

# LNG 저장탱크의 잔여수명평가 방안

이승림, 권부길, 이승현, 이정표  
한국가스안전공사 가스안전연구개발원 제품연구실

## A Scheme for Residual Life Assessment of LNG Storage Tanks

S.R. Lee, B.K. Kwon, S.H. Lee, J.P. Lee  
Rproducts R&D Division, Korea Gas Safety Corporation

### 1. 서 론

1986년 평택인수기지가 운전을 시작한 지 약 20여년이 되었고, 그 동안 LNG 설비의 운전과 유지관리에 있어서 많은 경험을 축적해 오고 있다. LNG 인수기지의 핵심설비인 LNG 저장탱크의 경우 설계보증수명이 약 25년으로 수명평가 및 수명연장 문제에 당면해 있으며, 노후화 현상의 발생빈도 및 심각성은 점차 증가할 것으로 예상된다. 따라서 노후 LNG 저장탱크의 신뢰성을 유지하면서 장기간 효과적으로 사용하고 운전비용을 절감하기 위해서 사용적합성평가(fitness for service) 등의 진단을 통해서 LNG 저장탱크를 포함한 설비의 잔여수명평가 및 수명연장 기술 개발이 절실히 요구된다.

본고에서는 외국의 LNG 저장탱크 수명연장 사례를 통해 우리나라의 사용적합성평가 및 잔여수명평가 기술 개발 및 대책 시행을 제언하고자 한다.

### 2. 해외 LNG 저장탱크 수명평가 사례

일본 도쿄가스는 총 29기의 지하식 저장탱크를 운영하고 있는데, 그중 가장 오래 된 것은 약 30년 전에 건설되었다. 높은 수준의 신뢰성과 낮은 수준의 비용으로 인수기지를 계속 운영하기 위해서는 오랜 기간 동안 운전 중인 저장탱크의 노후화 정도를 산정하고 필요한 대책을 준비하면서 계속 운전이 요구된다. 지붕이나 멤브레인과 같은 지하식 저장탱크의 주요 구조적 요소들의 노후화는 표면화되지 않았다. 그러나 피로나 기타 원인들로 인한 손상은 운전과 안전에 큰 위험요소가 될 것이다.

이 요소들을 재래식 기술로서 점검하고 진단하기 위해서는 그 저장탱크들을

공기로 채우고 정기보수(overhaul)할 필요가 있다. 이러한 방법은 막대한 비용과 장기간의 저장탱크 운전 정지를 수반하고 운영에 큰 손실을 가한다. 이에 따라서 일본의 도쿄가스는 저장탱크의 사용정지 없이 점검하고 진단하는 기술을 개발해서 실제 저장탱크들에 이를 적용하고 있다.

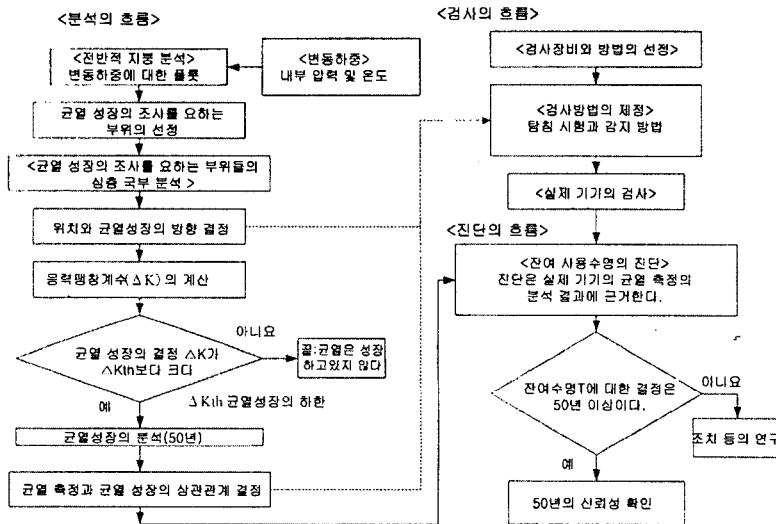
## 2.1 지붕 진단 기술

지금까지는 저장탱크를 사용하면서 지붕의 안쪽에 있는 필릿 용접부와 같은 부분들의 노후화의 정도를 평가하기가 어려웠다. 도쿄가스의 경우 그러한 부분들의 노후화의 진단을 위해서 분석과 검사의 기술적 수단을 확립하였고 실제 저장탱크들에 이를 적용하였다.

### 2.1.1 진단의 개요

지붕 노후화의 진단은 다음의 절차로 실시했으며 <그림 1>은 전반적인 진단의 절차를 나타낸다.

- 피로 균열 성장의 분석 결과에 근거한 진단 필요 부분의 선정
- 실제 저장탱크의 점검
- 평가(잔여 사용수명의 진단)



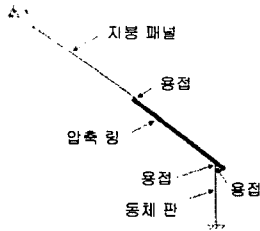
<그림 1> 지붕 진단 절차

### 2.1.2 피로 균열의 성장을 산정하기 위한 분석

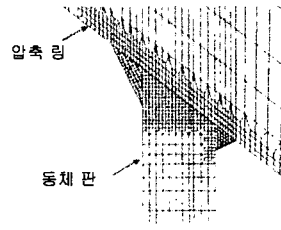
#### (1) 지붕의 전반적 분석

먼저, FEM 분석(그림 2 참조)에 의하여 높은 응력 변동(stress fluctuation)이 있는 부분들을 취하기 위하여 지붕 전체에 대하여 축대칭 모델(axisymmetric

model)을 사용하였다. 입력된 하중들은 내부압력, 사하중+부착물 하중, 구조재 변위 그리고 온도 하중이다. 내부 압력과 온도는 입력된 하중에 종속한다. 이 분석을 통해 지붕의 외곽 둘레에 큰 응력진폭(stress amplitude)이 있다는 것을 확인하였다.



<그림 2> 전체 지붕 분석 모델



<그림 3> 외곽 지붕 둘레에 대한 심층분석 샘플

## (2) 지붕의 심층 분석

다음에 상세한 응력 진폭을 도출하기 위해서 <그림 3>과 같은 지붕 외곽 둘레의 상세한 모델에 대한 FEM 분석을 실시했고, 균열의 존재 가능성이 있는 위치들을 선정하였다.

## (3) 균열 성장의 분석

심층 분석에서 균열 존재 가능성이 있는 위치들에 대해서 균열의 성장을 평가하기 위해서 FEM 응력분석과 균열분석(K 값을 위하여)을 실시하였다. 균열이 성장하고 있을 수도 있다고 인정한 위치들에 대하여 50년의 사용수명을 가정하여 균열성장의 양을 계산하였다.

### 1) 부하 조건

통상 운전 중에 내부압력과 온도의 변동 양상에 비추어 보아, 두 가지의 부하 조건 즉 설계하중과 실제(역사적) 운전하중에 대하여 분석을 수행하였다.

### 2) 분석 방법

균열 선단의 응력팽창계수(stress expansion coefficient)( $\Delta K$ )가 지붕의 심층분석용 모델에 적합하다고 판단하여 선택한 초기 균열 깊이(a)에 대한 플롯(plots)을 포함한 모델을 사용하여 계산하였다. 균열 성장의 가능성을 판단하기 위해서 그 결과를 하한응력팽창계수(lower limit stress expansion coefficient)( $\Delta K_{th}$ )와 비교하였다.

균열이 성장하고 있을 수 있다고 판단한 위치들에 대해서, 균열 깊이(a)를 바꾸고  $\Delta K$ -a 관계를 얻기 위해서 FEM분석을 실시한 후, 50년 운전기간 동안의 성장량을 계산하기 위해서 재료 내의 균열 성장의 속도에 관한 자료를 사용하였다.

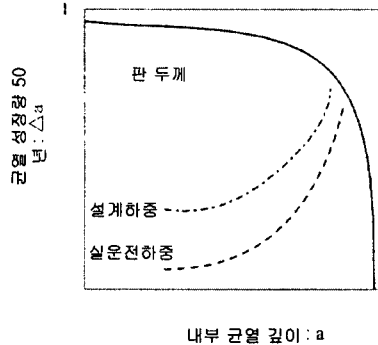
$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^n$$

여기서 C, n = 상수

이들 da/dN-ΔK(Paris 법칙)와 ΔK-a관계를 사용하여 하중 조건의 기본에 대하여 단계별 계산(step calculation)을 실시하였다.

### 3) 분석 결과

<그림 4>는 한 실제 사례의 분석 결과를 나타낸다. 이것은 하중 조건의 각 경우에 대한 플롯과 함께 지붕 들레의 용접선 상의 균열의 성장량을 나타낸다.



<그림 4> 균열 성장 곡선(분석의 결과)

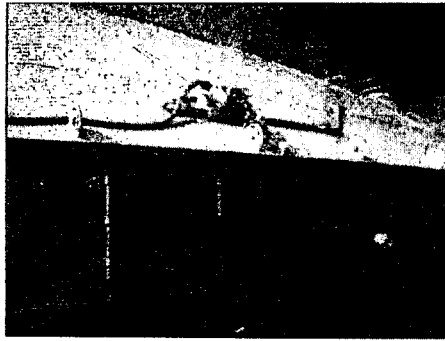
## 2.1.3 검사 방법의 제정과 실제 기기의 검사

### (1) 검사방법의 제정

위에서 기술한 분석을 통하여 선택한 부위들에서 균열 측정의 검사는 초음파 검사로 실시하였다. 지붕의 들레에 있는 준결함(quasi-flaw)이 있는 시험편 하나를 준비하여 이 시험을 실시하였다. 이 시험 결과에 근거하여 부위의 각 유형에 대해서 검출프로브(detection probe)와 감지방법의 최적의 조합을 선택했고 실제 기기에 대한 검사를 실시하였다.

### (2) 실제 기기의 검사

이 검사의 범위가 광범위하기 때문에 결함의 위치들을 선정하기 위해서 대략적인 탐지를 실시하였다. 대략적인 검사의 결과로부터 선정된 탐지수준을 넘는 위치들에 대해서 결함을 측정하기 위한 정밀검사를 실시하였다. 결함의 측정치는 측정된 자료의 자동 이미지 처리를 통해 얻었다. <그림 5>는 자동 감지기로 실제 기기를 검사하는 것을 나타내고 있다.



<그림 5> 실제 기기의 검사

#### 2.1.4 잔여 사용수명의 진단

잔여 사용수명은 실제 기기에서 검출한 균열의 측정치와 그 분석 결과를 근거로 하여 문제가 된다고 판단되는 측정치로부터 평가하였다. 평가의 결과 현재와 같은 방법으로 향후 50년 동안 계속 운전하더라도 피로로 인한 지붕 손상의 가능성은 없다고 판단하였다.

### 2.2 LNG 저장탱크용 잠액식 관측장치(submersible observation unit)의 개발과 실제 기기への 적용

분해검사를 하지 않고 저장탱크 내의 멤브레인을 점검할 목적으로, 도요가스는 LNG 속에 잠길 수 있는 내부 관측 장비를 개발하였다. 동 장비를 활용해 노화된 저장탱크의 내부를 점검한 결과 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

#### 2.2.1 잠액식 관측장비의 특징

도요가스가 개발한 잠액식 관측장비의 특징은 다음과 같다. 이 장치는 소형이며 경량이고 취급이 쉽다. 이 때문에 이 장치는 지진이나 기타 비상사태 시 단시간 내에 저장탱크의 내부를 점검하기 위하여 사용될 수 있다.

- LNG액 내에서도 사용 가능
- 최소 6 인치 크기의 노즐을 통하여 저장탱크 내에 삽입할 수 있는 소형
- 순수한 인력으로 관측할 수 있는 소형 및 경량
- 준비와 재가동을 포함하여 약 1 주 이내에 내부 점검을 할 수 있는 능력

#### 2.2.2 멤브레인 관측 결과

2000년도 이래 새로 개발한 장치들이 저장탱크의 건설 연도와 멤브레인 모델의 유형을 고려하여 멤브레인을 점검하는데 사용되어 왔다. 새로 개발한 장치들을 이용해 멤브레인에 비정상적인 변형이나 기타 유사한 문제들이 없음을 확인할 수 있었다. <그림 6>과 <그림 7>은 멤브레인 점검 시의 사진을 보여주고 있다.



<그림 6> 저장탱크 내부 멤브레인   <그림 7> 바닥 멤브레인의 팽창

### 3. 국내 LNG 저장탱크 사용적정성 및 잔여수명 평가 접근법

#### 3.1 결함 분류

모든 사용 적정성(fitness for service)과 잔여 수명 평가(residual life assessment)는 결함의 분류로부터 시작된다. 이론적으로 결함의 세부 사항은 많은 검사를 통해 수집되며 신뢰성 있는 검사 방법을 사용해 측정해야 한다. 결함 정보의 특징과 신뢰도는 평가 결과의 특징과 신뢰도와 직접적인 관련이 있다. 발견된 결함의 형태(균열성 결함, 일반 감육, 국부 감육, 피팅 등)는 사용되는 평가 방법을 결정하는데 중요하다. 여러 검사간의 결함 크기 차이는 향후 잔여수명을 평가하기 위해 사용되는 결함의 부식률이나 성장속도를 결정하는데 중요하게 작용한다.

검사 데이터의 정확성은 평가의 정확성을 결정하는데 중요 인자가 된다. 현재 결함 크기의 오차는 현재 운전에서 구성 성분의 잔여안전율(remaining safety margin)에 큰 영향을 준다. 결함 성장속도에 있어 오차는 최종 폐기일(final retirement date)을 계산하는데 큰 불확도(uncertainty) 범위에서 연별로 축적된다. 이 불확도는 계산된 잔여 수명시간에 첨부된 확률(probability)로서 나타난다.

평가의 중요 부분은 결함이 왜 나타나는지를 확실히 이해하는 것이다. 원인의 가능성은 제작 불량, 부식, 침식 및 기계적인 손상이라 할 수 있고 이를 이해함으로써 사용 적정성 평가에 신뢰를 가지게 된다. 잔여 수명 평가에 있어서 어떻게, 그리고 왜 결함이 진행되는 지에 대한 명확한 이해가 중요하다. 즉, 결함이 지금까지 보이는 속도로 진행을 계속 할 것인가? 저장 유체나 유체 조건의 변경은 결함 진행속도를 완전히 바꿀 수 있어, 모든 잔여 수명 평가에서는 반드시 고려되어야 한다. 끝으로 구성 요소의 노화 메커니즘 이해를 확실히 하기 위하여 부식과 손상 검토를 수행한다.

#### 3.2 금속 구조와 구성 요소의 결함 평가

석유 및 가스화 화학공장에서 주로 쓰는 평가 코드는 발견된 결함(균열성 결함, 라미네이션, 블리스터, 일반 부식, 국부 부식, 피팅)의 대부분을 다루는 API

579 이다. 정확한 평가 접근은 근본적으로 해당 결함의 형태와 API 579에 의존한다. 따라서 결함 분류작업 후 다음으로 해야 할 과제는 코드의 어느 부분이 쓰이게 될 지를 결정 및 문서화하고 선정된 작업을 수행하여야 한다.

균열에 관해서는 API 579가 오랫동안 사용 되어 왔던 이전의 코드(BS PD 6493, BS7910 등)와 깊은 상관이 있고, 관련 기업의 기술이 개발되면서 발전되어 왔다. 코드 내에서 다루는 상세한 파괴공학에 대한 접근이 잘 이해되고 타당할지라도 구성 요소에서 발견된 실제 균열성 결함(용접 균열, 초저온 균열, 블리스터 외면 균열, 블리스터 정상 균열, 수소 충전이나 황화수소(H<sub>2</sub>S) 사용조건에서의 재료에서 발견되는 순차 수직 균열)에 제외된 기술을 사용하려고 해야 한다.

### 3.3 콘크리트 구조물의 결함 평가

현재까지 LNG 저장탱크의 콘크리트 기초 및 외부탱크 구조의 결함 평가에 대해 규정하는 국내·외 규격은 없다. 올바르게 설계되고 건설되었음을 전제할 때 이런 콘크리트 구조물은 금속 탱크보다 오래가서 매우 긴 수명을 지닐 것이라는 것을 경험으로 쉽게 알고 있다. 콘크리트 강철 보강재 손상은 콘크리트 구조물에 일어날 수 있는 가장 심각한 피해이고, 이는 구조물이 기능을 수행할 수 없도록 할 수도 있다. 예로서, 약해진 외부 콘크리트 격납 시스템의 경우 강한 외부충격에 견딜 수 없거나, 기초의 파괴는 지지된 탱크에 붕괴를 가져 올 수 있다.

일반적으로 콘크리트 자체의 피해는 보강재의 피해와 노출이 일어나지 않는 한(콘크리트 체적의 손실이 크지 않는 한) 심각하지 않다. 따라서 콘크리트 구조물에 영향을 줄 수 있는 문제점들은 강재 보강재가 노출되어 결국 부서져 나가는 낮은 질의 콘크리트와, 콘크리트의 화학적 성질 자체가 저급해 강재 보강재에 충격을 줄 수 있는 콘크리트, 그리고 침강, 지진 활동, 혹은 지반의 동결로 인해 발생하는 동결부상(frost heave) 때문에 구조물을 지지하는 지반이 균열을 일으켜 움직이는 것을 들 수 있다.

그래서 콘크리트 구조물의 평가는 그 형상과 심각성(severity)을 결정하기 위하여 금속 구조물과 함께 결함의 분류를 요한다. 비록 X선 촬영이나 레이저 기술을 사용하더라도 동 검사의 데이터는 항상 가시적이다. 콘크리트 구조물에 뒤틀림이나 운동의 측정방법은 일일이 명시 되어야 한다(아마도 상시 모니터링을 해야 할 것이다). 이들 정보로부터 형상과 파손 심각성에 대한 평가가 이루어지고, 보수방법이 결정 된다. 결함의 본질은 잔여 수명을 평가하는 데에 계산적인 방법을 적용하는 것이 가능하지 못하다는 것이다. 그러나 잔여 수명 측정은 경험, 관찰된 파손의 특성, 그리고 보수 활동을 기본으로 하여 이루어질 수 있다.

#### 4. 결 론

일본 도쿄가스는 최소 50년 이상의 운전수명 확보를 목표로 LNG 저장탱크의 수명연장을 위한 설비별 진단기술을 개발하고 현장에 적용함으로써 LNG 저장탱크의 수명을 연장하고 있다. 이러한 사례 연구를 통해 우리나라의 경우도 LNG 저장탱크를 포함한 주요 LNG 설비들에 대한 안전도 수준을 유지하면서 인수기지의 운영비를 더욱 낮추려는 목표를 설정하고 노화되고 있는 설비를 위한 대책의 시행과 관련 기술의 개발을 시작해야 할 시점이다.

#### 5. 참고 문헌

- (1) "Cases of Diagnoses and Life Extension Measures of LNG Facilities at Tokyo Gas Negishi and Sodegaura Receiving Terminals", Tokyo Gas Co., Ltd, LNG 2004
- (2) "Fitness for Service and Residual Life Assessment of LNG Storage Tanks", AEA Technology, 2004
- (3) "Aging of installations at LNG Terminals", WGC 2003
- (4) "Guidelines and Commentary on Fatigue Design for Steel Structures", Japanese Society of Steel Construction(JSSC)