

위상차를 이용한 축계 마력 측정 시스템의 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Shaft Power Measuring System using Phase difference

남택근¹, 이돈출², 노영오³, 허광석⁴

¹ 목포시 죽교동 목포해양대학교 기관시스템공학부
E-mail: tknams@mmu.ac.kr

² 목포시 죽교동 목포해양대학교 기관시스템공학부
E-mail: ldcvib@mmu.ac.kr

³ 목포시 죽교동 목포해양대학교 기관시스템공학부
E-mail: mmuroh@mmu.ac.kr

⁴ 목포시 해안동 선박검사기술협회
E-mail: gsheo015@kst.or.kr

요 약

본 논문은 선박의 축계마력 측정방법 및 측정시스템의 개발방법에 대해 논의한다. 엔진 축계에서의 정확한 출력은 선박의 사용목적, 관련추진축계의 제작 및 설치비용 등과 밀접한 관련을 맺고 있다. 본 연구에서는 동력 전달축과 부하축사이의 축상에 두 개의 기어휠을 설치하고 각각의 기어휠에 비접촉식 검출기를 부착하여 위상을 계측한다. 동력이 가해질 경우 두 지점에서는 비틀림 각에 의한 위상차가 발생하게 되고, 발생된 위상차를 전압신호로 검출하여 축에서의 마력을 계산하게 된다.

Key Words : Phase difference, Shaft Power Measurement, Torsional Angle, Rotating Machinery

1. 서 론

본 연구에서는 소형 선박을 대상으로 한 축계마력의 출력측정 방법 및 측정 시스템의 개발방법에 대해 논의하고자 한다. 엔진 축계에서의 정확한 출력은 선박의 사용목적, 관련추진축계의 제작 및 설치비용 등과 밀접한 관련을 맺고 있다. 대부분의 엔진제작사의 경우 ISO의 규정에 의해 제시된 방법을 따를 경우 큰 문제가 없을 것이나 소형업체 등에서는 엔진출력에 관한 정확한 자료제시가 불충분할 경우 선주사가 피해를 입는 경우도 있다. 따라서 출력산정에 관한 자료는 정확하게 제시되어야 하는 중요한 자료이므로, 본 연구에서는 소형엔진, 압축기, 전동기 등을 포함한 회전기기의 정확한 출력 값을 측정하기 위한 시스템을 제안하고 있다.

선박의 일반적인 출력 측정방법은 P-V선도에 의한 방법, 기계식동력계, 수동력계, 와전류 등을 이용한 전기동력계를 이용하는 것이다(전, 2002). 본 연구에서는 실제 엔진을 회전기기로

가정하고 전동기로 대체한 회전기기의 출력측정시스템을 개발하고자 한다. 기본적으로는 회전기기의 동력이 축 상에 전달될 때 발생하는 비틀림 각을 위상으로 측정하는 시스템의 원리 및 개발절차에 대해 논의할 것이다.

선박용 엔진, 압축기, 전동기 등은 구동 동력원에 약간의 차이가 있지만 회전에 의한 동력 전달방식은 큰 차이가 없으므로 본 연구에서 제안한 동력측정 방법은 다양한 종류의 회전기에 폭넓게 적용할 수 있을 것이다.

2. 동력측정시스템

2.1 동력측정시스템의 개요

동력전달 축은 전달되는 토크에 의한 비틀림 각을 발생시키게 되는 데 본 연구에서는 동력 전달축(Diesel engine)과 부하축(Load: Propeller)사이의 축(Shaft)상에 두 개의 기어휠을 설치한다. 동력구동원에 의해 축은 회전하게 되고, 회전하는 기어의 산과 골 사이의

거리는 비접촉식 전자식검출기에 의해 검출되어 ON-OFF(구형파)신호로 출력된다. 동력전달축과 부하단축의 구형파신호는 가해지는 부하값에 의해 위상차가 발생하게 되고, 발생된 위상차는 전압신호로 출력되어 컴퓨터 상에서 모니터링과 신호해석을 동시에 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 그림 1 과 같다.

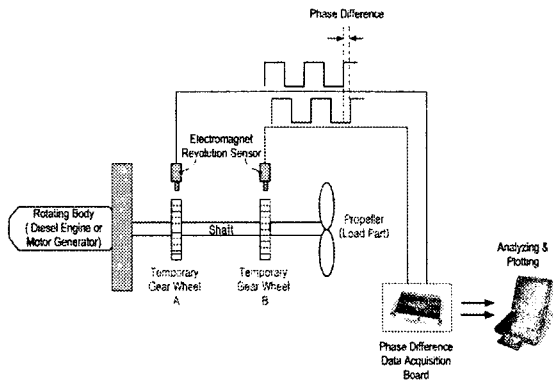


그림. 1 시스템의 구성도

그림 1과 같은 시스템을 이용하여 토크로 인한 축에서의 비틀림 각을 측정하고 비틀림 각과 탄성계수를 이용하여 토크를 계산한 다음 회전축의 각속도를 곱하여 축에서의 마력을 측정하게 된다.

2.2 토크측정원리^[3]

그림 1에서의 기어휠이 그림 2 (b)의 a, b 지점에 각각 설치되게 된다. 동력전달부로부터의 회전력은 그림 2 (a)와 같이 회전체의 축으로부터 거리 r 에 작용하는 접선방향의 힘 F_t

로써 회전체를 시계방향으로 회전시킨다. 이때 작용하는 힘은 F_t 와 r 에 따라 증가하는 데 두 물리량의 곱이 모멘트(moment)가 되고 회전축에 관한 모멘트는 토크(torque: T)를 발생시킨다.

$$T = F_t \cdot r \quad (1)$$

평형상태의 강체에 이와 같은 외부의 토크가 작용하면 내부토크에 의해 전단변형이 발생하고 그림 2 (b)와 같이 T 에 의해서 축에는 비틀림 각 θ 가 발생한다. 비틀림 각 θ 는 회전검출센서 A, B의 위상차로부터 계산을 한다. 전단변형에 따른 발생토크와 비틀림 각 사이에는

$$\theta = \frac{32L}{\pi d^4 G} T \quad (2)$$

의 관계가 성립된다. 단, G 는 재료의 횡탄성계수, d 는 축의 직경, L 은 두 계측지점간의 거리를 의미한다. 따라서 비틀림 각에 의한 토크의 값은

$$T = K_\theta \cdot \theta \quad (3)$$

과 같이 구할 수 있다. 단,

$K_\theta = \frac{\pi}{32} \frac{d^4 G}{L} [Nm/rad]$ 이고, 단조강의 횡탄성 계수 G 값은 $8.188 \times 10^{10} N/m^2 \sim 8.3359 \times 10^{10} N/m^2$ 이다.

비틀림 각에 의한 토크(T)가 계산되면 최종적으로 축에 전달되는 축 마력은

$$P_{shaft} = T \cdot \omega \quad (4)$$

로 구해진다. 단, ω 는 축의 회전 각 속도를

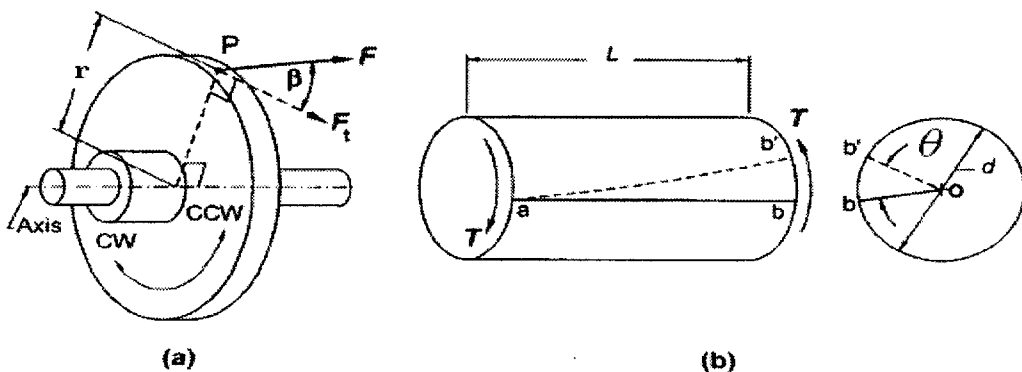


그림 2 토크에 의한 비틀림 각 발생

의미한다.

3. 시스템의 구성

3.1 시스템구성도

본 연구에서 제안한 동력측정시스템의 블록 선도는 그림 3과 같다. 크게 원동기, 기어휠, 엔코더, 토크측정용 시편, 발전기, 저항부하, PC로 구성되어 있다.

원동기로부터 발생된 토크 기어 A 와 기어 B 를 연결하는 축으로 전달되고, 발전기측의 전기적인 부하에 의해 토크측정용 시편에 비틀림 응력이 발생하며 이 비틀림은 기어 A, B에서 측정되는 구형파의 위상차로 변환되게 된다.

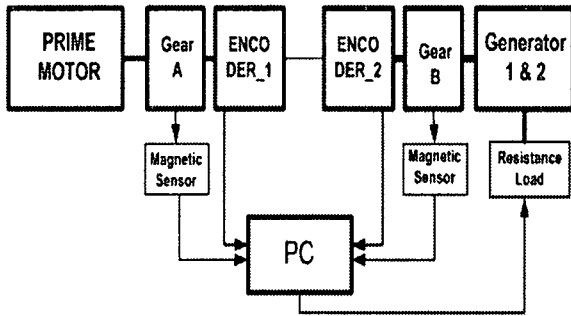


그림 3 시스템의 블록 다이어그램.

그림 4는 토크 측정봉을 나타내고 있다. 부하에 의해 기어휠 사이에는 비틀림이 작용하므로 토크측정용 시편의 재질을 50CrV4 이고, 강도는 HRC43~50 으로 하여 비틀림에 의해 시편이 부러지거나 파손되지 않도록 하였다.

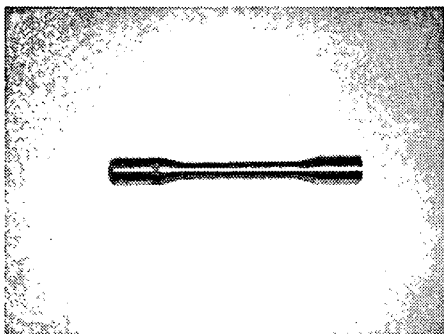
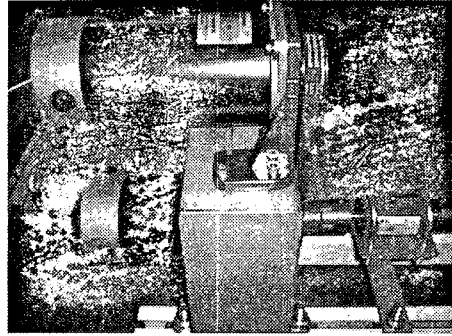
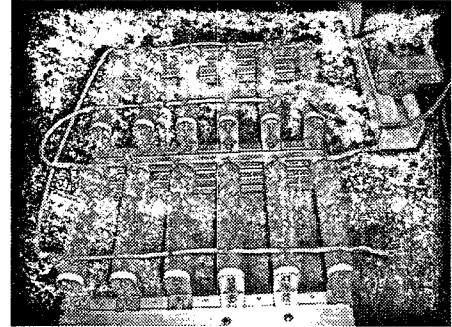


그림 4 토크측정용 시편

동력측정 시스템에서 부하측의 변화를 가하기 위하여 같은 축 상에 그림 5 (a)와 같은 발전기 2대를 병렬로 설치하였고, 부하는 그림 5 (b)와 같은 저항부하를 적용하였다.



(a)



(b)

그림 5 부하전류 발생용 발전기 및 저항부하

부하의 크기는 임의로 조절이 가능하도록 컴퓨터상에서 프로그래밍^[1]하였고, 발전기의 24V 발생전압(전류)을 부하단에 흐르게 하기 위하여 그림 6과 같은 DC 컨버터(5V DC→24V DC)를 적용하여 릴레이를 구동하도록 하였다.

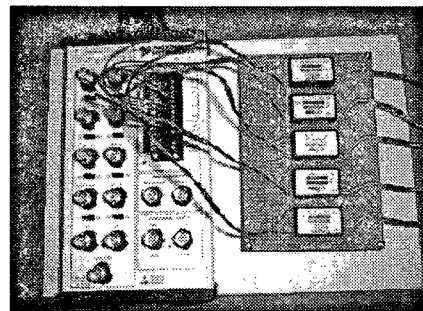


그림 6 DC24V 컨버터

그림 7은 전체시스템의 결선도를 나타내고 있다. 좌측 M은 원동기(3상BLDC), EN, GR, TM은 각각 엔코더, 기어, 토크센서를 나타내고 있다. 우측단의 G는 부하용발전기로서 현재 300W용량의 두 대가 설치되어 있다. 엔코더 신호, 기어휠의 구형파 신호, 토크센서로부터의 전압신호는 Multifunction board(A/D & DIO)로 입력되어 PC상에서 신호를 모니터링하고, 데이터로 저장하게 된다. 아울러 PC로부터 부

하를 가변시키기 위해 DIO(Digital Input Output) 채널-릴레이를 거쳐 해당 저항 부하를 연결시킬 수 있게 된다.

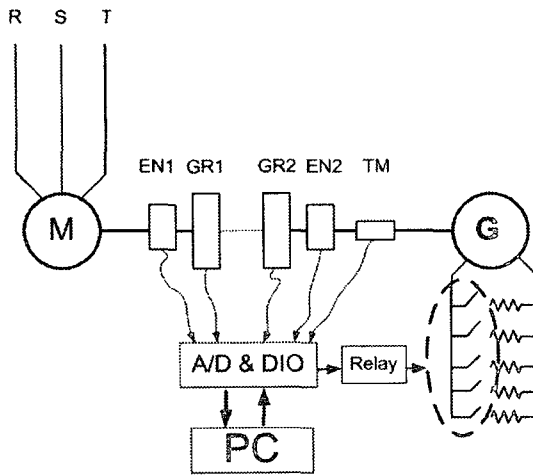
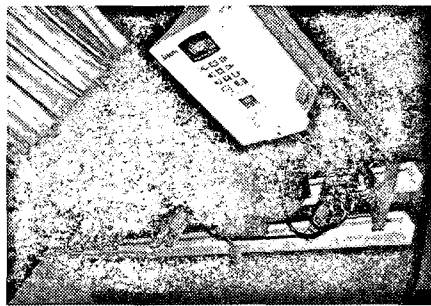
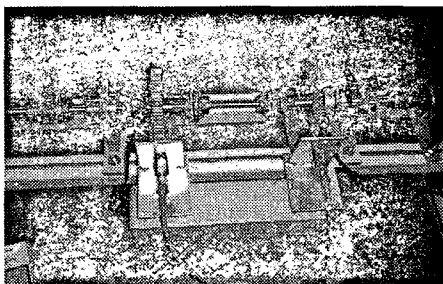


그림 7 전체 시스템의 결선도

상기와 같은 시스템에서 A/D보드를 통해 얻어지는 데이터로부터 두 지점간의 위상차를 검출 즉, (2)의 비틀림 각을 계산하고 (3)의 토크 및 (4)의 축마력은 프로세서내의 해석 프로그램에서 계산되어 최종적인 결과 값을 계측자가 알 수 있도록 디스플레이에 출력하게 된다. 그림 8은 완성된 시제품의 외관을 나타내고 있다.



(a)



(b)

그림 8 시제품 사진

3.2 계측데이터의 분석

그림 8과 같은 시스템에 전원을 투입하여 축을 회전시키고 원동기 측과 부하 측의 기어에 비접촉식 마그네틱센서와 DAQ보드(NI9215, 4채널, 1MS/s)를 이용하여 기어의 회전에 따른 구형파를 계측하였고, 그 결과는 그림 9~그림10과 같다. 단, 샘플링 레이트는 8192 S/s로 설정하였다.

그림 9는 원동기의 무 부하운전 시, 축의 회전에 따른 구형파펄스 출력을 나타낸 것이다. 그림의 $Signal_A, Signal_B$ 는 각각 그림 7의 기어 휠 A, B에서 계측한 파형을 의미한다. 그림 8에서 나타내는 두 신호의 위상차는 초기위상차를 의미한다.

그림 10은 원동기의 부하로 $100W \times 11 = 1.1kW$ 용량의 저항부하를 인가하였을 때 마그네틱 센서로부터 계측한 구형파펄스 출력을 나타낸 것이다. 그림의 $Signal_A, Signal_B$ 는 그림 9와 마찬가지로 각각 기어 휠 A, B에서 계측한 파형을 의미하고 있다. 그림 9와 그림 10으로부터 부하의 증가에 따라 위상차가 발생하고 있음을 알 수 있고, 위상차는 비틀림 각이 발생하고 있다는 것을 나타낸다. 여기에서 검출된 위상차 정보를 이용하여 토크 및 제동마력을 산출하게 되는 것이다.

그림 11은 3상 BLDC의 주파수를 5Hz($N = \frac{120 \cdot f}{P}$, $P=4$)로 지시하였을 때 취득한 데이터로부터 주파수를 연산한 결과이다.

그림 12는 1.1kW의 저항부하를 가한 상태에서 주파수를 5Hz, 10Hz, 15Hz로 가변 하였을 때 토크센서로부터 계측한 출력 토크파형을 나타내고 있다.

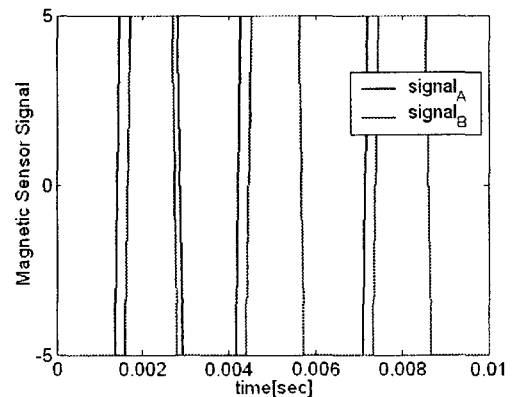


그림 9 무부하운전시의 구형파 펄스 출력

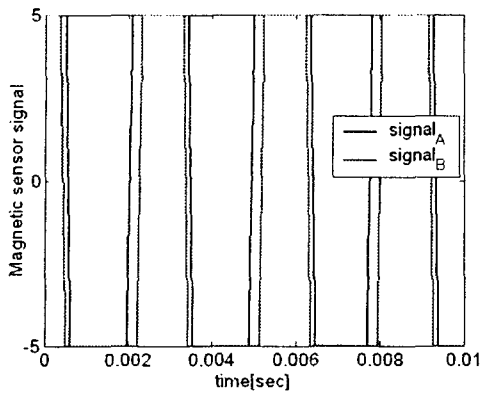


그림 10 부하운전시의 구형과 펄스 출력

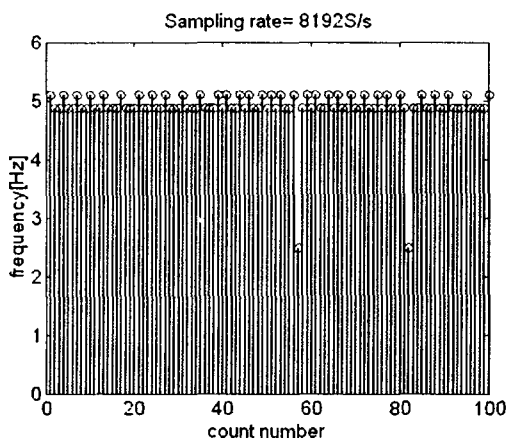


그림 11 계측 신호와 주파수 계산

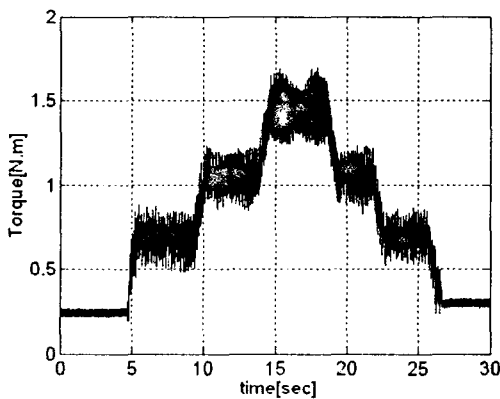


그림 12 계측 토크값

동기 측과 부하 측 사이에 두개의 기어휠을 설치하고, 마그네틱센서를 이용하여 기어휠의 회전 에 따른 구형파를 계측하였다. 부하의 변동에 따른 출력의 형태를 파악하기 위하여 릴레이를 이용하여 컴퓨터 상에서 부하를 조절할 수 있도록 하였다. 아울러 마그네틱 센서로부터의 값을 모니터링할 수 있는 프로그램을 개발하였고, 계측값의 정확도를 판단하기 위하여 토크센서로부터 직접적으로 계측한 토크 데이터를 비교데이터로 활용할 수 있도록 하였다.

계측값의 정확도 분석 및 토크 센서로부터의 값과의 비교분석을 향후 행할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] 광두영, 컴퓨터기반의 제어와 계측 Solution, Ohm사, 2002.
- [2] 見城尚志 외 5명, モータ制御、日刊工業新聞社、2004.
- [3] 민남기, 센서전자공학, 동일출판사, 2003.
- [4] 전호중, 최재성(2002), 내연기관강의, 효성출판사.
- [5] 이동욱 외 2명, 먼저배우는 DSP, 인터비전
- [6] 전주환 외 2인 공역, MATLAB을 이용한 디지털 신호처리, 시그마프레스.
- [7] Emmanuel C. Ifeachor and Barrie W. Jervis. Digital Signal Processing - a practical approach. Addison-Wesley, 1993.
- [8] J. G. Proakis and D. G. Manolakis. Digital Signal Processing Principles, Algorithms and Applications. Prentice Hall, 1996.

4. 결 론

본 연구에서는 두 지점간의 위상차를 이용하여 원동기 측의 토크와 축마력을 계측하기 위한 시스템을 개발하였다. 원동기의 회전과 더불어 축에 전달되는 동력을 측정하기 위해 원