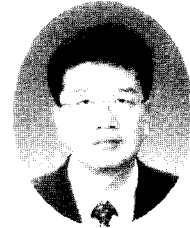


이란 카룬댐 프로젝트 콘크리트 공사

- Masjed-e-Soleiman Hydroelectric Power Project -



김종오*



노승규**

대림산업(주)는 이란 에너지성 산하의 수전력 개발공사가 발주한 이란내 최대의 토목공사로 관심을 끌어난 카룬댐 공사 (Masjed-e-Soleiman Hydroelectric Power Project)를 미화 4억6천4백만 달러에 수주하여 1994년 12월 착공한 후 6년 반 동안의 공사 끝에 지난 2001년 4월 19일 완공을 하게 되었다.

이란 정부가 국가의 잠재적인 수전력을 개발하고자 야심차게 시작한 이 프로젝트는 급격한 에너지 및 전력수요의 증가에 부응하고, 부존자원인 석유와 가스(gas)를 보전하며 온실효과를 일으키는 가스방출을 방지하고자 함에 목적이 있다고 할 수 있다.

이 댐은 이란의 수도인 테헤란으로부터 서남방 400 km 지점에 위치한 카룬강의 네번째 댐으로 높이 177 m, 댐 Crest 길이 498 m, 저수량 2억 2천 800만톤, 전력생산규모는 2,000 MW인 초대형 수력 발전댐이며 이란 내에서는 최대규모로 이 댐의 준공으로 인하여 이란의 전력생산량은 약 8% 증가하게 된다.

본 공사는 성토량이 1,370만 m³, 절토

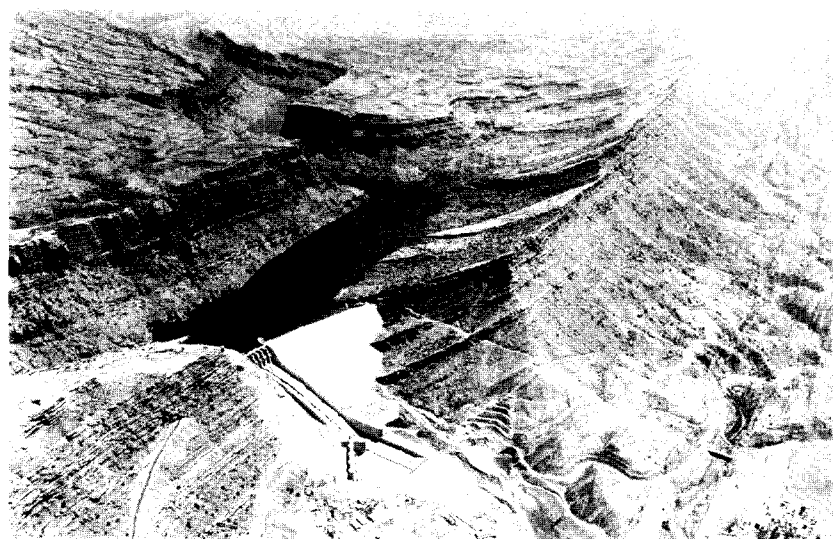


그림 1. 완성된 댐 모습

량이 2,000만 m³, 그리고 콘크리트량이 95만 m³이나 되는 엄청난 물량이 투입된 초대형 Zone형 Rockfill 댐 프로젝트로서 완공 후의 댐 모습이 매우 웅장할 뿐만 아니라 아름다움까지 겸비하고 있으며 이 프로젝트를 완성이 위한 모든 역경을 극복한 인간의 위대함까지 느껴지게 하는 프로젝트였다.

대림산업(주)은 이런 초대형 댐공사를 수행하면서 여러 가지 어려움을 겪었지만 공사 중 발생했던 난관들을 공사 참여자의 노력과 당사의 기술력으로 슬기롭게 극복하여 성공리에 공사를 마침으로써 이란내의 발주처뿐만 아니라 관련 정부기관 및 컨설턴트로부터 뛰어난 프로젝트 수행 능력을 인정받아 대림산업(주)뿐만이 아닌 우리나라의 건설위상을 국외에 더 한층 높이는 성과를 이룩하였다.

* 대림산업주식회사 토목사업부 부장

** 대림산업주식회사 기술연구소 차장



그림 2 위치도

6년 반의 공사기간 동안 불멸 날씨에 주야로 자연과의 힘겨운 싸움을 하면서 땀과 눈물로 성공리에 마친 지금에 와서 생각해보면 이 프로젝트를 좀 더 잘 수행할 수 있었지 않았나 하는 다소 아쉬움이 남

기도 하지만 지난날을 회고하고 반성해 보면서 앞으로의 공사에 타산지석으로 삼고자 하는 의미에서 간략한 프로젝트의 소개와 더불어 콘크리트 구조물 공사에 대한 것을 소개하고자 한다.

1. 프로젝트 개요

이란의 수전력은 에너지성(MOE; Ministry of Energy) 산하의 IWPC(Iran Water and Power Resources Development Company)에서 주요 프로젝트의 계획과 건설을 담당하고 있다. 이란의 총 설치전력용량은 1997년 현재 2만 2,000 MW를 다소 상회하고 연간발전량은 약 8만 GWh에 달한다. 이중 1999년 말 기준으로 가동중인 수전력은 2,050

MW로 총 전력용량의 10%에 못 미치고 있으며, 생산전력량으로는 이란 내 총 전기생산량의 13% 정도를 차지하고 있다. 참고로 기술적, 경제적으로 타당성을 고려할 때, 이란의 이론적으로 가능한 잠재적 수전력량은 연간 5만 6천 GWh로 1997년 연간발전량의 약 7배에 달한다고 한다.

이런 바탕 위에 부존자원인 gas와 석유를 보전하고 온실효과를 일으키는 가스방출을 제하며 국가기간산업을 일으켜 실업률을 감소시키는 등의 효과를 주목적으로, 1980년말 이란정부는 국가의 잠재적 수전력을 개발하기로 결정하여 1990년대에 6,000 ~ 7,000 MW의 수전력을 증설하는 목표를 수립하였으며 IWPC가 담당하는 주요 수전력 프로젝트 중 하나가 이란 남부 Khuzestan 주 Gordar-e-Landar 지역에 위치한 본 카분댐이다. <그림 1>은 완성된 댐의 모습을 <그림 2>는 프로젝트의 위치를, <그림 3>는 레이아웃을, <그림 4>은 댐의 표준단면을 보여주고 있으며 이 프로젝트의 주요 제원 및 물량은 <표 1>에 나타나 있다.

표 1. 주요 제원 및 물량

항목	제원
Integrated Cofferdam	- 형식 : 경사면에 코어가 있는 Rockfill 댐
	- 댐높이 : 80.0 m
	- 축조물량 : 180만 m ³
Main Dam	- 형식 : 중앙심벽형 Rockfill 댐
	- 댐높이 : 177m
	- 치수(m) : 498(길이) × 750(폭) × 177(높이)
	- 축조물량 : 1,116만 3,000 m ³
	- 담수용량 : 2억 2,800만 m ³
Measuring Weir	- 축조물량 : 20만 6,000 m ³
상류 Diversion Dike	- 높이 : 27.0 m
하류 Cofferdam	- 축조물량 : 13만 4,000 m ³
	- 높이 : 20.0 m
	- 축조물량 : 4만 8,705 m ³
굴착	- Mandatory : 1,718만 3,000 m ³
	- 석산 : 281만 7,000 m ³
	- Cavern & Tunnel : 50만 4,690 m ³
그라우팅	- 약 4만 6,000 m
콘크리트	- Open Air : 80만 2,000 m ³
	- Cavern & Tunnel : 12만 4,430 m ³

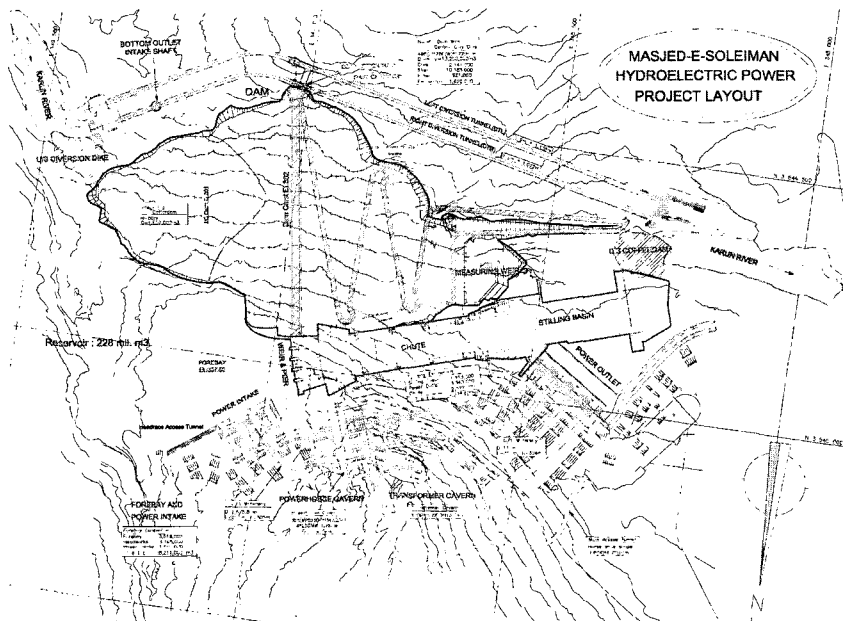


그림 3. 프로젝트 평면도

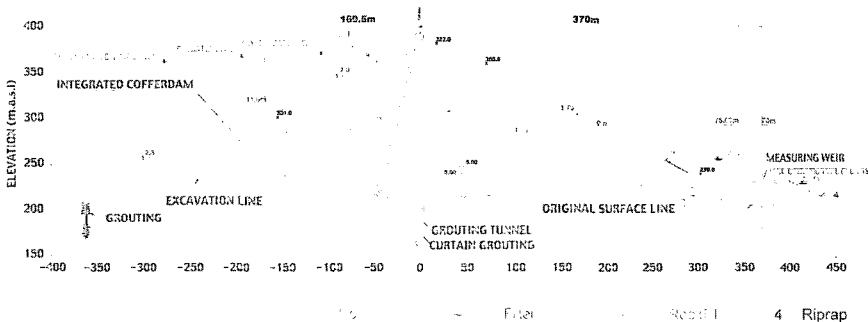


그림 4. 댐 표준단면도

표 2. 프로젝트 참여업체

Lot No.	Scope of Work	Contractor
1	Main Civil Works	대림(한국)+Sato(일본)
2	Preconstruction Works	Ilbau(Austria)+Foman(Iran)
3	Hydraulic Steel Structures	Machine Sazi Arak(Iran)
4	Mechanical Equipment	Farab(Iran)+Harbin(China)
5	Electrical I&C and HVAC Equipment	Farab(Iran)+Elin(Austria)
6	GIS Switchgear	IEO(Iran)

본 프로젝트의 개시는 1992년 6월 2개의 가배수터널공사를 착수함으로써 시작되었는데 이는 오스트리아의 ILBAU와 이란의 Foman Contractor에 의해 1994년 말에 완료되었으며, 전체 프로젝트는 6개의 패키지(package)로 나뉘어 발주되었고 패키지별 참여업체는 <표 2>와 같다.

<표 2>에서 볼 수 있듯이 당사는 일본 Sato Kogyo와 JV 형태로 Lot-1 Main Civil Works를 1995년 1월 1일부터 착수 2000년 11월 10일에 준공하여 2001년 4월 19일에 준공식을 가졌고, 계약액은 3억 2,200만 달러의 미화분(70%)과 30%의 현지화로 구성되었다. 설계 및 감리는 1994년에 일본(OECF: Overseas Economic Corporation Fund)과 이란정부간에 차관협정이 맺어져 Nippon Koei(Japan), Lahmeyer International, Moshanir가 공동으로 Consultant를 구성하여 수행하였다.

II. 콘크리트 공사

1. 콘크리트 공사 개요

본 공사의 Open Air Concrete를 구성하는 주요 구조물은 <표 3>에 나타나 있는

바와 같이 발전을 위한 물을 취수하기 위한 Power Intake, 발전한 물을 방류하는 Power Outlet, 그리고 홍수시나 비상시 물을 월류시키기 위한 여수로(Spillway)를 구성하는 Weir & Piers 및 Chute, 여수로를 통한 방류수의 높은 에너지를 감세시키는 Stilling Basin, 그리고 Spillway로 물을 유도하기 위한 Guidewall과 Weir & Pier를 양옆에서 지지하는 Abutment로 구성되어 있다.

본 프로젝트 콘크리트 공사의 가장 두드러진 특징은 첫째, 거의 모든 콘크리트가 매스 콘크리트로 하절기에는 대기온도가 50°C를 넘나드는 서중 콘크리트로 시공되었다는 점과 둘째, 발파굴착공사와의 근접시공으로 인한 간섭을 극복하며 콘크리트 공사를 해야만 했다는 점이다.

또 다른 특징으로는 큰 유속(Chute 방류시 최대 50 m/sec)과 대량의 흐르는 물에 저항하기 위하여 부피가 매시브한 구조로 되어 있으며, 시방에 규정되어 있는 마감허용오차가 다른 프로젝트의 구조물 보다 다소 엄격하여(일례로 여수로 구조물 중 Chute 구조물의 허용조도(roughness)는 3.0 m 직선자로 측정시 4 mm 이내 임) 구조물에 따라 마감정도가 다르지만 큰 유속과 접하는 구조물의 경우에는

철저한 표면마감공사가 요구되었다.

그리고 이런 콘크리트 구조물 대부분이 Open Air Excavation을 완료한 장소에 설치되게 되어 있어 굴착을 얼마나 빨리 완료하여 콘크리트 구조물이 착수될 수 있도록 구조물 자리를 내어 주느냐에 프로젝트의 성패가 달렸다 해도 과언이 아니었다. 또한 굴착된 후 발생암을 댐 성토재료로 사용하게끔 계획되어 있었고, 메인 댐이 콘크리트 운반로와 Chute 시공시는 작업으로도 이용되어 콘크리트 공사 계획 수립시 굴착공사는 물론 댐 성토공사 계획도 고려해야만 하였다.

여기에서는 당 현장과 같이 Open Air 콘크리트 몰량이 대규모이면서(약 80만 m³) 매스 콘크리트이고 대부분의 콘크리트가 30°C 이상의 대기온도에서 비교적 단기간에 타설되었던 콘크리트 공사를 수행한 방법을 주로 소개하고자 하며 주로 다룰 사항들은 다음과 같다.

- 시멘트, 골재 등의 콘크리트 생산을 위한 재료 공급
- 콘크리트의 생산, 운반 및 타설 등 제반 사항
- 콘크리트 수화열 대책 방법
- 기타 콘크리트 공사시 문제가 되었던 부분의 해결방안 등

콘크리트 구조물 중 가장 핵심이 되었던 Spillway 구조물은 <그림 5>와 같다.

2. 콘크리트 생산시설

콘크리트 배치 플랜트 선정시 중요하게

표 3. Open Air Concrete 구조물

구조물	주요 구성	콘크리트몰량(m ³)	구조물 크기, m(길이 × 폭 × 높이)
Power Intake	Intake Structures, Bridges, Facing Wall	6만 7,500	47.043 × 30 × 48(4 units)
Forebay	Guide Wall	6만 1,500	90.5 × 61.5 × 44.5
Spillway	Weir & Pier	9만 5,800	57.09 × 20.75 × 52(4 units)
	Abutment	Left & Right	57.09 × 40/49 × 52(left/right)
	Chute	Wall and Slab	371.15 × 82.5 × 49.5
	Stilling Basin	Wall and Slab	229 × 82.5 × 52.5
Power Outlet	Outlet Structures, Bridges, Facing Wall	10만 1,600	34.56 × 28 × 52.5(4 units)
Total		80만 2,800	

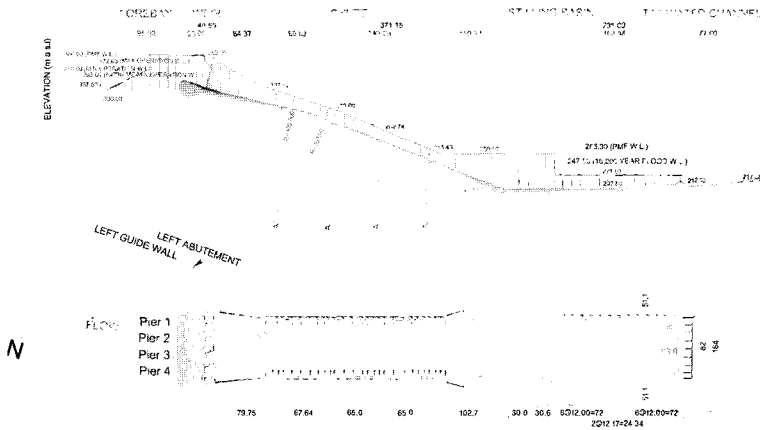


그림 5. Spillway

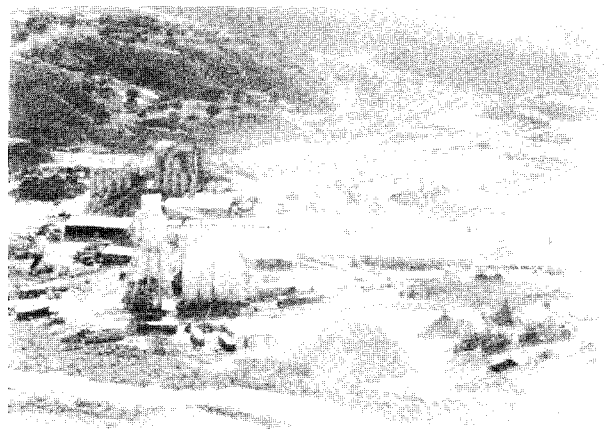


그림 6. 배치 플랜트 사이트 전경

고려되었던 조건은 다음과 같았다.

- 최대골재치수 76 mm의 매스 콘크리트 생산가능량(일 최대 2,000 m³)
- Precooling System
- Stand-by Plant

또한 콘크리트의 생산위치와 타설위치까지의 거리를 최대한 가깝도록 하기 위하여 배치 플랜트와 Crusher Plant를 공사 현장입구에 함께 위치시켰고, 최종 선정된 콘크리트 배치 플랜트 용량은 믹서용량 4.5 m³ × 2기의 플랜트 2기로 구성되어 있으며 교대로 이중 한대만 작동하였고 다른 1대는 stand-by 플랜트로 계획하였다.

콘크리트 생산을 위해 설치된 설비 종류와 그 주요 제원은 <표 4>와 같으며 <그림 6>은 배치 플랜트 사이트 전경을 보여 주고 있다. 이 중 더운 날씨 때문에 특별히 설치된 설비로는 Ice Flake를 생산하는 아이스 플랜트와 조골재를 호퍼로 이동

전 냉수에 담그게 되어 있는 Immersion Tank이다.

3. 주요재료

3.1 골재원(Quarry) 및 골재

오스트리아 ILBAU 사가 시공하였던 Lot 2(Diversion Tunnel Construction) 공사에서 이미 승인을 받고 사용된 공사현장 인근의 카룬강 퇴적지(deposit area)를 골재원으로 사용할 수 있는지 골재시험을 통해 조사한 결과 이 지역의 골재는 모든 시방기준을 만족하는 것으로 판명되었으며 채굴할 수 있는 예상물량은 약 250만 m³이었다. 따라서 Open Air Concrete 공사에 필요한 골재는 이 골재원으로부터 생산될 수 있을 것으로 예상했으나 후에 실제 예상보다 골재를 채취할 수 있는 양이 적고 또한 채취되는 골재의 품질이 떨어져서 골재를 여기서 더 이상 생산할 수 없게 됨에 따라 나중에는 옛날 카룬

I 댐 공사시 사용했던 Quarry를 개발하여 사용하였다(현장에서부터 약 25 km 떨어진 곳). 콘크리트 생산에 필요한 굵은 골재는 전부 Quarry에서 채취한 원석을 파쇄해서 생산하였으며, 잔골재는 Rod Mill을 사용, 생산하여 조달하는 한편 일부는 현장에서 모래를 조달하여 사용하였다.

3.2 시멘트

당초 일반 구조물에는 Type I 및 Type V가, 매스 콘크리트에는 IP Type V를 사용하는 것으로 규정되어 있었으며 각각 사용되는 곳은 다음과 같았다.

- PC Type I : Type V에 사용되는 이외의 모든 콘크리트 구조물
- PC Type V : Agha Jari Formation과 접하는 모든 콘크리트 구조물 (Agha Jari Formation이란 신생대 3기의 상부 마이오세에서 상부 플라이오세 시대에 형성된 것으로 약간의

표 4. 콘크리트 생산 설비 제원

설비	능력	용도	비고
Batching Plant	150 m ³ /hr × 2 units	Open air와 Underground works용	New
	60 m ³ /hr × 2 units	Underground works용	Old (Lot2에서 인수)
Crushing Plant	200 ton/hr	4종류의 굵은골재 생산용(8 mm, 19 mm, 38 mm, 76 mm)	
	150 ton/hr	Free drain(15 ~ 150 mm)과 2C 생산용	댐 축조용
	400 ton/hr	3종류의 굵은골재 생산용(8 mm, 19 mm, 38 mm)	K-I Quarry에 설치
Rod Mill	50 ton/hr	잔골재(0 ~ 5 mm) 생산용	
Chiller plant	20 ton/hr × 2 units	with 400 m ³ chilled water reserve tank	
Ice plant	3 units (100 ton/day)	with 150 ton ice reservoir	
Cement silo	3,640 ton	평균 피크때 8일간의 콘크리트 공사 가능	New
	3,500 ton	터널과 Shotcrete용	Old (Lot2에서 인수)

석고질을 함유한 claystone, silts-tone으로 sandstone이 협재되어 있는 층으로 Chute 하류부와 Power Outlet 지역의 EL.355 m 이하가 해당되었다.)

- IP Type V : 매스 콘크리트(최고 30%까지 포졸란이나 플라이 애쉬로 시멘트와 혼합)

당초에는 시멘트를 외국에서 수입하여 사용하는 것으로 계획되었으나, 발주처와 협의하여 이란 현지 시멘트를 사용하는 것으로 변경하여 이란 내 현지 생산업체인 Doroud, Khuzestan, Tehran Cement Company 등의 Type I 및 Type V 시멘트를 사용하였으며, 포졸란이 30% 함유된 IP Type V 시멘트(매스 콘크리트용)는 시방 규정을 만족하는 품질의 시멘트를 이란 내에서 구하기가 어려워 이를 대체하여 Type II 시멘트를 이란 내에서 구매하여 사용하였다. <그림 7>은 당 현장에서 사용한 시멘트의 Hydration Heat Curve를 보여주고 있다.

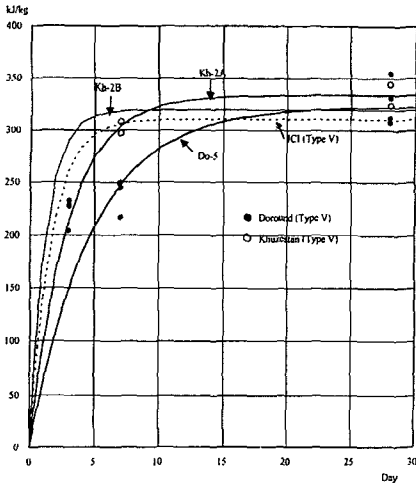


그림 7. Cement Hydration Heat Curve

4. 주요장비

4.1 크레인

본 현장의 콘크리트는 대부분 구조물의 면적이 넓고, 높이가 높아 이동식 크레인을 제한적으로 밖에 사용할 수 없었다. 따라서 계속되는 발파를 고려할 때 타워 크

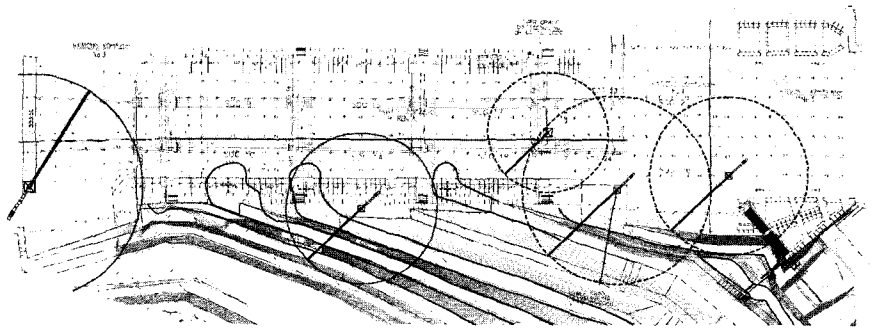


그림 8. 타워 크레인 배치도(Spillway)

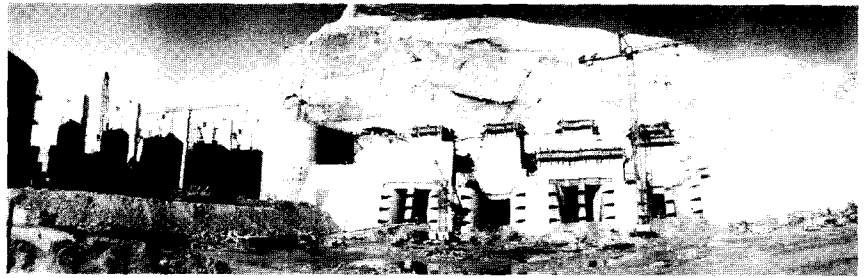


그림 9. 타워 크레인을 설치하여 공사중인 모습(Headworks 지역)

레인을 사용하는 것이 발파 위험성에 노출됨에도 불구하고 구조물 작업에 타워 크레인을 주로 투입할 수밖에 없었으며 발파영향범위에 타워 크레인이 위치한 경우에는 마스트에 페타이어 등을 부착하여 타워 크레인을 보호토록 하고 최대한 주의를 기울여 제어발파를 하는 방법 외에는 별다른 도리가 없었다. 발파 미산된 돌에 맞아 타워 크레인이 약간의 손상을 입은 적은 다소 있었지만 다행하게도 구조물 공사를 중지할 정도로 큰 손상은 발생치 않아 화급했던 구조물 공사 진행에 큰 지장을 초래하는 않았다. 타워 크레인은 공사진행에 따라 레일 위로 움직일 수 있는 이동식을 주로 사용하였고 이 외에도 100 ton 크롤러 및 작은 이동식 크레인도 사용가능 지역에 투입하여 작업에 효율을 꾀하였다. Spillway의 경우 콘크리트 공사를 원활히 수행하기 위하여 설치된 타워 크레인의 배치도는 <그림 8>과 같으며 <그림 9>는 Headworks 지역에 타워 크레인을 설치하여 공사중인 모습을 보여주고 있다.

4.2 콘크리트 타설

당 현장의 당초 콘크리트 타설계획은 일반 콘크리트는 콘크리트 펌프(펌프카 및

Stationary Pump)로 타설하고 매스 콘크리트의 경우(최대골재직경 76 mm) 이를 특수 주문한 펌프장비를 사용하여 타설하거나 자주 이동식의 벨트 컴베이어 타입인 Super Swinger를 사용하여 타설하였다. 그러나 사실상 펌프에 의한 골재최대치수 76 mm의 매스 콘크리트의 타설은 불가능하였고, Super Swinger 역시 구조물의 높이 및 넓이, 특히 시공단계의 철근 높이 등을 고려할 때 극히 일부의 콘크리트를 제외하곤 사용이 불가하여 장비계획을 수정할 수밖에 없었다.

그래서 다량의 매스 콘크리트를 효율적으로 타설하기 위해 Super Swinger보다 규모가 큰 Creter Crane과 함께 이동식 벨트 컴베이어 시스템을 고려하였으나 매일 계속되는 발파로 인한 손상가능성을 생각할 때 이 또한 결정을 내리기가 어려웠다. 발파와의 간섭을 고려하면(발파전후 1시간 정도 대피 필요), 기동성이 탁월한 콘크리트 펌프카 등을 사용해야만 했는데 다행히 가장 큰 문제였던 시멘트 증가로 인한 공사비 증가를 해결할 수 있게 되어, 매스 콘크리트(최대골재치수 76 mm)를 펌프 이용이 가능한 콘크리트(최대골재치수 38 mm)로 변경하고 이에 따른 온도해

석을 수행하여 대부분의 콘크리트를 콘크리트 펌퍼카나 Stationary Concrete Pump로 타설할 수 있게 하였다.

4.3 운반

전체적으로 콘크리트 물량이 대규모이며 또한 한번에 타설하는 콘크리트의 물량이 크기 때문에 6m³ 용량의 트럭 픽서와 함께 매스 콘크리트 운반용인 9m³ 용량인 Hi-Dump를 구매하여 이를 사용하였다. 콘크리트 주 운반로는 본 댐 성토공사장을 통과하는 굴착 및 성토공사 운반로와 같이 사용되어 성토 진행에 따라 수시로 변경되었으며 24시간 항상 최상의 상태로 유지되어야 했고, 배치 플랜트로부터 가장 멀리 떨어진 Headworks 지역까지 3km 정도로 운반에 약 10분에서 15분 정도가 소요되었다.

당 현장 콘크리트 공사에 사용한 주요 장비는 <표 5>와 같다.

5. 콘크리트

5.1 배합설계

당 공사에 사용된 콘크리트 등급은 Cube 강도로 28일 기준 15, 25, 35 MPa(B-15, B-25, B-35)의 3가지로 구성되어 있다. 등급에 따라 사용되는 기준은 B-15는 Backfill, Lean, Porous에 사용되었으며, 매스 콘크리트는 B-25, 그리고 기타 구조물에는 B-25 및 B-35가 설계에 따라 각 강도 등급별로 시멘트의 종류, 골재원 및 골재의 크기, 사용되는 혼화제의 종류 등을 반영하여 콘크리트 배합설계를 하여 콘크리트를 생산하였다. <표 6>은 시방서상의 콘크리트 배합 규정을 보여주고 있다.

5.2 콘크리트 타설온도 및 Lift Height

콘크리트 공사가 중점적으로 행해진 기간 동안의 당 현장 대기온도는 하절기에 대기 온도가 상당히 높고(4월에서 10월까지 최고온도가 40°C를 상회) 또한 대부분의 콘크리트 구조물이 매시브하기 때문에, 콘크리트 수화열로 인해 콘크리트에 균열이 발생하지 않도록 콘크리트 타설온도, Lift 높이, Lift 간의 시간간격 등에 대해 시방서에 의거 다음과 같이 시공을

하였다.

· 타설 온도

본공사의 시방서에는 모든 Open Air Concrete 중 매시브 콘크리트와 철근 콘크리트에 대해서는 최고 18°C 그 밖의 콘크리트는 25°C 이내로 콘크리트 타설 온도를 유지하라고 명시되어 있다. 이에 당 현장에서는 시공성을 고려하여 파이프 쿨링 등의 포스터 쿨링 방법 대신 주로 다음과 같은 프리쿨링 방법을 사용하였다.

- 배합수로 Chilled Water 사용
- 조골재에 Chilled Water 살수
- 조골재의 Immersion Tank 설치
- 시멘트 사이로 및 배관 파이프의 Insulation
- Ice Flake 사용

· 타설높이

시방서에는 수화열의 영향을 감소시키기 위해 가능최대 Lift 높이와 Lift간 최소 시간 간격을 여수로 구조물중 Weir와 Stilling Basin에 대하여는 2.5m와 64시간으로 하고, 3m 이하의 벽체와 Pier는 3m와 48시간으로 하라고 규정되어 있다.

실제로 현장에서는 구조물별로 Lift 높이와 타설경과시간에 따른 온도해석을 행하고 거푸집 높이와 타설되는 Block의 Size 등을 고려하여 매스 콘크리트가 거의 대부분인 콘크리트의 Lift 높이를 타설 물량에 따라 1.5m나 3.0m로 적용하였다.

· 온도해석

앞의 시방규정된 콘크리트 타설온도와 Lift 높이 및 Lift간 시간간격을 적용하여 구조물별로 매스 콘크리트 온도해석을 수행한 결과 모든 경우에 구조물 중심부 콘크리트 최대 온도 60°C 이내, 콘크리트 표면과 중심부와의 온도차 20°C 이내, 장기온도변화 40°C 이내의 요구조건을 만족하고 수화열로 인한 균열발생 우려가 없는 것으로 해석되었으며, 타설시 매설한 센서를 통하여 실제 온도변화를 측정할 결

표 5. 콘크리트 공사에 사용한 주요 장비

Equipment	Model	Specification	Qty	Working Area
타워 크레인	ER 240 AD	60 m × 2,200 kg	1	Headworks
	ER 240	40 m × 2,800 kg	1	Chute
	ER 180	50 m × 3,500 kg	2	D/S of Weir + Stilling Basin
	MR 123 HC5	42 m × 2,800 kg	1	Stilling Basin
	POTAIN	32 m × 2,100 kg	1	Power Outlet
	LIEBHERR	32 m × 800 kg	2	Headworks + Chute
Super Swinger	SS 105-18	수평거리 = 31.39 m	2	Chute + Tailrace Channel
		수직거리 = 17.89 m 능력 = 110 ~ 270 m ³ /hr		
콘크리트 펌프카	KVM 52	수평거리 = 49 m 수직거리 = 52 m 능력 = 150 m ³ /hr	1	전 지역
	KVM 42	수평거리 = 38.05 m 수직거리 = 42m 능력 = 150 m ³ /hr	4	전 지역
	KVM 36	수평거리 = 32.1m 수직거리 = 36 m 능력 = 116 m ³ /hr	2	전 지역
고정식 펌프	Different Type	BP2000(2), 3000(2) 4000(2), CIFA(2)	8	전 지역
Hi Dump 트럭 픽서	SECATOL	능력 = 9 m ³	12	전 지역
		능력 = 6 m ³	33	전 지역

과 계산치와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 물론 타설된 콘크리트에서도 수화열에 의한 균열발생은 관측되지 않았다.

5.3 콘크리트 운반용 도로

일반적으로 콘크리트 생산지역과 타설 지역까지는 운반시간 단축을 꾀하고 슬럼프 저하 및 콘크리트 온도 상승을 억제하기 위하여 최단 거리를 확보하는 것과 운반로를 항상 최상의 상태로 유지하는 것이 매우 중요하다. 당현장에서는 <그림 10>과 같이 흙 운반로와 동일한 공사용 도로를 사용하여 콘크리트를 운반한 후 이를 타설하였다. 그리고 Chute 구조물의 경우

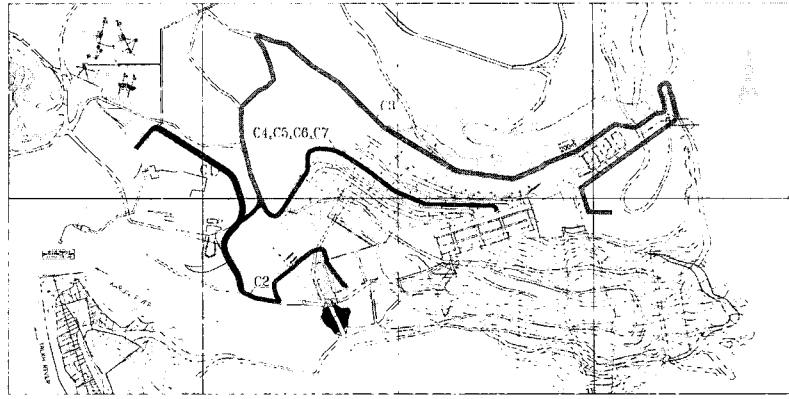


그림 10. 콘크리트 공사용 도로 현황

에는(특히 좌안) Main Dam Embankment를 이용하여 콘크리트 작업을 수행하

기도 하였다.

- C1 : Batching Plant로 가는 도로

표 6. 지방서상의 콘크리트 배합규정

Class	Description	Application	Aggregate max. size (mm)	W/C max.	Entrained Air max. (%)	Slump max. (mm)	Cement content max. (kg)	Cement Type (ASTM)	Cube Strength (Mpa)
B15	Backfill Concrete Dental Concrete	Non-structural concrete used to fill excavated pockets in rock or to correct over-excavation	38	0.79	no	50	200	(see Section II)	15
	Lean Concrete	Concrete placed on soil in order to provide a clean dry working surface	38	0.79	no	50	200	PC Type V	15
	Porous Concrete	Concrete without sand fractions for use as drainage behind walls, floors or alike	38	0.7	no	50	235	PC Type V	15
	Concrete for Blinding Layer	A layer of concrete spread on rock surface in order to provide a clean dry working surface	19	0.79	no	40	240	PC Type V	15
B25	Mass Concrete Reinf. Concrete Plain Concrete	Massive structures with or without reinforcement thick wall and slabs with thickness of not less than 1.00m	76	0.45	3.50%	50	235	IP Type V	25
	Reinforced Concrete and Concrete Lining	Walls, slabs, columns and linings with the smallest dimension less than 1.00m & more than 0.30m	38	0.55	2.50%	75	330	(see Section II)	25
B35	Reinforced Concrete and Concrete Lining	Walls, slabs, columns and linings with the smallest dimension less than 1.00m & more than 0.30m	38	0.47	no	75	385	(see Section II)	35
	Reinforced Concrete and Concrete Lining	Walls, slabs, columns and linings with the smallest dimension less than or equal to 0.30m	19	0.47	no	100	440	PC Type I	35
B25	Precast Concrete	Structural concrete cast elsewhere than its final position	38	0.61	no	100	280	PC Type I	25
B35	Precast Concrete	Structural concrete cast elsewhere than its final position	19	0.47	no	100	440	PC Type I	35
B25	Secondary Concrete	Concrete cast between steel structures and concrete cast in the first phase	19	0.61	no	75	335	PC Type I	25
B35	Secondary Concrete	Concrete cast in blockouts and congested spaces	19	0.47	no	75	435	PC Type I	35
	Slush Grout	Contact surface between bedrock and impervious embankment (clay core)	2.4	0.61	no	no	925	PC Type V	25
	Cement mortar	Mortar for grouting joints in Oprecast elements	2.4	0.47	no	no	760	(see Section II)	35

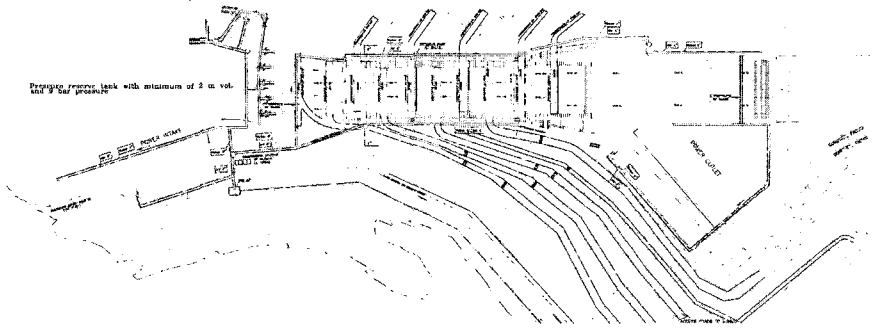


그림 11. Compressed Air 및 Water의 배관 현황

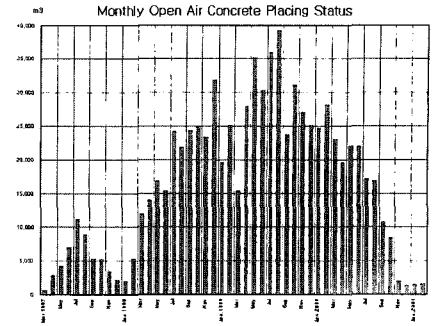


그림 12. 월별 콘크리트 타설 현황

- C2 : Stilling Basin 지역으로 가는 도로
- C3 : Headworks 지역으로 가는 도로
- C4 ~ C7 : Chute 지역으로 가는 도로

5.4 콘크리트 타설

당 현장에 콘크리트 타설시 가장 중요하게 고려했던 점은 타설면적이 넓고 기온이 높아 이로 인한 콜드 조인트가 발생치 않도록 하는 것과 타설후 적당한 시간이 경과한 후 때맞춰 타설면을 Compressed Air + Water로 Green Cut을 해주는 것이었다. 콜드 조인트를 방지하기 위하여 각 층(Layer)간의 시간 간격은 최대 1시간 30분 이내가 되도록 타설계획을 수립하였다. 그리고 앞에서 언급한 바와 같이 콘크리트 타설시 가장 문제가 되었던 것은 발파로 인해 대피와 그로 인한 콘크리트 타설 중단, 비산먼지 청소, 심지어는 타설 중인 구조물의 거푸집 손상 등이었으며, 이를 피하기 위해 중요한 콘크리트는 주로 저녁 발파 후인 야간에 타설되었다.

5.5 다짐 및 양생

콘크리트 다짐장비의 종류는 골재의 최대크기에 따라 선택되었는데 매스 콘크리트인 B25는 콘크리트의 컨시스턴스에 따라 일반 콘크리트에 사용되는 진동기보다는 큰 직경인 100 mm나 150 mm 진동기가 적절한 것으로 판단되었다. 이런 점에서 일반 콘크리트 및 매스 콘크리트용으로 3가지 Type의 Dynapac Pneumatic 진동기(φ75, φ100, φ150 mm)가 사용되었다. 그리고 일반적으로 양생은 살수나 Curing 컴파운드를 사용하였다. <그림 11>은 콘크리트 공사를 위해 설치된 Compressed Air 및 Water의 배관 현황을 보여주고 있다.

6. 콘크리트 월별 타설 현황

본 프로젝트의 월별 콘크리트 타설 현황은 <그림 12>에 나타나 있다. 그림에서 알수 있듯이 피크 때의 월 타설물량은 약 4만 m³에 육박하였다. 이 양은 도면상의

수량이며 Over-excavation에 의한 물량과 Underground(Tunnel) Concrete량을 합치면 피크 때 약 월 5만 m³이 생산·소요되었다. 그림에서 볼 수 있듯이 1999년 9월에는 콘크리트 타설물량이 급격히 감소하였는데 이는 이란 전역에 수출로 인한 시멘트 과동이 발생하여 근 20일간을 제대로 공사할 수 없었기 때문이다. 이로 인해 피크로 치닫고 있던 공사에 막대한 지장을 초래해 그 영향이 수개월간 지속되었던 점이 아쉬움으로 남는다.

III. 발파진동 대책

본 프로젝트 설계시 Open Air Excavation 지역의 얇은 멤 성토재료로 사용하고 굴착이 된 이지역에 콘크리트 구조물을 설치하는 것으로 계획되었다. 따라서 발파 지역과 콘크리트 구조물의 타설지역의 근접성을 예상하여 지방서에는 발파지역과 콘크리트 구조물 타설 지역의 거리가 200 m 이내인 경우에는 발파진동을 고려



그림 13. 여수로 콘크리트 공사중 모습

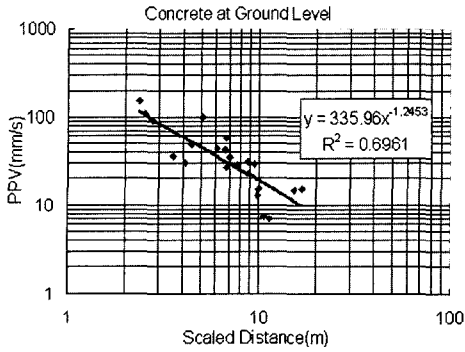


그림 14. 산출된 Calibration Line(지표면)

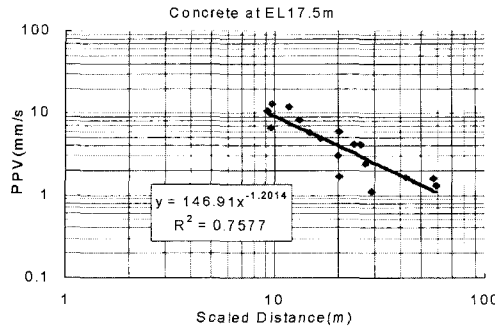


그림 15. 산출된 Calibration Line(17.5 m 높이)

에 기준값이 나타나 있다. 이 표에 의하면 진동수준이 콘크리트에 크게 악영향을 미치는 기간은 프레스 콘크리트가 경화되기 시작한 5 ~ 24시간 동안이다.

2. 지역보정 (Area Calibration)

발파로 인한 진동은 발파 지역의 지질, 지형, 기타 여러 가지 요인에 의하여 지역별로 고유 특성치를 갖게 되므로 "Scaled Distance Method"의 방정식중에서 콘크리트 구조물과 발파 지역의 지역보정인자(a, b)의 값을 구하기 위해 콘크리트 구조물이 지표면에 위치해 있는 경우와 높이가 17.5 m인 2가지 경우에 대하여 거리를 변경해 가며 여러 번의 시험발파를 실시하여 이 시험발파 자료를 근거로 <그림 14>와 <그림 15>를 도출하였다. 도출된 보정인자는 지표면의 경우 a = 335.96, b = 1.2453, EL.17.5 m의 경우 a = 146.91, b = 1.2014이다.

위의 결과에 의해 콘크리트 구조물과 발파 장소와의 거리와 콘크리트 양생기간에 따른 발파시 최대 장약량은 <표 7> 및 <표 8>과 같다.

따라서 당 현장은 이 표를 근거로 아래와 같은 흐름으로 천공 및 발파설계를 하여 발파로 인해 콘크리트 구조물이 피해를

하여 엔지니어의 허락을 득한 후 발파 또는 콘크리트 타설토록 규정되어 있었으며, 대개의 경우 발파지역과 콘크리트 구조물의 거리가 200 m 이내였고 심지어 20 m 정도가 되는 경우도 있어 실제 정상적인 콘크리트 구조물 작업이 상당히 난이하였 으며, 이에 발파로 인한 진동뿐만 아니라 발파시 비산된 암석과 먼지가 양생중이거나 설치가 완료된 콘크리트 구조물에 나쁜 영향을 미치지 않도록 할 조치가 필요했다. 따라서 이의 영향을 방지하기 위하여 시험발파를 통하여 콘크리트 구조물 재령과 발파장소와의 거리에 따라 사용장약량 한계 (kg/delay)를 정하고 제어발파를 실시하여 콘크리트 공사에 미치는 영향을 최소화하도록 노력을 경주하였다. 그러나 하루에 최대 10 ton의 화약을 사용하여 점심/저녁 2회의 발파를 계속할 수 없었기에 다른 프로젝트와 달리 콘크리트 공사와 굴착공사 공히 어려움이 많았음을 부인할 수 없다.

이에 발파로 인한 진동이 콘크리트에 균열 발생 등의 나쁜 영향을 주지 않도록 하기 위하여 "Scaled Distance Method"를 이용한 발파 진동 영향을 검토하여 이 결과를 토대로 콘크리트 양생기간, 타설 높이, 발파지점까지의 거리에 따른 장약량을 발파시 조절하여야 할 필요가 있어 다음과 같은 방법을 적용하였다.

1. Scaled Distance Method

본 프로젝트에 적용한 Scaled Distance Method(the US Bureau of

Mines)는 아래와 같다.

$$PPV = aSD^{-b}$$

$$SD = D/Q^{1/2}$$

여기서 PPV : Peak Particle Velocity(mm/s),
SD : Scaled Distance(m),
D : Distance(m),
Q : Maximum Charge per Delay(kg/delay)
a, b : Area Calibration Factors

여기서 콘크리트 구조물의 양생기간 별로 최대 허용할 수 있는 진동수준(Peak Partical Velocity)은 Ontario Hydro Concrete and Masonry Research Section(Canadian Guideline)의 자료를 기준으로 삼았으며 <표 7> 및 <표 8>

표 7. 지표면 콘크리트의 경우 안전한 장약량

콘크리트 재령	0 ~ 5 hr	5 ~ 24 hr	2 days	3 days	7 days	28 days	90 days
Max PPV(mm/s)*	100	14	30	40	60	85	100
SD(max)	2.646	12.83	6.958	5.52	3.988	3.015	2.646
Distance(m)	Safe Charge (kg/delay)						
20	57	2	8	13	25	44	57
40	229	10	33	53	101	176	229
60	514	22	74	118	226	396	514
80	914	39	132	210	402	704	914
100	1,428	61	207	328	629	1,100	1,428
120	2,057	87	297	473	905	1,584	2,057
140	2,799	119	405	643	1,232	2,156	2,799
160	3,656	156	529	840	1,610	2,816	3,656
180	4,628	197	669	1,063	2,037	3,564	4,628
200	5,713	243	826	1,313	2,515	4,400	5,713

*Ontario Hydro Concrete and Masonry Research Section

표 8. 지표면에서 17.5m 높이 콘크리트의 경우 안전한 장약량

콘크리트 재령	0~5 hr	5~24 hr	2 days	3 days	7 days	28 days	90 days
Max PPV(mm/s)*	100	14	30	40	60	85	100
SD(max)	1.38	7.08	3.75	2.95	2.11	1.58	1.38
Distance(m)	Safe Charge (kg/delay)						
20	210	8	28	46	90	160	210
40	840	32	114	184	359	641	840
60	1,890	72	256	414	809	1,442	1,890
80	3,361	128	455	735	1,438	2,564	3,361
100	5,251	199	711	1,149	2,246	4,006	5,251
120	7,561	287	1,024	1,655	3,234	5,768	7,561
140	10,292	391	1,394	2,252	4,402	7,851	10,292
160	13,443	511	1,820	2,942	5,750	10,255	13,443
180	17,013	646	2,304	3,723	7,277	12,979	17,013
200	21,004	798	2,844	4,596	8,985	16,023	21,004

*Ontario Hydro Concrete and Masonry Research Section

입지 않도록 하였다.

- 1) 콘크리트 재령 결정
- 2) 콘크리트와 발파지역과의 거리 결정
- 3) Guideline으로부터 Delay당 Safe Charge(q) 결정
- 4) 가능한 총 Delay 수
- 5) 총 허용 장약량 계산(Q)
- 6) 적정 Specific Charge(Qs) 결정 (kg/m³)
- 7) 총 가능 굴착량 계산(V = Q/Qs)
- 8) 필요 구멍수 결정(Nh = V/(Burden × Spacing × 깊이))

IV. 맺음말

이상으로 본 프로젝트의 콘크리트 공사를 수행한 사항을 간략히 소개하였다. 대

규모 및 복합적으로 행해진 당 현장의 콘크리트 공사를 단 몇 장의 지면에 전부 설명하기에는 부족하여 대규모의 매스 콘크리트 공사에 유의할 점과 발파 지역과 콘크리트 구조물 공사와 상호 간섭이 되어 이를 극복한 방법을 위주로 소개하였고 각 구조물별 공사 방법에 대해서는 지면이 허락치 않아 기회가 되면 추후에 소개를 하도록 할 방침이다.

본 공사를 수행하면서 새삼 다시 확인한 일이지만 특히 이러한 대규모 콘크리트 구조물 공사의 성공여부는 주도면밀한 계획 수립과 이의 수행에 의해 결정된다고 해도 과언이 아니다. 계획 중 중요한 것을 구태여 언급한다면,

- 콘크리트 생산을 위한 플랜트 설치 계획
- 콘크리트 생산용 자재 조달 계획(시멘트, 골재 등)

- 현장 상황에 맞는 콘크리트 배합설계
- 콘크리트 운반용 도로 계획
- 콘크리트 세부 공종별 인력 조직 운영 계획(콘크리트 타설, 거푸집, 철근 등)
- 적정 자재 선정 및 운영계획(Form, Scaffolding 등)
- 적정 장비 선정 및 운영계획(Lifting, 운반, 타설 등)
- 적정 설비 설치 및 운영계획 (전기, 용수, Air 등)
- 다른 공종과 연관된 계획 (본 프로젝트의 경우 Open Air Excavation)
- 각 구조물별 세부 타설 계획 (Block 및 Lift 별)
- 철저한 품질관리 계획 (위치, Elevation, Alignment, Cleaning, 표면 마감, 양생 등)
- 기타 : 수화열 저감 방법, 발파진동에 대한 대책 등이 있다.

본 공사처럼 대규모 공사는 처음 계획을 세울 때 비용측면을 고려하여 약간 부족하게 시설규모를 갖게 되면 공기 지연 등의 경우가 발생하여 당초 계획보다 더 큰 시설규모가 필요하게 될 경우 몇 배의 비용이 요구될 수도 있으며, 그렇지 않다 하더라도 공사 수행에 알게 모르게 지장을 초래한다는 점을 고려하여 적절한 계획을 수립하는 것이 특히 중요하다.

본 콘크리트 공사는 대림산업(주)가 해외에서 수행한 토목공사 중에서 가장 규모가 큰 공사였으며, 그러기에 공사초기부터 많은 토목인들이 직간접적으로 관여하였던 공사이기도 하다. 어렵사리 공사를 완료하면서 지면을 빌어 본 콘크리트 공사 계획단계부터 참여하였던 여러 선배·동료 직원들의 노고에 감사드리며, 한발자국 떼어놓을 때마다 땀방울이 떨어질 정도로 무척이나 뜨거웠던 현장에서 열심히 일을 해주었던 이란 현지인들과 현지업체 타블리에(TAP)에도 경의를 표한다. □

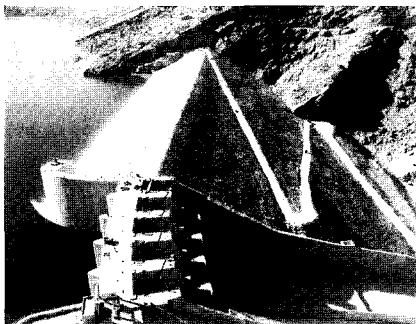


그림 16. 댐우안에서 본 댐 모습

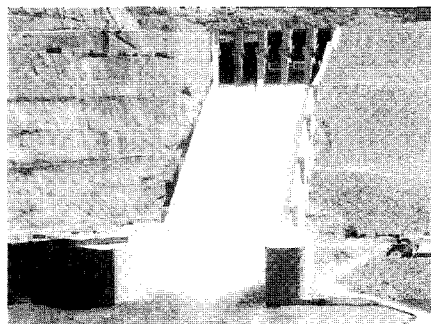


그림 17. 여수로로 물을 방류하는 모습