

수축보상을 위한 자기충전 콘크리트의 현장적용

A Field Application of the Self-Compaction Concrete for Shrinkage Compensation

이 상 수* 원 철* 박 상 준** 김 동 석**
 Lee, Sang-Soo Won, Cheol Park, Sang-Joon Kim, Dong-Seok

Abstract

The purpose of this study is to design and to apply the self-compaction concrete mixture to field, having not only high strength but also compensation for shrinkage without thermal crack under 4 sides outer restraint of the member. In the experimental mix, replacement ratio of limestone Powder, CSA expansive additives, and unit water were selected as parameters, using portland blast-furnace slag cement. And, bleeding test, expansibility test, hydration heat analysis were performed. As a results, when Cement is replaced with 35% limestone Powder, 6% CSA expansive additives at unit water 175kg/m³, demanded performances of fresh and hardened self-compaction concrete are accomplished in the field application.

키워드 : 자기충전, 고강도, 수축보상, 블리딩, 수화열

Keywords : Self-compaction, High strength, Compensation for Shrinkage, Bleeding, Hydration heat

1. 서 론

최근 LNG 탱크, 교량 등 해안에 건설되는 구조물은 그 입지의 특성상, 내구성의 향상 문제가 대두되고 있다. 이에 대한 대책의 일환으로 재료적인 측면에서는 고성능감수제의 개발과 함께, 낮은 물시멘트비의 콘크리트 제조가 가능하게 되어 고강도 콘크리트에 대한 연구나¹⁾ 타설시 다짐작업을 필요로 하지 않고 자기충전성을 갖는 콘크리트에 대한 연구가 많이 진행되어 실용화되기에 이르렀다.²⁾

고강도를 발현하는 자기충전 콘크리트(이하, SCC)는 밀실한 경화체를 형성하므로써 각종 열화인자의 침투가 억제되어 잠재적으로는 고내구성을 갖는 반면, 시멘트량이 증가함에 따라서 수화열에 의한 온도균열이 발생하기 쉽고, 건조수축 및 시멘트의 수화에 기인한 자기수축 등으로 인하여 각종 균열의 발생 가능성도 증가되는 단점이 있다. 따라서, 고강도·고유동화와 함께 고내구화의 관점에서는 균열저항성을 높이기 위한 콘크리트 자체의 수축저감이 중요한 문제가 된다.^{3),4)}

경남 통영의 해안에 건설되는 LNG 지상 저장탱크에는 내장공사를 위한 장비반입구로서 각 탱크의 outer wall에 2개소의 가설개구부(temporary opening)를 설치하게 되고, 이 개구부는 내장 탱크의 공사가 완료되면 폐쇄하게 된다. 가설개구부의 폐쇄에 타설되는 콘크리트는 만일의 누출시 극저온(-164℃)의 LNG를 확실하게 지키는 기능을 다하기 위해서 이미 타설되어 있는 콘크리트와 일체

화되어야 하지만, 이 부위는 철근의 배근이 과밀할 뿐만 아니라, 이미 타설된 콘크리트 사이에 충전되어야 하므로, 콘크리트의 타설 및 다짐이 곤란한 시공조건이다.

따라서, 본 연구는 CSA계 팽창재를 사용하여, 우수한 충전성을 가지면서 4면 구속하에서도 온도균열 없이 콘크리트의 수축을 보상할 수 있는 고강도의 SCC로서 가장 효과적인 배합에 대한 배합설계를 중심으로, 제조·타설 등 현장 시공에 관한 결과를 분석·정리한 것이다.

2. 공사개요 및 SCC의 요구성능

2.1 공사개요

적용현장은 한국가스공사(주)에서 발주하여 경남 통영에 건설중인 LNG 생산기지현장으로 공사개요는 표 1.과 같다.

표 1. 적용현장의 공사개요

구 분	내 용
현 장 명	통영 생산기지현장
공사내용	지상식 LNG탱크 및 본설비공사
저장용량	140,000kℓ/기
SCC 타설부위	201TK, 202TK, 203TK의 가설개구부 각 2개소 (총 6개소)
타설부위 크기	Small Opening(S) 10×4.0×0.810m Large Opening(L) 16×4.4×0.875m
SCC 적용기간	2001. 11. 23 ~ 2002. 2. 26

* (주)대우건설 기술연구소 건축연구팀 선임연구원

** (주)대우건설 기술연구소 건축연구팀 주임연구원

2.2 SCC의 요구성능

지상식 LNG 저장탱크의 outer wall의 가설개구부의 폐색에 사용되는 SCC의 요구성능은 표 2.와 같고, 다짐없이 과밀배근된 부위에 충전되기에 충분한 유동성 및 재료분리저항성이 확보되어야 한다.

표 2. SCC의 요구성능

항 목	성 능	비 고
슬럼프플로우	65±5cm	재료분리가 없을 것
유하시간	10±5sec	V-lot(O형)
공기량	4.5±1.5%	-
블리딩율	1% 이내	블리딩 종료시점
수화열	온도균열지수≥1.5	강도와 균형
팽창성	1.5×10 ⁻⁴ ~ 4.0×10 ⁻⁴	재령 7일
설계기준강도	400kgf/cm ²	재령 91일

특히, 이미 타설된 콘크리트 사이에 충전되므로 상부 콘크리트와 일체화되기 위해 최소한의 블리딩과 적절한 팽창성이 요구되며, 온도균열을 방지하기 위해서 과도한 수화열을 발생시키지 않아야 한다.

3. SCC의 최적배합 선정실험

3.1 실험계획

SCC의 실내배합실험에 사용된 실험배합표는 표 3.과 같다. 물결합재비(W/B)는 기존의 연구결과²⁾에서 굳지 않은 성상 및 강도를 만족하는 것으로 나타난 35%를 선정하였다.

혼화재로서 석회석분(LS) 및 팽창재(EX)가 콘크리트의 유동성 및 강도발현에 미치는 영향을 검토하기 위한 치환율은 각각 25, 35, 45% 및 3, 6, 9%로 하였고, 블리딩 및 건조수축을 고려하여 유동성 및 점성을 조절하기 위한 변수로서 단위수량은 175kg/m³이하에서 3수준으로 하였다.

표 3. SCC의 실험배합표

W/B (%)	LS (%)	EX (%)	W (kg/m ³)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)				
					C	LS	EX	S	G
35.0	25	6	165	51.0	325	118	28	825	814
	35				278	165	28	823	812
	45				231	212	28	820	809
	35	3			292	165	14	823	812
		9			264	165	42	822	812
		6			287	170	29	810	799
					175	295	175	30	797

또한, 실내배합실험의 결과에서 굳지 않은 성상 및 압축 강도를 만족하는 것으로 나타난 배합을 대상으로, 팽창재 치환율에 따른 블리딩·팽창성 시험을 실시하여 요구성능을 만족하는 배합을 최적배합으로 선정하고, 구조물 조건을 대상으로 수화열 평가를 실시하는 것으로 계획하였다.

3.2 사용재료

본 연구의 사용재료 중 시멘트는 LNG 지상 저장탱크가 해안구조물이고 대단면을 가지고 있으므로, 수밀성, 염분 차폐성, 내해수성 및 내약품성, 수화열 저감 등에 우수할 뿐만 아니라, 굳지 않은 상태에서 유동성 및 자기충진성의 확보에 유리한 고로시멘트를 선정하였다.⁵⁾ 혼화재로서, 석회석분은 수화열 저감 및 증량재로서 사용하였고, CSA계 팽창재는 국내에서 생산하는 제품을 사용하였다. 골재로써 잔골재는 경남 합천산의 강모래, 굵은골재는 경남 마산산의 20mm 쇄석을 사용하였다. 또한, 고성능감수제는 국내 D사의 폴리카르본산계를 사용하였으며, 각 재료의 물리적 성질 및 화학적 성질은 표 4. ~ 표 7.과 같다.

표 4. 고로시멘트의 물리적 성질

비중	분말도 (㎎/g)	응결시간(h:m)		강열감량 (%)	안정도 (%)	압축강도(kgf/cm ²)		
		초결	종결			3일	7일	28일
3.04	3990	4:40	8:00	0.5	0.08	168	256	429

표 5. 석회석분 및 팽창재의 물리·화학적 성질

혼화재의 종류	비중	분말도 (㎎/g)	강열감량 (%)	주성분(%)					
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
석회석분	2.70	6583	43.41	0.85	0.24	0.13	54.4	0.73	-
팽창재	2.91	4800	1.03	3.82	13.46	0.73	52.3	0.21	28.3

표 6. 골재의 물리적 성질

구 분	비중	흡수율 (%)	조립율 (F.M)	단위용적중량 (kg/m ³)	씻기손실량 (%)
잔골재	2.57	1.61	2.46	1574	1.60
굵은골재	2.64	0.65	6.77	1509	0.30

표 7. 고성능감수제의 물리적 성질

주성분	pH	비중	단위수량비 (%)	응결시간차(분)		압축강도비(%)		
				초결	종결	3일	7일	28일
폴리카르본산	7.5	1.195	81	25	20	131	121	119

3.3 실험방법

SCC의 실내배합실험은 Pan type의 강제식 믹서를 사용하였으며, 재료투입은 배척플랜트에 준해서 일괄투입하

였다. 비빔시간은 건비빔 60초, 콘크리트 비빔 180초로서 총 240초(4분)로 하였다. 고성능감수제의 사용량은 유동성을 만족하는 범위에서 1.2~1.8×B%를 사용하였다.

굳지 않은 콘크리트에 대한 슬럼프 플로우 시험은 JSCE-F 503-1990, V-lot 유하시험은 일본토목학회 콘크리트 기술시리즈 No. 15의 시험방법에 따라 실시하였고, 공기량 및 블리딩 시험은 각각 KS F 2421 및 2414에 따라 실시하였다. 또한, 팽창성 시험은 KS F 2562의 참고1중 B법 ‘팽창 및 수축을 대상으로 한 시험방법’에 따라 공시체를 제작·보존하였으며, 길이변화율의 측정은 구속강봉에 철근용 스트레인 게이지를 부착하여 재령 5주까지 실시하였다

3.4 배합실험결과

각 실험변수에 따른 배합실험결과는 표 8.과 같다.

석회석분 치환율에 따른 실험결과, 치환율이 증가함에 따라 유동성이 증진되는 결과를 보였다. 즉, 치환율 25%는 유동성이 부족함에 따라, 상대적으로 유하시간이 증대한 결과를 보였고, 치환율 35%에서는 양호한 유동성상과 강도발현 결과를 보였으나, 치환율 45%의 경우에는 성상은 양호하지만 블리딩수가 소량 발생하고 강도발현이 낮았다. 결국, 재료분리저항성을 높이기 위해 분체의 중량재로 사용한 석회석분은 굳지 않은 콘크리트의 유동성 개선에는 효과적이었으나, 비수경성 분체로서 강도발현에는 기여하지 않음을 알 수 있었다.

팽창재 치환율에 따른 실험결과, 콘크리트의 성상은 대체로 양호해 보였으며, 치환율이 증가함에 따라 유동성은 약간 감소하는 경향이었으나 거의 유사한 수준이었다. 압축강도 시험결과에 있어서는 팽창재 치환율 6% 이하에서 양호한 강도 발현성상을 보였다.

표 8. SCC의 배합실험결과

W/B (%)	LS (%)	EX (%)	W (kg/m ³)	S/a (%)	슬럼프 플로우 (cm)	유하시간 (sec)	공기량 (%)	압축강도 (kgf/cm ²)			
								7일	28일	56일	91일
35.0	25	6	165	51.0	59	17.3	4.5	270	454	488	512
					61	14.8	3.1	251	438	463	481
					64	11.7	3.9	198	350	375	397
	35	3	170	62	9.8	4.8	221	429	450	472	
				60	7.4	7.8	189	351	369	386	
				60	12.5	6.7	246	356	415	452	
	6	175	63	11.5	4.8	266	384	434	469		

블리딩, 건조수축 등에 큰 영향을 미치는 단위수량에 따른 실험결과, 단위수량이 증가함에 따라 콘크리트의 유동성은 증가하고, 유하시간이 감소하는 경향으로 목표값(10±5sec)내에서 최적값에 근접하고 있었다. 강도발현 성상은 공기량의 차이에 따른 영향이 큰 것으로 판단되

었다.

SCC의 굳지 않은 콘크리트의 요구성능 및 압축강도를 만족하는 배합을 선정하기 위하여 각각의 실험변수에 따라 배합실험을 수행한 결과, 물결합재비 35%에서 석회석분 치환율 35%, 팽창재 치환율 6%, 단위수량 175kg/m³인 경우가 가장 양호했던 것으로 나타났다.

3.5 블리딩·팽창율 시험결과

실내배합 실험결과에서 팽창재 치환율 6%의 경우가 양호한 유동성 및 강도발현 성상을 나타냈으나, 최적배합의 블리딩 및 팽창성을 검토하기 위하여 팽창재 치환율 3, 6, 9%에 대하여 블리딩 및 팽창성 시험을 실시하였다.

블리딩 시험결과는 그림 1.과 같이, 팽창재 치환율이 증가할수록 블리딩이 감소하는 경향으로, 치환율 9%의 경우에는 블리딩이 전혀 없었고, 치환율 6%의 경우에는 블리딩이 거의 없는 수준으로 요구성능인 1% 이하를 충분히 만족하였지만, 팽창재 치환율 3%의 경우에는 블리딩이 다소 발생하여 요구성능을 크게 벗어나고 있었다.

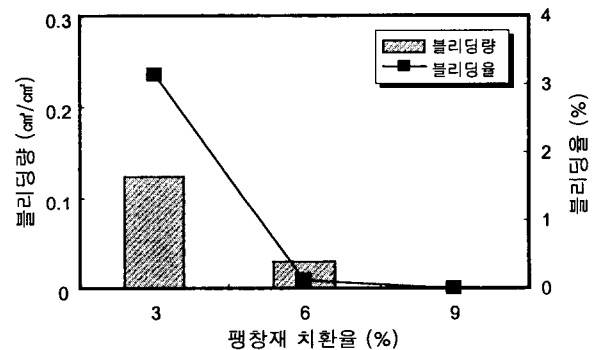


그림 1. 블리딩 시험결과

그림 2.는 팽창재 치환율에 따라서 재령 7일까지 수중 양생한 후, 재령 35일까지 항온항습조건에서 측정된 길이변화율을 나타낸 것이다.

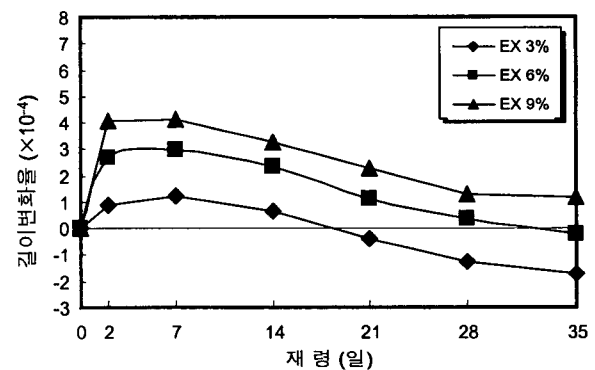


그림 2. 길이변화 시험결과

전반적인 경향으로는 수중양생한 재령 7일까지는 팽창하지만, 항온항습조건에서는 수축하기 시작하였다. 재령 7일에서 팽창재 치환율 6%인 경우의 변형은 2.95×10^{-4} 로서 목표값을 만족하고 있었고, 치환율 3%에 비해서 1.73×10^{-4} 의 수축보상 효과가 있었으나, 치환율 9%에 비해서는 1.18×10^{-4} 정도 팽창이 적은 것으로 나타났다.

팽창재 치환율 6%의 경우에 재령 32일경에 수축이 완전히 보상되는 것으로 나타났고, 치환율 9%의 경우는 계속 팽창측에 있지만, 실내배합 실험결과에서 보듯이 팽창재가 다량 혼입되면 강도가 저하되는 것으로 나타나, 팽창재의 적정 사용량이 중요함을 나타내고 있다. 따라서, 강도발현이 양호하면서 수축이 보상되는 팽창재 치환율은 6%가 적합한 것으로 분석됨에 따라서, 이 배합조건에 대하여 수화열 평가를 실시하는 것으로 하였다.

3.6 수화열 평가

수화열의 평가는 단열온도상승시험→수화열 해석→온도균열지수 평가의 순으로 실시하였다. 수화열 해석시 요구되는 콘크리트의 단열온도특성은 단열온도상승시험을 실시하여, $Q(t) = K(1 - e^{-\alpha t^\beta})$ 인 회귀분석식을 입력자료로 하여 결정하였다. 단열온도상승 시험결과 및 회귀분석곡선은 그림 3과 같고, 그 결과로 얻어진 단열온도특성은 각각 $K=41.18$, $\alpha=0.49$, $\beta=1.72$ 였다.

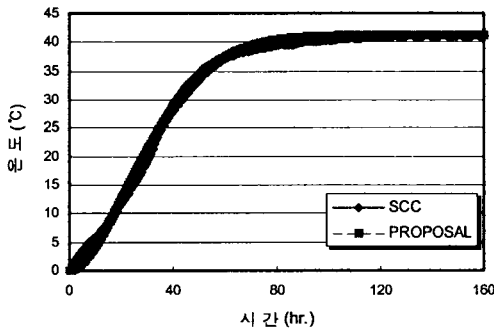


그림 3. 단열온도상승 시험결과 및 회귀분석곡선

수화열 해석은, 대상부재가 기 타설된 콘크리트에 의해 4면이 모두 외부구속이 강하게 되어 있으므로, 이에 적합한 3차원 수화열 전용 해석 프로그램을 이용하여 실시하였다. 해석 대상부재는 벽두께 및 길이에 대하여 각각 2등분하여 전체적으로는 4등분하여 모델링 하였다.

콘크리트 타설온도를 15°C로 가정하고, 길이방향과 높이방향에 대하여 4면 구속된 부재를 4등분하여 해석한 결과, 그림 4와 같은 온도분포로서 중심부 최고온도는 38.64°C로서 단열온도상승시험에서 얻어진 최고상승온도 41°C보다도 낮은 온도를 나타냈다. 이것은 벽체의 두께가 90cm정도이고, 부재형태상 방열면적이 크기 때문에 열의 방출이 신속하게 이루어졌기 때문이라고 판단된다.

온도이력 해석결과, 중앙부의 최고온도와 측면부의 최저온도차가 20°C 내외로서 일반적인 매스 콘크리트의 내외부 온도차 관리범위인 25°C보다 낮은 것으로 나타났으나, 외부구속이 강하므로 부재의 내외부 온도차만으로 균열발생의 유무를 평가하는 것에는 무리가 따른다. 따라서, 보다 정확한 평가를 위해서는 온도응력 해석을 통한 균열지수를 산출하고, 이에 따라 균열발생의 위험성에 대하여 판단해야 한다.

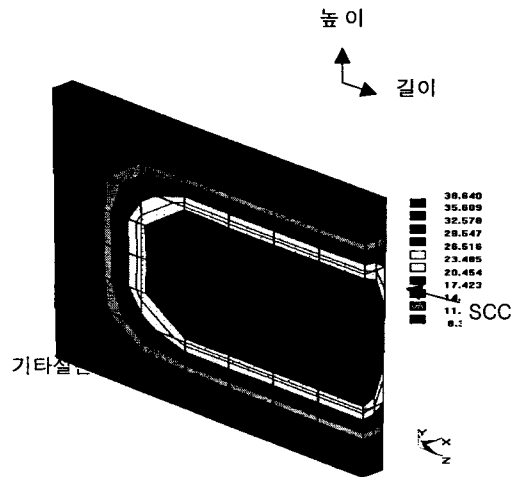


그림 4. 부재 위치별 온도분포

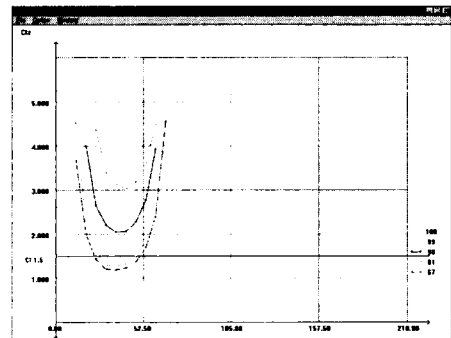


그림 5. 부재 위치별 균열지수(높이방향)

그림 5는 부재 위치별로 높이방향에 대한 온도균열지수를 나타낸 것이다. 높이방향 및 길이방향에 대한 균열지수 평가결과, 2면에 의해 구속되는 절점인 모서리 부분의 경우 균열지수가 1.5이하로 나타나고 있는 반면, 나머지 절점의 경우에 있어서는 모두 균열지수 1.5를 상회하고 있어 균열발생확률이 낮은 것으로 평가된다.

결과적으로, 2면에 의해서 강하게 구속받고 있는 모서리를 제외한 1면에 의해 구속을 받는 부위는 균열발생의 위험이 적다고 판단된다.

4. 현장시공 및 결과분석

4.1 배척플랜트 시험배합

SCC의 배합선정 시험에서 최적배합으로 선정된 배합조건을 대상으로 현장 내에 설치된 배척플랜트에서 시험배합을 실시하였으며, 시험결과는 표 9.와 같다.

SCC의 제조는 Single Shaft 형식의 믹서에서 일괄투입 방식으로 하였다. 또한, 비빔시간은 SCC의 충분한 교반을 위하여 1배치당 120초로 하였다.

표 9. 배척플랜트 시험배합결과

W/B (%)	LS (%)	EX (%)	W (kg/m ³)	S/a (%)	슬럼프 플로우 (cm)	유하시간 (sec)	공기량 (%)	압축강도 (kgf/cm ²)			
								7일	28일	56일	91일
35.0	35	6	175	51.0	61	11.8	5.1	269	360	422	475

시험결과, 고성능감수제 첨가량을 실내시험보다 0.1% 증대시킨 조건에서 굳지 않은 성상 및 압축강도 모두 양호한 결과를 나타냈다.

또한, 거푸집내의 과밀배근 부위에 대한 충전성의 확인을 위해 과밀배근 충전성 시험을 실시한 결과, 사진 1. 과 같이 막힘현상 없이 양호하게 충전되는 것을 확인할 수 있었다.

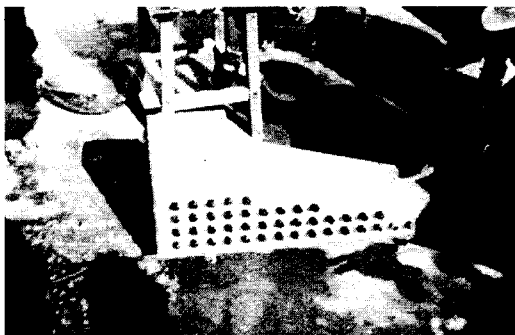


사진 1. 과밀배근 충전성 시험

한편, SCC를 생산할 배척플랜트가 현장내에 설치되어 있는 자체 배척플랜트로서, 콘크리트 생산에서 타설까지의 소요시간은 불과 5~10분 정도가 소요되었으므로, 경시변화에 대한 고려는 하지 않았다.

4.2 현장시공

가설개구부에 대한 SCC의 현장시공 전경은 사진 2.와 같고, 충전성을 높이고 표면성상을 고려하여, 먹망치를 사용해서 타설부위 안과 밖에서 약간의 다짐을 하여 타설시 갇힌 공기포를 제거하였다.

콘크리트의 타설은 SCC의 유동구배를 고려하여, 외부 거푸집 상부에 깔때기 형태의 타설구를 3곳을 설치하고,

펌프카의 플렉시블 호스를 직접 투입하여 타설하였다.

또한, 길이방향으로 거푸집 사이의 2곳에 투명 아크릴 판을 높이방향으로 설치하여 거푸집 내부의 콘크리트 충전상황을 확인할 수 있도록 하였다.

현장시공시의 SCC의 평가항목은 현장에서 수행하기 어렵고, 이미 배합선정 시험에서 평가가 수행된 블리딩·팽창을 시험을 제외하고, 슬럼프 플로우, 공기량, 깔대기 유하 시험 및 압축강도를 대상으로 하였으며, 지상식 저장탱크 201, 202, 203호기의 가설개구부에 대한 현재까지의 SCC의 현장시공 결과는 표 10.과 같다.



사진 2. SCC의 현장시공 전경

표 10. SCC의 현장시공 결과

구분	슬럼프 플로우 (cm)	유하시간 (sec)	공기량 (%)	압축강도 (kgf/cm ²)			
				7일	28일	56일	91일
201TK-S*	62	8.06	4.9	268	362	418	482
201TK-L*	60.5	12.22	4.1	281	358	423	490
202TK-S	61	10.98	4.3	270	371	449	-
202TK-L	62	8.07	4.5	269	368	439	-
203TK-S	63.5	10.22	5.1	263	356	409	483
203TK-L	62	12.11	3.9	275	365	452	502

* S : Small Opening, L : Large Opening

6회에 걸친 타설결과에서 보듯이, 슬럼프 플로우가 목표값의 하한측으로 되고는 있지만, 품질변동이 적은 균일한 값을 나타냈고, 유하시간 및 공기량도 목표값을 만족하고 있었다. 또한, 충전성의 평가는 과밀배근 충전성 시험을 대상으로 재료분리저항성도 함께 검토하였으며, 모두 양호한 성상을 나타냈다.

압축강도 측정결과, 재령 28일의 평균값이 363kgf/cm²로서 설계기준강도의 91%를 발현하고 있었고, 재령 56일에서 모두 설계기준강도 이상을 확보하고 있었다.

현장의 위치가 남해안이기는 하지만, 타설시기가 동절기인 점을 고려하여 콘크리트 타설이 끝난 후에는 간단한 비닐보양을 실시하여 내외부의 온도차를 줄이도록 하였다.

거푸집의 탈형은 프리스트레스의 도입을 위한 최소강도로서, 현장봉합 양생한 공시체의 압축강도가 Small Opening의 경우에 230kgf/cm² 이상, Large Opening의 경우에 270kgf/cm² 이상이 확보되는 시점에서 이루어졌다. 거푸집이 탈형된 후의 콘크리트 이음부의 표면성상은 사진 3.과 같다.

사진에서 보듯이, 이미 타설되어 있는 기존 콘크리트와의 이음부가 육안으로 관찰되기는 하지만, SCC와 기존 콘크리트가 일체성을 확보하고 있음을 알 수 있다.



사진 3. 콘크리트 이음부의 표면성상

5. 결론

본 연구는 CSA계 팽창재를 사용하여 자기충전성, 고강도, 온도균열 제어 및 수축보상 등 다양한 성능이 요구되는 LNG 저장시설 공사중 가설개구부에 적용되는 SCC의 배합설계 및 제조·타설 등 현장시공 결과를 분석·정리한 것으로서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 굳지 않은 상태의 유동성, 재료분리저항성 등 자기충전성을 확보하고, 관리재령 91일의 설계기준강도를 충분히 만족시키는 배합은 물결합재비 35%에서 석회석분치환율 35%, 팽창재 치환율 6%, 단위수량 175kg/m³인 것으로 나타났다.

(2) 팽창재 치환율 6%(30kg/m³)에서 블리딩율 1% 이하를 만족하였으며, 수중양생조건인 재령 7일까지는 팽창하지만, 항온항습조건에서는 수축하기 시작하였다. 또한, 재령 32일 경에 수축이 완전히 보상되는 것으로 나타났다.

(3) 수화열 해석결과, 2면 구속이 강한 모서리는 1.5이하로서 1.2정도를 나타내고 있으나, 1면 구속부위는 모두 온도균열지수 1.5를 상회하고 있어 균열발생의 위험이 적은 것으로 나타났으며, SCC 타설후에도 균열의 발생은 보이지 않았다.

(4) 팽창재를 사용하여 다짐없이도 충전되기에 충분한 유동성 및 재료분리저항성을 갖는 SCC를 타설하므로써,

기타설 콘크리트와의 일체성이 충분히 확보되는 양호한 품질의 LNG 저장탱크의 외벽 시공이 가능하였다.

참고문헌

- 1) 박철림 외, "고강도 콘크리트용 혼화제의 품질성능에 관한 실험적 연구-고성능감수제를 중심으로-", 한국콘크리트학회 논문집, 제5권1호, 1993.3.
- 2) 박철림 외, "초유동 콘크리트의 현장적용 및 실용화 연구", 대한건축학회 논문집 제12권3호, 1996.3.
- 3) 近松龍一 外, "高強度·高流動コンクリートの低収縮化に関する基礎的研究", 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 19, No. 1, 1997.
- 4) 한천구 외, "CSA계 팽창재 및 무기질 혼화재를 이용한 고성능 콘크리트의 특성에 관한 연구", 콘크리트학회 논문집, 제11권1호, 1999. 2.
- 5) 윤재환 외, "고로시멘트를 사용한 고유동 콘크리트의 제조에 관한 실험적 연구", 콘크리트학회 가을학술발표논문집, Vol. 6, No. 2, 1994. 11.