

## LNG 운송선의 Compact Simulator 소프트웨어 개발기술

이인구, 유희종, 김원배  
고등기술연구원 Plant Engineering 센터

### Development of Compact Simulator Software for LNG Carriers

Ingu Lee, Hijong You, Wonbae Kim  
Plant Engineering Center, Institute for Advanced Engineering

#### 1. 서론

사용자의 욕구를 충족시킬 수 있는 상품의 생산과 소유자의 이윤 창출(Efficiency), 인근 주민 및 운전자의 생명보호와 소유자의 재산보호(Safety), 운전의 용이성(Feasibility) 및 환경 친화적 Utility 건설등의 모든 요구조건 충족을 위해 각종의 발전소 및 화학공정들은 상당히 복잡하고 세분화된 공정계통과 제어시스템을 갖는다. 이러한 발전소 및 화학공정들의 효율적이고 안전한 운전조작을 위해 실시간 모의 훈련용 동적모사기의 개발은 필수적인 요소로 자리잡고 있다. 실시간 동적모사기는 사용용도에 따라 크게 운전원 훈련용과 제어루프 및 시스템 개발용으로 나눌 수 있다. 훈련용 동적모사기는 실제의 운전조건과 동일한 제어장비 및 환경을 구축하여 운전원들의 정상 및 비정상 상태의 대처능력 향상에 활용되는 Full Scope Simulator와 이에 비해 상당히 저가이고 한 대의 PC에서 대상공정의 학습, 공정 변수들의 변화추이 습득 및 대처능력 배가를 위한 교육목적의 Compact Simulator로 나뉜다. 개발용 동적모사기는 기개발된 하드웨어 및 제어기를 검증하기 위해 하드웨어와의 통신 모듈을 구성해 Commissioning 및 실험단계에서 적용하는 HILS(Hardware in the Loop Simulation)와 제어루프의 성능개선 및 개발과 대상공정의 설계단계등에 사전 적용되어지는 SILS(Software in the Loop Simulation)로 나눌 수 있다. 본 연구는 고등기술연구원과 대우중공업 해양선박연구소가 LNG 운송선 시운전단계에서 선박자동제어에 사용되어진 DCS TDC3000 장비 검증을 위한 HILS 실험용 및 운전원 교육용으로 개발한 동적모사기의 모델을 토대로, 본선의 제어로직을 추가 모델링하여 개발한 Compact Simulator로써 PC Windows 95 환경에서 구현되어지는 소프트웨어이다.

한편, 폭발성 인화물질인 초저온(약  $-163^{\circ}\text{C}$ )의 천연액화가스를 운반하는 LNG선박은, 화물을 실는 Cargo 공정과 이와 연계되어진 보일러 공정을 통제하고 감시하기 위해 상당히 복잡한 제어시스템을 사용하고 있지만, 국내외를 통틀어 전체 LNG 공정에 대한 운전원의 사전 모의실험 동적모사기가 거의 없는 실정이다. 이에 특수 운송선인 LNG선의 안전한 운전 및 관리와 숙련된 운전원들로부터의 효율적인 운전조작으로 연료를 효과적으로 사용해 운항할 수 있도록 사전 훈련시킬 수 있는 동적모사기 개발이 필요한 실정에 있다. 이와같

은 사항에 일조하기위해 개발된 Compact Simulator는 국내 LNG 운송선 Membrane 형태의 동적모사기 나아가서는 국내 건조중인 모든 선종의 동적모사기 개발에 바탕이 되었으면 한다.

## 2. 본론

### 2.1 개발환경

LNG 운송선 동적모사기의 공정모델은 발전소 및 화학공정에 대한 실시간 동적모사를 위해 개발된 캐나다 CTI(Cassiopeia Technology Inc.)사의 상용 소프트웨어 패키지인 CASSIM(Cassiopeia Simulation)을 기반으로 하여 개발하였다. CASSIM은 Block-oriented 방식의 모델링을 기반의 실시간 동적모사기 개발환경을 제공하는 프로그램으로써 CASSBASE와 CASSENG로 구성되어 있으며, 여기서 개발된 공정모델은 미국 NI(National Instruments)사의 LabVIEW와 상호 통신을 통해 GUI(Graphic User Interface) 화면을 구성할 수 있게 된다. 이러한 프로그램들의 상호관계 및 모델링 환경을 종합적으로 정리하면 [그림 1]과 같이 표현할 수 있다.

CASSBASE는 Block-oriented 방식으로 대상공정에 대한 모델의 구성, 디버깅 및 실행 파일의 생성등과 같은 역할을 수행하며, 일반적인 탱크, 열교환기, 및 보일러 등과 같은 다수의 장치들 및 밸브, 펌프, 압축기 등의 기기들의 라이브러리를 제공하고, 사용자에게 의해 개발된 공정모델 알고리즘을 라이브러리에 등록시켜 사용할 수 있다.

CASSENG는 CASSBASE에서 생성된 모델의 데이터 파일을 실행시키는 모사엔진인 동시에 모사결과에 대한 자료를 Client에 제공하는 Server의 역할을 수행한다. LabVIEW는 CASSENG와 MS Windows의 DDE(Dynamic Data Exchange) 통신을 사용하여 모사기 개발의 GUI(Graphic User Interface) 구성([그림 3] 참조) 및 제어로직을 프로그래밍하는데 사용되었다.

상기와 같은 개발환경에서 공정의 실시간 모사를 위해 대부분의 단위공정은 Lumped parameter system으로 가정하여 모델링 되었으며, 모델식의 적분은 Explicit Euler 방법을 사용하였다. 현재 동적모사기의 적분시간 간격은 0.1초이며, LabVIEW로 구성된 제어로직의 적분시간 간격은 2.0로 하여 대상공정의 동특성을 실시간으로 모사할 수 있도록 하였다.

### 2.2 이론 및 모델구성

대상공정을 모사하기 위해 전체공정 배관 수력망 모델링을 기반으로 하여 단위공정 모델 블록의 입출력 변수를 연계하여 전체 LNG 선박공정의 수학적 모델을 세웠다. 이에 전체공정 수력망의 이론식은 [그림 2]에 나타난 임의의 압력점 입출력 흐름의 질량보전과 모우멘 방정식을 일반화한 식 (1)가 사용되었다.

$$k_i \frac{dP_i}{dt} = - \sum_{j=1}^{n+m} B_j P_j + \sum_{j=1}^{n+m} B_j (P_j + P_s), \quad i=1,2,3,\dots,l \quad \text{식 (1)}$$

식 (1)을 차분화하여 정리하면 식(2)의 연립방정식이 구성되며, 이는 매번의 적분단계에

서 반복적으로 계산된다.

$$[P_i] = [M_{ij}]^{-1} \cdot [S_i] \quad \text{식 (2)}$$

여기서  $i$  및  $j$ 는 대상공정의 설정된 압력점,  $k$ 는 압력점의 Capacity,  $P_s$ 는 압력점사이에 설치된 펌프, 압축기등의 기기에서 얻은 압력이득,  $B$ 는 모우먼트 방정식의 선형화를 위해 표현된 계수를 나타낸다.

본 연구의 대상공정은 대우중공업에서 건조한 SK 해운의 Hull No.2202(SK Summit) LNG 선박으로 크게 LNG 화물탱크 및 LNG 가스연료 공급계통인 GMS(Gas Management System), 연료공급계통, 버너, 보일러 및 터빈으로 구분되며 전체적 동적모사기 모델부분의 공정흐름도는 [그림 4]와 같이 표현된다.

GMS 모델은 LNG 저장탱크, 강제증발기, 압축기 및 BOG (Boil-off Gas) 가열기와 같은 공정에 포함된 밸브, 펌프, 모터 등의 각종 공정기기류들을 포함한다. LNG 저장탱크로부터 자연증발된 주성분이 메탄인 BOG는 강제증발기를 거치지 않고 압축기로 공급되며, 압축된 가스는 BOG 가열기를 통하여 보일러의 연료로 공급된다. LNG 저장탱크내의 strip 펌프에 의해 압송된 액화상태의 LNG는 강제증발기에 의해서 증발된 후 자연 증발된 가스와 동일한 공정을 거쳐 보일러의 연료로 공급되어진다. 이와 같은 공정에 대하여 구성된 GMS 모델은 LNG 저장탱크의 압력변동 및 저장탱크로부터 발생된 BOG를 연료가스 공급계통으로 공급하는 과정에서 발생하는 공정변화의 동특성을 모사하여 GMS 제어로직에 포함된 모든 공정변수를 제공한다.

연료공급계통은 연료가스 공급계통, 연료오일 공급계통, atomizing 스팀 공급계통 및 연소공기 공급계통으로 구분될 수 있다. 연료가스는 GMS로부터 공급되며, 연료오일은 오일 탱크로부터 펌프에 의해서 공급된다. 각각의 연료들은 보일러의 부하 및 연료비의 조절에 따라 유량제어를 거쳐 버너로 공급된다. 버너에서 연소에 의해 발생된 연소가스는 보일러의 증발관, 과열기 및 절탄기를 거쳐 연돌로 배출된다. 이러한 공정에 대한 버너 및 연료공급계통의 모델은 공정에 포함된 장치류 이외에 밸브, 펌프 및 vane 등과 같은 공정기기 및 공급계통으로부터 공급된 연료를 연소하는 버너를 포함하며, 보일러 제어시스템에 필요한 연료공급유량 및 압력 등과 같은 공정변수의 동특성을 모사한다.

보일러는 급수계통, 증발기, 과열기 및 절탄기로 구성되며 연소가스로부터 전달된 열에 의해서 선박의 추진용 터빈 및 보조설비의 구동을 위한 스팀을 생성한다. 보일러 모델은 연소가스로부터 전달된 열에 의해서 생성되는 스팀의 압력, 온도 및 유량 등의 동특성을 모사하며, 또한 생성된 스팀에 의해서 구동되는 선박 추진용 터빈의 모델을 포함하기 때문에 보일러 제어시스템의 제어로직에서 요구하는 스팀의 압력 및 온도 이외에 보일러 드럼의 수위 및 터빈의 회전수와 같은 공정변수들을 제공한다.

### 2.3 제어로직 및 모델범위

LNG는 화물의 특성상 화물탱크내에서 연속적으로 증발하고 증발된 가스는 폭발성 인화 물질로 화물탱크내의 압력과 온도 및 누설여부를 지속적으로 감시해야 한다. 이를 위해 기관실 및 화물구역에 설치되는 모든 장비의 상태 감시와 원격제어 및 자동운전은 컴퓨터를

이용한 통합형 자동화시스템(Integrated Automation System, IAS)을 통해 모든 기능들이 서로 유기적으로 연결되어져 있다. 이러한 IAS의 주 시스템은 선실에 마련된 중앙제어통제실(Centralized Administration & Control Center, CACC)에 설치되어 한방에서 Cargo 시스템과 기관실 시스템을 동시에 관리할 수 있도록 하였으며, 기관실, Bridge 및 주요 선실구역등에서 보조제어 시스템과 모니터가 마련되어 있다. IAS는 분산형 구조를 가진 Distributed Control System(DCS)으로 최신의 32Bit 컴퓨터를 이용한 공정감시 및 제어시스템을 사용하고, 각 시스템 및 장비의 감시를 위해 출력되는 신호는 Process Station에 의해 처리되며 조작자가 사용하는 Operation Station 또는 별도의 컴퓨터에 의해 작동되도록 되어 있다. IAS 이외에도 보일러를 제어하는 Automatic Boiler Control System(ABC), 버너에 공급되는 연료량을 조정하는 Burner Management System(BMS) 등이 IAS와 함께 전체 선박의 제어계통을 구성하고 있고, 주요 부분에는 Local Panel들도 마련 되어 있다. LNG 운송선의 제어시스템은 앞서 설명했듯이 상당히 복잡하고 정교한 시스템으로 이를 한대의 PC상에서 구현한다는 것은 많은 제약조건을 갖는다. 이에 본선 시운전 단계에서 제어로직 검증 및 운전원 훈련용으로 개발된 동적모사기 실선적용 경험을 토대로 본선에 사용된 제어루프를 단순화시켜 프로그래밍을 수행하였다.

제어로직 모델링 단순화는 본선에서 실시하였던 정상 및 비정상 운전 상태의 테스트 절차서의 내용을 목표로 하여 이루어졌으며 테스트절차의 내용은 다음과 같다.

#### 정상상태

- Boiler Initial Firing/Steaming-up
- Ship Start & Burner Auto Increase
- Boiler Fuel Mode Change(FO → Dual)
- L/D Compressor Start & Load Auto Increase
- LNG Strip Pump Start
- FV Flow & Temperature Control
- BOG Heater Temperature Control
- Cargo Tank Vent Control
- LNG Strip Pump & Forcing Vaporizer Stop
- Boiler Fuel Mode Change(Dual → FG)
- LNG Strip Pump & Forcing Vaporizer Start
- Boiler Fuel Mode Change(Dual → FG)
- Ship Navigation

#### 비정상상태

- Boiler FO Boost-up Control
- Boiler FO Back-up Control
- Turbine Crash Astern

### 3. 결론

2.3절의 정상상태 테스트 절차중 Ship start & burner auto increase의 결과를 [그림 5]에 나타내었다. 이는 LNG선의 출발에서 터빈부하를 Navigation Full(85RPM)까지 서서히 올린 결과를 보여주며, 터빈부하 증가에 따른 증기공급량의 증가와 보일러 압력의 설계치 (61.5KG/CM<sup>2</sup>) 유지를 위한 마스터 제어기의 출력값 증가와 이에 따른 연료오일량의 증가를 보여준다. [그림 6]은 2.3절의 테스트 절차중 비정상 운전상태의 Boiler FO Boost-up Control 결과를 보여준다. 이는 보일러에 연료가스가 공급되는 도중 L/D 압축기나 연료가스 마스터 밸브의 Trip 등으로 인해 연료가스의 공급이 중단되어진 경우 그만큼의 부하값을 연료오일량이 보일러에 공급되는 현상을 보여준다. 본 동적모사기의 검증은 같은 운전조건 하의 운전자료 부족으로 실제적인 검증은 이루어지지 않았지만, 수년간의 LNG 본선 운전경력을 가진 실무자들과의 협의와 LNG선 건조후의 시험운전을 통한 데이터들의 경향과 비교해 볼 때 만족할 만하다는 결과를 얻었다.

상기와 같이 개발된 LNG 운송선 Compact Simulator는 대우중공업 기술영업부서의 신규 LNG선 수주를 위해 사용되고 있으며, 또한 대우중공업 연구동에 설치하여 시운전 부서 및 관련 부서의 모의 훈련용 동적모사기로 사용되고 있다. 또한, 기존의 외국기술에 의존하였던 본선 제어장비의 국산화를 위해 제어장비의 예비 Mock-up을 만들어 본 동적모사기에 사전 적용 실험함으로써 경비절감의 효과도 가지고 올 것이다.

### 참고문헌

1. A. W. Ordys, et al., "Modeling and Simulation of Power Generation Plants", Springer-Verlag, 1994.
2. CASSIM Tutorial, Cassiopeia Technologies Incorporated, 1071 5, King Street West, Suite 202, Toronto, Ontario, 1995.
3. Roy Fray., "Compact Simulators for Fossil Fueled Power Plants" IEEE Spectrum Feb, 46, 1995.
4. "LNG 편람", 한국선급협회, 1984.
5. "LNG 운반선의 구조, 기능에 대하여" 삼성중공업 조선기보, 1991.

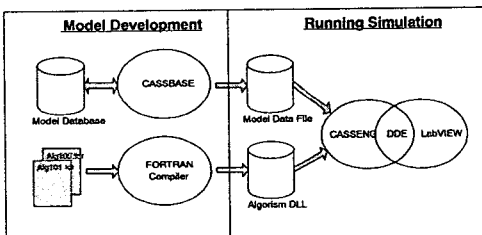


그림 1. CASSIM 모델 개발환경의 총괄적인 개략도

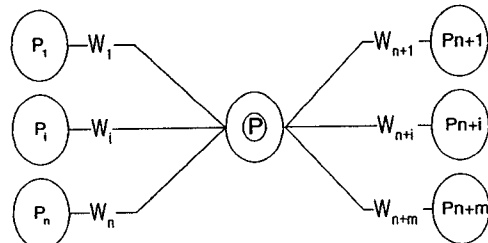


그림 2. 공정상 입의의 압력점에 대한 수력망

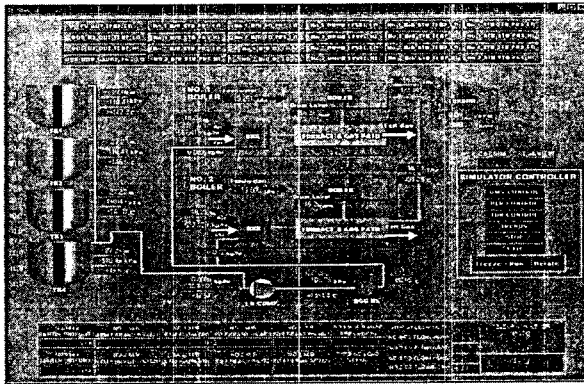


그림 3. LNG선 전체공정 사용자접속부 화면

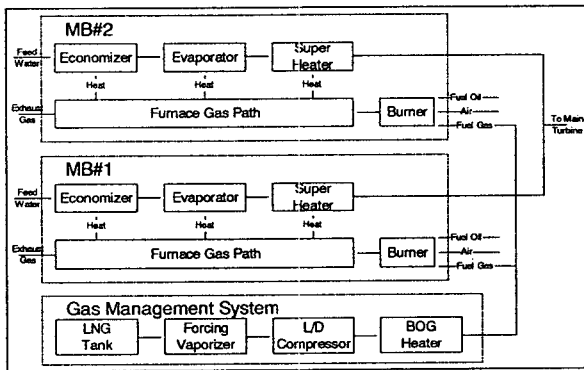


그림 4. LNG 선박 동적모사기의 공정흐름도

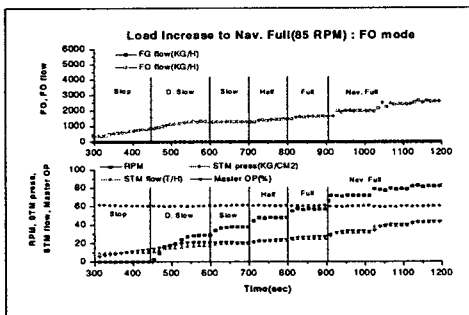


그림 5. Ship start & Burner auto increase : FO mode

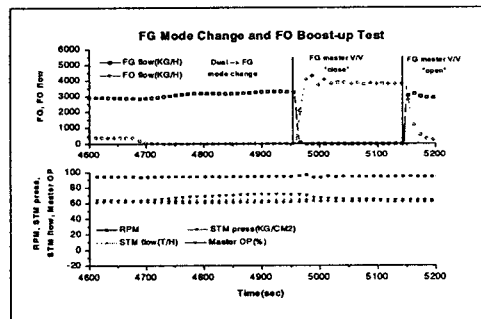


그림 6. 연료공급모드 변화와 Boost-up 테스트