

동적방식 광섬유자이로 콤파스의 제작

이석정* · 최우진** · 배정철** · 김성진*** · 이상식*** · 권용수*** · 홍창희*

Development of Dynamic Fiber Optic Gyrocompass

*Seok-Jeong Lee** · *Woo-Jin Choi*** · *Jeong-Chul Bae*** · *Sung-Jin Kim****
*Sang-Sik Lee**** · *Yong-Soo Kwon**** · *Tchang-Hee Hong**

〈Contents〉

Abstract	4. 실험결과 및 고찰
1. 서 론	5. 결 론
2. 광섬유 자이로콤파스의 원리	참고문헌
3. 동적방식 광섬유 자이로콤파스의 제작	감사의 글

Abstract

This paper described the method and the result of making a dynamic fiber optic gyrocompass measuring the heading angles of ships by processing the output signal from a constant rotating fiber optic sensor and also showed the measurement to test the performance of our system. Considering an economical view we designed and ordered a cheap medium grade fiber sensors increased not fiber length but the diameter of a fiber sensing loop. The scale factor and noise was 267mV/deg/s and $2\text{deg/hr}/\sqrt{\text{Hz}}$ (1σ), respectively. We made the dynamic fiber optic gyrocompass by this sensor. We measured the heading angles in an arbitrary direction to evaluate the accuracy of our system and the root mean square error was 0.4° . Moreover, we measured the angles in each direction of 45° successive rotation to know whether this system has distortions in a specific direction or not and the root mean square error in this case was 0.5° .

* 한국해양대학교 전자통신공학과

** 삼양무선공업(주) 선박자동화 연구소

*** 해군사관학교 전자공학과

1. 서 론

오늘날까지 사용되어오고 있는 기계식 자이로는 가격이 고가이며, 시동시간이 많이 걸릴 뿐만 아니라 전력소모가 많고 잦은 유지보수를 해야 하는 등의 여러 가지 단점이 있다. 광섬유 자이로콤파스는 광간섭성을 이용하기 때문에 이러한 단점을 보완할 수 있고, 게다가 대량생산과 저가격화에 적합하다.

최근의 광섬유 자이로콤파스의 개발동향을 살펴보면, 이미 일본의 히타치, 미국의 리튼, 앤드류사에서 각각 시작품을 개발하였으며, 미국의 하니웰에서는 항공기용으로 개발하여 도니어 328기와 보잉 777기에 이용되고 있다. 그러나 장시간 항해를 하는 선박의 경우에는 FOG센서의 중요한 특성인 drift에러를 항공기의 경우처럼 수시로 보정할 수가 없고 또한 경제성을 고려해야 하므로 아직은 세계적으로 선박용 광섬유 자이로콤파스가 상품화된 예는 없다.

본 연구실에서는 이미 Dyott와 Allen이 제안한 방법⁽¹⁾을 개선하여 스테핑모터를 이용한 정적방식 광섬유자이로콤파스의 제작에 관한 연구결과를 보고한 바 있다. 이방식은 회전체에서 외부로 신호를 전달하는 slip ring이 필요 없고 구조가 간단하며 신호처리부가 소프트웨어화되어 있으므로 적절한 범위 내에서 신호처리 알고리즘의 변경이 용이하다는 장점이 있다. 반면에 이 방식은 FOG센서가 정지한 상태에서 얻은 신호를 처리하여 방위각을 얻기 때문에 잡음특성이 좋은 고성능 센서가 필요하고 선박에 응용하기 위해서는 고도로 정밀한 안정화제어기가 필요하다. 이에 반하여 동적방식은 비록 기계적 구조가 복잡한 반면에 중저급 센서를 이용한 경제적인 광섬유 자이로콤파스를 구성하는 것이 가능하다.⁽²⁾

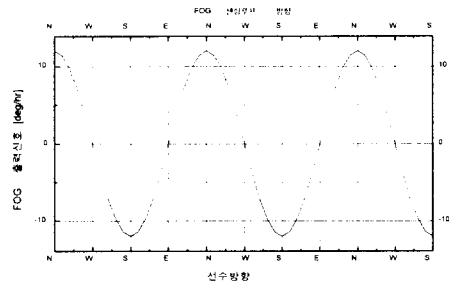
본 논문에서는 경제성을 고려한 동적방식 광섬유 자이로콤파스를 제작하고, 제작된 콤파스의 성능을 시험한 결과를 기술하였다.

2. 광자이로콤파스의 원리

그림 1의 (a)와 같이 지표상에 FOG센서를 수직



(a) 지표상에 수직한 축을 회전축으로 하여 정속회전하고 있는 FOG센서



(b) 지표상에 수직한 축을 회전축으로 하여 정속회전하고 있는 FOG의 출력신호

그림 1. 동적방식 광섬유 자이로콤파스의 원리

으로 세우고 센싱루프면을 지구자전축과 수직방향으로 하였을 때는 지구자전속도에 해당하는 출력값을 얻을 수 있으나, 평행한 방향으로 하였을 때는 출력값이 0이다. 따라서 FOG센서를 일정한 속도로 정속회전시켰을 때는 그림 1의 (b)와 같은 정현파그래프를 출력값으로 얻을 수 있다. 이것을 수식으로 표현하면

$$U_e = K_e \sin(\omega t + \phi_e) \dots\dots\dots (1)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 여기서

$K_e = k \cos \theta_e$: FOG센서의 출력신호진폭

$\omega = 2\pi f_o$: FOG센서의 정속회전각속도

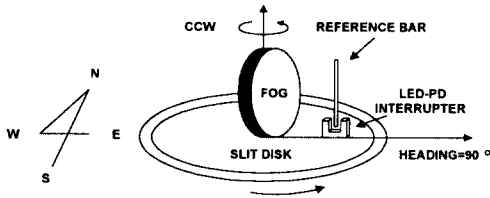
f_o : FOG센서의 정속회전 주파수

ϕ_e : 진북방향과 선수방향과의 위상차

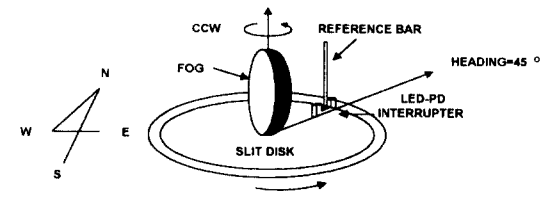
k : FOG의 스케일 팩터 θ_e : 위도

를 각각 나타낸다.⁽³⁾

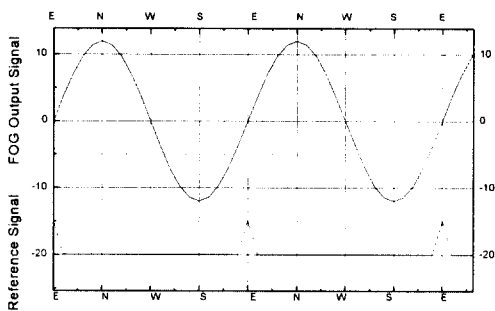
이 정현파 신호의 위상은 진북방향에 대한 선수방위각을 나타내며 크기는 FOG센서가 위치한 지구상의 위도와 관계가 있다. 따라서 FOG센서의 센싱루프면에 수직인 축을 기준축으로 정한다면 FOG센서의 출력신호가 최대값이 얻어질 때의 기준축방향이 진북을 가리킨다. 또한 선수를 나타내는 기준을 정하여 센서기준축이 선수기준위치에 올 때의 출력신호를 각도로 변환하면 선수방위각을 얻을 수 있다. 그림 2와 같이 FOG센서의 기준축 위치에 LED-PD interrupter를 두고 선수기준위치에 Reference bar를 장착하면 센서기준축이 선수기준위치에 왔을 때 한 펄스의 기준신호를 얻게 되며 FOG센서의 출력신호의 매 주기마다 한 개의 펄스를 기준신호로 얻을 수가 있다. 이 펄스와 FOG센서의 최대출력신호와의 위상차를 각도로 변환하면 선수방위각을 얻을 수가 있다.



(a) 선수방향(reference bar의 위치)이 동쪽을 향하고 있을 때

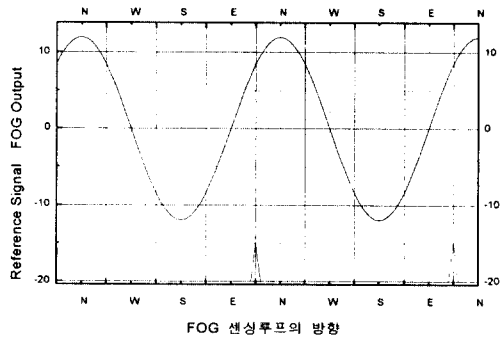


(a) 선수방향이 북동쪽을 향하고 있을 때



FOG 센싱루프의 방향

(b) 선수방향이 동쪽을 향하고 있을 때의 FOG 출력신호와 기준신호



FOG 센싱루프의 방향

(b) 선수방향이 북동쪽을 향하고 있을 때의 FOG 출력신호와 기준신호

그림 3 선수방향과 출력신호와의 관계

그림 2 선수방향과 출력신호와의 관계

그림 2의 (a)와 같이 FOG센서의 기준축 위치에

LED-PD interrupter를 두고 선수기준위치에 reference bar를 장착하면 센서 기준축이 선수 기준위치에 왔을 때 한 개의 펄스신호를 기준신호로 얻게 되며 FOG센서 출력신호의 매 주기마다 각각 한 개씩의 펄스신호를 기준신호로 얻을 수가 있다. 예를 들면 그림 2의 (a)와 같이 선수방향이 동쪽을 향하고 있을 때 기준신호는 그림 2의 (b)처럼 사인파의 한 주기의 초기위치 즉 출력신호가 0인 위치에서 펄스신호가 발생한다. 그리고 그림 3의 (a)에서 처럼 선수방향이 북동쪽을 향하고 있을 때는 그림 3의 (b)와 같이 기준신호는 출력신호 한 주기의 초기위치에서 오른쪽으로 45° 만큼 위상이 이동하게 된다. 따라서 진북방향에 대한 선수방향의 위상차가 선수방위각을 나타내므로 FOG센서의 최대출력신호값에서 현재 출력신호값을 뺀 신호값의 차를 각도로 변환하면 현재의 선수방위각을 구할 수 있다.

실제 FOG센서에서 나오는 출력신호는 그림 5와 같이 센서고유잡음, 소자고유잡음등의 전자적 잡음

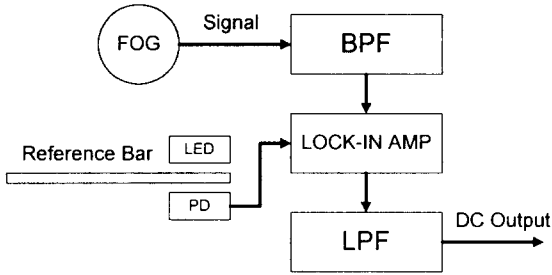


그림 4 광섬유 자이로콤파스의 신호처리 과정

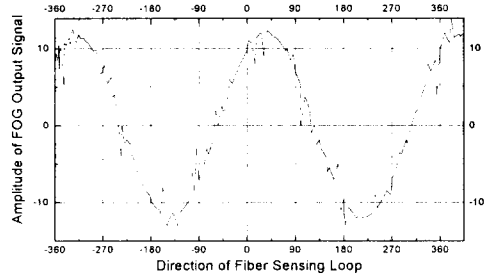


그림 5 FOG센서의 출력신호

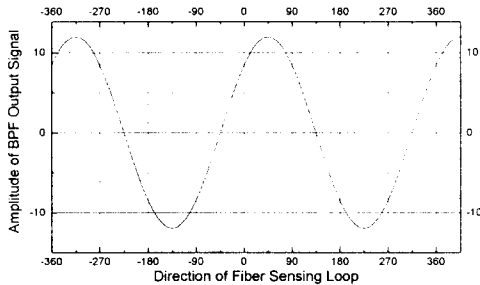


그림 6 밴드패스필터(BPF) 출력단의 신호

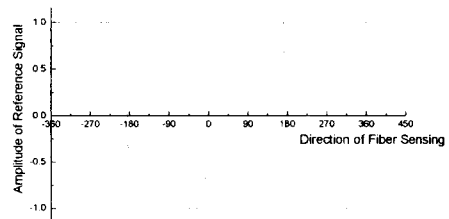


그림 7 LED-PD interrupter에서 Lock-in Amp로 입력되는 기준신호

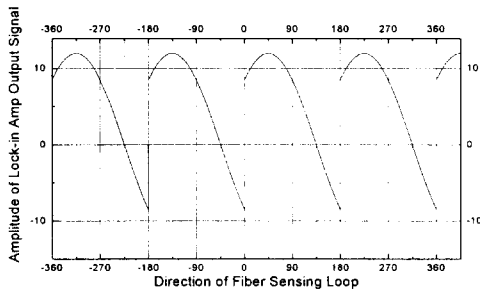


그림 8 Lock-in Amp의 출력신호

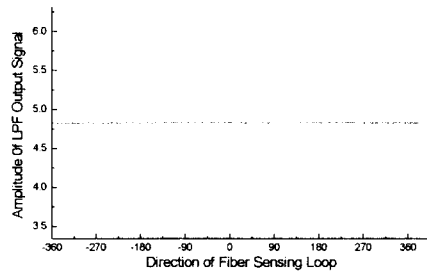


그림 9 로패스필터(LPF) 후의 출력신호

과 진동등의 기계적인 잡음이 혼합되어 나타나며 이러한 잡음이 각도오차를 발생시키고 결국 시스템의 정도를 저하시키게 된다. 따라서 각도오차를 최소화 하기 위해서는 이러한 잡음들을 필터링하여 방위정보만을 가지고 있는 출력신호로 걸러낼 필요가 있다. 그림 4는 이러한 신호처리 과정을 블록도로 나타내었다. FOG의 출력단에서 나오는 신호는 그림 5와 같이 여러 가지 잡음을 포함하고 있다. 따라서 원하는 출력신호의 주파수와 다른 주파수대역의 잡음성분을 제거하기 위하여 정속회전주

파수를 중심주파수로 하는 밴드패스필터(BPF)를 통과시킨다. BPF 후의 출력신호는 그림 6과 같다. 그러나 원하는 출력신호와 주파수가 동일한 잡음신호는 여전히 포함되므로 이 잡음을 소거하기 위해 Lock-in Amp를 통과시켜 BPF 출력신호와 기준신호를 곱한 후 로패스필터(LPF)를 통과시킴으로써 시간평균하여 DC신호로 변환시킨다. 그림 7은 LED-PD interrupter에서 Lock-in Amp로 입력되는 기준신호를 보여준다. 그림 8은 Lock-in Amp를 통과시킨 후의 출력신호를 나타내며 그림 9는 LPF

후의 출력신호를 나타낸다.

3. 동적방식 광섬유 자이로 콤파스의 제작⁽⁴⁾

광섬유 자이로콤파스에 사용되는 FOG센서는 지구자전속도를 검출할 수 있을 만큼 고감도여야 한다. FOG센서의 위상차는

$$\psi = \left(\frac{2\pi DL}{c\lambda} \right) \Omega \quad \dots\dots\dots (2)$$

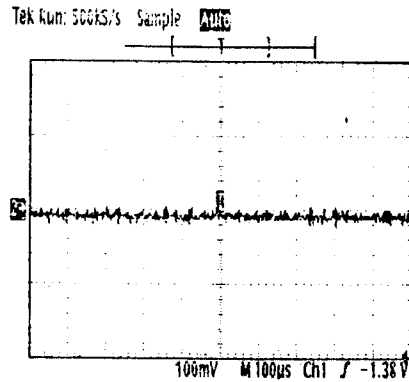
와 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 ψ 는 위상차, D는 광섬유 센싱루프의 직경, L은 광섬유의 길이, Ω 는 회전각속도이다. 위식에서 알 수 있듯이 위상차의 크기는 광섬유 센싱루프의 직경과 광섬유의 길이에 비례한다. 따라서 고감도의 FOG센서는 광섬유의 길이가 길기 때문에 가격이 비싸다. 본 연구

〈표 1〉 FOG센서의 특성

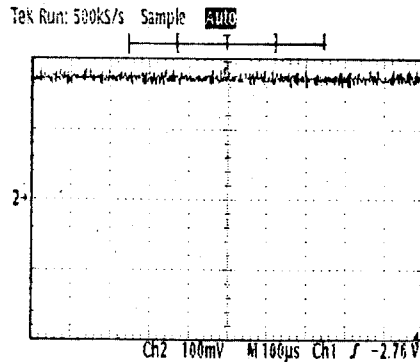
스케일 팩터(SF)	267mV/°/s ±15%
동작 범위	±40°/s
드리프트(1σ)	1~2°/hr
스케일 팩터 온도 진동	0.02~0.1%/°C
잡음(1σ)	2 deg/hr/√Hz
신호 대역폭	50Hz이상
잡음 재현성(1σ)	1~3 deg/hr/√Hz
바이어스 진동(1σ, 1hr, 정상상태)	0.2~0.8°/hr
랜덤 워크	0.01~0.03 deg/√Hz
스케일 팩터 재현성(1σ)	0.1~0.02%
기동 시간	0.1 sec
출력 임피던스	1 kΩ 이하
센싱 축 방향	부착면에 수직(비수직성 1mrad(1σ))
무게	680g
크기	φ150×30mm

에서는 경제성을 고려하여 일반적인 FOG센서를 지구자전속도를 검출할 수 있는 감도로 센싱루프의 직경을 크게 설계하여 주문 제작하였다. 〈표 1〉은 러시아 Fizoptika사에 주문 제작한 FOG센서

VG951의 특성을 나타낸다. VG951센서의 스케일 팩터가 267mV/°/s이므로 지구자전속도가 최대로 검출되었을 때의 출력신호값은 1.11mV이며, 위도 35°인 본 실험실에서는 0.82mV의 전압값을 갖는다.



(a) FOG센서를 지표상에 수평으로 놓았을 때의 출력신호



(b) FOG센서를 뒤집어서 지표상에 수평으로 놓았을 때의 출력신호

그림 10 FOG센서의 지구자전속도 검출실험

먼저 FOG센서가 지구자전속도를 검출할 만큼 감도를 갖는 지를 확인하기 위하여 안정된 테이블 위에 지표상에 대해 수평으로 놓고 출력신호를 얻는다. 그림 10의 (a)는 이 때의 출력신호를 보여준다. 다음은 FOG센서를 뒤집어서 지표상에 수평으로 놓고 출력신호를 얻는다. 그림 10의 (b)는 이 때의 출력신호를 보여준다. 그림 10의 (a)와 (b)의 출

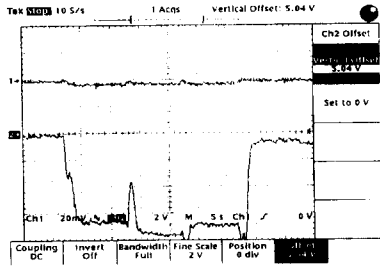


그림 11 북서남동의 각방위별 FOG센서의 출력신호

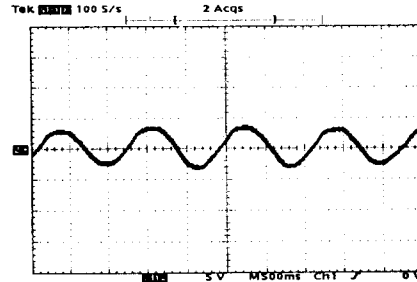


그림 12 정속회전시 지구자전속도의 각방위별 출력전압

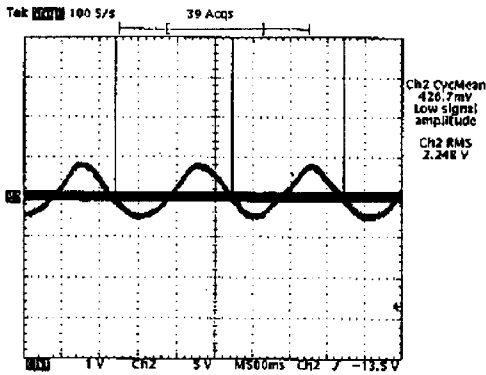


그림 13 선수방향이 서쪽인 경우

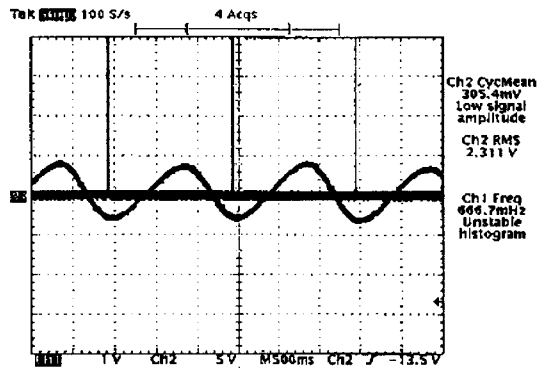


그림 14 선수방향이 남쪽인 경우

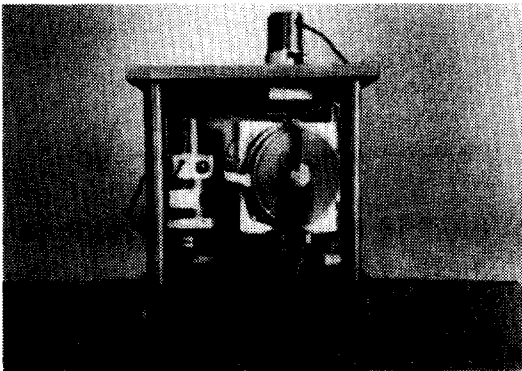


그림 15 동적방식 광섬유자이로콤포스의 외형사진

력신호 변화량이 지구자전속도의 최대출력신호값에 대한 위도성분만큼의 출력신호값의 두배에 해당된다.

그림 11은 차단주파수 1.6Hz의 로패스필터링을

하여 북서남동 각방위에서의 얻은 출력신호를 나타낸다. 채널 1은 FOG센서의 직접적인 출력신호를 나타내며, 채널 2는 증폭한 출력신호를 나타낸다. 다음은 선수 기준방향을 변화시켰을 때 FOG센서와 기준 펄스신호 사이의 위상차가 대응하여 변화하는 지를 알아보았다. 그림 12는 FOG센서를 일정한 속도로 정속회전하여 얻은 지구자전속도의 각방위별 출력전압을 보여준다. 그림 13은 선수방향이 서쪽을 향하고 있을 때의 FOG센서의 출력신호와 기준신호를 나타내며 FOG센서를 반시계 방향으로 정속회전하여 얻은 출력신호이므로 최대값 위치가 북쪽이기 때문에 이후에 나타나는 첫 영점 위치인 서쪽을 기준신호가 지시함을 알 수 있다. 그리고 선수방향을 반시계 방향으로 90° 회전하였을 때의 신호를 그림 14에 나타내었다. 이 때 기준

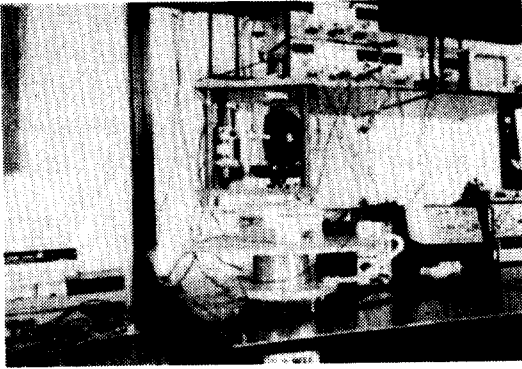


그림 16 제작된 광섬유 자이로콤파스의 성능조사를 위한 실험

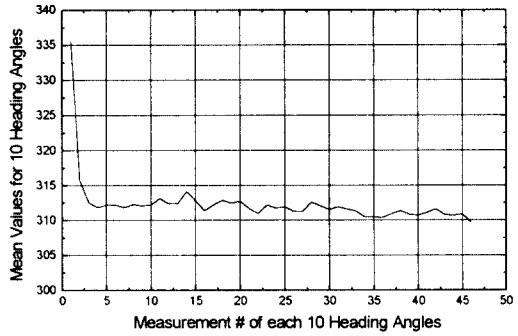


그림 17 임의의 선수방향에 대한 선수각측정의

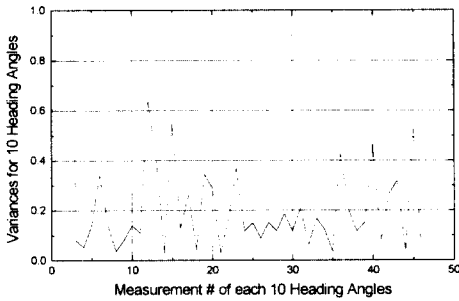


그림 18 임의의 선수방향에 대한 선수각측정의 분산그래프

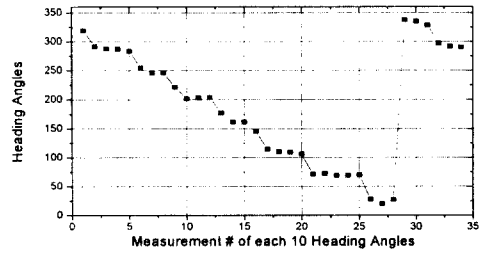


그림 19 45°씩 회전하며 얻은 각각의 방위에 대한 선수각 측정그래프

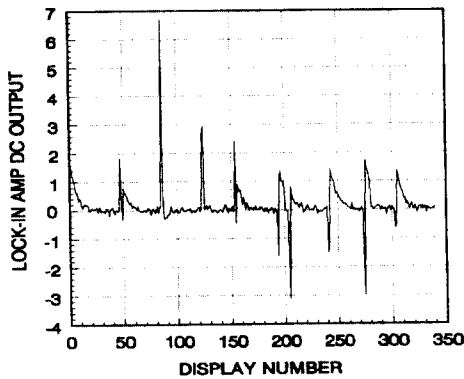


그림 20 45°씩 회전하며 측정한 실험중의 Lock-in Amp출력신호 형태

신호는 남쪽인 최소값 위치를 지시하고 있다. 이와

같은 실험을 통하여 본 연구에 사용한 FOG센서인 VG951 기종이 지구자전속도를 검출할 수 있으므로 광섬유 자이로콤파스에 이용할 수 있는 센서임을 확인하였다. 이러한 기초실험을 바탕으로 실제 제작과정에서는 이상적인 사인과 출력을 얻기 위한 정속회전용 모터로는 속응성과 정확도가 뛰어난 DC서보모터를 사용하였고 기준신호 입력과 정속회전을 위한 피드백 제어용으로 1000 ppr의 엔코더를 사용하였다. 신호처리를 위하여 FOG센서 출력단에 증폭이득 4000배 중심주파수 0.175Hz인 능동형 밴드패스필터를 설계하였고 Lock-in Amp와 시간평균을 위한 LPF는 드리프트 등의 전자적 잡음 요인의 제거와 구조의 간단화를 위하여 소프트웨어 처리하였다. 그림 15은 제작된 동적방식 광섬유 자이로콤파스의 외형사진을 보여준다. 센서의 회전주파수는 여러 가지 잡음의 주파수대역을 고려하여 최

적 회전주파수인 0.175Hz로 정속회전을 시켰다.

4. 실험결과 및 고찰

제작된 광섬유 자이로콤파스는 스위치를 켜고 동시에 시동되어 초기각 0°로 리셋된 후 현재의 선수방위각으로 추종하는데 걸리는 시간은 그림 17의 측정그래프에서 볼 수 있듯이 약 2~3분 정도 걸린다. 1회전당 한 개의 각도를 화면에 표시하며 이 때 걸리는 시간은 5.7초이다.

제작된 광섬유 자이로콤파스의 정도를 알아보기 위하여 임의의 방향에 대한 선수 방위각을 측정하여 보았다. 그림 16은 각도가 표시된 회전 플랫폼 위에 제작된 광섬유 자이로콤파스를 설치하여 성능을 조사하기 위한 실험장치를 보여준다. 그림 17는 임의의 한 방향에 대해 선수 방위각을 측정한 평균그래프이며 각각의 데이터는 10개의 선수방위각을 측정 후 평균하여 얻은 값이며 총 실험시간 45분 동안 46개의 데이터를 나타낸다. 그림 18은 이 데이터들의 분산을 나타내는 그래프이다. 첫 6개의 데이터는 초기 추종과정을 나타내므로 제외하고 평균값은 311.67°이며 자승평균오차는 0.4°이었다. 다음은 특정방향에 대한 신호왜곡이 있는지를 알아보기 위하여 각방위에 대하여 선수각을 측정하여 보았다. 그림 19는 자이로콤파스를 임의의 위치에서 시작하여 선수각을 45°씩 등간격으로 회전하여 측정하였다. 그림 20은 이때의 Lock-in Amp의 출력신호형태를 보여준다. 측정시간 30분 동안 34개의 데이터를 수집하였으며 자승평균오차는 0.5°이었다. 따라서 왜곡이 없이 양호하게 선수 방위각을 알 수 있었다.

4. 결 론

경제성을 고려하여 저가형 중급 FOG센서를 직접 설계하여 주문제작하였다. 이 센서의 특성은 scale factor 267mV/deg/s, 잡음은 $2 \text{ deg/hr}/\sqrt{\text{Hz}}$ 이었고 이것을 이용하여 동적방식 광섬유 자이로콤파스를 제작하였다. 회전주파수 0.175Hz로 정속회전시켜 1회전당 1개의 각도를 화면에 표시하는

데 걸리는 시간은 5.7초이다. 제작된 광섬유 자이로콤파스의 성능을 알아보기 위해 다음의 두가지 실험을 해 보았다. 첫째, 제작된 콤파스의 정도를 알아보기 위하여 임의의 방향에 대한 선수 방위각을 측정하였다. 측정시간 45분 동안 46개의 데이터를 얻었으며 자승평균오차는 0.4°였다. 둘째, 특정방향에 대한 신호왜곡이 있는지를 알아보기 위하여 임의의 방향에 대한 선수각을 측정해 보았다. 측정시간 30분 동안 34개의 데이터를 얻었으며 자승평균오차 0.5°를 얻었다. 따라서 왜곡이 없이 양호함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) R. B. Dyott and D. E. Allen, "A Fiber Optic Gyroscope North Finder", Proc. 10th International Conference on Optical Fiber Sensors, Glasgow, Scotland, p.442~p.448, 1994.
- (2) "광자이로스코프를 이용한 선박용 자이로콤파스 시스템 개발", 제 1차년도 중간 보고서, 통상산업부, 1995.
- (3) T. Kumagai, N. Ashizuka, H. Nakai, H. Kajioka, "Development of an optical gyrocompass using a high-sensitivity fiber optic gyroscope", SPIE vol. 1795 Fiber Optic and Laser Sensors X, p.105~p.117, 1994.
- (4) "광자이로스코프를 이용한 선박용 자이로콤파스 시스템 개발", 제 2차년도 중간 보고서, 통상산업부, 1996.

감사의 글

본연구는 중기거점 선박용 항해·통신장비 개발과제의 일환으로 통상산업부의 지원에 의하여 수행되었습니다.

러시아 세인트 피터스버그 통신주립대의 B. E. Strigalev, I. A. Matisov, B. A. Nicolaev교수의 기술지원에 감사하며, 삼양무선공업(주) 임 건사장님의 재정지원과 부설 선박자동화연구소의 김재관부장님과 이병창씨의 도움에 대해 감사드립니다.