대규모 단층특성을 고려한 최적 댐위치 및 형식 선정

김한중*, 유영권, 김영근, 임희대

A Study on Optimization for Location and type of Dam
Considering the Characteristic of Large Fault

Han-Jung Kim*, Young-Gwon Lyu, Young-Geun Kim, Hee-Dae Lim

Abstract Youngju multipurpose dam is planned to minimizing the damage by flood and obtaining the water for industrial use in Nakdong river region. Faults in rock mass have strong influences on the behaviors of dam structure. Thus, it is very important to analyse for the characteristics of fault rocks in dam design. However, due to the limitation of geotechnical investigation in design stages, engineers have to carry out the additional geological survey including directional boring to find the distribution of faults and the engineering properties of faults for stability of dam. Especially, the selection of location of dam and type of dam considering fault zone must be analyzed through various experimental and numerical analysis. In this study, various geological survey and field tests were carried out to analyse the characteristics of the large fault zone through the complex dam is designed in foundation region. Also, the distribution of structural geology, the shape of faults and the mechanical properties of fault rock were studied for the reasonable design of the location and type of dam for long-term stability of the complex dam.

Key words Large fault, Concrete face rockfill dam, Complex dam, Dam foundation, Dam Stability

초 록 영주다목적댐은 낙동강 중하류 갈수기 하천유지용수 확보와 낙동강 본류 및 내성천 연안지역의 홍수재해 방어, 경북북부지역의 안정적인 용수공급을 위하여 계획되었다. 일반적으로 댐설계시 단층은 댐 안정성에 있어 매우 중요한 리스크 요소이므로, 단층의 공학적 특성은 반드시 고려되어야만 한다. 본 댐의 경우 지반조사결과 댐하부에 대규모의 단층대가 확인됨에 따라 댐의 장기적인 안정성을 확보하기 위하여 댐위치 및 댐형식에 대한 보다 공학적인 검토가 요구되었다. 본 연구에서는 노두와 시추조사시 확인된 대규모 단층대가 확인됨에 따라 단층대의 공학적 특성을 규명하기 위하여 다양한 지질조사 및 현장시험을 실시하였다. 이와 같은 단층대 특성을 반영하여 단층의 영향을 최소화할 수 있는 최적의 댐 위치를 선정하였으며, 단층대를 포함한 기초지반의 특성을 반영하여 좌안에는 콘크리트 중력식댐을 우안에는 콘크리트 차수벽형 석괴댐형식의 복합댐을 선정하였다. 또한 단층처리 및 기초지반 그라우팅을 실시하여 댐 구조물의 안정성을 확보하도록 하였다.

핵심어 대규모 단층대, 콘크리트 표면차수벽 석괴댐, 복합댐, 기초지반, 댐구조물 안정성

1. 서 론

낙동강은 중하류에 경제사회 활동이 집중되는 대도시가 위치하여 수질이 악화되어 상류로부터 맑은 물 공급이 필요하나 2001년 수자원 장기종합계획에 따르면 낙

동강 권역 용수부족량은 2011년 748백만 m^3 , 2016년 889백만 m^3 , 2020년 1,000백만 m^3 에 달하는 것으로 예상하고 있다⁽¹⁾. 이에 기존댐의 연계운영 및 해수담수화 등 단기적인 대책과 병행하여 중장기적으로 신규 수자원확보가 필요한 것으로 검토되었다. 또한 2009년 재해연보에 따르면 최근 10년간 영주시를 비롯한 내성천 하류 예천군, 문경시, 상주시에서는 홍수로 인하여 25건, 총 1억 8천만의 피해가 발생한 바 있다.

이에 송리원 다목적댐에 대한 타당성 조사를⁽²⁾ 바탕으로 영주다목적댐에 대한 기본계획과 설계가 수행되었다. 영주다목적댐 지점은 낙동강 제1지류인 내성천 중상류부에 위치하며 행정구역상 경상북도 영주시 평

Received: Aug. 3, 2012

Revised: Aug. 22, 2012

Accepted: Aug. 23, 2012

*Corresponding Author: Han-Jung Kim

Tel) +82543392200, Fax) +82632704636

E-Mail) hjkim@kwater.or.kr

Korea water resources corporation

200 beon-gil, Sintanjin-ro, Daedeok-gu, Daejeon 306-711, Korea

Fig. 1. 영주댐 다목적댐 전경

은면에 위치하고 있다. 본댐의 유역면적은 500 km^2 로 내성천 유역면적 $1,814.7 \text{ km}^2$ 의 27.6%를 차지하고 있고, 댐 지점은 저면 길이가 긴 사다리꼴 지형으로 좌안은 1:3.8의 완만한 경사를, 우안은 1:1의 비교적 가파른 지형으로 이루어져 있다⁽³⁾.

당초 기본계획시 댐형식은 기초암반의 특성을 충분히 고려하지 않은 콘크리트 중력댐으로 계획되었으나, 기본설계시 좌안부는 콘크리트 중력댐, 우안부는 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐인 복합댐을 채택하였으며 댐 길이는 400 m, 댐 높이는 55.5 m로 계획하였다(Fig. 1). 이는 지반조사시⁽⁴⁾ 댐하부 기초지반에 폭 30 m 이상의 대규모 단층대를 포함한 단층밀집구간이 확인됨에 따라 댐의 장기적인 안정성을 확보할 수 있는 공학적인

분석이 요구되었다.

본 연구에서는 노두와 시추조사시 대규모 단층대가 확인됨에 따라 단층대의 공학적 특성을 규명하기 위하여 다양한 지질조사 및 현장시험을 실시하였다. 이와 같은 단층대 특성을 반영하여 단층의 영향을 최소화할 수 있는 최적의 댐 위치를 선정하였으며, 단층대를 포함한 기초지반의 특성을 반영하여 좌안에는 콘크리트 중력식 댐을 우안에는 콘크리트 차수벽형 석괴댐의 복합댐을 선정하였다. 또한 단층처리 및 기초지반 그라우팅을 실시하여 댐 구조물의 안정성을 확보하도록 하였다.

2. 지반 및 단층의 공학적 특성

2.1 지질 및 지질구조 특성

본 지역은 선캄브리아기 규암, 편암류 및 편마암류를 기반암으로, 4기 하상층적층이 부정합으로 피복되어 있다. 본 댐구간을 포함한 대표단면을 선정하여 검토한 결과, Fig. 2에서 보는 바와 같이 편마암류 및 화강암류 내 광역엽리는 60° 이상의 고각이며 북동-남서 내지 동북동-서남서의 방향성을 가진다. 남동쪽에 발달한 남-북 방향의 오운리 단층은 약 600 m의 변위를 보이며, 내성천 단층의 변위발생으로 단면상에서 엽리상 화강암류 및 편마암류가 반복되는 구간은 약 2,300 m, 내성천 하상을 통과하는 F1단층은 약 300 m의 변위를 보인다.

Fig. 3의 상세지질도에서 보는 바와 같이 F1 단층대는 동북동-서남서 방향의 역단층성 우수향 주향이동 단

Fig. 2. 지질단면도

Fig. 3. 상세 지질도 및 F1단층 노두

층이다. N73E/60NW의 대표방향, 연장 최소 4.5 km, 진폭 15 m이상의 단층핵부(fault core)를 가지며, 단층 점토/각력/파쇄대가 혼재하고 있다. 또한, F1 단층대를 따라 예천전단대의 전단작용에 의한 압쇄대가 재형성되어 있다. F1 단층대의 주향은 국부적으로 N20~84E의 방향변화를 보이며, 이는 단층을 형성시킨 주응력방향의 변화로 중첩구조가 형성된 것에 기인한 것으로 판단된다. F1 단층대를 기준으로 상반과 하반의 지층상태가 상이하게 나타나는데, F1 단층대의 상반에 해당하는 우안부는 규암 및 편암류가 분포하며, 단층대와 분기단층의 중첩에 의해 파쇄정도가 높은 불량한 암반이 형성되어 있다. 반면, F1 단층대 하반에 해당하는 좌안부는 석영-장석 편마암이 분포하며, 분기단층의 출현이 없이 비교적 양호한 암반을 형성하고 있다.

2.2 조사결과 및 분석

2.2.1 지층 특성

본담 기초구간은 F1 단층대를 기준으로 좌안부 11개소, 우안부 6개소의 시추조사를 수행한 결과, Fig. 4에서 보는 바와 같이, 매립층을 포함해 최대 15.2 m의 토사층 층후를 보이며, 우안은 F1 단층대의 상반에 해당하며, 단층중첩의 영향으로 보통암 및 경암급의 기반암 출현심도가 깊게 나타나고, 좌안부의 경우, 우안에 비해 암질이 좋은 석영-장석 편마암이 분포, F1 단층대의 영향을 받지 않아 비교적 양호한 기반암 상태를 보였다.

2.2.2 기초지반 공학적 특성

본담 구간 내 지층의 강도 및 변형특성을 파악하기 위하

Fig. 4. 본담구간 지층단면도

Table 1. 지층별 강도특성

구 분		공내전단시험		
		풍화토(D)	풍화암(CL)	단층파쇄대(D)
점착력 (kPa)	분포범위	25.5	26.5~31.1	13.24~25.69
	평 균	25.5	29.2	19.0
내부 마찰각 (°)	분포범위	27.92	27.0~31.8	26.1~31.2
	평 균	27.92	28.9	29.2

지층별 분포현황

Table 2. 변형특성 분석

지 층	변형계수(MPa)	탄성계수(MPa)
풍화암	290.0~470.9	504.6~705.2
단층대	125.2~513.6	209.7~940.0
연암	좌안	588.9~1,020.7
	우안	513.6
보통암	좌안	625.6~12,130.9
	우안	922.0~1,060.2
경암	좌안	2,280.0~18,210.9
	우안	465.9~13,892.5

공내재하시험 분포결과

Table 3. 토사구간 수리특성

구 분	투수계수(cm/sec)	지층상태별 투수계수
매립층	$9.40 \times 10^{-4} \sim 1.59 \times 10^{-3}$	
충적층	$3.96 \times 10^{-5} \sim 3.96 \times 10^{-3}$	
붕적층	$1.21 \times 10^{-5} \sim 1.76 \times 10^{-4}$	
퇴적층	$5.70 \times 10^{-6} \sim 4.76 \times 10^{-4}$	
풍화토	$3.23 \times 10^{-6} \sim 1.26 \times 10^{-4}$	
풍화암	$5.87 \times 10^{-6} \sim 1.32 \times 10^{-4}$	

Table 4. 암반구간 수리특성

구 분	루전값	투수계수(cm/sec)	지층상태별 투수계수
연암(CM)	1.290 ~ 1.548	$2.04 \times 10^{-5} \sim 2.73 \times 10^{-5}$	
보통암(CH)	0.037 ~ 11.397	$1.11 \times 10^{-7} \sim 1.54 \times 10^{-4}$	
경암(B)	0.008 ~ 22.430	$4.48 \times 10^{-8} \sim 1.37 \times 10^{-4}$

Fig. 5. 경사시추와 단층핵부

여 표준관입시험, 공내전단시험, 공내재하시험 등을 수행하였으며, 결과는 Table 1과 Table 2에서 보는 바와 같다.

2.2.3 기초지반 수리 특성

본댐 구간의 수리특성파악을 위하여 지표투수시험, 현장투수시험, 수압시험, 양수시험, 순간충격시험, 지하수 유향유속시험 등의 수리시험을 통해 투수계수(Table 3과 Table 4)를 분석하였다. 또한 Fig. 4에서 보는 바와 같이 루전(Lu)값 등을 분석한 결과, 단층대와 일부 보통암 및 경암 구간을 제외하면 모두 1 Lu 이하의 낮은 루전값을 보여 수밀성이 매우 양호한 것으로 판단된다.

2.3 단층 특성 분석

2.3.1 단층 분포 특성

F1 단층핵부 및 단층중첩구간 간섭영향을 고려한 댐

형식을 선정하고자 F1 단층핵부 및 단층중첩구간 공학적 특성 및 좌우안 지반조건을 중점적으로 검토하였다.

단층대 방향성의 신뢰성 확보를 위해 지표노두자료와 BIPS 자료를 비교검토하였으며, 단층대 폭의 신뢰성 확보를 위해 Fig. 5에서와 같이 단층대를 관통하는 확인경사시추를 수행하였다. 단층대의 진폭 및 기초굴착면상의 폭으로 구분하여 설계활용도를 제고하였으며, 단층 형성 메커니즘을 고려한 합리적인 단층분포도를 작성하였다.

단층노두에서 분석된 F1 단층대의 주향/경사와 BIPS 결과 분석된 F1 단층대의 주향/경사는 거의 일치하며, 단층대의 평균주방향은 N65E, 경사는 단층노두와 BIPS의 평균값인 60NW로 설정하였다. 단층대 구간에 대해 확인경사시추를 수행하였으며, 지표노두 및 BIPS 결과 설정된 단층대의 주향/경사를 이용하여 단층대의 진폭 및 기초굴착면에서의 폭을 산정하였다.

현장 지표지질조사를 통하여 우안 기존도로 사면에서

Table 5. 단층대 특성

구 분	방향성	연장	단층 해부의 폭	
F1	• N65E/60NW (주변위대 평균)	• 4.5 km 이상	진폭	• 노두 : 15.0 m 이상 • 시추코아: 21.0~28.0 m
DF2	• N65E/60NW (주변위대 평균)	• 약 220 m	기초출현폭	• 27.1~31.1 m
DF3			진폭	• 노두 : 3.0 m • 시추코아: 0.7~5.2 m
DF4	• N53E/60NW	• 약 230 m	기초출현폭	• 5.9 m
			진폭	• 최대 1.5 m(시추코아)
DF5	• N32E/48~62NW	• 약 460 m	기초출현폭	• 0.9~1.8 m
			진폭	• 노두 : 3.0 m • 시추코아 : 1.0 m
DF6	• EW/60N	• 약 160 m	기초출현폭	• 1.2 m
			진폭	• 최대 3.3 m
DF7	• N65E~EW/60NW	• 약 150 m	기초출현폭	• 3.7 m
			진폭	• 0.5~1.4 m
			기초출현폭	• 0.9~1.5 m

Table 6. 단층암의 구분

단층점토	단층각력	단층파쇄대

단층노두가 확인되었다. 단층대를 기준으로 상반은 백운모편암 및 각섬석편암, 하반은 석영-장석편마암이 분포하며, 단층대내에는 단층점토, 단층각력 및 단층파쇄대로 구성된 단층 물질이 발달되어 있다. 단층대 상반은 백운모 편암 및 각섬석 편암이 심하게 파쇄되어 있으며, 이는 F1 단층 및 중첩단층 발달의 영향으로 판단된다. Table 5에는 조사된 단층대에 대한 방향성 및 연장 등의 단층 특성이 정리되어 있다.

2.3.2 단층대 공학적 특성

본 단층암은 구분기준에 따라 각력의 함유량이 30% 미만인 경우를 단층점토대, 30% 이상인 경우를 단층각력대라 정의하였다. F1 단층대는 단층점토, 단층각력 및 단층파쇄대를 포함한 폭(규모)으로 정의하고, Table 6에서 보는 바와 같이 단층암을 단층점토, 단층각력 및 단층파쇄대로 구분하여 공학적 특성을 검토하였다.

단층물질의 전단강도, 변형특성 파악을 위해 현장에

서 공내재하시험과 공내전단시험을 실시하였으며, 미고결 단층점토 및 단층각력의 기본물성, 전단강도 파악을 위해 현장 불교란시료 및 자연시료 채취 후 실내에서 직접전단시험 및 삼축시험을 실시하였다.

검토결과 시험구간의 단층물질은 토질분류상 평균 N치 50/30의 실트질 모래(SM) 성분이 가장 우세하였으며, 단층물질의 단위중량은 전반적으로 19.5 kN/m³이므로 조밀한 풍화토급 지반에 해당한다. 단층점토는 대부분 점토질 세립모래(SC)가 우세하였으며, 단층각력은 입도가 불량한 모래(SW-SM)가 우세하게 분포하고 있다.

단층각력과 단층점토는 전단강도값의 차이를 보이지 않으며, 조밀, 견고한 풍화토 내지 약한 풍화암에 해당하는 전단강도 특성을 보였다. 점착력은 심도와 무관하게 25 kPa 미만을 나타냈으며, Fig. 6에 나타난 바와 같이 내부마찰각은 심도 15 m 까지는 증가하는 경향을 보이나, 15 m 하부에서는 일정하게 나타났다. 단층점토는 변형계수는 125~130 MPa로 풍화토 지반에 해당하

Fig. 6. 심도별 특성변화

Fig. 7. 단층가우지 Immersion Test(침수내마모성시험)

Fig. 8. 기초암반 출현심도 분석

Table 7. 양안별 기초암반 검토결과

구 분	좌 안	우 안
단층	• 단층발달 없음 → 신선한 양호 압반	• 3조의 단층 발달 → 불량한 파쇄 압반
출현심도	• G.L(-) 7.5 m에서 CH급 압반 출현	• G.L(-) 18.5~25.0 m에서 CH급 압반 출현
댐형식	• 콘크리트댐식 여수로	• 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD)
구조물	• 여수로(월류부, 비월류부)	• CFRD 본댐 및 프린스

며, 단층각력 및 단층파쇄대는 140~510 MPa로 풍화 토~약한 연암급 암반이 혼재된 복합지반에 해당한다. 또한 Fig. 7에는 단층가우지에 대한 침수 내마모성시험 장면과 결과가 나타나 있다.

2.3.3 기초지반의 공학적 분류

F1 단층 상반의 단층중첩구간(F1 단층의 상반, 본댐 우안부)과 F1 단층대의 하반(본댐 좌안부)의 강도, 변형 등 공학적 특성을 비교 검토하여 댐 형식 선정자료를 제공하였다. 분석결과 F1 단층대의 기초출현폭이 27.1 m 이며 2조의 중첩단층 우안부 집중되고, Fig. 8에서 보는

바와 같이 CH급 암반의 출현심도가 좌, 우안 비대칭 형태로서, 좌안부는 CH급 암반이상의 암반이 G.L(-) 7.5 m 이하에서 출현하고 우안부는 F1 단층대 및 중첩단층이 3조 발달(F1, DF5 및 DF7)하며, CH급 암반이 최대 G.L(-) 25 m에서 출현함을 볼 수 있다. 또한 Table 7에는 양안별 기초암반에 대한 검토결과가 정리되어 있다.

또한 Tanaka분류의 객관성을 확보하기 위하여 등급별 RMR, Q-System의 정량적 암반분류를 기준으로 Tanaka 분류의 등급별 해당 경계분포를 산정하였다. 검토결과 본댐 좌안의 기초굴착에 적용된 RMR은 CM급 암반이 31, CH급 암반이 40, B급 암반이 53이상으로 암반등급

Table 8. 기초압반에 대한 암반등급 결과

구 분	좌 안	우 안	암반등급도
분석 결과	<ul style="list-style-type: none"> RMR : 43 ~ 66(54) Q : 0.18 ~ 34.80(7.11) 지반등급 : II ~ III 	<ul style="list-style-type: none"> RMR : 29 ~ 55(41) Q : 0.06 ~ 2.03(0.61) 지반등급 : III ~ IV 	
검토 결과	<ul style="list-style-type: none"> 기초지지층 지반은 신선한 B급 암반 F1 단층영향 없음 	<ul style="list-style-type: none"> 우안의 기초지반은 CH가 우세 F1 단층 및 단층중첩 구간

Fig. 9. 댐위치 비교검토

기준으로 II~IV등급에 해당되며, 우안은 28~47로서 II I~IV등급으로 평가되었다. Table 8에는 기초압반에 대한 암반분류 분석결과 및 암반등급도가 나타나 있다.

3. 기초지반 특성을 고려한 댐위치 및 형식 선정

3.1 댐위치 검토

지반조사를 통하여 분석한 단층분포특성을 고려하여 최적의 댐위치를 선정하고자 하였다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 기본계획안, 비교안 그리고 기본설계안에 대한 단층과 지지층과의 분포 특성을 분석하였다.

기본계획안은 유로방향과 67°경사져 좌안 계곡부를 횡단하는 것으로 댐길이(L)는 340 m 이다. 지반조건은 댐축 중앙부에 대규모 단층(27 m) 및 파쇄대 발달하고, 댐 우안부는 심한 절리와 파쇄로 인해 RQD 값이 낮으며, 좌안부 암반은 비교적 양호한 상태를 보인다. 또한 대규모 단층대 발달 및 우안부 기반암 심도가 깊으며, 단층을 고려시 콘크리트댐 및 여수로 등 시설물 배치가 곤란한 것으로 판단된다.

비교안은 유로방향과 71°경사져 기본계획 댐축으로 상류 30m 이동한 양안 곡선형으로 댐길이(L)은 360 m 이다. 지반상태는 댐축중앙부에 대규모 단층(31 m) 및 파쇄대가 발달하여 있고, 댐 우안부에는 심한 절리와 파쇄로 인해 RQD 값이 낮으며, 좌안부는 비교적 양호

하다. 또한 유효저수용량이 40만 m³ 감소하고, 대규모 단층대 발달 및 우안부 기반암 심도가 매우 깊어 단층 고려시 콘크리트댐 및 여수로 등 시설물 배치가 곤란하다.

기본설계안은 유로방향과 85°경사져 기본계획 댐축으로 하류 85 m 이동한 것으로 댐길이 (L)은 400 m 이다. 지반조건은 댐축 중앙부에 대규모 단층(27 m) 및 파쇄대가 발달하고 하류방향으로 지반조건이 양호하며, 좌안부도 매우 양호한 상태를 보인다. 본 안은 유효저수용량 70만 m³ 추가확보가 가능하며, 단층대가 우안측에 위치하고 우안부 기반암 심도가 상대적으로 얕아 여수로 등 시설물 배치를 위해 좌안부 능선 굴착이 필요한 것으로 판단된다.

이상의 검토결과, 기본계획 및 비교안의 댐위치는 대규모 단층대 발달과 기반암 심도가 깊어 콘크리트댐으로 부적합하며, 기본계획 지점에 필댐 적용시 여수로, 배수문 등 주요시설물 배치가 곤란한 것으로 나타났다. 따라서 주요시설물 배치가 적정하고 댐의 안정성 확보를 위해 기본설계안을 최적위치로 선정하였다.

3.2 댐형식 선정

3.2.1 지형 및 지질여건 검토

댐 선정에 대한 지형 및 지질여건 검토결과는 Table 7에

Table 9. 지형 및 지질조건 검토결과

Fig. 10. 지층별 지지력 검토 결과

Fig. 11. 단층대 보강공법 및 해석결과

보는 바와 같다. 지형여건을 살펴보면, 댐지점은 내성천 본류구간의 하상(하폭 약 90 m)으로 사면경사가 1:0.98로 급한 우안측과 사면경사가 1:3.95로 완만한 좌안측을 가져 비대칭적인 역사다리꼴의 구릉지지형으로 이루어져 있다.

댐 형식의 개략적인 기준인 댐 형상계수(댐길이/댐높이)는 7.2로서 아치댐이외의 대부분 형식의 댐이 가능하다. 그러나 중심코어형 석괴댐은 우안측의 급경사 사면으로 인장균열등의 우려가 있어 불리한 것으로 나타났다.

지질조건은 본댐 중앙부에 5조의 크고 작은 단층대가 교차하고 좌안부와 우안부의 기반암 심도가 불규칙하게 분포하고 있는 특징을 가지고 있다. 좌안부는 7~15 m 이내에서 CH급 이상의 양호한 암이 도출되고, 하상구간을 포함한 중앙부는 깊은 심도의 층적층과 단층 폭이 약 30 m 인 F1단층 및 크고 작은 단층이 존재하며, 우안부는 8.0~66.0 m에 B급의 암선이 출현하는 것으로 나타났다. Table 9에는 지형 및 지질조건 검토결과가 나타나 있다.

3.2.2 지지층을 고려한 댐형식 검토

댐 기반암에 대한 지내력을 검토한 결과, Fig. 10에서 보는 바와 같이 보통암은 설계지내력을 만족하지 못해 콘크리트 중력댐의 지지층으로 부적합한 것으로 나타났다. 단층대 구간도 설계지내력을 만족하지 못하므로 특별한 보강대책이 필요한 것으로 평가되었다.

따라서 댐의 안정성을 확보하기 위해서는 본댐 기초 지지층을 경암으로 계획하여야 하고, 단층대구간에는 텐탈콘크리트와 같은 기초처리계획이 필요한 것으로 판단된다.

또한 설계기준을 분석한 결과, 콘크리트댐의 경우 기본적으로 CH급 이상의 지반을 지지층으로 분류하고 있으며, 콘크리트 차수벽형 석괴댐의 경우 프린스 하부 지지층에 대한 선택기준은 없으나 가급적 CM급 이상을 추천하고 있다.

기시공된 콘크리트 댐 및 콘크리트 차수벽형 석괴댐에 대한 지지층 조사결과, 콘크리트댐의 경우 대부분 경암에 설치되는 것으로 나타났으며, 콘크리트 차수벽

Fig. 12. 단층대 보강 해석결과

Fig. 13. 대구모 단층 무보강시 해석결과

Fig. 14. 댐 형식선정 프로세스 결과

형 석괴댐의 프린스 하부 지지층은 하상 층적층에서 연경암까지 다양한 지반에 설치가능한 것으로 조사되었다. 이상과 같이 지지력검토, 설계기준 및 예비분석 등 종합적인 분석결과로부터 콘크리트댐의 경우 경암이 지

지층으로 계획되어야 하며, 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐의 경우 토사에서 암반까지 지지층 조건이 비교적 자유로울 것으로 판단된다.

3.2.3 댐형식 적정성검토

본 구간은 대규모 단층이 존재하는 것으로 파악되었으므로, 기본 계획시 검토된 콘크리트댐 형식적용시 단층보강을 통하여 콘크리트댐의 안정성 확보가 가능한지 검토하여야만 한다. 이를 위하여 Fig. 11에서 보는 바와 같이 F1단층에 대한 덴탈콘크리트와 고압분사그라우팅 공법의 적용성 검토를 위해 수치해석을 수행하였다. 고압분사 그라우팅 치환심도를 증가시키면서 구조물의 최대침하량과 부등침하의 허용기준을 비교하여 제체의 안정성을 확인하였다.

해석결과는 Fig. 12에 나타난 바와 같다. 최대연직변위는 40.67 mm 발생하였으며, 보강에 따른 침하량은 치환깊이를 100 m까지 적용했을 때도 허용침하량(25 mm)을 만족하지 못했고, 부등 침하량도 27.41 mm 발생하여 허용부등침하량(20 mm)을 만족하지 못했다.

따라서 단층대에 대한 보강공법으로 덴탈콘크리트와 지반개량공법의 일종인 고압분사그라우팅 공법적용으로는 콘크리트 댐 하부에 발생하는 연직침하 및 부등침하를 제어하기 어려워 댐의 안정성을 확보할 수 없으므로, 대규모 단층구간에 대한 댐 형식 검토가 요구된다.

3.2.4 대규모 단층을 고려한 댐형식 검토

대규모 단층구간 5개소 위치의 콘크리트 차수벽형 석

괴댐 단면을 대표단면으로 선정하여 응력-변형을 해석을 수행하였다. 해석결과를 통해 담수시 제체, 차수벽 및 프린스에 대한 안정성을 평가하였으며, 그 결과는 Fig. 13에 나타나있다.

해석결과 대규모 단층구간 무보강시에도 프린스 및 차수벽은 부등침하에 대하여 안정한 것으로 평가되었다. 그러나 기존사례분석 및 장기안정성 확보를 위한 보강계획을 수립하여야 한다.

대규모 단층구간에 대해 콘크리트 댐을 적용할 경우 덴탈콘크리트 및 고압분사그라우팅을 적용하였을 경우에 안정성을 확보하지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 콘크리트 차수벽형 석괴댐의 경우, 대규모 단층구간내에도 충분히 적용 가능한 댐 형식으로 판단된다.

3.3 최적 댐위치 및 형식 선정

Fig. 14에는 댐 형식선정 프로세스에 따른 댐형식 선정결과가 정리되어 있다. 댐형식에 대한 검토결과, 좌안에는 유수전환 및 주요시설물의 배치에서 유리한 콘크리트댐, 우안에는 지반조건을 고려하여 구조적·수리적 안정성을 확보가 가능한 콘크리트 차수벽형 석괴댐(CFRD)형식을 갖춘 복합댐으로 결정하였다(Fig. 15).

Fig. 15. 복합댐(콘크리트댐+CFRD댐)

Table 10. 규모별 단층처리방안

	대규모 단층(F1)	소규모 단층(DF4~7)
프린스		
암석콘		

4. 댐구조물 안정성 분석

4.1 기초지반처리 및 안정성 검토

4.1.1 단층 처리방안

기초사례분석을 통하여 단층 규모별 최적의 보강계획을 수립하고자 하였다. Table 10에 나타난 바와 같이 대규모 단층의 경우 용담댐(단층폭 20 m내외, 덴탈콘크리트 3.5 m)의 사례를 참고하여 덴탈콘크리트의 심도를 5.0 m로 결정하였으며, 소규모 단층의 덴탈콘크리트 심도를 20 m로 선정하였다. 추가로 스페셜 그라우팅을 적용하여 상부 단층의 보강과 동시에 덴탈콘크리트와 지반의 공극을 채우는 효과까지 도모하였다.

제체내에는 단층주변 스페셜그라우팅 적용시 캡의 역할 및 대기에 노출된 단층의 풍화를 막기 위해 덴탈콘크리트 1.5 m를 적용하였으며, 단층 주변의 유실방지를 위해 스페셜그라우팅 10 m 5열, 15 m 2열을 적용하였다. 또한 대규모 단층구간에는 프린스 폭을 6 m에서 10 m로 확장시켜 추가로 지내력을 확보하였다.

4.1.2 단층특성을 고려한 차수공법 선정

F1단층은 점토 및 각력층이 혼재되어 침투유로 발생

시 단층점토의 급속한 유실로 구조물의 안정성이 우려되는 바 프린스 전면에 보다 확실한 차수계획이 필요하다. 따라서 단층의 지층형상 및 지질조건을 고려한 최적의 차수공법을 계획하고자 하였다.

Table 11과 Fig. 16에 나타난 바와 같이 F1단층과 같은 대규모 단층구간은 장기적인 수밀성 확보를 위해 연속 CIP 공법을 적용하였으며, 소규모 단층구간은 일반적인 차수공법인 저압침투그라우팅을 적용하였다. 또한 연속 CIP를 상류측에 추가로 차수그라우팅을 덴탈 콘크리트 하부에 설치하여 추가의 수밀성을 확보하였다. 또한 연속 CIP 품질관리를 위해 실시간으로 수직도판리가 가능하도록 모니터링 계획을 수립하였으며, 차수 그라우팅과 연속 CIP 사이에 검사공을 배치하여 연속 CIP 설치후 성능확인이 가능하도록 하였다.

4.1.3 차수그라우팅 효과 검증

그라우팅효과를 검증하기위해 침투해석을 실시하여 최대담수시 기초저면으로의 침투유량 및 파이핑 현상 발생 유무를 판정하였고, 침투유량 및 양압력 저감효과를 확인하였다. 콘크리트담 구간과 콘크리트 차수벽형 석괴담 구간으로 구분하여 대표단면을 선정하고 차수 그라우팅 심도는 단층구간은 40 m, 그 외의 구간은 30 m를 적용하여

Table 11. 규모별 단층처리방안

	연속 CIP 공법	저압침투그라우팅
개요도
지반조건	토사~암반 전구간	토사~암반 전구간
적용사례	안동댐 비상여수로, 예천양수 하부담	대부분의 댐
적용구간	대규모 단층(F1)	소규모 단층(DF4~7)

Fig. 16. 기초그라우팅 배치

Fig. 17. 파이프 안정성 검토

Fig. 18. 차수그라우팅 효과분석

그라우팅 효과를 검토하였다. Fig. 17에서 보는 바와 같이 침투해석결과 모든 단면에서 허용기준 이내이므로 파이프 현상에 대하여 안정한 것으로 평가되었다.

그라우팅 개량전후 침투수량 및 양압력 해석결과는 Fig. 18에 나타내었다. 그라우팅 개량전후 침투수량은 최대 88.5%, 양압력은 50%가 감소하는 것으로 분석되었다.

4.2 댐기초 안정성 검토

4.2.1 콘크리트댐 여수로 기초안정성

콘크리트댐 구간을 다양한 경험식 및 현장시험 결과를 통하여 허용 지지력 및 침하량을 산정하고 연속체 및 불연속체 수치해석을 통하여 침하량을 검토하였다. Fig. 19에서 보는 바와 같이, 지지력 및 침하량 산정결

Fig. 19. 콘크리트댐 여수로 기초안정성 검토결과

Table 12. 댐기초 안정성 해석결과

구 분		연직변위(mm)			수평변위(mm)		
		해석결과	허용기준량	판 정	해석결과	허용기준량	판 정
연속체	비월류부 (STA.0+245.0)	1.714	25.0	안 정	0.255	제체높이1% (555 mm)	안 정
	월류부 (STA.0+230.0)	2.256	25.0	안 정	0.281	제체높이1% (555 mm)	안 정
불연속체	비월류부 (STA.0+245.0)	1.224	25.0	안 정	0.876	제체높이1% (555 mm)	안 정
	월류부 (STA.0+230.0)	1.436	25.0	안 정	0.982	제체높이1% (555 mm)	안 정

과가 모두 허용기준치 이내로 안정한 것으로 분석되었다.

수위가 가장 높은 단면 중 월류부와 비월류부로 구분하여 수치해석을 실시하여 댐의 거동특성을 파악하였다. 해석결과는 Table 12에 나타난 바와 같다. 최대 연직변위와 수평변위 모두 허용변위 이내로 안정한 것으로 나타났다. 또한 부등침하는 비월류부와 월류부 각각 1/41, 910, 1/67, 385로 허용치 이내로 안정하다.

4.2.2 콘크리트댐 표면 차수벽형 석괴댐 안정성 검토

주축조제를 석괴로 적용한 필댐 형식의 콘크리트 차수벽형 석괴댐은 축조시 및 담수시 변형거동특성 분석과 담수위 변화에 따른 제체 활동검토를 통하여 댐의 안정성을 확인하고자 한다.

Fig. 20에서 나타난 바와 같이 수치해석에 의한 가상 파괴면을 반영하여 상하류 비탈면 해석을 실시한 결과, 축조시, 담수시, 우기시, 지진시 모두 안정성을 확보한 것으로 나타났다.

또한 콘크리트 차수벽 균열로 인한 누수가 발생할 경우, 제체내 수리거동을 파악하여 하류부 배수층 적용성 여부와 하류비탈면의 안정성을 확인하였다. Fig. 21에서 나타난 바와 같이, 제체내 침투시 안정성 검토결과 차수벽 상부누수시 침투량이 가장 큰 것으로 산정되었

고 차수벽 누수시 침윤선이 모두 댐체내에서 형성됨을 알 수 있다. 따라서 댐 제체내 특별한 배수층을 계획하지 않아도 누수에 대하여 안정한 것으로 판단된다.

댐 시공과정의 안정성을 평가하기 위하여 시공단계별로 제체에 대한 거동해석을 실시하였다. Fig. 22에는 1/3 축조시, 2/3 축조시 그리고 축조완료시에 대한 해석결과가 나타나 있다. 시공단계별 변위변화양상을 분석한 결과, 수평변위는 5단 성토이후 변위가 증가하고 연직변위는 지속적으로 증가함을 알 수 있다.

4.2.3 본댐 3차원 거동분석

본 댐은 하상에 대규모 단층이 통과하고 있으며, 콘크리트댐과 콘크리트 차수벽형 석괴댐은 서로 상이한 구조물로 보다 정확한 제체거동을 분석하기 위하여 3차원 해석을 실시하였다. Fig. 23에는 해석모델링도와 해석단계가 나타나 있다. 축조시 조건은 단계별 성토에 의한 변위 및 응력을 검토하였고, 담수시 조건은 성토시에 의한 변위를 배제한 담수하중에 의한 변위 및 응력을 분석하였다.

Fig. 24과 Table 13에는 3차원 해석결과가 정리되어 있다. 댐 정부 수평변위를 검토한 결과 콘크리트 댐구간은 4.34 mm, 콘크리트 차수벽형 석괴댐 구간은 최대

Fig. 20. 제체 비탈면 안정성 검토 결과

Fig. 21. 차수벽 누수시 제체 비탈면 안정성 검토 결과

Fig. 22. 제체 거동안정성 검토 결과

1단계	단층을 고려한 지형 및 지층 모델링
2단계	본댐 건설을 위한 굴착단계 모사
3단계	본댐 좌안 CGD 및 접속부 옹벽 시공
4단계	단층보강 및 CFRD 단계별 성토
5단계	CFRD 제체 완성후 차수벽 및 프린스
6단계	시공완료 및 답수

Fig. 23. 해석모델링 및 해석단계

Fig. 24. 3차원 거동해석 결과

Table 13. 본댐 3차원 해석결과

구 분		수평변위 경향			연직변위 경향		
		수평변위	수평변형률	접속부 변위	연직변위	연직변형률	접속부 변위
축조직후	콘크리트댐	8.56 mm	$1/3,300 < 1/500 \therefore \text{O.K}$	$7.99 \text{ mm} < 10 \text{ mm} \therefore \text{O.K}$	$6.45 \text{ mm} < 25 \text{ mm} \therefore \text{O.K}$	$1/23,297 < 1/500 \therefore \text{O.K}$	$0.80 < 10 \text{ mm} \therefore \text{O.K}$
	CRFD	17.96 mm	$1/3,115$		25.77 mm	$1/1,430$	
상 시 만수위시	콘크리트댐	8.94 mm	$1/3,003 < 1/500 \therefore \text{O.K}$	$6.54 \text{ mm} < 10 \text{ mm} \therefore \text{O.K}$	$7.65 \text{ mm} < 25 \text{ mm} \therefore \text{O.K}$	$1/23,273 < 1/500 \therefore \text{O.K}$	$0.64 < 10 \text{ mm} \therefore \text{O.K}$
	CRFD	21.94 mm	$1/2,976$		31.41 mm	$1/1,283$	

16.31 mm 발생하였다. 이는 허용 수평변위 1% 이내의 값으로 안정한 것으로 평가된다. 최대 연직변위량의 경우 콘크리트 댐구간은 최대 11.76 mm, 콘크리트 차수벽형 석괴댐 구간은 최대 28.55 mm 발생하여 허용 연직변위 555 mm 이내로 발생하였다.

콘크리트댐의 경우 일반구간에서는 대략 5 mm 이내

의 미소한 변형을 보이나 접속부 주변에서 변위가 증가함을 보였는데 이는 콘크리트 차수벽형 석괴댐 성토에 따른 CFRD 제체의 변형이 증가하면서 연속체 모델상 접속부 부근의 콘크리트 댐에도 영향이 미쳐 변위가 다소 크게 발생한 것으로 평가된다.

5. 결 론

본 연구에서는 댐하부 지반에 확인된 대규모 단층대의 구조지질적 특성과 단층대의 공학적 특성에 대하여 분석하였으며, 단층영향을 최소화할수 있는 최적의 댐 위치를 선정하고 기초지반의 특성을 고려한 댐형식을 선정하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 지반조사결과, 댐하부지반에는 폭 30 m 이상의 F1 단층을 포함한 약 150 m 이상의 단층밀집지역이 확인되었으며, 이는 스러스트 단층으로서 단층점토, 단층각력 및 단층파쇄대로 구성된 단층물질이 발달되어있다.
2. 3차원 지질모델링에 의한 각각의 댐위치별로 단층과 지지층과의 분포특성을 분석함으로써 대규모 단층대와의 교차가 최소화되고 기반암의 암반등급 분포가 비교적 양호한 기본설계안을 최적의 댐위치로 선정하였다.
3. 대규모 단층대 구간에 콘크리트댐을 적용할 경우 단층보강시에도 안정성이 확보되지 못하므로, 대규모 단층대가 위치한 우안에는 콘크리트 차수벽형 석괴댐(CFRD)을 적용하고, 좌안에는 콘크리트댐(CGD)을 적용한 복합댐을 선정하였다.
4. 댐기초지반의 안정성을 확보하기 위하여 단층구간은 텐탈콘크리트로 처리하고, 차수공법으로서 대규모 단층구간은 장기적인 수밀성 확보를 위해 연속 CIP 공법을, 소규모 단층구간은 저압침투그라우팅을 적용하고, 그라우팅 효과를 검증하였다.
5. 콘크리트 댐기초구간에 대하여 연속체 및 불연속체 수치해석결과, 지지력 및 침하량 모두 허용기준치 이내로 안정한 것으로 분석되었다. 또한 콘크리트 차수벽형 석괴댐에 대한 거동해석결과, 변위 및 응력 모두 허용기준치 이내로 안정한 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 이원관, 신용노(2010), 한국수자원학회 논문집 제43권 제11호 통권 제208호, pp. 75-78.
2. 송리원댐 다목적댐 타당성조사 보고서(2004), 건설교통부, 한국수자원공사.
3. 김종계, 김만기(2007), 하천유지용수 증대방안과 댐의 역할-송리원댐), 한국수자원학회 2007년도 학술발표회 논문집.
4. 영주다목적댐 건설공사 기본설계보고서(2009), 한국수자원공사.
5. 영주다목적댐 건설공사 지질조사보고서(2009), 한국수자원공사.
6. 지반기술자를 위한 지질 및 암반공학 II(2011), 한국지반공학회 암반역학기술위원회.
7. 김성욱, 최은경, 양태선(2011), 영주지역 압쇄암의 공학적 특성 연구, 한국지반공학회논문집 Vol. 27, No. 10, pp. 35-43.
8. 박동순, 김형수(2006), 불리한 조건에서의 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐 설계 및 시공, 대한지질공학회지 제16권 제1호 pp. 97-107.
9. 김훈, 정규정, 이왕근, 장중렬(2003), 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD)의 거동해석, 한국지반공학회 2003년도 봄 학술발표회 논문집.
10. 하익수, 서민우, 정우성, 박한규(2006), 담수에 따른 CFRD 콘크리트 표면차수벽 거동, 2006년도 대한토목학회 정기학술대회 논문집.
11. Harding, T. P., Vierbuuchen, R. C. & Christie-Blick, N. (1985), Structural style, plate-tectonic settings, and hydrocarbon traps of divergent (transtensional) wrench faults. Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation, Soc. Economic Paleo. & Mineral. 51-77.
12. Robert J. Twiss and Eldridge M. Moores (1992), *STRUCTURAL GEOLOGY*. New York: W. H. Freeman. pp. 106.
13. Ragan, D. M. (1985), *Structural geology. an introduction of geometrical technique*, Wiley, Chichester.
14. Ramsay, J. G. & Huber, M. I. (1997), *The techniques of modern structural geology*. V1. Academic Press. London.
15. Sibson, R. H. (1977), Fault rocks and fault mechanism. J. Geol. Soc. (Lond.), 133, 191-213.

김 한 중

1982년 충남대학교 토목공학과 공학사
2007년 충남대학교 토목공학과 공학석사

Tel: 054-339-2200, 010-9182-0788
E-mail: hjkim@kwater.or.kr
현재 한국수자원공사 보현산댐건설단 단장

유 영 권

1992년 충남대학교 지질학과 이학사
1996년 충남대학교 지질학과 이학석사
2011년 충남대학교 토목공학과 박사과정

Tel: 042-629-2725, 010-3462-7012
E-mail: geowater@kwater.or.kr
현재 한국수자원공사 조사기획처 차장

김 영 군

1987년 서울대학교 자원공학과 공학사
1989년 서울대학교 자원공학과 공학석사
1993년 서울대학교 자원공학과 공학박사

Tel: 031-244-1401, 010-3322-6749
E-mail: babokyg@hanmail.net
현재 서울대학교 에너지자원공학과 겸임 교수

임 희 대

1977년 충남대학교 토목공학과 공학사
1980년 충남대학교 토목공학과 공학석사
1991년 충남대학교 토목공학과 공학박사

Tel: 042-821-5679, 011-437-1599
E-mail: hdlim@cnu.ac.kr
현재 충남대학교 토목공학과 교수