

터널내 포장설계 특성 고찰

A Study on Design Characteristics of Tunnel Pavement

이경하* · 홍승호** · 유태석** · 박은용**

Lee, Kyung Ha · Hong Seung Ho · Yu, Tae Seok · Park, Eun Yong

1. 서 언

터널내 포장은 터널 굴착시공에 의하여 노상면이 양질의 암반으로 구성된다. 또한, 터널내 포장은 토공부 포장과는 달리 온도변화가 적고, 동상의 영향을 비교적 적게 받는다. 그렇지만 터널굴착에 의하여 용수가 많이 발생하는 경우가 있으므로 포장층내의 함수비가 높게 되어, 수분에 민감한 포장은 파손이 쉽게 발생할 수 있다. 또한, 터널내 포장은 조명시설의 설치에도 불구하고 주간에 조도가 토공부보다 낮으므로 명색화된 표면의 포장이 요구된다.

따라서, 터널내 포장은 일반 토공부와는 다른 지지력조건과 기후환경적 특이성 조건을 가지고 있기 때문에 일반 토공부와는 다른 포장설계방법을 적용하여야 한다. 본 고에서는 터널내 포장의 환경적 특성과 지지력 특성을 분석하고, 터널내 포장설계의 개선방안을 고찰하고자 한다.

2. 터널내 포장단면 설계

터널내에서는 일반적으로 측방여유폭이 적고, 환기설비 등의 부대설비가 필요하므로, 운전자의 시야확보를 위하여 터널내를 밝게하는 것이 필요하다. 또한, 일반적으로 대체도로가 적고 내부 포장구조체가 인버트 역할을 담당할 수 있도록 내구성이 높은 포장구조가 요구된다. 따라서, 이와같은 점을 고려하여 터널내 포장은 콘크리트 포장을 원칙으로 한다. 그러나 터널연장이 500m이하로 짧은 경우에는 지역여건과 시공성을 고려하여 터널 전후구간의 포장형식과 동일하게 적용할 필요가 있다.

터널내 포장의 형식 모두 하부층의 처리가 중요하다고 할 수 있다. 이는 터널이 가지고 있는 특수성으로 인하여 노상이 주로 암반으로 구성되어 있고, 지지력의 측면에서는 양호하나, 용출수가 많을 경우 이에 대한 처리가 매우 어렵기 때문이다. 그러므로 터널내 포장의 상부형식은 물론 하부형식에 있어서도 이러한 문제점을 간과해서는 안된다.

콘크리트 포장은 콘크리트 슬래브와 하부층에 시멘트 안정처리 필터층 또는 필터층을 적용하며, 린콘크리트 기층을 적용할 경우에는 용수의 배수를 위하여 반드시 하부에 필터층을 설치하여야 한다.

아스팔트 콘크리트포장은 아스팔트 혼합물층인 표층과 기층은 본선 토공부와 동일하게 시공하고, 보조기층은 생략하는 대신 필터층을 적용한다. 그 이유는 아스팔트포장에서 보조기층은 일정부분 하중지지 역할분담을 하도록 되어 있으나, 터널내포장은 노상이 암반으로 구성되어 있기 때문에 하중지지 역할은 필요없다. 그러나 노상으로 침투된 용출수의 배수가 필요하므로 배수 및 여굴에 따른 조정층의 역할을 하는 필터층의 설치가 요구된다.

터널내 노상은 주로 암반으로 구성되어 있으며, 지지력이 큰 특성을 가지고 있어서 포장두께설계에 대한 검토가 이루어져야 한다. 터널내 포장은 콘크리트 포장을 원칙으로 하고 있으며, 콘크리트포장 두께설계를 위하여 실제 터널내의 지지력 조사를 실시하여 이 지지력을 입력변수로 하여 콘크리트포장의 두께설계를 분

* 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원

** 한국도로공사 도로교통기술원 연구원



석하였으나 현행 AASHTO설계에서는 포장두께에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 터널내 포장은 별도의 단면설계를 하지 않고 본선포장과 동일하게 적용하는 것이 보다 효율적이다.

터널, 인접부 및 일반구간 콘크리트포장에 대한 중앙 처짐을 조사한 결과 터널, 인접부, 일반부의 순서로 작은 처짐을 나타내었고 큰 동적지지력을 얻을 수 있었다.

표 1. 터널포장의 처짐 특성

구 분		중앙부 최대처짐(μm) (9000lb환산)	하중전달율(%)	줄눈부 최대처짐(μm) (9000lb환산)	처짐비 줄눈부/중앙부
임고터널	터널부	22	81.1	43	1.95
	진입부	38	69.8	32	0.84
	절토부	55	73.7	45	0.82
	성토부	53	85.2	55	1.04
죽령터널	터널부	19	76.1	109	5.74
	진입부	41	85.2	79	1.93
육십령 터널	터널부	20	84.1	54	2.70
	절토부	46	71.1	128	2.78
	성토부	50	79.2	121	2.42
웅천터널	터널부	21	78.8	53	2.52
	진입부	76	92.2	115	1.51
진부터널	터널부	45	85.8	60	1.33

현재 사용되는 '81AASHTO 설계지침의 콘크리트포장 두께설계 공식을 사용하여 지지력의 변화에 따른 두께의 변화를 조사한 결과, 지지력이 두께에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 그러므로, 노상지지력이 양호한 조건에서 슬래브의 두께를 감소하기 보다는 토공부의 하부층이 린콘크리트와 선택층, 노상으로 구성되어 구하여진 합성지지력보다 노상인 암반과 필터층으로 구성된 합성지지력이 크므로 린콘크리트 기층을 생략할 수 있다.

그러나, 린콘크리트 기층은 구조적인 기능을 하는 외에도, 펌핑시 침식을 방지하는 역할을 하고, 선택층은 투수에 의해 펌핑을 방지하는 역할을 한다. 따라서, 터널내 포장에서는 침식방지와 투수역할을 할 수 있는 층이 필요하므로 투수성 입도의 시멘트 안정처리 필터층이 이 기능을 담당할 수 있다.

터널포장의 포장 하부구조 형식은 본선포장과는 전혀다른 특성을 가지고 있으므로 이에대한 검토가 이루어져야 한다. 터널이 용출수의 문제가 없다면 노상위에 콘크리트 슬래브 또는 아스팔트포장을 시공할 수 있으나, 용출수가 많은 터널에서는 용출수가 포장위로 나오는 펌핑현상이 발생하므로 용출수를 배제할 수 있는 필터층이 필요하다.

그러므로 필터층 재료로는 투수성의 필터층 재료가 사용될 수 있다. 터널내 콘크리트 포장의 하부구조 형식은 다음과 같이 나누어 질 수 있다.

표 2. 터널내 포장단면

구 분	콘크리트포장	아스팔트포장
I	콘크리트 슬래브	아스팔트 표층
	시멘트안정처리 필터층(15~25cm)	
II	콘크리트 슬래브	필터층(15~25cm)
	필터층(15~25cm)	

주) I : 용수에 의해 펌핑 및 침식의 우려가 있는 경우

II : 펌핑 및 침식의 우려가 없는 경우



아스팔트포장에서 아스팔트 혼합물층은 본선포장과 동일하게 시공하며 보조기층은 설치할 필요가 없다. 이는 아스팔트 포장에서 보조기층도 하중분산 역할을 하도록 되어 있으나 터널내 포장의 경우 노상이 암반으로 이루어져 있어서 하중지지역할이 크므로 보조기층을 설치할 필요가 없기 때문이다. 그 대신 투수층으로써의 역할이 필요하므로 필터층을 설치하며 필터층의 두께는 용수량에 따라 달라질 수 있다.

3. 동상방지층 설치

터널내의 노상은 일반적으로 암반으로 구성되어 동상을 쉽게 일으키는 토질이 아니며, 터널내부는 외부와 달리 온도변화가 적어 일반적으로 동상의 영향이 적다. 그러나, 터널내의 암반의 균열로부터 용수의 발생과 발파로 인한 요철면에 물이 고임에 따라 동상의 원인을 제공할 수 있다. 그리고, 발파면의 요철에 따른 배수 처리 불량으로 암반의 풍화에 따른 지저력약화를 가져올 수 있고, 암반에 존재하는 절리, 층리 및 단층대의 존재는 동상을 줄 수 있는 요인이다.

동결의 영향을 고려하는 지역에서는 일반적으로 동절기에 터널내 온도가 터널 입출구부 일정구간을 제외하고는 터널내부가 터널외부 온도보다 높아서 동결관입효과가 상당히 감소된다. 그렇지만 터널 갱구부에서는 터널바닥의 요철면에 물고임에 의한 포장층에 대한 동결융해 작용과 팽팽현상을 배제하기 위한 동결방지층 설치가 필요하다.

터널내 동절기 온도조사를 실시한 결과, 터널 입구부는 외기온도의 영향을 많이 받으며 이는 터널 내부로 차량의 진입에 의한 외기 유입으로 인한 것으로, 외기 온도의 영향권은 그림 1과 그림 2에서 150m인 것으로 나타났다. 또한, 입구부의 동상에 영향을 미치는 지점으로 동상방지층을 설치해야하는 지점은 입구부로부터 50m 인 것으로 나타났다.

출구부는 외기온도 영향권이 그림 3에서 50m인 것으로 나타났으나, 터널 출구부의 온도는 영상의 온도를 나타내므로 동상에 영향을 미치지 않는 온도조건이어서 동상방지층을 설치할 필요가 없는 것으로 나타났다. 따라서 출구부의 동상방지층은 터널시공지역의 기후환경여건을 고려하여 동상방지층을 생략할 수 있다.

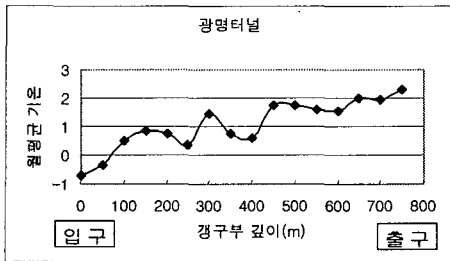


그림 1. 터널내부 온도 (터널연장 1km이하)

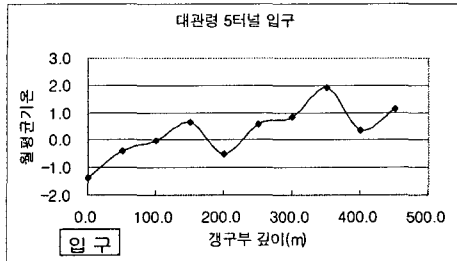


그림 2. 입구부 깊이별 터널내부 온도 (터널연장 1km이상)

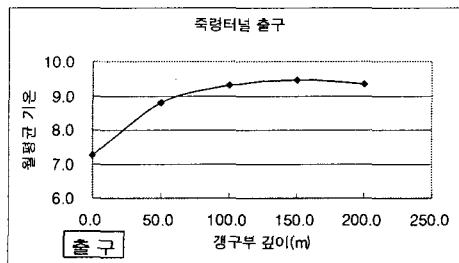


그림 3. 출구부 깊이별 터널내부온도 (터널연장 1km이상)



터널 연장별 온도특성을 살피기 위하여 터널연장별로 500m이하, 500~1000m, 1,000~2,000m, 2,000~3,000m, 3,000m이상으로 요인을 구분하여 터널을 선정하였다. 터널 내부의 공기중 온도를 동절기 일평균기온으로 조사한 결과는 표 3과 같으며 갱구부로부터 50m간격으로 조사하였다.

표 3. 터널내부 대기온도

터널명	위치	갱구부 깊이별 대기온도(℃)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
웅천	입구	1.6	2.2	2.6	2.5	-	-	-	-	-	-
	출구	2.3	2.2	2.4	2.7	-	-	-	-	-	-
광명	입구	-0.7	-0.4	0.5	0.9	0.7	0.4	1.5	0.7	-	-
	출구	2.3	2.0	2.0	1.5	1.6	1.7	1.7	0.6	-	-
대관령5	입구	-1.4	-0.4	0.0	0.6	-0.5	0.6	0.8	1.9	0.3	1.1
	출구	1.5	3.4	2.0	1.0	2.0	-	-	-	-	-
상주	입구	0.6	0.7	1.1	1.4	1.5	0.8	1.6	1.6	1.4	1.4
	출구	4.6	4.1	4.4	4.3	3.7	-	-	-	-	-
대관령1	입구	-3.5	-3.6	-3.4	-2.5	-2.7	-3.2	-2.7	-2.6	-	-
	출구	0.0	-0.7	0.2	-1.2	-0.1	-	-	-	-	-
진부1	입구	-2.7	-3.5	-3.3	-4.3	-3.8	-3.2	-4.2	-4.0	-4.9	-3.4
	출구	0.1	-0.5	-1.1	-0.3	-0.9	-	-	-	-	-
육십령	입구	-1.6	-0.1	-0.4	0.6	0.2	0.7	0.3	1.0	1.3	1.3
	출구	6.0	6.0	6.0	5.8	5.5	-	-	-	-	-
죽령	입구	2.4	2.7	2.7	2.4	3.5	3.2	3.2	3.0	3.6	3.9
	출구	7.3	8.8	9.3	9.5	9.4	-	-	-	-	-
평균	입구	-0.5	0.0	0.3	0.6	0.5	0.7	0.9	1.2	1.8	2.4
	출구	2.8	3.0	3.1	3.0	3.3	-	-	-	-	-

그림 4는 동절기 일평균기온과 동결지수와의 관계를 나타낸 것으로 동절기 일평균 기온을 구하면 동결지수를 구할 수 있도록 하였다. 일반적으로 동결지수가 100℃·일 이하이면 동결심도가 포장층이하가 되므로 동상방지층을 설치할 필요가 없게 된다. 그러므로 동결지수가 100℃·일에 해당하는 동절기 일평균 기온은 그림 4에서 0℃로 나타난다.

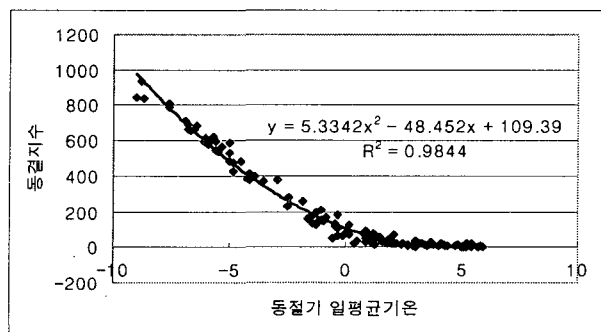


그림 4. 동절기 일평균기온과 동결지수와의 관계

따라서, 동절기 일평균기온이 0℃가 되는 지점까지 동상방지층을 설치하면 된다. 그림 5와 그림 6은 표 3의 평균치를 계산 한 값을 그래프로 나타낸 것이다.

터널 입구부로부터 동절기 일평균기온이 0℃가 되는 지점은 그림 5에서 입구부로부터 50m지점이고, 터널 출구부에서는 동절기 일평균 기온이 그림 2.9에서 0℃이상이 되므로 동상방지층을 설치할 필요가 없게 된다. 이는 터널내부의 보온효과와 자동차의 배기가스등으로 인하여 따뜻해진 공기가 터널출구로 배출되는 지점이므로 터널외부의 찬 공기가 영향을 미치지 않기 때문이다.



다만 상·하행이 분리되지 않은 터널의 경우에는 터널 입구부의 조건에 해당하므로 갱구부 양쪽 모두 동상방지층을 설치하여야 한다.

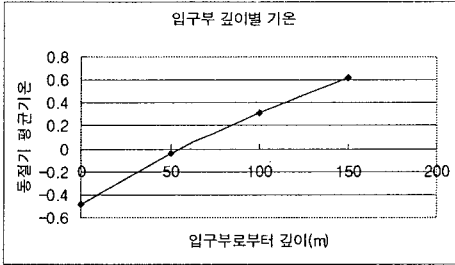


그림 5. 입구부 깊이별 공기온도

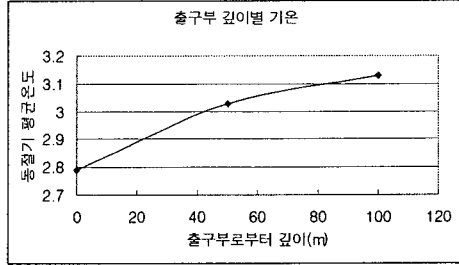


그림 6. 출구부 깊이별 공기온도

4. 필터층의 재료

터널내 포장형식중 콘크리트포장은 불투수성이므로 용수에 의한 문제는 없으나 콘크리트포장의 불연속면 사이로 용수에 의한 펌핑현상이 발생된다. 그러므로 콘크리트 슬래브 하부층에는 배수가 잘되는 필터층의 설치가 요구된다.

콘크리트 슬래브 하부층에 선택층을 설치하면 필터층으로써 역할을 할 수 있으나 펌핑현상 발생시 선택층의 침식으로 줄눈부 하부층에 공동이 발생하여 지지력 손실을 가져올 수 있다. 그러므로, 슬래브 하부층에는 시멘트로 안정처리된 필터층을 설치하여 침식을 방지할 수 있다.

투수성을 갖기위한 필터층의 입도변화에 따른 투수계수 특성분석결과, 0.08mm체 통과량 변화에 따른 투수계수의 변화특성은 0.08mm체 통과량이 증가할 수록 투수계수가 감소하는 특성을 갖고 있으며, 투수성 여부를 판단하는 보조기층 재료의 세골재로 모래를 사용하는 경우, 다짐공시체의 투수계수는 $1 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 로 나타나므로 그림 7에서 이 경우에 해당하는 0.08mm체 통과량은 5%정도로 나타나고 있다. 따라서, 0.08mm체 통과량을 4%이하로 하여야 한다.

따라서 그림 7의 결과를 토대로 필터층 재료의 입도를 표 4와 같이 제시할 수 있다.

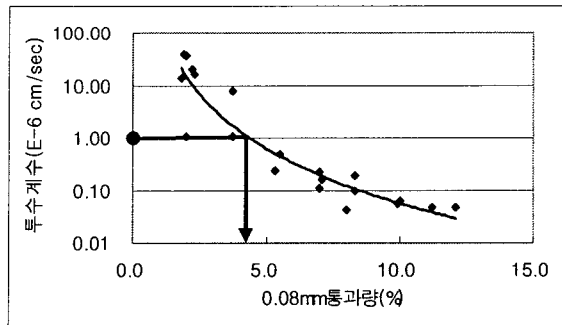


그림 7. 0.08mm 통과량 변화에 따른 투수계수의 변화



표 4. 필터층 재료의 입도

호칭치수(mm)	체통과중량 백분율(%)
50	100
40	80~100
20	55~90
5	30~65
2	20~50
0.4	5~25
0.08	0~4

5. 결 언

터널내 포장은 일반 토공부 포장과는 지지력조건과 기후환경적 특이성 조건을 가지고 있기 때문에 일반 토공부와는 다르게 설계되어야 한다. 현재 건설교통부 국책연구과제로 추진하고 있는 “한국형 포장설계법 개발 및 포장성능 개선방안 연구”의 일환으로 터널내 포장설계지침 연구를 수행하였으며, 터널내 포장설계지침을 수립중에 있다. 터널내 포장설계지침이 시행되면 터널특성에 맞는 보다 합리적인 설계가 될 것이며, 과도하게 설계되는 부분에 대하여 수정을 하므로써 도로 건설사업의 예산절감에도 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 기사는 건설교통부의 국책연구과제인 “한국형 포장설계법의 개발 및 포장성능개선연구”의 일부결과로서, 본 연구를 가능케 하여주신 건설교통부에 감사드립니다.