

지하연속벽용 병용계 고유동 콘크리트의 시공 품질 및 보증강도 평가에 관한 연구

권영호^{1)*}

¹⁾동양대학교 건축공학과

A Study on the Estimation for the Guaranteed Strength and Construction Quality of the Combined High Flowing Concrete in Slurry Wall

Yeong-Ho Kwon^{1)*}

¹⁾Dept. of Architectural Engineering, Dong Yang University, Youngju 750-801, Korea

ABSTRACT The primary purpose of this study is to estimate the guaranteed strength and construction quality of the combined high flowing concrete which is used in the slurry wall of underground LNG storage tank. The required compressive strength of this type of concrete become generally known as a non economical value because it is applied the high addition factor for variation coefficients and low reduction factor under water concrete. Therefore, after estimation of the construction quality and guaranteed strength in actual site work, this study is to propose a suitable equation to calculate the required compressive strength in order to improve its difference. Application results in actual site work are shown as followings. The optimum mix design proportion is selected that has water-cement ratio 51%, sand-aggregate ratio 48.8%, and replacement ratio 42.6% of lime stone powder by cement weight. Test results of slump flow as construction quality give average 616~634 mm. 500 mm flowing time and air content are satisfied with specifications in the rage of 6.3 seconds and 4.0% respectively. Results of strength test by standard curing mold show that average compressive strength is 49.9 MPa, standard deviation and variation coefficients are low as 1.66 MPa and 3.36%. Also test results by cored cylinder show that average compressive strength is 66.4 MPa, standard deviation and variation coefficients are low as 3.64 MPa and 5.48%. The guaranteed strength ratio between standard curing mold and cored cylinder show 1.23 and 1.32 in the 2 tanks. It is shown that applied addition factor for variation coefficients and reduction factor under water concrete to calculate the required compressive strength is proved very conservative. Therefore, based on these results, it is proposed new equation having variation coefficients 7%, addition factor 1.13 and reduction factor 0.98 under water concrete.

Keywords slurry wall, combined high flowing concrete, addition factor, reduction factor, construction quality

1. 서 론

최근 구조물의 고층화, 대형화 및 특수화에 따라 증대되는 지하축벽이 공사에 대응하는 방안으로 지하연속벽 공법이 채택되고 있으며, 특히 지하식 LNG 저장탱크와 같은 특수 구조물에 사용되는 고유동 콘크리트의 시공 품질과 보증강도에 대한 명확한 평가가 필요하다.

일반적으로 콘크리트의 보증강도는 설계기준강도 또는 구조물에서 채취한 코어 공시체의 강도로 평가한다. 또한, 콘크리트의 배합설계 단계에서 설계기준강도에 근거하여 호칭강도가 산정되며, 여기에 배합에 따른 변동요인을 고려한 할증계수를 곱하여 배합강도가 결정된다. 특히, 지하연속벽과 같은 구조물의 경우, 콘크리트의 호칭강도는 안정액 내부에 설치된 트레미 파이프를 통해 자

유낙하로 콘크리트를 타설하기 때문에, 이에 대한 품질 변동을 고려하여 설계기준강도에 적당한 저감계수를 나누어 산정한다.

이때 저감계수는 일반적으로 고강도 영역에서 0.9~0.95로 가정한다. 또한, 이러한 강도는 표준양생 공시체의 강도로 관리하지만, 실제 콘크리트의 타설 직전에 제작한 표준양생 공시체의 압축강도를 통계적으로 분석한 보증강도와 지하연속벽에서 채취한 코어 공시체의 보증강도와의 비율을 저감계수로 보기도 한다.¹⁾ 그러나 아직 국내에서는 이러한 자료에 대한 검증이나 보고가 거의 없기 때문에, 실적자료에 대한 통계적 평가가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 저열 포틀랜드시멘트(벨라이트시멘트)와 석회석미분말을 사용한 고유동 콘크리트의 현장 시공품질 및 설계기준강도의 할증계수와 코어 공시체의 보증강도에 따른 저감계수의 관계를 명확히 하여 이를 정량화시키는 방안을 제시하고자 한다.

*Corresponding author E-mail : kyh00127@phenix.dyu.ac.kr

Received August 28, 2006, Accepted October 9, 2006

©2006 by Korea Concrete Institute

2. 사용 재료 및 배합조건 선정 시험

2.1 사용 재료

현장 플랜트의 최적배합 조건의 선정 시험 및 배합시 간의 결정, 시공 품질을 확인하기 위한 연속생산성 시험에 사용된 고유동 콘크리트의 재료는 다음과 같다.

2.1.1 시멘트

시멘트는 S사의 저열 포틀랜드시멘트(벨라이트 시멘트)로 화학적·물리적 특성은 Table 1과 같다.

2.1.2 석회석 미분말

석회석 미분말은 W사의 C-140을 사용하였으며, 물리적·화학적 특성은 Table 2와 같다.

2.1.3 고성능 감수제 및 분리저감제

고유동 콘크리트의 배합설계 및 시공품질에 가장 크게 영향을 미치는 고성능 감수제는 Table 3에 나타난 바와 같이 J사의 폴리-카르복산계를 사용하였으며, 분리저감제는 폴리-싸카라이드계를 사용하였다.

또한, 굵은골재는 비부식산의 20 mm 쇄석을, 잔골재는 공주(금강)의 강모래를 사용하였다.

2.2 배합강도 산정 및 최적배합조건

2.2.1 배합강도 산정

지하식 LNG 저장탱크의 지하연속벽에 사용될 고유동

Table 1 (a) Chemical compositions of belite cement

Items	SO ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Loss ignition (%)	C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	Remark
Results	2.0	4.11	1.9	0.7	28.6	51.4	1.1	Type IV
KS L	max.	max.	max.	max.	max.	min.	max.	
5201	2.3	6.5	5.0	2.5	35	40	7.0	

Table 1 (b) Physical properties of belite cement

Items	Blaine (cm ² /g)	Autoclave expansion (%)	Setting time (hr:min)		Hydration heat (cal/g)		Compressive strength(MPa)	
			Initial	Final	7d	28d	7d	28d
Results	3,492	0.03	330	9:15	58.0	68.5	18.6	34.5
KS L	min.	max.	min.	max.	max.	max.	min.	min.
5201	2,800	0.8	60	10	60	70	7.5	18.0

Table 2 Properties of lime stone powder

Items	Chemical compositions(%)					Physical requirements		
	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Blaine (cm ² /g)	Specific gravity	Moisture (%)
Results	1.2	0.2	0.7	52.7	1.7	6,350	2.61	0.1
JIS A 5008	-					-	min. 2.60	max. 0.5

Table 3 Properties of high-range water reducing agent

Items	Water content (%)	Setting time (hr:min)		Compressive strength(%)			Length change (%)	Relative durability factor
		Initial	Final	3d	7d	28d		
Results	81.0	+15	+10	134	121	119	85	89
ASTM C 494	max. 88	1:00 nor	earlier 1:30 later	min. 125	min. 115	min. 110	max. 135	min. 80

콘크리트의 설계기준강도는 40 MPa이며, 벤토나이트 안정액 내부에 설치된 트레미 파이프를 통하여 자유낙하로 콘크리트를 타설하게 된다.

따라서 수화열 저감 및 고유동 콘크리트의 품질 변동을 최소화하기 위한 방안으로 석회석미분말과 분리저감제를 사용한 병용계 고유동 콘크리트를 선정하였으며, 배합강도는 콘크리트의 재료, 생산, 운반, 타설 등에 의한 변동계수(V)를 고려한 할증계수(α) 외에도 수중 콘크리트의 저감계수(γ)를 함께 고려하여 식 (1)에 따라 산정한다.

$$\text{배합강도}(f_{cr}) = \text{설계기준강도}(f_{ck}) \times \frac{\text{할증계수}(\alpha)}{\text{저감계수}(\gamma)} \quad (1)$$

배합강도에 대한 할증계수는 일본토목학회(JSCE)에서 제시한 식 (2)에 따라 산정하였는데, 본 연구에서는 현장의 플랜트 생산조건 및 품질의 안정성을 고려하여 변동계수를 10%로 가정하여 할증계수를 1.2로 적용하였다²⁾.

$$\text{할증계수}(\alpha) = \frac{1}{1 - \frac{1.64}{100} \times \text{변동계수}(V)} \quad (2)$$

또한, 수중 콘크리트의 저감계수는 일본의 오기시마(Ogishima)에서 지하식 LNG 저장탱크를 건설한 D사의 시공사례를 고려하여 0.95를 적용하였으며, 이에 따른 배합강도는 식 (3)과 같다³⁾.

$$\text{배합강도}(f_{cr}) = 40 \text{ MPa}(f_{ck}) \times \frac{1.2\alpha}{0.95\gamma} = 50.5 \text{ MPa} \quad (3)$$

2.2.2 배합변수에 따른 콘크리트의 배합조건

병용계 고유동 콘크리트의 최적배합조건을 선정하기 위한 배합조건은 Table 4와 같다.

2.2.3 배처플랜트의 최적배합시간

배처플랜트의 최적배합시간을 선정하기 위하여 믹서부

Table 4 Mix proportions for optimum mix condition

Mix proportions(%)				Unit material weight(kg/m ³)						
W/C	G _v	S/a	Air	Water	Cement	L.S.P	Sand	Gravel	A.D	V.A
47.9	53.0	48.8	4	174	363	236	745	785	7.49	0.16
51.0				174	341	254	745	785	7.44	0.16
52.4				174	332	262	745	784	7.43	0.16
54.0				174	322	270	745	784	7.40	0.16

A.D : high range water reducer
V.A : segregation reducing additive
G_v : aggregate volume

하를 나타내는 암페어 게이지 및 굳지 않은 콘크리트의 성상을 실험적으로 고찰하였으며, 3 m³/batch에 대해 모든 재료가 믹서에 투입된 후부터 10초 단위로 암페어를 측정 한 결과는 Fig. 1과 같다.

배합시간이 증가할수록 믹서 암페어가 감소하는데 이는 콘크리트의 품질이 균일해지기 때문이며, 믹서 암페어가 45A에서 안정된 경향을 보였다. 따라서 슬럼프 플로우 및 500 mm 플로우 도달시간, 콘크리트의 생산성 등을 함께 고려하여, 최적배합시간을 75초로 선정하였다.

2.2.4 배합변수별 시험결과

최적배합선정을 위한 배합변수별 고유동 콘크리트의 유동성, 충전성 및 압축강도 시험 결과는 다음과 같다.

(1) 굳지 않은 콘크리트의 시험 결과

Fig. 2는 고유동 콘크리트의 물-시멘트비에 따른 슬럼프 플로우의 경시변화, Figs. 3, 및 4는 500 mm 플로우 도달시간 및 깔대기 유하시간을 각각 나타낸 것이다.

시험 결과, 대부분 경시변화 30분까지 슬럼프 플로우가 증대되었다가 유지 또는 약간 감소하였다. 또한, 500 mm 플로우 도달시간 및 깔대기 유하시간은 경시변화에 따라 증대되는 것으로 나타났지만, 물-시멘트비의 영향도 많이 받는 것으로 나타났다. 특히, 깔대기 유하시간은 점성의 영향을 많이 받는 것으로 사료된다.

Fig. 5는 고유동 콘크리트의 경시변화에 따른 박스(box) 충전성 높이의 시험 결과를 나타낸 것이다.

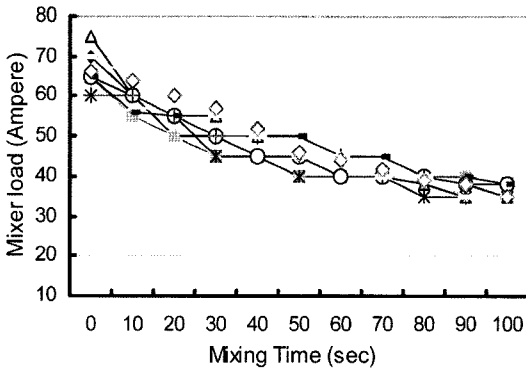


Fig. 1 Test results for mixing time-mixer load

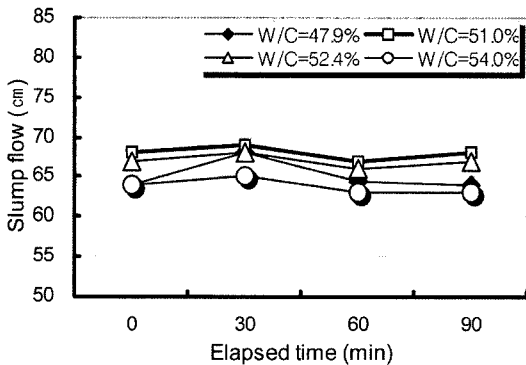


Fig. 2 Slump flow for elapsed time

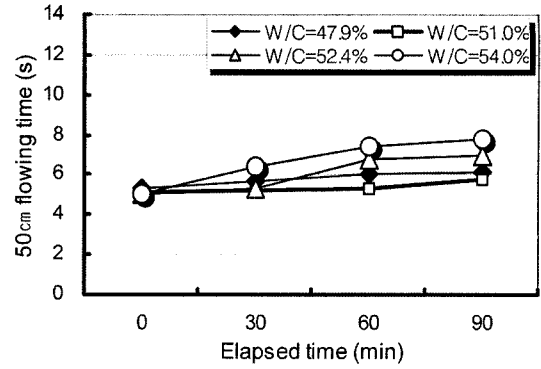


Fig. 3 50 mm flowing time for elapsed time

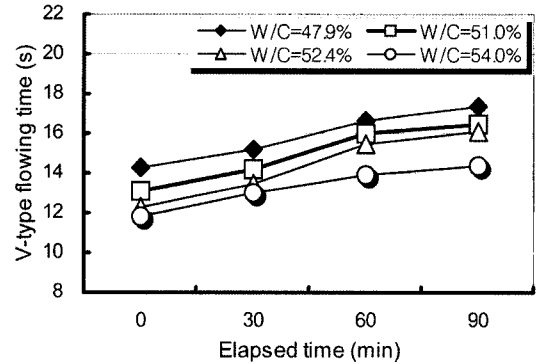


Fig. 4 V-type flowing time for elapsed time

시험 결과, 경시변화에 따른 박스 충전성 높이는 약간 감소하였으나, 전반적으로 매우 안정된 경향을 보였다.

(2) 압축강도의 시험 결과

Fig. 6은 재령별 압축강도 시험 결과를 나타낸 것이다. 압축강도 시험 결과, 벨라이트 시멘트의 초기 수화속도가 매우 느리고 석회석비분말의 사용량도 많기 때문에, 91일 재령강도에 대비 재령 3일은 22~27%, 7일은 33~42%, 28일은 68~74%로 강도발현율이 낮게 나타났다.

2.2.5 최적배합조건

최적배합조건은 활중계수 및 수중 콘크리트의 저감계수($\gamma=0.95$)를 고려하여 Table 5에 나타낸 바와 같이 배합강도(50.5 MPa)를 만족하는 물-시멘트비 51%로 결정하였다.

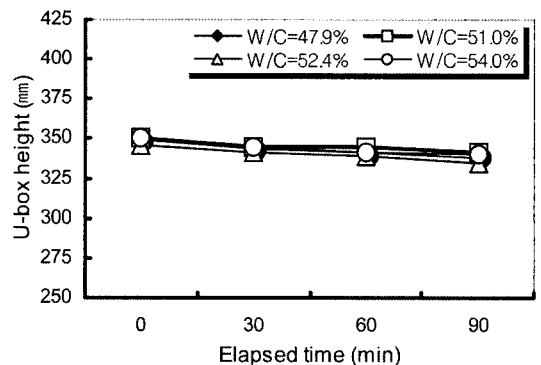


Fig. 5 U-box height for elapsed time

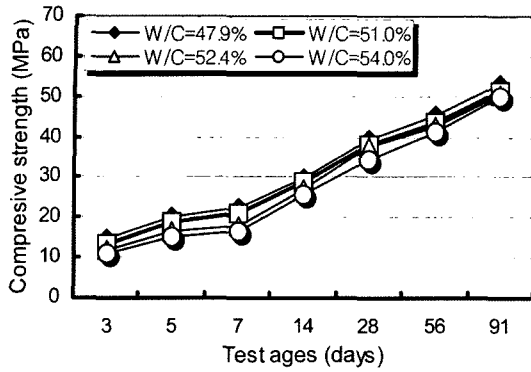


Fig. 6 Compressive strength for test ages

2.3 콘크리트 생산 및 시공 품질의 관리 계획

2.3.1 콘크리트의 생산 계획

플랜트에서 연속적으로 병용계 고유동 콘크리트를 생산할 때 6 m³당 평균 200초 정도가 소요되었으며, 믹서당 생산량은 믹서의 안전효율을 고려하여 100~110 m³/hr 정도로 산정되었다.

Table 6은 지하식 LNG 저장탱크의 패널별 사양 및 요구되는 콘크리트의 설계물량을 나타낸 것이다.

따라서 선형패널의 최대 타설량은 100 m³/hr이기 때문에, 콘크리트의 생산 및 공급에는 큰 문제가 없을 것으로 사료된다. 특히, 후행패널은 선형패널의 약1/3정도 규모이기 때문에, 2패널을 동시에 타설하는 것도 가능할 것으로 판단된다. 배수피트(drainage pit)의 경우에는 배수관(drainage pipe)의 부력을 고려하여 시간당 최대 타설속도가 4.5 m/hr이기 때문에, 콘크리트의 공급은 충분할 것으로 사료된다.

2.3.2 콘크리트의 운반 계획

패널별 요구되는 콘크리트의 물량을 공급하기 위해서

Table 5 Mix proportion of ready mixed concrete

Mix proportion (%)		Unit material weight (kg/m ³)								
W/C	W/B	S/a	Water	Cement	L.S.P	Sand	Gravel	A.D	V.A	
51.0	29.2	48.8	174	341	254	745	785	7.44	0.16	

Table 6 Specifications and size of slurry wall panel

Specifications	Primary panel	Secondary panel	Drainage pit
Panel size(m)	7.24×1.74×75	2.80×1.74×75	2.80×4.94×75
Concrete quantity(m ³)	975	376	937
Tremi pipe	3	2	2
Purring velocity(m/hr)	max 8.0	max. 8.0	max 4.5
Purring quantity(m ³ /hr)	max 100	max 40	max 60
Total purring time(hr)	13~15	9~10	15~16
Total panels	26	26	2

는 이에 적합한 운반 계획을 세워야 한다. 사전에 운반 거리 및 타설량, 타설시간 등을 고려하여 Table 7과 같이 콘크리트의 운반 계획 및 필요한 운반차 수를 산정하였다.

선형패널의 경우, 트레미 파이프가 3개 설치되어 있으며, 첫 타설은 운반차가 트레미 1개당 각각 2대씩 6대가 필요하며 그 후부터는 각각 1대씩 동시에 타설해야 한다.

이때, 트레미 파이프 1개당 평균 타설량을 30 m³/hr로, 운반차 1대당 타설시간을 5분으로, 타설높이에 따른 트레미 파이프의 제거시간을 5분으로 가정하면, 운반차 1대당 2cycle/hr가 된다. 따라서 출하시간 4분, 운반시간 6분, 타설 및 대기시간 11분, 회차 및 생산대기 시간을 고려하면, 선형패널에 요구되는 운반차 수는 초기에 12대, 공급이 안정된 후에는 9대가 필요한 것으로 나타났다.

2.3.3 콘크리트의 시공 품질 관리 계획

현장에서 병용계 고유동 콘크리트를 타설하면서 실시할 시공 품질 관리 계획은 Table 8과 같다.

시험 방법은 대부분 KS 규준에 따르지만, KS에 규정되어 있지 않은 항목에 대해서는 JSCE 규준을 준용하였다.

일반 콘크리트에 비해 병용계 고유동 콘크리트의 품질 관리를 보다 엄격하게 적용하기 위해 생산초기에는 믹서당 3회, 그 후로는 1회/100 m³로 관리시험을 실시하였다.

3. 시공 품질 및 보증강도 평가

3.1 시공 품질 시험 결과

3.1.1 굳지 않은 콘크리트의 시공 품질 시험 결과

굳지 않은 콘크리트의 시공품질 시험은 100 m³에 1회

Table 7 Specification of concrete purring time

Specification	Primary panel	Secondary panel	Drainage pit
Purring velocity per tremi	30 m ³ /hr	20 m ³ /hr	30 m ³ /hr
Remove time per tremi	5 min/hr	5 min/hr	5 min/hr
Purring time per agitator	5 min	5 min	5 min
Required agitators	12cars/panel	8cars/panel	8cars/panel

Table 8 Concrete control plan for construction quality

Test items	Standard range	Test frequency	Remark
Slump flow(cm)	65±5	1time/100 m ³	Initially 3times
500 mm flowing time(sec)	7±3		
Air content(%)	4±1		
Chloride content(kg/m ³)	max 0.3	min 2times/day	Initially 1time
Unit weight	-		
Mold for strength(set)	3 (7, 28, 91 days)	1time/100 m ³	

실시하는 것으로 선행패널은 콘크리트 평균물량이 960 m³ 이기 때문에 10회, 후행패널은 평균물량 370 m³로 4회에 걸쳐서 전체 26패널씩을 실시하였다. 슬럼프 플로우에 대한 시공 품질 시험 결과는 Table 9와 같다.

시험 결과, 슬럼프플로우의 목표값(65±5 cm)을 만족하였으며, 표준편차 및 변동계수가 매우 낮게 나타났다. 또한, 500 mm 플로우 도달시간은 평균 6.3초이며 공기량도 평균 4.0%를 나타내었다.

3.1.2 압축강도 시험 결과

시공 품질 관리 계획에서 선정된 시험 빈도에 따라 제작한 표준양생 공시체에 대한 91일 재령 압축강도를 통계적으로 분석한 결과는 Table 10과 같다.

표준양생 공시체의 변동계수는 2.18~4.3% 범위에 있으며, 전체평균 변동계수도 3.36% 범위로 병용계 고유동 콘크리트의 품질변동이 매우 낮다는 것을 알 수 있다.

Table 11은 지하연속벽에서 채취한 코어 공시체의 91일 압축강도를 통계적으로 분석한 결과를 나타낸 것이다.

여기서, C₁은 지하연속벽의 지면에서 아래로 깊이 3 m 위치에서, C₂ 및 C₃은 각각 27 m와 48 m에서 채취한 코어 공시체를 의미한다. 각각의 위치에서 4방향의 4개 패널에서 각각 2개소에서 채취한 6개의 코어 공시체를 시험한 결과를 나타낸 것이다.

코어강도의 변동계수는 3~8%의 범위로 패널 및 채취 위치에 따라 약간 다르지만, 안정액 내부에 타설된 지하연속벽의 코어 공시체라는 것을 고려하면 강도의 변동이 매우 작은 것으로 사료된다. 시험 결과, 대부분 설계기준강도(40 MPa)를 상회하는 것으로 판명되었다.

3.1.3 코어 공시체의 강도분포

A, B-탱크의 4방향 위치에서 연직방향에 연속적으로

Table 9 Statistical results for slump flow

Classification	Primary panel		Secondary panel	
	A-Tank	B-Tank	A-Tank	B-Tank
Test frequency(n)	260	260	104	104
max.(mm)	654	643	641	633
min.(mm)	616	612	614	608
Average m(cm)	634	623	62.9	616
Standard deviation σ(mm)	11	7	7	6
Variation coefficients(%)	1.7	1.1	1.1	1.0

Table 10 Statistical results for compressive strength(Cured)

Classification	A-Tank		B-Tank		Total
	Primary	Secondary	Primary	Secondary	
Test frequency(n)	260	104	260	104	728
max.(MPa)	53.2	53.1	54.9	55.0	54.9
min.(MPa)	45.1	47.5	48.5	46.0	45.1
Average m(MPa)	48.6	50.9	51.3	48.7	49.9
Standard deviation σ(MPa)	2.07	1.11	1.57	1.89	1.66
Variation coefficients(%)	4.3	2.18	3.07	3.9	3.36

Table 11 Statistical results for compressive strength(Cored)

Classification	A-Tank			B-Tank			Total
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₁	C ₂	C ₃	
Test frequency (n)	24	24	24	24	24	24	144
max. (MPa)	67.8	69.5	71.5	66.9	70.1	76.5	76.5
min. (MPa)	58.1	58.8	66.9	58.2	63.5	70.5	58.1
Average m (MPa)	62.5	64.0	68.3	62.1	67.2	74.3	66.4
Standard deviation σ (MPa)	5.05	5.14	2.15	4.04	2.84	2.63	3.64
Variation coefficients (%)	8.08	8.03	3.15	6.43	4.24	3.54	5.48

채취한 코어 공시체의 강도분포는 Fig. 7과 같다.

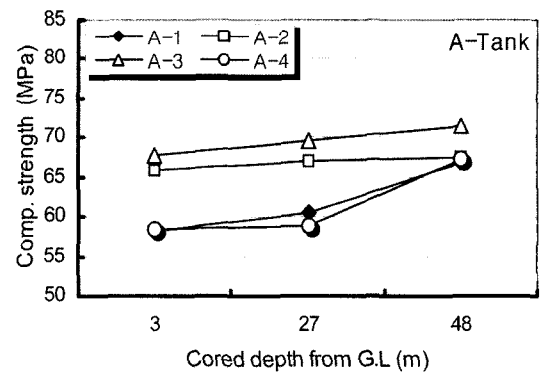
시험 결과, 코어 공시체의 압축강도는 지하연속벽의 깊이방향으로 갈수록 증가하였는데, 최상부(C₁: 3 m)의 평균 코어강도는 A-탱크에서 62.5 MPa, B-탱크에서 62.1 MPa를 나타내었다.

깊이에 따른 코어 강도비는 최상부(C₁)를 1.0으로 볼 때, A-탱크의 C₂(27 m)에서 1.024(64.0/62.5), C₃(48 m)에서 1.09(68.3/62.5)를, B-탱크의 C₂(27 m)에서는 1.08(67.2/62.1), C₃(48 m)에서는 1.19(74.3/62.1)를 나타내었다.

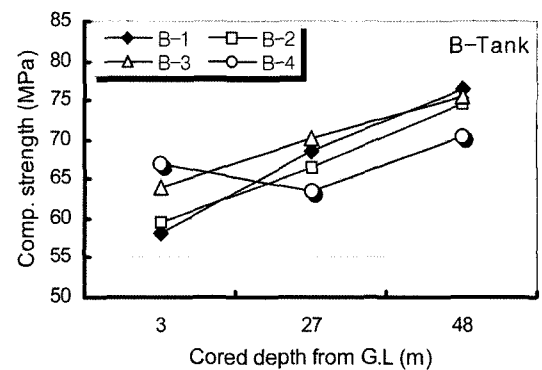
즉, 코어 강도비는 C₃(1.14) > C₂(1.05) > C₁(1.0)로 하부로 갈수록 증가되는 것으로 확인되었는데, 깊이방향에 따라 강도가 증가하는 요인은 자중에 의한 가압현상 및 콘크리트 조직의 치밀화에 따른 것으로 사료된다⁴⁾.

Fig. 8은 지하연속벽의 깊이에 따른 콘크리트의 온도이력을 측정된 결과이다.

콘크리트의 온도이력은 깊이방향에 따라 다르게 나타났



(a) A-Tank



(b) B-Tank

Fig. 7 Compressive strength for cored depth

는데, 지하연속벽의 바깥쪽(out)에서 측정한 최고온도는 최상부(C₁)에서 37.6°C, C₂(27 m)에서 39.8°C 및 C₃(48 m)에서 40.4°C로 나타났다.

또한, 내측(In)에서 측정한 최고온도는 C₁(3 m)에서 32.3°C, C₂(27 m)에서 34.4°C 및 C₃(48 m)에서 36.0°C로 대부분 하부로 갈수록 온도이력이 증가하는 것으로 나타나, 코어 공시체의 강도가 증가되는 요인은 하부일수록 온도이력의 증가현상이 두드러지기 때문으로 사료된다⁵⁾.

3.2 보증강도 평가

Table 12는 강도시험 결과를 통계적으로 분석하여 표준양생 및 코어 공시체의 보증강도로 환산한 것이다.

여기서, 보증강도는 강도의 불량률을 4%이하로 환산한 것이다. 코어 공시체의 보증강도는 A-탱크에서 평균 57.8 MPa, B-탱크에서 평균 62.3 MPa로 나타났다.

표준양생 공시체의 보증강도는 A, B-탱크 모두 평균 47.0 MPa로 나타났으며, 표준양생 공시체와 코어 공시체

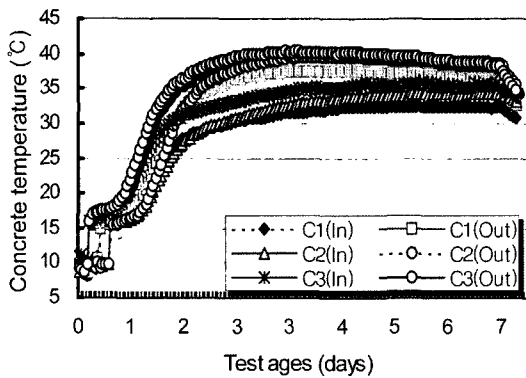


Fig. 8 Concrete temperature for cored depth

Table 12 Guaranteed strength by statistical results

Classification	Panel No.		Guaranteed strength	
			Mark	F _{gs} (MPa)
Cored cylinder	A-Tank	C ₁	F _{cc}	53.8
		C ₂		55.1
		C ₃		64.5
		Average		57.8
	B-Tank	C ₁		55.1
		C ₂		62.3
		C ₃		69.7
		Average		62.3
Cured mold	A-Tank	Primary panel	F _{cm}	45.1
		Secondary panel		48.9
		Average		47.0
	B-Tank	Primary panel		48.5
		Secondary panel		45.4
		Average		47.0
Guaranteed strength ratio	A-Tank	Cored / Cured	F _{cc} /F _{cm}	1.23
	B-Tank	Cored / Cured		1.32

$$F_{gs} = m - 1.73\sigma$$

의 보증강도비는 A-탱크에서 1.23, B-탱크에서 1.32로 확인되었다.

3.3 보증강도에 따른 제안식

표준양생 공시체 및 코어 공시체의 보증강도 결과를 기초로 배합강도를 선정하기 위한 기존의 산정식과 비교하여, 가장 적합한 식을 제안하고자 한다.

배합설계의 초기단계에서 병용계 콘크리트의 배합강도를 선정할 때, 변동계수(V)에 따른 할증계수(α) 및 수중 콘크리트의 저감계수(γ)를 각각 1.2 및 0.95로 적용한 값과 실제 현장에서 적용한 결과로부터 표준양생 및 코어 공시체강도의 시공품질을 통계적으로 분석하여 제안한 값은 Table 13과 같다.

분석한 결과를 보면, 재령 91일 압축강도에서의 변동계수 및 할증계수는 각각 3.66% 및 1.06으로 배합강도를 산정하기 위해 적용한 값보다 매우 안정적인 것으로 나타났다. 또한, 수중 콘크리트의 저감계수도 실제의 코어강도에서는 1.23으로 오히려 높게 나타났다.

즉, 병용계 고유동 콘크리트의 배합설계에서 적용한 강도관리의 변동계수 및 할증계수, 그리고 수중 콘크리트의 저감계수는 현장 압축강도의 시공 품질 시험 결과에 비해 매우 비경제적인 것을 알 수 있다.

따라서 저열 포틀랜드시멘트를 사용한 병용계 고유동 콘크리트를 지하연속벽에 타설할 경우에는 배합강도 산정식에 적용한 설계값과 실측값을 고려하여, 변동계수(V)를 7.0%로 하고 할증계수(α)를 1.13으로, 수중 콘크리트의 저감계수(γ)는 0.98로 가정하여, 본 연구에서는 다음의 식 (4)와 같이 배합강도 산정식을 제안하였다.

$$\text{배합강도}(f_{cr}) = \text{설계기준강도}(f_{ck}) \times \frac{1.13(\alpha)}{0.98(\gamma)} \quad (4)$$

이러한 자료를 이용하여 향후에 일반 콘크리트의 수준에서 병용계 고유동 콘크리트의 배합강도 선정 및 이에 따른 강도관리를 할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

병용계 고유동 콘크리트의 실측 자료를 사용한 시공 품질 및 보증강도 평가로부터 얻은 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

Table 13 Proposed value by statistical analysis

Items	Designed value	Actual data	Proposed value	Remark
Compressive strength(MPa)	50.5	49.9	46.1	
Standard deviation(MPa)	-	1.66	-	
Variation coefficients(%)	10	3.36	7.0	
Addition factor(α)	1.2	1.06	1.13	
Reduction factor under water concrete(γ)	0.95	1.23	0.98	

- 1) 배치플랜트에서 병용계 고유동 콘크리트의 최적배합시간은 75초가 가장 적합한 것으로 나타났으며, 최적배합조건은 석회석 미분말을 시멘트 중량비로 42.6% 치환한 물-시멘트비 51.0%, 잔골재율 48.8%로 선정하였다.
- 2) 슬럼프 플로우의 평균 616~634 mm로 나타났으며, 500 mm 플로우 도달시간은 평균 6.3초, 공기량은 평균 4.0%로 관리기준을 만족하였다.
- 3) 표준양생 공시체의 압축강도에 대한 시공 품질 시험결과, 평균 압축강도는 49.9 MPa로 나타났으며 평균 표준편차는 1.66 MPa, 변동계수는 3.36%의 범위로 매우 낮게 나타났다.
- 4) 코어 공시체의 압축강도에 대한 시공 품질 시험 결과, 평균 압축강도는 66.4 MPa를 나타내었으며, 평균 표준편차는 3.64 MPa, 변동계수는 5.48%로 나타났다. 특히, 자중에 의한 가압현상 및 조직의 치밀화로 깊이 따라 압축강도가 증가하는 것으로 나타났다.
- 5) 콘크리트의 온도이력은 깊이에 따라 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 하부의 압축강도 증가현상에 영향을 미친 것으로 사료된다.
- 6) 실측자료를 토대로 분석한 결과, 지하연속벽에 사용되는 병용계 고유동 콘크리트의 배합강도 산정에

있어서 변동계수는 7%, 활중계수 1.13 및 수중 콘크리트의 강도저감계수는 0.98로 제안하였다.

감사의 글

이 논문은 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임.(R05-2003-000-11123-0)

참고문헌

1. 青木 茂, “地下連續壁における壁體コンクリートの品質評價に関する研究”, 東北大學校學位論文, 1997, 149pp.
2. 日本土木學會, 콘크리트標準示方書-施工編, 日本土木學會, 1996, 348pp.
3. 青木 茂, 三浦律彦, 三浦 尚., “高ビ-ライトセメントを用いた高強度連壁コンクリートの品質特性”, セメントコンクリート論文集, No.50, 1996, pp.696~701.
4. 横田和直., “高強度・高流動コンクリートの地下連續壁への適用-硬化コンクリートの性質”, 日本土木學會 第50回年次學術講演會, 1995. 9, pp.1152~1153.
5. 青木 茂, 三浦律彦, 神代泰道., “超高強度・低發熱連壁コンクリートの實施工における壁體の硬化特性”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.18, No.1. 1996, pp.273~278.

요 약 본 연구에서는 지하식 LNG 저장탱크의 지하연속벽에 사용되는 병용계 고유동 콘크리트의 시공 품질 및 보증강도 평가를 정리한 것이다. 일반적으로 지하연속벽에 사용되는 고유동 콘크리트의 배합강도는 높은 활중계수와 낮은 수중 콘크리트의 저감계수를 적용하기 때문에, 매우 비경제적인 배합설계가 된다. 이를 구명하기 위한 방안으로 현장에서 실시한 병용계 고유동 콘크리트의 시공 품질과 보증강도를 평가하여 이에 적합한 배합강도 산정식을 제안하고자 하였다. 연구 결과, 최적배합조건은 물-시멘트비 51%, 잔골재율 48.8%, 그리고 석회석 미분말을 시멘트의 중량비로 42.6% 치환한 것으로 선정하였다. 또한, 현장 적용 결과를 분석해 보면, 슬럼프 플로우에 대한 시공 품질 시험 결과 평균 616~634 mm이고 500 mm 플로우 도달시간은 평균 6.3초, 공기량은 평균 4.0%로 관리기준을 만족하였다. 표준양생 공시체의 압축강도에 대한 시공 품질 시험 결과, 평균 49.9 MPa를 나타내었고 표준편차는 1.66 MPa, 변동계수는 3.36%로 매우 낮았다. 코어 공시체의 압축강도는 평균 66.4 MPa를 나타내었고, 표준편차는 3.64 Pa, 변동계수는 5.48%로 나타났다. 표준양생 공시체와 코어 공시체의 보증강도비는 1.23 및 1.32로 나타났다. 기존에 배합강도를 산정하기 위하여 적용한 활중계수 및 저감계수가 매우 안정적인 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이러한 결과를 통해 지하연속벽에 사용되는 병용계 고유동 콘크리트의 배합강도 산정에 있어서 변동계수 7%, 활중계수 1.13 및 수중 콘크리트의 강도저감 계수를 0.98로 제안하였다.

핵심용어 : 지하연속벽, 병용계 고유동 콘크리트, 활중계수, 저감계수, 시공품질