

터널 주변지반 강화를 위한 자기치유 그라우트(SSG) 특성 및 시공사례



이재덕
대원토질(주)
기술연구소 소장



최용기
대원토질(주)
대표



안기준
한진중공업(주)
현장소장

1. 자기치유 그라우트 소개

국내 지하공간 건설을 위한 시공은 주로 NATM공법에 의하여 시공이 이루어지고 있다. 그리고 국토개발의 지속화로 인하여 불량한 지반조건에서의 지하공간 건설이 수행되는 경우가 있으며, 시공 중 안정성 확보를 위하여 지반보강공법 적용사례가 증가하고 있는 실정이다.

지하공간 건설을 위한 지반보강공법은 지하공간 주변 지반에 보강재를 설치하거나 주변지반의 공극에 그라우트(주입재)를 침투시켜 주변지반의 공학적 특성을 개량하는 방법을 단독 또는 병행적용하는 방법이 주로 적용되고 있다.

지반개량을 위한 그라우트로서는 주로 시멘트 또는 시멘트와 규산소다(sodium silicate)를 이용하고 있다. 시멘트와 규산소다를 이용하는 그라우팅 공법에서는 수화생성물 속의 겔(gel) 공극과 모세관 공극 중의 유리가 수

중에서 유실되거나 대기 중에서 증발되면서 수축과 균열이 발생한다. 이러한 특성에 의하여 시멘트와 규산소다를 이용하는 그라우팅 공법에서는 일정시간 경과 후 차수성능 및 지반개량 특성의 감소되며, 이러한 개량특성 감소를 방지하기 위하여 다양한 그라우트의 적용성을 검토하고 있는 실정이다.

자기치유 그라우트(Self-Healing Smart Grout)는 지하공간 주변지반에 존재하는 물과 반응하여 그라우트가 침투된 주변지반에 결정을 성장시키는 특성을 가지고 있다. 따라서 그라우팅 시공 후 시간경과에 따라 투수성 감소 및 지반개량 특성 증가를 도모할 수 있는 최신 그라우팅 재료이다. 또한 자기치유 그라우트는 규산소다계 용액과 2가 금속 급결재의 겔화와 시멘트 수화반응에 의한 경화가 복합적으로 진행되어 수중에서 용탈 방지 특성이 우수하여 환경 오염우려가 없다.

2. 자기치유 그라우트의 특성

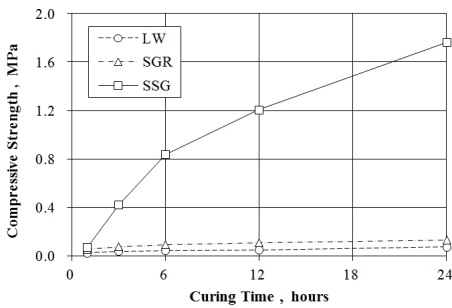
자기치유 그라우트가 가지고 있는 주요특성은 다음과 같다.

1. 자기치유 그라우트는 미세결정화제를 포함하고 있기 때문에 경화 후 경화체와 지반 사이 또는 경화체 내부의 미세균열에 미세결정이 형성되어 시간경과에 따라 차수성 및 지반개량 성능이 증가된다.
2. 자기치유 그라우트는 2가 금속 급결재에 의한 결합력이 증대되어 초기에 고강도(1일 이내에 28일 강도의 60%이상 발현)가 발현된다.
3. 자기치유 그라우트는 규산소다계 용액과 2가 금속 급결재의 반응에 의한 겔화 진행과 더불어 추가로 시멘트의 수화반응에 의한 경화가 진행되기 때문에

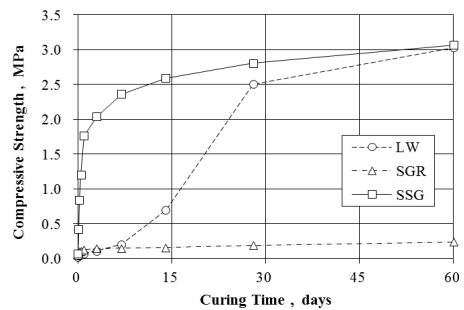
겔화된 규산소다에서 겔 형태가 소실되거나 강알칼리이온이 용탈되는 문제가 없다.

4. 자기치유 그라우트는 결합수 온도 의존성이 낮은 2가 금속 급결재 사용에 의하여 저온 작업수에서도 겔타임이 형성되며, 별도의 작업수 히팅장비 가동 없이도 동절기에도 작업성이 확보된다.
5. 자기치유 그라우트에 포함된 팽윤제는 겔형성 후에도 수축현상을 최소화하여 지속적인 차수성능 및 지반개량 성능이 유지된다.

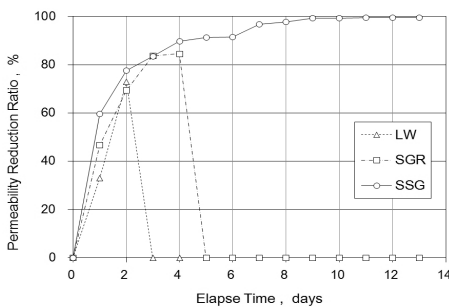
기존 그라우트 재료(LW그라우팅 및 SGR 그라우팅)와 비교하여 자기치유 그라우트의 특성 차이를 확인하기 위하여 실시된 일축압축강도와 균열 호모젤 시료의 투수시험 결과는 다음과 같다. 그림 1과 2에서 나타나듯이 자기치유 그라우트 경화물의 초기 강도가 비교 주입공법의 경



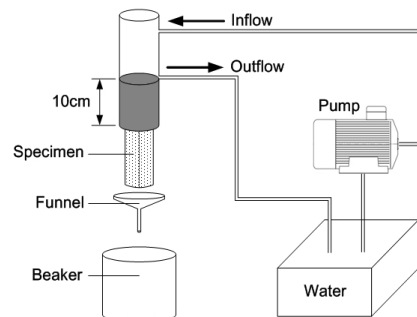
〈그림 1〉 호모젤 시료의 단기 압축강도



〈그림 2〉 호모젤 시료의 장기 압축강도



〈그림 3〉 균열 호모젤 시료의 투수시험 결과



〈그림 4〉 투수시험 모형도

화물과 비교하여 월등히 우수한 것으로 나타났다. 또한 투수시험결과(그림 3)에서도 자기치유 그라우트 경화물에서 발생한 미세결정이 균열부에 생성되어 투수성이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

3. 자기치유 그라우트의 현장적용 사례

본 시공사례는 시공 중 발생한 터널 붕락의 영향으로 이완된 터널 주변지반을 개량하기 위하여 자기치유 그라우트를 적용한 사례이다. “00~00 국도건설 공사” 중 00터널은 편도 2차선 도로터널이며, NATM공법으로 터널 공사가 수행되었다.

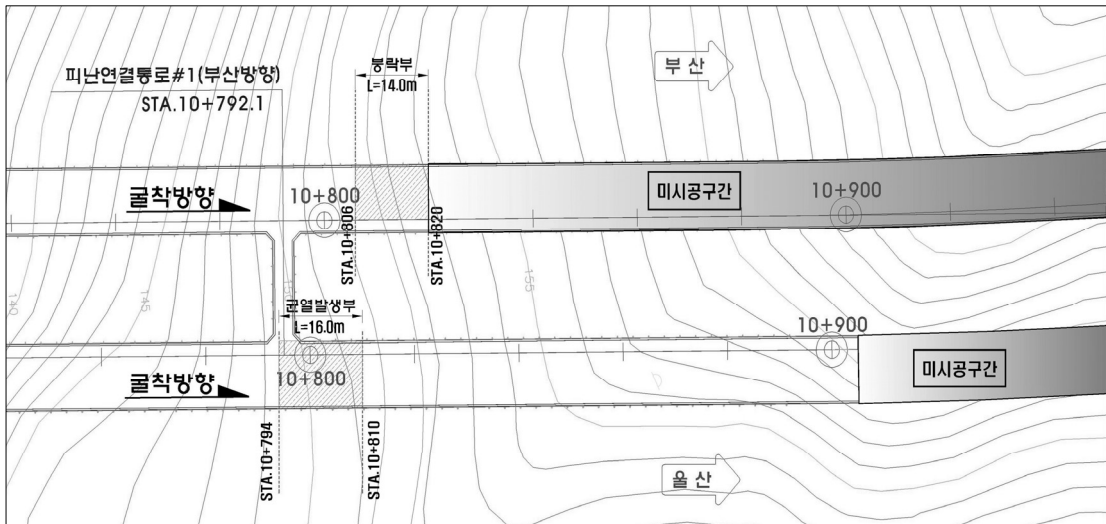
00터널의 붕락구간은 수립된 대책공법으로 굴착작업을 수행하여 현재 안전하게 시공이 완료되었다. 그리고 자기치유 그라우트의 초기 강도발현 특성을 이용하여 그라우팅 시공 후 굴착대기시간 감소로 공기단축을 도모한 시공사례이다.

3.1 00터널 붕락부 현황

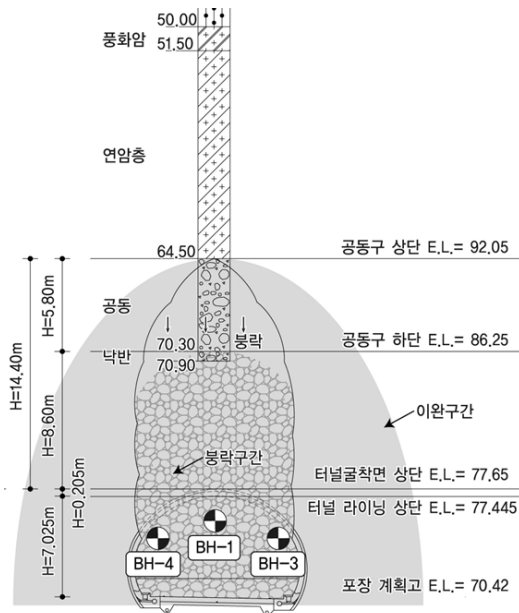
00터널에 발생한 붕락구간 연장은 14m이며, 붕락규모는 약 600m³이다. 붕락위치는 NATM 시점에서 234m 이격된 위치에서 발생하였으며, 토피고는 74.08~75.24m이다. 그리고 붕락에 의한 지반이완 영향으로 인접 터널의 숏크리트에 균열(연장 16m)이 발생하였다.

붕락구간 및 인접구간에 대한 막장면 관찰결과 및 현장조사 결과에 의하면 막장면에서 관찰된 지층은 풍화대가 매우 발달한 지층으로 풍화토~풍화암이 혼재되어 나타났다. 절리면 사이에는 점토층이 충전되어 있으며, 터널 내부에서 발생하는 용수가 많은 것으로 조사되었다.

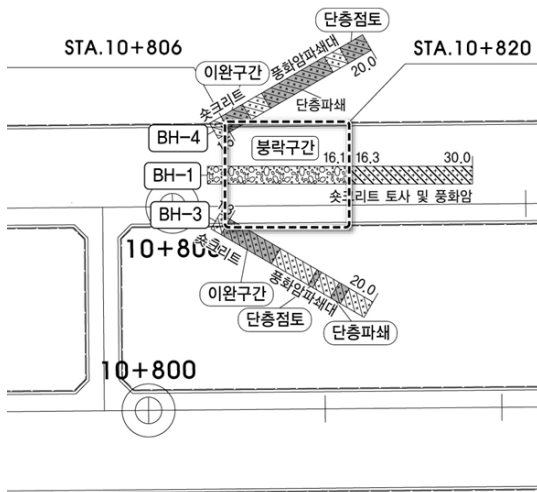
붕락이 발생한 터널 인접지반의 지반특성을 파악하기 위하여 시추조사를 수행한 결과에 의하면 터널 붕락에 의하여 터널 천단으로부터 14m 위치에 공동이 약 5.8m 두께로 존재하고 있는 것으로 나타났다. 수평시추조사 결과에 의하면 터널 주변지반은 풍화대(토사, 풍화암 및 파쇄대)가 존재하는 것으로 조사되었다.



〈그림 5〉 00터널 붕락구간 평면도



〈그림 6〉 수직 시추조사 결과



〈그림 7〉 수평 시추조사 결과

3.2 00터널 붕락부 보강계획 및 시공

00터널에 대한 붕락부 보강대책은 한국 터널지하공간 학회에서 실시한 “붕락부 원인분석 및 복구대책”과 “00터

널 붕락부 보강설계”를 통하여 보강대책을 수립하였다.

보강대책으로 터널 붕락에 의하여 발생된 낙반부의 지반특성을 개량하기 위하여 지반강화 그라우팅을 계획하였으며, 지반이완에 의한 과다변위 구간 및 지반 이완부에 대하여 굴착 중 안정성을 확보하기 위하여 소구경 및 대구경 강관 그라우팅과 각부 및 측벽보강 그라우팅을 계획하였다. 그리고 그라우팅 주입재료는 자기치유 그라우트가 사용되었다.

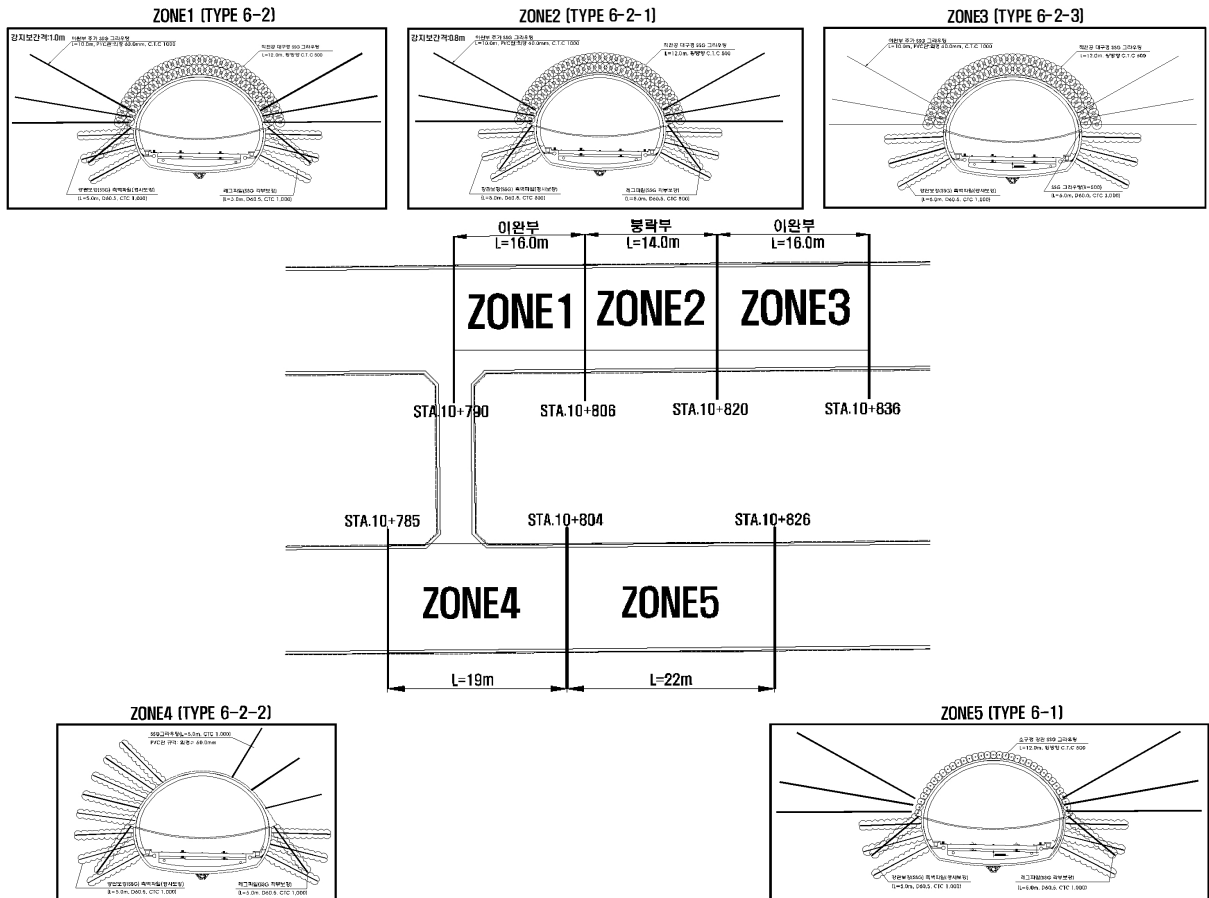
00터널 붕락부 주변지반은 풍화대가 발달되어 있으며, 연장 14m구간에 터널 붕락이 발생하여 터널 주변지반의 강도가 매우 약할 것으로 예측되었다.

따라서 그라우팅 시공에 의한 터널 주변지반 강도증진이 터널 안정성 확보에 매우 중요한 요소인 것으로 판단하였으며, 다음과 같이 4가지의 별도 그라우팅 품질관리 계획을 수립하여 시공 중 안정성을 확보하였다.

1. 그라우팅 시공을 위한 천공작업 시 천공 기록지를 작성하며, 터널 주변지반 지층 분포현황 기록 및 관리를 통한 주변지반 풍화대 확인 및 관리기준 설정.
2. 수립된 보강공사 시공 전 인접지역에서 그라우팅 시험주입 및 지반개량 특성 확인시험을 실시하여 그라우팅 지반개량 효과확인.
3. 붕괴 막장면에서 지반강화 그라우팅 시공 전과 후에 대한 수압시험을 실시하여 그라우트의 주입확인 및 주입관리를 위한 주입압력 설정.
4. 지반강화 그라우팅 시공 후 수직 시추조사를 통하여 그라우트의 절리면 침투여부 확인.

수압시험은 최대 수압 10.0kg/cm²으로 하였으며, 각 단계별로 2.0kg/cm²씩 수압을 증감시켜가며 총 9단계의 수압을 가압하였다. 수압시험은 지반강화 그라우팅 시공 전과 후에 실시하였으며, 시험결과를 통하여 그라우팅 시공 관리 기준 및 그라우트 주입성을 판단하였다.

수압시험 결과에 의하면 그라우팅 시공 전 수압시험에



〈그림 8〉 구간별 보강 패턴도

서는 한계압력은 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 초과하지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 한계압력을 토대로 낙반부에 대한 지반강화 그라우팅 시공 중 그라우트 주입압력을 $7\text{kg}/\text{cm}^2$ 이하로 관리하도록 하여 시공 중 설계에 적용된 주입량을 과도하게 초과하지 않도록 관리하였다.

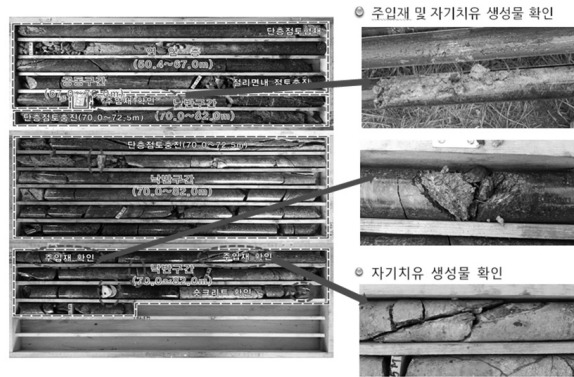
그리고 지반강화 그라우팅 시공 후 수압시험에서는 한계압력이 $10\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상으로 증가된 것으로 나타났다. 따라서 터널 주변지반에 그라우트의 침투가 적절하게 수행되어 붕락에 의하여 이완된 지반이 개량되었음을 확인할 수 있었다.

수직시추조사에도 붕락에 의한 낙반구간에 주입재가 존재하는 것으로 나타났으며, 자기치유 그라우트의 미세 결정 생성물이 절리면 사이에 생성된 것을 확인할 수 있었다.

또한 굴착 중 안정성 및 공기단축을 도모하기 위하여 일반 강관다단 그라우팅에 사용되는 그라우트(시멘트 밀크 및 L,W그라우팅)와 자기치유 그라우트의 시간경과에 따른 강도변화를 확인하여 그라우팅 시공 완료 6시간 경과 후 후속공정을 진행할 수 있도록 터널 시공공정 관리를 실시하여 그라우트 양생에 의한 대기시간 단축으로 공



〈그림 9〉 시공 중 수압시험 전경



〈그림 10〉 시추조사에 의한 그라우트 주입 확인

기단축을 도모하였다.

4. 결론

자기치유 그라우트는 기존 그라우트와 달리 물과 접촉 시 그라우트가 침투된 주변지반에 미세결정이 생성되어 그라우팅에 의한 지반개량효과를 증대시킬 수 있는 최신 그라우팅 재료이다. 또한 자기치유 특성과 함께 용탈방지 및 조기에 강도가 발현되는 특성을 가지고 있다.

실내시험 및 현장시공을 통하여 자기치유 그라우트가 가지고 있는 주요특성을 확인할 수 있었으며, 현장 시공 후 그라우팅 효과를 확인하기 위하여 실시한 시추조사결과에서도 그라우트가 침투된 주변지반에 미세결정 생성물이 관찰되어 타 주입재료와 비교하여 지반개량효과가 우수한 것을 알 수 있었다.

또한 기존 주입재료와 비교하여 자기치유 그라우트의 조기강도가 발현되는 특성을 이용하여 현장 검증 후 주입 작업 6시간 이후에 후속공정인 굴착작업을 수행하였다. 이를 통하여 터널 굴착보조공법의 주입재료로 자기치유 그라우트를 적용하면 NATM 터널의 공기를 단축할 수 있으며, 동시에 터널의 안정성도 확보할 수 있음을 확인할 수 있었다.