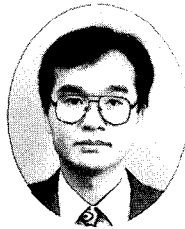


# 특 집

|| LNG 저장탱크의 설계와 시공기술 동향 ||

## 지하식 LNG 저장탱크의 시공기술 - Construction Technology of the In-ground LNG Tank -



권영호\*  
Kwon, Yeong Ho



김형성\*\*  
Kim, Hyung Sung



박철림\*\*\*  
Park, Chil Lim

### 1. 머리말

LNG 저장탱크는 정부가 안정적이고 환경친화적이면서, 저렴한 에너지를 공급하기 위하여 국책사업의 일환으로 수행하고 있는 대규모 건설공사이다. LNG 저장탱크의 역사는 1970년 일본에서 처음으로 1만 kℓ가 시공된 이래, 기술의 진보 및 가스수요의 증대에 따라 저장용량이 점차 증대되어 왔다. 국내에서도 평택, 인천 등지에서 10만 kℓ의 저장용량을 갖춘 지상식 탱크가 건설된 바 있으며, 최근에는 통영에 14만 kℓ의 저장용량을 갖춘 지상식 탱크가 건설되고 있다.

지금까지 국내에서 건설된 LNG 저장탱크는 대부분 지상식이기 때문에, 설계·엔지니어링·기계 및 운전의 요소기술은 매우 중요하게 인식되어 왔으나, 외부탱크의 콘크리트는 프리스트레스트 또는 포스트텐션을 도입하여 건설되는 관계로 콘크리트 부분이 중요한 요소기술로 간주되지 않았다.

그러나, 최근에 와서 시공기술과 콘크리트 요소기술의 발전에 따른 기술력 향상 및 저장탱크의 안정성 확보, 지상설비의 불필요, 그리고 토지 이용률의 증대를 목적으로, 1998년부터 해상운송 및 수도권 공급이 원활한 지리적 이점을 갖춘 인천 LNG 인수기지 저장설비 공사에서 지하식 저장탱크가 건설되기 시작하였다.

먼저, 1998년 인천 LNG인수기지에 국내 최초로 14만 kℓ의

저장용량을 갖는 지하식 저장탱크(#211, 212호기)가 건설되기 시작한 이래, 후속공사로 세계 최대의 저장용량(20만 kℓ)을 갖는 지하식 탱크(#213, 214, 215, 216, 217 및 218호기)가 각각의 공정에 따라 건설되고 있다.

지하식 LNG 저장탱크는 저장조의 최고액면이 지표면 아래에 있기 때문에 탱크의 안정성을 확보할 수 있지만, 지하굴착 깊이의 증대에 따른 토수압의 증가로 부재두께가 증대될 뿐만 아니라 지하연속벽(slurry wall)의 공사에 따른 콘크리트의 고강도화 및 고유동화가 필수적인 성능으로 요구된다. 또한, 해안에 건설되는 관계로 부력 및 내진설계에 따라 바닥슬래브(bottom slab) 및 측벽(side wall)의 규모가 매시브하기 때문에, 경화과정의 온도 균열을 방지하기 위한 저발열 및 팽팽성이 우수한 콘크리트가 요구된다. 이러한 특수조건에 있는 지하식 LNG 저장탱크의 건설공사는 설계·시공·유지관리 및 콘크리트의 배합설계가 매우 중요한 고부가가치의 요소기술로 인식되고 있다. 따라서, 본고에서는 이러한 건설공사의 시공과정에 대한 요소기술을 정리하여 국내의 시공기술 발전은 물론 향후 해외시장 개척에도 유용한 정보 및 기술축적의 계기를 만드는 데이터베이스로 활용되었으면 한다.

### 2. 지하식 LNG 저장탱크의 개요

#### 2.1 주요 구조물의 개요

인천기지에 건설되는 지하식 LNG 저장탱크의 주요 구조물은

\* 정회원, 동양대학교 건축공학과 교수

\*\* 정회원, 대우건설 인천LNG현장 소장

\*\*\* 정회원, (주)동주 교문, 목원대학교 초빙교수

표 1. 지하식 LNG 저장탱크의 구조물의 개요

구분	지하연속벽	바닥슬래브	측벽	지붕
설계강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	400(91일)	240(91일)	300(91일)	300(91일)
구조물 크기 (m)	-내경 : 78.5 -두께 : 1.7 -깊이 : 75.0	-내경 : 72.6 -두께 : 9.0	-두께 : 3.0 -높이 : 50	-두께 : 0.6 ~ 1.4
콘크리트 타설방법	-선행 : 26개 (길이 : 7.24 m) -후행 : 26개 (길이 : 2.8m)	-2 Lift 구획 -1 Lift : 6 m -2 Lift : 3 m	-10 Lot 구획 -1 Lot : 5 m	-6 block 구획
콘크리트 특성	고유동	저발열	저발열	저발열
콘크리트 물량 (m <sup>3</sup> /tank)	37,500	35,500	55,000	5,000

크게 지하연속벽, 본체의 바닥슬래브, 측벽 및 지붕(Roof)으로 구성되어 있으며, 개요는 <표 1>, <표 2> 및 <그림 1>과 같다.

### 2.2 지하탱크의 시공순서

지하식 LNG 저장탱크의 시공순서는 <그림 2>와 같다. 시공순서를 구체적으로 기술하면, ① 지반 및 지질조사 → ② 가설공사 및 guide wall 공사 → ③ 지하연속벽 공사 → ④ top portion 공사 → ⑤ 내부굴착공사 → ⑥ 측벽 1 lot 공사 → ⑦ 바닥슬래브 1 lift 공사 → ⑧ 측벽 2 lot 및 바닥슬래브 2 lift 공사 → ⑨ 측벽 3 ~ 10 lot 공사 → ⑩ 지붕 공기 부양 → ⑪ 지붕 콘크리트 공사 및 성토공사 순으로 진행된다. 특히, 인천 LNG 저장탱크의 지반조건이 실트계 사질토이기 때문에, S.M.W(Soil Mixing Wall) 시공 및 벤토나이트 안정액의 배합설계, 지반개량 등이 사전에 충분히 검토되어야 하며, 지하연속벽 및 본체의 시공과정에는 트레미관 및 분지관 공법으로 콘크리트를 타설하기 때문에 콘크리트의 배합설계 및 현장 품질관리를 위한 면밀한 시공계획이 요구된다.

표 2. 지하식 LNG 저장탱크의 공사개요(20만 kℓ인 213호기의 경우)

구분	내용
공사명	인천 LNG 저장시설현장 (1차, 2차, 3차현장)
발주처	한국가스공사
토목공정	① 파일, ② 지하연속벽, ③ 바닥슬래브, ④ 측벽, ⑤ 지붕
공사기간	1998. 11 ~ 2002. 7(213호기의 경우 : 3년 8개월)
시공자	대우건설(213, 215, 216, 218호기), 삼성물산(214, 217호기)
설계물량	① Concrete : 132,312 m <sup>3</sup> , ② Re-bar : 23,989 톤 (호기당) ③ Pre-stressing : 94 톤 ④ Roof & Deck PL : 710 톤

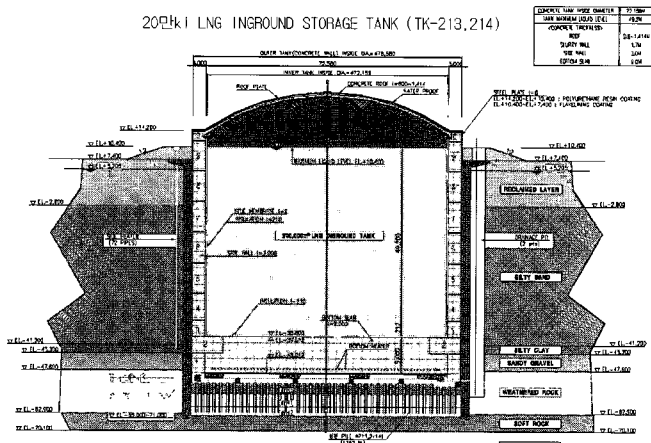


그림 1. 지하식 LNG 저장탱크 구조물의 단면도

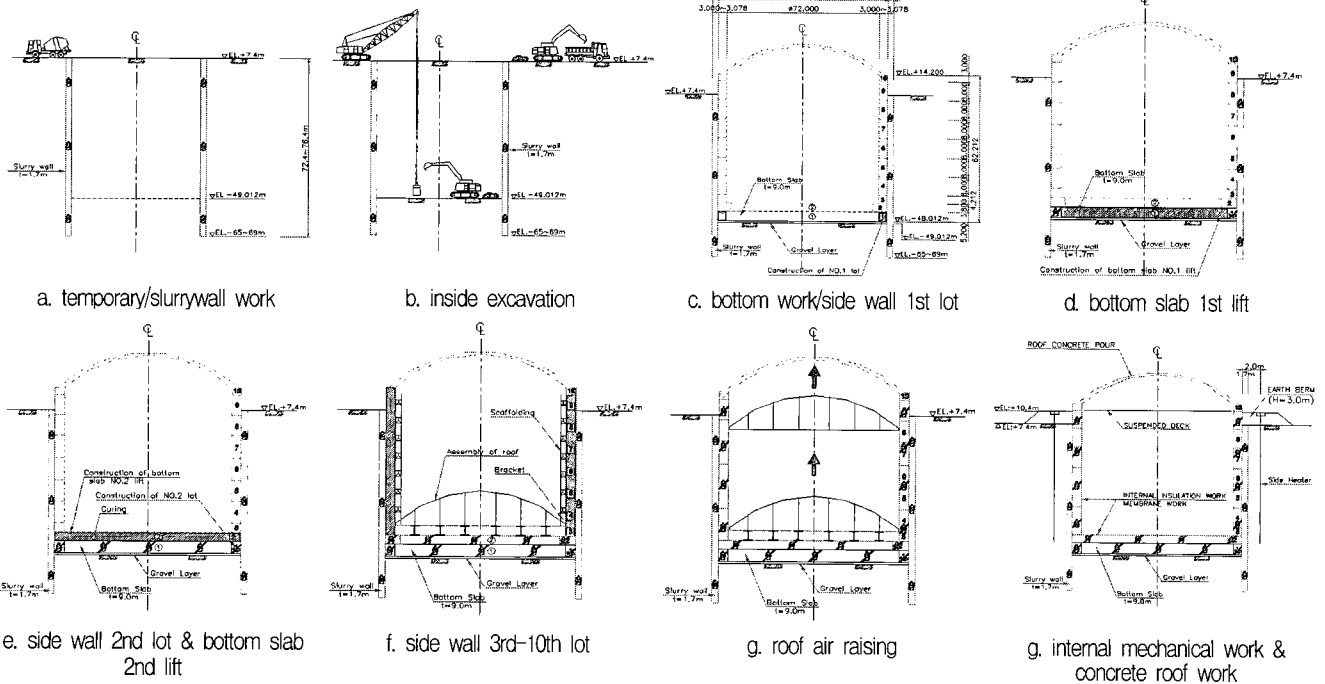


그림 2. 지하식 LNG 저장탱크의 시공순서

### 2.3 콘크리트의 요구성능 및 사용재료

#### 2.3.1 콘크리트의 요구성능

지하연속벽 및 본체 구조물(바닥슬래브, 측벽 및 지붕)에 타설되는 콘크리트의 요구성능은 <표 3>과 같다. 콘크리트의 배합강도는 변동계수(V) 10%를 고려한 활중계수( $\alpha$ )1.2를 적용하였으며, 지하연속벽의 경우에는 수중 콘크리트의 저감계수 0.95를 적용하였다. 또한, 공기량의 범위가  $5 \pm 1\%$ 인 것은 LNG가 저장될 때의 액화온도( $-162^{\circ}\text{C}$ )를 고려한 것으로, 내구성 측면에서 공기량의 범위를 가급적으로 높게 선정한 것이다. 특히, 지하식 LNG 저장탱크의 공사는 하부로 트레미관 또는 배관펌핑을 한 후에 분지관공법으로 타설되기 때문에, 콘크리트의 컨시스턴시를 유지하면서 재료분리를 방지하는 것이 중요한 사항이다. 따라서, 사전에 콘크리트의 요구성능에 대한 면밀한 기술적 검토가 선행되어야 한다.

표 3. 지하식 LNG 저장탱크에 타설된 콘크리트의 요구성능

구분	슬럼프 (cm)	설계강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	배합강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	경시변화 (분)	공기량 (%)	염화물량 (kg/m <sup>3</sup> )
지하연속벽	65 ± 5*	400	505	90	5 ± 1	0.3 이하
바닥슬래브	21 ± 3	240	288			
측벽	21 ± 3	300	360			
지붕	15 ± 2.5	300	360			

\* 슬럼프 플로우(50cm 도달시간 및 V형 깔대기, U형 박스시험 병행)

#### 2.3.2 콘크리트의 사용재료

지하식 LNG 저장탱크에 타설된 콘크리트는 고유동·저발열성을 만족해야 하기 때문에, 콘크리트의 사용재료의 선정이 중요하다. 본 공사의 지하연속벽 및 본체 구조물(바닥슬래브, 측벽 및 지붕)에 사용할 결합재의 선정하기 위한 특성의 비교결과는 <표 4>와 같다. 비교결과 및 콘크리트의 유동성·점성·재료분리 저항성 및 경제성, 대물량의 재료공급에 따른 수급사정 등을 고려하여 벨라이트 시멘트에 석회석 미분말을 치환하는 것으로 선정하였다. 특히, 지하연속벽의 경우에는 현장의 타설조건을 고려하여 증점제를 함께 사용하는 병용계 고유동 콘크리트를 선정하였다. 결합재 외의 콘크리트 재료로 잔골재는 강모래, 굵은골재는 19mm 쇄석 및 폴리칼본산계 고성능 감수제를 사용하였다.

표 4. 지하식 LNG 저장탱크 공사의 콘크리트용 결합재의 특성비교

구분	고로슬래그 시멘트 + 플라이 애쉬	벨라이트 시멘트 + 석회석 미분말	벨라이트 시멘트 + 슬래그 미분말	벨라이트 시멘트
위커빌리티	매우 양호	매우 양호	재료분리 경향	점성 증대
수화열	약간 높음	매우 양호	약간 높음	양호
경제성	매우 경제적	경제적	보통	비경제적
압축강도	양호	보통	보통	높음

### 2.4 콘크리트의 생산설비 및 최적조건 선정

#### 2.4.1 콘크리트의 생산설비

현장에서 콘크리트를 생산·공급할 설비는 <표 5>와 같다. 콘크리트용 골재관리는 품질의 안정성을 확보하기 위하여, 호퍼에 투입하기 전에 중간저장고(12×10×20m)에 2일 저장 후 사용하는 것을 원칙으로 하였으며, 골재호퍼는 지하터널식으로 수평 및 경사 컨베이어-벨트를 이용하여 믹서에 투입되도록 설치하였다.

표 5. 지하식 LNG 저장탱크 공사의 콘크리트 생산설비

구분	설비명칭	비고
설비용량	① 시멘트 사이로 : 500톤 × 4기	벨라이트 시멘트 석회석 미분말 플라이 애쉬
	② 결합재 사이로 : 500톤 × 4기	
	③ 혼화제 탱크 : 15톤 × 4기	
	④ 배합수 탱크 : 200톤 × 4기	
부대설비	① 실린더 용량 : 150 RT × 2기	서중 콘크리트 한중 콘크리트 비상용
	② 보일러 용량 : 400,000 kml × 3기	
	③ 발전기 : 500 kW × 2기	
생산용량	① Mixer type : Twin shaft	시간당 400 m <sup>3</sup> 예상
	② Mixer 용량 : 210 m <sup>3</sup> /hr × 4기	

표 6. 지하식 LNG 저장탱크에 타설된 콘크리트의 최적배합

구분	W/C (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/m <sup>3</sup> )					
			W	C	L.S.P*	G	S	A.D
지하연속벽	51.0	48.8	174	341	254	789	743	7.44
바닥슬래브	69.3	40.0	158	228	107	1,077	710	2.17
측벽	62.0	41.0	155	250	107	1,053	724	2.32
지붕	57.8	42.0	155	268	89	1,054	734	2.86

\* L.S.P : 석회석 미분말, C : 벨라이트 시멘트

#### 2.4.2 콘크리트의 B/P 배합시간 선정

병용계 고유동 콘크리트 및 저발열 콘크리트의 배합시간은 콘크리트의 성능뿐만 아니라, 현장에 요구되는 타설량 및 시간당 생산량을 결정하는데 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다. 따라서, 현장 B/P의 최적배합시간을 결정하기 위하여 믹서부하를 나타내는 암페어 게이지값 및 콘크리트의 성능에 대한 현장실험을 실시하였다. 일반적으로 배합중인 콘크리트의 품질이 안정되면, 믹서의 암페어는 일정한 값을 유지하게 된다. 이러한 관점에서

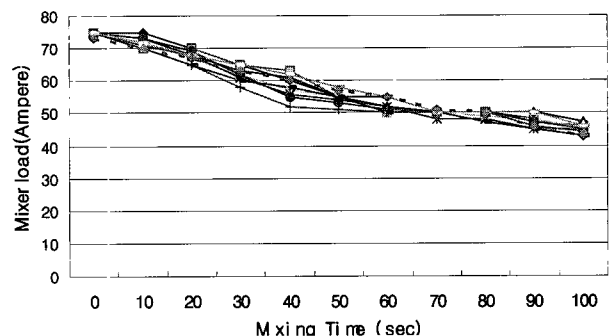


그림 3. 배합시간에 따른 암페어의 상관관계

B/P의 최적배합시간을 선정하기 위하여 콘크리트 3 m<sup>3</sup>/batch를 대상으로 모든 재료가 믹서내에 투입된 후 10초 단위로 암페어를 측정하였으며, 측정결과는 <그림 3>과 같다.

배합시간에 따른 믹서의 암페어를 비교한 결과, 암페어는 50 A 부근에서 안정되는 경향을 나타내었다. 따라서, 콘크리트의 성능을 고려하여 고유동 콘크리트는 70초, 저발열 콘크리트는 55초를 최적배합시간으로 선정하였다.

### 3. 지하식 LNG 저장탱크의 시공

#### 3.1 일반사항

지하식 LNG 저장탱크는 지상식과 달리 지하에 건설되기 때문에 사전에 지질 및 지하수 조사를 철저히 실시하여 각 단계별 공사에 반영해야 한다. 특히, 선박으로 LNG를 도입하기 용이한 해안 구조물이기 때문에 해수에 의한 내구성 및 해수면의 변동에 의한 토압·수압·부력 등을 고려하여 설계·시공되어야 한다.

본고에서는 지하연속벽의 안정적 굴착을 위한 사전단계인 S.M.W 및 Guide wall 시공을 비롯하여 지하연속벽·바닥슬래브·측벽 및 지붕의 시공순으로 정리하고자 한다.

#### 3.2 S.M.W 및 Guide wall 시공

##### 3.2.1 S.M.W 시공

S.M.W 공법은 연약한 사질토·점성토·부식토 및 실트층과 같은 연약지반의 개량을 위하여 많이 사용된다. 특히, 본 현장은 지층 상부가 실트층으로 구성되어 있기 때문에, 지하연속벽의 굴착공사를 하면서 발생할 수 있는 구벽의 붕괴를 방지하기 위하여 채용되었다. 즉, 지하연속벽이 굴착될 내경과 외경의 위치에 지하 12 m 구간을 Ø550 mm × 3 rod로 S.M.W를 시공하였다. 또한, 목표강도(10 kgf/cm<sup>2</sup> 이상)를 만족하는 S.M.W의 배합조건은 <표 7>과 같으며, 각 탱크당 S.M.W는 총 1,418개 소(내

표 7. S.M.W의 사용재료 및 최적배합 조건

구분	W/C (%)	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )	단위재료량(kg/m <sup>3</sup> )			채령별 강도(kgf/cm <sup>2</sup> )		
			W	C	벤토나이트	7	14	28
S.M.W	150	1,833	420	280	10	8.4	10.9	15.6

\* C : 보통포틀랜드 시멘트, 단위중량 : 대상토의 단위중량

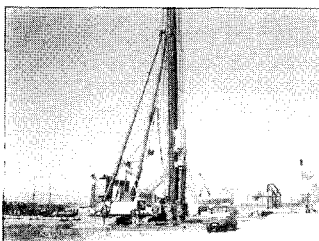


사진 1. S.M.W 시공전경

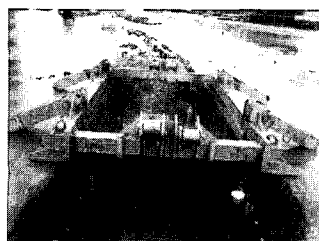


사진 2. 시공 완료된 guide wall

경 547개, 외경 579개, 테두리 260개 및 드레인 피트 32개)로 시공전경은 <사진 1>과 같다.

##### 3.2.2. Guide wall 시공

지하연속벽 공사에 있어서 Guide wall은 트렌치 굴착의 기준점으로 표층지반의 붕괴를 방지하고 장비(굴삭기, 철근망, 트레미관 등)의 지지대가 될 뿐만 아니라, 안정액의 저유조(貯留槽) 역할 및 지하연속벽의 정밀한 수직도를 위한 가설부재로 사용된다. 본 현장에서는 지반 및 장비의 지지대 역할을 위하여 캔티레버형 guide wall을 선정하였으며, 시공된 전경은 <사진 2>와 같다.

#### 3.3 지하연속벽의 시공

##### 3.3.1 일반사항

지하식 LNG 저장탱크의 지하연속벽은 타설심도가 깊고 매시 브하기 때문에 배합조건 뿐만 아니라 제조·운반·타설 및 시공상의 품질관리가 매우 중요하다. 따라서, 본 절에서는 B/P의 최적배합시간 및 연속생산성의 시험의 결과에 따른 생산량과 현장의 타설속도, 운반 및 시공계획 등에 대해 정리하고자 한다.

##### 3.3.2 콘크리트의 생산계획

지하연속벽은 선행 및 후행패널, drainage pit로 구성되어 있으며, 이에 따른 콘크리트의 설계물량 및 사양은 <표 8>과 같다. 최적배합시간을 고려한 B/P 1기당 콘크리트 생산량이 100 ~ 110 m<sup>3</sup>/hr로 나타났기 때문에, 선행패널의 최대 타설량 100 m<sup>3</sup>/hr를 공급할 수 있다. 특히, 후행패널은 선행패널의 약 1/3 정도 규모이기 때문에, 2패널을 동시에 타설할 수 있으며, drainage pit의 경우에는 파이프의 부력을 고려하여 시간당 최대 타설속도가 4.5 m/hr이기에, 콘크리트 공급은 충분할 것으로 예상되었다.

표 8. 패널별 사양 및 요구되는 콘크리트의 설계량

구분	선행패널	후행패널	Drainage pit
패널크기(m)	7.24 × 1.74 × 75	2.80 × 1.74 × 75	2.80 × 4.94 × 75
설계량(m <sup>3</sup> )	975	376	937
트레미관(set)	3	2	2
타설속도(m/hr)	8.0 이하	8.0 이하	4.5 이하
타설량(m <sup>3</sup> /hr)	100 이하	40 이하	60 이하
타설시간(hr)	13 ~ 15	9 ~ 10	15 ~ 16
전체 패널수	26	26	2(후행에 포함)

##### 3.3.3 콘크리트의 운반계획

적정한 운반계획을 세우기 위하여 사전에 운반거리 및 타설량, 타설시간 등을 고려하였으며, 이에 따른 운반계획 및 에지데이터 댓수를 <표 9>와 같이 선정하였다.

표 9. 운반계획 및 요구되는 에지테이터 댓수

구분	선행패널	후행패널	Drainage pit
콘크리트 타설량(트레미당)	30 m <sup>3</sup> /hr	20 m <sup>3</sup> /hr	30 m <sup>3</sup> /hr
트레미 관 제거시간	5 min/개	5 min/개	5 min/개
타설시간 (에지테이터당)	5 min	5 min	5 min
요구되는 에지테이터 수	12 cars/panel	8 cars/panel	8 cars/panel

운반시간은 출하시간 4분, 운반시간 6분, 타설 및 대기시간 11분, 회차 및 생산대기 시간을 고려하면, 선행패널에 요구되는 에지테이터 댓수는 초기에 12대, 공급이 안정된 후에는 9대가 필요하다. 후행패널의 경우에는 초기에 8대, 공급이 안정된 후에는 6대가 필요하며, drainage pit의 경우, 콘크리트 전체물량은 많지만 drainage pit의 outer pipe에 대한 부력을 고려하여 시간당 타설높이가 낮기 때문에 요구되는 에지테이터 댓수는 후행패널과 동일하게 계획하였다.

3.3.4 콘크리트의 시공계획

〈그림 4〉는 지하연속벽 콘크리트의 시공계획을 나타낸 것이다.

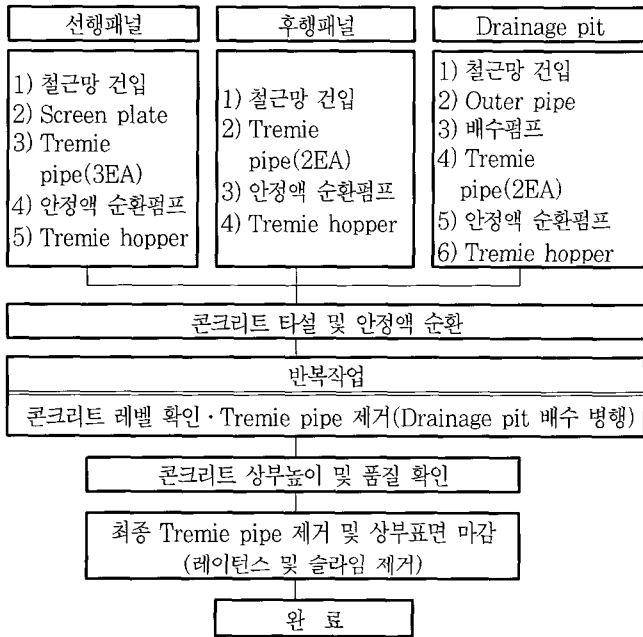


그림 4. 지하연속벽 콘크리트의 시공계획

콘크리트를 타설하기 전에 선행되는 작업은 BC-cutter에 의한 굴착작업으로, 이때 토사반출과 아울러 벤토나이트 안정액의 치환작업이 동시에 진행되었다. 선행패널의 경우에는 3 gut로 나누어 굴착이 진행되었으며, 후행패널의 경우에는 1 gut로 굴착을 실시하였다. 굴착과 더불어 철근 작업장에서는 건입할 철근망을 3 lot로 나누어 조립하며, 이때에 콘크리트의 수화열 측정을 위한

온도게이지 및 경사게이지, 토압게이지 등이 패널별, 위치별로 나누어 설치하였다.

콘크리트의 타설은 시공계획에 따라 철근망의 건입, 트레미 관 및 안정액의 순환펌프, 트레미 호퍼 등을 설치한 후에 시작되었다. 앞에서 규정한 타설속도에 따라 콘크리트의 레벨을 확인하고 순차적으로 트레미 관을 제거하면서 연속적으로 타설하였으며, 최상부까지 타설한 후에 콘크리트 시료를 채취하여 골재상태 및 콘크리트의 품질을 확인한 후 종료하였다.

3.3.5 콘크리트의 품질관리 계획

지하연속벽에 고유동 콘크리트를 타설하면서 수행할 콘크리트의 품질관리 계획은 〈표 10〉과 같다. 시험방법은 대부분 KS 규준에 따르지만, KS에 규정되어 있지 않은 항목에 대해서는 JSCE 규준을 준용하였다.

표 10. 고유동 콘크리트의 품질관리 계획

항목	기준	빈도	비고
슬럼프 플로우	65 ± 5 cm	1회/100 m <sup>3</sup>	초기 3회 연속
50 cm 플로우 도달시간	7 ± 3 초		
공기량	4 ± 1 %		
염화물 함유량	0.3 kg/m <sup>3</sup> 이하	2회 이상/일	초기 실시
단위용적중량	-	2회 이상/일	초기 실시
압축강도용 몰드	3조(7,28,91일)	1회/100 m <sup>3</sup>	초기 제작

3.3.6 지하연속벽의 시공결과

지하연속벽의 시공과정은 〈사진 3 ~ 사진 6〉에 나타내었다. 지하연속벽에 타설된 고유동 콘크리트의 품질관리 결과는 〈표 11〉과 같다. 대부분의 품질관리 결과는 요구성능에 매우 만족하는 것으로 나타났으며, 특히 압축강도의 변동계수는 재령에 따라 약간의 다르지만 1.9 ~ 3.2%의 범위를 나타내었는데, 이는 배합강도 선정시 적용했던 10%에 비해 매우 낮은 값이다.<sup>1)</sup>

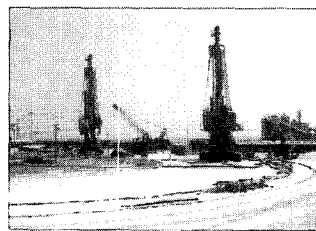


사진 3. 지하연속벽의 굴착

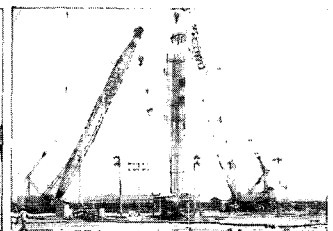


사진 4. 철근망 건입

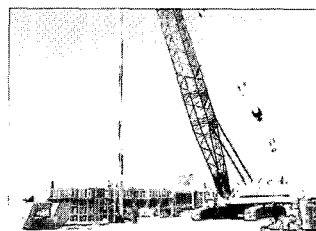


사진 5. 트레미관 건입

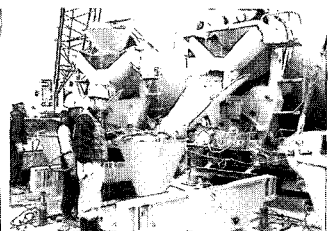


사진 6. 콘크리트 타설

표 11. 지하연속벽에 타설된 고유동 콘크리트의 품질관리 결과

항목	슬럼프 플로우 (cm)		50 cm 도달시간 (초)		압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )				비고
					선행패널		후행패널		
	215	216	215	216	28일	91일	28일	91일	
구분(TK)	215	216	215	216	28일	91일	28일	91일	
평균값	63.4	62.3	6.5	6.3	352	513	348	509	*215-TK *216-TK 설계강도 (400 kgf/cm <sup>2</sup> )
최대값	65.4	64.3	7.1	6.9	374	549	368	531	
최소값	61.9	61.2	5.7	5.6	337	485	329	475	
표준편차	1.1	0.7	0.3	0.4	9.1	15.7	11.2	11.1	
강도비 (%)	-	-	-	-	68.6	100	68.4	100	

3.4 바닥슬래브 및 측벽의 시공

3.4.1 일반사항

지하연속벽의 후속공정으로 지하연속벽 상부를 연결하는 top portion 콘크리트를 타설하고 내부굴착 및 하부 파일공사를 실시하였으며, 파일을 일체화시키기 위하여 pile cap slab 콘크리트를 타설하였다. 그리고 filter 및 gravel layer를 포설하고 덮씌움 콘크리트를 타설한 다음에 ① 측벽 1 lot → ② 바닥슬래브 1 lift → ③ 측벽 2 lot → ④ 바닥슬래브 2 lift → ⑤ 측벽 3 ~ 9 lot 순으로 시공하였다. 본 절에서는 바닥슬래브 및 측벽의 콘크리트 시공과정 및 품질관리에 대하여 기술하고자 한다.

3.4.2 콘크리트의 단열온도 상승시험

바닥슬래브(깊이 9 m) 및 측벽(두께 3 m)은 조건이 복잡한 매스 구조물에 해당하기 때문에, 콘크리트의 배합조건을 선정할 때, 수화열 해석에 의한 균열지수의 판정이 중요하다. 재료 및 배합조건 선정에서 측정한 단열온도 상승시험 결과는 <표 12>와 같다. 이외에 크리프 계수, 열팽창 계수 및 타설조건을 고려한 온도응력의 해석결과, 균열지수가 1.26 ~ 1.84 범위로 온도균열에 대한 충분한 대책이 마련된 것으로 나타났다.

표 12 콘크리트의 단열온도 상승시험 결과 및 균열지수

구분	K (°C)	α	역학적 특성(kgf/cm <sup>2</sup> ) : 3, 5, 7, 14, 28, 56, 91일		
			압축강도	인장강도	탄성계수(× 105)
바닥 슬래브	24.0	0.558	62 ~ 341	8.3 ~ 30.8	1.0 ~ 2.8
측 벽	25.3	0.577	84 ~ 405	10.2 ~ 36.6	1.5 ~ 3.0

3.4.3 재료공급 및 생산관리 계획

2만 m<sup>3</sup>(바닥슬래브 1 Lift)정도의 콘크리트 대물량을 연속적으로 생산·타설하기 위해서는 재료공급이 원활해야 한다. 따라서, 공사 개시전에 <표 13>과 같이 재료공급에 대한 계획을 수립하였다. B/P 운영은 믹서당 2개조(12명/조)로 12시간 교대하도록 인원계획을 세웠으며, 콘크리트의 품질관리는 6인 2개조로 하

표 13. 콘크리트의 재료공급 계획

구분	소요량	공급계획	비고
벨라이트 시멘트	4,560 톤	생산전 2,000 톤, 1,300ton/일	영월
석회석 미분말	2,140 톤	생산전 1,500 톤, 400ton/일	태백
굵은 골재	16,700 m <sup>3</sup>	생산전 20,000 m <sup>3</sup> 반입	광명
잔 골재	11,200 m <sup>3</sup>	생산전 15,000 m <sup>3</sup> 반입	금강
고성능 감수제	43.4 톤	생산전 50 톤 탱크 반입	증평

였다. 콘크리트의 품질관리는 기본적으로 150 m<sup>3</sup>당 1회를 기준으로 슬럼프, 공기량 등의 시험을 실시하였다. 특히, 공시체는 150 m<sup>3</sup>당 91일 재령의 1조 및 450 m<sup>3</sup>당 7, 28, 91일 재령의 3조씩 제작하는 것으로 계획하였다.

3.4.4 콘크리트 타설계획

바닥슬래브 및 측벽 콘크리트의 타설을 위한 장비 및 인원계획은 다음과 같다.

1) 콘크리트의 타설방법

콘크리트의 타설방법은 <그림 5>와 같이 지상에 11대의 펌프카를 배치하고 배관파이프를 통해 하부로 압송되도록 하였다. 바닥슬래브의 경우, 펌프카 #1·#4·#7·#9호기는 T-밸브(분지관)로, 나머지 7대의 펌프카는 분배기로 콘크리트를 타설할 수 있도록 계획하였다. 또한, 탱크바닥의 원모양은 각각의 분배기로 콘크리트를 타설할 수 있는 영역을 나타낸 것이다. 측벽의 경우에는 T-밸브 6기를 사용하여 타설하는 것으로 계획하였다.

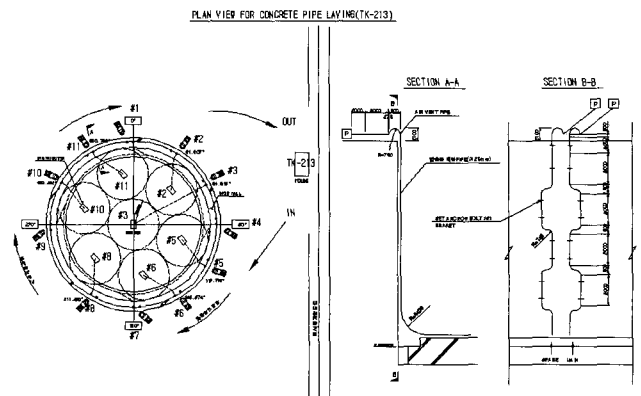


그림 5. 바닥슬래브의 콘크리트 타설방법

수직배관은 자유낙하로 인한 재료분리의 방지 및 원활한 펌핑성을 위하여 2개소에 곡면을 설치하였다. 수평배관은 분배기와 T-밸브의 배관으로 나누어지며, 분배기의 경우에는 일정한 간격으로 바닥슬래브 하부까지 트레미로 수직배관을 설치하여 콘크리트의 낙하높이를 최소화하였다. T-밸브의 경우에는 각각의 배출구에 고무호스를 부착하여 하부까지 콘크리트가 배출될 수 있도록 하였다. 특히, T-밸브에는 콘크리트 배출구가 12개소 설치되어 있는데, 초기의 모르타르를 펌핑할 때는 12개소 전부를 열어

놓은 상태에서 1번부터 모르타르가 통과된 것을 확인한 후 순차적으로 배출구를 닫으면서 11번까지 반복한다.

콘크리트는 배관의 끝단인 12번부터 10분간 배출한 후 역순으로 이웃한 11번을 배출하기 시작하면서 12번을 닫는 것으로 하였다. 따라서, 반복하여 동일한 번호의 배출구에 콘크리트가 다시 배출되는데 걸리는 시간은 130분 정도가 소요된다.

2) 작업 및 품질관리를 위한 인원 배치계획

콘크리트의 작업·품질관리를 위한 인원배치는 <표 14>와 같다. 콘크리트 타설이 시작되기 전에 모든 작업자 및 시공사의 시공·품질관리 요원이 정위치하여 리허설을 실시하였으며, 배관라인이 막힐 경우에 신속히 조치할 수 있도록 계획하였다.

표 14. 작업 및 품질관리 인원의 배치계획

구분	업무	배치인원	업무	배치인원	비고
탱크 상부	차량 유도원	3명 (배차/승장)	배관보수 요원	6명 (개폐관리)	소계 49명
	슈트 작업원	22명 (2명/펌프카)	상/하 신호수	11명 (1명/펌프카)	
	품질·안전팀	5명 (총괄포함)	전기 관리원	2명 (상/하부)	
	T-밸브 (4기)		분배기 (7기)		
탱크 하부	작업 반장	4명 (1명/밸브)	작업 반장	7명 (1명/분배기)	소계 113명
	밸브 개폐공	4명 (1명/밸브)	분배기 조정공	14명 (2명/분배기)	
	배관 관리공	8명 (2명/밸브)	진동 다짐공	42명 (6명/분배기)	
	진동 다짐공	20명 (5명/밸브)	청소공	3명 (발판이동)	
	시공 /품질관리	4명 (1명/밸브)	시공 /품질관리	7명 (1명/분배기)	
	전체인원 (주·야간)			162명 (324명)	

3.4.5 콘크리트 생산 및 품질관리

콘크리트는 현장내에 설치된 A·B 플랜트(믹서 각각 2기)에서 동시에 생산되었으며, 현장까지의 운반시간은 약 5분 정도 소요되었다. 시험빈도는 초기에 각 믹서에 대해 3대씩, 이후에는 150m<sup>3</sup>마다 1회로 측정하였다. 또한, 콘크리트의 품질에 영향을 미치는 잔골재의 표면수를 관리를 철저히 하여 배합조건에 반영하였다.

1) 콘크리트의 생산량

시간당 콘크리트의 생산량은 <그림 6>에 나타난 바와 같다. 전체적인 콘크리트의 시간당 생산량은 최대 468m<sup>3</sup>, 최소 209m<sup>3</sup> 및 평균 346m<sup>3</sup>로 나타났다. 생산성이 낮은 시간대는 주로 교대 및 식사시간, 그리고 약간의 플랜트 트러블로 인한 것이지만, 대체적으로 무난한 경향을 나타내었다. 전체 생산량은 2만 618m<sup>3</sup>이고 콘크리트의 타설을 완료하는데 소요된 시간은 60시간으로 나타났다. 그러나, 현장의 타설능력을 고려하면 시간당 400m<sup>3</sup> 정도 공급해야 할 것으로 평가된다.

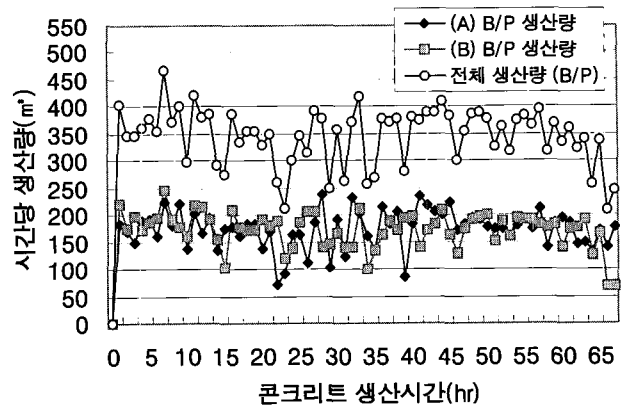


그림 6. 콘크리트의 시간당 생산추이

2) 콘크리트의 품질시험 결과

품질관리 항목은 슬럼프·공기량·염화물량, 단위중량 및 재령별 압축강도이며, <그림 7>은 빈도별 슬럼프값의 측정결과이다. 슬럼프 시험결과, 최대 22.5, 최소 19, 평균 20.6cm이고 표준편차는 0.7cm, 변동계수는 3.6이며, 공기량(최대 5.5, 최소 4.5, 평균 5.0%)이고 표준편차 0.2%, 변동계수 4.9) 및 염화물량(최대 0.02, 최소 0.008, 평균 0.013kg/m<sup>3</sup>)의 시험결과도 만족하였다. 또한, 콘크리트의 타설온도는 최대 17.9, 최소 13, 평균 15.2°C이었다. 압축강도 시험결과, 바닥슬래브는 28일에 약 220kgf/cm<sup>2</sup> 및 91일에 약 300kgf/cm<sup>2</sup> 정도로, 측벽은 각각 약 255kgf/cm<sup>2</sup> 및 350kgf/cm<sup>2</sup>로 나타나 구조물의 요구성능을 만족하였다.

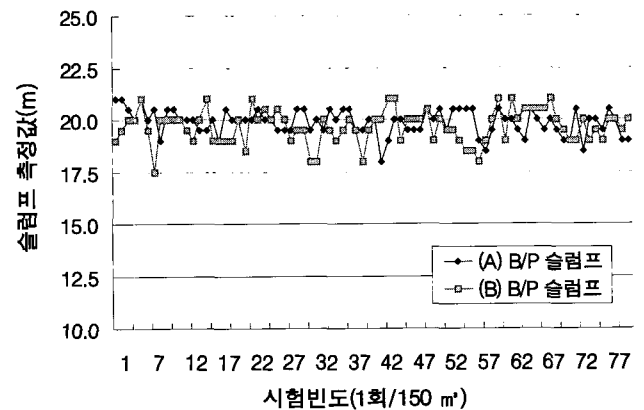


그림 7. 시험빈도에 따른 슬럼프 추이

3.4.6 콘크리트 타설

현장에서의 콘크리트 타설상황은 <사진 7~사진 10>과 같다. 펌프카 1대당 콘크리트의 타설용량은 시간당 40m<sup>3</sup>로 11대의 용량은 약 440m<sup>3</sup>이다. 또한, 펌프카의 압송압을 80~100kg/cm<sup>2</sup>로 관리하였으며, 콘크리트의 응결시간(초결 13시간, 중결 18시간)을 고려하여 분배기 및 T-밸브의 타설높이 및 콜드조인트 관리에 반영하였다.

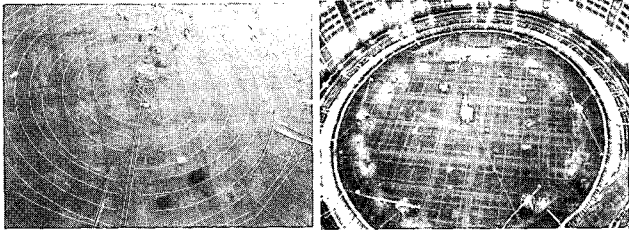


사진 7. 바닥 히터파이프 설치      사진 8. 바닥 콘크리트의 타설상황

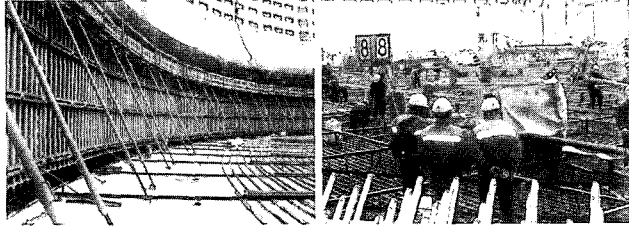


사진 9. 벽체 거푸집 설치      사진 10. 바닥 콘크리트 타설검측

### 3.4.7 콘크리트 양생관리

한꺼번에 타설하는 콘크리트의 두께가 6m인 바닥슬래브는 수화열이 높기 때문에 양생관리에 의한 균열제어가 매우 중요하다. 콘크리트의 양생관리는 <그림 8>에 나타난 바와 같이 4개의 영역(A, B, C, D)으로 나누어 실시하였다. A영역은 콘크리트 타설을 완료한 후에 7일간 비닐 + 양생포 2겹 + 비닐을 설치하고 습윤양생을 실시하였으며, B영역은 타설완료일로부터 5일 경과후

거푸집을 제거한 뒤 연결재(t = 30)를 면에 부착하였다. C영역은 비닐 + 양생포 + 비닐을 덮고 소정의 기간동안 양생을 실시하였다. 가장 중요한 D영역은 양생포를 표면에 깔고 약 10cm 정도로 담수한 다음 상부에 양생포를 깔고 비닐천막을 씌워 약 2개월동안 담수양생을 실시하였다.

측벽의 경우에는 상부에 양생포 2겹을 덮고 살수양생하는 것을 원칙으로 하였으며, 측벽 1lot에 설치한 수화열 측정결과는 <그림 9>와 같다. 타설시, 콘크리트의 평균온도는 약 13°C이며, 중앙부에 설치한 열전대의 최고온도는 약 36°C 정도로 나타났다. 이는 단열온도 상승값(25°C)을 고려할 때, 거의 일치되는 값으로 측벽에 발생하는 응력은 균열지수와의 일치하였으며 균열은 발생하지 않았다.

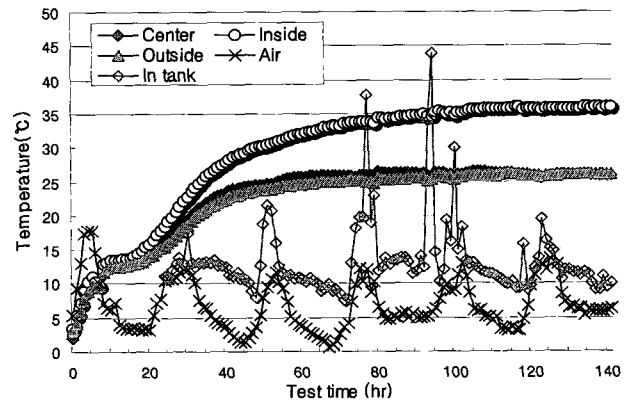


그림 9. 콘크리트 내부온도의 측정결과(측벽 1 Lot)

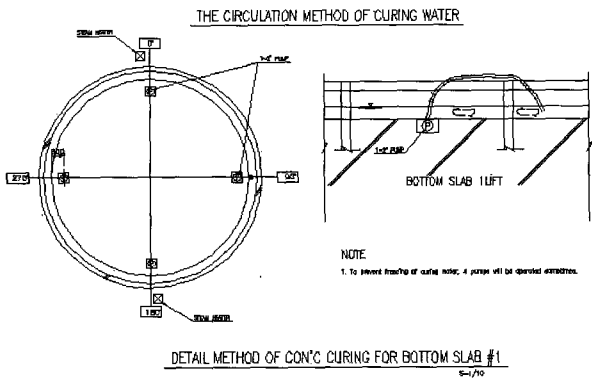


그림 8. 콘크리트의 영역별 양생방법

### 3.5 지붕의 시공

#### 3.5.1 일반사항

지하식 LNG 저장탱크의 지붕은 바닥슬래브에서 강재(두께 5t) 돔을 제작한 뒤에 상부로 air raising을 하는 air support 공법으로 측벽의 상부와 고정시킨다. 상부에 설치된 강재에 철근을 배근하고 콘크리트를 타설하고 7일 후에 프리스트레스를 도입하며, 약 3주가 경과한 다음에 air support를 제거하도록 설계하였다. 따라서, 콘크리트의 요구성능은 지붕 돔의 기울기 및 초기강도 발현을 만족할 수 있는 배합조건으로 해야 한다.

#### 3.5.2 콘크리트의 요구성능

콘크리트의 재령별 강도와 프리스트레싱 및 air support 제거에 소요되는 공정은 <그림 10>과 같다. 즉, 강도관리 재령을 28일로 할 경우에는 배합조건이 비경제적일 뿐만 아니라 측벽과 지붕의 단부가 정착되는 부위의 두께가 1.4m로 매시브하기 때문에, 수화열에 의한 균열의 가능성도 예측된다. 따라서, 프리스트레싱에 필요한 강도(100 kgf/cm<sup>2</sup>)가 7일 재령에 발현되고, air support를 제거에 필요한 강도(140 kgf/cm<sup>2</sup>)가 21일 재령을 만족하는 조건으로 최종강도관리 재령을 91일로 정하였다.



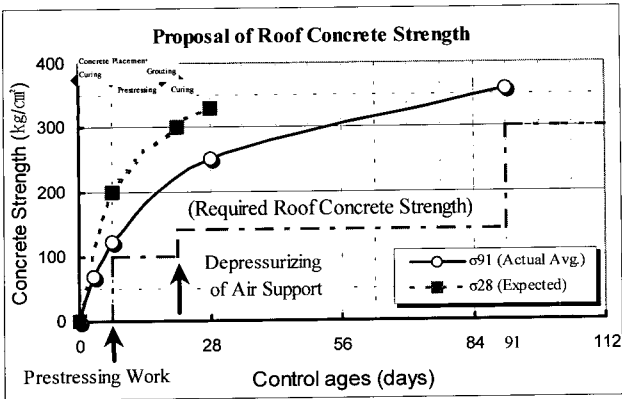


그림 10. 프리스트레싱 및 Air support 제거시기와 강도관계

3.5.3 지붕의 시공조건 및 콘크리트 타설

지붕의 시공조건은 <그림 11>과 같다. 지붕은 경사구배가 높고 단부에서 중앙부까지 콘크리트의 타설두께가 1.4 ~ 0.6 m로 되어 있기 때문에, 상부에 거푸집을 설치하고 콘크리트를 충전하는 방식을 채택하였다. 지붕의 타설구획은 6개 소로 나누었으며, 지붕의 시공과정은 <사진 11 ~ 사진 12>와 같다.

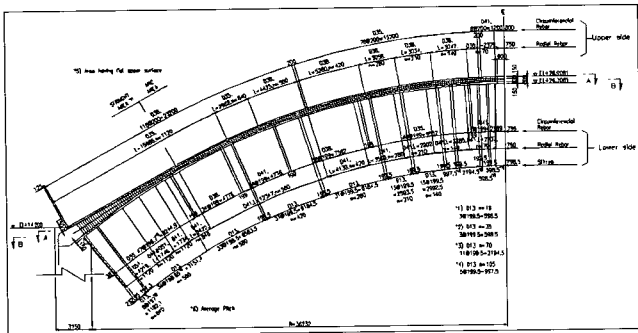


그림 11. 지하식 LNG 저장탱크의 지붕 상세도

3.5.4 콘크리트의 품질관리 결과

지붕에 타설된 콘크리트의 품질관리 결과는 <표 15>와 같다. 재령별 강도발현 결과, 프리스트레싱을 도입하는 7일에 평균강도 177 kgf/cm<sup>2</sup>, 최소값 150 kgf/cm<sup>2</sup>으로 요구강도(100 kgf/cm<sup>2</sup>)를 만족하였다. 또한, air support를 제거하는 21일에도 안정된

강도발현을 나타내어 후속공정을 완벽하게 진행할 수 있었으며, 지붕의 표면에 균열은 나타나지 않았다.

표 15. 지붕에 타설된 콘크리트의 품질관리 결과

구분	항목	콘크리트 온도 (°C)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )			비고
					7일	28일	91일	
평균값		13.4	16.2	4.9	177	280	369	* 215-TK 설계강도 (300 kgf/cm <sup>2</sup> )
최대값		14.8	17.5	5.2	217	333	424	
최소값		12.1	14.5	4.6	150	229	324	
표준편차		0.9	1.5	0.1	16.7	25.1	23.5	
강도비(%)		-	-	-	48	76	100	

4. 결론

국내에서 처음으로 시도된 20만 kl 대용량 지하식 LNG 저장탱크를 시공하면서 각 공정별 설계 및 시공기술에 대하여 기술하였다. 한정된 지면에 자세한 요소기술을 정리할 수는 없었지만, 점점 대용량으로 건설되는 LNG 저장탱크 시설공사를 통해 고유동 및 초저열 매스 콘크리트에 대한 기술력 확보 및 현장의 실제 자료들이 국내의 콘크리트 기술력 향상에 도움이 되었으면 한다. 특히, 본 공사의 성과를 좌우하는 콘크리트의 기술력이 순수 국내 기술개발의 결과<sup>2)</sup>로 가능하였기 때문에, 향후 유사한 해외 프로젝트에도 중요한 자료로 활용될 것으로 기대하면서 이번 특집을 통해 지하식 LNG 저장탱크 공사의 요소기술에 대한 인식 및 기술을 공유하는 계기가 되길 바라며, 본고를 마감하고자 한다. □

참고문헌

1. Yeong-ho Kwon, "A study on the mix design and quality factors of the combined high flowing concrete using high belite cement", International journal of the Korea Concrete Institute, Vol.14, No.3 September 2002, pp.121 ~129.
2. 林染林, 安宰鉉, 權寧鎬, "碎砂を用いた高流動コンクリートの實施工例-トップダウン工法への適用", 高機能コンクリートに関する第2回韓国セミナー講演論文集, 名古屋大學(日本) 1998.7. pp.61~71.

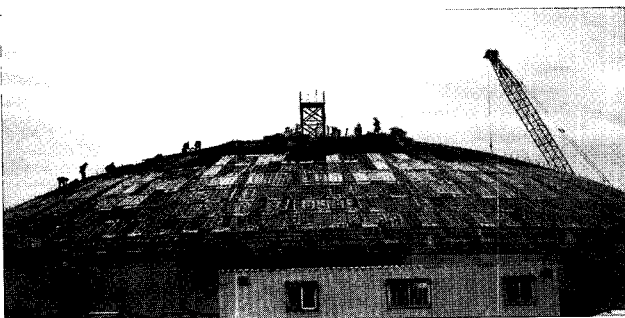


사진 11. 지붕의 거푸집 설치

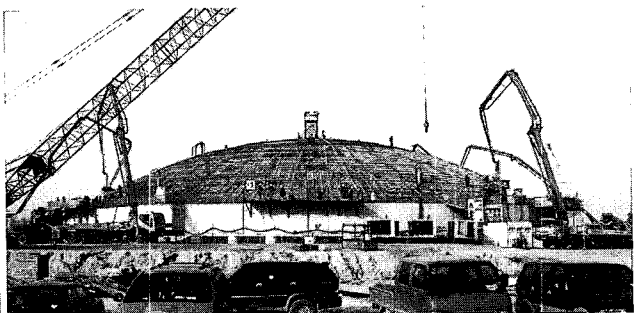


사진 12. 지붕의 콘크리트 타설