

3축형 인공자장발생장치의 제작과 성능에 관한 연구

이 유 원[†]

부경대학교

Performance and Manufacture of the Apparatus Generating Artificial Magnetic Field of 3-axis Type

Yoo-Won LEE

Pukyong National University

Abstract

The objects of this study were to discuss the performance of its using magnetic compass and to do a trial manufacture of the apparatus generating artificial magnetic field of 3-axis type to assess the performance of compass using terrestrial magnetism in the various magnetic field. The results obtained were summarized as follows:

The magnetic field of each axis showed the linearly increase in accordance with the increase of electrical current. Average range difference between measured and calculated values was 0.33~1.93 μT and there were no big difference. The magnitude and direction of magnetic field showed some change in the edge of Helmholtz coil, but it appeared to stabilize in the center.

In the horizontal magnetic force of 0.30gauss and 0.40gauss, the measured and calculated values of the damping characteristic of magnetic compass showed a good agreement. However, the confidence level was low at the horizontal magnetic force of 0.50gauss.

Key words : helmholtz coil(헬름홀츠 코일), apparatus generating artificial magnetic field (인공자장발생장치), magnetic compass (자기컴퍼스), damping characteristic (제진특성)

서 론

해상을 항해하는 선박에서 선수방위 정보는 선박의 위치결정, 침로유지 및 조선에 필수적이다. 선수방위 정보는 컴퍼스를 통하여 얻어지고 있는데, 선박 컴퍼스에는 자이로 컴퍼스, 전자자기 컴퍼스, 자기 컴퍼스 등이 오랜 기간 동안 사용되었으며, 최근에는 광섬유 자이로 컴퍼스, GPS 컴퍼스 등이 사용되고 있다.

자이로 컴퍼스는 정도는 탁월하나 작동하여 사용할 수 있을 때까지 수 시간의 안정시간이 필요하고 다른 컴퍼스에 비하여 고가이며 구조가 복잡하기 때문에

입·출항이 빈번한 연근해 소형어선에서는 많이 사용되고 있지 않다. 또한, 자기위도의 변화와 선체의 경사로 인한 자차 및 경선차의 자동적 수정 등 자기 컴퍼스의 단점을 극복하기 위해 신소자를 이용한 전자 자기 컴퍼스의 개발에 관한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이것은 주로 요트, 소형 어선 등에서 많이 사용되고 있다¹⁻⁶⁾. 한편, 자기 컴퍼스는 자차나 경선차 등에 의한 오차가 포함되어 있음에도 불구하고 구조가 간단하여 보수, 관리하기 쉽고 가격이 싸며, 더욱이 IMO NAV/ANNEX-I 및 II에서 기준 컴퍼스로 모든 선박에 장비하도록 규정하고 있으므로 영세한

[†] Corresponding author : yoowons@yahoo.co.kr

규모의 연근해 어선에 있어서는 자기 컴퍼스가 주 컴퍼스로 활용되고 있다.

자기 컴퍼스에 관한 연구는 1980년대 중반까지 활발하게 이루어졌는데 주로 자기 컴퍼스의 성능 향상을 위한 연구⁷⁾, 선체운동 및 진동이 자기 컴퍼스에 미치는 영향에 관한 연구와⁸⁻¹²⁾ 인공자장발생장치내에서 자기 컴퍼스의 성능 검증 등에 대한 연구가 수행되었다¹³⁻¹⁷⁾.

자기 컴퍼스의 성능을 평가를 위해서는 외란의 자계를 제어하여 안정된 임의의 자계공간을 얻을 필요가 있는데, 이를 위해 헬름홀츠 코일(Helmholtz coil)을 이용한 인공자장발생장치가 주로 사용되어 왔다. 일반적인 2축형 인공자장발생장치는 X, Y방향의 자계만의 제어가 가능하여 더욱 정밀한 방위정보를 얻기 위해서는 선체경사 등에 따른 선내 자계의 수직성분의 제어가 가능한 3축형 인공자장발생장치가 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 최근 널리 보급되고 있는 디지털형 지자기 감지형 컴퍼스의 전자장에서 다양한 성능을 평가하기 위한 3축형 인공자장발생장치를 실험적으로 제작하고, 자기 컴퍼스를 이용하여 그 성능의 정량적인 평가를 시도하였다.

재료 및 방법

1. 3축형 인공자장발생장치의 제작과 성능실험 시스템의 구성

3축형 인공자장발생장치는 직경 0.75mm의 동선 코일을 합판으로 만든 직경 900mm, 폭 50mm인 원형 홈통 속에 50회씩 감은 2개의 코일 바퀴의 간격을 600mm 떨어지게 구성한 헬름홀츠 코일 3개로써 제작하였고, 그 중심에서의 수평자력 방향은 자기자오선과 일치하도록 배치하였다. 자기자오선의 방향은 자이로 컴퍼스(Gyro Compass ES-11A, Tokyo Keiki Co. Ltd.)에 의한 지북방향과 지자기의 지역편차를 가감하여 구성하였다.

성능실험 시스템은 Fig. 1과 같이 헬름홀츠 코일로 구성된 인공자장발생장치와 그 중앙에서 실험용 컴퍼스 보울을 회전시키는 회전대, 자계를 제어하기 위한 제어 장치 및 퍼스널 컴퓨터로 구성하였다

전원은 전원공급장치(ED Laboratory, model 330)를 이용하여 DC전원으로 변환하여 0~30V범위 내에서 안정되게 공급하였다. 한편, 컴퍼스 보울을 인공자장발생장치 중앙에 유지 및 회전시키기 위한 회전대는 Fig. 1과 같이 직경 280mm, 높이 475mm의 스테인레스로 제작하였으며, 컴퍼스 보울의 회전은 회전대로부터 1800mm 떨어진 곳에 감속기가 부착된 가변모터(Shinpo industrial Co. Ltd., TW-100B-4A)와 체인으로 연결하여 행하였다.

한편, 자계의 제어는 Fig. 2에 나타난 회로도가 내장된 제어장치에서 인가되는 입력전압을 변화시켜 헬름홀츠 코일에 흐르는 전류를 조절하여 행하였으며, 입력 전압의 제어는 Visual basic을 이용한 퍼스널 컴퓨터상에서 행하였다.

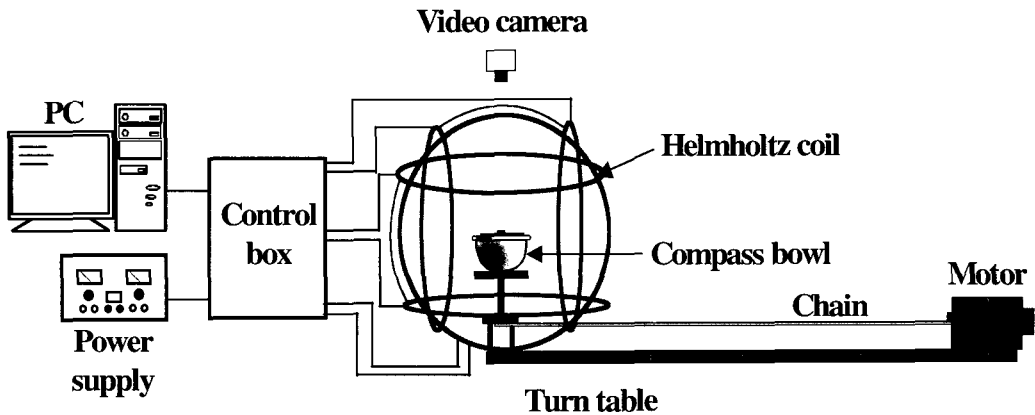


Fig. 1. Schematic diagram of experiment using the apparatus generating artificial magnetic field of 3-axis type.

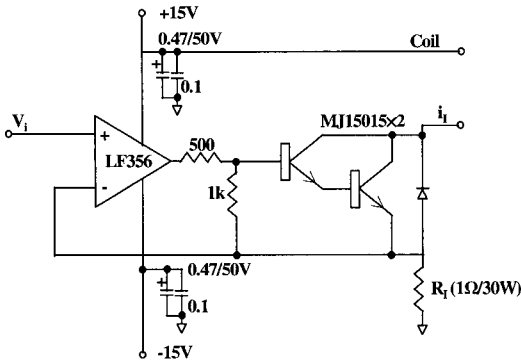


Fig. 2. Used circuit in the control equipment.

2. 실험 및 분석방법

2.1 자장측정

3축형 인공자장발생장치의 성능 실험은 부경대학교 항해계측공학실험실 내에서 실시하였으며, 인공자장발생장치의 기초적인 성능은 전류의 세기에 따른 자장 세기의 변화와 인공발생장치 내의 자장 분포 측정을 행하여 평가하였다. 이 때, 전류의 세기에 따른 자장 세기의 측정은 인공자장발생장치의 X, Y, Z의 각 축에 대하여 순차적으로 전류를 0~400mA범위에서 20mA씩 증가시키면서 자장의 세기를 측정하였고, 자장의 세기는 3축 자장센서(Bartington Instrument Ltd., MAG-03MC)를 이용하여 측정하였다. 3축 자장센서의 성능 제원은 Table 1과 같다.

한편, 인공자장발생장치 중심에서 측정된 전류에 따른 자장의 세기 $H(A/m)$ 는 식 (1)의 이론식에 의해 구해진 계산치와 비교, 분석하였다.

Table 1. Specifications of the 3-axis magnetic field sensor

Items	Specifications
Sensor type	3 orthogonal sensing elements
Measuring range	$\pm 100 \mu T$
Linearity	0.02%
Dynamic range	94dB
Calibration accuracy	$\pm 1 \%$
Operation Temperature range	$-20 \sim +85^\circ C$
Output scaling	$10 \mu T/V$

$$H = \frac{nI}{2r} \left[\left(1 + \left(\frac{x}{r} \right)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} + \left(1 + \left(\frac{r-x}{r} \right)^2 \right)^{-\frac{3}{2}} \right] \quad (1)$$

여기서, r : 헬름홀츠 코일의 반경

n : 코일의 권선수

I : 각축에 가한 전류의 세기

x : 헬름홀츠 코일의 각축으로부터 떨어진 거리

인공자장발생장치 내의 수평·수직자장은 헬름홀츠 코일 내에서 가로, 세로 15cm 간격으로 이동시키면서 측정하였으며, 센서의 높이는 헬름홀츠 코일의 중심 높이와 같도록 하였다.

2.2 인공자장발생장치상에서의 자기컴퍼스의 성능 평가

자기 컴퍼스를 이용한 인공자장발생장치의 성능을 평가하기 위하여 자기 컴퍼스 카드의 제진특성 및 수반각을 측정하여 측정치와 이론치를 비교하여 행하였다. 실험에 사용된 자기 컴퍼스(T1901M, Saura Keiki Seisakusho Co. Ltd.)로써 보울의 내경은 215mm, 카드 직경은 190mm, 크리어런스(clearance)는 12.5mm였다.

자기 컴퍼스의 제진특성은 인공자장발생장치 내에서 자기 컴퍼스 카드를 45° 초기 위상각을 준 후 컴퍼스 카드의 지북단이 자북을 통과하여 정지할 때까지의 움직임은 VCR 촬영을 통해 분석하였다.

제진특성의 측정치는 Fig. 3의 제진곡선에서 카드를 45° 편각시킨 후 카드의 지북단이 최초로 자북을 통과하는 시간을 t_1 , 반대쪽으로 과행각이 최대가 되었을 시간을 t_2 , 다시 자북을 통과하는 시간을 t_3 , 그 후 다시 과행각이 최대에 달한 시간 등 카드의 지북단이 자북을 통과하는 시간과 최대각이 되는 시간 등의 주요점 통과시간을 t_i 로 표시했으며, 과행각이 최대 되었을 때를 $P_1, P_2, P_3 \dots P_i$ 로 하였다. 여기서, P_1 은 제 1과행각, 감쇄율(D)은 최대편각에 대한 제동각의 비이다. 또한 진요회수(m)는 초기 위상각에서 편각이 반대쪽으로 최대가 된 후 다시 자북을 지나 최대가 되었을 때의 회수로써 구하였으며, 주기(T)는 t_1 에서 t_5 까지의 시간으로 구하였다.

측정된 값은 식 (2)에 의한 이론치와 비교, 평가하였다⁷⁾.

$$\theta_d = \frac{\pi}{4\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi\omega_d t} \cos(\omega_d \sqrt{1-\xi^2} t + \phi) \quad (2)$$

여기서, $\zeta = \frac{K}{\sqrt{MH}}$, $\omega_d = \sqrt{\frac{MH}{I}}$,

$$\tan \phi = -\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

- θ_d : 자북에서 편각(*degree*)
- I : 컴퍼스 카드의 관성능률($g\cdot cm^2$)
- K : 감쇠계수
- H : 수평자장(*gauss*)
- M : 자침의 자기능률(CGSEMU)
- ζ 및 ω_d : 계수
- t : 시간(*sec*)

수반각은 자기 컴퍼스를 인공자장발생장치 중앙에 설치된 회전대 위에 놓고 수평자장을 한국 근해의 표준자장인 0.30gauss 에서 선박의 선회운동과 같은 비율이 되도록 30초 및 60초에 1회전의 속도로 회전시키면서 선회각 45° 마다 컴퍼스 카드의 편각을 측정하였으며, 360° 회전하였을 때의 편각을 수반각으로 하였다.

수반각(θ_c)의 이론치는 식 (3)에 의해 구하였다⁷⁾.

$$\theta_c = \frac{120\mu}{MH} (0.325r - 1.60) (100\omega_c)^{1-0.07(a-r)} \dots\dots\dots (3)$$

- 여기서, μ : 컴퍼스액의 점성계수(*poise*)
- r : 컴퍼스 카드의 반경(*cm*)
- ω_c : 보울의 회전각속도(*radian/sec*)
- a : 보울의 내반경(*cm*)

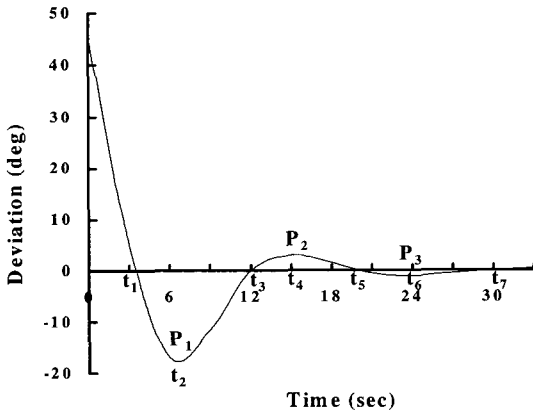


Fig. 3. Notation of the principal time and peak angle of damping curve.

결과 및 고찰

1. 전류의 변화에 따른 자력의 변화

인공자장발생장치의 3축에 대한 전류의 변화에 따른 자장 세기의 측정치와 이론치를 비교한 결과는 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에서 인공자장발생장치의 3축에 대한 자기력은 전류의 증가에 따라 선형적으로 증가하였으며, 각 축에 있어서 측정치와 이론치와의 차의 평균은 X, Y, Z축 각각 $1.66\mu T$, $1.93\mu T$, $0.33\mu T$ 였다. 또한, X축과 Y축은 이론치보다 측정치가 다소 작은 값을 보이며 전류가 증가할수록 그 차이가 증가되어 $400mA$ 에서는 그 차의 최대인 $3.59\mu T$ 와 $3.97\mu T$ 를 나타내었으나, Z축은 이론치와 거의 일치하였다. 한편 전류의 증가에 따라 자기력의 변화가 선형적으로 증가하였고, 이론치와의 비교에서도 그 차의 최대치가 $3.97\mu T$ (약 0.04gauss)로 크지 않아 제작된 인공자장발생장치의 성능은 양호한 것으로 판단된다.

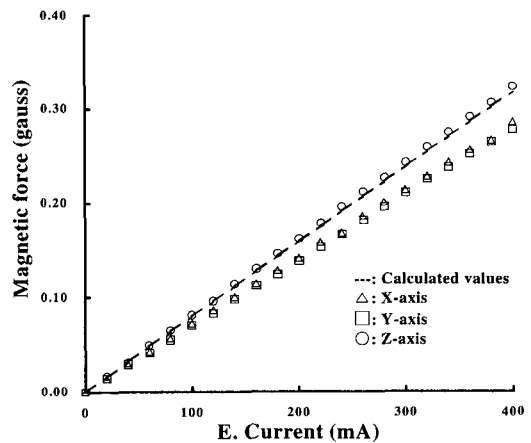


Fig. 4. Change of the magnetic force in the Helmholtz coils by the change of electric current.

2. 자력의 분포

각 축에 대하여 순차적으로 전류를 증가시키면서 자장의 분포를 측정한 결과중 대표적으로 X축에 $10mA$, $100mA$, $300mA$ 를 흘렸을 경우의 수평자력

과 수직자력의 결과는 Fig. 5와 같다.

Fig. 5의 10mA에서 수평자력의 변동범위는 22.00~23.80 μT 였고, 그 평균과 표준편차는 각각 22.77 μT 와 0.54 μT 였다. 수평자력의 벡터 방향은 자북을 기준으로 편동(E)이면 +, 편서(W)이면 -의 부호를 붙여 분석하였는데, -11.85~-3.07°의 변동을 보였고, 평균과 표준편차는 각각 -6.17°, 2.37°였다. 한편 수직자력의 범위는 36.00~37.90 μT 였고, 그 평균과 표준편차는 각각 36.96 μT 와 0.51 μT 였다. 수직자력과 함께 나타난 방위는 수직자력에서 전자력까지의 양각으로서 변동범위는 31.21~32.27°, 평균과 표준편차는 각각 31.64°, 0.33°였다.

100mA에서 수평자력의 범위, 평균 및 표준편차는 각각 27.62~31.98 μT , 29.70 μT , 1.16 μT 였으며, 그 벡터 방향은 -9.87~-0.57°에서 변동하여 평균은 -5.67°, 표준편차는 2.44°였다. 수직자력의 범위는 35.70~37.90 μT , 평균과 표준편차는 각각 36.84 μT 와 0.63 μT 였다. 수직자력에서 전자력까지의 양각은 37.00~41.61°, 평균과 표준편차는 각각 38.87°, 1.16°였다.

300mA에서 수평자력의 범위, 평균 및 표준편차는 각각 39.23~54.21 μT , 45.06 μT , 3.22 μT 였으며, 그 벡터 방향은 -17.10~3.39°에서 변동하여 평균은 -4.25°, 표준편차는 4.35°였다. 수직자력의 범위는 34.90~39.60 μT , 평균과 표준편차는 각각 36.76 μT 와 1.22 μT 였다. 수직자력에서 전자력까지의 양각은 47.31~57.23°, 평균과 표준편차는 각각 50.72°, 2.17°였다.

Fig. 5에서 수평자력의 벡터 방향이 편서로 치우치는 것은 헬름홀츠 코일의 권선수는 일정하였으나 코일을 감는 과정에서 감기는 방향의 불균형에 기인한 것으로 생각된다. 한편, 공통적으로 헬름홀츠 코일의 가장자리 쪽에서 자력의 크기와 방향에 다소 변동을

보였으나 중심으로 갈수록 그 변동폭이 작고 자력의 방향도 균일하여 시작된 인공발생장치의 성능은 양호한 것으로 판단되었다.

3. 인공자장발생장치내에서의 제진특성

인공자장발생장치의 성능효과를 검토하기 위하여 그 중앙에 자기 컴퍼스를 설치하고 수평자력을 0.30 gauss, 0.40 gauss 및 0.50 gauss로 변화시키면서 영구 막대자석을 이용하여 45° 초기 위상각을 준 후 제진특성 실험을 실시한 결과는 Fig. 6 및 Table 2와 같다.

Fig. 6에서 수평자력 0.30 gauss 및 0.40 gauss에 있어서 첫 번째 과행각 P₁이나 도달시간 t₂는 측정치와 이론치가 일치하는 경향을 나타내었으나, 과행각 P₂ 및 P₃에서는 측정치가 이론치보다 각각 4.29°, 2.08° 작게 나타났으며, 주요점의 통과시간인 t₃, t₄, t₅, 및 t₆는 거의 일치하였다. 과행각 P₂ 및 P₃에서 측정치가 이론치보다 다소 작은 것은 측정과 측도사이에 마모와 컴퍼스액 점성계수가 다소 변동되었기 때문이라 생각된다.

한편, 수평자력 0.50 gauss에서는 첫 번째 과행각 P₁은 비슷하였으나 주요점의 통과시간이 실측치가 이론치보다 다소 빠르게 나타났다. 이와 같은 원인은 자력을 강하게 할수록 전류가 불안정하게 된 때문으로 생각되어진다. 따라서, 비교적 높은 자장에서는 신뢰도가 낮은 것으로 판단되었다.

실험에 사용된 자기 컴퍼스의 성능은 진요회수에 대하여 ISO에서는 3회 이상을 허용범위로 규정하고 있는데 본 실험에서는 4회 이상이어서 적합하였으며, 감쇠율도 ISO의 허용범위인 0.6~0.8에 수렴되어 본 인공자장발생장치로써 다양한 지구자장에 대한 지자기에 의한 방위정보를 정확하게 해석할 수 있을 것으로 예상되었다.

Table 2. The comparison of measured and calculated values of the principal time of damping curve in accordance with the horizontal magnetic forces

Horizontal magnetic force (gauss)	Measured values					Calculated values				
	Period (T)	Damping degree (P)	Damping factor (D)	Swing number (m)	Fricative degree (F)	Period (T)	Damping degree (P)	Damping factor (D)	Swing number (m)	Fricative degree (F)
0.30	22.8	15.0	0.67	4.0	0.5	23.1	16.7	0.63	5.0	0.8
0.40	21.3	15.5	0.66	4.0	0.0	19.8	17.5	0.61	5.0	0.1
0.50	13.7	16.0	0.64	4.0	0.5	17.3	18.1	0.60	5.0	0.3

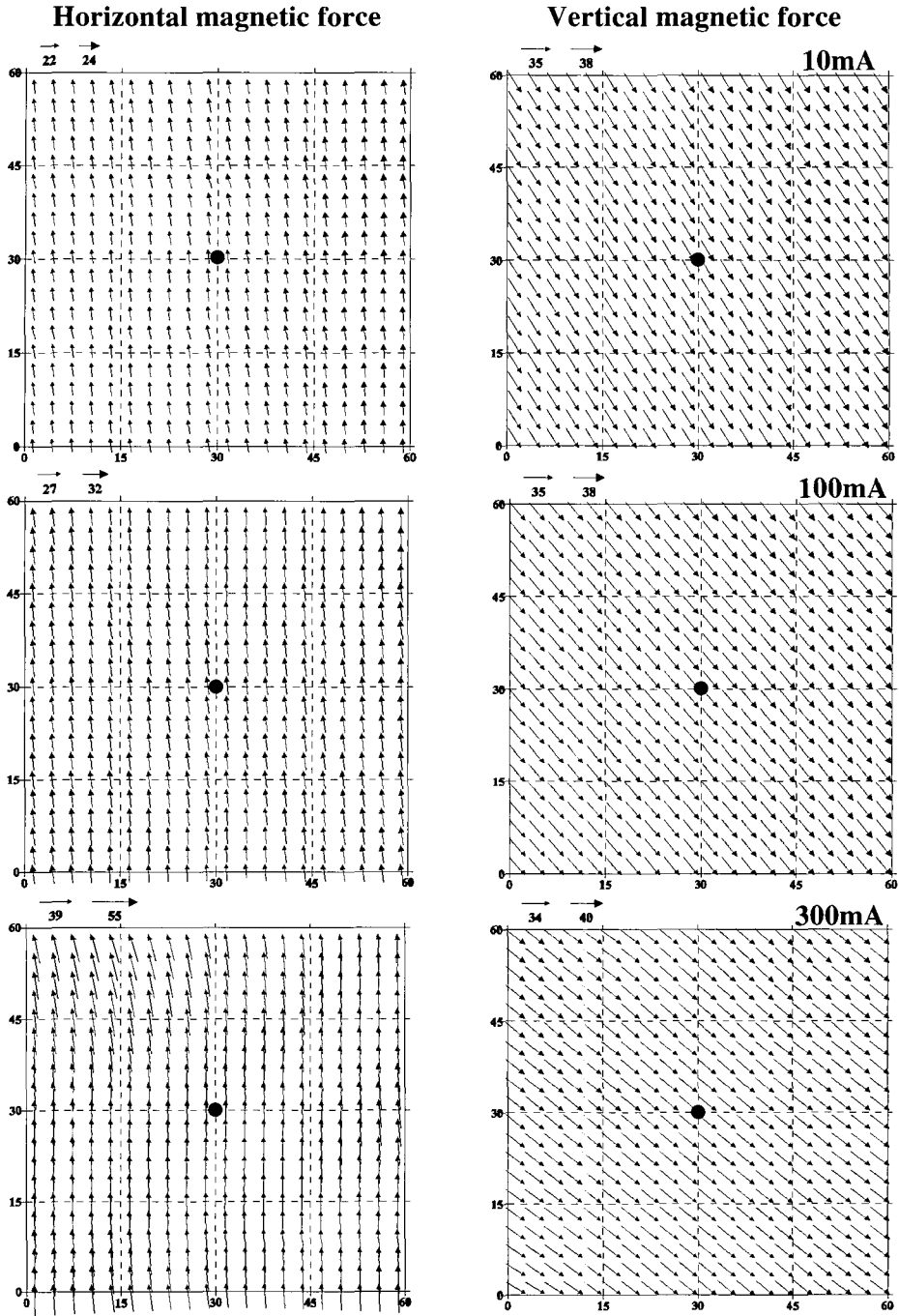


Fig. 5. Distribution and change of horizontal and vertical magnetic force by the change of electric current.
● : Center of apparatus generating artificial magnetic field.

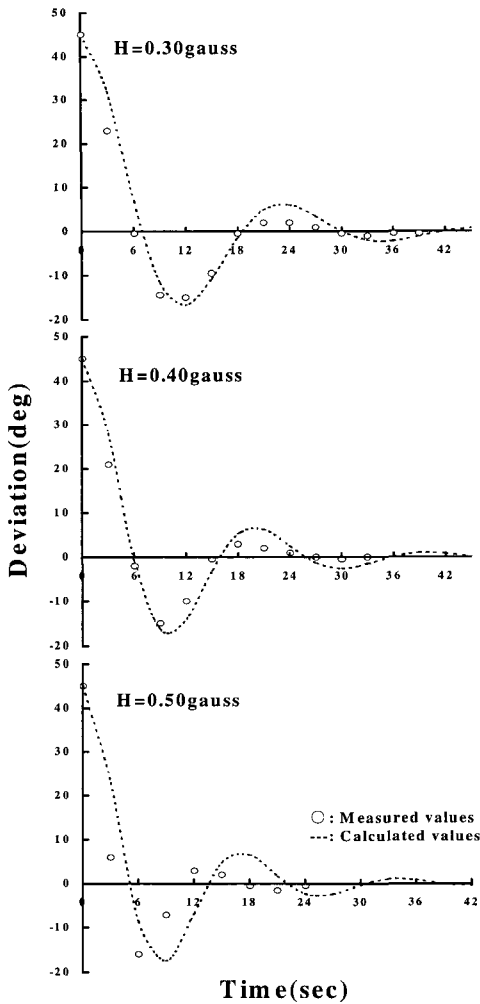


Fig. 6. Comparison of the damping curves between measured and calculated values by the change of horizontal magnetic force.

4. 인공자장발생장치내에서의 수반각

수평자장 0.30gauss에서 2rpm 및 1rpm의 속도로 회전시키면서 8주요점 방위마다 컴퍼스 카드의 편각을 측정할 결과는 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서 1rpm의 속도로 회전시켰을 경우, 회전과 함께 수반각은 180° 까지는 점차 증가하여 8°를 나타낸 후 서서히 감소하여 360° 회전을 시켰을 때의 수반각은 1°를 나타내었다. 수반운동의 범위는

0~8°였으며, 평균은 4.06°, 표준편차는 3.40°를 나타내었다. 한편 식 (3)에 의한 수반각은 4.58°였다.

2rpm의 경우도 1rpm의 경우와 같은 경향으로 180°에서 최대값 10°를 나타내었다가 서서히 감소하여 360°회전하였을 때는 4°를 나타내었다. 수반운동의 범위는 0~10°, 평균과 표준편차는 각각 4.33°, 3.28°를 나타내었으며, 식 (3)에 의한 수반각은 8.63°였다.

인공자장발생장치 내에서 0.30gauss의 안정된 자장이 유지되는 상태에서 측정된 수반각은 1rpm 속도로 회전하였을 때 6°미만인 국제성능 표준규격에 적합한 것으로 나타나 제작한 인공자장발생장치는 자기 컴퍼스의 수반각을 시험하는 데에도 우수한 성능을 발휘할 수 있음을 알 수 있었다.

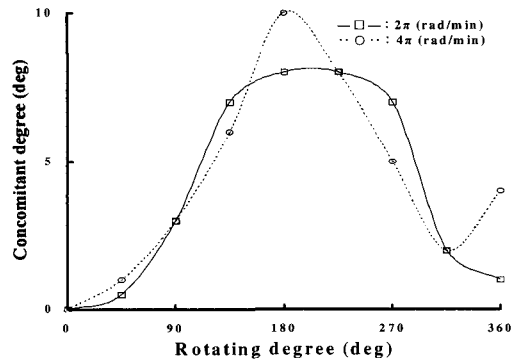


Fig. 7. Change of concomitant angle by the change of turning angular velocity.

요 약

최근 널리 개발되고 있는 디지털형 지자기 감지형 컴퍼스의 전자장에서의 다양한 성능을 평가하기 위한 3축형 인공자장발생장치를 실험적으로 제작하고, 그 성능 특성을 검토한 결과는 다음과 같다.

1. 3축형 인공자장발생장치의 X, Y, Z 각 축에 대한 자력의 변화는 전류의 증가에 따라 선형적으로 증가하였고, 측정치는 이론치와의 비교에서도 그 차의 평균 범위가 0.33~1.93μT로 이론치와 거의 일치하여 제작된 인공자장발생장치의 성능은 양호한 것으로 판단된다.

2. 헬름홀츠 코일내의 가장자리에서는 다소 불규칙한 자력의 변화가 발생하였지만, 중심으로 갈수록 그 변동이 안정되는 경향을 나타내었다.

3. 자기 컴퍼스의 제진특성의 측정치와 이론치와의 비교에서 수평자력 0.30gauss 및 0.40gauss에서는 성능이 양호한 것으로 판단되나, 수평자력 0.50gauss에서는 다소 큰 차이가 나타나어 0.40gauss 이상의 비교적 높은 자력에서는 신뢰도가 낮은 것으로 판단되었다.

4. 0.30gauss의 자장 속에서 측정된 수반각은 1rpm의 회전속도에서 1° 로서 이 값은 국제성능 표준규격(6° 미만)에 적합하였다.

참 고 문 헌

- 1) 宮本佳則 · 浜田悦之 · 白井靖辛 · 齋藤清隆 (1989) : 홀素子を用いた3軸固定型電子コンパスの試作, 日本航海学会論文集 80, 55-61.
- 2) 宮本佳則 · 浜田悦之 · 白井靖辛 · 齋藤清隆 (1990) : 3軸固定型電子コンパスの磁気緯度に対する自差補正, 日本航海学会論文集 83, 1-5.
- 3) 宮本佳則 · 浜田悦之 · 白井靖辛 · 齋藤清隆 · 中村善彦 (1992) : 電子磁気コンパスの傾船差補正について, 日本航海学会論文集 86, 127-133.
- 4) 안영화 · 신형일 · 白井靖辛 (1994) : 자기 검출소자를 이용한 전자자기 컴퍼스의 기초적 연구, 한국어업기술학회지, 30(3), 182-188.
- 5) 양주호 (1999) : 소형어선용 자동항행장치를 위한 전자자기컴퍼스의 국산화 개발 I, 선박안전 3, 14-25.
- 6) 양주호 (2000) : 소형어선용 자동항행장치를 위한 전자자기컴퍼스의 국산화 개발 II, 선박안전 4, 16-21.
- 7) 鈴木裕 (1962) : 船舶用磁気コンパスの性能改善に関する研究, 東京水産大学特別研究報告 6(3), 144.
- 8) 白井靖辛 · 鈴木裕 · 齋藤清隆 · 辛亨鎰 (1977) : 磁気コンパス装備位置付近における船体の振動測定結果, 日本航海学会論文集 58, 9-14.
- 9) 白井靖辛 · 鈴木裕 (1982) : 上下振動に伴う磁気コンパスカードの運動, 日本航海学会論文集 67, 115-118.
- 10) 白井靖辛 · 鈴木裕 (1983) : 磁気コンパスカードの水平軸回りの運動について, 日本航海学会論文集 68, 147-151.
- 11) 白井靖辛 · 鈴木裕 · 齋藤清隆 (1984) : 磁気コンパスボウルの動揺に伴うカードの動きについて, 日本航海学会論文集 70, 65-69.
- 12) 白井靖辛 · 鈴木裕 · 齋藤清隆 (1985) : 磁気コンパス動揺による誤差の検討, 日本航海学会論文集 72, 69-72.
- 13) 안영화 · 정공흔 · 안장영 · 신형일 (1983) : 인공자장발생장치와 자기컴퍼스의 성능, 한국어업기술학회지 19(2), 111-116.
- 14) 안영화 · 정공흔 · 신형일 (1986) : 자기컴퍼스의 방위지시부의 수반각, 한국어업기술학회지 22(3), 17-22.
- 15) 안영화 (1987) : 한국산 자기컴퍼스의 성능-I - 수반각 시험, 한국어업기술학회지 23(3), 21-26.
- 16) 안영화 (1990) : 한국산 자기컴퍼스의 성능-II - 제진특성 시험, 한국어업기술학회지 26(2), 173-179.
- 17) 홍장표 · 신형일 (1993) : 연안어선의 자기컴퍼스에 관한 연구, 한국어업기술학회지 29(1), 21-29.

2003년 6월 13일 접수

2003년 6월 21일 수리