

## 미호천 II 단계 청원 도수로

### Mihochon Comprehensive Agricultural Development Project - Phase II - Chungwon Diversion Canal

이 종 덕 \*  
Lee, Jong-duk

#### I. 사업의 배경 및 개요

청주시 일대의 미호천 유역은 구릉지로서 소유지 이상의 것을 설치하기에는 상대적으로 사업비가 많이 들기 때문에 별도의 용수원 확보 방안을 강구하지 않으면 안된다.

1970년도 금강, 평택지구 착공으로 시작된 대단위 농업종합개발 사업이 본 궤도에 올라 중부 내륙 미호천 유역 개발구상이 현실화되면서 미호천 대단위 농업종합개발 사업이 시작되었다.

미호천 I 단계에 비하여 II 단계는 대규모 저수지나 양수장을 별다른 수원공을 설치할 수 없는 지형적 여건을 고려하여 1977년 착공된 대청댐과 연계한 유역변경 방식에 의한 농업용수 공급계획을 수립하면서 구체화되었다.

청원 도수로는 대청호 물을 자연도수하기 위하여 계획한 것으로 미호천 II 단계 사업의 실질적 수원공이라 할 수 있다.

대청댐 상시 만수위 +76.50m에서 제한수위 +60.00m를 두고 조절되는 수위에 맞추어 청원 도수터널 바닥표고를 53.00m로 계획함으로써 제한수위시 7.0m의 수두를 두고 자연 유하할 수 있도록 함에 따라 청원 도수터널은 지표로부터 지하 17.0m~50.0m에 위치하여 지하수위 이하의 터널을 굴착하게 되었다.

도수터널의 지질구조가 경암으로부터 연약토에 이르기까지 복잡한 지층으로 형성되어 터널굴착 과정에서 붕락과 함몰 등 많은 어려움을 겪었으며

지하수 처리에 골몰하였던 것이 한두번이 아니며 지하수와와의 싸움이 공정의 주가 되기도 하였다.

미호천 농업종합개발 사업에 대한 이해를 돕기 위하여 주요 공사를 소개하면 다음과 같다.

I 단계 사업은 충청북도 음성, 진천, 괴산군과 경기도 안성군 농경지 11,554ha와 저수지 12개소, 양수장 2개소, 용수로 404km, 경지정리 2,560ha, 하천 개수 20km를 1989년 준공하였고, 뒤이어 II 단계 사업은 저수지 1개소, 도수로 6.2km, 취입보 1개소, 양수장 6개소, 용수로 252km, 경지정리 1,935ha를 주사업으로 하여 농경지 4,571ha를 관개하기 위하여 설치하는 것으로 충청북도 청주, 청원 일대를 수리 안전담화하는 대단위 농업종합개발사업이다.

#### II. 도수터널의 지질학적 특성

##### 1. 터널의 개황

터널은 가늘고 긴 구조물이기 때문에 조사 범위가 매우 넓게 되는 것이 일반적이며, 다른 구조물과 비교해서 조사 설계단계에서는 정밀도가 떨어지게 된다. 따라서 터널조사에 있어서는 조사 정밀도를 향상시키기 위하여 시공단계에서 조사를 세밀하게 실시하고 조사 결과를 수정·보완하면서 공사를 진행하는 것이 보통이다.

청원 도수로 터널공사에서는 지층상태에 대한

\* 농어촌진흥공사 시설영농처

정확한 분석이 이루어지지 않아 발파에 의한 굴착 방법으로는 토사 및 풍화대 구간의 막장자립이 되지 않거나 아울러 지하수의 다량 유출로 인한 붕락 및 함몰 등 터널 붕괴현상이 계속되어 굴착작업이 중단되는 등 공사 진행에 많은 문제점이 노출되었다.

청원 도수로 공사가 거의 완공에 가까운 시점에서 지질조사와 그동안 연약한 지층으로 인한 터널의 붕괴대책으로서 지표에서의 그라우팅 공사 및 갱내 그라우팅 공사, 그리고 공동대충진 등과 이와 관련된 그라우팅 공사를 실시한 후 현장 원위치 시험에 의한 그라우팅 공법의 주입 효과를 확인함으로써 이들 본 공법의 설계, 시공, 유지관리 차원에서 이용할 수 있는 정보를 얻기 위하여 시공전후 현지 특성의 제현상을 정량적, 정성적, 분석을 실시하였다.

일반적으로 강도가 낮은 지반에서 터널 굴착을 시행하는 경우, 또는 지하수위가 높아 다른 주변 지반의 침하가 예상되거나, 연약지반으로 인하여 굴착시 지반의 이완 영역이 넓은 경우 등은 지하 구조물 및 인접 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 굴착공법과 병행하여 적절한 보조공법을 사용하게 된다. 이러한 보조공법중에 주로 많이 사용되고 있는 공법으로는 주입공법을 들 수 있다.

주입재의 침투 효과에 의해 차수 및 주변 지반의 보강과 함께 지반의 이완 및 확대 등을 방지하므로 사질토, 점성토, 풍화토, 파쇄대층 및 풍화암 등 다양한 지반에 적용할 수 있으며, 특히 시공이 어려운 부분의 지하 구조물에 대한 안정효과 및 차수효과가 큰 것으로 밝혀져 최근 크게 각광을 받고 있다. 그러나 국내의 경우 L.W 그라우팅에 대한 공법의 기술성, 경제성에 대한 체계적인 연구가 수반되지 않고 있어 과연 어느 정도의 효과가 있는지, 어느 분야에 효과가 있는지 정확한 근거 자료가 제시되지 않고 있는 실정이다.

## 2. 지질조건

### 가. 지질개요

본 지구는 시대 미상의 흑운모 편암과 중생대 유라기에 이를 관입한 흑운모 화강암이 주로 분포하

고 있으며 수처에서 산성 암맥이 관입하고 있다.

흑운모 화강암의 관입에 의해 흑운모 편암은 압쇄, 변질, 풍화의 정도에 따라 다양하게 나타나며 접촉부 부근에 편암이 Xenolith로 나타나는 경우를 흔히 볼 수가 있다.

풍화가 진행중인 편암은 대기 노출시 반복된 함수풍화에 의해 결정의 급격한 이완작용으로 급격히 토사화 되며 세립질의 흑운모가 견운모화 되어 윤향성을 내재한다.

대체로 중립질 내지 조립질이고 등립질의 입상 석리를 보이는 흑운모 화강암은 화학적 풍화에 대한 저항력이 약해 풍화가 깊이 진행중에 있으며 주 성분 광물은 석영, 사장석, 각섬석으로 이루어져 있다.

신선한 편암 및 화강암은 경질의 암반이나 관입에 의해 불규칙하게 접촉되는 양암 접촉대의 암상은 매우 불량하며 파쇄대 및 소규모의 단층대를 수반한다.

### 나. 세부지질조사(시점부 No. 0+00~ No. 16+13)

#### 1) 조사목적

청원 도수터널 전연장 6.2km에 대해 지질조사(시추조사)자료는 기본조사시 506번 지방도를 따라 동쪽으로 지나는 노선으로 10공을 실시하였으나 실시설계시 506번 지방도 서쪽을 따라 지나는 노선으로 변경하면서 터널의 연장 구간에 대해 3개공의 시추조사만 실시하였으며, 시점부측은 기본조사자료를 평행 이동하여 지질조사 자료를 활용하였던 바, 터널굴착 시공시 예상지질과는 상이한 상태로 나타남에 따라 청원 도수터널 시점부 구간(터널상부에 저수지, 공장, 마을, 도로 등 치상물이 위치)에 대해 정밀지질조사를 실시하고 이에 대한 보완대책을 수립하게 되었다.

#### 2) 조사결과

가) 본 조사는 청주시 남쪽 약 10km 완만한 구릉과 평지 사이에 위치하고 있다.

나) 기반 암석은 캄브리아의 편암이고 이것을 유라기의 청주 화강암이 관입되어 형성되고 있다.

다) 시추결과에 의하면 지반은 위로부터 점성토, 사질토, 풍화편암, 편암, 접촉변질편암, 접촉변질화강암 및 화강암으로 구성되고 일부 No. 2 지점에 Dyke가 나타난다.

라) 전기검층의 결과 풍화편암 및 편암의 비저항은 130~250Ω·m, 접촉변질 암류는 450Ω·m, 화강암은 400~900Ω·m를 나타내고 있으며, 일반치에 비해 상당히 낮은 값 즉 풍화변질이 매우 진전되고 있는 것을 알 수 있다.

마) 속도검층의 결과 풍화편암의 P파 속도는 0.8~1.2km/s, 편암은 2.5~2.9km/s, 접촉변질암류는 1.5~2.5km/s, 화강암 1.8~2.0km/s를 나타내고 있으며 일부 편암 부분을 제외하고  $V_p < 2.5$ km/s를 나타내고 있으므로 “토사” 및 “풍화대”로 구분된다.

바) 공내재하시험의 결과 얻어진 탄성계수는 풍화편암이  $E=0.5\sim 1.3 \times 10^9$ kg/cm<sup>2</sup>, 접촉변질편암이  $E=1.1\sim 1.2 \times 10^9$ kg/cm<sup>2</sup>, 접촉변질 화강암은  $E=7.4\sim 9.1 \times 10^9$ kg/cm<sup>2</sup>, 화강암은  $E=2 \times 10^9$ kg/cm<sup>2</sup>를 나타내고 있다. Intact rock의 탄성계수  $1 \times 10^{10}$ kg/cm<sup>2</sup>인 것을 고려할 때 편암류는 1/100, 화강암류는 1/10 정도의 값 밖에 나타내고 있지 않다.

사) 현장투수시험결과 토사층의 투수계수는  $9.5 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-9}$ cm/s였다. 따라서, 양 지층은 투수도가 “중위” 내지 “낮다”고 판단된다.

아) Core Stone 등 시추코어로서 회수된(코아 회수율 20% 이하) 10cm 이하의 코아를 이용해서 Point load test를 실시하고 일축압축강도를 추측한 결과는 다음과 같다.

편 암  $\sigma = 500$ kg/cm<sup>2</sup>

화강암  $\sigma = 482$ kg/cm<sup>2</sup>

자) 시공상의 암반분류는 다음과 같다.

No.00+00~No.07+30 풍화대(접촉변질화강암)

No.07+30~No.09+00 풍화대(접촉변질편암)

No.09+30~No.10+00 토 사(풍화편암)

No.10+00~No.11+15 풍화대(접촉변질편암)

No.11+15~No.15+00 풍화대(접촉변질화강암)

No.15+00~No.16+13 풍화대(접촉변질편암)

### III. 청원 도수터널에서의 연약지반 보강 Grouting

#### 1. 연약지반 보강그라우팅의 개괄

연약지반을 보강키 위한 주입공법으로서 주입형태에 의한 분류와 주입재의 종류에 의해 분류할 수 있으며 그 내용은 다음과 같다.

##### ○ 주입형태에 의한 분류

주입형태	내 용
충진주입 (Filling)	터널의 뒷채움이나 구조물의 기초지반하의 공동 등을 메우는 주입을 말하며 일반적으로는 Cement, 점토 재료로 처리되는 수가 많으나 주입재의 외부유출이 심할 경우 약액을 사용하기도 한다.
할열주입 (Fracturing)	흙입자의 간극을 메우지 않고 흙의 조직을 파괴하면서 관입하여 국부전단을 일으킴으로써 흙의 입자를 재배열함과 아울러 주입재만이 고결되어 골격을 이루는 주입형태이다. 점성토나 극히 느슨한 사층에의 주입초기에 일어나고 현장에서는 하얗게 맥산으로 고결되어 있는 부분이 주입하여 고결된 약액이다.
침투주입 (Permeation)	흙입자의 배열을 변화시키지 않고 입자간의 간극을 메우기 위한 주입형태를 말하며 주로 사질계 지반에서 행하여진다.
경계주입 (Roofing)	서로 다른 2층 이상의 흙이 분포하는 구간에 주입재가 층의 경계면에 관상으로 뿜는 경우가 있다. 우선, 이 부분에 대해 충진이 이루어지지 않으면 지반중에 침투주입이 곤란하게 될 경우가 많으므로 최초에는 이 경계면에서의 처리가 필요하다.
할열교반 침투주입	주입재에 중고압을 주어 지반을 할열하고 이어서 인위적으로 주입재와 지반을 교반시킨다. 그 후 어느 정도 침투하고 주입재는 피압상태로 CEL화 한다. 이같은 주입형태를 할열교반 침투주입이라 한다. 최근 새로 개발된 이중관 ROD에 의한 Short Gel Time 주입방법이 여기에 해당하는 것이 있다.
복합침투 주입	주입대상지반의 지질특성에 맞는 Grout재를 침투성을 기초로 하여 선정하며 대공극내지 공동에는 원결 또는 순결 첨가제를 주입하고, 미세한 균열 또는 토입자의 간극 등은 Middle 또는 Long Gel Time제를 사용하여 침투 주입시켜 복합 주입을 행하는 것으로서 최근 S.G.R공법 등을 말한다.

○ 주입재료에 의한 분류

주입형태	내 용
현탁형용액	입자를 포함하는 Water Glass계 약액의 총칭이다. 현탁형용액은 흡입자 간극에의 침투가 어려우므로 일반적으로 다음의 경우에 사용되며 호모 겔의 강도가 크게 요구될 경우 사용된다. ① 점성토에의 활열주입 ② 경계면에서의 주입 ③ 역층 등 간극이 큰 부분에서의 주입 ④ 느슨한 사층에의 초기주입 ⑤ 인위적으로 느슨하게 한 지반에의 충전주입
용액형약액	사질토의 약액을 매우는 침투주입의 경우에 사용되고, Sand Gel이 형성되면 강도는 기대할 수 있다. 그러나 Homo Gel 강도는 현탁형 약액에 비해 일반적으로 약하기 때문에 지반중에 호모 겔로 존재한 경우는 그 부분이 공법 및 약액에 따라 활동면으로 되는 경우가 있으므로 주의가 필요하다. 또한 현탁형 용액형 2종의 약액의 병용도 실제로 잘 행해지고 있다.
Cemend Bemtonite계	이 재료를 지반에 주입한 경우 고화하기까지 시간을 요하기 때문에 넓은 범위로 확산될 염려가 있다. 또 침투상황도 현저히 나쁘고 동시에 사용한 혼합수의 대부분이 잉여수로 되어 지반중에 확산하기 때문에 통상적으로는 공극등에의 충전 Grout 이외에는 기술면 시공면에 문제가 있고, 지반주입재료로서는 거의 사용되고 있지 않다.
초미립자 현탁액	최근 발달된 분쇄기계의 개발에 의한 것으로서 입자 Grout재(Cement 등)를 초미립화 Plant를 통과시켜 용액형과 혼합시키거나 또는 독립적으로 사용하여 침투영역을 넓히고 강도의 증가가 가능토록 하는 것이다.

2. 청원 도수터널에서의 연약지반 보강 Grouting

청원 도수터널에서 연약지반 보강 Grouting으로는 침투주입 개념을 일부 포함한 경계주입 방법을 주로 이용하였으며 주입 재료는 현탁형 용액을 사용하였다.

경계주입 방법을 도입한 것은 편암 및 화강암이 교호(交互)되어 풍화토사화 되었으며 차등풍화에 의해 Core Stone을 함유하고 있는 본 지역의 지질 특성상 선택된 방법이다.

청원 도수터널 시공시 연약지반에 대한 보강 Grouting은 시공방법에 따라 2가지로 대별할 수 있다.

첫째는, 터널 상부의 원지반에서 터널굴착 단면

주위로 그라우팅을 하여 보강하는 갱의 그라우팅 방법과 둘째는, 갱내 막장에서 굴진 방향으로 터널 주위를 1 step별로 보강하는 방법이다.

3. 갱의 Grouting

터널계획고에서 원지반선 까지의 높이가 40m 이내로 굴진심도가 작으며 지상물이 없는 구간이나 터널굴진중 함몰되어 되폐음한 구간에 대해 실시하였다.

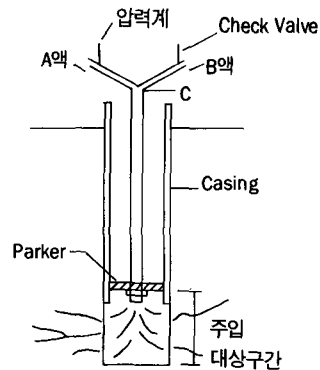
가. 주입 System

Casing을 이용하여 주입하는 방법과 Tube를 이용하여 주입하는 방법을 사용하였다.

1) Casing을 이용하는 방법

Y관을 이용하는 1.5공정식으로 A액 및 B액을 별도의 Mixer 및 Line으로 가압하여 보내면 점 C에서 A액과 B액이 합하여져 Parker 하부의 주입 대상구간에 주입하는 형식이다.

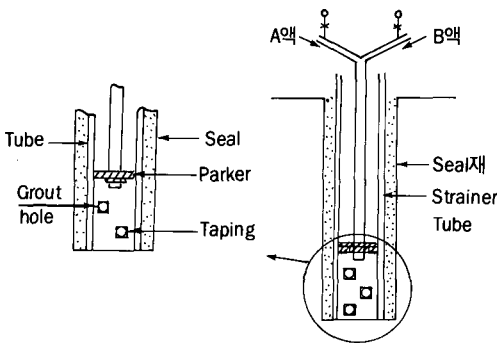
초기에 이용한 이 방법은 공정이 간단한 장점이 있는 반면, 가압시 Casing 하부 주입대상 구간 중간에서 hole이 폐쇄되어 하부에서의 주입이 불가능하게 되거나, Casing과 공벽 사이로 주입재가 누출이 되어 주입재의 손실 및 가압이 되지 않거나 연약부위를 따라 주입재가 편중되어 주입되는 단점이 있다.



<그림-1> 갱의 그라우팅에서의 Casing 이용법

2) Tube를 이용하는 방법

Y관을 이용하는 1.5m정격식은 Casing법과 같으나 Casing법의 단점을 보완하기 위해 사용한 방법이다. 먼저 주입대상 구간 하단까지 천공을 한 후 Casing내에 제작된 Tube를 삽입하고 Casing을 인양한 후 주입호스와 천공된 공벽사이의 공간을 막기 위해 Seal재가 어느 정도 고결된 후(10시간 이상) Tube내로 Parker를 삽입하여 가압하면 Tape가 터지면서 주입이 되는 방식으로 하부부터 상향식으로 단계별로 주입된다.



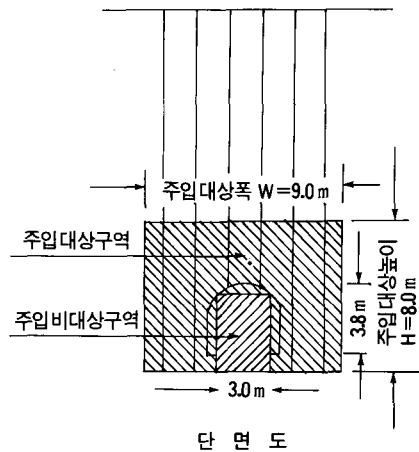
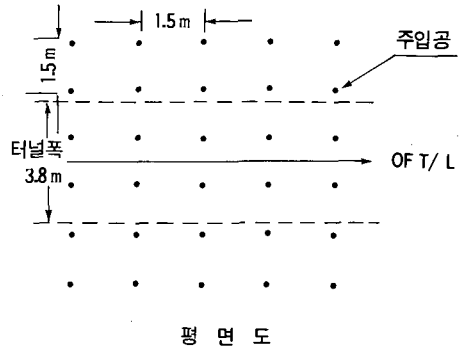
<그림-2> 갱의 그라우팅에서의 Tube 이용법

나. 주입재의 선정

주입재는 시멘트, 규산소다, 벤토나이트를 사용하였으며, 주입 비율은 Geltim 및 강도에 대한 실내 시험결과에 의해 선정하였으나 Homogel로서의 강도는 별의미가 없다. 청원 도수터널 연약지반 보강 그라우팅에 이용된 주입재 및 주입 비율은 한 가지를 주배합 비율로 선정하여 사용하였으며 시공시 현장 여건에 따라 수시로 가감조정 하였다.

다. 공배열 및 주입단면

현장여건, 지질상태 및 안전도의 우선순위와 경제성을 검토하여 터널 중심부를 기준으로 최소 5열, 최대 8열, 공간격 최대 3.0m, 최소 1.2m를 가감시공 하였으며 기본 공배열 및 주입단면은 다음과 같다.



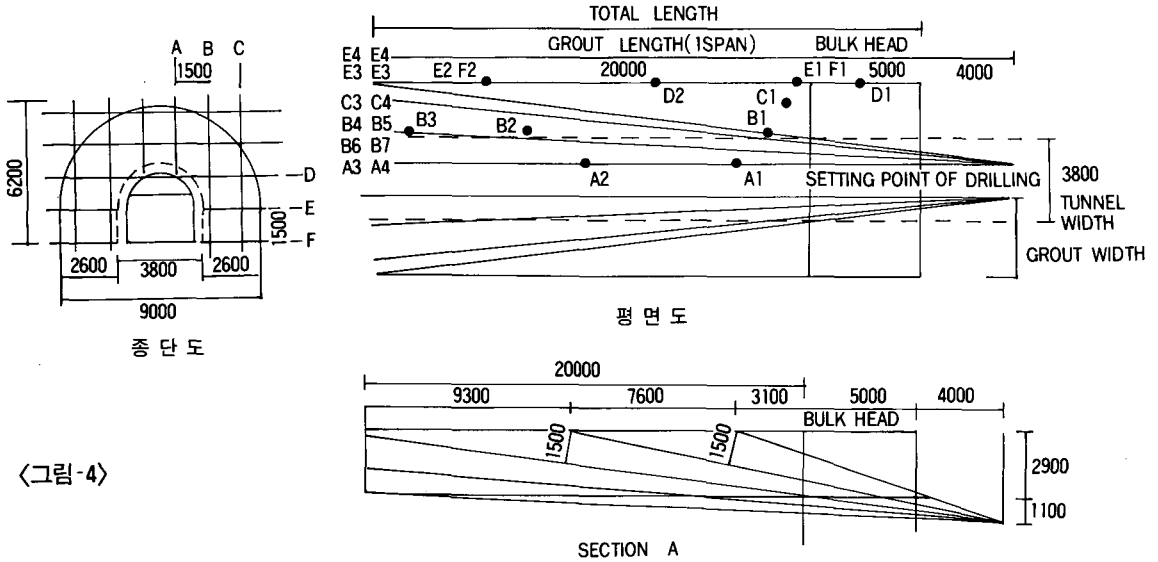
<그림-3> 공배열 및 단면도

4. 갱내 Grouting

터널 계획고에서 원지반선 까지의 굴진심도가 깊어 지상에서의 천공비가 과도한 구간이나 지상물(가옥, 도로 등)로 인해 지상에서의 작업이 불가능한 구간에 대해 갱내 Grouting을 실시하였다. 갱내 Grouting을 실시하면서 특히 유의할 점은 천공 및 주입작업시 교란받기 쉬운 막장면에 쇼트크리트를 시공하여 지반의 파괴와 주입재의 일출방지에 노력하였다.

가. 공배열

1 step당 연약지반 보강처리 구간을 20m로 설정하였으며, 그 설계 및 도면은 다음 <그림-4>와 같다.



<그림-4>

나. 시공실적

구 간	거리 (m)	주입 대상구간의 주지질	주 입 량				주입율 (%)	비 고
			시멘트 (Ton)	규산 소다 (D/ M)	혼화제 (kg)	계 (m³)		
No.0+0~No.0+16	16	Granite의 풍화토사	15.80	132	6.48	43.45	7.24	주입율 = 주입량 ÷ 주입대상체적 × 100
No.0+16~No.0+36	20	-	18.40	153	7030	50.45	8.41	
No.0+36~No.1+6	20	-	17.40	145	6660	47.79	7.96	
No.1+6~No.1+26	20	-	14.68	122	5620	40.24	6.71	
No.1+26~No.1+46	20	-	17.88	152	6967	50.02	8.34	
No.1+46~No.2+16	20	-	17.40	145	6660	47.89	7.98	
No.2+16~No.2+36	20	-	15.20	126	5800	41.66	6.94	
No.11+10~No.11+30	20	-	11.92	99	4608	32.89	5.48	
No.11+30~No.12+0	20	-	17.56	146	6708	48.22	8.03	
No.13+13~No.13+33	20	Granite 및 Schist의 풍화토사	15.32	127	6725	4194	6.99	
No.13+33~No.14+3	20	-	15.04	125	5740	41.22	6.87	
No.14+3~No.14+23	20	-	14.52	121	5560	39.88	6.65	
No.14+23~No.14+43	20	-	16.28	135	6240	44.58	7.43	
No.14+43~No.15+3	10	-	8.0	66	3048	21.81	7.27	
No.15+3~No.15+23	20	Schist의 풍화토사	16.12	134	6168	44.19	7.37	
No.15+23~No.15+43	20	-	17.56	146	6720	48.15	8.03	
No.15+43~No.16+13	20	-	14.40	120	5500	39.53	6.59	

나. 시공실적

다. 갱내 그라우팅에서의 주입율은 6.65~8.41%로 갱외 그라우팅의 주입율 0.33~4.13% 보다 주입 효과가 양호한 것으로 나타나는 것은 침투주입을 용이하게 하기 위해 약액(규산소다, 혼화제)을 위주로 시공하였기 때문이며, 경사찬공 및 주입에 따른 손실분이 상당량 계상된 것으로 사료된다.

라. 시공효과면에서 갱내 그라우팅과 갱외 그라우팅의 차이점을 크게 발견할 수가 없었으나 그 장단점을 개략적으로 비교해 보면 다음과 같다.

구 분	갱외 그라우팅	갱내 그라우팅
공사비	찬공심도 40m 이상일 때 과다함	찬공심도 40m 이상일 때 경제적임
공사기간	유리함	그라우팅과 굴진공종간의 Idle Time 발생
시공의 난이도	시공관리에 유리함	시공관리에 어려움이 많음

IV. 연약지반 보강 Grouting 효과 확인

1. 투수시험에 의한 주입효과 확인

그라우팅이 실시된 후 주입효과 검토는 시공단계에서 중요한 평가항목으로 터널 구조물 안정성에 대해서 매우 중요하다. 주입효과와 검토 목적은 Grouting이 실시된 지반이 소요의 지반상황에 맞게 주입되었는지 어떤가를 판정하는 것이며, 이 결과 여하에 따라 추가 Grouting의 실시가 검토된다. 따라서 이때의 평가가 적절하지 않으면 최악의 경우는 소요의 지반상황에 맞게 개량되어 있지 않는 상태에서 터널 구조물이 건설되게 되며, 그 결과로써 터널 안정성에 지장을 초래하게 된다.

본 현장에서는 Grouting 실시 후 주입효과와 검토를 Grouting 실시 전 시추공(PH공)에 투수시험 결과치와 Grouting 실시 후 10~20m 간격으로 실시된 검사공에서의 투수시험에 의하여 실시하였다. 이 결과에 의하면 Grouting 실시전의 투

수계수는  $\alpha \times 10^{-2} \sim \alpha \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  이나, 그라우팅 실시 후 투수계수는  $\alpha \times 10^{-4} \sim \alpha \times 10^{-6} \text{ cm/s}$  로서 소기의 목적대로 Grouting 주입이 효과적으로 이루어져 차수효과가 양호하게 나타났다.

2. 공내 탄성과 탐사

가. 시험방법

조사부지(No.10+00~No.11+10)의 지하암반에서의 동탄성을 파악하기 위한 방법으로 공내 탄성파탐사를 시행하였으며 조사 부지 내에서 1개공을 선정하여 총 9개 구간에 대하여 실시하였다. 본 탐사를 위하여 다음의 장비가 이용되었다.

- Oyo Mcseis 1500 Seismic Processing System.
  - 1197A Signal Enhancement Unit
  - 1216A Display Unit
  - 5744A Processing Disk Unit
- Model 3315 Borehole Pick
- Sledge Hammer
- Triger & Trigering Cable

시험구간의 선정은 가능한 한 암종 및 암질별로 대표될 수 있는 구간을 주상도에 의거 선정하였다. 시험방법은 시추공내에 Borehole Pick(Triaxial Geophone)을 공벽에 완전 밀착시킨 후 지표에서 Sledge Hammer를 사용하여 시추공과 직교하는 양방향에서 각각 타격하여 전단파를 발생시켰으며 동시에 파의 역전을 유도한 후 이를 기록지에 기록 해석하는 방법을 사용하였다. 이때 압축파(Vp)의 속도를 구하고자 지표면과 수직으로 타격하여 압축파를 발생시켜 압축파와 전단파를 동시에 측정하였다.

나. 조사결과

조사결과 본 시험공에서는 상부 Overburden의 매질이 매우 Loose함으로 인하여 전단파 발전에 의한 Shear Wave 감지가 매우 희박하여 Vp와 vs에 의한 Young's Modulus(Ed) 및 Shear Modulus(Gd) 산출이 불가능하였다. 따라서 본 시험공에서는 Grouting 전과 후의 효율을 Vp에 의해

간접적으로 판단한 결과 8.0~22.0m 풍화대에서 Grouting 전 700m/s, Grouting 후 6500m/s의 분포를 나타내며, 22.0~24.0m의 연암대에서 Grouting 전 400m/s, Grouting 후 2000m/s, 24.0~26.0m R구간에서 Grouting 전 670m/s, Grouting 후 2000m/s, 26.0~28.0m 구간에서는 Grouting 전 1500m/s, Grouting 후 2000m/s를 나타내어 양호한 Grouting 효과를 나타낸 것으로 판단된다. 특히 22.0m 상부 풍화대보다 22.0~28.0m 구간의 풍화암에서 Grouting 효과가 양호한 것으로 나타났다.

## V. 청원 도수터널 연약지반 보강 경과와 의의

6년 동안의 청원 도수로 터널공사를 수행함에 있어서 지층 상태에 대한 정확한 분석이 이루어지지 않음에 따른 토사, 풍화대, 풍화암 등 연약지반 구간에서 발파에 의한 굴착방법으로 막장자립이 되지 않으며, 또한 지하수의 유출이 많아 터널의 붕락 및 함몰 등 터널 붕괴 현상이 여러 지점에서 계속되어 작업이 중단되는 등, 공사진행에 상당한 어려움을 겪었다. 터널공사 구간중 연약지반으로 구성된 매우 열악한 지반조건하에서 적절한 보강 대책과 아울러 터널 굴착에 따른 붕괴예방을 위하여 터널 굴착 보조공법으로 그라우팅 공법을 적용하여 성공적으로 터널시공을 완료할 수 있었다.

특히, 그라우팅 공사를 실시한 후 현장 원위치 시험에 의한 그라우팅 공법의 주입확인 효과를 현장 여건을 고려하여 투수시험 및 탄성파 시험을 실시하였다.

본 현장에서 주입효과 검토를 Grouting 전후에 투수시험을 실시한 결과, 그라우팅 전의 투수계수는  $\alpha \times 10^{-2} \sim \alpha \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 이나 그라우팅 실시후 투수계수는  $\alpha \times 10^{-4} \sim \alpha \times 10^{-6} \text{cm/s}$ 로서 그라우팅에 의한 차수효과가 양호하게 나타난 것으로 판단되며, 또한 조사구간(No.10+00~No.11+10) 시험공에서의 Grouting 전과 후의 효율을  $V_p$ 에 의해 간접적으로 판단한 결과 양호한 그라우팅 효과

를 나타낸 것으로 판단되며, 특히 22m 상부 풍화대보다 22~28m 구간의 풍화암층에서 그라우팅 효과가 양호한 것으로 나타났다.

국내의 경우는 1980년대 중반부터 연약지반 터널 공사의 그라우팅으로 주변 지반을 차수와 보강을 수행하는 지하굴착 보조공법을 몇몇 현장에서 적용하였고, 최근에는 서울 지하철 공사시 그라우팅 공사로 여러 현장에서 적용한 바 있다. 그 결과 공비 및 공기면에서 타공법에 비해 유리한 것으로 알려져 있으나, 기술적인 측면에서의 전향적인 효과는 현재까지 밝혀져 있지 않다. 이는 본 공법의 적용시 터널 안전 효과나 주변 지반 거동 억제 측면에서의 효과가 어느 정도인지에 대한 연구가 최근까지도 심도 깊게 추진되지 않았기 때문이다. 국내의 경우 본 공사의 적용한계, 시공방법 등에 관한 기준이 없으며, 그라우팅 종류 및 배열 방법, 주입방식 등도 개괄적, 확일적으로 결정되고 있어 공학적 근거에 의한 본 공정의 설계가 이루어지지 않고 있다. 특히, 본 공법은 설계의 적정성 외에도 시공성의 영향이 매우 큰 것으로 알려져 있으므로 본 공정의 활용을 위해서는 우선적으로 현장의 여건에 맞는 시공법의 개발과 아울러 문제점 도출 및 개선방안이 마련되어야 할 것이다.

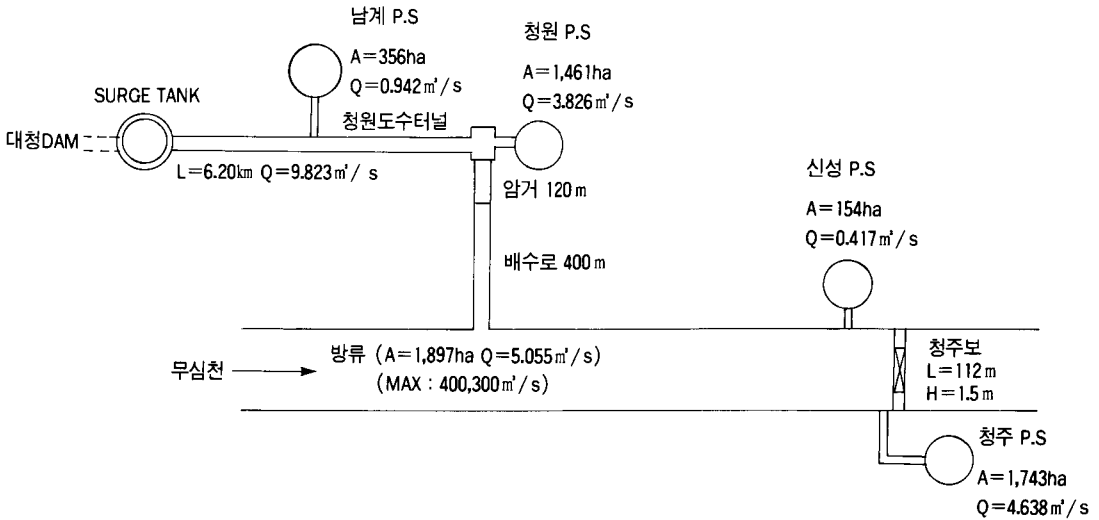
## VI. 터널굴착 및 적용공법

### 1. 용수계통

대청댐을 수원으로 하는 3,714ha는 대청댐 Surge-Tank에서 본 청원 도수터널을 통하여 9,823m<sup>3</sup>/s의 유량을 도수하고, 도수터널 1호 수직갱에 계획된 남계 양수장에서 Q=0.942m<sup>3</sup>/s를 양수하고 터널 토출부 청원 양수장에서 Q=3.826m<sup>3</sup>을 양수토록 계획하였다.

토출수조에서는 Q=5.055m<sup>3</sup>/s를 청주시를 관통하는 무심천에 방류하며 무심천 하류부에 설치한 청주보를 통해 신성 양수장에서 Q=0.417m<sup>3</sup>/s 양수하고, 나머지 Q=4.638m<sup>3</sup>/s를 청주양수장에서 양수하여 청주시 북동부 지역인 북일, 북이면에 농업용수를 공급한다.





〈그림-5〉 청원도수터널 용수계통도

## 2. 청원 도수터널 요약

대청댐 Surge-Tank에서 50m 구간은 한국수자원공사에서 시공하였고, 청원 도수터널은 연장이 6.2km, 내공단면 D=3.0m로서 당초 사갱 4(1,2,3,4호 사갱)개소와 토출부에서 작업토록 계획되었다.

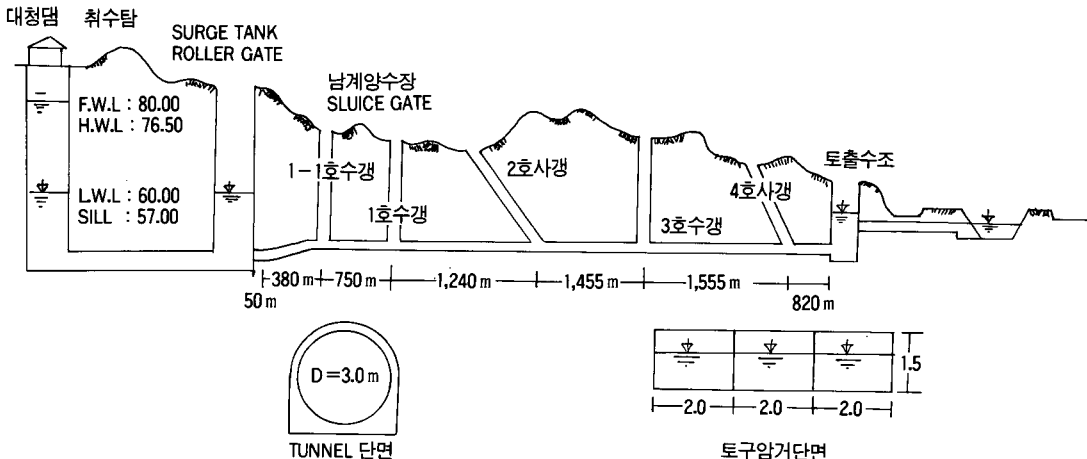
버력 운반장비는 터널 내에 레일을 깔고 배터리카를 이용토록 계획하였으나 지반상태가 연약하고 장비투입 및 운반 등을 검토하여 운반장비를 위해

수제작한 페로다를 사용하였으며, 운반중 지반의 연약화로 약 300m 구간은 복공판을 설치하였다. 이러한 문제점으로 1, 3호 사갱을 수직갱으로 변경하였고 No.7+30에 1-1호 수직갱을 신설하여 계획된 공기내에 전구간을 관통하였다.

### 가. No.42+00 지점의 함몰 및 처리사항

#### 1) 지질상태

본 지역은 No.44+40까지는 신선한 암반이 계속



〈그림-6〉 청원도수터널 요약 및 작업갱 위치도

### 3. 청원 도수터널의 붕락 및 함몰구간 처리 현황

구분	발생일	측 점	붕락 및 함몰구간	연장	지질상태	처리내용
붕락	'92. 3. 29	No. 16+16	1-1호수갱, 1호수갱구간	15m	풍화암, 풍화대	갱내 Grouting, 인력굴진, Fore Poling
함몰	'90. 5. 4	No. 24+20	1호수갱, 2호수갱구간	25m	연암, 보통암	갱외 Grouting, Fore Poling
붕락	'91. 11. 10	No. 27+10	1호수갱, 1호사갱구간	15m	풍화암, 보통암	갱외 Grouting, 미진동발파
함몰	'92. 6. 13	No. 28+46	1호수갱, 2호사갱구간	30m	풍화대	갱외 Grouting, 인력굴진, Fore Poling
함몰	'93. 10. 4	No. 40+30	1호수갱, 2호사갱구간	10m	풍화대	갱외 Grouting,
함몰	'90. 6. 16	No. 42+00	1호수갱, 2호사갱구간	30m	풍화대, 풍화암	갱외 Grouting, 인력굴진, Fore Poling
붕락	'90. 3. 19	No. 77+00	3호수갱, 4호사갱구간	20m	연암, 지질구조대	갱외 Grouting,
붕락	'91. 9. 2	No. 87+10	3호수갱, 4호사갱구간	20m	보통암, 지질구조대	공동대충진, 철근 Con'c
붕락	'92. 3. 13	No. 94+25	3호수갱, 4호사갱구간	20m	풍화암	안정후굴진
붕락	'91. 12. 6	No. 106+40	3호수갱, 4호사갱구간	30m	연암, 지질구조대	미진동발파, 갱외 Grouting, Fore Poling
함몰	'91. 10. 6	No. 107+20	4호수갱, 토출부구간	15m	풍화암	갱외 Grouting, 미진동발파
함몰	'90. 3. 13	No. 114+35	4호수갱, 토출부구간	15m	보통암, 지질구조대	갱외 Grouting, 철근 Con'c

※ <그림-6> 참고

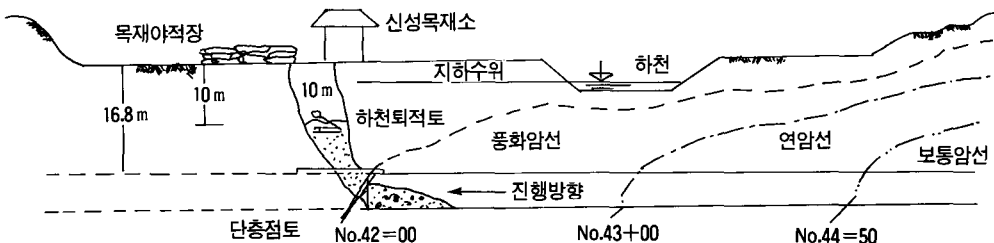
되었고, No.43+00까지는 하천 직하로 인한 연암 상태로 지하수 유입이 많았으나 50m 구간은 풍화암으로 점차 지하수 유입량이 감소되었고 위험구간을 지났다고 판단되어 계속 작업을 시행하였다.

2) 발생상황

- 일 시 : 1990. 6. 16
- 발생위치 : No.42+00
- 발생현황 : 신성목재소 건물밑에 직경 10.0m 정도 원주형으로 약 10.0m 깊이까지 지반이 내려앉아 통나무 등이

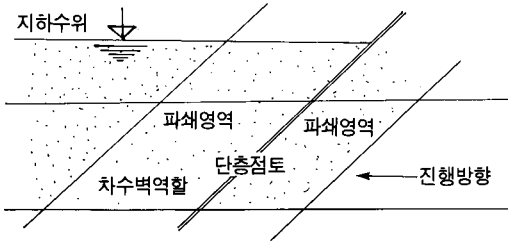
혼합되어 있고 건물 기초부가 일부 떠있는 상태임.

- 피해상황
  - 제재소 건물 붕락위험으로 공장가동 불능
  - 일부 원목 함몰
- 발생원인
  - 본 지역은 구하상 지대로 하천퇴적토로 지질이 급격히 변화된 지점
  - 하천의 수위와 동일한 지하수위를 형성한 포화된 상태



<그림-7> No.42+00 주변 현황도

- 지상에는 막중한 콘크리트 건물의 제재시설이 있고, 거구의 원목 장비운반으로 진동의 영향도 상당히 있었음.



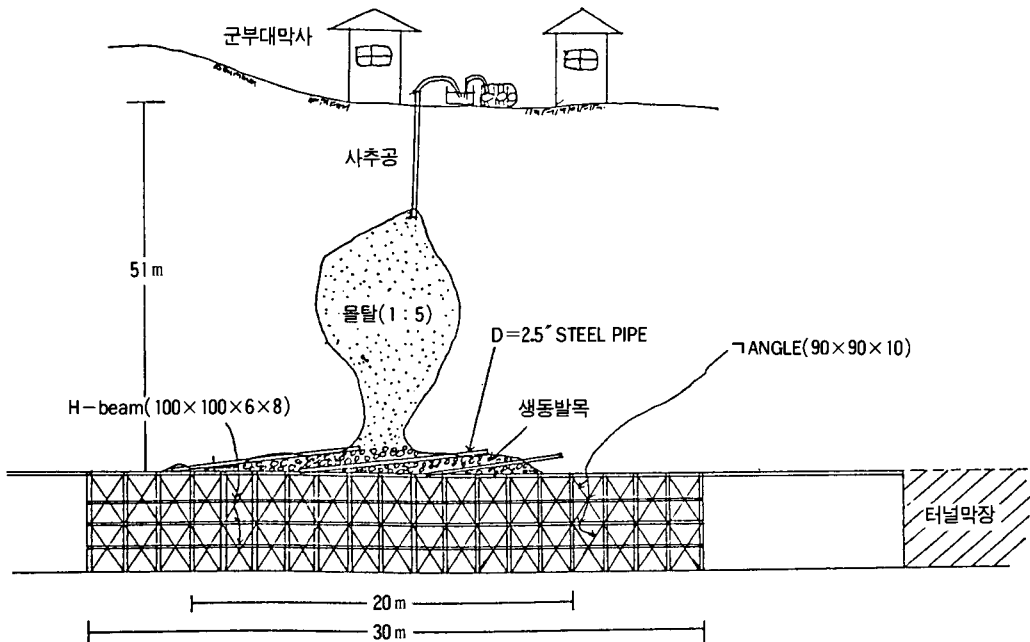
<그림-8> 막장 상세도

- 발생상황
  - 막장에서 발파후 버럭처리를 완료한 상태였으나 하천 퇴적토에 충만한 지하수가 지수벽 역할을 한 단층점토를 터트려 일시에 지하수와 하천 퇴적토가 함몰되어 붕락을 유도하였다.

- 처리사항
  - 작업갱에 적치되었던 버럭으로 함몰구간을 되메움 처리
  - 지하수위의 저하 및 토입자의 유출이 끝나 갱내 막장에서 맑은 물이 흐를때까지 상태 점검
  - H-Beam을 Crown 부위에 항타하여 붕락예방
  - Fore Poling 실시 : 강봉 및 생송말목 이용
- 처리후의 교훈적 사항
  - 진행방향의 단층 및 지질상태를 확인하기 위하여 시추공의 필요성 확인
  - 붕락 함몰토의 처리는 계속 작업 강행시 더 큰 지반함몰 상태가 발생하므로 토질 자체의 안정상태를 기다린 후 작업

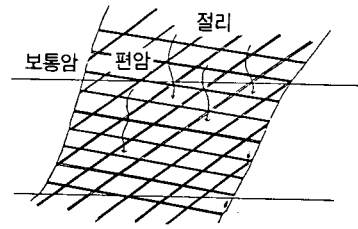
나. No. 87+10 지점의 붕락 및 처리사항

1) 지질상태



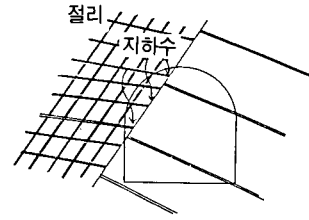
<그림-9> No.87+10 주변 현황도

본 지역은 설계 당시 보통암 구역이었으나 동지점의 암상태는 특히 편리가 발달된 흑운모 편암 분포구간으로서 화강암의 관입에 의한 열수변질 작용 및 지하수의 풍화작용에 의해 강도가 약해진 상태에서 터널굴착에 의한 갑작스런 압력감소와 지하수의 유통으로 변질된 장석류의 파괴 팽창으로 발생



2) 발생상황

일시	발 생 내 용	조 치 내 용
'91. 8.29	No.87+20 전후로 단면 좌측에서 파쇄암 및 토사가 약 50m <sup>3</sup> 유출 지보공 5기 변형	
'91. 8.30	지보공 보강중 토사 및 파쇄석 70m <sup>3</sup> 2차 붕락	유출토석 제거 및 지보공 보강 (0.3~0.4m 간격)
'91. 8.31	입도 40mm 이하의 파쇄석과 토사 40m <sup>3</sup> 정도 3,4차 붕락	유출토석 제거 및 지보공 보강재 설치 (Steel Pipe)
'91. 9. 2	지보공 보강중 간헐적 토석 유출	붕락상황 관찰
'92. 9. 3	붕락토 제거중 붕락범위가 확대되면서 토석총 100m <sup>3</sup> 유출로 보강자재 매몰	붕락토 제거
'92. 9. 4	간헐적 토석유출 약 2m <sup>3</sup> 정도	붕락토 제거 및 지보공 보강재 설치
'95. 9. 5	지보공 보강중 25m <sup>3</sup> 토사 추가 붕락	
'95. 9. 6	상부붕락 일부진행	



<그림-10> 함몰부위 지질상세도

(90×90×10)을 용접

- D<sub>2</sub>-1 강지보공 0.3 간격으로 30m 설치
- 상부 붕락에 대비하여 Φ2.5" Steel Pipe 10조 설치
- 생동발목 설치
- 조치후 Con'c Lining 타설
- 상부 몰탈 채움(256m<sup>3</sup>)
- 처리후 교훈적인 사항
  - 진행방향의 터널주위 지질상태 확인을 위한 시추공의 필요성
  - 지질확인에 따른 즉각적인 보강공법 실시 (갱내 Grouting 등)
  - 터널공사의 위험에 즉각적인 보강공법 시행을 위한 예비비 확보

• 피해상황

- 약 287m<sup>3</sup>의 토석 붕락
- 지보공 20m 변형

• 발생원인

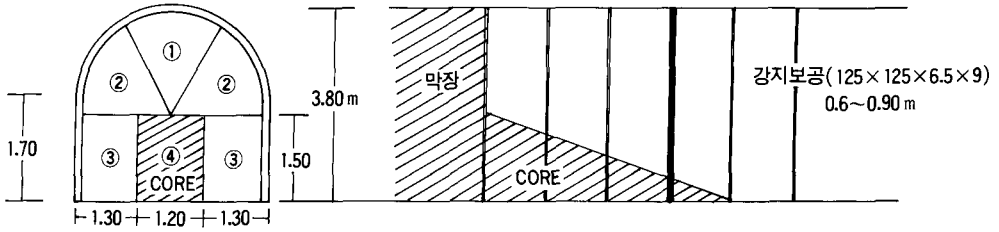
- 편리가 매우 발달된 흑운모 편암의 지질
- 터널굴착 후 갑작스런 압력 감소
- 지하수 유통으로 변질된 장석류의 파괴 팽창

• 처리사항

- 장방향으로 H-Beam(100× 100×6×8) 10조 설치
- 각 지보공과 H-Beam 보강재를 Angle

4. 링 컷트(Ring Cut) 공법

청원 도수터널 공사중 토사, 풍화대 구간은 Schist와 Granite가 연속적으로 교호하여 극심하게 풍화된 상태로 절리를 동반하고 있는 상태이고, 지하수위 이하의 터널로 전단면 굴착을 하는 경우 붕락발생으로 굴착이 곤란하여 <그림-11>과 같이 4단계의 Ring Cut 공법을 도입 풍화대 구간을 작업하였다.



<그림-11> 링 컷트 세부단면도

• Ring Cut 공법은 Crown 부위의 연속적인 붕락을 방지하고 막장 전면의 토사가 밀려나오는 것을 방지할 뿐만 아니라 용출수 처리가 가능하며 전방 및 측면의 지질확인이 가능한 공법이다.

• 작업방법은 그림과 같이 번호순대로(① ② ③ 순서) Crown부터 인력굴착하고 강지보공을 설치하는 방법으로 Core 부분 ④는 강지보공을 4조이상 설치하였을 때 굴착하기 시작한다.

• 성과 : 청원도수터널 풍화대 연약지반(3,954㎡)의 적용으로 붕락 및 함몰을 사전에 예방하였다.

- L=2.0m

- N=12 EA /Pattern

② 착암기 2대, 콤프레샤 1대

작업순서(풍화대)

풍화대

천공준비 → 천공 → 공내정리 → 캡슐(선단용) 설치 → 강봉타입 → 몰탈충진

풍화암

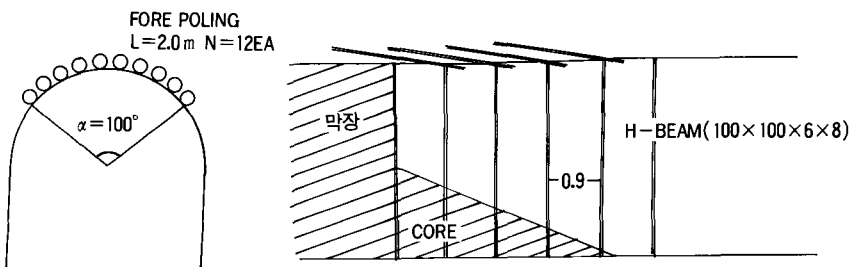
천공준비 → 천공 → 공내정리 → 캡슐(선단용) 설치 → 강봉타입

### 5. Fore Poling 공법

청원 도수터널 시공에 적용한 선지공 공법은 <그림-12>와 같은 Fore Poling 공법을 적용하였다. Ring Cut 공법과 병용한 공법으로 막장에서 지보공 2조를 세울 수 있도록 미리 강봉을 Crown 부위에 설치하였고, 절리가 발달한 풍화암 구간에서도 Fore Poling을 적용 붕락에 대한 안전성을 확보한 공법이다.

• 작업준비

① Pattern별 1Cycle당 수량



<그림-12> Fore Poling 개략도

### 6. 미진동 발파

가. 일반 발파

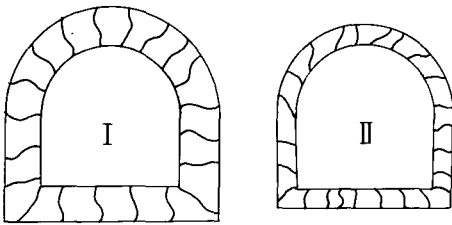
일반적으로 사용해 온 발파공법으로 양호한 암반에서 효과를 발휘할 수 있는 다이너마이트와 같은 고성능 폭약을 사용하는 공법으로, 원리는 폭약을 장진할 때 뚫은 구멍크기에 꼭차게 구멍 끝에서부터 소요 폭약량을 장진, 발파하면 폭발할 때 발생하는 충격파는 임의의 균열을 만들고, 다량의 가스압력은 뚫은 구멍 벽면에 작용하여 인장과 주응력에 따라 균열이 생기고 파괴되어 발파후 암면이 거칠고 여굴이 많이 발생되며, 발파소음 등 민원발

생이 높다.

**나. 미진동 발파**

터널내에서 이용되는 제어발파 공법으로 발파진동을 감소시키며 미려한 굴착면을 형성시키기 위해 굴착면의 발파공을 등간격으로 좁혀 진동을 감소시키는 공법으로, 사용 폭약은 Finex-Kovex 등이 있고, 뇌관은 D,S,D와 M,S,D을 같이 사용하나 터널에서는 D,S,D를 많이 사용한다.

원리는 구멍내에 장진된 폭약이 발파될 때 발생 하는 충격파는 폭약 주위의 구멍공간으로 감쇄시키고, Gas 압력에 의한 파괴를 일으켜 여굴예방과 모암균열 극소화로 정밀한 발파면을 만들며 발파진동 제어를 목적으로 하는 공법이다.



I 다이너마이트 시공으로 발파했을 때의 균열상  
 II 미진동발파 공법에 의한 Finex 사용시 균열상  
 ※ 시험치에 의하면 II과 I의 비율이 1:6 정도이다.

<그림-13> Finex와 다이너마이트 균열상

**7. Shotcrete**

Shotcrete는 굴착 직후 굴착면에 콘크리트를 뿜어 붙여서 밀착시킴으로써 모암의 이완 발달을 억제하고 굴착면의 요철을 매끄럽게 마무리하여 응력집중에 의한 Crack의 발달을 방지하고 풍화를 방지하여 굴착면의 안전을 도모하는 공법으로 지하철공사 등에서 많이 사용하고 있다.

• Shotcrete의 재료는 반발량이 적도록 부착력이 크고 Workability가 향상되도록 굵은 골재의 치수를 25mm 이하로 하고 급결재를 사용토록 한다.

• 본 청원 도수터널에서의 시공은 풍화대, 풍화암 구간으로 지하수의 영향으로 부착력이 저하되

어 반발량이 많고 작은 단면에서 기계의 운반이 곤란하여 20m만 시공하였다.

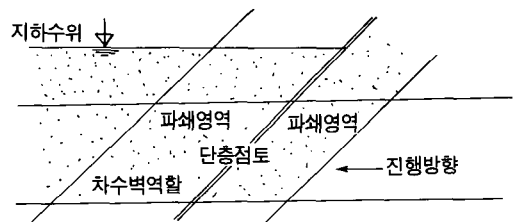
**8. 수평 측정**

터널에서의 용수는 암석의 균열 등을 통해서 오는 것이며 용수처리만 잘하면 터널구조 및 안전상 문제가 상당히 적어진다.

터널의 용수는 지질을 연약화시키는 한편 지보공의 기초를 연약화시켜 지지력의 저하를 초래하고, 지압증대와 편압의 작용, 또는 돌발적인 대응수를 동반해서 주변의 지반붕괴의 원인이 되는 것이기 때문에 터널굴진에 특히 유의해야 한다. 가장 조심해야 하는 구간은 <그림-14>와 같이 단층에 저류되고 있을 때 터널굴착 방향에서 돌연 고압의 용수에 봉착하게 된다.

청원 도수터널에서는 특히 No.42+0 지점의 지반함몰 현상은 이 경우와 같은 현상으로 상당한 어려움에 처하게 되었다. 터널내의 용수는 가능한 신속하게 배수하는 것이 좋다.

청원 도수터널의 대부분 함몰, 붕락은 이와 같은 경우로서 시점부 No.0~No.16+13 구간중 갱내의 Grouting이 없는 구간에 계획하였으나 시험용으로 30m 시공하였다.



<그림-14> 단층점토에 의한 치수별 역할

**VII. 결 론**

충청북도 청주, 청원 지방의 지형 여건상 대청댐 물을 이용하는 미호천 II단계 청원도수로 공사는 지하수위 이하로 굴진공사를 시행하는 과정에서

좋은 경험과 기술을 얻은 것은 사업자체는 물론 앞으로의 기술발전에 커다란 수확이 아닐 수 없다.

일반적으로 산 능선을 가로지르는 터널이 아니고 어쩔 수 없이 지하수위 이하의 터널을 계획할 때에는 지상 및 지하에서 발생할 수 있는 제반사항을 세밀히 조사·분석해야 한다. 자연부락이나 소규모공장 등은 지하수 관정을 생공용수로 사용하고 농경지는 대부분 소형 관정으로 용수를 공급하는 경우가 많은데, 이들 관정은 심도가 낮은 충적층 지하수이기 때문에 그 이하로 터널공간이 있을 때에는 지하수위 하강으로 관정이 고갈되어 민원이 발생하게 된다.

청원 도수터널 공사에서도 이러한 현상이 발생하여 많은 사업비를 투입하여 생활 및 농업용수 관정을 별도로 설치하지 않으면 안되었다.

터널의 깊이와 지하수의 흐름 상태에 따라 그 영향권이 짧게는 50m, 길게는 300m나 되었으며 터널이 완성되어 당초의 조건으로 복구(지하수위 회복)되어도 일부의 고갈된 관정은 다시 살아 나지 않는 것이 특징이라고 할 수 있다.

터널위치 주위는 좁은 간격으로 지질 및 지층조사를 실시하여 터널 길이가 길어지더라도 가능한 암층을 따라갈 수 있도록 하는 것이 굴진공법 선택에서 다양한 공법은 물론이고 현대화된 장비를 최대한 활용할 수 있으며 이는 사후 유발될 수

있는 제반 문제를 가장 적게 할 수 있을 것이다.

청원 도수터널과 같이 복잡 다양한 지질 및 지층을 갖고 있으면서 내경 3.0m 터널 내에서는 장비 투입이 부피면에서 극히 제한되며 연약지층에서는 장비의 중량 면에서 제한을 받아 인력에 의존하는 재래식 공법을 채택해야 하는 문제점도 있었다.

특히 한 단면에서 발파암과 연약도가 존재할 때 그 처리방법으로 인력에 의존하면서 발파를 병행하는 공법을 채택하였다.

붕락과 함몰이 발생하였을 때에는 그라우팅으로 지반을 고결시킨 상태에서 조심스럽게 재굴진 하였으며 터널 시점부 연약지층은 사전에 철저한 조사를 근거로 하여 갱외 및 갱내 그라우팅을 실시하면서 안전하게 굴진해야 하므로 철저한 사전조사가 매우 중요함을 강조하고 싶다.

약 력

이 종 덕



1968. 충북대학교 농과대학 농공학과 졸업  
현재 농어촌진흥공사 시설영농처  
근지암 지하저장 사업소장