

초기재령 콘크리트의 응결특성 모델링

Modeling of the Setting Characteristics of Early-age Concrete

조호진^{*} 송하원^{**} 변근주^{***}

Ho-Jin Cho Ha-Won Song Keun-Joo Byun

ABSTRACT

The so called setting is defined as the onset of rigidity in fresh concrete. In the analysis of the early-age concrete behavior, we consider fresh concrete as a structural element immediately after mixing. But for the activation of real structural behavior of fresh concrete, it takes some time after the beginning of hydration reaction. So, the very early age deformations due to hydration heat and shrinkage which occur before the setting do not produce restraint stresses.

In this paper, we propose a setting characteristic model based on the so called percolation theory. From the analysis using the model, the influence of curing temperature is investigated and analytical results are compared with experimental results. From the comparison, the validity of proposed model is verified. This model is also applied to evaluate stress development in a temperature-stress test machine (TSTM) specimen and then the effect of setting time on the stress development is discussed.

1. 서 론

초기재령 콘크리트의 거동 해석시 일반적으로 물과 시멘트가 만나 수화반응이 시작되는 시기부터 콘크리트가 강도를 가지는 구조재료의 역할을 하는 것으로 가정한다. 그러나 실제로 콘크리트가 구조재료로서의 역할을 하기까지는 반응개시 이후로부터 일정시간 이후에야 가능하다. 이는 수화반응에 의해 생성되는 수화물이 서로 연결되면서 어느 정도의 조직을 갖추는 시기부터 하중전달 등이 가능한 구조재료로서의 역할을 하기 때문인데, 이러한 과정을 응결(setting)이라 한다.

콘크리트의 응결시간(setting time)은 크게 초결시간(initial setting time)과 종결시간(final setting time)으로 구분된다. 초결시간은 운반, 타설, 다짐이 불가능해지는 시기와 대체적으로 일치하며, 종결시간은 경화(hardening)가 시작되는 시기와 거의 일치한다. 따라서 초결시점에서는 슬럼프가 거의 0이 되고, 종결시점에는 강도가 발현되기 시작하는 것으로 볼 수 있다.

초기재령 콘크리트의 거동해석에서 응결시점이 중요한 이유는 응결시점 이전에 발생하는 변형성분은 역학적으로 아무 의미를 가지지 못하기 때문이다. 그림 1은 수화열에 의한 온도거동을 예로

* 정회원, 연세대학교 토목공학과 대학원 박사과정

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

들어 응결시점의 중요성을 보인 것이다. 그림에서 보듯이 콘크리트가 구조재료로의 역할을 하기 이전에 발생하는 온도상승분은 구조물에 응력을 발생시키지 않기 때문에 초기재령 콘크리트의 구조거동을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 응결이 시작되는 시점에 대한 정확한 정의가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트의 응결특성을 나타낼 수 있는 해석모델을 도출하고, 이를 실험결과와 비교하여 도출된 모델의 타당성을 검증한다. 또한, 일축거동을 하는 부재에 대한 해석을 실시하여 응결시간이 구조거동에 미치는 영향을 해석적으로 분석한다.

2. 초기재령 콘크리트에서 응결시점의 정의

초기재령 콘크리트의 거동을 해석적으로 접근·분석하기 위해서는 콘크리트가 액상에서 고체상으로 변하면서 구조재료로서의 역할을 하기 시작하는 시점이 매우 중요한 역할을 한다. 즉, 콘크리트의 강도 및 강성이 발현되기 시작하는 응결시점이 응력해석의 시작점이 되고, 이 응결시점 이전의 거동은 역학적으로 의미가 없게 된다. 따라서 콘크리트의 응결시간, 특히 종결시간을 정확하게 예측할 수 있는 모델을 도출하는 것은 초기재령 콘크리트의 거동해석에서 매우 중요하다.

현재까지 콘크리트의 응결시점은 현상학적으로 정확하게 정의되고 있지는 않다. 가장 널리 사용되고 있는 정의로는 ASTM C403의 시험방법에 의한 것인데, 여기서는 침의 관입저항치로서 응결시점을 정의하고 있다. 이 시험법에서는 초결시간은 관통에 대한 저항성이 3.5 MPa인 경우로 하고, 종결시간은 27.6 MPa인 경우로 정의하고 있으며, 종결시점의 관통저항성은 일반적인 압축강도시험으로 환산할 때 0.7 MPa 정도이다. 최근에는 초음파, impact-echo 및 특수한 센서 등을 이용한 측정방법이 활발히 도입되고 있는 실정이다.

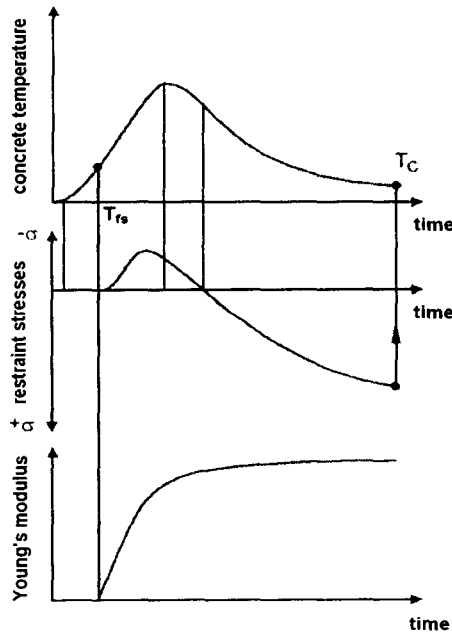


그림 1 응결시점에 따른 콘크리트의 거동 특성
(RILEM Technical Committee 119, 1998)¹¹

최근 콘크리트의 응결을 수화반응의 과정과 연결시키는 해석적 시도로서, Garnier 등²⁾과 Boumiz 등³⁾은 연결이론(percolation theory)에 기반하여 응결특성을 정의하는 연구를 수행하였다. 그림 2에서 보듯이 수화반응을 통해 생성되는 수화물은 시멘트 원입자의 주변부에 쌓이면서 점진적으로 증가하게 되는데, 연결이론은 이러한 수화생성물들이 서로 접촉되면서 하나의 연결통로(percolation)를 만드는 시점에 응결이 종결되면서 구조재료로서의 역할을 하는 것으로 가정한다. Garboczi와 Bentz⁴⁾는 3차원 시뮬레이션을 사용하여 연결시점(percolation threshold)에 대한 연구를 수행하였는데, 그림 3에서 보듯이 최초로 수화물이 연결되는 시점의 수화도는 물-시멘트비에 따라 달라지지만, 생성된 수화물의 부피비는 일정함을 보였다. 본 연구에서도 이러한 연결이론에 입각하여 응결시점을 정의하고, 이로부터 응결모델을 도출하였다.

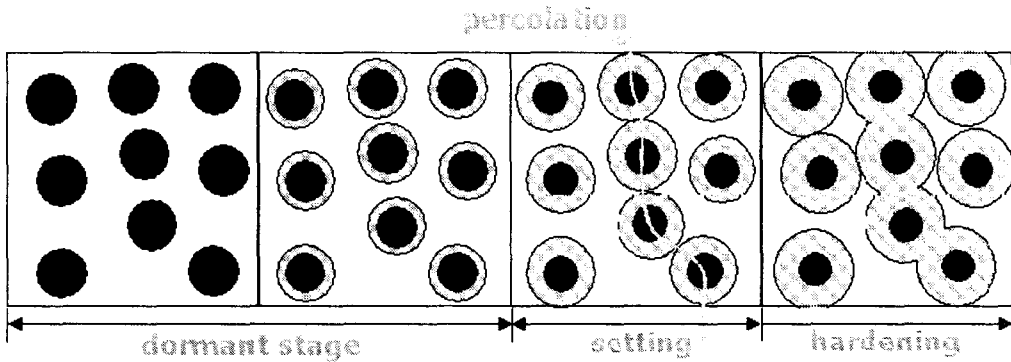
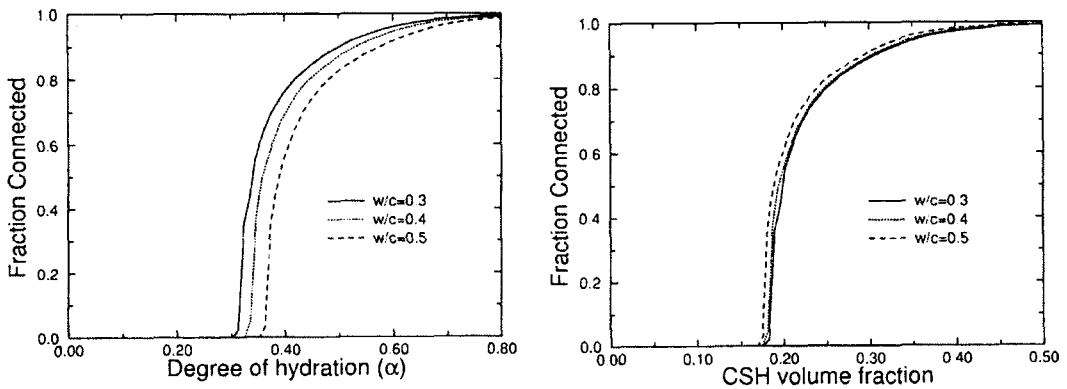


그림 2 수화진행에 따른 응결시점의 정의



a) 수화도에 따른 연결시점

b) 생성물의 부피비에 따른 연결시점

그림 3 수화 생성물의 연결시점 (Garboczi and Bentz)⁴⁾

3. 초기재령 콘크리트의 응결특성 모델링

전술한 대로 초기재령 콘크리트의 응결시점은 생성되는 수화물이 상호 연결되는 시점이 되는데, 이러한 연결에 기여하는 수화물은 주로 CSH와 ettringite 이다. 그림 3에서 보인 것은 CSH만이 생성되는 경우의 임계부피비를 나타낸 것으로서, 실제로 응결이 발생하는 시점의 임계부피비는 CSH 단독인 경우보다는 작을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 입자팽창모델(cluster expansion model)⁵⁾에 기반한 수화반응모델로부터 수화물의 생성량을 산정하고, 기존의 응결시간에 대한 실험결과와 비교하여 임계부피비를 산정한다.

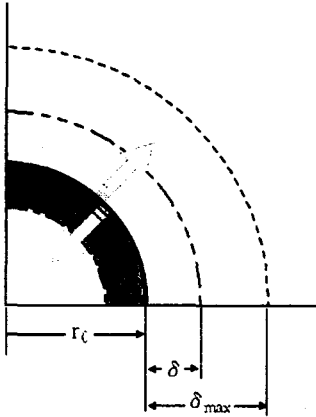


그림 4 입자팽창모델에 따른 수화물의 생성

$$V_c = \frac{(r_0 + \delta)^3 - r_0^3}{(r_0 + \delta_{max})^3} \quad (1)$$

여기서, r_0 , δ_{max} 는 초기배합조건을 이용하여 입체해석화적인 분석을 통하여 구할 수 있고, 임의의 시간에서 수화물의 두께 δ 는 수화생성물의 질량적합조건으로부터 구할 수 있다.⁵⁾

본 연구에서는 응결이 발생하는 임계부피비를 결정하기 위해 기존의 실험결과를 이용하였다. 다음 표 1은 연구자들의 시험결과로부터 얻은 응결시간과, 이 시점에서 해석모델을 통하여 구해지는 부피비를 비교하여 나타낸 것이다. 실험을 통해 구한 응결시점에서 해석모델로부터 구해지는 수화물의 부피비는 약 0.056~0.093 정도인 것으로 나타났는데, 평균적으로 0.075 정도에서 응결이 발생하는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 응결에 대한 임계부피비를 0.075로 가정하였다.

표 1 임계부피비의 설정을 위한 시험결과와 해석결과의 비교

연구자		응결시간 (hr) (시험결과)	응결시간에서 수화물의 부피비 (해석결과)
Pessiki and Carino ⁶⁾	w/c = 0.40	5.75	0.067
	w/c = 0.80	7.86	0.069
Pinto and Hover ⁷⁾	w/c = 0.33	5.63	0.093
Brooks 등 ⁸⁾	w/c = 0.55	5.64	0.056

4. 초기재령 콘크리트의 응결거동 분석

4.1 양생온도에 따른 응결특성의 분석

양생온도는 시멘트의 수화반응속도에 지대한 영향을 미치므로 이에 따른 응결시간도 크게 영향을 받게 된다. 일반적으로 양생온도가 높아질수록 수화반응 속도가 증가하므로 응결시간은 단축되고, 반대의 경우에는 응결시간이 지연되게 된다. 다음 그림 5는 양생온도에 따른 응결시간의 변화에 대한 실험결과와 해석결과를 비교하여 도시한 것이다. 그림에서 보듯이 양생온도가 낮은 경우 실험결과와 해석결과가 약간의 차이를 보이지만 전체적으로 본 연구의 해석모델이 실험결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 논문의 해석모델은 다양한 양생조건을 받는 콘크리트에 적용이 가능함을 알 수 있다.

4.2 응결특성의 고려 여부에 따른 해석결과 분석

응결시점의 고려여부가 구조부재의 해석결과에 미치는 영향을 분석하기 위해 1방향 온도거동을 하는 부재를 대상으로 유한요소 해석을 실시하였고, 이의 해석결과를 실험결과와 비교하였다. 일반적으로 수화열에 의한 온도거동을 하는 부재의 경우, 그림 1에서 보듯이 타설 직후부터 응결이 완료되는 시점까지의 온도상승분은 구조물에 구속응력을 발생시키지 않지만, 일반적으로 행해지는 해석에서는 이러한 차이를 고려하지 않는다. 따라서 수화 초기의 온도상승기에 발생하는 응력이 과대 평가되게 되며, 외부구속을 받는 부재의 경우에는 온도하강기에 발생하는 인장응력을 과소평가하는 결과를 초래하므로 비안전측의 해석결과를 산출하게 된다.

다음 그림 6는 Schöppel⁹⁾ 등이 TSTM(temperature-stress test machine)을 사용하여 실험한 결과를 비교한 것이다. 해석은 1) 응결시점을 고려하지 않고, 응력이완현상을 고려하지 않은 경우, 2) 응결시점을 고려하지 않고 응력이완현상을 고려한 경우, 3) 응결시점을 고려하고 응력이완현상도 고려한 경우로 나누어 실시하였다. 응력이완특성은 CEB의 크리프모델을 이용하여 고려하였다. 이상에서 보듯이 응력이완이나 응결특성을 고려하지 않는 경우의 해석결과와 실험결과와 약 3배 정도나 차이가 나고, 응력이완현상을 고려하더라도 실험결과와 해석결과가 약 15kgf/cm² 정도의 차이를 보였다. 응력이완현상과 응결특성을 모두 고려한 경우의 해석결과와 실험결과와 거의 유사한 경향을 보였다. 따라서 초기재령 콘크리트의 거동을 보다 정확하게 해석하기 위해서는 콘크리트의 응결특성을 정확하게 고려하는 것이 매우 중요하다.

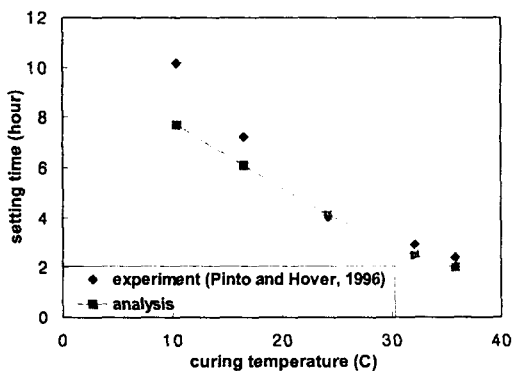


그림 5 양생온도에 따른 응결시간의 변화

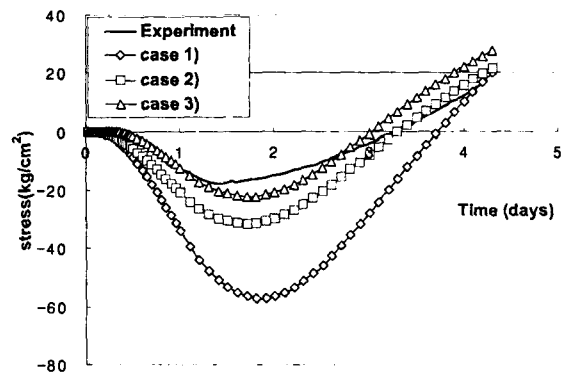


그림 6 응결시간의 고려여부에 따른 해석결과

5. 결 론

본 연구의 결론을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 초기재령 콘크리트의 응결특성을 나타낼 수 있는 해석적 모델을 연결이론(percolation theory)에 기반하여 제안하였다. 또한 기존의 응결시간에 대한 실험결과를 이용하여 수화생성물이 최초로 연결되는 임계부피비를 도출하였다.
- 2) 본 모델을 이용하여 양생온도에 따른 응결특성의 차이를 해석적으로 분석하였고, 해석결과와 시험결과의 비교를 통하여 본 모델의 타당성을 검증하였다. 비교결과 낮은 양생온도에서는 해석결과와 시험결과가 약간의 차이를 보였지만, 전체적으로 본 모델은 양생온도에 따른 응결거동의 차이를 잘 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.
- 3) 응결특성이 구속응력의 발현에 미치는 영향을 분석하기 위하여 일방향 거동을 하는 시편(TSTM)에 대해 온도거동해석을 실시하였고 이를 실험결과와 비교·분석하였다. 분석결과 응결에 따른 강성발현의 지연을 고려할때 해석결과가 실제 시험결과와 잘 일치하므로 보다 정확한 초기재령 콘크리트의 거동해석을 위해서는 콘크리트의 응결특성을 고려하는 해석이 타당함을 보였다.

참고문헌

1. RILEM Technical Committee 119 (1998), **Prevention of Thermal Cracking in Concrete at Early Ages ; State-of-the-art Report**, edited by Springenschmid, R., E&FN Spon.
2. Garnier, V., Corneloup, G., Sprauel, J. M. and Perfume, J. C. (1995), "Setting Time Study of Roller Compacted Concrete by Spectral Analysis of Transmitted Ultrasonic Signals", **NDT & E International**, vol. 28, No. 1, pp. 15-22.
3. Boumiz, A., Vernet, C. and Tenoudji, F. C. (1996), "Mechanical Properties of Cement Pastes and Mortars at Early Ages", **Advanced Cement Based Materials**, vol. 3. no. 3-4, pp. 94-106.
4. Garboczi, E. J. and Bentz, D. P. (2001), "The effect of statistical fluctuation, finite size error, and digital resolution on the phase percolation and transport properties of the NIST cement hydration model", **Cement and Concrete Research**, Vol. 31, pp.1501-1514.
5. Maekawa, K., Chaube, R. and Kishi, T. (1999), **Modeling of Concrete Performance : Hydration, Microstructure Formation and Mass Transport**, Routledge, London and New York.
6. Pessiki, S. P. and Carino, N. J. (1989), "Setting Time and Strength of Concrete Using the Impact-Echo Method", **ACI Material Journal**, vol. 85. no. 5, pp. 389-399.
7. Pinto, R. C. A. and Hover, K. C. (1996), "Effect of Silica Fume and Superplsticizer Addition on Setting Behavior of High-strength Mixtures", **Transportation Research Record**, no. 1574, pp.56-62.
8. Brooks, J. J., Megat-Johari, M. A. and Mazloom, M. (2000), "Effect of admixtures on the Setting Times of High-strength Concrete", **Cement and Concrete Composites**, vol. 22, pp. 293-301.
9. Schöppel, K., Planerter, M. and Springenschmid, R. (1994), "Determination of Restraint Stress and of Material Properties during Hydration of Concrete with the Temperature-Stress Testing Machine", in **Thermal Cracking in Concrete at Early Ages**, (edited by R. Springenschmid), E & FN SPON, pp.153-160.