

특 집

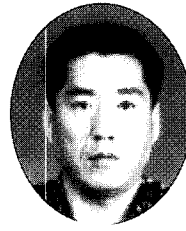
|| LNG 저장탱크의 설계와 시공기술 동향 ||

지상식 LNG 저장탱크의 시공

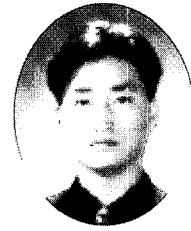
- Construction of Above-Ground Tanks for LNG Tank -



양인환*
Yang, In Hwan



이재양**
Lee, Jae Yang



김양수***
Kim, Yang Soo

1. 머리말

에너지 수요의 증가와 에너지 수입 다변화 정책에 따라 LNG (액화천연가스)의 수요가 급격히 증가하고 있는 실정이다. LNG는 운반선을 이용하여 외국에서 수입하는 관계로 LNG 인수기지(생산기지)에서 LNG를 액체상태로 저장하고 기화하여 천연가스(NG)를 생산하기 위한 시설이 필요하다. 이러한 에너지 시설 수요에 따라 국내 중부권역의 수요를 충족시키기 위해 평택과 인천에 LNG 인수기지를 건설하였으며, 남부권역의 수요를 충족시키기 위해 통영에 LNG 인수기지를 건설 중에 있다. 평택인수기지에서는 10기의 지상식 저장탱크가 건설되었다. 인천인수기지에서는 10기의 지상식 저장탱크 및 8기의 지중식 저장탱크가 건설되었다. 또한, 통영인수기지에는 10기의 지상식 저장탱크가 시공완료 또는 시공중에 있다. 본 글에서는 국내에서 시공되고 있는 지상식 LNG 저장탱크의 시공 방법 및 시공 사례를 소개한다.

2. 국내의 지상식 저장탱크 현황

평택 LNG 인수기지에 10기의 지상식 탱크가 건설되어 가동중에 있다. 인천 인수기지에는 10만 kl 용량의 저장탱크가 10기가 건설되어 운영중이다(그림 1). 통영 인수기지에는 14만 kl 용

량의 저장탱크가 10기가 건설중이다(그림 2). <표 1>에 인천 LNG 인수기지의 지상식 저장탱크 현황을 나타내었으며, <표 2>에 통영 LNG 인수기지의 지상식 저장탱크 현황을 나타내었다.

표 1. 인천 LNG 인수기지 지상식 저장탱크 현황

구분	인천 LNG 인수기지 공사	인천 LNG 인수기지 1차 확장공사	인천 LNG 인수기지 2차 확장공사
탱크	1,2,3호기	4,5,6호기	7,8,9,10호기
탱크 용량	100,000 kl	100,000 kl	100,000 kl
발주처	한국가스공사	한국가스공사	한국가스공사
설계	Dywidag(토목) TKK(기계)	Dywidag(토목) TKK(기계)	Dywidag(토목) TKK(기계)
시공	대림산업	대림산업	대림산업

표 2. 통영 LNG 인수기지 지상식 저장탱크 현황

구분	통영 LNG 인수기지 저장탱크 및 본설비공사	통영 LNG 인수기지 2단계 1차 공사	통영 LNG 인수기지 2단계 1차 확장공사	통영 LNG 인수기지 2단계 2차 공사
탱크	1,2,3호기	4,5호기	6,7호기	8,9,10호기
탱크용량	140,000 kl	140,000 kl	140,000 kl	140,000 kl
발주처	한국가스공사	한국가스공사	한국가스공사	한국가스공사
설계	Obayashi(토목) Kawasaki(기계)	Dywidag(토목) TKK(기계)	한국가스 기술공업	한국가스 기술공업
시공	대우건설 대림산업	대림산업 LG건설	대림산업 대이건설	대우건설

* 정회원, 대림산업(주) 기술연구소, 선임연구원
** 대림산업(주) 통영 LNG 인수기지현장, 부장
*** 대림산업(주) 통영 LNG 인수기지현장, 대리

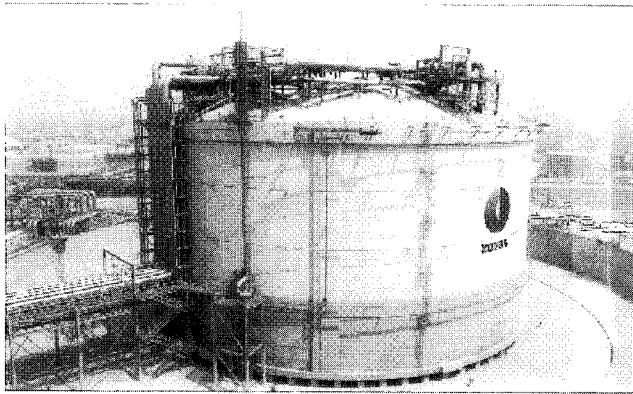


그림 1. 인천 지상식 저장탱크의 가동 전경

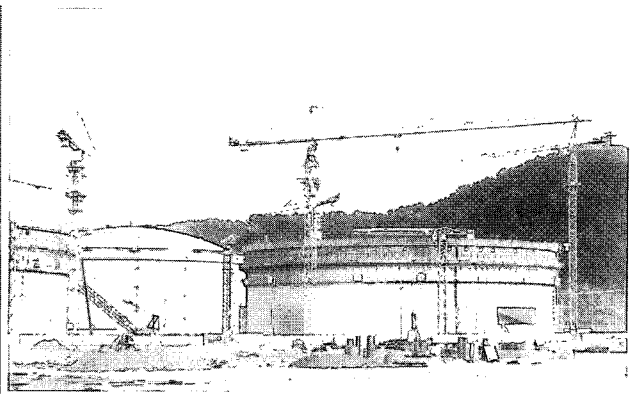


그림 2. 통영 지상식 저장탱크의 시공 전경

3. 국내 저장탱크의 구조

3.1 고상식 탱크의 구조

인천 LNG 인수기지의 지상식 저장 탱크는 고상식(elevated type)으로써 매트 기초 상면과 탱크 본체 사이에 1.5 m의 거리를 두고 페데스탈 및 단성패드가 위치한다(그림 3). 탱크의 저장용량은 10만 k이며, 탱크는 외조(outer tank) 및 내조(inner tank)의 이중 구조로 시공되었다. 탱크의 외벽은 바닥슬래브, 벽체, 링빔(ring beam) 및 지붕(roof)이 일체화된 콘크리트 구조물이다. 원형의 바닥슬래브는 직경이 73m이고 두께는 1.0m이다. 원통형의 벽체는 프리스트레스트 콘크리트 구조물이며, 바닥슬래브 상면에서 링빔 상면까지의 높이는 35m이며 내경은 70m이다. 링빔은 높이 2.6m, 두께 1.1m의 구조물이다. 구형 지붕은 내경 70m, 내측 높이는 9.4m, 지붕의 두께는 45cm이고 링빔의 현치 부분에서는 80cm 두께로 시공되었다. 내벽은 9% 니켈강으로 구성된다. 내벽과 외벽 사이 및 바닥슬래브에는 단열재인 펠라이트(perlite)로 충전되었다. 외벽과 내벽의 간격은 1.0m이다. 탄소강으로 만들어진 vapour barrier를 탱크 외벽 안쪽에 설치하고 외벽 표면은 페인팅으로 마감한다. 또한, 파이프 및 기계 기구 등을 탱크 지붕에 설치한다. 탱크 본체 구조물은 지진으로부터의 영

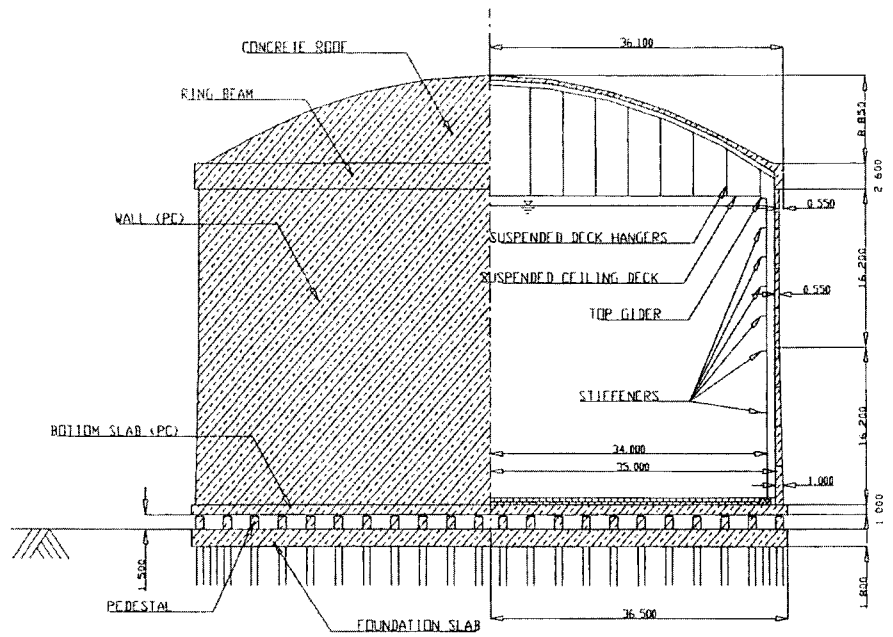


그림 3. 고상식 탱크의 단면 제원

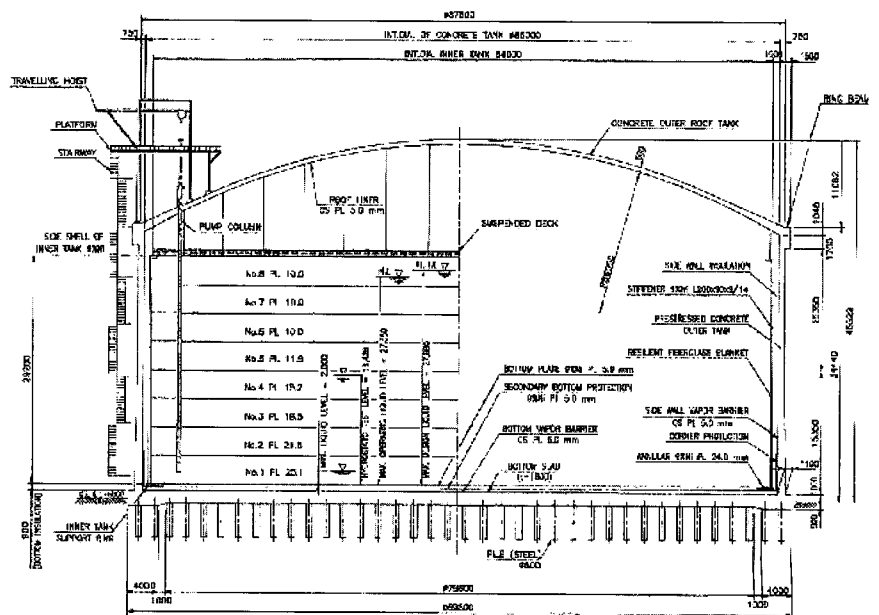


그림 4. 저부 가열식 탱크의 단면 제원

향을 줄이기 위한 392개의 면진 패드에 의해 지지되었다. 면진 패드는 페데스탈(pedestal) 상면과 탱크 본체의 바닥슬래브 하 면 사이에 위치한다. 페데스탈은 탱크 벽체 아래에서는 2열 원주 형태로 배치되고, 가운데 부분에서는 3.4 m × 3.4 m의 정방향으 로 배치되었다. 바닥슬래브와 매트 기초 콘크리트의 간격은 1.5 m이며, 추후 면진 패드를 검사하고 교체할 경우에 대비하여 1.5 m의 공간을 확보하였다. 또한, 상부구조물은 기반암까지 관입된 547개의 강관 파일로 지지되었다.

3.2 저부가열식 탱크의 구조

통영 LNG 인수기지의 지상식 저장탱크는 저부가열식

(bottom-heating type)으로써 파일 위에 탱크 본체의 바닥슬래 브가 위치한다(그림 4). 탱크의 저장용량은 14만 kl이며, 탱크는 인천에서와 마찬가지로 외조 및 내조의 이중 구조로 시공되었다. 원형 바닥슬래브의 직경은 89.8 m이고 두께는 1.6 m이다. 원통 형의 벽체는 프리스트레스트 콘크리트 구조물이며, 바닥슬래브 상면에서 링빔 상면까지의 높이는 33.44 m이며 내경은 86 m 이다. 링빔은 높이 2.74 m, 두께 1.5 m의 구조물이다. 구형 지붕 은 내경 86 m, 내측 높이는 11.5 m, 지붕의 두께는 60 cm로 시 공되었다. 내벽은 9% 니켈강으로 구성되었다. 내벽과 외벽 사이 및 바닥슬래브에는 단열재인 펄라이트(perlite)로 충전되었다. 외벽과 내벽의 간격은 1.0 m이다. 탄소강으로 만들어진 vapour barrier를 탱크 외벽 안쪽에 설치하였고 외벽 표면은 페인팅으로

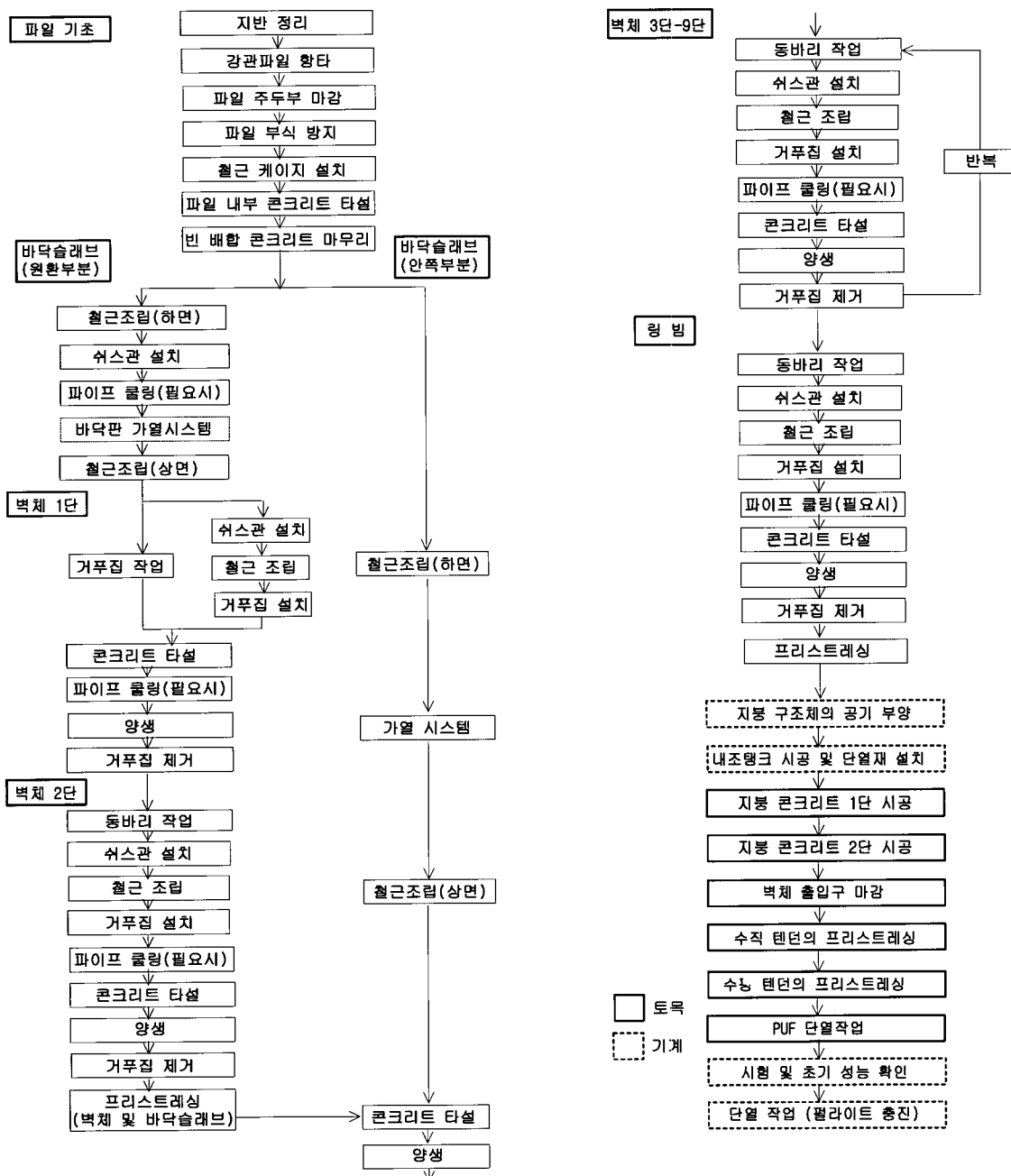


그림 5. 저부가열식 탱크의 시공 순서

마감한다. 또한, 파이프 및 기계 기구 등을 탱크 지붕에 설치한다. 탱크 본체 구조물은 기반암까지 관입된 820개의 강관파일로 지지된다. 본체의 바닥판이 지면에 막바로 접하고 있으므로 지면의 동결위험을 방지하기 위하여 본체 바닥슬래브에 가열 파이프를 이루어진 가열시스템을 설치하였다.

4. 저부가열식 탱크의 시공 과정

지상식 저장 시설의 시공은 9% 니켈강으로 이루어진 내조와 기계설비는 기계시공 작업으로 수행되며, 프리스트레스트 콘크리트 구조체로 이루어진 외조는 토목시공작업으로 이루어진다. 저부가열식 저장탱크의 시공 단계는 크게 아래와 같이 12단계로 이루어지며, 구조체별 시공순서를 <그림 5>에 나타내었다¹⁾. 고상식 탱크의 시공순서는 폐테스탈, 면진 패드 및 프리스트레싱 작업 순서를 제외하고는 저부가열식 탱크의 시공과 유사하게 이루어진다. 인천 인수기지에서 건설된 고상식 탱크의 구체적 시공과정은 다음 절에서 상술한다.

- (1) 단계 1 : 파일 기초 시공
강관파일을 지반에 시공한다.<그림 6>
- (2) 단계 2 : 바닥슬래브의 원환 부분(annular portion) 및 벽체 1, 2단 시공

벽체와 바닥슬래브 이음부 구조체 부위에 프리스트레싱을 효율성있게 도입하기 위해 바깥 부분을 우선 시공한다. 바닥슬래브의 원환부분과 벽체1,2단은 역T자 형태를 갖는다.

- (3) 단계 3 : 바닥슬래브의 안쪽 부분(circular portion) 시공
철근과 가열파이프를 설치한다<그림 7>. 또한, 바닥슬래브 원환부분의 프리스트레싱을 수행한 후 안쪽부분의 콘크리트를 타설한다.<그림 8>
- (4) 단계 4 : 벽체 시공
벽체 3단부터 9단까지의 시공을 수행한다<그림 9>. 각 단의 시공은 거푸집 설치, 철근조립, 스위관 설치 및 콘크리트의 타설과 양생으로 이루어진다.
- (5) 단계 5 : 링빔(ring beam) 시공
철근 조립과 스위관의 조립으로 수행. 링빔의 프리스트레싱은 2단계로 나뉘어 이루어진다. 우선 텐던의 1/3은 지붕 콘크리트를 타설하기 전에 긴장되며, 나머지 2/3는 지붕 콘크리트의 타설 후에 긴장된다.
- (6) 단계 6 : 철재 지붕 조립 및 공기부양 설치
바닥슬래브 상면에서 돔 형식의 강제 지붕과 현수 데크(suspended deck)를 제작한다<그림 10>. 공기부양 공법에 의해 현수 데크의 지붕 구조체를 외조 벽체의 상면에 위치시킨다.<그림 11, 그림 12>
- (7) 단계 7 : 지붕 콘크리트 타설

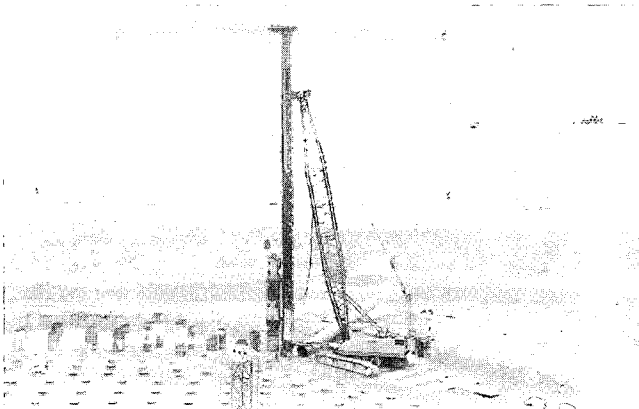


그림 6. 파일 항타



그림 7. 바닥슬래브 가열 파이프 설치



그림 8. 바닥슬래브 콘크리트 타설

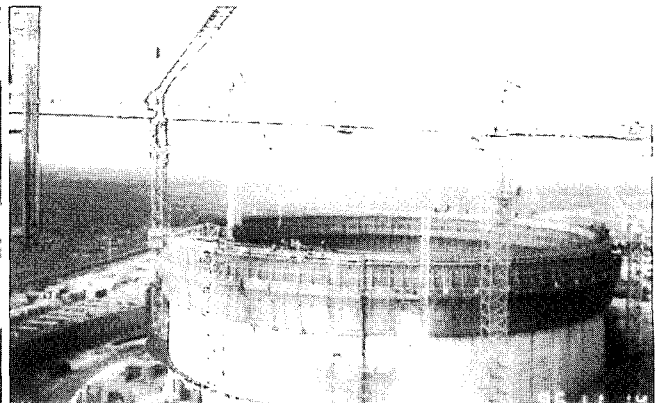


그림 9. 벽체 시공

강재 지붕 위에 콘크리트를 타설한다(그림 13). 이때, 지붕은 거푸집 역할을 한다.

(8) 단계 8 : 내조 시공

외조 바닥슬래브 상면에 단열재를 설치한다(그림 14). 단열재 설치후 니켈강 재질의 내조를 시공한다.(그림 15)

(9) 단계 9 : 벽체 시공 출입구 마감

작업 출입구로 사용되었던 벽체에 있던 임시 출입구를 마감한다. 출입구 마감 부위는 철근이 조밀하게 배근되어 있으므로 자기충전형 콘크리트(self-compacting concrete)를 타설하면 유리하다.

(10) 단계 10 : 프리스트레싱 작업

벽체의 수직 텐던을 먼저 긴장한 후, 원환방향의 수평텐던을 긴장한다.

(11) 단계 11 : 내조의 수압 시험

수압시험을 실시하여 내조의 기능성을 평가한다.

(12) 단계 12 : 단열재 설치

콘크리트 외조와 니켈강 내조 사이의 공간에 펠라이트 재질의 단열재를 충전한다.

5. 고상식 콘크리트 외조의 시공

지붕을 제외하고 외조의 바닥슬래브, 벽체 및 벽체 링빔에는 원환방향으로 프리스트레싱을 하며, 벽체는 원환방향과 연직방향

으로도 프리스트레싱을 한다. 프리스트레싱은 포스트-텐서닝 방법을 적용한다. 철근의 피복두께는 해수의 영향 유무와 화재시 화염에 저항하는 시간 등을 고려하여 40 ~ 75 mm로 결정하였다. 바닥슬래브, 벽체 및 지붕의 안쪽 피복두께는 40 mm이고 바깥쪽 피복두께는 50 mm이다. 또한, 페데스탈의 피복두께는 75 mm이다. LNG 누출시 구조물의 충분한 안전성 확보를 위해 초저온체의 영향을 받는 탱크 안쪽에 배근되는 철근은 강도 4,600 kgf/cm²의 특수철근을 사용하고 그 이외에 배근되는 철근은 강도 4,000 kgf/cm²의 철근을 사용한다. 각 부분의 시공 과정 및 특성은 다음과 같다.^{2,3,4)}

5.1 바닥슬래브의 시공

바닥슬래브는 2부분으로 나누어 콘크리트를 타설하며, 철근은 시공 이음면의 철근망(metal lath)을 지나 바닥슬래브 전체에 걸쳐 연속적으로 조립한다. 시공이음면은 거칠어야 하고 레이턴스 및 기타 이물질은 깨끗이 제거해야 하며, 콘크리트 타설전에 시공이음면을 습윤상태로 유지한다. 바닥슬래브의 시공순서를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 타워 크레인, H-형강 및 두께 15 mm의 합판을 사용하여 하부 거푸집을 시공
- (2) Pocket former(벽체의 연직 텐던의 정착구용)를 탱크 중

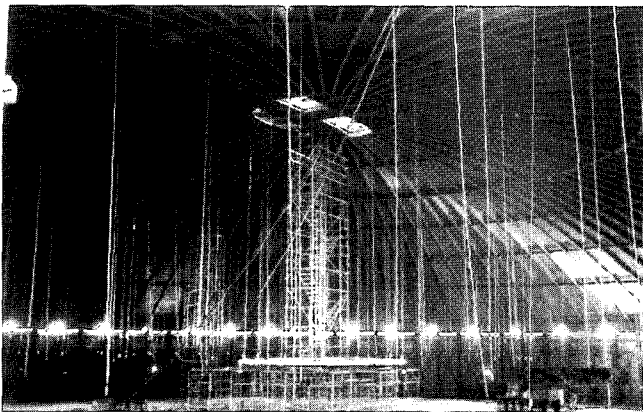


그림 10. 지붕의 현수 데크

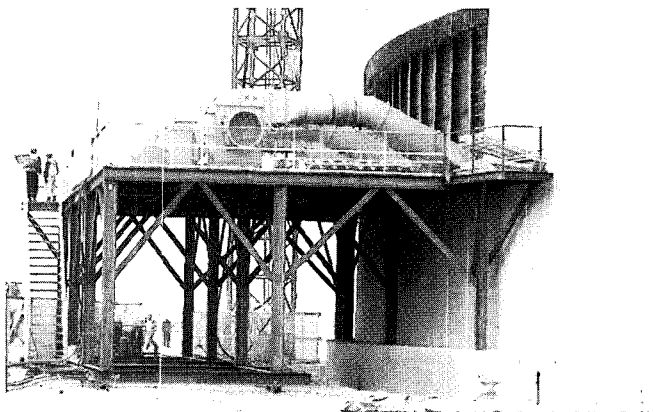


그림 11. 지붕의 공기 부양을 위한 송풍 장치

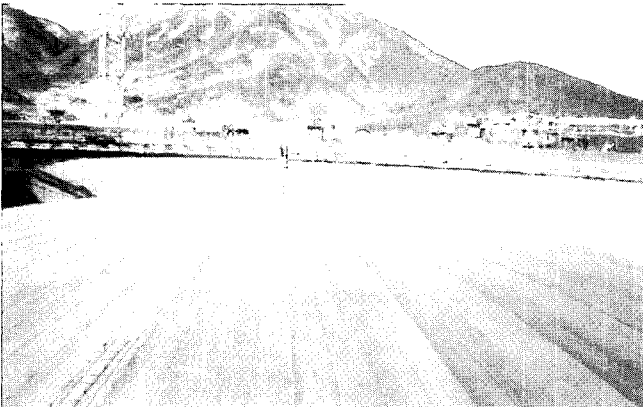


그림 12. 지붕의 공기 부양

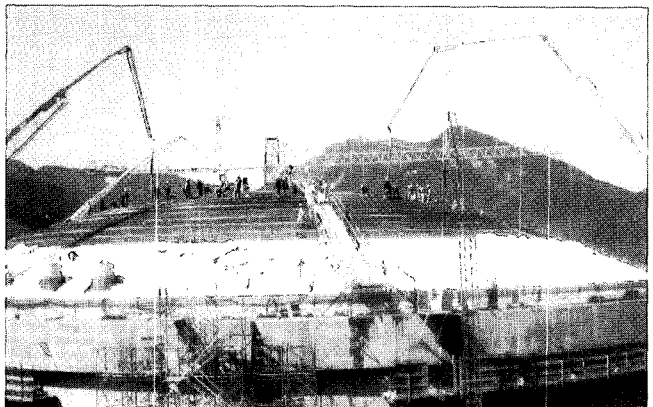


그림 13. 지붕 콘크리트 타설

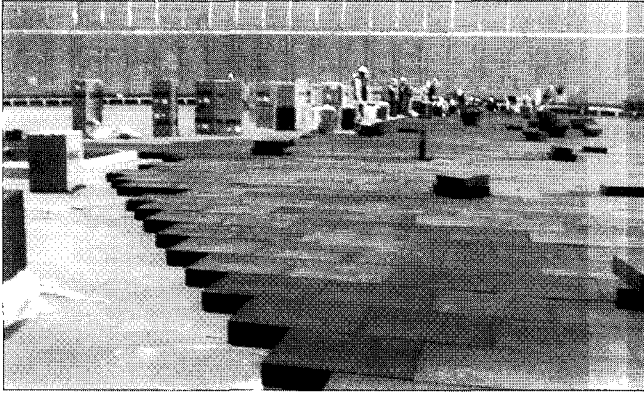


그림 14. 바닥판 단열재 설치 작업

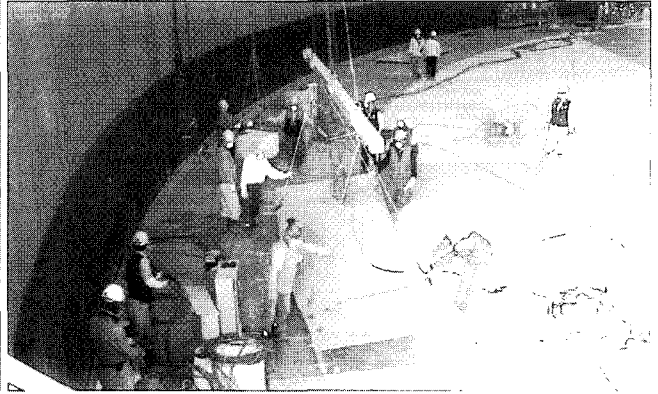


그림 15. 니켈강 설치 작업

심의 기준점으로부터 정확한 거리와 각도에 설치

- (3) 철근 조립, 쉬스관 설치 및 기타 매설 자재 설치
- (4) 콘크리트를 두 구간으로 나누어 타설
- (5) 콘크리트 표면을 피니셔를 이용하여 마감

5.2 벽체의 시공

벽체는 각각 4.05 m씩 8단으로 나누어 시공하고 시공단계에 따라 연속적으로 프리스트레싱 작업을 한다. 탱크 시공 기간 동안 두개의 임시 개구부(5.0 m × 2.0 m 와 3.0 m × 2.0 m)를 벽체 아래쪽에 설치하여 단열재 및 내조 시공에 소요되는 자재를 운반하는 통로로 이용하였다. 개구부는 철근 작업과 쉬스관의 설치가 완료된 후 마감한다. 벽체 시공순서를 요약하면 다음과 같으며, 이 과정을 벽체 1단부터 8단까지 반복 적용한다.

- (1) 시공이음면을 거칠게 하기
- (2) 안쪽면의 연직 철근 조립
- (3) 벽체의 vapour barrier plate 설치
- (4) 안쪽면 거푸집 설치
- (5) 기타 철근 조립
- (6) 쉬스관 설치
- (7) 바깥면 거푸집 설치
- (8) 콘크리트 타설
- (9) 양생

5.3 지붕의 시공

지붕 라이너(liner)는 바닥 슬래브 위에서 제작해서 공기압을 이용하여 최종위치까지 부양한다. 지붕 라이너는 콘크리트 지붕 구체에 대하여 법면 방향으로 위치하는 rafter 위에 위치하는 5 mm 두께의 강재 구조물이다. 지붕 라이너를 거푸집 역할로 하여 지붕 콘크리트는 2개의 층으로 나누어 타설한다. 첫 번째 층의 콘크리트를 타설하기 전에 지붕 라이너의 부양을 유지하기 위해 탱크 내부에 적절한 공기압을 계속 유지한다. 첫 번째 타설한 콘크리트의

압축강도를 확인한 후 두 번째 층의 철근작업 및 콘크리트 타설을 수행한다. 지붕의 시공순서를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 두께 25 cm의 첫 번째층의 콘크리트 타설중에는 내부에 75 ~ 85 mbar의 공기압으로 지지하며, 콘크리트의 압축강도가 135 kgf/cm² 이상이 될 때 두 번째 층의 콘크리트를 타설
- (2) 내조 지붕의 공기 부양후 링빔 텐던의 50%에 대하여 프리스트레싱 작업
- (3) 두 번째 층의 압축강도가 270 kgf/cm² 이상이 될 때 링빔의 나머지 50% 텐던에 대한 프리스트레싱 작업 수행

5.4 프리스트레싱 작업

프리스트레싱은 Dywidag 포스트-텐서닝 공법을 적용하였다. 바닥슬래브, 벽체 및 링빔에는 원환방향으로 프리스트레스를 도입하며, 벽체에는 연직방향 및 원환방향으로 프리스트레스를 도입한다. 원환방향으로 프리스트레스를 도입하는 각 수평 텐던에는 ASTM A406에 규정되어 있는 공칭직경 0.6 in.의 7연선 19가닥이 배치되며, 연직 텐던에는 공칭직경 0.6 in.의 7연선 9가닥이 배치된다. 원환방향으로 바닥슬래브에는 텐던이 6열 배치되며, 벽체에는 59열이 배치되고 링빔에는 8열이 배치된다. 또한, 벽체에는 1.64 m의 간격으로 연직방향 텐던이 배치된다. 수평텐던은 양단 긴장을 실시한다. 바닥슬래브의 수평 텐던은 콘크리트의 압축강도가 130 kgf/cm²에 도달하였을 때 소요 프리스트레스의 30%를 도입하며, 벽체 1단의 거푸집 제거후 소요 프리스트레스의 100%를 도입한다. 벽체의 수평 텐던은 라이너의 공기 부양후 지붕의 철근 작업을 시작하기 전에 벽체 7, 8단 프리스트레싱을 실시하고 보강 빔의 4열의 텐던에 대해 프리스트레싱을 한다. 보강 빔의 나머지 4열의 텐던에는 지붕의 2차 콘크리트 타설 후 소요의 콘크리트 압축강도가 도달하였을 때 프리스트레스를 도입한다. 벽체의 연직 텐던은 지붕의 1차 콘크리트를 타설하기 위해 탱크 내부에 공기압을 가하기 전까지 프리스트레싱을 실시한다. 작업통로 용도의 벽체 개구부에는 최종적으로 콘크리트

타설을 실시한 후 프리스트레스를 도입한다.

6. 니켈강 내조의 시공

탱크의 지붕을 설치하는 방법은 공기부양(air raising) 공법 (그림 16)과 가설 크레인을 이용하는 공법으로 대별된다. 크레인 공법에 비해 공기부양 공법은 안전성 및 경제성 측면에서 실용성이 있는 방법으로 지붕의 형태가 구형인 경우에 활용된다. 안전하고 성공적으로 지붕의 공기 부양을 실시하려면 탱크의 진원도(roundness), 밀폐성(sealing), 적절한 공기압 및 levelling system 등 4 가지 중요한 기본 요건이 필요하다. 본 공사에서는 직경 70 m, 중량 480톤의 강재 지붕을 바다슬래브에서 지붕의 위치까지 32.5 m를 부양하였다. 지붕의 부양시 공기압은 12 g/cm²을 유지한다. 부양 속도는 200 ~ 600 mm/min이고 소요 시간은 2 ~ 3시간이다. 본 공법을 수행하기 위한 작업자 편성은 <표 3>과 같으며, 공법 진행 과정은 다음과 같다.

- (1) 모든 작업자를 정위치에 배치
- (2) 점검 및 보수 담당 인원은 밀폐상태 및 suspended scaffolding과 leveling wire 간섭 상태를 탱크 내부에서 점검
- (3) 5분 간격으로 level 점검
- (4) 지붕이 corner lining plate에 약 2m 정도 접근하면 air blower의 방출구를 서서히 닫으면서 부양 속도를 줄인다.
- (5) Corner lining plate가 지붕에 접촉되면 위치 고정 및 용접 인원은 즉시 holding jig를 설치하고 roof plate와 corner lining plate의 접합부를 맞추고 용접을 실시한다.
- (6) 접합부의 용접이 끝나면 임시 작업 통로의 sealing plate leveling wire 및 vinyl seal을 제거한다.

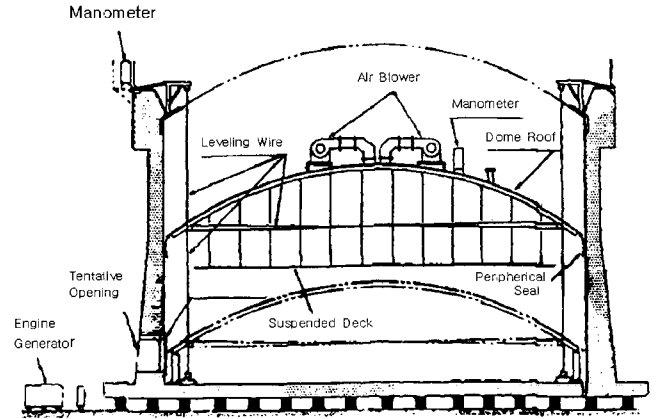


그림 16. 지붕의 공기부양 공법

7. 맺음말

지상식 LNG 저장탱크의 시공은 먼진 장치, 초저온 상태를 유지하기 위한 단열 장치, 공기 부양 공법을 이용한 현수 데크의 가설 등 특수 장치 및 공법을 필요로 한다. 국내에서 이러한 특수 공법을 직접 수행한 것은 기술 축적 및 신공법 측면에서 큰 의의가 있다. 기존에 축적된 설계 및 시공 경험을 바탕으로 특수한 선진 기술을 도입, 연구 검토하여 향후 공사에 적용시켜 기술 발전 및 구조물의 품질향상을 도모하는데 더욱 노력하여야 할 것으로 사료된다. □

참고문헌

1. 통영 LNG 인수기지 공사 기술제외서.
2. 인천 LNG 인수기지공사 건설지, 대림산업(주), 1996.
3. 인천 LNG 인수기지 1차 확장공사 건설지, 대림산업(주), 1998.
4. 인천 LNG 인수기지 2차 확장공사 건설지, 대림산업(주), 2000.

표 3. 공기부양 공법 작업자 편성

작업소	인원(명)	위치	작업 내용
총괄(지휘)	2	보강 빔의 지휘소	· 탱크 내부의 압력 확인 · 지붕의 균형 확인 · 작업 총괄 지휘
안전	2	· 링빔 위 · 탱크 주변 통제	안전관리감독
기록	2	링빔의 지휘소	지붕의 레벨, 탱크의 내부 압력 및 부양 속도 기록
Blower 가동	4	지붕의 blower 위치	Blower 운전(damper 조정)
레벨 측정	9	지붕 위 (0°, 90°, 180°, 270°)	지붕의 레벨을 5분마다 점검하여 지휘소에 보고
점검 및 보수	8	탱크 내부	· 밀폐상태 확인 · Suspended scaffolding과 leveling wire 간섭사항 확인
크레인 및 Rigger 작동	5	링빔 위(1명), 탱크 주변(4명)	지붕 균형 조정
위치고정 및 용접	62	Corner lining plate위	· Corner lining plate에 holding jig 설치 · 지붕과 corner lining plate의 용접
전기 및 기계 작업	4	· Main power panel · 비상 발전기	· 전원공급 이상유무 확인 · 비상 전원 대기