03

댐 전면월류식 여수로 시공 기술

김용명 단장 /
K-water 평화의댐관리단

이삼종 부장 /
K-water 평화의댐관리단

이현재 차장 /
K-water 평화의댐관리단

박병준 차장 /
K-water 평화의댐관리단

1. 서 론

일반적으로 댐의 주요 구조물인 여수로는 할당된 저류공간에 수용할 수 있는 용량을 초과하는 홍수량 또는 전환댐에서 전환계통의 용량을 초과하는 홍수량을 안전하고 효율적으로 방류할 수 있도록 하는 수로를 말한다. 여수로 위치는 경제성, 친환경성, 지형적 측면 등을 고려하며, 댐 형식을 고려시 흙과 암괴를 사용하는 필댐은 댐 본체와 별개로 저수지 주변의 자연지반에 설치하고 콘크리트댐은 댐 본체에 설치하는게 일반적이다.

하지만, 이러한 일반적 시공방법에서 벗어나 평화의댐에서는 국내 최초로 필댐 본체에 여수로를 설치하기 위한 획기적인 공사를 시공하고 있다. 한국수자원공사(K-water)에서는 당초 200년 빈도의 홍수에 대응할 수 있도록 건설된 평화의댐(강원도 화천군 소재, 콘크리트표면차수벽형석괴댐(C.F.R.D))에 대하여 가능최대홍수량(PMF)이 유입되는 경우 북한 임남댐의 비상사태를 대비하여 댐 안정성 확보와 하류피해 최소화를 위해 2012년부터 치수능력 증대사업을 추진중에 있다. 이러한 치수능력증대 방안으로는 기존댐 하류사면에 여수로를 설치하는 "댐 하류사면 전면 월류식 여수로" 형식을 채택하여 기존 댐 하류사면에 국내 최초로 페이스슬라브를 시공하도록 계획하였다. 2012년 착공 이후 2015.7월 페이스슬라브의 첫 콘크리트 타설이 시작되었으며, 지난 11개월(동절기 중지 5개월 제외)에 걸친 철야작업 끝에 2016.11월 페이스슬라브 시공을 성공적으로 완료하였다.

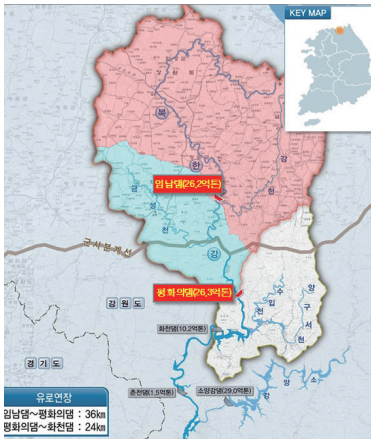
본 고에서는 국내 최초로 적용된 필댐 본체 여수로 설치와 국내 최대 규모의 페이스슬라브 시공 과정과 개선사항을 공유함으로써, 댐 건설기술 제고에 기여하고자 한다.

2. 평화의댐 건설 및 치수능력 증대사업 현황

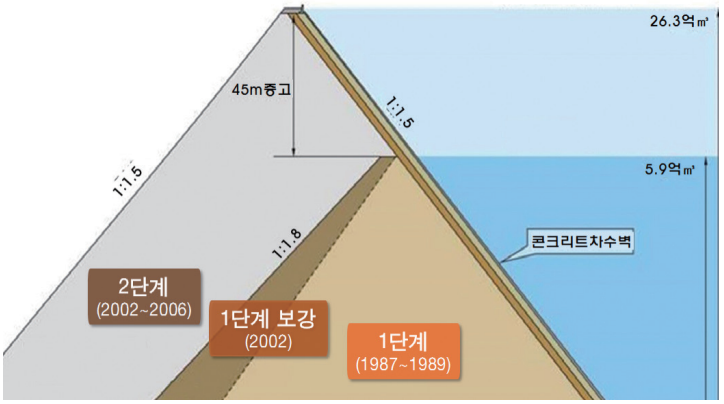
평화의댐은 〈그림 1〉과 같이 강원도 화천군 화천읍 동촌리에 위치하고 있으며, 평화의댐 상류 36km에는 임남댐, 하류 24km에는 화천댐이 위치하고 있다. 임남댐, 평화의댐, 화천댐의 현황은 〈표1〉과 같다. 평화의댐 건설은 북한의 임남댐 진척 상황 등을 고려하여 〈그림 2〉와 같이 단계적으로 추진되었다. 1단계 공사('87 ~ '89)는 임남댐 착수('86)에 따라 임남댐 가물막이 붕괴에 대응하기 위하여 시행(높이 80m, 저수용량 5.9억㎥)되었다.

이후 임남댐 담수 이후 '02.1월 댐체 이상징후 발생에 따른 대규모 방류(3억㎥)와 보수공사 등 임남댐의 불안한 상황에 대비하여 단기대책으로 1단계 보강공사('02)를 시행하고, 장기대책으로는 200년 빈도 강우 및 임남댐의 붕괴로부터 예상되는 막대한 홍수량에 대응하기 위하여 2단계 공사('02~'06)를 시행(높이 125m, 저수용량 26.3억㎥)하였다.
그러나, 최근 빈번해지는 이상기후에 따른 극한홍수 발생시 북한 임남댐을 고려한 가능최대홍수량(PMF)을 검토한 결과, 댐 마루표고(EL.270m)를 3.77m 월류하는 것으로 검토되어 극한홍수 발생에 대비한 댐 안정성을 확보하고자 치수능력 증대사업을 2012년부터 추진 중에 있다.

이러한 치수능력 증대방안은 댐하류사면 보강을 통한 "댐 전면 월류식 여수로 설치 방안", "댐체 증고 방안", "터널식 여수로 설치 방안" 등 다양한 방안을 검토한 결과, 안전성 · 시공성 · 경제성 등이 우수한 "댐 전면 월류식 여수로 설치 방안"을 〈그림 3〉과 같이 채택하였다. 댐 전면 월류식 여수로 설치방안은 사석으로 축조된 댐 하류사면에 콘크리트로 보강(페이스슬라브)하여 하류사면 전체를 여수로로 활용하는 것이며, 치수능력 증대사업 현황은 〈표2〉와 같다.



〈그림 1〉 평화의댐 위치도



〈그림 2〉 평화의댐 단면도

구 분	임남댐	평화의댐	화천댐
유역면적	2,353㎢	3,208㎢	4,073㎢
저수용량	26.2억톤	26.3억톤	10.2억톤
형식	중앙심벽형석괴댐	C.F.R.D	C.G.D
마루고	EL. 315.0m	EL. 270.0m	EL. 184.5m
높이/길이	121.5m/710m	125m/601m	81.5m/435m
여수로	상부3련, 하부3문, 방수로 1문	터널식 (D10m×4련)	문비식 16문
전경			

〈표 1〉 임남댐, 평화의댐, 화천댐 일반현황

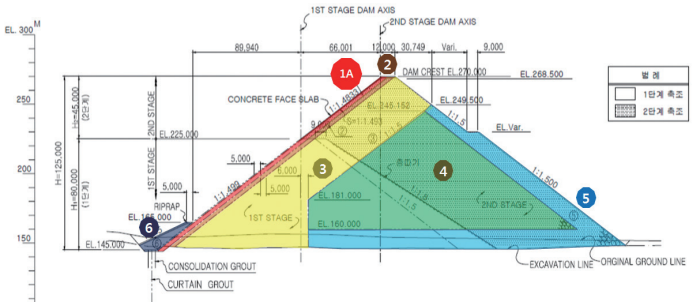
〈그림 3〉 치수능력 증대사업 조감도

총사업비	1,362억원(공사비 1,276, 보상비 8, 관리비 78)
사업기간	2012년~2017년(2018년 변경 예정)
사업내용	댐체 월류식 여수로 설치(댐 높이 변경 없음) – 댐 정상부 및 하류사면 콘크리트 보강 – 도류벽, 감세공 설치 및 친수공원 조성 등

〈표 2〉 치수능력 증대사업 현황

3. 기존 댐 축조 현황

1~2단계에 걸쳐 건설된 평화의댐은 CFRD에서 적용되는 표준 Zoning인 6개의 단면으로 축조되었으며 세부 단면은 〈표 3〉과 같이 구분된다

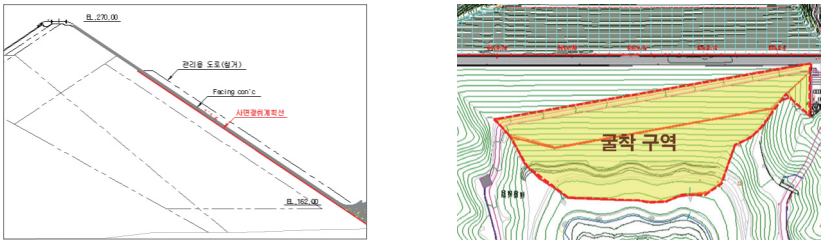


Zone		성토재 및 골재 최대 크기	비고
1-A	Face slab bedding	75mm 쇄석재	
2	Transition/Filter	150mm 쇄석재	
3	Graded Rockfill	800mm, 20~50% 25mm	
4	Rockfill	1,500mm, 50% 25mm	
5	Oversize rockfill	1,800mm 쇄석재	
6	Upsteram blanket	굴착토사 및 풍화토재	

〈표 3〉 치수능력 증대사업 현황

먼저 콘크리트 차수벽을 직접 받치고 있는 차수벽 지지층인 Zone1과 차수벽 균열 발생시 Zone1 재료가 유수에 의해 하류로 유출되는 것을 방지하기 위한 Transition 구간인 Zone2, 축조암의 침하 및 변형을 최소화시키기 위한 Zone3, 댐 축 하류부에 위치하고 있는 Zone4, 댐 하류 사면을 구성하고 높은 투수성을 필요로 하는 Zone5로 구성되어 있다. 그리고 Perimetric Joint의 변형이나 차수벽 균열로 인한 누수 발생에 대비하여 굴착재를 이용하여 1단계 콘크리트 차수벽 위에 축조된 Zone6가 있다.

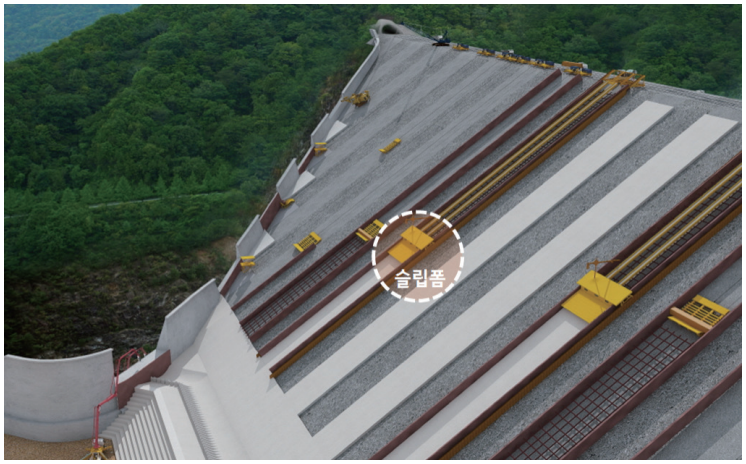
금회 치수능력증대사업은 댐체 월류안을 계획한 바, 방류수 유하시 댐체 하류사면 보호 및 고속류의 난류에 의해서 일어나는 침식을 방지하고 장기간 매끄러운 표면을 유지 할 수 있도록 Zone5 상부 전체를 콘크리트슬래브(페이스슬라브)로 보강하는 것으로 계획하였다. 다만, 당초 평화의댐 하류사면에는 〈그림 4〉와 같이 댐 유지관리를 위한 관리용도로(폭 9.0m)가 위치하고 있어 월류시 유수흐름에 악영향을 줌으로써 하류사면 관리용도로부는 굴착하여 전체 하류사면을 1:1.5의 사면경사로 형성하여 유수 소통에 지장이 없도록 계획하였다. 아울러 관리용도로부를 굴착하여 발생되는 암은 금회 공사의 현장 골재등으로 유용토록 계획하여 별도의 석산개발이 없는 친환경 공사로 계획하였다.



〈그림 4〉 관리용도로 굴착 단면도(좌) 및 평면도(우)

4. 페이스슬라브 시공 현황

댐 전면 월류식 여수로 설치를 위하여 댐 하류사면에 콘크리트 페이스슬라브를 〈그림 5〉와 같이 시공토록 계획하였다. 페이스슬라브는 총 42개의 블록으로 나누어 격간 시공하고, 1개의 블록은 폭 15m, 연장 최대 187m, 두께 1~1.5m로서 국내 페이스슬라브 시공 기록상 최대 및 최장의 규모이며, 댐체 표면에 지정된 두께로 연속타설하여 구조체의 강성을 높이고 균질화된 고품질의 시공품을 얻기 위하여 슬립폼 2기를 투입하였다. 지난 '15.7월 페이스슬라브 첫 콘크리트 타설을 시작으로 11개월(동절기 중지기간 5개월 제외)에 걸친 철야작업을 통해 '16.11월 전체 42BL에 대한 시공을 〈그림 6〉와 같이 성공적으로 완료하였다.



〈그림 5〉 페이스슬라브 시공 모식도

〈그림 6〉 시공전(좌) 및 시공후(우)

4.1 페이스슬라브 시공 절차

① 기존 댐 하류사면 굴착

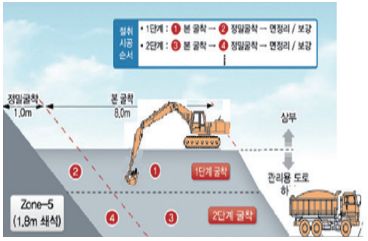
기존 댐 하류사면에 위치한 관리용도로부(Zone5)를 〈그림 7〉과 같이 굴착하여 유수 소통에 지장이 없도록 하였다. 굴착은 정밀굴착구간과 본굴착구간으로 나누어 시공하였다. 정밀굴착구간은 사면 절취계획선에서 1m이내의 절취구간으로 브레이커를 사용하여 돌출암을 제거하고 굴삭기로 정밀 면정리로 시공하였으며, 본굴착구간은 정밀굴착구간을 제외한 작업구간으로 굴삭기, 리퍼도저를 이용해 시공하였다.

② 기초처리

굴착된 사면부의 기초처리를 위해 〈그림 8〉과 같이 관리용도로 상부는 급경사수로 타설시 평탄성 확보를 목적으로 요철부 측량을 통해 0.15m의 숏크리트를 타설하였으며, 관리용도로 하부는 당초 최대 골재크기 1,800mm로 축조되어 상당한 규모의 요철면이 발생할 것으로 예상되어 평균 0.5m의 저슬럼프 콘크리트 타설을 실시하였다.

기존 댐 하류사면 전경 및 도로 철거 착수

기존 댐 Zone5 암석(최대치수 1.8m)



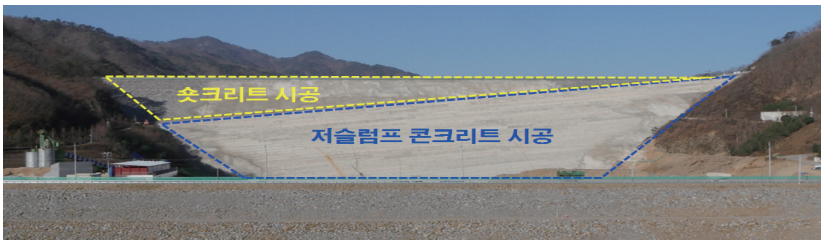
댐사면 단계별 굴착 개요도

하류사면 굴착 전경

〈그림 7〉 기존 댐 하류사면 굴착 전경

저슬럼프 콘크리트 타설 전경

숏크리트 타설 전경

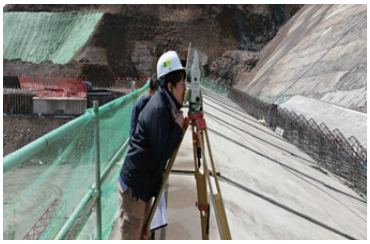


댐사면 단계별 굴착 개요도

〈그림 8〉 기초처리

③ 사면측량 및 타설구간 정리

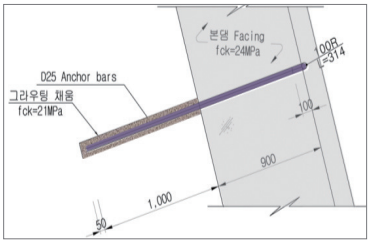
숏크리트와 저슬럼프 큰크리트로 정리된 댐 사면에 대하여 〈그림 9〉와 같이 측량을 실시하여 표면정리와 페이스슬라브 타설을 위한 대차장비 레일설치용 몰탈패드의 타설 높이를 결정하였다.



〈그림 9〉 사면 레벨 측량(좌) 및 타설면 정리(우)

④ 앵커 설치

앵커는 기존댐체와 신규 타설되는 페이스슬라브의 일체화 등을 위해 계획하였다. 시공은 〈그림 10〉과 같이 천공대차에 거치한 천공기(미니 크롤러 드릴)를 사용하여 깊이 1m로 천공 후 앵커바(D=25mm)를 삽입하고 그라우팅을 실시하였다.



〈그림 10〉 앵커바 설치도면(좌) 및 천공작업 전경(우)

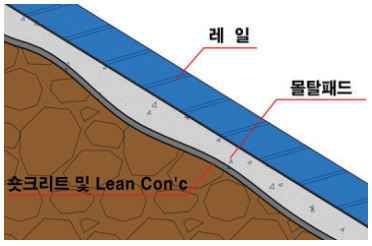
⑤ 몰탈패드 및 레일폼 시공

기존 댐 하류사면의 장기 거동에 따른 굴곡부를 극복하기 위하여 〈그림 11〉과 같이 몰탈패드를 시공하여 평탄성을 확보하고 몰탈패드 상부에 레일폼을 설치하였다. 레일폼은 페이스슬라브의 측면 거푸집 역할과 더불어 슬립폼의 이동로이기 때문에 레일폼의 정확한 시공은 페이스슬라브 최종 타설면의 정밀도와 직결되는 매우 중요한 작업이었다. 또한 페이스슬라브의 타설두께는 1.0m~1.5m로서 레일폼의 높이가 높아 콘크리트 측압 및 슬립폼 이동에 따른 레일폼 전도 방지를 위하여 레일 외측에 L형 형강 지지대를 설치하여 안전성을 향상시켰다.

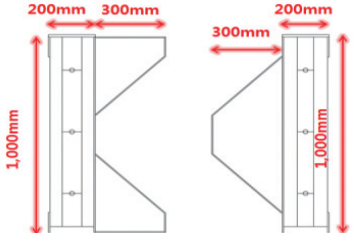
⑥ 철근 및 데크플레이트 설치

철근은 콘크리트의 건조수축과 시공과정에서 지지층의 불균등으로 인한 예측할 수 없는 국부적인 인장영역에서 발전되는 슬래브 균열의 균열폭을 억제시키며 슬래브 판을 유연하게 하여 양방향으로 동등한 휨저항을 받도록 〈그림 12〉와 같이 D19 철근을 300mm 간격으로 배근하였다. 또한, 페이스슬라브의 이음부는 부등침하와 수평변위 등 예기치 못한 댐체 변위 및 하중 분배 등에 대한 내하력 확보를 위하여 침하와 변위를 방지하는데 유리한 치형블럭을 〈그림 12〉와 같이 수직이음간격 L=15.0m, 수평이음간격 L=30.0m로 시공하였다. 수직이음은 레일폼을 치형블럭 형식으로 제작하여 콘크리트 타설 후 제거하고, 수평이음은 슬립폼 연속시공을 위하여 스테인레스 재질로 제작하여 매립하였다.

몰탈패드 타설 전경



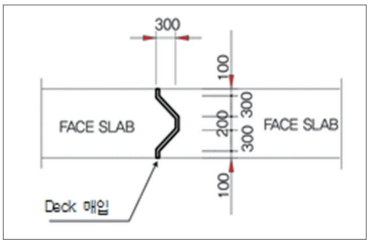
몰탈패드 타설 및 레일폼 설치 모식도



레일폼(수직이음) 정면도

레일폼 지지대 설치 사진

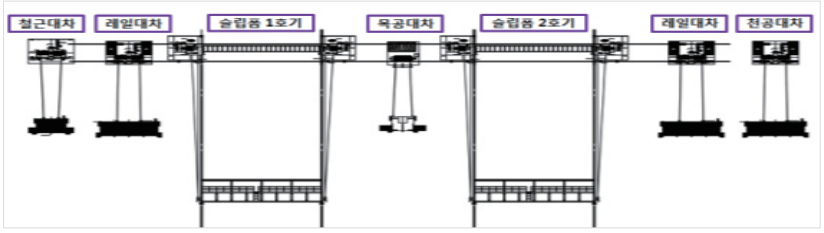
〈그림 11〉 몰탈패드 및 레일폼 시공 전경



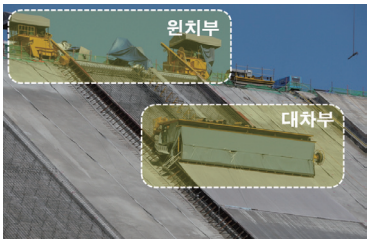
〈그림 12〉 철근 및 데크플레이트(수평이음) 설치 전경(좌) 및 데크플레이트 설치 모식도(우)

⑦ 슬립폼 및 작업대차 설치

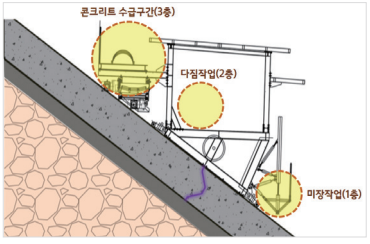
〈그림 13〉과 같이 슬립폼 2기와 작업대차 5기를 운영하여 콘크리트 타설 및 제반 작업의 용이성을 기하였다. 각 장비는 윈치부와 대차부로 구분되며 윈치부는 댐 정상부에 설치된 레일위에 거치하여 대차의 지지와 제어를 담당하였으며 윈치와 대차는 D32 와이어로프로 연결되었다. 슬립폼 대차부는 콘크리트 공급, 다짐, 미장, 양생작업이 가능하도록 3층의 구조로 구성되었으며 작업대차 중 천공대차는 앵커설치 작업, 목공대차는 각재운반 및 몰탈패드 작업, 레일대차는 레일운반 및 조립, 철근대차는 철근운반 및 조립에 사용하였다.



슬립폼 및 작업대차 구성도



슬립폼 설비 구성도



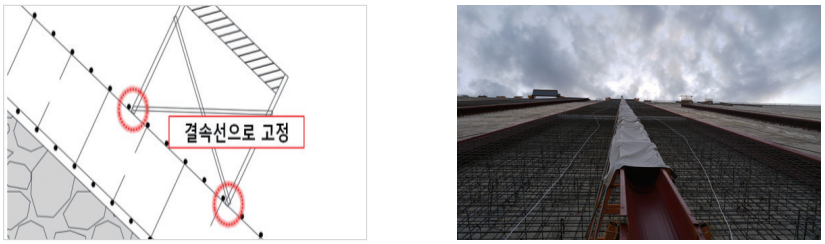
슬립폼 대차부 단면도

〈그림 13〉 슬립폼 및 작업대차

⑧ 슈트 설치 및 콘크리트 공급

페이스슬라브 연장이 최장 187m임에 따라 슬립폼 대차부에 콘크리트 공급을 위하여 〈그림 14〉와 같이 댐 정상부로부터 하단까지 슈트를 연속하여 연결하였으며, 우기시 품질 확보 및 혹서기 수분 증발을 방지하기 위하여 슈트 상부에 방수재질 덮개를 설치하였다. 콘크리트 공급용 슈트는 설치시 상단부에 와이어로프로 견고히 고정하고 페이스슬라브 철근과 결속선 및 철근으로 단단히 고정하였다. 전체적인 콘크리트 공급은 "레미콘 트럭→상부 컨베이어 벨트→슈트→슬립폼(대차부) 내 컨베이어 벨트" 경로를 통해 공급되었다.

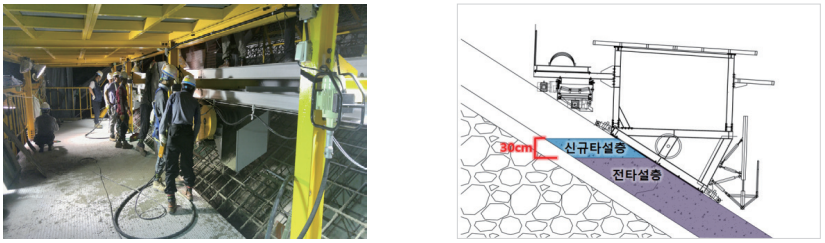
⑨ 콘크리트 타설



〈그림 14〉 콘크리트 슈트 설치 모식도(좌) 및 덮개설치 전경(우)

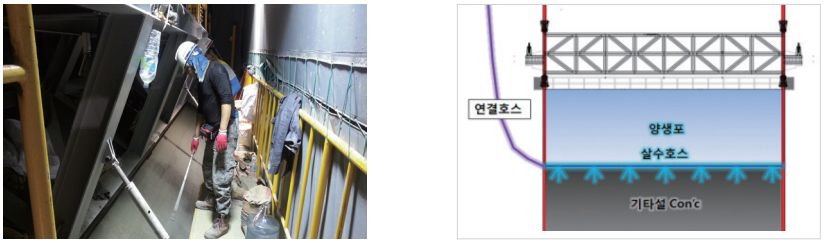
페이스슬라브 1개 BL의 타설은 슬립폼 내부에 설치되어 있는 컨베이어 벨트를 이용하여 좌우 타설 높이의 차이가 발생하지 않도록 관리하며, 슬립폼 상향속도는 기상상황 등 현장여건에 따라 변동은 있지만 시간당 1m를 유지할 수 있도록 관리하였다. 상향속도가 콘크리트 경화속도보다 빠르면 타설면에 배부름현상이 발생하고, 속도가 늦어지면 초기경화에 따라 타설면의 미장작업에 어려움이 발생하여 타설면이 불량해지는 문제가 발생한다.

콘크리트 타설시 〈그림 15〉와 같이 다짐봉 5개를 슬립폼 기둥에 거치하고 적정인원의 다짐인부를 배치하여 다짐을 실시하고, 전(前) 타설층 위로 30cm정도 신규 타설층을 형성하고 다짐봉으로 전 타설층까지 삽입하여 콜드조인트 발생을 방지하였다.



〈그림 15〉 콘크리트 다짐 전경(좌) 및 타설층 형성 모식도(우)

슬립폼 상향 후에는 노출된 타설면을 즉시 미장하고 〈그림 16〉과 같이 피막양생제를 2회 전면 분무 살포하였으며, 슬립폼 하단에는 비닐호수에 0.3m간격으로 10mm의 구멍을 뚫어 28일간 살수양생을 실시하였다.



〈그림 16〉 피막양생 전경(좌) 및 살수양생 모식도(우)

4.2 페이스 슬라브 시공 결과

상기와 같은 작업을 반복 작업하여 작업의 숙달도를 높이며 지난 11개월간에 걸쳐 페이스슬라브 시공을 완료하였으며, 본 공종에 투입된 제원 및 현황은 〈표 4, 5〉, 전체적인 시공전경은 〈그림 17〉과 같다.

구분	내 용	비고
블록수	42BL(슬립폼 타설 35BL, 인력타설 7BL)	
블럭폭	15.0m	
블록길이	총길이 : 5,130m, 최장길이 : 187m(사면경사 : 1:1.5)	
콘크리트 면적	74천㎡	
콘크리트 수량	104천㎥	
작업기간	철야 돌관공사 11개월 ('15.7.10~'16.11.27, 동절기 공사중지 5개월)	
투입장비	슬립폼 2기, 작업대차 5기 (철근 2, 레일1, 목공 1, 천공 1)	
투입인력	전체 21천명	

〈표 4〉 페이스 슬라브 공종 주요 투입 제원

구분 (43일)	앵커 (7일)	몰탈패드 (5일)	레일 (7일)	철근 (9일)	슈트 (1일)	콘크리트 타설 (14일)
투입 인력	3	15	10인 (5인×2조)	25	7명	18인 (9인×2교대)

* 콘크리트 타설 : 슬립폼 원치부 1인, 다짐공 5인, 미장공 2인, 슬립폼 대차부 운영 1인

〈표 5〉 페이스 슬라브 1BL(최장 길이 187m 블록 기준) 당 공정 및 투입인원

〈그림 17〉 페이스 슬라브 시공 전경

5. 페이스슬라브 시공 개선사례

5.1 데크플레이트(수평이음부 자재) 시공 개선

① 재질변경

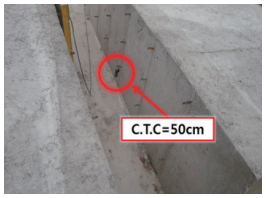
데크플레이트는 페이스슬라브 연속타설로 인해 설치 후 매입하도록 계획되었다. 당초 설계된 데크플레이트의 재질

은 전기방식 아연도금 강판으로 영구적인 방청재질이 아니며 시공 중 강판 절단이 필요한 경우 절단면은 아연도금 효과가 없어질 것으로 예상되었다. 또한, 댐사면 경사부에 시공되는 이음부는 〈그림 18-좌〉와 같이 강우시 표면수 유입이 용이하여 장기간 노출시 녹발생으로 댐 미관 및 기능저하가 우려되었다. 이에 따라, 전기방식 아연도금강판보다 방청성이 우수한 용융 아연도금 강판 및 스테인레스 합금판을 비교하였으며, 검토결과 스테인레스 합금판이 방청성 및 가공에 따른 변형저항성이 가장 양호한 것으로 검토되어 〈그림 18-우〉와 같이 제작하여 현장에 적용하였다.

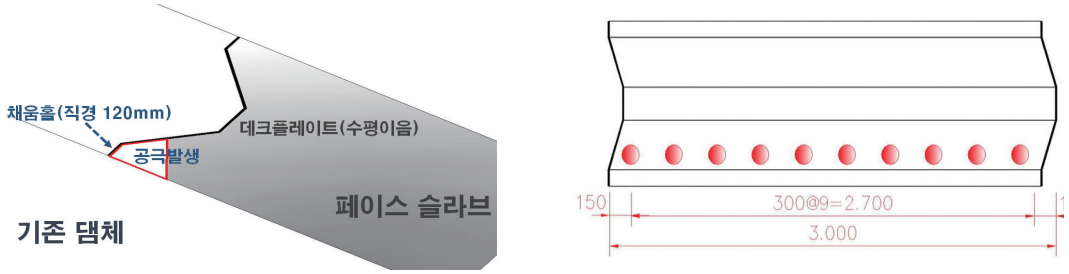
〈그림 18〉 수평이음부 우수 유입 모식도(좌) 및 스테인레스 합금판(우)

② 데크플레이트 하부 공극 최소화 방안

데크플레이트의 치형 형상으로 콘크리트 타설시 하부공간 공극 발생이 우려되어 데크플레이트 하단부에 채움홀(hole)을 설치하여 밀실하게 타설되도록 개선하였다. 적정한 채움홀 간격 결정을 위해 직경 120mm의 홀을 3가지 조건으로 모형시험을 실시하였으며, 시험 결과 〈표 6〉과 같이 0.3m 간격으로 채움홀을 설치한 경우 공극이 발생하지 않음을 확인하여 〈그림 19〉와 같이 시공하였다

구 분		1구간 (40-24-120)	2구간 (40-24-80)	3구간 (40-24-60)
홀 간격	미설치	매우 불량	다소 미흡	불량
	0.5m	다소 미흡	불량	다소 미흡
	0.3m	양호	양호	양호
시험결과				

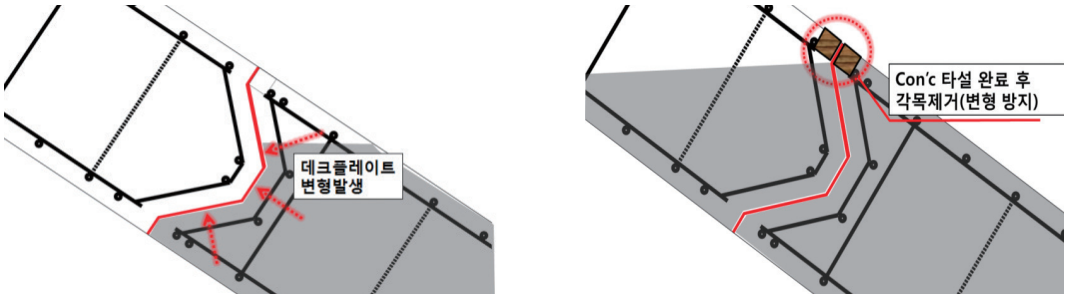
〈표 6〉 데크플레이트 하부공극 시험결과



〈그림 19〉 당초 공극발생 모식도(좌) 및 타설 홀 설치 정면도(우)

③ 콘크리트 타설시 데크플레이트 변형 방지 방안

데크플레이트 구간 타설시 콘크리트 하중에 따른 데크플레이트 변형과 컨베이어 벨트에서 낙하되는 큰크리트에 따른 데크플레이트 상단부 훼손이 예상되어 〈그림 20〉과 같이 타설시 데크플레이트 기준 상 · 하면 동시타설을 통해 콘크리트 측압에 의한 밀림 현상을 해소하였으며 데크플레이트 상단부에 각목을 이용하여 임시 고정하여 데크플레이트 상단부의 훼손을 최소화하였다.



〈그림 20〉 당초(좌) 및 개선(우)

5.2 콘크리트 최적 다짐방안 검토

최적의 콘크리트 시공 및 품질확보를 위하여 〈그림 21〉과 같이 고주파 및 저주파 다짐기의 성능비교를 실시하였다. 시험결과 다짐의 시공성은 저주파 다짐기가 다짐범위 및 다짐정도가 더 양호한 것으로 확인되었으며, 시험 후 다짐면 상태는 육안으로는 비교 판단이 불가능하였으나, 코어 채취 후 7일 압축강도 시험결과 〈표 7〉과 같이 저주파 다짐기를 사용한 콘크리트의 압축강도가 더 우수한 것으로 확인되어 저주파 다짐기를 적용하였다.

〈그림 21〉 고주파, 저주파 다짐기 비교시험(좌) 및 코어 채취 전경(우)

구분	규격	7일 압축강도(MPa)			평균강도 (Mpa)	비고
고주파 다짐기	40-24-60	5.72	7.18	7.41	6.77	
저주파 다짐기	40-24-60	5.83	8.12	8.73	7.56	

〈표 7〉 7일 압축강도 시험 결과

아울러, 지난 11개월간 저주파 다짐기를 사용하여 시공한 페이스슬라브의 콘크리트 강도 시험 결과 〈표 8〉과 같이 약 33MPa 측정되어(설계강도 24MPa 대비 약 140% 강도 증진) 저주파 다짐기는 페이스슬라브 품질향상에 일정부분 기여된 것으로 판단되며, 콘크리트 강도 시험 전경은 〈그림 22〉와 같다.

시험위치	반발경도(MPa)		
	측정값	설계값	비율(%)
하류사면1	33.8	24	140.8
하류사면2	34.0	24	141.7
하류사면3	33.2	24	138.3
평균	33.7	24	140.3

〈표 8〉 콘크리트해머에 의한 비파괴 시험 결과

〈그림 22〉 콘크리트 강도 시험 전경

5.3 슬립폼 안정성 강화

① 안정적 슬립폼 구동을 위한 인버터 설치

〈그림 23〉 슬립폼 이동 전경

슬립폼은 거푸집 역할을 하는 대차부와 대차를 끌어올리는 윈치부로 구성된다. 윈치부는 대차의 하중을 지지하고 대차가 이동 · 정지할 수 있도록 인양장치(모터, 감속기, 브레이크)가 위치한 부분이다. 모터를 통해 발생한 일정한 회전속도는 감속기를 통해 적정한 회전속도로 낮추어 사용하게 된다.

현장에 최초 반입된 슬립폼의 시운전 결과 몇가지 개선 필요 사항을 도출했다. 첫번째는 슬립폼의 운행속도가 너무 빨랐다. 이동속도 분석결과 약 0.1m/sec인 것으로 보여졌다. 두번째는 슬립폼이 출발 · 정지되는 시점에서 운행속도가 안정적으로 가 · 감속되지 않는 현상이 발생되었다.

슬립폼은 최대 수직높이 125m에서 위치하며, 〈그림 23〉과 같이 좁고 높은 레일폼(폭 0.2m, 높이 1~1.5m) 위로 하강 · 상승되어야 하는 환경으로, 이러한 빠른 속도와 일정하지 않은 운행속도는 자칫 레일폼을 이탈하여 슬립폼이 추락할 수 있는 위험요소로 판단하였다. 또한, 레일폼 상단에 불가피하게 존재하는 이물질이나 미세한 단차구간을 통과시에는 더욱 불안한 운영여건에 놓일수 있을 것으로 예측되었다.

이에 따라 슬립폼을 안정적으로 운영제어가 가능토록 인버터를 장착하게 되었다. 인버터란 V.V.V.F(Variable Voltage Variable Frequence/가변전압 가변주파수) 기능을 가지고 있는 전기장치이다. 모터에 공급되는 전원의 주파수(60Hz)를 사용자 요구에 맞게 조정하여 모터 회전속도를 가변적으로 제어해 주는 장치이다.

$$N = 120\frac{F}{P}(1 - S)$$

N:회전속도(RPM), F:주파수(HZ), P:모터의 극수, S:모터의 미끌어짐

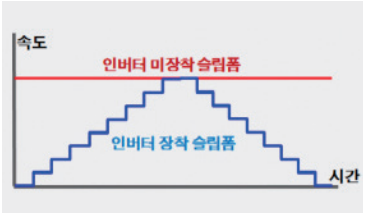
본 현장에서는 인버터를 설치하여 전원의 주파수를 조절하여 슬립폼 속도를 제어할 수 있고, 일정한 주파수를 모터에 안정적으로 공급하여 슬립폼 운행의 안정성을 도모할 수 있을 것으로 예측하였다.

이에 따라 슬립폼 윈치부에 〈그림 24〉과 같이 인버터를 장착하였으며 인버터는 전원과 모터사이에 위치하여 사용자가 설정한 주파수로 모터에 전원이 공급될 수 있도록 하였다. 또한 좌 · 우 윈치에 각각 인버터를 설치하여 운행시 슬립폼 대차가 기울어 질 경우에도 각 윈치모터에 상이한 회전속도를 공급하여 슬립폼 대차가 수평상태로 재위치 할 수 있도록 하였다.

〈그림 24〉 인버터 설지 전경(좌) 및 전력공급 계통도(우)

인버터 설치 후 슬립폼 운영여건은 더욱 안정적으로 개선되었다.

첫번째로, 당초 모터의 정격 주파수인 60Hz 상태에서는 슬립폼이 0.1m/sec의 빠른속도로 단일 운영만이 가능하였으나, 주파수를 1Hz~60Hz사이에서 0.1Hz 단위로 조정할 수 있게 되어 주의운전이 필요한 구간에서는 감속운행 등 슬립폼의 속도제어를 통해 운영의 안정성을 도모할 수 있었다. 각 Hz별 이동속도는 〈그림 25〉과 같이 확인되었으며 그간 슬립폼 운영결과 본 현장에서는 평균 10Hz에서 0.017m/sec가 되어 가장 안정적으로 운영할 수 있는 것으로 도출되었다.

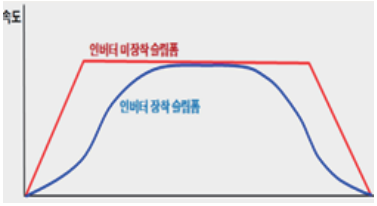


구분	이동속도
5Hz	0.008m/s
10Hz	0.017m/s
15Hz	0.025m/s
20Hz	0.033m/s
60Hz	0.100m/s

〈그림 25〉 인버터 설치시 단계별 속도제어 그래프(좌) 및 주파수별 이동속도 측정결과(우)

두 번째로 모터의 출발 · 정지시점에서 최고 주파수의 즉각적인 공급으로 발생하는 슬립폼의 불안정 운영은 〈그림 26〉과 같이 단계적 주파수 공급으로 슬립폼은 안정적으로 출발 · 정지 할 수 있었다.

이처럼 인버터를 장착한 슬립폼은 현장여건에 적정한 속도를 설정하여 가변적으로 이동할 수 있었으며 급출발 · 정지없이 안정적으로 운영 할 수 있었다.

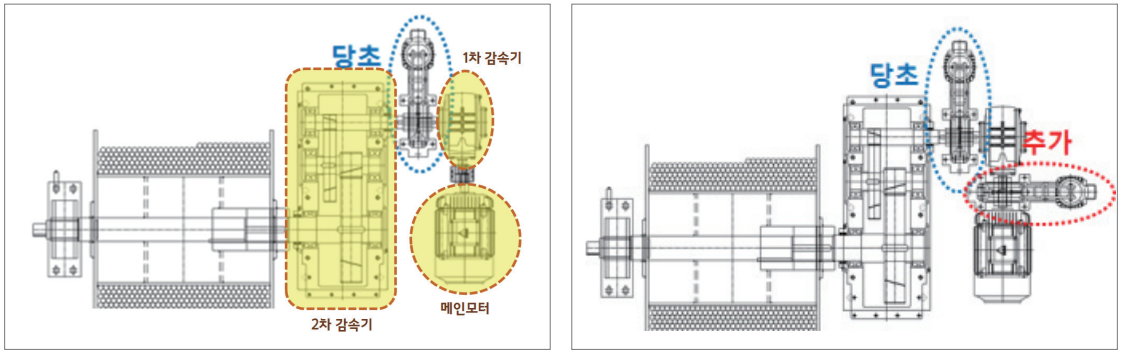


〈그림 26〉 인버터 설치시 안정적 운영 그래프

② 메인모터와 1차 감속기 사이 브레이크 추가

당초 1차 감속기와 2차 감속기 사이 1개의 브레이크를 설치하였으나, 〈그림 27〉과 같이 모터와 1차 감속기 연결 축에 브레이크를 추가 설치하여 하나의 브레이크에 이상이 발생하더라도 충분한 제동력을 확보하도록 하였다.

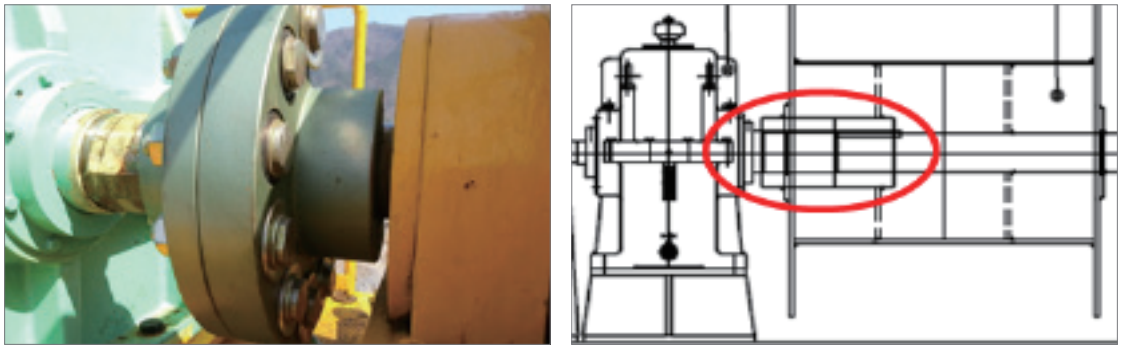
(브레이크의 성능은 모터 구동토크(18.2kg · m)의 150%(27.3kg · m) 이상이 되도록 구축)



〈그림 27〉 당초 브레이크 설치도(좌) 및 개선 브레이크 설치도(우)

③ 커플링 조립구조 개선(감속기축–와이어드럼축 연결부)

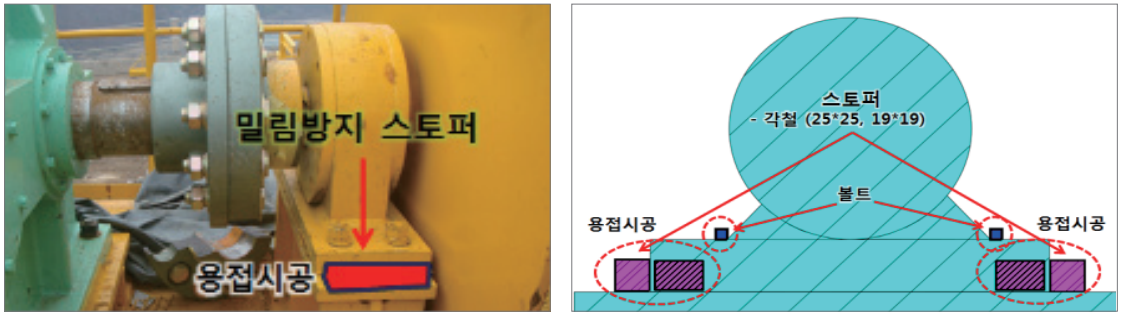
주물소재를 사용하여 충격력에 대한 인성이 떨어지는 플랜지형 커플링에서 〈그림 28〉과 같이 일체형 커플링(재질 : 기계 구조용 탄소 강재(S45C))으로 변경하여 구조적 안전성을 확보하였다.



〈그림 28〉 당초 플랜지형 커플링(좌) 및 개선 일체형 구조(우)

④ 주요 구동부 밀림방지용 스토퍼 설치

슬립폼의 장기간 사용시 주요 구동부의 미세한 밀림을 방지하기 위하여 기존 볼트체결과 더불어 〈그림 29〉와 같이 스토퍼를 설치하였다.



〈그림 29〉 당초 플랜지형 커플링(좌) 및 개선 일체형 구조(우)

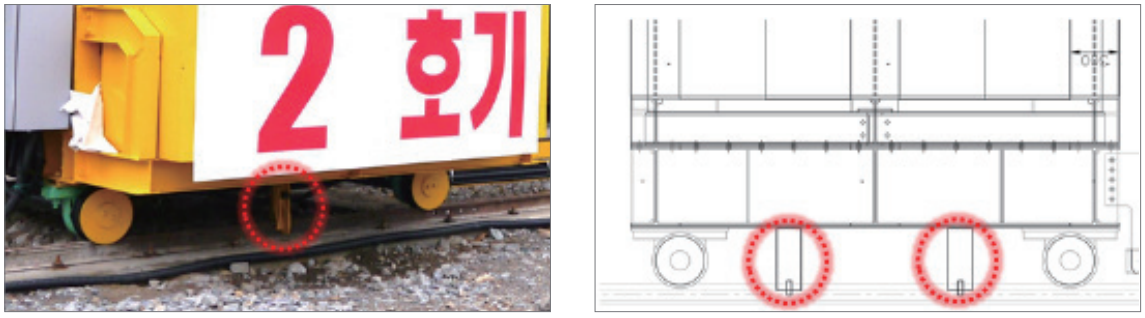
⑤ 무선 조정기기 설치

슬립폼의 레일 이탈 등 돌발 상황에서 조작원의 안전을 보장하기 위해 슬립폼 외부에서도 슬립폼 제어가 가능하도록 〈그림 30〉과 같이 무선 조정기기를 설치하였다.

〈그림 30〉 당초 유선 조정기기(좌) 및 개선 무선 조정기기(우)

⑥ 레일스토퍼 수량 증가

슬립폼 윈치부의 레일스토퍼를 〈그림 31〉과 같이 추가 설치(1개→4개/윈치 1기당)를 통해 슬립폼 상승 · 하강 중 슬립폼 윈치부의 움직임 억제와 전도에 대한 저항력을 강화하였다.



〈그림 31〉 당초 레일스토퍼(좌) 및 개선 레일스토퍼(우)

⑦ 와이어로프 처짐방지 지지대 설치

최장 187m에 이르는 장대 사면길이로 슬립폼 윈치부와 대차부를 연결하는 와이어로프는 좌 · 우 장력 불균형으로 대차의 인상력 차이가 발생하여 슬립폼 상승시 일부 원활치 않은 움직임 발생과 와이어로프 훼손이 우려됨에 따라 〈그림 32〉와 같이 와이어 로프 처짐구간 내 지지대를 설치하여 좌 · 우 인상력 차이를 최소화하였다.

〈그림 32〉 당초 와이어로프 끌림(좌) 및 개선 와이어로프 지지대 설치(우)

이러한 슬립폼에 대한 여러 개선사항은 슬립폼을 안정적이고 탄력적으로 운영할 수 있게 하여 페이스슬라브의 성공적 완수에 중요한 기반이 되었다. 아울러, 기계에 전달되는 충격하중 감소로 주요 기계장치의 수명연장 및 이에 따른 슬립폼 유지관리 비용절감 효과와 사고 예방에 따른 간접적 비용절감 효과도 예측해 볼 수 있다.

6. 결론

2012년 11월에 시작된 평화의댐 치수능력 증대사업은 치수능력 증대사업 중 유일하게 댐 전면월류식 여수로 설치 형식을 채택함에 따라 여수로 시공의 획기적인 방안을 수립 제시하였다. 그리고 핵심공종인 기존댐 하부사면 보완과 페이스슬라브 공사를 추진하면서 그간 국내 댐에서 시공한 경험을 바탕으로 슬립폼 안정성 개선 등을 통해 안전한 작업환경 하에서 시공성 및 품질을 제고하여 성공적인 시공방법을 확인할 수 있었다.

본 고는 극한홍수 발생시 기존 C.F.R.D. 댐체의 안정성을 유지하고 댐체 월류수를 방류할 수 있는 국내 최초의 전면월류식 여수로 페이스슬라브 시공사례를 중심으로 소개하였으며, 향후 표면차수벽 페이스슬라브 시공은 물론, 전면월류식 여수로 시공 기술 발전에 초석이 되고자 한다. 그간 페이스슬라브의 성공적 추진을 위해 함께 열정을 쏟은 K-water 김권일 처장, 김영우 처장, 서승철 부장, 채병수 부장, 김창준 부장, 이덕진 차장, 장창렬 차장, 이서우 대리, 김현석 대리, 김종석 대리, 고병철 대리 및 시공사인 대림산업 등 여러 참여자 분들의 노력에 감사를 드린다.

한편, 평화의댐 치수능력 증대사업은 2016년 12월 현재 78%의 공정이 진척중에 있으며, 2017년에 주요 구조물에 대한 시공을 완료하고, 조경 및 건축공사 등 친수공간 조성을 거쳐 2018년에 사업을 완료할 계획으로 매진하고 있다.

참고문헌

- 국토해양부.「댐설계기준」. 2011
- 건설교통부 · K-water.「평화의댐 건설사업 공사지」. 2006
- 국토교통부 · K-water.「평화의댐 치수능력증대 건설공사 실시설계 보고서」. 2013
- 수자원기술.「평화의댐 치수능력증대 건설공사 정기안전점검(4차) 보고서」. 2016

KNCOLD Magazine
Vol.40

Korea National Committee on Large Dams

Ⅲ. 2016년 주요 행사

① 제84차 ICOLD 연차회의 참관기 62

② 제4회 APG 심포지엄 및 제9회 동아시아 댐기술 교류회의(EADC) 참관기 65

③『최신 댐 안전 및 유지관리 기술』국제심포지엄 개최기 70

④ JEF 활동기 75