

豎坑工事的 技術的 問題에 對해서(II)

李 隆 植¹⁾

On the Technical Problems in the Shaft Works (II)

Yung Jik Rhee

1. 序 言

前回(터널과 지하공간, 한국암반역학회지 제1권 제2호 pp. 158~167)에는 豎坑掘下時 直面하는 岩盤力學的인 問題를 다루었다. 勿論 이 分野도 앞으로 繼續 檢討해 나가겠지만 그에 앞서 먼저 豎坑工事的 本質的인 分野부터 考察해 보기로 한다.

豎坑이란 作業場이 垂直方向으로 下降하는 特性 때문에 水平 터널과는 判異하게 다른, 技術的으로 여러가지 어려운 問題가 派生된다.

첫째는 掘下用 捲揚機(sinking winder)의 容量決定 問題이다. 水平터널에서는 運搬用 truck의 대수만 늘리면 문제는 쉽게 풀리지만 豎坑에서는 이 sinking winder 容量이 바로 掘下能率과 直結되므로 이 選擇은 여러가지 factor를 고려하여 신중히 결정해야 한다. 또한 이와 聯關하여 最適 穿孔長, 버력 處理方法의 선택도 重要한 問題이다.

둘째는 발파작업인데 수갱에서의 不發은 매우 위험하다. 쉽게 얘기하자면 만약 불발이 생겨서 이를 처리할 때는 마치 地雷발을 밟고 일하는 것과 비슷하다.

그러기 때문에 발파방법에 각별히 유의해야 하며 특히 수갱의 직경이 커서 孔數가 많거나 豎坑내에 出水가 많을 때 유의해야 한다.

셋째로 만약 수갱굴하중 다량의 出水사태가 발생하면 매우 심각하다. 즉 수평터널에서는 대용량 pump 설치의 아무 어려움이 없지만 좁은 수갱내에서는 장

소의 제약을 받기 때문에 대형 pump 설치의 매우 곤란하여 예전에 cementation(pregrouting)이나 freezing(동결공법) 등의 止水에 대한 기술이 개발되기 전에는 특히 shaft flood(豎坑의 水沒사고) 때문에 굴하중의 shaft를 포기하지 않으면 안되는 사례가 많았다. 그래서 이 지수작업이 매우 중요한 비중을 차지한다.

넷째는 수갱이기 때문에 상부에서 어떤 물체(사람, 기자재, 암괴 등)가 낙하하면 사람의 경우 致命的인 事故이며(Fatal accident), 그것도 地下 作業 中에서 가장 처참한 最後를 마쳐야 하고 기타 物體의 落下는 scaffold, 作業員에 重大한 災害를 惹起한다. 따라서 豎坑作業은 무엇보다도 保安에 各별한 注意를 해야 한다.

以下 上記한 技術的 問題를 풀이해 나가기로 한다. 먼저 豎坑 掘下工事的 概要를 簡單히 說明한다.

2. 豎坑 掘下工事的 種類와 施工方法

2.1 種類

— 正常掘下

— 追加掘下(deepening) : 卽히 어떤 深度까지 施工된 豎坑의 下部를 追加로 掘下하는 경우

— 斷面切擴(widening) : 卽히 施工된 豎坑이 捲上容量 또는 通風量을 늘리기 위하여 斷面(直徑)을 增大하는 경우

— 特殊作業 : 築壁의 變更

*1993년 5월 접수

1) 정회원, (주)汎洋엔지니어링 기술고문

(例) Brick lining을 concrete lining으로 變更하는 경우

(例) 特殊한 理由 때문에 築壁 을 補強하는 경우
Cast-steel tubing으로 補強

2.2 施工方法

- 掘鑿과 lining의 分離施工.

(例) 石公 長省鑛業所 No. 1 shaft

- 交互施工: 掘鑿과 lining을 交互로 施工.

- 同時施工: 掘鑿과 lining을 同時施工.

(例) 南 Africa, 서독 등.

3. 수갱 굴하능률 검토

수갱 굴하 능률을 산정하는데 필요한 제요소는 다음과 같다.

1) 심도, 2) 工期, 3) 捲上速度, 4) Kibble 용량, 5) Grab(loader)의 1회 적재량, 6) 坑口 및 坑底의 버럭 처리시간, 7) 천공시간, 8) 기타작업-止水작업 등

위 요소 중에서 kibble 용량, grab 용량 등은 수갱의 굴착직경에 의해서 결정되는데 현재 일반적으로 사

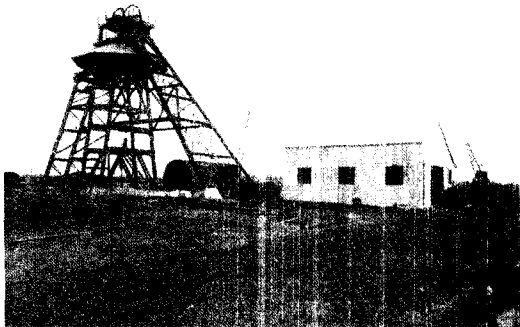


Fig. 1. 수갱굴하용 Tower, 수갱굴하화 동시에 영구시설 (Permanent tower)을 설치하기 위해서 보호장치를 했음.

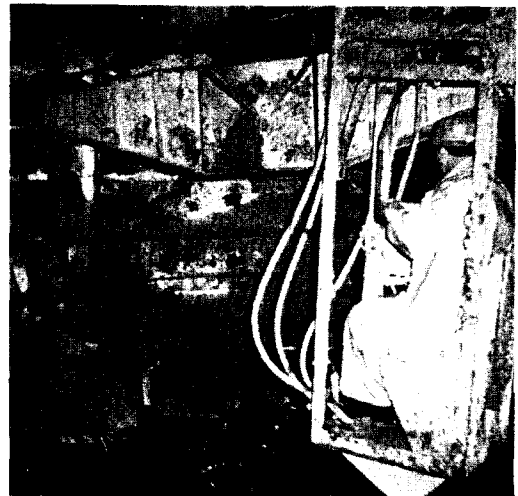


Fig. 3. Grab 운전대.

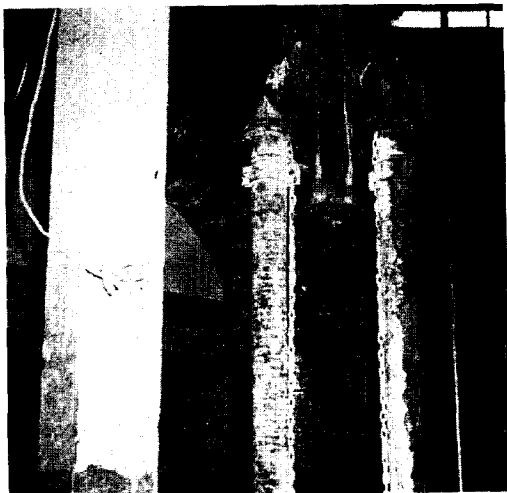


Fig. 2. Concrete 타설용 Pipe의 끝부분.



Fig. 4. Grab 경석삭법.



Fig. 5. 갱저의 작업광경.

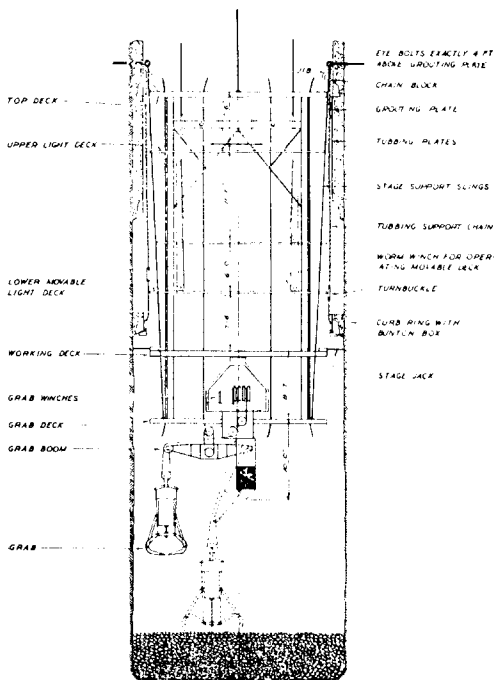


Fig. 6. Sinking stage for 24ft diameter shaft.

용되는 cactus grab의 용량은 0.3~0.5 m³이며 kibble 용량은 1.5~5 m³ 정도이다.

천공 작업은 근래 인원 절감을 위해서 수경용 jumbo가 보편화되었으며 천공장은 2~3.5 m 정도이다.

따라서 수갱의 굴착직경, 천공장이 결정되고 장비가 선정되면, 正味 천공시간과 버럭처리시간은 일단 예상할 수 있고 lining 작업과 기타 작업(배관, 지수, 각종 준비 작업) 시간도 예상할 수가 있으므로 일단 굴하속도의 추정이 가능하다.

그러나 전체 버럭 처리시간은 갱저에서의 정미 적재시간 보다는 kibble 운행시간에 좌우된다. 즉 후에 설명하는 kibble 운행시간 T₁보다 길어지면 전체 버럭처리시간은 지연되는 것이다. T₁보다 길어지지 않게 하기 위해서는 갱저에서 kibble에 적재가 끝났을 때, scaffold상에 empty kibble이 대기하고 있어야 하며, 대기시간이 0일 때의 심도를 限界深度라고 한다.

이 한계심도는 권양기의 rope speed에 의해서 결정된다.

따라서 한계심도 상부에서는 정미 적재시간에 根據한 굴하능률에 의해서 계획대로 굴하속도를 유지할 수 있으나, 한계심도 하부에서는 굴하능률이 점점 저하된다.

따라서 이 한계심도를 어느 지점에 두느냐에 따라 전체적인 굴하능률이 결정되는 것이다. 이것은 工期, 경제성, 지수작업의 빈도 등에 의해서 결정된다.

3.1 한계심도의 계산

(1) 권양기의 권상능력

가. Kibble의 1회 운행시간 : T(단위 : 초)

t_0 : 갱구(상부) 조작(tipping)에 요하는 시간(단위 : 초)

t_0' : 갱저(막장) 조작에 요하는 시간(단위 : 초)

l_1 : 갱구 減速 區間

v_1 : 갱구 감속 구간의 속도(평균)

l_2 : Kibble 운행 全速 區間

v_2 : 권양기 rope speed

l : 갱저 감속 구간

V : 갱저 감속 구간 속도(평균)

$$T = \{2 \times (l_1/v_1 + l_2/v_2) + t_0 + t_0'\}$$

나. 시간당 권양 회수

$$P = 3,600/T \text{ (회/시)}$$

다. 시간당 권양량

$$V = PQ \text{ (m}^3\text{/시간)} \quad Q : \text{kibble 적재량}$$

(2) Grab의 버럭처리 능력

가. Kibble당 적재 소요시간 : T'(단위 : 초)

C_0 : Grab 1회 적재 소요시간

g : 1 Kibble당 적재회수(Q/r)

r : Grab 1회 적재량

$$T' = C_0 \cdot g$$

※ r 의 수치는 보통 grab 적재용량의 80%로 본다.

Q 는 kibble 용량의 90%를 본다.

나. 시간당 적재 kibble 수 : G

$$G = 3600/T' = 3600/C_0 \cdot g$$

다. 시간당 적재량 = V

$$V = G \cdot Q = (3600/C_0 \cdot g) \cdot Q$$

(3) 한계심도

앞서 설명한 바와 같이 적재시간과 kibble의 운행 시간이 동일할 때의 심도를 한계심도라고 하는데 이때 kibble의 운행시간은 kibble이 scaffold를 통과하여上昇해서 갱구에서 tipping을 하고 다시 scaffold 상부까지 도착하는 시간이다. : T_1

따라서 한계심도는 $T_1 = T'$ 일 때의 L_2 이다.

$$T_1 = \{2 \times (l_1/v_1 + l_2/v_2) + t_0\} \text{이므로}$$

$$\{2 \times (l_1/v_1 + l_2/v_2) + t_0\} = C_0 \cdot g$$

$$l_1 + l_2 = H \quad l_2 = H - l_1$$

$$2 H/V_2 = C_0 \cdot g - t_0 - 2(l_1/v_1 - l_2/v_2)$$

$$H = \{1/2(C_0 \cdot g - t_0) - l_1/v_1\}v_2 + l_1$$

여기서 l_1 은 보통 20m 내외이면 평균속도는 1.5 m/sec 정도로서, 미리 정할 수 있는 상수이므로 V_2 즉 rope speed를 결정함에 따라 l_2 를 구할 수 있다. Single winder의 경우 rope speed가 3 m/sec이고 kibble 적재시간이 5분 정도이면, 한계심도는 300 m를 약간 상회하며 single-dual winder(단동권양기 2대)의 경우 약 2배가 된다.

Double-drum winder의 경우는 갱구와 갱저에서의 조작시간이 같지 않기 때문에 single-dual의 경우보다 심도에 따라 차이는 있으나 60~70% 정도의 능력을 갖는다.

(4) 측벽(lining) 작업

Concrete lining의 경우 concrete kibble에 의해서 재료반입을 했을 때에는 역시 버럭 적재시와 같은 한계심도를 생각할 수 있었으나, 근래에는 pipe에 의해서 운반하기 때문에, 여기서는 고려하지 않았다.

3.2 굴하능률산정

다음은 한계심도 상부에서의 굴하능률 산정의 한 예를 소개한 것이다.

(1) 굴착작업

가. 천공작업

천공수 63공, jumbo 2대, 천공장 2.5 m

천공속도 1 m/분

1공당 천공시간 200초

전천공시간 200초 × 63/2 = 1050초 ≈ 1시간

45분

천공 준비 30분

장약 발파 1시간

나. 버럭처리

발파 유효장 2.5 m × 85% = 2.1 m

파쇄 버럭량, 38 m²(굴착단면) × 2.1 m × 1.7 ≈ 135.7 m³

kibble 적재수 135.7 m³ / (3 m³ × 0.9) = 50.2 ≈ 50

Grab 적재시간 : Grab 1회 적재량 : 0.5 m³

1회 적재시간 : 40초

3 m³ kibble 적재회수 7회

{(40초 × 7) + 40초} × (50 + 10)

= 19,200초 = 5시간 20분

※ 갱저 kibble 운행시간 : 40초

※ 적재 개시 및 종료시의 10 kibble은 적재시간을 배로 본다.

가지보 30분

Grab 하강, 준비 1시간

재료 반출입 15분

배연, 부석처리 20분

pipe 연장 20분

계 11시간 30분

1일 굴착 cycle의 고장, 휴계시간을 0.5시간/cycle로 보면

1 cycle 총 시간은 11시간 30분

24시간 ÷ 11시간 30분 = 2.07 cycle

1일 굴착량 : 2.1 m × 2.07 = 4.4 m

(2) 측벽 작업

다음은 형틀(steel form)을 갱구에서 반입하여 조립하고, concrete kibble을 사용해서 타설하고 후에 형틀을 해체하여 갱구로 반출하는 재래식 방법에 의한 작업시간을 산정한 예이다.

준비작업 50분

형틀반입, 조립, 중심측량 1시간 50분

Concrete 타설 벽 두께 55 cm

형틀 2단 1.2 m × 2 = 2.4 m



Fig. 7. 형틀의 key plate.



Fig. 9. 암벽과 형틀 사이에 scribing board 설치.



Fig. 8. 형틀의 최저부 설치.



Fig. 10. 콘크리트 타설.

1 m당 타설량	11.3 m ³
총 타설량	11.3×2.4=27.14 m ³
Concrete kibble 용량	1.6 m ³
27.14 m ³ ÷ 1.6 m ³ = 17회	
1회 타설시간	300초
총 타설시간	300초×17=1시간 25분
kibble 교환 후 처리	55분
계	5시간
1일 측별 cycle	

cycle 당 0.5시간의 고장 휴계시간 가산
 24시간 ÷ 5.5시간 = 4.4 cycle
 1일 측벽장
 2.4×4.4 = 10.6 m
 - 굴착 측벽을 합친 월간 굴하심도
 1회 측벽높이를 30 m로 했을 때 이를 1 step라고
 하고 1 step마다 형틀 해체 반출, 갱지 배수, 이관
 기타작업에 3일 소요된다.
 따라서 1 step당 총 소요일수는

(30 m/1일 굴하장)+(30 m/1일 착별장)+3일
 월 26일 가동할 때의 월간 굴하장은 62.2 m이다.

(3) 외국에서의 굴하실적 예

(2)의 예는 극히 고전적인 경우이고 근래에는 측벽작업에 있어서 형틀을 일일히 반출입하지 않고 lining wall에 sling하여 측벽작업을 한다.

또한, 1 step을 5~7 m 이내로 단축(short-step)하고 천공, 버럭치리 시간의 단축 기타 작업시간을 작업방법의 개선, 장비개량 등으로 최소화한다.

그 결과 일본에서는 최대 월간 160 m의 굴하실적을 올린 바 있고, 수갱굴하의 선진국인 남 Africa에서는 월간 300 m 이상 굴하한 실적이 있다.

한편 우리나라의 그간 굴하 실적을 보면, 1980년 초반에 장성광업소 No. 2 shaft의 경우, 3 boom jumbo에 의한 천공, 0.6 m³ 용량의 cactus grab와 3.5 m³ 용량의 kibble을 사용하고, 측벽은 steel form을 측벽에 sling하여 이동강하하였고, concrete pipe을 사용하여 타설하였을 때(굴착직경 약 7.2~7.5 m) 월간 최고 50 m의 굴하, lining 실적을 올린 바 있다.

4. 발파방식

일반적으로 tunnel 굴착이나 shaft 굴하시의 발파 방법은 직렬(series) 방식이 통상적인 방법이다.

그러나 발파공수가 100공 이상일 때 또는 출수량이 많아서 공저에 물이 고일 때 암석이 단단해서 각선이 손상되기 쉬울 때 물이 염분이 함유되어 있을 때(saline water)는 50~60공 정도에서도 불발이 생기는 경우가 있다.

Shaft 굴하시의 불발은 tunnel 굴착시와 그 성격이 판이하게 달라서 매우 위험하다. 불발공이 많을 때는 발파후 버럭의 높이로서 어느 정도 예측할 수 있으나 불발공 수가 적을 때는 거의 불가능하다.

더욱이 버럭치리를 grab 등 장비에 의존할 때는 그 위험도는 더하다.

이를 해결하기 위해서 병렬발파법을 도입하게 되었다.

먼저 직, 병렬시 회로의 저항을 살펴보면 다음과 같다.

직렬시 회로의 저항치

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

R_1 : 뇌관부의 저항치

$$R_1 = n \cdot r \quad n : \text{뇌관개수}$$

r : 뇌관 1개의 저항치

R_2 : 모선부의 저항치

$$R_2 = r_H + r_B \quad r_H : \text{보조모선 저항치}$$

r_B : 모선 저항치

R_3 : 점화기의 저항치

Condensor식일 때는 0Ω

병렬시 회로의 저항치

$$R = r/n + R_2 + R_3$$

위식에서와 같이 병렬식일 때는 발파공 수가 많을 수록 갱저에서의 결선부분의 저항치는 적어진다.

실제 뇌관 1개의 저항치는 1Ω 미만이므로 지금 발파공이 100공일 때 직렬식에서는 약 100Ω인데 비해서 병렬식일 때는 반대로 1/100 Ω밖에 안된다.

따라서, 직렬식일 때 공저에 물이 있으면 전류가 물을 통해서 단락(short-circuit)할 확률이 높다. 또한 직렬식에서는 뇌관의 특성차이 때문에 電橋切斷 시간이 빠른, 어떤 뇌관이 폭발할 때 다른 뇌관에 충분한 전류가 흐르지 않으면, 그 회로에는 불발이 생긴다 (Fig. 11 참조).

직렬회로에서는 이러한 현상이 일어날 수 있으나 병렬회로에서는 각각의 뇌관에 거의 일정한 전류가 흐르기 때문에 불발이 생기지 않는다.

병렬회로에서의 전압, 전력

$$V = nI \frac{r}{n} + R_2 + R_3$$

발파공수 = 100공

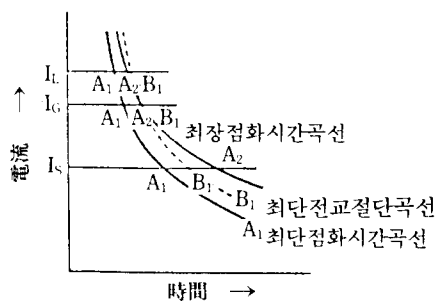


Fig. 11. 최단전교절단시간과 전류치와의 관계.

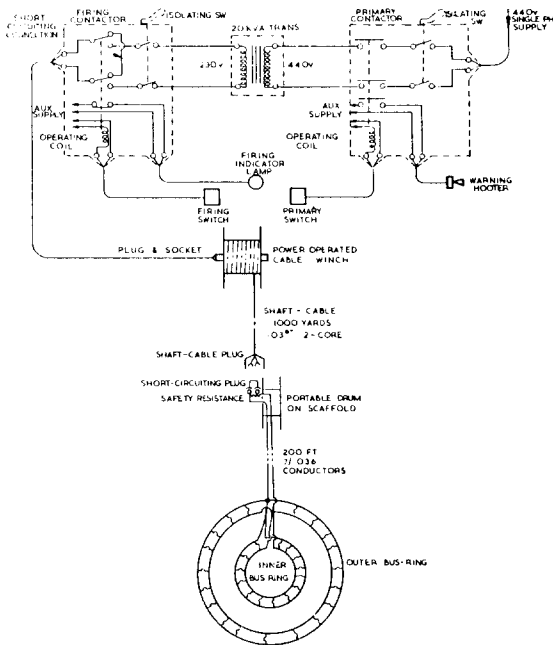


Fig. 12. Circuit for parallel firing from the mains in shafts.

뇌관 저항 0.85Ω 따라서, (r/n) 즉, 결선 회로의 저항은 무시해도 된다. 모선과 발파 장치의 회로저항을 1Ω 정도를 유지하도록 cable, 보조모선, bus-bar

wire의 규격을 정한다.

따라서 $I = 1A$ 라고 하면

$$V = 100 \text{ V}$$

$$P = IV \text{ 전력을 약 } 10,000 \text{ W} = 10 \text{ KW}$$

실제, 100공 정도의 공수에서는 공급전압 AC 220 V, 15 KVA 변압기를 사용한다.

참고문헌

- 1) Shaft Sinking Practice in South Africa, H. Macconachie, Proc. of the Symposium of Shaft Sinking and Tunnelling, 1959. Institution of Min. Engrs.
- 2) Blasting Practice in Shaft Sinking G. Fish, R. Westwater. Proc. of the Symp. of Shaft N Tunnelling, 1959.
- 3) 發破ハンドブック 工業火藥協會編 1976.
- 4) 立抗開さく 能率の算定について. 御厨 公 九州炭礦技術 連盟誌, 第13卷 3號, 1966.
- 5) Work Study Report at Cardowan No.3 Shaft, Scottish Div. The Cementation Co. Ltd Bently Works, Doncaster. 1959.
- 6) ICI Winsford Ventilation Shaft 굴하공사 실습보고서, 이웅직, 1966. (다음호에 계속)