

콘크리트의 압축강도 추정을 위한 적산온도 방식의 적용성에 대한 고찰

A Study on the Application of Maturity Method for Estimating Compressive Strength of Concrete

이 호 창

〈동국대학교 건축공학과 대학원〉

유 승 룡

〈동국대학교 건축공학과 조교수 · 공학박사〉

- | | |
|------------------------------------|-----------------------------|
| 1. 서론 | 3.1 Plowman의 강도 추정식에 대한 고찰 |
| 2. Maturity 함수 | 3.2 Plowman이후의 강도추정식에 대한 고찰 |
| 2.1 Maturity의 개념 | 4. Maturity 함수의 적용성 평가 |
| 2.2 온도와 재령에 의한 선형 Maturity | 4.1 등온도 양생에서의 콘크리트의 경화 |
| 2.3 화학반응 속도에 의한 Maturity | 4.2 Maturity 함수의 결함 |
| 2.4 온도와 재령에 의한 비선형 Maturity | 5. 결 론 |
| 3. Maturity 함수를 적용한 콘크리트의 압축강도 추정식 | |

1. 서 론

건축에서 주요한 구조재료로서 사용되고 있는 콘크리트의 압축강도는 콘크리트 부재의 품질관리면에서 가장 주요한 특성중의 하나로서 인식되고 있다. 콘크리트 압축강도의 조기 추정은 현장 공정에서의 안전하고 경제적인 공사계획의 추진을 가능하게 한다. 또한 구조부재로서의 기계적, 물리적 현상을 예측하여 콘크리트 제품의 품질관리의 척도로서

중요한 역할을 하고 있다.

일반적으로 콘크리트의 압축강도는 콘크리트의 조성, 배합 등 콘크리트를 구성하는 요소에 의존하며 콘크리트 양생 과정에서의 다양한 온도 및 재령 등에도 영향을 받는다. 특히 콘크리트의 압축강도 발현 현상은 온도에 의존하는 수화반응에 의해 진행된다고 할 수 있으므로 무엇보다도 콘크리트 양생 과정에서의 온도와 재령에 의해 콘크리트의 압축강도는 큰 영향을 받는다.

1940년대 후반,⁽¹⁾⁽²⁾ 콘크리트의 강도는 단순히 온도와 재령에 의한 수학적인 관계로서 표현될 수 있으며 이를 이용하여 콘크리트의 강도를 예측할 수 있다는 주장이 제기되었다. 양생 온도와 재령의 수학적인 함수는 Maturity(적산온도)라는 개념으로서 규정되어졌다.

Maturity는 비교적 측정이 용이한 변수들, 즉 온도와 재령에 의해 규정되어지므로 그 간편함과 경제성의 특성으로 공사 실무에서도 크게 주목받아왔다.

기존의 연구를 토대로 강도 추정을 위한 Maturity의 표현 방법에는 크게 두 가지로 대별될 수 있다. 첫 번째는 Nurse,⁽¹⁾McIntosh,⁽²⁾Saul,⁽³⁾등에 의해 제안된 온도와 재령에 의해 표현되는 방법과 두 번째는 Arrhenius⁽⁴⁾에 의해 제안된 화학반응 속도에 기초한 표현방법이다.

그러나 지금까지도 Maturity 방식에 관한 이론적인 기초를 규명하고자 하는 시도가 계속되고 있으며 부분적으로도 아직까지 상당히 다른 의견 차이를 보이고 있다. 이에 본고에서는 콘크리트의 강도 추정에 적용되는 Maturity방식의 기초적인 개념과 적용성 및 Maturity 적용시 발생하는 문제점에 관해 기술하고자 한다.

2. Maturity 함수

2.1 Maturity의 개념

Maturity를 간단히 정의하자면 콘크리트의 강도 발현에 있어서 양생온도와 양생시간이 미치는 영향을 정량적으로 표시한 함수이다. 즉 일정 기저온도(datum temperature) 이상에서의 콘크리트의 양생온도와 양생시간의 함수의 총화라고 할 수 있다. 여기서 기저

온도(datum temperature)란 양생시간에 관계없이 콘크리트가 일정한 강도를 나타내기 시작하는 지점에서의 양생온도를 의미한다.

Maturity M 은 다음 식 (2.1)과 식 (2.2)와 같이 두 가지로 표현될 수 있다.⁽¹⁾⁻⁽³⁾

(1) 양생 온도가 일정한 경우

$$M = \Sigma (D - D_0) \Delta t \quad (2.1)$$

M : Maturity

D : 콘크리트의 양생온도

D_0 : 기저온도

(Datum Temperature)

Δt : 양생시간

(2) 양생 온도 변화율이 일정할 경우

$$M = \int_{t_1}^{t_2} [D(t_1) - D(t_0)] dt \quad (2.2)$$

$D(t_1)$: 시간 t 에서의 콘크리트의 온도

$D(t_0)$: 기저온도

(datum temperature)

2.2 온도와 재령에 의한 선형 Maturity

Saul⁽³⁾에 의해 제안된 Maturity 법칙에 따르면 콘크리트는 동일한 Maturity에 도달할 경우 그 온도 내력(來歷)에 상관없이 거의 동일한 강도를 얻게 된다는 것이다. 또한 온도가 어느점 이하로 내려갈 경우 콘크리트의 강도 발현은 중지된다는 것이다. 이러한 개념들은 다음 식 (2.3)과 (2.4)에 의해 표현될 수 있다.

$$M_s = \Sigma (T - T_0) \Delta t \quad (2.3)$$

M_s : 재령 t 에서의 Maturity

T : 시간 t 동안의 콘크리트 압축강도

T_0 : 물의 동결온도

그러나 Bergstöm⁽⁵⁾에 의해 T_0 는 물이 동결하는 온도가 아닌 -10°C 로 산정 되어야 한다고 주장하였다. 그 외에도 T_0 의 실험적인 수치는 여러 차례 제시된 적이 있으나 -10°C 가 가

장 널리 받아들여지고 있다. 이에 따라 Saul의 Maturity함수를 다음 식 (2.4)와 같이 쓸 수 있다.

$$M_s = \Sigma(T+10) \Delta t \quad (2.4)$$

Maturity가 온도와 재령의 함수로서 단순히 표현되기는 하였으나 Maturity와 콘크리트 강도의 물리적 성질은 명확히 규명되지 않았다.

Rastrup⁽⁶⁾은 시간과 온도의 영향을 결합한 효과를 나타낸 상태에서 선별적인 접근 방법을 통해 '등가재령(equivalent age)'이라는 개념을 제안하였다. 등가재령이란 실제 콘크리트의 양생에서 동일한 Maturity가 되는 기준 온도에서의 양생시간을 의미한다.

수학적으로 등가재령은 다음 식 (2.5)과 같이 쓸 수 있다.

$$(t_s)_r = \frac{\Sigma(T-T_0) \Delta t}{T_r - T_0} \quad (2.5)$$

식 (2.5)에서 기준온도 T_r 은 20°C의 상온으로서 등가재령 t_s 는 다음 식 (2.6)과 같이 표현된다.

$$(t_s)_r = \frac{\Sigma(T-T_0) \Delta t}{20 - T_0} \quad (2.6)$$

상관비로서의 $(T-T_0)/(T_r-T_0)$ 는 실제 양생시 온도 T 에서의 Maturity와 동일한 값을 갖기 위해 기준온도 T_r 에서의 콘크리트의 경화에 필요한 시간의 비이다. 양생온도를 상관비로서 산출한 결과 이를 Saul의 Maturity함수에 적용시킬 수 있다는 결론이 나왔다.⁽⁷⁾

그러나 Price⁽⁸⁾, Carino⁽⁹⁾는 콘크리트의 경화는 양생온도의 함수와 선형을 이루지 않는다는 내용을 밝혔다. 또한 Saul의 Maturity함수는 5~30°C의 제한된 온도범위를 가지고 있으므로 Saul의 함수에 의해 추정된 콘크리트

의 강도는 Maturity가 극히 낮거나 0인 상태, 혹은 매우 높은 경우 실제 강도의 측정치와의 비교에서 부정확한 면을 보이고 있다.⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾

2.3 화학반응 속도에 의한 Maturity⁽⁷⁾

콘크리트의 강도 발현은 온도에 의존하는 시멘트의 수화반응에 의해 진행되므로 Arrhenius⁽⁴⁾는 Van't Hoff의 평형 상수식에 기초하여 다음 식 (2.7)과 같은 반응속도의 식을 유도하였다.

$$k = A^{-E/RT} \quad (2.7)$$

k : 속도 상수

A : 상수

E : 활성화에너지, kJ/(mol · k)

T : 절대온도, K

R : 기체상수, kJ/(mol · K)

일련의 화학 반응으로 이루어지는 시멘트의 수화반응은 온도상승에 대하여 비선형의 상태를 보이며 진행된다.

Copeland, Kantro, Verbeck⁽¹²⁾는 Arrhenius의 식에 시멘트의 수화반응속도를 정량적으로 사용할 수 있다고 제안하였다. 또한 Hansen과 Pedersen⁽¹³⁾은 Saul의 Maturity식에서 온도 대신 시멘트의 수화반응 속도 k 를 사용하여 식 (2.8)과 같은 새로운 Maturity 식을 제안하였다.

$$\begin{aligned} M_a &= \Sigma k \Delta t \\ &= A \Sigma \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \Delta t \end{aligned} \quad (2.3)$$

식 (2.8)에서 A , E 는 실험에 의해 규정되는 변수이다.

간단히 Maturity는 등가재령 t_s 의 형태로 표현될 수 있다. 즉 20°C에서의 재령에서 실제 양생온도에서와 동일한 Maturity를 나타낼 수 있

다. 이를 식으로 표현하면 식 (2.9)와 같다.

$$t_{\infty} = \frac{A \Sigma \exp(-E/RT) \Delta t}{A \exp(-E/293R)}$$

$$= \Sigma \exp\left\{\frac{E}{R}(1/293 - 1/T)\right\} \Delta t \quad (2.9)$$

식 (2.9)는 식 (2.8)에 비해 단 하나의 변수, 즉 활성화 에너지 E 만을 실험에 의해 정하면 된다는 이점을 가지고 있다.

상기의 Maturity 식은 유럽에서의 많은 연구를 통해 논의된 바 있는 시멘트의 수화반응 속도에 그 기초를 두고 있다.⁽¹⁴⁾ 또한 다음과 같은 사항들로 인해 식 (2.8) 및 식 (2.9)의 적용성이 인정되고 있다.

(1) 골재는 내부의 재료로서 화학반응에 직접참여하지 않으며 따라서 콘크리트의 경화에 많은 영향을 미치지 못한다.

(2) 시멘트의 활성화 에너지는 물시멘트비에 따라 변화되지 않는 것으로 보여진다.

(3) 비록 시멘트의 활성화에너지는 시멘트의 유형과 구성에 따라 특성화 되어있지만 하나의 수치로서 대부분의 포틀랜드 시멘트에 적용되어 질 수 있는 것으로 보고되었다.

Gauthier와 Regourd⁽¹⁵⁾에 따르면 활성화 에너지는 보통의 포틀랜드 시멘트에서 42~47kJ/mol의 다양한 범위를 나타내고 있으며 미립자화한 용광로의 슬래그를 70%정도 함유하고 있는 슬래그 포틀랜드 시멘트에서는 56kJ/mol 정도의 값을 가지고 있는 것으로 나타났다.

현실적으로 화학반응의 활성화 에너지는 시간과 온도의 물리량이다. 높은 온도에서는 반응이 일어나고, 그보다 낮은 온도에서 분자는 활성화된 복합체를 구성하기 위하여 활성화 에너지를 필요로 한다. 온도의 함수로서 포틀랜드 시멘트의 활성화 에너지는 다음 식 (2.10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(1) T < 20^{\circ}\text{C}$$

$$E = 33.5 + 1.47(20 - T) \quad (2.10)$$

$$(2) T \geq 20^{\circ}\text{C}$$

$$E = 33.5 \text{ kJ/mol}$$

이는 적절한 E 값을 사용할 경우 Arrhenius의 식을 사용하여 계산한 Maturity는 Saul의 Maturity함수에 비해 보다 넓은 온도범위의 콘크리트 강도 추정에 이용될 수 있다는 것을 의미한다.

2.4 온도와 재령에 의한 비선형 Maturity⁽⁷⁾

널리 사용하고 있는 식 (2.3)과 식(2.9)의 Maturity 함수는 결함을 가지고 있다. Saul의 함수는 일반적으로 간편하다는 점 때문에 현장에서 사용되기는 하지만 강도의 발현에 미치는 온도의 영향을 정확히 반영하고 있지는 못한다. 또한 이 함수의 적용범위는 5°C ~ 30°C로 제한되어 있다. 물론 Carino⁽⁹⁾가 제안한 일정온도 범위에서 변수 T_0 를 변화시킴으로서 콘크리트의 강도 추정의 정확성은 증가되기는 했으나 다른 함수에 비해 기저온도 T_0 를 결정하는 데에는 많은 시간과 노력이 필요한 것이 사실이다.

한편, Arrhenius의 함수에 기초한 Maturity 함수는 Saul에 비해 온도의 영향을 산정하는데 좋은 결과를 보였지만 온도에 의한 종속 변수 E 의 계산 등 그 계산 방식이 더욱 복잡해졌다.

따라서 현장에서 사용하기에도 간편하고, 보다 정확한 지수 함수 형태의 Maturity함수의 연구가 필연적으로 진행되었다.

Weaver와 Sadgrove⁽¹⁶⁾는 20°C에서의 등가재령을 계산하여 포물선의 형태로 표현되는 식을 제안하였다. 즉

$$t_{\infty} = \Sigma \frac{(T+16)^2}{1296} \Delta t \quad (2.11)$$

이 식은 Saul의 함수에 비해 낮은 Maturity에서 좀더 나은 결과치를 보이고 있으며, Saul의 함수에 비해 강도와 Maturity의 관계가 더 높은 상관관계를 나타내고 있다고 보고되었다.

3. Maturity 함수를 적용한 콘크리트의 압축강도 추정식

3.1 Plowman⁽¹⁷⁾의 강도추정식에 대한 고찰⁽¹⁸⁾

압축강도에 대한 시간과 온도의 영향을 Maturity 함수에 의해 정량화 한 후 다음 단계는 Maturity 함수를 이용하여 압축강도를 산정하는 것이다.

Plowman은 Saul의 Maturity를 적용하여 한중 콘크리트의 강도 결과를 분석하기 위해 Maturity와 콘크리트 강도의 함수관계를 밝혀내었다. 그는 식 (3.1) 같이 콘크리트의 강도 S 는 Maturity M 에 정비례한다는 Maturity에 의한 강도 발현의 법칙을 제안하였다.

$$S \propto \int_0^1 (T_1 - T) dt \quad (3.1)$$

Plowman에 의해 최초로 공식화된 Maturity 함수는 강도-Maturity의 관계를 단순히 log 형태의 함수로 표현되었다. 즉 Type 1 포틀랜드 보통 시멘트로 배합된 콘크리트에서 Plowman은 28일 강도의 비와 Maturity로써 Maturity에 따른 압축강도 발현에 관한 식 (3.2)을 제시하였다.

$$\frac{S_c}{S_{28}} = A + B \log \frac{M}{1000} \quad (3.2)$$

A, B : 상수

M : Maturity (F-hr)

S_c : Maturity M 에서의 압축강도

S_{28} : 28일 압축강도

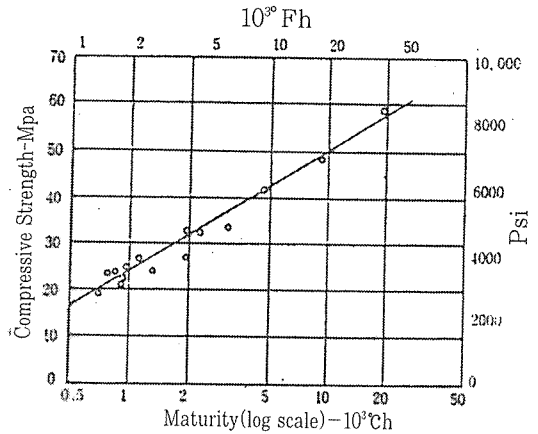


그림 3.1 log Maturity-압축강도의 관계

Plowman에 의해 규정된 상수 A, B 는 Maturity에 log를 적용한 변수에 대한 S_c/S_{28} 의 선형 회귀 분석을 통해서 얻어진 것이다. Plowman은 38°C이하에서는 식 (3.2)는 그림 (3.1)과 같이 완전히 선형관계를 유지한다고 주장하였다.

그러나 이 식은 발표 초기부터 논쟁을 불러일으켰다. 즉 식 (3.2)에 의해 추정된 콘크리트의 강도는 재령이 증가할수록 무한대로 증가 한다는 점이 지적되었다.

Klieger⁽¹⁰⁾는 Plowman의 식을 검토하는 과정에서 Plowman의 식이 완전히 선형관계를 유지 한다는 주장을 반박하게 되었다. Klieger는 -4~49°C 사이의 양생 온도와 Maturity값 20~20,000°C.day까지의 측정 결과 콘크리트 압축 강도가 무한히 증가하지 않으므로 Maturity 대수값은 한정된 범위에서만 성립한다고 발표하였고 3일에서 28일 강도까지에서는 Plowman의 식이 선형 관계를 유지한다고 증명하였다. 이 연구 결과는 Plowman의 선형이론을 다른 실험 공시체에 적용했을 경우 초기 재령과 장기 재령에 있어서는 비선형 관계를 나타내고 있다. Quao, H. N. O⁽¹⁹⁾는 Plowman 추정식의 대략적인 직선관계는 28일 강도까지

성립하며 그 이후는 Plowman의 추정강도보다 실제로 낮아진다고 주장하였다. Tam, C. T⁽²⁰⁾는 Plowman의 추정식은 Maturity값이 2,760~27,600°C.hr 사이의 값을 유지할때까지만 성립하여 선형이론은 양생의 초기재령과 장기재령에서는 적합하지 못하다고 주장하였다.

Marshall 역시 초기 재령과 장기 재령에 있어서 비선형 관계를 나타낸다는 Klieger의 주장에 동의하였다.

그림 (3.2)는 Marshall에 의해 유추해 낸 것으로서 재령에 log값과 압축강도의 관계는 완전히 비선형임을 나타낸 것이다. 이것은 Plowman의 이론에 대립되는 결과로서 초기 재령에 있어서의 콘크리트 강도에 Plowman의 선형 이론을 적용할 수 없다는 것을 나타낸 것이다.

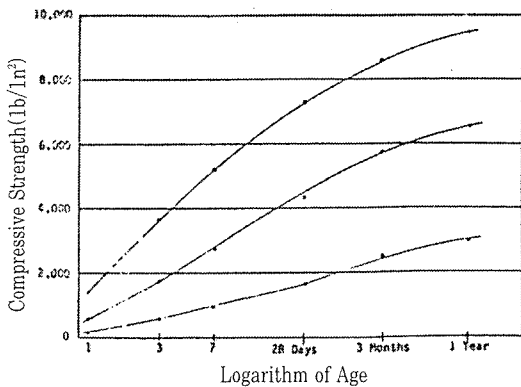


그림 3.2 log 재령과 압축강도와의 관계

결과적으로 Maturity의 개념에 기초한 Plowman의 (2.13) 식은 38°C이하의 낮은 양생에서는 적용될 수 있었다. 그러나 그 이후의 다른 연구들을 통해서 Maturity개념은 38°C이상의 콘크리트 양생 온도에서 콘크리트의 압축강도를 예측하는데에는 적용할 수 없다고 지적하였다. 사실상 Plowman은 이후 그가 제안한 관계가 극히 낮은 Maturity, 특히 Maturity값이 0이 되는 초기 재령에 있어서는

부정확하다는 입장을 밝힌 바 있다. 특히 초기 재령에 있어서의 Plowman의 식의 결함이 발견된 이후 콘크리트의 압축강도를 예측하는 발전된 형태의 수정된 관계식이 필요하게 되었다.

3. 2 Plowman이후의 강도 추정식에 대한 고찰⁽⁷⁾

Plowman의 콘크리트 압축강도 추정식의 결함과 제한적인 적용범위가 증명된 이후 많은 연구를 통하여 Maturity를 적용한 강도 추정식이 발표되었다.

1971년 Chin, F. K⁽²¹⁾는 콘크리트 강도와 Maturity의 관계를 쌍곡선의 식으로 표현하는 방법을 제안하였다. 이는 다음 식 (3.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{M_s}{aM_s + b} \quad (3.3)$$

a, b : 상수

M_s : Saul의 Maturity함수

식 (3.3)은 식 (3.2)에서 지적되었던 결함을 보정하였다. 즉 콘크리트의 강도는 콘크리트의 재령에 의한 상수 a 의 역수, 즉 $\frac{1}{a}$ 에 접근하기 때문에 Plowman의 강도 추정식 (3.2)의 재령에 따라 무한대로 강도가 증가되는 결점을 수정하였다. 그러나 식 (3.3)은 콘크리트 경화 초기의 온도 조건에 따른 장기 재령강도의 변화 현상에 대해서는 명확히 규명하지는 못하였다.

Carino⁽⁹⁾는 이론적으로 강도 - Maturity의 관계를 나타내는 식을 유도하였다. 그는 콘크리트의 등온도 양생에서 상대적인 강도(최종 강도와 콘크리트 강도와 비)의 증가속도는 잔여 강도비에 비례한다고 주장하였다. 이 개념을 식으로써 표현하면 식 (3.4)와 같다.

$$\frac{d(R/R_v)}{dt} = k(1 - \frac{R}{R_v})^n \quad (3.4)$$

R_v : 콘크리트의 강도
 R : 콘크리트 최종 강도
 k : 속도 상수
 n : 양의 정수

식 (3.4)에서 $n=1$ 또는 2로 가정하고 적분했을 경우 지수 또는 쌍곡선의 식이 얻어진다. Carino는 쌍곡선의 식 (3.5)는 지수로 표현된 식보다 정확한 값을 갖는다고 주장하였다.

$$\frac{M}{1 - (S/S_v)} = A(M_0 + M) \quad (3.5)$$

S/S_v : 최종강도에 대한 강도의 비
 M_0, M : Maturity

이를 식 (3.3)과 유사한 형태로 전환하면 다음 식 (3.6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \frac{S/S_v}{\frac{1}{A} + \frac{M}{Su}} \quad (3.6)$$

S : 콘크리트의 강도접선이 수렴하는 최대강도,
 A : 최적 곡선의 최초 접선 기울기

4. Maturity 함수의 적용성 평가⁽⁷⁾

4. 1 등온도 양생에서의 콘크리트의 경화

앞에서 고찰한 바와 같이 Maturity는 시간의 증가치와 그에 따른 온도의 총합으로서 표현된다. 만일 일정한 온도 상태에서 콘크리트가 경화한다면 Maturity는 재령과 일정한 양생온도의 총합의 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$M = \sum k_i \Delta t = k_i \sum \Delta t = k_i t \quad (4.1)$$

M : Maturity

k_i : 재령 t 에서의 온도

t : 재령

따라서 등온도 양생구간에 있어서 상수로써 보정하는 경우를 제외하고, Maturity와 강도의 상관관계를 표현하는 식은 양생기간과 강도의 상관관계를 표현하는 식과 결과적으로 동일할 것이다. 로그 함수, 지수 함수와 쌍곡선 함수를 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$R = a + b \log M = a + b \log k + b \log t = a' + b \log t \quad (4.2)$$

$$R = a e^{-b/M} = a e^{-b/kt} = a e^{-b'/t} \quad (4.3)$$

$$R = \frac{M}{aM + b} = \frac{kt}{akt + b} = \frac{t}{at + b/k} = \frac{t}{at + b'} \quad (4.4)$$

R : 압축강도

M : Maturity

k : 온도

t : 재령

a, b, a', b' : 상수

이 경우 Maturity의 도입은 불필요하게 된다. 즉 등온도 양생 구간에서의 Maturity 함수인 식 (4.1)~(4.4)에서 콘크리트의 강도는 시간에만 의존하고 있음을 나타낸다. 이론적으로는 콘크리트 강도의 경화를 나타내는 Maturity는 모든 양생구간에서 압축강도와 반드시 높은 상관관계 보이지 않는다는 것을 나타내고 있다.

4. 2 Maturity 함수의 결함

시멘트의 수화 반응으로 인해 콘크리트는 경화하게되므로 콘크리트의 경화 과정은 온도에 많은 영향을 받게 된다. 실제 콘크리트

의 강도발현에 있어서 이상적인 Maturity 함수는 시간과 온도에 의해 표현되며 또한 Maturity는 시멘트의 수화 반응의 누적량과 비례한다. 이는 식 (4.5)와 식 (4.6)으로 표현할 수 있다.

$$R_n = \Sigma k(T, t) \Delta t \quad (4.5)$$

$$M = AR_n = \Sigma Ak(T, t) \Delta t \quad (4.6)$$

R_n : 시멘트 수화반응의 누적량

M : 콘크리트의 Maturity

t : 콘크리트의 재령

T : 온도

$k(T, t)$: 재령 t 에서의 수화반응의 속도

: T, t 를 종속변수로 하는 함수

A : 비례상수

$Ak(T, t)$: 이상적인 Maturity에서의 콘크리트의 경화속도

Saul의 Maturity함수 M_s 는 다음 두 가지의 접근 방법에 의해 Maturity를 가장 간단하게 표현한 함수이다.

첫 번째는 경화속도는 $Ak(T, t) = k_r$ 로서 재령과는 무관하게 단지 온도의 함수만으로 표현될 수 있다는 것이다. 두 번째는 경화 속도는 기저온도의 초과치에 해당하는 온도, 즉 $k_r = (T - T_0)$ 동등하다고 가정할 수 있다는 것이다. 이에 따라 콘크리트의 등온양생에서의 Saul의 Maturity M_s 는 단지 여러 시간 값들을 나타내고, 콘크리트를 동일시간에 양생한다면 M_s 값은 T_0 에서부터 산정된 온도에 정비례할 것이다.

M_s 의 증가는 시멘트의 수화과정이나 강도 발현과는 차이를 가지고 있다. 왜냐하면, 양생과정에 있어서 특정한 주요 변수는 무시되거나 또는 온도의 영향만이 고려되기 때문이다. 이것은 Saul의 Maturity와 콘크리트의

강도사이에 정확한 상관관계가 성립되지 않는 이유이다.

Maturity 함수 M_a 는 수화반응에서 온도의 영향을 잘 반영한 Arrhenius의 식에 기초한 것이다. 그러나 속도상수 $\exp(-E/RT)$ 는 시간 의존성 경화 속도라기 보다는 재령 증가에 의한 k_r 의 승수로서 도입되었다. M_a 는 콘크리트가 등온양생될 경우 재령의 증가에 따라 정비례하는 변수라는 점은 개선되지 않고 있다. 따라서 M_a 의 증가는 콘크리트의 경화와 시멘트의 수화반응의 진행과는 여전히 차이를 가지고 있다.

콘크리트의 강도 추정을 위해 일반적으로 받아들이고 있는 이론적인 기초는 Saul에 의해 제시된 것으로서, 동일한 Maturity에 도달할 경우 온도 이력에 상관없이 거의 동등한 강도를 얻을 것이라는 내용이다. 그러나 Saul의 제안의 결점은 그림 (4.1)을 통해 볼 수 있다.

그림 (4.1)은 강도의 발현과 Maturity의 증가를 개략적으로 나타내고 있다. 곡선 1과 직선 1'은 일정온도 T_1 에서의 콘크리트의 경화를 나타내는 반면 곡선 2와 직선 2'는 온도 T_2 에서의 경화를 나타내고 있다.

콘크리트가 2가지의 각각 다른 경화과정을 거치고 있다고 생각할 경우 첫 번째의 과정에서 시간 t_1 동안 온도 T_1 으로 양생되고 나서, 또 다른 주기 t_2 에서 온도 T_2 로 양생되고 있는 것이다. 두 번째의 과정에서는 첫 번째의 과정과 동일한 콘크리트를 가지고 주기 t_2 동안 온도 T_2 로서 양생한 후 주기 t_1 동안 온도 T_1 으로 양생되고 있다.

직선 1'과 2'에 따르면 Maturity $k_r t_1 + k_r t_2$ 는 두 가지의 과정에서 동일하게 누적되고 있음을 알 수 있다. 곡선 1과 2는 압축강도 즉, 과정 1에서의 강도값 R_1 과 과정 2에서의 강도값 R_2 는 각기 다른 수치를 보이고 있다.

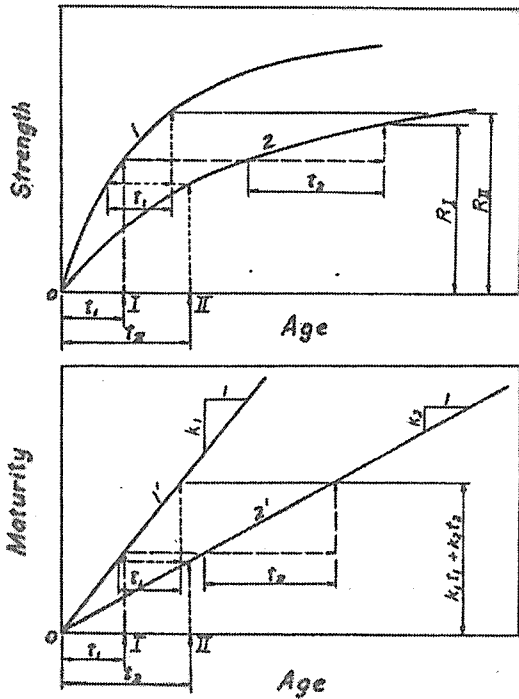


그림 4.1 콘크리트의 Maturity와 압축강도에 대한 온도내력의 영향

분명한 것은 측정된 시간과 온도로부터 각기 다른 온도에서의 콘크리트의 Maturity 값 Ms나 Ma를 산정할 수 있으며 콘크리트의 강도는 재령과 온도뿐만이 아니라 온도내력에도 영향을 받고 있는 복잡한 물리량이다.

이른바 Maturity 법칙이라는 것은 정밀한 것은 아니다. 즉, 초기재령강도의 예측에 있어서 Maturity의 방식에 어느 정도 의존할 수 있지만 콘크리트의 후기 재령의 강도에 있어서는 Maturity 법칙의 적용성은 급속히 감소된다. Ms나 Ma와 강도 사이의 이론적인 상관관계는 부정확한 결과를 보이고 있다.

앞에서 고찰한 콘크리트의 등가 재령은 재령에 대한 상온에서 강도와와의 상관관계를 나타낸 곡선으로부터 콘크리트 압축강도를 추정하는데 이용된다. 이 방법은 간편하기는 하지만 역시 결과치에 대해 비교적 큰 오차가

발생한다.

그림 (4.2)는 Maturity Ms와 Ma의 증가를 직선으로 나타내고 있으며 콘크리트의 강도 발현을 개략적인 곡선으로 나타내고 있다.

곡선 1과 직선 1'은 일정온도 T에서의 콘크리트의 경화를 보여주고 있고, 곡선 2와 직선 2'은 상온 20 °C에서의 경화를 나타내고 있다. 만일 콘크리트가 주기 $t=OG$ 동안 온도 T에서 경화한다면 식 (2.6), (2.9)의 Maturity 식으로 부터 계산된 등가재령 $t_{es} = OH'$ 가 될 것이고, 실제의 등가 재령 $t_e = OH$ 가 될 것이다. 만일 곡선 2로부터 콘크리트의 강도를 추정한다면 계산된 t_{es} 에 따라 상온에서의 곡선에서 그 결과치는 실제 강도 PG가 아닌 S'H'이 될 것이다. 즉 강도 추정에 있어서 오차는 콘크리트가 점점 더 경화될수록 증가하게 된다.

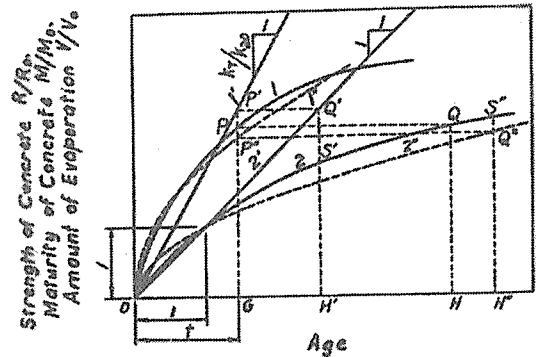


그림 4.2 그림 4.1의 압축강도-재령으로부터 콘크리트 압축강도의 추정

이러한 Maturity의 부정확성에도 불구하고 콘크리트의 Maturity의 수치나 등가재령, 특히 Arrhenius에 기초한 Maturity가 초기강도의 추정에 유용하게 사용되고 있는 이유는 다음과 같다. 즉 위의 그림 (4.2)와 같은 경우 실제 강도와 추정된 강도와의 차이 (PG-S'H'의 오차)는 Maturity를 적용하

는 과정에서 어느 정도 허용될 수 있다는 것이다. 또한 Maturity의 Ms나 Ma의 수치를 표준화하여 나타낸 직선은 재령과 강도의 상관관계를 나타내는 곡선의 초기 부분에 상당히 접근하고 있다는 것이다.

5. 결 론

콘크리트의 압축강도를 추정하기 위한 Maturity 함수의 적용성 및 강도추정식의 고찰에 관해 요약하면 다음과 같다.

(1) Saul의 Maturity 함수는 적용범위가 5 ~ 30℃로 제한된 범위를 가지고 있는 반면 Arrhenius의 Maturity 함수는 보다 넓은 온도범위의 콘크리트 강도 추정에 이용될 수 있다.

(2) Weaver와 Sadgrove에 의해 제안된 포물선 형태의 Maturity 함수는 사용이 간편하고, Saul의 Maturity 함수에 비해 낮은 Maturity에서도 적용성이 높은 것으로 나타났다.

(3) Plowman의 선형 이론은 재령의 증가에 따라 압축강도가 무한대로 증가하는 결함을 가지고 있고, Maturity가 극히 낮은 상태에서 부정확한 추정치를 보인다.

(4) 콘크리트의 경화를 Maturity의 개념으로써 표현할 경우 경화 조건에 따라 주요변수인 시간과 온도 중 한가지에만 의존하는 함수로써 표현될 수 있다. 그러므로 이론적으로 Maturity에 의해 콘크리트의 압축강도를 추정함에 있어 표준오차가 증가될 수 있다.

(5) 그러나 실제 Maturity에 의한 강도 추정에서 발생하는 오차는 예상치를 크게 초과하지 않고 있다.

참 고 문 헌

1. Nurse, R. W., "Steam Curing of Concrete," Magazine of Concrete Research (London), V. 1, No. 2, June 1949, pp. 79-88
2. McIntosh, J. D., "Electrical Curing of Concrete," Magazine of Concrete Research (London), V. 1, No. 1, Nov. 1949, pp. 21-28
3. Saul, A. G. A., "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete," Magazine of Concrete Research (London), V. 2, No. 6, Nov. 1951, pp. 127-140
4. Laidler, K. J., and Meiser, J. H., Physical Chemistry, The Benjamin/Cumming Publishing Co., Inc., Menlo Park, 1982, pp 919
5. Bergstöm, Sven G., "Curing Temperature, Age and Strength of Concrete," Magazine of Concrete Research (London), V. 5, No. 14, Dec. 1953, pp. 61-66
6. Rastrup, Erik, "Heat of Hydration in Concrete," Magazine of Concrete Research (London), V. 6, No. 17, Sept. 1954, pp. 79-92
7. Guo, Chengu, "Maturity of Concrete: Method for Predicting Early-Stage Strength," ACI Materials Journal, V. 86, No. 4, Jul-Aug. 1989, pp 341-353
8. Price, Walter H., "Factors Influencing Concrete Strength," ACI Journal Proceedings V. 47, No. 6, Feb. 1951, pp 417-432
9. Carino, Nicholas J., Lew, H. S., Volz, C. K., "Early Age Temperature Effects on Concrete Strength Prediction by the Maturity Model", ACI Journal, Proceedings, V. 80, No. 2, March-Apr.

-
- 1983, pp. 93-101
10. Klieger, Paul, Discussion on "Maturity and Strength of Concrete", by J. M. Plowman, Magazine of Concrete Research (London), V. 8, No. 24, Nov. 1956, pp. 175-178
 11. Marshall, W. T., Discussion on "Maturity and Strength of Concrete", by J. M. Plowman, Magazine of Concrete Research (London), V. 8, No. 24, Nov. 1956, pp. 179
 12. Copeland L. E.; Kantro, D. L.; and Verbeck, George, "Chemistry of Hydration of Cement," Proceedings, 4th International Symposium on the Chemistry of Cement (Washington, D. C., 1960), Monograph 43, National Bureau of Standards, Washington D. C., 1962, pp 429-465
 13. Freiesleben Hansen, P., and Pedersen, J., "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete," Nordisk Betong (Stockholm), V. 21, 1977, pp. 19-34
 14. Byfors, Jan, "Plain Concrete at Early Ages," CBI Research No. 3:80, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1980, pp 464
 15. Gauthier, E., and Regourd, M., "The Hardening of Cement in Function of Temperature," Proceedings, RILEM international Conferences on Concrete at Early Ages, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, Apr. 1982, V. 1, pp. 145-150
 16. Weaver, J., and Sadgrove, B. M., "Striking Times of Formwork-Tables of Curing Periods to Achieve Given Strength," CIRIA Report No. 36, Construction Industry Research and Information Association, London, Oct. 1971, pp 76
 17. Plowman, J. M., "Maturity and the Strength of Concrete," Magazine of Concrete Research (London), V. 8, No. 22, Mar. 1956, pp. 13-22
 18. Francis, A.; Oluokun, E. G. B.; and J. Harold, "Early-Age Concrete Strength Prediction by Maturity-Another Look," ACI Materials Journal, V. 87, No. 6, Nov-Dec. 1990, pp 565-572
 19. Quao, H. N. O., "The Age-Strength Relationship of Concrete under Tropical Conditions", RILEM Bulletin, New Series No. 24, Sept. 1964, pp 133-148
 20. Tam, C. T., "The Relationship Between Strength and Maturity of Concrete in Tropical Conditions," Journal, Dept. of Eng., Univ. of Malaya, June 1968, pp 60-73
 21. Chin Fung Kee, "Relation Between Strength and Maturity of Concrete," ACI Journal, Proceedings, V. 68, No. 3, Mar. 1971, pp 196-203