

콘크리트 強度의 早期判定에 관한 研究 (Ⅲ)

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 5 章 콘크리트 強度의 早期判定方法
最適化에 대한 考察

5.2 早期 強度와 28日 強度의 回歸分析

5.3 早期 強度判定式의 設定方法

5.4 早期 強度判定式의 適用

5.5 養生方法과 養生條件의 評價

5.6 最適의 早期判定方法의 提案

第 6 章 結 論

參考文獻

5-2 早期 強度와 28日 強度의 回歸分析

2) 養生條件과 壓縮強度의 關係

(1) 양생온도의 영향

양생방법별 강도결과를 각 모울드별로 양생 온도에 따른 변화를 나타낸 것이 그림 5-4이다.

그림 5-4에 의하면 促進養生時間이 짧은 (0+8)의 경우는 70°C 및 100°C의 양생에서 가장 크게 나타남을 알 수 있다. 그러나 양생사이클이 (3+21)과 같이 길어지면 70°C의 경우 가장 큰 강도를 나타낸다. 또한 (24+8)의 경우가 되면 양생온도에 의한 차이는 거의 없으나 70°C의 경우가 가장 크고 55°C와 100°C의 경우는 비슷한 결과를 나타내고 있다. 특히 (24+24)와 같이 促進養生 時間이 길어지면 70°C, 55°C, 100°C의 순으로 강도가 크게 나타난다. 이와 같이 양생 시간이 짧을 경우 高溫에서 높은 강도가 얻어지고, 양생시간이 길어지면 50~70°C의 양생온

도에서 더 큰 강도가 얻어진다는 것은 4장에서 고찰한 결과와 일치한다.

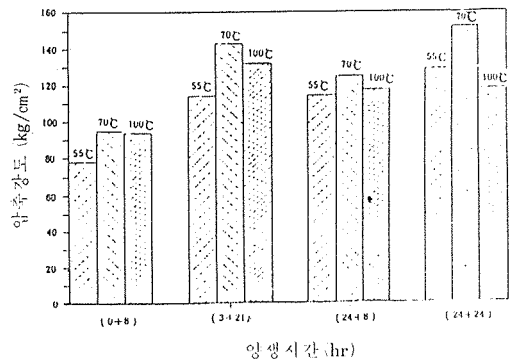


그림 5-4 a) 양생온도별 압축강도

(2) 양생시간의 영향

그림 5-5는 각 양생온도별로 양생시간에 따른 변화를 나타낸 것이다. 그림 5-5에 의하면

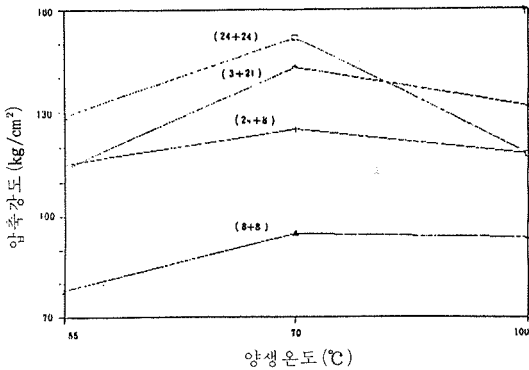


그림 5-4 (b) 양생시간별 압축강도

양생온도에 관계없이 (3+5), (24+3), (0+8), (24+8), (3+21), (24+24), (7일), (28일)의 순서로 강도가 점차 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 각 양생온도에 따른 시간별 변화의 경향은 다르다. 즉 짧은 양생시간에서는 100°C와 70°C의 경우에 높은 강도가 나타나지만, 양생시간이 길어질수록 70°C와 55°C에서 높은 강도가 발견되는 것을 알 수 있다. 이들 결과로부터 양생시간이 짧은 경우는 70°C나 100°C의 경우가 유리하며 前置時間보다 促進養生時間을 길게 하는 것이 바람직 하다고 생각된다.

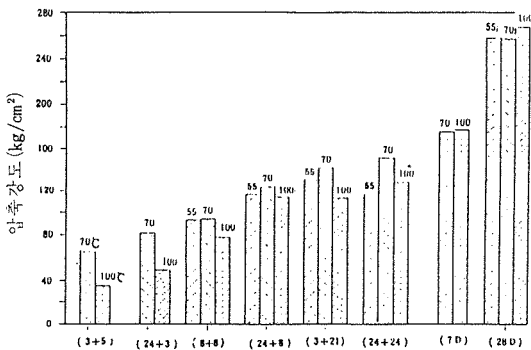


그림 5-5 양생시간별 강도

(3) 양생매체의 영향

양생매체의 변화에 의한 강도의 영향은 공시체 크기와 養生사이클이 같을 때는 항온수조양생의 경우와 항온항습조양생의 경우가 거의 차

이가 없으며, 대체적으로 항온항습조의 강도가 약간 크게 나타날 뿐이다. 따라서 양생매체를 물과 증기로 하는 경우는 그 차이가 거의 없다고 볼 수 있다.

(4) 사용모울드의 영향

그림5-6은 사용모울드에 따른 변화를 나타낸 것으로, $\phi 15 \times 30 \text{cm}$ 의 경우와 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 의 경우는 거의 같게 나타나고 있다. 그러나 $5 \times 5 \times 5 \text{cm}$ 의 모르터 공시체의 강도는 콘크리트 공시체의 강도보다 상당히 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 票準養生한 28일강도의 경우도 $\phi 15 \times 30 \text{cm}$ 의 결과와 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 의 결과가 거의 같고, $5 \times 5 \times 5 \text{cm}$ 의 결과는 크게 나타난다. 그러나 강도차이의 비율은 促進養生한 쪽이 더 크다. 이는 모르터 공시체의 경우, 크기가 작고 굽은 골재를 제거한 상태이기 때문에 促進養生의 효과가 현저하기 때문이라고 생각된다. 또한 모르터 공시체는 크기가 작아서 제작이나 켈핑을 할 때 불리한 면이 있을 수 있으나, 양생이 잘 되어 높은 강도가 나타나므로 변동계수에는 큰 변화가 없다고 생각된다.

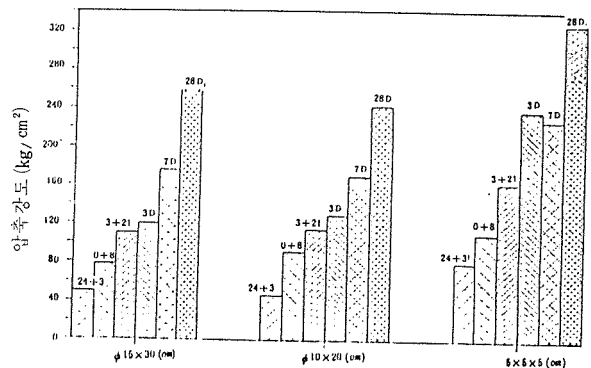


그림 5-6 사용모울드별 압축강도

5-3 早期強度判定式의 設定方法

1) 概說

相關성이 있는 두 變數의 관계는 일반적으로

回歸分析을 실시하여 回歸式으로 나타낼 수 있다. 回歸式은 實驗으로 얻어진 誤差의 범위 안에서 推定할 수 있으나 실제로 推定値를 밀도는 確率이 50%이기 때문에 不合格으로 해야 할 것을 合格으로 評價할 위험성이 매우 높다.

이런 위험을 줄이기 위해서 強度分布의 下限線을 推定式으로 하는 방법이 있으나 이 때는 推定値를 밀도는 확률이 거의 없으므로 필요 이상의 安全側이 되어 非經濟的이다.

한편 下限線의 채택과 유사한 것으로 回歸式에서 적당한 값을 빼는 方法이 있다. 예를 들어 早期強度와 28일強度의 관계에서 信賴限界를 90%로 잡을 경우 回歸式의 절편에서 1.28σ 를 빼서 사용하는 방법이다. 그러나 이 방법은 早期強度에 대응한 28日強度중의 약 90%정도가 이 추정치 이상이 될 것이라고 기대되는 것에 지나지 않는다.

결국 回歸式을 적절한 방법으로 수정한 推定式을 만들어야 하며, 이 때 추정식에 의해서 얻어진 결과와 실제 측정된 결과가 많은 차이를 나타내지 않도록 유의할 필요가 있다. 早期判定方法에서 이와 같은 추정식을 얻기 위해서는 우선 促進強度나 早期強度의 分布에 대하여 28日強度의 分布를 고려해야 한다. 또한 이들이 強度評價基準에 適合하는 確率의 기대값과, 추정식에 의해 얻어진 추정값의 適合確率과의 관계에 의하여 強度推定式을 설정해야 한다.

이와같은 合理的인 推定式을 設定하기 위한 研究는 일부 이루어진 것이 있으나^{(50)~(54)} 仕入豊和와 榊田佳寛에 의한 研究결과가^{(55)~(57)} 많이 이용되고 있으며 日本의 JCI에서 발행한 콘크리트品質의 早期判定指針(JCI R2)⁽⁶⁾에서도 채택하고 있다. 따라서 本研究의 回歸分析結果도 仕入豊和의 式을 이용해서 분석하기로 하고 먼저 仕入豊和의 推定式을 요약해서 정리하기로 한다.

2) 回歸式 形態의 選定과 推定式을 위한 假定 促進強度 및 3日, 7日의 早期強度와 28日強度의 相關性을 검토하기 위해서는 強度분포에 알

맞은 回歸式의 形態를 선정해야 한다. 回歸式의 形態는 單純回歸과 重回歸에 따라 달라진다. 單純回歸은 독립변수와 종속변수가 1대 1의 관계인 경우로서 直線인 경우와 非直線의 경우로 구분된다. 直線回歸인 경우는 식(5-1)과 같이 나타내진다.

$$\bar{F}_{28} = a \cdot F_a + b \quad (5-1)$$

여기서 \bar{F}_{28} : 28일의 推定強度

F_a : 促進強度 또는 早期強度

a, b: 回歸方程式의 係數로서 a는 기울기, b는 절편.

또한 非直線回歸은 累乘曲線, 指數曲線, 對數曲線등이 있으며 각각 식(5-2)~(5-4)로 나타내진다.

$$\bar{F}_{28} = a \cdot F_a^b \text{ 또는 } \log \bar{F}_{28} = \log a + b \log F_a \quad (5-2)$$

$$\bar{F}_{28} = a \cdot 10^{b F_a} \text{ 또는 } \log \bar{F}_{28} = \log a + b \cdot F_a \quad (5-3)$$

$$\bar{F}_{28} = a + b \log F_a \quad (5-4)$$

한편 重回歸分析은 從屬變動 1개에 獨立變數가 2개 이상인 경우에 해당된다.

본 연구에서 실시한 시험결과를 검토하고 각각의 回歸式으로 예비분석해 본 결과는, 單純線形回歸式의 상관계수가 좋게 나타났다. 또한 다른 非線形回歸式도 線形으로 置換이 가능하기 때문에 본 시험결과는 식(5-1)과 같은 單純值線回歸式으로 분석하였다.

강도분포와 강도평가 기준을 고려한 強度推定式을 유도하기 위해서는 回歸式 形態의 선정과 더불어 다음과 같은 가정이 필요하다.

(가정 1) 回歸式은 식(5-1)과 같은 직선식이며, 각 강도값은 回歸式에 대하여 正規分布한다. 또한 표준오차는 Se 라고 한다.

(가정 2) 促進強度 또는 早期強度의 分布는 正規分布 $N(m_a, \sigma_a^2)$ 이다.

(가정 3) 28日強度의 分布는 정규분포 $N(m_{28}, \sigma_{28}^2)$ 이다.

(가정 4) 28일강도(F_{28})의 표준편차 σ_a 의 비

$$\frac{\sigma_{28}}{\sigma_a} \text{는 回歸式의 기울기 } a \text{와 적어도}$$

같으며 식 (5-5)처럼 표시된다.

$$\frac{\sigma_{28}}{\sigma_a} \geq a \text{ 또는 } \sigma_{28} \geq a \cdot \sigma_a \quad (5-5)$$

(가정 5) 早期強度와 28日強度의 관계에서 回歸式에 대한 誤差의 범위가 일정하다. 즉 두 강도를 나타낸 散布度가 일정한 幅을 갖는 帶를 형성한다.

3) 強度推定式의 設定順序와 OC곡線

합리적인 강도추정식을 設定하기 위해서는 먼저 적용해야 할 強度評價基準을 고려하고 早期判定試驗의 대상이 되는 강도값의 분포를 생각해야 한다. 다음에 이 早期強度의 分布에 대해서 28日強度의 分布群이 평가기준에 적합하는 확률(즉 합격률)의 평균적인 값을 계산해야 한다. 그리고 推定式에 의해 얻어지는 28日強度 추정치의 분포군의 합격율을 구한 뒤, 測定된 28日강도와 推定된 28日強度의 평균적인 합격율을 비교하는 것으로 된다.

強度分布群의 平均的인 합격율을 나타내는데

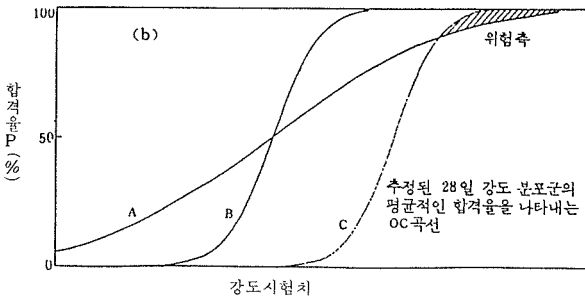
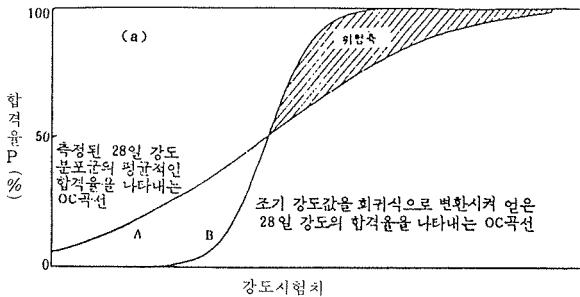


그림 5-7 OC 곡선과 위험률

OC曲線(Operating Characteristic Curve, 檢査特性曲線)^{(58)~(63)}이 있다. 그림5-7의 A線은 측정된 28일강도 (\bar{F}_{28})分布群의 평균적인 합격율을 나타내는 OC曲線이다. 또한 B線은 28일강도 推定값(\bar{F}^{28})의 합격율을 나타내는 OC曲線이다.

그림 5-1(a)에서 A선은 B선보다 완만하게 타나난다. 이 때문에 2개의 OC曲線은 어느 강도 및 합격율에서 교차하게 된다. 따라서 이 교차점보다 높은 곳에서는 28일 실측강도(\bar{F}_{28})分布群의 평균적인 합격율은 28일 측정강도(F_{28})의 합격율보다 낮게 되어 이 때의 강도추정식은 危險側이 될 것이다.

따라서 위험의 정도를 가능한한 작게 하기 위해서는, 그림 5-7(b)의 C線처럼 정해진 합격율 부근에서 2개의 OC曲線이 교차하도록 B線을 평행이동시켜야 한다. 평행이동시켜야 할 거리는 강도의 분포와 평가기준 및 적합확률에 따라 다르기 때문에 기본식을 만들어 이용해야 한다.

4) 強度推定 基本式의 誘導

(1) 實現 可能性이 있는 28日強度 分布群의 平均的인 合格率($\bar{L}(m_a)$)

早期強度의 分布 $N(m_a, \sigma_a^2)$ 에 대하여 測定된 28日강도 分布群의 평균값의 分布를 $N(M, \sigma^2)$ 이라고 하면 그 때의 測定強度 평균값은 M 은 다음과 같다.

$$M = a \cdot m_a + b \quad (5-6)$$

여기서 M : 回歸式에 의해 계산된 28日강도의 평균

m_a : 조기강도의 평균

또한 그 때의 分散은 $\sigma^2 = \sigma_a^2 + S_e^2$ 에서 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_a^2 &= \sigma^2 - S_e^2 \\ &= S_e^2 \quad (\because \text{식 5-5에 의해서}) \end{aligned}$$

여기서

$$S_e: \text{추정치의 표준오차} \quad \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F_{28i} - \bar{F}_{28})^2}{N-2}} \right)$$

다음에 조기강도의 分布가 $N(m_a, \sigma_a^2)$ 일때 測定된 28일강도가 m 이 되는 確率密度函數는 식(5-7)과 같다.

$$p(m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_1} e^{-\frac{(m-M)^2}{2\sigma_1^2}}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_2} e^{-\frac{(m-(a \cdot m_a + b))^2}{2S_2^2}} \quad (5-7)$$

따라서 實現可能性이 있는 28일강도 分布群의 平均的인 合格率을 $\tilde{L}(m_a)$ 라 하면 $\tilde{L}(m_a)$ 는 다음과 같다.

$$\tilde{L}(m_a) = \int_{-\infty}^{\infty} L\sigma_{28}(m) P(m) dm \quad \dots\dots (5-8)$$

식(5-8)의 $L\sigma_{28}(m)$ 은 S 에 대해서는 표준편차가 1이라고 생각되기 때문에 $L_1(S)$ 라고도 표시할 수 있다. 또한 $P(m)$ 을 S 의 함수로 나타내기 위하여 다음 式들을 이용한다.

$$S = \frac{m - \alpha \cdot F_0}{\sigma_{28}} = \frac{m - F_1}{\sigma_{28}} \quad \dots\dots (5-9)$$

$$S^* = \frac{M - \alpha \cdot F_0}{\sigma_{28}} = \frac{(a \cdot m_a + b) - F_1}{\sigma_{28}} \quad \dots (5-10)$$

$$r = \frac{S_c}{\sigma_{28}} \quad \dots\dots (5-11)$$

여기서 α : 최소강도 (F_1)의 소요강도 (F_0)에 대한 비율(%)

이들 식으로부터 $P(m)$ 은 S 의 함수로서 다음과 같이 된다.

$$P(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi r} \cdot \sigma_{28}} e^{-\frac{(s-s^*)^2}{2r^2}} \quad \dots\dots (5-12)$$

또한 식(5-9)는 ($m = S \cdot \sigma_{28} + F_1$)이 되고 이를 S 로 미분하면

($\frac{dm}{dS} = \sigma_{28}$)이 되어 ($dm = \sigma_{28} \cdot dS$)이므로 식(5-8)은 다음과 같이 된다.

$$\tilde{L}(m_a) = \int_{-\infty}^{\infty} L_1(S) p(S) dS \quad \dots\dots (5-13)$$

식(5-13)에 의한 數值計算結果를 R別, r別로 나타낸 것이 5-8이다.

(2) 28日強度推定値의 合格率($L\sigma_{28}(M')$)과 強度推定式

早期強度값 F_a 에 의한 28日強度推定式이 식(5-14)와 같이 주어진다면 F_{28} 의 분포는 정규분포 $N(a \cdot m_a + b - \delta, a^2 \sigma_a^2)$ 이 된다.

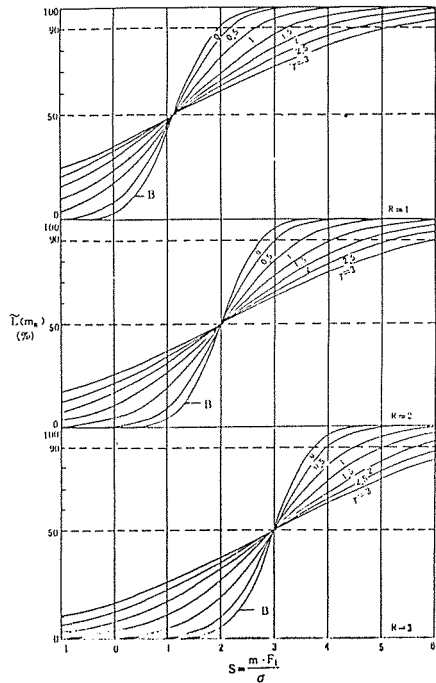


그림 5-8 실측 28일강도의 평균적인 합격율

$$F_{28} = a \cdot F_a + b - \delta \quad \dots\dots (5-14)$$

여기서 δ : 강도평가기준에 적합한 추정식을 만들기 위해서 回歸式의 절편에서 빼야할 값

따라서 추정강도의 평균은 식(5-15)와 같이 된다.

$$M' = a \cdot m_a + b - \delta \quad \dots\dots (5-15)$$

또한 이들이 강도평가기준에 適合하는 確率은 $L\delta_{28}(M')$ 로 나타낼 수 있다.

한편 그림 5-8을 보면 $r = S_c / \sigma_{28}$ 이므로 r 값이 큰 만큼 早期強度와 28日強度의 상관관계에 있어서 표준오차가 크게 되는 것을 알 수 있다. 또한 r 값이 커질수록 OC曲線이 완만해져서 檢定力이 약해짐을 알 수 있다. $r=0$ 에 해당되는 OC曲線인 B線은 $L\delta_{(m)}$ 또는 $L\delta_{28}(m)$ 을 나타내며, 상관관계에서 回歸式을 判定式으로 한 것과 같다. 이때 B線과 $L(m_a)$ 를 나타내는 다른 OC曲線과의 合格率은 모두 50%이며 危險率도 50%이다. 따라서 危險率을 줄이기 위해서는, $r=0$

에 해당되는 B線이 다른 OC曲線과 정해진 合格率 P%에서 교차되도록 右側으로 어느 값 k 만큼 평행이동시켜야 한다.

따라서 $L\sigma_{28}(m)$ 을 나타내는 OC곡선은 推定強度의 適合確率로서 $L\sigma_{28}(M')$ 를 나타냄을 알 수 있다. 이 때 k값에 σ_{28} 을 곱한 값을 δ 라고 하면, δ 는 식(5-14)와 같이 回歸式에서 推定式까지의 28日強度軸方向의 거리이다. 즉 強度推定式은 그림 5-9와 같이 기존의 回歸式과 평행한 직선으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{F}_{28} = a \cdot \bar{F}_a + b - k \cdot \sigma_{28} = a \cdot F_a + b - \delta \quad \dots(5-16)$$

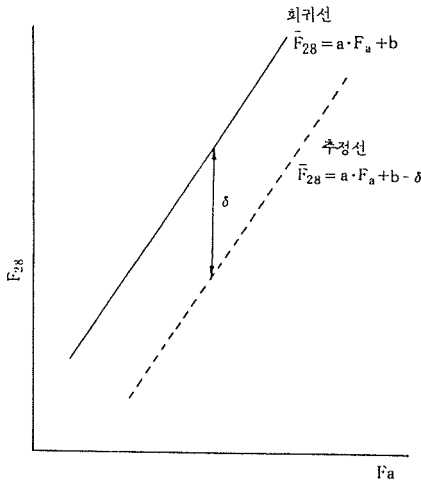


그림 5-9 회귀선과 추정선의 거리

결국 k값은 측정된 28일강도 分布群의 平均의인 合格率을 나타내는 OC曲線 $\tilde{L}(m_a)$ 와, 28日強度 推定值 分布群의 合格率을 나타내는 OC曲線 $L\sigma_{28}(M')$ 가 合格率 P%에서 교차하기 위해 평행이동하여야 할 거리이다.

식(5-16)의 k값을 간략화시키면 식(5-17)과 같이 된다.

$$k = \frac{K_p}{\sqrt{N}} (\sqrt{1 + Nr^2} - 1) \quad \dots(5-17)$$

여기서 K_p 는 그림 5-10에 나타낸 正規偏差이며 N은 시험횟수이고 r는 Se/σ_{28} 를 의미한다.

따라서 식 5-16은

$$\begin{aligned} \bar{F}_{28} &= a \cdot F_a + b - k \cdot \sigma_{28} \\ &= a \cdot F_a + b - \frac{K_p}{\sqrt{N}} \sigma_{28} \left(\sqrt{1 + N \left(\frac{Se}{\sigma_{28}} \right)^2} - 1 \right) \\ &= a \cdot F_a + b - K_p \left(\sqrt{\frac{\sigma_{28}^2}{N} + S_e^2} - \frac{\sigma_{28}}{\sqrt{N S_e}} \right) \end{aligned} \quad \dots(5-18)$$

$$= a \cdot F_a + b - K_p \cdot S_e \sqrt{\left(\frac{\sigma_{28}}{\sqrt{N} S_e} \right)^2 + 1} - \frac{\sigma_{28}}{\sqrt{N S_e}} \quad \dots(5-19)$$

이 되고 $P_N = \frac{\sigma_{28}}{\sqrt{N} S_e}$ 로 놓으면 추정식 \bar{F}_{28} 은

$$\bar{F}_{28} = a \cdot F_a + b - K_p \cdot S_e (\sqrt{P_N^2 + 1} - P_N) \quad \dots(5-20)$$

과 같이 비교적 단순하게 나타낼 수 있다.

식(5-18)을 보면 제 3 항의 ()속 값은 각각 $\tilde{L}(m_a)$ 와 $L\sigma(m)$ 의 標準偏差를 나타내고 있어, 두 OC曲線의 標準偏差의 差異에 K_p 를 곱하면 δ 가 되는 것을 알 수 있다. 그리고 $\tilde{L}(m_a)$ 와 $L\sigma(m)$ 은 각각 식(5-18) 3항의 標準偏差를 갖는 正規分布函數라고 할 수 있다.

한편 實現可能性이 있는 強度分布群의 平均의인 合格率(식 5-8)은 다음과 같이 변형된다.

$$L(m_a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{S_e^2 + \frac{\sigma_{28}^2}{N}}} \int_{-\infty}^M \exp \left\{ -\frac{(x - F_0)^2}{2(S_e^2 + \frac{\sigma_{28}^2}{N})} \right\} dx \quad \dots(5-21)$$

식(5-21)은 결국 標準偏差를 $\sqrt{S_e^2 + \frac{\sigma_{28}^2}{N}}$ 으로 하는 正規分布函數의 OC曲線이다.

다음에 조기강도값을 回歸式에 의해 변화시킨 28일강도값 N개의 平均이 評價基準에 적합한 확률은 다음과 같이 $\frac{\sigma_{28}}{\sqrt{N}}$ 을 標準偏差로 하

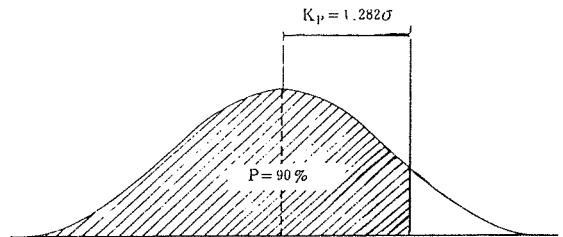


그림 5-10 정규편차 K_p (합격률 $P=90\%$ 의 경우)

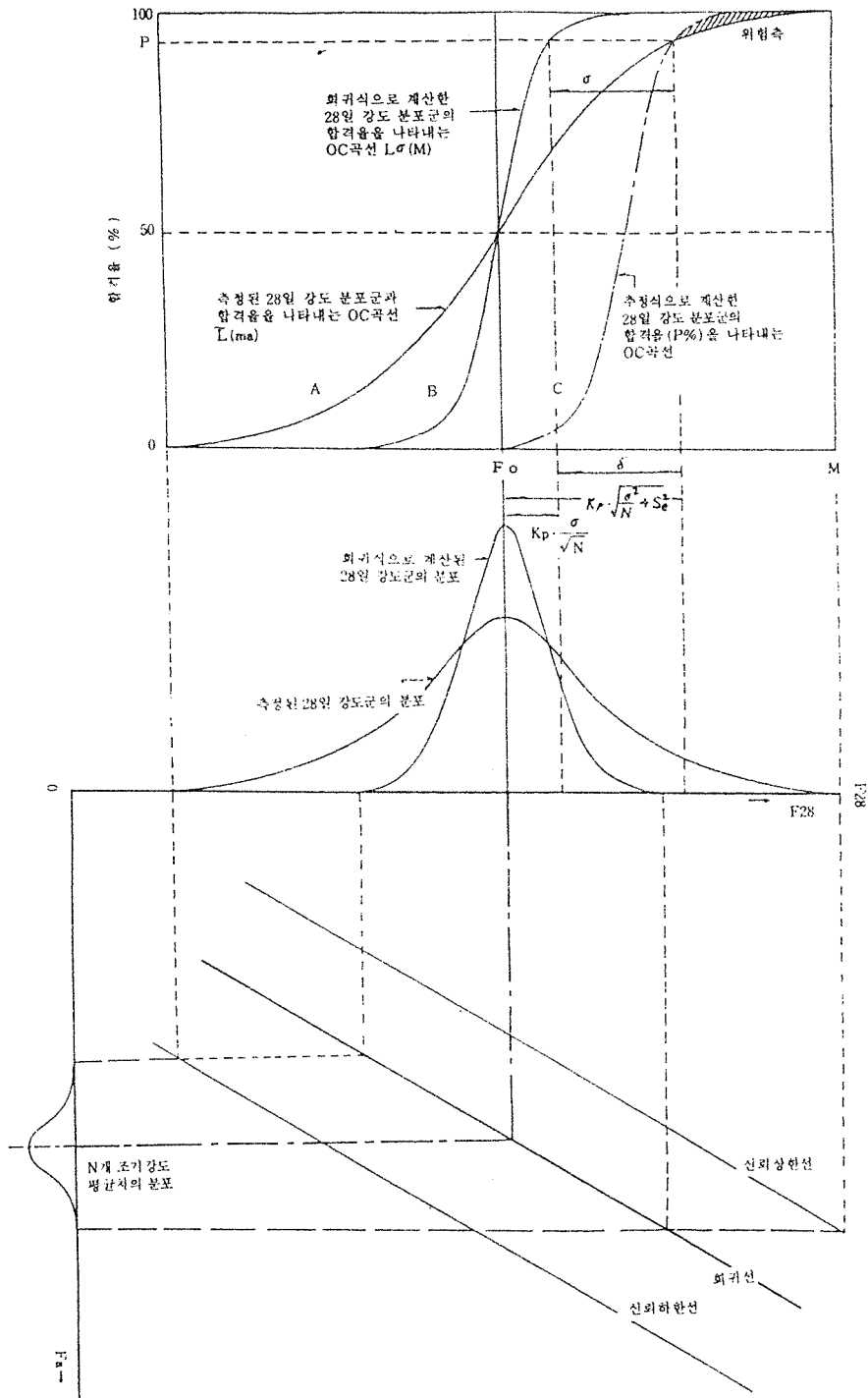


그림 5-11 OC 곡선과 강도분포

〈표 5-4 같은 재료, 같은 배합에서의 표준편차(일부)〉

실험번호	실험회수	F _a	F ₂₈	$\frac{F_a}{F_{28}}$ (%)	σ_a	σ_{28}	$\frac{\sigma_{28}}{\sigma_a}$	회귀계수 a
DL 3.5	25	33	244	13.5	7.6	19.4	2.55	2.46
DL 3.21	25	111	244	45.5	13.2	19.4	1.47	1.48
DL 8	20	79	275	28.7	6.8	16.4	2.41	1.8
DL 24.3	25	54	244	22.1	5.8	19.4	3.34	2
DL 24.3 S	25	53	244	21.7	6.6	19.4	2.94	1.67
DL 7 D	25	163	244	66.8	16.8	19.4	1.15	1.1

는 정규분포로 된다.

$$L_{\sigma_{28}}^{(M)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \frac{\sigma_{28}}{\sqrt{N}}} \int_{-\infty}^M e^{-2\left(\frac{x-F_0}{\sigma_{28}}\right)^2} \cdot dx \dots\dots\dots (5-22)$$

결국 식(5-21)과 (5-22)에 의해 표시되는 OC곡선을 같은 확률 P에서 교차시키기 위해 평행이동시켜야 할 거리는 그림 5-11과 같이 횡축을 S대신에 壓軸強度 F로 잡을 때 δ 로 나타낼 수 있으며, 이 δ 는 두 개의 정규분포函數의 標準偏差의 差異에 正規偏差 K_p로 곱한 것과 같다. 이 관계를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\delta = K_p \sqrt{\frac{\sigma_{28}^2}{N} + S_e^2 - \frac{\sigma_{28}}{\sqrt{N}}} \dots\dots\dots (5-23)$$

5-4 早期強度判定式의 適用

回歸分析을 실시하여 얻은 回歸式은 적절한 방법으로 수정하여, 추정식에 의한 결과와 실측한 결과들이 큰 차이가 없도록 하는 것이 바람직하다. 이를 위해 強度의 分布를 고려하고 評價基準에 적합하는 確率을 도입하여 유도한 것이 推定式이다.

따라서 早期判定方法을 적용할 경우는 回歸分析한 回歸式을 식(5-20)과 같이 推定式으로 수정하여 사용하여야 한다.

식(5-20)을 이용하기 위해서는 같은 재료와 같은 배합에 의한 표준편차 σ_{28} 을 구해 놓아야

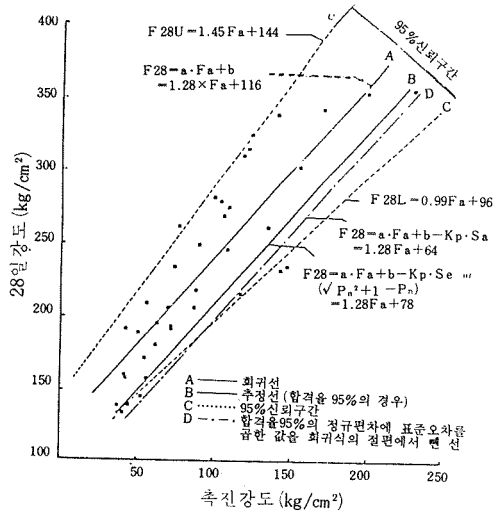


그림 5-12 회귀선과 추정선의 비교 (EL 0.8의 경우)

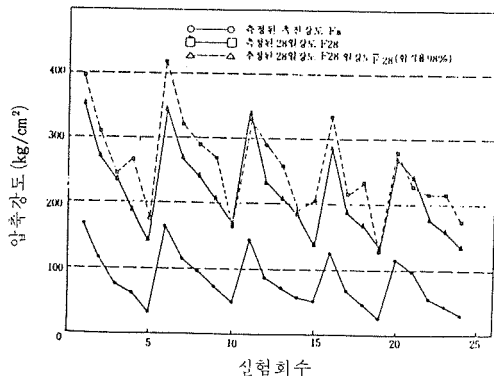


그림 5-13 측정강도와 추정강도의 비교 (EL 24.3)

〈표 5-5 합격율별 추정식 계산(일부)〉

실험번호	b	a	σ_{28}	S_e	P_N	$\frac{S_e}{(\sqrt{P_N^2+1}-P_N)}$	합 격 율 별 b					b'
							80%	90%	95%	98%	99%	
DL 8	129	1.8	16.4	30.6	.309	22.6	110	100	91	82	76	78
DL 3.5	150	2.46	19.4	48.2	.232	38.3	117	100	87	71	60	70
DL 3	66	1.48	19.4	37	.303	27.5	42	30	20	9	2	5
DL 24.3	135	2	19.4	36.4	.308	26.9	112	100	90	79	72	75
DL 24.3 S	14	1.67	19.4	51.5	.217	41.5	-34	-53	-68	-85	-96	-84
DL 7 D	57	1.1	19.4	26.6	.421	17.7	42	34	27	20	15	13
DM 8 S	103	1.7	17.6	35.6	.285	26.9	80	68	58	47	40	44
DM 24.3	134	2.02	21	32.6	.372	22.7	114	104	96	87	81	80
DM 24.8	114	1.26	17.6	32.4	.314	23.8	93	83	74	65	58	60
DM 24.24	8	1.16	21	29.4	.412	19.7	-16	-25	-32	-40	-45	-48
DM 24.3 S	13	1.83	21	35.7	.340	25.6	-21	-32	-42	-52	-59	-58
DM 24.8 S	10	1.22	17.6	30.7	.331	22.2	-18	-28	-36	-45	-51	-50
DM 3 D	124	1.02	17.6	34.2	.297	25.5	102	91	82	71	64	67
DM 7 D	82	91	21	27.2	.446	17.7	67	59	52	45	40	37

한다. 이 σ_{28} 을 구하기 위해서 D, E, F 실험의 각 배합중에서 같은 재료와 같은 배합에 대해 계산한 결과가 표 5-4이다.

또한 식(5-20)의 설정을 위한 가정 ($\frac{\sigma_{28}}{\sigma_a} \geq a$)이 성립하는 가를 검토하여야 한다.

표 5-4에 의하면 대부분의 경우 ($\frac{\sigma_{28}}{\sigma_a} \geq a$)가 성립되므로 식(5-20)을 이용할 수 있다.

한편 正規偏差 K_p 값은 합격률에 따라 다르며, 합격률 80, 90, 95, 98, 99%에 대한 각각의 K_p 는 0.842, 1.282, 1.645, 2.054, 2.326이다.

식(5-20)을 이용하여 (EL 3.5)의 경우를 계산하면 다음과 같다.

$$P_N = \frac{\sigma_{28}}{\sqrt{N} S_e} = \frac{7.6}{\sqrt{3} \times 42.3} = 0.10373$$

$$K_p \cdot S_e (\sqrt{P_N^2 + 1} - P_N) = K_p \times 42.3 (\sqrt{0.10373^2 + 1} - 0.10373)$$

$$= 38.13 K_p$$

$$K_p = 1.282 (\text{確率 } P = 90\% \text{ 일 때}) \text{ 이므로}$$

$$\begin{aligned} \bar{F}_{28} &= 2.15 F_a + 118 - 38.13 K_p \\ &= 2.15 F_a + 69 \end{aligned}$$

이들 계산은 σ_{28} 과 N 및 합격률 P에 따른 K_p 가 결정되면 可能하며, 합격률別 推定式의 계산 결과를 표 5-5에 나타내었다.

한편 그림 5-12는 本 연구에서 설정한 추정식과 既存의 信賴區間方法을 비교하기 위하여, (EL 0.8)의 경우를 나타낸 것이다. 즉 그림 5-12의 A線과 C線은 回歸分析 결과로서, A線은 回歸線, C線은 95% 信賴區間을 나타낸다. B線은 本 研究에서 사용하는 推定線으로서 표 5-5에서 합격률 95%의 결과를 나타낸 것이다. 또한 D線은 回歸式에서 일정한 값을 빼는 방법의 결과로서 95% 합격이 되는 正規偏差 K_p 에 標準誤差 S_e 를 곱한 값을 回歸式의 절편에서 뺀 결과를 나타낸 것이다.

이들 관계를 보면 합격률과 信賴區間이 같은 95%이지만, 本 研究에서 사용하는 推定線이 回歸線에 가장 近接하고 있으므로 같은 確率에서

경제적인 판정이 되는 것을 확인할 수 있다.

측정된 促進強도와 측정된 28日強度 및 추정된 28日강도의 관계는 그림 5-13과 같이 나타낼 수 있다. 그림 5-13은 (EL 24.3)의 경우로써, 측정강도가 추정강도를 下廻하는 정도를 쉽게 알 수 있다. 즉 그림 5-13에 의하면 측정강도의 대부분이 추정강도보다 크며, 작은 경우도 그 차이가 거의 없다. 이들 결과로부터 本 研究에서 설정한 추정식이 경제적이고 안정성을 갖는 판정식이 됨을 알 수 있다.

각 양생방법별의 추정식을 현장에 직접 적용하는 문제는 별도의 검토가 必要하지만, 본 연구에서 제안하는 양생방법들과 추정식은 早期判定方法에 기본적인 자료로 활용될 수 있다고 본다.

5-5 養生方法과 養生條件의 評價

1) 養生方法別 綜合評價

「強度促進法」에 있어서 最適의 早期判定方法을 제안하기 위해서 시도된 방법들을 이제까지의 고찰을 바탕으로 하여 早期判定方法의 기본 조건에 어느 정도 만족하는가를 평가해 보기로 한다.

이들의 평가방법은 먼저 평가항목을 설정하고 각 항목별 평가기준을 결정한 뒤 평가기준

별로 평점을 부과하였다. 평가항목은 8개로서 변동계수의 크기, 상관계수 r 의 크기, 회귀계수 a 의 크기, 회귀계수 b 의 크기, 28일 강도에 대한 비율(유효율), 신속성, 안전성, 실용성 등을 선정하였다.

각 평가항목은 항목별로 기준을 정하였으며, 일률적으로 4등급으로 구분하여 기여도에 따라 4점부터 1점까지 평점을 부과하였다. 항목별 평가기준은 일반적인 조건에 기초하였으며 그 기준은 표 5-6에 나타내었다.

각 항목별 평가를 실시한 결과는 표준양생을 포함한 71종류의 실험에서 19~29의 범위로 나타났다.

2) 養生條件別 綜合評價

그림 5-14는 각 방법들을 양생조건에 따라 평가하기 위해서 양생온도별, 사용모울드의 크기별, 사용모울드의 용도별, 양생시간별, 양생매체별 등으로 분류해서 평가한 것이다.

그림 5-14에 의하면 양생온도는 100°C의 경우가 가장 좋으며 55°C와 70°C도 보편적으로 좋게 나타났다. 사용모울드의 크기에 따른 차이는 거의 없기 때문에 사용에 제약을 두지 않아도 될 것이다. 사용모울드의 용도에 따른 종류는 단연 촉진모울드를 사용하는 것이 유용한 것으로 생각된다. 前置時間의 경우는 전치시간

〈표 5-6 평가 항목별 평가 기준〉

평가	평점	변동계수 (%)	회귀성(상관계수)	회귀계수 안정성	
				기울기 a	절편 b
A	4	3 이하	0.9 이상	1.2 이하	100 이하
B	3	3~5	0.85~0.9	1.2~1.5	100~130
C	2	5~7	0.8~0.85	1.5~1.8	130~160
D	1	7 이상	0.8 미만	1.8 이상	160 이상
평가	평점	28일강도비(유효율%)	신속성	안전성	실용성(간편성)
A	4	40% 이상	20시간 미만	55°C 법	100°C 촉진 모울드 사용
B	3	30~40	30시간 미만	기타방법	100°C 표준 모울드 사용 100°C, 70°C 황온 주조 사용
C	2	20~30	48시간 미만		55, 70°C 황온 황습조
D	1	20 미만	48시간 이상		표준양생

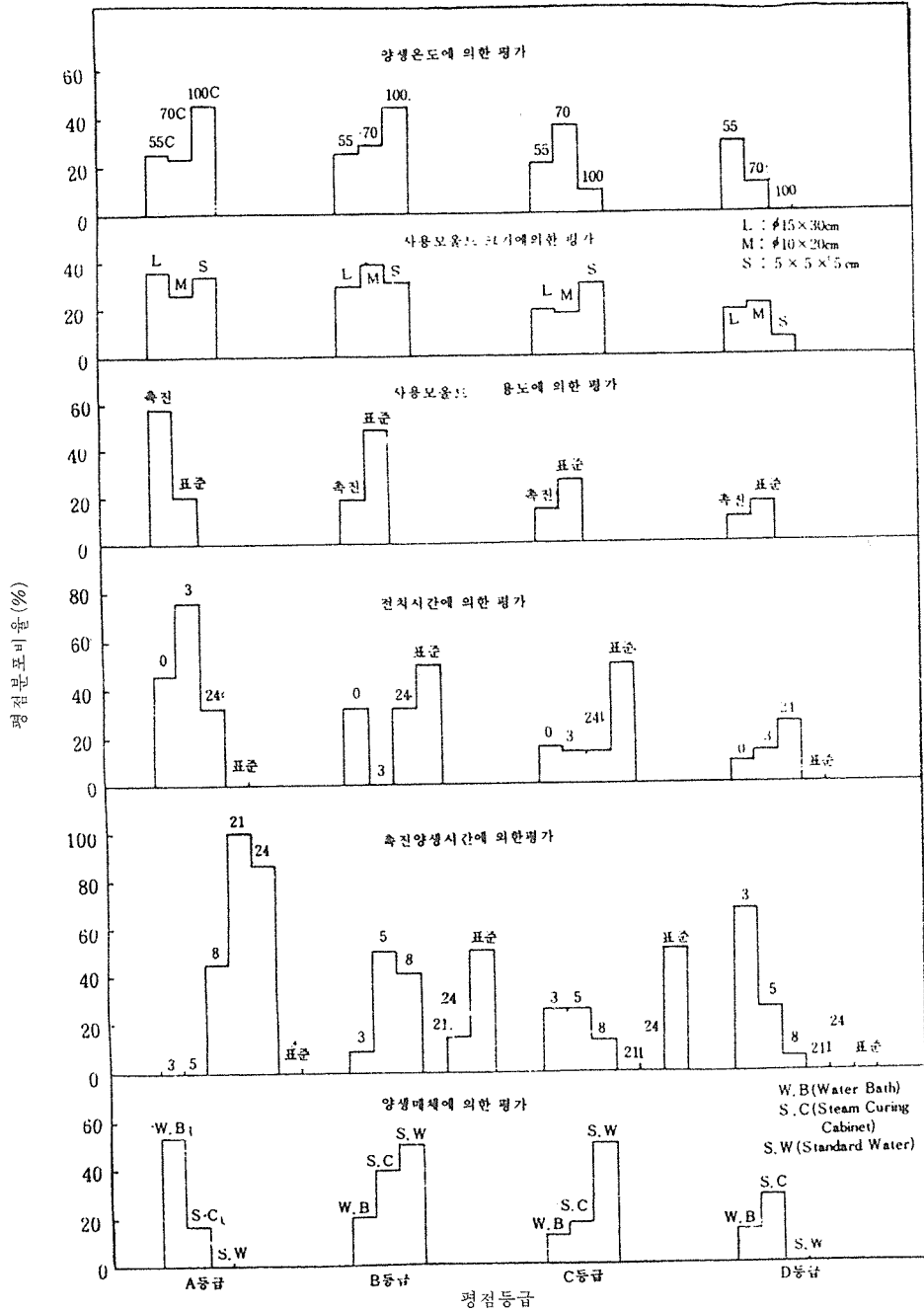


그림 5-14 양생조건별 평점분포 비율

없이 곧바로 양생하거나, 3시간 정도의 전치시간을 두는 것이 24시간의 전치시간을 두는 경우보다 유리함을 알 수 있다. 촉진양생시간은 길수록 좋으나 8시간 정도면 충분한 것으로 나타났다. 양생매체는 항온수조에 의한 것이 유용한 것으로 나타났지만, 이는 항온항습조의 경우 수분증발에 의한 注水의 문제가 있고 온도관리가 쉽지 않은 이유로 양생시간을 짧게 했기 때문이다.

3) 綜合考察 및 最適의 養生方法 提案

양생방법이나 조건에 따른 고찰을 종합해 보면 양생온도는 100°C의 경우가 유리하지만 촉진양생시간이 8시간 이상이면 55°C나 70°C도 유용한 방법이다. 사용모ULD의 크기는 관계 없으나 공시체 제작 즉시 양생이 가능하도록 촉

진모ULD를 쓰는 것이 유용한 방법이다. 前置時間은 현장의 조건을 고려해야 하지만, 前置時間을 없이하거나 3시간 정도로 하는 것이 좋다. 촉진양생시간도 역시 현장의 여건을 고려해야 하지만, 근본적으로 8시간 정도 이상일 필요가 없다. 양생기구로서는 항온 항습조에 의한 결과가 항온수조에 의한 결과와 유사하지만, 사용의 편의상 항온수조가 유리하다.

이상에서 고찰한 결과를 토대로 본 연구에서 제안하는 콘크리트 품질의 早期判定을 위한 가장 합리적인 방법은 그린 5-15와 같이 나타낼 수 있다. 먼저 본 연구에서 시도된 방법중에서 표준화가 가능한 양생방법은 3가지의 양생온도에 4가지의 양생사이클을 제안할 수 있다. 따라서 총 12종류의 양생방법이 되며, 각 양생방법은 모ULD의 크기에 대한 제약이 거의 없고 항

그림 5-15 최적의 양생방법

구 분	양생 온도 (°C)	양생 사이클 (hr)		전체양생시간 (hr)	사 용 가 구
		24	28		
제안된 표준방법	55	8	1/2	8 + 1/2	촉진 모ULD 항온수조, 항온항습조
	70	3, 21	1/2	24 + 1/2	촉진 모ULD 항온수조
	100	24	8, 1/2	32 + 1/2	표준 모ULD 항온수조
		24	24, 1/2	48 + 1/2	표준 모ULD 항온수조
사이클개선이 가능한 방법	55	10 ± 2	1/2	(10 + 1/2) ± 2	촉진 모ULD 항온수조, 항온항습조
		3, 18 ± 3	1/2	(21 + 1/2) ± 3	촉진 모ULD 항온수조
	70	20 ± 4	8, 1/2	(28 + 1/2) ± 4	표준 모ULD 촉진모ULD 항온수조
		24	16 ± 8, 1/2	(40 + 1/2) + 8	표준 모ULD 촉진모ULD 항온수조

*사용 모ULD의 크기는 ϕ15×30cm, ϕ10×20cm, 5×5×5cm이다.

*전치시간 및 공생시간의 온도는 상온으로서 20±3°C를 기준으로 한다.

*사용기구의 규격은 본 연구에서 사용한 것을 기준으로 한다.

온수조 이외에 항온항습조를 사용할 수 있기 때문에 가능한 양생방법의 종류는 더욱 늘어날 수 있다. 이들 표준화가 가능한 양생방법들을 현장에 적용할 때는 현장조건에 따라 선택의 폭을 넓힐 수 있으며, 사이클 개선이 가능한 방법들을 그림 5-15에 같이 나타내었다. 이 방법들은 양생온도가 3가지로 동일하지만, 양생사이클을 일정한 작업시간 범위내에서 자유롭게 선택할 수 있도록 ± 2 시간에서 ± 8 시간까지 변화를 주었다. 이들 방법도 사용모듈드의 크기에 제약이 없으며, 특히 표준모듈드 대신에 모든 방법에서 촉진모듈드를 사용할 수 있는 장점이 있다.

결국 본 연구에서 제안하는 그림 5-15의 방법들은 콘크리트 강도를早期에 判定하려는 強度促進法 중에서 最適의 방법이 될 수 있으며, 앞으로 콘크리트 強度의 早期判定方法의 선정이나 표준화 작업에 있어서 기본적인 자료로서 크게 활용될 수 있으리라 기대된다.

第6章 結 論

콘크리트 品質의 早期判定에 관한 研究結果를 종합하면 본 研究의 범위에서 다음과 같은 結論을 얻을 수 있다.

(1) 가열양생에 의한 콘크리트의 強度發現은 주로 시멘트의 활발한 水和 促進에 기인한 것이며, 약 10시간까지의 養生 初期에는 高溫일수록 크게 된다. 그러나 10시간 이후는 強度增進速度가 둔화되어 強度發現이 養生 溫度에 比例하지 않고, 24시간 정도가 되면 30~100°C사이의 養生溫度 중 70°C 양생에서 가장 큰 強度를 나타낸다.

(2) 強度促進法 중에서 100°C 沸騰水法은 10시간 정도에서 28日強度의 35~40%를 발현하고 定溫管理가 쉬워 가장 적합하다. 70°C 熱水法은 10~24시간에서 50~60%의 가장 높은 有効率을 나타내며, 55°C溫水法은 24시간 이상일 경우 60~70%의 높은 有効率을 나타내고 취급 安全한 장점이 있다.

(3) 加熱養生에 의한 強度의 變動係數는 55°C溫水法의 경우 4~8% 정도로서 표준양생한 경우의 3~5%에 비하여 그다지 크지 않다. 이는 促進養生과 標準養生에 의한 強度發現 메카니즘이 유사함을 의미하며, 早期強度로 28日強度를 推定할 수 있는 기본조건을 만족시킨다고 생각된다.

(4) 早期強度에 의한 28日 강도의 推定에 있어서는 기존의 回歸式方法이나 信賴區間 設定法보다 強度의 分布와 評價基準를 고려한 推定式에 의한 것이 더 유용한 것으로 밝혀졌으며, 제안된 推定式은 다음과 같다.

$$\bar{F}_z = a \cdot \bar{F}_a + b - K_p \cdot S_c (\sqrt{P_N^2 + 1} - P_N)$$

(5) 「強度促進法」에 의한 初期判定法 중에서 標準화가 가능한 대표적인 養生사이클은 前置時間과 促進養生時間으로 나타낼 수 있으며 空冷時間은 30分이 적당하다. 早期強度와 28日強度의 관계를 나타내는 回歸式은 다음과 같다.

$$\textcircled{1} 100^\circ\text{C}, (0+8) \text{의 경우} : \bar{F}_z = 1.86 \cdot F_a + 87$$

$$\textcircled{2} 100^\circ\text{C}, (24+8) \text{의 경우} : \bar{F}_z = 1.60 \cdot F_a + 69$$

$$\textcircled{3} 70^\circ\text{C}, (3+21) \text{의 경우} : \bar{F}_z = 1.07 \cdot F_a + 93$$

$$\textcircled{4} 55^\circ\text{C}, (24+24) \text{의 경우} : \bar{F}_z = 1.16 \cdot F_a + 81$$

(6) 早期判定方法의 最適化를 결정하기 위한 기준은 早期強度의 변동계수가 작고 有効率이 클수록 좋으며, 迅速性, 安全性, 實用性 등이 있어야 하고 試驗法의 標準화가 가능해야 한다. 또한 회귀분석결과와 相關係數가 물론 높아야 하며 回歸方程式의 절편이 작고 기울기가 1에 近接한 것일수록 좋다.

(7) 促進모듈드는 공시체 제작 후 즉시 양생이 가능한 장점이 있으며, 공시체의 크기가 $\phi 15 \times 30\text{cm}$ 인 경우와 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 인 경우의 강도는 거의 같다. 또한 加熱水와 上壓蒸氣에 의한 強度發現 메카니즘은 크게 다르지 않음을 알 수 있으며, 恒溫水槽와 恒溫恒濕槽의 강도 결과도 같기 때문에 恒溫水槽가 더 실용적인 기구라고 생각된다.

參考文獻

(50) A New Statistical Method for Prediction

-
- of Concrete Strength from In-Place Tests, Cement, Comente & Aggregates, 8(1), 3-12, 1986.
- (51) Estimation of Compressive Strength from Accelerated Strength Tests, Indian Concrete Journal, 60(3), 1986, pp75~78.
- (52) Recommended Practice for Evaluation of Compressive Tests of Field Concrete, ACI Journal, V. 54, No. 1, July. 1957. pp1~20.
- (53) Recommended Practice for Evaluation of Compressive Test Results of Field Concrete, ACI214-65.
- (54) Evaluation of Concrete Compression Test Results, L. R. Lauer, ACI. Journal 1965. 4. pp. 467~477.
- (55) 仕入豊和, 田桂寛, コンクリート品質の早期判定における強度判定式の一提案, 日本建築學會論文報告集, 298號, 1980.
- (56) 仕入豊和, 田桂寛, コンクリート強度早期判定のための一般式, 日本建築學會論文報告集, 303號, 1981.
- (57) 仕入豊和, 田桂寛, 富銘崔一郎, コンクリート強度の早期判定のための一般式, 日本建築學會論文報告集, 314號, 1982.
- (58) 金正年, 統計學, 經文社, 1986.
- (59) TQC活動과 技法, 산업기지개발공사, 1984.
- (60) コンクリートの品質管理, コンクリートの品質管理編輯委員會, 日本規格協會, 1984.
- (61) Alfredo H. S. Ang, Wilson H. Tang, 최영박, 윤용남, 共譯, 確率의 기초개념, 螢雪出版社, 1981.
- (62) Emlyn Lloyd, Probability, Handbook of Applicable Mathematics, Vol II, A Wiley Interscience Publication, 1980.
- (63) 朝香鐵一, 品質管理のための統計數學, 東京大學出版部, 1973, pp.64~65.