



피로 및 내구성을 고려한 LNG 저장탱크의 수명평가 프로그램 개발

†김정훈 · 김영구 · 조영도

한국가스안전공사 가스안전연구원

(2016년 8월 10일 접수, 2017년 6월 5일 수정, 2017년 6월 16일 채택)

The Development of Life Evaluation Program for LNG Storage Tank considering Fatigue and Durability

†Jung-Hoon Kim · Young-Gu Kim · Young-Do Jo

Institutes of Gas R&D, Korea Gas Safety Corporation, Eumseong, 369-811, Korea

(Received August 10, 2016; Revised June 5, 2017; Accepted June 16, 2017)

요약

LNG 산업의 핵심시설인 LNG 저장탱크는 주로 9% 니켈강형 내조와 프리스트레스 콘크리트의 외조로 구성 되어 있다. 1896년 상업운전 이후 내조의 피로와 외조의 내구성 저하로 인한 구조물 성능 열화의 위험성 증대에 선제적으로 대응할 수 있도록 수명평가 프로그램이 필요하다. 이 연구는 LNG 저장탱크의 내조에 대해 피로평가와 외조의 내구성(탄산화, 염해)을 평가할 수 있는 수명평가 프로그램을 개발하였다. 내조 탱크는 3가지의 주요 시나리오를 정의하여 구조해석과 마이너 손상법칙이 적용된 피로수명 해석이 수행된다. 외조 탱크의 탄산화 평가는 이산화탄소 함량과 침투 깊이 데이터를 이용하여 콘크리트 피복두께에 따른 탄산화 진전을 예측한다. 외조 탱크의 염해 평가는 다양한 입력조건 고려와 신뢰도 있는 결과를 도출하기 위해 공개 프로그램인 Life-365 프로그램에 연계하는 방안으로 구축하였다.

Abstract - The LNG storage tank as core facility of LNG industry is mainly composed of the inner tank of nickel 9% steel and the outer tank of prestressed concrete. To respond proactively increased risk of structure performance deterioration due to fatigue of the inner tank and durability reduction of the outer tank, life evaluation program for LNG storage tank is needed. In this study, life evaluation program for LNG storage tank was developed to assess fatigue of the inner tank and durability(carbonation and chloride attack) of the outer tank. By defining the main three scenarios in the inner tank, the fatigue life analysis is conducted from structural analysis and Miner's damage rule. Carbonation progress of the outer tank is predicted according to thickness of cover concrete by using carbon dioxide contents and data of penetration depth. To consider a variety of input conditions and a reliability in results of chloride attack, the evaluation of chloride attack for the outer tank is constructed through Life-365 program of open source.

Key words : LNG storage tank, fatigue, carbonation, chloride attack, durability, life evaluation program

1. 서론

국내에 최초로 건설되고 운전 개시된 평택인수기지 LNG 저장탱크의 경우 상업운전 이후 설계보

증 수명(약 25년)이 도래하고 있으며 최근에 탱크 운영사, 규제기관, 시공사 등 모든 이해당사자가 LNG 저장탱크의 잔여수명과 수명관리에 관심을 가지고 있다 [1-3]. 또한 일본이나 유럽의 경우 25년이 경과된 LNG 저장탱크에 대해 대부분 자체적으로 계속운전여부를 평가하여 40~50년 이상 운전하고 있는 경우도 많다. 이와 같이 LNG 저장탱크

†Corresponding author:jhkim223@kgs.or.kr

Copyright © 2017 by The Korean Institute of Gas

의 경제적이고 안전적 운영을 위해서 수명평가 시스템이 필요하다.

국내에서 많이 건설되어 운영하고 있는 9% 니켈강형 내조를 가지는 LNG저장탱크는 완전방호식 LNG저장탱크로서 내조탱크와 외조탱크가 각각 독립적으로 LNG를 저장할 수 있는 기능을 갖는 이중구조의 탱크를 말한다 [1, 4-5]. 정상운전 시에 초저온의 LNG를 직접 접촉, 저장하는 내부탱크의 재료로는 초저온 성능이 우수한 9% 니켈강이 사용된다. 그리고 외부탱크는 프리스트레스 콘크리트 구조물로서 내부탱크의 파손 시에 2차적으로 LNG를 저장할 수 있도록 설계되어있다 [5].

LNG 저장탱크의 9% 니켈강형 내조는 운전에 따른 최고, 최저 액위에 대한 유체정압, 자중, 가스압력 및 펄라이트 단열재 압력 등에 영향을 받으며 반복적으로 하중을 받게 되면 취약한 위치에서 피로의 영향으로 균열이 발생할 수 있는 위험이 있기 때문에 피로수명 평가가 이루어져야 한다.

가스인수의 용이성을 위해 해수에 직·간접적으로 영향을 받는 LNG저장탱크 외조는 해양환경에 존재하는 콘크리트 구조물로 가장 중요한 내구성 저하 요인은 염소이온 침투에 의한 철근 부식이다. 콘크리트 구조물 내구성의 주요 저하요인 중 다른 하나는 탄산화로 산일화와 도시화의 영향으로 대기 중 CO_2 농도가 점점 높아짐에 따라 LNG 저장탱크 외조 콘크리트에 탄산화에 의한 내구성 저하이다. 따라서, LNG 저장탱크의 외조탱크에 대해서 염해평가와 탄산화 평가를 하여 유지관리를 해야한다 [6-7].

이 연구에서는 LNG 저장탱크의 수명평가를 위해서 내조탱크에 대해 피로수명평가, 외조탱크에 대해서는 내구성평가의 일환으로 탄산화 및 염해평가가 가능한 수명평가 자동화 프로그램을 개발하였다.

II. LNG 저장탱크 수명평가 프로그램 구성

LNG 저장탱크 수명평가 프로그램의 Main Menu Template는 Fig. 1과 같고 5가지 Menu로 구성된다. Material DB 메뉴는 Mechanical Analysis(피로수명평가)와 Civil Analysis(탄산화 및 염해 평가)를 위한 물성값을 정의하며, Mechanical Analysis메뉴는 내조의 피로해석을 수행하고, Civil Analysis메뉴는 외조탱크의 내구성(탄산화, 염해) 해석을 수행한다. 수행된 결과는 Report메뉴를 통하여 인쇄가 되며 해석을 위한 관련 기본 Code내용은 Code메뉴에서 검토할 수 있다.

Material DB 메뉴는 LNG 저장탱크에 필수적인



Fig. 1. Main menu template

로 들어가는 재료물성치 DB를 구축하며 초기 값이 저장 되어 있으며 필요에 따라 사용자가 물성치값을 변경 가능하도록 프로그래밍 되었다.

Mechanical Analysis 메뉴는 기계분야의 해석으로 Abaqus 구조해석 프로그램과 FEMFAT 피로수명해석 프로그램이 연계되어 자동화 해석이 된다. FEMFAT 소프트웨어는 널리 사용되고 있는 FEM 프로그램인 NASTRAN, ABAQUS, ANSYS, I-DEAS, MEDINA, PATRAN, PRO/MECHANICA 등의 결과를 기반으로 다양한 영향인자를 고려하여 피로해석을 할 수 있고 많은 실험데이터 비교를 통해 신뢰성이 검증된 프로그램이다. Abaqus 구조해석 프로그램을 통해 응력 및 변위해석이 이루어진다. 구조해석 결과를 기반으로 FEMFAT 피로해석 프로그램이 연계되어 피로수명 계산이 이루어진다.

Civil Analysis 메뉴는 탄산화(Carbonation) 해석과 염해(Chloride Attack) 해석이 수행되고 사용자가 다양한 조건을 입력해야 하는 염해 해석의 경우에는 공개 프로그램인 Life-365 [8]를 실행시키고 별도의 입력 메뉴없이 사용자가 다양하게 해석을 진행하여 결과를 지정된 출력 파일로 저장하여 Report 메뉴에서 Post-Processing을 진행하도록 하였다.

Code 메뉴는 LNG 저장탱크의 최종 평가 및 판단을 하기 위하여 기존의 API, ASTM 및 AWS 등을 용이하게 찾아볼 수 있도록 하였다.

Report 메뉴는 LNG 저장탱크 수명 시뮬레이션 결과를 Post-Processing 하도록 하였다.

2.1. Material DB 메뉴

재료 물성치 DB는 초기값 물성치를 저장하였으며 LNG 저장탱크의 수명평가에 큰 영향을 미치기

피로 및 내구성을 고려한 LNG 저장탱크의 수명평가 프로그램 개발

때문에 사용자가 다시 한번 검토를 할 수 있도록 하였다. Fig. 2는 LNG 저장탱크 재료물성치의 초기

Material	Elastic Modulus	Poisson's Ratio	Expansion Coeff.	Density	Thermal Conductivity
9% Nickel steel	2.10E+11	0.3	9.21E-06	8000	30.115
Concrete & screed	2.80E+10	0.2	1.00E-05	2350	2
Form glass800	1.20E+09	0.2	6.97E-06	135	0.043
Perlite	1.00E+09	0.2	1.00E-05	64	0.042
Perlite Con. 1000	2.80E+10	0.2	1.00E-05	1000	0.27
PUF	2.45E+06	0.4	6.9E-05	55	0.0232
Resilient Blanket	1.20E+06	0.2	6.97E-06	16	0.059

Fig. 2. The default values of material properties

Code Group	Code No.	Description
ALL	API STD 620	Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Sto...
API	A.103M-05a	Standard Specification for Forged or Rolled Alloy and Stainless...
API	A.312M-05a	Standard Specification for Seamless, Welded, and Heavily Col...
API	A.333M-05	Standard Specification for Seamless and Welded Steel Pipe to...
API	A.334M-04a	Standard Specification for Seamless and Welded Carbon and...
API	A.353M-04	Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Alloy Steel...
API	A.358M-05	Standard Specification for Electric-Fusion-Welded Austenitic ...
API	A.370-05	Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testin...
API	A.414M-05	Standard Specification for Steel Strand, Uncoated Seven-Wire ...
API	A.421M-05	Standard Specification for Uncoated Stress-Relieved Steel Wr...
API	A.520M-01	Standard Specification for Forged or Rolled 8 and 9% Nickel Al...
BS	B.444-04	Standard Specification for Nickel-Chromium-Molybdenum-Co...
F.50M	F.50M	Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Mate...
AWS	AWS D1.1:2010	Structural Welding Code - Steel
BS EN 1479	BS EN 1479	Installation and equipment for liquefied natural gas - Design of...
BS EN 14620-1	BS EN 14620-1	Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat...
BS EN 14620-2	BS EN 14620-2	Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat...
BS EN 14620-3	BS EN 14620-3	Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat...

Fig. 3. Code menu for the program

Material	Elastic Modulus	Po Ratio	Coeff.	Density	Thermal Conductivity
9% Nickel steel	210000000000	0.3	9.21E-06	8000	30.115
Concrete & screed	280000000000	0.2	1E-05	2350	2
Form glass800	1200000000	0.2	6.97E-06	135	0.043
Perlite	1000000000	0.2	1E-05	64	0.042
Perlite Con. 1000	28000000000	0.2	1E-05	1000	0.27
PUF	2450000	0.4	6.9E-05	55	0.0232
Resilient Blanket	1200000	0.2	6.97E-06	16	0.059

CPO		CP3	
Safety Factor	0.238	Safety Factor	0.569
1 Year Cycle	48	1 Year Cycle	48
n	10000	n	10000
Damage	8.397	Damage	1.422

Fig. 4. Report menu for the program

값을 보여주며 LNG 저장탱크를 구성하는 중요 재료인 9% Nickel Steel, Concrete & Screed, Form Glass 800, Perlite, Perlite Con. 1000, PUF, Resilient Blanket의 7가지 재료의 물성치를 DB화 하였다.

2.2. Code 메뉴

LNG 저장탱크의 수명평가를 위하여 사용자가 검토하고 확인해야 할 Code 파일들을 링크시켜 놓았다. Code 파일들은 API, ASTM, AWS, BS, NFPA의 총 5가지 Code별 파일들을 저장하였으며 Fig. 3은 전체 Code 파일을 나타낸다.

2.3. Report 메뉴

LNG 저장탱크 수명평가의 최종 Report를 위한 Summary(요약보고서)는 Fig. 4와 같다. 해석에 적용된 재료물성치 값들을 표시하도록 하였으며 최종 피로수명 해석 결과인 안전계수(Safety Factor)와 피로 수명(Cycle, Damage)을 표시하도록 하였다.

Fig. 4는 Summary 결과를 인쇄가 가능한 형태나 보고서 형태로 저장하는 프로세스를 의미하며 pdf file, CSV file, Excel 97-2003, Rich Text Format, TIFF, Web Archive, XPS Document의 총 7가지 보고서 형태가 가능하도록 하였다.

III. 수명평가 대상 LNG 저장탱크

이 연구의 프로그램에서 수명평가 대상은 현재 단계에서 이미 건설되어 운전 중인 16만5천kl LNG 저장탱크에 대한 것이며 상세한 사양은 Table 1과 Fig. 5와 같다.

Table. 1. General specifications of LNG storage tank for life evaluation

탱크 분류	지상식(Above-ground), 완전방호식(Full Containment) 탱크
탱크 용량	165,000 m^3
내부탱크	9% 니켈강 (9% Ni Steel Plate)
외부탱크	프리스트레스트 콘크리트 (PS Concrete)
내부탱크 지름(m)	80.2
내부탱크 높이(m)	36.5
외부탱크 지름(m)	82.6

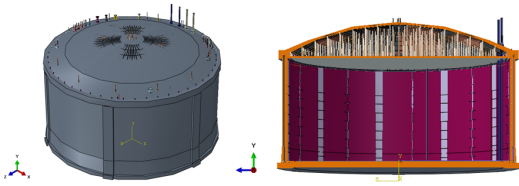


Fig. 5. Analysis model of life evaluation for LNG storage tank

IV. 기계분야의 내조 탱크 피로수명 평가 해석

기계분야 해석(Mechanical Analysis) 메뉴는 크게 다음 2가지의 프로세스로 구분된다. 유한요소해석 프로그램을 적용한 응력(구조/열) 해석 및 산출된 응력 결과를 기반을 한 피로수명 해석이다. 다양한 유한요소해석 프로그램 중에서 LNG 저장탱크 해석을 위하여 Abaqus 프로그램을 이용하였으며 피로수명 해석은 FEMFAT 프로그램을 활용하여 계산하였다. 상세한 해석 및 내용은 이승림 외 논문에서 확인을 할 수 있다[3]. Abaqus와 FEMFAT을 자동화 해석을 하기 위해서 batch command를 적용하였다.

4.1. 내조탱크의 해석 시나리오

내조탱크 수명평가와 관련하여 3가지 시나리오를 정의하고 구조해석 및 피로해석을 수행하였다.

4.2. 내조탱크의 구조해석

Abaqus 해석을 자동화하기 위해 batch command를 적용하면 어떠한 해석도 자동화할 수 있다. 특히 Abaqus는 Python이라고 불리는 Script 언어를 채택하였기 때문에 모델링 및 해석 프로세스를 모두 Python언어로 모듈화를 시켜놓고 batch command를 적용하였다.

Abaqus 해석을 통하여 사용자가 필요한 해석 정보는 온도 해석 결과, 응력 해석 결과, 변형 해석 결과의 3가지이며 온도 해석인 경우에는 온도 전체 해석 결과와 온도가 가장 크게 영향을 주는 Corner protection 부분을 확대한 2가지 온도 해석을 Post-Processing화 하였다. 응력 해석인 경우에는 온도 해석인 경우와 동일하게 응력 전체 해석 결과와 응력이 가장 크게 영향을 주는 Corner protection 부분을 확대한 2가지 응력 해석을 Post-Processing화 하였다. 변형 해석인 경우에는 변형 전의 형상과 변형 후의 형상 변화에 관심이 있기 때문에 변형 전후의 전체 해석 결과와 역시

Table. 2. Life evaluation scenarios of the inner tank

구분	주요조건
시나리오 1 (9% Ni강 내부탱크)	- LNG loading 및 unloading 조건에서 수두압, 자중, 단열재 압력하중 고려 - LNG 탱크 운전주기 사용
시나리오 2 (펌프 Column 및 지지구조물)	- 펌프 진동 및 LNG loading/unloading 조건을 고려
시나리오 3 (코너프로텍션)	- LNG 자중, 정수압, NG압력 및 Perlite 단열재 압력 고려

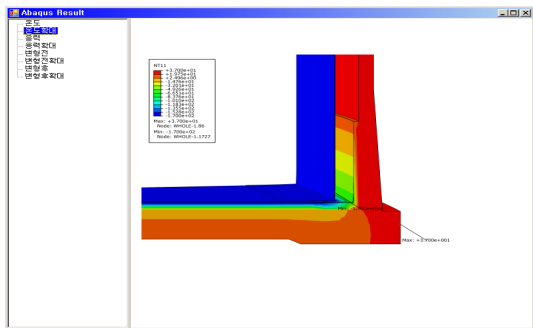


Fig. 6. Enlarge result of temperature analysis in Abaqus

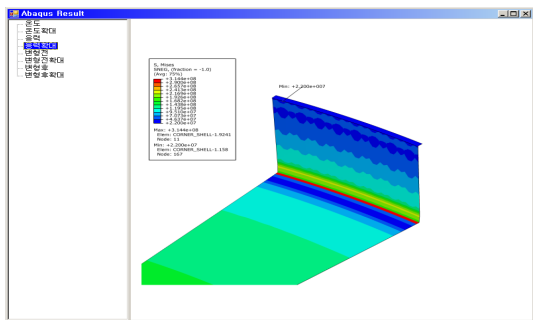


Fig. 7. Enlarge result of stress analysis in Abaqus

변형이 가장 크게 발생하는 Corner protection 부분을 확대한 2가지 변형 전후 해석을 Post-Processing화 하였다. Fig. 6은 Abaqus 온도 해석의 Corner Protection 확대 결과를 보여준다. Fig. 7은 Abaqus 응력 해석의 Corner Protection 확대 결과를 보여준다.

4.3. 내조탱크의 피로해석

FEMFAT 해석도 자동화 해석을 위해 batch command를 적용하였다. 하지만 FEMFAT에서는 batch command를 실행하기 위하여 fff라는 입력 파일을 생성하며 fff 입력 파일에 용접 조건과 같은 상세한 내용이 포함되어 있다.

피로파괴는 피로하중에 의한 일이 재료가 흡수할 수 있는 일의 총량에 도달했을 때 일어난다. 피로손상은 최대응력이 피로한도 응력보다 큰 경우에만 일어난다는 마이너 손상법칙(Miner's Rule)과 피로해석을 통해 구한 Damage 값을 이용하여 피로 수명을 예측하였다. 마이너 식은 $D=n/N$ 이며 여기서 D는Damage, n은 실제 하중 사이클 수, N은 파단시 수명 사이클 수를 의미한다 [3].

FEMFAT 해석은 자동화를 통하여 2가지 해석이 가능하다. 첫 번째로 안전계수(Safety Factor)를 구하기 위하여 FEMFAT을 한번 해석하고 난 후에 Damage와 피로수명을 계산하기 위한 두 번째 해석을 진행한다.

Fig. 8은 FEMFAT 해석 결과를 보여주며 제일 위의 해석 결과가 1차 FEMFAT 해석을 통하여 구한 안전계수(Safety factor)를 의미하며 위에서 4번째 해석 결과인 Damage가 2차 FEMFAT 해석을 통하여 구한 값이다. 설계자는 FEMFAT 해석 결과인

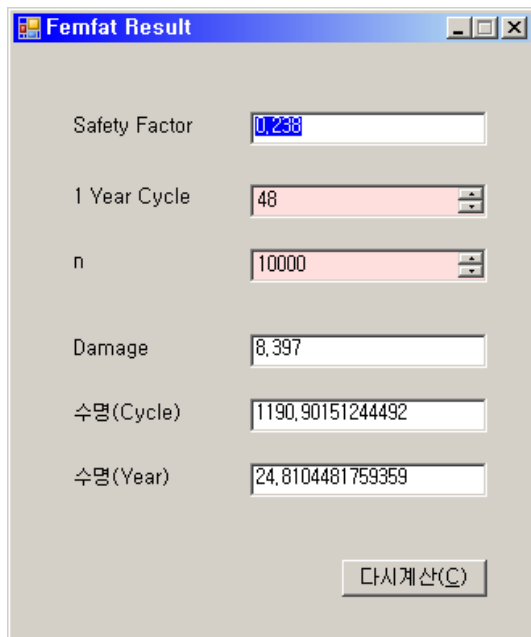


Fig. 8. Analysis result of FEMFAT.

Damage와 실제 운용 조건인 1 Year Cycle(1년 동안의 하중반복 횟수)과 n(실제 하중 사이클 수)의 값을 입력하면 사이클 수(Cycle)와 연도로 피로수명을 계산할 수 있다.

V. 토목분야의 외조 탱크 내구성 평가 해석

토목분야 해석(Civil Analysis) 메뉴는 프리스트레스 콘크리트로 구성되는 외조 탱크에 대해서 내구성 평가인 탄산화 해석 및 염해 해석을 수행한다.

5.1. 외조탱크의 탄산화 해석

탄산화 해석은 엑셀 프로그램을 활용하여 개발하였다. 엑셀 프로그램을 활용한 중요한 이유는 사용자가 탄산화 해석을 위하여 구축한 엑셀 파일 안에 존재하는 모든 수식을 직접 이용할 수 있다는 점이다. 추후 탄산화 프로그램뿐만 아니라 기타 자체 프로그램(In-house program)도 엑셀기반으로 개발한다면 아주 용이하게 LNG 저장탱크 수명평가 프로그램에 모두 Plug-In할 수가 있다.

Fig. 9는 탄산화 엑셀 프로그램 GUI를 나타내며 탄산화 1에서는 이산화탄소 함량(CO₂%)과 침투 깊이(mm)를 매개변수화 하였으며 사용자는 주어진 염해 조건을 고려하여 이산화탄소 함량과 침투 깊이를 설정한다. 탄산화 1에서 필요한 입력인 이산화탄소 함량과 침투 깊이를 입력하면 사용자는 오른쪽 아래에 있는 속도계수 계산 버튼을 눌러야 입력된 이산화탄소 함량과 침투 깊이가 적용이 되어 탄산화 2의 속도계수를 계산하게 된다 [2]. 계산된 속도계수를 가지고 미리 정의한 피복두께에 대한 잔여 수명을 계산하여 표시된다. 탄산화 2에서도 오른쪽 아래에 있는 결과계산 버튼을 누르면 잔여 수명이 계산되도록 하였다. 이 프로그램에서 실행되는 탄산화 해석에 대한 자세한 과정은 이승림 외 [2] 및 김정훈 외 [6]의 문헌에 설명되어 있다.

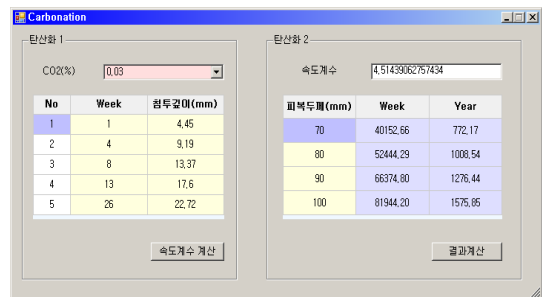


Fig. 9. GUI of carbonation analysis



Fig. 10. Run window of Life-365 program

5.2. 외조탱크의 염해 해석

염해 해석을 통한 염해 수명을 예측하기 위해서는 염해확산계수, 표면염화물량, 입계염화물량 등을 입력하여 잔여 수명을 예측한다. 염해 해석을 위해 공인된 공개 프로그램인 Life-365를 선정하였다. 하지만 염해 해석을 진행하기 위해서는 다양한 입력 조건들을 경우에 따라 입력해 주어야 하기 때문에 개발한 LNG저장탱크 수명평가 프로그램에서 매개변수화를 하는 것보다는 오히려 Life-365의 다양하고 자유도가 높은 기능을 적용하여 염해 해석을 진행한 후에 염해 해석 결과를 Report로 전환하는 프로세스를 구축하는 것이 타당하다고 판단하였다 [8].

Fig. 10은 Main menu에서 염해 해석을 실행했을 경우 자동으로 Life-365 프로그램이 실행되도록 프로그래밍한 결과를 보여준다. 사용자는 주어진 염해 조건에 따른 염해 해석을 Life-365에서 실행한 후에 해석 결과를 저장하고, 저장된 결과에서 Report에 필요한 이미지들을 추출하여 Report를 자동으로 인쇄한다.

이러한 염해해석을 통해 콘크리트 내부의 PS 강재나 철근 부식의 평가도 간접적으로 할 수 있으며 피복깊이 근처까지 염화물이 침투 되었다면 강재부식이 되기 전에 보수조치를 하여 유지관리를 해야 한다.

VI. 결 론

LNG 저장탱크에 대해서 내조탱크의 구조해석 및 피로수명 평가에 대한 자동화 해석 및 외조탱크 탄산화 및 염해평가가 가능한 프로그램을 개발하였다.

개발 프로그램의 Main Menu는 5가지 Menu로 구성된다. Material DB는 Mechanical Analysis와 Civil Analysis를 위한 물성값을 정의한다.

Mechanical Analysis는 내조탱크에 대해 3가지 주요 시나리오로 내조탱크, Column 및 지지구조물 및 코너프로텍션과 관련된 구조해석과 피로수명 해석을 수행한다. 피로수명 예측은 마이너의 손상법칙을 적용하였다.

Civil Analysis는 외조탱크에 대해 탄산화 및 염해 해석을 수행한다. 탄산화 해석은 이산화탄소 함량(CO_2 %)과 침투 깊이(mm)를 입력하면 속도계수를 계산하여 콘크리트 피복두께에 따른 탄산화 진전을 예측한다. 염해해석은 다양한 입력 조건 고려와 보다 신뢰도 높은 결과를 도출하기 위해 공인된 공개 프로그램인 Life-365프로그램을 연동해서 적용하는 방안으로 구축하였다.

앞의 메뉴에서 수행된 결과는 Report를 통하여 인쇄가 되며 해석을 위한 기본 Code 파일은 Code 메뉴에서 검토할 수 있다.

개발된 프로그램은 내조와 외조를 동시 평가가 가능한 LNG 저장탱크 구조물의 종합적 건전성 평가 프로그램으로 운영자가 LNG 저장탱크의 유지관리를 하는데 있어서 편리성 및 신속성 등의 장점이 있다. 또한, 에너지 저장 핵심설비의 수명연장을 통한 LNG supply chain의 건전성 확보로, 원활한 수급 지원을 통한 에너지안보 구축에 기여할 것이라고 판단된다.

개발된 프로그램은 LNG 저장탱크 외조에 대해서는 내구성만을 고려한 것이며 향후에 구조적 안전성 평가 및 내진 성능 평가 등이 추가된 LNG 저장탱크 통합 건전성 평가 프로그램을 개발 할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 플랜트기술고도화사업 LNG 플랜트사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] Lee, S. R., Kim, H. S., " The comparative risk assessment of LNG tank designs using FTA", *KIGAS*, 16(6), 48-53, (2012)
- [2] Lee, S. R., Song, I. H., Kim, H. S., "Service Life Assessment and Restrain Methods of Carbonation Attack on PC Outer Wall of LNG Storage Tanks", *KIGAS*, 18(2), 73~80, (2014)
- [3] Lee, S. R., Lee, K. M., Kim, H. S., "Prediction of Fatigue Life for 270,000 kl LNG Storage

- Tank According to Shape of Corner-protection Knuckle", *KIGAS*, 18(2), 69~72, (2014)
- [4] BS EN 14620-1~5, *Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0°C and -16 5°C*, CEN, (2006)
- [5] Yoon I. S., Lee Y. W., Hong S. H. and Lee Y. W., "Finite Element Analysis of Membrane for Liquefied Natural Gas," *Trans. of the KSME*, 18(10), 2797-2804, (1994)
- [6] Kim, J. H., Kang, S. K., Kim, Y. G., Jo, Y. D., "An Assessment of Carbonation and Chloride Attack for Outer Concrete of LNG Storage Tanks", *Korean Journal of Hazardous Materials*, 3(1), 15-23, (2015)
- [7] Cho, M. S., Noh, J. M., Kwon, K. J., "Development of Integrated Structural Life Management System in Nuclear Power Plants", *KCI concrete journal*, 22(6), 61-64, (2010)
- [8] Bentz, E. C. and Thomas, M. D. A., *Life-365 Service Life Prediction Model and Computer Programe for Predicting the Service Life and Life-Cycle Costs of Reinforced Concrete Exposed to Chlorides*, Life365 Users Manual, (2008)