

원유 저장용 지하공동의 건설중 점토 그라우팅에 의한 지하수 제어¹⁾

김치환²⁾ · 박창우³⁾ · 이석천²⁾

Control of Groundwater by Clay Grouting in Underground Excavation of Oil Storage Caverns

Chee Whan Kim, Chang Woo Park and Seok Chun Lee

ABSTRACT

Groundwater movement is one of the most important elements in the construction and management of underground oil storage cavern. To control the groundwater flow, grouting is run in parallel with water curtains. But as traditional grouting is conducted within cavern before and after excavation, the effect of grouting is delayed and the injection sphere is limited in the rock mass. Therefore, it is desirable to introduce a more extensive and effective grouting. This article is to present the clay grouting, which was the first to be carried out in the construction of underground cavern for oil storage in Japan. After conducting the clay grouting, the effect was confirmed by ground water level and infiltration quantity to the caverns.

1. 점토그라우팅의 원리

보통의 그라우팅은 시멘트 등 경화재료를 그라우팅 펌프에 의해 시추공 주변의 틈, 공극에 가압주입함으로써 시멘트 등의 입자로 완전히 충전하는 방식인데 반해, 점토 그라우팅은 지하수면 아래에 지하공동을 굴착하는 경우에 공동 방향으로 지하수가 침투되는 원리를 이용하여 그 침투류의 상부에서 미세한 점토 입자를 자연유입상태로 공급하여 지하수 침투경로가 되는 틈, 공극 등을 지하공동 주변 암반에서 광범위하게 채워줌으로써 지하공동으로 유입되는 용수량을

줄이고 지하수위의 저하를 방지할 수 있다. 이를테면 공동벽면 주변만이 아니라 암반전체를 서서히 광범위하게 개량하는 「광역 그라우팅」인 것이다.

본 공사에서는 원유 저장시의 기밀성 확보(수위저하에 따른 불포화 방지)를 위해 공동굴착에 앞서 공동상부에 수봉터널 및 수봉공을 설치하고 물을 주입할 때 점토를 혼합시켜 암반내에 공급하여 암반내 틈, 공극을 미세한 점토입자로 메꾸고 있다.

공동굴착은 분할굴착 방식에 따라 아치부-1단-2단-3단 벤치순으로 진행되기 때문에 지하수 침투경로도 변화하여 광범위한 암반내의 틈이나 공극으로 점토가

*1993년 5월 접수

1) 본고는 일본의 山海堂에서 발간되는 월간지 土木施工의 1992년 12월호에 게재된 '粘土グラウトによる地下水の制御 - 石油地下備蓄久慈基地'을 번역소개한 것이다.

2) 정회원, (주)삼림건설터트

3) (주)삼림건설터트

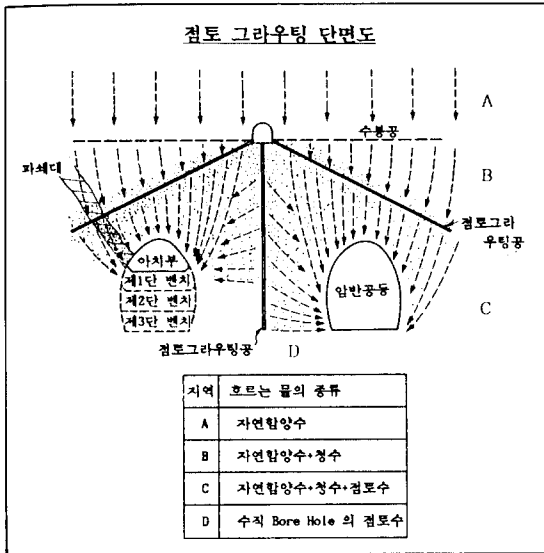


Fig. 1. 점토 그라우팅 설명도.

공급되어 투수성이 개량된다(Fig. 1).

점토 그라우팅은 가능한 한 광범위하게 수개월 또는 수년간 계속 진행해야 하는 것으로 그라우팅 공, 또는 공 주변만이 채워지지 않도록 저압, 저농도로 실시 하는데 공극내의 점토채움 메카니즘은 공극폭의 대소에 따라 상이하다. 실내시험 및 공사현장시험 결과에 따르면, 공극폭이 클 경우에는 점토입자가 공동 벽면까지 도달하여 공극채움이 그 상부로 진행되지만, 비교적 투수성이 높고 공극폭이 작은 본 공사의 경우에는 그 협착부의 일부에만 점토입자가 채워져 반드시 공극전체가 점토로 채워지지는 않는다는 것이 확인되고 있다. 한편 공동 굴착시 발생하는 국부적인 유입수에 대해서는 공동내에서의 보통의 시멘트 그라우팅 방식으로 유입속도를 억제할 필요가 있다.

2. 사용점토

본 그라우팅에 사용된 점토는 가능한 한 입경이 작고, 점성이 적으며 침강하기 어려운 것으로 현장 근처에서 산출되는 久慈점토이다. 久慈점토는 「가오리나이트」계의 내화성이 높고, 팽윤성이 없고 50% 입경이 3 μ m(레이저 분석)이며 현탁상태의 장시간 보존, 침강의 어려움 등 상기의 3가지 조건을 만족한 것으로서 지금까지 시험한 점토중에서 가장 적당한 것이었다(Fig. 2).

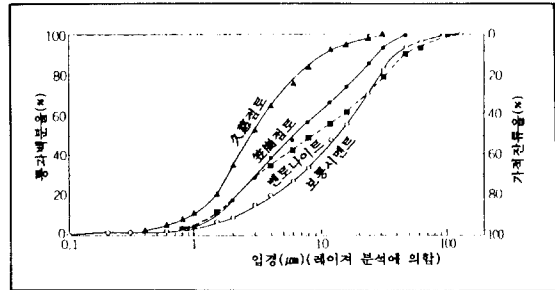


Fig. 2. 각종 재료의 입도곡선.

3. 점토 그라우팅 공사

3.1 대상범위 및 그라우팅 준비

실내 및 현장시험을 거쳐 '90년 4월 실제 지하공동에서의 점토 그라우팅 공사를 착공함에 있어, 그라우팅 유효성 및 수봉기능에 대한 무해성은 시험에서 확인된 바 있지만, 아직 점토 그라우팅 공사의 실적이 없기 때문에 처음에는 지하수위의 최저하 부분인 공동의 남동부 즉 101B, 102A, 102B, 102C 공동의 남측 반분의 상부에 위치한 수봉터널 2S와 3S에서 시작하여 점토 그라우팅의 효과 및 무해성을 현장확인한 후에 범위를 확대하고 있다(Fig. 3).

그라우팅 방식으로는 이미 설치된 수평수봉공은 수봉하면서 그라우팅을 진행할 수 있도록 배관방식을 채용한다. 수봉터널은 남북 각각 6열의 입구에 막음벽이 설치되어 수장수봉되고 있기 때문에, 그라우팅에 앞서 대상 2S 및 3S의 수봉수를 뽑고 배관에 의한 수봉으로 대체한 후에 보링과 그라우팅을 실시한다(Photo 1).

수봉공과는 별도로 길이 50 m의 그라우팅 공을 수봉공 중간위치에 하향경사 방향으로 10 m 간격(고투수부에서는 5 m)으로 타격식 천공기에 의해 천공한다. 공구경은 처음 2 m에는 이중관 팩커 설치를 위해 ϕ 101 mm이지만 전체적으로는 ϕ 76 mm이다. 그라우팅공내에는 내경 40 mm(외경 48 mm)의 내삽관을, 입구부의 이중관 팩커의 내관은 공급관에 접속시키고 외관에는 압력조절용 Raiser관(H=2.5 m)을 설치한다(Fig. 4).

점토수는 수봉터널내에 설치된 공급관으로부터 내삽관의 선단을 경유해서 그라우팅공내로 공급되어 그라우팅공 선단에서 종단 방향으로 흐르고, Raiser관에서 일정압으로 조정되어 Return관으로 회수된다.

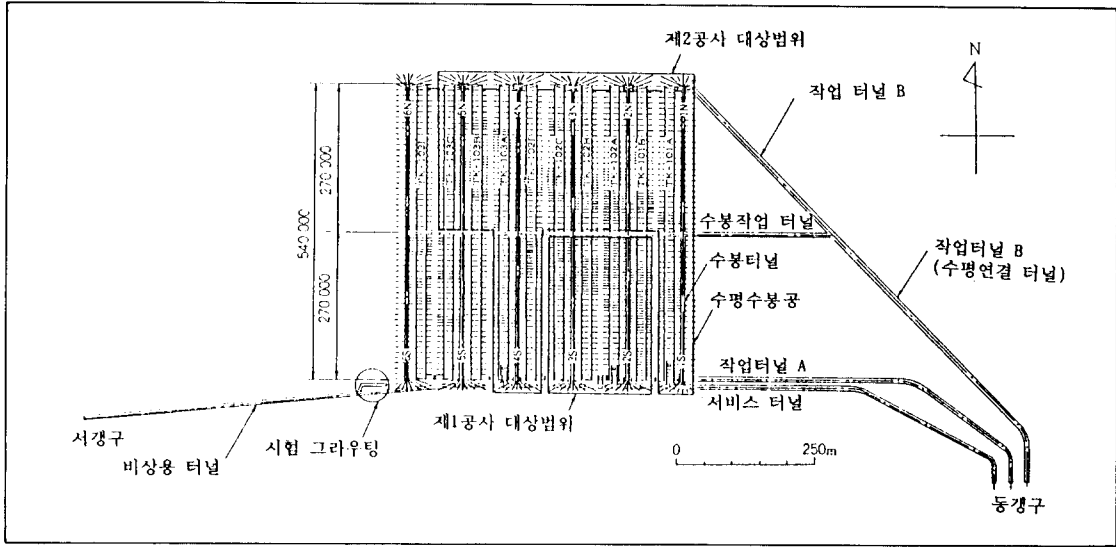


Fig. 3. 평면도.

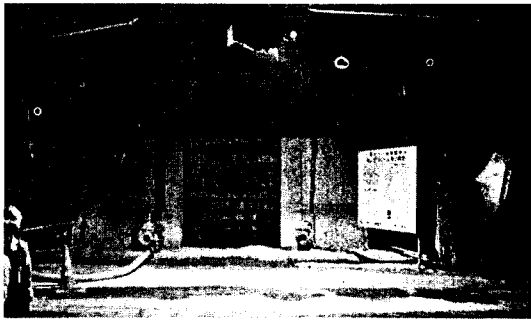


Photo 1. 수봉터널 입구 막음벽.

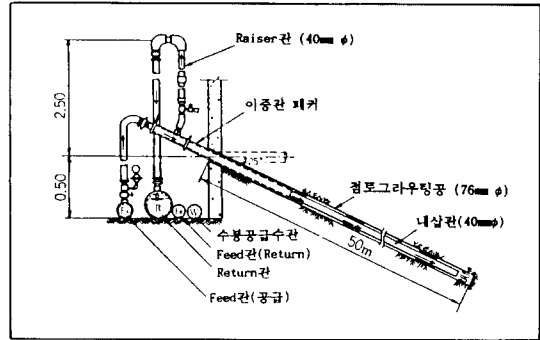


Fig. 4. 배관단면.

그라우팅공으로부터 공동으로 연속된 균열로 물의 흐름이 있는 경우에는 물과 함께 점토가 균열로 공급되지만 균열내에 물의 흐름이 없는 경우에는 점토는 물과 함께 Feed 탱크로 회수되어 재사용된다.

수봉터널내의 배관은 Fig. 5에서 보듯이, 중앙의 확폭부에 공급용 Feed 탱크(4m³)와 회수용 Return 탱크(1m³)가 좌, 우, 중앙 각 계통별로 주수량을 관리할 수 있도록 3조 배치된다. 1계통의 배관은 Feed관(공급, φ 100), Feed관(회수, φ 100, 공급유량 조절용), Return관(φ 250, Raiser관에서 리턴수 회수용, free-flow) 등으로 구성되어 터널 내에는 9개의 그라우팅용 배관과 2개의 수봉수 공급관 등 총 11개관이 배치된다 (Photo 2, 3).

3.2 그라우팅

채취된 점토는 제조플랜트로 운반되어 습식의 분쇄분급설비에 의해 조립분을 제거하여 원액(농도 1/2.5)을 만든다. 이때 입도는 거의 일정하게 하여 50% 입경이 3μm가 되도록 한다. 제조원액은 탱크차로 갱내 혼합플랜트로 운반되어 1/600의 농도로 조정된 후에 각 계통의 Feed 탱크로 압송된다(Photo 4, 5). 그라우팅 공에서 암반내로의 점토수 침투가 진행되면 Feed 탱크의 수위는 저하하며, 수위가 일정 레벨로 저하하면 1/600으로 조정된 점토수가 자동 보충된다.

2S 그룹은 '90년 8월 21일에, 3S 그룹은 9월 16일에 그라우팅이 개시되어 3S 그룹은 12개월 후인 '91년

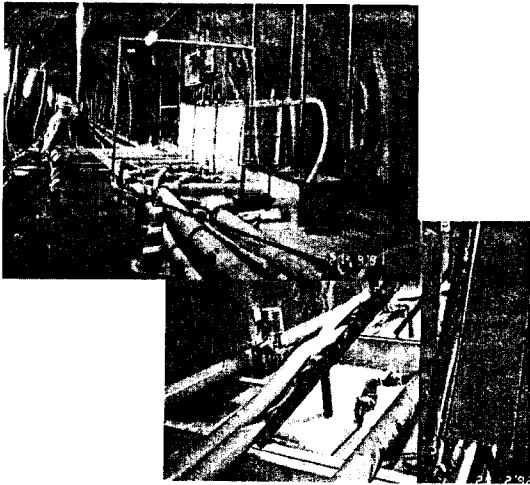


Photo 2. Feed 탱크와 점토수(1/600 농도).



Photo 3. 배관상황과 이종관 패커.

9월에 완료되었지만 2S의 경우에는 '92년 8월 10일 현재까지 24개월간 그라우팅 작업이 계속되는 중이다. 이 사이의 주수량 변화는 Fig. 6에서 보듯이 주수개시시점에서 주수량이 많았지만 2~3개월 후부터 안정되어 그 후에는 점차 감소하고 있다.

1공당 순환수량은 플랜트 능력상 20리터/분이지만 이 주수량으로는 유속이 적고 공내 침전량이 많기 때문에 정기적으로 유량을 증가시켜 공내 세정을 한다.

점토수의 초기농도는 현장시험 결과 1/600으로 하고 있다. 시험농도는 1/200이었지만 4개월의 주수경

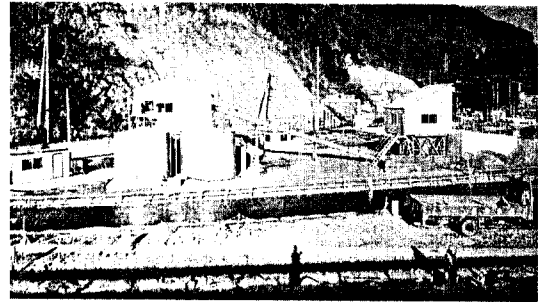


Photo 4. 점토제조 플랜트.

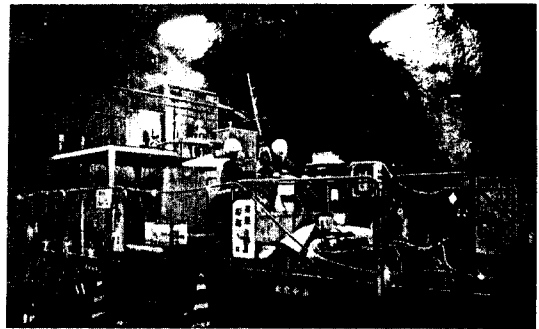


Photo 5. 혼합플랜트.

과시 Feed 탱크 농도가 상승하여(수분은 암반내로 침투하지만 점토입자는 암반내 침투가 어렵기 때문) 1년 이상의 지속적인 주수를 위해 농도를 1/600으로 낮게 설정하여 농도를 1/400, 1/300, 1/200의 단계로 상승시키는 방법을 채택하고 있다.

이와같이 1차 그라우팅 공사에서 점토 그라우팅 효과 및 무해성을 확인하여 '91년 6월부터의 2차 공사에서는 수위저하가 적은 서측의 6N, 6S, 5S의 3개 구획을 제외한 타지역으로 대상범위를 확대하여 계속 진행중에 있다. 공동 굴착은 '91년 11월 완료하여 인버트 콘트리트 타설도 '92년 2월 완료하고 있지만 그라우팅 공사는 각 계통 1년으로 '92년 12월까지의 전 계통을 완료할 예정이다.

3.3 그라우팅 효과 확인

그라우팅 효과는 대상 지하공동의 구간 유입 용수량 변화로 확인하는 것이 직접적이고 설득력이 있지만 금번 경우에 대상 공동은 벤치 굴착중으로 구간 용수량 측정이 불가능하며 벤치 굴착에 따른 공동 단면 확대는 용수량 증가요인이 되므로 그라우팅이 수위

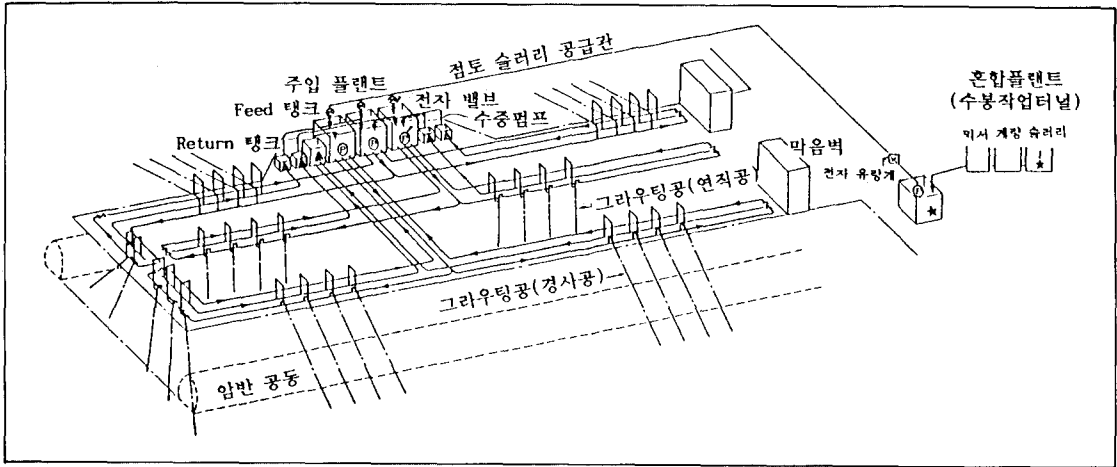


Fig. 5. 배관 배치도.

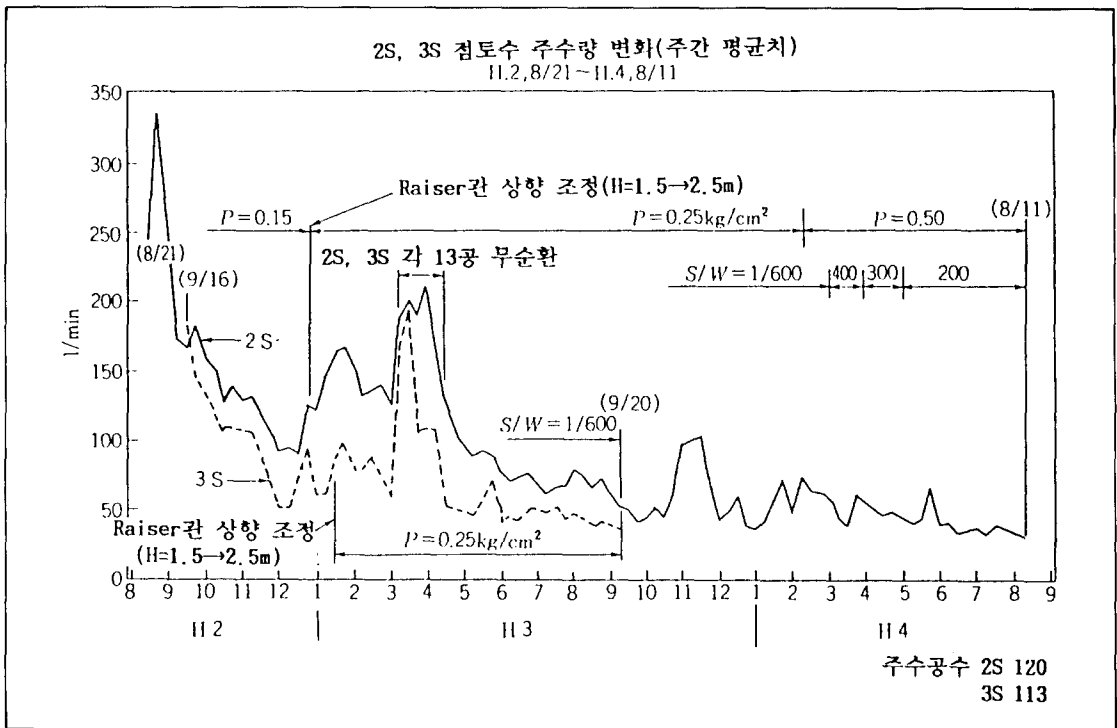


Fig. 6. 2S, 3S 주수량 변화.

상승에는 효과가 있다해도 용수량 감소에는 무관하기 때문에 굴착기간중의 구간 용수량 측정에 의한 그라우팅 효과 확인은 불가능했던 것이다. 또한 공동지역 전체의 갱구 용수량에 대해서도 상기의 증가요인에 덧붙여 제 1공사 대상구간이 전체의 20%에 불과하기

때문에 효과판정에는 이용할 수 없었다. 결국 그라우팅 효과는 지하수위 변화를 중심으로 하는 다른 요소에 의해 확인하고 있다.

1) 공동 상부 및 주변에는 소방법의 기준에 의거, 4만m²당 1l의 비율로 수위 측정공(W제-18공)을 신

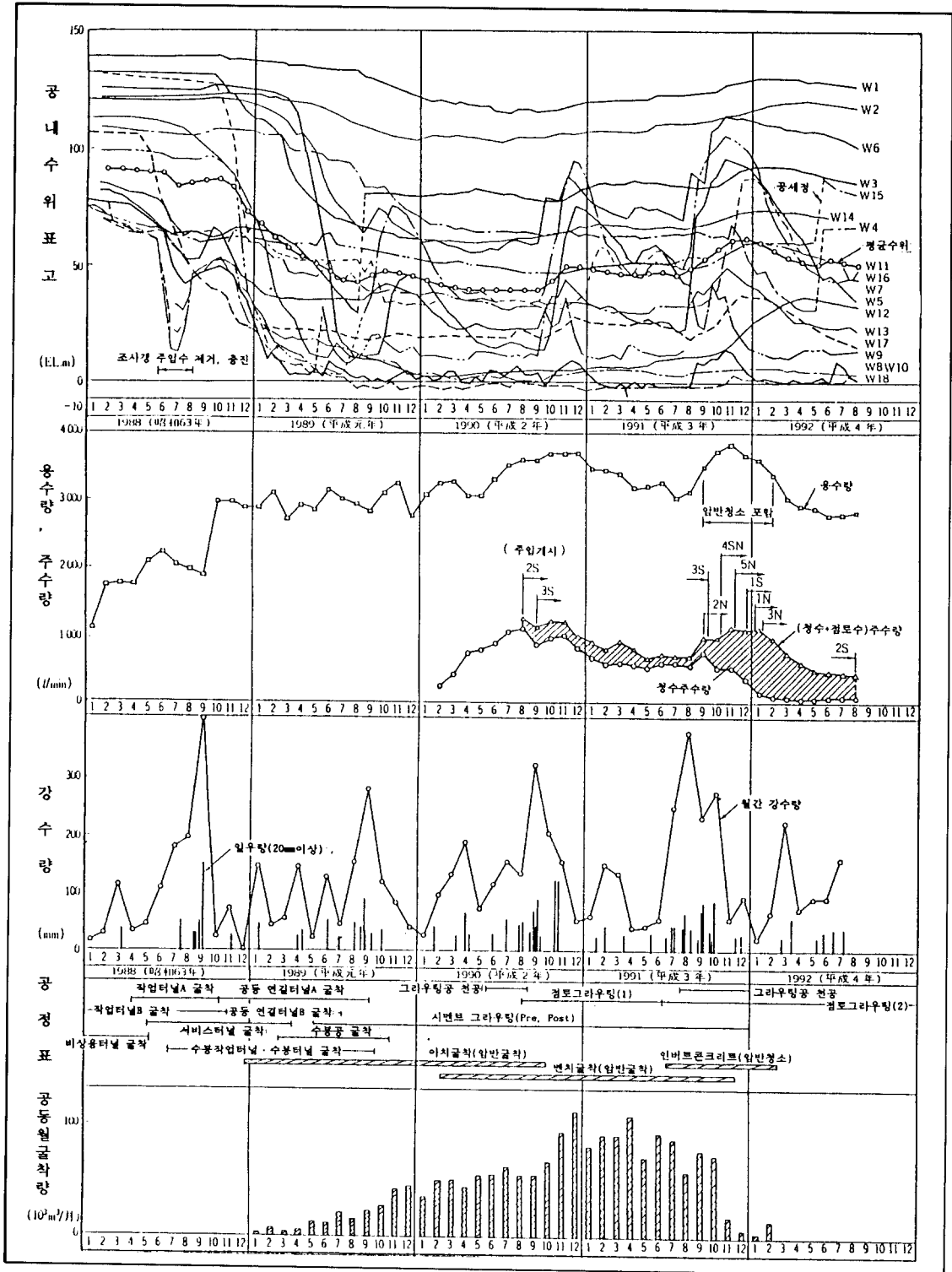


Fig. 7. 지하수위, 용수량 변화도.

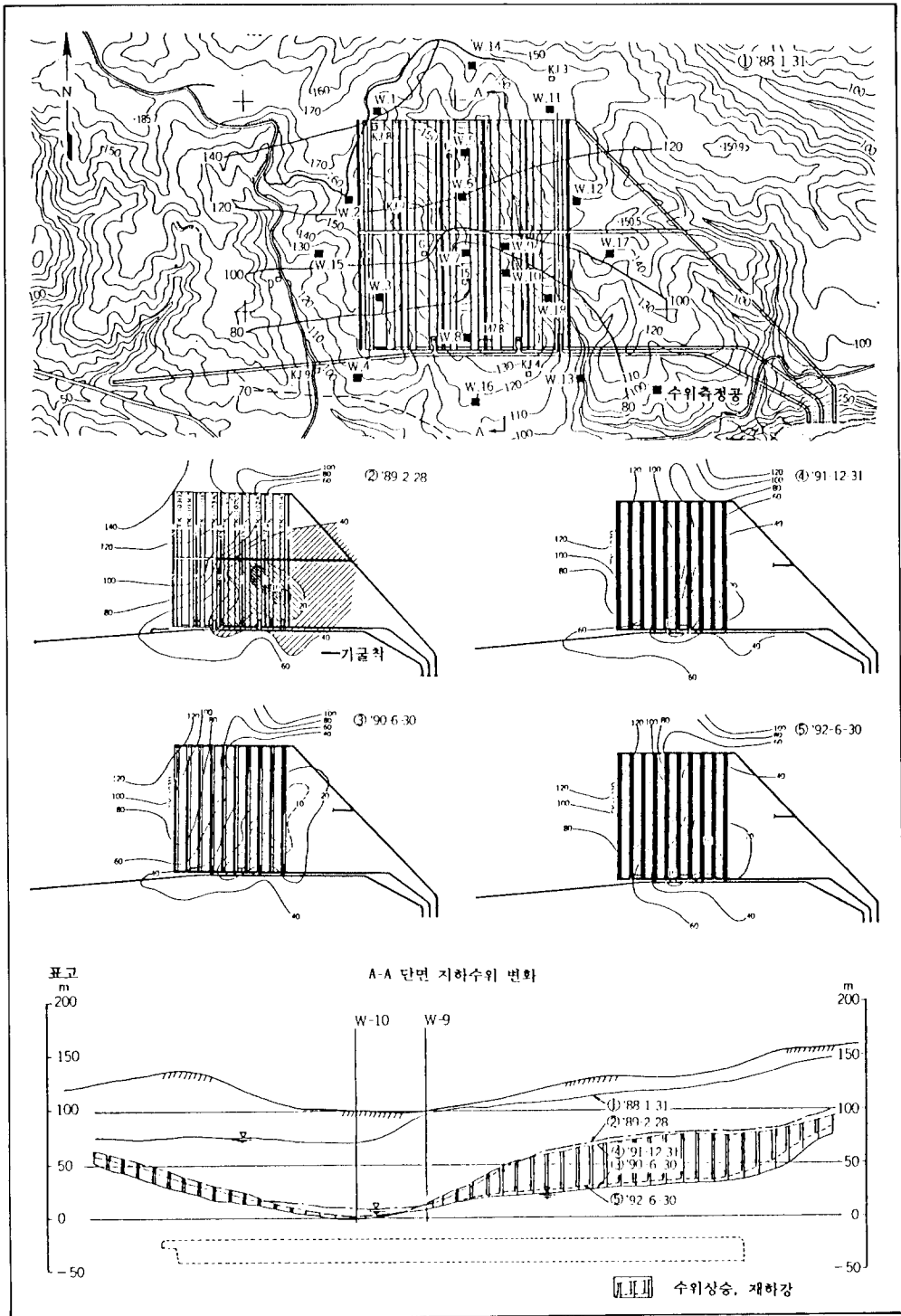


Fig. 8. 지하수위 Contour 및 단면.

설하고 기설공을 포함하여 약 30공의 수위 측정공에 대해 Telemeter에 의한 공내수위감시시스템을 이용하여 지하수위(공내수위) 변화를 감시한다.

각 공동의 용수량과 기지 전체의 용수량 측정도 계속하고 있다. 측정은 수중펌프의 배수량에 의해 공사에 영향을 미치지 않는 매주 월요일 아침에 실시하지만, 각 공동의 용수량은 벤치 굴착에 의해 유로가 끊임없이 변화하고 측정의 정밀도가 떨어지기 때문에 기지 전체의 용수량을 사용한다.

본격적인 수봉이 시작되고부터는 수봉수의 주수량을 측정함과 동시에, 점토 그라우팅 개시후에는 점토수의 주수량을 측정하여 수봉수에 가산해서 주수량으로 한다.

Fig. 7은 상기의 지하수위와 월간 강수량(20 mm 이상의 일우량도 병기), 용수량, 주수량의 공사중의 변화를 공사공정 및 공동의 월간 굴착량과 비교하여 정리한 것이다. 또한 Fig. 8은 지하수위의 변화를 ① 공사개시('88년 1월말), ② 수위저하 개시 초기('89년 2월말), ③ 수위가 최저로 된 점토 그라우팅 개시 직전('90년 6월말), ④ 점토 그라우팅 개시 16개월 후('91년 12월말), ⑤ 22개월 후('92년 6월말)의 대표적인 5개의 시점에 대해 지하수위 Contour와 수위 단면도를 나타낸 것이다.

그라우팅 개시 시점은 공동 아치부 굴착 완료단계로서 벤치 굴착에 의한 공동단면 확대중인 만큼, 그라우팅 미실시 경우의 수위가 잠시 저하되어도 당연한 것으로, 그라우팅 개시 직후부터는 전체적으로 지하수위가 반전하여 상승한다.

제1그라우팅 공사는 공동 전체의 20%에 상당하는 공동 1B, 2A, 2B, 2C의 남측 일부분이지만, 이 부분이 공동굴착에 의해 가장 수위가 저하하고 있고 그라우팅 개시직전의 지하수면은 그 부분을 중심으로 절구모양으로 수위가 저하하고 있다(Fig. 8의 ③). 그라우팅 개시 이후 절구모양의 아래부분에서 점토의 메꿈이 시작되면서 누수가 어려워져 전체 수위가 상승하고 있다.

물론 이러한 수위상승의 요인으로 매년 초가을의 강수량 증가와 1,200~600리터/분의 수봉수(점토수 제외) 보충이 작용할 가능성은 있지만, '90년 4~6월의 강수가 극히 적었음에도 수위 저하가 일어나지 않았다는 점, 또한 완전한 수봉이 개시된 '90년 4월 이후에도 수위 저하가 있었다는 점 등을 볼때 수위상

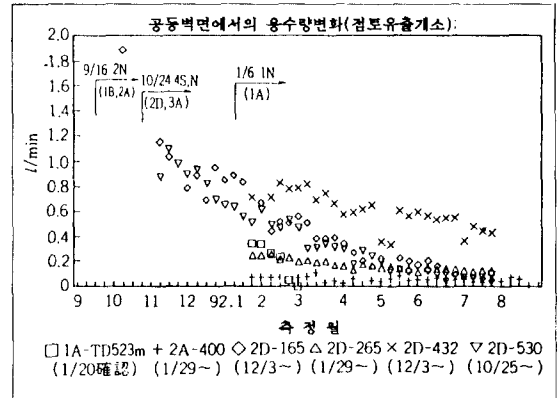


Fig. 9. 벽면 용수량의 감소상황(점토유출개소).



Photo 6. 벽면에서의 용수량 측정.

승에 그라우팅이 크게 기여한 것으로 판단되는 것이다.

2) 인버트 콘크리트 완성 후에는 측정 정밀도도 향상되어 용수량의 감소가 비로소 명확히 나타나고 있다(Fig. 7의 인버트 콘크리트와의 상승효과 참조).

3) 공동벽면에서의 용수량 변화 측정에 있어, 대부분의 장소에서 시간 경과와 더불어 용수량 감소가 확인되고 있고, 특히 용수량이 많은 장소일수록 그 경향은 현저하다(Fig. 9). 또한 초기에 점토수의 유출이 있었던 장소에서는 유출량이 감소하여 도중에 점토의 유출이 멈춰, 청수로 변화하고 있다. 공동벽면에 점토수가 유출된 곳은 약 30개소이다(Fig. 10).

4) 제1공사 3S에서의 그라우팅 완료시점에는 점토수 및 수봉수의 주수량이 각각 30리터/분, 10리터/분이었지만 그라우팅 급수를 정지했을 때도 수봉수의 주수량은 오히려 감소 추세를 나타내고 있다. 이것은

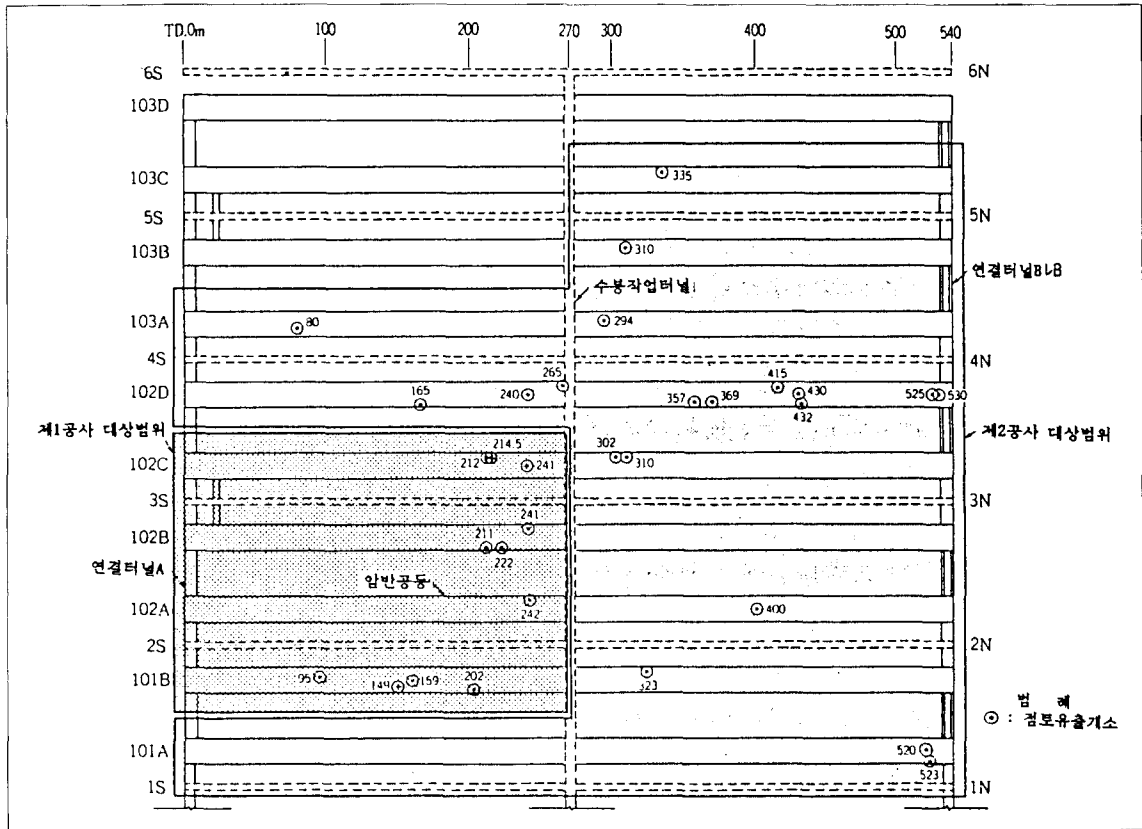


Fig. 10. 점토유출 위치도.

점토메꿈에 의해 수봉공과 공동사이의 암반 투수계수가 광범위하게 개량된 것을 의미한다(부근 지하수위가 전반적으로 상승하고 있다).

5) 24개월의 그라우팅 공사에 약 650톤의 점토가 공동주변의 암반에 유입되어 틈, 공극메꿈에 기여한 것이다.

4. 결 론

본 공사는 착공전에는 용수에 의한 난공사가 예상되었지만 인공 수봉에 의한 대량의 주수를 실시하면서 굴진하였음에도 점토그라우팅의 영향으로 큰 어려움 없이 완성되었다. 다행히도 투수계수가 높은 지역에 있어서는 짧은 시간내에 수위가 EL 0 m 부근까지 저하하여 공동굴착에는 큰 용수가 없었다.

완성된 공동내의 용수량은 현시점에서는 2,400리터/분까지 감소하고 있지만 투수계수가 큰 지역은 저수위로, 투수계수가 작은 지역은 고수위로 큰 변

화없이 안정된 상태를 유지하고 있다. 수위를 유지하기 위한 인공수봉수의 보급은 최대 1,200리터/분이었지만 현재는 점토수를 포함하여 500리터/분 이하까지 감소하고 있고 그라우팅 완료시점에는 200리터/분 정도로까지 감소할 것이라 예상된다.

금후 개시되는 LPG 지하비축기지에서는 공동 레벨이 EL-120 m 정도로 깊어지고, 해수면 아래에 설치되는 경우가 많아진다. 따라서 석유비축기지에 비해 수압으로 인한 용수량이 엄청나게 증가될 것이기 때문에 점토 그라우팅 기술의 필요성은 더욱 기대되는 바가 크다고 하겠다.

참고문헌

- 1) 蒔田敏明, 官永佳晴, 野間正治: '粘土グラウトによる地下水の制御-石油地下備蓄 久慈基地' 土木施工, 1992年 12月號.
- 2) 蒔田敏明, 官永佳晴, 野間正治: '石油地下備蓄久慈基地建設工事' 土木施工, 1992年 5月號.