

사질토 지반에서의 EPB Shield 굴진 EPB Shield Tunneling in Sand

구본호¹⁾, Bon-Hyo Gu, 박이태²⁾ E-Tae Park

¹⁾ 삼성물산 건설부문 토목ENG실 과장,

Senior Engineer, Civil Engineering Division,
Engineering & Construction Group, Samsung

²⁾ 삼성물산 건설부문 녹산전력구 현장 소장,

PM, Nogsan Power Cable Project,
Engineering & Construction Group, Samsung

개요(SYNOPSIS)

Shield method which has being widely used as urban tunneling method recently, is often applied in the excavation projects with very closed to surrounding structures. Therefore, it is necessary to reduce as possibly as the ground movement caused by shield advancing. For this reasons, the relation between the deformation of ground and constructing procedures is investigated by the monitoring system.

The result of this study, the method to reduce the settlement caused by tunneling with earth-pressure-balanced shield in sand are as follows. 1) Martos equation with construction factor 0.2~0.3 should be helpful to the designers in estimating ground movements. 2) Chamber pressure which is higher than the rest soil pressure is effective to repress ground movements. 3) Simultaneous backfill grouting with 130% volume of the tail void and backfill pressure which is higher than rest soil pressure are effective. 4) Automatic monitoring system is necessary to get the ground movements on real time. 5) As an excavating procedure by the above investigation result, the settlement of ground surface can be controlled within 10~20mm.

주요어(Key Words) Shield Tunnel, EPB, 굴진관리, 자동계측, 지반침하

1. 개요

Shield 공법에 의한 터널의 굴착은 터널노선 주변에 구조물과 지하매설물 등의 지장물이 많은 도심지에서 주로 적용되며, 공법의 특성상 연약지반에서의 터널 굴착시 자주 사용되고 있다. Shield 공법이 터널 굴착 공법 중에서 가장 지반변위를 억제할 수 있는 공법이지만 지반조건과 시공방법에 따라서 상당한 변위를 수반할 수 있다. 특히 도심지에서는 주요 구조물과 인접하여 시공되는 경우가 많으므로 터널굴착에 따라서 인근구조물에 미치는 영향을 최소화 하기 위해서는 정확한 시공기준의 설정과 엄격한 시공관리가 반드시 필요하게 된다. 따라서 일반적으로 Shield 공법에서는 초기굴진시에 대표계측을 실시하여 지반변위를 가장 억제할 수 있는 막장(Chamber)토압, 배면주입(Backfill)압 및 주입량, 배토량 등을 설정하게 된다.

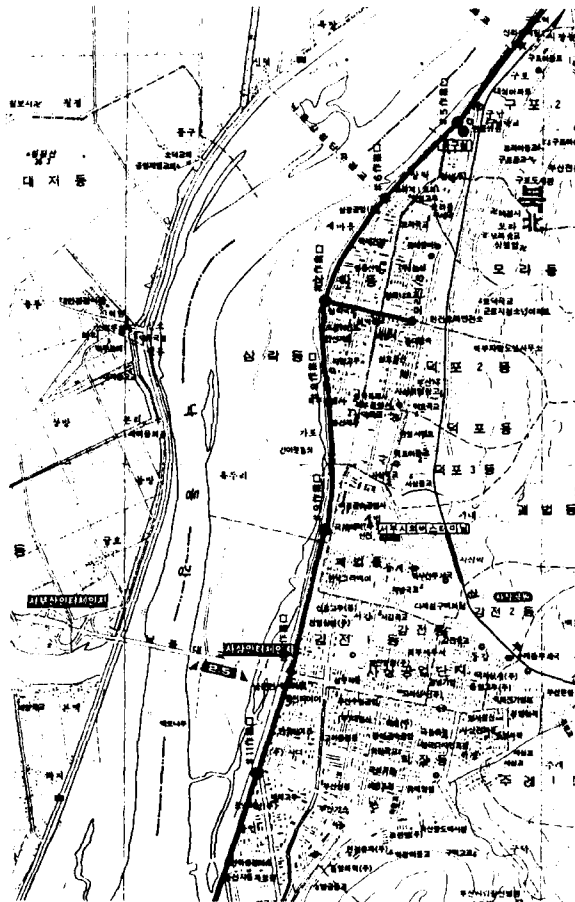
본 논문은 사질토 지반에서 EPB Shield 공법을 적용하는 경우 계측을 통하여 Shield 터널 굴진에 따른 지반의 거동을 분석하였으며, Shield의 굴진 Pattern을 설정하기 위한 자동화 계측의 타당성을 분석 하였다. 또한 계측 결과의 분석을 통하여 막장토압, 배면주입압 및 주입량 등 적절한 Shield 기계의 시공관리 기준을 설정코자 하였다.

2. 터널 및 공법의 개요

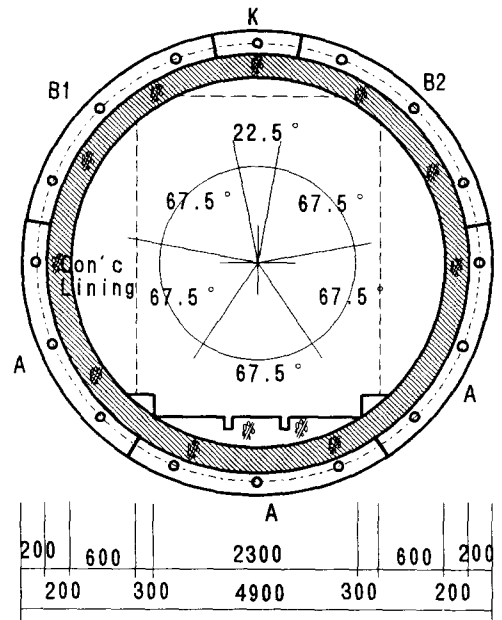
2.1 터널의 개요

본 연구에 적용된 현장은 부산시 전력 Cable 지중화 사업의 일환으로 한국전력에서 수행하는 전력 구 건설사업으로 낙동강의 동측 제방에 인접하여 만들어지는 전력구 터널 이다. 그 중에서 구포대교에서 감전충전소에 이르는 약 7Km의 구간에는 Shield 공법으로 터널이 만들어진다. 7Km에 이르는 Shield 터널 구간에는 7개의 작업구가 만들어지며 각 작업구간의 연장은 그림 2.1과 같다. 터널의 노선은 낙동강 우측의 도로하부에 위치하게 되며, 작업구는 낙동강 우측제방의 가장자리에 만들어진다. 터널은 지표아래 13-15m의 심도에 위치하게 되므로 토피는 11-13m이며, 굴착대상 지반은 실트질 점토 및 실트질 세사층 이다.

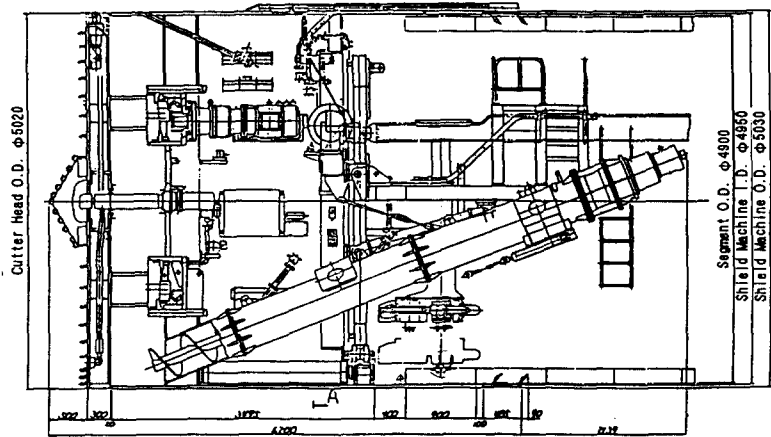
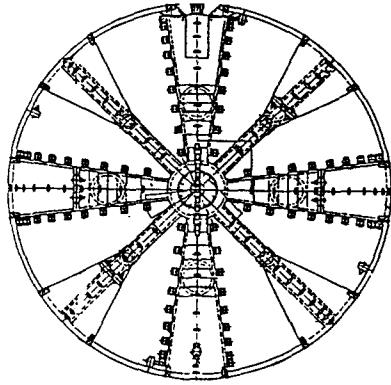
본 시공에서 적용한 Shield 공법의 형식은 토압식(Earth Pressure Balance Type)이며 Chamber내의 유동화 촉진 및 막장토압 유지를 위해서 막장주입재로 Bentonite Mud가 사용되었다. Segment 배면의 Backfill 주입은 동시주입 시스템을 사용하여 굴진과 동시에 충전이 이루어 지도록 하였다. 본 터널에 사용하는 Segment는 외경 4.9m의 콘크리트 Segment로 두께 20cm, 폭 90cm이며, 6개의 Piece(3A+2B+1K)로 분할되어 있으며, 사용한 Shield 기계의 주요 구조 및 사양은 그림 2.3과 같다.



< 그림 2.1 > 전력구 터널의 노선(Shield 터널구간)



< 그림 2.2 > 터널의 단면도(345KV 터널)

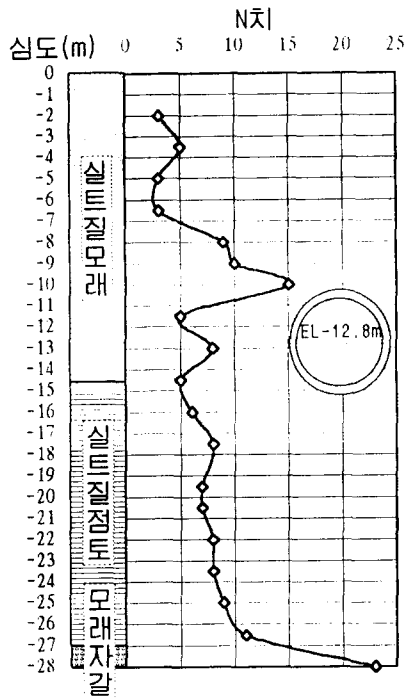


<p>Shield Machine Diameter:5030 mm Machine Length:6200 mm Thickness of Skinplate:Front 40 mm, Rear 40 mm Advance Speed:Normal 3 cm/min, 0-6.8 cm/min</p>	<p>Segment Erector Type:Hydraulically Driven Swivel Ring Type Angle, Speed:200° Each to Left and Right, 0-1 rpm Lifting Range,Sliding Range:0-550 mm,0-500 mm Expanding Force,Lifting Force:137 kN * 93 kN (14 t X 9.5 t)</p>
<p>Cutter Head Type:Closed Type Torque:Max 3883 kN.m (396 t.m) α=3.1 Revolution:Max 1.2 rpm Rotating Direction:Reversible LH/RH Opening Ratio:52 %</p>	<p>Screw Conveyor Tube Dia * Length:558.8 mm * 5500 mm Screw Dia * Pitch:515 mm * 500 mm Torque:Max 3.05 t.m, Normal 2.56 t.m Revolution:0-15 rpm Capacity:Max 85 m³/h (α=100 %)</p>
<p>Cylinder Shield Jack:150t * 235φ * 1350st * 350kg/cm²(18) Segment Erector Pressing Jack:7t * 80φ * 550st * 140kg/cm²(2) Segment Erector Gripping Jack:1.7t * 40φ * 100st * 140kg/cm²(2) Mixing Bar Jack:9t * 90φ * 400st * 140kg/cm²(1)</p>	<p>Copy Cutter Jack:12t * 105φ * 110st * 140kg/cm²(18) Segment Erector Sliding Jack:2.7t * 50φ * 500st * 140kg/cm²(1) Gate Jack:7t * 80φ * 500st * 140kg/cm²(2) Back Filling Jack:3.5t * 80φ * 100st * 70kg/cm²(3)</p>
<p>Motor Cutter Head Electric Motor:2.52t.m * 30kw * 4P * 440V * 60 Hz(11) Segment Erector Hydraulic Motor:0.45t.m * 210 Kg/cm²(2) Screw Conveyor Hydraulic Motor:2.55t.m * 210 Kg/cm²(1)</p>	<p>Power Unit Shield Propel:53 ℓ/min (37 kw * 4P) Screw Conveyor Revolution:135 ℓ/min (55 kw * 4P) Segment Erector Revolution:37.5 ℓ/min (18.5 kw * 4P)</p>

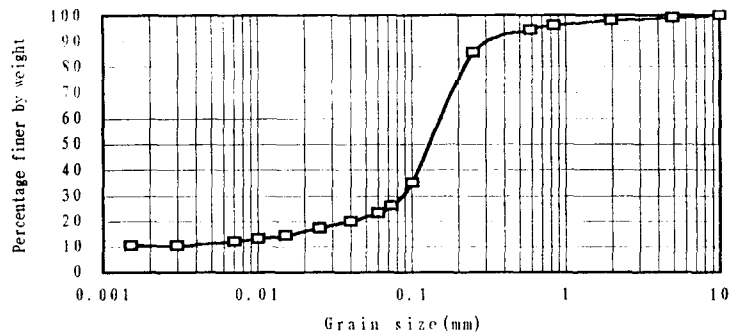
< 그림 2.3 > 니토압식 Shield 기계 (5030mm)

2.2 지반조건

본 터널이 만들어지는 지반은 화강암의 기반암을 부정합으로 피복하고 있는 충적층으로, 이 충적층은 낙동강 상류에서 운반되어 퇴적된 것으로 두께는 24-60m 이며 자갈, 모래 및 실트로 구성되어 있다. Shield 터널이 통과하게 되는 토층은 실트 및 점토분이 상당수 포함되어 있는 세사층이 주를 이루고 있으므로 굴착대상층은 N치 10 미만의 실트 및 세사층을 주로 굴진하게 된다. 지반침하 예측이 이루어진 지점에서의 지질주상도, N치, 입도분포 및 지반의 물성치는 그림 2.4와 같다. 심도 7.4~7.6m에서 채취한 시료는 함수비 31%의 실트가 함유된 세사로 통일분류법 상으로는 SC-SM으로 분류되고, N치가 3-10 정도 이므로 대단히 느슨한 상태로 판단된다. GL-14.5m 보다 깊은 부분에는 CL-CH의 점성토층이며 지하수위는 GL-1.4m의 위치에 있다.



Depth: -7.4 ~ -7.8m
 $G_s = 2.64$ $E = 630 \text{ t/m}^2$
 $e_o = 0.841$ $v = 0.25$
 $\gamma_t = 1.88 \text{ t/m}^3$
 $W_n = 31.1\%$
 $C = 0.33 \text{ Kg/cm}^2(\text{CU})$
 $\phi = 32^\circ$
 $k = (2.6 \sim 3.6) \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$



< 그림 2.4 > 토질 주상도 및 물성치

3. 니토압식 Shield 공법과 시공관리 데이터

3.1 니토압식 Shield 공법

니토압식 Shield는 Cutter Face 뒷부분에 격벽을 설치하여, Cutter로 굴착한 토사에 니토화재(Bentonite Mud 등)를 주입 교반하여 굴착토사를 불투수성과 소성유동성을 갖는 니토로 변환하여 Chamber내에 채운다. 이 상태를 유지하며 Shield Jack의 추진력에 의해 Chamber내의 니토에 니토압을 발생시켜 막장의 토압과 지하수압에 대항하고 Shield기의 굴진량과 배토량의 균형을 유지하면서 굴진한다. 즉 Shield기가 굴진할때 Chamber내에 설치된 토압계로 니토압을 항상 측정하여 토압의 균형을 유지하도록 Shield Jack 속도, Screw Conveyor의 회전수를 조절하여 막장을 안정시키면 원지반의 변화를 최소한으로 억제하는 것이 가능하다. 또 원지반의 지하수는 니토의 불투수성과 Screw Conveyor의 토류작용에 의해 용수의 유출방지가 가능하다.

이상에서 언급한 니토상태는 흙입자의 구성을 파괴하기 위하여 막대한 외력을 필요로 하지 않는 굴착토사의 상태를 말하는 것으로, 굴착토사가 니토상태로 되기 위해서는 굴착토사중 미세립자의 함유량이 큰 요소로 작용한다. 점성토질은 미세립자의 함유량이 많고 변형파괴가 용이하기 때문에 교반하는 것만으로 니토상태가 되는 경우가 많고, 모래 및 자갈의 경우에는 미세립자의 함유량에 따라 성질이 크게 다르고 니토 상태로 되기 위해서는 필요한 미세립자분을 니토화재로 보급하여 굴착토사가 불투수성과 소성 유동성을 갖게 하는 것이다.

3.2 배면주입 및 막장주입

일반적으로 배면주입에 사용하는 Gel Time은 30초를 기준으로 하여 30초 이상의 것을 완결고결형, 30초 이내의 것을 순결고결형이라 한다. 배면주입은 Tail Void의 충진을 목적으로 하기 때문에 지반내 주입에 비해서 일반적으로 빠른 Gel Time의 것을 사용하게 된다. 배면주입재의 Gel화 시간이 길면 주입범위를 일정한 범위로 한정시키는 것이 어렵고, 주입재가 막장으로 돌아나오거나 Tail Void 이외의 부분으로 확산되며, 지하수에 희석되어 재료분리가 생기게 된다. 따라서 지반조건에 따라서 굴착면의 자립시간이 짧은 사질토 지반의 경우에는 지반주입의 개념을 일부 도입하여야 할 것으로 생각되

나, 동시주입으로 Backfill을 하는 경우 Tail Void 굴착면의 붕괴 이전에 배면주입이 되는 것을 전제로 하여 Gel Time을 선정하여도 좋다.

본 현장 345KV구간의 굴착대상 지반은 실트 및 모래층으로 구성되어 있으므로 일부 모래지반에서는 주입되기 전까지 Tail Void 굴착면의 유지가 어려울 것으로 예상되나 동시주입을 하므로 짧은 Gel Time의 재료를 사용한다. 주입재는 물유리계의 2액성 주입재를 사용하므로 A액 및 B액이 혼합되어 Tail Void로 배출될때 까지의 시간을 기준으로 하여 10-15초의 Gel Time을 선정하였다.

지반과 터널의 안정을 위하여서는 배면주입재는 Gel화 후 즉시 높은 강도가 얻어지는 것이 가장 바람직하나 주입재료 및 주입방식의 특성상 Gel화 후 즉시 큰 강도가 얻어질 수 없다. 따라서 배면주입이 완료되고 그다음 Ring의 배면주입이 시작되기 전까지의 시간을 강도설정의 기준시간으로 보는 것이 가장 바람직하며, 강도의 크기는 원지반의 강도 이상으로 하는 것이 좋다. 그러나 초기강도가 너무 큰 경우에는 반대로 Gel화 된 주입재의 유동성이 적어서 Tail Void내의 충전성이 나빠지므로 주의하여야 한다. 본 현장 345KV 구간에서는 주입 완료후 다음 Ring 주입시까지의 평균시간인 2시간을 강도발현의 기준시간으로 하며, 이때의 일축압축강도는 0.8-1.4 kgf/cm²가 나올 수 있도록 하였다.

이상과 같은 조건을 만족시키는 배합을 구하기 위해서 표3.1과 같이 여러 가지의 배합에 대한 배합시험을 실시하였다. 배합은 Gel화 직후의 상태, Gel Time, 2시간 후의 일축압축강도를 기준으로 결정코자 하였다. 시멘트는 조강 시멘트를 사용하는 것이 Gel화 직후의 상태가 점토와 비슷한 상태가 되며 Gel화 직후의 강도가 크지 않으므로 주입관이 막히는 현상이 적을 것으로 판단되었다. 또한 조강시멘트는 물과 반응하는 속도가 빠르므로 반드시 지연효과가 있는 안정제를 시멘트량의 0.5% 사용하는 것으로 하였다. Gel Time은 규산소다의 량을 적게 사용하는 것이 좋으나 규산소다의 량이 적을 수록 강도가 떨어지므로 적절한 량을 선정한다. Bentonite는 토목용을 사용하며 조강 시멘트를 사용하는 경우에는 시멘트의 분말도가 크므로 Bentonite를 다소 줄여줄 수 있다.

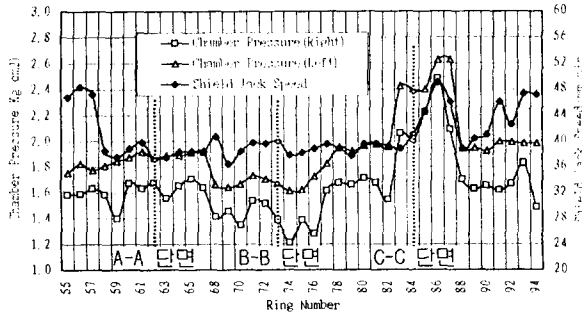
이와 같은 실험 결과로 부터 본 현장에서는 A액으로는 Portland 시멘트 300Kg, Bentonite 80Kg, 지연제 1.5 Liter, 물 779 Liter를, B액으로는 규산소다 91 Liter를 사용하는 것으로 하였다.

< 표 3.1 > Backfill의 배합시험

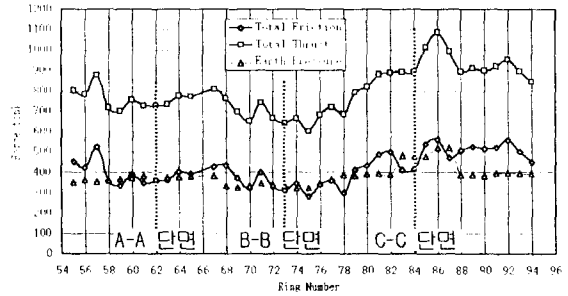
A 액				B 액		Gel Time (Sec)	일축압축강도 (Kg/cm ²)	
시멘트 (Kg)	벤토나이트 (Kg)	지연제 (Liter)	물 (Liter)	규산소다 (Liter)	물 (Liter)		1시간	2시간
Portland, 115	토목용, 25	-	453	KS3호, 250	250	110	0.26	0.31
Portland, 230	토목용, 80	1.15	801	KS3호, 91	-	27	0.46	1.58
Portland, 300	토목용, 80	1.5	779	KS3호, 91	-	15	0.52	2.42
Portland, 300	토목용, 80	1.5	719	KS3호, 150	-	30	0.66	3.34
Portland, 350	토목용, 80	1.75	765	KS3호, 91	-	10	1.25	2.68
Portland, 350	토목용, 80	1.75	756	KS3호, 100	-	12	1.67	3.43
Portland, 400	토목용, 80	2.0	757	KS3호, 100	-	14	1.14	3.92
조강, 300	토목용, 60	1.5	787	KS3호, 91	-	14	0.13	0.35
조강, 300	토목용, 60	1.5	778	KS3호, 100	-	10	0.36	1.54
조강, 400	토목용, 60	2.0	706	KS3호, 140	-	12	1.23	1.84
비중 3.14	비중 2.4	비중 1.35	비중 1.0	비중 1.4	-	-	-	-

3.3 터널 굴진기록

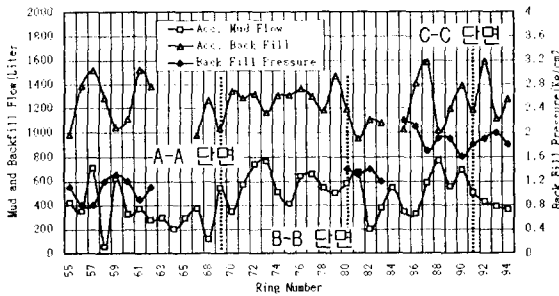
Shield 공법에서 지반변위에 가장 크게 영향을 미치는 요소는 굴진속도와 Chamber내 토압 및 배면 주입량과 주입압 이므로 본 절에서는 계측이 이루어지는 구간에서 터널 굴진시의 시공기록을 Ring별로 정리하였다. 각 Ring별 Chamber내 토압, 총추진력 및 마찰력, 배면주입량 및 배면주입압은 그림 3.1, 그림 3.2 및 그림 3.3과 같으며 각 계측단면별 굴진 상태는 표 3.2와 같다.



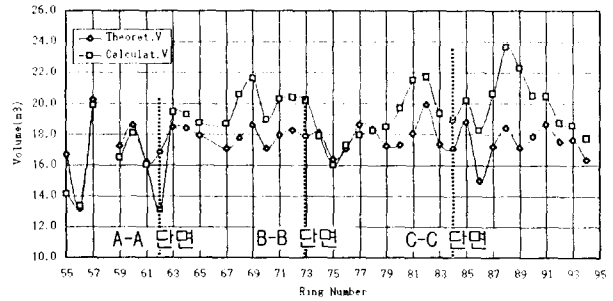
<그림 3.1> Chamber에 걸리는 토압



<그림 3.2> 총추진력 및 마찰력



<그림 3.3> 배면주입압 및 주입량



<그림 3.4> Ring별 굴착량

< 표 3.2 > 각 계측단면에서의 굴진기록

항목	A-A단면 (67 Ring)	B-B단면 (78 Ring)	C-C단면 (89 Ring)	비고
Chamber 토압(Kgf/cm ²)	1.6~1.9	1.4~1.7	2.0~2.4	-5 Ring
굴진속도(mm/min)	38~40	38~40	40~44	-5 Ring
총추진력(Ton)	720~750	640~660	900~1000	-5 Ring
배면주입압(Kgf/cm ²)	?	1.4	1.8	+2 Ring
배면주입량(Liter/Ring)	1100~1200 (108~118%)	1200 (118%)	1300 (128%)	+2 Ring
Mud 주입량(Liter/Ring)	300	750	550	-5 Ring
굴착토량(m ³ /Ring)	13	20.3	19	-5 Ring
비고	터널중심까지의 심도 = 12.8m, 토압계 까지의 심도 = 12.8 m 굴착단면적 = 19.9m ² 1 Ring의 체적 = 17.9m ³ Skin Plate 면적 = 85.3m ² 막장주입 Mud의 농도 = 30%			

4. 계측기의 설치와 계측

4.1 계측기의 종류와 설치

본 계측은 Shield 기계 운용 방식에 따른 지반거동을 파악하여 가장 지반변위를 일으키지 않는 굴진 Pattern을 결정하는 데 주 목적이 있으므로 10m 간격으로 시험 단면을 설정하여 시행오차법으로 굴진 Pattern을 변경시켜 가면서 지반변위를 계측하였다. 여기에서 적용한 자동화 계측장비의 사양 및 특성은 표 4.1과 같다. 지중의 침하는 최대 6개까지 설치 가능한 총별침하계를 사용하였으며, 총별침하계가 매설된 지표부에는 연통관식 침하계를 각각 1개씩 설치하였다. 터널상부 지반에는 간극수압계를 설치하여 터널 굴진에 따른 간극수압의 변화를 계측하였다. 각 계측센서의 위치관계는 그림 4.1과 같다. 전체의 계측 센서는 Strain Gauge식 변환기를 사용하여 데이터화 된다. 전체 계측구간의 센서수는 31개 이므로 50개 Channel의 전자식 Switch Box를 통하여 접점절환이 이루어 지도록 하였으며, Data Logger에서 변환되는 데이터는 즉각 컴퓨터의 Hard Disk에 저장되며 Monitor로 출력되도록 하였다.

< 표 4.1 > 자동화 계측장비의 사양 및 특성

구분	장비명	사양	특성
지표면침하	연통관식 침하계	DVP-100L	수압식, 정도 : 0.2mm
지중침하	총별침하계	PV-100-SG	측정가능변위량 : 100 mm
간극수압	간극수압계	BP-5KB	측정가능수압 : 5 Kg/cm ²
Switch Box		SSW-50C	전자식 접점절환
Data Logger		TDS-601A	Strain Gauge 식

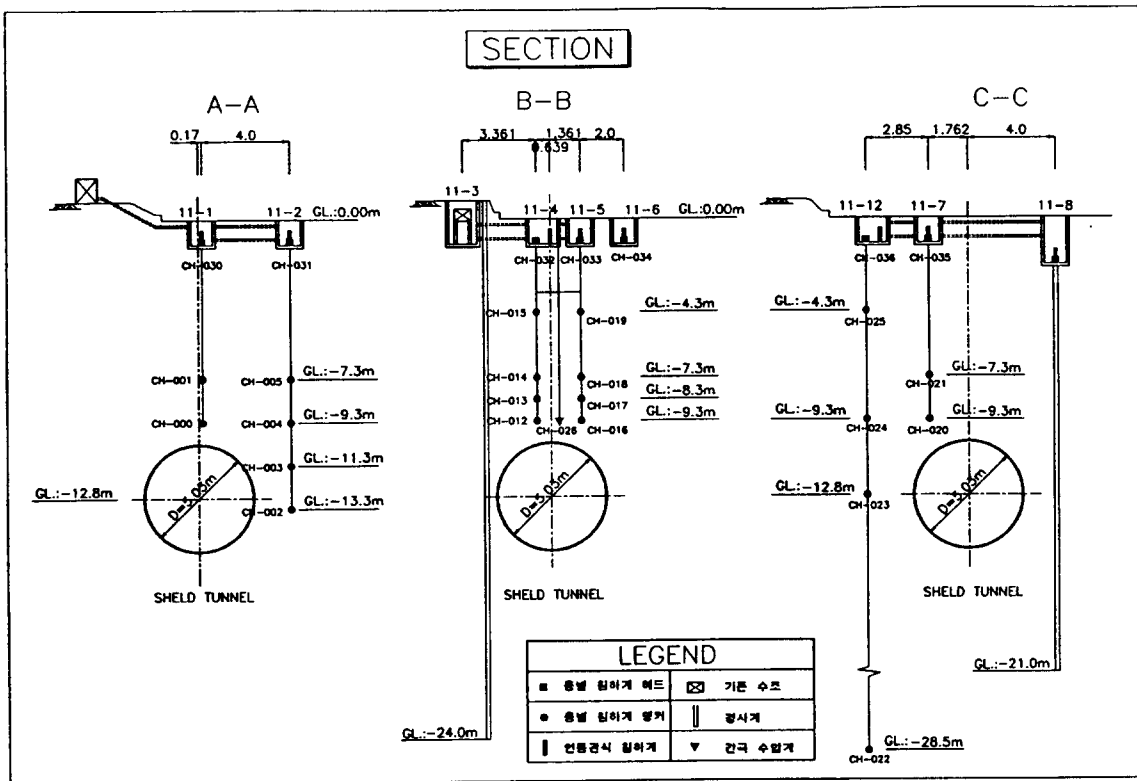
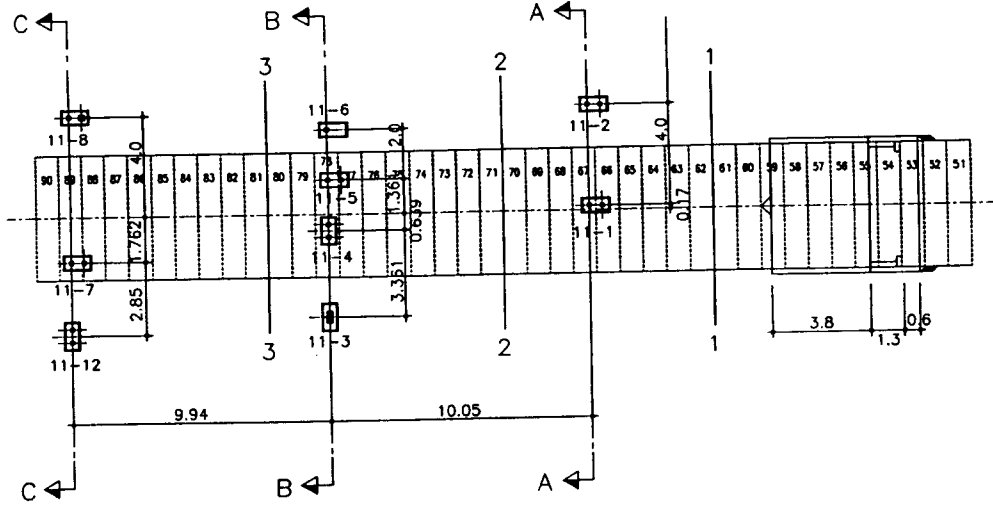
4.2 계측결과의 분석

Shield 터널의 굴진시 일어나는 지반침하의 원인은 적용하는 Shield 기계의 형태와 지반의 종류에 따라서 달라지나 일반적으로 아래와 같은 원인을 들 수 있다.

- ① 굴착으로 인해서 터널 막장에서 응력이 해방되며 이로 인하여 지반의 변형이 생겨서 침하가 나타난다.
- ② Shield 터널의 복공(Segment)과 지반사이에 생긴 공동(여굴과 Tail Void)으로 주변의 흙입자가 공동 내부로 떨어져서 지반이 이완되며 이것이 침하로 나타난다.
- ③ 터널의 복공인 Segment가 하중을 받아서 변형을 일으키게 되며 이로 인해서 침하가 일어난다.
- ④ 터널의 굴진에 따라서 지하수의 배출이 생기며 또한 지반에 전단 Strain이 발생하게 되므로 이로 인해서 지반의 침하가 발생된다.

이와 같은 굴착에 따른 침하를 억제시키기 위해서는 지반을 교란시키지 않도록 굴착을 하여야 하며 교란시킨 후에도 조기에 지반을 강화하는 것이 중요하다. 따라서 막장의 교란억제를 위한 적절한 막장토압의 유지, 빠른 배면주입의 시공(Tail Void의 충전), 주변지반의 이완억제를 위한 역약층의 약액주입 등의 관리로 지반변위를 억제할 수 있을 것이다. 그러나 실제 시공시에는 막장토압의 변동과 Shield 기계의 진행에 의해서 생기는 전단등에 의해서 막장의 주변에 미묘한 교란이 생기는 것은 막을 수 없다. 또한 일단 지반교란이 발생하면 주변지반으로 교란이 전달되어 지표 방향으로 확대되어 가며 토층에 따라서는 장기간에 걸쳐서 연속적으로 지표침하를 일으키게 된다. Shield 터널의 굴진시 이와같은 지표침하를 가장 억제할 수 있는 굴진 Pattern을 결정하여야 한다.

계측기 배치도 (#11번 작업구)

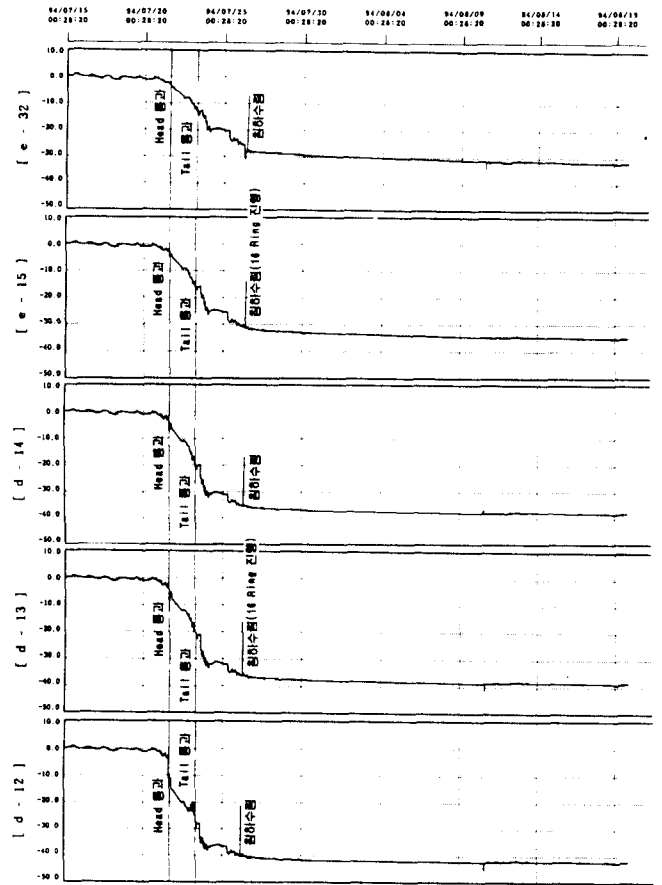


< 그림 4.1 > 계측기의 배치 및 심도

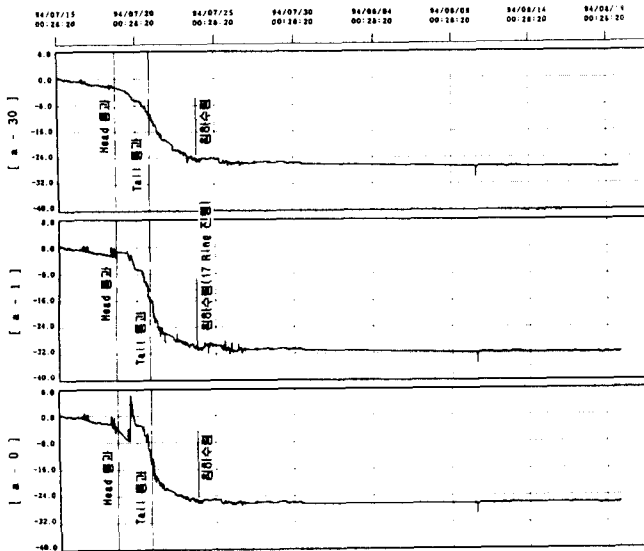
4.3.1 종방향 침하

시간경과에 따른 종방향의 침하는 각 축선별로 그림 4.2, 그림 4.3 및 그림 4.4와 같다. 그림에서 알수 있듯이 침하는 Shield Head가 계측위치에 접근하기 전에 발생하기 시작하여 Shield Tail이 계측선을 벗어나는 시점에서 침하곡선의 경사가 가장 급하며, Tail이 계측선을 벗어나서 3~4D(D:터널의 직경)정도 벗어난 시점에서는 거의 계측치가 수렴하고 있다. 굴진시 작용된 토압의 크기가 1.6 Kgf/cm² 이상인 A-A 축선 및 C-C 축선의 경우에는 Shield Head 접근시 터널 직상부에서 용기가 발생하였으며, 1.4~1.6 Kgf/cm²의 토압으로 굴진한 B-B 축선에서는 용기가 발생하지 않았다. 그러나 3개의 축선 모두 지표부까지는 Chamber압력이 미치지 않았다. 최종침하량은 Chamber 압력의 크기에 관계없이 심도가 깊어질수록 크고 지표면에서는 가장 값을 보여주고 있다.

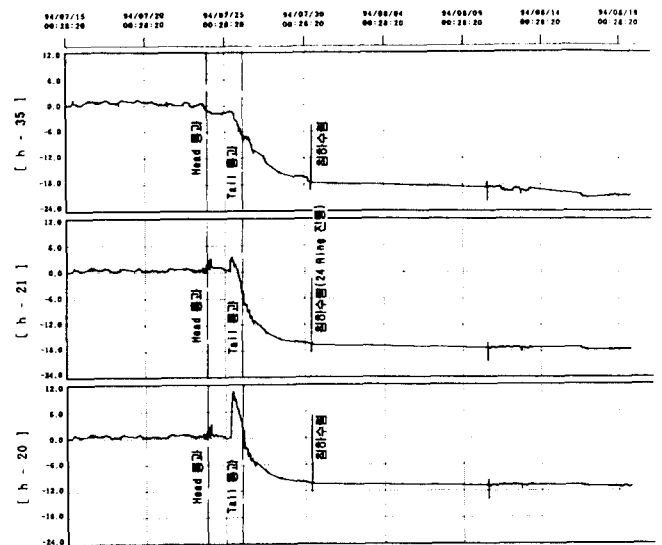
침하의 수렴은 심도에 관계없이 A-A 및 B-B 축선의 경우에는 Tail이 계측선을 벗어나 16-17 Ring 굴진된 시점에서 거의 수렴하였으나 Chamber 압력을 크게 작용시킨 C-C축선에서는 24 Ring이 벗어난 시점에서 수렴되고 있다. 즉 지표면 침하의 크기는 표 4.2와 같이 Chamber압을 크게 작용시킨 C-C 단면에서는 가장 작아서 15mm의 침하가 나타났으며 토압을 가장 작게 작용시킨 B-B 단면에서는 28mm까지의 침하가 나타났다. 또한 작은 Chamber압에서는 Shield Head 도착시까지 전체침하의 10% 정도가 나타났으나 Chamber압이 큰 C-C 단면에서는 7% 미만의 침하가 나타났다. 그러나 Chamber압을 크게 작용시킨 경우에는 침하의 수렴 시기가 늦어지게 된다.



<그림 4.2> B-B 축선에서의 종방향 침하량



<그림 4.3> A-A 축선에서의 종방향 침하량



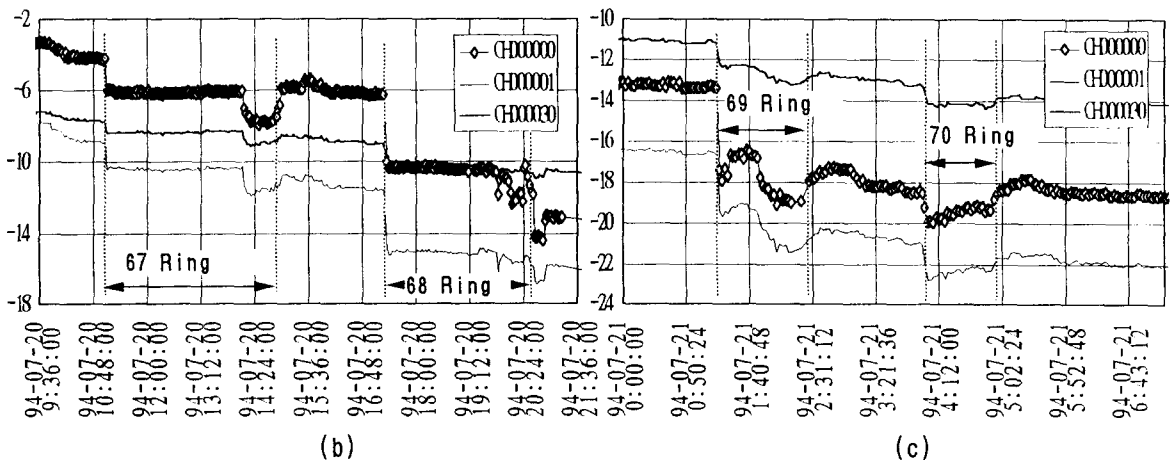
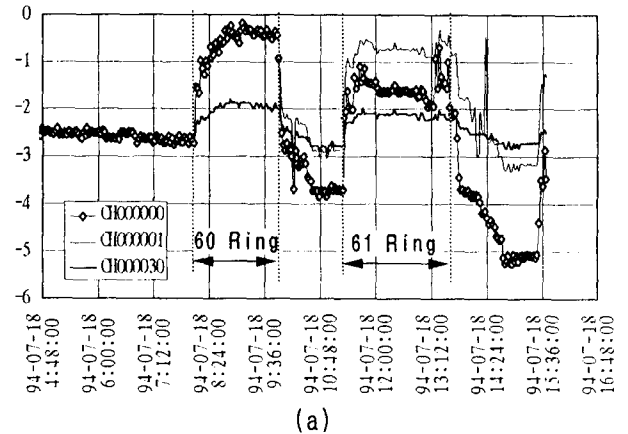
<그림 4.4> C-C 축선에서의 종방향 침하량

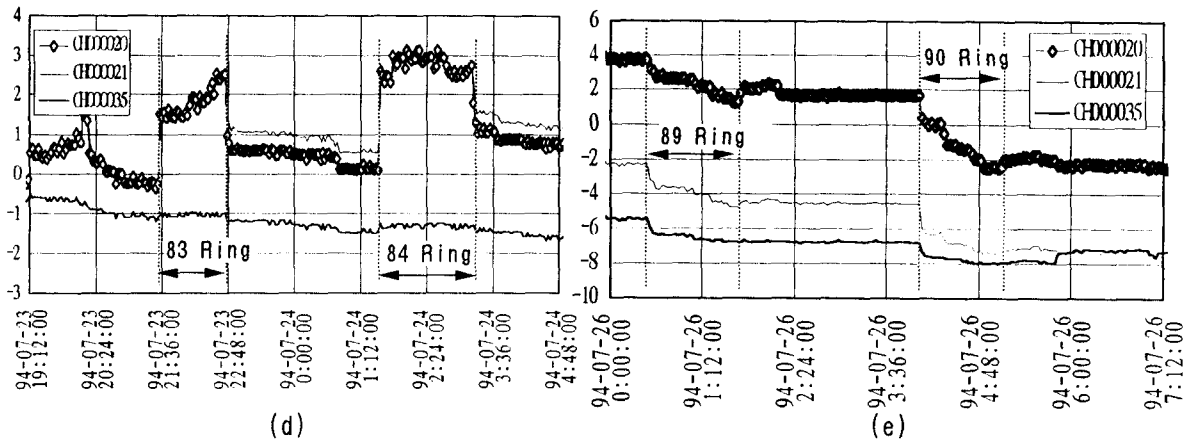
< 표 4.2 > 지표면 침하의 종방향 분포

단면구분	A-A 단면		B-B 단면		C-C 단면	
	+0.17m	+4.17m	-0.64m	+1.36m	-4.61m	-1.76m
중심에서의 거리	+0.17m	+4.17m	-0.64m	+1.36m	-4.61m	-1.76m
Head 통과시	2.5(10%)	1.5(15%)	3(11%)	2.5(11%)	0(0%)	1(7%)
Tail 통과시	11(43%)	4(40%)	13(46%)	10(45%)	2(25%)	7(47%)
수렴시	25.7 cm	10 cm	28 cm	22 cm	8 cm	15 cm

일반적으로 Shield 터널에서는 Tail Void의 영향으로 Tail의 통과이후에 발생하는 침하가 가장 큰 부분을 차지하지만 본 터널의 경우에는 배면주입으로 동시주입법을 적용하였으므로 Tail 통과시까지의 침하량은 토압의 크기에 관계없이 전체침하량의 40-50% 까지로 비교적 크게 나타났다. 또한 이와 같은 용기는 지표까지 전달되지 않았으며 궁극적으로는 지표의 침하를 억제하는 효과를 가져온 것으로 판단된다. 지반조건으로부터 Shield 중심부에서의 토압을 계산하면 주동토압은 1.53Kgf/cm², 정지 토압은 1.73Kgf/cm², 연직토압은 2.40Kgf/cm²이 된다. 따라서 사질토 지반에서 EPB Shield로 터널을 굴진할 경우에는 Chamber압력을 정지토압보다 조금 높게 작용시켜 주는 것이 전체의 침하량을 줄이는데 효과가 있는 것으로 판단되며, 연직토압은 넘지 않도록 하는 것이 바람직할 것이다.

시공조건별로 침하의 형태를 분석하여 보면 Shield Head가 계측점에 도달하기 전에는 그림 4.5(a) 및 그림 4.5(d)와 같이 용기가 발생한다. 또한 Chamber압이 정지토압과 비슷한 A-A 단면에서는 Segment 조립시 침하가 많이 발생하지만, Chamber압이 정지토압보다 큰 C-C 단면에서는 Segment 조립시 거의 침하가 발생하지 않는 것을 알수 있다. Shield Tail이 계측위치에 도달하기 직전인 그림 4.5 (b)의 경우에는 Segment 조립시에는 침하의 발현이 거의 없으나 굴진개시 시점에서 순간적으로 큰 침하가 나타나며 또한 굴진후반부에 침하가 나타나고 있다. 이는 굴진 개시시의 Shield Jack 이완과, 굴진이 거의 끝나가는 Jack Stroke 1200mm 에서는 배면주입이 이루어지지 않은 원인으로 판단된다. Tail이 계측점을 통과한 이후에는 굴진 후 반부의 침하는 크게 보이지 않으며 Backfill 주입압 및 주입량에 대한 나쁜 영향도 발견되지 않았다. 즉 C-C 단면에서의 주입량은 Tail Void의 128% 이며 주입압은 정지토압보다 큰 1.8 Kg/cm²에서도 별 문제가 없는 것을 알수 있었다.

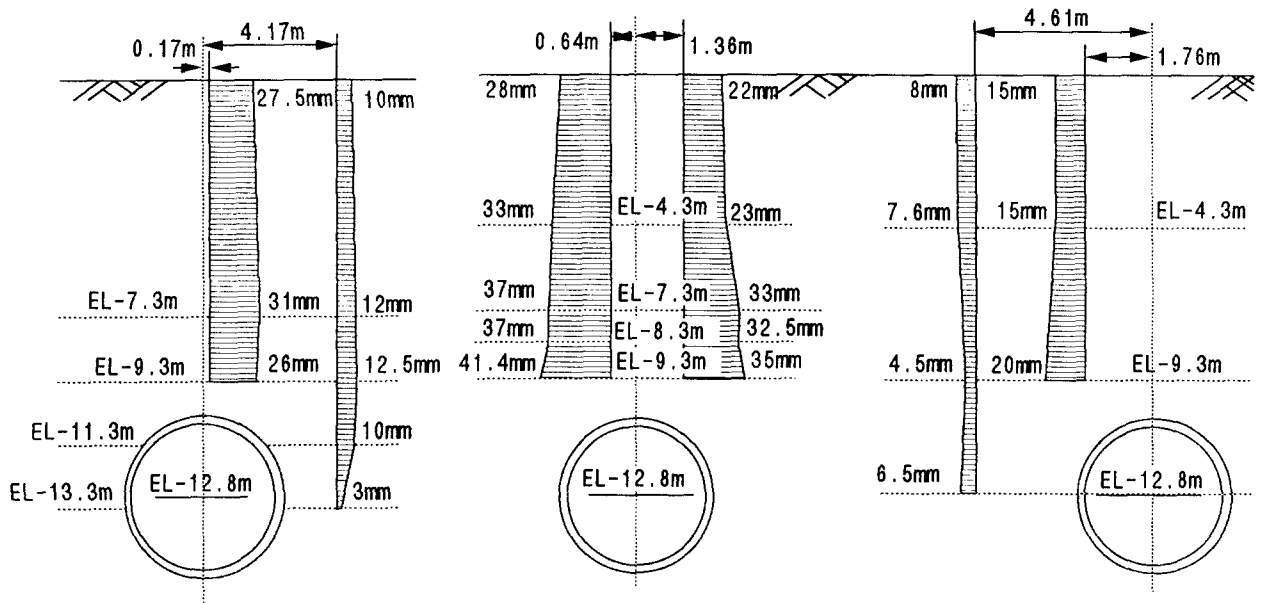




<그림 4.5> 시공조건별 대표적 침하 특성

4.3.2 횡방향 침하

횡방향의 침하는 계측점의 부족으로 침하영향 범위 등이 정확하게 분석되기는 어려우나 계측 데이터와 계산치를 비교 분석하여 적절한 침하예측식의 선정이 이루어지도록 하였다. 각 계측단면별 최종 침하량의 분포도는 그림 4.6과 같다. 그림에서 알수 있듯이 터널의 중심부에서 침하량은 가장 크며 터널의 중심에서 멀어질수록 침하량은 작아지는 것을 알수 있다. 또한 이상적인 굴진이 이루어진 C-C 단면에서 침하량은 터널 직상부에서 가장 크며 지표로 갈수록 작아지고 있음을 알수 있다. 그러나 터널에서 1D 정도 떨어진 곳에서는 침하의 영향이 줄어들어서 오히려 지표의 침하량이 지중의 침하량보다 크게 나타나고 있다.

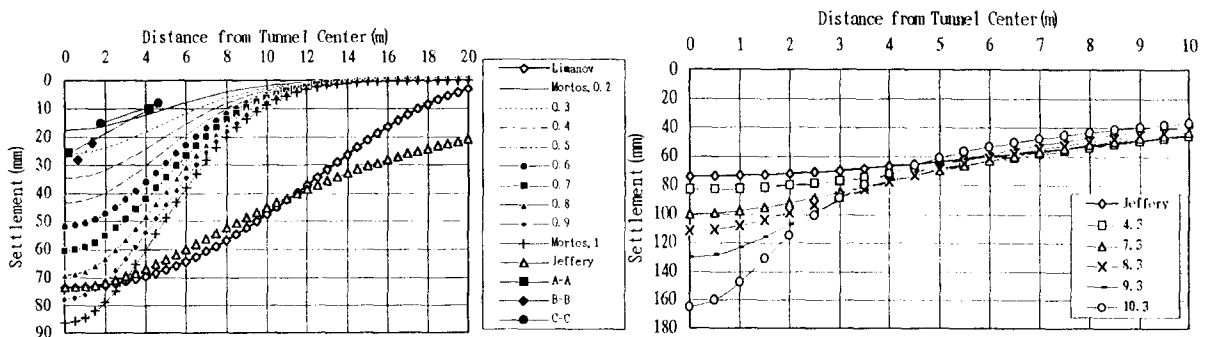


< 그림 4.6 > 최종침하의 분포도

Limanov, Martos, Jeffery는 탄성이론으로 부터 지반의 침하를 예측하는 식을 아래와 같이 제안하였다. Limanov는 Cambrian Clay에서 Shield로 터널을 굴착하는 경우 반무한 탄성체에서의 침하는 터널 Lining에서 주변지반을 밀어주는 힘에 의해서 발생한다고 생각하였다. 즉 터널 내부에서의 정지토 압에 의해서 Lining에 응력이 발생하고 이 Lining이 주변지반을 미는 형태로 되어 지표면에 나타나는 변형이 바로 지표 침하가 된다 (방향은 반대)고 하였다. 따라서 지반은 완전 탄성이며 터널 내부에는

가상의 압력을 가지고 있으며 Lining의 변형은 반경방향으로 균일하게 분포된다고 가정하고 Limanov는 침하량을 계산하는 식을 구하였다. 또한 침하 Trough의 형태를 Aversin의 확률곡선으로 보아서 최대 침하량으로 부터 횡단방향의 침하를 식도 제안하였다. Martos는 Shield의 굴진에 따른 침하는 Tail Void의 면적과 같은 크기의 침하가 발생한다고 보았으며, 이때 횡단방향의 침하형태는 오차함수의 형태로 분포한다고 보고 지표면 침하를 산정하는 식을 제안하였다. Jeffery는 균일한 반무한 탄성지반상에 원형 터널을 만들때 반무한체 내부에서의 이동은 터널내부압 및 지표에서의 상재하중에 의해서 일어난다고 하였다. 이것을 두개의 극좌표 시스템으로 변환하여 임의의 지점에서 수직변위(V) 및 수평변위(H)를 산출하는 식을 제시하였다.

이들의 방법은 토피와 Shield 직경이 결정되면 침하량은 흙의 탄성계수와 Poisson비에 의해서 결정되어지도록 만들어 졌다. 실제로 Shield 추진에 따라서 발생하는 침하는 시공정도에 따라서 크게 달라지나 Limanov식에서는 시공정도가 반영되지 않는다는 단점이 있으며, Martos는 시공정도에 따른 계수는 Backfill의 주입시기와 주입재료의 종류 등에 따라서 크게 달라진다고 하여 시공계수를 적용하였다. 일본에서의 최근 시공에서는 점성토에서 0.256, 사질토에서는 0.08의 시공계수를 많이 사용하고 있다. 본 현장의 조건으로 부터 상기식을 이용하여 지중침하 및 지표면 침하를 계산하고 이것을 계측치와 비교하였다. 그림 4.7에서 알수 있듯이 Limanov식은 계측치와 큰 차이를 보이고 있으며, Jeffery식은 지중침하를 계산할수 있는 장점이 있으나 침하량에 있어서는 Limanov식과 마찬가지로 계측치와 큰 차이를 보이고 있다. Martos식은 시공계수가 1인 경우에는 다른 두가지 방법과 비슷한 크기의 최대침하량을 보여주고 있으며 시공계수가 0.2~0.3인 경우가 계측치와 유사한 값을 보여주고 있다. 따라서 사질토 지반에서 폐쇄식 Shield를 사용하여 터널을 굴진하는 경우의 지표침하는 Martos의 식으로 예측이 가능하며 이때 굴진 Pattern에 따라서 적절한 시공계수를 적용하여야 한다.



<그림 4.7> 계산치와 계측치의 비교

5. 결론

- 1) 사질토 지반에서 EPB Shield로 터널을 굴진하는 경우 지표면 침하의 예측은 Martos의 식을 사용하는 것이 적절하며, 배면주입시스템 및 적용 Chamber압에 따라서 시공계수는 0.2~0.3을 적용하는 것이 좋다.
- 2) 지표면 지반침하를 줄이기 위해서는 Chamber압은 정지토압보다 크게 작용시키는 것이 좋으며, 이때 Chamber압은 연직토압을 넘지않도록 한다.
- 3) Shield 공법에서 지반의 침하를 일으키는 가장 중요한 항목중의 하나가 Tail Void이므로 배면주입은 가능한 동시주입을 하여 주는 것이 바람직하며, 주입압은 정지토압의 크기로 하며, 주입량은 Tail Void의 130% 정도가 적절하다.
- 4) Shield 공법에 의한 터널 시공시 대표단면에서의 계측을 통하여 가장 합리적인 굴진 Pattern을 결정하여 주어야 하며, 이를 위해서는 자동화 계측이 이루어져야 한다. 아울러 Shield 기계의 굴진에 따른 시공데이터도 동시에 얻어질수 있도록 하여야 한다.