

# 성숙도 개념을 이용한 콘크리트 초기강도 예측 모델 개발 연구

## Development of Prediction Model of Early-Age Concrete Strength by Maturity Concept

오병환\*

이명규\*\*

홍경옥\*\*

김광수\*\*

Oh, Byung Hwan Lee, Myung Gue Hong, Kyung Ok Kim, Kwang Soo

### 요 약

성숙도는 콘크리트의 양생 온도이력에서 구해지는 것으로 초기강도 예측을 위한 하나의 유용한 지표가 될 수 있다. 즉 성숙도 이론은 배합이 동일할 때 성숙도 값이 같으면 강도값도 같다는 이론이다. 본 연구에서는 성숙도 법칙의 이론적 전개과정을 살펴보고 그 값을 계산하기 위하여 가장 널리 알려진 Nurse-Saul 함수를 검토하였다. 또한, 성숙도 함수와 기준온도(datum temperature) 설정을 위한 일련의 포괄적인 실험연구를 수행하였다. 성숙도를 강도값에 연관시키기 위한 여러가지 성숙도-강도 함수를 비교해 보고 그 장단점을 분석해 보았으며 이를 통하여 유용한 강도예측 함수를 제안하였다.

성숙도 이론의 적용에 있어서 고려해야 할 변수들을 도출하기 위하여 양생조건과 시멘트의 종류, 그리고 물-시멘트 비 등을 달리하였으며 이 경우에는 습도나 초기양생온도 등이 변수로 채택되었다. 마지막으로 제안된 함수의 타당성과 정확성을 검증하기 위하여 콘크리트 슬래브를 타설하고 시간단계별로 콘크리트 코어를 채취하여 예측된 강도값과 비교하여 보았다. 본 논문은 실제 콘크리트 구조물의 초기강도 예측을 위해 매우 유용할 것으로 사료되며 현장품질관리에 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

### Abstract

Maturity is expressed as the integral of time and temperature of concrete above a datum temperature. The maturity concept proposes that concrete of the same mix at the same maturity has the same strength, whatever combination of temperature and time makes up that maturity. In this study, the Nurse-Saul function which was proposed to account for the effects of temperature and time on strength development is used in computing maturity. After existing various functions are considered to relate concrete strength to the maturity value, new strength-maturity function is proposed.

Tests are conducted in order to determine a datum temperature and compare prediction value with measured concrete strength. The constants in proposed prediction equation are determined

\* 正會員, 서울大學校 土木工學科 教授  
\*\* 正會員, 서울大學校 土木工學科 大學院

• 본 논문에 대한 토의를 1996년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 1996년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

from test results, and the equation is adopted to predict the strength of slab. The slab was cast in the laboratory from the same batch of mold, and cores are cut from slab in order to estimate the actual strength. These values are used to compare with predicted value. The present study allows more realistic determination of early-age strength of concrete and can be efficiently used to control the quality in actual construction.

**Keywords :** Early-Age Strength Prediction, maturity concept, concrete, temperature

## 1. 서 론

공사기간과 시공공간의 문제가 시공에 있어 주요 관심사로 떠오른 지금 콘크리트 초기강도를 정확히 예측하는 것은 공사비 절감과 안전한 시공을 위해 유용하게 활용될 수 있는 일이다. 구조부재의 제작과 콘크리트의 시공에 있어서 거푸집의 제거나 프리스트레스트 콘크리트 부재에서의 긴장력의 도입 등의 작업일정을 경제성과 안전성 관점에서 계획하기 위해서는 사용되는 콘크리트 강도 발현과정에 대한 이해가 필수적이다. 여기서 콘크리트의 강도는 시간과 온도이력의 함수로 볼 수 있다. 즉 양생기간중에 콘크리트 온도는 콘크리트 강도발현을 평가할 수 있는 중요한 지표가 될 수 있는 것이다.

강도발현의 예측에 이 두가지 변수의 복합적 영향을 활용하는 성숙도 방법은 증기양생의 효과를 예견하기 위한 것이 그 동기였으나 뒤이어 일반양생에 까지 이 방법의 응용이 확대되었다.<sup>(1)</sup> 본 연구에서는 양생중인 콘크리트의 강도를 성숙도 방법으로 평가하기 위한 이론적 배경과 절차를 고찰하고 제안된 여러가지 이론들을 검증해 보고자 한다. 그리고 강도발현의 반응이 일어날 수 있는 온도로 인정되어 성숙도 계산의 기준점이 되는 온도인 기준온도(datum temperature)  $T_0$ 를 산정하는 절차를 고찰하고 그 값을 도출하였다. 여기서 도출된 기준온도는 동일한 콘크리트 배합인 경우에는 양생조건이 다를 경우에도 동일하게 적용될 수 있다.

다음으로 실제 시편을 제작하여 콘크리트 온도 계측을 통해 성숙도를 계산해 내고 그에 따른 압축강도를 측정함으로써 강도-성숙도 관계를 살

펴보았다. 이러한 실험결과를 토대로 타당한 강도 예측식을 제안하고자 한 것이다. 이 과정에서 다른 양생조건에서 시편을 제작하여 측정함으로써 습도나 초기 양생온도가 미치는 영향을 규명하고자 하였다. 그리고 제안한 예측식에 있어서 배합에 따른 계수의 변동을 살펴보기 위해 배합강도가 같으면서도 물-시멘트 비가 다른 두가지 배합으로 실험을 수행하여 각각의 예측식을 도출하여 비교해 보았다.

실 구조물에서의 적용 타당성을 검증하고 합리적 적용방안을 제시하기 위해 소규모 슬래브를 타설하여 온도측정을 통해 성숙도를 계산하고 그 부위의 강도는 시간단계별로 콘크리트 코어를 채취하여 측정하였다. 이를 통하여 제안된 예측식의 타당성을 살펴볼 것이다.

## 2. 성숙도 이론

### 2.1 성숙도의 이론적 배경

일반적으로 가장 널리 사용되는 성숙도 함수인 Nurse-Saul 함수는 하나의 근사법으로 콘크리트 강도에서 시간과 온도의 영향을 설명하기 위한 것이다. 이 함수는 엄밀한 이론적 기반을 토대로 한 것이라기 보다는 경험적인 증거를 응용하여 수학적 수식으로 전개해 나가는 것이다.

어떤시간  $t$ 에서의 강도발현율( $dS/dt$ )은 강도( $S$ )와 온도( $T$ )의 함수로 생각해볼 수 있다.

$$\frac{dS}{dt} = f(S) \cdot k(T) \quad (1)$$

여기서  $f(S)$ 는 강도의 함수이고  $k(T)$ 는 온도의

함수인데 초기 강도 발현율에 가장 지배적인 영향을 준다고 할 수 있다. 여기서 다음과 같은 Bernhardt의 경험식을 도입할 수 있다.

$$f(S) = S_x \left[ 1 - \frac{S}{S_x} \right]^2 \quad (2)$$

여기서  $S_x$ 는 무한시간에서의 한계강도를 나타낸다. 만약  $S_0$ 가 양생온도에 무관하다고 가정하고 식 (1)과 식 (2)를 결합하면 다음의 적분식이 얻어진다.

$$\int_0^S \frac{dS}{\left[ \left( 1 - \frac{S}{S_x} \right) \right]^2} = S_x \int_{t_0}^t k(T) dt \quad (3)$$

식 (3)의 우변 적분식이 온도와 시간의 곱을 포함하고 있음을 주목하면 이 적분식은 성속도 함수의 일반적인 형태이고  $M(t, T)$ 로 나타낸다.<sup>(1,2)</sup>

$$M(t, T) = \int_{t_0}^t k(T) dt \quad (4)$$

## 2.2 성속도의 기본이론

Saul은 강도발현이 관찰된 가장 낮은 온도인 기준온도(datum temperature)에 근거하여 성속도를 계산하였는데 이 방정식은 Nurse-Saul함수로 알려져 있다.

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (5)$$

여기서  $M$ 은 일정시간  $t$ 에서의 성속도를 나타내며  $T$ 는 시간 주기  $t$ 동안의 콘크리트 평균온도이고  $T_0$ 는 강도발현 기준 온도이다. 이러한 시간과 온도의 복합적 영향을 나타내기 위한 또다른 접근으로서 Rastrup에 의해 발전된 등가재령(Equivalent Age) 개념이 있다.

$$t_e = \frac{\sum (T - T_0)}{(T_r - T_0)} \Delta t \quad (6)$$

여기서  $t_e$ 는 기준 온도에서의 등가재령을 말한다.

고  $T_r$ 은 양생기준온도(Reference Temperature)를 나타낸다.

## 2.3 성속도-강도 관계

Plowman은 강도를 Nurse-Saul식으로 계산한 성속도의 대수 함수로 나타냈을 때 직선에 아주 근접함에 주안하여 다음과 같은 강도-성속도 관계를 제안하였다.

$$S = a + b \log(M) \quad (7)$$

상수  $a$ ,  $b$ 는 물-시멘트 비와 시멘트의 종류에 의해 결정된다고 볼 수 있다. 이 관계식은 그 형태가 간단하고 결정해야 할 상수가 2개에 불과해 많은 연구자들에 의해 논의되었다. 그 타당성과 적용의 성공사례도 많았으나 한계점을 지적하는 연구결과도 적지 않았다. 이 외에도 Lew와 Reichard는 그들의 실험과 분석을 통하여 다음과 같은 강도-성속도 경험식을 제안하였다.

$$S = \frac{K}{1 + D[\log(M - 16.7)]^b} \quad (8)$$

Freiesleben Hansen과 Pederson은 강도-성속도 관계가 수화열과 성속도 사이의 관계에 부합해야 한다는 점에 주안을 두어 다음의 강도-성속도 경험식을 제안하였다.<sup>(1,3)</sup>

$$S = S_x e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^a} \quad (9)$$

여기서  $S_x$ 는 물론 한계강도를 나타내고  $\tau$ ,  $a$ 는 각각 시간상수와 형상계수이다. 이상에서 몇 개의 성속도-강도 관계를 고찰해 보았는데 각 관계식들 마다 장, 단점을 가지고 있다. 특히 결정해야 할 계수가 3개 이상인 관계식은 그 상수의 결정에 어려움이 있고 더구나 한계강도를 포함하고 있는 경우가 많아 그 값의 결정이 쉽지 않을 뿐더러 같은 배합일 경우에도 일률적으로 동일하게 한계강도 값을 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 이러한 모든 점을 고려한 강도 예측식의 개발은 성속도 이론의 적용에 핵심이 되는 부분이라 할 것이다.

### 3. 기준온도(Datum Temperature)의 결정

#### 3.1 개요

기준온도는 강도발현을 위한 콘크리트 경화작용이 일어날 수 있는 최저온도를 말한다. 이러한 기준온도의 값은 여러 연구자들에 의해 다양한 값들이 제안된 바 있는데 대체로  $-10^{\circ}\text{C}$  내외의 값들로서 성숙도 계산을 위한 기본치가 된다. 만약 기준온도  $T_0$ 가  $-10^{\circ}\text{C}$ 였다면 성숙도는 그 온도 이상의 온도에 대한 시간적분으로 구해질 수 있다. 물론 계산에 적용되는 성숙도 방정식은 Nurse-Saul 함수를 적용하게 된다.

#### 3.2 기준온도 결정 절차

먼저 콘크리트에 사용될 배합비를 갖는 모르터를 준비하여 콘크리트가 현장에서 받을 것으로 예상되는 최고 온도와 최저온도, 그리고 두 온도의 중간정도의 온도로 유지되는 세개의 수조에 시편을 넣는다. 다음으로 각 온도의 수조속의 시편에 대한 관입시험을 통하여 종결시간을 결정해 낸다.

다음으로는 실제 압축강도 실험으로서  $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 정육면체 공시체를 제작하여 세가지 온도로 유지되는 수조에 시편을 넣는다. 각 수조의 시편에 대해서 종결시간의 2배에 달하는 시점에서 압축강도를 측정해 나간다. 즉, 종결시간의 각 2, 4, 8배의 시간단계에서 강도시험을 실시해 나가는 것이다.

각 양생온도에 대해서 강도의 역수를 수직축에, 재령의 역수를 수평축에 도시하여 각각의 최적 직선을 찾아낸다. 각 직선의 절편을 기울기로 나눈 값이 기준온도와 활성화에너지의 계산에 사용되는 K값이 되는데 강도와 같은 차원을 갖는다. 횡축에 세가지 양생온도를, 그리고 각 온도에 해당하는 K값을 종축에 표시하여 선형회귀분석하면 y절편이 강도가 0인 경우의 온도에 해당하는 기준온도가 된다.

### 3.3 기준온도 값의 결정

실험에서 적용할 배합중 28일 강도  $450\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 목표로 실제 교량현장에서 사용되고 있는 조강시멘트를 사용한 배합을 사용하였다. 물론 굵은 골재는 제외하여 모르터를 사용하여 Cube를 제작하게 되는데 혼화제는 동일하게 사용된다.

적용대상 콘크리트는 여름철에  $50^{\circ}\text{C}$  까지 온도를 기록하고 겨울철에도 증기양생을 실시하게 되므로 적어도 경험하게 되는 최고온도는 여름철과 차이는 없게 된다. 따라서 모르터 Cube를 양생할 최고온도를  $40^{\circ}\text{C}$  이상으로 상정하였고 최저온도는  $10^{\circ}\text{C}$ 이하가 될 것으로 생각되었다.

결국 최고온도에서의 양생은 전기오븐으로  $43^{\circ}\text{C}$ 의 온도를 유지시키고 최저온도는 일반 냉장고를 이용하여  $7^{\circ}\text{C}$ 로 유지하였다. 중간온도는 수조의 온도유지나 실험환경상  $27^{\circ}\text{C}$ 에서 양생하게 되었다.

상기절차에 의해 실험을 수행하여 세가지 각각의 양생온도와 K값으로 선형회귀분석을 하면 다음의 식을 얻는다.

$$y = 0.1665 + 0.0164x \quad (10)$$

$$\text{따라서 기준온도} = -\frac{\text{직선의 절편}}{\text{기울기}} =$$

$$-\frac{0.1665}{0.0164} = -10.15^{\circ}\text{C}$$

본 연구에서 결정된  $-10.15^{\circ}\text{C}$ 의 기준온도는 Saul에 의해 제시된  $-10.5^{\circ}\text{C}$ 나 Plowman이 제시한  $-12^{\circ}\text{C}$ 와 비교해 볼때 근사한 차이를 보이고 있기는 하다. 일반적으로  $-10^{\circ}\text{C}$ 를 많이 사용하고 있는데 보다 엄밀한 강도추정을 위해선 배합과 양생조건별로 기준온도를 결정하는 절차가 필요하다. 정확한 강도예측을 위해서는 정확한 성숙도 값을 구하는 것이 무엇보다도 선행되어야 하는 일이기 때문이다.

## 4. 성숙도 실험 및 결과 분석

표 1 조강시멘트를 사용한 배합표

(단위 : kg/m<sup>3</sup>)

물-시멘트비	잔골재율	시멘트	물	잔골재	굵은 골재	혼화제
31.00%	35.00%	530	164	598	1132	7.95

### 4.1 개요

성숙도 실험은 콘크리트를 타설한 뒤 온도측정을 통하여 성숙도 값을 계산해 내고 그에 따른 강도실험을 해 봄으로써 성숙도 이론의 타당성을 검증하고 강도-성숙도 관계를 구해내고자 하는데 그 목적이 있다. 본 연구에서는 성숙도 이론에서 많은 논란이 있어 온 변수들을 추가하여 실험을 수행해 보았다.

먼저 양생조건 문제인데 동일한 배합의 콘크리트를 여러가지 다른 조건에서 양생하면서 온도를 측정하였다. 양생은 크게 4가지로 나누어 실시하였는데 등온상태와 변온상태에서의 양생으로 나누고 또한 증기양생을 하여 높은 초기온도를 경험하게도 하였다. 습도의 영향을 살펴보기 위하여 23℃의 항온실에서 등온상태로 양생하면서 상대습도를 50%로 유지시킨 것과 수조에 양생한 결과들을 비교하였다. 또한 동일한 배합일지라도 시멘트의 종류에 따른 영향을 살펴보기 위해 보통시멘트와 조강시멘트를 사용하여 배합을 하여 강도 발현특성과 성숙도-강도 관계를 비교, 분석하였다.

또다른 변수로 상정할 수 있는 것은 물-시멘트 비인데 성숙도 이론의 전개과정에서 포함되었던 한계강도  $S_{\infty}$ 의 영향을 없애기 위하여 설계강도가 같으나 물-시멘트 비가 다른 두가지 종류의 배합을 써서 실험을 수행하였다. 이러한 실험결과들의 분석을 통해 예측식의 상수들에 영향을 주는 변수들을 밝혀내고 그 변동특성을 규명해 내고자 하였다.

### 4.2 양생조건별 실험

실험에서 적용할 배합중 28일 강도 450kg/cm<sup>2</sup>을 목표로 조강시멘트를 사용한 배합을 사용하였는데 배합표는 아래와 같다. 굵은 골재는 자연석을 사용하였고 혼화제는 유동화제를 사용하였다.

이러한 배합으로 시편의 중앙에 Thermocouple을 매설하여 타설한 뒤 각 4가지 조건으로 양생을 실시하였는데 각 조건에 따른 시편의 온도측정 결과는 시간에 따라 적분되어 성숙도 계산에 사용된다.

양생조건 1에서는 콘크리트를 타설한 후 항온항습실에 넣어 일정한 온도를 유지하도록 하였다. 다만 수조에 넣어 됴으로써 습윤양생을 실시하였는데 항온항습실의 온도는 23℃로 유지시켰다. 양생조건 2는 조건 1과 마찬가지로 23℃로 유지한 항온항습실에서 양생하였으나 수조에 넣지않아 상대습도가 50%인 상태로 유지시켜서 외부습도에 따른 성숙도와 강도의 관계를 살펴보고자 하였다. 따라서 이는 성숙도 이론에 습도의 영향을 살펴보기 위한 의도에서 실시된 것이다.

양생조건 3의 경우는 시편을 타설한 후 자연상태로 방치하여 외부에 노출시켰다. 이러한 경우 콘크리트의 초기온도는 조건 1, 2와 비슷하지만 양생기간중의 온도는 상당히 높게 기록되었다. 결국 앞의 두 경우는 등온상태이지만 지금의 조건은 변온상태에서 양생하게 된 것이다. 양생조건 4는 촉진양생의 경우를 살펴보기 위해 계획되었다. 즉

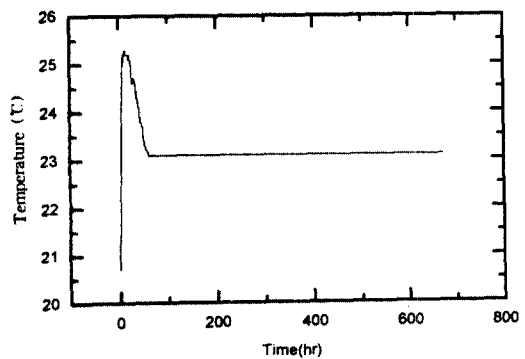


그림 1 콘크리트 온도변화 곡선 (항온항습실, 습윤양생)

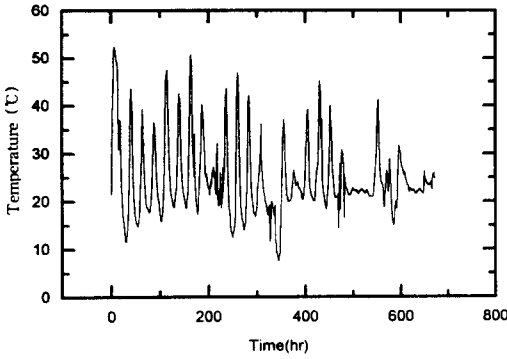


그림 2 콘크리트 온도변화 곡선 (축진양생)

시편을 타설한 직후 약 43°C의 증기 양생을 12시간 실시한 다음 외부에 노출시켰다. 초기에 높은 온도를 경험한 콘크리트가 나타내는 특성을 살펴보고 프리캐스트 콘크리트의 제작에 많이 사용되는 증기양생에 있어 성숙도 이론의 적용이 타당한지를 살펴보기 위한 것이다.

참고로 양생조건 1과 4의 경우에 콘크리트 온도 측정 결과를 나타내보면 그림 1, 2와 같다.

#### 4.3 기존의 성숙도-강도함수 분석

성숙도와 강도 관계를 나타내는 함수는 오랜 기간동안 많은 학자들에 의해 다양한 형태로 제시되었다. 이중 대수함수를 이용한 Plowman의 식이 많이 논의되었고 이를 개선하고자 Lew와 Reichard에 의해 제안된 식도 그 나름의 장점을 찾을 수 있다. 여기서 이 두식의 인자들을 양생조건별로 구해보면 다음과 같다.

##### (1) Plowman 모델

이 모델의 기본형태는 앞의 식 (7)과 같은데 결정해야 할 상수가 a, b 두개이다. 이들을 성숙도

표 2 Plowman 식의 계수도출 결과

양생조건	분 석 결 과	
	a	b
Case 1	-113.532	133.862
Case 2	-139.187	143.355
Case 3	-255.560	183.309
Case 4	-14.925	139.510

실험을 통하여 결정하는데 본 연구에서 설정한 조건별로 도출해 본 결과는 다음과 같다.

##### (2) Lew & Reichard 모델

이 모델의 기본형태는 식 (8)과 같은데 결정해야 할 상수는 D와 b이고 한계강도를 나타내는 K 값은 ACI의 추천식을 써서 결정하였다. 이 모델의 분석에서는 변수들이 기존의 가정대로 시멘트의 종류나 물-시멘트 비에만 영향을 받는지를 살펴보는 데 주안을 두었다. 마찬가지로 양생조건별로 도출결과는 다음과 같다.

표 3 Lew & Reichard 식의 계수도출 결과

양생조건	분 석 결 과		
	K	D	b
Case 1	501.63	165.328	-4.899
Case 2	524.92	197.386	-4.974
Case 3	591.85	467.020	-5.537
Case 4	573.60	3650.97	-8.263

#### 4.4 각 함수와 실험치와의 비교

다음은 가로축을 성숙도, 세로축을 압축강도로 하여 각 양생조건별로 나타낸 그림이다. 위에서 도출한 두가지 수식을 그래프로 나타내고 이를 실험결과치와 함께 표시하였다.

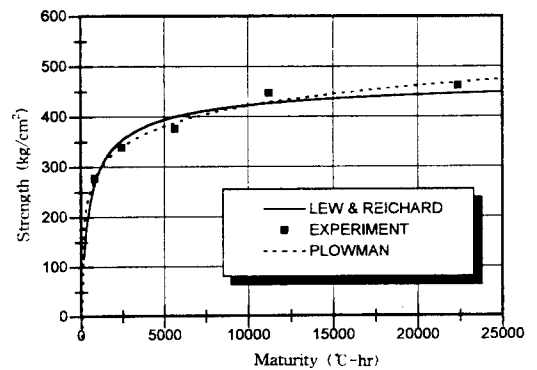


그림 3 성숙도-강도함수의 비교(양생조건 1)

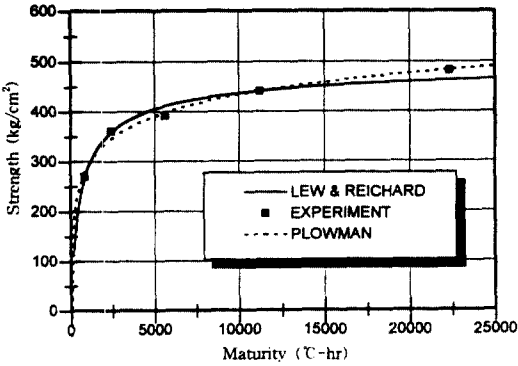


그림 4 성숙도-강도함수의 비교(양생조건 2)

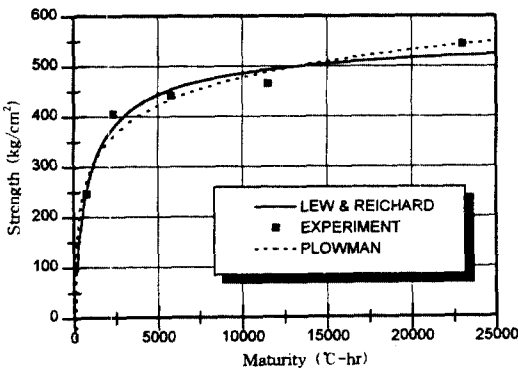


그림 5 성숙도-강도함수의 비교(양생조건 3)

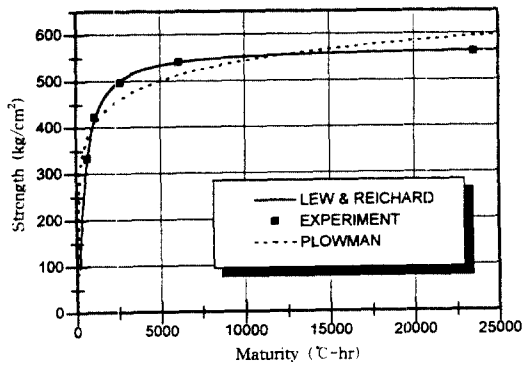


그림 6 성숙도-강도함수의 비교(양생조건 4)

#### 4.5 실험결과 및 분석

기존의 Plowman의 식과 Lew & Reichard의 식에 의하여 분석을 해본 결과 성숙도 이론에 의

한 강도예측은 충분히 그 타당성이 입증되었다. 그리고 양생조건별로 계수를 도출해 보면 우선 등은 온상태에서의 양생과 변온상태에서의 양생은 구분되어서 그 관계가 적용되어야 함을 알 수 있다. 즉 Case 1에서와 Case 2는 서로 별 차이를 보이고 있지는 않으므로 습도의 영향은 그리 크지 않은 것으로 사료되나 Case 3과 Case 4와는 상이한 결과를 나타내 주고 있다.

그러나 초기에 높은 온도를 기록한 Case 4의 경우는 그 차이가 다른 경우에 비해 상당히 크게 나타나고 있다. 표준양생과 촉진양생에 있어 그 강도발현 특성이 상당히 다른 점에 미루어 이는 충분히 예측된 결과이기도 한데 같은 배합일 지라도 초기 양생온도가 높은 경우에는 동일하게 성숙도 관계를 적용할 수 없음을 알 수 있다.

앞서의 실험과 분석에서 적용한 두가지 식은 몇 가지 단점을 가지고 있다. Plowman의 식은 그 형태가 간단하고 결정해야 할 계수가 두개이므로 적용은 편리하다. 하지만 다른 학자들에 의해 지적한 대로 성숙도의 증가에 따라 강도가 계속 증가하는 형태의 모델이어서 일반적인 콘크리트의 강도발현 과정과 부합하지 않는다. 따라서 성숙도값이 작거나 다소 큰 경우에는 그 정확성에 의문이 있어 적용가능한 성숙도값의 범위가 제한될 수 있는 것이다.

Lew & Reichard의 모델은 예측식의 유도에 있어서 수학적 배경이 비교적 확실한 쌍곡선 형태에 근거하고 있고 초기 강도발현율이 큰 Case 4의 경우를 잘 나타내 주고 있음을 알 수 있다. 그러나 이 식의 적용에 있어서 가장 어려운 부분이 한계 강도 K의 결정인데 그 값의 결정이 어려울 뿐더러 구조물의 위치에 따라 일률적으로 동일하게 적용할 수는 없는 것이다. 따라서 적용이 간편하고 결정 상수가 작으면서도 Plowman 식의 약점을 극복할 수 있는 예측식의 제안이 필요하다고 할 것이다.

### 5. 새로운 강도 예측함수의 제안

#### 5.1 함수의 기본 형태

본 연구에서는 성숙도의 증진에 따른 콘크리트

의 강도 발현과정이 대수함수적인 모양보다는 지수함수적 형태에 더 근접함을 주목하였다.

그리고 무엇보다도 강도발현은 성숙도값이 일정한 수치에 이르렀을 때부터 시작된다는 사실을 고려하여 계산된 성숙도 값 M에서 기본 성숙도 (Offset Maturity)  $M_0$ 를 뺀 값을 함수에 적용하는 것이 합리적이라는 결론을 내리고 다음과 같은 형태의 성숙도-강도 관계 함수를 제안하게 되었다.

$$S = c[(M - M_0)]^k$$

여기서  $M_0$ 는 기본 성숙도(Offset Maturity)이며  $c$ 와  $k$ 는 결정해야 할 상수이다. 위 식에서 기본 성숙도의 값은 모르터를 제작하여 초결과 종결시간을 결정하는 절차에 준하여 실험과 분석을 통해 결정해 보았는데 그 값이 30~40 °C-hr인 것으로 추정되었다. 또한 실제로 기본 성숙도를 도입하지 않은 예측식을 통해 산출된 강도 예측치는 초기 재령에서의 강도를 다소 과대평가하고 있는 것으로 나타났는데 이는 기본 성숙도 도입의 타당성을 뒷받침하는 증거가 되었다.

## 5.2 예측식의 상수 결정

### 5.2.1 양생조건별 상수결정

제안된 예측식의 상수를 결정하여 양생조건별로 비교해 보기 위해 먼저 앞에서 사용한 콘크리트 배합을 사용하여 분석해 보았다. 10cm×20cm의 표준공시체를 제작하여 습도, 초기온도, 등온 및 변온상태등 4가지 조건에서 양생하여 예측식의 상수를 결정한 결과 다음과 같이 나타났다.

표 4 양생조건별 상수결정

양생조건	분 석 결 과	
	c	k
Case 1(항온실에서 습윤양생)	100.7	0.1550
Case 2(항온실에서 건조양생)	98.0	0.1606
Case 3(타설후 외부에 방치)	83.8	0.1873
Case 4(증기양생후 외부방치)	181.6	0.1176

위의 결과들을 살펴보면 성숙도 이론의 적용에

있어서 상수들의 상관변수는 앞에서 분석한 결과들과 마찬가지로 임을 알 수 있다. 즉 등온과 변온상태에 따라서 적용은 달라야 하나 주위 습도의 영향은 그리 크지 않다. 그러나 초기양생온도가 큰 증기양생의 경우는 성숙도-강도 관계가 상당히 다르게 나타나므로 이에 대한 고려가 필요함이 증명되었다.

### 5.2.2 시멘트의 종류에 따른 분석

제안된 함수의 적용에 있어서 시멘트의 종류에 따른 상수의 변동 특성을 살펴보기 위해 앞의 경우와는 달리 조강시멘트 대신에 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하여 동일한 배합으로 공시체를 제작하였다. 다만 양생조건은 Case 1의 경우와 동일하게 항온상태를 유지하고 습윤양생을 실시하였는데 외부온도는 21°C로 유지되었다.

이 경우 원래의 성숙도 이론대로 한다면 Case 1의 식으로 유도한 값들이 시멘트의 종류를 달리한 이번 배합에도 부합되어야 한다. 하지만 조강시멘트에 의한 예측식은 동일한 배합일지라도 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우에는 적용할 만큼 정확성을 보이지 않음을 확인할 수 있었다.

결국 별도로 적용상수를 구해보면  $c$ 는 108.8, 그리고  $k$ 는 0.147로 나타났다. 즉 조강시멘트 대신에 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하면 상수  $c$ 는 그 값이 증가하고  $k$ 값은 감소하는 경향을 보인다.

### 5.2.3 물-시멘트 비에 따른 분석

콘크리트의 강도발현 특성에 많은 영향을 미치는 인자중 하나가 바로 물-시멘트 비이다. 따라서 이를 달리하여 공시체를 제작하되 한계강도  $S_0$ 에 따른 영향을 없애기 위하여 28일 설계강도가 270 kg/cm<sup>2</sup>으로 동일하도록 배합설계를 하였다. 양생은 실험실내에서 거의 등온상태로 표준양생을 실시하였는데 동일한 시간에 두가지 배합의 공시체를 제작하여 같은 시간단계별로 성숙도와 강도를 측정하여 보았다.

먼저 물-시멘트 비 42.16인 경우로서 그 배합표는 다음과 같다.



표 5 물-시멘트 비가 42.16인 경우의 배합표

(단위 : kg/m<sup>3</sup>)

잔골재율	시멘트	물	잔골재	굵은골재	혼화제
42.25%	408	172	731	1022	1.428

이 경우에 있어서 상수를 결정해 보면 c값은 47.30이고 k값은 0.199로 나타났다. 다음은 동일한 배합강도를 갖는 물-시멘트 비 47.6의 경우로서 배합표는 아래 표와 같다.

표 6 물-시멘트 비가 47.6인 경우의 배합표

(단위:kg/m<sup>3</sup>)

잔골재율	시멘트	물	잔골재	굵은골재	혼화제
44.00%	393	187	764	988	0

물-시멘트 비를 증가시킨 이 경우에는 c의 값이 49.67로 증가하는 경향을 보이는 반면 k값은 0.193으로 다소 감소하는 것으로 나타났다. 물론 이 값들은 앞의 네가지 양생의 경우와 비교해 볼 때 Case 3과 다소 유사한 양상을 보이는데 양생조건을 살펴볼때 당연한 결과로 생각된다. 다만 28일 설계강도가 다를 경우에는 적용 예측식의 상수가 다소 크게 영향을 받음을 알 수 있다. 이는 앞서 성숙도 이론의 수학적 전개 과정에서 포함되었던 한계강도 S<sub>x</sub>의 영향인 것으로 사료된다.

이상에서 각각의 실험변수별로 예측식의 상수를 결정하여 보았는데 이를 정리하여 보면 다음 표와 같다.

표 7 실험변수에 따른 예측식의 상수변화

실험 변수	계 수		
		c	k
시멘트의 종류	보통	100.7	0.155
	조강	108.8	0.147
물-시멘트 비 (동일 강도)	42.16	47.30	0.199
	47.60	49.67	0.193

위에서 계수의 값이 두가지로 큰 차이를 보이는 것은 고강도 콘크리트와 보통 콘크리트로 배합하였기 때문인 것으로 사료된다. 결국 이상과 같이 초기강도 예측을 위한 식을 제안하고 그 상수들도 결정하여 보았으나 이는 표준 공시체의 실험만을

그 대상으로 한 것이다. 따라서 그 발열특성이나 강도발현 형태가 다르게 나타날 실 구조물에 있어서 그 예측식의 타당성과 성숙도 이론의 적용가능성을 살펴보기 위하여 코아채취를 통한 비교적 정확한 강도측정이 가능한 슬래브를 제작하여 예측식의 검증은 계획하게 되었다.

## 6. 제안된 함수의 적용 및 분석

### 6.1 개요

본 연구에서 콘크리트 강도 예측을 위해 사용한 성숙도 이론은 많은 연구자들에 의해 그 타당성이 입증된 바 있다. 그러나 표준 공시체가 아닌 실 구조물의 경우에 있어서는 콘크리트의 발열특성이 다소 다른 형태로 나타날 것이며 특히 초기 온도의 상승치가 공시체에 비해 크게 나타나게 된다. 따라서 이런 경우에도 성숙도 이론의 기본가정이나 강도-성숙도 관계가 동일하게 적용될 수 있는지 여부는 중요한 문제라 할 것이다.

이런 점에 주목하여 성숙도 이론을 실 구조물에 적용하는데 있어 그 타당성을 검증해 보기 위해 90cm×90cm의 정방형으로 20cm 두께의 슬래브를 타설하여 각 부위별로 온도를 측정하고 성숙도를 계산하여 시간단계별로 제안된 예측식에 의거 강도를 예측해 보았다.

이와 함께 예측된 강도값을 검증해 보기 위하여 각 해당 시간단계에서 콘크리트 코어를 채취하여 압축강도를 측정하였다. 콘크리트 코어는 성숙도 계산을 위해 온도가 측정된 곳에서 채취하였는데 시간단계별로 실험을 하기 위하여 2개의 슬래브를 타설하였다. 슬래브는 앞서 공시체 제작에 사용된 표 7의 내용과 같은 배합강도 270 kg/cm<sup>2</sup>이고 물-시멘트 비 47.6%의 것을 사용하였다.

따라서 이 경우에 예측식에 적용해야할 상수는 c값이 49.67이고 k값이 0.193이다. 결국 채취된 콘크리트 코어의 강도는 다음식에 의해 예측될 수 있다.

$$S = 49.67[(M - M_0)]^{0.193}$$

## 6.2 슬래브의 타설 및 온도측정

타설한 슬래브의 제원과 온도측정 위치는 다음 그림과 같다.

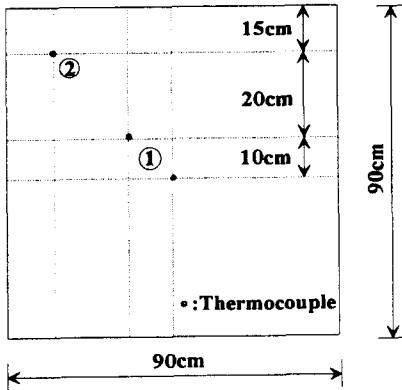


그림 7 슬래브의 제원 및 온도측정 위치

위와 같이 슬래브를 타설한 뒤 성속도 계산을 위해서 각 측정에서 온도를 측정해 보면 예측식의 상수 결정을 위해 타설한 동일한 배합의 공시체에 보였던 온도변화와는 상당히 다른 분포를 보임을 알 수 있다. 다음 그림을 통하여 슬래브와 몰드에서의 온도변화를 비교해 보았다.

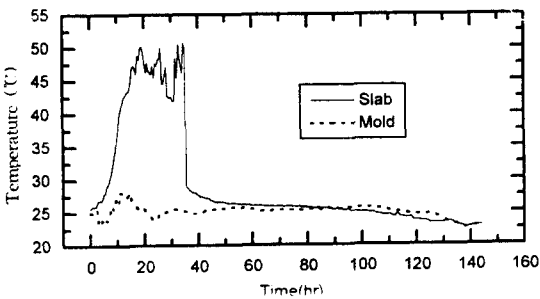


그림 8 슬래브 중앙에서의 온도와 공시체 온도

## 6.3 강도 예측값과 실제 측정치와의 비교

두곳의 성속도를 계산하여 제안된 예측식으로 강도를 예측해 보고 이를 코아채취를 통한 실측강도와 비교해 보면 아래 표와 같다.

표 8 슬래브 중앙에서의 예측치와 실측치 비교

양생시간	예측강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	실측강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	비 고
194hr	276.3	251.8	109.7%
305hr	298.4	290.1	102.9%
353hr	306.1	285.1	107.4%
454hr	319.5	298.9	106.9%
692hr	344.1	349.4	98.5%

표 9 슬래브 가장자리에서의 예측치와 실측치 비교

양생시간	예측강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	실측강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	비 고
194hr	276.8	242.7	114.1%
305hr	298.1	280.9	106.1%
353hr	305.7	302.6	101.0%
454hr	319.2	313.3	101.9%
692hr	343.9	329.2	105.5%

앞의 결과들은 대체로 예측치가 실측강도에 거의 접근하여 실제 현장에 충분히 사용가능함을 보여주고 있다. 또한 전체적으로 예측치가 실측치보다 약간 큰 값을 보이고 있는데 이것은 실측을 위한 코아채취시의 약간의 진동등의 영향인 것으로 사료된다.

## 7. 결론 및 추후 연구방향

본 연구에서는 시공중인 콘크리트 구조물에 있어서 품질관리 및 후속시공등을 위한 초기강도를 예측하기 위하여 성속도 이론을 이용한 강도예측식을 제안하고자 하였다. 먼저 성속도 이론의 전체적 내용을 살펴보고 이를 통하여 예측식을 유도해 보았는데 제안된 예측식을 검증하기 위하여 슬래브를 타설하여 실측된 강도값과 예측된 값들을 비교해 보았다. 그 결과 성속도 이론에 의한 강도 예측은 간편하고 정확하게 현장에 적용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 시공중인 콘크리트 교량에 활용해 봄으로써 현장 적용방안을 제시하고자 하였는데 축진양생이나 프리캐스트 콘크리트의 생산등에 폭넓게 활용될 수 있을 것이다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 성속도값을 계산하기 위한 강도발현 기준온도  $T_0$ 는  $-10.15^\circ\text{C}$ 로 나타났는데 Saul이 제시한

-10.5℃나, Plowman이 제시한 -12℃와 근사한 값을 주고 있다. 일반적으로 -10℃가 사용되는데 일정 배합에 대해 정확한 성숙도 값을 얻기 위해서는 여기서 수행된 것처럼 각 배합별로 기준온도를 결정하는 것이 바람직하다.

(2) 한 배합에 있어 성숙도-강도 관계는 양생 조건에 관계없이 항상 일정하게 나타나는 것은 아님을 알 수 있다. 따라서 성숙도로부터 보다 정확하게 강도를 예측하기 위해선 좀더 다양한 변수들을 고려하여 함수를 도출하는 것이 필요하다. 본 연구를 수행한 결과 대기 습도의 영향은 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

(3) 또한 촉진양생에 있어서는 Plowman의 모델보다는 Lew & Reichard의 모델이 정확하게 강도-성숙도 관계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 무엇보다도 중요하게 고려되어야 할 양생조건은 바로 초기의 콘크리트 온도로서 약 45℃ 이상을 기록하게 되면 일반적인 강도발현 양상과는 다른 특성을 가지는 것으로 나타나고 있다.

(4) 본 연구에서는 강도예측식의 기본 형태를 제시하고 예측식에 포함된 상수들은 양생조건별로 나누어서 결정하였다. 더불어 배합에 따른 영향을 살펴보기 위해 28일 설계강도와 물-시멘트비가 다른 배합들에 사용될 수 있는 예측식을 결정하여 제시하였다.

(5) 앞으로 성숙도 이론은 초기강도 예측뿐만 아니라 후기강도의 예측에도 이용될 수 있을 것으로 사료된다. 성숙도 이론은 콘크리트의 온도를 강도에 연결시키고자 하는 것인데 후기재령에는 콘크리트의 온도가 강도를 결정하는 중요한자가 되지 못하므로 그 약점이 있었다. 따라서 일정시점에서의 강도발현율을 결정하는 하나의 함수인 온도의 함수에 대한 수정과 적절한 변수의 추가가 있다면 후기강도의 예측에도 성숙도 이론은 비교적 정확하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

(6) 본 연구결과는 최근들어 많이 건설되고 있는 교량이나 건물등의 콘크리트 품질관리 및 후속 시공을 위한 초기강도 예측에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 논문은 1995년도 서울대학교 공과대학 교육 연구재단 대학발전기금의 일부로 연구되었으므로 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Malhotra, V.M., and Carino, N.J., "Handbook on Nondestructive Testing of Concrete", CRC Press, 1991
2. Oluokun, F.A., Burdette, E.G., and Deatherage, J.H., "Early-Age Concrete Strength Prediction by Maturity", ACI Material Journal, V.87, No.6, Nov.-Dec. 1990, pp. 565-572
3. Carino, N.J., Lew, H.S., and Volz, C.K., "Early Age Temperature Effects on Concrete Strength Prediction by the Maturity Method", ACI Journal, V.80, No.10, Mar.-Apr. 1983, pp. 93-101
4. Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method, ASTM C 1074-87, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02, 1987
5. Chengju, G., "Maturity of Concrete : Method for Predicting Early-Stage Strength", ACI Material Journal, V.86, No.4, Jul.-Aug. 1989, pp.341-353
6. Hulshizer, M. A. et al., "Maturity Concept Proves Effective in Reducing Form Removal Time and Winter Curing Cost", ACI SP-82, 1984.
7. Thomas J. Parsons and Tarun R. Naik, "Early Age Concrete Strength Determination by Pul-lout Testing and Maturity", ACI SP-82, 1984
8. 오 병환외, "성숙도를 고려한 콘크리트 강도예측에 관한 실험연구", 한국콘크리트학회 가을학술 발표회 논문집, 제6권 2호, 1994, pp.77-82
9. 오 병환외, "콘크리트 초기강도 예측을 위한 합리적인 기법 연구", 한국콘크리트학회 가을학술 발표회 논문집, 제7권 2호, 1995, pp.124-128

(접수일자 : 1996. 2. 26)