

## 터널내 환경을 고려한 콘크리트 포장의 양생제 살포기준 연구

### A Study of Spraying Curing Compound for Concrete Pavement Considering Environmental Condition in Tunnel

류 성 우	Ryu, SungWoo	한국도로공사 도로교통연구원 도로연구실 박사후과정 (E-mail: sw.ryu@ex.co.kr)
권 오 선	Kwon, OhSun	정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 도로연구실 선임연구원 (E-mail: pooh2461@ex.co.kr)
송거름수	Song, GeoRuemSoo	중앙대학교 도로 및 교통연구실 석사 (E-mail: pbara1234@nate.com)
이 민 경	Lee, MinKyung	한국도로공사 도로교통연구원 도로연구실 연구원 (E-mail: lmk@ex.co.kr)
조 윤 호	Cho, Yoon-Ho	정회원 · 중앙대학교 공과대학 사회기반시스템공학부 교수 · 교신저자 (E-mail: yhcho@cau.ac.kr)

#### ABSTRACT

**PURPOSES :** This study is to suggest tunnel length to spray curing compound, based on the field tests.

**METHODS :** At first field test, length from the entrance of tunnel to wet wall was checked by visual survey. The second and third test, various sensors were installed in concrete or in tunnel, such as RH sensor, temperature sensor, portable weather station and etc.. And also, test for bleeding and retaining water of concrete were conducted to evaluate environmental effect on concrete pavement.

**RESULTS :** The result of the field experiment for tunnel length to spray curing compound indicates that length changes depending on tunnel length, season, and location. Environmental condition of a short tunnel was not much different between location near entrance and at center of tunnel. However, in case of a medium and long tunnel, effect of outside environmental condition decreased, when location moved into tunnel center of it.

**CONCLUSIONS :** From the testing results, it can be proposed that optimum tunnel length to spray curing compound is 60m for a medium and long tunnel, and whole length for a short tunnel.

#### Keywords

tunnel pavement, curing compound, environmental condition, concrete pavement

Corresponding Author : Cho, Yoon-Ho, Professor  
Department of Civil and Environmental Engineering,  
Chung-Ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul,  
156-756, Korea  
Tel : +82.2.820.5336 Fax : +82.2.816.0251  
E-mail : yhcho@cau.ac.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ijhe.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (Print)  
ISSN 2287-3678 (Online)

Received Mar. 26, 2014 Revised Apr. 1, 2014 Accepted May. 28, 2014

## 1. 서론

시멘트 콘크리트 포장에서의 양생은 피막을 형성하는 양생제, 비닐시트, 수분공급 등의 방법을 통해 수분증발을 방지함으로써 강도, 내구성, 수밀성 등을 증진시키는

활동으로 콘크리트 초기 품질관리에 있어 중요하다 (Dan Y. et al. 2006). 환경조건에 의해 수분이 손실될 경우 포장체의 강도발현은 저하되고, 블리딩 수의 증발로 인하여 표면의 미세한 요철부에 모세관 장력이 발생

하며 이는 수축균열로 이어지게 된다. 최근에는 일반콘크리트 외에 알칼리 실리카반응(ASR) 및 동결융해 등 내구성 문제를 해결하고 장기강도 증진을 위해 플라이애시와 같은 포졸란 재료의 사용이 증가하고 있다. 포졸란 재료가 그 성능을 발휘하기 위해서는 포졸란 재료의  $\text{SiO}_2$ 와 수산화칼슘이 물과 반응하는 과정에서 지속적인 수분유지가 필요하기 때문에 초기 품질관리의 중요성이 더욱 강조된다(Mehta P. K. et al. 2006). 각 현장마다 시멘트 콘크리트 포장의 품질이 균일하지 않을 경우, 초기 균열가능성이 높아지고 장기적으로는 유지보수로 인한 예산의 낭비 및 교통혼잡과 같은 2차적인 문제를 야기하고 있다. 국외의 경우 초기 품질관리의 중요성을 인식하여 명확하고 구체적인 지침 및 시방으로 제한하고 있다.

시공 초기단계에 공기 중에 노출된 넓은 표면을 최대한 빠르고 적절하게 관리하기 위해 현재 다양한 양생방법들이 사용되고 있으나, 양생제를 이용하는 방법이 효율적이고 비용이 적게 든다는 장점이 있다. 지금까지 양생제 살포는 햇빛이 비치고 바람이 불며 습도 변화가 일어나는 본선 포장에 초점이 맞춰져 왔었다. 하지만, 우리나라는 국토의 70% 이상이 산지로 되어 있어 고속도로 건설 시, 터널 구간이 차지하는 비율이 높다. 국내 고속도로에 설치되어 있는 터널은 총 708개소로 연장 553km에 달한다. 도로상의 터널 내부는 외부보다 상대적으로 다습하고 외부환경의 영향을 덜 받는 특징이 있다. 때문에 터널 내 시멘트 콘크리트 포장의 경우, 본선 포장에 비해 품질관리 및 양생에 많은 노력을 기울이지 못하는 실정이다. 하지만 터널 진·출입구 부분은 실외의 직사광선 및 습도 등과 같은 환경조건이 터널 내부와 다르며, 영향을 받는 거리도 터널 길이에 따라 다르다. 따라서 출입구 지점이 터널 내부처럼 양생제를 살포하지 않는다면 장기적으로 시멘트 콘크리트 포장의 수명을 단축시키는 결과를 야기할 수 있다.

본 논문에서는 문헌조사를 바탕으로 터널내 시멘트 콘크리트 포장의 양생에 영향을 주는 환경 인자들을 검토하고 터널 현장조사를 통하여 관련 인자에 대한 정보를 정량화하였다. 분석결과를 토대로 터널 내 시멘트 콘크리트 포장의 양생제 살포에 대한 정량적으로 판단할 수 있는 기준과 함께 세부적인 시공방법 및 관리방안을 현장 기술자에게 제시하기 위함이다.

## 2. 터널내 양생제 살포 기준

국내 터널 구간의 콘크리트 포장에 대한 양생제 살포

기준은 마련되어 있지 않으며, 대부분이 본선 콘크리트 포장에 관한 내용들을 제시하고 있다. 국내 본선 포장의 양생제 살포에 관한 내용들은 경험에 바탕을 하고 있으며, 정성적으로 적용하고 있다. 2009년도에 개정된 한국도로공사 및 국토해양부의 전문시방서를 살펴보면, 피막 양생제는 콘크리트 슬래브 표면에 물기가 없어진 직후 초기응결이 시작되기 전에 2회 이상 나누어 얼룩이 없도록 충분히 살포해야 하며, 포장면의 양 측면까지 양생제를 살포하도록 하였다. 양생제 살포량은  $0.4\sim 0.5\text{l}/\text{m}^2$ 를 기준으로 하고 있다(KEC, 2009).

일본, 미국 및 유럽에서도 터널 내 양생제 살포기준에 대한 기준을 찾아보기 어려우며, 본선 포장 위주로 많은 시방서 및 지침서들이 만들어져 있다. 중국의 경우에는 본선 포장의 양생제 살포에 대한 기준을 터널 내 포장으로 확대 적용한 경우들이 있다. 광둥성 교통운수청은  $0.3\text{kg}/\text{m}^2$  이상의 양생제를 터널 출입구에 살포하고, 양생포를 덮어 최소 14일 이상 양생할 것을 권고하고 있다(Guangdong DOT, 2010). 중국인민공화국 교통부에서는 터널 내 콘크리트 포장에 양생제를 살포할 것을 제시하고 있다. 그 양은 1등급 양생제 사용 시  $0.3\text{kg}/\text{m}^2$  이상을, 일반제품 사용 시  $0.35\text{kg}/\text{m}^2$  이상을 살포하도록 하고 있다. 양생제 보수율이 90%를 미달할 경우에는 2층으로 양생제를 살포할 것을 권장하고 있다(China Mistry of Transportation, 2009).

시멘트 콘크리트의 양생과 밀접한 관련이 있는 소성건조수축 균열발생 여부를 평가하기 위해 미국 콘크리트 협회(ACI : American Concrete Institute)는 노모그래프를 제시하였다(ACI, 1998). 이 그래프는 대기온도, 상대습도, 콘크리트 온도, 풍속이 수분증발율에 미치는 영향과 양생의 필요성을 설명하였다. 하지만 각 변수에 따른 실제 수분증발율이 경험적으로 계산되었기 때문에 현장에서의 각 변수들을 실제 실험에서와 동일한 조건상에서 측정해야하며, 일부는 실제와 다른 조건들이 포함되어 있다. 예를 들어, 직사광선은 수분증발에 직접적으로 영향을 주지 않으며 증발되는 표면에서의 수온이 실제 콘크리트 온도와 같다고 가정한다. 그리고 대기온도는 수분이 증발하는 면으로부터 약 1.2~1.8m 위에서, 상대습도는 그들에서 바람이 불어오는 방향에서 수분이 증발하는 면으로부터 약 1.2~1.8m 위에서, 풍속은 수분이 증발하는 면으로부터 약 0.8m 위에서 측정한다.

문헌조사 결과, 전체적으로 국내의 터널 내 시멘트 콘크리트 포장의 양생제 살포에 대한 지침이 부재하거나 본선 포장의 것을 확대·적용하였기 때문에 그 공학적

근거가 미미하다. 따라서 터널 내 양생효과에 영향을 미치는 환경특성을 조사·분석한 결과를 바탕으로 터널 내 양생제 살포에 대한 구체적이고 정량적인 방안의 제시가 필요하다.

### 3. 현장조사

현장조사는 터널 내에서 양생제를 어디까지 뿌려야 하는지를 정량화하기 위한 기초자료를 얻기 위해 수행하였으며, 총 3회에 걸쳐 이뤄졌다. 조사항목은 앞서 살펴본 ACI에서 제시한 노모그래프에 나타난 대기온도, 상대습도, 콘크리트 온도, 풍속 등과 같은 입력변수 및 그로 인해 발생한 수분증발률 및 블리딩을 조사하였다(KS F 2406, 2009; KS F 2414, 2010). 1차 현장조사에서는 여름철과 가을철에 다양한 터널 길이에 따른 환경특성을 조사 및 분석하였다. 터널 내에서 양생제 살포에 대한 1차 현장조사 결과를 검증하기 위하여 2, 3차 현장조사를 진행하였다. 온·습도 센서를 이용한 환경특성 조사방법을 추가하고, 시편을 제작하여 정확한 콘크리트 수분증발량을 측정하였다. 일련의 시험 및 분석을 통해 터널 입구로부터 얼마만큼의 거리까지 양생제를 살포해야 하는지를 제안하였다. 이를 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

1차 조사에서는 현장의 터널 내 양생제 살포 현황을 파악하고, 웨더스테이션을 설치하여 환경 인자들을 측정하였다. 여름에는 총 16개의 터널, 가을에는 총 10개의 터널을 조사하였다. 각 조사 시기별로 터널의 길이가 150m를 초과하지 않는 2개의 터널에만 양생제를 살포하는 것으로 나타났다. 각 터널의 진·출입구 벽면에 이슬이 맺힌 구간의 거리를 조사하였고, 터널 내의 상대습도, 풍속 및 온도를 측정하여 각 변수들간의 상관성을 검토하였다.

Table 1. Section Information of Tunnels for Environment Condition Survey

	First survey	Second survey	Third survey
Time	Summer and Fall, 2010	May, 18~21, 2011	August 18~19, 2011
Site	26 tunnels (Summer : 16, Fall : 10)	San-in tunnel (direction : Jin-ju → Soon-chun)	Kyum-beak tunnel (direction : Kwang-yang → Mock-po)
Object	Analysis of environmental factors in tunnel	Verification for 1 <sup>st</sup> survey	Verification for 1 <sup>st</sup> and 2 <sup>nd</sup> survey

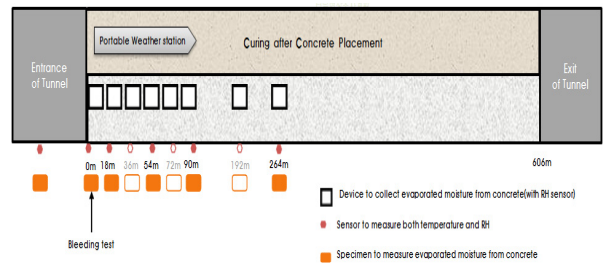


Fig. 1 Monitoring Items and System in San-in Tunnel

2차 현장조사는 2011년 5월에 688m의 중터널인 산인 터널을 대상으로 하였으며, 1차 현장조사 결과를 검증하기 위한 실험 및 조사를 진행하였다. 터널 중앙을 기준으로 양측의 특성이 비슷하다고 판단하여 시공구간의 절반 길이에 맞추어 터널 외부, 입구 및 중앙부까지 조사하였다. 대상구간에는 린 콘크리트가 타설된 상태였다. Fig. 1은 현장의 계측항목 및 시스템을 나타낸 것이다. 시공 하루 전 습도센서를 120cm 높이에 설치하고 4cm 바로 아래에 온·습도 센서를 부착한 증발수집기를 설치하였다. 외부와 중앙부에는 추가적으로 웨더스테이션을 설치하였다. 각 측정지점에서 콘크리트 시편 2개를 제작하여 초기 무게를 측정하고, 이후 무게 감량을 통해 수분증발량을 산출하였다. 콘크리트의 블리딩 측정은 0m~18m 타설시점에 직경 29.5cm 원형통 시편 2개를 제작하여 실시하였다. 풍속은 휴대용 웨더스테이션을 활용하여 각 지점의 50cm 높이에서 측정하였고, 적외선 온도계를 이용하여 콘크리트 및 시편온도를 측정하였다. 각각 한 지점에서 5번씩 측정하여 산술평균을 통해 측정결과를 산출하였다. 현장에 사용된 플라이애쉬 콘크리트의 슬럼프 및 공기량은 각각 3.8cm, 5.2%로 기준을 만족하였다. 휨강도는 28일 기준 5.66MPa으로 기준 강도인 4.5MPa를 만족하였다. 블리딩량은 타설 후 약 60분에서 최고치를 나타내었으며, 블리딩 실험은 콘크리트 성형 후 약 210분에 종료되었다.

3차 현장조사는 2011년 8월 18~19일에 걸쳐 전라남도 보성군에 위치한 2,211m의 장대터널인 검백터널에서 광양에서 목포방면으로 2차 현장조사 때와 유사한 항목들의 시험을 수행하였다. 산인터널에서와 같이 터널 외부를 비롯하여 입구부터 중앙부까지 환경변화를 조사하였다. 본 조사대상인 2차로에 린콘크리트가 타설되어 있었으며, 계측 시스템은 산인터널과 유사하다. 터널 입구에서 300m 지점까지는 2011. 8. 18에 시공하였으며, 다음날 1km지점까지 시공을 완료하였다. 시공재료인 플라이애쉬 콘크리트의 슬럼프 및 공기량은 각각 3.5cm, 5.3%로 기준을 만족하였다. 콘크리트 28일 휨

강도는 기준에 모두 부합하였고, 블리딩 측정결과는 산 인터널과 유사하였다.

## 4. 결과 분석

### 4.1. 1차 현장조사 결과

여름철 터널 구간은 현장조사 시 터널 벽면에는 습도가 높아 진·출입부 일정거리 이후에는 이슬이 맺혀 있었다. 터널 길이별로 건조구간의 길이를 측정하여 정한 것이 Table 2이다. 터널이 설치된 지역, 설치방향, 콘크리트 타설 시기, 조사시간 등에 따라 차이가 있지만, 본 연구에서는 조사대상 터널의 입구 혹은 출구로부터 약 40m 정도까지 터널 벽면에 이슬이 맺혀 있는 것으로 나타났다. 여름철에 비해 상대적으로 상대습도가 낮은 가을철의 터널 구간에는 신설 시멘트 콘크리트 포장의 양생 중임에도 불구하고 벽면에 이슬이 맺히는 구간이 발견되지는 않았다.

Table 2. Length from Tunnel Entrance or Exit to Wet Wall

Tunnel length (km)	Right or left side of tunnel wall	Up-direction (m)		Down-direction (m)	
		from entrance	from exit	from entrance	from exit
1.40	Right	40.50	39.20	41.50	38.40
	Left	42.20	39.50	39.20	39.50
1.20	Right	35.80	35.60	33.20	32.00
	Left	26.50	27.00	28.30	29.40
0.70	Right	27.00	25.40	28.00	23.20
	Left	26.30	26.80	27.40	24.40
0.50	Right	10.20	11.40	12.20	11.20
	Left	11.50	10.50	11.40	11.30
0.15	Right	8.10	9.20	8.40	8.20
	Left	8.10	9.10	9.50	9.30

Fig. 2는 여름철에 조사한 터널 연장의 상대위치에 따른 상대습도의 변화를 보여주고 있다. 150m 터널과 500m 이상의 터널의 상대습도 차이가 약 10% 이상 발생하였다. 상대적으로 짧은 150m 이하 터널의 경우, 터널 내부의 공기가 터널 외부의 공기와 교류하기 쉽기 때문에 터널 전체에 걸쳐 상대습도가 낮았다. 1,400m 장대터널은 중심부의 상대습도가 95%까지 증가하였고, 터널 내에서는 벽면에 이슬이 맺혀있었다. 터널 내부의 공기가 외부와 교류가 힘들기 때문에 양생 시 증발한 수증기가 사라질 환경이 조성되지 못하였다. 이 때문에 터널 입구에서의 상대습도도 150m 터널에 비해 15% 이상 높았다.

장대터널의 콘크리트 표면의 육안조사 결과, 양생제를 살포하지 않아도 포장 표면에 문제가 발생하지 않았다.

여름철보다 상대적으로 건조한 가을철의 경우, 150m 터널의 상대습도 변화는 최대 3% 정도 발생한 반면, 500m 이상의 경우는 진·출입구의 상대습도보다 터널 내부의 상대습도가 15% 이상 높은 경우도 있었다. 그리고 터널 내부는 60% 이상의 다습한 환경이었다.

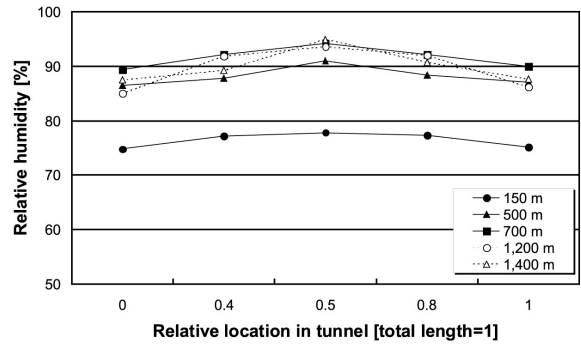


Fig. 2 Relative Humidity at each Location in according with Different Tunnel Length (Summer)

콘크리트 표면의 수분증발량은 공기 중의 상대습도와 밀접한 관련이 있다. 상대습도는 터널의 풍속과 관련이 있기 때문에 Fig. 3과 같이 풍속을 조사하였다. 전반적으로 1,400m 터널의 경우, 터널 중앙부에서는 바람이 거의 불지 않는 반면, 150m 터널의 경우, 외부와의 풍속변화폭이 크지 않았다. 전체적으로 계절에 관계없이 150m 길이의 터널은 전 구간이 바람의 영향을 상대적으로 크게 받고 있었고, 터널 안 상대습도도 실외에 비해 약 5%밖에 높지 않아 콘크리트 포장 표면의 많은 수분 손실이 우려되었다. 반면 1,400m 이상의 장대터널은 진입부로부터 일정 거리 이후에는 상대습도가 높고 바람이 약하게 불고 있어 증발량이 상대적으로 적었다.

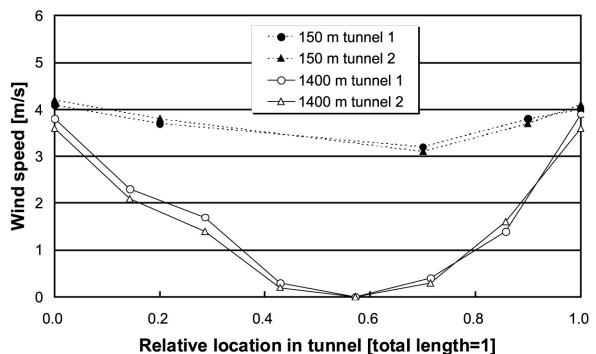


Fig. 3 Wind Speed at each Location in according with Different Tunnel Length (Summer)

가을철도 여름철과 유사한 경향이 나타났다. 따라서, 터널 입구 혹은 출구에 일정구간에 양생제를 살포하는 것이 효과적인 것으로 판단된다.

각 위치별 대기온도를 측정된 결과는 Fig. 4와 같다. 풍속측정 결과에서의 패턴과 유사하게 500m 이상의 터널에서는 터널 내부로 이동함에 따라 온도가 낮아졌으나, 150m 터널은 상대적으로 그 감소폭이 상대적으로 적었다.

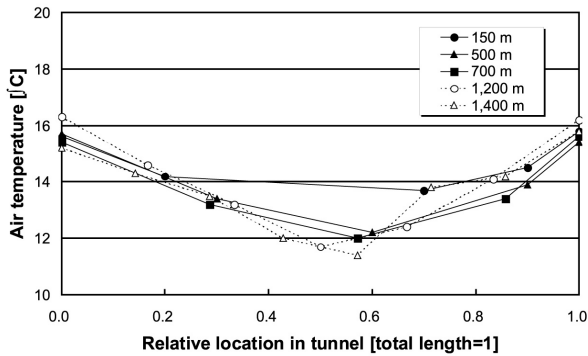


Fig. 4 Air Temperature at each Location in according with Different Tunnel Length (Fall)

Fig. 5는 터널 길이별로 가을철에 조사한 터널 외부와 터널 내의 습도를 외부기준으로 상대적인 비율로 도시한 것이다. 대부분의 터널은 터널 중앙부로 갈수록 다습한 환경임을 확인할 수 있다. 본 조사결과, 1.05 습도비를 초과하는 터널 내 구간(터널 입구로부터 약 40~60m 이상의 위치)에서는 양생제를 살포하지 않아도 대부분 포장 표면에 아무런 문제가 발생하지 않으며, 터널 벽면에 건조구간이 발생하지 않았다. 터널의 길이, 시공시기 및 지역 등에 따라 터널 내 환경이 변화하지만, 1차 육안조사를 바탕으로 150m를 초과하는 길이의 터널은 최소한 출·입구에서부터 약 60m까지는 양생제를 살포하는 것을 권장한다. 다만, 150m 길이의 터널은

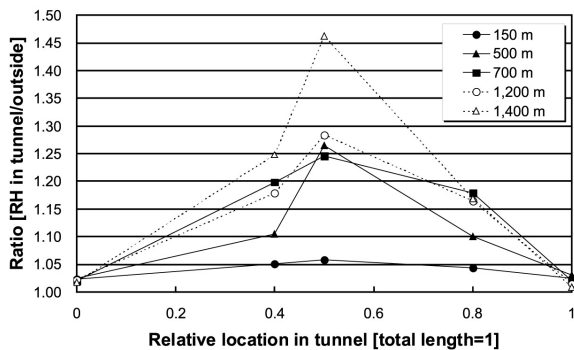


Fig. 5 RH Ratio at each Location in according with Different Tunnel Length (Fall)

전구간에 걸쳐 양생제를 살포하는 것이 콘크리트 포장에 유리할 것으로 판단된다.

#### 4.2. 2차 현장조사 결과

터널 외부풍속을 기준으로 터널 내부의 각 위치에서 풍속을 비교한 결과, 내부로 들어감에 따라 풍속은 감소하였다. 터널 54m 구간에서는 외부풍속의 50% 이하였으며, 중앙지점은 외부풍속의 약 10%~20% 수준으로 저감되었다.

대기온도의 조사결과는 Fig. 6과 같다. 터널 입구부분은 외부의 환경영향 때문에 대기온도에 영향을 직접 받았다. 출입구를 제외한 터널 내부는 밀폐되어 있고, 직사광선의 영향이 적어 터널 내 대기온도 변화는 1차 현장조사에서와 같이 외부에서 크고 터널 중앙부로 갈수록 적었다. 시멘트 콘크리트 포장 내부에 온도측정 센서(i-Button)를 매설하여 터널 내부에서 대기온도 및 콘크리트 온도변화를 살펴보았다. Fig. 7은 터널 입구와 터널 중앙에서의 슬래브 내 온도와 대기온도를 측정한 결과이다. 터널 외부는 초기수화열에 의해 타설 후 다음날 정오까지 표면은 초기보다 최대 16℃, 하부는 23℃ 상승하였다. 상부의 온도는 대기중에 노출이 되어 있

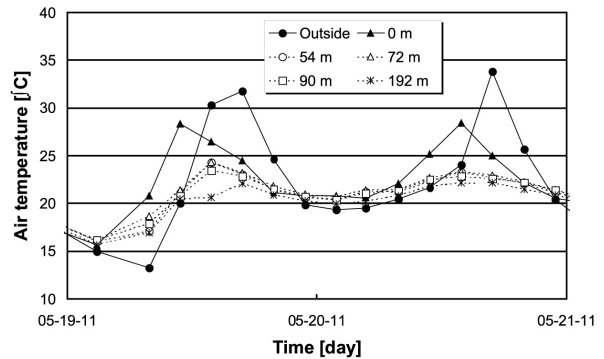


Fig. 6 Air temperature at each Location (San-in tunnel)

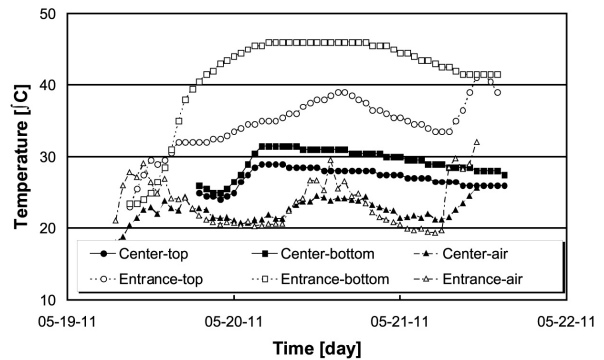


Fig. 7 Temperature of Pavement Surface at Entrance and Center (San-in tunnel)

어 초기 6시간을 제외하고는 하부의 온도보다 더 낮았다. 터널 중앙부에서는 타설 후 수화열에 의한 콘크리트의 온도상승은 크지 않았으며, 상부는 6℃, 하부는 5℃ 상승하였다. 터널 입구와 달리 외부환경에 영향을 적게 받기 때문에 상하부의 온도 차이는 크지 않았다.

다음으로 터널에서 입구부터 264m까지 상대습도의 변화를 조사하였다. Fig. 8은 하루동안의 상대습도 차이의 변화를 나타낸 것이다. 콘크리트 타설 전에는 실외의 상대습도 변화는 약 57%, 터널 내 194m 위치에서는 25% 정도 변화하였다. 그 변화 정도는 터널 내부로 들어가면서 점점 작아졌다. 콘크리트 타설 후에는 터널 외부가 약 60%, 터널 입구는 52%였으며, 터널 입구로부터 18m 이후는 16~23% 변화하여 위치에 따라 큰 차이가 없었다. 이는 콘크리트 타설 후 콘크리트 포장의 수분이 증발하면서 터널 내부의 상대습도가 증가하였으며, 외부보다 온도의 영향을 적게 받기 때문에 상대습도의 일변화량은 상대적으로 적었다.

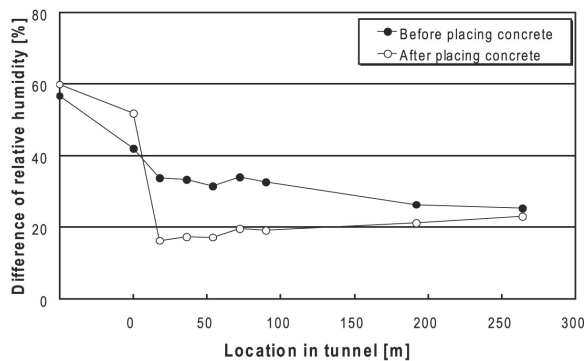


Fig. 8 Difference of Relative Humidity at each Location

증발시편을 사용하여 콘크리트의 수분증발량을 측정하였다. Fig. 9는 타설 후 4시간 동안의 터널 구간별 누적 수분증발량을 보여주고 있다. 터널 외부 및 터널 입

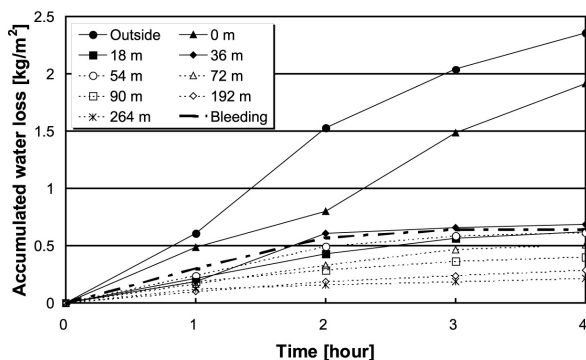


Fig. 9 Accumulated Water Loss at each Location (San-in tunnel)

구는 환경에 영향을 많이 받아 수분증발량이 많은 반면, 36m 이상 깊이에서는 차이가 크지 않았다.

### 4.3. 3차 현장조사 결과

풍속은 터널 실외에서부터 터널 중앙부 800m까지 측정하였다. 터널 실외의 풍속 값과 비교했을 때, 터널 입구, 18m 및 중앙지점에서 각각 외부풍속의 60%, 40%, 10% 수준으로 나타났다. 전체적으로 풍속은 1차 및 2차 현장조사의 경우에서와 같이 터널 내부로 들어갈수록 줄어들었다.

대기온도를 측정한 결과, 터널 출입구와 가까운 지점을 제외하고는 하루 중 온도변화가 5℃ 이내였다. 특히, 터널 중앙부는 온도편차가 약 2℃ 이내였다. 조사결과, 터널 내 온도는 내부로 들어갈수록 낮아진다는 점을 재확인하였다.

하루동안 상대습도의 변화를 살펴본 결과, 터널 외부와 터널 입구에서의 습도변화는 40~50% 이상의 차이가 났고, 18m 이상의 내부에서의 상대습도 변화는 20~30%로 외부보다 적었다. 터널 시공을 하는 동안에 육안조사 결과, 약 60m 지점 이상에서는 터널의 벽면이 젖어 있었다.

Fig. 10은 각 터널 구간에서의 시간에 따른 누적 수분증발량 변화를 나타낸 것이다. 터널 외부 및 입구에서의 수분증발량이 컸으며, 타설 후 약 3시간 후에 가장 큰 증발량이 나타났다. 터널 중앙부로 이동함에 따라 누적 증발량이 점차 감소하였다. 콘크리트 타설 후 4시간 동안 터널 전구간에서의 누적 수분증발량과 누적 블리딩량의 관계를 나타내고 있다. 산인터널에서와 같이 겹백 터널에서도 0~54m 지점의 경우 수분증발량이 블리딩량보다 크거나 비슷하였다.

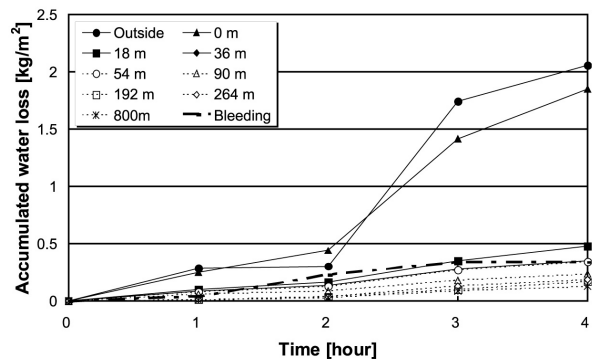


Fig. 10 Accumulated Water Loss at each Location (Kyum-beak tunnel)

## 5. 결론 및 제언

### 5.1. 결론

3회에 걸친 터널 내 환경조건을 종합적으로 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 길이가 150m 초과하는 터널은 터널 내부로 갈수록 상대습도는 증가하였다. 장대터널의 경우, 터널은 중심부의 상대습도가 95%까지 증가하였으며, 콘크리트 포장을 시공 중인 터널의 경우는 콘크리트 수분으로 인해 터널 내부가 시공 및 양생기간 동안에 항상 상대습도가 높았다. 하지만, 150m인 짧은 터널의 경우는 바람에 의한 영향으로 인해 상대습도가 낮았을 뿐만 아니라, 터널 안팎의 상대습도는 5% 이내의 차이만 보였다.
2. 터널 내 환경조건을 조사결과와 현장의 여건을 종합한 결과, 150m를 초과하는 터널은 최소한 출·입구 60m 구역까지는 양생제를 살포하는 것이, 150m 길이의 터널은 전구간에 걸쳐 양생제를 살포하는 것이 콘크리트 포장에 유리할 것으로 판단된다.
3. 대체적으로 터널 내 환경특성 조사에서도 500m 이상의 터널에서는 중앙부로 가까워질수록 바람이 거의 불지 않았으며, 온도는 점차 감소하였다. 반면, 150m 터널의 경우, 외부와의 풍속의 변화가 거의 없었다. 산인터널 및 검백터널에서는 터널 내부로 갈수록 풍속이 낮아져 36m 부근에서 외부의 50% 수준이었다.
4. 산인터널 및 검백터널에서의 경우, 콘크리트 타설 후 36m 이상의 깊이에서 하루동안의 상대습도 변화는 터널 외부에 비해 약 30% 수준이었다. 또한 외부 및 출입구는 하루 중 온도변화도 터널 내부에 비해 상대적으로 컸다.

5. 콘크리트 타설 후 4시간 동안에 터널 전구간에서의 수분증발량과 블리딩량을 측정한 결과, 터널 내부 0~54m 지점에서는 수분증발량이 블리딩량보다 크거나 비슷한 것으로 나타났다.

### 5.2. 제언

터널내 온도, 상대습도, 풍속 등의 환경조건은 터널의 길이, 위치, 조사시점 등에 따라 변화하는 것을 확인하였다. 하지만 터널 벽면의 이슬이 맺히는 깊이, 풍속 및 온도, 상대습도 변화, 누적 수분증발량 등의 결과들을 종합할 때, 중터널 및 장대터널은 출입구 부분부터 터널 내부로 대략 60m까지, 200m 이하의 단터널에서는 전구간에 걸쳐 양생제를 살포할 것을 제안한다.

## References

- American Concrete Institute, Standard Specification for Curing Concrete, ACI 308.1-98, 1998.
- China Mistry of Transportation, Specification of Construction and Technology for Tunnel (JTC F60), 2009
- Dan Y., Anal M., and Dan G. Z., Laboratory and Field Evaluation of Concrete Paving Curing Effectiveness, Texas Transportation Institute, The Texas A&M University, 2006.
- Guangdong Department of Transportation, Specification of Construction and Technology for Concrete Pavement in Guangdong, 2010
- Korea Expressway Corporation, Specification for Highway Works (Civil Engineering Part), 2009.
- KS F 2414, Method of Test for Bleeding of Concrete, 2010.
- KS F 2406, Standard Test Method for Water Retention of Concrete Curing Material, 2009.
- Mehta P. K. and Monteiro P. J. M. M., Concrete : Microstructure, Properties, and Materials, The third edition, 2006.