



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學博士 學位論文

천문항해를 이용한 방위산출  
알고리즘 및 임베디드 장치의 구현

Implementation of Azimuth Calculation Algorithm  
and Embedded Device through Celestial Navigation



2019年 2月

韓國海洋大學校 大學院

電子通信工學科  
林 震 國

本 論文을 林震國의 工學博士 學位論文으로 認准함.

委員長：李 尚 培 (印)

委 員：蔡 良 範 (印)

委 員：朴 鍾 成 (印)

委 員：牟 守 鍾 (印)

委 員：林 宰 弘 (印)



2019 年 12 月 19 日

韓國海洋大學校 大學院

# 목 차

List of Tables .....	ii
List of Figures .....	iii
Abstract .....	v
Abbreviation .....	viii
제 1 장 서론 .....	1
1.1 연구 목적 .....	1
1.2 연구 방법 .....	4
제 2 장 방위제공장치와 천문항해의 고찰 .....	6
2.1 방위제공장치 .....	6
2.2 천문항해 .....	10
제 3 장 천문항해를 이용한 방위산출 알고리즘 .....	23
3.1 지구중심의 태양좌표 .....	24
3.2 천측을 이용한 방위산출 .....	39
3.3 One Body Fix를 이용한 위치산출 .....	55
제 4 장 임베디드 장치의 구현 및 시험평가 .....	59
4.1 임베디드 장치의 구성 .....	59
4.2 임베디드 장치의 시험평가 .....	84
4.3 결과 분석 및 활용 .....	95
제 5 장 결론 .....	99
참고문헌 .....	102
Appendix A. Planets: Periodic Terms .....	106

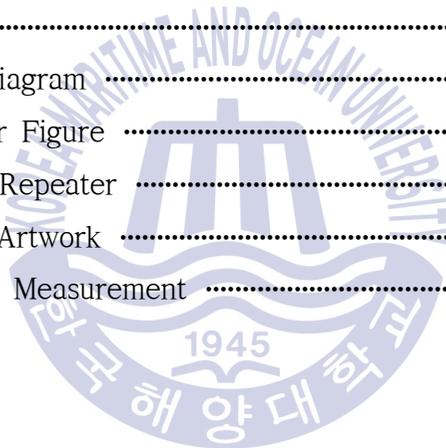
## List of Tables

<b>Table 1</b> Sun's Parameter .....	21
<b>Table 2</b> Reference to the Earth J2000.0 .....	35
<b>Table 3</b> Azimuth Error Range .....	47
<b>Table 4</b> Error Analysis by Altitude .....	51
<b>Table 5</b> Prototype Display Module Specification .....	64
<b>Table 6</b> Display Module Specification .....	66
<b>Table 7</b> Prototype Azimuth Circle Specification .....	69
<b>Table 8</b> Azimuth Circle Specification .....	74
<b>Table 9</b> Monitoring Screen Set .....	75
<b>Table 10</b> Connector & Pin Map .....	80
<b>Table 11</b> Compass Repeater Specification .....	83
<b>Table 12</b> Sun GP between Almanac and Algorithm .....	85
<b>Table 13</b> Astronomical Observation Process and Time .....	87
<b>Table 14</b> Test #1 Results .....	89
<b>Table 15</b> Test #2 Results .....	90
<b>Table 16</b> Test #3 Results .....	91
<b>Table 17</b> Test #4 Results .....	91
<b>Table 18</b> Test #5 Results .....	92
<b>Table 19</b> Test #6 Results .....	92
<b>Table 20</b> Test #7 Results .....	93
<b>Table 21</b> Test #8 Results .....	93
<b>Table 22</b> Test #9 Results .....	94
<b>Table 23</b> Comparison of Test Results .....	95
<b>Table 24</b> Tolerance Comparison .....	96

## List of Figures

Fig. 1 Navigational Triangle .....	11
Fig. 2 Navigational Triangle (North) .....	12
Fig. 3 Navigational Triangle (South) .....	14
Fig. 4 Azimuth Angle .....	15
Fig. 5 Coordinate System .....	16
Fig. 6 Geographical Position .....	17
Fig. 7 Declination and Hour Angle .....	19
Fig. 8 Nautical Almanac .....	38
Fig. 9 Azimuth Circle .....	39
Fig. 10 Chronometer .....	41
Fig. 11 Observation Example .....	44
Fig. 12 Azimuth Error by GP & Angle Distance .....	48
Fig. 13 Sunrise at the ship's position .....	54
Fig. 14 Ship Position through Navigational Triangle .....	56
Fig. 15 Device Schematic Diagram .....	59
Fig. 16 Block Diagram of Embedded Device .....	60
Fig. 17 Encoder Bearing & True Heading .....	61
Fig. 18 Embedded Device Drawing .....	62
Fig. 19 Prototype PCB Artwork .....	63
Fig. 20 Display Module Connection .....	64
Fig. 21 NMEA Sentence .....	65
Fig. 22 Display Module (PCB Artwork) .....	66
Fig. 23 GUI of Embedded Device .....	67
Fig. 24 Prototype PCB Artwork of Azimuth Circle .....	69

Fig. 25 Implementation of Embedded Device .....	70
Fig. 26 GPS Module .....	71
Fig. 27 Single Turn Type Encoder .....	72
Fig. 28 Azimuth Circle .....	73
Fig. 29 Azimuth Circle PCB Artwork .....	73
Fig. 30 Monitoring Screen Initial Display .....	74
Fig. 31 Troubleshooting Testing Mode .....	75
Fig. 32 Encoder Monitor Display .....	76
Fig. 33 GPS Monitor Display .....	77
Fig. 34 Junction Box .....	78
Fig. 35 Junction Box Diagram .....	79
Fig. 36 Repeater Upper Figure .....	81
Fig. 37 Binnacle Type Repeater .....	82
Fig. 38 Repeater PCB Artwork .....	83
Fig. 39 Preparation for Measurement .....	89



# Implementation of Azimuth Calculation Algorithm and Embedded Device through Celestial Navigation

Lim, Jin Kook

Department of Electronic Communication and Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

The celestial navigation uses the sun and stars to determine the position of the vessel and to know the bearing for the voyage. After observing the sun and stars in the sky, the navigators of the ship found their position through a complicated calculation process and sailed to the destination. The celestial navigation was a major task to the navigators and was considered the most important in the voyage.

The compass is used to find the bearing of the vessel and there are the Magnetic compass and Gyro Compass. THD is an electronic device that provides the ship's true heading and is installed on ships of 300GT(Gross Tonnage) and upwards less than 500GT/passenger craft certified to carry 100 passenger or less, which do not carry a Gyro Compass in accordance with IMO regulations. Most ships satisfy the THD of the IMO regulations as Standard Magnetic Compass. The static error limit of THD is set within  $\pm 1.0^\circ$ .

The navigational triangle consists of three points that are the pole, the zenith, and the celestial body, three sides that are Colatitude, Polar distance and Coaltitude and three angles are the Meridian angle, Azimuth angle, and Parallax angle. In order to calculate the ship's position using the navigational triangle, it is necessary to know the exact time and position of the sun.

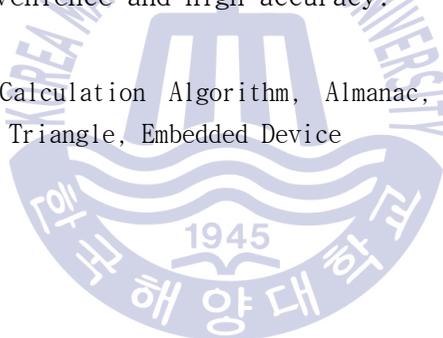
Most of the sun's geographical position calculation is using the Nautical Almanac. Also, the planetary theories VSOP 82 and VSOP 87 can be used for obtaining more precise celestial coordinates. By deriving the cycles of the celestial bodies with mathematical calculation, it is possible to obtain the celestial coordinates and rectangular coordinates exactly, and the accuracy of bearing calculation can be further improved. Observation time, the position of the vessel, and celestial body, that is the geographic position of the sun, are required to calculate bearing using an observation. Also, time errors should be minimized to increase the accuracy of the observations. If you know the position of the ship and the geographic position of the sun, it is possible to find the bearing using the algorithm about calculating the bearing of the navigational triangle.

In this paper, we propose the One Body Fix position calculation algorithm that shortens the time for calculating the position using the navigational triangle and simplifies the calculation process. This algorithm derives its position using the sun the Azimuth angle( $z$ ), Declination(Dec), and observed altitude. Based on the derived location, we can correct the error by calculating the heading of the ship and true north using Azimuths of the sun and Sight Reduction Tables.

We used the computer and IT technology to computerize the bearing calculation method used in astronomical navigation and the calculation processes that people performed directly. The implemented embedded device has the convenience and accuracy to be used in real ship, and it implemented SW and HW in embedded form. By automating an observation and calculation processes, the operator can reduce the time of bearing calculation.

Experiments have been performed several times to test the accuracy and the result showed an error within  $0.2^\circ$ . These results were within the margin of error about devices by IMO regulations, THD and compass, etc. The implemented embedded device is expected to be very useful for the ship as the convenience and high accuracy.

**KEY WORDS:** Azimuth Calculation Algorithm, Almanac, Celestial Navigation, Compass, Navigational Triangle, Embedded Device



## Abbreviation

<b>AIS</b>	Automatic Identification System	선박자동식별장치
<b>AP</b>	Assumed Position	가정위치
<b>AU</b>	Astronomical Unit	천문단위
<b>Dec</b>	Declination	적위
<b>DR</b>	Dead Reckoning	추측위치
<b>ECDIS</b>	Electronic Chart Display Information System	전자해도표시정보시스템
<b>GHA</b>	Greenwich Hour Angle	본초시각
<b>GMDSS</b>	Global Maritime Distress and Safety System	범세계해양조난 및 안전제도
<b>GP</b>	Geographical Position	지위
<b>GPS</b>	Global Positioning System	범지구위치결정시스템
<b>GUI</b>	Graphic User Interface	그래픽사용자인터페이스
<b>IMO</b>	International Maritime Organizational	국제해사기구
<b>INS</b>	Inertial Navigation System	관성항법장치
<b>LHA</b>	Local Hour Angle	지방시각
<b>NMEA</b>	National Marine Electronics Association	미국립해양전자협회
<b>RA</b>	Right Ascension	적경
<b>SHA</b>	Sidereal Hour Angle	항성시각
<b>THD</b>	Transmitting Heading Device	선박방위송신장치
<b>UT</b>	Universal Time	세계시
<b>VDR</b>	Voice Data Recorder	음성자료기록장치
<b>VSOP</b>	Variations Séculaires des Orbites Planétaires	태양계행성위치계산
<b>ZD</b>	Zenith Distance	정거(頂距)

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 목적

IMO(International Maritime Organization; 국제해사기구)는 해운과 조선에 관한 국제적인 문제들을 다루기 위한 국제기구로, 유엔의 산하 기관이다. IMO는 해상통신 시스템의 운용 및 성능 등에 관한 표준을 제정하기 위하여 국제해상조난안전시스템인 GMDSS(Global Maritime Distress and Safety System; 전세계해상조난 및 안전제도)와 e-Navigation 등의 개발을 고위급 행동계획(High Level Action Plan)의 실행 항목으로 선정하여 진행하고 있다[1]. e-Navigation이란 선박의 안전 및 보안과 해양환경 보호와 관련된 서비스를 개선하기 위해 선박이나 육상에서 해양 및 선박정보의 수집, 통합, 교환, 표현 및 분석을 전자적으로 융합하여 통일된 포맷으로 보여주는 자동화된 전자항법 체계이다.

우리나라 해양수산부에서는 국제해사기구의 권고에 따라 한국형 e-Navigation 사업을 추진하고 있다. 차세대 선박운항체제로 발전시키기 위하여 기존의 선박운항, 조선기술에 정보통신기술을 접목하여 각종 해양 및 선박운용에 관한 정보를 국제표준화, 디지털화하여 선박 또는 육상 간에 실시간으로 상호 공유토록 함으로써 안전과 효율을 동시에 추구하고 있다[2].

선박이 항구를 출항하여 목적지로 이동하는 데 있어 중요한 요소는 위치 및 방위라고 할 것이다. 연안에서는 육지의 물표를 따라가면서 항해할 수 있으나, 육지에서 멀리 벗어나거나 대양을 항해하는 경우에는 위치 및 방위를 파악하기 위해서는 별도 장치가 필요하다. 1990년대 이후 GPS(Global Positioning System)를 포함한 위성항법시스템의 발달로 인해 위치를 구하는 것은 그리 어렵지 않은 일이 되었다. 선박이 목적지로 가기 위해서는 정확한 방위를 아는 것이 중요하다. GPS에 의해 얻어진 위치 정보를 계산하여 선박의 헤딩(Heading)으로 이용할 수도 있다. 하지만 항해를 위한 대부분의 방위 정보는 컴파스를 이용하여 얻고 있다.

오래전부터 사용되어온 마그네틱컴파스는 오늘날까지 많은 선박에 탑재되어 이용되고 있다. 지구의 자기장에 따라 남북 방위를 가리키는 현상을 이용하므로 지구 자기장의 왜곡이나 지역 특성에 따라 자기장의 이상현상, 그리고 철 구조물 등에 의한 오차 등이 발생하므로 정확한 방위의 제공을 위해서는 별도의 장치 및 정밀한 자기교정 절차 등이 필요하다.

19세기 말 자이로스코프의 회전력을 이용하여 진북을 찾고자 하는 노력이 계속되었다. 20세기 초 독일에서 처음으로 자이로컴파스가 발명되었으며, 이후 1910년 개발된 미국의 스페리 자이로스코프가 항공기와 군함 등에 장착되어 방위를 제공하였다. 지자기장의 영향을 받는 마그네틱컴파스와 달리 자이로컴파스는 방위의 정확성이 매우 높아 널리 쓰이게 되었다. 안정적인 전원을 공급할 수 있는 발전기 및 부수장치 등이 잘 갖추어진 중대형 선박이나 고가의 소형 선박에는 자이로컴파스의 탑재가 용이하지만, 저가의 소형선박 등에는 잘 사용되지 않는 실정이다[3].

선박이 방위를 얻는 데 있어 마그네틱컴파스나 자이로컴파스만 이용할 수 있다는 것은 매우 아쉬운 일이다. 오차가 많은 지구 자기장을 이용하는 장비나 고가의 장비 등은 그 사용범위 및 효용성에 있어 한계를 가질 수밖에 없기 때문이다. 마그네틱컴파스나 자이로컴파스가 사용되기 이전의 시대에 고대의 항해사들이 어떻게 항해를 하였는가를 생각한다면 그 새로운 대안을 얻을 수 있을 것이라 생각한다.

GPS가 널리 사용되기 시작한 1990년대 이전만 하더라도 대양을 항해하는 선박의 항해사들은 하늘의 태양이나 달, 별 등을 관측하여 선박의 위치를 산출하고 방위를 찾아서 항해에 사용하는 천문항법을 잘 알고 있었고, 선박의 항해에도 적용하였다. 천문항법은 고대로부터 현대에 이르기까지 바다를 항해하거나 미지의 대륙을 탐험하는 선장이나 항해사에게는 그들의 항해 성공 여부 및 생존과도 직결되는 중요한 것이었다.

천문항법을 이용하여 위치를 구하고 방위를 알기 위해서는 여러 단계를 거쳐야 하고, 많은 항해 서적 및 자료들이 있어야 한다. 먼저 하늘의 태양이나 달,

별 등의 위치를 찾아 방위환 및 육분의를 통하여 방위 및 천체고도 각도를 관측하여야 한다. 관측된 수치를 바탕으로 천측력, 태양방위각표 등의 천문항해책자들에 수록된 자료들을 이용하여 여러 차례의 복잡한 계산과정을 거친 후 위치 및 방위를 산출할 수 있으며, 그 정확도는 관측자의 숙련도에 따라 많은 차이가 나게 된다. 이러한 계산과정에는 숙련된 항해사들의 경우에도 10~30분 이상이 걸린다. 초급 항해사의 경우에는 계산과정에만 몇 시간이 걸리고, 산출된 위치 및 방위에도 많은 오차가 포함되기도 한다.

방위를 제공하는 컴파스나 GPS 등의 장비가 선박에 탑재되어 있으나, 장비 특성 및 기계적/전자적 결함이나 오작동에 의한 오차의 발생 가능성을 배제할 수는 없는 실정이다. 대양을 항해하는 선박의 항해사들은 수시로 선박의 위치 및 항해 장비들의 정상 작동 여부를 파악하고, 정확한 방위로 선박의 heading을 유지하면서 항해를 하고 있다. 항해하면서 육지의 물표가 있는 경우에는 방위 제공 장치가 오작동을 하더라도 쉽게 알아차릴 수 있고, 목적지를 향해 선박의 heading을 어느 정도는 유지할 수가 있다. 하지만 대양을 항해하는 선박의 경우에는 방위의 오류를 인지할 별도의 수단이 없기에 탑재된 장비에만 의존할 수밖에 없다.

IMO에서는 선박의 방위제공을 위한 장치로 선박의 톤수 및 종류에 따라 자이로컴파스, 마그네틱컴파스 등을 항해 필수장비로 지정하여 탑재하도록 규정하고 있다. 이러한 탑재장비 규정에는 선박의 heading을 지속적으로 제공할 수 있는 THD(Transmitting Heading Device) 장비도 포함하고 있다. 하지만 THD 장비를 탑재하도록 한 IMO의 규정을 적용하는데 있어, 대부분 선박은 마그네틱컴파스로 THD의 요건을 충족하고 있다[4]. 이는 THD의 규정에서 정하고 있는 정확성과 안정성 등을 충족하는 방위제공 장비는 찾기 힘들기 때문일 것이다.

과거 항해사들이 천문항해를 이용하여 선박의 정확한 위치와 방위를 구하여 항해하였다는 것을 고려해 볼 때, 천문항해의 각종 자료를 전산화하고, 복잡한 계산과정을 알고리즘으로 단순화하여 최신의 IT기술을 적용한 장치를 구현하게 된다면 태양관측을 통해 선박에 방위를 정확히 제공할 수 있을 것으로 생각하여 논문의 연구 목적으로 하였다.

## 1.2 연구 방법

선박에 탑재되는 컴파스의 중요성은 여전히 강조되고 있으며, 대부분 선박에 탑재되어 사용되고 있다[5]. 국제해사기구에서는 기존의 항해 장비 이외에도 최신기술이 반영된 전자해도, 등의 항해장비를 선박의 필수장비로 지정하여 탑재할 것을 권고하고 있다. 천문항해를 이용한 방위산출이 가능한 임베디드 장치를 최신의 IT 기술을 접목하여 구현할 수 있다면 새로운 항해장비로 적용될 가능성도 있을 것으로 생각한다.

천문항해를 이용한 위치 및 방위산출은 오래전부터 항해사들에 의해 수행되어왔다. 시진의(Chronometer)를 이용하여 정밀한 시간을 산출하고, 천측력을 이용하여 태양 혹은 천체의 지위를 구하였으며, 이러한 정보를 바탕으로 각종 계산과정을 거쳐 항해사들이 방위를 구하고 위치를 구하는 것은 그들의 가장 기본적이고도 중요한 업무였다. 마그네틱컴파스에서 발생하는 지자기 등에 의한 오차도 없고, 자이로컴파스에서 발생할 수 있는 고장이나 오작동 등의 우려가 없는 천문항해는 천측 및 계산과정을 통해서 방위를 제공할 수 있다는 점에서 매우 유용한 항해 기법으로 사용될 수 있는 것이다.

연구 방법은 먼저 방위를 제공하는 항해장비인 마그네틱컴파스와 자이로컴파스의 종류와 오차를 알아보고, 국제해사기구에서 규정한 THD 장비의 특성과 기능, 정확성 등을 파악하였다. 그리고 천문항해에 관한 이론적 근거가 되는 주요 요소들 가운데 항해삼각형의 의미와 이를 구성하는 3각과 3변에 대해 알아본 후에, 계산에 필요한 지위, 시각 등에 대해 이론적으로 고찰하였다.

천문항해를 이용한 방위산출 알고리즘을 얻기 위하여 태양의 지위, 천측 방위 및 One Body Fix 위치산출 등을 알고리즘으로 도출하였다. 태양의 지위는 VSOP 87을 바탕으로 지구 중심의 태양의 좌표, 그리고 천측력에 나와 있는 지위를 파악하였다. 항해삼각형을 이용한 천측방위 및 One Body Fix 위치 산출 알고리즘은 구면삼각형의 사인법칙과 코사인법칙을 이용하여 수식으로 유도하여 산출하였다. 이러한 알고리즘 도출에는 많은 천문항해 자료들과 복잡한 계산을 전산화가 가능한 수식으로 적용할 수 있도록 단순하고도 정확한 계산식을

구하고자 하였다.

장치는 도출된 알고리즘을 구현하기 위한 것으로, 최신의 IT기술을 적용한 임베디드 장치로 구현하였다. 계산 및 출력장치는 방위환에서 측정된 자료와 방위센서의 값을 실시간으로 처리하여 산출된 방위를 전시기에 나타내도록 하고, 방위환은 태양의 방위를 정밀하게 측정할 수 있으며, 각종 부수장치 등을 운용자가 편리하게 사용할 수 있도록 구현하였다.

구현된 임베디드 장치의 정확성과 편의성을 검증하기 위한 시험 및 평가방법도 구체화하였다. 편의성은 측정 후 방위산출까지 걸리는 시간과 운용자가 편리함을 느끼는 정도를 고려하여 평가하도록 하고, 장치에서 제공되는 방위의 차이와 편차가 얼마나 되는지를 비교하여 장치의 정확성을 살펴보았다.

논문의 구성은 2장에서 이론적 고찰을 위하여 방위를 제공하는 항해장비와 천문항해의 항해삼각형, 지위 등을 살펴보았다. 3장은 천문항해를 위한 방위산출 알고리즘을 도출하기 위하여 태양의 지위와 천측방위 등의 계산과정을 수식화하였다. 4장은 본 논문의 핵심 내용으로 도출한 알고리즘에 최신의 IT기술을 적용한 임베디드 장치의 계산 및 전시장치, 방위환, 그리고 부수장비 등을 설명하였다. 그리고 구현된 장치의 편의성 및 정확성을 검증하기 위한 시험 및 평가방법을 구체화하고, 그에 따라 시험 및 평가를 하였다. 마지막으로 5장에서는 연구의 결과를 정리하였다.

## 제 2 장 방위제공장치와 천문항해의 고찰

GPS의 전파항법이 널리 퍼지게 된 것은 1990년대 중반 이후로, 그 이전의 항해사들은 아무것도 보이지 않는 대양에서 오로지 천체를 기준으로 자선의 위치와 방위를 예측하였다. 얼마나 정확히 자선의 위치와 방위를 찾아낼 수 있는지는 항해사가 가지는 가장 중요한 업무 중의 하나였다. 따라서 과거 항해사들은 수학적으로 뛰어난 재능을 가진 사람들이 직무를 수행하였으며, 그들은 천체를 이용하여 자선의 방위는 물론 위치를 정확히 파악하기 위해 당시로는 매우 복잡하지만 사용하지 않을 수 없었던 수학적 방법을 편리하게 사용할 수 있도록 다양한 노력을 기울여 왔다.

본 장에서는 방위를 표시하는 컴파스를 살펴보고, 선박에 방위를 제공하는 THD의 기능 및 운용조건 등에 대하여 정리하였다. 그리고 천문항해에 대한 이론적 고찰을 통해 주요 요소 및 개념들을 이해할 수 있도록 정리하였다.

### 2.1 방위제공장치

#### 2.1.1 컴파스의 종류와 오차

컴파스는 방위 측정용 계기로서 마그네틱컴파스와 자이로컴파스가 있다. 마그네틱컴파스는 지구의 지자기에 의하여 방향이 결정되는 계기이고, 자이로컴파스는 지축에 일치하려는 자이로스코우프의 원리를 이용하여 방위를 찾을 수 있도록 한 계기이다[6].

마그네틱컴파스는 지구 자장의 방향을 이용하여 방위를 구하는 가장 오래된 항해계기이다. 항상 일정한 방향을 가리키므로 선박의 침로를 알거나 또는 세계 내에 있는 물표의 방위를 측정하여 선박의 위치를 결정하는데 사용된다. 자북원리는 지구 자력의 남북방향에 따라 자침이 일치하려는 성질을 갖게 되므로 항상 지구 자기 방향을 가리키게 되어 남북 방향을 알 수 있게 된다. 마그네틱컴파스의 종류로는 형태에 따라 표준형, 잠망경형, 구형으로 분류하고, 사용목

적에 따라 표준나침의, 조타나침의, 단정나침의로 구분할 수 있다.

마그네틱컴파스는 지자기장과 상호 작용하는 자석이 남북방향의 자축(Magnetic Pole)을 향하는 것을 이용하는데 지구상의 남북과 자축이 다르므로 오차가 발생하게 된다. 편차는 지구 자전축의 북(진북)과 지구 자기장의 북(자북)이 이루는 교각(즉 진북과 자북의 차이)을 말하고, 자차는 마그네틱컴파스가 주변에 있는 철기류의 영향을 받아서 지자기의 극(자북)을 가리키지 못하고 자북과 다른 방향을 가리킴에 따라 발생하는 차이를 말한다[6].

자이로컴파스는 자이로스코프가 지구의 자전에 무관하게 일정하게 한 방향을 가리키는 원리를 이용하여 회전축이 항상 지구의 북쪽을 가리키도록 하여 진북을 표시한다. 자이로컴파스에는 장비 자체의 결함으로 인한 오차, 적도 이외의 지방에서 발생하는 위도 오차, 항해 중 발생하는 속도 오차, 그리고 가속도오차와 동요 오차 등이 있다[7]. 자이로컴파스는 군사용으로 사용되는 링레이저자이로와 광섬유자이로가 있고, 오래된 기계식 자이로가 있다. 국제해사기구의 규정에 따라 대부분의 중대형 선박은 자이로컴파스를 탑재하고 있으며, 마그네틱컴파스도 같이 탑재하고 있다[5].

자이로컴파스는 위도 60도 이내의 지역에서 정상 작동되어야 하며, 정지상태에서의 오차범위는  $\pm 0.25^\circ$  이내이어야 하고, 20Kts의 빠른 속력에서 급변침 중에도  $\pm 2^\circ$  이내에 있어야 한다. 그리고 마스터자이로와 리피터 간의 차이도 최대  $\pm 0.5^\circ$  를 넘어서는 안된다[8].

### 2.1.2 컴파스 오차 수정

선박에서 컴파스를 사용하는 것은 진북을 기준으로 선박의 선수 방향인 헤딩을 알기 위해서다. 컴파스의 오차를 항해 중에 장비 자체에서 검출하거나 수정하는 것은 거의 불가능하다. 마그네틱컴퍼스는 자북을 가리키고 있으나 주변의 철 구조물과 지자기장의 특성에 따라 왜곡이 발생하고, 자이로컴퍼스의 경우에도 장치 내부적인 오차나 장기간 사용으로 인한 오차를 항시 내포하고 있다.

항해 중 컴파스의 오차를 보정하기 위해서는 진북을 정확히 찾아야 한다. 연

안을 항해하는 선박의 경우 시각 또는 레이더 등의 장비를 이용하여 주변의 지형지물을 측정하고 위치를 산출하는 등의 일련의 계산과정을 거쳐서 찾기도 하고, 대양을 항해하는 경우에는 GPS 위성을 이용하기도 한다. GPS를 이용하여 오차를 확인하는 것은 가장 편리한 방법이지만, 군사적 관점에서는 전파교란 등의 취약성이 내포되어 있고, 고도의 신뢰성이 요구되는 경우에는 전파에 의한 오차를 내포하고 있어 충분한 정밀성을 확보하기는 어려운 실정이다.

오래전부터 대양을 항해하는 선박의 항해사들은 태양이나 달, 그리고 각종 천체들을 관측하고 천측력 및 천측계산표 등을 이용하여 진북을 산출하였고, 이를 통해 선박에 탑재된 컴파스의 오차를 수정하기도 하였다.

### 2.1.3 THD 적용 규정

국제해사기구에서는 선박의 건조, 항해 및 안전을 위하여 다양한 결의안 및 규정을 마련하고 있다. 각 규정은 총회, 상임위원회, 해사법위원회, 선박안전위원회 등으로 구분되어 쉽게 찾을 수 있다[9]. 선박의 heading과 관련된 항해장비로 THD 규정을 적용하고 있으며, 선박의 항해에 필요로 하는 보다 정확한 방위를 제공하도록 하고 있다[10].

IMO MSC 116(73)에서 규정하는 THD는 선박의 True heading에 대한 정보를 공급하는 전자 장비이다. True Heading은 해당 규정에 따르면, 진자오선과 선박의 heading이 이루는 각을 의미한다.

이 규정에 의거, 개정된 SOLAS Convention의 5장의 자이로컴파스를 탑재하지 않은 총 통수 기준 300톤 이상, 500톤 이하의 선박은 THD가 요구된다[11]. 또한 자이로컴파스를 탑재하지 않은 100명 또는 이하 여객수송이 인증된 고속 여객수송선박은 선박의 heading을 제공하는 적합한 장비가 요구된다[12].

기능적인 측면으로, 이 규정에 따르면 THD는 지리적 운영지역을 규정하지 않는 경우, 센서부에 적용되는 국제해사기구의 운용 표준에 의거, THD 장비는 북위 70° 에서 남위 70° 까지의 지역에서 운용 가능하여야 한다.

## 2.1.4 THD 요소 및 운용 조건

선박의 헤딩은 진북을 기준으로 하는 선박의 선수방향 방위값으로, 반드시 THD 기능에 포함되어야 하며, 센서부는 송신단에 연결되는 헤딩 정보에 대한 감지 기능이 구현되어야 한다. 송신부는 센서부에서 헤딩 정보를 받아 규정에서 요구하는 신호로 변환하는 장치이다[10].

여기서 진방위란 진북을 지나는 자오선의 수직면과 선박의 선수 및 선미가 이루는 중심선 간의 수평각을 의미하는 것으로서 0° 에서 360° 까지의 범위를 가진다.

각종 오차에 대한 규정으로, 전달 및 해상도 오차는 원래의 신호를 수신장치에 전달하는 사용 방식에 기인한 오차를 의미한다. 어떠한 사유에 의해, 시스템 운용 중에 장비의 출력 값이 변하지 않는 상태가 되는 오류를 정적오차라고 하며, 이에 반해 동적오차는 진동, 롤, 피칭, 혹은 가속도 등 동적 영향에 의해 시스템에서 발생하는 오류이다. 그 밖의 선회오차는 감지되는 수치와 교차 신호의 가용성, 또는 시스템 출력에서의 데이터 연속 처리 간에 지연으로 인해 발생하는 오차이다. 이 오차는 침로변경 시 실제 헤딩과 시스템 출력의 정보 간에 발생하는 오차로서 정적상태에서는 발생하지 않는다.

THD는 헤딩 신호를 수신하며, 다른 장비로 적합한 출력 신호를 생성해야 한다. 모든 센서부는 장비 내에 내장되어야 한다. 모든 보정 장비 및 변수는 오동작이 되지 않도록 보호되어야 한다.

센서를 제외한 모든 전시 및 출력은 진방위를 표시하여야 한다. 수동적인 전자적 보정에 대하여 인지가 가능하도록 적절하게 표시되어야 한다. 센서부가 연결된 상태하에서 THD의 정확도 검사가 이루어져야 한다. 센서부가 송신단 부품 내에 포함되어 있을 시 모든 부품과 함께 검사가 이루어져야 한다. THD 장비는 최소한 국제해사기구의 결의안 A.424(XI) 또는 A.821(19)에서 언급한 해상 상태에서 장비 출력 정확도 기준에 부합되도록 해야 한다.

해상도를 포함한 송신신호의 오차는  $\pm 0.2^\circ$  미만이어야 하고, 정적상태에서의

시스템 오차는  $\pm 1.0^\circ$ , 동적상태의 시스템 오차는  $\pm 1.5^\circ$  미만이어야 한다. 즉, THD의 오차는 정적상태에서  $\pm 1.0^\circ$ 의 정확도를 가져야 함을 알 수 있다.

## 2.2 천문항해

### 2.2.1 항해삼각형

지구좌표, 천구 적도좌표 및 수평좌표를 종합하여 동명극, 천정 및 천체의 3점으로 이루어지는 천구상의 구면삼각형을 천문삼각형(Astronomical triangle)이라 한다. 지구상의 동명극, 관측자의 위치 및 지위의 3점으로 이루어지는 지구상의 구면삼각형을 지문삼각형(Terrestrial triangle)이라 한다[13].

Fig. 1에서 보는 것처럼, 지구의 반경을 무한히 연장하여 천구의 반경과 같게 하면 이 두 삼각형은 동일한 삼각형이 되며, 이들 삼각형을 항해 목적으로 이용하는 경우 이들 전부를 항해삼각형이라 한다.

항해삼각형의 3변은 여위도(Colatitude), 극거리(Polar distance) 및 여고도(Coaltitude)라 하고 3각을 자오선각(Meridian angle), 방위각(Azimuth angle) 및 위치각(Parallactic angle)이라 한다.

항해학의 여러 공식을 유도하는데 있어 항해삼각형은 매우 중요한 것으로, 일반적으로 다음과 같은 문제를 해결하는 데에 이용되고 있다.

#### (1) 천측계산을 하여 위치선을 구하려고 할 때

이것은 관측자의 위도, 천체의 적위 및 자오선각을 이용하여 고도 및 방위각을 구하는 문제이다.

#### (2) 천체를 식별하려고 할 때

이것은 관측자의 위도, 천체의 고도 및 방위각을 이용하여 적위와 자오선각을 구하는 문제이다.

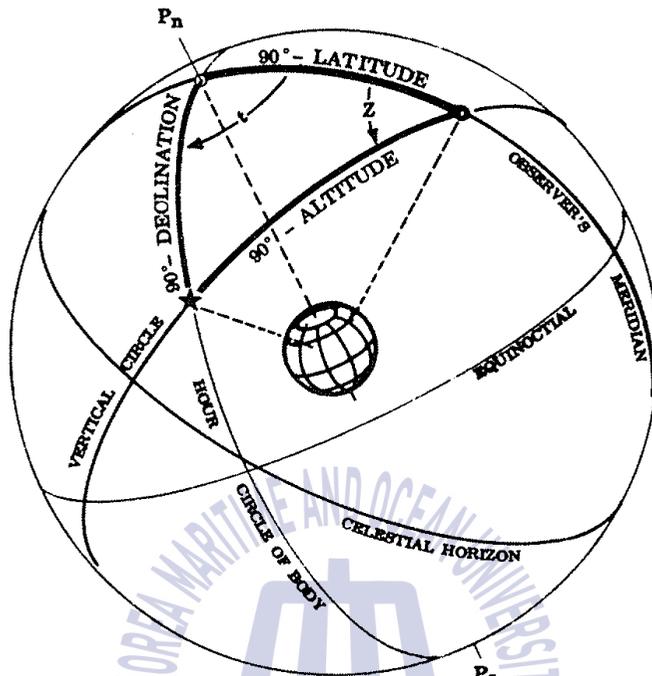


Fig. 1 Navigational Triangle

(3) 천체의 방위를 구하려고 할 때

이것은 자오선각, 적위 및 고도를 알고 방위각을 구하는 문제이다.

(4) 대권항법에서 출발침로와 대권 항정을 구하려고 할 때

이것은 위치선을 구하는 경우와 같으며, 다만 이때에는 지구표면에 그려진 항해삼각형을 계산한다는 점이 다르다[14].

항해삼각형의 3점은 동명극(Polar; P), 관측자의 가정위치(Assumed Point; AP) 및 전체의 지위(Geographical Position; GP)이다. 동명극은 관측자의 위도부호에 따라 결정된다.

Fig. 2의 경우와 같이 관측자가 북반구에 있는 경우는 북극이 동명극이 되고,

반대로 관측자가 남반구에 있는 경우는 남극이 동명극이 된다.

천체는 시간이 지남에 따라 계속적으로 움직이고 있기 때문에 지위도 천체와 더불어 이동하게 된다. 지위는 천체의 적위에 따라 북반구에 있을 수도 있고 남반구에 있을 수도 있다[13].

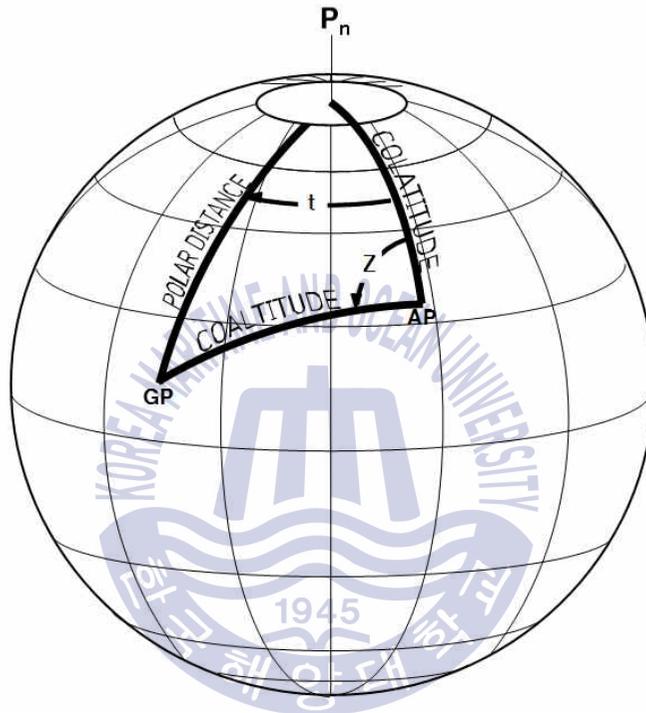


Fig. 2 Navigational Triangle (North)

여위도(Colat)는 동명극과 가정위치 사이의 자오선 상의 호이다. 그러므로 가정위치의 위도를  $90^\circ$  에서 감한 각도와 같다.

$$Colat. = 90^\circ - Lat.$$

극거리(P)는 동명극과 지위 사이의 자오선 상의 호이다. 관측자의 위도와 적위가 동명(Same name)인 경우의 극거리는  $90^\circ$  에서 적위를 감한 각도와 같고 이명(Contrary name)인 경우는 더한 각도와 같다.

$$p = 90^\circ \pm Dec.$$

여고도(Coalt)는 지위와 가정위치 사이의 대권(수직권) 상의 호이다.  $90^\circ$  에서 천체의 고도를 감한 각도와 같으며 정거(Zenith Distance)과 같게 된다.

$$Coalt. = 90^\circ - h$$

## 2.2.2 항해삼각형(航海三角形)의 3각

자오선각(Meridian angle; t)은 관측자(AP)의 자오선으로부터 지위의 자오선까지 측정한 동명극에서의 각이며 측정 방향에 따라 접미부호 E(east) 또는 W(west)를 붙인다.

지방시각(LHA)은 관측자의 자오선으로부터 천체의 시권까지 항상 서쪽으로만  $360^\circ$  까지 측정하는 반면 자오선각은 항해삼각형의 내각으로 측정하기 때문에  $0^\circ$  에서  $180^\circ$  까지 측정하며 측정방향에 따라 접미부호를 붙여주어야 한다.

지방시각과 자오선각의 상호 관계는 아래와 같다.

$$LHA < 180^\circ \text{ 인 경우 } t(W) = LHA$$

$$LHA > 180^\circ \text{ 인 경우 } t(E) = 360^\circ - LHA$$

방위각(Azimuth angle; Z)은 관측자(AP)의 자오선으로부터 관측자(AP)와 지위(GP)를 연결하는 대권(수직권)으로 측정한 관측자(AP)에서의 각이다. 측정기준이 되는 동명극에 따라 접두부호 N(north) 또는 S(south)를 붙여주고, 관측자를 기준으로 지위의 방향에 따라 동 또는 서쪽으로 측정하며 방향에 따르는 접미부호 E(east) 또는 W(west)를 붙여준다. 천체방위는 정북(North point)을 기준으로 시계방향으로 천체의 수직권까지의 각으로  $360^\circ$  까지 측정하는 반면에 방위각(Z)은, 정북 또는 정남으로부터 천체의 수직권까지 동쪽(E) 또는 서쪽(W)으로  $0^\circ$  에서  $180^\circ$  까지 측정한 각이다. 접두부호는 위도와 동명이 되고, 접미부호는 자오선각과 동명이 된다.

Fig. 3은 남극이 상으로 된 경우의 항해삼각형이다. 이때 관측자(AP)가 남반구에 있으므로 남극이 동명극이 된다. 그림에서 천체의 지위(GP)는 관측자의

서쪽에 위치하고 있으므로 자오선각( $t$ )의 접미부호는 W이다. 이러한 경우에 있어서 방위각( $Z$ )의 접두부호가 S이고, 접미부호는 W가 된다. 만약 방위각의 크기가  $110^\circ$  이면 S  $110^\circ$  W라 적는다.

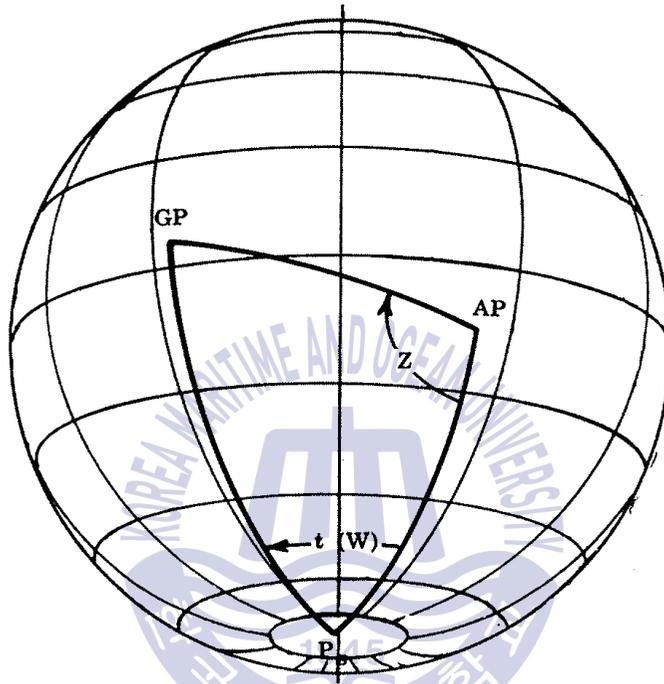


Fig. 3 Navigational Triangle (South)

방위각( $Z$ )을 진방위( $Z_n$ )로 나타내려면 Fig. 4의 방위도표를 그려보면 쉽게 환산할 수 있다. 방위각( $Z$ ) S  $110^\circ$  W를 진방위로 환산하려면 방위각에  $180^\circ$  를 더하면 된다.

$$Z_n = 110^\circ + 180^\circ = 290^\circ (T)$$

방위각( $Z$ )과 진방위( $Z_n$ )의 상호관계는 다음과 같다.

Lat. N, t. E 인 경우 N Z E,  $Z_n = Z$

Lat. N, t. W 인 경우 N Z W,  $Z_n = 360^\circ - Z$

Lat. S, t. E 인 경우 S Z E,  $Z_n = 180^\circ - Z$

Lat. S, t. W 인 경우 S Z W,  $Z_n = 180^\circ + Z$

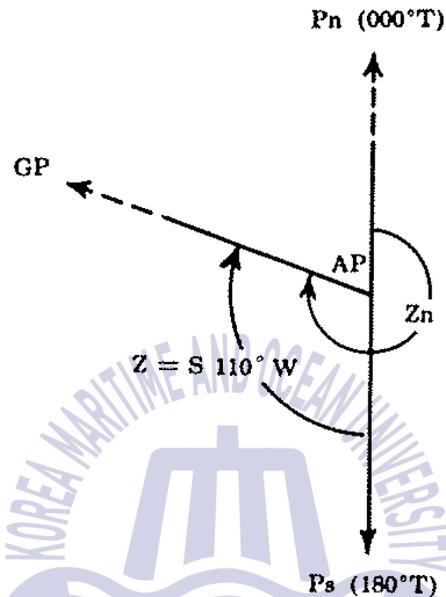


Fig. 4 Azimuth Angle

위치각(X; Parallactic angle)은 천체의 시권과 수직권 사이의 천체에서 이루는 각이며, 항해용으로 사용되지 않는 각이기 때문에 설명을 생략한다.

### 2.2.3 지위(地位)

천체와 지구중심을 연결한 직선이 지구표면과 만나는 점을 지위(GP)라 한다. 천정 바로 아래가 관측자의 위치인 것처럼 천체 바로 아래가 지위이다. 천체의 지위는 천체의 적도좌표에 의해 결정된다. 지위의 위도는 적위의 좌표와 같으나 지위의 경도는 본초자오선을 기준하여 동 또는 서쪽으로  $180^\circ$  까지 측정하는 것에 반하여 본초시각은 본초자오선을 기준하여 항상 서쪽으로만  $360^\circ$  까지 측정한다[13].

유클리드 공간에서 두 지점간의 방위를 구하기 위해 평면상에는 두 지점의 좌표가 반드시 필요하다. 즉, 2차원적인 평면에서는  $p1:(x1, y1)$ ,  $p2:(x2, y2)$ 의 좌표에 의해  $p1$ 에서  $p2$ 를 바라보는 각을 구할 수 있다. Fig. 5(a)와 같이, 이때 북쪽을 기준으로  $p1$ 과  $p2$ 의 각도를 구하는 것은 어려운 작업이 아니다.

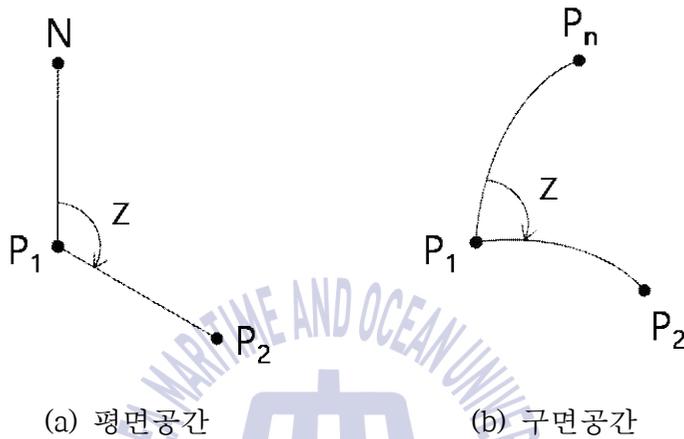


Fig. 5 Coordinate System

그러나 Fig. 5(b)에서 보듯이, 선박에서 방위를 구하는 방법은 상기 유클리드 공간에서의 방법과 다르다. 천문항해를 이용할 때, 선박의 위치는 과거로부터 연구되어 온 여러 가지 방법으로 알 수 있지만, 즉  $p1$ (자선의 위치)을 안다고 하더라도, 문제는 하늘에 떠 있는 천체를 어떻게 지구 표면상의  $p2$ (지위)로 구체화할 수 있는지를 알아야 한다. 지구는 유클리드의 평면으로 해석할 수도 없다. 여기서 제기된 두 가지 선결 조건의 해결을 위해, 즉 천체를 이용하여  $p2$  지점을 알아내는 방법과 유클리드 평면이 아닌 지구상에서 계산을 시행하기 위한 해석의 방법을 정의할 필요가 있다.

천체를 지구상의  $p2$  지점으로 구체화하는 작업을 위해 지위의 개념이 필요하다. Fig. 6에서 보는 것과 같이 지위는 적위(Declination; Dec)와 적경(Right Ascension; RA)으로 구성된다.

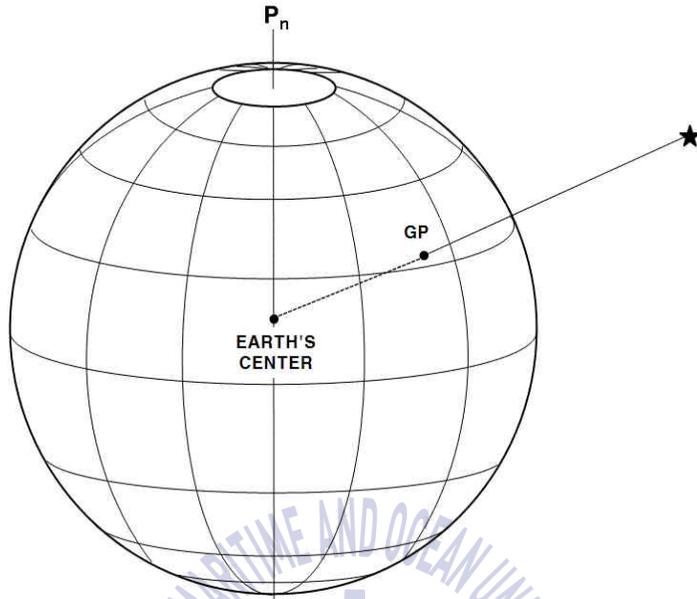


Fig. 6 Geographical Position

지구상 어느 지점의 위도는 적도로부터 북쪽 또는 남쪽으로 측정한 각거리로서 각각 90° 까지 측정되고 측정 방향에 따라 N(North) 또는 S(South)의 접미부호를 붙인다. 천체를 지나는 천의 자오선 상에서 천의 적도로부터 천체까지의 호를 그 천체의 적위(Dec)라 하며 지구상의 위도에 대응하는 것이다. 적도상의 0° 에서 남북으로 각각 90° 까지 채고, 측정 방향에 따라 N(North) 또는 S(South)의 접미부호를 붙인다. 적위가 같은 점을 연결한 소권을 적위의 거등권(Paralles of Declination)이라 한다[14].

춘분점의 시권으로부터 천체의 시권까지 0h에서 24h 또는 0° 에서 360° 까지 동쪽으로 측정한 적도상의 호의 길이 또는 극에서의 각을 적경이라 한다. 항성 시각(Sidereal Hour Angle; SHA)은 도 단위로 서쪽으로 측정하는 것이고, 적경은 도 또는 시 단위로 동쪽으로 측정하는 것으로 상호 관계는 다음과 같다.

$$SHA + RA = 360^\circ$$

본 논문에서는 방위산출을 위해 이용하는 천체를 태양으로 정하여 기술하고 있다. 그리고 천체의 적경이 일반 항성들에서는 SHA(Sidereal Hour Angle; 항성 시각)에 연계되어 계산되는 반면, 태양은 본초시각(Greenwich hour angle; GHA)과 연계하여 계산을 할 수 있다.

본 논문에서는 P1을 관측자의 위치, 그리고 P2를 천체의 위치로 정의한다. 따라서 지구상의 좌표 P1과 천구상의 좌표 P2를 동일한 차원으로 한정하여야 할 필요가 있다. 지구상의 좌표로 표시할 때, P1(x1, y1)의 좌표는 (Longitude, Latitude)이고 P2(x2, y2)의 좌표는 (GHA, Dec)이므로 P2의 천구상의 좌표를 지구상의 좌표로 변환하여야 한다.

x1 = Longitude

y1 = Latitude

if (GHA < 180) x2 = -GHA

else x2 = 360 - GHA

y2 = Dec

이상의 식을 살펴보면 P1은 위도와 경도 성분을 그대로 좌표로 사용 가능하며, P2의 위도 성분은 Dec 성분을 그대로 대입하여 사용하면 된다. 단, P2의 경도 성분은 이상에서 설명한 바와 같이, GHA가 180° 보다 작을 때는 경도의 서경의 증가분과 동일하다. 그러나 동경을 (+)부호로 서경을 (-)부호로서 계산상 구분 짓기 때문에 P2의 경도 성분은 GHA 값에 부호가 반대이다. GHA가 180°를 넘게 되면 360°에서 차감한 값이 동경의 값으로 표시되어야 한다. 동일한 방법으로, 계산을 위한 위도 성분은 북위에서 (+)부호, 남위에서 (-)부호가 된다.

동일한 방법으로 이상의 P1과 P2의 좌표를 천구상에서 표현할 때는,

if ( $\lambda = W$ ) x1 = - $\lambda$

( $\lambda = E$ ) x1 = 360 -  $\lambda$

여기서  $\lambda$ 는 경도(Longitude).

$y_1 = \text{Latitude}$

$x_2 = \text{GHA}$

$y_2 = \text{Dec}$

와 같이 정리할 수 있다.

즉, 관측자의 위치는 지구상의 좌표이며, 관측되는 천체의 좌표는 천구상의 좌표이므로, 연산을 위해서는 이러한 개념을 적용하여 동일한 차원의 값으로 보정하고, 그 이후에 계산을 진행하여야 한다.

이상을 정리하면, 지위는 개념적으로는 위도와 경도에 각각 대응한다. 적위는 위도와 같은 의미로 사용되며, 따라서 적도를 기준으로 남과 북의 접미사 N과 S를 가진다. 경도 성분의 경우, 동서의 접미사를 가지는 반면에 GHA는 동서의 구분 없이  $0^\circ$  에서  $360^\circ$  의 값을 가진다.

## 2.2.4 시각(時角)

Fig. 7은 적위와 시각의 개념을 함께 나타낸 것이다[13]. 그림과 같이 지구상의 어느 기준선으로부터 천체의 시권까지 서쪽으로  $0^\circ$  에서  $360^\circ$  까지 측정된 적도상의 호의 길이 또는 극에서의 각을 시각(Hour Angle; HA)이라 한다.

① 본초시각 : 본초자오선으로부터 천체의 시권까지의 시각을 본초시각(Greenwich Hour Angle; GHA)이라 한다. 지구의 경도는 본초자오선을 기준으로 동 또는 서쪽으로  $0^\circ$  에서  $180^\circ$  까지 측정하고 측정 방향에 따라 접미부호 E 또는 W를 붙이게 되나, 본초시각은 항상 서쪽으로만  $360^\circ$  까지 측정하게 되어 있고 접미부호가 없다.

② 지방시각 : 관측자의 천의 자오선으로부터 천체의 시권까지의 시각을 지방시각(Local Hour Angle; LHA)이라 한다.

본초시각과 지방시각 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$LHA = GHA \pm \lambda$$

(단,  $\lambda$ (E)이면 “+”,  $\lambda$ (W)이면 “-” )

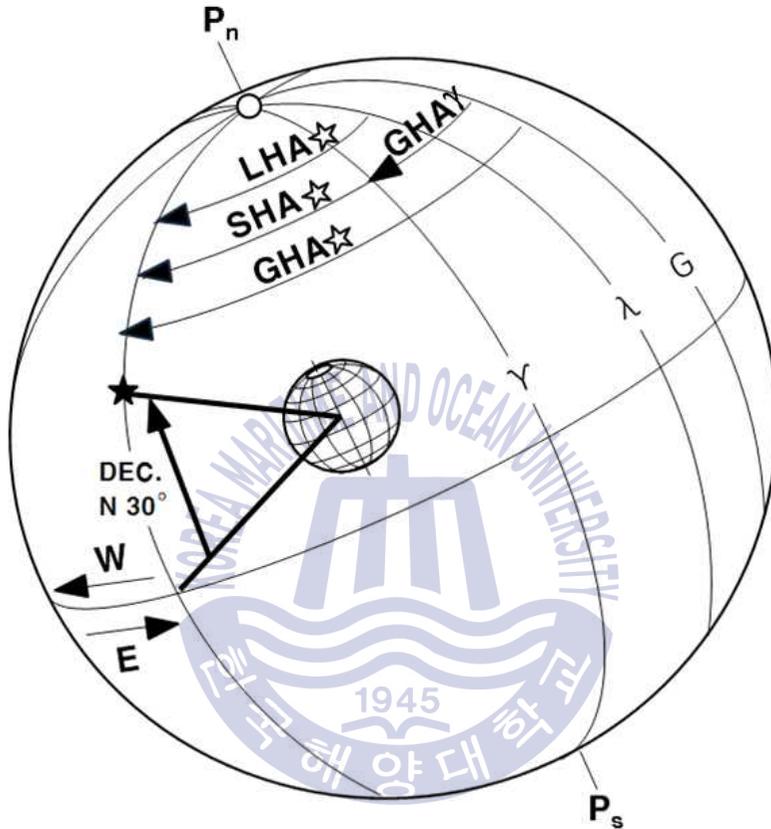


Fig. 7 Declination and Hour Angle

③ 항성시각 : 춘분점( $\Upsilon$ )의 시권으로부터 천체의 시권까지의 시각을 항성시각 (Sidereal Hour Angle; SHA)이라 한다.

항성의 본초시각(GHA ★)은 본초자오선에서 천체의 시권까지의 시각이고, 춘분점의 본초시각(GHA  $\Upsilon$ )은 본초자오선에서 춘분점의 시권까지의 시각으로 항성시각과는 다음과 같은 관계가 있게 된다.

$$GHA \star = GHA \Upsilon + SHA \star$$

Fig. 7에서 본초자오선으로부터 천체의 시각까지의 시각을 그리니치 시각 또는 본초시각(GHA)이라 한다. 관측자의 천의 자오선으로부터 천체의 시각까지의 시각을 지방시각(Local Hour Angle; LHA)이라 한다[13].

### 2.2.5 태양

태양은 태양계의 중심이 되는 천체이며, 태양계 안에 있는 모든 천체의 질량을 합한 것의 약 1,000배나 되는 천체로서 태양계에 있는 천체들에 열과 빛을 공급하여 주고 있으며, 항해학적인 관점에서도 다른 어느 천체보다 그 활용도가 높다.

태양의 주요 상수는 Table 1과 같다.

**Table 1** Sun's Parameter

Mean Distance	1.4967 * 100,000,000 km
Mean Apparent semi-diameter	15 ' 59 " .63 ± 0 " .05
Mean Equator Horizontal Differential	8 " .79
Equatorial Radius	695,553 km
Mass	1.99 * 100,000,000,000,000,000 kg
Greatest Brilliancy	-26.7

지구와 태양 사이의 거리는 지구궤도의 이심률 때문에 끊임없이 변하고 있으나 그 평균거리를 길이의 단위로 정한 것을 천문단위(Astronomical Unit; AU)라고 하며 주로 태양계 안의 거리 측정 단위로 사용하고 있다[14].

지구와 태양 사이의 거리 변화로 인해 태양의 겉보기 반지름(Apparent semi-diameter)도 변하며 1월 1일경에 가장 커져서 16 ' 18 " , 7월 2일경에 가장

작아져서 15 ' 45 " 로 된다. 태양의 전 복사 에너지는, 천문단위 거리에 있어서 지구의 단위 표면적이 빛에 수직이고 또 대기가 존재하지 않는다는 가정하에 단위시간 동안 받는 에너지양으로 표현하며 이를 태양상수라고 한다.



### 제 3 장 천문항해를 이용한 방위산출 알고리즘

본 장에서는 태양의 지위를 산출하기 위한 방법들과 천문항해의 항해삼각형을 이용한 알고리즘에 대하여 연구한 내용을 기술하였다.

방위산출에 이용되는 다양한 천체 중에서 태양은 주간 중에만 이용할 수 있다는 한계가 있지만, 지위의 정확성 및 관측의 편의성 등을 고려할 때 가장 활용성이 높은 천체라고 할 수 있다. 태양의 지위를 구하는 다양한 방법을 살펴보고, 전산화가 용이하도록 하였다.

천문항해의 대부분 이론은 항해삼각형을 근거로 하고 있으므로 이들 이론을 활용하여 어떻게 선박의 방위를 측정할 수 있는지에 대한 방법을 제시하고자 한다. 선박의 방위를 나타내는 데 있어 선미와 선수를 연결한 선분이 자오선과 이루는 각을 선박의 헤딩이라고 한다. 지구 어느 위치에 있어서나 그 위치를 지나는 자오선은 남과 북의 극점과 연결되어 있다. 그러나 보이지 않는 그 극점을 어떻게 찾을 것인가? 그리고 그 극점을 지나는 가상의 자오선을 어떻게 구분할 것인가? 선박의 위치에서 바라본 천체의 진방위를 구해야만 이를 연계하여 진북을 찾을 수 있고, 진북을 찾는다는 것은 자오선을 찾는 것이므로, 위에서 언급한 내용 들을 풀어나가는 과정이라 할 수 있다.

과거에 천문관측을 이용하여 방위를 산출하고자 하였던 것은 항해중인 선박의 헤딩을 정확히 알기 위함이었다. 선박에서는 헤딩을 정확히 산출한 후에 원하는 방향으로의 항해를 원활히 하는 것은 물론, 원하는 물표의 정확한 방위도 알 수 있었다.

따라서 천문관측을 한 후에 항해삼각형의 해법에 필요한 각종 요소들을 이용하여 관측자의 현재 위치를 찾고, 관측자의 위치를 기준으로 천체의 방위를 도출함으로써 진북을 추출하게 되며, 이후 선박의 헤딩을 산출하는 것이다. 이러한 전체적인 계산과정과 이에 대한 이론적인 근거를 함께 기술하였다.

### 3.1 지구중심의 태양좌표

과거부터 지금까지 태양의 지위를 구하는 방법은 천측력을 이용하는 것이었다. 천측력은 1시간 단위로 GHA와 Dec가 기록되어 있다. 항해사는 원하는 시간에 천체의 지위를 알기 위해 천측력에서 해당 시각의 앞 뒤 시각의 지위들을 각각 찾아 현 시각에 대한 보정 계산을 통해 정확히 구할 수 있다[15].

이미 설명하였듯이 선박의 위치에 대한 태양 지위의 좌표가 정확할수록 선수 방위의 정밀한 계산이 가능하다. 따라서 천측력을 이용하여 각각의 시각별로 정리된 태양의 지위 데이터를 이용하여 원하는 시각의 정밀한 태양의 지위 값을 계산하는 것은 그리 어렵지 않은 작업이다. 이러한 천측력이 어떻게 계산되어 구성되어 있는지를 이해하고 이를 응용한다면 더욱 원활한 방위의 산출에 도움이 될 것이다. 본 연구에서는 태양계 내 행성의 지위를 계산하는 VSOP87의 계산 처리 과정을 먼저 살펴본 이후, 천측력에 대해서도 설명하고자 한다.

#### 3.1.1 행성의 위치

1982년, Bureau de Longitudes of Paris의 P.Bretagnon은 행성이론 VSOP82를 출간하였다. VSOP는 “Variations Séculaires des Orbites Planétaires”의 약어이다. VSOP82는 수성부터 해왕성까지의 주요 행성의 각각의 장기적인 주기로 구성되어 있다. 행성이 주어질 때, 이 주기의 합은 주어진 시점을 기준으로 평가되며, 상점궤도의 다음 값을 도출할 수 있다. 상점궤도란 “일시적인” 행성의 궤도를 의미한다[16].

$$\begin{aligned} a &= \text{궤도의 반장축} \\ \lambda &= \text{행성의 평균 경도} \\ h &= e \sin \pi \\ k &= e \cos \pi \\ p &= \sin \frac{1}{2} i \sin \Omega \\ q &= \sin \frac{1}{2} i \cos \Omega \end{aligned}$$

이때  $e$ 는 궤도 이심률,  $\pi$ 는 근일점의 경도,  $i$ 는 기울기 그리고  $\Omega$ 는 상승교

점의 경도이다.  $a$ ,  $\lambda$ ,  $e$  및  $\pi$  ( $h$ 와  $K$ 의),  $i$ 와  $\Omega$ ( $p$ 와  $q$ 의)를 알 경우, 주어진 시점의 공간상에서의 실제 위치가 도출 될 수 있다.

VSOP82를 사용하는데 불편한 점은 정확도가 확보되지 않을 경우 계산을 함에 있어 많은 혼동이 발생한다는 것이었다. 다행히도 1987년 Bretagnon과 Francou는 VSOP87이라고 불리는 신 버전을 구축했다. 이는 행성의 태양 중심 좌표를 직접적으로 계산하는 주기를 도출하는 것으로 다음의 기호를 사용한다.

- L, 타원 경도
- B, 타원 위도
- R, 반경 벡터(태양까지의 거리)

VSOP82와 VSOP87의 구축을 위해 사용되는 방법이 천문학 보고서에서 기술되었다[16] [17].

부록 I 에 있는 항성의 운항 주기는 VSOP87 이론으로부터 인용할 수 있었다. 이는 각 행성의  $L_0, L_1, L_2, \dots, B_0, B_1, \dots, R_0, R_1, \dots$ 이라고 명명되었다.

$L_0, L_1, \dots$  시리즈는 행성의 태양 중심 타원 경도  $L$ 을 구하기 위해 필요하며, 시리즈  $B_0, B_1$ 은 황도 경도  $B$ 를 구하기 위해 그리고 시리즈  $R_0, R_1$ 은 반경  $R$ 을 구하기 위해 필요한 요소이다.

목록상의 각 수평선은 단일의 주기를 나타내며 4개의 숫자를 포함한다.

- 시리즈 상의 주기의 현재 숫자. 이는 실제 계산에서는 필요하지 않으며 참고 목적으로만 사용한다.

- 나머지 세 숫자는 각각 A, B, C라고 명명한다..

JDE를 주어진 시점에 대응하는 율리우스 천체력일로 두자. 연대 J2000.0을 기준으로 하는 율리우스 1000년 단위의 시간  $\tau$ 를 구하면

$$\tau = \frac{JDE - 2451545.0}{365250} \quad (1)$$

각 주기의 값은 다음의 식을 통해 도출할 수 있다.

$$A \cos(B + C\tau) \quad (2)$$

예를 들어 수성의 시리즈 L0의 9번째 주기는 다음과 같다.

$$1803 \cos(4.103.3 + 5661.332.0\tau) \quad (3)$$

부록 I의 목록에서 계수 A는 경도, 위도는  $10^{-8}$  라디안 단위를 사용하고, 반경은  $10^{-8}$  AU 단위를 사용한다. B와 C는 라디안 단위를 사용한다.

당일의 평균 분점에 기반을 둔 주어진 시점의 행성의 태양 중심 타원 황도 L을 구하기 위해서는 다음의 절차를 이행하여야 한다. 먼저 시리즈 L0의 주기의 L0의 합, 시리즈 L1의 주기의 L1의 합 등을 구한다. 이후 라디안 단위로 경도를 다음의 식을 통해 구한다.

$$L = (L_0 + L_1\tau + L_2\tau^2 + L_3\tau^3 + L_4\tau^4 + L_5\tau^5) / 10^8 \quad (4)$$

태양 중심 황도 B와 반경 R의 경우에도 유사하게 시행하면 된다.

행성의 태양 중심 황도 L과 위도 B는 Bretagnon의 VSOP 행성 이론에 의해 정의된 당일의 평균 동적 황도와 분점에 기반을 둔다.

다음을 계산하면

$$L' = L - 1''.397T - 0''.00031T^2 \quad (5)$$

이때 L과 B의 개정은 다음과 같다.

$$\Delta L = -0''.09033 + 0''.03916 (\cos L' + \sin L') \tan B \quad (6)$$

$$\Delta B = +0''.03916 (\cos L' - \sin L')$$

이 개정은 매우 정확한 계산을 요할 시에만 필수적이다.

계산 결과가 높은 정확도를 요구할 경우, VSOP87 솔루션의 주기는 비교적 늦게 수렴된다. 다음의 귀납적인 법칙은 Bretagnon과 Francou에 의해 고안된 것이다[17].

n이 존속주기(retained term)의 수이고 A가 최소 존속주기의 출몰방위각인 경우, 생략된 시리즈의 정확도는 약  $\eta\sqrt{\eta} * A$  이며, 이 때  $\eta$ 는 2 미만의 수이다.

예를 들어 수성의 태양 중심 황도를 고려해보자. 이 행성의 시리즈 L0는 38 주기를 가지며 최소 존속주기의 계수는  $100 * 10^{-8} \text{radian}$ 이다. 따라서 생략된 시리즈를 통해 계산한 수성의 태양 중심 황도 상의 최대의 가능 오류를 다음과 같이 어림잡아 예측할 수 있다.

$$2 * \sqrt{38} * 100 * 10^{-8} \text{radian} = 2''.54 \quad (7)$$

물론, 시리즈 L1, L2 등은 생략된 상태이며  $0''.41 \tau$ ,  $0''.08 \tau^2$  등의 순서로 추가적인 불확실성을 야기한다[18].

### 3.1.2 태양의 황경 좌표

정확도  $0.01^\circ$  이면 충분할 때, 태양의 지리적 중심의 위치는 순수하게 지구의 타원 운동을 가정함으로써 계산이 가능하다. 즉 달과 행성에 의한 섭동을 무시하면 된다. 계산은 다음과 같다.

JD를 율리우스 일로 두고, 연대 J2000.0부터 36525 천체력일의 율리우스 세기로 계산한 시간 T는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$T = \frac{JD - 2451545.0}{36525} \quad (8)$$

이는 충분한 정도의 소수 자리를 고려하여 계산하여야 한다. T를 세기 단위로 표기하면 T값의 0.00001의 오류가 0.37일의 오류로 나타난다.

당일의 평균분점에 기반을 둔 태양의 기하학적 평균 황경은 다음과 같다.

$$L_0 = 280^\circ .46646 + 36000^\circ .76983 T + 0^\circ .0003032 T^2 \quad (9)$$

태양의 평균 근점이각은 다음과 같다.

$$M = 357^\circ .52911 + 35999^\circ .05029 T - 0^\circ .0001537 T^2 \quad (10)$$

지구 궤도의 이심률은 다음과 같다.

$$e = 0.016708634 - 0.000042037 T - 0.000000126 T^2 \quad (11)$$

태양의 중심 C의 균차를 구하면,

$$C = + (1^\circ .914602 - 0^\circ .004817T - 0^\circ .000014T^2) \sin M \quad (12)$$

$$+ (0^\circ .019993 - 0^\circ .000101T) \sin 2M$$

$$+ 0^\circ .000289 \sin 3M$$

태양의 실제 황경은 다음과 같다.

$$\odot = L_0 + C \quad (13)$$

태양의 실제 근점이각은 다음과 같다.

$$v = M + C \quad (14)$$

태양의 반경, 즉 태양의 중심과 지구의 중심 간의 거리는 AU 단위로 나타냈을 때 다음과 같다.

$$R = \frac{1.000001018(1 - e^2)}{1 + e \cos v} \quad (15)$$

분수의 분자 부분은 시간에 따라 천천히 변동할 수 있는 값이다. 이는 다음과 같다.

1800년	0.999 7190
1900년	0.999 7204
2000년	0.999 7218
2100년	0.999 7232

태양의 황경( $\odot$ )도 위의 방법으로 구할 수 있으며, 이는 당일의 평균 분점에 기반을 둔 실제 기하학적 황경이다. 이 황경은 기하학적 행성 위치의 계산 등에 사용된다[17].

당일의 실제 분점에 기반을 둔 육안 황경  $\lambda$ 이 요구될 시  $\odot$ 는 장동과 광행차를 고려하여 개정되어야 한다. 높은 정확도가 요구될 시, 다음과 같이  $\Omega$ 과  $\lambda$ 를 두면 된다.

$$\Omega = 125^{\circ}.04 - 1934^{\circ}.136 T \quad (16)$$

$$\lambda = \odot - 0^{\circ}.00569 - 0^{\circ}.00478 \sin \Omega$$

유성과 같은 일부 예시에서 J2000.0의 표준 분점에 기반을 둔 태양의 황경의 값은 필수적이다. 1900년부터 2100년간의 태양의 황경의 값은 다음을 통해 충분한 정확도로 계산가능하다.

$$\odot_{2000} = \odot - 0^{\circ}.01397 (\text{year} - 2000) \quad (17)$$

태양의 황경은 달과 행성의 운행 때문에 정확히 0이 아니다. 당일의 황도에 기반을 둘 때 1.2각초를 초과하지 않는다. 높은 정확도가 요구되지 않는 한 이 황경은 0으로 두어도 무방하다.

$$\tan \alpha = \frac{\cos \varepsilon \sin \odot}{\cos \odot} \quad (18)$$

$$\sin \delta = \sin \varepsilon \sin \odot \quad (19)$$

태양의 육안 위치를 구할 경우 식 (3)과 (4)에서  $\odot$  대신  $\lambda$ 를 사용하고  $\varepsilon$ 를 다음의 값으로 개정하여야 한다.

$$+ 0^{\circ}.00256 \cos \Omega$$

식 (3)은  $\tan \alpha = \cos \varepsilon \tan \odot$ 로 변환되며, 이 때  $\alpha$ 가  $\odot$ 와 동일한 사분면에 위치하여야 한다.

$$\alpha = \text{ATAN2}(\cos \varepsilon \sin \odot, \cos \odot) \quad (20)$$

보다 높은 정확도를 위해, Bretagnon과 Simon은 그들의 저서 Planetary Programs and Tables from -4000 to +2800(Wilmann-Bell, Richmond; 1986)에서 다양한 목적으로 사용하기에 충분한 정도의 정확도로 태양의 황경을 계산할 수 있는 방법을 소개했다. 이 방법은 0년에서 +2800년 사이에는  $0.0006^{\circ}$  ( $2''$ .2)의 정확도로, -4000년부터 +8000년까지는  $0.0009(3''$ .2)의 정확도로 결과를 도출하면서도 겨우 49개의 주기를 가진다.

매우 높은 정확도인 0.01각초는 완전한 VSOP87 이론을 사용할 시 달성 가능하지만 지구의 경우 이 이론은 2425개의 주기를 가진다. 즉 지구의 황경에 1080개, 황위에 348개 그리고 반경에 997개의 주기를 가진다. -2000년부터 +6000년간 태양의 위치 계산 시 1"의 정확도를 초과하지 않는 VSOP87에서 가장 중요한 개념은 부록 I에 있다. 이 절차는 다음과 같다.

부록 I의 지구에 대한 정보를 이용하여 그 시점의 태양 중심의 황경  $L$ , 황위  $B$  및 반경  $R$ 을 계산한다. 시간  $\tau$ 는 세기 단위가 아닌 율리우스 천년기(365 250일)의 JDE 2451 545.0일로 계산된다는 것과  $L$ 과  $B$ 의 결과값은 라디안 단위이다.

지구 중심의 태양의 황경  $\odot$ 과 황위  $\beta$ 을 획득하고자 할 시  $180^\circ$ 이나  $\pi$  라디안을  $L$ 에 더하고  $B$ 의 부호를 바꾸면 된다.

$$\odot = L + 180^\circ, \quad \beta = -B$$

FK5 체계로의 변환 - 태양의 황경  $\odot$ 와 황위  $\beta$ 는 P. Bretagnon의 VSOP 행성 공식에 의해 정의된 평균 동적 황도와 당일의 분점에 기반을 두어 구해진다. 이 참조 프레임은 표준 FK5 체계와 미세하게 다르다.  $\odot$ 과  $\beta$ 의 FK5 체계로의 변환은 다음과 같으며  $T$ 는 2000.0으로부터의 세기 단위의 시간 또는  $T=10\tau$ 를 만족한다.

다음을 계산해보면,

$$\lambda' = \odot - 1^\circ .397T - 0^\circ .00031T^2 \quad (21)$$

이 때  $\odot$ 와  $\beta$ 의 개정값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta\odot &= -0''.09033 \\ \Delta\beta &= +0''.03916(\cos\lambda' - \sin\lambda') \end{aligned} \quad (22)$$

이 개정은 매우 정확한 계산 시에만 요구된다.

태양의 육안 위치 - 태양의 황경  $\odot$ 는 당일의 평균 분점에 기반을 둔 태양의 (기하학적) 실제 황경이다. 육안 황경  $\lambda$ 를 구하고자할 때에는 장동과 광행차의 영향을 고려하여야 한다.

장동의 경우 황경의 장동  $\Delta \psi$ 에  $\odot$ 를 더하기만 하면 된다. 광행차의 경우 태양의 기하학적 황경에 개정을 가하면 된다.

$$\frac{20''.4898}{R} \quad (23)$$

이 때 R은 AU 단위의 지구의 반경이다. 분수의 분자 부분은 식 (23)의 분자와 같이  $a(1-e^2)$ 를 광행차 상수( $k=20'' .49552$ )에 곱한 값과 일치한다. 따라서 식 (23)의 분자는 실제로 시간에 따라 0년에  $20'' .4893$ 에서 +4000년에  $20'' .4904$ 까지 시간에 따라 매우 천천히 변동한다.

그러나 더 중요한 것은 식 (23)은 매우 정확한 결과값을 도출하지 않는다는 것이다. 왜냐하면 이는 타원 궤도에서의 지구의 섭동 운동을 전제로 하기 때문이다. 주로 달에 의해 발생하는 섭동 때문에 결과는 0.01각초의 오류를 야기할 수 있다.

높은 정확도가 요구될 시 다음과 같이 광행차에 의한 태양의 황경에 개정을 가할 수 있다. 태양의 황경의 변화  $\Delta \lambda$ 를 일당 각초의 단위로 구할 시 아래와 같이 계산할 수 있다. 광행차의 개정은 다음과 같다.

$$-0.005\ 775\ 518\ R\ \Delta \lambda \quad (24)$$

이 때 R은 이전과 같이 AU 단위의 태양의 반경이다. 계산법의 상수는 단위 거리의 광행시간 단위 (=8.3분)이다.

태양의 황경이 장동과 광행차에 의해 개정되면 우리는 태양의 육안 황경  $\lambda$ 를 도출할 수 있다. 이 때 태양의 육안 황경  $\lambda$ 와 황위  $\beta$ 는 육안 적경  $\alpha$ 와 육안 적위  $\delta$ 로 변환될 수 있다. 이때  $\varepsilon$ 는 실제 이심률이며 황도경사  $\Delta \varepsilon$ 에 의해 장동에 영향을 받는다.

태양의 지구 중심의 황경의 변화  $\Delta \lambda$ 는 일당 각초 단위이며 2000.0의 고정 참조 프레임을 갖는다. 이는 다음 쪽에서 주어진 식에 의해 구할 수 있으며  $\tau$ 은 J2000.0으로부터의 천년 단위의 시간이며 도와 소수자리로 구성된 사인의 편각이다.

이 식에서 가장 중요한 주기만이 보류된다. 결과적으로 결과는 완전히 정확하지는 않지만  $\Delta \lambda$ 는 0" .1 이하의 오류를 가진다.  $\Delta \lambda$ 의 결과값은 식 (7)을 이용하여 태양의 광행차를 계산하는데 쓰이며 오류는 0" .001 미만이다.

태양의 기하학적 중심에서의 황경의 일일 변차(각초 단위)는 다음과 같다.

이때 시간  $\tau$ 은 율리우스 천년기로 J2000.0(JDE 2451 545.0)로부터 계산하고 사인의 편각은 ° (degree) 단위이다.

$$\begin{aligned} \Delta\lambda = & 3548.193 & (25) \\ & + 118.568 \sin ( 87.5287 + 359993.7286\tau) \\ & + 2.476 \sin ( 85.0561 + 719987.4571\tau) \\ & + 1.376 \sin ( 27.8502 + 4452671.1152\tau) \\ & + 0.119 \sin ( 73.1375 + 450368.8564\tau) \\ & + 0.114 \sin (337.2264 + 329644.6718\tau) \\ & + 0.086 \sin (222.5400 + 659289.3436\tau) \\ & + 0.078 \sin (162.8136 + 9224659.7915\tau) \\ & + 0.054 \sin ( 82.5823 + 1079981.1857\tau) \\ & + 0.052 \sin (171.5189 + 225184.4282\tau) \\ & + 0.034 \sin ( 30.3214 + 4092677.3866\tau) \\ & + 0.033 \sin (119.8105 + 337181.4711\tau) \\ & + 0.023 \sin (247.5418 + 299295.6151\tau) \\ & + 0.023 \sin (325.1526 + 315559.5560\tau) \\ & + 0.021 \sin (155.1241 + 675553.2846\tau) \\ & + 7.311 \tau \sin (333.4515 + 359993.7286\tau) \\ & + 0.305 \tau \sin (330.9814 + 719987.4571\tau) \\ & + 0.010 \tau \sin (328.5170 + 1079981.1857\tau) \\ & + 0.309 \tau^2 \sin (241.4518 + 359993.7286\tau) \\ & + 0.021 \tau^2 \sin (205.0482 + 719987.4571\tau) \\ & + 0.004 \tau^2 \sin (297.8610 + 4452671.1152\tau) \\ & + 0.010 \tau^3 \sin (154.7066 + 359993.7286\tau) \end{aligned}$$

$\tau$ 이 계수 359 993.7, 719 987 또는 1079 981을 갖는 주기일 경우 지구의 궤도의 이심률에 의해 야기된 것이다. 4452 671, 9224 660 또는 4092 677의 주기는 달의 운행에 따라 발생한다. 350 369, 659 289 또는 299 296은 목성에 의한 것이며 337 181은 화성의 운행에 따라 야기된 것이다[18].

### 3.1.3 태양의 직각 좌표

지구중심에서 측정한 태양의 적도 좌표  $X, Y, Z$ 는 소행성 또는 혜성의 천체력의 계산을 위해 필요하다. 이 좌표의 원점은 지구의 중심이다.  $X$ 축은 춘분점을 향하며 (황경  $0^\circ$ );  $Y$ 축 또한 적도면에 위치하며 황경  $90^\circ$  로 향한다. 이 때  $Z$ 축은 천구의 북극을 향한다.

$X, Y, Z$ 의 값은 매일 00h 기준으로 AU 단위로 천측력에 수록되어 있다. 일반적으로 이는 당일의 평균 적도 또는 분점이 아닌 J2000.0의 표준 분점 등에 기반을 둔다.

높은 정확도를 요구하는 방법을 사용하여 태양의 기하학적 좌표를 계산할 때, FK5 체계로의 축소를 위해 개정 식이 사용되지만, 이는 장동과 광행차의 개정을 생략한 것이다.

$\odot$ 와  $\beta$ 는 태양의 기하학적 황경 및 황위이며,  $R$ 은 AU 단위의 반경이다. 이 때 당일의 평균 적도 및 분점에 기반을 둔 태양의 직각 좌표는 다음과 같다.

$$X = R \cos\beta \cos\odot \quad (26)$$

$$Y = R (\cos\beta \sin\odot \cos\varepsilon - \sin\beta \sin\varepsilon)$$

$$Z = R (\cos\beta \sin\odot \sin\varepsilon + \sin\beta \cos\varepsilon)$$

이 때  $\varepsilon$ 는 평균 황도경사이다.

당일의 황도에 기반을 둔 태양의 황위는 1.2각초를 절대 초과하지 않으며 식 (26)의 경우,  $\cos\beta=1$ 를 대입하면 된다.

J2000.0의 분점에 기반을 둔 주어진 시점의 태양 중심에서 측정한 지구의 황경  $L$ 과 황위  $B$ 와 반경  $R$ 을 계산할 때, 부록 I의 지구의 정보를 이용하면 된다.

- L1 장, 계수 “A”의 최초값인 628 331 966 747을 628 307 584 999로 대체
- L2, L3, L4 장은 Table 2에서 주어진 값으로 대체
- L5 장은 생략

- 황위 B를 계산할 때 Table 2의 B1과 B4 항이 아닌 부록 I의 B0 항을 사용한다.

다음과 같이 L에 180° 를 더하여 태양의 지구 중심 황경을 구하고 B의 부호를 바꾸어 태양의 황위  $\beta$ 를 도출해보면,

$$\odot = L + 180^\circ \quad \beta = -B$$

이 단계에서 태양의 기하학적 황경은 J2000.0의 표준 분점에 기반을 두어야 하며 VSOP 역학 분점을 FK5 분점으로 황경을 변환하기 위해  $\odot$ 에서 0" .09033을 빼야 한다.

- 그렇지 않으면 이 개정을 생략하고 다음의 절차를 이행하여야 한다.

- 다음을 계산하면,

$$X = R \cos \beta \cos \odot \tag{27}$$

$$Y = R \cos \beta \sin \odot$$

$$Z = R \sin \beta$$

물론 이 식은 각각  $X = -R \cos B \cos L$ ,  $Y = -R \cos B \sin L$  및  $Z = R \sin B$ 와 동일하다.



Table 2 Reference to the Earth J2000.0

지구 J2000.0 (일부 기한 한정)

No.	A	B	C
L2	1	8 722	1.072 5
	2	991	3.141 6
	3	295	0.437
	4	27	0.05
	5	16	5.19
	6	16	3.69
	7	9	0.30
	8	9	2.06
	9	7	0.83
	10	5	4.66
	11	4	1.03
	12	4	3.44
	13	3	5.14
	14	3	6.05
	15	3	1.19
	16	3	6.12
	17	3	0.30
	18	3	2.28
	19	2	4.38
	20	2	3.75
L3	1	289	5.842
	2	21	6.05
	3	3	5.20
	4	3	3.14
	5	1	4.72
	6	1	5.97
	7	1	5.54
L4	1	8	4.14
	2	1	3.28
B1	1	227 778	3.413 766
	2	3 806	3.370 6
	3	3 620	0
	4	72	3.33
	5	8	3.89
	6	8	1.79
	7	6	5.20
B2	1	9 721	5.151 9
	2	233	3.141 6
	3	134	0.644
	4	7	1.07
B3	1	276	0.595
	2	17	3.14
	3	4	0.12
B4	1	6	2.27
	2	1	0

식 (27)를 통해 도출한 직각좌표 X, Y, Z는 J2000.0의 타원 역학 참조 프레임 (VSOP)으로 정의된다. 이는 다음과 같이 적도 FK5 J2000.0 참조 프레임으로 변환될 수 있다.

$$\begin{aligned} X_0 &= X + 0.000000440360 Y - 0.000000190919 Z & (28) \\ Y_0 &= -0.000000479966 X + 0.917482137087 Y - 0.397776982902 Z \\ Z_0 &= 0.397776982902 Y + 0.917482137087 Z \end{aligned}$$

B1950.0의 평균 분점은 식 (28)를 다음과 같이 변환하여 J2000.0과 동일한 절차를 이행하여 계산한다.

$$\begin{aligned} X_0 &= 0.999925702634 X + 0.012189716217 Y + 0.000011134016 Z & (29) \\ Y_0 &= -0.011179418036 X + 0.917413998946 Y - 0.397777041885 Z \\ Z_0 &= -0.004859003787 X + 0.397747363646 Y + 0.917482111428 Z \end{aligned}$$

이러한 방식을 도출된 직각 좌표는 “분점 오류”의 영향을 받는 FK4 체계가 아닌 FK5 체계의 연대 B1950.0의 평균 적도와 분점에 기반을 둔다.

위와 같이 J2000.0의 표준 분점에 기반을 둔 태양의 적도 좌표  $X_0, Y_0, Z_0$ 을 계산하여 보자. 즉 식 (27)와 (28)을 이용하여,

$$t = \frac{JD - 2451545.0}{36525}$$

태양의 직각 좌표는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X' &= X_x X_0 + Y_x Y_0 + Z_x Z_0 & (30) \\ Y' &= X_y X_0 + Y_y Y_0 + Z_y Z_0 \\ Z' &= X_z X_0 + Y_z Y_0 + Z_z Z_0 \end{aligned}$$

이 때 좌표 X, Y, Z의 값은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
X_x &= \cos\zeta \cos z \cos\theta - \sin\zeta \sin z \\
X_y &= \sin\zeta \cos z + \cos\zeta \sin z \cos\theta \\
X_z &= \cos\zeta \sin\theta \\
Y_x &= -\cos\zeta \sin z - \sin\zeta \cos z \cos\theta \\
Y_y &= \cos\zeta \cos z - \sin\zeta \sin z \cos\theta \\
Y_z &= -\sin\zeta \sin\theta \\
Z_x &= -\cos z \sin\theta \\
Z_y &= -\sin z \sin\theta \\
Z_z &= \cos\theta
\end{aligned}
\tag{31}$$

$X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ 의 좌표는 값이 계산될 때와 다른 날짜의 연대의 평균 분점에 기반을 둔다[18].

### 3.1.4 태양의 천측력 지위 산출

해양수산부에서는 선박의 항해와 관련된 다양한 출판물을 간행하고 있다. 수로서지 제310호 Nautical Almanac은 위치 결정 시에 필요한 항해용 천체들의 적도좌표를 비롯하여 항해에 필요한 제반 천문학적 현상에 관한 자료를 수록한 책이며 매년 국립해양조사원에서 간행한다. 내용은 주요 항해용 천체의 GHA와 Dec 등을 게재한 주표와 35페이지에 달하는 증분 및 개정표가 주요 부분으로 구성된다[19].

천측력 주표의 오른쪽 페이지에는 태양과 달에 대한 지위가 표시되어 있다. 한 페이지에는 3일분의 지위가 표시되어 있는데 매 1시간 간격으로 표시되어 있다. 앞선 VSOP87 등의 자동화 된 연산을 사용하지 못할 경우, 이러한 천측력의 시간 간격의 지위를 활용하여 정확한 시각의 지위를 연산해 낼 수가 있다.

천측력은 매년 발행되고 있는데, 일자별로 태양이나 행성의 위치가 조금씩 차이가 있다. 2018년 7월 16일 00시(UTC)의 태양 GHA와 Dec를 2017년과 비교하면 GHA는  $0.1'$ , Dec는  $2.4'$ 의 차이가 발생함을 알 수 있다. 물론 수치상으로는 얼마 되지 않지만, 위치산출에 있어서는 적다고 할 수 없을 것이다[20].

Fig. 8은 2017년도의 천측력 한 페이지를 나타낸 것이다.

2017. 7/15 - 7/17 (SAT, SUN, MON)

UT	SUN		MOON				Lat.	Twilight			Sunrise	Moonrise				
	GHA	Dec	GHA	v	Dec	d		HP	Naut.	Civil		Sunrise	Moonrise			
													15	16	17	18
d h	° /	° /	° /	'	° /	'	'	°	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m
15 00	178 30.9	N21 31.3	291 45.7	12.3	S02 45.6	10.9	57.2	N 72	000	000	000	23 01	22 53	22 44	22 32	
01	193 30.8	N21 30.9	306 16.9	12.3	S02 34.8	10.9	57.2	N 70	000	000	000	23 03	23 01	22 59	22 59	
02	208 30.8	N21 30.5	320 48.2	12.2	S02 23.9	10.9	57.2	68	000	000	000	23 04	23 07	23 12	23 19	
03	223 30.7	N21 30.2	335 19.4	12.2	S02 13.0	10.9	57.3	66	///	///	01 40	23 05	23 13	23 22	23 35	
04	238 30.7	N21 29.8	349 50.7	12.2	S02 2.0	11.0	57.3	64	///	///	02 19	23 07	23 18	23 31	23 48	
05	253 30.6	N21 29.4	4 21.9	12.2	S01 51.1	11.0	57.3	62	///	///	00 58	23 08	23 22	23 38	23 59	
06	268 30.5	N21 29.0	18 53.0	12.2	S01 40.1	11.0	57.4	60	///	///	01 49	23 08	23 25	23 45	24 09	
S 07	283 30.5	N21 28.6	33 24.2	12.1	S01 29.1	11.0	57.4	N 58	///	///	02 19	23 22	23 09	23 28	23 50	24 17
08	298 30.4	N21 28.2	47 55.3	12.1	S01 18.1	11.0	57.4	56	00 53	02 41	03 37	23 10	23 31	23 55	24 24	
T 09	313 30.3	N21 27.8	62 26.4	12.1	S01 7.1	11.0	57.4	54	01 40	02 59	03 49	23 10	23 34	24 00	00 00	
U 10	328 30.3	N21 27.4	76 57.5	12.1	S00 56.1	11.1	57.5	52	02 08	03 14	03 59	23 11	23 36	24 04	00 04	
R 11	343 30.2	N21 27.0	91 28.6	12.0	S00 45.0	11.1	57.5	50	02 28	03 27	04 09	23 11	23 38	24 08	00 08	
D 12	358 30.2	N21 26.6	105 59.6	12.0	S00 33.9	11.1	57.5	45	03 06	03 53	04 29	23 13	23 43	24 16	00 16	
A 13	13 30.1	N21 26.2	120 30.6	12.0	S00 22.9	11.1	57.5	N 40	03 33	04 13	04 45	23 14	23 47	24 23	00 23	
Y 14	28 30.0	N21 25.8	135 1.6	11.9	S00 11.8	11.1	57.6	35	03 54	04 29	04 58	23 13	23 50	24 29	00 29	
15	43 30.0	N21 25.4	149 32.5	11.9	S00 0.7	11.1	57.6	30	04 10	04 43	05 10	23 15	23 54	24 35	00 35	
16	58 29.9	N21 25.0	164 3.5	11.9	N00 10.4	11.1	57.6	20	04 37	05 05	05 30	23 16	23 59	24 44	00 44	
17	73 29.9	N21 24.6	178 34.3	11.9	N00 21.6	11.1	57.7	10	04 57	05 24	05 47	23 17	24 04	00 04	00 52	
18	88 29.8	N21 24.1	193 5.2	11.8	N00 32.7	11.1	57.7	0	05 14	05 40	06 02	23 19	24 08	00 08	01 00	
19	103 29.7	N21 23.7	207 36.0	11.8	N00 43.8	11.1	57.7	S 10	05 30	05 56	06 18	23 20	24 13	00 13	01 08	
20	118 29.7	N21 23.3	222 6.8	11.8	N00 55.0	11.2	57.7	20	05 44	06 11	06 35	23 21	24 17	00 17	01 16	
21	133 29.6	N21 22.9	236 37.6	11.7	N01 6.1	11.2	57.8	30	05 59	06 28	06 54	23 22	24 23	00 23	01 26	
22	148 29.6	N21 22.5	251 8.3	11.7	N01 17.3	11.2	57.8	35	06 06	06 37	07 05	23 23	24 26	00 26	01 31	
23	163 29.5	N21 22.1	265 39.0	11.7	N01 28.4	11.2	57.8	40	06 14	06 48	07 18	23 24	24 30	00 30	01 37	
16 00	178 29.4	N21 21.7	280 9.6	11.6	N01 39.6	11.2	57.9	45	06 23	07 00	07 32	23 25	24 34	00 34	01 45	
01	193 29.4	N21 21.3	294 40.3	11.6	N01 50.8	11.2	57.9	S 50	06 33	07 14	07 51	23 27	24 39	00 39	01 54	
02	208 29.3	N21 20.9	309 10.8	11.5	N02 1.9	11.2	57.9	52	06 38	07 20	07 59	23 27	24 42	00 42	01 58	
03	223 29.3	N21 20.5	323 41.4	11.5	N02 13.1	11.2	57.9	54	06 42	07 27	08 09	23 28	24 44	00 44	02 03	
04	238 29.2	N21 20.1	338 11.9	11.5	N02 24.3	11.2	58.0	56	06 47	07 35	08 20	23 29	24 47	00 47	02 08	
05	253 29.2	N21 19.7	352 42.4	11.4	N02 35.4	11.2	58.0	58	06 53	07 44	08 32	23 29	24 50	00 50	02 13	
06	268 29.1	N21 19.2	7 12.8	11.4	N02 46.6	11.2	58.0	60	06 59	07 53	08 46	23 30	24 54	00 54	02 20	
S 07	283 29.0	N21 18.8	21 43.2	11.3	N02 57.8	11.2	58.1									
08	298 29.0	N21 18.4	36 13.5	11.3	N03 8.9	11.1	58.1	Lat.	Sunset	Twilight			Moonset			
09	313 28.9	N21 18.0	50 43.8	11.3	N03 20.1	11.1	58.1			Civil	Naut.	15	16	17	18	
10	328 28.9	N21 17.6	65 14.1	11.2	N03 31.2	11.1	58.1	°	h m	h m	h m	h m	h m	h m	h m	
11	343 28.8	N21 17.2	79 44.3	11.2	N03 42.3	11.1	58.2	N 72	000	000	000	10 42	12 32	14 27	16 30	
D 12	358 28.8	N21 16.8	94 14.4	11.1	N03 53.4	11.1	58.2	N 70	000	000	000	10 43	12 26	14 13	16 05	
A 13	13 28.7	N21 16.3	108 44.5	11.1	N04 4.6	11.1	58.2	68	000	000	000	10 44	12 22	14 02	15 47	
14	28 28.6	N21 15.9	123 14.6	11.0	N04 15.7	11.1	58.3	66	22 28	///	///	10 45	12 18	13 53	15 32	
15	43 28.6	N21 15.5	137 44.6	11.0	N04 26.8	11.1	58.3	64	21 51	///	///	10 46	12 15	13 46	15 19	
16	58 28.5	N21 15.1	152 14.6	10.9	N04 37.8	11.1	58.3	62	21 25	23 08	///	10 47	12 12	13 40	15 09	
17	73 28.5	N21 14.7	166 44.5	10.9	N04 48.9	11.1	58.3	60	21 05	22 21	///	10 47	12 09	13 34	15 00	
18	88 28.4	N21 14.2	181 14.4	10.8	N05 0.0	11.0	58.4	N 58	20 49	21 52	///	10 48	12 07	13 29	14 53	
19	103 28.4	N21 13.8	195 44.2	10.8	N05 11.0	11.0	58.4	56	20 35	21 30	23 14	10 48	12 05	13 25	14 46	
20	118 28.3	N21 13.4	210 14.0	10.7	N05 22.0	11.0	58.4	54	20 23	21 12	22 30	10 49	12 04	13 21	14 40	
21	133 28.3	N21 13.0	224 43.7	10.7	N05 33.0	11.0	58.5	52	20 12	20 57	22 03	10 49	12 02	13 18	14 34	
22	148 28.2	N21 12.6	239 13.4	10.6	N05 44.0	11.0	58.5	50	20 03	20 44	21 42	10 49	12 01	13 14	14 29	
23	163 28.1	N21 12.1	253 43.0	10.6	N05 54.9	10.9	58.5	45	19 43	20 19	21 05	10 50	11 58	13 07	14 19	
17 00	178 28.1	N21 11.7	268 12.6	10.5	N06 5.9	10.9	58.5	N 40	19 27	19 59	20 38	10 50	11 55	13 02	14 10	
01	193 28.0	N21 11.3	282 42.1	10.5	N06 16.8	10.9	58.6	35	19 14	19 43	20 18	10 51	11 53	12 57	14 03	
02	208 28.0	N21 10.9	297 11.6	10.4	N06 27.7	10.9	58.6	30	19 02	19 29	20 01	10 51	11 51	12 53	13 56	
03	223 27.9	N21 10.4	311 41.0	10.3	N06 38.6	10.8	58.6	20	18 42	19 07	19 35	10 52	11 48	12 45	13 45	
04	238 27.9	N21 10.0	326 10.3	10.3	N06 49.4	10.8	58.7	10	18 25	18 48	19 15	10 53	11 45	12 38	13 35	
05	253 27.8	N21 9.6	340 39.6	10.2	N07 0.2	10.8	58.7	0	18 10	18 32	18 58	10 53	11 42	12 32	13 25	
S 06	268 27.8	N21 9.2	355 8.8	10.2	N07 11.0	10.8	58.7	S 10	17 54	18 17	18 42	10 54	11 39	12 26	13 16	
07	283 27.7	N21 8.7	9 38.0	10.1	N07 21.8	10.7	58.7	20	17 37	18 01	18 28	10 54	11 36	12 20	13 06	
08	298 27.7	N21 8.3	24 7.1	10.0	N07 32.5	10.7	58.8	30	17 18	17 44	18 14	10 55	11 33	12 12	12 55	
09	313 27.6	N21 7.9	38 36.1	10.0	N07 43.2	10.7	58.8	35	17 07	17 35	18 06	10 55	11 31	12 08	12 49	
10	328 27.6	N21 7.4	53 5.1	9.9	N07 53.8	10.6	58.8	40	16 55	17 25	17 58	10 56	11 29	12 03	12 41	
11	343 27.5	N21 7.0	67 34.0	9.9	N08 4.5	10.6	58.9	45	16 40	17 13	17 49	10 56	11 26	11 58	12 33	
D 12	358 27.5	N21 6.6	82 2.9	9.8	N08 15.1	10.6	58.9	S 50	16 22	16 59	17 39	10 57	11 23	11 51	12 22	
13	13 27.4	N21 6.2	96 31.6	9.7	N08 25.6	10.5	58.9	52	16 13	16 53	17 35	10 57	11 21	11 48	12 18	
14	28 27.4	N21 5.7	111 0.4	9.7	N08 36.6	10.5	59.0	54	16 04	16 46	17 30	10 57	11 20	11 44	12 12	
15	43 27.3	N21 5.3	125 29.0	9.6	N08 46.6	10.4	59.0	56	15 53	16 38	17 25	10 58	11 18	11 41	12 07	
16	58 27.3	N21 4.9	139 57.6	9.5	N08 57.1	10.4	59.0	58	15 41	16 29	17 20	10 58	11 16	11 37	12 00	
17	73 27.2	N21 4.4	154 26.2	9.5	N09 7.5											

## 3.2 천측을 이용한 방위산출

### 3.2.1 방위산출 구성요소

방위환은 선박의 자이로 리피터상에 장착되어 특정 물표나 천체의 방위를 측정할 수 있는 도구이다. 원양 항해에 종사하는 대부분의 선박에 장착되어 있으며, 오랜 시간 방위환을 사용하여 해상에서 방위를 구하는 방법은 항해의 가장 중요한 요소로 인식되어왔다.

Fig. 9는 Marine Data 社の 방위환 MD69BR을 나타낸 것으로 천문항법에서 진북을 구하기 위해서는 이러한 방위환을 이용하여 낮 동안에 태양을 관측하는 것이 보편적이다[21].



Fig. 9 Azimuth Circle

진북을 구하기 위해서는 현재의 시각, 자선의 위치, 그리고 측정하고자 하는 천체의 지위를 알아야 한다. 그러나 이 세 가지 요소를 정확히 파악하는 것은

흔들리는 선박의 상황에서 그리고 독립적인 선박의 운항 속에서 다소 어려움이 존재한다. 특히 관측자의 숙련도에 따라 이러한 측정치의 오차는 더욱 크게 될 가능성이 있다.

**현재의 시각:** 항해사는 정확한 측정 시각을 알아야 태양의 지위를 산출할 수 있다. 관측자가 태양을 바라보는 방위를 측정하는데, 이때의 천체의 지위를 알고 있다는 가정하에서 계산을 통해 진북을 계산할 수 있다. 또한 관측 이후에 이루어지는 모든 계산은 관측 당시의 정확한 시각을 알고 있다는 가정하에 이루어진다. 따라서 선박에서 관측 시각을 정확히 알아야 하는 것은 천문학항해에 있어 가장 중요한 요소이다.

선박은 경도선을 따라 지역 시각이 수시로 변화될 수 있으므로 현재의 정확한 세계시(Universal Time; UT)를 알아야 한다. UT를 정확히 알아야만 자선의 위치를 계산할 뿐만 아니라 천체의 지위를 정확히 산출할 수 있다.

천측력에서 천체좌표를 구하기 위해서는 초(")까지 정확히 측정된 그리니치 평시가 필요하다. 그러므로 천체 관측시에는 초(")까지의 정확성이 요구되는 시각 측정 방법이 있어야 한다. 선박에서는 이와 같은 목적을 위하여 시진의 (Chronometer) 또는 무전시보(Radio time signal)를 이용한다.

시진의는 정확한 시각을 측정하기 위하여 해상선박의 특수 사정에 알맞도록 제작된 시계로 Fig. 10에서 볼 수 있다. 특히 온도 변화에 따르는 금속의 수축·팽창과 태엽의 탄력 변화에 따르는 자동 조정 장치가 부착된다. 선박의 Rolling과 Pitching에 대비하여 항상 수평을 유지할 수 있도록 Gimbal ring을 장치하여 목재상자 안에 보관한다.

그밖에도 GPS를 이용하여 편리하게 시각을 산출할 수도 있고, 혹은 전자화된 시계를 이용하여 출항지에서 시각동기화를 통해 항해 중 편리하게 시각을 산출할 수도 있다.



Fig. 10 Chronometer

**자선의 위치:** 선박의 좌표는 GPS를 이용하여 구할 수 있다. 그러나 GPS의 동작이 원활하지 못할 경우 혹은 오동작할 경우에는 대략적인 선박의 위치를 가지고도 방위를 산출하는 것은 가능하다. 다음 절에서 여타한 오차의 환경에서도 산출한 방위의 정확성이 신뢰성을 확보할 수 있는 정도에 대하여 따로 논의하였다.

추측위치(Dead Reckoning; DR) 방법은 최초 이미 알고 있는 위치를 중심으로 선박의 운항 코스와 기준 시각 대비 경과한 거리를 면밀히 계산하여 현재의 위치를 파악하는 것이다. 이 방법의 장점은 기존의 선박 장비인 컴파스와 시계만으로도 쉽게 위치 파악이 가능하다는 점인데 반해, 단점은 너무나 분명하게 나

타난다. DR 방법은 시간이 경과하면서 위치의 오차가 급격히 커지게 되는데, 해상 상황에 따른 운항 코스의 정확도가 가지는 오차, 또한 선박의 대지속도 대비 선박의 속도가 일치하지 못하는 오차는 위치 산출에 있어 심각한 오차를 유발할 수 있다.

과거 천문항해는 Sextant를 이용하여 수평선 대비 천체의 고도를 측정하여 선박의 위치를 파악할 수 있었다. 이 방법은 현재에도 사용되고 있으며, 천문항법을 익힌 항해사는 시계를 이용하여 천체를 관측하던 정확한 시각을 파악하고, 그 해당 시각에 대한 천체의 지위를 천측력을 이용하여 산출한 뒤, 각종 보정 자료를 적용하여 해도 위에 위치선을 작도하여 위치를 구하는 방법이다. 관측자의 능력에 따라 위치의 정확도는 많은 차이를 나타내기도 하지만, GPS를 제외하면 현재까지 가장 정확한 위치의 산출 방식이다.

한편 연안 항해를 하고 있을 경우 지형지물을 이용하여 자선의 위치를 구할 수도 있다.

**천체의 지위:** 천측력을 이용하여 태양의 지위를 구하기 위해서는 국립해양조사원에서 발행하는 해당년도의 천측력을 이용하여야 한다. 태양의 지위는 1시간 간격으로 표시되어 있으며, 해당 시각의 분, 초에 해당하는 정확한 태양의 지위를 산출하기 위해서는 해당 시각의 전, 후 두 시간 간격의 태양 지위 변화를 따로 계산하여 구하여야 한다.

지구가 태양의 주위에 위치하면서 하루 1회 자전하므로, 1시간에 약  $15^\circ$ 의 시각 변경이 발생한다.

태양은 GHA가 하루  $360^\circ$  변화하는데 비해, Dec는 북회귀선과 남회귀선, 즉 북위와 남위의  $23.5^\circ$ 를 1년에 한번 넘나든다. 그러므로 하루의 변화량도 크지는 않은 수준이다. 이것은 태양의 GHA에 비하면 그 변화량이 아주 미미한 수준이라 할 수 있다.

### 3.2.2 진북과 선수방위

태양방위각표는 태양의 일출부터 일몰까지 관측자의 위도와 동명의 극으로부터 켜 태양의 방위를 10분 간격으로 나타내고 있다. 표의 방위각을 결정하는 인수는 위도, 적위 및 지방시이다. 이 책은 마그네틱컴파스의 자차와 자이로컴파스의 오차를 구하는데 필요한 제 요소를 제공하고 있다. 마그네틱컴파스의 편차를 해도에서 구한 뒤, 마그네틱컴파스로 측정된 관측방위를 계산하여 자차를 구할 수 있다. 자이로 오차는 태양을 관측한 방위와 표에서 구한 진방위의 차이로 구할 수 있다[22].

천측계산표에 의해 구해진 태양방위를 이용하여 선박의 headings 얼마인지 계산할 수 있다. 모든 컴퍼스는 선수방위를 기준으로 천체의 상대방위를 측정함과 동시에 진북을 기준으로 진방위를 측정할 수도 있다.

항해사는 이렇게 구해진 태양의 방위를 이용하여 다시 선수의 headings의 방위가 얼마인지 계산하여야 한다. 모든 컴퍼스는 선수의 방향을 기준으로 방위를 측정하므로 선박의 선수가 진북대비 얼마라는 것을 정확히 알아야 한다. 선박에서 측정되는 모든 방위는 선수대비의 값으로 측정된다. 따라서 선수의 방위값이 정확하지 않으면 이후 측정되는 모든 방위값은 그 신뢰도에 문제가 발생한다.

Fig. 11에서 보듯이 특정시간 및 위치에서 천측계산표를 이용하여 구해진 태양의 진북 대비 방위는 각  $a+b$ 를 의미한다. 이때 구해진 태양의 방위값을 반대로 감산하여 적용한다면 태양을 보는 방위에서 진북을 찾아낼 수 있게 된다. 즉, 태양의 방위에서  $-(a+b)$ 는 진북을 가리키게 된다.

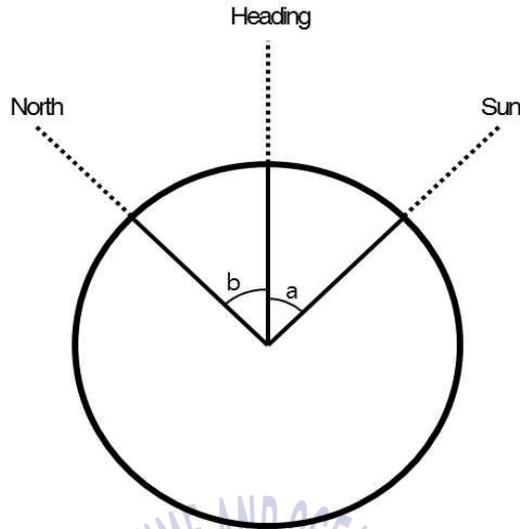


Fig. 11 Observation Example

방위환을 태양의 방향으로 조준하여 태양을 관측할 때 방위환의 방위는 선수 대비 방위  $a$ 를 나타낸다. 그러나 천측계산표에 의해 산출된 태양의 방위는  $a+b$ 가 된다. 따라서 선수의 진북대비 방위를 구하기 위해서는 태양의 진북대비 방위값( $a+b$ )에서 기계적인 태양의 방위환의 방위( $a$ )를 빼면 진북대비 선수의 방위를 구할 수 있다.

선박에서 컴퍼스를 사용하는 것은 진북을 기준으로 선박의 선수 방향인 헤딩을 알기 위함이 주된 목적이다. 그러나 선박이 운항 중, 정밀한 선수의 방위를 찾는 것은 결코 쉬운 작업이 아니다.

과거로부터 어려운 수학에 기반하여, 대양을 항해하는 선박의 항해사들은 태양이나 달, 그리고 각종 천체들을 관측하고 천측력 및 천측계산표 등을 이용하여 진북을 산출하였고, 이를 통해 방위를 정확히 찾아낼 수 있었다.

선박의 자이로 리피터 상에 장착되어 특정 물표나 천체의 방위를 측정할 수 있는 방위환을 활용하여 천체를 관찰하고 현재의 시각, 위치, 그리고 측정하고자 하는 천체의 방위가 선박을 기준으로 얼마인지를 정확히 알아야 한다.

태양의 방위를 구하기 위해 천측력을 이용할 경우, 우리나라에서는 국립해양조사원에서 발행하는 천측력을 이용하여 1시간 간격으로 표시되어 있는 지위를 구할 수 있다. 만일 해당 시각의 정확한 분, 초까지의 지위를 산출하기 위해서는 구하고자 하는 시각의 앞, 뒤 두 시간 간격 혹은 3시간 간격의 지위 값을 대상으로 보정하여 원하는 시각의 정한 지위를 구할 수 있다. 태양은 1시간에  $15^\circ$  의 GHA 변경이 되므로 값의 계산에 신중을 기하여야 한다.

Sight Reduction(천측계산표)는 천측력과 함께 사용되며 이미 주어진 삼각형의 2변과 그 끼인 각으로부터 제3변과 인접각을 구하는 데 사용된다. 항해삼각형의 모든 해법을 얻을 수 있도록 시차나 위치각의 수치를 표에서 구하여 6개 요소로 삼각계산을 완성하는 간단한 방법이 제시되어 있다. 모두 6권으로 구성되어 있는 천측계산표는 각 권이 위도  $15^\circ$  간격으로 구성되어 있으나, 실제로는  $16^\circ$  로 되어있어  $8^\circ$  씩 전, 후반 2개의 위도대로 나누어서 배열되어 있다 [23]-[28].

천측계산표를 이용한다면 자신의 위치에 대해 지위를 알고 있을 때, 진북 대비 방위를 구할 수 있는데, 선박에서 측정한 태양의 방위가 진북 대비 얼마라는 것을 알 수 있다. 그러나 이 표는 선박의 위치를 도 단위로만 산출할 수 있으므로 선박의 정확한 위치에 대한 태양 방위를 산출하기 위해서는 보간표를 이용하여 별도의 계산이 추가로 이루어져야 한다.

### 3.2.3 방위산출 정확성 요소

진북을 산출하기 위해서는 정확히 두 기점, 즉 선박의 위치와 천체의 지위가 정확해야 한다. 그러나 어떠한 이유에서건 이 두 기점의 산출이 항상 정확할 수는 없다.

선박의 위치는 그 위치를 구하는 관측자의 능력에 따라 달라진다. GPS를 이용하여 선박의 위치를 구하여도 그 구하여진 위치에는 오차가 포함되어 있다. 그러므로 천문항법을 이용하여 구한 선박의 위치나 혹은 DR 등을 이용하여 산출한 선박의 위치는 더욱더 심각한 오차를 내포하고 있음을 짐작할 수 있다.

한편, 천체의 지위는 천측력을 이용하면 쉽게 구할 수 있으나, 시간 단위로 표시되는 지위에 대하여 정확히 필요한 시각의 지위를 구하는 계산은 그 과정상 오차를 유발할 수 있으며, 특히 시각의 정확성이 담보되지 못하면 해당 천체의 지위는 오차를 내포하게 된다.

즉 선박의 위치는 관측자의 능력에 따른 오차를 내포하는 반면, 천체의 지위는 관측 시각의 정확성 및 시각 대비 지위의 보정에 따른 오차가 포함되어 있음을 알 수 있다.

그러나 상기에 언급한 선박의 위치와 천체의 지위를 오차 없이 구할 수 있다는 것은 사실상 불가능하다. 문제는 이러한 오차를 얼마나 적게 줄일 수 있는가 하는 문제인데, 이에 앞서 본 절에서는 이 두 가지의 위치 오차가 방위산출에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 분석을 하였다.

선박의 위치는 위도와 경도로, 천체의 지위는 GHA와 Dec로 표시된다. 위도와 경도는 오차가 내포될 경우, 가정위치를 기준으로 진위치의 오차는 랜덤하게 발생하므로 반드시 위도 성분 혹은 경도 성분에 따른 진위치의 특정한 영향을 논하기 어렵다. 그러나 시간을 잘못 측정하여 오차가 발생할 경우, 천체의 지위는 Dec 성분에 대해 절대적으로 GHA의 성분 오차가 크다는 것을 알 수 있다.

태양은 북회귀선과 남회귀선 사이를 1년을 기준으로 1회씩 지난다. 따라서  $23.5^\circ$  에서  $-23.5^\circ$  총  $47^\circ$  의 변화량을 1년에 2회, 변화하므로 하지에서 동지 혹은 춘분에서 추분 어떤 기준이 되었든, Dec의 변화량은 아래와 같이 시간당 1분 미만의 변화량을 가진다.

$$47^\circ / (365/2)\text{일} / 24\text{시간} = 38.6''$$

이에 비해 지구의 자전주기는 약 1일이므로, 시간성분인 태양의 GHA는

$$360^\circ / 24\text{시간} = 15^\circ$$

약  $15^\circ$  의 변화량을 보인다.

따라서, 천측을 통한 방위의 산출을 위해서 태양의 Dec 성분의 변화보다는

GHA 성분의 변화가 방위의 측정에 미치는 영향이 매우 크다는 것을 의미한다. 또한 GHA는 시간에 대한 Factor이므로 시각의 정밀성이 함께 요구됨을 알 수 있다.

그러나 운항 중, 태양을 관측하여 천측력을 찾아 태양의 지위를 파악하고, 이를 통해 계산하여 자선의 위치를 기반으로 방위를 산출하는데 까지는 많은 시간이 걸리는 것이 불가피하다. 편리한 전자계산기를 사용하더라도, 해상의 환경에서 일련의 작업을 진행하기 위한 시간적인 오차는 필연 발생하게 된다.

Table 3은 Fig. 12와 대응하는 것으로, 시각의 측정 오차에 따른 방위 오차를 예상한 것으로 최대 1시간의 시간 오차가 발생하였을 때, 태양의 지위와 선박의 위치 간격이 각각  $10^\circ$  일 때와  $90^\circ$  일 때 방위의 오차를 계산한 것이다.

Table 3 Azimuth Error Range

	GHA( $15^\circ$ )	Dec.( $38.6''$ )
$90^\circ$	$15^\circ$	$38.6''$
$10^\circ$	$97^\circ 28' 14''$	$3' 42.5''$

이때 태양의 지위와 선박의 위치 범위 선정에 있어,  $90^\circ$  이상의 값은 선박에서 태양의 관측이 불가능하기 때문에 그 한계값으로 선정한 것이며, 우리나라의 내륙에서는 중앙이 대부분  $37^\circ$  근방임을 감안할 때 지위의 Dec 값이  $10^\circ$  이하의 값은 존재하지 않거나와 연안 해상에서는 거의 태양이 남중하는 상황이므로 그 이하 값을 선정할 이유가 없다.

Fig. 12 (a)는 GHA가  $15^\circ$  가 차이 날 때, 태양의 지위와 선박의 각거리가  $90^\circ$  일 때를, Fig. 12 (b)는 Dec가  $38.6''$  가 차이 날 때, 태양의 지위와 선박의 거리가  $90^\circ$  일 때를, Fig. 12 (c)는 GHA가  $15^\circ$  차이 날 때, 태양의 지위와 선박의 각거리가  $10^\circ$  일 때를, Fig. 12 (d)는 Dec가  $38.6''$  가 차이 날 때, 태양의 지

위와 선박의 각거리가 10° 일 때를 각각 도식화한 것이다.

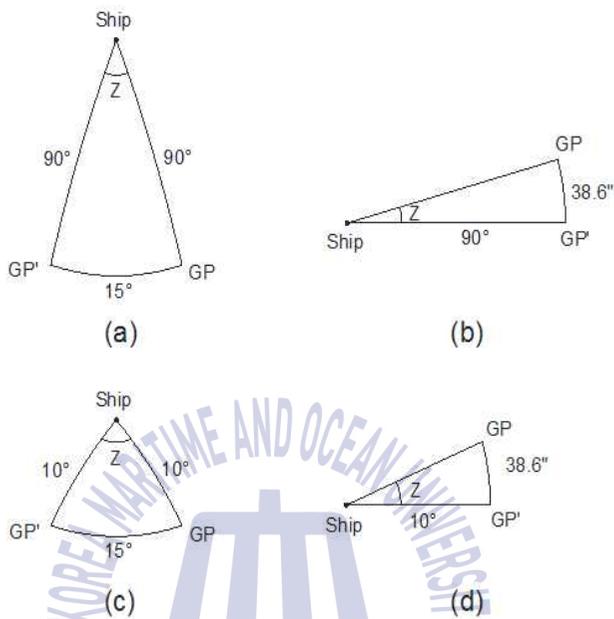


Fig. 12 Azimuth Error by GP & Angle Distance

이때,

$$a) z = \text{acos}\left(\frac{\cos(15^\circ) - \cos(90^\circ)\cos(90^\circ)}{\sin(90^\circ)\sin(90^\circ)}\right) = 15^\circ \quad (32)$$

$$b) z = \text{acos}\left(\frac{\cos(38.6'') - \cos(90^\circ)\cos(90^\circ)}{\sin(90^\circ)\sin(90^\circ)}\right) = 38.6''$$

$$c) z = \text{acos}\left(\frac{\cos(15^\circ) - \cos(10^\circ)\cos(10^\circ)}{\sin(10^\circ)\sin(10^\circ)}\right) = 97^\circ 28' 14''$$

$$d) z = \text{acos}\left(\frac{\cos(38.6'') - \cos(10^\circ)\cos(10^\circ)}{\sin(10^\circ)\sin(10^\circ)}\right) = 3' 42.5''$$

임을 알 수 있다.

상기 식의 풀이과정에서 보듯이 지위의 Dec 성분의 1시간 오차에 대해서는 태양의 지위와 선박의 위치 각거리가 멀면 1분 이내, 가까운 경우에도 대략 4분 이내로 나타나므로, 이를 Degree로 표현하면,  $0.1^\circ$  이하의 방위 오차가 나타나므로 사실상 무시할 만큼 적은 오차가 발생한다는 것을 알 수 있다.

그러나 GHA의 경우, 태양의 지위와 선박의 위치가 최대 거리에 있다고 하여도  $15^\circ$  의 큰 오차가 발생할 뿐만 아니라,  $10^\circ$  의 근거리에서는  $90^\circ$  이상의 방위오차가 발생함을 알 수 있다. 이는 시간의 오차가 1분이 발생할 경우라고 해도, 약  $2^\circ$  가까운 오차가 발생하는 것으로, 천측을 이용한 방위의 측정에 치명적인 오차가 개입되는 것이라 할 수 있다.

이상의 계산을 통해 유추할 수 있는 사실은 아래의 2가지와 같다.

첫째, 시각의 오차는 지위의 GHA 성분에 지대한 영향을 미치므로 시각의 정확성은 방위산출을 위한 가장 중요한 오차의 감소에 필요한 요소라는 점이다. 상기 식 (a)와 (c)에서 확인할 수 있는 것과 같이 지위의 GHA 성분은 그 오차 자체가 방위의 오차에 그대로 영향을 미친다는 것이다. 특히 태양의 고도가 높으면 높을수록 오히려 그 방위의 오차는 더욱 증대되는데, 1시간의 간격은 각거리  $90^\circ$  에서는 GHA의 오차가  $15^\circ$  에 불과하지만, 고도가 높아 선박의 위치와 천체의 지위 사이의 각거리가  $10^\circ$  밖에 되지 않을 때에는  $90^\circ$  가 넘는 오차를 발생시키는 것을 알 수 있었다. 따라서 정확한 시계로 관측시의 시간을 측정한다는 것은 천문항법을 통해 방위를 측정하는 방법 중에 가장 우선되어야 할 사항이다.

둘째, 선박의 위치가 천체의 진위와 멀면 멀수록 오차가 방위에 미치는 영향이 적다는 것이다. 상기 식(a)와 식(c) 그리고 식(b)와 식(d)의 차이는 선박의 위치와 지위와의 거리가 다르다는 것이다. 더 정확하게는 식(a) 대비 식(c)가 선박의 위치와 천체의 지위가 더 가깝다는 것이고, 식(b) 대비 식(d)가 더 가깝다는 것이다.

일반적으로 천문항법에서 Sextant를 이용하여 천체의 고도를 측정할 경우, 빛의 굴절 때문에 저고도에서 천체를 천체 관측하는 것을 권장하지 않는다. 극단

적으로 천정에 천체의 지위가 존재할 경우 빛의 굴절은 '0'가 되며, 선박의 위치는 천체의 지위와 동일하게 된다.

그러나 방위를 측정할 경우에는 앞서 거론한 바와 같이 천체의 고도가 높으면 높을수록 오차가 커질 수 있다는 것을 계산을 통해 알 수 있었다. 따라서 천체의 고도가 높으면 선박의 위치를 산출하기에 용이하지만, 천체를 이용하여 방위를 측정하기 위해서는 천체의 고도가 낮을수록 좋다는 것을 알 수 있었다. 따라서 천체의 높은 고도를 측정한 값은 선박의 위치를 산출하는데 사용하면 좋고, 저고도의 천체를 관측할 경우에는 천체의 방위를 산출하는 용도로 사용하는 것이 좋다.

상기 내용을 토대로 실질적인 현장에서 발생할 수 있는 상황을 가정해 보면, 30° 이내의 고도에 존재하는 태양을 시각 오차 10초 내외로 1NM의 오차를 내포한 관측자의 방위 오차를 정리하여 본다면 다음과 같다.

1시간에 15° GHA 변경에 대해 10초의 시각오차는,

$$15^\circ / 3600'' * 10\text{sec} = 150''$$

의 오차가 발생한다는 것이고, 1NM의 오차는 적도 기준으로 1'의 오차가 있음을 뜻한다.

즉 10초의 시간 오차는 각도로는 150'' (2.5')의 오차를 가지게 되며, 1NM의 위치오차는 1'의 오차를 가진다는 것을 알 수 있으므로 총 3.5'의 오차가 발생한 것으로 이것을 degree로 나타내면 약 0.058°가 된다. 상기 식(a)에 대입하여 태양의 고도 30° (각거리는 60°)의 영향을 최대라고 가정할 때의 값을 구하면,

$$z = \arccos\left(\frac{\cos(0.0583^\circ) - \cos(60^\circ)\cos(60^\circ)}{\sin(60^\circ)\sin(60^\circ)}\right) = 0.067^\circ \quad (33)$$

의 최대 오차 성분을 가지는 것을 알 수 있다.

만일 여기서 각각 요소별 오차를 조금씩 줄일 수 있다면 최종 오차의 범위는

어떻게 최대값으로 산출될 수 있는지를 아래의 Table 4에 도시하였다.

Table 4에서, 첫째 가로줄은 선박의 위치에 따른 오차의 감소를 표현한 것이다. 각각 괄호 안의 값은 호도법에 의한 표시이며, 그리고 첫째 세로 줄은 시각의 오차가 줄어드는 것을 표시한 것이며 각각 괄호 안의 값은 역시 호도법에 의한 표시이다. 나머지 칸의 괄호 안은 선박의 위치 오차와 발생한 시각의 오차를 합한 값을 표현하였으며, 그 괄호 값 위에 굵은 글씨로 표시된 것은 이때 발생한 방위의 오차를 표현한 것이다.

한편 (a)보다는 (b)가 10° 작은 고도에서 태양을 관측한 것을, (c)에서는 또 10° 낮은 고도에서 측정한 결과를 도식하였다. 이 표에서 알 수 있는 것은 선박의 위치보다는 시각의 정확성에 더욱 민감하게 오차가 변화한다는 것을 나타내는 것이며, 선박의 위치 오차가 같다고 한다면 낮은 고도에서 측정할수록 더욱 정밀한 방위의 측정이 가능할 것임을 예측할 수 있다.

Table 4 Error Analysis by Altitude

(a) Altitude 30°

	1NM (0.0167°)	0.5NM (0.0083°)	0.3NM (0.005°)	0.1NM (0.0017°)
10초 (0.0417°)	<b>0.0674°</b> (0.0584°)	<b>0.0577°</b> (0.05°)	<b>0.0539°</b> (0.0467°)	<b>0.0501°</b> (0.0434°)
5초 (0.0208°)	<b>0.0433°</b> (0.0375°)	<b>0.0336°</b> (0.0291°)	<b>0.0298°</b> (0.0258°)	<b>0.026°</b> (0.0225°)
3초 (0.0139°)	<b>0.0353°</b> (0.0306°)	<b>0.0256°</b> (0.0222°)	<b>0.0218°</b> (0.0189°)	<b>0.018°</b> (0.0156°)
1초 (0.0042°)	<b>0.0241°</b> (0.0209°)	<b>0.0144°</b> (0.0125°)	<b>0.0106°</b> (0.0092°)	<b>0.0068°</b> (0.0059°)

(b) Altitude 20°

	1NM (0.0167°)	0.5NM (0.0083°)	0.3NM (0.005°)	0.1NM (0.0017°)
10초 (0.0417°)	<b>0.0621°</b> (0.0584°)	<b>0.0532°</b> (0.05°)	<b>0.050°</b> (0.0467°)	<b>0.0462°</b> (0.0434°)
5초 (0.0208°)	<b>0.0399°</b> (0.0375°)	<b>0.031°</b> (0.0291°)	<b>0.0275°</b> (0.0258°)	<b>0.0239°</b> (0.0225°)
3초 (0.0139°)	<b>0.0326°</b> (0.0306°)	<b>0.0236°</b> (0.0222°)	<b>0.0201°</b> (0.0189°)	<b>0.0166°</b> (0.0156°)
1초 (0.0042°)	<b>0.0222°</b> (0.0209°)	<b>0.0133°</b> (0.0125°)	<b>0.0098°</b> (0.0092°)	<b>0.0063°</b> (0.0059°)

(c) Altitude 10°

	1NM (0.0167°)	0.5NM (0.0083°)	0.3NM (0.005°)	0.1NM (0.0017°)
10초 (0.0417°)	<b>0.0593°</b> (0.0584°)	<b>0.0508°</b> (0.05°)	<b>0.0474°</b> (0.0467°)	<b>0.0441°</b> (0.0434°)
5초 (0.0208°)	<b>0.0381°</b> (0.0375°)	<b>0.0295°</b> (0.0291°)	<b>0.0262°</b> (0.0258°)	<b>0.0228°</b> (0.0225°)
3초 (0.0139°)	<b>0.0311°</b> (0.0306°)	<b>0.0225°</b> (0.0222°)	<b>0.0192°</b> (0.0189°)	<b>0.0158°</b> (0.0156°)
1초 (0.0042°)	<b>0.0212°</b> (0.0209°)	<b>0.0127°</b> (0.0125°)	<b>0.0093°</b> (0.0092°)	<b>0.006°</b> (0.0059°)

전체적인 분석에 의하면, 관측자의 숙련도에 따른 오차가 아직 반영되지 않은 상태에서, 선박의 위치 오차가 약 1NM 정도이고, 시각 오차도 10초 정도 있다는 가정하에, 30° 정도의 고도를 가지는 태양을 측정하면 최대 0.06° 정도의 오차를 가지는 방위 측정이 이루어질 것이라고 추측할 수 있다. 특히 시간적인 지체를 없앤다면 약 0.02° 이내의 범위에서 오차를 줄일 수 있다는 가정이 성립되므로, 본 논문에서는 천체의 위치를 관측하는 시점에서의 시각 정보를 직

접 시스템에서 입력받을 수 있도록 시스템 클럭의 중요성에 많은 노력을 집중하였다. 즉, 시각에 대한 정확성이 보장된다면, 관측자의 측정 및 기타 기기 등의 오차 합산이 일정 범주를 벗어나지 않는 이상, 모든 측정 관측 데이터는 더욱 정밀한 방위의 측정이 충분히 가능할 것임을 예측할 수 있었다.

한편, 천측을 통한 오차의 발생을 가정한다면, 첫째, 선박에 장착된 시진의 혹은 선박 시계의 GMT 대비 정확도가 얼마나 정확한가? 둘째, 관측자의 관측 시간과 기록 사이의 오차, 셋째, 관측 장비의 사용상의 오차, 넷째, 관측 장비의 기계적 오차, 다섯째, 계산상의 오류 등 각각의 오차가 개입될 여지가 수동의 계산과정에서 매우 많다는 단점을 지적할 수 있다. 즉 이러한 오차의 개입이 Dec의 방향에 영향을 미친다면 방위의 측정에는 문제가 없다고 하더라도, 이러한 오류가 GHA의 방향에 대한 오류로 작용할 경우 좋지 못한 결과를 유출할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다.

따라서, 천측을 통한 방위의 산출을 위해서는 정확한 GMT 시각의 공급과 기계의 동작, 그리고 무엇보다 시간 지연이 없는 방위산출 계산기가 함께 존재해야 한다는 것이다.

본 논문에서는 이러한 문제의 해결을 위해 임베디드화한 천측장비를 구현하여 이를 측정하였다. 즉 천측력을 이용하는데 있어 시간적인 오차가 발생한다면 방위 오차가 반드시 발생하므로, 본 논문에서는 시간적인 오차를 최소화하기 위해 태양 관측 시 최단 시간 내에 관측자의 지위와 방위를 산출할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

### 3.2.4 항해삼각형 방위산출 알고리즘

방위를 산출하는데 있어 Napier's 삼각함수에 대수학을 이용하는 시진방위각법을 이용할 수도 있다. 시진방위각법은 천체의 자오선각, 적위 및 관측자의 위도 3가지 요소를 사용하여 천체의 진방위를 산출하는 것으로 항해삼각형 방식에 비해 수식이 복잡하고 전산화하는데 여러가지 애로가 있었다. 따라서 본 논문에서는 항해삼각형을 이용한 방위산출 알고리즘을 제시하였다[29].

앞서 지구상 좌표와 천구상 좌표의 계산을 위해 좌표의 동기가 필요함을 기술한 바 있다. 여기서는 천구상의 좌표로 모든 값을 계산한다. 따라서 Fig. 13에서 각  $Z_n$  방위를 구하기 위해서는 경도 성분을 천구좌표상의 성분으로 변경하여야 한다.

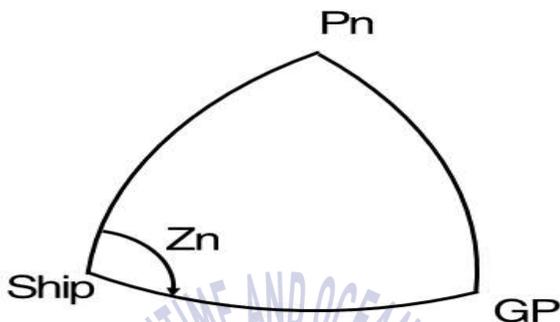


Fig. 13 Sunrise at the ship's position

따라서 태양의 지위와 선박의 경도 성분이 이루는 지방 시각 LHA는

$$LHA = GHA + \lambda \quad (\lambda : E \text{ 일 때}) \quad (34)$$

$$LHA = GHA - \lambda \quad (\lambda : W \text{ 일 때})$$

이를 토대로 자오선 각  $t$ 는

$$\text{if } (LHA < 180^\circ) \quad t(W) = LHA$$

$$\text{else } t(E) = 360 - LHA$$

방위  $Z_n$ 을 구하기 위해 요구되는 선박과 태양의 지위간의 거리를  $dist$ 라 하고 이를 구하기 위해,

$$\cos(dist) = \cos(90 - Lat)\cos(90 - dec) + \sin(90 - Lat)\cos(dec)\cos(t) \quad (35)$$

$$\Rightarrow \cos(dist) = \sin(Lat)\sin(dec) + \cos(Lat)\cos(dec)\cos(t)$$

으로 계산된다.

이렇게 구해진  $dist$ 를 이용하여 선박에서 바라보는 태양의 방위를 구하면,

$$\cos(Z_n) = \frac{\cos(90 - dec) - \cos(90 - Lat)\cos(dist)}{\sin(90 - Lat)\sin(dist)} \quad (36)$$

$$\Rightarrow \cos(Z_n) = \frac{\sin(dec) - \sin(Lat)\cos(dist)}{\cos(Lat)\sin(dist)}$$

으로 계산된다.

식(35)에서  $t$ 는 코사인의 인수이므로 코사인의 특성상  $-90^\circ$  에서  $90^\circ$  까지의 값은 양의 값으로 표현된다. 선박의 위치와 지위의 위치간격  $dist$ 는 단지 거리만 표시할 뿐, 두 지점 간의 전후 비교가 불가하다. 즉, 선박에서 오전에 태양을 관측한 것인지, 오후에 태양을 관측한 것인지 알 수 없고, 단지 두 지점에 대한 스칼라 값이 된다는 것을 알 수 있다.

또한 식(36)에서 방위  $Z_n$  역시 코사인의 인수이므로  $180^\circ$  이상의 값을 표현하지 못한다. 즉, 선박을 기준으로 태양이 저물고 있는 오후를 나타낼 경우, 태양은 이미 관측자의 자오선을 앞질러 있고,  $Z_n$ 은  $180^\circ$  이상의 값으로 표현되어야 한다.

따라서 식 (36)은 GP와 선박의 순서가 바뀌는 경우에 한하여,

$$Z_n = 360 - Z_n \quad (37)$$

으로 계산된다[29].

### 3.3 One Body Fix를 이용한 위치 산출

상기에서 언급한 바와 같이 자선의 위치를 알기 위해서는 전파항법, 혹은 DR, 혹은 Sextant를 이용한 천문항법이 있음을 언급한 바 있다. GPS의 전파 교란과 고장 등의 경우에 자선의 위치를 쉽게 측정하기 어려울 때, 본 논문에서는 과거 천문항법에서 사용하던 One Body Fix 방법을 이용하여 간략히 위치를 구할 것을 제안하고 있다. 본 논문에서 제안하는 방위산출 방법이 정밀하므로 단일 천체를 이용하더라도 이전의 Two body Fix 방법에 비하여 비교되지 않을

만큼의 빠른 위치의 산출이 가능하다. 천체의 방위를 이용한 One Body Fix 방법은 다음과 같다.

Fig. 14에서와 같이, 임의의 시각, 임의의 천체에 대하여 자선에서 측정한 방위를 구할 수 있다면, 동시에 해당 천체의 고도를 측정하여 선박의 위치를 구할 수 있다.

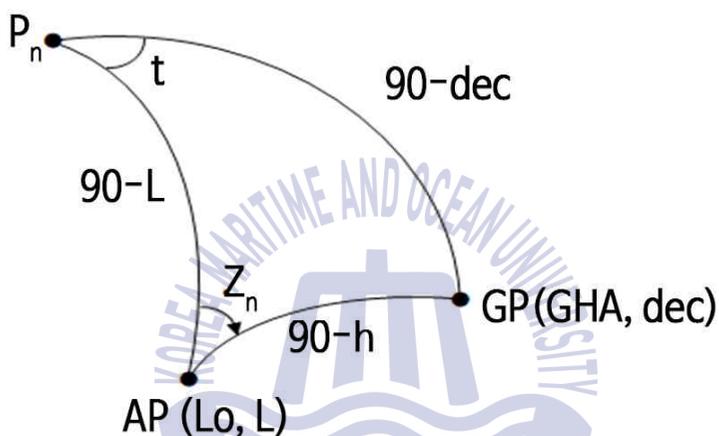


Fig. 14 Ship Position through Navigational Triangle

GP와 AP의 위치에 따라 Fig. 14는 오전에 태양이 뜨고 있는 상황을 나타내고 있다. 이와 반대로 GP와 AP의 위치가 시간의 경과에 따라 반대가 되면 오후의 해가 지는 상황을 나타낸다.

구면삼각형 사인법칙에 의해

$$\sin(90 - dec) / \sin(z) = \sin(90 - h) / \sin(t)$$

$$\Rightarrow \cos(dec) / \sin(z) = \cos(h) / \sin(t)$$

$$\Rightarrow \sin(t) = \sin(z) * \cos(h) / \cos(dec)$$

$$\therefore t = \arcsin(\sin(z) * \cos(h) / \cos(dec)) \quad (38)$$

상기 식 (38)을 통해  $t$  를 구함으로서 경도 성분은 명확히 구할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 경도를 구하면,

$$Lo = GHA + t$$

가 되며,  $t(W)$  는 (+) 값이고,  $t(E)$  는 (-) 값이 된다.

상기 식 (38)에서 알 수 있듯이 부호에 영향을 미칠 수 있는 Factor는  $z$  뿐이다. 사인값의 특성상  $180^\circ$  이상의 값을 가지면  $t$ 는 (-)부호를 가진다.

위도  $L$ 을 구하기 위해, 구하고자 하는 위도 성분은 적도를 기준으로 상측은 (+)부호를 가지며, 남반구는 (-)의 부호를 가지는 값으로 표현되어야 한다. 따라서  $L$ 은 사인에 대한 연산으로 해석되어야 한다.

이를 위해 구면 코사인 법칙에 의해

각  $z$ 를 이용하여,

$$\cos(90 - dec) = \cos(90 - h)\cos(90 - L) + \sin(90 - h)\sin(90 - L)\cos(z)$$

$$\Rightarrow \sin(dec) = \sin(L)\sin(h) + \cos(L)\cos(h)\cos(z)$$

$$\Rightarrow \cos(L)\cos(h)\cos(z) = \sin(dec) - \sin(L)\sin(h)$$

$$\therefore \cos(L) = \frac{\sin(dec) - \sin(L)\sin(h)}{\cos(h)\cos(z)} \quad (39)$$

이에 각  $t$ 를 이용하여,

$$\cos(90 - h) = \cos(90 - L)\cos(90 - dec) + \sin(90 - L)\sin(90 - dec)\cos(t) \quad (40)$$

$$\Rightarrow \sin(h) = \sin(L)\sin(dec) + \cos(L)\cos(dec)\cos(t)$$

여기에 식(39)의  $\cos(L)$ 을 대입하면,

$$\Rightarrow \sin(h) = \frac{\sin(L)\sin(dec) + \sin(dec)\cos(dec)\cos(t) - \sin(L)\sin(h)\cos(dec)\cos(t)}{\cos(h)\cos(z)}$$

$$\Rightarrow \sin(L)\sin(dec) = \frac{\sin(h)\cos(h)\cos(z) - \sin(dec)\cos(dec)\cos(t) + \sin(L)\sin(h)\cos(dec)\cos(t)}{\cos(h)\cos(z)}$$

$$\Rightarrow \sin(L)\sin(dec)\cos(h)\cos(z) = \sin(h)\cos(h)\cos(z) - \sin(dec)\cos(dec)\cos(t) + \sin(L)\sin(h)\cos(dec)\cos(t)$$

$$\Rightarrow \sin(L)(\sin(dec)\cos(h)\cos(z) - \sin(h)\cos(dec)\cos(t)) = \sin(h)\cos(h)\cos(z) - \sin(dec)\cos(dec)\cos(t)$$

$$\Rightarrow \sin(L) = \frac{\sin(h)\cos(h)\cos(z) - \sin(dec)\cos(dec)\cos(t)}{\sin(dec)\cos(h)\cos(z) - \sin(h)\cos(dec)\cos(t)}$$

$$\therefore L = \arcsin\left(\frac{\sin(h)\cos(h)\cos(z) - \sin(dec)\cos(dec)\cos(t)}{\sin(dec)\cos(h)\cos(z) - \sin(h)\cos(dec)\cos(t)}\right) \quad (41)$$

식 (41)에서 보는 바와 같이, 사용 가능한 One Body Fix 방법은 사인값으로 구해지게 되므로  $-90^\circ \sim 90^\circ$  에서 사용할 수 있다.

## 제 4 장 임베디드 장치의 구현 및 시험평가

본 장에서는 천문항해의 이론적 고찰과 도출한 방위산출 알고리즘을 이용하여 사용 가능한 임베디드 장치를 구현하였다. 구현된 장치의 편의성과 정확도를 확인하기 위한 시험평가 방안을 마련하여 평가함으로써 실용성에 대해 확인하였다. 그리고 임베디드 장치의 정확도가 선박에 탑재되는 기존의 방위제공 장비들과 어느 정도 수준인지를 비교하였다.

### 4.1 임베디드 장치의 구성

#### 4.1.1 장치의 구성 및 방위의 연산

진북측정을 위한 임베디드 장치는 태양 측정을 위한 방위환과 데이터 연산을 위한 전시모듈로 구성된다.

본 장치의 전체적인 계통도는 Fig. 15와 같다.

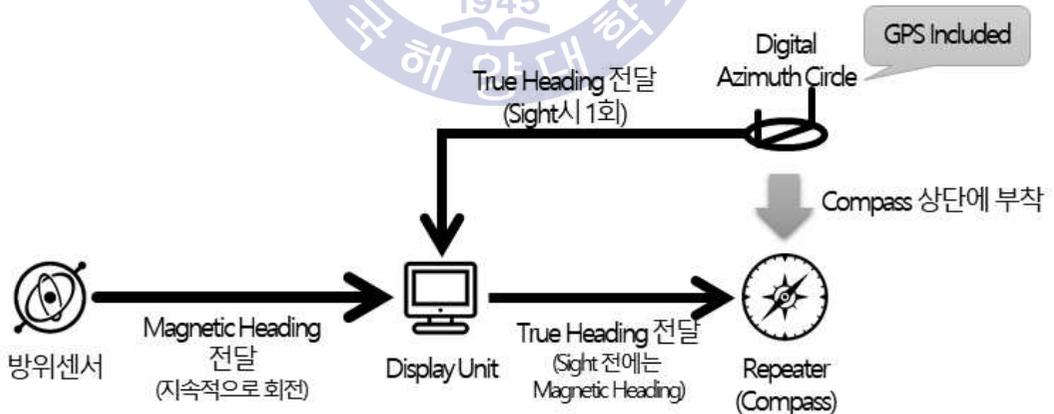


Fig. 15 Device Schematic Diagram

방위환은 사용자가 태양의 위치를 측정하면 엔코더를 통해 선수와 태양 간의 각을 수신하고, 알고리즘을 통해 데이터를 가공하여 측정된 진북 데이터를 전

시모듈로 전달하는 역할을 한다.

전시모듈은 방위환에서 계산을 통해 전달받은 진북 자료와 방위센서에서 전달받은 회전각 자료를 계산하여 실시간으로 선박의 heading값을 연산하여 출력하게 된다.

Fig. 16은 구현한 임베디드 장치의 동작 절차를 알기 쉽도록 블록 다이어그램으로 도식화한 것이다.

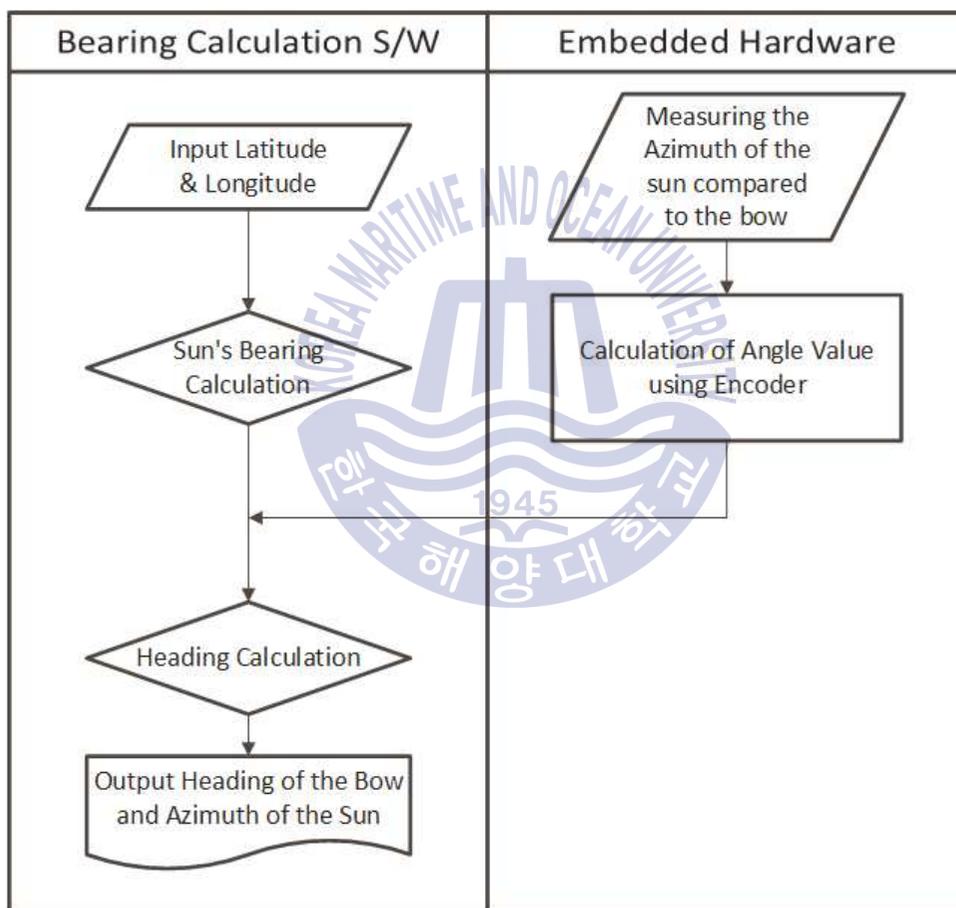


Fig. 16 Block Diagram of Embedded Device

엔코더에서 측정된 태양의 방위각을 이용하여 선박의 진방위 heading을 연산하는 방식은 Fig. 17과 같다.

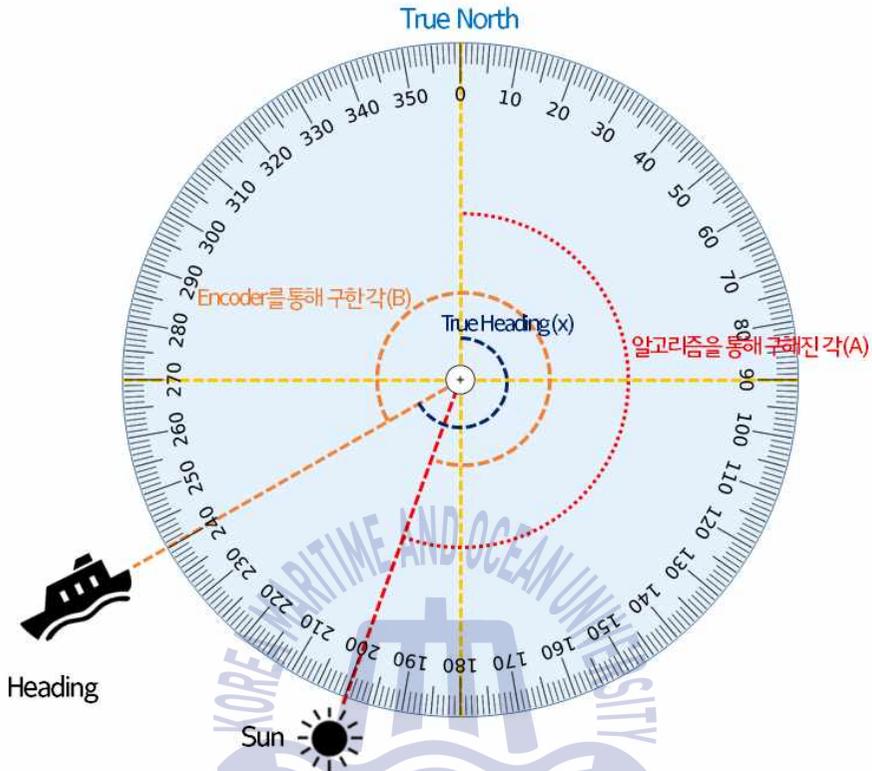


Fig. 17 Encoder Bearing & True Heading

앞의 태양과 선박의 선수방위 그리고 진북의 관계를 앞에서 설명하였는데, 방위환에 장착된 엔코더의 동작을 시스템적으로 표현한 것이 Fig. 17이라고 할 수 있다.

천측 알고리즘을 통하여 진북 대비 태양의 위치 (A)가 연산되며, 엔코더를 통해 태양의 위치 대비 선박 headings 위치 (B)를 측정하게 된다. 이때 진북 대비 heading (x)는 식 (42) 와 같이 표현된다.

$$x = A + (360 - B) \quad (42)$$

이때 방위환의 동작 범위는 0~360° 이므로, 진북 대비 heading (x)는 식 (43)과 같이 간소화할 수 있다.

$$x = A - B \quad (\text{단, } 0 \leq x \leq 360) \quad (43)$$

이와 같은 연산과정을 통하여 방위환을 통하여 태양을 측정함으로써 진북 대비 선체의 heading을 연산할 수 있게 된다.

Fig. 18은 최종 구현된 임베디드 장치의 도면이다.

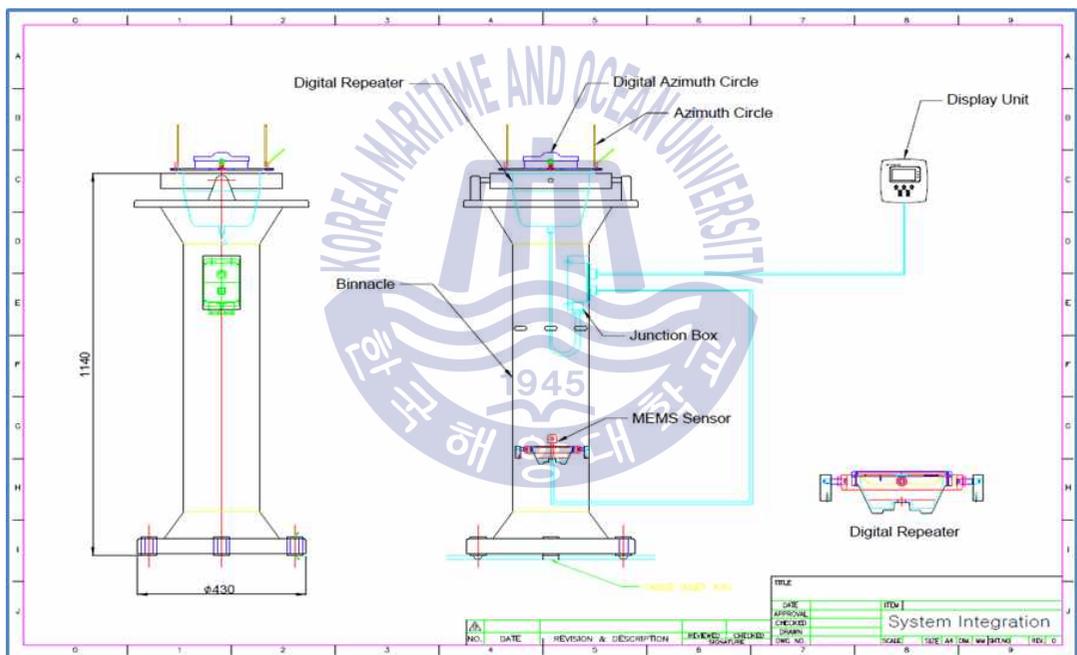


Fig. 18 Embedded Device Drawing

구현된 임베디드 장치를 기존의 선박에 적용하여 항해에 활용하기 위하여 설치 편의성을 고려하였다. 모델의 도면에서 보듯이 기존의 Binnacle형 자이로 리피터에 적용하기 위하여 설치 및 개조 소요가 최소화될 수 있도록 구현하였다.

방위환은 기존의 리피터 위에 그대로 올려놓을 수 있도록 크기를 맞추었으

며, 신호전달을 위한 연결 케이블은 장/탈착이 원활하도록 하였다. 연결단자 및 센서는 Binnacle 내에 장착할 수 있도록 개조 부분을 최소화하였고, 연결단자를 통하여 전시기 및 디지털 리피터가 연결될 수 있도록 함으로써 설치 편의성 및 활용성을 높일 수 있게 하였다.

#### 4.1.2 전시처리장치

Fig. 19는 전시모듈의 초기 PCB Artwork 및 PCB Board의 사진이다.

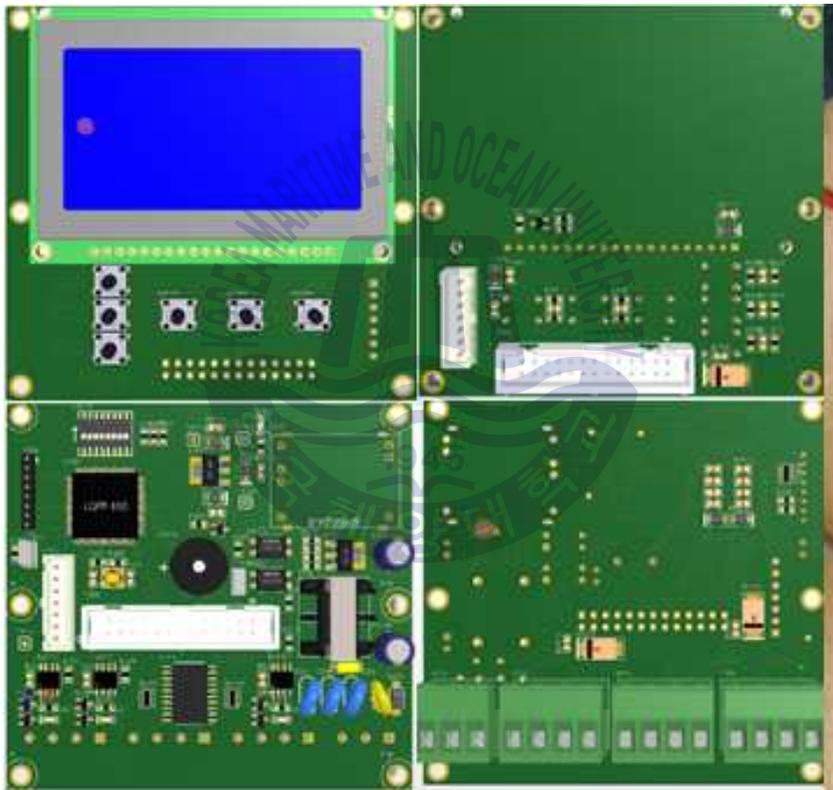


Fig. 19 Prototype PCB Artwork

초기 전시모듈의 사양은 Table 5와 같다.

**Table 5** Prototype Display Module Specification

Item	Specification
Supply Power	DC 24V
Data Input	RS-422
Baud Rate	4,800 bps
Data bit	8 bits
Stop bit	1 bits
Parity	None

사용된 Core Processor는 ST사의 Cortex-M4 기반 STM32F437VGT6이 사용되었다. 이 프로세서는 최대 1 Mbyte의 Flash Memory를 지원하며, 저전력으로 동작하는 프로세서이다. 각 모듈간 통신은 안정적으로 1:n 통신이 가능한 RS-422 통신을 사용하여 안정적인 데이터 전송이 가능하도록 하였다.

Fig. 20은 전시모듈의 후면 연결부 사진이다.



**Fig. 20** Display Module Connection

전시모듈의 경우 원형 커넥터를 통해 구성장비를 연결하도록 제작하여 사용

자 편의성을 향상시켰고, 각 연결부별로 핀 및 크기를 다르게 함으로써 사용자가 혼동되지 않도록 쉽게 구성하였다.

또한 MENU를 통해 자차 및 편차를 등록하여 다양한 선박 환경에 대응할 수 있도록 제작하였으며, 출력되는 NMEA 0183 프로토콜도 정의할 수 있도록 하여 다른 장비와의 호환성을 유지하였다.

내부 프로토콜은 NMEA 0183 Protocol을 활용함으로써 타사 장비와의 호환성을 최대한 유지하도록 노력하였으며, 사용된 프로토콜은 Fig. 21과 같다.

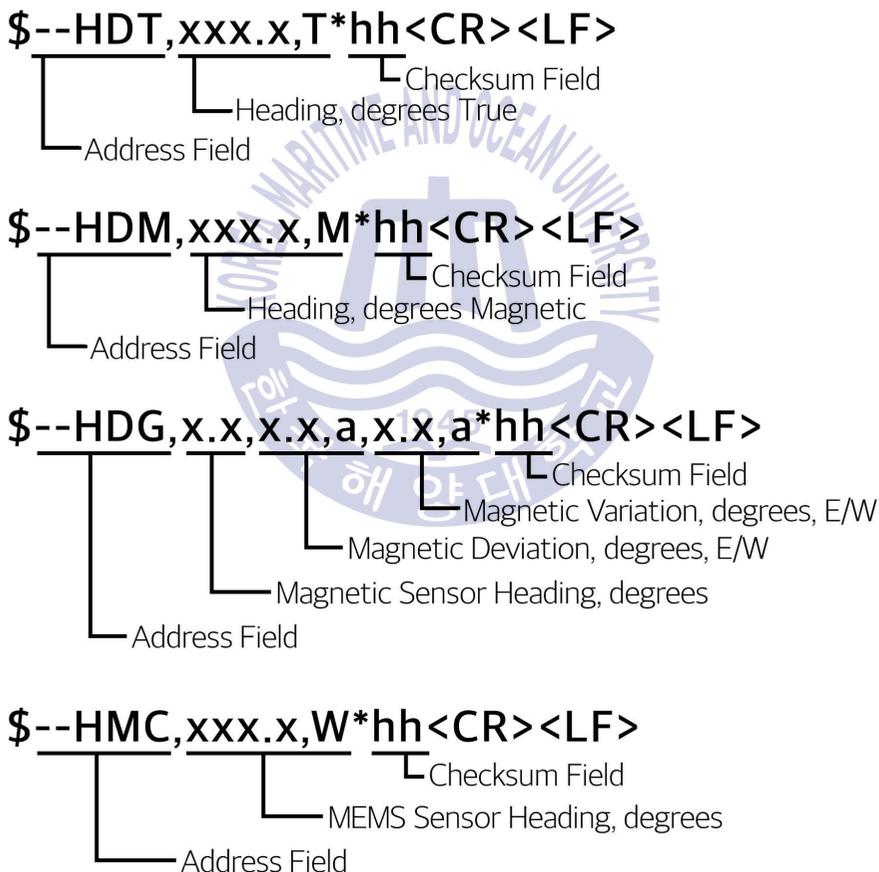


Fig. 21 NMEA Sentence

Fig. 22는 최종 완성된 전시모듈의 PCB Artwork 이미지이다.

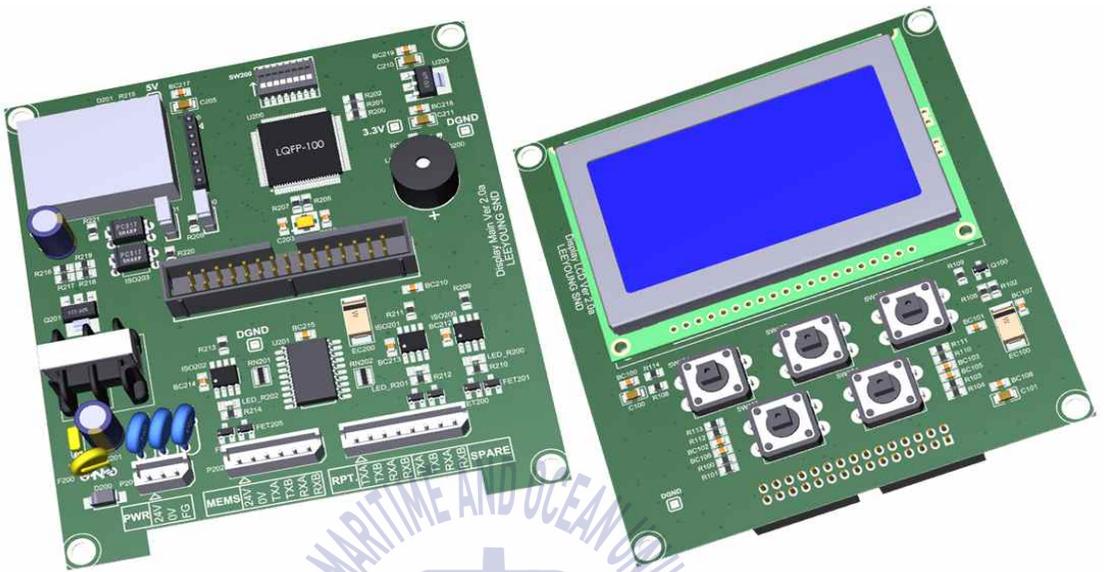


Fig. 22 Display Module (PCB Artwork)

초기 적용된 장치에 비해 전시모듈에서 전체적인 전원 관리를 지원하도록 하여 방위센서 및 방위환에서 전원을 추가로 인가하는 과정을 없앴고, 자료 처리 속도 및 성능이 우수한 제품으로 적용하였다.

Table 6은 최종 완성된 Display Module의 사양이다.

Table 6 Display Module Specification

Item	Specification
Supply Power	DC 24V
Data Input	RS-422
Baud Rate	Optional (Default : 4,800bps)
Data bit	8 bits
Stop bit	1 bits
Parity	None

본 논문의 실험을 위하여 Fig. 23과 같이 임베디드 장치의 GUI를 구성하였다. GUI의 구성은 천측을 하고자 하는 시간의 천측 데이터의 올바른 검출이 가능한지를 실시간 파악할 수 있도록 구성하였다.

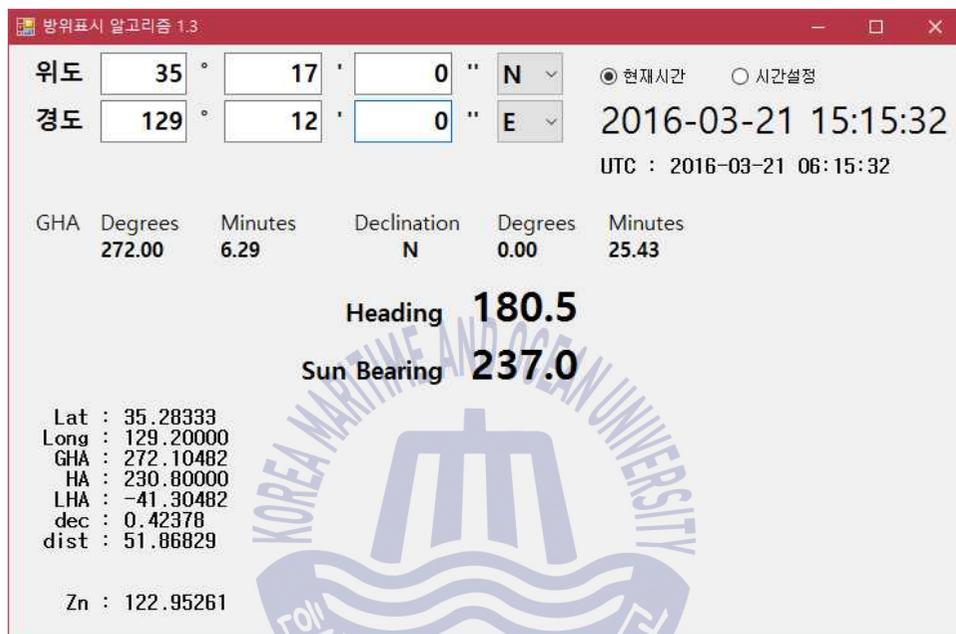


Fig. 23 GUI of Embedded Device

관측 장소의 위도와 경도를 입력할 수 있도록 하였고, 시각은 UTC로 표현하였다. 천측데이터의 이상 유무 확인을 위해, 임의의 시간 대비 천측력 값을 비교하기 위하여 시간 설정에 따른 방위의 산출이 가능하도록 하였다. 따라서 해당 시간에 언제라도 GHA와 Dec의 실시간적인 표현이 가능하도록 하였다.

관련 데이터는 국립해양조사원에서 발행되고 있는 천측력과 동일함을 확인하였다. 단, 실제 실험을 위해서는 UTC의 현재시간을 이용하여, 방위환이 측정된 해당 시간의 데이터를 이용할 수 있도록 하였다.

지위(GHA, Dec)와 현위치(위도, 경도) 사이의 지구상의 거리를 dist라는 변수를 이용하여 각거리로 표현하고 태양의 이동에 따른 지위에서의 방위 변화를 실시간 관측이 가능하도록 구성하였다.

소프트웨어는 C# .NET Framework 2.0 환경에서 개발함으로써 호환성을 최대한 고려하였다. 구현한 소프트웨어는 임베디드 하드웨어와의 인터페이스를 위하여 USB to RS422 컨버터를 통해 통신하도록 하였고, 임베디드 하드웨어는 RS422 통신을 통해 NMEA 0183 신호를 출력하도록 함으로써 PC용 소프트웨어가 아닌 다른 임베디드 장비와의 통신하게 될 경우를 고려하였다. 소프트웨어 내부적으로 오류 검출을 위한 Checksum 검증 알고리즘을 적용하여, 통신 중에 노이즈 등으로 인한 문제가 생길 때에도 오류가 발생하지 않도록 하였다.

소프트웨어는 진북 산출을 위한 방위산출 알고리즘을 반영하여 제작하였으며, 내부적으로 8byte의 double 자료형을 사용함으로써 좀 더 정밀한 연산이 가능할 수 있도록 고려하였다. 출력되는 모든 값은 도(Degree) 단위의 숫자 형태로 변환되어 출력하며 사용자가 보기 쉽게 하였다.

소프트웨어는 시간 및 위도, 경도를 입력받아 알고리즘을 통해 태양의 방위를 연산하여 소프트웨어에서 Sun Bearing 값으로 출력하게 된다. 임베디드 장치에 포함된 방위환에서 선수와 태양 사이의 방위각을 12비트 엔코더를 통해 전달받고 이를 Sun Bearing 값과 비교 연산한 후에, 최종적으로 선박의 헤딩을 출력하였다. 즉, 선수와 방위환에서 가리키는 태양 방위와의 각도를 엔코더로 측정하고 임베디드 S/W에서 검출한 Sun Bearing 값에서 이 각도를 연산하게 되면 구하고자 하는 선수의 진방위를 얻을 수 있도록 구현하였다.

### 4.1.3 방위환

방위환은 기존 선박의 리피터에 장착을 용이하게 하기 위하여 크기를 선박에 장착되어 있는 자이로 리피터에 맞추었고, 형태도 방위환과 유사하게 하였다. 그리고 연산 기능을 구현하기 위한 장치를 방위환에 포함하였고, 방위환이 리피터 위에서 원활하게 돌아갈 수 있도록 하였다.

Fig. 24는 초기 방위환의 PCB Artwork과 구성품의 사진이다.

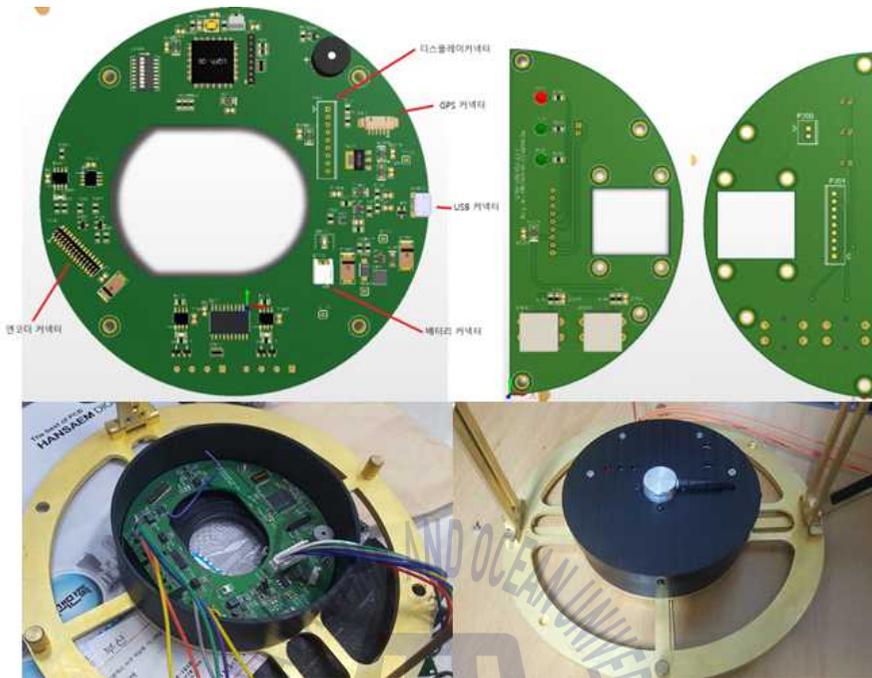


Fig. 24 Prototype PCB Artwork of Azimuth Circle

초기 버전의 방위환 사양은 Table 7과 같다.

Table 7 Prototype Azimuth Circle Specification

Item	Specification
Supply Power	DC 5V
Data Input	RS-422 / SPI
Baud Rate	4,800 bps (GPS : 9,600 bps)
Data bit	8 bits
Stop bit	1 bits
Parity	None

Fig. 25는 임베디드 장치의 하드웨어 모습이다.



Fig. 25 Implementation of Embedded Device

구현된 장치는 기존에 사용되던 아날로그 방위환과 엔코더 시스템이 접목된 형태인데, 효율적인 소숫점 연산을 위해 Cortex-M4 코어 기반의 STM32F407 마이크로프로세서를 사용하여 168MHz의 클럭 속도를 가지도록 하였다.

방위환에 구현된 임베디드 장치는 해당 시각의 위도 및 경도를 자동 혹은 수동으로 입력받아 방위산출 알고리즘을 통해 태양의 방위를 계산한다. 임베디드 장치가 적용된 방위환을 통해 선수 대비 태양의 방위각을 엔코더를 통해 구하고 이를 Sun Bearing 값과 비교 연산하여 최종적으로 계산된 선박의 heading 방위를 출력하게 된다.

방위환에는 태양을 측정할 때 회전된 각도를 디지털 수치로 변환하기 위한 엔코더와 현재의 위치를 파악하기 위한 GPS 모듈이 삽입되었다. GPS 모듈은 (주)아센코리아의 AKMU2P 제품을 사용하였다.

Fig. 26은 해당 제품의 사진이다.



Fig. 26 GPS Module

이 제품은 최고수준의 수신감도(-165dB)와 빠른 초기 수신 시간(Time-to-First-Fix; TTFF), 최저의 소비 전력을 구현하고 있으며, 열악한 수신 상황이나 고속이동 조건 시에도 정확한 GPS 신호를 수신할 수 있는 MT3339 칩셋이 적용된 제품이다.

내장 안테나 채용으로 별다른 안테나 모듈의 연결 없이 빠른 속도로 GPS 신호 수신 가능한 제품으로써 제품의 크기를 최소화할 수 있도록 제작되었다.

태양의 GHA, Dec 데이터는 현재의 세계시각(Universal Time; UT)을 통해 연산하지만, 현 위치에서의 진북 방위각을 연산하기 위해서는 현재의 위도, 경도 값이 요구된다. GPS 모듈에서는 태양의 GHA, Dec 데이터 연산을 위한 현재의 세계시각과 방위각을 연산하기 위한 현재의 위도·경도 값을 산출하게 되며, 이러한 값들이 방위산출 알고리즘의 연산과정에 적용되도록 하였다.

엔코더는 독일 Kubler사의 8.2450.1212.G121 제품이 사용되었다. Fig. 27은 해당 제품의 사진이다.



Fig. 27 Single Turn Type Encoder

해당 제품은 Absolute Type Encoder로써, 전원이 차단되었을 때에도 회전각을 기억하여 유지함으로써 본 구성품에 가장 적합한 타입으로 판단하였다. 본 연구에서는 0~360° 사이의 각도가 확인되어야 하고, 회전수는 중요하지 않으므로 비교적 해상도가 높은 Single-Turn Type의 엔코더를 사용하였다.

본 연구에서 사용된 엔코더는 12bit resolution을 가지고 있어, 식 (44)와 같이 0.088° 단위까지 측정이 가능함을 알 수 있다. 따라서 0.1° 단위로 측정 및 정확성을 갖고자 하는 본 연구에 적합한 해상도라 할 수 있다.

$$ANGLE = \frac{360^\circ}{2^{res}} = \frac{360^\circ}{2^{12}} = \frac{360^\circ}{4096} = 0.088^\circ \quad (44)$$

방위환에 사용된 Core Processor는 ST사의 Cortex-M4 기반 STM32F437VGT6이 사용되었으며, 이는 고성능의 32-bit Microprocessor이다. 천축 연산 특성상 부동 소수점 연산이 요구되므로 Floating-Point Unit을 제공하는 고성능의 프로세서가 사용되었다.

Fig. 28은 최종적으로 완성된 방위환의 사진이다. 최종 완성된 방위환은 원형 플러그를 이용하여 연결하도록 구현함으로써 편의성을 구현하였다.



Fig. 28 Azimuth Circle

Fig. 29는 최종 구현된 방위환의 PCB Artwork 형상이다.

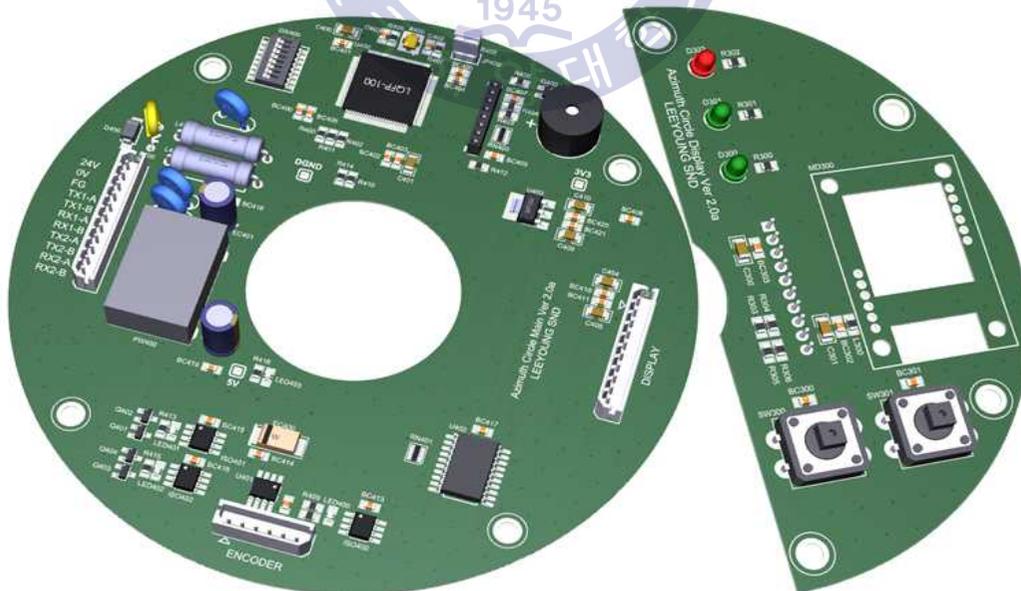


Fig. 29 Azimuth Circle PCB Artwork

최종 구현된 장치는 계산 및 처리능력이 향상된 제품을 채택하고, 구성품을 조금 더 간략화하였다.

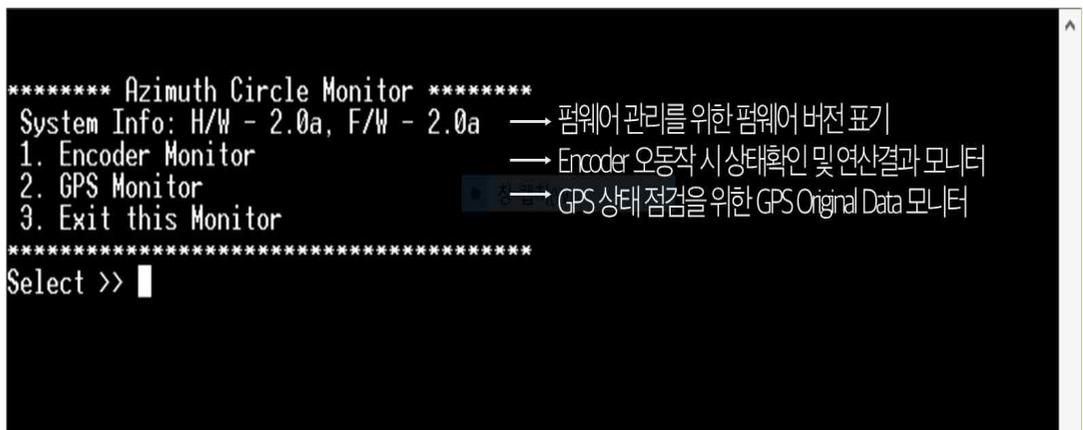
Table 8은 최종 완성된 방위환의 사양이다.

**Table 8** Azimuth Circle Specification

Item	Specification
Supply Power	DC 24V
Data Input	RS-422 / SPI
Baud Rate	4,800 bps (GPS : 9,600 bps)
Data bit	8 bits
Stop bit	1 bits
Parity	None

최종 구현된 방위환에는 유지보수를 위한 DEBUG Mode를 별도로 지원하도록 제작하였다.

Fig. 30은 Monitoring Screen 초기 화면이다.



**Fig. 30** Monitoring Screen Initial Display

Fig. 31은 DEBUG Mode의 테스트 화면을 나타낸 것이다.

```

Raw=2086, Adj=0272, Encoder=23.9, SUN=0.0, TRUE=0.0      GPS Monitoring!
Raw=0996, Adj=3277, Encoder=288.1, SUN=0.0, TRUE=0.0
Raw=3429, Adj=1615, Encoder=142.0, SUN=0.0, TRUE=0.0    $GPGGA,0.71856,000,3510.5315,N,12907.7190,E,1.10,0.79,21.6,M,25.4,M,0.0,0000,0.0,0000
Raw=2538, Adj=0724, Encoder=63.6, SUN=0.0, TRUE=0.0    $GPGSA,A,3,08,31,27,07,26,23,16,193,21,09,0.0,1.11,0.79,0.77,36
Raw=1508, Adj=3789, Encoder=333.1, SUN=0.0, TRUE=0.0   $GPRMC,0.71856,000,A,3510.5315,N,12907.7190,E,0.44,12.41,260416,0.0,A,55
Raw=0087, Adj=2368, Encoder=208.2, SUN=0.0, TRUE=0.0   $GPVTG,12.41,T,M,0.44,N,0.82,K,A=01
Raw=3076, Adj=1262, Encoder=110.9, SUN=0.0, TRUE=0.0   $GPGGA,0.71857,000,3510.5316,N,12907.7191,E,1.10,0.80,21.6,M,25.4,M,0.0,0000,0.0,0000
Raw=2036, Adj=0222, Encoder=19.5, SUN=0.0, TRUE=0.0   $GPGSA,A,3,08,31,27,07,26,23,16,193,21,09,0.0,1.45,0.80,1.20,32
Raw=1879, Adj=0065, Encoder=5.7, SUN=0.0, TRUE=0.0    $GPRMC,0.71857,000,A,3510.5316,N,12907.7191,E,0.44,9.68,260416,0.0,A,67
Raw=1879, Adj=0065, Encoder=5.7, SUN=263.7, TRUE=258.0 $GPVTG,9.68,T,M,0.44,N,0.82,K,A=30
Raw=1879, Adj=0065, Encoder=5.7, SUN=263.7, TRUE=258.0 $GPGGA,0.71858,000,3510.5317,N,12907.7191,E,1.10,0.80,21.6,M,25.4,M,0.0,0000,0.0,0000
Raw=1879, Adj=0065, Encoder=5.7, SUN=263.7, TRUE=258.0 $GPGSA,A,3,08,31,27,07,26,23,16,193,21,09,0.0,1.45,0.80,1.20,32
Raw=1879, Adj=0065, Encoder=5.7, SUN=263.7, TRUE=258.0 $GPRMC,0.71858,000,A,3510.5317,N,12907.7191,E,0.36,342.38,260416,0.0,A,65
Raw=0744, Adj=3025, Encoder=265.9, SUN=263.7, TRUE=258.0 $GPVTG,342.38,T,M,0.36,N,0.66,K,A=36
Raw=0488, Adj=2769, Encoder=243.4, SUN=263.7, TRUE=258.0 $GPGGA,0.71859,000,3510.5318,N,12907.7191,E,1.10,0.79,21.6,M,25.4,M,0.0,0000,0.0,0000
Raw=0489, Adj=2770, Encoder=243.5, SUN=263.7, TRUE=20.2 $GPGSA,A,3,08,31,27,07,26,23,16,193,21,09,0.0,1.11,0.79,0.77,36
Raw=0489, Adj=2770, Encoder=243.5, SUN=263.7, TRUE=20.2 $GPGSV,3,1,12,27,84,313,20.16,57,036,28,08,53,237,14,26,38,072,30,70
Raw=1366, Adj=3647, Encoder=320.6, SUN=263.7, TRUE=20.2 $GPGSV,3,2,12,23,31,247,18,09,27,282,26,21,20,050,21,07,14,317,17,76
Raw=1365, Adj=3646, Encoder=320.5, SUN=263.7, TRUE=303.2 $GPGSV,3,3,12,31,14,139,15,44,12,254,193,09,167,17,11,09,202,18,46
Raw=1365, Adj=3646, Encoder=320.5, SUN=263.7, TRUE=303.2 $GPRMC,0.71859,000,A,3510.5318,N,12907.7191,E,0.33,332.88,260416,0.0,A,62
Raw=1365, Adj=3646, Encoder=320.5, SUN=263.7, TRUE=303.2 $GPVTG,332.88,T,M,0.33,N,0.62,K,A=3B
Raw=1365, Adj=3646, Encoder=320.5, SUN=263.7, TRUE=303.2 $GPGGA,0.71900,000,3510.5319,N,12907.7190,E,1.10,0.79,21.6,M,25.4,M,0.0,0000,0.0,0000
Raw=1365, Adj=3646, Encoder=320.5, SUN=263.7, TRUE=303.2 $GPGSA,A,3,08,31,27,07,26,23,16,193,21,09,0.0,1.11,0.79,0.77,36
Raw=1365, Adj=3646, Encoder=320.5, SUN=263.7, TRUE=303.2 $GPRMC,0.71900,000,A,3510.5319,N,12907.7190,E,0.25,5.14,260416,0.0,A,6A

```

Fig. 31 Troubleshooting Testing Mode

Monitoring Screen은 노트북을 통해 연결박스 또는 방위환과 노트북을 통해 인터페이스가 가능하며, 하이퍼터미널 및 Tera Term, Putty, COMMaster 등 시리얼 통신을 지원하는 터미널 S/W를 통해 연결할 수 있다.

해당 모드로 진입하기 위한 설정은 Table 9와 같다.

Table 9 Monitoring Screen Set

Item	Specification
Data Output	RS-232
Baud Rate	38,400 bps
Data bit	8 bits
Stop bit	1 bits
Parity	None

데이터 전송을 할 때 잡음 발생을 최소화하기 위하여 평시에는 동작하지 않도록 하였으며, 사용자가 PC로 연결하여 명령을 실행하였을 때에만 동작하도록 제작함으로써 시스템의 안정성을 최대한 확보할 수 있도록 하였다.

DEBUG Mode가 시작되면 먼저 상단에 펌웨어 버전 관리를 위하여 설치되어 있는 펌웨어 및 하드웨어 S/W의 버전을 표시하도록 하였으며, Menu Tree를 통하여 원하는 모드로 진입할 수 있도록 제작하였다.

Fig. 32는 엔코더 모니터를 실행하였을 때의 화면이다.

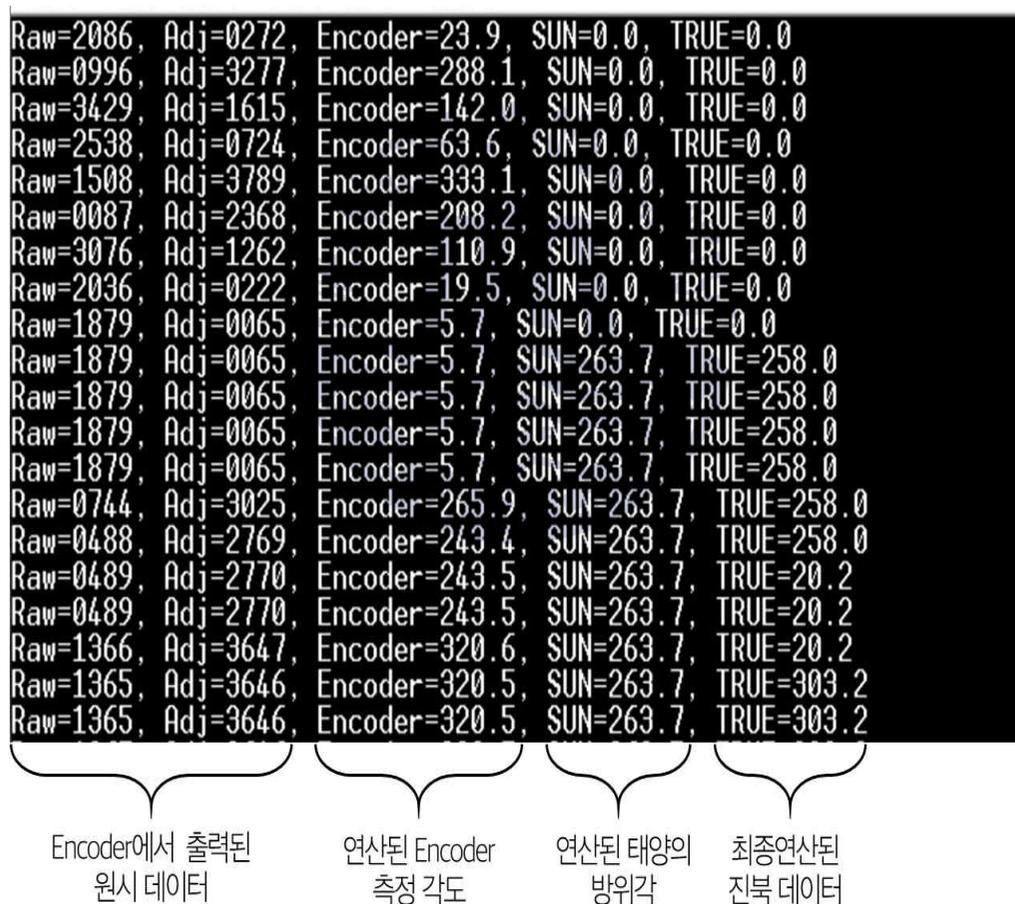


Fig. 32 Encoder Monitor Display

엔코더 모니터 화면에서는 엔코더에서 출력된 원시 데이터만 출력하는 것이 아니라, 해당 값을 통해 계산한 실제 엔코더가 회전한 각을 실시간으로 확인할 수 있도록 하였다. GPS 데이터를 기반으로 알고리즘을 통해 연산된 태양의 방위각 데이터를 확인할 수 있도록 하여, 엔코더 쪽에서 문제가 발생한 것이 맞는지 검증할 수 있도록 하였다. 최종 연산된 진북 데이터도 모니터링 할 수 있도록 하여 전시 모듈과 통신이 정상적으로 진행되고 있는지도 확인할 수 있도록 하였다.

Fig. 33은 GPS 모니터를 실행하였을 때의 화면이다. 해당 화면에서는 GPS에서 전달되어 오는 원시 데이터를 별도의 가공 없이 전시해준다. 따라서 GPS 오동작이 발생하였을 경우 즉각적으로 문제 파악이 가능하도록 하였다.

```

GPS Monitoring!
$GPGGA,071856.000,3510.5315,N,12907.7190,E,1,10,0.79,21.6,M,25.4,M,,*5F
$GPGSA,A,3,08,31,27,07,26,23,16,193,21,09,,1.11,0.79,0.77*36
$GPRMC,071856.000,A,3510.5315,N,12907.7190,E,0.44,12.41,260416,,A*55
$GPVTG,12.41,T,M,0.44,N,0.82,K,A*01
$GPGGA,071857.000,3510.5316,N,12907.7191,E,1,10,0.80,21.6,M,25.4,M,,*5A
$GPGSA,A,3,08,31,27,07,26,23,16,193,21,09,,1.45,0.80,1.20*32
$GPRMC,071857.000,A,3510.5316,N,12907.7191,E,0.44,9.68,260416,,A*67
$GPVTG,9.68,T,M,0.44,N,0.82,K,A*30
$GPGGA,071858.000,3510.5317,N,12907.7191,E,1,10,0.80,21.6,M,25.4,M,,*54
$GPGSA,A,3,08,31,27,07,26,23,16,193,21,09,,1.45,0.80,1.20*32
$GPRMC,071858.000,A,3510.5317,N,12907.7191,E,0.36,342.38,260416,,A*65
$GPVTG,342.38,T,M,0.36,N,0.66,K,A*36
$GPGGA,071859.000,3510.5318,N,12907.7191,E,1,10,0.79,21.6,M,25.4,M,,*5C
$GPGSA,A,3,08,31,27,07,26,23,16,193,21,09,,1.11,0.79,0.77*36
$GPGSV,3,1,12,27,84,313,20,16,57,036,28,08,53,237,14,26,38,072,30*7C
$GPGSV,3,2,12,23,31,247,18,09,27,282,26,21,20,050,21,07,14,317,17*76
$GPGSV,3,3,12,31,14,139,15,44,12,254,,193,09,167,17,11,09,202,18*46
$GPRMC,071859.000,A,3510.5318,N,12907.7191,E,0.33,332.88,260416,,A*62
$GPVTG,332.88,T,M,0.33,N,0.62,K,A*3B
$GPGGA,071900.000,3510.5319,N,12907.7190,E,1,10,0.79,21.6,M,25.4,M,,*51
$GPGSA,A,3,08,31,27,07,26,23,16,193,21,09,,1.11,0.79,0.77*36
$GPRMC,071900.000,A,3510.5319,N,12907.7190,E,0.25,5.14,260416,,A*6A

```

Fig. 33 GPS Monitor Display

본 연구에서는 GPRMC 값을 활용하므로 자료를 필터링하여 GPRMC 값만 나타나도록 구현할 수도 있으나, GPS 오동작의 경우에는 GPRMC 값이 수집되지 않는 문제가 발생할 가능성도 있으므로 수신된 원시 데이터 그대로 출력되도록 구현하였다.

#### 4.1.4 연결단자 및 케이블

Fig. 34는 연결단자의 형상이다.



Fig. 34 Junction Box

선박에 고정적으로 설치되는 리피터/전시기와 달리, 방위환은 사용할 때만 설치하고 이후에는 분리할 수 있어야 하므로 편리한 사용을 위하여 연결단자를 이용하여 장비를 결합/분리하도록 구성하였다.

그리고 연결단자는 장비 간 전원 분배 및 신호 분기, DEBUG Screen 진입을 위한 Port도 제공한다.

Fig. 35는 연결단자 계통도이다.

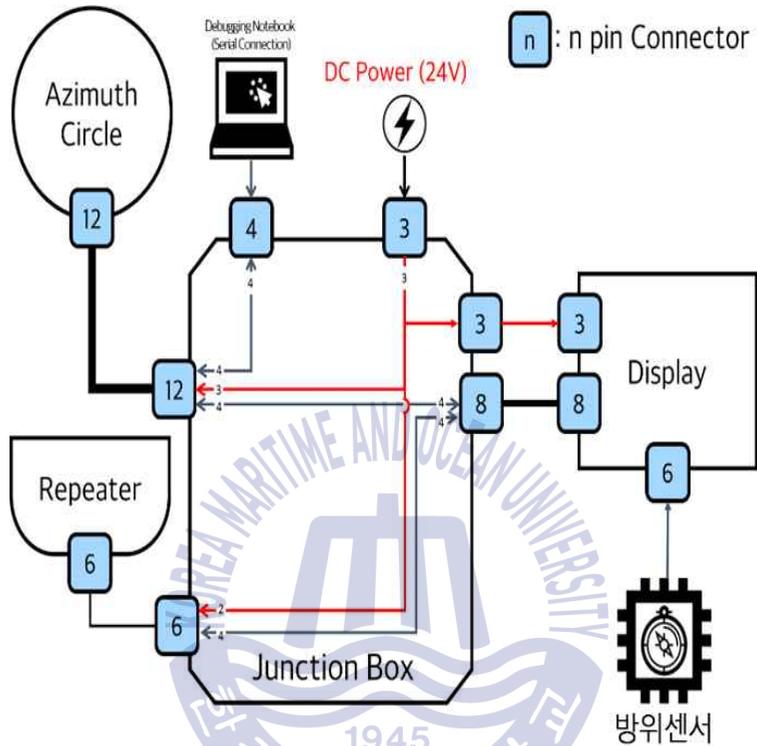
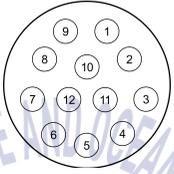
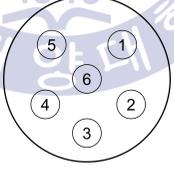
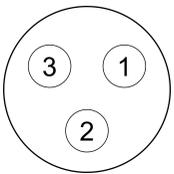


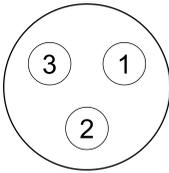
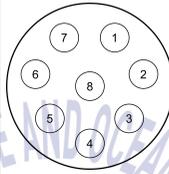
Fig. 35 Junction Box Diagram

본 연구에서는 전달되는 신호의 특성을 고려하여 다양한 크기의 원형 커넥터를 사용하여 장비간 연결을 용이하게 함은 물론, 사용자의 실수로 인해 잘못된 곳에 연결하여 발생할 수 있는 문제를 예방할 수 있도록 하였다.

Table 10은 각 커넥터의 Pin Map이다.

Table 10 Connector & Pin Map

Pin	Part	Pin Map				
12	Azimuth Circle to Junction Box		Pin img.	No	Description	Color
			1	24V	Red	
			2	0V	Black	
			3	FG	Orange	
			4	TX1-A (DISP)	Yellow	
			5	TX1-B (DISP)	Green	
			6	RX1-A (DISP)	Blue	
			7	RX1-B (DISP)	Violet	
			8	TX2-A (DEBUG)	Gray	
			9	TX2-B (DEBUG)	White	
			10	RX2-A (DEBUG)	RD-BL	
			11	RX2-B (DEBUG)	YE-BL	
12	-	OR-BL				
6	Repeater to Junction Box		Pin img.	No	Description	Color
			1	24V	Red	
			2	0V	Black	
			3	Tx-A	Brown	
			4	Tx-B	Orange	
			5	Rx-A	Yellow	
6	Rx-B	Green				
3	Power to Junction Box		Pin img.	No	Description	Color
			1	24V	Green	
			2	0V	Brown	
3	FG (Optional)	Blue				

3	Junction Box to Display	Pin img.	No	Description	Color
			1	24V	Green
			2	0V	Brown
			3	FG (Optional)	Blue
8	Junction Box to Display	Pin img.	No	Description	Color
			1	TX1-A(ACircle)	Brown
			2	TX1-B(ACircle)	Orange
			3	RX1-A(ACircle)	Yellow
			4	RX1-B(ACircle)	Green
			5	TX2-A(Rept)	Blue
			6	TX2-B(Rept)	Red
			7	Not Use	Black
			8	Not Use	White

#### 4.1.5 디지털 리피터

Fig. 36은 리피터의 상부 사진이다.



Fig. 36 Repeater Upper Figure

선박에 탑재되어 항해할 때 사용되는 컴파스의 리피터와 유사한 형태로 제작하였으며, 전시모듈에서 전달되는 NMEA 신호를 수신하여 heading 방향을 정확하게 표시할 수 있다.

Fig. 37은 Binnacle 형태로 구성된 기구부의 사진이다. Binnacle 내부에 방위 센서가 삽입되고, 연결단자가 외부에 장착되도록 구성하였다.



**Fig. 37** Binnacle Type Repeater

Fig. 38은 제작된 리피터의 PCB Artwork 이미지이다.



Fig. 38 Repeater PCB Artwork

제작된 컴파스 리피터의 사양은 Table 11과 같다.

Table 11 Compass Repeater Specification

Item	Specification
Dimensions	310 × 118mm / Bezel Ø241mm
Mounting	Gimbal
Gimbal Action	±45° pitch and roll
Power	24V DC
Data I/O	RS422/NMEA0183
Resolution	±0.5°
Follow-Up Rate	15°/second
Display	DUAL Scale 36:1
Operation Temperature Range	-25°C ~ 55°C
Weight	less 8kg

## 4.2 임베디드 장치의 시험평가

### 4.2.1 시험 환경 및 평가항목 설정

천문항해에서 도출한 태양의 지위 및 방위산출을 위한 알고리즘을 적용하여 구현한 임베디드 장치의 시험 항목과 환경을 설정하였다.

구현된 장치의 시험을 위한 실험환경으로 측정을 위한 장소의 선정은 주위가 트인 곳으로 실험시간 내내 지속적으로 태양을 관측할 수 있도록 장애물이 없는 지점으로 하였다. 관측 방위를 명확히 식별할 수 있는 육상의 물표 중에서 정확성을 위하여 관측하고자 하는 물표의 좌, 우측 끝단이나 돌출된 부분을 선정하여 선수방위를 측정하도록 하였다.

실험시간은 다양한 조건하에서의 정확성을 확인하기 위하여 측정시간대 및 시간 간격을 달리하였다. 측정 시간은 태양이 떠오르는 오전 시간대와 태양 고도가 점차 낮아지는 오후 시간대를 구분하여 측정하였고, 측정하는 시간 간격도 10분, 20분, 30분 간격으로 달리하여 시험하였다. 그리고 관측자의 숙련도에 따른 차이를 파악하기 위해 단일 측정에서 나온 자료와 5회의 연속 측정을 통하여 자료를 구하였다.

태양방위 측정이 용이한 장소를 선정하여 실험을 위한 환경을 구축하고, 헤딩을 잘 확인할 수 있는 물표를 정한 후에 진행하였다. 태양의 방위 및 고도는 시간의 흐름에 따라 계속 변하게 되나 관측 위치 및 헤딩은 고정되어있는 상태인 것이다. 방위환에서 태양의 방위를 측정하게 되면, 측정시간의 천체의 위치 및 진북을 산출하는 연산과정을 거친 후에 헤딩을 나타내게 된다.

이러한 관측 및 계산 과정을 일정한 시간 간격으로 수행하고, 그 결과를 비교하게 되면 산출된 헤딩의 정확성을 판단할 수 있게 된다. 즉 태양을 관측하는 방위가 시간의 흐름에 따라 달라지는데도 헤딩이 동일하거나 일정한 오차 범위 내에 있다면 구현된 임베디드 장치의 진북 산출 및 방위 제공의 정확성이 입증되는 것이다.

오차가 없는 이상적인 경우라면 시간 흐름에 따른 태양의 이동을 관측하고 계산한 결과인 헤딩 값은 일정하게 유지되어야 하지만, 측정에 따른 관측자의 오차 및 기기 등의 오차로 인해 적은 수준의 방위 차이가 발생하였다. 선박이 항해 및 선회를 하더라도 탑재된 자이로컴파스는 지속적으로 진북을 가리키고 있고, 그 신호를 리피터에 제공함으로써 선박의 헤딩을 계속 제공하는 것과 같이, 본 실험에서도 태양의 위치가 달라지더라도 태양을 관측한 후 계산을 통해 진북을 찾고 그에 따라 방위를 제공할 수 있도록 한 것이다.

Table 12는 본 연구개발에서 사용된 알고리즘과 국립해양조사원에서 발간한 천측력을 비교 검증한 표이다. 태양의 지위를 Dec 및 GHA의 형태로 나타낸 것으로 두 자료의 정확도를 쉽게 알 수 있도록 하였다.

**Table 12 Sun GP between Almanac and Algorithm**

Time	Almanac		Algorithm		Difference	
	GHA	Dec	GHA	Dec	GHA	Dec
01:00	194° 11.9'	S 23° 2.2'	194° 11.90'	S 23° 2.2'	0° 0.00'	0° 0.0'
13:00	11° 54.5'	S 7° 35.1'	11° 54.48'	S 7° 35.1'	-0° 0.02'	0° 0.0'
06:00	270° 55.1'	N 18° 47.7'	270° 55.08'	N 18° 47.7'	-0° 0.02'	0° 0.0'
18:00	88° 25.0'	N 17° 57.4'	88° 25.06'	N 17° 57.4'	+0° 0.06'	0° 0.0'
09:00	318° 31.9'	S 08° 27.1'	318° 31.87'	S 8° 27.1'	-0° 0.03'	0° 0.0'
21:00	137° 44.3'	S 21° 50.8'	137° 44.38'	S 21° 50.8'	+0° 0.08'	0° 0.0'

Table 12에 표기된 바와 같이 GHA 및 Dec의 연산을 위해 사용된 방위산출 알고리즘은 국립해양조사원에서 발행하는 천측력과 차이가 거의 없음을 알 수 있었다. 오히려 소수점 첫째 자리에서 버려지게 되는 천측력 값과는 달리 더 정확한 값을 연산할 수 있었으며, 분·초 단위까지 정확한 태양의 위치를 알 수 있다는 것을 확인할 수 있었다.

방위산출 시험을 하기 위해 구현한 계산알고리즘과 국립해양조사원에서 발간

한 천측력과의 태양 지위에 대한 산출 결과치는 GHA 오차범위 최대  $\pm 0.1'$ , Dec는 값이 일치함을 알 수 있었다. 천측력에 표시된 값들은 분(') 단위 소수점 1자리까지만 표시하고 있기 때문에, 본 논문에서 알고리즘으로 구현한 지위 산출 프로그램의 반올림을 생각하면 오차는 거의 없다는 것을 의미한다.

본 논문에서의 평가항목은 진북을 찾기 위한 항해사의 기존 업무 수행과 비교하여 개선되는 부분을 아래의 세 가지로 구분하였다.

첫째, 시간의 경감으로, 항해사가 기존의 방법을 사용하여 천측을 통해 방위를 산출하는 경우와 비교하여 얼마나 빨리 산출할 수 있는가? 이 부분은 임베디드 장치를 이용한 진북의 산출 과정이 시간적으로는 매우 큰 이점이 있음을 실험을 통해 확인하였다.

둘째, 결과의 정확성으로, 방위환을 이용하여 태양을 관측하고 산출되는 헤딩의 값들을 서로 비교하고, 오차를 확인함으로써 구현된 임베디드 장치의 정확도를 파악하도록 하였다.

셋째, 업무의 편리성으로, 진북의 산출 과정에 따른 과거의 복잡하고 어려운 계산 절차를 줄일 수 있는 부분을 비교하였다.

평가항목으로 선정한 세 가지 부분에 대해, 시간의 경감 부분과 업무의 편리성은 천측의 절차가 간단해짐에 따라 전체적으로 시간이 줄어든다는 사실을 알 수 있었다. 이에 따라 시간의 경감과 사용상의 편리성을 한데 묶어 운용상의 편의성 개선 부분으로 표현하였다. 편의성 개선은 일반적인 여건에서도 인정받을 수 있도록 반복적인 시행을 거쳤다.

그리고 측정의 정확성을 시간별로 결과를 표시하여, 본 실험의 정확성을 객관적으로 나타낼 수 있도록 표현하였다. 측정의 정확성은 시간 변화에 따른 관측은 물론, 객관적으로 평가할 수 있도록 대상을 선정하여 테스트를 진행함으로써 실험결과의 정확도를 포함한 객관성을 확보하고자 하였다.

#### 4.2.2 운용상의 편의성 평가

Table 13은 천측을 하는 절차와 각 단계에서 걸리는 시간을 나타낸 것이다.

표에서 알 수 있듯이 기존의 관측 및 계산 절차에 있어 가장 많은 시간이 걸리는 단계는 태양의 지위 계산 및 천문자료가 수록된 책자를 이용하여 방위선을 찾는 과정이다.

**Table 13** Astronomical Observation Process and Time

Observation Procedure	Existing Observation Process	Required Time	
		Existing Observation Method	Proposed Observation Method
Azimuth Measurement of Celestial Bodies	Azimuth Circle	3 sec	3 sec
Register Current Time	Chronometer Electronic Watch	3 sec	1 sec
GP Calculation of Celestial Bodies	Interpolate using the Nautical Almanac	300 sec	
Identify Own Ship Position	GPS or Recognized Location	2 sec	
Bearing of the Celestial Bodies	Sight Reduction Table	150 sec	
Heading Detection	Bearing Indicator Reading	5 sec	
<b>Operation Time</b>		<b>463 sec</b>	<b>4 sec</b>

과거의 측정 방법은 선박의 운항 중 숙달된 항해사가 계산하더라도 최소 8분 정도가 걸렸으며, 일반적인 항해사들은 30분 이상의 시간이 필요하였다. 그리고 계산에 있어 여러 단계를 거치기 때문에 각 단계의 측정 및 계산 지연에 따른 오차가 크게 나타날 수 있고, 특히 해상 환경의 잦은 변화로 인해 자선의 위치를 향해 도중에 실시간으로 측정하여 위치 및 방위를 확인하기에는 많은 애로점이 존재해 왔다.

그러나 구현된 장치를 이용한 실험을 통해서 약 5초 이내에 정확한 진북의 판단은 물론 선박의 heading을 산출할 수 있었다. 임베디드 장치의 연산 처리 시간이 거의 실시간임을 감안할 때, 항해사가 방위환을 이용하여 관측하는 시간을 제외하면 별도의 시간을 필요로 하지 않는다는 것을 알 수 있다.

방위환을 이용하여 태양을 관측한 이후 임베디드 장치에 의한 방위의 산출이 자동화되므로 사용상 편의성은 한결 증대되었음을 알 수 있다. Table 13은 본 연구를 수행하면서 본인의 직접적인 경험을 토대로 산출한 것으로, 편의성에 대한 객관적인 자료나 검증이 필요할 경우에는 많은 항해사들의 설문조사 등을 통해 그 객관성을 공고히 할 수 있다.

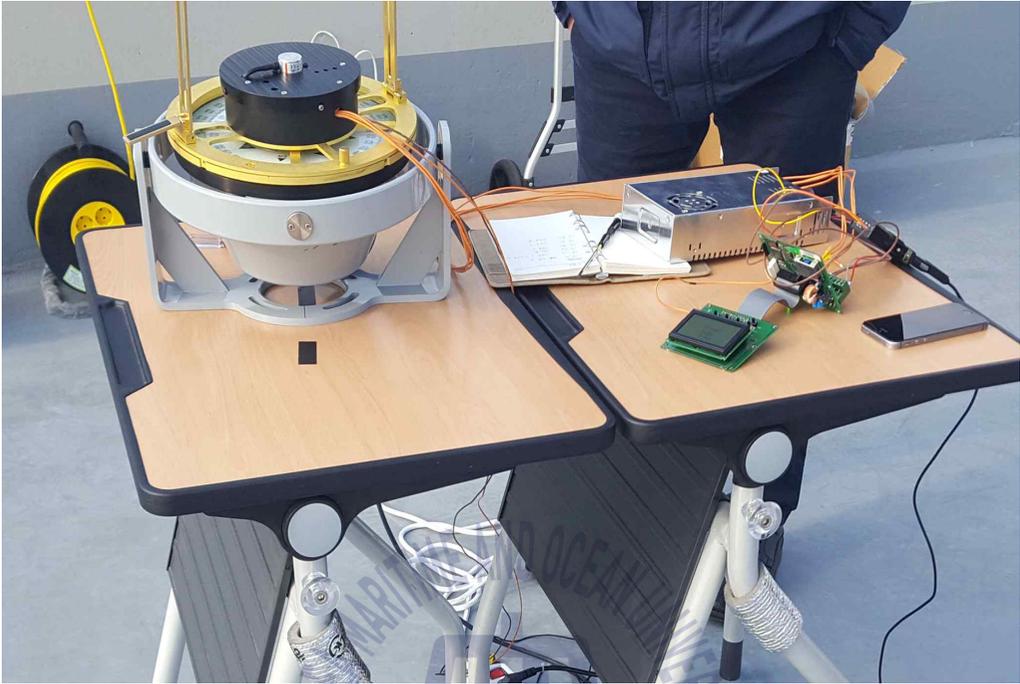
그러나 본 논문은 시간의 단축에만 초점을 두는 것이 아니라, 관측 이후 방위의 산출 과정을 전산화를 구현하여 자동화한 것이라 할 수 있다. 임베디드 장치를 사용하게 되면 기존의 관측 및 계산과 달리 시간 지연을 줄일 수 있고 정확성도 가진다는 데 그 의의를 두고자 한다. 즉, 측정 및 계산 과정이 줄어들면 당연히 시간의 낭비 요소는 없어질 것이며, 이에 따른 오차도 상당 부분 감소될 것이다.

#### 4.2.3 방위 측정의 정확성 평가

시제품은 디지털 방위환과 전시기, 그리고 리피터로 구성되어 있다. 산출장치를 관측을 위한 장소에 설치하고 동작 테스트를 진행하여 장비의 이상유무를 확인하였다.

Fig. 39는 측정을 위한 준비 장면 사진이다. 기존의 선박에서 사용하는 방위 측정장치를 이용하여 연구에서 구현한 방위환을 설치하였다. 그리고 관측의 결과를 바로 확인할 수 있도록 전시기도 같이 구성하여 테스트를 진행하였으며, 전원은 DC 24V를 공급하였다.

1차 테스트는 최초 시제품을 제작한 이후 방위산출 알고리즘을 검증하고, 구성 기기들이 정상적으로 동작하는지를 확인하는데 중점을 두고 진행하였다.



**Fig. 39** Preparation for Measurement

1차 테스트는 부산광역시 영도구 태종로 727, 위도 35.074917, 경도 129.086057에서 시행하였으며, 방위환으로 1시간 동안 10분 간격으로 총 7회 측정을 진행하여 결과를 확인하였다. Table 14는 결과를 나타낸 것이다.

**Table 14** Test #1 Results

Time	15:00	15:10	15:20	15:30	15:40	15:50	16:00	Mean
Result	158.6	163.1	167.3	171.3	175.3	179	182.6	171.03
Error	-	4.5	4.2	4	4	3.7	3.6	4.00
Dev.	12.43	7.93	3.73	0.27	4.27	7.97	11.57	6.88

표의 “오차” 는 이전 값과의 차이를 의미하며, “편차” 는 평균치와의 차이의 절대값이다. 따라서 편차의 평균은 평균편차를 의미한다.

테스트 측정값은 진방위를 표시하는 것이므로, 특정 값이 오차범위 내에서 유지되어야만 한다. 하지만 테스트 결과 측정값은 지속적으로 증가하는 것으로 확인되었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 내부 Firmware를 점검한 결과 Encoder 처리 함수에서 수식이 잘못 작성되어 있어 Encoder 방향을 틀리게 나타내는 문제를 발견하였으며, 해당 문제를 해결한 후 2차 테스트를 진행하였다.

2차 테스트는 부산광역시 영도구 태종로 727, 위도 35.074913, 경도 129.086150에서 시행하였으며, Azimuth Circle로 2시간 동안 20분 간격으로 총 7회 측정을 진행하여 Table 15와 같이 결과를 확인하였다. 시간이 경과하여 태양의 방위가 변하더라도 관측 물표에 대한 헤딩은 일정 범위 내의 진방위를 유지하는 것으로 확인되었고, 측정오차의 분산은 평균 0.21° 를 나타내었다.

Table 15 Test #2 Results

Time	13:20	13:40	14:00	14:20	14:40	15:00	15:20	Mean
Result	288.1	288.2	287.7	287.7	287.6	287.6	287.6	287.79
Error	-	0.1	- 0.5	0	- 0.1	0	0	
Dev.	0.31	0.41	0.09	0.09	0.19	0.19	0.19	0.21

3차 테스트는 부산광역시 해운대구 센텀동로 71, 위도 35.174708, 경도 129.128110에서 시행하였다. 방위환을 이용하여 20분 간격으로 총 6회 측정을 진행하여 Table 16과 같이 결과를 확인하였다. 2차 테스트와 동일하게 시간이 경과하여 태양을 관측하는 방위가 변하는데도 관측물표에 대한 헤딩은 지속적으로 일정 범위내에서 진방위를 유지하는 것으로 확인되었고, 측정오차의 분산

은 평균  $0.28^\circ$  를 나타내었다.

**Table 16** Test #3 Results

Time	10:00	10:20	10:40	11:00	11:20	11:40	Mean
Result	287.6	288.5	287.7	287.7	288.2	287.9	287.9
Error	-	0.9	-0.8	0	0.5	-0.3	
Dev.	0.33	0.57	0.23	0.23	0.27	0.03	0.28

4차 테스트는 부산광역시 영도구 남항서로 52, 위도 35.085579, 경도 129.034898에서 시행하였다. Azimuth Circle로 30분 간격으로 총 8회 측정을 진행하여 Table 17과 같이 결과를 확인하였다. 2차와 3차 테스트와 동일하게 헤딩은 계속 진방위를 유지하는 것으로 확인되었고, 측정오차의 분산은 평균  $0.20^\circ$  을 나타내었다.

**Table 17** Test #4 Results

Time	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00	Mean
Result	145.0	145.2	145.4	145.5	145.5	145.4	145.1	145.8	145.45
Error	-	0.2	0.2	0.1	0	-0.1	-0.3	0.7	
Dev.	0.36	0.16	0.04	0.14	0.14	0.04	0.26	0.44	0.20

5차 테스트는 부산광역시 영도구 태종로 727, 위도 35.074859, 경도 129.085948에서 진행하였다. Azimuth Circle로 10분 간격으로 1시간 30분 동안 총 10회 측정을 진행하여 Table 18과 같이 결과를 확인하였다. 5차 테스트의 결과 측정오차의 분산은 평균  $0.05^\circ$  가 나타남을 알 수 있었다.

**Table 18** Test #5 Results

Time	14:30	14:40	14:50	15:00	15:10	15:20	15:30	15:40	15:50	16:00	Mean
Result	178.3	178.4	178.3	178.3	178.3	178.3	178.3	178.4	178.2	178.4	178.32
Error	-	0.1	-0.1	0	0	0	0	0.1	-0.2	0.2	
Dev.	0.02	0.08	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.08	0.12	0.08	0.05

6차 테스트는 부산광역시 해운대구 센텀동로 71, 위도 35.174530, 경도 129.128125에서 시행하였다. Azimuth Circle로 20분 간격으로 총 5회 측정을 진행하여 Table 19와 같이 결과를 확인하였다. 시간이 경과하여도 헤딩은 진방위를 유지하는 것으로 확인되었고, 측정오차의 분산은 평균 0.14° 가 나타남을 알 수 있었다.

**Table 19** Test #6 Results

Time	9:30	9:50	10:10	10:30	10:50	Mean
Result	264.3	264.5	264.1	264.1	264.4	264.28
Error	-	0.2	-0.4	0	0.3	
Deviation	0.02	0.22	0.18	0.18	0.12	0.14

7차 테스트는 부산광역시 영도구 태종로 727, 위도 35.074887, 경도 129.085976에서 시행하였다. Azimuth Circle로 10분 간격으로 총 7회 측정 후, 30분뒤 1회 추가 측정하여 Table 20과 같이 결과를 확인하였다. 측정오차의 분산은 평균 0.17° 이 나타남을 알 수 있었다.

Table 20 Test #7 Results

Time	15:00	15:10	15:20	15:30	15:40	15:50	16:00	16:30	Mean
Result	220.3	220.1	220.6	220.6	220.5	220.3	220.6	220.2	220.4
Error	-	-0.2	0.5	0	-0.1	-0.2	0.3	-0.4	
Deviation	0.10	0.30	0.20	0.20	0.10	0.10	0.20	0.20	0.17

8차 테스트는 부산광역시 영도구 남항서로 52, 위도 35.085550, 경도 129.034928에서 진행하였다. Azimuth Circle로 10분 간격으로 총 8회 측정하여 결과를 확인하되, 초시계로 정확히 10분 간격으로 측정하였다. 측정오차의 분산은 평균 0.19° 를 나타내는 것을 Table 21과 같이 확인하였다.

Table 21 Test #8 Results

시간	15:12	15:22	15:32	15:42	15:52	16:02	16:12	16:22	Mean
Result	226.5	226.6	226.1	226.3	226.1	226.0	226.1	226.0	226.21
Error	-	0.1	-0.5	0.2	-0.20	-0.1	0.1	-0.1	
Deviation	0.29	0.39	0.11	0.09	0.11	0.21	0.11	0.21	0.19

9차 테스트는 부산광역시 영도구 태종로 727, 위도 35.074844, 경도 129.085957에서 시행하였으며, Azimuth Circle로 20분 간격으로 2시간동안 총 7회 측정하되, 각 측정 회차 마다 연속으로 총 5회를 측정하여 측정치 중에서 최대값과 최소값을 제외한 나머지의 평균값을 측정치로 정의하였다. 측정 결과 헤딩은 일정한 범위 내 진방위를 유지하였으며, 2차~8차의 테스트에 비해 오차

의 크기 및 분산의 양이 훨씬 적게 나타남으로써 관측자의 숙련도가 매우 중요함을 알 수 있었다. 측정오차의 분산은 평균  $0.04^\circ$  의 아주 우수한 결과를 나타냄을 Table 22과 같이 알 수 있었다.

Table 22 Test #9 Results

Time	14:00	14:20	14:40	15:00	15:20	15:40	16:00	Mean
1	194.7	194.5	194.6	194.7	194.7	194.6	194.4	
2	194.8	194.7	194.6	194.6	194.6	194.7	194.7	
3	194.7	194.5	194.5	194.6	194.6	194.7	194.6	
4	194.7	194.6	194.5	194.6	194.6	194.8	194.7	
5	194.7	194.8	194.7	194.7	194.6	194.7	194.7	
Result	194.7	194.6	194.57	194.63	194.6	194.7	194.67	194.64
Error	-	-0.1	-0.03	0.07	-0.03	0.1	-0.03	
Deviation	0.06	0.04	0.07	0.01	0.04	0.06	0.03	0.04

기존 테스트 시 비숙련자가 태양의 방위를 1회의 관측만으로는 정확하게 측정하기가 쉽지 않다는 점을 인지하고 이를 해결하기 위한 대안을 마련하기 위하여 연속 관측을 하게 되었다. 이러한 관측 방법의 변경은 관측자의 미숙련도로 인하여 측정오차가 크게 나타나는 것을 방지함과 동시에, 정확도에 있어 관측자의 숙련 정도가 미치는 영향을 파악하기 위한 것이었다.

9차 테스트를 통해 관측자의 숙련도가 방위산출의 정확도에 가장 큰 영향을 준다는 것을 확인하였다. 이는 태양의 지위를 구하는 소프트웨어와 방위산출 알고리즘이 매우 정확하게 구현되었으며, 기기상의 오차는 거의 없다는 것을 입증하는 것임을 알 수 있었다.

### 4.3 결과 분석 및 활용

#### 4.3.1 시험 결과의 분석

시험은 모두 9차례 진행하였는데, 1차 테스트가 장비 오류로 판명되어 제외하였음을 고려한다면 실질적으로는 8번의 테스트가 수행되었다. 서로 다른 3곳의 장소는 테스트 시간 내내 태양의 관측이 지속적으로 가능하고, 헤딩으로 선정할 물표를 명확히 인식할 수 있는 곳으로 하였다. 관측시간은 오전 2회, 오후 6회로 하여 태양이 떠오르고, 지는 환경 모두를 시험할 수 있도록 하였으며, 관측 시간 간격도 10분, 20분, 30분으로 다양하게 구분하여 실험하였다.

이러한 방위산출의 정확성에 대한 실험결과를 Table 23에 정리하였다.

Table 23 Comparision of Test Results

	Test #1	Test #2~#8	Test #9
Mean Error	6.88°	0.17°	0.04°
Remarks	Bug Error	Single Observation	Multi Observation

앞에서 설명하였듯이 1차 테스트는 기기적인 결함이 있었다. 이론을 토대로 장치를 구현하여 시스템을 구성하고 시험을 하는 동안, 1차 테스트를 통해 장비의 오동작을 알 수 있었으며, 이를 보완하여 시스템을 수정하였다.

새로 구현된 임베디드 장치를 갖고 2차 테스트를 시작하여 총 8차 테스트까지 7번의 개별관측을 통한 시험을 수행하였으며, 그 결과 오차가 0.17° 수준의 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

본 논문에 있어 방위를 관측하는 방법에 대해서는 수차례의 시험 결과에 나와 있듯이 충분히 개인의 오차가 있다는 것을 인지할 수 있었고, 이에 대한 보완 방안을 마련하여 9차 테스트를 실시한 결과 오차 0.04° 의 더 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 태양의 고도에 따른 정확성의 차이를 실험에서는 명확

히 식별해 내지는 못하였으나 어느 정도 영향은 있다는 것을 알 수 있었다. 산출된 값의 정확도 및 오차를 고려할 때 태양의 고도 변화에 따른 오차보다는 관측자의 숙련도가 더 많은 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 구현된 임베디드 장치는 0.2° 이내의 방위 오차를 가지고 있음을 알 수 있었지만, 숙련도가 높은 운용자가 태양의 방위를 관측하도록 한다면 0.1° 정도의 오차 범위 이내에서 방위를 측정할 수 있음을 알 수 있었다.

본 연구를 통해 얻어진 실험결과들이 어느 정도의 정확도인지를 분석하였다. Table 24에서 보듯이 THD는 국제해사기구의 결의안 MSC. 116(73)에 규정되어 있는데, 선박이 Transmitting Heading Device를 탑재해야 하는 규정을 정의하고 있다. Gyro 컴퍼스를 의무적으로 탑재하지 못하는 선박에 대한 대안인 THD는 그 정확도를 1.0° 이하로 규정하고 있다.

Table 24 Tolerance Comparison

	THD	TG-8000/8500	JLR-21	Proposed Equipment
Tolerance	1.0° or less	0.5° RMS	0.5° RMS	0.17° (0.04°)

그리고 TG-8000/8500은 Tokyo KEIKI에서 판매하고 있는 Gyro 컴퍼스이며, IMO 규정을 준수하는 제품으로 허용오차를 RMS 0.5° 이하로 정하고 있다[30].

JLR-21은 JRC에서 판매하고 있는 GPS 컴퍼스이며 허용오차를 RMS 0.5° 로 규정하고 있다[31].

시험 내용을 토대로 본 연구의 진북 산출 시험 결과가 국제해사기구의 컴퍼스 정확도 기준에 부합되는 것은 물론이고, 현재 시판되고 있는 방위 관련 제품들의 방위 정확도의 허용 오차 범위 이내에 있음을 알 수 있었다. 방위환을 이용하여 천측한 후 임베디드 장치를 통해 자동으로 선박의 heading을 구해내는 것에 대하여 기존 천측 방법과의 차이에 따른 편의상 장점을 구체적으로 정량화하지는 못했지만, 실무에서는 많은 편의성을 가져다줄 것으로 생각한다.

### 4.3.2 임베디드 장치의 활용

국제해사기구에서는 선박의 항해 및 안전을 위하여 THDs(Transmitting Heading Devices) 및 TMHDs((Transmitting Magnetic Heading Devices)의 탑재를 권고하고 있다. 이는 대부분의 대상 선박이 통상 자이로컴파스로서 선박에 탑재되어야 할 THDs 규정을 충족시키고 있으나, 일부 선박에 있어서는 TMHDs도 허용하고 있다[32].

국제해사기구에서 규정하는 항해 장비/시스템으로는 자이로 및 마그네틱컴파스, ECDIS, AIS, VDR, 국제신호서 등이 있다. 이러한 선박의 구비목록은 기술발전 및 필요에 따라 변경되고 있으며, 최신기술을 적용한 장비들이 추가되고 있다[33][34]. 이번 연구에서 제시된 임베디드 장치의 성능이 널리 입증되고, 부가적인 전자 및 기계장치의 보완이 이루어진다면 TMHDs를 대체하는 필수 장비로 인정받을 수도 있을 것이다.

GPS로 대표되는 위성항법은 지구 약 2만 킬로미터 상공에 있는 인공위성의 송출 항법신호를 최소 4개 이상 수신하여 삼각측량 방식으로 실시간 정밀한 위치 측정이 가능하다. 하지만 위성항법 신호는 주파수 등이 이미 공개되어 적대적 이용이 가능하고, 수신전력이 매우 미약하여 간섭신호에 취약하다. GPS 신호에 대해 잡음 또는 기만 재밍 등의 전파 교란이 일어난다면 항법장비의 정상적인 기능을 보장하기가 어려울 것이다[35]. 외부의 전파교란 등에 영향을 받지 않는 천문항해를 이용한 자동화된 장비를 통해 방위를 산출하고 위치를 제공할 수 있다면 그 활용성은 매우 크다고 할 것이다.

임베디드 장치의 활용성에 있어 선박을 대상으로 진방위를 제공하는 방법에 대하여 주로 연구를 수행하였다. 하지만 정확한 방위를 제공할 수 있는 장치는 육상에서도 많은 활용성이 있을 것으로 생각한다. 육상의 대규모 건설공사 현장이나 정확성을 필요로 하는 측량 등에도 활용될 수 있으며, 군사적으로는 육군의 기갑 및 포병 등의 전술 및 작전 운용에도 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

구현된 임베디드 장치의 높은 활용성에도 불구하고, 태양을 관측하지 못하는 흐린 날이나 야간에는 운용상 제한점이 발생하는 것은 불가피한 일이다. 하지만 방위산출 알고리즘의 대상 천체를 달이나 다른 항성들로 넓혀간다면 야간에도 방위제공 기능을 충분히 발휘할 수 있을 것이다.

임베디드 장치가 일반에 사용되기 위해서는 공인된 시험기관에 의뢰하여 검증을 받는 것이 필요하며, 기존에 운용되고 있는 관성항법장비(INS), GPS 등과의 차이와 장점 등도 명확하게 구분될 수 있도록 해야 할 것이다.



## 제 5 장 결론

고대 선박을 운항하던 항해사들은 태양과 하늘의 별을 보면서 위치를 파악하고 항해를 하였다. 바다에서 항해를 위한 방위를 알기 위하여 오랫동안 지구의 자기장을 이용한 마그네틱컴파스를 사용하였다. 그러나 마그네틱컴파스는 지구 자기장의 왜곡에 따라 차이가 발생하고, 선체의 철 구조물 등의 자기 성분 등으로 인해 오차가 발생하기도 하였다. 이에 따라 대양에서는 오로지 하늘에 있는 태양과 달, 그리고 항성을 이용할 수밖에 없었으며, 그 결과 천문항해술이 발달하게 되었다.

19세기 이후 자이로컴파스가 발명되어 방위에 대한 정확성이 어느 정도 갖추어졌음에도 불구하고 대부분 선박은 마그네틱컴파스를 탑재하고 있으며 항해에 필요한 필수 장비로 사용하고 있다. 하늘의 태양과 항성 등을 이용하는 천문항해를 통해 선박의 위치를 파악하고 항해를 위한 방위를 알 수 있다. 선박의 항해사들은 천문항해를 위하여 수많은 항해 서적들을 항상 지니고 다녔다. 하늘의 태양과 별을 관측한 후에 서적들의 자료를 찾고 복잡한 계산과정을 거쳐서 자신의 위치를 파악하였으며, 목적지로 가기 위한 방위를 정하여 항해하였다. 천문항해를 위한 수많은 책자를 챙기고, 관측 후 수행되는 복잡한 계산과정은 항해사들의 주요한 업무였으며, 선박이 목적지로 항해하기 위해서도 가장 중요한 일이었다.

마그네틱컴파스에는 자차와 편차의 오차가 있으며, 자이로 컴파스에도 기계적인 오차와 장기간 사용에 따른 누적 오차 등이 있다. THD는 선박의 True heading을 제공해 주는 전자 장치로서 국제해사기구의 규정에 따라 선박에 설치하도록 하고 있다. THD는 자체 동력으로 선수 방위값을 발생시키도록 하고 있다. 대부분 선박에 탑재된 표준 마그네틱컴파스로서 국제해사기구 규정의 THD 항목을 만족시키고 있으며, THD의 정적오차 한계는  $\pm 1.0^\circ$  이내로 정해져 있다.

하지만 마그네틱컴파스의 경우 지구 자장이 장소에 따라 일정하지 않고, 선박의 선체 및 철 구조물 등에 따라 많은 영향을 받음에 따라 오차가 더 커질

수 있다. 마그네틱컴파스의 오차를 보정하기 위하여 자이로컴파스를 이용하고 있지만, 고가의 자이로컴파스가 모든 선박에 탑재되기는 어려운 실정이다. 따라서 국제해사기구 규정의 THD 항목을 충족시킬 수 있는 별도의 방위제공 장치의 필요성은 여전하다고 할 것이다.

천문항해는 천체를 관측하여 선박의 항해에 이용하는 것으로 항해삼각형은 동명극, 천정 및 천체의 3점으로 이루어지고, 3변은 여위도, 극거리, 여고도이며, 3각은 자오선각, 방위각 및 위치각이 있다. 항해삼각형을 이용하여 선박의 위치를 산출하기 위해서는 정확한 시간과 태양의 위치를 알아야 한다. 이를 위해 태양의 지위를 적위와 적경으로 구체화하여 나타내어야 한다.

태양의 지위를 산출하기 위해 주로 천측력을 이용하였다. 천측력에는 시간 단위로 태양의 GHA와 Dec가 표시되어 있으며, 원하는 시간의 천체 지위를 알기 위해 천측력에 있는 시간단위의 지위를 찾아 보정 계산을 통해 구할 수가 있다. 보다 정확한 태양 좌표를 구하기 위해서는 행성이론 VSOP82 및 VSOP87을 이용할 수 있다. 천체의 운행주기를 수학적 계산으로 도출하여 태양의 천구 좌표와 직각좌표를 보다 정확하게 구할 수 있어 산출되는 방위의 정확도를 더욱 높일 수 있다.

천측을 이용하여 방위를 산출하기 위해서는 관측 시간, 선박의 위치, 그리고 천체 즉, 태양의 지위가 필요하다. 천측계산표를 이용하면 자신의 위치에서 태양의 지위를 관측하여 진북 및 선수 방향의 방위를 구할 수 있다. 방위산출의 정확성을 높이기 위해서는 시간오차를 최소화하여야 한다. 그리고 태양의 방위를 측정할 때는 낮은 고도에서 측정하는 것이 좋으며, 태양의 고도를 측정할 때는 고도가 높을수록 더 정확하게 측정할 수 있다. 선박의 위치와 관측시간, 태양의 지위를 알고 있다면 항해삼각형의 방위산출 알고리즘을 이용하여 방위를 구할 수 있다.

본 논문에서는 항해삼각형을 이용하여 계산과정을 단순화한 One Body Fix 위치산출 알고리즘을 제시하였다. 이 알고리즘은 태양의 방위각(z), 적위(Dec), 관측고도를 이용하여 자신의 위치를 산출하는 것이다. 산출된 위치를 바탕으로

태양방위각표 및 천측계산표에 나와 있는 진북을 구하고 선박의 heading을 산출하여 오차를 보정할 수 있다.

본 논문에서는 천문항해를 위한 방위측정 및 계산과정을 방위산출 알고리즘으로 구체화하고, 컴퓨터 및 IT기술을 접목하여 임베디드 장치를 구현하였다. 구현된 장치는 실제 선박에서 사용할 수 있을 정도의 편의성과 정확성을 갖도록 하였다. 시스템을 구현하기 위하여 태양의 지위 데이터를 전산화하여 입력하였으며, 천측하는 시간의 태양의 지위 성분인 GHA, Dec를 실시간으로 계산하여 활용할 수 있게 되었다. 시스템은 임베디드 형태로 SW와 HW를 구현하고 운용자의 편의성을 높이기 위하여 천측 및 계산과정을 자동화하였으며, 이를 통해 방위산출 시간을 줄이도록 하였다.

구현된 임베디드 장치의 정확성을 알기 위하여 실험을 진행하였다. 실험 결과 평균 0.2° 미만의 오차를 나타내었으며, 이 결과는 IMO 규정과 각종 방위제공 장비들의 오차 한계 이내에 있는 수준이었다. 구현된 시스템의 운용상 편의성과 방위의 정확성을 고려할 때 본 논문에서 구현한 임베디드 장치의 성능은 충분히 만족스럽다고 할 것이다.

오늘날 GPS 및 자이로컴퍼스 등을 이용하여 선박의 위치나 방위를 쉽게 찾을 수 있지만, 전파교란이나 장비고장 등의 경우에는 제 기능을 발휘할 수 없다는 한계점을 가지고 있다. 하지만 태양 관측을 통해 진북 및 선박의 heading을 산출할 수 있는 본 논문의 연구결과를 활용하여 다른 센서들과 결합한다면 하나의 완전한 컴퍼스의 구현도 가능할 것으로 생각된다. 본 논문의 연구결과가 해상 또는 선박, 그리고 육상에서 방위의 정확성을 요구하는 다양한 장비나 시스템의 개발 등에도 활용되기를 기대한다.

## 참고문헌

- [1] International Maritime Organization, 2011, *High-Level Action Plan of the Organization and Priorities for the 2012-2013 Biennium*, IMO Resolution A.1038(27), [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Documents/A - Assembly/1038\(27\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Documents/A - Assembly/1038(27).pdf) (Accessed 10 Oct 2018)
- [2] 해양수산부 정책브리핑, 2016, *e-Navigation*, <http://www.korea.kr/policy>
- [3] Lee, S. G.(2002), *The theory of new navigation' s equipments*, Dasom Publishing,
- [4] International Maritime Organization(1998), *Adoption of New and Amended Performance Standards for Navigational Equipment, Annex 2. Recommendation on Performance Standards for Marine Transmitting Magnetic Heading Devices (TMHDs)*, IMO Resolution MSC. 86(70) [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\)/Documents/MSC.86\(70\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MSC.86(70).pdf) (Accessed 10 Oct 2018)
- [5] International Maritime Organization(2000), *Adoption of Amendments to the Protocol of 1988 Relating to the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, As Amended*, IMO Resolution MSC. 100(73), [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\)/Documents/MSC.100\(73\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MSC.100(73).pdf) (Accessed 10 Oct 2018)
- [6] Thomas J. Cutler, *“Dutton’ s Natical Navigation”*, Fifteenth edition, U. S. Naval Institute Press, 2004.
- [7] 박양기, 박생기, 2007. *지문항해*, 연경문화사.
- [8] International Maritime Organization(1979), *Performance Standards for Gyro-Compass*, IMO Resolution A. 424(XI), [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Documents/A - Assembly/424\(11\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Documents/A - Assembly/424(11).pdf) (Accessed

10 Oct 2018)

- [9] International Maritime Organization(1979), *Index of IMO Resolution*, <http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/Default.aspx> (Accessed 10 Oct 2018)
- [10] International Maritime Organization(2000), *Performance Standards for Marine Transmitting Heading Devices (THD)*, IMO Resolution MSC. 116(73), [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\)/Documents/MSC.116\(73\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MSC.116(73).pdf) (Accessed 10 Oct 2018)
- [11] International Maritime Organization(2000), *Regulation 19, Carriage Requirements for Shipborne Navigational Systems and Equipment*, IMO Resolution MSC. 99(73) [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\)/Documents/MSC.99\(73\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MSC.99(73).pdf) (Accessed 10 Oct 2018)
- [12] International Maritime Organization(1995), *Performance Standards for Gyro-Compass for High-Speed Craft*, IMO Resolution A. 821(19), [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/Assembly-\(A\).aspx](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Pages/Assembly-(A).aspx) 821(19).pdf (Accessed 10 Oct 2018)
- [13] 박성기, 박양기, 2010. *천문항해*, 연경문화사.
- [14] 윤여정, 전승환, 2013. *천문항해학*, 한국해양대학교 해사도서출판부.
- [15] 해양수산부 국립해양조사원, 2016. *2016년 천측력*, 국립해양조사원.
- [16] P. Bretagnon, “Théorie du mouvement de l’ensemble des planètes. Solution VSOP82” , *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 114, pages 278-288 (1982).
- [17] P. Bretagnon, G. Francou, “Planetary theories in rectangular and spherical variables. VSOP87 solutions” , *Astronomy and astrophysics*, Vol. 202, pages 309-315(1988).

- [18] Jean, Meeus. 2015. *Astronomical Algorithms*, Willmann-Bell, Inc.,
- [19] 해양수산부 국립해양조사원, 2017. *2017년 천측력*, 국립해양조사원.
- [20] 해양수산부 국립해양조사원, 2018. *2018년 천측력*, 국립해양조사원.
- [21] Marine Data Systems. *MD69BR/BO/Ship Repeater for Compasses*. <http://www.nauticexpo.com/prod/marine-data-systems/> (Accessed 10 Oct 2018)
- [22] 국립해양조사원, 2013, *태양방위각표*, 부산, 국립해양조사원
- [23] 국립해양조사원, 2011. *천측 계산표 제1권(Lat 0° ~15°)*, 부산, 국립해양조사원.
- [24] 국립해양조사원, 2012. *천측 계산표 제2권(Lat 15° ~30°)*, 부산, 국립해양조사원.
- [25] 국립해양조사원, 2009. *천측 계산표 제3권(Lat 30° ~45°)*, 부산, 국립해양조사원.
- [26] 국립해양조사원, 2010. *천측 계산표 제4권(Lat 45° ~60°)*, 부산, 국립해양조사원.
- [27] 국립해양조사원, 2007. *천측 계산표 제5권(Lat 60° ~75°)*, 부산, 국립해양조사원.
- [28] 국립해양조사원, 2010. *천측 계산표 제6권(Lat 75° ~90°)*, 부산, 국립해양조사원.
- [29] Karl, John H. 2011. *Celestial Navigation in the GPS Age*, PARADISE CAY Publications.
- [30] Tokyo Keiki(2018), *Gyrocompass TG-8000* Data- sheet, <https://www.tokyokeiki.jp/e/products/detail.html?pdid=155> (Accessed 15 Oct 2018)
- [31] Japan Radio Co. Ltd., *3D Dynamic sensor GPS COMPASS / GPS NAVIGATER*: JLR-31/JLR-21 Brochure, [http://www.jrc.co.jp/jp/product/lineup/jlr21\\_31/index.html](http://www.jrc.co.jp/jp/product/lineup/jlr21_31/index.html) (Accessed 22 Oct 2018)
- [32] International Maritime Organization(2004), *Application of Performance Standards for Transmitting Heading Devices (THDs) to Marine Transmitting Magnetic Heading Devices (TMHDs)*, IMO Resolution MSC. 166(78) [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\)/Documents/MSC.166\(78\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MSC.166(78).pdf) (Accessed 18 Oct 2018)

- [33] International Maritime Organization(2004), *Amendments to the Protocol of 1988 Relating to the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974*, IMO Resolution MSC. 171(79) [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\)/Documents/MSC.171\(79\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MSC.171(79).pdf) (Accessed 18 Oct 2018)
- [34] International Maritime Organization(2012), *Amendments to the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, As Amended*, , IMO Resolution MSC. 338(91) [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-\(MSC\)/Documents/MSC.338\(91\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-(MSC)/Documents/MSC.338(91).pdf) (Accessed 18 Oct 2018)
- [35] 신옥현, 2017, “위성항법 교란기술 현황 및 발전방향” 2017 전자전워크숍 발표자료, 국방과학연구소 주관



## Appendix A. Planets: Periodic Terms

Planet	Series	No.	A	B	C
EARTH	L0	1	175347046	0	0
		2	3341656	4.6692568	6283.07585
		3	34894	4.62610	12566.1517
		4	3497	2.7441	5753.3849
		5	3418	2.8289	3.5231
		6	3136	3.6277	77713.7715
		7	2676	4.4181	7860.4194
		8	2343	6.1352	3930.2097
		9	1324	0.7425	11506.7698
		10	1273	2.0371	529.6910
		11	1199	1.1096	1577.3435
		12	990	5.233	5884.927
		13	902	2.045	26.298
		14	857	3.508	398.149
		15	780	1.179	5223.694
		16	753	2.533	5507.553
		17	505	4.583	18849.228
		18	492	4.205	775.523
		19	357	2.920	0.067
		20	317	5.849	11790.629
		21	284	1.899	796.298
		22	271	0.315	10977.079
		23	243	0.345	5486.778
		24	206	4.806	2544.314
		25	205	1.869	5573.143
		26	202	2.458	6069.777
		27	156	0.833	213.299
		28	132	3.411	2942.463
		29	126	1.083	20.775
		30	115	0.645	0.980
		31	103	0.636	4694.003
		32	102	0.976	15720.839
		33	102	4.267	7.114
		34	99	6.21	2146.17
		35	98	0.68	155.42
		36	86	5.98	161000.69
		37	85	1.30	6275.96
		38	85	3.67	71430.70
		39	80	1.81	17260.15
		40	79	3.04	12036.46

		41	75	1.76	5088.63
		42	74	3.50	3154.69
		43	74	4.68	801.82
		44	70	0.83	9437.76
		45	62	3.98	8827.39
		46	61	1.82	7084.90
		47	57	2.78	6286.60
		48	56	4.39	14143.50
		49	56	3.47	6279.55
		50	52	0.19	12139.55
		51	52	1.33	1748.02
		52	51	0.28	5856.48
		53	49	0.49	1194.45
		54	41	5.37	8429.24
		55	41	2.40	19651.05
		56	39	6.17	10447.39
		57	37	6.04	10213.29
		58	37	2.57	1059.38
		59	36	1.71	2352.87
		60	36	1.78	6812.77
		61	33	0.59	17789.85
		62	30	0.44	83996.85
		63	30	2.74	1349.87
		64	25	3.16	4690.48
EARTH	L1	1	628331966747	0	0
		2	206059	2.678235	6283.075850
		3	4303	2.6351	12566.1517
		4	425	1.590	3.523
		5	119	5.796	26.298
		6	109	2.966	1577.344
		7	93	2.59	18849.23
		8	72	1.14	529.69
		9	68	1.87	398.15
		10	67	4.41	5507.55
		11	59	2.89	5223.69
		12	56	2.17	155.42
		13	45	0.40	796.30
		14	36	0.47	775.52
		15	29	2.65	7.11
		16	21	5.34	0.98
		17	19	1.85	5486.78
		18	19	4.97	213.30
		19	17	2.99	6275.96
		20	16	0.03	2544.31

		21	16	1.43	2146.17
		22	15	1.21	10977.08
		23	12	2.83	1748.02
		24	12	3.26	5088.63
		25	12	5.27	1194.45
		26	12	2.08	4694.00
		27	11	0.77	553.57
		28	10	1.30	6286.60
		29	10	4.24	1349.87
		30	9	2.70	242.73
		31	9	5.64	951.72
		32	8	5.30	2352.87
		33	6	2.65	9437.76
		34	6	4.67	4690.48
EARTH	L2	1	52919	0	0
		2	8720	1.0721	6283.0758
		3	309	0.867	12566.152
		4	27	0.05	3.52
		5	16	5.19	26.30
		6	16	3.68	155.42
		7	10	0.76	18849.23
		8	9	2.06	77713.77
		9	7	0.83	775.52
		10	5	4.66	1577.34
		11	4	1.03	7.11
		12	4	3.44	5573.14
		13	3	5.14	796.30
		14	3	6.05	5507.55
		15	3	1.19	242.73
		16	3	6.12	529.69
		17	3	0.31	398.15
		18	3	2.28	553.57
		19	2	4.38	5223.69
		20	2	3.75	0.98
EARTH	L3	1	289	5.844	6283.076
		2	35	0	0
		3	17	5.49	12566.15
		4	3	5.20	155.42
		5	1	4.72	3.52
		6	1	5.30	18849.23
		7	1	5.97	242.73
EARTH	L4	1	114	3.142	0
		2	8	4.13	6283.08
		3	1	3.84	12566.15

EARTH	L5	1	1	3.14	0
EARTH	B0	1	280	3.199	84334.662
		2	102	5.422	5507.553
		3	80	3.88	5223.69
		4	44	3.70	2352.87
		5	32	4.00	1577.34
EARTH	B1	1	9	3.90	5507.55
		2	6	1.73	5223.69
EARTH	R0	1	100013989	0	0
		2	1670700	3.0984635	6283.0758500
		3	13956	3.05525	12566.15170
		4	3084	5.1985	77713.7715
		5	1628	1.1739	5753.3849
		6	1576	2.8469	7860.4194
		7	925	5.453	11506.770
		8	542	4.564	3930.210
		9	472	3.661	5884.927
		10	346	0.964	5507.553
		11	329	5.900	5223.694
		12	307	0.299	5573.143
		13	243	4.273	11790.629
		14	212	5.847	1577.344
		15	186	5.022	10977.079
		16	175	3.012	18849.228
		17	110	5.055	5486.778
		18	98	0.89	6069.78
		19	86	5.69	15720.84
		20	86	1.27	161000.69
		21	65	0.27	17260.15
		22	63	0.92	529.69
		23	57	2.01	83996.85
		24	56	5.24	71430.70
		25	49	3.25	2544.31
		26	47	2.58	775.52
		27	45	5.54	9437.76
		28	43	6.01	6275.96
		29	39	5.36	4694.00
		30	38	2.39	8827.39
		31	37	0.83	19651.05
		32	37	4.90	12139.55
		33	36	1.67	12036.46
		34	35	1.84	2942.46
		35	33	0.24	7084.90
		36	32	0.18	5088.63

		37	32	1.78	398.15
		38	28	1.21	6286.60
		39	28	1.90	6279.55
		40	26	4.59	10447.39
EARTH	R1	1	103019	1.107490	6283.075850
		2	1721	1.0644	12566.1517
		3	702	3.142	0
		4	32	1.02	18849.23
		5	31	2.84	5507.55
		6	25	1.32	5223.69
		7	18	1.42	1577.34
		8	10	5.91	10977.08
		9	9	1.42	6275.96
		10	9	0.27	5486.78
EARTH	R2	1	4359	5.7846	6283.0758
		2	124	5.579	12566.152
		3	12	3.14	0
		4	9	3.63	77713.77
		5	6	1.87	5573.14
		6	3	5.47	18849.23
EARTH	R3	1	145	4.273	6283.076
		2	7	3.92	12566.15
EARTH	R4	1	4	2.56	6283.08

