

초기양생온도에 따른 시멘트 모르타르의 강도발현에 관한 기초적 연구

A Fundamental Study on the Strength Development in Cement Mortar under Initial Curing Temperature

백 민 수*	이 영 도**	임 남 기**	김 성 식**
Paik, Min Su	Lee, Young Do	Lim, Nam Gi	Kim, Sung Sik
	이 종 균**	최 문 식***	정 상 진***
	Lee, Jong Kyun	Choi, Mun Shik	Jung, Sang Jin

ABSTRACT

In this experiment, there is a purpose to analysis the relationship of featureof compressive strength after fixing of remarkable element under the condition of initial curing temperaturer.

Accoring to this experiment, we get tothe fallow result. In case of highest curing temperature, 3-day-strength become high but last revelation of strength become low. among the condition of initial curing temperature, the highest curing temperature have an effect on revelation of strength by the application of cumulative temperature, we can get the shape of revelation of strength.

keywords : initial curing temperature, high curing temperature, cumulative temperature

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

콘크리트는 화학반응의 일종인 시멘트의 수화반응에 의존하여 강도발현을 일으킨다. 이 때 시멘트의 수화반응은 양생온도의 차이에 영향을 받아 강도발현을 증가 또는 저하시킨다. 최근들어 콘크리트 구조물은 구조 수요의 증대와 구조해석 기법 및 설계 기술의 발달로 대형화 하는 경향이 있다.

-
- 1) * 정희원, 단국대학교 대학원 석사과정
 - 2) ** 정희원, 단국대학교 대학원 박사과정
 - 3) *** 정희원, 단국대학교 건축공학과 교수, 공학박사

콘크리트 구조물이 대형화 됨에 따라 콘크리트 경화시 부재 내부에서 발생하는 수화열의 축적량이 증가하고 이로 인하여 타설후 초기에 고온의 온도작용을 받게된다. 이와같이 시멘트의 수화열이나 주위의 온도변동으로 등은 구조물에 큰 온도응력을 유발하고 콘크리트의 강도발현에 특이한 성상을 나타나게 한다.

본 연구에서는 초기 양생에 있어서 대표적인 요인을 설정하여 초기양생온도조건과 압축강도의 관계를 제시하며, 초기양생온도가 압축강도에 미치는 영향을 파악하는데 목적이 있다.

2. 실험

2.1 사용재료

(1) 시멘트

본 실험에서 사용한 시멘트는 KS L 5201에 규정된 국내산 S사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다.

(2) 골재

본 실험에 사용된 골재는 KS L 5100에 규정되어 있는 주문진산 표준사를 사용하여 골재의 입도에 의한 실험편차를 줄이도록 하였다.

2.2. 시험체의 배합

본 실험에서는 표준사와 시멘트를 사용하여 모르타 시험체를 제작하였다. 콘크리트 시험체 사용을 배제한 것은 콘크리트에 포함되어 있는 입도와 비중이 서로 다른 조골재입자의 열팽창, 열전도율로 인한 영향을 배제하기 위함이다.

모르타의 배합계획은 W/C 45%, 60%로 목표 플로우 $140 \pm 10\text{mm}$ 를 발휘하도록 시험비빔을 통하여 결정하였다. 모르타의 배합은 표준사와 시멘트를 흙손으로 건비빔한 후 물을 투입하여 KS L 5105에 의한 모르타 비빔기를 사용하여 약 3분간 비빔을 한 후 공시체를 만들었다. 공시체는 KS L 3503의 $4\text{cm} \times 4\text{cm} \times 16\text{cm}$ 의 3연형 강제물드를 사용하였다. 모르타 배합을 표 1에 나타내었다.

표 1. 모르타 시험체의 배합비

W/C 비 (%)	C : S 비	중량배합 (kg/m ³)			용적배합 (ℓ/m ³)		
		시멘트	물	골재	시멘트	물	골재
45%	1 : 2	651	293	1302	206.6	293	500.4
60%	1 : 3	483	290	1449	153.5	290	557.5

2.3 실험방법

시험체는 제작 직후 양생기에 5일간 증기 양생을 실시하고 이 후 소정의 재령까지 표준 수중양생을 실시하였다. 양생기 양생시에 온도조건을 4가지로 설정하여 이 초기양생온도 조건에 맞추어 양생하였다. 온도조건은 A: 최고온도 변화, B: 타설온도 변화, C: 온도상승량을 통일시키고 타 요인을 조작한 온도변화, D: 최고온도 도달재령의 변화로 초기온도 환경을 설정하였다

초기양생 조건의 그래프를 그림 1에 나타내었다. 시험체는 소정의 재령에서 압축강도 실험을 실시하였다.

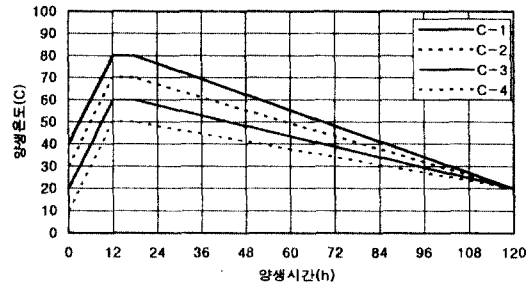
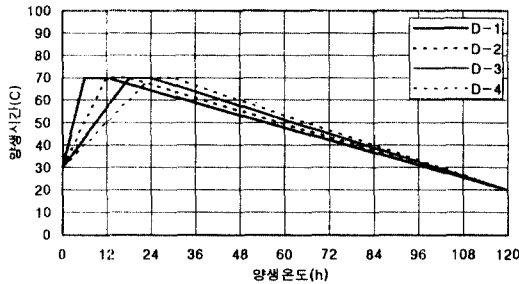
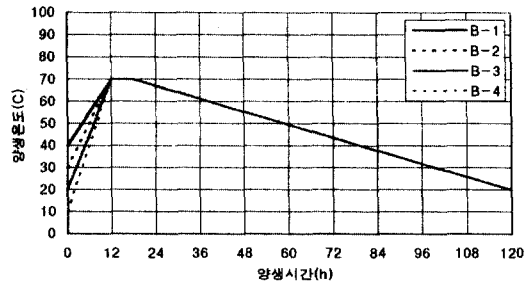
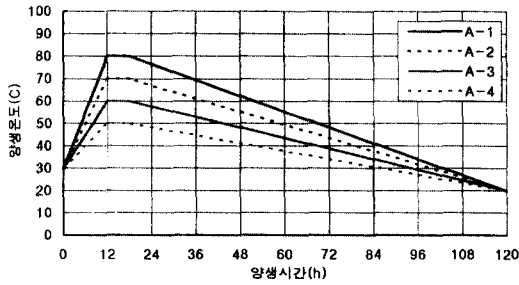


그림 1. 초기양생온도 조건

3. 실험결과 및 고찰

3.1 초기온도조건과 강도발현성상

표 2는 모르타 시험체의 재령경과에 따른 압축강도를 나타내고 있다.

초기온도환경 A의 경우 양생최고온도가 80°C인 시험체에서는 초기에 높은강도 발현을 나타내고 있으나 시간이 경과함에 따라 강도의 증가는 둔해지고, 최고양생온도가 감소할수록 초기강도는 작으나 지속적인 강도증가를 나타내고 있다.

초기온도환경 B의 경우 타설온도 30°C, 40°C시험체가 초기강도가 우수하게 발현되나 시간이 경과함에 따라 강도의 증가는 둔해지고 28일강도는 타설온도가 낮은 시험체가 더 크게 발현된다.

초기온도환경 C의 경우 강도발현은 A의 경우와 유사하게 나타나고 있어 최고온도에 의해 지배를 받는 것으로 사료된다.

초기온도환경 D의 경우 최고온도도달재령이 빠른 시험체가 초기강도가 크게 발현되나, 최고온도도달재령이 늦은 시험체가 28일 강도는 우수하게 나타나고 있다. 그러나 다른 온도이력인자에 비해 유사한 강도발현성상을 나타내고 있다.

시험체의 강도결과를 표준양생 시험체의 28일 강도를 100으로한 강도비로 나타내어 아래의 식에 의해 회귀분석하였다.

$$F = A \log t + B$$

F : 표준양생 28일 강도에 대한 강도비

t : 재령 (일)

표 2. 모르터 시험체의 재령경과에 따른 압축강도

시험체명	3일	7일	28일	시험체명	3일	7일	28일
A-1-45	302	322	342	A-1-60	190	201	239
A-2-45	283	321	352	A-2-60	181	201	241
A-3-45	258	321	367	A-3-60	153	188	254
A-4-45	225	304	377	A-4-60	133	188	269
B-1-45	280	313	332	B-1-60	182	192	232
B-2-45	283	321	352	B-2-60	181	201	241
B-3-45	271	317	354	B-3-60	169	193	242
B-4-45	254	326	379	B-4-60	157	202	264
C-1-45	259	301	327	C-1-60	167	181	204
C-2-45	283	321	352	C-2-60	181	201	241
C-3-45	242	325	359	C-3-60	156	208	240
C-4-45	193	277	359	C-4-60	127	165	238
D-1-45	279	288	345	D-1-60	169	187	227
D-2-45	283	321	352	D-2-60	181	201	241
D-3-45	279	313	362	D-3-60	172	204	249
D-4-45	267	329	371	D-4-60	152	211	250
S-45	170	256	382	S-60	117	176	276

표 3. 회귀계수 A·B

시험체명	A	B	시험체명	A	B
A-1-45	10.59	74.52	A-1-60	18.74	58.78
A-2-45	18.12	66.69	A-2-60	22.57	54.40
A-3-45	28.49	56.25	A-3-60	37.92	36.85
A-4-45	40.11	42.03	A-4-60	50.59	24.56
B-1-45	13.31	68.75	B-1-60	19.21	55.46
B-2-45	18.12	66.69	B-2-60	22.57	54.40
B-3-45	21.78	62.09	B-3-60	27.48	47.58
B-4-45	32.68	53.51	B-4-60	39.70	38.71
C-1-45	17.66	61.10	C-1-60	13.82	53.91
C-2-45	18.12	66.69	C-2-60	22.57	54.40
C-3-45	29.93	53.17	C-3-60	30.19	45.07
C-4-45	43.91	31.80	C-4-60	41.70	25.51
D-1-45	18.49	62.51	D-1-60	20.89	51.49
D-2-45	18.12	66.68	D-2-60	22.57	54.40
D-3-45	22.28	62.68	D-3-60	29.61	47.78
D-4-45	27.10	59.37	D-4-60	35.32	41.42
S-45	56.98	17.91	S-60	59.47	13.82

회귀계수 A는 시험체의 강도증진성을 나타내고, 회귀계수 B는 시험체 초기강도의 크기를 나타낸다. 회귀 계수 A, B를 표3에 나타내었다.

회귀분석에 의해 산출된 회귀계수 A, B와 온도조건을 회귀분석하여 각 온도조건과 회귀계수와의 관계를 검토하였다. 회귀분석결과를 표 4에 나타내었다.

온도조건중 양생최고온도는 회귀계수 A에 대하여 W/C 45% 시험체에서 결정계수 0.846, W/C 60% 시험체에서 결정계수 0.766을 나타내고 있으며, 회귀계수 B에 대하여는 W/C 45%, 60%에서 각각 결정계수 0.865, 0.822의 높은 상관성을 나타내고 있다.

타설온도는 회귀계수에 대하여 결정계수 0.373~0.291의 상관성을 나타내며, 온도상승량의 경우 결정계수 0.336~0.256의 상관성을 나타내고, 최고온도도달재령의 경우 결정계수 0.229~0.071의 상관성을 나타낸다. 최고온도 이외의 온도조건은 회귀계수 A, B에 대한 결정계수가 0.5이하로서 회귀식에 대해 50%이상 설명이 되지 않는 상관성은 매우 낮은 것으로 판단된다.

표 4. 초기온도조건에 대한 회귀분석결과

W/C	초기온도조건	회귀계수 A (강도증진성) 결정계수 R ²	회귀계수 B (초기강도) 결정계수 R ²	W/C	초기온도조건	회귀계수 A (강도증진성) 결정계수 R ²	회귀계수 B (초기강도) 결정계수 R ²
45	타설온도	0.373	0.307	60	타설온도	0.307	0.291
	최고온도	0.846	0.865		최고온도	0.766	0.822
	온도상승량	0.280	0.256		온도상승량	0.336	0.311
	최고온도도달재령	0.146	0.229		최고온도도달재령	0.071	0.114

3.2 초기적산온도의 적용

양생최고온도가 강도발현에 가장 큰 영향을 미치는 요인이라는 점에 의하여 초기적산온도의 적용성을 검토하였다. 먼저 타설후 X일 까지의 적산온도를 아래식에 의해 구하였다.

$$M_{0-x} = \int_0^x \{\theta(t) + 10\} dt$$

$\theta(t)$: 재령 t(일) 시간동안
콘크리트의 평균양생온도

타설로부터 1일~28일간의 적산온도와 회귀계수 A, B와의 관계를 검토하였다. 표 5에 회귀분석결과를 나타내었다.

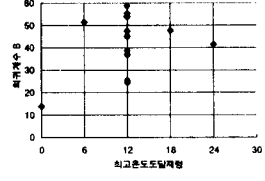
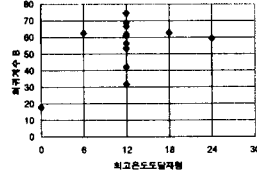
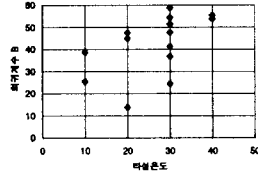
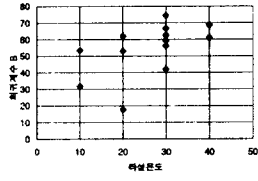
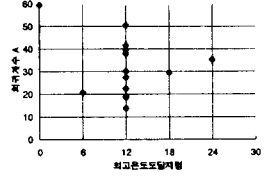
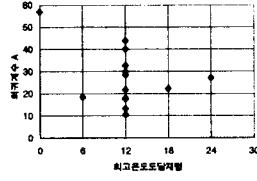
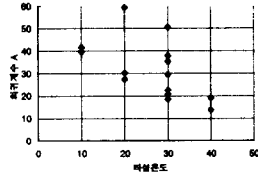
표 5. 적산온도에 대한 회귀분석결과

W/C	온도이력요인	회귀계수 A (강도증진성) 결정계수 R ²	회귀계수 B (초기강도) 결정계수 R ²	W/C	온도이력요인	회귀계수 A (강도증진성) 결정계수 R ²	회귀계수 B (초기강도) 결정계수 R ²
45	적산온도	1일	0.841	60	적산온도	1일	0.784
		1.5일	0.902			1.5일	0.867
		2일	0.889			2일	0.855
		3일	0.872			3일	0.839
		7일	0.862			7일	0.830
		28일	0.862			28일	0.830

분석에 의하면 적산온도와 회귀계수 A와는 W/C 45%시험체에서 결정계수 0.841이상의 높은 상관성을 나타내고 있다. 특히 타설 후 1.5일까지의 적산온도의 경우 결정계수 0.902로 가장 높은 상관성을 보이고 있다.

W/C 60%시험체의 경우 회귀계수 A와 0.775이상의 상관성을 보이며 타설 1.5일까지의 적산온도와 결정계수 0.888로 가장 높은 상관관계를 나타내고 있다. 회귀계수 B의 경우에도 W/C 45% 시험체에서 결정계수가 0.792이상이며 타설 1.5일까지의 적산온도에서 0.834로 가장 높은 상관성을 나타내며, W/C 60% 시험체의 경우에도 0.784이상의 결정계수를 나타내며 역시 타설 후 1.5일까지의 적산온도에서 결정계수가 0.867로 가장 높게 나타나고 있다. 적산온도와 회귀계수 A, B와의 상관관계는 타설 후 1.5일 까지의 적산온도와의 관계가 가장 큰 것으로 나타나고 있다.

초기온도조건과 회귀계수 A, B와의 관계를 그림 3에 나타내고 있다. 그림에 의하면 최고온도에 의하여 회귀계수 A, B가 지배되고 있는 것을 알 수 있다. 1.5일 까지의 적산온도(M_{0-1.5})를 이용한 그림에서 회귀계수 A, B와 깊은 상관관계를 나타내는 것을 파악할 수 있다.



W/C 45%

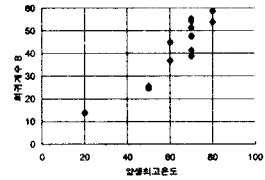
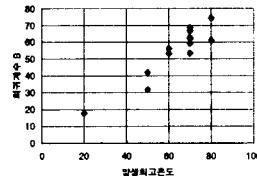
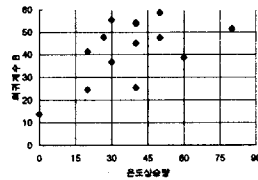
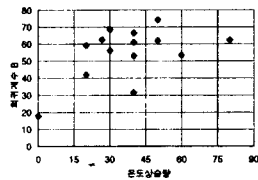
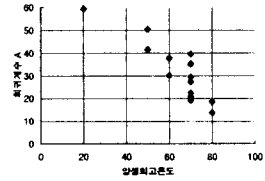
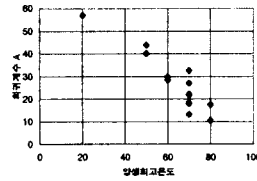
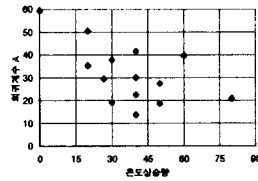
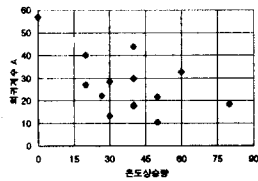
W/C 60%

W/C 45%

W/C 60%

a) 타설온도와 회귀계수와 관계

b) 최고온도도달계령과 회귀계수와 관계



W/C 45%

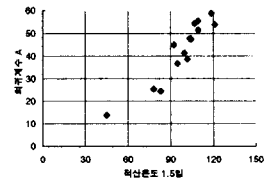
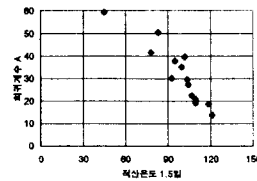
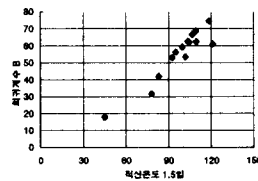
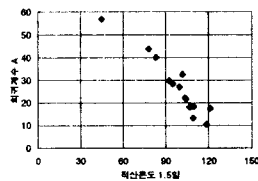
W/C 60%

W/C 45%

W/C 60%

c) 온도상승량과 회귀계수와 관계

d) 최고온도와 회귀계수와 관계



W/C 45%

W/C 60%

e) 적산온도와 회귀계수와 관계

그림 3. 초기온도조건과 회귀계수의 관계

3.2 초기적산온도의 적용

양생최고온도가 강도발현에 가장 큰 영향을 미치는 요인이라는 점에 의하여 초기적산온도의 적용성을 검토하였다. 먼저 타설후 X일 까지의 적산온도를 아래식에 의해 구하였다.

$$M_{0-x} = \int_0^x \{\theta(t) + 10\} dt$$

$\theta(t)$: 재령 t(일) 시간동안
콘크리트의 평균양생온도

타설로부터 1일~28일간의 적산온도와 회귀계수 A, B와의 관계를 검토하였다. 표 5에 회귀분석결과를 나타내었다.

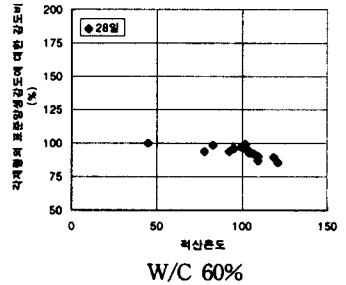
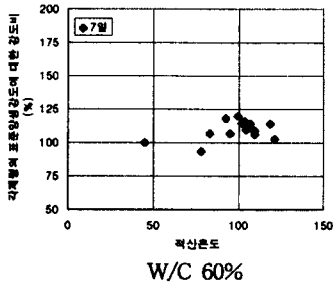
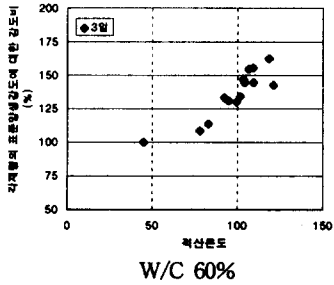
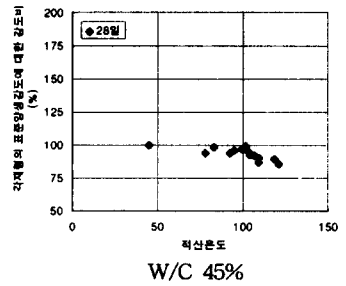
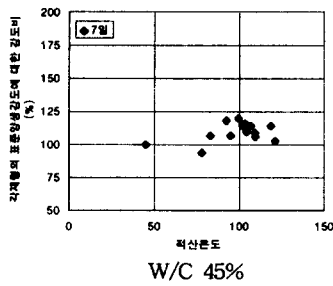
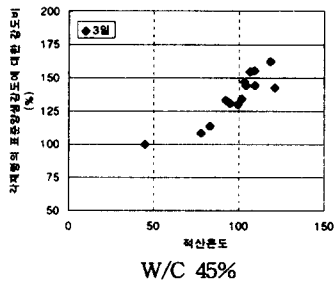
표 5. 적산온도에 대한 회귀분석결과

W/C	온도이력요인		회귀계수 A (강도증진성) 결정계수 R ²	회귀계수 B (초기강도) 결정계수 R ²	W/C	온도이력요인		회귀계수 A (강도증진성) 결정계수 R ²	회귀계수 B (초기강도) 결정계수 R ²
45	적산온도	1일	0.841	0.792	60	적산온도	1일	0.794	0.784
		1.5일	0.902	0.888			1.5일	0.834	0.867
		2일	0.889	0.888			2일	0.812	0.855
		3일	0.872	0.883			3일	0.788	0.839
		7일	0.862	0.879			7일	0.775	0.830
		28일	0.862	0.879			28일	0.775	0.830

분석에 의하면 적산온도와 회귀계수 A와는 W/C 45%시험체에서 결정계수 0.841이상의 높은 상관성을 나타내고 있다. 특히 타설 후 1.5일까지의 적산온도의 경우 결정계수 0.902로 가장 높은 상관성을 보이고 있다.

W/C 60%시험체의 경우 회귀계수 A와 0.775이상의 상관성을 보이며 타설 1.5일까지의 적산온도와 결정계수 0.888로 가장 높은 상관관계를 나타내고 있다. 회귀계수 B의 경우에도 W/C 45% 시험체에서 결정계수가 0.792이상이며 타설 1.5일까지의 적산온도에서 0.834로 가장 높은 상관성을 나타내며, W/C 60% 시험체의 경우에도 0.784이상의 결정계수를 나타내며 역시 타설 후 1.5일까지의 적산온도에서 결정계수가 0.867로 가장 높게 나타나고 있다. 적산온도와 회귀계수 A, B와의 상관관계는 타설 후 1.5일 까지의 적산온도와의 관계가 가장 큰 것으로 나타나고 있다.

초기온도조건과 회귀계수 A, B와의 관계를 그림 3에 나타내고 있다. 그림에 의하면 최고온도에 의하여 회귀계수 A, B가 지배되고 있는 것을 알 수 있다. 1.5일 까지의 적산온도(M_{0-1.5})를 이용한 그림에서 회귀계수 A, B와 깊은 상관관계를 나타내는 것을 파악할 수 있다.



a) 적산온도 $M_{0-1.5}$ 에서 3일 강도비 b) 적산온도 $M_{0-1.5}$ 에서 7일 강도비 c) 적산온도 $M_{0-1.5}$ 에서 28일 강도비

그림 4. 적산온도 $M_{0-1.5}$ 에서 각재령의 강도비

그림 4에서는 각재령에 의한 강도비와의 대응관계가 명확하게 나타내고 있다. 1.5일 까지의 적산온도($M_{0-1.5}$)가 클 경우 초기에는 강도가 크게 나타나고 있으나 장기로 진행함에 있어서는 역으로 강도가 작아지는 것을 알 수 있다. 온도온도이력을 1.5일까지의 적산온도($M_{0-1.5}$)로 나타내는것으로서 강도특성과의 관계가 명확하게 나타나고 있다.

4. 결론

초기양생온도에 따른 시멘트 모르타의 강도 발현에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을수 있었다.

1. 양생최고온도가 높은 경우 초기강도(3일)는 크게 발현되었다. 그러나, 지속적인 강도의 발현은 저하되어 28일강도에서는 표준 수증양생한 시험체보다 강도가 작게 발현되었다.
2. 본 실험에서 적용한 초기 양생온도조건 중에서 강도발현에 가장 큰 영향을 미치는 것은 양생최고온도 인 것으로 사료된다.
3. 타설 후 1.5일까지의 적산온도($M_{0-1.5}$)를 회귀계수에 적용함으로써 강도발현과의 관계를 명확히 나타낼 수 있다. 이에 따르면 초기적산온도가 커지면 초기에는 높은강도를 나타내나 재령이 경과함에 따라 표준양생보다 강도가 저하한다.

참고 문헌

1. "최신콘크리트 공학", 한국콘크리트학회, 1992
2. 大門正機, "セメントの水和におよぼす加熱養生環境", セ技年報 27, 1973
3. 徳根吉郎, "セメント・コンクリート化学", 技報堂出版株式会社, 1978
4. 木村敬三 외 4人, "蒸氣養生콘크리트研究", 慶島建設技術研究所年報 第 15 號
5. 横田紀男, "混合セメントを用いたコンクリートの蒸氣養生における強度性狀", セ技年報 34, 1980
6. 三中健郎 외 3人, "初期材齡での高温養生条件における超高强度コンクリートの強度發現に及ぼす骨材品質の環境", 콘크리트工學年次論文報告集, 日本콘크리트工學協會, 1995
7. V.A. Rosserri & G. Chiochio, "Low Pressure Steam Hydration of Tricalcium silicate", Cement and Concrete Reserch, Vol. 4, 1974