

LNG 지하탱크에 요구되는 콘크리트의 특성평가

하재담* · 김태홍 · 유재상 · 이종열 · 이동윤 · 권영호

<쌍용양회 기술연구소>

<동양대학교>

1. 서 론

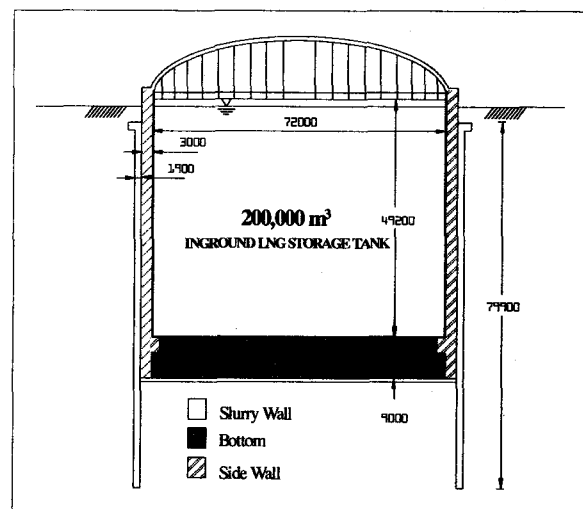
한국가스공사(주)에서는 수도권의 천연가스 수요에 대응하기 위하여 인천 송도 앞 바다 8km 지점에 위치한 30만평의 인공 섬에 1993년부터 2000년까지 10기의 지상식 LNG 저장탱크를 건설하였으며 1998년부터 8기의 지하식 탱크가 건설 중에 있다. LNG 저장탱크는 다른 토목구조물과는 달리 초저온성과 고도의 안정성을 필요로 한다. 즉, -162°C 의 초저온 상태를 유지해야 하는 보냉 구조와 가연성 가스에 대한 충분한 수밀성 및 안정성을 기본적으로 가져야 한다. LNG 지하탱크 15 및 16호기는, 아래의 그림에서 보는바와 같이, 20만kl의 용량으로 안지름 72.0m, 높이 68.2m의 철근콘크리트 구조물로 slurry wall(지하연속벽), bottom(기초), side wall(측벽) 및 roof(지붕) 등으로 구성되어 있다.

Slurry wall은 대원통형 구조물로 온도균열 방지를 위하여 초저발열성, 벤토나이트 용액이 채워진 상태에서 트래미공법으로 대심도의 충전성을 확보하기 위한 고유동성 및 고강도성을 동시에 만족하기 위하여 초저발열-고유동-고강도 콘크리트(이하 고유동 콘크리트)가 요구된다. 또한 bottom 및 side wall은 대형 매스콘크리트로 특히 기초는 9.0m의 두께로, 하단높이 6.0m, 상단높이 3.0m로 하단의 경우 레미콘 트럭 4,000대 분량인 $24,000\text{m}^3$ 의 콘크리트를 일괄 타설하여야 하는 국내 최대의 매스구조물로 초저발열 콘크리트가 요구된다.

고유동 콘크리트는 일반콘크리트에 비해 사용재료의 품질변동, 계량오차, 온도변화 등에 따라

특성이 민감하게 변화하기 때문에 성공적인 공사를 위하여 이에 대한 검토가 타설전 반드시 이루어져야 한다.

본 연구에서는 slurry wall용 고유동 콘크리트에 대하여 저열 포틀랜드시멘트와 석회석 미분말을 분체로 사용하고 증점제를 사용한 병용계 고유동콘크리트에 대하여 잔골재 및 굵은골재의 조립율, 석회석 미분말의 평균입경, 단위수량, 단위혼화제량, 단위증점제량, 콘크리트의 온도 등의 변화에 대한 특성을 평가하였으며 또한, bottom 및 side wall용 초저발열 콘크리트에 대하여서는 온도균열을 제어하기 위해서 수화열을 최대한 저감할 수 있는 시멘트 및 혼화제에 대하여 단일온도상승특성을 분석하여 최적의 재료를 선정하는 과정을 나타내었다.



<그림 1> 인천 LNG 지하탱크(단면도)

2. 실험 개요 및 방법

2.1 요구특성

Slurry wall용 고유동 콘크리트의 경우 시험을 통하여 최적배합을 선정하였으며 사용재료의 품질변동은 <표 1>의 시방배합에 대하여 실시하였다.

Slurry wall용 고유동 콘크리트의 요구특성은, <표 2>에서 보는바와 같이, 온도해석을 통하여 온도균열지수 1.2 이상을 만족하는 조건인 $Q_{\infty}=35^{\circ}\text{C}$ 및 $r=0.45$ 이하이어야 하고, 굳지 않은 콘크리트에서는 75.0m의 깊이부터 트레미관을 통한 역타설이 가능하도록 점성과 유동성의 균형 및 자기충전성의 확보가 필요하여, 슬럼프 플로우, 슬럼프 플로우 50cm 도,

달시간 V-lot 유하시간, U-box 높이 등의 조건을 만족하여야 하며 특히, 시공성을 고려하여 굳지 않은 콘크리트의 특성이 90분동안 유지되어야 한다.

Side wall 및 bottom에 요구되는 콘크리트는, <표 3>에서 보는바와 같이, 우선 제일 중요한 특성으로 온도균열을 제어할 목적으로, 타설온도 20°C 인 경우, 단열온도상승실험(7일간)에 의한 최종단열온도상승량(Q_{∞}) 및 온도상승에 관한 계수(r)에 대한 특성이며 또한, 굳지 않은 콘크리트 및 굳은 콘크리트의 특성 요구특성이 추가된 초저발열 콘크리트로 이 값들은 온도해석을 수행하여 온도균열지수를 1.2 이상, 즉 균열발생을 제한할 경우를 고려하여 선정하였다.

또한 bottom의 경우에는 물론 side wall에서도 마찬가지로 모든 본체 구조물은 시공이음이 받

<표 1> Slurry wall용 고유동 콘크리트 시방배합

G_{\max} (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit Weight(kg/m^3)						
			W	C	P	S	G	SP	VA
20	51.0	48.8	174	341	254	743	789	7.40	0.16

<표 2> Slurry wall용 고유동 콘크리트의 요구특성

부 위	타설량 (m^3)	굳지 않은 콘크리트 (90분간 유지)					굳은 콘크리트 (91일 관리재령)		단열온도상승(7일간) $Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-rt})$	
		Slump Flow (cm)	SF 50cm (sec)	V-lot (sec)	U-box (mm)	Air (%)	f_{ck} (kgf/cm^2)	f_{cr} (kgf/cm^2)	Q_{∞} ($^{\circ}\text{C}$)	r
Slurry wall	37,500	65±5	7±3	15±5	300≤	4±1	400	505	35≥	0.46≥

<표 3> Side wall 및 Bottom용 초저발열 콘크리트의 요구특성

부 위	타설량 (m^3)	굳지 않은 콘크리트 (90분간 유지)		굳은 콘크리트 (91일 관리재령)		단열온도상승(7일간) $Q(t) = Q_{\infty} (1 - e^{-rt})$	
		Slump (cm)	Air (%)	f_{ck} (kgf/cm^2)	f_{cr} (kgf/cm^2)	Q_{∞} ($^{\circ}\text{C}$)	r
Side wall	52,000	21±3	5±1	300	360	30≥	0.6≥
Bottom	35,000			240	288	25≥	0.6≥

생되지 않은 사항에서 많은 콘크리트량을 일괄 타설하여야 하기 때문에 90분까지 슬럼프 및 공기량 등의 굳지 않은 콘크리트의 특성이 유지되어야 한다.

2.2 사용 재료

2.2.1 시멘트

Slurry wall용 고유동 콘크리트는 저열, 장기 고강도 및 고유동의 특성을 만족하기 위하여 4종 저열 포틀랜드 시멘트를 결합재로 사용하였으며, bottom 및 side wall용 초저발열 콘크리트의 Base 시멘트를 선정하기 위해 검토된 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트, 4종 저열 포틀랜드 시멘트 및 고로슬래그 시멘트특급이며 화학

성분과 광물조성 및 물리성능과 수화열을 <표 4> 및 <표 5>에 각각 나타내었다.

2.2.2 기타 재료

또한 골재, 증점제, 폴리카본산계 고성능 AE 감수제, 플라이 애쉬, 고로슬래그 미분말, 석회석 미분말 등을 특성평가에 사용하였으며 각각의 특성을 <표 6>에 나타내었다.

2.3 실험 방법

고유동 콘크리트는 일반콘크리트에 비하여 사용재료의 품질변동, 계량오차, 온도변화 등에 따라 특성이 민감하게 변화하기 때문에, <표 7>에서 보는바와 같이, 골재의 조립율, 석회석 미분말

<표 4> 시멘트의 화학성분과 광물조성

항목 시멘트	기호	화학성분(%)						광물조성(%)			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	R ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1종	N	21.0	5.9	3.2	62.5	2.1	0.78	49	23	10	9
4종	L	25.3	3.1	3.6	62.5	2.3	0.51	29	50	3	9
고로 특급	B	31.7	10.3	1.7	52.6	2.7	0.96	-	-	-	-

<표 5> 시멘트의 물리성능과 수화열

항목 시멘트	기호	비중	Blaine (cm ² /g)	응결(h:m)		압축강도(kgf/cm ²)				수화열(cal/g)		
				초결	종결	3일	7일	28일	91일	7일	28일	91일
1종	N	3.15	3,200	4:30	6:50	195	290	376	465	81	92	99
4종	L	3.22	3,500	5:50	9:20	126	175	360	550	55	67	78
고로 특급	B	3.05	3,880	4:30	7:30	136	266	431	-	62	76	80

<표 6> 기타 사용재료의 특성

재 료	기 호	특 성
잔 골재	S	강사, 조립율 2.60, 표건비중 2.62, 흡수율 1.05%
굵은 골재	G	20mm 쇄석, 조립율 6.60, 표건비중 2.63, 흡수율 0.71%
증점제	VA	폴리사카라이드계 분말형 증점제, 점도 800cp
혼화제	SP	폴리카본산계 고성능 AE감수제
플라이 애쉬	F	삼천포산, 절건비중 2.28, 강열감량 3.5%, Blaine 4,500cm ² /g
석회석 미분말	P	C-140, 절건비중 2.61, 평균입경 9.7μm, Blaine 6,000cm ² /g
고로슬래그 미분말	S	광양산, 절건비중 2.96, 강열감량 0.1%, Blaine 4,500cm ² /g

<표 7> 고유동 콘크리트의 시험인자 및 수준

시험인자		시험수준					
사용 재료	잔골재의 조립율	5	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0
	굵은골재의 조립율	3	6.4		6.6	6.8	
	석회석 미분말의 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	

의 평균입경 등의 사용재료 자체의 변동에 따른 특성과 단위수량, 단위혼화제량, 단위증점제량, 콘크리트의 타설온도 등의 배합요인의 변동에 대한 특성을 평가하였다.

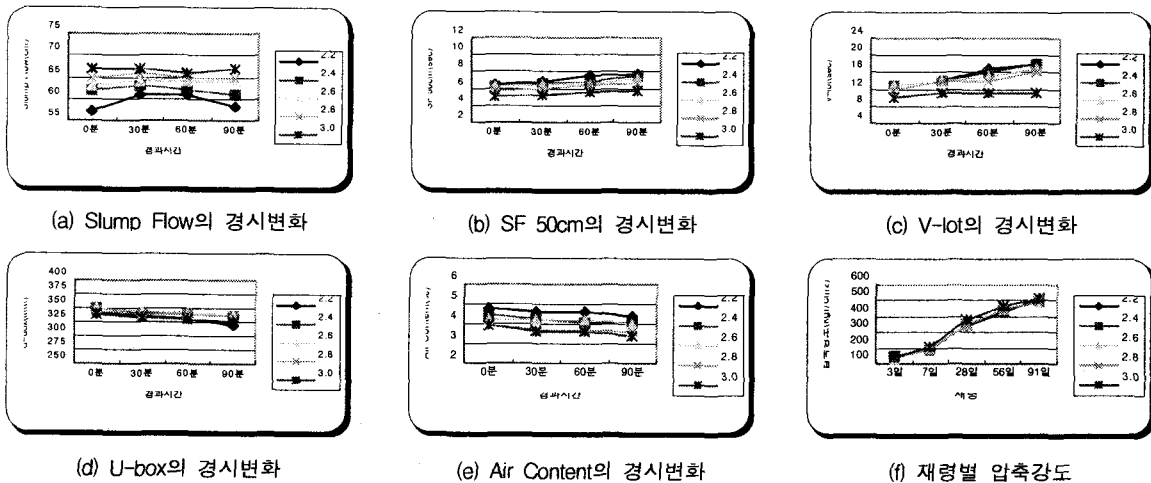
Bottom 및 side wall용 초저발열 콘크리트를 선정하기 위하여 먼저 단열온도상승실험을 수행하여 1종, 4종 및 고로슬래그(특급) 시멘트 중 base 시멘트를 선정한 후 혼화제로 플라이 애쉬, 석회석 미분말 및 고로슬래그 미분말 중 선택하였으며 최종적으로 선택된 재료에 대하여 물-결합재별로 단열온도상승특성 및 역학적 특성을 검토하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 Slurry wall용 고유동 콘크리트

3.1.1 잔골재의 조립율 변동에 따른 시험결과

LNG 구조물의 내구성을 고려하여 강사를 사용하도록 규정되어 있으며 강사는 채취장소에 따라 잔골재의 조립율 변동이 심하여 잔골재의 조립율에 대하여 기준 2.6에서 ±0.2 및 ±0.4의 수준에서 시험하였으며 잔골재의 조립율이 낮을수록 미분이 많아 콘크리트의 점성이 증대되어 slump flow는 감소하여 2.2인 경우는 요구특성을 만족하지 못하며, SF 50cm 도달시간이 증대되고, V-lot 유하시간이 증대되며 U-box 충전성 높이차가 증가하며 또한 공기량은 증가하는 것으로 측정되었다. 압축강도는 거의 유사하나 조립율이 3.0인 경우 잔골재의 부착력 증대로 인하여 높게 나타났다. 따라서 잔골재의 조립율 변동에 따른 고유동 콘크리트의 품질은 2.6±0.2 범위에서 유동성 및 충전성 측면에서 안정적인 것으로 사료된다.



<그림 2> 잔골재의 조립율 변동에 따른 시험결과

3.1.2 굵은골재의 조립을 변동에 따른 시험결과

굵은골재의 변동에 대한 고유동콘크리트의 특성변화는 유동성과 충전성 모두 둔감한 것으로 나타났으며 시험 범위인 6.6±0.2 범위에서 요구 특성을 만족하는 것으로 나타났으며 압축강도도 거의 유사한 것으로 나타났다.

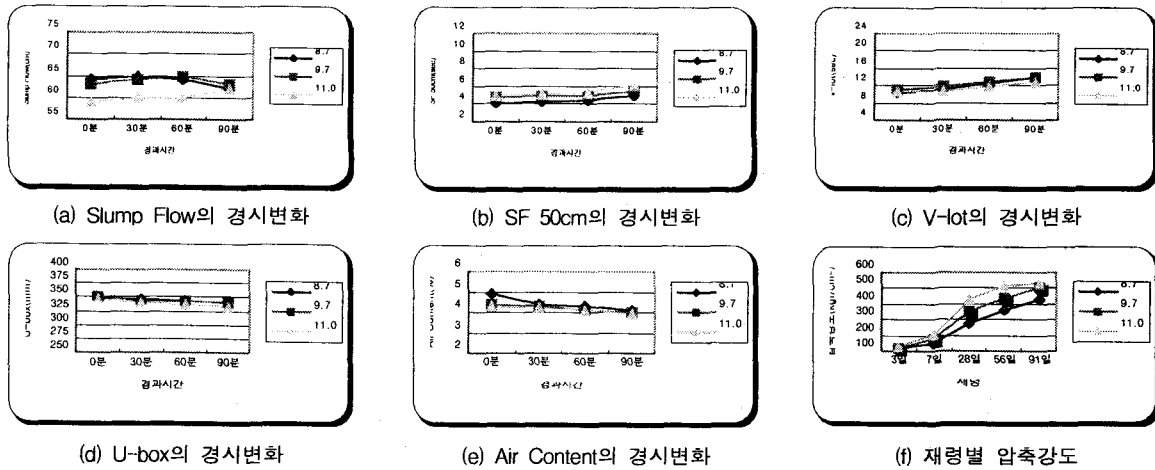
이는 점성 증대로 인하여 갇힌 공기량의 영향으로 사료된다.

3.1.4 단위수량 변동에 따른 시험결과

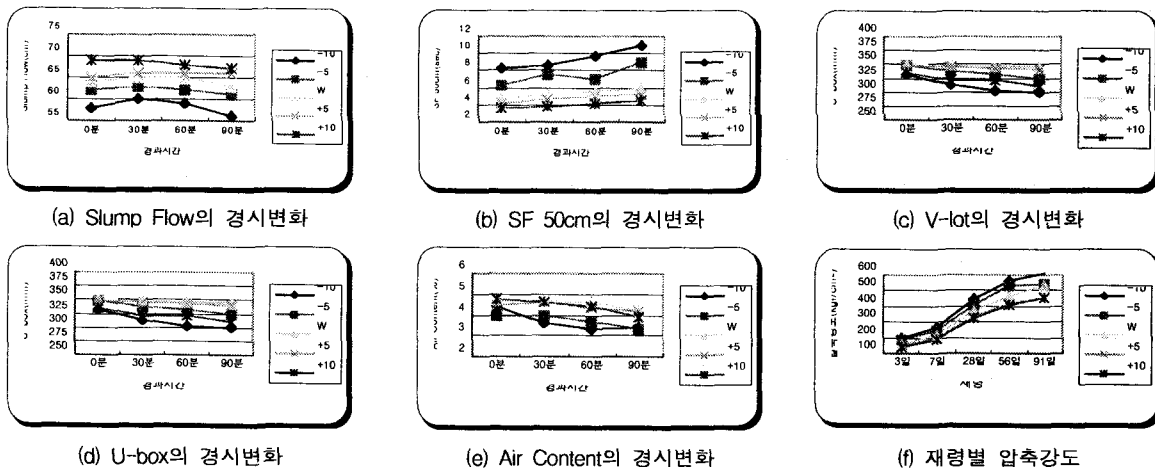
현장에서 잔골재의 표면수 관리는 실질적으로 불가능한 것을 고려하여 표면수의 변동에 따른 품질변동을 확인하고자 단위수량을 기준 174kg에서 ±5kg 및 ±10kg의 수준에서 시험하였으며 잔골재의 표면수 변동에 따른 고유동콘크리트의 특성은 유동성 및 충전성 측면에서 영향을 많이 미치는 것으로 나타났으며 시험결과 ±5kg 범위 즉 잔골재 표면수율로 환산할 때 ±6% 범위에서 관리하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

3.1.3 석회석 미분말의 평균입경 변동에 따른 시험결과

석회석미분말의 평균입경이 적을수록 즉 분말도가 높을수록 점성이 증대되어 유동성이 감소하여 slump flow가 감소하며 U-box 충전성 높이가 감소하였다. 또한 공기량은 증가하였으며



<그림 3> 석회석미분말의 평균입경 변동에 따른 시험결과



<그림 4> 단위수량 변동에 따른 시험결과

3.1.5 단위혼화제량 변동에 따른 시험결과

고유동 콘크리트에 사용된 혼화제는 폴리카본산계 고성능AE감수제로 감수율이 상당히 높은 혼화제로 사용량의 변화에 따라 특성 변동은 많은 것으로 나타났다. 특히 기준량±0.4%에서는 재료분리 또는 유동성 부족현상이 발생하여 slump flow가 관리기준을 벗어나는 것으로 나타났으며 특히 V-lot 유하시간의 변동은 심하였으며 (-) 범위에서는 유동성 및 분산작용의 부족으로, (+) 범위에서는 골재분리 및 골재입자간의 맞물림 작용으로 유하시간이 증대되는 경향을 나타내었다.

3.1.6 단위증점제량 변동에 따른 시험결과

증점제의 사용량이 증대할수록 점성이 증대되고 유동성이 저하되기 때문에 slump flow는 감소하였으며 이는 60분 이후 더 증대되는 경향을 나타내었으며 증점제의 사용량이 증가할수록 고유동 콘크리트의 공기량은 증가하는 것으로 나타났으며 이는 점성이 증가할수록 연행 공기 이외에 콘크리트 내부의 갇힌 공기의 영향으로 사료된다. 또한 증점제의 사용량이 증가할수록 압축강도는 약간 감소하는 것으로 나타났다.

3.1.7 콘크리트의 온도 변동에 따른 시험결과

병용계 고유동 콘크리트의 온도 변동에 따른 품질변화는 증점제의 온도에 대한 민감성으로 인하여 점성 및 공기량에 미치는 영향은 매우 큰 것으로 나타났다. 즉 콘크리트의 온도가 높아질수록 점성이 감소하여 slump flow가 증대되며 SF 50cm 도달시간이 감소되는 것으로 나타났다. 또한 압축강도는 증가되는 경향이지만 후기재령에

<표 8>시멘트종류에 따른 단열온도상승 특성

배합	단열온도상승 특성(7일간)	
	Q_{∞} (°C)	r
N(320-55.0-42.0)-20	46.8	0.861
L(320-55.0-43.0)-20	33.5	0.445
B(320-55.0-41.0)-20	47.4	0.811

서는 차이가 감소되는 것으로 나타났다.

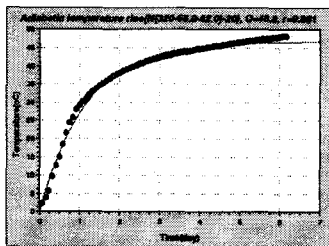
3.2 Bottom 및 side wall용 초저발열 콘크리트

3.2.1 Base 시멘트 선정을 실험 및 결과

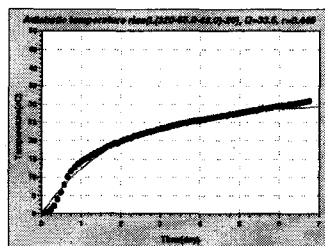
Base 시멘트를 선정하기 위하여 우선 1종, 4종 및 고로슬래그 시멘트를 단독으로 하여 bottom 배합 즉, $f_{ck}=240\text{kgf/cm}^2$ 을 만족하는 배합에 대하여 단열온도상승실험을 7일간 수행하여 최종 단열온도상승량(Q_{∞}) 및 온도상승에 관한 계수(r)를 구하였다.

배합표기의 예로서 LP30(330-50.0-40.0)-20은 L은 base 시멘트의 종류(N=1종, L=4종, B=고로슬래그), P는 혼화제의 종류(F=플라이애시, P=석회석미분말, S=고로슬래그미분말), 30은 혼화제의 혼입율(30=30%) 및 괄호안의 숫자는 총 결합재량-물결합재비-잔골재율의 순서이고 마지막 20은 콘크리트 치기온도(20=20°C)를 나타낸다.

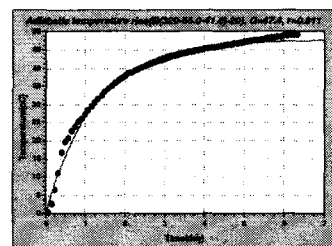
실험결과, <표 8> 및 <그림 5>에서 보는바와 같이, 4종 시멘트가 월등한 온도저감효과가 있어 선정하였으며 bottom에 요구되는 콘크리트의 요구조건인 Q_{∞} 를 25°C를 만족하기 위하여 혼화제를 검토하였다.



a) N(320-55.0-42.0)-20



b) L(320-55.0-43.0)-20



c) B(320-55.0-41.0)-20

<그림 5> Base 시멘트선정을 위한 단열온도상승실험 결과

<표 9> 혼화재에 따른 단열온도상승 특성

배합	단열온도상승 특성 (7일간)	
	Q_{∞} (°C)	r
LF30(330-50.0-40.0)-20	29.7	0.383
LP30(330-50.0-40.0)-20	23.8	0.521
LS30(330-50.0-40.0)-20	41.6	0.300

3.2.2 혼화재 선정을 위한 실험 및 결과

Base 시멘트를 4종으로 하고 Q_{∞} 를 저감하기 위하여 총 결합재량을 330kg/m^3 으로 하여 플라이 애쉬, 석회석 미분말 및 고로슬래그 미분말을 각각 30% 혼입하여 단열온도상승실험을 한 결과는 <표 9>에서 보는바와 같이 석회석 미분말이 온도저감효과가 탁월하여 선정하였다.

3.2.3 물-결합재비에 따른 특성실험 및 결과

물-결합재비에 따른 단열온도상승 특성 및 역학적 특성을 검토하기 위하여 사용된 배합은 총 다섯 배합에 대한 콘크리트특성은 다음과 같다. 물-결합재비에 따른 단열온도상승 특성은 <표

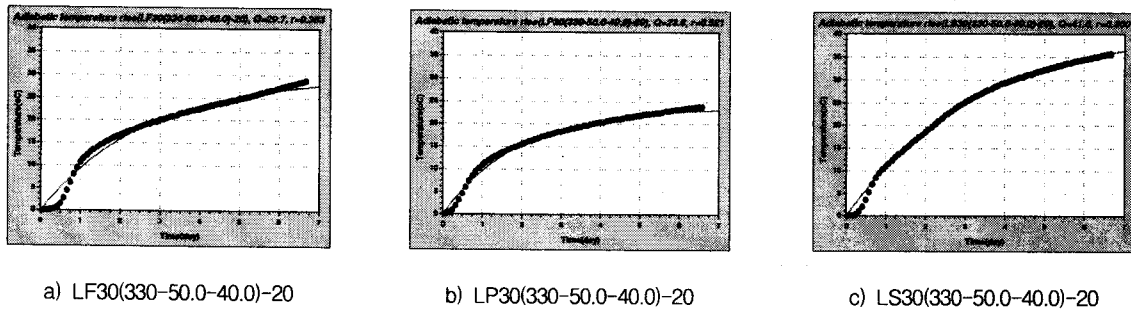
<표 10> W/B에 따른 단열온도상승 특성

배합	단열온도상승 특성 (7일간)	
	Q_{∞} (°C)	r
LP30(373-41.6-41.0)-20	28.4	0.596
LP30(357-43.4-40.0)-20	25.3	0.577
LP30(348-44.5-40.5)-20	24.9	0.563
LP30(326-48.5-40.0)-20	24.0	0.558
LP30(316-50.1-40.0)-20	22.9	0.556

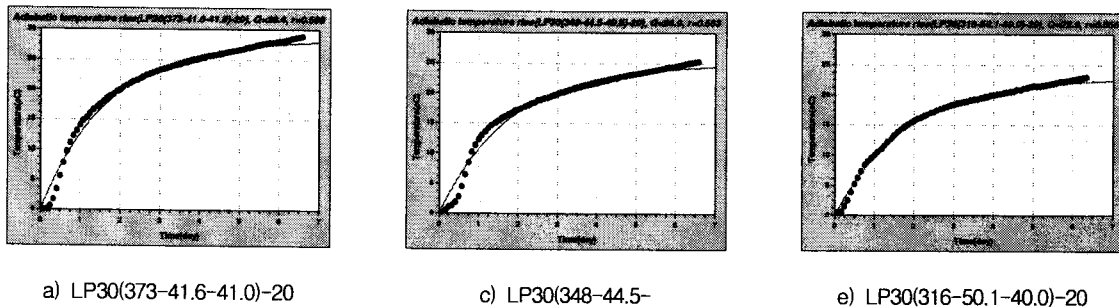
10>에 나타난 것과 같이 총 결합재량이 373kg/m^3 이하이면 side wall 콘크리트 및 348kg/m^3 이하이면 bottom 콘크리트의 요구특성을 만족한다.

5. 결 론

인천 LNG 지하탱크 15 및 16호 slurry wall에 요구되는 고유동콘크리트의 시방배합에 대하여 사용재료 및 배합 변동에 따른 영향을 분석하기



<그림 6> 혼화재 선정을 위한 단열온도상승실험 결과



<그림 7> 물-결합재비에 따른 단열온도상승실험 결과

<표 11> 물-결합재비별 콘크리트의 특성

배합	Slump (cm)				Air (%)				f _{cu} (kgf/cm ²)			
	0분	30분	60분	90분	0분	30분	60분	90분	7일	28일	56일	91일
LP30(373-41.6-41.0)-20	21.0	22.5	21.0	20.0	5.3	4.4	4.6	4.5	184	309	415	443
LP30(357-43.4-40.0)-20	20.5	21.0	20.5	20.0	6.0	5.2	4.9	4.6	135	278	10/16	11/20
LP30(348-44.5-40.5)-20	19.5	20.5	20.5	19.5	5.3	4.6	4.4	4.9	131	260	324	363
LP30(326-48.5-40.0)-20	21.0	21.5	20.0	18.5	5.2	4.6	4.8	4.8	105	223	10/16	11/20
LP30(316-50.1-40.0)-20	21.0	21.0	21.0	20.0	4.6	4.7	4.7	4.8	97	219	10/16	11/20

위하여 검토한 결과 및 bottom 및 side wall용 초저발열 콘크리트를 선정하기 위한 실험결과는 다음과 같다.

Slurry wall용 고유동 콘크리트:

- 1) 잔골재의 조립율은 고유동콘크리트의 점성 및 자기충진성에 영향을 미치기 때문에 2.6±0.2 범위에서 관리하여야 한다.
- 2) 굵은골재의 조립율은 6.6±0.2 범위에서 고유동 콘크리트의 특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
- 3) 석회석미분말의 평균입径의 영향보다는 입도분포가 특성에 영향을 미치는 것으로 사료된다.
- 4) 잔골재의 표면수율 변동의 영향을 평가하기 위해 단위수량을 기준량±5kg 및 ±10kg 범위에서 시험한 결과 유동성, 점성 및 재료분리 저항성뿐만 아니라 압축강도에도 영향을 미치기 때문에 잔골재의 표면수율을 ±0.6% 범위에서 엄격하게 관리하여야 한다.
- 5) 감수율이 높은 혼화제를 사용함으로써 혼화제의 사용량에 따른 특성은 많이 변화기 때문에 혼화제의 계량오차는 ±1% 범위에서 관리하여야 한다.
- 6) 증점제의 사용량이 증가할수록 점성 및 재료분리 저항성은 증대하지만, 유동성에는 나쁜 영향을 미치는 것으로 나타나 계량오차를 줄이기 위한 방안이 필요하다.
- 7) 콘크리트의 온도변화는 증점제의 온도민감성으로 인하여 점성 및 공기량에 영향을 미치기 때문에 콘크리트의 온도는 10~20°C 범위에서 관리하는 것이 바람직하며, 하절기에도 30°C를 넘지 않도록 하여야 한다.

Bottom 및 side wall용 초저발열 콘크리트:

- 8) Bottom 및 side wall에 타설할 목적으로 먼저 온도해석을 수행하여 최종단열온도 상승량(Q_∞) 및 온도상승에 관한 계수(r)에 대한 요구특성을 온도균열지수를 1.2이상 즉 균열 발생을 제한할 경우를 고려하여 구한다.
- 9) 이에 적합한 재료를 선정하기 위하여 여러 종류의 시멘트 및 혼화제를 사용하여 단열온도상승 특성을 검토한 결과 4종 시멘트에 석회석미분말을 30% 혼입하여 굳지 않은 콘크리트 및 굳은 콘크리트의 특성은 물론 단열온도상승 요구특성을 만족하였다.

< 참고 문헌 >

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