

LNG선 하역작업 교육 시스템 개발에 관한 연구

김대희⁺·예병덕⁺⁺·송재욱⁺⁺⁺

Development of Cargo Working Education System for LNG Carrier

Dae-Hee Kim⁺, Byeong-Deok Yea⁺⁺ and Chae-Uk Song⁺⁺⁺

Abstract : This paper describes a system for LNG carrier's loading and discharging work education. This system consists of three modules(cargo work simulation, ballast work simulation and loading calculation module), and could be a useful to train mariners boarding on LNG carrier so as to take a suitable action while their ship maneuvering and cargo handling.

Key words : LNG carrier, Education system, Cargo handling

1. 서론

원유수송선이나 LNG운반선과 같은 특수선에서는 일반 화물선과 달리 적하 및 양하 작업이 복잡하고 까다로우며, 특히 LNG 및 LPG 운반선 등은 운송화물의 특성상 극저온 또는 고압 기술이 필요하기 때문에 선박운항 뿐만 아니라 운송화물의 취급에 있어서 고도의 안전성이 요구된다.

특히, 운송 화물의 위험성 및 독성으로 인하여 해난사고로 인하여 발생하는 인명의 손실이나 해양환경 오염에 따른 손해가 매우 크기 때문에, 특수선에 의한 각종 해난사고의 예방을 위해서는 특수선 운송화물의 적·양하 작업에 대한 선원의 교육 및 훈련이 필수적으로 요구된다.

현재 국제적으로 LNG운반선에 승선하는 선원의 양성교육기관에 대한 필요성이 대두되고 있으며, 보다 체계적이고 효율적인 정형화 및 자동화된 교육과정이나 LNG선 하역작업 교육시스템 등과 같은 교육지원시설에 대한 필요성이 크게 대두되고 있는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 LNG 운반선을 대상으로 하

여, 선체내 또는 갑판상에 있는 각종 Pipe Line의 이해와 구성 및 Pump 사용에 관한 유체역학적 지식을 교육할 수 있는 적하 및 양하 작업 교육용 시뮬레이션 시스템을 개발하고자 한다.

2. LNG선 하역작업 교육시스템 기능

현재 우리나라 해양교육기관이나 선원 재교육기관 등에서 사용되고 있는 액체화물 운반성용 교육 시뮬레이션시스템은 거의 외국으로부터 도입된 장비를 사용하고 있으며, 국내 개발 기술력으로 구축되어 사용되고 있는 시스템은 거의 전무한 실정이다.

또한 인명 안전 및 해상환경 보호를 위해 액체화물 취급의 중요성은 인식하면서도 과학적인 장비를 이용한 체계적이고 효율적인 교육·훈련에 관한 관심이나 표준 교육방법 및 제도적 지원책은 미미한 실정이다.

따라서, 국제해사기구(IMO)에서는 각종 교육용 장비의 성능을 STCW 코드 제A편의 제 A-I/12조(시뮬레이터의 이용에 적용되는 기준)에 정의하여 됨으로써, 이를 개발하고자 하는 기업체나 이를 사용하고자 하는 교육기관에서 기준을 삼도록 하였다.

+ 김대희(주식회사 엠아이티), E-mail:????@m????, Tel: 051)404-5065

++ 예병덕, 한국해양대학교 해사대학 항해시스템공학부

+++ 송재욱, 한국해양대학교 해사대학 항해시스템공학부

강제적 교육훈련에 사용되는 시뮬레이터에 대한 일반적 성능기준이 아래와 같이 나와 있다.

- 선정된 목적과 교육훈련 내용에 적합해야 한다.
- 관련 선박 설비의 운항 성능을 훈련 목표에 적합한 수준의 물리적 현실감이 있을 정도로 시뮬레이션을 할 수 있어야 하며, 그러한 장치의 성능, 한계 및 발생 가능한 고장 또한 포함해야 한다.
- 훈련생이 훈련의 목표에 적합한 기술을 습득할 수 있을 정도로 거동적 측면에서 충분한 현실감이 있어야 한다.
- 훈련목표에 관계되는 긴급, 위험 또는 일상적인 아닌 상황을 포함한 다양한 조건을 설정할 수 있는 제어된 운항 환경을 제공해야 한다.
- 훈련생이 장비 모의 환경 및 적절한 경우 instructor와 상호 연계할 수 있도록 하는 인터페이스가 있어야 한다.
- 시뮬레이션이 끝난 후 교육훈련생에게 효과적으로 강평할 수 있도록 instructor가 훈련을 통제, 감시 그리고 기록할 수 있어야 한다.

3. LNG선 하역작업 교육시스템의 구성내용

본 연구에서는 138,000m³ 급 멤브레인형 LNG 운반선을 기준으로 하여, 적하 및 양하 작업 교육용 시뮬레이션 시스템을 구성하였으며, 각 기능별 세부 시스템 구성은 다음과 같다.

3.1 Cargo/Ballast Modeling 영역

3.1.1 Cargo 영역

- Cargo Containment System (4 sets of cargo tank)
- Cargo Piping System
 - liquid header line
 - vapor header line
 - spray header line
 - fuel gas line
 - vent line
 - inerting/aeration line

- Cargo Pump
 - main cargo pump (8 sets)
 - stripping/spray pump (4 sets)
- Cargo Compressor
 - H/D(High Duty) compressor (2 sets)
 - L/D(Low Duty) compressor (2 sets)
- Boil-Off Gas Warm Up Heater (2 sets)
- LNG Vaporizer (1 set)
- Forcing Vaporizer (1 set)
- CTS (Custody Transfer System)
- Nitrogen Generator (1 set)
- Inert Gas Generator (1 set)
- Valve Remote Control and Emergency Shut Down (ESD) System
 - cargo and ballast valve remote control system
 - emergency shutdown (ESD) and cargo tank protection scheme
- Gas Management System
- Relief Systems
 - cargo tank relief valves
 - Primary and secondary insulation space relief valves

3.1.2 Ballast Simulator 영역

- Ballast System
 - ballast tank
 - ballast pump (3 sets)
 - eductor (2 sets)
 - piping and valves

3.1.3 Loading Computer 영역

- Loading Computer System
 - Cargo simulator / Ballast simulator와 서로 연동
 - Draft, Trim, Heeling등을 감안하여 작동

3.2 Cargo/Ballast Simulation 영역

3.2.1 Simulation 영역

■ Primary and Secondary Insulation Space Pressurizing

- insulation space inerting
- in service test

■ Post Dry Dock Operation

- initial insulation space inerting
- drying cargo tanks
- inerting cargo tanks
- gas filling cargo tanks
- cooling down cargo tanks

■ Ballast Passage

- cooling down cargo tanks prior to arrival
- spraying during ballast voyage

■ Loading

- preparation for loading
- cargo line cool down
- to load cargo with vapor return to shore via HD compressor
- deballasting

■ Loaded Voyage With Boil-Off Gas Burning

- loaded voyage with normal boil-off gas burning
- loaded voyage with forced boil-off gas burning

■ Discharge with Gas Return from Shore

- preparation for unloading
- liquid line cool down
- unloading
- ballasting

■ Pre Dry Dock Operation

- stripping and line draining
- tank warm up
- inerting
- aerating

3.2.2 Software 사양

(1) 이용가능범위

- 정상적인 화물작업 훈련

- 재생을 통한 훈련의 분석

- 특정 장비 및 화물작업 절차 및 내용에 대한 오작동 및 실수의 도입

(2) 만족 요건/기능

- 훈련 상황을 실시간으로 동화상 그래픽이나 문자 화면으로 나타낼 수 있을 것.

- 훈련 상황의 일부 혹은 전체를 fast-time(실시간의 2, 5, 10, 20, 60배의 속도)으로 동화상 그래픽이나 문자화면으로 나타낼 수 있을 것.

- 하역 및 적재에 관한 작업 시나리오를 프로그램할 수 있는 기능을 제공할 것.

- 인스트럭터 스테이션에서 교육생 콘솔에 개별적으로, 그룹으로, 전체적으로 다른 혹은/그리고 동일한 훈련 시나리오 지정이 가능할 것.

- 교육생 콘솔에서의 훈련상황을 인스트럭터 스테이션에서 감시할 수 있을 것

- 훈련의 일시 정지 및 재생 기능을 포함하는 브리핑 기능을 가질 것.

(3) 사용자 교육, 훈련을 제공할 것.

(4) 컴퓨터에 의한 교육 및 훈련 지원 기능

- C.O.C 화면을 통해 승조원이 배워야 할 작업의 관계되는 절차 및 하역/적재 작업을 훈련 할 수 있는 기능을 제공할 것.

(5) 사용언어는 한국어와 영어를 병용

(6) 현실성과 잡음

- 훈련 중의 탱크 레벨, 각종 압력의 변화, 밸브의 개도, 펌프 회전수 등의 상태와 변화하는 과정은 실선과 같이 연속적으로 표시

- 이들 값의 변화는 On/Off 상태만이 아니라 그 과정이 연속적으로 정확하게 표시

- 선박의 화물취급이 어떻게 이루어지는가를 보다 현실성이 있도록 보여 줄 수 있도록 하기 위해서 주위의 소음 재생

(7) 훈련 S/W는 신속하고 용이하게 사용할 수 있도록 설계 및 설치

(8) Loading S/W 기능

- 트림: 선수, 선미 및 중앙의 흡수

- 종강력 계산: 해상에서 또는 항만 내에서 전단력 및 특정지점에서의 허용 최대치에 대한 비율로서 표시

- 배수량 계산: 배수량
- 복원력 계산: 횡방향의 메타센터의 높이
- 적화 시뮬레이션: 적화 중의 선체 트림, 복원력, 굽힘력, 전단력 및 요구 트림

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial z} + \mathbf{G}$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \rho_l(\alpha_{ll} + \alpha_{gl}) \\ \rho_g(\alpha_{gg} + \alpha_{lg}) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} \rho_l(\alpha_{ll} v_l + \alpha_{gl} v_g) \\ \rho_g(\alpha_{gg} v_g + \alpha_{lg} v_l) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_l \\ G_g \end{bmatrix}$$

Tab.1 Steady-state simulation versus dynamic simulation

4. 기본 Modeling 이론

Cargo/ballast simulation system을 구성하는 각각의 수학적 model들은 질량, 에너지, 운동량 보존식 및 열역학적 관계식을 기본으로 modeling되었다.+ 일반적으로 process simulation은 정상상태 (steady-state)와 비정상상태 (dynamic simulation)로 분류될 수 있으며, 각각에 대한 특성을 비교하여 정리하면 Table 1.과 같다.

Steady-State Simulation	Dynamic Simulation
Algebraic mass balance model	Differential mass balance model
Algebraic energy balance model	Differential energy balance model
Algebraic momentum balance model	Differential energy balance model
Rigorous thermodynamics	Rigorous thermodynamics
No hydraulics	Hydraulics
No control model	Control model

Steady-state simulation은 공정의 설계에 있어서 에너지 및 물질수지 계산 이외에 장치 sizing 등에 사용된다. 이러한 steady-state simulation은 공정 각각에 대한 대수방정식이 연결된 형태로 구성되며, 공정의 변화에 따른 정상상태 조건을 반복계산에 의해서 예측한다.

Dynamic Momentum Balance Equation

따라서, steady-state simulation에서 물질 및 에너지 변화 속도 등과 같은 시간에 따른 변화는 없는 것으로 가정된다.** 반면에 dynamic simulation의 경우 공정의 정상상태 조건을 계산할 뿐만 아니라, 외란 및 운전조건 변화 등에 의해 시간에 따라 변화되는 공정의 비정상상태 조건을 계산한다.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial z} - \mathbf{F} - \mathbf{H}$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} (\rho_l \alpha_{ll} + \rho_g \alpha_{gl}) v_l \\ (\rho_g \alpha_{gg} + \rho_l \alpha_{gl}) v_g \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r} = \begin{bmatrix} (\rho_l \alpha_{ll} + \rho_g \alpha_{gl}) v_l^2 \\ (\rho_g \alpha_{gg} + \rho_l \alpha_{gl}) v_g^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} (\alpha_{ll} + \alpha_{gl}) \\ (\alpha_{gg} + \alpha_{gl}) \end{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial z} + \begin{bmatrix} (\rho_l \alpha_{ll} + \rho_g \alpha_{gl}) \\ (\rho_g \alpha_{gg} + \rho_l \alpha_{gl}) \end{bmatrix} g \sin \theta,$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \tau_w \frac{S_l}{A} \\ \tau_{gw} \frac{S_g}{A} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\tau \frac{S_i}{A} \\ +\tau_i \frac{S_i}{A} \end{bmatrix}$$

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho_l \left(\frac{f_l}{4} \right) v_l |v_l|, \tau_{gw} = \frac{1}{2} \rho_g \left(\frac{f_g}{4} \right) v_g |v_g|, \tau_i = \frac{1}{2} \rho_g \left(\frac{f_i}{4} \right) (v_g - v_l) |v_g - v_l|$$

Process dynamic simulator에서 이러한 dynamic simulation은 공정의 비정상상태 물질 및 에너지 수지의 시간에 대한 미분식이 연결된 형태로 구성되며, 실시간(real-time)으로 해를 얻을 수 있도록 구성된다.+++ 즉, 단위 시스템 각각의 modeling에 사용되는 dynamic model을 일반화하여 요약하면 다음과 같다.

Dynamic Energy Balance Equation

Dynamic Mass Balance Equation

+ 노승탁, “열역학의 기본법칙의 재공식화”, 대한기계학회지, 제23권, 제5호, pp.335~343, 1983.

++ 공창덕, 정석수, “Steady-State and Transient Performance Simulation of a Turbohaft Engine with a Free Power Turbine”, KSME Journal, 제14권, 제11호, pp. 1296~1304, 2000.

+++ 이강주, 윤인섭, “화학공정 비정상상태 모사기 개발, Development of Dynamic Process Simulator”, 학술회의(자동제어 학술회의 논문집, 제1권, pp. 482~487, 1988.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial r}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial x} + S$$

$$u = \left[\frac{1}{2}(\rho_0 \alpha_{0i} + \rho_g \alpha_{0g}) v_i^2 + (\rho_0 \alpha_{0i} + \rho_g \alpha_{0g}) \varphi + (\rho_0 \alpha_{0e} + \rho_g \alpha_{0g} e_g) + \frac{1}{2}(\rho_0 \alpha_{0g} + \rho_g \alpha_{0gg}) v_g^2 + (\rho_0 \alpha_{0g} + \rho_g \alpha_{0gg}) \varphi + (\rho_0 \alpha_{0g} e_i + \rho_g \alpha_{0gg} e_g) \right]$$

$$S = (Gh + G_g h_g)$$

$$r = v_i \left[\frac{1}{2}(\rho_0 \alpha_{0i} + \rho_g \alpha_{0g}) v_i^2 + (\rho_0 \alpha_{0i} + \rho_g \alpha_{0g}) \varphi + (\rho_0 \alpha_{0i} h + \rho_g \alpha_{0g} h_g) \right]$$

$$r = v_g \left[\frac{1}{2}(\rho_0 \alpha_{0g} + \rho_g \alpha_{0gg}) v_g^2 + (\rho_0 \alpha_{0g} + \rho_g \alpha_{0gg}) \varphi + (\rho_0 \alpha_{0g} h + \rho_g \alpha_{0gg} h_g) \right]$$

$$\varphi = gY$$

5. 시스템 구성 및 실현

다음의 Fig. 1과 같이 본 LNG에 대한 cargo/ballast simulator는 5대의 student/operator station과 1대의 instructor station으로 구성되며 student/operator station은 최대 40대까지 확장이 가능하다.

Fig. 2는 각종 밸브 및 펌프 구동, 각 탱크별 화물 계산 및 기온/압력 계산 등 본 연구에서 제안하는 교육용 시스템 구축시에 사용되는 주요 계산로직을 나타내고 있다. Fig. 3과 Fig. 4는 실제 구축된 시스템의 주요 구성화면 중 시스템 전체 구성 화면 및 Ballast pump control화면을 나타내고 있다.

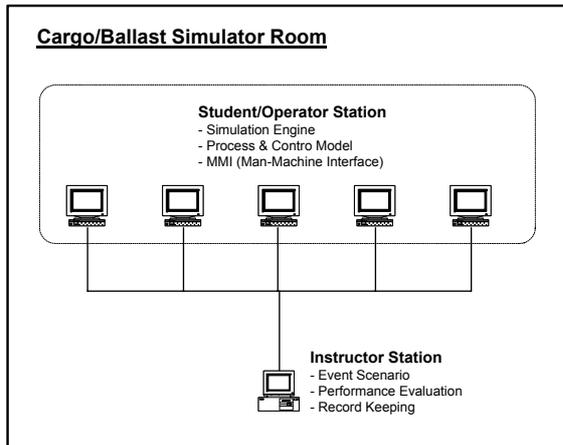


Fig. 1 System configuration

6. 결론

본 논문에서는 LNG 운반선을 대상으로 하여, 각종

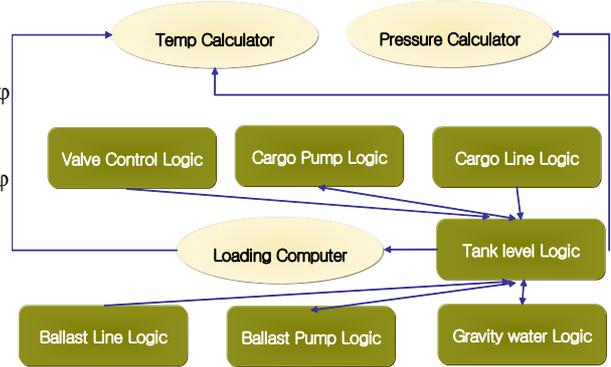


Fig. 2 Calculation logic

Pipe Line의 이해와 구성 및 Pump 사용에 관한 유체 역학적 지식을 교육할 수 있는 적하 및 양하 작업 교육용 시뮬레이션 시스템을 개발하였다. 그 결과, LNG선에서 극저온의 LNG화물을 적·양하 하는 단계를 실제 작업과 유사한 환경하에서 수행할 수 있게 되었으며 화물 및 발라스트의 연동으로 인해 선박의 실시간 변동사항을 즉시 반영할 수 있게 되어 보다 실감나는 시뮬레이션을 체험할 수 있게 되었다.

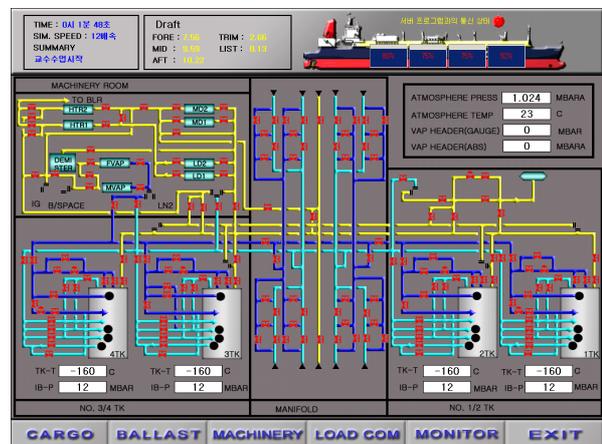


Fig. 3 Overview of system

본 연구 결과물을 통해, 실시간 액체화물 적·양하 조작 훈련은 물론, Network연결을 통하여 다수의 인원이 동시에 실습이 가능하고, 통상적인 운용 능력과 긴급 상황 대처 능력을 향상시킴으로써 LNG선 승무원 양성에 필요한 교육 자료로써 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

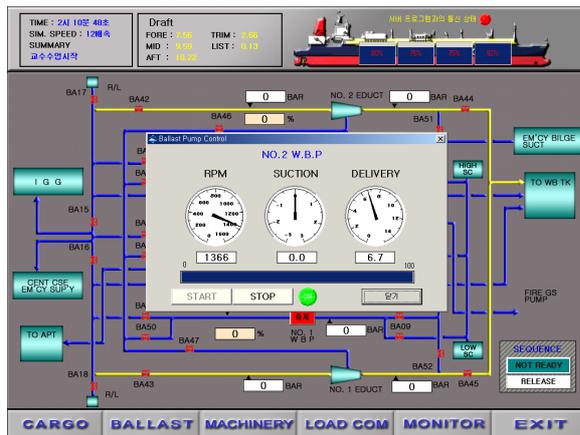


Fig. 4 A screen of ballast pump control

향후, LNG 화물의 온도와 HOLD 및 PIPE LINE에 미치는 압력변화에 대한 좀 더 면밀한 연구가 요구되며, 따라서 LNG화물의 콘트role에 연동한 정량화된 LNG화물 온도 MODEL과 압력 MODEL 개발이 추후 과제로 남아있다.

참고문헌

- [1] 노승탁, “열역학의 기본법칙의 재공식화”, 대한기계학회지, 제23권, 제5호, pp.335-343, 1983.
- [2] 공창덕, 정석수, “Steady-State and Transient Performance Simulation of a Turboshaft Engine with a Free Power Turbine”, KSME Journal, 제14권, 제11호, pp. 1296-1304, 2000.
- [3] 이강주, 윤인섭, “화학공정 비정상상태 모사기 개발, Development of Dynamic Process Simulator”, 학술회의(자동제어 학술회의 논문집, 제1권, pp. 482~487, 1988.