

고로슬래그 시멘트를 사용한 콘크리트의 강도증진 해석에 의한 거푸집 존치기간의 제안

Proposition of the Removal Time of Form Based on the Analysis of Strength Development of Concrete Using Blast-Furnace Slag Cement

표 대 수 유 호 범 한 민 철 윤 기 원 한 천 구
 Pyo, Dae Soo Ryu, Ho Bum Han, Min Cheol Yoon, Gi Won Han, Cheon Goo

ABSTRACT

In this paper, removal times of form from concrete using OPC(Ordinary Portland Cement) and BSC(Blast-Furnace Slag cement) are suggested by applying logistic curve, which evaluates the strength development of concrete with maturity. W/B, kinds of cement and curing temperatures are selected as test parameters. According to the results, the estimation of strength development by logistic curve has a good agreement between calculated values and measured values. As for the removal times of form suggested in this paper, as W/B increase, curing temperature decrease and BSC is used, removal they times of form are shown to be kept longer. Removal times of form from concrete using OPC suggested in this paper are shorter by about 2~3 days than those of standard specifications provided in KCI in the range of over 20°C, while they takes 4~5 days shorter compared with those of standard specifications Provided in KCI in the range of 10~20°C. Removal times of form for concrete using OPC are longer than those using BSC by about 1 day.

1. 서 론

최근들어 건설공사 현장에서는 산업부산물의 일종인 고로슬래그 시멘트를 콘크리트용 혼화제로 사용하는 경우가 많아졌다. 그러나 고로슬래그 시멘트를 이용한 콘크리트는 저렴한 시멘트 가격에 의한 경제성 추구, 화학적 저항성의 증대, 장기강도증진, 수화열 저감등 요구의 품질을 충분히 확보할 수 있는 장점이 있지만, 초기 강도 발현의 지연으로 한중콘크리트에서 서중콘크리트에 이르기까지 보통포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용한 콘크리트와는 거푸집 존치기간이 다르게 적용되어야 할 것으로 사료된다.

한편, 거푸집 존치기간과 관련하여 콘크리트 표준시방서의 경우는 표 1과같이 콘크리트의 연직하중을 지탱하지 않는 부위 즉, 보옆, 기둥, 벽등의 측벽인 경우는 10°C 이상의 온도에서 24시간이상 양생한 후에 콘크리트 압축강도가 50kgf/cm² 이상 도달할 경우는 거푸집을 해체 할 수 있다. 다만 거푸집판재 존치기간중의 평균온이 10°C 이상일 경우는 콘

표 1. 콘크리트의 압축강도를 시험할 경우

부 계	콘크리트 압축강도(fcu)
확대기초, 보옆, 벽 등의 측벽	50kg/cm ² 이상
슬래브 및 보의 밑면, 아치 내면	설계기준강도×2/3(fcu≥2/3fck) 다만, 140kg/cm ² 이상

* 정회원, 청주대학교 대학원 석사과정

** 정회원, 청주대학교 대학원 박사과정

*** 정회원, 주성대학 건설재료공학과 조교수, 공학박사

**** 정회원, 청주대학교 건축공학부 교수, 공학박사

크리트 재령이 표 2에 주어진 재령이상 경과하면 압축강도 시험을 하지 않아도 거푸집을 해체할 수 있도록 거푸집 존치기간을 정하고 있다. 그러나, 이 경우는 외국에서 연구된 자료에 근거하여 규정을 제정한 것으로 우리나라의 조건과 다를 수 있고, 또한, 양생온도 단계별 규정도 다를 수가 있어 현장적용에는 다소 문제가 있다.

그러므로, 본 연구에서는 시멘트 종류, W/B 및 양생온도 변화별 재령경과에 따른 강도증진을 실험한 후 적산온도에 의한 콘크리트의 강도증진을 해석한 다음, 이를 토대로 하여 시멘트의 종류, W/B 및 양생온도에 따른 콘크리트의 측면 거푸집 존치기간을 제안하여 기존의 규정을 재검토하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 3과 같고 콘크리트의 배합사항은 표 4와 같다.

2.2 사용재료

본 연구에 사용한 OPC(비중 : 3.15, F_{28} : 346kgf/cm²) 및 BSC는 국내산 S 사재를 이용하였다. 단, BSC는 고로슬래그 30% 혼입품으로, 그 물리적 성질은 표 5와 같다. 유동성 및 공기량 확보를 위하여 사용되는 혼화제는 표 6과 같다.

골재로써, 잔골재는 충남 병천산 강모래(비중 : 2.58, 조립률 : 2.43)를 사용하였으며, 굵은 골재는 충북 괴산산 20mm 화강암 부순돌(비중 : 2.61, 조립률 : 6.70)을 사용하였다.

2.3 실험방법

콘크리트의 혼합, 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프, 공기량 시험 및 경화콘크리트의 압축강도시험은

표 2. 콘크리트의 압축강도를 시험하지 않을 경우
-기초, 보열, 기둥 및 벽의 측벽

시멘트 종류	조 강 포틀랜드 시멘트	보통포틀랜드시멘트	고로슬래그시멘트
		고로슬래그시멘트(복급) 포틀랜드포졸란시멘트(A종) 플라이애시시멘트(A종)	고로슬래그시멘트 포틀랜드포졸란시멘트(B종) 플라이애시시멘트(B종)
평균기온			
20℃ 이상	2일	4일	5일
20℃ 미만 10℃ 이상	3일	6일	8일

표 3. 실험계획

실험요인		수준	
배합사항	결합재	3	보통포틀랜드시멘트(이하 OPC) 고로슬래그 1급 시멘트(이하 BSC)
	W/B(%)	3	40, 50, 60
	목표 슬럼프	1	21±1cm (W/B 30~40%) 18±1cm (W/B 50~60%)
	목표 공기량(%)	1	4.5±1.5
	양생온도(℃)	5	-10, 5, 10, 20, 35
실험사항	굳지않은 콘크리트	2	슬럼프, 공기량
	경화 콘크리트	1	압축강도

표 4. 콘크리트의 배합표

구분	W/B (%)	S/A (%)	AE/C (%)	SP/C (%)	W (kg/m ³)	용적배합(l/m ³)		
						C	S	G
OPC	40	39	0.002	0.84	179	146	244	382
	50	39	0.26*	-	182	116	256	401
	60	40	0.18*	-	181	96	264	414
BSC	40	37	0.003	0.85	183	156	228	388
	50	39	0.4*	-	181	123	254	397
	60	41	0.4*	-	180	102	275	398

*는 AE 감수제를 의미한다.

표 5. 고로슬래그 시멘트의 물리적 성질

용결시간(분)		압축강도(kgf/cm ²)			분광도(cm ² /g)	비중	안정도(%)	강열감량(%)
초결	종결	3일	7일	28일				
250	460	189	277	397	3,720	2.94	0.08	0.8

표 6. 혼화제의 물리적 성질

구분	주성분	형태	색상	비중
고성능감수제	술폰산 멜라민계	분말	흰색	-
AE제	Synthetic Tensides	액상	암갈색	1.02
AE 감수제	나프탈렌계	액상	암갈색	1.14±0.02

KS 규격에 의거 실시하였다. 단, 압축강도 측정재령은 표 7과 같다.

표 7. 압축강도측정 재령 및 적산온도

W/C (%)	양생온도 (°C)	압축강도 측정재령 및 적산온도								
		일	3	7	14	28	56	96	-	-
40	-10	일	3	7	14	28	56	96	-	-
		DD	45	45	45	45	45	45	-	-
	5	일	2	6	14	28	42	56	110	182
		DD	30	90	210	420	630	840	1725	2730
	10	일	1.5	3	4.5	10.5	31.5	42	84	136.5
		DD	30	90	210	420	630	840	1680	2730
60	20	일	1	3	7	14	21	28	56	96
		DD	30	90	210	420	630	840	1680	2730
	35	일	0.7	2	4.7	9.3	14	18.7	37.3	60.7
		DD	31.5	90	211	418	630	841	1678	2731

3. 실험결과 및 분석

3.1 재령 및 적산온도에 따른 강도증진 해석

그림 1은 OPC와 BSC를 혼입한 콘크리트의 W/C 및 양생온도별 재령경과에 따른 강도증진 성상을 나타낸 것이다.

먼저, 시멘트의 종류별로는 OPC의 경우 양생온도가 높을수록 초기재령에서는 높은 강도증진을 보이고 있으나, 재령이 경과할수록 오히려 저온양생의 경우보다 강도증진이 둔화되는 강도증진의 역전현상이 나타남을 알 수 있었고, 저온양생의 경우 초기재령에서는 강도증진이 미약하나 장기재령으로 진행할수록 강도증진이 높게 됨을 알 수 있었다.

한편, BSC의 경우는 OPC에 비하여 35°C에서는 초기에 높은 강도증진을 나타내며 재령이 경과하여도 고온에 의해서 촉진된 포졸란 반응에 기인하여 지속적으로 높은 강도증진을 나타내고 있었는데, 이는 매스콘크리트, 서중콘크리트 및 증기양생의 경우에 BSC를 이용하게 되면 높은 강도의 발휘와 그에 따른 경제성을 성취할 수 있음을 시사해주는 것으로 분석된다.

단, 저온양생의 경우 전반적으로 초기재령에서는 낮은 강도값을 나타내고 재령이 경과하여도 강도의 역전현상이나 커다란 강도의 증진은 없는 것으로 나타나고 있어 한중콘크리트와 같은 저온환경에서 BSC의 사용은 신중을

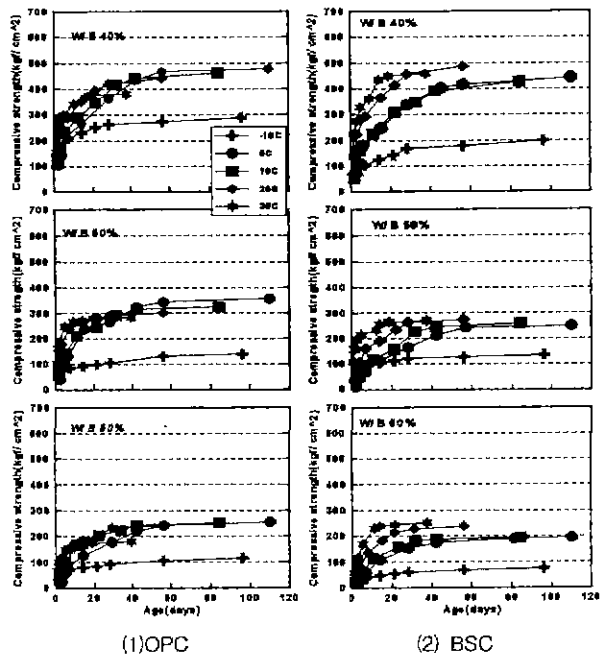


그림 1. 재령경과에 따른 콘크리트의 강도 증진

기하여야 할 것으로 사료된다.

3.1.1 적산온도 및 로지스틱모델

본 연구에서 적용한 적산온도식은 식(1)과 같고, 강도증진해석 모델식은 鎌田¹⁾에 의한 로지스틱 곡선식으로 식(2)와 같다.

$$M = \sum_{0}^n (\theta + 10) \Delta t \dots \dots \dots (1)$$

여기서, θ : Δt 시간중의 콘크리트온도(°C)

Δt : 시간(일)

$$F_c = \frac{F_\infty}{1 + \exp(-k \cdot \log M + m)} \dots (2)$$

여기서, F_∞ : 최종도달강도(kgf/cm²)
 k, m : 실험상수

3.1.2 로지스틱 곡선에 의한 강도증진해석

그림 2는 OPC 및 BSC사용 콘크리트의 W/B 별 적산온도경과에 따른 강도증진성상을 양생 온도별로 구분하여 나타낸 것이다. 전반적으로 20℃이하의 온도에서는 적산온도에 따라 유사한 강도증진을 보이고 있으나, 양생온도 35℃에서는 OPC의 경우 장기적산온도에서 강도의 역전현상이 나타나고 있었고, BSC의 경우는 양생 온도가 높을수록 전반적으로 큰 강도를 유지함을 알 수 있었다.

로지스틱 곡선을 이용한 강도증진해석의 상관성은 시멘트종류에 관계없이 결정계수 0.95~0.98정도이고, 표준오차는 5~25kgf/cm² 정도로 나타나고 있어 실험에 의하여 측정된 값과 로지스틱 곡선에 의해 계산된 값이 매우 양호한 추정 정밀도임을 확인할 수 있었다.

3.2 강도증진해석 모델식의 최적계수 산정

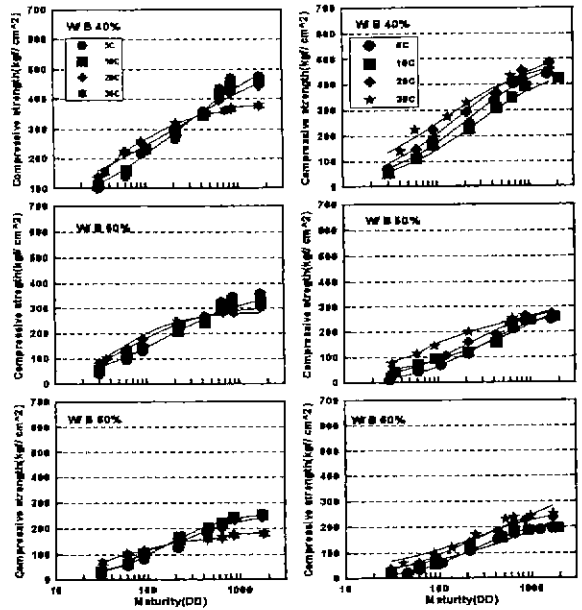
그림 3은 OPC와 BSC를 혼입한 콘크리트의 W/B별 로지스틱 모델식의 각 계수값을 일체화하여 산정하기 위한 일련의 절차를 도식화한 것이다.

또한, 표 8은 그림 3의 절차에 의하여 산정된 로지스틱 모델식의 W/B별 계수값과 결정계수 값을 나타낸 것이고, 그림 4는 상기의 절차를 통하여 일체화된 시멘트 종류별, W/B별 적산온도에 따른 강도증진 경향을 나타낸 것이다.

3.3 거푸집 존치기간의 산정

3.3.1 거푸집 존치기간의 산정방법

본 연구에서는 기초, 보열, 기둥 및 벽의 거푸집을 해체할 수 있는 압축강도값을 앞 절에서 W/B별로 일체화된 로지스틱 모델식에 대입하는데, 로지스틱 모델식은 소요의 강도가 발휘되는 적산온도값을 산정하도록 식(3)과 같이 변형하여 사용하였다.



(1) OPC (2) BSC
 그림 2. 로지스틱곡선식에 의한 콘크리트의 강도증진

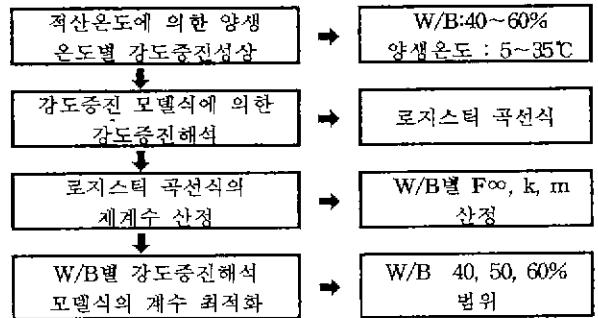


그림 3. 로지스틱 곡선식에 의한 강도증진해석절차

표 8. 로지스틱 곡선식에서의 계수값

계수값	OPC			BSC		
	W/B(%)			W/B(%)		
	40	50	60	40	50	60
F_∞	479	396	328	534	448	392
k	2.04	2.20	2.30	2.02	1.92	1.86
m	4.14	4.75	5.16	4.70	4.87	4.98

$$M = e^{-\frac{1}{k} [\ln(\frac{F_{\infty}}{F_c} - 1) - m]} \dots \dots \dots (3)$$

여기서, M : 적산온도(DD)

F_{∞} : 최종도달강도(kgf/cm²)

k, m : 실험상수

또한, 해당강도가 발휘되는 적산온도를 식(3)에 따라 산정한 후 이를 다시 적산온도식(식4)을 이용하여 양생온도 단계별로 재령을 구하였는데, 이 값이 거푸집 해체에 필요한 강도까지의 거푸집 존치일수가 된다.

$$\Delta t = \frac{M}{(\theta + 10)} \dots \dots \dots (4)$$

여기서, Δt : 재령(일),

M : 적산온도(D · D)

θ : 콘크리트 온도(°C)

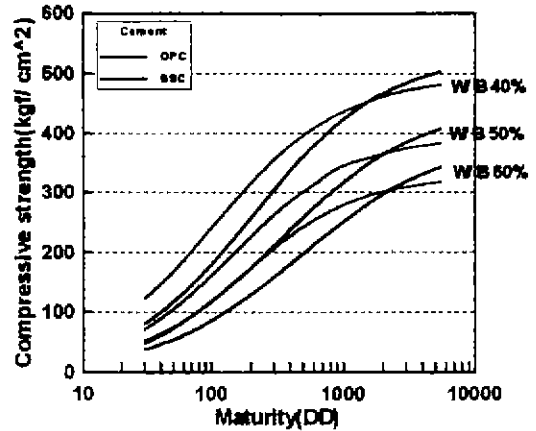


그림 4. 적산온도경과에 따른 강도증진해석

3.3.2 거푸집 존치기간의 제안

표 9는 상기의 절차에 의하여 시멘트 종류별로 구분하여 소요의 압축강도를 얻기위한 W/B 및 예상 양생온도별로 거푸집 존치기간을 나타낸 것이다. W/B는 5% 단위로 설정하였는데, 이는 해석 모델식의 각 실험상수값을 B/W와의 관계로 회귀식을 산정한 후, 각 W/B별로 모델식의 실험상수값을 결정, 적용하여 거푸집 존치기간을 제안하였다.

먼저, 예상 양생온도는 실무조건을 고려하여 한중, 일반 및 서중환경에 해당되는 0°C에서 35°C 이상의 단계를 두어 구분 제안하였다. 이때 산정된 기간은 구간온도범위 중 제일 낮은 온도에서 0.5일 단위로 설정한 후 최불리 조건을 고려하여 제안하였다. 거푸집 존치기간을 제안한 결과 W/B가 클수록, 그리고 양생온도 낮아질수록 거푸집 존치기간은 길어지는 것으로 나타났다. 그리고, 시멘트 종류별 거푸집 존치기간은 W/B 및 소요의 압축강도 단계별로 약간의 차이는 있으나 OPC를 사용한 경우가 동일 조건에서 BSC보다 기간이 짧게 나타나고 있었다.

또한, 거푸집의 평균 존치기간 및 평균 적산온도는 OPC를 사용한 경우 W/B 및 양생온도 단계에 따라 약간의 차이는 있지만 전반적으로 0.5~3.5일, 평균 21DD 정도가 소요되는 것으로 나타났으나, BSC를 사용한 경우는 0.5~4.5일, 평균 30DD로 OPC의 경우보다 기간이 더욱 길어지는 것을 알 수 있었는데, 단, OPC의 경우는 양생온도 25°C 이상에서는 거푸집 존치기간이 W/B별로 약간의 차이는 있지만, 약 1일 정도

표 9. 소요의 압축강도를 얻기 위한 저령 및 적산온도

시멘트 종류	소요의 압축강도 (kgf/cm ²)	W/B (%)	소요의 압축강도를 얻을때까지 예상되는 양생온도(°C)								소요의 적산온도 (° DD)
			0 ≤ t < 5	5 ≤ t < 10	10 ≤ t < 15	15 ≤ t < 20	20 ≤ t < 25	25 ≤ t < 30	30 ≤ t < 35	35 ≤ t	
OPC	50	40	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	10
		45	1.5	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	14
		50	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	20
		55	3.0	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	26
		60	3.5	2.0	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	32
BSC	50	40	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	16
		45	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	0.5	22
		50	3.0	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	29
		55	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	36
		60	4.5	3.0	2.5	2.0	2.0	2.0	1.5	1.0	44

로 산정되었다.

한편, 본 연구의 결과 거푸집 존치기간은 현행 KCI의 규정에 비하여 OPC의 경우 20℃이상에서는 약 2~3정도, 10℃이상 20℃미만에서는 4~5일 정도 짧아진 것을 확인할 수 있었다.

그림 5는 BSC를 사용한 콘크리트의 거푸집 존치기간을 OPC를 사용한 경우에 대하여 비교한 것이다. 먼저, 소요의 압축강도 50kgf/cm²를 얻을 때까지의 거푸집 존치일수는 BSC를 사용한 경우가 OPC를 사용한 경우에 비하여 약 1일 정도 긴 것으로 나타나, BSC를 사용할 경우에 거푸집 존치기간 산정은 충분한 고려가 필요함을 알 수 있었다.

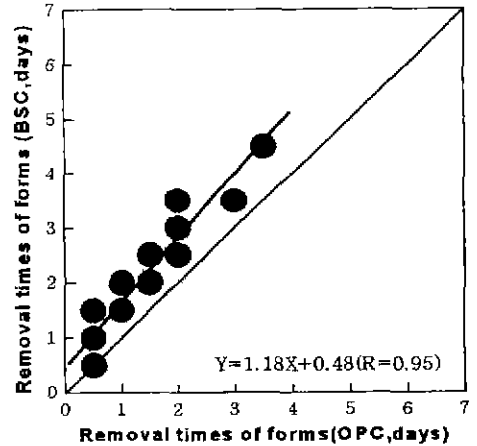


그림 5. OPC 와 BSC의 거푸집 존치기간 비교

4. 결 론

본 연구에서는 양생온도 변화에 따른 BSC콘크리트의 강도증진성상을 적산온도 방법으로 OPC와 비교 검토하고, 거푸집 존치기간을 제안하는데 대하여 재검토한 결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 로지스틱 모델식에 의한 강도증진해석의 결과는 표 8 및 그림 4와 같은데, 해석모델에 의한 해석치와 실험측정치 사이의 상관성 검토결과, 결정계수는 시멘트의 종류에 따라 약간의 차이는 있지만 0.95~0.98, 표준오차는 5~20kgf/cm² 정도로 양호한 상관성을 보이고 있었다.

2) 거푸집 존치기간은 W/B가 커질수록, 예상 양생온도가 낮을수록, 그리고 BSC를 사용한 경우가 길어지는 것을 알 수 있다.

3) 본 연구에 의하면 거푸집 존치기간은 현행 KCI의 규정에 비하여 OPC의 경우 20℃이상에서는 약 2~3일 정도 단축되고, 10℃이상 20℃미만에서는 4~5일 정도 짧아진 것을 확인할 수 있었고, BSC를 사용한 경우는 OPC를 사용한 경우에 비하여 거푸집 존치기간이 약 1일 정도 더 긴 것으로 나타나, BSC를 사용할 경우의 거푸집 존치기간은 충분한 고려가 필요함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) 鎌田英治 ; 로지스틱 곡선을 응용한 콘크리트 강도추정법의 제안, 日本建築學會論文報告集, 第 367號, 1986.
- 2) 한국콘크리트학회, 콘크리트 표준시방서, 1999.1
- 3) 日本建築學會, 寒中콘크리트 施工指針・同解説, 1989.
- 4) 日本土木學會, 콘크리트 標準示方書 施工編, 1989.9
- 5) 韓千求, 洪悅郎, 鎌田英治, 吉野利幸, 桂修 ; 高強度 콘크리트의 壓縮強度增進性狀에 關する 研究, (平均養生溫度による 寒中 콘크리트의 強度補正值의 提案, 日本建築學會大會學 術講演論文集, 1992.
- 6) Flowman, J. M ; Maturity and Strength of Concrete, Magazine of Concrete Research, 1956.
- 7) Carino, N. J ; Maturity Method; Theory and Application, Journal of Cement Concrete and Aggregate, ASTM, 1984.
- 8) ACI, Cold weather concreting, 1980.