

# 3차원 수치모의를 이용한 배수갑문의 형상변화에 따른 방류능력 개선효과 분석

## Analysis on the Discharge Capacity Improvement of the Lock Gate Type by Using the 3-Dimensional Numerical Simulation

이종현\*, 이길성\*\*, 김대근\*\*\*, 최원석\*\*\*\*

Jong Hyun Lee, Kil Seong Lee, Dae Geun Kim, Won Suk Choi

### 요 지

통상 방조제 배수갑문의 방류능력은 위어공식 또는 오리피스공식을 이용하여 산정하는데, 이 경우 지형특성, 배수갑문 형상에 따른 흐름의 간섭현상, 유입부와 유출부의 형상 등이 방류량에 미치는 영향을 고려하지 못한다. 본 연구에서는 도류벽, 배수문, 물받이 등 방조제 배수갑문의 형상과 배치가 방류량에 미치는 영향을 상용 프로그램인 FLOW-3D를 이용하여 정량적으로 해석하였다. 이를 통해 배수갑문의 방류능력과 유황을 개선할 수 있는 방안을 도출하였다.

본 연구에서는 시화조력발전소를 대상으로 배수갑문의 방류능력 개선에 3차원 수치모의가 효과적으로 적용될 수 있음을 보였다. 본 연구에서 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 유출부측의 물받이길이를 40 m 증가시킴에 따라 전체 방류량은 계획안에 비해 약 10 % 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 물받이 끝과 원지반의 연결부 사면을 1:1에서 1:5의 완경사로 변화시킴에 따라 전체 방류량은 약 2 % 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 배수문과 수차발전 구조물 사이의 유선형 연결구조물을 제거함에 따라 전체 방류량은 약 3% 증가하는 것으로 나타났다.
- 4) 도류벽의 접근각도를 10° 감소시키거나 증가시킴에 따라 전체 방류량은 약 5 % 감소 또는 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구는 배수갑문의 설계시 방류능력 개선을 위해서는 수리학적 검토가 필요하며 수치모형실험이 수리모형실험과 더불어 유용한 해석도구로 이용될 수 있음을 보인 것으로, 이후 관련 구조물의 설계시 참고자료로 이용 가능할 것으로 사료된다.

**핵심용어 : 배수갑문, FLOW-3D, 도류벽, 수치모형실험**

### 1. 서론

댐 여수로, 방조제 배수갑문과 같은 대규모 수리구조물을 건설하는 경우에는 구조물의 수리학적 안정성과 기능성을 검토하여야 한다. 검토방법은 수리모형실험과 수치모형실험으로 크게 나눌 수 있다. 일반적으로 수리모형실험은 수치모형실험에 비해 시간과 비용이 많이 소요된다. 특히 비용과 시간의 제한이 있는 경우, 원안을 포함한 다양한 대안에 대해 수리모형실험을 이용한 검토는 불가능할 수 있다. 이러한 경우, 수치모형실험은 수리모형실험의 좋은 대안이 될 수 있으나 수치모형실험을 현장에 적용하는 경우, 모형의 적용한계에 대한 설계자의 이해가 바탕이 되어야 할 것이다.

지금까지의 연구는 대부분 여수로 월류부에서의 흐름특성을 해석한 것으로, 방조제 배수갑문에서의 수리학

\* 정회원 · (주)웹솔루스 수자원부 대리 · E-mail : ljh@websolus.co.kr  
\*\* 정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 · E-mail : kilselee@snu.ac.kr  
\*\*\* 정회원 · 목포대학교 토목공학과 교수 · E-mail : dgkim@mokpo.ac.kr  
\*\*\*\* 정회원 · 현대건설 토목사업본부 차장 · E-mail : cws@hdec.co.kr

적인 흐름해석은 찾아보기 어려운 실정이다. 통상 방조제 배수갑문의 방류능력은 위어공식 또는 오리피스공식을 이용하여 산정하는데, 이 경우 지형특성, 배수갑문 형상에 따른 흐름의 간섭현상, 유입부와 유출부의 형상 등이 방류량에 미치는 영향을 고려하지 못한다. 본 연구에서는 도류벽, 배수문, 물받이 등 방조제 배수갑문의 형상과 배치가 방류량에 미치는 영향을 상용 프로그램인 FLOW-3D를 이용하여 정량적으로 해석하였다.

## 2. 연구방법

본 연구의 적용대상은 시화방조제의 조력발전소이다. 시화호 조력발전 건설사업은 시화호 수질개선 종합대책의 일환으로 시화호 운영방법을 담수호에서 해수호로 전환함에 따라 시화호의 홍수 조절능력을 유지하고, 조석간만의 차를 이용한 해수순환을 통하여 수질악화를 방지하는 한편, 해양에너지 개발을 통한 안정적 전력공급의 일환으로 계획이 수립되었다 (한국수자원공사, 2002). 본 연구에서는 시화호 조력발전 건설사업 기본계획 (한국수자원공사, 2002)에서 제시하고 있는 배수갑문 계획안 (이하 계획안)의 방류능력과 유황을 검토하고, 이를 개선할 수 있는 방안을 도출하였다.

## 3. 모의조건

계획안에는 단위기 용량 21,000 kW급 수차구조물 12기와 12m×12m 단면의 배수문 6기가 계획되어 있다. 창조시에는 수차구조물을 통해 발전을 수행하고, 낙조시에는 배수문과 수차구조물을 전면 개방하여 방류하는 방식을 채택하고 있다. 적절한 발전량을 얻기 위해서는 창조 유입시에 높은 수위차를 유지해야 하는데, 이를 위해서는 낙조 방류시에 충분한 양의 물을 외해로 방류하여 내해의 수위를 낮출 수 있어야 한다. 즉, 배수문의 주요 기능 중 하나는 시화호 내해의 유량을 낙조시 빠르게 외해로 방류하는 것이다.

배수문과 수차구조물의 형상은 흐름에 큰 영향을 미치는 인자들 중 하나이며, 특히 유입부의 형상 및 관내 형상은 방류량에 직접적인 영향을 미친다. 본 연구에서는 배수문의 형상은 물론 내외해의 지형 및 기타 구조물들의 정확한 제원을 입력자료로 사용함으로써, 지형의 영향이나 유입부, 유출부 및 관 내부의 유동양상, 지형에 따른 영향을 파악할 수 있도록 하였다. 그림 1은 시화조력발전소의 평면도이다.

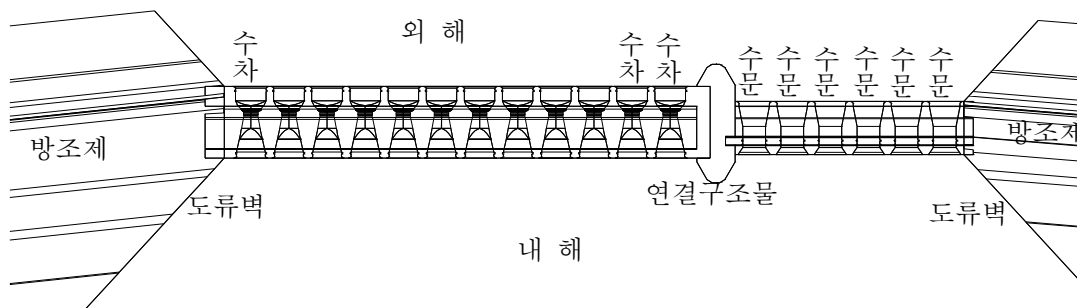


그림 1. 시화조력발전소 평면도

계산영역은 조력발전소를 중심으로 주흐름방향을  $x$ 축, 그 직각방향을  $y$ 축으로 설정하였으며 각각 1050 m, 1116 m의 범위에 대해 모의하였다. 계산격자는 구조물 부근의 흐름이 급변하는 곳은 격자크기를 작게, 흐름의 변화가 완만한 곳은 격자크기를 크게 하였다.

경계조건으로 시화호의 내수위와 외해의 수위를 입력하였으며, 시화호와 외해를 Multi Block으로 나누어 두 지역의 수위차에 의해 흐름이 발생하도록 하였다. 본 연구에서는 시화호와 외해의 수위차가 1.0 m인 경우에 대해 모의하였다. 계산결과와 수렴여부는 흐름의 운동에너지, 난류운동에너지, 유입 및 유출유량의 수렴여부를 이용하여 판단하였다.

## 4. 모의결과

### 4.1 모형의 검증

그림 2는 수리모형실험을 통해 측정된 배수문에서의 방류량과 본 연구에서 계산된 방류량을 비교한 것이다. 수리모형실험은 개수로에 하나의 배수문을 설치하고 유량을 측정하는 것으로 3차원적인 지형과 배수문간 방류흐름의 간섭이 배제된 결과이다 (한국건설기술연구원, 2003). 그러나 수치모의 결과는 3차원 지형과 흐름의 간섭을 고려하여 모의한 결과이다. 수치모의 결과는 각각의 배수문에서 각기 다른 방류량을 보이는데 최소방류량은 4번과 5번 배수문에서  $610 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이며, 최대방류량은 1번 배수문에서  $890 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이다. 각 배수문별 방류량이 다른 이유는 다음 절의 유황분석에서 검토하였다. 수치모의 결과의 평균방류량은 약  $707 \text{ m}^3/\text{sec}$ 로 실험결과와 대체로 잘 일치하고 있다.

그림 3은 상기 수리모형실험에서 주흐름방향 유속의 연직분포를 측정된 단면이다. 그림 3의 6개 단면에서 실측한 유속과 본 수치모의 결과를 그림 4에 비교, 도시하였다. 실험결과와 모의결과는 대체로 잘 일치하고 있다.

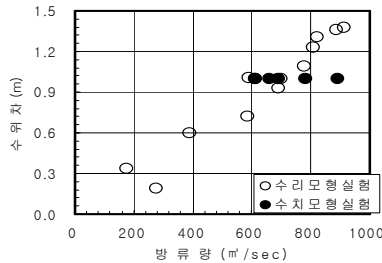


그림 2. 배수문을 통한 방류량

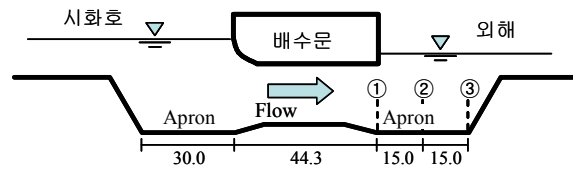
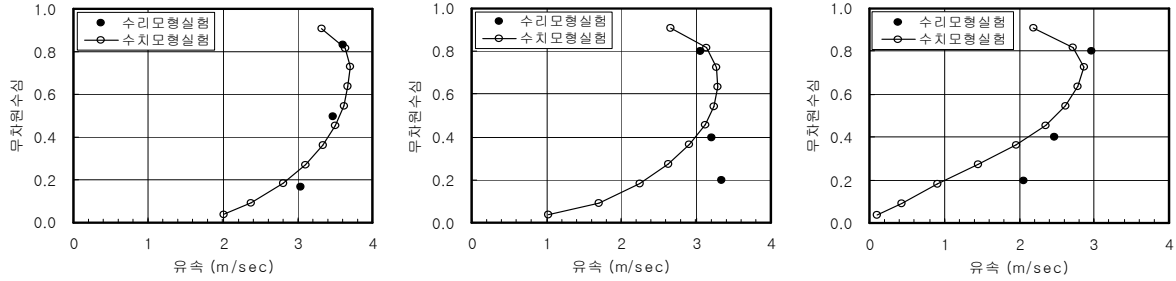


그림 3. 유속측정 지점 (단위: m)



(a) ①번 지점

(b) ②번 지점

(c) ③번 지점

그림 4. 주흐름방향 유속의 연직분포 비교

### 4.2 방류능력 개선을 위한 검토

#### 4.2.1 물받이 형상에 따른 방류능력 검토

계획안의 물받이길이는 유입구측 유출구측 모두 30 m이다. 유입부측 물받이길이는 30 m로 고정시키고 유출부측 물받이길이를 변화시키며 방류량에 미치는 영향을 검토하였다. 단, 주변지형의 영향 및 수류의 간섭이 방류량에 미치는 영향을 배제하기 위하여 배수문 1기만을 재현하여 결과를 분석하였다. 표 1은 유출부측 물받이 길이별 방류량을 정리한 것이다. 물받이길이가 증가할수록 방류량이 증가하는 것을 알 수 있다. 물받이길이가 70 m까지는 방류량의 개선효과가 크지만, 그 이상에서는 방류량의 개선효과가 상대적으로 미미하게 나타나고 있다.

유입구측 물받이길이를 변화시키며 방류량에 미치는 영향을 검토하였다. 유출부측 물받이 길이는 앞의 검토 결과를 바탕으로 70 m로 고정하였다. 표 2는 유입부측 물받이길이별 방류량을 정리한 것이다. 물받이길이가 증가할수록 방류량이 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 표 1의 결과에 비하면 그 증가량은 미미하게 나타나고 있다.

**표 1. 유출부측 물받이길이별 방류량**

물받이길이 (m)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	Q/Q <sub>∞</sub>
30	770	0.91
50	815	0.96
70	840	0.99
90	845	0.99
∞	850	1.00

**표 2. 유입부측 물받이길이별 방류량**

물받이길이 (m)	Q (m <sup>3</sup> /sec)	Q/Q <sub>∞</sub>
30	840	0.98
50	845	0.99
70	849	0.99
90	852	1.00
∞	855	1.00

앞의 검토결과를 바탕으로 유입부측의 물받이길이는 30 m, 유출부측의 물받이길이는 70 m로 결정하고 전체 지형에 대한 수치모의를 수행하였다. 표 3은 각 배수문별 방류량을 정리한 것이다. 전체적으로 계획안에 비해 방류량이 증가하고 있으며 특히, 4, 5번 배수문에서의 방류량이 크게 증가하였음을 알 수 있다. 전체 방류량의 관점에서 계획안에 비해 약 10 % 정도 방류량이 증가하였는데, 이는 유출부측 물받이길이가 증가하면서 전체적으로 유황이 개선되었기 때문이다.

물받이 끝과 원지반의 연결부 사면의 각도가 방류량에 미치는 영향을 검토해 보았다. 계획안의 사면각인 1:1을 1:5의 완경사로 변화시켜 방류량을 산정하고 이를 표 3에 정리하였다. 전체 방류량이 계획안에 비해 약 2% 정도 증가하였다.

**표 3. 물받이길이 연장과 사면각에 따른 각 배수문별 방류량**

배수문 번호	계획안 방류량 (m <sup>3</sup> /sec)	물받이길이 연장 후 방류량 (m <sup>3</sup> /sec)	사면각 변경에 따른 방류량 (m <sup>3</sup> /sec)
1	890	932	916
2	780	850	807
3	690	765	697
4	610	693	614
5	610	695	624
6	660	730	665
합 계	4,240	4,675	4,323

4.2.2 연결구조물의 형상 검토

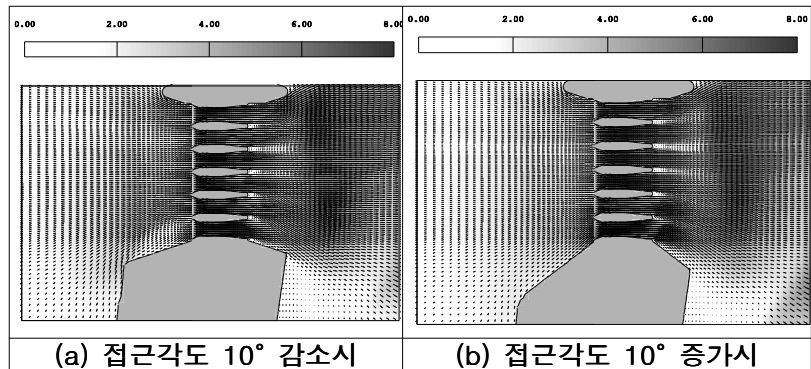
배수문과 수차구조물 사이의 유선형 연결구조물은 양 구조물의 방류량 차이로 인한 수류의 간섭을 피하기 위하여 계획된 구조물이다. 계획안에서 6번 배수문이 1번 배수문에 비해 방류량이 작은 이유는 이 연결구조물로 인한 흐름의 간섭이 영향을 미치고 있는 것으로 판단되어 연결구조물을 제거하고 유황을 검토하였다. 수차구조물 유입부에 일부 정체되던 흐름이 연결구조물 제거 후 배수문 쪽으로 유입되는 모습을 확인할 수 있다. 이로 인해 6번 배수문의 방류량이 증가할 것으로 예측되는데 이는 표 4에서 확인할 수 있다. 전체적으로 약 3 % 정도의 방류량이 증가하는데 6번 배수문은 약 8 % 정도 방류량이 증가하였다.

**표 4. 연결구조물 제거에 따른 방류량**

배수문 번호	계획안 방류량 (m <sup>3</sup> /sec)	연결구조물 제거시 방류량 (m <sup>3</sup> /sec)
1	890	905
2	780	794
3	690	692
4	610	644
5	610	630
6	660	714
합 계	4,240	4,379

4.2.3 도류벽의 접근각도 검토

방류구조물에서 흐름의 방향을 잡아주는 도류벽의 역할은 중요하다. 계획안에서는 방조제 끝의 직선형 옹벽이 배수문의 도류벽 역할을 수행하고 있는데 (그림 1 참조), 본 연구에서는 이 도류벽의 접근각도를 변화시키며 방류량을 산정해 보았다. 배수문 측의 도류벽 뿐만 아니라 수차구조물 측의 도류벽도 같은 방식으로 변형하여 대칭성을 유지하였다.



**그림 6. 도류벽 접근각도에 따른 유황 (단위: m/sec)**

그림 6은 계획안에 비해 도류벽의 접근각도를 10° 감소시켰을 때와 10° 증가시켰을 때의 유황을 도시한 것이다. 도류벽의 접근각도를 10° 감소시켰을 때에는 방조제와 도류벽의 경계에서 흐름의 분리가 발생하는데, 이로 인해 1번 배수문으로의 흐름 유입이 방해받고 있다. 반면, 접근각도를 10° 증가시켰을 때에는 방조제 주변의 흐름이 도류벽을 타고 부드럽게 1번 배수문으로 유입하는 것을 확인할 수 있다. 표 5는 접근각도에 따른 방류량의 변화를 정리한 것이다. 접근각도를 감소시켰을 경우 1번 배수문의 방류량이 크게 감소하였으며, 그 영향으로 다른 배수문의 방류량도 다소 감소했음을 알 수 있다. 반면 접근각도를 증가시켰을 경우 1번 배수문의 방류량이 크게 증가하였으며 인접 배수문들에서도 방류량이 증가하였다.

표 5. 도류벽 접근각도에 따른 각 배수문별 방류량

배수문 번호	계획안 방류량 (m <sup>3</sup> /sec)	접근각도 10° 감소시 방류량 (m <sup>3</sup> /sec)	접근각도 10° 증가시 방류량 (m <sup>3</sup> /sec)
1	890	755	990
2	780	742	830
3	690	657	715
4	610	623	635
5	610	582	635
6	660	649	665
합 계	4,240	4,008	4,470

## 5. 결론

최근 들어 컴퓨터의 용량증대와 계산속도의 향상은 수리구조물에서의 복잡한 수리현상의 해석에 수치모형의 이용을 가능케 하고 있다. 이러한 수치모형의 비용과 시간의 제한이 있는 경우 또는 모든 대안을 수리모형실험을 통해 검토하는 것이 어려운 경우, 설계자에게 수리모형실험의 좋은 대안으로 사용될 수 있다. 본 연구에서는 시화조력발전소를 대상으로 배수갑문의 방류능력 개선에 3차원 수치모형의 효과적으로 적용될 수 있음을 보였다. 본 연구에서 도출한 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 유출부측과 유입부측 물받이길이를 증가시키에 따라 방류량이 증가하는데, 유출부측의 물받이길이가 유입부측 물받이길이에 비해 방류량에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 유출부측의 물받이길이를 계획안 30 m에서 70 m로 연장함에 따라 전체 방류량은 계획안에 비해 약 10 % 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) 물받이 끝과 원지반의 연결부 사면경사를 계획안 1:1에서 1:5의 완경사로 변화시키에 따라 전체 방류량은 계획안에 비해 약 2 % 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 배수문과 수차구조물 사이의 유선형 연결구조물을 제거함에 따라 전체 방류량은 계획안에 비해 약 3% 증가하는 것으로 나타났다.
- 4) 도류벽의 접근각도를 계획안에 비해 10° 감소시키거나 증가시키에 따라 전체 방류량은 계획안에 비해 약 5 % 감소 또는 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구는 배수갑문의 설계시 방류능력 개선을 위해서는 수리학적 검토가 필요하며 수치모형실험이 수리모형실험과 더불어 유용한 해석도구로 이용될 수 있음을 보인 것으로, 이후 관련 구조물의 설계시 참고자료로 이용 가능할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. 김남일 (2003). *Investigation of scale effects of hydraulic model for dam spillway using 3-D CFD model*. 박사학위논문, 서울대학교.
2. 김대근, 이재형, 서일원 (2004). “교각이 설치된 월류형 여수로에서의 흐름에 대한 수치모의.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제5호, pp. 363-373.
3. 김영한, 오정선, 서일원 (2003). “수치모형을 이용한 댐 상류 및 여수로 수리현상 해석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 761-776.
4. 한국수자원공사 (2002). 시화호 조력발전 건설사업 타당성 조사 및 기본계획보고서.
5. 한국건설기술연구원 (2003). 시화호 조력발전 건설사업 수리모형실험보고서.
6. Ho, D.K.H, Boyes, K.M., and Donohoo, S.M. (2001). "Investigation of spillway behavior under increased maximum flood by computational fluid dynamics technique." *14th Australasian Fluid Mechanics Conference*, Adelaide University, Adelaide, Australia.
7. Olsen, N.R., and Kjellesvig, H.M. (1998). "Three-dimensional numerical flow modeling for estimation of spillway capacity." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 36, No. 5, pp. 775-784.
8. Savage, B.M., and Johnson, M.C. (2001). "Flow over ogee spillway : Physical and numerical model case study." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 8, pp. 640-649.