

# 위상차를 이용한 축계마력 측정시스템에 관한 연구

## A Study on the Shaft Power Measurement System using Phase Difference

허 광 석<sup>†\*</sup>Gwang-Seok Heo<sup>†\*</sup>

### 요 약 문

본 연구에서는 소형 선박을 대상으로 축계에서의 정확한 출력을 측정하기 위한 시스템을 제안하고, 그에 대한 개발방법에 대하여 논의하고자 한다. 일반적으로 선박에 탑재되는 엔진은 선박의 사용 목적, 선박 크기 및 선속 등의 설계 사항에 맞추어 결정된다. 따라서 엔진으로부터 프로펠러에 전달되는 동력 즉, 엔진의 출력을 정확하게 검출하는 것은 설계된 선박이 본래의 설계 목적을 만족시킬 수 있는 지에 대한 판단근거로 활용되는 중요한 작업이라 할 수 있다.

실제로 엔진 출력산정에 관한 자료는 정확하게 제시되어야하며 본 연구에서는 실제 엔진을 회전 기기로 가정하고, 전동기로 대체한 회전기기의 출력측정시스템을 개발하고자 한다. 선박용 엔진, 압축기, 전동기 등은 구동 동력원에 약간의 차이가 있지만 회전에 의한 동력전달방식은 큰 차이가 없다고 볼 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 동력측정 방법은 다양한 종류의 회전기기에 폭넓게 적용할 수 있을 것이다.

※ Keywords : 위상차(Phase Difference), 축계마력(Shaft Power)

## 1. 서 론

1877년 William Froude가 수동력계(Water brake)를 개발한 이래 소형은 수십 마력에서 대형은 14만 마력정도까지 엔진출력을 측정하기 위한

동력계는 아주 다양하다. 엔진 제작사들은 추진용 엔진으로 이러한 유형의 동력계를 대부분 이용하고 있으며, P-V 선도를 이용한 동력측정은 선도의 면적을 구한 다음에 구할 수 있다. 기계효율은 지압계나 PMI SYSTEM 등을 이용하여 P-V선도를

\* 선박안전기술공단 여수지부

† 논문주저자

연은 후 면적계산에 의해서 지시마력을 구하고 동력계에서는 축마력인 평균유효마력을 측정하여 기계효율을 구하게 된다. 동력측정은 동력계에서 수행하는 것이 가장 바람직하며 해상시운전 시 엔진의 동력을 측정 또는 평가할 수 있는 기본 자료들을 제공하고 있다. 또한 디젤엔진이 새로운 기종의 경우 관계기관과 선급 등의 입회하에서 형식 승인을 받게 된다. 이때 마력뿐만 아니라 많은 계측들을 수행하여 엔진 부품들의 신뢰성을 확인하게 된다. 그리고 시운전 결과 보고서에는 IACS M50과 ISO 3046-1에 명시된 부하들 (25%, 50%, 75%, 85%(일반적으로 Nominal Continuous Rating), 100%, 110% of the maximum rated power)에 대하여 기계효율, FO Pump Rack indicator, T/C RPM, FO Consumptions, 각 중요부위의 주변온도 및 압력 등을 계측하여 해상시운전시 엔진 동력을 산정할 수 있는 기본 자료를 제공하여야 한다. 시운전시 출력 동력계 내부에 설치된 전단변형률을 측정하기 위하여 스트레인 게이지 타입의 센서와 부수적인 장비들이 구성되는데 이들에 대해서는 규정에 따라 정기적으로 공인된 기관에서 교정 작업을 수행하여야 한다. 그 외에 소용량이나 발전용 엔진의 출력은 와전류(Eddy current)를 이용한 동력계가 사용되기도 한다.

선박에서 엔진동력을 측정하는 방법은 상당히 어렵고 정확성이 약간 떨어지기는 하지만 동력 산정 방법을 관계기관과 선주에게 사전에 알려 주어야 한다. 또한 해상에서 정밀하게 동력을 측정하는 방법으로 실린더 내 연소압력을 측정하는 방법과 중간축에 토크미터(Torque-Meter)를 설치하여 측정하는 방법이 있다. 구체적인 동력측정

방법으로는 지압계, MAN B&W에서 제공한 PMI SYSTEM, 그리고 스트레인 게이지를 이용하는 방법이 있다.

우선 지압계의 활용 방법으로서 연소압력은 지압계로 측정할 수 있는데 종래에 많이 사용해 오던 기계식 Maihak지압계를 이용하는 방법을 소개하고자 한다.

고속엔진에는 엔진회전수가 높기 때문에 여기에 적합하게 개발된 지압계는 일반적으로 중·고속 엔진에는 피스톤의 행정변화에 따라 P-V 선도를 그려낼 수 있도록 준비가 안된 엔진의 경우가 많다. 이러한 경우에는 단순하게 실린더 내 압축 및 연소 압력만을 체크하는데 그치고 있는 반면 저속엔진 용에는 지압계에 많이 쓰고 있는데 실린더 행정의 변화에 따라 P-V 선도를 쉽게 그려낼 수 있다.

그리고 전기식 지압계인 PMI 시스템의 일반적인 구성은 압력을 계측할 수 있는 피에조 타입의 압력 센서, 크랭크 각을 Pick-up할 수 있는 센서 그리고 TDC를 측정하는 Pick-up 센서로 구성되는데 각 회사마다 크랭크 각을 Pick-up할 수 있는 센서는 다르다.

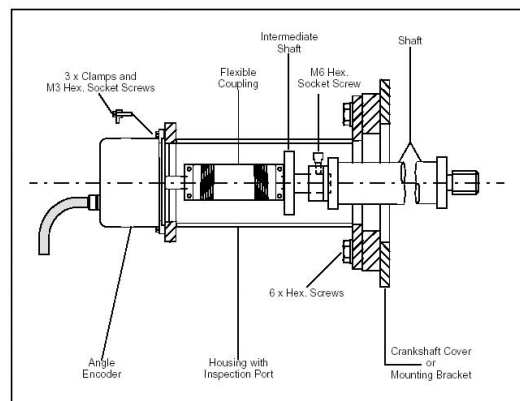


Fig. 1 PMI 시스템에서 크랭크 각을 Pick-up 하기 위한 엔코더

엔진 전체의 축 동력을 계측하는 방법으로 대부분 토크 메타를 중간축에 설치하게 되는데, Fig. 2는 스트레인게이지를 이용한 토크측정시스템의 기본 구성도이며, Fig. 3은 노르웨이 KYMA사의 마력 측정 시스템을 나타내고 있다.

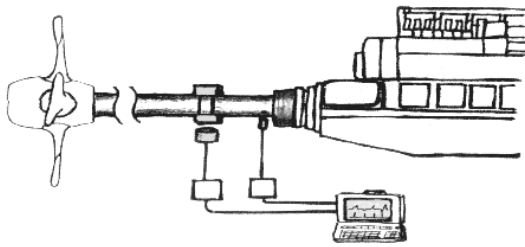


Fig. 2 스트레인 게이지를 이용한 동력측정을 위한 기본원리

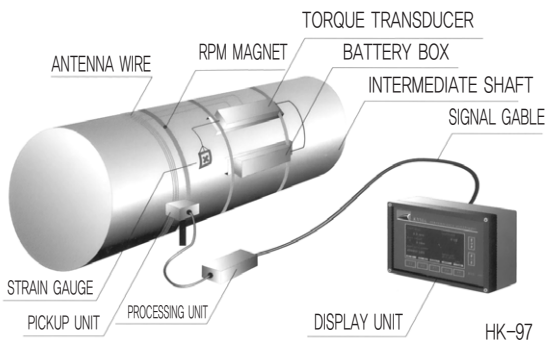


Fig. 3 스트레인 게이지를 이용한 동력측정방법

Fig. 2와 Fig. 3의 동력 측정계를 살펴보면 우선 중간축에 Full Bridge를 갖는 스트레인 게이지가 부착되고 축의 전단 변형률이 저항변화로 바뀌게 된다. 그리고, 이를 원격송신장치(Telemetering)를 통해서 수신하여 마력으로 환산하게 된다. 이 그림에서는 Battery 전원이 사용되었지만 선박에 영구적으로 설치하여 항상 마력을 측정할 경우 일정한 전압이 역방향으로 원격측정장치를 통해 스트레인

게이지에 공급되게 된다. Fig.1.3에서의 DISPLAY를 ENGINE CONTROL RM에 부착하면 영구적인 동력측정시스템이 되게 된다.

## 2. 동력측정시스템의 개발

동력전달 축은 전달되는 토크에 의한 비틀림 각을 발생시키게 되는데 본 연구에서는 동력 전달 축(Motor part)과 부하 축(Load part)사이의 축(Shaft)상에 두 개의 기어 휠을 설치한다. 동력 구동원에 의해 축은 회전하게 되고, 회전하는 기어의 산과 골 사이의 거리는 비접촉식 전자식검출기에 의해 검출되어 ON-OFF(구형파)신호로 출력된다. 동력전달 축과 부하단 축의 구형파신호는 가해지는 부하 값에 의해 위상차가 발생하게 되고, 발생된 위상차는 전압신호로 출력되어 컴퓨터상에서 모니터링과 신호해석을 행하게 된다.

제어프로세서에서는 위에서 얻어진 위상차에 대한 정보를 바탕으로 축에 가해진 토크 및 마력을 계산하여 결과 값을 모니터에 출력하는 시스템이 얻어지게 된다. 두 지점간의 위상차를 이용한 축계마력 측정시스템의 구성도는 Fig.4와 같다.

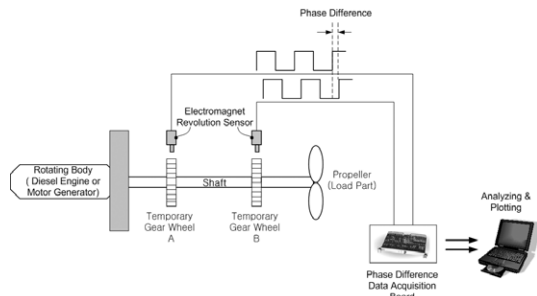


Fig. 4 토크측정시스템의 구성도

Fig. 4와 같은 시스템을 이용하여 토크로 인한 축에서의 비틀림 각을 측정하고 비틀림 각과 탄성 계수를 이용하여 토크를 계산한 다음 회전축의 각 속도를 곱하여 축에서의 마력을 계측하게 되는데 다음과 같은 측정원리를 이용하게 된다.

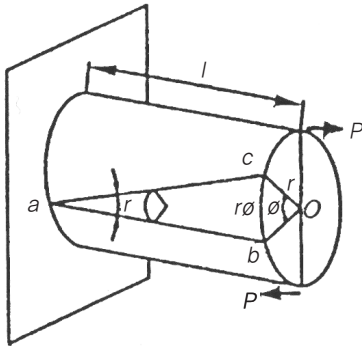


Fig. 5 원형단면의 비틀림

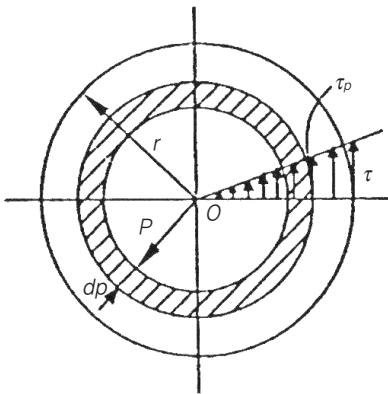


Fig. 6 원형단면의 응력분포

Fig. 5의 원형축의 한쪽 끝은 고정시키고, 다른 쪽 끝에 우력을 작용시키면 축선과 평행한 기준선 ab는 축의 비틀림에 의해 ac로 변형된다. 이 때 축 내부에는 비틀림 응력(torsion stress)이 발생되며,

외부에서 가해진 우력을 비틀림 모멘트(torsional moment) 또는 토크(Torque)라고 한다. 비틀림 모멘트의 단위는 “힘 거리”이므로  $N, m$ 가 된다. Fig. 5의 축선 ab가 ac로 변함에 따라 축의 끝단에서는  $\angle boc$ 인 비틀림 각  $\theta$ 가 만들어지고 원호 bc는  $r\theta$ 가 된다. 여기서,  $\angle bac$ 를  $\gamma$ 라고 하면 다음 식이 성립된다.

$$\tan \gamma = \frac{bc}{ab} = \frac{r\theta}{l} \quad (1.1)$$

여기서,  $\gamma$ 는 극히 작은 각이므로

$$\gamma = \frac{r\theta}{l} \quad (1.2)$$

가 된다.

$\tau$ 는 토크에 의해 길이  $l$ 인 원형단면의 축 둘레에 발생하는 전단변형률(shearing strain)이다. 따라서 축에 발생하는 전단응력은

$$\tau = G\gamma = G \frac{r\theta}{l} = G \frac{\theta}{l} r = G\theta r \quad (1.3)$$

여기서,  $\frac{\theta}{l} = \theta'$ 로 표시하였으며, 축의 단위길이 당의 비틀림 각이다. 식 (1.3)에서  $r=0$ 인 경우(축의 중앙점)에는  $\tau=0$ 이 되고, 임의반경  $p$ 에서는 다음 식이 얻어진다.

$$\tau_p = G \frac{\rho\theta'}{l} \quad (1.4)$$

$\rho$ 가  $r$ 일 때,  $\tau$ 는 최대값으로서  $\tau_{max}$ 가 된다. 식 (1.3)과 식 (1.4)로부터 다음 식이 얻어진다.

$$\frac{\tau_p}{\tau} = \frac{\rho}{r} \quad (1.5)$$

다음으로 토크와 비틀림 응력의 관계를 보면 원형봉에 토크  $T_q$ 가 가해질 때, 단면상에 발생하는 비틀림 응력은 Fig. 6에 도시되어 있다. 여기서, 원점  $O$ 로부터  $\rho$ 만큼 떨어진 미소원환의 면적을  $dA$ 라고 하면 이 면상에 작용하는 전단력은 다음과 같다.

$$dF = \tau_p dA \quad (1.6)$$

그리고  $dA$ 에 작용하는 토크는

$$dT = \rho dF = \tau_p \rho dA \quad (1.7)$$

이 된다. 식 (1.7)에 식 (1.5)를 대입하고 적분하면  $\int dT = T_q$  이고,

$$\begin{aligned} \int \rho^2 dA &= I_p \text{ 이므로} \\ T_q &= \int_A \tau_p \rho dA = \int_A \tau \frac{\rho}{r} \rho dA \\ &= \frac{\tau}{r} \int \rho^2 dA \\ &= \frac{\tau}{r} I_p \end{aligned} \quad (1.8)$$

이 된다.  $I_p = Z_p r$ 을 이용하면 식 (1.8)은

$$T_q = \frac{\tau}{\gamma} I_p = \frac{\tau}{\gamma} Z_p r = \tau Z_p \quad (1.9)$$

가 된다. 이 식은 토크  $T_q$ 를 받는 축의 비틀림 응력  $\tau$ 를 구하는 중요한 식이다. 일반적으로 원형 축을 많이 사용하므로 원형단면의 극단면 계수  $Z_p = \frac{\pi d^3}{16}$ 을 식 (1.9)에 대입하면

$$T_q = \tau \frac{\pi d^3}{16} \quad (1.10)$$

이 된다. 즉, 원형축의 비틀림 응력은 토크  $T_q$ 에 비례하고, 직경의 3제곱의 비례함을 알 수 있다.

토크  $T_q$ 가 작용하는 경우,  $T_q$ 에 의한 비틀림 각  $\theta$ 를 구하면 식 (1.3)에서

$$\tau = G \frac{r\theta}{l} \text{ 이므로}$$

$$T_q = G \frac{\pi d^4 \theta}{32l} \quad (1.11)$$

의 관계가 성립된다. 단,  $\theta = \frac{32Tl}{G\pi d^4}$  이고,  $G$ 는 재료의 횡탄성 계수,  $d$ 는 축의 직경,  $l$ 은 두 측정 지점 간의 거리를 의미한다. 따라서 비틀림 각에 의한 토크의 값은

$$T_q = K_\theta \cdot \theta \quad (1.12)$$

와 같이 구할 수 있다.

단,  $K_\theta = \frac{\pi}{32} \frac{d^4 G}{l}$  [Nm/rad]이고, 토크봉의 횡(전단)탄성 계수  $G$  값은  $7.060788 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup>이다.

비틀림 각에 의한 토크( $T_q$ )가 계산되면 최종적으로 축에 전달되는 축마력은

$$P = T_q \cdot \omega \quad (1.13)$$

로 구해진다. 단,  $\omega$ 는 축의 회전각속도를 의미한다.

## 2.1 동력측정시스템

### 1) 외 관

본 연구에서 제안한 동력측정시스템의 블록선도는 Fig. 7과 같다. 크게 원동기, 기어 휠, 엔코더, 토크측정용 시편, 토크센서, 발전기, 저항부하, PC로 구성이 되어 있다. Fig. 7은 구성품을 갖는 동력측정시스템을 나타내고 있다.

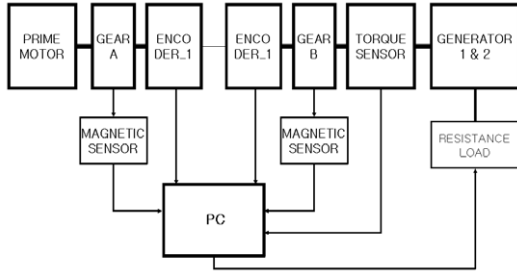


Fig. 7 시스템의 구성도

원동기로부터 발생된 토크는 기어 A와 기어 B를 연결하는 축으로 전달되고, 발전기 축의 전기적인 부하에 의해 토크측정용 시편에 비틀림 응력이 발생하며 이 비틀림은 기어 A, B에서 측정되는 구형파의 위상차로 변환되게 된다.

축에서 발생된 위상차는 DAQ보드를 통해 디지털 값으로 변환되어 파일로 저장된 후 해석을 행하여 위상차를 계산하고, 위상차로부터 축에 가해진 토크 값을 계산한 다음 최종적인 축마력을 계산하게 된다.

## 2) GEAR

무부하측과 부하측의 위상차를 검출하기 위해 기어를 설치하였다.

모듈이란 기어의 이(齒)의 크기를 정하는 수치로 지름을 이의 수로 나눈 값을 말한다. 본 논문에서 사용한 기어의 경우 Involute type이고 모듈은 다음과 같다.

$$\text{모듈} = \frac{\text{기어의 지름}}{\text{기어의 이주}} = \frac{150}{70} = 2.14$$

탐지 거리는 기어 모듈에 의해 영향을 받게 되고, Fig. 8은 Duty cycle이  $50\% \pm 20\%$ 일 때의 산출 파형을 가정한 비접촉센서(MP981)의 탐지범위를 나타내고 있다.

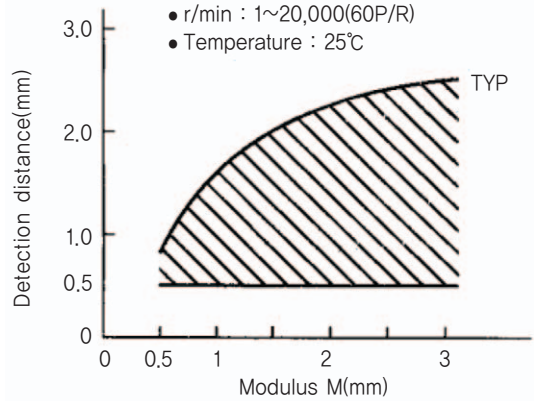


Fig. 8 모듈에 따른 탐지거리

## 2.2 센서

### 1) Encoder

엔코더는 회전 위치 및 속도를 검출하는 목적으로 서보모터를 사용한 고속회전 위치 제어에 사용된다. 엔코더는 수십kHz 정도까지 응답하는 고속성과 비접촉 동작에 의한 높은 신뢰성을 가지고 있다. 로터리 엔코더에는 절대값형(Absolute)과 증분형(Incremental)이 있다. Fig 9는 엔코더의 동작원리를 나타낸다. LED로부터 광 투사된 광선은 회전 디스크의 슬릿을 통과한 뒤 고정 슬릿판의 A, B, 0에 해당하는 각각의 슬릿을 통과하여 A, B, 0의 수광소자에서 검출된다. 고정 슬릿판상의 A, B의 슬릿은  $90^\circ$ 의 위상차를 갖도록 배치되어 있으며, 파형이 정비된 전기적 신호 출력도  $90^\circ$ 의 위상차를 갖는 구형파로 된다.

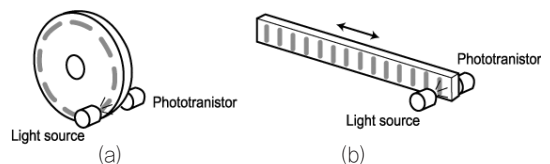


Fig. 9 Incremental 엔코더의 원리

Incremental Encoder는 구조가 간단하고 가격이 싸며, 출력 전선의 개수도 작아서 신호전달이 간단하다. 엔코더의 출력 펄스는 축의 회전 위치의 절대치를 나타내지는 않고 축의 회전 각도에 비례한 펄스수가 얻어지는 것이며, 절대치 표시를 수행하는 경우는 엔코더 출력 펄스를 카운터에 축적한 것으로 표시한다.

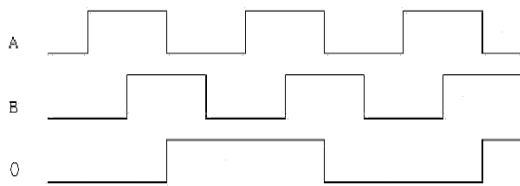


Fig. 10 시계방향(CW)의 파형

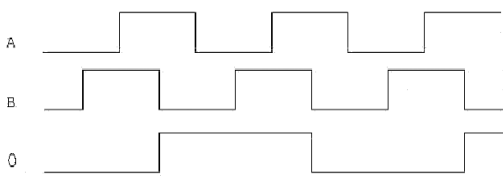


Fig. 11 반시계 방향(CCW)의 파형

Fig. 10과 Fig. 11은 증분형 엔코더의 시계방향(CW), 반시계 방향(CCW)의 파형을 나타내고 있다. 시계 방향(CW)과 반시계 방향(CCW)으로 휠이 회전할 때 발생하는 파형을 각각 채널 X와 채널 Y라고 명명하며, 이 두 채널의 신호 파형을 이용하여 회전 방향을 판별할 수 있다.

## 2) Magnetic sensor (MP-981)

본 장치에서는 Magnetic sensor로 MP-981을 사용하였으며 기어 등과 같은 대상물에 대하여 거리에 의한 ON-OFF값 즉, 구형파를 생성시킨다.

Fig. 12는 본 연구에서 사용된 Magnetic Sensor인 MP-981의 외관을 나타낸다.

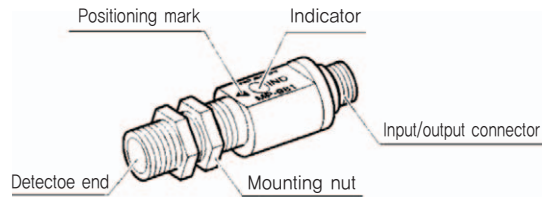


Fig. 12 Magnetic sensor MP-981

산출된 펄스의 폭은 CW, CCW 방향에 따라 달라진다. Fig. 13은 회전 방향에 따른 펄스의 예를 보여준다.

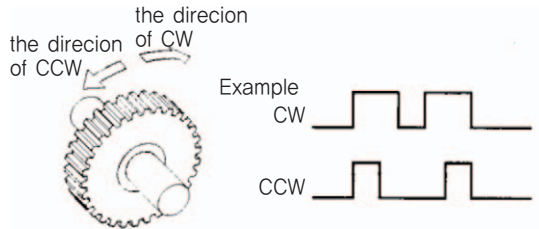


Fig. 13 회전방향에 따른 펄스의 폭

탐지거리는 기어의 모듈 및 주변 환경의 온도에 의해서도 영향을 받는다. 온도가 홀원소에 영향을

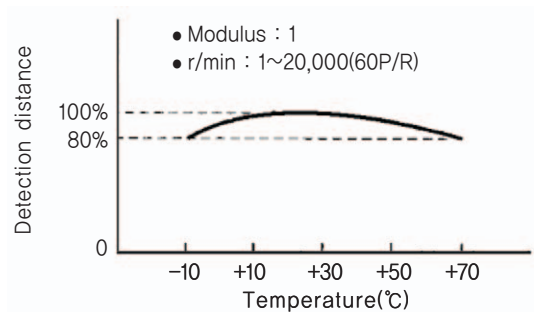


Fig. 14 온도에 따른 탐지거리

미치므로, 탐지거리를 정할 때 온도 변화에 주의해야 한다. Fig. 14는 온도에 따른 탐지거리의 변화를 보여준다.

### 3) Torque Sensor

토크 센서는 스트레인 게이지 방식의 내부 비틀림을 신호 처리하여 직접적으로 축에 발생된 토크를 측정할 수 있다. 센서의 사용목적 또는 정적·동적 비틀림 측정방식에 따라 정현식과 회전식으로 나누어지며, 회전식은 내부 신호출력을 위한 슬립링과 브러시를 사용한 접촉식(슬립링 타입)과 회전부와 고정부(신호처리부)가 베어링이나 무단식 구조를 가지는 비접촉식으로 나누어진다. 본 장치에 사용된 비접촉식 토크센서는 전 토크센서로 구조상 소형이므로 적은 관성력과 회전부와 고정부의 신호 처리는 FM-Module에 의한 방식과 Digital transmission 방식이 있으며 출력신호는 각각 Active voltage인  $\pm 5V/\pm 10V$ 를 가지고 사용자의 구현에 따라 직접 PLC나 A/D-Converter를 이용한 PC로 측정·제어가 가능하다. 다음 Fig. 15는 본 장치에 사용된 토크 센서이다.



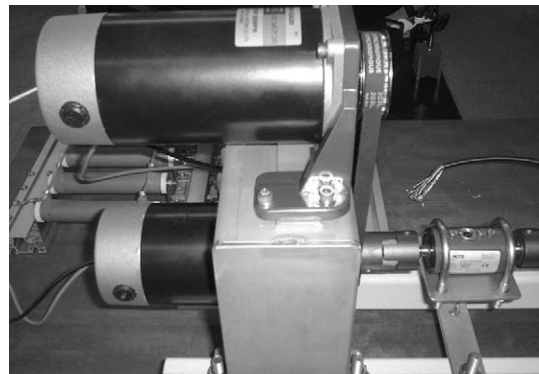
Fig. 15 Torque sensor

### 2.3 토크 측정봉

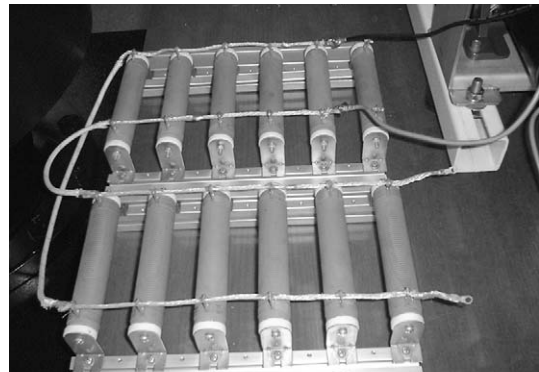
부하에 의해 기어 휠 사이에는 비틀림이 작용하므로 토크측정용 시편의 재질은 50CrV4, 경도는 HRC43~50으로 하여 비틀림에 의해 시편이 부러지거나 파손되지 않도록 하였다.

### 2.4 부하측

동력측정시스템에서 부하측의 변화를 가하기 위하여 같은 축 상에 Fig. 16 (a)와 같은 발전기 2대(직류 전동기)를 병렬로 설치하였고, 부하는 Fig. 16 (b)와 같은 저항부하(권선저항)를 적용하였다.



(a)



(b)

Fig. 16 부하전류 발생용 발전기 및 저항부하



또한 부하의 크기는 임의로 조절이 가능하도록 컴퓨터상에서 프로그래밍 하였고, 발전기의 24V 발생전압(전류)을 부하단에 흐르게 하기 위하여 DC 컨버터(5V DC → 24V DC)를 적용하여 릴레이를 구동하도록 하였다.

## 2.5 결선도

### 1) 전체시스템

Fig. 17은 전체 시스템의 결선도를 나타내고 있다. 좌측 M은 원동기(3상 BLDC전동기), EN, GR, TM은 각각 엔코더, 기어, 토크센서를 나타내고 있다. 우측단의 G는 부하용 발전기로서 300W 용량의 직류전동기가 2대 설치되어 있다. 엔코더 신호, 기어 휠의 구형파 신호, 토크센서로부터의 전압신호는 Multifunction board(A/D&DIO)로 입력되어 PC상에서 신호를 모니터링하고, 데이터로 저장하게 된다. 아울러 PC로부터 부하를 가변시키기 위해 DIO(Digital Input Output) 채널-릴레이를 거쳐 해당 저항 부하를 연결시킬 수 있게 된다.

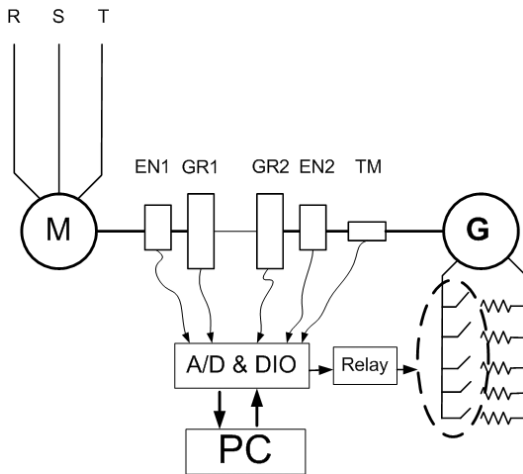


Fig. 17 전체 시스템의 결선도

상기와 같은 시스템에서 A/D보드를 통해 얻어지는 데이터로부터 두 지점간의 위상차를 검출 즉, 토크로 인한 비틀림 각을 계산하고 토크 및 축마력은 컴퓨터 내의 해석 프로그램에서 계산되어 최종적인 결과 값을 계측자가 알 수 있도록 출력하게 된다.

### 2) Magnetic Sensor (MP-981)

기어가 회전함에 따라 구형파를 출력하는 비접촉식 마그네틱센서 MP-981을 사용하였다. 연결된 빨간색 선에 의해 양극전원이 검은색 선에 의해 음극전원이 공급된다. 이때의 공급전원은 DC 12 ±2V이다. 다른 장치의 카운터가 MP-981과 연결되었을 때, 신호 산출을 위한 파워 공급은 검은색 선과 녹색 선이 함께 연결되어야 한다. 또한, 분리된 파워 공급으로부터의 작동을 위해, 파란색 선과 녹색 선은 출력 신호로서 사용되고 붉은색 선과 검은색 선은 그 파워 공급 신호로서 사용된다. 이러한 유형의 작동은, 카운터 또는 다른 장치에서의 음극 전원공급과 그라운드는 탐지기내에서 서로 연결되어 있기 때문에 이러한 것들을 따로 분리해 줄 필요가 없다. Shield는 탐지기의 케이스에 연결되고 보통 다른 장치, 카운터의 케이스 또는 공통의 터미널에 이어져야 한다. Fig. 18은 MP-981의 전원 결선도를 나타낸다.

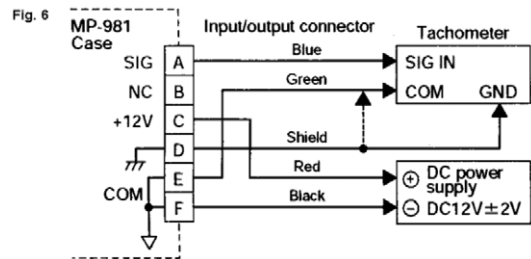


Fig. 18 MP-981 전원 결선도

### 3) Encoder

본 연구에서 사용된 Incremental Encoder의 핀 배열을 갖는 것을 사용하였으며, 엔코더의 공급 전압과 출력전압 범위는 다음과 같다.

- 공급전압 : DC 5~30V
- 출력전압 : DC 12.8V~13.2V

### 4) Torque sensor

Fig. 19와 본 연구에서 사용된 토크 센서의 단자와 핀 배열이다.

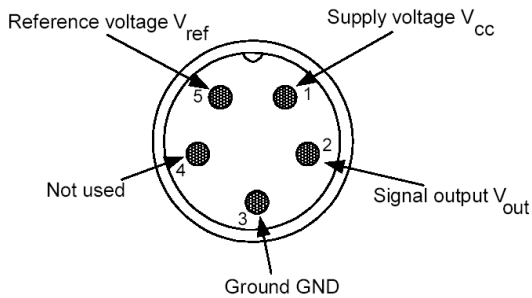


Fig. 19 센서 소켓 출력부의 단자그림

$V_{ref}$ 는 2.5V 출력, 그리고 +/- 토크 측정의 가상 영점을 나타낸다. Fig. 20과 Fig. 21은 토크 센서의 결선 방법을 나타내고 있으며, Fig. 20은 Absolute 결선법이고 Fig. 21은 Relative 결선법이다.

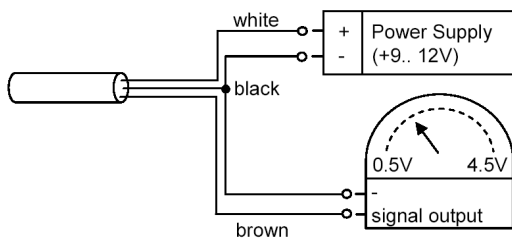


Fig. 20 Absolute 결선법

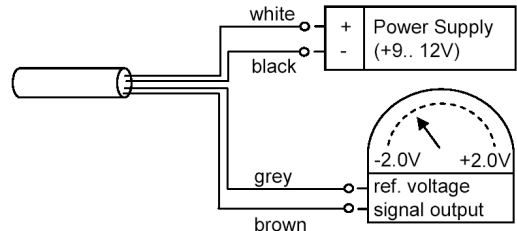


Fig. 21 Relative 결선법

Fig. 20이 나타내는 회로에서는 절대적 토크 값이 출력된다. 즉, 기준 전압  $V_{ref}$ 인 회색을 연결하지 않고 마이너스전원을 연결하면 출력전압의 범위가 0.5V에서 4.5V인 Absolute 결선이 된다. 또한, Fig. 21이 나타내는 회로에서는 상대적 토크 값이 출력된다. Fig. 20과는 반대로  $V_{ref}$ 에 회색을 연결하여 기준 전압을 2.5V를 인가하게 되면 기준 전압이 0V에서 2.5V로 변하기 때문에 0.5V에서 4.5V이던 출력범위가 -2V~+2V인 Relative 결선법이 된다.

### 5) Relay

부하 상태를 선택(Load 및 Unload)하기 위하여 저항 측에 전류를 도통해 주는 중간회로에 릴레이 (NAIS)를 사용하였다. 릴레이의 구동전원은 DC 24V이다.

Fig. 22는 릴레이(NAIS)의 외관을 나타내며 Fig. 23은 릴레이의 결선법을 나타낸다. Pin 1에 +12V를 Pin 6에 -12V를 걸어주면 Pin 7번과

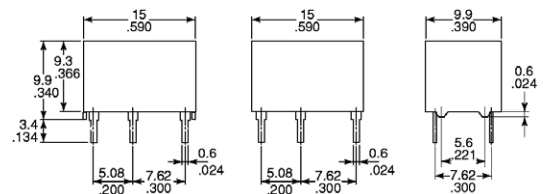


Fig. 22 Relay의 외관

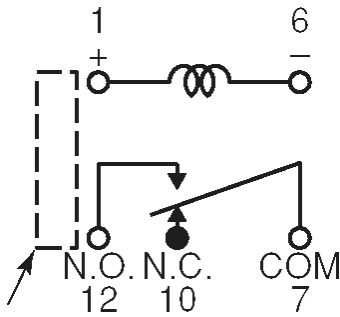


Fig. 23 Pin 결선도

Pin 12번이 A접점이므로 닫히게 된다. 즉, 무부하시에 Open상태의 접점연결에서 부하 시에 Close 상태의 접점에 의해 발전기로부터의 전류가 권선 저항 측으로 흐르게 된다.

### 3. 실험 및 분석

본 연구에서 신호를 계측하기 위해 사용한 프로그램은 NI(national instrument)사의 LabView이다. LabView 프로그램은 그래픽라이브러리를 이용한 프로그램으로 사용이 간편하여 계측분야에서 많이 사용되고 있다.

#### 3.1 계측 프로그램

Fig. 24는 작성한 프로그램의 프론트 패널(실행창)을 나타내고 있으며 DAQ보드를 설정하는 physical channel, 입력신호 값의 범위를 설정하는 창, 샘플링레이트(sampling rate)를 입력하는 창으로 구성되어 있다. 계측신호로는 무부하측과 부하 측의 기어에서의 구형파 출력 전압(2곳), 토크센서 출력전압(1곳), 엔코더의 출력전압

(1곳)을 계측하여 텍스트 파일 형태로 저장되도록 하였다.

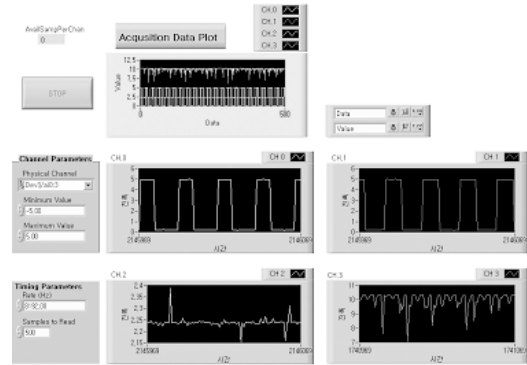


Fig. 24 계측프로그램의 실행화면

#### 3.2 DATA 계측

시스템에 전원을 투입하여 축을 회전시키고 원동기 측과 부하측의 기어에 설치된 비접촉식 마그네틱센서(MP981)로부터 펄스신호(구형파)를 계측하였다. 계측에 사용된 DAQ보드는 NI(national instrument)의 PCMCIA타입(16ch)이었고, 3상 BLDC 모터의 회전 주파수를  $60\text{Hz}(N = \frac{120 \cdot f}{P})$ , P=4)로 지시하여 취득한 결과를 Fig. 25에 나타내었다. 단, Sampling Rate는 32768 S/s로 설정하였다.

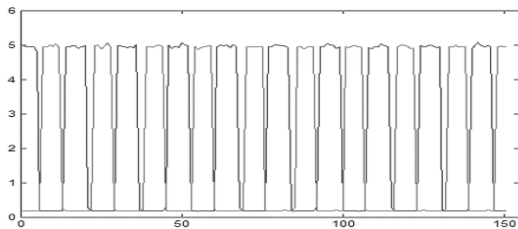
Fig. 26 (a)와 같은 구형파에 대하여 원동기측의 폴링에지(falling edge)와 부하측의 라이징에지(rising edge)를 검출하기 위해 Fig.26 (b)와 같이  $\pm 5\text{V}$ 의 파형으로 변환하였다. Fig. 26 (b)의 파형에 있어서 신호가  $\pm$ 로 바뀌는 지점에 대해 차분을 행하면 불연속 구간이므로 무한대( $\infty$ )의 결과 값이 얻어지게 된다. 따라서 전 구간에 대해 차분을

행하고 그에 대한 값이 일정크기 이상인 곳을 검출하여 무부하측과 부하측의 폴링에지와 라이징 에지를 찾아내게 된다.

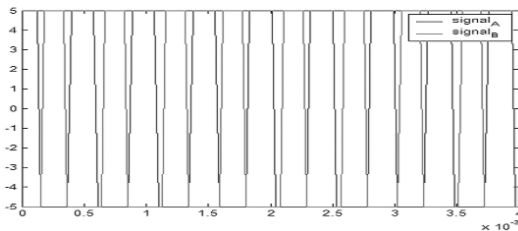
Fig. 26 (c)는 무부하측과 부하측의 폴링에지와 라이징에지를 검출하여 나타낸 것이고, 이로부터 라이징에지와 폴링에지의 시간차 즉, 위상차(phase difference)를 계산하게 된다.

### 1) 계측 파형(60hz)

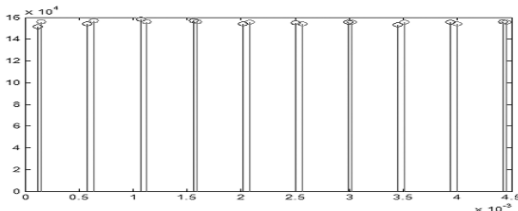
다음 Fig. 25는 무부하 60Hz 상태에서 계측한 원동기측(Signal A)과 부하측(Signal B)의 출력 파형을 나타내고 있다.



(a) 원 파형



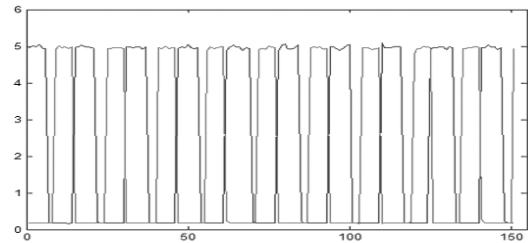
(b) Signal  $\pm 5V$ 로 변환한 파형



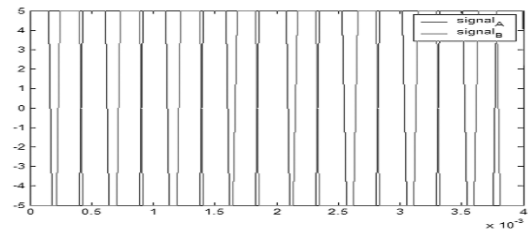
(c) Phase Difference 출력 파형

Fig. 25 무부하운전시 파형 출력

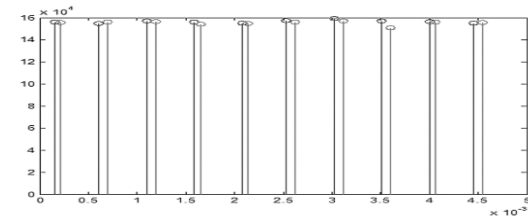
Fig. 26은 60Hz 회전상태에서 부하를 연결한 상태로 계측한 원동기측(Signal A)과 부하측(Signal B)의 출력파형을 나타내고 있다.



(a) 원 파형



(b) Signal  $\pm 5V$ 로 변환한 파형



(c) Phase Difference값 파형

Fig. 26 부하운전 시 출력 파형

### 2) 구형파 주기와 위상차

무부하 또는 부하운전 시 MP-981센서로부터 구형파가 발생하는데 이때 1주기에 해당하는 시간 값을 T라 하고 Fig. 27과 같이 표현할 수 있다.

또한 Fig. 27은 Gear A와 Gear B 사이에서 비틀림 각에 의한 편차를 나타내고 있고, 본 논문에서는 이를 위상차(Phase Difference)  $d_f$ 로 정의한다.

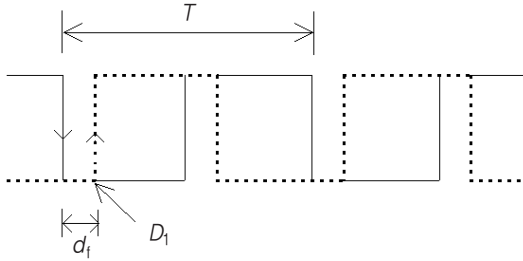


Fig. 27 Phase Difference(위상차)

### 3.3 계측 데이터 분석

#### 1) 데이터 분석(60Hz)

PC에 txt 파일로 저장된 60Hz영역에서의 Data를 MATLAB을 사용하여 1주기 당 시간  $T$  값과 위상차를 산출하였다. 계측신호로부터 최종적인 축마력을 계산하는 과정은 다음과 같다. 먼저, 계측 신호(원동기측과 부하측)에 대한 에지를 검출하여 주기를 구하고 구해진 주기로부터 구형파 신호의 주파수와 회전 각속도를 다음과 같이 계산하게 된다.

$$f = \frac{1}{T} \quad \omega = 2\pi f \quad (3.1)$$

Table. 1의 값을 적용하면 계측신호의 주파수와 각속도는 각각 2049.18[Hz]와 183.84[rad/s] 얻어진다. 기어휠의 기어 산의 수가 70이므로 축의 실제 초당회전수(rps: revolution per second)는  $f/70$ 이 되므로 상기 주파수로부터 29.3rps 값이 구해진다. 기어 휠에서 발생하는 펄스당(1주기) 각도를  $y_1$ 이라고 하면

$$y_1 = \frac{2\pi}{70} = 0.0897[\text{rad}] \quad (3.2)$$

이 된다. 원동기측(signal A)의 폴링에지와 부하측(signal B)의 라이징에지와 위상차(phase

difference :  $d_f$ )는 부하측 신호의 라이징에지 시점을  $D_1$ 이라 하면

$$d_f = y_1 \times \frac{D_1}{T} [\text{rad}] \quad (3.3)$$

로 구해지고, 위상차가 토크로 인한 축에서의 비틀림각( $\theta$ )이 된다. 위에서의 계측신호의 주기 및 라이징에지 시점을 이용하면  $d_f = 0.0056[\text{rad}]$ 이 얻어진다. 따라서 비틀림각을 이용하여 축에 가해진 토크( $T_q$ )를 계산하면

$$T_q = K_\theta \cdot \theta \quad (3.4)$$

단,  $K_\theta = \frac{\pi}{32} \frac{d^4 G}{l}$  [Nm/rad]이고, 실험에서의 토크봉의 전단탄성계수  $G = 7.0607 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ , 길이와 직경은 각각  $l = 0.097[\text{m}]$ ,  $d = 0.015[\text{m}]$ 로 하여  $K_\theta = 361.50[\text{Nm/rad}]$ 로 주어지므로 축에 가해진 토크는 위식으로부터  $T = 2.028[\text{Nm}]$ 가 얻어진다.

따라서, 축에 발생된 동력을  $P$ 라고 하면

$$P = T_q \times \omega = T_q \times 2\pi n [\text{W}] \quad (3.5)$$

단,  $n$ 은 rps를 의미하고 위 식으로부터 토크 및 각속도를 대입하여 동력을 구하면  $P = 373.19[\text{W}] = 0.37319[\text{kW}]$ 가 얻어진다. 발생동력을 미터마력으로 환산하면

$$P = \frac{P}{75 \cdot 9.807} [\text{ps}] \quad (3.6)$$

로부터 0.49[PS]가 얻어진다.

#### 2) 데이터 분석(20Hz & 40Hz)

Fig. 28은 20Hz(전동기 회전 지시 주파수)에서 계측한 파형을 나타내고 있다. Fig.28 (a), Fig. 28

(b)는 각각 신호의 계측파형과 하강 및 상승에지를 검출하기 위해  $\pm 5V$ 로 변환한 파형을 나타내고 있다. Fig. 28 (c), Fig. 28 (d)는 같은 주파수에서 부하를 연결했을 경우의 출력파형을 나타낸다.

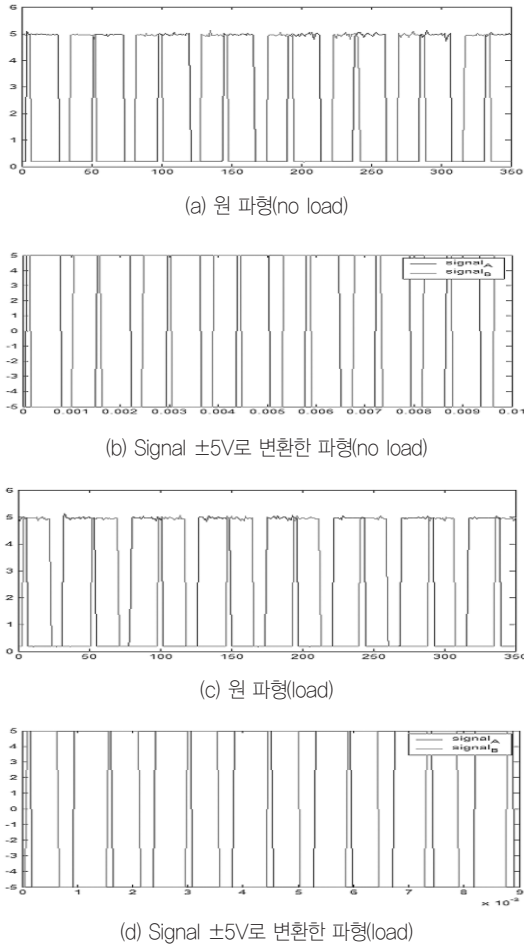


Fig. 28 Measured signal at 20Hz

Fig. 29는 40Hz(전동기 회전 지시 주파수)에서 계측한 파형을 나타내고 있다. Fig. 29 (a), Fig. 29 (b)는 각각 신호의 계측파형과 하강 및 상승에지를 검출하기 위해  $\pm 5V$ 로 변환한 파형을 나타내고 있다. Fig. 29 (c), Fig. 29 (d)는 같은 주파수에서

부하를 연결했을 경우의 출력파형을 나타낸다.

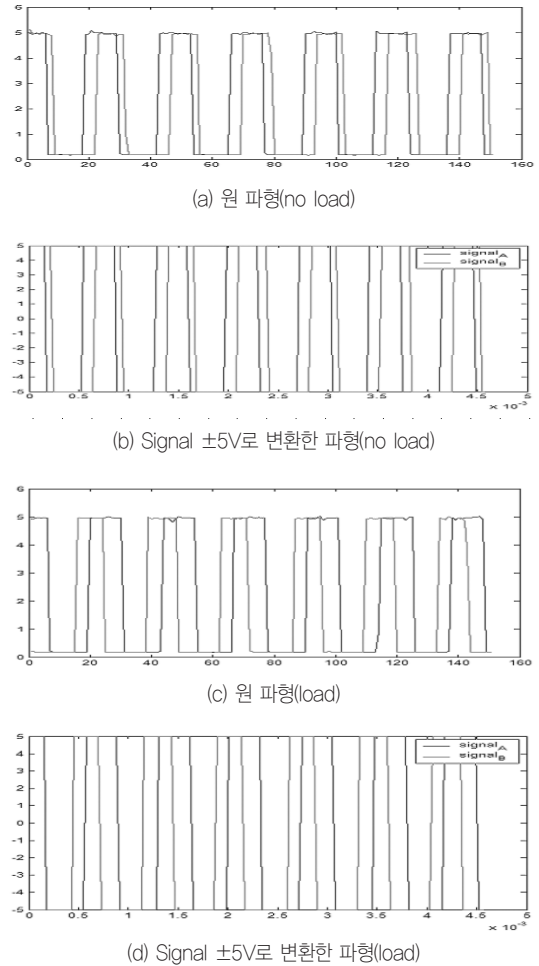


Fig. 29 Measured signal at 40Hz

각 주파수에서 계측한 신호를 바탕으로 주파수 20Hz와 40Hz에서의 1주기 당 시간 T값과 Gear A와 Gear B에서의 파형 편차 값인 위상차를 얻을 수 있었다. 20Hz와 40Hz에서 각각 출력(P)을 산출하기 위하여 3.3절에서 사용한 과정을 적용하여 계산한 것이다. Frequency는 모터의 회전 주파수를 나타낸 것이고,  $f$ 는 MP-981을 통해

계측된 구형파 주파수를 의미한다. 기어 이수가 70개  
이므로 실질적인 주파수 및 초당회전수를 계산할  
때는 70으로 나누어 주게 된다.

### 3) 토크센서를 이용한 측정 결과

MP981센서로부터의 출력 파형에 대한 위상차를  
검출하여 계산한 토크 값을 비교하기 위하여 토크  
센서로부터 출력전압을 계측하였고, 계측결과는  
다음과 같다.

Fig. 30은 60Hz 무부하 상태에서 계측한 토크  
센서의 출력전압이다. 토크센서를 이용한 토크의  
측정범위는 0~17.5[Nm]이며 센서감도는 106.31  
[V/Nm]이므로 9.406[VNm/V]의 출력특성을  
가지게 된다.

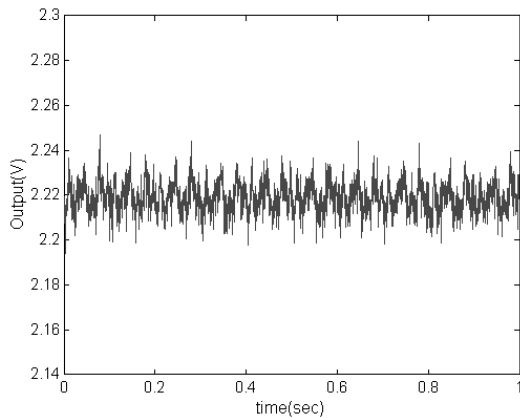


Fig. 30 출력전압(무부하, 60Hz)

Fig. 31은 60Hz 부하 상태에서 계측한 토크센  
서의 출력전압을 나타내고 있다.

20Hz~60Hz 구간에서 무부하와 부하운전을  
행하여 토크센서로부터 전압을 측정하였고, 전압의  
평균치를 구하여 센서감도를 적용하여 토크 값과  
발생동력을 계산하였다.

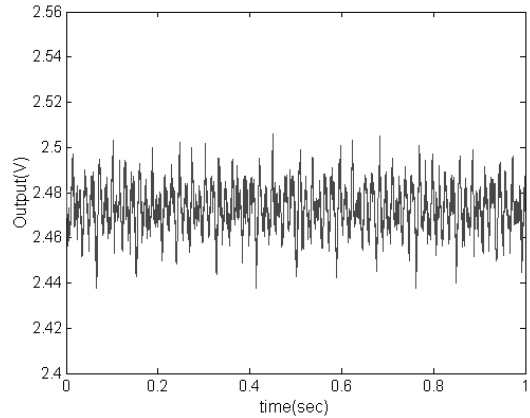


Fig. 31 출력전압(부하, 60Hz)

### 4) 토크측정 결과 비교

1)~2)에서는 두 지점간에서 발생하는 신호의  
위상차를 이용하여 부하단에서 발생하는 토크와  
마력을 계산하였고, 3)에서는 토크 센서를 직접적  
으로 적용하여 측정전압으로부터 발생토크를 검출  
하였다. 사용된 두 가지의 방법에 대한 비교검토를  
하기 위해 초당회전속도, 발생토크 및 동력을 기준  
으로 검토를 하였으며 그 결과 Table 1 값을 얻을  
수 있었다.

검토결과 세 주파수에서의 발생동력은 평균적  
으로 5% 이내의 오차범위를 가지는 것으로 확인  
되었다.

Table 1 결과 비교

Hz	MP981			Torque sensor		
	<i>rps</i>	$(T_q)$	P[W]	<i>rps</i>	$(T_q)$	P[W]
20	10.0	0.61106	38.256	10.0	0.6537	41
40	19.5	1.28486	157.474	19.5	1.3478	165
60	29.3	2.02815	373.189	29.5	2.0467	375

## 4. 결 론

본 논문에서는 두 지점 간의 위상차를 이용하여 원동기 축의 토크와 축마력을 계측하기 위한 시스템을 개발하고 실험을 통하여 개발된 시스템의 유용성을 확인하였다. 전기적인 부하로 권선 저항을 연결하여 부하로 인한 비틀림이 발생하도록 하였고 원동기축과 부하축 두 지점에서 계측된 신호를 이용하여 비틀림 각과 토크를 산출하고 최종적으로 원동기축의 발생동력을 추정할 수 있는 시스템을 개발하였다.

20Hz, 40Hz, 60Hz에서 실험을 행하였고, 두 지점간의 위상차를 바탕으로 한 토크 및 동력 계산의 정확성을 검증하기 위하여 토크센서로부터 계산한 토크와 비교 검토를 행하였다. 비교결과 5% 이내의 오차범위를 갖는 것으로 확인하였고, 이를 통해 본 연구에서 제안한 시스템의 유용성을 확인할 수 있었다. 향후, 기어에서 발생하는 출력파형의 정도(resolution)를 향상시킬 수 있는 엔코더의 이용과 무하와 무부하 상태를ダイナミック하게 조절한 시험이 뒤 따른다면 더욱 실용성 있는 연구결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- (1) 광두영(2002), 컴퓨터기반의 제어와 계측 Solution, Ohm사
- (2) 민남기(2003), 센서전자공학, 동일출판사
- (3) 김용수(2004), MATLAB 입문과 활용, 높이깊이
- (4) 전효중, 최재성(2002), 내연기관강의, 효성출판사
- (5) Emmanuel C. Ifeachor and Barrie W. Jervis[1993]. Digital Signal Processing – a Practical approach, Addison-Wesley.
- (6) J. G. Proakis and D. G. Manolakis [1996]. Digital Signal Processing Principles, Algorithms and Applications, Prentice Hall
- (7) Rotary Torque Sensor Manual(2006), <http://www.ncte.de>
- (8) Singiresu S. Rao (2004), Mechanical vibrations, Prentice Hall.
- (9) Ono Sokki Magneto-Type Detector MP-981 Instruction Manual, <http://www.onosokki.co.jp>
- (10) BEI IDEACOD INCREMENTAL ENCODERS DHO5 Instruction Manual, <http://www.bei-ideacod.com>
- (11) 토크센서의 분류 <http://www.emobile-tech.com/21331C.htm>