



초기 양생조건에 따른 고강도 콘크리트의 강도발현에 관한 실험적 연구

권영호^{1)*} · 이태왕²⁾

¹⁾동양대학교 건축소방행정학과 ²⁾한필 이엔지

An Experimental Study on the Strength Development of High Strength Concrete in Various Curing Conditions at an Early-age

Yeong-Ho Kwon^{1)*} and Tea-Wang Lee²⁾

¹⁾Dept. of Architecture and Fire Service Administration, Dong Yang University, Youngju 36040, Rep. of Korea

²⁾Hanphil ENG, Seongnam 13631, Rep. of Korea

ABSTRACT This study is experimentally investigated the effects of various steam curing parameters on the early-age compressive strength development of high strength concrete (over 40 MPa) in the precast plant production. High strength concrete are used only ordinary portland cement (type I) and water-cement ratio selected 3cases (25%, 35% and 45%). Also, steam curing parameters are as followings ; (1) Preset period 2cases (3 hours and 6 hours) (2) Maximum curing temperature 3cases (45°C, 55°C and 65°C) (3) Maintenance time of curing temperature 3cases (4 hours, 6 hours and 8 hours) (4) Maximum rate of heating and cooling 15°C/hr. Initial setting time and adiabatic temperature rising ratio of these concrete according to water-cement ratio are tested before main tests and examined the compressive strength development for the steam curing parameters. Also compressive strength are compared with optimum steam curing condition and standard curing at test ages. As test results, the optimum steam curing conditions for high strength concrete(over 40 MPa) are as followings. (1) Preset period ; over initial setting time of concrete (2) Maximum curing temperature ; bellow 55°C (3) Maintenance time of curing temperature ; bellow 6hours. Also strength development of steam curing concrete show in the reversed strength at 28 days. It is to propose an efficient steam curing condition for high strength concrete in the precast method.

Keywords : Initial setting time, adiabatic temperature rising, preset period, maximum curing temperature and maintenance

1. 서 론

최근 구조물의 대형화·초고층화 및 특수화 경향에 따른 콘크리트의 요소기술은 고강도·고유동 및 고내구성의 고성능 콘크리트 개발로 급속하게 발전하였으며, 많은 분야에서 현장적용과 실용화가 이루어지고 있다. 그러나 이러한 고성능 콘크리트의 발전과 사용성의 증대에도 불구하고 현장타설 콘크리트의 품질 검증을 위한 소요공기 및 경제성 등에 대한 개선방안이 필요한 실정에 있다.¹⁾

이러한 문제점을 해결하기 위한 일환으로, 습식에 의한 현장타설 콘크리트 공법을 공장 제작·운반 및 현장 설치·조립하는 건식공법인 프리캐스트(Pre-cast, 이하 PC)공법에 주로 적용하는 방안이 점차로 대두되고 있다. PC공법은 빠른

시간 내에 요구되는 강도발현을 확보할 수 있을 뿐만 아니라, 마감재의 우수한 질감확보 등을 통하여 구조물의 가치를 상승시킬 수 있으며, 또한 현장에서의 공기단축 및 인력 절감의 효과 등으로 공사비 및 금융비용의 저감, 그리고 환경적 측면에서도 유리한 시공품질을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.¹⁾

일반적으로 PC부재의 공장 제조과정은 고온증기양생의 시스템에 따라 ① 전치양생(Preset period) → ② 승온양생(Heating) → ③ 유지양생(maintenance) → ④ 강온양생(Cooling) → ⑤ 후치양생(Postpose)의 5단계로 진행된다. 특히, 콘크리트 공극에 존재하는 물과 공기는 시멘트 경화체의 약 10~200 배의 열팽창 계수를 갖기 때문에, 굳지 않은 콘크리트 상태에서 급격한 증기양생을 실시할 경우에는 굳은 콘크리트의 특성 및 미세구조 형성에도 영향을 미칠 수 있으며, 이에 따른 강도저감 및 균열발생의 원인이 되기도 한다.²⁾

또한, 일반강도 콘크리트에 비하여 고강도 콘크리트는 수화열 및 콘크리트 경화체의 미세조직이 다르기 때문에, 전

*Corresponding author E-mail : kyh00127@naver.com
 Received October 24, 2016, Revised December 6, 2016,
 Accepted February 6, 2017
 ©2017 by Korea Concrete Institute

치양생 시간과 초기 승온양생 속도를 조절할 필요가 있다.³⁾ 전치양생 시간은 ACI 517.2R-92에 콘크리트의 초기응결에 근접하는 시간으로 규정하고 있으며, PCI 및 PCA에 초기응결 후 3~5시간으로 규정하고 있다. 승온양생 속도는 ACI 및 PCI에서 11~44°C/hr 범위로, PCA에서 11~22°C/hr 범위로 각각 제한하고 있다.³⁾

한편, 최고 양생온도 및 유지시간에 따라 장기재령에서의 DEF (Delayed Ettringite Formation) 현상 등의 문제가 발생할 수 있기 때문에 PCI에서는 65°C, ACI에서는 82°C를 초과하지 않도록 규정하고 있다.³⁾

증기양생과 관련하여 국내에서 수행된 선행연구는 온도 이력 및 사용재료에 따른 역학적 특성 등에 대한 실험적 연구가 이루어 졌으나, 대부분 일반강도 콘크리트의 영역에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있다.^{4,5)}

고강도 콘크리트(40 MPa 이상)의 영역에 있어서 매스 콘크리트, 열화특성, 강도발현, 내구성에 관한 증기양생의 영향을 연구한 결과가 발표되기도 하였지만,^{6,9)} PC공법에 따른 공장생산에 있어서의 다양한 양생조건에 관한 연구는 많지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 고강도 콘크리트 영역의 압축강도 발현성상을 중심으로 PC부재의 공장생산에 최적화된 증기양생 이력조건을 도출하여, 경제적인 증기양생 조건 및 현장생산을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실험개요 및 배합조건

2.1 실험개요 및 방법

2.1.1 실험개요

본 연구에서의 증기양생 조건은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 각각의 온도이력 구간을 구분하였다.

Fig. 1에서 전치양생 시간은 콘크리트의 응결시간을 고려하여 3시간, 6시간으로 선정하였다. 또한, 증기양생 규정에서 제시된 값을 검토하여 최고 양생온도(45°C, 55°C 및 65°C)과 최고온도 유지시간(4시간, 6시간 및 8시간)을 선정하였으며, 승온 및 강온양생 속도는 15°C/hr로 정하였다. 이

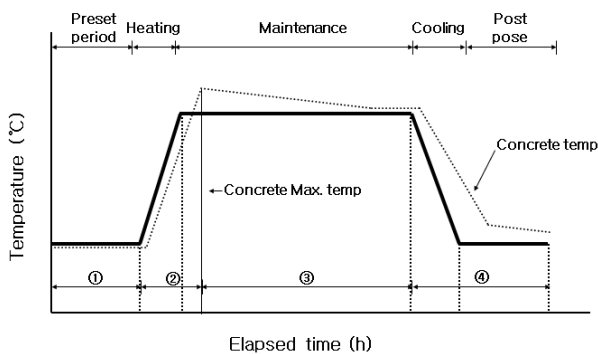


Fig. 1 Temperature history of concrete steam curing

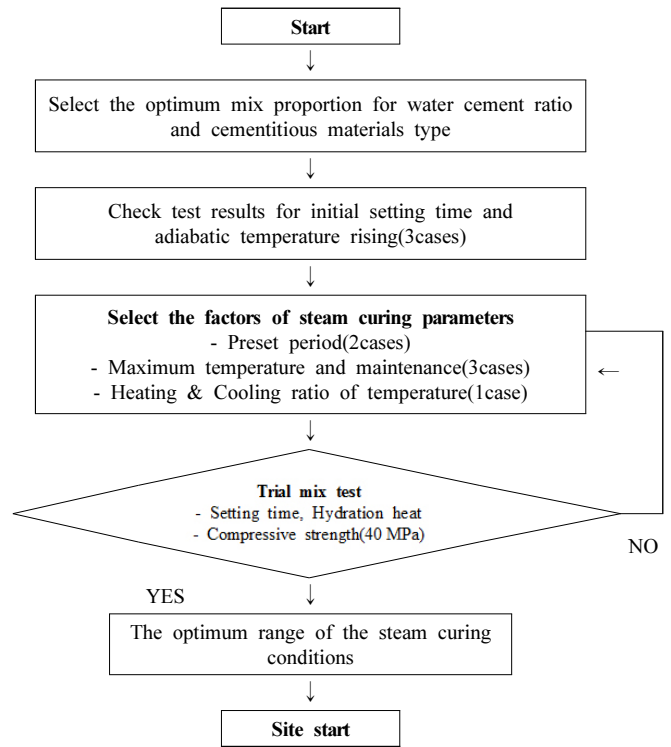


Fig. 2 Test procedures for steam curing conditions

에 따른 본 연구의 단계별 실험과정은 Fig. 2와 같다.

2.1.2 실험방법

콘크리트의 슬럼프 시험 및 압축강도 시험은 각각 KS F 2402 및 KS F 2405에 준하여 실시하였다. 콘크리트의 응결 시간은 KS F 2436(관입 저항침에 의한 콘크리트 응결시간 시험방법)에 규정에 따라 $\Phi 150 \times 150$ mm의 원주형 시료를 제작하였으며, 항온항습기에서 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 양생을 실시한 후에 관입저항값으로 측정하였다.

또한, 콘크리트의 단열온도 상승량은 $300 \times 300 \times 300$ mm 부재를 제작하여 측정하였으며, 증기양생 이력조건에 따른 콘크리트 내부의 온도변화를 확인하기 위하여 $\Phi 100 \times 200$ mm 시험체의 중심부에 온도센서를 부착하여 수화온도 이력을 측정하였다.

2.2 사용재료 및 배합조건

2.2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 재료의 물리적 특성은 Table 1에 나타난 바와 같이 시멘트는 밀도 3.15 g/cm^3 , 분말도 $3,674 \text{ cm}^2/\text{g}$ 인 1종 포틀랜드 시멘트이며, 밀도 2.59 g/cm^3 의 세척모래와 2.62 g/cm^3 의 쇄석(부순골재)를 사용하였고, 유동성 확보를 위하여 나프탈렌계 고성능 감수제를 사용하였다.

2.2.2 배합조건 및 배합방법

증기양생 온도이력의 영향을 실험적으로 검증하기 위한 콘크리트의 배합조건은 Table 2와 같다.

Table 1 Properties of concrete materials

Materials	Physical and chemical properties
Cement	Ordinary portland cement (Type I) Density (3.15 g/cm ³), Blaine (3,674 cm ² /g)
Fine aggregate	Sea sand, Density (2.59 g/cm ³) F.M. (2.74), Absorption ratio (1.01%)
Coarse aggregate	Gmax 20 mm, Crushed stone, Density (2.62 g/cm ³), F.M. (6.59), Absorption ratio (0.79%)
Admixture	High range water reducer based Naphthalene

Table 2 Mix proportions of concrete and test items

W/C (%)	S/a (%)	Unit materials content (kg/m ³)					Remark (Test items)
		Water	Cement	Sand	Gravel	Ad	
25	40	165	660	630	952	11.2	-Setting time -Hydration heat -Compressive strength
35	42	165	471	727	1,011	8.10	
45	45	165	367	817	1,007	6.24	

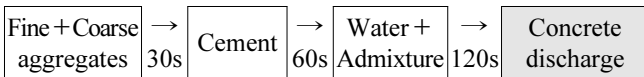


Fig. 3 Mixing method and time of the fresh concrete

먼저, 물-시멘트비(25%~45%)에 따른 고강도 콘크리트의 영역(40 MPa 이상)을 정하고, 이에 따른 증기양생 온도이력의 영향을 비교하고자 하였다. 콘크리트의 특성시험은 응결시간, 수화열 특성 및 재령별 압축강도를 측정하였다. 콘크리트의 배합방법은 100 L 용량의 강제식 믹서(40 rpm)를 사용하여 Fig. 3과 같이 골재 및 시멘트를 투입하여 1분간 건비빔을 실시한 후, 배합수와 혼화제를 투입하여 2분간 배합을 실시하는 순서로 진행하였다. 이때, 전체 배합시간은 210초이지만 건비빔 단계를 제외하면 실제 배합시간은 120초이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 콘크리트의 응결시간 및 단열온도 특성

Table 3은 Table 2에서 제시한 콘크리트의 배합조건에 대하여, 물-시멘트비에 따른 콘크리트의 응결시간 시험결과를 나타낸 것이며, Fig. 4는 물-시멘트비에 따른 단열온도 상승시험의 결과를 나타낸 것이다.

Table 3에 나타난 콘크리트의 응결시간 시험결과, 물-시멘트비 35% 및 45%의 경우에는 초결이 6시간 20분 정도 소요되는 반면에, 물-시멘트비 25%의 경우에는 초결이 약 4시간 정도가 소요되는 것으로 나타났다. 따라서, 전치양생 시간의 선정에는 콘크리트의 초기 응결시간의 관점에서 고려해야 할 것으로 사료된다.³⁾

Fig. 4에서 보듯이 콘크리트의 단열온도 상승시험 결과,

Table 3 Setting time test for W/C

W/C (%)	Initial setting time (hr:min)	Final setting time (hr:min)
25	3:50	5:40
35	6:20	7:48
45	6:28	8:56

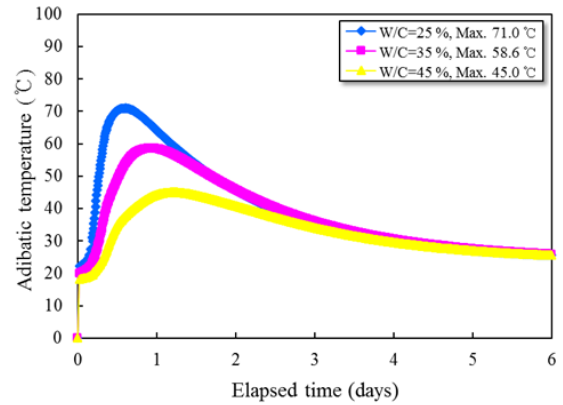


Fig. 4 Adiabatic temperature rising test for W/C

물-시멘트비 25%의 경우에는 약 14시간 경과 후 최고온도 71°C에 도달하였으며, 35%의 경우에는 약 20시간 경과 후 최고온도 58.6°C에 도달하였다. 또한, 물-시멘트비 45%의 경우에는 약 24시간 경과 후 최고온도 45°C에 도달하였다. 이는 물-시멘트비가 감소할수록 시멘트의 수화반응 속도 및 수화열이 증가되는 현상이기 때문에, 증기양생 조건에 따른 온도이력에도 영향을 미칠 것으로 예상되며, 이로 인한 콘크리트의 압축강도 발현에도 상승작용을 할 것으로 사료된다.⁴⁾

3.2 최고 양생온도에 따른 수화온도이력 특성

Table 4 및 Fig. 5는 물-시멘트비에 따른 최고 양생온도별 수화온도 이력의 측정결과를 나타낸 것이다.

여기서, 전치양생 시간은 6시간, 승온양생 및 강온양생은 15°C/hr로 일정하게 선정하였으며, 최고 양생온도는 3종류(45°C, 55°C 및 65°C)를 대상으로 이에 따른 수화온도 이력을 측정하고자 하였다. 이때, 최고 양생온도의 유지시간은 8시간으로 일정하게 하였다.

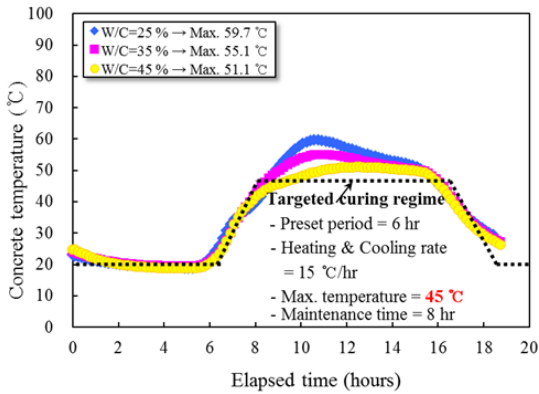
실험결과, 최고 양생온도가 10°C씩 증가할수록 온도이력은 W/C 25%에서 15~32%, W/C 35%에서 22~34%, W/C 45%에서 23~42% 범위로 증가되는 것으로 나타났다. 또한 물-시멘트비가 감소할수록 온도이력은 최고 양생온도 45°C에서 7.8~16.8%, 55°C에서 6.7~9.6%, 65°C에서 2.2~9.1% 범위로 증가되는 경향을 보였다.

이는 최고 양생온도가 높을수록, 물-시멘트비가 낮을수록 외부로부터의 에너지 공급 및 결합재량의 증가에 의한 수화열 발생으로 콘크리트의 자체온도가 상승하였기 때문이다. 따라서 DEF현상에 의한 온도균열의 발생을 최소화하기 위

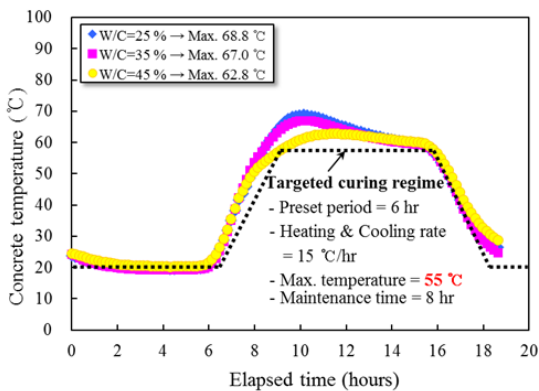
Table 4 Maximum temperature and increasing ratio

W/C (%)	Concrete temperature and increasing ratio	Maximum steam curing temperature (°C)		
		45	55	65
25	Max. temperature (°C) ¹⁾	59.7	68.8	79.0
	Increasing ratio (%)	100	115	132
35	Max. temperature (°C) ¹⁾	55.1	67.0	74.0
	Increasing ratio (%)	100	122	134
45	Max. temperature (°C) ¹⁾	51.1	62.8	72.4
	Increasing ratio (%)	100	123	142

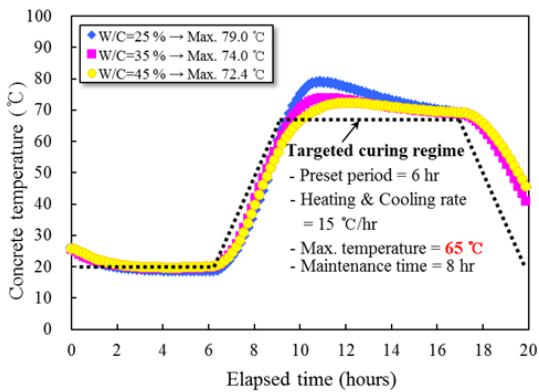
¹⁾ Maximum concrete temperature



(a) Maximum steam curing temperature 45°C



(b) Maximum steam curing temperature 55°C



(c) Maximum steam curing temperature 65°C

Fig. 5 History of hydration heat for W/C and steam curing temperature

하여 콘크리트의 이력온도가 70°C 이하인 55°C 이하로 관리하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.¹⁾

3.3 양생조건에 따른 압축강도 발현 특성

3.3.1 전치양생 시간에 따른 압축강도 발현

Figs. 6, 7 및 8은 전치양생 시간에 따른 압축강도 발현성을 각각의 물-시멘트비별로 나타낸 것이다. 이때의 전치양생 시간은 2종류(3시간, 6시간)로 정하였고, 각각에 대한

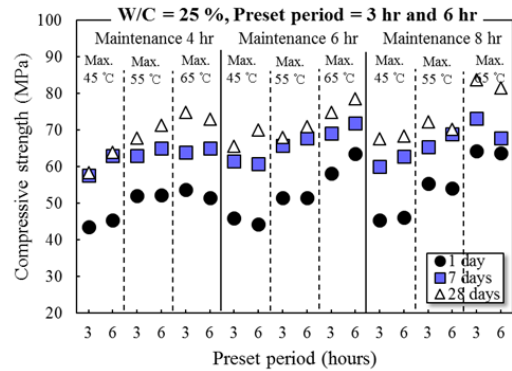


Fig. 6 Compressive strength for preset period(3 and 6 hours) at test ages (W/C 25%)

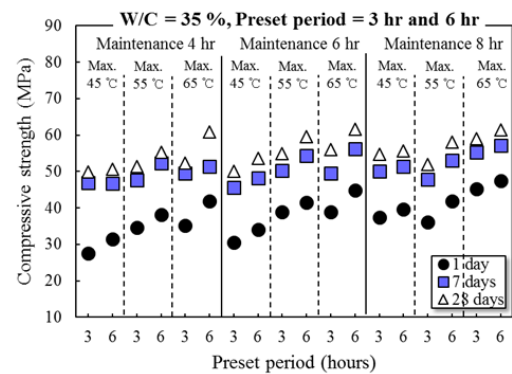


Fig. 7 Compressive strength for preset period(3 and 6 hours) at test ages (W/C 35%)

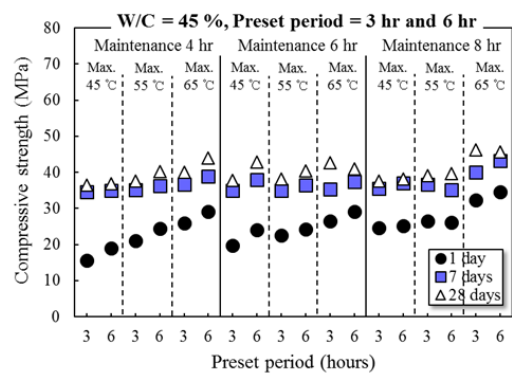


Fig. 8 Compressive strength for preset period(3 and 6 hours) at test ages (W/C 45%)

최고 양생온도 3종류(45°C, 55°C 및 65°C) 및 최고온도 유지시간 3종류(4시간, 6시간 및 8시간)를 변수로 비교·실험을 실시하였다.

실험결과, 물-시멘트비 25% 경우, 전치양생 시간이 재령별 압축강도 발현에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 즉, 양생조건에 따라 약간의 차이는 있으나 전치양생 6시간이 3시간보다 평균 0.5% 정도 압축강도 발현이 높게 나타났는데, 이는 콘크리트의 초결시간 3:50 (hr: min)의 영향에 따른 것으로 사료된다.

그러나 물-시멘트비 35% 경우 전치양생 6시간이 3시간에 비하여 압축강도 발현이 평균 11.2% 증가되었으며, 물-시멘트비 45% 경우 평균 10.7% 정도로 압축강도 발현이 높게 나타났다. 이는 물-시멘트비 35% 및 45% 경우에도 콘크리트의 초결시간 6:20 및 6:28 (hr:min) 영향으로 평가된다. 즉, 전치양생 3시간은 초결이 시작되기 전에 외부 에너지에 의한 승온양생으로 온도충격의 영향을 받은 것으로 사료된다. 따라서, 물-시멘트비에 따라 전치양생 시간을 결정할 때에는 콘크리트의 초결시간을 고려해야 할 것으로 사료된다.³⁾

3.3.2 최고 양생온도에 따른 압축강도 발현

최고 양생온도 3종류(45°C, 55°C 및 65°C)에 따른 재령별 압축강도 발현성상에 대한 실험결과는 Figs. 9, 10 및 11에 나타난 바와 같다.

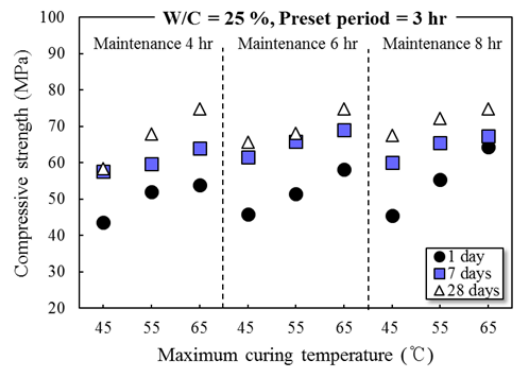
실험결과, Fig. 9에서 보듯이 물-시멘트비 25%의 경우에 최고 양생온도 10°C씩 증가할수록 각각 평균 15.5% 및 11.8% 범위로 압축강도 발현이 증가되었으며, 55°C에서 50 MPa 이상을 만족하였다. 특히, 전치양생 시간의 영향보다 최고 양생온도에 따른 압축강도 발현의 영향이 더 큰 것으로 나타났는데, 이는 초결시간과 수화속도 및 성숙도(Maturity)의 증가에 따른 것으로 사료된다.²⁾

물-시멘트비 35% 경우 Fig. 10에서 보듯이 최고 양생온도 45°C를 기준으로 볼 때, 양생온도 10°C씩 증가할수록 각각 평균 16.3% 및 9.6% 범위로 강도발현이 증가하였다. 또한, 최고 양생온도 55°C 이상 및 최고온도 유지시간 6~8시간에서 고강도 콘크리트의 범위(40 MPa 이상)를 만족하였고, 재령 7일에서는 대부분 50 MPa에 근접하였다.

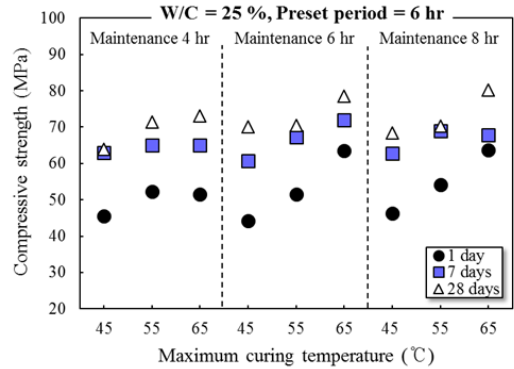
양생온도 이력에서 물-시멘트비 25% 및 35% 경우에는 최고 양생온도 55°C에서 강도발현의 증가율이 큰 것으로 나타났다. 또한, Fig. 11에 나타난 바와 같이 물-시멘트비 45%일 때, 최고 양생온도 45°C를 기준으로 양생온도 10°C씩 증가할수록 각각 평균 15.0% 및 22.4% 범위로 압축강도가 증가하였지만, 대부분 일반강도 콘크리트의 범위(40 MPa 이하)를 나타내었으며, 양생온도가 높은 65°C에서 가장 강도발현의 증가율이 높은 것으로 나타났다.

3.3.3 최고 양생온도 유지시간에 따른 압축강도 발현

최고 양생온도의 유지시간 3종류(4시간, 6시간 및 8시간)에 따른 압축강도 발현성상의 영향을 실험적으로 측정·비교하였으며, 물-시멘트비에 따른 실험결과는 Figs. 12, 13 및 14

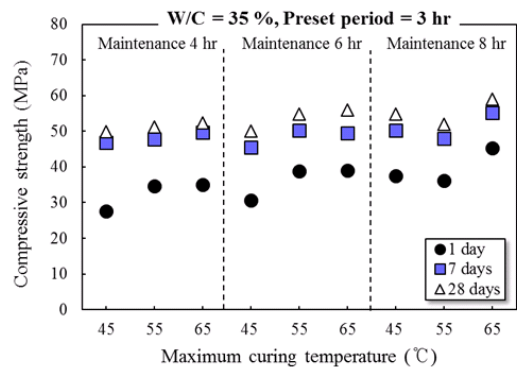


(a) W/C 25%, 3 hours

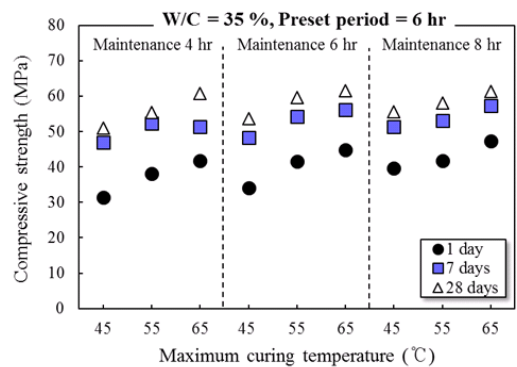


(b) W/C 25%, 6 hours

Fig. 9 Compressive strength for maximum curing temperature at test ages

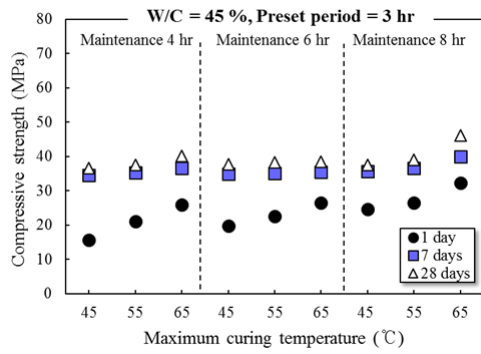


(a) W/C 35%, 3 hours

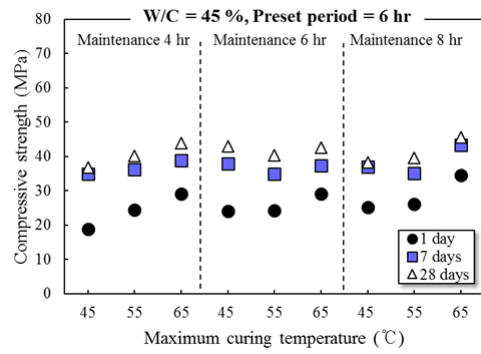


(b) W/C 35%, 6 hours

Fig. 10 Compressive strength for maximum curing temperature at test ages

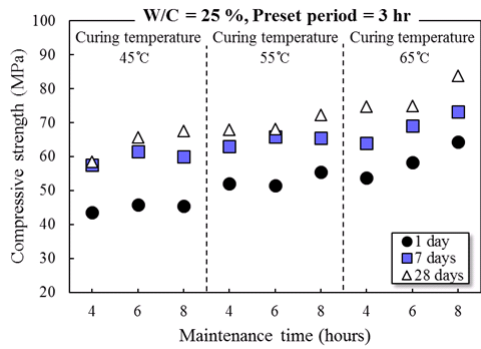


(a) W/C 45%, 3 hours

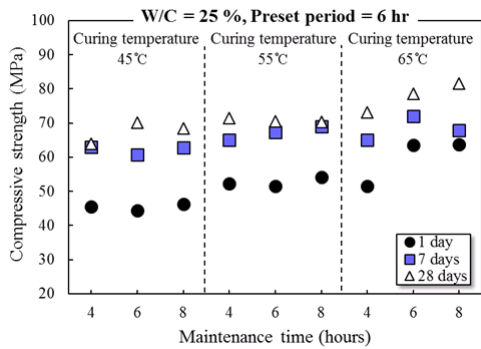


(b) W/C 45%, 6 hours

Fig. 11 Compressive strength for maximum curing temperature at test ages

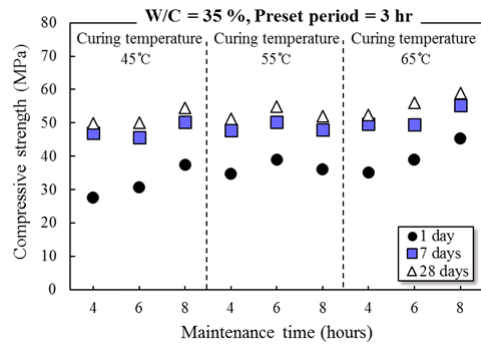


(a) W/C 25%, 3 hours

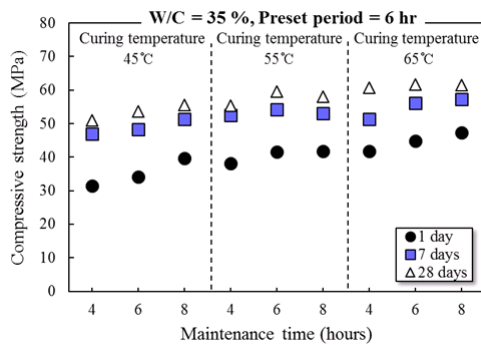


(b) W/C 25%, 6 hours

Fig. 12 Compressive strength for maintenance time at test ages

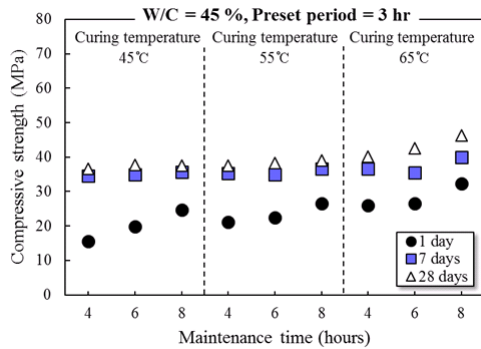


(a) W/C 35%, 3 hours

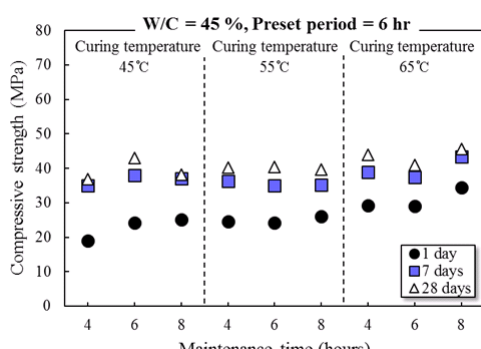


(b) W/C 35%, 6 hours

Fig. 13 Compressive strength for maintenance time at test ages



(a) W/C 45%, 3 hours



(b) W/C 45%, 6 hours

Fig. 14 Compressive strength for maintenance time at test ages

와 같다.

Fig. 12에서 보듯이 물-시멘트비가 25%인 경우에 최고온도의 유지시간 4시간을 기준으로 2시간씩 증가할 때, 각각 평균 5.4% 및 4.4% 범위로 압축강도 발현이 증가하는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 13에 나타난 바와 같이 물-시멘트비가 35%인 경우에 최고온도의 유지시간이 증가할수록 각각 9.8% 및 10.6% 범위로 압축강도 발현이 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 14는 물-시멘트비 45%의 경우에 최고온도 유지시간에 따른 압축강도 발현성상을 나타낸 것이다. 실험결과, 최고온도 유지시간 4시간을 기준으로 각각 2시간씩 증가할 때, 평균 10.3% 및 15.7% 범위로 압축강도 발현이 증가하는 것으로 나타났다. 특히 물-시멘트비 25% 경우에는 최고 양생 온도 55°C 이상에서는 유지시간에 관계없이 50 MPa를 만족하였으며, 물-시멘트비 35% 경우에는 유지시간 6시간 이상에서 40 MPa를 만족하였다. 따라서 고강도 콘크리트의 범위에서는 최고 양생온도의 유지시간을 6시간 이하로 하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

3.3.4 표준양생과 증기양생에 따른 압축강도 발현

Fig. 15는 동일한 콘크리트의 배합조건에서 표준양생 및 증기양생에 따른 재령별 압축강도 발현성상을 나타낸 것이다. 여기서, 양생조건은 전치양생 6시간, 최고 양생온도 55°C 및 유지시간을 6시간으로 하였다.

실험결과, 재령 1일의 압축강도는 물-시멘트비가 증가할수록 표준양생에 비해 증기양생을 실시한 공시체가 약 50%~108% 정도 높게 나타났으나, 재령이 증가할수록 표준양생에 비해 증기양생의 압축강도가 낮아지는 경향을 보였다.¹⁰⁾

즉, 재령 7일에서 표준양생에 비해 증기양생의 강도발현 비율이 7.3%~2.4%, 재령 14일에서 6.2%~10.5% 정도였으며, 재령 28일에서는 -5.2%~17.7%로 압축강도의 역전현상을 나타내었으며, 물-시멘트비가 클수록 초기재령(7일)에서 역전현상이 발생하였다.¹⁾

증기양생의 경우에는 양생온도 조건에 따른 높은 성숙도

(Maturity)와 콘크리트 내부의 수화열이 상승작용을 하여 초기에 빠른 경화가 이루어짐에 따라 초기재령의 압축강도 발현은 높으나, 시간이 지남에 따라 그 증가율은 떨어지는 것으로 나타났다. 반면에, 표준양생의 경우에는 안정적인 시멘트-페이스와 골재의 경계면의 물리적 결합력 증대 및 화학적으로 수화생성물의 치밀한 공극구조 및 에트링자이트(Ettringite) 결정이 서서히 형성되기 때문에 후기재령의 강도발현이 증가된 것으로 사료된다.³⁾

4. 결 론

초기 양생조건에 따른 고강도 콘크리트의 강도발현에 관한 본 연구의 결론을 정리하면, 다음과 같다.

- 1) 콘크리트의 초기 응결시간 및 단열온도 상승량이 전치양생 시간 및 온도이력에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 양생온도가 높을수록, 물-시멘트비가 낮을수록 외부 에너지 공급 및 수화열로 인하여 콘크리트 내부의 온도가 상승하는 것으로 나타났다.
- 2) 고강도 콘크리트의 전치양생 시간은 콘크리트의 초기 응결시간을 확인하고 선정하는 것이 바람직하며, 물-시멘트비 25% 경우 최고 양생온도에 관계없이 50 MPa 이상을 만족하였으며, 물-시멘트비 35% 경우 55°C 이상에서 40 MPa의 강도범위를 만족하였다. 따라서, 고강도 콘크리트의 최고 양생온도는 55°C 이하로 선정하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.
- 3) 최고 양생온도의 유지시간의 영향은 다른 양생요인에 비해 크지 않지만, 6시간 이하로 하는 것이 바람직하다. 또한, 표준양생에 비해 증기양생의 강도발현이 초기재령에서 매우 우수하지만, 대부분 28일 이후 재령에서 압축강도의 역전현상이 나타났다.

감사의 글

본 연구는 2016년도 동양대학교 학술연구비의 지원으로 수행된 것이며, 이에 감사드립니다.

Reference

1. Park, J.S., Kim, Y.J., Cho, J.R., and Jeon, S.J., "Early-Age Strength of Ultra-High Performance Concrete in Various Curing Conditions", *Journal of Materials published by MDPI AG*, Basel, Switzerland, Vol. 8, 2015, pp.5537-5553.
2. Nagao, Y., and Suzuki, K., "Basic Properties and Utilization of Steam-Cured Concrete using Ground Granulated Blast-Furnace Slag", *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, No.109, 2015, pp.125-129.
3. Hwang, S.D., Khatib, R., Lee, H.K., Lee, S.H., Khayat, K.H., "Optimization of Steam-Curing Regime for High-Strength, Self-Consolidating Concrete for Precast, Prestressed Concrete

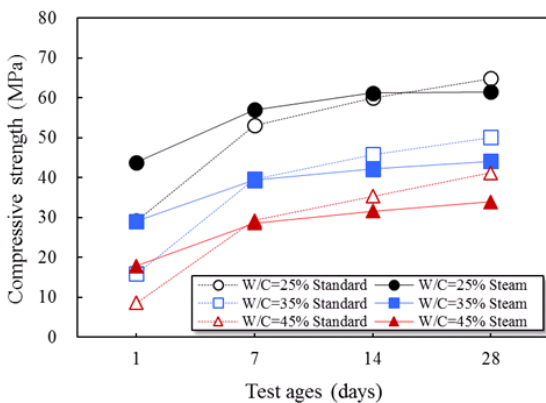


Fig. 15 Compressive strength for curing method and W/C at test ages

- Application”, *Journal of Precast/prestressed Concrete Institute (PCI)*, Vol.57, No.3, 2012, pp.48-62.
4. Song, Y.W., Yoon, S., Jeong, Y., Jeon, Y.S., Gong, M. H., and Chung, G.T., “A Study for Strength Properties by Temperature Change of Steam Curing of Concrete using Blast-Furnace Slag of High Volume”, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol.24, No.2, 2012, pp.183-184.
 5. Lee, M. K., Kim, K. S., Lee, K. H., and Jung, S. H., “Strength of Recycled Concrete with Furnace Slag cement under Steam Curing Condition”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.17, No.4, 2005, pp.613-620.
 6. Park, H. L., Kim, S.J., Paik, M.S., Lee, H.K., Park, B.K., and Jung, S.J., “An Experimental Study on Temperature Property of High-strength Mass Concrete Cured by Steam”, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol.19, No.2, 2007, pp.593-596.
 7. Yoon, S., Jung, Y.M., Jeong, Y., Lee, S.Y., and Kim, Y.B., “The Effect of Steam Curing on the Compressive Strength and Durability in High Strength Concrete”, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol.19, No.1, 2007, pp.697-700.
 8. Kwon, H.S., Choi, E.K., Lim, N.K., Lee, Y.D., and Jung, S.J., “An Effects of the Strength Development of High Strength Mortar under Temperature History by Steam Curing”, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol.8, No.4, 2008, pp.115-121.
 9. Park, J.H., Kim, S.J., Paik, M.S., Lee, S.H., Park, B.K., and Jung, S.J., “An Experimental Study on Strength Characteristics of Mass Concrete Cast with High-Strength Concrete for Precast Application”, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol.19, No.2, 2007, pp.49-52.
 10. Kim, M.H., Lee, S.H., Kang, S.P., Khil, B.S., and Joo, J.H., “Development of Early-Strength of High Strength Concrete According to Curing Temperature for Application of System Form”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.13, No.4, 2001, pp.536-543.

요 약 본 연구는 PC부재의 공장생산에 있어서 여러 가지 증기양생 조건의 변수에 따른 고강도 콘크리트의 초기 압축강도 발현성상을 실험적으로 검증하고, 최적 양생조건을 확인하기 위한 것이다. 40 MPa 이상의 고강도 콘크리트 제조에는 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 콘크리트의 배합조건은 물-시멘트비 3종류(W/C 25%, 35% 및 45%)를 대상으로 하였다. 본 연구의 증기양생 변수로 (1) 전치양생 시간 3종류, (2) 최고 양생온도 3종류, (3) 최고온도 유지시간 3종류, (4) 승온 및 강온양생 온도 1종류 등을 대상으로 재령별 압축강도 시험을 실시하였다. 또한, 증기양생 및 표준양생에 따른 재령별 강도발현을 비교하였다. 실험결과, (1) 전치양생은 콘크리트의 초기 응결시간 이상, (2) 최고 양생온도는 55°C 이하, (3) 최고온도 유지시간은 6시간 이하로 하는 것이 증기양생 고강도 콘크리트의 강도발현에 적합한 양생조건으로 나타났다. 또한, 재령 28일에서 증기양생과 표준양생의 압축강도 발현성상의 역전현상이 발생하였다. 따라서 이러한 양생조건으로 PC부재의 생산성 및 현장관리를 위한 기초자료로 제시하고자 한다.

핵심용어 : 초기 응결시간, 단열온도 상승시험, 전치양생, 최고 양생온도, 최고온도 유지시간