차) 0.29  
TwoWay-Layout (이원배치 표준편차) 0.23

표1. 하중제어의 반복테스트시 표준편차

표1에서는 위의 방법에 의해 어느정도의 정밀도를 가지는지 지표로 볼수 있는 표준편차 산출을 한 것이다. 통상적인 수치 0.60kgf의 절반이하인  $\sigma = 0.23\text{kgf}$ 의 우수한 정도를 나타내고 있다.

#### 4. 결론

본연구를 통하여 PLC의 기능을 활용하여 제어특성이 우수한 시스템 구현이 가능함을 알수 있었으며 이는 산업현장의 제조설비에 많이 사용되는 접근성과 신뢰성이 있는 콘트롤러로서의 이점과 실험을 통해서 본 강성균일성 측정기의 Cycle Time단축을 할수 있었다. 또한 하중제어시 부가적으로 계산할수 있었던 스프링상수 산출은 단순하면서도 비교적 정확한 수치로서 활용가치가 높다고 할수 있다.

#### (참고 문헌)

- [1] Socio-Tech : "ACPU Programming(PID)", Mitsubishi Electronics, 1999
- [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