

# 혼화제 종류 변화에 따른 저온조건하 콘크리트의 초기강도 발현 특성

## Strength Development of the Concrete at Early Age subjected to Low Temperature depending on Admixture Types

한민철\*

Han, Min-Cheol

### Abstract

In this paper, tests are carried out in order to investigate the strength development of concrete under various binder types, W/B and curing temperature ranged from 5~20°C. Fly ash and blast furnace slag were incorporated by as much as 30%, respectively. Strength development of concrete are estimated using Logistic model and strength ratio of concrete at 28days to that at early age are also investigated. According to experimental results, it is found that good agreements are obtained between measured values and calculated ones using logistic model below 20 °C. Strength ratio of concrete at 28days to that at early age increases in case W/B decreases and curing temperature increases. Tables and graphs for strength ratio of concrete are provided in this paper. It is capable of obtaining and predicting the periods to attain design strength by considering increment factor of strength easily with the table and graphs presented in this paper. This paper presents the reference data to decide removal time of form, time to reach target strength and strength inspection of remicon whether the test specimens meet the specified criteria of compressive strength. Multi regression models with respect to the relationship between 7days compressive strength and 28 days compressive strength depending on W/B and admixture types are presented.

키워드 : 강도증진, 적산온도, 로지스틱모델, 강도비, 혼화제

Key words : Strength Development, Maturity, Logistic Model, Strength Ratio, Admixture

## 1. 서론

콘크리트의 압축강도는 시멘트의 수화 반응에 의하여 발현 되는 것으로 이러한 수화반응은 온도에 민감한 영향을 받게 된다.

또한, 압축강도는 품질관리 상 가장 중요한 품질특성 인자 중의 하나로서 이러한 콘크리트의 압축강도는 부어넣은 후 28 일에 측정할 강도 값으로 그 품질의 양부를 평가하는 기준이 된다.

따라서 실무건축공사 현장에서 재령 28일의 압축강도를 미리 확인할 수 있고, 그에 대한 체계적인 자료가 제시되어 있을 경우에는 강도시험 이전에 설계기준강도 및 호칭강도의 발취 시점, 양생기간의 결정 그리고 거푸집 제거시기의 결정 등을 미리 예측할 수 있으므로 그에 따르는 공기의 단축, 원가절감 및 레미콘의 압축강도 검사 합격여부의 평가자료를 얻을 수 있어 보다 과학적인 품질관리가 가능할 수 있을 것으로 사료된다.

더욱이 겨울철과 같은 저온환경 조건의 경우 온도조건에 따른 초기강도 발현 성상은 품질관리상 매우 중요한 포인트로 인

식되고 있고, 특히, 플라이애시나 고로슬래그와 같은 광물질 혼화제를 사용함에 따른 저온조건에서의 초기강도 저하는 커다란 관심사로 대두되고 있는 실정이다.

그러나 우리나라 실무 건축공사 현장에서는 이에 대한 충분한 연구 자료의 미비, 실무담당자들의 인식 부족과 아울러 각 레미콘사별로 배합강도 결정시 활중계수에 차이가 존재하기 때문에 재령 28일 전후를 대상으로 한 강도를 미리 예측하기가 곤란한 실정이고, 과학적 방법에 의한 접근보다는 경험적 사실에 입각한 대처로 많은 어려움을 겪고 있다.

그러므로 본 연구에서는 혼화제 종류, W/B 및 양생온도 변화에 따른 콘크리트의 강도증진성상을 적산온도 방법으로 해석한 후, 이를 이용하여 재령 28일의 강도에 대한 초기재령하에서의 각 재령별 강도비를 산정, 검토하므로써 실무건설현장에서 저온조건에서 콘크리트의 초기 압축강도의 평가 및 예측과 연관한 품질관리에 한 참고자료를 제시하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같고, 배합사항은 표 2와 같다.

\*청주대학교 건축공학부 전임강사, 공학박사

표 1. 실험요인 및 수준

실험요인		수준	
배합 사항	W/B(%)	4	30, 40, 50, 60
	결합재	3	·OPC ·FAC (플라이애시 30%치환) ·BSC (고로슬래그 30%치환)
	목표 슬럼프	2	·210±10mm(W/B 30, 40%) ·180±10mm(W/B 50, 60%)
	목표 공기량	1	4.5±1.5 (%)
	양생온도(°C)	3	5, 10, 20
실험 사항	굳지 않은 콘크리트	2	슬럼프, 공기량
	경화 콘크리트	1	압축강도

표 2. 콘크리트의 배합표

구분	W/B (%)	S/A (%)	AE/C (%)	SP/C (%)	W (kg/m³)	용적배합(ℓ/m³)			
						C	F.A	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
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
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 고로슬래그를 혼합한 결합재의 용적임  
\*\*는 AE 감수제를 의미함

W/B는 30, 40, 50, 60%의 4수준으로 계획하였고, 결합재는 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 30%치환하였다.

## 2.2 사용재료

본 연구에 사용한 결합재의 경우 보통포틀랜드 시멘트 및 고로슬래그 시멘트는 국내산 S사제를 사용하였고, 플라이애시는 충남 보령 화력산을 사용하였다. 골재로써 잔골재는 충남 병천산 강모래를 사용하였고, 굵은 골재는 충북 괴산산 20mm 화강암 부순 굵은 골재를 사용하였다. 각각의 물리적 성질은 표 3~표 5와 같다.

유동성 및 공기량 확보를 위하여 사용되는 혼화제는 멜라민계 고성능 감수제와 Sodium Lauryl Sulfate계 AE제, 나프탈렌계 AE감수제를 사용하였는데, 물리적 성질은 표 6과 같다.

표 3. 시멘트의 물리적 성질

시멘트	응결시간		압축강도 (MPa)			분말도 (cm²/g)	밀도 (g/cm³)	안정도 (%)	강열감량 (%)
	초결 (분)	종결 (분)	3일	7일	28일				
OPC	237	341	24	30	34	3,412	3.15	0.05	0.9
BSC	250	460	18	27	39	3,720	2.94	0.08	0.8

표 4. 플라이애시의 물리적 성질

밀도 (g/cm³)	분말도 (cm²/g)	압축강도비 (%)	SiO₂ (%)	강열감량 (%)	습분 (%)
2.23	3,519	97	97	3.4	0.3

표 5. 골재의 물리적 성질

골재의 종류	밀도 (g/cm³)	조립율	흡수율 (%)	단위용적 질량 (kg/m³)	공극율 (%)
굵은 골재	2.69	6.80	1.15	1,647	40.80
잔골재	2.58	2.43	1.90	1,502	42.13

표 6. 혼화제의 물리적 성질

구분	주성분	형태	색상	밀도
고성능 감수제	술폰산 멜라민계	분말	흰색	1.01
AE제	Synthetic Tensides	액상	암갈색	1.02
AE 감수제	나프탈렌계	액상	암갈색	1.14

## 2.3 실험방법

콘크리트의 혼합, 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프, 공기량 시험 및 경화 콘크리트의 압축강도시험은 KS 규격에 의거 실시하였고, 압축강도 측정재령은 표 7과 같다.

표 7. 압축강도측정 재령 및 적산온도

W/B (%)	양생온도 (°C)	압축강도 측정재령 및 적산온도								
		2	6	14	28	42	56	110	182	
30	5	일	30	90	210	420	630	840	1725	2730
	° DD	30	90	210	420	630	840	1725	2730	
40	10	일	15	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	

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 적산온도에 따른 강도증진해석

본 연구에서 적용한 적산 온도식은 현행 KASS-5에 규정되어 있는 식(1)을<sup>1)</sup>, 강도증진해석을 위한 해석모델은 鎌田<sup>2)</sup>에 의한 식(2)의 로지스틱 모델식을 적용하였다.

$$M = \sum_{z=1}^n (\theta_z + 10) \quad \dots (1)$$

여기서, z:재령(일)

n:구조체 콘크리트의 강도관리 재령(일)

θ z:재령 z(일)에 있어서 콘크리트의 일평균 양생온도(°C)

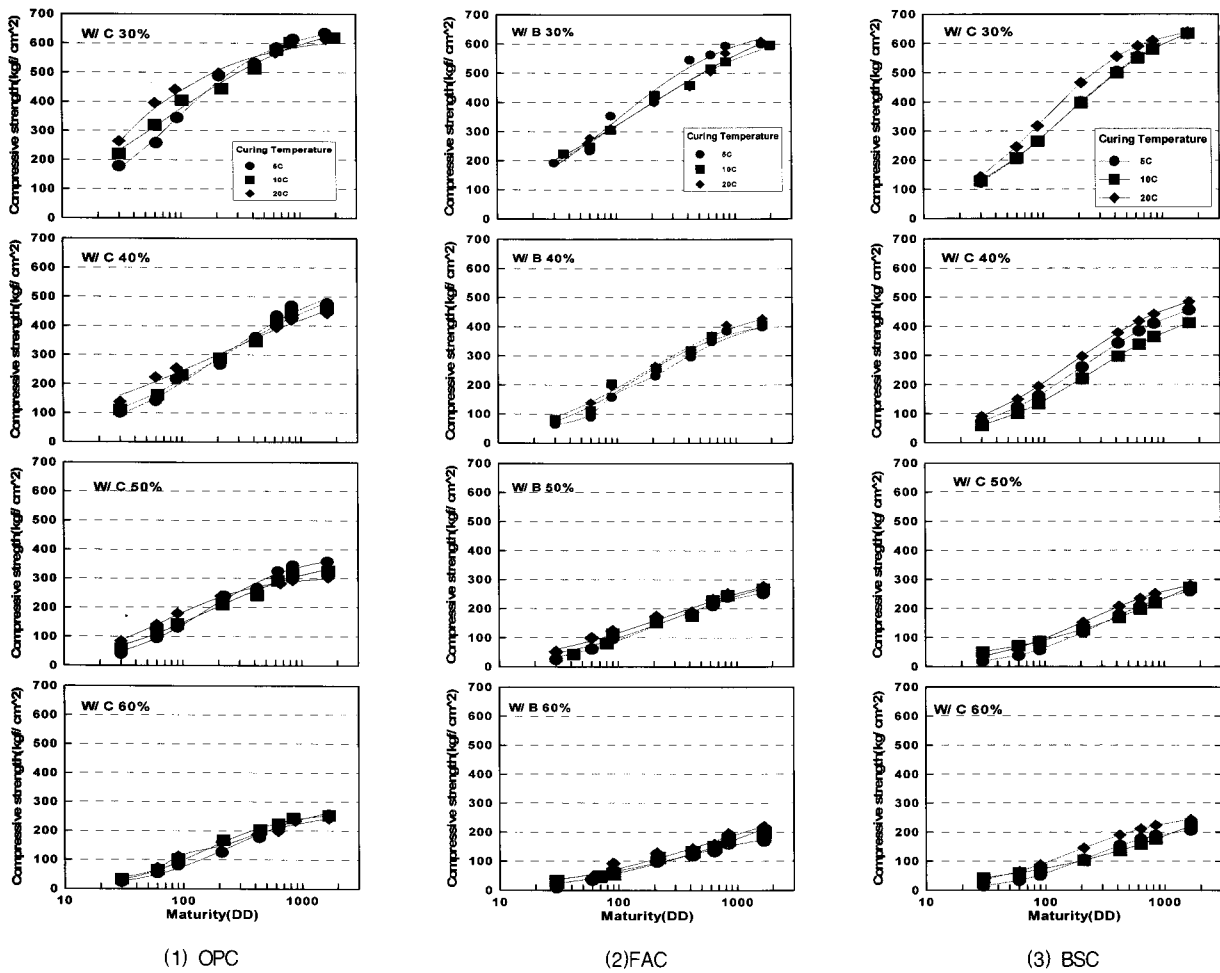


그림 1. 혼화재 종류별 적산온도경과에 따른 강도증진 성상

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

여기서,  $F_\infty$  : 최종도달강도(MPa)

$k, m$  : 실험상수

그림 1은 로지스틱 모델식을 이용한 강도증진성상을 나타낸 것이다.

전반적으로 양생온도 20°C 이하에서는 동일적산온도의 경우 양생온도별로 유사한 강도증진을 보임을 알 수 있다.

한편, 로지스틱 모델식을 이용한 강도증진 해석 결과 시멘트의 종류나 양생온도에 관계없이 결정계수가 0.95~0.98정도이

고, 표준오차는 0.5~2.5MPa 정도로 나타나고 있는데, 실험에 의하여 측정된 값과 로지스틱 모델 식에 의해 예측된 값이 비교적 양호한 추정 정밀도를 갖는 것으로 나타났다.

그림 2는 W/B별 로지스틱 모델식의 실험상수를 결정하기 위한 절차를 나타낸 것이고, 표 8은 그림 2의 절차를 통하여 산정된 W/B별 로지스틱 곡선식의 실험상수치를 나타낸 것이다. 전반적으로 최종 도달 강도는 W/B가 증가할수록 감소하고 있으며 계수  $k, m$ 은 증가하는 경향으로 나타났다.

한편, 그림 3은 로지스틱 모델 식에 의하여 일체화된 실험상수 값을 이용한 시멘트 종류별 콘크리트의 강도증진 경향을

표 8. 로지스틱모델의 실험상수값

실험 상수값	OPC								FAC								BSC							
	W/B(%)								W/B(%)								W/B(%)							
	30	35	40	45	50	55	60	30	35	40	45	50	55	60	30	35	40	45	50	55	60			
$F_\infty$	697	584	499	431	379	335	300	675	570	492	431	382	342	309	693	592	516	457	410	371	339			
$k$	1.76	1.95	2.11	2.21	2.31	2.38	2.45	1.82	1.84	1.85	1.86	1.87	1.87	1.88	2.21	2.19	2.19	2.18	2.18	2.17	2.17			
$m$	3.24	3.88	4.38	4.75	5.06	5.31	5.51	3.14	4.01	4.29	4.51	4.68	4.82	4.94	4.72	4.98	5.18	5.33	5.46	5.56	5.64			

나타낸 것이다.

전반적으로 FAC 및 BSC를 사용한 콘크리트는 초기적산온도에서 OPC보다 낮은 강도증진을 보이나 적산온도가 경과함에 따라 포졸란 반응 및 잠재수경성 반응에 의하여 OPC의 강도와 비슷하거나 유사한 수준으로 회복함을 알 수 있었다.

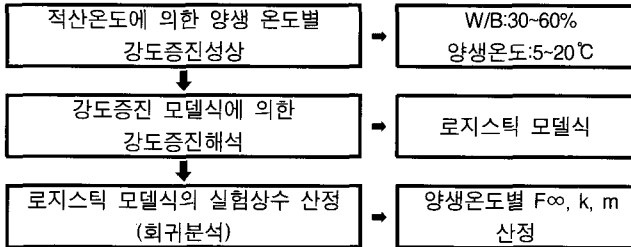


그림 2. 로지스틱 곡선식에 의한 강도증진해석절차

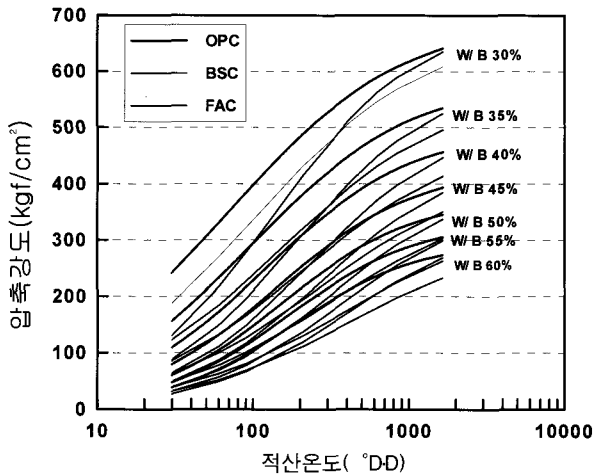


그림 3. 적산온도에 따른 콘크리트의 강도증진성상

### 3.2 재령 28일의 강도에 대한 강도비

그림 4는 W/B 및 혼화재료를 사용한 콘크리트의 7일 및 28일 강도를 나타낸 것이고, 표 9 및 그림 5는 W/B별로 재령 28일 강도에 대한 여타 초기재령에서의 강도비를 시멘트 종류 및 양생온도별로 구분하여 나타낸 것이다.

먼저, 혼화재 종류별로는 OPC를 사용한 경우 양생온도가 높아질수록, W/B가 감소할수록 초기재령에서의 강도비는 높아지는 것으로 나타났으나, 재령 28일 이후의 강도비는 오히려 양생온도가 낮을수록, W/B가 높을수록 증가하는 강도비의 역전 현상을 보였다.

반면에 FAC 및 BSC를 사용한 경우는 전반적으로 OPC에 비하여 초기재령에서의 강도비는 작게 나타나고 있었는데, 재령 7일에서의 강도비는 OPC의 경우 64~80%로 나타난 반면, FAC 나 BSC의 경우는 52~76%정도 수준을 보이고 있었다.

그러나, 재령 28일 이후의 강도비는 오히려 OPC의 경우보다 커짐을 알 수 있는데, 이는 플라야이시 및 고로슬래그의 포졸란 반응 및 잠재수경성 반응에 기인된 결과로 사료된다.

동일재령에서 W/B별로 강도비의 차이를 검토한 결과 초기 재령의 경우는 커다란 차이를 보이고 있으나, 재령이 경과함에

그 차이가 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 재령 3일에서는 OPC의 경우 약간의 차이는 있으나 W/B별로 약 25%정도 강도비의 차이가 있으나, 재령 21일에서는 약 5%정도의 차이만을 나타내었다.

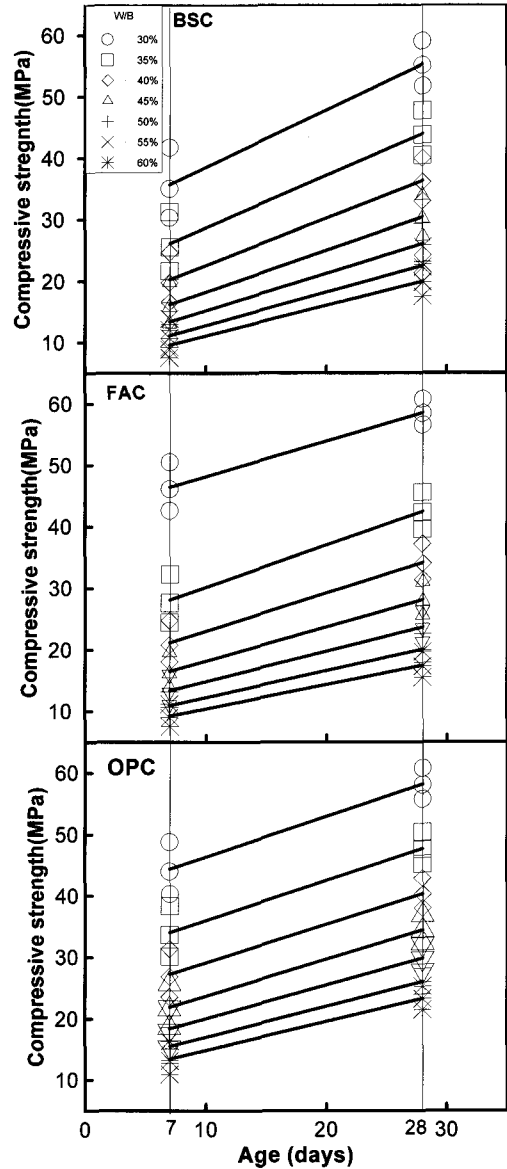


그림 4. 7일강도와 28일강도의 관계

한편, 실무건축공사 현장에서 재령 28일의 강도값은 설계기준강도에 증가계수를 고려한 배합강도의 값으로서 역으로 각 레미콘사의 증가 계수값을 알게 될 경우 이를 이용하여 설계기준강도를 구할 수 있는데, 본 연구의 그림 5를 이용하면 설계기준강도가 발휘되는 시점을 역산하여 알 수 있게 된다.

일예로 레미콘사의 증가계수가 1.2일 경우 이를 28일에서의 강도 값으로 나누면 28일 강도의 83%정도가 발휘되는데, 이 값이 설계기준강도가 되고 이를 그림 5에서 해당강도비가 얻어지는 재령을 산정하면 W/B별로 설계기준강도 발휘시점을 얻을 수 있게 된다.

이 결과를 이용할 경우 설계기준강도가 발휘되는 시점을 미리 알 수 있으므로 하부 거푸집 존치기간의 산정이나 설계기준

표 9. 시멘트 및 W/B에 따른 재령 28일 강도에 대한 각 재령별 강도증진율

양생 온도 (°C)	구 분		OPC								FAC								BSC													
			W/B(%)								W/B(%)								W/B(%)													
			30	35	40	45	50	55	60	30	35	40	45	50	55	60	30	35	40	45	50	55	60									
5	재령 (일)	적산온도 (DD)	1	3	7	14	21	28	35	42	56	91	1	3	7	14	21	28	35	42	56	91	1	3	7	14	21	28	35	42	56	91
	15	45	105	210	315	420	630	840	1365	20	60	140	280	420	560	840	1120	1820	30	90	210	420	630	840	1260	1680	2730					
	29	52	72	87	95	100	105	109	113	33	56	75	89	96	100	104	107	111	39	63	80	91	96	100	103	105	108					
	21	44	66	84	94	100	107	109	116	25	48	70	87	95	100	106	107	111	56	80	96	98	98	100	104	106	107					
	17	38	61	82	93	100	108	109	118	20	43	66	85	94	100	107	107	112	31	50	73	88	95	100	105	108	111					
	11	33	58	80	92	100	109	109	122	14	35	58	82	93	100	108	108	113	19	40	66	86	94	100	105	108	112					
	10	28	55	80	91	100	109	111	124	12	32	56	80	92	100	108	108	113	16	38	64	85	94	100	105	108	112					
	9	26	50	80	91	100	111	111	125	11	31	56	80	92	100	106	106	111	15	35	64	85	94	100	105	108	112					
	24	46	66	84	93	100	110	114	128	30	52	72	83	93	100	107	107	112	27	49	70	86	97	100	105	109	114					
19	39	61	81	92	100	109	114	128	22	43	65	81	92	100	109	109	116	23	44	70	87	93	100	105	109	117						
16	35	57	81	91	100	111	118	133	17	39	61	79	90	100	109	110	116	20	41	66	84	92	100	105	109	117						
15	32	54	81	90	100	112	121	137	15	33	57	77	90	100	109	111	116	18	38	63	82	92	100	105	109	117						
14	30	51	81	90	100	115	125	141	14	31	55	75	90	100	109	113	117	17	36	63	82	92	100	105	109	117						
13	28	50	81	90	100	115	127	144	13	31	53	74	90	100	109	114	119	16	34	61	80	91	100	105	109	117						
12	27	48	50	88	92	100	116	144	12	30	51	74	90	100	109	114	121	16	34	61	80	91	100	105	109	117						
14	29	47	53	88	92	100	116	144	14	30	51	74	90	100	109	114	121	18	37	61	80	91	100	105	109	117						
12	27	47	53	88	92	100	116	144	12	30	51	74	90	100	109	114	121	16	34	61	80	91	100	105	109	117						
10	27	47	53	88	92	100	116	144	10	27	47	72	92	100	109	114	121	14	34	61	80	91	100	105	109	117						
9	26	47	53	88	92	100	116	144	9	26	47	72	92	100	109	114	121	14	34	61	80	91	100	105	109	117						
8	25	47	53	88	92	100	116	144	8	25	47	72	92	100	109	114	121	14	34	61	80	91	100	105	109	117						
8	25	47	53	88	92	100	116	144	8	25	47	72	92	100	109	114	121	14	34	61	80	91	100	105	109	117						

강도를 이용한 콘크리트의 강도관리가 용이해짐에 따라 공기의 단축은 물론 원가절감 및 보다 과학적인 품질관리가 가능할 것으로 사료된다.

또한, 본 자료를 이용할 경우 재령 28일에서 레미콘의 압축 강도검사 결과가 불합격되었을 경우는 91일 강도의 예측이 가능할 수 있어 구조 계산없이 대상전물의 사용여부를 쉽게 결정할 수 있다.

### 3.3 7일 압축강도를 이용한 28일 압축강도 추정식 제안

표 10은 표 9 및 그림 5를 토대로 7일 강도와 W/B를 이용하여 28일 강도를 추정하기 위한 중회귀 분석결과를 나타낸 것이다. 표 10을 이용하면, 혼화재 종류별로 7일강도와 W/B를 해당식에 대입할 경우 28일 강도를 추정할 수 있게 된다.

한편, 본 연구에서 얻어진 회귀식은 결정계수 0.91이상의 양

호한 상관성을 갖는 것으로 나타났다.

표 10. 7일 강도에 의한 28일 강도 추정식

구분	회귀식	결정계수
OPC	$f_{28} = 0.14f_7 - 99.27W/C + 78.24$	0.913
FAC	$f_{28} = 0.69f_7 - 51.13W/B + 40.59$	0.960
BSC	$f_{28} = 0.93f_7 - 36.66W/B + 32.31$	0.995

여기서,  $f_{28}$  : 28일 강도(MPa)

$f_7$  : 7일강도(MPa)

W/B : 물결합재비

그림 6은 표 10을 이용하여 혼화재 종류 및 W/B에 따른 7일

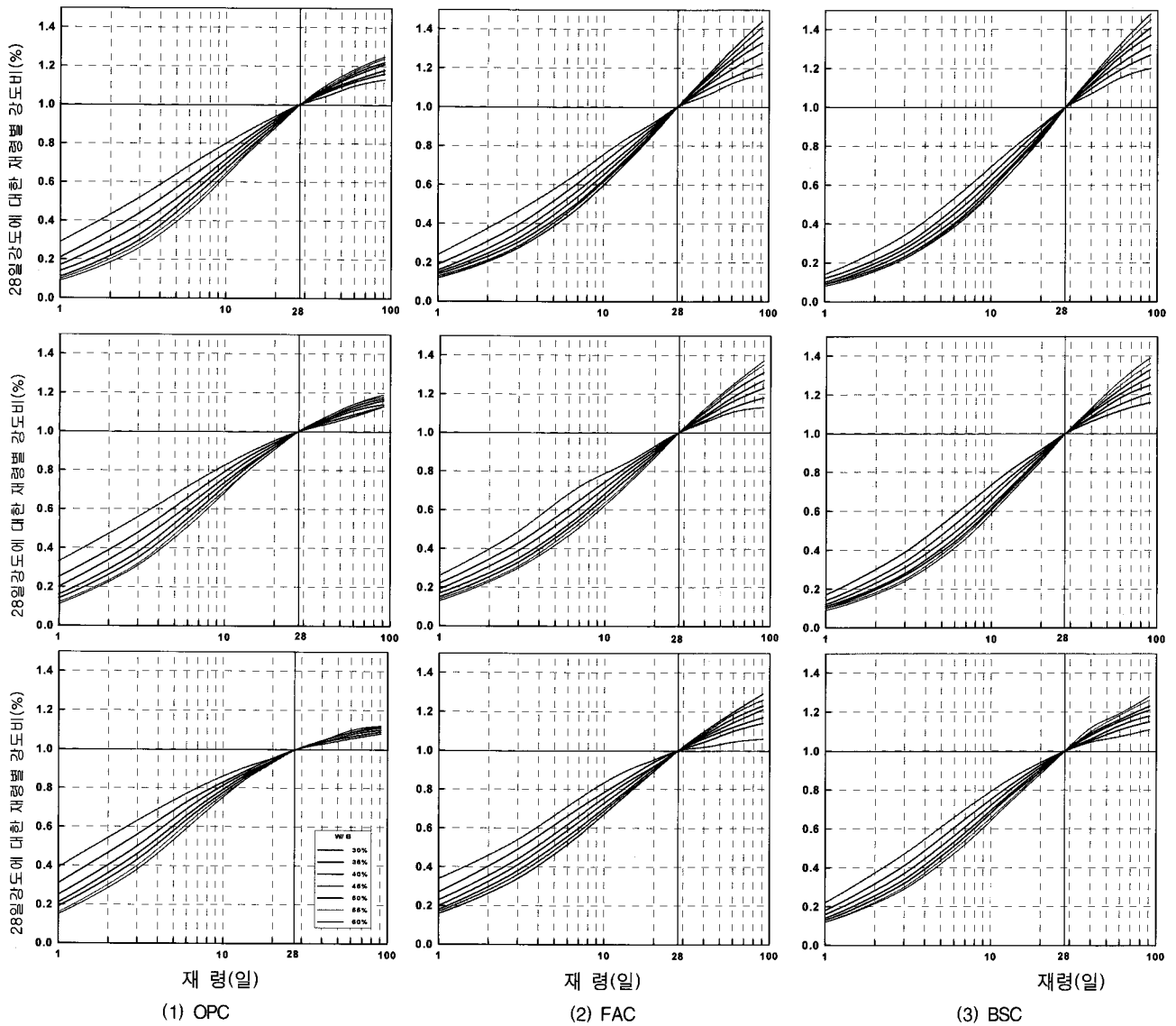


그림 5. 결합재 종류 및 W/B별 재령 28일의 강도에 대한 여타재령에서의 강도비

강도를 이용한 28일 강도 추정에 대한 그래프를 나타낸 것이다.

전반적으로 OPC를 사용한 경우 7일 강도에 대한 28일강도 발현이 크지 않음을 알 수 있으나, FAC나 BSC의 경우 OPC보다 높은 강도발현을 보이고 있다. 이는 FAC 및 BSC의 경우 7일강도가 OPC에 비해 비교적 낮게 발현되어 28일 강도와 비교할 경우 발현 폭이 상대적으로 크게 나타나기 때문으로 사료된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 저온조건에서 혼화재 종류 및 W/B별 적산온도에 따른 강도증진해석을 실시한 후, 이를 토대로 재령 28일의 강도에 대한 각 재령별 강도 비를 검토하고자 하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 로지스틱 모델에 의한 강도증진해석결과 OPC를 사용한 콘크리트는 초기재령에서 FAC나 BSC를 사용한 경우보다

평균적으로 10~15%정도 높은 강도를 보이는 것으로 나타났다.

2) 재령 28일의 강도에 대한 여타재령의 강도 비는 W/B가 작을수록, 양생온도가 높을수록 그리고 OPC를 사용한 경우가 초기재령에서 높은 강도 비를 유지하는 것을 알 수 있었다.

3) 본 연구의 표 9 및 그림 5를 이용할 경우 재령 28일의 강도로부터 설계기준강도의 발현시점을 미리 알 수 있어 적기의 하부거푸집 탈형 시기의 결정으로 공기의 단축 및 이에 따른 원가절감과 불합격 공시체의 평가에 자료를 얻을 수 있는 등 레미콘의 양호한 품질관리가 가능할 것으로 사료된다.

4) 본 연구에서는 표 10 및 그림 6을 이용하여 혼화재료 종류 및 W/B에 따라 7일 압축강도를 이용하여 28일 압축강도를 추정할 수 있는 모델식을 중회귀 분석을 통하여 제안하였다.

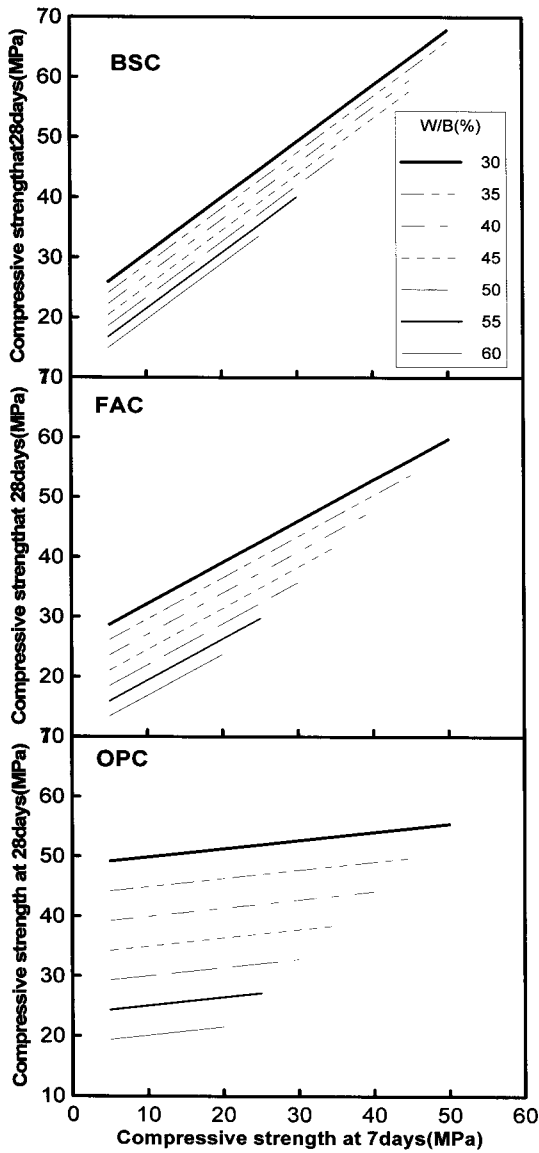


그림 6. 7일 강도에 의한 28일강도 추정

### 참고 문헌

1. 대한건축학회, 건축공사표준시방서, 2006
2. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서, 2003
3. 한천구, 한민철, 윤치환, 윤기원, 양생온도변화에 따른 플라이애쉬 혼입콘크리트의 강도증진성상, 대한건축학회 학술발표논문집, 1999. 5
4. 한천구, 한민철, 적산온도방식의 콘크리트 강도증진해석에 의한 기온보정강도의 검토, 대한건축학회 논문집 구조계, 15권 11호, pp.71-78, 1999. 11.
5. ASTM C 618-96a, Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, 1997
6. Carino, N. J., Maturity Method; Theory and Application., Journal of Cement Concrete and Aggregate, ASTM, 1984
7. Plowman, J. M., Maturity and Strength of Concrete. Magazine of Concrete Research (London), Vol. 8, No. 22, Mar. 1956, pp. 13-22
- 8.鎌田英治, 洪悅郎, 林直樹, 寒中콘크리트를對象とした콘크리트強度増進曲線の検討, セメント技術年報, 1990.
9. 日本建築學會, 寒中콘크리트施工指針·同解説, 1998.
10. 韓千求, 洪悅郎, 鎌田英治, 吉野利幸, 桂修, 高强度콘크리트의壓縮強度増進性狀에關する研究,(平均養生溫度 による寒中콘크리트의強度補正值の提案,日本建築學會大會學術講演論文集, 1992.
11. 韓千求, 浜幸雄, 鎌田英治, 耐寒劑を使用した콘크리트의積算溫度關數式の検討, 自然環境と콘크리트性能에關するシポジウム論文集, 1993.5
12. 日本建築學會, 建築工事標準示方書·同解説(JASS 5, 鐵筋콘크리트工事), pp191-195.
13. 寺田米男, 各種セメントを用いたモルタル콘크리트の強度推定方法について,セメント技術年報, Vol. 35.
14. 笠井芳夫, 콘크리트의初期強度初期養生에關する研究, 學位論文.
15. 友澤史紀, 콘크리트의促進養生とその建築生産工業化への利用-第Ⅲ編 콘크리트の強度發現關する速度論的研究, 學位論文.
16. 金武漢·洪悅郎·鎌田英治, 모르탈および콘크리트의積算溫度と壓縮強度發現에關する實驗的研究, 日本建築學會構造系論文報告集, No. 355.