

콘크리트 強度의 早期判定에 관한 研究(Ⅱ)

A Study on the Early Evaluation of Concrete Strength

全 贊 基

〈富川工專 土木科 副教授, 工博〉

目 次

第4章 加熱養生 콘크리트의 水和 및 強度 特性	5.1 促進強度의 變動特性
4.1 概 說	5.2 早期強度와 28日強度의 回歸分析
4.2 加熱에 의한 溫度上昇量의 特性	5.3 早期強度判定式의 設定方法
4.3 養生條件과 壓縮強度의 發現性狀	5.4 早期強度判定式의 適用
4.4 養生方法의 最適條件 選定	5.5 養生方法과 養生條件의 評價
第5章 콘크리트強度의 早期判定方法 最適化에 대한 考察	5.6 最適의 早期判定方法의 提案
	第6章 結 論
	參考文獻

第4章 加熱養生 콘크리트의 水和 및 強度特性

4-1 概 說

콘크리트 強度에 영향을 미치는 要因은 여러 가지가 있지만, 養生 初期의 養生溫度에 의한 영향이 가장 크다고 알려져 있으며, 이 분야의 연구가 Maturity(積算溫度 또는 成熟度)와 관련하여 많이 이루어져 있다.^{35)~45)} 그러나 대부분의 경우에 低溫이나 常溫의 범위를 크게 벗어나지 못하고 있으며 특히 70°C 이상의 養生溫度와 強度의 관계에 대한 연구와 콘크리트 強度의 早期判定方法의 선정을 위한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 本章에서는 콘크리트 강도의 早期判定에 적용할 수 있는 30~100°C 범위의 加熱養生이 콘크리트의 水和 및 強度發現性狀에 미치는 영향을 검토하여, 이들 결과를 콘크리트 強度의 早期判定에 있어서 最適의 養生溫度 및 養生사이클 결정에 이용하고자 한다. 또한 이들 결과는 콘크리트 2차 제품과 매스콘크리트 및 熱帶地方에서의 콘크리트 初期強度의 特性을 파악하는 기초적 자료가 될 수 있을 것이다.

4-2 加熱에 의한 溫度上昇量의 特性

콘크리트를 加熱養生한 경우의 시멘트 水和程度를 알아보는데는 走査顯微鏡(SEM, Scanning Electron Microscope)에 의한 관찰과 시멘트 硬化體의 細孔構造 分析 및 水和物 分析 등

의 방법이 알려져 있다.⁽⁴⁶⁾⁽⁴⁷⁾ 그러나 本 研究의 實驗에서는 熱電對(Thermocouples)를 이용하여 콘크리트 供試體 中心部の 溫度上昇量을 測定 함으로써 水和反應의 程度를 비교적 간단하게 관찰하였다. 또한 溫度上昇量을 측정함과 동시에 같은 상태에 있는 콘크리트의 압축강도를 측정하여 加熱養生의 溫度條件이 콘크리트의 初期強度에 미치는 영향을 검토하였다.

그림 4-1은 加熱狀態의 콘크리트 供試體 中心部の 溫度上昇量 測定結果를 養生溫度別, 前置時間別로 나타낸 것이다. 세로축의 相對水和溫度는 供試體 中心部の 溫度와 養生水槽溫度와의 差로서 內部溫度上昇量을 의미한다.

그림 4-1로부터 (0+T), (3+T)의 경우는 養生溫度가 높을수록 相對水和溫도의 피크가 높고 빠르게 나타나고 있는 반면, (24+T)의 경우는 (0+T) (3+T)에 비해 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 이것은 공시체 중심부의 溫度上昇量이 前置時間의 有無에 따라 변한다는 것을 의미하며, 前置時間이 짧을수록 양생온도의 영

향이 크다는 것을 알 수 있다.

또한 (0+T), (3+T), (24+T)의 모든 공시체가 80°C 이상의 양생온도에서는 피크 뒤의 온도상승량이 급속한 下降을 보이고 있으나, 40~70°C의 범위에서는 그 하강이 완만하다. 또 40~70°C의 범위에서는 비교적 높은 온도상승량이 지속되는 현상을 보이고 있으며, 이런 지속 현상은 (24+T)의 경우 50~70°C의 범위에서 특히 현저하다.

한편 그림 4-1의 相對水和溫度曲線은 그림 4-2의 시멘트 水和發熱量을 傳導式熱量計로 測定하여 시간에 따른 水和發熱速度로 表示한 것⁽⁴⁸⁾과 유사함을 알 수 있다.

이것은 시멘트 硬化體의 水和特性을 고찰하는 데는 熱電對를 이용하여 공시체 중심부의 온도상승량을 측정함으로써 간단히 판단할 수 있음을 의미한다.

그림 4-2에서 초기에 나타나는 약간 높은 水和速度는 시멘트 組成礦物 중의 하나인 C₃A에 기인하는 것이지만⁽⁴⁹⁾, 그림 4-1에서는 나타

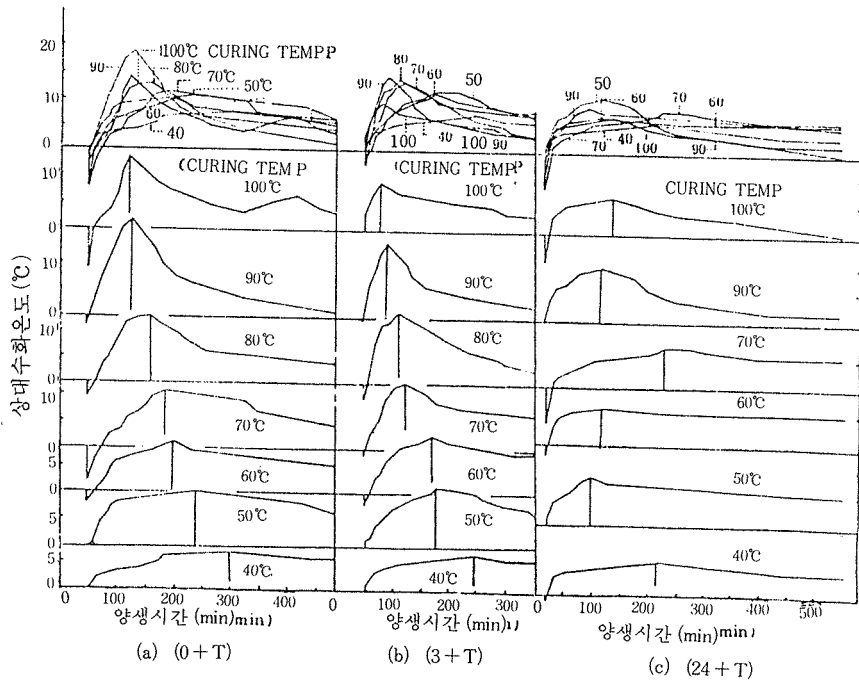


그림 4-1 양생온도별 상대수화온도

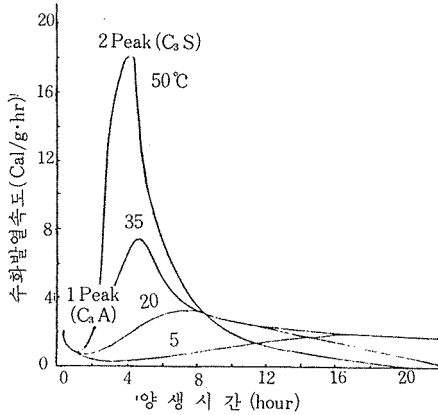


그림 4-2 양생온도별 수화발열속도

나지 않는다. 이는 C_3A 의 수화發熱이 양생溫度에 비하여 상대적으로 작기 때문이라고 생각된다.

또한 그림 4-2에서 C_3A 에 의한 제 1 피크 이후부터 C_3S 에 의해 수화속도가 다시 상승되는 時期까지를 誘導期(潛伏期, Dormant Period)라고 하지만 그림 4-1에서는 분명하지 않다. 그러나 양생초기부터 양생온도와 공시체 중심부 온도가 같아지는 시기까지를 유도기라고 간주할 수 있을 것이다.

2) 溫度上昇量の 피크時期 및 피크

양생水槽의 溫度와 공시체 내부의 溫度가 같아진 뒤 실질적인 온도상승이 일어나기 시작하는 시기는 (0+T), (3+T)의 경우 그림 4-3(a)와 같이 50~60分 정도이다. 이와 같은 현상은 常溫에서의 유도기가 2~3시간 지속된다⁴⁸⁾는 사실과 비교해 볼 때, 가열양생을 실시하면 유도기가 매우 단축된다는 것을 의미한다.

(24+T)의 경우는 온도상승이 일어나는 시기가 20分 정도로서 더욱 단축되는 것을 알 수 있다. 이는 이미 24시간 동안 수화 및 硬化가 이루어진 상태이므로 수화 및 初期의 유도기에 나타나는 Ettringite皮膜에 의한 수화妨害가 없기 때문이 아닌가 생각된다.

한편 수화反應이 가장 활발하게 일어나는 時期, 즉 相對水和溫度가 피크에 도달하는 시기는

(0+T), (3+T)의 경우 그림 4-3(b)로부터 양생온도가 높아질수록 빨라짐을 알 수 있다. 특히 (3+T)의 경우는 양생온도의 차이에 관계없이 (0+T)의 경우보다 1시간 정도가 더 빠르다. 이는 (3+T)의 경우 3시간의 前置時間 동안 규산칼슘 수화物인 $C-S-H$ (Calcium Silicate Hydrate)gel의 生成이 이루어진 뒤 C_3S 의 수화가 활발히 일어나는 上昇期로 접어들었기 때문이다. 결국 온도상승이 나타나는 시기는 (3+T)와 (0+T)가 비슷하다더라도 (3+T)의 상승속도가 크기 때문에 피크가 나타나는 시기는 빨라진다고 생각된다.

(24+T)의 경우는 70°C의 경우를 제외하고는 2~3시간 후에 피크를 나타내고 있어서 (0+T), (3+T)의 경우와 相異한 현상을 보인다. 그 이유는 70°C의 경우 공시체 중심부의 온도가 피크에 도달하는 시기가 늦어지지만 높은 수화溫度가 상당기간 지속되는 사실을 들 수 있으나 분명하지는 않다.

한편 相對水和溫度의 피크는 그림 4-3(c)로부터 (0+T), (3+T)의 경우가 (24+T)보다 큰 것을 알 수 있다. 이런 현상은 相對水和溫度의 피크를 나타낸 그림 4-3(d)로부터 더욱 분명해지며, 특히 90°C의 경우가 100°C의 경우보다 높은 것은 특이한 사실이다. 이는 수화反應이 너무 급속하게 일어나면 未水和 시멘트 粒子 주위에 다소 두꺼운 수화 生成層이 형성되어 정상적인 수화進行을 방해하기 때문이라고 생각된다.

3) 溫度上昇量の 上昇速度

양생溫度와 공시체 중심부의 수화온도가 같게 된 時期 이후의 溫度上昇速度는 相對水和溫度를 양생時間으로 나눔으로써 나타낼 수 있다. 이들 溫度上昇速度和 양생時間과의 관계에 대해 예를 든 것이 그림 4-4이다. 이 그림으로부터 양생 溫度가 높을수록 初期의 上昇速度가 큰 반면 급속한 速度低下를 나타내고 있음을 알 수 있다.

특히 이와 같은 현상은 그림 4-2와 비교해 볼 때 전체적인 양상이 매우 유사함을 알 수 있다.

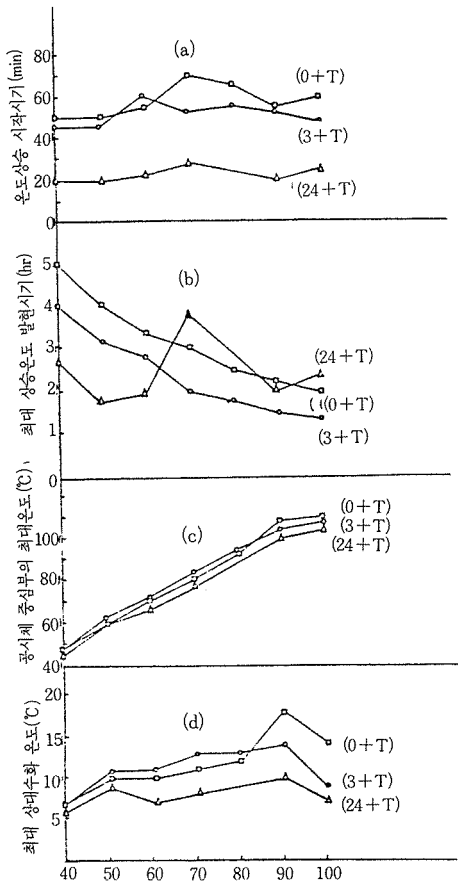


그림 4-3 양생온도와 상대수화온도

결국 이상과 같은 사실로부터 熱電對에 의한 溫度上昇量曲線 및 上昇速度曲線은 傳導式 熱量計를 이용한 水和速度曲線과 여러가지 特性이 유사함을 알 수 있다.

4-3 養生條件과 壓縮強度의 發現性狀

1) 養生條件과 壓縮強度

養生溫度와 養生時間에 따른 壓縮強度를 總合적으로 알아보기 위해서 3次元 그래픽을 이용하였으며 그중 대표적인 것이 그림 4-5와 4-6이다.⁽⁴⁵⁾ 이들 그림에서 알 수 있듯이 셸구조 형태를 하고 있어 콘크리트의 強度가 養生溫度와 養生時間에 정비례하지 않음을 확인할 수 있다. 이것은 供試體 中心部の 溫度上昇量 結果

에서도 나타난 바와 같이 養生時間과 養生溫度에 따라 水和程度가 다르기 때문이다.

또한 이런 결과를 等強度線으로 나타낸 것이 그림 4-7과 4-8이다. 이 그림에서도 等強度線의 간격이 일정하지 않은 것으로 나타내고 있어, 壓縮強度가 養生溫度와 養生時間에 따라 일정하게 증진되지 않음을 알 수 있다. 그러나 이

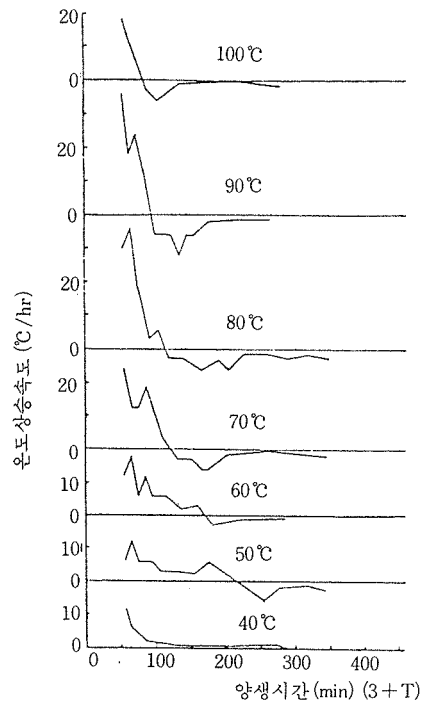


그림 4-4 양생온도별 온도상승속도

런 현상을 직접 분석하기는 어려운 점이 많아 養生溫度와 養生時間을 각각의 조건으로 하여 분석해 보기로 한다.

2) 養生時間과 壓縮強度

養生時間에 따른 壓縮強度 結果를 養生溫度別로 나타낸 것이 그림 4-9이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 (3+T)의 경우 全體養生時間이 12시간 정도 이내일 때는 高溫일수록 강도가 크게 나타난다. 한편 (24+T)의 경우 初期에는 80~100°C의 高溫에서 높은 강도를 나

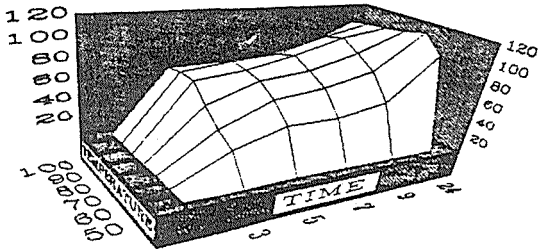


그림 4-5 양생시간-양생온도-
압축강도의 관계 I ($\phi 10 \times 20$ cm)

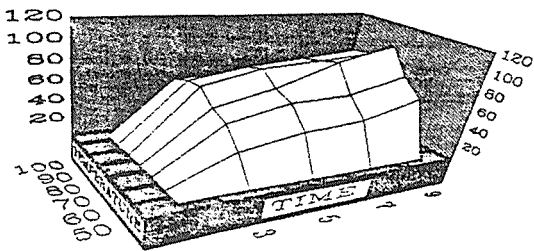


그림 4-6 양생시간-양생온도-
압축강도의 관계 II ($5 \times 5 \times 5$ cm)

타내지만, 前置時間을 포함한 全體 材令이 2日 정도가 되면 70~80°C의 경우에서 오히려 높은 강도를 나타낸다. 이것은 그림 4-1의 溫度上昇量 結果와 일치되는 현상으로, 溫度上昇량이 높을수록 콘크리트의 強度도 커지며 溫度上昇量

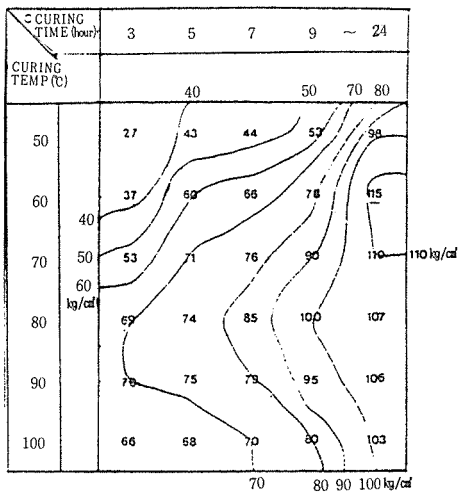


그림 4-7 等強度線 I ($\phi 10 \times 20$ cm)

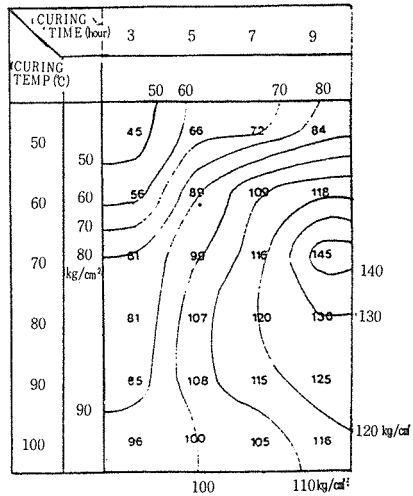


그림 4-8 等強度線 II ($5 \times 5 \times 5$ cm)

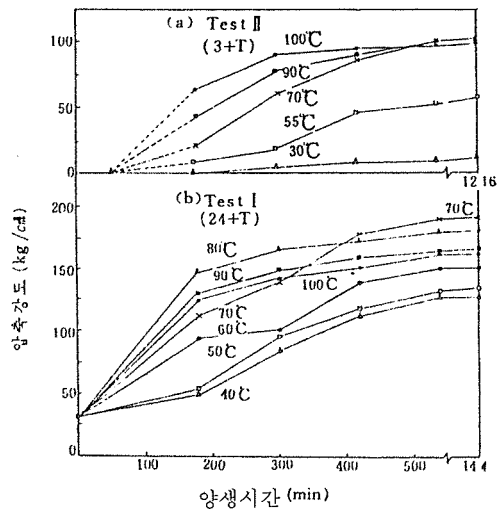


그림 4-9 양생시간과 압축강도

과 強度는 직접적인 관계가 있음을 알 수 있다. 한편 그림 4-9에서 알 수 있는 또 하나의 현상은 (3+T), (24+T) 모두 촉진양생시간이 약 500分 정도를 지나면 강도의 증진이 거의 없다는 것이다. 이는 加熱養生에 의한 콘크리트의 強度增進이 加熱初期에는 상당히 크지만, 양생시간이 길어질수록 加熱의 영향이 점점 약해져서 약 10시간 정도 이후에는 加熱의 효과가 거의 없음을 나타내는 것이다.

3) 養生溫度와 壓縮強度

그림 4-10은 養生溫度에 따른 壓縮強度의 결과를 나타낸 것이다. 그림 4-10(a)로부터 (0+8), (3+5)와 같이 全體養生時間이 8시간인 경우는 高溫일수록 強度가 높아진다. 특히 (0+8)은 70°C 이상에서, (3+5)는 80°C 이상에서 거의 같은 강도를 나타냄을 알 수 있다. 한편 (0+24), (3+21)과 같이 全體養生時間이 24시간인 경우는 (0+8), (3+5)에 비하여 養生溫度에 따른 강도변화가 작음을 알 수 있다.

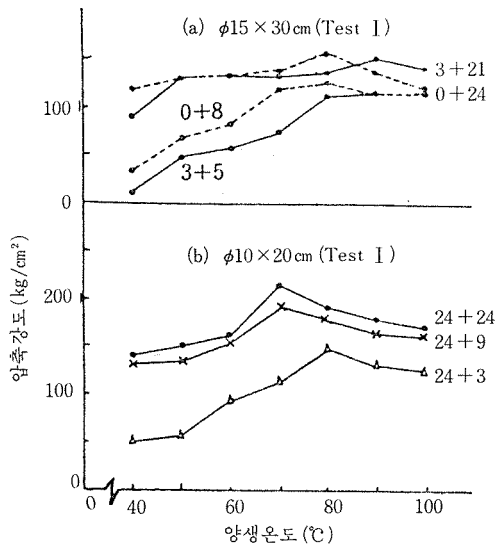


그림 4-10 양생온도별 압축강도

前置時間이 24시간인 그림 4-10(b)를 보면, 촉진양생시간이 3시간 정도로 짧은 경우는 콘크리트의 強度가 80°C에서 가장 높으며 90~100°C에서도 비교적 높게 나타난다. 그러나 촉진양생시간이 9시간 정도를 넘고 24시간 정도가 되면 70°C의 양생온도에서 가장 높은 강도를 나타낸다. 이와 같은 현상들은 그림 4-1에서 나타난 현상을 분석한 것과 밀접하게 관련되고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 4-10(b)로부터 촉진양생시간이 9시간 정도를 지나면 그 뒤에는 加熱養生에 의한 強度增進이 작음을 알 수 있다.

한편 그림 4-10으로 前置時間에 의한 영향을 검토해 볼 수 있다. 즉 그림 4-10(a)로부터 (0+8), (3+5)의 경우는 全體養生時間이 같은 8시간이지만 (0+8)의 경우가 (3+5)의 경우보다 일률적으로 높은 강도를 나타낸다. 이는 앞에서 고찰한 바와 같이 養生溫度의 영향은 양생초기에 크다는 사실을 생각하면 당연할 일이다. 따라서 콘크리트 강도를 早期判定하기 위한 방법의 선정에 있어서 短時間의 촉진양생사이클을 택할 경우는 前置時間 없이 바로 촉진양생을 실시하는 것이 비교적 높은 강도를 얻을 수 있다는 것을 시사해 준다.

그러나 (0+24)와 (3+21)과 같이 全體養生時間이 24시간으로 상당히 긴 경우는 前置時間의 영향을 특별히 발견할 수 없다. 또한 前置時間을 24시간으로 실시한 그림 4-10(b)의 경우는 養生初期부터 80°C 부근의 강도가 크게 나타나고 後期에는 70°C 부근에서 큰 강도가 나타난다. 이런 현상은 高溫일수록 큰 강도가 나타나는 그림 4-10(a)의 결과와는 相異한 것이다.

따라서 高強度가 요구되고 養生時間이 짧은 경우에는 前置時間을 두지 않는 것이 유리하지만, 양생시간이 24시간 정도로 긴 경우는 安定된 水和를 도모하기 위해서라도 3시간 정도의 前置時間을 두는 쪽이 좋다고 생각된다. 또한 前置時間을 24시간으로 할 경우는 양생온도를 70~80°C로 택하는 것이 높은 강도를 얻을 수 있어 유리하다.

4) 養生時間 및 溫度와 強度發現速度

養生時間에 따른 壓縮強度의 發現速度를 養生溫度別로 나타낸 것이 그림 4-11이다. 그림 4-11(a)의 (3+T)는 高溫일수록 強度發現速度가 급하고 피크에 도달하는 시간이 빠르지만, 피크 이후의 強度下降速度도 高溫일수록 빠르다. 즉 壓縮強度 發現의 상승속도는 高溫일수록 初期에 높고 後期에 완만하지만, 低溫일수록 初期보다 中期에 높아지고 있다.

한편 그림 4-11(b)의 (24+T)는 100°C에서보다 80°C에서 強度발현속도가 빠르며, 70°C의 경우는 중간에 약간 떨어지는 현상이 있으나

다시 회복되어 상당시간 계속되고 있음을 나타내고 있다. 따라서 지속적인 壓縮強度의 증진을 도모하는 데는 70°C 정도가 最適의 溫度임을 알 수 있으며, 이와 같은 현상은 그림 4-1로부터 입증되었다.

또한 그림 4-11은 양생시간이 약 500分 정도를 지나면 강도의 상승속도가 극히 저조함을 나타내고 있어, 高溫에 의한 強度增進의 영향은 약 10시간 정도까지가 비교적 크며 그 이후는 양생온도의 영향이 작음을 알 수 있다.

그림 4-12는 양생온도에 따른 강도발현속도를 양생시간별로 나타낸 것으로써 (24+T)의 경우를 예로 든 것이다. 이 그림으로부터 養生初期에는 55°~75°C에서 큰 상승속도를 나타내고 低溫 (40°C 정도)과 高溫(80~100°C 정도)에서는 상승속도가 작지만 양생시간이 길어질수록 60°~70°C에서 높은 上昇率을 나타냄을 알 수 있다.

한편 압축강도와 강도발현속도를 직접적으로 비교하기 위해 나타낸 것이 그림 4-13이다. 그림 4-13(b)로부터 (0+24), (3+21)의 경우 강도는 高溫일수록 커지면서 80~90°C에서 가장 크게 나타나지만, 그림 4-13(a)의 강도상승속도는 고온일수록 둔화된다. 그러나 (24+24)

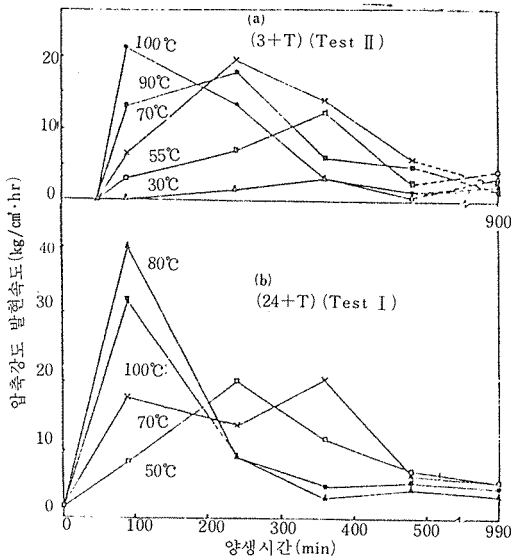


그림 4-11 양생시간 강도발현속도

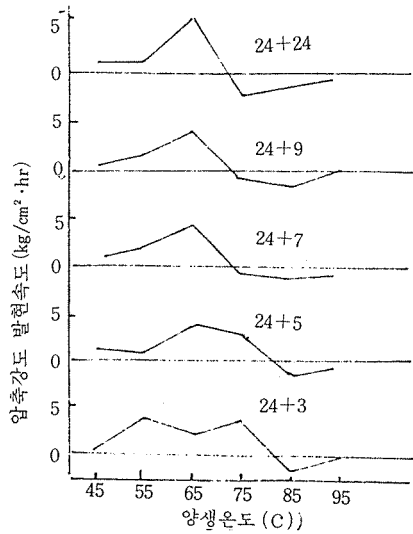


그림 4-12 양생온도별 강도발현속도

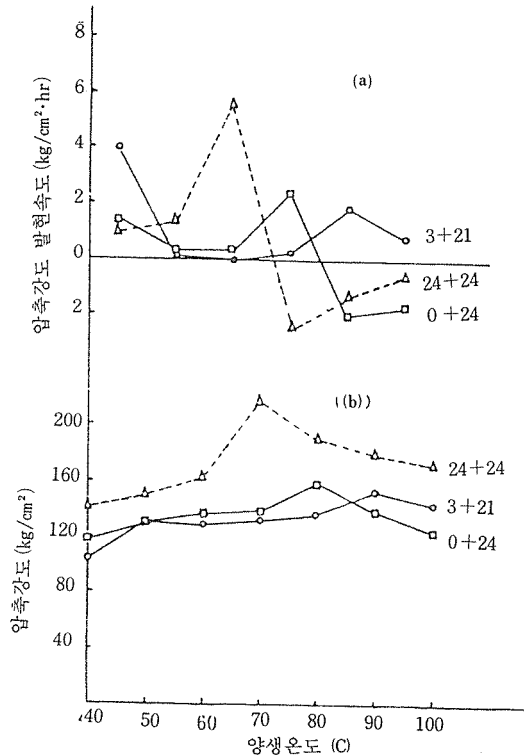


그림 4-13 양생시간별 강도특성

의 경우는 70°C에서 높은 강도가 발현되고 또 한 強度上昇速度는 60~70°C에서 높아진다.

5) 水和特性和 強度特性和의 관계

이상에서 고찰한 바를 종합적으로 비교 검토 하기 위하여 養生時間에 따른 相對水和溫度와 壓縮強度 및 強度發現速度의 관계를 일부 나타 낸 것이 그림 4-14이다.

그림 4-14는 相對水和溫도와 壓縮強度의 發現速度가 同一한 경향을 나타내고 있으며, 溫度上昇量의 上昇時間과 피크時間 및 피크는 強度發現速度의 그것들과 거의 同一한 형상임을 보여주고 있다. 또한 相對水和溫도와 強度發現速度가 下降하기 시작할 때부터 壓縮強度의 增進은 둔화되며, 약 500分 정도를 지나면 강도의 증진이 거의 없음을 보여주고 있다.

따라서 加熱養生 콘크리트의 強度發現은 공

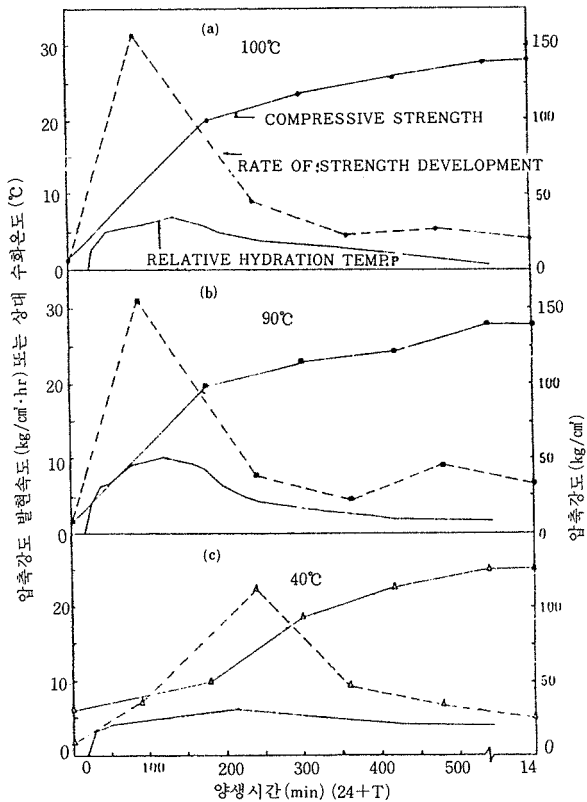
시체 중심부의 온도상승량이 높을수록 또 온도 상승량이 높은 상태로 지속될수록 강도증진이 크게 된다는 것을 알 수 있다. 또한 水和가 유 도기를 지나서 활발히 진행할 때까지인 10시간 정도의 양생 온도가 높을수록 강도의 증진이 크며, 그 이후는 加熱養生의 영향이 현저히 작 아지는 것이 분명하다.

4-4 養生方法의 最適條件 選定

콘크리트 강도의 早期判定方法을 선정하기 위한 1 단계 실험의 결과, 最適의 養生 溫度와 양생사이클에 대해서 다음과 같이 정리할 수 있다.

양생시간이 10시간 정도 이내로 짧을 경우는 高溫일수록 高強度가 발현되므로 100°C 양생온 도를 택하는 것이 유리하다. 그러나 양생시간이 10시간 이상이 되는 경우는 강도의 증진이 거 의 없으며 오히려 70°C 부근의 양생온도에서 큰 강도가 발현된다. 따라서 양생시간이 24시간 정도일 경우는 70°C의 양생온도를 택하는 것이 유리하다. 또한 양생시간이 24시간 정도 이상이 면 50°C 정도에서도 비교적 큰 강도가 발현되 므로 화상의 염려가 없는 최대온도 55°C를 택 하는 것도 유용하다고 생각된다. 이들 양생온도 는 100°C의 경우 定溫管理가 필요 없는 장점이 있고 55°C 및 70°C의 경우는 온도 쇼크를 줄이 거나 변동이 작은 장점이 있다.

또한 양생사이클의 선정은 현장의 조건과 공 사의 진행상황을 고려하여 결정해야 한다. 촉진 강도의 시험결과가 打設 當日에 필요한 경우는 全體養生時間이 10시간 이내가 되도록 해야 할 것이다. 이와 같이 10시간 정도의 試驗期間에서 는 前置時間을 두지 않고 공시체 제작 즉시 촉 진양생을 실시함으로써, 촉진강도를 어느 정도 까지 증진시키는 방법이 유용하다. 따라서 공시 체 제작을 위한 준비시간과 촉진양생 후의 空 冷時間을 고려하여 촉진양생시간은 8시간 정도 로 하는 것이 바람직하다. 한편 촉진강도 시험 결과가 打設 다음날에 필요한 경우나 콘크리트 의 타설이 오후에 이루어진 경우는 3시간 정도



4-14 양생온도별 강도특성과 온도상승량 특성

의 前置時間을 두어 養生初期의 安定된 水和를 도모하거나 24시간의 前置時間을 두어 시험사이클을 1日 單位로 하는 것이 유용하다.

이와 같은 고찰의 결과에 의하여 선정된 早期判定 試驗사이클의 종류는 표 3-6에 나타낸 바와 같다.

第5章 콘크리트強도의 早期判定方法 最適化에 대한 考察

5-1 促進強도의 變動特性

促進養生한 콘크리트의 강도가 표준양생한 콘크리트의 강도에 비해서 강도변동이 심하면, 促進養生方法을 早期判定方法으로 채택하는 것은 곤란하다. 따라서 加熱에 의해 促進養生된 早期強도가 標準養生한 강도에 비해서 어떠한 범위의 強度變動을 나타내는가를 알아보아야 한다. 이는 촉진강도를 28일강도와 相關시킬 수

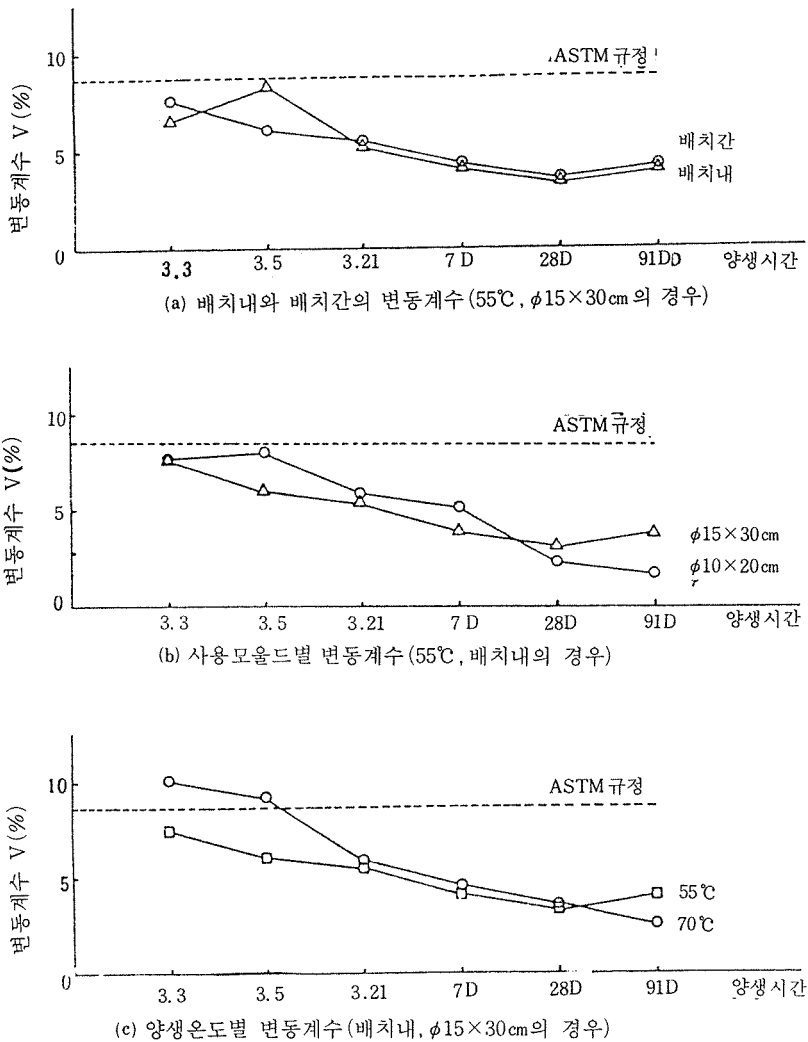


그림 5-1 양생방법별 변동계수

표 5-1 양생방법별 변동계수(2단계 실험)

사 용 모 울 드 (cm)	양생시간	변동계수 V(%) (55°C 양생)											
		배 치 내						배 치 간					
		B1	B2	B3	B4	B5	평균	B1	B2	B3	B4	B5	평균
φ15×30	3+3hr	11	10.7	5.9	3.6	6.6	7.6	7.4	6.2	7	7.8	4.2	6.5
	3+5hr	5.5	5.6	7.2	3.9	7.6	6	12.8	6.9	10.5	7.3	7.5	9
	3+21hr	5.8	4.8	3.8	5.2	8	5.5	10.8	3.8	2.3	5.1	4.7	5.3
	7D	4.3	3.7	2.8	3.4	5.8	4	3.5	2.8	1.9	5.7	5.8	4.3
	28D	4.9	3.1	1.8	3	3.5	3.3	3.6	1.8	1.7	5.2	3	3.4
	91D	4.9	3.7	-	-	-	4.3	3.9	-	-	-	-	4.1
φ10×20	3+3hr	9	12.4	6.2	2.5	8.3	7.7	12.2	10.9	4.1	4.8	3.5	7.1
	3+5hr	7	6	11.1	3.6	12.1	8.7	6.3	11.8	9.3	3.5	11.2	8.4
	3+21hr	5.9	5.7	6.7	3.3	7.8	5.9	2.2	2.9	6.3	3.8	5.9	4.2
	7D	5.8	-	2.8	2.7	8.8	5.2	5.5	-	1.4	4.8	1	3.6
	28D	2.8	-	2	1.6	3	2.4	1.6	-	2.5	1	3.5	2
	91D	1.8	-	-	-	-	1.8	1.1	-	-	-	-	1.1

사 용 모 울 드 (cm)	양생시간	변동계수 V(%) (70°C 양생)											
		배 치 내						배 치 간					
		C1	C2	C3	C4	C5	평균	C1	C2	C3	C4	C5	평균
φ15×30	3+3hr	9.4	7.9	9.3	14.9	9.7	10.2	9.6	5.5	5.7	7.6	11.2	7.6
	3+5hr	6.1	4.2	9.8	10.1	15.6	9.2	10.5	3.7	6	9.2	12	8.3
	3+21hr	7.2	4.8	6.7	8.3	3.2	6	2.7	6.3	5.4	10	1.4	5.2
	7D	3.5	3.5	5.9	4.9	5	4.6	3.4	3.9	8	4.2	5.4	5
	28D	4.4	3	2.5	5.1	3.5	3.7	2.9	2.3	2.8	4.4	4.2	3.3
	91D	-	-	-	2.7	2.4	2.6	-	-	-	3.3	3.4	3.4
φ10×20	3+3hr	11	10.3	10.8	16	10.2	11.7	9.1	14.2	10.9	7.9	6.8	9.8
	3+5hr	3.8	6.9	7	6.2	5.5	5.9	5.6	8.3	4.9	2.5	10.8	8.4
	3+21hr	3.2	5.7	5	8.3	9.9	6.4	3.4	3.8	5.8	3.3	2.8	3.8
	7D	4.7	5.2	3.1	5.3	-	4.7	2.4	1.4	4.3	6.5	-	4.2
	28D	2.5	3.1	2.6	3.9	-	3.2	2.2	2.5	1.4	2.2	-	2.1
	91D	-	-	-	3.3	-	3.3	-	-	-	2.7	-	2.7

있을 것인가, 또 축진강도를 콘크리트의 強度特性으로 볼 수 있을 것인가를 결정하는 중요한 요인이 되기 때문이다. 즉 축진강도로 콘크리트의 品質管理를 할 수 있는지를 검토하는 기본 사항인 것이다.

강도의 변동을 검토하기 위한 실험은 2단계 실험에서 1차적으로 실시하였다. 즉 5종류의 배

합을 각각 5배치씩 실험하였으며, 배치內 변동의 결과와 배치間 변동의 결과를 표 5-1에 나타내었다. 표 5-1의 배치內에서의 평균은 각 배치에서의 3개 공시체 대한 변동계수를 평균한 것이다. 또 배치間에서의 평균은 각 배치에서 실시한 3개 공시체의 강도를 평균한 뒤 그 평균값으로 5배치에 대한 변동계수를 구한 것

이다. 이들 결과를 그림으로 나타낸 것이 그림 5-1이다.

그림 5-1에 의하면 촉진양생시간이 짧을수록 28일 표준양생의 경우보다 큰 변동계수를 나타내지만, 양생시간이 (3+21)의 경우는 28일 표준양생의 변동계수와 거의 같음을 알 수 있다. 배치内の 변동계수와 배치間의 변동계수는 거의 차이가 없으나 배치間의 경우가 약간 작게 나타난다. 또한 55°C의 경우와 70°C의 경우를 비교해 보면 차이가 거의 없으나 55°C의 경우가 약간 작다. 공시체의 크기에 따른 변동계수의 변화는 거의 발견할 수는 없다.

전체적인 변동성을 보면 촉진양생에 의한 변동계수가 표준양생의 변동계수보다 다소 크지만 대부분 10% 미만이다. 변동계수의 기준은 ASTM C684-74⁽⁴⁾에 언급되어 있을 뿐 특별한 기준은 거의 없다. ASTM 기준에 의하면 배치内の 경우 3.6%, 배치間의 경우 8.7%로 되어 있다. 이 기준을 본 실험의 결과와 비교해 보면 배치間의 경우는 기준보다 작은 편이나 배치内の 경우는 기준보다 약간 크다. 그러나 ASTM의 배치內 기준이 너무 낮게 되어 있어서 일률적으로 비교하는 것은 타당하지 못하다.

따라서 촉진강도의 변동계수는 표준양생강도의 변동계수와 비교하는 것이 바람직하며, 표준양생의 변동계수에 비해 큰 차이가 없으면 대체로 허용범위에 들어간다고 할 수 있다. 본 연구에서 나타난 촉진강도의 변동계수는 표준양생강도의 변동계수와 큰 차이가 없고 대체로 ASTM 배치間 기준인 8.7% 미만이므로 양호하다고 볼 수 있다.

이러한 결과는 촉진강도와 표준양생강도의 물리적 특성이 크게 다르지 않고, 강도發現의 메카니즘이 유사함을 의미한다. 이는 촉진강도와 28일 강도를 相關시킬 수 있으며, 촉진강도에 의해 28일강도를 추정하는 데 무리가 없음을 뜻한다. 즉 촉진양생한 콘크리트의 강도로 28일강도를 추정할 수 있는 중요한 뒷받침이 된다. 또한 촉진강도를 28일강도 대신에 콘크리트 강도의 특성값으로도 사용할 수 있다는 것을

시사해 주는 것이다.

한편 3, 4, 5 단계의 실험에서 나타난 強度의變動을 검토해 본 결과(지면관계상 생략), 1단계와 마찬가지로 促進強度의 변동계수가 標準養生 強度의 변동계수보다 약간 클 뿐이며 전체적으로 작은 변동성을 나타내주고 있다.

5-2 早期強度와 28日強度의 回歸分析

1) 試驗結果의 回歸分析

早期強度로 28日強度를 推定하기 위해서는 일반적으로 回歸分析을 실시해야 한다. 早期判定을 위한 本實驗인 D, E, F實驗의 強度結果는 지면관계상 생략하였고 SPSSX 프로그램으로 回歸分析 한 결과의 일부가 표 5-2에 나타나 있다.

(1) 相關係數

相關係數 r 은 표 5-2에 의하면 양생사이클이나 養生溫度에 관계없이 대부분 0.8이상을 보여주고 있다. 이는 早期強度와 28日強度가 直線 回歸式에 의해 좋은 상관을 이루고 있음을 의미한다. 특히 양생시간이 길어질수록 높은 상관계수를 보여주고 있으며, 養生溫度의 차이에 의한 變化는 거의 없음을 알 수 있다. 또한 양생방법이 恒溫수조인 경우와 恒溫습상조인 경우에서의 차이도 거의 없으며, 사용모듈드의 차이에 의한 變化도 거의 발견할 수 없다.

(2) 回歸係數의 기울기

回歸係數의 기울기 a 는 早期強度와 28日強度의 相關性을 나타내는 지표로서, 그 값이 1에 가까울수록 두 강도가 1對 1로 대응한다는 것을 의미하며 유용한 방법이라고 할 수 있다. 그림 5-2는 回歸係數의 기울기 a 의 養生溫度別結果를 나타낸 것이다.

그림 5-2에 의하면 양생시간이 짧을 경우는 70°C에서 보편적으로 1에 가깝고 100°C나 55°C의 경우는 70°C보다 큰 편이지만 일정하지는 않다. 그러나 양생시간이 (24+8)이나 (24+24)인 경우는 55°C의 기울기가 1에 가장 가까우며 다음으로 70°C, 100°C의 순서이다. 이와같이 양

표 5-2. 회귀분석 결과(55°C 양생)

실험번호	양생매체	사용모울드 (cm)	양생시간	실험회수 N	회귀계수 b	회귀계수 a	상관계수 r	표준오차 Se
DLS	H.W	φ15×30	0+8	30	129	1.796	.87732	30.6
DL3.3	"		3+5	40	150	2.461	.75825	49.2
DL3.21	"		3+21	70	66	1.475	.85073	37
DL24.8	"		24+3	40	135	2.003	.85516	36.4
DL24.3S	S.C		24+3	33	144	1.67	.70969	51.8
DL 7D	S.W		7DAYS	40	57	1.099	.93239	26.6
DM8S	S.C	φ10×20	0+8	30	103	1.7	.82165	35.6
DM24.3	H.W		24+3	40	134	2.017	.87569	33.6
DM24.8	"		24+8	30	114	1.264	.8561	32.4
DM24.24	"		24+24	66	81	1.16	.89602	29.4
DM24.3S	S.C		24+3	33	136	1.831	.85082	35.7
DM24.8S	"		24+8	30	108	1.222	.8721	30.7
DM3D	S.W		3DAYS	30	124	1.023	.84367	34.2
DM7D	"		7DAYS	70	82	0.906	.91518	27.2
DS8	H.W	5×5×5	0+8	30	202	1.837	.81018	56.8
DS8S	S.C		0+8	30	157	1.689	.89581	43.2
DS3.24	H.W		3+24	30	93	1.5	.81879	61.6
DS24.3	"		24+3	36	190	1.789	.87594	45.5
DS24.3S	S.C		24+3	32	179	1.75	.91843	37.6
DS24.8	H.W		24+8	30	156	1.154	.87528	47
DS24.8S	S.C		24+8	30	161	1.097	.87551	45.6
DS24.24	H.W		24+24	53	116	1.04	.91728	38.7
DS3D	S.W		3DAYS	30	153	1.036	.91611	39
DS7D	"		7DAYS	69	85	0.99	.90552	41.2

주 : 양생방법의 H. W는 Hot Water(70°C), S. C는 Steam Curing(70°C)
S. W는 standard Water(23±2°C)이다.

주 : 표준오차는 추정값에 대한 것이다.

생온도에 따른 강도발현의 특징과는 다소 다른 현상이 나타나는 이유는 100°C나, 70°C의 高温 養生보다 55°C 정도의 양생이 강도의 범위에 관계없이 일정한 강도증진을 나타내는 것을 의미한다. 즉 물-시멘트비 등에 의해 강도가 변하더라도, 낮은 강도의 범위나 높은 강도의 범위에 관계없이 양생시간에 따른 강도증진이 일정하다고 볼 수 있다. 반대로 100°C의 경우는 강도의 범위가 달라지면 강도증진 현상도 달라져서 高强度일수록 강도증진이 크게 된다는 것을 의미하는 것이다.

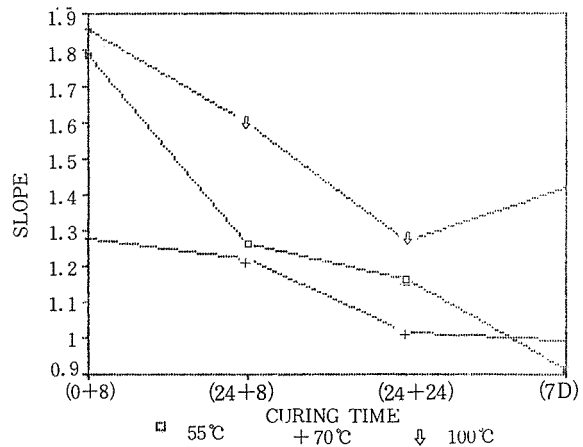


그림 5-2 양생온도별 회귀계수 기울기 a

또한 사용모우드별 회귀係數의 기울기 a(결과 생략)는 사용모우드가 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 인 경우는 차이가 거의 없으나 $5 \times 5 \times 5 \text{cm}$ 의 모르터의 경우는 전반적으로 커지는 경향이 있다. 그러나 양생시간이 길어질수록 차이가 작아진다. 특히 標準養生 7일의 경우에는 모우드에 의한 차이가 거의 없다. 이는 促進養生의 초기에는 공시체 크기에 따라 강도 증진의 현상이 달라지지만, 양생시간이 길어지면 공시체 크기에 의한 차이가 거의 없음을 의미한다.

(3) 回歸係數의 절편

한편 양생온도별 回歸係數의 절편 b(결과 생략)는 작을수록 28日強度에 근접하기 때문에 좋은 방법이라고 볼 수 있다.

그림 5-3은 回歸係數의 절편 b를 나타낸 것으로 양생시간이 짧은 (0+8)의 경우는 양생온도가 높을수록 b값이 작게 나타나지만 양생시간이 (24+24)와 같이 길어지면 b값이 거의 같아진다. 이런 현상이 전체적으로 같지는 않지만, 양생초기의 高温이 강도증진에 기여함은 물론 回歸係數 b를 작게하는 작용을 한다고 볼 수 있다.

한편 공시체 크기별 回歸係數 b(결과 생략)는 앞에서 고찰한 強度나 回歸係數 a의 경우와 유사하다. 즉 $\phi 15 \times 30 \text{cm}$ 와 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 의 콘크리트 공시체 경우는 거의 동일하며, $5 \times 5 \times 5 \text{cm}$ 의 모르터 공시체는 일반적으로 이들보다 큰값을 나타낸다. 그러나 양생시간이 길어짐에 따라 전체적으로 비슷한 값을 나타내고 있다.

(4) 有効率

28日強度에 대한 早期強度의 比率을 有効率(Efficiency)이라고 하며 有効率이 클수록 좋은 養生方法이라고 할 수 있다. 有効率은 그 특성이 回歸係數의 기울기 a와 유사하여 a가 1에 가까울수록 有効率도 커져서 早期強度가 28日強度에 근접하게 된다. 표 5-3은 양생온도별 有効率을 나타낸 것으로, 양생온도에 관계없이 (3+5), (24+3), (0+8), (24+8), (3+21), (24+24), (7D), (14D)의 순서대로 有効率이 커진

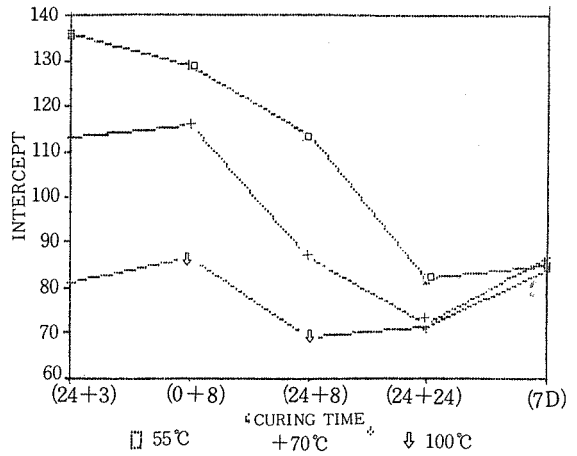


그림 5-3(a) 양생온도별 회귀계수의 절편 b

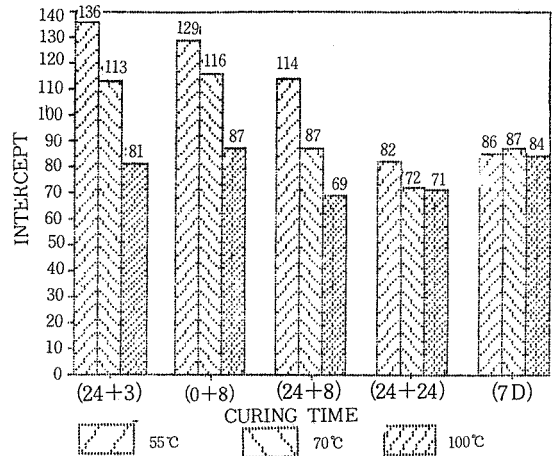


그림 5-3(b) 양생온도별 회귀계수의 절편 b

다. 또한 양생시간이 짧을 때는 70°C나 100°C에서 크고 양생시간이 길어지면 55°C, 70°C에서 높은 유효율을 나타낸다.

한편 促進養生時間이 5시간 이하일 때는 20%보다도 작은 경우가 있다. 즉(DL 3.5)의 경우는 실험방법으로의 채택에 신중을 기하여야 할 것이다. 반면 전체양생이 같은 8시간이라도 (DL8)같은 경우는 (DL3.5)보다 有効率이 크며, 특히 (24+3)의 형태인 (DL24.3), (DL24.3S) 등보다도 크다. 이는 前置時間을 길게 하는 것보다 促進養生時間을 늘게 하는 것이 오히려 더 유용하다는 것을 의미한다.

표 5-3 유효율(Fa/F28×100)(%)

양생시간 (hr)	φ15×30cm			φ10×20cm			5×5×5cm		
	55°C	70°C	100°C	55°C	70°C	100°C	55°C	70°C	100°C
0+8	29	37	36				22	31	36
				36	40	27	32	38	37
3+5	13	25							
3+24	43	55	51						46
24+3	19	32		18	34		23	35	
	20	33		20	35		23	39	
24+8				44	51	46	47	49	45
				47	52	45	47	52	47
24+24				50	63		60	65	
3D				51	50		53	46	46
7D	66	68		61	70		65		

<參考文獻>

- (35) W. Czernin, 徳根吉郎譯, 建設技術者のためのセメント化學, 技報堂, 1978.
- (36) T. C. Powers, The Chemistry of Cement, Edited by H. F. W. Taylor, American Press, London, 1964.
- (37) F. M. Lea, The Chemistry of Cement and Concrete, 3rd ed., Chemical Pub. Co., New York, 1971.
- (38) A. M. Neville, Properties of Concrete, 2nd ed., Pitman Press, Great Britain, 1977.
- (39) Concrete Manual, 8th ed., US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1978.
- (40) 近藤連一, 後藤誠史, 大門正機, 保坂義公, セメントの水和におよぼす加熱養生の影響, セメント・コンクリート, No. 321. 1973. pp.2~8.
- (41) 仕入豊和, 地濃茂雄, コンクリートの凝結・硬化におよぼす温度条件の影響—セメントの水和反應過程からの考察, 日本建築學會論文報告集, 293號, 1980. 7.
- (42) 同, 320號, 1982. 10.
- (43) 鈴川論一, セメントの水和熱, セメント・コンクリート, No. 253, 1968.
- (44) 大井孝和, 養生温度の變動がコンクリート強度發現に及ぼす影響—積算温度方式の適合性に關連して—, 日本建築學會論文報告集, 307號, 1981. 9.
- (45) 全贊基, 元永壽, 加熱養生 콘크리트의 Maturity 適用에 관한 研究, 富川工業專門大學論文集, 第9輯, 1988.
- (46) 大井孝和, コンクリート供試體におはるセメント水和の進行とコンクリート強度發現の關係, 日本建築學會論文報告集, 343號, 1984. 9.
- (47) 地農茂雄, 仕入豊和, コンクリート強度發現性狀におよぼす温度履歴条件の影響, 日本建築學會論文報告集, 337號, 1984. 3.
- (48) コンクリート技術者のためのセメント化學雜論, セメント協會 1985. p.16.
- (49) 笠井順一, セメント化學概念(その4), コンクリート工學, Vol. 22, No. 2, 1984. 2, pp. 50~53.