



차광막을 이용한 하절기 콘크리트포장의 초기온도 관리 방안연구

A Study for Controlling Early-age Temperature Rise of the Concrete Pavement by Shadow Tent in Hot Weather Construction

조 영 오* 김 형 배** 서 영 찬*** 안 성 순****
 Joh, Young Oh Kim, Hyung Bae Suh, Young Chan Ann, Sung Soon

Abstract

Long term performance of concrete pavement significantly depends on the given construction and environmental condition. It means that random cracks and extreme crack width due to inappropriate quality control at the early age might lead to decreasing the pavement service life. The temperature and moisture during the construction, cement and aggregate types, curing condition are major components to affect the quality of the concrete pavement at the early age. First of all, the high temperature differential, that is made by increasing air temperature and the heat of cement hydration, is known as the major contributor to severe cracks.

In this study, tent covering was used for controlling temperature of the concrete slab. The field measurement data indicates that the effect of the tent covering is very significant to decrease possibilities of random crack occurrence and curling stress and enhance the long-term concrete strength. HIPERPAV(High PERformance PAVing software), a program predicting the strength and stress of an early-age concrete pavement (72 hour after placement), is used for simulating the effects of tent covering. The HIPERPAVE results showed that the section with the tent covering has higher reliability than the section without the tent covering by 22.5%. In details, reliability is increased 72.5% (without the tent covering) to 95% (with the tent covering).

Keywords : crack, tent covering, curling stress, concrete strength, reliability

요 지

콘크리트 포장의 장기 공용성은 시공조건과 환경조건에 크게 좌우된다. 즉 초기에 무작위 균열이나 균열틈이 많이 벌어진 경우 포장수명을 저감시키는 원인이 된다. 시공당시의 온도와 습도, 시멘트와 골재의 종류, 양생조건들은 콘

* (주)로드코리아 대리
 ** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원
 *** 정회원 · 한양대학교 교통공학과 교수
 **** 정회원 · 도로교통기술원 원장

크리트포장의 품질에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 그 중에서도 대기온도와 수화열의 증가에 의한 높은 온도차이는 심각한 초기균열을 발생시키는 원인이 되는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 차광막을 사용하여 콘크리트 슬래브의 온도를 제어하여 초기균열이 발생할 가능성을 낮추고 슬래브 깊이의 온도차이에 의해 발생하는 curling stress를 줄일 수 있었고, 강도에 있어서는 차광막 설치 구간이 일반시공 구간보다 장기강도를 크게 할 수 있음을 확인하였다. 또한 콘크리트포장의 포설 후 72시간의 강도 및 응력을 예측하는 프로그램인 HIPERPAV를 사용하여 초기에 균열이 발생할 가능성을 비교해본 결과 차광막을 설치한 구간이 본 시험시공의 예에서 균열이 발생하지 않을 가능성(reliability)이 차광막을 설치하지 않은 구간(일반시공구간) 72.5%, 차광막 설치 구간 95%로 나타나 차광막 설치 구간이 차광막을 설치하지 않은 구간보다 균열이 발생하지 않을 가능성을 크게 증가시킬 수 있을 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 초기균열, 차광막, curling stress, 강도, 신뢰성

1. 서론

국내의 고속도로는 88고속도로의 개통 이후부터 대부분 콘크리트포장으로 시공되어 왔다. 그동안 콘크리트포장의 설계, 시공 및 재료 등에 관한 연구는 활발히 수행되어 왔지만 장기적인 공용성에 중요한 영향을 주는 초기균열거동에 관한 연구는 매우 빈약한 상태라고 할 수 있다. 콘크리트포장의 장기적인 공용성은 그 포장의 초기재령의 상태에 크게 좌우된다. 즉 초기균열이 많거나 균열틈이 많이 벌어진 경우 그 포장의 장기 공용성은 그렇지 않은 포장에 비해 크게 떨어질 수밖에 없다. 이러한 초기재령의 상태는 시공시기, 재료조건, 설계조건, 시공 직후의 온도 및 습도 조건 등에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다. 그 중에서도 콘크리트포장의 포설 이후 초기에 발생하는 균열은 대부분 시멘트의 수화작용과 포설 당시 외부온도 조건간의 관계, 또는 콘크리트의 수분 증발 등에 의해서 발생한다.

본 연구는 시공직후 직사광선으로부터 콘크리트의 급격한 온도상승 및 건조량을 줄이기 위한 차광막의 효과를 확인하기 위한 연구로서 하루 중 최고기온이 너무 높거나 일교차가 심하여 초기 슬래브 온도 상승 폭이 높고 야간의 온도저하로 인한 온도하강 편차가 심해질 우려가 있을 경우에 대한 적절한 방안을 검토하고자 하는 것이다. 따라서, 시공 시 콘크리트 슬래

브의 과도한 온도 상승 방지 방안을 검토하고 온도상승 억제방법에 대한 효과 검증 및 차광막 설치에 따른 양생 효과, 온도 및 일사량의 변화를 관찰하였다.

콘크리트 슬래브에 차광막을 설치하여 각각의 온도패턴을 깊이별, 차광막 유무별(차광막, 일반시공)로 비교하였으며, 차광막을 설치하여 얻은 초기온도 패턴과 강도를 HIPERPAV Program에 적용하여 차광막과 일반시공구간을 비교하였다.

2. 실험

2.1 계측기기

1) i-Button

콘크리트 슬래브의 온도를 측정하기 위해서 사용한 다. 측정 가능한 온도범위는 $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ 로 0.5°C 단위로 증감하며, 정확도는 $-20^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ 에서 오차 범위는 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 이다. i-Button은 별도의 로거를 필요로 하지 않으며 자체 저장기능이 있어 실험기간이 완료된 이후 한번의 접속으로 실험기간 중의 온도이력을 확보할 수 있는 장점이 있다(박대근, 2002).

본 시험시공에서는 콘크리트 슬래브에 설치하는 콘크리트 패이버에 의한 기계포설이 이루어짐으로 작업의 용이성을 위해 그림 1과 같은 i-button 거치대

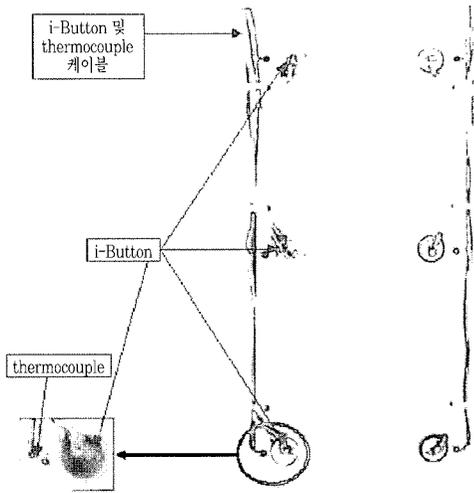


그림 1. 콘크리트 슬래브용 i-Button 거치대

를 별도 제작하여 포설 직후 굳기 전의 콘크리트 슬래브에 삽입하는 방법으로 콘크리트 슬래브 표면으로부터 각각 3cm(상부), 15cm(중앙부), 27cm(하부)에서 측정할 수 있도록 하여 일정한 깊이에서 온도를 측정할 수 있게 하였다.

2) 태양광 차광막

보조기층의 온도와 슬래브의 온도 상승 억제를 위해서 설치하며, 본 실험을 위하여 콘크리트 슬래브 두개를 동시에 차단할 수 있는 크기(12m×6m)를



그림 2. 차광막

사용하였다.

3) 비파괴 강도시험

초음파를 이용하여 두개의 탐촉자 사이의 속도를 이용하는 방법으로 탐촉자 사이의 간격은 30cm, 슬래브에서 55cm 떨어진 곳에서 측정을 하였다. 펄스의 발생시키는 전압은 250V, 500V, 1200V 가 있고 본 실험에는 500V의 펄스를 발생시켰다. 측정항목으로 속도를 선택하였고 미리 정해둔 측정 길이와 측정 시 기록된 통과시간으로 속도를 구하게 된다.



그림 3. PUNDIT

2.2 실험방법

콘크리트 슬래브의 온도를 조절하여 콘크리트슬래브의 초기균열을 억제하기 위하여 차광막을 설치하였다. 설치위치는 하루의 오전시공 부분이었다.

콘크리트 슬래브가 시공이 되면, 패이버가 지나가고 타이닝 하기 전에 i-button 거치대를 슬래브에 설치한다. 주의사항은 거치대를 슬래브에 설치할 때 플라스틱이므로 슬래브에 바로 설치하지 않고 거치대가 들어갈 수 있게 철근으로 설치될 자리를 확보하고, 타이닝시에 전선이 타이닝에 걸리지 않도록 타이닝 깊이보다 깊게 매설을 한 후, 양생제가 살포된 직후에 차광막을 설치하고 대기온도 측정을 위한 온도계(i-button)를 차광막 내부에 설치하였다.

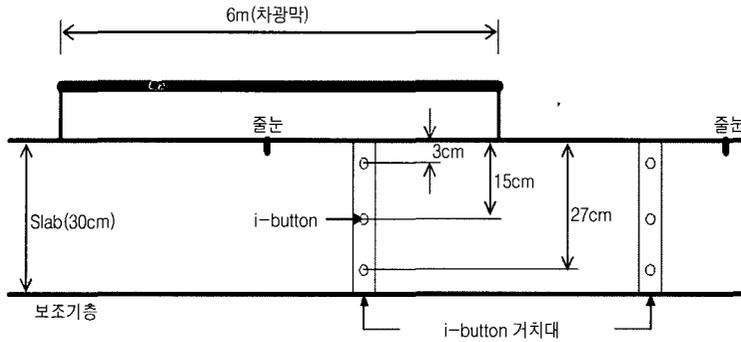


그림 4. 콘크리트슬래브에서의 i-Button 거치대 설치

3. 문헌고찰

3.1 온도조건과 수화열

시멘트는 물과 만나면 수화과정에서 에너지를 방출하며 이 에너지는 열을 발생시켜 양생중 콘크리트의 온도를 상승시키는 작용을 한다. 같은 배합조건에서 수화열의 발생률은 시간의 경과에 따라 다르며 시멘트의 주성분인 Tricalcium Silicate의 시간경과에 따른 수화열의 발생률을 나타낸다. 시멘트의 다른 성분도 이와 비슷한 패턴으로 수화열을 발생시킨다. 수화열은 일정시간의 휴지기를 지나 본격적으로 증가

했다가 다시 감소한다.

반응 초기에도 높은 수화열이 발생하나 약 15분 이내에 끝나므로 콘크리트의 온도 증가에는 별로 영향을 주지 못한다(Mindess et al, 1981).

여기서 강조할 사항은 그림 5와 같이 수화열이 본격적으로 발생하는 시기는 시멘트가 물과 혼합된 직후가 아니라 일정시간이 경과한 후라는 점이다.

수화열 발생률에 관한 또 하나의 중요한 사항은 수화열의 발생속도나 최대 수화열의 크기가 외부의 온도 조건에 크게 영향을 받는다는 점이다. 그 이유는 시멘트의 수화가 일종의 화학반응이기 때문이다. 즉, 그림 6에서 주변 온도가 높으면 수화는 빨리 진행되

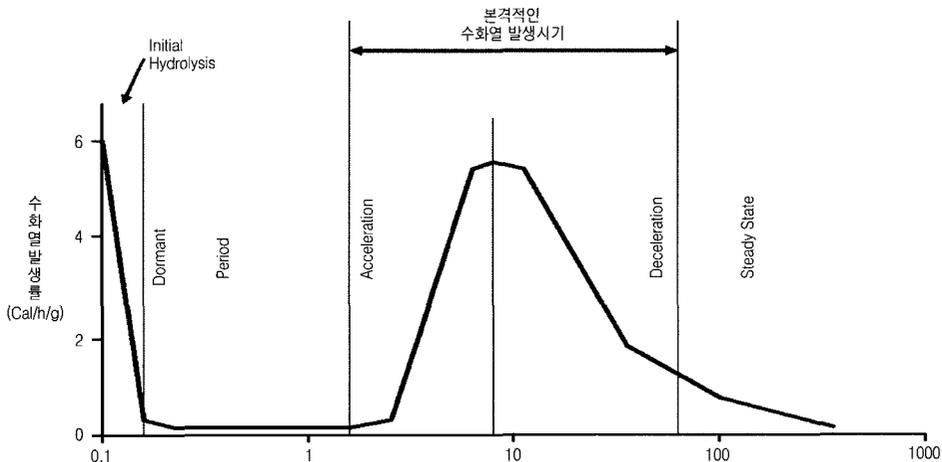


그림 5. 시멘트 주성분의 시간에 따른 수화열 발생률

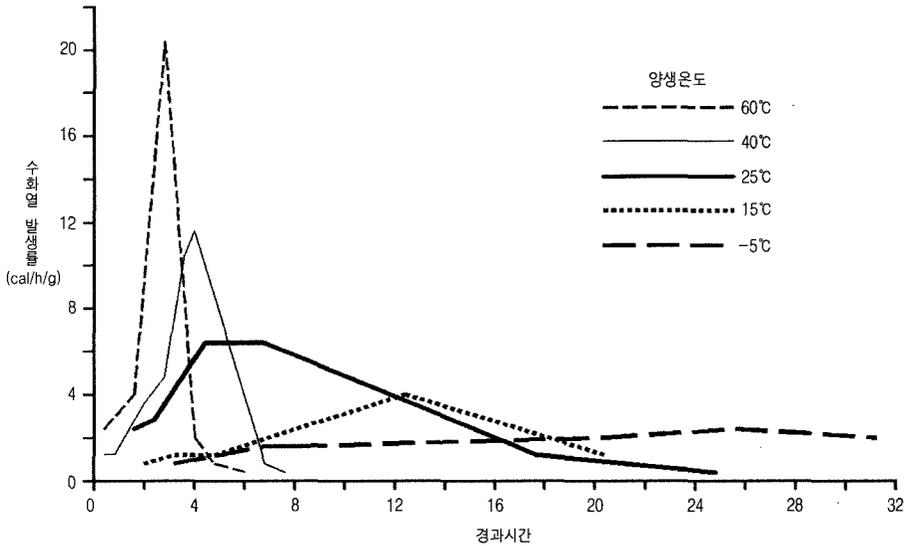


그림 6. 주변온도 조건이 최대수화열의 크기와 발생시기에 미치는 영향

고 최대 수화열도 빨리 발생하며 그 크기도 크며, 반대로 외부온도가 낮으면 수화는 비교적 천천히 진행되어 최대 수화열의 발생시기가 늦어지며 그 크기도 비교적 작다(Samarai et al, 1992).

그러므로 콘크리트 포설시의 주변온도 조건은 수화열의 발생패턴을 결정하는 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 여기서 주변온도라 함은 대기온도, 콘크리트 혼합물의 온도, 태양의 복사열 등을 총칭하는 것이다.

3.3 양생온도의 영향

양생온도를 높이면 수화에 따른 화학반응을 촉진시켜 후기재령에서 강도에 나쁜 영향을 주지 않고 콘크리트의 초기강도에 유리한 영향을 준다고 알려져 왔다. 그러나 콘크리트를 포설할 때나 응결기간 중에 높은 온도를 유지하면 초기강도는 증가하지만 대략 7일 이후의 강도에는 불리하다. 이것은 초기의 급속한 수화반응에 의해 대개는 빈약한 구조의 다공질 화학생성물이 만들어져 대부분의 기공이 채워지지 않고 그대로 남아 있기 때문이라고 알려져 있다.

초기의 고온이 후기재령에서의 강도에 불리한 영

향을 주는가에 대한 문제의 설명에서는, 초기의 높은 온도로 급속히 수화시키면 그 후의 수화반응이 지연되어 페이스트 내의 수화생성물의 분포가 불균일하게 되기 때문이라고 기술하고 있다(Verbeck et al, 1968). 그 이유는, 초기의 급속한 수화반응에서는 시멘트 입자로부터의 수화생성물이 확산되고, 또 조직의 간격을 균등하게 채워나가는 데 필요한 충분한 시간이 없기 때문이다. 그 결과로 수화생성물이 수화반응 중의 시멘트입자의 둘레에 집중적으로 만들어져 그 후의 수화반응을 지연시키므로 장기강도에 불리하게 작용하게 되는 것이다.

그림 7은 비변진 후부터 2시간 사이의 온도가 콘크리트의 강도증진에 어떤 영향을 주는가에 대하여 물·시멘트비 0.53의 콘크리트에 대한 실험결과이다(Price, 1951). 실험한 온도의 범위는 4~46°C로 재령 2시간 이후에는 모든 공시체를 21°C에서 양생하였고, 공시체는 수분의 이동을 막기 위하여 밀봉하였다.

3.4 컬링

콘크리트 슬래브의 상부의 온도가 하단보다 낮을

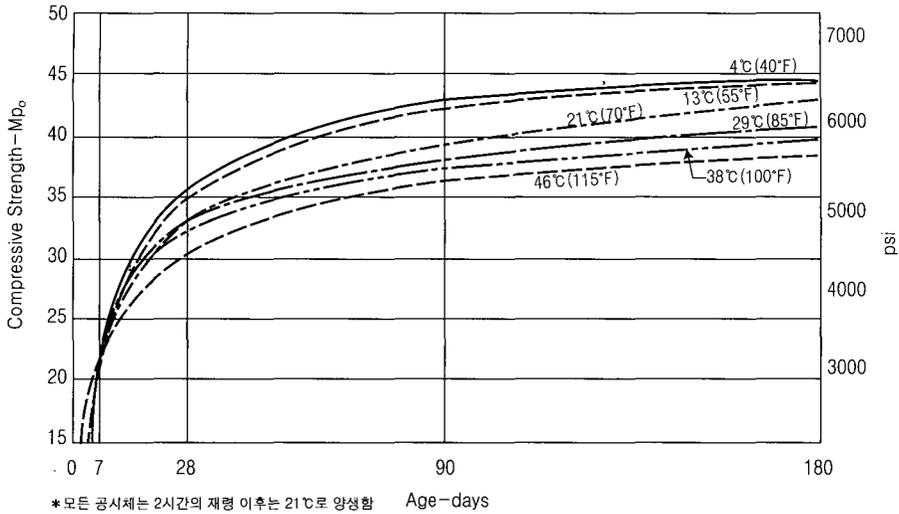


그림 7. 강도발현에 미치는 포설 이후 최초 2시간의 온도 영향

경우에는 콘크리트 슬래브의 상부에서는 압축이 발생하고 하부에서는 인장이 발생하여 그림 8a와 같이 포장단부가 위로 밀려 올라가며, 반대로 포장 슬래브의 상단의 온도가 하단의 온도보다 높을 경우 상부에서는 인장이 발생하고 하부에 압축이 발생하여 그림 8b와 같이 아래로 밀려진다.

하절기 오전의 콘크리트 슬래브는 오후보다는 낮은 온도에서 시공을 하기 때문에 콘크리트 슬래브의 상부와 하부의 온도차이가 작지만, 시공을 한 후 3시간 정도가 지나게 되면 Set-Time이 지나면서 콘크리트 슬래브는 고체 상태로 변화된다. 이와 동시에 대기온도는 상승을 하고 콘크리트 슬래브의 상부의 온도도 상승하게 되면서 상부에서는 인장이 발생하고 하부에서는 압축이 발생하여 아래로 말려지고 인장 부분에 균열이 발생할 가능성을 갖는다.

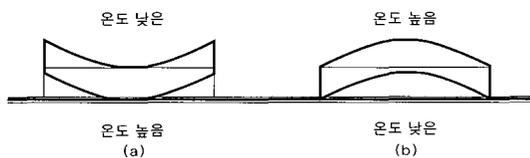


그림 8. 온도차에 따른 콘크리트 슬래브의 변형

3.5 콘크리트 표면 강도

콘크리트 혼합물은 타설 후 시간이 경과함에 따라 2가지 물성을 나타낸다. 즉 초기에는 타설 작업이 가능한 소성체(Plastic) 성질을 가지며 그 후 전이단계(Transition)를 거쳐 고체 특성인 탄성 거동을 하게 된다(McCullough, 1999). 여기서 고체 특성을 갖기 시작하는 시기를 초결(Initial Setting Time)이라 하며, 이때의 온도를 Setting Temperature라 한다. 이 두 가지 요소는 콘크리트 초기거동 해석에 있어 매우 중요한 의미를 가진다. 초결 이후 포장체는 고체물성을 가지게 된다. 이때부터 콘크리트의 강도 및 응력이 발생하게 되며 이는 물성해석에 중요한 시기이다. Setting Temperature는 이때의 온도를 기준(Reference Temp.)으로 슬래브 온도가 상승(Temp. Rise)하게 되면 슬래브는 압축응력이 발생하고, 반대로 온도가 하락(Temp. Drop)하게 되면 슬래브는 인장응력이 발생한다. 위의 내용을 그래프화한 것이 그림 9와 같다.

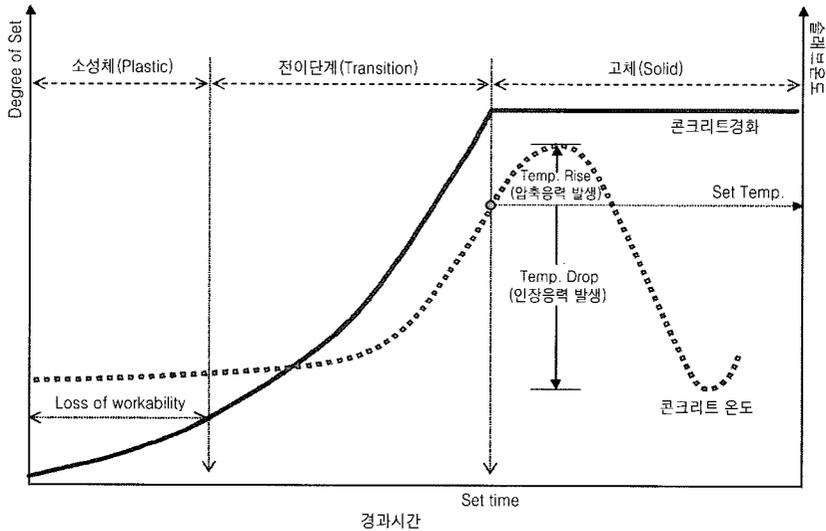


그림 9. 콘크리트 포설 후 물성 및 온도변화(Initial Setting Time, Setting Temperature)

4. 실험수행 및 결과분석

4.1 실험 구간별 비교

현장실험은 중부내륙 고속도로 상주 구간에서 2003년 8월 15일에 실시되었다. 시공은 오전 9시에 시작되었으며, 세 번째와 네 번째 콘크리트 슬래브 사이에 차광막을 설치하였다. 차광막을 설치한 콘크리트 슬래브의 시공 시작은 오전 10시 17분이며 페이바가 지나간 후 바로 i-button 거치대를 설치하였다. 차광막은 타이닝을 하고 양생제를 살포한 후 오후 11시 50분에 설치하였으며, 24시간동안 차광막을 설치하고 거동을 측정하였다. 그림 10은 차광막 설치구간 및 일반시공 구간에서 콘크리트 슬래브 상부(3cm)의 온도변화를 보여주고 있다. 콘크리트 슬래브 시공 후 일반시공 구간에서는 온도가 급속히 올라가서 최고 43℃까지 상승한 반면 차광막 설치 구간에서는 그 시점에서 온도가 가장 낮게 나타났으며, 최고온도는 일반구간보다 늦게 올라가는 현상을 보여 최고온도의 차이는 9℃정도로 나타났다. 또한, 일반시공 구간의 최고, 최저 온도차이는 14℃, 차광막 설치 구간은 5.5℃로 9.5℃ 정도 차이가 났다. 이는

태양광 차광막이 한 여름철의 무더위상황에서 콘크리트 포장이 급격하게 수화반응을 하여 지나치게 초기강도가 상승하는 것을 억제하는 데 효과가 있음을 보여주는 것일 뿐 아니라 슬래브 온도 변화 폭을 상당히 낮추어 줌으로서 콘크리트가 종결시점을 지난 이후에 지나친 수축과 팽창거동이 발생하지 않도록 하여 초기 균열억제에도 큰 효과가 있다는 사실도 간접적으로 증명하는 것이라 할 수 있다.

중양부(15cm)의 경우 차광막을 설치한 곳에서는 초반에 콘크리트 내부 온도가 차광막의 영향으로 대기로 원활히 발산을 하지 못하고 내부온도 전도효율이 늦어지면서 차광막을 설치한 부분에서 온도가 오히려 높게 나타나는 경향을 보였으나 슬래브의 수화 온도열이 증가하기 시작하면서 일반시공 구간 슬래브 온도가 보다 급격히 상승하는 현상을 보였다(그림 11). 일반시공 구간의 최고온도는 43℃이고, 차광막 설치 구간은 38℃로 5℃ 차이가 났으며 최고온도까지 올라가는 시간은 일반시공 구간의 경우 16시 50분(시공 후 6시간 30분 경과)이고, 차광막 설치 구간은 18시 16분(시공 후 8시간 경과)으로 차광막 설치구간의 온도변화 속도가 훨씬 느리고 적었다. 최고 및 최저 온도차이는 일반시공 구간의 경우 10℃,

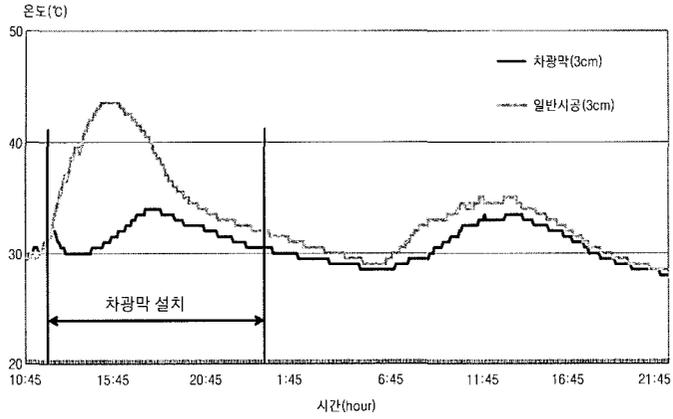


그림 10. 상부(3cm) 온도패턴

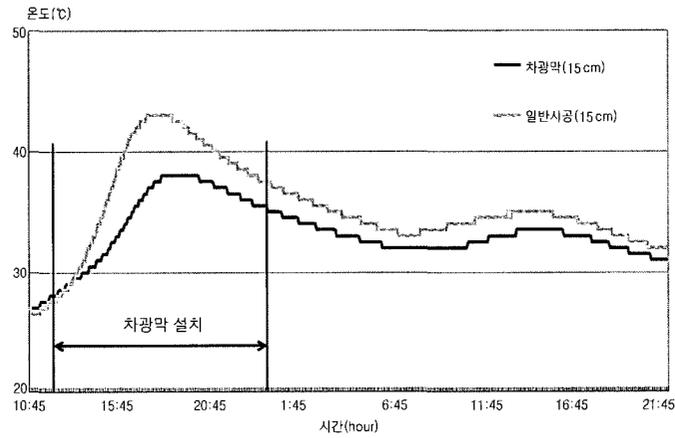


그림 11. 중앙부(15cm) 온도 패턴

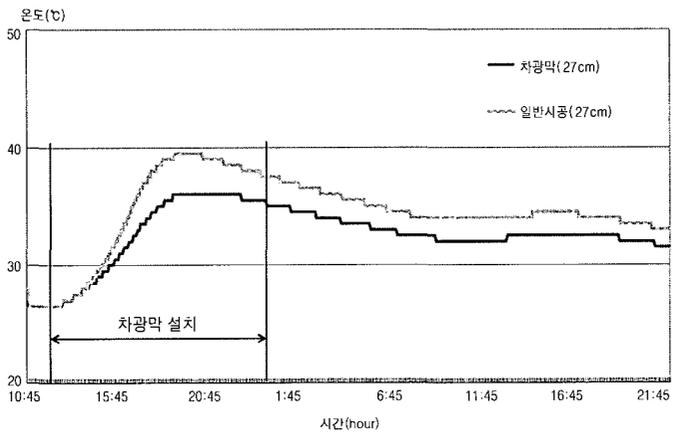


그림 12. 하부(27cm) 온도패턴

표 1. 실험 구간별 최고온도와 최저온도

		최 고 온 도		최저온도(℃)	온 도 차(℃)
		온 도(℃)	시 간		
상 부	일반시공	43	15:40	29	14
	차광막	34	17:31	28.5	5.5
중양부	일반시공	43	16:50	33	10
	차광막	38	18:16	32	6
하 부	일반시공	39.5	18:35	34	5.5
	차광막	36	19:01	32	4

차광막 설치 구간은 6℃로 측정되었다.

그림 10, 11, 12를 통해서 상부(3cm)에서 하부로 내려올수록 일반시공 구간과 차광막 설치 구간의 온도 차이가 적어지는 것을 알 수 있는데, 하부(27cm)의 경우 일반시공 구간의 최고온도는 39.5℃이고, 차광막 설치 구간은 36℃로 3.5℃ 차이가 나며 최고 온도까지 올라가는 시간은 일반시공 구간의 경우 시공 후 9시간 정도가 경과한 19시 6분이고, 차광막 설치 구간은 19시 1분이었다. 최고온도와 최저온도의 차이는 일반시공 구간의 경우 5.5℃, 차광막 설치 구간은 4℃로 측정되었다.

일반시공 구간의 콘크리트 슬래브의 온도 낙차폭이 차광막 설치 구간의 온도 낙차폭보다 크게 나타났다. 일반적으로 이러한 온도 낙차폭은 콘크리트에 발생하는 인장응력의 크기를 비교적 합리적으로 가늠할 수 있는 요소로 알려져 있다. 온도 낙차폭이 크다는 것은 온도가 최고점까지 상승하였다가 큰 폭으로 떨어진다는 것을 의미하는데, 이때 감소되는 온도가 콘크리트 슬래브를 수축시키게 되어 콘크리트 슬래브 내부에서는 인장응력이 발생한다는 것이다. 이러한 인장응력이 콘크리트 슬래브의 강도보다 커지게 되면 균열이 발생하게 된다. 따라서 차광막을 설치한 경우에 콘크리트 슬래브의 온도와 인장응력을 감소시켜 초기에 발생하는 균열을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 깊이별 비교

오전 10시 17분에 콘크리트 슬래브 시공에 들어갔으며 차광막은 11시 50분에 설치하였다. 차광막 설치 구간의 상부(3cm)의 온도변화는 29.5℃에서 33.5℃, 하부(27cm)에서의 온도변화는 26.5℃에서 36℃로 나타났고, 일반시공 구간의 경우의 상부(3cm)의 온도변화는 29.5℃에서 44℃, 하부(27cm)에서의 온도변화는 26.5℃에서 약 40℃로 차광막 설치 구간보다 넓은 온도 분포를 보였다(그림 13). 표 2에서 직사광선이 가장 강한 13시부터 16시까지 온도를 보면, 차광막 설치 구간의 상부와 하부의 온도차이가 1℃, 일반시공 구간의 경우는 날씨가 맑아 일사량을 많이 받아서 상부와 하부의 온도 차이가 13.5℃가 나는 것을 알 수 있다.

13시 이후에 상부(3cm)와 하부(27cm)에서의 온도차를 보면 일반시공 구간의 경우가 차광막 설치 구간보다 크게 나타나는 것을 확인하였다. 초결시점을 기준으로 콘크리트 슬래브의 온도경사가 커지면 상부에 인장이 발생하는 downward 컬링이 발생하고 온도경사가 작아지면 upward 컬링이 하부에 인장이 발생하게 된다. 차광막 설치 구간의 경우가 초결시점에서 온도경사의 절대값이 일반시공 구간보다 상당히 적게 되어서 향후 온도변화에 따른 curling 응력이 보다 적게 발생하게 되며 이는 콘크리트 포장의 장기 공용수명 증진에 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

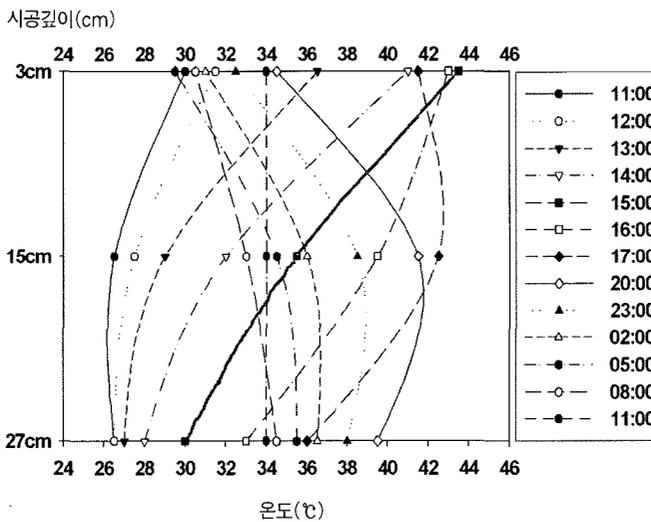
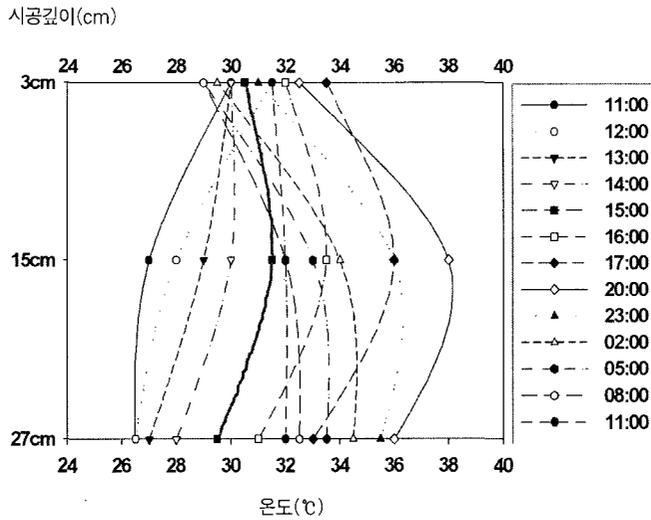


그림 13. 차광막(상) · 일반시공(하) 구간의 깊이별 온도 패턴

표 2. 차광막과 일반시공 구간의 상부와 하부 온도차이

시 간	11시	12시	13시	14시	15시	16시	17시	20시	23시	2시	5시	8시	11시
차 광 막	3.5	5	3	2	1	1	0.5	3.5	4.5	5	4.5	3.5	0.5
일반시공	3.5	5	9.5	13	13.5	10	5.5	5	5.5	5.5	6	4	0

4.3 표면 강도 시험

콘크리트 슬래브의 표면강도를 PUNDIT를 사용

하여 탐촉자에 전달되는 초음파 속도를 측정하였다 (그림 14). 차광막 설치 구간의 슬래브는 10시 17분에 시공하였으며, 차광막의 설치는 11시 40분에 하

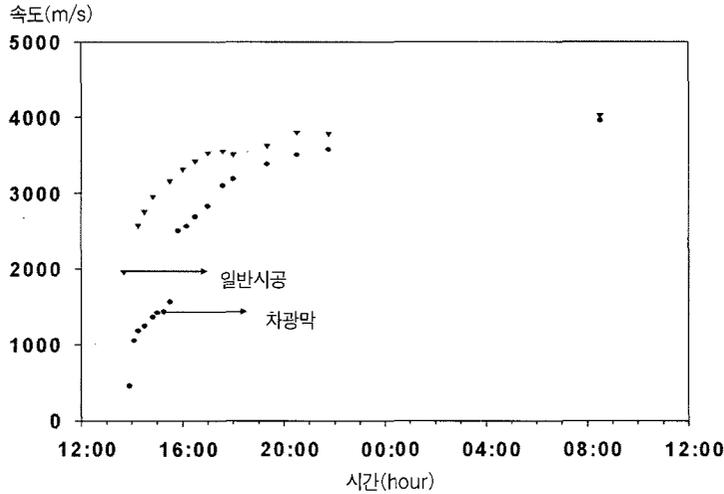


그림 14. PV(Pulse Velocity) 측정 값

표 3. 재량에 따른 초음파 전달속도(m/sec)

	1일	6일	30일	60일	95일
일반시공	4,027	4,636	4,667	4,712	4,777
차광막	3,959	4,746	4,854	4,892	4,934

였다. 약 3시간 후에 PV(Pulse Velocity) 측정하였고, 일반시공의 경우 13시 40분에 1966m/s로 측정되었고, 차광막 설치 구간은 13시 55분에 463m/s에서 14시 5분에 1058m/s로 증가하였다.

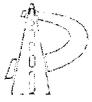
PV측정은 차광막과 일반시공에서 3개 지점씩 측정하여 평균값을 사용하였다. 그림 14에서 포설 후 3시간이 경과된 이후 초음파 속도 또한 급격히 증가함을 나타내었으나, 슬래브 온도는 이 시기 이후에도 계속하여 상승하는 경향을 나타내었다. 단정적 결론을 내릴 순 없으나, 측정값을 분석해 보면 콘크리트의 초결은 포설 후 3시간 이후부터 시작이 되었다는 것을 유추할 수가 있다. 차광막을 설치한 곳이 일사량의 영향을 적게 받아서 일반시공한 곳 보다 강도가 늦게 발현되었고, 24시간에서의 강도는 일반시공 구간의 강도와 비슷하게 나타났다. 95일 까지 측정된 결과 24시간 이후에는 차광막 설치 구간에서의 강도 발현 속도가 일반시공 구간보다 빠르게 나타나는 것

을 알 수 있었다. 표 3에서와 같이 차광막을 설치하여 시공 초기에 양생온도를 저감시킴으로써 콘크리트 슬래브의 빠른 강도발현 속도를 막고, 장기 강도를 높일 수 있었다.

4.4 차광막 효과의 HIPERPAV Program 적용

4.4.1 신뢰성

신뢰성은 일종의 안전율 개념으로써, 프로그램을 통한 시뮬레이션을 수행함에 안전성을 얼마나 고려할 것인가를 상대적인 수치(%)로 나타낸 것이다. 또한 프로그램에서 제공되지 않는 상황 혹은 고려하지 못한 변수들을 반영해 주는 항목으로써, 매우 높은 등급의 도로나 시공상 엄격한 품질 관리를 한다면 그 값을 크게 설정할 수 있다. 반대로 등급이 낮은 도로를 시공하거나, 일반적인 품질관리 기준이라면 입력 변수 값의 크기는 상대적으로 작은 값을 입력해야 할



것이다. HIPERPAV 프로그램에서는 내부 Logic에 의해 예측된 강도 및 응력은 안전률 개념을 도입하여 예측된 강도 및 응력에 정규분포를 적용하여 값을 조정하게 된다(McCullough, 1999). 식 (1) 및 식 (2)는 위의 개념이 적용된 것을 나타낸다.

$$S = S_{actual} \times \left[1 - \left(\frac{z(R) * CV_S}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (1)$$

$$\sigma = \sigma_{actual} \times \left(\frac{z(R) * CV_\sigma}{\sqrt{2}} \right) \quad (2)$$

여기서,

- S : 보정된 프로그램 예측 강도
- S_{actual} : 프로그램 모델에 의한 예측 강도
- $z(R)$: 정규분포의 z-value
- CV_S : 변동계수(강도)
- CV_σ : 변동계수(응력)
- σ : 보정된 프로그램 예측 응력
- σ_{actual} : 프로그램 모델에 의한 예측 응력

강도와 응력이 확률변수로서 일정한 확률 분포를 이루고 있을 때 HIPERPAV는 정해진 신뢰도에 해당하는 과소 강도와 과다 응력을 택하여 비교하게 된다. 높은 신뢰수준일수록 Z-value는 크게 됨으로 최종 예측 강도는 작게, 응력은 보다 크게 예측을 한다.

4.4.2 HIPERPAV 입력변수 및 결과

실내 및 현장실험을 통해 획득한 자료를 프로그램 각 카테고리별 입력변수 형태로 정리하였다(김중호, 2002). Design Input 카테고리의 입력변수인 탄성계수 값은 포장용 콘크리트의 일반적인 값을 입력하였다. 간접인장강도의 경우는 실내시험에서 얻어진 값을 입력하였고, Reliability값은 Environment Input에서 구름량을 sunny(일반시공), cloudy(차광막)로 보고 처음 균열이 생기는 시기를 기준으로 Reliability값을 변화시켰다. 보조기층의 종류는 프로그램에서 제공되는 항목 중 시공현장과 일치되는 항목이 존재하지 않아 실제 Push-Off Test 결과 값

인 5.5kPa과 이때의 Movement인 0.1cm를 입력하였다. Mix Design 카테고리에서는 시멘트의 종류는 type I 을 선택하였으며, 배합설계에서 조골재, 세골재, 물 및 시멘트양은 현장 시방배합을 기준으로 입력하였으며, 그 외 입력변수는 프로그램에서 제공하는 기본값(Default)을 입력하였다. Environment Input 카테고리의 기온은 현장에서의 측정값을 사용하였고, 최고/최저 상대습도, 평균풍속은 기상청 자료를 사용하였으며 운량의 경우 일반시공은 sunny,

표 4. 입력항목 및 프로그램 입력 값

카테고리	입력변수	입력값	비고
설계입력	줄눈 간격	6m	
	슬래브 폭	8.2m	
	슬래브 두께	30cm	
	Reliability	-	
	간접인장강도	실내시험 값	
	탄성계수	34474MP _a	기본값
	마찰력	5.5kP _a	
	이동거리	0.1cm	
배합입력	시멘트종류	type I	
	실험실양생자료	기본값(default)	
	시멘트 성분 구성	기본값(default)	
	콘크리트 열팽창계수	8.6μ ^o /F	
	조골재량	1093kg/cm ³	
	세골재량	751kg/cm ³	
	물	149kg/cm ³	
	시멘트	324kg/cm ³	
환경입력	감수제 사용여부	사용	
	대기온도분포	3일 측정온도사용	
	상대습도(아침/저녁)	(80%/40%)	
	구름량	sunny/cloudy	
시공입력	풍속	6.1kph	
	시공시각	10:00 AM	
	초기 콘크리트 배합온도	27.5℃	
	초기 보조기층 온도	27.5℃	
	양생방법	1회 액상 양생제	
	양생제 적용시간	2시간	
Saw-cutting여부	Saw-cutting여부	9시간 후	



차광막은 cloudy로 입력하였다. Construction Input 카테고리에서는 시공시간, 초기 배합온도 및 보조기층의 온도, 양생방법, 양생제 적용시간, Saw-Cutting시각을 입력하는데, 각 항목들은 실제 측정 및 시공사항들을 관찰하여, 그 값들을 입력하였다.

일반시공 구간은 Environment Input에서의 sunny로 선택하고, 차광막 설치 구간은 cloudy로 선택하여 시뮬레이션 했다. 차광막 설치 구간을 시뮬레이션 하는데 있어서 현재의 HIPERPAV 프로그램에서는 차광막 효과를 모사하는 입력변수가 없기 때문에 가장 유사한 조건이라 판단되는 cloudy 조건을 선택하였다. 차광막은 cloudy 조건보다 직사광선 차단효과가 크게 나타나므로 실제 차광막을 활용한 현장조건에서는 강도발현이 보다 느리게 발현되고 온도변화에 따른 응력 변화도 상대적으로 크지 않을 것으로 예상된다. 따라서, cloudy 조건을 적용한

HIPERPAV 프로그램은 실제 차광막을 활용했을 때 나타나는 강도발현-응력변화 관계를 더욱 보수적으로 모사할 것으로 판단된다.

HIPERPAV 프로그램에 입력하는 간접인장강도는 실내시험에 의하여 얻은 값을 대입하였으며, 대기 온도는 일반시공 구간의 경우 차광막 외부의 온도를 사용하였고, 차광막 설치 구간의 경우 차광막 내부의 온도를 사용하였다. 그림 15는 신뢰도 50%일 때의 일반시공 구간과 차광막 설치 구간에서의 강도와 응력의 그래프이다.

신뢰도 50% 상태에서 처음 균열이 생기는 시기를 기준으로 신뢰도 값을 변화시켰다: 일반시공 구간의 경우 처음 균열이 생기는 시기의 신뢰도가 72.5%였고, 차광막 설치 구간의 경우 처음 균열이 생기는 시기의 신뢰도가 95%로 나타났다 (그림 16).

본 시험시공의 예에서 HIPERPAV Program을 이

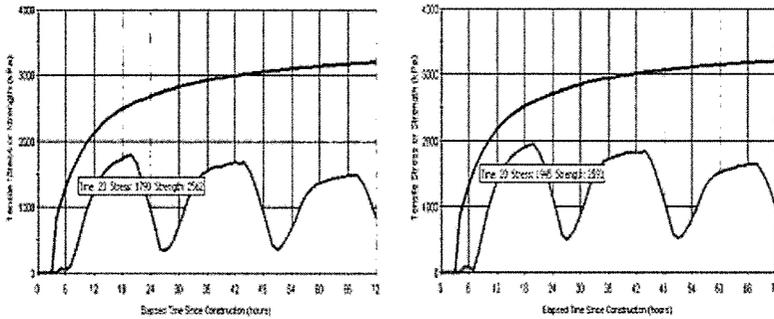


그림 15. 신뢰도를 50%로 설정한 후 HIPERPAV 결과 (차광막 설치(좌) · 일반시공구간(우))

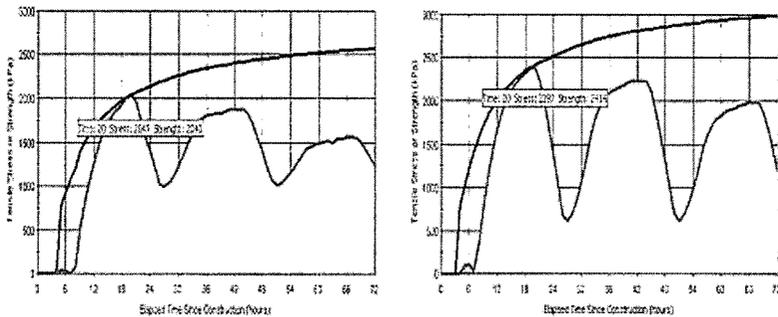


그림 16. 신뢰도를 설정한 후 HIPERPAV 결과 (차광막 설치(좌) · 일반시공구간(우))



용하여 차광막 사용에 따른 균열발생 가능성을 시뮬레이션한 결과 차광막 설치 구간이 일반시공 구간보다 균열이 발생하지 않을 가능성(신뢰도)을 72.5%에서 95%로 증진시킬 수 있을 것으로 나타났다.

5. 차광막 활용을 위한 현장조건

하절기 콘크리트 시공의 특징은 높은 기온 뿐 아니라 높은 fresh concrete 온도, 높은 태양복사열, 낮은 상대습도 등으로 짧은 시간안에 높은 수화열과 함께 건조수축의 가능성도 높아지기 때문에 시공직후 수일 내에 원치 않는 초기균열 문제가 발생될 가능성이 크다. 따라서, 차광막을 활용한 콘크리트 포장 시공은 이러한 시공에 극히 불리한 환경조건에서 높은 수화열과 건조수축으로 인해 콘크리트 포장 포설 후 수일 내에 발생하는 초기균열을 방지하고 과도한 초기 built-in curiling을 억제하기 위한 시공관리 방안의 하나로서 제시될 수 있을 것이다.

차광막을 활용한 콘크리트 포장 시공 시행여부를 판단하는 구체적인 기준 수립을 위해서는 지역적 특성, 환경조건, 현장여건 등 여러 가지 사항이 종합적으로 고려되어야 하므로 모든 현장에서 일률적으로 적용될 수 있는 차광막 활용 판단기준을 제시하는 것은 현실적으로 불가능하다. 다만, 일반적인 지침으로 하절기(6월8월) 시공에 적용하는 것이 바람직하며, 표 5에서 보는 것처럼 국외 사례의 경우 기온이 일정 이상 되면 콘크리트포장 포설을 제한하는 경우도 있다는 점을 참고하여 시공 당일 예상되는 최고기온이

표 5. 미국 각 주의 콘크리트 포설 제한 대기온도 (Shindler et al. 2002)

아리조나	32℃	아칸소	32℃
플로리다	29℃	일리노이	32℃
루이지애나	35℃	사우스캐롤라이나	32℃
뉴욕	32℃	오하이오	32℃

32℃ 이상 되는 경우에는 차광막을 활용한 초기 콘크리트 포장 균열발생 억제 방안을 적극적으로 고려하는 것이 권장된다.

6. 결 론

본 연구를 통하여 다양한 실험을 수행하여 얻은 분석결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 차광막을 이용해 콘크리트 슬래브에서 발생하는 최고온도를 일반시공구간에 비해 슬래브 상단부를 기준으로 9℃까지 줄일 수 있었으며 온도 낙차폭도 8.5℃까지 감소하는 것을 현장 시험시공을 통해 확인하였다. 이는 차광막이 한 여름철의 무더위상황에서 콘크리트 포장의 급격한 수화반응을 억제하고 슬래브의 온도 변화폭을 상당히 낮추어 줌으로서 콘크리트에 지나친 수축과 팽창 거동이 발생하지 않도록 하여 초기 균열억제에 큰 효과가 있다는 것을 나타내는 것이다.
- (2) 콘크리트 슬래브에서 포장 깊이에 따른 온도 측정 시 일반시공 구간에서는 13.5℃, 차광막 설치 구간은 1℃의 온도편차(Temperature gradient)를 보였다. 시공초기 차광막을 설치함으로써 향후 콘크리트 슬래브에서 curling 응력 발생가능성을 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 차광막 설치 구간에서 PV(Pulse Velocity)측정 결과 시공 초기에는 양생온도를 저감시켜 콘크리트 슬래브의 초기 강도발현은 일반구간에 비하여 다소 늦으나, 장기 강도 측면에서는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.
- (4) HIPERPAV Program을 이용하여 차광막 사용에 따른 균열발생 가능성을 시뮬레이션한 결과 본 시험시공의 예에서 균열이 발생하지 않을 가능성(신뢰도)을 72.5%(sunny)부터 95%(cloudy) 이상으로 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다.



참 고 문 헌

1. FHWA (1991), Report on *The 1992 U. S. Tour of European Concrete Highways*.
2. McCullough, B. F. and Rasmussen, R. O.(1999), *Fast-Track Paving : Concrete Temperature Control and Traffic Opening Criteria for Bonded Concrete Overlays*, FHWA-RD-98-167, FHWA, Washington, D.C.
3. Mindess, S., and Young, F.(1981), "*CONCRETE*", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
4. Price, W. H.(1951), "Factors influencing concrete strength," *ACI Journal, Proceedings* Vol.47, pp.147-32.
5. Samarai, M., Popovics, S., and Malhotra, V, M.(1992), "*Effect of High Temperatures on the Properties of Fresh Concrete.*", TRR 924. pp.42-50.
6. Verbeck, G. J. and Helmuth, R. A. (1968), "Structures and physical properties of cement paste," *Proc. 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement*, Tokyo, Part Ⅲ, pp.1-32.
7. 김종호(2002), "콘크리트포장 예측프로그램의 국내 적용성 연구," 한양대학교, 석사학위 논문.
8. 박대근(2002), "i-Button의 실용화 및 콘크리트포장 초기균열 거동연구," 한양대학교, 석사학위 논문.
9. 서영찬(1993), "콘크리트 포장의 포설시기가 시공초기의 균열 발생 패턴에 미치는 영향," 대한토목학회 논문집 Vol.13 No.2, pp 135-139.
10. 한국도로공사(1988), *중부고속도로 건설지*. pp. 494-495.

〈접수 : 2004. 7. 21〉