

LNG tank用 超流動 콘크리트의 要求性能

The required performance of the super flowing concrete for LNG

權 寧 鎬^{*} 全 成 根^{**} 白 承 峻^{***} 李 用 一^{****} 金 武 漢^{*****}
Kwon, Yeong Ho Jun, Seung Keun Baek, Seung Jun Lee, Yong Il Kim, Moo Han

ABSTRACT

The slurry wall of Incheon LNG receiving terminal tank will be planned the super flowing concrete having properties of high strength(required strength 520kg/cm²), no-vibrating and massive structure in the underground. For the performance of this concrete, we investigate and select all materials, the optimum mix design and sensibility test in the laboratory.

As test results, we choose portland blast-furnace slag cement and lime stone powder(L.S.P) as cementitious materials, W/C 41%(W/B 35.4%), S/a 50.8% and unit volume of coarse aggregate 0.30 as optimum mix design. Also test results of the fresh and hardened concrete are satisfied with specifications of slurry wall.

1. 서론

1.1 연구배경

LNG 지하탱크의 역사는 1970년 일본에서 처음으로 도입된 이래, 기술의 진보 및 가스수요의 증대에 따라 저장용량이 점차 증대되어 왔다. 국내에서도 1998년 인천 LNG인수기지에 처음으로 14만kl 용량의 지하탱크가 건설중이며, 향후 건설용량이 증대될 예정이다. LNG 지하탱크는 저장조의 최고액면이 지표면 아래에 있기 때문에, 탱크의 안정성 확보, 지상설비 불필요 및 토지의 이용율을 높일 수 있으나, 지하굴착 깊이에 따른 토수압의 증가로 부재두께가 증대될 뿐만 아니라 콘크리트의 고강도화 및 고유동화가 필수적으로 요구된다.

본 논문에서는 국내 최초로 시공되는 20만kl 용량의 LNG 지하탱크 Slurry wall에 사용되는 초유동 콘크리트의 재료선정, 요구성능, 평가기준, 배합설계 및 현장적용을 위한 분석결과를 서술하고자 한다.

1.2 지하탱크의 구조개요 및 특징

지하탱크의 구조개요 및 시공순서는 그림 1 및 그림 2에 나타난 바와 같이 내부직경이 78.58m이고 Slurry Wall의 두께는 1.7m이며, 깊이는 지반조건에 따라 72.4~76.4m이다. 또한, Slurry wall은 26개의 선행 Element(길이 7.24m)와 26개의 후행 Element(길이 2.8m) 및 2개의 Drainage Pit로 구성된다.

*정회원, 대우건설 인천LNG 지하탱크현장 시험실장

**정회원, 대우건설 인천LNG 지하탱크현장 토목부장

***정회원, 삼성물산 인천LNG 지하탱크현장 대리

****정회원, 진흥화학 중앙연구소 차장

*****정회원, 충남대학교 교수

지하탱크의 토목공사 시공순서는 ①가설공사 및 Guide wall공사→②Slurry wall공사→③Bottom slab공사→④Side wall공사→⑤Roof공사로 진행되며, 특히 Slurry wall의 콘크리트 공사는 지하탱크의 품질을 좌우하는 주요 공정이기 때문에 많은 기술적 검토가 선행되어야 한다.

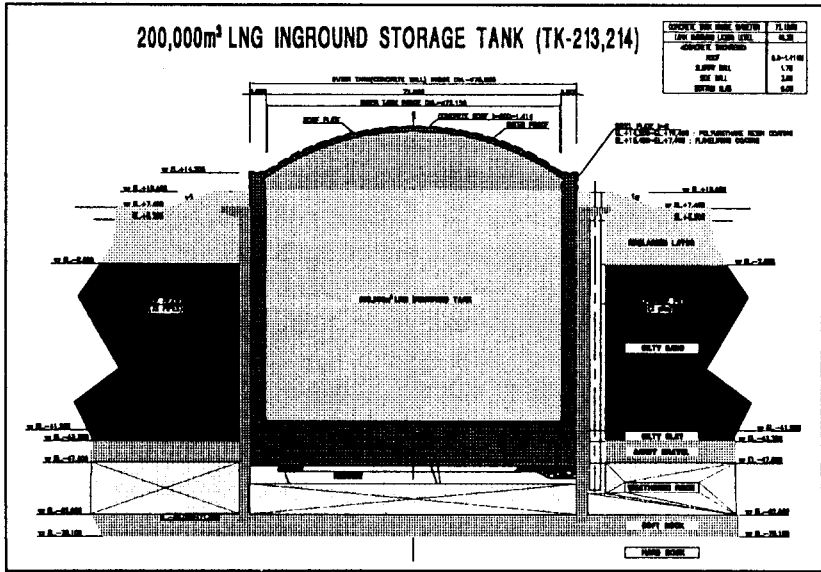


그림 1 LNG 지하탱크의 구조개요

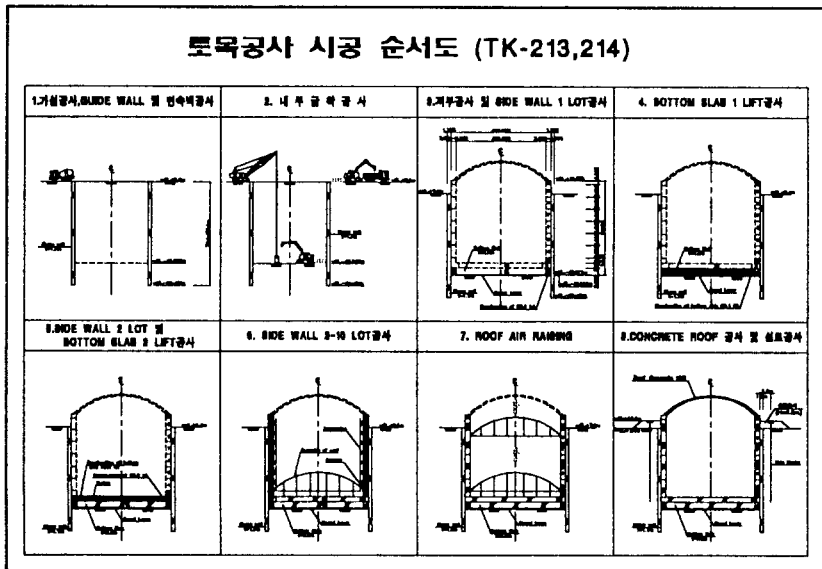


그림 2 LNG 지하탱크의 시공순서

2. 초유동 콘크리트의 배합강도 및 요구성능

2.1 초유동 콘크리트의 배합강도

지하탱크의 Slurry wall용 초유동 콘크리트의 설계기준강도(400kg/cm²)에 대한 배합강도는 JSCE에서 제시한 산정식에 따라 변동계수(V) 10%로 할때 활중계수(α)는 1.2, 수중 콘크리트의 저감계수(γ)는 日本 大成建設에서 Ogishima LNG 지하탱크 공사에 적용한 0.93을 사용하여 다음식으로 산정하였다. 이때의 강도관리 재량은 91일로 하였다.

$$\text{배합강도}(f_{cr}) = \text{설계기준강도}(f_{ck}) \times \frac{\text{활중계수}(\alpha)}{\text{저감계수}(\gamma)} = 400 \times \frac{1.2}{0.93} \approx 520 \text{kg/cm}^2 \quad \text{----- (식 1)}$$

2.2 초유동 콘크리트의 요구성능

초유동 콘크리트의 평가기준 항목은 JSCE에서 제시한 기준값⁽¹⁾을 근거로 표 1과 같이 정하였다. 특히, 이러한 요구성능은 콘크리트를 제조한 직후부터 90분간 경시변화의 특성에도 적용되는데, 이는 운반 및 타설시간 뿐만 아니라 Slurry Wall의 Tremie에 타설한 후 역충전하여 유동되는 시간을 포함한 시간내에 요구성능을 갖도록 고려한 것이다.

표 1 초유동 콘크리트의 평가항목 및 요구성능

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

* 모든 평가항목은 90분까지의 경시변화 특성을 만족해야 함.

3. 실험개요

3.1 사용재료

본 연구에 사용된 시멘트는 고로슬래그 시멘트이며, 이외에도 석회석 미분말, 고성능 AE감수제 및 증점제가 사용된 병용계 초유동 콘크리트로 사용재료의 특성은 표 2와 같다.

표 2 초유동 콘크리트에 사용된 재료특성

Slag cement	Lime stone powder	Coarse agg.	Fine agg.	Superplasticizer	Viscosity
-T社(고로시멘트) -치환율(평균 46.5%) -블레인(4,035cm ² /g) -비 중(평균 3.03)	-W社(C-140) -블레인(7,975cm ² /g) -비 중(평균 2.64) -입경(평균 8.66μm)	-20mm 쇄석(원우) -F.M(평균 6.64) -비중(평균 2.60) -흡수율(1.05%)	-강모래(금강) -F.M(평균 2.50) -비중(평균 2.63) -흡수율(0.71%)	-J社(PHOENIX) -폴리카르본산계 -고형분(36.4%) -비 중(1.202)	-J社(PHOENIX) -Poly saccharide +HPMC -점도(800cp)

3.2 배합변수 및 시험방법

LNG 지하탱크용 초유동 콘크리트의 배합변수는 표 3과 같다. 여기서, 물/시멘트비는 배합강도 선정용이며, 나머지 배합변수는 굳지않은 콘크리트 상태를 비교·평가하기 위한 것으로 각각의 변수에 따른 요구성능의 만족여부를 평가하고자 하였다. 특히, 잔골재의 표면수율 변동을 고려한 단위수량 및 고성능 감수제의 계량오차를 첨가량 변동에 따른 민감도 시험은 현장 품질관리 범위를 설정할 목적으로 실시하였다.

표 3 LNG지하탱크용 초유동 콘크리트의 배합변수

W/C (%)	W/B (%)	Unit water (kg/m ³)	Coarse agg. volume (m ³ /m ³)	S/a (%)	Moisture variation (kg/m ³)	Superplasticizer dosage range (%)
38~44	35.0~35.8	180	0.28~0.32	50.8	180 ±5, ±10	2.3 ±0.2, ±0.4

시험방법은 KS F 4009 규준을 기본으로, 슬럼프 플로우는 JSCE F 503, SF50cm 도달시간은 JIS A 1101, 공기량 시험은 KS F 2409, V-lot 및 U-box 충전성 시험은 JSCE 제안방법⁽²⁾에 따라 측정하였다. 콘크리트 배합시간은 60ℓ용 강제식 믹서(rpm 44)를 사용하여 3분30초로 정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 물/시멘트비에 따른 실험결과

물/시멘트비에 따른 굳지않은 콘크리트의 실험결과는 표 4와 같다.

표 4 물/시멘트비에 따른 초유동 콘크리트의 실험결과

Mix design condition		W/C=38%, S.P=2.4%				W/C=41%, S.P=2.2%				W/C=44%, S.P=1.9%			
Elapsed Time	Spec.	0min	30min	60min	90min	0min	30min	60min	90min	0min	30min	60min	90min
Slump Flow(cm)	65±5	65.0	67.0	67.5	67.0	62.5	69.5	66.5	65.0	64.0	66.5	67.5	63.5
SF50cm time(sec)	4~10	4.6	4.2	6.0	6.7	5.5	4.3	5.4	5.6	4.5	4.8	6.3	7.6
V-lot time(sec)	10~20	10.6	11.3	13.3	17.4	11.6	10.4	14.8	15.2	10.6	12.3	12.8	14.1
U-box H (mm)	≥300	350	347	347	335	347	344	343	340	345	346	344	340
Air contents(%)	4±1	3.5	3.7	3.7	3.5	3.0	3.6	4.4	4.3	3.6	4.2	4.6	4.5
Con'c Temp.(°C)	≤30	18.9	18.8	18.2	17.7	18.8	18.9	18.6	18.0	18.8	18.3	17.5	17.4

실험결과, 물/시멘트비에 관계없이 경시변화에 따른 요구성능을 만족하는 것으로 나타났다. 특히, 슬럼프 플로우는 운반시간을 고려하여 약 15분정도에서 분산성능이 최대로 된후, 유지성능을 발휘하도록 하여 규정된 요구성능을 만족할 수 있도록 고성능 감수제의 구성비를 조절하였다. 물/시멘트비에 따른 재령별 압축강도 결과는 그림 2와 같다.

압축강도 시험결과, 물/시멘트비에 관계없이 요구되는 배합강도(520kg/cm²)를 만족하는 것으로 나타났다.

그러나, 본 공사의 특수성 및 현장 품질관리의 안정성, 편차, 수화열 등을 고려하여 최적배합비를 W/C 41%(S/a=50.8%, C=438kg/m³, W=180kg/m³, L.S.P=70kg/m³, Superplasticizer(이하, AD)=2.3%)로 결정하였다.

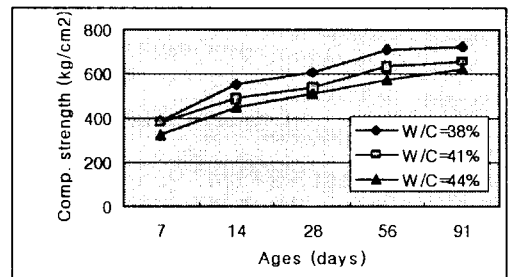


그림 2 물/시멘트비에 따른 압축강도 시험결과

4.2 굵은골재 용적비에 따른 실험결과

굵은골재 용적비는 초유동 콘크리트의 V-lot 및 충전성에 영향을 미치기 때문에, 굳지않은 콘크리트의 골재용적에 대한 평가시험을 실시하였으며, 굵은골재 용적비에 따른 실험결과는 표 5와 같다. 실험결과, 굵은골재 용적비가 0.32인 경우 대부분의 성능을 만족하지 않는 것으로 나타났으며, 0.28의 경우에도 SF50cm 도달시간이 빠른 것으로 나타났다. 이는 골재의 맞물림 및 점성의 변화에 기인한 것으로, 0.30일 때 가장 적합한 것으로 평가된다.

표 5 굵은골재 용적비에 따른 초유동 콘크리트의 실험결과

Gravel volume (m ³ /m ³)	Slump flow (cm)			SF50 ^{cm} (sec)			V-lot (sec)			U-type (mm)			Air content (%)		
	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min
0.28	68.0	68.0	67.0	4.1	4.1	4.2	10.2	11.2	13.0	332	326	310	5.0	4.8	4.2
0.30	65.0	66.0	64.5	5.3	6.2	6.0	12.3	14.5	14.2	345	339	335	4.8	4.5	3.9
0.32	57.0	54.0	55.0	9.3	10.8	12.4	18.4	20.4	22.4	292	283	275	4.6	4.1	3.8

4.3 단위수량의 변동에 따른 민감도 실험결과

잔골재의 표면수율 변동 및 계량오차 등에 따른 초유동 콘크리트의 품질변동을 측정하기 위하여 단위수량을 기본조건(180kg/m³)에 ± 5 , ± 10 kg/m³로 변화시켰으며, 실험결과는 표 6과 같다.

표 6 단위수량 변동에 따른 민감도 실험결과

Change water (kg/m ³)	Slump flow (cm)			SF50 ^{cm} (sec)			V-lot (sec)			U-type (mm)			Air content (%)		
	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min
+10	68.0	68.0	69.0	4.6	5.6	7.2	10.5	17.4	20.4	330	311	298	5.2	5.0	5.1
+5	66.0	66.0	64.0	5.4	6.0	7.4	11.3	13.1	15.6	329	325	324	4.9	4.5	4.0
0	65.0	64.0	63.0	5.5	6.4	7.4	12.0	14.1	14.4	338	331	330	4.8	4.4	3.9
-5	63.0	61.5	61.0	6.8	6.7	9.2	13.6	15.7	18.5	322	320	315	4.7	3.9	3.1
-10	59.0	53.0	51.5	13.4	15.8	18.9	21.4	26.8	×	281	260	242	3.8	3.3	2.9

실험결과, 단위수량 변동폭이 ± 10 kg/m³인 경우에는 초유동 콘크리트의 요구성능을 벗어나는 것으로 나타났으며, 특히, -10kg/m³인 경우에는 모든 성능을 만족하지 않는 것으로 측정되었다.

그림 4 및 그림 5는 단위수량 변화에 따른 슬럼프 플로우 및 U-type 충전성 결과를 나타낸 것이다.

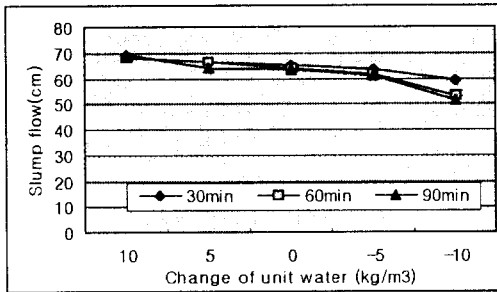


그림 4. 단위수량 변동에 따른 슬럼프 플로우

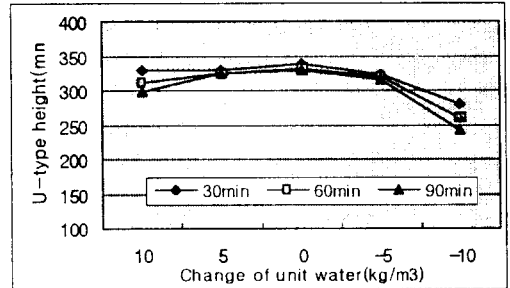


그림 5. 단위수량 변동에 따른 충전성 높이

충전성능을 고려한 단위수량의 변동은 ± 5 kg/m³범위에서 요구성능을 만족하는 것으로 나타났는데, 이를 잔골재의 표면수율로 환산하면 $\pm 0.6\%$ 가 된다. 따라서, 현장 초유동 콘크리트의 요구성능을 만족하는 범위에서 단위수량의 변동범위를 ± 5 kg/m³ 이내로 규정하는 것이 바람직하다.

4.4 고성능 감수제 첨가량의 변동에 따른 민감도 실험결과

고성능 감수제의 계량오차 등에 따른 초유동 콘크리트의 품질변동을 측정하기 위하여 기준 첨가량

(2.3%)에 $\pm 0.2\%$, $\pm 0.4\%$ 로 변화시킨 실험결과는 표 7 및 그림 6과 그림 7에 나타난 바와 같다.

표 7 고성능 감수제 첨가량 변동에 따른 민감도 실험결과

Change A.D (%)	Slump flow (cm)			SF50cm (sec)			V-lot (sec)			U-type (mm)			Air content (%)		
	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min	30min	60min	90min
+0.4	70.0	72.0	69.0	4.4	4.2	4.6	18.5	20.6	22.4	308	293	262	5.4	5.0	4.7
+0.2	66.0	68.0	64.0	5.2	5.7	6.0	13.1	13.9	14.0	337	335	332	5.0	4.7	4.1
0	65.0	64.0	63.0	5.5	6.4	7.4	12.0	14.1	14.4	338	331	330	4.8	4.4	3.9
-0.2	63.0	62.5	61.0	6.4	7.2	8.4	16.4	18.7	19.0	319	310	307	4.7	4.1	3.8
-0.4	61.0	59.0	57.0	7.7	9.8	10.8	17.4	19.5	21.5	314	287	251	4.3	3.3	3.2
Target	65 \pm 5			4~10			10~20			min. 300			4 \pm 1		

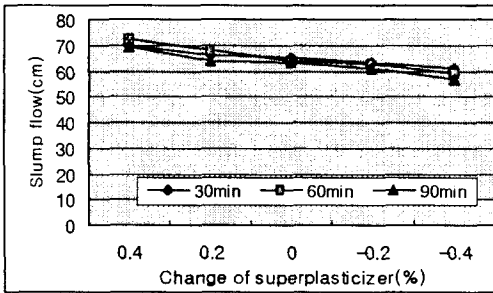


그림 6 고성능 감수제 변동에 따른 슬럼프 플로우

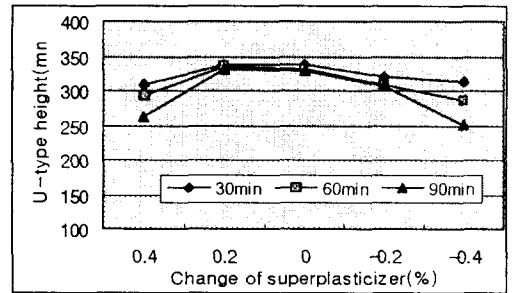


그림 7 고성능 감수제 변동에 따른 충전성 높이

고성능 감수제 첨가량의 변동이 $\pm 4\%$ 일 경우, V-lot 및 U-type 충전성이 요구성능의 범위를 벗어 나는 것으로 나타났는데, 이는 각각 골재 맞물림 및 유동성 저하현상에 기인된 것으로 평가된다. 특히, 충전성을 고려할 때, 고성능 감수제의 변동을 $\pm 2\%$ 이내로 엄격히 관리하는 것이 필요하다.

5. 결론

LNG 지하탱크용 초유동 콘크리트의 시험배합 및 요구성능에 대한 평가결과는 다음과 같다.

- ① 수화열, 유동성, 충전성 및 품질의 안정성 등을 고려하여 슬래그 시멘트+석회석분+중점제를 사용한 병용계 초유동 콘크리트를 LNG(#213, 214 TK) 저장탱크용 콘크리트로 선정하였다.
- ② 경시변화 90분까지의 요구성능을 고려한 최적배합비는 W/C=41%, S/a=50.8%, 굵은골재 용적=0.30, C=438kg/m³, L.S.P=70kg/m³, W=180kg/m³ 및 고성능 감수제 첨가량=2.3%로 정하였다.
- ③ 민감도 시험결과, 초유동 콘크리트의 충전가능 범위를 만족하기 위하여 단위수량의 변동은 $\pm 5\text{kg}/\text{m}^3$ (잔골재 표면수율 $\pm 0.6\%$), 고성능 감수제의 변동은 $\pm 0.2\%$ 이내에서 제한하는 것이 바람직하다.

참고문헌

- (1) 魚本健人, 小澤一雅, 河井 徹, 渡部 正, “土木學會 高流動콘크리트施工指針について”, 콘크리트工学 Vol 36, No.10, 1998.10. pp.9~17.
- (2) JSCE “高流動 콘크리트에 關する技術의 現狀と問題”, Concrete Engineering Series 15. 1996.