

## 라이닝콘크리트의 양생시스템 개선



**유영선**  
삼성건설  
경주감포도로현장  
공사팀장



**김용하**  
삼성건설  
경주감포도로현장  
품질관리실장



**문병탁**  
삼성건설  
경주감포도로현장  
공무팀장



**이현구**  
삼성건설  
경주감포도로현장  
설계팀장



**권기활**  
삼성건설  
경주감포도로현장  
소장



**임주영**  
삼성건설 상무

### 요약

양복터널은 굴착과 동시에 라이닝콘크리트를 타설하였다. 터널굴착과 라이닝콘크리트의 동시시공을 위한 적정 시공 Cycle을 결정하고, 이에 따른 양생기간과 양생온도를 설정하는 순으로 시험하였다. 라이닝콘크리트는 품질관리를 위해 보온장치를 탑재한 Sliding form과 양생대차를 운영하고, 균열을 최소화하기 위해 양생온도와 양생시간 및 탈형강도 등을 시험에 의해 결정하였다. 시험과정은 터널내부와 라이닝콘크리트 내부온도를 계절별로 측정하고, 양생온도별로 콘크리트의 강도를 측정하였다. 거푸집 탈형시 콘크리트 온도가 터널내부의 온도로 수렴하기까지는 15~20℃의 차이로 측정되었고, 거푸집 탈형을 위한 콘크리트 초기강도 4MPa을 발현하는데는 양생온도에 따라 차이가 발생하지만 시공 Cycle에 적합한 양생시간은 약 20시간이고, 이 때의 양생온도는 23℃ 이상이었다. 위의 시험결과대로 현장에서 라이닝콘크리트를

양생한 결과 시공 Cycle과 압축강도 및 콘크리트면의 외관 등이 만족한 결과를 나타내었다.

### 1. 현장개요

경주-감포2국도건설공사는 경주시 진현동에서 양복읍 장항리를 연결하는 도로공사로서(그림 1), 토함산맥을 통과하는 터널이 양복터널이다.

양복터널은 총연장이 4.35km에 이르는 장대 터널로서 굴착구간의 상당부분이 풍화토층, 역암층, 세일층으로 이루어져 있고, 불국사화강암의 단층대를 통과하므로 터널의 안전성을 위해 굴착과 라이닝콘크리트를 동시시공하고 있다.

라이닝콘크리트를 타설하기 위하여 대개의 경우 Sliding Form을 사용하는데, 지금까지의 Sliding Form의 기능은 터널 내공단면 규격을 정확한 위치에 확보하고, 시공중 이완이 되지 않도록 거푸집 역할만을 하였다. 양복터널

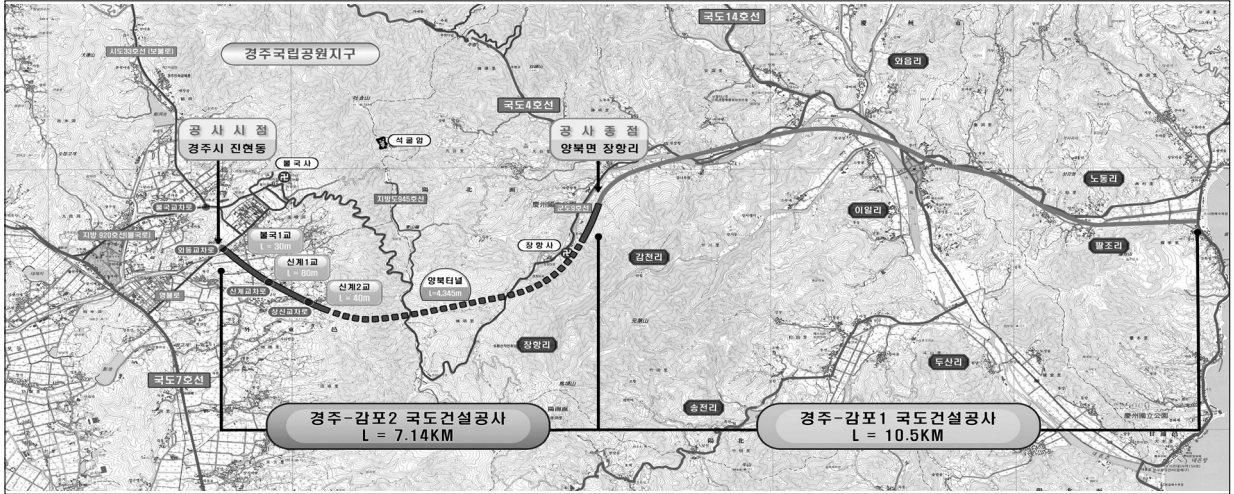


그림 1. 위치도



그림 2. Sliding Form(왼쪽)과 양생대차(오른쪽)

현장에서는 동시시공을 시행하기 위해서 Sliding Form을 특수하게 제작하였다. 이는 콘크리트 타설을 위한 거푸집 역할은 물론 환기 등 각종 설비 라인의 통과 공간 확보 및 작업차량을 통과시킬 수 있도록 배치하였다. 또한 동절기에 라이닝 콘크리트 타설후 보온양생을 시행하기 위하여 보온장치를 부착하였고, 양생대차를 별도로 제작하였다. 양생대차에도 보온 양생장치를 부착하였다(그림 2).

## 2. 양생 System 비교

### 2.1 Sliding Form의 기능

라이닝콘크리트를 타설하기 위한 거푸집 형식은 일반적으로 Sliding form을 사용한다. Sliding form은 이동성이 좋아야 하고, 내공단면 규격을 정확한 위치에 확보

표 1. Sliding Form 의 비교

구 분	기존의 Sliding Form	개선된 Sliding Form
내공단면 규격 확보	정확한 위치에 설치	정확한 위치에 설치
이동성	전동모터 설치	전동모터 설치
콘크리트 타설시 다짐	진동다짐기를 설치	진동다짐기를 설치
점검창	점검창 설치	점검창 설치
환기설비의 통과공간	-	환기 덕트 공간 확보
작업차량 통과공간	-	폭 5.5m, 높이 4.3m의 공간 확보
동절기 보온장치	-	Heating system 부착
콘크리트 양생장치	-	양생대차 설치



그림 3. 기존의 라이닝콘크리트 타설 Cycle

하여야 하며, 콘크리트 작업중이나 작업완료 후 콘크리트 압력에 견딜 수 있는 견고한 구조이어야 한다. 또한, 콘크리트를 타설하는 동안 콘크리트가 분리되지 않아야 하고, 타설과정을 점검할 수 있어야 하며, 타설완료 후 초기강도가 발현될 때까지 양생할 수 있어야 한다.

Sliding form에는 콘크리트 타설시 진동다짐을 할 수 있는 진동다짐기를 설치하고, 다짐상태를 확인할 수 있는 점검창을 적정하게 배치하여야 하며, 천정부에는 콘크리트 펌핑파이프와 공기구멍 파이프를 배치한다. 동시시공의 경우 환기덕트의 통과 공간과 작업차량의 통과공간을 추가로 확보하여야 한다.

당 현장의 경우는 동절기 콘크리트의 보온양생을 위한 보온장치를 추가로 설치하였다. 또한 초기강도 확보를 위한 양생대차를 별도로 운영하였다. 이 외에도 터널내에 청정공간을 유지하기 위하여 별도로 집진설비를 운영하였다. 집진설비는 발파로 인한 오염된 공기를 정화시켜주는 설비이다. 집진설비로 터널은 전구간이 항상 쾌적한 공간으로 유지할 수 있었다.

## 2.2 기존의 양생 System

라이닝콘크리트를 타설한 후 양생을 시행하는데, 양생은 콘크리트의 경화에 필요한 온도 및 습도를 유지하면서 양생하여야 한다. 초기양생은 타설한 콘크리트의 압축강도가 3MPa 이상이 발현되거나 라이닝콘크리트의 자중을 충분히 견딜 수 있는 기간까지 양생하여야 한다(시방서 기준).

일반적으로 병렬터널로 시공된 터널의 라이닝콘크리트의 시공은 『1일 콘크리트 타설-1일 양생』의 사이클로 양쪽터널을 교대로 반복하여 작업을 한다. 따라서, 터널 한쪽을 기준하면 2일에 한번씩 콘크리트를 타설하게 되므로 라이닝콘크리트 양생에 소요되는 시간은 20~24시간으로서 이 기간 동안에 콘크리트는 4MPa 이상의 강도를 발현하여야 한다(라이닝콘크리트 탈형강도 기준).

라이닝콘크리트의 작업 Cycle은 그림 3과 같이 콘크리트를 타설하고 양생한 후 탈형하는 과정을 되풀이 한다. 기존의 양생방법은 콘크리트를 타설한 후 수화과정에서



그림 4. 개선된 라이닝콘크리트 타설 Cycle

발생하는 수화열에 의존하므로 특별한 보온장치가 없다. 따라서, 여름철에 타설된 콘크리트는 양생온도가 높아서 초기강도가 충분히 발현되나 겨울철에 타설된 콘크리트는 터널내의 저온에 노출되어 있어 압축강도가 충분히 발현되지 않은 상태에서 시공 Cycle에 따라 작업이 진행되기도 한다.

### 2.3 개선된 양생시스템

당 현장에서는 기존의 양생시스템의 문제를 개선하여 표 1과 같이 새로운 Sliding Form을 만들었다. 개량된 양생시스템에 의하면 기존의 Sliding form 기능은 물론 환기, 통행차량 및 보온설비를 추가하였다. 그림 4의 시공 사이클대로 작업을 진행하므로 Sliding Form과 양생대차에 각각 보온양생할 수 있는 설비가 부착되어 있어 계절에 관계없이 균질한 콘크리트로 양생할 수 있다.

## 3. 라이닝콘크리트의 품질관리 기준 검토

### 3.1 라이닝콘크리트의 균열 원인분석

라이닝콘크리트에서 가장 많이 발생하는 불량중의 하

나가 균열이다. 라이닝콘크리트의 균열원인은 여러 가지가 복합되어 발생하지만, 최적의 설계와 좋은 재료의 사용 및 정확한 시공으로 균열을 감소시킬 수 있다. 특히, 시공상의 원인으로는 타설과 양생에 관한 항목으로 크게 나눌 수 있고, 이 중 천단부근에 발생하는 종단균열은 온도응력과 건조수축 및 조기탈형 등이 주요 요인이라 할 수 있겠다(그림 5).

### 3.2 라이닝콘크리트의 탈형강도 기준

#### 3.2.1 온도 응력과 콘크리트 강도

콘크리트는 온도가 상승하면 팽창하고 하강하면 수축한다. 온도에 의한 수축이 건조수축과 동시에 발생하면 균열이 발생할 우려가 크고, 균열이 발생하면 콘크리트의 안정성과 미관에 영향을 미치게 된다. 일반적으로 시공시의 온도영향에 대해서는 고려하지 않지만, 라이닝콘크리트의 균열발생을 최소화하기 위해서는 초기의 콘크리트부터 온도관리를 할 필요가 있다. 거푸집을 탈형했을 때 콘크리트의 내부온도가 터널내부의 온도로 수렴할 때는 그림 6과 같이 15~20℃ 정도로 하강한다. 따라서 이로인한 콘크리트의 온도응력  $f_{ck}$ 는 35~46kgf/cm<sup>2</sup> 정도가 발생한다.

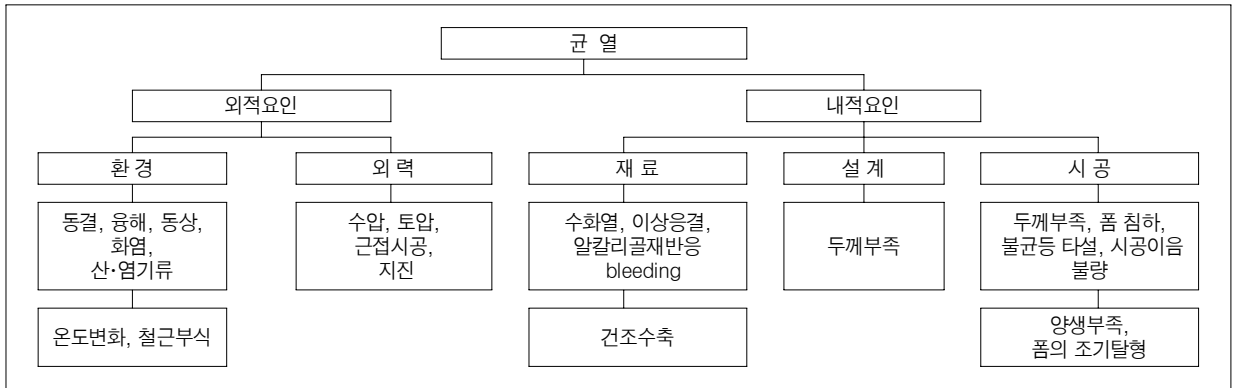


그림 5. 라이닝 콘크리트의 균열 원인분석(터널 학회지)

$$f_{ck} = \epsilon_c E_c = (\alpha t) E_c = 1 \times 10^{-5} \times (15 \sim 20) \times 2.3 \times 10^6 = 35 \sim 46 (\text{kgf/cm}^2)$$

### 3.2.2 라이닝 자중에 견딜 수 있는 콘크리트의 강도

터널표준시방서(한국터널공학회, 2009)에 의하면 콘크리트라이닝의 거푸집은 부여넣은 콘크리트의 강도가 3MPa 이상 발현된 후 또는 콘크리트 라이닝의 자중을 견딜 수 있는 강도가 발현된 후에 제거하여야 한다고 명시되어 있다. 여기서 명시한 3MPa 이상은 라이닝콘크리트의 두께가 30cm인 경우이고, 두께가 40cm인 경우는 4MPa 이상으로 검토되었다.

다음은 터널해석보고서에서 검토한 콘크리트 라이닝의 단면력과 응력이다.

<  $h = 0.4m$  및  $f_{ck} = 40 \text{ kgf/cm}^2 (= 400 \text{ tf/m}^2)$  일 때 >

$$\bullet f = \frac{P}{A} \pm \frac{M}{Z} = \frac{4.820}{0.400} \pm \frac{0.537}{0.02667} = 12.050 \pm 20.134 \text{ tonf/m}^2$$

$$\bullet \text{최대응력 } f_{\max} = 32.184 \text{ tonf/m}^2 < f_{ca} = 0.40 f_{ck} = 160.00 \text{ tonf/m}^2 \text{ (O.K)}$$

$$\bullet \text{최소응력 } f_{\min} = 8.084 \text{ tonf/m}^2 < f_{ca} = 0.42 \sqrt{f_{ck}} = 8.40 \text{ tonf/m}^2 \text{ (O.K)}$$

$$\bullet \tau = \frac{V}{A} = \frac{0.526}{0.400} = 1.315 \text{ tonf/m}^2 < \tau_a = 0.25 \sqrt{f_{ck}} = 5.00 \text{ tonf/m}^2 \text{ (O.K)}$$

### 3.2.3 라이닝콘크리트의 탈형강도 기준

타설한 라이닝콘크리트가 충분한 강도에 도달하기 전에 거푸집을 제거하면 타설한 콘크리트의 자중에 의해 균열이 발생할 수 있으므로, 콘크리트의 강도가 자중에 의한 응력보다 더 크게 발현한 이후에 거푸집을 제거하여야 한다.

위의 검토에서 탈형시의 콘크리트 강도는 시방서에 명기한 3MPa를 적용하기 보다는 4MPa를 적용하는 것이 라이닝의 균열을 방지하는데 효과적이라 판단되어서 본 연구에서는 4MPa를 기준으로 콘크리트 강도를 검토하였다.

## 4. 양생기준 설정을 위한 실내시험

### 4.1. 터널내부 및 콘크리트 내부의 온도 변화 측정

라이닝콘크리트 주변 온도의 변화가 콘크리트 강도에 미치는 영향을 검토하기 위해 터널내부와 콘크리트 내부의 온도변화를 측정하였다. 온도측정의 방법은 터널내부와 콘크리트내부에 온도센서를 장치하고 자동온도측정장치를 이용하여 경과시간별로 측정하였다. 라이닝 콘크리트를 타설하는 동안 계절별로 터널내의 기온과 타설한 라

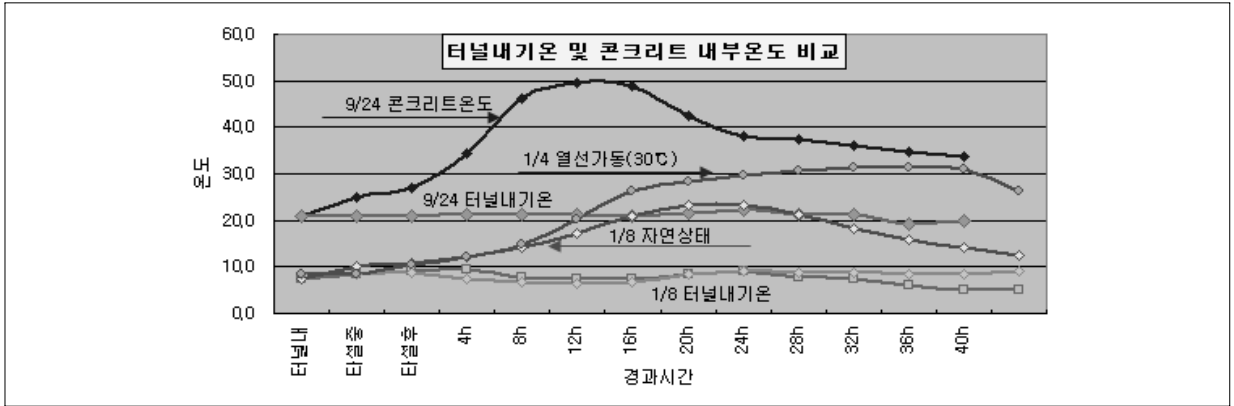


그림 6. 경과시간별 터널내와 콘크리트 내부의 온도 변화

이닝콘크리트의 내부온도를 비교하였다.

터널외부의 계절별 기온변화에 비교하면 터널내부의 온도변화는 크지 않지만, 터널내부의 온도도 계절별로 변화가 있었다. 터널내부의 온도는 가을철(9월)은 약 20°C를 조금 넘고, 겨울철(1월)은 10°C를 약간 하회하여 약 15°C의 온도차이를 보였다. 콘크리트 내부의 온도는 응결시에 발생하는 수화열에 의해 어느 정도 상승하다가 Sliding Form을 제거하면, 터널내부의 기온 영향으로 하강하며, 결국은 터널내의 기온으로 수렴하였다. 가을철은 자연상태로 방치하여도 콘크리트의 온도는 터널내 기온보다 약 30°C 높은 50°C까지 상승하였고, 터널내의 온도가 약 10°C인 겨울철에는 자연상태로 방치한 경우는 터널내 온도에 비해 약 15°C 정도 상승하다가 서서히 하강하였다. 이는 수화열에 의해 상승하던 콘크리트의 온도가 터널내부의 온도에 영향을 받아서 온도 상승의 폭이 적은 것으로 판단된다. 그래서 Sliding Form에 설치된 보온장치를 이용하여 콘크리트 표면온도를 30°C까지 상승하였더니 콘크리트의 온도는 30°C 정도를 유지하였다. 그림 6은 터널내 기온과 콘크리트 내부의 온도 변화를 가을과 겨울로 비교하였고, 겨울은 자연상태와 보온장치 가동상태의 온도변화를 비교하였다.

#### 4.2 시험실에서 시행한 양생온도별 콘크리트의 압축강도 시험

라이닝콘크리트용 거푸집은 타설한 콘크리트의 압축강도가 4MPa에 도달한 이후에 거푸집을 탈형하기 위하여 양생온도별로 콘크리트의 압축강도 변화를 측정하였다.

이 지역의 겨울철의 기온은 최저치가 영하 10°C 정도였으나, 터널내의 온도는 약 10°C 내외로 측정되었다. 시험은 가장 조건이 나쁜 겨울철을 기준하였다. 겨울철의 시방조건은 한중콘크리트의 시방기준에 의하고, 콘크리트는 생산에서 타설시까지 10°C 이상을 유지하였고, 양생기간에는 터널의 온도에 영향을 받기 때문에 양생조건을 최소 10°C부터 시작하였다. 따라서 양생온도는 10°C, 20°C, 30°C, 40°C로 설정하였다.

항온항습조에서 10°C, 20°C, 30°C, 40°C로 설정한 양생온도에서 각 재령별로 압축강도시험을 측정하였다. 재령은 18(19)시간, 24시간, 30시간, 48시간 및 72시간으로 하였고, 각 재령별로 압축강도시험은 6회 시행하여 평균하였다. 그러나 양생온도 30°C 이상에서는 압축강도가 4MPa 이상이 발현되어 30°C와 40°C의 양생온도에서는 다시 14시간부터 압축강도시험을 시행하였다. 양생온도별 각 재령에서의 평균압축강도시험결과는 표 2와 같고,

표 2. 양생온도별 각 재령에서의 평균압축강도(단위 : MPa)

양생온도	타설온도	Slump	Air	14Hr	16Hr	19Hr	24Hr	30Hr	48Hr	72Hr
10℃	11.3℃	15cm	3.6%	-	-	0.5	1.0	3.1	6.3	10.1
20℃	14.0℃	15cm	4.2%	-	-	3.2	5.3	7.5	13.1	15.4
30℃	11.7℃	15cm	4.0%	5.0	6.8	8.6	11.2	13.3	17.3	20.0
40℃	13.3℃	15cm	4.1%	7.8	10.1	12.8	16.8	18.6	21.7	24.6

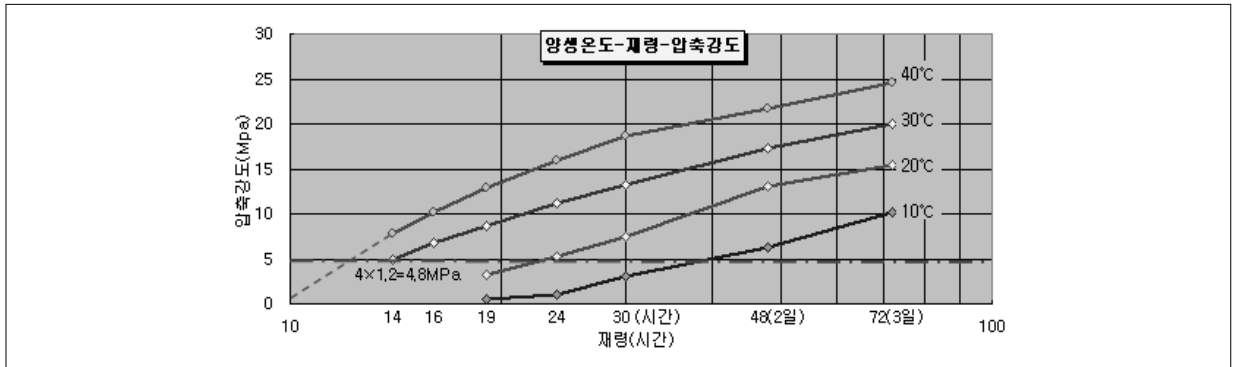


그림 7. 양생온도별 각 재령에서의 압축강도 변화

표 3. 압축강도 4.8MPa를 발휘하는 소요시간

양생온도	10℃	20℃	30℃	40℃	비고
소요시간(시간)	35	21	14	12	(그림8) 참조

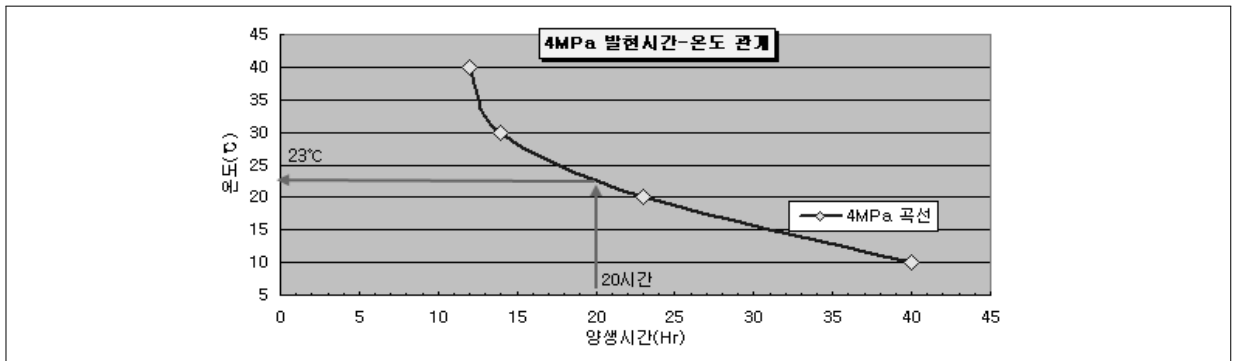


그림 8. 4MPa 압축강도를 발휘하는 양생시간과 온도의 관계

이를 그래프로 나타내면 그림 7과 같다.

#### 4.3 4MPa를 발휘하는 양생시간 및 양생온도

실내에서 항온항습조에 의해 시험한 조건과 현장에서

타설한 콘크리트와의 조건은 일치하지 않기 때문에 현장에서 4MPa에 해당하는 실내시험의 압축강도는 20% 증가한 4.8MPa를 기준하였다. 이는 콘크리트의 초기재령에서 강도변화는 매우 예민하기 때문에 항온항습장치처럼 정확한 온도관리가 되지 않은 현장상태를 감안한 것이

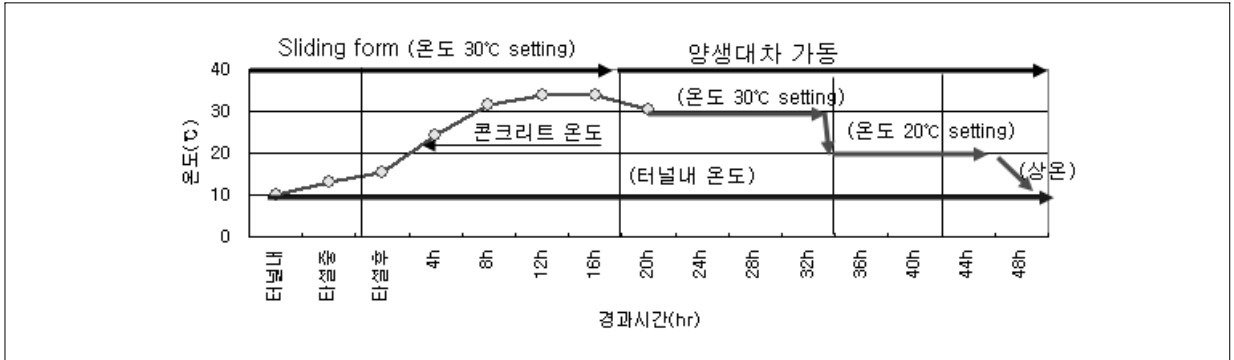


그림 9. 현장에서 콘크리트의 온도관리

다. 그림 7에서 압축강도 4.8MPa를 발휘하는 양생소요시간을 각 온도별로 찾아내었다.

30°C 이하에서는 그래프에서 찾을 수 있었으나 40°C에서는 비례식으로 추정하였고 그 결과는 그림 8에 나타내었다. 그림 8에서 라이닝콘크리트의 작업 Cycle에서 양생에 소요되는 시간인 20시간에 해당하는 평균양생온도는 23°C이었다. 따라서 23°C 이상으로 양생하여야 작업 Cycle에 적합함을 알 수 있다.

이때 보온양생의 온도는 최소 23°C 이상이나, 충분한 강도 발현을 위하여 30°C로 설정하고, 거푸집 탈형시는 양생대차를 이용하여 30°C로 약 15시간 정도 양생하고, 다시 20°C로 낮추어 12시간정도 유지하다가 상온으로 하강하였다. 이는 콘크리트 온도가 30°C에서 10°C로 급격히 하강할 때 발생하는 온도응력으로 인한 균열발생을 방지하기 위한 완충 조치였다.

## 5. 양생조건 확인을 위한 현장시험

### 5.1 현장에서의 양생온도 관리 기준

겨울철은 터널외부의 온도가 영하 10°C 정도 되더라도 터널내의 기온은 10°C에 약간 못미치는 정도였고, 터널내의 기온이 10°C 이하일 때는 수화열에 의한 콘크리트의 내부온도 상승이 미미하였으므로(그림 6), 터널내의 기온이 낮을 때는 콘크리트의 양생온도를 일정하게 유지하기 위하여 Sliding Form에 부착한 보온장치를 가동하였다.

보온장치의 가동온도는 『양생온도-압축강도 시험』에서 라이닝콘크리트의 내부온도를 23°C 이상 유지하여야 하므로 시공 Cycle에 맞추어 그림 9와 같이 시행하였다.

### 5.2 라이닝콘크리트의 압축강도 확인

라이닝콘크리트를 타설한 후 그림 9와 같이 양생하였을 때, 콘크리트 타설 후 20시간이 경과한 후 거푸집을 탈형하고, Core를 채취하여 성형하고, 압축강도를 시험하였다. 이때의 Core 압축강도는 타설 후 28시간이 경과한 시점에서 시행되었는데 Core 평균압축강도는 6.0MPa로서 온도균열과 자중에 의한 처짐균열이 발생하지 않는 강도를 충분히 발휘할 수 있음을 확인하였다.

또, 콘크리트의 설계강도의 확인을 위해 재령 7일과 28일의 압축강도를 확인하였다. 겨울철(1월)에 양생한 라이닝콘크리트의 평균압축강도시험 결과는 재령 7일에서는 23.7MPa, 재령 28일에서는 32.8MPa이 발휘되어 라이닝콘크리트의 기준인 24MPa를 만족한다는 것을 확인하였다. 재령 28일에서 실제 발현한 콘크리트의 압축강도가



설계강도에 비하여 상당량 높게 나타난 것은 거푸집의 탈형강도를 20시간에 4MPa이 발현되도록 배합설계하였기 때문이다.

## 6. 결론

병렬터널에서 동시시공으로 라이닝콘크리트를 타설할 때는 양쪽터널을 교대로 반복하여 작업하는 방법을 선택하였다. 당 현장에서는 터널굴착과 라이닝콘크리트의 동시시공을 시행하기 위하여 환기설비와 작업차량이 통과 되도록 기존의 Sliding Form을 개선하였고, 동절기에 대비하여 Form 자체에 열선을 배치하여 콘크리트를 보온양생할 수 있는 새로운 개념의 Sliding Forming을 제작하여 사용하였고, 양생대차를 별도로 제작하여 운행하였다. 다음은 연구 결과를 정리한 것이다.

- (1) 라이닝콘크리트의 거푸집을 탈형하는 시간은 시공 Cycle에 의해 20시간을 기준하였다.
- (2) 거푸집 탈형시기는 콘크리트 강도가 온도변화에 영향받지 않고, 라이닝콘크리트의 자중에 견딜 수 있는 강도인 4MPa을 기준하였다.

- (3) 수화열의 발생에도 불구하고 터널내부의 온도가 낮으면 콘크리트 내부 온도의 상승폭이 낮았다.
- (4) 실내에서 항온항습장치로 시험한 결과 양생온도가 높을수록 압축강도가 크게 나타났다.
- (5) 양생시간 20시간에 4MPa을 발현하는 양생온도는 23℃ 이상이였다.
- (6) 콘크리트를 타설한 후 계획대로 양생한 후, 거푸집을 탈형한 후의 Core 압축강도를 확인한 결과는 6.0MPa로서 온도균열과 라이닝콘크리트의 자중에 의한 균열이 발생하지 않는 강도를 충분히 발현하고 있었다.
- (7) 라이닝 콘크리트의 재령 28일 압축강도가 32.8MPa로서 설계강도 이상이 발현되고 있었다.

## 참고문헌

1. 철근콘크리트(2001. 변동균외, 동명사).
2. NATM 이론과 실제(2006. 김용하외, 구미서관).
3. 터널표준시방서(2009. 국토해양부, (사)한국터널공학회).
4. NATM터널 굴착·라이닝 동시시공 공법(2009. 김장득외, 논문).
5. NATM에서의 콘크리트라이닝 시공시 유의점과 대책에 대한 고찰(2009. 요시오미타라시외, 터널 학회지).
6. 경주~감포2국도건설공사의 터널해석보고서, p. 738 (2005. 부산지방국토관리청).