한국환경과학회지 제15권(제2호), 185~191, 2006
Journal of the Environmental Sciences

플라이애시 시멘트를 사용한 콘크리트의 거푸집 존치기간 결정에 관한 연구

신 병 철 · 한 민 철*
중부대학교 환경조경학과, *청주대학교 산업과학연구소
(2005년 12월 16일 접수; 2006년 2월 23일 채택)

A Study on the Determination of the Removal Times of Form in Concrete Using Fly Ash Cement

Byung-Cheol Shin and Min-Cheol Han*
Department of Landscape Architecture, Joongbu University, Chungnam 312-940, Korea
**Industrial Science Research Institute, Chongju University, Cheongju 360-764, Korea*
(Manuscript received 16 December, 2005; accepted 23 February, 2006)

In this paper, removal time of side form from concrete using OPC(ordinary Portland cement) and FAC(fly ash cement) are proposed by appling logistic model, which evaluates the strength development of concrete with maturity. W/B, types of cement and curing temperatures are adapted as test parameters. The estimation of strength development by logistic model has a good agreement between calculated values and measured ones. As for the removal times of form works suggested in this paper, as W/B increases, curing temperature decreases and fly ash is used, removal time of side form is prolonged. Removal time of form from concrete using OPC suggested in this paper is shorter 2.5~3.5 days than those of KASS-5 (Korean Architectural Standard Specifications-5) in the range of over 20℃. And in the range of 10~20℃removal time of form is shorter than that of KASS-5 by as much as 4~4.5 days. The use of FAC results in an increase in removal time of form compared to that of OPC by about 1 day.

Key Words : Fly ash, Removal times of form, Strength development, Maturity, Concrete

1. 서 론

최근 우리나라의 건축, 토목 및 조경 등 건설 공사현장의 경우 골조부재의 주재료로서 사용되는 콘크리트는 자원재활용, 환경오염방지, 원가절감 및 품질향상을 목적으로 산업부산물의 일종인 플라이애시(Fly ash)를 콘크리트용 혼화재료로 이용하는 경우가 많아졌다.

이러한 플라이애시는 석탄을 원료로 하는 화력발전소에서 미분탄을 약 1400~1500℃의 고온으로 연소시켰을 때 회분이 용융되어 고온의 연소가스와 더불어 굴뚝에 이르는 도중에 급격히 냉각되어 표면장력에 의해 구형으로 생성되는 0.5~100μm 정도의 미세한 분말로서 전기식 또는 기계식 집진 장치를 사용하여 집진한 것이다.

그런데 이러한 플라이애시를 콘크리트용 혼화재로서 일부 치환할 경우 저렴한 플라이애시의 가격에 의한 경제성 성취와 아울러, 유동성향상, 수화열 감소, 장기강도증진, 화학저항성증대 등 장점이 있기는 하지만, 초기 강도의 발현이 지연되는 단점도 있어 저온인 한중콘크리트에서부터 고온인 서중콘크리트에 이르기까지 보통 포틀랜드시멘트(이하 OPC라 칭함)를 사용한 콘크리트와는 다르게 거푸집 존치기간이 적용되어야 할 것으로 사료된다.

그런데, 우리나라의 건축공사 표준시방서[1](이하 KASS-5라 칭함)에서는 바닥 슬래브 밑 등 하부거푸집의 경우는 설계기준강도의 100%이상을 발휘한 후 해체하는 것으로 정해져 있어 이는 논외로 하지만,

Corresponding Author : Byung-Chuel Shin, Department of Landscape Architecture, Joongbu University, Chungnam 312-940, Korea
Phone: +62-41-753-2268
E-mail: bcshin@joongbu.ac.kr

기초, 보옆, 기둥, 벽체 등 측면거푸집은 "콘크리트의 압축강도 5N/mm^{2}이상에 도달한 것이 확인될 때까지" 로 하고 있고, 또한, "거푸집판재 존치기간중의 평균기온이 10℃이상인 경우는 콘크리트의 재령이 Table 1에 나타난 일수 이상 경과하면 압축강도시험을 하지 않고도 떼어낼 수 있다."고 규정하고 있다.

또한, 한국콘크리트학회[2](이하 KCI라 칭함)의 경우도 "기초, 보의 측면, 기둥, 벽의 거푸집 널은 24시간이상 양생한 후에 콘크리트의 압축강도가 Table 2의 값에 도달하였음을 시험에 의하여 확인된 경우에 해체할 수 있다. 특히, 내구성을 고려할 때에는 콘크리트 압축강도가 10MPa 이상 도달한 경우 거푸집널을 해체하는 것이 좋다. 거푸집널 존치기간중 평균기온이 10℃이상인 경우는 콘크리트 재령이 Table 1에 주어진 재령이상 경과하면 압축강도시험을 하지 않고도 해체할 수 있다."라고 규정되어 있다.

그러나, 이 경우는 외국에서 연구된 자료를 근거로 규정을 제정한 것으로서 우리나라의 환경, 시공 및 재료 조건과 다를 수 있고, 또한 10℃이하 및 상세한 양생온도 단계별의 규정도 미비하며, 물-결합재비(W/B)별에 따라 강도발현경향은 다소 달라질 수 있음에도 구별이 미비하여 실무 적용시에는 많은 어려움이 따르고 있는 것이 현실이다.

한편, 이러한 거푸집존치기간과 연관하여 국내에서는 별다른 연구 성과는 보고되고 있지 않은 실정인데, 한[3]등은 W/B 25~45%의 고강도 콘크리트 범위에서 거푸집의 부착강도 및 P형 슈미트 햄머를 이용하여 측면거푸집존치기간에 대한 일련의 연구를 진행하여, 고강도 콘크리트 거푸집제거에 필요한 적산온도는 21~25°D · D정도이고 소요시간은 약 17~20시간 정도로 나타났다고 보고하고 있다.

그러므로, 본 연구에서는 시멘트 종류, W/B 및 양생온도 변화별 재령경과에 따른 강도증진을 실험한 후 적산온도에 의한 콘크리트의 강도증진을 해석을 통하여 구명한 다음, 이를 토대로 하여 시멘트의 종류, W/B 및 양생온도에 따른 콘크리트의 측면 거푸집 존치기간의 결정하고 재검토하므로써, 플라이애시를 활용하는 건설공사의 실무활용에 기여하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1. 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 2와 같고, 콘크리트의 배합사항은 Table 3과 같다. 시멘트는 OPC와 플라이애시 시멘트 (FAC)의 2종류를 사용하였고, W/B는 40, 50, 60%의 3수준으로 실험계획하였다. 또한, 양생온도는 -10℃부터 35℃에 이르는 5수준으로 계획하였다.

압축강도측정 재령은 Table 7에서와 같이 양생온도별로 소요의 적산온도가 얻어지는 시점을 선택하였으며 양생온도별로 2730°D · D가 얻어지는 재령까지 측정하였다. 압축강도 시험체는 각 재령별로 3개씩 제작하여 압축강도를 측정하였다.

2.2. 사용재료

본 연구에 사용한 시멘트는 국내 S사에서 생산되는 OPC (밀도 : 3.15g/cm^3, f_{28} : 35.2N/mm^2)를 사용하고, 플라이애시 시멘트(이하 FAC라 칭함)는 국내에 시판품이 없으므로 플라이애시를 국내 S사의 OPC에 30%치환하여 이용하였는데, 플라이애시는 충남 보령화력산으로 그 물리적 성질은 Table 5와 같다. 골재로써 잔골재는 충남 병천산 강모래 (밀도 : 2.58g/cm^3, 조립율 : 2.43)를 사용하며, 굵은 골재는 충북 괴산산 20㎜ 화강암 부순돌(밀도 : 2.61

Table 1. Age for side form removal in Korean Architectural Standard Specification (KASS-5 ; days)

Cement / Mean temperature	High early strength Portland cement	Ordinary Portland cement Blast furnace slag cement A Fly ash cement type A	Blast furnace slag cement B Pozzolan cement B Fly ash cement B
above 20℃	2	4	5
above 20℃ below 10℃	3	6	8

Table 2. Age for side form removal in concrete standard specification of Korea Concrete Institute (KCI;days)

Member	Compressive strength of concrete(f_{cr})
Footing, side girder, column, wall	above 5MPa
Beneath slab and girder, inner side of arch	Design strength×2/3($f_{cu} \geq 2/3 f_{ck}$), under the condition of above 14MPa

Table 3. Design of experiment

Factors considered			Items tested
Mixture	Binder	2	Ordinary portland cement (OPC) Fly ash cement(replaced 30% by mass of OPC ;FAC)
	W/B(%)	3	40, 50, 60
	Target slump	2	21±1㎝ (W/B 40%) 18±1㎝ (W/B 50~60%)
	Target air content	1	4.5±1.5(%)
	Curing temperature (℃)	5	-10, 5, 10, 20, 35
Experimental	Fresh concrete	2	Slump, Air content
	Hardened concrete	1	Compressive strength

Table 4. Mixture proportion of concrete

Cement	W/B (%)	S/A (%)	AE/C (%)	SP/C (%)	W (kg/m³)	Absolute volume (ℓ/m³)			
						Cement	Fly ash	Sand	Gravel
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
FAC	40	38	0.003	1.00	178	105	62	231	377
	50	39	0.3*	-	182	81	49	251	392
	60	40	0.4*	-	180	67	40	267	401

*Air entraind water reducing admixture

Table 5. Physical properties of fly ash

Density (g/cm^3)	Blaine (cm^2/g)	Ratio of compressive strength (%)	SiO_2 (%)	Loss on ignition (%)	moisture content (%)
2.23	3,519	97	97	3.4	0.3

g/cm^3, 조립율 : 6.70)을 사용한다. 유동성 및 공기량 확보를 위하여 사용되는 혼화제는 Table 6과 같다.

2.3. 실험방법

먼저 콘크리트의 혼합은 강제식 팬믹서를 사용하였고, 굳지않은 콘크리트의 실험으로서 슬럼프는 KS F 2402의 규정에 의거하여 실시하였으며, 공기량 시험은 KS F 2421 규정의 압력법에 의한 공기함유량 실험방으로 실시하였다.

한편, 공시체의 양생방법은 콘크리트 타설후 5℃, 10℃, 20℃ 및 35℃의 온도가 유지되도록 1일간 기중 봉함양생을 실시한 후 탈형하여 소요의 재령까지 소정의 온도가 유지되는 수중양생조에서 수중양생하는 것으로 한다. 단, -10℃의 경우는 초기동해방지를 위하여 5℃에서 3일간 양생한 후 -10℃의 저장시설에서 기중봉함 양생으로 소정의 재령까지 실시한다.

압축강도시험은 KS F 2405의 방법에 의거하여 실시한다. 압축강도 측정재령은 Table 7과 같다.

3. 실험결과 및 분석

3.1. 적산온도에 따른 강도증진해석

3.1.1. 적산온도 및 로지스틱모델

적산온도란 콘크리트의 강도증진에 있어서 양생온도와 양생시간이 미치는 영향을 정량적으로 표시한 함수로서 일정기준온도(Datum temperature)이상에서의 콘크리트의 양생온도와 양생시간 함수의 조합으로 표현된다. 여기서, 기준온도란 양생시간에 관계없이 콘크리트가 일정한 강도를 나타내기 시작하는 시점에서의 양생온도를 의미한다[4].

Saul[5]에 의한 적산온도 개념에 따르면 콘크리트는 동일한 적산온도에 도달할 경우 그 온도내력에 관계없이 거의 동일한 강도를 얻게 된다는 것이다.

본 연구에서 적용한 적산온도식은 KASS-5에서 제시된 식 (1)과 같고, 강도증진 해석모델은 鎌田[6]

Table 6. Physical properties of chemical admixture

Admixture	Basis	Appearance	Colour	Density (g/cm^3)
Superplsticizer	Melamine sulfonate	Grain	White	-
AE agent	Synthetic tensides	Aqueous	Dark brown	1.02
AE water reducing admixture	Naphtalene based	Aqueous	Dark brown	1.14

Table 7. Age and maturity for compression test

W/B (%)	Curing temperature (℃)		Age and maturity							
40 50 60	-10	days	3	7	14	28	56	96	-	-
		°D · D	45	45	45	45	45	45	-	-
	5	days	2	6	14	28	42	56	110	182
		°D · D	30	90	210	420	630	840	1725	2730
	10	days	1.5	3	4.5	10.5	31.5	42	84	136.5
		°D · D	30	90	210	420	630	840	1680	2730
	20	days	1	3	7	14	21	28	56	96
		°D · D	30	90	210	420	630	840	1680	2730
	35	days	0.7	2	4.7	9.3	14	18.7	37.3	60.7
		°D · D	31.5	90	211	418	630	841	1678	2731

에 의한 로지스틱 모델식으로 Eq.(2)와 같다.

$$M=\sum_{i=0}^{n}(\Theta_i+10)\Delta t \quad (1)$$

여기서, Θ_i : Δt 시간중의 콘크리트온도(℃)
Δt : 시간(일)

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

여기서, F_∞ : 최종도달강도(N/mm^2)
k, m : 실험상수

3.1.2. 로지스틱 곡선에 의한 강도증진해석

Fig. 1은 로지스틱 곡선식을 이용한 OPC 및 FAC 콘크리트의 강도증진해석 결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 적산온도의 경과에 따라 양생온도 5~20℃까지의 강도증진은 약간의 차이는 있으나 동일한 적산온도에서 거의 유사함을 보이고 있는 반면, 양생온도 35℃의 경우 OPC는 장기적산온도에서 강도가 저온의 양생온도에 비하여 저하하고 있었고, FAC는 지속적으로 증진되고 있었다.

로지스틱 곡선식을 이용한 강도증진해석의 상관성은 시멘트의 종류에 관계없이 결정계수 0.95~0.98정도이고, 표준오차는 0.5~2.5N/mm^2 정도로 나타나고 있어 실험에 의하여 측정된 값과 로지스틱 곡선에 의해 계산된 값이 매우 양호한 추정 정밀도를 갖는 것을 확인할 수 있었다.

3.2. 강도 증진해석 모델식의 최적화

Fig. 2는 W/B별 로지스틱 모델식의 각 계수값을 일반화하기 위한 일련의 절차를 도식화 한 것이다. 또한, Table 8은 Fig. 2의 절차에 의하여 산정된 로지스틱 모델식의 W/B별 계수값과 결정계수값을 나타낸 것이고, Fig.3는 상기의 절차를 통하여 일체화된 시멘트 종류별, W/B별 적산온도에 따른 강도증진 경향을 나타낸 것이다.

3.3. 거푸집 존치기간의 산정

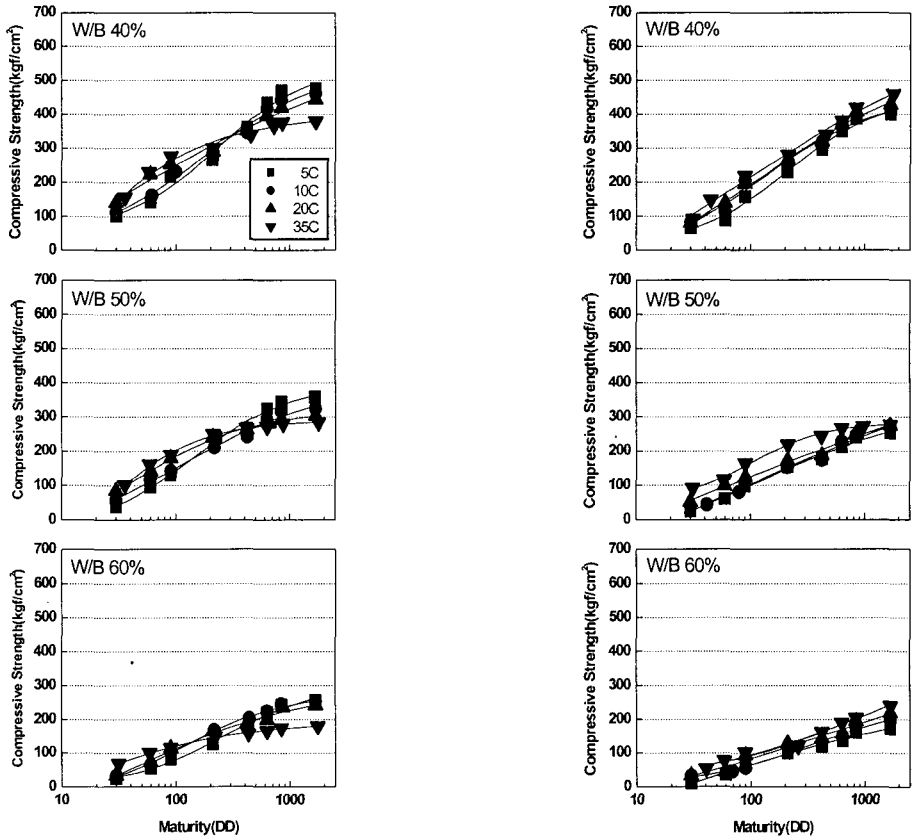
3.3.1. 거푸집 존치기간의 산정방법

본 연구에서는 기초, 보옆, 기둥 및 벽의 거푸집을 해체할 수 있는 압축강도값을 Table 7의 W/B별로 일체화된 로지스틱 모델식에 대입하는데, 로지스틱 모델식은 소요의 강도가 발휘되는 적산온도값을 산정하도록 Eq.(3)과 같이 변형하여 사용하였다.

$$M=e^{-\frac{1}{k}\{\ln(\frac{F_\infty}{F_C}-1)-m\}} \quad (3)$$

여기서, M : 적산온도(DD)
F_∞ : 최종도달강도(N/mm^2)
k, m : 실험상수

또한, 해당강도가 발휘되는 적산온도를 Eq.(3)을 이용하여 산정한 후 이를 다시 적산온도식(Eq.(4))을 이용하여 양생온도 단계별로 재령을 구하였는데, 이 값이 거푸집 해체에 필요한 강도까지의 거푸집



(1) OPC (2) FAC

Fig. 1. Strength development of concrete with maturity based on Logistic model.

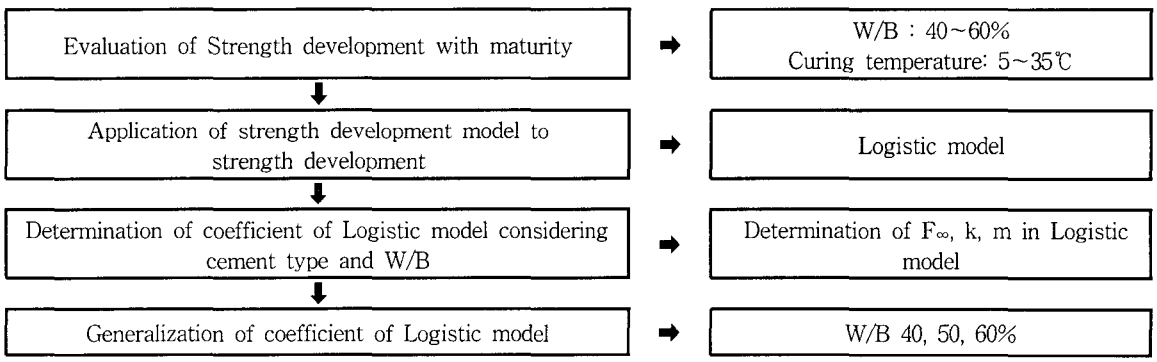


Fig. 2. Estimation of Strength development of concrete based on Logistic model.

존치일수가 된다.

$$\Delta t = \frac{M}{(\Theta + 10)} \quad (4)$$

여기서, Δt : 재령(일),
M : 적산온도(D · D)
Θ : 콘크리트 온도(℃)

3.3.2. 거푸집 존치기간 산정

Table 9는 상기의 절차에 의하여 시멘트 종류를 구분한 다음, 소요압축 강도를 발휘하기 위한 W/B 및 예상양생온도별 거푸집 존치일수를 나타낸 것이다. 단, W/B의 단계는 5%단위로 설정하였는데, 이는 해석 모델식의 계수값을 B/W와의 관계로 회귀식을 산정한 후, 각 W/B별로 모델식의 계수값을 결

Table 8. Correlation coefficient of Logistic model by regression analysis

Coefficient	OPC			FAC		
	W/B(%)			W/B(%)		
	40	50	60	40	50	60
F_∞	479	396	328	503	410	349
k	2.04	2.20	2.30	1.83	1.83	1.83
m	4.14	4.75	5.16	4.12	4.51	4.77
R^2	0.952	0.963	0.977	0.955	0.964	0.966

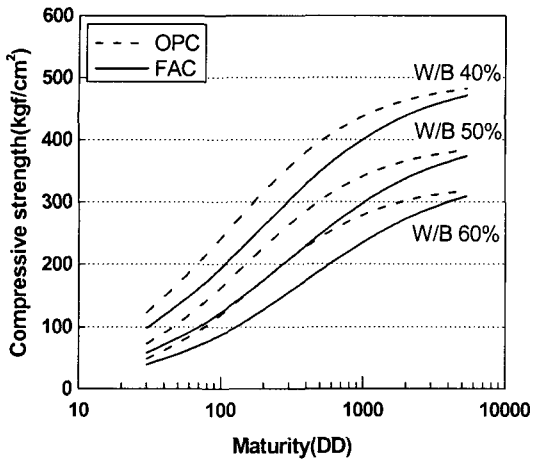


Fig. 3 Strength development of concrete with maturity by Logistic model.

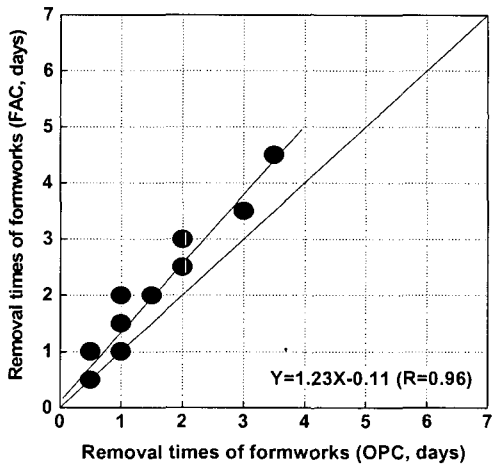


Fig. 4. Comparison of form removal time between OPC concrete and FAC concrete.

정하여 적용하였다.

먼저, 예상 양생온도의 구분은 실무현장 조건을 고려하여 한중, 일반 및 서중환경으로 여겨지는 0℃에서 35℃이상의 8단계로 구분하였는데, 현행 KASS-5규정상에서는 10℃이상의 경우 전술한 Table 1과 같이 제시하고 있으나, 본 연구에서는 한중환경에서도 거푸집 존치기간이 검토가 되었기 때문에 0℃부터 거푸집 존치기간을 산정하였다. 이 때 산정된 기간은 구간온도범위 중 제일 낮은 온도에서 0.5일 단위로 설정한 후 최불리 조건을 고려하여 결정하였다.

산정결과에 따르면, 전반적으로 W/B가 클수록, 그리고 양생온도 낮아질수록 거푸집 존치기간은 길어지는 것으로 나타났다. 그리고, 시멘트 종류별 거푸집 존치기간은 W/B 및 소요강도 단계별로 약간의 차이는 있으나 OPC를 사용한 경우가 동일 조건에서 FAC보다 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 21°D · D 정도가 소요되는 것으로 나타났으나, FAC를 사용한 경우는 0.5~4.5일, 평균 27°D · D로 OPC의 경우보다 기간이 더욱 길어지는 것을 알 수 있었으며, OPC의 경우는 양생온도 25℃이상에서 거푸집 존치기간이 약 1일 정도로 됨을 알 수 있었다.

한편, 본 연구의 결과 거푸집 존치기간은 현행 KASS-5의 규정에 비하여 OPC의 경우 20℃이상에서는 약 2.5~3.5일 정도이고, 10℃이상 20℃미만에서는 4~5.5일 정도 짧아진 것을 확인할 수 있었다.

Fig.4는 FAC를 사용한 콘크리트의 거푸집 존치기간을 OPC를 사용한 경우에 대하여 비교한 것이다. 먼저, 소요의 압축강도 5N/mm²를 얻을 때까지의 거푸집 존치 일수는 FAC를 사용한 경우가 OPC를 사용한 경우에 비하여 약 1일 정도 긴 것으로 나타나, FAC를 사용할 경우에 거푸집 존치기간 산정에 충분한 고려가 필요함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 FAC를 사용한 콘크리트를 OPC를 사용한 콘크리트와 비교하여 적산온도 방법으로 강도증진해석을 실시하고, 이를 이용하여 KASS-5 규정의 거푸집 존치기간을 재검토하고 문제점을 제안한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 로지스틱 모델식에 의한 강도증진해석의 결과

Table 9. Required age and maturity for form removal based on present paper

Cement	Compressive strength (N/mm^2)	W/B (%)	Curing temperature(℃)								Maturity (°D · D)
			0≤t<5	5≤t<10	10≤t<15	15≤t<20	20≤t<25	25≤t<30	30≤t<35	35≤t	
OPC	5	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
FAC	5	40	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	12
		45	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0	0.5	0.5	0.5	18
		50	2.5	2.0	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	25
		55	3.5	2.5	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	1.0	33
		60	4.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.5	1.5	1.0	43

는 Table 8 및 Fig. 4와 같은데, 해석모델에 의한 해석치와 실험측정치 사이의 상관성 검토결과, 결정계수는 시멘트의 종류에 따라 약간의 차이는 있지만 0.95~0.98, 표준오차는 0.5~2.0N/mm^2 정도로 양호한 상관성을 보이고 있었다.

2) 적산온도에 의한 강도증진해석에 의하여 거푸집 해체에 요구되는 소요의 압축강도를 얻기 위한 기간 및 적산온도를 산정한 결과는 Table 9와 같다. 이 Table은 실무에서 적용할 수 있는 참고자료로 제안하는데, 거푸집 존치기간은 W/B가 커질수록, 예상 양생온도가 낮을수록, 그리고 FAC를 사용한 경우가 길어지는 것을 알 수 있다.

3) 본 연구에 의하면 거푸집 존치기간은 현행 KASS의 규정에 비하여 OPC의 경우 20℃이상에서는 약 2.5~3.5일 정도 단축되고, 10℃이상 20℃미만에서는 4~5.5일 정도 짧아진 것을 확인할 수 있었고, FAC를 사용한 경우는 OPC를 사용한 경우에 비하여 거푸집 존치기간이 약 1일 정도 긴 것으로 나타나, FAC를 사용할 경우의 거푸집 존치기간은 충분한 고려가 필요함을 알 수 있었다.

금후의 연구과제로는 고로슬래그 미분말 및 특수시멘트 등을 이용한 콘크리트의 측면거푸집 존치기간에 대한 연구가 필요하며, 아울러 이를 토대로 우리나라 환경 및 재료 조건에 부합하는 측면거푸집 존치기간의 관련규정을 개정 및 제시할 필요성이 제기된다. 아울러 본 연구의 결과를 이용하여 각종 조경시설의 콘크리트 공사에 활용시 보다 합리적이고 과학적인 콘크리트 품질관리가 가능할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1) 대한건축학회, 2003, 건축공사 표준시방서, 239-241.

2) 한국콘크리트학회, 2003, 콘크리트 표준시방서, 124-126.

3) 한천구, 한민철, 2004, 고강도콘크리트 시공시 측면 거푸집 탈형시기의 결정, 한국콘크리트학회논문집, 16(3), 327-334.

4) Carino, N. J., 1984, Maturity method; theory and application, Journal of Cement Concrete and Aggregate, ASTM., 1-15.

5) Saul, A. G. A., 1951, Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure, Magazine of Concrete Research, 2(6), 127-140.

6) 鎌田英治, 1986, ロジステック曲線を應用したコンクリート强度推定法の提案, 日本建築學會論文報告集, 367, 1-8.