

工學碩士 學位論文

항해중인 선박의 내항성능평가를 위한
선체운동계측시스템 개발

Development of A Hull Motion Measurement System
for Evaluating the Seakeeping Performance of a ship

指導教授 孔 吉 永

2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

運航시스템工學科

金 大 楷

本 論文을 金大楷의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 宋 在 旭



委 員 工學博士 李 允 石



委 員 工學博士 孔 吉 永



2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

목 차

Abstract	vi
Nomenclature	viii
제 1 장 서 론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 관련 연구 동향	3
제 2 장 내항성능 평가기술	5
2.1 내항성능 평가요소 및 시스템적 결합	5
2.2 파랑중의 선체운동	8
2.3 해양파 스펙트럼	10
2.4 내항성능 평가치 및 위험도	12
2.4.1 평가치	12
2.4.2 위험도	13
2.4.3 최대 위험도와 상대 위험도	13
2.5 내항성능 평가지표	15
2.5.1 내항성능 평가요소의 변환 평가치	15
2.5.2 내항성능 지표의 정의	17
2.6 임의의 대표적인 요소에 의한 내항성능 평가	20
2.7 상하 가속도를 계측한 내항성능 평가	21
2.8 수치 시뮬레이션	22
2.8.1 수치 계산의 평가방법	24
2.8.2 수치 계산 결과	24

제 3 장 선체운동계측시스템의 설계	32
3.1 선체운동계측시스템 개요	32
3.2 선체운동계측시스템의 설계	33
3.2.1 3축 가속도계 (3-Dimensional Accelerometer)	36
3.2.2 2축 경사계 (2-Dimensional Tilt Sensor)	38
3.2.3 변위계 (Displacement Sensor)	40
3.2.4 방위계 (Azimuth Sensor)	42
제 4 장 선체운동계측시스템의 개발	44
4.1 선체운동계측해석 시스템	44
4.2 선체운동계측시스템의 하드웨어 구성	47
4.2.1 신호처리절차	47
4.2.2 가속도계 (Accelerometer)	49
4.2.2.1 가속도 계측 이론	49
4.2.2.2 3축 가속도계 (3-Dimensional Accelerometer)	51
4.2.3 2축 경사계 (2-Dimensional Tilt Sensor)	53
4.2.4 DAQ Card (Data Acquisition Card)	55
4.2.5 단자대 (Terminal Plate)	57
4.2.6 전원공급장치 (Power Supply)	59
4.3 선체운동 해석 소프트웨어	61
4.4 선체운동계측시스템의 특징	67
제 5 장 결 론	69
참 고 문 헌	71

List of Figures

Fig. 2.1 Serial combination of factors for evaluating seakeeping performance	6
Fig. 2.2 Coordinate system	9
Fig. 2.3 Seakeeping performance index of 'T/S HANNARA' (Sea State 8, $F_n=0.2$)	26
Fig. 2.4 Seakeeping performance index of 'T/S HANNARA' (Sea State 8, $F_n=0.272$)	27
Fig. 2.5 Comparison of navigational safety of 'T/S HANNARA' considering and not considered speed loss (Sea State 8, $F_n=0.2$)	28
Fig. 2.6 Comparison of navigational safety of 'T/S HANNARA' considering and not considered speed loss (Sea State 8, $F_n=0.275$)	29
Fig. 2.7 Evaluation diagram of navigational safety of 'T/S HANNARA' ($F_n=0.2$)	30
Fig. 2.8 Evaluation diagram of navigational safety of 'T/S HANNARA' ($F_n=0.275$)	31
Fig. 3.1 Total safety evaluation system	32
Fig. 3.2 Configuration of measurement system	33
Fig. 3.3 Internal flow charts of hardware system	34
Fig. 3.4 Definition of 6-degree of freedom in right hand system	35
Fig. 3.5 3-Dimensional accelerometer	36
Fig. 3.6 2-Dimensional tilt sensor	38
Fig. 3.7 Displacement sensor	40
Fig. 3.8 Azimuth sensor	42
Fig. 4.1 Flow chart in measurement & analysis system	45
Fig. 4.2 Hull motion measurement system	46
Fig. 4.3 Hardware system of measuring device	48
Fig. 4.4 Real model of hardware system	48
Fig. 4.5 Accelerometer principle	49
Fig. 4.6 Dimensions of 3-dimensional accelerometer [Seika SW3]	52

Fig. 4.7 Installation of 3-dimensional accelerometer	52
Fig. 4.8 Block diagram of 2-dimensional tilt sensor [Seika SB2I]	53
Fig. 4.9 Dimensions of 2-dimensional tilt sensor [Seika SB2I]	54
Fig. 4.10 Installation of 2-dimensional tilt sensor	54
Fig. 4.11 Arrangement of DAQ card	55
Fig. 4.12 Installation of DAQ card	56
Fig. 4.13 USB to RS-232 convertor [UTS2009]	57
Fig. 4.14 Installation of terminal plate	58
Fig. 4.15 Installation of USB to RS-232 convertor	58
Fig. 4.16 Block diagram of power supply [UP30DAE]	59
Fig. 4.17 Dimensions of power supply [UP30DAE]	60
Fig. 4.18 Installation of power supply	60
Fig. 4.19 Chart option screen	62
Fig. 4.20 File saving and sampling time setting	62
Fig. 4.21 Monitoring and analysis program	63
Fig. 4.22 Evaluation diagram of navigational safety by programming	64
Fig. 4.23 Block diagram of integrated seakeeping performance evaluation system	65
Fig. 4.24 Replay function of saved file	66

List of Tables

Table 1.1 Solutions for the safety of navigation	1
Table 2.1 Beaufort scale number and wave characteristics	22
Table 2.2 Principal particulars of T/S HANNARA	23
Table 3.1 3-Dimensional accelerometer specification	37
Table 3.2 2-Dimensional tilt sensor specification	39
Table 3.3 Displacement sensor specification	41
Table 3.4 Azimuth sensor specification	43
Table 4.1 Function of USB to RS-232 convertor	57

Development of A Hull Motion Measurement System for Evaluating the Seakeeping Performance of a Ship

Dae-Hae Kim

Department of Ship Operation System Engineering,
Graduate School of Korea Maritime University

ABSTRACT

In order to evaluate the seakeeping performance at sea and the safety of mooring on berthing, it is necessary that the ship dynamic motion induced wave and wind should be measured in real time domain for the validity of theoretical evaluation method such as seakeeping performance and safety of mooring.

The seakeeping performance can be evaluated by measuring only hull vertical acceleration of a ship.

The seakeeping performance can be defined as the ability of a ship to go to sea, and to accomplish its missions successfully and safely even in adverse environmental conditions.

In this paper, the basic design of sensors is discussed and the system configurations were shown. The developed system consists of 4 kinds of sensors, i.e. three dimensional accelerometer, two

dimensional tilt sensor, two displacement sensors and azimuth sensor.

Using this Hull Motion Measuring System(HMMS), it can be obtained the 6 degrees of freedom of ship dynamic motions at sea and on berthing such as rolling, pitching, yawing, swaying, heaving and surging under the certain external forces.

The Hull Motion Measuring System is useful to evaluate the seakeeping performance and the safety of mooring of a ship. The results are applied to develop the optimum ship route system and next generation voyage data recorder.

Nomenclature

- \bar{E}_i : 내항성능 평가요소의 변환 평가치
 \bar{E}_T : 선박 시스템의 내항성능 변환 평가치
 E_{Tc} : 선박 시스템의 내항성능 한계 평가치
 E_{Xi} : 내항성능 평가요소의 평가치
 E_{Xic} : 내항성능 평가요소의 한계 평가치
 F_n : Froude number (= $\frac{V}{\sqrt{gL}}$)
 g : 중력 가속도
 $H_{X_i}(\omega, \mathbf{V}, X - \Theta)$: 내항성능 평가요소의 응답 함수
 L : 선박의 길이
 N_e : 주기관의 회전수
 N_p : 프로펠러 회전수
 Q_{Xic} : 내항성능 평가요소의 한계발생확률
 $Q(X_i)$: 내항성능 평가요소의 발생 확률
 $Q(t)$: 내항성능 평가요소인 현상이 최저 1회 발생할 확률
 Q_e : 주기의 토크
 Q_p : 프로펠러 토크
 $\mathbf{q}(X_i)$: Rayleigh 분포의 1차원 확률밀도함수
 P_i : 내항성능 평가요소의 신뢰도 함수
 P_T : 내항성능 신뢰도 함수
 R : 선체 저항
 r : 주기관과 프로펠러의 회전수 비
 S : 해면 상태
 $S_{X_i}(\omega, X)$: 내항성능 평가요소의 스펙트럼

$S_{\zeta}(\omega)$: 장파정 해양파 스펙트럼
$S_{\zeta}(\omega, \theta)$: 단파정 해양파 스펙트럼
T_P	: 프로펠러 추력
t	: 추력 감소 계수
U	: 프로펠러 유입 속도
V	: 선박의 속도
X_i	: 내항성능 평가요소
X_{ic}	: 내항성능 평가요소의 한계치
$X_i(t)$: 내항성능 평가요소의 확률 과정
w	: 반류 계수
$\angle N$: 자연적 감속
$\angle R$: 선체 저항 증가량
η_t	: 전달 계수
η_R	: 프로펠러 효율비
Λ	: 주기관의 1회전당 연료 주입량
σ_{X_i}	: 내항성능 평가요소의 표준 편차
$\sigma_{X_i}^2$: 내항성능 평가요소의 분산치
μ_T	: 내항성능지표 (Seakeeping Performance Index)
μ_m	: 내항성능 평가요소의 최대 위험도
μ_{X_i}	: 내항성능 평가요소의 위험도
ω	: 해양파 주파수
χ	: 선박과 파와의 만남각

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근에 건조되는 선박은 과학 기술의 발전에 따라 자동화, 대형화, 지능화 및 고속화 되어가고 있다. 선박을 운항하는 해기사들은 불규칙한 해상에서 바람, 파랑 등의 외력에 대응하여, 고도의 안전성과 신뢰성을 유지하면서 항해의 목적을 달성하고 해양사고를 미연에 방지하는 것이 주된 임무이다.

해양사고의 주요한 유형은 충돌, 기관손상, 화재·폭발, 좌초 그리고 전복·침몰사고 등이다. Table 1.1에 나타낸 바와 같이 이러한 해양사고를 방지하기 위한 노력과 선박자동화의 일환으로 기존의 장비가 보다 최신화되고 또한 새로운 장비가 개발되고 있다.

Table 1.1 Solutions for the safety of navigation

Objective	Type of Information	Nautical Equipment
Reducing the risk of collision	Traffic situation	Radar (ARPA) AIS
Reducing the risk of grounding	Sheltered waters	GPS ECDIS Echo sounder
Reducing the risk of heavy weather damage	Weather condition and operational limits	Weather routing Ballasting system Automatic Operation System

차세대를 지향하는 조선 및 항해 기술의 과제는 선박이 출항지에서의 적화작업으로부터 기항지에서의 하역작업까지 고도의 안전성과 신뢰성을 유지하면서, 최적의 항로와 속력을 택하여 가장 경제적인 해상 수송을 수행하는 고 신뢰도 지능화 선박을 연구·개발하는 것이다.

고도의 안전성 및 신뢰도를 확보할 수 있는 지능화 선박의 자동운항시스템을 개발하기 위해서 반드시 해결해야 할 중요한 과제는, 선박이 어떤 해상을 항해함에 있어 어느 정도의 운항 속도로 항해해야 하는 것인가와 선박의 종합적인 내항 성능이 어느 정도인가를 정량적으로 판단하는 것이다. 그리고 만약 어떤 선박이 특정 기상 또는 해상 상태에서 하역작업 또는 항해가 위험하다고 판단되는 경우, 그 위험 상태가 어떤 요소로 인해 유발되었으며 어떤 조치를 어떻게 얼마만큼 취해야 선박의 안전을 확보할 수 있는가 하는 것이다.

파랑중 항해하는 선박의 항해 안전성을 평가하는 방법으로 내항성능 평가를 이용한다. 내항성능(Seakeeping performance)이란 「선박이 바람이나 파랑 등의 외력을 받으며 항행할 경우 유효한 평균선속의 저하를 최소로 하여 안전하고 쾌적하게 항해할 수 있는 성질」 또는 「어떤 해상상태에서 예정속도를 유지하고 선체의 손상이나 성능의 저하 없이 항해가 가능한 성질」이라 정의하고 있다.

내항성능의 평가요소는 한계발생확률이 각각 다르게 제안되어져 있기 때문에 선박전체의 내항성능을 평가하기 위해서는 모든 요소의 계측을 필요로 한다. 그러나, 모든 요소에 센서를 설치하여 평가한다는 것은, 계측을 위한 센서의 설치가 불가능한 것도 있고, 경제적인 면에서도 비용의 과다로 계측상 문제가 있다.

이런 계측상의 어려움을 해결할 수 있는 평가방법으로, 임의의 대표 요소 의한 내항성능 평가 즉, 선박 운항자들이 감각적인 면에서 정량화된 평가요소로 채택하기 쉬운 상하가속도를 계측하여 종합적인 내항성능을 평가할 수 있는 내항성능지표(SPI: Seakeeping Performance Index)가 개발되어 있다.¹⁾

따라서 본 연구에서는 그러한 평가방법을 실용화하여 실해역을 항해중인 선박에 적용할 수 있는 선체운동계측장치를 제작하였다. 즉, 선박에 하드웨어 장치인 선체운동 가속도 계측·해석 시스템을 탑재하여 실해역에서의 상하 및 좌우 가속도를 계측하고, 계측된 데이터를 해석 및 계산을 통해 선박안전성능을 평가하고, 그 당시의 항해위험도를 컴퓨터 화면상에 화상 처리함으로써 시각적으로 쉽게 항해안전성을 평가할 수 있는 선체운동계측시스템을 개발하게 되었다.

본 연구의 최종적인 목표는 선박의 내항성능과 정박 중인 선박의 계류 안전성 평가에 기초가 되는, 외력에 따른 선체운동 평가를 위한 선체운동계측시스템의 개발에 있다.

1.2 관련 연구 동향

선박의 내항성능은 황천 등과 같은 비교적 거친 해상상태에서 특정 항로에 운항 중인 선박의 안전성을 내항성능 이론을 이용하여 평가하고 있다. 또 최근 내항성능 관련 연구¹⁻³⁾는 충분한 이론적인 연구 성과를 기초로 기존 내항성능 평가 방법에 대한 문제점을 개선·보완하여, 실선에서 임의의 대표 한 요소만을 계측하여 선박 전체의 내항성능을 평가하는 항해안전성 종합 평가시스템을 구축하여 본격적인 실선 실험을 준비하고 있다. 이러한 항해안전성 종합 평가시스템¹⁾은 그 동안 선박 운항자의 감각적인 면에서 정량화된 평가요소로 채택하기 쉬운 상하가속도의 1/3 유의치를 계측하여, 다른 평가 요소와의 상관관계를 도출함으로써 선박의 종합적인 내항성능을 평가하는 시스템^{2,3)}이다.

한편 계류 안전성^{4,5)}은 특정 부두에 계류하여 하역작업을 수행하고 있는 선박이 파랑, 바람, 조류 등과 같은 외력 하에서 수반되는 선체의 동적 동요를 해석하여 선체동요⁴⁾에 따른 한계 하역치의 설정 및 계류 한계 외력 등을 이론적 방법⁵⁾

으로 접근하여 평가하는 연구가 진행되어져 왔다. 최근 계류 안전성 관련 연구는 신항만 신설이나 전용부두의 설계 시에 외력에 따른 계류 선박의 동적 동요를 해석하여 그 결과를 부두 시설물이나 방충재 등의 최대허용하중 설계에 이용하고 있다.

이러한 내항성능 및 계류 안전성 평가에 가장 중요한 요소는 외력에 따른 선체의 동적 동요를 정량적인 방법으로 분석하여, 외력의 크기와 방향 그리고 선형에 따라 일반화하는 일이라 할 수 있다. 그 동안 항해 및 계류 안전성과 관련하여 이론적인 접근 방식을 기초로한 수많은 연구들이 수치 시뮬레이션 또는 수리 모형 시험을 중심으로 진행되어져 이론적인 부분에서는 어느 정도 가시적인 성과가 있었다. 앞으로의 과제는 이러한 이론적 연구를 실선에 적용하여 그 연구 결과를 검증한 후 선박의 운항자가 직접적으로 활용할 수 있도록 실용화 하는 작업이라 할 수 있다.

따라서 본 연구는 항행 안전성과 계류 안전성 평가에 있어 기본이 되는 특정 조건 하에서 발생하는 선체의 동적 동요를 평가할 수 있는 선박 탑재용 선체운동 계측시스템을 개발하는데 있다.

제 2 장 내항성능 평가기술

2.1 내항성능 평가요소 및 시스템적 결합

과량중 선박의 내항성능에 관한 현재까지의 연구에 의하면, 불규칙한 해상을 항행하는 선박의 인명, 선체, 화물의 안전을 고려하여 과량 등의 외력에 대한 선박의 내항성능을 평가하기 위해, 선체의 운동으로부터 발생하는 다음과 같은 현상을 내항성능 평가요소로 하고 있다.

- (1) 선수 갑판 침수
- (2) 프로펠러 레이싱
- (3) 슬래밍
- (4) 횡동요
- (5) F.P.의 상하 가속도
- (6) S.S. 8½의 좌우 가속도

과량중을 항해하는 선박에서 각 내항성능 평가요소는 주어진 한계치를 초과할 때에 그 현상이 발생하고, 그 발생 확률이 주어진 한계발생확률을 넘을 때 선박은 과량중에서 그 기능을 잃거나 아니면 위험하게 된다. 이와 같은 각 내항성능 평가요소의 시스템적 결합은 Fig. 2.1에 나타난 바와 같이 직렬 결합(serial combination) 구조로서, 한 개의 요소라도 그 발생 확률이 한계발생확률을 초과하게 되면 선박은 기능을 잃게 된다.

한편, 이들 각 내항성능 평가요소들에 대해 일반적으로 적용되고 있는 한계치와 한계발생확률은 다음과 같다. 여기에서 각 내항성능 평가요소에 대한 한계발생확률이 각각 다르게 제안되어져 있다. 이것은 각 요소에 대한 연구가 각각 행하여져 얻은 결과이기도 하고, 다른 한편으로는 내항성능 평가시 각 요소의 중요도를 달리 부여한 의미도 있다.

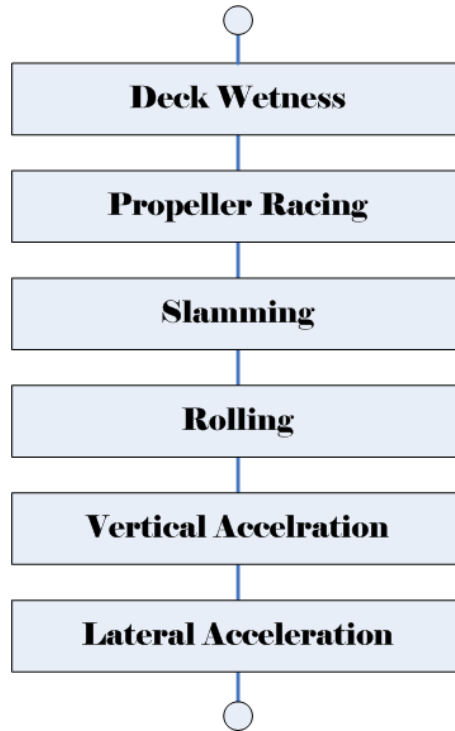


Fig. 2.1 Serial combination of factors for evaluating seakeeping performance

(1) 선수 갑판 침수

선수 갑판 침수의 한계치는 모형 시험 결과에 의해 해석된 정수중 항주시의 수위 상승을 고려한 선수 수선(F.P.)의 유효 건현이다. 한계발생확률은 2×10^{-2} 이다.

(2) 프로펠러 레이싱

Nakamura, Naito 등의 실험에 의하면 프로펠러 상단이 수면 가까이 왔을 때, 프로펠러 특성상 토크의 급격한 변화가 일어난다. 따라서 프로펠러 레이싱의 한계치는 정수중 항주시의 상대 수위 상승을 고려하지 않은 상태에서 프로펠러 반경의 $\frac{1}{3}$ 이 노출되는 것이다. 한계발생확률은 10^{-1} 이다.

(3) 슬래밍

슬래밍의 한계치는 S.S.8½에서의 선저 노출과 동시에, 파에 돌입할 때의 선저의 파면에 대한 상대 속도가 한계 속도(threshold velocity)를 초과하는 것을 한계치로 한다. 여기에서 한계 속도는 $0.09\sqrt{gL}$ 을 채택한다. 한계발생확률은 10^{-2} 이다.

(4) 횡동요

횡동요의 한계치는 정수중 항주시 선체 중앙부 Weather Side의 Bulwark Top에 해수가 유입하는 것을 한계 상태로 하여 흘수면에서 Bulwark Top까지의 높이이다. 한계발생확률은 10^{-3} 이다.

(5) F.P.의 상하 가속도

선체 F.P.에서 작용하는 상하 가속도는 Aertssen이 설계 단계에서 제안한 선박 길이에 따른 가속도의 한계치를 이용한다. 한계발생확률은 10^{-3} 이다.

(6) S.S.8½의 좌우 가속도

항해하는 선박에서 인간은 좌우 가속도에 대해 민감하게 반응한다는 연구 결과를 바탕으로, 한계치는 조타실, 통신실 등에서의 운항자 작업성을 고려하여 0.6g을 적용한다. 한계발생확률은 10^{-3} 이다.

2.2 파랑중의 선체운동

불규칙 파랑중에서 항행하는 선박의 선체운동 응답치를 해석하기 위해서는 먼저 규칙파에 대한 선체운동의 응답함수가 필요하다. 이러한 규칙파중에서 선박이 파로부터 받는 힘을 명확히 파악하고, 선체의 여러 가지 운동과 힘을 측정하기 위해서 주로 Strip 이론이 널리 사용되고 있다.

Strip 이론은 선체를 2차원 단면(Strip)을 갖는다고 가정하고, 선체를 여러 개의 Strip으로 나누어 각각의 Strip에 작용하는 2차원 유체력들을 선박의 길이 방향으로 적분함으로써 3차원인 선체에 작용하는 유체력들을 산정하는 방법이다.

그리고, 파랑중 선체운동계산을 위한 좌표계는 Fig. 2.2와 같다.

- 즉, $O' - XYZ$: 정지공간 좌표계
- $O_0 - x_0y_0z_0$: 등속이동 공간 좌표계
- $O - xyz$: 원점을 정지 자유표면에 놓은 선체 고정 좌표계
- $G - x_b y_b z_b$: 원점을 중심에 놓은 선체 고정 좌표계

선박은 파의 진행방향에 대해 X 각도로 이루어지는 직선상을 속도 V 로서 항행을 하고, 평균위치 O_0 의 주위에서 무게중심 G 가 각각의 축 방향 및 축 주위로 미소 진폭의 동요를 한다고 가정한다. 그리고, 위상각은 파정이 선체 중앙의 중심선에 있을 때를 기준으로 하며 위상전진을 (+)로 정한다.

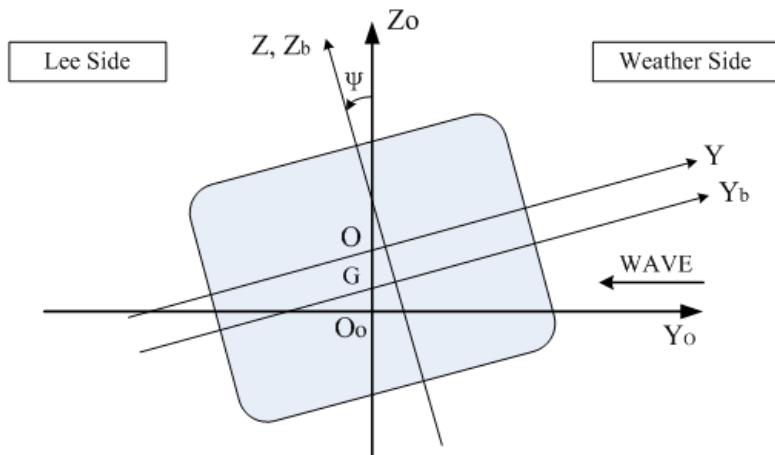
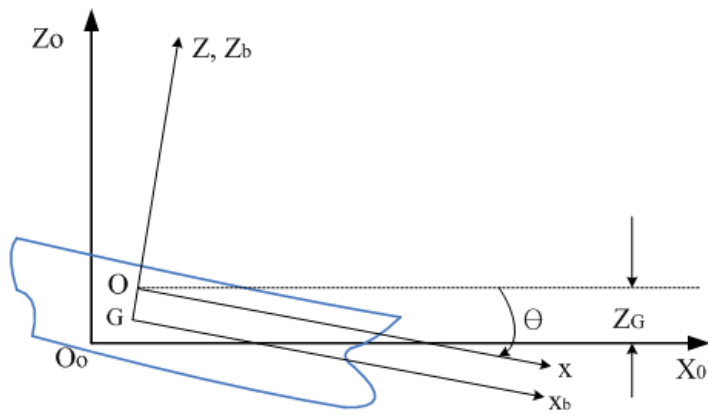
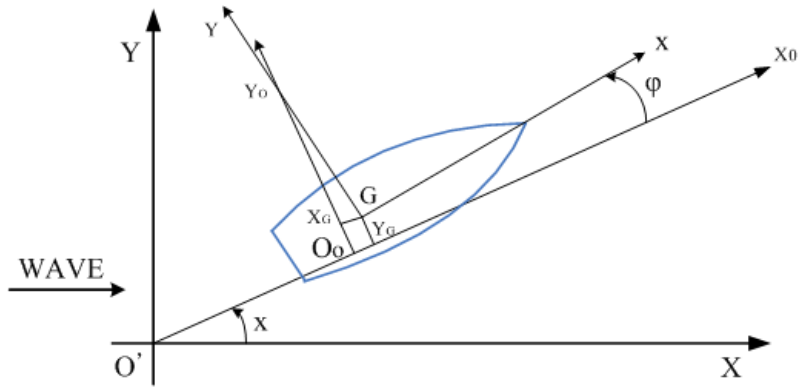


Fig. 2.2 Coordinate system

2.3 해양파 스펙트럼

불규칙한 해상 상태를 해석하기 위하여, 일반적으로 해양파를 다음과 같이 가정하고 분석한다.

- (1) 일정한 주기로 측정된 파고(wave elevation)의 분포는 정규 분포이며, 그 극치는 Rayleigh 분포를 따른다.
- (2) 불규칙한 파의 파형은 서로 다른 파장과 파고를 가진 여러 규칙파의 중첩(superposition)이다.

상기의 가정하에 해양파의 불규칙성은 파 스펙트럼으로 해석할 수 있다. 이론적인 해양파 스펙트럼은 그 동안 많은 해양 학자들에 의해 제안되었으나, 일반적으로 몇가지가 통용되고 있다. 여기에서는 국제선체구조회의(ISSC)에서 채용한 장과정 해양파 스펙트럼인 개량 P-M (Pierson-Moskowitz)형 스펙트럼을 채택하였다. 해양파 스펙트럼을 $S(\omega)$ 이라고 하면 다음과 같다.

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \cdot 0.11 (H_{1/3})^2 T_o \left(\frac{T_o}{2\pi}\omega\right)^{-5} \exp\{-0.44\left(\frac{T_o}{2\pi} \cdot \omega\right)^{-4}\} \quad (2-1)$$

여기서, T_o : 평균파주기

$H_{1/3}$: 유의파고

ω : 파의 원주파수(circular frequency)

또한 실제 해상에 가깝게 표현되는 파 스펙트럼의 방향성 분포에 관해서는 파의 평균 진행 방향에 대해 $-\pi/2 \sim \pi/2$ 의 범위에서는 방향성파의 성분이

분포하고 그 이외의 범위에서는 0으로 가정하면, 방향 성분을 고려한 단파정 해양파 스펙트럼은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 S_{\zeta}(\omega, \theta) &= \frac{2}{\pi} \cdot S(\omega) \cos^2 \theta && ; -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\
 &= 0 && ; \text{그 밖의 경우}
 \end{aligned}
 \tag{2-2}$$

여기서, θ : 파의 평균 진행 방향과 요소파가 이루는 각도

선박이 파도와의 만남각(encounter angle) χ , 속도 V 로서 항행중일 때 선체와 파도의 만남주파수(ω_e)와 파도의 원주파수(ω) 사이에는 $\omega_e = \omega(1 - \frac{\omega V}{g} \cos \chi)$ 의 관계가 성립하므로, ω 로서 표현된 파의 스펙트럼 $S_{\zeta}(\omega, \theta)$ 은 만남 주파수 ω_e 로서 표현된 $S_{\zeta}(\omega_e, \theta)$ 로 변형하여 계산하며, 그 식은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
 \frac{d\omega_e}{d\omega} &= 1 - \frac{2\omega V}{g} \cos \chi \\
 d\omega_e &= (1 - \frac{2\omega V}{g} \cos \chi) d\omega
 \end{aligned}
 \tag{2-3}$$

파도의 원주파수 ω 와 이에 대응하는 ω_e 를 갖는 스펙트럼 아래의 면적은 크기가 서로 같아야 하므로 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 S_{\zeta}(\omega, \theta) d\omega &= S_{\zeta}(\omega_e, \theta) d\omega_e \\
 S_{\zeta}(\omega_e, \theta) &= S_{\zeta}(\omega, \theta) \frac{d\omega}{d\omega_e}
 \end{aligned}
 \tag{2-4}$$

따라서, 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$S_{\zeta}(\omega_e, \theta) = \frac{S_{\zeta}(\omega, \theta)}{1 - (2\omega V/g)\cos\chi} \quad (2-5)$$

2.4 내항성능 평가치 및 위험도

선박의 내항성능 평가는 일반적으로 각 내항성능 평가요소가 그 한계치를 초과하는 발생 확률로부터 정의되는 평가치, 위험도, 최대 위험도, 상대 위험도를 적용한다.

2.4.1 평가치

임의 내항성능 평가요소의 극치 분포는 Rayleigh 분포로서, 그 발생확률을 $Q(\mathbf{X}_i)$ 라고 하면, 임의 내항성능 평가요소의 평가치 $\mathbf{E}_{\mathbf{X}_i}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{E}_{\mathbf{X}_i} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln\{Q(\mathbf{X}_i)\}}} = \left[\frac{\sigma_{\mathbf{X}_i}}{\mathbf{X}_i} \right] \quad (2-6)$$

평가치 $\mathbf{E}_{\mathbf{X}_i}$ 가 0이 되면 임의 요소(X_i)의 신뢰도는 1이 되고, $\mathbf{E}_{\mathbf{X}_i}$ 가 무한대가 되면 X_i 요소의 신뢰도는 0이 된다.

2.4.2 위험도

임의 X_i 요소의 주어진 한계발생확률에 관한 한계 평가치를 $E_{X_{ic}}$ 로 하고, 한계 평가치 $E_{X_{ic}}$ 에 대한 평가치 E_{X_i} 의 비를 X_i 요소의 위험도 μ_{X_i} 라 정의한다.

$$\mu_{X_i} = \frac{E_{X_i}}{E_{X_{ic}}} = \frac{\left[\frac{X_i}{\sigma_{X_{ic}}} \right]}{\left[\frac{X_i}{\sigma_{X_i}} \right]} = \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_{X_{ic}}} \quad (2-7)$$

여기서, $\sigma_{X_{ic}}$: X_i 가 위험하게 되는 한계표준편차

위험도 μ_{X_i} 는 파에 대한 만남각(χ), 선속(V) 및 해상 상태(S)에 따라 변화한다. 여기에서 $\mu_{X_i} \geq 1.0$ 인 경우 X_i 요소가 위험하고, $\mu_{X_i} < 1.0$ 인 경우는 안전하다는 것을 나타낸다.

2.4.3 최대 위험도와 상대 위험도

내항성능 평가요소의 위험도 μ_{X_i} 에서 최대치를 최대 위험도 μ_m 이라 정의한다.

$$\mu_m(X, V, S) = \text{Maximum}[\mu_i(X, V, S)] \quad (2-8)$$

이 μ_m 은 어떤 상황하에서 μ_{X_i} 의 최고치인 값으로서, 그 값은 각 요소에 대한 상대치로 비교되는 값이다.

또한 임의 X_i , X_j 요소의 위험도가 μ_i , μ_j 인 경우, X_i 요소를 기준으로 하여 나타낸 X_j 요소의 위험도의 비를 X_i 요소에 대한 X_j 요소의 상대 위험도 μ_{ij} 라 정의 한다.

$$\mu_{ij} = \frac{\mu_i}{\mu_j} = \frac{\frac{X_i}{\sigma_{X_i}}}{a_{ij} \left[\frac{X_j}{\sigma_j} \right]} = \frac{\sigma_{X_{jc}}}{\sigma_{X_{ic}}} \cdot \frac{\sigma_{X_j}}{\sigma_{X_i}} \quad (2-9)$$

$$\text{단, } a_{ij} = \frac{E_{X_{jc}}}{E_{X_{ic}}} = \frac{\left[\frac{X_{ic}}{\sigma_{X_{ic}}} \right]}{\left[\frac{X_{jc}}{\sigma_{X_{jc}}} \right]}$$

여기에서 $\mu_{ij} > 1.0$ 인 경우는 X_i 요소에 비해 X_j 요소가 더 위험하고, $\mu_{ij} < 1.0$ 인 경우는 그 반대의 의미를 갖는다.

이러한 상대 위험도 μ_{ij} 를 계산함으로써 기준 요소인 X_i 요소와 임의 X_j 요소는 상대적으로 동등하게 성능을 평가할 수 있게 된다. 그것은 X_j 요소의 한계치를 $a_{ij} \cdot \mu_{ij}$ 배한 값이 X_j 요소의 결보기 한계치(X_{jc})로 되기 때문에 기준으로 한 X_i 요소로써 임의의 X_j 요소의 상태를 평가할 수 있다.

2.5 내항성능 평가지표

Fig. 2.1에 나타난 각 내항성능 평가요소에 한계발생확률이 주어져 있는 것은 동일한 위험도를 가지는 요소는 위험하게 되는 정도가 같다는 것을 의미한다. 이것은 신뢰성 공학에서 시스템 요소의 고장 발생 확률이 같은 경우, 그 고장률이 동일하게 되는 것과 같은 의미를 가진다. 그러므로 각 내항성능 평가요소의 위험도가 같은 경우, 그 발생 확률도 같다는 것으로 변환하여 계산하는 것으로 선박 시스템 전체의 항해 안전성을 평가할 수 있는 내항성능지표가 개발되었다. 이 내항성능지표는 임의의 한 개 내항성능 평가요소만을 계측하여도 6개 내항성능 평가요소 전체의 최대 위험도를 계산할 수 있다. 따라서 6개 요소를 모두 계측하지 않아도 전체 선박 시스템의 항해 안전성을 평가할 수 있는 지표이다. 또한 이 지표는 기존의 6개 내항성능 평가요소의 위험도가 모두 1보다 작은 경우 최대 위험도를 이용하면 전체 선박 시스템이 안전하게 평가되는 부분을 보완하여, 6개 내항성능 평가요소를 종합하여 보다 항해 안전을 도모한 평가가 가능하게 한다.⁶⁾

2.5.1 내항성능 평가요소의 변환 평가치

현재까지 연구되어진 바에 따르면, 과량중을 항해하는 선박 시스템의 내항성능을 평가할 수 있는 요소의 한계발생확률이 각각 다르게 설정되어 있다. 따라서 한계발생확률이 큰 내항성능 평가요소에 비해서 작은 요소의 위험도가 전체 선박 시스템의 내항성능 평가에서 무시되어 위험한 상태가 안전한 상태로 평가되는 경우가 있다. 이것을 보완하기 위해서는 각 내항성능 평가요소들이 한계발생확률에 도달하면, 그 위험도가 한계발생확률이 가장 큰 프로펠러 레이싱의 한계발생확률($Q_{pc}=10^{-1}$)에 도달하는 것과 같은 값으로 변환하여 평가하는 것이다. 즉 각 내항성능 평가요소의 위험도가 프로펠러 레이싱의 위험도와

같은 경우, 그 발생 확률도 프로펠러 레이싱의 발생 확률과 동일하게 되는 각 내항성능 평가요소의 평가치(E_i)에 대한 변환 평가치(\bar{E}_i)를 다음과 같이 계산한다.

(1) 프로펠러 레이싱에 대한 변환 평가치

$$\bar{E}_P = \frac{E_P}{\alpha_{PP}} = E_P \cdot \frac{E_{Pc}}{E_{Pc}} = E_P \quad (2-10)$$

여기서,

$$E_P : \text{프로펠러 레이싱의 평가치} \left(\frac{\sigma_P}{X_P} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln(Q_P)}} \right)$$

\bar{E}_P : 프로펠러 레이싱의 변환 평가치

$$E_{Pc} : \text{프로펠러 레이싱의 한계 평가치} \left(\frac{\sigma_{Pc}}{X_{Pc}} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln(0.1)}} \right)$$

(2) 프로펠러 레이싱 이외의 임의 요소에 대한 변환 평가치

$$\bar{E}_i = \frac{E_i}{\alpha_{Pi}} = \frac{E_{Pc}}{E_{ic}} \cdot E_i = \mu_i \cdot E_{Pc}$$

$$\bar{E}_j = \frac{E_j}{\alpha_{Pj}} = \frac{E_{Pc}}{E_{jc}} \cdot E_j = \mu_j \cdot E_{Pc} \quad (2-11)$$

여기서,

$$\alpha_{Pi} : \text{프로펠러 레이싱과 } i \text{ 요소의 한계 평가치의 비} \left(= \frac{E_{ic}}{E_{Pc}} \right)$$

$$\mu_i : i \text{ 요소의 위험도} \left(= \frac{E_i}{E_{ic}} \right)$$

식 2-10, 2-11에서 위험도가 같은 경우 변환 평가치도 같아지며, 그 발생 확률 (\bar{Q}_i)도 같은 값을 가지게 됨을 알 수 있다.

$$\mu_i = \mu_j \Rightarrow \bar{E}_i = \bar{E}_j, \quad \bar{Q}_i = \bar{Q}_j \quad (2-13)$$

2.5.2 내항성능 평가지표의 정의

프로펠러 레이싱에 대한 변환 평가치를 이용하여, N 개의 내항성능 평가요소로 구성되는 선박 전체 시스템의 변환 평가치(\bar{E}_T)와 한계 평가치(E_{TC})에 대한 개념을 분석하여 내항성능 평가지표(μ_T)를 정의한다.

선박 전체 시스템의 변환 평가치 \bar{E}_T 는 다음과 같이 정리하여 나타낼 수 있다.

$$\bar{E}_T = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln(1 - \bar{P}_T)}} \quad (2-14)$$

$$\text{여기서, } \bar{P}_T = \prod_{i=1}^n \bar{P}_i$$

선박의 내항성능 평가요소의 신뢰도 함수 \bar{P}_i 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{P}_i &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{1}{\bar{E}_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i}}{\bar{E}_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i} \cdot X_i}{\sigma_i}\right)^2\right\} \\ &= 1 - Q(X_i)^{\alpha_{P_i}^2} \end{aligned} \quad (2-15)$$

$$\text{여기서, } Q(X_i) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i}{\sigma_i}\right)^2\right\}$$

그리고 선박 시스템의 한계 평가치 E_{Tc} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{Tc} = \frac{1}{\sqrt{-2 \ln(1 - P_{Tc})}} \quad (2-16)$$

여기서,

$$P_{Tc} = \prod_{i=1}^n P_{ic} \quad (2-17)$$

$$P_{ic} = 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_i}{\sigma_{ic}}\right)^2\right\} = 1 - Q_{X_{ic}}$$

P_{Tc} : 내항성능 신뢰도 함수

$Q_{X_{ic}}$: 각 요소의 한계발생확률 (Rayleigh 분포)

따라서 선박 시스템 전체의 내항성능을 평가하기 위해서는 식 2-16의 한계 평가치(E_{Tc})와 식 2-14의 변환 평가치(\widetilde{E}_T)의 비를 내항성능 평가지표 μ_T 로 정의하고, 다음과 같이 나타낸다.

$$\mu_T = \frac{\widetilde{E}_T}{E_{Tc}} = \sqrt{\frac{\ln(1 - P_{Tc})}{\ln(1 - \widetilde{P}_T)}} \quad (2-18)$$

여기에서 $\mu_T \geq 1.0$ 인 경우 선박 시스템 전체는 위험하게 되고, $\mu_T < 1.0$ 인 경우 시스템은 안전한 것으로 평가할 수 있다.

또한 이 μ_T 는 내항성능 평가요소중 한 개의 요소라도 그 위험도가 1보다 큰 경우, μ_T 도 1보다 크게 되는 성질을 가지고 있다. 따라서 μ_T 는 내항성능 평가요소의 최대 위험도와 근사하는 값이 된다. 이것은 한 개의 요소만을 계측하여 모든 내항성능 평가요소의 최대 위험도의 근사치를 구할 수 있다.

$$\mu_T \doteq \mu_m(X, V, S) = \text{Maximum}[\mu_i(X, V, S)] \quad (2-19)$$

2.6 임의의 대표적인 요소에 의한 내항성능 평가

내항성능 평가요소 중 대표적인 요소 한 가지에 의해 선박 전체의 내항성능을 평가할 수 있다. 즉, 임의의 대표적 요소 X_j 로서 신뢰도함수 \tilde{P}_i 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \tilde{P}_i &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_\pi X_j}{\beta_i \cdot \sigma_j}\right)^2\right\} \\
 &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_\pi \cdot X_j}{\alpha_{ji} \cdot \mu_{ji} \cdot \sigma_j}\right)^2\right\} \\
 &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{E_{ic}}{E_{pc}} \cdot \frac{E_{jc}}{E_{ic}} \cdot \frac{X_j}{\mu_{ji} \sigma_j}\right)^2\right\} \\
 &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{pj}}{\mu_{ji}} \cdot \frac{X_j}{\sigma_j}\right)^2\right\} \\
 &= 1 - Q(X_j)^{\left(\frac{\alpha_{pj}}{\mu_{ji}}\right)} \tag{2-20}
 \end{aligned}$$

여기서, $Q(X_j) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_j}{\sigma_j}\right)^2\right\}$

X_{im} : 계측하는 임의의 내항성능 평가요소

$$\beta_i = \alpha_{ji} \cdot \mu_{ji}$$

μ_{ij} : 임의 i 요소에 대한 임의 j 요소의 상대 위험도

α_{bj} : 프로펠러 레이싱에 대한 임의 j 요소의 한계평가치의 비

2.7 상하 가속도를 계측한 내항성능 평가

앞에서 정의된 내항성능지표(μ_T)는 기존의 내항성능 평가요소 중 한 개 요소만을 계측하여 선박 전체의 항해 안전성을 평가할 수 있는 지표이다. 따라서 본 장에서는 기존 내항성능 평가요소 중 계측성이 편리하고, 화물의 안전과 승조원의 작업성 등에 직접적인 영향을 주는 상하 가속도 한 개의 요소만을 계측하여 선박 전체의 항해 안전성을 평가한다. 식 2-15의 \bar{P}_i 는 상하 가속도를 계측하여 구할 수 있으며, 이것을 이용하여 내항성능지표 μ_T 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \bar{P}_i &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i} X_{AV}}{\beta_i \sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\
 &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{P_i} X_{AV}}{\alpha_{P_i} \mu_{AVi} \sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\
 &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{E_{ic}}{E_{Pc}} \cdot \frac{E_{AVc}}{E_{ic}} \cdot \frac{X_{AV}}{\mu_{AVi} \sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\
 &= 1 - \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\alpha_{PAV}}{\mu_{AVi}} \cdot \frac{X_{AV}}{\sigma_{AV}}\right)^2\right\} \\
 &= 1 - Q(X_{AV}) \left(\frac{\alpha_{PAV}}{\mu_{AVi}}\right)^2
 \end{aligned} \tag{2-21}$$

여기서,

$$Q(X_{AV}) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{X_{AV}}{\sigma_{AV}}\right)^2\right\}$$

$$\beta_i = \alpha_{AVi} \cdot \mu_{AVi}$$

μ_{AVi} : 상하 가속도에 대한 각 요소의 상대 위험도

α_{PAV} : 프로펠러 레이싱에 대한 상하 가속도의
한계 평가치의 비

그런데 프로펠러 레이싱과 상하 가속도의 한계발생확률이 각각 $Q_{Pc} = 10^{-1}$, $Q_{AVc} = 10^{-3}$ 이므로, $\alpha_{PAV} = 1/\sqrt{3}$ 로 되는 값이다. 따라서 식 2-21은 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

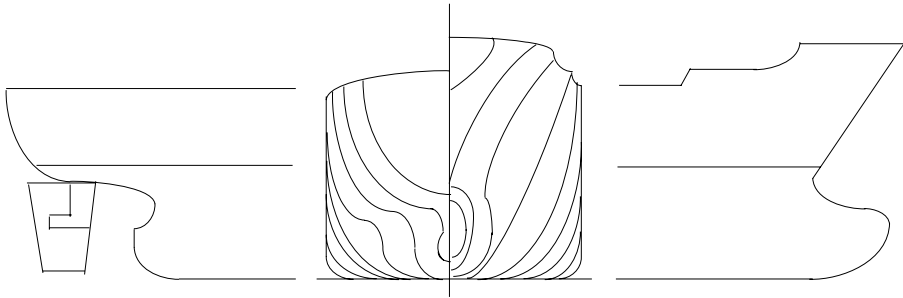
$$P_i = 1 - Q(X_{AV}) \frac{1}{3} \left(\frac{1}{\mu_{AV}} \right)^2 \quad (2-22)$$

2.8 수치 시뮬레이션

본 연구에서 수치 계산에 사용한 선형은 $L_{pp} = 93m$ 의 여객선형인 실습선 'HANNARA'로서 그 주요목은 Table 2.2에 나타내고 있다. 해상상태는 WMO의 CODE 1100을 이용하였으며, 유의파고 및 평균 파주기는 Table 2.1에 나타낸다.

Table 3.1 Beaufort scale number and wave characteristics (WMO CODE 1100)

Beaufort No.	Mean Wave Period T_0 (sec)	Significant Wave Height $H_{1/3}$ (m)	Wind Speed (kts)
1	1.2	0.1	1 ~ 4
2	1.7	0.2	4 ~ 7
3	3.0	0.6	7 ~ 11
4	3.9	1.0	11 ~ 17
5	5.5	2.0	17 ~ 22
6	6.7	3.0	22 ~ 28
7	7.7	4.0	28 ~ 34
8	9.1	5.5	34 ~ 41
9	10.2	7.0	41 ~ 48



Lines and sheer profile of T/S HANNARA

Table 2.2 Principal particulars of T/S HANNARA

ITEMS		DIMENSION
Length P.P.	Lpp (m)	93
Breadth	B (m)	14.5
Depth	D (m)	7
Mean Draft	dm (m)	5.115
Displacement Volume	(m ³)	4,274.82
Block Coefficient	Cb	0.6028
Length–Breadth Ratio	L/B	6.414
Breadth–Draft Ratio	B/D	2.835
Height of C.G.	KG (m)	5.033
Metacentric Height	GM (m)	1.355
Rolling Period	TR (sec)	13.142
Propeller Diameter	DP (m)	3.55
Propeller Pitch Ratio	p	0.751

2.8.1 수치 계산의 평가방법

수치계산은 실습선 ‘HANNARA’의 운항실적을 토대로 하여 실제 항해중 관측되어 기록되었던 기상 정보와 실선계측을 통해 얻은 상하 가속도 값을 이용하여 수치 계산을 하였다.

2.8.2 수치 계산 결과

Fig. 2.3, 2.4는 식 2-22를 식 2-15에 대입하여 계산한 대상 선박인 실습선 ‘HANNARA’에 대한 내항성능지표(μ_T)와 내항성능 평가요소의 위험도(μ_i)를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 X축은 선박과 파의 만남각(χ)으로, $\chi=180^\circ$ 은 선수 정향파, $\chi=90^\circ$ 은 정횡파, $\chi=0^\circ$ 은 선미 추파를 나타내고, Y축은 내항성능 위험도를 표시하였다. 그림의 실선은 내항성능지표를 나타내며, 각 점선은 각 내항성능 평가요소의 위험도를 나타내고 있다.

Fig. 2.3, 2.4에서 보면, 선수파 부근에서는 상하 가속도가, 횡파와 선미 추파 부근에서에서는 좌우 가속도가 최대 위험 요소이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 해면 상태나 선속에 관계없이 내항성능지표와 최대 위험도가 근사하고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 사실은 다른 선속과 해면 상태에서도 같은 경향을 나타낸다는 사실을 확인할 수 있었다.

Fig. 2.5~Fig. 2.8은 대상 선형인 실습선이 만재 상태에서 일정한 속력으로 항해하는 경우, 각 해상 상태에 따른 침로별 내항성능지표(μ_T)를 이용하여 내항성능을 나타낸 평가도이다. 이 평가도는 컴퓨터 화면이나 레이더 스크린 상에서 화상 처리하여 편리하게 사용할 수 있도록 좌표의 원점을 위험도 0으로 하여 시각적으로 쉽게 내항성능을 판정할 수 있도록 하였다. 그리고 선박 운항

자가 이 평가도를 이용하여 다음 침로에 대한 내항성능을 쉽게 파악할 수 있어, 다음 침로 결정에 편리함을 더해 주고 있다. 그림에서 $\chi=180^\circ$ 는 선수 정향과, $\chi=90^\circ$ 는 정횡과, $\chi=0^\circ$ 는 선미 추과를 나타낸다. 그리고 반원중 $\mu_T=1.0$ 은 내항성능지표의 한계 위험치를 나타내고, 각 침로별 내항성능지표는 30° 단위로 표시한다. 그 중 내항성능지표가 한계치인 $\mu_T=1.0$ 의 반원을 초과하는 경우에 그 선박은 위험하게 된다.

Fig. 2.5, Fig. 2.6은 실습선이 속력 $F_n=0.2$, $F_n=0.275$ 로 항해할 때, 침로별 자연적 감속을 고려한 경우와 그렇지 않은 경우의 내항성능지표(μ_T)를 비교하여 나타낸 것이다. 실습선은 선수파에서 자연적 감속이 많이 발생함으로, 만남각 $\chi=180^\circ\sim 120^\circ$ 에서 자연적 감속을 고려하는 경우 내항성능지표가 상당히 작아지는 것을 알 수 있다.

Fig. 2.7, Fig. 2.8은 속력 $F_n=0.2$ $F_n=0.275$ 로 항해하는 실습선의 내항성능지표(μ_T)를 자연적 감속을 고려한 상태에서 계산하여 해상 상태별로 내항성능을 나타낸 평가도이다.

해상 상태 6에서, $F_n=0.2$, $F_n=0.275$ 실습선의 내항성능지표가 정횡과 부근에서 1에 접근하고 있어서 주의 항해가 요구되지만, 그 밖의 만남각에서는 안전한 것으로 평가된다. 해상 상태 7에서는 해상 상태 6에 비하여 전반적으로 내항성능지표가 크고, 특히 $F_n=0.2$ 에서는 $\chi=100^\circ\sim 50^\circ$, $F_n=0.275$ 에서는 $\chi=120^\circ\sim 50^\circ$ 에서 1을 초과하여 위험한 상태가 된다. 해상 상태 8에서는 $F_n=0.2$, $F_n=0.275$ 그 위험 범위가 확대되어, $F_n=0.2$ 에서는 $\chi=180^\circ\sim 50^\circ$, $F_n=0.275$ 에서는 $\chi=180^\circ\sim 45^\circ$ 에서 내항성능지표가 1을 초과하여 위험한 상태가 된다. 해상 상태 9에 이르면 $F_n=0.2$, $F_n=0.275$ 전 만남각에서 위험한 것으로 평가된다.

이상을 종합해 보면, 실습선은 해상 상태 7 이상이 되면 전반적으로 위험하고, 역시 항해 속력이 $F_n=0.2(11.7\text{kts})$ 이상이 되면 선속이 높아질수록 내항 성능지표의 값이 점점 커지는 사실을 알 수 있다. 특히 정횡파에서의 위험도가 대단히 높다는 것에 주의해야 할 것이다.

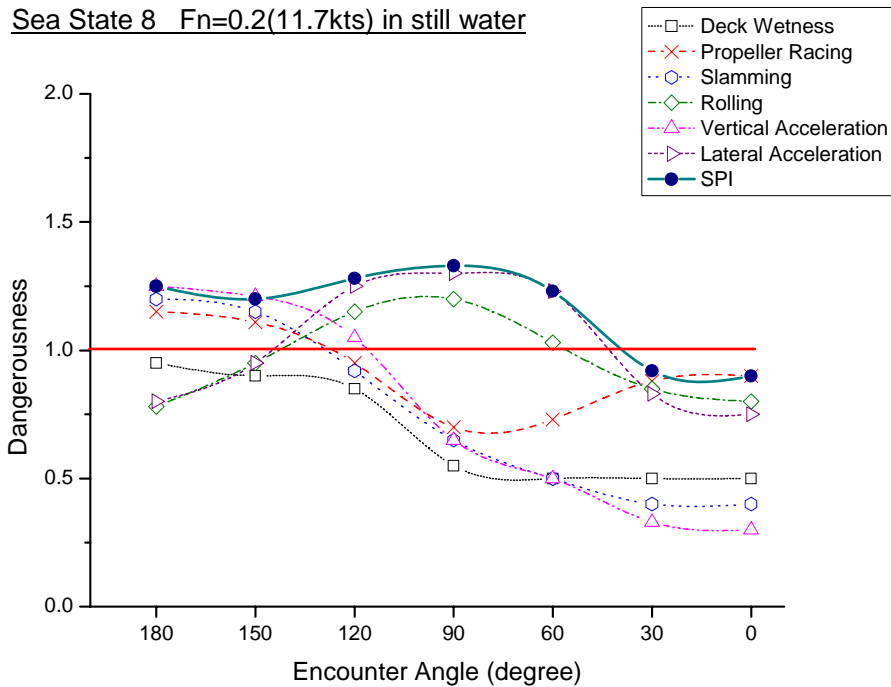


Fig. 2.3 Seakeeping performance index of 'T/S HANNARA'
(Sea State 8, $F_n=0.2$)

Sea State 8 $F_n=0.275(16.1\text{kts})$ in still water

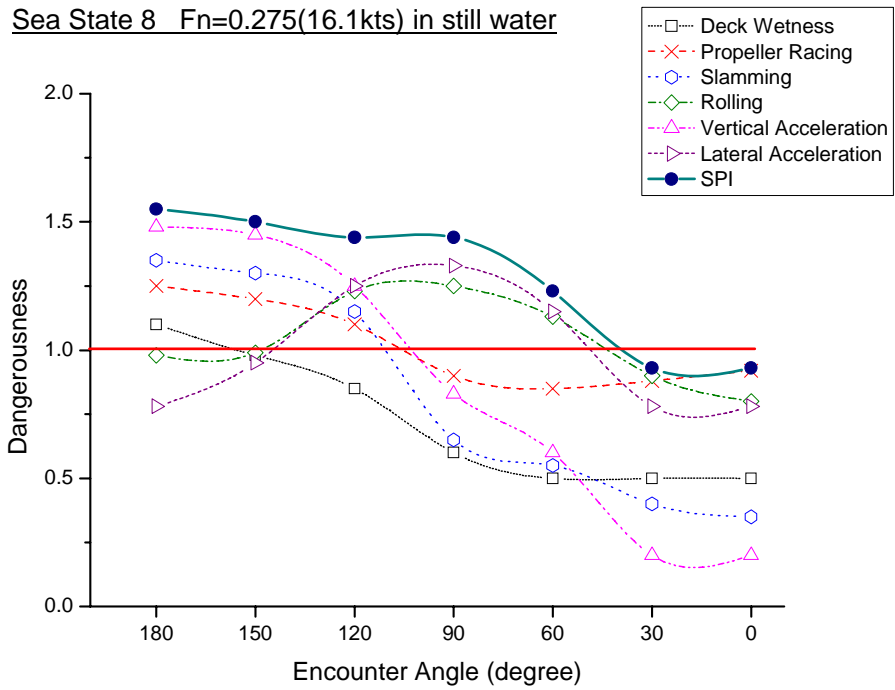


Fig. 2.4 Seakeeping performance index of 'T/S HANNARA'
(Sea State 8, $F_n=0.275$)

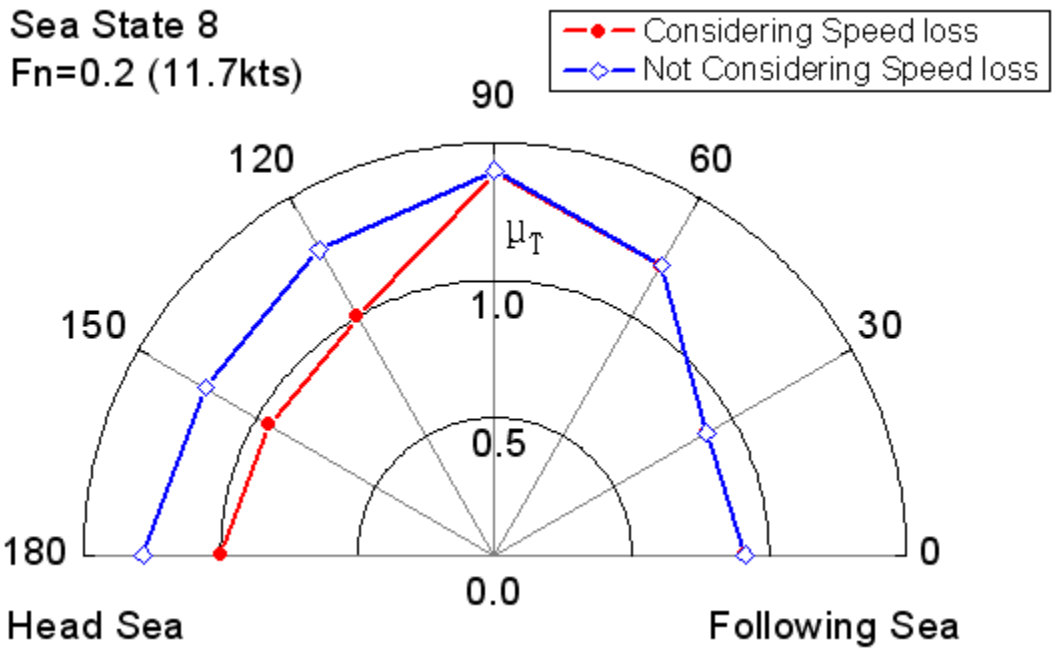


Fig. 2.5 Comparison of SPI safety of 'T/S HANNARA' considering and not considered speed loss (Sea State 8, Fn=0.2)

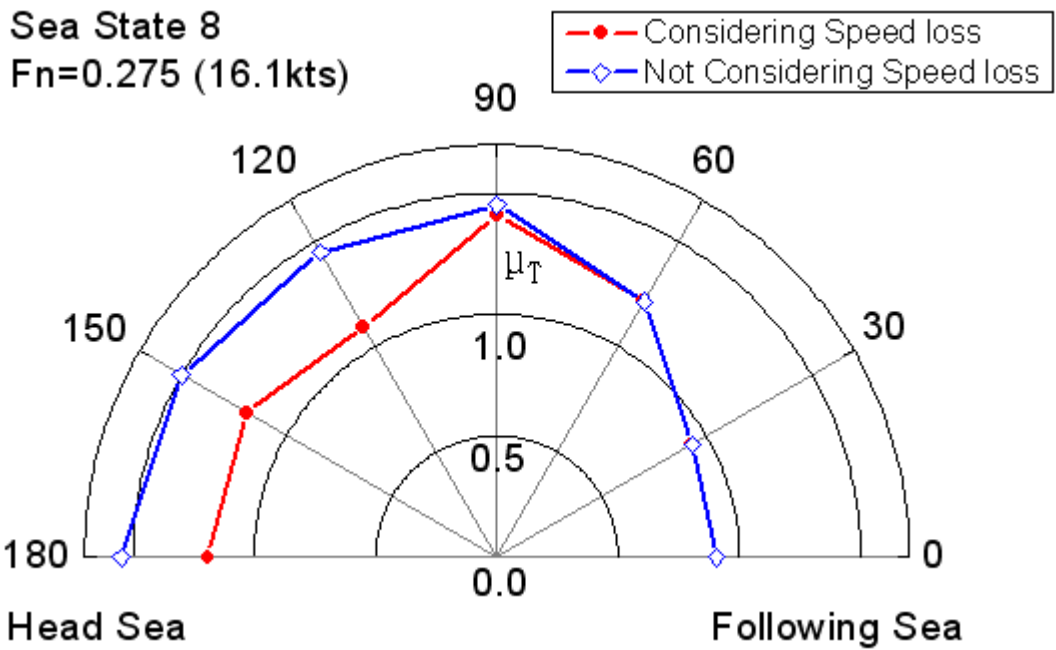


Fig. 2.6 Comparison of SPI safety of 'T/S HANNARA' considering and not considered speed loss (Sea State 8, Fn=0.275)

**Fn=0.2 (11.7kts) in still water
Considering Speed Loss**

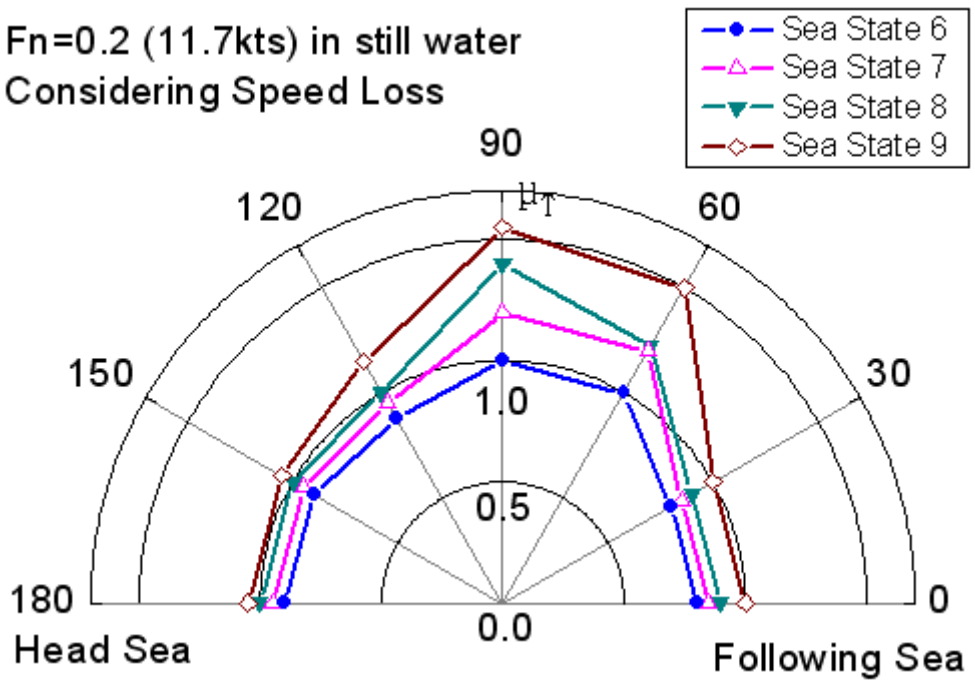


Fig. 2.7 Evaluation diagram of SPI of 'T/S HANNARA' (Fn=0.2)

$F_n=0.275$ (16.1kts) in still water
 Considering Speed Loss

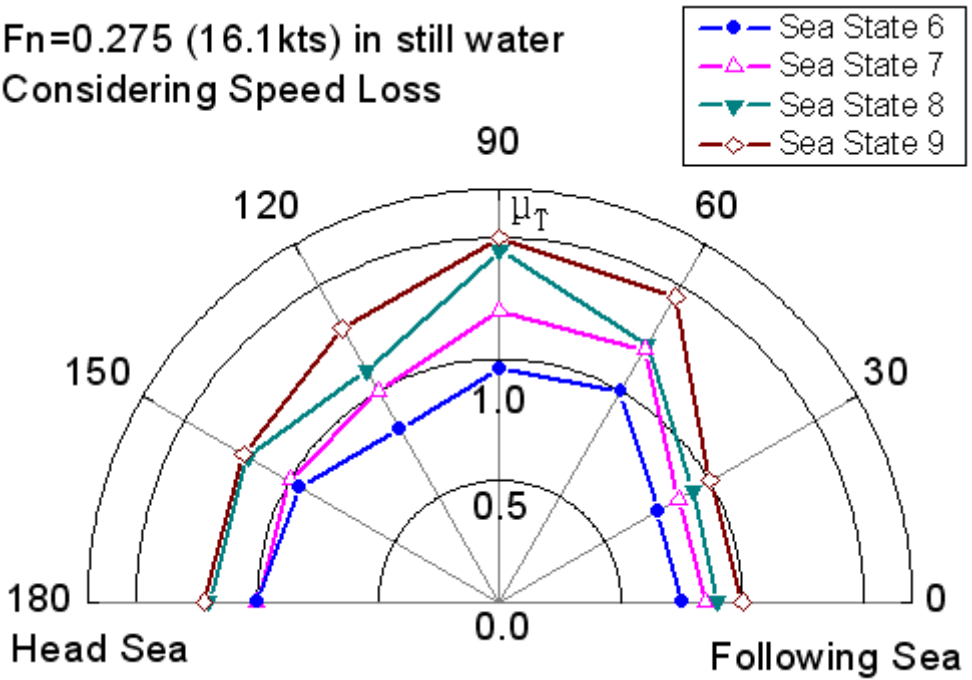


Fig. 2.8 Evaluation diagram of SPI of 'T/S HANNARA' ($F_n=0.275$)

제 3 장 선체운동계측시스템의 설계

3.1 선체운동계측시스템의 개요

선체운동계측시스템은 항해중인 선박에 탑재하여 파랑, 바람, 조류에 의해 발생하는 선체 운동을 특정 센서를 이용하여 실시간으로 측정하고자 하는 시스템이다. 선박의 항해 및 계류 안전성을 종합적으로 평가하기 위해서는 Fig. 3.1과 같이 정량적인 외력을 분석할 수 있는 외력 분석 시스템, 항해 또는 정박 중인 선박의 상태에 관한 선박 데이터베이스 시스템, 그리고 외력에 의해 발생하는 선체 운동을 계측하는 운동 평가 시스템이 갖추어져야 한다.

선체운동계측시스템은 Fig. 3.1의 운동 평가 시스템에 해당된다.

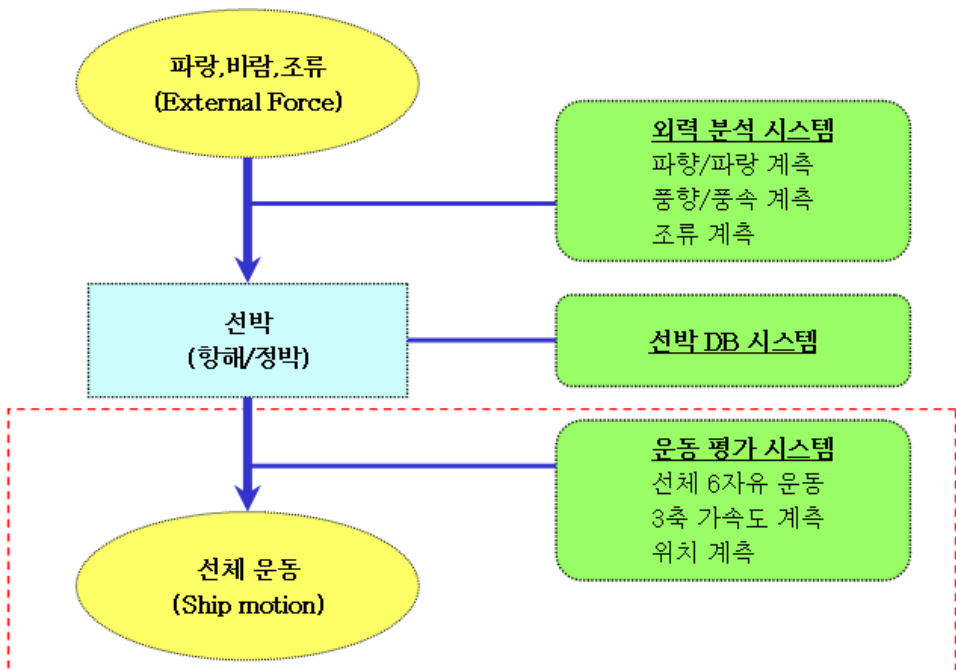


Fig. 3.1 Total safety evaluation system

본 연구에서 개발하고자 하는 선체운동계측시스템은 다음과 같은 기능을 수행할 수 있는 시스템이어야 한다.

- 선내 탑재 가능한 시스템
- 항해/정박 중인 선박의 선체 운동 계측이 가능한 시스템
- 실시간 영역에서 데이터 저장 및 디스플레이가 가능한 시스템

3.2 선체운동계측시스템의 설계

선체운동계측시스템은 Fig. 3.2와 같이 선체 운동이 계측 가능한 센서를 탑재한 H/W와 계측한 데이터를 자동 저장 및 분석하는 전용 S/W로 구성한다. 선내에 탑재할 H/W 장치는 내항성능 평가 또는 계류 안전성 평가에 이용될 수 있도록 선체 6자유 운동과 상하가속도, 좌우가속도, 전후가속도의 계측이 가능한 센서로 구성한다. 저장 및 분석용 전용 S/W는 H/W와 연결되어 계측 데이터를 PC에 직접 저장, 분석 및 디스플레이가 가능해야 한다.

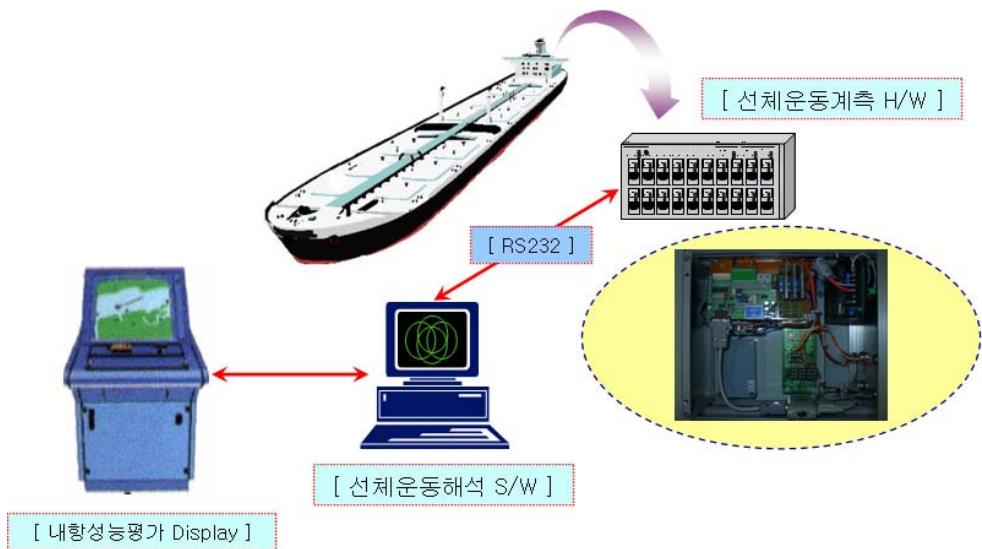


Fig. 3.2 Configuration of measurement system

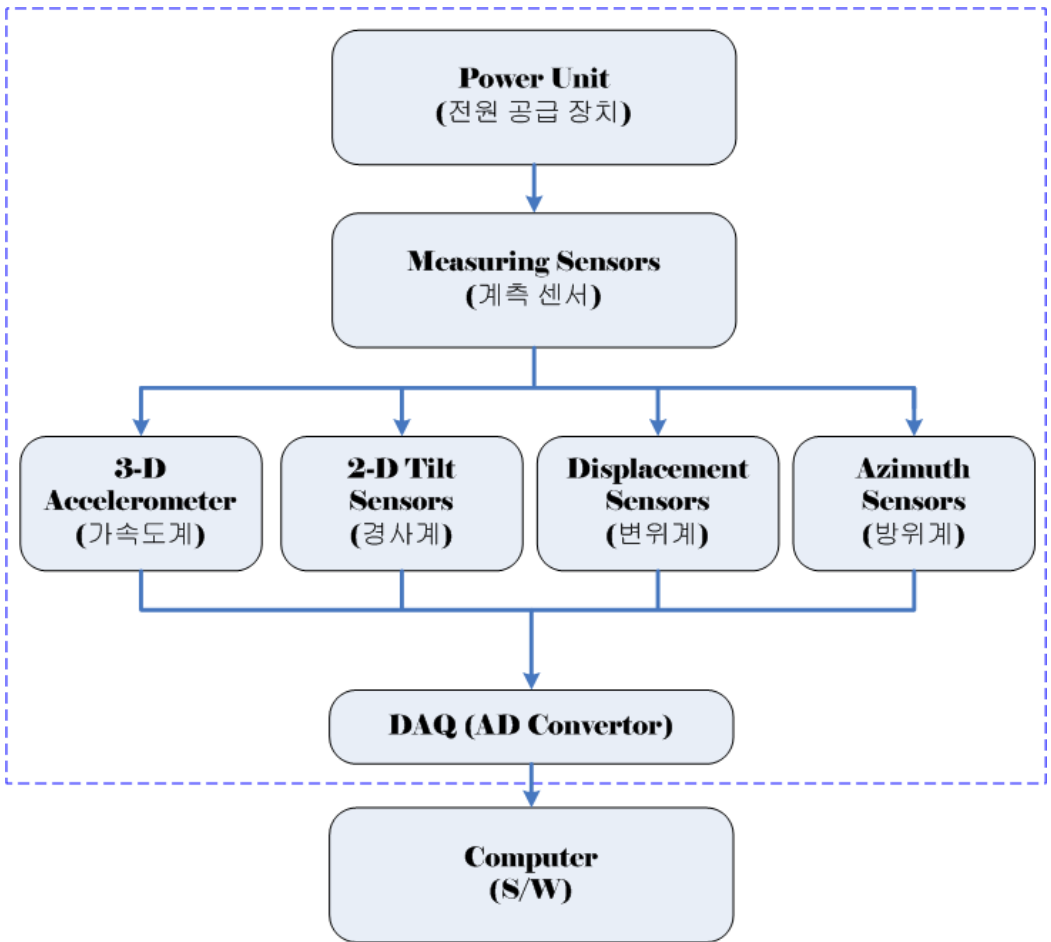


Fig. 3.3 Internal flow charts of hardware system

선체운동계측시스템의 H/W는 Fig. 3.3의 내부 구성도와 같이 각종 센서(가속도계, 경사계, 변위계, 방위계), 전원공급장치, 신호처리를 위한 AD 컨버터로 구성되며 PC의 전용 분석 S/W 프로그램과 데이터 통신이 가능하도록 설계하였다.

Fig. 3.4와 같은 외력에 따른 선체 6자유도 운동(Rolling, Pitching, Yawing, Surging, Swaying, Heaving)과 내항성능에 활용되는 가속도를 계측하기 위한 선체운동계측시스템 개발에 이용된 센서는 3축 가속도계, 2개의 변위계, 2축 경사계와 방위계이다.

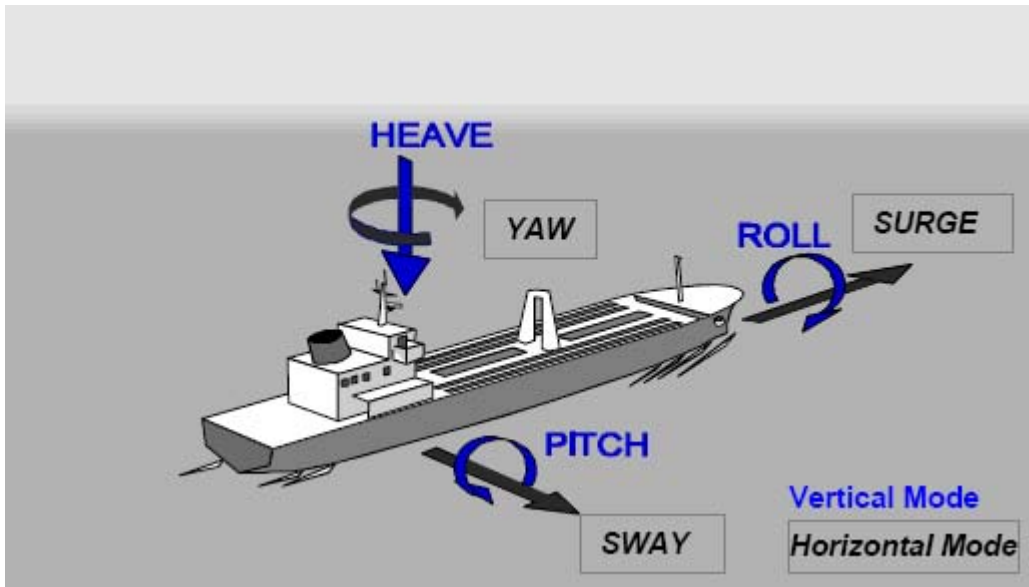


Fig. 3.4 Definition of 6-degree of freedom in right hand system

3.2.1 3축 가속도계 (3-Dimensional Accelerometer)

3축 가속도계는 서로 직교하는 3축을 동시에 측정하는 센서로서, 좌우방향의 가로축(X축), 전후방향의 세로축(Y축), 그리고 상하방향의 수직축(Z축)을 따라 선박이 어떤 가속도로 움직이는지를 측정한다. 3축 가속도계(SW3)는 $\pm 3g$ 의 계측 범위를 가지며, 입력전압은 DC 5V, 12mA이며, 출력전압은 2.5V를 기준으로 $\pm 2V$ 의 범위로 출력된다. Fig. 3.5와 Table 3.1에 SW3 3축 가속도계의 외형 모습과 사양을 나타내었다.



Fig. 3.5 3-Dimensional accelerometer

Table 3.1 3-Dimensional accelerometer specification

Item		Specification
Model Name		SW3
Material		nickel-plated brass
Weight excluding sensors		78 gramms
Weight including sensors		approx. 145 gramms
Electrical connection		cable or single wires
Manufacture		SEIKA
Performance	Range	$\pm 3 \text{ g}$
	Sensitivity	1 V/g
	Bandwidth	125 Hz
	Noise	1.5 mg
	Noise density	$130 \mu\text{g} / \sqrt{\text{Hz}}$
	Zero g-output	$2.5 \pm 0.15 \text{ mV}$
Environmental	Temperature Ranger	$-40^\circ \sim +85^\circ \text{ }^\circ\text{C}$
	Temperature Sensitivity	$\pm 3.5 \% \text{ FS}$
	Shock	2000 g
	Input Voltage	5 Vdc

3.2.2. 2축 경사계 (2-Dimensional Tilt Sensor)

2축 경사계는 서로 직교하는 2축을 동시에 측정하는 경사 센서로서, 선박의 좌우방향의 경사(Rolling)와 전후방향의 경사(Pitching)가 생기는지를 측정한다. 2축 경사계(SB2I)는 $\pm 90^\circ$ 의 측정 범위를 가지며, 입력전압은 DC 24V(+10V~+30V), 12mA이며, 출력신호는 4mA~20mA(12mA Zero point)의 범위로 출력된다. Fig. 3.6과 Table 3.2에 2축 경사계의 외형 모습과 성능사양을 나타내었다.



Fig. 3.6 2-Dimensional tilt sensor

Table 3.2 2-Dimensional tilt sensor specification

Item	Specification
Model	SB2I
Terminals	6 x 1.5 mm ²
Cable fixing	M12 x 1.5 cable gland, clamping range 6mm~7.5mm
Measuring range	± 100° / sec
Measuring Resolution, etc.	0.014 / sec
Scale Factor	20 mV
Band width	100 Hz
Turn on Time	1 sec
Degree of protection	IP65
Mounting orientation	any
Measuring planes (N.. sensors)	3 main housing planes
Measuring directions (B., BD.. sensors)	In X,Y,Z coordinate of housing
Terminal voltage	10V~30V
Minimum loop currents	2.5mA~3.5mA
Maximum loop currents	22mA~26mA
Output signal loop current	4mA~20mA (12mA for zero position)
Adjustable variables	zero point (12mA), amplification
Maximum load resistances	500 Ohm (at 24 Volt supply voltage)
Low pass filter	Active, 3rd order, minimal ripple
Operating temperature	-40° C~+85° C
Manufacture	SEIKA

3.2.3 변위계 (Displacement Sensor)

변위계는 위치 변화를 계측하는 초음파 변위 측정 센서로서, 선박이 항해중 일 경우 파랑의 상대 파고를 측정하고, 선박이 계류중에는 선체의 좌우방향의 변위(Sway)와 전후방향의 변위(Surge)를 측정한다. 변위계는 600~6000mm의 계측 범위를 가지며, 입력전압은 DC 24V(+20V~+30V)이고, 출력전류는 300mA로 출력된다. 무게는 약 380g이고, 변위계의 운용 온도 범위는 -25℃~+70℃에서 정상적인 동작을 보장하고 있다. 바이어스 전류는 일정온도에서 50mA이다. Fig. 3.7와 Table 3.3에 VRTU 430 변위계의 외형 모습과 성능 사양을 나타내었다.



Fig. 3.7 Displacement sensor

Table 3.3 Displacement sensor specification

Item		Specification
Ultrasonic Spec.	Operating range	600~6000 mm
	Ultrasonic frequency	80 kHz
	Opening angle	6°
	Resolution	≥ 1mm
	Reproducibility	± 9mm
	Switching hysteresis	60mm
Timing	Switching frequency	1 Hz
	Response time	400ms
	Delay before start-up	280ms
Electrical data	Operating voltage U_B	20~30 V DC
	Residual ripple	±10% of U_B
	Bias current	≤ 50mA (without load)
	Switching output	2 PNP transistor
	Output current	300mA
	Switching range adjustment	potentiometer 270°
Mechanical data	Housing	metal / CuZn
	Weight	380g
	Connection type	M 12 connector, plastic, 5-pin
Environmental data	Ambient temp. (operation/storage)	-25°C ~ +70°C / -40°C ~ +85°C
	Standards applied	IEC 60947-5-2
	Protection class	IP 65
	Fitting position	any
-	Manufacture	Leuze electronic

3.2.4 방위계 (Azimuth Sensor)

방위계는 방위 변화를 계측하는 방위 측정 센서로서, 항해중인 선박의 Heading을 계측하여 선수동요(Yawing)을 측정한다. (Gyro Compass가 장착된 선박은 Gyro 신호값을 사용할 수 있다) 방위계는 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ 의 계측 범위를 가지며, 입력전압은 DC 24V(+10V~+32V) 130mA이고, 출력 신호는 RS-232 Serial 통신으로 NMEA 0183을 지원한다. 무게는 약 270g이고, 방위계의 운용 온도 범위는 $-10^{\circ}\text{C} \sim +55^{\circ}\text{C}$ 에서 정상적인 동작을 보장하고 있다. Fig. 3.8과 Table 3.4에 방위계의 외형 모습과 성능사양을 나타내었다.

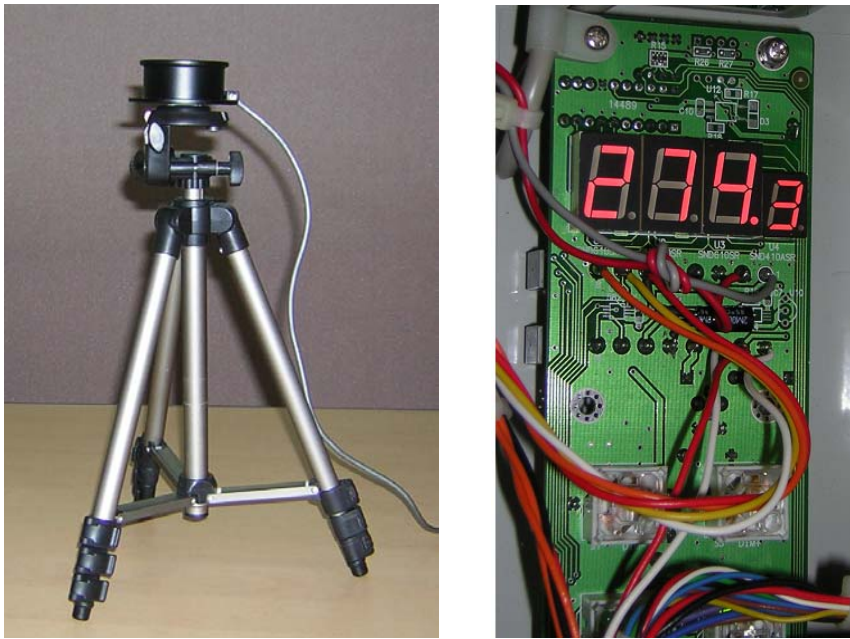


Fig. 3.8 Azimuth sensor

Table 3.4 Azimuth sensor specification

Item	Specification
Operating voltage range	10 V to 32 V DC
Power consumption	130 mA (max)
Operating Conditions	<ul style="list-style-type: none"> •temperature range : -10° C to 55° C •relative humidity limit : 80% •water protection : drip resistant when mounted vertically
Storage Conditions	<ul style="list-style-type: none"> •temperature range : -5° C to 60° C •relative humidity limit : 75%
Dimensions	width 74 mm , height 74 mm, depth 39 mm
Weight	0.27 kg
Inputs	<ul style="list-style-type: none"> •SeaTalk •power •service port (NMEA 0183 v2.3 in)
Outputs	<ul style="list-style-type: none"> •NMEA 0183 v2.3 out: Heading (HDM) 10 Hz at 0.1° resolution, accurate to $\pm 2^{\circ}$ NMEA Heading sentence: HDM, •SeaTalk (2Hz, including Heading at 0.5° resolution, accurate to $\pm 2^{\circ}$) •Analogue Rate: 22 mV/$^{\circ}$ /sec
Heading error correction	<ul style="list-style-type: none"> •compensates for 1st and 2nd harmonic deviation errors •eliminates northerly turning error

제 4 장 선체운동계측시스템의 구성

4.1 선체운동 계측·해석 시스템

본 시스템은 가속도 계측·해석 시스템 장치 내에 장착된 3개의 고정도 가속도 센서(Accelerometer), 2축 경사계(Tilt Sensor), 2개의 변위계(Displacement Sensor)와 방위계(Azimuth Sensor)를 이용하여, 복잡한 선체의 6자유도 운동에서 얻어지는 선체의 좌우 가속도(Sway), 상하 가속도(Heave) 및 전후 가속도(Surge)와 종동요(Rolling), 횡동요(Pitching), 선수동요(Yawing)을 측정하여 이를 표시해 주는 자료 취득 시스템(Data Acquisition System)이다.

여기서 선체의 좌우가속도를 X축, 전후가속도를 Y축, 상하가속도를 Z축으로 하여 계측한, 선체 가속도 값의 평균 및 분산값을 컴퓨터를 통해 수집·통계 처리한다.

선체운동계측시스템은 내항성능 평가요소 중 계측이 편리하고, 화물의 안전과 승조원의 작업성 등에 직접적인 영향을 주는 상하가속도를 계측하여 그 데이터를 분석하는 선체운동 계측 및 해석 시스템이다.

선체운동계측시스템의 기본적인 Flow Chart는 Fig. 4.1과 같으며, 계측 장치를 장치한 상황은 Fig. 4.2에 제시한다.

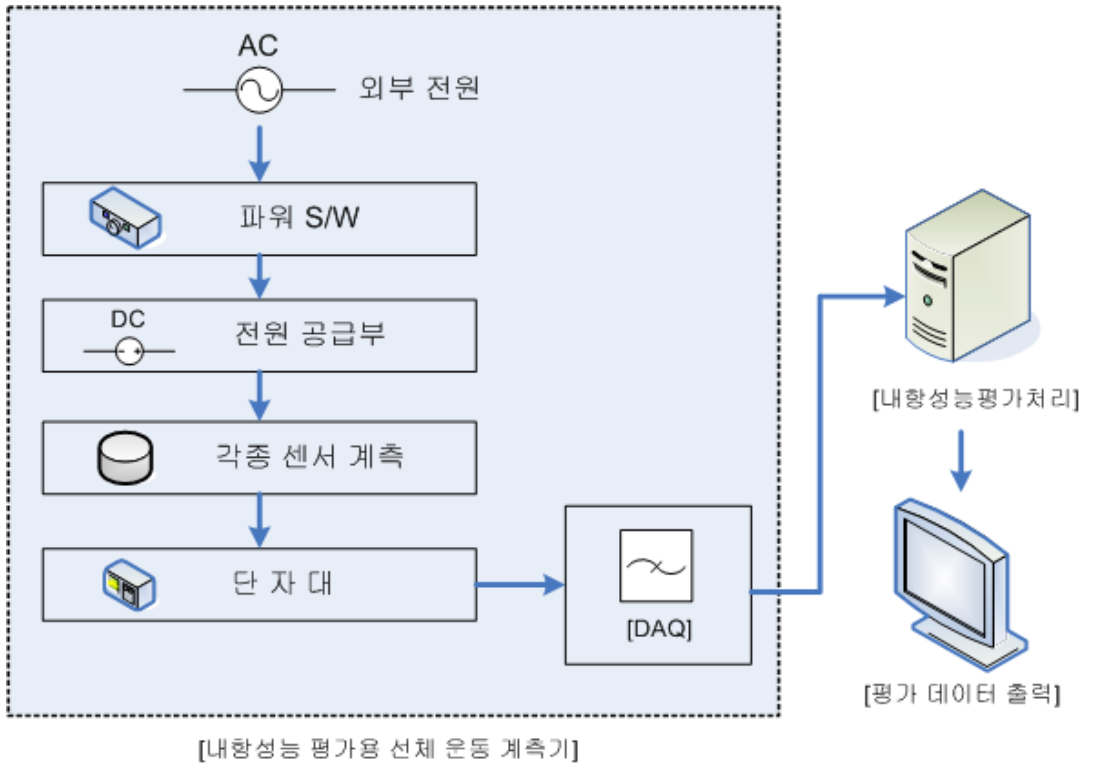


Fig. 4.1 Flow chart in measurement & analysis system



Fig. 4.2 Hull motion measurement system

4.2 선체운동계측시스템의 하드웨어 구성

4.2.1 신호처리절차

선체운동 계측 시스템은 AC 85~264V의 전압이 공급될 때, 전원 스위치가 이를 제어, 센서 전원 공급 장치를 통해 DC $\pm 24V$ 와 DC $\pm 5V$ 로 변환시킨다. 변환된 전압이 단자대를 통해 각 센서에 전원을 공급한다. 이 때, 선체의 움직임에 따라 발생하는 X축(좌우), Y축(전후) 및 Z축(상하)의 가속도량(전기적인 Analog 신호)과 횡동요와 종동요를 계측하는 2축 경사계의 측정치, 변위계와 방위계의 아날로그 데이터를 AD 변환기(Analog-Digital Converter)를 통해 컴퓨터에서 인식 가능한 Digital 신호 레벨로 변환시켜 직렬 신호를 보내준다. 컴퓨터는 이 신호를 받아 계측되는 가속도량을 파일로 저장하여 데이터를 수집 통계 처리한다. 본 계측 장치의 내부 장치도는 Fig. 4.3과 Fig. 4.4에 제시한다.

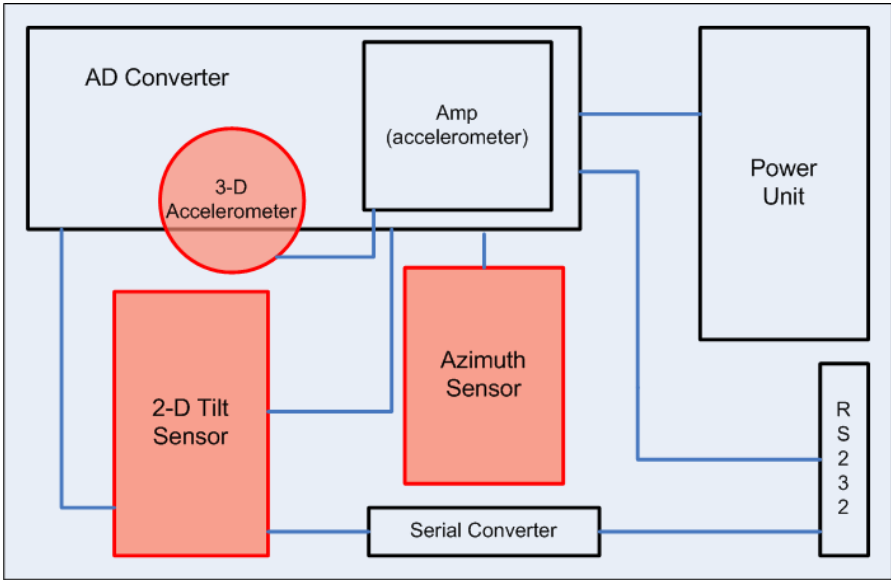


Fig. 4.3 Hardware system of measuring device

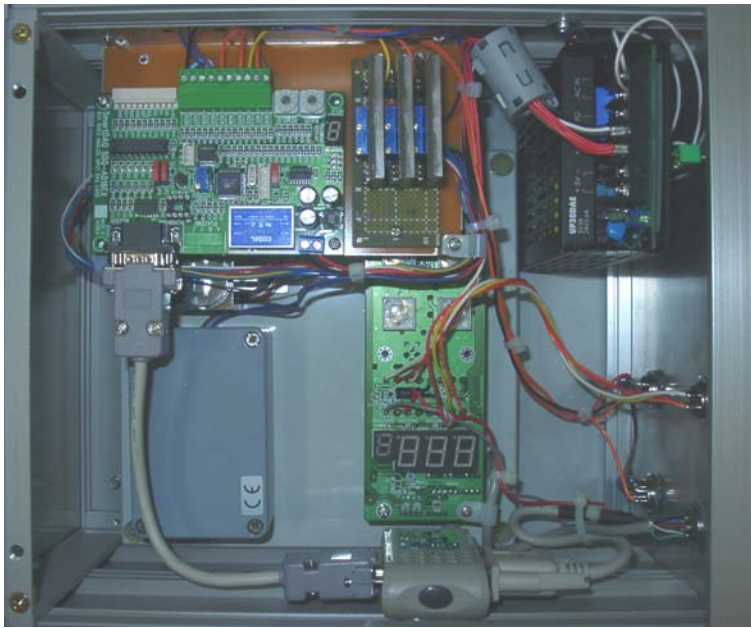


Fig. 4.4 Real model of hardware system

4.2.2 가속도계 (Accelerometer)

4.2.2.1 가속도 계측 이론

임의의 진동계에 대하여 어떤 진동상태에 있는지를 알려고 할 경우 진동측정기를 사용한다. 그리고 그 진동측정기에서 출력파형을 보며 어떤 진동인가를 판단한다. 그러나 진동상태를 알기 위해서는 주파수, 진폭, 가속도를 검출하여야 한다. 이러한 것들을 측정하기 위해서 진동수를 측정하는 진동수 측정기 진동변위 혹은 가속도를 측정하는 진동 변위계, 진동 가속도계로 분류된다.

진동계의 기본 요소는 다음 Fig. 4.5에 나타낸 바와 같이 탄성지지상의 질량과 Base의 운동에 대한 상대운동에 따라서 가속도, 속도, 진폭 등으로 구성된다.

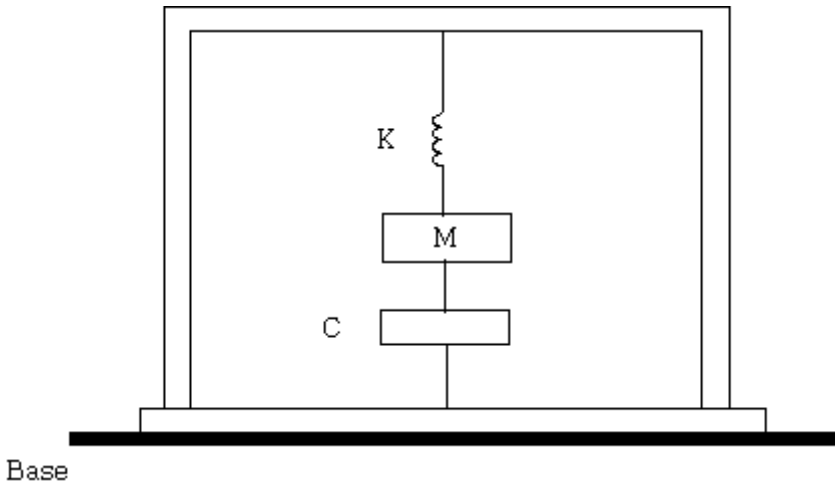


Fig. 4.5 Accelerometer principle

Fig. 4.5에서 나타낸 것과 같이 스프링 상수 K 와 질량 M 및 감쇠계수 C 로 이루어진 변환기는 피측정물 표면과 일체가 되어 운동을 한다. 변환기의 구조

는 케이스 양단 고정의 판 스프링을 설치하고 중앙에 추를 단 것이 변환소자로서 작용한다. 탄성지지상의 질량과 Base의 운동에 의한 이 계의 운동방정식은 다음과 같다.

Newton의 운동 제 2법칙에 따라 이 계의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$m\ddot{x} = -k(x - y) - c(\dot{x} - \dot{y}) \quad (4-1)$$

질량과 Base의 상대운동의 변위 $z = (x - y)$ 라 놓고 진동체의 조화 운동을 $y = Y\sin wt$ 라 가정하면 식 (4-1)로부터 다음의 결과를 얻을 수 있다.

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = mw^2 Y\sin wt \quad (4-2)$$

점성 감쇠가 있기 때문에 식 (4-2)의 해는 다음과 같다.

$$z = Z\sin (wt - \phi)$$

또한 진폭(amplitude) Z 와 위상각(phase angle) ϕ 는 다음과 같이 구해진다.

$$Z = \frac{mw^2 Y}{\sqrt{(k - mw^2)^2 + (cw)^2}} \quad (4-3)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{cw}{k - mw^2}$$

여기에서 진동계의 고유원진동수를 w_n , 임계감쇠계수를 C_c , 감쇠비를 $\zeta = C/C_c$ 라 하면 식 (4-3)은 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$Z = \frac{Y(w/w_n)^2}{\sqrt{\{1 - (w/w_n)^2\}^2 + \{\zeta(w/w_n)^2\}}}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\zeta(w/w_n)}{1 - (w/w_n)^2}$$

4.2.2.2 3축 가속도계 (3-Dimension Accelerometer)

선체운동 가속도 계측·해석 시스템에 사용된 가속도 센서는 세 개의 가속도 센서를 설치하여 좌우가속도를 X축, 전후가속도를 Y축, 상하가속도를 Z축 방향으로 하여 계측한다.

가속도계는 바닥면(Base)에 대하여 수직인 방향의 진동에 대하여 감도를 고려해 보면 주방향의 감도가 가장 높다. 그러나 실제로는 가속도계 바닥면에 평행한 횡방향의 진동에 대해서도 약간의 감도를 가지고 있으며 그 크기는 주방향 감도의 4% 이내이다. 따라서 가속도계는 측정 방향과 주 감도축이 일치하도록 부착되는 것이 가장 좋다.

가장 이상적인 고정 방법은 Fig. 4.7에 나타낸 바와 같이 평탄하고 광이 나는 표면에 나사못을 사용하여 고정하는 것이다. 이 경우 공진 주파수는 약 31kHz로써 고정면이 완전히 평탄하고 매끈한 곳에서 교정해서 얻어진 공진주파수 32kHz와 거의 같다.

Fig. 4.6은 3축 가속도계의 외형 치수이고, Fig. 4.7은 가속도계를 선체운동 계측시스템의 하드웨어에 장착한 사진이다.

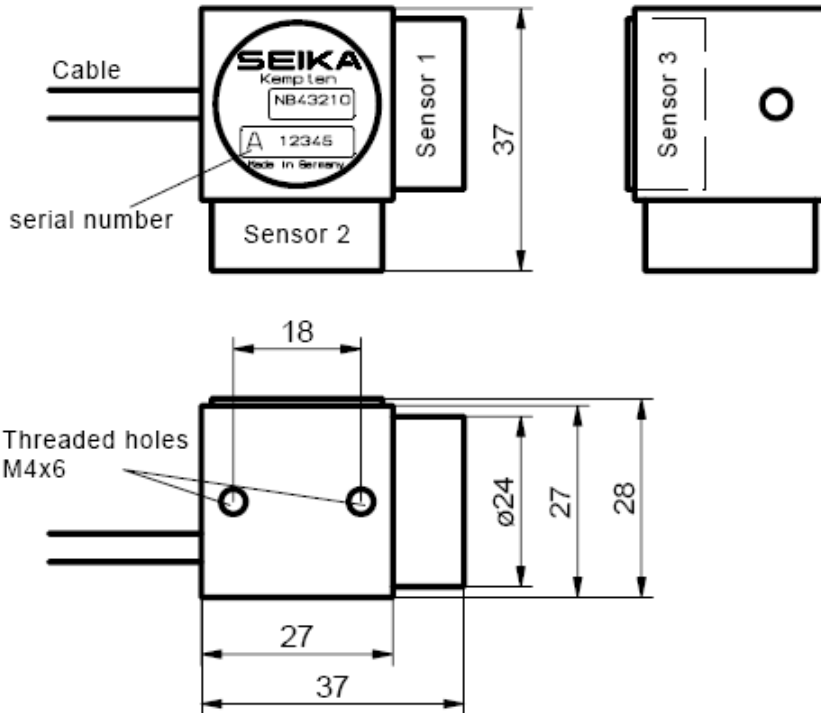


Fig. 4.6 Dimensions of 3-dimensional accelerometer [Seika SW3]



Fig. 4.7 Installation of 3-dimensional accelerometer

4.2.3 2축 경사계 (2-Dimension Tilt Sensor)

선체운동 중 횡동요(Rolling)와 종동요(Pitching)를 계측하기 위해 두 개의 경사센서(Tilt Sensor)를 사용한다. 경사계는 경사각 또는 교차하는 두 축 사이의 가속도를 측정하기 위해 두 센서를 수밀이 가능한 알루미늄 케이스에 조합하였다. 각 센서는 각각의 독립된 신호 조절기를 가지며, 각각 4~20mA 출력단과 고전압 차단 기능이 있다. 신호 조절기는 높은 주파수를 제거하기 위한 저역 필터(low pass filter)와 두 센서가 측정 작업을 하기 위한 설정 시간을 조정할 수 있다. 그리고, 현재 루프를 단극 접속을 할 수 있도록 Diode Bridge와 출력단의 전류를 제어할 수 있는 Noise Voltage Filter를 포함한다. Fig. 4.8의 블록 다이어그램에서 그 기능을 나타내었다. 접지 전류에 의한 신호 간섭은 각 센서와 각 시그널 조절기로부터 전기적 신호를 분리하여 제거할 수 있다.

Fig. 4.9은 2축 경사계의 내부와 외형 치수이고, Fig. 4.10은 경사계를 선체운동계측시스템의 하드웨어에 장착한 사진이다.

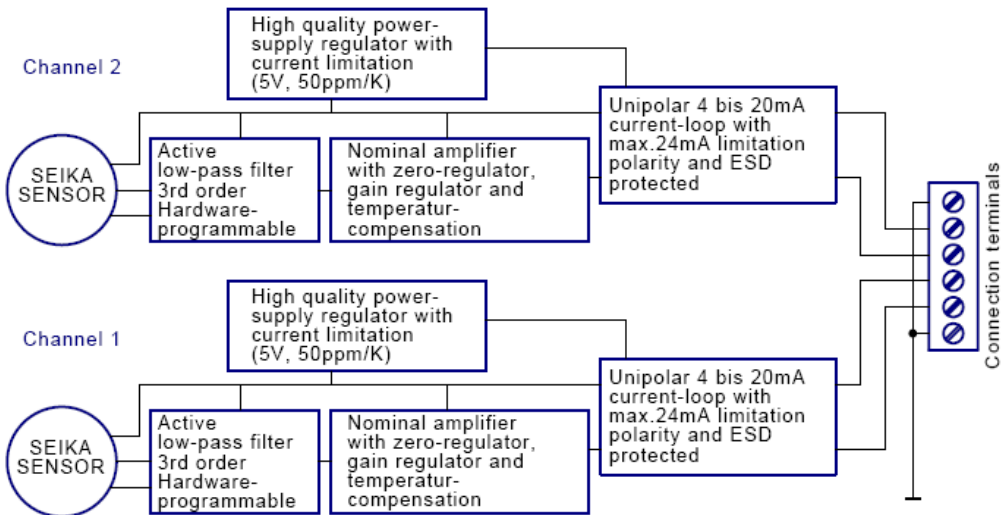


Fig. 4.8 Block Diagram of 2-dimensional tilt sensor (Seika SB2I)

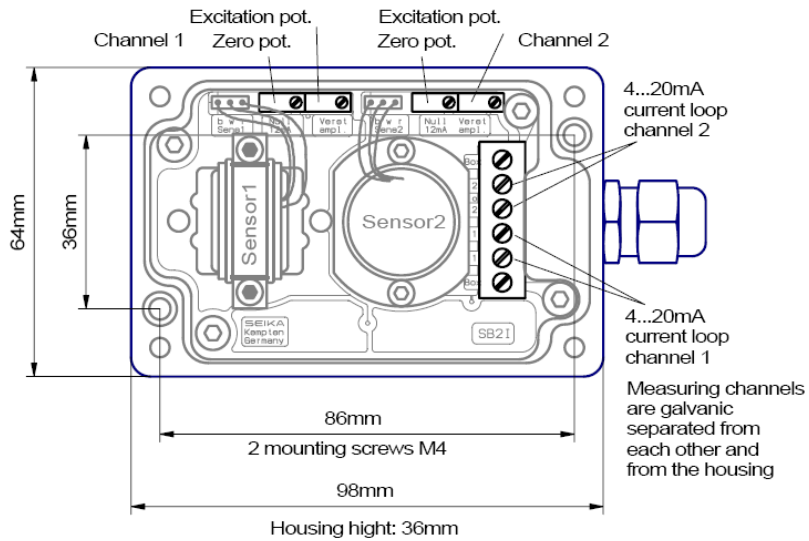


Fig. 4.9 Dimensions of 2-dimensional tilt sensor [Seika SB2I]



Fig. 4.10 Installation of 2-dimensional tilt sensor

4.2.4 DAQ Card (Data Acquisition Card)

DAQ 카드는 각 센서를 통해 감지된 아날로그 신호를 디지털신호로 변환 (AD Converting) 또는 신호를 컴퓨터로 전송하여 계측치를 S/W로 분석 가능토록 변환하는 기능을 가진 것이 특징이다. 외장형 타입의 DAQ 보드로 구현되어져 전용 드라이버 없이 사용이 가능하며, 고속의 직렬(Serial) 통신방식으로 PC 중심의 범용적인 데이터 제어, 계측을 할 수 있다.

Fig. 4.11은 DAQ 카드의 외부 결선법이고, Fig. 4.12은 DAQ 카드를 선체 운동계측시스템의 하드웨어에 장착한 사진이다.

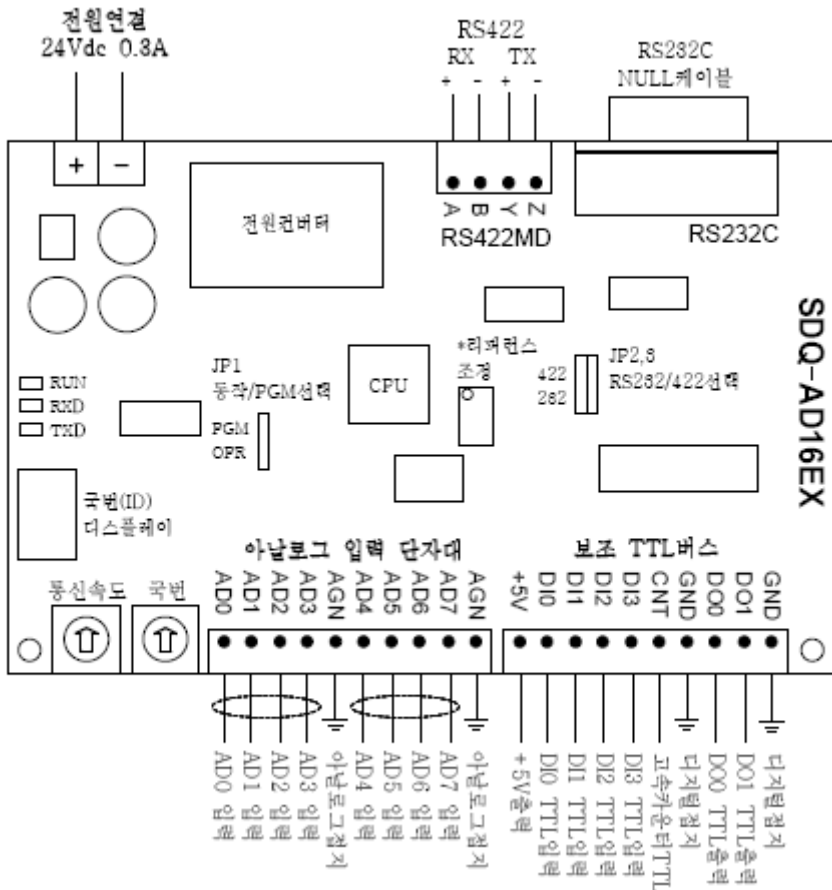


Fig. 4.11 Arrangement of DAQ card

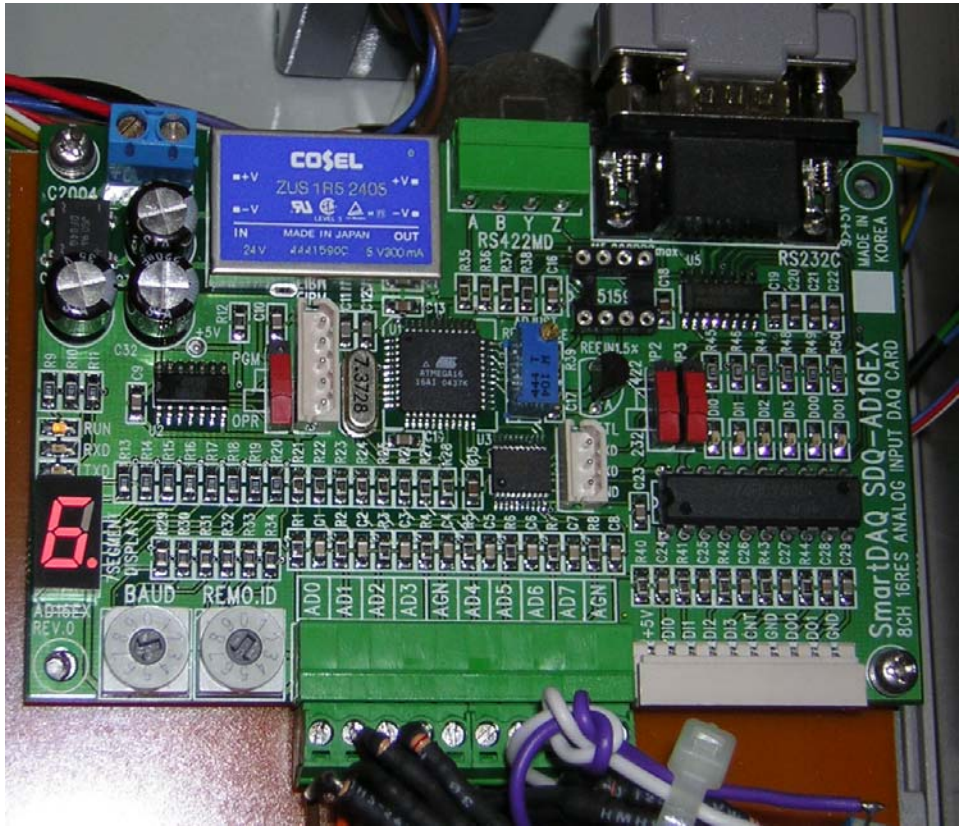


Fig. 4.12 Installation of DAQ card

4.2.5 단자대 (Terminal Plate)

단자대(Terminal Plate)는 선체의 6자유도 연성운동의 정도에 따라 발생하는 각종 센서 신호를 전송하기 위해 외부 기기와 연결시켜준다. 신호 처리 방식은 각종 센서와 DAQ 보드 사이에는 직렬 통신(Serial)을 하고, USB TO RS-232 Convertor를 통해 PC와는 USB 방식 통신을 채택하여 선체운동 계측기와 외부 기기와의 호환성을 높였다. Fig. 4.13와 Table 4.1은 USB TO RS-232 Convertor [UTS2009]의 외형 모습과 기술 사양이고, Fig. 4.14와 Fig. 4.15는 단자대와 컨버터를 선체운동계측시스템의 하드웨어에 장착한 사진이다.



Fig. 4.13 USB to RS-232 convertor [UTS2009]

Table 4.1 Function of USB to RS-232 convertor

Function	<ul style="list-style-type: none"> ● Support both USB 1.1 & 2.0 interface ● Support wake-on-line & power management function ● No IRQ, DMA, I/O Address resources required ● Dual databuffers for upstream and downstream data flow ● RS-232 speed up to 115Kbps ● Hot-Swap ● Plug & Play
----------	--



Fig. 4.14 Installation of terminal plate



Fig. 4.15 Installation of USB to RS-232 convertor

4.2.6 전원공급장치 (Power Supply)

전원공급장치는 단자대의 파워 스위치를 On하면 외부로부터 전원(AC 85V ~264V)을 인가받아 소정의 전압 레벨(DC 24V, 5V)로 변환시키기 위한 장치이다. Fig. 4.16은 2채널 전원공급장치의 블록 다이어그램이고, Fig. 17은 내부와 외형 치수이며, Fig. 4.18은 전원공급장치를 선체운동계측시스템의 하드웨어에 장착한 사진이다.

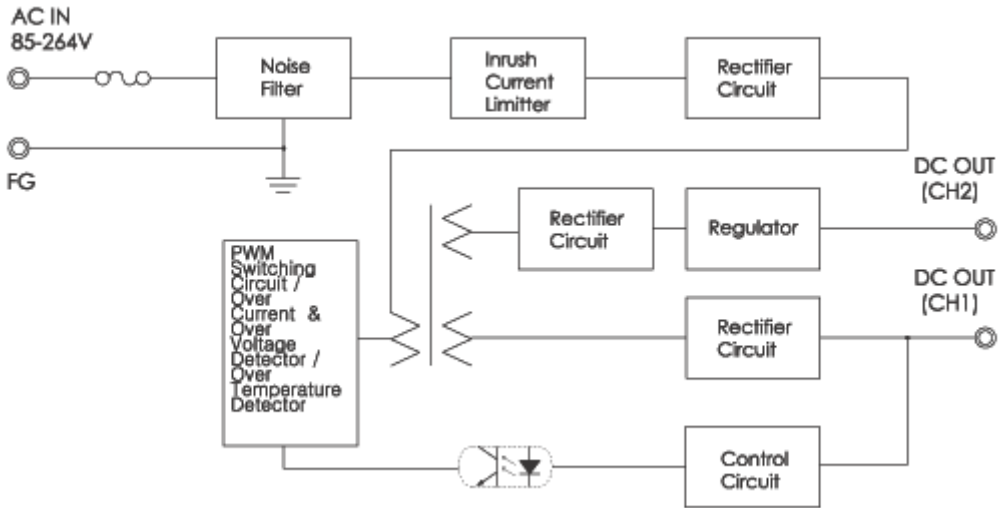


Fig. 4.16 Block diagram of power supply [UP30DAE]

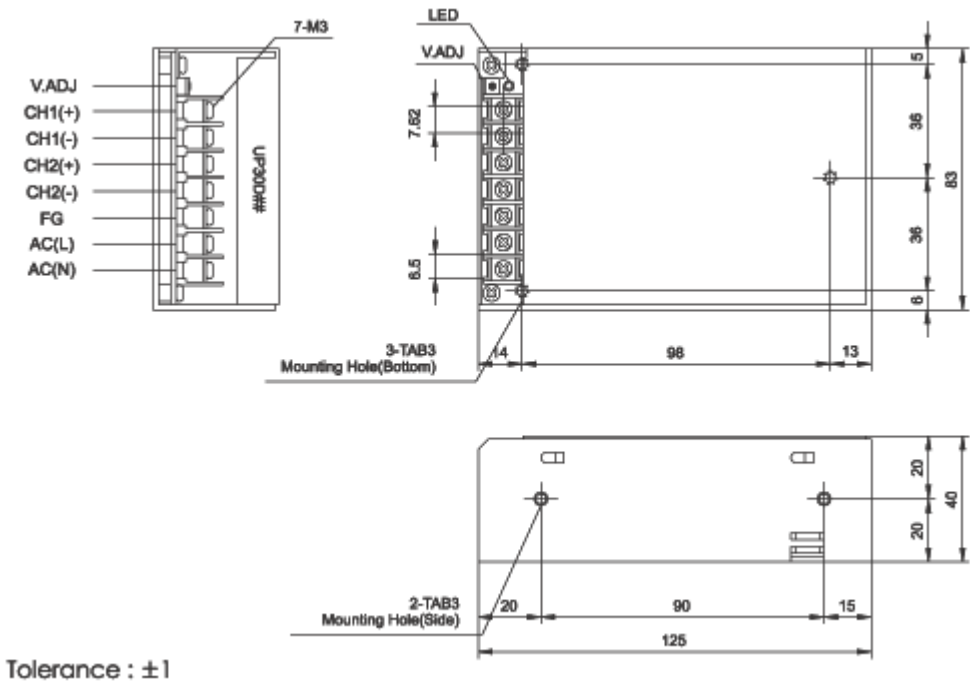


Fig. 4.17 Dimensions of power supply [UP30DAE] Unit=mm



Fig. 4.18 Installation of power supply

4.3 선체운동 해석 소프트웨어

선체운동계측시스템의 선체운동 해석 S/W는 RS232 단자대를 통해 PC와 연결되어 실시간으로 수집된 각종 센서 정보들을 저장하거나 분석한다. 본 계측시스템의 선체운동 해석 S/W 응용 프로그램은 Visual Basic으로 작성되었으며, RS232 통신을 위한 수신부는 2개의 채널로부터 데이터를 입력받을 수 있도록 구성되었다. 또한 AD Converter로부터 수집된 데이터의 전송속도가 115200 Bps인데 비해서 방위 신호는 4800 Bps(NMEA 0183)의 속도로 데이터를 전송하므로 이 두 채널간의 데이터 전송속도 차가 시스템의 성능에 영향을 미치지 않도록 비동기 방식의 RS232 데이터 수신부를 구성하였다. 또한 계측시스템은 1개의 USB 포트로 PC와 인터페이스 되므로 타 장비 또는 소프트웨어에 사용되어 질 수 있다. 그리고 계측 H/W로부터 수집된 데이터는 별도의 외부 데이터로 저장되므로 이 데이터를 이용하여 별도의 프로그램을 구성할 수도 있으며, 타 시스템에 필요한 자료를 제공할 수도 있다.

선체운동 해석 S/W 프로그램은 우선 환경설정 파일(CFG File)을 사용하여 선체운동 각 계측 센서의 초기화(각 센서의 영점조정)를 수행한다. 그리고 초기화가 완료되면 AD 컨버터를 통해 변환된 각 센서들의 디지털 출력 정보를 지정한 특정 파일에 일정 간격 동안 저장하면서 동시에 프로그램에 의해 설정된 최대치 및 최소치 범위에 상응하는 값으로 변환되어 모니터 화면상에 시계열 데이터로서 표시된다.



Fig. 4.19 Chart option screen

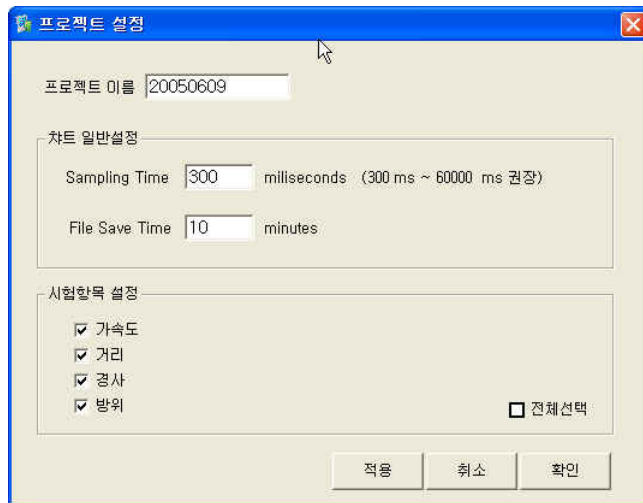


Fig. 4.20 File saving and sampling time setting

선체운동 해석 프로그램은 초기 환경 설정을 통해 각 센서별로 계측 환경을 별도로 지정하거나 다른 프로젝트로 관리할 수 있다. 또한 Fig. 4.19, Fig. 4.20과 같이 프로젝트명, Sampling Time, File Save Time 및 시험항목 설정

이 가능하고, 차트 옵션을 통해 계측 스톱프의 차트 스타일을 설정하여 사용자와의 GUI(Graphical User Interface)가 용이하도록 하였다.

Fig. 4.20에 각 센서로부터의 출력된 디지털 정보를 파일로 저장 또는 샘플링 시간을 설정하는 아이콘 화면을 제시하고, Fig. 4.21에 센서로부터 계측된 각종 계측치를 표시하는 프로그램 화면을 일례로 제시한다.

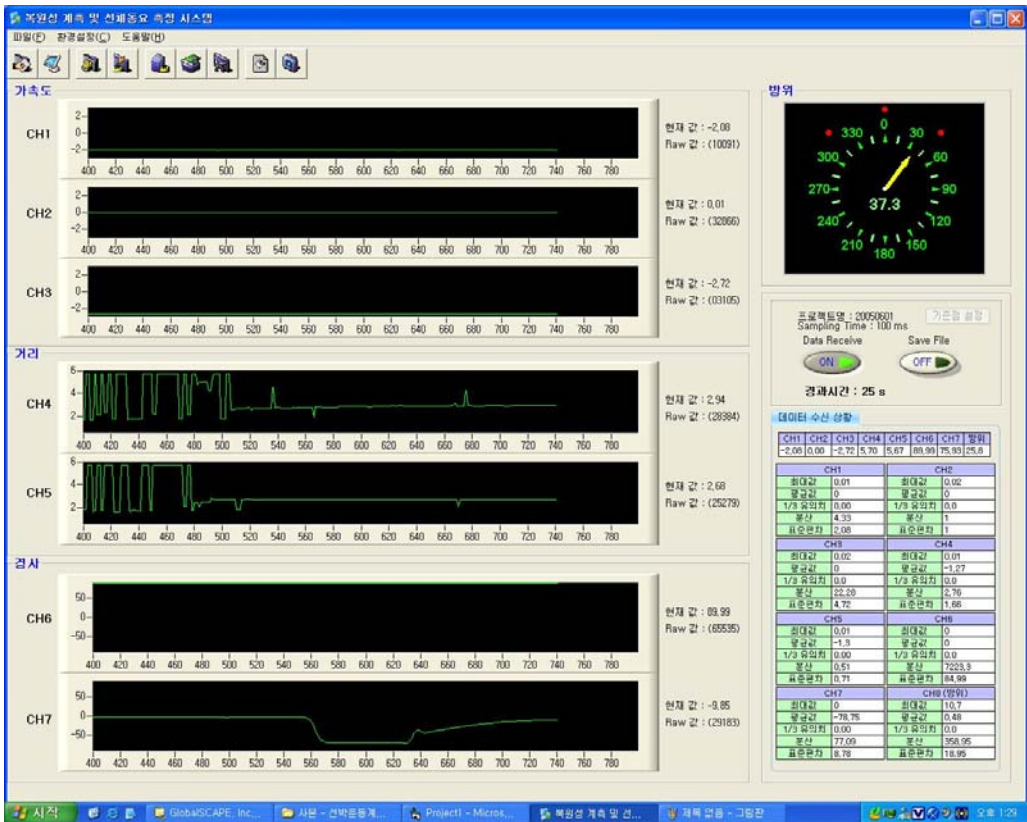


Fig. 4.21 Monitoring and analysis program

Fig. 4.21에 나타난 시스템의 프로그램은 실시간으로 가속도, 변위계, 경사계, 방위계에 대한 계측치의 표시는 물론 특정 시간 간격 동안의 평균치, 분산치 및 1/3 유의치를 자동적으로 분석하여 각 계측 시간에 대한 계측치를 파일에 저장할 수 있다.

저장된 실시간 데이터를 필요에 따라 차후에 보다 구체적인 분석 및 현상 해석이 가능하도록 Fig. 4.24와 같이 저장된 데이터를 불러내어 각 시간대별 실시간 데이터 파형만을 원하는 센서 정보를 선택하여 확인할 수 있도록 프로그램을 제작하였다. 또한 비교적 안정적으로 계측된 특정 영역만을 선택하여 지정된 범위내의 평균치, 분산치 및 유의치를 제공하도록 하는 기능을 추가하였다.

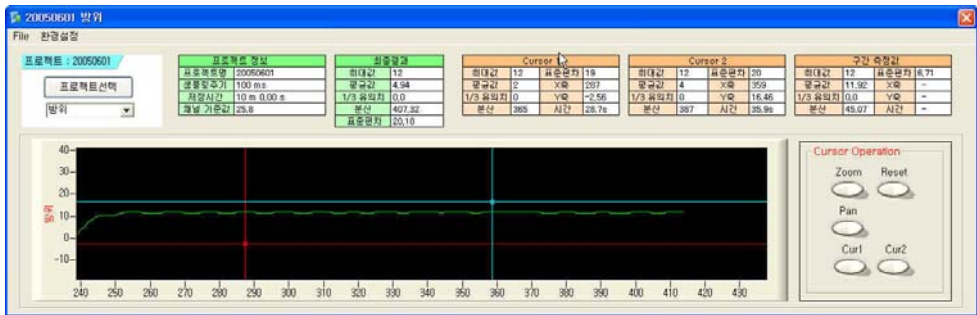


Fig. 4.24 Replay function of saved file

Fig. 4.24의 Replay Window에서 그래프 조작 및 데이터 확인하기 위해 Cursor Operation Panel의 기능을 이용하면 불러낸 그래프에서 Zoom, Pan, Cursor와 같은 다양한 기능을 이용할 수 있다. 그래프 상에 Cursor가 위치한 좌표의 값은 위의 Cursor1, Cursor2, 구간 측정값에 표시된다. 또한 Cursor Operation Panel에서 Cur2 버튼을 누르면 구간 측정값을 얻을 수 있는데, 이때 왼쪽 Shift 키를 누른 상태에서 키보드의 좌우 이동 버튼을 이용하여 구간 측정값을 얻을 수 있다.

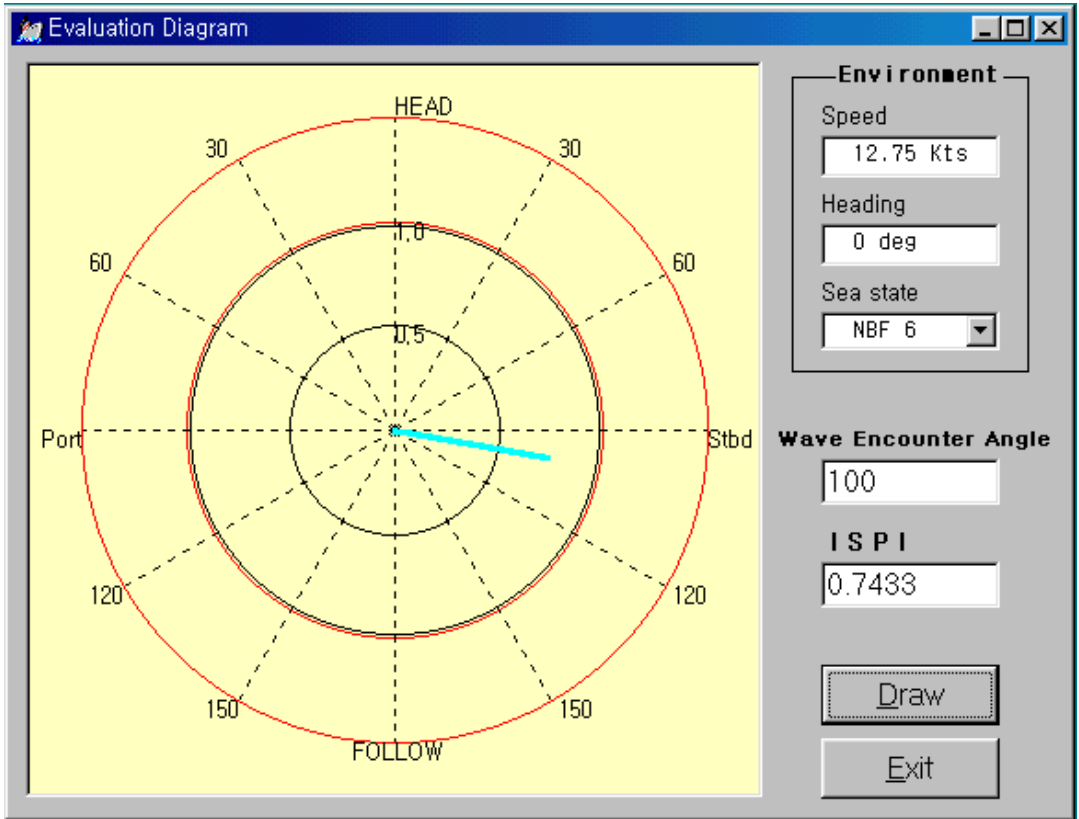


Fig.4.22 Evaluation diagram of navigational safety by programming

Fig. 4.22는 선박 종합 내항성능 평가 프로그램으로서, 센서들로부터 얻은 정보를 바탕으로 항해 위험도를 판별하여 나타낸 화면으로, 계측된 항목을 운항자가 한눈에 파악할 수 있도록 설계한 화면이다. 운항자는 이 화면을 통해서 선체로부터 360도 방위에 대한 상하/좌우 가속도, 변위 등을 파악함으로써 그 당시 선박의 위험 정도를 알 수 있고 또한 침로 및 속력에 따라 위험 정도가 얼마인지를 보여준다. 따라서 선박 운항자는 그 당시 선박이 위험구역에 가까워지면 침로나 속력을 변경해 그 위험 상황을 피할 수 있도록 권고해 준다. 또 기상 예측에 따른 임의의 파고를 입력하면 앞으로 선박에 미칠 위험 정도를 미리 파악할 수 있어 그에 대비할 수도 있다.

Fig. 4.23은 선박 종합 내항성능 평가 시스템의 흐름도이다.

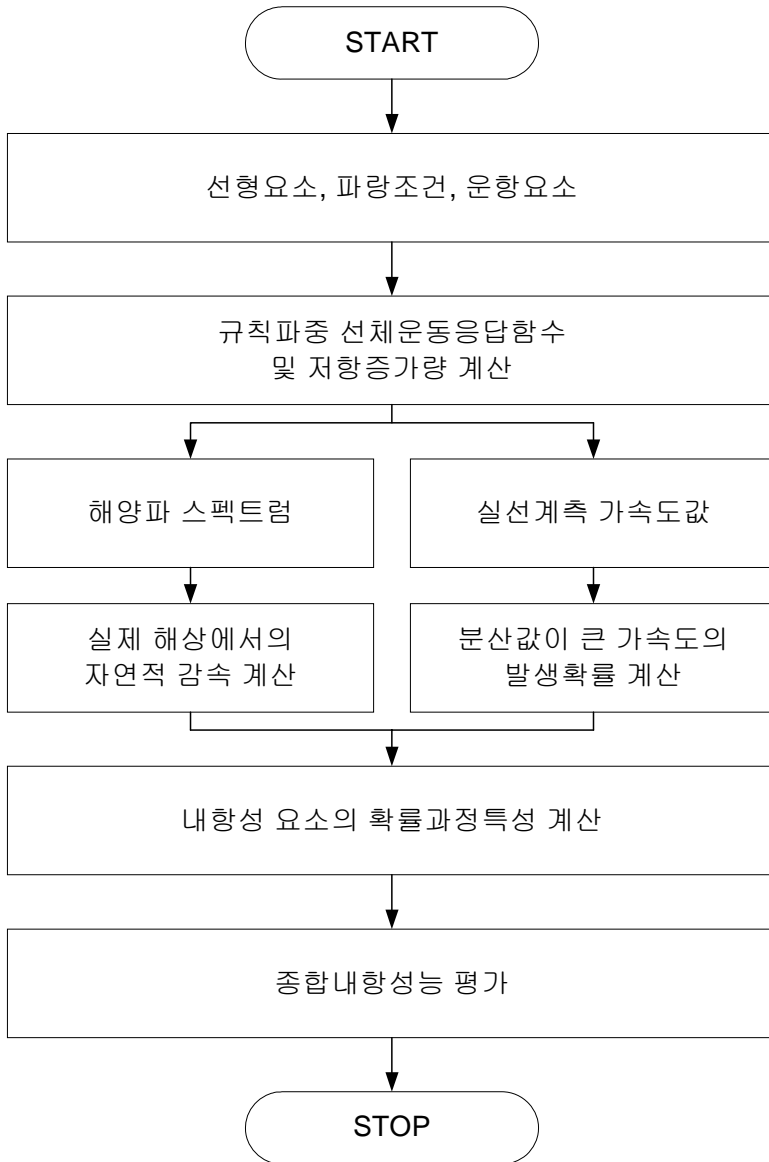


Fig. 4.23 Flow chart of integrated seakeeping performance evaluation system

4.4 선체운동계측시스템의 특징

본 연구에서 개발한 항해 또는 정박 중인 선박의 선체 동요 계측을 위한 선체 운동계측시스템은 물리적 센서 부분과 선체운동 해석 S/W로 구성되며, 물리적 센서 부분을 선내에 휴대하여 간편하게 설치할 수 있어서 실용화 가능성을 높였다. 선체운동계측시스템의 주요 특징만을 정리하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 총 8개의 AD Channel 및 그래프 지원

AD 컨버터는 외장형 DAQ보드로 구현하여, 고속의 시리얼 통신 방식으로 최대 8대까지 멀티 통신이 가능하다. PC 중심의 범용적인 데이터 제어 및 계측 시스템으로 전용 드라이버 없이 손쉽게 시스템을 구현할 수 있다.

장착된 8개의 센서로부터 계측된 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여, 모니터상에 그 결과치를 디지털 데이터 및 그래프로 표시하여 사용자가 한눈에 파악하기 쉽도록 구성하였다.

2) 총 4종류의 센서 지원 : 가속도계, 변위계, 경사계, 방위계

선체 6자유도운동을 디지털 데이터로 정량화하기 위해 3축 가속도계, 2축 경사계, 2개의 변위계, 방위계를 사용하여 계측하여, 수집 데이터의 정밀도 및 신뢰도를 높였다.

3) 실시간 통계치 분석 : 최대값, 평균값, 1/3 유의치, 분산, 표준편차

선체운동 해석 프로그램은 실시간으로 가속도, 변위계, 경사계, 방위계에 대한 계측치의 표시는 물론 특정 시간 간격 동안의 평균치, 분산치 및 1/3 유의치를 자동적으로 분석하여 각 계측 시간에 대한 계측치를 파일에 저장할 수 있다.

4) USB 인터페이스를 제공하여 PC와의 인터페이스가 용이

데이터 처리 방식은 각종 센서와 DAQ 보드 사이에는 직렬 통신(Serial)을 하고, USB TO RS-232 Converter를 통해 PC와는 USB 방식 통신을 채택하여 선체운동 계측기와 외부기기와의 호환성 및 범용성을 높였다.

4) 외장형 AD 컨버터 지원

외장형 타입의 AD 컨버터를 지원하는 DAQ 보드로 구현되어져 전용 드라이버 없이 사용이 가능하며, 고속의 직렬(Serial) 통신방식으로 PC 중심의 범용적인 데이터 제어, 계측을 할 수 있다.

6) Replay 기능을 통해 과거 History 조회 가능

저장된 실시간 데이터를 필요에 따라 보다 구체적인 분석 및 현상 해석이 가능하도록 저장된 데이터를 불러내어 각 시간대별 실시간 데이터 파형만을 원하는 센서 정보를 선택하여 확인이 가능하다.

7) 계측 데이터의 특정 범위를 설정하는 영역 설정 지원을 통해 구간별 통계치 및 분석이 가능

비교적 안정적으로 계측된 특정 범위를 설정하는 특정 계측 영역 구역이 선택 가능하여, 지정된 범위내의 평균치, 분산치 및 유의치를 제공하는 기능이 가능하다.

8) 모니터링 그래프의 Zoom, Pan 기능 및 2개의 커서 지원을 통한 다양한 Data 검출이 가능

제 5 장 결 론

본 논문에서는 항해중인 선박의 선체 운동을 계측 및 해석 할 수 있는 선체 운동계측시스템을 개발하였다. 개발된 시스템을 선박에 탑재하여 각 계측 센서로부터 선박의 6자유도 운동을 계측하고, 측정된 데이터를 선박 운항자가 쉽게 알 수 있도록 정량적인 디지털 데이터로 출력하여, 종합 내항성능 평가 기법을 통해 선박의 내항성능을 평가하는 시스템을 구축하였다. 이상의 연구 수행을 통하여 얻은 결론은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 개발된 선체운동계측시스템은 항해 또는 정박 중인 선박의 외력에 의해 수반되는 선체의 동적 동요에 대한 정량화된 데이터 수집이 가능하다.
- 2) 최대치, 평균치, 분산치, 1/3 유의치 등과 같은 통계 분석 방법을 통해 해상과 같은 특수한 환경 하에서 발생하는 선체의 동적 동요에 대한 주요 운동 특성을 심층적으로 분석 및 평가할 수 있다.
- 3) 실선 계측 자료는 내항성능 평가 또는 계류 안전성 평가에 대한 이론적 연구 결과와 상호 비교 검토가 가능할 것으로 생각된다.
- 4) 단순한 데이터 수집이 아니라 사용자가 설정한 형태의 데이터 수집이 가능하므로, 관련 데이터에 대한 가공 및 활용이 자유로워 다방면으로 응용이 가능할 것으로 판단된다.
- 5) 항해 안전성 여부를 한눈에 파악할 수 있는 평가도를 프로그램화하여 컴퓨터 화면에 화상 처리함으로써, 선체운동 측정결과를 계측과 동시에 모니터 화면에 전시할 수 있는 계기를 마련하였다.

향후 과제로서, 개발된 선체운동계측시스템을 실제 선박에 탑재하여 다양한 환경 하에서 계측을 수행하고, 계측 과정에서 수반되는 각종 문제점을 파악하여 성능 개선이 필요할 것으로 생각된다. 또한 다양한 계측 결과를 정량적 통계 처리를 수행하여 관련 이론 연구 결과와 상호 비교 분석하는 것이 필요하다.

그리고, 향후 선체운동계측시스템을 보다 확장하여 외력 요소들을 자동적으로 계측 가능한 외력 분석 시스템은 물론 선박 DB 시스템과 연동하여 종합 항해 안전성 평가시스템으로 구축 되어야 할 것으로 판단된다.

개발된 선체운동계측시스템은 해상에서의 전복사고 분석, 선박 출입항 통제, 부두에서의 하역작업 통제, 조선소에서 내항성능 및 안전설계에 있어서도 적용이 가능하므로, 계속적으로 선체운동계측시스템의 성능 향상과 측정된 데이터를 다양하게 분석할 수 있는 평가 기법에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- (1) 공길영, 이상민, 김철승 : 선박 탑재형 내항성능 평가시스템 개발(I), 「한국항해항만학회지」, 제28권(집), 제1호, PP.1-8, 한국항해항만학회, 2004.
- (2) 김순갑, 이충로, 공길영 : 선박의 종합내항성능 평가정보제공시스템 개발에 관한 연구, 「한국항해학회지」, 제25권(집), 제3호, PP.247-256, 한국항해학회, 2001.
- (3) 김순갑, 김정만, 공길영 : 선박의 적화상태별 종합내항성능지표에 의한 항해안전성 평가, 「해양안전학회지」, 제4권(집), 제2호, 한국해양안전학회, PP.43-52, 1998.
- (4) Kubo, M. and Sakakibara, S.: Evaluation Method for Operation Efficiency of Cargo Handling and Advanced Safety Ship Mooring System, Bulletin of the 28th Permanent International Association of Navigation Congress, pp.99-105. 1994.
- (5) Ueda, S. and Shiraishi, S. : The Allowable Ship Motions for Cargo Handling at Waves, Report of the Port and Research Institute, Japan, Vol.27, No.4, pp3-61, 1990.
- (6) 공길영 : 선박의 항해중 종합내항성능지표에 관한 연구, 한국항해학회지 제21권 제2호, 1997.6
- (7) 조익순, 이충로, 김순갑 : 선박탑재용 종합내항성능 평가시스템 개발을 위한 기초적 연구, 한국항해학회지, 2000. 6, pp 103 - 111
- (8) 高石敬史·高利伊三夫·宮本武 : ストリップ法計算の比較と解析, 日本造船學會, 運動性能研究委員會 第1回シンポジウム, 1986.12
- (9) 元良成三 : 船體と海洋構造物の運動學, 成山堂, 1992, P50
- (10) Lewis E.V. : The Status of Merchant Ship Seakeeping Reserch,

Proc.19th ATTC, Vol.1, 1980.7

- (11) Nakamura S·Hosoda R. : A Method for Predicting the Power in a Seaway, Proc.14th ITTC, Vol.4, 1975
- (12) 中村彰一 : 耐航性の諸要素, 第1回 耐航性に関するシンポジウム, 日本造船學會, 1969
- (13) 細田龍介·黒井昌明 : 最適航法,第2回耐航性に関するシンポジウム, 日本造船學會, 1977
- (14) Bruce L Hutchison : Joint Seakeeping Response Processes for Determining Structural Loads, Transaction of Society of Naval Architects and Marine Engineers, Vol.110, pp.189-214, 2002. 12
- (15) Edward V. Lewis : Principles of Naval Architecture, SNAME, 1989, pp. 137 - 159
- (16) J. N. Newman : Marine Hydrodynamics, MIT Press, 1980, pp. 328 - 373
- (17) 김재열, 심재기, 오용훈 : 3축 진동가속도계의 특성시험에 관한 연구, 「동력자원연구소지」, 93-II호, PP.99-104, 조선대학교, 1993.
- (18) 양승일외 7인 : 과량중 운동제어 기술개발, 「차세대 선박 핵심기술 개발 최종 연구보고서」, PP.3-47, 과학기술처, 2001. 3-47
- (19) 스트랩다운 관성항법시스템 성능평가 시험, 「항공우주기술」, 제1권, 제1호, PP.28-40, 한국항공우주연구원, 2000.