

성숙도를 고려한 콘크리트의 강도예측에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Concrete Strength Prediction by Maturity Method

오 병환*, 이 명규**, 김 광수**, 전 세진**, 김 의성***, 김 상섭***, 최 인혁***
Oh, B.H., Lee, M.G., Kim, K.S., Jeon, S.J., Kim, E.S., Kim, S.S., Choi, I.H.

ABSTRACT

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. Maturity is the integral of time and temperature of concrete above a datum temperature.

Tests are conducted in order to determine a datum temperature and to measure compressive strengths and maturity of test specimens. This study also proposes some appropriate functions to represent the relationship between maturity and strength development.

1. 서론

공사기간과 시공공간의 문제가 시공에 있어 주요 관심사로 떠오른 지금 콘크리트 초기강도를 정확히 예측하는 것은 공사비 절감과 안전시공을 위해 중요한 일이다. 구조부재의 제작과 콘크리트의 시공에 있어서 콘크리트의 초기강도의 예측은 가장 중요한 사항이다. 거푸집의 제거나 프리스트레스트 부재에서의 긴장력의 도입등의 작업일정을 경제성과 안전성 관점에서 계획하기 위해서는 사용되는 콘크리트 강도 발현과정에 대한 이해가 필수적이다. 여기서 콘크리트의 강도

는 시간과 온도이력의 함수로 볼수 있다.

강도발현의 측정에 이 두가지 변수의 복합적 영향을 활용하는 성숙도 방법은 증기양생의 효과를 예견하기 위한 것이 그 동기였으나 뒤이어 일반양생에 까지 이 방법의 응용이 확대되었다.

본 연구에서는 양생중인 콘크리트의 강도를 성숙도법으로 평가하기 위한 이론적 배경과 절차를 고찰하고 성숙도함수에 사용되는 기준온도를 제시하였다. 또한 성숙도-강도 함수들을 도출하고 그들의 비교를 통하여 보다 정확한 식을 제시하고자 하였다.

* 서울대학교 토목공학과 교수

** 서울대학교 토목공학과 대학원

*** 동부건설(주) 기술연구소

2. 성숙도 이론

2.1 개요

일반적으로 가장 많이 논의되는 성속도 함수인 Nurse-Saul 함수 등은 하나의 근사법으로 콘크리트 강도에서 시간과 온도의 영향을 설명하기 위한 것이다. 따라서 엄밀한 이론적 기반을 토대로 한 것이라기 보다는 경험적인 증거에 근거하여 응용한 것이다.

여기서 Bernhardt 등에 의해 처음으로 제시된 콘크리트 압축강도 발현을 나타내는 수학적 표현들의 발전과정을 살펴보기로 한다.

어떤 시간 t 에서의 강도발현율(dS/dt)은 강도(S)와 온도(T)의 함수로 가정될 수 있다.

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

여기서, $f(S)$: 강도의 함수

$k(T)$: 온도의 함수

경험에 의하여 Bernhardt는 다음을 제안하였다.

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

여기서, S_{∞} : 무한시간에서의 한계강도
강도가 발현되기 시작할 때 $f(S) = S_{\infty}$ 임을 감안하면 초기 강도 발현율은 다음과 같다.

$$\left. \frac{dS}{dt} \right|_{S=0} = S_{\infty} k(T) \quad (3)$$

온도 함수 $k(T)$ 는 “비례상수”라 불리는데 초기 강도 발현율에 영향을 주기 때문이다.

만약 S_{∞} 가 양생온도에 무관하다고 가정하고 식 (1)과 식 (2)를 결합하면 다음의 적분식이 얻어진다.

$$\int_0^S \frac{dS}{\left[\left(1 - \frac{S}{S_{\infty}} \right) \right]^2} \quad (4)$$

$$= S_{\infty} \int_{t_0}^t k(T) dt$$

식 (4)는 배합 후 일정시간 t_0 가 지난 뒤에야 강도 발현이 시작된다는 Bernhardt의 원래의 유도로 부터 나온 것이다. 이러한 근사식은 식(1)에서 쓰인 초기 배합과 강도 발현 사이의 지연시간을 고려해주기 위해 도입된 것이다.

식 (4)의 우변 적분식이 온도와 시간의 곱을 포함하고 있음을 주목하면 이 적분식은 성속도 함수의 일반적인 형태이고 $M(t, T)$ 로 나타낸다.

$$M(t, T) = \int_{t_0}^t k(T) dt \quad (5)$$

2.2 성속도의 기본이론

1951년 Saul은 영국 Cement and Concrete Association에서 수행된 증기양생의 원칙에 관한 연구에서 시간과 온도의 곱을 적분한 것으로 다음과 같이 성속도 계산방식을 제시하였다.

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (6)$$

여기서 M : 시간 t 에서의 성속도

T : 시간 주기 Δt 동안의 콘크리트 평균온도

T_0 : 강도발현 기준 온도

여기서 기준온도의 항은 강도 발현이 이루어 질 수 있는 가장 낮은 온도로서 이에 근거하여 성속도가 계산되어야 함을 제안한 것이다.

이러한 시간과 온도의 복합적 영향을 나타내기 위한 또다른 접근으로서 Rastrup에 의해 발전된 등가재령(Equivalent Age) 개념이 있다. 이는 동일한 성속도 값을 얻기 위해 양생기준온도에서 콘크리트가 양생되어야 할 시간을 나타내는 것인데 수식화하면 다음과 같다.

$$t_e = \frac{\sum (T - T_o)}{(T_r - T_o)} \Delta t \quad (7)$$

여기서 t_e : 기준 온도에서의 등가 시간
 T_r : 기준 온도

3. 성숙도와 콘크리트 압축강도 관계실험

3.1 실험개요

Nurse-Saul 함수를 적용하여 성숙도를 구하기 위한 실험은 강도발현 기준온도를 결정하기 위한 실험과 성숙도-강도 함수 도출을 위한 실험으로 대별될 수 있다.

배합은 28일 강도 450kg/cm²을 목표로 물/시멘트비는 31%, 잔골재율은 35.0%로 하였다. 굵은 골재는 자연석을 사용하였으며 유동화제 7.95kg/cm²를 첨가하였다.

강도발현 기준온도의 결정을 위해서는 5cm×5cm×5cm의 cube를 써서 3가지 양생 조건에서 양생하고 성숙도와 압축강도는 10cm×20cm의 cylinder를 제작하여 4가지 조건에서 양생,각각을 측정하게 된다.

3.2 기준온도의 결정

실험절차를 요약하면 다음과 같다.

- ① 콘크리트에 사용될 배합비를 갖는 모르터를 준비한다. (혼화제는 콘크리트와 동일하게 사용)
- ② 콘크리트가 현장에서 받을 것으로 예상되는 최고 온도와 최저온도, 두 온도의 중간정도의 온도로 유지되는 세개의 수조에 시편을 넣는다.
- ③ 각 온도의 수조속의 시편에 대한 관입시험을 통하여 종결시간을 결정한다.
- ④ 50×50정육면체 공시체를 제작하여 세가지 온도로 유지되는 수조에 시편을 넣는다. 강도시험을 실시하기 1시간전에 탈형하여 수조에 다시 넣는다.
- ⑤ 각 수조의 시편에 대해서 종결시간의 2배

에 달하는 시점에서 압축강도를 측정한다. 즉, 종결시간의 2,4,8,16,32,64배의 시간이 경과한 후 강도시험을 실시한다.

- ⑥ 각 양생온도에 대해서 강도의 역수를 수직축에, 재령의 역수를 수평축에 도시한다.
- ⑦ 각 양생온도에서 최적 직선을 찾아낸다.
- ⑧ 각 직선의 절편을 기울기로 나눈 값이 기준온도와 활성화에너지의 계산에 사용되는 K값이 된다.

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

$$y=0.1665+0.0164x \quad (8)$$

결국 기준온도 $T_o=-10.15$ °C를 얻는다.

3.3 양생조건별 강도발현

3.3.1 시험절차

- ① 강도-성숙도관계가 결정될 콘크리트와 배합 및 성분이 동일하도록 공시체를 제작한다.
- ② 온도측정장치를 최소한 2개의 시편의 중심에 매설하여 성숙도계나 온도측정장치에 연결 측정한다.
- ③ 시편을 습윤양생시킨다.
- ④ 1,3,7,14,28일 강도시험을 실시한다.
- ⑤ 각 시험시점에서 평균 성숙도값을 기록한다. 온도기록간격은 처음 48시간동안은 30분이나 더 짧은 간격으로 다음에는 적절하게 조절한다.
- ⑥ 다른 온도 조건에서 양생된 콘크리트의 강도를 산정하기 위하여 성숙도 관계를 이용한다.

3.3.2 강도 측정결과

각 양생조건별로 온도를 측정하고 재령에 따른 강도를 구한 결과는 다음과 같다. (압축강도 단위:Kg/cm²)

1) Case 1, 항온항습실, 수조양생

재령	1일	3일	7일	14일	28일
강도	277.67	339.23	376.35	447.15	461.5

2) Case 2, 항온항습실, 건조상태

재령	1일	3일	7일	14일	28일
강도	269.8	361.4	392.0	441.03	482.93

3) Case 3, 자연양생

재령	1일	3일	7일	14일	28일
강도	246.03	405.75	441.45	465.0	544.5

4) Case 4, 12시간 증기양생후 자연양생

재령	0.5일	1일	3일	7일	28일
강도	333.2	422.9	497.25	540.7	562.13

4. 성숙도 실험결과 및 분석

4.1 성숙도-강도함수의 도출

성숙도와 강도 관계를 나타내는 함수는 오랜기간동안 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

- 기본형태 : $S = a + b \times \text{Log}(M)$
- 실험결과

양 생 조 건	실 험 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

(2) Lew & Reichard 모델

- 기본형태

$$S = \frac{K}{1 + D \times [\text{Log}(M - 16.7)]^b}$$

(K : The Limiting Strength)

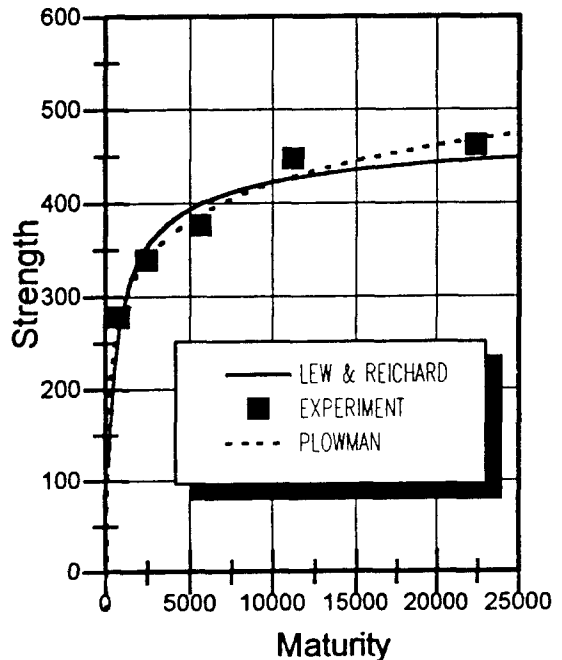
- 실험결과

양 생 조 건	실 험 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

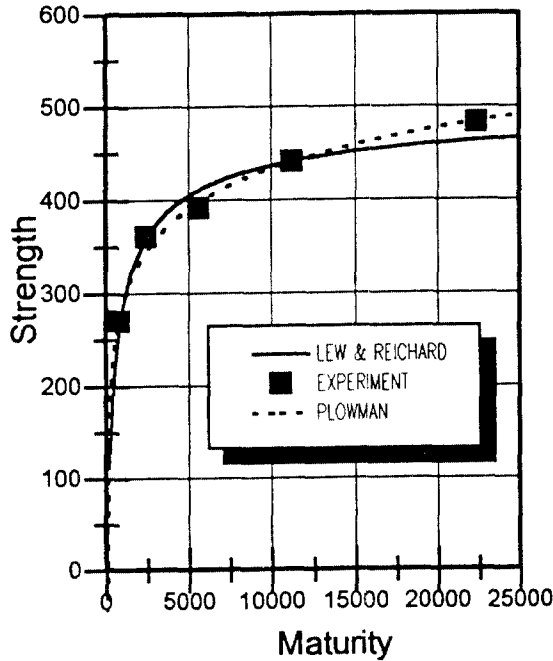
4.2 각 함수와 실험치와의 비교

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

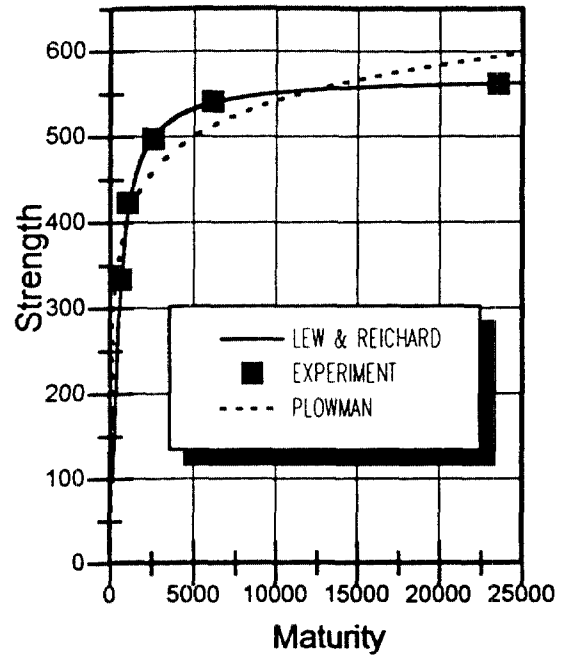
1) Case 1



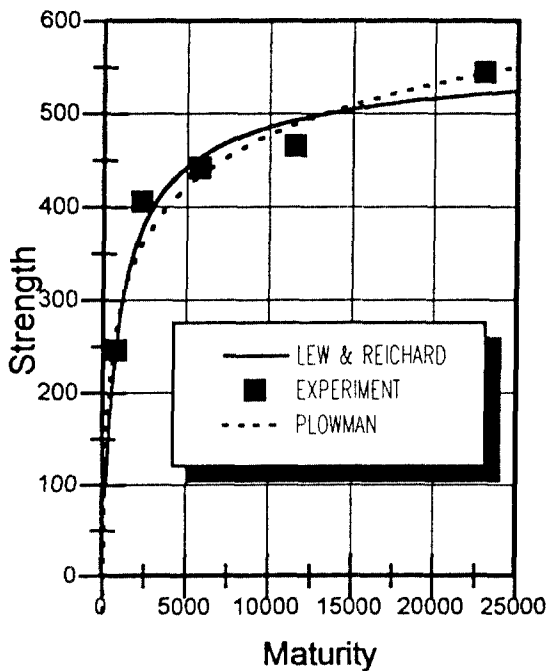
2) Case 2



4) Case 4



3) Case 3



5. 결론

강도발현 기준온도 T_0 는 -10.15°C 로 나타났는데 Saul이 제시한 -10.5°C 나, Plowman이 제시한 -12°C 와 근사한 차이는 있다. 일반적으로 -10°C 가 사용되는데 일정 배합에 대해 정확한 성숙도 값을 얻기 위해서는 여기서 수행된 것처럼 각 배합별 기준온도를 규정 절차에 의거 산출해 내야 한다.

그리고, 한 배합에 있어 성숙도-강도 관계 함수는 양생조건에 관계없이 항상 일정하게 나타나는 것은 아님을 알 수 있다. 따라서 성숙도로부터 보다 정확하게 강도를 예측하기 위해선 좀더 다양한 변수들을 고려하여 함수를 도출하는 것이 필요하다. 다만 본 연구를 수행한 결과 대기 습도의 영향은 그리 크지 않은 것으로 사료된다. 또한 촉진 양생에 있어서는 Plowman의 모델보다는 Lew & Reichard의 모델이 정확하게 강도-성숙도 관계를 나타내고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

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