

본 연구는 한국과학재단 연구비 지원으로 수행된 것임

遠隔指示式 磁氣 compass 에 관한 研究(I)

李 相 鏞* · 任 政 彬*

The Research for Remote-indicating Magnetic Compass(I)

Lee Sang-jib · Yim Jeong-bin

< 目 次 >

Abstract	3. 周波數 doubler
I. 序 論	4. 359° counter
II. 回轉 encoder 式 磁氣 compass 의 設計	5. Display 回路
II-1. 裝置의 概要	6. 計數開始器(counting starter) 回路
II-2. 光電素子의 設計	7. 電源部
II-3. 受光信號處理回路의 設計	III. 實驗의 結果 및 考察
1. 增幅器와 Schmitt 回路	IV. 結 論
2. 位相判別回路	

Abstract

Self-contained portable remote-indicating magnetic compass was designed and tested. Its sensing part consists of main scale disk of rotary encoder with photo-etched 180 opaque slits and three pairs of light sources and detectors seperated by a transparent index scale, so that any angular deflection of main scale disk against the bowl may be detected optically.

The outputs from the sensing part are transformed into digital ship's course indication by electronics unit which consists of operational amplifier, phase discriminator, up-down counter and counting starter circuit.

The results from testing the above compass with turntable at variable rate of turn are as following:

- 1) The main scale disk deflection against the bowl can be detected without any disturbing influence to the freedom of its north-seeking function.
- 2) The digital indication resolution is found to be ± 1 degree.
- 3) Misrepresenting indication can be avoided by ensuring dimension uniformity and arrangement accuracy of slits on main and index scale disks and by centering pivot in the encoder disk.
- 4) Indication resolution should be improved by modifying the signal processing and by doubling the number of slits on compass card.

* 正會員, 韓國海洋大學

- 5) Further study should be made on developing non-conductive compass liquid, analogue repeater driving system and more compact processing element.

1. 序 論

船舶用 遠隔指示式 磁氣 compass 는 必要한 곳에 그 指示度를 傳達시킬 수 있는 機能이 있을 뿐만 아니라 船體磁氣의 影響이 덜 받는 곳을 擇하여 compass 를 設置할 수 있는 利點이 있다.

지금까지 開發된 製品은 compass bowl 이 指北 磁針을 追從하게 한 follow-up system 에 의하거나 指北 磁針의 旋回에 따라 torque amplifier 가 동작하게 하여 그 指示度가 repeater 에 傳達되게 한 transmitting magnetic compass 가 있고, 이러한 中繼傳送裝置를 쓰지 않고 card 의 指示度가 遠隔所로 傳達되게 한 remote-indicating magnetic compass 가 있다. 前者는 비교적 正確性이 높으나 裝置가 複雜하며 驅動用 電源은 船內 電源에 依存해야 한다. 또 後者는 repeater 에 傳達되는 torque 가 微弱하므로 그 正確도가 낮다.

이들 製品에서 compass card 의 回轉을 感知하는 偏角信號 檢出器는 다음과 같은 방식이 쓰이고 있다. ① 指北 磁針과 slave 磁針과의 磁氣的인 結合에 依한 slave system, ② capacity bridge 回路를 이용한 capacity system, ③ 液體抵抗 또는 potentiometer 를 이용한 抵抗 bridge system, ④ 指北 磁針의 磁場으로 飽和되는 誘導子를 이용한 inductive system, ⑤ 光感度 bridge 를 利用한 photoelectric system, ⑥ 感磁性 素子를 이용한 Sony magnetic diode bridge system 등이 있다.

이들 製品은 船內電源에 의존해야 하므로 獨立性이 없고 船內電源을 쓸 수 없는 非常時에는 그 機能을 상실하게 되어 최악의 비상 상태에서도 그 機能이 保存되어야 하는 磁氣 compass 의 基本要件을 갖추지 못하고 있다.

本 研究에서는 이러한 점을 염두에 두고 遠隔指示式 磁氣 compass 의 開發을 試圖하였다. 즉 指向性이 좋은 光源에서 發사된 빛이 回轉 slit(main scale)와 固定 slit(index scale)를 透過하여 受光되는 경우에는 다음과 같은 것이 成立된다.

① 受光素子の 受光量 變動은 回轉 slit 의 回轉角에 따라 變動한다.

② 두개의 獨立된 受光素子の 受光量 變動이 서로 90° 位相差를 유지하도록 한 경우에는 回轉 slit 의 回轉方向에 따라 受光素子の 出力特性은 서로 바꾸어진다.

이러한 特性을 利用하면 compass course 의 指示度를 計數化할 수 있다는 점에 着眼하여 回轉 encoder 式 磁氣 compass 를 設計하였다. 얇은 황동판 위에 360° 의 눈금이 새겨진 compass card 대신에 slit 가 있는 合成樹脂 원반을 float 에 부착하였고, 受光素子에 의한 回轉 slit 의 回轉角 檢出信號는 增幅回路, phase detector, up-down counter, display 등으로 구

성된 electronics 에서 처리되어 指示되게 하였으며 그 性能은 turn table 을 利用하여 試驗하였다. 그 結果 card 의 指北動作을 방해함이 없이 遠隔指示가 가능함이 糾明되었다.

II. 回轉 encoder 式 磁氣 compass 의 設計

II-1. 裝置의 概要

Fig. 1 과 같이 180 개의 slit 가 等角間隔으로 排列된 合成樹脂盤 card 를 pivot-needle 式 磁氣 compass 의 float 에 固定시켰는데 이 float 는 compass bowl 에 充滿된 compass 液과 pivot 로 支持되어 있다. 發光素子 A'', B''에서 나온 빛은 각각 card slit, 固定 slit 를 透過하여 受光素子 A, B에서 受光되며, 各 受光素子의 受光量은 card 의 回轉角에 따라 規則的

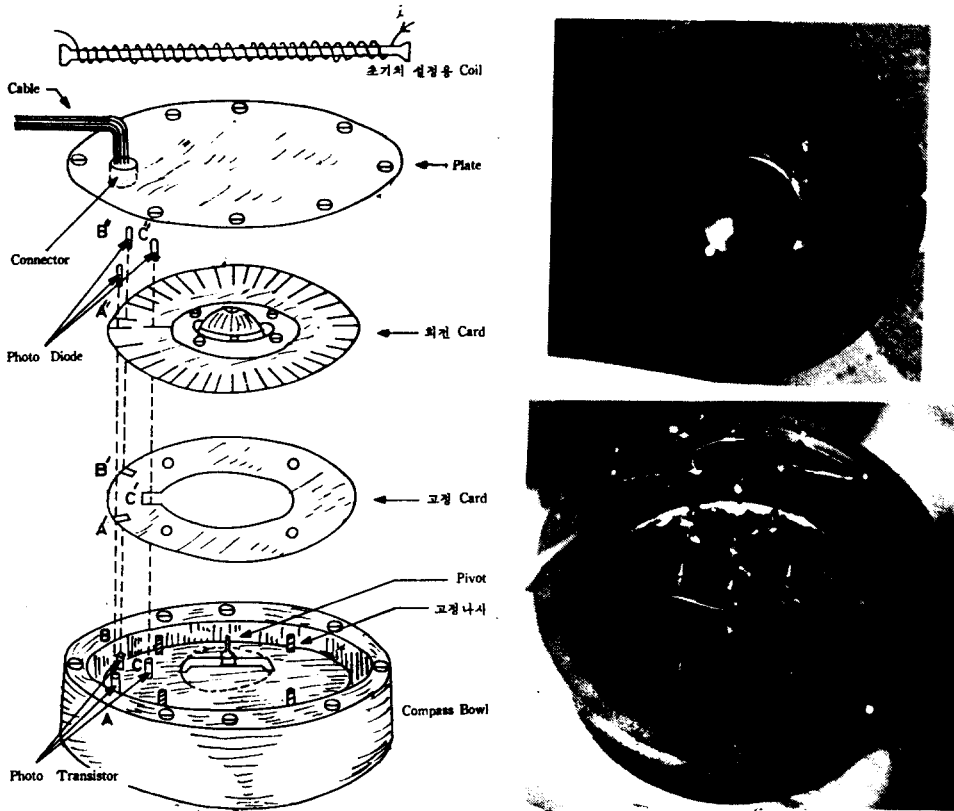


Fig. 1. Elements of sensing part

— sensing part 의 제원 —

- | | |
|--|--|
| • card : 합성수지 원반(지름 17.3cm) | • main scale slit 의 최대폭 : 1.5mm |
| • bowl : 황동관(지름 19.5cm) | • index scale 간의 간격 : 4.2cm |
| • compass 液 : 알콜과 증류수혼합액
(액체저항 220K Ω /cm) | • 發光素子 : 赤外發光 diode(EL-ICL ₃ H) |
| | • 受光素子 : photo transistor(ST-ICL ₃ H) |

으로變動되도록 하였으며, 두 受光素子의 受光量 變動樣相은 서로 90°의 位相差가 유지되도록 固定 slit A', B'를 排列하였다. 受光素子 C와 固定 slit C'는 船首方向과 平行하도록 固定하고, card에서는 磁針의 N端과 一致한 方向에 獨立된 slit를 두었다. 이 slit를 透過한 빛이 C에 受光될때 針路가 000°가 되도록 設計하였다. 또 指示度의 初值는 필요에 따라 맞출 수 있도록 船首尾方向으로 card 위에 誘導 coil을 附着하였다. 受光素子 A, B에 入力된 信號는 增幅回路, schmitt 回路, 位相判別回路, counter 回路를 通하여 digital 式 針路情報가 얻어지도록 處理하였다(Fig. 2).

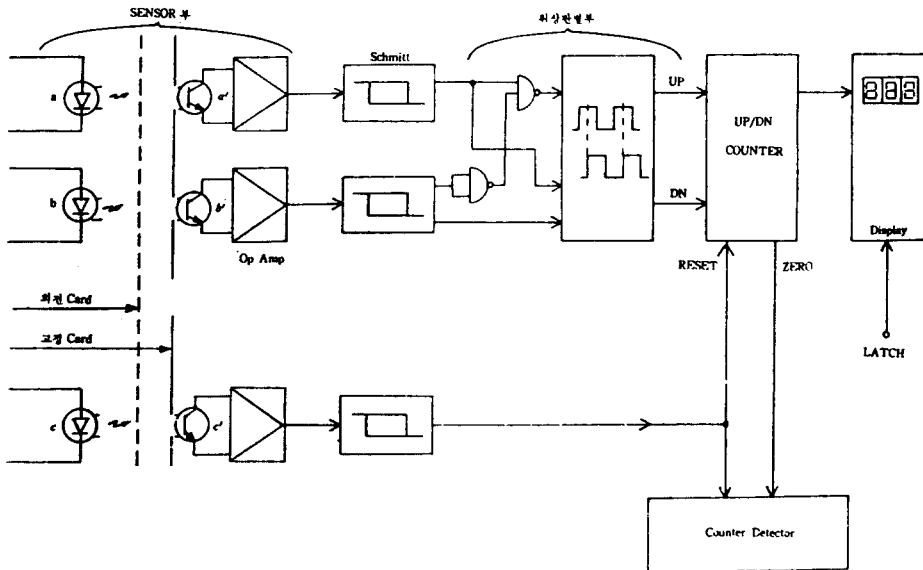


Fig. 2. Compass course data flow diagram

II-2. 光電素子の 設計

赤外發光 diode EL-ICL,H를 發光素子로, photo transistor(ST-ICL,H)를 受光素子로 使用하였다. 이들의 特性은 Fig.3(a)에서 보인 바와 같이 beam 幅은 넓은 편이나 ceramic package로 되어 있어 compass card의 指北動作에 妨害되는 磁場을 거의 形成하지 않고 小形이라는 利點이 있다. Fig.3(b)는 光電素子の 제원이다.

Fig. 3(a). Typical characters of photo diodes and photo transistor

Type No.	Absolute maximum ratings	Package	Others
EL-ICL3	IF : 40mA, VR : 4V, P : 70mW	Ceramic	λ : 940nm, $\Delta\theta$: $\pm 53\text{deg}$
ST-ICL3H	Vceo : 40V, Pc : 75mW	Ceramic	λP : 800nm $\Delta\theta$: $\pm 50\text{deg}$

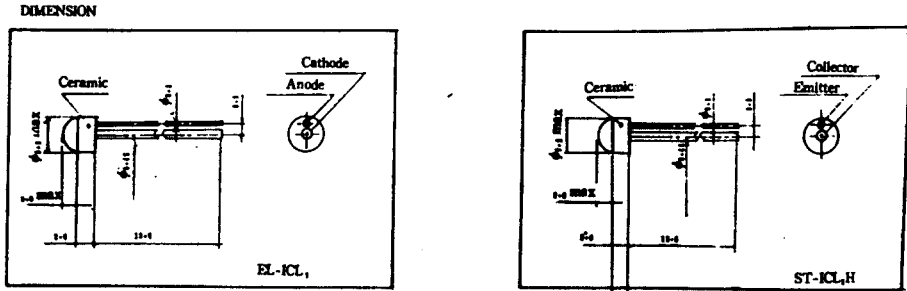


Fig. 3(b). Dimensions of photo diode and photo transistor

Fig. 4 에서 bias 를 12V로 했을 때 赤外 發光 diode EL-ICL₁H는 定格電流가 40mA 이지만 약 25mA 가 되도록 抵抗을 달았고, 마찬가지로 受光素子, ST-ICL₁H 도 5mA 가 되도록 저항을 달았다. 또 이들 光素子는 compass 液속에서 漏電이 되어 출력信號가 약해지고 전력소모가 많아지는 일이 없도록 구리 cap으로 밀봉하였다.

受光素子 A, B 및 C의 出力特性은 이론적으로는 三角波形이 되나 光線이 平行으로 進行하지 않아 受光量이 極大, 極小가 되는 경우가 뚜렷하지 않고 또 빛의 廻折現象으로 光선이 slit 를 투과시 확산되므로 Fig.5(a)와 같이 근사적인 正弦波形이 되고 다음과 같이 나타낼 수 있으므로 90°의 位相差를 유지한다.

$$V_A = V \cdot \sin n\omega t \quad (V)$$

$$V_B = V \cdot \cos n\omega t \quad (V) \quad \begin{matrix} (n : \text{slit의 갯수}) \\ (\omega : \text{각 속도}) \end{matrix}$$

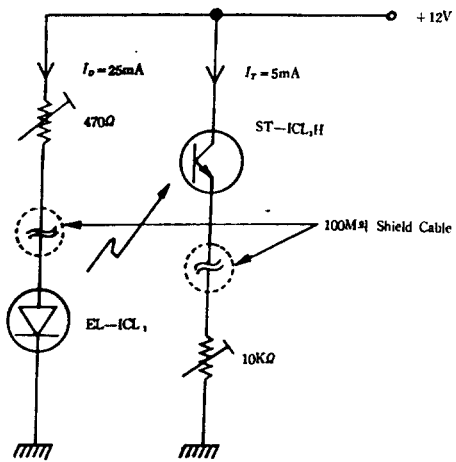


Fig. 4. Schematics of photo sensors

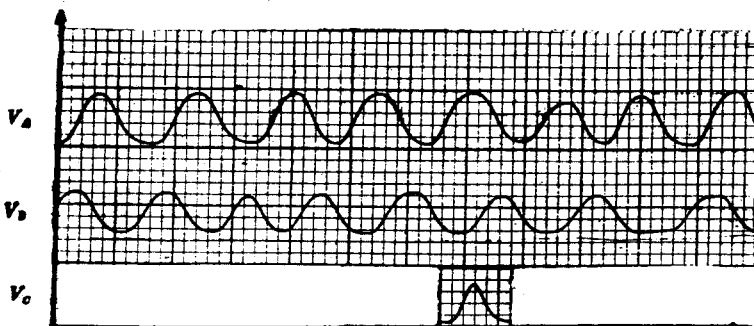


Fig. 5(a). Wave form of outputs A, B and C

V_C 는 card의 N端이 lubber line을 指示할 때 出力된다. Fig.5(b)는 오실로스코프로 측정한 V_A , V_B , V_C 의 出力特性이며 scale은 5[V/Div.]이다.

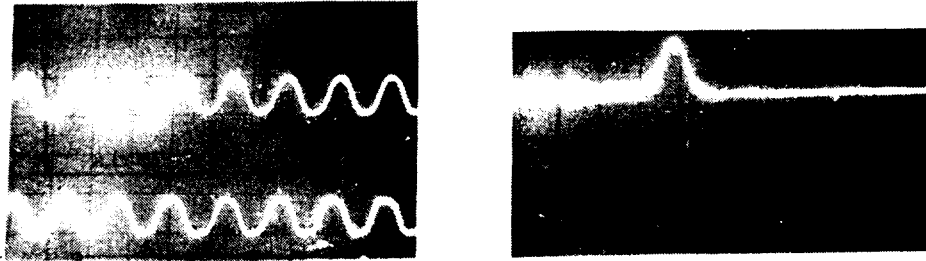


Fig. 5(b). Waveform of sensor outputs

II-3. 受光信號 處理回路의 設計

1. 增幅器와 Schmitt 回路

增幅器는 Operational amplifier $\mu A 1741$ 를 사용하여 製作하였다. 受光素子의 出力은 약 4V이므로, 增幅回路의 增幅度를 크게 할 必要는 없었다. 그러나 compass bowl과 指示器間의 cable 길이, TTL IC와의 interface 등을 고려하여 增幅回路를 設計하였다.

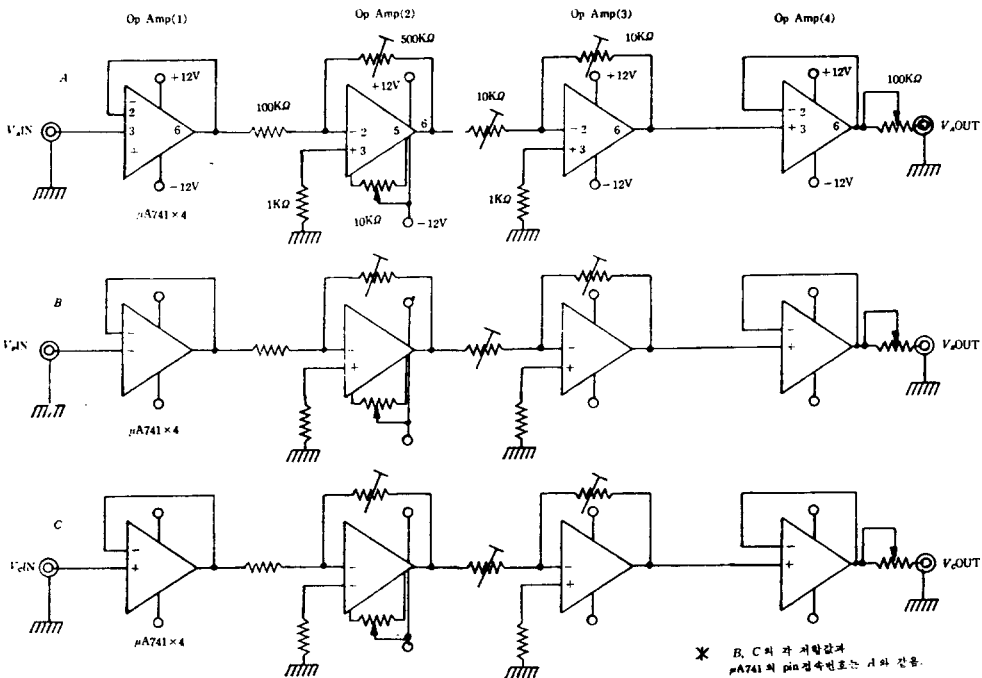


Fig. 6(a). Schematics of operational amplifier

Fig. 6(a)에서 Op. Amp. (1)은 入力 impedance 를 높게 하고, interface 및 cable 의 内部 容量을 中和할 수 있도록 하였다. Op. Amp. (2)와 Op. Amp. (3)은 位相反轉增幅器로서 이

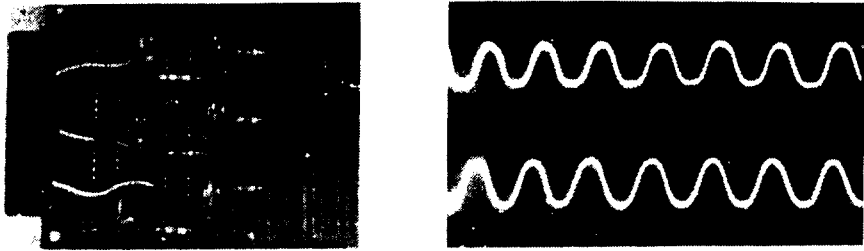


Fig. 6(b). Operational amplifier and output waveform

른적인 利得, A_v 는 각각 $-5, -1$ 이다. Op. Amp. (2)에서는 信號對 雜音의 比(S/N)를 높이고 直流成分을 最少限으로 줄이며, Op. Amp. (3)에서는 出力端의 出力電壓을 $0\sim 6V$ 로 하더라도 波形的의 찌그러짐이 없도록 可變抵抗 $10k\Omega$ 으로 利得을 調整하였다. 또 Op. Amp. (4)는 Op. Amp. (1)과 같은 機能을 갖도록 하여 出力 impedance 를 낮게 하였다. Op. Amp. 와 V_A 및 V_B 의 出力波形的은 Fig. 6(b)와 같다. 이때 오실로스코프의 scale은 $5[V/Div.]$ 이다.

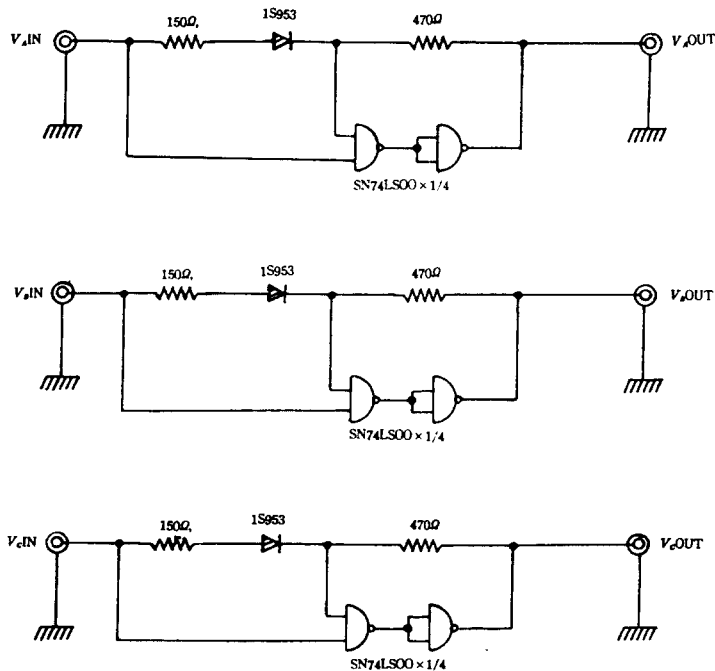


Fig. 7(a). Schematics of schmitt trigger

Fig. 7(a)는 schmitt 회로로 diode 1S953 과 저항 150Ω 으로 level shift 하였고 Fig. 7(b)는 schmitt trigger 와 V_A , V_B 의 出力波形을 나타낸 것이며 Op. Amp.(3)의 각 Amp.에 있는 두개의 저항 $10k\Omega$ 으로 調整하여 矩形波의 幅과 間隔이 같도록 (duty 比가 1)하였다.

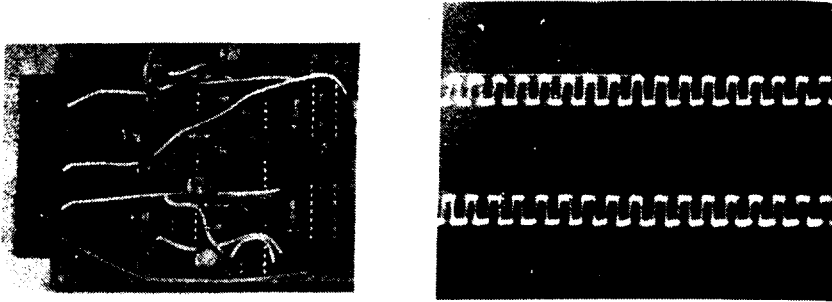


Fig. 7(b). Schmitt trigger and outputs waveforms(scale 5[V/Div.])

2. 位相判別回路

船舶의 旋回方向에 따라 針路가 指示되도록 다음과 같이 回路를 設計하였다. 우선, Fig. 8 과 같이 V_A 가 V_B 에 對하여 位相이 앞서게 되면 IC SN74LS74 Q端의 出力은 H 狀態

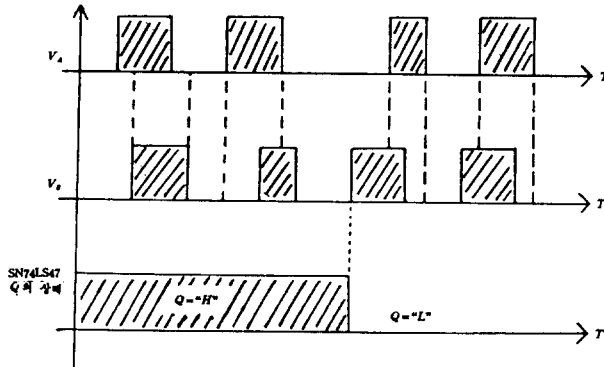


Fig. 8. Example of phase discriminated outputs

로 되고 V_B 가 V_A 에 對하여 앞서게 되면 L 狀態가 된다. 이러한 特性을 利用하여 Fig. 9(a)와 같이 位相判別回路를 구성하였다. 즉, schmitt 회로에서 出力된 矩形波를 buffer 를 利用하여 波形이 뚜렷해지도록 하였고, D-T flip-flop SN74LS74 을 利用하여 位相이 判別되도록 하였다. 位相判別 信號는 SN74LS00 으로 구성된 up-down 分離回路에 入力된다. 한편, V_A , V_B 두 信號는 counter 回路에서 組合되어 counter 信號로 出力된 다음 up-down 分離回

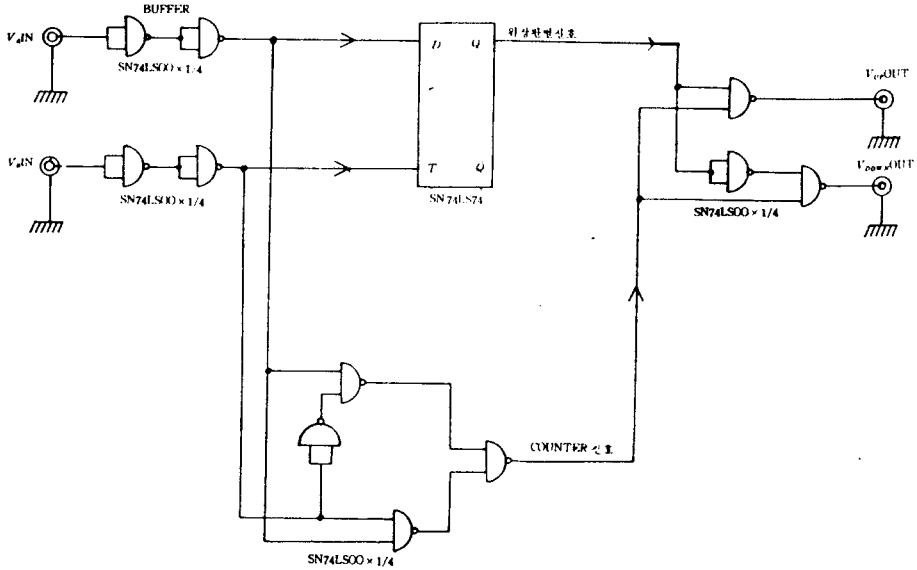


Fig. 9(a). Schematics of phase discriminator

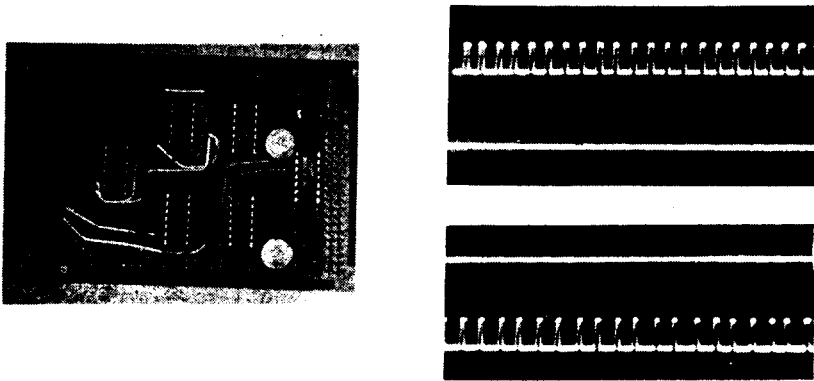


Fig. 9(b). Phase discriminator and output waveforms

로 입력되어 up 신호와 down 신호로 분리되어 출력된다. 위상판별회로와 up 신호 및 down 신호의 출력波形은 Fig. 9(b)와 같다.

3. 周波數 doubler

card slit 圓盤의 slit 數는 180 개이므로 360°까지 整數度로 判讀하도록 周波數 doubler 를 使用하였다(Fig. 10).

Exclusive OR gate(SNT4LS86)는 두 入力信號가 서로 一致하지 않을 때만 出力이 H로 된다. 따라서 어느 한쪽의 入力信號가 CR에 의하여 지연되면 Fig. 11(b)와 같이 入力信號

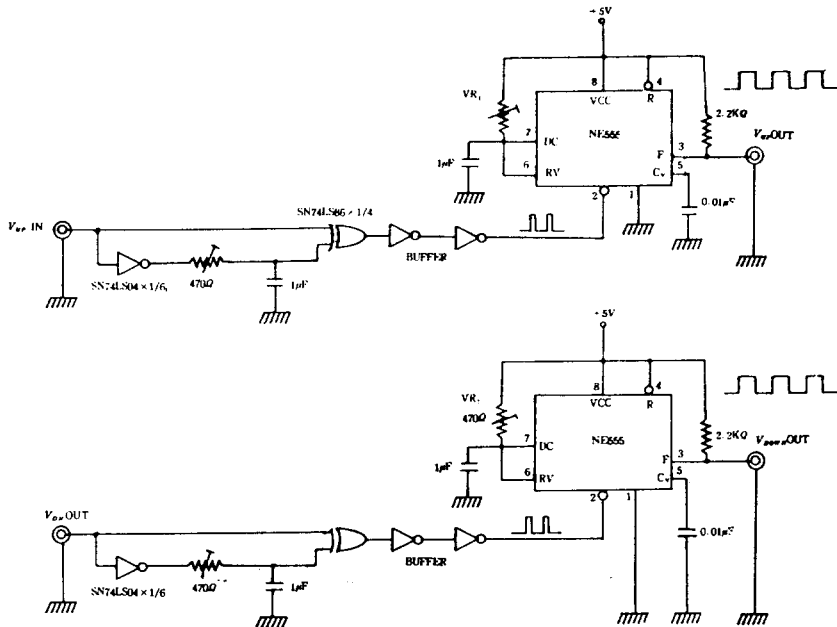


Fig. 10. Frequency doubler

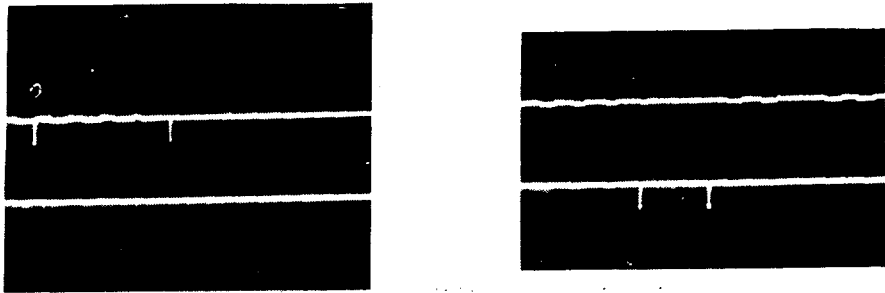


Fig. 11(a). Frequency doubler and output wave form

가上昇할 때와 下降할 때 出力이 나오게 되지만 콘덴서 C는 上昇할 때의 充電時間과 下降할 때의 放電時間이 다르므로 出力 波形은 pulse 幅이 다를 뿐만 아니라 不安定하다. 그러므로 monomulti vibrator NE555를 사용하여 出力 pulse 幅이 一定하고 安定하도록 하였다. NE 555의 動作시간 보다 trigger의 入力 펄스週期가 길면 自走(free running) multi-vibrator로 動作하게 되므로 trigger 入力 펄스週期가 NE 555의 動作시간 보다 짧게 되도록 可變抵抗 V_{R1} 과 V_{R2} 로 調整하였다. 實際의 出力特性은 Fig. 11(a)와 같다.

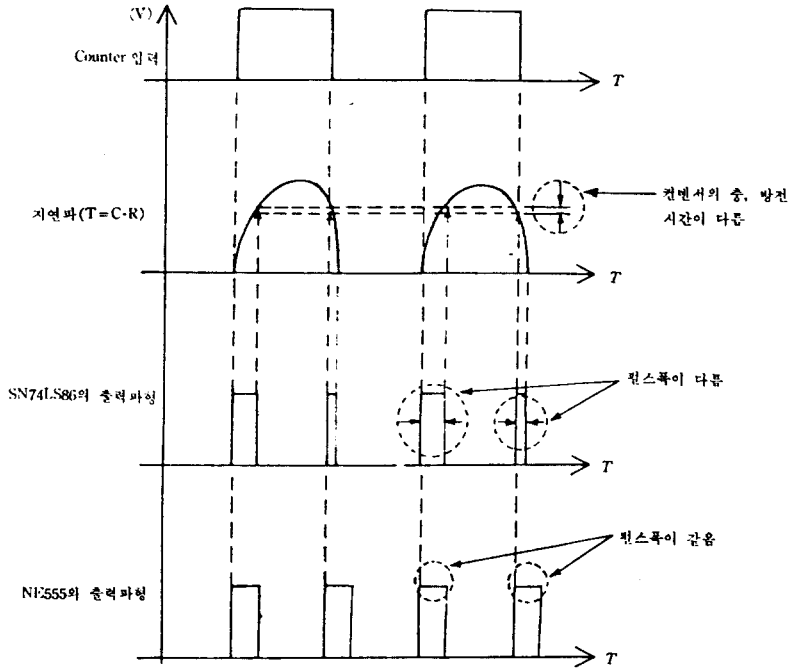


Fig. 11(b). Example of outputs of frequency doubler and those of monostable multivibrator

4. 359° counter

針路가 digital式으로 指示되도록 하는 counting 回路는 Fig. 12(a)에서와 같이 programmable counter IC SN74LS192를 사용하였다. 이것은 同期式 4-Bit up-down counter로서 원하는 data를 preset 할 수 있다. preset 入力 \bar{L} 가 H일 때는 data 入力에 상관없이 counting을 계속하고 \bar{L} 를 L로 하면 counter 入力에 관계없이 非同期로 BCD code의 preset data 入力이 그대로 counter에 set 되고, \bar{L} 를 H로 하면 preset된 狀態에서 counting를 始作한다. preset 動作을 시키지 않을 때는 \bar{L} 入力만 H로 해두면 data 入力이 L이든 H이든 상관없이 counting 한다. Fig. 12(b)는 counter unit이다.

SN74LS192의 1, 9, 10, 15번 端子는 data 入力으로서 0에서 9까지의 狀態를 program 할 수 있다. 359의 狀態를 SN74LS08의 AND gate로 組合하여 up down 信號에 同期한 出力으로 preset시키고 reset 信號는 非同期式으로 指示度를 000으로 한다. reset 入力 R은 H로 할 때 reset되고 L로 하면 counter 된다.

이들 動作을 timing diagram으로 表示하면 Fig. 13과 같다. counter up 信號가 계속 入力되어 counter 狀態가 359로 되면 그 다음 信號에 의하여 reset되어 000의 counter 狀態로 된다. 反對로 counter down 信號가 계속 入力되어 counter 狀態가 000이 되면 그다음 信號에 의하여 preset되어 359의 counter 狀態를 表示하게 된다.

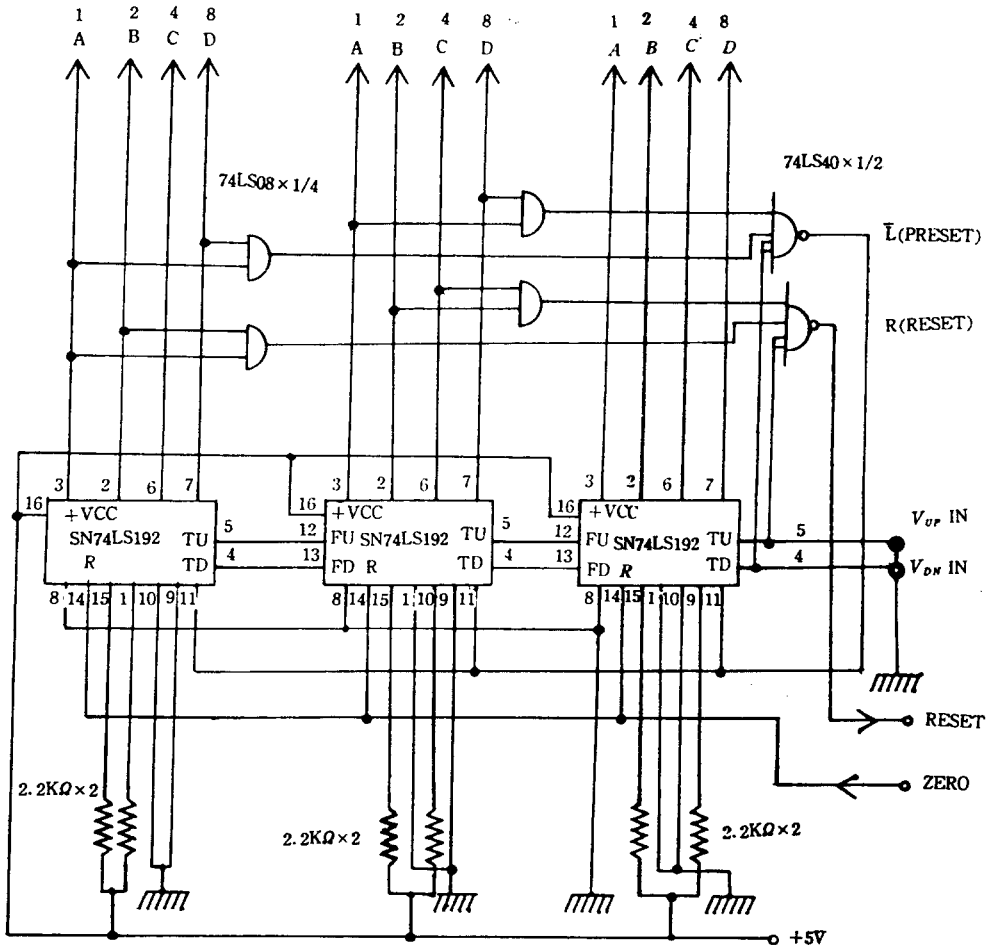


Fig. 12(a). Schematics of counter

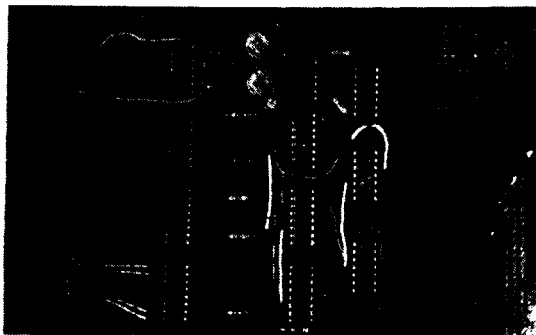


Fig. 12(b). Counter unit

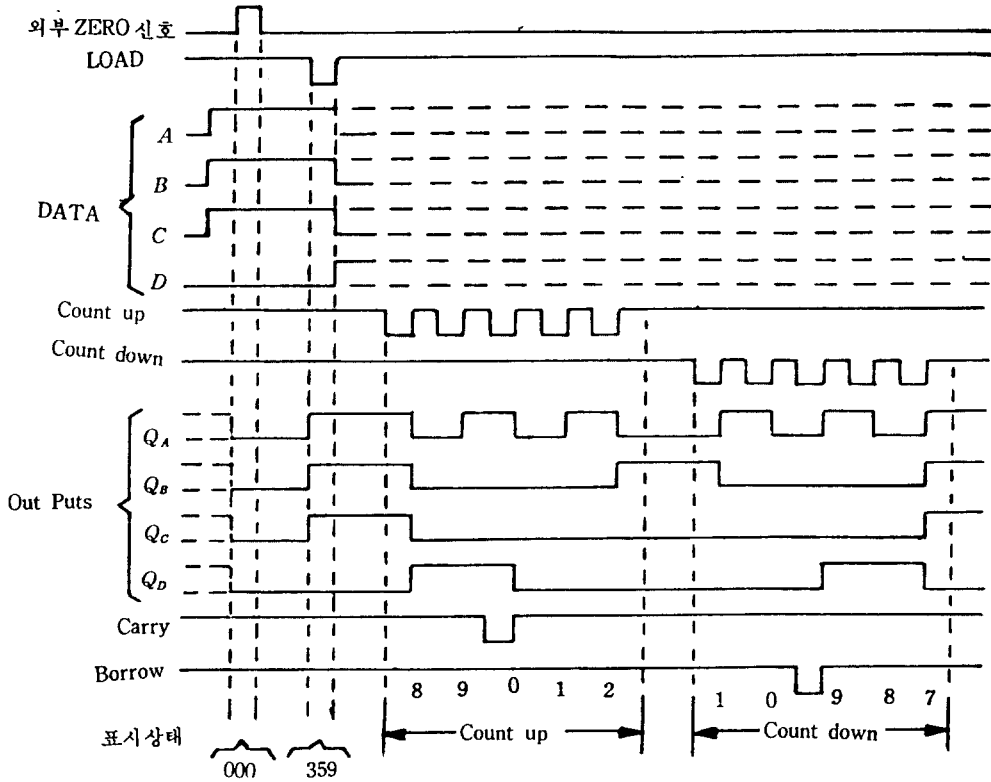


Fig. 13. Timing diagram of counter

5. display 回路

Fig. 14 는 display 回路로 counter 回路 SN74LS192 에서 出力된 BCD 信號를 7 segment 인 FND 500 으로 表示하게 한 回路이다. SN74LS75 에 의하여 원하는 때 정지된 指示度를 볼 수 있게 latch 回路가 添加되어 있다.

따라서 latch 를 on 하면 現在の 針路가 指示된체로 停止하며 다시 latch 를 off로 하면 針路를 계속 指示하게 된다. SN74LS47 은 BCD 信號를 7 segment 로 表示하기 위한 BCD-7 segment IC 이다.

6. 計數開始器(counting starter)

compass bowl 위쪽에 船首尾方向으로 一時磁場이 形成되도록 誘導 coil을 附着하였다. 一時磁場이 形成되면 compass card 의 N 端이 船首方位와 一致되게 하였고, coil 에 흐르는 電

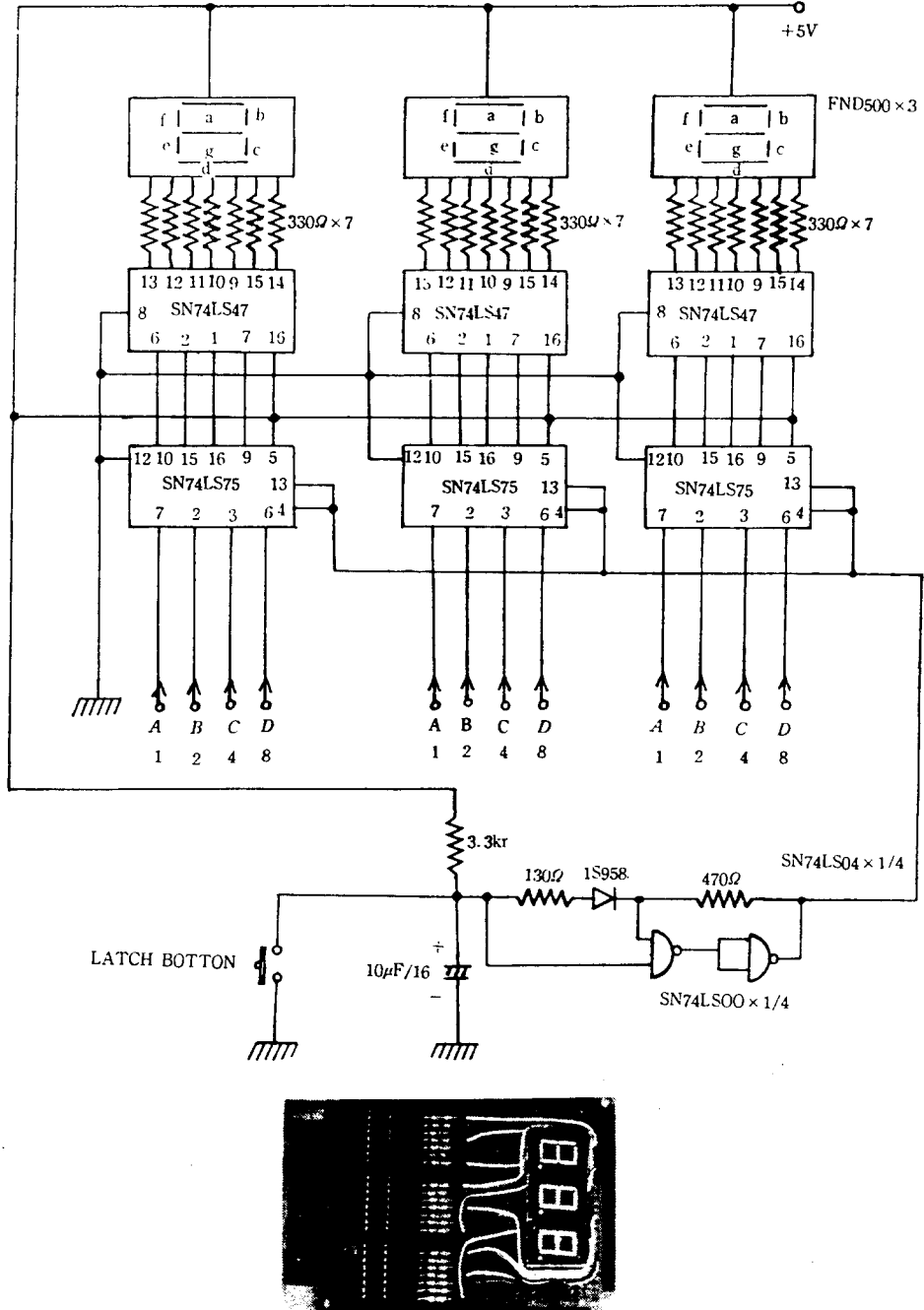


Fig. 14. Schematics of display and display unit.

流가 차단되면 card가 回轉하여 現在의 針路가 指示되게 하였다.

Fig. 15(a)에서 push button을 한번 누르면 schmitt 회로를 통하여 雜音이 없는 矩形波가 얻어지고 NAND gate에 의한 $\bar{R}-\bar{S}$ flip-flop의 \bar{S} 에 入力되어 2SA562, 2SD235가 on이 되므로 relay가 on이 된다. 이 狀態에서 compass 바로 위에 設置된 coil에 誘導磁場이 생기므로 compass card의 磁針이 誘導磁場의 方向과 一致하면 zero信號가 檢出하게 된다. 檢出된 zero信號는 counter의 $\bar{R}-\bar{S}$ flip-flop의 \bar{R} 에 入力되어 relay를 off시킨다.

따라서 card는 原位置를 向하여 回轉하기 始作하고, 그와 同時에 counting하므로 결국 現在의 針路를 가리키게 된다. Fig. 15(b)는 counting stater unit이다.

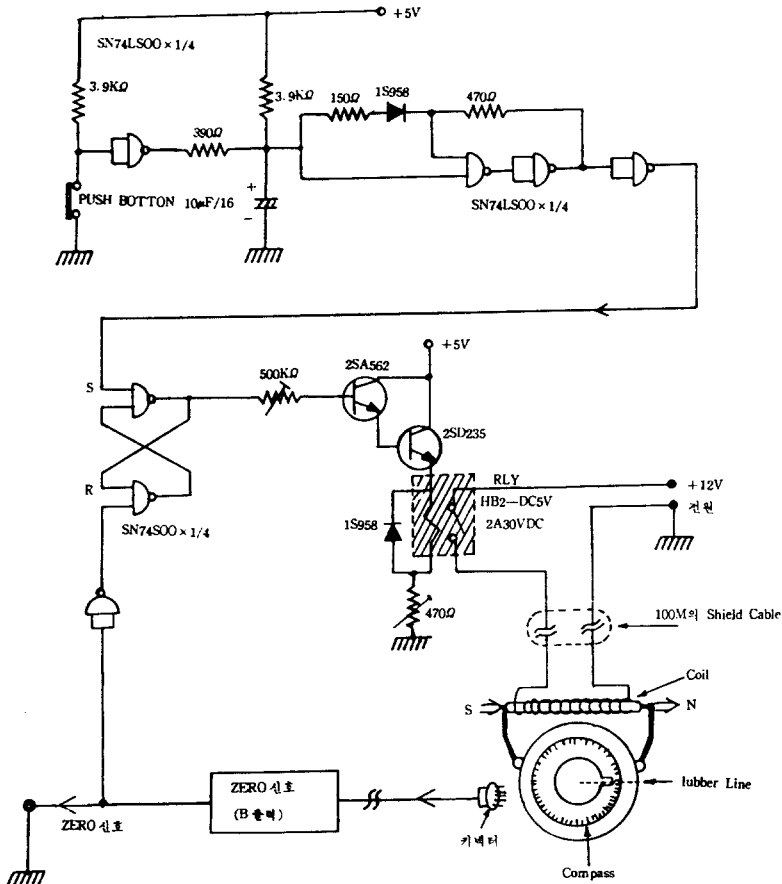


Fig. 15(a). Schematics of counting counting starter

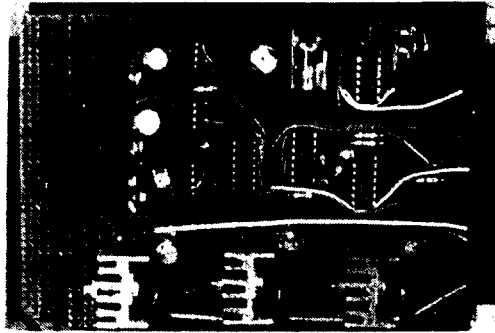


Fig. 15(b). Counting starter unit

7. 電源部

各種 船舶에서 本 器機를 實驗할 수 있도록 휴대용 獨立式 電源을 만들었다.

Fig. 16 과 같이 4DM-6V 진전지를 여러 개 조합하여 +12V 의 單一 電源과 ±12V 의 兩 電源 및 +6V 電源을 만들었다. 後에 本 器機를 船舶에 設置하는 경우 船內電源을 整流하여 사용할 수 있도록 5V 정전압TR 7805 를 사용하여 counter 用 電源(I), display 用 電源 (II), 그의 電源(III) 등으로 각각 分離시켜 공급전압이 安定化되도록 하였다.

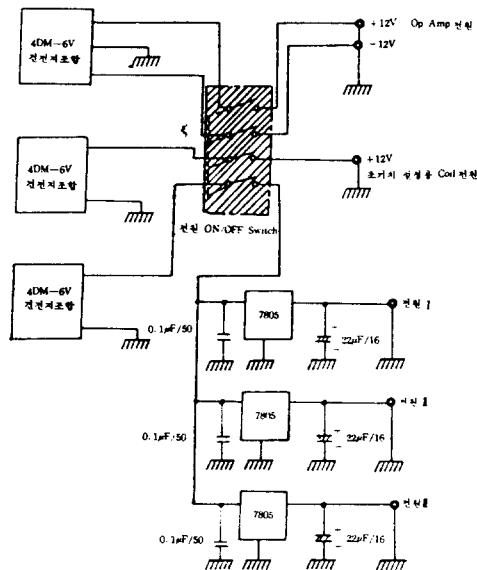


Fig. 16. Power supply

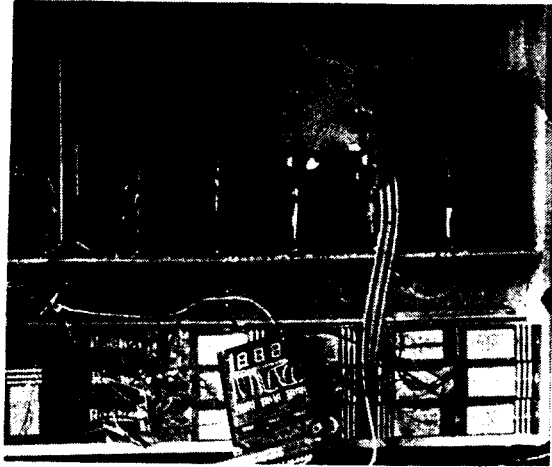


Fig. 16. Signal processing electronics and power supply unit

Ⅲ. 實驗의 結果 및 考察

Fig. 17 과 같이 旋回台 위에 compass bowl 을 設置하고 旋回速度를 變更하면서 up 信號와 down 信號의 波形을 測定하였다. 그 결과 出力狀態는 Fig. 18 과 같이 旋回台가 1.2/sec~



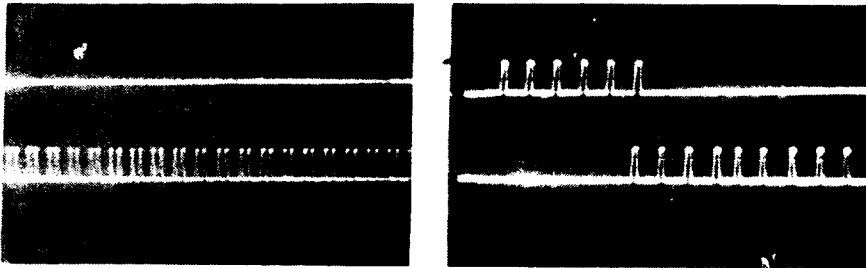
A : X-Y Recorder, B : Oscilloscope, C : Electronics and Display,
D : Cable, E : Cable reel, F : Sensing part, G : Turn table

Fig. 17. General view of experimental installations

36°/sec 의 속도로 회전되더라도 指示針路에 關係없이 誤讀되는 일이 없었다.

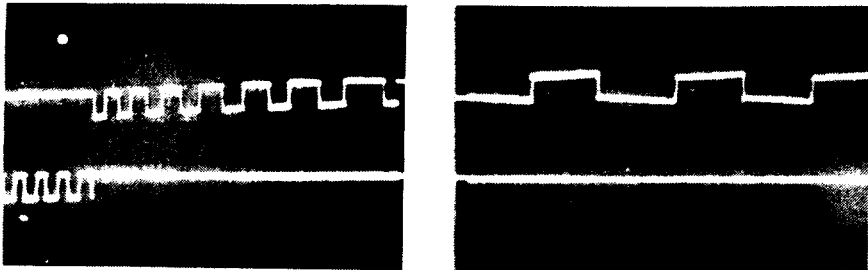
한편 製作의 편의상 card slit 를 180개로 하였고 信號處理의 過程에서 frequency doubler 를 사용하였으므로, 이로 인한 判讀分解能은 2°로 볼 수 있다. 그러나

card 의 slit 갯수를 360개 또는 720개로 늘이고 信號處理 過程에 전압 분할 방식 또는 波形분할 方式을 導入하면 判讀分解能은 더욱 개선될 수 있을 것으로 본다.



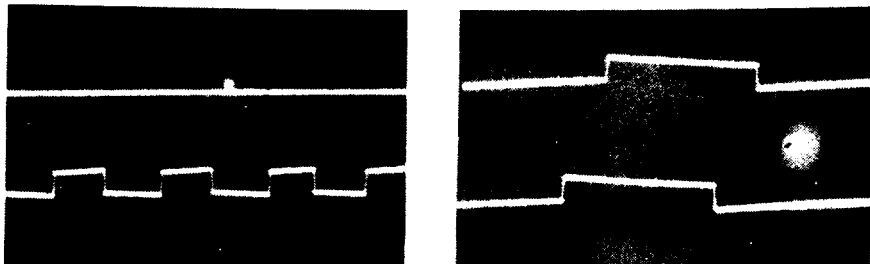
36°/sec

12°/sec



6°/sec

3°/sec



1.8°/sec

1.2°/sec

Fig. 18. Up-down outputs at the different rate of turn via the turntable

IV. 結 論

光電式 rotary encoder 의 原理를 pivot-needle magnetic compass 에 適用하여 remote-indicating magnetic compass 를 設計·製作하고 compass bowl 을 回轉台 위에 고정 한 다음 1.2~36°/sec 의 速度로 回轉 試驗한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

① 既存 magnetic compass card 의 指北動作을 妨害하는 일이 없이 情報의 傳達이 可能하다.

② compass card slit 의 갯수를 180으로 하였고 信號處理 過程에서 frequency doubler 를 사용하였으므로 分解能은 $\pm 1^\circ$ 로 볼 수 있다. 그러나 slit 갯수를 360, 720으로 늘이고 受光 信號의 출력을 전압 또는 파형분할 方式으로 하면 指示度의 分解能은 더욱 높일 수 있을 것으로 본다.

③ electronics unit 內에는 operational amplifier, phase detector, up-down counter, display, counting starter 回路 등이 포함되어 있을 뿐 機械的으로 驅動되는 部分이 없으므로 構造가 간단하다.

④ 구동용 電원이 따로 필요없고 휴대용 DC 電원으로 가동되므로 電원부가 작을 뿐만 아니라 獨立式 器機로서 性能을 갖추고 있다.

⑤ compass card 의 slit 幅과 各 slit 間의 間격이 일정하지 않거나 固定板 slit 의 位置가 不正確하며 pivot 의 끝과 card 中心과 固定板의 中心이 어긋난 경우에는 誤讀되는 수가 있다.

光素子를 防水 處理하고 導電성이 낮은 compass 液을 開發하여 漏電으로 인한 電力損失을 방지하여야 하며 方位測定에 活用되도록 repeater card 를 驅動시키는 問題, 指示度의 分電能을 더욱 높이는 問題 등이 계속 研究되어야 한다.

參 考 文 獻

- 1) 이상집 : 기본항해기, pp. 2~98, 아성출판사, 1982.
- 2) 고대식 : 전자용용회로집, 도서산업사, 1985.
- 3) 佐野清人 : 機械技術者のための センサ技術入門, pp. 99~108, 日刊工業社, 1982.
- 4) 欠賀八洲男 : IC による 測定器의 製作, pp. 61~62, 産報, 1975.
- 5) 鈴木裕外 5人, Digital 指示磁氣 compass 의 試作と 性能に關する研究, 日本航海學會論文集, 60號, pp. 29~36, 1976.
- 6) 飯島幸人 等 1人, SMD compass 의 基礎研究, 日本航海學會論文集, 41號, pp. 103~113, 1967.

- 7) 山田淳外 2人, 交流サーボ形 SMD compass の試作, 日本航海學會誌, 42號, pp. 79~85, 1968.
- 8) 山田博, 電子サーボ系の 基礎と 應用, pp. 102~104, 総合電子出版社, 1970.
- 9) 瀬昇外 1人, 圖解センサ 活用の 實際, pp. 64~99, オーム社, 1982.
- 10) 工業調査會編集部, センサ 活用技術, pp. 177~198, 工業調査會, 1984.
- 11) 中小企業事業團, 機械計測の ための センサと 信號處理, pp. 100~102, 日刊工業新聞社, 1983.
- 12) CQ 出版, センサ・インターフェーシング, No. 3 活用編, part III, pp. 27~56, 1981.
- 13) 蓮具考雄, 實用電子計測器, ハンドブック, pp. 51~53, 東京電機大學, 1982.
- 14) 志賀正明, カウンタ回路と その應用, pp. 53~72, 産報, 1977.
- 15) 中野正次, Digital 回路設計 know-how, pp. 76~108, CQ 出版, 1983.
- 16) 玉村俊雄, Op amp IC 活用 know-how, pp. 11~34, CQ 出版, 1983.
- 17) Alfred Hine, Magnetic Compasses and Magnetometers, pp. 163-210, Toronto University Press, 1968.
- 18) B. Williams, Designers' Handbook of Integrated Circuits, pp. 9-1—9-41, McGraw-Hill, 1984.
- 19) David F. Stout, Operational Amplifier Circuit Design, pp. 4-1—4-21, McGraw Hill, 1976.
- 20) Bryan Norris, Power-Transistor and TTL Integrated-Circuit Applications, pp. 215-232, McGraw Hill, 1977.