

# 촉진양생이 콘크리트의 수화 및 압축강도에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the effect of Accelerated Curing  
on Hydration and Compressive Strength of Concrete

김 생 빈\*    유 승 룡\*\*    김 동 신\*\*\*    최 세 규\*\*\*\*

Kim, Saeng Bin    Yu, Sung Yong    Kim, Dong Sin    Choi, Se Gyu

## Abstract

The testing specimens were made from the standard mix proportion according to those of domestic PC factories to establish a basic data for the Accelerated Curing Effect. The experimental tests were conducted according to the conditions of each sub-curing periods.

By comparing the results of compression tests on de-molded and 28-day water-curing specimens, we find that the most effective curing condition to obtain more than the required design strength after 28 days of water curing may be as followings; the presteaming period does not affect seriously and less than 30 °C/hr - the rate of temperature rise and less than 82°C - maximum temperature are necessary. It seems that post-curing procedure is very important factor to increase the effect of accelerated curing.

## 1. 서론

국내 PC(Precast Concrete)공장에서 PC벽체의 제작시 일반적으로 실시하고 있는 양생 방법은 철판거푸집을 스팀 또는 전기로 가열하여 양생온도를 높여 초기 탈형강도를 증진시키는 "뱃데리시스템"<sup>(1)</sup> 양생방법을 채택하고 있다. 그러나 PC제품생산에 관한 기초적인 연구 없이 기계설비를 도입하여, 도입 당시의 외국 기술에만 의존하여 생산하고 있으며, 생산성의 이유를 들어 외국에서 명시한 기준값조차 무시한 채 탈형 시의 강도에만 주안점을 두고 생산하고 있는 실정이다.

건설교통부<sup>(2)</sup> 및 대한주택공사<sup>(3)</sup>의 표준시방서에서는 촉진양생방법에 대하여 전양생시간, 양생온도의 상승구배, 최고양생온도와 그 지속시간, 양생조 내의 기압, 후기양생 등에 대하여 언급을 하고 있으나 각 시기에 따른 온

도의 한계치에 대하여 명확한 기준을 설정하지 않았으므로 PC공장마다 양생주기값을 다르게 적용하고 있다.

기존의 촉진양생에 관한 연구는<sup>(4)~(7)</sup> 1960~1970년대에 실행된 것으로, 전체 증기양생시간이 18시간 또는 24시간인 경우에 한하여 기술하여 왔고, 수동식 항온항습조 또는 온수양생조를 사용하여 연구하여 왔으므로 온도상승구배의 효과에 대한 명확한 규명을 할 수 없는 것으로 판단된다. 또한 수증기가 콘크리트 표면에 직접 분사되는 증기양생이나 여러 가지 촉진양생에 대한 일반 이론들은 현 국내 PC공장에서 벽체생산시 사용하는 뱃데리시스템의 기준 자료로 직접 활용하는 것은 부적절하다.

본 연구는 국내 실정을 고려한 PC벽체의 최적양생주기를 구하기 위하여 국내 PC공장에서 사용하는 배합표를 수집하고 이를 근거로 시험 배합을 거쳐 본 배합표를 작성하였으며, 이에 따라 시험공시체를 제작하여 실험하였다. 또한 외국 시방서 및 연구 자료를 참고하여<sup>(8),(9),(10)</sup> 촉진양생주기의 전양생시간, 온

\* 동국대 토목공학과 교수, 공학박사

\*\* 동국대 건축공학과 조교수, 공학박사

\*\*\* 동국대 토목공학과 강사

\*\*\*\* 동국대 토목공학과 박사과정

도상승구배, 최고양생온도가 탈형 및 28일 압축강도에 미치는 영향을 분석하였고, 촉진양생 후 수중양생을 시켜 재령 28일의 압축강도를 측정하여 수분 공급에 의한 2차양생의 효과를 규명하고자 하였다.

## 2. 실험 계획 및 방법

### 2.1 실험 계획

상이한 촉진양생조건에 따른 강도 발현의 성상을 알아보기 위하여 본 연구에서는 전양생시간, 온도상승구배 그리고 최고양생온도를 변수로 채택하고 변화를 주어 공시체를 제작하였다.

공시체의 설계강도는 국내 PC공장에서 PC 벽체생산시 일반적으로 적용하고 있는 설계강도  $270\text{kg/cm}^2$ 을 채택하였으며, 실험의 기준값이 될 기준공시체의 양생주기로는, 전양생시간은 3시간으로, 온도상승 및 하강구배는 단위 시간당  $20^\circ\text{C}$ 로, 최고양생온도는  $82^\circ\text{C}$ 로, 최고양생온도의 지속시간은 6시간을 적용시켜 제작하였다. 실험공시체는 표1과 같이 각 양생주기를 변화시켜 만든 공시체이다.

기준공시체 및 실험공시체는 각 측정 시기 별로 각각 3개씩 제작하여 시험하였다. 압축강도 측정은 촉진양생을 마친 후 탈형 즉시와 촉진양생 후 각각 14일, 28일간 수중양생한 후에 실시하였다.

실험공시체와 기준공시체의 압축강도 값을 비교분석하여 각 양생주기에서의 변수가 압축강도에 미치는 영향을 평가하고, 소성수축균열을 일으키지 않은 상태를 유지하면서 소요

표 1 촉진양생주기의 변수

| 항목                            | 변수                      | 기준값                                                       |
|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 전양생시간 (hr)                    | 0, 1, 2, 3, 4, 5        | 온도상승구배 $20^\circ\text{C/hr}$<br>최고양생온도 $82^\circ\text{C}$ |
| 온도상승구배 ( $^\circ\text{C/h}$ ) | 10, 20, 30, 45, 70, 95  | 전양생시간 3시간<br>최고양생온도 $82^\circ\text{C}$                    |
| 최고양생온도 ( $^\circ\text{C}$ )   | 66, 71, 77, 82, 87, 100 | 전양생시간 3시간<br>온도상승구배 $20^\circ\text{C/hr}$                 |

의 강도를 얻을 수 있는 최적시간을 검토하였다. 또한 촉진양생 후 표준양생과 같은 방법으로 수조에 침수시켜 재령 14일 및 28일 강도를 측정하여 2차양생에 대한 효과를 분석하였다.

## 2.2 사용재료 및 배합설계

### 2.2.1 시멘트

본 실험에서는 국내 A사 제품의 1종 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 그 물리적 성질은 표 2와 같다.

표 2 시멘트의 물리적 성질

| 비중   | 분말도 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) | 응결시간 (시 : 분) |      | 압축강도( $\text{kg/cm}^2$ ) |     |     |
|------|--------------------------------|--------------|------|--------------------------|-----|-----|
|      |                                | 초결           | 종결   | 3일                       | 7일  | 28일 |
| 3.15 | 3299                           | 2:25         | 6:05 | 210                      | 283 | 369 |

### 2.2.2 골재

잔골재 및 굵은골재는 남한강 상류지역에서 채취한 천연골재를 사용하였으며 그 물리적 성질은 표 3과 같다.

표 3 골재의 물리적 성질

| 종류   | 최대입경 | 비중   | 흡수율(%) | F. M. |
|------|------|------|--------|-------|
| 잔골재  | -    | 2.60 | 0.6    | 2.78  |
| 굵은골재 | 25mm | 2.63 | 0.95   | 6.39  |

### 2.2.3 배합

콘크리트의 배합은 우선 국내 PC공장 6개사의 배합설계표를 수집하여 설계강도 및 그에 따른 사용재료의 단위량을 분석한 후, PC 벽체생산시 일반적으로 적용하고 있는 설계강도  $270\text{kg/cm}^2$ 을 채택하여 배합설계표를 작성하고 이에 따라 실험을 실시하였다.

표 4 배합설계표

| 굵은골재 최대치수 (mm) | 슬럼프 (cm) | 공기량 (%) | W/C (%) | S/a (%) | 단위량( $\text{kg/m}^3$ ) |     |     |      |
|----------------|----------|---------|---------|---------|------------------------|-----|-----|------|
|                |          |         |         |         | 물                      | 시멘트 | 잔골재 | 굵은골재 |
| 25             | 5        | 2.0     | 44      | 42      | 157                    | 357 | 780 | 1086 |

## 2.2.4 실험 장비

공시체 제작에 사용된 몰드는 6mm의 균일한 두께를 가진 주철로 제작된  $\phi 15 \times 30$ cm인 압축강도용 실린더 몰드이다. 몰드 윗 부분에는 뚜껑을 부착하여 고온에 따른 수분 증발을 방지하고, 동시에 양생조 내에 결로된 물이 공시체 속으로 흘러들지 않도록 하였다.

증기양생조는 양생시간과 온도 및 습도, 온도의 상승 및 하강구배를 Control Box에서 프로그램화하여 자동제어할 수 있으며, 특히 증기양생에서 가장 큰 영향을 주는 인자인 온도의 오차를  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  이내로 제어할 수 있다.

압축강도시험은 200톤급 만능시험기를 사용하여 압축강도를 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 전양생시간과 압축강도

전양생시간만을 변화시켜 압축강도 시험을 실시한 결과, 전양생시간이 길수록 강도는 선형으로 비례하여 증가하는 것으로 나타났다.

전양생시간 0시간에 비하여 1시간 두었을 경우  $14 \text{ kg/cm}^2$ 의 강도가 증진되었고, 전양생시간을 1시간씩 더 취할 때마다 약  $3 \sim 4 \text{ kg/cm}^2$ 씩 증진되었다.

모든 공시체는 촉진양생 후 수중에서 양생시켰으므로 수화반응이 계속 진행되어 설계강도 이상으로 강도증진이 이루어 졌다. 재령 28일 강도는 탈형시에 비하여 모두  $80 \text{ kg/cm}^2$  이상 증가되어 설계강도를 초과하였으나, 0시간과 1시간의 경우는 28일 지난 후에도 설계강도에 도달하지 못한 것으로 보아 구성재료간의 열팽창압을 충분히 견딜 수 있는 인장강도를 지니지 못한 상태에서 내부에 회복할 수 없는 미세균열이 발생하였다고 사료된다.

본 시험의 결과에서 탈형압축강도 곡선만을 살펴보면 기울기가 둔화되는 시점인 전양생시간 1시간 이내에 상당한 양의 수화가 진행되어 외부 온도 상승에 견딜 수 있는 안정된 수화조직을 갖출 수 있다고 사료되지만,

탈형시, 재령 14일, 재령 28일에서 각각 강도 증진이 둔화되는 시점인 3시간 이상을 상온에서 전양생 시킨 뒤 가열을 시작해야 구성 재료간의 열팽창에 의한 강도 저하를 방지할 수 있다고 판단된다.

표 5 전양생시간과 압축강도

| 전양생 시간 (hr) \ 압축강도 ( $\text{kg/cm}^2$ ) | $\sigma_1$ | $\sigma_{14}$ | $\sigma_{28}$ | 강도 증가량 ( $\text{kg/cm}^2$ ) |
|-----------------------------------------|------------|---------------|---------------|-----------------------------|
| 0                                       | 173        | 237           | 263           | 90                          |
| 1                                       | 187        | 247           | 269           | 82                          |
| 2                                       | 191        | 256           | 276           | 85                          |
| 3                                       | 196        | 276           | 285           | 89                          |
| 4                                       | 197        | 277           | 285           | 88                          |
| 5                                       | 202        | 280           | 289           | 87                          |

주)  $\sigma_1$  : 탈형시 압축강도

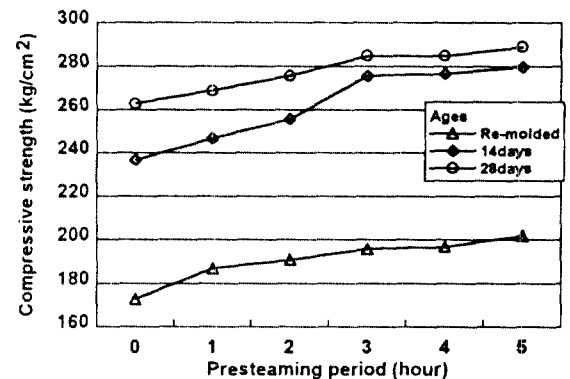


그림 1 전양생시간과 압축강도

### 3.2 온도상승구배와 압축강도

본 연구에서 전양생시간을 동일하게 3시간씩 적용시킨 후 온도상승을 시켰을 때, 탈형 압축강도는 온도상승구배가  $30^\circ\text{C/hr}$ 를 초과하였을 경우 강도가 감소되었으며, 재령 28일의 강도값을 비교해 보면 모든 공시체가 설계강도 값에 근접하고 있음을 알 수 있었다. 그림 7에서 처럼 강도의 증가는 탈형강도가 클수록 적게 증가하였으며, 탈형강도가 낮을수록 강도의 증가량이 크게 나타났다. 이는 탈형 후 수중 양생 과정에서 탈형강도가 낮을수록 미

수화된 부분이 많으므로 수화가 진행됨에 따라 강도증진량이 많은 것으로 판단된다.

강도 증진을 살펴보면, 온도 상승을 시간당 70°C 이상으로 시켰을 때 재령 28일 경과 후 강도는 설계강도값 근처에 접근하는 것으로 나타났으며, 45°C 이하인 경우는 설계강도를 초과하는 것으로 나타났다.

그러나 현장에서는 대부분 부재를 증기양생한 후 2차양생을 실시하지 않은 상태에서 제품을 출하시키고 있어, 본 실험결과에서 30°C/hr 보다 높은 온도상승구배는 탈형 압축강도가 크게 감소되므로 현장에서 사용할 수 있는 적절한 온도상승구배는 30°C/hr 내외라고 사료된다.

표 6 온도상승구배와 압축강도

| 온도상승구배 (°C/hr) | 압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_1$ | $\sigma_{14}$ | $\sigma_{28}$ | 강도증가량 (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|----------------|----------------------------|------------|---------------|---------------|-----------------------------|
| 10             |                            | 197        | 256           | 271           | 74                          |
| 20             |                            | 196        | 276           | 285           | 89                          |
| 30             |                            | 190        | 277           | 281           | 91                          |
| 45             |                            | 177        | 274           | 280           | 103                         |
| 70             |                            | 161        | 251           | 271           | 110                         |
| 95             |                            | 157        | 233           | 269           | 112                         |

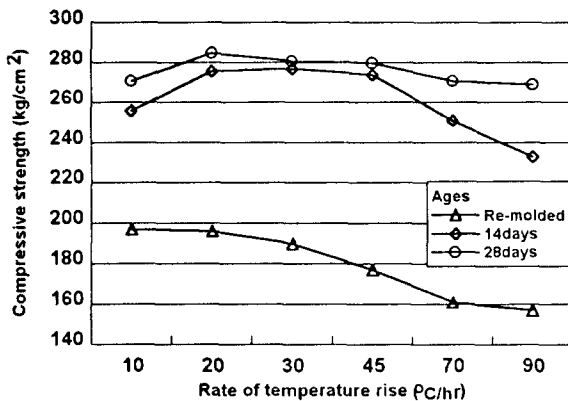


그림 2 온도상승구배와 압축강도

### 3.3 최고양생온도와 압축강도

전양생시간을 3시간, 온도상승구배를 20°C로 일정하게 하고 최고온도만을 변화시켜 실험한 결과, 최고양생온도와 강도값은 항상 비

례하지는 않는 것으로 나타났다. 즉, 콘크리트 부재를 촉진양생시킬 때 온도응력의 변화를 적게 하여 높은 강도를 발현할 수 있도록 적절한 전양생시간과 온도상승구배 조건을 갖추었다 하더라도, 최고양생온도가 어느 정도 이상 높이면 압축강도는 증진되지 않는을 시험결과를 통하여 알 수 있었다.

탈형강도는 77°C나 82°C의 경우가 오히려 100°C의 경우보다 강도가 상회하는 것으로 나타나는데 이는 구성 재료간의 열팽창에 의한 온도균열 등이 발생하여 압축강도 감소를 초래하기 때문이라고 사료된다.

재령 28일의 강도를 비교해 보면 87°C와 100°C의 경우를 제외하고 모두 설계강도값을 상회하고 있다. 설계강도 270kg/cm<sup>2</sup>에 비하여 87°C의 경우는 20kg/cm<sup>2</sup> 정도 강도가 낮으며, 100°C인 경우 40kg/cm<sup>2</sup> 정도 강도가 낮은 결과를 나타냈으며, 이는 촉진양생시 이미 수화 생성물의 내부에 회복할 수 없는 온도균열이 발생하여 지속적인 수분공급으로 수화를 계속 진행시켜도 강도증진량은 아주 적게 나타나 설계강도 값에 훨씬 못 미치는 강도를 나타냈다고 판단된다.

수중양생에 의한 2차양생시 강도의 증진량을 살펴보면 탈형 강도가 낮을수록 크게 증가하였으며, 82°C를 초과하는 경우는 모두 재령 28일 강도가 설계강도 값에 도달하지 못하였다. 따라서 본 실험결과 82°C정도가 강도증진과 감소의 전환점이라 할 수 있으므로 최고양

표 7 최고양생온도와 압축강도

| 최고양생온도 (°C) | 압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> ) | $\sigma_1$ | $\sigma_{14}$ | $\sigma_{28}$ | 강도증진량 (kg/cm <sup>2</sup> ) |
|-------------|----------------------------|------------|---------------|---------------|-----------------------------|
| 66          |                            | 155        | 239           | 289           | 134                         |
| 71          |                            | 161        | 244           | 287           | 126                         |
| 77          |                            | 188        | 267           | 288           | 100                         |
| 82          |                            | 196        | 276           | 285           | 89                          |
| 87          |                            | 185        | 220           | 250           | 65                          |
| 100         |                            | 180        | 208           | 231           | 51                          |

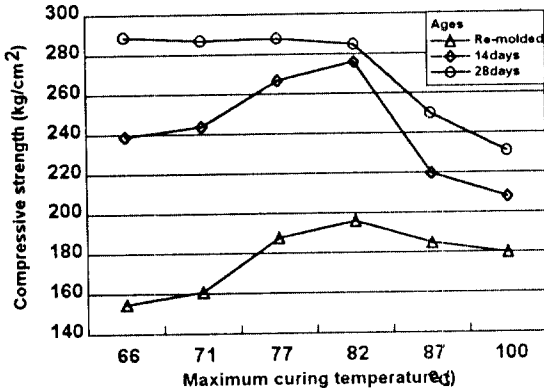


그림 6 최고양생온도와 압축강도

생온도는 82°C를 초과하지 않도록 해야 한다.

## 5. 결론

1) 촉진양생 후 탈형 강도는 대부분 설계강도에 훨씬 못 미쳤으나 촉진양생 후 수중에서 재령 28일 후 압축강도 시험을 하였을 때 대부분 설계강도를 상회하는 것으로 측정되었다. 다만, 전양생시간이 1시간 이하인 경우, 온도상승구배가 단위시간당 95°C 이상인 경우, 그리고 최고양생온도 87°C 이상인 경우는 설계강도보다 작게 측정되었다.

2) 촉진양생으로 콘크리트를 경화시킬 때, 콘크리트 구성 재료간의 열팽창계수 차이에 의한 과도한 온도응력의 발생을 방지하고 재령 28일 후 설계강도 값에 효과적으로 도달하기 위한 양생조건은, 본 시험 조건하에서, 전양생시간은 커다란 영향을 미치지 않았으나 설계강도 확보를 위해 기준값인 3시간 이상을 두어야 하고, 단위 시간당 30°C 이하로 온도상승을 시켜야 하며, 또한 최고양생온도는 82°C를 초과하지 않도록 해야 한다고 판단된다.

3) 촉진양생시킨 공시체를 계속하여 수중에서 양생시킨 후 측정된 재령 28일의 강도는 대부분 설계강도를 초과하였으므로 현장에서는 촉진양생의 효과를 증대시키기 위하여 촉진양생 후 일정 온도에서 살수 등 2차양생을

실시하여 강도증진을 도모해야 한다.

4) 추후의 연구에서 양생조건의 변화를 다양하게 하여 강도가 증감하는 온도 및 시기에 대하여 보다 정확한 결과를 얻기 위한 연구가 지속되어야 할 것이며, 현장적용성을 살리기 위하여 촉진양생을 마친 후 여러 가지 상태의 대기조건에 방치한 경우 등에 대하여 광범위한 실험이 이루어져야 할 것이다.

## 참고문헌

1. ACI Committee 517, "Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressures" State of the Art (ACI 517.2R-80)
2. 건설부, "프리캐스트 콘크리트 조립식 건축공사 표준시방서", 1994.4.
3. 대한주택공사, "프리캐스트 콘크리트 부재 제작 및 조립공사 표준시방서", 1994, 4.
4. Schmid, Emil, and Schutz, Raymond J., "Steam Curing", Journal, Prestressed Concrete Institute, Vol. 2, No. 2, Sept. 1957, pp.37-40
5. Higginson, Elmo C., "Effect of Steam Curing on the Important Properties of Concrete", ACI Journal, Proceedings, Vol. 58, No. 3, Sept. 1961, pp.281-298
6. Nurse R. W., "Steam Curing of Concrete", Magazine of Concrete Research (London), Vol. 1, No. 2, June 1949, pp.79-88
7. 日本セメント協會, "콘크리트 技術者のためセメント化學雜論", 1985, pp.15-20
8. 日本建築學會, 建築工事標準任樣書·同解説, JASS10 프레캐스트 콘크리트 工事, 1991.1
9. ACI Committee 308, "Standard Practice for Curing Concrete (ACI 308-92)," ACI Standard 1992.
10. ACI Committee 517, "Low Pressure Steam Curing", J. of ACI, Aug. 1963.