

터널굴착시 산성암반배수에 대한 습지영향평가 및 구조물대책

유영일, 오정배, 이두화 (삼보기술단)

김재곤 (한국지질자원연구원)

전해표 (삼두주식회사)

이선복, 제해찬 (동부건설(주))

1. 서 론

터널굴착으로 인해 황철석을 함유한 암반이 대기중에 노출되어 공기와 지하수를 만나 산성암반배수를 발생시켜 주변 토양 및 수질을 오염시키거나 인근 구조물을 부식시키는 사례가 국내외적으로 빈번히 발생하고 있다. 본 설계 구간에는 황철석을 함유한 암반이 분포하고 있으며, 터널갱구와 250m 이격되어 □□습지가 있어 이에 대한 검토 및 대책방안 마련이 필요하였다. 산성암반배수평가와 중금속 오염원해석을 통한 습지 영향 평가 및 대책방안을 제시하고 아울러 구조물 안전대책도 마련하였다.

2. 산성암반배수 분석

2.1 산성암반배수 발생 과정

황화광물은 공기접촉이 차단된 지하에 존재할 때는 안정하나 건설공사 및 광업활동과정의 지반굴착으로 지표에 노출되면 공기 중의 산소 및 물에 녹아 있는 산소와 반응하여 산화

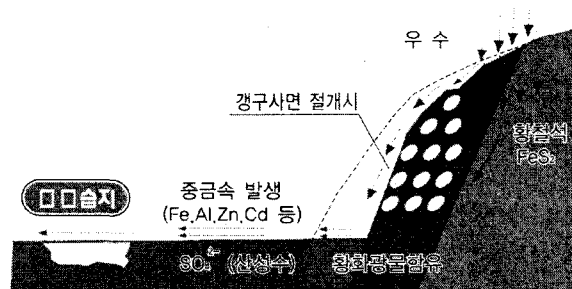


그림 1. 산성암반배수 발생 매커니즘

되는 과정에서 황산을 생성시킨다. 또한, 황화광물은 산성암반배수의 근원암석인 황철석(Pyrite, FeS₂)뿐만 아니라 미량의 다양한 종류의 중금속도 함유하고 있어 산화과정에서 황산뿐만 아니라 중금속을 생태계로 용출시킨다.

2.2 터널구간 지질현황 및 황화광물 분포

A터널의 본선과 종점은 응회암으로 구성되어 있으며 시점은 관입암인 석영반암으로 구성되어 있다. 응회암은 산성암반배수의 근원광물인 황화광물이 관찰되지 않았으나 시점에 분포하는 석영반암은 세립 - 중립의 황철석(FeS₂)이 분산상으로 분포하고 있다.

B1터널은 세일이 협재된 사암으로 이루어져 있다. 황화광물은 B1터널의 시점에서 황철석 세맥과 함께 암석에 분산상으로 산출된다. B1터널 본선 일부구간에서 황철석이 분산되어 산출되고 섬아연석(ZnS) 세맥이 분산되어 나타나는 것을 관찰하였다.

B2터널은 세일과 역암이 협재된 사암과 화강암으로 구성되어 있다. 화강암내에 세립의 분산형태의 황철석이 관찰되었다. B1터널과 B2터널의 중간부분(저토피)는 사암으로 구성되어 있으며 규장질 암맥(Felsite dyke)이 관입되어 있다. 일부구간에서 약 5 - 10cm 두께의 황철석과 섬아연석 맥이 관찰되었다. 시추조사에서 확인되지 않은 사암구간에서도 황화광물(황철석, 방연석, 섬아연석)의 맥이 존재할 개연성이 매우 높은 것으로 판단된다.

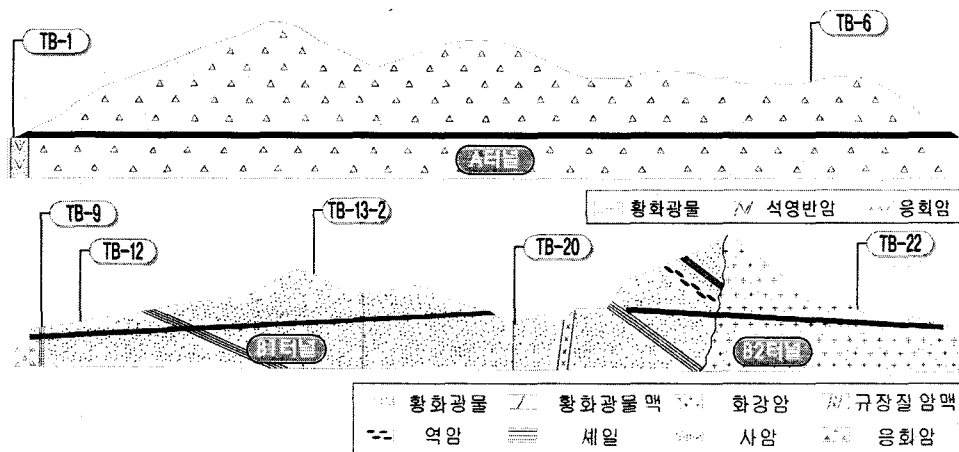


그림 2. 터널구간 황화광물 분포현황

2.3 산성암반배수 발생 개연성시험(Acid Base Account Test)

터널구간에서 채취한 시추코어중 굴착예상 심도의 시료를 대상으로 황화광물의 존재여부를 육안 조사하고 황화광물이 존재하는 암석과 존재하지 않는 대표암석을 선정하여 분석하여 암석의 최대 산발생능력(Maximum Potential Acidity, MPA), 산중화능력(Neutralization Potential, NP), 순산발생능력(NAPP), 순산발생량(Net Acid Generation, NAG)을 다음 표에 나타내었다.

순산발생량(NAG)과 순산발생능력(NAPP)을 이용하여 암석을 산성암반배수 발생시키는 것과 산성 배수를 발생 시키지 않는 것으로 분류하였다. TB-1, TB-9, TB-13-2(vein), TB-20 암석은 산성암반 배수를 발생시킬 개연성이 있는 암석으로 분류되었다. 반면 다른 암석들은 산성암반배수를 발생

시킬 개연성이 낮은 암석으로 분류되었다. 육안관찰결과 TB-22(화강암)와 TB-13-2는 산성암반배수를 발생시킬 개연성이 있는 것으로 판단되었으나 ABA test 결과 산성암반배수를 발생시킬 개연성이 낮은 것으로 나타났다.

표 1. 산성암반배수 개연성 시험결과

시료 번호	시추 위치	Total S (%)	MPA (KgCaCO ₃ /t)	NP (KgCaCO ₃ /t)	NAPP (KgCaCO ₃ /t)	NAG (KgH ₂ SO ₄ /t)	NP/MPA	NAG* (pH)
TB-1*	A시점	0.023	0.712	-0.037	0.749	0.521	-0.053	3.56
TB-1**	A시점	0.079	2.477	-0.200	2.677	3.060	-0.081	2.77
TB-1***	A시점	0.173	5.400	-0.162	5.562	2.450	-0.030	2.56
TB-6	A본선	0.001	0.027	19.338	-19.311	0.000	728.863	6.78
TB-9	B1시점	3.710	115.800	1.988	113.813	46.062	0.017	1.97
TB-12	B1시점	0.013	0.406	36.725	-36.319	0.000	90.542	6.91
TB-13-2	B1본선	0.208	6.492	18.225	-11.733	0.000	2.807	7.24
TB-15	B1종점	0.001	0.025	1.975	-1.950	0.000	79.591	5.02
TB-20*	저토포	6.630	206.942	33.400	173.542	98.147	0.161	1.65
TB-20**	저토포	0.000	0.052	2.338	-2.338	0.000	45.387	5.22
TB-22	B2종점	0.027	0.844	14.850	4.006	0.000	17.598	6.49

*MPA=total S(%)×31.213, NAPP =MPA-NP

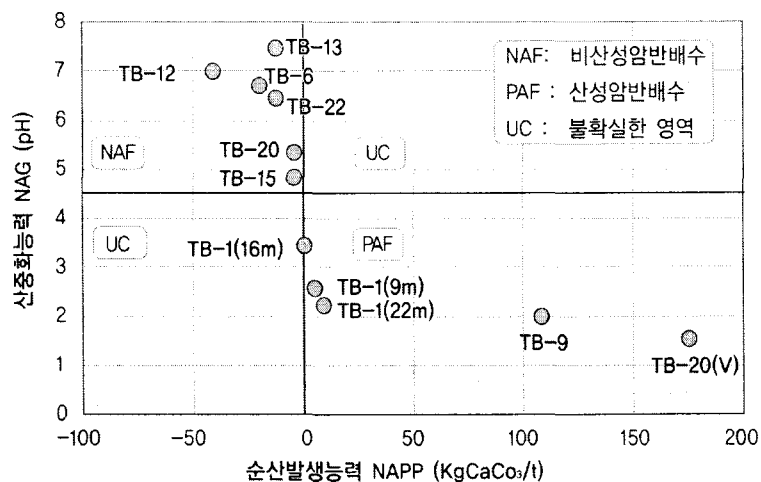


그림 3. NAG와 NAPP를 이용한 산성암반배수 개연성 평가

산중화능력(NP)/최대산발생능력(MPA)을 이용하여 산성암반배수의 위해도에 따라 암석을 분류하였다. TB-1, TB-9, TB-20(vein)은 산성암반배수에 의한 피해가 나타날 개연성이 있는 암석으로 TB-13-2는 주의가 요구되는 암석으로 분류되었다. TB-22(화강암)는 육안관찰결과 일정량의 황철석이 함유되어 있어 공사기간 중에 세심한 관찰이 요구된다.

표 2. 산중화능력(NP)/최대산발생능력(MPA)를 이용한 산성암반배수의 위해도 등급

위해도등급	NP/MPA	시료 번호	비 고
위험	<1	TB-1, TB-9, TB-20(vein)	산성암반배수에 대한 대책 필요함
주의	1-2 or 3	TB-13-2	공사기간에 황화광물의 함량, 산출상태를 관찰하고 필요에 따라 대책수립이 요구됨
안전	>2	TB-6, TB-12, TB-20, TB-22	산성암반배수에 의한 피해가 없을 것으로 판단됨




2.4 산성암반배수에 의한 오염물질 발생

암석 분말시료와 15% H_2O_2 용액(1:100)을 반응 시킨 후 용액의 주요 양이온과 중금속의 농도를 다음 표에 도시하였다.

황화광물의 산화시험결과 TB-1, TB-9과 TB-20(vein)시료로부터 발생하는 산성암반배수는 중금속, 카드뮴, 철, 망간, 알루미늄이 높을 것으로 판단된다. 따라서 터널공사에 의하여 발생하는 산성암반배수의 중화뿐만 아니라 중금속 제거에 필요한 공법이 적용되어야 할 것으로 판단된다. STD*는 오염물질 배출허용기준이다.

표 3. 황화광물의 산화시험에 의한 오염물질 용출결과

시료	Mg	Ca	Na	K	Al	Mn	Fe	As	Cd	Ni	Zn	Pb	Cr	Co	Cu	
단위	----mg/L(ppm)----				-----µg/L(ppb)-----											
TB-1*	0.17	2.24	0.96	2.84	562	1250	190	8	25	12	9070	1250	5	7	218	
TB-1**	0.15	1.11	1.21	2.49	1520	40.0	49	1	65	11	1490	202	6	8	42	
TB-1***	0.21	1.93	1.23	2.58	1700	38.0	477	1	6	12	56	56	7	7	15	
TB-6	0.64	54.5	0.96	1.93	83	128.0	6	7	5	11	4	2	7	6	10	
TB-9	6.16	10.1	2.35	4.01	9390	1720	33000	92	14	38	14	114	11	84	84	
TB-12	0.84	52.0	1.13	0.21	102	129.0	8	7	5	11	5	4	5	11	13	
TB-13-2	0.59	39.0	1.06	0.20	101	86.0	6	6	5	10	5	4	5	5	17	
TB-15	1.11	2.64	1.13	0.17	73	88.0	67	28	2	5	2	2	10	6	6	
TB-20	1.20	5.06	1.30	0.21	58	248.0	47	7	5	12	5	5	7	6	8	
TB-20V	27.40	135.8	1.50	0.61	2304	3640	3639	256	45	45	43	43	10	83	83	
TB-22	0.41	52.8	0.90	0.63	44	34.0	35	51	2	5	2	2	8	5	4	
STD*					300	2000	200	100	20		1000	200	500		500	

주)  : 기준치 초과,  : 국내기준치가 없으나 환경오염이 우려됨,  : 기준치 근접

3. 오염원 거동해석

3.1 해석에 적용될 오염물질 선정

암반으로부터 용출되어 주변 지하수, 하천 및 습지에 영향을 미치는 유해중금속 가운데 인체 및 생태학적 독성이 높으며 용출 농도가 기준치를 초과할 우려가 있는 Cd를 선정하여 A터널 및 B1,2터널 굴착시 주변 지하수 유동에 따른 중금속 거동을 예측하였다.

3.2 오염원 거동해석

터널 굴착에 따른 Cd의 거동 예측은 첫째로 Modflow의 정상류 해석을 통하여 주변 지하수 분포를 모사하고 터널 굴착에 따른 지하수 유동 양상을 부정류 해석을 통해 구현한 후 MT3D 모듈을 통해 지하수 유동에 따른 Cd의 거동을 예측하였다.

오염원 거동해석을 위한 지하수 유동해석(Modflow)을 실시한 결과, 터널굴착개시 후 수위강화가 발생하며 차수 후 다시 회복하는 양상을 나타내었다. A터널은 굴착 후 최대 15m 수위강하가 발생하였고, B1,2터널은 최대 2m 수위강하가 발생하였다.

A터널의 경우, □□습지와 가까운 시점부부터 굴착할 예정이므로, 암반배수가 □□습지방향으로 발생하며 중금속도 □□습지 방향으로 유출될 것으로 판단된다.

B1터널은 종점부에서, B2터널은 시점부에서 굴착계획 되어 있어 각 터널의 종점부방향과 시점부 방향으로 중금속이 유출될 것으로 보인다.

A터널구간은 굴착완료 후 Cd의 농도가 1ppb이상으로 확산되는 곳은 갱구부를 중심으로 10m이내의 구간으로 나타났다. 관심구역인 □□습지에 미치는 영향은 1000일 경과후에 0.1ppb 이내로 확산되는 것으로 나타났다. 수직적인 Cd 확산은 0.1ppb기준으로 갱구부 주변에서 약 6m심부로 확산되는 것으로 나타났다. 일반적인 생활용수 및 농업용수 관리기준 제한치가 10ppb인 것을 감안할 때 암반으로부터 용출되는 Cd는 A터널 부근에서는 유의할 만한 수준은 아닌 것으로 판단되었다.

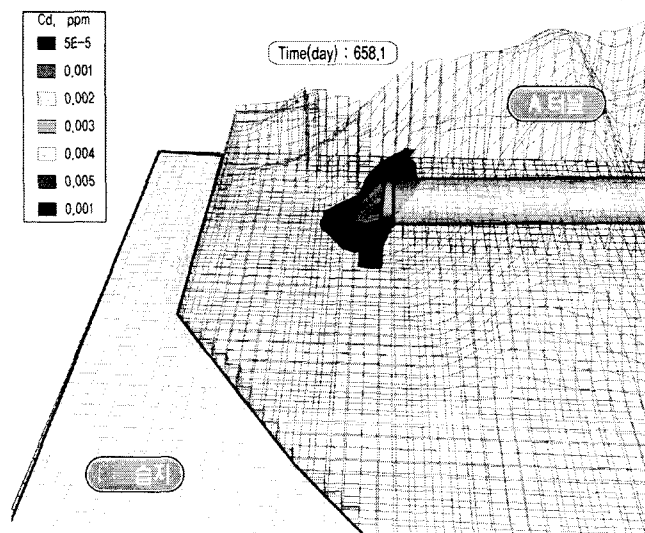


그림 4. 굴착 종료시 Cd 농도분포도(A터널)

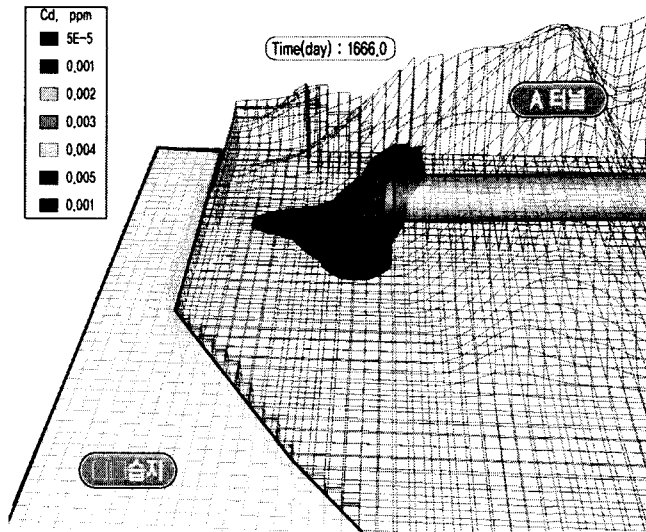


그림 5. 굴착 종료후 1,000일경과후 Cd 농도분포도(A터널)

B1,2터널 구간에서 Cd의 농도가 1ppb이상으로 확산되는 곳은 약 1km 이내의 구간인 것으로 나타났다. B1,2터널 갱구부를 중심으로 Cd은 확산되며 지형적인 영향으로 계곡을 따라 저지대쪽으로의 확산이 우세하게 나타났다. 수직적인 Cd의 확산은 해당지역의 수두분포 특성상 수평적인 지하수 유동이 우세하게 일어나 0.1ppb 기준으로 갱구부 주변에서 약 1.5m 심부 이내로 확산되는 것으로 나타났다. 일반적인 생활용수 및 농업용수 관리기준 제한치가 10ppb인 것을 감안할 때 그보다 높은 Cd 농도가 발생한 지역은 없으나, B1,2터널터널 갱구부에서 기준치에 근접한 농도가 발생함으로써 굴착 시공시 암반으로부터 용출되는 Cd의 확산에 유의하여야 하며 정기적인 모니터링을 실시할 필요가 있는 것으로 판단된다.

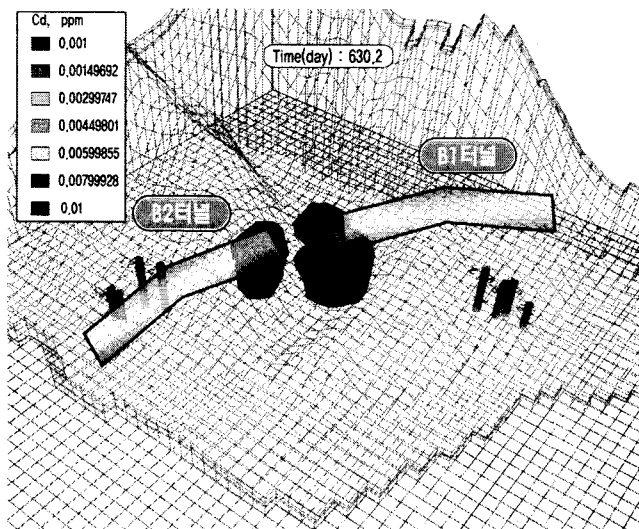


그림 6. 굴착 종료시 Cd 농도분포도(B1/B2터널)

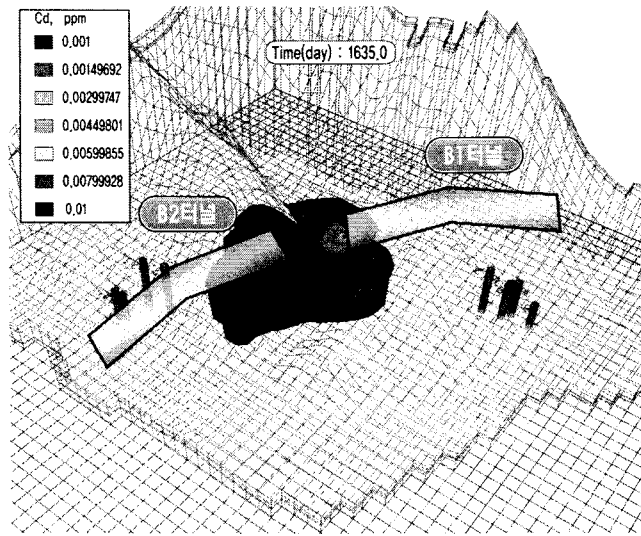


그림 7. 굴착 종료후 1,000일경과후 Cd 농도분포도(B1/B2터널)

4. 산성암반배수 대책

4.1 □□습지 오염 방지 대책

오염원거동해석결과 □□습지로 중금속이 흘러들어갈 가능성은 적으나, 산성암반배수 분석결과 A 터널 시점부에 강산성의 암반배수 가능성이 크므로 이에 대한 대책을 수립하였다.

산성암반배수에 대한 발생 후 처리대책으로는 화학적 중화처리(Chemical treatment), 인공습지를 이용한 처리(Wetland)와 석회암수로를 이용한 중화처리 방법(Limestone channel)등이 있다.

인공습지를 이용한 처리는 산성이며 중금속을 많이 함유한 산성암반배수를 습지에서 생물학적 환원작용, 안정화를 이용하여 산성암반배수를 처리하는 공법이다. 우리나라에서 최근에 시공 시 산성암반배수문제가 발생하여 적용되고 있는 방법이지만, 넓은 부지가 요구되며, 공사비가 많이 드는 단점이 있다.

석회암수로를 이용한 중화처리 방법은 산성암반배수가 석회암 수로를 통과할 때 방해석과 배수에 포함된 H⁺이 반응하여 중화되며, pH 상승과 함께 산성암반배수에 함유되어 있는 중금속도 침전되어 제거하는 방법이다. 석회암 수로의 설치 초기에는 중화효율이 높으나 시간이 경과함에 따라 중화과정에서 침전된 산화철의 석회암 표면코팅으로 석회석의 중화효율이 저감되는 현상이 나타난다. 이러한 중화효율의 저감을 개선하기 위하여 일정시간이 경과한 후 수로의 석회암을 교체하여 주는 단점이 있다.

본 구간에서는 현장여건상 부지편입이 어려워 시공 중에 오폐수처리조 내에 화학적 중화제인 가성소다(NaOH)를 첨가하여 산성암반배수를 중화시키고 동시에 중금속을 침전시켜 정화시키는 방법을 적용하는 화학적 중화처리방법을 적용하였다.

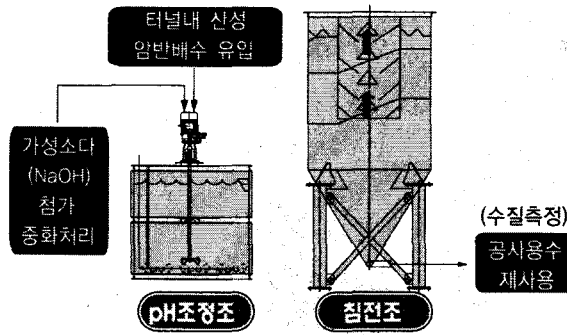


그림 8. 시공중 산성암반배수 처리 대책

4.2 터널구조물 안전대책

터널본선 계획구간에서 국부적으로 황화광물이 농집되어 나타난다. 따라서 본선의 내부사면 전체에서 산성암반배수가 발생되지 않고 좁은 범위에서 집중적으로 발생된다. 터널건설이 완료된 후에 산성암반배수가 발생하는 구간에서는 구조물의 노후화가 빨리 진행되어 안정을 저해할 것으로 판단된다. 따라서 산성암반배수가 발생할 개연성이 높은 구간에서 발생저감대책과 다음의 구조물 안전대책을 필요하였다.

굴착 후 황화광물의 산화가 진행되기 전에 표면피막 형성제를 살포한 후에 내산성 시멘트모르타르를 이용하여 슛크리트를 시공한다. 사면안정성 확보를 위하여 설치하는 록볼트 등은 산에 의하여 부식이 잘되지 않는 이중관록볼트를 적용하고 갭문구조물에 사용되는 시멘트는 내산성 시멘트를 사용한다.

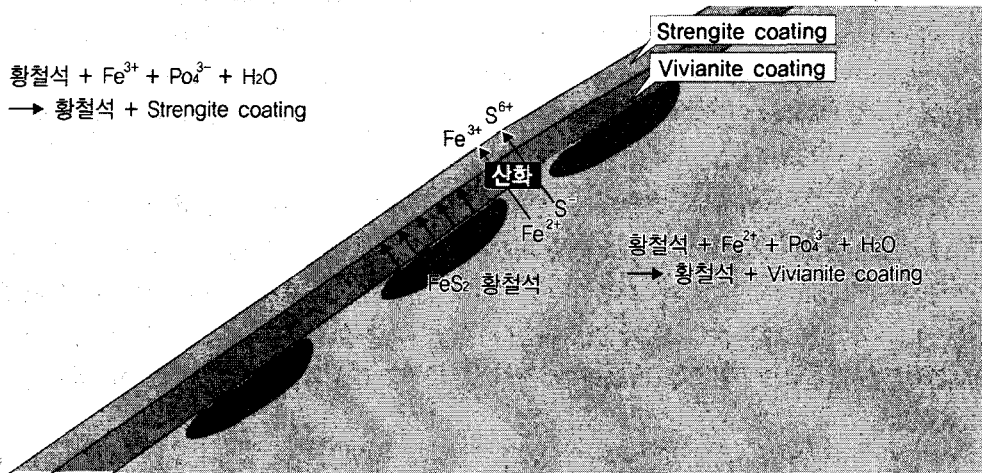


그림 9. 표면피막 형성제

4.3 굴착암버력 처리

석영반암은 A터널 시점에 좁은 범위에 분포하는 암석으로서 산성암반배수를 발생시킬 개연성이 높아 대책수립 및 시행이 요구되는 암석으로 판명되었다. 석영반암은 터널의 시점에 분포하고 있

어 본선구간에 비하여 많은 량의 암석이 굴착이 이루어질 것으로 판단된다. 따라서 굴착된 암석은 노반충진, 골재로서의 재활용에 많은 제약이 있다. 골재로서의 재활용은 불가능할 것으로 판단되며 노반충진물질로서 활용은 주의가 필요하다. 노반충진물질로 재활용은 격리공법(Containment)을 준용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

5. 결 론

터널굴착으로 인해 황철석을 함유한 암반이 대기중에 노출되어 공기와 지하수를 만나 산성암반배수를 발생시켜 주변 토양 및 수질을 오염시키거나 인근 구조물을 부식시키는 사례가 국내외적으로 빈번히 발생하고 있어 산성암반배수평가와 중금속 오염원해석을 통한 습지오염 영향 평가 및 구조물 안전 대책을 마련하였다.

1. 산성암반배수 평가결과, 암석으로부터 발생하는 산성암반배수는 중금속, 카드뮴, 철, 망간, 알루미늄 성분이 높을 것으로 판단되어, 터널공사에 의하여 발생하는 산성암반배수의 중화뿐만 아니라 중금속 제거에 필요한 공법이 적용되어야 할 것으로 판단되었다.
2. 유해중금속 가운데 독성이 높으며 용출 가능성이 기준치에 근접할 것으로 평가되는 카드뮴을 우려할만한 유해중금속으로 산정하여 지하수 오염원 해석을 실시한 결과, 확산영향은 A터널의 경우 주변 지하수 및 습지에 영향을 미치지 못하는 것으로 평가되었으나, B1,2터널은 경우 주변 지하수 유동을 따라 1km이상 확산되는 것으로 평가되어 향후 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.
3. 산성암반배수에 의한 □□습지 오염방지대책으로는 가성소다(NaOH)에 의한 중화처리, 사면 안정대책으로는 피막형성제 살포후 내산성 숏크리트 타설 및 내산성 록볼트 시공, 갯문구조물 안전대책으로는 내산성 콘크리트를 타설하도록 계획하였다.

참고문헌

1. 이규호, 김재곤 외, 2005.7, 산성암반배수에 의한 절취사면 구조물의 피해현황과 평가, 한국지반공학회 논문집, pp. 83-92.
2. 정영욱 외, 2005.5, 회북I/C 침출수 처리방안 검토용역보고서, 지질자원연구원.
3. Acid Rock Drainage at Skytop, Centre County, Pennsylvania, 2004, USGS.
4. Acid Mine Drainage Prediction, 1994, US Environmental Protection Agency.