

SEMI-SHIELD 공법의 설계 및 시공상 문제점 Design and Construction Problems of Semi-Shield Method

김종인¹⁾, Jongin Kim, 정성남²⁾, Sungnam Jung, 박영건³⁾, Yeonggeon Park

¹⁾ (주)경도 기술연구소 수석연구원, Principal Research Engineer, R&D Center of Kyeongdo Construction Co., LTD.

²⁾ (주)경도 기술연구소 소장, Director, R&D Center of Kyeongdo Construction Co., LTD.

³⁾ 강릉건설(주) 기술지원팀장, Manager, Engineering Support Team of Kangnung Construction Co., LTD.

SYNOPSIS : The tunnel excavations are used for construction of common utility tunnel, electric tunnel, communication line tunnel, water supply and public sewerage pile line in urban area. The trench cut methods were mainly used in the past, but now, tunneling method is more being used. The tunnel excavation method like as NATM, Messer-Shield, Semi-Shield Methods are being applied to small section tunnel in Korea. The actual construction results of seme-shield method are increasing due to simplified construction process and reduced noise and vibration. And also this method is being used frequently in waterway tunnel and construction of prevention flooding recently. The seme-shield method design guideline is absence except for electric line tunnel construction in Korea, because of the semi-shield method was developed in Europe and Japan. In the prescriptive design, engineer's subjects are tending to intervene, because of absence of standard and specification for details. Therefore, Design and Construction Problems of Semi-Shield Method were described and construction trouble was introduced for exam. These problem and construction troubles have to be examined thoroughly in advance.

Keywords : semi-shield, pipe jacking, micro tunnel, slurry type, earth pressure balance type

1. 서론

도심지에서의 터널굴착은 공동구, 전력구, 통신구, 상·하수도 관로 부설공사에 주로 이용되고 있다. 과거에는 대부분 개착공법이 주를 이루고 있으나, 근래에는 터널공법이 많이 사용된다. 소단면의 터널 굴착공법중 우리나라에서 많이 사용하는 공법은 NATM, MESSER-SHIELD, SEMI-SHIELD 등의 공법이 적용되고 있다. 이 중에서 SEMI-SHIELD 공법은 공정이 단순하고 소음·진동이 적어 이용 실적이 증가하고 있다. 또한 최근에는 도수터널, 침수방지 시설공사 등에서도 이용이 빈번하다. 그러나 SEMI-SHIELD 공법은 유럽과 일본에서 개발되어 설계시 일본의 기준을 많이 적용하고 있으며 국내에서는 전력구 공사를 제외하고는 설계기준이 마련되어 있지 않다. 또한 설계시 세부사항에 대한 기준이나 시방서가 없어 설계자의 주관에 개입되는 경향이 있다. 따라서 본 연구에서는 SEMI-SHIELD 공법의 설계시 문제점과 시공시 흔히 발생하는 시공 트러블에 대하여 기술하였으며 마지막으로 시공 트러블 사례를 소개하였다. 이러한 문제점 및 트러블 요인은 설계 및 시공에 있어 사전에 면밀한 검토가 수행되어야 한다.

2. SEMI-SHIELD 공법

SEMI-SHIELD공법은 도시기반시설인 공동구, 전력구, 통신구 등의 축조와 상·하수도, 가스관등의 매설 공간 확보를 위해 종래의 개착식 공법으로 시공시 발생하는 소음, 분진, 지반침하 및 교통장애등을 최소화하기 위하여 발달한 공법이다. SEMI-SHIELD 공법은 SEMI-SHIELD MACHINE(강재 원통형 굴착 기계)을 가시설 수직 작업구 내에 투입시켜 장비 선단부에 정착되어 있는 굴착용 CUTTER HEAD의 회전에 의하여 지반을 굴착하고 막장 전면에 각종 보조공법으로 굴착면의 붕괴를 방지하고 SEMI SHIELD MACHINE 후방에 있는 유압잭을 이용하여 추진관을 압입 추진하며 설치하는 것을 반복하여 지중내에 터널을 형성시키는 공법이다.

개발초기에는 개방형 인력굴착이었으나, 연약층의 공사증대는 물론 난공사 조건에 대처하기 위하여 기계굴진이 개발 개선되어 이수가압형 SEMI-SHIELD가 널리 보급되었으며, 최근에는 이수가압식의 단점인 이수와 토사의 분리를 위한 고가의 플랜트 설비 및 이의 작업공간등으로 인하여 토압식 SEMI-SHIELD도 많이 이용되고 있다. SEMI-SHIELD공법의 특징은 굴착 즉시 유압잭에 의한 압입, 추진방식으로 추진관을 설치하므로 붕괴 위험성이 없으며 시공중 각종 건설공해(교통장애, 소음, 분진, 진동 등)가 거의 없다. 또한 별도 보조공법 없이 연약지반통과가 용이하며 반복작업으로 공사가 단순하고 시공관리가 용이하고 거의 모든 토질에 적용가능하다.

2.1 SEMI-SHIELD 공법의 종류

SEMI-SHIELD공법은 Blind식, 이수가압식, 토압식으로 구분되나, Blind식은 극히 연약한 점성토에 한정되어 사용되므로 여기서는 이수가압식과 토압식을 비교 검토하였다.

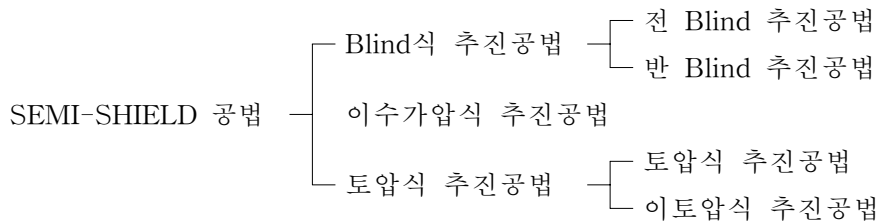


그림 1. SEMI-SHIELD 공법의 종류

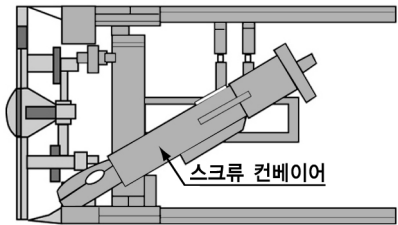
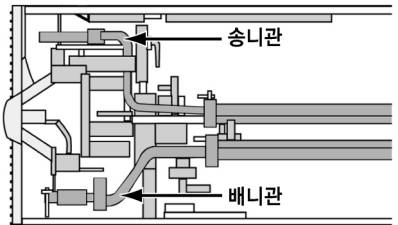
이수가압식추진공법은 밀폐형 기계굴진의 전면굴착부에 펌프로 이수를 압송하여 지반의 붕괴를 방지하는 동시에 커터에 의해 굴착된 토사는 이수와 혼합되어 배니파이프를 통하여 갱외로 배출되면서 발진구내 관체 후부의 잭에 의해 관을 연속적으로 추진하는 공법이다.

이수압을 가하지 않고 막장의 안정에 유효한 고비중, 고점성 이수를 사용하여 막장을 안정시키기도 하며 수압이 높은 곳에서 적합한 방식이다. 지반 안정 처리는 원칙적으로 필요하지 않다.

토압식추진공법은 굴착토사 또는 버력으로 챔버를 채우고 추진력에 의해 가압하여 토압이 굴진면 전체에 작용해 굴착면의 안정을 확보하는 동시에 굴착토는 스크류 콘베이어에 의해 배토되면서 발진구내 관체후부의 잭에 의해 관을 연속적으로 추진하는 공법이다. 굴진면 안정을 위해 소성유동화한 굴착토를 챔버내에 가득 채우는 것이 중요하므로 이를 위해 첨가재로 벤토나이트, 점토 기포재 등을 사용하기도 한다. 토압식추진공법은 굴착토의 배토상태에 따라 지반의 상황을 판단하기 쉬우며, 이수 또는 이수제작 설비가 없어 작업구 부지가 작아도 되며, 굴착토의 처리가 용이하다.

2.2 SEMI-SHIELD 공법의 설계

표 1. 이수가압식과 토압식 SEMI-SHIELD 공법 비교

구 분		이수가압식 SEMI SHIELD	토압식 SEMI SHIELD
개 념 도			
적용가능 토질		<ul style="list-style-type: none"> 전지반에 적용 가능하며 특히 지하수 많은층에 유리. 	<ul style="list-style-type: none"> 전지반 적용 가능하며, 파쇄대 통과성능이 우수하고 암반구간 굴진시 시공속도 향상.
배 토 방식		<ul style="list-style-type: none"> Chamber → 배니 Pipe(유체수송) → Desand Plant → 토사반출 	<ul style="list-style-type: none"> Chamber → 스크류 컨베이어 → 벨트 컨베이어 → 작업대책 → 토사반출
막장의 안정		<ul style="list-style-type: none"> 굴진면에 이수를 침투시켜 이막 형성을 통한 안정성 확보 	<ul style="list-style-type: none"> 굴착토사를 소성유동화 시키면서 챔버 내에 충전시켜 토압 및 수압에 대응
장 단 점	장 점	<ul style="list-style-type: none"> 지질적용범위가 넓고 단거리 굴진에 적합. 추진속도 빨라 공기 단축. 지반침하 영향 작음. 굴착토사가 배니관을 통하여 유체수송이 되기 때문에 터널내부가 깨끗하고 작업공간 넓음. 	<ul style="list-style-type: none"> 장거리 굴진이 가능하며 암반대응에 매우 유리. 굴착토의 배토상태에 따라 지반의 상황을 판단하기가 용이 이수 또는 이수제작설비가 없어 작업구 부지가 작아도 됨 굴착토의 처리가 비교적 용이
	단 점	<ul style="list-style-type: none"> PLANT 설비를 위한 넓은 작업장이 필요하며, 운전관리비가 소요. 지중에 나무, 전석등이 많을 경우 굴착이 곤란. 이수의 처리비용이 비교적 고가 투수계수가 큰 사력층에서는 국부적인 붕괴가 발생함 	<ul style="list-style-type: none"> 이수식에 비해 터널내부가 깨끗하지 못하고 복잡하여 작업공간 협소(소구경 적용 곤란). 광차를 크레인으로 들어 올려 덤핑하는 관계로 이수식에 비해 버력처리 시간이 많이 소요. 지하수 출현시 대처능력 저하 버력처리시 오탍수 설비 필요

SEMI-SHIELD 설계에 있어 일반적으로 매설환경조건조사, 중·평선형검토, 하중산정, 추진관의 안정성 검토, 터널안정성 검토 순으로 이루어지며, 주 설계사항은 추진관의 안정성 검토에 해당된다.

추진관의 검토는 연직하중(토압하중, 활하중)과 추진 JACK에 의한 추진방향하중(추진력)에 의해 결정되어지는데, 관의 추진력에 대응하는 내압력에 대한 검토가 설계의 요점이 된다.

외압강도의 산정은 상재활하중, 상재토압 및 수압, 횡방향 토압 및 수압, 관의 자중, 양압력등을 고려하여야 한다. 이 강도가 정해지면 추진관의 내하력에 대한 안정성을 검토한다. 또한, 축방향 하중에 대한 검토로 추진력, 초기저항력, 관외주면에 발생하는 저항력, 관의 허용내압하중을 고려하여야 한다.

추진력이 산정되면 반력벽의 설계가 이루어지며, 시공방법에 있어 토질조건에 따른 지반개량 유무, SHIELD기의 형식, 거리, 수직구 간격, 선형을 계획한다. 원압추진 및 중압추진단계에서는 추진관의 규격강도, 관체의 구조계산, 지압벽의 내력을 검토한다.

SEMI-SHIELD공법의 설계상의 문제점은 다음과 같다.

(1) 토압 및 수압 산정의 문제

터널의 심도가 깊을 경우 전토압으로 추진관의 내하력을 검토할 경우 추진관의 내하력 부족으로 기성 추진관의 사용이 불가능한 경우가 발생한다. 또한 지하수 아래에서도 같은 결과가 도출된다. 실제 설계에서는 이러한 문제로 인해 Terzaghi의 이완토압을 적용하는 경우가 많다. 따라서, 상재하중 산정에 대한 명확한 기준이 필요하다.

(2) 추진관의 내하력 검토

터널 곡선부 노선의 추진관 내하력 검토시 터널노선의 곡선반경에 따라 편심을 적용하여야 하나 관과

관의 접촉면적의 산정이 명확하지 않아 실제 설계에서는 추진관을 직선으로 간주하고 추진관의 전단면이 추진압을 부담하는 것으로 설계하고 있으나, 실제로 곡선부에서는 추진관의 압축응력의 부족으로 관 파손의 원인이 된다. 따라서, 터널노선의 곡선 반경에 따른 추진관의 접촉면적의 산정기준이 마련되어야 한다.

(3) 곡선부에서의 차수문제

현재 추진관의 차수체계는 이중차수체계로 되어 있다. 1차 차수는 추진관 외면과 칼라 사이에 고무 씰링재를 설치하여 차수를 하고 있으며, 2차 차수는 추진관 접촉면에 수팽창 팽창지수재를 사용하여 차수를 하고 있다. 그러나 반복되는 추진압에 의해 고무 씰링재의 마모가 발생하며, 곡선반경이 작은 곡선부에서의 2차차수재는 팽창으로 터널내부로 압출되는 경우가 발생한다. 따라서 이에 대한 대책이 요구된다.

(4) 이수사용시 버력의 폐기물 처리 문제

현재 폐기물관리법에는 이수에 벤토나이트를 사용할 경우 터널 굴착시 발생하는 버력에 대해 폐기물 처리를 하도록 규정되어 있다. 벤토나이트는 인공처리되는 되어 있으나 점토광물의 일종으로 이를 제거시 사토처리가 가능하도록 하는 기술적 재해석이 요구된다.

(5) 장비선정의 문제

현재 설계시 장비선정에 있어 크게 이수가압식과 토압식의 적용성을 분석하여 굴착장비 선정을 완료한 후 이에 해당하는 국내보유장비의 굴착장비 및 부대설비의 가격에 의해 최저가 순으로 장비를 선정하고 있다. 이는 지층조건, 장비의 특성 등을 고려하기 힘들어 적절한 장비투입이 되지 않는 실정이다. SHIELD TBM의 경우 각각의 공사에 따라 새로운 장비를 발주하지만 SEMI-SHIELD의 경우 장비를 재활용함으로써 발생하는 문제로 실제 공사시 노후장비의 트러블이 발생하는 경우가 빈번하다. 따라서, SHIELD장비의 손료의 현실화와 내구년한 또는 굴착 거리에 따라 사용을 제한하는 조치가 필요할 것으로 사료된다.

(6) 품셈

SEMI-SHIELD공법은 많은 공사실적을 가지고 있고, 향후에도 그 사용은 증가할 것으로 예상되지만, 건설표준품셈 등에는 SEMI-SHIELD공이 적용되지 않아 설계 및 시공시 단가적용 등의 어려움이 있다.

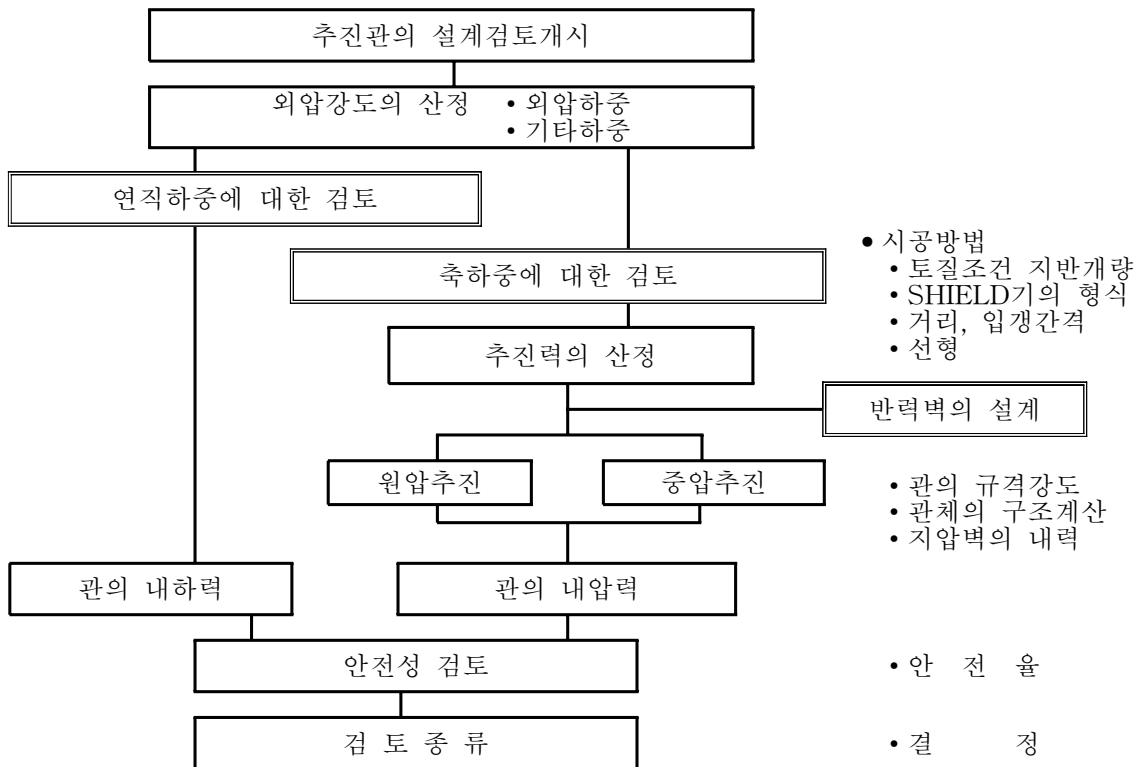


그림 2. 추진관의 설계 흐름도

2.3 SEMI-SHIELD 공법의 시공

SEMI-SHIELD 공법의 시공은 수직구 공사, 반력벽 설치, 발진갱구부 공사, 원압잭 설치, SEMI-SHIELD 설치, 초기굴진, 본굴진, 굴진기 반출 순으로 이루어지며, 공종은 대부분 단순하며 굴진하는 공정이 반복되는 특징이 있다.

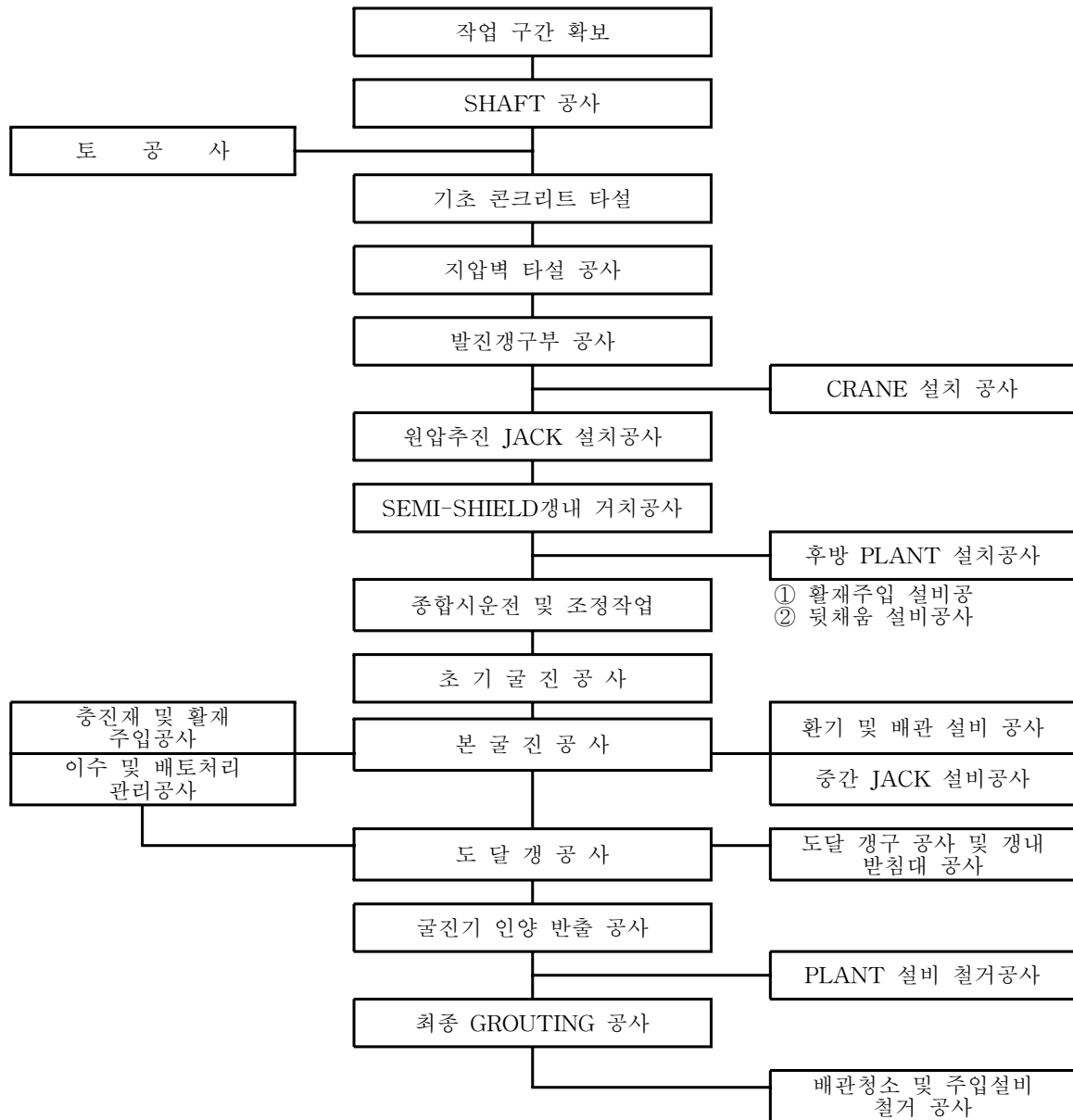


그림 3. SEMI-SHIELD 공법의 시공순서도

(1) Jamming 현상

SEMI-SHIELD공법 설계시 토질정수 산정에 있어 사질토 또는 점성토로 구분하여 내부마찰각적용 또는 점착력 적용의 경우로 설계되고 있으며, 내부마찰각과 점착력의 동시 적용은 거의 이루어 지지 않고 있다. 실제 터널노선 및 종단설계에 있어 풍화토 또는 풍화암, 연암, 경암 등 단일지층을 통과하는 경우가 있고 복합적으로 통과하는 경우가 많다. 풍화토 또는 풍화암을 통과할 경우 굴착대상토질은 내부마찰각, 점착력을 모두 고려하여야 하지만 지반 분류상 사질토로 분류되어 내부마찰각만 적용하는 경우가

많다. 이러한 경우 관과 대상토질의 마찰력 증대로 인해 설계 추진력으로 추진관 추진이 안될 경우가 발생한다.

(2) 관 파손

Jamming현상 발생시 과도한 추진력으로 추진을 시도할 경우 과다 추진력 발생으로 추진관의 허용압축강도를 초과하여 관 파손의 원인이 되며 심할 경우 추진관을 보강하여야 하므로 공기 증가 및 공사비 상승의 요인이 된다.

(3) 막장면 붕괴

이수가압식 쉴드에서는 공극이 큰 자갈층 또는 전석층에서 이수 농도를 크게 하여도 이수가 이탈하는 현상이 발생하며 이는 이수관리를 철저히 하더라도 문제가 될 수 있다. 또한 토압식 쉴드에서 굴착대상 지반이 사질토 또는 사력층일 경우 막장 자립이 불가하여 굴진과 동시에 상부의 토사가 굴진면으로 유입되어 막장면 상부에 공동 발생의 우려가 있다.

(4) 누수로 인한 하자발생

SEMI-SHIELD 공법은 세그먼트를 설치하는 SHIELD TBM 공법과 달리 추진관을 추진하는 공법으로 추진관 사이는 고무 실링제, 수팽창 지수재를 통해 누수문제를 해결하고 있으나 곡선부 시공 또는 추진력을 재하-제하에 따라 추진관과 칼라 사이에 마찰이 발생하므로 고무 실링제의 파손, 수팽창 지수재의 이탈로 시공중 작업환경이 좋지 않으며 향후 방수처리에도 문제가 돼 하자 발생의 원인이 되며 유지관리비가 증가된다.

3. SEMI-SHIELD 시공 트러블 사례

3.1 터널구간 과업개요

본 현장은 인근택지 개발지구 일원의 전력 공급능력 확충과 전력 부족난을 해소하기 위하여 지중 송전계통 구성을 위한 전력구 공사이다. SEMI-SHIELD 터널은 수직구 #2에서 수직구 #1방향으로 굴착되었으며 전체 연장 634m 구간 중 210m 지점에서 굴진이 중단된 상태이다. 또한, 공사가 중단된 현장의 곡률반경은 R=300으로 단층점토 및 각력구간을 굴진하던 중에 굴착 추진력 과다상승이 발생하였다. 굴진 중단구간은 굴착 표면부는 반복하중으로 점토화 되어 추진관과 밀착된 상태로 마찰력을 증대시키는 요인으로 작용하고 있다.

3.2 추진력 과다 상승 원인

○○분기 전력구 공사의 SEMI-SHIELD 터널 굴착 중 발생한 추진력 과다 상승에 대한 원인은 다음과 같이 정리할 수 있다.

표 2. 터널구간 개요

적용공법	소요 단면 (내경)	터널구간	
SEMI-SHIELD 공법 (이수가압식)	φ2,400	L = 575.83m	
		풍화암층	연암층
		293.0m	282.83m
	추진관	232EA	
	중압관	6단	

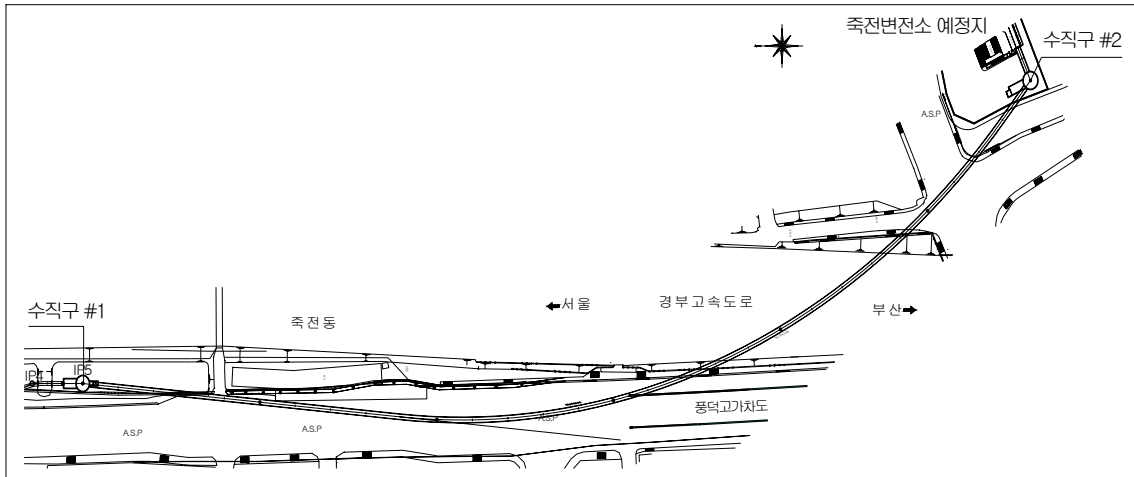


그림 4. 터널구간 노선현황

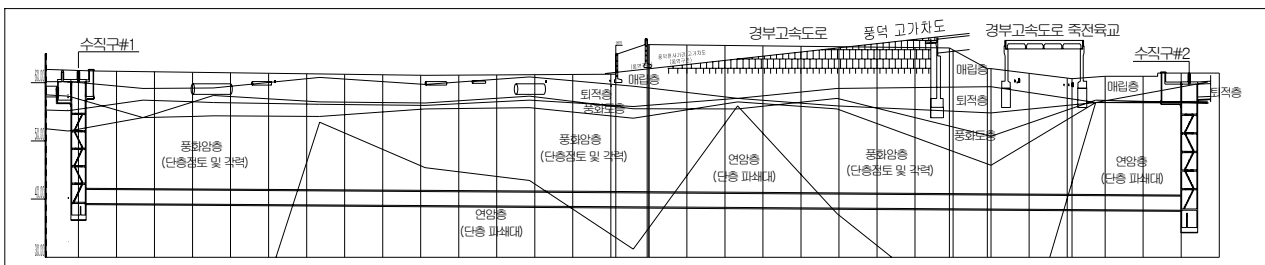


그림 5. 터널구간 종단면도

- 노선이 신갈단층을 통과하는 과정에서 지층이 단층점토와 각력층으로 구성된 풍화암층과 파쇄가 심한 연암층이다.
- 추진력 측정결과와 터널 해석결과, 추진관에 작용되는 마찰력은 2tonf/m^2 이상으로 설계시 1.2tonf/m^2 보다 크게 나타났는데 이것은 설계시 점착력의 과소평가와 신갈단층에 의한 지반특성에 따른 차이로 판단된다. 단층작용으로 생성된 압쇄암의 영향으로 굴착시 점토성분이 급증하여 마찰력을 증가시켰으며 굴착시 발생된 다량의 미세이자로 구성된 슬라임이 시간경과에 따른 함수비 감소, 추진관과 굴착면과의 압착마찰에 의해 함수비의 감소로 굳은 케이크를 형성시켜 추진관의 마찰력 증가에 따른 추진력이 과다하게 발생된 것으로 추정된다.
- 과업구간에 발달되어 있는 절리의 방향이 터널굴착 방향과 예각으로 존재하고 터널굴착에 의해 발생된 이완영역 내부 암괴들의 Wedge작용도 마찰력 증가요소로 추정된다.

3.3 대책 방안

이상과 같은 원인으로 추진이 불가한 것으로 판단되어 대책을 검토한 결과 다음과 같다.

- 추진기 위치의 지상에 있는 지장물은 경부고속도로, 지방도 23호선, 고가차도가 위치하고 있어 지상 개착조건이 곤란한 상황이다.
- 국내에서 시공한 기계화 굴착시 공사가 중단된 사례들을 분석한 결과 주로 지반조건에 의해 발생되었으며 지상부에서 개착에 의한 장비반출 또는 NATM 터널을 굴착하여 지하에서 장비를 반출하는 방법이 적용되었다.
- 본 구간에 적용된 이수가압식 SEMI-SHIELD는 마찰력이 과다하게 작용되어 터널굴착이 곤란하므로 부지의 여유가 있는 인접지에 추가의 수직구(#3)를 계획하고 NATM 공법에 의한 역 굴착을 실시하고 지하에서 SEMI-SHIELD기를 반출하는 방법이 적절한 것으로 판단된다.

- 수직구 #3에서 수직구 #2 방향으로 NATM 터널을 굴착하는 동시에 수직구 #1에서 별도의 SEMI-SHIELD기를 투입하여 굴착하면 굴착공기가 단축될 것으로 판단된다.
- 수직구 #1에서 굴착진행시 지반상태가 추진력이 과다하게 상승된 현재의 굴착구간과 유사하기 때문에 실측 및 터널해석에 의한 마찰력을 참조하여 중압재 설치위치를 조정해야 할 것이다. 또한, 굴착중 추진관에 작용되는 마찰력을 감소시키기 위하여 굴착직경의 확대, 추진관 하부에 잔류하는 미세석분을 감소시키는 방안이 필요하다.

4. 결론

SEMI-SHIELD 공법의 설계 및 시공상의 문제점에 대하여 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) SEMI-SHIELD 공법의 적용은 향후 계속적으로 증가할 것으로 예상되나 설계시 토압 및 수압 산정, 추진관의 내하력 검토, 곡선부에서의 차수, 이수사용시 버력의 폐기물 처리, 장비선정, 폼셈 적용에 대한 문제가 있어 이에 대한 세부적인 설계기준 및 시방서가 작성되어야 한다.

(2) 시공상 문제는 설계와 시공시 지반조건의 차이에서 기인하는 경우가 대부분이며, jamming 현상, 관 파손, 막장면 붕괴, 누수로 인한 하자발생이 대표적이다. SEMI-SHIELD 장비는 대부분이 재활용되는 실정을 감안할 때 장비 도입시 probe grouting 장치, overcutting disk 장착, 자동측량장치, 자동활재 주입장치 등의 설비를 장착할 수 있는 장비를 도입하는 것이 향후 활용성이 증대될 것으로 판단된다.

(3) SEMI-SHIELD 공법은 후방에서 추진관을 추진하여 터널을 형성하는 공법으로 지중에서 문제발생시 대처할 수 있는 방법이 많지 않다. 설계 및 시공시 예상 문제점을 파악하고 이를 극복할 수 있는 적극적인 대처가 필요하다.

참고문헌

1. KT건설사업단(2004), 이수가압식(泥水加壓式) 마이크로 실드공사의 적산기준
2. 과학기술(1998), 추진공법의 조사-설계에서 시공까지
3. 한국전력공사(2007), 電力溝 標準設計書
4. 한국지반공학회(2006), 기계식 터널 굴착 추진력 과다상승 원인 및 대책연구
5. 한국터널공학회(2008), 터널기계화시공 설계편
6. 土木工法研究會(1990), 쉘드工法의 實際
7. 유니콘協會(平成九年度), 泥水加壓推進工法 積算資料
8. 日本下水道協會, 下水道用 設計積算要領 - 管路施設(シールド)編
9. 社團法人 日本下水道協會(1996), 推進工法 應用編(長距離, 曲線推進)