

콘크리트 조기강도 예측을 위한 합리적인 기법 연구(II)

A Study on Prediction of Early-Age Concrete Strength by Maturity Concept(II)

오 병환*, 채 성태**, 이 명규**, 김 광수**
Oh, B.H., Chae, S.T., Lee, M.G., Kim, K.S.

ABSTRACT

It is the "maturity rule" that concrete of the same mix, at the same maturity, has the same strength. 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 to relate concrete strength to the maturity value are considered, new strength-maturity function is proposed.

Tests are conducted in order to compare prediction value with measured concrete strength. The constants in proposed prediction equation are determined by standard specimens(cylinders) test, and the equation is adopted to predict 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 proposed equation.

1. 서론

일정 배합의 콘크리트에 있어서 양생기간중에 콘크리트 강도발현을 평가할 수 있는 중요한 지표가 될 수 있는 것이 바로 콘크리트의 온도와 시간이다. 강도발현의 예측에 이 두가지 변수의 복합적 영향을 활용하는 성숙도 방법(Maturity Method)은 초기에 제안되었을 때부터 광범위한 연구가 수행되었고, 온도 이력으로부터 정확한 강도 추정을 위해 여러가지 수정안들이 제안되었다. 오늘날, 성숙도법은 강도 발현에 있어 시간과 온도의 복합적 영향을 평가하는 유용하고도 간단한 수단으로 인식되고 있다.

이러한 성숙도계산을 위한 함수는 콘크리트의 온도이력을 강도 발현량을 나타내는 계수로 전환하기 위해 사용될 수 있는 것이다. 여기서 초기 강도 발현량에 대한 예측자료는 시공과정에 유용하게 이용될 수 있다. 특히 프리캐스트 콘크리트의 제작이나 프리스트레싱 부재에는 그 효용이 아주 크다 할 수 있다.

본 연구에서는 양생중인 콘크리트의 강도를 성숙도 개념으로 평가하기 위한 이론적 배경과 절차를 간략히 고찰하고 제안된 몇가지 이론들을 살펴 보고자 한다. 또한 최종적으로 강도-성숙도 관계를 통하여 양생기간중의 콘크리트 강도예측을 위한 식을 제안하고 연구성과의 현장적용방안을 모색하고자 한다.

이를 위하여 실제 시편을 제작하여 콘크리트 온도계측을 통해 성숙도를 계산해내고 그에 따른

* 서울대학교 토목공학과 교수

** 서울대학교 토목공학과 대학원

압축강도를 측정함으로써 강도-성숙도 관계를 살펴보았다. 이러한 실험결과를 토대로 타당한 강도에측시를 제안하고자 한 것이다. 이 과정에서 다른 양생조건에서 시편을 제작하여 측정함으로써 습도나 초기 양생온도가 미치는 영향을 고찰하여 보았다.

최종적으로는 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 함수와 기준온도

2.1 성숙도 이론의 기본배경

Saul은 다음과 같이 '성숙도 법칙(Maturity Rule)'을 한마디로 정리하였다. 즉 '같은 성숙도를 갖는 동일 콘크리트 배합은 온도와 시간의 결합이 어떻게 되었든 같은 강도를 갖는다' 라는 사실이다. 물론 그 후 많은 연구자들이 추가로 고려되어야 할 몇가지 변수들을 제안하였지만 배합이 같은 경우에 콘크리트에 있어서 양생중의 강도발현은 시간과 온도이력에 의해 지배된다는 사실에 기본적으로 근거하고 있다.

2.2 성숙도 함수(Maturity Function)

본 연구에서도 적용하였으며 가장 보편적으로 이용되는 성숙도 함수는 아래와 같은 형태의 Nurse-Saul 방정식이다. 이는 시간과 기준온도 이상이 되는 온도와 시간의 적을 성숙도로 계산해 내는 것이다.

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (1)$$

여기서 M : 시간 t에서의 성숙도
 T : 콘크리트 온도
 T₀ : 강도발현 기준온도

2.3 기준온도(Datum Temperature)

McIntosh는 양생과정에서의 강도 발현에 온도와 시간이력의 영향을 종합하기 위하여 기준온도 이상의 시간과 콘크리트 온도의 곱을 이용할 수 있다고 제안하였다. 그는 기준온도를 1.1°C로 제

안하였고, 기준온도이상의 시간과 온도의 적(積)을 "기본재령(Basic Age)"라 불렀다.

Nurse는 기준 온도의 사용을 제안하지는 않았는데 그의 계산은 실제 콘크리트 온도에 근거하고 있는 것이 아니라 양생실 온도에 근거하였다. 이러한 사실은 콘크리트의 초기 수화열을 고려하지 않았다는 점에서 그 약점이 있다. Saul은 강도발현이 관찰된 가장 낮은 온도인 기준온도에 근거하여 성숙도가 계산되어야 한다는 사실을 지적하였다. 여기서 기준온도의 항은 강도 발현이 이루어 질 수 있는 가장 낮은 온도로서 이에 근거하여 성숙도가 계산되어야 함을 제안한 것이다. Nurse-Saul 방정식은 이와 같이 콘크리트 온도가 T₀보다 더 높은 부분만을 고려한다. Saul은 콘크리트가 초결될때 0°C이하의 온도에서도 계속하여 강도발현이 이루어지는 사실을 고려하여 위 방정식에 대하여 -10.5°C의 기준온도를 제시하였다. Plowman은 그의 연구결과를 보고하였는데, 사전에 초결이 시작된 콘크리트의 강도발현이 중단된 순간에서의 온도를 결정하기 위한 것이었다. 실험 결과에 근거하여 Plowman은 기준온도로서 -12°C의 값을 제안하였다. 일반적으로 -10°C가 Nurse-Saul함수에서 기준온도로 사용된다.

이전의 연구에서 본 연구자는 T₀를 -10.15°C로 도출해 낸 바 있으며 이번의 성숙도 계산에도 적용하였다.

3. 성숙도-강도 관계

3.1 개요

먼저 Nykanen은 다음과 같이 지수형태의 강도-성숙도 관계를 제안한 바 있다.

$$S = S_{\infty} (1 - e^{-kM}) \quad (2)$$

여기서 S : 압축강도
 S_∞ : 한계 압축강도
 M : 성숙도
 k : 상수

한계 압축강도는 물-시멘트 비의 함수로 볼 수 있고 상수 k는 초기 강도 발현율과 관련된다. Nykanen은 k의 값이 물-시멘트 비와 시멘트의 종류에 의존하는 것으로 보았다.

Plowman은 강도를 Nurse-Saul식으로 계산한 성숙도의 대수 함수로 나타냈을 때 직선에 아

주 근접함을 보였다. 이로부터 강도-성속도에 관한 경험식을 제안하였다.

$$S = a + b \log(M) \quad (3)$$

Bernhardt는 쌍곡선형태의 강도-성속도 관계를 제시하였다. 재령에 따른 강도의 발현을 나타내기 위해 Goral에 의해서도 같은 식이 독립적으로 제안되었다. 이후, 미국 콘크리트 학회는 서로 다른 재령에서 콘크리트 강도 추정을 위한 같은 식을 제시하였다. Chin도 역시 형태의 식을 제안하였고, 주어진 자료에 대해 함수의 적절성을 평가하는 절차에 대하여 기술하였다. 쌍곡선형태의 강도-성속도 함수는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$S = \frac{M}{\frac{1}{A} + \frac{M}{S_{\infty}}} \quad (4)$$

여기서, M : 성속도

S_{∞} : 한계 강도

A : 강도 성속도 곡선의 초기 기울기
실험 자료와 이전에 나온 실험자료에 근거하여 Lew와 Reichard는 다음과 같은 강도-성속도 경험식을 제안하였다.

$$S = \frac{K}{1 + D[\log(M - 16.7)]^b} \quad (5)$$

계수 b는 물-시멘트 비와 시멘트 종류에 따라 좌우되는데 -1.5와 -4.3사이에서 변화하는 것으로 밝혀졌다. 강도 발현률과 유관한 계수 D 또한 물-시멘트 비와 시멘트 종류에 의존하는 것으로 밝혀졌다. 계수 K는 한계강도인데 그것은 물론 물-시멘트 비에 크게 좌우되고 시멘트 종류에는 다소 덜 의존하는 것으로 밝혀졌다. 식 (5)의 세 계수는 T_0 를 -12.2°C 로 하여 Nurse-Saul 성속도 함수를 사용하는데 근거하고 있다. $16.7 (^{\circ}\text{C}\text{-일})$ 의 기본성속도(Offset Maturity), M_0 이하에서는 압축강도가 실제로 0인 것을 보여주고 있다.

3.2 새로운 성속도-강도 함수의 제안

3.2.1 개요

성속도-강도 함수는 이제까지 많은 학자들에 의해 제안된 바 있다. Plowman의 식이 비교적 많이 논의되고 있는데 그 이유는 그것이 정확한 것 외에도 그 형태가 간단하여 적용이 편리하다

는데 있다. 하지만 여러 연구자들에 의해서 그 한계점들도 지적되고 있는데 그 식에서 나타난 대로 성속도의 증가에 따라 강도가 계속적으로 증가하지는 않는다는 것이다. 또한 초기재령의 성속도에서는 잘 맞지 않는 사례가 보고된 바도 있다.

그외 앞서 실명한 Chin이나 Lew, Reichard등의 식들도 그 나쁜의 특성을 가지고 있으나 이들 식들은 결정되어야 할 상수항을 3개정도 포함하고 있어 사용이 불편하고 특히 상수를 결정하는 방법에 있어 충분한 설명이 뒷받침되지는 못하고 있다.

3.2.2 성속도-강도 함수

본 연구에서는 성속도의 증진에 따른 콘크리트의 강도 발현과정이 대수함수적인 모양보다는 지수함수적 형태에 더 근접함을 주목하였다.

그리고 무엇보다도 강도발현은 성속도값이 일정한 수치에 이르렀을때 부터 시작된다는 사실을 고려하여 계산된 성속도 값 M에서 기본 성속도(Offset Maturity) M_0 를 뺀 값을 함수에 적용하는 것이 합리적이라는 결론을 내리게 되었다. 결국 다음과 같은 형태의 성속도-강도 관계 함수를 제안하게 되었다.

$$S = c [(M - M_0)]^k \quad (6)$$

S : 콘크리트 압축강도

M : 성속도

M_0 : Offset Maturity ($=16.7^{\circ}\text{C} \cdot \text{hr}$)

c, k : 결정할 상수

이 모델은 성속도가 일정한 값에 이른 뒤부터 강도발현이 시작된다는 사실에서 기본 성속도를 도입한 점이 타당하다. 또한 결정할 계수가 2개인 점이 식의 적용을 간편하게 하여 줄 수 있다. 또한 양생조건별로 계수를 제안함으로써 타당성을 보다 제고하고자 한다.

4. 예측식의 적용

4.1 양생조건별 계수도출

실험에서 적용할 배합중 28일 강도 $450\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 목표로 조강시멘트를 사용한 배합을 사용하였는데 배합표는 아래와 같다. 굵은 골재는 자연석을 사용하였고 혼화제는 유동화제를 사용하였다.

(단위:kg/m³)

시멘트	물	잔골재	굵은골재	혼화제
530	164	598	1132	7.95

이러한 배합으로 시편의 중앙에 Thermocouple을 매설하여 타실한 뒤 각 시가지 조건으로 양생을 실시하였다. 성숙도에 미치는 여러가지 변수들의 영향을 살펴보기 위해 다음과 같이 조건을 달리하였는데 이는 초기온도와 습도의 영향, 그리고 콘크리트가 동온상태와 변온상태에 있는 경우 등으로 구분하여 살펴보았다.

그결과 도출된 양생조건별 예측식의 계수는 다음과 같다

양 생 조 건	실 험 결 과	
	c	k
(1)_동온, 습윤	100.7	0.1550
(2) 동온, 건조	98.0	0.1606
(3) 변온상태	83.8	0.1873
(4) 증기양생	181.6	0.1176

위 결과를 토대로 양생조건에 따라 성숙도와 강도관계를 그림으로 나타내 보면 다음과 같다.

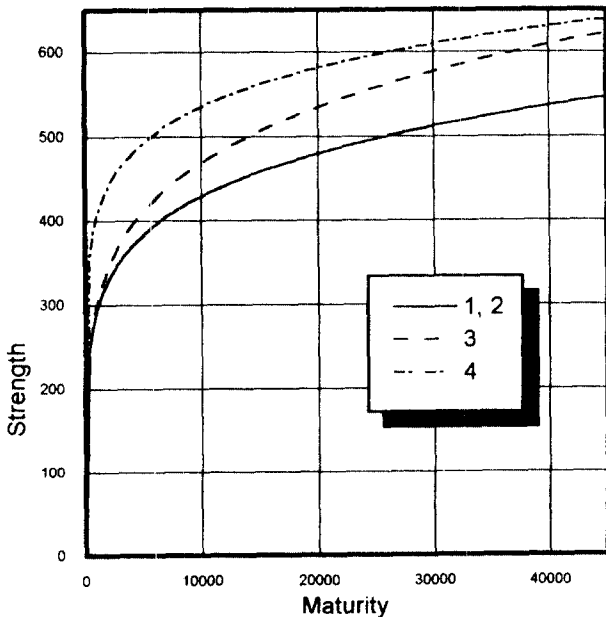


그림 1 양생조건별 강도-성숙도 관계

4.2 예측식의 적용

4.2.1 공시체 제작 및 계수의 도출

28일 설계강도가 270kg/cm²인 아래의 물-시멘트 비 47.6%의 콘크리트 배합으로 실험하였는데 양생조건은 습윤양생으로 외부온도가 12℃ 이하로 변하는 거의 동온상태하에서 수행하였다.

시멘트	물	잔골재	굵은골재
393	187	764	988

먼저 공시체를 제작하여 시간단계별 온도를 측정하여 Nurse-Saul 함수로 성숙도를 계산하고 그에 따른 강도를 측정하여 제안된 식의 계수를 구한 결과 c=49.67, k=0.193으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 제작한 슬래브의 강도추정식은 다음과 같다.

$$S = 49.67 [(M - 16.7)]^{0.193}$$

4.2.2 슬래브 제작 및 압축강도 실험

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 초기 온도의 상승치등 콘크리트의 발열특성이 다소 다른 형태로 나타날 것이다. 따라서 이런 경우에도 성숙도 이론의 기본가정이나 강도-성숙도 관계가 동일하게 적용될 수 있는 지 여부는 중요한 문제라 할 것이다.

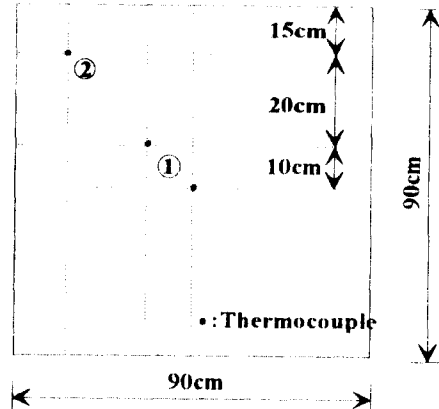


그림2 슬래브의 제원 및 온도측정 위치

이런 집에 주목하여 성숙도 이론의 합리성과 제안된 예측식을 실 구조물에 적용하는데 있어 그 타당성을 검증해 보기 위해 90cm×90cm의 정방형으로 20cm 두께의 슬래브를 타설하여 부위별로 온도를 측정하고 시간 단계별로 콘크리트 코어를 채취하여 압축강도 실험을 하였다. 슬래브의 세원 및 온도측정 위치는 위 그림과 같다.

측정점 ①과 ②에 있어서의 예측강도 및 실측강도는 아래 표와 같은데 그 결과를 다음 그래프로 도시하여 보았다.

1) 측정점 ①

양생시간	성숙도	예측강도	실측강도	비교
194hr	7289.0	276.3	251.8	109.7%
305hr	10858.0	298.4	290.1	102.9%
353hr	12368.2	306.1	285.1	107.4%
454hr	15440.0	319.5	298.9	106.9%
692hr	22697.3	344.1	349.4	98.5%

2) 측정점 ②

양생시간	성숙도	예측강도	실측강도	비교
194hr	7218.3	276.8	242.7	114.1%
305hr	10787.3	298.1	280.9	106.1%
353hr	12297.5	305.7	302.6	101.0%
454hr	15369.3	319.2	313.3	101.9%
692hr	22626.6	343.9	329.2	105.5%

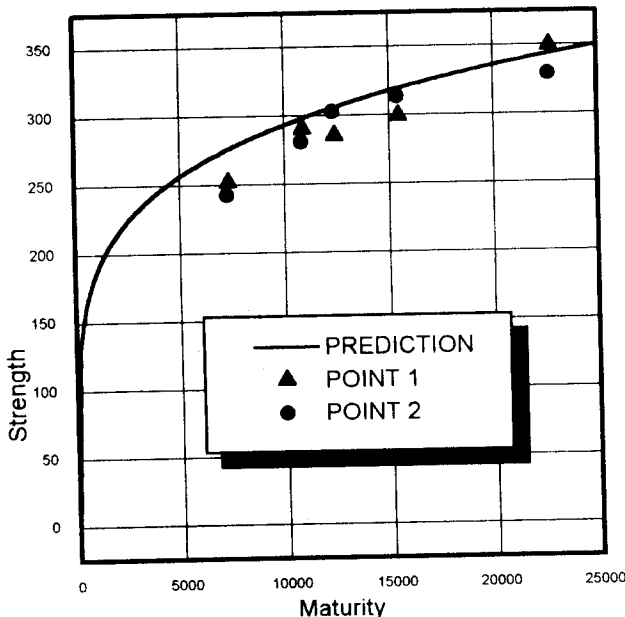


그림3 슬래브의 예측강도와 실측값

5. 결론 및 추후 연구방향

성숙도에서 강도를 예측해내기 위한 식을 제안하였고 이를 슬래브 타설을 통해 검증해 보았다. 더불어 강도-성숙도 관계를 활용함에 있어 배합에 따라 하나의 관계를 적용하기 보다는 몇가지 가능한 양생조건별로 적용하는 것이 보다 합리적인 일임을 알 수 있었다.

제안된 식에서 결정되어야 하는 상수들은 초기 양생온도나 물/시멘트비, 또는 단위시멘트량에 의해 좌우될 것으로 사료되는데 향후 추가적인 실험과 분석을 통해서 이러한 상수들의 변동특성을 밝혀낼 수 있을 것이다.

본 연구에서 수행한 초기 강도예측을 위한 방법은 프리캐스트 콘크리트등의 제작과정에서 거푸집 제거시점의 결정이나 야적방안검토, 혹은 증기양생의 지속시간 결정등 많은 부분에서 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Malhotra, V.M., and Carino, N.J., "Handbook on Nondestructive Testing of Concrete", CRC Press, 1991
2. Carino, N. J., Tank, R. C., "Maturity Functions for Concrete Made with Various Cements and Admixtures.", International Conference on Concrete at Early Ages, RILEM, 1991, pp.192-206
3. DeSitter, W. R. and Ramler J. P. G., "The Concrete Hardening Control System:CHCS", International Conference on Concrete at Early Ages, RILEM, 1991, pp.224-2422. Chengju, G., "Maturity of Concrete : Method for Predicting Early-Stage Strength", ACI Material Journal, V.86, No.4, Jul.-Aug. 1989, pp.341-353
4. Hulshizer, M. A. et al., "Maturity Concept Proves Effective in Reducing Form Removal Time and Winter Curing Cost", ACI SP-82, 1984.
5. Thomas J. Parsons and Tarun R. Naik, "Early Age Concrete Strength Determination by Pullout Testing and Maturity", ACI SP-82, 1984