

## 수갱공사의 기술적 문제에 대해서 (V) (물과의 싸움)

李 隆 植<sup>1)</sup>

### On The Technical Problem In The Shaft Works (V)

Yung-Jik Rhee

승 전(承 前)

“수갱공사의 기술적 문제에 대해서 (II)”에서 4가지 특성중 굴하용(掘下用) 권양기의 용량을 결정하는 지표가 되는 한계(限界)심도의 결정, 대형 수갱 또는 출수가 많은 경우 폭약의 불발 사고를 방지하는 방법을 다루었으며, 금회(今回)에는 수갱의 출수(出水) 문제를 검토하기로 한다.

#### 1. 서 론

문헌에 나타난 최초의 수갱 방수작업은 1864년 독일 Homburg 의 Rhein Preussen 탄광수갱, 심도 90 YD 에서 Cement Milk 를 지상에서 소형 Hand Pump로 압입(押入) 지수(止水) 한 예이다<sup>1)</sup>. 그러나 수갱 굴하중의 출수사고는 단지 기록에 나타나지 않을 뿐 멀리 중세기로 거슬러 올라가야 할것이고, 그것은 지금까지도 계속되고 있는 것이다.

최근(1992년) 에도 불란서에서 LPG 지하저장시설 건설용 수갱 굴하중 지수 작업에 어려움을 겪은 나머지 Conventional Method(천공발파, 버럭처리에 의한 굴하방식)에서 Large Dia Boring Method(대구경 천공에 의한 굴하 방식)로 전환하지 않으면 안된 사례가 있다. 수갱의 출수 사고는, 크게는 한 기업(企業)의 흥망성쇠(興亡盛衰)에 영향을 주고, 작게는 개인의 운명을 좌우하며, 실로 그 결과가 엄청나게 크다. 필자(筆者) 자신도 과거, 석공장성(石公長省)제 1수갱 건설 당시, 300ML Carcircuit-조차회로(操車回路)에서의 출수때문에 자칫 하면 5년여에 걸쳐서 시공해 놓은 수갱을 수몰(Shaft-Flood) 시킬 뻔한 쓰라린 경험을 가지고 있다.

이하 대표적인 수갱의 출수 사고와 또한 이 출수 문제를 여하히 해결하였는가 하는것을 전반적으로-조사, 지수방법, 지수제(止水劑)등-논하기로 한다.

#### 2. 출수 사고의 사례(事例)

##### 2.1 Thorne 탄광 수갱<sup>2, 3)</sup>

이것은 매우 특이(特異)한 예이며, 여기서 얻은 교훈(教訓)이 매우 많기 때문에 자주 거론 된다.

Thorne 탄광 수갱은 그 출발로부터 악운(惡運)을 만났다.

탄광은 영국 중부 Yorkshire 탄전 동부에 위치 하며, 제철용 Cokes 의 원료인 Coking Coal을 채굴할 목적으로 1909년 후반에 수갱굴하에 착수하였으나, 다량의 출수 (최대 한 수갱에서 28 m<sup>3</sup>/분) 때문에 1년반 동안에 각각 140 M와 160 M를 굴하하고 중단하고 말았다.

1912년에 독일 기술자에 의해서 그 당시 새로 개발된 Freezing Method(동결공법)을 시도하여, Freezing Hole(동결공)을 시공중 1차 대전이 일어나면서 Hole (32공)만 뚫고 공사는 다시 중단되었다.

대전이 끝난후 1919년 공사는 재개되었으나, 배수작

\* 1995년 3월 15일 접수

1) 범양 엔지니어링 주식회사 기술고문

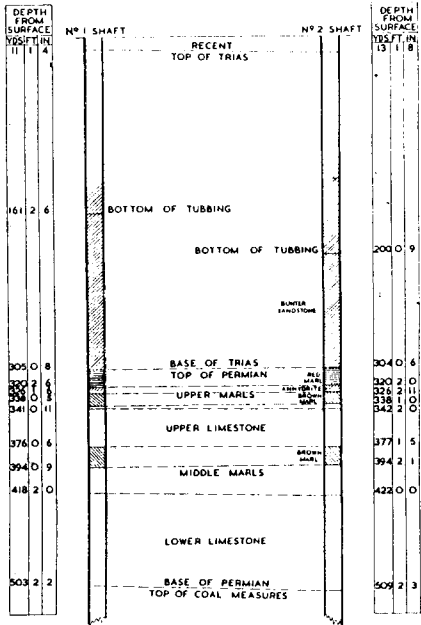


Fig. 1. Thorn 탄광 수갱 지질주상도

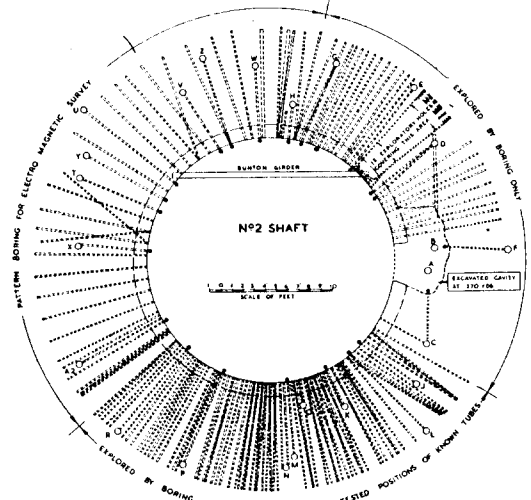


Fig. 2. 동결공 탐사 작업도.

업과 수갱 저부(底部)에 Concrete Plug의 설치와 철거에 1년이 소요되었다.

이때 Freezing Hole내에 설치된 Casing을 전부 회수하지 못하고 공(孔)도 매꾸지 않고, 그대로 방치(放置) 되었는데 이것이 뒤에 가서 유례 없는 출수사고의 원인이 된 것이다.

지수 방법은 M. Francois가 개발한 Silicization-현재의 SGR 공법의 원조(元祖)에 의존하였고, 다량의 출수를 어렵게 막아내면서 각각 1924년과 1926년 가행(稼行) 탄층이 부존 하는 881m 하부까지 도달했다.

그러니까 처음 작업에 착수한지 무려 15년 내지 17년이 걸린 셈이다.

그후에도 계속 Grouting을 함으로써 수갱내 출수는 20 Gallon (英)·약 10 l /분·으로 줄었다. 즉, 일단은 거의 수갱내의 출수가 멈춘 상태가 된 것이다.

이렇게 해서 수갱공사의 대장정(大長征) 끝에 Thorne 탄광은 가행하기 시작하였고, 그후 10년 동안은 무사히 지내다 1936년부터 다시 누수량이 증가하기 시작해서 1943년에는 제 2수갱에서 4.1 m<sup>3</sup>/분에 이르렀고, 제 1수갱에서도 1943년경 갑자기 늘어나기 시작하였다.

참고로 수갱이 굴하된 지층의 주상도(柱狀圖)를 Fig. 1

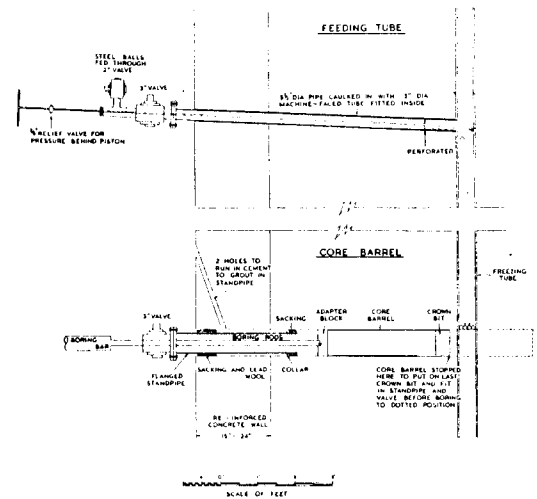


Fig. 3. "D"공의 충색작업

에 표시하였거니와, 출수가 많은구간은 380~400 YD이며, 따라서 함수층인 Bunter Sandstone (영국의 대표적인 함수층)보다는 훨씬 하부임으로, 필시 동결공을 따라 물이 내려 온것이 아닌가하는 추측을 날게했고, 그래서 제 2수갱의 누수 개소에서 측벽안으로 천공을 한 결과 동결공 한계와 작은 공동을 발견하여 이를 충색(充塞)한 결과 누수량이 0.5 m<sup>3</sup>/분까지 감소하였다. 그 후 10년은 소강상태(小康狀態)를 유지하다 1953년 제 2수갱의 누수(漏水)가 늘어나기 시작, 두개의 수갱이 합해서 1.4 m<sup>3</sup>/분이 되었다. 이때부터 본격적인 지수 작업에 들어가는데 이후 장장(長長) 10년여에 걸친 작

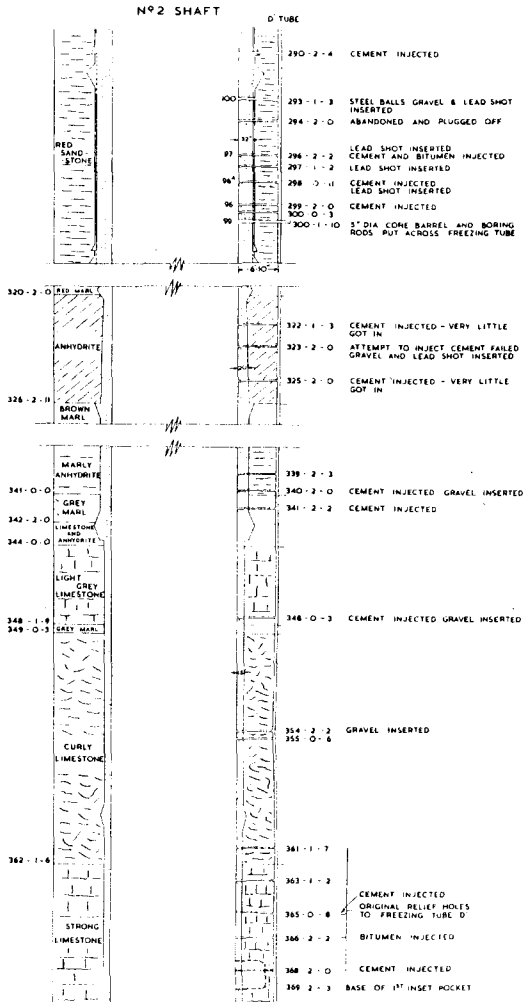


Fig. 4. "D"공의 충색작업

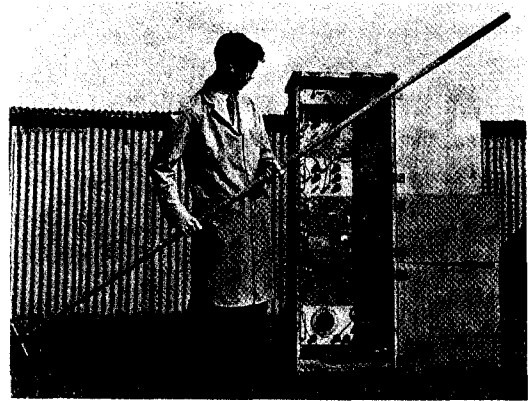


Fig. 5. 전자식 탐사기.

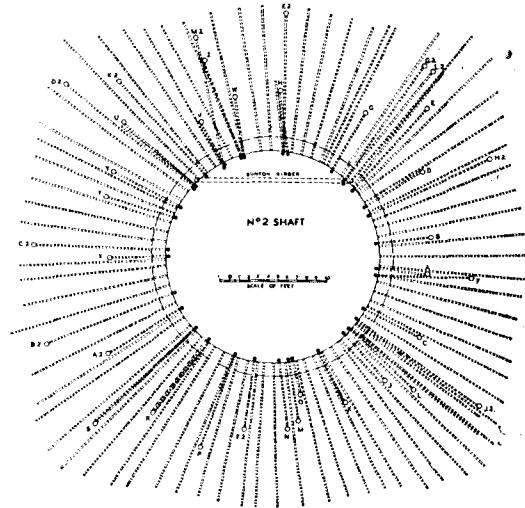


Fig. 6. 동결공 탐사작업.

업을 요약하면 아래와 같다.

1차 지수작업 (1953년 9월~1956년 7월)

제 2 수갱

- 364~370 YD 심도의 수갱 주벽(周壁)에서 암 반대로 약 170공 (길이 3m) 천공 동결공 24개를 발견, 지하수 유도(誘導), 동결공 충색 작업실시 Fig. 2
- 특히 다량의 지하수를 유통(流通) 하고 있는 "A", "B", "D" 공을 집중적으로 충색 (366~290 YD 구간) 하였다. Fig. 3, Fig. 4
- 전자식탐사기(電磁式探查器)를 사용 동결공 탐지 작업의 능률을 올렸다. Fig. 5
- 325 YD에서 총 62공 (길이 4.5 m)을 천공 22공 발견 (1955년 6월~1955년 9월) Fig. 6

- 1955년 9월 제 2 수갱 정상가동 중지, 수갱내에 Scaffold 설치, 그때까지 야간·병방(丙方)에만 작업하던 것을, 주·야간 계속 작업방식으로 전환.
- 325 YD 심도에 추가로 50공 천공하여 동결공 12공 (총 32공 발견) Fig. 6
- 물을 유통하고 있는공(7공)의 충색을 실시하였으나 일부만 성공하였다.
- 작업을 하는 동안에도 축벽이 파괴된 개소는 수시로 보수작업을 하였다.
- 그간 계속된 동결공의 충색에도 불구하고 누수량은 계속되어 1955년 11월에는 7.6 m<sup>3</sup>/분에 달해 Pump Lodge (500 YD 심도에 설치)의 Pump 를 더이상 증설 할 수 없게 되었음.

- 이상의 경의로 미루어서 동결공을 개별적으로 충색하는 방법으로는 지수효과를 얻을 수 없다고 판단하여, 1956년 5월부터는 325 YD와 400 YD (측벽보강 부분, 누수량이 가장 많은개소)사이 전 구간을 일시에 Cement Injecting 하는 방법을 구상하여, 새로 발견된 "D" 공과, 유사하게 다량의 물을 유통시키는 "R" 공의 327 YD에 설치된 Relief Valve를 열고 물을 방출시키고, 50 YD 하부의 같은 "R" 공의 Valve를 잠그니, 예상외로 강대한 수압이 작용하며, 보강벽면에 균열(龜裂)이 생겨서, 위험 사태가 야기되므로서 이 방법도 포기하였다. 결국 1차 지수작업은 아무런 소득없이 끝났다.

**2차 지수작업 (1956년~1959년)**

지수작업에 착수하기전에 작업능률을 올리기 위해, Thorne 탄광의 생산을 전면 중단하였다.

즉 제 1수갱도 Cage를 철거하고 Scaffold를 설치하였다. 그 후 2년여에 걸쳐서 양쪽수갱의 305 YD에서 520 YD 사이의 측벽을 각각, 두께 1휘트, 3휘트씩 임시로 보강하고, 전과같이 동결공안의 충색 (Filling)을 지양하고 벽면(壁面) 내부전체의 충색을 시도하였으나, 수압과 그라우팅의 주입압 때문에, 보강한 콘크리트 벽면에 금이가기 시작해서 이 방법도 허사로 돌아갔다. 사태가 이렇게 되자 NCB (석탄청)는 보수작업의 근본적인 검토를 하게되었고 면밀한 조사끝에 벽면내부의 지수, 암반 보강은 도저히 불가능하다는 결론을 내려 1961년부터 철강제 지보의 시공에 착수하여 1966년 양(兩)수갱의 보수공사가 끝난것이다. 즉 본격적인 작업을 시작한지 13년만에 공사가 끝난것이다. 영국은 1947년 석탄산업 국유화(國有化)가 되어 국가의 재정 지원하에 장기간에 걸친 공사가 가능했던것이며, 사기업(私企業) 같으면 중도에 포기했을 것이다. 같은 사례가 그 무렵 독일에서도 발생 했는데" 이때도 역시 유사한 방법에 의해서 지수하였다.

**2.2 Potash Mine, 카리광산(加里鑛山)의 출수 사고**

- 캐나다 Saskatchewan 지역의 사례.

수갱출수 사고의 주역(主役)은 탄광수갱과 이 Potash Mine 이 쌍벽을 이룬다고 할 수 있다. 19세기 중엽(中葉)부터 POTASH를 채굴하고 있는 독일의 경우, 총 225개 광산중 46.5%에 해당하는 119개 광산이, 수갱 굴하 또는 가행(稼行)중의 수갱 측벽과 채굴장(採掘場)에서의 출수때문에 수몰(水沒)되었다고 한다.

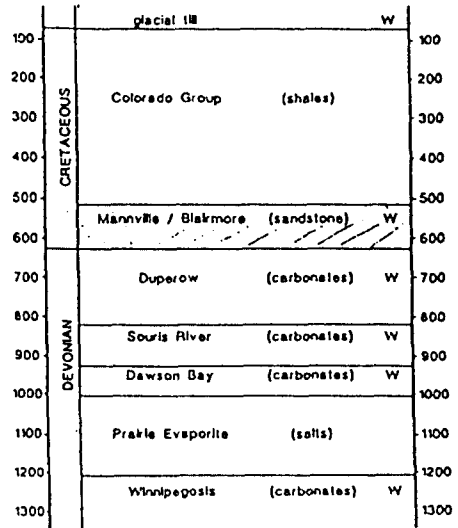


Fig. 7. Saskatchewan potash mine 지질주상도

30여년의 비교적 짧은 역사를 가진 캐나다 Saskatchewan 지역의 Potash Mine Shaft도 그 예외는 아니며, 많은 출수사고를 겪었고, 그래서 개발에 참여한 기업들의 상호(商號)가 여러번 바뀌는 쓰라린 역사를 가지고 있다<sup>5)</sup>.

이 지역의 지질단면을 Fig. 7에 표시하였다. 암염층 (POTASH를 포함하고 있는 층) 상하반(上下盤)에 걸쳐 합수대가 있으며, 그중 특히 Blairmore 층이 다량의 물을 포함하고 지층도 미고결(未固結)-붕괴성(崩壞性)이어서 이것이 출수사고의 주원인이 된다.

최초의 수갱 (Unity)은 1952년 착공되었는데, 지표 부분에서부터 곧바로 난관에 봉착하여 Freezing 공법에 의해서 간신히 통과하여, Colorado Group(Shale 층)를 굴하하고 1961년 Blair More 층에 들어갔으나, 다량의 고압수(高壓水)를 막아본 경험이 전혀없는 시공회사는 거의 무방비 상태에서 엄청난 돌출수(突出水)를 만나 수갱은 순식간에 수몰(Shaft Inundation)되고 말았다.

Shaft Flood의 경우는 수위상승 속도가 그리 크지 않아서, 시공자는 위로 쫓겨 올라가면서도, 다음 복구 작업(Salvage Work)을 준비할 시간적 여유가 있으나, Inundation의 경우는 1분에 1m씩 수위가 올라갈 정도로 빠르기 때문에 속수무책(束手無策)으로 수갱에서 출출(逐出)되고 마는 것이다.

그러니까 9년 걸려서 550 m 우물통 하나 판셈인데 이

것도 그 후 수년동안 백방(百方)으로 손을 써왔으나, 끝내 복구하지 못하고 1968년 폐쇄(Sealing)하고 말았다.

Saskatchewan지역 개발초기 미국의 시공회사에 의해서 착공된 4개소의 수갱중 하나는 앞서 설명한대로 영원히 포기되었고, 나머지 3개소의 수갱도, 기술·경험부족(Cementation, 동결공법의 실패등)으로 인해 한 차례씩 수몰되는 시련을 겪었고, 그 중 하나는 구라파의 수갱전문 시공업체를 초빙(招聘)함으로써<sup>6,7)</sup> 가까스로 공사를 마무리 지을수 있었다.

60년대 이후에 착공된 수갱은, 구라파(주로 독일) 회사가 공사를 전담 함으로서, 지수(止水)를 위시하여 Cast-Iron Tubbing, Double-Steel Lining<sup>8)</sup> 등의 최신 공법을 구사(驅使) 함으로 별사고 없이 끝냈다. 그것이 낙후(落後)되었던 북미주(北美洲)의 Shaft Sinking Technique를 일약 구라파 수준으로 끌어올리는 계기가 된것 것이다.

### 2.3 Cotgrave, Bevercote 탄광의 출수사고

지하수가 수갱을 공격(攻擊)할 때 비단 물량공세(物量攻勢)-수압과 수량만 가하는 것이 아니라 때로는 그 질(質)로써 승부를 걸때가 있다. 그 좋은 예가 영국 중동부(East-Midland) 지방의 국유화(國有化)후에 신규 개발(新規開發-Brand New Colliery)된 Cotgrave와 Bevercote 탄광 수갱에서의 출수사고이다.<sup>9,10)</sup> 같은 시대에 시공된 여타 지역의 수갱 공사가 전문 시공회사에 의해서 굴하되는데 반해서 이들 수갱은 NCB의 직영형태로 이루어 졌다. 여기에 1차적인 사고의 원인이 있다고 한다.

이들 수갱 굴하 지층 중에 석고(石膏-Gypsum)가 협재(挾在)되어 있고, 따라서 지하수에는 유산염(硫酸鹽-Sulphate)이 포함되어 있다. 이로 인해 Concrete가 부식(腐蝕)되기 때문에, Cement는 내산성(耐酸性)이 경우 Sulphate Resisting이라야 하며, 그래서 Almina Cement (CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 약 75~80%)를 선택한 것인데, 이 Cement는 석회(石灰)가 매우 적어서 화학적 침식(化學的 侵蝕)에는 강한 반면 수화열(水和熱-Hydration Heat) 이 매우 높고 급경(急硬)-6시간 강도가 다른 Concrete의 28일 강도와 거의 맞먹는다. 하는 다루기가 매우 어렵고 까다로운 Cement 이다.

그러기 때문에 이 Cement를 사용할 때는-0.5 mm 이하의 모래의 사용을 피하고

- 물/시멘트를 최소로 억제하고

- Workability를 높여서 치밀(緻密)한 Concrete를 만들고 -냉수(冷水)를 살수(撒水)하여 경화온도(硬化溫度)의 상승을 극력(極力) 억제 한다.

등의 철저한 시공관리를 해야한다.

그러나 Cotgrave나 Bevercote 탄광 수갱공사에서는 수갱이라는 특수작업조건 때문에 이러한 준수사항(遵守事項)이 제대로 지켜지지 않으므로 콘크리트 축벽에 Shrinkage로 인한 Crack과, Honeycomb로 인한 Sulphate의 침식때문에 Concrete가 부식되어 이로 인한 출수를 억제하고-Grouting, 축벽보강-Cast-Iron Tubbing설치 때문에 전체 공정이 약 3년씩 지연되어 에너지 수급 계획의 대폭적인 수정이 불가피해진 것이다. 필자가 현지를 방문했을때 들은바에 의하면 공사를 담당했던 책임기술자는 심한 노이로제에 걸려 자살했다고 한다.

## 3. 수몰수갱의 복구작업

수갱굴하중 불행(不幸)히도 수몰사고를 당했을 때 이것을 복구하는 작업(Salvage Work)의 예를 소개한다. 이것은 대수층(Aquifer)를 통과할 때 Shaft-Sinking Engineer가 알아야 할 필수(必須)사항이다.

일본 북해도(北海道) 유바리(夕長) 신(新) 탄광에서 발생한 사례<sup>12)</sup>인데 사고는 심도 400 m 지점에서 지수를 위한 Grouting 주입공 천공중에 발생했다.

용수량(湧水量)은 약 1.5 m<sup>3</sup>/분, 수압 35 Kg/cm<sup>2</sup>에 달했고, 이때 배수 능력은 Pump와 Kibble에 의한 처리를 합해서 1.0 m<sup>3</sup>/분 밖에 안되었다고 한다.

곧 공(孔)내 5 m 위치에 Packer를 설치하려고 했으나 수압에 밀려서 겨우 1.3 m 위치에 고정했고, 그 위치가 너무 얕아서 암반에 균열이 생겨 계속 물이 용출되었다. 결국 수갱은 수몰되고 말았고, 물이 약 350 m 상승한 위치에서 수압과 균형이 잡혔다.

이 상태에서 수갱내에 설치된 Grouting 주입 Pipe를 통해서 Cement Milk (물:시멘트비 1:1)를 유입(流入)시켜 수갱 저부(底部)에 Bulk Head를 축조하였다.

이때 Bulk Head의 두께는 다음식에 의해서 정해졌다.

$$l = \frac{D \cdot P}{4\tau + D\tau}$$

여기서,  $l$  : Bulk Head의 두께

$P$  : 용수압, 35 Kg/cm<sup>2</sup>  $D$  : 수갱직경 7 m

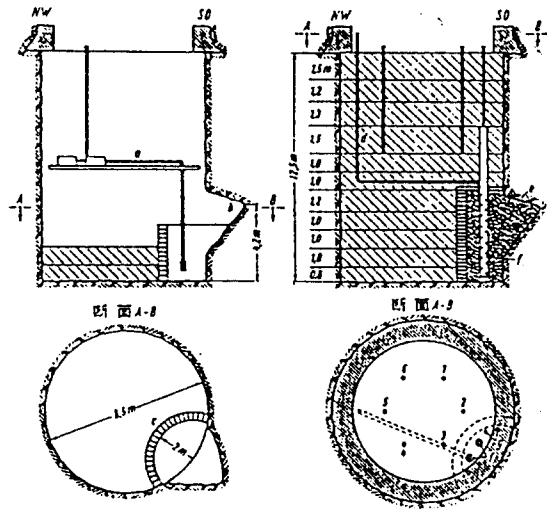


Fig. 8. 수갱저부의 Bulk-Head.

$$\tau : \text{전단강도} = \text{압축강도} \times 1/6 \approx 10 \text{ Kg/cm}^2$$

$$r : \text{Cement Milk의 비용적} : 0.0015 \text{ Kg/cm}^3$$

$$\therefore l \approx 6 \text{ M}$$

실제는 상부 레이탄스의 무효(無效) 부분과 안전성을 고려하여 7 m로 하였다.

이때 용적은 약 290 m<sup>3</sup> 로서 물 시멘트비 1:1 일때, Milk의 경화(硬化)후의 용적 감소율은 7.5% 따라서 1톤의 Cement로 1 m<sup>3</sup>의 고결 용적(固結容積)을 얻는다.

실제 Cement 사용량은 300톤이며, 유입에 33시간 소요되었다.

양생에 1주일 두고, 배수를 시작했는데 배수능력을 3 m<sup>3</sup>/분으로 키웠고, 14일만에 배수완료 하여 Bulk Head 까지 도달하였다.

Bulk Head는 우려했던 것과 달리, 레이탄스도 없고, 평탄(平坦)한 상태로 고결되었다고 한다. 코아를 채취하여 측정한 압축강도는 최소 28, 최대 219 Kg/cm<sup>2</sup> 평균 97.5 Kg/m<sup>2</sup>를 나타냈다. 그 후에는 이 Bulk Head에서 천공, Cementation으로 지수하면서 다시 굴하작업을 계속할 수 있었다. 출수사고를 만난지 약 40 일만에, 복구작업은 끝났다. 굴하작업 중, 측벽이 무너지면서 물이 나오는 경우가 있는데<sup>13)</sup>, 이럴때는 Fig. 8과 같이, 출수개소를 콘크리트 부록의 반원형울타리로 막고 그 내부에는 자갈을 채워, 배수 Pipe를 설치하고 울타리 밖은, Fig. 8과 같이 수갱저(低)부에 Bulk-Head 상부에서, 천공 Cementation을 한다.

그러나 이러한 방법은 어디까지나 긴급사태에 대처한 응급조치인 것이다.

이상 외국의 수갱출수 사고의 예를 몇가지 들었는데 그럼 우리나라 현실은 어떤가?

과거 탄광이나 금속 광산에서 수갱을 굴하했을 때 본격적인 지수 작업(Freezing, Cementation)이나 수몰(Shaft Flood)된 예는 없다. 그만큼 우리나라는 천혜(天惠)의 자연조건을 갖추고 있다. 그러나 지하 심부에서의 출수에 대한 대비는 항시 소홀(疏忽)이 해서는 안되며, 유바리 신탄광의 예에서 보듯이 심부(300 m 이하)에서 일 1,000톤 정도의 출수를 만나면, 우리나라와 같이 경험이 전무하다 싶이 한 상태에서는 수몰되기 쉽고, 또한 300~400톤/일 정도면 지수작업을 해야 한다.

따라서 장차, LNG 지하저장시설 이나 핵폐기물 처리장을 수갱을 이용해서 건설하기 위해서는 필히 이에 대한 대비책을 미리부터 강구해야 할 것이다.

#### 4. 지수(止水) 작업

현재, 굴하작업중의 출수량은 대략 0.2 m<sup>3</sup>/분을 기준으로 그 이상일 경우 지수작업을 하는것으로 되어있다<sup>14)</sup>. 이 정도면, Lining 시공 후 Back Wall Injection에 의해서 지수할 수 있고 또한 Control 할 수 있다. 그러나 이 이상 많아지면 여러가지 지장이 생겨서, 굴하전에 미리 지수하는것이 안전하고 경제적이며, 또한 수갱 완공후의 Dry-Shaft를 유지 할 수 있다.

바로 여기에 지수작업의 필요성이 대두(擡頭)되는 것이다. 초창기의 지수 작업은 과학적 이론의 뒷받침없이 암중모색(暗中摸索)적인 방법으로, 많은 시행착오를 겪으면서 해오다가 차츰, 수리지질(水理地質)의 발전, Grout 제(劑)의 개발등에 힘입어 오늘날 고도의 기술을 이룩하였다. 근본적으로 Grouting이란 수리지질의 반응분야이다. 즉 흐름의 공식(물의경우)에 비중과 점성(Viscosity) 항을 포함시키면, 그것이 Grouting의 여러현상을 해석 할 수 있는 바탕이 되는것이다.

##### 3.1 조사

조사항목은 시추공에서 채취된 Core의 Logging, 수리지질조사, 공내검층(檢層)의 세가지로 대별할 수 있다. 현재 시행되고 있는 각 공 수리 지질조사방법은 다음과 같다.

(1) 조사방법 : Pump-Out Test

조사사항 : 지하수위, 조사공주변의 평균 Permeability, 출수량, Recharge

적 요 : 지표부분, 비교적 얇은 지대의조사

(2) 조사방법 : Lugeon Test

조사사항 : Permeability

적 요 : 약 150 m 정도의 비교적 얇은 부분에 사용

(3) 조사방법 : Airlift Test

조사사항 : 지하수위, 출수량과 Recharge 량 Permeability

(4) 조사방법 : Drill Stem Test (DST)

조사사항 : 대수층(帶水層)의 여러가지 특성 Permeability, Transmissivity, 수압, 출수, Recharge

(5) 조사방법 : DST의 변형-Pump Out Test

조사사항 : (4)와 같음.

적 요 : DST의 개량된 방법

이들 Test 가운데 5번째 Pump-Out Test는 DST의 개량형이며 (Fig. 9, a, b)<sup>15)</sup>, Casing안에 장착된 Pump에 의해서

Pumping-Recovery Test를 하여 Honer's Plot에 의해서 T를 구하고 따라서 Aquifer의 두께 H를 알면, T = KH 에서 K를 구한다.

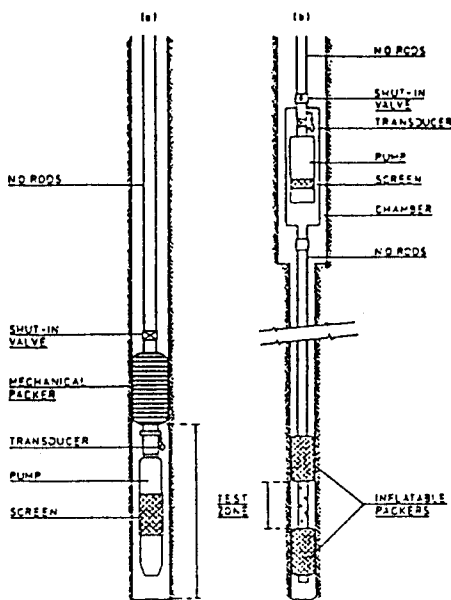


Fig. 9. DST의 개량된 장치

이 K 값을 가지고 다음 공식에 의해서 수갱내에 유입되는 지하수량을 추정할 수 있다.

$$Q = \frac{2\pi KHh}{\log\left(\frac{Re}{\gamma}\right)}$$

$$T = KH = 0.183 \frac{Q}{m}$$

여기서, Q = 수갱에 유입되는 지하수량, m<sup>3</sup>/sec

Re = 지하수의 유입으로 인한 지하수면의 변동 범위, m

t = 지하수 유입시간, 분

γ = 수갱굴착직경, m

h = 대수층의 평균압력, 수두, m

K = 투수계수 m/sec

H = 대수층의 두께

q = 지하수유입량, m<sup>3</sup>/sec

m = Horner's Plot상의 기울기, 수두(m)로 표시

그러나 현실적으로 5번째 Test가 국내에서 어려울

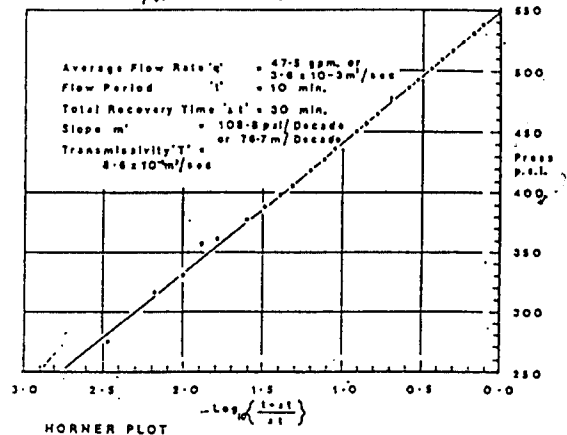
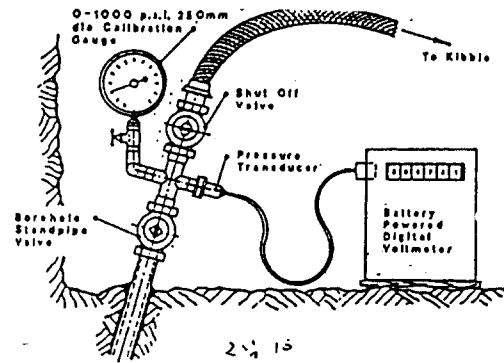


Fig. 10. Pressure Relief Test.

경우, 조사공에 의해서 미리 대수층을 파악한 다음, 굴하도중 대수층 상부 20~30 m에서 선지천공하여, 그공에서 지하수가 용출되면 Fig. 10 과 같이 압력계를 부착하고 출수량을 Kibble이나 미리 준비한 Tank에 받아서 측정하고, Valve를 참고로 압력상승을 측정하므로, Pumping Recovery Test를 할 수 있다. 이때 이것을 Pressure-Relief 공으로 쓸 수 있다<sup>16)</sup>.

수리지질 조사에 의해서 출수량, 지하수압, 기타 대수층의 특성등을 파악하고, 또한 Core Logging과 LAB. Test에 의해서 대수층압반의 Fissure 또는 Joint의 발달여부, Porous Rock, 또는 Solution Cavity (Lime Stone의 경우) 인지를 파악하고, 여기에 필요시 Gamma Ray Logging등의 검층을 통해서 Porosity등의 정밀조사를 한다.

조사결과에 의해서 가장 효율적인 지수방법 (공의 배치, 주입압력, 주입량, 주수제의 선택)을 결정하게 된다.

#### 4.2 지수작업의 종류

##### - Permeation Grouting

암반내에 공극이 많고 그 공극이 서로 연결된 상태 (Intergranular)일때, 이것은 사질토와 비슷한 상태이며, 이때 주입공 배치는 Fig. 11과 같이, 수갱측벽에서 일정한 경사로 방사선 (No Spin)방향으로 천공한다. 이때 주입량과 유효범위는 다음 식에 의해서 결정된다.

$$Q = \frac{2\pi a k h_1}{\beta \log \frac{\gamma_1}{\gamma_0}}$$

여기서, Q : 주입량, cm<sup>2</sup>/sec  
 K : 투수계수, cm/sec  
 a : 주입고 (길이), cm

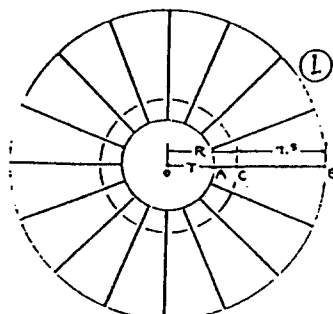


Fig. 11. Permeation Grouting의 주입공 (평면도)

h<sub>1</sub> : 주입압 (수두), cm  
 β : 주입제의 동점성계수, (CST)  
 γ<sub>1</sub> : 주입제 침투반경, cm  
 γ<sub>0</sub> : 주입공 반경, cm  
 여기서, n : 공극률, 소수(小數)로 표시  
 t : 주입시간

여기서 유의할 것은 Gel Time을 충분히 줘서, 주입제가 암반내에 침투하여 서로 연결되도록 하는것이다. Permeation Grouting의 적용범위는 다음과 같다<sup>17)</sup>.

암 종	투수 계수	지 수 제
조립(粗粒)사암	1×10 <sup>-2</sup> cm/S	Cement
중립~조립사암	1×10 <sup>-2</sup> cm/S ~4×10 <sup>-2</sup> cm/S	Chemical Grout와 Silicate
중립~세립(細粒)	4×10 <sup>-4</sup> cm/S ~1×10 <sup>-4</sup> cm/S	Chemical Grout와 Silicate

Fig. 12)는<sup>18)</sup>, 미국 Missouri주의 ST. Joseph Lead Mine의 수갱공사에서 심도 430 m에서, 그 하부 15 m 에 존재하는 대수층(사암)을 지수하기 위해서 Permeation Grouting을 했을때의 천공규격도이다.

##### - Fissure Grouting

우리나라는 외국과 같이 대수층을 이루는 Sanstone 이나 또는 Limestone 층의 존재가 그리 많지 않기 때문에, Permeation Grouting은 주로 지표부근에서 실시되고 있으며, 그래서 수갱에서의 Grouting은 주로 Fissure Grouting이다. 일반적으로 Cement가 사용되나, Portland Cement의 경우, 최대 입자가 80~100 mesh인데, 실험에 의하면<sup>19, 20)</sup>, 주입재(注入劑)의 최대

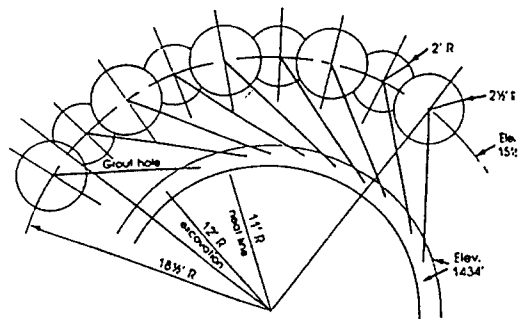


Fig. 12. Permeation Grouting 천공도.



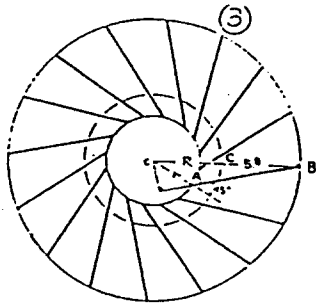


Fig. 13. Fissure Grouting 천공도.

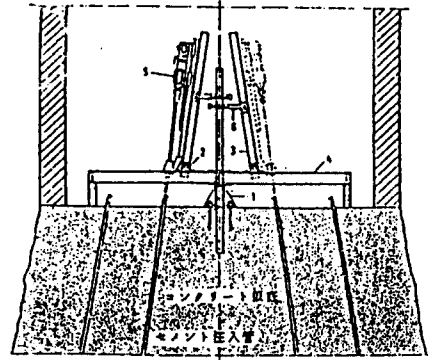


Fig. 15. 회전식 천공장치.

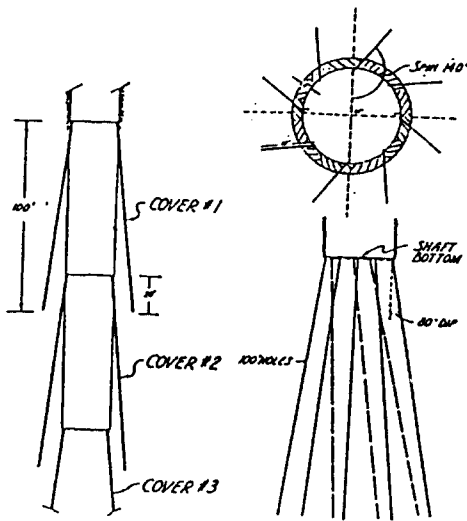


Fig. 14. Fissure Grouting (Cementation).

입자(粒子)보다 최소 3배 이상의 폭(幅)을 갖는 Fissure나 Crack일때 Grouting이 가능하다고 하며 따라서 그 폭은 최소 200~300 $\mu$ 은 되어야 한다.

그 이하면 지수효과를 기대하기 어렵다. 또한 이러한 매우 좁은 공간(空間)을 수압을 이겨내면서 침투해 들어 가야하기 때문에, Permeation Grouting보다 주입압(注入壓)이 훨씬 높아야 한다. 이 주입압은<sup>21)</sup> 최대 지하수압 (용출압력)+Fissure와 주입제, 주입제 내부의 마찰력+Cement Milk의 경우 마지막으로 물을 짜내는 (Squeezing) 힘으로 구성되는데, 이것은 주입개소에서의 압력(Termianl Pressure)이고, Pump의 토출 압력은 주입 Pipe 내의 마찰 손실이 감안되어야 하고, Pump의 용량 계산에는 역시 Cement Milk의 경우 비중(W/C 비율이 2:1일 경우 약 1.7)을 가산(加算)해야 한다. 또한 지수 효과를 높이위해, 상기한 주입압보다 더 높여서, Fissure를 확장 (Fracturing) 시키는

것이 일반적인 추세이다<sup>22)</sup>. 따라서 주입압(Ter-minal Pressure)은 지하수압의 2.5~3배 정도가 되어야 한다. 물/Cement 비는 보통 10에서부터 시작하는데, 그러므로써 Cement Milk의 점도를 적게하여, 유동(流動)시의 마찰 저항을 줄이고, Setting Time (凝結時間)이 연장되므로써 Milk의 침투거리가 길어진다. 주입 말기에는, 이 비율을 2또는 그 이상 올리므로 고결(固結) 후의 강도(強度)를 높인다.

주입공의 천공방향(Drilling Pattern)은 Fig. 13과 같이, 방사선 (Radial Type)형이 아니고 원추의 접선과 일정한 각도를 유지함으로써, Fissure나 Crack를 빠짐없이 교차토록 한다. 공의 길이는 대수층의 두께, 가동(可動) 장비 등에 따라 결정되나 보통 20~50 m 정도이다.

공수는 Fissure의 간격에 의해서 결정되며, 수갱 주변 수압이 클때는 수갱 주변밖으로 충분한 거리를 주어야 한다.

대추층의 두께가 클때는 Stage Grouting을하되 반드시 Grout Cover가 중복되도록 한다.

Fig. 14에<sup>23)</sup> Grouting 작업의 실례를 들었다. 천공작업시, 공의 각도, 방향을 정확하게 유지해야 하며 여러 가지 방법이 있으나, 굴하용 Jumbo를 사용할 수 있다. Fig. 15는 수개저부(底部)에 회전대(回轉臺)를 설치, 그

위에 시추기를 장치하여 천공하는 방법이다.

지하수압이 매우 높을때는 약 5 m 천공 후 곧 Stand Pipe를 설치하여, Valve를 장착해야 한다. 그렇지 않으면, 천공중에 다량의 용수가 있을때, 이를 즉시 막지 못해서 수물사고를 야기 할 수도 있다.

일반적으로 Fissure Grouting 의 천공수는 Permeation Grouting 보다 적은 경우가 많다.

그러나, 이 두 가지 방법다 지수효과를 확인하기 위해서는 반드시 Probe Hole를 뚫었어야 한다. 만약 Probe Hole에서 용수(湧水)가 있으면, 재차(再次) 지수작업을 해야 한다.

### 4.3 주입재료

Grouting 주입재료는 Particulate Grouts (현탁액-懸濁液) 와 Non-Particulate Grouts (용액)으로 대별된다.

#### 가) Particulate Grouts

이는 Cement와 Clay로 분류되며 Clay는 Bentonite를 말한다. Cement는 입자의 크기때문에 주입조건에 제약을 받는다. Fissure-Grouting의 경우는 Permeability가 10 MD 이하면 주입효과가 현저히 떨어진다. 이러한 단점때문에 19세기 말부터 Non-Particulate Grouts가 개발되었던 것이다. 그러나 Cement는 경제적이고 강도가 높기때문에, 여전히 주입제의 주종(主宗)을 이루고 있으며, 근래에는<sup>24)</sup>

- Setting Time의 조정을 가능케 함으로써 불필요한 주입을 억제하고,
- 초기강도를 높이므로써 주입범위를 줄여 Grouting의 경제성을 높이고,
- Bleeding이 일어나지 않도록 함으로써 Fissure의 초기 충색(充塞)을 막고
- 또한 Shrinkage를 억제하는등, 각종 첨가제를 개발하여 주입재료로서의 성능제고(提高)에 힘쓰고 있다.

#### 나) Non-Particulate Grouts

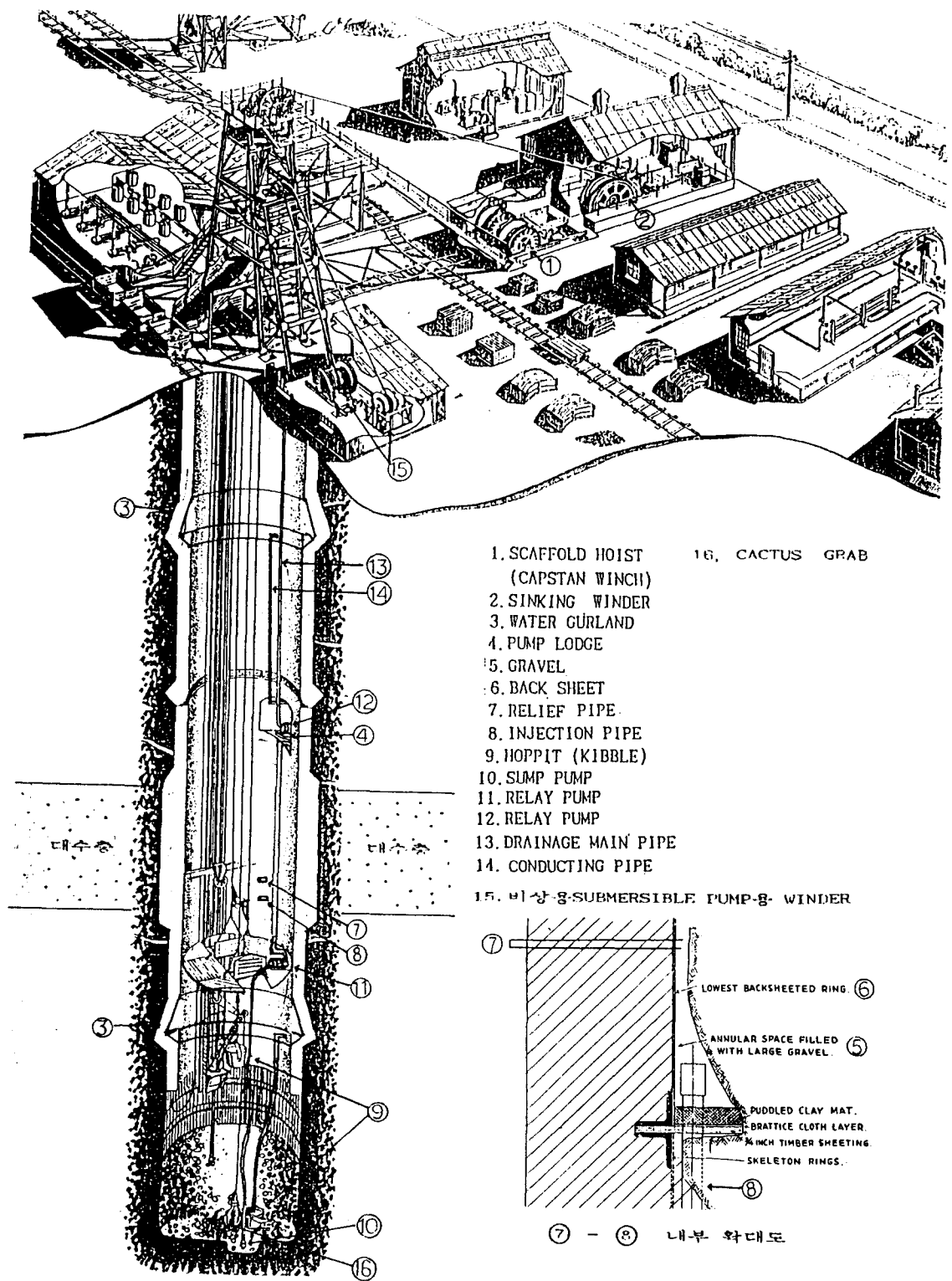
현재 수갱방수공사에서 주로 사용되는 Non-Particulate Grouts는 통칭(通稱) 규산소다(Sodium Silicate)를 Base로 하는 각종 약액(藥液)이다. 정확하게는 Sodium Meta-Silicate( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )이며, 이것은  $\text{Na}_2\text{O}$  on  $\text{SiO}_2$ 로 표시되는 Water Glass(물유리) 계(系) 약액을 대표한다. 이 물유리의 수용액 ( $\text{Na}_2\text{O}$   $\text{SiO}_2$  40% 이하)은 알카리성이기 때문에 여기에 산이나, 산염(Acid Salts)과 화합해서 중화되면 침전물(Gel)이 생기며, 이

것이 지수효과를 발생하는 것이다. 초창기에 개발된 것은 황산 알미늄을 반응제(反應劑)로 사용한 Silicatization Method와 염화칼슘을 사용한 Joosten Method인데 이들은 Gel Time이 너무 빠른 순간성(瞬間性)이기 때문에 Silicate-Group로서 완성품이라 할 수 없고 그 후 각국에서 여러가지 반응제 “-중조(重曹),알미늄산나트륨, 중황산(重黃酸)나트륨-”를 사용하여, Gel-Time의 연장을 시도하다가 1950년대에 유기 화합물 “-탄산에치렌, 탄산프로피렌, 애치렌 그리콜 아세테이트등-”을 첨가함으로써 Gel-Time를 60분 이상으로 올리므로써 주입범위를 넓히고, 약액의 동시주입 (One-Shot)을 가능케 했고, Silicate의 희석도(稀釋度)를 억제함으로써 Gel의 강도를 높이고, 또한 Gel이 생성될때, 점도를 낮게 유지함으로써 주입 효과를 높일 수 있었다.

특수 주입제의 개발은 영국 북부 Yorkshire의 Boulby Potash Mine의 제 2 수갱 굴하시 심도 610~914 m 구간의 Bunter-Sandstone의 지수작업에서 개발된 특수약액이 그 좋은 예이다<sup>25)</sup>. 지수작업은 먼저 Cement Injection에 의해서 Fissure와 Joint를 충색하고, 다시 동일공(孔)에 Chemical Grouting을 함으로써 암반의 공극(Pore)을 매꾸었는데, 이때 Pore의 크기가 1  $\mu\text{m}$  이하 였다고 한다. 종전에 사용되었던 어떤 주입제도 이 조건하에서는 사용수수가 없어서 30개월의 연구개발(RND)끝에 Resorcinol-Formaldehyde계의 약품을 새로 개발하여 사용함으로써 성공적으로 지수작업을 끝냈다고 한다. 이렇듯 각국에서는 꾸준히, 주입조건에 적합한 새로운 지수제를 만들고 있는 것이다.

### 4.4 지수작업의 효율

자주 인용되는 Selby Project의 Wistow 제 2수갱의 지수작업 실적을 보면 26) 심도 240~260 m 구간의 대수층 지수작업에서 예상출수량 750 l /분을 Cement와 Cemex A<sub>2</sub> (Silica-Gel)를 주입함으로써 0.73 l /분으로 줄였다고 한다. 이때 지수효과를 나타내는 Wirf (Water-Inflow Reduction Ratio)는 약 1,000이다. Grout Hole은 2층으로 배열되어, Primary(외측) Hole 은 32공, Secondary(내측) Hole 16공을 약 37~38 m 천공, 185 Ton의 Cement를 사용하여 수갱 중심부에서 4공의 Test Hole에서 11.4 l /분의 출수를 확인하여 제 3 열 (14공)에 Cement와 Cemex A<sub>2</sub>를 주입하였다. Wirf는 다음과 같이 표시된다.



- 1. SCAFFOLD HOIST (CAPSTAN WINCH)
- 2. SINKING WINDER
- 3. WATER CURLAND
- 4. PUMP LODGE
- 5. GRAVEL
- 6. BACK SHEET
- 7. RELIEF PIPE
- 8. INJECTION PIPE
- 9. HOPBIT (KIBBLE)
- 10. SUMP PUMP
- 11. RELAY PUMP
- 12. RELAY PUMP
- 13. DRAINAGE MAIN PIPE
- 14. CONDUCTING PIPE
- 15. 비상용-SUBMERSIBLE PUMP-용- WINDER
- 16. CACTUS GRAB

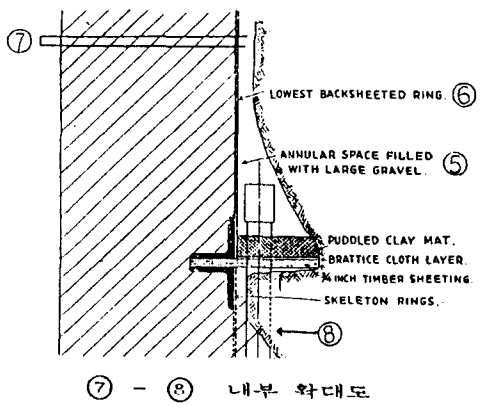


Fig. 16. 수갱배수 계통도

$$\text{Wirf} = \frac{Q_0}{Q_1} = \frac{f \ln(\text{rg}/\gamma) + \ln(\text{Ro}/\gamma)}{\ln(\text{Ro}/\gamma)}$$

여기서,  $Q_0$  : 지수작업전의 유입량

$$f = \frac{K_1}{K_g} = \text{Permeability}$$

$K_1$  : 암반내 Permeability

$K_g$  : 주입된 암반내의 Permeability

$\gamma$  : 수갱반경

$\gamma_g$  : 주입된 암반의 반경

$\text{Ro}$  : 경계(Boundary) 지점까지의 반경

지금 수갱반경 4 m, 주입범위 3 m, 경계조건  $\text{Ro}$  를 1,000 m라고 가정하면  $\text{Wirf} = 0.101f + 0.9$  즉, 출수량을 1/10으로 줄이려면 Permeability는 1/100으로 줄여야 한다. 앞서 예에서  $\text{Wirf}$ 가 1,000 일때  $K$ 는 1/10,000로 감소시켜야한다. 물론 이 식은 어디까지나 이상적 상태(Homogeneous-Isotropic)를 전제로 한 것이기 때문에 정밀한 수치는 아니지만 그러나 적어도 Index로는 충분하다. 일본 북해도의 수갱 지수작업에서는 잔여출수(Residual-Water)가 500 l/분이 되었다고 한다. 좋은 대조가 아닐 수 없다. 이것은 오로지 사전에 정밀한 지질조사를 실시하여 이에 따라 가장 효과적인 지수방법을 채택하고, 아울러 우수한 Grouting 장비를 가동하여 얻은 결과이다. Shaft-Sinking의 선진국에서는 현재까지도 꾸준히 이 분야의 기술향상에 노력을 경주하고 있는것이다<sup>27)</sup>.

## 5. 수갱굴하시 지하수의 Control

Fig. 16은 정상적인 굴하작업때의 수갱내 배수계통도이다. 수갱저부(底部)의 아직 Lining 하지않는 부분의 출수는 Sump Pump에 의해서 양수되어, Scaffold 상의 Relay Pump에 의해서 수갱 중간에 설치된 Pump Lodge로 중계되어 지상으로 배수된다.

수갱의 심도가 깊어지면, 적당거리에 Pump Lodge를 계속 설치한다.

한편 Lining 벽에서의 Seepage는 Water-Gurland로 집수(集水)되어, Pump Lodge로 보내거나, 최하부의 Gurland의 물은 Kibble에 담아서 지상으로 보낸다. 또한 Grouting 후의 잔여출수(Residual Water)는 ⑤, ⑥, ⑦, ⑧과 같이 Lining시, Back Sheet와

Gravel, 특수 Gurland에 의해서 격리되어 후에 Back Wall Injection을 한다.

이렇게 함으로써 Shaft Sinker가 우의(雨衣)를 안 입고도 작업 할 수 있는 "Dry Shaft"를 만드는 것이다.

## 參 考 文 獻

- 1) Ball H. Standish, 1920 "The Application of Cementation to Mining", PROC. S. WALES INST.ENGRS, 36. 511.
- 2) Hunter, J.R., 1956~57, "The Shaft Water Problem Of Thorne Colliery", TRANS. INST. MIN. ENGRS., 116, 970 [PAPER NR., 3671].
- 3) 이 응직, 1966, "THORNE 탄광수갱의 방수공사-영국 수갱굴하작업 실습기(5)", 석탄 제 26 호.
- 4) Von Caimlle, 1954, Sainte Fontaine 광산 수갱의 지수작업 Gluckauf, Bd. 3, NR. 12
- 5) Fritz F. Prugger, Arnfinn F. Prugger, 1991, "Water Problem In Saskatchewan-What can be learned from them?" Bulletin Of Canadian Mining & Metallurgy (CIM) Vol. 84, No. 945.
- 6) SCOTT S.A., 1963, "Shaft Sinking Through Blairmore Sand & Paleozoic Water-Bearing Limestones" CIM, FEB.
- 7) WALLI J.R.O., 1964 "The Application Of European Shaft-Sinking Technique To The Blairmore Formation", CIM, FEB.
- 8) STORCK U., 1968 "First Use Of The Double Steel And Concrete Sandwich Lining For Keeping High-Pressure Water Out Of A Potash Shaft" CIM,
- 9) Alan Walmsley, 1962, "Shaft And Inset Work At Cotgrave Colliery" The MIN. ENGRS., MAY [3916]
- 10) 1963, Shaft Protection At Bevercotes Colliery" Colliery Gurdian, July, Vol. 27, Nr. 5334.
- 11) 上浦正雄譯, 1966, "アルミナセメントの水和について" セメントコンクリート, 1966. 4
- 12) 夕張新炭鑛技術部 1972, "立坑底に築造したセメントミルクによるハルクヘット" "について" 炭鑛技術, 7.
- 13) Hubert Siebert, 1964, "Sachsen 5 立坑の堀下げ" に際しての 出水防止. Gluckauf, VOL.13, Nr. 4(日譯版).

- 14) DUNN R. B., 1982, Water "Problems In Mines" Bulletin Of Inst. Of MIN. Metallurgy IMM, Vol. 91, Oct
- 15) DAW G. P, SCOTT R.A., 1983, "Hydrological Testing For Deep Shaft And Tunnels" Bulletin Of The Int.Assoc. Of Engineering Geology, No. 26-27.
- 16) 이응직, 1994 "수갱공사의 기술문제에 관해서(III)", 암반역학회지
- 17) TAIT, A., 1983, "Shaft Sinking Techniques" Mining Technology, April.
- 18) REED J.J., BILHEIMER L.B., 1960 "How Rsesarch Advances Grouting Techniques At St. Joseph Lead Minning", Mining World, Nov.
- 19) KENNEDY J.B., 1958 "Pressure Grouting To Fine Fissures" Proc. A.S.C.E (American Society Of Civ. Engrs.) Aug. (Paper 1731).
- 20) MINEAR V.L, 1957 "General Aspects Of Cement Grouting" Proc. A.S.C.E Jan.
- 21) 渡邊貫 1936, "セメント注入"
- 22) CAMBEFORT H., 1977 "The Principles And Applications Of Grouting" Quaterly J.Engng. Geol. Vol. 10.
- 23) Lionel A. York, 1964, "Grouting The Prairie Sediments" CIM. JAN.
- 24) Oliver R.A., 1976, "Improved Techniques For Water Control", IMM, A. 38-39.
- 25) Cleasby J.V. & Others, 1975, "Shaft Sinking At Boulby Mine, Cleaveland Potash, LTD" - Discussion-IMM. VOL. 84, NR. 824.
- 26) Black J.C., Pollard. C.A., Daw. G.P., 1982, "Hydro-Geological Assessment And Grouting At Selby", Proc. Of Conf. On Grouting & Geotechnical Engng. Asce. Feb. New-Orleans.
- 27) Jeffery R.I., & Others, 1989, "Assessment Of Shaft Inflow Characteristics For Deep Aquifer Associated With Coal Mining In The Uk", Proc. Shaft Engng., IMM.