

LNG 배관시스템의 열유동 해석 및 최적설계 프로그램 개발

이 상 규 · 홍 성 호 · 이 중 남 · 박 석 호*
한국가스공사 연구개발원, *삼성중공업 기전연구소
(2000년 5월 28일 접수, 2000년 6월 10일 채택)

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

Sanggyu Lee, Seong-Ho Hong, Joong-Nam Lee*, Seok-Ho Park*
KOGAS R & D Center, *Samsung Heavy Co
(Received 28 May 2000 ; Accepted 10 June 2000)

요 약

생산지로부터 LNG 선박으로 수송되어 각 생산기지의 저장탱크로 저장되는 액화천연가스(LNG; Liquefied Natural Gas)는 극저온인 Boiling Point보다 약간 낮은 온도(-162°C)로 전송된다. LNG 전송은 배관을 통하여 이루어지며, 이로 인하여 배관 내에는 2상 유동(2-Phase Flow)이 자주 형성된다. 본 연구에서는 일차적으로 이러한 배관내의 2상 유동에 대한 압력강하량 계산법을 연구하였고, 단열재와 배관 표면을 통한 외부 열유입량과 그에 따른 BOG(Boil-off Gas) 발생량 계산 방법을 연구하여, 이들을 기반으로 LNG 배관시스템의 열유동 해석 프로그램을 개발하였다. 또한 본 연구 및 프로그램 개발을 토대로 최적의 단열재 두께와 배관 Size를 구할 수 있는 최적 설계 프로그램을 구축하였다. 이는 배관 설계 시 주어진 최대 허용 압력 강하량과 BOG 발생량 등의 허용 운전 조건과, 단위 길이 당 배관가격과 단위 부피당 단열재가격을 기준으로 허용 범위 내의 최소 설비 비용을 찾는 최적 설계 방법이다.

Abstract - LNG (Liquefied Natural Gas) carried by LNG ship is unloaded into the LNG storage tanks at the very low temperature (a little lower than the boiling point of LNG). Because LNG is unloaded through the pipeline, two phase flow appears in the pipeline. In this study, we have studied the pressure-drop mechanisms of the two-phase flow in the pipeline, and the calculation method of BOG (Boil-off Gas) amount based on the heat transfer mechanism through the insulation and the surface of the pipeline. We have developed a computer program for thermal-hydraulic analysis on the LNG pipeline system. We have also developed the optimal design program to find the optimal thickness of insulation and the pipeline size. The program searches the optimal design with the minimum capital cost of pipelines and insulation on the operating conditions of maximum allowance pressure-drop and BOG amount, etc.

Key words : LNG, pipeline, 2-phase flow, pressure drop, BOG, optimal design

1. 서 론

액화 천연가스(LNG; Liquefied Natural Gas)

는 청정 및 고효율 에너지원으로서, 일반 가정은 물론 산업현장에서부터 국가 기간산업에 이르기까지 다양한 목적으로 널리 사용되고 있

다. 이러한 생활에 필수적인 액화 천연가스는 -162℃의 초저온 액체이므로 취급상 세심한 주의가 요구된다. 따라서, 수송과정은 물론 저장 설비나 이송 배관의 설계, 제작, 보존 등에 있어서 세심한 검사기준을 적용하고 있다. 특히 LNG를 LNG 수송선에서부터 배관 시스템을 통해 저장 설비로 전달하고 계속해서 생산기내 배관망에 공급하는 과정은 극저온의 극한 상태이므로, 이들 수송 시스템을 구성할 때에는 실제 발생하는 각종 현상들을 보다 명확하게 규명하여 안전하게 설계하고 제작할 필요가 있다.

하역 (Unloading) 상의 배관내에서나 tank에서의 액화 천연가스는 보통 -162℃ 이하의 낮은 온도를 유지하게 되는데, 배관계 또는 tank 내외부의 온도 차이로 인해 내부로의 많은 열 전달이 일어나게 된다. 이러한 열전달 현상은 특히 내외부의 온도차에 비례하며 내부에 있는 액화 천연가스의 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 매카니즘에 대한 정확한 이해와 함께 안정성 확립을 위한 설계 자료 및 변수의 확보가 필요하며, 이것을 통해 전열 및 증발 현상을 최대한 억제하는 방향으로 설계하는 것이 바람직하다.

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, 구성된 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 이들을 최소화하기 위한 설계조건을 도출을 목적으로 하는 전용 프로그램을 개발하고자 한다.

2. 상 유동

2.1. 상 유동에 대한 기존의 연구

산업 전반에 걸친 2상유동은 많은 연구자들이 다년간 실험을 병행한 이론 연구를 활발히 진행하였으나, 현상의 복잡성과 특이성 때문에 2상유동의 유동 기구 (mechanism)나 전열 과정에 대한 이해는 아직도 부족한 실정이다.

Baker[1]는 최초로 수평관에 대한 2상 유동 양식을 연구하여 2상 유동 양식 선도 (diagram)를 발표하였고, Scott[2]는 Baker 선

Table 1 The characteristics of calculation models of pressure drop for 2-phase flow

Model	Lockhart-Martinelli	Martinelli-Nelson	Thom	Baroczy	HTFS	HTRI
Condition	대기압 근처의 수평 유동	Steam-water	Steam-water (P>17bar)	All liquid	All liquid	All liquid
Flowrate (Kg/m ² s)	350 ≥	350 ≥	150 - 2000	300 - 4000	10 - 3160	350 ≥
Charact.	저압 배관용 일반적 사용	L-M모델보완 (고압 배관)	수직상향의 강제 대류	질량 속도 고려	계산 간단	유동형식별 수식차별화
Accuracy	low	low	medium	medium	medium	high

한편, 수송선으로부터 unloading되는 액화 천연가스는 펌프, 직관, 곡관, 각종 밸브 등 여러 가지 fitting류들로 구성되는 배관계에 의해 압력 저하 (pressure drop), 2상(2-phase)화 유동 등의 현상이 나타나는데, 상압보다 높은 압력과 극저온에서 운전되므로 이들 요소들의 유동

도를 부분적으로 수정하여 천이경계선에 폭을 갖는 형태로 표시한 선도를 제안하였다. 그리고 Mandhane[3]는 수평 관내의 2 성분계 2상 유동에 관한 다수의 계측 결과를 종합하여 유동 양식에 가장 큰 영향을 미치는 길보기 유속에 의한 유동양식 선도를 제시하였다.

한편, Lockhart 와 Martinelli[4]는 대기압 상태에서의 각종 공기-액체 단열 2상류에 대한 측정 결과를 기초로 2상류에 대한 마찰손실(friction loss)과 보이드율(void fraction)을 예측하는 실험적 방법을 연구 발표하였다. 이 방법은 2상류 마찰손실 구배(gradient)를, 전유량 중 액상 성분만이 혹은 기상 성분만이 단상(one phase)류로 흐른다고 가정할 때의 마찰손실구배에 대한 비로써 나타내었고, 관내의 2상류 압력손실계산의 기초가 되었다. 그리고 Martinelli와 Nelson[5]은 위의 L-M(Lockhart-Martinelli) 처리 방법을 확장하여 관길이 방향으로 균일한 가열을 받는 증발관의 마찰 손실에 대한 계산방법을 제시하였다. 또한 Thom[6]은, 수직 관내의 상향류에 대하여 물의 강제유동 비등계의 압력손실을, 광범위한 실험결과로부터 간단히 추정하는 방법 등을 제시하였다.

2.2. 2상 유동의 종류

2상 유동은 기체나 액체의 질량 유량, 유동 속도, 관벽면의 가열 여부에 따라 여러가지의 유동형태를 이룬다. 이러한 유동 상태를 파악하거나, 해석모델을 설정하기 위하여, 유동형태를 몇 가지의 유동양식(flow pattern)으로 구분할 수 있으며, Fig. 1 에 각각의 구분된 유동양식의 종류를 수직관과 수평관으로 분리하여 나타내었다.

3. LNG Pipe Line에서의 현상 모델링

3.1 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 야기되며, 또한 흐름도중에 거치게 되는 각종 배관요소들에 의해서도 발생된다. 그리고 상기의 압력강하 모델들은 특성별로 약간씩의 정도 차이는 있으나, 본질적으로는 같은 실험

식 배경을 갖고 있으며 대부분이 개발된 프로그램을 통하여 계산이 가능하다. 전체적인 계산식의 배경은 이 등 [7]의 논문에서 찾아볼 수 있다.

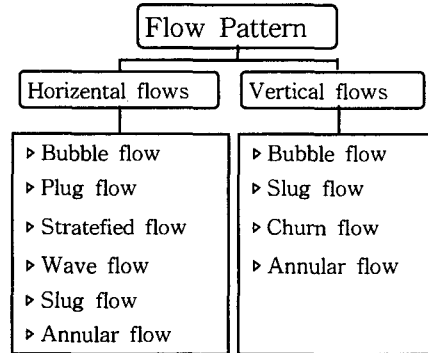


Fig. 1. The flow patterns of 2-phase flow.

3.2. 배관내 증발량 계산 모델

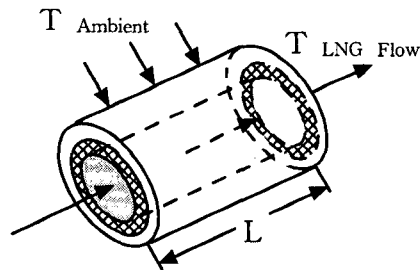


Fig. 2. Heat transfer mechanism in the LNG pipe.

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 -162℃ 전후의 극저온 유체로 흐르는데, pipe 외부의 경우는 대부분 상온으로 유지되므로, 안과 밖의 온도 차이로 인해 내부로의 열전달이 일어나게 된다. 이러한 전달 열량의 계산은 단순 2차원 실린더 좌표(cylindrical coordinate) 상의 전도(conduction)방정식과 전술된 2상 유동의 압력 강하 계산모델에 포함된 void fraction과 상계 되어 행해지며 개발 프로그램에서도 이와 같은

방법이 적용되고 있다.

2.4. 최적화 계산 모델

배관설계의 핵심요소인 최적화 계산 모델을 부가적으로 개발하여 적용하였다. 최적화 계산 과정은 초기 계산된 배관 구성계에 대한 각종 결과를 활용하고, 적절히 주어진 단열재의 두께 범위, 배관의 직경, 배관 및 단열재의 비용 등에 대해 허용할 수 있는 압력강하량, BOG 및 전체 비용 등의 조건을 입력하면 이에 따라 적절한 배관직경과 단열두께 등을 도출해내어, 설비 구성에 있어서 최적의 비용을 찾는 데 목적을 두고 있다. 다음과 같은 최적화 함수 (I_{cost})를 이용하여 최소값을 찾는다.

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

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

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 크게 main solver부, data bank부, I/O display부 및 subroutine부로 구분된다. Solver에서는 유입열량에 따른 온도 변화, 물성 변화, 그리고 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. 또한 최적화 계산 기능은 위의 프로그램 전체를 반복적으로 수행할 수 있도록 독립적 형태로 만들었다.

한편, 본 프로그램 개발에 있어서 유동상의 특성 및 개발자료의 한계 등을 고려하기 위하여 사용된 가정들 (assumptions)은 다음과 같다.

a. 온도에 대한 가정

- 1) 배관 내부에서의 수직적 온도 구배 (gradient)는 고려하지 않으나, 외부로부터의 열전달에 의한 영향이 큰 벽면 근처만은 고려하였다.
- 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 전체 LNG 질량에 비하여 발생하는 BOG 양은 작다고 가정하였다.

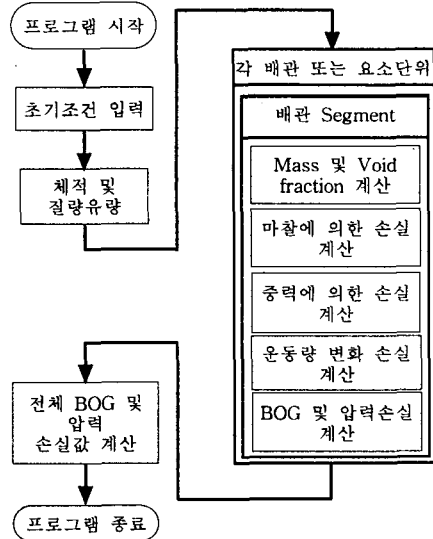


Fig. 3. The flowchart of main programme.

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 변환되고 계산에 고려되지만, 기체가 발생하여 흘러가는 형태는 환형류(annular)로 가정한다.

3.2. 계산 순서

본 프로그램의 계산순서는 Fig. 3 과 같다. 먼저 LNG생산지에 따라 달라지는 물성값을 얻기 위해, 조성에 따른 mole 분율을 입력하면, LNG에 대한 초기 밀도 및 점도 등을 계산한다. 이어서, 초기 유속 및 유량에 따른 유동양식(flow pattern)을 계산한 다음, 보냉구조(insulation structure)에 따른 배관 내부로의 segment별 입열량을 계산한다. Segment별로 계산된 입열량을 통해 변화된 물성치의 평균값을 다시 구하고, 2상 유동 특성인 mass fraction, void fraction 등을 계산하여 손실 마찰을 계산하고, 그에 따른 증발량을 구하고 이를 루틴화 한다. 최종적으로, 각종 요소 손실 등과 합산하여 전체 압력 손실값과 BOG량을 도출해 낸다.

되게 된다. 그러나, 프로그램상에서는 다관, 또는 네트워크 식의 연결관에 대한 계산적용의 한계성으로 인해 Fig. 4 와 같이 단관계(single pipe system)형태로 단순화시켜 모델링하였다. 한편, 이같은 단순화 모델링에 있어서도 각종 배관요소(밸브, fitting 등)들은 실제 line과 똑같은 수량 및 연결형태로 적용 가능토록 모델링하였다.

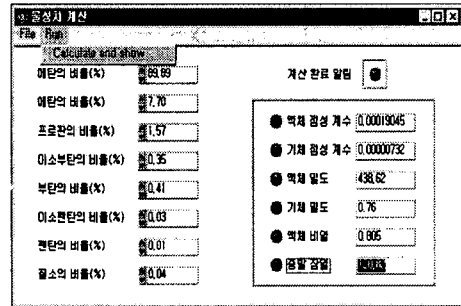


Fig. 5. Window for the calculation of physical properties.

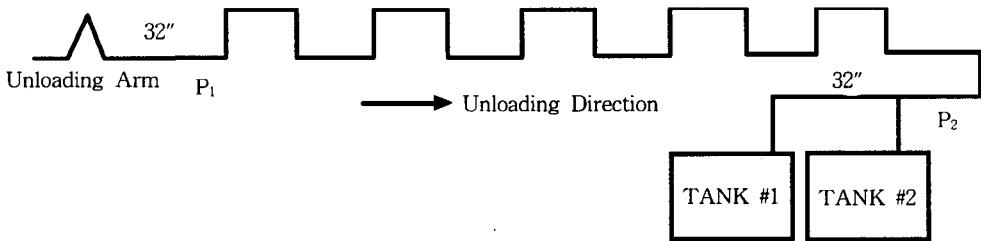


Fig. 4 Simplified unloading line for the program.

4. 결 과 고 찰

4.1. 하역배관 (Unloading Line)의 단순화

LNG unloading line의 배관계 설계를 위한 프로그램 적용에 있어, 실제 unloading line 구조의 복잡성, 배관 연결의 다양성 등을 고려하여 Fig. 4 와 같이 간략화 또는 단순화하여 모델링하였다. 즉 실제 unloading line에 있어서는, 3개의 unloading arm을 거쳐 나온 LNG는 직경이 24"인 3개의 배관을 통해 유입된 다음, 다시 직경이 32"인 두 개의 배관으로 합쳐져서, 약 1.42km의 운송거리를 거쳐 tank로 유입

4.2. 프로그램을 이용한 계산과정

앞에서 기술된 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 배관요

소 입력 조건항의 data로 가져가 2상 유동에 대한 계산의 초기값으로 사용되어 진다.

배관 요소 번호	1	연차까지 계산	
배관 요소 종류	Straight pipe	추가합니다	
추가합니다	취소합니다		
출구 직경(m)	0.8128	배관외경(m)	0.8128
y-높이(m)	0.00	보냉재외경(m)	1.1176
내부온도(C)	-157.8	입구 건조	0.00000
외부온도(C)	20.0	입구 보이드율	0.00000
입구 유량(kg/hr)	5902.00	Heat ratio	1.00
입구 압력(kg/sq.m)	35500.00		
미활계수 계산식	Biasius	보이드율 계산식	L-M
미활계수 계산식	L-M	pipe 보냉재료	PUF

Fig. 6. Input window for the LNG pipeline system.

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 선택사항으로 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 파악할 수 있으며, 또한 국부 요소(엘보우, 티, 각종 밸브 등)에서의 급격한 변화치 등을 예측할 수가 있다.

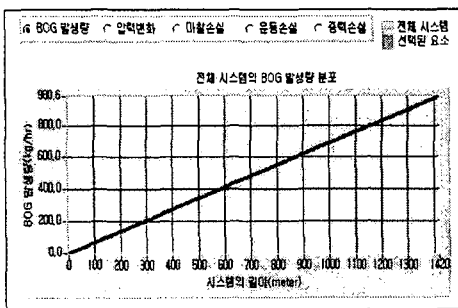


Fig. 7. Result window for the profile of BOG amount in the pipeline.

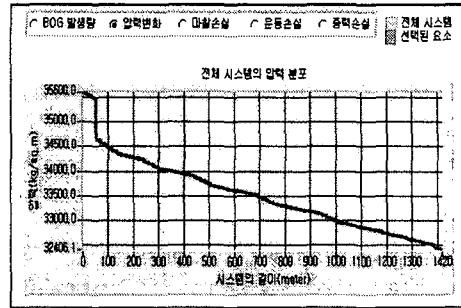


Fig. 8. Result window for the profile of pressure-drop in the pipeline.

한편 Fig. 9 에서 Fig. 11 까지는 개발 프로그램의 최종목적인 배관계의 최적화를 위한 부가 프로그램의 계산 화면들이다. 먼저 Fig. 11 과 같은 화면이 나타나는데, 이 화면에서는 기존의 데이터 형식으로 저장된 계산 파일을 loading 한 다음, 각 배관 종류별 단위가격 및 최적화 범위내의 보냉재 두께와 보냉재의 체적당 가격 등을 입력한다.

배관의 단위 길이당 가격입니다.	
20 인치	₩245540.00 원 / 1 미터
30 인치	₩530448.00 원 / 1 미터
32 인치	₩581940.00 원 / 1 미터
34 인치	₩62000.00 원 / 1 미터
보냉재의 단위 체적당 가격입니다.	
	₩663490.00 원 / 1 미터³
입력	
취소	

Fig. 9. Input window for the condition of capital cost.

검사할 조건을 입력해 주십시오		
BOG 발생량(kg/hr)	₩900.00 미치	₩0.00 미상
입력 손실량(kg/sq.m)	₩0.25 미하	₩0.00 미상
재반 비용(W)	₩0.00 미하	₩0.00 미상
입력		
취소		

Fig. 10. Input window for the condition of pipeline operation.

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.

력강하량에 대한 실측값과, 같은 조건에서의 각각의 계산결과에 대한 비교를 Table 2 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%,

보냉두께	20 인치	30 인치	40 인치	50 인치
4 인치	2.539E+3	* 1.865E+3	* 1.803E+3	* 1.792E+3
6 인치	2.575E+3	1.903E+3	* 1.844E+3	* 1.817E+3
8 인치	2.592E+3	1.921E+3	* 1.865E+3	* 1.826E+3
10 인치	2.601E+3	1.930E+3	* 1.877E+3	* 1.829E+3

Fig. 11. Window for initial condition and calculation result in the sub-program of optimization.

Table 2. Calculated results and error percentages of the various computational methods in the case study

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

4.2. 결과 비교

Unloading line상에서의 배관손실로 인한 압

그리고 프로그램의 검증차원에서 같은 조건을 IHI사(일본)에 의뢰해 계산을 수행한 결과, 실

측치와는 대략 4.5% 이상의 오차 범위를 나타내었다.

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

6. 결 론

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 프로그래밍한 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.

참 고 문 헌

1. Baker, O.: Simultaneous flow of oil and gas, Oil Gas J., 53, 185-190. (1954).
2. Scott, D.S.: Properties of concurrent-gas-liquid flow, Advances in Chemical Engineering, 4. Academic Press, New York, 200 (1963).
3. Mandhane, J.M., Gregory, G. A., and Aziz, K.: A Flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes, Int. J. Multiphase Flow, 537-554, (1974).
4. Lockhart, R.W. and Martinelli, R.C.: Proposed correlation of data for

isothermal two-phase two-component flow in pipes, Chem. Eng. Prog., 45-1, 39-48, (1945).

5. Martinelli, R.C. and Nelson, D.B.: Prediction of pressure drop during forced-circulation boiling of water, Trans. ASME, 70, 695-702, (1948) .
6. Thom, J.R.: Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water, Int. J. Heat Mass Transfer, 7, 709-724 (1964).
7. 이상규, 홍성호, 이종남 and 이성우: LNG 배관내 2상 유동에 관한 연구, 한국가스학회 '98추계학술발표회, 154-160 (1998).
8. Baroczy, C.J.: A Systemic correlation for two-phase pressure drop, Chemical Engineering Prog. Symp. Ser. 62-64 (1966).
9. Donald L. katz and Robert L. Lee: Natural gas engineering, Production & storage McGrew Hill publishing company (1990).
10. Frank M. White: "Fluid mechanics", Mc Grew-Hill publishing company 3rd ed. (1994).
11. Frank P. Incropera and David P. Dewitt: "Introduction to heat transfer", John wiley & sons (1990).
12. Havens, J.A.: Evaluation of 3-D Hydrodynamic Computer Models for Prediction of LNG Vapor Dispersion in the Atmosphere, Gas Research Institute GRI-87-0173 (1990).
13. Ted, A. Williams: High Expansion Form for LNG Mitigation, GRI-90/0003(1990).
14. 이상규, 홍성호, 이종남 and 박석호: LNG 배관시스템의 열유동 해석 Program 개발, 한국가스학회 '99추계학술발표회, 71-80 (1999).