

LNG 배관시스템의 열유동 해석 Program 개발

이상규, 홍성호, 이종남¹⁾, 박석호²⁾
한국가스공사 연구개발원, 삼성중공업 기전연구소²⁾

A Computer Programme Development for Thermal-Hydraulic Analysis on LNG Pipeline System

Sanggyu Lee, Seong-Ho Hong, Joong-Nam Lee¹⁾, Seok-Ho Park²⁾
KOGAS R & D Center, Samsung Heavy Co²⁾

1. 서론

액화 천연가스(LNG; Liquefied Natural Gas)는 에너지원으로서, 일반 가정은 물론 산업현장에서부터 국가 기간산업에 이르기까지 다양한 목적으로 널리 사용되고 있다. 이러한 생활에 필수적인 액화 천연가스는 인화성이 매우 강하여 취급상의 안전성이 무엇보다 중요하다. 따라서, 수송 과정은 물론 저장 용기(storage tank)나 이송 배관의 설계, 제작, 보존 등에 있어서 세심한 검사 기준을 적용하고 있다. 특히 LNG 수송선에서부터 배관 시스템을 통해 지상 tank로 전달되고 계속해서 배관망으로 공급되는 과정은, 극저온의 극한 상태이므로 이들 수송 시스템을 구성할 시에는, 실제 발생하는 각종 현상들을 보다 명확하게 규명하여 안전하게 설계, 제작할 필요가 있다.

Unloading 상의 배관내에서나 tank에서의 액화 천연가스는 -160°C 이하의 낮은 온도를 유지하게 되는데, 배관계 또는 tank 내외부의 온도 차이로 인해 내부로의 많은 열전달이 일어나게 된다. 이러한 열전달 현상은 특히 내외부의 온도차에 비례하며 내부에 있는 액화가스의 증발을 유도하게 되고, 증발량이 많을 경우 내부 압력의 심한 변화를 초래하게 되어 큰 문제를 발생시킬 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해선 근본적으로 실제 현상에 따른 전열 메카니즘에 대한 정확한 이해와 함께 안정성 확립을 위한 설계 parameter의 확보를 통해 전열 및 증발 현상을 최대한 억제시키는 것이 바람직하다.

한편, 수송선으로부터 unloading되는 액화 천연가스는 펌프, 직관, 곡관, 각종 밸브 등 여러 가지 fitting들로 구성되는 배관계에 의해 압력 저하(pressure drop), 2상(2-phase)화 유동 등의 현상에 좌우되는데, 마찬가지로 상압보다 높은 압력과 극저온에서 운전되므로 이들 요소들의 유동 특성들에 대해서도 충분히 고찰하여 배관 시스템의 설계에 적용해야 한다.

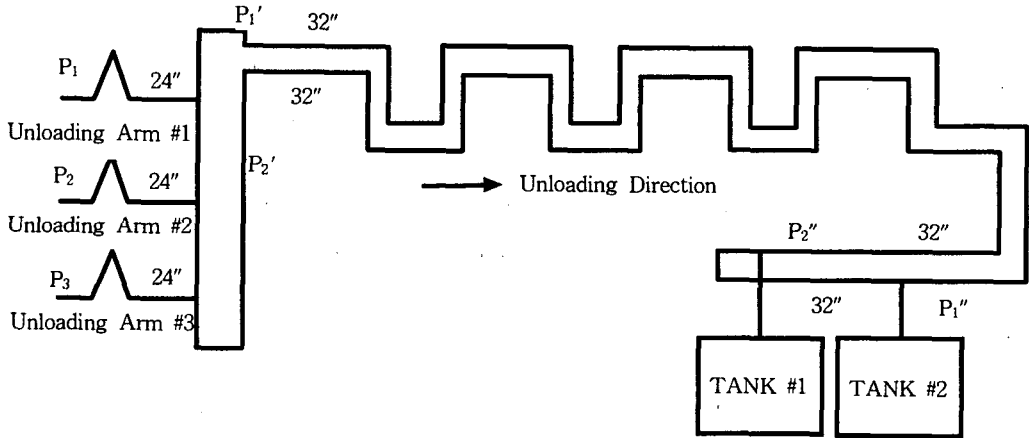
따라서 본 연구에서는 LNG 생산기지에서의 unloading 배관 line에 대한 운전조건 확립 및 최적화 설계자료의 확보를 위하여, 구성하고 있는 각종 요소들에 대한 유동 특성별 손실값들을 자료화 한 다음 수송상의 유동 유형별 물성 조건에 따른 정량적인 압력손실을 계산하고, 열전달 특성과 증발에 관한 현상을 규명하여 배관 유동상에 발생하는 증발 가스량을 정량적으로 예측하여 이들의 최소화를 위한 설계조건 도출을 목적으로 하는 전용 프로그램을 개발하고자 한다.

2. Unloading Line에서의 현상 모델링

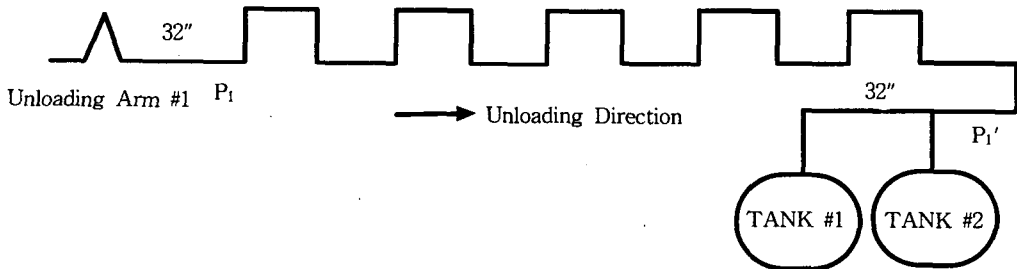
2.1 Unloading Line의 단순화

LNG unloading line의 배관계 설계를 위한 프로그램 개발에 있어, 실제 unloading line 구조의

복잡성, 배관 연결의 다양성 등을 고려하여 Fig. 1 과 같이 간략화 또는 단순화하여 모델링하였다.



a. 실제 Plant에서의 Unloading line



b. 프로그램에 적용된 Unloading line

Fig. 1 실제 Plant의 경우와 계산상 단순화된 Unloading line

즉 실제 unloading line에 있어서는, Fig. 1 의 a 처럼 3개의 unloading arm을 거쳐 나온 유량은 각각의 직경이 24"인 3개의 배관을 통해 P_1, P_2, P_3 의 압력으로 유입된 다음, 다시 직경이 32"인 두 개의 배관으로 합쳐져 P_1', P_2' 로 평균화되어 약 1.42km의 운송거리를 거쳐 최종 P_1', P_2' 로 강하되어 tank로 유입되게 된다. 그러나, 프로그램상에서는 a 경우처럼 다관, 또는 네트워크의 연결관에 대한 계산적용의 한계성으로 인해 b 와 같이 단관계(single pipe system)형태로 단순화시켜 모델링한다. 한편, 이같은 단순화 모델링에 있어서도 각종 배관요소(밸브, fitting 등)들은 실제 line과 똑같은 수량 및 연결형태로 적용 가능토록 하며 초기 조건인 압력(P_1) 및 유량도 마찬가지로 실제 line에서 세 개의 관(24")이 두 배관(32")으로 합쳐진 시점(P_1')에서의 실측치를 이용하여 적용할 수 있도록 모델링한다.

2.2 배관내 압력 강하에 대한 계산모델

배관내 유동에서는 반드시 유동저항을 수반하게 된다. 그리고, 이 유동저항은 유동압력의 변화 즉 압력 강하라는 결과를 가져오게 된다. 이러한 압력 강하(pressure drop)는 다음과 같은 강하 기구(drop mechanism)에 의해 총합되어 이루어진다.

$$\Delta P_{tot} = \Delta P_f + \Delta P_a + \Delta P_g + \Delta P_o$$

즉, 압력 강하는 마찰(friction), 가속(acceleration), 그리고 중력(gravity)에 의해서 주로 발생되며, 또한 흐름도중에 거치게 되는 각종 배관요소들에 의해서도 발생된다.

일반적으로 통용되는 2상 유동에서의 압력 강하량을 계산하는 모델의 종류는 다음과 같다.

- ◇ Homogeneous method
- ◇ Martinelli-Nelson method
- ◇ HTFS method
- ◇ B-coefficient method
- ◇ Lockhart-Martinelli method
- ◇ Thom method
- ◇ HTRI method
- ◇ C-coefficient method

그리고 상기의 압력강하 모델들은 특성별로 약간씩의 정도 차이는 있으나, 본질적으로는 같은 실험식 배경을 갖고 있으며 대부분이 개발된 프로그램을 통하여 계산이 가능하다.

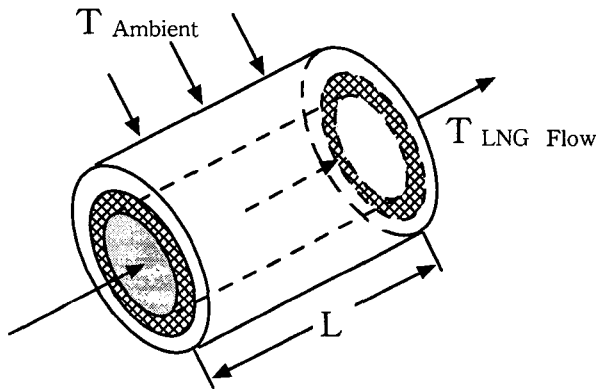


Fig. 2 pipe내의 LNG 흐름

2.3 배관내 증발량 계산 모델

LNG 관내로 흐르는 유동에는 외부로부터의 완벽한 단열(adiabatic)상태를 유지하지 않는 한 지속적인 열의 유입 현상이 있다. Fig. 2 는 pipe내에 LNG가 흘러갈 때의 열전달이 일어나는 형태를 나타내고 있다. unloading line에서의 LNG는 보통 -160°C 전후의 극저온 유체로 흐르는데, pipe 외부의 경우는 대부분 상온으로 유지되므로, 안과 밖의 온도 차이로 인해 내부로 열전달이 일어나게 된다. 이러한 전달 열량의 계산은 단순 2차원 실린더 좌표(cylindrical coordinate) 상

의 전도(conduction)방정식과 전술된 2상 유동의 압력강하 계산모델에 포함된 void fraction과 상계되어 행해지며 개발 프로그램에서도 이와 같은 routine을 적용하고 있다.

2.4 물성변화 및 최적화 계산 모델

배관으로 유입된 LNG의 초기 물성치는 산지별 일정한 조성에 의한 평균값으로 적용하였다. 그러나, 배관내로 유입된 후 계속적인 진행과 함께 배관 외부로부터 들어오는 유입열을 받아 LNG성분중의 일부 또는 전체 온도가 미약하나마 상승하게 되면, LNG의 물성치는 초기값에서 변하게 된다. 따라서 변해가는 물성치에 대한 정확한 계산과 함께 변한 만큼의 물리적 반응, 즉 압력손실 또는 BOG의 생성으로 이어지는 과정을 정확히 유추해 내는 것이 계산결과 오차를 줄여 나가는 방법이며, 이러한 현상을 고려하기 위하여 LNG의 주요성분 8가지에 대한 개별적인 Temperature-pressure선도, Pressure-enthalpy선도 등을 이용하여 각각의 조건에 대해 viscosity, latent, specific-heat 값 등을 curve-fitting한 후, 수식화 하여 자료화 한 다음 배관 segment별로 유입되는 열량에 대한 반응의 한 과정으로 루틴(routine)화 하여 정량적인 BOG 및 압력손실을 계산하면서 진행해 나갈수 있도록 구성하였다.

한편, 배관설계의 핵심요소인 최적화 계산 모델을 부가적으로 개발하여 적용하였다. 최적화 계산과정은 초기 계산된 배관 구성계에 대한 각종 결과를 활용하고, 적절히 주워진 단열재의 두께 범위, 배관의 직경, 배관 및 단열재의 비용 등에 대해 허용할 수 있는 압력강하량, BOG 및 전체 비용 등의 조건을 입력하면 이에 적절한 배관직경과 단열두께 등을 도출해내어 설비 구성에 있어서 최적의 비용을 찾아는데 목적을 두고 있으며, 다음과 같이 기본함수로 짜여진 최적화 함수(I_{cost})의 최소값을 찾는 것으로 하였다.

$$I_{cost} = I_{pipe} + I_{insu.}$$

$$I_{pipe} = C_{pipe \text{ unit length}} \times L_{pipe}$$

여기서, C : Cost, L : length

$$I_{insu.} = C_{insu. \text{ unit volumn}} \times L_{pipe} \times A_{insu.}$$

여기서, $A_{insu.} = \pi(R_{insu \text{ outside}}^2 - R_{insu \text{ inside}}^2)$

한편, 최적화 계산에 있어 주워지는 제한 조건은 압력강하량, BOG 량 및 출구온도 등이다.

3. 프로그램 개발

3.1 기본구조 및 가정(Assumptions)

프로그램의 구성은 Fig. 3 에서와 같이 크게 main solver부, data bank부, I/O display부 및 subroutine부로 구분된다. Solver에서는 유입열량에 따른 물성 변화치와 함께 생성 가스(BOG)의 계산 루틴, 단상 유동 및 2상 유동 압력강하 계산루틴 등을 지원하고, data bank에서는 LNG에 대한 각종 물성 지원, 배관 요소별 마찰계수 및 기타 계산수행을 위한 각종 물성자료 등을 지원하게 된다. 그리고 I/O display부에서는 배관설계시의 초기 입력조건 및 경계조건 등을 입력할 수 있으며, 계산결과에 대한 display 및 여타 code와의 결과 호환기능을 수행하게 되고, 마지막으

로 subroutine (others) 에서는 최적화 계산 및 단위환산 등의 기능을 독립체제로 수행하게 된다.

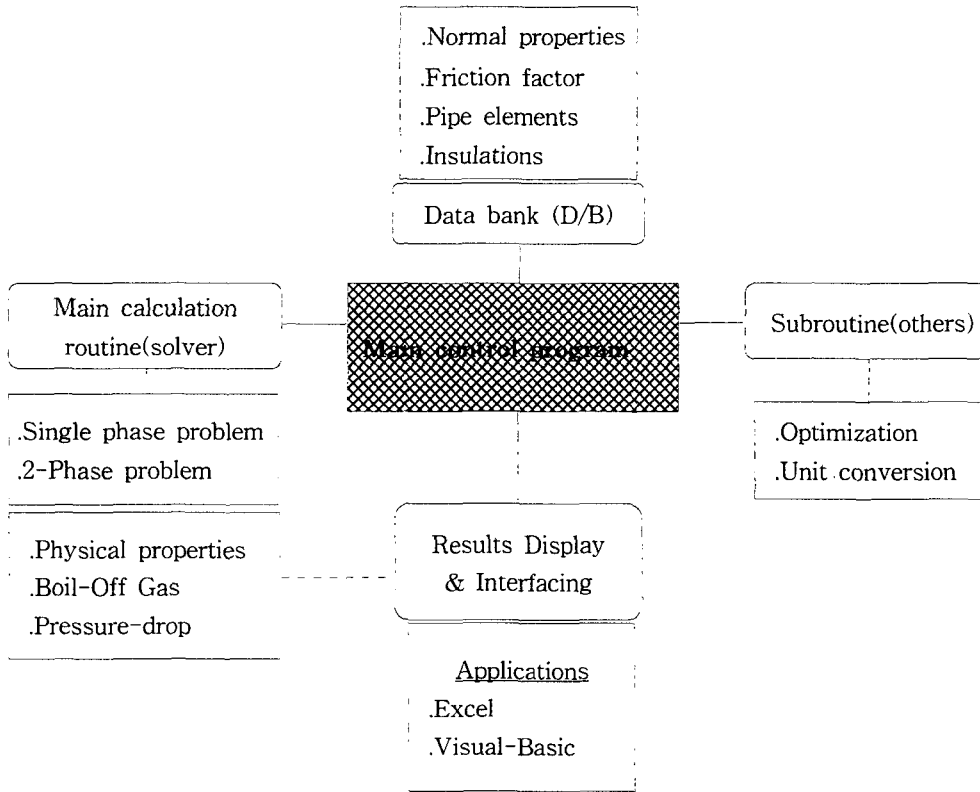


Fig. 3 The basic structure of programme

한편, 개발에 있어서 유동상의 특성 및 개발자료의 한계 등을 고려하여 사용된 가정들 (assumptions)은 다음과 같다.

a. 온도에 대한 가정

- 1) 배관 내부에서의 온도 구배(gradient)는 존재하지 않으나, 벽면 근처에서만 외부로부터의 열전달에 의한 영향이 크다.
- 2) 배관 외부의 온도는 항상 일정하며, 외부 공기의 유동에 의한 열전달계수의 변화는 없다.

b. LNG의 구성 요소에 대한 가정

- 1) LNG를 이루는 각 구성요소(메탄, 에탄, 프로판 등)들은 서로 완벽하게 섞여있다.
- 2) BOG(Boil-Off Gas)의 성분은 메탄이다. 즉 BOG가 많이 발생할 때에는 LNG 및 NG 성분의 변화에 따른 문제가 발생할 수 있다.

c. 유동에 대한 가정

- 1) 액체 상태와 기체 상태의 상호 작용(interaction)이 없고 유량은 항상 일정하다.
- 2) 각 배관요소(fittings)의 내부에서는 액체 상태와 기체 상태의 속도가 같다.

3) 기체상태가 모두 벽면근처에 존재한다. 즉, 실제의 유동양식은 조건에 따라 변환상태로 계산되지만 기체가 발생하여 흘러가는 형태는 환형류(annular)형이다.

3.2 계산 순서

본 프로그램의 계산순서는 Fig. 4 로 이는 다음과 같다. 먼저 LNG생산지에 따라 달라지는 물성치를 얻기 위해, 분자 조성별 mole 분율을 입력하여 LNG전체에 대한 초기 평균 밀도 및 평균 점도 등을 계산한다. 이어서, 초기 유속 및 유량에 따른 유동 양식(flow pattern)을 계산한 다음, 보냉구조 (insulation structure)에 따른 배관 내부로의 segment별 입열량을 계산한다. Segment별 로 계산된 입열량을 통해 변화된 물성치의 평균값을 다시 구하고, 유동상의 2상 유동 특성인 mass fraction, void fraction 등을 계산하여 손실 마찰을 계산하고, 그에 따른 증발량을 구하여 루틴화 한다. 최종적으로, 각종 요소 손실 등과 합산하여 최종 압력 손실값과 BOG량을 도출해 낸다.

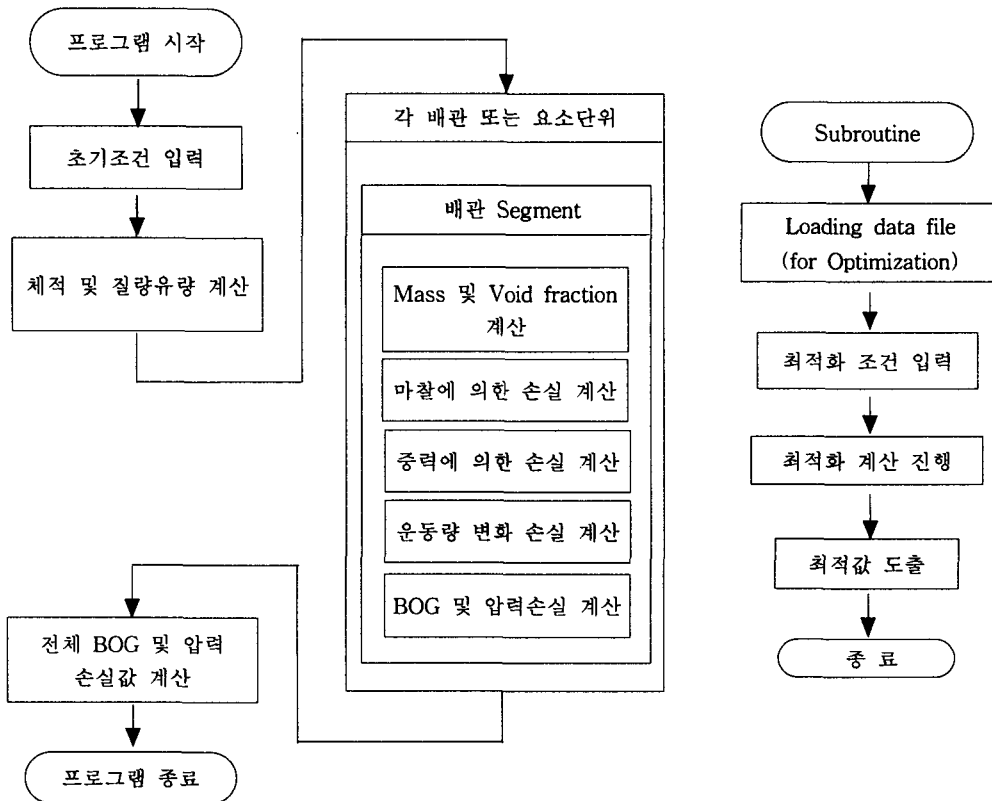


Fig. 4 The Flowchart of main programme

4. 결과 고찰

4.1 프로그램을 이용한 계산과정

앞에서 전술된 알고리즘에 따라, 개발된 프로그램으로 LNG unloading line에 대한 계산을 수행하였다. 2상 유동에서의 압력강하량 수식은 대표적인 HTRI model을 이용하였고, 초기조건 입력 및 계산과정, 최종 결과값 등을 다음의 Fig. 5 와 6 등에 각각 나타내었다. Fig. 5 는 내부 유체인 LNG의 평균 물성치를 계산할 수 있도록 구성된 부 프로그램이며, 성분별 mole % 를 입력하여 계산을 수행하면 액체 및 기체에 대한 초기 평균밀도, 점도 및 증발잠열 등의 각종 물성치를 얻을 수 있다. 그리고 계산되어진 물성값들은 Fig. 6의 배관요소 입력 조건항의 data로 가져가 2상 유동에 대한 계산의 초기값으로 사용되어 진다.

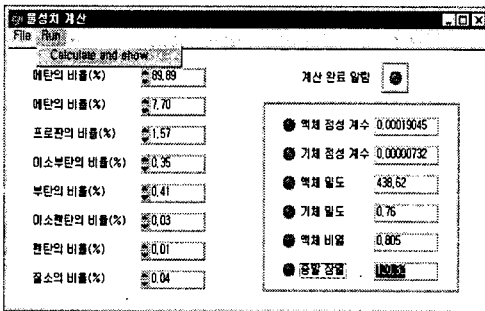


Fig. 5 물성치 계산 과정(화면)

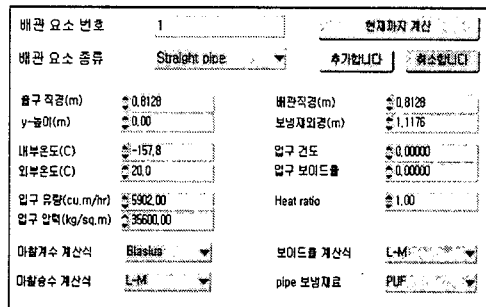


Fig. 6 배관계 초기조건 및 구성 입력화면

Fig. 6 은 본 계산 수행을 위한 입력항으로서 초기 배관의 상태 즉 직경, 보냉재 종류 및 두께, 배관길이 및 배관 내외부 온도등의 입력은 물론, 각종 배관요소들의 적용과 함께 계산상의 선택 사항으로 되어있는 2상 유동의 계산 모델 등을 선정하여 적용할 수가 있다. 또한 Fig. 5의 물성치 계산에서 가져온 결과를 이용하여 선택된 segment 에 대한 1차적인 BOG, 압력강하량 등을 계산하게 된다. Fig. 7 과 8 은 상기의 입력모드를 통해 전체 unloading line에 걸쳐 HTRI 모델에 의해 최종적으로 계산되어진 BOG 및 압력강하량의 결과를 profile로 나타낸 것이다. 이들 결과에 따라 각종 배관 요소들의 배열에 따른 압력강하 및 BOG발생에 대한 경향등을 상세히 파악

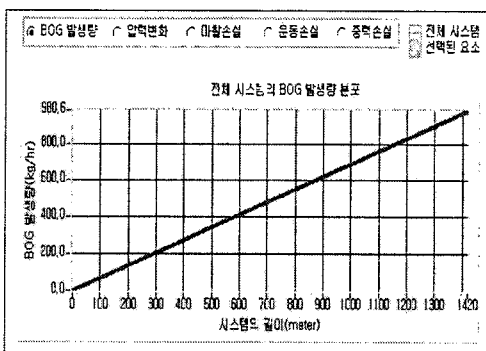


Fig. 7 B.O.G 계산 결과 Profile

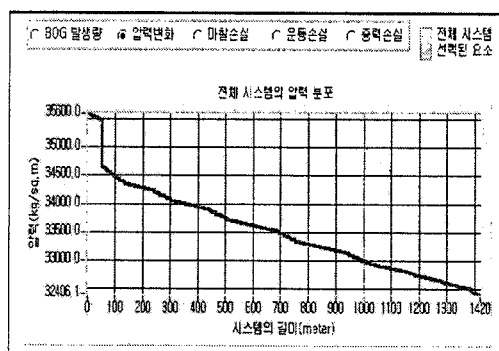


Fig. 8 압력강하 계산 결과 Profile

할 수 있으며, 또한 국부 요소(엘보우, 티, 각종 밸브 등)들에서의 급격한 변화치 등을 예측할 수가 있다. 한편 Fig. 9 에서 Fig. 11 까지는 개발 프로그램의 최종목적인 배관계의 최적화를 위한 부가 프로그램의 계산 화면들이다. 먼저 Fig. 11 과 같은 화면이 뜨는데, 이 화면에서 기존의

데이터 형식으로 저장된 계산 파일을 loading 한 다음, 각 배관 종류별 단위가격 및 최적화 범위 내의 보냉재 두께와 보냉재의 체적당 가격 등을 입력한다.

배관의 단위 길이당 가격입니다.

20인치 원 / 1미터
 30인치 원 / 1미터
 32인치 원 / 1미터
 34인치 원 / 1미터

보냉재의 단위 체적당 가격입니다.

원 / 1미터³

Fig. 9 가격조건 입력화면

검사할 조건을 입력해 주십시오.

BOG 발생량(kg/hr) 이하 이상
 압력 손실량(kg/sq.m) 이하 이상
 제반 비용(₩) 이하 이상

Fig. 10 검사조건 입력화면

가격항목, 조건검사 항목은 Fig. 9 와 10 같은 입력화면을 통해 압력손실 조건, 온도상승 조건 및 적용비용 조건 등을 설정하며, 이를 실행시키면 그에 따른 전체 계산결과를 Fig. 11 에서처럼 나타내어 주며, 조건을 만족시키는 배관과 보냉사양을 각각의 결과값 앞에 있는 표시란을 통해 함께 나타내어 준다.

-----> ▼

-----> ▼

직경의 변화-->

보냉두께	20인치	30인치	32인치	34인치
4인치	<input type="text" value="2.539E+3"/>	<input type="text" value="1.865E+3"/>	<input type="text" value="1.803E+3"/>	<input type="text" value="1.792E+3"/>
6인치	<input type="text" value="2.575E+3"/>	<input type="text" value="1.903E+3"/>	<input type="text" value="1.844E+3"/>	<input type="text" value="1.817E+3"/>
8인치	<input type="text" value="2.592E+3"/>	<input type="text" value="1.921E+3"/>	<input type="text" value="1.865E+3"/>	<input type="text" value="1.826E+3"/>
10인치	<input type="text" value="2.601E+3"/>	<input type="text" value="1.930E+3"/>	<input type="text" value="1.877E+3"/>	<input type="text" value="1.829E+3"/>

Fig. 11 부 프로그램인 최적화 프로그램상의 초기조건 입력 및 계산결과 화면

4.2 결과 비교

Unloading line상에서의 배관손실로 인한 압력강하량에 대한 실측값과, 같은 조건에서의 각각의 계산결과에 대한 비교를 Table 1 에 나타내었다. 결과적으로 프로그램상의 대표적인 2상유동 모델인 HTRI 실험식을 이용한 계산오차는 대략 3% 이내의 범위로 나타났으며, 유동상태를 2상 유동이 아닌 단상 유동(single phase flow)이라 가정하였을 경우는 약 13%, 그리고 프로그램의 검증차원에서 같은 조건을 IHI사(일본)에 의뢰해 계산을 수행한 결과, 실측치와는 대략 4.5% 이상의 오차 범위를 나타내었다.

구 분	생산기지 실측값	개발 프로 그램 계산	Single phase	IHI (일)	HYSYS (상용code)
P ₁ (kg/cm ²)	3.56				
P ₂ (kg/cm ²)	3.30	3.26	2.9	3.450	2.916
Delta P (kg/cm ²)	0.26	0.30	0.66	0.11	0.644
오차율 % (실측값 대비)	0	2.4	13	4.5	12

Table 1 계산 결과 및 비교 오차율

따라서 상기의 비교결과에 의하면 개발 프로그램에 의해 계산된 결과가 비교적 적은 오차범위를 나타낸다는 것을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는, LNG 하역과정에 대한 안정성 확보차원에 따른 배관 설계를 위한 전용 프로그램을 개발하여, 최적의 배관 설계조건을 도출하기 위한 tool의 구현이 목적이다. 따라서, 본 연구를 통해 :

- 가. 2상 유동현상을 고려한 LNG 배관 전용 열유동 설계 프로그램을 개발하였다.
- 나. 2상 유동에 대한 발생기구의 규명과 억제 조건 등을 상세히 파악할 수 있었고;
- 다. 2상 유동의 계산 모델 및 각종 유동계수 등에 대한 보다 정확한 수식을 정립하여 프로그램한 다음, 실제 LNG 하역 라인을 모델로 한 최적 설계 조건도출에 적용할 수 있었으며;
- 라. 여타 tool과의 비교 계산을 통해 개발된 프로그램의 정확성과 오차범위를 논할 수 있었다.

참고문헌

1. Mandhane, J.M., Gregory, G. A., & Aziz, K. A Flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes, Int. J. Multiphase Flow, 537-554, (1974)
2. Lockhart, R. W. & Martinelli, R.C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase

- two-component flow in pipes, Chem. Eng. Prog., 45-1, 39-48, (1945)
3. Baroczy, C.J. A Systemic correlation for two-phase pressure drop, Chemical Engineering Prog. Symp. Ser. 62-64 (1966)
 4. Donald L. katz, Robert L. Lee, Natural gas engineering, Production & storage McGrew Hill publishing company (1990)
 5. Frank M. White, Fluid mechanics, Mc Grew-Hill publishing company 3rd ed. (1994)
 6. Frank P. Incropera, & David P. Dewitt, Introduction to heat transfer, John wiley & sons (1990)
 7. Havens, J. A. et al., Evaluation of 3-D Hydrodynamic Computer Models for Prediction of LNG Vapor Dispersion in the Atmosphere, Gas Research Institute GRI-87-0173 (1990)
 8. Ted, A. Williams, High Expansion Form for LNG Mitigation, GRI-90/0003(1990)
 9. 이상규, 홍성호, 이중남, 이성우, LNG 배관내 2상 유동에 관한 연구, 한국가스학회 '98추계학술발표회, 154-160 (1998)