

도심지터널기술위원회

Annual Technical Report

1. 실드터널의 기술적 변천과 굴진기술

2022

터널 지하공간학회

도심지터널기술위원회

Annual Technical Report(Part 1)

실드터널의 기술적 변천과 굴진기술

2022

터널 지하 공간 학회
도심지터널 기술위원회

■ 목 차 ■

1. 서 론.....	1
2. 분기실드기술의 개요와 분류.....	1
3. 분기실드기술의 기술개발과 실적변천.....	3
4. 분기실드(실드본체분리형)의 각종 공법개요.....	6
4.1 구체실드공법.....	6
4.2 본체실드공법.....	7
4.3 직각분기실드공법(지하분기실드공법).....	8
4.4 H&V실드공법.....	8
5. 분기실드(실드본체분리형)의 각종 공법개요.....	9
5.1 기설실드에서 수평분기(JUC공법).....	9
5.2 상향실드공법.....	11
5.3 기설실드와의 접합(T-BOSS공법).....	12
5.4 DO-Jet공법(지중접합).....	13
6. 확대실드공법.....	14
7. 분기실드에 사용되는 세그먼트 기술.....	15
8. 도로분기합류부의 지중확폭기술.....	17

■ 표 목 차 ■

<표-1> 분기실드 각 공법의 적용개시 실적..... 5

■ 그림/사진 목 차 ■

[그림-1] 분기실드공법의 분류 및 각 공법의 실적건수..... 1

[그림-2] 분기실드공사 발주건수..... 5

[그림-3] 구체실드공법 개념도..... 6

[그림-4] JUC공법에 의한 지중접합분기 개념도..... 10

[그림-5] 상향실드공법 개념도..... 11

[그림-6] T-BOSS공법에 의한 지중접합방법 개념도..... 12

[그림-7] DO-Jet공법에 의한 지중접합방법 개념도..... 13

[그림-8] 확대실드공법 시공 개념도..... 14

[그림-9] 분기실드의 직접절삭 세그먼트 개념도..... 15

[그림-10] 외각라이닝에 의한 지중확폭공법 이미지(제공 : 다이세건설(주))..... 17

[사진-1] H&V 실드(지하철 12호선 롯본기역 공구)..... 3

[사진-2] 구체실드(요코요코)(가와사키시 칸온가와 우수저류지(제공:다이세건설(주)))..... 4

[사진-3] 직각분기(지하분기) 실드(간사이전력 타니마치스지 관로)..... 4

[사진-4] 구체실드(타테요코방식)(도쿄 하수도 제2쥬니소 간선)..... 6

[사진-5] 분체실드 토목공사(도쿄지하철 7호선 미나미아자부 공구 토목공사)..... 7

[사진-6] 직각분기실드(도쿄도 수도국 오오이 급수처배수관)..... 8

[사진-7] H&V실드(도쿄도 하수도 난타이간선)..... 9

[사진-8] 상향실드(오사카시 하수도국 반다이~사카미나미 간선)..... 11

[사진-9] T-BOSS공법 실드(도쿄도 하수도 미나토구 아카사카-롯데빌 재구축)..... 12

[사진-10] DO-Jet공법 실드..... 13

[사진-11] 확대원주실드(슈토고속도로 요코하마 칸쥬키타선 실드)..... 14

[사진-12] 확대실드 현황(슈토고속도로 요코하마 칸쥬키타선 실드)..... 15

[사진-13] 상향실드의 FFU 세그먼트(나고야시 메이역 미나미 우수간선)..... 16

[사진-14] JUC공법의 특수 세그먼트(도쿄도 하수도국 스기나미구 호리노우치 지선)..... 16

1. 서론

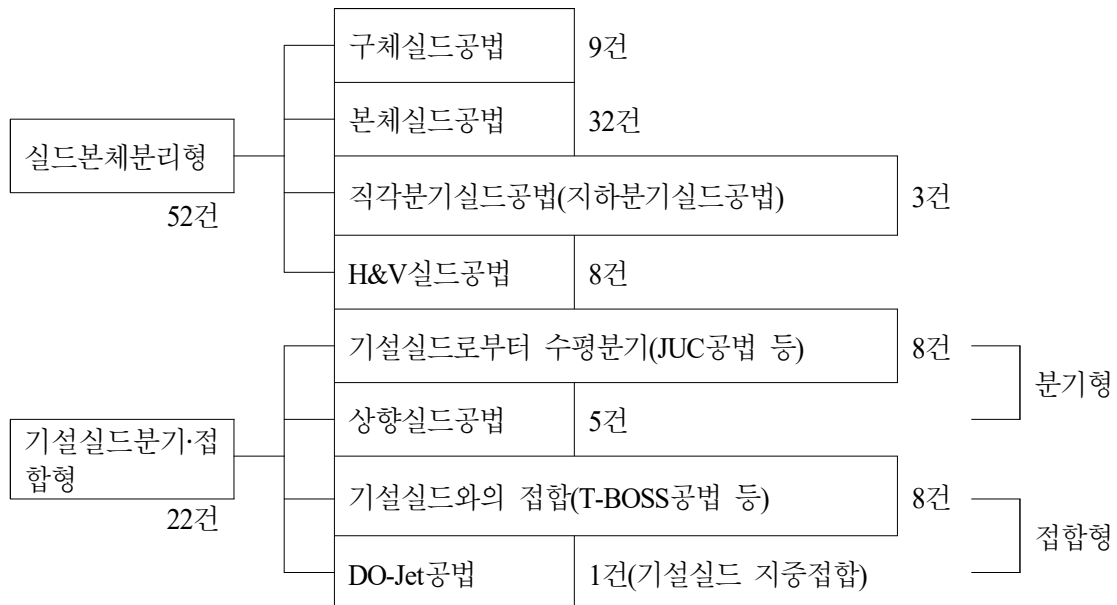
일본의 실드터널기술은 고도화된 도시부의 지하구조물 과밀화 또는 복잡화에 따라 지상에 공사용지를 확보할 수 없는 등 시공조건을 극복하기 위해 다종다양한 특수실드공법의 기술개발과 실용화를 추진해왔다.

본 고에서는 특수실드 중 실드터널을 지중에서 분기·분리 또는 접합하는 기술을 「분기실드」라 명명하고 기술변천과 각종 공법개요를 소개한다. 또한 실드터널 구경확대에 적용되는 「확대실드」나 도로분기합류부 적용성 검토 중인 「지중확폭기술」에 대해서도 실드분기기술의 토픽으로 다룬다.

2. 분기실드기술의 개요와 분류

분기실드는 본체와 부체 또는 2대의 동형기체를 일체화한 실드를 도중에서 분기 또는 분리시켜 2개의 실드터널을 구축하는 방식(실드본체분리형)과 이미 구축완료된 1차 라이닝에 대해 새로운 실드를 발진 또는 도달시켜 분기실드를 구축하는 방식(기설실드 분기·접합형)으로 분류할 수 있다.

그림-1은 분기실드공법의 분류와 각 공법의 공사실적건수를 나타낸다.



※각 공법의 건수는 실드공법기술협회 [실드공사실적표]¹⁾상 2020년도까지의 공사건수에 기초함

그림-1 분기실드공법의 분류 및 각 공법의 실적건수

여기서, 지반개량이나 지반동결을 이용한 지중접합이나 실드의 역학적 토크에 의한 지중접합은 실적건수 대상에서 제외한다.

실드본체분리형에는 구체실드공법, 본체실드공법, 직각분기실드공법(지하분기실드공법) 외에 형태는 다르지만 2대의 원형실드를 일체화시킨 상태로 굴진도중 분기하는 H&V실드공법 등이 있다. 기설실드 분기·접합형에는 기설실드터널 내에서 수평방향으로 발전하는 분기실드(JUC공법 외)나 기설실드를 절삭하면서 분기터널을 접합하여 구축하는 T-BOSS공법 외, 하수도나 공동구에서 사용되는 기설터널 내에서 지표면으로 연직상향 발전하는 상향실드공이 있다. 또한 실드전방에서 초고압 제트를 이용하여 지반개량과 지장물 절단이 가능한 DO-Jet공법도 접합형 실드로 이용된다.

분기실드기술의 특징으로 터널의 분기·접합이나 단면변화가 필요한 경우에 수직갱 구축을 생략할 수 있고 분기부의 발전·도달에 필요한 지반개량 규모를 축소할 수 있다. 또한 실드본체분리형에서는 실드공장제작, 현장조립작업을 한번에 집약할 수 있다.

실드공법기술협회의 공사실적데이터로부터 집계한 2020년도까지의 분기실드 공사건수는 합계 74건이며(그림-1), 시설용도의 내역은 우수정류시설을 포함한 하수도 관련시설이 약 70%인 54건으로 가장 많고 철도(지하철) 7건, 가스 5건, 공동구 4건, 수도 2건, 전력 2건이다.

3. 분기실드기술의 기술개발과 실적변천

분기실드의 전진기술이 된 것은 H&V실드공법이며, 비분기지만 최초의 H&V실드공법은 1991년 착공한 지하철 12호선 롯본기역공구(도쿄지하철건설(주))에 적용되었다(사진-1²⁾)



사진-1 H&V 실드²⁾(지하철 12호선 롯본기역 공구)

그 후 부체내포형 분기실드로 개발된 것이 구체실드공법이다. 본 공사는 1990년 전후에 수직갱과 수평방향 터널을 1대의 실드로 시공할 목적으로 개발되어 1991년 구체공법의 실증시험을 거쳐 1992년 착공한 가와사키시 칸온가와 우수저류지 공사에서 직각분기실드인 「요코요코실드」가 공사에 적용되었다(사진-2).



사진-2 구체실드(요코요코)

(가와사키시 칸온가와 우수저류지(제공:다이세건설(주)))

이어 1993년 착공한 도쿄도 하수도국 아다치구 하나바타지선공사에서 수직갱과

실드터널을 1대의 실드로 시공한 「타테요코실드」가 적용되었으며, 구체실드는 비트교환을 목적으로한 크론공법을 제외하고 합계 9건의 공사에 적용된 분기실드기술의 선도적 역할을 하였다.

구체실드공법에 이어 개발된 것이 직각분기실드(지하분기실드)공법과 본체실드공법이다. 직각분기실드는 1993년 착공한 간사이전력(주)의 타니마치스지 관로신설공사(사진-3³⁾)에 적용된 후 하수도 및 상수도 공사에 적용되었다.



사진-3 직각분기(지하분기) 실드³⁾(간사이전력 타니마치스지 관로)

본체실드공법은 1990년 전후부터 개발되어 1995년에 직경축소방식의 본체실드공법으로 도쿄전력(주)의 환7도카이마츠하라 관로공사(1공구), 요코하마시 하수도국의 하치만 간선하수도공사, 테도고속도교통영단((현)도쿄지하철(주))의 7호선 미나미아자부 공구 토목공사 3공구에 적용되었다.

2000년 이후 기설실드 분기·접합형 실드공법의 적용화와 더불어 실드에서 직접절삭이 가능한 세그먼트 기술개발이 각 방면에서 이루어졌다. 2000년에 반다이~사카미나미 간선하수관공사(오사카시 수도국)에 상향실드공법이 처음 적용되었다. 상향실드공법에는 실드에 직접절삭이 가능한 FFU세그먼트가 적용된다. 마찬가지로 2000년에 마고메 히가시2호 간선공사에 T-BOSS공법이 최초 적용되어 이후 T-BOSS공법은 하수도 시설 재구축을 목적으로 한 공사에 지속적으로 적용되고 있다. 또한 2004년에는 세그먼트에 미리 개구보강과 직접절삭부재(고인성 몰탈)를 주입하여 실드갱내에서 분기·접합할 수 있는 JUC공법(Joints in Underground Conveniently)이 도쿄도 하수도국의 스기나미구 호리노우치 지선공사에 적용되었다. 요즘 분기실드에서는 세그먼트 직접절삭 기술이 중용한 역할을 담당하게 되었다.

표-1은 분기실드 각 공법의 초회 공사발주년도와 공사건명을 표시한다.

표-1 분기실드 각 공법의 적용개시 실적¹⁾

발주년도	분기실드 공법명 공사건명(약칭)	시설용도 발주자(약칭)
1991년	H&V실드공법(비분기) 지하철12호선 롯데기역	지하철역 도쿄도 지하철건설
1992년	구체실드공법(요코요코) 가와사키시 간온가와 우수저류지	하수도 일본 하수도사업단
1993년	구체실드공법(타테요코) 아다치구 하나바타케 7, 8호메 지선	하수도 도쿄도 하수도국
1993년	직각분기·지하분기 실드공법 타니마치스지 관로신설	전력관로 간사이전력
1995년	본체실드공법(본체→부체) 환7도카이마츠하라교 관로신설	전력맨홀 도쿄전력
1995년	본체실드공법(본체→부체) 7호선 미나미아자부 공구 토목공사	지하철역 도쿄 지하철
1995년	본체실드공법(본체→부체) 요코하마시 남부처리구 하치만 간선	하수도 요코하마시 하수도국
2000년	T-BOSS공법 마고메 히가시2호 간선	하수도 도쿄도 하수도국
2002년	기설실드 분기(JUC공법) 스기나미구 호리노우치 1,2 호메 부근 지선	하수도 도쿄도 하수도국
2015년	DO-Jet공법(지중접합) 히로시마시 우지나 8호 우수간선	하수도 일본 하수도사업단

※실드공법 기술협회[실드공사실적표]외에 기초하여 조사

분기실드공사 발주건수의 추이는 그림-2와 같다.

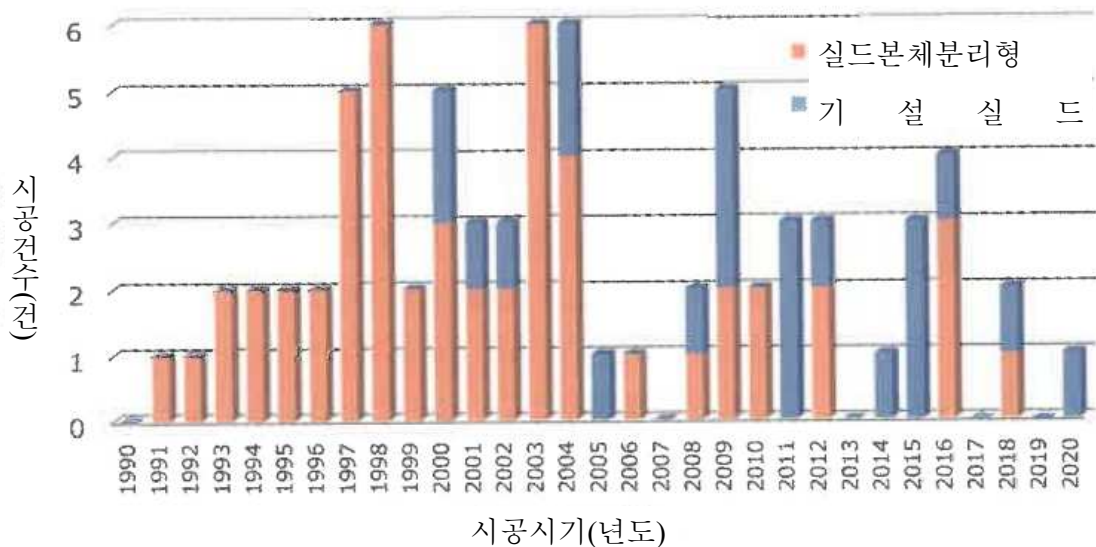


그림-2 분기실드공사 발주건수

실드본체분리형 공사건수는 2003년을 피크로 감소하는 경향이다. 그 원인은 수많은 실드공사에서 본체분리형 실드 적용 시 유리하지 않은 장거리·고속화 요구의 확대와 어번 링공법(분할조립형 토류벽) 등 합리적 수직갱 구축기술의 보급에 따른 것이다. 한편 기설실드 분기·접합형 공사건수는 2000년 이후부터 주로 하수도 관련공사를 기반으로 명맥을 유지하고 있다.

4. 분기실드(실드본체분리형)의 각종 공법개요

4.1 구체실드공법

가. 공법개요

수직갱과 터널을 1대의 실드로 연속적으로 구축하는 것을 목적으로 개발된 공법이다. 실드의 커터장치를 구체구조로하는 것으로서 임의지점에서 커터를 자유자재로 방향전환하여 분기실드를 추진한다. 지상으로부터 실드로 수직갱을 굴진한 후 횡실드를 굴진하는 타테요코방식과 수평방향으로 방향전환하는 요코요코방식이 있다.(그림-3⁴⁾, 사진-4⁴⁾)



그림-3 구체실드공법 개념도⁴⁾



사진-4 구체실드(타테요코방식)⁴⁾
(도쿄 하수도 제2주니소 간선)

나. 실적

1992~2003년에 9건의 공사실적이 있다. 용도는 하수도 시설에 한정되어있다. 2004년 이후 신규공사에 적용된 바 없다.

4.2 본체실드공법

가. 공법개요

하수도에서는 계획유량에 맞추어 관경변경이 필요하며, 지하철에서는 역사나 유치선 구간과 본선구간의 내공단면 변경이 필요하다. 이처럼 단면이 변화되는 터널을 1대의 실드로 시공하는 것을 목적으로 개발된 공법이다. 실드 본체내에 실드 부체를 포함한 이중구조의 실드로 굴진하고 굴진도중 부체를 분리 발진시키는 직경축소방식과 중간 수직갱부까지 굴진한 부체에 본체를 추가장착하여 굴진하는 직경확대방식이 있다. 직경축소방식으로 시공한 도쿄 지하철 7호선 미나미아자부 공구의 본체실드 외경은 $\phi 14.18\text{m}$ 이며, 현재시공 중인 도쿄 가이칸공사 발주이전의 국내 최대직경 실드이다(사진-5⁵⁾).

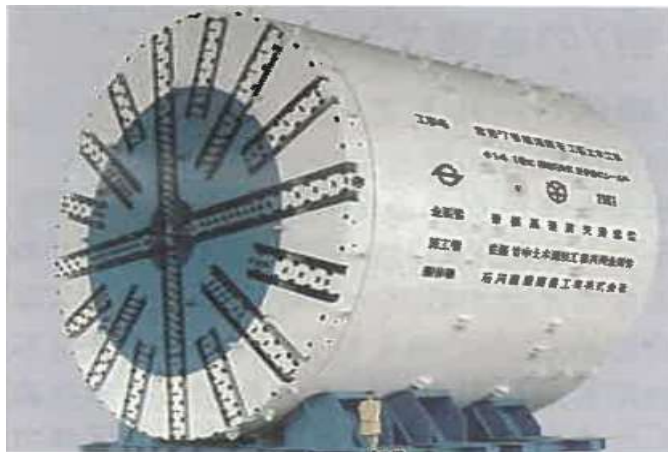


사진-5 본체실드 토목공사⁴⁾ (도쿄지하철 7호선 미나미아자부 공구 토목공사)

나. 실적

1995~2020년에 30건 이상의 실적이 있으며, 분기실드 중 가장 적용건수가 많은 공법이다. 시설용도도 지하철, 하수도, 공동구, 전력, 가스까지 다양하다.

4.3 직각분기실드공법 (지하분기실드공법)

가. 공법개요

T자 접속을 필요로 하는 터널구조에서 세그먼트보강이나 지반개량을 생략 또는 합리화하여 전체공기를 단축 및 접속부 지수성 향상 등을 목적으로 개발된 공법이다. 실드는 머리부, 중간부, 꼬리부의 세부분으로 구성되어 있으며, 중간부에 분기하는 실드를 내장하여 직각방향으로 분기실드를 발진시킨다. 분기 후 본선실드는 머리부만 발진한다.

나. 실적

1993~2003년에 직각분기실드로서 3건의 실적이 있다. 용도는 전력관로 및 상하수도이다. 2004년 이후 신규공사에 적용된 바 없다.(사진-6⁶⁾)



사진-6 직각분기실드⁶⁾ (도쿄도 수도국 오오이 급수처배수관)

4.4 H&V실드공법

가. 공법개요

기본적으로는 2대의 원형실드를 연결한 구조로 초근접 또는 일체화한 터널단면을 형성하고 굴진도중 실드를 분기할 수 있는 공법이다. 횡 또는 종 연결상태에서 연결장치의 제어로 2련의 위치관계를 단계적으로 변화시킴으로써 중횡의 위치관계를 순서대로 바꾸는 스파이럴 형태의 선형구축이 가능하며, 용지조건에 맞추어 합리적인 터널선형계획이 가능하다.

나. 실적

1989년에 실증시험공사를 실시하여 $\phi 2.1\text{m} \times 2\text{런}$ 실드에 의해 횡 2런, 종 2런 스파이럴, 분기 등의 시공성이 실증된 후 철도나 하수도에 적용되어 1991~2020년까지 8건의 실적이 있다.(사진-7²⁾)



사진-7 H&V실드²⁾ (도쿄도 하수도 난타이간선)

5. 분기실드(기설실드분기형)의 각종 공법개요

5.1 기설실드에서 수평분기(JUC공법)

가. 공법개요

기설실드에서의 수평분기실드 시공은 종래의 지반개량공법이나 내부보강대책을 조합하는 것이 일반적이거나 여기에서는 터널 갱내에서 수평분기하는 JUC공법에 대해 기술한다. 본 공법은 사전에 분기·접합용 개구보강구조 및 실드에 의한 직접절삭이 가능한 라이닝 재료로 구성된 전용 세그먼트를 조립해 두는 것으로서 지상작업이 필요없고 실드 갱내시공만으로 실드 분기·접합이 가능하다. 본 공법의 특징으로는 지상 시공이 불필요하다는 것, 지반개량 등 보조공법의 생략 또는 저감이 가능하다는 것, 시공기간을 단축할 수 있다는 점이다.(그림-4^{7), 8)})

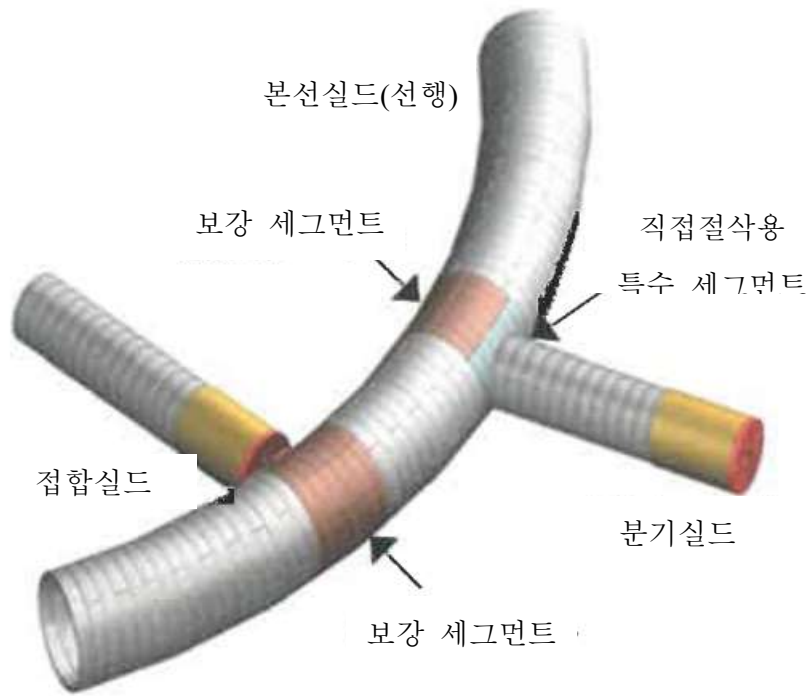


그림-4 JUC공법에 의한 지중접합·분기 개념도^{7), 8)}

나. 실적

JUC공법 적용실적은 1건이며, 용도는 하수도 시설이다.

5.2 상향실드공법

가. 공법개요

도시부나 간선도로에 위치한 하수도 간선의 유입공 공사에서 지상작업을 대폭 감소시키고 실드 갱내에서 효율적으로 유입공을 구축하는 것을 목적으로 개발된 공법이다. 기설실드 갱내에서 지상으로 상향실드를 발진시킴으로써 중방향 터널을 구축하는 공법이며, 실드는 지상에서 회수하거나 갱내로 되돌려 재사용이 가능하다. 실드본체 외에 필요한 기재는 모두 터널 갱내에서 운반·공급한다. 실드로 직접절삭이 가능한 FFU 세그먼트를 발진부에 배치하여 지반개량 등 보조공법을 생략 또는 저감할 수 있다.(그림-5⁹⁾, 사진-8⁹⁾)



그림-5 상향실드공법 개념도⁹⁾



사진-8 상향실드⁹⁾
(오사카시 하수도국 반다이~사카미나미 간선)

나. 실적

2000~2020년에 5건의 실적이 있다. 1건의 공사에서 유입공 구조를 만든 것은 물론 상향실드 시공실적이 15회이다. 용도는 하수도 및 공동구이다.

5.3 기설실드와의 접합(T-BOSS공법)

가. 공법개요

T-BOSS공법은 대심도 기설하수터널에 T자형으로 접합할 때 지상 매설물이나 용지조건에 좌우되지 않고 지중접합할 수 있도록 개발된 공법이다. 실드 내 절삭비트가 장착된 강재 링(절삭링, 사진-9¹⁰⁾ 참조)을 접합위치에서 전방으로 슬라이드시키면서 회전, 기설실드의 세그먼트를 직접절삭하여 관입함으로써 기설터널을 접합하는 공법이다.(그림-6¹⁰⁾, 사진-9¹⁰⁾)

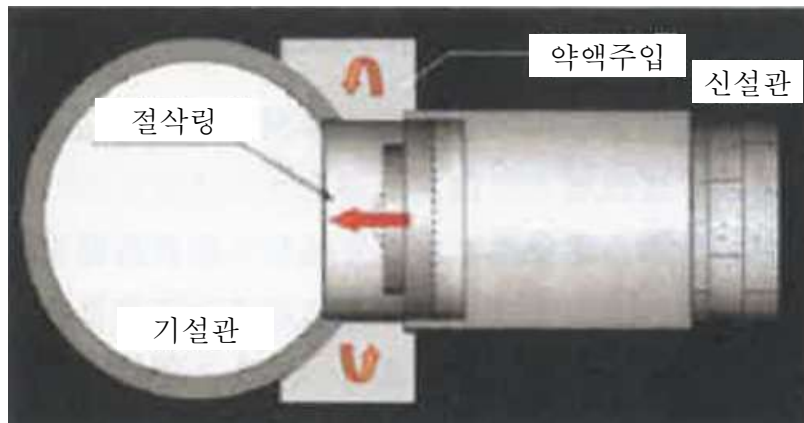


그림-6 T-BOSS공법에 의한 지중접합방법 개념도¹⁰⁾



사진-9 T-BOSS공법 실드¹⁰⁾ (도쿄도 하수도 미나토구 아카사카롯본기 재구축)

실드 절삭링 자체가 토압·수압에 대한 구조부재가 되며, 지수기능을 가지기 때문에 접합부의 지반개량을 생략하거나 저감할 수 있다.

나. 실적

2000~2020년에 8건의 실적이 있다. 용도는 기설 하수도와 신설관의 접속이다.

5.4 DO-Jet공법 (지중접합)

가. 공법개요

DO-Jet공법은 본래 초고압 분사시스템을 사용하여 실드 내에서 지반개량 및 지장물을 절삭·제거하는 공법이나 실드에 슬라이드 커버를 장착함으로써 실드 내부에서 지중접합을 할 수 있다. 시공순서는 종래와 마찬가지로 DO-Jet공법으로 초고압 지반개량을 수행하면서 슬라이드 커버를 전진시켜 접합부의 토류와 지수에 대응한다.(사진-10¹¹⁾, 그림-7¹¹⁾)

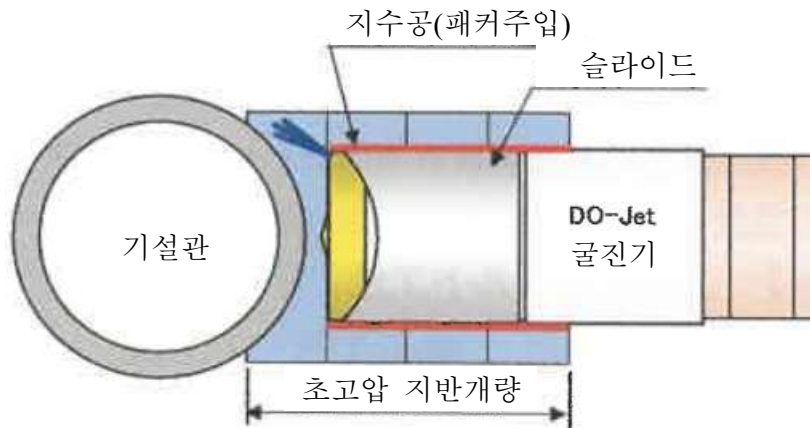


그림-7 DO-Jet공법에 의한 지중접합방법 개념도¹¹⁾



굴진 시(지반개량)

지중접합 시

사진-10 DO-Jet공법 실드¹¹⁾

나. 실적

DO-Jet공법의 공사실적은 2020년까지 45건이나 슬라이드 커버를 조합하여 기설관과 실드를 지중접합한 실적은 1건이다. 용도는 기설 하수관과 신설관의 접속이다.

6. 확대실드공법

확대실드공법은 실드터널의 임의장소에서 확대용 원주실드를 발진시켜 기설실드의 외주변으로 확대단면을 구축하는 공법이다. 더불어 도넛형태의 대형실드를 종단방향으로 굴진함으로써 확대단면을 연장하는 방식도 있다.(그림-8¹²⁾)

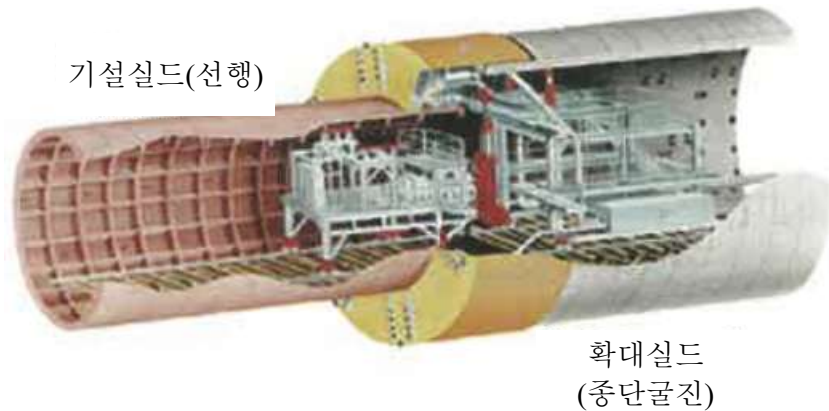


그림-8 확대실드공법 시공 개념도¹²⁾

본 공법의 특징은 터널 내에서 시공되기 때문에 이외 분기실드공법과 마찬가지로 지상작업을 생략할 수 있다. 국내 최초의 확대실드공법은 1984년 도쿄전력(주) 발주의 키요스바시도오리 관로신설공사로서 전력케이블 접속과 전화케이블 연계를 위한 확대터널 축조를 목적으로 적용되었다. 1차 세그먼트 외경 $\phi 6.6\text{m}$ 에서 2차 세그먼트 외경 $\phi 7.8\text{m}$ 로 확대되며, 연장은 약 24m이다. 확대실드공법은 주로 전력 및 공동구의 지중맨홀공사에 적용되며, 2003년까지 함께 9건의 시공실적을 남겼다.

그 후 2010년 착공한 슈토고속도로(주)에서 발주한 요코하마 칸쥬키타선 실드터널공사에 본선터널 외경 $\phi 12.3\text{m}$ 를 확대실드에 의해 외경 $\phi 18.3\text{m}$ 로 확폭하였다. 확폭부는 도로합류부를 지중확폭하기 위한 파이프루프 발진기지로 이용되었으며, 확대실드의 실적으로는 국내 최대규모이다.(사진-11, 12¹³⁾)



사진-11 확대원주실드¹³⁾ (슈토고속도로 요코하마 칸쥬키타선 실드)



사진-12 확대실드 현황¹³⁾ (슈토고속도로 요코하마 칸조키타선 실드)

확대실드공법의 적용건수는 많지 않음에도 불구하고 향후 노후된 실드터널을 비개착으로 확대, 개량하는 공법으로 이용될 가능성이 있다.

7. 분기실드에 사용되는 세그먼트 기술

분기실드의 발진·도달부나 후술할 외각실드 라이닝에서는 실드에서 직접절삭이 가능한 특수 세그먼트가 개발되었다. 이러한 부재에는 FFU, 유리섬유, 탄소섬유, 특수 몰탈 등이 사용된다.(그림-9⁹⁾)

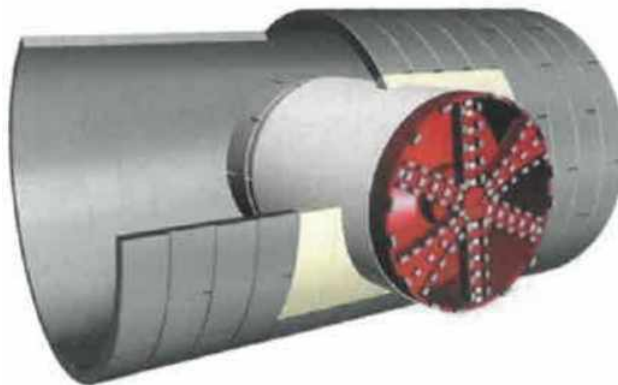


그림-9 분기실드의 직접절삭 세그먼트 개념도⁹⁾

그 중 FFU는 이미 발진·도달 수직갱의 토류벽 직접절삭부재로서 보급되어 그 기술을 응용하여 전술한 상향실드의 발진부용 세그먼트로도 적용되었다.(사진-13⁹⁾)



사진-13 상향실트의 FFU 세그먼트⁹⁾ (나고야시 메이역 미나미 우수간선)

또한 JUC공법에 적용하는 특수 세그먼트는 절삭가능부재로서 고인성 몰탈을 선정하고, 공장에서 강재 세그먼트에 보강재를 용접하여 고인성 몰탈과 일체화시킨 것이다.(사진-14⁸⁾)

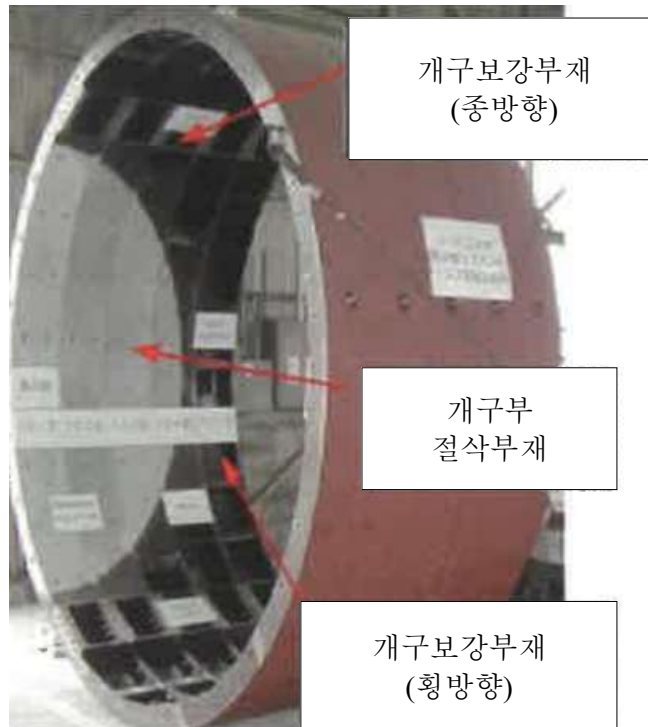


사진-14 JUC공법의 특수 세그먼트⁸⁾ (도쿄도 하수도국 스기나미구 호리노우치 지선)

FFU 세그먼트, 특수 세그먼트 모두 발진방호 시 지반개량이나 인력에 의한 개구작업을 생략함으로써 공정과 공사비를 절감하고, 발진·도달 시의 출수 트러블 방지를 도모하였다.

8. 도로분기합류부의 지중확폭기술

최근 도시부 도로터널의 분기합류부 건설계획 시 지중확폭공법에 관한 기술개발이 진행되고 있다. 특히 대심도에서는 수압 등의 하중조건이 불량하고 종래의 절삭 및 구축 방법으로는 구조적으로 성립되지 아니하므로 본선터널과 램프터널 주변으로 다수의 소구경 실드를 주상으로 배치하여 대단면 원형구조체(외각라이닝)을 축조하는 시공방법 및 구조형식이 검토되고 있다.(그림-10)

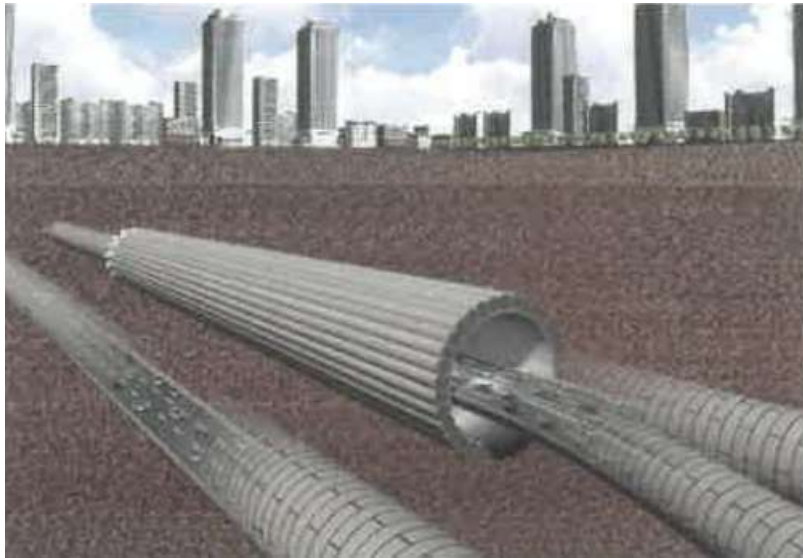


그림-10 외각라이닝에 의한 지중확폭공법 이미지(제공 : 다이세건설(주))

이러한 구조형식의 원형은 1980년대에 미국 시애틀에 건설된 Mount Baker Ridge터널이다. 당 공사는 오픈실드로서 24조의 마제형 터널을 동일 원주상으로 중합하여 내경 19.3m의 대단면 터널을 건설하는 것이었다. 외각부의 실드터널 완성 후 터널내부는 백호로 굴착하였다. 도시부 대심도에서 대단면 외각실드방식을 실용화함에 있어서는 고수압 조건에서 외각 라이닝의 구조적 안정뿐만 아니라 시공 중 및 완성 후 확실한 지수대책이 중요한 과제이다.

(문헌 : 타니구치 아즈시다이세건설(주))

참고문헌

1. 실드공법기술협회 : 공사실적집(1983~2020년)
2. 실드공법기술협회 : H&V실드공법, 상세 팜플렛
3. 니시마츠건설 : 기술&솔루션, 분기실드공법(지하분기공법) 팜플렛
4. 실드공법기술협회 : 구체실드공법, 상세 팜플렛
5. 사토공업 : 토목분야, 실드·추진, 부채장착형 실드
6. 카고시마건설 : 토목기술, 실드터널기술, 공법실적
7. 코야마 준·카와무라 분키·쇼무라 노리오·소메야 히로키 : 실드 갱내분기·접합공법의 개발(1), 토목학회 제59회 년차학술강연회, pp.159~160, 2004.9.
8. 하시구치 아키오·타케다 히사오·시미즈 야스오·타무라 나오아키 : 실드 갱내분기·접합공법의 개발(2), 토목학회 제59회 년차학술강연회, pp.161~162, 2004.9.
9. 나카무라 타카요시·스기후지 테츠야·하라 노부유키 : 도시대응 상향실드공법과 발전부 세그먼트, 나고야시 메이역 미나미 우수간선, 터널과 지하, Vol.40, No.9, pp.51~57, 2009.9.
10. 도쿄도 하수도 서비스 : 기계식 T자 접합실드공법(T-BOSS공법)
11. DO-Jet공법연구회 : 회보 제12호
12. 실드공법기술협회 : 확대실드공법, 상세 팜플렛
13. 오치아이 에이지·가토 미즈호·마츠하라 켄타·후지이 쯔요시·츠자카 오사무 : 대단면 확대실드의 계획과 시공, 터널공학보고서집, Vol.24, II-9, 2014.12.