

온도조건하의 콘크리트

## 콘크리트 성숙도 개념의 현장 적용

Application of Concrete Maturity on Construction Fields



양 성 철\*



최 고 일\*\*

### 1. 서 론

콘크리트 구조물의 거푸집 제거시거나 프리스트레스트 콘크리트 부재에서의 인장력 도입등으로 작업 일정을 경제성과 안정성의 차원에서 계획하기 위해서는 콘크리트 강도발현에 대한 이해가 필수적이다. 콘크리트 강도발현에 있어서 문제는 조기강도 발현이 콘크리트의 양생온도이력에 의해 매우 민감하게 변화된다는데 있다. 이러한 관찰을 바탕으로 1950년대를 전후하여 성숙도라는 개념이 도입되었는데 콘크리트의 강도는 콘크리트가 적절히 타설되어 다져지며 충분한 수분의 공급으로 양생이 된다면 성숙도 즉 시간과 양생온도이력의 함수로 볼 수 있다는 것이다.

현재 국내의 토목 및 건축분야에서 성숙도개념을 적용하는 사례는 거의 없다. 단지 여러 분야의 시공 현장에서 계절 특히 대기온도를 고려한 콘크리트의

강도 및 균열방지를위해 수화열 해석등은 고려하고 있지만 이를 성숙도의 개념으로 바꿔 시도하고 있는 않는다.

따라서, 본 고에서는 성숙도의 이론 및 강도관계와 현장에서의 적용방법등 성숙도의 개념에 대해 먼저 살펴보고 성숙도 개념이 적용될 수 있는 건설분야에 대해 살펴보았다. 이러한 분야로는 구조물의 거푸집 탈형과 프리스트레스트 콘크리트 부재에서의 인장력 도입시간 결정, 수화열해석 및 콘크리트 슬래브의 줄눈시공시기와 콘크리트포장의 교통개방에 필요한 시간결정등이다.

### 2. 성숙도의 개념

콘크리트의 성숙도는 어떤 특정한 시간에서의 콘크리트의 강도를 예견할 수 있는 시간과 온도와의 관계식이다. 성숙도 이론의 기본배경은 1950년대

\* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

\*\* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 품질관리부장

Nurse-Saul의 연구로 거슬러 올라간다. 이들은 증기양생의 효과를 예견하기 위하여 콘크리트강도를 온도와 시간의 함수를 사용하여 설명하였다.

## 2.1 성숙도의 기본이론

성숙도의 함수는 Nurse-Saul에 의해 제안된 아래의 식 (1) 또는 Arrhenius 공식에 입각한 식 (2)에 의해 나타낸다.

$$M = \sum_{\Delta t} (T - T_0) \Delta t \quad (1)$$

$$t_c = \sum_{\Delta t} e^{-\frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} \Delta t \quad (2)$$

여기서

- M : 성숙도 (Maturity)
- T : 콘크리트 온도
- T<sub>0</sub> : 식 (1)의 강도발현 기준온도
- T<sub>r</sub> : 식 (2)의 강도발현 기준온도
- Δt : 시간증가량
- t<sub>c</sub> : 등가재령 (Equivalent Age)
- E : 활성화에너지 (Activation Energy)
- R : 가스상수, 8,3144 J/(mol · K)

식 (2)는 화학분야에서는 잘 알려져 있는 Arrhenius공식을 바탕으로 해서 정립되었다. Arrhenius공식은 고체상태에서의 원자배열의 산출비에 근거를 두고 있다. 물론 실험을 근거로 했는데 원자끼리 반응할 때 원자가 이동하는 비율은 온도에 따라 변화되며 exponential 함수형태로 표현한다. 일반적으로 exponential 형태의 식 (2)가 선형식 (1)보다 더 정확한 것으로 알려져 있다. 식 (1)에서는 온도 T 또는 T<sub>0</sub>가 섭씨온도이지만 식 (2)에서는 절대온도가 된다. 식 (1)에서는 성숙도 산정시 T<sub>0</sub>가 강도발현시 가장 낮은 온도에 근거하였기에 초창기에는 -10℃에 근거를 두었으나 콘크리트배합에 따라 변화된다. 그리고 식 (2)에서는 콘크리트 불성에 대한 상수로 활성화에너지, E를 실험실에서 구하여 사용한다. 그러나 식 (2)는 절대온도의 역수를 사용하므로 계산이 불편하기에 Carino에 의해 다음과 같은 지수함수를 제안하였다.

여기서 B는 콘크리트 불성에 대한 상수이다. 식

(2)와 식 (3)은 아래와 같이 호환될 수 있다.

$$t_c = \sum_{\Delta t} e^{B(T-T_0)} \Delta t \quad (3)$$

$$B = \frac{E}{R \cdot 296 \cdot (273 + T)} \quad (4)$$

위의 식 (2) 또는 식 (3)에서 물성치인 E 나 B를 구하는 방법은 여러 논문을 참조하면 된다. 그러나 근사법으로 등가재령을 사용한다면 여러 연구자들의 연구결과로부터 다음의 수치를 사용하면 된다.

표 1 참고문헌에서 정리한 활성화에너지 (E) 와 상수 (B)의 결과(물-시멘트비 : 0.45-0.60)

시멘트 종류	E, (KJ/mol)	B (1/°C)
I종 시멘트	46-61	0.058-0.088
II종 시멘트	43-51	0.054-0.073
III종 시멘트	43-44	0.054-0.063
I종+20% 플라이애쉬	30-31	0.038-0.045
I종+50% 슬래그	46-55	0.058-0.079
I종+Accelerator	46-49	0.058-0.070
I종+Retarder	39-39	0.049-0.056

## 2.2 성숙도-강도 관계

여러 연구자들에 의해 성숙도-강도의 관계식이 제안되었다. 이들 중에는 Nykanen의 지수형태, Bernhardt의 쌍곡선형태, 그리고 Lew와 Reichard의 점근선적인 형태의 log함수를 사용한 식들이 있다. 위의 식들은 한계강도가 성숙도 또는 등가재령에 영향을 받지 않는다는 가정 하에 세워졌다. 그러나 위의 제안된 식들은 여러 연구자들에 의해 그 한계점이 지적되고 있는데 가장 중요한 이유는 성숙도의 증가에 따라 한계강도가 영향을 받기 때문이다. 즉 양생온도가 증가함에 따라 콘크리트의 한계강도가 감소함이 알려졌다. 이러한 단점을 보완한 Carino가 제안한 식을 소개하면 아래와 같다.

$$\frac{S}{S_u} = \frac{k_r(t_c - t_{cr})}{1 + k_r(t_c - t_{cr})} \quad (5)$$

여기서

- S : 콘크리트 강도
- S<sub>u</sub> : 콘크리트 한계강도
- k<sub>r</sub> : 온도에 관한 비상수

$t_{e}$  : 기본동가재령 (Offset Equivalent Age)

또는 Freiesleben Hansen과 Pederson은 다음의 강도-성속도 경험식을 제안하였다.

$$S = S_u e^{-\left(\frac{t}{M}\right)^a} \quad (6)$$

여기서  $\tau$ 와  $a$ 는 강도-성속도곡선의 형상에 관한 계수이다.

### 2.3 성속도 원리의 현장적용

성속도의 기본원리를 현장에 적용하는 그림을 그림 1에 도식화하였다.

#### LAB TESTING

입방형 압축시험  
T1 T2 T3

빔 또는 압축시험

#### FIELD MEASUREMENT

구조물

온도 계속 또는 온도 예측

성속도 또는 등가재령

그림 1 성속도의 현장적용

두단계의 실험이 수반된다. 첫째는 실내실험, 둘째는 현장에서의 강도 및 성속도(또는 온도) 계속이며 현장실험전에 실내실험을 하여야 한다. 실내실험이라 함은 성속도에 관한 선형식 (1)의  $T_c$  결정 또는 지수함수형태의 식 (4)의  $B$  결정이다. 실내실험에서 성속도-강도의 관계식 (master curve)을 설정한 후 현장에서의 성속도를 성속도미터등의 계측기를 통해 얻어서 master curve를 이용해 대상구조물의 강도를 추정한다. 이때 물론 실내실험에서 구한 master curve와 현장에서 구한 관계식과는 차이가 있을 수 있으므로 보정을 하여 사용한다.

### 3. 거푸집의 탈형

거푸집의 탈형 시기를 결정하는데는 구조물의 특성과 위치 및 기후등 콘크리트의 경화에 영향을 미치는 여러 가지 조건을 고려하여야한다. 도로공사에서는 부재의 중요도(교량의 경간)나 부재의 위치 (측면 또는 밑면)에 따라 거푸집의 탈형 시기를 정하고 있다. 그리고 갈아내기를 하여야 할 장식용 구조물의 수직면에 설치한 거푸집은 표면의 마무리 작업을 쉽게 하기 위하여 콘크리트에 손상을 입히지 않을 만큼 경화하면 제거하도록 되어 있다. 그러나 조강시멘트를 사용하거나 증기양생을 통해 조기강도를 원하는 공사나 기둥, 벽, 빔의 측면과 기타의 수직면은 마무리작업을 쉽게 하기 위해서 감독원의 승인을 받아 일찍 거푸집을 제거할 수 있도록 되어 있다. 한편 ACI Committee 347에서는 주요부재 (보와 슬래브)의 콘크리트강도가 설계강도의 70 % 이상일 때 거푸집 탈형을 제안하고 있다. 또한 주택공사에서는 거푸집 존치시간을 구조물의 종류별로 콘크리트의 강도나 양생 후 경과 일수 그리고 기후에 따라 다르게 시방 되어있다. 대상물이 벽체인 경우는 압축강도가 50 kg/cm<sup>2</sup> 이상일 때 거푸집을 제거하도록 되어 있고 평균대기온이 20 ℃이상에서 4일, 10~20 ℃에서 6일을 요구한다. 한편 구조물이 슬래브나 보일 경우는 압축강도가 설계강도 100 % 확보된 경우나 평균 대기온이 20 ℃이상에서 7일, 10~20 ℃에서 9일 이상 거푸집 존치를 요한다.

표 2는 주택건설 공사자료의 일부이다. 만약에 성속도가 고려된다면 현장 A에서 현장 C로 가면서 거푸집의 존치시간이 단축되어야 하는데 오히려 길어졌다. 이는 공사가 진행되는 월별에 상관없이 즉 기후 (또는 콘크리트의 성속도)에 상관없이 주어진 콘크리트공사시간에 따라 거푸집의 제거를 결정하는 듯하다. 따라서 성속도의 개념을 적용하면 기후 또는

표 2 거푸집의 탈형 시간

구분	공사기간	벽거푸집 존치시간	슬래브 거푸집 존치시간	콘크리트 공사기간
현장A	'94. 4. 8~4. 17	2-3일	5-6일	10일
현장B	'94. 5. 2~5. 15	2-3일	6-7일	10일
현장C	'94. 5. 23~6. 3	2-3일	6-7일	12일

양생방법과 시멘트재료에 따른 콘크리트의 강도발현 상태를 정량적으로 알 수 있기 때문에 안전하고 내구적인 구조물의 거푸집 탈형 시기를 결정할 수 있다.

#### 4. 프리스트레스 콘크리트의 긴장력 도입

앞에서 언급한 바와 같이 프리스트레스 콘크리트 부재에서의 인장력의 도입시간의 결정은 작업공정에 대한 경제성과 안정성 차원에서 중요하다. 프리스트레스를 도입할 때의 콘크리트는 도입된 응력에 견딜 수 있도록 충분한 강도를 가져야한다. 고속도로 공사에서는 프리스트레스를 도입할 때의 콘크리트 압축강도는 설계기준강도의 80% 이상으로 하고 있다.

표 3은 도로공사에서 금강대교 건설에 PC Box Girder를 MSS공법으로 시공하면서 인장력도입시기를 결정하기 위하여 콘크리트 타설 후 인장력 도입전의 콘크리트시편의 강도 및 실제 인장도입일과 28일 압축강도를 월별로 측정된 시험자료이다. 표에 의하면 6~10월에는 콘크리트 타설 후 4일만에 인장하였고 11월부터 2월까지의 동절기에는 기온등의 영향으로 늦어져서 8일 이후에 인장을 했음을 알 수 있다. 이는 인장력 도입을 위한 콘크리트의 강도발현이 앞에서 설명한 성숙도의 개념으로 쉽게 설명될 수 있는 것으로서 성숙도미터등의 계측기를 활용한다면 인장시기를 어느정도 예측이 가능할 수 있을 것이다.

표 3 PC Box Girder (MSS공법)의 인장력 도입 (설계기준강도 : 400kg/cm<sup>2</sup>)

타설시기 (월)	인장을 위한 측정강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	실제 인장일	28일 압축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )
95. 11	$\sigma_c = 335$	8일	429
12	$\sigma_c = 328$	10일	429
96. 02	$\sigma_c = 349$	10일	430
03	$\sigma_c = 338$	8일	432
05	$\sigma_c = 351$	6일	430
06	$\sigma_c = 326$	4일	419
07	$\sigma_c = 349$	4일	503
08	$\sigma_c = 336$	4일	454
09	$\sigma_c = 334$	4일	451
10	$\sigma_c = 329$	4일	462

#### 5. 줄눈시공시기

콘크리트 벽체 및 콘크리트 포장등을 시공할 때 현장에서의 줄눈컷팅은 콘크리트포설 후 8~12 시간후가된다. 그러나 특별한 경우에는 컷팅시기보다 먼저 균열이 발생하는 경우도 있는데 이는 시공지역의 기온변화가 크거나 특수한 시멘트 또는 재료를 사용한 경우이다. 일반적으로 현장 감독자나 시공자는 계절에 따라 또는 콘크리트포설 시간대에 따라 줄눈컷팅의 시기가 달라짐을 알고 있다. 국내에서는 숙련된 기능공의 경험에 의하여 줄눈컷팅시기가 결정되는 경우가 많고 외국의 경우에도 일례로 미국 남부지역에서는 줄눈컷팅의 시기를 결정하기 위해 작업자가 양생중인 콘크리트슬래브에 올라서서 이때 발자국이 안 생기면 컷팅을 시작하는 경우도 있다. 이렇게 해서 컷팅을 시작했을 때 골재가 튀거나 모서리가 탈리될 때는 작업을 중단하고 기다렸다가 컷팅을 시작한다. 이러한 경험적인 방법만으로는 현장에서의 품질 관리에 만전을 기할 수가 없다. 따라서, 줄눈컷팅시간에도 성숙도의 개념을 적용하면 좀더 과학적인 방법으로 컷팅을 유도할 수 있다.

콘크리트의 줄눈컷팅이 종결시간 (final setting time) 에서 결정된다면 KS F2436-92의 "관입저항에 의한 콘크리트 응결시간 시험방법"을 이용하여 컷팅시간을 결정할 수 있다. 이 실험은 관입저항침을 콘크리트체로 쳐서 만든 모르타르 공시체 안에 25mm 까지 관입시키는데 필요한 저항치가 35 kg/cm<sup>2</sup> 이 될 때를 초결 시간 (initial setting time) 그리고 280 kg/cm<sup>2</sup> 이 될 때를 종결 시간으로 정한다. 따라서 실험실에서 온도별로 양생된 시편

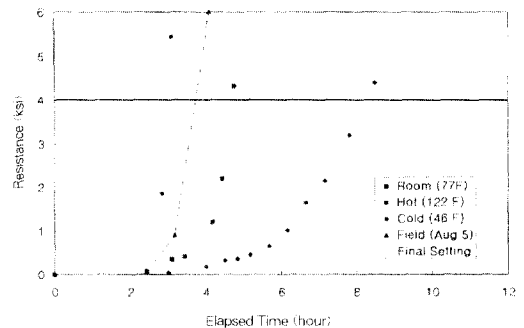


그림 2 현장에서의 줄눈시공시기 결정

에 대해 종결시간을 구한 후 온도와 시간을 성속도로 결합해서 종결시간을 기점으로 해서 컷팅시간을 결정한다. 다음의 그림은 현장에서의 줄눈컷팅시간 결정을 할 수 있는 콘크리트 양생 후 콘크리트의 저항치를 보여준다. 그림 2는 실험실에서 구한 계수와 현장에서 구한 계수들을 보여준다. 아울러 양생온도가 변화하면서 저항치가 변하는 모습을 보여준다. 공사현장은 1994년 미국 텍사스주 휴스톤시의 한 도로공사이다. 당시의 대기온도는 약 35°C였다.

## 6. 수화열

콘크리트 구조물의 대형화 및 콘크리트의 고강도화의 추세에 따라 수화열에 대한 관심이 점차 증가하고 있다. 부재의 두께가 1~2 m 정도의 매스 콘크리트 부재에서는 방출되는 열량에 비해 수화열에 의한 발열량이 크기 때문에 부재내부의 온도가 상당히 상승하게 되고 부재의 외부와는 큰 온도차를 보이게 된다. 이때 부재에서는 온도가 하강될 때 부재의 구속에 의한 심각한 균열이 발생하게되어 구조물이 심각한 손상을 가져올 수도 있다.

현재 국내에서도 대형구조물 부재에는 수화열을 고려한 시공을 시도하고 있다. 먼저 실험실에서 시멘트의 수화열특성을 결정한 후 유한요소법을 이용한 열전도해석을 통해 현장에서의 대기조건을 이용하여 실제 계측한 콘크리트 내부의 온도와 해석에 의한 온도를 비교한 바 상당히 비슷하게 일치함을 보여준다. 일반적으로 양생온도가 높을수록 초기에는 높은 수화열을 수반하지만 시간이 경과함에 따라 양생온도가 낮을 때보다도 더 낮은 수화열을 기록하게 된다. 그림 3은 단열조건을 이용한 여러 다른 양생온도에서의 수화열시험 결과치를 보여준다. 따라서 그림 3으로 부터 수화열해석을 할 때도 성속도의 개념이 쓰여져야 함을 알 수 있다. 이때 시멘트의 수화열 특성은 다음과 같이 성속도 또는 재령온도에 비례함이 알려져 있다.

$$a = \exp[-\lambda_1 (Ln\tau)^{k_1}] \quad (7)$$

여기서  $\tau = 1 + t/t_1$  이며  $\lambda_1$ ,  $t_1$ ,  $k_1$ 은 시멘트의 물성치를 나타낸다.

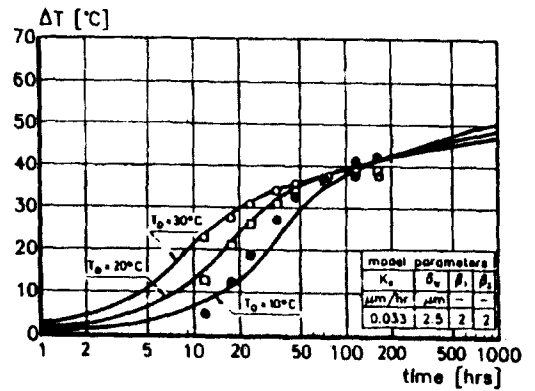


그림 3 양생온도 변화에 따른 수화열

## 7. 무근콘크리트포장 (Jointed concrete-pavement)

JCP는 적절한 간격의 수축줄눈을 사용한다. 다웰바(dowel bar)나 골재가 interlock이 되어 줄눈사이의 하중을 전달하는 기능이다. 대체적으로 줄눈의 간격은 4-9 m를 사용한다. JCP의 근본기능은 포장슬래브에 균열이 안 생기도록하는데 있다. 현재 국내의 고속도로에는 6 m의 줄눈간격으로 시공하고 있다. 줄눈간격은 콘크리트포장슬래브의 두께와 폭 및 슬래브와 보조기층과의 마찰계수등과 아울러 환경적인 인자로는 콘크리트의 온도차 및 건조수축등에 의해 결정된다.

### 7.1 교통개방시간 기준 작업표

교통개방시간 기준 작업표는 공사감독자에게 현장에서 양생중인 콘크리트의 강도발현을 평가하거나 콘크리트포장을 교통 개방하는데 필요한 시간을 추정하기 위한 간단한 방법이다. 본 작업표에서 강도발현에 사용된 자료는 ASTM C 1074에 제시되고 있는 것으로서 다음과 같이 실험실에서 실험절차에 의해 산출된다.

- (1) 초기 양생부터 28일 까지의 강도측정  
(예를 들어 1, 3, 7, 14, 28 일)
- (2) 강도 측정시간
- (3) 양생온도
- (4) (2)와 (3)으로부터 (1)의 강도에 대한 성속도 측정
- (5) 성속도모델 (식 (1), 식 (2), 식 (3))에 따라 기준온도 ( $T_0$ )나 활성화에너지 ( $E$ ) 또는콘크

리트 물성치 (B) 결정

(6) 한계강도 또는 28일 강도

위의 기술한 데이터를 이용하여 6.2에서 제시되는 차트와 그림은 콘크리트포장을 교통 개방시키기 위해 필요한 강도나 시간에서의 성숙도를 확인하기 위해 사용될 수 있다. 콘크리트강도와 성숙도의 관계식은 식 (5)을 사용할 수 있다. 식 (5)을 다시 쓰면 :

$$\frac{S}{S_u} = e^{-\left(\frac{\tau}{M}\right)^n} \quad (8)$$

위의 식은 다음과 같이 선형의 형태로 표현한다.

$$y = mx + b$$

여기서

$$y = \text{Ln}(-\text{Ln}(S/S_u))$$

$$x = \text{Ln}(M)$$

$$m = a \quad \text{: slope}$$

$$b = a\text{Ln}(\tau) \quad \text{: intercept}$$

상수 a와 τ는 도표 또는 회귀분석으로부터 얻어진 강도-성숙도 데이터에서의 기울기나 y-절편으로 구한다. 한계강도 S<sub>u</sub>는 파일럿 빔 시편으로부터 휨강도를 얻을 수 있으며 S/S<sub>u</sub>는 양생온도 조건에 따라 변화될 수 있다. 이는 S<sub>u</sub>가 시편이 양생되는 조건에 따라 변화하기 때문이다.

파일럿 빔 실험이 강도-성숙도관계를 정립하기 위해 필요하다면 5시리즈 정도의 강도-성숙도 데이터를 위해 3일내지 28일 기간을 두고 강도실험을 한다. 이때 성숙도는 성숙도미터를 사용하여 강도실험을 할 때마다 기록을 한다. 한 예로서 강도-성숙도의 관계가 다음의 현장 파일럿 빔실험 데이터와 그에 따른 성숙도데이터에 의해 주어졌다.

예로 사용된 콘크리트는 보통 1종 포틀랜드 시멘트를 m<sup>3</sup> 당 391 kg을 사용하여 만들었다.

7.2 교통개방에 필요한 강도 기준 작업표 작성방법

한계강도(S<sub>u</sub> or S<sub>cr</sub>) : 744 psi

(1) 빔 실험 데이터를 적당한 행에 대입하여 다음 테이블을 작성한다.

Col.A	Col.B	Col.C	Col.D	Col.E
강도 (psi)	Col.A	Ln(Col.B)	Ln(-Col.C)	Maturity/Ln(Maturity)
210	0.282	-1.265	0.235	844(6.74)
420	0.565	-0.572	-0.559	1576(7.36)
540	0.726	-0.320	-1.138	1902(7.55)

(2) Col. E와 Col. D의 값들을 아래의 그림에 기입한다; Col. E는 x-축, Col. D는 y-축. 그리고 각각의 데이터에 따라 가장 적합한 직선을 그린다.

(3) 교통개방을 위한 S<sub>opening</sub>/S<sub>u</sub> 비를 구하여 이에 상응하는 수평직선을 긋는다.

(4) (2)번 절차에 설명된 강도-성숙도 관계선 (Strength-Maturity Relationship) 과 교통개방 강도비 (Opening Strength Ratio)가 만나는 점을 따라 Ln(maturity)를 구한다.

이 값에 대응하는 시간이 교통개방시간이 된다. 본 예에서는 교통개방시간이 16.4 시간이 된다. 본 예에 사용된 콘크리트는 고강도용이었으며 조기개방용 콘크리트포장에 대한 텍사스주내에서의 첫시도로 인한 불확실성 때문에 실제로는 48시간 후에 개방되었다.

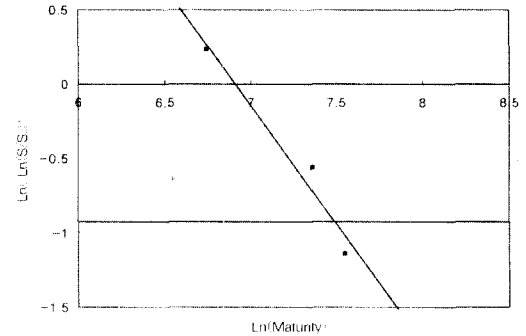


그림 4 성숙도를 이용한 무근콘크리트포장의 교통개방

8. 성숙도의 한계

성숙도의 원리를 현장 적용하여 강도를 추정하는 데 있어서 다음과 같은요인들에 의해 오차를 수반할 수가 있다.

(1) 초기재령에서의 너무 높은 강도가 발견되는 경우

(2) 콘크리트의 양생에 필요한 수분이 임계이하가 되어 콘크리트의 수화가 멈추는 경우

(3) 실제 콘크리트구조물의 콘크리트는 대기온도 변화에 따른 양생온도이력에 의해 양생중의 온도가 변화하는데 비해 실내실험에 의해 결정된 상수 또는 한계강도는 등온에서 결정된 상수로 인한 경우.

## 9. 맺음말

본고에서는 콘크리트 성숙도 개념의 현장 적용에 대해 콘크리트 구조물의 거푸집 탈형, 프리스트레스 부재의 인장력, 슬래브의 줄눈시공, 콘크리트 타설 후 발생하는 수화열, 콘크리트포장의 교통개방등에 관해 살펴보았다. 현재까지는 국내의 건축·토목 분야에서 성숙도의 개념이 적용되고 있지는 않지만 콘크리트공사의 여러 분야에서 기후나 콘크리트의 물성을 고려한 콘크리트의 강도발현에 주의를 기하고 있다. 다양화되는 콘크리트 구조물에 대한 시공관리와 내구적인 구조물의 품질관리를 위해서는 기후등의 환경변화에 적응할 수 있는 재료의 개발이 병행되어야 하겠지만 결국은 현장에서의 관리가 중요한 것이기 때문에 성숙도 개념을 적용해서 효율적인 콘크리트 공사관리가 되도록 하여야 하겠다. 성숙도의 개념이 결코 어려운 것이 아니기 때문에 현장에서의 품질관리를 위해 양생온도이력을 데이터로하거나 성숙

도미터를 사용하여 강도실험과 함께 구하면 콘크리트의 조기강도발현 및 원하는 기준강도가 발현되기 까지 잔여 등가재령 또는 잔여시간을 추정할 수 있기 때문에 콘크리트 구조물 시공에 활용이 가능하리라 본다.

## 참고 문헌

1. 고속도로공사 일반시방서, 한국도로공사.
2. 건축공사 표준시방서, 주택공사.
3. Carino, N.J., "The Maturity Method," CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, 1989 pp. 101-146
4. 오병환외, "성숙도 개념을 이용한 콘크리트 초기강도 예측모델 개발 연구," 콘크리트학회논문집 제 8권 3호 1996.6 pp. 197-207
5. 양성철, C급 플라이애쉬를 사용한 모르타의 응결 및 성숙도, 콘크리트학회논문집 제9권 3호 1997.6., pp. 197-207.
6. Breugel, K. V. "Simulation of hydration and formulation of structure in hardening cement-based materials," Delft University of Technology, Netherlands, 1991.
7. 최계식외, "수화열 계측 및 파이프쿨리시공사례," 한국콘크리트학회, 1994년도 가을학술발표회, 1994. 11. 7. 