

豎坑工事의 技術的 問題에 對해서(III)

李 隆 植¹⁾

On the Technical Problems in the Shaft Works(III)

Yung Jik Rhee

1. 서 론

〈承前〉이 報告文은 한국암반역학회지 VOL.1 1991에 발표됐던 '豎坑工事의 技術的 問題에 對해서(I)'의 계속이다. 전회의 내용은

1. 序 言

2. 英國의 豎坑 施工 事例

2.1 SELBY PROJECT

1) 靜水壓 狀態에서의 수갱 LINING 두께 산정

A) 彈性限界내의 應力狀態에서의 厚肉圓筒 (THICK CYLINDER)의 諸般公式을 이용 하는 設計

B) BS CP110에 의한 CONCRETE의 極限 狀態(ULTIMATE STATE)에서의 設計

C) SELBY SHAFT의 施工例

前회에서는 英國의 수갱측벽 LINING 두께산정에 관해서 간단히 소개하였다.

앞에서도 언급한 바와 같이 英國에서는 LINING 두께를 결정할 때, 靜水壓 狀態를 主考慮對象으로 한다. 그 이유는 英國 炭鑛에서는 수갱을 중심으로 일정 구역의 炭層을 채굴하지 않고, 稼行最終段階까지 보호함으로써 岩盤에 복잡한 地壓現狀이 야기되지 않도록 한다. 또한 帶水層 岩盤을 제외한 挾炭層

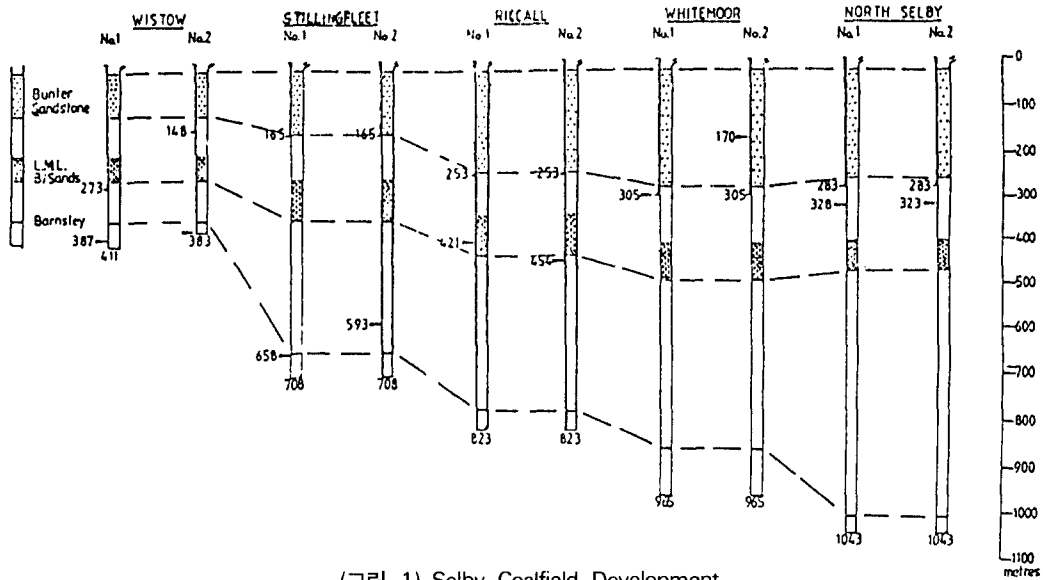
(COAL MEASURE)을 구성하는 암석은 비교적 견고하여 (COMPETANT ROCK), 豎坑側壁에 큰 盤壓이 작용하지 않음이 오랜 기간, 수많은 SHAFT를 굴착 하면서 실증되었다고 한다. 따라서 SHAFT LINING의 機能은 帶水層(AQUIFER 또는 WATER BEARING STRATA)으로부터 작용하는 水壓에 견딜 수 있는 剛性支保의 性格을 지니고 있다.*

靜水頭의 경우 그 크기를 정확하게 예측할 수 있고 (대개의 경우 帶水層이 地表까지 연장되기 때문), 또한 側壁에 均等(UNIFORM)하게 작용하기 때문에 LINING 두께 산정이 용이하다. 그래서 英國의 SHAFT LINING에 대한 基本方向은 예측된 압력에 견딜 수 있는 안전하고도 제일 경제적인 支保材의 개발(CAST IRON TUBBING을 사용하지 않고 高強度의 MASS CONCRETE로만 시공)과 정확한 시공, 철저한 사후 관리(計測 등)에 초점이 모아진 것이며, 그 좋은 예가 SELBY PROJECT¹⁾에서 시공된 5개의 SHAFT

*) 반면 獨逸의 경우는 保安炭柱(SAFETY PILLER)를 거의 남기지 않고 採掘함으로써, 沈下가 일어나 암반 전체가 움직이는 3次元의인 岩盤의 舉動이 생겨나 正량적인 해석이 매우 어려워지므로, SHAFT LINING은 이러한 복잡한 岩盤의 움직임에 순응할 수 있는 FLEXIBLE(可縮可屈)하고, 동시에 큰 盤壓에도 견딜 수 있게 設計, 施工한다.

*1993년 11월 12일 접수

1) 정희원, 범양건설(주) 기술고문



(그림 1) Selby Coalfield Development

GROUP(WISTOW, STILLINGFLEET, RICCALL, WHITEMOOR, NORTH SELBY)이다(그림 1). 以下, WISTOW, RICCALL SHAFT의 경우를 구체적으로 살펴보기로 한다.

2. 본 론

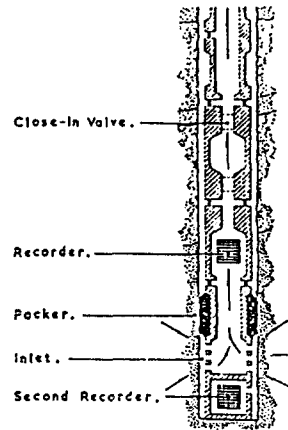
-WISTOW SHAFT, RICCALL SHAFT와 WHITEMOOR SHAFT의 施工例

WISTOW SHAFT는 SELBY PROJECT 지역의 서쪽, 炭層深度가 가장 얇은 구역의, 5개 SHAFT GROUP중에서 최초로 시공되었다. 이 SHAFT의 調査, 計劃, 施工중에 얻은 여러가지 경험이 후속 SHAFT 공사에 반영되었다.

가) 調査

試錐調査孔에서 얻은 CORE로부터 層序, 岩盤分類, 岩石의 物性試驗, 孔內檢層 등을 실시, 파악하는 외에 특기할 만한 것은 水理地質試驗(HYDROGEOLOGICAL TEST)에 石油探査에 이용되고 있는 DRILL STEM TEST(DST)²⁾를 응용한 것이다.

DRILL STEM TEST란 PRESSURE BUILD-UP, FLOW TEST³⁾를 별도의 觀測孔을 설치하지 않고 (深井의 경우, 별도의 觀測孔을 설치하는 것은 비경

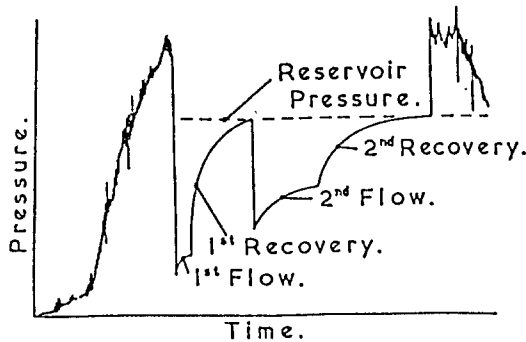


(그림 2) Drill Stem Tool

제적이기 때문이다), 單一孔에 의해서 시행하는 것인데, (그림 2)와 같은 裝備를 試錐孔의 調査深度까지 하강시켜, 매 30 M 구간마다 일정시간 孔壁에서 出水(IN-FLOW)하는 상태(時間, 壓力變化, 出水量)를 측정하고, VALVE를 닫으면 하강했던 壓力가 서서히 회

**) PRESSURE BUILD-UP, FLOW TEST는 INJECTION FALL-OFF TEST³⁾의 逆順이며, 따라서 HORNER'S PLOT에 의해서 T(TRANSMISSIBILITY)를 구하고, $T=K \cdot H$ 에서 K(PERMEABILITY)값을 구할 수 있다.

復된다(그림 3). 이것을 반복함으로써 試驗區間の 平均透水係數, 帶水層의 賦存範圍, 水壓, 公내에 유입되는 물에 의해서 압력이 강하하는 한계등을 推算하고, 그로부터 장차 굴착할 SHAFT에서의 出水量을 算定하게 된다. 또한 試驗區間の 시추CORE에 의해서 帶水層의 심도와 두께, FISSURE의 크기, 發達狀態, 방향에 따른 透水係數의 변화, POROSITY, 空隙의 범위등을 측정하여 帶水層의 特性을 더 精밀하게 파악한다. (표 1)⁴⁾은 調査結果를 요약한 것이다.



(그림 3) Pressure Record from a Drill Stem Test

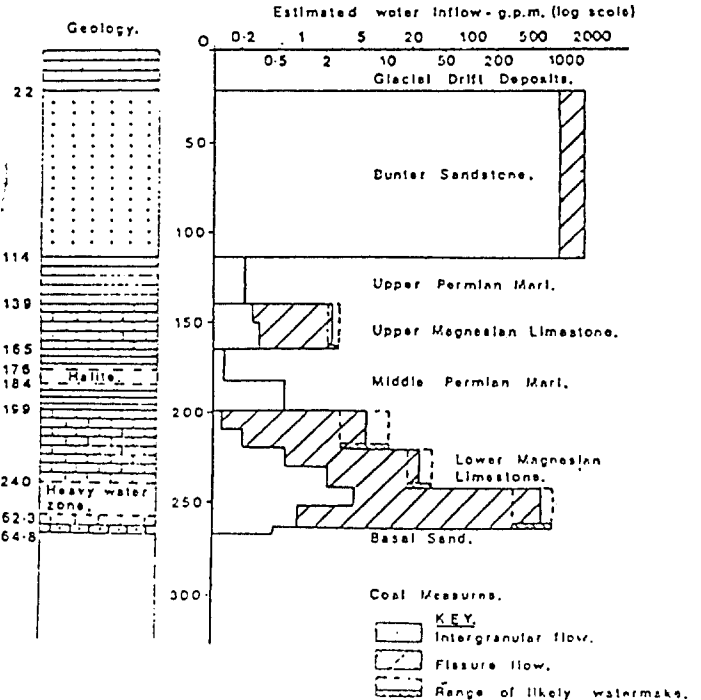
나) 設 計

아래 표에 의하면 WISTOW SHAFT의 豫想出水量 13.6 M³/MIN중 2/3가 BUNTER SANDSTONE층에서 나오고, 나머지가 LOWER MAGNESIAN LIMESTONE(LML)에서 나온다. 따라서 BUNTER SANDSTONE층은 凍結工法에 의해서 止水를 하고, LML층은 CEMENT GROUT 또는 CHEMICAL GROUT로 止水하기로 하고, LINING두께는 前述한 바와 같이 最小安全係數 2.2, CONCRETE 強度 45 N/mm² (GRADE 45)로 하여 LAME의 공식에 의해서 결정하였다(그림 4). 단 이 그림에서 보듯, 두께는 심도에 따라 변화하는 것이 아니고, 施工의 편의상 일정구간 같은 두께를 유지한다. 凍結區間에서는 CONCRETE 온도를 최저 0C 이상으로 유지하기 위하여 두께를 최소 600 mm⁵⁾를 확보한다.

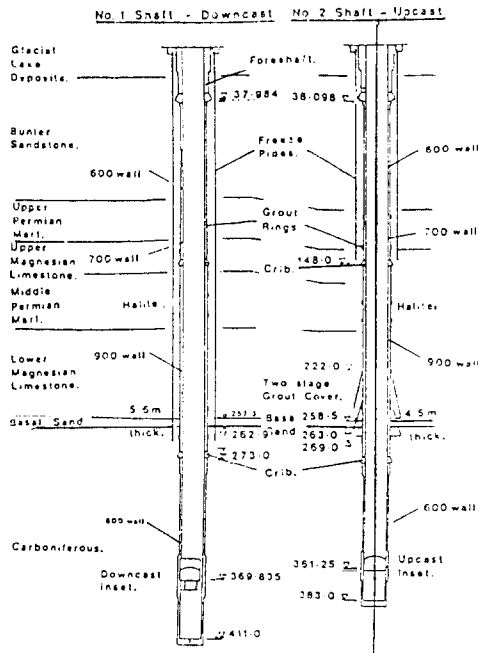
(그림 5)는 RICCALL #2 SHAFT의 심도별 LINING 두께를 표시하였는데 -635 LML 대수층의 두께는 무려 1.4 M에 이른다. 반면 그 하부 COAL MEASURE에서는 약 30 cm로 감소되었다.

다) 施 工

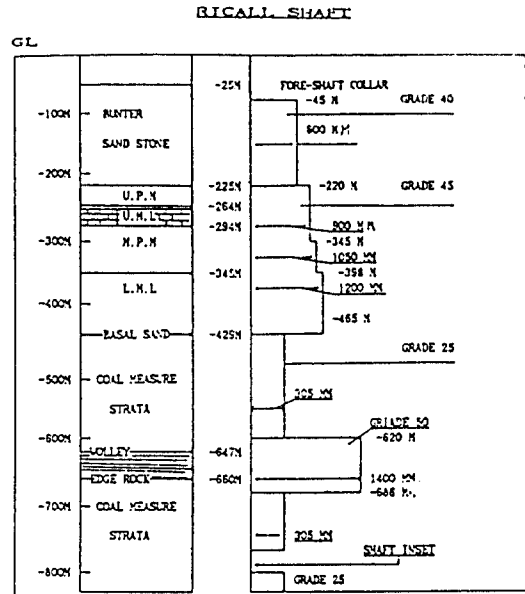
Strength -MN/m ²	Comments.
	Silty Clay with sand layers.
2 - 15 Increasing with depth.	Coarse grained Sandstone, highly porous (30%) and fissured. Bands of Marl in lower half.
10-12	Weak Red Marl with 6m layer of massive Anhydrite.
30-64	Medium grained Limestone, no fissures and low permeability.
41	Hard Red and Green Marl with veins of Gypsum and Anhydrite. Massive Halite bed with bands of Mudstone in centre.
43-57	Strong fine grained Limestone, fissures & cavities Gypsum filled.
51-58	Strong, uniform Limestone with no fissures or cavities.
42-63	Fissures and cavities are open and up to 20cm. diameter.
>20	Relatively impermeable fine grained Sandstone.



(표 1) Wistow Water Test Borehole Informations



(그림 4) Wistow Shaft Design



U.P.M : UPPER PERMIAN MARL
 U.M.L : UPPER MAGNESIAN LIMESTONE
 M.P.M : MIDDLE PERMIAN MARL
 L.M.L : LOWER MAGNESIAN LIMESTONE

(그림 5) Lining Thickness of Riccall Shaft

1) CONCRETE강도, WORKABILITY

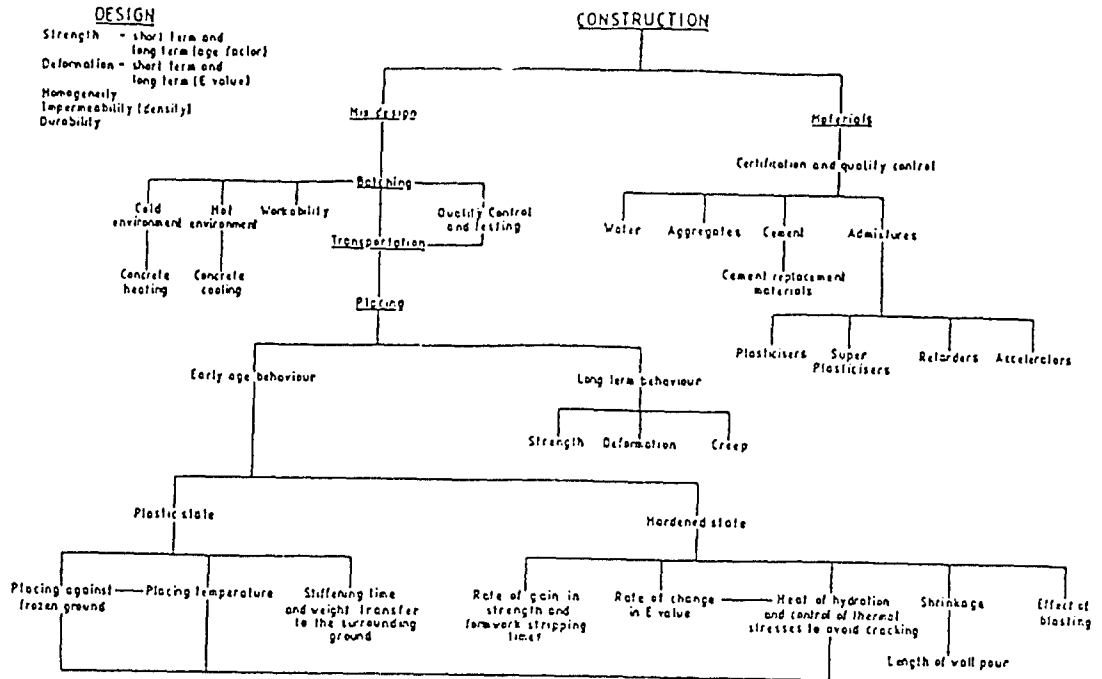
누차 언급한 바와 같이 최대 6 N/mm²(=60 Kg/cm²)의 강대한 水壓을 PLAIN CONCRETE로만 지탱하기 위해서는, CONCRETE의 품질이 절대 보장되어야 한다. 즉 LAME의 공식이란, THICK CYLINDER, 다시 말해서, 支保의 부재가 均質等方性을 가진다는 前提하에 성립되는 것이므로, LINING CONCRETE는 그 品質이 均一하여 어느 개소, 어느 위치이던간에 규정된 강도가 나와야 한다. 그러기 위해서는 정확한

MIXDESIGN, MATERIAL(CEMENT, 모래, 자갈, 세골재, 물, 각종 ADDITIVE)의 선택과 운반, 저장관리, 정확한 BATCHING, CONCRETE 搬入, 打設 (PLACING), 打設후의 初期固結(SETTING과 HARDENING), 長期的인 強化(6개월후)過程에서의 物性變化 등을 일관성있게 CONTROL해야 한다. (표 2)⁶⁾는 GRADE 45의 여러가지 配合狀態를 나타내며, (표 3)⁷⁾

(표 2) Shaft Lining Concrete Mix Designs Grade 45

	Normal mixes (sulphate resisting Portland cement)			Cement replacement mix
Site	Selby Wistow	Selby Riccall	North Selby	North Selby
Supplier	Topmix Ltd	Trumix Ltd	Topmix Ltd	Topmix Ltd
Cement	Ribblesdale, 420kg/m ³	Rugby Crown, 460kg/m ³	Blue Circle, 440kg/m ³	500kg/m ³ (total Cementitious Content, 30:70 O.P.C.: Cemsave)
Sand	Elvaston Zone 2, 615kg/m ³	Farnham Zone 2, 665kg/m ³	Blaxton Zone 3, 670kg/m ³	Blaxton Zone 3, 595kg/m ³
Sand % of total aggregate	35%	39%	37%	34%
Coarse aggregate	Elvaston gravel, 20-5mm 1140kg/m ³	Farnham gravel, 10mm 350kg/m ³ 20mm 700kg/m ³	Blaxton gravel, 1120kg/m ³	Blaxton gravel, 1150kg/m ³
Water	Borehole, 180 li/m ³	Borehole, 156 li/m ³	Borehole, 185 li/m ³	Borehole, 180 li/m ³
Water/cement ratio	0.41	0.40	0.42	0.36
Slump without plasticizer	75mm	75mm	75mm	60mm
Plasticizer	Flocrete N, 0.18 to 0.36 li per 50kg cement			
Slump with plasticizer	Varies with shaft depth but generally 160mm and upwards			

(표 3) Concrete in Shaft Linings : Controlling Factors and Subsequent Behaviour



은 최대 GRADE 60의 강도를 얻기 위한 CONCRETE Q.C.의 組織, 運營體制를 나타내고 있다.

또한, SHAFT LINING과 같이 狹小하고 행동에 제한을 받는 위험작업에서는 SLUMP의 값을 높여 (16~20 cm) SELF COMPACTING이 이루어질 수 있도록 하되, 材料分離가 일어나지 않도록 WORKABILITY도 보장되어야 한다. CONCRETE 강도를 높이려면 SLUMP는 당연히 6~7 cm 정도로 낮아지므로, PLASTICIZER를 적당량 혼합하여 그 값을 높인다.

(표 2)는 GRADE 45의 각종 CONCRETE MIX, PLASTICIZER의 混合率등을 나타낸다.

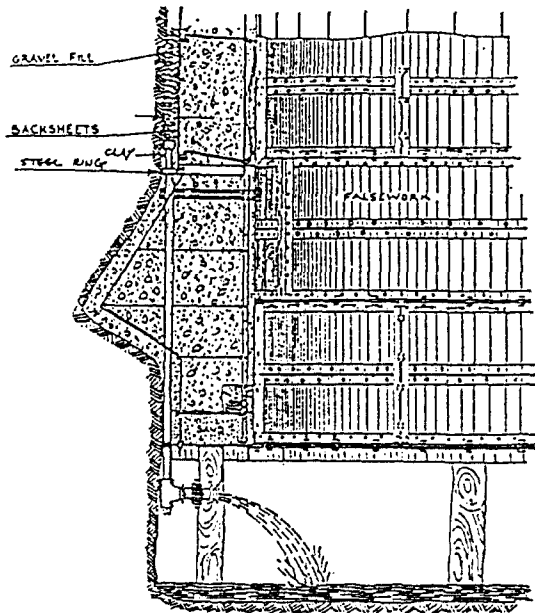
2) CEMENT의 水密性(WATER TIGHTNESS)

현행 NCB(英國石炭廳)의 규정에 의하면, SHAFT WALL에서의 最大許容滲水量은 매 100 ft²의 깊이에서 1 GPM으로 되어 있다. CONCRETE의 透水度는 - 10 M DARCY(1×10⁻⁹M/S) 정도이므로 CONCRETE WALL 자체는 不透水性이나, LINING 시공중의 JOINT가 문제가 된다. 그래서 JOINT에 WATER BAR 또는 PLASTIC SHEET를 설치하지만, 이것만으로는 완벽하게 滲水를 막을 수가 없기 때문에, 出

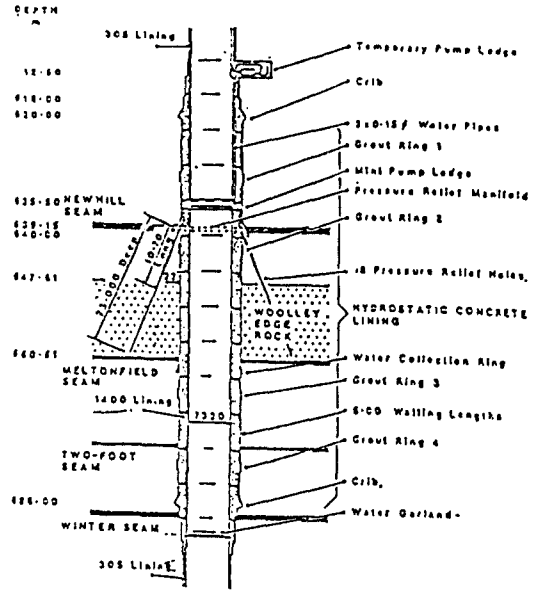
水 洩 所의 LINING后 CONTACT GROUTING을 한다.

LINING 施工時, SHAFT의 암벽에서 出水가 없으면, CONCRETE를 암반까지 직접 打設하여, 접착력에 의해서 CONCRETE WALL을 SELF SUPPORT하게 함으로써, FOOTING 또는 CRIB의 필요성을 없애도록 한다. 그러나 암벽에서 물이 나오는 洩所에서는 직접 打設하면 CONCRETE강도가 떨어지므로, 이때는 (그림 6)과 같이 STEEL FORM과 암벽사이 LINING두께를 확보할 수 있는 위치에 PLASTIC SHEET를 두르고, SHEET 하부에 STEEL RING을 장치한 후, 그 위에 자갈을 쌓고 PIPE를 설치한다. 그리고 그 PIPE를 통해서 CONTACT GROUTING 하기 전까지는 물을 통하게 하고 적당한 시기에 GROUTING을 한다.

GROUTING 작업은 보통 帶水層의 상하부 양쪽에서 시행하여 地下水의 유동을 완전 遮斷한다. 또한 帶水層이 아닌 곳에서도 소량의 出水가 있을 때는 (그림 6)과 같은 장치를 하되, 이때는 굳이 GROUTING까지는 하지 않고 물을 계속 RELIEF한다. 이 물은 CONCRETE WALL에 일정 간격을 두고 설치한 WATER GARLAND에 집수되어 PIPE를 통하여 하부



(그림 6) Ferro-Concrete Backsheeted Lining



(그림 7) Strata Water Pressure Relief System and Concrete Lining Design

INSET(SHAFT의 水平分岐點)까지 유도된다.

3) PRESSURE RELIEF(地下水壓의 制御)

CONTACT GROUTING의 압력은 보통 地下水壓의 1.25배¹⁰⁾까지 올려야 한다. 그런데 SELBY RICCALL NO.2 SHAFT의 -647 M WOOLLEY EDGE ROCK의 帶水層의 경우, $6.47 \times 1.25 = 8.1 \text{ N/mm}^2$ 까지 GROUTING 압력을 올리게 되면, CONCRETE 내에 발생하는 STRESS가 破壞強度에 접근하여 매우 위험하다. 이 위험을 제거하기 위해 개발된 것이 PRESSURE RELIEF이다. 이것은 帶水層 상부에서 (그림 7)과 같이 18~20공을 帶水層 하부까지 천공하여, RELIEF HOLE에서 나오는 물은 측벽에 임시로 설치된 PUMP LODGE에서 지표까지 양수한다. 이 방법에 의해서 地下水壓이 강하하는 정도는, 예컨대 (그림 8)의 경우, 이것은 RICCALL NO. 2 SHAFT, -430 M 심도에서의 PRESSURE RELIEF인데, 10분간 지하수를 흘러나오게 했을 때 300 psi(약 21 kg/cm^2) 강하했다. 따라서 이 PRESSURE RELIEF 방법에 의해서 地下水壓을 억제하면 CONTACT GROUTING PRESSURE를 낮출 수 있고(통상 地下水壓과 같은 壓力으로 GROUTING한다), 그럼으로써 CONCRETE LINING을 안전하게 보호할 수 있다. 또 帶水層의 압

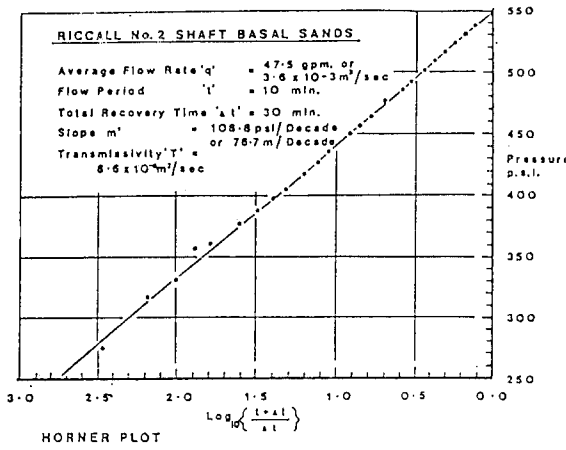
만이 취약하여 GROUTING의 효과를 100% 보장할 수 없고, 그래서 굴착중 예기치 못한 出水사고가 발생할 수 있는 경우, 그 위험을 미연에 방지할 수 있다.

이와 같이 SELBY PROJECT에서는 水理地質調査에, 石油探査에 사용되는 기법(DRILL STEM TEST¹¹⁾)을 도입하여 帶水層의 深度, 豫想 出水量, 그에 따른 止水 工法(FREEZING 또는 GROUTING)의 選擇, LINING의 두께 결정, CONCRETE의 철저한 品質管理, PRESSURE RELIEF에 의한 안전하고, 확실한 시공을 하였다. 그 결과, 종전에는 PLAIN CONCRETE에 의해서 통과할 수 있는 帶水層의 깊이는 SHAFT 내경 24 FEET(7.32 M : 이것은 연간 150만톤의 PRODUCTION SHAFT의 경우, 필요한 통기량 등 모든 요소를 감안했을 때의 제일 경제적인 크기로서 현재 NCB의 標準規格이다)일 때, 460 M가 한계였는데 SELBY에서는 심도 650 M까지 가능케한 것이다.

4) 施工後 管理-計測¹¹⁾

SHAFT 시공후 CONCRETE WALL과 인접한 압

***) DST는 石油探査 전문용역업체가 전담하고 있어서 용역비가 매우 비싸고, 조사결과도 조건에 따라 큰 오차가 발생할 수 있기 때문에 그후 개량된 방법이 개발되었다.¹²⁾



(그림 8) Pressure Recovery Test

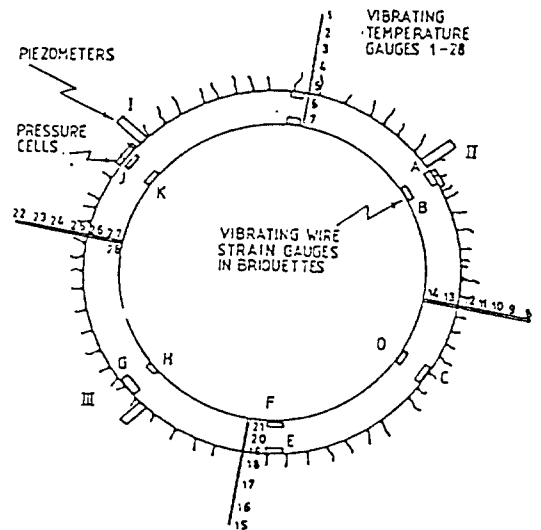
반내의 狀態變移-온도, 수압, 반압 및 STRAIN 등의 상태변이를 계속 計測, 監視(MONITORING)하는 事後管理는 SHAFT의 장기적인 유지관리를 위해서 매우 중요한 일이다. 또한 조사, 설계시 예측된 각종 物性値와 실제값을 비교 검토함으로써 미비한 점을 수정, 보완하여, 이를 다음 PROJECT에 반영하여 기술향상을 도모할 수 있는 것이다. 이하 WHITEMOOR SHAFT의 심도 232 M 지점, BUNTER SANDSTONE층(凍結區間)에서 실시한 計測의 예를 살펴본다.

(그림 9)는 VIBRATING TEMP. GAUGE, PRESSURE CELL, PIEZOMETER, VIBRATING STRAIN GAUGE의 설치위치를 나타낸다. 온도GAUGE 7개가 동일선상에 설치되었으나, 그 중 3개는 CONCRETE WALL내에, 나머지 4개는 암반내에 설치되었다.

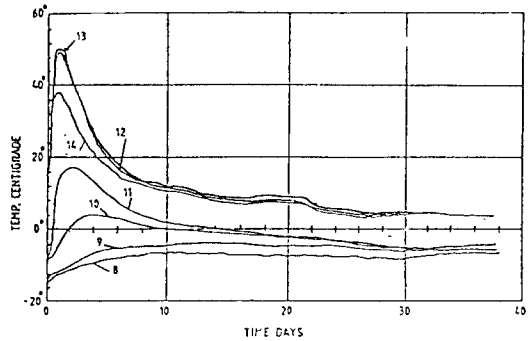
計測結果는 3개의 GROUP으로 대별되는데 ; CONCRETE의 硬化期間의 水化熱에 의한 온도변화, 동결(FREEZING)종료후의 암반내의 온도상승, 그리고 수압상승에 의한 PIEZOMETER, PRESSURE CELL, STRAIN GAUGE등의 변화이다.

(그림 10)은 CONCRETE 打設後 약 40일간의 CONCRETE WALL 및 암반의 온도변화를 나타낸다. GAUGE # 12~13은 WALL 내부에 설치되었고, # 10, 11은 암반내(CONCRETE WALL 외부표면에서 각각 50 cm, 82 cm 위치에 설치되었다.

CONCRETE는 미리 20°C 정도로 가열한 상태이며, 打設後 PEAK 때 약 50°C 까지 올라갔다 서서히



(그림 9) General Layout of Instrumentation Around Whitemoor Mine



(그림 10) Change in Temperature with Time After Pouring of Concrete at Gauges in Array 8-14

내려가나, 12일까지는 10°C 이상을 유지하며 30일 후에도 4°C를 유지한다. 따라서 CONCRETE의 硬化에는 아무런 문제가 없음을 알 수 있다.

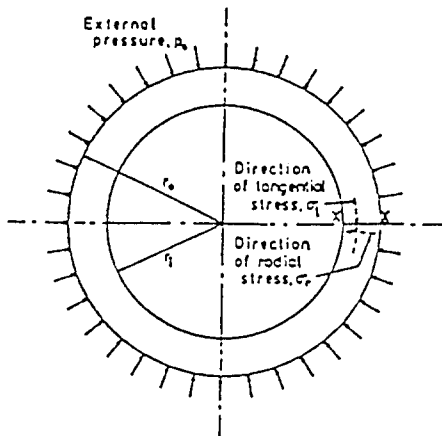
(표 4)는 PRESSURE CELL과 PIEZOMETER의 측정결과이다. 이때 CONCRETE 타설후 13일만에 FREEZING이 끝났고, 209일째 되던 날에 ICE WALL (SHAFT 주변에 FREEZING에 의해서 형성된 地下水의 얼음벽)이 녹아서 地下水의 유동이 시작됐다. 표에서도 200일까지 PIEZOMETER의 값이 거의 0이었던가, 209일에는 0.5 MPa(5 kg/cm²)로 급상승하고, 그후 약간 내려갔다 300일 후에 2.22 MPa(22.2

kg/cm²까지 상승하였다. 이값은 地下水壓과 같다. 한편 PRESSURE CELL의 값(즉 盤壓)은 PIEZOMETER의 값보다 앞질러 상승하다가 300일후에는 같아진다. 결과적으로, 이때 SHAFT CONCRETE WALL에는 단지 水壓만이 작용하고 있음을 알 수 있다.

라) COULOMB PLASTIC STATE에 의한 LINING두께 산정¹³⁾

전회에서 언급한 바와 같이 LAME의 공식은 ELASTIC MODE에 의한 것이므로, TANGENTIAL STRESS(σ_t)는 CONCRETE LINING표면에서 최대이고, 내부로 갈수록 감소된다. LINING두께는 축벽에 작용하는 外壓(水壓)에 의해서 발생하는 σ_r 가 CONCRETE의 破壞強度(\times 안전률)에 도달한 상태에서 구한 것이므로, LINING내부에서는 규정된 安全率(NCB의 경우 2.73)보다 훨씬 큰 값을 갖게 되며, 너무 여유가 많다. 즉 非經濟的이다.

그래서 착안한 것이 PURE PLASTIC FAILURE MODE인데, 이것은 破壞時, CONCRETE의 내부에서 외부표면까지 일정한 SHEARING STRESS, $1/2 \cdot (\sigma_t - \sigma_r)$ 가 작용한다고 보는 것이다. 그러나 이것 역시 CONCRETE의 破壞機構(MECHANISM)를 완전히 반영한 것이 아니다. 즉 JAEGER AND COOK¹⁴⁾에 의하면 CONCRETE가 파괴하게 되는 σ_t 는, σ_r 의 증가에 따라 그 제약을 받아, 같이 커진다는 것이다. 그러니까 이 경우 ELASTIC MODE와는 반대로 CONCRETE내부로 갈수록 σ_t 가 증가한다.(그림 11)



(그림 11) Stress Distribution in a Thick Cylinder

(표 4) Total Stress and Hydrostatic Pressure Readings

Time after concrete pour(days)	Total stress-pressure cells (kg/cm ²)			Hydrostatic pressure-piezometers (kg/cm ²)		
	I	II	III	I	II	III
15	0.37	0.40	0.33	0	0	0
100	0.40	0.42	0.36	0.03	0.05	0.04
209	0.67	0.66	0.63	0.50	0.53	0.56
217	0.68	0.69	0.65	0.48	0.38	0.49
300	2.20	2.11	2.17	2.22	2.20	2.21

이것을 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\sigma_t = UCS + A \cdot \sigma_r \quad (19)$$

여기서, UCS : 일축압축강도

$$A : \tan^2 \alpha \quad (20a), \quad \alpha = \pi/4 + \phi/4 \quad (20b)$$

이러한 조건하에서 CONCRETE LINING(THICK CYLINDER)의 外壓에 의한 ULTIMATE PLASTIC STRESS는

$$\sigma_t = (UCS/A-1) \cdot \langle (r/r_i)^{A-1} - 1 \rangle \quad (21a)$$

$$\sigma_r = (UCS/A-1) \cdot \langle A(r/r_i)^{A-1} - 1 \rangle \quad (21b)$$

이 된다.

$r = r_i$, 즉 LINING의 내부표면에서는

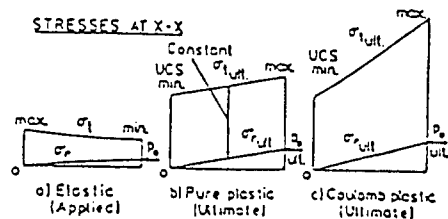
$$\sigma_{rmin} = 0$$

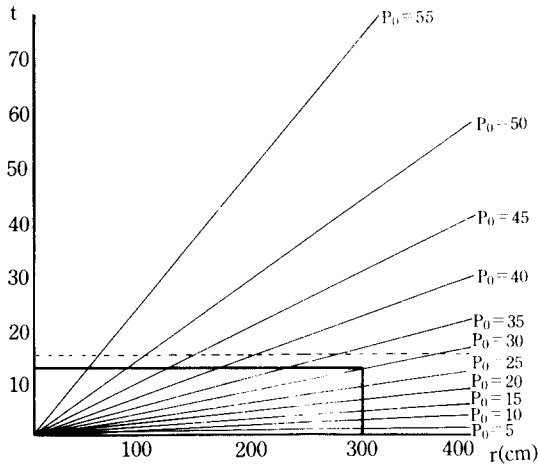
$$\sigma_{tmin} = UCS$$

$r = r_o$, 즉 LINING의 외부표면에서는

$$\sigma_{rmax} = (UCS/A-1) \cdot \langle (r_o/r_i)^{A-1} - 1 \rangle \quad (22a)$$

$$\sigma_{tmax} = (UCS/A-1) \cdot \langle A(r_o/r_i)^{A-1} - 1 \rangle \quad (22b)$$





(그림 12) Lining Thickness

따라서 CONCRETE LINING 전체가 PLASTIC FLOW(즉 파괴된 상태)가 되기 위해서는

$$P_{oult} = \sigma_{rmax} = (UCS/A-1) \cdot \langle (r_0/r_1)^{A-1} - 1 \rangle \quad (23)$$

P_0 : 外壓(水壓)

즉 σ_r 는 LINING의 외부표면에서 최대이며, 그값은 外壓 P_0 와 같기 때문이다.

지금 CONCRETE의 내부마찰각 ϕ 를 30° 라고 하면, 식 (20a), (20b)에서 A는 3이 된다. 또한 안전율은 2.73, $P_0 = 0.01d$, $r_0 = r_1 + t$, $UCS = 1.2f_{cu}$ 로 하면

$$0.01d = 1.2f_{cu}/2.73 \cdot t(t + 2r_1)/r_1^2 \quad (24a)$$

$$\therefore t = r_1 \langle (0.01d \times 2.73 \times 2 / 1.2f_{cu} + 1)^{1/2} - 1 \rangle \quad (24b)$$

지금 LAME의 공식 PURE PLASTIC MODE, COULOMB PLASTIC MODE에 의해서, CONCRETE강도 60 N/mm^2 , 수압 6.35 N/mm^2 (이것은 RICCALL NO.2 SHAFT의 실레이며 실제로는 LAME의 식을 적용했다)일 때의 두께 t를 구하면 각각 1400 mm, 1000 mm, 800 mm****가 된다.

이 때의 안전율을 살펴보면 LINING의 내부표면에 발생하는 ELASTIC TANGENTIAL STRESS는 각각 26.62, 33.13과 38.87 N/mm^2 로서 안전율은 2.26, 1.81과 1.54가 된다.

****) COULOMB PLASTIC MODE에 의한 계산치는 이정인 교수가 발표한¹⁶⁾ TRIAXIAL STRESS CONDITION에 의한 값과 매우 흡사하다.

그러나 CONTACT GROUTING시는 GROUTING 압력을 水壓의 1.25배까지 올린다고 했을 때, 안전율은 다시 1.80, 1.45, 그리고 1.23으로 떨어져 COULOMB PLASTIC MODE때는 매우 위험한 상태에 놓이게 된다. 그래서 다시금 PRESSURE RELIEF의 효능을 실감케 한다.

COULOMB PLASTIC MODE에 의한 시공사례는 영국에서도 아직 없는 것으로 안다. 그러나 그들의 기술수준으로는 능히 가능한 방법이다.

—韓國에서의 실지적용성 검토

이상 靜水頭에 의한 CONCRETE LINING의 두께 산정에 대해서 개략적으로 논하였거니와, 그럼 현실적으로 우리나라에서 적용할 수 있는 방법은 무엇인가 하는 점이 중요한데, 상기 3가지 방법중에서 LAME의 방법은 安全도가 제일 높기 때문에 실용적이라고 할 수 있으나, 만약 현장의 施工管理가 매우 우수하다고 하면, PURE PLASTIC MODE까지는 적용할 수 있을 것이다.

그 공식은

$$0.01d = f_{cu}/SF \cdot \log(1 + t/r_1) \quad (25a)$$

$$t = r_1 \langle e^{(SF \times 0.01d)} - 1 \rangle \quad (25b)$$

SF : 安全率

이다.

마) 盤壓(ROCK LOAD DUE TO INCOMPETANT ROCK)에 의한 LINING두께 산정¹⁵⁾

盤壓에 관한 연구는 지금까지 많은 발표가 있었지만, NCB에서 채택하고 있는 것은 다음과 같다.

$$P_c = dEc \langle 1 - (r_1/r_0)^2 \rangle / 2r_1 \quad (26a)$$

$$P_1 = 2\gamma a / 10^3 A (f-2) \times (f-2/f)^{1/2} \quad (26b)$$

여기서

a : SHAFT의 굴착반경(mm)

df : 굴착표면에서의 반경방향의 변위량(mm)

$$df = vEf \times \Delta r, \Delta r = r_1 - a$$

d : LINING표면에서의 반경방향의 변위량(mm)

v : 암반의 POISSON비

Ef : 암반의 평균과피 STRAIN(%)

Ec : LINING CONCRETE의 탄성계수(N/mm²)

r₁ : SHAFT LINING의 내경(mm)

r₀ : SHAFT LINING의 외경(mm)

- γ : 암반의 밀도(N/mm²)
 P_c : LINING 위 발생하는 REACTION(STRESS)
 (N/mm²)
 P_i : 반압(N/mm²)
 A : 비례상수의 한계치 = $Kd(\text{최대치 } \tan \phi)$
 K : 비례상수
 f : 수직응력의 수평응력에 대한 RANKIN RATIO
 $r_1 = a < f/(f-2) >^{1/2}$ (27)
 $f = \tan^2(45 + \phi/2)$, 또는 $f = 1 + \sin\phi/1 - \sin\phi$

이 방법은 SHAFT 주변의 岩盤이 MORE의 이론에 의한 STRESS의 영향하에, PLASTIC EQUILIBRIUM (소성평형상태)에 있을 때의 조건을 전제하여 도출한 것이다.

이에 대한 검토는 다음 회에 하기로 한다.(이하 다음 회에 계속)

3. 부 록

수갱의 LINING 두께는 (정수압의 경우) 다음 공식에 의거, 구할 수 있다.

$$t = r \left[\sqrt{\frac{\sigma/SF}{\sigma/SF - 2P_o}} - 1 \right]$$

- t : LINING 두께(cm)
 r : 수갱 내경 (FINISHED RADIUS : cm)
 σ : CONCRETE 압축강도(kg/cm²)
 SF : 안전계수
 P_o : 외압(kg/cm²)

예컨대, CONCRETE 압축강도 300 kg/cm², SF 2.5의 가정하에, 수갱 내경 300 cm, 외압이 30 kg/cm²인 경우의 LINING 두께는

$$t = 300 \left[\sqrt{\frac{300/2.5}{300/2.5 - 2 \times 30}} - 1 \right]$$

$t = 124.2$ cm가 된다.

참고문헌

- 1) C.T. Massey "Selby reaches maturity" Coll. Gurdian, Aug. 1983
- 2) J.N. Adamson & R.A. Scotts, "Borehole Investigation and Logging Methods in Shaft Sinking" The Min. Engr. Jan. 1973 Paper No.4458
- 3) 이용직, "지하유류저장시설의 수리지질조사에 대하여" 터널과 지하공간 암반역학회지 1991 창간호 제 1권 제 1호
- 4) J.F. Tunnickliff & S. Keeble, "Shaft Sinking at Selby" The Min. Engr. Aug. 1981 (4830)
- 5) Weehuizer J.M. (1959) "New Shafts of The Dutch State Mines" Proc. Symp. Shaft Sinking and Tunnelling. London Inst. Min. Engr.
- 6) Auld F.A., "Concrete in Shafts and Tunnels" Part I, II, Concrete, June and July 1983
- 7) J.C. Black & F.A. Auld, "Current and Future UK Practice for The Permanent Support of Shaft Excavations" Int. Journal of Min. Engineering. 1985. 3.
- 8) M.J. Bell, "The Design of Shaft Linings in Coal Measure Rocks" Proc. Symp. on Strata Mechanics, Newcastle upon Tyne 1982
- 9) E.G. Atherton & W.S. Garnet, "The History of Cementation of shaft sinking" Proc. Symp. Shaft Sinking and Tunnelling, London Inst. Min. Engr. (1959)
- 10) J.B. Fortheringham & J.C. Black, "Groundwater Pressure Relief in Shaft Sinking" The Min. Engr. Aug. 1983 (4931)
- 11) P.F.R. Altounyen, M.J. Bell, I.W. Harmer, C.J. Happer, "Temp. Stress & Strain Measurements during and after Construction of Concrete Lining in Frozen Ground" Proc. 3rd. Int. Symp. of Ground Freezing, Hanover, New-hampshire, June 1982
- 12) Daw G.P. & Scott R.A., "Hydrogeological Testing for Deep Shafts and Tunnels" Bulletin of The Int. Assoc. of Engineering Geology No. 26-27 Paris 1983
- 13) F.A. Auld, "Ultimate Strength of Concrete Shaft Linings and its Influence on Design" Proc. Symp. on Strata Mechanics, Newcastle upon Tyne, 1982
- 14) J.C. Jaeger & N.G.W. Cook, "Fundamentals of

- Rock Mechanics” PP.87, PP.395 Methuen & Co.
Ltd. 11 New Fetter Lane London
- 15) A. Tait, “Shaft Sinking Techniques” Mining
Technology. London. April 1983
- 16) 이정인 “원형수갱의 콘크리트축벽 두께산정에
관한 연구” 대한광산학회지 Vol.15, PP.290-301