

터널 콘크리트 라이닝 구조물의 성능저하 특성

김동규¹, 정호섭^{2*}, 배규진³, 신휴성¹

Characterization of deterioration of concrete lining in tunnel structures

Dong-Gyou Kim, Ho-Seop Jung, Gyu-Jin Bae, Hyu-Soung Shin

Abstract The objective of this study is to evaluate the durability and deterioration of concrete lining in the seven conventional tunnels. These tunnels were constructed about 40~70 years ago, and closed about 10~40 years ago. The field investigation and various laboratory testings were performed for this study. It was observed from the visual examinations that the concrete linings of 7 tunnels were severely deteriorated, such as, cracks, leakages, desquamation, and exploitations. The compressive strengths obtained from rebound hardness method and uniaxial compressive strength test on core specimens largely differed depending on the locations in the tunnel. The maximum compressive strength of concrete lining was greater about 2 times than the minimum compressive strength of concrete lining in the same tunnel. The results of micro-structural analysis showed that the substances deteriorating the concrete lining, such as ettringite and thaumasite, were detected in the concrete lining of tunnel.

Keywords: Tunnel, concrete lining, durability, compressive strength, deterioration

요 지 터널구조물은 지하공간에 건설되며 육안으로 터널 배면상태를 확인하는 것이 불가능하기 때문에 유지 관리하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 재래식 터널의 주 지보재인 콘크리트 라이닝의 장기 내구성 및 성능저하 원인을 규명하기 위하여 준공된 지 약 40~70년이 경과된 7개의 철도 폐터널을 대상으로 현장조사 및 실내실험을 수행하였다. 그 결과, 조사 대상 터널 구조물의 콘크리트 라이닝은 준공년도에 관계없이 모든 구조물에서 다양한 형태의 균열이 조사되었으며 특히 시공이음부에 열화현상이 심각하게 나타났다. 터널 구조물의 콘크리트 라이닝 주변 지하 공간으로부터 유입되는 침출수의 유해이온은 콘크리트 열화에 직접적인 영향을 미치는 농도는 아니었으나 일정한 농도의 유해이온이 장기간 지속적으로 콘크리트 라이닝에 침식작용을 한 것으로 나타났다. 터널 구조물의 콘크리트 라이닝에서 측정된 비파괴 압축강도와 동일한 위치에서 채취한 코어시편을 대상으로 측정된 일축압축강도는 콘크리트 라이닝의 표면의 건전 여부에 따라 상이한 결과를 나타내었다.

주요어: 장대도로터널, 자연환기력, 기압장벽고, 굴뚝효과, 풍압

1. 서 론

국내의 경우 약 100년 전부터 통행의 수단으로 인공적으로 터널 구조물을 건설하기 시작한 이래, 다양한 형태의 터널이 건설되고 있다. 국토의 70% 이상이 산악지형인 국내 특성을 고려할 때 경제개발과 동시에 국토를 효율적으로 활용하기 위하여 도로터널, 지하철, 철도터널 및 수로터널의 수요가 기하급수적으로 증가하고 있다. 제한된 도심지역에서 인구증가로 인한 도심지 교통량 및 물류교통망의 증가, 국가 전역의 생활권화에 따라 다양한 형태의 구조물이 건설되고 있다. 또한, 상습정체

구역을 해소하기 위한 지하차도 건설 방안 등 지하공간 확대 및 활용에 대한 기대 및 요구가 증가하고 있다.

공용기간이 오래된 기존 터널구조물들에서 노후화에 따른 콘크리트 라이닝의 균열과 누수 및 손상 등으로 인하여 터널 구조물의 안정성, 사용성 및 인접구조물의 안전성에 대한 문제가 대두되고 있다(배규진 외, 2001, 오혁희 외, 2001). 대부분의 구조물은 그것이 위치한 주변 환경에 따라 정도의 차이는 있지만 공용기간이 경과함에 따라 성능이 저하하게 된다. 특히 터널구조물은 지하공간에 건설되므로 육안으로 터널 배면상태를 확인하는 것이 불가능하기 때문에 유지 관리하는데 있어 어려움이 있다. 터널 구조물은 다양한 내·외부 주변 환경의 변화로 인하여 변상이 발생하게 되며 터널 시공중 발생되는 구조적 결함에 의하여 변상이 촉진될 수 있다(猪態

¹정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원

²비회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원

³정회원, 한국건설기술연구원 선임본부장실 연구위원

*교신저자: 정호섭 (E-mail: hsnj97@kict.re.kr)

明, 2004, 新堀敏彦 外, 2003, 新堀敏彦 外, 2003).

장기적인 측면에서 터널 구조물의 사용성을 증대시키고 효과적인 유지관리 방안을 마련하기 위해서는 각종 성능저하 현상, 손상정도 및 내구성을 장기적으로 점검함으로써 최적의 보수, 보강대책을 수립하여야 할 것이다(Kroop and Hilsdorf, 1995). 장기적 내구성이 감소되어 수십 년 경과한 현 시점에서 점차 증가하는 노후화된 터널에 대한 효율적인 유지관리를 통한 안정성 확보와 공용수명을 연장시켜야 할 필요성이 대두되고 있다. 노출환경에 따른 재래식 터널의 콘크리트 라이닝의 재료적인 측면에서의 검토는 구조적 측면에도 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 의미를 갖는다(Lee et. al, 2009, Lee and Hooton, 2005).

따라서 본 연구에서는 준공년도가 다양한 7개의 철도 페터널 구조물을 선정하여 콘크리트 라이닝의 성능저하 원인을 재료적인 측면에서 검토, 분석하였다. 여러 가지 이유로 공용중단된 페터널을 대상으로 외관조사를 비롯하여 비파괴시험 및 코어를 채취하였으며 채취한 코어 시편을 이용하여 압축강도, 탄산화 및 기기분석 등 실내 실험을 실시하여 지하수 및 토양환경에 노출된 콘크리트 라이닝의 성능저하 원인을 물리·화학적으로 검토하였다.

2. 조사 및 실험개요

2.1 조사대상 구조물

터널의 노후화에 따른 콘크리트 라이닝의 성능저하

원인을 규명하기 위하여 그림 1에서와 같이 준공된 지 40~70년이 지난 7개의 터널을 선정하여 외관조사를 비롯한 코어 채취에 의한 역학적인 특성을 조사하였다. 조사대상 터널 구조물은 여러 가지 이유로 인하여 사용이 중지된 지 10~40여년이 경과하였으며, 모두 마제형식의 콘크리트 라이닝 구조물이다. 본 연구에서 페터널을 사용한 것은 페터널이 사용 중지된 후 전혀 유지관리가 되지 않으므로 콘크리트 라이닝의 열화정도 및 진행을 분명하게 보여줄 수 있다는 판단에서다. 그림 1에서 막대그래프는 페터널이 건설되어 사용 중지되기까지의 공용기간을 보여주고 있다.

2.2 실험방법

터널의 콘크리트 라이닝 성능저하 원인을 규명하기 위하여 다음과 같은 방법으로 현장조사 및 실내실험을 실시하였다. 조사 대상구조물의 외관조사는 주로 터널 내부의 누수, 균열, 백화, 박리 및 박락 등 성능저하 현상에 대하여 육안관찰을 실시하였다. 또한 Romer(2002), 및 Feryburg and Berninger(2003) 등은 콘크리트 라이닝의 침식원인 중 노출환경에 따라 황산염 이온에 의한 것도 있다는 현장 조사 결과를 발표한 바 있다. 이에 유해이온의 유무를 확인하기 위하여 터널주변에 흐르는 지하수와 라이닝 표면에서 누수되는 침출수를 무균채수병으로 채수하여 국내 공인기관에 수질검사를 의뢰하여 유해물질의 함유량을 분석하였다. 또한 콘크리트 라이닝의 압축강도를 측정하기 위하여 비파괴 검사법과 코

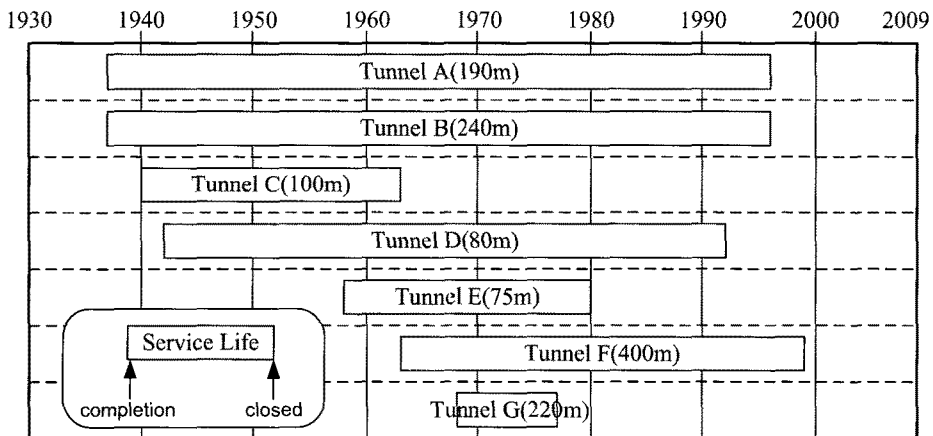


그림 1. 조사대상 터널 구조물 제원

어를 이용한 실내파괴시험을 통하여 측정하였다. 비파괴 검사는 슈미트 해머를 이용하여 터널 전반부에 걸쳐 각 측정 개소마다 타격점 상호간 30 mm 간격으로 중횡으로 4×5열의 직선을 그어 직교하는 20점을 타격하여 그 평균값을 반발경도로 결정한 후 일본 재료학회식 ($F_c=1.3R-18.3 \text{ MPa}$) (日本建築學會, 1983)을 이용하여 추정하였다. 슈미트 해머를 타격한 지점에서 코어를 채취하여 KS F 2405에 근거하여 실내 일축압축강도 시험을 실시하여 비교하였다.

탄산화 깊이는 콘크리트 라이닝에서 채취한 코어 공시체에 대하여 KS M 0015에 준하여 1% 페놀프탈레인 용액을 코어 시편에 분부하여 표면에서부터 변색부위까지의 깊이를 탄산화 깊이로 하는 페놀프탈레인법으로 측정하였다.

콘크리트 라이닝의 열화원인을 분석하기 위하여 현장에서 채취한 코어 시편을 건전부위와 표면열화부위의 시료를 대상으로 하여 XRD, SEM 및 EDS분석 등을 수행하였다.

3. 조사 및 실험결과

3.1 표면조사

본 연구에서 조사된 터널 구조물은 모두 과거에 철도 터널로 사용되어왔다. 그러나 현재는 구조물의 수명이 다하여 폐쇄된 것이 아니라 대부분 선형변경으로 인하여 폐쇄된 것이다. 그러므로 공용중인 터널에 비하여 유지관리 및 보수보강이 거의 이루어지지 않은 상태이다. 그림 2에서 보여주듯이 이러한 터널 구조물에 대한 외관 조사를 실시한 결과 모든 터널에서 천정부와 측벽부에 중균열, 경사균열, 망상균열 및 횡균열 등 크고 작은 균열이 다양하게 분포하는 것으로 조사되었다. 또한 콘크리트 라이닝의 터널 양측벽 및 천정부위에서 균열로 인한 누수, 박리 및 박락 등 심각한 성능저하 현상이 발생하였다.

한편 Tunnel F의 경우 공용중에 대부분의 구간에서 두께 50 mm 정도로 보강을 실시한 흔적도 조사되었으나 보강단면 대부분은 망상형 균열이 발생한 상태였다. 보강이력은 알 수 없었으나 보강단면 또한 경과시간에

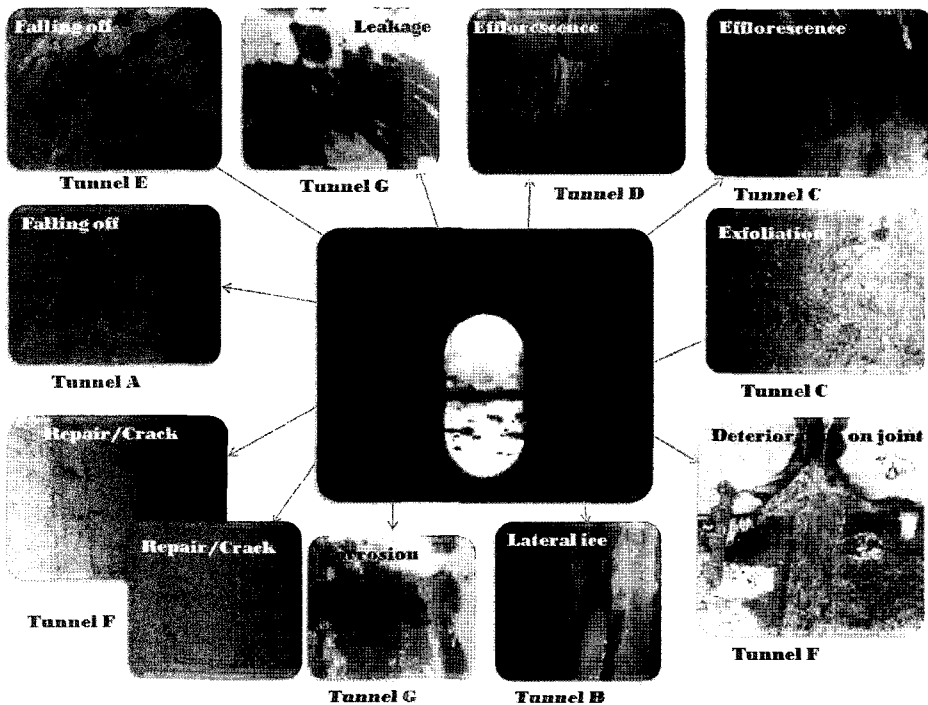


그림 2. 외관조사 결과

다른 열화에 의하여 원단면과 부착되지 않고 떨어져 있는 상태로 놓여 있었다. 이러한 보수단면의 경우 공용중인 터널이었다고 가정한다면 콘크리트 덩어리의 박락으로 통행하는 교통수단의 손상과 인명피해 등 2차적인 문제를 발생시킬 수 있어 아주 위험한 상태를 초래하게 된다.

또한 대부분의 터널에서 콘크리트 라이닝의 시공이음부에서 많은 문제점이 나타났으며 시공이음부에서 시멘트 경화체의 결합력 감소로 인하여 백색의 물질이 다량 용출되었다. 이와 같은 백색물질은 건습의 반복작용에 의하여 결정으로 만들어진다. 그것이 균열내에 누적되어 균열 폭이 점점 더 커지게 되므로 광폭균열로 발생하는 원인중 하나로 판단되었다.

특히 Tunnel E의 경우 그림 2에서 보는 바와 같이 지속적인 누수와 심각한 균열로 인하여 직경 약 1 m 정도의 콘크리트 덩어리가 탈락하여 철근이 노출된 경우도 조사되었다. 이러한 콘크리트 라이닝의 박리 및 박락현상은 조사된 모든 터널에서 직경 수 cm에서 수십 cm 크기로 각각 존재하는 것으로 조사되었다.

일반적으로 터널구조물은 그 특성상 지하수와 접하는 경우가 많다. 본 연구의 조사 대상구조물 중 토피고가 1 m 내외인 Tunnel D의 경우를 제외한 모든 터널에서 누수흔적이 다수 조사되었다. 그림 2에서 보여주듯이 균열 및 누수로 인한 백색 및 붉은색 침전물이 용출되어 콘크리트 라이닝 표면을 덮고 있는 것을 확인할 수 있었

다. 특히 동절기에 조사된 Tunnel B의 경우 누수에 의한 측빙도 조사되었다. 외관조사 결과 터널의 준공년도와 공용기간에 관계없이 구조물이 위치한 노출환경에 따라 열화정도가 다르게 나타났다.

3.2 지하수 분석

터널 구조물은 구조물의 특성상 지반 혹은 암반 내에 건설되며, 이러한 지하공간에 건설되는 구조물은 주로 지하수에 접하게 된다. 지역에 따라 지하수에는 여러 가지 유해이온이 다량으로 존재하는 경우가 있으며 콘크리트는 이러한 유해이온들의 침투로 인하여 화학적 침식을 받을 우려가 있다. 일반적으로 시멘트콘크리트 구조물이 해수, 온천지대, 하수처리장 또는 공장 등과 같은 오폐수 및 황산염 토양환경 등에 건설될 경우, 시간이 경과함에 따라 유해이온이 시멘트 경화체 내부로 침투하여 열화시키고 결국에는 콘크리트 구조물의 성능이 저하하게 된다. 이와 같은 유해이온들의 침식을 받은 콘크리트는 내구성능이 저하되어 결국에는 구조체로서 역할을 상실할 수도 있다(Al-Amoudi, 2004, Tumidajski, et al, 1995).

본 연구에서는 7개의 터널 구조물을 대상으로 현장조사시 누수가 발생한 5개의 터널에서 지하수의 유해이온 유무를 확인하기 위하여 무균채수병으로 침출수를 채취하여 수질검사를 실시하였다. Tunnel D와 F의 경우는 현장조사 당시 터널주변에 존재하는 지하수의 수질분석을 위해 필요한 최소량을 채취할 수 없을 만큼 침출수가 발생하지 않아서 수질분석을 수행하지 않았다.

대부분의 터널에서 침출수의 pH는 5.90~7.58 정도로 약산성 또는 중성으로 나타났으며, 콘크리트 구조물의 성능을 저하시킬 수 있는 대표적인 유해이온들의 함유율을 수돗물에 대한 비로서 나타낸 것이 그림 3이다. 지하수 수질검사를 수행한 터널에서 Tunnel C의 경우가 황산염이온, 칼슘이온 및 마그네슘이온 함유량이 가장 높게 나타났다. Tunnel A에서 채취한 지하수의 수질분석결과 염소이온의 경우 수돗물에 비하여 약 1.8배 정도의 값을 나타낸 반면 나머지 터널에서는 거의 검출되지 않았다.

시멘트 경화체에서 황산염에 의한 침식을 일으키는 황산염이온(SO₄²⁻)의 농도는 Tunnel A와 Tunnel C의 경우 각각 51.3 ppm 및 291.2 ppm으로서 그 농도는

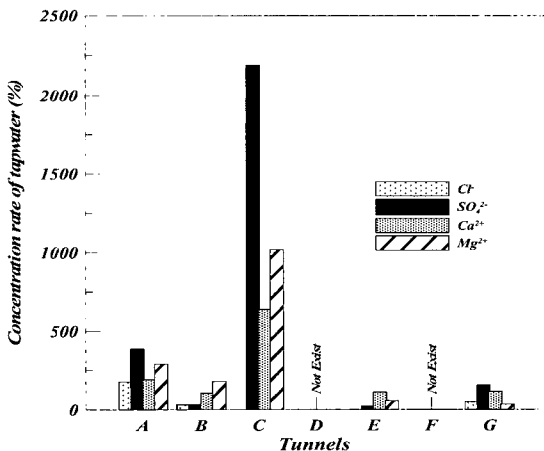


그림 3. 조사 대상 구조물의 지하수분석 결과

콘크리트에 직접적으로 영향을 미치는 정도는 아니지만 Tunnel C의 경우 수돗물에 비하여 약 22배 정도 높게 나타났다. 또한 황산염(SO₄²⁻)과 함께 화학적 반응을 하여 황산염침식에 영향을 주는 칼슘이온(Ca²⁺)은 지하수가 채취된 모든 터널에서 수돗물보다 약 1배에서 6배정도 높게 나타났으며, 마그네슘이온(Mg²⁺)은 Tunnel E와 G를 제외하고는 수돗물보다 2배에서 10배정도 높게 나타났다. 황산염의 농도와 침식정도에 대하여 CEB Task Group Durability에 의하여 제시한 것이 표 1이다.

위와 같이 터널구조물 내부로 흘러 들어온 침출수에 대한 지하수 분석결과, 콘크리트에 직접적인 영향을 미치는 농도는 아니지만 오랜 시간동안 지속적으로 노출되는 경우 지하수로부터 기인하는 화학적 침식에 대하여 어느 정도 영향을 받을 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 콘크리트 라이닝 구조물의 성능저하 원인 및 정도를 분석하기 위하여 코어 시편을 채취하여 화학적 침식에 대한 원인분석을 수행하여 후자에 서술하였다.

3.3 콘크리트 라이닝 압축강도

터널 콘크리트 라이닝의 압축강도 특성을 알아보기

표 1. 황산염 농도와 침식정도

SO ₃ (ppm)	Na ₂ SO ₄ (ppm)	침식정도
< 300	< 533	가벼운 침식성
300 ~ 1,000	533 ~ 1,780	침식성
>1,000	> 1,780	강한 침식성

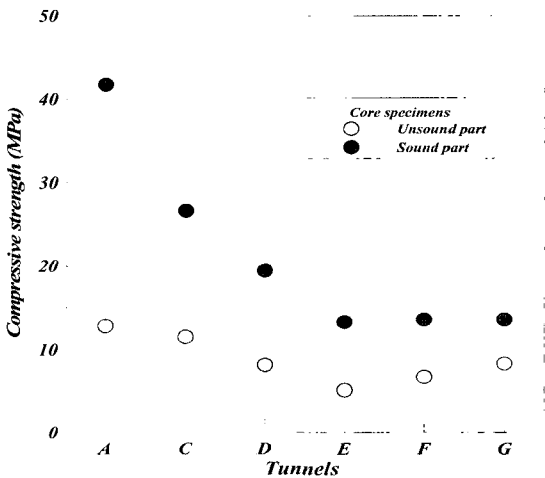


그림 4. 콘크리트 압축강도(코어시편)

위하여 슈미트 해머를 사용한 반발경도법에 의한 결과와 현장에서 채취한 코어시편을 대상으로 측정된 일축 압축강도 결과를 측정하여 비교 분석하였다. 터널의 연장에 따라 각각의 터널 콘크리트 라이닝에서 약 30 m 간격으로 반발경도를 측정된 후 동일지점에서 코어 드릴을 이용하여 압축강도 측정용 시편을 채취하였다. 반발경도법에 의한 비파괴 압축강도 측정은 슈미트해머를 이용하여 각 측정 개소마다 측정된 20개의 반발경도 값을 평균하여 결정하였다.

그림 4 및 그림 5는 각 터널구조물의 건전부위(Sound Part)와 열화부분(Unsound Part)에서 측정된 일축압축강도 및 비파괴 추정강도 결과값을 나타낸 것이다. 그림 4에서 알 수 있듯이 열화 부위에서 채취한 코어의 일축 압축강도 결과 값은 5.1~12.8 MPa로 낮게 나타났으나 건전한 부분에서는 준공년도가 오래된 Tunnel A의 경우 41.7 MPa로 가장 크게 나타났다. 이러한 경향은 비파괴 압축강도 측정결과에서도 유사하게 나타났다.

한편 이들 그림에서 보여주듯이 각각의 터널에서 측정된 비파괴 압축강도는 코어에 의한 일축압축강도 결과값과 서로 일치하지 않았다. 특히 최대 압축강도에서 파괴 압축강도와 비파괴 압축강도가 약 2배정도 차이를 보이는 부분도 있었다. 이는 콘크리트 라이닝의 열화정도 및 열화원인을 분석하기 위하여 코어시편을 대부분 표면열화가 심한 부분을 선정하여 채취하였기 때문으로 판단된다. 콘크리트 라이닝의 표면조건에 따라 즉, 콘크

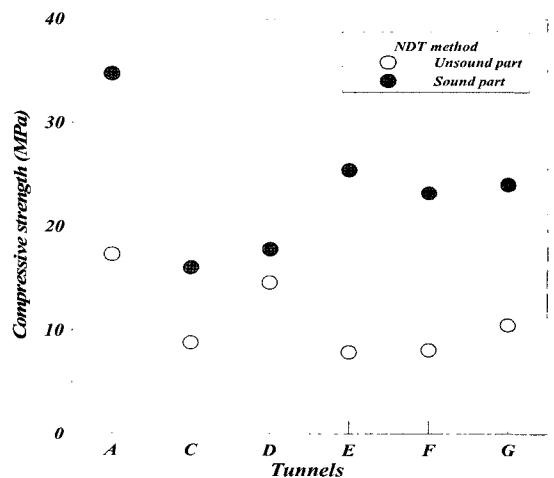


그림 5. 콘크리트 압축강도(비파괴)

리트 라이닝의 표면이 누수 및 반응생성물의 영향을 받았을 경우 반발경도가 작게 나타날 수 있으며 상대적으로 건전한 상태로 존재할 경우 반발경도가 보다 크게 나타날 수 있다.

또한, 그림 6과 7에서 나타낸 바와 같이 콘크리트 라이닝의 표면 및 코어시편을 통하여 관찰한 결과 시공 당시 콘크리트 라이닝의 골재 크기는 5 mm에서 150 mm 정도로 추정되어 품질이 일정하지 못한 것으로 판단되었다. 이러한 불균질한 골재크기는 콘크리트 라이닝의 파괴압축강도 및 비파괴압축강도 측정에 큰 영향을 준 것으로 판단되면 두 압축강도에 큰 차이를 보이는 중요한 원인으로 판단된다.

3.4 탄산화 측정

주지하는 바와 같이 콘크리트 탄산화는 대기 중의 이산화탄소를 비롯한 침식성 가스가 콘크리트에 침투하여

콘크리트의 강알칼리성을 중성화시켜 결국에는 콘크리트내부에 있는 철근의 부동태피막을 파괴하여 철근의 방식기능을 저하시켜 구조물의 수명을 저하시키는 현상을 말한다(岸谷孝一, 櫻野紀元, 1979, 서울특별시, 1998).

터널 구조물은 지하공간에 건설되기 때문에 터널 연장이 긴 경우에는 외기와의 통풍이 원활하지 못하고 또한 습한 지역이 많아서 일반적인 대기중에 분포하는 이산화탄소의 평균 농도보다 높게 나타나는 경우가 많다. 특히 도심지 도로터널이나 지하철 터널 구조물의 경우 탄산가스에 더 많이 노출이 되므로 탄산화가 빠르게 진행될 수 있다. 터널이 위치한 주변 환경의 차이로 인하여 동일 재령의 콘크리트 일지라도 탄산화의 정도는 차이가 있다.

본 연구에서는 터널 구조물에서 채취한 콘크리트 라이닝의 코어 공시체를 대상으로 1% 페놀프탈레인법으로 탄산화 깊이를 측정하였다. 그림 8은 측정된 탄산화 깊이 결과를 보여주고 있으며, 각 터널에서 측정된 최대, 최소 및 평균 탄산화 깊이를 나타내고 있다. 이 그림에서 Tunnel F의 최대 탄산화 깊이가 55 mm로 조사 대상 터널중 가장 크게 나타난 반면 Tunnel G에서는 탄산화가 진행되지 않은 부분도 있었다.

전반적으로 경과시간에 비하여 탄산화 진행이 느리게 나타났으며 또한 준공년도와 관계없이 또한 터널 연장이 400 m인 Tunnel F의 경우 준공년도가 빠른 Tunnel A, C, D 및 E의 경우보다 더 큰 결과 값을 나타내었다. 이와 같은 이유는 본 연구에서 대상으로 한 터널 구조물은 철도터널로서 터널연장이 비교적 짧아서 지하철 터



그림 6. 콘크리트 라이닝 골재크기



그림 7. 골재크기(코어시편)

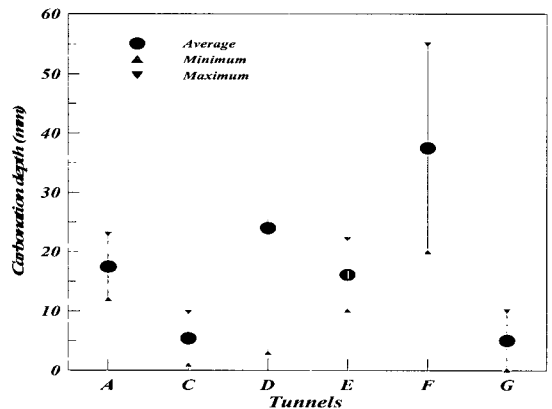


그림 8. 탄산화 깊이

널의 경우보다 외기의 출입이 용이할 뿐만 아니라 열차 운행중 발생하는 분진(0.5~1.0 mm 정도의 미세 고형분)이 부착되어 미세공극을 채워줌으로서 이산화탄소가 콘크리트 내부로 침투되는 것을 1차적으로 막아주는 역할을 한 것으로 판단된다.

3.5 기기분석

조사 대상 터널 구조물의 대부분에서 균열 및 누수가 발생하였으며, 지하수의 영향권에 구조물이 위치하기 때문에 재래식 터널 구조물인 경우 주시보재인 콘크리트 라이닝은 지하수에 포함된 유해이온에 의해 성능이 저하될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 터널내로 침출수가 발생한 터널 중 황산염 이온농도가 가장 높게 조사된 Tunnel C의 콘크리트 라이닝에서 성능저하현상이 명백하게 진행된 부분의 샘플을 채취하여 XRD, SEM 및 EDS 등 기기분석을 실시하였다.

그림 9는 Tunnel C의 콘크리트 라이닝 중 표면열화가 많이 진행된 개소에서 채취한 샘플을 대상으로 수행한 XRD분석 결과를 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 2θ가 9.1° 부근에서 반응물질인 ettringite와 thaumasite의 중첩피크가 관찰된 반면 18.1° 부근에서는 시멘트 수화 생성물인 portlandite의 피크 강도가 매우 약하게 나타났다. 이러한 현상을 바탕으로 콘크리트 라이닝의 외부로부터 침투한 유해이온의 작용으로 인한 침식이 이루어진 것으로 판단된다. 또한 portlandite 피크가 검출됨에 따라 향후 화학적 침식이 더욱 더 진행될 수가 있다는 것을 보여주고 있다. 그리고 분석에 사용된 분말이 콘크리트 라이닝으로부터 채취하여 골재성분으로 추정

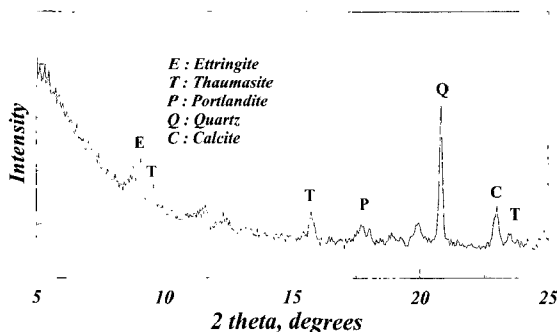


그림 9. XRD 분석결과(Tunnel C)

되는 quartz 피크가 높은 강도로 검출되었다.

동일한 코어 시편에서 채취한 샘플을 대상으로 시멘트 경화체의 성능저하 원인을 시각적으로 조사하기 위하여 SEM 및 EDS 분석을 실시한 결과를 그림 10에 나타내었다. 열화된 콘크리트 라이닝의 표면부분에 대한 미세조직 분석결과 그물모양의 반응생성물이 확인되었다. 반응생성물에 대한 EDS 분석결과는 XRD 분석결과와 마찬가지로, ettringite와 thaumasite의 혼합물질로 판명되었으며 이러한 반응생성물이 콘크리트 라이닝의 성능을 저하시키는 주요원인임을 확인할 수 있었다(Lee et. al, 2009, Gollop and Taylor, 1995).

준공된 지 약 70년이 경과한 Tunnel C 구조물에 대한 기기분석 결과를 종합적으로 고찰해 볼 때, 터널 구조물 주변의 지반으로부터 유입된 지하수에 포함된 유해 이온, 특히 황산염 이온의 영향으로 인하여 반응생성물인 thaumasite와 ettringite가 생성될 가능성이 높다. 따라서 외부로부터 유입된 황산염 이온이 지배적으로 반응하였다고 추정할 수 있으며 수질조사에서의 같이 황산염에 대한 농도는 콘크리트 라이닝을 열화시킬 정도는 아니지만 일정한 농도의 유해이온이 장기적으로 침식한 결과로 판단된다.

4. 결 론

철도 폐터널을 이용하여 터널 콘크리트 라이닝의 성능저하 원인을 현장조사와 실내시험을 통하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

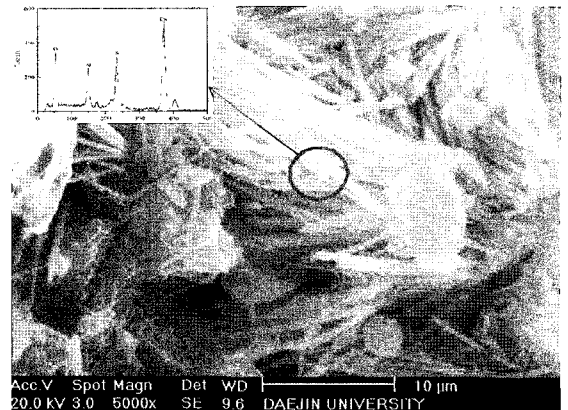


그림 10. SEM 및 EDS 분석결과(Tunnel C)

1. 7개의 철도 페터널을 대상으로 외관현장 조사를 실시한 결과, 준공년도에 관계없이 모든 터널에서 크고 작은 다양한 형태의 균열이 조사되었으며, 누수, 박리/박락, 콘크리트 탈락 등 열화 현상이 심각하게 진행된 것으로 조사되었다.
2. 콘크리트 라이닝의 탄산화 깊이 측정결과 전반적으로 경과시간에 비하여 탄산화 진행이 느리게 나타났다. 그 이유는 터널의 연장이 비교적 짧아서 외기와의 통풍이 자유로울 뿐만 아니라 운행중 발생하는 분진 등의 미세고형분이 표면에 부착되어 미세공극을 채워줌으로서 탄산가스가 콘크리트 내부로 침투되는 것을 막아주었기 때문으로 판단되었다.
3. 콘크리트 라이닝의 표면열화원인을 분석하기 위하여 대상 터널 구조물의 콘크리트 라이닝 주변 지하 공간으로부터 유입되는 침출수의 수질 및 기기 분석결과 침출수의 유해이온은 콘크리트 열화에 직접적인 영향을 미치는 농도는 아니었지만 일정한 농도의 유해이온이 장기간 지속적으로 작용하여 침식을 받은 것으로 판단되었다.
4. 터널 구조물의 콘크리트 라이닝에서 측정된 비파괴 압축강도와 동일한 위치에서 채취한 코어시편을 대상으로 측정된 일축압축강도는 콘크리트 라이닝의 표면의 건전 여부에 따라 상이한 결과를 나타내었다. 코어 시편의 압축강도는 콘크리트 라이닝의 성능저하 정도와 밀접한 관련이 있고 비파괴 압축강도는 콘크리트 라이닝의 표면 열화 정도와 관련이 있는 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 배규진, 이성원, 조만섭, 이광호 (2001), “국내외 터널구조물의 변상에 관한 조사 및 분석”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제3권, 제3호, pp. 31-43.
2. 서울특별시 (1998), 콘크리트 구조물의 부식상태 조사 및 방지대책에 관한 연구.
3. 오혁희, 신용석, 이종우, 박남서, 김영근 (2001), “터널구조물의 상태평가 기준에 관한 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제3권, 제4호, pp. 35-55.
4. 岸谷孝一, 檉野紀元 (1979), “コンクリート中の鐵筋の腐食に關する研究(その1コンクリートの中性化深さが鐵筋腐食に及ぼす影響について)”, 日本建築學會論文報告集, 第283号, pp. 11-16.
5. 新堀敏彦, 松田芳範, 下山貴史 (2003), “鐵道トンネルの剝離・剝落對策の現狀”, トンネルと地下, Vol. 34, No. 1, pp. 43-47.
6. 猪熊 明 (2004), “現場技術者のためにトンネル維持管理の實際”, 山海堂.
7. 日本建築學會 (1983), “コンクリート強度推定のための非破壞試驗方法マニュアル”, pp. 22-28.
8. Al-Amoudi, O.S.B. (2004), “Attack on Plain and Blended Cement Aggressive Sulfate Environments”, Cement and Concrete Composites, Vol. 24, pp. 305-316.
9. Freyburg, E. and Berminger, A.M. (2003), “Field Experiences in Concrete Deterioration by Thaumascite Formation: Possibilities and Problems in Thaumascite Analysis”, Cement and Concrete Composites, Vol. 25, No. 8, pp. 1105-1110.
10. Gollop, R.S. and Taylor, H.F.W. (1995), “Microstructural and Microanalytical Studies of Sulfate Attack, III, Sulfate-Resisting Portland-Cement: Reaction with Sodium and Magnesium Sulfate Solution”, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1581-1590.
11. Kropp, J. and Hilsdorf, H.K. (1995), “Performance Criteria for Concrete Durability”, RILEM REPORT 12, E & FN SPON.
12. Lee, S.T. and Hooton, R.D. (2005), “Prediction of Performance on Cement Matrix Exposed to Sulfate Media”, Annual Report, University of Toronto.
13. Lee, S.T., Kim, D.G. and Jung, H.S. (2009), “Sulfate Attack of Cement Matrix Containing Inorganic Alkali-free Accelerator”, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 13, No. 1, pp. 49-54.
14. Romer, M., Holzer, L. and Pfiffner, M. (2002), “Swiss Tunnel Structures; Concrete Damage by Formation of Thaumascite”, 1st international concrete on thaumascite in cementitious materials.
15. Tumidajski, P.J., Chan, G.W. and Philipose, K.E. (1995), “An Effective Diffusivity for Sulfate Transportation into Concrete”, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 6, pp. 1159-1163.

접수일(2009.10.20), 수정일(2009.11.10), 게재확정일(2009.11.30)