

화학적 침식을 받은 재래식 터널 콘크리트 라이닝의 내구성능 및 열화특성

Characterization of Durability and Deterioration Eroded by Chemical Attack on the Concrete Lining in Conventional Tunnel

김 동 규¹ Kim, Dong-Gyou

정 호 섭² Jung, Ho-Seop

이 승 태³ Lee, Seung-Tae

Abstract

This study is to evaluate the effect of chemical attack on durability and deterioration of lining concrete in tunnel. Surface examination, nondestructive inspection, uniaxial compressive strength test, carbonation test, chloride diffusion test, micro-structural analysis were performed to analyze the deterioration of lining concrete in tunnel constructed 70 years ago. From surface examination results, the tunnel had been repaired and reinforced in several times. It has many cracks, water-leakage, efflorescence and exploitation. Compressive strengths obtained from nondestructive inspection and uniaxial compressive strength test have measured 17.5 ~ 34.7MPa, and 12.8 ~ 40.3MPa, respectively. Carbonation depth specimen cored from concrete lining has ranged from 3mm to 27mm. From chloride diffusion test, most specimens have low permeability. And the XRD analysis was able to detect ettringite and thaumasite, which were confirmed by SEM and EDS results to be the causes for the deterioration of lining concrete.

요 지

본 연구에서는 화학적 침식을 받는 환경에 놓인 터널 콘크리트 라이닝 구조물의 성능저하 원인을 분석하기 위하여 준공 후 70년 된 터널 구조물을 대상으로 외관조사, 비파괴검사, 코어시편의 압축강도, 탄산화, 투수성 평가 및 기기분석을 실시하였다. 그 결과 대상 터널 구조물은 수차례에 걸쳐 보수 및 보강공사의 흔적이 존재하였으며 내부 콘크리트 라이닝의 심한 균열, 누수 및 탈락현상 등으로 성능저하가 크게 발생한 상태였다. 콘크리트 라이닝의 비파괴 압축강도추정과 코어시편에 의한 압축강도는 위치마다 차이는 있었으나 각각 17.5~34.7MPa 및 12.8~40.3MPa로 나타났으며, 반발경도법의 경우 콘크리트 표면이 누수 및 반응생성물의 영향으로 반발경도가 작게 나타나는 경우가 있었다. 콘크리트 라이닝 코어시편을 이용하여 전위차에 의한 촉진 염소이온 확산실험법으로 투수성 시험결과 일부 코어 시편을 제외한 대부분 낮은(Low) 영역으로 우수한 결과를 나타내었다. 또한 터널 콘크리트 라이닝 코어시편을 대상으로 미세구조를 분석한 결과 터널 콘크리트 라이닝 주변 지하공간으로부터 유입된 황산염이온의 영향으로 반응물질이 생성되어 성능이 저하되었으며, ettringite와 thaumasite 등의 생성에 의한 결정압에 의하여 균열 및 박리현상이 발생한 것으로 판단된다. 따라서 고내구성 콘크리트 라이닝의 제조를 위한 재료적 대책수립 및 관련지침안의 제정이 필요할 것으로 생각된다.

Keywords : Chemical attack, Concrete lining, Deterioration, Durability, Micro-structural analysis

1 정회원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실, 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Underground Structure Research Division, Korea Institute of Construction Technology)

2 한국건설기술연구원 지하구조물연구실, 선임연구원 (Senior Researcher, Underground Structure Research Division, Korea Institute of Construction Technology, hnsj97@kict.re.kr, 교신저자)

3 국립군산대학교 토목환경공학부, 교수 (Prof., Department of Civil and Environmental Engrg., Kunsan National University)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

국내 터널 구조물은 약 100년 전부터 건설되기 시작한 이래, 철도터널, 도로터널, 지하철 터널 등 다양한 형태로 건설되고 있으며, 수십 년 경과한 현 시점에서 점차 증가하는 노후화된 터널에 대한 효율적인 유지관리를 통한 안정성 확보와 공용수명을 연장시켜야 할 필요성이 대두되고 있는 실정이다(김동규 외, 2004; 김성수, 2004; 변근주, 2005). 터널 구조물은 인접 지상건물의 신축, 교차터널의 건설, 인접지반의 굴착 등에 따른 응력 증가 및 이완 등 외부 주변 환경변화 및 유해 지하수 유입이나 동결융해 등에 따른 지보재의 성능저하, 건조수축에 따른 균열 등 내부 환경영향의 변화로 인하여 변상이 발생하며 터널 시공중 발생하는 구조적 결함에 의하여 변상이 촉진될 수 있다(新堀敏彦 외, 2003; 猪熊明, 2004). 아울러 터널 구조물의 주변 지반의 물리적 특성, 터널의 기하학적 특성, 지보재의 형식, 지하수위 및 환경 등이 터널의 안전성에 큰 영향을 미치게 된다. 특히 공용기간이 증가함에 따라 주변 환경에 의하여 재래식 터널의 콘크리트 라이닝은 산화 또는 탄산화되고 구성재료의 변상에 따라 터널의 안정성 및 사용성이 저하될 수 있다(猪熊明, 2004; Lee and Hooton, 2005). 장기적인 측면에서 터널 구조물의 사용성을 증대시키고 효과적인 유지관리 방안을 마련하기 위해서는 각종 성능저하 현상, 손상정도 및 내구성을 장기적으로 점검함으로써 최적의 보수, 보강대책을 수립하여야 할 것이며, 노출환경에 따른 재래식 터널의 콘크리트 라이닝의 재료적인 측면에서의 검토는 구조적 측면에도 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 의미를 갖는다(新堀敏彦 외, 2003; Al-Amoudi, 2004; Gollop and Taylor, 1995).

특히, Hooton(2005)은 숏크리트 라이닝에 대하여 급결제의 종류에 따른 화학적 침식에 대하여 모르타르 시험체를 제조하여 침지시험을 통하여 각각의 재령에서 기기분석을 통하여 열화정도를 평가한 바 있다.

따라서 본 연구에서는 노후화된 재래식 터널 구조물의 주지보재인 콘크리트 라이닝의 성능저하 특성을 파

악하기 위하여 준공 후 70년이 경과한 철도터널을 대상으로 현장조사를 실시하였으며, 뿐만 아니라 재래식 터널 콘크리트 라이닝에서 채취한 코어 시험체를 이용하여 실내실험을 실시하여 지하수 및 토양환경에 노출된 콘크리트 라이닝의 성능저하 원인을 물리·화학적으로 검토하였다. 노후 터널의 콘크리트 라이닝에 대한 현장조사는 외관조사, 비파괴시험 및 채취된 콘크리트 라이닝 코어 시편의 압축강도, 탄산화깊이, 투수성 평가 및 XRD 및 SEM에 의한 정량 및 정성적 기기분석을 실시하였으며, 실험결과를 바탕으로 터널 구조물 콘크리트 라이닝의 화학적 성능저하 메커니즘을 분석하였다.

2. 조사대상 구조물의 개요 및 실험방법

2.1 구조물의 개요 및 환경조사

노후 터널의 콘크리트 라이닝 성능저하 원인을 규명하기 위하여 준공 후 약 70여년이 경과된 경기도에 위치한 철도터널을 선정하여 조사 및 분석을 실시하였다. 표 1은 조사대상 터널 구조물의 제원을 나타낸 것이다. 이 터널 구조물은 총 연장이 190m이며, 일축압축강도 기준이 약 12MPa(1930년대 기준) 추정되는 콘크리트 라이닝으로 시공되었다. 또한, 터널 내부는 수차궤에 걸쳐 보수 및 보강공사의 흔적이 존재하였으나, 보수시기, 보수방법 및 보수재료에 대한 자세한 이력은 알 수 없었으며, 10여 년 전부터 사용이 중지된 채 방치되어 현재 터널 내부 콘크리트 라이닝에서 누수 및 탈락현상 등으로 성능저하가 크게 발생된 것으로 조사되었다.

조사 대상 구조물의 주변 환경을 평가하기 위하여 철도터널 부근 및 내부 배수로에서 지하수를 채집하여 성분분석을 실시한 결과 pH는 약 6.5~7.0 정도로 약산성 또는 중성으로 나타났으며, 콘크리트의 성능을 저하시키는 황산염이온(SO₄²⁻) 농도는 180~200ppm, 마그네슘이온(Mg²⁺) 농도는 40~50ppm, 칼슘이온(Ca²⁺) 농도 70~100ppm 및 소량의 염소이온(Cl⁻)이 측정되었다.

표 1. 조사대상 터널구조물의 제원

연장	선로			형식	배수형식	준공년도	비고
	단복선	구배	직곡선				
190m	단선	10/1000 하구배	직선	말굽형	중심하수	1937	폐선

2.2 실험 방법

- (1) 외관조사 : 조사 대상구조물의 외관조사는 주로 터널 내부의 누수, 균열, 백화 및 박리·박락 등 성능저하현상에 대하여 육안관찰을 실시하였다.
- (2) 비파괴 압축강도추정 : 슈미트 해머를 이용하여 각 측정 개소마다 타격점 상호간 30mm 간격으로 중형으로 4×5열의 직선을 그어 직교하는 20점을 타격하여 그 평균값을 반발경도로 결정하였으며, 일본재료학회에서 제안한 식($F_c = 1.3R_o - 18.4\text{MPa}$)을 이용하여 추정하였다.
- (3) 일축압축강도 : 터널 콘크리트 라이닝에서 채취된 지름 100mm와 높이 200mm인 코어시편을 사용하여 KS F 2405에 근거하여 콘크리트 라이닝의 일축압축강도를 측정하였다.
- (4) 투수성평가 : 콘크리트 라이닝 코어시편의 투수성을 평가하기 위하여 ASTM C 1202에 준하여 전위차에 의한 촉진 염소이온 확산실험을 통하여 평가하였다.
- (5) XRD 분석 : 현장에서 채취한 코어 시편을 미분쇄한 시료를 대상으로 RINT D/max 2500을 이용하여 X-선 회절분석을 실시하였으며, 이때 측정조건은 $\text{CuK}\alpha$ (Ni filter) : 30kV, 20mA, Scanning speed 2°/min, 2 θ : 5~25°로 하였다.
- (6) ESEM 및 EDS분석 : 콘크리트의 건전부위 및 침식부위 시료를 대상으로 XL 30 ESEM을 이용하여 여러 가지 배율로 각각 확대촬영 하였으며, EDS 분석은 EDXA Falcon Energy System 60SEM을 사용하여 분석하였다.

3. 현장조사 및 실험결과에 대한 분석·고찰

3.1 외관조사

조사대상 구조물의 외관조사 결과 터널내부의 천장



그림 1. 조사대상 터널라이닝 구조물의 외관조사 결과

부 및 측벽부 전 구간에 걸쳐서 균열이 발생하였으며, 균열 폭은 0.1mm 정도 되는 균열부터 1.0~3.0mm 이상의 종균열, 경사균열, 망상균열 및 횡균열 등 다양하게 분포하고 있었다. 콘크리트 라이닝은 터널 양측벽 및 천정부위에서 균열로 인한 누수, 박리 및 박락 등 심각한 성능저하 현상이 발생한 것을 알 수 있었으며, 특히 측벽 콘크리트 라이닝의 이음부분은 결합력의 감소로 인하여 백색의 물질이 다량 용출되었으며 이 물질이 건습의 반복 작용으로 인하여 결정상으로 존재함에 따라 균열 폭이 점점 더 커져 광폭의 균열이 생성된 것으로 관찰되었다. 그림 1은 대상구조물의 균열로 인하여 누수 및 백태가 발생한 광경을 나타낸 것이며 이 그림에서 보는바와 같이 균열 및 누수로 인한 백화현상과 여러 곳에서 박리·박락이 많이 발생되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 비파괴 압축강도 및 코어시편 압축강도

콘크리트 라이닝의 압축강도는 슈미트해머를 이용한 비파괴 방법인 반발경도법과 재래식 터널 콘크리트 라이닝에서 코어드릴을 이용하여 채취한 코어시편에 의한 실내일축압축실험으로부터 얻었다. 그림 2는 본 연구에서 사용한 코어 시편의 채취 위치에 대한 모식도를 나타낸 것이며 터널 양측면에서 30m 간격으로 비파괴시험을 수행한 후 코어시편을 채취하였다. 그림 3은 콘크리트 라이닝의 비파괴 추정 압축강도와 실내일축압축강도실험에서 얻어진 압축강도를 정리하여 나타낸 것이다. 비파괴 압축강도 실험에 의하여 얻어진 값은 콘크리트 라이닝의 압축강도를 의미하는 것은 아니며, 콘크리트 라이닝의 성능저하 요인에 의하여 침식된 정도, 특히 표면 연화작용에 의한 성능저하 정도를 알아보기 위하여 실시한 것이다. 즉, 콘크리트 라이닝의 표면이 누수 및 반응생성물의 영향을 받았을 경우 반발경도가 작게 나타나며 상대적으로 건전한 상태로 존재할 경우 반발경

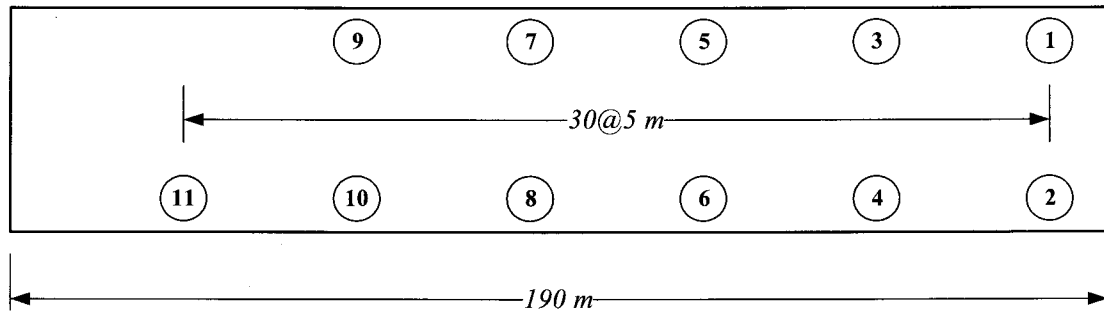


그림 2. 조사대상 터널구조물에서 코어시편 채취 위치 모식도

도가 보다 크게 나타난다. 비파괴 강도는 총 11개소에서 수행되었으며 추정된 콘크리트 라이닝의 압축강도는 17.3~34.7MPa 범위를 나타내었다. 한편 그림 3에서 No. 7과 8의 위치에서 압축강도는 다른 위치에서 채취한 코어 공시체에 비하여 상대적으로 높은 결과를 나타내었다. 콘크리트 라이닝의 일축압축강도실험은 11개의 지점에서 채취된 코어시편에서 수행되었으며 압축강도결과는 13.4MPa에서 41.7MPa까지 측정되었다. 그림 3에서 보여주듯이 터널내의 각 지점에서 측정된 비파괴 추정강도 및 일축압축강도는 서로 일치하지 않았으며, 앞에서 언급된 터널 준공 당시의 일축압축강도기준인 12MPa보다 크게 나타났다. 이것은 그림 4에서 보여주듯이 상당히 큰 골재를 사용하여 콘크리트 라이닝을 건설하여 높은 압축강도를 나타낸 것으로 판단된다. 채취된 코어시편을 기준으로 판단해 보면 본 터널에 사용된 콘크리트 라이닝의 골재 입도는 5mm에서 100mm 정도로 추정되었다.

3.3 탄산화 깊이 및 투수성

터널 주변 지반의 물리적 특성, 터널의 기하적 형상, 지보재의 형식, 지하수위 및 환경 등이 터널의 안전성에 큰 영향을 미치게 된다. 특히, 공용기간이 증가함에 따라 주변 환경에 의하여 콘크리트 라이닝은 산화 또는 탄산화되고, 구성 재료가 열화됨에 따라 터널의 안전성 및 사용성은 저하된다. 그림 4와 그림 5는 대상 터널구조물 콘크리트 라이닝에서 채취한 코어 시편의 탄산화 깊이를 측정할 모습과 결과를 보여주고 있다. 11개의 채취된 코어시편에서 측정된 탄산화 깊이는 3mm에서 27mm의 범위를 보이고 있으며 평균적으로 약 13mm 정도로 나타났다. 경과 년 수에 비해 탄산화가 비교적 적게 진행된 이유는 터널길이가 짧아서 외부공기의 출입

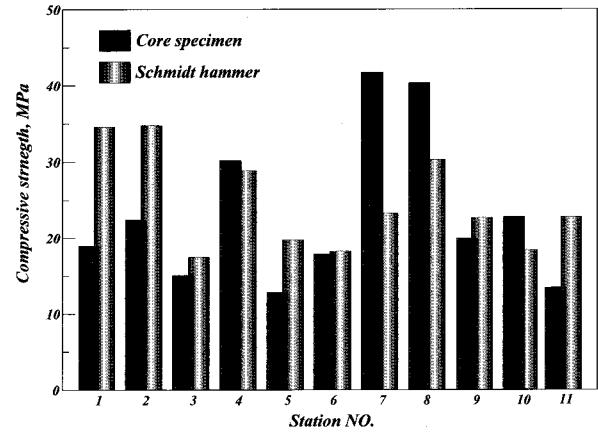


그림 3. 반발경도법 및 코어시편에 의한 압축강도

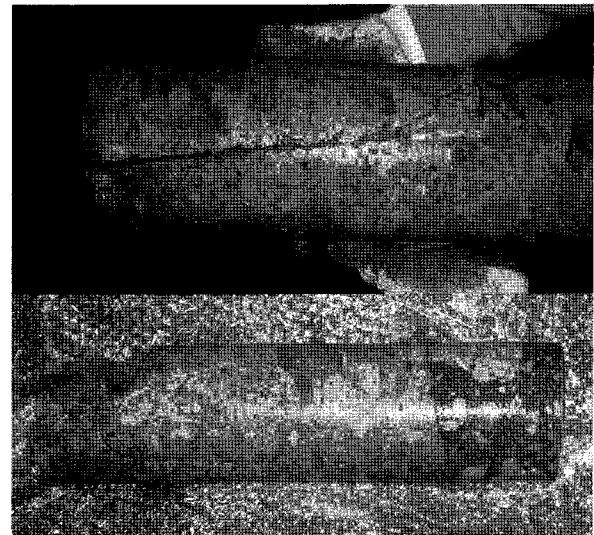


그림 4. 채취된 코어시편 및 탄산화 깊이 측정

이 용이하고, 또한 라이닝 표면에 0.5~1mm 정도의 고품분이 부착되어 미세공극을 채움으로써 이산화탄소(CO₂)와 콘크리트 수화생성물과의 반응을 1차적으로 차단시켰기 때문으로 판단된다.

한편 터널 구조물의 콘크리트 라이닝에서 채취한 코어 공시체의 역학적 특성을 알아보기 위한 일환으로 투

표 2. 총 통과전하량에 근거한 염소이온 침투성 기준

총 통과전하량 (coulomb)	투수성 평가기준
> 4,000	High
2,000 ~ 4,000	Moderate
1,000 ~ 2,000	Low
100 ~ 1,000	Very low
< 100	Negligible

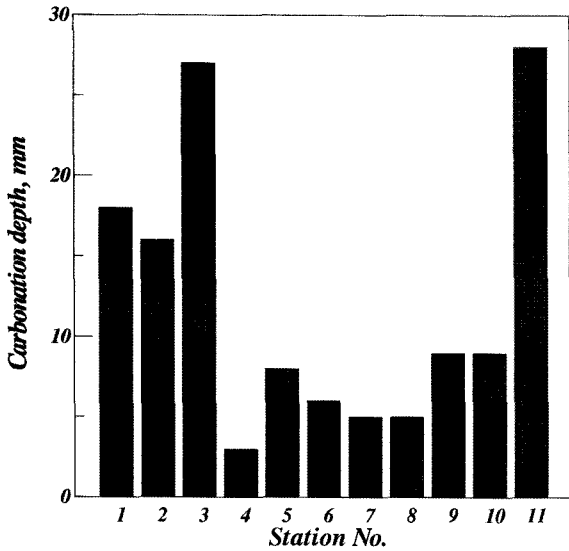


그림 5. 탄산화깊이 측정결과

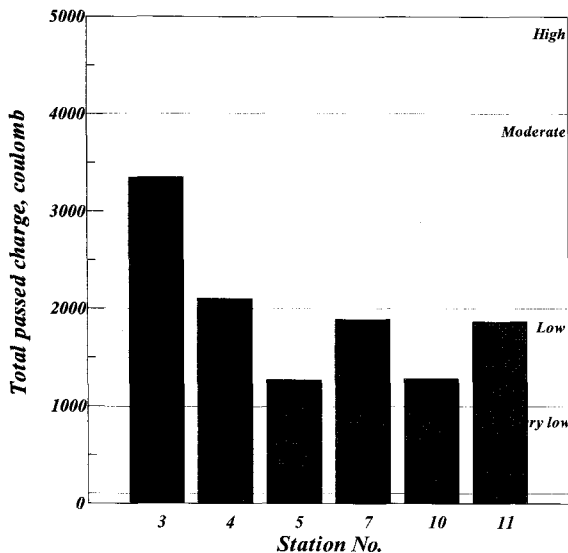


그림 6. 총통과전하량

수성 실험을 실시한 결과 코어시편의 양단을 통과한 총 전하량을 정리하여 나타낸 것이 그림 6이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, No. 5 및 No. 10 코어 시편의 경우 총 통과전하량이 약 1,200 coulomb 정도로 적게 나타나는 좋은 결과를 보인 반면, No. 3의 경우 약 3,300 coulomb 정도로 크게 나타남을 알 수 있다. 총 통과전하

량의 실험결과로서 표 2에 나타난 투수성 평가기준과 비교해 보면, No. 3 코어 공시체를 제외하면, 대부분 low 영역을 나타내었다. 이러한 경향은 앞서 전술한 코어 압축강도 결과와는 다소 상이하게 나타남을 알 수 있다. 그 이유는 압축강도와 콘크리트의 투수성은 직접적인 관련이 없을 뿐 만 아니라, 콘크리트 라이닝 제조 당시 지나치게 큰 굵은 골재가 사용되어 투수성 평가를 위한 기준 적용이 다소 신뢰성이 떨어지기 때문으로 판단된다.

3.4 미세 구조적 관찰

그림 2에 표시된 바와 같이 노후터널의 No. 8 부근의 벽면 및 천정부분에서 시편을 채취하여 콘크리트 라이닝의 성능저하 현상이 명확하게 나타난 시편에 대하여 XRD, SEM 및 EDS 등 기기분석을 통하여 원인분석을 실시하였다.

일반적으로 X선 회절분석법은 시멘트 경화체의 수화 반응에 의하여 생성되는 수화생성물 뿐만 아니라, 주변 환경에서 유입되는 각종 유해이온과 시멘트 수화물과의 화학반응에 의하여 생성되는 반응생성물을 반정량적으로 평가할 수 있는 방법으로 알려져 있다. 이 XRD 법에 의하여 확인되는 반응 및 수화 생성물은 결정적 조직구조를 가진 물질에 한정되는 단점이 있지만, 시멘트 조직구조를 구성하는 성분을 조사하기 위한 최적의 방법으로 현재 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 quartz 피크에 의한 상(phase)의 희석효과(dilution effect)를 최소화 하기 위하여 2θ 측정범위를 5~25°에 대한 결과로 제한하였다.

또한 XRD 분석결과로 도출된 결과를 바탕으로 생성 가능한 물질에 대한 미세구조 조사는 SEM 및 EDS 분석을 통하여 수행하였다. 성능이 저하된 코어 공시체의 표면에 대한 SEM 분석을 실시한 후, 결정 물질에 대한 원소분포를 EDS분석을 통하여 고찰함으로써 성능저하 원인을 규명하고자 하였다. 본 연구에서는 터널 중앙부 No. 8부근에서 열화현상을 명확하게 보여주는 시료에 대하여 벽면과 천정부분에 대하여 언급하기로 한다.

3.4.1 측벽부분

대상 구조물의 표면열화가 많이 진행된 측벽 콘크리트 라이닝의 코어 시편을 대상으로 표면부분에 대한 XRD분석결과를 그림 7에 나타내었다. 이 그림에서 알

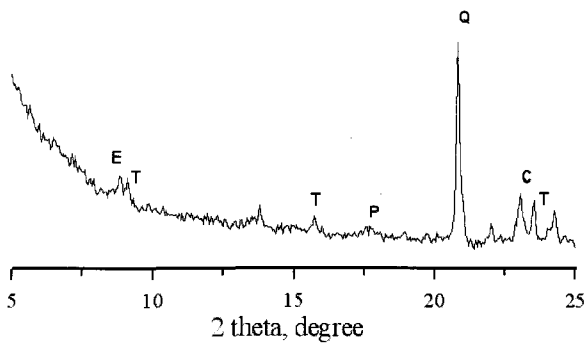


그림 7. No. 8 코어 시편 표면 부분 XRD 분석(E : Ettringite, T : Thaumasite, P : Portlandite, Q : Quartz, C : Calcite)

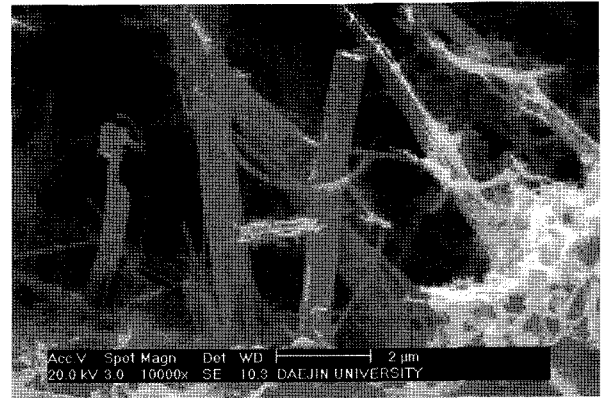


그림 9. 그림 8의 □부분에 대한 확대 SEM 촬영 (×10,000)

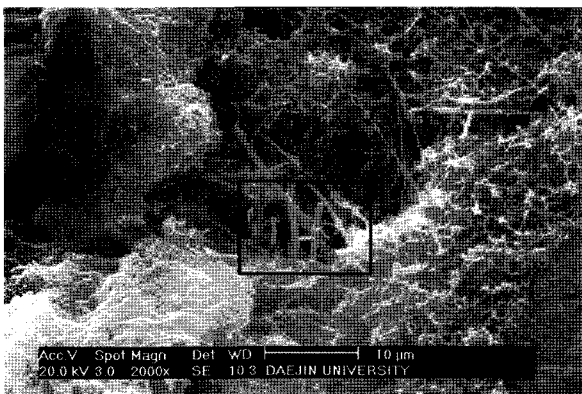


그림 8. No. 8 코어 시편 표면 부분 SEM 사진

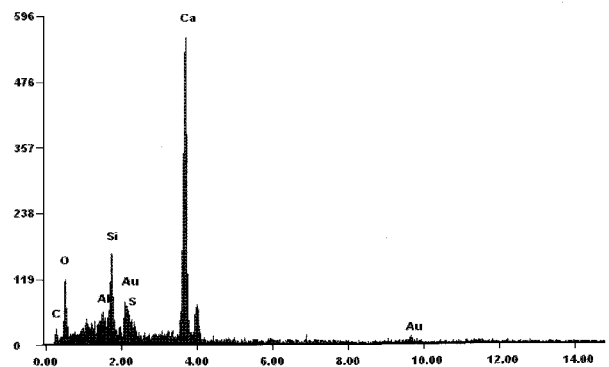


그림 10. 그림 9의 반응생성물에 대한 EDS 분석

수 있듯이 분석에 사용된 분말이 콘크리트 라이닝으로부터 채취한 탓으로 골재의 성분으로 추정되는 quartz 피크가 높은 강도로 검출된 것을 알 수 있다. 또한 콘크리트 라이닝의 외부로부터 침투한 유해이온의 작용으로 인하여 2θ가 9.1° 부근에서 팽창성 반응물질인 ettringite 및 연화 반응물질인 thaumasite의 중첩피크가 관찰됨을 확인할 수 있었다. 반면에 2θ가 18.1° 부근에서 portlandite의 피크 강도는 매우 약하게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 현상이 나타난 이유는 콘크리트 라이닝의 표면부에서 건습 반복 작용으로 인한 수산화칼슘의 용출(leaching) 및 반응물질의 생성이 심화된 탓으로 해석된다. 이러한 환경에서는 mirabilite ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)의 생성에 의한 결정압(crystal pressure)이 크게 작용하여 콘크리트 라이닝의 조직에 심각한 손상을 유발할 가능성이 높은 것으로 보고되고 있다(Gollop and Taylor, 1995; Al-Amoudi, 2004).

다음으로 동일한 콘크리트 라이닝 코어 공시체에서 채취한 샘플의 성능저하 원인을 시각적으로 조사하기 위하여 SEM을 사용하여 미세구조를 조사하였다. 먼저

그림 8은 No. 8부근 코어공시체의 표면부분에 대한 미세조직을 나타낸 사진으로써 그물모양의 반응생성물이 확인되었으며, 중앙부분에는 각주형의 반응물질이 생성되었음을 확인할 수 있었다. 고배율에서 이 생성물을 확인하기 위하여 그림 8의 □부분에 대한 확대촬영을 실시한 것이 그림 9이며, EDS 분석결과를 나타낸 것이 그림 10이다. 이들 그림에서 알 수 있듯이 각주형의 반응물질은 다량의 C, S 및 O가 분포하며, 소량의 S 원소가 존재하므로, C-S-H gel과 thaumasite가 혼합된 형태의 물질임을 추정할 수 있었다.

3.4.2 천정부분

그림 11은 터널 콘크리트 라이닝의 No. 8 코어 시편에서 가까운 천정부분에서 채취한 샘플에 대한 XRD 분석 결과를 나타내고 있다. 앞에서 언급한 No. 8 측벽부분 코어 공시체의 표면부분에서 나타난 XRD 패턴과 유사하게 thaumasite로 추정되는 고강도(high-intensity) 피크가 검출됨을 알 수 있다. 뿐만 아니라, ettringite의 피크도 관찰되므로 이 부분에 지하수 또는 외부토양으로

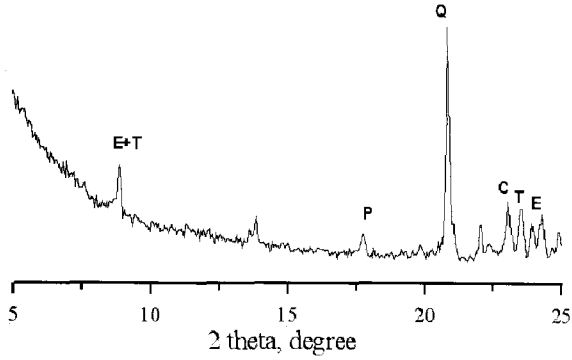


그림 11. 천정부분 샘플의 표면 부분 XRD 분석결과(E : Ettringite, T : Thaumassite, P : Portlandite, Q : Quartz, C : Calcite)

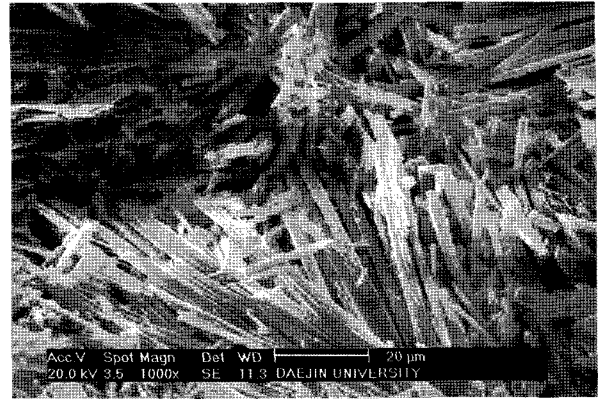


그림 13. 그림 12의 □부분에 대한 확대 SEM 촬영 (×1,000)

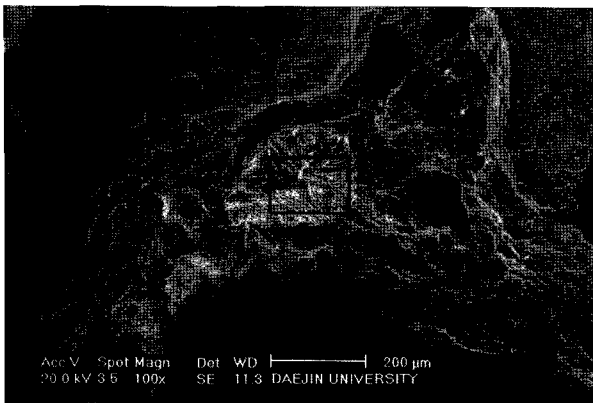


그림 12. 천정부분 샘플의 표면 부분 SEM 사진

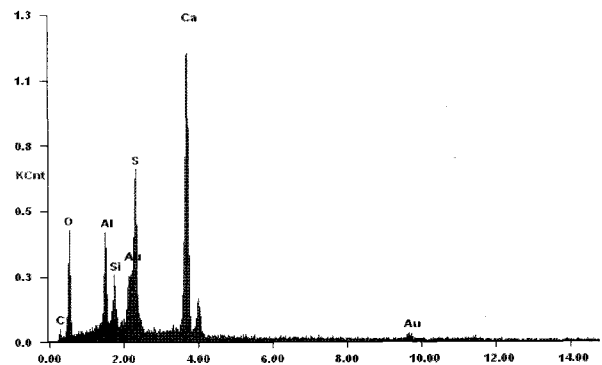


그림 14. 그림 13의 반응생성물에 대한 EDS 분석

부터 유입된 황산염(SO₄²⁻)이온이 지배적으로 반응하였다고 추정할 수 있다(Ogawa and Roy, 1982). 그러나 portlandite의 피크도 검출됨에 따라 향후 화학적 침식이 더욱더 진행될 가능성이 있는 것으로 판단된다. 실제로 본 샘플을 채취한 부위는 누수의 흔적이 뚜렷하였으며, 과도한 콘크리트 라이닝의 탈락으로 인하여 동공(空洞) 상태가 존재하였다.

콘크리트 라이닝에 생성된 반응생성물을 명확하게 평가하기 위하여 No. 8 코어 공시체 부근 천정에서 채취한 코어 공시체에 대한 SEM 촬영을 실시한 것이 그림 12로써, 중앙부분에 골재가 박리된 흔적을 발견할 수 있었다. 이 부분에 대한 보다 고배율(×1,000)의 촬영을 실시한 것이 그림 13으로써 침상의 반응생성물을 발견할 수 있다. 또한 이 물질에 대한 원소분포 분석 결과를 나타낸 것이 그림 14로써, Ca, Si, S, Al, O 및 소량의 C 피크가 존재함을 알 수 있다. 다시 말해서, thaumasite와 ettringite가 공존하는 침상물질임을 확인할 수 있었다. 이것은 앞에서 서술한 XRD 분석결과와 일맥상통하는 것으로 판단된다. 반응생성물 중 ettringite와 thaumasite

가 공존하는 것은 수화물질과 외부환경으로부터 유입된 SO₄²⁻이온이 반응으로 생성된 물질의 전이반응(transition reaction)에 의한 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 반응물질의 생성에 따른 천이지역(interfacial transition zone)에서 강성의 소실이 골재의 탈락 및 탈산화(decalcification)에 따른 강도저하를 유발한 것으로 생각할 수 있다.

4. 결론

재래식 터널 구조물의 지보재인 콘크리트 라이닝의 장기내구성, 화학적 성능저하 및 반응 메커니즘을 규명하기 위하여 노후화된 터널 구조물에 대한 현장조사 및 실내실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 터널 구조물의 측벽부분에서 채취한 콘크리트 라이닝 코어 공시체의 압축강도 측정 결과, 채취부위에 따라 상이한 값을 나타내었으며, 코어 공시체의 압축강도는 콘크리트 라이닝의 성능저하 정도와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 또 코어 공시체의

압축강도는 반발경도를 이용한 현장 비파괴 시험결과와 상이하게 나타났다. 그러나 본 연구에서는 콘크리트 라이닝의 압축강도가 설계당시인 12MPa 보다 크게 나타났으며 이것은 5mm에서부터 100mm의 크기의 골재를 사용하여 콘크리트 라이닝을 건설하여 나타난 것으로 판단된다.

- (2) 콘크리트 라이닝에서 채취한 코어 공시체의 투수성 실험 결과, 총 통과전하량이 약 1,200 - 3,300 coulomb 정도로 평가되었으며, 투수성 평가기준과 비교해 볼 때, 일부 코어 공시체를 제외하면 대부분 low 영역을 나타내는 좋은 결과를 나타내었다. 그러나 터널 구조물의 콘크리트 라이닝 건설당시 지나치게 큰 굵은 골재가 사용되어 투수성 평가를 위한 기준의 적용이 다소 신뢰성이 떨어지기 때문에 판단된다.
- (3) 콘크리트 라이닝의 성능저하 원인을 평가하기 위하여 XRD 분석 결과, 코어 시편의 채취위치에 관계없이 $9.1^\circ 2\theta$ 부근에서 시멘트 성능 저하 반응물질인 ettringite 및 thaumasite의 중첩피크가 관찰되었으며, 시편의 노출 위치에 따라서 수산화칼슘의 용출 및 수화반응의 영향으로 portlandite의 피크도 검출되어 대상 터널 구조물의 콘크리트 라이닝은 주변 지하공간으로부터 유입된 SO_4^{2-} 이온의 영향으로 반응물질이 생성된 것으로 판단된다.
- (4) 콘크리트 라이닝에 대한 화학적 성능저하 원인 및 정도를 평가한 결과, 배면의 토양 및 주변 지하수로부터 유입되는 유해인자의 영향을 크게 받았음을 알 수 있었다. 화학적 반응에 의한 ettringite, gypsum 및 thaumasite의 생성은 콘크리트 라이닝의 역학적

성질에 영향을 미치며, 궁극적으로 내구수명 저하를 가져오게 되므로 고내구성 콘크리트 라이닝의 제조를 위한 재료적 대책수립 및 관련 지침안의 제정이 반드시 필요한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김동규, 이규필, 최순옥 (2004), “노후터널 안전관리 및 재해 예방 기술개발”, 한국건설기술연구원 연차보고서.
2. 김성수 (2004), “터널지보재의 열화특성 연구”, 한국건설기술연구원 위탁연구보고서.
3. 변근주 (2005), “콘크리트 구조물의 내구성 향상과 장수명화”, 한국레미콘공업협회 연구과제보고서.
4. 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.
5. 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.
6. Al-Amoudi, O. S. B. (2004), “Attack on Plain and Blended Cement Aggressive sulfate Environments”, *Cement and Concrete Composites*, Vol.24, pp.305-316.
7. 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.
8. Hooton, R. D. (2005) “Microstructural Study on the Deterioration of Shotcrete in Tunnel Structures”, *KICT Report*, University of Toronto.
9. Lee, S. T. and Hooton, R. D. (2005), “Prediction of Performance on Cement Matrix Exposed to Sulfate Media”, *Annual Report*, University of Toronto.
10. Ogawa, K. and Roy, D. M. (1982), “C4A3S Hydration, Ettringite Formation and Its Expansion Mechanism, III, Effect of Cao, NaOH and NaCl”, *Cement and Concrete Research*, Vol.12, No.2, pp.247-256.

(접수일자 2007. 5. 8, 심사완료일 2007. 12. 18)