

23,000m³의 콘크리트가 연속타설된 지하식 LNG 저장탱크의 Bottom slab 시공사례

權 寧 鎬

〈대우건설 인천LNG 지하탱크현장, 품질팀장(工博)〉

全 成 根

〈대우건설 인천LNG 지하탱크현장, 토목소장(技術士)〉

金 武 漢

〈충남대학교 공과대학 건축공학과 교수(工博)〉

1. 머리말
2. 지하식 LNG 지하탱크의 공사개요
 - 2.1 공사개요
 - 2.2 구조개요
3. 콘크리트의 사용재료 및 배합설계
 - 3.1 사용재료
 - 3.2 콘크리트의 요구성능
 - 3.3 콘크리트의 배합조건 및 실험결과
 - 3.4 플랜트에서의 품질 확인시험

4. 콘크리트의 생산 및 타설계획
 - 4.1 콘크리트의 생산설비 및 용량
 - 4.2 재료공급 및 생산관리 계획
 - 4.3 콘크리트의 타설계획
 - 4.4 콘크리트의 생산 및 품질관리
 - 4.5 콘크리트의 품질시험 결과
 - 4.6 콘크리트의 타설관리
 - 4.7 콘크리트의 양생 및 수화열 관리
5. 맺음말

1. 머리말

LNG(Liquefied natural gas) 저장탱크는 안정적이고 환경친화적이면서, 저렴한 에너지를 공급하기 위하여 정부에서 國策事業의 일환으로 수행하고 있는 대규모 건설공사로, 평택·인천에 10만kl의 용량을 갖춘 지상식 저장탱크가 건설된 바 있으며, 최근에는 통영

에 14만kl의 용량을 갖춘 지상식 LNG 저장탱크가 大字建設에 의해 건설되고 있다.

그러나, 지금까지 국내에서 건설된 LNG 저장탱크는 대부분 지상식 탱크였기 때문에, 설계·엔지니어링·기계, 운전 등에 대한 Know-how는 매우 중요한 요소기술로 인식되어 왔으나, 구조물에 Pre-stressed 또는 Post-tension을 도입하여 건설되었기 때문

에 콘크리트 부분은 중요한 요소기술로 간주되지 않았다.

최근, 시공기술 및 콘크리트 요소기술의 발전에 따른 기술력 향상 및 LNG 저장탱크의 안정성 확보, 지상설비의 불필요, 그리고 토지이용율의 증대를 목적으로, 1998년부터 한국가스공사에서는 해상운송 및 수도권 공급이 원활한 지리적 이점을 갖춘 인천 LNG 인수기지 저장설비 공사에 지하식 LNG 저장탱크를 건설하기 시작하였다.

지하식 LNG 저장탱크의 역사는 日本의 동경가스에서 도시가스의 수요증가에 대응하기 위하여 1945년부터 건설하기 시작한 이래, 현재 根岸공장의 경우에는 세계 최대규모인 20만kl 용량의 지하탱크가 가동되고 있다.

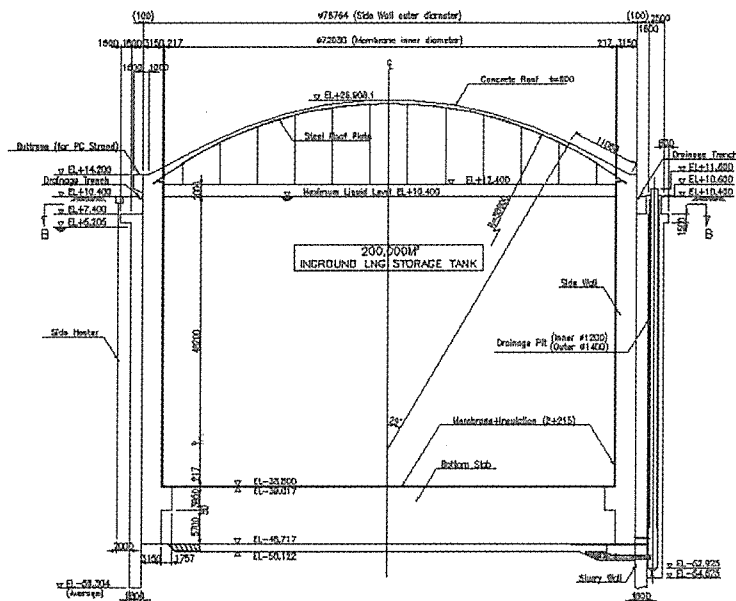
국내에서도 1998년부터 한국가스공사의 인천 LNG 인수기지에 국내 최초로 14만kl의 용량을 갖춘 지하식 저장탱크(#211, 212 - TK)가 건설되기 시작한 이래, [그림 1]에 나

타난 바와 같이 후속공사로 세계 최대의 저장용량(20만kl)을 갖는 지하식 LNG 저장탱크(#213, 215, 216 및 #218-TK)가 大宇建設에 의해 시공되고 있다.

현재의 건설공정을 살펴보면, #213-TK의 경우 Slurry wall(이하, 지하연속벽), Side wall(이하 측벽) 9Lot 및 Bottom slab(이하, 바닥슬래브) 2Lift가 완성되었다.

또한, #215, 216-TK의 경우에는 지하연속벽이 완성되었으며 측벽은 각각 5Lot 및 2Lot가 완료되었으며, 바닥슬래브는 각각 1Lift가 완료된 상태이다. #218-TK의 경우에는 지하연속벽 공사가 완료되었으며, 본체 공사를 위한 내부 굴착이 진행되고 있다.

여기서, 지하연속벽에 사용된 콘크리트는 高强度(400kg/cm²) 콘크리트일 뿐만 아니라, 타설시의 自己充填性 및 트레미(Tremie)에 의한 시공성의 확보로 다짐이 필요없는 高流動 콘크리트의 성능 및 경과과정에서 구조체



(그림 1) 지하식 LNG 지하탱크의 구조도(20만kl 용량 : 인천기지)

에 발생할 수 있는 온도균열을 방지하기 위하여 低發熱性이 함께 요구되었다.^{(1),(2)}

특히, 저장탱크의 바닥슬래브에 적용되는 콘크리트는 바닥두께가 9m이고 이를 2회에 나누어서 타설하기 때문에, 균열을 방지하기 위한 초저열 콘크리트의 성능이 요구된다. 1Lift의 경우에는 23,000m³, 2Lift의 경우에는 11,000m³의 콘크리트가 약 50m의 하부배관을 통해 타설되기 때문에, 재료분리 및 펌핑성을 고려한 콘크리트의 배합설계 및 수화열 억제, 콜드조인트 및 시공불량을 방지하기 위하여 면밀한 시공계획이 요구된다.

따라서, 본 보고에서는 大字建設에 의해 시공중인 인천기지의 지하식 LNG 저장탱크(#213-TK)의 바닥슬래브에 사용된 超低熱 콘크리트의 배합설계, 온도관리, 콘크리트의 제조·운반·타설·양생 등에 대한 품질관리 결과를 정리하였으며, 국내에서 최대규모로 타설된 콘크리트의 배합 및 시공사례에 따른 자료축적은 물론 이를 통해 국내 콘크리트 기술의 선진화·고품질화 및 요소기술의 공유화를 실현하고자 한다.

여기서, 콘크리트의 재료는 요구성능(水和熱, 強度 및 耐久性), 경제성 및 자원의 유효이용이라는 관점에서 고로슬래그 미분말 50% 및 플라이애쉬 30%를 치환한 3성분계 시멘트를 사용하였기 때문에, 이러한 대형 구조물에 시공한 사례를 통해 국내의 콘크리트 분야에 대한 기술의 발전도 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 지하식 LNG 저장탱크의 공사개요

2.1 공사개요

지하식 LNG 저장탱크의 공사개요는 [표 1]과 같다.

[표 1] 지하식 LNG 저장탱크의 공사개요

구분	내용
공사명	인천 LNG 인수기지 시설현장(1차)
발주처	한국가스공사
시공자	대우건설 (#213-TK : 1차현장)
주요 토목공정	① 지하연속벽 ② 바닥슬래브 ③ 측벽 ④ 지붕
공사기간	1998.11 ~ 2002.7 (3년 8개월)
주요 설계물량	① 콘크리트 : 132,312m ³ ② Re-bar : 23,989 Ton ③ Pre-stressing : 94 Ton ④ Roof & Deck PL. : 710 Ton

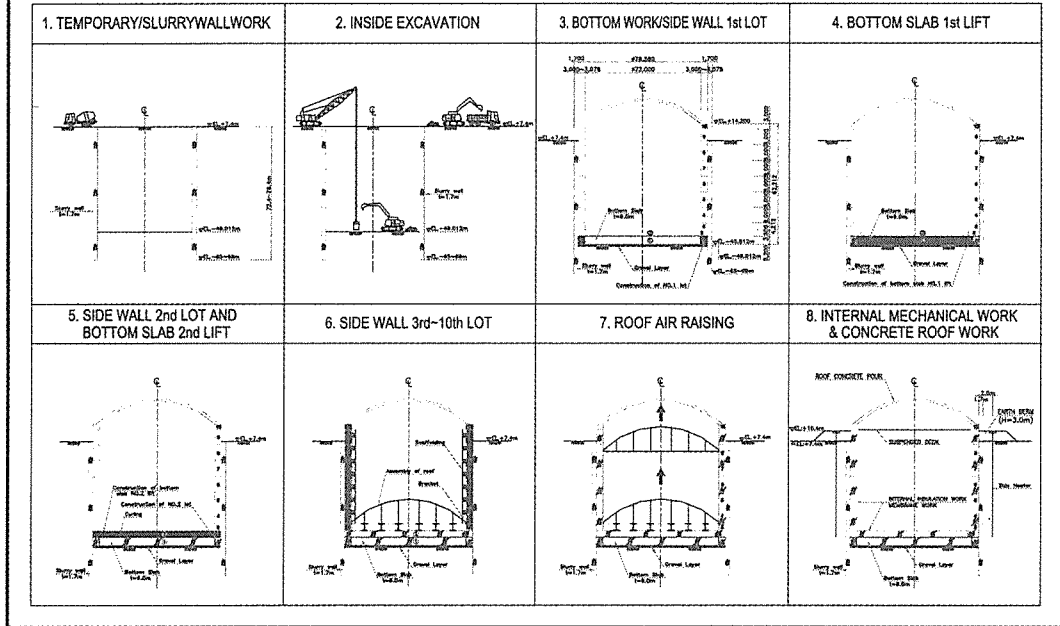
[표 1]에 기술한 바와 같이 대부분 특수 콘크리트의 공정이고, 단일공사로는 국내에서 처음 시도되는 대규모의 공사임을 알 수 있다.

지하식 LNG 저장탱크의 주요공정 시공순서는 [그림 2]와 같다.

- 1) 지반 및 지질조사
- 2) 가설공사 및 Guide wall 콘크리트 시공
- 3) 지하연속벽(Slurry wall) 굴착 및 콘크리트 시공
- 4) Top portion(지하연속벽 상부) 콘크리트 시공
- 5) 내부굴착 및 하부파일 시공
- 6) Pile cap slab 콘크리트 시공
- 7) Filter & Gravel layer 포설 및 덮씌움
- 8) 측벽(Side wall) 1Lot 콘크리트 시공
- 9) 바닥슬래브(Bottom slab) 1Lift 콘크리트 시공
- 10) 측벽 2Lot 및 바닥슬래브 2Lift 콘크리트 시공
- 11) 측벽 3~10Lot 순차적인 콘크리트 시공
- 12) Roof air raising 및 Roof 콘크리트 시공
- 13) 성토 및 마감공사

물론, 상기의 시공순서는 순수하게 土木工事に 국한시킨 공정이며, 기계 및 설비공정

CONSTRUCTION SEQUENCE FOR INGROUND TANK



[그림 2] 지하식 LNG 지하탱크의 주요공정 시공순서도

은 제외하였다. 현재 본 공사는 11)단계가 진행중이며, 본 보고에서는 단일공사로는 최대 용량인 바닥슬래브의 콘크리트(약 34,000m³) 배합 및 제조, 시공, 양생 및 품질관리 결과에 대하여 기술하고자 한다.

2.2 구조개요

본 보고에서 기술하고자 하는 지하식 LNG 저장탱크의 주요 구조개요는 [표 2]와 같다.

[표 2]에서 보듯이 대부분의 콘크리트 공정

[표 2] 지하식 LNG 저장탱크의 주요 구조개요(#213-TK)

구 분	지하 연속벽	바닥 슬래브	측 벽
설계기준강도	400 kg/cm ² (91일)	240 kg/cm ² (91일)	270~300 kg/cm ² (91일)
구조물 사양	- 내부직경 : 78.5m - 연속벽 두께 : 1.7m - 연속벽 깊이 : 75.0m	- 내부직경 : 72.6m - 슬래브 두께 : 9.0m	- 측벽 두께 : 3.0m - 측벽 높이 : 50m
콘크리트 타설계획	- 선행판넬 : 26개 (판넬길이 : 7.24m) - 후행판넬 : 26개 (판넬길이 : 2.8m)	- 2개 Lift로 분할 타설 - 1Lift : 6.0 m - 2Lift : 3.0 m	- 10Lot로 분할 타설 - 순차적으로 타설 - 1Lot 평균높이 : 5m
콘크리트 특성	병용계 고유동 콘크리트	초저열 콘크리트	초저열 콘크리트
콘크리트 물량	37,500m ³ / tank	35,500m ³ / tank	55,000m ³ / tank

이 중요하지만, 특히 바닥슬래브의 경우에는 콘크리트의 타설높이(9m) 및 물량(약 34,000m³)의 측면에서 볼 때, 국내에서 처음으로 시도되는 공사로 콘크리트의 水和熱 및 品質管理가 매우 중요한 항목으로 사료된다.

3. 콘크리트의 사용재료 및 배합설계

3.1 사용재료

일본에서 시공된 지하식 LNG 저장탱크의 바닥슬래브 사례에 따르면, 콘크리트에 사용된 시멘트는 고로슬래그 시멘트(B종)에 석회석 미분말(Lime stone powder) 또는 플라이애쉬를 혼합하거나 Belite 시멘트에 석회석 미분말을 혼합 또는 Belite 시멘트를 단독으로 사용한 경우가 많았다.⁽³⁾

본 공사의 바닥슬래브에 사용되는 시멘트는 해외기술선(일본의 大成建設, 大林組, 鹿島)의 시공실적 및 국내 콘크리트 재료의 특성, 경제성 등을 고려하여 3성분계 시멘트(고로슬래그 시멘트+플라이애쉬)로 정하였다.

그러나, 후속공사인 #215, 216 및 #218-TK는 수화열 및 콘크리트의 제조·품질관리 등의 영향을 고려하여 Belite 시멘트와 석회석 미분말을 주요 結合材로 선정하였으며, 이로 인해 공정별 사양이 다른 콘크리트를 동일한 플랜트에서 균일한 품질로 생산할 수 있게 되었다.⁽⁴⁾

#213-TK의 바닥슬래브에 타설된 콘크리트의 재료는 [표 3]과 같다.

고로슬래그 시멘트

[표 3] 바닥슬래브용 콘크리트의 재료

시멘트	혼화재	잔골재	굵은골재	혼화제
슬래그시멘트	플라이애쉬	강모래	20mm 쇄석	폴리-카르본계

(B종)는 분말도 4,000cm²/g, 비중 3.05, 슬래그 미분말의 치환율이 평균 50%인 S-社의 제품을 사용하였고, 플라이애쉬는 분말도 3,150cm²/g, 비중 2.21인 태안 화력발전소의 제품을 사용하였다.

또한, 굵은골재는 조립율 6.69, 비중 2.8, 흡수율 0.66%인 광명석산의 20mm 쇄석을 사용하였으며, 잔골재는 조립율 2.55, 비중 2.63, 흡수율 0.71%인 금강의 강모래를 사용하였다. 특히, 고성능 AE감수제는 경시변화 90분까지 굳지 않은 콘크리트의 요구성능을 유지하기 위해 D-사의 액상형 폴리-카르본계를 사용하였다.

3.2 콘크리트의 요구성능

바닥슬래브에 타설된 콘크리트의 설계기준 강도는 240kg/cm²이지만, 배합강도는 변동계수(V) 10%를 고려한 활중계수(α) 1.2를 적용하였으며 콘크리트의 요구성능은 [표 4]와 같다.

여기서, 굳지 않은 콘크리트의 요구성능은 경시변화 90분까지 만족해야 한다. 특히, 공기량의 범위가 5±1%인 것은 LNG가 저장될 때의 액화온도가 -162℃정도로 낮기 때문에, 내구성 측면에서 공기량의 범위를 가급적으로 높게 선정한 것이다.

특히, 지금까지 일반적인 콘크리트 공사는

[표 4] 바닥슬래브용 콘크리트의 요구성능

슬럼프 (cm)	공기량 (%)	염화물량 (kg/m ³)	설계강도 (kg/cm ²)	배합강도 (kg/cm ²)
18±3.0	5±1	0.3 이하	240	288

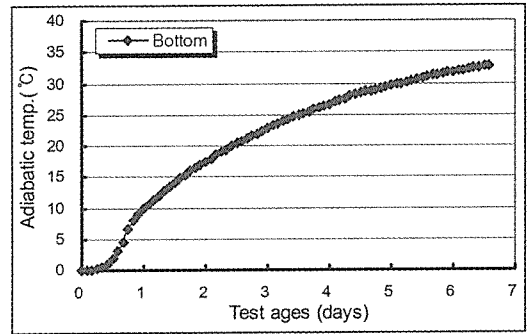
상부로 콘크리트를 펌핑하는 반면에 지하식 LNG 저장탱크의 바닥슬래브 공사는 하부로 약 50m정도 배관펌핑을 한 후에, 分枝管 工法으로 타설되기 때문에, 콘크리트의 컨시스턴시를 유지하면서 재료분리를 방지하는 것이 중요한 사항이다.

3.3 콘크리트의 배합조건 및 실험결과

바닥슬래브용 콘크리트의 배합설계는 워커빌리티, 강도, 수화열 및 경제성 측면에서 다각도로 검토하였으며, 3성분계 초저열 콘크리트의 특성을 갖는 배합설계의 조건에 만족하는 최적배합을 도출하고자 하였다.

콘크리트의 재령별 압축강도 및 수화열 특성, 변수별 시험결과를 고려하여 [표 5]와 같은 배합조건을 제시하였으며, 이에 대한 굳지 않은 콘크리트의 특성 및 재령강도, 수화열 특성에 대한 실험결과는 [표 6] 및 [그림 3]과 같다.⁽⁵⁾

각각의 배합조건에 대하여, 굳지 않은 콘크리트의 요구성능 및 경시변화, 재령별 압축강도의 결과는 모두 만족하였지만, 경제성 및 단



[그림 3] 단열온도 상승시험결과(W/B=52.3)

열온도 상승시험의 결과를 고려하여, $K=38.1^{\circ}\text{C}$, $\alpha=0.250$ 을 나타낸 두 번째의 배합조건(W/B=52.3%)을 최적배합으로 선정하였다.

단열온도 상승시험의 결과 및 재령별 압축강도, 인장강도, 탄성계수, 크리프계수 등을 사용하여 온도응력을 해석하였다. 해석결과, 선정된 바닥슬래브용 콘크리트의 배합조건은 균열지수가 1.05~1.26을 나타내어 요구조건인 1.0이상을 만족하였다. 따라서, 물/결합재비 52.3%인 배합조건을 바닥슬래브용 콘크리트의 최적배합으로 선정하였다.

3.4 플랜트에서의 품질 확인시험

[그림 4]는 실내에서 선정된 배합조건에 대해 배치 플랜트의 배합시간을 결정하기 위하여 이에 따른 믹서

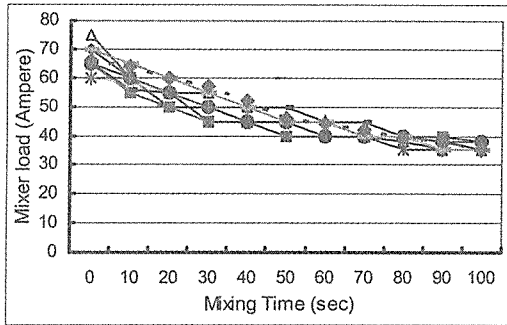
[표 5] 바닥슬래브용 콘크리트의 배합조건

W/B (%)	S/a (%)	단위재료량(kg/cm ³)					Ad (B×%)
		W	C	F/A	S	G	
50.8	41.5	161	222	95	726	1.035	1.17
52.3	41.0	161	215	93	720	1.049	1.18
53.7	41.0	161	210	90	724	1.053	1.18

[표 6] 배합조건에 따른 시험결과

W/B (%)	슬럼프(cm)			공기량(%)			압축강도(kg/cm ²)				비고
	직후	30분	60분	직후	30분	60분	3일	7일	28일	91일	
50.8	19.5	19.0	18.0	5.6	5.1	4.8	109	179	309	404	
52.3	20.0	20.0	18.5	4.7	4.5	4.2	103	166	288	378	◎
53.7	19.0	19.0	17.0	4.8	4.6	4.2	98	138	274	343	

의 암페어 관계를 측정한 결과이다.



[그림 4] 배합시간에 따른 믹서의 암페어 관계

이때, 굳지 않은 콘크리트의 상태를 함께 검토하여 비교적 믹서의 암페어가 안정적인 값을 나타낸 55초를 최종 배합시간으로 선정하였다.

이러한 배합시간을 근거로 시간당 콘크리트의 생산량을 산출한 결과, 플랜트에서 연속적으로 3m³ 및 6m³의 콘크리트를 생산하는데 요구되는 시간은 [그림 5]와 같다.

즉, 3m³의 콘크리트를 생산하는데 소요되는 시간은 115초이지만, 6m³를 연속적으로 생산할 경우에는 材料計量 및 배출시간이 중복되

기 때문에 170초가 필요하였다. 또한, 연속적으로 생산할 경우에는 재료계량 및 배출시간, 그리고 차량의 배차관리를 고려하여 6m³당 평균 200초 정도가 소요될 것으로 예상하였다.

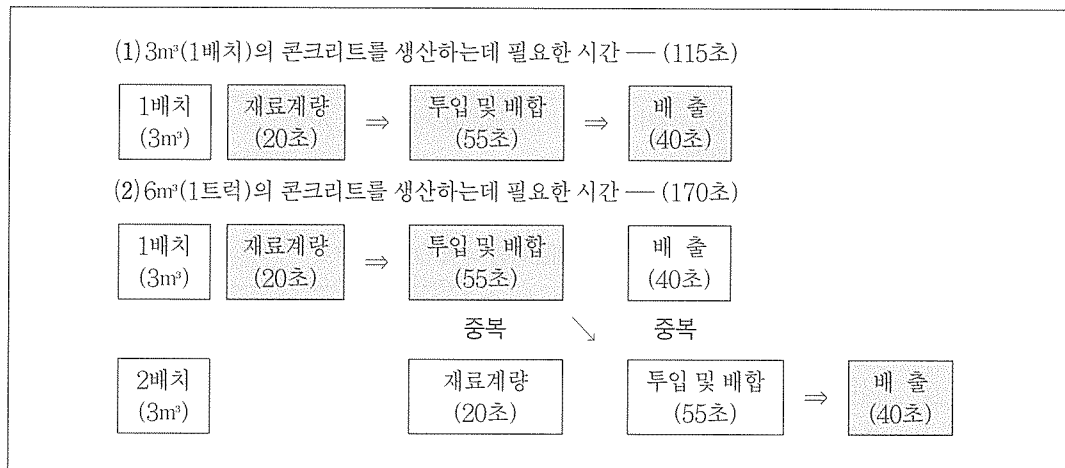
따라서, 믹서당 콘크리트의 생산량은 연속 생산성 시험으로부터 믹서의 安全效率를 고려하여 100~110m³/hr정도이며, 믹서 4기에서 생산되는 콘크리트의 시간당 생산량은 평균 408m³/hr정도로 산정되었다.

또한, 플랜트에서 최종적인 콘크리트의 품질시험을 실시하였으며, 결과는 [표 7]과 같다.

측정결과, 경시변화에 따른 슬럼프 및 공기량은 바닥슬래브용 콘크리트의 요구성능을 만족하였다. 본 배합조건으로 콘크리트를 생산하여 현장에 설치된 배관라인으로 사전에 펌핑시험을 실시하였으며, 이를 통해 나타나는 시공상의 문제점을 검토하여 보완하였다.

[표 7] 플랜트에서의 최종 배합시험 결과

항 목	경시변화에 따른 시험결과				비 고
	직 후	30분	60분	90분	
슬럼프(cm)	20.5	20.0	20.0	20.0	양호
공기량(%)	4.3	4.8	5.1	5.0	양호



[그림 5] 3m³ 및 6m³의 콘크리트를 생산하는데 요구되는 시간

4. 콘크리트의 생산 및 타설계획

바닥슬래브 콘크리트를 타설하기 위한 준비 및 공정상의 품질관리 포인트는 다음과 같다.

4.1 플랜트의 생산설비 및 용량

인천 LNG 인수기지에는 자체 배척플랜트의 생산설비가 갖추어져 있으며, 바닥슬래브



(사진 1) 현장 배척플랜트의 전경

용 콘크리트를 제조하기 위한 생산설비 및 용량은 [사진 1] 및 [표 8]과 같다.

생산설비는 사전에 점검을 실시하였고, 콘크리트를 생산하는 도중에 발생할 수 있는 문제점에 대해서는 여분의 장비와 인력을 배치하였다.

4.2 재료공급 및 생산관리 계획

34,000m³ (1Lift = 23,000m³, 2Lift = 11,000m³) 정도의 콘크리트 물량을 한꺼번에 연속적으로 생산·타설하기 위하여, 사전에 [표 9]과 같이 재료공급에 대한 계획을 수립하였다.

배척플랜트 운영은 믹서당 2개조(조당 12명)로 12시간 교대하도록 인원계획을 세웠으며, 콘크리트의 품질관리는 6인 2개조로 구성하여 실시하였다.

콘크리트의 품질관리 빈도는 기본적으로 150m³당 1회를 기준으로 슬럼프, 공기량 등의 시험을 실시하였다. 특히, 압축강도 측정용 공

(표 8) 현장 배척플랜트의 설비 및 용량

구분	설비 용량		비고
저장설비	- 시멘트: 500톤 Silo×4기 - 혼화제: 15톤 Tank×4기	- 혼화제: 500톤 Silo×4기 - 배합수: 200톤 Tank×4기	플라이애쉬
생산설비	- Mixer 용량: 210m ³ /hr×4기	- 생산용량: 360~440m ³ /hr	- 배합시간
보조설비	- Chiller: 150RT×4기 - Generator: 500kW×2기	- Boiler: 4만kcal×3기	- 서중 및 한중 - 정전시
운반설비	- Agitator 댓수: 39~41대	- Agitator 용량: 6m ³ /대	- 타설용량

(표 9) 콘크리트의 재료공급 계획 (1Lift 경우)

구분	소요량	공급 계획		비고
시멘트	5,120(Ton)	- 생산전 Silo반입(2,000T)	- 1일 1,500Ton 입고	청원(177km)
플라이애쉬	2,215(Ton)	- 생산전 Silo반입(1,800T)	- 1일 500Ton 입고	태안(180km)
굵은골재	16,700(m ³)	- 생산전 20,000m ³ 반입		광명(40km)
잔골재	11,200(m ³)	- 생산전 15,000m ³ 반입		금강(180km)
혼화제	86.5(Ton)	- 생산전 50Ton Tank 반입	- 1일 30Ton 입고	홍천(140km)

시체는 150m³당 91일 재령의 1조 및 450m³당 7, 28, 91일 재령의 3조씩 제작하는 것으로 계획하였다.

4.3 콘크리트의 타설계획

바닥슬래브에 콘크리트를 타설하기 위한 장비 및 인원계획은 다음과 같다.

1) 콘크리트의 타설계획

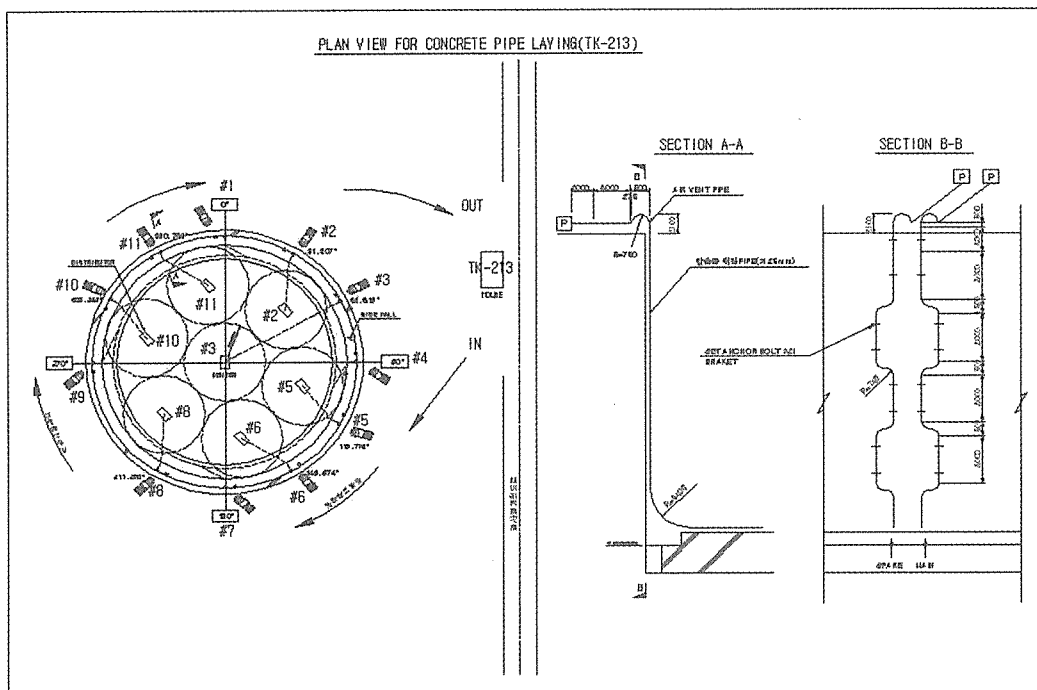
콘크리트의 타설계획은 [그림 6]에 나타난 바와 같이 지상에 11대의 펌프카를 배치하고 배관파이프(직경 150mm)를 통하여 콘크리트가 하부로 압송되도록 하였다.

여기서, 펌프카 #1호기, #4호기, #7호기 및 #9호기는 T-밸브(분지관)로, 나머지 7대의 펌프카는 분배기(Distributor)로 콘크리트를

타설할 수 있도록 배치하였다. 또한, 탱크바닥의 원모양은 각각의 분배기로 콘크리트를 타설할 수 있는 영역을 나타낸 것이다.

수직배관은 자유낙하로 인한 재료분리의 방지 및 원활한 펌핑성을 위하여 2개소에 곡면부를 설치하였다. 수평배관은 분배기와 T-밸브의 배관으로 나누어지며, 분배기의 경우에는 일정한 간격으로 바닥슬래브 하부까지 트레미로 수직배관을 설치하여 콘크리트의 낙하높이를 최소화하였다. T-밸브의 경우에는 각각의 타설구에 플렉시블 호스를 부착하여 하부의 콘크리트 타설높이를 최소화하도록 하였다.

특히, T-밸브에는 콘크리트 타설 게이트가 12개소 설치되어 있는데, 초기의 모르타르를 펌핑할 때는 12개소 전부를 열어놓은 상태에서 1번부터 모르타르가 통과된 것을 확인한 후 순차적으로 타설 게이트를 닫으면서 11번까지



(그림 6) 콘크리트의 배관 및 타설계획

반복하도록 하였으며, 콘크리트는 배관의 끝단인 12번부터 10분간 타설한 후 역순으로 이웃한 11번의 타설을 시작하면서 12번을 단도록 계획하였다. 따라서, 반복하여 동일한 번호의 타설 게이트에 콘크리트가 다시 타설되는데 걸리는 시간은 130분 정도가 소요된다.

2) 다짐 및 배수계획

콘크리트의 다짐은 고주파 바이브레이터를 사용하도록 하였으며, 각각의 콘크리트 타설구에 2대씩을 상시 가동하도록 하고 1대는 예비로 배치하였다.

또한, 콘크리트 타설중에 발생할 수 있는 블리딩수 및 빗물처리를 위하여 하부에 진공펌프를 배치하였으며, 이를 Notch tank로 수집하여 지상으로 배출하도록 계획하였다.

[표 10] 작업 및 품질관리 인원의 배치계획

구분	업 무	배 치 인 원	비 고
탱크 상부	차량유도원	-3명 (배차/송장)	
	슈트작업원	-22명 (2명/펌프카)	
	품질·안전팀	-5명 (총괄포함)	
	배관보수요원	-6명 (개폐관리)	
	상/하 신호수	-11명 (1명/펌프카)	
	전기관리원	-2명 (상/하부)	
	소 계	49 명	
탱크 하부	작업반장	-4명 (1명/밸브)	T 밸 브 (4)
	밸브 개폐공	-4명 (1명/밸브)	
	배관 관리공	-8명 (2명/밸브)	
	진동 다짐공	-20명 (5명/밸브)	
	시공/품질관리	-4명 (1명/밸브)	
	작업반장	-7명 (1명/분배기)	분 배 기 (7)
	분배기 조정공	-14명 (2명/분배기)	
	진동 다짐공	-42명 (6명/분배기)	
	청 소 공	-3명 (발판이동)	
	시공/품질관리	-7명 (1명/분배기)	
소 계	113 명		
전체인원 (주·야간)	162명(324명)		

3) 작업 및 품질관리를 위한 인원배치

콘크리트의 작업 및 품질관리를 위한 인원 배치 계획은 [표 10]과 같다.

콘크리트 타설이 시작되기 전에 모든 작업자 및 시공사의 시공·품질관리 요원이 정위치하여 리허설을 실시하였으며, 배관라인이 막힐 경우에 신속히 조치할 수 있도록 계획하였다.

4.4 콘크리트의 생산 및 품질관리

콘크리트는 현장내에 설치된 A·B 플랜트(믹서 각각 2기)에서 동시에 생산되었으며, 현장까지의 운반시간은 약 5분정도 소요되었다. 시험빈도는 초기에 각각의 믹서에 대해 3대씩, 이후에는 150m³마다 1회로 측정하였다. 또한, 콘크리트의 품질에 영향을 미치는 잔골재의 표면수를 관리를 철저히 하여 배합조건에 반영하였다.

1) 예지테이터 댓수 산정

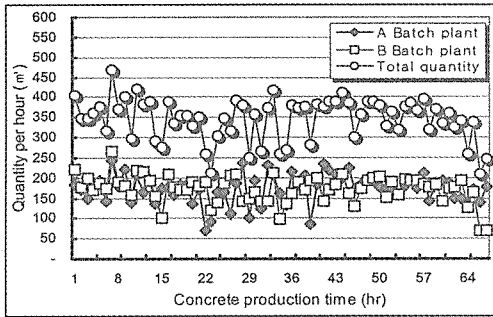
바닥슬래브 콘크리트의 타설을 위한 배관라인 및 펌프카는 11대가 설치되어 있으며, 콘크리트의 생산시간(약 4분), 운반시간(약 8분), 대기 및 타설시간(약 9분) 및 회차시간(약 9분)을 고려하여 예지테이터의 1회전 시간에 따른 댓수를 산정하였다. 산정결과, 예지테이터의 댓수는 34대이고 여기에 예비용 8대를 포함하여 총 42대의 예지테이터를 사용하였다.

2) 시간당 콘크리트의 생산량

A·B 플랜트에서 시간당 콘크리트의 생산량은 [그림 7]에 나타난 바와 같다.

전체적인 콘크리트의 시간당 생산량은 최대 468m³, 최소 209m³ 및 평균 346m³로 나타났다. 생산성이 낮은 시간은 주로 교대 및 식사시간, 그리고 약간의 플랜트 트러블로 인한 것이

지만, 대체적으로 무난한 경향을 보였다. 전체 생산량은 23,180m³(11lift)이고 콘크리트의 타설을 완료하는데 소요된 시간은 68시간으로 나타났다. 그러나, 현장의 타설능력을 고려하면 시간당 400m³정도 공급해야 할 것으로 사료된다.



(그림 7) 시간당 콘크리트의 생산추이

4.5 콘크리트의 품질시험 결과

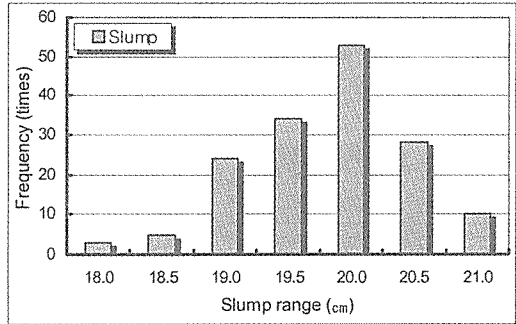
현장 콘크리트의 품질관리 항목은 슬럼프 · 공기량 · 염화물량, 단위중량 및 재령별 압축강도이며, [표 11] 및 [그림 8]은 빈도별 콘크리트의 품질시험 결과를 나타낸 것이다.

슬럼프 시험결과, 160회에 걸친 빈도에 따른 평균값은 19.8cm, 최대값은 21.0cm 및 최소값은 17.5cm를 나타내었으며, 이때의 표준편차는 0.71cm이고 변동계수는 3.4%로 나타났다.

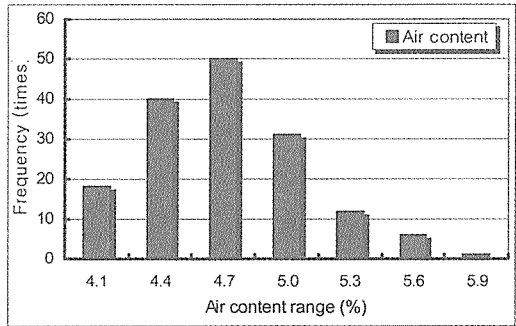
마찬가지로 공기량 시험결과, 평균값은 4.7%, 최대값은 5.9% 및 최소값은 4.06%를

(표 11) 바닥슬래브용 콘크리트의 품질시험 결과

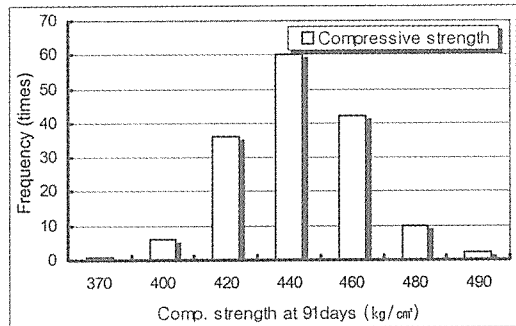
구분	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	염화물량 (kg/m ³)	콘크리트 온도(℃)	압축강도(kg/m ²)
평균	19.8	4.7	0.06	14.7	442
표준편차	0.71	0.38	0.04	1.61	20.4
변동계수(%)	3.4	8.1	-	10.6	4.6



(그림 8(a)) 시험빈도에 따른 슬럼프 결과 분포도



(그림 8(b)) 시험빈도에 따른 공기량 결과 분포도



(그림 8(c)) 시험빈도에 따른 압축강도 결과 분포도

나타내었으며, 표준편차는 0.38%이고 변동계수는 8.1%로 나타났다.

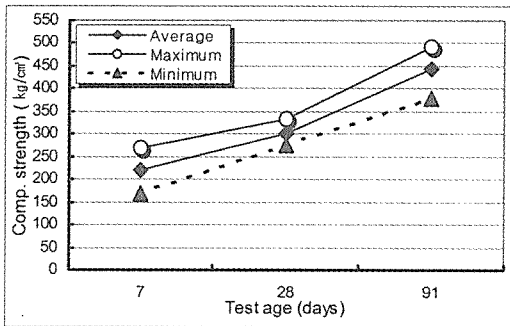
특히, 계절적으로 안정된 11월에 콘크리트를 타설하였기 때문

에, 콘크리트 온도의 측정결과, 평균값은 14.7℃, 최대값은 19.3℃ 및 최소값은 10.2℃를 나타내었다.

또한, 콘크리트의 염화물량 및 단위중량에 대한 측정결과, 평균값은 각각 0.06kg/m³ 및 2.295ton/m³로 나타났다.

재령 91일의 압축강도를 측정한 결과, 평균값은 442kg/cm², 최대값은 493kg/cm² 및 최소값은 378kg/cm²을 나타내었으며, 이때의 표준편차는 20.4kg/cm²이고 변동계수는 4.6%로 매우 양호한 결과를 나타내었다.

또한, 재령별 압축강도의 평균값, 최대값 및 최소값은 [그림 9]와 같다.

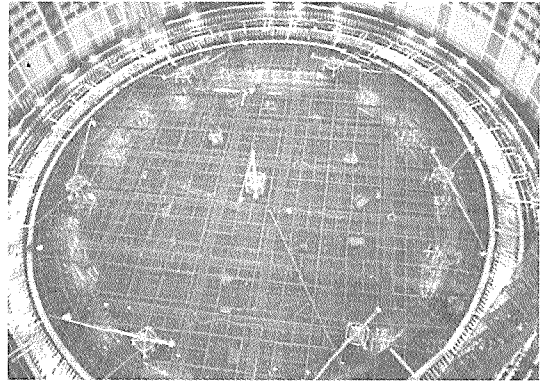


[그림 9] 재령별 압축강도의 측정결과

재령 7일의 평균값은 219kg/cm², 최대값은 268kg/cm² 및 최소값은 168kg/cm²이고 변동계수는 10.5%로 비교적 높게 측정되었는데, 이는 플라이애쉬의 치환율이 30%로 높기 때문에 초기강도 발현의 지연에 따른 편차로 사료된다. 재령 28일의 경우, 평균값은 302kg/cm², 최대값은 333kg/cm² 및 최소값은 274kg/cm²이고 변동계수는 4.8%로 양호한 값을 나타내었다.

특히, 재령 91일의 압축강도를 기준으로 볼 때, 재령 7일 및 28일의 강도발현율은 각각 50% 및 68%를 나타내었다.

4.6 콘크리트의 타설관리



[사진 2] 바닥콘크리트의 타설상황 (야간)

현장에서의 콘크리트 타설상황은 [사진 2]에 나타난 바와 같다.

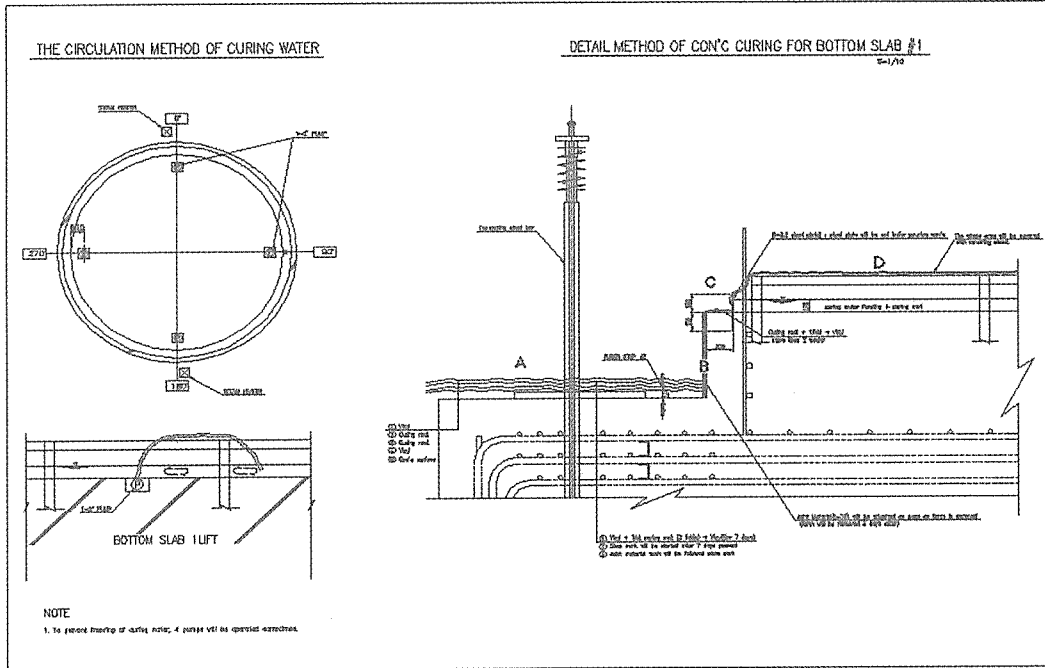
펌프카 1대당 콘크리트의 타설용량은 시간당 40m³로 11대의 용량은 약 440m³이다. 또한, 펌프카의 압송압을 80~100kg/cm²로 관리하였으며, 콘크리트의 응결시간(초결 13시간, 종결 18시간)을 고려하여 분배기 및 T-밸브의 타설높이 및 콜드조인트 관리에 반영하였다.

4.7 콘크리트의 양생 및 수화열 관리

한꺼번에 타설하는 콘크리트의 두께가 6m인 바닥슬래브는 수화열이 높기 때문에 양생 관리에 의한 균열제어가 매우 중요하다.

콘크리트의 양생관리는 [그림 10]에 나타난 바와 같이 4개의 영역(A, B, C 및 D)으로 나누어 실시하였다. A영역은 콘크리트 타설을 완료한 후에 7일간 비닐+양생포2겹+비닐을 설치하고 濕潤養生을 실시하였으며, B영역은 타설완료일부부터 5일 경과후 거푸집을 제거한 뒤 Joint재(t=30)를 면에 부착하였다. C영역은 비닐+양생포+비닐을 덮고 소정의 기간 동안 양생을 실시하였다.

가장 중요한 D영역은 양생포를 표면에 깔고 약 10cm정도로 담수한 다음 상부에 양생포를



[그림 10] 콘크리트의 영역별 양생방법

깎고 비닐천막을 씌워 약 2개월동안 담수양생을 실시하였다.

양생관리는 바닥슬래브의 각 위치에 설치된 열전대의 온도측정으로 하였는데, 중심부 높이별 온도를 측정한 결과는 [그림 11]과 같다.

타설시, 콘크리트의 평균온도는 약 15℃였는데, 이는 가장 아래에 설치된 열전대(EL-47m)의 초기온도와 일치한다. 또한 타설을 시작한지 하루가 경과된 후, 중간부에 설치된 열전대(EL-45m)의 온도가 15℃를 나타내고 있으며, 약 2일 경과한 후에 가장 상부에 설치된 열전대(EL-42m)의 온도가 15℃에 일치하고 있다. 이때의 외기온은 3~5℃범위에 있으며, 이를 통해 콘크리트의 타설속도를 예측할 수도 있다.

타설된 콘크리트의 하부온도는 안정된 지반 온도의 영향을 받기 때문에, 최고점의 온도가 7.5일만에 35.0℃에 도달하였으며 계속 일정

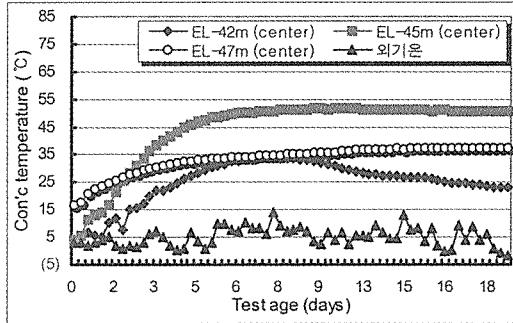
한 온도로 유지되고 있는 경향을 보였다.

또한, 중앙부 온도는 콘크리트의 水和熱에 의한 영향을 가장 많이 받기 때문에, 최고점의 온도가 8.5일(타설전 1일 제외)만에 51.6℃에 도달한 후 매우 서서히 낮아지고 있다.

표면과 가장 근접한 상부온도는 외기온의 영향을 많이 받기 때문에 최고점의 온도가 6일(타설전 2일 제외)만에 33.6℃에 도달한 후 계속 낮아지고 있다. 특히, 콘크리트의 표면에 담수한 물의 온도는 25℃까지 상승하였다가 서서히 하강하여 17.5℃를 나타내고 있다.

이러한 온도이력을 고려할 때, 콘크리트 타설후 약 20일이 경과한 시점에서의 양생관리는 매우 양호한 것을 알 수 있다.

앞으로 실측자료가 축적되면, 단일온도 상승시험에서 분석한 해석값과 비교하여 상관성 및 정확성을 정량적으로 평가할 수 있을 것이다.



(그림 11) 콘크리트 내부온도의 측정결과

5. 맺음말

국내에서 처음으로 시도된 실타설 23,180 m³의 대규모 콘크리트 물량을 68시간동안 연속적으로 인천기지 지하식 LNG 저장탱크의 바닥슬래브에 성공적으로 타설할 수 있었던 것은 본 공사와 관련된 발주처·시공사·협력업체의 철저한 준비와 축적된 시공 및 품질관리 기술의 결과로 사료된다.

본 공사를 수행하면서 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 슬럼프가 20cm정도인 콘크리트의 배합 설계는 압축강도, 수화열 외에도 컨시스턴시(점도)와 워커빌리티에 대한 적합성을 부여하는 것이 매우 중요한 요구성능이며, 특히 수직하부의 배관펌핑에 따른 재료분리 저항성 및 막힘에 유의해야 한다.

2) 고로슬래그 시멘트 및 플라이애쉬를 사용한 3성분계 콘크리트는 경제성 및 자원의 유효이용에 대한 효과가 있는 반면에, 수화열의 최소화 방안 및 플라이애쉬의 수급·품질변동에 대한 사항을 사전에 철저히 검토해야 한다.

3) 현장시공에 있어서 분배기와 T-밸브의 적절한 대수선정 및 적소배치는 시공효율에 중요한 영향을 미치기 때문에, 본 공사를 통해 얻은 정량적인 자료를 분석하여 향후 범용적

으로 활용하는 방안이 필요하다.

4) 매스구조물의 수화열에 의한 온도균열을 억제하기 위한 콘크리트의 재료 및 배합선정, 시공상의 수화열 관리, 그리고 효과적인 양생관리 방안에 대해 본 공사에서 수행한 방법을 실측자료와 함께 Data base화하는 것이 필요하다.

감사의 글

본 공사의 바닥슬래브 콘크리트에 대한 시공은 일본의 시공사례 등을 고려할 때 콘크리트의 타설완료 시간이 120시간 정도 소요될 것으로 예상하였으나, 23,000m³를 타설하는데 68시간이 소요되는 대기록을 세웠으며 함께 일하는 일본의 엔지니어들도 감탄을 아끼지 않았다.

이는 사전에 철저한 관리계획 및 준비, 본 공사와 관련된 모든 엔지니어, 작업자들의 긴밀한 협조와 노력, 그리고 장비의 효율적인 관리운영에 기인한 것으로 생각된다.

본 공사를 직접 수행한 大宇建設 인천 LNG 저장시설현장의 박재열 총괄소장님, 전성근 토목소장님 및 정재현·김형성·김명환 공구소장님, 그리고 품질팀을 비롯한 모든 직원들께 감사하며, 특히 공사가 차질없이 진행될 수 있도록 함께 노력한 한국가스공사 인천기지의 박용택 건설소장님, 이상직 토건팀장님 및 모든 공사감독들에게도 감사하는 바이다.

특히, 협력업체로 우수한 시공품질에 만전을 기한 曉明建設의 권영채 소장님과 직원 여러분께도 감사하는 바이다.

끝으로 본 공사에 사용되는 콘크리트에 대해 材料選定, 配合設計, 品質 및 施工管理에 직접 참여한 필자로선 국내 콘크리트 기술의 향상 및 원가절감을 달성할 수 있었던 부분에 대해 가장 보람있게 생각하며, 본 공사를 통해

얻은 자료가 후속공사는 물론 국내의 콘크리트 기술과 LNG 요소기술의 발전에 기여할 수 있기를 기대한다.

참고문헌

- (1) 金武漢, 全成根, 權寧鎬., “LNG 저장탱크의 지하연속벽 시공사례”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표 논문집 제12권1호, 2000.5, pp.880~887
- (2) 金武漢, 全成根, 權寧鎬., “LNG Tank용 超流動 콘크리트의 要求性能”, 한국콘크리트학회 봄 학술발표 논문집 제11권1호, 1999.5, pp.463~467
- (3) 高木 淳, 中下兼次, 名倉健, 中村龍ほか: “世界最墳のLNG地下タンクの合理化施工-東京ガス根岸工場TL-41LNG地下式貯槽-”, セメント・コンクリート, No.572, pp.8~13, 1994.10.
- (4) 權寧鎬, 河在潭, “석회석 미분말을 혼입한 초저발열 매스 콘크리트의 특성에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 가을학술발표논문집 제12권2호, 2001.11, pp.1175~1180
- (5) 金武漢, 全成根, 權寧鎬., “사용재료의 품질변동이 併用系 高流動 콘크리트의 특성에 미치는 영향”, 한국레미콘공업협회, 레미콘지 통권64호, 2000.7, pp.16~30

