

## 이중 광학식 회전 엔코더 구조를 이용한 고정밀도 엔코더 시스템 개발

이세한<sup>#</sup>

### Development of a High-Resolution Encoder System Using Dual Optical Encoders

Se-Han Lee<sup>#</sup>

#### ABSTRACT

An optical rotary encoder is easy to implement for automatic control applications. In particular, the output of the encoder has a digital form pulse, which is also easy to be connected to a popular digital controller. By using the encoder, there are various angular velocity detecting methods, M-, T-, and M/T-method. Each of them has a property of its own. They have common limitation that the angular velocity detection period is strongly subject to the destination velocity magnitude in case of ultimate low range. They have ultimate long detection period or cannot even detect angular velocity at near zero velocity. This paper proposes a dual encoder system with two encoders of normal resolution. The dual encoder system is able to keep detection period moderately at near zero velocity and even detects zero velocity within nominal period. It is useful for detecting velocity in case of changing rotational direction at which there occurs zero velocity. In this paper, various experimental results are shown for the dual encoder system validity.

**Key Words:** M/T-method (M/T 기법), Dual encoder (이중 엔코더), Control period (제어주기), Zero velocity (영속도)

#### 1. 서론

서보 모터를 이용한 기계 시스템의 정밀도는 고급 위치, 속도 제어 기술에 힘 입어 개선되어 왔다. 특히, 광학식 회전 엔코더는 높은 해상도와 디지털 제어기와 연결이 용이한 특성 때문에 서보 모터를 사용한 제어 시스템에서 위치 및 속도 검출 용도에 폭 넓게 사용되고 있다.<sup>1</sup>

광학식 엔코더를 이용한 회전 속도 검출은 고

정주기 혹은 고정변위에 기준하여 수행된다. 펄스 계수법 혹은 'M'법으로 알려져 있는 고정주기법은 고정된 샘플링 주기 동안에 입력된 엔코더의 펄스 개수를 검출하여 회전속도를 산출한다. 반면에 펄스 주기 검출 혹은 'T'법으로 알려진 고정 변위법은 엔코더 펄스의 주기를 검출하여 회전속도를 산출한다. 고정주기법과 고정 변위법은 각각 저속과 고속 영역에서 정밀도가 감소하는 단점을 갖고 있다. 이러한 단점을 개선하고자 Ohmac<sup>2</sup> 는 M/T 를

접수일: 2006년 11월 8일; 게재승인일: 2007년 7월 12일

# 교신저자: 경남대학교 기계자동화공학부

E-mail: leesehan@kyungnam.ac.kr Tel. (054) 249-2149

제한하였다. M/T 법은 앞에서 기술한 2 가지 방법을 조합하여 넓은 범위에 걸친 속도를 정밀하게 검출할 수 있지만, 속도 검출 주기가 가변 되는 단점을 갖고 있다. 예를 들면, 저속 영역에서 검출 주기는 극단적으로 늘어나며, 검출되는 속도는 해당 순간의 속도가 아니라 늘어난 주기 동안의 평균값에 해당된다.

기존의 M/T 법을 이용할 경우, 저속 영역에서 디지털 제어기의 제어주기는 극단적으로 늘어나게 되어, 저속 영역에서 증가되는 마찰력의 영향을 제대로 보상할 수 없게 된다. 뿐만 아니라 속도 검출 주기의 증가는 정밀 위치 제어기에 효과적인 가속도<sup>8</sup> 검출에 악영향을 미치게 된다.

광학식 엔코더를 이용한 효율적인 속도 검출 알고리즘에 대하여 많은 연구들이 수행되었다. Belanger<sup>3</sup> 등은 속도와 가속도 검출성능 개선에 Kalman 필터를 이용하는 연구를 수행하였다. Dunworth<sup>4</sup> 는 엔코더 펄스의 주파수를 검출하기 위해서 추가 하드웨어를 사용하였지만 속도 검출 주기가 길어져 정밀 제어에 필수적인 짧은 샘플링 주기에 부적합한 경향이 있다. Saito<sup>5</sup> 등은 속도 분포를 다항식으로 근사화 하여 순간 속도를 추정하였지만 장기간 엔코더 펄스가 입력되지 않을 경우 추정 오차가 발생하게 된다. Hori<sup>6</sup> 와 Lee<sup>7</sup> 등은 엔코더 펄스가 입력되지 않는 구간에도 주기적으로 외란을 추정함으로써 순간 속도를 양호하게 추정한 연구를 수행하였다. Hori 와 Lee 방법은 엔코더 펄스가 입력되지 않는 구간 안에서 외란이 지속적으로 임의 가변 되는 경우는 순간 속도 추정 성능이 저하될 우려가 있다. Kim<sup>10</sup> 등은 초정밀 엔코더를 반도체 상에서 구현하는 연구를 수행하였다. Kim 등의 방법은 초미세 변위 검출 성능 개선에 기반을 두고 있지만, 여전히 초저속에서 성능이 감소는 기존 엔코더 특징을 그대로 승계하고 있다.

본 연구에서는 2 개의 단순 저해상도 광학식 증분 엔코더를 연결하여 고속의 속도검출 주기를 유지한 상태에서 초저속 영역과 정지 상태까지 검출할 수 있는 엔코더 시스템을 구성하였다. 기존 속도검출 방법에 기초한 가속도 검출법의 경우 움직임이 전환되는 영역, 즉, 속도의 부호가 전환되는 영역에서 오류<sup>9</sup> 를 발생하게 된다. 본 연구의 특징인 제로 속도검출 성능은 진행 방향이 전환되는 영역에서 필연적으로 발생하는 제로 속도를 양호하게 고속으로 검출할 수 있도록 한다. 이러한 제

로속도 검출 능력은 기계 가공장비에 유효하게 적용될 수 있다.

본 연구의 2 장은 엔코더를 이용한 속도 검출 방법과 특징을 개략적으로 설명하고 본 연구의 아이디어를 기술한다. 3 장에서는 본 연구의 아이디어를 구체적으로 구현하고 성능 오차에 대하여 설명하고, 4 장에서는 구성된 실험장치를 통해서 얻어진 결과를 바탕으로 본 연구의 유효성을 보인다.

## 2. 엔코더를 이용한 속도 검출법 및 특성

광학식 증분 엔코더는 입수가 용이하고 디지털 형태의 결과를 출력하는 등 디지털 제어기와 연결이 용이한 특성 때문에 구동장치로서 전기모터를 주로 사용하는 메카트로닉스 분야에서 주로 사용되는 각도검출 센서의 일종이다. Fig. 1 은 광학식 증분 엔코더 기본 구조를 나타내고 있다. 엔코더의 회전축이 회전함에 따라서 광 슬릿이 형성된 회전판은 회전하면서 발광부와 수광부의 사이의 광 통과를 차단 혹은 허용한다.

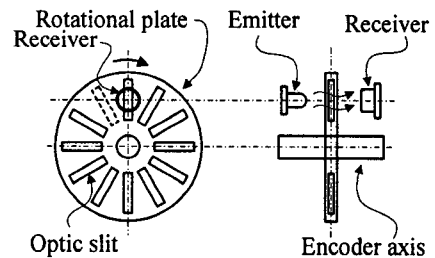


Fig. 1 An optical incremental encoder

엔코더의 회전축이 회전함에 따라서 엔코더 내부에서 광의 차단과 통과가 반복되어 부차된 전기 회로에서 광 흐름에 동기 되는 펄스 형태의 전기 신호가 출력되게 된다. 즉, 디지털 제어기가 엔코더에서 출력되는 전기 신호의 변화 빈도를 계수하면 회전축의 회전상태를 검출할 수 있다.

### 2.1 속도 검출법

광학식 증분 엔코더의 출력을 이용하여 회전속도를 검출하는 방법은 M 법과 T 법으로 나누어 볼 수 있다. M 법은 고정된 샘플링 주기 동안에 입력된 엔코더 펄스의 수를 계수하여 속도를 산출하는 방법으로, 고속회전의 경우 한 주기 동안에 입

력되는 엔코더 펄스의 수가 많으므로 정확한 속도를 얻을 수 있다. 한편, 저속회전의 경우에는 한 주기 동안에 입력되는 엔코더 펄스의 개 수가 감소하여 검출 속도의 정밀도가 감소하는 특징이 있다. T 법은 엔코더 펄스의 주기를 검출하는 방법이며, 저속의 경우 주기가 길어져 정확한 주기를 검출할 수 있는 반면에, 고속의 경우 주기가 짧아져서 정확한 주기 검출이 곤란하여 속도 검출 속도의 정밀도가 감소한다.

일반적으로 M 법과 T 법의 장점을 혼합한 M/T 법이 널리 사용되고 있다. Fig. 2 는 M/T 법의 개략도를 나타내고 있다.

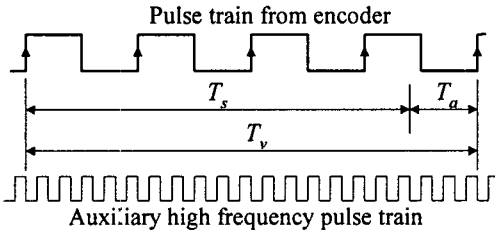


Fig. 2 Timing diagram of speed measurement using M/T method

속도 검출을 위한 샘플링 주기  $T_S$  동안에  $m$  개의 엔코더 펄스가 입력되었다고 가정하자. Fig. 2 에서 보듯이 샘플링 주기의 종료 시점과 엔코더 펄스의 상승 에지(여기서는 펄스의 상승 에지에서 계수 동작이 실행된다고 가정한다.)와는 일반적으로 일치하지 않는다. 따라서  $T_S$  의 종료 시점부터 이후에 최초로 입력되는 엔코더 펄스의 상승 에지 사이의 간격을  $T_a$  라 하고,  $T_v = T_S + T_a$  에 해당하는 새로운 주기를 고주파수를 갖는 보조 펄스(Auxiliary high frequency pulse)를 사용하여 검출한다.

결과적으로  $T_v = T_S + T_a$  구간 내에서 검출된 완전한 엔코더 펄스 개수는  $(m + 1)$ 개가 되며, 이상의 정보를 사용하여 이 구간에 대하여 평균 속도  $v_{avg}$  를 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$v_{avg} = \frac{\Delta\theta \cdot (m+1)}{T_v} = \frac{\Delta\theta \cdot (m+1)}{T_s + T_a} \quad (1)$$

여기서,  $\Delta\theta$  는 엔코더 출력 펄스 1 주기에 해당하는 회전각으로 분해능(Resolution) 에 해당된다.

본 연구에서 제안하는 이중 엔코더 시스템은 T

법의 일부 개념을 사용하며, 본 연구에서 디지털 제어기로 사용하는 DSP(Digital Signal Processor)는 내장된 캡처 및 타이머 기능을 이용하여 대상 엔코더 펄스들의 주기를 검출할 수 있다.

## 2.2 속도 검출법의 특징

특정 크기 이하의 저속 영역에서는 M 법 혹은 T 법 모두 검출 성능이 감소하는 특징이 있다. 예를 들면, 입력되는 엔코더 펄스의 주기가 샘플링 주기보다 길어지는 경우, M/T 법은 속도를 검출할 수 있지만, 검출 주기가 제어용 샘플링 주기를 상당히 초과하는 단점이 발생한다. 디지털 제어에서 제어 주기의 증가는 제어기 이득의 제한을 초래하므로 제어 성능 감소를 의미할 뿐만 아니라 안정성까지 훼손하게 된다. 특히, 저속에서 마찰력의 영향이 상대적으로 증가되므로 샘플링 주기의 증가는 제어 성능의 급격한 감소를 초래하게 된다. 마찰력을 보상하기 위해서 엔코더 펄스가 입력되지 않는 구간에는 마찰력 같은 외란을 추정하는 연구가 있지만, 계속해서 임의로 가변되는 외란에 대해서 양호한 추정은 곤란하게 된다.

Fig. 3 은 각 방법에 따른 정밀도 경향을 수치 시뮬레이션을 통해서 나타내고 있다. 이 때, 엔코더는 1 회전에 100 펄스 출력형을, M 법 적용 샘플링 주기는 0.1s 를, T 법에 사용된 보조 펄스 주파수 10KHz 를 사용, 그리고 적용 기준 회전 각속도는 10 초 동안에 0rps 에서 10rps 로 선형 증가하는 파형을 사용하였다. 이미 알려져 있듯이, M 법은 저속 회전 영역에서 검출 오차가 증가하는 반면 고속 회전 영역에서 검출 오차가 감소하는 경향을 보이고 있으며, T 법은 반대 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. M/T 법은 전반적인 영역에서 양호한 검출 성능을 보이고 있으나, 저속 영역에서는 T 법과 유사한 경향을 나타내고 있다. 그렇지만, M 법, T 법, M/T 법 모두 초저속 영역에서 문제를 발생하고 있다. T 법과 M/T 법은 속도 검출이 개시 후부터  $t = 0.1414s$  에서 비로써 검출값을 얻을 수 있으며, 그나마 50% 정도의 오차를 보이고 있는 반면에 M 법의 경우  $t = 0.2s$  에서 비로써 50%의 오차를 갖는 검출값을 얻을 수 있다.

M 법, T 법 및 M/T 법에서는 검출 주기가 주어졌을 때, 최소 검출 가능 속도는 엔코더의 정밀도에 반비례한다. 즉, 최소 검출 가능 속도를  $1/N$  로 감소시키기 위해서는 N 배의 정밀도를 갖는 엔코

더가 요구된다.

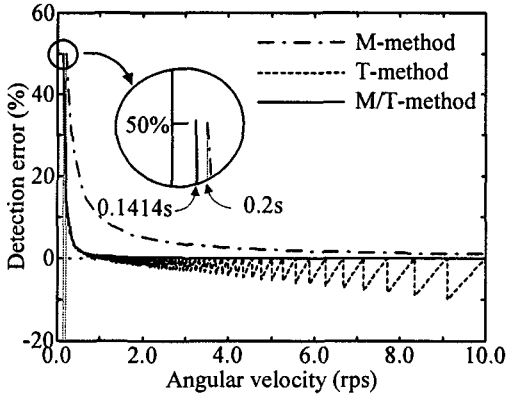


Fig. 3 An example of the both counting encoder pulse methods

### 2.3 수광부 회전 아이디어

엔코더의 회전판이 매우 저속으로 회전하는 경우에 해당되는 엔코더 출력 펄스 발생 순간  $t_1$  와 회전 속도 검출용 샘플링 펄스 발생 순간  $T_1$ 가 Fig. 4에 표시되어 있다.

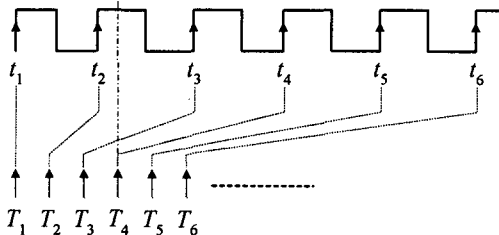


Fig. 4 Sampling instant and pulse train for slow speed

현재의 상태를  $t_1$  과  $T_1$  으로 설정한 경우를 고려해 보자. 엔코더 펄스 입력 여부를 검출하는 샘플링 순간  $T_1$  에서 엔코더 출력 펄스 순간  $t_1$  을 검출할 수 있음은 자명하다. 그리고 샘플링 주기  $T_S$  후의 시점인  $T_2$  에는 어떠한 엔코더 펄스도 검출할 수 없다. 왜냐하면, 엔코더의 회전판이 매우 저속으로 회전하여 다음 번 광 슬롯이 미처 수광부를 통과하지 못했기 때문이다. Fig.4에 의하면, 미래 샘플링 시점인  $T_4$  순간이 되어서야 비로소 엔코더 출력 펄스 발생 순간  $t_2$  가 검출될 수 있음을 알

수 있다. 만일, 먼 미래의  $t_2$  시점의 엔코더 펄스를 상대적으로 가까운 미래인  $T_2$  시점에서 미리 검출할 수 있다면, 초저속 검출 문제가 해결될 것이다. 그렇지만, 이것은 미래를 정확하게 예측하는 문제에 해당하므로 물리적으로 불가능한 것이다. 이런 문제를 개선하기 위해서 수광부를 이미 알려진 속도로 회전하는 방법을 생각해 볼 수 있다. 수광부를 회전시켜서 먼 미래 정보를 가까운 미래에 미리 검출할 수 있는 아이디어가 가능한 이유는 그 아이디어가 현재 상태에서 특정한 미래의 상태를 검출하는 것을 목표로 하는 것이 아니라, 매우 가까운 미래(짧은  $T_S$  후에) 시점에 먼 미래(긴  $\Delta t = t_2 - t_1$ ) 시점 상태를 검출하는 것이기 때문이다. 즉, 어떤 형태로도 시간이 흐른다는 점이다. 이러한 목적을 달성하기 위하여 매우 짧은 시간 동안에 미소하게 이동하는 회전판을 수광부가 고속으로 이동하여 단시간 내에 회전판의 상태를 검출하는 것이다.

### 3. 이중 엔코더 시스템 구현

Fig. 4에서, 엔코더의 회전판이 매우 저속으로 회전할 때, (일정 속도가 아니어도 무방)  $t_1$  과  $t_2$  사이의 시간 차이는 일정하지 않다. 문제 제기상  $t_2 - t_1 \gg T_S$  로 그 차이값은 속도 검출 주기  $T_S$  보다 상대적으로 길다. 즉, 매우 저속이다. 그렇지만, 물리적인 그 회전각도  $\Delta\theta$ 는 일정하다. 엔코더 제조 원리상 원판에 일정 간격으로 광 슬롯을 배치하였기 때문이다. 엔코더 펄스 출력 순간  $t_1$  과 속도 검출 샘플링 순간  $T_1$  을 일치시킨 상태에서, Fig. 1의 좌측 그림 중에서 원형의 수광부 좌측에 점선으로 표시된 광 슬롯이 원형의 수광부 중심과 일치할 때까지 소요되는 시간은  $\Delta t = t_2 - t_1$  에 해당한다. 그렇지만,  $t_2 - t_1 = \Delta t$  는  $T_S$  보다 상대적으로 매우 길어지기 때문에  $T_S$  가 경과된 후에도  $\Delta t = t_2 - t_1$  에 해당하는 정보를 얻기에는 현실적으로 불가능하게 된다. 그러므로 Fig. 1에 표시된 원형의 수광부를 반시계 방향으로 회전, 점선으로 표시된 광 슬롯측으로 이동 시키는 아이디어를 생각해 볼 수 있다. 물론 수광부 회전 속도는 이미 알고 있는 점이 특징이다. 속도 검출 샘플링 주기  $T_S$  후에 시계 방향으로 회전하는 점선으로 표시된 광 슬롯과 반시계 방향으로 회전하는 원형의 수광부가 일치할 수 있는 원형의 수광부의 각속도  $\omega$

는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_1 T_S + \omega T_S = \Delta\theta \rightarrow \omega = \frac{\Delta\theta}{T_S} - \omega_1 \quad (2)$$

이 때,  $\omega_1$  는 광 슬릿이 형성되어 있는 회전판의 각속도이다. 식 (2)에 의하면, 수광부의 각속도  $\omega$  를 구하기 위해서는 광 슬릿이 형성되어 있는 회전판의 각속도  $\omega_1$  가 검출되어야 함을 알 수 있다. 이것은 모순이다. 원래의 목적은  $\omega_1$  을 구하는 문제이기 때문이다. 다음과 같은 문제를 생각해 보자. 수광부를 미리 정해진 일정 각속도  $\omega$  로 회전 시키는 경우를 생각해 보자. 수광부 각속도  $\omega$  를 일정한 값으로 고정하면, 시계 방향으로 회전하는 점선으로 표시된 광 슬릿과 반시계 방향으로 회전하는 원형의 수광부가 일치할 때까지 소요되는 시간은 검출 대상이 될 것이며, 임의의 값  $\Delta T < \Delta t = t_2 - t_1$  가 될 것이다. 즉, 엔코더의 수광부가 회전하게 되면 새로운 엔코더 펄스 입력 검출에 소요되는 시간  $\Delta T$  는 실제 정지된 상태에서 새로운 엔코더 펄스 출력에 소요되는 시간  $\Delta t = t_2 - t_1$  보다 짧을 것이다. 식 (2)는 다음과 같이 수정될 수 있을 것이다.

$$\omega_1 \Delta T = \Delta\theta - \omega \Delta T \rightarrow \omega_1 = \frac{\Delta\theta}{\Delta T} - \omega \quad (3)$$

이 때,  $\omega$  는 주어진  $\omega_1$  범위에 대하여  $\Delta T$  가 희망하는 속도 검출 주기 제어기에서 요구하는  $T_S$  에 근접하도록 적절한 범위에서 선정될 필요가 있다. 자세한 중간 수식 과정은 다음 절에 소개된다.

### 3.1 이중 엔코더 구현

앞에서 기술한 내용의 핵심은 엔코더의 원형 수광부를 일정한 속도로 회전 시키는 것이다. 실제로 수광부 회전을 구현하기 위해서 2 개의 엔코더 (1000 펄스/회전)를 결합한 이중 엔코더 시스템을 Fig. 5 와 같이 구성하였다. 2 개의 엔코더는 편의상 Enc. #1 과 Enc. #2 로 구분되며, Enc. #1 의 몸체는

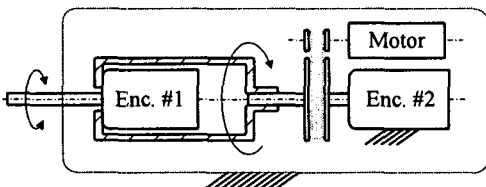


Fig. 5 Dual encoders connection concept

Enc. #2 의 회전축에 연결되어 있다. 이때, Enc. #2 의 몸체는 실험장치 고정부에 부착되어 있으며, Enc. #1 의 회전축은 외부 구동모터에 의해서 일정한 속도로 회전제어 되고 있다.

이중 엔코더의 동작 원리를 기술하기 위해서 Fig 6 에 각 엔코더 펄스 출력 예를 나타내었다. 먼저, Fig. 6(c)의 Enc. #2 는 1 회전에 1000 개의 펄스가 출력되므로 펄스의 간격  $\Delta\theta$  는 0.36 도에 해당된다. Enc. #2 가 1rps 로 회전제어 될 때,  $\Delta\theta$  에 해당하는 펄스는 약 1msec 간격으로 출력될 것이다. 만일, Enc. #1 의 회전축이 고정되어 있다면, 즉, 회전 각속도가 0 이라면, Enc. #1 의 펄스 출력은 Fig. 6(b)와 동일할 것이다. 물론 정확하게 동기되어 있지 않을 수 있으므로 Fig. 6(b) 과 같이 Enc. #2 출력 펄스와의 위상 차이가 표시될 것이다. 만일, Enc. #1 이 회전하게 되면 Enc. #1 의 펄스 출력의 주기는 Fig. 6(a)와 같이  $T \rightarrow T_1$  으로 변경될 것이다. Enc. #1 펄스 출력의 주기 변경은 Enc. #1 의 회전에 기인한 것임을 쉽게 알 수 있다.

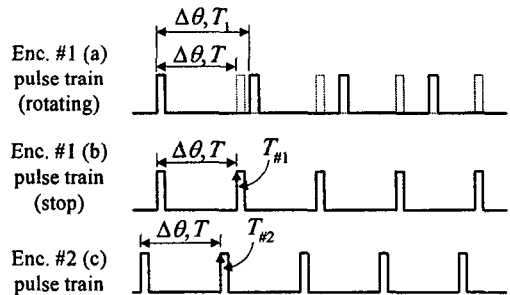


Fig. 6 Pulse trains of each encoder

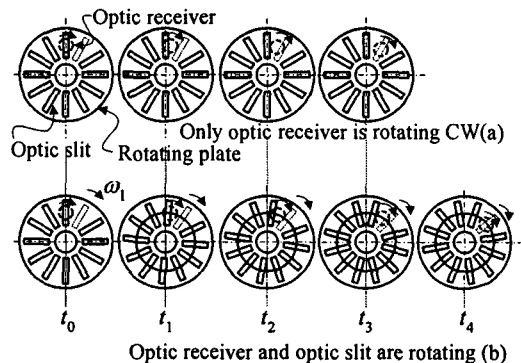


Fig. 7 Inner view of the encoder corresponding to Fig. 6

Fig. 6 에 해당하는 실제의 엔코더 내부 동작을 Fig. 7 에 나타내었다. Fig. 7(a)는 수광부가 시계방향으로 회전한 경우를 나타내고 있다. 수광부가 엔코더의 광 슬릿 1 개 분에 해당하는  $\Delta\theta$  만큼 회전한 시점  $t_3$  에 발광부의 광을 검출하여 엔코더 펄스를 출력할 것이다. 이 상황은 Fig. 6(b)의 Enc. #1 의 펄스 출력에 해당한다. 한편, Fig. 7(b)는 광 슬릿이 형성되어 있는 회전판이 시계방향으로  $\omega_1$  로 회전하고 있는 경우를 나타낸다. 엔코더의 회전판이 시계방향으로 회전하고 있을 경우, 광 슬릿이 전진하고 있으므로 수광부가 발광부의 광을 검출하는 시점은  $t_3$  이 아닌 약간 지연된  $t_4$  이 된다.

다시, Fig. 6 으로 돌아가자 먼저, 1 회전에 1000 개의 펄스가 출력되는 Enc. #2 가 약 1% 정도의 오차를 갖고 1rps 로 회전하고 있다. 그러므로  $\Delta\theta$  는 0.36 도이며, 해당 주기는 약  $T = 0.001s$  가 된다. 만일, Enc. #1 의 회전축이 시계방향으로  $\omega_1$  으로 회전하고 있다고 가정한다. 그러므로 Fig. 6(a) 중의 실선으로 표시된 펄스가 출력되고 그 주기는  $T_1 > T = 0.001s$  로 증가되는 관계가 성립한다. 왜냐하면 광이 통과하는 슬릿이 앞서서 미리 이동하기 때문이다.

Enc. #2 펄스가 출력되는 시점  $T_{\#2}$  와 Enc. #1 의 펄스가 출력되는 시점  $T_{\#1}$  이 서로 다르기 때문에 문제가 발생할 수 있다. 그렇지만, Enc. #2 는 매우 작은 오차를 갖고 일정 속도로 회전 제어되고 있으므로 개략적인 상수  $T$  값이 알려져 있음을 알 수 있다. Fig.6(a)에서 검출된  $T_1$  동안에 수광부는 시계방향으로  $\omega = 2\pi/s = 1rps$  로 회전하고 있으며, 회전판 역시 시계방향으로  $\omega_1$  로 회전하고 있다. 그러므로  $T_1$  동안 회전판이  $\omega_1$  로 이동하는 동안에 수광부가 이동한 각도  $\Delta\theta_1$  은 각각 다음과 같다.

$$\Delta\theta_1 = \omega \cdot T_1 \quad (4)$$

이 때,  $\Delta\theta_1$  는 엔코더 정밀도  $\Delta\theta$  와 다름에 유의한다.

한편, Enc. #1 회전축이 시계방향으로 회전할 경우,  $\Delta\theta_1$  와 엔코더의 정밀도  $\Delta\theta$  는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\Delta\theta_1 > \Delta\theta \quad (5)$$

식 (5)의 차이값은 Enc. #1 회전판이 시계방향으로 회전하였기 때문이므로 그 차이값과 Enc. #1 회전축의 각속도  $\omega_1$  와 다음과 같은 관계가 있다.

$$\Delta\theta_1 - \Delta\theta = \omega_1 \cdot T_1 \rightarrow \Delta\theta_1 = \omega_1 \cdot T_1 + \Delta\theta \quad (6)$$

이미 알고 있는 Enc. #2 각속도  $\omega$  와 검출된  $T_1$  의 관계식 (4)를 (6)에 대입하면, Enc. #1 회전판 각속도  $\omega_1$  의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \omega \cdot T_1 &= \omega_1 \cdot T_1 + \Delta\theta \\ \omega \cdot T_1 - \Delta\theta &= \omega_1 \cdot T_1 \\ \omega_1 &= \frac{\omega \cdot T_1 - \Delta\theta}{T_1} = \omega - \frac{\Delta\theta}{T_1} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 Enc. #1 의 회전축의 각속도를 계산할 수 있다. 다음과 같이 수치 예제를 들어 본다. Enc. #1 펄스간격이  $T_1 = 0.0011s$  로 검출되었다. 즉, 엔코더 펄스 검출 주기가 약 10% 증가하였다. Enc. #1 축의 각속도는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega - \frac{\Delta\theta}{T_1} \\ &= 2\pi - \frac{2\pi}{1000 \times 0.0011} = 0.091 \times 2\pi \text{ (rad/s)} \end{aligned} \quad (8)$$

### 3.2 오차 해석

앞에서 이중 엔코더 원리를 설명하면서  $\omega = 1rps$  로 Enc. #2 가 정확하게 회전하고 있다고 가정하였다. 그렇지만, Enc. #2 가 실용적으로는  $\pm 1\%$  정도의 오차를 갖고 회전하고 있다고 가정하면, 식 (7)의  $\omega$  를 상수로 처리할 수 없고 구체적으로 그때 그때 검출된 실제의  $T$  와  $\Delta\theta$  를 이용하여 식 (7)은 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$\omega_1 = \omega - \frac{\Delta\theta}{T_1} = \frac{\Delta\theta}{T} - \frac{\Delta\theta}{T_1} = \Delta\theta \cdot \frac{T_1 - T}{T \cdot T_1} \quad (9)$$

$T$  는  $T_1$  를 검출한 시점에서 최근에 검출된 Enc. #2 의 펄스 주기를 나타낸다. 기준이 되는  $\omega = 1rps$  에 포함된 오차가 흡수될 필요가 있다. 그러므로 Enc. #2 의 각속도  $\omega$  를 상수로 사용하지 않고 식 (9)처럼 최근에 검출된  $T$  를 직접 사용하는 것이 유리하다. 물론  $T$  의 검출 시점과  $T_1$  이 검출 시점이 서로 틀리기 때문에 가장 최근의  $T$  를 채용할 필요가 있다. 실제로 Enc. #2 는 정확하게 1rps 로 회전하지 않고 시시각각 오차를 갖기 때문에 상수 각속도  $\omega$  를 채용하면 오차를 발생할 염려가 있다.

Fig. 8 을 살펴보도록 하자. 1 번 수광부는 Enc.

#2 의 회전축과 고정되어 있으므로 1 번 수광부와 Enc. #2 의 특정 슬릿 사이에  $\phi$ 만큼의 고정된 위상 차이가 존재한다. 이 위상 차이각은 Enc. #1 과 Enc. #2 의 상호 조립이 완료된 다음에는 그 값은 변하지 않는 특징이 있다.

Enc. #1 의 회전축이 정지되어 있을 경우, Enc. #1 슬릿들은 Fig. 8 의 좌측 하단에 표시된 기준좌표에 대하여 정지되어 있으며, 역시, 2 번 수광부도 정지되어 있다. 반면에 1 번 수광부와 2 번 슬릿은 서로 고정되어 우측으로  $\omega$ 로 회전하고 있다. 2 번 슬릿이 2 번 수광부를 통과했을 때, 검출된 값은  $T$ 이다. 그렇지만, Enc. #1 의  $n+1$  번째 슬릿이 1 번 수광부를 통과하기 까지는  $T_2$ 의 시간이 추가로 소요된다. Enc. #1 의  $n+1$  번째 슬릿이 1 번 수광부를 통과하는 시점에서 이중 엔코더 신호 처리 알고리즘 계산이 개시된다. 뿐만 아니라 Enc. #1 의 회전축이 회전하면 추가로  $\Delta\theta_1$ 만큼  $T_2$ 는 증가할 것이다. 즉, Enc. #2 에서 검출된  $T$ 순간의 평균 각속도는  $\omega = \Delta\theta/T$  임은 명확하다. 그렇지만, 그 순간에서  $T_2$ 가 경과된 후에도  $\omega = \Delta\theta/T$ 로 가정할 수 있을까? 엄밀하게 기술하면 그렇지 못하다. 이 때,  $T_2$ 는  $0 \leq T_2 < T$  범위를 가지므로 최악의 경우  $T$ 까지 될 수 있다. Enc. #2 의 각속도 제어를 통해서 강제적으로 속도 오차를 1% 미만으로 유지할 수 있다면, 최악의 경우  $T_2$  경과된 후의 각속도 역시 최대 1% 오차를 포함하고 있다고 가정할 수 있다.

Enc. #2 의 각속도  $\omega$ 가 최대 1%의 오차를 포함하고 있다면, 식 (9)은 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$\omega_1 = (\omega \pm \Delta\omega) - \frac{\Delta\theta}{T_1} = \left( \omega - \frac{\Delta\theta}{T_1} \right) \pm \Delta\omega \quad (10)$$

식 (10)의 의미는 Enc. #2 가 최대  $\Delta\omega$ 오차를 갖고 회전하고 있을 때, 최종적으로 검출될 수 있는 Enc. #1 회전축의 최소 각속도의 크기는  $\Delta\omega$ 임을 알 수 있다. 즉, 최종 검출 각속도  $\omega_1$ 에는 기본적으로  $\Delta\omega$ 의 잡음이 포함되어 있으므로  $\Delta\omega$  미만의 크기의  $\omega_1$  값은 의미를 상실하게 된다. 결과적으로 정밀한  $\omega_1$ 을 검출하기 위해서는 Enc. #2 의 각속도  $\omega$ 를 정밀하게 제어할 수 있는 제어기 및 기구적인 정밀도 유지가 필요가 있다.

실용적으로 Enc. #2 를 1% 미만의 정밀도의 각속도로 제어하면 최소 1%에 해당하는  $\Delta\omega$  각속도 까지를 검출할 수 있다. Enc. #2  $\omega = 1\text{rps}$  조건과 1

회전에 1000 펄스 제원을 사용했다면, 이론적으로 최소 약 0.01rps 까지 검출할 수 있는 엔코더 시스템을 구성할 수 있다. 이 때,  $T_1 \approx T$ 조건이 형성되므로 최대 0.01rps 의 초저속을 거의 1msec 주기로 검출 가능해진다. 이 결과는 1 회전에 약 100,000 펄스를 출력할 수 있는 정밀한 엔코더를 사용하는 경우와 동일한 효과에 해당한다.

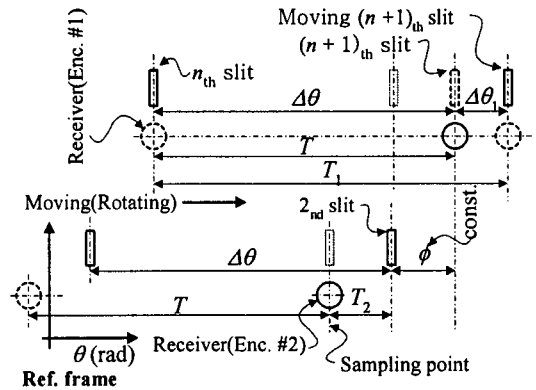


Fig. 8 Timing chart of each pulse from the encoders

#### 4. 실험결과 및 토론

본 연구의 핵심인 이중 엔코더 시스템의 유효성을 확인하기 위하여 Fig. 9 와 같은 실험장치를 구성하였다. 본 연구는 광학식 엔코더 펄스 처리 알고리즘이 목적이므로 제어기 및 알고리즘 연산용으로, TI(Texas Instrument)의 전용 TMS320F2812 DSP를 채용하였다. 이중 엔코더 시스템의 Enc. #2 를 일정 속도로 구동하기 위하여 외부 구동모터와 Enc. #2 의 회전축은 4:1 감속 타이밍 벨트로 연결되어 있다. 한편, Enc. #1 의 하우징은 Enc. #2 의 회전축과 연결되어 회전하고 있으므로 Enc. #1 의 펄스 신호는 무선으로 전송된다. 본 연구의 실험 결과에 적용된 하우징 회전속도는  $\omega = 2\text{rps}$ 이다.

이중 엔코더 시스템의 엔코더 펄스는 매우 정밀한 시간 정보를 포함하고 있으므로 무선 전송에 따른 지연을 최소한으로 감소 시키기 위해서 광변조를 이용한다. 직류 전원은 외부에서 슬립링(Slip ring)을 통하여 하우징으로 공급되며, Enc. #1 은 엔코더 펄스를 스위칭 트랜지스터를 이용하여 적외선 다이오드를 구동한다. 한편, Enc. #2 는 중공(Hollow)형태를 채용하고 있으며, Enc. #1 의 하우징

은 Enc. #2 의 중공축에 연결되므로 광 변조용 적외선 다이오드는 중공을 통하여 외부로 적외선을 방사한다. 외부에서는 포토 트랜지스터를 이용하여 적외선을 검출하여 Enc. #1 의 펄스를 복조하게 된다. 이러한 광 변조 실험 결과, 광 변조는 수 나노(nano)초의 지연을 포함하고 있었다. 엔코더 펄스의 시간 정보 처리에 수 마이크로( $\mu$ )초 정도를 이용하고 있으므로 수 나노초 수준의 지연은 무시될 수 있다.

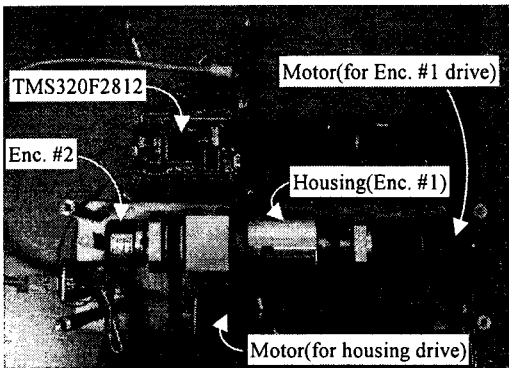


Fig. 9 Experimental setup

먼저, Enc. #1 의 축을 고정된 상태에서 Enc. #2 를 구동했을 때, 1 번 및 Enc. #2 의 펄스 주기를 검출한 결과를 Fig. 10 에 나타내었다.

Fig. 10 의 실험 결과에 의하면 1 번 및 Enc. #2 의 출력 신호는 거의 동일한 주기(속도)를 나타내고 있다. 이것은 당연한 결과이다. Enc. #1 및 Enc. #2 가 서로 연결되어 동기 회전하기 때문이다. 여기서 중요한 내용은 Fig. 10 의 결과와 같은 회전 속도 정보를 거의 1ms 주기로 얻을 수 있고, 이중 엔코더 시스템의 알고리즘 처리를 통해서 정지 속도에 해당함을 알 수 있다. 즉, 정지 상태를 1ms 주기로 검출하고 있다는 점이다.

이중 엔코더 시스템이 초저속 조건에 대해서 어떤 성능을 보이는지 확인하기 위해서 별도 외부 구동모터와 246:1 감속기를 이용하여 Enc. #1 을 일정한 속도로 Enc. #2 와 동일한 정방향(Direct direction) 및 역방향(Count direction)으로 구동하였을 때, 1 번 및 Enc. #2 의 펄스 주기를 검출한 결과를 Fig. 11 에 나타내었다. Fig. 12 는 이중 엔코더 알고리즘으로 최종적으로 계산된 속도와 외부 구동모터의 내장 엔코더를 이용해서 계산된 속도를 나타

내고 있다.이 때, 외부 구동모터에 부착된 감속기 정보가 주어져 있으며, 외부 구동모터에 내장된 별도의 엔코더를 이용하여 외부 구동모터의 회전 속도를 파악할 수 있으므로 최종 감속된 Enc. #1 의 초저속 상태는 이미 알려져 있다. 외부 구동모터용 드라이버의 특성차이로 인하여 정방향 최저 속도는 약 3.5rpm 을 역방향 최저 속도는 약 2rpm 을 나타내고 있다.

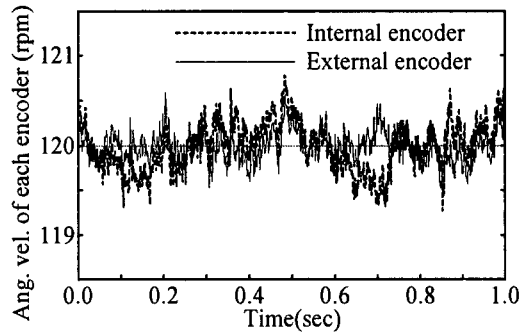


Fig. 10 Pulse period of both the encoders with locked inner encoder axis

Enc. #1 이 역방향으로 회전하는 경우 이중 엔코더 알고리즘 결과와 내장 엔코더 결과는 거의 일치하는 반면에, Enc. #1 이 정방향으로 회전하는 경우 이중 엔코더 알고리즘 결과와 내장 엔코더 결과 사이에 상대적으로 큰 오차가 발생하고 있다. 그 이유는 다음과 같이 추정된다. 광변조를 통한 Enc. #1 신호 통과 확보를 위해서 중공형 Enc. #2 를 사용하는데, 부착 정밀도에 민감한 Enc. #2 의 조립 오차 및 하우징 가공 오차에 의해서 회전 방향에 따른 서로 다른 흔들림 발생 경향이 그 원인으로 추정되고 있다.

Fig. 13 은 사용하여 외부 구동모터의 속도제어 없이 일정한 전압으로 구동한 다음, 단순히 0.5 초 주기로 회전 방향만을 주기적으로 반전시켰을 때, Enc. #1 과 Enc. #2 의 결과를 나타낸 것이다. 이 때, 외부 구동모터의 속도는 Enc. #1 출력과 Enc. #2 출력의 차이값으로 주어진다. 구동모터의 회전 방향이 전환되는 영역, 즉, 제로 속도가 발생하는 경우에 대한 이중 엔코더 시스템의 1 번 및 Enc. #2 의 펄스 주기를 검출한 결과를 나타내고 있다. 이러한 결과는 Fig. 10 과 연결해서 고찰해 보면, 제로 속도가 존재하는 회전 방향이 전환되는 영역



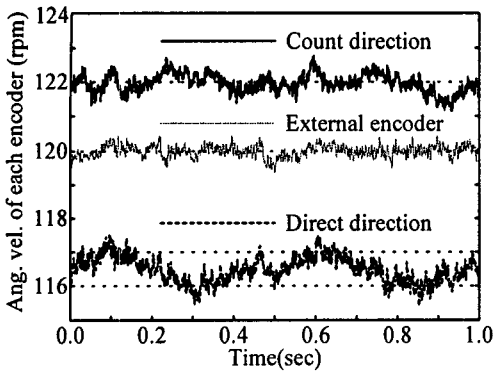


Fig. 11 Velocity from pulse trains of both the encoders in case of ultimate slow speed with both directions

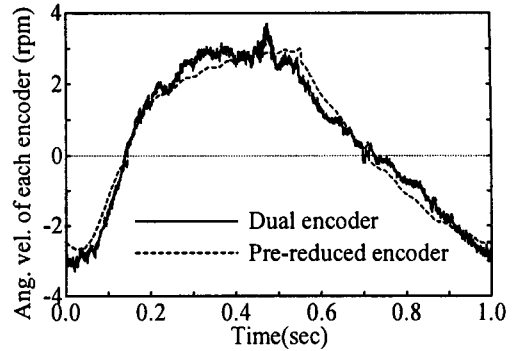


Fig. 14 The real velocity with pre-reduced encoder and ultimate low velocity detection with the dual encoder

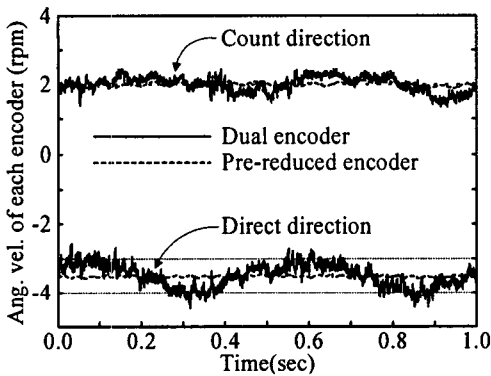


Fig. 12 Both direction velocities of the internal encoder's axis by using the dual encoder system

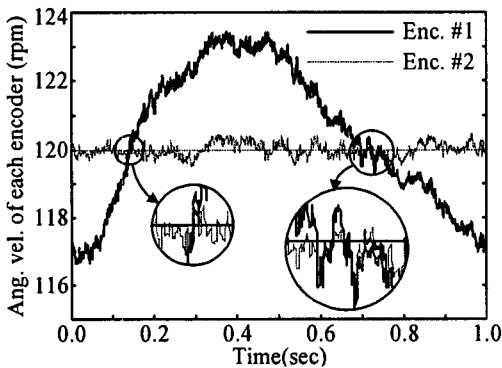


Fig. 13 Angular velocity of both internal and external encoders in case of ultimate slow speed of the driving

에서는 1번 및 Enc. #2의 펄스 주기가 거의 동일함을 알 수 있다.

Fig. 14는 이중 엔코더 알고리즘으로 최종적으로 계산된 속도와 외부 구동모터의 엔코더를 이용해서 계산된 속도를 나타내고 있다. 이 때, 외부 구동모터에 직접 부착된 내장 엔코더는 매우 높은 빈도(수 KHz)로 펄스를 출력하므로 Enc. #1의 초저속 상태를 양호하게 얻을 수 있다. Fig. 14의 결과에 의하면 예상한 바와 같이 초저속 상태에서 회전 방향의 전환에도 상관없이 고속 빈도로 속도를 양호하게 검출하고 있음을 보여주고 있다.

### 5. 결론

본 연구에서는 보통 정밀도급 광학식 엔코더 2개와 검출 알고리즘 처리용 DSP 제어기를 이용하여 고정밀 이중 엔코더 시스템을 구성하였다. 저속에서 샘플링 주기가 현저하게 훼손되는 기존 엔코더의 신호처리 특성과는 달리 초저속에서도 이중 엔코더 시스템 알고리즘은 샘플링 주기 훼손이 발생하지 않으며, 정지 속도 및 역회전이 발생하는 순간에도 안정된 결과를 얻을 수 있었다. 저속에서 고속의 속도 검출 샘플링 주기를 유지하는 특징은 특히, 마찰력의 영향력이 상대적으로 증가하는 저속에서 매우 유용한 장점이 될 수 있다.

이중 엔코더 시스템은 사용하는 엔코더의 정밀도에도 영향을 받지 않고, 기존에 제어기로 사용되고 있는 제어기에 수치 알고리즘 형태로 포함될 수 있다. 이중 엔코더 시스템은 기존에 엔코더 펄

스의 원시 펄스를 AD 변환하는 아날로그 방식과는 달리 완전 디지털 방식으로 외부의 전기적인 잡음에 매우 강인한 특징을 갖고 있으므로 온도, 전압 변화 등 주변 환경의 변화에 매우 강한 디지털 특성을 그대로 승계하고 있다.

## 후 기

이 연구 결과물은 2005 학년도 경남대학교 신진 교수연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Brown, R. H., Schneider, S. C. and Mulligan, M. G., "Analysis of algorithms for velocity estimation from discrete position versus time data," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 39, Issue 1, pp. 11-19, 1992.
2. Ohmae, T., Matsuda, T., Kamiyama, K. and Tachikawa, M., "A microprocessor-controlled high-accuracy wide-range speed regulator for motor drives," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. IE-29, Issue 3, pp. 207-211, 1982.
3. Belanger, P. R., Dobrovolny, P., Helmy, A. and Zhang, X., "Estimation of angular velocity and acceleration from shaft-encoder measurements," Int. J. Robot. Res., Vol. 17, No. 11, pp. 1225-1233, 1998.
4. Dunworth, A., "Digital instrumentation for angular velocity and acceleration," IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. IM-18, Issue 3, pp.132-138, 1969.
5. Saito, K., Kamiyama, K., Ohmae, T. and Matsuda, T., "A microprocessor controlled speed regulator with instantaneous speed estimation for motor drives," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 35, Issue 1, pp. 95-99, 1988.
6. Hori, Y., "Robust and adaptive control of a servomotor using low precision shaft encoder," IEEE IECON'93, pp. 73-78, 1993.
7. Lee, S. H., Lasky, T. A. and Velinsky, S. A., "Improved velocity estimation for low-speed and transient regimes using low-Resolution Encoders," IEEE/ASME Trans. Mechatron., Vol. 9, No. 3, pp. 553-560, 2004.
8. Ishikawa, J. and Tomizuka, M., "Pivot friction compensation using an accelerometer and a disturbance observer for hard disk drives," IEEE/ASME Trans. Mechatron., Vol. 3, Issue 3, pp. 194-201, 1998.
9. Lee, S. H. and Song, J. B., "Acceleration estimation for low-velocity and low-acceleration regions based on encoder position data," IEEE/ASME Trans. Mechatron., Vol. 6, No. 1, pp. 58-64, 2001.
10. Kim, K. J. and Kim, Y. G., "Fabrication of Optical Micro-Encoder Chips for Sub-Micron Displacement Measurements," J. of the Korea Society for Precision Engineering, Vol. 16, No. 2, pp. 74-81, 1999.