

MSG공법의 공학적 특성과 터널보강 및 차수 공법 비교

비교결된 총적모래, 자갈층에 터널을 굴착함에 있어 근접하천의 영향을 받는 지하수의 유출과 함께 굴착면이 붕괴되어 자립 시간 이내에 지보설치가 불가능한 경우는 일반적인 굴착공법을 적용하기 곤란하다. 따라서 이러한 연약지층은 인위적으로 보강하여 굴착 및 지보작업이 가능한 최소단면으로서 자립할 수 있도록 지반감성을 크게 증가시켜야 한다.

1 개요

최근 우리나라는 지하철, 고속철도, 고속도로, 댐, 항만 등 대형 건설공사시 양호한 입지선정이 어려워지면서 지반보강의 필요성이 급증하고 약액주입공법의 적용 사례가 많아지고 있는 실정이다. 약액주입공법은 1970년대 말 서울지하철공사 착공과 함께 LW, SGR, JSP 공법 등 여러가지 주입공법이 도입되어 차수 및 지반보강공법의 대표적인 공법으로 적용되고 있으나 내구성 저하, 공해 발생, 주입효과에 대한 신뢰성 저하, 인접구조물에 대한 손상 등 해결해야할 주입공법의 본질적인 문제점이 많이 노출되면서 신공법 개발에 관심이 높아지고 있다. 따라서, 약액주입공법 분야의 기술발전동향은 무공해성의 무기계 입자를 마이크로화 하여 주입효과와 내구성을 증진시키기 위한 고성능 재료개발, 저압으로 복합주입하여 인접구조물에 대한 손상을 억제하기 위한 주입장치개발, 주입관리 및 효과관정을 자동화 하여 주입공법에 대한 신뢰성을 향상시키고자 하는 품질관리 자동화 시스템개발 등이 활발히 진행되고 있으며, 이러한 사회적 요구에 부응하여 최근 국내 기술진에 의해서

MSG공법이 개발되었으며 서울지하철 9호선 건설의 가시철 분야에 주공법으로 설계반영 되었다.

MSG공법은 경화재 및 응결조절재와 주입선단장치를 동시에 개발한 첨단주입공법으로 구성되어 있으며, 경화재는 평균입경 3~6 μ m, 분말도 8,000cm²/g 이상의 마이크로 복합실리카를 주성분으로 사용하기 때문에 고침투성, 고강도성, 고내구성, 환경친화성 및 저압침투주입성을 특징으로 하며, 모든 조성물이 혼합되어 같은 포대에 포장되어 있기 때문에 품질관리가 매우 용이하다. 또한, 실리카 함량과 겔타임 조절제를 이용해서 3~5초의 초급결형, 7~15초의 급결형, 40~90초의 완결형 및 5~7분의 초완결형까지 겔타임을 폭넓게 조정할 수 있다. 응결조절재는 저알칼리형의 특수규산으로 반응속도가 빠르기 때문에 유수중의 겔타임 지연을 방지할 수 있으며 경화후 알칼리 용탈량이 현저히 저감되므로 내구성이 향상되며 환경적으로도 안전하다.

MSG공법의 주입방식은 2.0shot방식 또는 1.5shot방식의 주입선단장치를 선택적으로 사용할 수 있기 때문에 복잡한 출수(出水)상황과 호층(互層)지반에서도 효과적으로 대응할 수 있

는 맞춤형 그라우팅이다. 2.0shot 주입방식의 경우 룯주입 방식의 종래의 주입선단장치를 이용하여 현탁액을 주입할 경우 막힘현상이 많이 발생되어 주입공정이 중단되는 현상이 빈번히 발생하였는데 MSG공법에서는 주입재료의 특성에 적합하게 주입선단장치를 개량하여 현장 트러블 발생을 현저히 저감시킬 수 있다. 또한, 1.5shot 주입공정에서도 2중관 더블팩커시스템을 기본적으로 도입함으로써 종래의 싱글팩커시스템에 비해서 주입효과 향상이 기대된다.

한편, MSG공법은 주입장치도 첨단화된 시스템을 개량하였다. 초미립자 분체를 균질하게 분산시킬 수 있는 고속전단믹서, P(압력)-Q(유량)-T(주입속도)를 자동으로 모니터링하여 주입 펌프를 제어할 수 있는 자동제어 시스템, 트레일러 등에 일괄 탑재된 이동형 주입장치 시스템 등으로 구성되어 있다. 이중 고속전단믹서는 현장에서 실용적으로 적용되고 있으며 P-Q-T 모니터링 시스템, 이동형 주입장치 시스템 등은 점차 도입될 것이다.

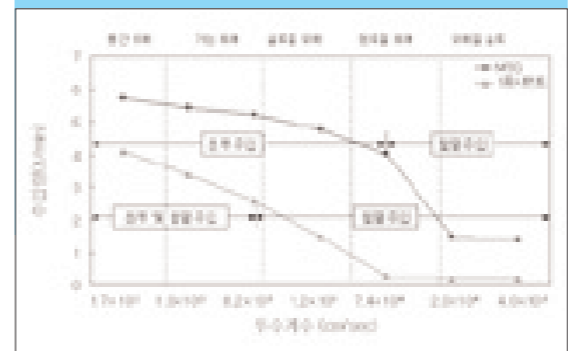
2 공학적 특성

MSG공법은 고침투 · 고강도 · 고내구성 · 환경친화성 및 저압 침투주입을 특징으로 하며 각각의 특성을 기존의 약액주입공법과 비교평가한 결과는 다음과 같다.

2-1. 고침투성

MSG공법은 기본적으로 마이크로화된 주입재를 사용하기 때문에 보통시멘트를 사용하는 기존의 공법과 비교해서 침투성이 우수하다. 각 공법의 표준배합을 이용해서 직경15cm×높이30cm의 모형토조에 스트레이너를 매설하고 5kg/cm²로 주입시험을 실시한 결과 대상토질의 종류에 따라서 침투특성에 큰 차이를 보였으며 실험결과는 <그림-1>과 같습니다.

그림 1. 대상토질별 침투성 시험결과



<그림-1>에서 MSG공법은 투수계수 $k=a \times 10^{-4}$ cm/sec까지 완전한 침투주입이 가능하지만 1중시멘트를 사용하는 LW공법 등은 $k=a \times 10^{-2}$ cm/sec정도에서도 침투주입과 할렬주입이 혼재하는 것을 나타냈다.

<그림-1>의 실험결과를 시멘트 종류별 침투주입 한계를 평가한 Kravetz가 제시한 <표-1>의 주입비 실험관계와도 잘 일치되는 것을 확인할 수 있다.

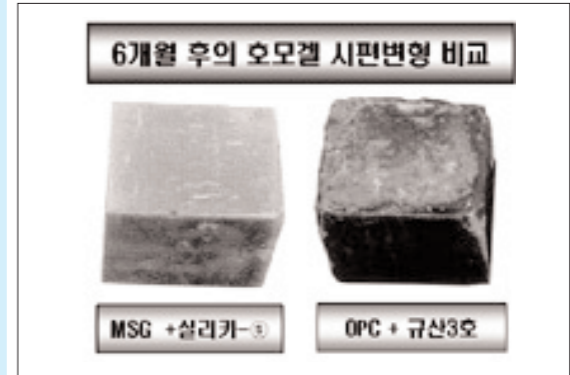
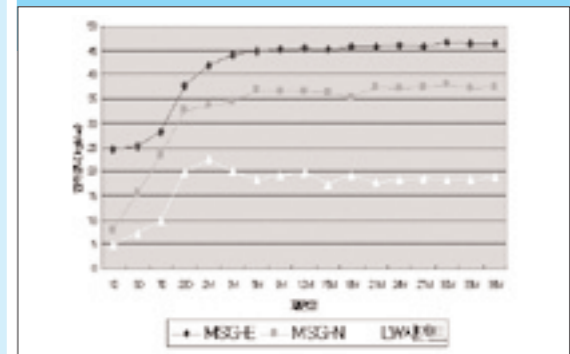
표 1. 시멘트 종류별 침투주입 한계 참고치 (ref. Kravetz's relationship ; D15=15d85)

시멘트 종류	비표면적 (cm ² /g)	투수계수 K (cm/sec)	d85 of grouts (mm)	D15 of soil (mm)
보통 시멘트	3,170	2.3×10 ⁻¹	0.047	0.87
조강 시멘트	4,320	1.3×10 ⁻¹	0.033	0.67
콜로이드 시멘트	6,270	3.2×10 ⁻²	0.019	0.38
마이크로 시멘트	8,150	3.5×10 ⁻³	0.006	0.12

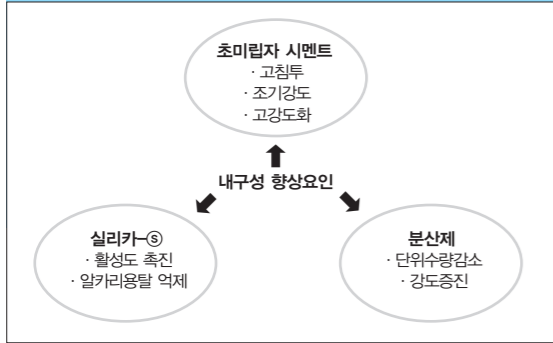
2-2. 고강도 및 고내구성

MSG공법은 초미립자계 시멘트와 실리카질을 적정비율로 혼합하여 사용하고, 감수분산제를 사용하기 때문에 보통시멘트만을 사용하는 기존의 공법에 비해서 고강도가 발현되고 내구성이 향상된다. MSG공법과 기존 공법의 호모겔시편에 대해서 재령별 일축압축강도를 측정한 결과와 6개월 후의 시편변형 특성을 비교한 결과는 <그림-2>와 같으며, MSG공법의 내구성 향상요인 개념도는 <그림-3>과 같다.

그림 2. 재령별 일축압축강도와 시편변형 특성



■ 그림 3. MSG공법의 내구성 향상요인 개념도



2-3. 환경 친화적

MSG주입재는 독극물, 위험물이 포함되어 있지 않기 때문에 중금속류가 검출되지 않는다. 또한, 지하수에 의한 알칼리 용탈이 적기 때문에 pH상승이 낮고 식생환경에 미치는 영향이 적다.

2-4. 저압 침투주입

MSG주입재는 초미립자계 분체를 사용하고, 분산제를 사용하여 점성을 낮추었기 때문에 <그림-1>에서와 같이 침투성이 우수하고 침투속도도 빠르다. 따라서, 기존 공법에서 7~15kg/cm²로 고압주입을 하는 것이 관례인데 비해서 MSG공법은 1~3kg/cm² 정도의 저압으로도 침투주입이 충분히 가능하기 때문에 인접구조물에 대한 측방유동의 피해를 대폭 감소시킬 수 있다.

2-5. 품질관리 편의성

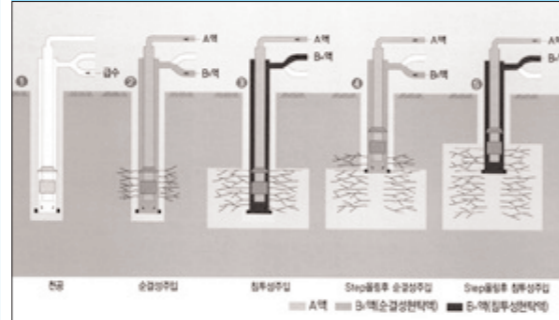
MSG주입재는 초미립자계 시멘트 및 실리카질, 분산제, 겔타입 조절제 등이 적절한 비율로 혼합되어 한 포대에 포장되어 있기 때문에 제품의 입하 및 검수가 매우 간편하고, 주입시공의 절차가 간소화 되어 시공성을 향상시킬 수 있다. 따라서, 시공에 대한 감리감독을 용이하게 차질없이 수행할 수 있어 시공자를 줄일 수 있다.

3 MSG공법의 시공방법

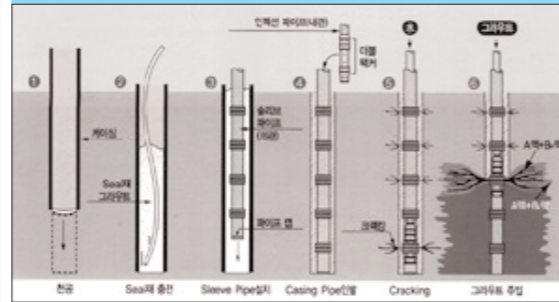
MSG공법은 대상지반과 주입공사의 목적에 따라서 2중관 룯드 주입방식과 2중관 더블팩커 슬리브 주입방식으로 구분된다. 2중관 룯드 주입방식은 순결성 그라우트와 침투성 그라우트를 반복하여 선정할 수 있는 2.0shot공정을 기본으로 하며, 2중관 더블팩커 슬리브 주입방식은 고탄성 슬리브를 통해서 원판

상(圓板狀) 인공 유선이 형성되므로 주입재를 균질하게 분사 침투시킬 수 있는 1.5shot공정을 기본으로 한다. 또한, 현탁형 밀크만 주입해야 하는 1.0shot 주입공정의 경우 공사목적에 따라서 룯드 주입과 슬리브주입을 선택적으로 사용할 수 있다.

■ 그림 4. 2중관 룯드 주입방식(2.0shot 방식)



■ 그림 5. 2중관 더블팩커 슬리브 주입방식(1.5shot 방식)



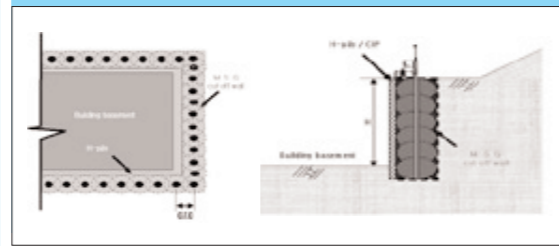
4 적용 범위

MSG공법은 모든 토사지반 및 암반의 차수·지반보강 및 강관다단, FRP다단의 보강 목적으로 적용이 가능하며 대표적인 적용예와 시공모식도는 다음과 같다.

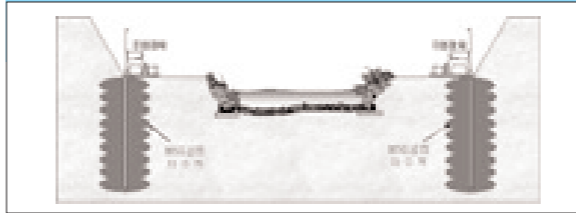
■ 표 2. MSG공법 적용예

영구 구조물의 차수·지반보강	가시시설물의 차수·지반보강
·댐기초, 교량기초, NATM터널 ·성토부 및 제방삼척 ·지하구조물 누수방지를 위한 외벽 ·액상화방지 및 기초공 언더파싱	·각종 개착공의 파이핑·Heaving 방지 ·실드터널의 발진부,곡선부, 도달부 보강 ·강관다단·FRP다단 보강

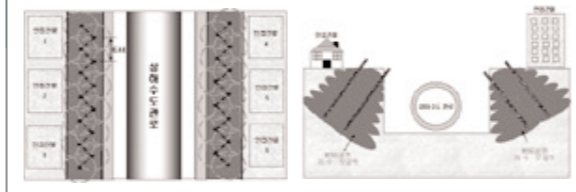
■ 그림 6. 구조물 지하굴착시 벽면 차수·보강 공사



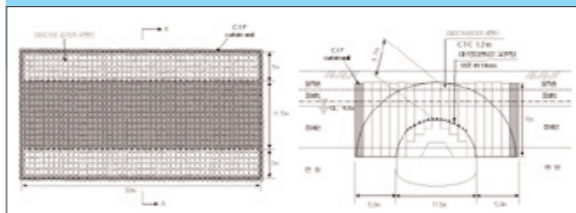
■ 그림 7. 유지용수 손실방지를 위한 차수벽 공사



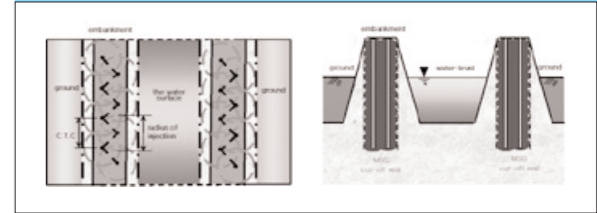
■ 그림 8. 지하 매설물 관로 설치시 인접 구조물 변상방지 대책 차수·보강벽 공사



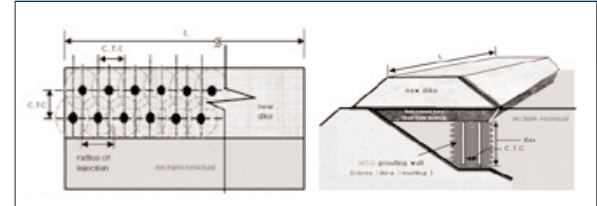
■ 그림 9. 터널상부 천층토피 불량방지를 위한 차수·보강층 공사



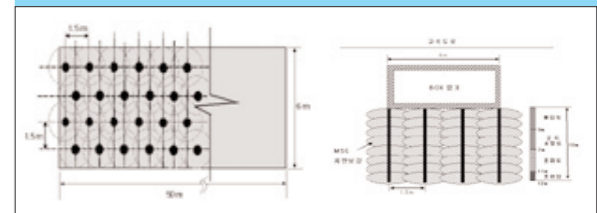
■ 그림 10. 제방 차수벽 공사







■ 그림 11. 증축공사 기초 보강공사










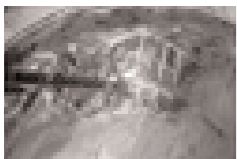

■ 그림 12. 구조물 연약기초 보강공사








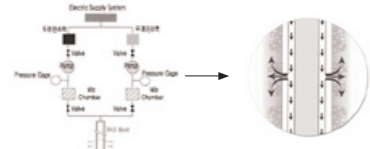
5 터널보강 및 차수공법 비교



구분	대구경 강관다단그라우팅
개요	터널 굴착에 선행하여 터널 원주면을 따라 일정 간격으로 천공한 후, 소구경 강관(φ50~60mm)을 삽입하고 강관 내부에 이동식 패커를 설치하여 다단으로 그라우트를 주입하는 공법이다. 그라우트에 의한 지반 개량효과로 주변지반의 전단강도를 증가시키며, 강관의 빔(Beam)작용을 유발시켜 터널에 작용하는 상재하중, 토압 등의 분산작용 및 경감효과를 얻어 막장의 안정성을 확보하게 된다. 또한, 주입시 물유리와 시멘트를 주 주입재로 이용하므로 차수 및 보강효과를 동시에 얻을 수 있다.
특징	·강관의 제작이 용이하다. ·강관 재료가 저렴하다. ·강관삽입시 주입구 밴드부의 파손으로 SEAL재 및 천공 슬러임이 강관 내부에 유입되어 패커 설치가 곤란한 경우가 발생한다. ·강관의 자체 중량이 커서 시공성이 저하된다.
시공 순서	 1) 천공 및 강관설치  2) 주입구 코킹  3) 실링  4) 물유리와 시멘트 등 주입


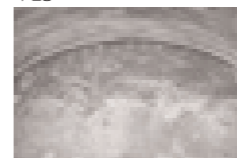


구분	직천공 대구경 강관다단그라우팅
개요	φ114mm 이상 천공이 가능한 터널전용 장비를 사용하여 이중관 방식으로 천공과 동시에 강관이 설치되는 직천공 작업방식으로 천공 및 강관을 설치하고 그라우트를 주입하는 공법이다. 그라우트에 의한 지반 개량효과 및 대구경 강관(φ114mm)의 빔(Beam)작용을 유발시켜 터널에 작용하는 상재하중, 토압 등의 분산작용 및 경감효과를 얻어 막장의 안정성을 확보하게 된다. 또한, 터널전용 장비를 사용하므로 확실한 시공이 가능하며, 직천공 작업 방식이므로 이음부가 없는 12m 강관을 사용하여 구조적인 안정성을 확보할 수 있고 작업효율이 높다.
특징	·전용장비를 사용하므로 시공 정밀도가 높고 180도 보강이 가능하다. ·이음 없는 강관을 사용하여 구조적인 안정성을 확보할 수 있다. ·직천공 방식으로 천공을 붕괴로 인한 시공성 저하를 방지할 수 있다. ·직천공으로 인하여 주변지반의 이완을 최소화할 수 있다. ·전용장비가 고가이다.
시공 순서	 1) 천공 및 강관설치  2) 주입구 CAULKING 후 주입 <p>※ 천공방식</p>  (TOP HAMMER 방식)  (DOWN HOLE HAMMER 방식)



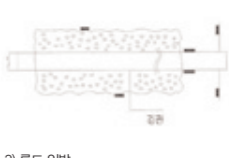
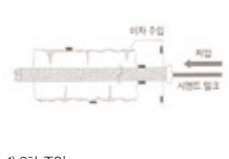
구분	FRP 터널보강 그라우팅
개요	본 공법은 토목 구조용으로 개발된 신소재인 고강도 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)관을 Umbrella Type으로 배열·설치하고, FRP관 내에 패커를 설치하여 고강도 주입재(FRC 1호+시멘트) 및 특수약재를 지반에 주입함으로써 주입재에 의한 지반의 고결로 인하여 고강도 FRP관과 지반을 일체화함으로써 터널 주변지반에 보(Beam)를 형성하여 터널에 가해지는 상재하중, 토압 등의 분산효과 및 경감효과를 얻을 수 있고, 일반의 절리와 토사 지반의 공극에 고강도 주입재를 주입함으로써 차수 및 보강효과(흙 및 전단)를 동시에 얻을 수 있으며, 시공성 및 경제적 측면에서 매우 우수한 공법이다.
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 주입재에 의한 지반의 고결로 인하여 원 지반의 전단강도 증대와 고강도 FRP관에 의한 빔 작용으로 지반에 가해지는 상재하중, 토압 등의 분산효과 및 경감효과를 얻을 수 있다. · 차수효과 및 지반보강 효과를 동시에 얻을 수 있다. · 중량이 가벼워 취급이 용이하며 내열 및 내부식성이 우수하다. · 특수 제작된 간격재에 의한 주입을 보호 및 FRP관이 천공을 중앙에 위치 함으로 방사상 주입이 가능하여 주입효과가 양호하다. · 방사상 주입에 의하여 낙반 및 여굴 현상을 방지할 수 있다. · FRP관과 그라우트와의 부착강도가 우수하다.
시공 순서	 1) 천공  2) FRP관 삽입  3) 주입구 CAULKING  4) SEALING  5) 다단주입  6) 주입 PLANT

구분	강관다단그라우팅
개요	터널 굴착에 선행하여 터널 원주면을 따라 일정 간격으로 천공한 후, 소구경 강관(φ50~60mm)을 삽입하고 강관 내부에 이동식 패커를 설치하여 다단으로 그라우트를 주입하는 공법이다. 그라우트에 의한 지반 개량효과로 주변지반의 전단강도를 증가시키며, 강관의 빔(Beam)작용을 유발시켜 터널에 작용하는 상재하중, 토압 등의 분산작용 및 경감효과를 얻어 막장의 안정성을 확보하게 된다. 또한, 주입시 물유리와 시멘트를 주 주입재로 이용하므로 차수 및 보강효과를 동시에 얻을 수 있다.
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 강관의 제작이 용이하다. · 강관 재료비가 저렴하다. · 강관 삽입시 주입구 밴딩부의 파손으로 SEAL재 및 천공 슬라임이 강관 내부에 유입되어 패커 설치가 곤란한 경우가 발생한다. · 강관의 자체 중량이 커서 시공성이 저하된다.
시공 순서	 1) 천공  2) 강관 삽입  3) 주입구 CAULKING  4) SEALING  5) 물유리와 시멘트 등 주입

구분	TAS공법
개요	터널 굴진시 전도를 대폭 저하시킨 폴리우레탄계 TAS주입재를 사용하여 주입볼트의 길이를 최대 12m까지 연장하므로 막장면 붕락억제효과가 우수할 뿐만 아니라 기존 강관에 비해 보형성 효과가 탁월하며 불필요한 약액 손실을 최소화시켜 주입 효율 및 경제성을 대폭 향상시킨 토사 및 대단면 터널의 보조공법
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 흙의 경우 입경 0.03mm이상인 실트질 및 모래지반, 암의 경우 0.010.03mm이상의 미소 균열이 지반에 침투주입이 가능한 액상의 고분자 폴리우레탄계 약액 사용 · 기존 우레탄 약액의 겔타입(60초) 특성상 주입볼트의 시공길이 6m로 제한되었으나 TAS주입재는 612m까지의 볼트길이 연장 가능 · 개량형 주입볼트가 중공 이중관 형식으로 설계되어 기존 강관 다단 그라우팅용 강관에 비해 약 40% 강성이 증가
기타	<ul style="list-style-type: none"> ※공법 적용범위 · 각종 터널 · 대절리와 파쇄가 심한 풍화토, 풍화암, 파쇄연암, 전석층 등 지반 ※주입 매커니즘 

구분	강관 MSG 그라우팅
개요	강관 다단 그라우팅 공법과 MSG 그라우팅 공법을 접목시킨 공법으로 강관 다단 그라우팅시 주입재를 일반 포틀랜드 시멘트를 사용하지 않고 마이크로 실리카 시멘트를 사용하여, 차수 및 지반보강 효과를 극대화 시킨 공법이다. 주입 대상지반은 세립질 모래지반은 물론 실트질 모래지반까지도 침투주입이 가능하며 다량의 지하수가 유출되는 구간에서 뛰어난 차수 및 지반보강 효과를 얻을 수 있다.
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 지반조건 및 주입재의 특성에 맞는 주입방법의 선택(1.5 or 2.0 Shot)시공이 가능하다. · 초립자 주입재 사용으로 미세한 공극에서도 침투효과가 양호하다. · 강도발현 및 내구성이 우수하다. · 저압, 저속이므로 주입시간이 다소 느리다.
시공 순서	 1) 천공 및 강관삽입  2) 주입구 CAULKING 후

구분	FRP MSG 그라우팅
개요	FRP 보강 그라우팅 공법과 MSG 그라우팅 공법을 접목시킨 공법으로 FRP 터널 보강 그라우팅시 주입재를 일반 포틀랜드 시멘트를 사용하지 않고 마이크로 실리카 시멘트를 사용하여, 차수 및 지반보강 효과를 극대화 시킨 공법이다. 주입 대상지반은 세립질 모래지반은 물론 실트질 모래지반까지도 침투주입이 가능하며 다량의 지하수가 유출되는 구간에서 뛰어난 차수 및 지반보강 효과를 얻을 수 있다.
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 중량이 가벼워 취급이 용이하다. · 내부식성이 좋아 영구적인 보강재로 가능하다. · FRP관과 간격재가 일체화 되어 주입을 보호하여 그라우팅 품질을 향상시킬 수 있다. · 초립자 주입재 사용으로 미세한 공극에서도 침투효과가 양호하다. · 강도발현 및 내구성이 우수하다.
시공 순서	 1) 천공  2) FRP관 삽입  3) SEAL제 주입  4) MSG 삽입

구분	TREVI JET 그라우팅
개요	천공과 동시에 대구경 강관(φ114mm)을 삽입하면서 고압분사를 실시하여 600~800mm의 개량체를 조성할 뿐만 아니라 삽입된 대구경 강관을 이용하여 2차 주입을 실시하여 보강효과가 확실한 공법이다. 천공은 보강재인 강관을 외관으로 하고 룯드를 내관으로 하는 이중관 방식의 천공이다. 외관은 회전, 내관은 선반에 부착된 특수 분사장치에서 경화재를 분사하면서 회전(필요시에 따라서는 타격하여 주변지반을 천공, 원주형의 개량체를 조성한다).
특징	<ul style="list-style-type: none"> · 연약지반에서 지반보강 효과가 가장 크다. · 공사비가 고가이다. · N값이 30이상인 경우 시공성이 떨어진다. · 국내 시공실적이 부족하다.
시공 순서	 1) 벌크 헤드부 천공  2) 고압분사  3) 룯드 인발  4) 2차 주입

