

터널 콘크리트 라이닝 탄산화 영향인자 관계성 분석

이규필*

정회원, 한국건설기술연구원 지반연구본부 연구위원

A study on the relationship of the influencing factors on carbonation in tunnel concrete linings

Gyu-Phil Lee*

Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*Corresponding Author : Gyu-Phil Lee, freely@kict.re.kr

Abstract

In general, the tunnel portal is constructed with reinforced concrete. And the carbonation of concrete can cause reinforcement corrosion, causing function failure and tunnel destruction. To establish management system such as tunnel inspection and rehabilitation, distance between tunnel portal and coast, service life and traffic were selected as carbonation influencing factors and correlation analysis with carbonation depth for each influencing factor was performed.

Keywords: Concrete lining, Salt injury, Carbonation, Regression analysis, Pearson correlation coefficients

초 록

일반적으로 터널 입출구부는 철근콘크리트 라이닝으로 시공되며 콘크리트의 탄산화는 철근 부식을 발생시켜 터널구조물의 기능상실 및 파괴를 유발할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 터널구조물 점검, 보수·보강 등 유지관리를 위한 체계 정립을 위하여, 탄산화 영향인자로 터널 입·출구부와 해안과의 거리, 공용연수 및 교통량을 선정하였으며 각 영향인자별 탄산화깊이와의 상관관계 분석을 수행하였다.

주요어: 콘크리트 라이닝, 염해, 탄산화, 회귀분석, 피어슨 상관계수

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
26(5)507-518(2024)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2024.26.5.507>

eISSN: 2287-4747
pISSN: 2233-8292

Received August 2, 2024
Revised August 19, 2024
Accepted August 20, 2024



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2024, Korean Tunnelling and Underground Space Association

1. 서론

최근 해양 환경이나 제빙화해제(제설염, deicing salt)에 노출되는 지역 등과 같이 열악한 환경에 건설되는 구조물이 늘어가고 있다. 이러한 환경의 변화 및 구조물의 장수명화에 대한 요구 등에 따라 콘크리트 구조물의 내구성 설계와 시공에 대한 관심이 높아지고 있다.

콘크리트 구조물의 내구성은 기상 작용, 화학적 침식 작용, 물리적 마모 작용, 기타 열화 작용 등에 저항하며 구조물에 요구되는 역학적 및 기능적인 성능을 장기간에 걸쳐 발휘하는 능력이다(Japan Concrete Institute, 2024). 또한 콘크리트 구조물의 내구성은 콘크리트의 열화 상태에 크게 영향을 받으며 콘크리트의 열화는 염해, 탄산화, 알칼리 골재 반응 등의 화학적 요인과 동결융해작용, 건조수축, 화학적 침식, 시공불량 등의 물리적 요인으로 구분할 수 있다.

터널구조물의 내구성 평가는 「시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법」에 따라 성능평가 시 시행하고 있다. 내구성 평가항목은 열화진전평가와 열화환경평가로 구분하며 열화진전평가에는 염화물침투량, 탄산화깊이, 피복(표면부) 콘크리트의 품질이 포함되고, 열화환경평가에는 염해환경 및 동해환경이 포함된다.

그러나 염해는 해양 환경 하에 있는 콘크리트 구조물에 있어서 가장 중요한 열화 메커니즘 중 하나로 장기간 염해 환경에 노출되는 경우 구조물 내부로의 염화물 침입 및 이에 따른 철근 부식 등이 심각하게 발생할 수 있다(Lee and An, 2012). 해수와 직접 접하지 않는 구조물에서도 염해는 주로 대기 중의 비래염분에 의해서 발생하게 된다. 비래염분은 파도에 의해 부서지는 해수에서 발생하는 것으로 대기 중에 부유하여 해풍이나 계절풍 등에 의해 내륙으로 날아 들어와 구조물에 염해를 발생시키게 된다(Lee et al., 2010).

반면 탄산화는 대기 중의 이산화탄소가 콘크리트 내부로 침투하여 철근 주변이 중성화되어 알칼리 상태에서 존재하는 철근의 부동태 피막이 파괴되어 철근 부식이 발생하게 된다. 염해와 탄산화는 철근 부식의 발생원인은 다르지만 외부 파괴양상만 본다면 철근부식과 이로 인한 피복의 파괴에 의한 내구성 저하라는 현상은 동일하다(Han and Park, 2008). 탄산화는 자체가 콘크리트에 직접적인 손상을 미치는 것은 아니며 탄산화된 콘크리트는 불투수성을 나타내기 때문에 유해물질에 대한 저항성이 증대될 수 있다(Kim, 1995). 그러나 해양 환경 하에 노출된 건물은 염분의 직접적인 영향으로 내륙 지역 소재 건물에 비해 염화물량이 많으며 콘크리트 중성화와 염해가 중첩된 노후 건축물에서 단면 결손이 발생되고 있다(Kim et al., 2002).

그러나 「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침(성능평가 편)」에서는 열화진전평가(탄산화깊이)와 열화환경평가(염해환경)는 독립적으로 실시하며 대상 시설물의 내구성 종합등급에는 열화진전평가만이 사용되고, 열화환경평가는 종합등급 산정에는 활용하지 않는 것으로 규정하고 있다. 콘크리트 라이닝의 중성화와 염해가 중첩되는 경우 구조물 보수·보강 등 유지관리 계획 수립에 영향을 미칠 수 있다.

따라서 본 연구에서는 해안가에 인접한 터널구조물 콘크리트 라이닝의 중성화와 염해가 중첩될 수 있는 염해 환경, 대기 중 이산화탄소의 농도 및 콘크리트 라이닝과 이산화탄소의 접촉 시간에 따른 영향분석을 위하여 교통량 및 공용연수를 탄산화깊이와의 상관관계를 분석하였다. 염해환경의 경우 해안으로부터 터널 입구부 또는

출구부까지의 거리변화에 따른 탄산화깊이와의 상관관계 분석을 수행하였다.

2. 자료수집 및 분석

「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침」에서는 터널구조물에 대한 정밀안전점검 또는 정밀안전진단 시 균열, 누수, 파손 및 손상, 재질열화 등과 같은 외관조사는 물론 콘크리트 강도 및 탄산화깊이 측정 등과 같은 재료 시험을 시행하도록 규정하고 있다. 본 연구에서는 염해환경, 공용연수 및 교통량과 콘크리트 라이닝의 탄산화깊이 간 상관관계분석을 위하여, ○○터널(상) 등 90개소 터널에 대한 최근 3년간 정밀안전점검 또는 정밀안전진단 결과를 조사 및 분석하였다.

2.1 탄산화깊이

「시설물의 안전 및 유지관리 실시 세부지침」에서는 페놀프탈레인 용액을 이용하여 콘크리트 라이닝의 탄산화 깊이를 측정하도록 규정하고 있다. 탄산화깊이 측정은 코어 공시체를 이용하는 경우 코어공시체를 할렬하고 할렬면을 측정대상으로 하며, 드릴을 이용하는 경우 직경 10 mm의 드릴링에 의해 채취되는 콘크리트가루가 페놀프탈레인용액을 적신 시험지에 떨어져 변색되는 시점을 탄산화깊이로 정하고 있다(Fig. 1 참조).



Fig. 1. Overview of carbonation depth test

정밀안전점검 또는 정밀안전진단 시 탄산화깊이 측정은 일반적으로 철근보강콘크리트로 시공되는 터널입출구부 라이닝에 대하여 시행되며, 본 연구에서는 각 터널별 측정된 탄산화깊이의 평균값을 기준으로 분석하였다. ○○터널(상) 등 90개소 터널별 콘크리트 라이닝의 탄산화깊이는 3.1~14.8 mm인 것으로 조사되었으며 분포현황은 Fig. 2와 같다.

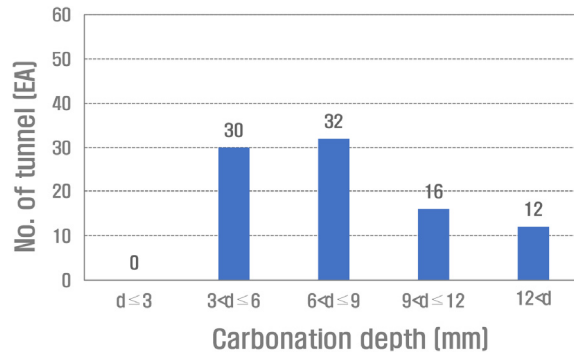


Fig. 2. Distribution of carbonation depth

2.2 터널 입·출구부와 해안간 거리

염해환경과 탄산화깊이의 상관관계분석을 위한 터널 입구부 또는 출구부로부터 해안까지의 거리는 지도상 직선거리를 기준으로 조사하였다. 조사대상 터널의 터널 입구부 또는 출구부와 해안과의 거리는 0.1~111.6 km이며 분포현황은 Fig. 3과 같다.

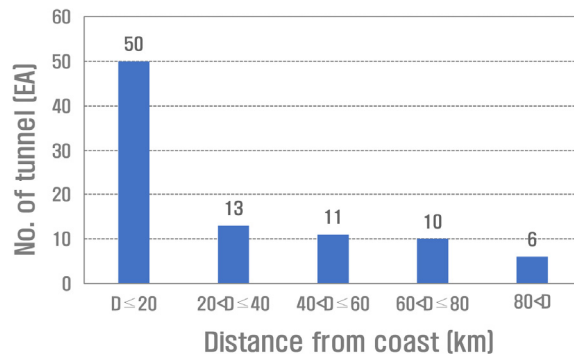


Fig. 3. Distribution of distance between tunnel portal and coast

2.3 교통량 및 공용연수

탄산화는 콘크리트와 CO₂의 반응에 의해 발생하는 현상이므로 본 연구에서는 CO₂ 가스 발생 요인 중 하나인 교통량과 CO₂ 가스 노출시간인 공용연수와 콘크리트 라이닝 탄산화의 상관관계 분석을 수행하였다. 각 터널별 교통량은 국토교통부 교통량정보제공시스템(Traffic Monitoring System, 2024)에서 제공하는 교통량을 기준으로 분석하였으며 공용연수는 준공연도를 기준으로 산정하였다.

조사대상 터널별 교통량은 최소 1,905대에서 최대 51,052대이며 공용연수는 최소 4년에서 최대 26년이다 (Figs. 4 and 5 참조).

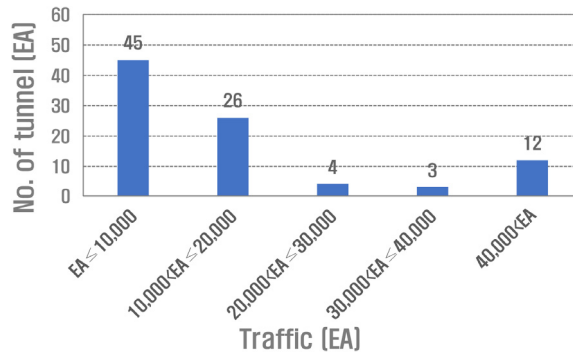


Fig. 4. Distribution of traffic

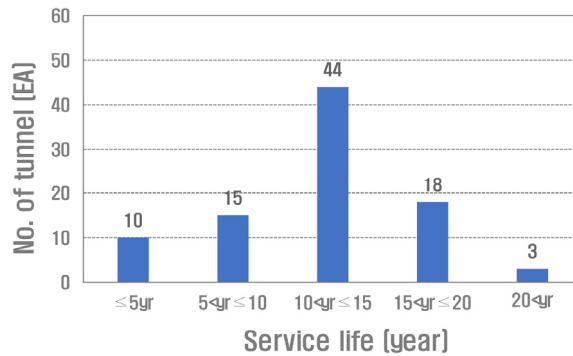


Fig. 5. Distribution of service life

○○터널(상) 등 90개소 터널의 콘크리트 라이닝 탄산화깊이 조사자료 중 해안과 가장 가까운 곳에 위치한 터널(거리 0.1 km, 공용연수 5년, 교통량 1,946대)과 가장 먼 곳에 위치한 터널(거리 111.6 km, 공용연수 11년, 교통량 9,115대) 콘크리트 라이닝 각각의 탄산화깊이는 11.7 mm, 4.6 mm이며, 상관계수 분석결과 해안에 가까운 염해환경에 노출된 터널 콘크리트 라이닝의 탄산화깊이가 깊어 발생하는 것으로 나타났다.

3. 관계분석

3.1 회귀분석

회귀분석이란 연속형 변수들에 대해 두 변수 사이의 모형을 구한 뒤 적합도를 측정해 내는 분석 방법이며, 독립 변수인 터널과 해안간의 거리, 공용연수 및 교통량 각각에 대한 종속변수 탄산화깊이의 관계를 의미한다.

○○터널(상) 등 90개소 터널의 콘크리트 라이닝 탄산화깊이와 해안과의 직선거리, 공용연수 및 교통량에 대한 각각의 단순 회귀 분석 결과는 Figs. 6~8과 같다.

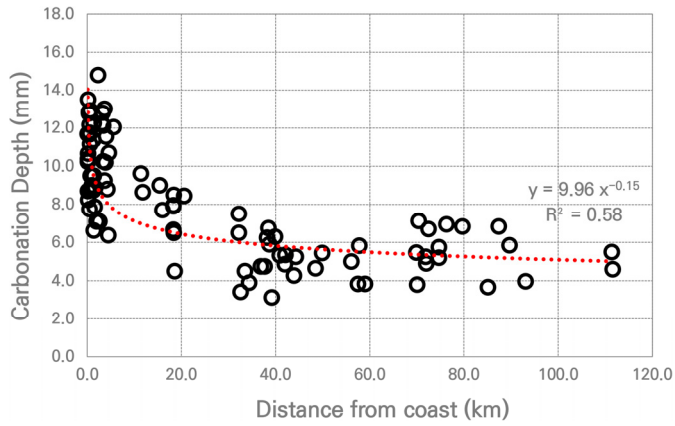


Fig. 6. Carbonation depth and distance from coast

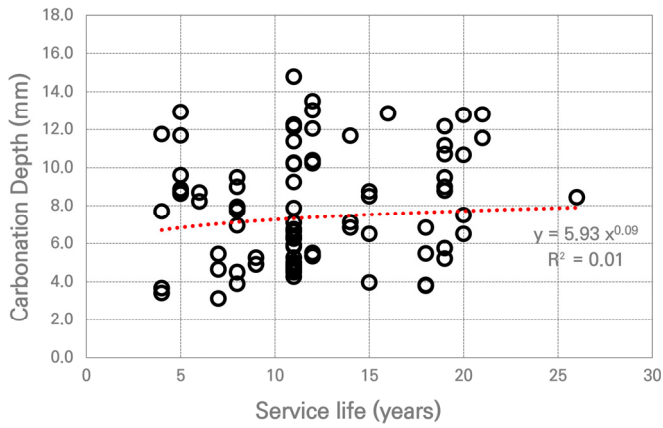


Fig. 7. Carbonation depth and service life

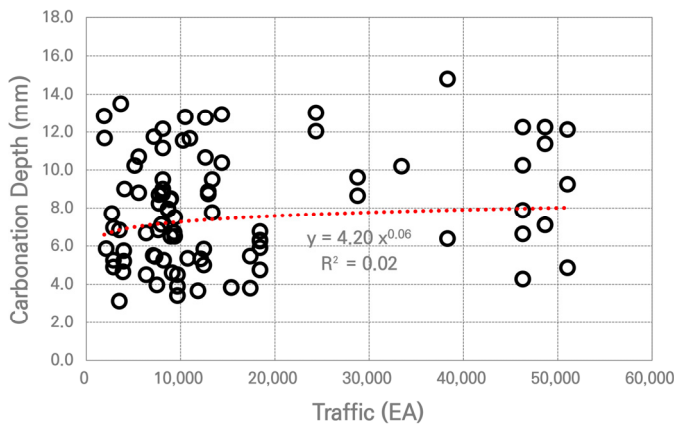


Fig. 8. Carbonation depth and traffic

상관계수의 값이 높을수록 두 변수간의 관계가 높다고 할 수 있으며 탄산화깊이와 해안과의 직선거리간 상관 계수는 0.58로 높은 상관관계를 보이지 않는 것으로 나타났다. 또한 탄산화깊이와 공용연수, 교통량은 상관관계가 없는 것으로 분석되었다. 그러나 계수의 값이 작다고 해서 그 가치가 중요하지 않다고 할 수 없으므로 각 변수 간 관계성 분석을 위한 피어슨 상관관계 분석을 수행하였다.

또한 본 연구에서는 단순 회귀 분석 이외에 다중 회귀 분석을 수행하였다. 다중 회귀 분석은 원인이 되는 독립 변수와 결과가 되는 종속 변수가 존재하는데, 이때 종속 변수는 하나이고 독립 변수가 2개 이상인 회귀 모델에 대한 분석을 수행하는 방법이다. 엑셀 프로그램을 통한 다중 회귀 분석결과 유의한 F (significance F)는 2.238×10^{-14} 이며, 터널 입·출구부와 해안간 거리, 교통량과 공용연수의 P-값(P-value)은 각각 5.40×10^{-15} , 0.64042, 0.03289으로 분석되었다(Table 1 참조).

Table 1. P-value

	Distance from coast	Service life	Traffic
P-value	5.40×10^{-15}	0.03289	0.64042

유의한 F값이 0.05보다 작으면 독립변수들 가운데 적어도 하나 이상의 변수가 종속변수를 설명함에 있어 유의하다 할 수 있으며, P-값이 0.5보다 큰 독립변수는 종속변수에 영향을 미치지 않는다. 따라서 교통량은 탄산화에 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 교통량을 제외한 두 종속변수 해안과의 직선거리, 공용연수에 대한 다중 회귀 분석 재수행 결과 유의한 F는 3.08003×10^{-15} , 터널 입·출구부와 해안간 거리, 공용연수의 P-값 (P-value)은 각각 7.14809×10^{-16} , 0.02757로 분석되었다. 또한 터널 입·출구부와 해안간 거리, 공용연수의 계수 값은 각각 -0.06881, 0.098493인 것으로 분석되었다(Table 2 참조).

Table 2. Coefficient and P-value

	Coefficient	P-value
Distance from coast	-0.06881	7.14809×10^{-16}
Service life	0.098493	0.02757

계수의 절대값이 0에 가까운 독립변수가 종속변수에 대한 영향력이 크다 할 수 있으며, 따라서 본 연구에서 선정한 콘크리트 탄산화 영향인자 3가지 가운데 터널 입·출구부와 해안간 거리가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

3.2 상관분석

상관분석은 두 변수 간에 어떤 선형적 관계가 있는지를 분석하는 방법으로 두 변수는 서로 독립적인 관계이거나 상관된 관계일 수 있으며 이때 두 변수간 관계의 강도를 상관관계(correlation)라 한다. 상관관계는 연속적 속성을 갖는 두 변수들 간 상호 연관성에 대한 기술통계 정보를 제공해 줄 뿐만 아니라, 두 변수 간의 상호 연관성에 대한 통계적 유의성을 검증해 주는 통계분석 기법이다.

본 연구에서는 탄산화깊이와 터널 입구부 또는 출구부에서 해안까지의 거리, 교통량 및 공용연수간 관련성을 분석하기 위하여 피어슨 상관계수(γ)를 분석하였다. 피어슨 상관계수란 두 변수 X와 Y 간의 선형 상관 관계를 계량화한 수치로 두 변수의 공분산을 각각의 표준편차의 곱으로 나눈 값으로 다음과 같이 계산할 수 있다(Lee, 2023).

$$\text{피어슨 상관계수} = \frac{\text{공분산}}{\text{표준편차} \cdot \text{표준편차}} \quad (1)$$

즉

$$\gamma_{XY} = \frac{\frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n-1}}{\sqrt{\frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \sqrt{\frac{\sum_i^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}}} \quad (2)$$

여기서, X_i, Y_i : 변인

\bar{X}, \bar{Y} : 표본의 평균

n : 표본의 크기

따라서

$$\gamma_{XY} = \frac{\sum_i^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_i^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_i^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

피어슨 상관계수는 +1~-1 사이의 값을 가지며 크기에 따라 두 변수간의 관계는 Table 3에서 보이는 바와 같이 No relationship~Perfect로 정의할 수 있다.

Table 3. Interpretation index of pearson correlation coefficients

Correlation value	Relationship
1.0 / -1.0	Perfect
0.80~0.99 / -0.80~-0.99	Very strong
0.60~0.79 / -0.60~-0.79	Strong
0.40~0.59 / -0.40~-0.59	Moderate
0.20~0.39 / -0.20~-0.39	Weak
0.01~0.19 / -0.01~-0.19	Very weak
0.0	No relationship

3.2.1 상관분석 자료 및 결과 예시

본 연구에서는 콘크리트 라이닝 탄산화깊이와 해안과의 직선거리, 공용연수 및 교통량 각각에 대한 피어슨 상관분석을 수행하였으며, 분석에 필요한 90개 터널에 대한 분석자료 정리현황 및 식 (3)에 의한 피어슨 상관계수 분석결과는 Fig. 9와 같다.

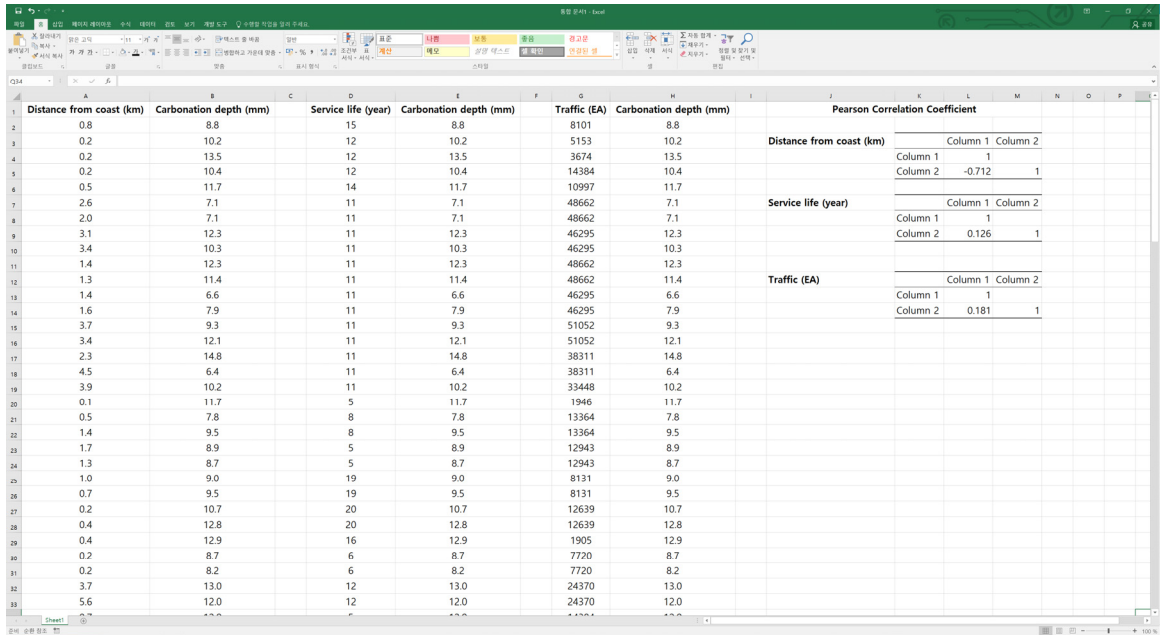


Fig. 9. Example of data and pearson correlation coefficients

3.2.2 피어슨 상관계수

탄산화깊이와 터널 입·출구부와 해안과의 직선거리간 상관계수는 -0.712, 탄산화깊이와 공용연수 및 교통량간의 상관계수는 각각 -0.04, 0.06인 것으로 분석되었다(Table 4 참조).

Table 4. Pearson correlation coefficient

	Distance from coast	Service life	Traffic
Pearson correlation coefficient	-0.712	-0.04	0.06

본 연구에서 고려한 콘크리트 라이닝 탄산화와 관련한 3가지 영향인자는 공용연수, 교통량, 그리고 터널 입·출구부와 해안과의 직선거리이다. 이 가운데 터널 콘크리트 라이닝의 탄산화깊이는 공용연수, 교통량보다 터널 입·출구부와 해안과의 직선거리가 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 각 영향인자별 피어슨 상관계수의 절대값을 비교하면 Fig. 10과 같다.

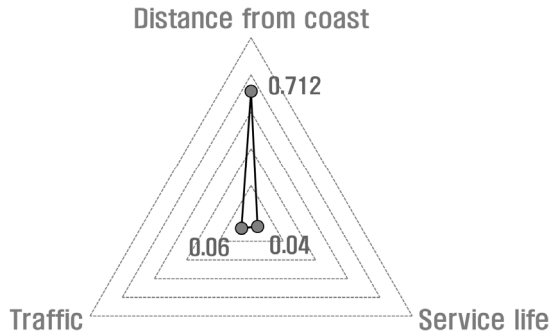


Fig. 10. Comparison of pearson correlation coefficient

3.3 결과분석

탄산화는 시멘트경화체 내의 알칼리성이 산성비, 산성토양의 접촉, 탄산화반응, 화재 등으로 감소되는 현상으로 시멘트경화체 내의 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$), 수산화나트륨, monosulphate, ettringite, C-S-H 등이 CO_2 와 반응하여 탄산화합물 및 기타 물질로 분해되는 현상이며, 물-시멘트비, 단위시멘트량, 시멘트 및 골재종류, 혼화제, 양생조건 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

염해는 콘크리트 속에 침입한 염화물이온에 의해 철근이 부식되어 철근콘크리트구조물의 여러 가지 성능을 저하시키는 현상이다. 해수와 직접 접하지 않는 구조물에서도 염해는 주로 대기 중의 비래염분에 의해서 발생하게 되며, 남해안 장흥지역의 경우 비래염분은 해안으로부터 5,000 m 지점에서도 해안가 대비 약 55% 정도로 유지되는 특성을 보인다(Lee et al., 2010).

탄산화와 염해는 그 발생원인이 상이할 뿐만 아니라 상호간 발생에 미치는 영향이 명확하게 규명되지 않았으나, 해수와 직접적인 접촉을 하지 않는 해안 인근의 터널 콘크리트 라이닝에서도 중성화와 염해가 중첩된 손상 발생의 우려가 높은 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 터널과 해안간 거리, 교통량 및 공용연수와 콘크리트 라이닝의 탄산화 관계성 분석을 위하여 피어슨 상관관계 분석을 수행하였다. 이를 위하여 ○○터널(상) 등 90개소 터널에 대한 최근 3년간 정밀안전점검 또는 정밀안전진단 결과를 조사 및 분석하였으며 관련 내용을 정리하면 다음과 같다.

1. 탄산화와 염해는 그 발생원인이 상이할 뿐만 아니라 상호간 발생에 미치는 영향이 명확하게 규명되지 않았으나, 탄산화깊이와 터널 입·출구부와 해안과의 직선거리간 상관계수는 -0.712로 높은 관계성이 있는 것으로 분석되었다.
2. 또한 다중 회귀 분석결과 본 연구에서 선정한 3가지 독립변수 가운데 터널 입·출구부와 해안과의 직선거리가 탄산화깊이에 가장 큰 영향을 미치며, 교통량은 탄산화깊이에 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다.
3. 콘크리트 라이닝은 교통량, 공용연수에 따라 탄산화 영향인자인 CO₂ 노출환경에 차이를 보이게 되므로 해당 변수와 콘크리트 라이닝의 탄산화깊이에 대한 상관계수를 분석하였다. 탄산화깊이와 공용연수 및 교통량과의 상관관계는 각각 -0.04, 0.06으로 관계성이 매우 낮은 것으로 나타났다.
4. 터널구조물에 대한 성능평가 시 열화진전평가(탄산화깊이)와 열화환경평가(염해환경)는 독립적으로 실시하며 대상 시설물의 내구성능 종합등급에는 열화진전평가만이 사용되고 있다. 해안가에 인접한 터널구조물은 콘크리트 라이닝의 중성화와 염해가 중첩될 수 있으므로, 이러한 환경에 대한 구조물 유지관리 체계 검토가 요구된다.
5. 해수와 직접적인 접촉을 하지 않는 해안 인근의 터널 콘크리트 라이닝에서도 중성화와 염해가 중첩된 손상 발생의 우려가 높은 것으로 판단된다.

저자 기여도

이규필은 연구 개념 및 설계, 데이터 수집 및 분석, 원고 작성 및 검토를 하였다.

References

1. Han, S.H., Park, W.S. (2008), "Analysis of carbonation for harbor concrete structure", Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, Vol. 20, No. 6, pp. 575-582.

2. Japan Concrete Institute Home page, <https://www.jci-net.or.jp/j/concrete/kiso/Durability.html> (April 28, 2024).
3. Kim, D.H., Lim, N.G., Lee, S.B. (2002), "The study on salt injury and carbonation of reinforced-concrete", *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 2, No. 2, pp. 165-172.
4. Kim, W. (1995), "Major causes for deterioration in concrete structure", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 7, No. 6, pp. 14-22.
5. Lee, G.P. (2023), "Correlation analysis of traffic and crack in concrete lining", *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, Vol. 25, No. 5, pp. 345-355.
6. Lee, J.S., Ahn, K.H., Kim, D.G., Park, J.J. (2010), "Distribution properties of airborne chlorides in Korea", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 6, pp. 769-776.
7. Lee, J.S., An, G.H. (2012), "Penetration properties of airborne chlorides on concrete exposed in marine environment", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 5, pp. 553-558.
8. Traffic Monitoring System Home page, <https://www.road.re.kr> (July 20, 2024).