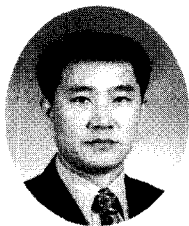
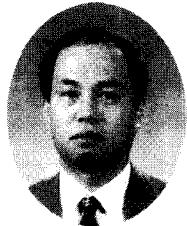


LNG 지하탱크 지하연속벽 콘크리트의 시공

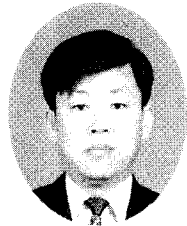
- Construction of Slurry Wall Concrete for LNG Inground Tank -



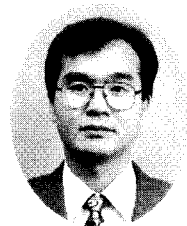
하재담*



유재상**



이종열***



권영호****

1. 머리말

한국가스공사(주)에서는 수도권 의 천연가스 수요에 대응하기 위하여, 사진에서 보는바와 같이, 인천 송도 앞 바다 8km 지점에 위치한 30만평의 인공 섬에 1993년부터 2000년까지 10기의 지상식 LNG 저장탱크를 건설하였으며 1998년부터 8기의 지하식 탱크가 건설 중에 있다. LNG 저장탱크는 다른 토목 구조물과는 달리 초저온성과 고도의 안정성을 필요로 한다. 즉, -162°C 의 초저온 상태를 유지해야하는 보냉 구조와 가연성 가스에 대한 충분한 수밀성 및 안정성을 기본적으로 가져야 한다. 특히 지하식 탱크는 지상식 탱크 공사비와 비슷하며 주변의 경관 및 환경에 조화시키며 안정성이 높은 것이 특징이다.

대용량의 지하식 저장탱크의 건설은, 다음의 <그림 1>에서 보는바

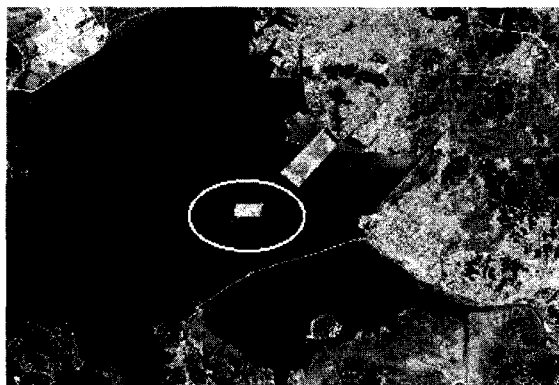


사진 1 인천 LNG 생산기지 위치 및 전경

와 같이, 먼저 토압에 견디고 지하수의 차수를 위한 대심도 지중연속벽 구조물이 선행되고 그 후에 본체 즉, 기초 및 측벽이 건설되며 탱크 내부바닥에서 지붕 골조를 조립하여 Air Raising으로 지상까지 올려 벽체 상부에 고정하고 마지막으로 보냉재와 멤브레인을 설치한다.

2. LNG 지하탱크 #215, 216-TK의 지하연속벽 개요

LNG 지하탱크에서 본체를 보호하는 부분인 지하연속벽은 재료선정에서 시공방법까지 면밀하게 검토되어야 하며 #215, #216-TK 지하탱크는 20만 kl의 용량으로 지하연속벽은 내부 직경 78.5m, 벽체 두께 1.7m, 75.0m의 벽체 깊이의 대원통형 구조물이며 구조물에서 발생할 수 있는 온도균열의 방지를 위하여 초저발열성, 벤토나

이트 용액이 채워진 상태에서 트레미공법으로 대심도의 충전성을 확보하고 또한, 고유동성 및 고강도성을 동시에 만족하기

* 정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 책임연구원

** 정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 콘크리트연구실 실장

*** 정회원, 쌍용양회공업(주) 기술연구소 소장

**** 정회원, 동양대학교 건축공학과 교수

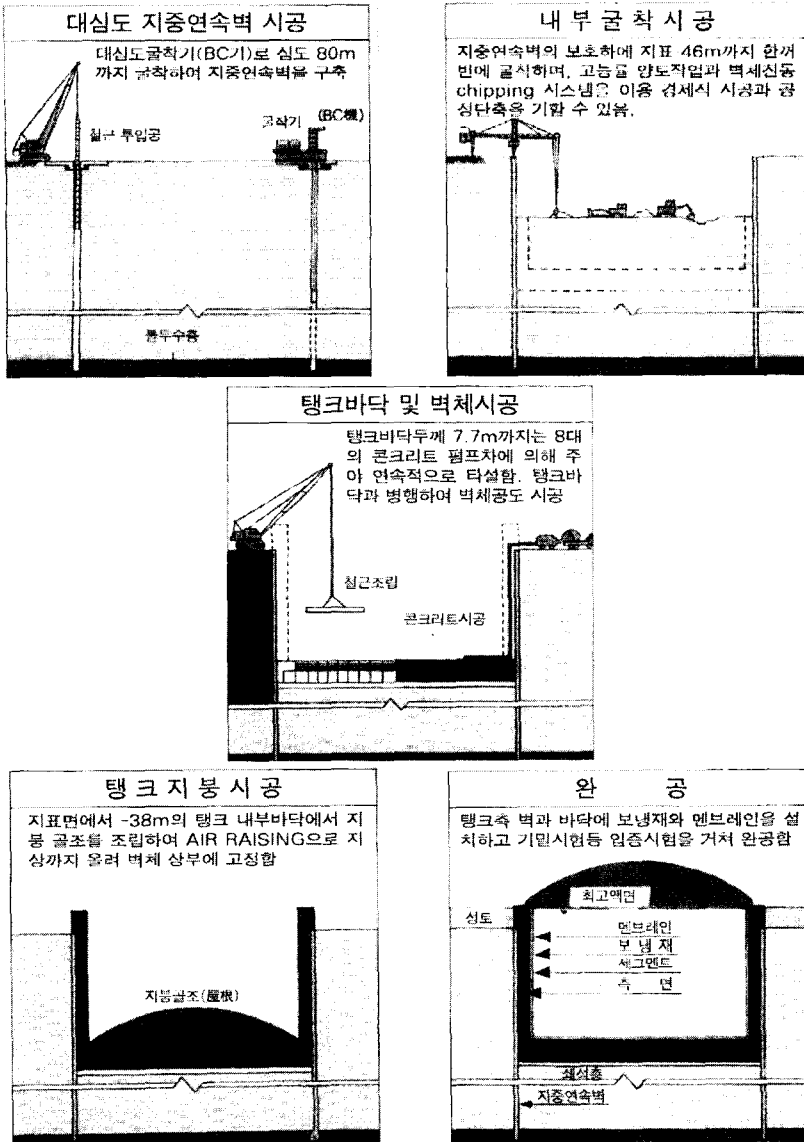


그림 1. LNG 지하탱크의 시공순서

표 1. LNG 지하탱크 지하연속벽의 특성(#215, #216-TK)

구분	지하연속벽
배합강도(91일)	505 kgf/cm ²
크기	내부 직경 : 78.5 m 벽체 두께 : 1.7 m 벽체 깊이 : 75.0 m
콘크리트 타설공정	선행 판널 : 26개(길이 7.24 m) 후행 판널 : 26개(길이 2.80 m)
콘크리트 특성	초저발열-고유동-고강도
콘크리트 물량	37,500 m ³ /tank

표 2. 지하연속벽 콘크리트의 요구 특성

단열온도상승(7일) $Q(t) = K(1 - e^{-at})$		굳지 않은 콘크리트 (90분간 유지)				굳은 콘크리트 (91일 관리재령)		
K (°C)	a	Slump Flow (cm)	S.F. 50 cm (sec)	V-lot (sec)	U-box (mm)	Air (%)	f _{ck} (kgf/cm ²)	f _{cr} (kgf/cm ²)
< 35	< 0.45	65 + 5	7 + 3	15 + 5	> 300	4 + 1	400	505

위하여 초저발열-고유동-고강도 콘크리트 (이하 고유동 콘크리트)가 요구된다.

3. 지하연속벽 콘크리트의 배합

3.1 품질기준

LNG 지하탱크 #215, #216-TK 지하연속벽 콘크리트의 품질은, <표 1>에서 보는 바와 같이, 설계기준강도는 재령 91일에서 400 kgf/cm²이며 벤토나이트 용액 중 타설에 대한 강도 저감율(0.95)을 고려하여 호칭강도는 421(400/0.95) kgf/cm²로 하였으며 현장 생산설비(Batching plant)의 변동에 대한 할증계수는, 약 10%의 변동계수를 고려하여, 1.2로 하여 배합강도는 505(400/0.95 × 1.2) kgf/cm²로 하였다.

지하연속벽 콘크리트의 요구특성은 온도해석을 통하여 온도균열지수 1.2 이상을 만족하는 조건인 K는 35°C, a는 0.45 이하이어야 하고, 굳지 않은 콘크리트에서는 75.0m의 깊이부터 역타설이 가능하도록 점성과 유동성의 균형 및 자기충진성의 확보가 필요하여, <표 2>에 나타낸 바와 같이, 슬럼프 플로우, 슬럼프 플로우 50cm 도달시간, V-lot 플로우 유하시간, U-box 충전성 높이 등의 조건을 만족하여야 하며 특히, 시공성을 고려하여 굳지 않은 콘크리트의 특성을 90분 동안 유지해야 한다.

3.2 콘크리트의 배합

(1) 사용재료

사용재료는, <표 3>에서 보는바와 같이, 시멘트는 온도균열저감 효과가 크고 유동성이 우수하며, 초기재령에서 압축강도 발현율은 낮지만 재령 91일에서 28일의 1.4 ~ 1.5배 정도의 고강도 발현이 되는 저열 포틀랜드 시멘트(4종)로 선정하였고 콘크리트는 지하연속벽의 심도 및 자기충진성을 고려하여 분체로는 석회석 미분말, 증점제는 폴리사카라이드계를 첨가한 병용계 고유동 콘크리트를 적용하였다.

또한, 혼화제는 감수율이 높고 굳지 않

표 3. 사용재료

재료	생산지	기호	비중	흡수율	조립률
시멘트	S사	C	3.22	Blaine : 3,500 cm ² /g	
잔골재	금강	S	2.61	1.05 %	2.62
굵은골재	비봉	G	2.63	0.71 %	6.69
증점제	J사	VA	-	점도 : 800 cp	
혼화제	J사	SP	1.05 ± 0.02	폴리카본산계 고성능 AE감수제	
석회석미분말	W사	LP	2.70	Blaine : 6,000 cm ² /g, 평균입경 : 9.7 μm	

표 4. 지하연속벽 콘크리트의 시방배합표(#215, #216-TK)

Gmax (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m ³)						
			W	C	LP	S	G	SP	VA
20	51.0	48.8	174	341	254	743	789	7.44	0.16

은 콘크리트의 특성을 2시간까지 유지하는 성능을 지닌 폴리카본산계 고성능 AE감수제를 사용하였으며 저열 포틀랜드 시멘트는 혼화제가 흡착하는 C₃A 및 C₄AF의 함유량이 다른 종류의 시멘트에 비하여 30% 이상 적어 혼화제가 분산효과를 최대한 발휘하기 때문에 적은량을 사용하여도 항복점의 감소효과를 높일 수 있다.

잔골재는 LNG 구조물의 내구성을 고려하여 강사를 사용하였으며 조립률 변화에 따라 굳지 않은 콘크리트의 유동특성이 많이 변화하기 때문에 조립률 관리를 철저히 하도록 하였다. 또한, 고유동 콘크리트의

자기충전성을 확보하기 위하여 굵은골재 최대치수가 20 mm인 골재를 사용하였다.

(2) 배합조건

배합조건은 소요의 강도가 얻어지는 물-시멘트비에 대하여 슬럼프 플로우가 65 ± 5 cm인 범위에서 적당한 점성과 분리저항성을 갖는 자기충전성능에 만족하도록 단위 분체량과 단위수량을 선정하여 다음 표의 최종 시방배합을 채택하였다.

배합선정에 있어 특히 중요한 부분은 온도균열을 방지하기 위하여, <그림 2>에서 보는바와 같이, 단열온도상승 특성인

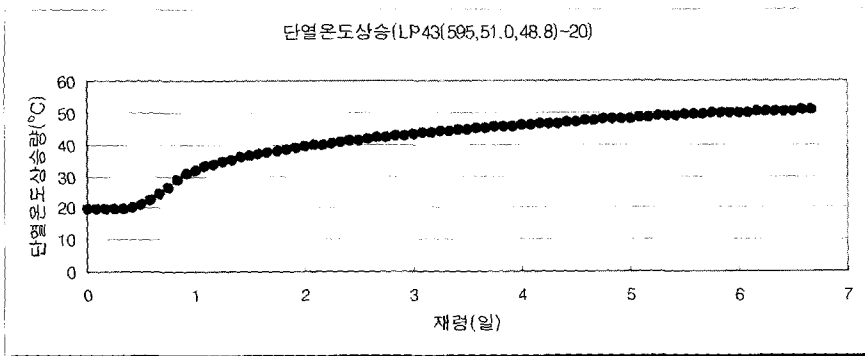


그림 2. 단열온도상승 시험결과(7일간)

표 5. 시험인자 및 수준

사용재료	시험인자	시험수준					
		5	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
배합	잔골재의 조립률	5	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
	굵은골재의 조립률	3	6.4	6.6	6.8		
	석회석미분말의 평균입경(μm)	3	8.7	9.7	11.0		
배합	단위수량(kg/m ³)	5	-10	-5	0	+5	+10
	단위혼화제량(%)	5	-0.4	-0.2	0	+0.2	+0.4
	단위증점제량(%)	3	-0.01	0		+0.01	
	콘크리트의 온도(°C)	3	10	20			30

K 및 α를 만족하기 위하여 배합강도가 505 kgf/cm²에도 불구하고 단위시멘트량을 341kg/m³로 하여 최소화하였다.

또한 고유동 콘크리트는 일반콘크리트에 비하여 사용재료의 품질변동, 계량오차, 온도변화 등에 따라 특성이 민감하게 변화하기 때문에, 다음의 표에 나타난 바와 같이, 잔골재, 굵은골재의 조립률, 석회석 미분말 평균입경 등의 사용재료 자체의 변동에 따

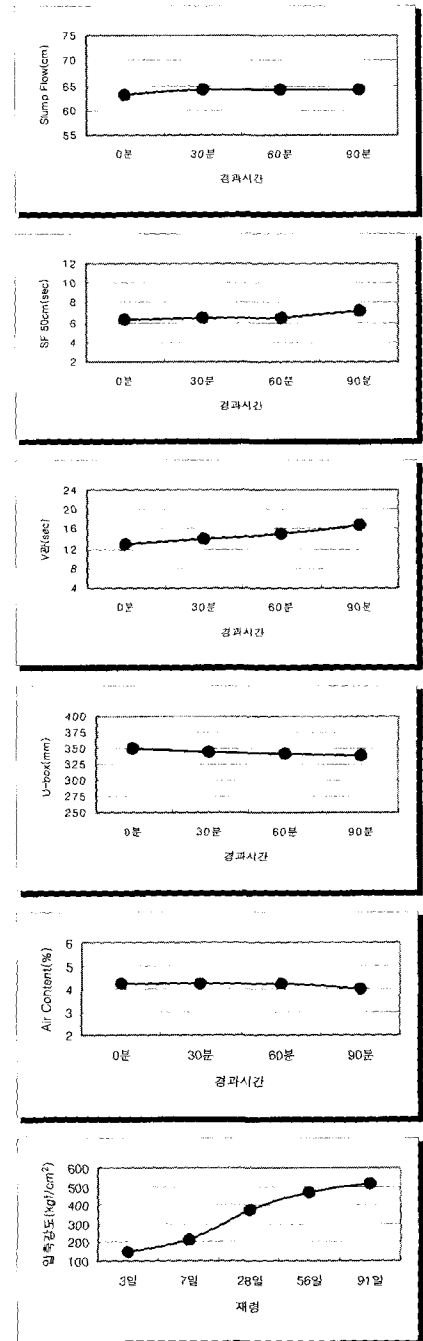


그림 3. 굳지 않은 콘크리트의 경시변화 및 압축강도 특성

큰 특성과 단위수량, 단위혼화제량, 단위중점제량, 콘크리트의 타설온도 등의 배합요인의 변동에 대한 특성을 평가하여 현장 품질관리의 기준으로 하였다.

실험실에서의 굳지 않은 콘크리트의 경시변화 특성 및 강도특성은 <그림 3>에서 보는바와 같이 양호하였다.

4. 지하연속벽 콘크리트의 타설

#215, #216-TK 지하연속벽의 타설은 1999년 11월부터 2000년 5월까지 약 7개월간 한 탱크씩 타설하였으며 제조, 품질 및 타설관리를 다음과 같이 수행하였다.

4.1 제조관리

플랜트에서의 배합시간은 믹서암페어가 안정화되고 굳지 않은 콘크리트의 요구성능을 만족하는 55초로 결정하였으며, <그림 4>는 플랜트에서 연속적으로 3m³ 및 6m³의 콘크리트를 생산하는데 요구되는 시간을 측정된 결과이다.

생산시간의 측정결과, 3m³의 콘크리트

를 생산하는데 133초가 소요되지만, 6m³를 연속적으로 생산할 경우에는 계량 및 배출시간이 중복되기 때문에 208초가 필요하였다. 또한, 연속적으로 생산할 경우에는 계량 및 배출시간을 중복되기 때문에, 6m³당 평균 200초 정도가 소요될 것으로 예상되었다.

따라서, 믹서당 콘크리트의 생산량은 연속생산성 시험으로 믹서의 안전효율을 고려하여 100~110m³/hr정도로 산정할 수 있었다.

4.2 품질관리

지하연속벽 고유동 콘크리트의 형상은 다음과 같으며, 타설전 굳지 않은 콘크리트의 특성을 <사진 2>에서 보는바와 같이 100m³당 슬럼프 플로우 및 V-lot 유하 시험을 수행하였다.

<그림 5, 6>에서 보는바와 같이, 슬럼프 플로우, 슬럼프 플로우 50cm 도달시간에 대한 품질관리 시험결과는 요구특성을 만족하였다.

또한 압축강도 시험결과, <표 6>에서

보는바와 같이, 재령 91일에서 평균 513kgf/cm²(선행패널), 509kgf/cm²(후행패널)도 설계기준강도를 상회하는 것을 알 수 있다.

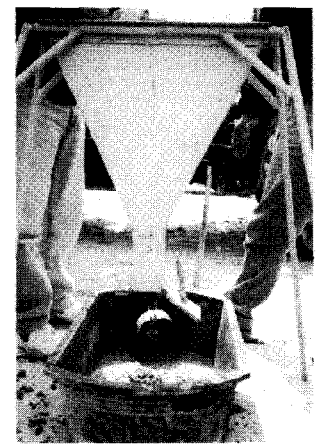
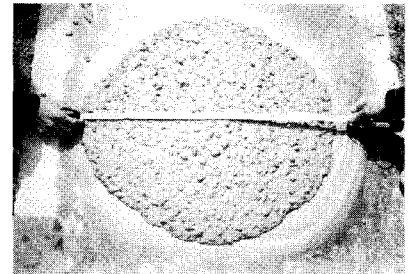


사진 2. 굳지 않은 콘크리트의 특성평가

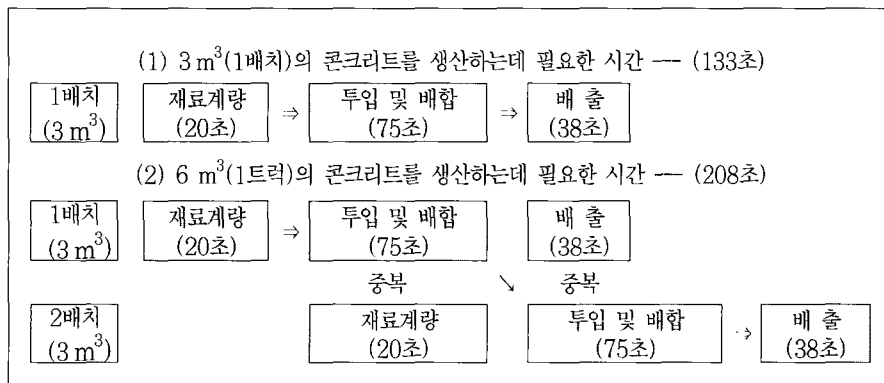


그림 4. 콘크리트를 생산하는데 요구되는 시간(3m³ 및 6m³)

표 6. 재령별 압축강도 결과에 대한 통계분석 결과(#215-TK)

구분 측정값	재령별 압축강도의 측정결과 (kgf/cm ²)						비고
	선행패널			후행패널			
	7일	28일	91일	7일	28일	91일	
평균값	205	352	513	202	348	509	f _{ck} = 400 (kgf/cm ²)
최대값	212	374	549	206	368	531	
최소값	199	337	485	197	329	475	
표준편차	3.9	9.1	15.7	2.6	11.2	11.1	
변동계수(%)	1.9	2.6	3.1	1.3	3.2	2.2	
강도비(%)	40.0	68.6	100	39.7	68.4	100	

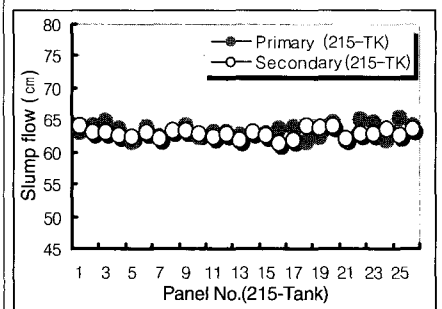


그림 5. 슬럼프 플로우에 대한 품질시험 결과(#215-TK)

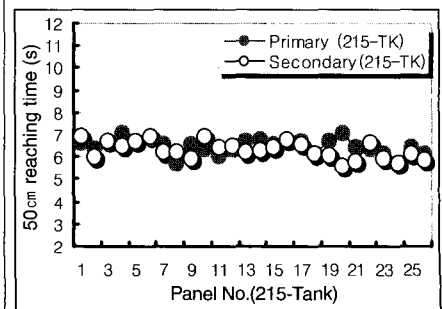


그림 6. 50 cm 플로우 도달시간에 대한 품질시험 결과(#215-TK)

4.3 타설관리

지하연속벽 콘크리트는, 다음 사진에서 보는바와 같이, 사후 관리를 위하여 유효 응력계 등 각종 센서가 설치된 철근배근을 투입한 후 $\phi 250$ mm 트레미관을 선행관 넣인 경우 3개, 후행관넣인 경우 2개를 사용하여 타설하였으며 평균 콘크리트 타설량은 각각 $1,000 \text{ m}^3$ 및 400 m^3 로 평균 14시간 및 10시간이 소요되었다.



사진 3. 철근망 투입

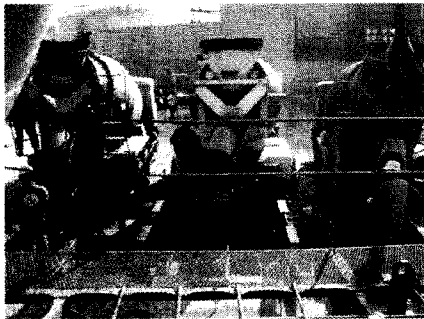


사진 4. 고유동콘크리트 타설

4.4 현장계측 및 균열조사 결과

수화열 현장계측은 모든 패널에서 수행하였으며 깊이가 각각 3, 27, 48m(EL)인 단면에서 측정하였다. <그림 7>은 콘크리트의 평균타설온도가 14.4°C 일 때, EL-27m 지점에 설치된 온도센서로부터 계측한 수화열 측정의 결과를 나타낸 것이다.

즉, 내부 콘크리트의 수화열은 측정지점에 따라 약간 차이가 있지만, 약 $30.9 \sim 37.6^\circ\text{C}$ 의 범위를 나타내었다. 또한, 최고 온도에 도달하는 시간은 콘크리트 타설 후 86 ~ 98시간이 경과한 후였으며, 이후에는 점차 온도가 감소하는 경향을 나타내었다.

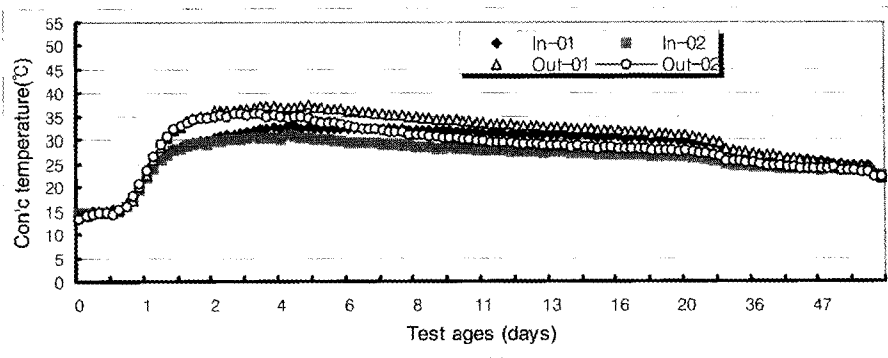


그림 7. 콘크리트의 수화열 측정 결과#215-TK EL-27

전체적으로 볼 때, 벨라이트계(저열 포틀랜드 시멘트) 고유동 콘크리트의 배합조건에 대한 단열온도상승시험에서 측정된 최종 단열온도상승량(K)이 30.8°C 이었고 타설시의 콘크리트 평균온도가 14.4°C 로 나타났기 때문에, 실제의 내부 콘크리트의 최고온도는 예상보다 적게 나타난 것으로 사료된다.

이는 콘크리트의 내부온도보다 지반의 온도가 낮기 때문으로 사료되며, 또한 매우 안정적인 콘크리트의 온도결과를 나타낸 것은 지반내부의 조건이 온도변화에 안정적이고 열교환이 거의 없었기 때문으로 평가된다.

<사진 5>에서 보는바와 같이 지하연속벽 타설하고 굴착한 후 균열조사를 수행한 결과 균열이 발생하지 않은 것으로 나타났다.

5. 맺음말

본 공사에서는 국내 최대용량(20만kℓ)의 지하식 LNG 저장탱크를 시공하면서, 지하연속벽에 요구되는 콘크리트를 초저발열-고유동-고강도 콘크리트로 선정하고 이에 대

한 온도균열의 제어대책 수립, 배합시험 및 특성평가를 수행한 후 저열 포틀랜드 시멘트를 시여 최적배합을 선정하였다.

트레미관을 사용하여 벤토나이트 용액 중대심도에 타설되기 때문에 슬럼프 플로우, 공기량 이외에 적절한 점성 및 자기충전성을 확보하기 위하여 슬럼프 플로우 50cm 도달시간, V-hot 유하시간, U-box 충전성 등의 굳지 않은 콘크리트의 특성을 품질관리 항목으로 포함시켰으며 또한 현장 역타설 공법에 의한 자기충전성 및 시공성을 고려하여 경시변화 90분간 굳지 않은 콘크리트의 특성을 유지하도록 하였다.

타설 결과, 평균 압축강도는 511 kgf/cm^2 로 우수한 강도발현율을 나타내었고 온도균열이 전혀 발생되지 않아 완벽한 지하연속벽의 건설이 가능하였으며, 총 타설량 14 만 m^3 의 고유동 콘크리트를 성공적으로 타설하여 국내의 콘크리트 기술을 한 단계 향상시킨 계기가 되었다. 특히, 해외기술선(일본)인 오바야시, 다이세이, 도쿄가스 엔지니어링 등의 기술진에게 지하연속벽도 전혀 균열이 없이 시공을 할 수 있다는 것을 확인시켜주는 계기가 되었

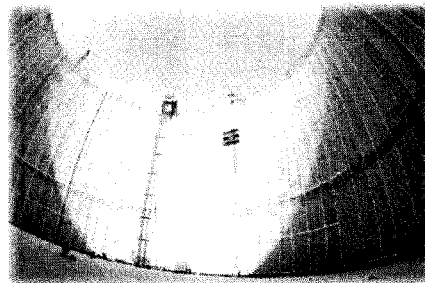


사진 5. 지하연속벽 전경

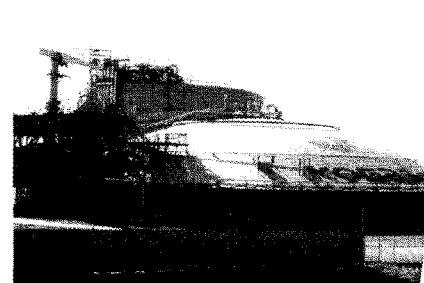


사진 6. LNG 지하탱크 전경

으며, 본 공사를 통해 국내의 고유동 콘크리트 기술이 자리 매김을 하길 바란다. □

참고문헌

1. 하재담 외 5인, "저열 포틀랜드(벨라이트) 시멘트 콘크리트의 특성", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회, 1998.
2. 현대건설(주) 및 쌍용양회공업(주), "한국 콘크리트학회상 기술상 공적서", 1999.
3. 하재담 외 4인, "석회석미분말을 혼입한 초저발열 매스콘크리트의 특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 가을 학술발표회, 2000.
4. 권영호 외 3인, "LNG 지하탱크의 바닥 슬래브 콘크리트 시공 사례", 한국콘크리트학회 콘크리트학회지 제13권 2호, 2001.
5. 하재담 외 3인, "결합재 종류에 따른 콘크리트의 단열온도상승특성 및 단열온도상승에 따른 압축강도특성에 관한 연구", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회, 2001.
6. 권영호, "병용계 고유동콘크리트의 배합설계 요인 및 공학적 특성에 관한 연구", 박사학위논문, 2001.

2002년 3월 건축허가 및 건축물 착공통계 현황

가. 건축허가통계

(단위:천제곱미터, -는 감소)

구분	3월					누계(1-3월)				
	2001		2002		대비 (%)	2001		2002		대비 (%)
		%		%			%		%	
합계	5,846	100.0 %	13,961	100.0 %	138.8 %	15,634	100.0 %	31,600	100.0 %	102.1 %
주거	2,780	47.5 %	6,329	45.3 %	127.7 %	6,466	41.4 %	13,584	43.0 %	110.1 %
상업	1,560	26.7 %	5,068	36.3 %	224.9 %	3,830	24.5 %	11,410	36.1 %	197.9 %
공업	912	15.6 %	1,257	9.0 %	37.9 %	3,533	22.6 %	3,507	11.1 %	-0.7 %
문교	243	4.1 %	628	4.5 %	158.8 %	944	6.0 %	1,559	4.9 %	65.2 %
사회										
기타	352	6.0 %	678	4.9 %	92.6 %	861	5.5 %	1,539	4.9 %	78.7 %

나. 건축물 착공통계

(단위:천제곱미터, -는 감소)

구분	3월					누계(1-3월)				
	2001		2002		대비 (%)	2001		2002		대비 (%)
		%		%			%		%	
합계	5,560	100.0 %	10,347	100.0 %	86.1 %	11,673	100.0 %	21,392	100.0 %	83.3 %
주거	2,519	45.3 %	4,305	41.6 %	70.9 %	5,090	43.6 %	9,119	42.6 %	79.2 %
상업	1,545	27.8 %	3,847	37.2 %	149.0 %	3,330	28.5 %	7,621	35.6 %	128.9 %
공업	949	17.1 %	922	8.9 %	-2.8 %	1,972	16.9 %	2,229	10.4 %	13.1 %
문교	0	0.0 %	534	5.2 %	0.0 %	0	0.0 %	1,080	5.1 %	0.0 %
사회										
기타	547	9.8 %	739	7.1 %	35.1 %	1,281	11.0 %	1,342	6.3 %	4.7 %

* 착공의 경우 문교,사회용은 2002.1월부터 조사하였음

[자료출처 : 건설교통부]