

콘크리트의 강도관리를 위한 성숙도법의 적용

오 병 환

〈서울대학교 토목공학과 교수〉

장 승 업

〈서울대학교 토목공학과 박사과정 연구원〉

1. 서론

콘크리트 기술의 진보에도 불구하고, 콘크리트의 양생에 관련된 콘크리트의 내적 및 외적 영향인자의 복합적인 작용으로 인해 콘크리트의 강도를 이론적인 방법으로 정확히 예측하는 것은 아직까지 상당히 어려운 일이다. 콘크리트의 강도예측은 특히, 한중 콘크리트 타설에서 경제적인 시공을 위해 가장 합리적인 거푸집의 제거시기를 결정하는 데 있어 매우 유용하다. 만약 단순히 과거의 경험을 바탕으로 거푸집이나 동바리 제거시기를 결정한다면 자칫 큰 실패로 이어질 수 있으므로, 정확한 강도의 예측이 반드시 뒷받침되어야 한다.

지금까지 콘크리트의 강도 발현율을 예측하기 위해 많은 종류의 강도평가방법이 제안되

었다. 그러나, 이 방법들 중에서 현장에서 콘크리트 공시체를 직접 양생하면서 강도를 측정하는 방법은 현장 콘크리트가 실제 콘크리트의 내부온도를 반영하지 못하기 때문에 실제 강도를 과소평가할 수 있다. 다른 시간에 따라 강도를 측정하는 방법은 시편이나 계측장치를 모두 소모할 경우에는 더 이상 강도를 예측할 수 없는 어려움이 있으며, 콘크리트 표면 특성과 관련된 강도측정방법은 콘크리트의 내부온도변화와 관련된 초기강도발현을 반영하지 못하기 때문에 실제 콘크리트 내부의, 특히 두꺼운 부재의 경우, 강도를 정확하게 예측하지 못하게 된다.

여기 소개될 내용은 전자계측장치(electronic meters) 또는 정착식 계측장치(disposable meters)를 이용한 성숙도법의

적용사례로서, 이와 같은 장치를 이용할 경우, 연속적으로 온도 계측, 성숙도 계산 그리고 강도 예측을 수행할 수 있기 때문에 양생의 종료 시점 및 거푸집과 동바리의 제거시기를 결정하는 데 보다 더 효율적으로 성숙도법을 적용할 수 있음을 보여준다.

2. 성숙도법의 기본개념

성숙도법은 콘크리트의 강도와 수화 중인 콘크리트의 온도와 시간의 적산을 상호연관시켜(correlate) 강도를 예측하는 방법이다. 즉, 콘크리트의 강도 발현율이 시간과 온도의 함수이므로, 구조물 내에서의 콘크리트의 강도는 현장 콘크리트의 시간-온도이력과 표준 양생조건에서 현장 콘크리트와 같은 배합으로 만들어진 콘크리트 공시체의 강도를 연결시킴으로써 예측될 수 있다. 이와 같은 성숙도 개념은 1951년경부터 인식되기 시작하여 수년에 걸쳐 주목할만한 여러 연구들이 뒤따르면서 차츰 현재와 같이 정립되었다. 성숙도는, ACI 306R³과 ASTM C 1074⁴에 정의된 바에 따르면, 다음과 같다.

$$M = \sum (T - T_0) \Delta t \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

M = 성숙도계수, °C-hr

T = 콘크리트의 온도, °C

T_0 = 기준온도(datum temperature), °C

Δt = 온도 T 인 시점까지의 경과시간, hr

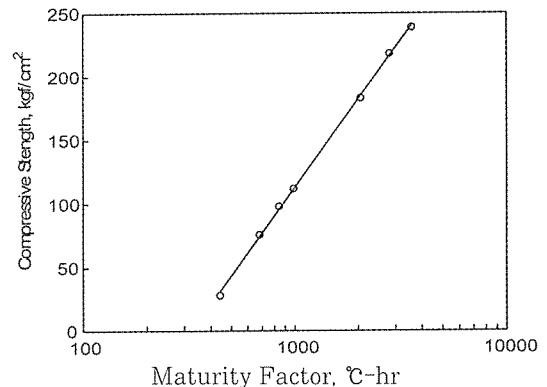
식 (1)에서 기준온도는 시멘트의 종류, 혼화 재료의 종류와 양, 양생온도의 범위에 좌우된다. Carino는 0~20°C의 범위에서 양생된 1종 시멘트를 사용한 콘크리트에 대해 기준온도를 -5°C로 제안했다. 그러나, 시멘트 종류가

다르거나, 1종 시멘트를 사용한 콘크리트라 하더라도 화학 혼화제(chemical admixture)나 광물 혼화제(mineral admixture)를 함께 사용한 경우에는 이 값을 직접 적용하기 어렵다. 따라서, 기준온도 T_0 는 각 콘크리트의 배합특성에 따라 실험을 통해 결정되는 것이 가장 바람직하다. 기준온도의 실험방법은 ASTM C 1074에 규정되어 있다.

3. 성숙도법의 적용

3.1 성숙도 계수

[표 1]과 [그림 1]은 성숙도계수와 강도와 의 관계를 구하는 과정을 보여주고 있다(ACI 306R). 그러나, [표 1]에 주어진 방법은 수작업에 의한 것이기 때문에 노력이 많이 들고, 측정된 시간차가 짧지 않으면 적산의 오차가 커지기 때문에 현장 콘크리트의 성숙도를 과소평가하고, 따라서 실제 콘크리트의 강도 또한 과소평가할 수 있다. 그래서, 최근에는 성숙도법에서 보다 정확하게 초기 상관관계를 구하고 이를 적용할 수 있고, 보다 쉽게 사용할 수 있도록 하는 전기장치와 이와 관련된 evaporation tube등이 개발되어 적용되고 있다(Hulshizer⁶).



(그림 1) 성숙도 계수와 압축강도 관계

(표 1) 성숙도 계수의 계산

A	B	C	D	E	F	G	H
경과시간 hr	콘크리트 온도 ℃	평균온도 ℃	(C열)-(-5) ℃	시간차 hr	(D열)×(E열) ℃-hr	성숙도계수, Σ(F열) ℃-hr	압축강도 kgf/cm ²
0	10						
12	10	10	15	12	180	180	-
24	10	10	15	12	180	360	-
30	7.8	8.9	13.9	6	83	443	28
48	8.8	8.3	13.3	18	239	682	76
60	7.8	8.3	13.3	12	160	842	98
72	6.6	7.2	12.2	12	146	988	112
168	5.6	6.1	11.1	96	1066	2054	183
240	5.6	5.6	10.6	72	763	2817	218
312	5.6	5.6	10.6	72	763	3580	239

3.2 성숙도법의 적용

여기 소개하는 사례는 24시간 연속 타설하는 터널 라이닝 콘크리트 시공에서 안전한 거푸집 제거를 위해서 12시간~14시간의 범위에서 거푸집을 설치, 이동이 가능해야만 하는 터널 공사에 대한 것으로 Hulshizer 등⁷에 의해 수행된 연구결과를 인용한 것이다. 이 터널은 길 10km, 지름 5.9m이고, 라이닝 두께는 457mm이다. 24시간 연속 콘크리트 타설의 효율은, 노동자들의 안전에 대한 고려를 제외하면, 거푸집을 얼마나 빨리 이동시킬 수 있는가에 달려 있다. 따라서, 거푸집의 제거시기를 결정하는 것이 매우 중요하다.

이런 측면에서, 성숙도 방법(maturity method)의 신뢰성과 을 결정하고, 12시간 내에 타설된 콘크리트의 강도를 안전하게 추정할 수 있는 다른 강도추정방법을 평가하기 위한 광범위한 실험연구가 실시되었다⁷. 이 연구는 probe 설치위치, 두께의 영향, 찬 암반과 거푸집과의 경계면에 의한 열감소 영향(heat-sink effect)에 대한 평가도 포함하고

있다. 실험결과에 따르면, 실제 타설된 콘크리트와 현장 양생 콘크리트와의 온도변화의 차이 때문에 일반적인 강도추정방법으로는 타설 부재크기가 커짐에 따라, 강도가 과소 평가될 수 있다.

여러 강도추정방법 중에서, Windsor probe에 의한 방법은 12~18시간의 범위에서 저강도 콘크리트에 대해서는 오차를 보일 수 있는 것으로 나타났고, 인발시험법(pullout inserts)은 일반적인 Discrete 강도추정법이 갖는 제한요인, 즉 측정회수가 제한적이고, 콘크리트 표면부에만 국한되는 문제점으로 인해 신뢰성이 떨어지는 것으로 나타났다.

현장 양생 콘크리트 공시체는 터널 내부 온도 13℃에서 양생되었기 때문에 실제 콘크리트 라이닝 내부의 성숙도와는 상관관계가 낮을 수밖에 없다. 게다가 현장 양생 콘크리트 공시체는 약 타설 12시간 후부터 터널 내에서 손상없이 다루어져야 하고, 5km 정도의 거리를 옮겨져야 하지만, 이것이 그리 쉬운 일이 아니었다. 따라서, 이 실험 결과는 일관성이 부족

하고, 거푸집 제거시기를 결정하기 위해서는 다소 신뢰성이 떨어진다.

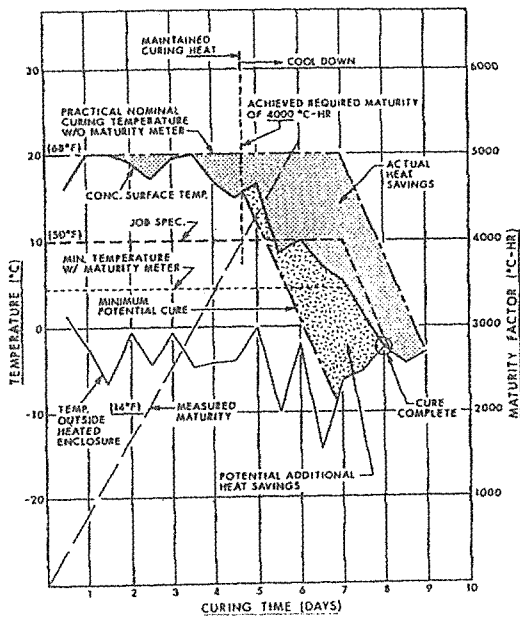
이상의 결과를 종합적으로 분석한 결과, Hulshizer는 이 연구에서 고려된 여러 강도 추정방법 중에서 성숙도법이 콘크리트의 초기 강도를 예측하는 가장 실용적이고 정확한 방법이라고 결론지었으며, 성숙도법의 효율성을 높이기 위해 전자계측장치와 정착식 계측장치를 이용하는 방법에 대해 연구하였다. 다음은 전자계측장치와 정착식 계측장치의 적용사례를 요약한 것이다.

(1) 전자계측장치의 이용

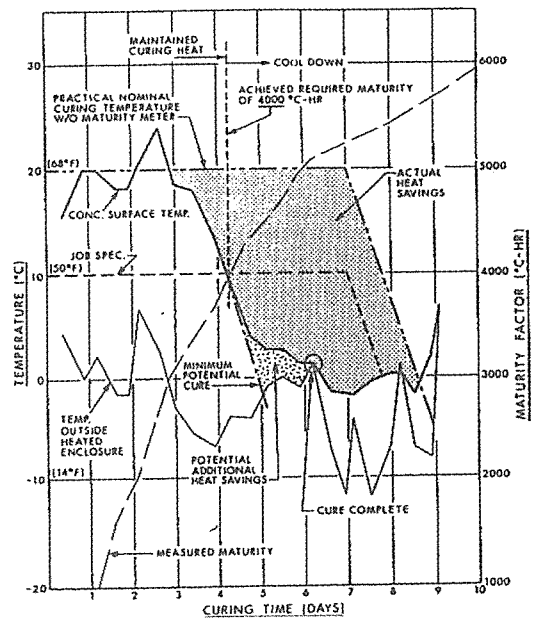
Hulshizer⁷의 연구결과에 의하면, 전자계측장치를 이용한 성숙도법을 터널 라이닝의 거푸집 제거시기의 결정에 적용한 결과, 콘크리트를 전혀 파괴하지 않고, 콘크리트 거푸집 제거시기의 제약으로 인해 발생하는 어떠한 작업지연도 없이 콘크리트 작업을 계속할 수

있었다. 이와 같은 전자 성숙도 계측기의 성공 결과를 바탕으로, New England의 원자력 발전소 건설에서 겨울철 콘크리트의 양생시간 단축을 위해 성숙도법이 적용되기도 하였다. 이 전자계측장치 적용사례에서 성숙도 정보는 7일 동안 측정되는데, 이는 한중 콘크리트의 양생, 보호 및 온도강하(양생의 종료)와 관련된 기본적인 기간이다. 자세한 실험내용과 실험결과는 참고문헌 7을 참조하면 된다.

[그림 2, 3]은 전자계측장치를 이용한 콘크리트 강도 추정에서 단축과 실제 콘크리트의 수화열 발열량을 타설하는 동안 측정하기 때문에 얻을 수 있는 양생시간과 비용의 절감을 나타내고 있다. 이 그림은 외기 온도와 콘크리트 내부온도를 함께 나타내고 있으며, 성숙도 또는 강도가 목표치에 도달한 시간과 콘크리트의 보호를 위한 난방의 절감을 보여주고 있다. 이 결과에 따르면, 전자계측장치를 이용한 성숙도법의 적용은 겨울동안 작업속도를 증가



[그림 2] 두께 660 mm 콘크리트 벽체의 겨울철 양생에 대한 성숙도법 적용사례⁶⁾



[그림 3] 두께 1 m 콘크리트 벽체의 겨울철 양생에 대한 성숙도법 적용사례⁶⁾

시키고, 가열, 강도조사와 유지관리에 필요한 비용을 상당히 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

성숙도법이 초기에 적용되지 않았더라도, 2년에 걸쳐 성숙도법을 적용한 결과에 따르면, 이 방법은 겨울철에 양생에 드는 노력을 상당히 줄일 수 있었으며, 이로 인해 작업일수 200일 가량을 다른 생산적인 작업으로 돌릴 수 있었던 것으로 평가되었다. 또한, 콘크리트 보호를 위한 난방과 노동력의 절감효과를 얻을 수 있었고 아울러 거푸집 제거와 기타 작업시기의 결정이 부적절하게 이루어지는 것을 줄일 수 있었다. 특히, 콘크리트의 난방의 절감률은 ACI 306R의 일반적인 양생시간 규정을 적용했을 때보다 약 30%이상 높은 것으로 추정된다.

(2) 정착식 계측장치의 이용

성숙도법에 의한 강도의 예측이 매우 경제적이고, 일정관리에 매우 유용하다는 사실에도 불구하고, 개별 시공현장에서 전자계측장치를 구입하고 이를 적용할 만큼 겨울철 한중 콘크리트 타설이 많은 비중을 차지하지 않을 수도 있다. 이런 경우, 정착식 계측장치(disposable meters)를 이용할 수 있다. 정착식 계측장치의 경우, 개당 가격이 대략 미화 15\$정도이므로 적은 예산으로 효과적으로 강도발현을 모니터링할 수 있다.

ACI 306R과 ASTM C 1074에 주어진 성숙도 결정과정이 강도와 성숙도 계수의 관계를 결정하는 것이라면, 이 정착식 계측장치는 "meter-days"의 형태로 보정하여 적용한다. 그러나, 강도를 예측하는 원리는 ACI 306R의 6.4절에 기술된 성숙도법의 원리와 동일하다. 정착식 계측장치의 경우, 콘크리트 내부에서 발생하는 수화열에 비례하는 속도로 증발하는 유체에 의해 계측이 이루어진다. 즉, 이 장치는 증발시간의 함수로 발열량을 측정하게 된다. 그렇기 때문에 이 장치를 콘크리트에 매

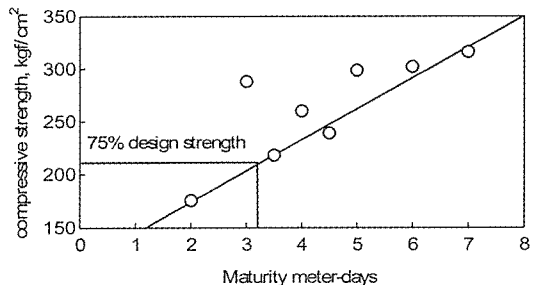
설하면 효율적으로 측정된 수화열 발열량을 시간에 따라 적분할 수 있고, 이를 미리 측정된 공시체의 강도와 연관시켜 그 관계를 찾아낼 수 있다.

이와 같은 정착식 계측장치를 사용하면, 성숙도법에서 성숙도-강도관계를 결정하는 대신, meter-day/강도 값을 구하게 되는데, 이 값을 구하는 방법은 성숙도법에서 성숙도-강도관계를 구하는 것과 동일하다. 콘크리트의 강도와 meter-day를 연결시키는 간략한 방법을 아래의 예제를 통해 소개한다.

【사례 1】 강도와 meter-day 관계

▶ 목표 - 콘크리트의 강도가 28일 설계강도(280 kgf/cm²)의 75%, 즉 210 kgf/cm²에 도달하는 시간을 결정하는데 사용될 meter-day 값의 결정

각 배치에서 7 set의 원주형 공시체를 제작하였다. 각 set은 최소 2개 이상의 원주형 공시체를 포함하고 있다. 공시체의 제작, 이송, 양생은 ASTM 기준에 따라 수행되었다. 타설시 홀수 번째 공시체에 15 meter-day 정착식 계측장치를 정착하고 작동시킨 다음, 양생이 틀째에 첫 번째 set의 공시체의 평균압축강도와 이에 해당하는 meter-day 값을 측정한다. 6 set의 공시체에 대해 하루 또는 이틀간격을



(그림 4) meter-day 계산예제⁶

두고 이와 같은 과정을 계속 반복하고, 그때마다 각 공시체의 압축강도와 meter-day를 기록한다. 측정된 강도와 meter-day 관계를 그림4와 같이 나타내면, 직선관계를 도출할 수 있으며, 여기서 구한 강도 meter-day 관계를 측정된 강도범위 내에서 현장 콘크리트에 대해 적용하면 된다.

[그림 4]와 같은 직선은 적어도 두 가지 이상의 배치에 대해 두 개의 정착식 계측장치로부터 측정된 값을 평균해서 적용해야 보다 정확한 관계를 구할 수 있다. 주어진 콘크리트 배합에 대해 전자계측장치나 정착식 계측장치의 상관계수를 결정하면, 이 값은 시멘트의 물성과 C_3A 량이 변하지 않는다면, 같은 배합에 대해서 계속 적용될 수 있다.

【사례 2】 현장 적용

강도를 관찰할 콘크리트를 타설한 후, 정착식 계측장치를 부재의 더 얇고 재령이 작은 부분을 대표할 수 있고, 닿기 쉬운 부분에 정착한다. 이 때, 콘크리트의 온도는 $4^{\circ}C$ 를 넘어서는 안 된다. 계측장치의 갯수는 구조물의 크기나 형상의 복잡성 등에 따라 결정된다. 일반적인 경우, 구조물이나 매 타설 시 주요 부재에 대해 2개 이상의 계측장치를 사용해야 한다. meter-day 값은 보통 실제 날짜보다 다소 빠르기 때문에 5 meter-day 기기는 초기강도의 예측에 적합하다고 볼 수 있다. 그리고, 계측장치는 열이 발생하는 곳은 피해서 정착해야 한다.

타설 이틀부근에서, 현재의 meter-day 값을 측정해야 하며, 모든 정착된 계측장치의 값이 정해진 meter-day 값을 초과할 때, 양생의 중단이나 거푸집 제거등의 작업을 해야 한다. 그러나, 보다 정밀한 강도 측정이 이루어지지 않으면, 적어도 3일 이전에는 거푸집 제

거나 기타 다른 작업이 이루어져서는 안된다.

[그림 4]에 나타난 바와 같은 실제 시공사례에서 210 kgf/cm^2 의 강도에 해당하는 meter-day 값은 3 meter-day 이상으로 약 2일경에 구할 수 있었다. 그러나, 앞서 서술한 바와 같이 3일을 거푸집-동바리 제거나 양생의 중단 등 작업을 하기 위한 최소기간으로 설정되어야 한다.

4. 결론

앞서 서술한 바와 같이 성숙도법은 초기 재령에서 콘크리트의 강도를 정확하고 쉽게 예측할 수 있는 방법이다. 특히, 전자계측장치나 정착식 계측장치를 적용하면, 성숙도법은 매우 효율적으로 겨울철 한중 콘크리트의 시공이나 콘크리트의 초기강도가 중요한 다른 조건의 시공에서 시공비용을 줄이고 공사기간을 단축시킬 수 있다.

전자계측장치나 정착식 계측장치를 적용하는 최상의 방법은 적용할 콘크리트 배합에 대해 시공하기 이전에 미리 실험을 통해 상관계수를 결정하는 것이며, 이 때 콘크리트는 실험실의 실험배치보다는 실제 배치에 대해 적용하는 것이 더 좋다. 비용의 측면에서는 일단 주어진 배합에 대해 상관계수만 결정된다면, 정착식 계측장치의 비용은 하나의 공시체를 제작, 양생하고 강도를 측정하는데 드는 비용보다 더 적기 때문에, 훨씬 경제적이라 할 수 있다.

이상의 계측장치를 이용한 성숙도법의 보다 능률적인 적용을 위해 콘크리트 생산자가 표준배합에 대해 위 두 가지 계측장치에 대한 상관계수를 미리 결정한 후 그 배합을 사용하는 콘크리트를 현장에 적용할 때, 이 값을 콘크리트 구입자에게 제공하는 것도 좋은 방법이 될 것이다.

참고문헌

1. Malhotra, V. M., In-Situ/Nondestructive Testing of Concrete, Sp-82, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1984, 831pp.
2. Malhotra, V. M., Testing Hardened Concrete, Nondestructive Methods, Monograph No.9, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1976.
3. ACI 306R-88, "Cold Weather Concreting," American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 23pp.
4. ASTM C 1074-93, "Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method," American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa.
5. Carino, N. J., "Temperature Effects on the Strength-Maturity Relation of Mortar," NBSIR 81-2244, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, Mar. 1981.
6. Hulshizer, A. J., "Benefits of the Maturity Method for Cold-Weather Concreting," Concrete International, Mar. 2001, pp. 68-72.
7. Hulshizer, A. J., Edgar, M. A., Daniels, R. E., Suminsby, J. D. and Myers, G. E., "Maturity Concept Proves Effective in Reducing Form Removal Time and Winter Curing Cost," In-Situ Nondestructive Testing of Concrete, Sp-82, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 1984, pp.351-376.