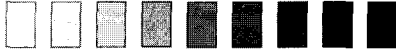


해설



토목 산업에서의 벤토나이트의 특성과 활용

박성완 · 서전형 · 이상현

주식회사 한국수드케미

벤토나이트는 'The clay with thousand uses' 라는 별명을 가지고 있을 만큼 다양한 용도를 가진 점토 물질로서, 1898년 'Knight' 에 의해 미국 몬태나 주 'Fort Benton' 지역에 있는 팽윤성이 아주 큰 백악기 점토에 대해 처음으로 명명되었다. 주로 응회암 또는 화산재와 같은 유리질 화산물질의 열수변질이나 속성변질 작용 등의 화학적 변질작용으로 형성되는 지방감과 가소성을 가진 스멕타이트(Smectite) 그룹

의 몬모릴로나이트(Montmorillonite)를 주구성 광물로 이루어진 광석명인 동시에 상품명으로 통용되고 있다. 여기에 부성분광물로서 화산 유리질물질 내의 반정에서 기원된 장석, 흑운모, 석영, 방해석 등이 수반된다.

몬모릴로나이트는 2개의 SiO₄ 4면체판과 그 사이에 Al과 O로 이루어진 8면체판에 의한 2:1 구조로 이루어진다. 이 몬모릴로나이트의 4면체 내에서는 Si⁴⁺가 Al³⁺로 치환되거나 팔면체내

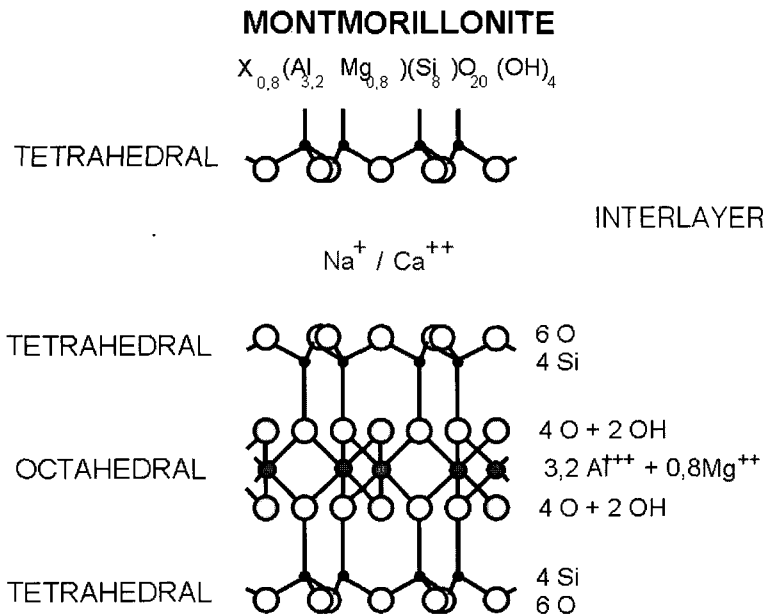


그림 1. 몬모릴로나이트의 결정 구조.

에서의 Al^{3+} 를 Mg^{2+} 나 Fe^{2+} 로 치환이 가능한데, 이러한 결과로 인하여 양전하의 결손을 초래하여 몬모릴로나이트의 층간(interlayer)에는 부전하를 띠게 된다. 이러한 결손은 층간에 Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , H^+ 등의 양이온들이나 유기물이 들어가면서 보상되어진다(그림 1). 이것을 더 쉽게 설명하자면, 벤토나이트의 주성분은 몬모릴로나이트로 구성되는데, 그 구조는 층의 표면에 흡착된 양이온이 존재하는 얇은 판상의 Si-Al-Si 구성 단위가 겹쳐진 구조가 된다. 이 구조를 하나의 건물로 생각하면 Si-Al-Si 구성 단위는 벽돌에 해당하며, 흡착된 양이온은 벽돌을 쌓을 때 넣는 몰탈에 해당된다고 할 수 있다. 팽윤은 Si 층면을 따라 물이 들어가 인접한 구성단위의 층간 폭을 넓히는 현상을 말한다. 같은 구조를 하고 있는 몬모릴로나이트에서도 흡착된 양이온의 종류에 따라 팽윤이 달라진다. 흡착된 이온이 Na일 때는 층간 간격이 넓어지나, Ca일 때는 물이 많이 들어가지 못하여 층간의 간격이 Na일 때 보다는 좁다(그림 2).

Ca-몬모릴로나이트는 물을 흡수하여 단위층의 간격이 20\AA 정도까지만 팽윤되지만, Na-몬모릴로나이트는 150\AA 이상까지 크게 팽윤이 가능하다(Fukushima, 1984).

따라서 우세한 양이온의 종류에 따라 Na 및 Ca계 벤토나이트로 구분된다. 우리나라에서 산출되는 벤토나이트뿐만 아니라 전 세계 대부분의 나라에서는 Ca계 벤토나이트가 주로 산출되는데, 이것은 활성화(Activation) 공정에 의해 층간 양이온을 Na로 치환시켜 점도 및 팽윤도가 월등히 향상된 Na계 벤토나이트로 제조하여 산업에 이용하고 있다.

벤토나이트는 산업적으로 이용될 때, 원광석의 치환 종류에 따라 산으로 치환된 것, 알칼리로 치환된 것, 치환되지 않은 천연 벤토나이트 및 유기물로 치환된 것으로 크게 네 가지로 분류된다. 또한, 식료품 산업, 광물질 기름 산업, 식음료와 제당 산업, 제지 산업, 약품 산업, 건설 산업, 토목 산업, 주물 산업, 시추 산업, 페인트 산업, 환경보호 산업, 도자기 및 타일 산업,

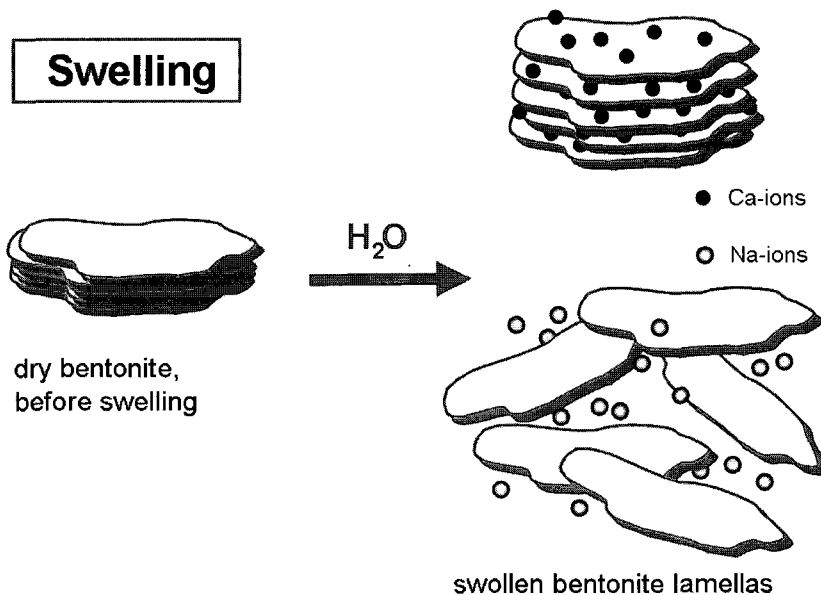


그림 2. 몬모릴로나이트의 양이온의 종류에 따른 팽윤정도.

방습제, 원예, 농업 및 기타 다양한 산업에서 다양한 목적으로 사용되고 있다(박성완 외, 2005). 이중 토목 및 건설 산업 등의 기초공사에도 많이 사용되는데, 이러한 벤토나이트의 이용 원리는 주성분 광물인 몬모릴로나이트의 광물학적 특성에 기초한다. 이 몬모릴로나이트는 나노 단위에서부터 수 마이크로에 이르는 미립의 크기를 가지는 층상 규산염광물로서, 이온교환성, 현탁성, 흡착성, 팽윤성 등의 많은 물리화학적 특성을 가지고 있다.

토목 기초 공사에 벤토나이트를 사용하는 주목적은 굴착 및 시추 시, 벽면의 붕괴 방지를 위한 것이다. 물에 분산된 벤토나이트의 안정액은 높은 점도를 나타내며, 물이나 기름과는 달리 유동속도가 변하게 되어 점도도 같이 변하여 낮은 유동 속도에서는 높은 점도를 높은 유동 속도에서는 낮은 점도를 나타내는 성질이 있다. 이러한 현상은 요변성(thixotropy)이라 하며, 이는 유동이 없는 상태에서는 겔 상태가 되고,

급격한 이동이 일어날 때는 액상의 줄 상태로 변하게 된다. 이러한 성질 때문에 시추나 굴착시에 벤토나이트 안정액을 주입하게 되면, 굴착공의 선단인 비트 부분에서는 유동속도가 빨라 안정액은 점도가 낮아져 굴착속도가 빨라지게 되고, 굴착공의 벽면에서는 유동속도가 낮은 상태이기 때문에 안정액의 점도가 높아지게 되어 굴착된 압편 부스러기들을 지상까지 운반하는 것이 가능하게 된다(황진연, 2000). 또한 몬모릴로나이트는 극히 얇은 박편상의 결정 형태의 입자로 구성되어 있어 이 입자들이 평행하게 중첩되어 배열되므로, 굴착시에 굴착 벽면에 물이 잘 빠지지 않는 불투수성의 막을 형성하여 벽면의 붕괴를 방지하는 역할을 한다. 그리고 이러한 벽면이 형성될 때 안정액의 작은 입자들이 지층 중에 침투하여 공극들을 충전하고 토양과 같은 느슨한 입자들을 점결하는 효과도 있으므로 굴착 벽면의 붕괴를 방지하는 역할도 한다(그림 3). 그림 3은 벤토나이트 안정액의 역할

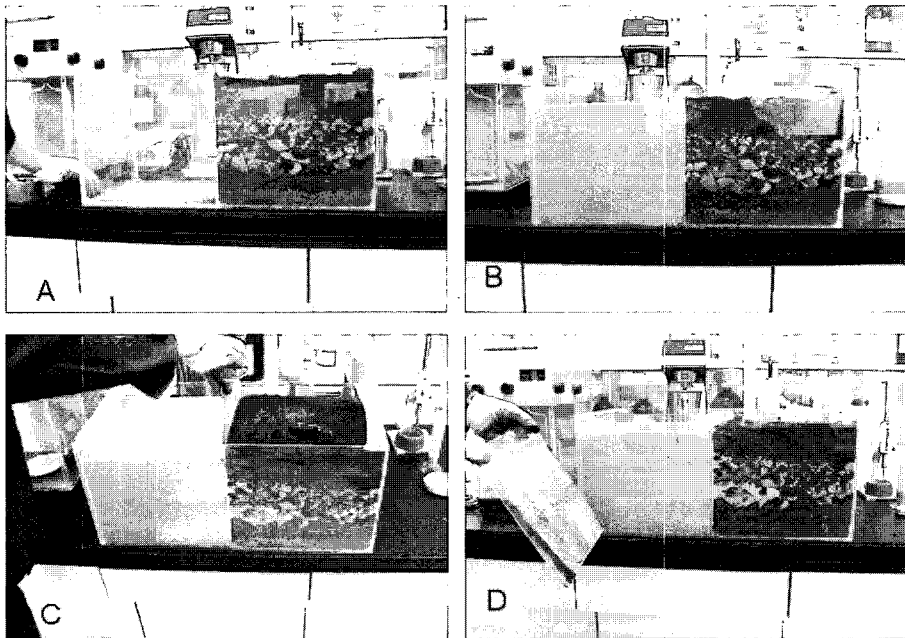


그림 3. 벤토나이트 안정액의 역할.

을 시각적으로 나타내기 위하여 실험실에서 인공적으로 만든 장치로, 가운데 칸막이가 있는 투명 용기에 오른쪽 칸에 인위적으로 토양과 자갈을 반복하여 채워 넣고(A), 다른 왼쪽 칸에는 벤토나이트 안정액을 가득 채운 다음(B), 가운데 있는 칸막이를 제거하였을 때(C) 오른쪽 칸의 인위적으로 채워놓은 토양과 자갈층이 위에서 언급한 벤토나이트 안정액의 작용으로 인하여 전혀 붕괴되지 않는 것을 볼 수 있다(D). 또한 이 벤토나이트 안정액은 굴착기 선단의 회전하는 비트에 대해 윤활 작용과 냉각 작용도 하게 된다.

토목 산업용 벤토나이트 사용 현황

우리나라의 토목 및 건축용 벤토나이트는 굴착용 안정액으로 사용되며, 2005년 기준으로 약 6,000여 톤 가량이 소요되었고, 다소 저급용 벤토나이트인 그라우팅용 및 쏘일 실링(soil sealing)용 벤토나이트는 약 11,000여 톤이 소요되었다. 총량기준으로 약 20,000여 톤 내외의 벤토나이트가 해마다 토목 및 건축용으로 사용되고 있으며, 그 사용방법은 대략 다음 세 가지이다(표 1).

- 가. 벤토나이트를 물에 분산시켜 안정액 상태로 사용하는 용도(지하 연속벽 공법).
- 나. 벤토나이트를 물에 분산 시킨 후에 시멘트를 투입하여 고화시켜 벽체로 사용하는 용도(셸드턴널링).
- 다. 벤토나이트를 분말이나 입상의 상태로 차수 및 방수에 사용되는 용도(쏘일실링, 그라우팅등).

표 1. 국내 토목 및 건축용 벤토나이트 사용 현황 (2005년 기준).

Methods	Market Volume(Ton)
Diaphragm Wall	6,000
Tunnel(Shield)	1,000
Soil Sealing, Grouting & etc.	11,000
Total	18,000

토목용 벤토나이트의 제조

제조과정

일반적으로 토목용 벤토나이트의 제조 공정은 다른 산업 용도의 벤토나이트(주물용, 제지용, 동물사료용)의 제조와 크게 다르지 않다. 대부분의 제조 업체에서는 같은 시설에서 각각의 용도에 맞는 벤토나이트제품을 같이 생산하고 있다. 다만, 국내에서 산출되는 벤토나이트는 Ca-벤토나이트가 대부분이므로(황진연과 박성완, 1992) 대부분의 국내 생산업체에서는 탄산나트륨을 첨가하여 Na-벤토나이트로 활성화 시켜 생산하고 있다. 이러한 활성화 과정(신희덕, 1986)은 매우 중요한 과정으로서 보통 엑스트루더와 팬밀이라는 두개의 장치를 이용하여 Ca-벤토나이트를 Na-벤토나이트로 치환시키는 장치이다. 1990년대에 들어서면서부터 국내 몇몇 업체가 이 활성화장치를 설치하였으나, 엑스트루더 장치 하나만 설치하여 그 효율성이 떨어지며, 그나마 대부분의 군소 업체들은 이런 장치를 거치지 않고, 회사 야적장의 원광에 탄산나트륨을 뿌려 바로 건조로에 투입되고 있는 실정이므로 완전한 활성화를 기대하기 어렵다고 할 수 있다. 이러한 활성화 과정은 앞서 언급했듯이 몬모릴로나이트 층간의 양이온의 종류에 따라 점도와 팽윤도 등에 큰 영향을 미치는 공정이라 할 수 있다. 또한 다른 산업적 용도(주

물용, 제지용 등)에 사용되는 벤토나이트와는 다르게 생산 공정 중에 점도 등을 조절하기 위하여 수산화마그네슘이나 CMC 등을 첨가하기도 한다.

국내 토목용 벤토나이트의 생산 공정은 크게 활성화 및 건조(Activation & Drying), 분쇄(Milling), 포장(Packing)의 3단계로 이루어진다. 이러한 공정은 생산 업체의 보유 설비에 따라 다를 수가 있으나 크게 벗어나지는 않는다(박성완 외, 2005).

품질 관리

벤토나이트의 품질 측정은 원광의 특성에 크게 좌우되며 제품의 생산 공정에 연계 되어 행해진다. 우선 각 광산별로 산출되는 벤토나이트 원광의 특성을 파악한 후, 각각의 용도에 맞게 제품의 생산에 이용된다(황진연 외, 1997). 광산에서 채취된 원광은 우선 벤토나이트 내의 몬모릴로나이트의 함량을 알아보기 위해 메틸렌블루(Methylene Blue) 흡착 실험, 수분 함량 측정, 팽윤도 측정, 필요시 pH 측정이 이루어진다. 그리고 이 시료에 일정량의 탄산나트륨(Na_2CO_3)를 첨가하여 몬모릴로나이트 층간에 있는 Ca 대신에 Na를 치환시킨 후 분말로 만들어 실험을 하게 된다(박성완 외, 2005).

토목용에 적합유무를 판단하기 위해서는 마쉬 점도(Marsh Funnel Viscosity), 전단강도(Gel Strength 또는 Shear Strength), 여과수량 측정(Fluid Loss), 팽윤도, pH 등을 측정한다. 마쉬 점도는 위와 같이 활성화된 일정량의 벤토나이트를 증류수 1리터에 혼합한 후 약 3,000 RPM 속도의 교반기로 약 5분간 교반시킨 후 1시간 뒤에 이 혼합액이 946ml의 깔때기를 통과하는데 걸리는 시간으로 점도를 나타낸다. 전단강도는 이 혼합액에 알루미늄 튜브를 낙하시킬 때의 정도로 나타내며, 질소가스를 이

용하여 7bar의 압력을 30분간 가했을 때 빠져 나오는 물의 양인 여과수량(Filter Loss 또는 Fluid Loss)으로 측정된다. 또한 팽윤도는 증류수가 담긴 100ml의 메스실린더에 2g의 벤토나이트 분말을 여러번 나누어 자유낙하 시킨 뒤 약 2시간 후 팽윤되는 벤토나이트의 높이를 측정한다.

이렇게 특성이 파악된 원광은 생산 공장으로 운반되며, 운반된 원광에 대해서도 위와 같은 방법으로 반복 실험을 하게 된다. 또한, 특성이 파악된 벤토나이트는 각 제품의 용도에 맞게 혼합 비율을 결정하기 위해 위와 같은 실험이 수행되며, 활성화되어 건조된 반제품인 그레놀(Granule)에 대해서도 각 단계별로 품질측정을 하게 된다. 여기를 통과한 그레놀은 분쇄기(Mill)로 투입되어 분쇄되는 과정에서도 각각의 시험을 거치게 되고, 최종 포장이 되기 전에도 위와 같은 실험이 수행된다.

토목용 벤토나이트의 활용

토목 및 건축용 벤토나이트를 사용하는 공법은 다음과 같다.

- 가. 지하 연속벽(Diaphragm Wall, Drilling) 나. 터널링(Shield, Semi-Shield, Pipe Jacking)
- 다. 토양 쉐링(Soil Sealing)
- 라. 지열 냉난방 공법(Geothermal Heat System)
- 마. 플라스틱 차수벽(C.B Slurry)
- 바. 협단 차수벽(Narrow Plastic grout Cut-off Wall)
- 사. 각종 주입 공법(LW, SGR Grout...)

지하 연속벽 공법은 안정액 상태의 벤토나이트를 사용하여 현존하는 가장 고기술의 기초 공법으로 벽체 형성, 차수, 강도 발현 등의 요구

목적은 전부 만족 시켜주는 공법으로 다소 시공비가 비싸다는 단점을 제외하고는 가장 우수한 공법이라 할 수 있다. 또한, 대규모 토목 공사중에 지하철이나 전력구, 통신구 용도의 터널 공사는 기존에는 'open cut' 공법이라 하여 노면을 굴착하여 용도에 맞는 시설물 설치를 하던 기존 공법과는 달리 필요 대상 체적만 굴착하여 대상 목적물을 설치하는 'Shield', 'Semi-Shield', 'Pipe jacking' 등의 다른 공법도 있다. 또한 이 공법도 슬러리(slurry) 상태의 벤토나이트를 사용하여 지반의 안정의 유도하여 굴착하는 공법 중의 하나이다.

위에 설명된 2가지의 공법(가와 나)은 물에 벤토나이트를 수화 분산 시켜서 안정액을 만든 후, 안정액 상태의 벤토나이트가 지반의 안정을 유도하여 공사를 하는 공법이며, 토양셀링공법은 벤토나이트를 분말이나 입상으로 단독으로 사용하여 지반 공극률을 충전해 차수를 목적으로 사용되는 공법이다. 그리고 아래의 4가지 공법은 물에 벤토나이트를 분산시켜 안정액에 시멘트를 첨가하고 차수를 겹하여 일정한 강도를 요구하는 용도로 사용되어지는 공법들이다.

지하 연속벽 공법(Diaphragm Wall)

벤토나이트는 수화 분산 시키면 입자들의 음이온 간의 반발력으로 인한 저항으로 유체의 마찰 즉, 점성이 아주 높은 안정액 상태가 된다. 이 안정액은 높은 점성을 띠며 투입된 벤토나이트만큼의 중량으로 일정 정도의 비중을 가지며, 판상 광물 입자의 벽체 부착으로 인한 'Mud film' 현상으로 차수 성능을 가지게 된다. 이러한 상태의 안정액은 굴착 장소에서 굴착 외부 벽체의 함몰 및 지하수의 이동을 억제하여 요구하는 깊이까지 굴착하는 동안 지반의 안정을 가져다주며, 이러한 굴착 작업을 연속으로 시행하여 지하외벽을 형성하여 주상복합 건물 등 초고

층 건물의 건설을 가능하게 해주는 공법이다.

이러한 지하 연속벽 공법이 우리나라에서는 1981년 서울 여의도에 있는 쌍둥이빌딩을 지을 때 프랑스계의 쏘레당쉬 회사에서 처음으로 시공하였으며, 당시에는 국내의 벤토나이트 제품이 이러한 공법에 사용되기에는 품질이 떨어져 전부 수입산을 이용하여 시공되었다. 현재 이 공법을 이용하여 건설된 최대의 구조물은 인천에 있는 LNG 저장 탱크로서 높이가 84m, 직경이 80m, 두께가 약 1.7m이다. 이러한 공법을 국내외에서 시공하는 국내업체는 약 9개 업체이며, 연간 국내에서 이 공법에 사용하는 벤토나이트는 약 5,000~8,000톤이다. 주요 시공사례로는 인천의 LNG 저장 탱크, 부산 지하철 1호선과 2호선, 서울지하철 9호선, 서울 남지도 쓰레기 매립지 등이 있다.

수화 시킨 벤토나이트는 지반을 안정시켜 준다는 의미에서 안정액이라 불린다. 이 안정액은 높은 점성과 적절한 비중, 그리고 액의 투과량을 억제하는 요인에 의해 다음과 같은 커다란 기능을 수행하게 된다. 자연 그대로 안정된 지반을 수직으로 굴착하면 토압의 균형이 파괴되어 굴착 벽면은 항상 붕괴의 우려가 있다.

가. 굴착 벽면의 붕괴를 막는 기능

이것은 가장 중요한 것으로 다음의 작용에 의한 것이다.

- 안정액의 액압에 의해 굴착 벽면에 작용하는 토압 및 수압에 저항하며 또 지하수의 용출을 방지한다.
- 굴착 벽면에 불투수성의 필름을 형성하여 액압을 유효하게 작용시키는 동시에 굴착 벽면의 표면 낙하를 막는다.
- 안정액이 굴착 벽면에서 어느 범위 까지 지반 내에 침투되며 흠 입자에 부착된다. 이 작용에 따라 지반의 붕괴성 및 투수성을 감소시킨다.

나. 안정액 속에 부유되어 있는 토사를 유지하는 기능

- 굴착 중 안정액에 부유되는 굴착 토사가 굴착 종료 후에 차츰 굴착 저면에 퇴적되고, 철근망의 근입을 곤란하게 하는 동시에 타설된 콘크리트의 품질을 나쁘게 한다. 적절하게 관리된 안정액은 이 침전 퇴적물의 발생을 억제한다.

다. 굴착 토사를 지표까지 운반하는 기능

- 커터식 굴착의 경우에 굴착 토사의 배출은 안정액을 지상에 순환시킴에 따라 실시된다. 굴착 토사를 신속히 배출시키지 않으면 굴착 기구의 기능을 저하시키고, 또한 안정액 속에 부유되는 토사의 양을 많게 하여 안정액의 순환 저항이 많아지며 굴착 능률을 더욱 저하시킨다.


일반적으로 안정액의 지반 안정을 위한 층죽 조건으로는 다음 표 2와 같다. 대략 토목적 지반 분류인 토사, 점토층에서의 점도(Marsh Viscosity) 관리는 28~32 초 가량에서 관리되며, 세립질 모래나 모래층에서는 32~43 초, 조




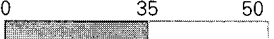

립질 모래나 자갈층에서는 40 초 이상의 점도를 유지하면 지반의 안정을 유지할 수 있다. 이 같은 점도 관리 수치는 별도의 근거 없이 시공 경험에 의한 경험치에서 유래된 것이다.

굴착이 완료된 후 이 안정액에 레미콘을 타설하며 벽체 조성을 하나 이때 주의 할 점은 안정액의 비중을 최소로 유지하여야 레미콘과의 교대가 원활하여 최종 목적물인 레미콘의 강도가 발현될 수 있다는 것이다. 다만 부산, 울산 그리고 서울 한강변의 지층에서는 지반의 강도가 연약한 세립질 실트, 점토층 등으로 구성이 되기 때문에, 안정액의 비중을 낮추기 위해 별도로 비중이 낮은 안정액을 기존의 비중이 높은 굴착 중인 교환하지 않고, 기존의 안정액 내 침전물인 굴착토 등을 제거한 후에 레미콘을 타설하는 드문 사례도 있다. 이는 비중이 높은 안정액과 낮은 안정액을 급격하게 교환시 안정액 주변 토질의 토압에 불균형을 초래하여 공벽 안정에 심각한 영향을 초래하기 때문이다.

지하 연속벽 공법의 큰 장점은 건축물 지하를 터파기(굴착)하기 전에 건축물의 벽체를 선시공하여 인접 지반의 이완이나 지하수 누수의 위험

표 2. 벤토나이트 안정액의 관리 기준.

(적절  조정요 )

관 리 항 목	관 리 기 준 치	측정방법	비 고
비 중	1.00 1.03 1.15 1.20 	Mud Blance	
사 분 율	0 3 5 	API 사분측정기	
점 성	28 32 43 50 	Marsh Funnel점도기	
여 과 수 량	0 35 50 	API여과시험기	
P H	7 9 11.5 12 	PH Meter	

지하 연속벽 공법의 작업순서

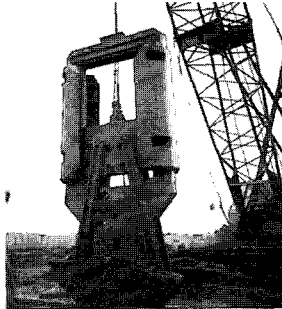
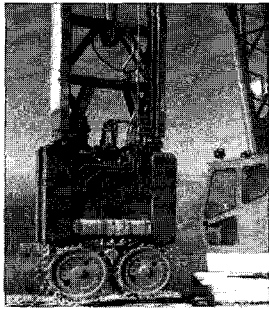
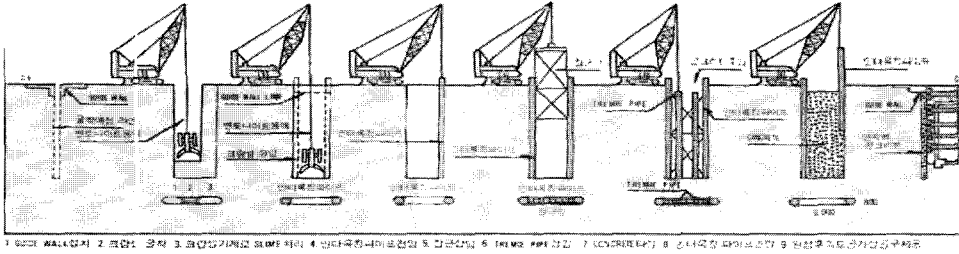


그림 4. 지하 연속벽 공법의 작업 순서.

으로 탈피하여 안전하고 능률적으로 추가 공사를 진행 하는 이점이 있다. 이는 건축물 벽체를 세밀하게 구분하고 분할하여 각 벽체를 조밀하게 연결시키는 방법으로 개개의 벽체가 모여 한 개의 커다란 벽체를 형성하는 원리이다(그림 4). 그 굴착 장비는 버킷식(그림 4, C)과 커터식이 있으며, 요즘은 이 두 장비를 혼용하는 추세이다. 다만 버킷 굴착 장비는 굴착시 벽체 수직도 유지에 한계가 있기 때문에 일정 심도(선행 굴착:10~20m)이상은 굴착을 금지하고 있다. 일본의 경우 지하 120m 이상 굴착 기록이 있으며, 국내에서는 지하 84m의 굴착 기록을 가지고 있으며 국내 대부분의 지하 연속벽 공사는 지하 40m 전후의 굴착을 하고 있다.

터널링 공법(Shield, Semi-Shield)

지하 연속벽 공법으로 지하철 시공을 하는 경우도 있으나 특수한 경우 터널식 굴착 방법으로

지하철 터널 공사를 진행하는 경우가 있다(그림 5). 터널 굴착 방법으로는 'NATM' 방법과 'SHIELD' 공법 등이 있으나, 'NATM' 굴착 공법의 경우 대부분 암반 지반에서의 터널 굴착 방법이고, 'SHIELD' 공법의 경우는 연약 지반이나 연약지반을 포함한 암반 지층의 복합 지층 굴착 공법이다. 지하 연속벽 공법은 수직으로의 굴착 방법이라면 'SHIELD' 공법은 수평 굴착 방법중의 하나로 'SHIELD' 공법은 크게 이토압식 'SHIELD' 공법과 'SLURRY SHIELD'의 두 가지로 나뉘어 진다.

이토압식 'SHIELD' 공법은 단순 'CUTTER'의 삭박으로 토사나 암반을 굴착하여 'SCREW CONVEYOR' 및 'FPDLFD'에 의해 굴착 토사를 운반 하는 공법이며, 벤토나이트는 'SLURRY SHIELD' 공법에서 주로 사용이 되어 지는데 벤토나이트 슬러리의 안정액으로 막장 전면의 안정을 유지하며 굴착토의 부유, 이송 기능은 지하 연속벽 공법과 유사하

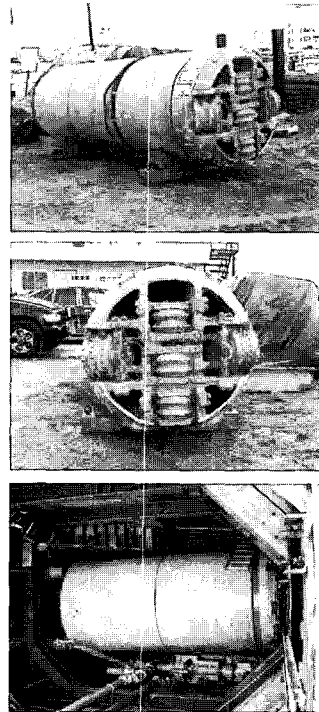
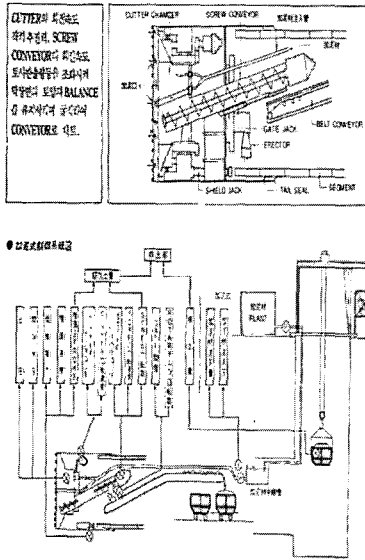


그림 5. 터널링 공법의 모식도와 장비들.

다. 다만 다른 특징중의 하나는 같은 슬러리이면서 안정액 이송 거리가 1Km 이상 되는 경우가 많아서 통상적으로 안정액의 비중을 1.15 이상의 고비중의 안정액을 사용하는 점이 지하연속벽 공법의 안정액과 비교가 된다.

다른 공법중 'Semi-Shield' 공법은 굴착 방법은 'Slurry Shield' 공법과 같으나 굴착 기계 배면의 관 추진 방법이 상이하다. 'SHIELD'의 경우 굴착 후 관을 기계 내부에서 조립하여 그 관을 반력벽으로 이용하여 굴착을 진행하나 'Semi-Shield' 공법은 초기부터 별도의 유압의 jack 추진력으로 굴진을 진행 하는 방법의 차이로 구분된다. 따라서 'SHIELD' 공법은 굴착 연장이 무한대이나, 'Semi-Shield' 공법의 경우 1회당 굴착 길이의 제한을 받는다. 국내에서 최장 'Semi-Shield' 굴착 연장은 대략 900m 가량이다.

토양셀링 공법(Soil Sealing)

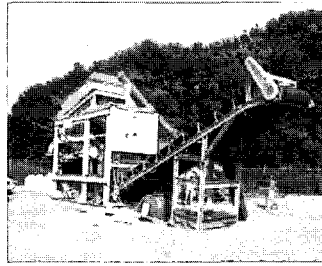
토양셀링(Soil Sealing)공법은 벤토나이트 분말이나 입상이 단독으로 사용되는 대표적인 공법 중의 하나이다. 대부분의 국내 쓰레기 매립장은 이 공법으로 시공이 된다. 일부는 고화제를 사용하는 공법도 있으나 대규모의 매립장의 경우는 토양셀링공법이 사용된다(그림 6).

이 공법은 기초 공사 후 배수 공사의 상부에 입도 분포가 양호한 토사와 벤토나이트를 10~15% 비율로 혼합하여 층 다짐을 한 후 쓰레기를 매립하는 방법으로, 토사와 혼합된 벤토나이트는 매립장 내에 물의 유입이 있으면 벤토나이트의 팽윤에 의해 공극 충전으로 지하수의 유동을 10~7이하로 낮추어 매립장내 침출수의 유출을 억제하는 벤토나이트의 특징을 가장 잘 살린 공법이라 할 수 있다. 이 공법은 쓰레기 매

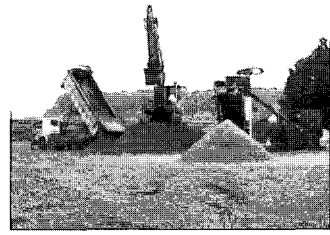
토양 씰링 공법(Soil Sealing)



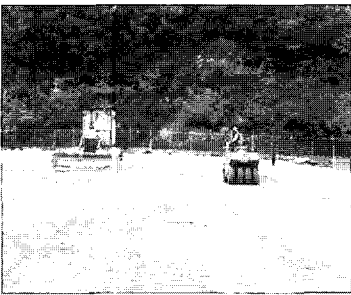
1. Land before work



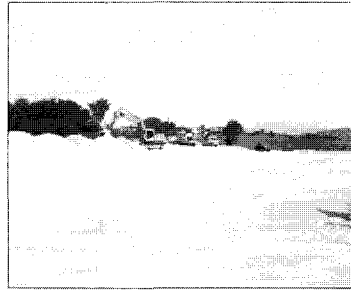
2. Mixing Plant



3. Soil + Montigel Mix.



4. Spreading and compacting of No.3



5. Complete soil sealing view

그림 6. 매립이 완료된 매립장에서의 토양씰링공법의 시공순서.

표 3. 벤토나이트의 종류에 따른 열전도율(코오롱 기술연구소, 2003).

종 류	Water/Bentonite	열전도율
외산벤토나이트	1.5	1.78±0.01
국내 토목용 벤토나이트	1.5	1.97±0.18
국내 제지용벤토나이트	1.5	1.88±0.18

립장의 바닥 처리 공법으로 사용이 되며, 매립이 완료된 매립장의 상부에 같은 방법인 복토 방법으로도 사용이 되어진다. 그림 6은 매립이 완료된 쓰레기 매립장에서의 복토를 위한 토양 씰링공법의 시공 순서를 나타낸 사진들로, 쓰레기로 매립이 완료된 매립장에(그림 6, A), 혼합장비(그림 6, B)에 의해 벤토나이트와 25 mm 이하의 토사와 적절하게 혼합한 후(그림 6, C), 그 혼합토를 그림 6, D와 같이 매립된 쓰레기 상부에 포설 후 진동 다짐을 하여 시공을 완료한다. 쓰레기를 매립하기 전에는 매립장 바닥에

도 이와 같은 방법으로 혼합토를 시공하며, 앞서와는 달리, 'HDPE' 시트와 모래층을 별도로 벤토나이트 혼합토층 상부에 시공한다.

지열냉난방공법(Geothermal Heat System)

이 공법은 지반의 저감 효과(대기는 계절에 따라 온도 변화가 크지만, 지표에서 일정 깊이 이하의 지중은 대기의 온도 변화에 영향을 받지 않고 일정 온도를 계속 유지)를 열원으로 하여 냉, 난방 시스템을 가동하는 공법으로, 벤토나

이트의 높은 팽윤 특성과 다소 높은 열전도도의 특징을 이용하여 새로운 대체 에너지 공법으로 각광받고 있다.

4인치 구경의 냉각효과를 위한 바둑판식의 격자 형태로 굴착공을 형성한 후, 배관 파이프를 공내에 삽입하여 벤토나이트 혹은 벤토나이트 + 실리카 또는 벤토나이트 + 시멘트로 공내 충진을 하여 지반에서의 지열을 배관에 전도시키는 공법이다. 벤토나이트의 양호한 열전도도 및 수화 팽창에 의해서 굴착 공벽에 있는 공극을 충전함으로써 생기는 밀폐효과로 열손실을 억제하여 주는 역할을 한다. 다만 벤토나이트의 높은 팽윤 특성으로 인한 팽핑의 문제를 해결하기 위해 소량의 유동성 조절제를 투입하여 주는 특징이 있다.

이 공법의 이용 분야는 냉·난방 공유, 온수 급탕, 스케이트장 유지, 관거 동파 방지 등이며, 난방과 냉방시에는 각각 30~70%, 20~50%의 에너지 절감효과를 가져다준다. 이 공법을 적용하기 위해서는 지하수와 같은 유체의 흐름을 낮추는 낮은 투수성, 양호한 열전도 특성, 지

열교환기와 시추공벽을 견고하게 결합, 그라우트가 접할 지하수 성분, 변형물질에 대한 화학적 비활성 또는 무반응, 용이한 혼합성, 타설 시간 동안의 팽핑 가능한 유체 유동성, 4 또는 1인치 직경의 파이프를 따라 시추공 타설 작업성, 시추공내에서 'Self Level' 가능, 투수층로의 최소 침투의 조건이 필요하다.

기타 공법들(플라스틱 차수벽, 협단 차수벽, 일반 주입 공법)

그 외 토목용으로 벤토나이트를 사용하는 공법들에는 플라스틱 차수벽(Cement-Bentonite Slurry), 협단 차수벽(Narrow Slurry), 일반 주입(Grouting) 등이 있다. 이러한 공법들은 사용되는 시멘트 등의 강도 발현 보다는 차수를 목적으로 주로 사용되어지는 물 + 벤토나이트 + 시멘트 공법으로 국내에서 가장 하차 발생 요인이 많은 공법이라 할 수 있다. 이 공법들은 대부분의 토목 및 건축 공사의 기초 굴착전에 사전 시공으로 이루어지며 차수 공법으로, 벤토

각종 주입 공법(물+벤토나이트+시멘트)

- 실드 공사 뒷재움 용도
- 공동 충전 용도
- 각종 그라우트 용도
- 플라스틱 차수 용도

기본배합 예

물	시멘트	벤토나이트	유동화제
900 l	200~300kg	50~70kg	0.5kg

- * 이 공법에 대한 현실적인 문제점들 :
 - 보조 재료로서 성능의 이해 부족
 - 물, 벤토나이트, 시멘트의 광물학적 특성
 - 적절한 사용 방법에 관한 이해 부족
 - 투입 방법, 배합 설비
 - 경제성 감안
 - 사후 관리

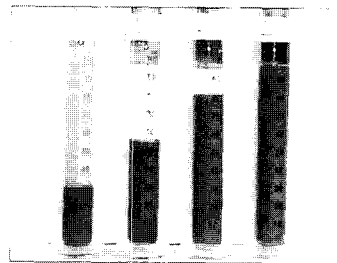


그림 7. 기타공법들.

나이트의 팽윤 특성과 시멘트와의 전기적인 응집 현상으로 시멘트 입자의 침전을 억제하여 균등 고화체를 형성 시켜주는 벤토나이트의 특성을 살린 공법이다. 그러나 대부분의 시공사들이 벤토나이트의 기능 및 전기적 특성을 이해하지 못하여 물에 시멘트를 먼저 투입하여 교반을 시키거나 벤토나이트를 투입하지 않는 사례로 인해 상당히 큰 차이의 시공 결과를 초래한다(그림 7). 그림 7에서 맨 왼쪽의 메스실린더에는 벤토나이트를 투입하지 않고 시멘트만 배합한 결과이고, 오른쪽으로 갈수록 벤토나이트의 투입량을 증가시켜 시멘트와 배합한 결과이다. 보는 것과 같이 시멘트만 투입한 메스실린더는 시멘트와 물과의 분리 현상이 나타나고, 오른쪽으로 갈수록 분리 현상이 적게 일어난다. 따라서 분리현상이 적게 일어날수록 공동충진효과가 탁월하므로 벤토나이트의 사용이 필수적이라 할 수 있다.

토목 산업에서 벤토나이트의 중요성

미세하게 분산 수화되는 벤토나이트이지만 그 미세한 벤토나이트는 엄청나게 밀어내는 토압과 지하수의 유입을 억제하여 초고층 건물의 지하 기초를 설치하기 전까지 지반을 튼튼하게 유지하는데 아주 중요한 요소이나, 그 사용에 있어서 사소한 잘못으로 인하여 엄청난 피해를 야기하는 것 또한 현실이다.

벤토나이트는 토목 및 건축 공사비의 1%미만의 재료비를 차지하지만, 지하 구조물 공사의

50% 가량의 하자를 발생시키는 요인이 된다. 이러한 하자 발생의 근본 원인으로서는 설계사, 시공사의 벤토나이트 이해 부족, 안전을 무시한 소액의 공사 원가를 절감하기 위한 시공, 시공사와 시공기술자들의 기술적 우월감에 의한 자만 등이다. 그러므로, 이러한 토목, 건축공사시의 기초공사에는 용도에 맞는 양질의 벤토나이트를 사용하여야 하며, 적절한 배합에 의한 정확한 벤토나이트의 사용량이 요구되어 진다.

참고 문헌

- 박성완, 현부영, 이상현 (2005) 주물산업에서의 벤토나이트의 특성과 활용. 광물과 산업, 18, 31~41.
- 신희덕 (1986) 점토광물의 제조와 활용기술. 산업기술정보원, 조사연구보고 5호.
- 황진연 (1997) 점토란 무엇인가?. 광물과 산업, 10, 11~17.
- 황진연 (2000) 벤토나이트의 토목공사로의 응용. 제1회 산업광물 심포지움 논문요약집, 벤토나이트와 그 응용, 51~60.
- 황진연, 박성완 (1992) 경북 양남지역 벤토나이트광상의 성인적 고찰. 지질학회지, 28, 392~402.
- Fukushima, Y. (1984) X-ray diffraction study of aqueous montmorillonite emulsions. Clay and clay minerals, 32, 320-326.