



# 성숙도 개념을 이용한 Whitetopping 포장의 현장 적용

## The Application of Maturity Method on Whitetopping Construction

정 종 석\*      조 윤 호\*\*      이 강 원\*\*\*  
 Jung, Jong Suk      Cho, Yoon Ho      Lee, Kang Won

### Abstract

Maturity method is a non-destructive method for estimating in-place concrete strength as a function of time and temperature. The main objective is to use maturity method determining joint sawing and traffic opening time for whitetopping construction in Korea. Another objective is to investigate the influence of air temperature in the correspondence to slab temperature and maturity value. For determining the joint sawing and traffic opening time, thermachron i-button and strain gage were inserted in the fresh concrete in the slab and a maturity value was calculated at desired times. In-place strength was then estimated from a pre-established relationship between maturity values and compressive strength. The results showed that there are significant differences between the estimated strength obtained from maturity curve and in-place concrete strength. The reasons are that the gain of in-place concrete strength was influenced by several factors in the field such as curing conditions, air temperature, and wind speed etc. Also, the results showed that air temperature had significant influence on slab temperature and maturity value. The slopes of maturity curves exponentially decrease as air temperature decreases. This means that maturity value sharply dropped as air temperature decreases.

*Keyword : maturity, whitetopping, compressive strength, air temperature*

### 요 지

성숙도는 비파괴시험으로 현장 콘크리트 강도를 시간과 온도의 함수로 추정하는 방법이다. 본 연구의 주목적은 실 내실험에서 추정된 성숙도 곡선을 이용하여 whitetopping의 줄눈절삭과 교통개방의 시간을 결정하는 것이다. 또한 대기온도가 콘크리트 슬래브 온도와 성숙도에 미치는 영향을 평가하였고, 줄눈절삭과 교통개방시기를 결정하기 위해 성숙도 곡선을 개발하였다. i-button을 슬래브 내부에 설치하여 온도를 계측하였고, strain gauge를 이용하여 변위

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 Post-doctor  
 \*\* 정회원 · 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 부교수  
 \*\*\* 정회원 · 중앙대학교 공과대학 토목공학과 석사과정



를 측정하였다. 실내실험에서 얻어진 성숙도 곡선을 이용하여 현장 압축강도를 예측한 결과, 현장 압축강도와 성숙도 곡선에서 예측된 압축강도와는 상당한 차이를 나타냈다. 이와 같은 결과는 현장의 양생조건, 대기온도, 풍속을 포함하는 여러 인자가 현장콘크리트 강도에 중요한 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 여러 인자 중에서 대기온도의 변화에 따른 슬래브 온도와 성숙도 값에 미치는 영향을 평가한 결과, 대기온도는 슬래브 온도와 성숙도에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 특히 대기온도에 따른 성숙도 곡선의 기울기는 감소하였으며, 이는 대기온도가 감소함에 따라 성숙도 값이 급격히 감소하였다.

**핵심용어** : 성숙도, *whitetopping*, 압축강도, 대기온도

## 1. 서론

빠른 시간내에 교통개방을 하는 것은 계약자나 발주자의 공통된 목적이다. 계약자는 가능한 빨리 공사를 진행하여 공사비용을 최소화시키고자 하며 발주자는 공사와 관련된 지체를 최소화하여 적절한 시간 내에 교통을 개방하고자 한다. 콘크리트의 포장의 경우 교통개방은 콘크리트 강도를 기준으로 하여 결정되기 때문에 콘크리트 포장의 교통개방은 정확한 강도를 추정하는 방법이 중요하다. 성숙도(maturity method)는 콘크리트 강도를 지속적으로 측정할 수 있으며, 전통적인 파괴실험에서 필요한 공시체수를 감소시켜 품질보증 비용을 줄일 수 있는 신뢰적인 방법이다.

이 방법은 현장 콘크리트 강도를 측정하는 비파괴 시험방식으로 줄눈절삭과 교통개방 시기를 결정하는데 유용한 방식이다. 미국의 경우 32개주에서 연구 및 적용중이며, 13개주는 자체 시방서를 보유하고 있다<sup>(1)</sup>. 그러나 국내의 콘크리트 포장에서는 성숙도 개념을 적용된 사례가 없으며, 단지 일부 시공현장에서만 콘크리트 강도 발현 및 균열방지를 위해 계절에 따른 대기온도를 고려한 수화열 해석시 적용하고 있다<sup>(2)</sup>.

본 연구에서는 성숙도 이론을 살펴보고 실내실험을 통하여 줄눈절삭과 교통개방시기를 결정하는 성숙도 값을 선정하여 이를 국도 17호선과 2호선의 Whitetopping 포장 시공에 적용함으로써 실내실험

에서 개발된 성숙도의 값과 현장성숙도의 값을 비교하여 적합성과 문제점을 검토하였다. 또한 대기온도의 변화에 따른 슬래브 온도와 성숙도에 관한 영향을 고찰하기 위하여 대기온도가 낮을 때 시공된 국도 39호선(예산구간)을 포함시켰다.

## 2. Whitetopping 유지보수공법

Whitetopping은 1913년 미국에서 기존 콘크리트 층에 강성포장재의 덧씌우기가 시작된 이래, 기존층이 아스팔트 포장인 경우에도 적용할 수 있도록 발전하였고 교통차단을 최소화하는 신속개방을 주된 목표로 하고 있으며 1999년까지 180여건의 시공사례를 보이고 있다<sup>(3)</sup>. Whitetopping의 장점은 아스팔트 층과 콘크리트 슬래브가 밀착되어 복합거동을 함으로써 중립축의 하향을 유도하고 콘크리트포장에서 발생하는 응력을 최소화하여 중하중 교통량이 많은 지역 등에 효과적으로 적용할 수 있다는 점과 조강시멘트의 사용으로 인한 조기 교통개방을 할 수 있다는 점이다<sup>(3)</sup>. 특히 아스팔트 포장의 문제점인 정지하중으로 인하여 러팅과 쇼빙이 반복적으로 일어나서 도로이용자의 불편과 유지관리비용이 증가하는 교차로에서 Whitetopping은 좋은 대안이 될 수 있다<sup>(4)</sup>. 본 연구에서는 Whitetopping 유지보수공법을 최초로 국내에 도입하여 2003년 7월말에는 국도 17호선과 2호선에 성숙도개념을 적용하였으며 또



한, 이 공법의 공용성을 지속적으로 측정 및 평가하고 있다.

### 3. 성숙도 개념

성숙도 개념은 1950년대에 증기식 양생 콘크리트와 관련하여 처음으로 연구되었다. 수화반응은 온도가 높을수록 빨리 반응하며, 콘크리트 강도는 시간에 따라 지속적으로 증가한다. 이러한 개념을 바탕으로 하여 성숙도는 콘크리트 강도 발현에 관련된 시간과 온도의 함수로 개발되었다. Saul은 성숙도를 “같은 배합설계에서 나온 같은 성숙도의 값은 시간과 온도의 구성에 관련없이 대략적으로 같은 강도를 가진다.”라고 정의하였다<sup>(5)</sup>. 1987년 ASTM(American Society for Testing and Materials)에서는 성숙도 개념을 강도추정 사용에 표준화하였다.

성숙도 계산을 위해서는 두 개의 방정식이 사용된다. Nurse-Saul이 제안한 식 1은 콘크리트 강도를 양생온도와 시간과의 함수로 나타낸 것이다<sup>(5)</sup>. Saul은 콘크리트가 시간의 경과에 따라 더 이상 강도를 발현할 수 없다고 가정한 기준온도(datum temperature)를  $-10^{\circ}\text{C}$ 로 제안하였다.

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

여기서,

- $M$  : 콘크리트의 성숙도 ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$ )
- $T$  : 콘크리트 양생 온도( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_0$  : 기준온도( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\Delta t$  : 시간간격(hour)

식 2는 Arrhenius가 주어진 평균온도에서 동일하게 양생된 콘크리트의 성숙도의 값은 같다는 것을 가정한 등가재령(equivalent age)을 이용하였다. Rastrup이 처음으로 등가재령의 개념을 제안하였다<sup>(6)</sup>. 온도가  $10^{\circ}\text{C}$ 증가하면 화학반응 비율이 두 배에 이른다는 가정을 근거로 했다<sup>(5)</sup>. 하지만 다른 연구에

따르면 Rastrup의 식은 Nurse-Saul의 식보다 정확하지 않다고 보고 되었다<sup>(5)</sup>. 최종적으로 1977년 Freiesleben Hansen과 Pederson이 Arrhenius 공식에 근거한 아래의 (식 2)를 제안하였다<sup>(6)</sup>.

$$t_e = \sum_0^t e^{-\frac{E}{R}(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r})} \Delta t \quad (2)$$

여기서,

- $t_e$  : 등가재령
- $T$  : 평균콘크리트 온도 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_r$  : 기준온도( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\Delta t$  : 시간증가량(h, or day)
- $E$  : 활성화에너지
- $R$  : 가스상수,  $8.3144 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$

일반적으로 지수 형태의 식 2가 선형식인 식 1보다 비교적 더 정확한 것으로 알려져 있지만 콘크리트 물성에 대한 상수인 활성화 에너지  $E$ 를 실험실에서 구하여 적용하기 어렵기 때문에 상대적으로 계산 방법이 쉽고 간편한 식 1이 일반적으로 사용되고 있다<sup>(7)</sup>. 그리고 Nurse-Saul식과 Arrhenius식은 성숙도와 강도와의 상관관계가 우수하므로 본 논문에서는 상대적으로 간편한 식 1을 적용하여 성숙도의 값을 계산하고 줄눈절삭과 교통개방시기를 결정하였다.

기준온도의 범위는 보통  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서  $0^{\circ}\text{C}$ 사이지만, 기준온도의 변화는 교통개방을 조기에 할 수 있으므로 주의를 기울여야한다<sup>(8),(9)</sup>. 대부분 미국 각 주의 교통국에서는 Saul이 제안한  $-10^{\circ}\text{C}$ 를 사용하고 있다<sup>(5),(9),(10)</sup>. 따라서 본 연구에서는  $-10^{\circ}\text{C}$ 를 기준온도로 정하였다.

### 4. 실내실험

실내실험목적은 줄눈절삭시간 결정과 교통개방시간을 성숙도로 추정하는 것이다. 본 연구에서는 줄눈절삭에 필요한 허용강도를 결정하기 위하여 슬래브



(0.9m×0.9m×0.1m)를 제작하였다. 현장에서 실제 사용되는 절삭기를 사용하여 슬래브 타설후 6시간 부터 30분 간격으로 줄눈절삭이 타당하다고 판단되는 시점까지 실내실험에서 압축강도를 측정하였다.

공시체의 수는 각각의 시간에 따라서 3개씩, 총 27개의 공시체를 제작하여 실내온도 20℃를 유지하면서 수중양생 하였다. 성숙도측정을 위해 기존의 Themocouple(온도측정장비) 대신 데이터 수집이 용이한 Thermachron i-button(온도측정장비)을 슬래브의 중앙(깊이 2cm, 5cm)에 매립하였다. 이 온도측정장비의 오차는 비교적 작은 2°F이며 성숙도 계산에서 신뢰할 만한 결과가 도출되었다<sup>(11)</sup>. 수화반응에 따른 건조수축을 측정하기 위해 Strain gauge 를 slab edge의 영향을 피하기 위해 15cm 떨어진 곳 (깊이 5cm)에 매립하여 10분 간격으로 측정하였다. 표 1은 실내실험에 사용된 실험종류, 계측장비, 측정 시간, 그리고 공시체수를 나타낸 것이다.

#### 4.1 배합설계

1종 시멘트는 강도발현이 낮아 조기 교통개방 콘크리트 포장에 적용하기 어려울 것으로 판단되어 3

종 시멘트를 선정하였다. 굵은골재 최대치수는 25mm이며 많은 시행착오와 현장 B/P에서 재료의 운반시간을 고려하여 아래의 표 2에 제시된 구성성분으로 최종배합을 선정하였다.

#### 4.2 성숙도 그래프의 개발

그림 1은 실내실험을 바탕으로 도출된 성숙도 그래프이다. 슬래브 상부에서 측정된 온도를 이용한 성숙도 그래프는 줄눈절삭시기를 결정하고 슬래브 중앙에서 측정된 온도를 이용한 성숙도 그래프는 교통개방시기를 결정하는데 이용된다<sup>(9)</sup>. 그러나 그림 1에

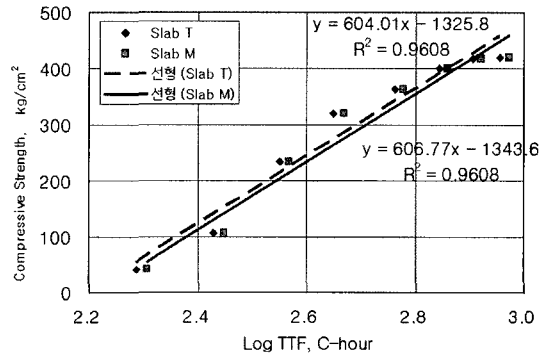


그림 1. 실내실험에서 얻어진 성숙도 곡선

표 1. 실내실험계획

실험종류	계측장비	측정시간	공시체수	비고
압축강도	압축강도시험기	6, 8, 10, 12, 15, 18, 21, 24 시간	24개	수중 양생
건조수축	Data logger Strain gage	양생 후 10분 간격으로 측정(슬래브)	-	
온도측정	Thermachron i-button	양생 후 10분 간격으로 측정 [슬래브 상(깊이 2cm)·중(깊이 5cm), 대기온도]	3개	

표 2. 최종배합

굵은 골재의 최대치수 (mm)	슬럼프의 범위 (cm)	공기량의 범위 (%)	물-시멘트 비 W/C (%)	잔골재율 S/a (%)	단 위 량 (kgf/m³)							
					물 W	시멘트 C	잔골재 S	굵은 골재 G	고성능 감수제	공기 연행제	축진제	조강 혼화제
25	8~15	3~7	34~40	40~45	170 이하	450~490	700~800	900~1000	5~10	0~0.2	5~10	5~10



서 보는바와 같이 두개의 성숙도 그래프의 차이는 미미한 수준이어서 슬래브 중앙에서 측정된 온도를 바탕으로 만들어진 성숙도를 기준으로 줄눈절삭과 교통개방시기를 결정하였다.

식 3은 콘크리트 압축강도와 성숙도의 관계를 나타낸다. R-Square는 0.9608 이며, 이는 인디아나 교통국 (Indiana Department of Transportation)의 기준인 0.95이상의 R-Square를 충족시킨다<sup>(6)</sup>. 따라서 식 3은 콘크리트 압축강도의 예측에 적합하다고 판단된다.

$$y = 606.77 \text{Log}(TTF) - 1343.6 \quad (3)$$

여기서,

$y$  = 콘크리트 압축강도

$TTF$  = 온도\*시간 관계요소 (Maturity)

### 4.3 줄눈절삭과 교통개방시기의 결정

줄눈절삭시기는 균열발생의 원인이 될 수 있는 내부 콘크리트 응력이 발생되기 전에 결정되어야 한다. 미주리 교통국 (Missouri department of transportation)에서는 성숙도 그래프를 따라서 콘크리트 압축강도가 750~800psi(52.7~56.2 kg/cm<sup>2</sup>)에 도달했을 때 줄눈을 절삭하고 있다<sup>(3)</sup>.

그림 2는 실내실험에서 측정된 하루 동안 대기 온도 및 슬래브 내부온도 그리고 건조수축결과를 나타내고 있다. 배합후 약 두 시간동안은 건조수축이 일어나지 않는 상태를 보여주고 있다. 이 시기는 시멘트 입자표면이 물과 접촉하여 첫 수화반응이 일어나는 시기인 dormant period이며 시멘트 요소중에서 C<sub>3</sub>A와 크게 연관되어 있다<sup>(7)</sup>. 그림 2에서 보는 바와 같이 이 시기를 지난 후 3시간 정도 온도는 일정한 상태로 유지되며 이 시기에 콘크리트가 응결되고 수화반응의 정도가 낮아 건조수축이 시작된다. 이는 시멘트 입자주위에 첫 수화반응에서 생성된 C-S-H 화합물이 지속적인 수화반응을 방해하기 때문에 생기는 현상이다<sup>(7)</sup>. 약 5시간 이후부터 9시간까지는 수화

반응이 다시 활발히 일어나는 시기이며 또한 건조수축이 거의 일어나지 않는 상태로 유지된 후 9시간 이후부터 다시 건조수축이 일어난다. 따라서 약 5시간에서 9시간까지는 콘크리트 건조수축에 의한 내부응력이 발생되지 않는다고 판단할 수 있으며, 줄눈절삭 시기로 적절하다는 것을 알 수 있다. 또한 5~9시간까지 콘크리트 슬래브의 내부온도가 급격히 상승하여 슬래브의 온도가 최대일 때부터 건조수축이 다시 일어나는 것을 알 수 있다.

위의 결과를 바탕으로 양생후 5시간 이후부터 30분 간격으로 줄눈을 절삭하여 상태를 관찰하였다. 양생 5시간후에는 줄눈절삭시 골재 튀 현상이 다수 발생되었으며, 30분경과 한 후에도 줄눈절삭시 골재 튀 현상이 관찰되었다. 하지만 양생후 6시간부터는 골재가 줄눈부에서 튀는 것을 관찰할 수 없었다. 이 시점이 줄눈절삭에 필요한 소요강도가 발현할 시점으로 판단하여 강도를 측정 한 결과 약 45kg/cm<sup>2</sup>이었다. 그 후 두 차례에 걸쳐 줄눈절삭실험을 수행한 결과 골재가 튀거나 모서리 부분이 떨어져 나가는 현상은 발견하지 못했다. 그러나 이번 실험에서는 실제 현장에서 줄눈절삭후 이루어지는 높은 수압의 물청소를 고려하지 못하였다. 따라서 이를 고려하여 현장에서의 줄눈 허용압축강도는 이보다 10kg/cm<sup>2</sup> 높은 55kg/cm<sup>2</sup>가 기준강도로 적절하다고 판단하였다.

실험을 통해서 줄눈절삭시기는 양생후 6시간이 지나고 성숙도의 값이 최소한 200℃·hr이상 일 때 적절하다고 판단되었으며, 콘크리트 슬래브 길이의 변

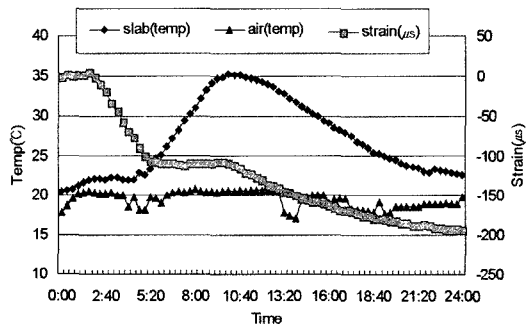


그림 2. 시간에 따른 건조수축 및 온도변화



표 3. 슬래브 줄눈 시기 및 교통개방 결정

압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	구 분	양생시간(hr)	성숙도 (°C · hr)
55이상	줄눈절삭	6시간 경과후	200이상
230이상	교통개방	10시간 경과후	400이상

화량이 나타나지 않는 9시간 전까지는 줄눈절삭이 마무리 되어야 한다. 또한 교통개방시기는 허용강도인 230kg/cm<sup>2</sup>에 해당되는 성숙도 값은 400°C · hr이 상이고 타설후 10시간 이후가 타당하다는 결론이 도출되었다. 표 3은 실험을 통해서 얻어진 줄눈절삭과 교통개방시기를 결정하는 압축강도와 성숙도의 값을 보여주고 있다.

## 5. 현장시공

현장시험시공은 대기온도가 높은 7월말에 국도 17호선과 2호선의 교차로에 각각 100m씩 2개 구간에 Whitetopping 공법을 적용하였다. 국도 17호선과 2호선의 일평균 교통량은 약 40,000대이고 중차량의 비율은 40%로 나타났다. 17호선의 여수 - 순천 방향은 약 34%이상의 종단구배가 있으며, 2호선의 광양 - 순천은 곡선 구간이다. 평균 러팅은 34cm에 이르며 아스팔트 표층의 FWD(Falling Weight Deflector-meter) 측정결과에서 최대 치짐량은 216micron으로 나타났으며 이를 통하여 지지력이 양호하다는 것을 추정할 수 있었다. 중차량이 많이 다니는 도로의 특성을 고려하여 아스팔트 밀링 후 15cm의 두께를 가지는 whitetopping(slab:1.8m×1.8m)을 시공하였다.

### 5.1 현장시공의 결과 및 강도비교

실내시험의 연구결과를 바탕으로 줄눈절삭에 필요한 성숙도의 최소 값은 200°C · hr이며, 현장구간에서 5시간 경과후에 성숙도 값 200°C · hr을 만족하

였다. 그리고 교통개방에 필요한 성숙도의 값인 400°C · hr을 17호선과 2-1구간의 타설후 8시간 지난 후에 도달하였으며, 2-2구간은 9시간이 경과한 후에 도달하였다. 그림 3은 시간의 경과에 따른 각 슬래브의 온도를 보여준다. 실내실험에서 최대 슬래브 온도는 10시간 경과후 도달했으나 17-1, 17-2, 2-1구간에서는 콘크리트 타설 한 후 7시간이 경과한 후 슬래브 온도가 최대치에 도달했으며, 2-2 구간은 8시간 경과후에 슬래브 온도가 최대치에 도달했다. 이러한 차이는 2-2구간이 대기온도가 상대적으로 낮은 오후 7시 30분경에 시공되었기 때문이다.

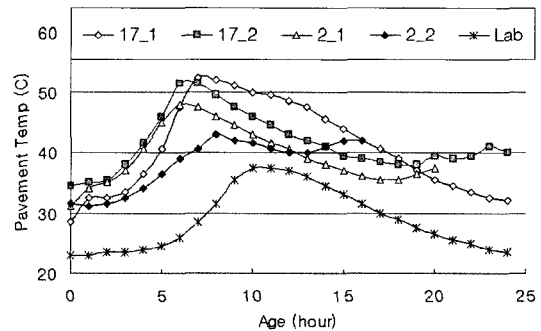


그림 3. 시간에 따른 슬래브 온도의 변이

그림 2에서 나타난 바와 같이 슬래브의 최대온도가 도달한때부터 건조수축이 일어나는 것을 알 수가 있었다. 따라서 줄눈절삭의 경우, 국도 2-2구간은 포설후 58시간 이내, 17-1, 17-2, 2-1구간은 57시간 이내 줄눈절삭이 마무리 되어야 한다.

현장에서의 콘크리트 압축강도는 실험실에서 얻어진 성숙도에 따른 예측압축강도 값들과는 상당한 차이를 보였다. 따라서 현장압축강도를 고려하여 국도 17-2구간과 국도 2-2구간은 5시간, 국도 17-1구간

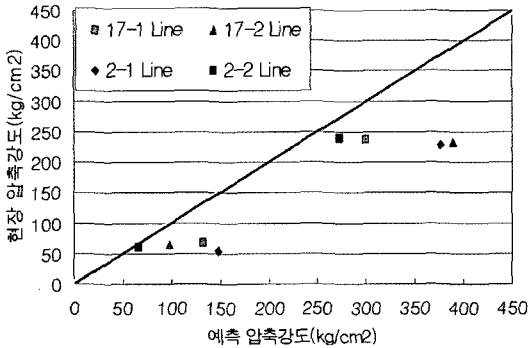


그림 4. 현장압축강도와 예측압축강도의 비교

과 국도 2-1구간은 6시간 경과후에 줄눈절삭을 하였다. 줄눈절삭후 국도 17호선 구간들과 국도 2호선 구간들의 슬래브 줄눈부를 관측한 결과 모서리 부분이 떨어져 나가는 현상은 발견할 수 없었으나, 절삭 후 청소과정에서 높은 수압으로 인해 골재가 이탈하는 현상은 두 지점의 일부구간에서 관찰되었다.

예측압축강도는 실내실험에서 도출된 식 3에 의해 계산된 값들이다. 줄눈절삭과 교통개방기준에 맞는 콘크리트 압축강도 55kg/cm²와 230kg/cm²를 전 구간이 만족하였지만 실내실험과 현장시공 압축강도 비교결과 그림 4에서 보는 바와 같이 2-2 구간을 제외하고는 예측압축강도와 차이가 크다는 것을 볼 수가 있다. 그림 4에서 나타난 선에 가까울수록 성숙도에서 예측된 압축강도와 근사한 값이다.

그림 4와 표 4에서 보는 바와 같이 실내실험에서 얻어진 성숙도에 따른 예측압축강도와 현장압축강도는 많은 오차가 있다는 것을 보여준다. 미국 콘크리트 포장협회(American concrete Pavement

Association)에서 휨강도의 경우는 50psi(3.5kgf/cm²), 압축강도의 경우는 500psi(35kgf/cm²)의 범위 내에 있어야 실내실험에서 얻어진 성숙도에 따른 예측압축강도가 유효하다는 기준이 있다<sup>9)</sup>. 이 기준에 따르면 국도 2-2구간을 제외한 모든 구간은 실내실험에서 얻어진 성숙도에 의한 예측압축강도로 교통개방의 시기를 결정하여 사용할 수가 없다는 것을 의미하며, 현장상황을 고려하여 성숙도곡선을 새로이 제시해야 한다. 이러한 성숙도 값의 차이는 실내실험에서는 일정한 온도(20℃)로 수증양생한 공시체와 현장의 양생조건의 차이, 대기온도와 바람, 태양광 등 여러 요소들의 영향 때문이라고 판단된다. Newbolds 등은 현장의 대기온도 및 양생상태와 유사한 조건으로 실내실험을 실시할 경우, 성숙도의 값에 따른 예측압축강도와 현장압축강도는 매우 유사하다고 밝히고 있다<sup>5)</sup>.

### 5.2 슬래브온도에 대한 대기온도의 영향

대기온도는 콘크리트 슬래브 온도 및 성숙도와 밀접한 관련이 있다. 대기온도가 높을수록 수화반응이 빨리 일어나 초기 콘크리트 강도발현에 유리하다. 같은 양생시기 및 배합조건이라고 가정한다면 성숙도 값의 차이는 대기온도에 영향을 받는 슬래브 온도 차이로 표현된다. 또한 대기온도는 강도발현에 있어서 슬래브 두께보다도 더 큰 영향을 미치며 시공 시 대기온도가 강도발현에 중요하다<sup>6)</sup>.

대기온도가 슬래브 온도와 성숙도곡선에 어떤 영향을 주는지 조사하기 위하여 실내실험 때보다 낮은

표 4. 예측압축강도와 현장압축강도의 차이

17-1구간		17-2구간	
줄눈절삭	교통개방	줄눈절삭	교통개방
(70kgf/cm²) 98%	(64kgf/cm²) 27%	(33kgf/cm²) 51%	(156kgf/cm²) 67%
2-1구간		2-2구간	
줄눈절삭	교통개방	줄눈절삭	교통개방
(94kgf/cm²) 174%	(148kgf/cm²) 65%	(6kgf/cm²) 10%	(33kgf/cm²) 14%

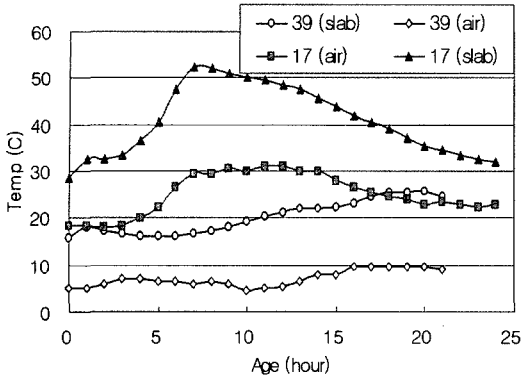


그림 5. 국도 17호선, 39호선 구간의 대기온도 및 슬래브 온도

대기온도 조건에서 시공된 예산구간(국도 39호선)의 대기온도와 슬래브 온도(1.8m×1.8m의 슬래브 중앙에서 깊이 7.5cm)를 측정하였다. 그림 5는 국도 17호선 구간(국도 17-1 구간과 17-2 구간은 새벽 3~4시경에 시공되었으며 대기온도 및 슬래브 온도가 상당히 유사했다.)과 국도 39호선 구간의 대기온도와 슬래브 온도의 관계를 보여준다. 국도 17호선의 시공시점에서 대기온도는 약 20℃이고 평균온도는 약 25℃정도이며 국도 39호선의 시공시점에서 대기온도는 5℃이고 평균대기온도는 약 7℃이다. 국도 17호선의 경우 대기온도가 상승함에 따라서 슬래브의 온도(1.8m×1.8m의 슬래브 중앙에서 깊이 7.5cm) 역시 상승하는 것을 보여주며 슬래브의 최대온도는 7~8시간 사이에서 나타났다. 이 시점에서 대기온도는 약 30℃에 이르렀으며 최대 슬래브온도는 50℃를 넘어선다. 국도 39호선(예산구간)의 슬래브 온도는 국도 17호선과 상당히 차이가 나타나는 것을 그림 5에서 보여준다. 대기온도가 10℃ 미만인 국도 39호선의 경우 슬래브 온도의 피크치가 거의 나타나지 않았으며 슬래브 온도 역시 서서히 증가되는 것을 볼 수 있으며, 또한 최대 슬래브 온도 역시 다른 구간에 비해서 상당히 낮음을 알 수 있다.

그림 6은 국도 2호선 구간들의 대기온도와 슬래브 온도(1.8m×1.8m의 슬래브 중앙에서 깊이 7.5cm)를 보여준다. 시공시점의 대기온도는 국도 2-1구간의 경우 30℃이며 국도 2-2 구간은 26.5℃이다, 국

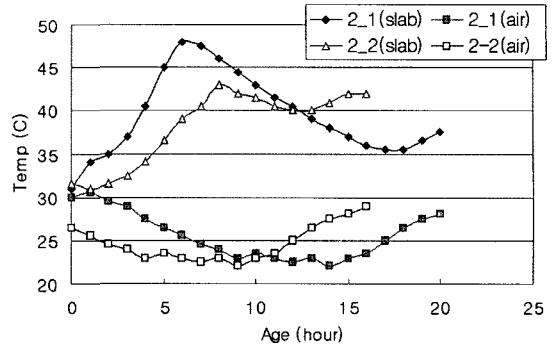


그림 6. 국도 2호선 구간들의 대기온도 및 슬래브 온도

도 2호선 구간들은 7~8시간후에 슬래브 온도가 최대치에 도달했다. 국도 2-1구간은 대기온도가 가장 높은 시점인 2시 30분경에 시공되었고, 국도 2-2 구간에서는 해가 저문 오후 7시 30분경에 시공되었다. 두 구간의 슬래브 최대온도가 약 10℃정도 차이가 나는 것은 태양광(solar radiation)이 슬래브 내부온도에 영향을 미친다는 것을 보여준다.

### 5.3 성숙도에 대한 대기온도의 영향

그림 7은 양생시간에 따른 각 구간들의 성숙도곡선과 기울기를 보여준다. 교통개방의 기준인 성숙도 값이 400℃·hr에 도달한 때는 실내시험의 평균온도 20℃일 경우 10시간이며 현장의 평균대기온도가 25℃의 경우 8~9시간인 반면, 예산구간(국도 39호선)의 평균대기온도가 7℃일 경우에는 15시간이 소

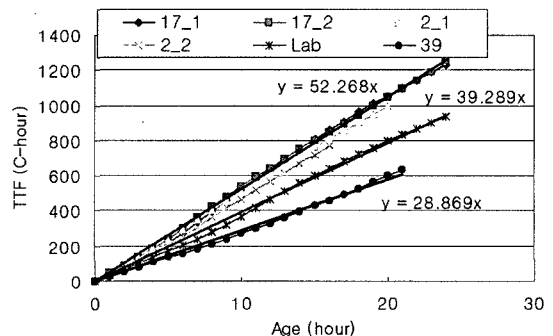


그림 7. 슬래브온도에 따른 성숙도 (TTF)의 차이



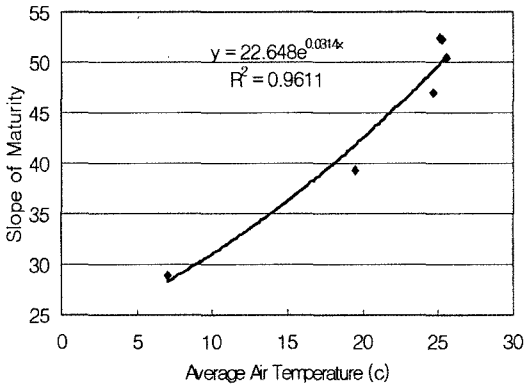


그림 8. 평균대기온도에 따른 성숙도의 기울기 변화

요되었다. 그림 8은 대기평균온도에 따른 각 구간들의 성숙도 기울기의 변화량을 보여준다. 0.96의 R-Square값이 보여주듯이 성숙도 기울기는 대기온도와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있으며, 대기온도가 떨어질 때 성숙도 기울기의 값은 지수형태로 급격하게 떨어지는 것을 볼 수가 있다. 이는 대기온도가 낮을 경우 줄눈절삭 및 교통개방에 필요한 성숙도 값에 도달하기 위해서는 긴 양생시간이 요구됨을 의미한다.

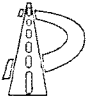
## 6. 결론 및 요약

성숙도는 콘크리트 강도를 추정할 수 있는 시간과 온도와의 관계식이다. 여러 선진국에서는 성숙도를 현장시공시 줄눈절삭이나 교통개방시기를 적용하여 만족스러운 결과를 얻고 있다. 본 연구에서는 실내실험을 통하여 얻어진 성숙도의 값을 국내 최초로 Whitetopping 포장의 줄눈절삭과 교통개방시기 결정에 적용하였다. 현장에서 허용강도를 간접적으로 추정할 수 있는 성숙도개념을 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서는 실내실험을 통하여 Whitetopping 포장의 강도를 추정할 수 있는 성숙도관계식을 제안하였다. 실내실험을 통하여 Whitetopping 포장에서 줄눈절삭시 허용강도는 55kgf/cm<sup>2</sup>정도로 판단되며, 이에 상응하는 성숙도 값은 200

℃·hr이다. 또한 콘크리트 내부응력이 발생되는 건조수축이 다시 일어나기 전에 줄눈절삭이 마무리 되어야 한다. 건조수축이 다시 일어나는 시기는 콘크리트 내부온도가 최대점에 도달할 때 임을 알 수 있었으며 시간상으로는 타설후 약 9시간이다. 하지만 현장에서는 높은 대기온도로 인하여 슬래브 최대온도가 실내실험의 경우보다 빨리 도달했으며, 줄눈절삭시기도 빨라졌다. 줄눈절삭은 2-2구간의 경우 포설후 5~8시간 이내에 이루어졌고 17-1, 17-2, 2-1구간은 5~7시간전에 줄눈절삭이 마무리 되었다.

- (2) 현장에서 교통개방허용강도(230kg/cm<sup>2</sup>)를 추정하기 위하여 실내실험을 수행하였다. 실내실험결과 교통개방 허용강도에 이르는 성숙도 값은 400℃·hr이었다. 그러나 실내실험과 현장과의 결과를 비교해 보면 허용강도를 만족할 때의 성숙도 값이 상당한 차이가 있음을 알 수 있었다. 이는 현장의 온도변화와 다양한 기후조건 및 양생상태 등이 초기에 높은 강도발현을 하는 Whitetopping 포장에 영향을 주어 상이한 결과가 나온 것으로 판단된다.
- (3) 대기온도는 슬래브 온도에 크게 영향을 미친다. 또한 시공시점에서 대기온도도 슬래브 온도에 영향을 미친다. 같은 평균대기온도라도 햇빛이 있는 경우와 없는 경우에 따라서 슬래브 온도의 차이가 나타났다. 대기온도가 10℃미만인 예산구간(국도 39호선)의 경우, 국도 17호선과 2호선구간들의 슬래브 온도와 다른 경향을 나타냈다. 예산구간의 슬래브 온도 경향은 다른 구간보다 피크치도 낮았고 슬래브 온도 또한 다른 구간들에 비해서 상당히 낮았다.
- (4) 대기온도는 성숙도 값에 크게 영향을 미친다. 20℃의 대기온도를 기준으로 평균 5℃가 높을 경우는 교통개방에 필요한 성숙도 값이 10~20%정도 빠르게 도달하는 반면, 평균 10℃가 낮을 경우는 교통개방에 필요한 성숙도 값이 50%정도 늦게 도달했다. 성숙도곡선의 기울기는 대기온도



의 하락에 지수형태로 떨어졌으며 이는 대기온도가 낮을 경우 줄눈절삭 및 교통개방에 필요한 성숙도의 값에 도달하기 위해서는 긴 양생시간이 요구됨을 의미하였다.

참고문헌

1. Tepke, David and Tikalsky, P. J., "Concrete Maturity Progress : A Survey of Departments of Transportation," *Paper No. 01-2939, Presented at 80th Annual Meeting of Transportation Research Board, TRB Record 1775, Washington D.C. Dec. 2001.*
2. 양성철, 최고일, "콘크리트 성숙도개념의 현장적용", 콘크리트학회지 제9권 4호., 1997.
3. 조윤희의 다수, "중하중 교통도로의 신속개방형 답수 및 덧씌우기용 고성능 강성포장 재료의 설계 및 시공 기술 개발", 중앙대학교, 2004.
4. Missouri Department of Transportation, "Evaluation of Ultra-Thin Whitetopping" Report No. RDT-014, Missouri Department of Transportation, October, 2001.
5. Newbolds, S.C. and J. Olek, "The Influence of Curing Conditions on Strengths and Maturity Development of Concrete", Report No. FHWA/IN/JTPR-2001/23, Indiana Department of Transportation and Federal Highway Administration, November 2001.

6. Hansan, F.P. and E. J. Pedersen, "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete", *Nordisk Betong, 1, 19., 1997.*
7. Neville, A.M., "Properties of Concrete", Fourth Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY., 1997.
8. Mohsen, J. P., B. L. Roach, and D. T. Kessinger, "Maturity Method Applied to Highway Construction-The Kentucky Experience". *Presented at 81th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington D.C., 2002.*
9. American Concrete Pavement Association, "Maturity Testing of Concrete Pavements : Applications and Benefits", ACPA, 2002.
10. Missouri Department of Transportation, "MoDOT Application of Maturity Technology". Missouri Department of Transportation, Research Investigation 93-007, July 2003.
11. Ramaiah, S.V., T. Dossey, and B.F. McCullough, "An Investigation of the Thermachron i-button for Early-Age and Long-Term Temperature Monitoring in Concrete Pavements", *Presented at 81th Annual Meeting of Transportation Research Board, Washington D.C., 2002.*

〈접수 : 2005. 1. 13〉