

# 스마트팩토리의 자동 정밀 제어를 위한 리니어 모션 가이드에 장착 가능한 변위 센서 개발

이숙윤  
고려대학교 컴퓨터학과  
e-mail:uni7@korea.ac.kr

## Development of displacement sensor of linear motion guide for automated precise control of smart factory

Suk-Yun Lee  
Dept. of Computer Science and Engineering, Korea University

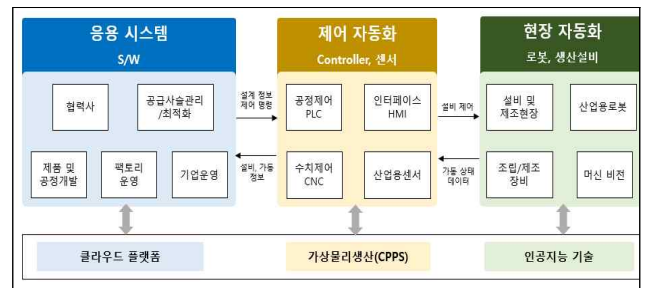
### 요약

본 논문에서는 다양한 기술이 융합되어 서비스가 구성되어 제조 혁신을 주도하는 방안의 스마트 팩토리를 실현하기 위한 자동화 부품 중에 하나인 리니어 모션 가이드(LM 가이드)에 필요한 센싱 시스템을 제안하였다. 공장 환경의 통합적 개선 구축에 필요한 디지털화, 지능화, 통합을 위한 주요 부품인 LM가이드에 공장 자동화 장비에서 빠른 응답 속도로 고정밀, 고정도 제어가 가능하고 디지털 처리와 저비용의 DC 모터와 연동이 가능한 변위 센싱 시스템을 개발하였다. 기존의 광학식이나 홀센서의 변위 센싱 기술의 한계를 극복할 수 있도록 와전류(Eddy Current) 기법을 이용하여 LC 공진보드와 전도체를 제작하여 디지털 펄스 형태의 공진 주파수가 출력될 수 있도록 했다. 와전류 센싱부에서 출력되는 미세 인덕턴스 값을 측정할 수 있도록 디지털 신호처리 구조와 알고리즘을 연구하고 FPGA가 구성된 HW 시스템을 제작하여 고속으로 실시간 측정이 가능하도록 구현하였다. 본 논문에서 구현한 HW 와전류 센싱 시스템을 이용하여 LM 가이드를 직선 이동시키며 측정하는 실험을 진행했다. 측정된 변위값은 FPGA, 보드와 PC가 USB로 연결됨으로 실시간으로 PC에 출력되어 UI를 통하여 확인이 가능하도록 구현하였다. PC에서 실측 데이터와 그래프로 실시간 검증이 가능하다. 개발된 시스템은 공장 자동화 장비에서 사용되는 LM 가이드의 직선 운동시 변위 값의 분해능과 응답속도 면에서 우수함을 확인했다. 개발된 시스템은 향후 소형화 하면 다양한 응용 분야에도 적용이 가능하다.

### 1. 서론

스마트팩토리 기술은 기존의 제조 기술에 IT 기술을 접목하여 센서, 정밀 제어, 네트워크, 데이터 수집 및 분석 등 다양한 기술이 융합되어 서비스가 구성되어 제조업 혁신을 주도하고 있다. 제조 현장에서 생산과 관련된 환경 정보를 감지하고 감지된 정보에 의한 판단하고, 판단된 결과가 생산 현장에 반영되어 제조 현장의 자동화가 실행되는 기능을 수행하고 있다.[2] 제품의 라이프 사이클이 단축되고 맞춤형 대량 생산으로 변화하면서 제조 현장의 공정이 유기적으로 연계되면서 자동화와 최적화가 구현된 스마트팩토리를 실현하기 위한 연구와 개발들이 진행되고 있다.

스마트팩토리는 [그림 1]과 같이 크게 3개의 시스템 구조로 나뉘어서 구축이 되며, 단순 공정 개선이 아닌 모든 생산활동에 필요한 요소를 고려하여 공장 환경의 통합적 개선을 도모하는 것이다. 구축을 위하여 필요한 조건은 디지털화, 지능화, 통합, 엔지니어링 지식의 창출, 스마트 시스템과의 연결이다.



[그림 1] 스마트팩토리의 구조[1]

본 논문에서는 자동화 시스템의 주요 부품인 리니어 모션 가이드(Linear Motion Guide : LM 가이드)에 장착하여 DC 모터나 BLDC 모터와 연동할 수 있는 센서를 개발함으로써 자동으로 정밀제어가 가능하게 하는 것이다. LM 가이드를 사용한 공장 자동화 장비에서 빠른 응답 속도로 고정밀, 고정도 제어가 가능하고 디지털 처리와 모터와 연동이 가능한 변위 센싱 시스템을 개발하고 구현하였다. 본 연구에서 개발된 센싱 시스템은 추후 소형화 IC로 제작이 되면 LM 가이드에 장

착이 가능함에 따라 스마트 LM 가이드 시스템이 가능하다.

## 2. 리니어 모션과 변위 센서

### 2.1 LM 가이드(Linear Motion Guide)

LM 가이드 시스템은 전동면 사이에 볼 혹은 롤러 등의 전동체를 삽입시켜 직선구름 운동을 하는 시스템이다. 볼 또는 롤러의 전동체가 블록의 내부를 부드럽게 순환하는 구조로 블록이 레일의 궤도면을 타고 무한 직선운동을 하는 특징이 있다.[3] LM 가이드는 로봇, 반도체 장비, 디스플레이 제조 장비, 공장기기, 정밀측정기기, 자동화설비 등의 직선운동부의 핵심부품으로 고정밀/고정도 제어를 요구한다.[4]

[표 1] LM가이드와 적용 사례

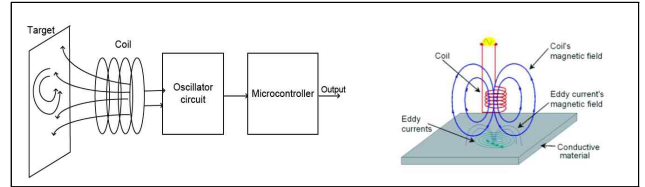


### 2.2 변위 센싱 시스템

변위 센서는 위치 센서의 한 종류로, 일정 위치의 기준점에서 다른 위치로 이동했을 때 위치의 변화된 양을 측정하는 센서이다. 변위는 직선변위와 회전변위의 측정에 따라 다양한 기술이 사용되는데, 본 논문에서는 일반적인 LM 가이드가 직선 운동을 함에 따라 이에 적합한 기술을 이용한다. 직선 운동의 변위 측정 방법에는 주로 광학식 센서와 자기식 홀센서가 사용된다. 광학식 센서는 높은 정밀도와 넓은 측정 범위를 제공하지만, 정교한 구조가 필요로 한다. 또한 높은 정밀도를 요구할수록 크기가 커지고 가격이 비싸지는 단점이 있고 먼지나 습기에 취약하다. 반면 홀센서는 먼지와 습기에는 강인하지만 고정밀이 어렵고 홀센서 구동 회로가 복잡함에 따라 저전력이 어려워지는 단점이 있다.

본 논문에서는 위의 두 센서의 기술적 한계를 극복한 방법으로 와전류(Eddy Current) 변위 센싱 기술을 이용하였다. 와전류 기술은 [그림 2]와 같이 센서 코일에 전류를 공급하면 수직 방향으로 교류 자계가 발생하고 이에 반발하는 자기장

이 생성된다. 여기에 인접한 도체가 접근하면 와전류가 생성되어 코일에 흐르는 전류에 영향을 주게 된다.[5][6] 이 흐르는 전류의 크기와 위상을 이용하여 코일과 도체를 이동시키며 변위 거리를 측정하는 방식이다. 와전류 기술은 소형화 하여 LM 가이드 내에 직접 장착하게 되면 DC 모터를 사용하는 정밀측정 및 제조장비의 직선 운동시 정확한 위치 정보를 획득할 수 있는 것이 특징이다.

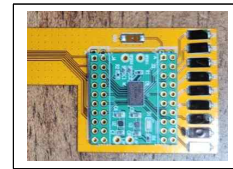


[그림 2] 와전류 센싱 기법

## 3. 센싱 시스템 HW 구현

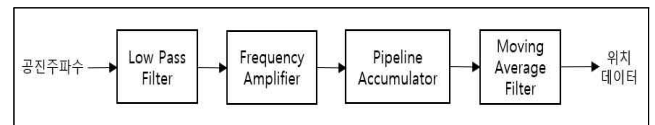
### 3.1 디지털 신호처리

본 연구에서는 코일을 이용하여 [그림 3] 와 같이 LC 공진 보드를 개발하였다. LC 공진기에서 발생한 값은 아날로그가 아닌 디지털 펄스 형태의 공진 주파수이다. 이 값은 디지털 신호처리가 가능함에 따라 고분해능을 가지며 성능을 높일 수 있도록 [그림 4]의 신호처리 구조를 개발하여 구현하였다.



[그림 3] LC 공진보드

먼저 공진주파수의 jitter를 개선하기 위하여 Low Pass Filter 및 Moving Average Filter를 적용하였다. 이후 매우 미세한 인덕턴스 변화량을 시간 지연 없이 증폭하기 위해 Pipeline 구조를 사용하여 디지털 적분기의 누적 횟수 증가를 통한 미세 변화량 검출이 가능한 구조를 개발하여 높은 분해능이 가능하다.

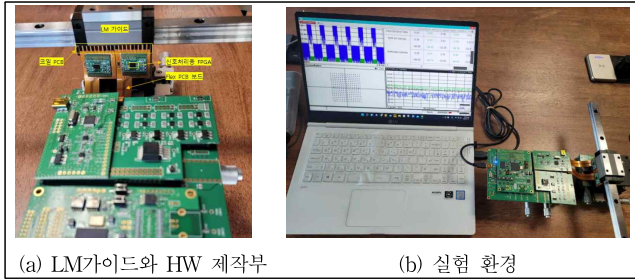


[그림 4] 신호처리 구조

### 3.2 HW 시스템

본 논문에서는 [그림 4]의 구조로 와전류 센싱 기술과 디지털 신호처리 기술을 적용할 수 있도록 리니어 스테이지를 이

용하여 HW 시스템을 제작하였다.[그림 5]의 (a)와 같이 상업용 LM 가이드와 LC 공진보드, FPGA 보드로 다른 크기로 실험장비를 제작하였다. 각각의 보드와 LM 가이드는 리니어 스테이지에서 분리가 가능하며, LM 가이드는 크기 별로 교체 가능하며 성능 테스트를 진행할 수 있도록 개발하였다.



[그림 5] 제작된 와전류 HW 시스템과 실험 환경

또한 디지털 신호처리 HW부는 FPGA를 이용하여 [그림 4]의 알고리즘과 구조로 구현하여 FPGA 보드에 타게팅 한 후 실험을 진행했다. LM 가이드를 직선으로 이동시키면, 전도체와 코일 간의 gap이 늘어나고, 전도체에 형성된 와전류로 인해 자기장이 증가하면서 코일의 자기장을 간섭함으로 인덕턴스 값에 영향을 준다. 이로 인해 공진 주파수는 감소되는데, 공진 주파수 변화가 매우 작으므로 FPGA 시스템에서 디지털 증폭과 필터링 후 누적값을 통하여 거리값을 계산한다. 계산된 변위값은 PC와 USB 연결을 통하여 출력으로 확인이 가능하다. 실시간으로 변위값의 변화를 데이터와 그래프로 볼 수 있도록 UI를 구현함으로 확인할 수 있다.

#### 4. 결과 및 계획

[그림 5]에서 제작한 와전류 시스템에서 LM 가이드를 수직축으로 직선 이동시키며 실시간으로 성능평가를 진행했고, 그 결과는 다음과 같다. 정밀도를 높이기 위하여 차후 온도 보상 알고리즘을 추가하면 실측 장비 측정 환경에서 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 예측된다.

[표 2] 실험 결과

분해능	0.005% 변화량 감지(5um/1000um)
응답속도	2ms 이내

본 논문에서는 스마트팩토리의 제어 자동화를 위한 핵심 구성 부품인 LM 가이드에 활용이 가능하도록 와전류 변위 센싱 시스템을 제안하고 구현하였다. 제안된 와전류 변위 시스템은 장비에서 저비용으로 사용이 손쉬운 DC 모터와 연동이 가능하면서도 정밀도가 높은 장점이 있다. 개발된 시스템은 향후 신호처리 알고리즘 성능을 향상시키고 최적화를 통

하여 신뢰성을 높일 예정이다. 향후 LM 가이드에 장착이 가능하도록 IC 개발을 진행하여 센싱 일체화된 스마트 LM 가이드를 구현할 계획이다. 구현된 시스템은 본 논문의 스마트 팩토리 외에도 소형 스마트 전자 부품이나 자동차, 서비스 로봇의 액츄에이터 등 다양한 제품에서 활용이 가능할 것으로 예상된다.

#### Acknowledgement

\* 이 논문은 한국연구재단의 지원으로 수행되었음.  
(No. NRF-2020R1I1A1A01064150)

#### 참고문헌

- [1] <https://www.smart-factory.kr/smartFactoryIntro>, 스마트제조혁신단 사업 그림 재구성
- [2] 심위, “스마트 팩토리 시장의 트렌드 변화와 시사점”, ASTI MARKET INSIGHT 2021- 008
- [3] <http://www.wonst.co.kr>
- [4] <http://samichk.co.kr>
- [5] Donald J, Hangemaier, 1990, "Fundamentals of Eddy Current Testing", ASNT, pp. 43.
- [6] P. Ragunathan\* and E. Logashanmugam, Design and Fabrication of Low Cost Eddy Current Sensor for Position Control Applications. Indian Journal of Science and Technology, Vol 9(42), November 2016.