

도로터널의 환기방식에 따른 라이닝 콘크리트의 중성화 사례 연구 Case Study of Carbonation on Lining Concrete in Vehicular Tunnel as Ventilation System

추진호¹⁾, Jin-Ho, Choo, 맹두영²⁾, Doo-Young, Maeng,
황인백³⁾, In-BaeK, Hwang, 노은철⁴⁾, Eun-Chul, Noh

- 1) 한국시설안전기술공단 지하시설실 직원, Employee, Dept. of Tunnel and Underground Structure, Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation
- 2) 한국시설안전기술공단 지하시설실 부장, Head of Dept. of Tunnel and Underground Structure, KISTEC
- 3) 한국시설안전기술공단 지하시설실 차장, Assistant director of Dept. of Tunnel and Underground Structure, KISTEC
- 4) 한국시설안전기술공단 지하시설실 과장, Head of Section of Dept. of Tunnel and Underground Structure, KISTEC

개요(SYNOPSIS) : The appropriate ventilation system in vehicular tunnel should be the most economical solution with regard to both construction and maintenance. The damages on tunnel lining was affected by formula of ventilation system in long vehicular tunnel. In this study, carbonation, one of main experimental items in precision safety diagnosis, was analyzed by contouring damage area with ventilation system. Considerations of carbonation were also given to the design and maintenance which manage the long-term safety in tunnel.

주요어(Key words) : Carbonation, Ventilation, Vehicular Tunnel, Maintenance

1. 서론

도심지의 원활한 차량통행을 위해 도로터널의 필요성과 시공이 늘어나고 있으며 도심지의 장대 도로터널의 설계에 있어서 중요하게 대두되는 것이 환기에 대한 고려사항일 것이다. 차량정체시의 배기가스와 화재시의 발생될 수 있는 유독가스등의 적절한 배기를 인위적으로 수행할 수 있도록 여건에 맞는 환기방법과 용량의 설계는 장대 도로터널에 있어서 매우 중요한 설계인자라 할 수 있다.

기존에 시공된 많은 도로터널에 사용되는 환기방식에는 자연환기방식, 횡방향 환기방식, 장대터널 내에서의 Fan을 이용하는 방식, 반횡류식, 횡류식등의 다양한 방식들이 있으며 터널의 지형적, 위치적인 특성에 맞추어 시공되어져왔다.

준공된 도로터널의 경우 공용년수가 증가함에 따라 구조물이 노후화되어 손상이 육안으로 조사되고 주 재료인 콘크리트 라이닝의 내구성 저하와 철재빔, 철근 등의 보조 재료에 부식이 진행되어 구조물의 안전성에 영향을 미치게 된다. 환기방식에 따라 노후화된 도로터널의 특징은 환기터널 내부의 오염정도와 공기 흐름이 다르게 나타나는데 이는 1961년에 발표된 Stahel과 Ackeret에 연구 내용으로 현재까지 터널환기 시스템의 설계에 많이 이용되고 있다. 본 연구에서는 터널의 노후화로 인한 터널라이닝의 안

전성 평가항목인 중성화에 대해 00터널의 현장시험 자료를 이용하여 환기방식에 따른 손상의 분포를 살펴보았으며 이를 기초로 설계와 유지관리를 고려되어야 할 부분을 제안하고자 한다.

2. 중성화의 이론적 고찰

중성화란 굳은 콘크리트와 공기중의 탄산가스가 반응하면서 알칼리성을 잃게 되는 현상을 일컫는다. 즉 건전한 콘크리트는 경화 시멘트풀의 수산화 화합물중 약 25%를 차지하는 수산화칼슘(Ca(OH)₂)의 영향으로 pH가 12~13인 강알칼리성을 나타내나 탄산가스와 수산화칼슘이 반응하면 탄산칼슘(CaCO₃)으로 환원되면서 표면부터 콘크리트의 pH가 서서히 10이하로 낮아지는 현상이다(식 (1) 참고).



콘크리트의 중성화는 표면에서 내부를 향해 진행되어 탄산가스가 반응한 중량만큼 콘크리트가 무겁고 치밀해진다. 또한 중성화가 진행되면서 아주 미세한 균열이 발생되지만 중성화에 의해 직접적으로 콘크리트의 성능이 저하되는 것은 아니다. 단지 중성화가 문제가 되는 이유는 중성화가 피복두께를 넘어서 철근의 표면에 도달하게 되면 철근표면을 감싸고 있던 부동태 피막이 파괴되면서 철근표면에 부식이 시작되기 때문이다.

철근은 대기 중에서는 조기에 산화되어 녹이 발생하지만 중성화되지 않은 콘크리트 내에서는 안정적이다. 즉 pH 11 이상에서 철은 표면에 부동태를 형성해, 산소가 존재해도 녹이 발생하지 않는다. 그러나 중성화에 의해 pH가 10이하가 되면 철근은 녹이 발생하고, 녹이 발생함으로써 철은 약 2.5배의 체적팽창을 한다. 녹의 진행과 함께 콘크리트에 균열을 발생시켜, 피복콘크리트의 박리를 발생시킨다. 이 때문에 콘크리트구조물의 내구성을 고려할 때 중성화를 검토하는 것이 중요하다.

일반 대기와 접해있는 콘크리트의 중성화속도는 환경조건(대기중의 탄산가스농도, 온도, 습도, 마감재 등)을 주원인으로 하는 외적요인 및 콘크리트 자체의 성능·품질(함수율, 강도, 시멘트의 종류, 배합조건, 시공조건 등)을 주원인으로 하는 내적요인에 의해 복합적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

대기중의 탄산가스에 의한 콘크리트표면으로부터의 중성화의 진행을 경과시간의 함수로서 표현한 것이 중성화 속도식이다. 중성화가 정상상태에서 탄산가스의 콘크리트내부 확산에 따라 생긴다고 가정하면, 중성화깊이 C는 경과시간 t의 평방근에 비례하다고 하는 식(2)가 도출된다. 이것은 통상, \sqrt{t} 법으로 불리며, 가장 일반적으로 사용되고 있다.

$$C = A\sqrt{t} \quad (2)$$

이때, C는 중성화 깊이(mm), A는 주변환경 및 콘크리트에 관련된 계수이고 t는 콘크리트 타설 후 경과된 시간이다. 여기서 계수 A값의 제안식은 浜田(하마다)식, 岸谷(키시타니)식, 白山(시로야마)식, 依田(요다)식 등이 있으며 본 연구에서는 식 (3)의 키시타니식을 사용하여 중성화의 진행의 추정깊이를 산정하였다(콘크리트구조물의 耐久性시리즈, 1986).

$$W/C < 0.6 \text{인 경우} : X \text{ (mm)} = \sqrt{-t \left\{ \frac{R^2 (4.6 W/C - 1.76)^2 \times 100}{7.2} \right\}} \quad (3)$$

이때, t : 경과시간(년), X : 중성화 깊이(mm), W/C : 물/시멘트 비, R : 중성화 비율상수이며 본 연구에서는 물-시멘트 비는 상행선 56.58%, 하행선 59.81%(실내시험 결과), R=1 (강모래·강자갈 사용), 경과시간은 상행선(9년), 하행선(10년)을 적용하였다.

3. 중성화 조사 및 환기방식의 고찰

3.1 00터널의 형식

00터널은 상·하행의 독립된 2개의 일방향 터널로 각 연장이 1500M의 2차선으로 도심지의 많은 교통의 흐름을 처리하고 있으며 출·퇴근 시간 및 일기가 좋지 않은 저기압의 상황에서는 터널내의 깨끗한 공기를 위해 강제배기를 실시하고 있다.

상행선의 환기방식은 그림 2와 같이 반횡류식으로 지형적인 구배를 해결하기 위하여 중앙에 송풍용 환기연결통로를 추가적으로 설치되어 있는 형태를 지니고 있으며 차량의 흐름방향으로 공기의 흐름이 진행되도록 설계되어 있다.

반횡류식은 터널 연장 전체에 균일한 공기의 흡·배기를 유지할 수 있으며, 화재 시에는 역방향으로 환기하는 방식으로 급기구를 통하여 연기를 흡기하도록 설계되었으며 반횡류식 터널의 오염정도는 차량 이동 방향으로 상대적으로 일정한 비율을 보이게 된다(Guan Sin Kwa, 2004).

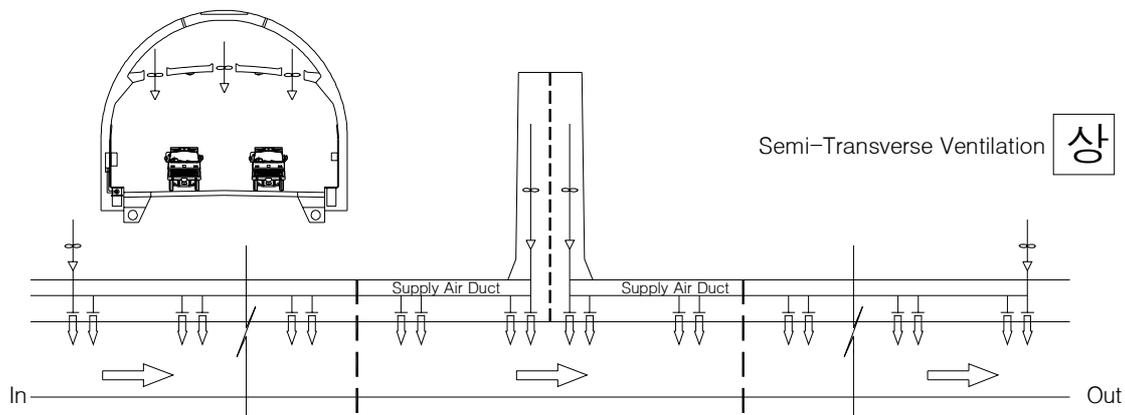


그림 2. 상행선의 반횡류식 환기방식 및 바람의 흐름

하행선의 환기방식은 그림 3과 같이 횡류식으로 환기덕트부의 중간에 격벽을 설치하여 바람을 한쪽으로 송풍하여 도로부의 오염된 공기를 다른 환기덕트부를 통해 강제 배기시키는 시스템으로 차량의 흐름방향과 동일하게 공기의 흐름이 진행되도록 설계되었다.

횡류식은 터널 연장 전체에 일정하게 외부공기를 공급하고 공기의 흐름은 터널방향에 횡단하는 방향이며 배기의 양은 흡기의 양과 동일하게 설계된다. 화재시에는 연기는 슬래브 하면을 따라 이동하게 되며 배기구를 통하여 배출하는 방식이며 터널내 공기 흐름의 속도뿐만 아니라 오염정도는 상대적으로 일정하다. 특히, 연기가 없는 구역을 만들어 인명을 대피할 수 있는 장점을 지닌다(Guan Sin Kwa, 2004).

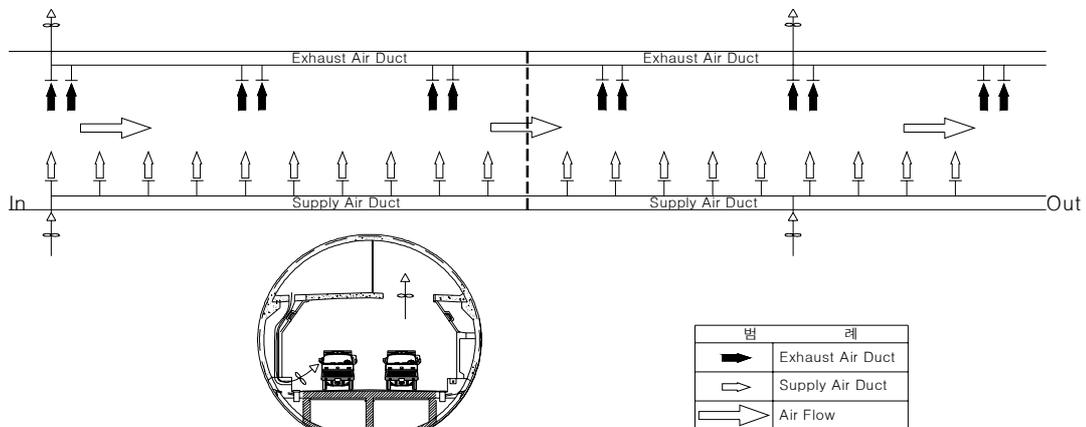


그림 3. 하행선의 횡류식 환기방식 및 바람의 흐름

3.2 중성화 진행 측정방법

본 연구에서는 도로터널의 주요부재인 콘크리트 라이닝의 중성화 시험 중 시약을 사용하는 방법으로 전용 코어채취기를 이용하여 코어채취 후 할렬하여 페놀프탈레인 1% 용액을 살포하면 중성화가 진행된 부분에 할렬면이 선홍색으로 반응한 경계를 측정하여 중성화의 진행 깊이를 파악하였다(Peter H. Emmons, 1995). 구조물에 피해를 최소화하는 동시에 정밀한 중성화의 진행에 대한 시험을 하기 위하여 본 연구에서는 $\phi 50\text{mm}$ 핸드드릴을 이용하여 코어를 채취하였다. 측정 진경은 그림 1과 같으며 00터널의 환기방식에 따라 중성화의 손상분포를 파악하기 위하여 환기덕트부와 슬래브 상·하면등의 도로터널의 주요부분을 조사하였다.



그림 1. 현장에서의 중성화 깊이 측정 전경

3.3 00 중성화 측정 결과 고찰

00터널의 정밀안전진단의 콘크리트 내구성 평가의 한 항목으로 실시된 중성화 진행의 측정은 출·퇴근 시간을 피해 환기덕트부의 팬을 정지시킨 후 중성화 측정 기구를 이동하며 1차 조사 후 1달 이내에 자료 분석을 위한 추가조사를 실시하였으며 조사현황은 표 1. 과 같다.

표 1. 추정식을 이용한 중성화 진행 추정깊이 및 조사현황

구 분	경과시간 (년:t)	중 성 화 추정깊이 (X:mm)	평균깊이(측정개소)		중성화 깊이의 범위(mm)
			$\phi 22$ (드릴)	$\phi 50$ (코어)	
상 행 선	9	9.4	14.6mm (16개소)		12.1~19.0
				20.96mm (16개소)	16.0~26.6
				14.49mm (12개소)	7.3~21.6
하 행 선	10	11.6	10.63mm (31개소)		4.7~16.4
				25.65mm (28개소)	5.3~41.5
				15.12mm (6개소)	9.5~18.2

※ 측정된 평균 중성화 깊이는 각 측정위치에서의 산술평균임

본 연구의 중성화 측정은 현장 여건에 따라 $\phi 22\text{mm}$ 드릴링과 $\phi 50\text{mm}$ 코어를 이용하여 실시하였으며, 그림 4와 5에 조사된 자료를 도시하여 분석하였다. 상/하행선 모두 키시타니(岸谷)의 실험식으로 추정함

중성화 깊이보다는 진행이 크게 된 것으로 조사되었다. 이는 차량통행에 따른 대기중의 이산화탄소의 농도가 환기 덕트부를 통해 배출되며 축적되어 있어 오염원으로 작용하고 있는 것으로 판단된다. 라이닝의 중성화 깊이는 상행선에 비하여 하행선의 경우가 중성화 진행이 느린 것으로 조사되었는데 이는 하행선 환기덕트부 아치부 전 구간에 걸쳐 시멘트풀로 보수가 이루어져 어느 정도 중성화의 진행을 억제하고는 있으나, 시간의 경과에 따라 중성화가 진행될 것으로 보아 중성화에 대한 대책이 필요할 것으로 판단된다. Φ 22mm 드릴을 이용한 경우는 중성화의 진행에 대한 측정결과의 정밀도가 다소 낮은 것으로 판단되어 본 연구에서는 Φ 50mm의 결과를 이용하여 환기방식에 따른 도로터널내의 중성화 진행 분포를 분석하였다.

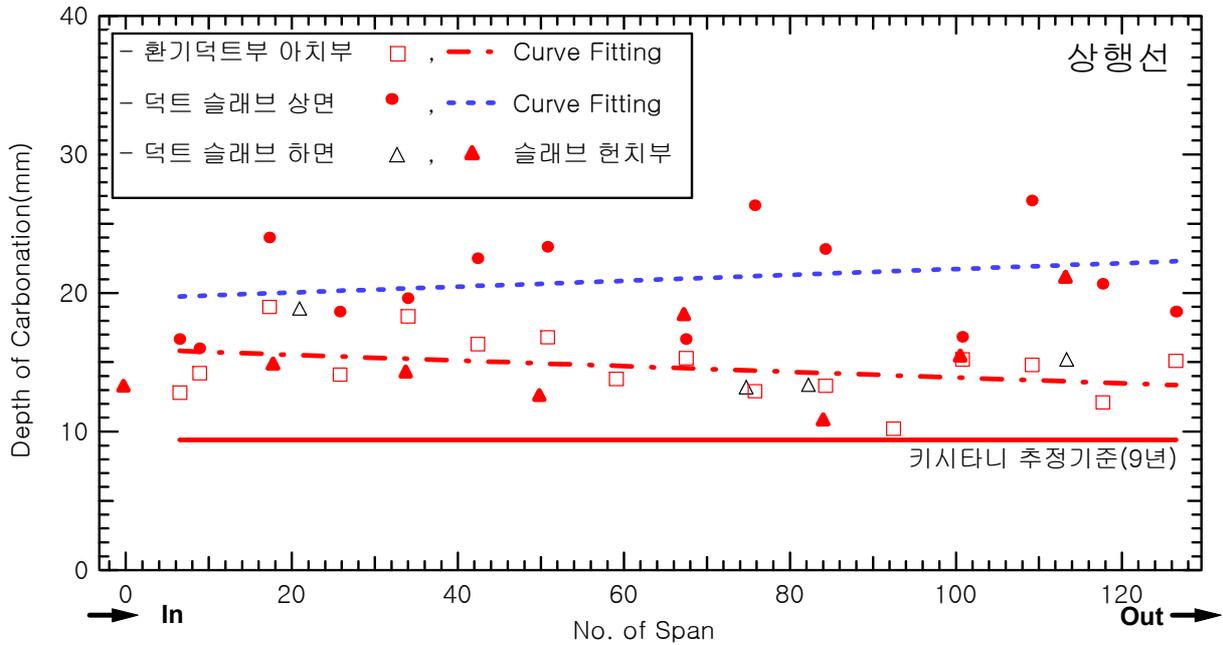


그림 4. 상행선의 중성화 시험 결과 및 분석

그림 4의 상행선의 중성화 진행분포에서 환기덕트부 아치부와 슬래브 모두 중성화 진행 추정식 보다 중성화의 진행이 크게 이루어진 것으로 조사되었다. 반횡류식인 00터널의 상행선의 환기덕트부 아치부 라이닝이 덕트슬래브 상면에 비하여 중성화의 진행이 적게 평가된 이유는 외관조사결과 송풍시의 오염원이 슬래브상부에 적체되어있기 때문인 것으로 판단된다. 차량 이동방향으로 환기를 유도하고 있어 출구방향으로 오염으로 인한 콘크리트 슬래브의 중성화 진행 분포가 증가하는 것으로 조사되었다.

환기덕트부의 중간벽을 설치하여 송·배기를 유도하는 하행선의 경우 차량 이동방향으로 환기가 유도되어 출구방향으로 오염의 정도가 증가하는 일반적인 경향을 따르는 것으로 조사되었다. 상행선과 다르게 환기덕트부 아치부가 추정깊이 보다 다소 낮게 조사되었는데 이는 아치부에 시멘트풀 보수가 실시되어 부분적으로 중성화 진행을 억제하고 있는 것으로 판단된다. 환기덕트부 슬래브의 배기부가 송기부보다 중성화의 진행이 평균적으로 5mm이상 큰 것으로 조사되었는데 이는 송기부에 비해 배기부에 차동차 배기가스로 인한 오염의 정도가 심하기 때문이다. 덕트슬래브 하면의 경우에 있어서도 중성화의 진행은 경과년수와 비교하여 크게 진행된 것으로 조사되었다.

‘98년도에 측정된 값과 금년도의 측정치를 비교해 볼 때 중성화의 진행은 10~20mm 이내로 일반적으로 철도 및 지하철의 중성화 진행보다 상당히 진행되었으며, 5년의 추정깊이(9.27mm)를 고려할 경우 그 속도는 빠르게 진행되고 있다고 판단된다.

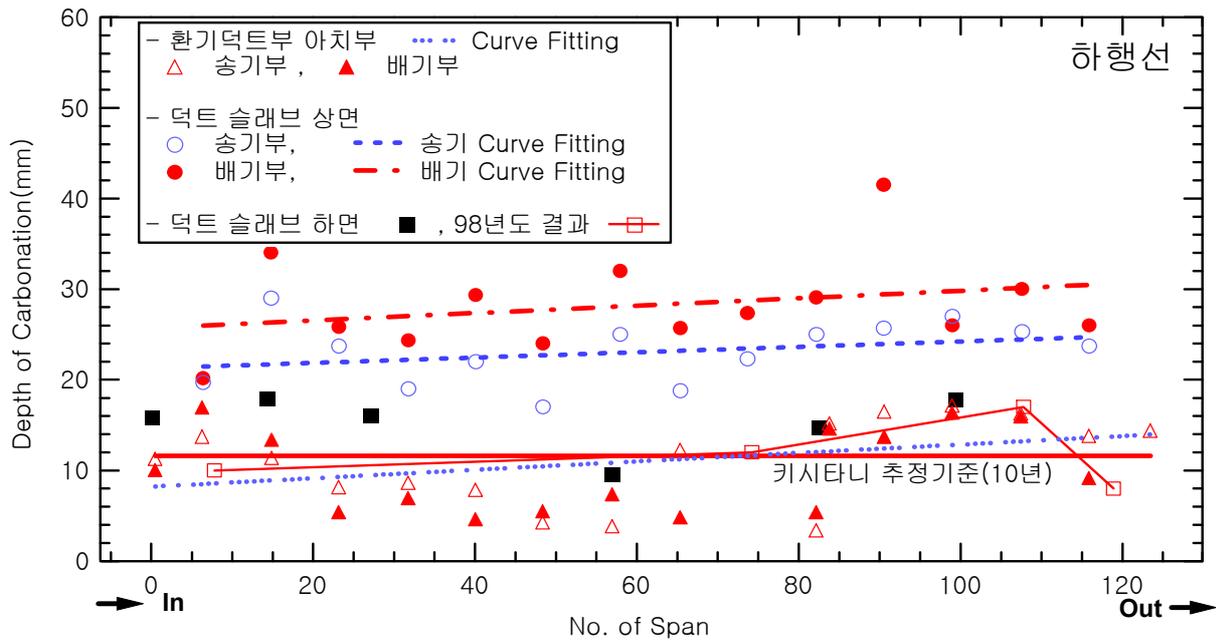


그림 5. 하행선의 중성화 시험 결과 및 분석

4. 결론

00터널의 환기방식에 따라 라이닝 콘크리트 손상의 정도를 파악한 본 연구에서는 장기적인 안전성 및 유지관리를 위해 다음과 같은 내용을 분석하였다.

1. 환기덕트부의 덕트슬래브 상면의 경우 상·하행선 모두 중성화가 상당히 진행된 것으로 조사되었으며, 5cm의 철근피복을 고려할 때 우선적으로 출구부 방향으로 중성화 억제공법 적용이 필요한 것으로 나타났다.
2. 하행선의 경우, 송·배기 모두 중성화 억제공법을 적용해야 하나 송기부보다 배기부의 중성화 진행 정도가 깊은 점을 감안할 때 배기부의 보수가 우선적으로 실시되어야 하는 것으로 판단된다.
3. 상·하행선 덕트슬래브의 중성화 진행이 아치부보다 크게 평가된 것은 덕트슬래브의 경우 환기로 인한 오염물이 덕트슬래브 상부에 적체되어 중성화의 진행에 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.
4. 상행선의 중성화 진행의 범위보다 하행선의 경우가 크게 평가되는 것은 환기방식의 차이로 반횡류식의 경우 배기가스로 인한 분진이 도로표면을 따라 출구방향으로 배출되나 횡류식의 경우 배기가스로 인한 분진이 덕트슬래브 배기부에 적체되어 덕트슬래브의 중성화 진행을 가속하는 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 한국시설안전기술공단(2003), “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침”, 터널
2. 콘크리트 구조물의 耐久性시리즈 : 日本 技報堂出版, 1986
3. Guian Sin Kwa(2004), “The Design of Tunnel Ventilation System for a Long Vehicular Tunnel”, ITA, Singapore
4. John O. Kickel ; T. R. Kuesel(1982), Tunnel Engineering HandBook
5. Peter H. Emmons(1995) "Concrete Repair and Maintenance Illustrated", R.S Means Company, MA