

# 노르웨이의 수중수로관통 발파 기술

## Norwegian Underwater Tunnel Piercing

김민규  
Min-Kyu Kim  
한국지질자원연구원

### 초 록

수중수로관통 발파는 수로터널을 호수 바닥에 근접하도록 터널을 뚫고 최종적으로 플러그를 발파하여 수로와 호수 바닥을 연결시키는 발파 기술로서 수력발전에서 경비와 공기를 단축시킬 수 있는 매우 유용한 기술이다. 이 기술은 본질적으로는 수중발파와 동일하지만 완벽한 성공을 보장하기 위한 별도의 조치를 해야하고 수갱의 수문과 여타의 설비를 보전할 수 있는 대책을 강구하여야 한다. 논문에서는 노르웨이에서는 보편화되어 있는 이 기술의 핵심 내용과 적용의 예를 실어 소개하고자 한다.

**핵심어** : 수중수로관통발파, 플러그, 수력발전, 수중발파

### 1. 서 론

노르웨이는 대륙의 융기와 빙하의 침식으로 높은 고산과 고원지대와 깊은 협곡으로 이루어져 있는데 고산과 고원지대에도 빙하의 침식으로 형성된 깊은 호수들이 많고 이 호수들은 자연적으로 조성된 훌륭한 저수지로 수력 발전에 값싼 용수를 공급하는 역할을 하고 있다.

수중수로관통 발파는 호수 혹은 해저 바닥에 근접하도록 터널을 뚫고 최종적으로 막장을 발파하여 수로와 호수 혹은 해저 바닥을 연결시키는 발파 기술로서 수력 발전에 있어서 매우 유용한 기술이다.

이 기술을 적용하면 호수나 해저의 물길을 유도하거나 막아서 지반을 굴착할 수 있는 공간을 확보하는데 소요되는 다대한 인력, 경비와 시간을 절약하고 또 안전을 확보할 수 있다.

수중수로관통 발파는 노르웨이에서 수십 년이 넘도록 시행되어 오면서 발전해온 발파 기술로 그동안 보고된 횟수도 700회를 넘는다.

기본적으로 적용되는 발파는 터널 막장에서 최종발파가 일어날 때 수압을 이겨내야 하기 때문에 발파의 방법은 수중발파와 거의 유사하다. 발파가 시행되면 접근한 수로 터널을 통해 막대한 발파 충격 공기압이 생성되는데 이 공기압을 수갱을 통해 대기로 개방시키는 개방 방식과 갱구를 일시적으로 막는 밀폐 방

식이 있다. 수중수로관통 발파의 절차는 터널 시스템의 설계, 터널의 굴착, 최종발파 설계 및 발파로 이루어진다.

## 2. 기술의 개요

수중수로관통 발파는 보통 수심 100m 정도에서 이루어지는데 간혹 가다 실패를 하기도 하는데 이 실패확률은 수심이 깊을수록 증가한다. 수중수로관통 발파가 실패하게되면 경제적 손실이 매우 크고 심지어는 인명 피해가 생기기도 하다. 그러므로 성공을 최대한 보장하기 위해서는 수중수로관통 발파에 대한 복잡한 여러 부분을 잘 이해할 필요가 있다.

수중수로관통 발파가 적용되는 입수터널의 개략은 그림1과 같다. 입수터널에서 발파가 이루어지는 최종 막장을 플러그(plug)라고 한다. 이 플러그 아래에는 발파후 폐석을 수집하기 위한 공간을 굴착한다. 발파 후 폐석을 이렇게 수집하지 않으면 발파 후 폐석에 작용하는

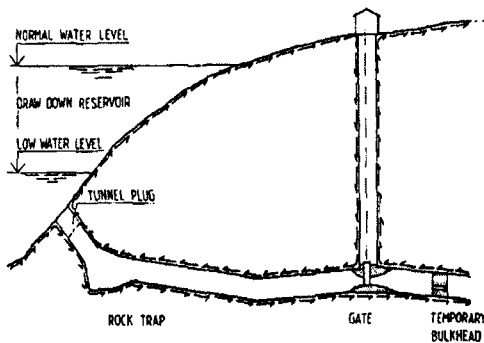


그림 1. 수중수로관통 발파가 적용되는 도수로 터널의 개략도

수압으로 폐석이 떠밀려 가면서 수로터널을 메우거나 혹은 수갱에서 작동되는 수문을 파손시킬 우려가 있다. 그리고 수로터널 아래쪽에서 공사가 있을 경우에는 입수터널 부분을 격리시키는 임시 차폐문을 설치하기도 한다.

## 3. 수중수로관통 발파 설계와 시공순서

### 3.1 저수지 평가

수중수로관통 발파 시스템은 저수기능을 갖는 호수와 도수로터널을 연결시키는 방식이기 때문에 먼저 호수가 갖는 저수지로서의 기능을 평가하게 된다. 이 평가는 매우 간단한 것으로 다음과 같다.

- 1) 갈수기 때 수면의 최저 위치
- 2) 호수 바닥 면의 지형으로 파악되는 호수의 크기
- 3) 호수면이 낮아질 경우 가능한 호수사면 붕괴의 위험 여부

### 3.2 지질조사

지질조건은 수중수로관통발파의 위치를 결정하는데 중요한 변수가 된다. 지질조사에서는 관통지점의 암질과 퇴적층을 형성하는 흙의 두께를 파악한다. 암질평가에서는 기반암 자체의 물성과 불연속면의 특성과 빈도를 동시에 고려한다. 대체적으로 기반암 자체는 안정성을 유지하고 누수를 방지할 수 있을 정도의 강도와 불투수성을 갖고 있어야 한다. 보통 암중에 따라 고유한 물성과 불연속면의 특성을 유지하고 있으므로 기반암의 구성하는 암종을 파악하게 된다.

단층과 파쇄대가 복잡하게 발달된 지역은 가능한 한 피해야 한다. 암질이 낮은 경우 발

생하는 안정성과 누수의 문제는 기술적으로 해결할 수 있지만 비용이 많이 소요하게 되므로 가급적 피해야 한다.

플러그 위의 퇴적층은 얇은 수록 좋고 얇은 실트층이 있을 경우에는 균열면을 통해 들어오는 누수를 방지하고 천공작업 수월해지는 장점이 있어서 퇴적층의 유무는 문제가 되지는 않지만 퇴적층의 두께가 터널 공동의 직경 정도가 최대 허용되는 퇴적층의 두께이다.

### 3.3 플러그의 위치 결정

터널과 호수지대의 지질조사와 평가가 끝나면 플러그의 위치와 호수 면으로부터의 수심을 결정하게 된다. 다음에는 수중수로관통발파의 방식과 선정된 수심에서의 위치를 결정하게 되는데 다음과 같은 사항이 필요하다.

- 1) 호수 바닥면과 호수면이 닿는 주변의 호수가에 대한 측척이 크고 정밀한 지도
- 2) 파쇄대, 균열과 연약한 퇴적층을 등기저암의 정보를 알 수 있도록 해주는 탄성과 탐사자료
- 3) 연약한 퇴적층의 구조와 밀도 등에 대한 시험
- 4) 수중수로관통 발파가 시행될 지점에 대한 기저암을 확인할 수 있는 시추와 이에 대한 자료

### 3.4 플러그 주변의 암반 보강 : 그라우팅

지도와 탄성과 자료를 근거하여 수로터널의 위치와 방향을 정하고 이 지점에 대한 시추자료를 바탕으로 하여 연약한 퇴적층의 규모와 조성을 근거하여 최종적으로 수중수로관통발파를 시행할 위치를 정한다. 이 위치는 기저암이 가장 견고하고 퇴적층이 가장 없는 곳으

로 정해지며 주변으로부터의 잡다한 퇴적물들이 수입되지 않도록 사면의 경사가 유리한 곳을 선정한다.

그럼에도 불구하고 플러그를 구성하는 암반에 균열이 있거나 누수가 있으면 그라우팅을 하여 보강을 한다.

플러그 위치를 보강하기 위해서는 체계적인 조사를 통해 누수의 가능성을 조사한다. 이 조사에서는 조사용 선진 천공을 별도로 하게 되는데 필요하다고 인정되는 개소가 대량의 누수가 예상되는 곳에서는 집중적인 조사를 하게된다. 보통 조사용 선진공의 길이는 24~30 m 정도이다.

터널 굴착 중에 누수가 감지되면 발파 전에 급속 고착식 그라우팅(fast-setting grouts)으로 지반을 보강한다. 터널 굴착에서 그라우팅 직후 바로 천공과 발파를 할 수 있도록 급속 고착식 그라우팅을 한다. 여기서는 급결제가 포함된 시멘트와 입자가 굵은 충전재료와 필요할 경우 폴리우레탄을 첨가하게 된다. 그러나 플러그 지점에서는 이러한 보통의 그라우팅으로는 성공적인 효과를 거두기가 어렵다. 플러그 지점을 보강하기 위해서는 일정량의 폴리우레탄을 사용하고는 급속 고착식 방식으로 터널 주변의 전면에 그라우팅을 하게 된다 (그림 2 참조). 그라우팅 공의 길이는 대략 15 m 정도로 한다.

그라우팅 압력은 낮을수록 좋지만 그라우팅 재료가 불연속면을 이루는 균열 속으로 충분히 침투할 수 있는 압력은 유지해야 한다. 그라우팅의 압력은 지질조건과 지하심도에 따라 다르지만 보통 20~60 bar 정도를 유지한다. 현재까지 보고된 수중수로관통 발파에서 이러한 그라우팅의 예가 300회 이상 보고되고 있다.

수중수로관통발파에서 터널과 호수를 관통

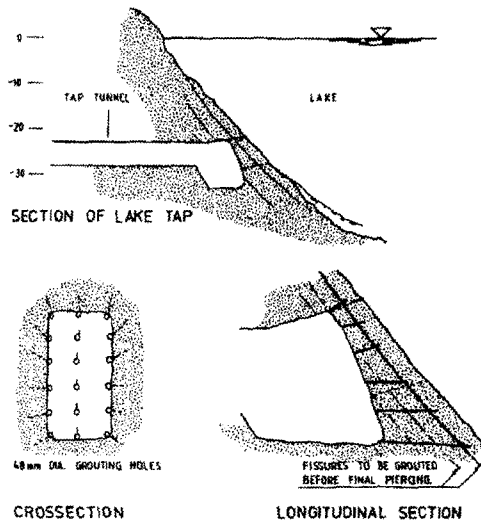


그림 2 . 플러그에서의 기반암 보강하기 위한 그라우팅

시키는 천공이 발생할 수 있는데 이러한 경우는 주로 조사용 선진 천공을 하는 경우에 발생하게 된다. 이럴 경우 차가운 고압수가 갯내로 뿜어져 나오게 되는데 경험상 이를 인력으로 막을 수 없기 때문에 이에 대비하여 별도의 장비를 준비하여야 한다.

### 3.5 수중수로관통 발파 방식 결정

수중수로관통 발파에는 두 가지 방식이 있다. 최종 발파를 하기 전에 도수로 터널을 완전히 혹은 부분적으로 물로 채우는 방식과 터널을 물이 없는 상태로 두고 대기와 차단을 시키는 방식이다. 이 두 가지는 물론 각각의 장단점이 있다. 수중수로관통 발파의 방식은 계획단계에서 결정한다.

개방식 방식은 터널 수경을 개방된 상태에서 발파하는 방식으로 터널을 물로 채우게 되고 보통 습식법(wet method)이라고도 불린다. 일반적으로 터널의 규모가 작고 유입되는 물

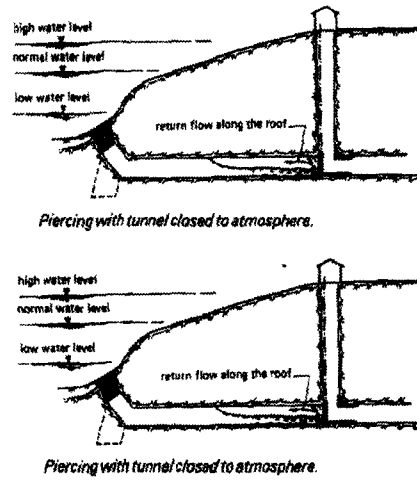


그림 3. 수중수로관통발파의 두가지 방법: 밀폐식(상)과 개방식(하)

의 속도가 낮은 경우 적용되며 플러그와 수문간의 거리가 짧은 경우 적용된다. 안전하고 주로 적용되는 방식이다.

밀폐식 방식은 터널 수경을 폐쇄된 상태에서 발파하는 방식으로 건식법(dry method)이라고도 불린다. 발파시 터널로 유입되는 압력수를 조절하기 위해 충분한 정도의 대기공간이 확보되어야 한다. 터널이 크고 유입되는 물의 속도가 높을 때 적용되며 수경을 설치하지 않거나 플러그와 수문까지의 거리가 충분한 경우 적용된다. 발파 후 충격수압에 의한 폐석의 돌출비산을 충분히 제어할 수 있어야 하며 플러그 아래에 폐석수집공동(traps)을 충분히 확보해한다.

상기한 두가지 방법은 현재까지 모두 성공적으로 적용되는 방법으로 수중수로관통 발파의 규모와 터널의 형상에 따라 결정이 된다.

### 3.6 굴진과 폐석 수집구 굴착

터널은 천공 발파법으로 굴착된다. 이는 선진 조사 천공과 그라우팅을 해야하며 최종 단계에서 기하학적으로 공동의 모양을 조정하고 굴진방향을 변화시켜 하기 때문이다. 터널이 플러그의 위치에 가까워지면 체계적으로 조사용 선진 천공을 하고 막장에서 물을 펴고 있는 단층이나 균열을 파악하여야 한다. 누수가 심각한 정도이면 막장면 안쪽에서 그라우팅을 하고 경미할 때는 무시를 한다. 막장이 플러그의 위치에 다가가면 최종 플러그의 위치와 천공을 결정하기 위해서 충분한 정도의 조사용 천공을 하여야 한다. 그리고 플러그의 위치가 확인되면 플러그 아래에 폐석 수집구를 굴착하게 된다. 폐석수집구는 발파후 쏟아져 내리는 폐석을 사전에 수집하여 터널의 막힘을 방지하고 급류와 함께 휩쓸려 가는 폐석으로부터 수문 및 터널의 설비를 보호하기 위한 조치이다. 이러한 최종적인 준비사항이 끝나면 천공과 발파설계가 마무리된다.

### 3.7 천공과 장약

수중수로관통발파를 성공적으로 수행하기 위해서는 정상 발파에 비하여 과장약을 하게 된다. 이 장약은 천공을 하지 않고 남아 있는 기저암반층과 그 위의 퇴적층을 충분히 관통시킬 수 있는 양이어야 하는데 보통 3~5 kg/m<sup>2</sup> 정도의 비장약을 하게 되는데 8 kg/m<sup>2</sup>의 비장약을 한 경우도 있다. 지나치게 과장약을 하게 되면 밀폐 방식에서는 내부의 충격압이 발생하고 폐석을 발생시키고 이를 밀어내어서 수로터널이 완전히 혹은 부분적으로 막히는 폐단이 발생하고, 발파로 인한 공동이 계획보다 커지면 예상되는 것보다 더 높은 압력이 발생하기 때문에 장약량을 발파의 성공과 피해를 최소화할 수 있는 적절한 양에서 결정하게 되고 수중수로관통 발파에서 가장 중요하

게 고려되어야 할 요인 중에 하나이다.

막장에서 천공을 하되 공저와 호수면 바닥과의 거리가 0.5 m를 남기고 막장에서 천공을 한다. 중심에서의 천공장은 3.5 m, 플러그 가장자리의 천공장은 4.3 m이었다. 천공경은 45 mm이고 장약공은 모두 151개이다. 총장약량은 716 kg이며 폭약은 노르웨이에서 생산되는 "Extra Dynamite" 이다. 암체로 구성되는 플러그의 체적은 약 150 m<sup>3</sup>이다. 독일제 M/S

표 1 노르웨이 수중수로관통발파에서 천공장약 설계의 사례 비교

위치	Lomi	Tyee	Ringed-alvatn
플러그단면 m <sup>2</sup>	18	22.5	35
파쇄암량 m <sup>3</sup>	80	56	150
총장약량 kg	404	144	716
비장약 kg/m <sup>2</sup>	5.1	6.38	4.8
심베기 수	3	2	3
장약천공경, mm	45	35	45
장약천공수	80	67	151
뇌관수 (MS)	160	134	302
천공장 m	4.0	2.5	3.5
무장약 대구공수	12	8	12
대구공경 mm	125	76	125
수두, m	75	50	85
플러그-호수 바닥 거리, m	0.5	0.3	0.5
폭약	Extra Dynamit, 60% NG		

뇌관을 각 장약공당 2개씩 설치하였는데 100 m의 수압에서 72시간을 견딜 수 있도록 수중 용으로 생산된 화약이다. 표1은 노르웨이서 보고된 3가지 경우의 수중수로관통 발파에 적용된 천공발파 적용 사례를 비교한 것이다.

### 3.7 물 채움

개방식 수중수로관통 발파 방식을 택할 경우 그림1에서와 같이 플러그에서 수문까지 물을 채우게 된다. 수갱 아래의 터널은 폭발로 인한 급류와 퇴적층이 밀려들어가지 않도록 차단벽을 설치한다. 이 방식에서는 폭발시 폐석이 차단문으로 쇄도하지 않도록 발파막장과 수갱을 부분적으로 물로 채우게 된다. 경우에 따라서는 폐석이 수백 미터나 휩쓸려가서 수갱과 주변에 손상을 주기도 한다. 게다가 폐석이 혼입된 압력상태의 물이 솟구쳐서 피해를 줄 수 있고 특히 수갱시설에 그러하다. 그러므로 이러한 압력수의 솟구침이 발생하지 않도록 수로터널 입구를 물로 채워야 한다. 수면과 수갱에 채운 물의 높이에 적절한 차이를 두면 이런 압력수의 솟구침을 막을 수 있는데 터널 벽면의 저항과 와류의 정도를 고려하여 압력수의 솟구침이 발파시 호수면과 수갱의 수위차이가 발파시 70~90% 정도가 되도록 조절하면 된다.

압력수가 최대로 솟구치더라도 수갱의 시설 물이 있는 수갱실 바닥까지 올라오면 안 되는 이는 수갱 설비들이 발파시에 이미 시설되어 있기 때문이다. 그래서 수갱의 물을 채울수록 좋지만 이 채움에는 이와 같은 한계가 있게 된다. 그리고 발파시의 충격압을 완화시키기 위해서 발파 막장에는 적당한 공간을 비워두어야 한다. 이 공간은 물을 통해서 수문에 전달되는 위험한 충격수압을 완화시킨다.

### 3.8 공기 채움

막장과 수갱구를 물로 채울 때 막장 주변의 밀폐된 공간은 압력을 받게 된다. 이때 밀폐 공간 내의 공기압이 플러그에 작용하는 수압보다 더 크면 안 된다. 만일 내부압이 수압보다 더 크게 되면 공기는 호수 속으로 누기되고 최악의 경우에는 밀폐된 공간이 사라져 버릴 수도 있다. 경암에서는 공기압이 수압보다 조금 더 높더라도 많은 누기가 발생하지 않을 수도 있다. 그러나 호수의 퇴적층으로 천공된 구멍으로 공기가 달아날 위험이 있다. 이런 구멍들은 수압이 공기압보다 크면 공기가 새어나가지 않지만 물을 채우면서 내부의 압력이 주변의 수압보다 높아지면 공기가 달아날 수가 있다. 밀폐 공간에 남아 있던 공기가 막장에 설치된 장약과 터널 속에 채운 물을 격리시킬 만큼 충분하지 않으면 임의로 외부에서 공기를 공급해 주어야 한다.

막장과 터널과의 격리 공간은 과도한 수압의 직접 전달을 방지한다. 발파시 보통 화약 1 kg 당 약 0.8 m<sup>3</sup>의 가스가 대기압의 상태 발생한다. 막장에서 예상할 수 있는 가장 높은 압력은 발파가 실패하여 모든 화약의 에너지가 가스압으로 전환되는 경우이다. 이 경우 높은 압력의 공기와 발생된 가스가 모두 압력으로 작용하면서 터널과 수문장치에 손상을 입히게 된다.

## 4. 사례 연구 : 루미(Lomi) 수력발전소의 수중수로관통발파

### 4.1 개요

루미 수력발전소는 노르웨이 북부에 위치하고 있는데 부되(Bodø)에서 동쪽으로 약 100 km 떨어져 있다. 입수로 터널은 수중수로관통 발파에 의해 루미(Lomi) 호수와 연결되어져 있다. 관통부의 입구에 작용하는 수두는 75 m

이다. 입수터널의 입구 단면적은 18 m<sup>2</sup>, 입수터널 최종 막장에서 호수바닥까지의 거리는 4.5 m이다. 입수터널의 입구와 수갱과의 거리는 280 m이다(Fig.1). 암종은 석영질 운모편암(quartzitic mica schist)이며 입수터널의 입구가 호수에 접근할 때 발생하는 암석의 틈새로 스며들어 오는 누수는 경미한 수준이었다.

#### 4.2 물 채움

수중수로관통발파가 이루어질 때 입수터널의 차단문을 막고 안쪽으로는 물을 채웠는데 수갱으로 차 올라온 물의 표면은 호수면 보다 10 m 낮게 하였다. 그리고 발파직전 입구에는 공기로 채워서 공기로 인한 완충공간을 확보하였다.

터널과 입구수갱을 채우기 위해서 15,000 m<sup>3</sup>의 물이 소요되었으며 두 개의 양수기를 사용했다. 양수기의 용량은 350 ℓ/초로 수면 아래 20 m까지 작동할 수 있는 수중용으로 움직이는 크레인에 달아서 호수의 물을 양수하여 직경 10인치의 파이프를 입구수갱으로 양수하였다. 터널에 물이 다 찬 이후 수갱에 물이 차 오르면서 물과 공기를 번갈아서 주입하면서 플러그 밑의 압기공간이 유지될 수 있도록 하였다. 이 작업은 15시간만에 완료되었다. 이 때 수갱 속의 물의 수면은 호수면 보다 8 m 아래에 머물도록 하였다. 플러그에서의 압기의 공간은 1,080 m<sup>3</sup>을 확보하였으며 플러그는 호수면에서 85 m 아래에 위치하였다. 발파전에 플러그 아래의 압기가 새어나가지 않도록 조치를 하였다. 그리고 발파 이후 예견하지 못한 물기둥이 솟구칠 경우를 대비하여 콘크리트로 된 입구수갱의 정상부에 3 m<sup>3</sup> 크기의 문을 달았다. 이 문으로 소기의 목적으로 사용되는 일은 없을지라도 각종 장치를 하고 발파를 작업을 준비하는데 매우 유용하였다.

플러그의 발파는 1982년 26일 종료되었다. 발파이전의 플러그의 공기층의 압력은 9 bar였는데 발파도중에 최고압이 39% 증가하여 12.5 bar가 측정되었다. 수문에서의 압력은 7.8 bar에서 17% 증가하여 9.1 bar가 측정되었다.

입구수갱에서의 물은 예상했던 바와 같이 발파로 인해서 수문에 미치는 압력에 상응하여 호수면 아래 5.8 m까지 출렁거렸다. 입구수갱에서의 수면의 상승은 26초간 지속되었는데 예상했던 시간 29초와 거의 일치했다. 수갱에서의 물은 최초 호수면 아래 8 m에서 5.8 m로 72% 상승했다.

#### 4.3 공기 채움

수로터널은 발파준비가 완료되면 물을 채우게 되는데 이때 발파막장의 후면에는 공간을 두게 되면 이 공간을 채우고 있는 공기가 압축되는데 이 공기의 체적은 대략 150 m<sup>3</sup> 정도이다.

이 작업에서는 몇 가지의 세심한 작업을 요한다. 첫째 플러그 아래에 수면의 높이를 측정하는 전기 장치가 설치되어야 한다. 발파시 발생하는 충격압이 물을 통해 전이되어 주 차폐문을 손상을 줄 수 있는데 이를 방지하기 위해 이 공기완충 공간을 만들어서 발파전까지 유지를 해야한다. 물의 수위를 플러그의 아래에 위치하도록 조절하고 공기가 새어날때 이를 보충하기 위해서는 직경 2인치 파이프를 연결시킨다. 파이프의 주둥이 길이 0.5 m, 직경 10인치의 철판을 주조하여 연결시켜서 주입하는 공기의 흐름을 부드럽게 하였다.

공기완충은 수중수로관통발파시 발생된 충격압이 터널의 물 속으로 전달되어 차폐문에 손상을 주지 않도록 하는 역할을 한다. 공기완충은 물길의 연속성을 차단하여 충격압을

감소시킨다. 이론적으로 공기완충대가 클수록 압력의 증가분은 감소한다는 것이 밝혀져 있다.

#### 4.4 천공배치

평행천공에 의한 대구경 심빼기를 하되 동일 단면에서 심빼기 개소를 3곳으로 하고 무장약 대구경의 지름은 125 mm(5인치), 장약공은 45 mm로 천공을 하였다. 천공 배치는 그림 6에 소개하였다. 이 경우에 장약공은 80개, 무장약 대구경공은 12개를 천공했다. 호수 바닥에서 막장까지의 거리는 3.9~5 m인데 막장에서 천공하여 호수바닥면에서 0.5 m의 거리를 남기도록 하였는데 평균 천공장은 4 m이다.

#### 4.5 장약과 기폭

발파에는 고강력 젤라틴 다이ना마이트와 M.S 지연뇌관을 사용하였다. 폭약의 약경은 35 mm, 길이는 600 mm이며 60% NG의 젤라틴 다이나마이트('Extra Dynamit')이다. 장약 밀도는 1.4 kg/m이고, 각 작약공마다 지연시차 번호가 동일하며 감도가 보통 수준인 2개의 뇌관을 설치하였다. 한 개는 역기폭으로 장약공의 바닥에, 다른 하나는 장약장의 중간부위에 설치하고 뇌관과 6 m 길이의 리드선은 보호덮개를 씌웠다. 약 0.3 m 길이의 무장약 부분은 리드선이 통과할 수 있도록 흠을 파낸 선단고정용 목봉(wooden conical dowel)을 삽입하고, 팽창성 폴리스티렌 수지(expanded polystyrene)로 천장공의 입구를 밀폐했다. 역기폭을 설치한 뇌관들을 한 회로에 직렬로 연결하고 공의 중간부위에 설치한 뇌관들은 다른 회로에 직렬로 연결한 후 두 회로를 병렬로 다시 병렬로 연결하였다. 천공과 발파의 제원은 표 2와 같다. 발파기는 수

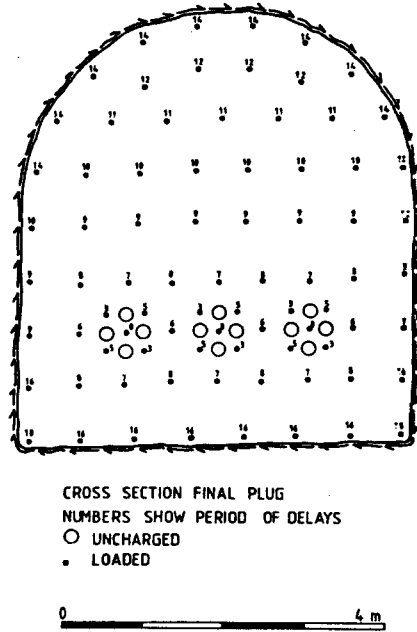


그림 4. 루미(Lomi) 수력발전소 건설에서의 플러그 천공배치도

갱의 입구에 위치시키고, 물채움으로 물이 차올라 수갱에서의 수면이 호수면 보다 10 m 아래에 도달하면 바로 기폭시켰다.

## 6. 결론

본 논문에서는 노르웨이에서 성공적으로 실행되고 있는 수중수로관통 발파 기술을 소개하였다. 이처럼 수중수로관통 발파는 호수속에서 별도의 물막이 공사를 할 필요가 없어 공기가 단축되고 경비가 절약된다. 뿐만 아니라 호수가 깊은 경우에는 물막이 공사가 어려워져서 수중수로관통 발파가 거의 유일한 대안이 될 수도 있다. 국내에서는 그 적용의



## 참 고 문 헌

표 2. 루미(Lomi) 수력발전소의 플러그 발파에 사용된 뇌관과 지발당 장약량

뇌관 번호 (MS)	지발당 뇌관수	지발당 장약량 (kg)
0	6	14.4
3	12	28.8
5	12	28.8
6	8	20.3
7	12	29.4
8	16	40.3
9	20	51.1
10	16	41.7
11	10	25.7
12	8	21.1
14	20	52.2
16	16	39.3
18	4	10.4
(소계)	160	403.7

빈도가 많지 않을 것으로 예상되나 국내기업이 해외에서 수주하는 관련 공사가 많을 것으로 예상되어 이 수중수로관통 발파에 대한 기본 및 실무지식을 갖추고 있는 것이 많은 도움이 될 것이며 이에 대한 충분한 연구 검토가 필요하리라 생각된다.

1. Sivilingeniør Øystein H. Storme, 1982, "Tunnel Break Through Beneath 85m Water at Ringedalsvatn" in Norwegian Tunnelling Technology, Norwegian Soil and Rock Engineering Association. pp. 53~55.
2. Ø. solvik, 1982, Underwater piercing of a tunnel, In: Norwegian Hydropower Tunnelling. NSREA, pp111~114.
3. B.Bardal, et. al, 1982, Lake tap-the Norwegian method. In: Norwegian Hydropower Tunnelling. NSREA. pp. 115~119.
4. Bjorn Buen, 1988, "Lake Taps", in Norwegian Tunnelling Technology, Norwegian Soil and Rock Engineering Association, pp. 91~92.
5. Oddbjorn Aasen, 1988, "Rock Grouting", in Norwegian Tunnelling Technology, Norwegian Soil and Rock Engineering Association, pp. 103~105.