

# 지상식 멤브레인 LNG 저장탱크의 방류독 기능 연구

이 승 립, 조 지 환, 권 부 길

한국가스안전공사 가스안전시험연구원 제품연구실

## A Study on the Function of Dike of Above-ground Membrane type LNG Storage Tanks

Seung-Lim Lee, Ji-Hwan Jo, Boo-kil Kwon

Products R&D Division, Gas Safety Technology R&D Center, Korea Gas Safety Co.

(Received 00 September 2003 ; Accepted 00 September 2003)

### 요 약

현행 가스법상 지상식 LNG 저장탱크에 있어서 일정 용량의 저장탱크 주위에는 액상의 가스가 누출된 경우에 그 유출을 방지할 수 있는 방류독(Dike) 또는 이와 동등 이상의 효과가 있는 시설을 설치하도록 규정하고 있어, 실제로 모든 지상식 LNG 저장탱크에 대해서 별도의 방류독 설치를 의무화하고 있다.

또한, 예외규정으로 국제기준(international codes and standards)에 의해 설계되는 저장탱크는 심의를 통해 방류독 기능을 인정할 수 있도록 하고 있다.

외국의 경우 LNG 저장탱크는 일반적으로 자국내 법령보다는 국제기준에 의해 건설됨으로써 1차 탱크로부터 일정거리의 둘레에 방류독이 필요한 단일방호식 저장탱크 이외에 이중방호식, 완전방호식(full-containment) 및 멤브레인식(membrane) 저장탱크의 경우 외부(콘크리트, 강재)탱크가 방류독 기능을 가지고 있어 별도의 방류독이 필요없는 구조로 규정하고 있다.

멤브레인 LNG 저장탱크의 경우 프랑스, 일본 및 한국이 설계기술을 보유하고 있고, 최근 프랑스 및 한국에서 별도의 방류독 없는 지상식 멤브레인 저장탱크 건설이 추진되고 있으나 양국 모두 자국법의 방류독 규정에 의해 건설의 장애요소로 작용하고 있다.

따라서 지상식 멤브레인 LNG 저장탱크의 방류독 기능에 대한 각국의 법령 및 기준을 조사하고, 방류독 일체형 저장탱크(완전방호식 및 멤브레인 저장탱크)의 형식별 안전성 평가 자료를 비교·검토함으로써 방류독 일체형 멤브레인 저장탱크의 국내 도입의 타당성을 검토하고자 하였다.

조사결과 유럽, 미국 및 일본에서는 이중벽 LNG 저장탱크의 경우 콘크리트 외부탱크가 방류독 기능을 가지는 것으로 규정하고 있으며, 특히 EN 1473과 제정중인 prEN 265002에서는 멤브레인 저장탱크의 경우 내부 멤브레인 탱크 누출시 단열

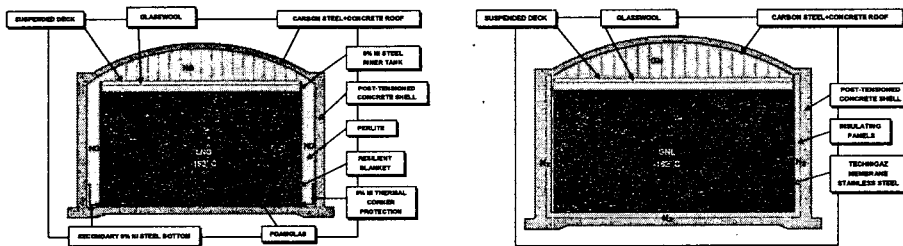
시스템과 함께 외부 콘크리트 탱크가 액밀성 및 기밀성을 동시에 가지는 것으로 별도의 방류둑이 불필요함을 규정하고 있다.

프랑스 및 일본의 방류둑 일체형 LNG 저장탱크에 대한 위험성 평가 결과를 검토한 결과 멤브레인 저장탱크와 완전방호식 저장탱크는 안전성 차원에서 거의 동일한 것으로 나타났다.

따라서 국내에서 개발한 지상식 멤브레인 LNG 저장탱크 설계모델에 대한 안전성 제고 및 안전성 평가 등을 통해 객관적인 안전성 근거가 확보된다면 동탱크의 경우에도 완전방호식 LNG 저장탱크와 같이 외부콘크리트 저장탱크의 방류둑 기능인정이 가능할 것으로 판단된다.

## 1. 서 론

지상식 LNG 저장탱크의 경우 1960년대에 건설이 시작된 이래, 70년대 후반까지는 단일방호 형태가, 70년대 중반부터 80년대 후반까지는 주로 이중방호 형태가 건설되었고, 80년 중반부터는 완전방호식 저장탱크와 멤브레인 저장탱크가 건설되기 시작하였으며, 현재까지의 기술개발 상황, 안전성 및 경제성 개선 측면에서 향후 방류둑 일체형 저장탱크(완전방호식 저장탱크 및 멤브레인 저장탱크)가 LNG저장탱크 시장을 주도할 것으로 예상된다. <그림 1>에 방류둑 일체형 저장탱크의 개략도를 나타내었다.



<그림 1> 완전방호식 LNG 저장탱크와 멤브레인 LNG 저장탱크 개략도

지상식 저장탱크 시장에 있어 자립식 강재(9% Ni강 등) 저장탱크의 경우 기준화된 국제규격을 통해 세계적으로 약 50여기가 운전중인 반면 멤브레인 기술은 특정회사의 특허라는 한계로 인해 12기만이 프랑스(2기)와 한국(10기)에 건설되어 운전중에 있다.

국내의 경우 완전방호식 저장탱크는 외부 프리스트레스트 콘크리트 저장탱크의 방류둑(dike) 기능을 인정받아 별도의 방류둑이 없는 형태로 통영생산기지에 총 10기(14만kℓ 용량)가 건설중에 있다.

또한, 한국가스공사에서는 약 6년 간(1996.12~2002.6)의 LNG저장탱크 국산화개발사업을 추진하여 상용 9% Ni강식 및 멤브레인(membrane) LNG 저장탱크 설계를 국산화하였다.

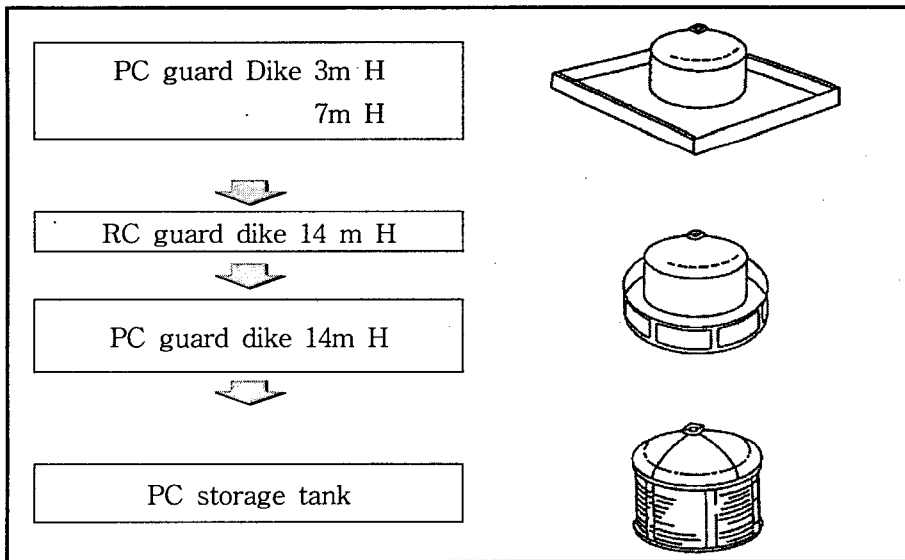
국내 기술로 설계된 9% Ni강식 저장탱크의 경우 통영생산기지의 #6~10호기에 적용

하였고, 국산 멤브레인 저장탱크도 현장 적용을 목전에 두고 있다.

상용화를 앞두고 있는 지상식 멤브레인 저장탱크의 경우, 유럽규격(EN)에서는 외부콘크리트 저장탱크가 방류독 기능을 갖는 방류독 일체형 저장탱크 구조로 규정하고 있으나 자립식 내부탱크를 가지는 완전방호식 저장탱크에 비해 안전성이 떨어진다는 선입견 등이 있어 동 저장탱크의 국내 도입을 위해 콘크리트 외부탱크의 방류독 기능 보유여부 및 안전성에 대한 조사연구를 통해 국내도입의 타당성 검토가 필요한 시점이다.

## 2. 방류독 관련 해외 규격 비교

다음의 <그림 2>는 지상식 LNG 저장탱크의 방류독 변천 과정을 간단하게 나타낸다. 방류독의 경우 안정성(증발을 최소화) 및 경제성 측면에서 발전하였는데 초기 낮은 형태의 방류독에서 점점 탱크와의 거리는 가까워지고 높이는 높아지는 것을 알 수 있다. 최근에는 완전방호식과 같이 탱크와 단열공간을 사이에 두고 밀착되어 누출시 발생증기까지 제어가능한 형태로 발전하고 있다.



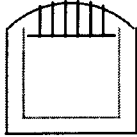
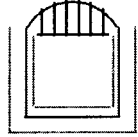
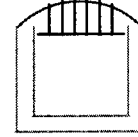
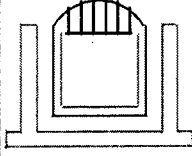
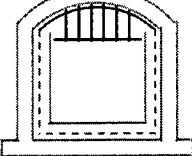
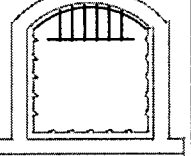
<그림 2> 방류독 변천사 개요(오사카가스엔지니어링)



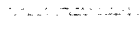
### 2.1 유럽규격(BS EN 1473 / prEN 265002)

유럽의 대표적인 LNG 저장탱크관련 코드인 BS EN 1473과 prEN 265002를 중심으로 유럽 규격의 방류독에 대한 규정을 살펴보면 다음과 같다.

단일방호식 원통형 저장탱크와 구형저장탱크의 경우 개별적 저류지(impounding area)를 2차 저장탱크로 요구하고 있는 반면, 이중방호식, 완전방호식 및 멤브레인 LNG 저장탱크의 경우에는 외부(강재 및 콘크리트)탱크가 이차방호를 위한 방류독 기능을 가지므로 별도의 방류독은 필요없는 것으로 규정하고 있다.

다음의 <그림 3>은 유럽규격에서 규정하고 있는 저장탱크 종류별 설계 개념과 방류독관련 요구사항을 나타낸다.

구분	단일방호	이중방호	원전방호	멤브레인
강재저장탱크				-
콘크리트저장탱크	-			
방류독 요구조건 (유럽 기준)	YES	No	No	No

 LNG 하중을 지탱할 수 있는 강  
 LNG 하중을 지탱할 수 없는 강  
 콘크리트

<그림 3> LNG 저장탱크 종류별 설계 개념과 방류독관련 요구사항(Technigaz, France)

특히, 제정중인 prEN 265002에서는 멤브레인 저장탱크에 대해서 멤브레인에서 누출된 경우 콘크리트 저장탱크가 단일시스템과 함께 액체를 방호할 수 있도록 설계되어야 하며, 방류독이 필요없는 구조임을 명문화하고 있다.

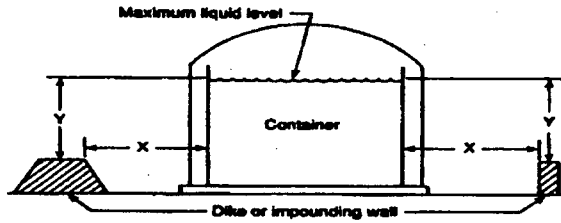
### 3.2 미국규격(NFPA 59A, API 620)

미국의 경우 LNG 저장탱크 건설시 NFPA 59A, API 620, ACI 코드 등이 사용되고 있는데, 근본적으로는 API 620에서 자립식 내부탱크만을 규정하고 있고, 멤브레인 저장탱크에 대해서는 개념 정립이 되지 않은 상태이다.

미국 연방법(CFR) 49 Chapter I Part 193(Liquefied Natural Gas Facilities: Federal Safety Standards)은 'LNG 설비를 위한 안전표준'으로 부지선정, 설계, 건설, 기기, 운전, 유지관리, 인원의 자격과 훈련, 소방 및 안전 등에 대해 규정하고 있는데, CFR 1913.2161(방류독 일반사항)에서는 외벽이 콘크리트로 건설될 경우에 한해서 방류독으로 사용할 수 있으며, 1913.2167(덮개가 있는 시스템)에서는 콘크리트 벽체가 외벽으로서 방류독 역할을 하는 콘크리트 벽으로 설계된 저장탱크는 덮개가 있는 집액시스템을 허용하고 있다.

또, NFPA 59A(Standard for the Production, Storage and Handling of Liquefied Natural Gas(LNG))에서는 방류독은 저장탱크와 독립적으로 설치될 수도 있고, 저장탱크와 통합하여 설치될 수 있으며, 이중벽 탱크의 외부동체가 방류독 조건을 만족시키는 경우 저류지역으로 간주하고 있다.

다음의 <그림 4>는 방류독 일체형 LNG 저장탱크 건설이 가능한 조항으로 LNG 저장탱크에 인접한 방류독 설계 개념을 나타낸다.



<그림 4> 저장탱크에 인접한 방류둑

여기서, X는 Y와 액위의 공간에 기체상태로 압축되어 있는 LNG의 높이를 더한 값과 같거나 이를 초과해야 하는데, 단, 방류둑이나 저류벽의 높이가 액위의 최대치 이상이 되는 경우 X는 어떤 값이라도 무방한 것으로 규정하고 있어 실제로 미국의 경우도 방류둑 일체형 저장탱크의 건설이 법령이나 코드 측면에서는 가능한 것으로 조사되었다. 또, 최근에는 실제로 완전방호식 LNG 저장탱크의 건설이 활발하게 추진되고 있다.

### 3.3 일본 규격

일본의 경우 LNG 저장탱크 및 방류둑에 관한 사항은 전기사업법, 가스사업법 및 고압가스보안법에서 거의 동일한 내용을 규정하고 있다. 또한 이는 우리의 도시가스사업법과 대부분 동일한 규정을 적용하고 있다.

단일방호식, 지하식, In-pit식 및 PC 지상식 저장탱크의 경우 법적으로 규정되어 근거가 마련되어 있으나, 지상식 멤브레인 저장탱크는 현재까지 법적 근거 및 건설실적은 없는 상황이다. 그러나 도쿄가스를 중심으로 지상식 멤브레인 LNG 저장탱크의 일본내 건설을 위한 안전성평가 등의 연구가 진행되고 있다.

일본의 가스사업법에서는 현재까지 단일방호식은 별도의 방류둑이 필요하나 PC 지상식 저장탱크(완전방호식 저장탱크)의 경우 외부콘크리트 탱크가 방류둑 기능을 가지므로 별도의 방류둑을 요구하고 있지 않다.

다음 <표 1>은 일본의 가스사업법상 LNG 저장탱크의 분류를 나타낸다.

<표 1> 일본 가스사업법상 LNG 저장탱크 분류

구 분	일반 조건		누출시	탱크 및 방류둑 (2차 용기)의 기초
	액밀성	강도(액두압)	액저장, 강도 (방류둑 또는 2차 용기)	
지중식 탱크	멤브레인	RC & Earth side wall & 바닥		독립(일반적)
9% Ni-지상식 탱크 (단일방호식)	용기 (금속 후판)		방류둑 (RC, 흙등)	비독립
지상식 탱크 (In-pit식)			RC retaining wall & 흙	비독립
PC 지상식 탱크 (Semi-완전방호식)			방류둑 기능을 가진 PC 외부탱크	독립(일반적)
미규정				
PC 멤브레인 탱크	멤브레인	방류둑 기능을 가진 PC 외부탱크		독립(일반적)

#### 4. 멤브레인 저장탱크의 안전성 평가

본 절에서는 방류독 일체형 저장탱크인 완전방호식 및 멤브레인 LNG 저장탱크의 안전성을 정량적으로 비교 평가한 외국의 연구결과를 비교·검토함으로써 멤브레인 LNG 저장탱크의 안전성에 대해서 기술한다.

한국가스공사에서 국산화한 완전방호식 및 멤브레인 LNG 저장탱크의 주요 사양을 비교하면 다음의 <표 2>와 같다.

<표 2> 방류독 일체형 완전방호식(통영) 탱크와 멤브레인식(KOGAS) 탱크의 비교

구 분	완전방호식 (통영)	멤브레인 (KOGAS)
내부탱크 재질	9% Ni (두께 10mm~30mm)	STS 304 (두께 2mm)
벽체 단열재	perlite (1,000mm)	PUF (200mm)
바닥 단열재	foam glass	PUF
내부탱크 누출 감시시스템	thermal Sensor	N <sub>2</sub>
내외조 사이 Vapour	NG 존재	N <sub>2</sub> 로 purge (누설 감시)
Vapour Barrier	Carbon Steel (NG 차단 및 수분 차단)	mastic + epoxy (외부 수분 차단)

#### 4.1 일본(도쿄가스)의 안전성 평가

2003년 6월 WGC 2003(동경)에서 발표된 일본 도쿄가스의 “LNG 생산기지의 운전 기록에 따른 지상식 저장탱크의 정량적 위험성 평가와 수명 평가” 논문에서는 단일방호식 저장탱크, 방류독 일체형의 멤브레인식 저장탱크 및 완전방호식 저장탱크, 지하식 멤브레인 저장탱크에 대한 안전성 비교/평가 결과를 소개하고 있다.

이 논문에서는 평가방법으로 정량적 위험성 평가법(QRA)과 고장수목분석법(fault tree analysis)을 채택하였으며, 각 저장탱크 유형에 따른 분석을 실시하였다.

정량적 위험성 평가 결과를 요약하면 <표 3>와 같다.

<표 3> 일본 도쿄가스의 정량적 위험성 평가 결과

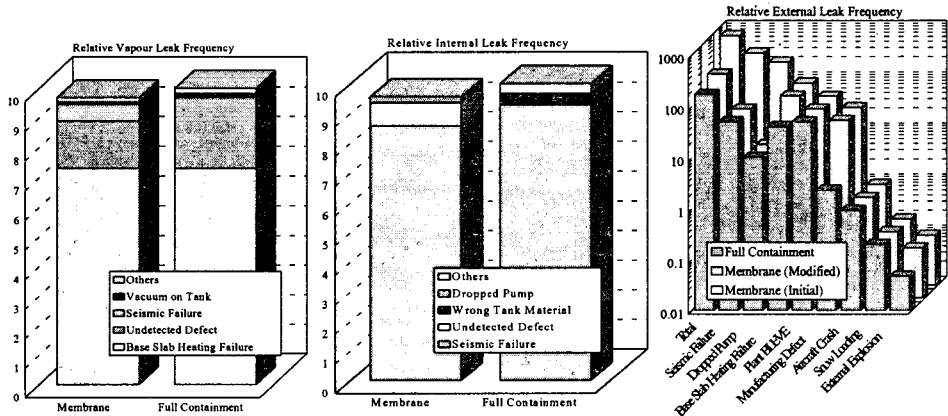
사고 유형	완전방호식	멤브레인식	단일방호식	지하 멤브레인식
설계 및 검사 결함	$7 \times 10^{-10}$ 회/년	$1 \times 10^{-8}$ 회/년	$3 \times 10^{-5}$ 회/년	$3 \times 10^{-9}$ 회/년
자연재해	$6 \times 10^{-8}$ 회/년	$3 \times 10^{-8}$ 회/년	$4 \times 10^{-7}$ 회/년	$4 \times 10^{-7}$ 회/년
운전 결함	$3 \times 10^{-10}$ 회/년	$3 \times 10^{-10}$ 회/년	$3 \times 10^{-10}$ 회/년	$3 \times 10^{-14}$ 회/년
비정상적 사고	$7 \times 10^{-8}$ 회/년	$7 \times 10^{-8}$ 회/년	$7 \times 10^{-8}$ 회/년	$7 \times 10^{-8}$ 회/년
합 계	$1 \times 10^{-7}$ 회/년	$1 \times 10^{-7}$ 회/년	$3 \times 10^{-5}$ 회/년	$5 \times 10^{-7}$ 회/년

#### 4.2 유럽(AEA)의 안전성 평가

저장탱크 형태에 상관없이 동일한 시나리오를 적용한 정량적 위험성 평가를 2회에 걸쳐 미국의 Battelle 연구소와 영국의 AEA Technology에서 수행하였고, 그 연구결과가 LNG 11(1995)과 LNG 12(1998)에 발표되었다. 위험성 평

가 방법은 정량적 위험성 평가법(QRA)과 고장수목분석법(fault tree analysis)을 사용하였고, 방류독이 없는 완전방호식 저장탱크와 멤브레인식 저장탱크의 안전성에 초점을 맞추어 비교·분석하였다.

정량적 위험성 평가 결과를 살펴보면, 지진에 의한 손상도가 매우 높게 나타나며, 가스의 누설과 내부탱크 누설 등은 두 형식에 따른 차이가 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. <그림 5>에서 <그림 7>은 완전방호식과 멤브레인식의 안전성을 그래프 형태로 비교한 자료이다.



<그림 5> 외부 가스 누출 안전성 <그림 6> 내부 LNG 누출 안전성 <그림 7> 외부 LNG 누출 안전성

## 5. 결 론

현재 국제적으로 통용되고 있는 유럽기준(EN 1473, BS 7777, prEN 265002), 미국 법령 및 기준(49 CFR, NFPA 59A), 일본기준(가스사업법, LNG 지상식저조지침)을 종합해 볼 이중벽 탱크에 있어 외부탱크가 콘크리트 탱크인 경우에는 방류독 기능을 갖는 것으로 인정하고 있다. 특히, EN 1473과 제정중인 prEN 265002에서는 멤브레인 저장탱크의 경우 내부 멤브레인 탱크 누출시 단일시스템과 함께 외부 콘크리트 탱크가 액밀성 및 기밀성을 동시에 가지는 것으로 별도의 방류독이 불필요함을 규정하고 있다. 또한, 프랑스 및 일본에서 위험성평가 전문회사에 의뢰하거나 자체에서 실시한 위험성평가 결과 별도의 방류독 없는 지상식 멤브레인 저장탱크와 완전방호식 저장탱크는 안전성 차원에서 거의 동일한 것으로 나타났다.

결론적으로 내부 탱크의 형식(9% Ni강식 또는 멤브레인 탱크)에 무관하게 방류독 기능을 가진 외부콘크리트 탱크의 성능이 방류독 일체형 탱크의 이차 방호 성능을 결정하게 되므로 멤브레인 저장탱크나 완전방호식 저장탱크의 경우 외부콘크리트 탱크가 방류독 기능을 가지며 거의 동일한 안전성을 갖는 것으로 판단된다.

그러나 방류독 일체형 멤브레인 LNG 저장탱크의 국내 적용을 위해서는 외국 법령이나 코드상의 강제규정 만을 만족시키는 데에서 벗어나 취약부에 대한 안전

장치를 연구·검토해 설계에 반영함으로써 안전성을 제고하고, 객관적이고 상대적인 안전성 입증을 위해 국산화 설계한 멤브레인 저장탱크 모델에 대한 위험성 평가가 후속되어야 할 것으로 사료된다. 또한, 국내에 도입된다면 동 탱크의 장기적인 안전성 확보 와 설계, 시공 및 검사의 표준화를 위한 코드(Code) 개발도 요구된다.

#### 【참고 문헌】

1. BS 7777 “Flat-bottomed, vertical, cylindrical storage tanks for low temperature service”, 1993
2. API 620 “Design and Construction of large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks”, 1996
3. BS EN 1473 “Installation and equipment for liquefied natural gas(Design of onshore installations)”, 1996
4. prEN 265002 “Specification for the design, construction and installation of sit built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between  $-5^{\circ}\text{C}$  and  $-165^{\circ}\text{C}$ ”, 2001
5. 미연방법(CFR) 49 Chapter I Part 193 “액화천연가스설비: 연방안전표준”, 2002
6. NFPA 59A “Standard for the production, storage and handling of liquefied natural gas(LNG)”, 2001
7. (사)일본가스협회(JGA), “LNG地上式貯槽指針”, 2002
8. SN Technigaz and AEA Technology, “Quantification and comparison of the risk of LNG storage concepts-membrane and full containment”, LNG 12(Perth), 1998
9. Tokyo Gas Co., Ltd. 외 1, “Quantitative risk assessment of LNG above-ground tanks based on past operating records of LNG regasification terminals and life cycle assessment”, WGC 2003(Tokyo)