

第 37 回 碩士學位論文

指導教授 洪 元 杓

쉴드터널에서 掘鑿速度가 地表沈下에 미치는  
影響에 관한 研究

A Study on The Surface Settlement under The  
Influence of Excavating Speed in Shield Tunnel

中央大學校 建設大學院

建設工學科 地盤工學 專攻

尹 榮 辰

2004年 6月

쉴드터널에서 掘鑿速度가 地表沈下에 미치는  
影響에 관한 研究

A Study on The Surface Settlement under The  
Influence of Excavating Speed in Shield Tunnel

이 論文을 碩士學位 論文으로 提出함

2004年 6月

中央大學校 建設大學院

建設工學科 地盤工學 專攻

尹 榮 辰

# 尹榮辰의 碩士學位 論文을 認定함

審査委員長 印

---

審査委員 印

---

審査委員 印

---

中央大學校 建設大學院

2004年 6月

# 목 차

제 1 장 서 론 .....	1
1.1 연구 목적 .....	1
1.2 연구방법 및 내용 .....	3
제 2 장 쉘드 터널공법과 지표침하 .....	4
2.1 쉘드 터널공법의 소개 .....	4
2.1.1 일반원리 .....	4
2.1.2 기원과 역사 .....	5
2.2 쉘드기의 분류 .....	9
2.2.1 기계식 지보(mechanical support) 쉘드 .....	10
2.2.2 이수식 (Slurry pressure balance) 쉘드 .....	11
2.2.3 토압식 (Earth pressure balance) 쉘드 .....	12
2.2.4 혼합식 쉘드 .....	14
2.3 쉘드 굴진기종의 선정 .....	14
2.4 쉘드 굴진기의 기본구조 .....	21
2.4.1 쉘드본체 .....	21
2.4.2 커터헤드 .....	28
2.4.3 추진기구 .....	32
2.4.4 세그먼트 조립기구 .....	34
2.4.5 유압,전기,제어기구 .....	37
2.4.6 부속기구 .....	38
2.5 이수식 쉘드 .....	41
2.5.1 특징 .....	41

2.5.2 굴진속도 .....	42
2.6 지표침하 .....	45
2.6.1 지표침하 이론 .....	45
2.6.2 쉘드터널의 지표침하 측정값 .....	51
<b>제 3 장 현장조건과 계측 .....</b>	<b>58</b>
3.1 주변현황 및 시공조건 .....	58
3.1.1 현장현황 .....	58
3.1.2 지반특성 .....	59
3.1.3 계측기 설치 및 계측방법 .....	61
3.1.4 지표침하계 관리기준치 선정 .....	64
3.2 쉘드터널 시공현황 .....	66
<b>제 4 장 분석 및 고찰 .....</b>	<b>68</b>
4.1 계측결과 분석 .....	68
4.1.1 횡방향 침하곡선 .....	68
4.1.2 종방향 침하곡선 .....	70
4.1.3 이론 지표침하량과 실측치와의 비교 .....	74
4.2 쉘드터널 굴착속도 분석 .....	76
4.3 쉘드 굴착속도가 지표침하에 미치는 영향 분석 .....	84
<b>제 5 장 결 론 .....</b>	<b>86</b>
<b>참고문헌 .....</b>	<b>88</b>

Abstract .....	90
----------------	----

## 표 목 차

<표 2.1> 쉼트TBM장비의 비교표 .....	19
<표 2.2> 지반조건과 쉼트TBM장비의 상관관계 및 검토내용 .....	20
<표 2.3> 계측에 의해 얻어진 상수 a, b .....	53
<표 3.1> 쉼트장비 주요제원 .....	67

## 그림목차

<Fig 2.1> 브루넬의 템즈강 하저 터널공사를 위한 쉘드 .....	5
<Fig 2.2> 그레이트 헤드 쉘드, 외경 9.35m, 로테하이데 터널(1994) .....	6
<Fig 2.3> 기계화 쉘드, J.프라이스(1902) .....	7
<Fig 2.4> 슬러리쉘드, 그레이트헤드(1874) .....	8
<Fig 2.5> 슬러리쉘드, 하그(Haag) (1896) .....	8
<Fig 2.6> 토압식 쉘드, 일본 사토코교 (1963) .....	9
<Fig 2.7> 기계식 지보 쉘드 .....	10
<Fig 2.8> 이수가압식 쉘드TBM장비와 구조도 .....	11
<Fig 2.9> 이수가압식 쉘드TBM 공법의 개요도 .....	12
<Fig 2.10> 토압식 쉘드TBM장비와 구조도 .....	13
<Fig 2.11> 토압식 쉘드TBM 공법의 개요도 .....	13
<Fig 2.12> 세그먼트 조립시 여유 .....	22
<Fig 2.13> 테일 클리어런스 .....	23
<Fig 2.14> 쉘드TBM의 길이 .....	24
<Fig 2.15> 테일부의 길이 .....	26
<Fig 2.16> 각종 커터면판 .....	29
<Fig 2.17> 스프레더 .....	34
<Fig 2.18> 쉘드터널과 지표침하 .....	46
<Fig 2.19> 일반적인 지표침하 양상 .....	47
<Fig 2.20> 침하형상곡선 비교 .....	48
<Fig 2.21> 토피와 지표침하 폭 사이의 관계 .....	49
<Fig 2.22> 침하영역해석도표(Cording & Hansmire,1976) .....	50
<Fig 2.23> 침하곡선 .....	51
<Fig 2.24> 쉘드형식과 최대지표 침하의 관계 .....	52

<Fig 2.25> 타이페이 MRT CH218B1 프로젝트동안의 침하 .....	53
<Fig 2.26> 아래쪽 터널시공시 위쪽 터널에서 측정되는 수렴점(앙트웹 메트로, 1977~88) .....	55
<Fig 2.27> 미세모래지질(슬러리쉴드)에서의 전형적인 지표침하의 측정값 (앙트웹메트로, 1977~88) .....	56
<Fig 3.1> 평면도 .....	58
<Fig 3.2> 종단면도 .....	59
<Fig 3.3> 지표침하계 설치 평면도 .....	61
<Fig 3.4> 계측단면 (Sta.32k675) .....	62
<Fig 3.5> 계측단면 (Sta.32k735) .....	62
<Fig 3.6> 지표침하 계측 관리기준 산정도 .....	64
<Fig 3.7> 쉴드장비 종단면도, 정면도, 후면도 .....	66
<Fig 4.1> 횡방향 침하곡선(32k675) .....	69
<Fig 4.2> 횡방향 침하곡선(32k735) .....	69
<Fig 4.3> 종방향 침하곡선(32k675) .....	71
<Fig 4.4> 종방향 침하곡선(32k735) .....	73
<Fig 4.5> Fig 2.24의 막장지지형식에 따른 일반적인 최대침하량 관계 비 교 .....	75
<Fig 4.6> 평균굴진속도 .....	77
<Fig 4.7> 경과일수별 굴진링수 .....	78
<Fig 4.8> 거리에 따른 Thrust force .....	80
<Fig 4.9> 거리에 따른 Cutter Torque .....	80
<Fig 4.10> Thrust Force와 Torque 관계 .....	81
<Fig 4.11> 거리에 따른 Cutter Torque에 대한 Thrust Force비 .....	81
<Fig 4.12> 거리에 따른 Thrust Force에 대한 Cutter Torque .....	82
<Fig 4.13> Cutter Torque에 대한 Thrust Force비와 굴진속도 .....	83

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 목적

도시화가 급속도로 진행되면서 도시에는 도로, 지하철을 비롯하여 상·하수도, 전력, 통신 등의 시설들이 거미줄 같이 건설되었으며, 이들의 시설이 지하에 건설되는 일이 많았다. 대부분이 개착방식에 의해 지표에서부터 굴착해 내려가는 방법이 많이 쓰였으나, 개착방식은 교통에 많은 영향을 미쳐서 건설되는 동안에는 지역주민 혹은 통행차량 등에게 많은 불편을 주지 않을 수 없었다. 최근에 많은 터널링(Tunnelling) 공법들이 개발되어 수많은 지하공간을 터널링(Tunnelling)이라는 수단을 통해서 개발하고 있는데, 이러한 방법은 지상 건축물이나 교통에 영향을 거의 미치지 않고, 지하에서 시공되는 장점이 있다.

터널굴착의 대표적인 공법으로 NATM공법이 있으나, 이 공법은 주로 암반을 대상으로 하며, 연약한 지반, 특히 수압이 발생하는 연약한 지반에서는 시공하기가 대단히 어렵기 때문에 이러한 지반에서는 최근에 쉘드터널 공법이 광범위하게 적용되기에 이르렀다.

일본은 지하공간의 개발 분야에 대한 여러 가지 광범위한 경험을 키워왔는데 이는 일본의 도시공간이 제한을 갖고 있기 때문이다. 일본의 지반은 우리나라와는 달리 매우 연약한 지반이 깊게 분포하고 있기 때문에 쉘드터널 공법이 매우 발달해 있으며, 현재 이 분야에서 선두그룹에 있다고 할 수 있다. 쉘드터널 공법은 토피가 매우 작고 지반과 지하수의 상태가 불안정한 지역에서 지표의 교란이나 커다란 침하를 초래하지 않고 장기간 동안 지하구조물을 건설하는 공법이다. 쉘드 터널공법은 연약지반, 고압의 점성이 없는 지반, 소성이 있는 부드러운 지반, 움직이는 지반 등에서 응

용이 가능하며, 최근에는 우리나라에서처럼 지표 수미터 아래에서 암반이 출현하는 지반에서도 사용하기에 이르렀다.

우리나라에서의 쉘드터널링의 대부분이 전력구 공사, 통신구 공사 등 비교적 소구경의 터널 공사에 적용되어 왔으나, 최근에 도심지에서 발파에 따른 진동, 소음, 안전 등의 문제 때문에 지하철과 같은 대규모의 공사에 쉘드터널 공법이 적용되기 시작했다. 이미 부산과 광주 지하철에서 성공적으로 쉘드터널이 시공되었고, 서울지하철 9호선, 분당선 왕십리~선릉간 등에 쉘드터널 공법이 계획되었고, 다른 많은 터널 설계에 적용되고 있는 실정이다.

쉘드터널 공법이 비록 공사비 면에 있어서 다른 터널공법에 비해 비교적 고가의 공법이나, 도심지 공사에서처럼 침하의 문제, 정밀도의 문제, 소음, 진동의 문제를 해결할 수 있고, 낮은 토피와 높은 지하수위, 급격한 지질의 변화에도 대처능력이 뛰어난 쉘드공법은 앞으로도 계속적으로 사용될 것을 믿어 의심치 않는다.

최근의 쉘드터널 공법은 대단히 많은 발전을 거듭해 온 것이 사실이고, 불안정한 지반에 효과적으로 대응하기 위해 밀폐식 쉘드가 대부분의 쉘드터널에서 적용되고 있으나, 밀폐식 쉘드는 NATM 터널과는 달리 굴진중에는 막장면을 확인할 수 있는 방법이 없으므로 시추조사 및 물리탐사에 의해 조사된 자료 및 쉘드터널 굴착장비 정지시 막장면 관찰을 통하여 굴진방법을 조정할 수 밖에 없다. 일반적으로 설계시 추정하는 지반침하량 등의 예측값은 실제와는 기술적 측면 및 시공적 측면에서 상당한 차이가 있으므로 도심통과 노선의 경우 지상구조물에 막대한 피해를 미칠 수 있는 개연성이 충분하여 충분한 안전율을 갖고, 필요이상의 비용을 들여 비경제적으로 시공하지 않으면 안될 경우가 많다.

그러므로 본 논문은 적절한 굴진속도, 공사기간, 공사비의 상관성을 연구하여 향후 계획단계에서 적절한 굴진속도 산정 기준 및 참고자료로 활

용될 수 있도록 하는데 목적이 있다.

## 1.2 연구방법 및 내용

본 연구에서는 기시공된 부산지하철 쉼터널 공사 현장을 대상으로 하여 밀폐식 쉼드중 이수가압식 쉼터널의 굴진속도와 지표침하계에 계측된 지표침하 거동변화의 상관관계를 도출하고자 하며, 굴진속도는 쉼드면판 Torque, 쉼드굴착기 Thrust Force 등의 실측치를 통하여 고찰하고자 한다.

## 제 2 장 쉘드 터널공법과 지표침하

### 2.1 쉘드 터널공법의 소개

#### 2.1.1 일반원리

쉘드 터널공법은 흙을 굴착함과 동시에 터널의 중심축을 따라 원통형의 철강 어셈블리를 밀어넣는 것을 기본으로 한다. 철강 어셈블리는 터널 라이닝(lining)의 예비작업 및 마무리 작업이 완성될 때까지 굴착된 빈 공간을 유지하는 역할을 한다. 쉘드는 주위를 둘러싸고 있는 토압을 견딜 수 있어야 하며, 지하수의 유입을 막아야 한다. 흙의 굴착은 기계의 추력과 면판의 회전에 의해 커팅툴(디스크커터, 비트)에 의해 이루어진다. 기계의 추력은 기계에 장착된 잭(Jack)으로 라이닝(세그먼트) 측면에서 반력을 구해 얻어지며, 면판의 회전은 전기 또는 유압모터에 의해 얻어진다.

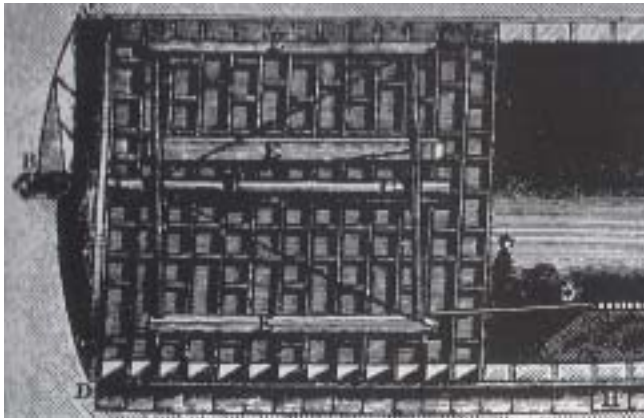
쉘드 터널공법은 원통형의 철강 어셈블리 안에서 작업원이 작업을 하도록 되어 있기 때문에 안전한 공법이기는 하나, 밀폐형 쉘드의 경우 막장을 관찰할 수 없기 때문에 예상 못한 위험이 초래되기도 한다.

터널의 내부 둘레면을 따라 생기는 공간을 쉘드에 의해서 유지되는 동안, 터널 막장면을 보호하기 위해서 지질상태 및 지하수의 상태를 고려한 조사가 추가로 이루어져야 한다.

터널면을 안정화 시키기 위한 방법을 간략히 살펴보면, 첫째 자연적인 막장지지 방식, 둘째 기계적인 막장지지 방식, 셋째 압축공기 막장지지 방식, 넷째 이수가압식 막장지지 방식, 다섯째 토압식 막장지지 방식이 있으며, 다른 터널링 방법과는 대조적으로, 굴착이 진행되는 동안 어느 지점에서든 지반의 안정화가 가능하다.

## 2.1.2 기원과 역사

마크 브루넬(Marc Isambard Brunel : 1769~1845)은 최초의 터널 굴착용 쉴드를 발명하여 1818년 특허를 얻고, 1825년 이 쉴드를 테임즈 하저터널 시공에 사용하였으나, 이는 자립성이 부족한 지반을 쉴드로 지지하고 그 속에서 인력굴착 작업을 진행한 단순한 터널 주변 지지공법이라 볼 수 있다.

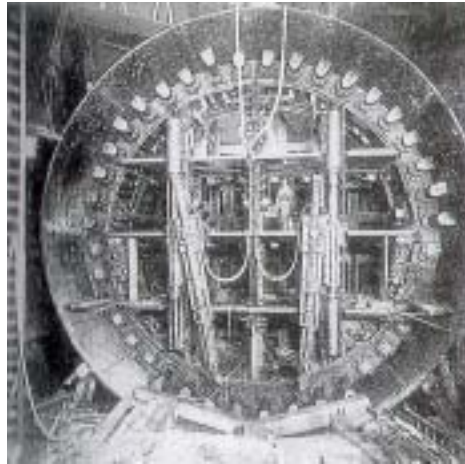


<Fig 2.1> 브루넬의 템즈강 하저 터널공사를 위한 쉴드

1869년에 엔지니어 제임스 헨리 그레이트헤드(James Henry Greathead)는 원통형 쉴드를 가지고 템즈강 아래의 터널공사를 다시 하였다. 최초로 그는 철주조 라이닝(cast iron lining segment)을 채택하였다. 그레이트헤드의 원형쉴드는 그 이후에 제작된 대부분의 개방형 쉴드의 모델이 되었다.

해수 아래에서 연약한 지반의 터널공사 동안 지하수를 억제하는 문제는 제독 코크레인 경(Cochrane)에 의해서 해결되었다. 그는 1828년 브루넬에게 제출된 켈로던(Callodan)의 제안을 따라 압축공기를 사용하였다. 압축

공기 굴착법이 최초로 적용된 것은 1879년 앤트워프(Antwerp)과 1880년 뉴욕에서 거의 동시였으나, 쉴드는 사용되지 않았다.

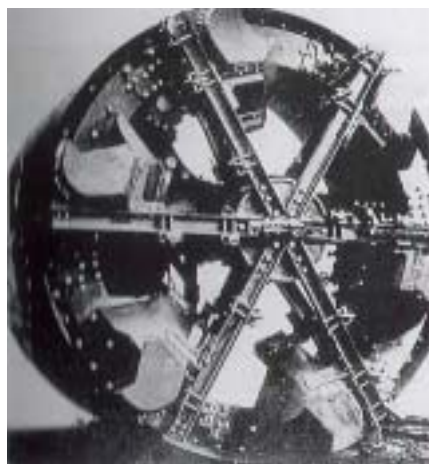


<Fig 2.2> 그레이트헤드 쉴드, 외경 9.35m, 로테하이데 터널(1994)

1886년 그레이트헤드는 런던지하철 공사중에 쉴드터널링과 압축공기공법을 조합하였다. 압축공기 터널링은 지하수가 있는 지반에서의 터널공사에 진일보하는 결과를 가져왔다. 이것의 결과로써 세계적으로 상당히 많은 수의 쉴드터널이 증가하였다. 20세기초에 대다수의 터널은 그레이트헤드 쉴드로 시공되었다.

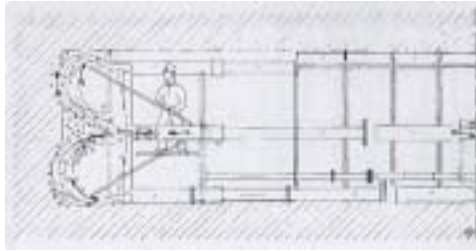
브루넬의 발명에 뒤따라 인력굴착 작업을 기계굴착식으로 대체시킨 사람은 영국인인 존 디킨스 브룬톤과 조지 브룬톤이었다. 쉴드는 몇 개의 판으로 이루어진 반원형태의 회전하는 커터헤드를 가지고 있었다. 굴착되어 생기는 토사는 커터헤드에 방사형으로 설치되어 있는 Bucket 안으로 떨어지고, Bucket은 컨베이어 벨트 위로 토사를 전달하고, 컨베이어 벨트는 토사를 쉴드의 맨 뒤끝 쪽으로 전달한다. 커팅휠(cutting wheel)은 6개의 원통형 실린더에 의해 회전한다.

1896년에 발명하고 특허를 획득한 사람의 이름을 따라 지어진 프라이스 쉴드(Price Shield)는 더욱 발전된 형태의 쉴드였다. 이 기계는 런던에서의 점토층에서 성공적으로 적용되었으며, 그레이트헤드 쉴드와 회전커터 헤드를 접목시킨 최초의 기계였다. 4개의 스포크(차바퀴살) 형태의 팔로 이루어져 있었으며 그 위에는 커팅툴(또는 스크래핑툴)이 부착되어 있었다. 더욱이 커팅휠에는 함지박 모양의 손가락 같은 기구가 부착되어 굴착되어 생기는 흙을 모아 위로 들어올려 자동운반장치로 전달할 수 있도록 하였다. 따라서 이미 제 위치에 와있는 트롤리로 굴착된 흙을 떨어뜨리고 나면 지표면으로 운송되었다. 커팅휠은 차축에 의해 전기로 구동되었다.



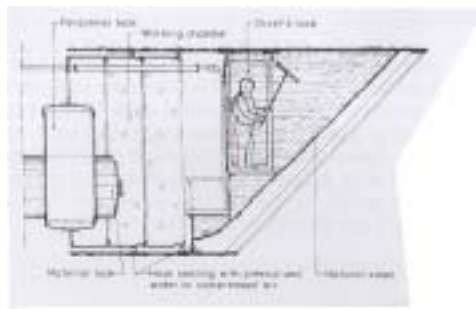
<Fig 2.3> 기계화 쉴드, J.프라이스(1902)

침투성이 매우높은 지반에서는 터널막장의 지지를 위해 압축공기를 사용하는 것이 어렵다. 그렇기 때문에 이미 1874년에 그레이트헤드는 터널 막장을 유체로 지지하는 쉴드를 개발했던 것이다. 유체의 유출을 통해 흙이 슬러리의 형태로 배출된다.



<Fig 2.4> 슬러리 쉴드, 그레이트헤드 (1874)

1896년 베를린에서 하그(Haag)는 터널막장을 유체로 지지하는 쉴드의 특허를 독일에서 처음으로 출원신청을 하였는데 쉴드는 굴착용 챔버를 압력 챔버로써 밀폐하였다.

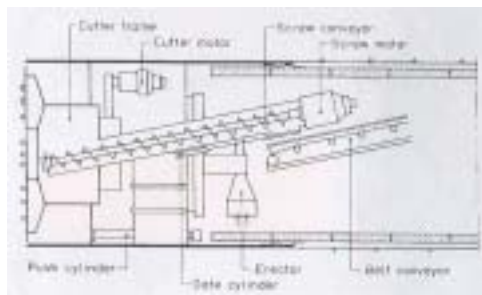


<Fig 2.5> 슬러리쉴드, 하그(Haag) (1896)

1959년이 되어서야 터널 막장을 유체로 지지하는 아이디어가 엘머 가드너(Elmer C. Gardner)에 의해서 성공적으로 시험되었는데 직경 3.35m의 하수 터널 이었다. 1960년에 슈나이더라이트(Schneiderite)는 벤토나이트 현탁액(Bentonite Suspension)을 통해서 액티브 페이스 서포트(Active Face Support)라는 용어를 소개하였다. 이때 H.로렌즈(H. Lorenz)는 압축된 벤토나이트에 의한 터널 막장을 안정화하는 것으로 특허를 얻었다. 1967년에 커팅휠과 hydraulic mucking이 있는 최초의 이수가압식 쉴드가

일본에서 사용되었다. 그것의 직경은 3.1m 였다.

브루넬의 스크류 쉴드를 전조로 볼 수 있겠지만, 토압식 쉴드 (earth-pressure balance shields)는 그보다 훨씬 이후에 개발되었다. 이 기술이 최초로 개발된 것은 1963년 일본회사인 사토코교 주식회사에 의해서 였는데, 이는 지하수위 아래의 연약지반에 터널을 뚫는 방법을 모색하는 과정에서 이루어진 것이다. 일본에서는 이수가압식 쉴드 뿐만 아니라 압축공기 쉴드도 성공적으로 사용되었기 때문에 토압식 쉴드의 개발은 하나의 놀라움 이었다. 토압식 쉴드의 개발은 이미 일본의 여러 주요도시에서 발효중이던 엄격한 환경 법규에 기인하였다. 이러한 사실들은 굴착 물질의 투척에 의한 공기나 지하수의 오염과 압축공기와 관련된 안전 및 건강문제 등에 관한 염려 때문이었다.



<Fig 2.6> 토압식 쉴드, 일본 사토코교 (1963)

## 2.2 쉴드기의 분류

쉴드기의 분류에 대하여는 (사)한국터널공학회와 두산건설(주)에서 제안한 “쉴드TBM 지침서(2001)” 국내기계화 시공법 분류기준에 따르면, 쉴드기의 분류는 기계식 지보 쉴드, 이수식 쉴드, 토압식 쉴드, 혼합식 쉴드로 나눌 수 있다.

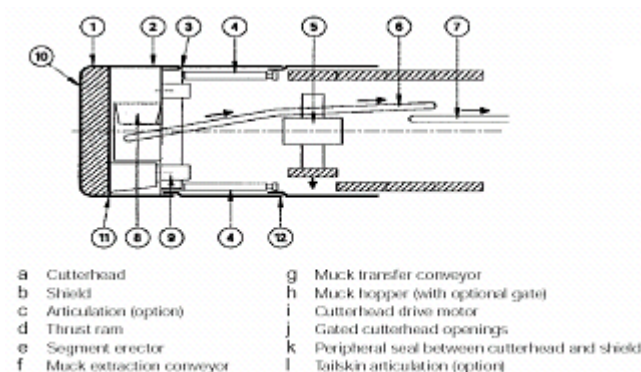
## 2.2.1 기계식 지보(mechanical support) 쉴드

기계식 지보 쉴드는 터널 막장면의 지속적인 굴착을 위하여 회전식의 커터헤드가 장착되어 있으며, 커터헤드는 2가지의 종류가 있는데, 디스크형(disk type)과 커터헤드의 중심으로부터 방사형으로 로드(rod)가 부착된 스포크형(spoke type)이 있다.

디스크형 헤드는 대단면의 터널에 적합한데, 터널 막장면이 디스크 커터의 헤드에 의해 안정화된다. 즉 커터헤드가 굴착과 막장을 지지하는 2중의 역할을 수행하게 된다. 이런 형식의 장비는 디스크에 배출구멍을 만들어 자갈과 각력(角礫)들이 포함된 토사지반의 굴착에 적합하며, 자갈과 각력들의 크기에 따라 조절이 가능하다.

스포크형 헤드는 터널 막장면이 비교적 안정한 소단면 터널굴착에 자주 사용된다. 자갈과 각력들은 스포크 커터의 회전에 의해 배출된다.

기계식 지보 쉴드는 막장면 자립이 가능한 충적층, 지하수가 없는 지반 등에 적합하다. 종종 막장면 자립이 곤란한 홍적층에 이런 장비를 적용하기 위해서는 압축 공기 등, 하나 혹은 그 이상의 보조공법을 병행해야 하며, 배수 및 약액그라우팅 등의 보조공법을 추가로 시공해야 한다.

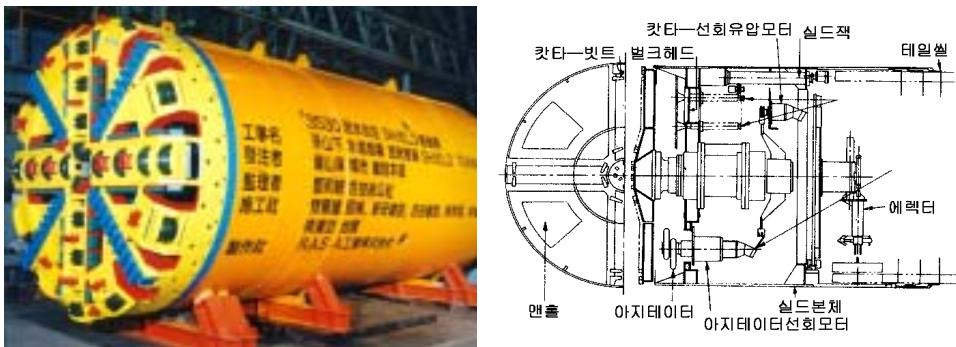


<Fig 2.7> 기계식 지보 쉴드

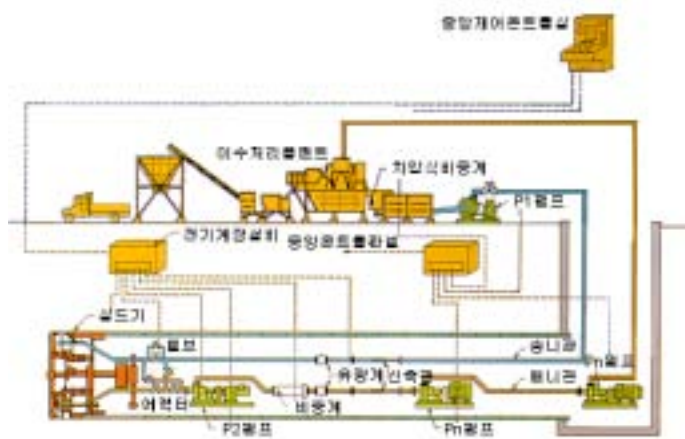
## 2.2.2 이수식(Slurry pressure balance) 쉘드

이수가압식 쉘드TBM 공법은 수압, 토압에 대응해서 챔버내에 소정의 압력을 가한 이수를 충만, 가압하여 막장의 안정을 유지하는 동시에 이수를 순환시켜 굴착토를 유체 상태로 수송하여 배토하는 공법이다.

막장의 수압 및 토압 보다 다소 높은 이수압을 가하여 막장의 안정을 확보한다. 또 비중이 크고 점성이 높은 이수를 사용하여 막장의 안정도를 증가시킬 수 있기 때문에 연약지반에서 뿐만 아니라 해저, 하저 등의 수압이 높은 지반의 경우 많이 사용되고 있다. 또 펌프를 사용해서 지상으로부터 막장까지 파이프를 송·배니(送·排泥)하고 막장을 완전하게 밀폐시키므로 안정성이 높고 시공환경이 양호하다. 그러나, 이수처리설비 설치를 위해 광범위한 부지점용이 필요하고, 이수의 처리비용이 비교적 고가이며, N치15이하, 균등계수 5이하의 사질층에서는 국부적인 붕괴를 일으키기 쉬우므로 사전에 주의를 요한다.



<Fig 2.8> 이수가압식 쉘드TBM장비와 구조도



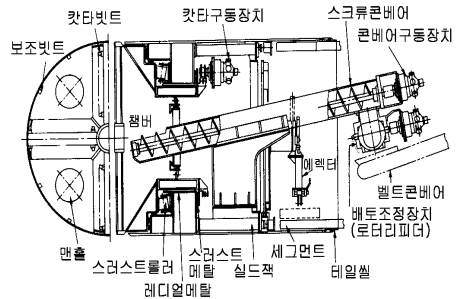
<Fig 2.9> 이수가압식 쉴드TBM 공법의 개요도

## 2.2.3 토압식(Earth pressure balance) 쉴드

토압식 쉴드공법은 커터헤드로 굴착한 토사를 쉴드기계의 전통부에 설치한 격벽 사이에 충만시키고, 쉴드의 추진력으로 굴진하면서 스크류콘베이어로 굴착토를 배토하는 공법이다. 일반적으로 스크류콘베이어의 회전력에 의해 막장에 주동토압하의 토압이 발생하지 않도록 하기 때문에, 막장토압이 확실하게 스크류콘베이어에 전달되지 않으면 안되므로, 소성유동화한 굴착토를 커터 챔버내에 충분히 충만시키는 것이 매우 중요하다. 따라서 최근에는 첨가재 주입기구 및 첨가재와 굴착토를 확실하게 교반하는 기구를 장착하는 경우도 있다. 챔버내의 굴착토는 쉴드의 추진력에 의해 가압되고, 토압이 막장전체에 작용하여 굴착면의 안정을 확보한다. 또 굴착토가 소성 유동화 되어 있기 때문에 스크류콘베이어 등에 의해 천천히 배토가 가능하다. 토압식 쉴드공법은 막장토압을 제어하면서 토사의 유입과 추진을 병행해서 할 수 있기 때문에 막장을 유지하기가 쉽고, 지반변형을 적게 한다. 또 적용토질이 광범위하고 보조공법이 별로 필요 없

으며, 플랜트 설치공간이 비교적 작게 소요되기 때문에 최근에 많이 사용되고 있다.

첨가재료는 벤토나이트, 점토, 기포재 C.M.C(수용성고분자) 등이 있으며, 고결점토 및 고결실트층에서 N치가 높은 경우 굴착효과가 극단적으로 저하 되므로 주의를 요한다.



<Fig 2.10> 토압식 쉴드TBM장비와 구조도



<Fig 2.11> 토압식 쉴드TBM 공법의 개요도

## 2.2.4 혼합식 쉼드

혼합식 쉼드는 터널 주변 및 막장에 대하여 능동적인 지보시스템을 갖추고 있으며, 전단면을 굴착하는 쉼드이다. 특징은 밀폐형 및 개방형 모두 작동할 수 있으며, 다양한 형태의 막장지지 방법을 사용할 수 있다는 것이다. 한 작업모드에서 다른 작업으로 전환하기 위해서는 기계의 형상을 바꾸기 위한 기계적인 조작이 필요하며 버력의 배출도 각 작업모드별로 다양하게 사용된다.

혼합식 쉼드TBM은 다음과 같은 3가지의 범주로 세분할 수 있다.

첫째, 개방형에서는 버력을 처리하는 벨트 컨베이어와 함께 사용하고, 밀폐형으로 형상을 바꾼 후에는 스크류 컨베이어에 의해 토압식 쉼드와 같이 지반압과 균형을 이루어 막장을 지지하는 형식이며,

둘째, 마찬가지로 개방형에서는 버력을 처리하는 벨트 컨베이어를 사용하고, 밀폐형으로 형상을 바꾼 다음에는 이수식 쉼드와 같이 이수의 압력 순환에 의한 버력배출과 막장을 지지할 수 있다.

셋째, 이수식과 토압식을 모두 사용할 수 있는 형식이다.

이와 같은 형태의 쉼드는 각각의 막장지지 시스템에 따라 갖추어야 하는 특수장비의 교체 공간이 필요하기 때문에 일반적으로 대구경의 굴착에 제한적으로 사용된다. 또한 적용 대상 지반은 막장자립의 한계가 있고 지하수위하에 있는 암반이나 토사층에 적용이 가능하다.

## 2.3 쉼드 굴진기종의 선정

쉼드장비의 선정에 있어서 고려할 사항은, 쉼드장비가 적용 지반에 적합한 타입인지, 쉼드장비의 굴착능력과 후방설비 및 작업기지의 플랜트의 처리능력이 서로 조화를 이루고 있는지, 시공

연장에 적합한 형식인지, 보조공법과의 연관성에 대하여 검토했는지, 작업원의 작업효율을 고려하였는가 하는 점이다. 특히 일본과 달리 복합지층이 출현하는 경우가 많은 우리나라의 지층에서는 적절한 쉴드장비의 선정을 위해서는 지층형상을 면밀히 분석하여 대체로 많이 분포하고 있는 지층에 맞추어 장비를 선정하는 것이 좋다.

쉴드장비는 일반적으로 본체, 커터헤드, 추진설비, 복공설비, 유압설비, 부속 설비 등으로 구성되어 있으므로 각 부위별 상관성에 유의해서 선정해야 한다. 따라서 쉴드장비의 선정에 있어서 소정의 설계조건을 기준으로 하여 지반조건, 시공조건에 적합하고 공기내 안전하고 경제적인 시공이 가능한 장비를 선정하기 위해서는 더욱 세부적으로 검토해야 한다.

#### 가. 막장의 안정

쉴드TBM공법에서는 굴착에 의해 막장 전면부에 작용하고 있는 토압과 수압의 영향을 받기 때문에 막장안정 장치에 의해 이에 대응해야 한다. 일반적으로 자립성이 양호한 지반에서는 개방형 쉴드장비가 적합하고, 연약한 점성토 지반에 유동성이 큰 지반에서는 블라인드식 쉴드장비, 자립성이 나쁜 지반에서는 밀폐형 쉴드장비가 사용되고 있다. 특히 예전에 시공이 곤란한 느슨한 대수사질층, 전석이 섞인 사암층, 고수압의 붕괴성 지반 등 막장이 불안정한 지반에서도 밀폐형 쉴드장비로도 시공이 가능하게 되었다. 즉 개방형 쉴드공법에서는 일반적으로 지반의 자립성을 높여주기 위해서 압기공법 등의 보조공법을 사용하는 경우도 있다.

#### 나. 막장의 확인

쉴드 굴진시 시공조건에 변화에 적절하게 대처하기 위해서는 가능한 한 막장의 상태를 확인하면서 시공하는 것이 바람직하지만 쉴드장비 전면에 격벽이 설치되어 막장의 상태를 확인하기가 어려운 밀폐형 쉴드장비를 사

용함에 있어서는 시공관리에 충분한 주의를 기울여야 한다.

#### 다. 지장물의 처리

개방형 쉼트장비의 경우 막장 전면부를 육안으로 관찰하면서 굴진하기 때문에 지장물에 대한 대처가 비교적 용이하다. 밀폐형 쉼트장비로는 지장물에 대한 대처가 어렵다. 따라서 지장물 출현시 막장 전면을 지반개량하고, 막장 전면부로 나가서 지장물을 제거하거나, 새로운 수직구를 축조하여 장애물을 제거하지 않으면 안되기 때문에 장비선평시 사전에 지장물 처리 방안에 대해서도 검토를 해야 한다.

#### 라. 곡선부의 시공

쉼트공법의 특징 중 하나로 선형이 복잡하고 곡률반경이 적은 곡선구간의 시공이 가능하다는 점이다. 일반적으로 밀폐형 쉼트는 장비의 길이가 길어 여굴에 의해 주변지반의 붕괴를 방지하기 때문에 개방형 쉼트장비에 비하여 곡선시공이 어렵다. 그러나 최근에 들어서는 중절식(articulation) 쉼트가 개발되어 급곡선( $R=15m$ )의 시공도 가능하게 되었다.

#### 마. 쉼트장비의 고장시의 영향

쉼트공사는 장비의 의존도가 크기 때문에 장비의 고장으로 인해 공사중지시 공기 및 공사비에 막대한 영향을 미친다. 그러므로 가능한 한 간단한 구조로 제작해야 상대적으로 고장이 적어진다.

#### 바. 공법의 변경

토질변화에 따라 개방형쉼트나 블라인드식 쉼트는 상호 공법변경이 가능하나, 밀폐형 쉼트에서는 공법변경이 불가능하기 때문에 사전 지질 조사시 입도분포, 암의 크기, 형상, 균등계수, 투수계수 등에 대해서 면밀히

검토를 해야 한다.

#### 사. 적용토질

장비별로 적용토질에 따라서 막장안정 방법이 다르기 때문에 장비선정 시 특히 유의해야 한다.

#### 아. 지하수 대책

대수층의 수압이 크고 투수계수가 큰 경우에는 밀폐형 쉴드장비를 사용하는 경우가 많으며, 개방형 쉴드에서는 지하수에 대한 대책으로서는 압기공법이나, 약액주입공법, 지하수위저하공법 등의 보조공법을 병행하여 시공하기도 한다.

#### 자. 버력처리

이수가압식 쉴드공법을 제외하고 굴착토는 버력처리용 광차를 통해서 갱외로 반출되어진다. 이수가압식 쉴드공법에서는 굴착토나 이수를 배관에 의해 유체수송하여 갱외에 설치한 이수처리플랜트에서 분리, 탈수처리한다.

#### 차. 작업환경

개방형 쉴드공법에서는 일반적으로 압기공법을 병행하여 사용하는 경우가 많으므로 작업환경이 열악하다. 밀폐형 쉴드공법에서는 이수가압식 쉴드공법을 제외하고 갱내에 버력처리용 광차가 주행하고 있기 때문에 작업공간이 협소하여 소단면의 경우에는 적용시 안정성의 확보에 염두를 두고 장비를 선정해야 한다.

#### 카. 주변환경

쉴드장비 사용시 작업공간 확보, 소음, 진동 등의 주변환경 등을 고려하여 장비를 선정해야 한다.

#### 타. 공사비

일반적으로 이수가압식 쉴드장비가 이수처리플랜트의 대형화로 장비가격이 토압식 쉴드장비에 비하여 비교적 고가이나, 장비 선정시 보조공법, 기타 지하매설물처리, 지하수의 처리 등의 종합적인 검토를 하여 판단해야 한다.

#### 파. 종합적 판단

이상의 검토결과를 가지고 시공성, 안정성, 시공의 확실성, 경제성, 공사기간 등을 평가하여 최적의 장비를 선정해야 한다.

쉴드공법이 지반조건이나 주위 환경조건에 따라 많은 변수를 가지기 때문에 지반조건에 적합한 쉴드장비를 선정하는 것이 가장 중요한 문제중 하나이다. 따라서 아래 표와 같이 지반조건과 쉴드장비의 상관관계를 참고로 지반조건에 적합한 쉴드장비를 선정하도록 해야 한다.

표 2.1 쉘드TBM장비의 비교표

구 분	인력식	기계굴착식	이수가압식	토압식
막장의 안정	전면이 개방되어 있어 토류잭 등으로 막장 붕괴방지	회전커터의 면판으로 막장 붕괴방지	막장과 격벽사이에 이수를 충만시켜 막장 붕괴방지	막장과 격벽사이에 굴착토사로 막장 붕괴방지
막장의 확인	가능	불가능	불가능	불가능
곡선부 시공	제한이 없음	R=300 이상	제한이 없음	제한이 없음
보조공법	막장안정을 위해 지하수위저하공법, 압기공법 병행	막장안정을 위해 지하수위저하공법, 압기공법 병행	원칙적으로 필요가 없음	사질층에서는 지반개량이 필요
지장물의 처리	막장에서 발견이 쉽고 처리가 용이	막장에서 발견이 쉽고 처리가 약간 어려움	막장에서 발견 및 처리가 어려움	막장에서 발견 및 처리가 어려움
작업환경과 안정성	작업환경이 나쁨	비교적 양호	양호	양호
주변환경	공기압축기, 잔토처리대차의 소음이 크다	공기압축기, 잔토처리대차의 소음이 크다	양호	양호
잔토처리의 문제점	비교적 적다	비교적 적다	이수처리의 능력에 제한을 받음	비교적 적다

표 2.2 지반조건과 쉴드TBM장비의 상관관계 및 검토내용

구 분	토압식		이수가압식		기계굴착식		인력식	
층적 점성토	○	초연약층은 곤란 굴착도량의 관리	△	초연약층은 곤란 이수분발의 체크	△	막장의 자립 지반침하	△	막장의 자립 지반침하
홍적 점성토	○	유동성의 확보 면판의 부착	○	2차처리설비의 증설	○	대수사질층의 협재	○	굴착능률의 저하 대수사질층의 협재
연,경암	△	대수사질층의 협 재시 검토 필요 면판의 부착	△	대수사질층의 협 재시 검토 필요	△	대수사질층의 협재시 검토 필요 커터비트의 마모	×	굴착곤란
느슨한 사질토	○	고도의 굴착관리	○	고도의 굴착관리 이수품질의 확보	×	막장의 자립 곤란	×	막장의 자립 곤란
단단한 사질토	○	커터비트의 마모 첨가재의 사용	○	이수품질의 확보	△	막장의 자립 지하수위, 투수성	△	막장의 자립 지하수위, 투 수성
사암	○	커터비트의 마모 첨가재의 사용	○	일니대책 암파쇄장치 부착 유체수송 구조	△	막장의 자립 지하수위, 투수성	△	막장의 자립 지하수위, 투수성
전석이 섞인 사암	○	암파쇄장치 부착 커터비트의 마모 스크류콘베어 직경	△	일니대책 암파쇄장치 부착 유체수송 구조	×	전석의 유입 곤란 커터비트의 마모	×	굴착작업 위험
토질변 화에 대한 적응성	○	일반적으로 적용 토 질이 광범위	○	일반적으로 적용 토질이 광범위	×	굴착기계의 변경 불가능	△	보조공법이 필요

셴드장비의 선정에 있어서는 토질조건(강도, 입도구성, 조도 등), 지하수의 유무(수위, 피압수압, 유속 등), 가스(가연성 가스, 산소결핍공기), 터널 선형, 터널단면, 주변환경(교통상황, 매설물, 주요구조물, 사유지) 등을 충분히 조사한 후에 경제성, 안정성을 고려해서 공해가 없고 시공성이 양호한 것으로 선정해야 한다. 따라서 장비선정시 장비의 본체, 굴착경, 길이, 파워, 부속장치 등의 세부사항을 검토하여야 한다.

## 2.4 셴드 굴진기의 기본구조

셴드 굴진기의 기본구조는 셴드 본체, 커터부, 추진기구, 세그먼트 조립기구, 유압,전기,제어기구, 기타 부속기구로 나눌 수 있다.

### 2.4.1 셴드 본체

셴드는 외부로부터 작용하는 하중에 대응하여 내부를 보호하기 위해 외부를 둘러싸고 있는 강판부분과 전면의 막장부분에서 굴착을 하고 후방부에서 세그먼트를 조립하면서 굴진이 가능한 기능을 갖고 있는 장치의 조합이다. 또 셴드의 가동에 필요한 동력, 제어설비는 셴드단면의 크기나 구조에 의해 설비의 일부 또는 전부를 후속대차에 설치한다. 강판부분은 스킨플레이트(외판)와 그 보강재로 되어 있고, 막장측으로부터 후드부, 거더부 및 테일부의 3개 부분으로 나뉘어 진다.

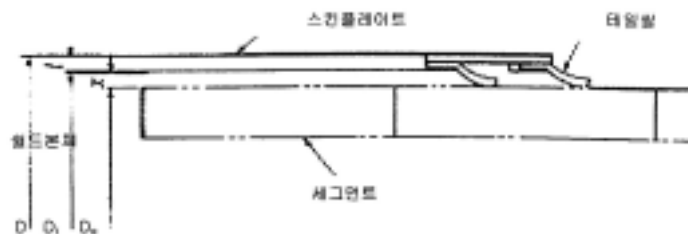
밀폐형 셴드에는 후드부와 거더부는 격벽으로 분리되고, 후드부는 커터헤드로 굴착된 토사의 배토장치로의 이동로로 이용된다. 또 비트 교환작업, 장애물제거작업 등을 압기하에서 시행하기 위해서 격벽부 또는 전통부의 링거더 일부에 맨록을 설치하기도 한다.

거더부 내에는 커터헤드 구동장치, 배토장치, 셴드잭 등의 기계장치를

격납하는 공간으로서 이용되고 테일부에서는 테일셀을 후방에 배치해서 지수기능을 갖게 한다. 또 이렉터를 설치하여 주로 세그먼트 조립작업을 조립하는 공간으로서 이용한다.

중절기구를 장착하고 있는 쉘드에서는 거더부에서 분할되기 때문에 중절빔, 중절책 등으로 연결된다. 중절기구의 사용여부는 터널의 선형, 쉘드의 외경, 지질 및 노선주변의 상황을 고려해서 결정한다. 또 지중접합 쉘드에는 보조공법을 저장하는 목적으로 커터헤드의 슬라이드, 후드의 슬라이드 등의 각종기구를 설치하는 경우도 있다.

쉘드의 외경은 세그먼트링의 외경, 테일클리어런스 및 테일스킨플레이트의 두께를 고려해서 결정해야 한다.



<Fig 2.12> 세그먼트 조립시 여유

쉘드의 외경은 스킨플레이트의 외경을 말하며 오버커터용 비트, 프리션 커터플레이트, 약액주입관 등에 의한 돌출부의 치수는 제외된다. 테일클리어런스와 테일스킨플레이트 내면과 세그먼트외주면의 간격을 말한다. 쉘드의 외경을 산정하는 식은 아래와 같다.

$$D = D_0 + 2(x + t) \quad (2.1)$$

여기에서 D : 쉘드의 외경

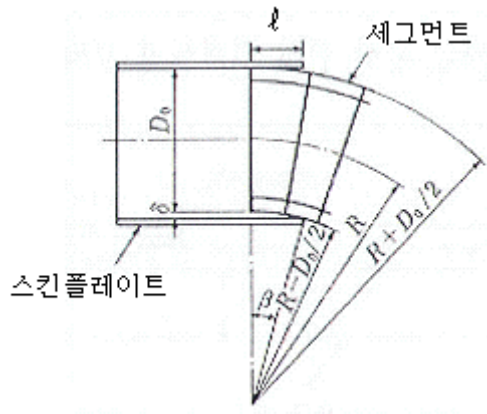
$D_0$  : 세그먼트의 외경

$x$  : 테일클리어런스(tail clearance)

$t$  : 테일스킨플레이트 두께

테일클리어런스는 세그먼트링의 형상치수, 터널의 선형, 사행수정, 테일실의 부착 등을 고려해서 결정해야 한다.

월드의 곡선시공 및 사행수정시에 필요한 최소의 여유( $x_1$ )은 월드와 세그먼트간의 최대 클리어런스,  $\delta$ 의 1/2로 볼 수 있으므로 아래의 식으로 표시할 수 있다.



<Fig 2.13> 테일 클리어런스

$$X_1 = \delta/2$$

$$\delta = (R - D_0 / 2) (1 - \cos\beta)$$

$$\approx \ell^2 / 2(R - D_0 / 2) \quad (2.2)$$

여기서,  $R$  : 곡선시공반경

$R + D_0 / 2$  = 세그먼트부의 곡선외 반경

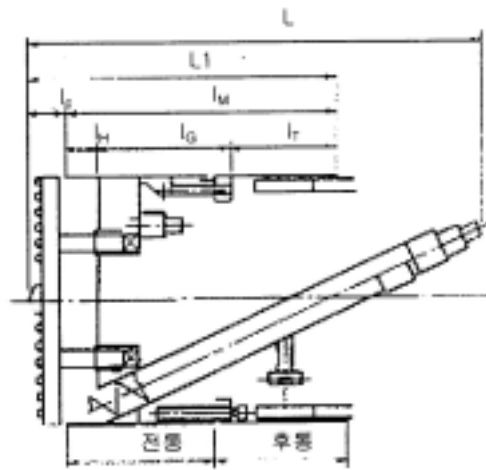
$R - D_0 / 2$  = 세그먼트부의 곡선내 반경

$\ell$  : 월드테일과 세그먼트의 최장리드(最長lead)

$\beta$  : 월드축으로부터의 세그먼트의 경사각

테일클리어런스의 실적으로서는 20~40 mm정도가 많다. 썰드를 굴진한 후에는 테일 클리어런스와 테일스킨플레이트의 두께와의 합계는 그대로 테일보이드로서 남기 때문에 클리어런스의 치수에 대해서는 충분히 검토

썰드는 <Fig 2.14>에 보인 바와 같이 크게 커터부와 본체부로 나뉘며, 본체부는 다시 후드부, 거더부, 테일부로 나눌 수 있다. 따라서 썰드전체의 길이(L), 썰드의 선단부터 테일부까지의 거리인 썰드길이(L<sub>1</sub>), 그리고 스킨플레이트의 최대길이, 또는 썰드본체의 길이( $\ell_M$ )은 각각, 다음과 같다.



<Fig 2.14> 썰드TBM의 길이

$$L = \ell_c + L_1 \quad (2.3)$$

$$L_1 = \ell_c + \ell_M$$

$$\ell_M = \ell_H + \ell_G + \ell_T$$

여기서, L<sub>1</sub> : 썰드의 길이

$\ell_M$  : 썰드본체의 길이

$\ell_c$  : 커터부의 길이

$\ell_H$  : 후드부의 길이

$\ell_G$  : 거더부의 길이

$\ell_T$  : 테일부의 길이

셴드의 길이는 외경과의 발란스를 고려한 후에 가능한 한 짧게 하는 것이 바람직하다.

후드부의 형상과 치수는 지반의 조건 및 셴드의 형식에 적합하도록 결정하고, 그 구조는 충분한 강도를 가지고 있는 것으로 해야 한다. 후드부는 막장의 안정을 확보하고, 굴착토사의 후방 이동로가 된다. 토압식, 이수압식 셴드의 경우에는 굴착토사의 배출상황을 고려해서, 형상, 치수를 결정할 필요가 있다. 특히 밀폐형 셴드의 경우는 굴착토사의 교반이 충분히 되도록 고려할 필요가 있다.

거더부의 길이는 셴드잭, 커터헤드의 수축, 진동장치, 중절기구 및 배토장치 등의 부착공간을 고려해서 결정해야 하며 그 구조는 충분한 강성을 갖고 있어야 한다.

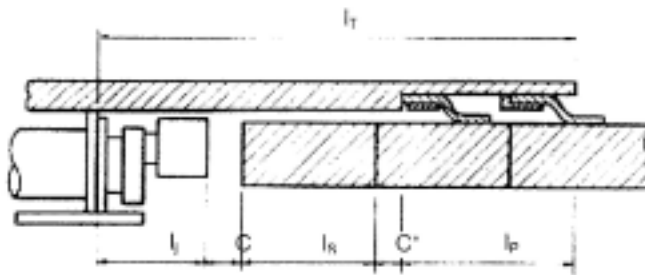
거더부는 셴드의 주구조체로 셴드에 걸리는 전체하중을 담당하는 골격이 된다. 또한, 후드부와 테일부와 함께 거더부가 충분한 강성이 있는 것으로 가정해서 설계되기 때문에 거더부의 설계에 있어서는 충분한 주의를 할 필요가 있다. 거더부의 전방과 후방은 링 모양의 강구조체로 보강되고 중,대구경 셴드에서는 기둥이나 보로 보강하는 경우가 많다. 이렇게 거더부의 전방부 및 후방부에 충분한 보강을 하기 때문에 거더부의 스킨 플레이트의 두께는 테일부나 후드부보다 얇게 설계되는 경우가 많다.

기둥이나 보는 거더로부터 하중을 지지하는 동시에 이렉터, 배토장치, 후방데크 등의 하중을 지지하고, 유압기구, 전기기구, 배관, 배선 등의 설비공간 및 유지관리 등의 작업공간의 확보가 가능하도록 설계할 필요가

있다.

중절기구를 갖고 있는 쉘드의 거더부에 있어서는 강도와 강성에 대해서도 주의 할 필요가 있다.

테일부의 길이는 세그먼트의 폭 및 형상을 토대로 해서 결정해야한다. 테일부의 길이는 세그먼트의 조립길이와 테일썰의 형상 및 단수에 의해 결정할 필요가 있다. 또 터널곡선 등을 고려해서 약간의 여유를 가질 필요가 있다. 테일부의 길이는 일반적으로 아래와 같이 산정한다.



<Fig 2.15> 테일부의 길이

$$l_T = l_J + l_S + l_P + C + C' \quad (2.4)$$

여기서,  $l_T$  : 테일부의 길이

$l_J$  : 쉘드잭의 부착길이

$l_S$  : 세그먼트의 폭

$l_P$  : 테일썰의 부착길이

$C$  : 세그먼트의 조립여유=100~150 mm정도

(단 축방향 삽입형 K 세그먼트에서 세그먼트의 삽입각도에 의해 길이가 보다 길어진다.)

$C'$  : 기타의 여유(테일내의 세그먼트 길이)

테일스킨플레이트의 두께는 변형에 대해서 충분한 검토해서 결정해야

한다. 테일스킨플레이트의 두께는 유해한 변형을 발생하지 않는 범위내에서 가능한 얇게 하는 쪽이 바람직하다, 다만 테일썰 부착에 필요한 두께를 고려해야 한다. 테일부는 안전하고 효율적인 작업이 가능하도록 그 공간을 확보해야 한다. 테일부에는 세그먼트의 조립작업, 약액주입작업 및 측량작업 등 안전하고 효율적이 되도록 공간을 확보하고 필요에 따라서 작업대 등을 설치할 필요가 있다.

테일썰은 약액주입재의 누수방지 및 내압성, 내구성 등을 고려해서 선정해야한다. 일반적으로 테일썰은 테일스킨플레이트와 세그먼트외면과의 사이에 장착하여 지하수나 약액주입재 등의 쉘드내부로의 누수방지를 목적으로 하지만 토압식 쉘드, 이수가압식 쉘드에 대해서는 압력유지의 역할도 한다.

세그먼트는 필히 쉘드 테일부와 동심원 모양으로 조립되는 것이 아니고 편심으로 조립되기도 한다. 특히 곡선시공의 경우 테일클리어런스는 균등하게 되는 경우가 적기 때문에 테일클리어런스가 적어도 소정의 2배정도 되는 상태라도 소요의 약액 주입 압이나 지하수압, 이수압 등에 견딜 수가 있어야 한다.

테일썰의 부착단수는 지수성능을 향상시키기위해 통상적으로 복수로 설치한다. 부착단수는 쉘드의 외경, 토질조건 지하수압, 시공도중의 테일썰의 교환 등을 고려해서 결정해야 한다. 테일썰의 재료는 고무, 수지, 동, 스테인레스 또는 이것들의 조합품 등 여러 가지가 있지만 테일썰의 형상은 브러쉬식, 판모양 등이 있다.

일반적으로 테일썰의 지수성과 수명을 높이는 목적으로 썰 사이에 윤활유를 충전하지만 굴착에 따라 소비되기 때문에 정기적으로 보충할 수 있도록 설비할 필요가 있다. 테일썰의 수명은 재료, 구조에 따라 다르지만 그 외에 사용하는 세그먼트의 배면재질, 조립정도에 따라 달라지는 경우

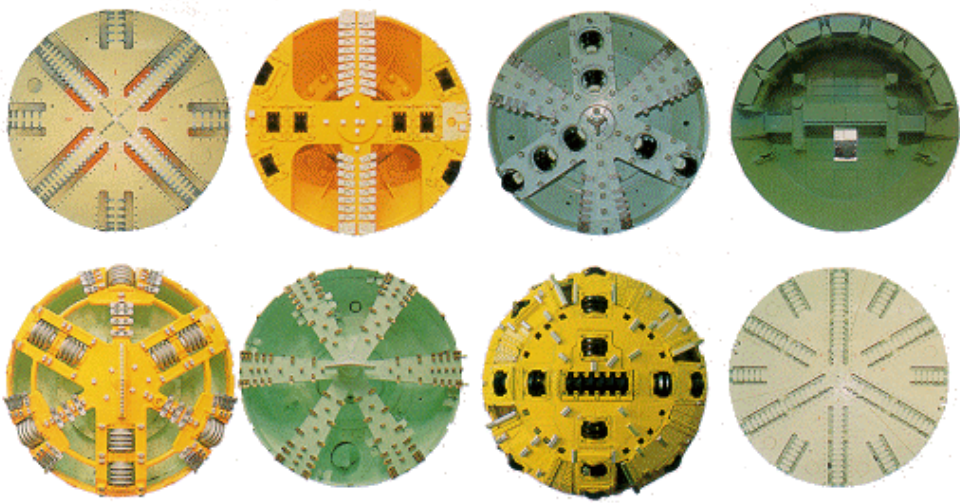
가 많다. 재료의 선택에 있어서는 이들 조건들을 고려해서 충분히 검토해야 한다. 특히 장거리 시공의 경우나 급곡선 시공에 대해서는 재질, 단수, 그리고 충전재의 주입방법 등을 충분히 검토해야 한다.

## 2.4.2 커터헤드

굴착기구는 굴진속도의 향상 및 적절한 막장보호에 의한 안전시공을 고려해서 선정해야 한다.

굴착기구의 선정에 있어서는 쉘드의 형식, 커터헤드의 형식, 커터헤드의 지지방식, 커터장비의 토크, 커터슬릿트, 커터비트, 장비추력 등에 대해서, 또 이들의 조합에 대해서도 충분히 고려할 필요가 있다.

토압식, 이수식가압식 쉘드의 커터헤드의 형식은 지반의 조건에 적합하고 기능이 확실히 발휘될 수 있도록 선정해야 한다. 토압식, 이수식 쉘드의 사용목적은 굴진속도의 향상 및 적절한 막장보호에 의해 안전시공을 하기 위해서다. 따라서, 토압식, 이수식쉘드에 있어서는 커터헤드의 형식, 커터헤드의 지지방식, 장비의 토크, 커터비트, 장비추력 등에 의해 또는 이들의 조합에 대해서도 충분한 고려를 해야 한다.



<Fig 2.16> 각종 커터면판

가. 절삭방식은 회전절삭방식이 구조적으로 간단하여 일반적으로 사용되고 있다.

나. 구조는 스포크형과 면판형이 있고, 시공조건, 토질조건에 의해 결정된다.

다. 선단의 형상으로는 평판형(flat), 세미돔형(semi-dome), 돔형(dome)의 크게 3가지로 분류할 수가 있다. 이들의 형상은 막장의 안정을 고려해서 결정해야 한다. 전면의 형상은 대체로 원형으로 되어있지만 터널의 용도에 따라 기타의 형상으로 만들어지기도 한다. 국내 현장 적용에 있어서 Open TBM장비의 경우 돔(dome)형식을 사용하고 쉘드장비의 경우는 세미돔(semi-dome), 평판형(flat)을 일반적으로 사용하고 있다.

커터헤드의 지지방식은 구경, 토질조건 등에 적합하도록 선정해야 하며 배토기구와의 조합 등에 대해서도 고려해야 한다. 지지방식에는 다음과 같은 방식이 있다.

가. 센터지지방식 : 구조가 단순하고 중, 소구경의 쉴드에 사용되는 경우가 많고, 이 방식은 구조가 간단하기 때문에 점성토의 부착 위험이 적다. 또 커터헤드에 블라인드구조가 필요한 경우에는 다른 방식과 비교해서 용이하다. 하지만 구조상 기내공간이 좁기 때문에 전석이나 암반처리 등의 어려움이 있다.

나. 중간지지방식 : 구조적으로 균형을 맞추고 주로 대,중구경에 사용되는 경우가 많다. 소구경에 사용하는 경우에는 전석층의 처리, 중심부 점성토의 부착방지 등을 충분히 검토할 필요가 있다.

다. 외주지지방식 : 기계내 공간이 넓기 때문에 소구경에 있어서는 전석 등의 처리가 용이하다. 이 방식은 커터헤드 외주부에서 토사의 부착이 발생하기 쉽기 때문에 점성토에서는 부착방지를 충분히 검토할 필요가 있다.

커터의 토크는 지반의 조건, 쉴드의 형식, 쉴드의 구조 등을 고려해서 결정해야 하지만, 커터의 소요토크는 아래의 요소로부터 결정된다.

$$T_N = T_1 + T_2 + T_3 + T_4 + T_5 + T_6 \quad (2.5)$$

여기서,  $T_N$  : 커터의 소요 토크

$T_1$  : 흙의 절삭저항에 의한 토크

$T_2$  : 흙의 마찰저항에 의한 토크

$T_3$  : 흙의 교반, 쓸어올림저항에 의한 토크

$T_4$  : 축수저항에 의한 토크

$T_5$  : 축수쉴드의 마찰저항에 의한 토크

$T_6$  : 감속장치의 기계손실에 의한 토크 등이다.

장비토크는 소요토크에 대해 여유를 가질 필요가 있다.

지질의 조건에 따라 쉴드장비의 회전력(rpm)및 토크의 값이 다른 장비

를 선정해야 하는데, 연약층의 경우 컷터의 투과 깊이가 깊으므로 저속의 회전력(rpm)과 토크치를 높게 하고, 암반층의 경우 컷터의 투과 깊이가 얕으므로 고속의 회전력(rpm)과 토크치를 낮게 하여 제작하는 것이 효율적이다

컷터 토크는 경험적으로 아래의 식에 의해 구할 수 있다.

$$T = \alpha \times D^3 \quad (2.6)$$

여기서, T : 토크

$\alpha$  : 토크계수(토압식 : 8~23, 이수식 : 9~15)

D : 쉘드의 외경

다만 위에 제시한  $\alpha$ 의 값은 T의 단위가 KN·m, D의 단위가 m일 때 적용된다.

컷터의 구동방식으로는 유압모터방식과 전동모터방식이 있다.

유압모터구동방식은 회전속도제어, 토크관리, 미동조정이 용이하고, 전동모터구동방식은 효율이 좋고 갱내환경이 좋다(소음이 적고, 갱내온도 상승이 적다). 또, 인버트 등을 사용하는 것에 의해 회전속도제어가 가능하고, 컷터구동용 파워유니트 대차를 간소화 할 수 있는 장점이 있지만, 미동조정에 대해서는 충분한 검토를 할 필요가 있다.

국내의 지질에 있어서 암반층의 경우에는 화강암, 편모암, 안산암 등이 주종을 이루고 있어 암질 특성상 컷터의 배열을 75~100mm 간격으로 사용할 것을 각 장비 메이커 별로 추천하고 있으며, 쉘드장비의 경우, 면판 형식을 세미돔(semi-dome), 평판형(flat)을 일반적으로 사용하기 때문에 돔(dome) 형식의 면판보다 컷터 부착 면적에 제한을 많이 받으며, 따라서 컷터의 개수 및 크기를 제한 받는다. 이와 같은 이유로 국내의 쉘드장비의 경우 크기가 12"~14" 사이의 컷터를 일반적으로 사용하고 있다.

커터의 슬릿트는 지반의 조건, 막정안정기구 및 굴착기능을 고려해서 형식, 치수, 배치 등을 결정해야 한다.

커터 슬릿트의 형상 및 치수는 스포크 수 유입된 암의 크기 등으로부터 제약을 받는 경우가 있기 때문에 주의가 필요하다.

커터헤드의 개구율은 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$W_0 = A_s / A_r \quad (2.7)$$

여기서  $W_0$  : 개구율

$A_s$  : 면판의 개구부분 총면적(비트의 투영면적은 무시한다)

$A_r$  : 커터헤드의 면적

이수가압식의 경우에는 개구율이 10~30 %정도가 많고, 토압식의 경우에는 개구율의 범위가 넓다. 고결점성토나 부착력이 높은 토질에 대해서는 개구율을 크게 해서 굴착하는 것이 바람직하다. 한편, 붕괴성이 높은 지반에서는 토사의 유입이 과다해지기 때문에 개구율에 대해서는 충분한 검토해야 하며 필요에 따라 굴진 정지시의 슬릿트로부터 붕괴를 방지하는 슬릿트 개폐장치를 고려하는 경우도 있다.

### 2.4.3 추진기구

셴드잭의 선정과 배치는 셴드의 조향성, 세그먼트의 조립 시공성 등을 고려하여 결정 해야 한다.

잭에는 높은 유압을 이용하기 때문에 콤팩트한 구조가 되도록 해야 한다. 현재에는 사용하는 유압펌프, 밸브배관류 등의 관계로 30,000~40,000 kN/m<sup>2</sup>이 사용되고 있다.

잭류는 가볍고, 내구성이 크며 보수, 교환이 용이하도록 해야 하고, 잭류는 전용을 충분히 고려해서 선택하는 것이 바람직하다.

잭류는 쉘드의 스킨플레이트의 내측에 근접해서 등간격으로 배치하여 세그먼트의 전체부분에 균등하게 하중을 가하도록 배치할 필요가 있다. 하지만 토질이나 기타의 조건에 의해 간격을 다르게 배치하는 경우도 있다.

셸드잭은 추진축이 쉘드 축선에 평행하도록 설치해야 한다. 즉 롤링 방식을 위해서 일부를 경사지게 배치하기도 한다. 이 경우에는 릿드에 편심 하중이 작용하므로 주의가 필요하다.

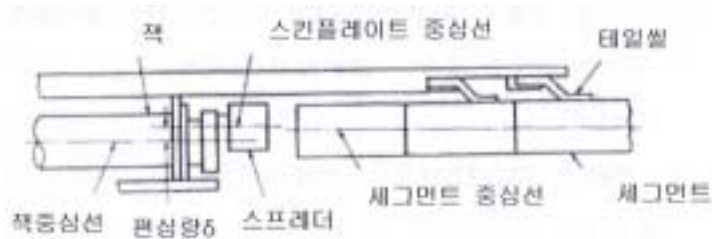
셸드잭 1본당 추력과 본수는 쉘드의 외경, 총추력, 세그먼트의 구조, 분할수 및 터널의 선형 등의 관계를 고려해서 결정해야 한다. 일반적으로 셸드잭의 1본당 총추력은 중소구경 쉘드에서는 600~1,500 kN, 대구경 쉘드에서는 2,000~4,000 kN이 많이 사용되고 있다. 일반적으로 국내의 경우에는 굴착단면에 비례하여 8~14개의 셸드잭을 설치하는 것으로 제작되어 있다.

셸드잭의 피스톤롯드 선단에는 스프레더를 설치하지 않으면 안된다. 셸드잭의 스프레더는 구면계수 등에 의해 세그먼트 단면에 균등하게 추력이 분포되는 구조로 해야 한다.

세그먼트에 가해지는 편심력을 적게하는 목적과 스프레더 중심을 잭의 중심선에 편심을 가하는 역할을 한다. 또 동일 터널구간에서 크기가 다른 세그먼트를 사용하는 경우에는 세그먼트와 부딪혀 스프레더를 교환하는 일도 있다.

스프레더는 세그먼트에 국부적으로 과대한 힘이 작용하지 않도록 크기를 고려해서 결정할 필요가 있다. 특히 강재세그먼트를 사용하는 경우에는 종리브와의 간섭여부에 주의할 필요가 있다.

세그먼트재질에 따라 스프레더면에 고무판 등의 라이닝을 시공하여 세그먼트면을 보호할 필요가 있다.



<Fig 2.17> 스프레더

월드잭의 스트로크는 세그먼트 폭에 소요의 여유를 주어 결정해야 한다. 스트로크의 여유는 세그먼트를 월드테일내에서 조립하는 경우에 필요하기도 하고, 게다가 월드의 곡선시공에 대해서도 충분한 길이로 해야 한다. 일반적으로 월드잭의 스트로크는 세그먼트의 폭에 100~150 mm를 더한 길이로 한다. 또 축방향삽입형 K형 세그먼트의 경우에는 세그먼트의 높이, 세그먼트의 폭, K형 세그먼트의 주방향길이, 삽입각도 등에 따라 큰 스트로크가 필요하기도 한다.

월드잭의 작동속도는 굴진속도 및 시공능율을 고려해서 결정해야한다. 월드잭의 작동속도는 보통의 경우에는 50~100 mm/min 정도를 사용한다. 또 월드잭의 원상복구 속도는 시공능율을 높이기 위해 빠를수록 좋다.

#### 2.4.4 세그먼트 조립기구

이렉터는 월드의 형식과 규모, 세그먼트, 굴착토의 처리방법, 작업싸이클 등을 고려하고, 세그먼트의 조립이 정확하고 능률적으로 되도록 선정해야 한다. 이렉터는 테일부에서 세그먼트를 소정의 형상으로 조립하는 장치이다. 이렉터는 회전운동 및 신축운동을 하도록 설비해야한다. 회전 및 신축작용에는 유압식이 이용되고 있다. 이렉터는 월드본체의 링거더부

에 장착되는 것과 후방대차에 장착되는 것도 있다.

이렉터에는 쉘드에 장착되는 링식과 중공(中空)축식이 있으나, 링식이 가장 많이 사용되고 있다. 링식은 링거더 후방부 또는 쉘드잭 스프레더 부근의 테일부에 설치된 롤러러 지지된 중공원형에 신축이 자유자재로 움직이는 암(arm)을 설치한 것이다. 중공축식은 회전축이 중공으로 되어 있고 그 가운데 굴착토의 반출장치 등이 설치 가능한 구조를 갖고 있다.

에렉터그리퍼의 구조는 세그먼트의 형상에 의해 달라지지만 세그먼트의 조립 능력에 영향을 미치기 때문에 설계에 있어서는 세그먼트를 안전하고 신속하게 조립가능 하도록 충분한 주의를 기울여야 된다.

세그먼트 자동조립장치는 조립작업의 안전성향상, 조립정밀도의 향상, 작업의 간편성 증대, 작업의 능률화를 위해 사용되며, 자동조립장치는 세그먼트의 공급, 위치결정, 연속체결 등의 장치로 구성되어 있다. 자동조립 장치의 사용에 있어서는 세그먼트의 형상, 갱내환경, 기계의 내구성, 장착 공간 등에 대해서 고려한 후 사용해야 한다.

에렉터의 능력은 세그먼트의 종류, 형상, 중량 및 조립의 순서 등을 고려해서 결정해야 한다. 에렉터의 능력은 아래의 사항을 참고로 한다.

가. 압입력 : 세그먼트의 조립시 에렉터로 집은 세그먼트를 바깥쪽으로 압입하거나, 또는 K형 세그먼트를 삽입하거나 조립을 완료한 세그먼트를 바로잡기 위한 능력이다. 일반적으로 세그먼트 최대 피스(piece) 중량의 5배 이상의 능력이 바람직하다.

나. 인상(引上)력 : 세그먼트 최대중량의 1.5~2배를 산정하는 것이 일반적이다.

다. 회전력 : 에렉터는 세그먼트의 최대 피스를 집은 상태에서 최대 스트로크로 회전이 용이하도록 해야 한다.

라. 회전속도 : 회전속도는 저속과 고속의 2단계 제어가 가능한 것이 바

람직하다. 이 경우 고속에서의 경우는 250~400 mm/s, 저속에서는 10~50 mm/s 정도가 일반적이다.

마. 신축속도 : 신축속도는 유압실린더의 반경방향으로 신축하는 속도로 일반적으로 50~200 mm/s 정도가 좋다.

바. 전후이동거리 : 세그먼트의 조립시 세그먼트를 축방향으로 이동 가능한 거리로 일반적으로 150~300 mm 정도가 바람직하다.

사. 세그먼트 자동조립장치의 부가능력 : 세그먼트자동 조립장치에 있어서는 제어기구나 조립 방법에 의해 상기 가~바 까지의 능력 및 속도를 자유자재로 제어가능한 경우가 있다.

아. 작동유압 : 액터계의 유압은 10,000~20,000 kN/m<sup>2</sup> 정도가 사용되고 있다.

세그먼트를 바르게 조립하기 위해 형상유지장치 등 보조기구를 설치하는 것이 바람직하다. 세그먼트를 정확하게 조립하지 않으면 다음의 세그먼트의 조립이 곤란하게 된다. 정확한 조립을 위해서는 다음과 같은 방법이 있다.

가. 형상유지장치에 설치한 유압잭을 사용하여 세그먼트를 교정하는 방법

나. 쉘드테일내면의 구조를 가공하여 세그먼트를 교정하는 방법 : 쉘드의 테일내면에 세그먼트 가이드를 설치해서 세그먼트의 이탈을 방지하고 형상유지링을 설치한 세그먼트의 변형을 제어하기도 하여 조립작업을 용이하게 하는 방법이 있다. 테일부 내경이 적어지기 때문에 방향제어 등에 가해지는 영향을 고려할 필요가 있다.

## 2.4.5 유압,전기,제어기구

### 가. 유압기구

유압회로는 각 기구가 확실하게 작동하여 이상 정지시는 정지위치를 안전하게 유지가능 하도록 해야 한다. 또 유압기구는 사용조건에 적응가능 하도록 고려해서 선택해야 한다.

유압회로는 쉴드잭계, 커터계, 에렉터계 등 각 계통별로 구성되어 있지만, 동력원은 각 계통을 통째로 설치되는 경우와 각각의 것을 공용하는 경우가 있다. 유압기구는 일반건설기계와 다르며, 고압, 대용량으로 사용되는 경우가 많기 때문에 선택 및 설치계획에 있어서 충분한 주의를 기울일 필요가 있다.

제어지령을 근거로 각 동작부가 확실하게 작동하여 외력을 받은 작동부는 정지시에도 그 위치를 유지가능 하도록 고려한다. 또 전원차단이나 비상정지시의 경우에도 정지 위치를 안전하게 유지가능 하도록 한다.

유압작동유는 일반적으로 광물성작동유가 많이 사용되고 있고 사용에 있어서는 작동유의 청정도가 유압기구의 성능유지에 크게 영향을 끼치기 때문에 배관계통의 막힘에 대한 대책을 충분히 고려해야 한다.

사용하는 유압기구는 고온, 다습, 토사, 분진 등 사용조건 및 고효율, 저소음, 내구성 등을 충분히 고려해서 선택해야 한다.

### 나. 전기기구

전기기기류는 방수, 방습, 방진성에 유의한 기구로 하거나, 또 보호 가능한 구조로하여 가능한 한 콤팩트한 구조로서 조작, 점검, 보수 등이 편리한 위치에 설치해야 한다.

### 다. 제어기구

쉴드의 제어는 각 기구가 확실하게 작동하여 굴착, 추진, 배토 등 상호간에 연결과 관련된 기구 및 기타 기구가 밸런스를 양호하게 가동하도록

하는 시스템을 말하며, 이상시에는 안전사고에 대처 가능하도록 해야 한다.

## 2.4.6 부속기구

### 가. 자세제어장치

자세제어장치는 지반조건, 터널선형, 쉼트의 형식 등을 고려하여 확실하게 쉼트의 자세제어가 되도록 선정해야 한다. 자세제어장치는 쉼트의 선형(곡선, 구배)에 맞추어 정확하게 쉼트를 추진하기 위해서 쉼트의 자세를 제어하는 장치이다. 일반적으로 쉼트체의 조작만으로 자세제어가 곤란한 경우에 사용된다. 자세제어장치의 검토에 있어서는 쉼트의 중심 위치에 주의를 기울이는 동시에 아래의 항목을 고려해야 한다.

쉼트의 추진에 의해 생기는 저항토크에 대해서 충분한 기능과 강도를 갖고있어야 한다.

터널의 선형, 토질의 조건, 쉼트의 형식등에 의해 종류와 형상, 개수, 위치를 선정해야 한다.

자세제어장치로는 여굴장치로서 토압식, 이수식쉼트의 커터헤드에 부착하는 오버커터, 코피커터 등 쉼트외경 보다 크게 굴착하는 기구가 있으며, 이 여굴에 의해 저항토크를 경감시켜 자세제어를 쉽게 할 수가 있다. 스테빌라이저는 진행방향에 연직으로 날개를 세우고 이 저항에 의해 롤링을 방지한다. 받침은 쉼트후드 하부에 설치하여 자중에 의한 침하를 방지하는 동시에 방향수정을 할 수 있게 한다. 또 그리퍼는 터널격벽을 밀어부쳐 그의 반력에 의해 방향제어를 하는 기구이다.

### 나. 중절장치(articulation)

중절장치는 터널의 선형, 지반의 조건, 쉼트의 형식 등에 적합하고 그 기능이 확실히 발휘 가능한 형식의 구조를 선택 해야 한다.

곡선시공시의 선형확보를 위해, 쉘드본체를 전통측을 분할하여 1개소 또는 2개소로 굴곡시켜 추진시의 여굴량을 저감시키는 동시에 추진시에 추진력을 발생시켜 곡선굴진이 쉽게 하기위한 목적으로 중절장치를 설치하는 경우가 있다. 중절장치의 사용에 있어서는 중절쉘드의 지수성, 쉘드본체 굴곡시의 쉘드잭과 세그먼트 중심선과의 편심량, 토압식쉘드의 스크류콘베어 또는 송배니관의 설치간격을 고려해야 한다.

다. 중절방식 중절방식으로서는 일반적으로 쉘드잭 전후통에 지지되는 전통 지지방식과 후통측에 지지되는 후통지지방식이 사용되고 있다.

#### 라. 중절기구

쉘드본체를 중절하는 기구의 대표적인 예로는 굴곡부에 회전빔을 설치한 X 중절기구, 굴곡부에 회전빔을 사용하지않는 V 중절기구가 있다.

#### 마. 측량장치

측량장치는 신뢰도가 높고, 고온다습, 압기 등의 환경조건에 있는 갱내에 있어서도 충분한 정밀도를 가지도록 해야 한다.

#### 바. 동시약액주입장치

동시약액주입장치는 주입재료, 주입방법, 주입량 등을 고려하여 테일보이드에 주입재를 확실히 충전시킬 수 있어야 하며, 또 유지관리가 용이한 기구를 선정해야 한다. 동시주입을 위해서는 약액주입관을 쉘드본체 테일부측에 장착하는 경우가 있다. 동시약액주입장치는 테일보이드내에 연속해서 주입이 가능한 기구로서 주입관의 구경, 부착위치 등에 있어서는 지반을 교란시키지 않도록 고려한 구조로 하는 동시에 쉘드의 발진시에 엔트랜스팩킹의 기능을 손상시키지 않도록 배려한 구조로 해야 한다. 주입작업에 있어서는 주입재료의 토출구로부터 토사나 물의 역류를 방지하고 연속적으로 주입이 되도록 하며, 또 주입라인에서의 고결에 대해서는 세정제 등을 이용하여 고결을 방지할 필요가 있다.

#### 사. 후방대차

후방대차는 쉼드의 외경, 형식, 장치용량에 의해 쉼드내에 설치하지 못하는 운전석, 유압장치, 전기장치를 설치하는 동시에 굴착토사반출설비, 주입설비, 세그먼트 하역용 호이스트 등을 설치하는 대차이다.

터널단면과 후방대차의 배치는 탑재기구, 장치의 보수 및 관리, 굴착토 반출이나 세그먼트의 투입, 각종 작업대 등을 고려하여 작업성이 확보되도록 계획해야 한다.

소구경 쉼드에서는 대피통로의 확보가 곤란하기 때문에 안전관리상의 대책이 필요하다. 대구경 쉼드에서는 난간등의 낙하방지 대책이 필요하다.

후방대차의 형상에는 문형(門形)대차, 편측대차 등이 있고, 터널내경, 공사의 특성에 따라서 적절한 것을 선정해야 한다. 일반적으로 후방대차 전용의 궤도를 부설하거나, 브라켓을 세그먼트에 부착하여 그 위에 주행시킨다. 이동방식으로는 후방대차를 쉼드본체와 잠금장치 등으로 연결하거나, 쉼드추진에 따라 견인하는 동시견인식과 대차가 쉼드기계에 붙어있는 자주식대차의 방식이 있다. 즉, 대차구성의 계획에 있어서는 급곡선시 공부의 대차이동에 따른 세그먼트와의 공간확보 및 견인에 따른 대차의 전도, 탈선방지에 대한 고려, 급구배 시공부에서의 대차의 탈선방지대책에 대해서 충분한 검토를 해야 한다.

#### 아. 윤활기구

윤활기구는 커터의 축수, 커터축수썰, 감속장치, 아지테이터, 스크류콘베어, 중절장치 등이 정상적인 기능을 유지하도록 선정해야 한다. 윤활기구의 운전방법에 있어서는 소정의 윤활유를 선정된 방법에 의해 정기적으로 일정량을 보급하는 것으로 각부의 기구, 장치가 정상적인 기능을 유지하도록 하기 위하여 보통의 작업 사이클로 주입하는 것이 바람직하다.

## 2.5 이수식 쉼드

### 2.5.1 특징

일본의 슬러리 쉼드의 활발한 개발과 수많은 응용의 원인은 일본의 큰 해안도시들에서 발견되는 지질유형이다. 지질은 종종 수평으로 층을 형성하고, 강과 바다로부터의 퇴적물로 구성된다. 충적모래(alluvial sands)의 아래는 보통 점토와 실트로 이루어진 부드러운, 점성 지질이 존재한다. 이러한 층은 해안으로부터 매우 멀리 떨어지면서 층이 얇아진다. 모래는 자갈층 아래에 위치한다. 따라서 슬러리 쉼드는 모래 혹은 실트에서의 응용을 위하여 설계된다. 한계는 구멍의 막힘(clogging)을 유발하는 보다 점성이 많은 점토, 혹은 커팅휠에 작용하는 마찰력을 극복하기 위해 토크의 상당한 증가를 요하는 조밀한 자갈층에서 나타난다.

슬러리 쉼드의 주요한 특성들은 지지 유체의 유형, 커팅휠의 설계와 지압력의 조정과 제어방법이다.

슬러리 쉼드의 커팅휠은 평평하게 설계되고 거의 닫혔으며, 기계적인 막장지지 기능을 제공한다. 방해물 등의 제거를 위한 터널면으로의 접근은 오직 몇 개의 구멍들을 통해서만 가능하다. 커팅휠은 각방향에서 회전하는 헤드를 갖고, 두줄로 방사상으로 배치된다. 지질은 병렬로 배열된 슬릿(slot)을 통해서 쉼드로 들어가는데 슬릿의 너비는 예상되는 최대 고체의 크기에 맞추어진다.

필요한 토크에 따라서 커팅휠은 중심축 타입(center shaft type), 드럼 타입(drum type) 혹은 중심원뿔 타입(center cone type)의 설계가 적용된다.

지지유체는 굴착챔버의 윗부분에서 투입되고, 굴착된 토사와 슬러리와 혼합물은 굴착챔버 하부에서 추출된다. 혼합물의 침전을 방지하고 균

질한 운송매개체를 만들어 내기 위해 아지테이터(argitator) 장치가 설치된다.

슬러리 쉘드에서 터널막장의 지지압력은 굴착챔버내의 슬러리 쉘드의 추가 및 제거를 통해서 직접적으로 영향을 받는다. 굴착챔버 안, 배니관과 송니관의 안쪽에 센서에 의해 측정된 지지압력은 이론적으로 계산된 지지압력과 비교된다. 슬러리액 순회펌프와 밸브들은 동일한 방법으로 제어된다.

터널막장에서 변화를 보는 것은 불가능하기 때문에 안정성은 이론적인 굴착량과 현재의 굴착량 사이의 비교에 의해서 제어될 수 있다. 현재의 굴착량은 지지유체의 밀도를 측정함으로써 계산된다.

터널 굴착기계의 모든 운전 및 제어기능 들은 지상의 중앙처리장치내에서 집중된다. 많은 수의 자료가 수집되고, 분류되고, 가시화 되지만 굴착도중 곤란한 경우가 생기는 것에 대비하여 쉘드내부에 오퍼레이터가 필요하다.

## 2.5.2 굴진속도

일반적으로 토사지반에서의 쉘드 굴진속도는 여러 현장의 데이터를 가지고 기술자의 판단에 의해 경험적으로 결정되고 있으며, 경험적으로 결정된 굴진속도에 의해 후속설비의 용량이 결정되고 있다. 굴진속도의 최대치에 모든 후속설비의 용량이 맞추어져 있으며, 이는 가동율이 상대적으로 낮은 밀폐형 쉘드터널에서의 공기지연을 최대한 방지하기 위한 목적이거나, 한편으로는 과다한 공사비 증액요인으로 평가할 수 있다. 적절한 굴진속도 예측과 문제발생시 대응체계의 수립, 또한 가동율의 증가가 경제적이고 안정적인 공사수행에 필요불가결한 조건이나, 공사의 성격상 어느 정도의 한계는 분명히 있다.

반면에 암반구간에서는 쉘드장비라 하더라도 이는 open TBM과 유사한 개념을 적용할 수가 있으며, 암반구간에 대한 open TBM의 굴진속도의 산정은 몇몇 문헌에서 자세히 알려져 있다.

노르웨이의 트론트하임(Trondheim) 대학이 발간한 보고서 “경암반 기계화 시공(Project Report 1-94, Hard Rock Tunnel Boring)”는 주로 경암반 굴착용 TBM의 작업성능예측에 관한 내용을 수록하였으며, 이 자료는 노르웨이와 기타 국가의 TBM 굴진현장 자료를 사용하였는데 33개 현장의 총연장 230km에 이르는 터널자료를 통계처리 하였다. 이들 자료는 비교적 양호한 터널현장에서 수집된 것으로 일반적인 자료이며 특수한 상태의 자료는 제외되었다. 즉 이 자료는 일반적인 범주 내에서 활용할 수 있다는 점을 인식하여야 한다. 이 자료에 제시된 예측모델은 1975년 이래 지속적으로 발전되어 왔으며, 현재의 모델은 경암반 터널의 TBM 굴착을 시행할 때 공사기간과 공사비의 예측, 커터링의 수명예측, 문제발생 가능성과 대응책 등을 도표로 제시하고 이들 도표를 사용하는 예제를 제시하였다.

TBM 굴진에 영향을 미치는 주요 변수로는 암체의 특성(Rock mass properties)과 장비의 특성(machine parameters)이 있고, 이들로부터 순관입률과 부가 소요시간을 고려하여 총 굴진율을 산정할 수 있다.

암체특성으로는 굴진율 지수(DRI ; Drilling Rate Index), 커터수명 지수(CLI; Cutter Life Index), 파쇄면(Fracturing)이 있다.

굴진율 지수는 취성치(Brittleness Value S20), 시버의 J-값(Sievers J-Value SJ)이라는 실내실험을 통하여 구할 수 있는데, 이 두 실험은 암석의 표면경도(Surface Hardness)에 관련된 것으로 반복충격하중을 가하여 암석의 파쇄저항 능력을 평가한 수치를 부여한다.

커터 수명지수는 시버의 J-값과 마모지수(AVS; Abrasion Value Steel) 값으로 계산한다.

터널의 TBM굴착에서 가장 중요한 굴진지수가 파쇄면인데, 파쇄면이란 절리나 틈새로 구성된 연약면으로써 이 면을 따라 전단강도가 거의 없는 상태를 의미한다. 이들 파쇄면 사이의 간격이 좁아질수록 굴진속도에 미치는 영향이 커진다.

장비특성으로는 커터 기본추력(Basic Cutter Thrust), 커터간격(Cutter Spacing), 커터헤드 회전수(rpm), 커터헤드 출력과 소요 토크(Torque) 등이 있다.

커터의 기본추력은 TBM의 총추력을 커터의 수로 나눈 것이다. 즉, 커터 기본추력은 커터헤드에 있는 모든 커터들의 평균 추력을 의미한다.

커터간격은 막장면에 그려지는 커터 궤적들 사이의 평균거리를 말하며, 보통 약 70mm이다.

커터헤드 회전수는 커터헤드의 직경에 반비례하는데, 이는 주변 커터(peripheral cutter)의 회전속도(rolling speed)를 제한하기 위함이다.

커터헤드 출력은 커터헤드에 토크를 주기위한 모터의 정격출력을 의미한다. 회전저항과 소요토크는 순굴진량에 비례하여 증가한다. 그러므로 토크의 용량은 굴진율이 높거나, 매우 파쇄된 암반을 TBM이 굴진할 때 제약요소가 될 수 있다.

전체 터널굴착 작업시간에는 순관입율에 따라 결정되는 굴착시간(boring time), 실린더의 스트로크(stroke)길이에 의존하고 보통은 1.5~2.0m의 스트로크에 평균 4~5분이 소요되는 그립핑 시간(gripping time), 커터링 수명과 순관입율에 의존하는데 커터교환에 필요한 시간은 1개 커터당 30~60분 정도로 다양한 커터교환 및 검사시간, 순관입율에 의존하는 유지관리와 보수에 소요되는 시간, 세그먼트 조립시간, 수송 대기 시간, 측량 혹은 레이저 장비 이동시간, 지하수 처리시간, 환기용 전력선 부설시간이나, 청소 등에 걸리는 시간 등이 있다.

## 2.6 지표침하

### 2.6.1 지표침하 이론

이동이 가능한 안전장치로서 쉴드는 마지막 라이닝이 설치되기까지 공간의 안전을 보장하는 역할을 하게 된다. 쉴드는 둘러싸고 있는 토압을 견뎌야 하고 지하수의 유입을 막을 수 있어야만 한다.

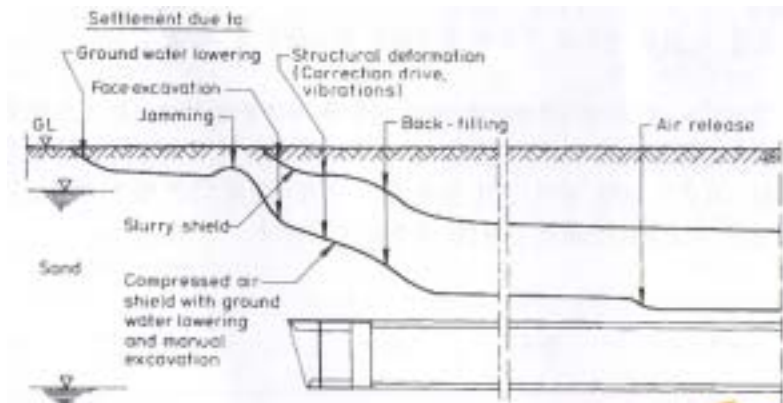
하상에서의 시공은 상부 지표침하에 대한 염려가 중요하지는 않지만 도심지에서는 지표면의 침하방지가 무엇보다도 중요하다.

지표면의 침하가 거의 일어나지 않게 하려면 쉴드를 전진시킬 때 작업이 신속하게 이루어져야 한다. 즉 발생하는 공극을 계속적으로 지지해주는 것이 지표침하를 최소화하는 필요조건인 것이다. 자연적으로 지표층이 헐거워지고 제 위치를 이탈하는 것을 최소화시켜야 하며, 지지가 필요한 곳은 터널막장, 쉴드지역, 쉴드후방이다.

현대적인 쉴드 터널링에서 조차 지표침하를 완전히 배제할 수는 없다. 공극 주위의 자연 지표층이 연약화 되고 교란되면 압력이 이탈되고 지표면이 움푹이게 되는데, 이것이 지표의 침하가 된다. 그렇지만 현대의 터널링 기술은 지하의 구조물과 지표면에 존재하는 구조물의 피해를 크게 줄일 수 있을 정도로 지표의 움푹임을 최소화 할 수 있다.

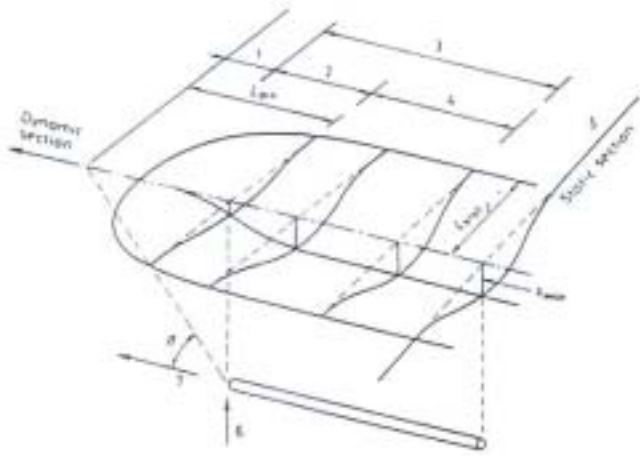
쉴드를 사용하는 터널공사시 지표침하에 영향을 미치는 요소들은 함유하는 물의 용량이 변화되기 쉬운 지반에서 지하수가 낮아지는 경우, 쉴드 전면 응력전이, 적당하지 않은 막장지지로 막장이 손실되는 경우, 곡선부 시공으로 인해 구조적 변형과 쉴드주위 지반의 압밀작용으로 진동이 발생하여 쉴드표면 공극이 불충분하게 지지될 경우, 불충분한 되메우기 또는 고압의 그라우팅에 의해 생긴 지표 침하값의 불충분한 보정, 터널내의 압축된 공기를 뿜 때 라이닝에 작용하는 중력이 증가하기 때문에 터널의 단

면감소가 되는 경우 등이다.



<Fig 2.18> 쉘드터널과 지표침하

터널의 천단침하나 내공변위는 터널내부로 밀려 들어오는 토사량과 밀접한 관계를 갖게 되며 이 영향은 지반을 통해 지표로 전파된다. 그 전파양상은 지반조건 및 터널과 지반의 기하학적 구조에 따라 크게 좌우되며 지표에 발생된 최대침하량 또한 지표의 최대 기울기와 밀접한 관계를 갖게 되므로 비록 터널은 안정되었다 할지라도 지표침하로 인해 건물이나 시설물들은 불안정하게 될 수 있다. 이러한 경우는 막장압력관리, Backfill 관리 및 굴진관리 등 철저한 시공관리를 통해 변위를 억제하여야 지표까지 파급되는 변위량을 제한할 수 있다.



<Fig 2.19> 일반적인 지표침하 양상

지표침하가 예상되는 용적을 계산하는 것은 터널공사가 지표면 위의 구조물에 영향을 예측할 수 있게 한다. 횡단면 침하형상곡선을 나타내는 식으로는,

$$S(x) = S_{\max} \text{Exp}\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (\text{by Peck, 1969}) \quad (2.8)$$

$$= S_{\max} \text{Exp}\left(-\frac{x^2}{0.25L^2}\right)$$

$$S(x) = S_{\max} \left(1 - \frac{x}{L}\right)^{4.54} \text{Exp}\left(\frac{4.54x}{L}\right) \quad (\text{by Aversin, 1953})$$

(2.9)

$$S(x) = S_{\max} \left( \frac{0.75}{\text{Exp}(2x/L)^2} + \frac{0.25}{\text{Exp}(2x/L)^4} \right)$$

(by Arato, 1992) (2.10)

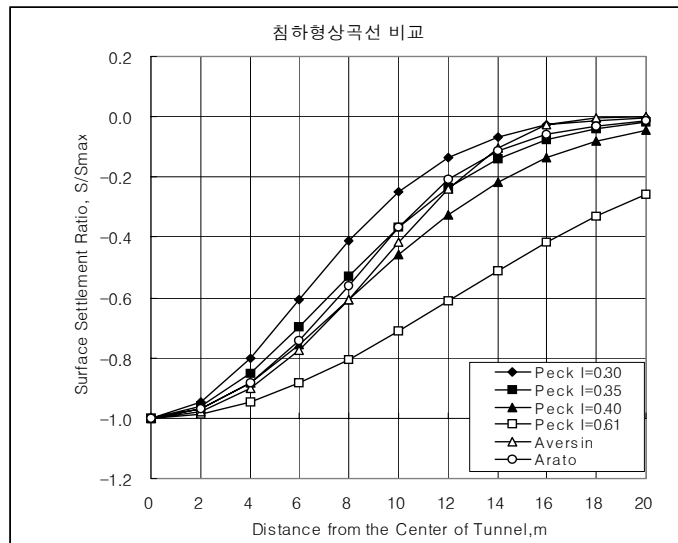
여기서, L : 침하형상폭의 절반

$i$  :  $\alpha L$  변곡점,  $\alpha$  : 지반조건에 따른 상수

$x$  : 최대침하량 발생 지점으로부터 임의점까지의 거리

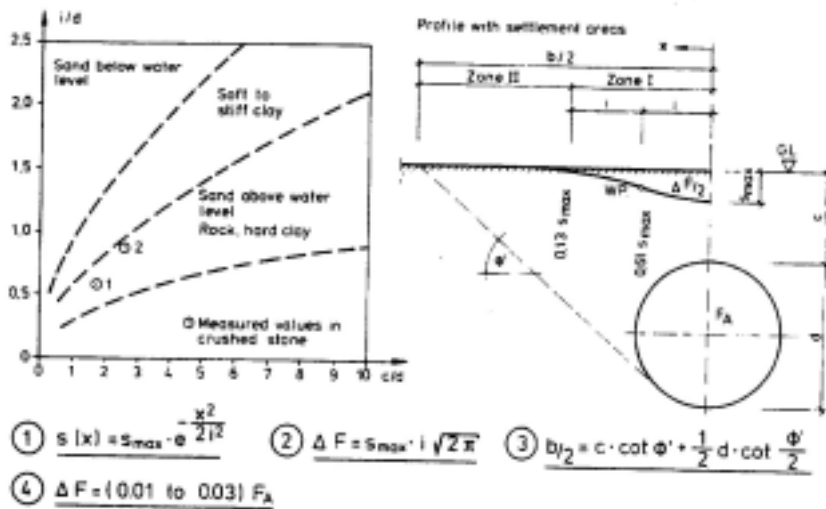
지표 침하형상 곡선으로는 Peck이 제안한 공식이 많이 사용되고 있으며, 이 공식은 침하예상폭(2L) 이외에도 변곡점  $i$ 에 대한 값이 필요하다. Peck은  $i$ 점을 최대 침하량의 61%의 침하량이 발생하는 지점 ( $S/S_{\max} = 0.61$ )으로 정의하였다. 최대침하량 발생지점(터널중심)으로부터 약 0.35L되는 지점의 값을  $i$ 값으로 정하였을 경우 Averson식이나, Arato식과 비교적 잘 일치한다. 이 결과를 이용하면 Peck이 제안한 식은  $i$ 값을 L로 치환한 식으로 변환할 수 있다. 즉,

$$S(x) = S_{\max} \text{Exp}\left(-\frac{x^2}{0.25L^2}\right).$$



<Fig 2.20> 침하형상곡선 비교

많은 공사들의 통계적인 평가를 기본으로 하여 펙(Peck)은 1969년에 지표침하 폭에 대하여 지질에 따른 근사 값들을 제정하였다.



<Fig 2.21> 토피와 지표침하 폭 사이의 관계

지질에 따라 경험적으로 계산된 곡선, 지질에 따른 커브, 토피 및 터널 직경 사이의 관계로부터 터널축에 수직인 침하곡선의 굴절 지점의 위치인  $i$ 를 측정할 수 있다. 측정값인  $i$ 와 <Fig 2.21 식①>로부터 터널 축에 수직인 어떤 지점  $x$ 에서의 침하를 결정할 수 있다. 지표의 위쪽 가장자리와 침하곡선사이의 구역  $\Delta F$ 는 <Fig 2.21 식④>에 의해서 결정된다. <Fig 2.21 식②>와 함께 사용하면 최대 침하  $S_{max}$ 를 구할 수 있다.

침하의 규모는  $\Delta F/F_A$ 의 백분율로 표시된다. 여기서  $\Delta F$ 는 침하곡의 지표를 가로지르는 영역이고,  $F_A$ 는 굴착된 터널 영역이다.  $\Delta F/F_A$ 의 값은 1에서 3% 사이에서 변하며 이것은 수동굴착 또는 부분면 굴착의 터널공사시 제어가 잘 이루어진다는 것을 표시하는 것이다. 모든 공정이 기계화된 굴착에서는 변화의 범위가 제한될 것이고 이수가압식 또는 토압식 쉴드를 사용하는 경우라면 백분율 값은 상당히 작아질 것이다.

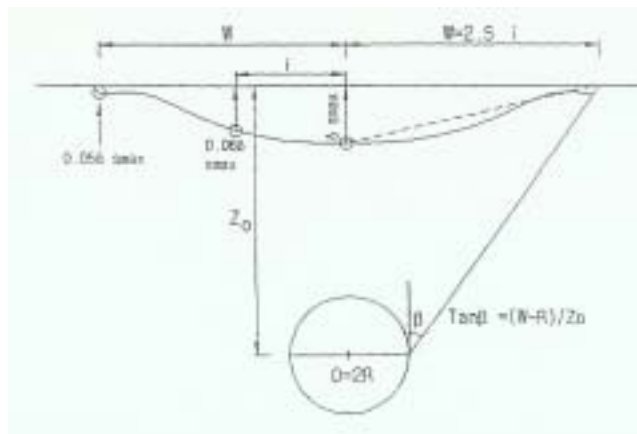
1975년 Cording과 Hansmire는 광산 침하 해석시 침하폭을 규정하는 Limit angle과 유사한 Draw angle( $\beta$ 각)과 트라프 폭의 1/2을 나타내는

W를 이용하여  $i/R$ 과  $Z_0/D$ 와의 상관관계를 제시하였다.  $\beta$ 각은 흙의 성질과 함께 터널의 기하학적인 제원과 밀접한 관계를 갖고 있기 때문에 현장 시험이나, 실내시험을 통하여 결정되는 일반적인 재료의 성질계수와는 다르다. 최근 터널현장에서는 간편하게 침하해석시 터널의 깊이를 무시하고, 단지 지반의 성질만을 고려하여  $\beta$ 각을 다음과 같은 식으로 가정하는 경우가 많다.

$$\beta = 45^\circ - \frac{\psi_m}{2} \quad (2.11)$$

여기서,  $\psi_m$  : 야기된 지반의 내부마찰각

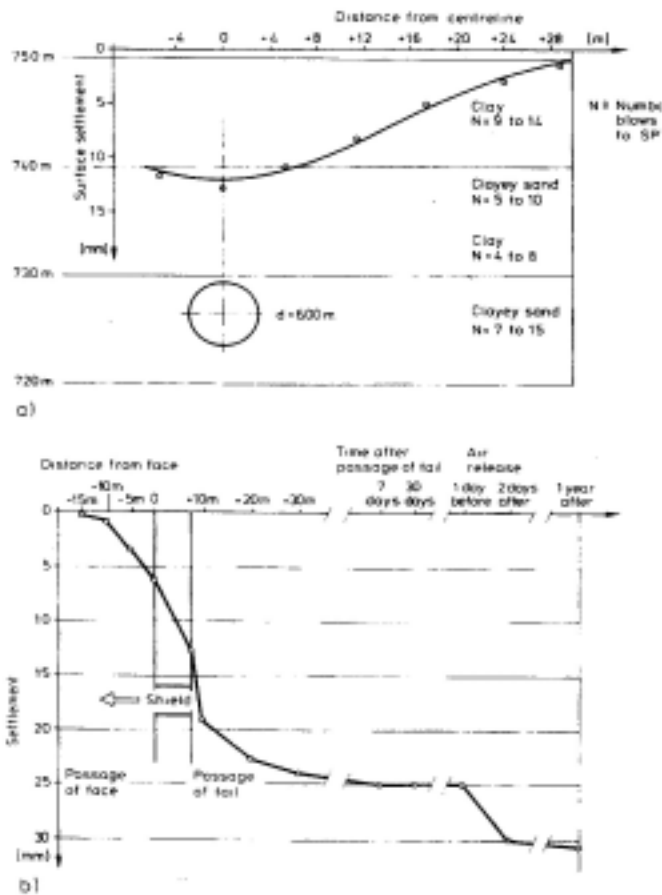
(Mobilized angle of internal friction)



<Fig 2.22> 침하영역해석도표(Cording & Hansmire,1976)

## 2.6.2 쉘터널의 지표침하 측정값

쉘터널 지표침하의 완전한 내용은 아주 드문 경우에만 발표되었다. 1978년 소지오(Sozio)는 진흙과 진흙모래 지반에서 약 25미터 깊이에서의 쉘드공사에 대해 발표하였다. 터널은 압축공기하에서 전단면 굴착방식으로 시공되었다.

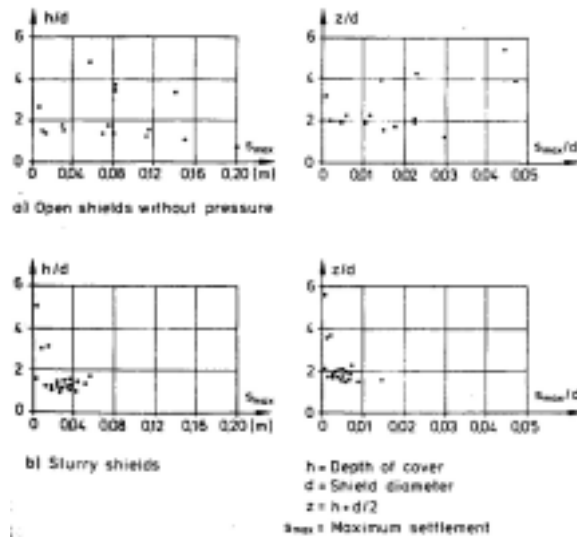


<Fig 2.23> a) 횡방향 침하곡선

b) 종방향 침하곡선

<Fig 2.23 a>는 터널 축에 직각인 횡단면 침하의 측정값을 보여준다. 균형곡선은 침하골의 전형적인 형태를 나타낸다. 아래의 b곡선은 불충분한 Backfill상태를 보여준다. 변형이 잘되는 주철 라이닝에서 압축공기를 끌어내리면 터널 4m 위에서의 침하가 대략 5m/m 정도 증가한다.

<Fig 2.24>는 지표침하에서의 막장지지의 영향을 보여준다. 점성 지질에서 개방형 쉴드에서 침하값은 일반적으로 슬러리 쉴드의 경우보다 훨씬 크다.



<Fig 2.24> 쉴드 형식과 최대지표 침하의 관계

a) 무압력 개방형 쉴드, b) 이수가압식 쉴드

Fang(1993)은 토압식 쉴드에서 쉴드 축 바로 위에서의 침하의 진행에 대한 반경험적 식을 세웠다.

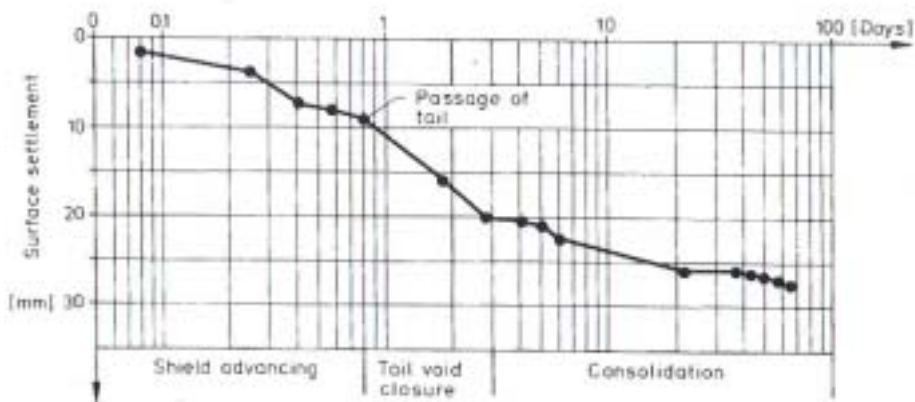
$$S_{max} = \frac{t}{a + bt} \quad (2.12)$$

상수  $a$ ,  $b$ 는 계측에 의해서 각각의 프로젝트에 대해 계산되었다. 시간  $t$

는 일수로 환산하여 식에 대입되며, 최대 침하값  $S_{\max}$  는 밀리미터로 주어진다. 표에서 4번째 컬럼의 내용은 시간  $t$ 가 무한대일 때 즉, 모든 지반의 움직임이 소멸한 이후의  $S_{\max}$  의 최대 침하값이다.

표 2.3 계측에 의해 얻어진 상수  $a$ ,  $b$

Case	Constant $a$ [d/mm]	Constant $b$ [1/mm]	$\lim_{t \rightarrow \infty} S_{\max}$ [mm]
Milwaukee Sewer, section CT-8-2	0.0803	0.0142	70.4
Milwaukee Sewer, section CT-7	0.2078	0.0176	56.8
Milwaukee Sewer, section CT-5/6	0.0944	0.0267	37.5
Tennohij-Benten, Giant Sewer	0.0836	0.0155	64.6
Singapore Sewer, CH1480	0.2173	0.0292	34.2
Singapore Sewer, CH2830	0.1296	0.0146	68.5
Taipei MRT CN254, section S1	0.2145	0.0264	37.9
Taipei MRT CN254, section S2	0.2934	0.0229	43.7
Taipei MRT CN218, section B1	0.0534	0.0363	27.6

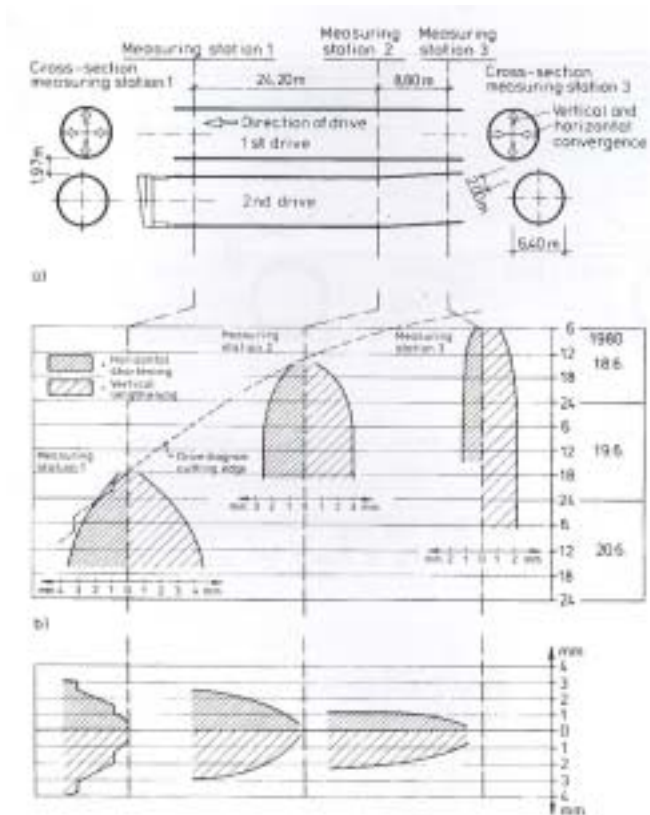


<Fig 2.25> 타이페이 MRT CH218B1 프로젝트동안의 침하

<Fig 2.25>는 1993년도의 타이페이 MRT CH218B1 프로젝트에서 터널

축 위의 침하의 각각의 진행을 보여준다.

<Fig 2.26>는 이수가압식 쉘드터널에서 터널 면에서 loosening으로부터 생기는 지면의 수직방향으로 침하율이 얼마나 작아질 수 있는가를 보여준다. 앙트워프 메트로 공사중(1977~88)에도 자료가 얻어졌다. 세 개의 계측소가 수렴점을 결정하기 위해 배치되었다. <Fig 2.26 a>에서는 서로 연관된 계측소와 터널 위치의 배열을 보여준다. <Fig 2.26 b>는 아래에 위치하는 두 번째 터널을 시공하는 동안 이미 존재하는 첫 번째 터널의 수렴점이 시간이 경과함에 따라 변천하는 과정을 보여준다. 수평방향으로 단축시키고, 수직방향으로 연장하면 약 4mm에 도달한다. <Fig 2.26 c>에서는 수렴점의 시간의 흐름에 따른 변천은 두 번째 터널 시공의 변천에 적용되어 첫 번째 터널에서 수렴점의 관계는 아래 쉘드의 위치로부터 얻어진다.

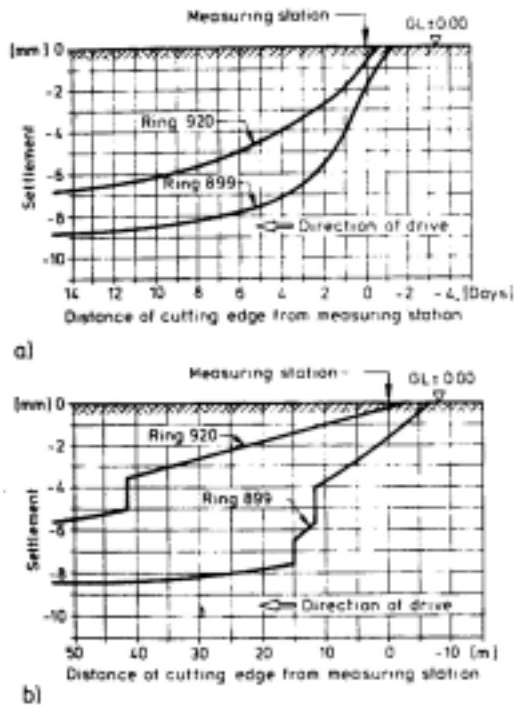


<Fig 2.26> 아래쪽 터널시공시 위쪽터널에서 측정되는 수렴점

(앙트웬 메트로, 1977~88)

- 서로 관계가 있는 레벨과 터널 위치
- 첫 번째 위쪽 터널에서의 수렴점의 시간에 따른 변천
- 첫 번째 위쪽 터널에서의 수렴점과 아래의 쉴드 위치와의 관계

측정을 통해서 커팅한 가장자리(cutting edge)를 따라 생기는 변형은 각각의 측정중단을 지났음을 알 수 있다. 측정점 1에서의 들쭉날쭉한 굴곡은 몇 번의 굴착중단에 기인한다.



<Fig 2.27> 미세모래지질(슬러리쉴드)에서의 전형적인 지표침하의 측정값  
(양트웍 메트로, 1977~88)

a) 시간에 따른 경과

b) 공간적 진행

<Fig 2.27>는 양트웍 메트로 시공중에 많은 측정을 통해서 최소, 최대 침하량을 보여준다. 계측소에서 토피는 17m였다. 쉴드는 외경 6.5m였고 터널공사는 거의 점성이 없는 미세한 모래지질에서 지하수 위아래에서 진행되었다. <Fig 2.27 a>는 쉴드가 계측지점을 통과한 이후의 시간-침하 경과를 보여준다. <Fig 2.27 b>는 쉴드가 계측지점을 통과한 이후의 연장-침하경과를 보여준다. 여기서의 들쭉날쭉한 곡선은 굴착중단에 기인한다.

고도의 쉼드기술로 말미암아 터널링에 있어서 적은 침하가 지표와 근접한 터널의 경우라 하더라도 침하는 몇 밀리미터 정도의 범위 내에서 유지될 수도 있다. 추가적인 계측을 통해서 특별히 민감한 지반에서의 지반변위를 배제하는 것을 용이하게 할 수 있게 되었다.

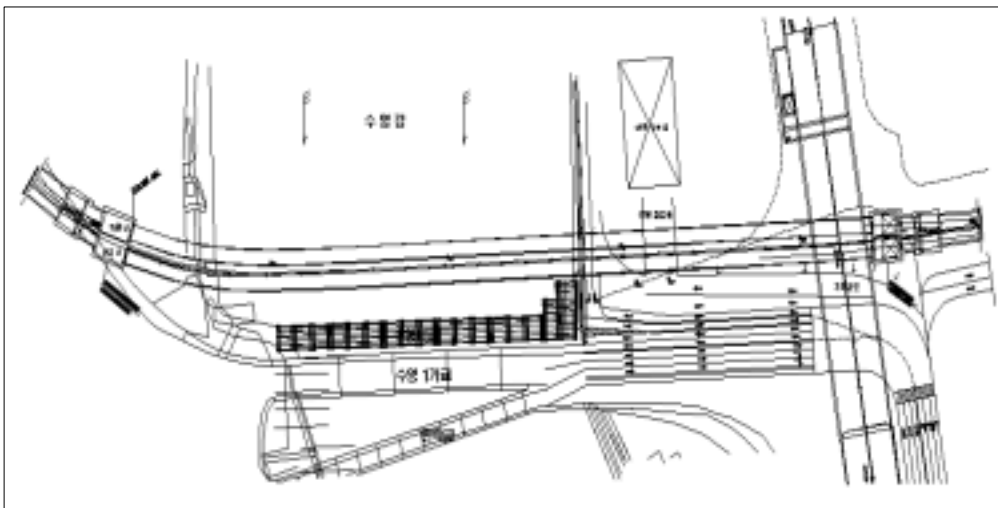
## 제 3 장 현장조건과 계측

### 3.1 주변현황 및 시공조건

#### 3.1.1 현장 현황

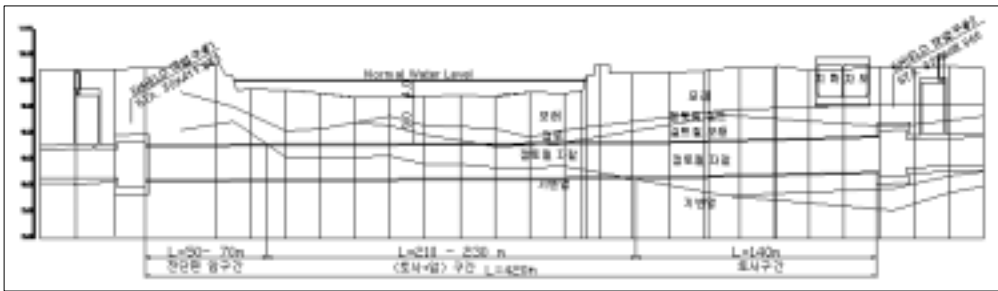
본 연구에 적용된 현장은 국내 최초로 하저를 대구경 쉘드공법으로 시공한 00지하철공사로서 쉘드구간은 연장 420m의 단선병렬 터널과 작업구 2개소로 구성되어 있으며, 최초 발진구에서 굴진을 시작하여 하행선 터널을 시공하였고, 회전구에서 쉘드장비 회전후 상행선 터널을 완료하였다.

터널간의 순간격은 최소 3.4m, 최대 4.3m이며, 강의 평균 수심은 4m이고, 하저로부터 터널상부까지의 토피는 하저구간 약 9m, 육상구간 약 15m로서 하저구간 연장 200m와 육상구간 연장 220m를 왕복 시공하는 단선터널로 총연장은 840m (Sta. 3km420 ~ 3km840)이다.



<Fig 3.1> 평면도

<Fig 3.1>에서 보면, 좌측이 시점측이고, 우측이 종점측이며, 상부가 하행선이고, 하부가 상행선이다. 종점측 발진작업구 부근에 지하차도 Box가 있고, 수영강 상행선측에 수영가교 및 수영1가교가 근접하여 있다.



<Fig 3.2> 종단면도

<Fig 3.2>에서 보면, 시점측에서 약 50~70m 구간이 전단면 암반구간, 210~230m 구간이 토사와 암반이 혼재한 복합지반 구간이고, 종점부 약 140m가 순수 토사구간이다.

### 3.1.2 지반특성

본 구간은 부산 수영강 및 수영강 좌우안에 해당하여 인위적 매립층에 이어 하천유수에 의한 퇴적작용으로 형성된 두터운 심도의 하성퇴적층(모래, 점토질 실트, 실트질 점토)과 봉적층(점토질 자갈)이 형성 분포하여 이후로 기반암의 풍화대와 기반암층으로 연결되는 지층분포를 보인다.

이러한 상태의 지층별 특징은 다음과 같다.

매립층은 지표면을 형성하고 있고, 육상부 구간에서 나타나며 점토, 모래, 자갈 등의 인위적인 혼합 매립층으로 구성되어 있다. 지층의 두께는

0.4~5.2m로 분포하며, 지층의 색조는 암회 담갈색을 띤다. 지반조사시 병행한 표준관입시험결과 N값은 7~14회 또는 50/2회로 자갈 및 호박돌의 함유에 기인하여 결과값이 다소 불규칙하게 나타난다.

실트질 모래층은 모래에 실트~세립토가 함유된 해성퇴적층으로 부분적으로 패각이 함유되어 있으며, 지층의 두께는 2.5~6.3m로 분포하고, 지층의 색깔은 담갈, 암회색을 띤다. 표준관입시험결과 N값은 6~14회로 loose~medium의 상대밀도로 확인된다.

모래층은 강의 직접적인 운반퇴적작용으로 형성되었으며, 세립~중조립질 모래로 구성되었고, 부분적으로 유기질점토 seam과 패각이 협재되어 나타나고 있다. 지층의 두께는 3.1~9.5m로 분포하며, 색조는 담갈, 암회색을 띤다. 표준관입시험결과 N값은 4~19회로 loose~medium의 상대밀도를 보인다.

점토층은 흙의 공학적 분류에 의하면 CH로 구분되며, 1.5~3.5m 두께로 분포하고, 부분적으로 실트 및 세립질 모래를 소량 함유하기도 한다. N값은 0~4회로 대단히 연약~중정도 연경도를 보인다.

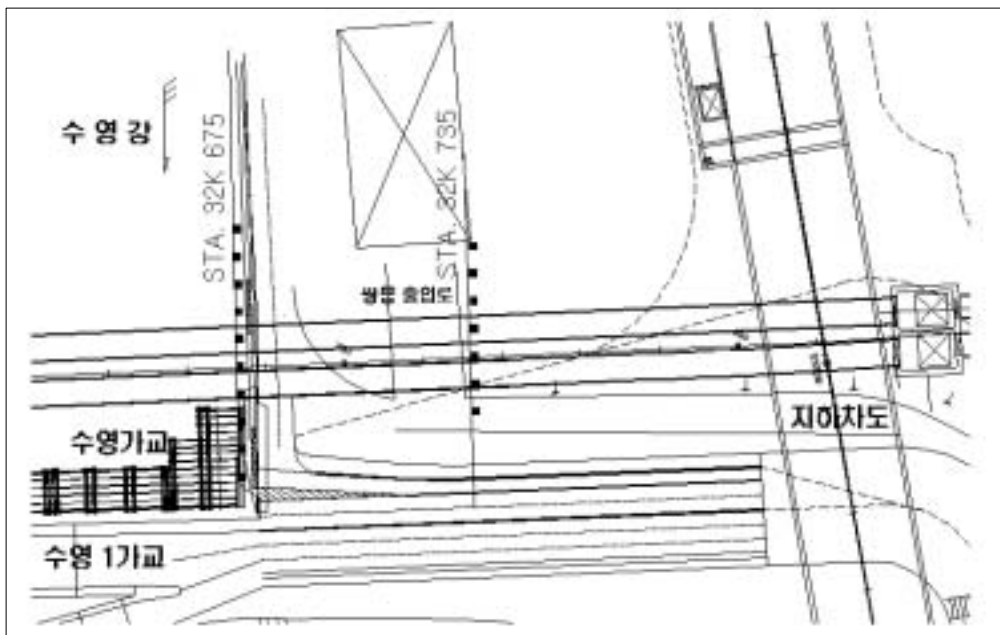
실트질 점토층은 점토에 실트질토가 혼재된 해성퇴적층으로 부분적으로 패각이 함유되어 있고, 지층의 두께는 1.0~4.4m로 분포하며, 지층의 색조는 담갈, 암회색을 띤다. N값은 1~3회로 매우 연약한 연경도를 보인다.

점토질 자갈층 하성퇴적층 이후에서 확인되며 점토에 자갈이 혼재된 자연퇴적층이다. 지층의 두께는 2.9~10.7m로 분포하며, 색조는 황갈~갈색을 띤다. N값은 11~50회로, 50회를 초과한 구간은 자갈의 함유에 기인한 것으로 판단되며 지층 전반적으로 치밀 견고한 양상이다.

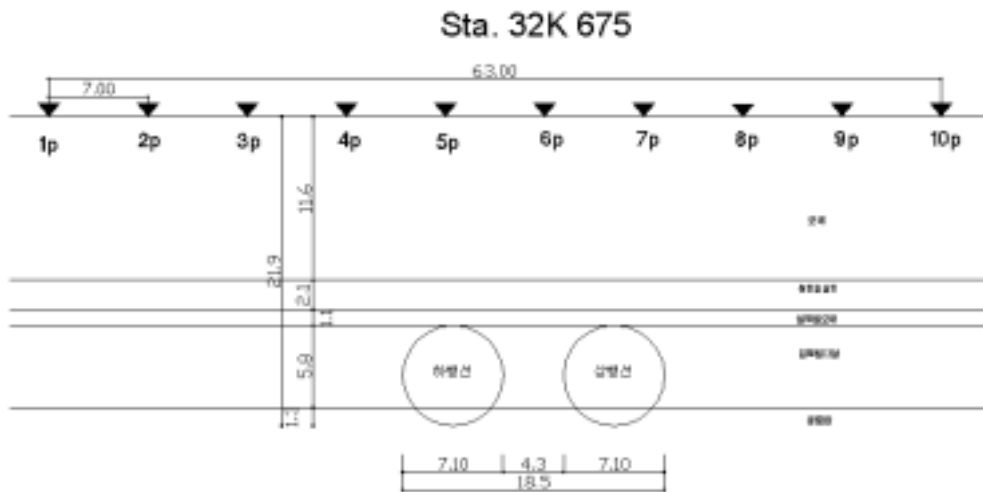
### 3.1.3 계측기 설치 및 계측방법

현장계측의 목적은 제한된 지반조사 및 토질시험 결과로부터 결정한 지반특성에 근거하여 설계단계에서 예측한 설계정수의 불확실성으로 인하여 발생될 수도 있는 문제점을 시공중에 발견하여 설계 및 시공에 반영함으로써 시공의 안정성과 경제성을 도모하기 위한 것으로 본 연구에서는 기 시공된 현장의 자료를 토대로 토사지반에서 쉘드터널 굴착시 굴착속도가 지반침하에 미치는 영향을 파악하여 경제적이고 안전한 굴착속도를 산정하여 향후 설계시 또는 시공시 참고자료로의 활용을 목적으로 한다.

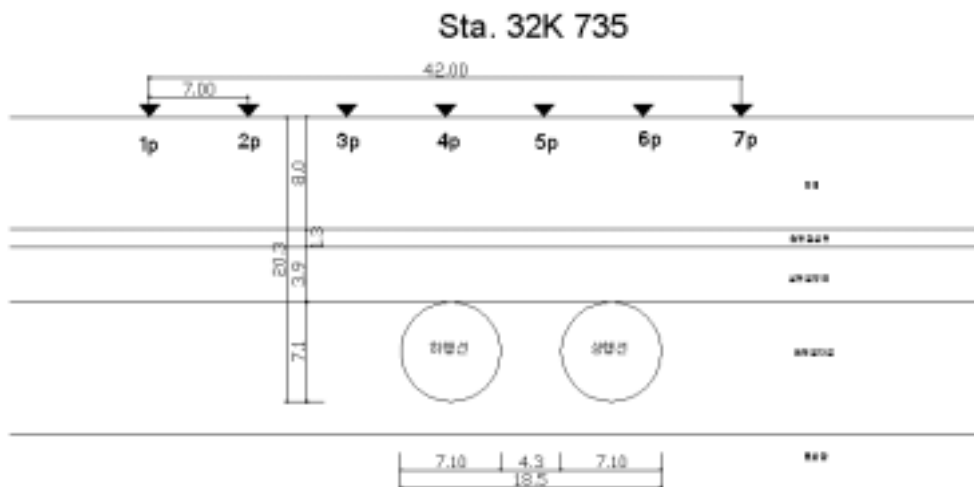
대상현장은 지표침하계를 설치하여 시공중 및 시공완료후 장기간에 걸쳐 주기적으로 또는 특이한 상황이 있을 시에 계측을 실시하였다. 변위의 정확한 측정을 위하여 지표침하계는 터널 단면당 10개를 설치하였고, 토사구간 침하해석을 위해 2개 단면의 지표침하값이 이용되었다.



<Fig 3.3> 지표침하계 설치 평면도



<Fig 3.4> 계측단면 (Sta.32k675)



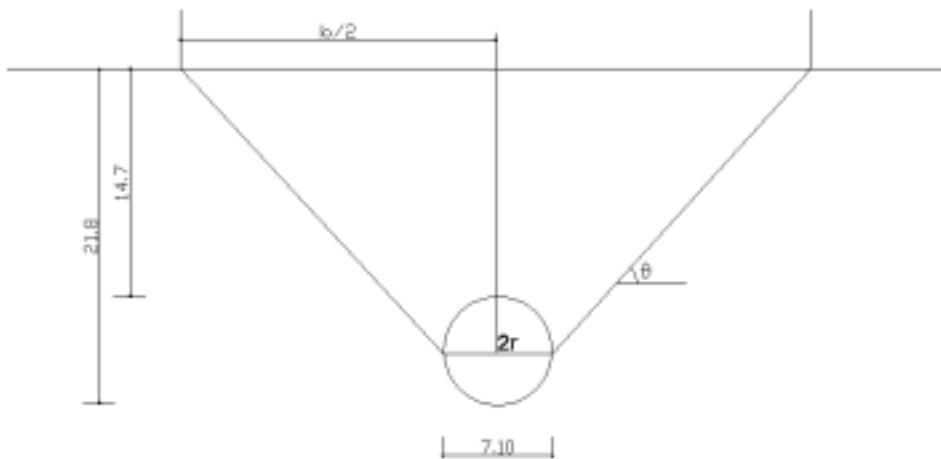
<Fig 3.5> 계측단면 (Sta.32k735)

<Fig 3.3>에서 지표침하계 설치 평면도를 나타냈으며, <Fig 3.4>에서

는 Sta.32K675 지점의 단면과 <Fig 3.5>에서는 Sta.32K735 지점에서의 지표침하계 설치 횡단면을 나타내었다. 평면도상에서 상부측 노선이 하행선으로 본고에서는 상행선 시공에 의한 지표침하영향은 고려치 않았다. 설드장비 회전후 상행선 굴진시 면판을 교체하였고, 계측지점이 변경 또는 망실되었기 때문이다.

### 3.1.4 지표침하계 관리기준치 선정

본 현장 검토단면의 지반 내부 마찰각은  $28.9^\circ$  로 적용하였으며, 굴착 토량에 대한 지반손실을 결정은 터널 굴착시 시공을 고려하여 시공이 양호할 경우 1%, 불량할 경우 5%중 시공성이 양호할 경우로 1%를 적용하였다.



<Fig 3.6> 지표침하 계측 관리기준 산정도

Peck(1969)의 산정식에 의해 침하영향범위를 계산하면,  
 평균 내부마찰각  $\phi' = 28.9$ , 지름  $d = 7.1\text{m}$ , 토피  $c = 14.7\text{m}$ 에서

각도  $\theta = 45 + \frac{28.9}{2} = 59.45$ 이므로

$$L = b/2 = c \cdot \cot \theta + \frac{1}{2} d \cdot \cot \frac{\theta}{2} = 8.7 + 6.2 = 14.9 \text{ m}$$

즉, 터널 중심으로부터 좌우측으로 14.9m 까지가 영향범위 이다.

$$\text{또한, } S(x) = S_{\max} \text{Exp}\left(-\frac{x^2}{0.25L^2}\right),$$

$$\Delta F = S_{\max} i\sqrt{2\pi}, \quad \Delta F = 0.01 \sim 0.03 F_A \text{에서,}$$

$$i = 0.35L = 5.2\text{m} \text{이므로}$$

$$\Delta F = S_{\max} \times 5.2\sqrt{2\pi} = S_{\max} \times 13.0,$$

$$\Delta F = 0.01F_A = 0.01 \times \pi \times 7.1^2 / 4 = 0.4$$

그러므로,  $S_{\max} = 3.1\text{cm}$ 이다.

Cording & Hansmire(1976)에 의해 침하영향범위를 산정하면,

$$\beta = 45 - \frac{28.9}{2} = 30.5 \text{ 이므로}$$

$$\tan \beta = (w - r) / z \text{ 식을 이용하면,}$$

$$\tan 30.5 = (w - 3.55) / (14.7 + 3.55)$$

$$0.59 = (w - 3.55) / 18.25$$

그러므로  $w = 14.3\text{m}$  이다.

또한, 굴착토량에 의한 지반손실을  $\alpha = 1\%$ (시공성이 양호한 경우)로 가정할 때 침하트래프의 면적  $V_s = 0.01F_A = 0.4$ 이고,

변곡점  $i = w / 2.5 = 5.72\text{m}$ 이다.

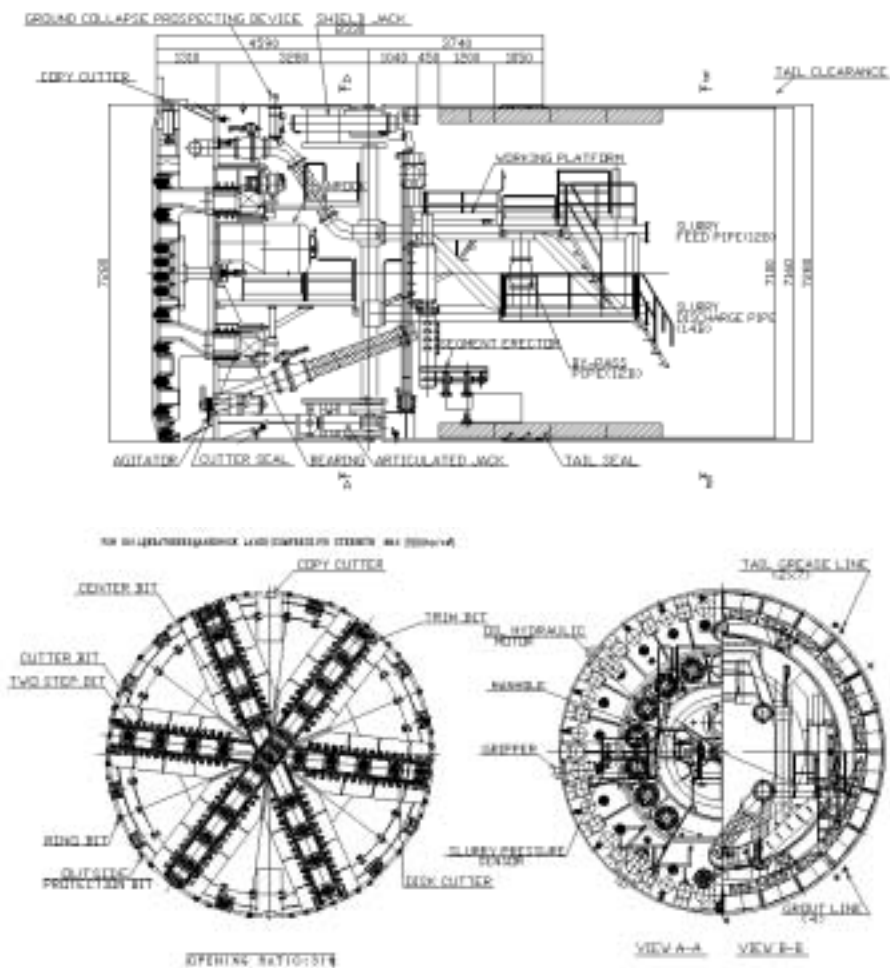
그러므로  $S_{\max} = V_s / 2.5i = 0.028\text{m} = 2.8\text{cm}$  이다.

Peck 산정식에 의하면 최대침하량 3.1cm, Cording & Hansmire에 의하면 최대침하량 2.8cm로 산정되었다.

본 현장의 지표침하량 관리기준치는 2.8cm로 적용하였다.

### 3.2 쉘드터널 시공현황

본 현장의 쉘드터널 공사는 환기구#2로부터 환기구#1 쪽으로 하행선 굴진을 먼저 시작하였다. 2000. 11. 27일 최초굴진을 시작하였고, 2001. 1. 31일 177링(212m)에서 문제가 발생하여 장비가 정지하였다. 2001. 4. 2일 재굴진을 시작하여 2001. 9. 24일 하행선 420m를 관통하였다. 환기구#1에서 쉘드장비를 U-turn 한 후, 2001.11.9일 상행선 굴진을 시작하여 2002. 1.30일 상행선을 관통, 쉘드터널 840m를 최종 완료하였다.



<Fig 3.7> 쉘드장비 종단면도, 정면도, 후면도

표 3.1 쉴드장비 주요제원

구 분		제 원	비 고
굴착외경		7,320mm	
면판외경		7,280mm	
길이		8,330mm	
Cutter Device	Torque	523.2 tf • m	At low torque
		942.6 tf • m	At high torque
	Rotation Speed	0 ~ 1.5 rpm	At low torque
		0 ~ 0.8 rpm	At high torque
	Electric mortor	132kw × 7 unit	
	유압모터	305kgf/cm <sup>2</sup> × 14unit	
	유압펌프	416.2rpm × 7unit	
Shield Jack Device	Stroke	1,700mm	
	Total Thrust	200tf×24EA=4,800tf	
	Total Thrust / Face Area	115.3 tf/m <sup>2</sup>	

쉴드장비는 일본 NKK사의 복합지반용 이수식 쉴드 TBM이 사용되었다. 토사지반, 토사와 암반이 혼재된 복합지반 및 전단면 암반지반에 대응 가능한 장비로 선정되었고, 이수처리를 위한 쉴드 플랜트는 환기구#2에 위치하였다.

쉴드장비의 주요제원에 대하여는 <표 3.1>에 나타내었다.

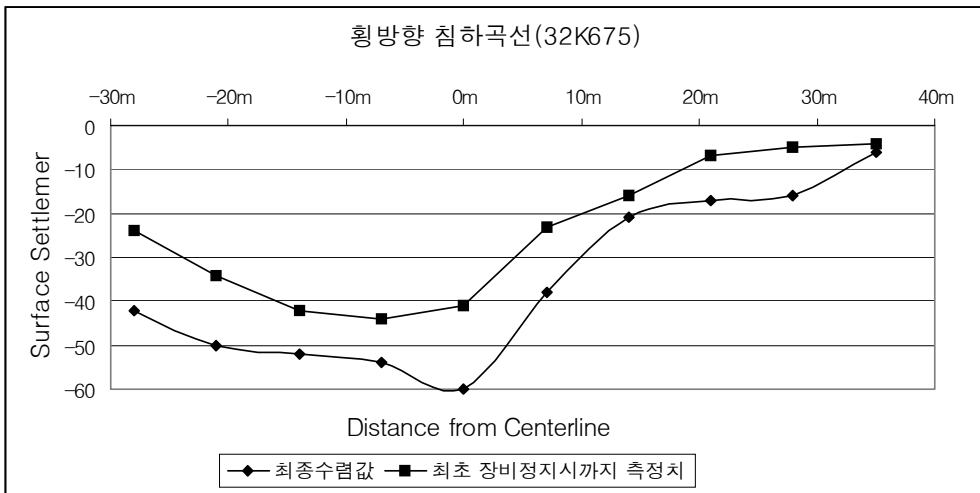
## 제 4 장 분석 및 고찰

### 4.1 계측결과 분석

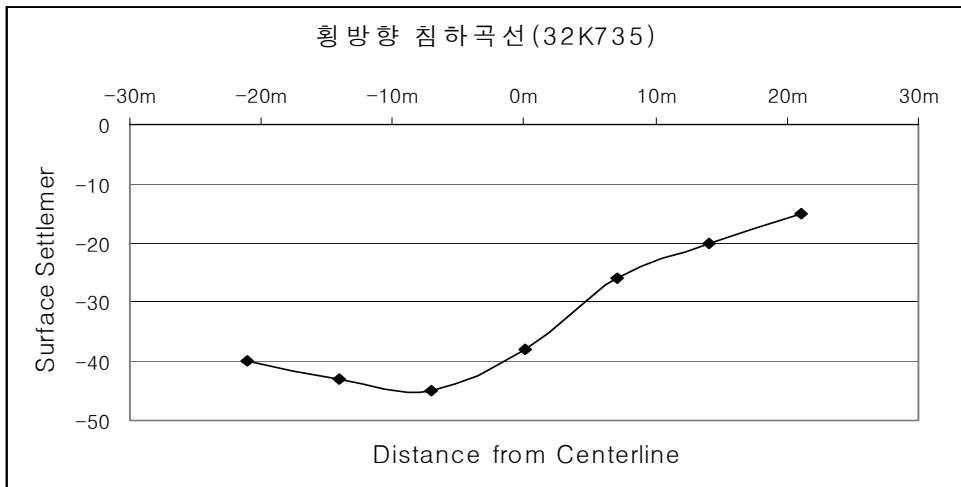
#### 4.1.1 횡방향 침하곡선

강변에 인접한 도로변 화단(32K675)에 설치한 지표침하계 측정치의 경우 2000.11.22일 초기값 측정후 쉘드장비가 2001. 1. 30일 178링에서 정지하여 약 2달간 정지상태로 있었는데, 2001. 1.19일 침하량 측정시까지 최대침하량이 44mm를 기록하고 있었다. 문제점이 해결된 이후 장비굴진이 재개되었으며, 2001.6.20일 마지막 측정치로 60mm의 최대 침하량 값을 기록하였다. <Fig 4.1>에서 상부 침하영향곡선은 최초 장비 정지시까지의 측정치이며, 하부 침하영향곡선은 최종 수렴후의 측정치이다. 이 그림에서 볼 때 장비 굴진방향의 우측부의 침하가 좌측부의 그것보다 크며, 이것은 인근 현장 중장비의 빈번한 통행과 주변 지반특성에 기인한 것으로 판단된다.

<Fig 4.2>에서의 침하영향곡선은 <Fig 4.1>와 유사한 모양을 보였으며, 2000.12.14일 초기치 측정이후 최초 장비 정지시점인 2001. 1.28일 이후에 망실되어 수렴치 못하였고, 최대침하량은 45mm로 앞의 결과와 유사하다.



<Fig 4.1> 횡방향 침하곡선 (32K675)



<Fig 4.2> 횡방향 침하곡선 (32K735)

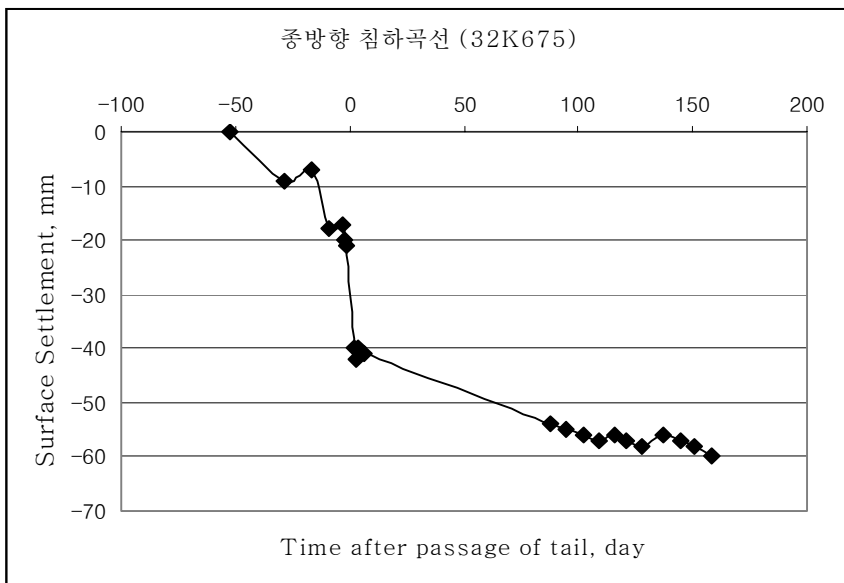
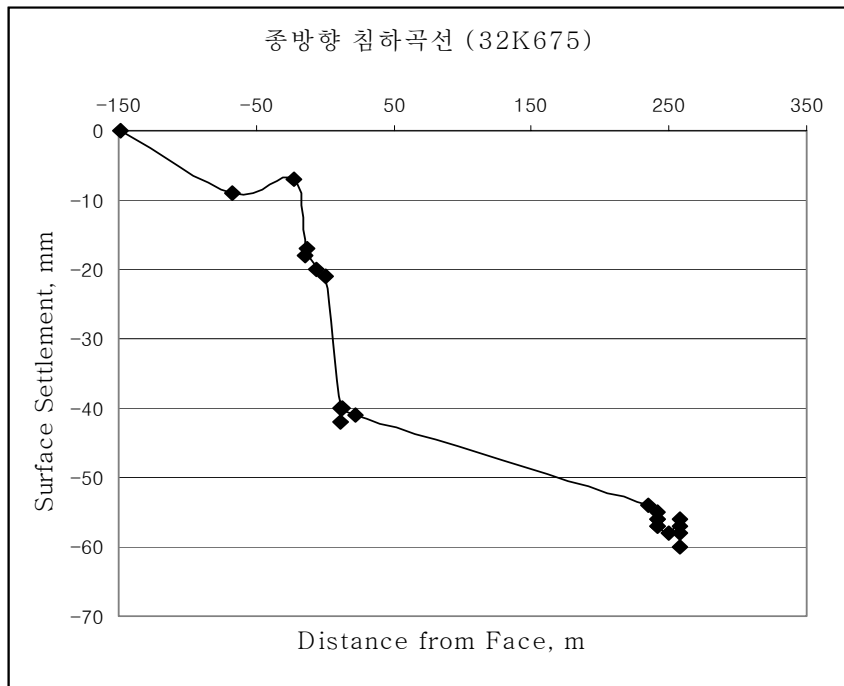
#### 4.1.2 종방향 침하곡선

<Fig 4.3>에서 보면, Sta.32K675 지점의 경우 종방향 침하곡선이 계측 지점으로부터 100여 미터 이전에서부터 상당한 침하량을 보였으며, 50m 이전에 이미 약 10mm의 침하값을 나타냈다. 이는 침하계 설치후 중장비 및 차량통행에 의한 침하값으로 판단되며, 본 고에서는 고려치 않도록 한다.

계측점 통과시점에서 약 30mm의 상당한 침하값을 보였고, 이후에는 장비가 정지해 있던 2달동안 계속적으로 일정한 값의 침하를 기록하였다. 이는 통과시점에 굴진속도가 상당하여 지표에 그 영향이 직접적으로 미친 것으로 판단되며, 장비 정지동안의 침하값은 불충분한 Backfill로 인한 침하가 발생한 것으로 판단된다.

이후의 값들은 계측오차나 차량통행으로 기인한 것으로 판단되므로 고려치 않도록 한다.

<Fig 4.3> 계측점 테일부 통과 경과일수에 따른 침하량을 보면, 역시 <Fig 4.2>와 유사한 경향을 보여주고 있다. 계측점 통과 25일 전 부근에서 이미 약 10mm의 침하량을 보여주고 있으며, 통과일 부근에서 25mm 이상의 침하량을 보여주고 있다.

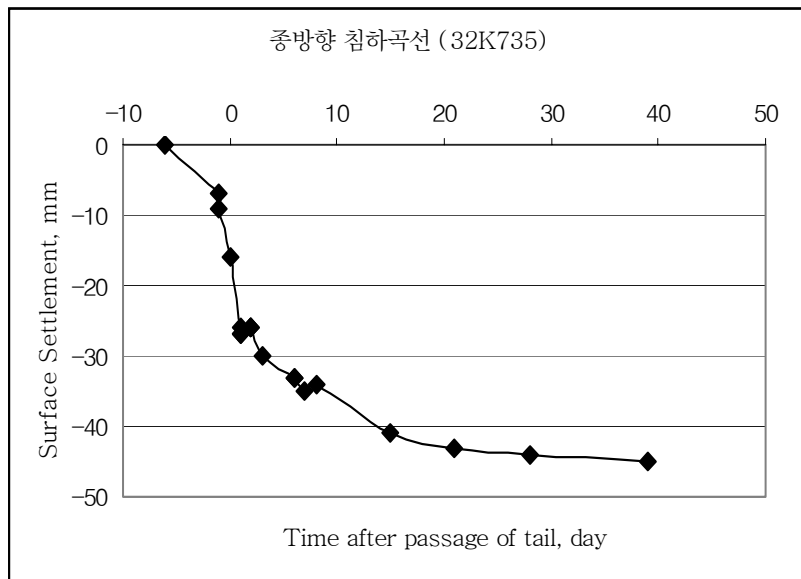
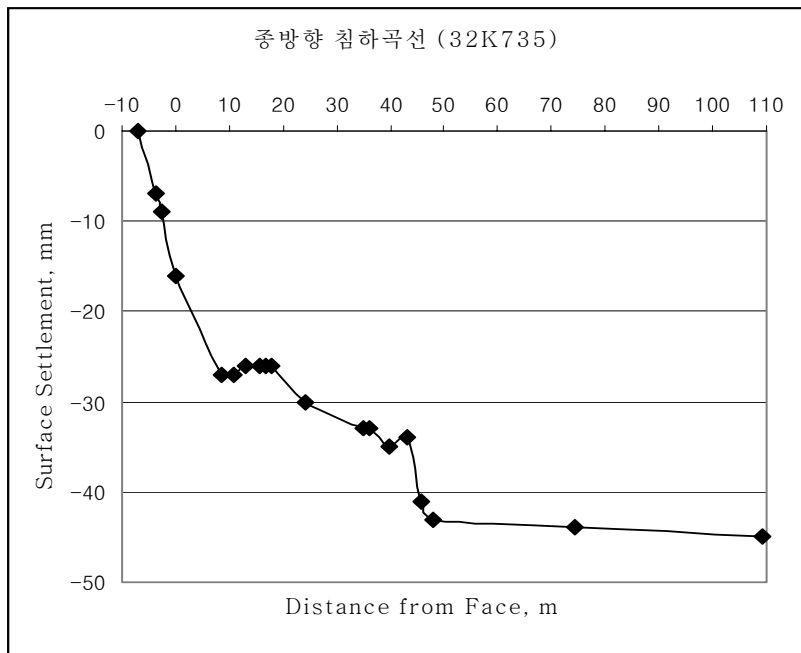


<Fig 4.3> 종방향 침하곡선(32K675)

<Fig 4.4>에서는 초기치 계측이 계측지점에서 10m 이전, 5일전에 초기치가 계측되기 시작하여 계측계획이 원활하지 못했던 것으로 판단되며, 45일만에 계측점이 망실되어 초반부 및 후반부의 경향을 판단할 수 없다.

초기에 약 30mm의 침하량을 보였으며, 망실될 때까지는 수렴이 되는 듯한 형태를 보였다. 특이한 점은 경과거리 10m 지점에서 침하량이 회복되는 모습을 보이는데, 이는 일시적인 현상으로 계측오차 또는 이수압이 과다했던 것으로 판단된다.

경과일수 7일, 경과거리 40m 지점에서는 쉘드장비를 운영하는 일본인들이 신정연휴를 맞이하여 10일간 장비가 정지된 사이에 나타난 침하값이다. 10mm 정도의 침하값으로 이는 Backfill이 완성되지 않은 시점에 직접적으로 발생한 침하로 판단되며, 현장시공 관리에서 Backfill의 중요성을 나타내는 결과로 판단된다.



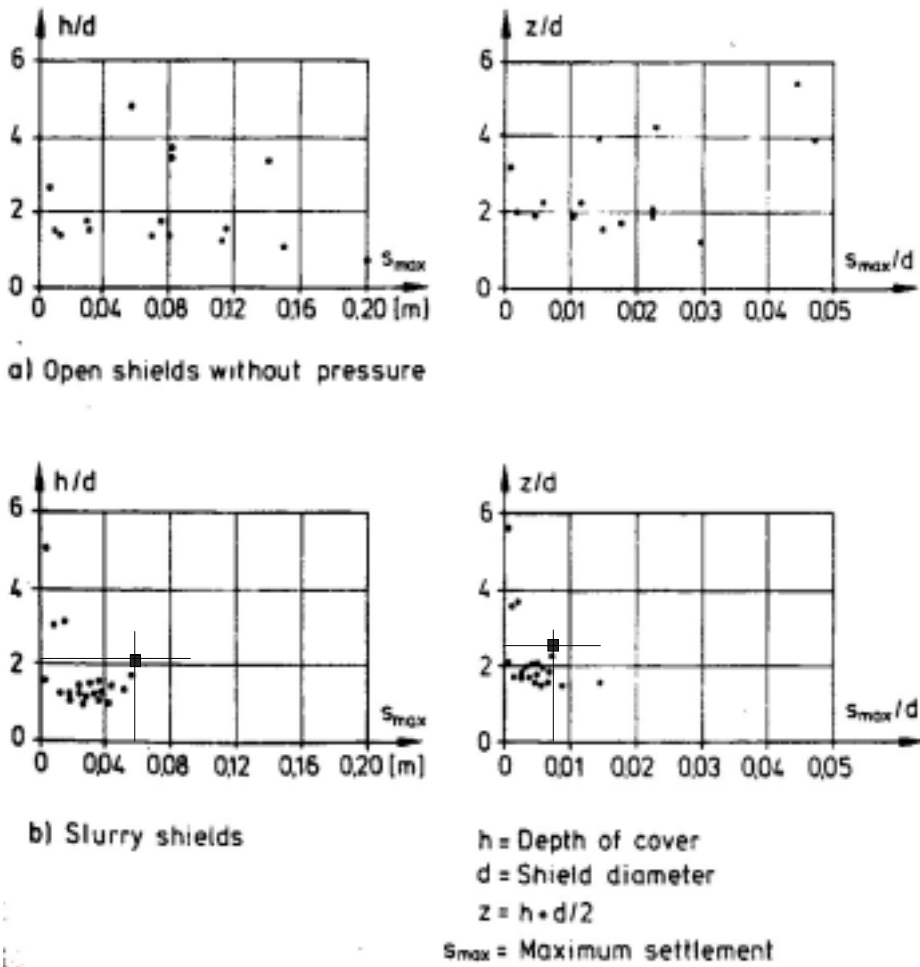
<Fig 4.4> 중방향 침하곡선 (Sta32K735)

#### 4.1.3 이론 지표침하량과 실측치와의 비교

Peck(1969) 산정식에 의한 최대침하량은 31mm 이며, Cording & Hansmire(1976) 산정식에 의하면 28mm로 산출되었다. 그러나, Sta. 32K675 지점에서 계측된 최대침하량은 60mm로 약 2배의 침하를 보였다. 이는 계측지점 인접하여 중차량이 빈번히 운행됨에 따른 영향과 쉴드가 통과하는 지반이 점토질 자갈층으로 과다 굴착의 영향이 상당하였을 것으로 판단된다. 전석 등이 면판의 외곽부에서 파쇄되지 못하고 면판의 회전을 따라 같이 회전할 경우 상당한 Face Loss 현상이 나타날 수 있다. 비록 터널 상부에 약 1m 두께의 Clay Seam층이 존재하였으나, 침하방지에 별다른 도움이 되지 못한 듯 하다.

<Fig 2.24 b>에서 이수가압식 쉴드의 최대지표침하의 일반적인 관계를 도표화 하였는데, 본현장은  $h/d = 2.1$ ,  $S_{max} = 60\text{mm}$ 로서 일반적인 값에서 약간 벗어났다. 여기서,  $h$ 는 토피이고  $d$ 는 쉴드직경이다. 또한  $z/d = 2.6$ ,  $S_{max}/d = 0.008$ 로서 역시 일반적인 값과는 차이가 있다. 여기서  $z = h + d/2$ 의 값으로 지표에서 터널중심까지의 거리이다. <Fig 4.5>에 도시하였다.

지반특성 및 토피 등의 영향이 있었지만, 통상적으로 이수가압식 쉴드 터널에서 기대되는 지표침하량 보다는 다소 많은 침하량을 보였다는 것을 알 수 있다.



<Fig 4.5> Fig 2.24의 막장지지형식에 따른 일반적인 최대침하량 관계 비교

## 4.2 쉼터널 굴착속도 분석

토사지반에서의 굴착속도 산정은 현재까지 특별한 이론식이 없는 것 같다. 통상적으로 장비메이커 측에서 경험적인 실적치를 갖고 제안하는 경우가 대부분이다. 장비메이커 측에서 제공하는 값은 최대치를 말하는 것으로 실질적인 현장운영을 위하여 필요한 일평균 굴진속도 또는 월평균 굴진속도는 기술자의 경험과 판단으로 이루어 져야 한다.

본현장의 경우 평균굴착속도는 178링에서 장비정지시 까지 10mm/min ~ 20mm/min의 값으로 측정되었다. 정상적으로 굴진한다고 가정할 때, 일일 가능한 굴진량은,

굴진속도 10mm/min에서  $(20-1)\text{hr/일} \div (2\text{hr}+0.75\text{hr}) = 7\text{링} = 8.4\text{m}$ ,

굴진속도 20mm/min에서  $(20-1)\text{hr/일} \div (1\text{hr}+0.75\text{hr}) = 11\text{링} = 13.2\text{m}$ 이다.

여기서, 앞부분은 작업가능시간으로 일일 20hr 작업에서 교대시간 1hr을 제외하여 일일 19hr을 나타내며, 뒷부분은 세그먼트 1링당 굴진시간과 세그먼트 조립 및 굴진준비시간을 나타낸다. 굴진준비시간이란, 세그먼트 조립을 끝내고 대차이동을 위한 레일부설 및 송,배니관 등의 연결시간을 의미한다.

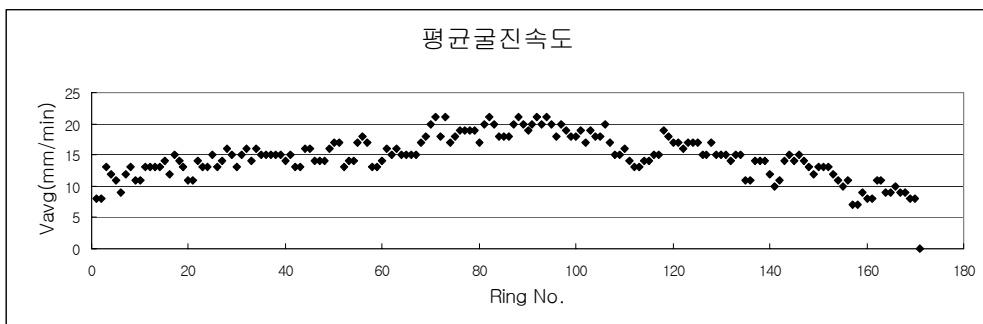
상기한 굴진속도는 가장 peak시, 장비가동을 100%시의 굴진량을 나타내며, 장비운전원의 숙련도, 장비고장, 비트 및 디스크커터 교환 등의 loss time은 고려치 않은 속도이며 실제적으로는 <Fig 4.6>에서와 같은 굴진속도를 보였다.

<Fig 4.7>에서 보면 일일 최대 9링의 굴진속도를 보였으며, 중간에 끊어진 선은 장비가 수리 또는 작업원의 휴가 등으로 가동하지 않았다는 것을 의미한다.

실제로 굴진일수 만을 감안하여 평균굴진속도는 일일 3.8링(4.56m)이었

으며, 비굴진일수 까지 감안하면 평균굴진속도는 2.5링(3.0m)이었다. 장비가동율 100%시의 평균굴진속도 9링(10.8m)를 감안할 때 실제로 28%의 장비가동율을 보였다. 대부분의 쉘터터널공사의 장비가동율은 40%를 넘지 못하는 것으로 알려졌고, 현장고유 특성에 의해 상당한 편차를 나타내는 것으로 알려졌다. 장비가동율은 공사기간, 공사비와 직접적으로 연관되는 것으로 프로젝트의 성패를 좌우한다고 할 수 있을 만큼 중요한 문제이다.

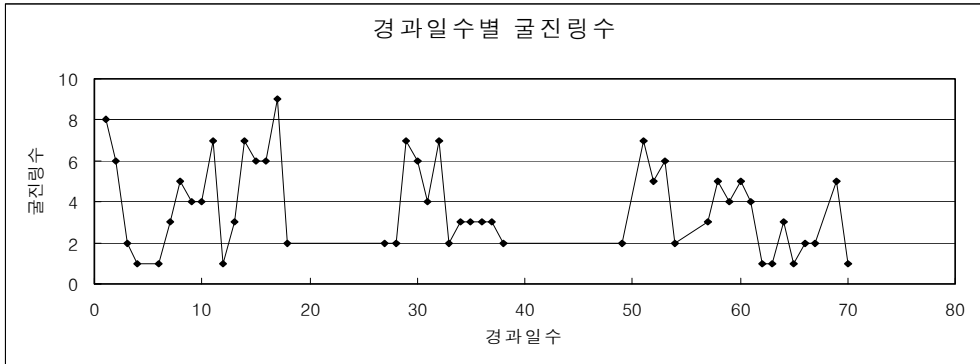
그러므로 신규 프로젝트에서 공정관리, 공사비 관리면에서 상당히 중요한 굴진속도 산정시 이러한 장비가동율의 판단은 대단히 중요한 문제이다.



<Fig 4.6> 평균굴진속도

<Fig 4.6>에서 보면, 본현장에서는 특별히 초기굴진을 염두에 두지 않은 것으로 보인다. 굴진 초기에는 장비의 쉘드잭 반력을 세그먼트에서 받아주지 못하여 작업구에 반력대를 설치하여 이용하게 되는데, 아무래도 반력대의 능력이 세그먼트에 많이 미치지 못하므로 초기굴진 기간에는 장비 굴진속도를 50% 정도 감소시켜 굴진하는 것이 타당하나, 20링을 지나지 않아 굴진속도가 본굴진 수준에 도달한 것을 알 수 있다. 통상적으로 초기굴진 거리는 장비의 후속대차 설비까지의 거리를 기준으로 하며 약

70~80m에 이른다.



<Fig 4.7> 경과일수별 굴진링수

<Fig 4.7>에서 보면 경과일수 17일 경에 최대 9링의 일일 굴진량을 기록하였으며, 두 번의 장비 정지 기간이 있었던 것을 나타낸다. 굴진량이 저조한 시점들의 경우도 장비 수리 등의 사유로 전일작업이 안되었다는 것을 알 수 있다.

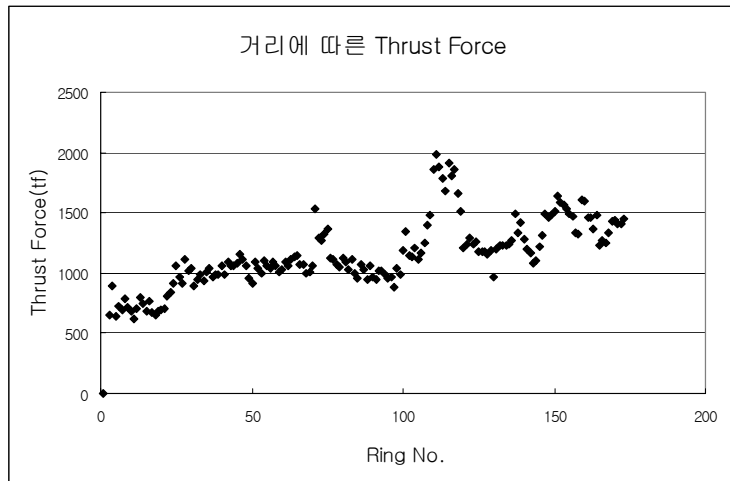
굴진속도에 영향을 미치는 인자는 여러 가지가 있겠지만, 직접적으로 영향을 미치는 장비 추진력(Thrust Force) 및 면판회전력(Cutter Torque)의 상관관계에 따른 굴진속도의 영향을 고찰해 보기로 한다.

<Fig 4.8>에서 보면, Thrust force는 1,000 ~ 1,500(tf)에서 주로 가동되었다. 120링 부근에서 급격한 추진력 상승을 보였고, <Fig 4.9>에서 보면, Cutter Torque는 100링까지 100~150(tf·m)로 거의 일정하다가 Thrust Force와 마찬가지로 100링 이후 급격한 상승을 보였으며, 120링 부근에서 360(tf·m) 까지 상승했는데, 이는 터널 하부에 기반암이 출현한 것에 기인한 것으로 판단된다. 약간의 차이점으로는, Thrust Force의

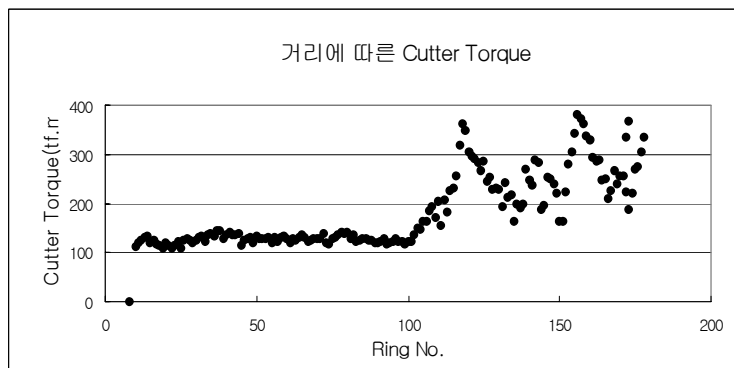
상승이 먼저 이루어지고, Cutter Torque의 상승이 추가로 이루어지는 것을 발견할 수 있는데, 쉘드장비 운전원의 운전성향인 것으로 판단된다. 굴진이 원활치 못하면 일단 추진력을 증가시키고, 다음에 면판 Torque를 증가시키는 것이다.

암반을 절삭하는 기능을 갖고 있는 디스크커터가 암반과 토사의 복합단면 하에서 원활한 기능을 발휘하지 못하여 억지로 추진하고, 회전하는 결과를 보인 것으로 판단되며 결국 178링에 가서는 장비가 더 이상 굴진을 할 수 없었다.

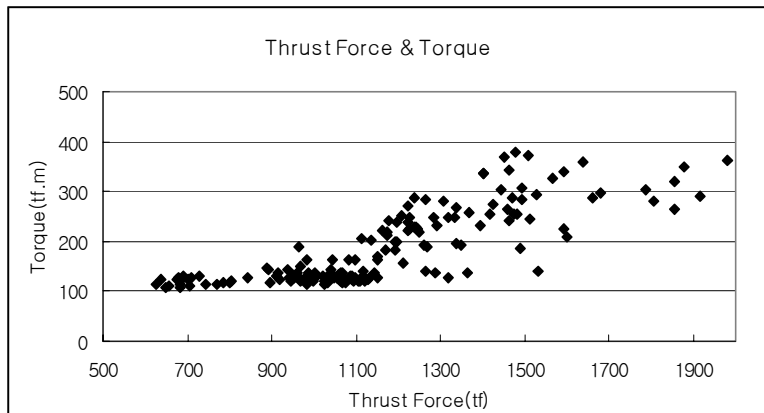
상부의 지하수위 아래 토사지반은 커터 교환을 위한 막장 개방시 자립할 수 없으므로 막장이 자립할 수 있도록 지반보강이 필요하나, 장비 인접부에서의 그라우팅은 면판의 고착 등의 불리한 결과가 예상되므로 이격하여 지반보강을 실시하였으며, 보강부위까지 장비를 굴진하여 디스크커터의 교환 후 정상적인 굴진을 할 수 있었다. 이 부분에서 시사하는 점은, 막장이 자립할 수 없는 지반의 경우에 디스크커터 및 커터비트를 교환하기 위해서는 교환 예상지점을 판단하여 사전 그라우팅으로 지반을 안정화시켜야 한다는 것이다. 이것은 또한 디스크커터의 마모량 계산의 적정성과도 밀접한 연관성이 있으므로 이 부분의 판단 또한 대단히 중요하다고 할 수 있다. 다시 말해, 복합 및 암반지반에서 효율적인 장비가동을 위해서는 디스크커터의 성능 및 교환주기의 판단이 더 없이 중요하다는 것을 알 수 있다.



<Fig 4.8> 거리에 따른 Trust Force

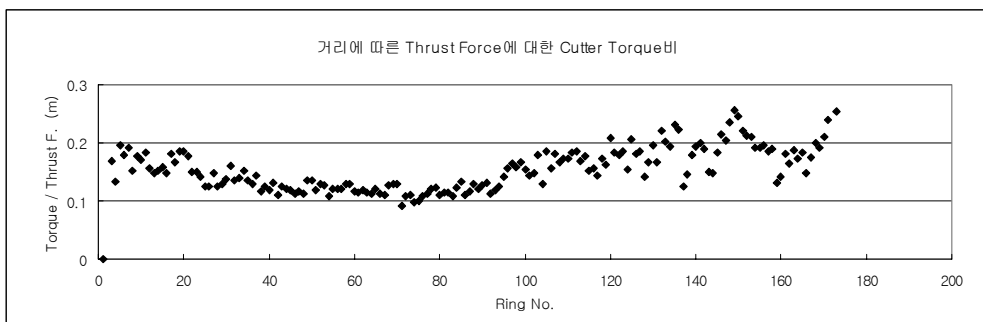


<Fig 4.9> 거리에 따른 Cutter Torque



<Fig 4.10> Thrust Force와 Torque 관계

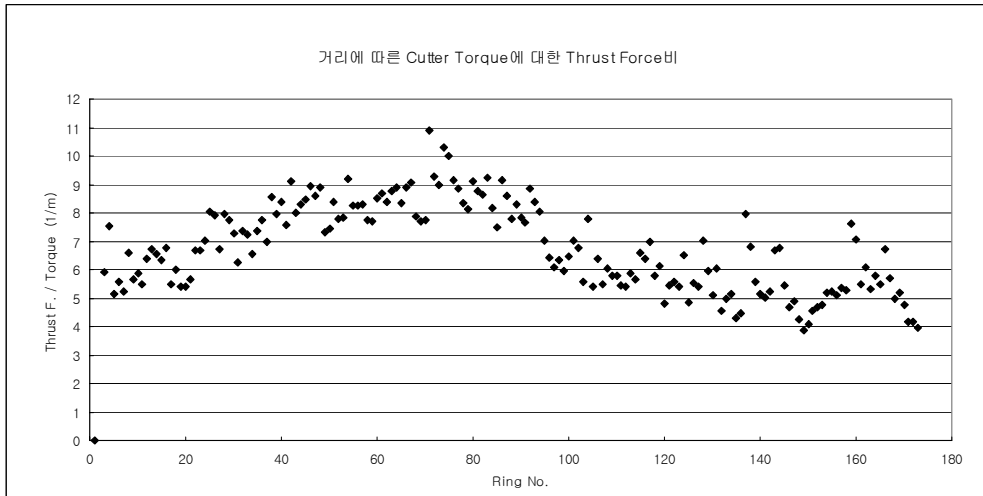
Thrust Force와 Cutter Torque의 상관관계를 알기위하여 Thrust Force에 대한 Cutter Torque의 비를 계산하면, <Fig 4.11>에서와 같이 0.1 ~ 0.2 (m)의 실적을 기록했다.



<Fig 4.11> 거리에 따른 Thrust Force에 대한 Cutter Torque의 비

<Fig 4.11>의 역수를 구하여 <Fig 4.12>에 나타내었다. Cutter Torque에 대한 Thrust Force의 비가 정상적으로 원활한 굴진을 하는 기간인 100링 까지의 값이  $5 \sim 9 \text{m}^{-1}$ 를 기록했다. 원활한 굴진을 못했던 100링 이후의 기간에 값이 오히려 감소하는 추세를 보이는데, 문제 발생시의 상승률

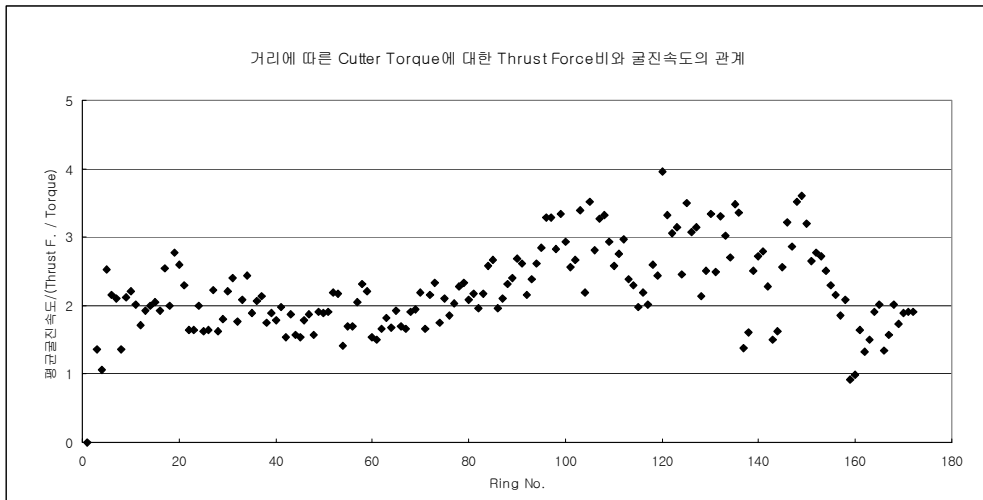
은 Cutter Torque가 더욱 급격하기 때문이다.



<Fig 4.12> 거리에 따른 Cutter Torque에 대한 Thrust Force의 비

여기까지의 결과에서 시사하는 점은,

본 대상현장에서와 같은 지질의 토사지반에서 7m class의 쉘드장비의 Thrust Force는 1,000tf 이하, Cutter Torque는 120tf · m 이하로 운전하는 것이 원활한 굴진속도와 지표침하의 영향을 최대한 억제할 수 있을 것으로 판단되며, Backfill의 철저한 관리 및 2차 Backfill로 후속침하를 억제할 수 있어야 할 것으로 사료된다.



<Fig 4.13> Cutter Torque에 대한 Thrust Force비와 굴진속도

<Fig 4.13>에서 보면 정상적인 100링까지의 굴진결과에서 굴진속도는 Cutter Torque에 대한 Thrust Force비의 1.5 ~ 2.5배 값을 나타내고 있다. <Fig 4.6>평균굴진속도와 <Fig 4.12>거리에 따른 Cutter Torque에 대한 Thrust Force비 그래프 형태가 유사하므로 Cutter Torque에 대한 Thrust Force비가 높으면 굴진속도도 증가함을 알 수 있다.

### 4.3 쉘드 굴착속도가 지표침하에 미치는 영향 분석

계측점 이전의 침하량 약 10mm는 중차량 통행에 의한 지반침하로 판단되며, 계측점 이후의 침하량 약 15mm는 Backfill 관리의 문제로 보인다. 이후의 5mm는 계측오차로 판단된다.

첫 번째 계측점(81링, Sta.32K735)에서의 즉시침하량이 15mm에 달하였으며, Jack 평균속도는 17mm/min, 7링/일의 굴진속도를 보였다. 또한 이때의 Thrust Force는 1,100tf이었으며, Cutter Torque는 120tf·m였다. Cutter Torque에 대한 Thrust Force의 비를 계산하면  $9.1\text{m}^{-1}$ 이다.

두 번째 계측점(132링, Sta.32K675)에서의 즉시침하량은 30mm에 달하였으며, Jack 평균속도는 17mm/min, 6링/일의 굴진속도를 보였다. 또한 이때의 Thrust Force는 1,100tf 부근이었으며, Cutter Torque는 200tf·m를 상회하였다. 역시 Cutter Torque에 대한 Thrust Force의 비를 구해보면  $5.5\text{m}^{-1}$ 이하가 된다.

가장 원활한 굴진을 보인 시점이 계측점 부근이었으며, 또한 이 기간중 가장 큰 침하량을 보였다.

토사구간에서 원활하고, 경제적이며, 침하를 최대한 억제하기 위해서는, 같은 속도에서 Cutter Torque가 상대적으로 크지 않아야 한다. 다시말하면, Cutter Torque에 대한 Thrust Force의 비가 가능한 높아야 한다. 이것은 같은 Thrust Force에서 상대적으로 높은 Cutter Torque가 터널 Face Loss를 증가시키는 원인이 될 수 있기 때문이다.

침하를 억제하기 위해서는 막장 이수압의 유지, 굴진속도의 저감, Cutter Torque의 저감이 필요하다. 저감된 속도는 장비가동율의 증가로 만회할 수 있어야 경제적인 터널링이 가능할 것이다. 공사 착공전 적정한 장비의 선정, 공사중 원활한 운전 및 문제점에 대한 대책마련이 공사의

성 패를 좌우한다는 것을 시사하고 있다.

## 제 5 장 결 론

터널공사를 성공적으로 수행하기 위하여 가장 중요한 것은 안전성이며, 주변 구조물에 미치는 영향을 최소화할 수 있는 방법으로 시공되어야 할 것이다. 또한 경제적으로 공사를 수행하는 것도 더없이 중요할 것이다. 안전하게 경제적으로 터널공사를 수행할 수 있기 위하여 안전의 문제는 지표침하, 경제성의 문제는 굴진속도를 대상으로 연구하였다.

본 연구에서는 부산지하철 00공구 수영강 하저 쉘드터널 현장을 대상으로 토사지반에서 쉘드터널의 굴진속도, 굴진속도에 영향을 미치는 Thrust Force 및 Cutter Torque에 대한 실측치와 지표침하량의 계측치를 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 본 현장의 Thrust Force는 1,000 ~ 1,500(tonf), Cutter Torque는 100~150(tf • m)로 주로 가동되었으며, Cutter Torque에 대한 Thrust Force의 비는  $5 \sim 9 \text{ m}^{-1}$ 의 실적을 나타내었다. 가장 큰 즉시침하량이 발생하였을 때의 침하량 및 Cutter Torque에 대한 Thrust Force 비는 15cm 일때  $9.1\text{m}^{-1}$ , 30cm 일때  $5.5\text{m}^{-1}$ 로 침하량과 반비례함을 알 수 있었다. 또한, 침하를 억제하기 위해서는 같은 속도에서 Cutter Torque의 값이 상대적으로 크지 않아야 한다는 것을 알 수 있었다. 즉, Cutter Torque에 대한 Thrust Force비가 높아야 하며 이것은 같은 Thrust Force에서 상대적으로 높은 Cutter Torque가 터널 Face Loss를 증가시키는 원인이 될 수 있기 때문이다.
2. 정상적 굴진시 평균 굴진속도는 Torque에 대한 Thrust비의 1.5~2.5 배를 나타내었으며, Torque에 대한 Thrust비가 높으면 굴진속도도

증가함을 알 수 있었다.

3. 침하를 억제하기 위해서는 막장 이수압의 유지, 굴진속도의 저감, Cutter Torque의 저감이 필요하며 저감된 속도는 장비가동율의 증가로 만회할 수 있어야 경제적인 터널링이 가능할 것이다.
4. Backfill의 철저한 관리 및 2차 Backfill로 후속침하를 억제할 수 있어야 할 것이다.

아직까지 국내에서 직경 7m 이상의 대구경 쉘드터널을 시공한 사례는 부산과 광주 지하철공사 2개 현장 밖에 없으며, 대부분 시공 및 설계과정에 대한 자료가 발표되었다. 다행히 대구경 쉘드터널 공법을 적용하여 설계 및 시공 예정인 공사가 다수 나타나고 있으므로 향후에는 좀 더 많은 귀중한 자료가 발표될 것으로 기대된다.

## 참고문헌

1. 부산교통공단 (1999) "부산지하철 2호선 230공구 건설공사 변경설계보고서(토목)"
2. (주)동아지질 (1999), "부산지하철 2호선 230공구 수영강횡단구간지반조사"
3. 두산건설(주) (2002) "계측보고서(3월)"
4. 이인모 (2002) "토질역학의 원리", 새론
5. 김승렬, 이정인 (1998) "터널의 설계" 지반공학시리즈 7권, 터널, 제3장, (사) 한국지반공학회 저, 구미서관, pp. 128~131
6. 두산건설(주) (2001) "셸드TBM 지침서"
7. Martin Herrenknecht, Bernhard Maidl (2000). "Mechanised Shield Tunnelling", Herrenknecht International L.T.D
8. Peck, R. B. (1969). "Deep excavation and tunnelling in soft ground", Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, State of the Art Volume, pp.225290.
9. Fang, Y. S., Lin, S. J., (1993). "Time and settlement in EPB Shield tunnelling", Tunnels & Tunnelling 25 (November 1993), pp.2728.
10. AFTES, "New Recommendations on Choosing Mechanized Tunnelling Techniques", Sept. 2000.
11. ITA Working Group No. 14, "Recommendations and Guideline for Tunnel Boring Machines (TBMs), Sept. 2000.
12. Johannessen, O. (1998). "Hard Rock Tunnel Boring", Project report 1-88, The university of trondheim, The norwegian

institute of technology, The division of construction engineering.

13. Maconochie, D. J., Suwansawat, S., Chang, C. C.(2001)  
"Tunnelling for the Chaloem Ratchamongkhon line in bangkok", RETC Proceedings, 2001, pp. 113~128.

# Abstract

## A Study on The Surface Settlement under The Influence of Excavating Speed in Shield Tunnel

Yoon, Young Jin

The Department of Construction Engineering

The Graduate School of Construction Engineering

Chung-Ang University, Seoul, Korea

Advisor: Prof. Hong, Won Pyo

The first priority to insure the successful tunneling is safety and it must be done in a fashion that minimizes damage to its surroundings. Also it must be done with careful economic considerations. Research answering the question of safety presided on surface settlement, and research on economic efficiency placed its emphasis on tunneling speed.

The main subject of this research was the Pusan subway 00 section Soo-yong Riverbed Shield-tunnel construction site and the following results were compiled after research was done on the shielded tunnel's tunneling velocity, substantial measurements of thrust force and cutterhead torque that effect tunneling speed, and measurements of surface settlement.

1. The Thrust force operated at the site was 1,000 ~ 1,500 tonf, cutterhead torque 100 ~ 150 tonf • m. The ratio between the cutterhead torque and thrust force was determined as 5 ~ 9 m<sup>-1</sup>. In the case of the largest immediate settlement, the thrust force ratio between the subsidence and cutterhead torque was 9.1m<sup>-1</sup> when 15cm and 5.5m<sup>-1</sup> when 30 cm, which proves to be inversely proportionate to settlement. Also to restrain settlement it was found the same speed needed cutterhead torque not to be relatively lower. Thus the cutterhead torque in ratio with the thrust force should be larger and this is because it may be the reason why cutterhead torque having the same thrust force results in an increase of face loss.

2. The average of normal tunneling speed showed that the ratio between torque to thrust as 1.5~2.5 times more and as a result in an increase of this ratio, the tunneling speed increased.

3. In order to restrain settlement, consistent slurry pressure, decreased tunneling speed, and reduced cutterhead torque is needed and decreased speed must be displaced with the efficient operation of equipment to insure economic tunneling.

4. Backfill and secondary backfill that result in continuous settlement must be managed and restrained.

With the exception of Pusan and Gwangju's two subway construction sites, there was not a single construction of 7 meter class

shield tunnels in this country, Fortunately constructions methods used to create wide shield tunnels are becoming used more often which will eventually produce more data and material in the future.

## 감사의 글

본 논문이 완성되기까지 끊임없는 격려와 세심한 지도, 따끔한 충고를 아끼지 않으신 홍원표 교수님께 깊은 감사를 드립니다. 그리고 본 논문을 심사하시는 동안 세심하게 검토하여 지도와 격려를 해주신 임수빈 교수님과 한중근 교수님께 감사드립니다.

이 논문이 완성되기까지 자료수집을 도와준 전성일 형님, 최기훈씨, 자료정리를 도와준 강동연씨께도 감사를 드리며 본 과정을 무사히 마칠 수 있도록 넓은 마음과 배려로 도와주신 (주)대우건설 분당선하저터널현장 소장님 이하 동료분들과 전직장이었던 두산건설(주) 토목사업본부 동료분들께 감사를 드립니다.

힘들었지만 여기까지 올 수 있도록 끈끈한 정으로 동고동락을 함께한 이경두 형님, 김학규 형님, 박정호 형님, 안재민, 장효석, 홍건표, 이기승씨께도 감사의 말씀을 전하고 싶습니다.

큰아들이 나이가 들어도 항상 걱정해 주시고, 힘이 되어 주시는 아버님과 어머님의 사랑에 감사를 드리며, 역할도 제대로 못하는 둘째사위를 아껴주시는 장인어른과 장모님께도 감사드립니다. 큰동서 내외, 막내동서 내외 그리고 동생내외에게도 감사드립니다.

어려운 형편에서도 내색하지 않고 항상 힘이 되어주고 따뜻한 미소를 잃지 않는 아내 이재선에게 사랑과 감사의 말을 전합니다. 많은 시간 함께하지 못해 늘 미안한 어린 딸 민경이와 아들 민성이에게도 사랑한다는 말과 함께 이 기쁨을 함께 나누고 싶습니다.

감사합니다.

윤 영 진