工學碩士 學位論文

선체응력 감시시스템의 소프트웨어 개발에 관한 연구

A Study on the Development
of the Software of Ship Hull Stress Monitoring System

指導敎授　金　昌　濟

2001年　2月

韓國海洋大學校 大學院

海事輸送科學科

沈　一　煥

목 차

Abstract

제 1 장 서 론 · 1

제 2 장 세계 주요 선급의 규칙상 기본요건 및 시스템의 구성 · · · 3

2.1 세계 주요 선급의 규칙상 기본요건 · · · · · · · · · · · · · · · 3
2.2 HSMS의 구성 · 8

제 3 장 계측 장치와 인터페이싱 · · · · · · · · · · · · · · · · · 10

3.1 계측 장치 · 10
3.1.1 LBSG(Long Based Strain Gauge) · · · · · · · · · · · · · 11
3.1.2 가속도계 및 압력계 · 12

3.2 인터페이스 시스템 · 12

제 4 장 소프트웨어 시스템 · 15

4.1 데이터 입력 및 분석알고리즘 · · · · · · · · · · · · · · · · · 15

4.2 프로그램 구현 · 24

제 5 장 결 론 · 32

참고문헌 · 33

A Study on the Development of Ship Hull Stress Monitoring System

Il-Hwan, Sim

Department of Maritime Transportation Science,
Graduate School of Korea Maritime University

Abstract

In the recent years, major ship registers have demanded improved safety on the hull stress of large bulk carriers which are on navigation or cargo handling in harbour.

Under these circumstances, a system that monitors hull stress and ship condition is becoming more and more important. If efficient and appropriate navigational information is given, safety of navigation would be greatly improved.

The major ship registers of the globe are investing a great effort on the development of a system that monitors the hull stress of ship. Using this system, information of hull stress and ship motion is given to the users and also the data is stored on the external data storage system simultaneously.

Through this study, a software that monitors hull stress was developed. Not only can randomized input-data of the standard hardwares be applied to the system, but also this system can be operated on and applied to real hardware systems.

서　　론

물동량의 증가에 따른 선박의 대형·고속화로 인해 해양사고가 급증하고 있는 실정이다. 해양사고에는 조선자의 실수 등 인적과실에 의한 사고, 황천항해 등 천재지변에 의한 사고, 과도한 선체응력 등 선체의 구조적 결함에 의한 사고 등이 있다. 항해중 또는 선적중 선박에는 적화중량 및 파랑하중 등 외력에 의한 선체손상의 위험이 항상 존재한다. 이러한 외력의 영향으로부터 선체의 구조적 결함을 파악하고 승무원, 선박 및 화물의 안전을 확보하기 위해서 조선자는 선체응력의 상태를 미리 확인할 수 있는 선체응력 감시시템을 운용해야 할 것이다. 선체응력 감시시스템을 운용함으로써 선박의 감항능력을 유지함과 더불어 적절한 조선이 가능하며 또한, 생성되는 기록 데이터는 사고원인을 증명해주는 중요한 자료로 이용될 수 있고, 선박 건조기술에 활용되어 유사 사고의 재발을 방지할 수 있다.

최근 국제해사기구(International Maritime Organization : 이하 IMO)에서는 20,000DWT(Deadweight Ton : 이하 DWT)이상의 Bulk Carrier에 대해 선체응력 감시시스템(Hull Stress Monitoring System : 이하 HSMS)의 설치를 제안하였으며[1], 또한, 영국선급(Lloyd's Register : 이하 LR), 노르웨이선급(Det norske Veritas : 이하 DnV), 미국선급(American Bureau of Shipping : 이하 ABS) 등 선진국의 선급은 HSMS의 설치를 권고하는 잠정규칙을 제정하고 HSMS의 요건을 마련하였다[2].

한편, 영국, 노르웨이 및 미국 등은 자국의 선급규정을 적용하여 HSMS를 개발·생산하고 있으며, 신조 선박의 경우 HSMS의 설치가 증가되고 있다. 국내에서는 한국선급(Korean Register of Shipping : 이하 KR), 대학 및 연구소가 이 시스템을 연구·개발 하고있으나 하드웨어 및 소프트웨어를 포함한 완전한 시스템의 개발에는 미치지 못하고 있다.

이 연구에서는 조선자가 선체응력의 변화를 감시할 수 있도록 HSMS의 데이터처리, 디스플레이 및 저장시스템 소프트웨어를 개발하여, 각종 항해보조장비의 정보를 포함한 종합적인 선박 운항환경 모니터링 소프트웨어를 사용자 중심의 운항환경에 적합하도록 구축하고자 한다.

그리고 그 결과를 강제적용 예정인 항해데이터저장시스템(Voyage Data Record : **이하** VDR)**과 연계시키면 항해정보 감시시스템 및 레코드저장 시스템으로 발전되어 종합항해 솔루션 개발에 활용될 것이다**.

제 2 장 세계 주요 선급 규칙상 기본요건 및 시스템의 구성

이 장에서는 세계 주요 선급의 HSMS에 대한 규칙의 기본요건과 시스템의 전반적인 구성을 소개하고자 한다.

2.1 세계 주요 선급 규칙상 기본요건

세계 주요 선급은 HSMS를 선체의 거동을 감시하여 과도한 응력이나 선체운동이 발생할 경우 사용자에게 경보를 주는 장치로 정의하고 있으며, IMO는 HSMS를 항해중 및 선적작업시의 선체응력과 선체운동의 실시간 정보를 사용자에게 제공하는 것으로 정의하였다.

LR은 선체감시시스템(Hull Surveillance System)에 관한 잠정규정을, DnV는 신조선에 적용시키기 위하여 LR과 동일 명칭의 규칙 초안을, ABS는 선체상태 감시시스템(Hull Condition Monitoring System)에 대한 지침을[3], 한국선급(KR)은 자체 연구 및 시스템의 개발과 연계하여 선체응력 감시장치의 규칙 초안을 마련하였다[4]. 또한, IMO는 DWT 20,000톤 이상의 살적화물선에 선체응력 감시시스템(Hull Stress Monitoring System)의 채용을 권고하였다.

세계 주요 선급 및 국제해사기구는 선체응력 감시시스템과 관련하여 센서, 데이터 프로세싱, 디스플레이 방식 및 장비의 설치위치를 기본요건으로 규정하고 있다. 이러한 기구에서 규정한 선체응력 감시시스템의 관련기준을 요약하면 Table 1, Table 2 및 Table 3과 같다.

Table 1은 측정 센서에 대한 세계 주요 선급의 요구사항을 나타낸다. Table 1에서 알 수 있듯이, 응력센서의 정도는 $\pm 5\,\mu\varepsilon$, 주파수는 0 5㎐이며, 선수 가속도계의 설치 위치는 주갑판 선체중심선상 선수로부터 0.01L 이내, 범위는 ±2g 그리고 정도는 ±0.1g로, 각 선급의 센서에 대한 요구사항은 거의 유사하다. Table 2는 이 연구의 시스템 알고리즘이 되는 부분으로, 자료처리부에 대한 요구사항을 나타낸 것이며, 경향, 그래픽 디스플레이, 평균 및 표준편차 등을 규정하고 있다. Table 3은 세계 주요 선급의 계측대상에 따른 감지기의 종류와 설치위치에 대한 공통적 최소요건을 나타낸 것으로, HSMS의 등급 즉 선급부호를 부여하는 방법을 나타내며, 측정 대상에 따라서 설치위치를 지정하는 규정이다. Table 3에서 ①, ②및 ③항은 항해시 동적 선체응력을 감시하는 최소한의 장비이며, 응력기준치 초과시 사용자에게 경보를

주는 시스템이다. 여기에 ④항을 추가시킨 시스템(①+②+③+④)은 정수중 적하상태 감시와 동적 선체응력분포의 저장 장치를 포함하는 경우이며, 마지막으로 위에 ⑤를 추가시킨 시스템(①+②+③+④+⑤)은 VDR기능에 의해 여러 운항 상황을 제공해 주는 시스템이다. 또한, LVDT (Linear Variable Differential Transformer)는 선형변위 측정기이다.

Table 1과 Table 2에서 알 수 있는 바와 같이, 이 시스템에 대한 세계 주요 선급의 요구조건은 대부분 유사한 내용들로 이루어져 있으며, 따라서 이와 같은 요구조건들을 포괄적으로 수용할 수 있는 소프트웨어를 개발하여야 한다.

Table 1 Sensor

	Requirements
LR	① 응력센서(최소 2개) -국부응력 배제 -정도 : ±5 $\mu\varepsilon$ -주파수 : 0 5㎐ ② 선수가속도계(최소 1개) -위치 : 주갑판, 선체중심선상 선수로부터 0.01L 이내. -범위 : ±2g -정도 : ±0.1g
DnV	① 응력센서(최소 2개) -국부응력 배제 -정도 : ±5 $\mu\varepsilon$ -주파수 : 0 5㎐ ② 선수가속도계(최소 1개) -위치 : 주갑판, 선체중심선상 선수로부터 0.01L 이내. -범위 : ±20m/ sec^2 -정도 : ±0.1g
ABS	① 응력센서 -국부응력 배제 -정도 : ±5 $\mu\varepsilon$ -주파수 : 0 5㎐ ② 선수가속도계 -위치 : 주갑판, 선체중심선상 선수로부터 0.01L 이내. -범위 : ±2g+1g -정도 : ±0.01g(전 범위의 0.5%)
KR	① 응력센서 -국부응력 배제 -정도 : ±5 $\mu\varepsilon$ -주파수 : 0 5㎐ ② 선수가속도계 -위치 : 주갑판, 선체중심선상 선수로부터 0.01L 이내. -범위 : ±1g+1g -정도 : ±0.01g(전 범위의 0.5%)
IMO	① 장축 게이지 (화물적하시 및 항해중 응력계측) -주갑판상, 각 화물창 및 그 외 필요하다고 판단되는 최대 파랑응력이 예상되는 곳. ② 선수 가속도계 ③ Roll 및 Sway 계측을 위한 가속도계(선체 중심선상)

Table 2 Data Processing and Display

	Requirements
LR	① 평균, 표준편차, 피크 치의 디스플레이를 5 30분 간격으로 업데이트 ② slam계산(counting) ③ 이전 4시간에 대한 trend ④ bridge에 시청각 경보 및 그래픽 디스플레이 ⑤ 30분 동안 최대/최소, 연이은 극대극소의 최대값, 평균, 표준편차, zero cross주기, slam 주기, 횟수, 기준 시각을 최소 한 달에 한번 저장
DnV	① 5 30분 간격으로 자료를 화면에 표시 ② 24시간의 trend 표시 ③ 시청각 경보 및 그래픽으로 시각적 비교 ④ bridge에 최대값, 표준편차, 극값, 피로해석용 하중 histogram작성을 위한 싸이클 counting를 표시 ⑤ 30분동안 최대/최소, 연이은 극대극소의 최대값, 평균, 표준편차, zero corss주기, slam 주기, 횟수, 기준 시각을 최소 한 달에 한번 저장
ABS	① 20분 간격으로 자료를 화면에 표시 ② 화면 명도 조절 가능 ③ 시청각 경보 및 그래픽으로 시각적 비교 ④ bridge에 최대값, 표준편차, 극값, 피로해석용 하중 histogram작성을 위한 싸이클 counting을 표시 ⑤ 20분동안 최대/최소, 연이은 극대극소의 최대값, 평균, 표준편차, zero corss주기, slam 주기, 횟수, 기준 시각을 최소 일 주일에 한번 저장
KR	① 1분 간격으로 5분마다 계산된 자료를 화면에 표시 ② 1시간 trend ③ 시청각 경보 및 그래픽으로 시각적 비교 ④ bridge에 평균, 표준편차, 연이은 극대/극소의 최대값, 평균 zero cross 주기, 기준 시각 ⑤ 5분동안 평균, 표준편차, 연이은 극대/극소의 최대값, 평균 zero cross 주기, 기준 시각을 저장
IMO	① 허용 범위 비교, 적화기와 연결(정적 응력) ② 임계값 초과시 시청각경보 ③ 정.동적 피드백을 위한 데이터 저장 ④ 슬래밍 정보, 수직 및 횡방향 가속도

Table 3 Equipment Position and Type

measuring object	equipment position	equipment type
① **Hull Girder Stress**	LVDT : 4개 - 2 LVDT : Midship P&S side - 1 LVDT : L/4 from Bow - 1 LVDT : L/4 form stern	Hull girder stress
② **Ship Motion**	Clinometer : 2개 - 2 Clinometer : Deckhouse	Pitch and roll angle
③ **Slamming**	Accelerometer and/or Pressure gauge - 1 Accelerometer : Bow - 1 Pressure gauge : Bow btm	Acceleration 또는 해수면에 대한 흘수선 상대 위치
④ **Data File Storage**	PC의 External Cartridge Drive - system rack mounted on deck house	trend of hull girder stress and impact response by bow slamming
⑤ **Crack 및 항해정보**	Strain gauge : 2개 and 항해 보조장비 - 2 strain gauge : midship on bilge at port/stbd side - interfacing PC with GPS, Speed Log, Torque meter and Loading computer	Local stress for evaluation of initial fatigue. Voyage condition

2.2 HSMS의 구성

선체응력 감시시스템의 구성은 Fig. 1과 같다. Fig. 1(a)는 일반적인 시스템의 구성도로서 하드웨어 부분인 선체응력 감지 센서, slamming 감지용 가속도계, 압력계 및 선체운동 측정센서 등에서 들어오는 전기적 아날로그 신호가 인터페이스 부분인 증폭기와 잡음제거용 필터를 거쳐 A/D Converter를 통해 디지털신호로 변환됨을 나타낸다. 디지털 신호는 소프트웨어 부분에서 계산/출력 된 후 외부 저장 장치에 저장된다.

Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)의 하드웨어 부분에 항해보조 장비인 GPS(Global Positioning System), Doppler sonar log, Gyro compass 및 Anemometer로부터의 신호를 추가로 입력받는 형태로 VDR기능을 일부 부가한 것이다. 이 기능은 앞으로 VDR의 강제 탑재 규정이 적용될 경우 시스템의 변경 없이 사용할 수 있도록 의도된 것이며, 선체운동 및 응력 뿐만 아니라 종합적인 항행조건을 참조함으로써 위험 상황시 보다 신속하고 적절한 조치를 위해 부가된 기능이다.

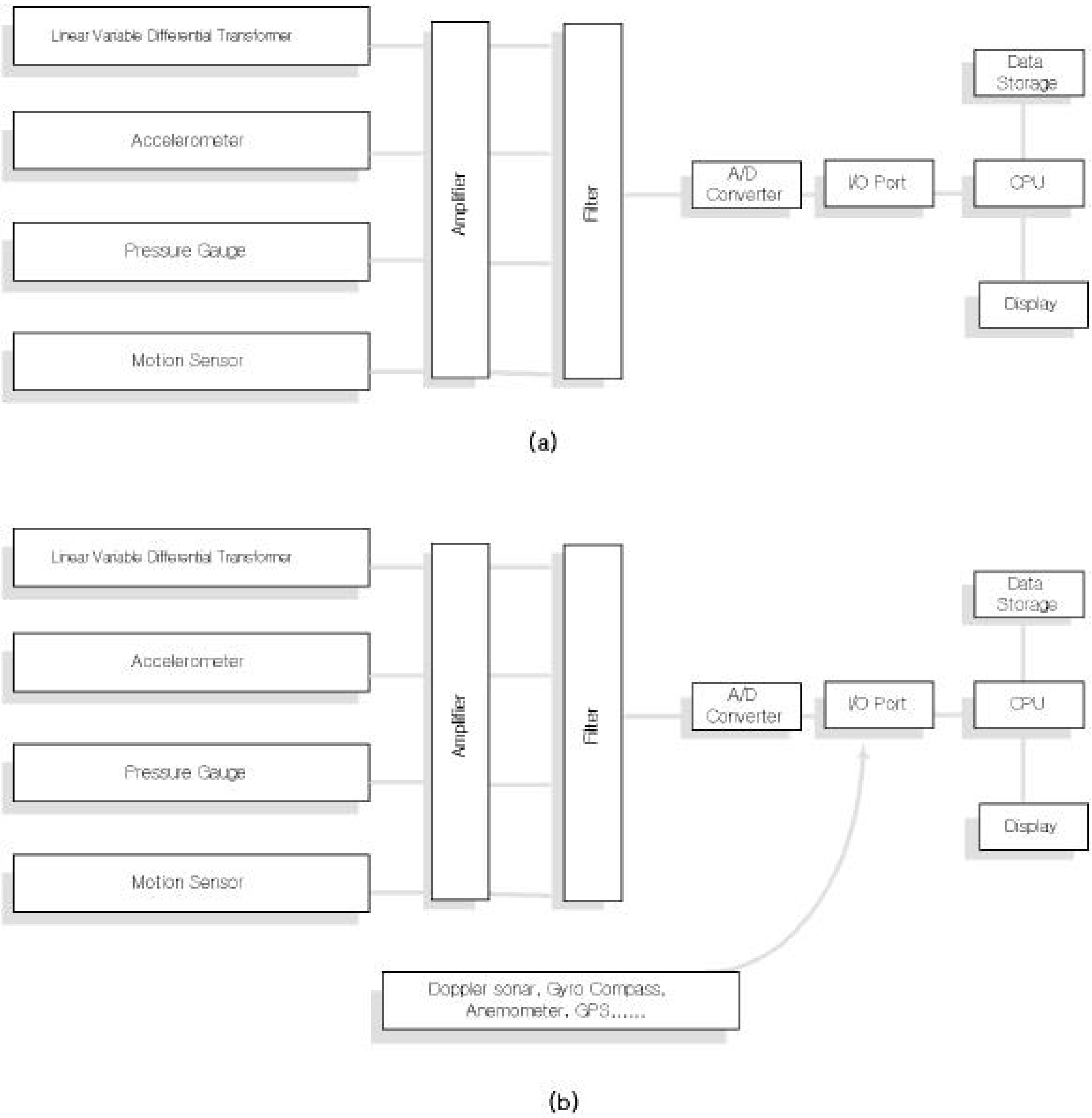


Fig. 1 Diagram of HSMS

제 3 장 계측 장치와 인터페이싱

이 장에서는 이 연구의 프로그램 구현을 위해 모델로 활용된 하드웨어의 특성과 인터페이스에 대해 소개하고자 한다.

3.1 계측 장치

계측장치에는 선체의 응력을 측정하기 위한 LVDT와 선체 변형도 측정을 위한 스트레인 게이지, 선박의 거동을 측정하기 위한 가속도계와 경사계가 있다. 또한 선박에 장착된 각종 항해 보조장비들을 연계하여 사용할 수 있다. 이 장치는 그 타입에 제한이 없으나, 선급의 형식승인을 취득한 장치라야 하며, 해상환경조건에 적절하여야 한다.

Table 4는 계측장치의 계측 대상과 계측장치의 종류별 성능, 정도 및 주파수 범위를 정리한 것으로 세계 주요 선급의 요구사항을 충족시키는 최소요건을 나타낸다[5].

Table 4 Scale and Precision of Equipment

position & objects	epuipment	full scale	frequency range	position	precision
Ship Motion (Heave, Sway , Surge)	Accelerometer	±2g + 1g	5㎐	Midship	±0.01g
Ship Motion (Pitch, Roll)	Angle Sencor (Clinometer)	±30 °	5㎐	Midship or Appropriate Position	±0.3 °
Bow Acceleration	Accelerometer	±2g + 1g	5㎐	Forward end	±0.01g
Hull Girder Stress	LVDT	±2.5mm	5㎐	Midship on Deck	±2% (±5 ㎛ε)
Local Stress	Strain Gauge	±2500 ㎛ε	5㎐	Midship in way of Longitudinal	±5 ㎛ε
Pressure	Pressure Gauge	900 1100 mbar	5㎐	Bow on Bottom	±5%

3.1.1 LBSG(Long Based Strain Gauge)

LBSG는 주 선체거더에 작용하는 응력 및 굽힘모멘트의 양을 계측하기 위하여 갑판상의 한 기준점에 대해 일정거리 떨어진 점의 변위량을 측정하는 장치이다. 즉, 종방향으로는 격벽을, 횡방향으로는 갑판하부의 종거드 상부에 게이지의 구동부와 고정점을 rod로 연결하여 2, 3개 프레임의 간격으로 갑판에 설치한다(Fig. 2참조)[6].

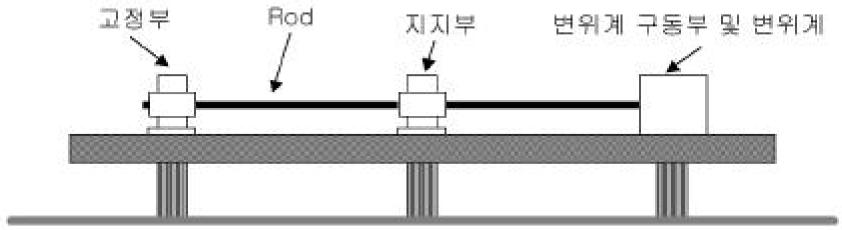


Fig. 2 Diagram of LBSG

LBSG의 변위계로는 LVDT와 Linear Potentiometer(LPM)이 있다. LVDT의 경우 비접촉식으로 정밀도가 높으며 큰 변위 측정에 사용되는 변위계로 수명이 긴 반면 높은 전압을 요구하므로 위험구역에 설치할 수 없다. LPM의 경우 접촉식으로 작은 변위 계측에 주로 사용되고 낮은 전류를 사용하면서도 정밀 측정이 가능한 계기이지만 수명이 짧다는 단점이 있다. 그러나 LPM은 본질안전(Intrinsically Safe)에 유리하고, LVDT와 비슷한 정밀도를 가지며 비용이 저렴하기 때문에 주로 사용되고 있다[7]. 이 연구의 프로그램 구현을 위해 모델로 사용된 일본 MIDORI사의 LP-10FB의 전기적 사양은 Table 5 와 같다.

Table 5 Electrical Specification of LP-10FB

유효 측정 길이	10 mm
전 저항치	0.1, 0.2, 0.5, 1 kΩ
전 저항치 편차	±20 %
직선성	±1 %
정격 전력	0.3 W / 70 ℃
정격 출력	0.1 % 이하
절연 저항	100 MΩ 이상 DC 500 V
내전압	AC 500 V 1분간
저항온도 계수	±400 ppm / ℃

3.1.2 가속도계 및 압력계

가속도계는 선수부에 설치하여 슬래밍을 계측하기 위한 1축 가속도계와 선체중앙에 설치하여 선체의 운동을 측정하는 3축 가속도계가 사용된다. 측정된 가속도를 적분하여 속도와 변위를 구할 수 있다. 가속도계의 종류에는 아주 미세한 진동 감지용인 servo-type, 차량, 교량, 대형 구조물 등의 진동 감지용으로 광범위하게 사용되는 bridge-type 그리고 고진동 감지용으로 사용되는 piezo-type이 있다. 프로그램 구현에서는 ±2g+1g의 범위를 갖는 가속도계를 대표 모델로 하였다.

압력계는 슬래밍 계측을 위해 사용되며, 주로 고성능 스트레인 게이지형 압력계가 사용된다. 압력계는 선수저 중심선상 좌우현으로 약간 치우친 위치에 한 쌍이 설치된다. 압력 게이지로부터 계측된 값은 선수 흘수, 수면에 대한 선수상대속도, 선수저의 출수와 출수범위 및 선저 충격압의 크기와 범위를 결정한다. 설치시 대기압을 0으로 하여 0점 조정하고 수두와 선수 흘수표지의 값을 비교하여 스케일을 설정한다. 프로그램의 대표 모델은 900 1100mbar의 범위를 갖는 압력계로 하였다.

3.2 인터페이스 시스템

이 연구에서 사용된 인터페이스 장치의 모델은 Fig. 3과 같다. 감시센서와 항해보조장비의 데이터는 multiplexer를 통하여 PC로 입력된다. Multiplexer와 PC의 시리얼통신은 RS-232C를 사용한다.

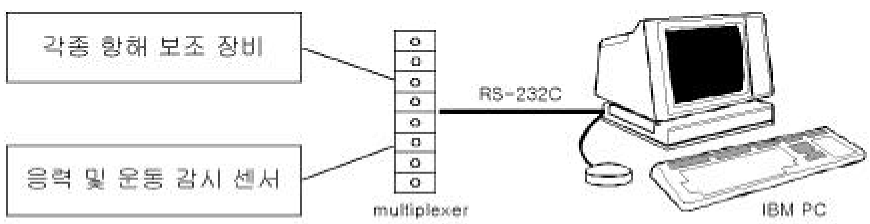


Fig. 3 Diagram of the Interface

RS-232C를 이용한 통신 처리부분은 인터럽트를 이용하여 처리하는 방법이다. 센서들로부터 입력된 데이터들은 $로 시작하여 <CR><LF>로 끝나는 문자열들로 형성되어 있다.

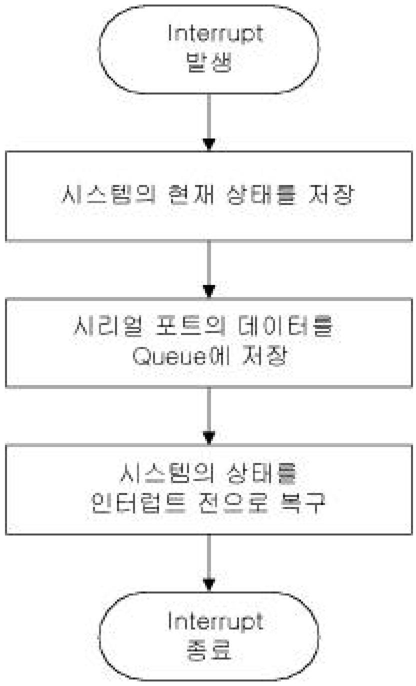


Fig. 4 Flowchart of the Interrupt Function

Fig. 4는 인터럽트 Function의 흐름도이다. Queue는 데이터 통신에서 전송을 기다리고 있는 메시지의 대기열을 말하는데, 데이터가 Queue의 끝까지 가도 이미 읽은 Queue의 시작 부분에 다시 저장되는 순환 구조로 되어있다. 시리얼 통신을 통해 데이터를 입력받을 경우 Queue에 저장되는데, 이것을 이벤트라 한다. Queue에 저장된 데이터를 가져와 데이터 buffer에 저장하는데 사용되는 방식은 폴링방식이다. 폴링방식이란 순차적으로 진행하다가 이벤트가 체크되면 데이터를 가져와 data buffer에 저장하는 방식으로 Fig. 5와 같은 순서이다. data buffer는 계측장치로부터 읽어들인 데이터들이 완전한 문자열 형태를 이룰 때까지 저장해 두는 임시 기억장소이다.

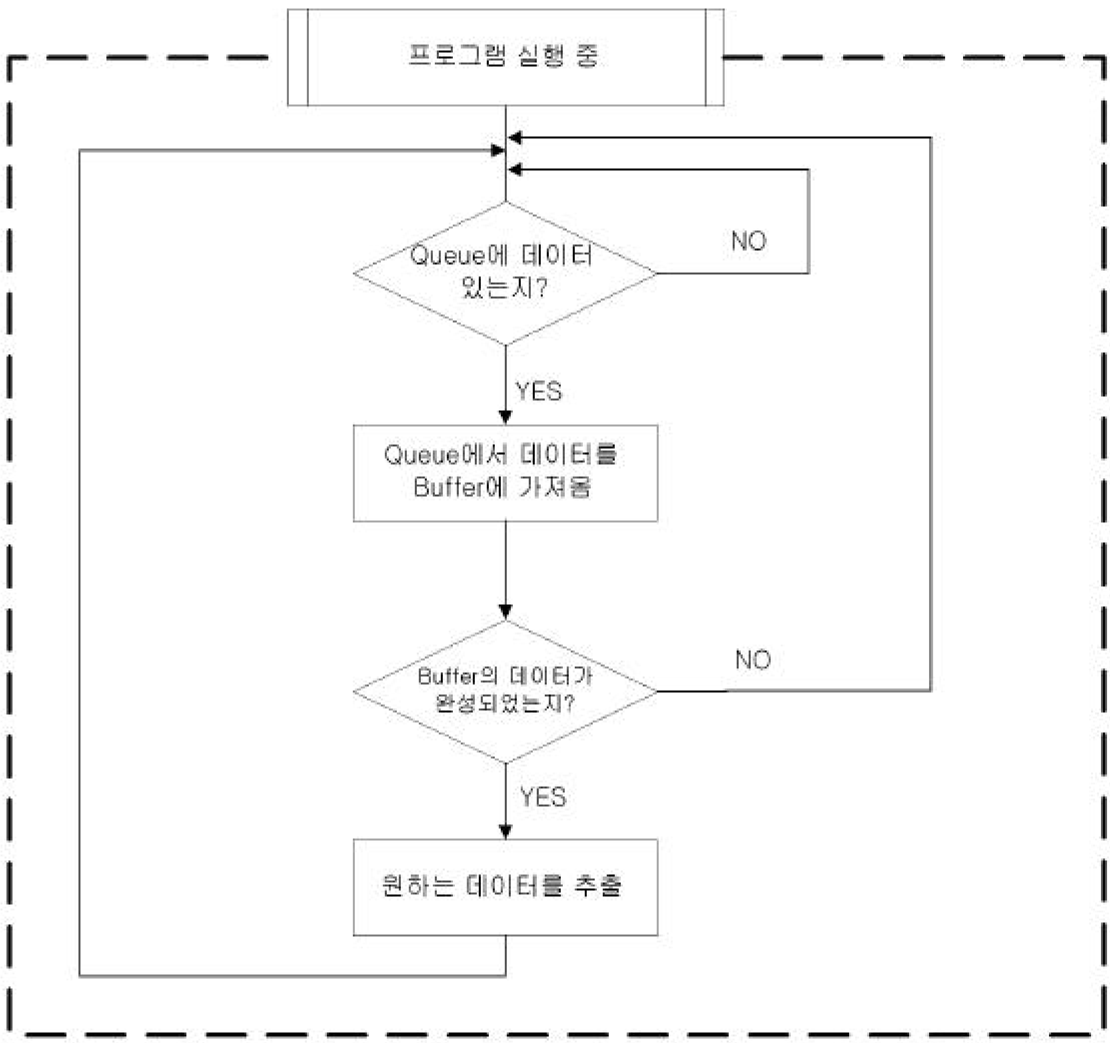


Fig. 5 Flowchart of Data Processing

Fig. 5에서 알 수 있듯이 프로그램이 진행 중에도 데이터의 입력과 저장이 계속적으로 이루어진다. 데이터를 화면에 디스플레이 해주는 GUI(Graphical User Interface : 이하 GUI)는 Fig. 5와 같은 방법으로 저장 · 입력된 데이터를 화면에 표시해 주는 방식이다. 즉, HSMS는 데이터를 입력받은 후 각종 그래픽으로 화면에 출력시키면서 동시에 계속적으로 데이터의 입력 및 저장이 이루어져야 하는데, 본 연구에서 개발한 소프트웨어는 이것이 가능하도록 다중처리(Multi-tasking)를 하였으며, 특히 사용자가 편리하게 사용할 수 있도록 GUI로 구성하였다.

제 4 장 소프트웨어 시스템

이 장에서는 이 연구의 주된 방향인 HSMS의 소프트웨어 시스템에 있어서 입력된 데이터의 분석, 출력 및 저장에 대한 알고리즘을 소개하고자 한다.

알고리즘은 Table 2의 요건을 만족시키도록 Real Time Multi-tasking이 가능해야 하며, 자료취득이 중단되지 않고 연속적으로 실행되어야 한다. 그리고, 데이터 저장 드라이브의 카트리지 교환시점 이외에는 데이터 처리 및 저장이 완전 자동으로 수행될 수 있도록 설계되어야 한다[8].

4.1 데이터 입력 및 분석 알고리즘

세계 주요선급의 요구조건을 모두 만족시키도록 각 센서 및 항해 보조장비의 특성에 따라 샘플링 속도를 조절하여, 취득 · 입력된 자료를 5분 단위로 계산하는 알고리즘을 구축하였다. 선체응력 및 운동에 관련된 자료의 평균, 최대치, 최소치, 표준편차, rms(root mean square) 및 zero-cross주기를 계산하여 저장하고, 항해 보조 장비에서 입력되는 자료는 실측값만 저장되도록 하였다.

선체 굽힘모멘트는 정수중 굽힘모멘트와 파랑 굽힘모멘트 및 전 굽힘 모멘트가 있다. 세계 주요 선급의 선체강도에 대한 정수중 및 파랑중 굽힘모멘트의 최대허용치 계산식과 전 굽힘모멘트의 관계는 Table 6과 같다.

항해중일 때 전 굽힘모멘트는 정수중 굽힘모멘트와 파랑중 굽힘모멘트의 합으로 계산되며, 정박중일 때 전 굽힘모멘트는 정수중 굽힘모멘트로만 계산된다. 그 관계를 다음 식(1)에 나타낸다.

$$M_{total} = \frac{M_{still} + M_{wave}}{M_t} \times 100 \quad (\%) \qquad : \text{항해중}$$

(1)

$$M_{total} = \frac{M_{still}}{M_s} \times 100 \quad (\%) \qquad : \text{정박중}$$

여기서, M_{total} 은 전 굽힘모멘트, M_{still} 는 정수중 굽힘모멘트 그리고 M_{wave} 는 파랑중 굽힘모멘트이다. M_t 는 Table 6에 의해 계산된 최대허용 전 굽힘모멘트, M_s 는 최대허용 정수중 굽힘모멘트 그리고 M_w 는 최대허용 파랑중 굽힘모멘트이다.

LBSG의 설치 위치 x 에서 계측된 데이터는 Mx 로 계산된 후, M_{still} 과 M_{wave} 의 계산에 이용된다. Mx 는 다음 식(2)와 같이 나타낸다[5].

$$Mx = \left(\frac{V_{out}}{V_{\max}}\right)\left(\frac{\Delta\ell_{\max}}{\ell}\right)\cdot E\cdot Z_x \quad (2)$$

여기서, V_{out} 는 LBSG의 출력계측 전압, $V_{\max}$ 는 LBSG의 최대 출력 전압, $\Delta\ell_{\max}$ 는 LBSG Rod의 최대 변형량, ℓ 는 LBSG Rod의 길이, E 는 영율(Young's Modulus), Z_x 는 위치 x에서의 실단면계수를 나타낸다.

M_{still} 은 5분 동안의 Mx 평균값으로, 다음 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{still} = \frac{1}{N}\sum M_x \quad (3)$$

여기서, N은 5분 동안 계측된 데이터의 수이다.

M_{wave} 는 동일기간의 Mx 의 표준편차를 2.65배한 값으로, 다음 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$M_{wave} = 2.65\times\sqrt{\frac{1}{N}\sum(M_x - \overline{M}_x)^2} \quad (4)$$

여기서, 계수 2.65는 30개의 연속파에서 발생할 수 있는 신호의 최대진폭에 대한 통계적 추정자이다[9].

M_{total} 는 M_{still} 와 M_{wave} 를 구한 후, 식(1)에 의해 계산된다. 즉 M_{total}

은 세계 주요 선급의 기준 최대허용치(M_t)에 대한 퍼센트로 실시간 표시 된다.

이 프로그램은 사용자가 선박의 인증 선급을 선택하면, 그 선급의 규정에 적합한 식에 의해 계산되는 알고리즘으로 되어있다.

Table 6 Requirements concerning Strength of Ship

	Requirements
LR	$M_t = M_s + M_w$ **<파랑중 최대 허용 굽힘모멘트>** $M_w = f_1 f_2 M_{w0}$ (kN-m) f_1 : ship service factor **운항상 제약이 없는 경우** = -1.1, **특별 제약이 있는 경우** = 0.5 f_2 : wave bending moment factor = -1.1 for *sagging* $= \frac{1.9 C_b}{(C_b + 0.7)}$ for *hogging* $C_b \geq 0.6$ $M_{w0} = 0.1 C_1 C_2 L^2 B(C_b + 0.7)$ $C_1 = 0.0412L + 4.0$ $L < 90$ m $= 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right)^{1.5}$ $90 \leq L \leq 300$ m $= 10.75$ $300 < L \leq 350$ m $= 10.75 - \left(\frac{L - 350}{150}\right)^{1.5}$ $350 < L \leq 500$ m C_2 : longitudinal distribution factor = 0 for $A.P.$ and $F.P.$ = 1.0 for $0.4L \leq x \leq 0.65L$ **그외 구간은 선형보간에 의한 값** **<정수중 최대 허용 굽힘모멘트>** $\lvert M_s \rvert = F_d \sigma Z_d \times 10^3 - \lvert M_w \rvert$ (kN-m) σ : **선체 수직굽힘에 대한 허용 조합**(**정수중**+**파랑중**)**응력** (N/㎟) $= \frac{175}{k_L}$ k_L : **고장력강 계수** $= \frac{245}{\sigma_0}$ **선각거더의 단면계수 결정시, 최대값** 0.72, **즉 계산값이** 0.72**보다 크면** 0.72**를 선택** = 1.0 **사용 재료가 연강일 경우**

	Requirements
LR	σ_0 : **최소항복응력**, 353 N/㎟ **보다 크면 별도 고려** Z_{min} : **선각의 최소 단면계수** $= f_1 k_L C_1 L^2 B(C_b + 0.7) \times 10^{-6}$ **㎥** F_d : Local scantling reduction factors $= \frac{\sigma_d}{\sigma}$ $\sigma_d = \frac{\overline{M}_s + M_w}{Z_d} \times 10^{-3}$ **일반적으로 이용되는** σ_d**값이 새깅이나 호깅응력보다 크고**, F_d**는 판재에 대해서는** 0.67, **종보강재에는** 0.75**보다 작게 취하지 않는다**. Z_d : **강력갑판과 용골에서의 선체중앙단면의 실단면계수** [LR Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part 3 ship Structures, Chapter 4 Longitudinal Strength, 1992]
DnV	$M_t = M_s + 1.1 M_w$ in intact condition $M_s = C_w L^2 B(0.1225 - 0.015 C_b)$ kN-m : hogging $= -0.065 C_w L^2 B(C_b + 0.7)$ kN-m : sagging $M_w = 0.19 C_w L^2 B C_b$ kN-m : hogging $= -0.11 C_w L^2 B(C_b + 0.7)$ kN-m : hogging $C_w = 0.0792$ for $L \leq 100$ m $= 10.75 - \{(300 - L)/100\}^{1.5}$ for $100 < L < 300$ m $= 0.075$ for $300 \leq L \leq 350$ m $= 10.75 - \{(L - 350)/150\}^{1.5}$ for $L > 350$ m [DnV Hull Structural Design, ships with length 100 meters and above, 1994]

	Requirements
ABS	$M_t = M_s + M_w$ $M_s = C_{st} L^{2.5} B(C_b + 0.5)$ (ft-1.ton) $C_{st} = 0.275 \times 10^{-3}$ $\qquad 690 < L \le 820ft$ $C_{st} = \left[0.275 - \frac{L - 820}{1160}\right] \times 10^{-3}$ $\qquad 690 < L \le 820ft$ L =선박길이(ft), B =선박폭(ft), C_b =block coefficient $M_w = C_2 L^2 B H_e K_b$ (ft-1.ton) $C_2 = (6.53 C_b + 0.57) \times 10^{-4}$ $H_e = (335 + 4.5L - 0.00216 L^2) \times 10^{-2}$ $\qquad 720 < L \le 1000$ft $K_b = 1.0$ $\qquad C_b \ge 0.80$ [Rules for Building and Classing Steel Vessels, Section 6-Longitudinal Strength, 1977]
KR	<**정수중 최대 허용 굽힘모멘트**> $M_s = \frac{175}{K} Z_{min} - \alpha M_w$ K : 재료상수 Z_{min} : 최소 단면계수 $Z_{min} = C_1 L^2 B(C_b + 0.7)K$ $C_1 = 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right)$ $\qquad$ for $90 \le L \le 300$ m $= 10.75$ $\qquad$ for $300 \le L \le 350$ m $= 10.75 - \left(\frac{300 - L}{100}\right)$ $\qquad$ for $350 \le L \le 500$ m L : 선박의 길이 B : 선박의 폭 C_b : 방형 계수(block coefficient) α : 계수, 파랑의 영향이 없는 항내(=0.5), 항해 상태(=1.0)

<table>
<tr><th></th><th>Requirements</th></tr>
<tr><td>KR</td><td>

M_w : 파랑 종굽힘모멘트

$M_w(hogging) = 0.19\ C_1\ C_2\ L^2 B\ C_b$
$M_w(sagging) = -0.11\ C_1\ C_2\ L^2 B(C_b + 0.7)$

C_2 : 선박 길이 방향의 분포계수

= 1.0 for $0.4L \le x \le 0.65L$
= 0.0 for $A.P$ and $F.P$
이외 구간에서는 선형보간법으로 계산한 값.

<파랑중 최대 허용 굽힘모멘트>

$M_w = \frac{175}{K} Z_{min} - (M_s)_{actual}$

$(M_s)_{actual}$ 은 Beam 이론에 의해 계산된 값을 이용한다.

즉, 중량곡선과 부력곡선의 차에 의한 하중곡선을 이용하여 계산된 굽힘모멘트 곡선으로부터 구할 수 있다.
이때, 다음과 같은 최대 굽힘모멘트를 구하는 약산식도 이용가능.

$M_{max} = \frac{W \cdot L}{C}$

W : 만재배수량(ton)
C : 상수

대형화물선 : 35(hogging), 중형화물선 : 32(hogging)
광석운반선 : 35(hogging/sagging), 유조선 : 40(sagging)

[선급 및 강선규칙 제 3편 선체구조, 1995]
</td></tr>
</table>

슬래밍은 선수저에 설치된 압력계 및 가속도계로부터 계측된 데이터를 이용하여 계산, 출력 및 저장된다.

가속도계로부터 계측된 선수 가속도는 슬래밍 충격을 측정하기 위한 것이다. 이때, 슬래밍 충격에 대한 허용 가속도는 수직방향 선수 가속도의 진폭이 중력가속도 g의 40%에 도달할 때를 의미한다[10]. 즉, 가속도가 0.4g이상일 경우 사용자에게 슬래밍에 의한 선체손상 경보를 준다.

압력계로부터 계측된 자료는 수면에 대한 선수저의 상대변위 계산에 이용되고, 사용자는 계산된 상대변위로 선수저 출수 경고와 슬래밍 경고를 동시에 관측할 수 있다. 일반적으로 선수저 출수 경고 기준($Warning_e$)은 선수저와 수면간 상대변위의 표준편차 (σ_{RMe})에 보정계수 5.22를 곱한 식(5)를 이용하여 나타낸다[11].

$$\sigma_{RMe} = H\sqrt{-\frac{1}{2\ln\left(\frac{2\pi N_e}{3600R}\right)}}$$

$$Warning_e = \sigma_{RMe} \times 5.22 \tag{5}$$

여기서, H는 5분 동안의 선수부 압력센서로부터 계측된 압력을 수두로 환산한 값의 평균(m), N_e 는 시간당 선수저(흘수 0m)의 출수가 발생할 임의의 작은 값으로 통상 0.1을 취한다. 보정계수 5.22는 조우주기 10sec에 대한 5분 동안의 표준편차를 그 시간동안의 최대치로 환산하는 통계적인 값이다. R은 선수저 상대속도의 표준편차와 선수저의 수면에 대한 상대변위의 표준편차 사이의 비이며, 내항성능 추정을 통하여 선속(V)의 함수로 구한다. 일반적으로 간이식을 사용하며, 식(6)과 같이 나타낸다.

$$R = 0.012 \times V + 0.65 \tag{6}$$

여기서, V는 선속이다.

$Warning_e$ 은 5분 단위로 계산되는데, 압력계로부터 5분 동안 계측된 값을 식(5)로 계산한 후 이를 기준으로 하며, 다음 5분 동안 계측된 선수저와 수면간의 최대변위값과 기준값을 비교하여 최대변위값이 기준값을 초과할 경우 출수한 것으로 판정한다.

슬래밍 경고 기준($Warning_s$)은 선수저와 수면간 상대변위의 표준편차(σ_{RMs})에 보정계수 5.22를 곱한 식(7)을 이용하여 나타낸다[11].

$$\sigma_{RMs} = H\sqrt{-\frac{1+\left(\frac{R_{dot}}{H}\right)^2}{2\ln\left(\frac{2\pi N_s}{3600R}\right)}} \tag{7}$$

$$Warning_s = \sigma_{RMs} \times 5.22$$

여기서, N_s 는 시간당 선수저 슬래밍 횟수로 통상 0.1을 취하며, R_{dot} 는 슬래밍의 임계속도를 나타내며, 식(8)과 같이 나타낸다.

$$R_{dot} = 0.0927\sqrt{gL} \quad \text{(m/sec)} \tag{8}$$

여기서, g는 중력 가속도, L은 선체 길이이다.

$Warning_s$ 는 5분 단위로 계산되며, 전전 5분 동안의 계측값을 식(7)을 이용해 계산한 후, 최근 5분 동안 압력계로부터 계측된 선수저와 수면간의 최대변위값과 비교하여 슬래밍에 의한 위험 여부를 판단한다.

4.2 프로그램 구현

선체응력 및 운동 감시시스템의 자료 처리부, 화면 표시부 및 저장부에 관한 프로그램의 전체 흐름도는 Fig. 6과 같다. 프로그램의 구성은 초기치 입력창인 initial setup window, 대양 항해 중 사용되는 sailing mode window, 항내 선적시 사용되는 harbour mode window, 전체적인 굽힘모멘트를 조감할 수 있는 bending moments window, 처리된 데이터를 볼 수 있는 data display mode window, 각 센서의 작동 이상유무를 파악할 수 있는 gauge check mode window 및 굽힘모멘트의 trend를 볼 수 있는 trend window로 구성되어 있다.

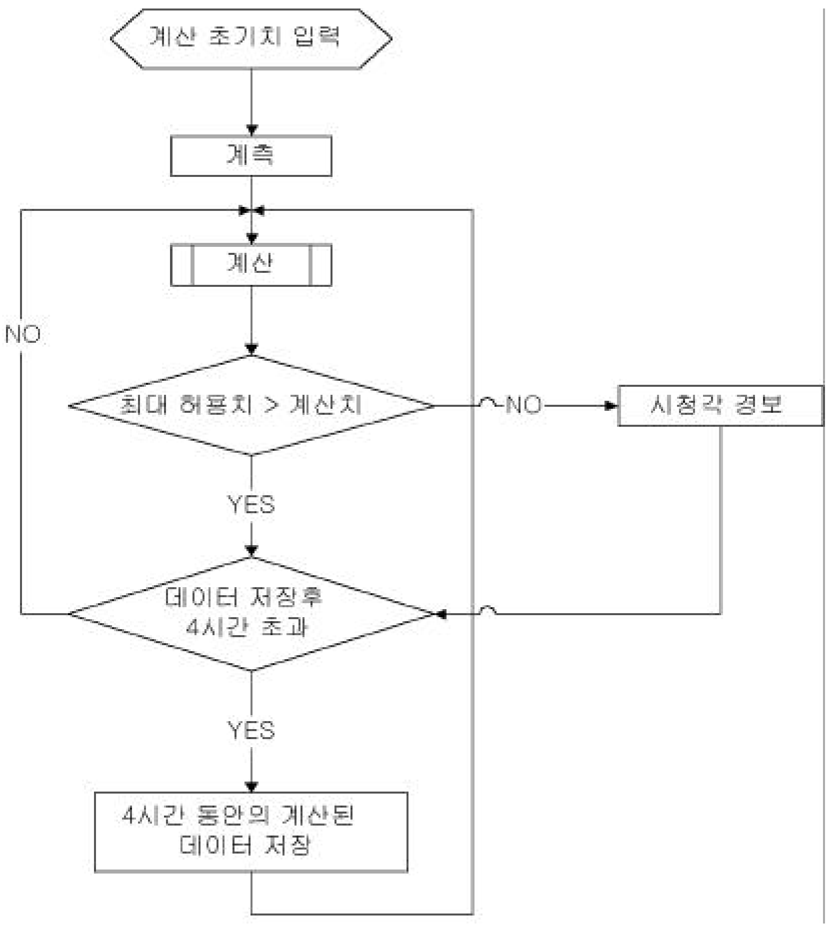


Fig. 6 A Flowchart of Program

프로그램 구현에 사용된 환경은 windows 98이며, 사용 언어는 visual basic 6.0이다. 프로그램의 그래프를 구현하기 위한 OCX(OLE Custom Control)로는 mhgaug32.ocx, mhhist32.ocx 및 mhfram32.ocx을 사용하는데, mhgaug32.ocx는 막대그래프를, mhhist32.ocx는 경향그래프를, mhfram32.ocx는 애니메이션 구현을 위해 사용되었다. 디스플레이 모드는 크게 항해 모드와 항내 선적 모드로 이루어지며, 각각 계산식에 의한 결과들이 그래픽으로 디스플레이 된 후 저장된다.

Fig. 7은 항해중 사용모드의 기능별 기본 배치도이다. ①은 선속, 침로, 풍향 및 풍속, ②는 롤링과 피칭, ③은 슬래밍, ④는 선체응력, ⑤는 주 메뉴, ⑥은 데이터 저장 장치의 용량 그리고 ⑦은 기준 시각을 나타낸다.

Fig. 8은 항해중 사용모드, Fig. 9는 하역중 사용모드이다. 항해중 사용모드에서는 선박의 선체응력, 선박의 운동 상태 및 기타 항해 정보를 한 화면에 그래픽으로 조감할 수 있으며, 바탕화면을 검게 처리하여 야간항해중 사용을 고려하였다. 하역중 사용모드에서는 선체응력과 heeling 및 trim을 조감할 수 있다. 모든 정보를 그래픽으로 표시하여 사용자에게 쉽게 상황을 알릴 수 있다. 여기서, Max는 최대값, Min은 최소값, Mean은 평균, PTP는 피크치 주기, S/D는 표준편차, Zero CP는 zero cross period를 나타낸다.

그래픽에 대한 보다 자세한 정보를 원할 경우에는 각 그래픽 항목을 클릭하면 상세정보 창이 디스플레이 된다. Fig. 10은 각 항목들의 상세정보 창을 보여준다.

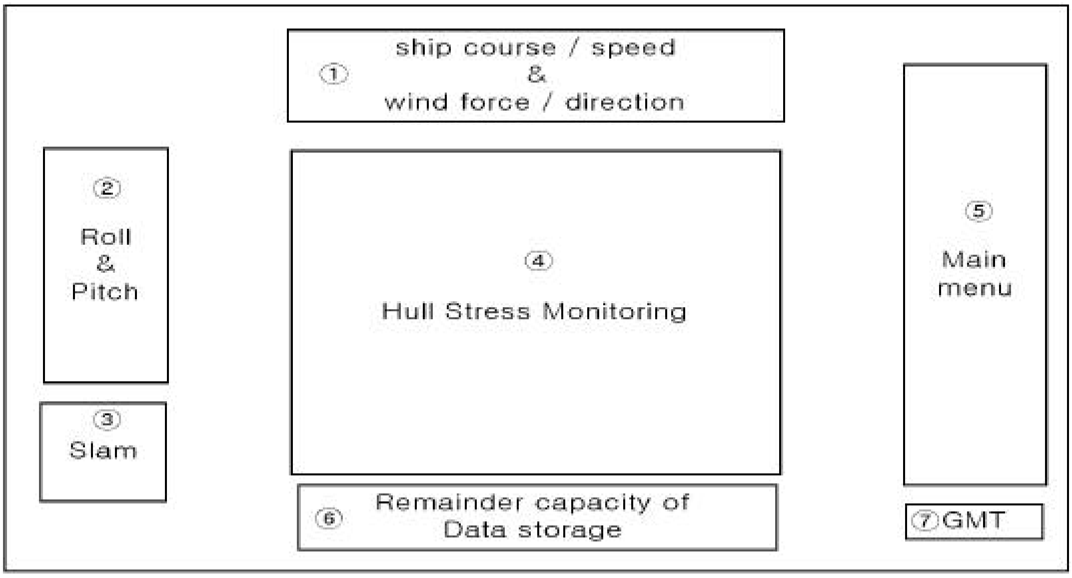


Fig. 7 Diagram of Main Display

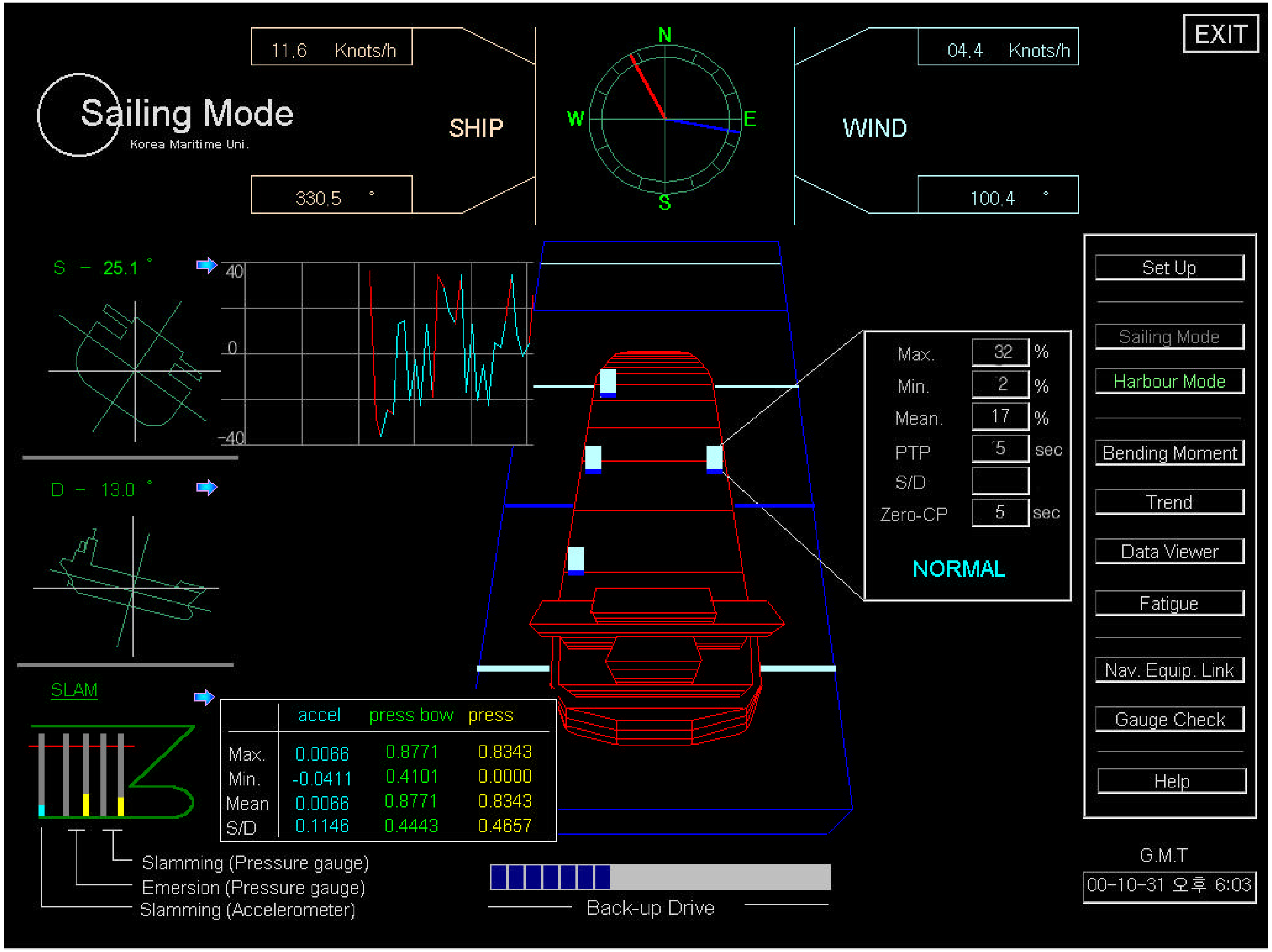


Fig. 8 Sailing display mode

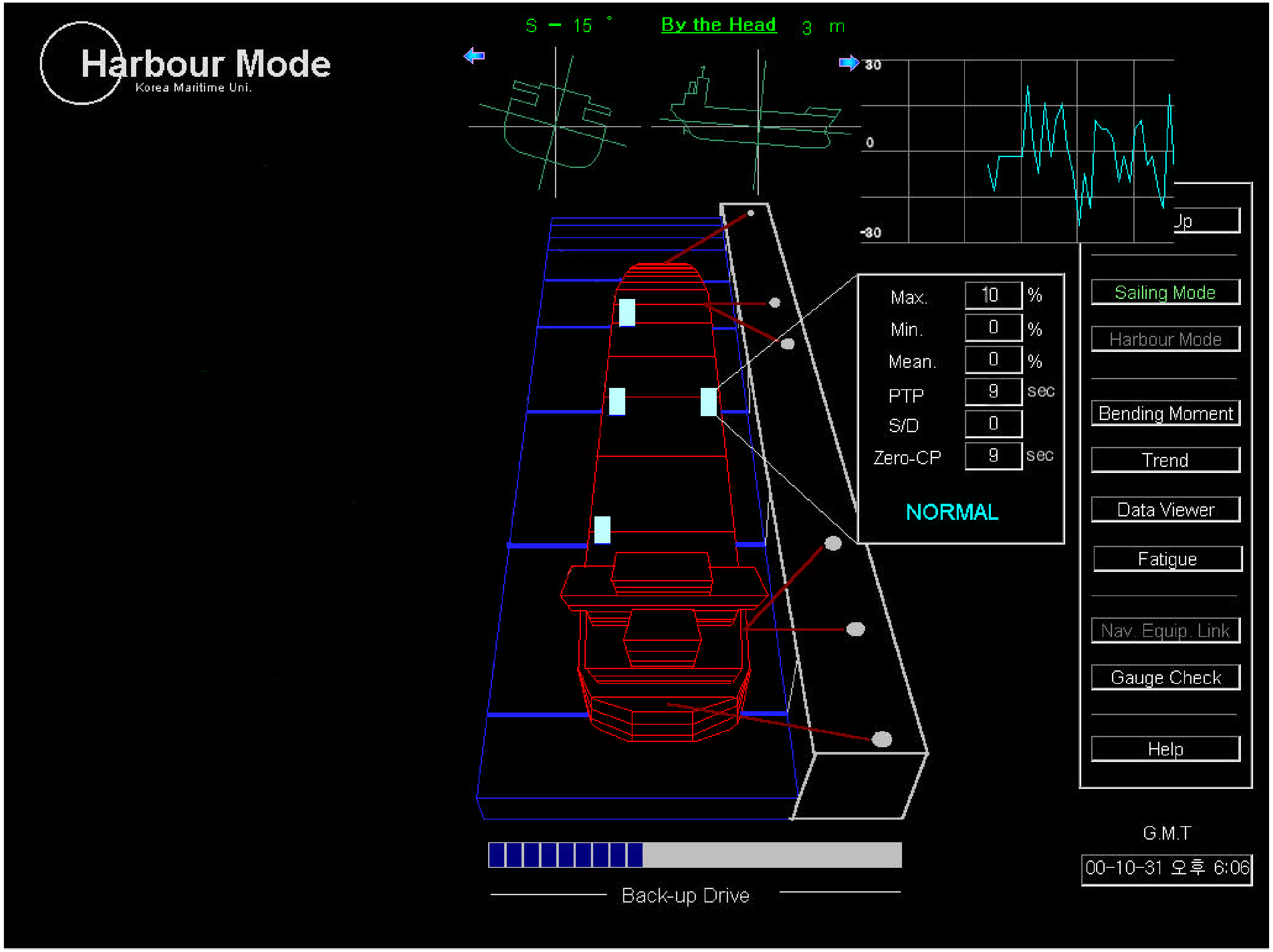
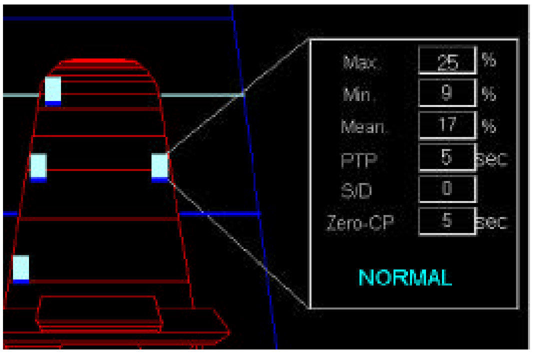
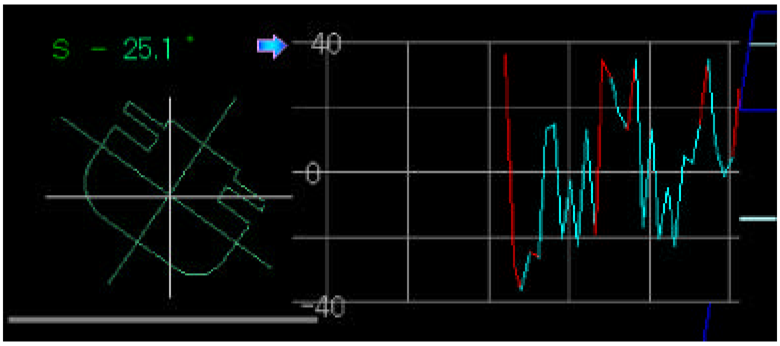


Fig. 9 Harbour display mode

① Hull Stress





② Rolling

③ Slamming

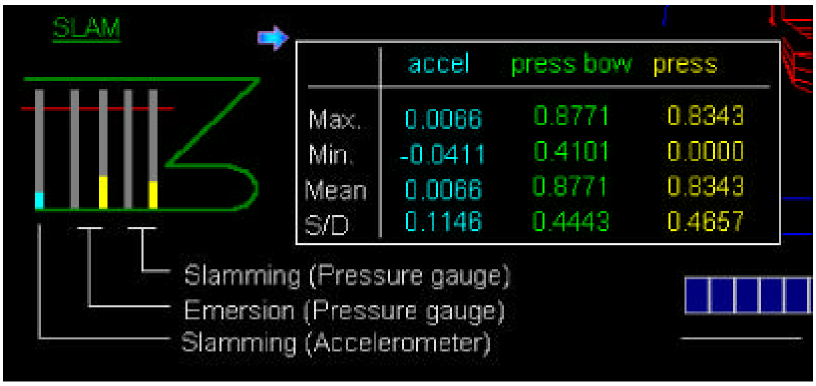


Fig. 10 Details of data display

롤링이나 피칭의 경사각(°)은 연속값을, 슬래밍은 각 계측 센서로부터 입력되는 값들의 계산치와 통계치를, 선체응력(%)은 통계치를 나타낸다.

Fig. 11은 초기치 입력창이며, 사용자가 이 프로그램의 계산에 사용되는 각종 변수와 계산식을 설정할 수 있도록 되어있다. Ship's particulars 항목에서 선급을 선택하면 선급별 적용 계산식이 바뀐다. Principal Dimensions은 선박의 각종 제원을 정확히 입력시키는 항으로 프로그램 내의 각종 계산식에 적용되는 변수들이 입력된다. LBSG는 응력측정 기기의 사양을 입력하는 항으로, 입력되는 값들은 선체응력 계산식에 적용되는 변수들의 값이다. Warning은 선체응력과 슬래밍에 대한 경보 값을 설정하는 항으로 선급 규칙상의 한계 값을 100으로 하여 퍼센트로 값을 입력해야한다. 최종 입력된 값들은 "Save"를 선택함으로써 자동으로 데이터베이스에 입력된다. 반면, "Cancel"을 선택할 경우 입력전의 데이터들이 변화 없이 적용된다.

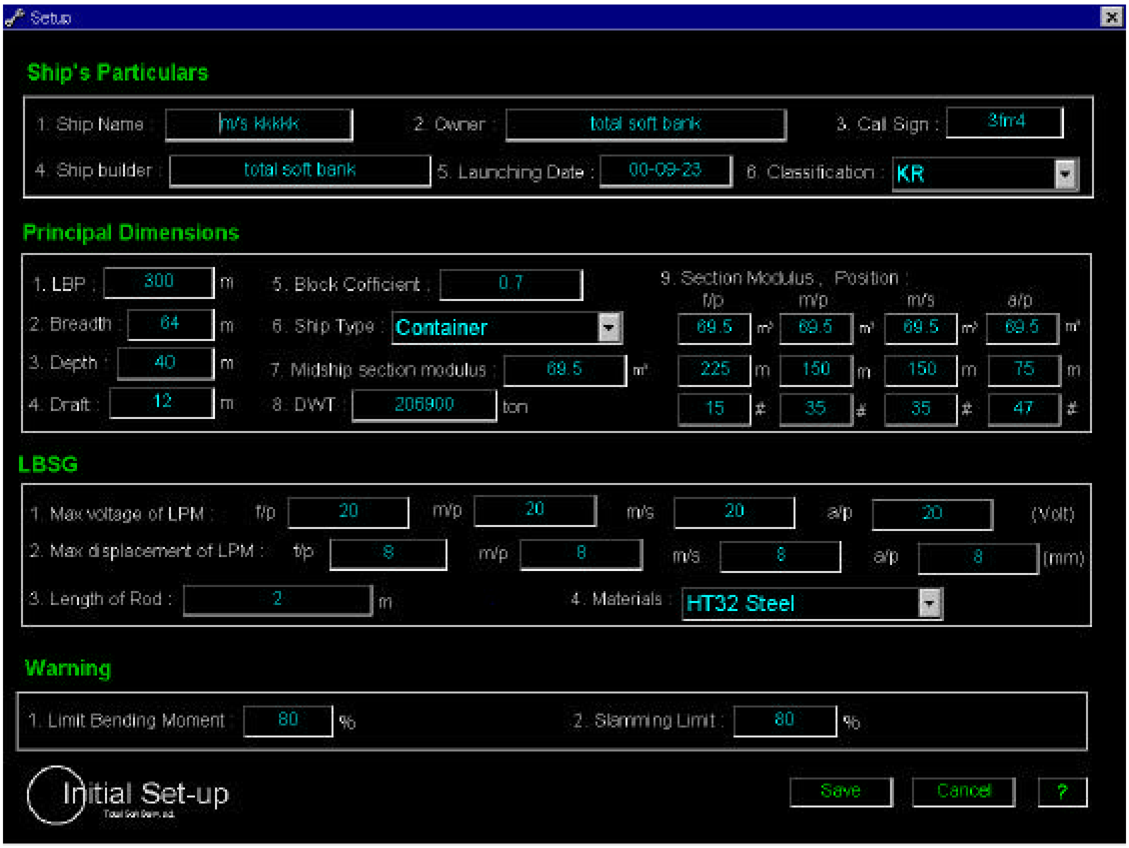
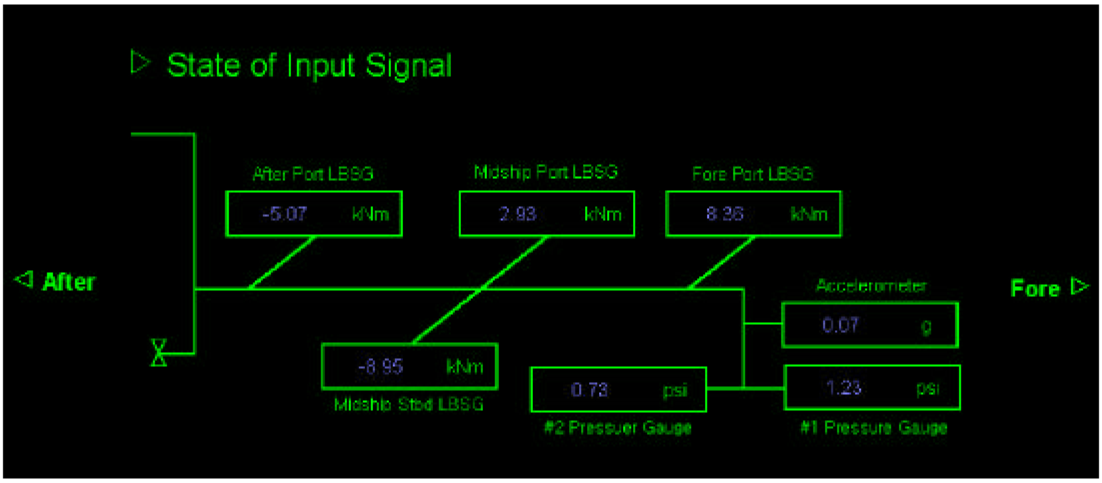
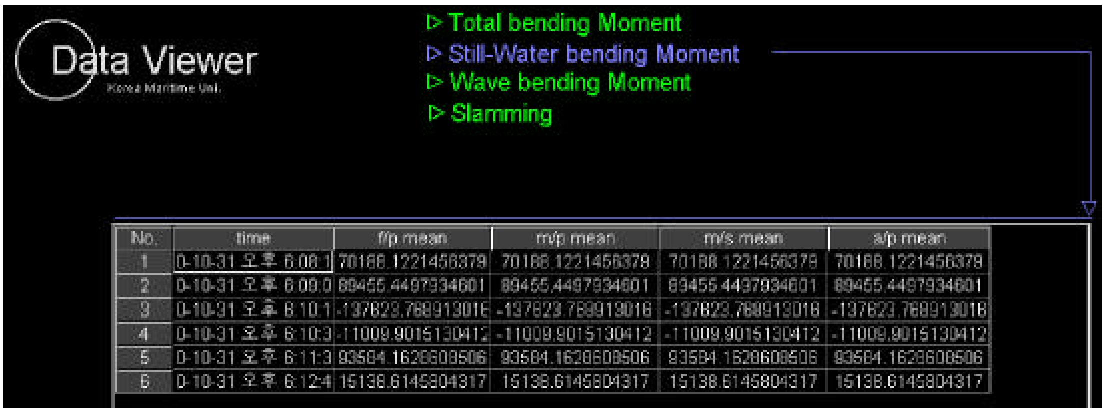


Fig. 11 Initial-Setup display

Fig. 12는 게이지 이상유무의 감시와 굽힘모멘트의 저장 데이터 표시 화면을 나타낸다. (a)는 각종 계측기의 상태를 조감할 수 있는 Gauge check모드이다. 이 모드에서 각 창의 수치가 변화 없거나 다른 동종의 게이지와 값의 차이가 확연히 클 경우 또는 수치가 표시되지 않을 경우 게이지 이상이 있음을 감지할 수 있다. (b)는 Data Viewer모드로써, 4시간동안 계산된 응력 및 슬래밍의 평균을 볼 수 있다. 두 모드에서는 편집이나 입력은 할 수 없으며 단순 참고용으로 사용하는 모드이다.



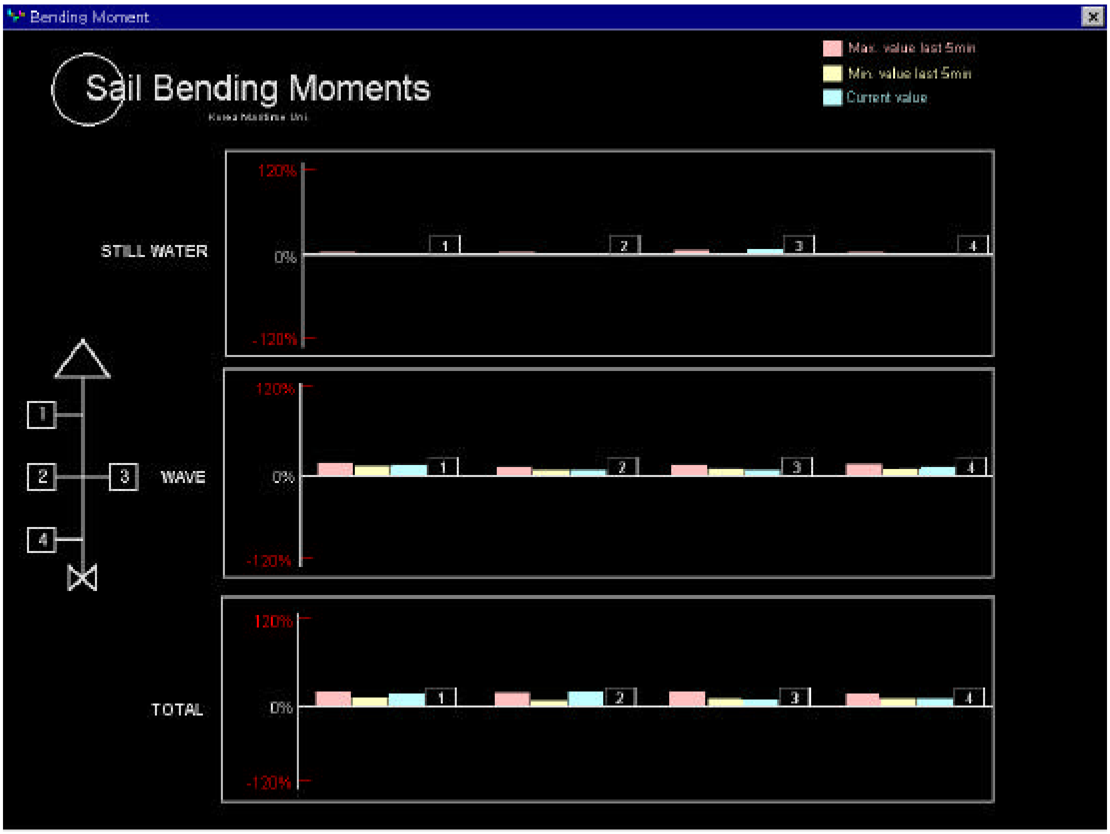
(a)



(b)

Fig. 12 Gauge check & Data viewer display

Fig. 13은 각 센서들의 굽힘모멘트를 막대그래프와 선그래프로 나타내는 화면이다. (a)는 세계 주요선급의 최대 허용치를 100으로 하며, 각 게이지의 종 굽힘모멘트를 퍼센트로 환산하여 막대그래프로 보여주는 창이다. 항해중일 경우 정수중 굽힘모멘트, 파랑중 굽힘모멘트 및 전 굽힘모멘트를 표시하며, 하역중일 경우는 정수중 굽힘모멘트만을 표시해 준다. (b)는 굽힘모멘트의 변화 경향을 보여주는 창이다.



(a)

(b)

Fig. 13 Bar-graph & Trend display

제 5 장 결 론

이 연구에서는 선박의 응력 및 운동감시시스템의 계산, 출력 및 저장 프로그램을 구현하였다.

선체응력 감시시스템에 각종 항해보조 장비들을 연결하여, 사용자들이 종합적인 선체 및 운항 환경을 감시·판단 할 수 있게 하는 HSMS 소프트웨어를 개발하였다. 기존에 개발된 HSMS소프트웨어는 선체응력을 감시하는 기능만 탑재하였으며, 항해중 사용하기에 불편한 화면구성을 제공함으로써 운항환경을 효율적이고 종합적으로 감시할 수 없었다. 반면에 이 연구에서 개발한 HSMS소프트웨어는 선체 운동, 선체응력 및 기타 운항환경을 한 화면에서 조감할 수 있고, 야간 항해를 위한 화면구성으로 항해에 적합한 사용조건을 구비하였다.

2002년 07월부터 강제화 되는 VDR(Voyage Data Record)시스템 기능을 연계시켜 저가의 통합항해 감시 및 저장 장치의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

앞으로 하드웨어와의 직접적인 연결과 그에 따른 실험·검토가 요구되며, Loading Computer와 연계하여 선체응력 측정 오차의 자동수정 기능과 피로계측 및 예측기법을 확대 적용하는 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] "Recommendation for the Fitting of Hull Stress Monitoring System", IMO, MSC/Circ. 646, June, 1994.

[2] "Provisional Rules for the Classification of Hull Surveillance Systems", Lloyd's Register of Shipping, Aug., 1991.

[3] "Guide for Hull Condition Monitoring System", American Bureau of Shipping, 1995.

[4] "선체응력 감시장치의 기준 개발", 한국선급, 위탁연구 개발보고서, 1100-4-7, July, 1998.

[5] 선체응력 감시시스템 개발 최종보고서, 산업자원부, BSN079-674.M, Nov., 1998.

[6] D.J. Witmer, et al., "The BP Oil Tanker Structural Monitoring System", Marine Technology, Vol.32, No.4, Oct., 1995.

[7] P.Lacey and H. Chen, "Improved Passage Planning Using Weather Forecasting, Maneuvering Guidance, and Instrumentation Feedback" , Marine Technology, Jan., 1995.

[8] 管井和夫, "선체강도 Monitoring System에 대하여", 일본조선학회지, 제705호, Mar., 1988.

[9] 이기탁, 김재동, "선체응력 감시시스템 개발 및 실선탑재시험", 한국해양공학회 추계학술발표대회 논문집, 1998.

[10] M.K. Ochi and E.M. Lewis, "Prediction of Slamming Characteristics and Hull Responses for Ship Design", Trans. SNAME, Vol. 78, 1973.

[11] D.J. Witmer and J.W. Lewis, "The BP Oil Tanker Structural Monitoring System", Marine Technology, Vol. 32, No. 4, 1995