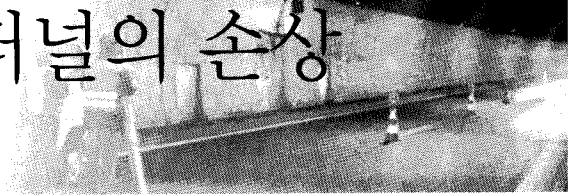


황산염에 의한 기존 터널의 손상 사례 및 보수·보강



오혁희

시설안전기술공단 지하시설실장



신용석

시설안전기술공단 지하시설실 부장



윤태국

시설안전기술공단 지하시설실 차장

1. 서언

본고는 강원도 태백지역의 ○○터널에 대한 정밀안전진단을 실시한 결과 박리, 박락, 황산염 등에 의한 피해가 심하여 보수·보강을 실시하였으나, 그 중 타 지역의 터널과는 상이하게 황산염에 의한 피해가 많아 황산염에 의한 손상사례를 살펴보고 이에 대한 적절한 보수·보강(안)을 제시하였으며 향후 유사한 사례에 대한 구조물의 설계, 시공, 유지관리시 본고의 내용을 참고로 하여 보다 내실있는 대책이 마련되어야 할 것으로 판단된다.

2. 본론

2.1 대상터널의 주요 현황

대상터널은 재래식 공법으로 시공되어진 단선 철도터널로서 1966년 준공된 후 44년이 경과한 ○○터널이다. 라이닝은 무근콘크리트로 시공되어있으며 공용기간 중 기존 라이닝의 변상이 심한 구간은 철근 콘크리트로 보강 시공한 구간도 조사되었다.

한편 본 터널에 대한 전반적인 현황은 현장조사시 실시한 외관조사결과 일반적인 균열, 누수, 박리, 박락 등의 열화 현상이 조사되었다.

가. 균열

균열은 콘크리트 라이닝 전구간에 부분적으로 발생되어 있으며 시공이음부와 아치부에는 종·횡 방향 균열, Cold Joint부에서는 사방향 균열이 주를 이루었다. 특히, 중요한 균열은 아치부와 측벽부의 종방향 시공이음부와 라이닝 타설시 발생하는 횡방향 시공이음부에서 주로 발생하였으며, 기존 라이닝에 철근콘크리트로 보강된 라이닝 구간은 무근 콘크리트 라이닝 구간보다는 비교적 균열 발생이 적게 조사되었다.

나. 누수

누수는 주로 시공이음부, 균열부, Cold Joint부와 같은 취약부에서 발생하고 있다. 누수가 집중되는 위치에는 도수공 및 시공 당시 배수구를 설치하여 터널내부로 유도하고 있으며, 누수현상은 넓은 구간에서 발생하는 면상 누수형태로 조사되었다. 터널상부 좌측 계곡부에 '72년 폐광된 광산(□□광업소)의 흔적이 있고, 폐광산 지역에서는 철분이 많이 함유된 암석과 비산성분을 가공하고 남은 폐기물이 방치되어 있어 그 성분이 터널내부로 유입되고

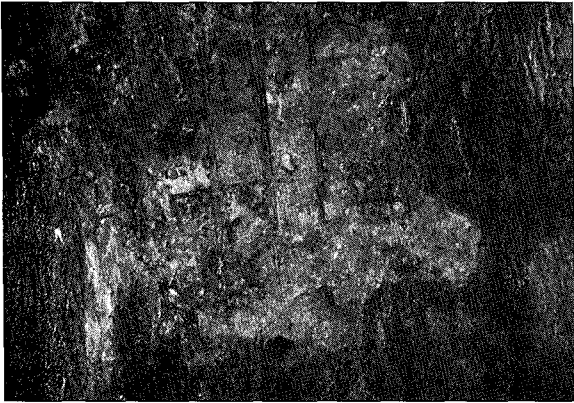


그림 1. 황산염에 의한 콘크리트 손상 상태

있으며 성분분석을 위하여 지하수의 수질조사를 실시하였다.

다. 손상

박리는 전구간에서 부분적으로 발생되었으나 주로 아치부에서 발생하였다. 일부는 균열과 함께 조사된 개소도 있었다.

박락은 전구간에서 심하게 나타났고 특히 아치부와 측벽부의 중방향 시공이음부에서 많이 발생되었으며, 박락 현상이 발생된 지점에서는 황토색의 면상누수와 철근 부식의 정도가 심한 것으로 조사되었다. 폐광산에서 유입되

는 지하수에 의하여 침해를 받는 일부구간의 기존 라이닝과 철근콘크리트로 보강된 라이닝에 심한 손상형태로 조사되었다(그림 1 참조).

2.2 터널상부 폐광산 주변조사

'72년도에 폐광된 가공공장(□□광업소)은 ○○터널 입구부로부터 약 150m 정도 떨어진 좌측계곡부에 위치하고 있으며, 폐광전 광업소에 근무하였던 관계자에 의하면 철분이 함유된 암석을 캐내어 비산을 생산하였다고 증언하고 있다.

또한, 폐갱은 2개소가 있는데 그 중 터널 천정부로부터 토피고가 약 60m 정도 떨어진 지점의 폐갱은 굴진 초기 단계에서 중단된 상태이고, 터널측면으로부터 약 40m 정도 떨어진 지점의 폐갱은 길이가 약 30m 정도로서 계곡에서 흐르는 물의 배수로 역할을하고 있다(그림 2 참조).

2.3 실내 분석 시험

터널 라이닝에서 조사된 황토색의 면상누수 및 철근 부식 등의 열화 현상의 원인을 분석하기 위하여 여러 가지

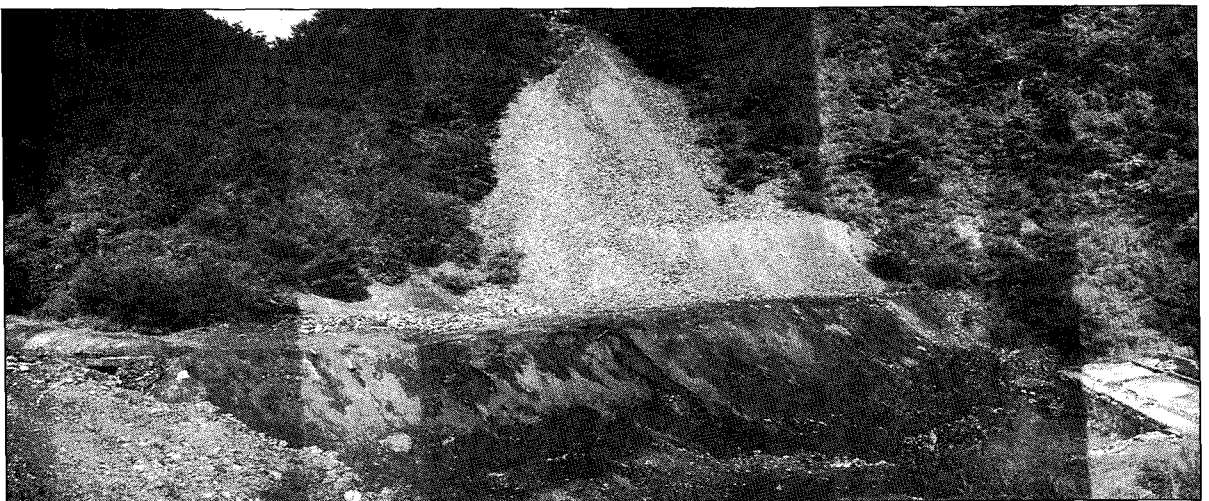


그림 2. 터널 상부의 폐광산 주변상태



그림 3. 산성수 누수지역의 코어 채취

현장조사 및 실내분석 시험을 실시하였다. 콘크리트의 물성에 관한 분석은 구조적인 요소보다는 재료적인 요소 즉, 화학적인 요소가 보다 중요한 관계로 판단되어 채취한 코어로부터 염화물 분석을 실시하였고 수질분석은 라이닝 상태가 가장 취약한 부위에서 누수되는 물을 채취하여 실시하였다(그림 3 참조).

2.3.1 염화물 시험

가. 개요

콘크리트의 pH는 12.5~13으로 콘크리트의 내부에 포함하는 철근의 표면에 부동태 피막을 형성하여 철근을 부식으로부터 보호하고 있다. 그러나 콘크리트 내에 과도한 염화물이 존재하는 경우, 염소 이온의 작용에 의해 부동태 피막이 파괴되어 철근이 부식하기 쉬운 상태로 된다. 또한 콘크리트의 중성화가 철근까지 진행되면 철근의 부식에 대한 염소 이온의 영향은 더욱 커진다.

더구나 염화물은 고결시 액체 상태일 때보다 2~3배의

표 1. 콘크리트 표준시방서 염화물 함유량 규제치

항목	규제량
콘크리트 중의 염화물 함유량의 한도	· 콘크리트 중의 염화물 함유량은 콘크리트중에 함유된 염화물 이온(Cl)의 총량으로 표시한다. · 비빌 때 콘크리트 중의 전 염화물 이온량은 원칙으로 0.3kg/m ³ 이하로 한다.

체적 팽창이 이루어지므로 콘크리트 공극 내에서의 염의 결정화는 염 결정체에 의한 압력 때문에 콘크리트를 붕괴시키는 원인이 되며, 특히 환경적 요인에 의해 습윤과 건조가 되풀이 되는 경우에는 이러한 현상을 더욱 가중시켜 콘크리트 구조물의 성능과 수명을 저하시키는 중대한 요인이 될 수 있다.

콘크리트 내의 염화물은 철근의 부식을 발생시키거나, 콘크리트를 노후화시켜 구조물의 성능과 수명을 저하시키는 요인이 되므로, 과거부터 콘크리트 중의 염화물량 증가의 최대 요인인 해사의 함유량을 제한하여 왔다.

콘크리트 표준시방서(’96. 5 건설교통부)의 염화물 함유량 규제치는 표 1과 같다.

나. 시험 방법 및 결과

콘크리트 코어 공시체에서 채취한 미분말 시료 200g을 일본콘크리트 공업협회 기준(안)의 경화한 콘크리트 중의 염분량 측정방법에 의해 염분용액을 추출한 후 Salt Meter인 CL-303F형을 사용하여 전류전극 측정법으로 측정하였으며 시험결과는 표 2와 같다.

다. 분석 결과

본 대상 구조물의 콘크리트 중에 함유되어 있는 염화물 함유량은 코어채취에 의한 표본조사이므로 터널 전체에 적용하기는 어렵지만 0.141kg/m³로 나타났다. 따라서 본 구조물의 염화물량은 적은 것으로 판단되며 염화물에 의한 구조물의 노후화 촉진이나 철근부식의 우려는 없는 것으로 판단된다.

2.3.2 수질조사

가. 개요

표 2. 콘크리트 중의 염화물 함유량시험 결과

구분	염화물함유량 (NaCl, %)	평균 염화물 함유량	
		NaCl (%)	Cl (kg/m ³)
00k 240(LW)	0.008	0.010	0.141
00k 320(RW)	0.012		

표 3. 수질분석 시험결과

구분 \ 분석 항목	pH (20℃)	용해성 증발잔유물	SO ²⁺	Na	Cl	Mg ²⁺	비고
단위	-	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
00k 140	5.9	12,494	5,408	7.95	2.03	138	산성수 지역
00k 264	7.5	308	21.1	3.62	3.36	8.94	

주) 수질분석기관 : 화학시험연구소

표 4. 리트머스 시험지에 의한 pH 측정결과

위치	○○터널										
	105 (LW)	125 (LW)	125 (RW)	127 (RW)	130 (LW)	130 (RW)	135 (LW)	140 (RW)	145 (LW)	145 (RW)	150 (RW)
pH	7~8	1~2	5~6	2~3	1~2	7~8	2~3	4~5	5~6	7~8	7~8

표 5. 지하수의 수질기준

구분 \ 분석 항목	pH (20℃)	증발 잔유물	SO ²⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Cl	Mg ²⁺
단위	-	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
지하수 평균치	8.9	303.41	34.72	48.07	13.73	0.9	16.77	0.74
음용수기준	5.8~8.5	-	200	-	-	-	-	-
오수평균	9.6이상	-	-	-	-	-	94	-
지하수 최대치	9.6이상	-	34	68	40.47	-	80.9	5.3

주) EC : 전기 전도도

본 터널의 배수상태는 라이닝 콘크리트 배면을 타고 흘러내린 지하수가 라이닝 표면으로 유출되어 선로의 자갈층을 통해 자갈도상하부 중심하수관으로 배수되고 있으며, 일부 구간에서는 콘크리트 라이닝에 적색을 띤 지하수가 균열 및 라이닝 내부 공극으로 스며나와 라이닝 면을 타고 흘러내려 터널내부로 유입되고 있는 상태이다.

따라서 본 터널의 라이닝 콘크리트 내구성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 지하수에 대한 시료를 채취하여 콘크리트에 유해한 영향을 미치는 유해 이온 함유량에 대한 시험을 실시하였으며, 현장에서는 간편하게 pH값을 측정할 수 있는 리트머스 시험지로 시험을 병행하였다.

나. 시료채취 및 분석현황

1) 시료채취

본 터널의 전구간 중 2개소로부터 지하수를 채취하

였다.

① Sta. 00k 140 (LW)

코어채취 후 코어채취공에 고인물을 떠서 시료를 채취.

② Sta. 00k 264 (RW)

우측벽부에 시공된 유도배수공을 통해서 누출되는 곳에 대하여 시료를 채취

2) 시료 분석 의뢰

시료 채취일시 : 00년 8월 18일

시료 량 : 각 1.5ℓ

3) 분석항목

- 내구성 저하를 발생시킬 수 있는 pH(수소이온 농도)
- 용해성 증발 잔유물

표 6. 지하수의 pH가 콘크리트에 미치는 영향

pH	콘크리트에 미치는 영향	판정
4.0이하	시멘트가 용해되어 붕괴	위험
4.1~5.0	비교적 짧은 기간에 표면이 요철로 된다.	위험
5.1~6.0	표면이 약하게 되기 쉬움	주의
6.1~7.9	콘크리트 초기 재령시 주의 요망	약간 안전
8.0이상	안전	안전

주) "터널 보강·보수 매뉴얼", 일본철도총합기술연구소

표 7. 유해 이온 함유량에 따른 환경 조건의 분류

유해요소	정도	심한정도		
		약함	중간	심함
pH		6.5~5.5	5.5~6.5	< 4.5
mg/l 단위의 탄산 (CO ₂)		15~40	40~100	> 100
암모늄 (NH ₄ ⁺)		15~30	30~60	> 60
mg/l 단위의 마그네슘 (Mg ²⁺)		300~1,000	1,000~3,000	> 3,000
mg/l 단위의 황산염 (SO ₄ ²⁻)		200~600	600~3,000	> 3,000

주) 농·어업 토목 시설물의 내구성 향상을 위한 고품질 콘크리트에 관한 연구 p121

- 주요 음이온 : SO₄²⁻, Cl⁻
- 주요 양이온 : Na⁺, Mg²⁺
- 질소 이온 : NO₃⁻

다. 리트머스 시험지의 시험현황

- 1) 시험구간 : L=53m
- 2) 시험수량 : 11개소

라. 시험결과

수질시험 결과 및 리트머스 시험지에 의한 pH 측정결과를 표 3, 표 4와 같다.

참고로 지하수의 수질기준은 다음 표 5와 같으며 지하수의 pH가 콘크리트에 미치는 영향 및 유해 이온 함유량에 따른 환경 조건의 분류는 표 6, 표 7에 나타내었다.

마. 결과분석

- 1) 시료 채취 시험 결과

코어채취의 배면에서 흘러내린 지하수의 수질을 분석한 결과 pH(수소이온 농도)값은 5.9이고 황산염(SO₄²⁻)의 이온값은 5,408mg/l 로서 다량으로 검출되어 콘크리트에 유해한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

pH값과 황산이온(SO₄²⁻)량은 콘크리트의 화학적 침해와 성능저하를 가속화 시킬수 있으며, 기존 무근콘크리트 라이닝에 철근콘크리트 라이닝으로 보강된 구간은 산성수와 황산염에 의한 콘크리트 라이닝 손상이 발생하여 보강된 것으로 판단된다.

이러한 산성수와 황산이온량은 터널상부 좌측계곡에 있는 폐광산(72년 폐광)에서 침투된 침출수로 판단되며 구조물의 사용성, 내구성, 안전성 확보를 위하여 보수·보강되어야 할 것으로 판단된다.

2) 리트머스 시험지의 시험결과

현장에서 간편하게 pH값을 측정할 리트머스 시험지에 의한 시험결과는 pH값이 최대 1~2로서 강한 산성수로 나타났으며 산성이온수에 의한 콘크리트 라이닝의 노후화가 발생할 수 있는 pH 5 이하의 구간은 15m로 조사되었다.

따라서 터널 상부 좌측 계곡에 있는 폐광산의 영향을 받는 구간은 황산염에 의한 콘크리트 라이닝의 변상을 방지하기 위하여 근본적인 대책이 필요하다.

바. 황산염 반응에 의한 콘크리트 구조물의 성능 저하 고찰

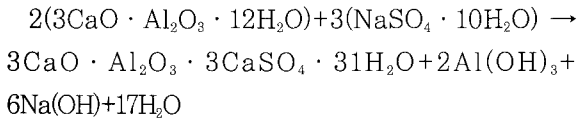
1) 황산염 반응 및 반응기구

황산염 반응은 라이닝 콘크리트와 인접한 주위 환경의 지하수 등으로부터 나트륨, 칼슘, 칼륨 및 마그네슘 등의 자연 발생적인 황산염들이 콘크리트 구조물의 성능 저하 현상을 일으키게 된다.

콘크리트가 황산염을 함유한 지하수나 흙에 접하여 황산염에 노출된 경우 반복된 건조과정을 통해 주위환경에 의한 상당량의 황산염이 콘크리트에 축적된다. 콘크리트 내에 축적된 황산염의 화학적 반응에 의해 궁극적으로 콘크리트의 성능 저하가 발생하며 다른 성능 저하 작용에 알맞은 환경을 제공하므로써 다른 원인에 의한 콘크리트의 성능 저하가 연속적으로 가속화 된다.

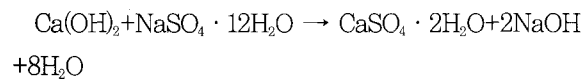
황산염 반응에 의한 콘크리트의 성능 저하 과정은 다음의 세가지 중요한 과정으로 구분할 수 있다.

먼저 콘크리트 내부에 존재하는 황산염이 칼슘 알루미늄 수화물과 반응하여 칼슘 설포 알루미늄아이트 생성물(Calcium Sulfo Aluminate Product), 즉 Ettringite($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$)를 생성하는데 그 화학 반응식은 다음과 같다.



위의 반응에 의하여 생성된 Ettringite는 반응물질에 비하여 상당히 큰 부피를 갖으며 비교적 낮은 황산이온 집중상태에서는 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 의 저위 황산염으로 분해된다. 콘크리트내에 Ettringite가 축적되면 그 팽창에 의하여 팽창응력이 발생하며 이러한 Ettringite는 황산염 용액에 의한 콘크리트의 성능저하 및 콘크리트 팽창의 주요한 원인이 된다.

두 번째 과정으로는 콘크리트 내의 수산화 칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)이 석회성분($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)에 의해 대체되는 것으로 화학반응식은 다음과 같다.



석회성분은 수산화 칼슘에 비하여 체적이 크므로 석회성분의 생성은 콘크리트 내에 팽창응력을 유발한다. 이 석회성분이 점차 용해되므로서 콘크리트 내에는 간극이 생기게 되며 간극의 발생에 의하여 콘크리트 투수성이 증가하게 된다.

황산염의 농도는 SO_4 증량의 ppm(part per million)단위로 표현되는데 1,000ppm 정도면 보통의 침해 조건이고, 2,000ppm 정도면 매우 심한 침해 조건이 되며 황산염의 농도와 더불어 황산염이 용해된 침투수의 유입 또는 재충전의 속도에 따라 침해속도는 큰 영향을 받는다. 즉

황산염 침해의 정도를 파악하기 위해서는 지하수의 이동에 따라 파악해야 되며 콘크리트 내부로의 지하수의 흐름이 존재하거나, 계속해서 반복적인 건습조건이 조성될 때 황산염 침해는 가속화 된다.

2) 황산염 반응으로 성능저하

황산염 반응의 결과로서 Ettringite가 생성되며 이에 의하여 체적 팽창에 의한 콘크리트 응력이 발생한다. 팽창응력이 콘크리트의 강도를 초과하면 콘크리트내에 균열이 발생하여 심한 경우에는 콘크리트의 분쇄를 야기하기도 한다.

또한 황산염이 콘크리트내에 축적되므로서 염소이온과 같이 콘크리트에 부정적인 영향을 미치는 파괴적인 염들의 반응을 활성화시켜 콘크리트의 성능저하가 가속화된다. 수산화 칼슘을 대체한 석회성분은 체적을 팽창하므로서 콘크리트에 팽창응력을 유발 콘크리트에 균열을 발생시키고 또한 석회성분이 점차로 용해되며 콘크리트 내부에서 공극이 생기게 되고 결국에는 콘크리트의 투수성을 증가시키는 결과를 가져온다.

2.4 보수·보강(안)

황산염에 의한 피해를 입은 터널에 대한 조사 결과를 근거로 하여 설계시의 내구성을 유지하기 위한 보수·보강방법을 선정함에 있어 표 8과 같이 비교하였다.

가. SO_4^{2-} 이온함유량이 높은 산성수의 제어 방안에 대한 기술검토

1) 황산염 반응에 대한 콘크리트 저항성에 대한 Miller와 Manson의 연구결과에 따르면 포틀랜드 시멘트 내의 트라이 칼슘 알루미늄아이트(알루미늄산 3석회 : Tricalcium Aluminate, C_3A)함량이 콘크리트의 황산염 반응 저항성에 큰 영향을 주는 것으로 보고되어 있다.

2) ASTM C150에서는 C_3A 의 함량이 최대 5%를 가지

표 8. 지하수의 수질기준

보수·보강공법 구분	제 1안 (추천) 내황산 시멘트 그라우팅 공법	제 2안 폴리우레탄 주입공법	제 3안 경량기포 모르터 주입공법
공법개요	<ul style="list-style-type: none"> 내황산시멘트에 포졸란 또는 고로슬래그를 첨가하여수화작용시 발생하는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$와 반응하여 칼슘실리케이트 수화물을 생성하므로써 황산염(SO_4^{2-})이온에 대한 저항을 증가시키는 공법이다.(5종시멘트사용) 	<ul style="list-style-type: none"> 폴리우레탄 주입공법은 두가지 약액을 주입기에서 일정비율로 혼합하여 정위치에 주입하고 혼합액의 발포 및 고결로 배면공동채움 및 원지반을 강화시켜 차수제로 많이 사용하고 있는 공법이다. 	<ul style="list-style-type: none"> 경량기포 모르터는 시멘트, 모래, 물, 액체방수제 등을 믹서에서 혼합하여 얻어지는 슬러리에서 특수 발포 노즐을 통하여 얻어지는 발포액의 기포를 다시 혼합과 동시에 압송하여 배면공동채움을 실시하는 공법이다.
시공순서	<ol style="list-style-type: none"> ① 사전조사(천공등) ② 주입설계 ③ 시험시공 ④ 주입공, 검사공 ⑤ 주입기 설치 및 주입시행 ⑥ 마무리 작업 ⑦ 유도배수공 및 도수공법(필요시) 	<ol style="list-style-type: none"> ① 사전조사(천공등) ② 주입설계 ③ 시험시공 ④ 주입공, 검사공 ⑤ 주입기 설치 및 주입시행 ⑥ 마무리 작업 ⑦ 유도배수공 및 도수공법(필요시) 	<ol style="list-style-type: none"> ① 사전조사(천공등) ② 주입설계 ③ 시험시공 ④ 주입공, 검사공 ⑤ 주입기 설치 및 주입시행 ⑥ 마무리 작업 ⑦ 유도배수공 및 도수공법(필요시)
장, 단점	<ul style="list-style-type: none"> 라이닝 배면 지반에 주입하여 지반보강 및 차수효과 증대 복잡한 공간에도 치밀하게 공동충진 가능 내황산시멘트(5종)에 방수제, 강도증진제를 혼합하여 황산염반응에 저항성이 크다. 시공성, 경제성 등이 타공법보다 불리하다 사전에 라이닝 배면조사가 필요하고 시공 및 품질관리가 어렵다 	<ul style="list-style-type: none"> 매우 높은 고결강도와 다량의 수분에도 강하여 고결강도를 유지한다. 우수한 점착력, 고압축, 인장강도로 차수와 구조물 보강에도 좋다. 일반형, 고침투성, 급경화성, 차수 전용 및 코킹재 등 다양한 형태로서 현장상황 및 용도에 따라 선택이 가능하다. 공사비가 고가이고 다양한 적용이 힘들다. 사전에 라이닝 배면조사가 필요하고 시공 및 품질관리가 어렵다. 	<ul style="list-style-type: none"> 자중이 작아서 라이닝에 영향을 적게준다 침투성이 양호하여 배면공동 충전율이 좋다 아치콘크레터로서 작용토압의 분산 효과 기대 차수효과가 양호하여 누수에 의한 라이닝 노후화 방지 효과 경량기포 모르터 강도는 25~30kg/cm² 정도임
추천	○		
추천사유	<ul style="list-style-type: none"> 터널상부 좌측계곡부에 있는 폐광산 주변에서 유입되는 산성수(SO_4^{2-}이온함유량 : 5408mg/l)의 영향을 받아 콘크리트 라이닝의 침해를 받고 있음 라이닝 표면에 누수가 심하고, 특히 우기시에는 누수가 심하여 라이닝 전단면으로 확대되며 건기시에도 누수가 있는 상태 라이닝 배면에서 차수를 하여 라이닝 표면의 누수 및 화학적 침해방지, 라이닝 보강 및 노후화 방지 등 라이닝 배면에 공동은 탐지되지 않았으나 누수가 심하고 라이닝 두께가 부족한 구간이 있음 		
특기사항	<ul style="list-style-type: none"> · 시험시공 필요 · 주입상태 확인 및 주입관리 철저 · 주입시 계측관리 필요 · 시공 및 품질관리 철저 		

표 9. 황산염에 노출된 콘크리트에 대한 시멘트 및 혼화재료 선정에 관한 ACI Guide 규정

폭로조건	가수용성 황산염 ¹⁾ 토양(%)	가수용성 SO ₄ (ppm)	시멘트	물-시멘트 비 최대값 ²⁾
완만	0.00-0.10	0-150	-	-
보통 (해수포함)	0.10-0.20	150-1,500	2종 시멘트 ³⁾	0.50
심각	0.20-2.00	1,500-10,000	5종 시멘트 ⁴⁾	0.45
매우심각	2.00 이상	10,000 이상	5종시멘트 + 포졸란이나 슬래그 ⁵⁾	0.45

- 주1) SO₄로서 표시된 황산염과 SO₃(3산화황)로서 표시된 황산염의 관계는 시멘트의 화학분석에서 SO₃ × 1.2 = SO₄ 로 알려진 바와 같다.
- 주2) 더 낮은 물-시멘트 비가 콘크리트 내에 매립된 철근의 부식을 방지하기 위해 요구 될 수도 있다.
- 주3) 시험에 의해 동등한 내황산염 특성을 줄 수 있다고 이미 알려진 1종 시멘트와 고로 슬래그나 포졸란의 혼합.
- 주4) 시험에 의해 동등한 내황산염 특성을 줄 수 있다고 이미 알려진 2종 시멘트와 고로 슬래그나 포졸란의 혼합.
- 주5) 5종 시멘트를 함유하는 콘크리트에 사용되었을 경우 내황산염 특성을 개선시킨다고 시험에 의해 이미 알려진 포졸란이나 슬래그의 사용

는 Type V의 내황산염 시멘트에 대하여 규정하고 있다. 포틀랜드 시멘트가 함유하는 알루미늄페리트(알루미늄산 4석회 : Tetracalcium Aluminoferrite, C₄AF)가 콘크리트 내의 황산염 반응을 지연시키는 것이다.

- 황산염에 노출된 콘크리트에 대한 시멘트 및 혼화재료 선정에 관한 ACI Guide 규정을 참고로 한다(표 9 참조).
- 콘크리트에 포졸란 또는 고로 슬래그를 첨가하거나 이들을 혼합한 시멘트를 사용함으로써 콘크리트의 황산염 반응 저항성을 증진시킬 수 있다. 포졸란과 고로 슬래그 등의 혼화재료들은 콘크리트의 수화작용시 발생되는 Ca(OH)₂와 반응하여 칼슘 실리케이트 수화물(Calcium Silicate Hydrate, 3CaO · 2SiO₂,

표 10. 내황산 시멘트 그라우팅 공법 보수·보강 방안

구분	보수·보강 방안
적용 구간	L = 40m
보수·보강	<ul style="list-style-type: none"> 내황산시멘트그라우팅공법 - 보강라이닝이 미시공된 구간 (40m) : 라이닝 배면의 지반에 주입(2~3m 내외) • 유도배수공 설치 - 양측벽부에 5~10m 간격으로 Zig-Zag로 배치

nH₂O)을 생성하므로써 콘크리트의 투수성 및 모세관 작용을 억제하게 된다.

나. 보수·보강 방안

- 보수 및 보강 방안은 완벽한 유도배수, 방수성, 내황산성 등을 고려하여 콘크리트면과 접촉 및 부식 방지를 위해 유도 배수공과 SO₄²⁻이온에 대한 저항성이 높은 5종 시멘트(내황산 시멘트)에 고로 슬래그를 첨가하여 저항성을 증가시켜야 할 것으로 판단되며 라이닝 배면 공동과 기반암에 그라우팅시 5종 시멘트(내황산 시멘트)에 고로 슬래그를 첨가하여 사용할 것을 추천한다.

2) 보수·보강 방안

표 10의 내용 참조

3. 결론

기존의 ○○터널에 대한 정밀안전진단을 실시한 결과 타 지역과 상이하게 황산염에 의한 피해사례를 살펴보고 이를 분석하기 위하여 여러 가지 분석 및 시험을 실시하였으며 이 중 콘크리트의 염화물 분석 및 주변의 지하수에 대한 수질분석결과 라이닝 콘크리트에 유해한 황산염 성분의 수질이 조사되었다.

이러한 황산염에 의한 손상에 대하여 구간별 특징별로 여러 가지 보수·보강(안)을 제시하였으나 본고에서는 이

중 내황산 시멘트 그라우팅에 의한 보수보강방법을 제시하였다.

따라서 향후 폐광지역, 기반암이 석회석이 혼용되어 있거나 퇴적암, 화산암 등 황산염이 혼재되어 있는 지역, 산성의 지하수가 발생한 우려가 있는 지역 등에 대한 구조물의 설계, 시공, 유지관리는 충분히 이에 대한 대책을 고려하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 시설물의 안전관리에 관한 특별법, 1995.
2. 시설안전기술공단 : 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침, 1996.
3. 시설안전기술공단 : 안전점검 및 정밀안전진단 실무요령(터널편), 1997.
4. 사단법인 일본터널기술협회 : 터널변상의 실태조사와 그 원인, 1981.
5. 북해도 개발국 토목시험소 : 변상터널의 원인과 수복공법, 1987.
6. 철도계 도서출판 주식회사 : 청함터널기술의 전부
7. 한국 콘크리트 학회 : 콘크리트 구조물의 진단·보강 및 유지관리, 1995.
8. 일본철도 종합기술연구소 : 터널보강·보수 매뉴얼, 1990.
9. 사단법인 일본터널기술협회 : 터널보강·보수에 관한 연구 보고서, 1986.
10. ASTM(American Society for Testing and Material)
11. R.S. Sinha, Elsevier : Underground Structure, 1991.
12. 사단법인 일본터널 기술협회 : 현장관계자 필휴 "터널공사의 안전"(산악터널·보조 공법편)