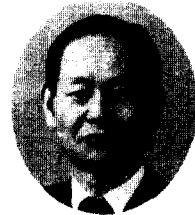


촉진양생에 따른 PC벽체 콘크리트의 강도저하와 균열문제에 대하여

For the Strength Reduction and the Cracking Problems
in Precast Concrete Walls by Accelerated Curing System



유 승 룡*



김 생 빈**

1. 서 론

지금까지 국내 PC공장에서 PC벽체에 일반적으로 적용되는 양생방법은 철판을 스팀 또는 전기로 가열하여 보양온도를 높임으로써 초기 탈형강도를 가속시키는 양생방법으로(일명 : 바페리시스템), 수증기가 콘크리트 표면에 직접 적용되는 스팀양생과는 본질적으로 다른 방법이다.

이러한 촉진양생 방법은 유럽 지역에서 2차대전 후의 심각한 주택난을 해결하기 위하여 고안 적용된 후 지금까지 일부 사용되고 있으나, 대부분의 구미지역에서는 PC벽체를 스팀양생 또는 3종 조강시멘트를 이용한 대기양생이 일반적이다. 기록된 참고문헌^(1,2)으로부터, 이와 같은 양생방법은 다음과 같은 문제점을 유발시킬 수 있음을 알 수 있었다.

1) 벽체를 세워서 양생하므로 블리딩현상을 유

발시킬 수 있다.

- 2) 시멘트 수화작용에 필요한 수분을 공급하지 않고 온도만 높일 경우 소성균열을 일으킬 수 있다.
- 3) 벽체의 한쪽면만 가열하는 경우 부재의 휨이나 뒤틀림으로 인한 잔류응력을 유발시킬 수 있다.
- 4) 고온양생을 하면 저온양생에 비해 초기 강도는 좋으나 장기강도에서는 강도 저하를 가져올 수 있다.
- 5) 벽체를 세워서 거푸집 진동다짐하면 골재가 하부로 결집하여, 상부 콘크리트의 강도는 하부 콘크리트의 강도보다 낮게 나타날 수 있다.
- 6) 다짐성형을 할 때 짧은 주기의 거푸집 진동을 주지 못할 경우 다짐의 효율성이 떨어질 수 있다.

* 정회원, 동국대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사

** 정회원, 동국대학교 토목공학과 교수, 공학박사

2. 국내 PC벽체 생산방법

국내 PC공장에서는 하루 한 번 또는 두 번 생산을 위하여 일반적으로 1시간 이내의 전양생과 4~5시간의 본양생으로 PC벽체를 생산하고 있으며, 양생후 대기에서 보양하고 있다. 두 번 생산할 경우, 생산능률과 경제성을 위하여, 5~6시간 안에 1주기를 마무리 지어야 하고, 요구되는 탈형강도(80 kg/cm²)를 얻기 위하여 80~90℃의 고온가열하여 생산하고 있다. 또한, 하루 두 번의 생산을 위하여 전양생 시간을 충분히 갖지 못하는 경우가 자주 있었다.

일반시멘트를 사용한 콘크리트에서 응결시간을 줄이고 조기압축강도를 얻을 수 있는 방법은 :

- 1) 시멘트 배합비를 크게 하고,
- 2) W/C비를 줄이고,

3) 양생온도를 높게 함으로써 얻을 수 있다. 스팀양생에 의한 PC슬라브 경우 A사의 현지 보고서에 의하면 70℃ 가열하면 80~90개, 90℃ 경우는 120~130개를 생산할 수 있으므로, 그 생산성을 위하여 고온가열이 필연적인 것으로 설명하고 있다.

콘크리트강도는 임의로 선택한 벽체를 반발경도법으로 검사한 결과 만족한 강도를 얻은 것으로 나타났다. 공시체에 대한 28일 수중양생 압축강도는 291~299kg/cm²이며, 반발경도법에 의한 결과치도 설계강도 270kg/cm²를 상회하는 것으로 밝혀졌다.

3. 건설부 표준시방서에 의한 촉진양생 방법

건설부 표준시방서에 의한 촉진양생방법은 다음에 관한 사항을 기준으로 정하고 시행하도록 하고 있다.^(3,4)

- 1) 강도증진 및 양생기간의 단축을 위해서 고압 증기양생, 대기압에서의 증기양생, 가열 습윤양생이나 합리적인 다른 방법으로 양생할 수 있다. 이 때의 촉진양생 방법은 감독자와의 협의에 의하여 정하여야 한다.
- 2) 촉진양생 개시까지의 양생방법

(1) 촉진양생 개시까지의 양생방법

(2) 양생온도의 상승구배

(3) 최고 양생온도와 지속시간

(4) 양생조내의 기압

3) 양생종료시에 양생조내의 온도와 외기 온도와의 차가 큰 경우에는 부재의 급격한 냉각을 방지할 수 있는 조치를 강구하여야 한다.

4) 촉진양생방법에 의한 콘크리트는 일반 양생방법을 사용한 콘크리트와 같은 내구성을 가져야 한다.

상기규준은 양생방법 즉 운수, 스팀 및 전열 등에 대하여 일반적으로 적용될 수 있으나, 그 한계치에 대한 규준이 없으므로, 각 PC사업체마다 적용이 상이하고 체계적인 시험이 아직 실시되지 않은 상황이고, 여기에 대한 개선방향도 제시되지 않은 상태이다.

4. 기본재료

촉진양생에 쓰이는 콘크리트의 배합비는 일반양생에서 쓰이는 배합비와 동일하고 그 재료도 일반양생 때와 동일하다. 다만 주의하여야 할 사항은 급속한 강도증진에 의한 효과가 촉진양생으로 인한 단점을 최종 강도 및 내구성에서 보완할 수 있어야 한다.

4.1 시멘트

촉진양생에서 모든 종류의 시멘트가 사용될 수 있으나, 일반양생과는 그 결과치가 매우 다르게 나타날 수 있다. 1종 보통과 3종 조강 포틀랜드시멘트가 가장 많이 사용되고 있으나, 특별한 조건, 예를 들어 내화확성이 요구되는 곳 등에서는 그에 따른 2종 중용열시멘트가 사용될 수도 있다.

4.2 자갈과 물

자갈은 고유의 내열성과 흡수성에 따라 신중하게 선택되어야 한다. 예로, 경량자갈을 사용할 경우 그에 따른 조치가 있어야 한다. 물은 일반양생 때와 동일하다.

4.3 혼화제

조기강도를 얻을 수 있는 콘크리트는 탈형강도를 얻는데 시간을 절약할 수 있으므로 PC공장에서 실용적으로 많이 고려하고 있다. 일반적으로 여름에는 응결지연제를 사용하거나 혼화제를 사용하지 않은 콘크리트배합을 적용하고, 겨울에는 급결제와 고온양생이 함께 시행된다.

급결제로는 염화칼슘과 감수급결제가 흔히 사용된다(ASTM C494, Type E). 염화칼슘은 시멘트무게의 약 1%를 사용하여도 그 효과를 볼 수 있으므로, 철근부식을 방지하기 위하여 정량을 사용하여야 한다. 감수 급결제도 염화칼슘을 포함하고 있으므로 시멘트무게에 따른 정량을 사용하여야 한다.

AE제나 감수제는 촉진양생에서 일반적으로 큰 효과가 없으나 응결지연제, 포졸란, 플라이애쉬 등은 좋은 효과를 얻을 수 있다. 단, 포졸란과 플라이애쉬는 조기강도를 얻기 위하여 주로 사용되는데 시멘트의 석회성분과 포졸란 사이에서의 느린 반응때문에 효과를 보기 위해서는 고온의 스팀양생이 필요하다.

5. ACI 고온 스팀양생규준

이상적인 고온양생주기에 따르면, 3종 조강시멘트를 사용할 경우, 최소한 3~5시간은 가열하지 않아야 하며(전양생), 2시간반동안 온도상승기간을 두며, 12시간의 동온양생, 2시간의 온도강하기간을 두는 것을 규정하고 있다(그림 1 참조). 그러나, 국내에선 높은 단가로 인해 조강시멘트를 PC벽체에 사용하지 않는 형편이고(1종 보통시멘트의 5배), 일반적으로 1종 보통시멘트를 사용하고 있으며, 이 경우 ACI⁽²⁾는 보다 연장된 전양생과 본양생 시간을 고려해야 함을 규정하고 있다.

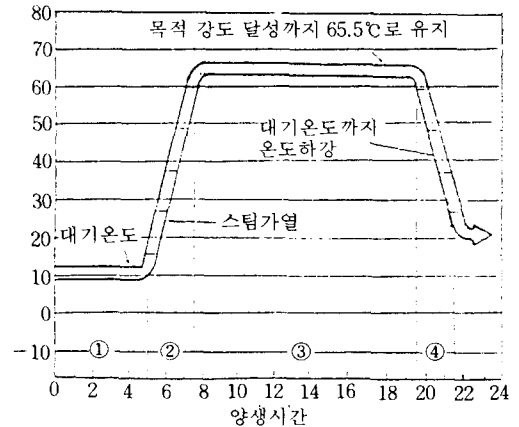
ACI는 최고 조기강도를 위하여 3~5시간의 전양생 기간을 갖는 것이 가장 적절하다고 하였다. 한편, 온도상승기간 동안 66℃정도의 스팀온도를 유지하도록 규정하였다. 스팀온도 66℃~82℃ 사이에서는 강도증가가 오히려 늦어짐을 언급하였고, 비경제적이고 최종강도의 감소를 초래함을 지

적하였다.

또한, 최고 스팀온도는 82℃를 절대로 넘지 않도록 규정하였다. 66℃의 온도로 24시간 양생하였을 때는 21℃로 28일 양생한 콘크리트보다 건조수축과 크리프에 의한 변형을 줄일 수 있다고 하였다.

적정 스팀양생 기간은 24시간 양생으로 28일강도를 얻는 것을 그 근본으로 한다. Schmid와 Schutz⁽⁵⁾는 높은 28일 강도를 위하여, 55~75℃의 온도를 양생조안에 유지하여야 하며, 24시간 안에 더 높은 강도를 얻기 위해서는 75℃ 이상의 양생온도가 필요하다고 하였다. 그러나, 28일 강도는 55~75℃로 가열한 것이 75℃ 이상으로 가열한 것보다 높았다. Higginson⁽⁶⁾는 70℃의 양생온도가 가장 높은 28일 강도를 보여주었다고 주장하였다.

양생조의 온도



- ① 전양생(2~5시간)
- ② 온도상승구배(2 1/2)
- ③ 본양생(6~12시간)
- ④ 온도하강구배(2시간)

그림 1 이상적인 고온 스팀양생주기(3종 조강시멘트)

양생온도가 강도에 미치는 영향은 시멘트의 품질, 배합 및 혼화제 등에 의하여 달라지나, 하루 양생온도가 10℃ 일때 380 kg/cm²의 28일 후기압축강도의 증가를 얻을 수 있고, 양생온도가 49℃ 일때 150 kg/cm²의 28일 후기 압축강도 증가를 얻을 수 있다는 것을 보여 준다(그림 2). 이는 양생온도가 증가할수록 콘크리트의 조기강도는 증

가하나 장기강도는 저하됨을 의미한다. 즉, 급격한 후기압축강도의 감소를 초래하므로, 실제적인 적용을 위하여 국내 실정에 맞는 그 한계치를 규명하여 적용하여야 한다.

온도구배는 시간당 5~16°C 사이를 유지하며, 그 이상 또는 이하일 경우 급격한 체적변화로 인한 균열이 발생할 수 있으므로 반드시 지켜져야 함을 명시하였다. 최고 양생온도는 탈형강도가 얻어질 때까지 일정하게 유지되어야 하며, 요구되는 시간은 콘크리트배합비와 스팀온도에 따라 정하여진다.

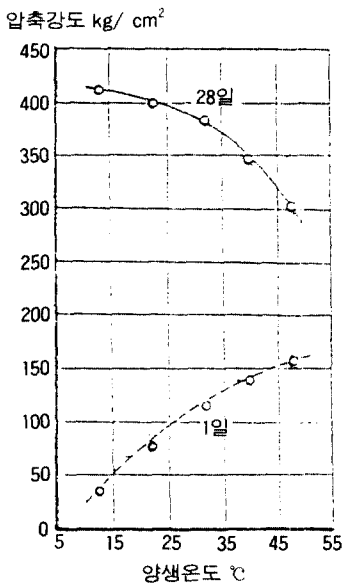


그림 2 스팀양생 온도에 따른 재령 1일과 28일 콘크리트 압축강도

6. 양생주기 작성에 고려할 사항

어떤 공장에서 적당한 양생주기도 다른 공장에서 쓰는 그 결과가 다르게 나타날 수도 있다. 왜냐하면 수많은 영향인자가 양생주기와 상호 연관관계에 있기 때문이다. 적정 양생주기를 위하여 양생하려는 부재의 크기, 모양, 목적강도, 배합비, 대기온도, 사용하는 양생 시스템, 시멘트의 종류와 품질, 자갈의 품질(내열성과 흡수성) 등을 포함하여 고려하여야 한다. 일정 콘크리트를 위한 최적

양생주기는 오직 다수의 실험을 통하여 시행착오를 거친 후 결정할 수 있다.

체적이 큰 부재의 경우 열전달이 느리므로, 부위에 따른 온도와 수분증발의 차이로 부재 중심부와 바깥부위 사이에서 잔류응력이 유발될 수 있다. 작은 부재의 경우 큰 부재보다 빨리 열전달이 되지만 큰 부재의 경우는 더 많은 자체열을 포함할 수 있고, 수화작용에 따른 열을 발산한다. 이와 같은 큰 부재는 곧 대기온도보다 높은 온도에 자체적으로 도달할 수 있다. 스팀에 의한 온도와 부재 각 부위의 온도가 동일하게 되는 시간을 lag라고 한다. 작은 부재에서는 lag값이 작고, 큰 부재에서는 lag값이 크다. 이 lag값에 따라서 양생주기는 재조정되어야 한다.

표면적이 부피에 비하여 큰 부재의 경우 열의 전달과 수분증발이 빠르므로 그에 따른 양생주기가 주어져야 한다. 부재체적에 대한 표면적의 비율이 클수록 수분의 증발과 열전달이 더욱 빨라져 부재 중앙과 가장자리 부근의 수분과 열에 대한 적용이 달라지므로 각 최적 주기가 달리 적용되어야 한다. W/C비도 스팀양생주기를 변동시킨다. 예로, 낮은 W/C비는 일반적으로 전양생기간을 짧게 한다.

스팀양생주기에 있어서 양생주기의 각 부분은 서로 상호연관관계에 있다. 즉, 전양생시간의 변화는 온도상승구배와 최고 양생온도에 영향을 미친다. 프리캐스트 부재에 대한 세부 스팀양생 방법은 다음과 같다.

6.1 전양생 기간

전양생 시간을 갖는 주된 이유는 시멘트와 자갈과 물, 공기의 열팽창 계수가 다르기 때문이다. 시멘트와 자갈은 거의 같은 열팽창 계수를 가지고 있으나 물과 공기에 있어서 물은 20배, 공기는 200배의 열팽창 계수를 가지고 있다. 콘크리트가 이 팽창응력에 저항할 정도의 충분한 조기강도를 갖지 못하면 작은 수평균열이 발생하게 되며 온도상승률이 커질수록 큰 수평균열로 발달한다. 그러나 다짐이 충분하지 않은 다공질의 콘크리트 경우는 공기와 물의 배출구가 있으므로 전양생을 하지 않

고 바로 가열하는 경우도 있다.

전양생시간은 길수록 좋으나 온도상승시간과 대응하여서 짜여져야 한다. 즉, 전양생 시간이 짧으면 온도상승비가 작게 조절되어야 하고, 충분한 전양생시간을 주었을 경우 온도상승비가 기준보다 조금 높게 할 수도 있다.

고강도의 콘크리트 구조재의 경우, 일반적으로 최소 3시간 전양생과 온도상승 16℃, 또는 4시간 전양생과 온도상승 4~16℃의 시간이 필요하다. 그리고 90%이상의 충분한 상대습도가 유지되어야 한다.

스팀양생에서 전양생은 반드시 필요한 것이며 후속되는 양생주기와의 밀접한 관계를 가지므로 근본상수로 처리되어야 한다. 이 전양생 시간은 실험에 의해서만 구해질 수 있다. 그러나 여러가지 이유로 일부 공장에서는 임의로 채택된 값을 사용하고 있다. 예로 콘크리트의 응결에 필요한 시간을 흔히 전양생 시간으로 사용하는 경우도 있다. 이 경우는 시멘트의 종류, W/C비, 대기온도, 부재단면의 모양과 크기, 콘크리트의 응결시간 등을 무시한 결과를 얻을 수 밖에 없다.

그림 1에서와 같이 프리캐스트 부재에서는 전양생 기간은 적어도 3시간 이상이 요구된다. 그러나 구미에서는 적당한 조기강도와 장기강도를 위하여 7시간 정도의 전양생이 경제적이며 가장 적당한 시간으로 권고되고 있다.

6.2 온도상승구배

프리캐스트 부재를 위한 온도상승구배는 충분한 전양생이 이루어진 후에 적용되는 것으로 11~33℃까지 다양하다. 그러나, 전양생 시간과는 관계없이 온도상승구배치가 작을수록 경제적이고 콘크리트 품질이 좋다. 콘크리트를 천천히 가열함으로써 얻을 수 있는 효과는 전양생시간을 길게 함으로써 얻을 수 있는 효과와 같다. 최대 온도구배는 33℃/시간 이하이고 전양생시간을 길게 할 경우 짧은 온도구배를 사용, 짧게 하였을 경우에는 긴 온도구배를 사용하는 것이 일반적이다. 적절한 온도상승구배를 사용하지 않았을 경우 생기는 문제는 서중콘크리트에서 생기는 문제와 유사

하다.

시멘트의 수화작용에 필요한 수분증발을 막기 위하여 양생조 안에는 높은 상대습도가 요구된다. 만약 콘크리트가 낮은 상대습도에서 양생되면 균열이 발생한다.

프리캐스트 구조재를 위하여 일반적으로 22~33℃의 온도상승구배와 3~5시간의 전양생시간이 구미에서는 일반적으로 적용되고 있다.

6.3 최대 양생온도

가장 효과적인 최대 양생온도는 66~82℃이고 만약 양생이 24시간 정도 계속될 수 있다면 이 범위 안에서 낮은 온도일수록 더욱 효과적이다. 높은 최대 양생온도는 그에 따른 더 긴 온도상승 기간을 요구한다. 높은 최대 양생 온도는 높은 조기강도와 낮은 장기강도를 일반적으로 산출한다.

Schmid와 Schutz⁽⁵⁾는 최대 양생온도와 시간이 24시간 콘크리트 강도에 매우 큰 영향을 미침을 주장하였다. 일반적으로 시간이 길수록 24시간 강도가 커진다. 그리고 24시간의 스팀양생 후에는 강도상승이 거의 없다는 것을 주장하였다.

6.4 온도하강구배

빠른 온도하강은 콘크리트의 수축으로 인하여 균열을 일으키므로 반드시 방지할 수 있어야 한다. 스팀양생 콘크리트는 온도쇼크로 인하여 균열을 일으킬 수 있다. ACI 517.2 R⁽²⁾에 의하면 최대 온도 하강률은 39℃/시간 이하로 규정되어 있다.

취약한 골재를 사용하였을 때에는 콘크리트의 변형한계가 떨어지기 때문에 온도 하강률은 더욱 하향조정되어야 한다. 온도 하강에 대한 규제는 슬라브나 보 전체에 적용되어야 하며, 온도센서가 있는 부분만 적용되어서는 안된다.

ACI 517.2 R에 의하면 급냉에 의한 콘크리트는 오직 두꺼운 벽체의 표면에만 균열을 일으키게 되므로 부재를 가로지르는 수직균열의 경우 외에는 강도나 내구성에 큰 영향이 없음이 보고되었다.

Nurse⁽⁷⁾에 의하면 콘크리트부재가 두껍거나 또는 복잡한 형상을 지녔거나, 철근이 콘크리트 표

면에 가깝게 배치되었을 때는 특히 온도하강비를 조절하여 균열을 방지하여야 한다고 주장하였다. 최대 온도하강구배는 39℃/시간 이하이나 강도감소를 줄이기 위하여 온도하강비를 더욱 느리게 할 필요가 있다.

여름철에는 탈형즉시 대기적재를 실행하여도 별 문제가 없지만, 겨울에는 이와 같이 하였을 때 온도하강비가 기준값보다 커져 균열이 발생하게 되므로 반드시 이에 대한 조치를 취하여야 한다.

6.5 기타사항

스팀양생에 관한 이론은 시험체를 이용한 실험 결과에서 일반적으로 초래되었다. 이 경우, 실험 환경은 반드시 현장환경과 동일하여야 한다. 짧은 시간에 균등한 온도만 주어지게 되어있는 실험 환경은 온도구배에 따른 실제환경과 차이가 날 때가 많다. 특히 주의하여야 할 것은 시험체의 크기에 따른 변수에 대하여 유의하여야 한다.

7. 맺음말

PC벽체는 PC아파트에서 기둥과 벽체 역할을 동시에 하는 주 구조재로서, 장거리 운송후 마감 공사를 별도로 시행하지 않고 바로 시공하는 PC의 특성상, 공장 생산에서부터 좋은 외장마무리와 일정한 콘크리트강도와 내구성이 함께 요구되는 요소이다.

현재 국내 PC공장에서는 PC벽체를 위하여 일반적으로 사용되고 있는 촉진, 전열양생 방법은 콘크리트 장기강도와 내구성에 문제점이 있으나, 경제적인 장점으로 인하여 계속 적용된다는 상이점이 있다. 이 촉진양생(바페리 양생)방법은 국내에서 PC벽체를 위하여 주로 적용되는 시스템이므로, 일반 스팀양생과 같은 양생주기에 대한 체계적인 정보와 규준이 필요하다.

그러나 국내에선 콘크리트강도에 대한 체계적인 시험이 아직 실시되지 않은 상태이고, 여기에 대한 개선방향은 물론, 이에 대한 규준도 명확히 설정되지 않은 상태이다. 따라서, 부재의 모양과 크기, 기본양생시간, 각 세부양생, 온도와 시간, 대기온도효과, 시멘트와 자갈품질에 대한 양생효과에 대하여 연구 검토를 하므로, 이에 대한 근본적인 보완책이 앞으로 마련되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 308, Standard Practice for Curing Concrete(ACI308-92),” ACI Standard 1992.
2. ACI Committee 517, “Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressures- State of the Art, : (ACI 517. 2R-80), ACI Journal Proceedings Vol. 77, No. 6, Nov-Dec. 1980, pp 429-448.
3. 프리캐스트 콘크리트 부재제작 및 조립공사 표준시방서, 대한 주택공사, 1994. 4.
4. 프리캐스트 콘크리트 조립식 건축공사 표준시방서, 건설부, 1992. 4.
5. Schmid, Emil, and Schutz, Raymond J., “Steam Curing,” Journal, Prestressed Concrete Institute, Vol. 2, No. 2, Sept.1957, pp. 37-40.
6. 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.
7. Nurse R. W., “Steam Curing of Concrete,” Magazine of Concrete Research (London), Vol. 1, No. 2, June 1949, pp 79-88. 