

# LNG 저장탱크 종합 열유동 해석프로그램 개발

김호연\* · 최성희\* · 이정환\* · 박영\* · 하종만\* · 주상우\*\*

## Program Development on the Thermofluidodynamic Analysis of LNG Storage Tanks

Hoyeon Kim, Sunghye Choi, Junghwan Lee, Young Bak, Jongmann Ha and Sangwoo Joo

**Key Words:** Thermofluid Behaviors(열유체 거동), Cool Down Process(Cool Down 프로세스), Filling Process(주입프로세스), Mixing LNG Storage(혼합 LNG 저장)

### Abstract

Cryogenic LNG(Liquefied Natural Gas) which is stored in the cylindrical storage tanks of 100,000m<sup>3</sup> has very complex flow phenomena and the changes of thermal properties with exterior conditions and operation mdoes. These complex thermofluid behaviors are affected by the storage, exterior conditions of LNG, design specifications and heat transfer characteristics of tanks, Also, those have influence on the stable storage and supply of LNG in the storage tanks. Thus this study performed the analysis on the 2-D heat transfer of the tank with exterior conditions, on the Cool Down Process in order to cool down the LNG Storage Tank at the initial normal state, and on the Filling Process considered for incoming and rising of LNG. The analysis on the Mixing LNG Storage was studied too. At last, the visualized program on the complex thermofluidodynamic analysis was developed on the basis of the above analyses. The development of this program becomes to be used to the basic design of the commercial tanks as well as to assure technical skill of the analysis on the thermal stability of the stored LNG in the LNG Storage Tank.

### 1. 서 론

천연가스를 약 -162℃로 액화시켜 저장하고 있는 LNG 저장탱크는 내경 57m, 높이 약 48m로 100,000m<sup>3</sup>의 액화천연가스를 저장할 수 있는 원통형의 초대형 저장설비이다. 또한, 외부로부터의 열유입을 최소화하기 위한 단열과 보냉공간이 존재한다.<sup>(1)</sup> 그러나 대기중에 노출되어 있는 LNG 저장탱크는 장시간에 걸쳐 탱크내부로의 지속적인 열유입을 수반하게 되고, 이것으로 인하여 저장된 LNG는 탱크내벽을 따라 난류성 자연대류가

형성되게 된다. 이때 유입된 열에너지는 액상부의 자유계면에 도달하게 되고 탱크내압과 같은 운전조건에 따라 증발가스를 방출하여 열적평형 상태에 도달하게 된다. 또 한편으로는 증발이 일어나면서 부분적으로 냉각된 상부의 경계층류가 과포화 상태의 내부 LNG와 재혼합되면서 새로운 순환류가 지속적으로 발생하게 된다. 이러한 저장 LNG의 유동양상 및 관련된 열물성 변화는 LNG의 저장, 운전조건, 탱크사양, LNG의 성분변화, 그리고 저장탱크 및 LNG의 열전달 특성에 크게 영향을 받는다.<sup>(2~5)</sup>

따라서, 본 연구는 초저온의 액화천연가스를 저장하고 있는 LNG 저장탱크의 열전달 해석과 주 운전모드인 Cool Down 프로세스, 주입프로세

\* 한국가스공사 연구개발원

\*\* 영남대학교 기계공학부

스, 혼합프로세스에서 일어날 수 있는 유동양상 및 열물성 변화를 상용코드를 사용하여 우선적으로 해석하고, 이를 기반으로 하여 일반 사용자가 전문적인 지식이 없이 상용코드를 사용하여 수행할 수 있도록 가시화하는 종합적인 열유동 해석 프로그램을 개발하고자 한다.

## 2. 프로그램 개발

### 2.1 구성

본 프로그램의 구성은 크게 가시화를 수행하기 위한 내부루틴과 외부루틴으로 되어 있으며, 그 작업흐름에 대한 구조는 Fig. 1과 같다.

여기서, 내부루틴은 본 프로그램이 자체 수행이 가능한 부분으로 4단계로 구성되어 있다. 제1단계는 탱크의 제원을 입력하고 제2단계는 LNG 저장탱크의 운전모드를 선택하게 되어 있으며 제3단계는 프로세스를 수행하게 되어 있다. 특히, 이 단계는 사용자가 열유동 해석을 위해 상용화된 전용패키지를 다루기 위한 메뉴선택 및 입력수치를 구체화하여 가시화해 주는 화면들로 구성되어 있다. 제4단계는 마지막 단계로 외부루틴으로부터 계산된 결과파일을 받아서 화면에 보

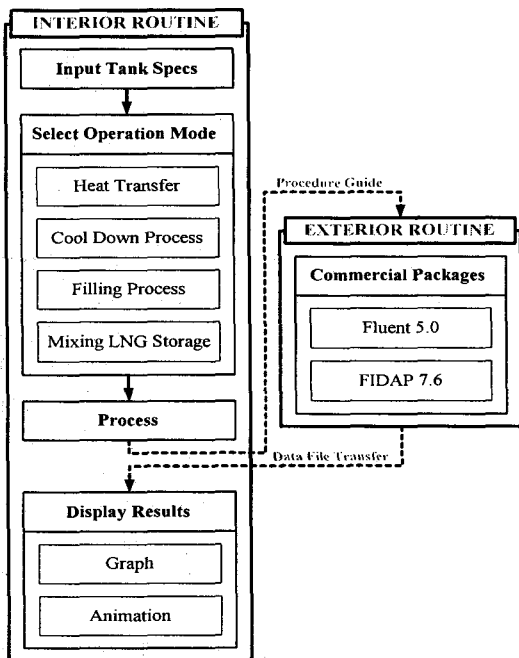


Fig. 1 Structural diagram of workflow.

여 주도록 구성되어 있고 온도장, 속도장, 농도장을 그래프나 동영상으로 볼 수 있다.

외부루틴은 내부루틴이 단독으로 수행할 수 없는 계산수행과정을 상용화된 패키지인 Fluent나 FIDAP을 사용할 수 있도록 구성된 가상적인 루틴으로 내부루틴의 프로세스에 의해 가시화된 절차에 따라 독자적으로 계산을 수행하고, 그 수행 결과에서 생성된 결과파일들을 내부루틴에서 가시화하게 된다.

### 2.2 탱크제원 입력

탱크제원에 대한 자료입력화면은 Fig. 2와 같이 구성되어 있으며, 화면의 왼쪽 창에는 각 단계별로 메뉴가 구성되어 있고 중앙 탭에는 탱크사양에 대한 수치입력상자로 구성되어 있다. 그리고 오른쪽 창에는 탱크의 개략적인 단면도를 보여주고 있고 OK버튼을 누르게 되면 입력상자에 있는 각 수치들이 단면도에 표시된다. 특히, 탱크사양에 대한 입력부분은 입력수치의 연관성을 고려하여 탱크의 제원, 벽체부, 바닥부, 현수지붕부, 천정부 그리고 대기조건으로 크게 분류하여 탭으로 구성하였다. 또한, 탱크사양에 대한 입력수치의 초기값은 현재 인천 LNG기지에서 실제 운영중인 LNG 저장탱크 201 모델을 기준으로 하였으며 그 구체적 치수들은 Table 1에서 보여준다

### 2.3 열전달

LNG 저장탱크의 열전달 해석은 2차원 y축 대칭인 모델로 결정하였다. 그리고 탱크 내외부에서의 대류 열전달계수는 전도 열전달계수에 비해 상대적으로 작고 탱크벽에서의 온도분포와 단열

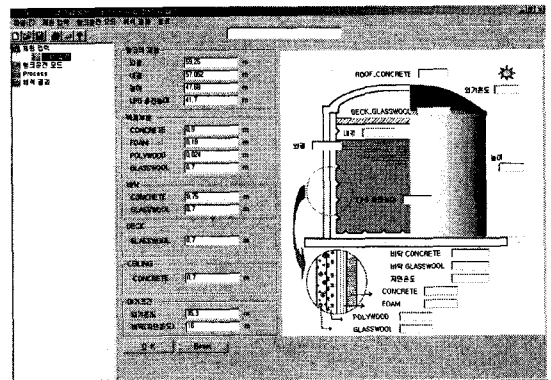


Fig. 2 Input window for specs of LNG tank.

Table 1 Specs of LNG Storage Tank 201.

Specification		Wall	
Outer dia.	59.26m	Concrete	0.900m
Inner dia.	57.05m	Foam	0.180m
Height	47.69m	Polywood	0.024m
LNG height	41.70m	Glasswool	0.700m
Slab		Outer conditions	
Concrete	0.75m	Outdoor Temp.	35.3℃
Glasswool	0.70m	Ground Temp.	16.0℃
Roof		Suspended ceiling	
Concrete	0.70m	Glasswool	0.70m

재를 결정하는 설계인자로 중요하지 않으므로 무시하였다.

Fig. 3에 보여주고 있는 열전달 해석에 관한 입력화면의 구성은 중앙부의 탭에서 재료의 물성치, 초기조건, 그리고 경계조건을 입력하도록 하였고 우측창에서 탱크의 각 위치별로 경계조건들을 보여주도록 하였다. 특히, 재료의 물성치는 본 모델의 지배방정식인 2차원 비정상상태 복합열전도 방정식의 열확산계수를 토대로 각 재료의 밀도, 비열, 그리고 열전도도를 입력하도록 하였으며, 그 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

여기서,  $\alpha$ 는 열확산계수로 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (2)$$

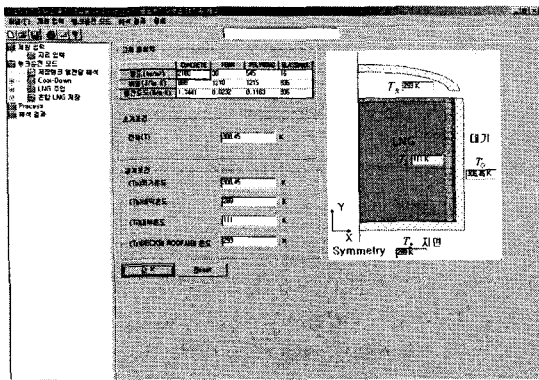


Fig. 3 Input window for Heat Transfer mode.

LNG 저장탱크의 열전달 입력화면에서 초기값으로 설정된 재료와 물성치 그리고 초기조건과 경계조건은 Tank 201를 기준으로 하였으며 그 값들은 Table 2에서 보여 주고 있다.

Table 2 Input data of Heat Transfer mode.

□ Properties of materials			
Items	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Specific heat [J/kg·K]	Conductivity [W/m·K]
Concrete	2,100	880	1.7441
Foam	30	1,210	0.0232
Polywood	545	1,215	0.1163
Glasswool	16	835	0.0465
□ Boundary conditions			
Outdoor	308K	Slab	289K
Indoor	111K	Space	293K
□ Initial condition			
Initial Temp.	111K		

#### 2.4 Cool Down 프로세스 모드

Cool Down 프로세스는 상온 상태의 탱크내부를 -155℃로 낮추는 공정이며 냉각방식에서도 Top Cool Down 방식과 Bottom Cool Down 방식이 있다. 그러나 본 프로그램에서는 현재 Tank 201에 적용하고 있는 Bottom Cool Down 방식을 모델로 하여 Cool Down 프로세스를 해석하도록 하였고 Bottom Cool Down 모델을 두가지로 분류하였다. 하나는 중앙하부 유입에 따른 상부 가장자리 유출과 하부 가장자리 유입에 따른 상부 중앙유출로 분류하여 Case 1과 Case 2로 나누어서 화면을 구성하였다.

본 모델에 대한 지배방정식은 유체의 경우 연속방정식, 비압축성 Reynolds-averaged 운동량방정식, 그리고 에너지방정식을 사용하였고 난류모델은 Standard k-ε 모델을 사용하였으며, 고체부분의 경우는 에너지방정식만을 고려하였다. 여기서, 유체의 연속방정식은 다음과 같으며,

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

운동량방정식은

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

$$-\frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \Big] + \frac{\partial}{\partial x_i} (-\rho \overline{u_i u_j}) + \rho g_i \quad (4)$$

로 표현되고, 유체에 대한 에너지방정식은 다음과 같다.

$$\rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{\mu}{\sigma} \left( \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i T} \right] \quad (5)$$

또한, 고체부분의 각 재료에 해당하는 에너지방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial T^s}{\partial t} = a^s \frac{\partial^2 T^s}{\partial x_j^2} \quad (6)$$

Case 1의 화면구성은 Fig. 4와 같으며 입력조건은 상기의 지배방정식들을 토대로 하여 Cool Down 모델, 재료물성치, 유체물성치, 초기조건, 경계조건, 그리고 입구조건으로 분류하여 입력하도록 하였다.

현재 Fig. 4의 화면에 초기화된 데이터들은 Tank 201을 기준으로 하였으며 그 구체적인 데이터들은 Table 3에 보여주고 있다. 단, 재료에 대한 물성치는 Table 2와 동일하므로 제외하였다.

Case 2의 화면구성도 Fig. 4와 동일하며 유입에서의 방향과 유출에서의 위치만 차이가 있고 다른 부분은 Case 1과 동일하다. 따라서 입구에서의 경계조건인 축방향속도만 바뀌게 된다.

Table 3 Input data of Cool Down mode.

Cool Down Model			
Outer dia.	29.7m	Inlet dia.	0.6m
Height	42.7m	Outlet dia.	0.6m
			0.5m
Properties of fluid			
Density	420kg/m <sup>3</sup>	Conductivity	0.1878W/mK
Specific heat	3,454J/kg·K	Viscosity	111E-6 kg/m·s
Inital conditions			
Temp.	308K	Velocity	0m/s
Boundary conditions			
Outdoor	308K	Ground	300K
Space	298K	Inlet temp.	115K
Inlet vel.			11m/s

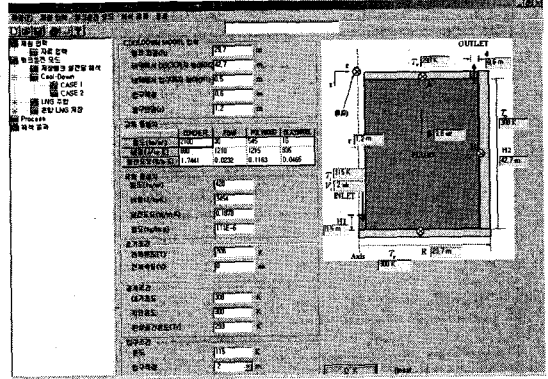


Fig. 4 Input window for Case 1 of Cool Down.

## 2.5 주입프로세스 모드

주입프로세스는 기 저장된 저장탱크에 새로운 LNG를 주입하는 공정을 말하며, 산지가 다른 이종 물성의 LNG를 주입할 때의 혼합과정을 묘사하기 위한 것이다. LNG 저장탱크에 LNG를 주입하는 방식에도 상부주입과 하부주입 두가지가 있는데 본 연구에서는 하부주입을 모델로 하였으며 하부주입도 하부 가장자리 주입은 Case 1으로 하부 중앙에서의 주입은 Case 2로 메뉴를 구성하였다.

주입프로세스의 Case 1에 대한 입력화면은 Fig. 5에 보여 준다. 중앙 탭에는 주입프로세스의 모델입력, 유체물성치, 초기조건, 경계조건, 그리고 입구조건으로 구분하여 구성하였고, 우측의 탭모델에 대한 창에는 주입프로세스 모델, 초기조건, 경계조건들에 대한 수치 데이터를 모델 탭크의 위치에 맞게 보여 주도록 구성하였다. 또한, 입력 데이터들은 Tank 201을 기준으로 하였으며, 본

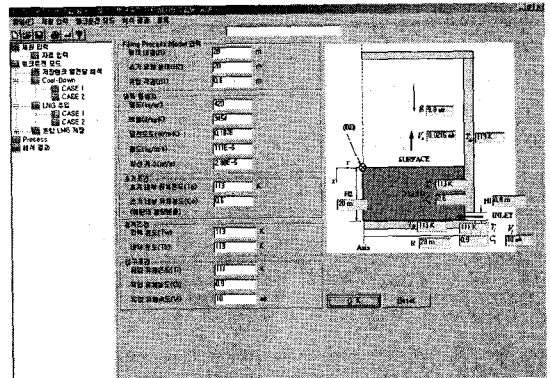


Fig. 5 Input window for Case 1 of Filling Process.

주입모델의 지배방정식인 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 메탄성분의 질량보존방정식을 토대로 하여 입력상자를 구성하였다.

여기서, 연속방정식은 식(3)과 운동량방정식은 식(4)와 같이 표현될 수 있으며, 에너지방정식은 식(5)에 난류열전도계수를 적용하여 사용한다. 그리고, 메탄성분에 대한 질량보존방정식은 다음과 같다

$$\rho \left( \frac{\partial C}{\partial t} + u_i C_{,i} \right) = (\rho \alpha C_{,i} - \rho \overline{u_i C})_{,i} \quad (7)$$

주입프로세스의 Case 2에 대한 입력화면은 초기 주입방향만 반경방향인 Case 1과 다른 축방향이고 나머지는 동일하다. 또한, 유입파이프 온도가 추가 되는 데 이것은 외벽온도와 동일한 것으로 간주하였다

주입프로세스 입력화면에 사용된 세부적인 데이터들은 Table 4와 같고 유체에 대한 물성치는 Table 3에서의 유체 물성치와 같고 확산계수만 추가된다.

Table 4 Input data of Filling Process mode.

Filling Process Model			
Radius	28.0m	Height	20m
Inlet dia.	0.6m		
Properties of fluid			
Diffusivity	2.88E-5m <sup>2</sup> /s		
Initial conditions			
Temp.	113K	Concent.	0.6
Boundary conditions			
Outer wall	113K	Ground	113K
Temp.	111K	Concent.	0.9
Velocity	10m/s		

## 2.6 혼합 LNG 저장 모드

LNG의 혼합저장지, 생산지와 저장시간에 따른 밀도차이가 발생되어 단일 탱크내에서 층화된 유체층이 서로 공존하는 경우가 발생되고, 이때, 외부 열유입으로 인해 서로 다른 온도와 농도 차이 때문에 열 및 물질전달이 이루어지면서 혼합이 이루어진다. 이런 현상을 규명하기 위한 목적으로 구성된 것이 혼합 LNG 저장 모드이다.

혼합 LNG 저장은 크게 Real Model과 Small

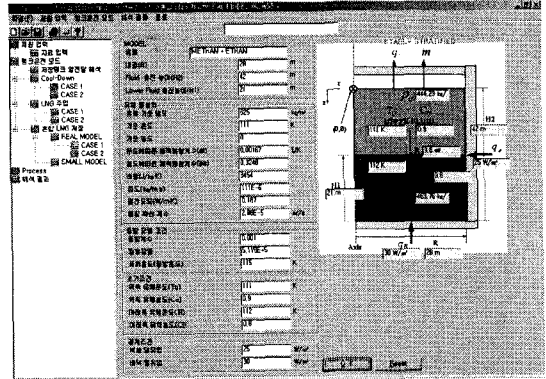


Fig. 6 Input window for Case 1 of Mixing LNG Storage.

Model로 메뉴를 구성하였다. 여기서 Real Model은 초기 불안정한 상태와 안정한 상태로 하여 Case 1과 Case 2로 구분하였다. Small Model은 자유계면에서의 증발모델무시와 측면에서의 열유입만을 고려한 모델이다. 혼합 LNG 저장 모드에 대한 입력화면은 Fig. 6와 같다.

Fig. 6의 입력조건들은 식(3)의 연속방정식, 식(4)의 운동량방정식, 식(5)의 에너지방정식, 식(7)에서 온도차에 의한 메탄의 확산을 무시한 확산방정식을 토대로 구성하였다. 단, 식(4)의 운동량

Table 5 Input data of Mixing LNG Storage.

Mixing LNG Storage Model			
Fluid	CH <sub>4</sub> +C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Radius	28m
T. Height	42m	B. Height	21m
Properties of fluid			
Ref. den.	625kg/m <sup>3</sup>	Ref. temp.	111K
Ref. con.	0		
Vol. expansion coeff. with temp.		1.67E-2 1/K	
Vol. expansion coeff with concent.		0.3248	
Evaporation Model			
Coeff.	0.001	L.H.	5.115E+5
Temp.	115K		
Initial conditions			
T. temp.	111K	T. con.	0.9
B. temp.	112K	T. con.	0.8
Boundary conditions			
Heat flux from wall		25W/m <sup>2</sup>	
Heat flux from slab		30W/m <sup>2</sup>	

방정식에는 부력항이 추가된다.

입력조건에 대한 세부적인 데이터들은 Table 5에 보여 준다. Case 2의 입력조건은 Case 1의 수치와 동일하며 단, 상부와 하부의 수치가 반대이다. Small Model에 대한 입력조건에는 증발모델에 대한 입력조건과 바닥에 대한 열유입이 존재하지 않는다.

### 2.7 프로세스

프로세스는 운전모드에 대한 상용코드의 작업진행에 대한 절차를 슬라이드쇼로 보여 주도록 하였으며, 크게 Fluent 프로세스와 Fidap 프로세스로 구분하였다.

Fluent 프로세스는 Fluent 상용코드를 기동하여 Case 파일과 Data 파일을 읽어들이고 각 절차에 따라 입력과정을 수행해서 결과를 얻게되고, Fidap 프로세스는 Fidap 상용코드를 실행시켜 Journal 파일을 읽어 들이고 물성치, 경계조건, 초기설정 등에 대한 입력을 수행하게 하고 계산결과를 얻는다.

### 2.8 결과출력

결과출력 화면에는 상용코드로 계산된 결과들을 파일로 받아 들여 보여 주도록 되어 있으며, 크게 그래프와 동영상으로 나누었다. 그래프 부분에는 온도장, 속도장, 그리고 농도장의 해석결과를 가시화하고 동영상 부분에도 동일하게 온도장, 속도장, 농도장의 해석결과를 보게 된다.

Tank 201에 대한 해석결과들을 불러 들인 예로 Fig. 7은 동영상의 농도장을 보여 주고 있다.

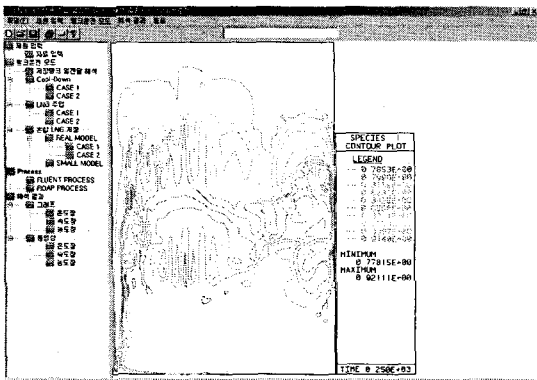


Fig. 7 Results display of concentration field at animation window.

## 3. 결론

본 연구결과인 종합 열유동 해석프로그램은 복잡한 유동양상과 열물성 변화를 보이는 LNG 저장탱크의 열유동 해석을 수행할 수 있는 프로그램으로서 LNG 저장탱크의 설계 및 운전에 직접적인 기여를 할 수 있다. 특히, 저장탱크 구조물에 대한 온도분포, 저장탱크의 Cool Down 프로세스, LNG 주입 및 혼합시 내부 혼합류, 그리고 저장 LNG의 열적 안정성 등에 관한 해석을 수행할 수 있고 가시화 할 수 있다.

따라서, 본 연구를 통하여 개발된 LNG 저장탱크의 종합 열유동 해석프로그램은 탱크의 운전모드별 열유동 해석의 자체 기술력 확보뿐만 아니라 세부결과의 데이터베이스화를 실현함으로써 연구내용의 문서화에 그치지 않고 LNG 저장탱크 관련 종사자들에게 직접적인 도움을 줄 수 있게 되었다.

## 후 기

본 연구는 한국가스공사의 연구개발비 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 한국가스공사, 1998, "운전지침서(2차 확장 설비)".
- (2) Heestand, J., Shipman, C. W. and Meader, J. W., 1983, "A predictive model for rollover in stratified LNG tanks", AICHE Journal, Vol. 29, No. 2.
- (3) Sarsten, J. A., 1972, "LNG stratification and rollover", Pipeline and Gas Journal.
- (4) 김효, 김세윤, 손영순, 1994, "층 분리된 LNG의 저장시 ROLLOVER 현상 예측에 관한 연구", 한국에너지공학회지, 제3권 제1호, pp. 95-101.
- (5) Chereskin, T. K. and Linden, P. F., 1986, "The effect of rotation on intrusions produced by heating a salinity gradient", Deep-Sea Resources, Vol. 33, No. 3, pp. 305-322.