

LNG 저장탱크의 종합 열유동 해석프로그램 개발

†김 호 연 · 최 성 희 · 박 영 · 이 정 환 · 윤 익 근 · 김 동 혁 · 하 종 만 · 주 상 우*
한국가스공사 연구개발원, *영남대학교
(2001년 5월 3일 접수, 2001년 6월 22일 채택)

Program Development on the Thermofluidodynamic Analysis of LNG Storage Tanks

Hoyeon Kim · Sunghee Choi · Young Bak · Junghwan Lee ·
Ikkeun Yoon · Donghyuk Kim · Jongmann Ha · Sangwoo Joo*
Korea Gas Corporation R&D Center
*Dept. of Mechanical Eng., Yeungnam University
(Received 3 May 2001 ; Accepted 22 June 2001)

요 약

100,000m³ 규모의 원통형 탱크에 저장되어 있는 초저온의 액화천연가스는 외부조건 및 운전모드에 따라 복잡한 유동양상과 열물성 변화를 보인다. 이런 현상은 LNG의 저장 및 운전조건과 탱크의 설계사양 및 열전달 특성에 크게 영향을 받으며, 또한 저장탱크내 LNG의 안정적 저장 및 공급에 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 연구에서는 LNG 저장탱크의 외부조건에 따른 2차원 열전달 해석, 시운전시 초기 상온상태의 LNG 저장탱크를 냉각하기 위한 Cool Down 프로세스, 그리고 탱크내 LNG의 유입 및 상승을 고려한 주입프로세스의 해석을 수행하였다. 또한, 혼합 LNG 저장에 대한 해석도 수행하였다. 이런 LNG 저장탱크내의 전반적인 열유동에 대한 해석을 토대로 가시화된 종합적인 열유동 해석프로그램을 개발하였다. 본 프로그램의 개발은 탱크내 저장된 LNG의 열적 안정성 해석의 기술력 확보뿐만 아니라 실탱크의 기본설계에 이용할 수 있게 되었다.

Abstract - Cryogenic LNG(Liquefied Natural Gas) which is stored in the cylindrical storage tanks of 100,000m³ has very complex flow phenomena and the changes of thermal properties with exterior conditions and operation modes. 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.

Key words : cryogenic LNG, thermofluid behaviors, Cool Down Process, Filling Process, Mixing LNG Storage, thermofluidodynamic analysis, thermal stability, LNG Storage Tank

I. 서 론

천연가스를 약 -162°C 로 액화시켜 저장하고 있는 LNG 저장탱크는 내경 57m, 높이 약 48m로 $100,000\text{m}^3$ 의 액화천연가스를 저장할 수 있는 원통형의 초대형 저장설비이다. 또한, 외부로부터의 열유입을 최소화하기 위한 단열과 보냉공간이 존재한다[1]. 그러나 대기 중에 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 열적 평형상태에 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[2~7].

우선적으로 LNG 저장탱크의 열전달 특성은 외부조건에 따른 복사와 대류에 의한 열유입의 동적 변화뿐만 아니라 LNG 저장탱크의 외조, 복합단열재의 구조, 열전도 특성, 그리고 내부 LNG 및 NG(Natural Gas)의 이상대류를 종합적으로 고려한 입체적 모사를 통하여 열분포를 해석할 필요성이 있다. 이는 내부유체의 유동형태 변화에 따라 실제 탱크 구조물의 세부적인 온도분포를 예측할 수 있도록 한다. 그리고 운전조건에 따른 열유동 해석은 LNG 저장탱크의 시운전시 Cool Down 프로세스에서 내부 구조물의 온도분포 해석, LNG 주입프로세스에서 유체역학적 해석, 그리고 혼합 LNG 저장에 대한 해석 등을 포함하고 있다.

현재, LNG 저장탱크에 관련된 혼합 유체유동 및 계면에서의 열물질전달 등에 대한 복합적인 연구는 기 수행한 바가 없다. 그리고 LNG 저장탱크의 국산화를 위한 기술개발의

전단계인 $1,000\text{m}^3$ 규모의 파일럿탱크의 설계 및 제작단계 수준인 현시점에서 파일럿탱크의 운전 및 scale factor의 규명을 위해서도 반드시 필요하다. 그러므로 LNG의 혼합거동을 열과 물질이동의 복합적인 해석에 대하여 전산모사를 수행해야 할 필요성이 대두되고 있는 것이다. 이는 탱크내 유동장과 온도분포에 따른 밀도분포 및 열량표준화 작업에도 필수적인 요소이다. 또한, 주입 LNG와 기 저장 LNG의 열물질의 혼합유동류 해석으로 시운전시 Cool Down 프로세스의 효율성을 평가할 수 있으며 상부, 하부, 혼합 주입설비의 경우에는 충상화방지를 위한 최적설계 기술 데이터를 제공할 수 있다. 게다가 자연충화현상의 규명 및 실제 탱크기준의 LNG 저장탱크 해석기술을 자체 개발함으로써 세부적인 해석결과를 가질 수 있다.

따라서, 본 연구는 초저온의 액화천연가스를 저장하고 있는 LNG 저장탱크의 열전달 해석과 주 운전모드인 Cool Down 프로세스, 주입프로세스, 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 해석프로그램을 개발하고자 한다.

본 프로그램의 개발은 탱크사양 및 저장조건별로 사용자 편의를 위한 가시화 프로그래밍을 수행할 수 있고 자료화합으로서 LNG 저장탱크의 기본설계에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 예상된다.

II. 프로그램 개발

2.1. 구성

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

여기서, 내부루틴은 본 프로그램이 자체적으로 수행이 가능한 부분으로 4단계로 구성

되어 있다. 제1단계는 탱크의 제원을 입력하고 제2단계는 LNG 저장탱크의 운전모드를 선택하도록 되어 있으며 제3단계는 프로세스를 수행하도록 되어 있는 데, 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 결과파일들을 받아서 화면에 보여주도록 구성되어 있고 온도장, 속도장, 농도장을 그래프나 동영상으로 볼 수 있게 되어 있다.

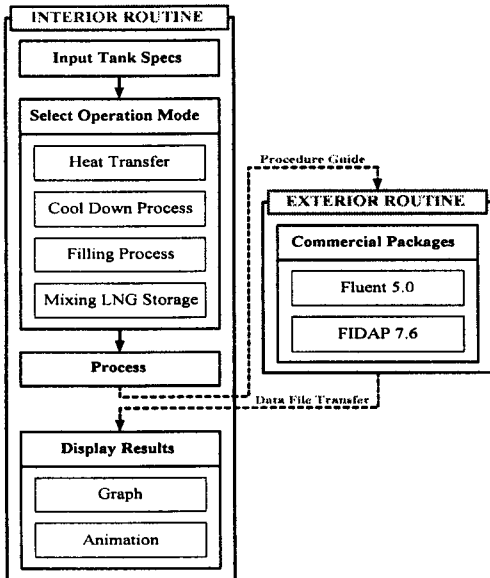


Fig. 1. Structural diagram of workflow.

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 수행하게 되고, 그 수행결과에서 생성된 결과파일들을 내부루틴에서 가시화하게 된다.

본 가시화 프로그램은 계산과정을 단독으로 수행할 수 없다는 단점을 가지고 있지만 비전문가가 LNG 저장탱크의 복잡한 열유동 현상을 쉽게 접근할 수 있도록 저장 및 운전 조건에 대한 간단한 입력화면을 통하여 상용 패키지의 입력절차를 가시화함으로써 LNG 저장탱크에 대한 해석을 수행할 수 있게 한다.

2.2. 탱크제원 입력 .

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

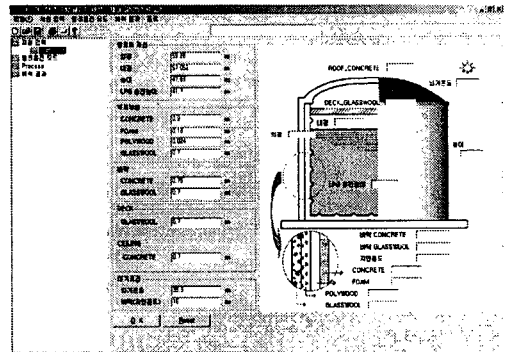


Fig. 2. Input window of tank specs.

Table 1. Specs of Tank 201.

탱크의 제원		벽 체 부	
외경	59.26m	콘크리트	0.900m
내경	57.05m	Foam	0.180m
높이	47.69m	Polywood	0.024m
LNG높이	41.70m	Glasswool	0.700m
바 닥 부		대 기 조 건	
콘크리트	0.75m	외기온도	35.3℃
Glasswool	0.70m	지면온도	16.0℃
천 정 부		현 수 지 붕 부	
콘크리트	0.70m	Glasswool	0.70m

2.3. 열전달

LNG 저장탱크의 열전달 해석은 탱크의 형상이 원통형인 것을 고려하여 2차원 y축 대칭인 모델로 결정하였다. 그리고 탱크 내외부에서의 대류 열전달계수는 전도 열전달계수에 비해 상대적으로 작고 탱크벽에서의 온도분포와 단열재를 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, α 는 열확산계수로 다음과 같다.

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

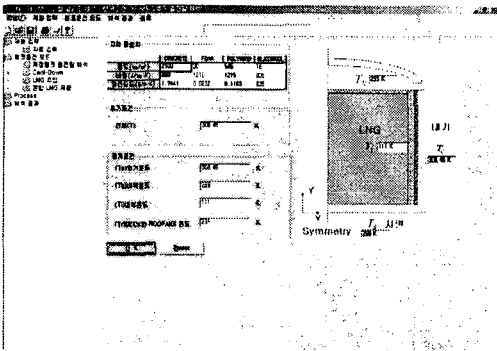


Fig. 3. Input window of heat transfer mode.

LNG 저장탱크의 열전달 입력화면에서 초기값으로 설정된 재료와 물성치 그리고 초기조건과 경계조건은 Tank 201를 기준으로 하였으며 그 값들은 Table 2에 보여 주고 있다. 여기서, 탱크의 초기조건은 저장 LNG온도인 111K으로 하였고, 경계조건으로 외기온

도는 308K, 지면온도는 289K, 현수지붕과 천정사이의 단열공간은 293K으로 초기화 되어 있다. 여기서, 정상상태시의 해석은 경계조건만을 가지고 계산하게 된다.

Table 2. Input conditions of heat transfer mode.

□재료의 물성치			
구 분	밀도 [kg/m ³]	비열 [J/kg·K]	열전도도 [W/m·K]
콘크리트	2,100	880	1.7441
Foam	30	1,210	0.0232
Polywood	545	1,215	0.1163
Glasswool	16	835	0.0465
□경계조건			
외기온도	308K	바닥온도	289K
내부온도	111K	단열공간	293K
□초기조건			
초기온도	111K		

2.4. Cool Down 프로세스 모드

Cool Down 프로세스는 LNG 저장탱크의 불활성가스 치환작업과 건조작업이 완료된 후 LNG를 하역하기 전에 상온 상태인 탱크 내부를 -155℃로 낮추는 공정이다. 이때 저장탱크 내부의 모든 기기 및 탱크에 포함된 모든 계통이 냉각되는 데 시간당 약 5~15℃의 온도강하율로 냉각되도록 LNG를 주입하고 Cool Down시 발생하는 증발가스를 증발라인을 통해 Flare로 방출된다. 이러한 작업은 약 36시간이 소요되며 탱크의 온도가 -155℃에 도달하면 현수지붕 밑의 온도는 약 -100℃가 된다. 또한 냉각방식에서도 Fig. 4의 (A)와 같이 상부에서 하부로 냉각하는 Top Cool Down 방식과 (B)에서처럼 하부에서 상부로 냉각하는 Bottom Cool Down 방식이 있다. 그러나 본 프로그램에서는 현재 Tank 201에 적용하고 있는 Bottom Cool Down 방식을 모델로 하여 Cool Down 프로세스를 해석하도록 하였다. 그리고 Bottom Cool Down 모델을 두 가지로 분류하였는데 하나는 중앙하부 유입을 동반한 상부 가장자리로 유출하는 것과 또 하나는 하부 가장자리 유입을 동반한 상부 중앙으로의 유출로 분류하여 Case 1과 Case 2로 나누어서 화면을 구성하였다.

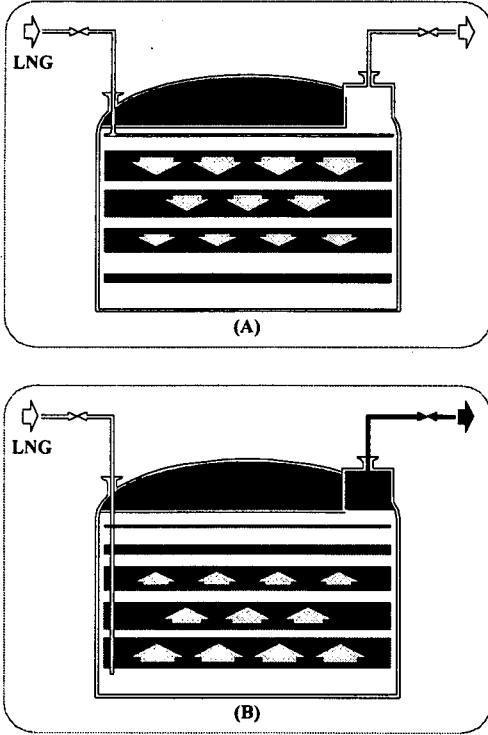


Fig. 4. Top Cool Down(A) and Bottom Cool Down(B) for LNG Tank.

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

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

운동량방정식은

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) + \rho g_i \quad (4)$$

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.

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

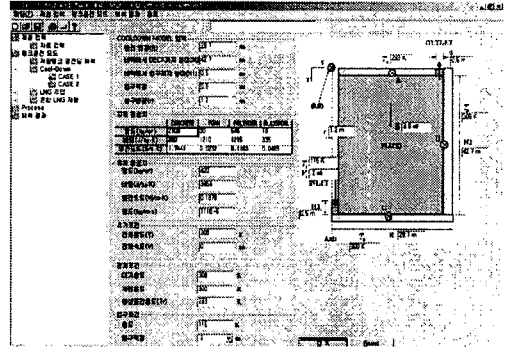


Fig. 5. Input window for Case 1 of Cool Down process

Case 1의 화면구성은 Fig. 5와 같으며 입력조건은 상기의 지배방정식들과 Tank 201를 축대칭 모델로한 기하학적 구조를 토대로 하여 Cool Down 모델, 재료물성치, 유체물성치, 초기조건, 경계조건, 그리고 입구조건으로 분류하여 입력하도록 하였다. 여기서 Cool Down 모델은 탱크형상에 대한 기하학적 데이터를 입력하도록 하였고 재료의 물성치는 Table 2와 동일하며 유체의 물성치는 포화온도 115K에서 메탄의 물성치를 사용하였다. 그리고 초기조건은 대기온도 308K로 균일하게 하였으며 경계조건은 속도와 온도에 관한 경계조건이 있는데, 속도에 관한 경계조건으로 모든 벽면에서 점착조건을 사용하였고 축대칭라인에서 반경방향속도는 0으로 하였다. 특히, 입구조건에서 축방향속도는 11m/s로 Cool Down시 최대유량 기준이다. 그리고 온도에 관한 경계조건으로 외벽은 대기온도로 일정한 온도 308K를 주었고 대칭라인에

서 열유속은 0으로 하였다. 그리고 유체와 고체가 닿는 부분에서의 온도 및 열유속은 연속인 것으로 하였다.

현재 Fig. 5의 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. 5와 동일하며 유입에서의 방향과 유출에서의 위치만 차이가 있고 다른 부분은 Case 1과 동일하다. 따라서 입구에서의 경계조건인 축방향속도만 반경방향속도로 바뀌게 된다. Fig. 6는 Case 2의 입력화면을 보여준다.

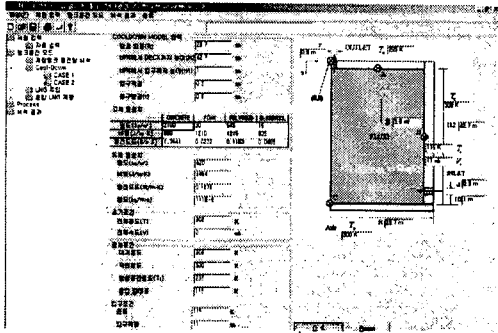


Fig. 6. Input window for Case 2 of Cool Down process.

Table 3. Input conditions of Cool Down.

Cool Down Model			
탱크의경	29.7m	입구직경	0.6m
내부높이	42.7m	출구직경	0.6m
유입높이	0.5m		
유체의 물성치			
밀도	420kg/m ³	열전도도	0.1878W/mK
비열	3,454J/kg·K	점도	111E-6 kg/m·s
초기조건			
온도	308K	속도	0m/s
경계조건			
대기온도	308K	지면온도	300K
단열공간	298K	입구온도	115K
입구속도	11m/s		

2.5. 주입프로세스 모드

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

주입프로세스의 Case 1에 대한 입력화면은 Fig. 7에 보여 준다. 중앙 탭에는 주입프로세스의 모델입력, 유체물성치, 초기조건, 경계조

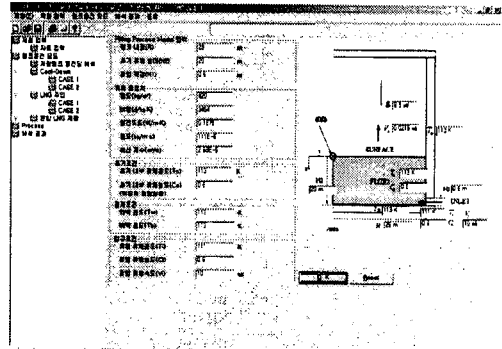


Fig. 7. Input window for Case 1 of Filling process.

건, 그리고 입구조건으로 구분하여 구성하였고, 우측의 탭모델에 대한 창에는 주입프로세스 모델, 초기조건, 경계조건들에 대한 수치 데이터를 모델 탭의 위치에 맞게 보여 주도록 구성하였다. 또한, 입력데이터들은 Tank 201을 기준으로 하였으며, 본 주입모델의 지배방정식인 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 메탄성분의 질량보존방정식을 토대로 하여 입력상자를 구성하였다.

여기서, 연속방정식은 다음과 같이 표현되며,

$$u_{j,j} = 0 \quad (7)$$

운동량방정식은

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} \right) = -p_{,i} + [\mu (u_{i,j} + u_{j,i}) - \rho \overline{u_i u_j}]_j + \rho g_i \quad (8)$$

와 같고, 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_j T_j \right) = (kT_j - \rho c_p \overline{u_j T})_j \quad (9)$$

그리고, 메탄성분에 대한 질량보존방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho \left(\frac{\partial C}{\partial t} + u_j C_j \right) = (\rho a C_j - \rho \overline{u_j C})_j \quad (10)$$

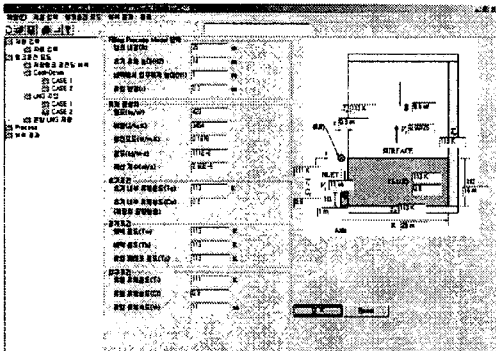


Fig. 8. Input window for Case 2 of Filling process.

Table 4. Input conditions of Filling Process.

Filling Process Model			
탱크반경	28.0m	초기높이	20m
유입직경	0.6m		
유체의 물성치			
확산계수	2.88E-5m ² /s		
초기조건			
온도	113K	농도	0.6
경계조건			
외벽온도	113K	지면온도	113K
유입온도	111K	유입농도	0.9
유입속도	10m/s		

주입프로세스의 Case 2에 대한 입력화면은 Fig. 8에 보여 주고 있는 데 초기 주입방향만

반경방향인 Case 1과 다른 축방향이고 나머지는 동일하다. 또한, 유입파이프 온도가 추가되는 데 이것은 외벽온도와 동일한 것으로 간주하였다. 주입프로세스 입력화면에 사용된 세부적인 데이터들은 Table 4와 같다. 여기서, 유입속도는 최대유량 11,000m³/h으로 계산된 속도이다. 특히, 유체에 대한 물성치는 Table 3에서의 유체 물성치와 같고 확산계수만 추가된다.

2.6. 혼합 LNG 저장 모드

LNG의 혼합저장시, 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 Model로 메뉴를 구성하였다. 여기서 Real Model은 초기 불안정한 상태로 상부 밀도가 높고 하부 밀도가 낮은 경우로 Case 1으로 하였고 초기 안정한 상태로 상부 밀도가 낮고 하부 밀도가 높은 경우로 Case 2로 하여 두가지로 구성하였다. Small Model은 자유계면에서의 증발모델무시와 바닥에서의 단열조건으로 측면에서의 열유입만을 고려한 모델이다.

Case 1은 자유계면에서의 증발모델을 포함하고 있는 것으로 Fig. 9에서 보여 주고 있다. 여기서, 입력조건들은 연속방정식, 운동량방정식, 에너지방정식, 메탄의 확산방정식을 토대로 구성하였다. 지배방정식은 벡터로 표현하였으며, 연속방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (11)$$

그리고, 운동량방정식은

$$\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u - (\rho - \rho_0)g \quad (12)$$

와 같고, 에너지방정식은 다음과 같다.

$$\rho_0 C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T \quad (13)$$

그리고, 온도차에 의한 확산을 무시한 메탄의 확산방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_0 \left(\frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \nabla C \right) = \rho_0 a \nabla^2 C \quad (14)$$

입력조건에 대한 세부적인 데이터들은 Table 5에 보여 준다. 상하부 유체의 높이는 Tank 201의 최대충진높이를 이등분하였다. 유체의

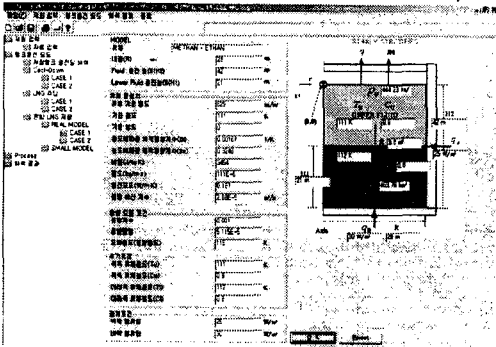


Fig. 9. Input window for Case 1 of Mixing LNG Storage.

비열, 점도, 열전도도, 확산계수는 Table 3, 4와 동일하다. 특히, 유체의 물성치중 밀도를 제외하고는 모두 일정하다고 보았다. 메탄 및 에탄의 밀도에 대한 입력값은 온도만의 함수로 다음과 같이 선형화 하였다.

$$\rho_{CH_4}(T) = -1.421T + 581.736 \quad (15)$$

$$\rho_{C_2H_6}(T) = -1.0526T + 744.842 \quad (16)$$

특히, 혼합물의 밀도는 식(12)의 부력항을 제외한 모든 영역에서 일정하다고 보았고 부력항에는 밀도변화를 온도와 농도의 함수로 보았다.

Case 2의 입력조건은 Case 1의 수치와 동일하며 단, 상부와 하부의 값이 정반대의 값을 갖는다. Small Model에 대한 입력조건에는 증발모델에 대한 입력조건과 바닥에 대한 열유입이 존재하지 않는다.

Table 5. Input conditions of Mixing LNG Storage.

Mixing LNG Storage Model			
유체	CH ₄ +C ₂ H ₆	탱크반경	28m
상부높이	42m	하부높이	21m
유체의 물성치			
기준밀도	625kg/m ³	기준온도	111K
기준농도	0		
온도에 의한 체적팽창계수			1.67E-2 1/K
농도에 의한 체적팽창계수			0.3248
증발모델			
증발계수	0.001	증발잠열	5.115E+5
증발온도	115K		
초기조건			
상부온도	111K	상부농도	0.9
하부온도	112K	하부농도	0.8
경계조건			
벽체 열유입		25W/m ²	
바닥 열유입		30W/m ²	

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 읽어들이어 각 절차에 따라 입력과정을 수행하는 화면, 후처리를 위한 화면 등으로 순차적으로 진행할 수 있도록 구성되어 있다. 그리고 Fidap 프로세스는 Fidap 상용코드를 실행시켜 Journal 파일을 읽어 들이고 물성치, 경계조건, 초기설정 등에 대한 입력을 수행하게 하고 계산결과를 얻을 수 있도록 순차적으로 진행과정을 보여 준다. 프로세스 내부에 구성된 슬라이드쇼에 의해 사례별로 비전문가가 상용코드의 전 계산과정을 수행할 수 있도록 하였다.

2.8. 결과출력

결과출력 화면에는 상용코드로 계산된 결과들을 파일로 받아 들여 보여 주도록 되어 있으며, 크게 그래프와 동영상의 두 부분으로

구성하였다. 그래프 부분에는 온도장, 속도장, 그리고 농도장의 해석결과를 가시화하도록 하였고 동영상 부분에도 동일하게 온도장, 속도장, 농도장의 해석결과를 볼 수 있도록 하였다.

Tank 201에 대한 해석결과들을 불러들인 예로 Fig. 10은 그래프의 속도장을 보여 주고 있고 Fig. 11은 동영상의 농도장을 보여 주고 있다.

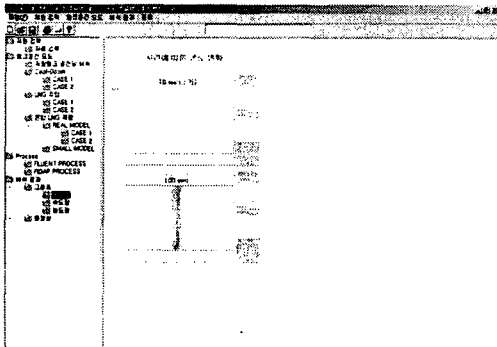


Fig. 10. Results display of velocity field at graph window.

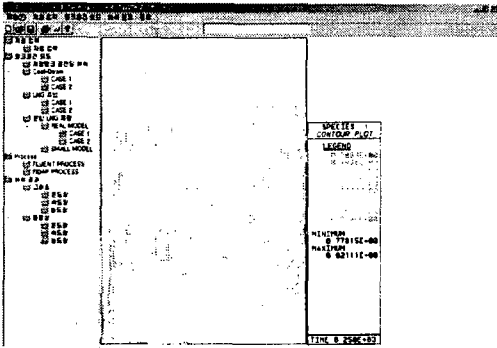


Fig. 11. Results display of concentration field at animation window.

III. 결 론

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, 저장

탱크의 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 세부결과와 데이터베이스화를 실현함으로써 연구내용의 문서화에 그치지 않고 LNG 저장탱크 관련 종사자들에게 직접적인 도움을 줄 수 있게 되었다.

감 사

본 연구는 한국가스공사의 연구개발비 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

사 용 기 호

- T : Temperature
- t : Time
- x : Spatial coordinate
- y : Spatial coordinate
- k : Thermal conductivity
- C_p : Specific heat of constant pressure
- u : Velocity of x-direction
- p : Pressure
- g : Gravity acceleration
- C : Concentration

그 리 이 스 문 자

- α : Thermal diffusivity coefficient
- ρ : Density
- μ : Viscosity
- δ : Kronecker delta
- σ : Stress
- ρ_0 : Reference density

참 고 문 헌

- [1] 한국가스공사, "운전지침서(2차 확장 설비)", 1998.
- [2] J. Heestand, C.W. Shipman, and J.W. Meader, "A predictive model for rollover in stratified LNG tanks", AIChE Journal, Vol. 29, No. 2, 1983.
- [3] J.A. Sarsten, "LNG stratification and rollover", Pipeline and Gas Journal, 1972.
- [4] 김효, 김세윤, 손영순, "층 분리된 LNG의 저장시 ROLLOVER 현상 예측에 관한 연구", 한국에너지공학회지, 1994, 제 3권 제1호, pp.95-101.
- [5] T.K. Chereskin and P.F. Linden, "The effect of rotation on intrusions produced by heating a salinity gradient", Deep-Sea Resources, 1986, Vol. 33, No. 3, pp.305-322.
- [6] T. Munakata, N. Lior, and I. Tanasawa, "A study of double-diffusive rollover in cylindrical enclosures", Proceedings of the ASME Heat Transfer Division, 1995, pp.279-291.
- [7] J. A. Sarsten, "LNG Stratification and Rollover", Pipeline and Gas Journal, Sep. 1972, pp.37-39.