

위상차 검지기법과 주파수 변화 검지기법을 결합한 새로운 루프 검지기 회로

A New Loop-Detector Circuit Combining Frequency-shift Method with Phase-shift Method

고 재 인*, 김 성 옥*, 최 영 규**, 조 동 일*

(*서울대학교 전기공학부, **장우정보통신(주))

목 차

1. 서론	4. 실험 결과
2. 루프 검지기의 원리	5. 결론
3. 개발된 루프 검지기 회로	

1. 서론

'90년대에 들어서면서 자동차의 급속한 대중화에 따라 심화된 교통난을 해결하기 위해서는 도로 확장 등의 교통기반시설에 대한 투자뿐만 아니라, 더불어 교통 체계를 효율적으로 운영하기 위한 지능형 교통 시스템(ITS : Intelligent Transportation Systems)에 관한 연구가 병행되어야 한다. 교통량 검지기는 지능형 교통 시스템의 구축을 위한 가장 기본적인 요소기술로서, 도로에 설치되어 도로를 주행하는 차량정보와 도로 상황 등의 교통정보를 획득하는 장치이다. 교통량 검지기에서 생성되는 각종 교통정보가 효과적인 교통관리 시스템의 구축에 필수적임을 감안할 때, 교통량 검지기는 교통관리 시스템의 핵심 요소라고 할 수 있다.

여러 종류의 검지기 중 현재 가장 널리 사용되는 것은 루프 검지기이다. 루프 검지기는 일반적으로 센서의 가격이 다른 검지기에 비하여 저렴하므로 다량 설치가 가능하며 얻고자 하는 교통 정보에 따라 다양한 센서의 조합이 가능하다. 도로를 주행하는 차량의 계수 정보만을 얻고자 할 때에는 차선당 하나의 루프 센서를 사용하고, 계수 정보뿐만 아니라 개별차량의 속도, 길이 등의 정보를 획득하고자 하면 차선당

두 개 이상의 루프 센서를 설치하여야 한다 [1,2,3,4]. 또한 루프 검지기는 오랫동안 사용된 기술로서 다른 검지기 기술에 비하여 충분히 현장 검증된 기술이라는 장점도 가지고 있다 [5]. 그러나 위상차 검지방식을 이용한 아날로그 방식의 루프 검지기는 차량이 일정 속도 이상으로 주행하는 경우에 맞추어 개발되었으므로 현재 폭발적인 차량증가에 따른 도심 교통 혼잡 상황에 대해서는 적지 않은 문제점을 가지게 되었다. 출·퇴근 시간이나 차량의 증가로 인한 서행시에는 주행하는 차량의 간격이 줄어들거나 차량이 센서 검지영역 위에서 정지하는 경우가 빈번하게 발생하는데, 이러한 경우에 기존 위상차 검지방식의 루프 검지기는 하나의 차량을 여러 대로 인식하거나, 각 차량의 속도, 길이 등의 정보를 정확히 산출해 내지 못하는 문제점이 발생할 수 있다. 이에 반해 주파수의 변화를 검지하는 디지털 방식의 루프 검지기는 느린 반응시간(response time) 때문에 고속으로 주행하는 차량의 검지보다는 주로 차량이 루프 센서 위에 오랫동안 존재하는 상황이 많이 발생하는 곳에서 차량의 존재 또는 통과 여부 확인 등에 주로 사용되어 왔다. 본 논문에서는 루프 검지기를 도로에 매설하여 교통량을 산출시 고속 주행뿐 아니라 저속 주행, 차량 정체시에

도 효과적인 교통정보 산출이 가능한 새로운 루프 검지기용 신호처리 회로의 개발을 연구의 목적으로 한다. 이를 위하여 기존의 아날로그 위상차 검지방식 루프 검지기의 동작 원리와 이에 따른 문제점을 분석하고, 이를 해결하기 위하여 디지털 방식을 혼합한 루프 검지회로를 제안한다. 새로운 루프 검지회로를 제작한 후 기존 루프 검지기의 문제점을 효과적으로 해결할 수 있는가를 실제 실험을 통하여 확인한 후, 나아가 새로운 검지회로가 기존 루프 검지기의 장점을 모두 살리고 있는지 검토한다.

2. 루프 검지기의 원리

루프 검지기는 도로에 매설되는 루프 코일과 차량의 통과시 루프 센서의 인덕턴스의 변화를 검지하여 차량의 존재유무를 출력하는 회로 등으로 구성된다. 도로에 매설된 루프 코일에 전류를 공급해주면 루프 자체의 인덕턴스와 회로에서 정해진 커패시터 값에 의해 결정된 공진 주파수 성분의 교류 전류가 루프 코일에 흐르게 된다. 이 전류에 의해 루프 코일 내부에는 시변(time-varying) 유도 자기장이 형성되고, 이러한 자기장의 변화에 의해 차량이 루프를 통과하거나 루프 위에서 정지하게 되면, 차량에는 와전류(eddy current)가 유도되어 루프 센서에 저장된 전기 에너지의 손실을 야기시킨다. 그리고 이러한 에너지의 손실은 결국 루프 인덕턴스의 감소로 이어지며, 이는 다시 루프 코일의 공진주파수를 증가 시켜 루프 코일에 흐르는 전류의 주파수 및 위상의 변화를 가져온다 [2]. 따라서 루프 센서에 흐르는 전류의 주파수 또는 위상을 측정하면 차량의 진입시간, 센서 검지영역 내에 존재하는 시간 등을 얻을 수 있고, 이를 바탕으로 개별 차량의 속도, 길이, 통과 대수 등의 정보를 생성하게 된다 [6,7].

일반적으로 루프 검지기의 검지방식은 차량이 센서에 존재하지 않을 때의 센서에서 출력되는 전기신호 파형과 차량이 센서에 존재시의 전기신호 파형의 위상차를 비교하여 차량의 존재 또는 통과 유무를 검출하는 위상차 검지방식(phase-shift method)과 루프 센서에서 출력되는 전기신호의 주파수의 변화를 이용하여 차

량의 존재를 검출하는 주파수 변화 검지 방식(frequency-shift method)으로 나뉜다.

위상차 검지 방식은 위상의 변화에 비례하여 전압이 출력되는 아날로그 방식으로, 현재 도로를 주행하는 차량의 정보 획득을 위하여 널리 사용되고 있다. 이 방식은 위상차의 변화를 즉시 인식하여 출력 신호를 발생하므로 차량의 진입시 반응 시간이 빠르다는 장점이 있으나 [2], 출·퇴근 시간 또는 차량 정체시에 저속으로 주행하는 차량이나 센서의 검지영역 내에서 가·감속을 반복하는 차량에 대해서는 한 대의 차량을 여러 대로 계수하는 등의 문제점을 가지고 있다. 이는 위상차 검지 회로의 전류 구동을 위하여 주로 위상 동기 루프(phase locked loop)를 사용하기 때문이다. 즉 차량이 검지영역에 오래 존재하게 되면, 일정 시간 후 변화된 위상은 위상 동기 루프에 의해 동기화가 이루어져 차량이 루프 센서를 벗어난 것과 같이 인식되는 결과를 가져온다. 이러한 현상은 저속 또는 차량 정체시에 빈번하게 발생할 수 있으며, 실제 차량이 센서 위에 존재하는 시간보다 짧은 시간 동안만 검지 신호를 출력하게 된다. 또한 정체시에는 차량이 센서 위에서 가·감속을 반복하여 주행하는 상황이 자주 발생하게 되는데 이러한 경우에는 한 대의 차량을 여러 대로 인식하게 되며 이로 인해 다음 차량의 정보에도 오차를 발생시킬 수 있다 [8,9].

이에 반하여 주파수 변화 검지 방식은 디지털 방식을 사용하며, 차량이 센서에 존재하지 않는 경우에 루프 센서에 흐르는 주파수의 값을 기준으로 하여 루프 센서의 전류 주파수가 기준 주파수보다 일정한 기준 이상으로 변화하면 차량의 검지 신호를 출력하게 된다. 이 방식은 차량 진입시 주파수의 변화가 일정한 기준 이상이 될 때까지 검지 출력이 생성되지 않고, 검지기의 민감도(sensitivity)를 높이기 위해서는 주파수를 카운트하는 주기가 길어져야 하므로 차량 진입시 반응 시간이 느리다는 단점이 있는 반면, 센서 위에 차량이 오랫동안 존재하거나 센서 위에서 가·감속을 반복하는 경우에도 정확한 검지 신호를 생성하는 장점이 있다. 따라서 위상차 검지방식과 주파수 변화 검지방식의 어느 한 가지만으로는 저속 및 고속 주행의 모든 상황에 적용될 수 없으며 현재 도심지

및 고속도로와 같이 저속 및 고속의 다양한 교통상황이 빈번하게 반복되는 곳에 루프 검지기를 적용하기 위해서는 두 가지 방식의 장점을 모두 갖는 새로운 시스템이 필요하다.

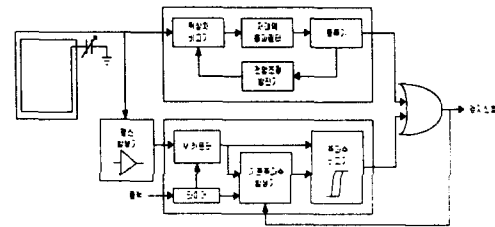
3. 개발된 루프 검지기 회로

이러한 필요에 따라 위상차 검지 방식과 주파수 변화 검지 방식을 결합하여 두 가지 방식의 장점을 모두 갖는 하나의 시스템을 구현하였다. 개발된 시스템은 고속 및 저속의 다양한 교통상황에도 모두 적용이 가능하다. 기존의 아날로그 방식으로 구현된 위상차 검지 방식 회로의 저속 주행에 대한 검지 성능 저하라는 문제점을 해결하기 위해 새로운 주파수 변화 검지 회로를 개발하였다. 주파수 변화 검지 회로는 디지털 펄스 발생기, M-기법(M-method)을 이용한 주파수 카운터, 타이머, 기준 주파수 생성부 및 주파수 비교기로 구성되었으며, 위상차 검지 회로는 전류 구동부 및 위상 잠금 회로 등으로 구성된다. 개발된 루프 검지기 회로의 구성도는 그림 1과 같다.

M-기법은 모터 제어에서 모터의 속도를 측정하는데 주로 사용되는 방법으로, 고정된 시간 구간동안 발생한 엔코더 펄스를 계수한 후 이를 디지털 값으로 변환하여 출력하는 방식이다 [10,11]. 엔코더의 펄스의 수는 모터의 회전 각도에 비례하여 발생되며, M-기법은 고정된 시간 구간의 엔코더 펄스를 계수 함으로써 모터의 속도를 측정할 수 있다.

루프 센서에 인가되는 교류 전류는 펄스 발생기를 통해 디지털 펄스로 변환되고, M-카운터는 이를 계수하여 루프 센서에 흐르는 전류의 주파수를 측정할 수 있다. M-카운터의 동작 시 주파수를 카운트하는 단위 시간은 타이머를 통하여 제공된다. M-카운터에서는 현재 루프 센서의 공진 주파수를 생성하게 되고, 이렇게 생성된 M-카운터의 출력과 함께 차량의 센서 진입 신호를 앞먹임 방식으로 사용하여 기준 주파수를 생성하게 된다. 기준 주파수는 차량이 일단 센서에 진입하고 나면 하나의 값으로 고정되어 차량의 존재여부를 비교하는 기준으로 사용되며, 차량이 센서를 완전히 빠져나간 후

다시 새로운 값으로 조정된다. 차량이 센서에 진입하게 되면 루프의 공진 주파수는 기준 주파수보다 증가하게 되므로 주파수 비교기에서는 두 값을 비교하여 차량 검지 신호를 출력하게 된다. 이 때 출력 신호의 떨림 현상(jittering)을 방지하기 위하여 주파수 비교기는 히스테리시스 방식으로 구현되었다. 주파수 변화 검지 회로에 사용되는 각종 디지털 소자들은 하나의 FPGA(Field Programmable Gate Array)로 구현되었다. 이는 회로의 크기를 줄이고, 신호처리 보드의 가격의 저렴화를 가져오는 장점이 있어 하나의 보드에 두 가지 방식을 결합한 회로의 구현을 가능하게 하여준다.

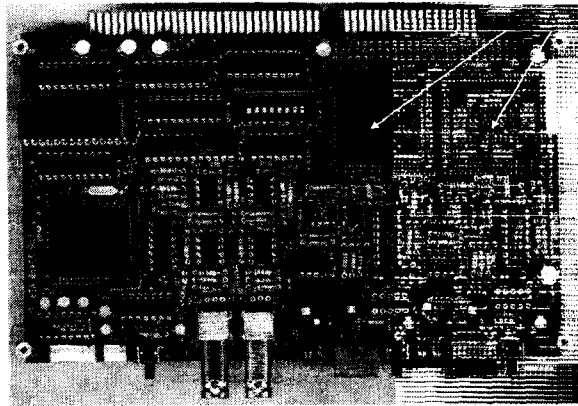


<그림 1> 개발된 검지기 회로의 구성도

개발된 검지기 회로의 주파수 변화 검지부중 M-카운터의 동작원리를 좀더 자세히 살펴보면 다음과 같다. 루프 센서에 인가되는 공진 주파수는 루프 코일의 인덕턴스와 회로에서 정해주는 커패시터에 의해 적정한 값으로 정해진다. 일반적으로 루프 센서의 공진 주파수 범위는 50kHz에서 120kHz이다. 루프 센서에 인가되는 아날로그 신호는 펄스 발생기와 M-카운터를 이용하여 매 5msec마다 주파수 값이 계산된다. 주파수를 생성하는 기준 시간은 검지기의 응답 시간과 민감도에 영향을 줄 수 있으므로 두 가지를 모두 고려하여 결정되어야 한다. 즉 기준 시간이 길면 검지기의 민감도가 높아져 작은 주파수 변화에도 차량의 검지가 가능한 장점이 있는 반면, 응답 시간이 길어져 데이터의 정확도가 낮아질 수 있다. 반대로 기준 시간이 짧아질 경우에도 각각의 장단점이 존재하므로 M-카운터에 제공되는 기준 시간을 적절히 선택하여야 한다. 계산된 주파수의 값이 기준 주파수의 값보다 일정 기준 이상으로 증가하게 되면 검지 신호가 트리거 되고, 차량이 루프센서의 반응영역을 완전히 벗어나게 되면 다음 차량의

진입을 기다리는 동안 기준 주파수가 재생성된다.

개발된 주파수 변화 방식의 디지털 검지기 회로는 아날로그 방식의 위상차 검지부와 결합되어, 두 가지 검지 방식의 출력 중 하나라도 트리거되면 유효한 정보로 인식하여, 각종 차량 정보 생성의 기본 자료로 제공한다. 따라서 개발된 신호처리 보드는 고속 및 저속의 다양한 교통상황에 적용이 가능하다. 두 가지 방식을 결합하여 개발된 신호처리 보드는 그림 2와 같다. 그림 2의 보드에는 루프 센서만이 아니라 피에조 센서 신호 처리도 가능하게 하여 루프 센서와 피에조 센서를 동시에 이용하는 많은 검지기 시스템에 응용이 가능하게 하였다.



<그림 2> 개발된 신호처리 보드

4. 실험 결과

개발된 회로의 성능 검증을 위해 실제 차량과 루프 센서를 이용하여 실험을 수행하였다. 국도 변에 설치되어 있는 루프 센서를 이용하였는데, 실험 현장의 사진은 그림 3과 같다.

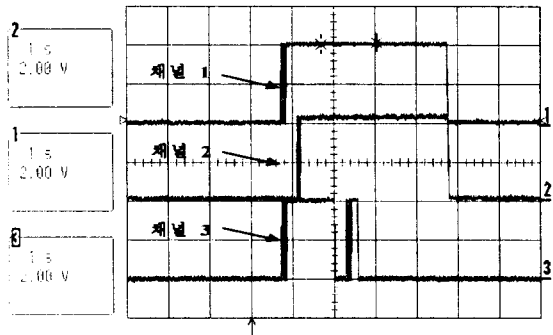


<그림 3> 실험 현장

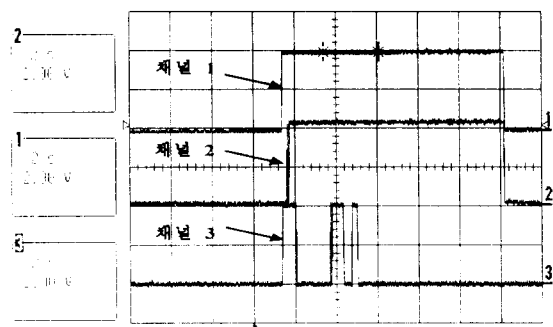
고속 및 저속의 다양한 교통상황에 따른 성능을 측정하기 위하여 루프 센서가 설치된 도

로를 다양한 속도로 통과하는 차량에 대하여 검지 성능 측정 실험을 수행하였다. 특히 저속 주행 차량에 대한 검지 성능 검증을 위해서 차량 정체시 가·감속을 반복하는 경우와 서행하는 경우 차량의 검지신호를 측정하였고, 정체시 차량의 차간 거리가 좁은 상태로 주행하는 상황에서도 차량 검지 성능을 측정하였다. 또한 실제 도로상의 다양한 속도 및 주행 행태의 차량에 대해서 계수 정확도 측정 실험을 수행하였다.

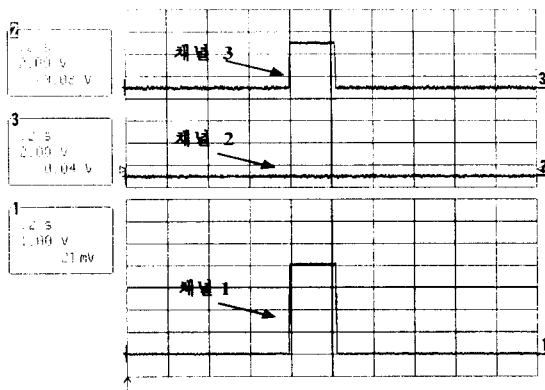
그림 4는 고속 및 저속을 주행시 위상차 검지방식과 주파수 변화 검지방식에 의한 차량 검지신호를 나타낸다. 채널 1은 위상차 검지방식에 의한 검지신호이고, 채널 2는 주파수 변화 검지방식에 의한 신호이며, 채널 3은 두 가지 방식을 혼합한 개발된 검지회로의 최종 검지신호이다. 그림 4(a)는 저속으로 루프 센서 위를 주행하였을 때의 결과를 나타내고, 그림 4(b)는 차량이 가·감속을 반복하는 교통 상황인 경우의 결과이다. 그림 4(a), 4(b)에서 주파수 변화 검지 방식은 모두 하나의 차량을 하나의 차량으로 올바르게 인식한 반면, 위상차 검지 방식은 하나의 차량을 두 대 혹은 세 대로 인식하는 것을 볼 수 있다. 그러나 반응 시작 시간면에서 볼 때 전자의 방식이 후자보다 느리게 반응하는 것을 보여준다. 이러한 느린 반응속도 때문에 고속으로 주행하는 차량을 검지하지 못하는 경우가 발생하는데, 이에 대한 결과가 그림 4(c)에 나타나 있다. 그림 4(c)는 차량이 고속으로 센서를 주행할 때의 검지 신호 결과이며, 이 때 위상 변화 검지 방식만이 올바르게 차량 통과 정보를 생성함을 볼 수 있다. 그림 4(a), (b), (c)에서 두가지 검지 방식의 출력을 결합한 최종적인 출력인 채널 3은 어떤 형태의 차량 주행에도 시간의 지연이 없이 정확하게 차량의 정보를 생성함을 볼 수 있다.



(a)



(b)

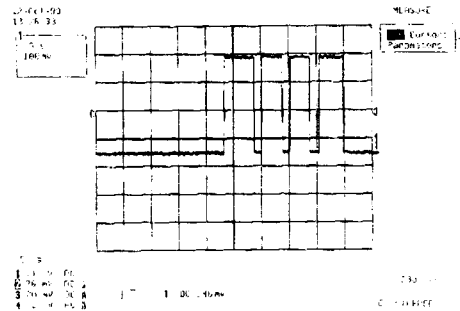


(c)

<그림 4> 차량의 주행 행태에 따른 검지기 출력
 (a) 차량이 서행하는 경우
 (b) 차량이 가·감속을 반복하는 경우
 (c) 차량이 고속으로 주행하는 경우

저속시 차간거리가 좁게 주행하는 상황에서 차량의 계수 정확도를 측정하기 위하여 4대의 차량이 차간거리 2m로 저속 주행시 검지 신호를 측정하였으며, 그 결과는 그림 5에 나타나 있다. 이러한 실험을 통하여 개발된 루프 검지

회로는 위상차 검지방식과 주파수 변화 검지방식의 장점은 잃지 않고, 각 검지방식의 단점을 제거함으로써 고속 및 저속의 다양한 상황에 효과적으로 대처할 수 있음을 알 수 있다.



<그림 5> 4대의 차량이 차간거리 2m로 저속 주행시 검지신호

기존 위상차 방식의 루프 검지기와의 통과차량에 대한 통계적인 비교 실험 결과는 표 1에 나타나 있다. 각 검지기에서 생성된 통과량 결과는 실측값과 비교하였다. 개발된 검지기의 오차율은 0.35% 이고, 기존 검지기의 경우는 -3.5%이다. 따라서 개발된 회로를 장착한 시스템은 기존 시스템에 비해 상당히 향상된 계수 성능을 가짐을 알 수 있다. 개발된 장비의 오차의 원인은 차량이 차선의 가운데로 주행하지 않고 양 차선을 걸쳐서 주행하거나 차선을 바꾸는 경우 때문이다. 이러한 차량의 주행 행태로 인한 오차는 하드웨어적인 문제로는 해결할 수 없고 소프트웨어적인 알고리즘으로 개선시킬 수 있다.

<표 1> 통과 차량 계수 실험 결과

	차량대수	오차율(%)
실측값	1422	
기존 시스템	1378	-3.09
개발된 시스템	1426	0.28

5. 결론

본 논문에서는 기존의 위상차 검지 방식과 주파수 변화 검지 방식을 결합하여 두 가지 방식의 장점을 모두 갖는 새로운 루프 검지기 회

로를 제안하였다. 주파수 변화 검지 방식은 모터 제어에 응용이 되는 M-기법을 사용하였으며, 이를 회로로 구현시 FPGA를 이용하여 집적화 함으로써, 전체 회로 크기의 증가를 막고 잡음에도 안정적인 특성을 갖도록 하였다. 개발된 시스템의 성능을 확인하기 위하여 국도에 설치된 루프 센서를 이용한 현장 실험을 수행하였다. 다양한 주행 상황에 대한 실험에서 위상차 검지방식과 주파수 변화 검지 방식의 각 문제점들을 효과적으로 해결하였음을 확인하였다. 따라서 개발된 루프 검지기 회로를 이용하면 고속 및 저속으로 주행하는 차량뿐만 아니라 차량 정체시 센서 위에서 가·감속을 반복하거나 차간거리가 좁게 주행하는 차량에 대해서도 정확한 교통 정보의 수집이 가능하다.

참고문헌

- [1] ECM Inc., ECM Technical manual, France, Mar., 1994.
- [2] ITE., Traffic detector handbook, 2nd edition.
- [3] R. L. Gordon, R. A. Reiss, H. Haenel, E. R. Case, R. L. French, A. Mohaddes, and R. Wolcott, *Traffic control systems handbook*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Feb., 1996.
- [4] N. Ushio and T. Shimizu, "Loop vs. Ultrasonic in Chicago: Ultrasonic Vehicle Detector Field Test Isolating Diffused Reflection and Enduring Harsh Environment," *Proc. of the 5th World Congress on Intelligent Transport Systems*, Seoul, Korea, Oct., 1998.
- [5] S. W. Kim, Y. Eun, H. Kim, J. I. Ko, W. J. Jung, Y. G. Choi, Y. G. Cho, and D. Cho, "Performance Comparison of Loop/Piezo and Ultrasonic Sensor-based Detection Systems for Collecting Individual Vehicle Information," *Proc. of the 5th World Congress on Intelligent Transport Systems*, Seoul, Korea, Oct., 1998.
- [6] 이승환, 조한선, 최기주, "단일 루프 검지기를 이용한 차종 분류 알고리즘 개발," *대한교통학회지* 제14권, 제1호, pp. 135-154, 1996.
- [7] 오영태, 이철기, "실시간 교통신호제어를 위한 루프 검지기의 최적형상결정에 관한 연구," *대한교통학회지* 제13권, 제3호, pp. 67-86, 1995.
- [8] S. W. Kim, J. Ko, H. Kim, I. Cho, and D. Cho, "A New Loop-detector Circuit for Improving Low-speed Performance", *Proc. of The 6th World Congress on ITS*, Toronto, Canada, November 8-12, 1999. accepted.
- [9] 김성욱, 고재인, 김형진, 조일수, 조동일, "저속 차량의 정보 오차를 줄이기 위한 새로운 루프 검지기 회로," 제14회 한국자동제어학술회의, 서울, 제C권, pp. 294-297, 1999.
- [10] T. Ohmae, T. Matsuda, K. Kamiyama, and M. Tachikawa, "A Microprocessor-controlled High Accuracy Wide-range Speed Regulator for Motor Drive," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 29, no. 3, pp. 207-211, Mar., 1982.
- [11] Y. Eun, J. Kim, K. Kim, and D. Cho, "Discrete-time Variable Structure Controller with a Decoupled Disturbance Compensator and Its Application to a CNC Servomechanism," *IEEE Trans. on Control System Technology*, vol. 7, no. 4, pp. 414-423, July, 1999.