

LNG 貯藏탱크의 地下連續壁 施工事例

An actual data on the slurry wall of LNG underground tank

權 寧 鎬*

Kwon, Yeong Ho

全 成 根**

Jun, Seung Keun

朴 在 烈***

Park, Jae Yeol

金 武 漢***

Kim, Moo-Han

1. 머리말

1.1 연구배경

LNG 저장탱크는 정부가 안정적이고 환경친화적이면서, 저렴한 에너지의 공급을 위한 국책사업의 일환으로 수행하고 있는 대규모 건설공사로 평택, 인천 등지에서 10만㎥의 저장용량을 갖춘 지상탱크가 건설된 바 있으며, 최근에는 통영에 14만㎥의 저장용량을 갖는 지상탱크가 건설되고 있다. 그러나, 지금까지 국내에서 건설된 LNG탱크는 대부분 지상탱크였기 때문에, 설계·엔지니어링·기계 및 운전 등은 중요한 Know-how로 인식되어 왔으나, 콘크리트는 요소기술로 간주되지 않은 실정이었다.

최근, 시공 및 콘크리트 기술의 발전과 탱크의 안정성 확보, 지상설비의 불필요, 그리고 토지 이용을 증대 및 환경친화적 목적으로, 지반조건, 해상운송 및 수도권 공급에 원활한 지리적 이점을 갖춘 인천기지에 LNG 지하탱크가 건설되기 시작하였다.

지하탱크는 일본의 동경가스에서 도시가스의 수요증가에 대응하기 위하여 1991년부터 대용량으로 건설되기 시작하였으며, 현재 根岸공장에 세계 최대규모인 20만㎥ 용량을 가동하고 있다. 국내에서도 1998년부터 최초로 14만㎥의 저장용량을 갖는 지하탱크(211,212-TK)가 건설되기 시작하였으며, 후속공사로 세계 최대의 저장용량(20만㎥)을 갖는 지하탱크(213,214-TK 및 215,216-TK)가 건설되고 있다.

LNG 지하탱크는 저장조의 최고액면이 지표면 아래에 있기 때문에, 탱크의 안정성을 확보할 수 있을 뿐만 아니라 지상설비의 불필요 및 토지 이용율의 증대 등과 같은 장점이 있지만, 지하굴착 깊이의 증대에 따른 토수압의 증가로 부재두께가 증대될 뿐만 아니라 지하연속벽(Slurry wall)의 공사에 따른 콘크리트의 고강도 및 고유동화가 필수적인 성능으로 요구된다.

특히, 지하연속벽에 사용되는 콘크리트는 고강도일 뿐만 아니라, 구조체 내의 자기충전성 및 트레미(Tremie)에 의한 시공성을 확보해야 하기 때문에 고유동성이 필요하며, 경화과정에서 구조체에 발생할 수 있는 온도균열을 방지하기 위하여 저발열성이 요구된다.

본 논문에서는 20만㎥ 저장용량인 LNG 지하탱크(213,214-TK)의 지하연속벽에 사용된 병용계 초유동 콘크리트의 요구성능, 평가기준, 배합설계 및 제조, 현장적용에 따른 품질관리 결과를 서술하고자 하며, 이를 통해 국내 콘크리트 기술의 선진화·고품질화 및 기술의 공유화를 실현하고자 한다.

1.2 LNG 지하탱크의 구조개요

인천 LNG 지하탱크(213,214-TK)의 주요구조는 크게 지하연속벽, 본체의 바닥슬래브(Bottom slab), 벽체(Side wall) 및 지붕(Roof)으로 구성되어 있으며, 구조개요는 Table-1과 같다.

*경희원, 대우건설 인천LNG 지하탱크현장 품질팀장

**경희원, 대우건설 인천LNG 지하탱크현장 로목소장

***경희원, 대우건설 인천LNG 지하탱크현장 현장소장

***경희원, 충남대학교 교수 공학박사

Table-1 Summary for main structure of Incheon LNG underground tanks(#213 214-TK)

Classification	Slurry wall	Bottom slab	Side wall
Design strength (kg/cm ²)	400 (91days)	240 (91days)	270~300 (91days)
Structure size (m)	- Inner diameter : 78.5 - Wall thickness : 1.7 - Wall depth : 75.0	- Inner diameter : 72.6 - Slab thickness : 9.0	- Wall thickness : 3.0 - Wall height : 50
Pouring schedule	- Primary panel : 26 (7.24m) - Secondary panel: 26 (2.8m) - Drainage pit : 2	- Separate pouring (2Lifts) - 1Lift : 6.0 m - 2Lift : 3.0 m	- Separated pouring (10Lots) - Pouring by Lot step - 1Lot : Ave. 5m
Concrete property	Super flowing concrete	Low heat concrete	Low heat concrete
Concrete quantity	37,500m ³ /tank	35,500m ³ /tank	55,000m ³ /tank

지하탱크의 시공순서는 ①지반 및 지질조사→②가설 및 Guide wall→③Slurry wall→④Top portion 공사→⑤내부굴착→⑥Side wall 1Lot→⑦Bottom slab 1Lift→⑧Side wall 2Lot 및 Bottom slab 2Lift→⑨Side wall 3~10Lot→⑩Roof air raising→⑪Roof 콘크리트 및 성토공사 순으로 진행된다.

1.3 연구범위

본 연구에서는 초유동 콘크리트의 배합설계 단계에서 선정된 최적배합에 대한 현장 플랜트의 수정 배합, 배합시간, 연속성 시험 및 생산량 결정, 타설속도에 따른 에지테이러 댓수, 타설시간 등을 산정하고, 선행 및 후행판별의 콘크리트 타설량, 굳지 않은 콘크리트 및 압축강도의 평균값·표준편차, 지하연속벽의 코아강도 등의 결과를 분석하였다.

2. 초유동 콘크리트의 최적배합 선정시험

2.1 배합강도 산정 및 요구성능

지하연속벽에 타설되는 초유동 콘크리트의 설계기준강도(400kg/cm²)에 대한 배합강도(520kg/cm²: 91일)는 JSCE에 따라 변동계수(V) 10%에서 할증계수(α)를 1.2로 적용하였으며, 수중 콘크리트의 저감계수(γ)는 기술제휴선인 일본의 大成建設에서 건설한 Ogishima LPG 지하탱크의 실적을 고려하여 0.93으로 적용하여 산정하였다. 현장조건을 고려한 초유동 콘크리트의 요구성능은 Table-2와 같다.

Table-2 Evaluation items and required performance of super flowing concrete

Standard	Slump flow (cm)	SF 50cm time (sec)	V-tot time (sec)	U-box height (mm)	Air content (%)
JSCE	65±5	4~10	10~20	min. 300	4±1

* All items must be satisfied with required performance during 90min

지하연속벽에 사용되는 초유동 콘크리트는 70m이상의 지하심도에 트레미 판을 사용하여 자유낙하 시켜야 하기 때문에, 유동성 및 분리저항성이 필수적으로 요구되며, 콘크리트와 안경액과의 혼합을 방지하기 위하여 트레미 판의 끝단을 일정깊이 이상으로 타설된 콘크리트의 내부에 유지하면서 상부로 콘크리트를 충전시켜야 하기 때문에, 우수한 자기충진성이 요구된다.

2.2 최적배합의 선정시험

2.2.1 사용재료

지하연속벽에 사용된 초유동 콘크리트는 심도, 타설조건 및 자기충진성을 고려하여 분체+증점제를 사용하는 병용계로 선정하였으며, 사용재료의 사양은 Table-3과 같다.

Table-3 Material properties used in super flowing concrete (combined type)

Cement	Lime stone powder	Coarse aggregate	Fine aggregate	Superplasticizer	Viscosity
-Slag cement(T)	-C-140(W)	-19mm(crushed)	-River sand	-PHOENIX-HPC	-PHOENIX-V (J)
-Slag ratio(46.5%)	-Blaine(7,975 ^{cm²/g})	-F.M(6.64)	-F.M(2.50)	-Poly-carbone	-Poly saccaride
-Blaine(4,035 ^{cm²/g})	-Spe. gravity(2.64)	-Spec. gravity(2.60)	-Spe. gravity(2.63)	-Solid(36.4%)	+HPMC
-Spe. gravity(3.03)	-Particle size(9.7 ^{μm})	-Absorption(1.05%)	-Absorption(0.71%)	-Spe. gravity(1.2)	-Viscosity(800cp)

2.2.2 실내 최적배합의 선정시험

병용계 초유동 콘크리트의 최적배합조건은 Table-4와 같이 3단계의 물/시멘트비를 제안하였다.

Table-4 The optimum mix condition of super flowing concrete (combined type)

Mix design condition (%)					Unit material weight (kg/m ³)						
W/C	W/B	S/a	Sr	Gv	Water	Cement	LSP	Sand	Gravel	S.P	Viscosity
38	35	50.8	47	53	180	474	40	805	795	12.3	0.25
41	35.4	50.8	47	53	180	438	70	806	796	11.2	0.25
44	35.6	50.8	47	53	180	409	97	806	795	9.6	0.25

* Sr : fine aggregate volume for mortar, ** Gv : coarse aggregate volume for concrete

Table-4의 배합조건은 슬럼프 플로우, 50cm도달시간, V-lot, U-box 및 공기량 규준을 만족하였으나 W/C 38%는 높은 압축강도를 나타내었기 때문에, 41% 및 44%에 대해 현장배합을 실시하였다.

2.2.3 사용재료의 변동에 따른 민감도 시험결과

사용재료의 품질변동 및 현장조건에 따른 민감도 시험결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 콘크리트 온도는 10~20℃ 범위에서 관리(30℃ 미만).
- 2) 잔골재의 조립율은 2.6±0.2 범위에서 관리.
- 3) 잔골재의 표면수율은 ±0.6% 이내에서 관리.
- 4) 슬래그 치환율은 45~50%에서 관리.
- 5) 고성능 AE감수제의 계량오차는 1% 이내에서 관리.

2.2.4 B/P 배합시간 선정시험

배합시간은 콘크리트의 성능뿐만 아니라, 시간당 생산량에 영향을 미치기 때문에 매우 중요하다. 따라서, 현장 B/P의 배합시간은 믹서부하를 나타내는 암페어로 선정하였다. 이를 위해 콘크리트 3m³/batch를 대상으로 모든 재료가 믹서내에 투입된 후 10초 단위로 암페어를 측정 한 결과는 Fig.-1과 같다.

암페어는 50A 부근에서 안정되는 경향을 보였으며, 이때의 배합시간은 70초 범위였다. 따라서, 굳지 않은 콘크리트의 요구성능을 고려하여, 안정값에 +5초 정도로 하여 최적배합시간을 75초로 선정하였다.

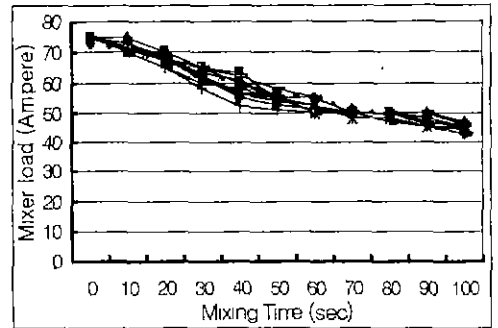


Fig-1 Mixer ampere for mixing time(A)

2.2.5 현장배합 확인시험

현장배합에서 배합시간은 75초로, 재료투입 순서는 일괄투입으로, 증점제는 소량이기 때문에 인력에 의해 투입하였다. 이때, 모든 조건은 생산조건과 동일하게 하였으며, 예지테이터 드럼의 회전속도도 6rpm으로 일정하게 하였다. 본 시험은 동결기(12월)에 실시되었기 때문에, 보일러 시스템로 콘크리트 온도를 관리하였다. B/P의 현장배합에 대한 굳지 않은 콘크리트의 시험결과는 Table-5과 같다.

Table-5 Test results for the fresh concrete of adjusted mix condition in site B/P

Mixing condition and elapsed time		W/C=41%, S.P=2.2%				W/C=44%, S.P=1.9%			
		0min	30min	60min	90min	0min	30min	60min	90min
Test Items	Specification								
Slump Flow (cm)	65±5	62.0	66.0	68.0	65.0	63.0	67.0	68.0	68.0
SF 50 ^{cm} time (sec)	4~10	4.9	5.2	6.2	6.9	5.0	5.5	6.9	10.5
V-jot time (sec)	10~20	14.1	14.6	15.5	18.7	12.1	12.1	13.6	16.2
U-box Height (mm)	min. 300	352	345	345	344	352	350	346	338
Air content (%)	4±1	4.1	4.0	4.6	4.5	3.5	4.1	4.5	3.9
Concrete temp. (°C)	max. 30	12.5	12.7	12.7	12.4	12.3	12.3	12.2	12.2

시험결과, 대부분 관리규준을 만족하였으나 고성능 AE감수제의 분산 및 유지성능, 현장 대기시간 등을 고려하여 15분에 관리시험을 실시하였으며, 이에 대한 압축강도 시험결과는 Fig.-2와 같다.

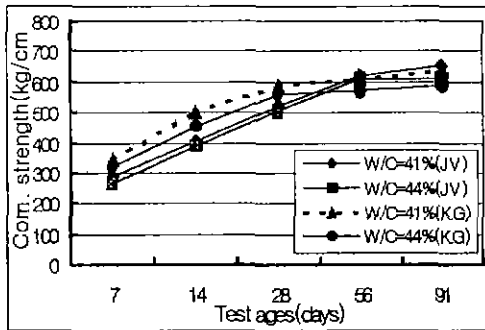


Fig.-2(a) Compressive strength for test ages

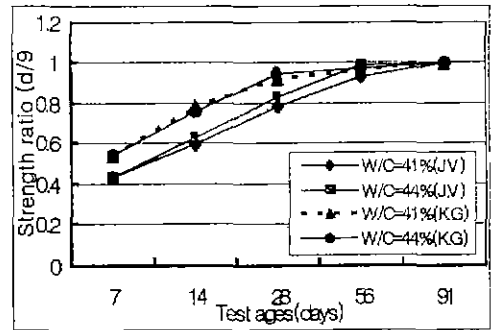


Fig.-2(b) Strength development ratio for test ages

압축강도 시험결과, 재령 7일에서 91일 압축강도의 43~54%, 28일에서 78~95%의 강도발현율을 나타내었으며, 강도발현에 대한 안정값을 고려하여 최적배합을 W/C 41%로 결정하였다.

3. B/P의 제조 및 품질관리

3.1 연속생산성에 대한 시험결과

B/P 연속생산성 시험은 Mixer의 성능 및 설비, 제량오차 등에 따른 콘크리트의 특성을 사전에 검토하기 위한 것으로, 이를 위해 3m²씩 20회 연속적으로 콘크리트를 생산하여 유동성 및 검성, 공기량을 측정하였다.

시험결과, 슬럼프 플로우는 평균 63.7cm, 최대 66cm, 최소 62cm이며, 표준편차는 1.5cm였다. 플로우 50cm 도달시간은 평균 6.1초, 최대 7.3초, 최소 5.1초이며, 표준편차는 0.7초를 나타내었다. 또한, V-jot 유하시간은 평균 14.4초, 최대 17.1초, 최소 12.2초이며, 표준편차는 1.2초로 측정되었다. 공기량은 평균 4.0%, 최대 4.5%, 최소 3.5%이며, 표준편차는 0.3%를 나타내었다. 연속생산성 시험결과, 대부분의 측정값이 허용범위를 만족하기 때문에 B/P에 대한 콘크리트 생산품질의 안정성을 확보할 수 있었다.

3.2 시간당 생산능력에 대한 시험결과

병용계 초유동 콘크리트는 일반 콘크리트에 비해 점성이 높기 때문에, 믹서부하가 많이 걸릴 뿐만 아니라 콘크리트의 요구성능을 만족하기 위한 배합시간이 증대된다. 그러나, 배합시간의 증대는 콘크리트의 생산성을 저하시키기 때문에 가능한 한 최적배합시간을 신중하게 설정하는 것이 필요하다. 따라서, 본

단계에서는 앞에서 선정된 배합시간 75초에 대하여 시간당 생산량을 산정하기 위한 시험을 실시하였으며, 3m³ 및 6m³를 연속적으로 생산할 경우에 소요되는 시간은 Fig.-3과 같다.

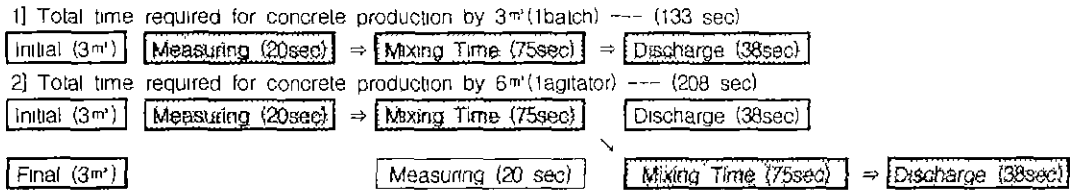


Fig.-3 Total time required for concrete production by 3m³ and 6m³

시험결과, 3m³의 콘크리트를 생산하는데 133초가 소요되지만, 6m³를 연속적으로 생산할 경우에는 계량 및 배출시간이 중복되기 때문에 208초가 필요하다. 또한, 계속 생산을 할 경우에는 계량과 배출시간을 중복되기 때문에, 6m³당 200초 정도면 생산이 가능할 것으로 사료된다. 따라서, 시간당 생산량은 안전율을 고려하여 100~110m³정도로 예상된다.

3.3 콘크리트의 소요 및 공급계획

지하연속벽에 타설되는 초유동 콘크리트의 소요량 및 각각의 사양은 Table-6과 같다.

Table-6 Specification and required concrete quantity for slurry wall panels

Classification	Primary panel	Secondary panel	Drainage pit
Ave. Panel size (m)	7.24 × 1.74 × 75	7.24 × 1.74 × 75	7.24 × 1.74 × 75
Ave. concrete quantity (m ³)	975	376	937
Tremie pipe (Set)	3	2	2
Concrete pouring height (m/hr)	max. 8	max. 8	max. 4.5
Unit quantity by hour (m ³ /hr)	max. 100	max. 40	max. 60
Total concrete pouring time (hr)	11 ~ 13	9 ~ 10	15 ~ 16
Total panel	26	24	2

판별별 콘크리트 소요량은 손실을 3%를 고려한 물량이며, 시간당 소요량을 B/F의 시간당 생산량과 비교할 때 큰 문제가 없을 것으로 확인되었다.

3.4 콘크리트의 운반계획

Table-6과 같이 현장에 소요되는 콘크리트의 운반계획 및 에지레이터는 Table-7과 같다.

Table-7 Transportation plan and required agitators for slurry wall panel

Classification	Primary panel	Secondary panel	Drainage pit
Ave. quantity for tremie	30 m ³ /hr	20 m ³ /hr	30 m ³ /hr
Removal time of tremie	5 min/hr	5 min/hr	5 min/hr
Pouring time for agitator	5 min	5 min	5 min
Required agitators	12cars/panel (9/panel)	8cars/panel (6/panel)	8cars/panel (6/panel)

선행판별은 첫 타설시 에지레이터가 트레미관 1개당 각각 2대씩 6대, 그 후부터 각각 1대씩 타설하기 때문에, 트레미관 1개당 평균 타설량을 30m³/hr. 에지레이터 1대당 타설시간을 5분, 타설높이에 따른 트레미관 제거시간을 5분으로 가정하면, 에지레이터 1대당 2cycle/hr가 된다. 따라서, 출하시간 4분,

운반시간 6분, 타설 및 대기시간 11분, 회차 및 생산대기 시간을 고려하면, 선행판넬에 요구되는 에지 테이더는 초기에 12대, 공급이 안정된 후에는 9대가 필요하다. 후행판넬은 트레미관이 2개 설치되으나, 선행판넬과 같은 조건이므로 초기 8대, 공급이 안정된 후에는 6대가 필요하다. Drainage pit는 Outer pipe에 대한 부력으로 시간당 타설높이가 낮기 때문에 요구되는 에지 테이더는 후행판넬과 동일하다.

4. 초유동 콘크리트의 품질관리 결과분석

4.1 사용재료에 대한 품질관리 결과분석

지하연속벽에 타설된 초유동 콘크리트의 총물량은 75,000m³이며, 시멘트는 35,500ton으로 시험빈도는 공인시험 1회/3,000톤, 자체시험 1회/300톤이며, 석회석 미분말은 5,800ton, 시험빈도는 각각 1회/1,200톤 및 1회/300톤이다. 굵은골재 및 잔골재는 각각 약 49,000m³으로, 시험빈도는 공인시험 1회/10,000m³ 및 자체시험 1회/1,000m³이며, 고성능 감수제 및 증점제는 896 및 18.7ton가 사용되었다.

시멘트에 대한 Lot별 품질시험결과, KS L 5210 규준을 만족하였으며, 응결시간, 압축강도, 분말도 및 수화열에 대한 시험결과는 매우 양호한 것으로 나타났다. 응결시간은 초결이 평균 270분, 표준편차는 16분으로, 종결은 평균 7:54, 표준편차는 29분이었다. 분말도는 평균 3,787cm²/g, 표준편차는 192cm²/g으로 측정되었다.

석회석 미분말에 대한 Lot별 품질시험결과, JIS A 5008 규준을 만족하였으며, 초유동 콘크리트의 특성에 영향을 미치는 습분함량은 평균 0.1%로 매우 양호하였으며 비중도 매우 균일하였다. 규준에는 없지만 강열감량이 높게 나타난 것은 석회석 미분말이 상온에서 주로 CaCO₃ 형태로 존재하지만, 강열감량 측정을 위해 고온(750±50℃)을 가할 경우 CaO+CO₂로 분리되기 때문으로 사료된다.

잔골재는 강모래이기 때문에 조립을 관리가 매우 중요하다. 조립율에 대한 민감도 시험결과를 고려해 볼 때, 잔골재의 조립율은 2.6±0.2범위를 만족해야 한다. 실험결과, 평균 조립율은 2.58이며, 표준편차는 0.1정도로 민감도 관리범위를 만족하였다.

4.2 굳지 않은 콘크리트의 결과분석

굳지 않은 콘크리트의 품질관리는 슬럼프 플로우, 플로우 50cm 도달시간, 공기량 및 염화물 측정을 대상으로, 시험시기는 생산후 15분, 시험빈도는 초기 3대의 에지 테이더 및 1회/100m³로 실시하였다.

4.2.1 슬럼프 플로우에 대한 결과분석

지하탱크(213, 214-TK)의 지하연속벽에 타설된 초유동 콘크리트의 슬럼프 플로우에 대한 전체 판넬의 품질관리 결과는 Fig.-4와 같다.

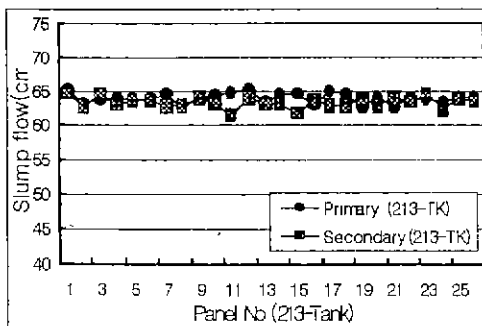


Fig.-4(a) Test results for slump flow in the 213-TK

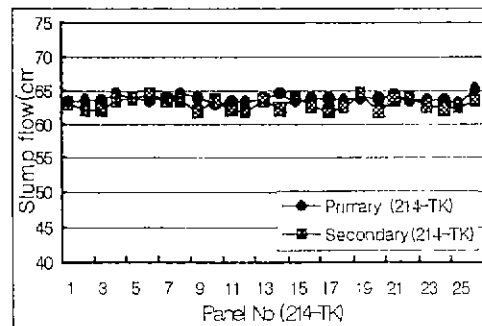


Fig.-4(b) Test results for slump flow in the 214 TK

슬럼프 플로우의 측정결과, Fig.-4(a)의 213-TK는 선행판넬이 평균 64.0cm, 최대 65.3cm, 최소 62.7cm 및 표준편차 0.7cm였으며, 후행판넬은 평균 63.3cm, 최대 64.5cm, 최소 61.5cm, 표준편차 0.8cm이었다. Fig.-4(b)의 214-TK는 선행판넬이 평균 63.7cm, 최대 65.1cm, 최소 62.9cm 및 표준편차 0.8cm이고, 후행판넬은 평균 63.0cm, 최대 64.5cm, 최소 61.8cm, 표준편차 0.8cm로 나타났다. 각각의 탱크에서 선행판넬은 26판넬의 시험Lot가 판넬당 평균 10회임을 감안하면 260회의 슬럼프 플로우에 대한 결과이며, 후행판넬은 24판넬의 시험Lot가 판넬당 평균 4회이며, 여기에 Drainage pit 20회를 포함하면 116회의 슬럼프 플로우에 대한 결과로, 관리규준인 $65 \pm 5\text{cm}$ 를 만족할 뿐만 아니라 편차도 매우 적었다.

4.2.2 플로우 50cm 도달시간에 대한 결과분석

플로우 50cm 도달시간에 대한 측정결과, 213-TK는 선행판넬이 평균 5.6초, 최대 6.7초, 최소 4.9초, 표준편차 0.5초이며, 후행판넬은 평균 6.0초, 최대 7.1초, 최소 5.0초, 표준편차 0.5초였다. 214-TK는 선행판넬이 평균 5.6초, 최대 6.4초, 최소 5.1초, 표준편차 0.4초이며, 후행판넬은 평균 6.1초, 최대 7.4초, 최소 5.0초, 표준편차 0.5초로 나타났다. 전체적으로는 관리규준인 4~10초를 만족하고 있으나, 대체로 점성이 낮은 것으로 판단된다. 특히, 콘크리트 온도가 높을수록 점성이 낮게 나타났는데, 이는 증점제의 온도민감성에 따른 것으로 평가된다.

4.2.3 공기량에 대한 결과분석

공기량 측정결과, 213-TK는 선행판넬이 평균 3.6%, 최대 4.1%, 최소 3.4%이며, 후행판넬은 평균 3.8%, 최대 4.2%, 최소 3.4%이며, 표준편차는 0.2%로 동일하였다. 214-TK 경우, 선행판넬은 평균 3.6%, 최대 4.0%, 최소 3.3%이고, 표준편차는 0.2%였다. 후행판넬은 평균 3.9%, 최대 4.5%, 최소 3.3%이며, 표준편차는 0.3%로 나타났다. 전체 판넬의 공기량 시험결과는 관리규준인 $4 \pm 1\%$ 를 만족하였다.

4.3 압축강도에 대한 결과분석

압축강도에 대한 품질관리는 7일, 28일 및 91일 재령강도로 측정하였으며, 시험빈도는 1회/100m²로 9개의 공시체를 제작하였다. 213, 214-TK의 판넬별 콘크리트의 압축강도 측정결과는 다음과 같다.

4.3.1 재령별 압축강도 시험결과

213, 214-TK의 지하연속벽에 대한 선행판넬의 재령별 압축강도는 Fig.-5와 같다.

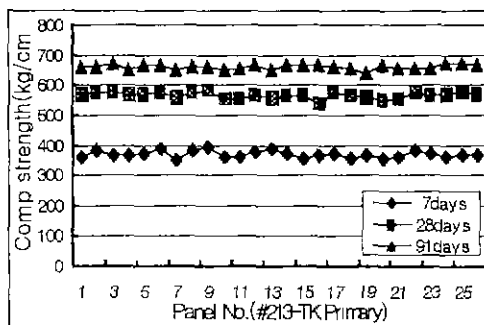


Fig.-5(a) Strength results for ages (213-TK Primary)

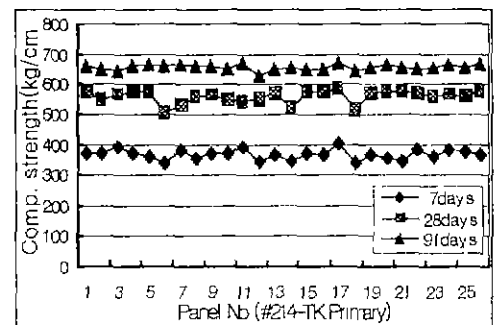


Fig.-5(b) Strength results for ages (214-TK Secondary)

213-TK의 경우, 선행판넬의 7일 압축강도는 평균 368kg/cm², 최대 390kg/cm², 최소 351kg/cm², 표준편차는 10.3kg/cm²이며, 28일은 평균 565kg/cm², 최대 582kg/cm², 최소 536kg/cm², 표준편차 10.6kg/cm²이다. 또

한, 91일은 평균 659kg/cm², 최대 672kg/cm², 최소 641kg/cm², 표준편차는 7.9kg/cm²이다. 후행판넬의 7일 압축강도는 평균 356kg/cm², 최대 389kg/cm², 최소 312kg/cm², 표준편차는 17.4kg/cm²이며, 28일 압축강도는 평균 561kg/cm², 최대 576kg/cm², 최소 511kg/cm², 표준편차는 11.0kg/cm²였다. 91일은 평균 647kg/cm², 최대 665kg/cm², 최소 623kg/cm², 표준편차는 9.9kg/cm²였다.

214-TK의 경우, 선행판넬의 7일 압축강도는 평균 366kg/cm², 최대 384kg/cm², 최소 344kg/cm², 표준편차는 16.8kg/cm²이며, 28일은 평균 559kg/cm², 최대 583kg/cm², 최소 530kg/cm², 표준편차는 20.6kg/cm²였다. 91일은 평균 657kg/cm², 최대 674kg/cm², 최소 638kg/cm², 표준편차는 9.7kg/cm²였다. 후행판넬의 7일 압축강도는 평균 355kg/cm², 최대 367kg/cm², 최소 343kg/cm², 표준편차는 13.5kg/cm²이며, 28일은 평균 563kg/cm², 최대 576kg/cm², 최소 550kg/cm², 표준편차는 7.8kg/cm²였다. 91일은 평균 645kg/cm², 최대 654kg/cm², 최소 637kg/cm², 표준편차는 8.4kg/cm²였다. 재령 91일을 기준으로 볼 때, 재령 7일에서 55~56%, 재령 28일에서 85~87%정도의 강도발현을 나타내고 있다.

4.3.2 코아강도에 대한 결과분석

지하연속벽 타설후 탱크의 내부굴착을 하면서 높이별 코아를 채취하여 압축강도를 측정하였다. 213-TK(A02) 및 214-TK(A22)를 대상으로, 상부에서 18.3m, 30m, 40m 및 50m 위치의 코아에 대한 압축강도 측정결과, 213-TK(A02)은 768~784kg/cm²으로 실린더 압축강도에 비해 약 11~19% 증대된 값을 보였다. 214-TK(A22)는 770~779kg/cm²으로 15~18% 증대된 값을 나타내었다.

이는 지하연속벽의 특수한 조건에서 열교환이 없는 양생조건 및 콘크리트 타설온도, 높은 단위시멘트량(438kg/cm³)에 영향을 받은 것으로 사료된다.

따라서, 차기 공사에서는 해외기술선의 시공실적 및 배합조건은 참고만 하고, 국내실정에 맞는 배합조건 및 재료를 선정해야 할 것으로 사료된다. 특히, 최근에 일본에서는 슬래그 미분말의 자기수축 특성에 대한 우려로 사용빈도가 감소되는 실정을 고려하여 Belite계 시멘트 적용 및 석회석 미분말의 사용량을 증대시키는 방안이 요구된다.

5. 맺음말

지면상 인천 LNG 지하탱크(213,214-TK)의 지하연속벽 시공사례를 상세히 시술하기는 어렵지만, 중요한 공정사항에 대한 결과 및 특성을 나름대로 분석하였다. 병용계 초유동 콘크리트에 고로슬래그 시멘트를 사용할 경우에는 단위시멘트량을 최소화시킬 필요가 있으며, 자기수축에 의한 거동을 사전에 검토해야 한다. 특히, 균열대책으로 Belite계 시멘트 또는 플라이애쉬를 사용하는 방안도 필요하다.

특히, 해외기술선에서 제시한 재료 및 배합조건에 대한 충분한 사전가 이루어지지 않았으며, 최적배합에 대한 국내 재료의 특성 및 경제성을 충분히 반영시키지 못한 아쉬움이 남는다.

결론적으로 LNG 지하탱크의 지하연속벽과 같은 특수조건에 사용되는 초유동 콘크리트에 대한 요소기술의 축적과 이러한 엔지니어링 기술을 바탕으로 후속공사인 215,216-TK는 물론 향후 해외공사에도 국내 기술력이 해외기술선으로 참가할 수 있도록 많은 기술자들의 관심과 노력이 필요하다.

지금까지 213,214-TK의 지하연속벽 공사를 위해 노력해 준 삼성·대우·대아건설 관계자 및 발주처인 한국가스공사, 현대엔지니어링 감리단, 그리고 동아지질을 포함한 협력업체 관계자 여러분께 감사 드리는 바이다. 특히, 안정적이고 우수한 품질의 재료공급에 힘써온 동양시멘트, 왕표화학(L.S.P), 창현물산(골재) 및 진웅화학(혼화제) 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) JSCE(日本土木學會) "高流動コンクリートに関する技術の現状と問題", Concrete Engineering Series 15. 1996.