



지하식 LNG 저장탱크의 지붕 콘크리트의 요구성능에 관한 실험적 연구

권영호^{1)*}

¹⁾동양대학교 건축소방행정학과

An Experimental Study on the Required Performances of Roof Concrete Placed in the In-ground LNG Storage Tank

Yeong-Ho Kwon^{1)*}

¹⁾Dept. of Architecture and Fire Service Administration, Dong Yang University, Youngju 750-801, Korea

ABSTRACT This study is to derive from the required performances and the optimum mix proportion of the roof concrete placed in the in-ground LNG storage tank with a capacity of 200000 m³, and propose the actual data for site concrete work. The concrete placing work without sliding and segregation in the fresh concrete condition is very important because the slope of domed roof is varied in the large range by its curvature. Also the control of hydration heat and the strength development at test ages are classified with massive section about 1.4 m thick and considered to the pre-stressing work and removal of air support after concrete placing work. Considering above condition, slump range is selected 100±25 mm under the slope 20° and 150±25 mm over the slope 20° s until 60 minutes of elapsed time. Also, the roof concrete is satisfied with compressive strength range including design strength at 91 days (30 MPa), pre-stressing work at 7 days (10 MPa), air support removal work at 21 days (14 MPa). Replacement ratio of limestone powder is determined by confined water ratio test and main design factors include water-cement ratio (W/C), sand-aggregate ratio and dosage of admixture. As test results, the optimum mix proportion of the roof concrete used low heat cement is as followings. 1) Replacement ratio of limestone powder 25% by confined water ratio test 2) Water-cement ratio 57.8% 3) Sand-aggregate ratio 42.0%. Also, test results for the adiabatic temperature rising test is satisfied with its criteria and shown the lower value compared to preceding storage tank (TK-13, 14). These required performances and the optimum mix proportion is to apply the actual construction work.

Keywords : roof slope, pre-stressing, air support, confined water ratio, adiabatic temperature raising test

1. 서 론

대용량 지하식 LNG(liquefied natural gas; 액화천연가스) 저장탱크의 주요 구조부는 지하연속벽(slurry wall), 바닥슬래브(bottom slab), 측벽(side wall) 및 지붕(roof)으로 나누어지며, 대부분 매스 콘크리트 구조물로 설계된다.¹⁾ 특히, 지붕은 원형의 돔 형태를 갖는 매스 콘크리트 구조물로 지붕 기울기가 곡률에 따라 크게 다르기 때문에, 콘크리트 타설작업에 있어서 시공성 및 충전성, 단계별 재령강도의 확보가 매우 중요한 공정으로 간주된다. 또한, 측벽의 최상단부와 연결되는 돔 형태의 지붕 끝 단면은 두께 1.4 m 정도의 매스 콘크리트 구조물이기 때문에, 수화열 관리도 매우 중요하다.^{2,3)}

일반적으로 지하식 LNG 저장탱크의 지붕공사 순서는 강제지붕을 바닥슬래브 층에서 조립하고 내면에 보냉재를 부착한 후에 공기부양공법(air raising method)으로 들어 올려서 측벽의 정상부에 고정시킨다. 이때, 내압 및 기밀시험으로 강제지붕의 내압성 및 기밀성을 확인한 후에 강제지붕 위에서 철근을 조립한다.

또한, 탱크의 내부를 승압시켜 강제지붕을 air support 하고 외주에서 내측까지 고리모양(ring狀)으로 콘크리트의 타설작업을 진행한다.

소정의 기간동안 콘크리트의 양생을 실시한 후에 정상부에 배치된 PC tendon(긴장재)으로 프리스트레스 응력을 도입한다. 프리스트레스를 도입한 후에 탱크의 내압을 감압하며, 콘크리트의 표면을 우레탄 방수 등으로 전면피복하면 지붕의 공정이 끝나게 된다.⁴⁾

이러한 공정에 타설되는 지붕 콘크리트의 요구성능은 돔의 경사구배에 따른 시공성 및 충전성, 그리고 단계별 초기강도 발현의 조건을 만족해야 한다.⁵⁾ 국내에서의 적

*Corresponding author E-mail : kyh00127@hanmail.net

Received January 22, 2013, Revised February 19, 2013,

Accepted February 27, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

용사례를 보면, 한국가스공사의 평택, 통영, 인천기지에 10~14만 m³ 용량의 지상식 LNG 저장탱크가 건설·가동 중에 있으며, 최근에는 삼척기지에 20~27만 m³의 지상식 LNG 저장탱크가 건설되고 있다. 그러나 20만 m³의 지하식 LNG 저장탱크의 지붕 콘크리트에 관한 연구현황은 아직 체계적으로 알려져 있지 않은 실정이다.

따라서, 이 연구에서는 지하식 LNG 저장탱크의 지붕 콘크리트에 사용되는 재료특성, 시공성 및 충전성, 강도발현과 수화열 관리에 적합한 최적 배합조건을 제시하는 것을 목적으로 하며, 이를 위하여 저열 포틀랜드 시멘트 (Belite cement)에 석회석 미분말(Lime stone powder, 이하 LSP)을 내할로 치환하여 사용하는 방안을 검토하였다.

2. 실험개요 및 배합조건

2.1 배합설계 과정 및 요구성능

돔 형태의 지붕 콘크리트의 배합설계 과정은 Fig. 1에 나타난 바와 같고, 요구성능은 Table 1과 같다.

2.1.1 압축강도

지붕 콘크리트의 설계기준강도는 30 MPa이며, 제조·운반·타설 및 양생 등의 과정에서 발생하는 변동계수(V)를 10%로 가정하였으며, 식 (1)에 따른 할증계수(α)는 1.2로 하였으며, 산정된 배합강도는 36 MPa이다.

$$\alpha = \frac{1}{1 - 1.64 \times \frac{V}{100}} \quad (1)$$

Fig. 2는 지붕 콘크리트의 실제 적용될 공정을 고려하여 단계별 재령의 강도발현과 프리스트레싱 작업 및 air support 제거에 소요되는 공정을 나타낸 것이다.

지붕 구조물의 프리스트레싱 작업은 지붕 콘크리트의 압축강도가 10 MPa에 도달한 후 실시할 수 있으며, 대략 재령 7일 정도가 적당한 것으로 사료된다.

그라우팅과 양생공정이 7일 정도 소요되며 이러한 공정이 마무리되면, air support를 제거하게 된다. air support를 감압할 때에 요구되는 콘크리트의 압축강도는 14 MPa로 21일 재령을 만족하는 조건으로 하였으며 최종강도 관리재령은 91일로 정하였다.⁶⁾

Air support의 감압으로 인하여 하중을 분담해야 하는 기간 동안에는 강관이나 비계발판 등으로 지붕 콘크리트를 보강해야 한다. 또한, 공기압 시험도 이 기간 동안에 실시하게 되는데, 공기압 시험에 요구되는 강도는 설계 기준강도가 아니다.⁷⁾

Fig. 2에 나타난 재령 91일 강도발현 곡선은 측벽에 적용된 매스 콘크리트의 실제 강도발현 곡선을 인용한 것이며, 28일 강도발현 곡선은 일반 콘크리트의 조건에서

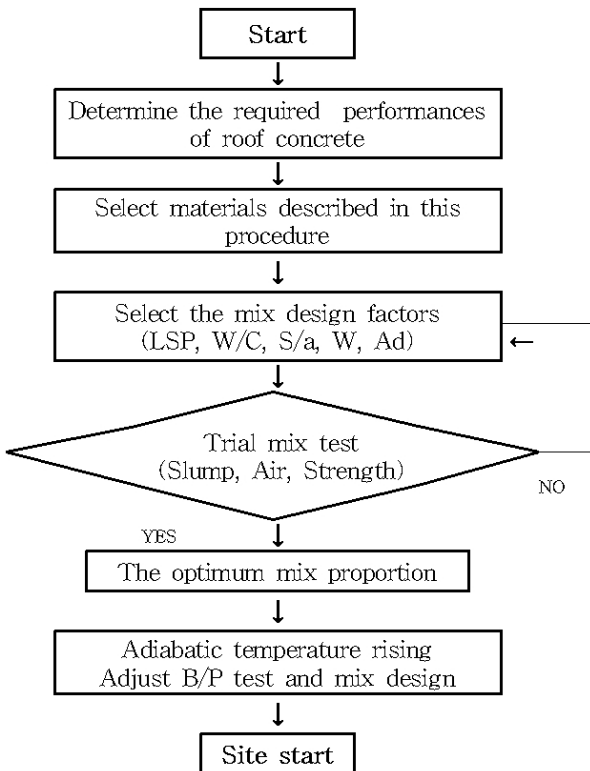


Fig. 1 The Optimum mix design procedure of roof concrete

Table 1 Required performances of the roof concrete

Measurement items	Target value	Remark
Specified design compressive strength (MPa)	30	KS F 2405 91 days (Φ100×200 mm)
Required compressive strength (MPa)	36	
Slump (mm)	100±25 ¹⁾	¹⁾ Slope < 20° ²⁾ Slope ≥ 20°
	150±25 ²⁾	
Air contents (%)	5.0±1.0	KS F 4009
Chloride contents (kg/m ³)	Max. 0.3	

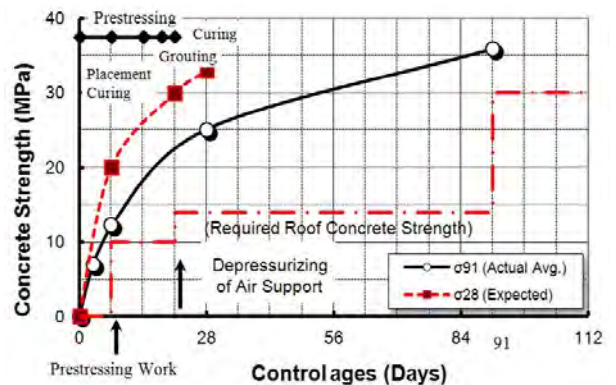


Fig. 2 Actual data and the required concrete strength

기대되는 강도발현 경향을 나타낸 것이다.⁸⁾

재령 91일까지의 단계별 강도발현 성상은 대부분 지붕 콘크리트에 요구되는 강도를 만족하고 있는 것으로 나타났다. 28일 관리재령에 비하여 91일 관리재령의 압축강도를 채택하게 되면, 단위시멘트량의 저감을 통하여 경제성 및 수화열 저감효과를 얻을 수 있기 때문에 균열억제를 위한 효과적인 방안이 될 수 있을 것으로 사료된다.⁹⁾

2.1.2 슬럼프

지붕에 사용되는 콘크리트는 기본적으로 굳지않은 상태에서 워커빌리티, 재료분리 저항성 등을 포함한 반죽 질기가 확보되어야 하는 동시에 돔 형태 지붕의 경사기울기, 응결시간, 기온과 바람 및 수화열 제어 등에 관해서도 함께 고려하여야 한다.

지하식 LNG 저장탱크의 단면도 및 지붕의 시공조건은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 경사구배에 따라 단부에서 중앙부까지 콘크리트의 타설 두께가 1.4~0.6 m로 되어있기 때문에, 콘크리트의 시공성 및 충전성이 요구된다.

일반적으로 경사구배가 20° 이상인 콘크리트에는 진동 거푸집을 설치하지만, 거푸집 설치에 따른 공사기간 및 공사비 상승, 거푸집 면의 콘크리트 품질 등의 문제가 발생할 수 있기 때문에 표층의 처짐방지용 용접철망의 사용을 고려하였다.¹⁰⁾

따라서, 이 연구에서 콘크리트의 슬럼프는 지붕의 경사기울기 20° 미만에서는 100±25 mm, 20° 이상에서는 150±25 mm로 범위를 정하였다. 또한, 경시변화에 따른 슬럼프 손실을 고려하여 경시변화 60분까지 슬럼프를 유지하는 것으로 하였다.¹¹⁾

2.1.3 공기량

지붕 콘크리트는 KS F 4009에 규정된 일반 콘크리트 로 분류되지만, LNG 저장탱크의 액화온도(-162℃)를 고려하여 동결융해 저항성을 향상시킨다는 측면에서 굳지않은 콘크리트의 공기량을 5.0±1.0%로 관리하도록 하였다.

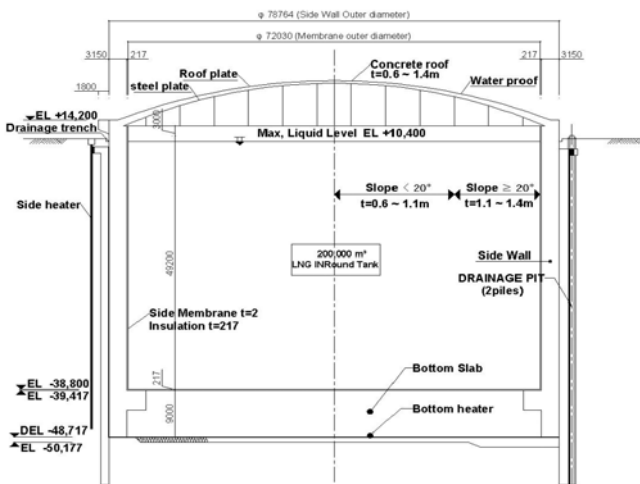


Fig. 3 Roof section of in-ground LNG storage tank

2.2 사용재료

2.2.1 시멘트

콘크리트의 요구성능 및 수화열을 고려하여 저열 포틀랜드 시멘트(4종 Belite cement)를 선정하였으며, 시험 결과는 Table 2와 같이 KS L 5201 규준을 만족하였다.

2.2.2 골재

잔골재는 강모래, 굵은골재는 20 mm 쇄석으로, 특성시험 결과는 Table 3에 나타난 바와 같이 KS F 2526 규준을 만족하였다.

2.2.3 고성능 AE감수제

고성능 AE감수제는 폴리-카르본계로 특성시험 결과는 Table 4와 같이 ASTM C 494의 규준을 만족하였다.

Table 2(a) Chemical composition of the belite cement

SO ₃ (%)	MgO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	Loss Ig. (%)	Remark
1.7	2.0	3.8	26.2	54.8	1.9	1.1	KS L 5201
Max. 2.3	Max. 5.0	Max. 6.0	Max. 35	Min. 40	Max. 7.0	Max. 2.5	

Table 2(b) Physical properties of the belite cement

Autoclave expansion (%)	Setting time (Gilmore)		Comp. strength (MPa)		Hydration heat (cal/g)		Remark
	Initial (min)	Final (hr)	7 days	28 days	7 days	28 days	
0.03	300	08:30	16.5	32.2	58.1	68.7	KS L 5201
Max. 0.8	Max. 60	Max. 10	Min. 7.3	Min. 17.7	Max. 60	Max. 70	

Table 3(a) Test results of the fine aggregate

FM	Absorption ratio (%)	Density (g/m ³)	Soundness (%)	Organic Impurities	Chloride content (%)	Passing 0.08 mm (%)	Remark
2.67	1.10	2.60	4.1	O.K	0.01	1.1	KS F 2526
-	Max. 3.0	Min. 2.50	Max. 10.0	Lighter than ST	Max. 0.04	Max. 5.0	

Table 3(b) Test results of the coarse aggregate

FM	Absorption ratio (%)	Density (g/m ³)	Soundness (%)	Clay lumps (%)	Abrasion ratio (%)	Passing 0.08 mm (%)	Remark
6.57	0.66	2.63	4.6	0.01	20.8	0.1	KS F 2526
-	Max. 3.0	Min. 2.50	Max. 12.0	Max. 1.0	Max. 0.04	Max. 5.0	

Table 4 Test results of the high-range water reducing admixture

Water content (%)	Setting time (hr: min)		Compressive strength ratio (%)		Flexural strength ratio (%)		Remark
	Initial	Final	7 days	28 days	7 days	28 days	
81.0	+30	+20	124	119	107	104	ASTM C494
Max. 88	1:00 earlier nor 1:30 later		Min. 115	Min. 110	Min. 100	Min. 100	

Table 5 Test results of the lime stone powder

Density (g/m ³)	Moisture content (%)	Blaine (sieve size: μm)			Remark
		600	150	75	
2.61	0.06	-	100	100	JIS A 5008
Min. 2.60	Max. 1.0	100	Min. 90%	Min. 70%	

2.2.4 석회석 미분말

수화열의 저감 및 응결시간의 조절, 워커빌리티의 향상 등을 위하여 석회석 미분말을 사용하였으며, 특성시험 결과는 Table 5와 같이 JIS A 5008의 규준을 만족하였다.

2.3 배합조건 및 시험변수

이 연구의 지붕 콘크리트의 배합조건은 Table 6과 같다. 또한, 지하식 LNG 저장탱크의 바닥슬래브 및 측벽에서 나타난 실측자료를 고려하여 지붕 콘크리트의 기본배합은 Table 7과 같이 정하였다.

지붕 콘크리트의 요구 성능에 적합한 최적배합 조건을 도출하기 위한 배합변수의 범위는 Table 8과 같다. 이때, 콘크리트의 배합방법은 60 L 용량의 가정식 믹서(44 rpm)를 사용하였으며, Fig. 4와 같이 콘크리트 재료의 건비빔을 포함하여 배합시간을 3분(180초)으로 하였다.

지붕 콘크리트의 최적배합을 도출하기 위한 변수는 물-시멘트비 3 cases 및 잔골재율 3 cases, 그리고 석회석 미분말의 치환율 시험을 위한 치환율을 4 cases로 선정하였으며, 이에 따른 콘크리트의 배합시험 및 단열온도 상승시험을 실시하고 그 결과를 분석하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 석회석 미분말의 구속수비 결과 분석

석회석 미분말의 치환율에 따른 구속수비의 특성을 확인하기 위하여 저열 포틀랜드 시멘트의 내할 0, 15, 30 및 45%를 치환하여 구속수비 시험을 실시하였으며, 시험 결과는 Fig. 5와 같다.

실험 결과, 석회석 미분말의 치환율이 증가할수록 구

Table 6 Mixing condition for the roof concrete

Classification	Mixing condition	Remark
Max. size of coarse aggregate (mm)	20	KS F 4009
Water-binder ratio (W/B) (%)	Max. 55	
Unit water content (W) (kg/m ³)	Max. 175	
Unit binder content (B) (kg/m ³)	Min. 270	
Sand-aggregate ratio (S/a) (%)	Max. 55	
Dosage of HRWR agent (%)	Max. B×3.5	

Table 7 Basic mix condition for roof concrete

W/B (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight materials (kg/m ³)					
			Water	Cement	LSP	Sand	Gravel	Ad
43.4	62	41	155	250	107	721	1049	2.32

Table 8 Test ranges of mix design factors

W/B (%)	W/C (%)	S/a (%)	Replacement ratio of lime stone powder (C×%)
43.4	54.2, 57.8, 62.0	41.0, 43.0, 45.0	0, 15, 30, 45

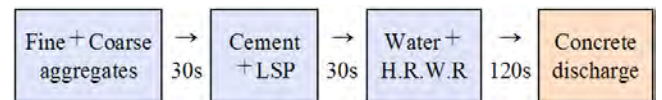


Fig. 4 Mixing method and time of the fresh concrete

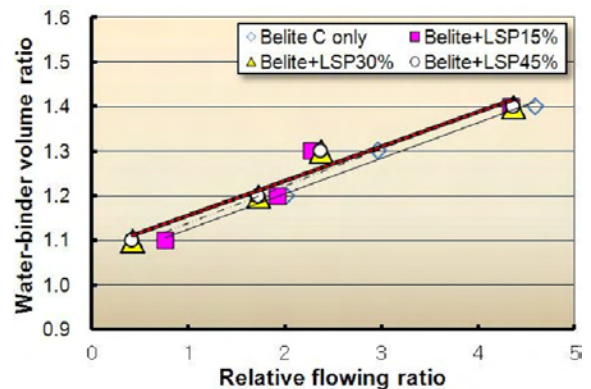


Fig. 5 Confined water ratio for LSP replacement ratio (Belite cement type)

속수비는 증가하는 경향을 나타내었지만 15% 이상에서는 거의 일정한 값(1.078)에 수렴하였다. 변형계수는 치환율과 관계없이 일정한 값(0.078)을 나타내었다. 따라서, 석회석 미분말의 최적치환율은 15~45% 범위에서 시공성, 강도발현 및 수화열 저감 등을 고려하여 정해야 한다.

3.2 물-시멘트비에 따른 결과분석

Table 1에 제시된 지붕 콘크리트의 요구성능을 만족해야 하고 특히 측벽의 최상단(9Lot)의 프리스트레싱 뿐만

아니라 air support의 제거 등을 고려하여 압축강도 발현이 매우 중요하다. 따라서, 측벽 콘크리트와 비교하여 7일 재령의 압축강도를 향상시키는 방안으로 Table 9와 같은 배합조건의 물-시멘트비에 따른 실험을 실시하였다.

물-시멘트비에 따른 슬럼프 및 공기량은 각각 150~135 mm(150±25 mm 기준) 및 5.8~4.5%(5±1% 기준)로 요구성능에서 정한 범위를 만족하였으며, 재령별 압축강도 결과는 Fig. 6과 같다.

실험 결과, 대부분의 물-시멘트비에서 Fig. 2에서 요구하는 지붕 콘크리트의 재령강도를 만족하였다.

따라서, 측벽의 콘크리트 압축강도, 강도발현의 안정성, 경제성 및 수화열 등을 고려하여 물-시멘트비 57.8%를 최적 조건으로 선정하였다.

3.3 잔골재율에 따른 결과 분석

단계별 지붕 콘크리트의 강도발현 성능 외에도 슬럼프의 경시변화 및 적합한 워커빌리티, 경제성 등을 확인하기 위하여 Table 10과 같은 배합조건으로 잔골재율(S/a)에 따른 실험을 실시하였다.

Table 9 Mix design conditions according to W/C

W/C (%)	S/a (%)	Unit weight of materials (kg/m ³)						Ad (%)
		Water	Cement	LSP	Sand	Gravel		
62.0	41.0	155	250	107 (30)	721	1049	0.65	
57.8	41.0	155	268	91 (25)	721	1049	0.75	
54.2	41.0	155	286	77 (21)	721	1049	0.85	

(): Replacement ratio of lime stone powder

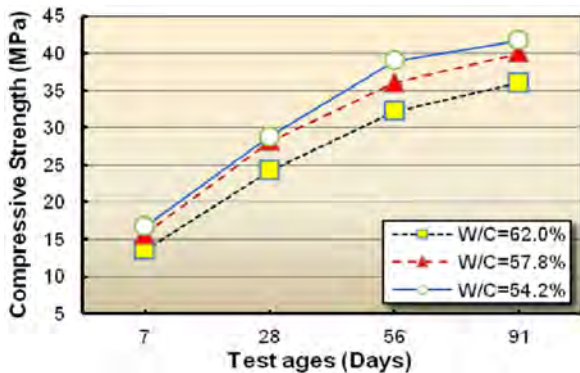


Fig. 6 Comp. strength for water cement ratio (W/C)

Table 10 Mix design conditions according to S/a

W/C (%)	S/a (%)	Unit weight of materials (kg/m ³)						Ad (%)
		Water	Cement	LSP	Sand	Gravel		
57.8	41.0	155	268	91	721	1049	0.8	
	43.0	155	268	91	757	1015	0.8	
	45.0	155	268	91	792	979	0.8	

잔골재율에 따른 경시변화 30분의 슬럼프 및 공기량은 각각 Fig. 7 및 8에 나타난 바와 같으며, 잔골재율 43%가 가장 워커빌리티가 우수한 것으로 나타났다.

경시변화 및 품질의 안정성을 고려하여, Table 10과 같이 잔골재율을 1%로 감소시켜 슬럼프 150±25 mm의 최적배합조건으로 제시하였으며, 슬럼프 100±25 mm의 배합조건은 고성능 AE감수제의 사용량으로 조정하도록 하였다.

3.4 최적배합설계에 따른 결과분석

지붕의 경사구배에 따른 슬럼프를 고려한 지붕 콘크리트의 최적배합 조건은 Table 11과 같다.

고성능 AE감수제의 사용량은 결합재(시멘트+석회석 미분말)의 중량비를 나타낸 것이다. 지붕 콘크리트의 최적배합 조건에 따른 슬럼프 및 공기량의 경시변화 특성 실험 결과는 Fig. 9 및 10에 나타난 바와 같다.

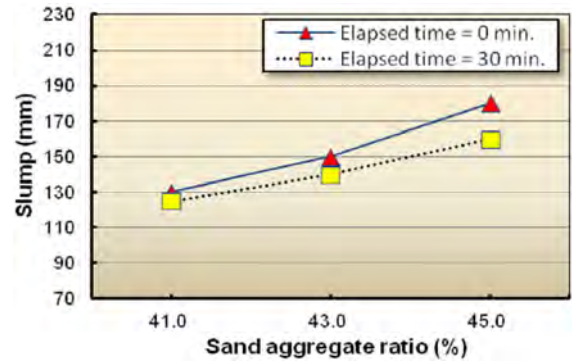


Fig. 7 Slump results for S/a by elapsed time

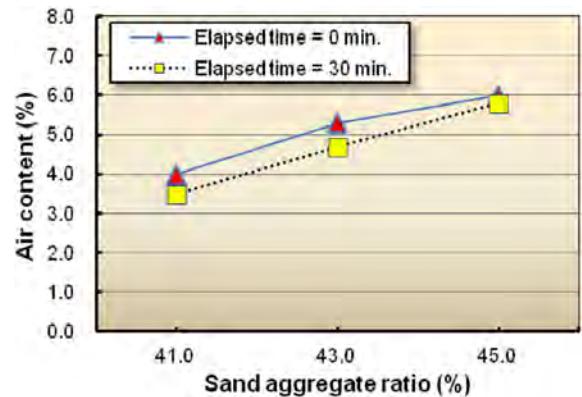


Fig. 8 Air content results for S/a by elapsed time

Table 11 Optimum mix proportion conditions

No. (slump)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight of materials (kg/m ³)					Ad (%)
			Water	Cement	LSP	Sand	Gravel	
150±25	57.8	42.0	155	268	91	739	1,032	0.8
100±25	57.8	42.0	155	268	91	739	1,032	0.7

경시변화 60분까지 슬럼프 및 공기량의 실험 결과는 지붕 콘크리트의 요구성능을 만족하는 것으로 나타났다.

재령별 압축강도 시험 결과는 Fig. 11에 나타난 바와 같이 Fig. 2에 제시된 지붕 콘크리트의 단계별 요구되는 강도발현 공정을 만족하는 것으로 나타났다.

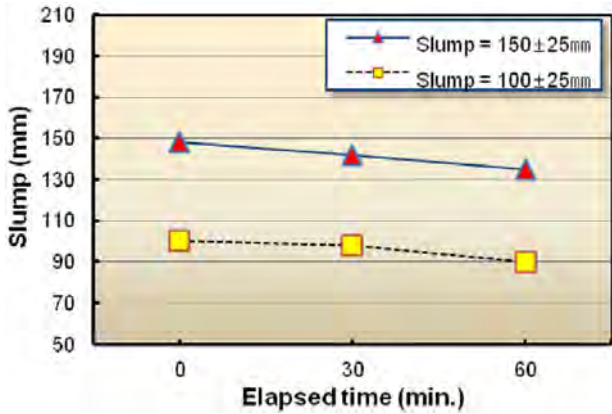


Fig. 9 Slump results for slump range by elapsed time (until 60 minutes)

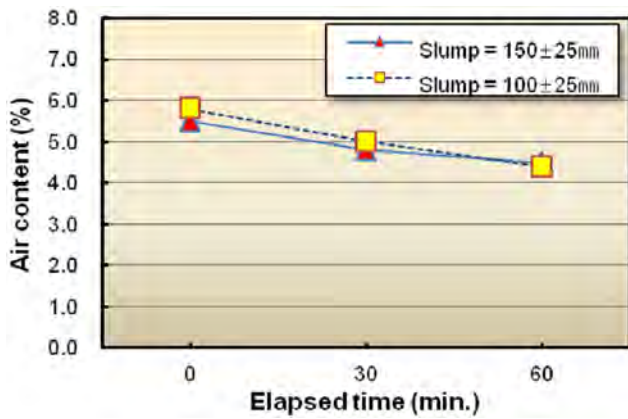


Fig. 10 Air contents for slump range by elapsed time (until 60 minutes)

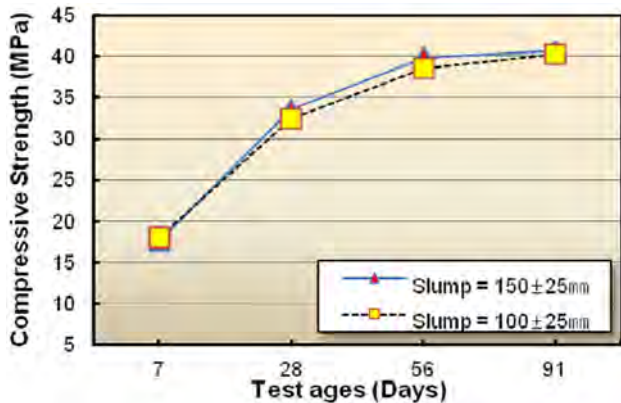


Fig. 11 Compressive strength results for slump range by test ages

3.5 단열온도 상승시험에 따른 결과 분석

지붕 콘크리트와 같은 매스 구조물의 온도응력을 분석하기 위하여 선정된 최적배합 조건에 대하여 단열온도 상승시험 및 압축인장강도, 탄성계수 시험을 실시하였으며, 결과는 Fig. 12 및 Table 12에 나타난 바와 같다.

실험 결과, 물-시멘트비에 따라 약간의 차이는 있지만, 저열 포틀랜드 시멘트와 석회석 미분말을 사용하였기 때문에 단열온도 상승양(Q_{∞}) 및 상승속도(γ)가 낮게 나타났다. 또한, 선행탱크의 시공사례¹²⁾와 비교해 볼 때, 선행탱크의 단열온도 상승양(42.9°C)보다 낮은 실험 결과를 나타내었는데, 이는 저열 포틀랜드 시멘트의 수화반응에 기여하는 C_3A 와 C_3S 그리고 C_2S 성분의 함량 및 석회석 미분말의 치환율(내할 25%)의 영향도 큰 것으로 사료된다.

4. 결 론

이 연구에서는 저열 포틀랜드 시멘트 및 석회석 미분말을 사용한 지하식 LNG 저장탱크의 지붕 콘크리트의 요구성능에 대한 콘크리트의 최적배합 조건을 실험적으로 고찰하였으며, 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 강도실험 결과, 공기부양공법(air raising method)으로 조립하는 강재지붕의 프리스트레싱 작업에 요구되는 지붕 콘크리트 7일 재령강도(10 MPa 이상)와 air support의 제거공정을 고려한 21일 재령강도(14 MPa 이상)를 만족하는 것으로 나타났다.

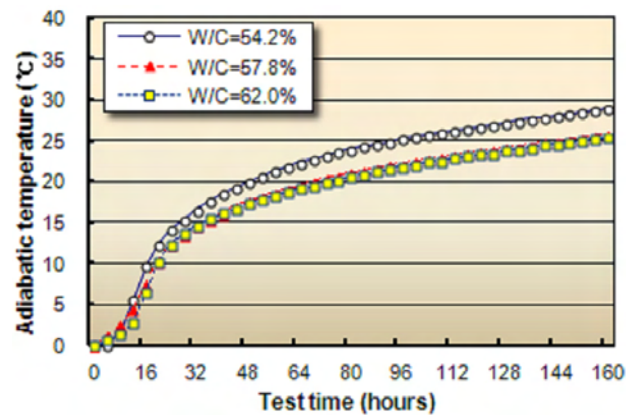


Fig. 12 Adiabatic temperature rising test for W/C

Table 12 Test results of adiabatic temperature

Q_{∞} (°C)	γ	Strength	Strength and E_c test results for ages (MPa)							
			3 days	5 days	7 days	14 days	28 days	56 days	91 days	
26.3	0.58	Comp.	9.6	12.9	15.2	21.8	29.4	36.3	41.2	
		Ten-sile	1.03	1.37	1.60	2.10	2.71	3.39	3.72	
		E_c ($\times 10^4$)	1.64	1.81	1.93	2.29	2.65	2.97	3.10	

- 2) 슬럼프 실험 결과, 돔 형태 지붕의 경사기울기에 따라 20°미만에서의 슬럼프 관리기준(100±25 mm) 및 20°이상에서의 슬럼프 관리기준(150±25 mm)을 만족하는 것으로 나타났다.
- 3) 석회석 미분말의 치환율은 페이스트의 구속수비 및 콘크리트의 충전성, 강도발현, 수화열 저감 등을 고려하여 저열 포틀랜드 시멘트의 내할 25%로 하는 것이 가장 바람직하다.
- 4) 지붕 공사의 단계별 공정에 따른 콘크리트의 강도발현 및 경사구배에 따른 시공성, 충전성을 고려하여 최적배합 조건은 물-시멘트비 57.8%, 잔골재율 42%가 가장 적합한 것으로 확인되었다. 또한, 슬럼프 및 공기량은 경시변화 60분까지 요구성능을 만족하였다.
- 5) 단열온도 상승시험 결과, 단열온도 상승량은 26.3℃로 선행탱크(TK-13,14)에 비하여 매우 낮은 것으로 나타났다. 이는 저열 포틀랜드 시멘트 및 석회석 미분말의 사용에 따른 저감효과로 사료된다.

References

1. Korea Gas Corporation, "Code of the Full Containment LNG Storage Tank," Report of Korea Gas Corporation, 2002, 126 pp.
2. Kim, T. H. and Ha, J. D., "Thermal Crack Control of LNG Tank Roof," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 14, No. 2, 2002, pp. 421-424.
3. Choi, C. K., Lee, T. Y., and Lee, E. J., "Improved Finite Element Models for the In-ground LNG Storage Tank," *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No. 5-A, 2002, pp. 1175-1182.
4. Takagi, J., Nakashita, K., Nagura, K., and Nakamura, R., "The Rational Construction of In-ground LNG Tank Having of the Largest Capacity in the World-41LNG," *Journal of the Cement Concrete*, No. 572, 1994, pp. 8-13.
5. Yang, I. H., Lee, J. Y., and Kim, Y. S., "Construction of Above-Ground Tanks for LNG Tank," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 15, No. 3, 2003, pp. 24-30.
6. Kim, J. H., Yoon, I. S., and Yang, Y. M., "The Analysis of In-ground LNG Storage Tank Compression Ring Behavior during Concrete Pouring," *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 9, No. 2, 2005, pp. 16-21.
7. Lee, K. W., Kim, Y. K., and Hong, S. H., "The Study of Roof Design for LNG Storage Tank," *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 2, No. 1, 2001, pp. 448-452.
8. Kwon, Y. H., "Study on the Optimum Mix Design of the Mass Concrete Designed as Massive and Deep Structure," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 17, No. 2, 2005, pp. 293-302.
9. Ha, J. D. and Park, C. K., "The Requirement Properties of Concrete for LNG Tank," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 15, No. 3, 2003, pp. 56-61.
10. Wataki, H., "Design and Construction on the Roof Concrete of In-ground LNG Storage Tank," NKK Technical Report, No. 132, 1990, pp. 70-77.
11. Takagi, J., "Construction and Development of In-ground LNG Storage Tank Having of Large Capacity," *Journal of the Cement Concrete*, No. 587, 1996, pp. 14-20.
12. Korea Gas Corporation, "The Study on Thermal Cracking of Concrete Roof in Incheon LNG Terminal (TK-13, 14)," Taisei Corporation Document No. A-C-CR-0004, 2002, pp. 1-15.

요 약 이 연구는 200000 m³의 용량을 갖는 지하식 LNG 저장탱크의 지붕 콘크리트에 대한 요구성능 및 이에 따른 콘크리트의 최적배합비를 도출하고, 현장시공의 자료로 제안하기 위한 것이다. 지붕 콘크리트는 돔형 지붕의 경사기울기에 따라 굳지 않은 콘크리트의 시공성 및 충전성이 요구된다. 또한, 1.4~0.6 m의 지붕두께를 고려한 수화열 저감과 콘크리트 타설 후의 프리스트레싱 작업 및 air support의 제거공정에 따른 단계별 압축강도의 확보가 중요한 요구성능이다. 이러한 조건을 고려하여 지붕의 기울기가 20° 미만일 경우에는 슬럼프 100±25 mm, 20° 이상일 경우에는 150±25 mm로 선정하였으며, 경시변화 60분을 만족해야 한다. 특히, 91일 재령의 설계기준강도 30 MPa, 프리스트레싱 작업시 7일 재령의 압축강도 10 MPa, air support 제거공정에서 21일 재령의 압축강도 14 MPa를 만족해야 한다. 석회석 미분말의 최적 치환율은 구속시험 결과에 따라 정하였으며, 주요 배합변수는 물-시멘트비, 잔골재율 및 고성능 AE감수제의 첨가율 등이다. 배합시험 결과, 저열 포틀랜드 시멘트 및 석회석 미분말을 사용한 지붕 콘크리트의 최적배합 조건은 석회석 미분말의 최적 치환율 25%(내할), 물-시멘트비 57.8%, 잔골재율 42.0%로 나타났으며, 공기량 및 슬럼프의 시험결과도 경시변화 60분까지 성능을 만족하였다. 또한, 단열온도 상승시험의 결과, 단열온도 상승량(Q_∞)이 26.3℃, 상승속도(γ) 0.58로 선행탱크(TK-13,14)와 비교해 볼 때 매우 낮게 나타나 수화열 저감의 효과를 기대할 수 있다. 이러한 요구성능 및 최적배합 조건을 만족하는 설계기준강도 30 MPa(배합강도 36 MPa)의 지하식 LNG 저장탱크의 지붕 콘크리트 용으로 제안하였다.

핵심용어 : 지붕 기울기, 프리스트레싱, air support, 구속수비, 단열온도 상승량