

물받이 형상에 따른 조력발전용 수문의 통수성능 변화 수치모델링 Numerical Modeling on the Change in Discharge Performance of the Sluice for Tidal Power Plant According to the Apron Shape

오상호* · 한인숙* · 김진우** · 정원무*
Sang-Ho Oh*, In-Suk Han*, Gunwoo Kim** and Weon-Mu Jeong*

요 지 : 본 연구에서는 물받이 형상이 조력발전용 수문의 통수성능에 미치는 영향을 평가하기 위한 수치모델링을 수행하였다. 수치모델링은 수문 구조물 자체의 형상은 변화시키지 않고 물받이 폭, 경사 및 수평구간 길이가 다른 경우에 유량계수 값의 차이를 비교함으로써 이루어졌다. 모델링 결과로부터 물받이 형상에 따라서 전반적인 통수성능에 유의미한 차이가 나타나게 됨을 확인하였다. 수문의 통수성능을 최대한 발휘하기 위해서는 수문 구조물 양 측면으로 수문의 폭 만큼 여유를 두고, 경사는 1:5, 수평 구간 길이는 수문 케이슨의 흐름방향 길이와 비슷한 50 m 정도가 되도록 물받이를 설계하는 것이 바람직한 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 물받이, 수문 케이슨, 조력 발전, 통수성능, 수치모델링

Abstract : In this study, numerical modeling was performed to investigate influence of the apron shape on the discharge performance of the sluice for tidal power plant. The numerical modeling was carried out for comparison of the difference in the discharge coefficient when the apron width, slope, and the length of the horizontal section were different, without considering change in the shape of the sluice caisson itself. The modeling result showed that significant discrepancy in terms of the overall discharge performance appeared according to the apron geometry. In order to achieve maximum discharge performance of the sluice caisson, it is desirable to make the design by putting a space equivalent to the width of the sluice caisson on its both sides, by making the apron slope be 1:5, and by keeping length of the horizontal section to be 50 m that is corresponding to the streamwise length of the sluice caisson.

Keywords : apron, sluice caisson, tidal power generation, discharge performance, numerical modeling

1. 서 론

최근 시화호 조력발전소가 완공되어 본격적인 전력 생산을 시작하면서 우리나라에서도 조력발전 상용화가 이루어지게 되었다. 또한, 가로림만, 아산만 등의 조력발전 후보지들에 대한 타당성조사 사업 및 개발 계획 등도 꾸준히 추진되면서 우리나라의 조력발전 관련 기술 수준도 크게 향상된 것으로 평가되고 있다. 특히, 시화 조력발전소가 본격적으로 운영됨에 따라서 발전 시간 및 발전량을 최적화할 수 있는 운영 기술까지 가까운 장래에 확보하게 되면 조력발전 관련 기술 역량은 더욱 높아질 것으로 전망된다. 기본적으로 조력발전의 핵심 원리 및 실용화 기술은 매우 단순하지만 발전 효율 증대 및 친환경성, 안전성 제고 측면에서의 기술개발 필요성은 여전히 남아 있으며, 발전 유량 확보 측면에서 높은 중요성을 가

지는 수문 설계에 관련된 기술도 그 중 하나이다. 조력발전용 수문의 통수 성능을 향상시킴으로써 발전 시 낙차를 확대시킬 수 있고 이는 발전량 증대 효과로 나타나게 된다.

조력발전용 수문의 주요한 수리학적 특성은 최근 수행된 일련의 연구들을 통해서 규명된 바 있다(윤 등, 2005a; 윤 등 2005b; 이 등, 2008a; 이 등, 2008b, 오 등, 2011). 그러나 지금까지 대부분의 연구에서는 수문 자체의 통수 성능에 대해서만 다루었을 뿐, 수문 케이슨 구조물 전·후면에 통상 설치되는 물받이(apron)의 영향을 고려한 연구는 거의 없었다. 윤 등(2005a; 2005b)이 물받이 구조물을 포함하는 시화호 조력발전소 설계안 변경에 따른 통수성능 변화를 실험적으로 검토한 바 있으나, 다양한 조건의 물받이 형상 변화는 고려하지 못하였다. 반면에, 실제 조력발전소 건설 시에는 조력발전용 수문 및 수차 케이슨 주변에 설치되는 물받이 구간의 제

*한국해양과학기술원 연안개발 · 에너지연구부 (Corresponding author: Sang-Ho Oh, Coastal Development & Ocean Energy Research Department, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Ansan, Kyunggi 426-744, Tel: 031-400-7802, Fax: 031-408-5823, Korea, ohsangho@kiost.ac)

**목포해양대학교 해양 · 플랜트건설공학과 (Department of Ocean Civil & Plant Construction Engineering, Mokpo National Maritime University)

원 및 형상을 결정하는 것이 설계상에서 주요한 변수로 대두되게 된다. 이러한 측면에 대한 선행 연구의 미진함을 보완하고자 본 연구에서는 상용 수치해석 모델인 FLOW-3D를 이용하여 조력발전용 수문의 통수성능에 물받이가 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

FLOW-3D는 VOF(Volume Of Fluid) 및 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 기법을 통해 자유수면을 포함하는 다양한 유체현상에 대한 모델링을 수행할 수 있는 소프트웨어로서(Hirt and Nichols, 1981), 해안 및 항만 공학 분야를 비롯하여 항공, 수리, 기계 등 다양한 분야의 유체 모델링에 폭넓게 사용되고 있다. 본 연구에서는 물받이의 지형적 형상에 따른 조력발전용 수문의 통수성능 변화를 고찰하기 위해서 물받이 구간의 길이 및 경사, 폭 등 다양한 형상 변수들을 변화시키면서 종합적인 수치모델링을 수행하였다. 본 연구 결과는 현업 실무자가 조력발전용 수문 구조물 상·하류측에 설치되는 물받이 구간에 대한 설계 수행 시 참고 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 조력발전용 수문 물받이

물받이(apron)는 하천유지시설의 한 형태로서 도수(hydraulic jump)를 발생시켜 유수의 세력을 완화시킬 목적으로 설치한다. 물받이 하류에서는 난류 현상이 강하게 나타나기 때문에 세굴이 발생하기 쉬우며, 물받이는 이를 방지할 수 있는 길이 및 두께로 설계·시공되어야 한다(김, 1994; 한국수자원학회, 2009; 김 등, 2010). 조력발전용 수문 케이스 하류단에서는 제트류와 같은 흐름이 형성되어 유속이 매우 빠르며, 자유수면으로 급격하게 복원되기 때문에 도수 현상이 발생하게 되어 세굴이 발생할 가능성이 높다. 이러한 측면에서 조력발전용 수문 케이스 주변 하상에 대해서도 물받이 구간을 설치하여 세굴을 방지하고 흐름을 안정화시키는 것이 필요하다. 다만, 이 경우에는 통상적인 하천 흐름과는 달리 조수(潮水) 및 발전소 운영 모드에 따른 문비(gate) 개폐에 따라서 왕복성 양방향 흐름이 발생하므로 수문 케이스 양 측면에 모두 물받이를 설치하게 된다. 또한, 하천 흐름에서는 물받이 이후에는 하상 경사가 대체로 일정하게 유지되는 반면, 조력발전용 수문 케이스 주변에서는 수문이 설치되는 위치와 주변 지반고 사이에 상당한 표고차가 존재하는 경우가 많아 이를 연결하는 경사 구간을 두어야 할 필요성이 있다.

하천 수리학에서 물받이의 길이는 통상적으로 블라이(Bligh) 공식을 적용하여 산정한다(한국수자원학회, 2009). 조력발전용 수문 주변의 물받이의 경우에도 별도로 개발된 공식이 없기 때문에 블라이 공식을 적용하여 설계하고 수리모형실험 등을 실시하여 적정성을 검토하는 경우가 많다(예: 한국서부발전, 2007). 그러나 블라이 공식은 근본적으로 상·하류 사이에 낙차가 존재하는 보 형식의 하천 구조물에서 발생하는 월류에 따른 보 하류측의 세굴을 방지하기 위한 측면에서 필요

한 물받이의 길이를 산정하기 위하여 개발된 공식이므로 흐름 현상이 이와는 차이가 있는 조력발전용 수문 주변의 물받이 길이 산정에 그대로 적용하기에는 다소 무리가 있다. 또한 조력발전용 수문 주변 지반의 세굴 방지 목적도 중요하지만 수문의 고유 기능이라고 할 수 있는 통수성능 유지 측면에서도 물받이의 길이 및 경사가 합리적으로 설계될 필요성이 있다. 즉, 물받이 구간의 길이 및 경사가 어떻게 결정되는지에 따라서 수문의 통수성능이 저하될 가능성이 있기 때문에 설계 시 이러한 경우가 발생되지 않도록 검토해야 한다. 이러한 점을 고려해 볼 때 조력발전용 수문과 관련해서는 수문 양 측면의 수평 구간 뿐만 아니라 주변 지반으로 연결되는 사면부의 경사 구간을 모두 포함한 전체 구간을 물받이 구조물로 해석하는 것이 타당할 것이다.

현재로서는 조력발전용 수문 주변에 설치되는 물받이의 형상이 수문의 통수성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 기준 또는 공식이 없기 때문에, 국내에서 이루어지는 조력발전소 타당성 조사 및 기본계획에서는 블라이 공식을 이용하여 수문 물받이 길이를 설계하고 있으며, 필요 시 수리모형실험 또는 수치모델링을 보조적으로 수행하는 것으로 보인다. 특히, 물받이 경사 선정과 관련해서는 하천설계기준·해설(한국수자원학회, 2009)에 마땅한 기준이 없기 때문에 설계자의 경험 및 직관에 따라 어느 정도는 다소 임의적으로 적용되고 있는 실정이라고 할 수 있다.

3. 수치모델링

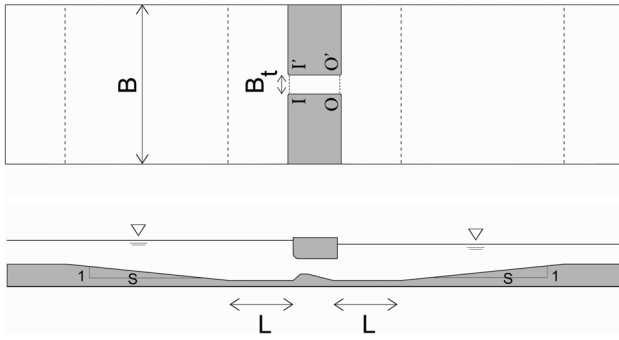
3.1 모델링 조건

수치모형실험을 위한 수문 구조물로는 인천만 조력발전 예비타당성 조사 사업에서 제시된 벤츄리(venturi) 형식의 수문을 선정하였으며, 수치모델링의 주된 관심이 수문 자체의 통수성능보다는 물받이 형상 변화에 따른 전체적인 통수성능을 검토하는 것이므로 수문 형상은 변화시키지 않았다. 물받이 길이 및 경사에 따른 수문의 통수성능을 평가하기 위한 수치모형실험은 수문 상류측 및 하류측에 설치된 물받이 및 경사구간의 측면 및 평면 제원을 다양하게 변화시키면서 이루어졌다. 이러한 변화에 따른 수문 통수성능을 효과적으로 평가하기 위하여 오직 1개의 수문이 설치된 조건에 대해서 수치모델링을 수행하였다.

Fig. 1에 보인 것처럼 수문 상류측 및 하류측의 폭(B)은 수문 1개의 폭(B_1) 19 m의 1, 2, 3, 5, 7배인 19, 38, 57, 95, 133 m의 5가지로 다르게 적용하였다. 또한, 수문 상·하류측의 물받이 경사(1:S)를 1:2, 1:5, 1:10, 1:20 및 1:∞의 5가지 조건으로 변화시켰다. 이 경우 처음 네 조건의 경사구간 수평 길이는 각각 경사구간의 표고차 13.6 m의 2, 5, 10, 20배인 27.2, 68, 136, 272 m가 되었으며 마지막 조건은 경사구간이 없이 바닥이 평평한 경우에 해당한다. 또한, 물받이 수평구간의 길이(L)도 50 m를 기본값으로 설정하고 추가적으로

Table 1. Summary of the numerical modeling conditions

Parameter	Value	Remark
Width of sluice (B_i)	19 m	
Width of sluice upstream and downstream (B)	19, 38, 57, 95, 133 m	$B/B_i = 1, 2, 3, 5, 7$
Slope of apron	1:2, 1:5, 1:10, 1:20, 1:∞	$S = 2, 5, 10, 20, \infty$
Length of apron	20, 35, 50, 65, 80 m	$L = 20, 35, 50, 65, 80$
Water level difference b/w upstream and downstream	0.3, 0.6, 0.9 m	$\Delta H = 0.3, 0.6, 0.9$

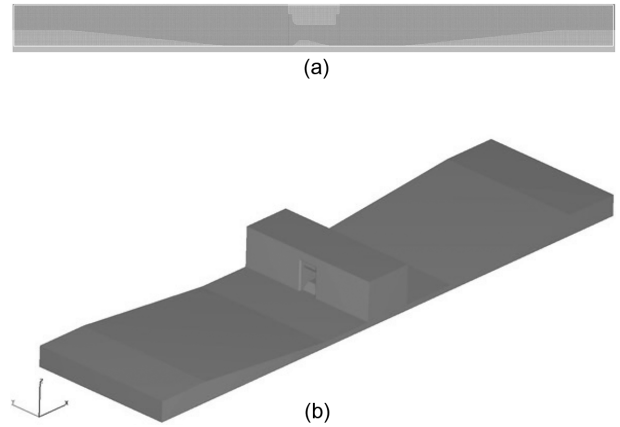
**Fig. 1.** Plan and side views of the area around a single sluice caisson.

$L = 20, 35, 65, 80$ m인 조건에 대해서도 통수성능을 검토하였다. 이처럼 물받이의 측면 및 평면적 형상이 서로 다른 각각의 실험 조건에 대하여 수문 상·하류측 사이의 수위차(ΔH)가 0.3, 0.6, 0.9 m의 값을 가지도록 유량 조건을 세 가지로 변화시키면서 모델링을 수행하였다. 실제 현장에서는 수문 상·하류측 수위차가 시간에 따라 변화하는 비정상상태가 되지만 수위차의 유의미한 변화가 발생하기까지는 수십 초~수 분 정도가 소요되므로 일반적으로 수문 통수성능 평가 시에는 수위차가 일정한 경우, 즉 정상상태에 대한 모델링을 수행하게 된다.

본 논문에서 고려한 B/B_i , S , L 및 ΔH 의 값은 실제 조력 발전소가 건설되는 현장의 여건을 감안하여 그 범위를 결정하였으며, Table 1에는 이상의 실험 조건을 정리하여 제시하였다.

3.2 격자 구성 및 경계 조건

계산 영역의 크기는 x 방향으로 514 m, y 방향으로 131 m, z 방향으로 35 m였으며, 격자의 크기는 세 가지 방향 모두 1 m인 등방격자로 설정하였다. 이에 따른 총 계산 격자수는 2,356,690개였다. 한편, 경계 조건으로는 개방 경계의 경우에는 압력을 일정하게 유지시킴으로서 수위를 고정시키는 경계 조건을 사용하였으며, y 방향으로 양 측면에서는 직각 방향으로 유체의 이동이 없는 고정경계 조건을 적용하였다. 수문 구조물 및 수로 바닥면과 유체 사이의 경계면에서는 마찰을 고려하였으며, y 방향으로 양쪽의 경계면에서는 마찰에 의한 에너지 손실이 발생하지 않도록 설정하였다. Fig. 2에는 물받이 경사가 1:10인 경우에 대하여 계산영역의 측면도 및 3차원 겨냥도를 예시로서 나타내었다. 한편, 본격적인 수치모델

**Fig. 2.** Computational domain for the case of $S = 10$ and $B/B_i = 3$. (a) Side view. (b) Three dimensional rendering image.

링을 수행하기 전에 기존에 수행되었던 수리모형실험(지식경제부, 2008) 결과와 비교 목적의 예비실험을 수행하여 모델링 결과를 검증하였다.

4. 수치모델링 결과

통상적으로 수문 구조물의 통수성능은 수문의 통과유량 및 아래와 같이 정의되는 유량계수(C_d)를 사용하여 평가된다 (Baker, 1991).

$$C_d = \frac{Q}{A_f \sqrt{2g\Delta H}} \quad (1)$$

여기에서 Q 는 유량, A_f 는 최소단면의 단면적, g 는 중력가속도, ΔH 는 수문 상·하류측의 수위차를 의미한다. 유량계수(C_d)는 수문의 최소단면 단위 면적당의 통수성능을 나타내는 지표로서 자주 사용되며, 최소단면적 크기가 동일한 경우 유량계수의 값이 클수록 수문의 통수성능이 우수함을 의미한다. 수문의 통수성능과 관련하여 가장 본질적으로 중요한 파라메터는 통과유량이라고 할 수 있지만, 통상적으로 통과유량은 수문 상·하류측 사이의 수위차(ΔH)에 비례하는 상관관계를 가지게 되므로 수위차가 서로 다른 실험 결과를 비교하기에는 적합하지 않다. 본 연구에서는 수문의 형상은 그대로 유지한 채로 물받이 폭, 경사 및 길이를 변화시키면서 그에 따른 통수성능 변화를 고찰하는 것이 주된 목적이므로 서로 다른 실험 조건별로 유량계수 값의 변화를 고찰함으로써

각 요소가 수문의 통수성능에 미치는 영향을 평가하는 것이 효과적이다.

한편, 조력발전용 수문의 유량계수의 값은 식 (1)에 정의된 것처럼 유량계수 계산 시 수문 최소단면적 A_t 의 값으로 나누게 되기 때문에 1보다 크게 산정될 수 있다. 통상적인 관수로 또는 개수로 흐름에서 유량계수란 이상적(ideal)인 통수량에 대한 실제(actual)의 통수량을 나타내는 지표로서 수로의 급격한 형상 변화 등 수두 손실을 발생시키는 다양한 요인에 의해서 실제의 통수량이 이상적인 통수량에 비해 작게 되기 때문에 1보다 작은 값을 가지게 된다(이 1968; 권·나, 1986). 즉, 유량계수가 1에 가까울수록 수두 손실이 적고 통수성능이 좋은 시스템을 의미하지만 유량계수가 1보다 크게 될 수는 없다. 반면에, 조력발전용 수문의 통수성능을 논하는 경우에는 식 (1)과 같이 유량계수 값을 수문 최소단면적 A_t 와 관련하여 정의하는 경우가 많다(Baker, 1991). 만약 식 (1)에서 A_t 대신 수문 상류측 또는 하류측의 통수단면적을 사용하여 유량계수를 정의하게 된다면 그 값은 1보다 크지 않게 될 것이다. Baker(1991)에서도 이처럼 유량계수가 A_t 에 관하여 정의되기 때문에 그 값은 A_t 가 동일한 수문 구조물의 상대 비교에만 유효하다는 점을 명시하고 있다.

4.1 물받이 폭(B)에 따른 통수성능 변화

물받이 폭에 따른 통과유량의 그림을 수위차(ΔH) 3가지 조건에 대하여 각각 Fig. 3에 나타내었다. 각 그림에서 x축은 수문의 폭(B)을 물받이 상·하류측의 폭(B_t)으로 나눈 값으로 표현하였다. 이 그림들로부터 물받이 상·하류측과 수문 폭이 같은 경우($B/B_t = 1$)에는 물받이 경사에 따라서 통과유량이 크게 차이가 남을 확인할 수 있다. 물받이 구간의 경사가 완만해질수록 통과유량이 크게 증가하였으며, $S = \infty$ 인 경우에는 $S = 2$ 인 경우에 비해서 약 1.8배 정도 큰 통과유량을 나타내었다. 반면에, B/B_t 값이 3 이상인 경우에는 물받이 경사에 따른 통과유량의 차이가 상대적으로 작은 편이었으며, 특히 경사가 $S = \infty$ 인 조건을 제외한 나머지 3가지 조건의 경우에는 통과유량 차이가 미미하였다.

한편, Fig. 4에는 식(1)에 의해서 계산된 유량계수(C_d) 값

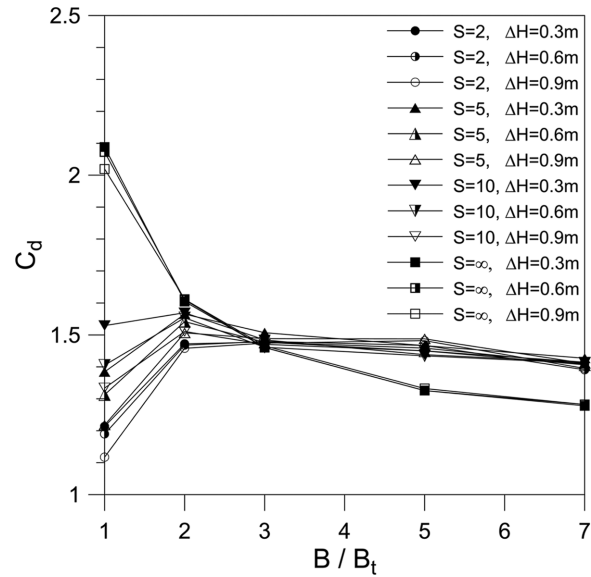


Fig. 4. Values of the discharge coefficient as a function of B/B_t .

을 Fig. 3과 마찬가지로 B/B_t 의 함수로 나타내었다. Fig. 3과 마찬가지로 $B/B_t = 1$ 인 경우에는 물받이 경사 및 수위차에 따라서 유량계수의 값이 매우 큰 차이를 나타내었고, $B/B_t = 2$ 인 경우에도 유량계수 값 편차가 어느 정도 존재한 반면, $B/B_t \geq 3$ 인 경우에는 $S = \infty$ 인 조건을 제외하면 그 차이가 적었다. 또한, 유량계수는 수위차가 증가하여도 그 값이 크게 달라지지 않았는데, 이는 Fig. 3에서 통과유량(Q)이 수문 상·하류측의 수위차(ΔH)가 증가함에 따라서 그 값이 증가한 것과는 구별되는 특징이다. 이처럼 유량계수의 값이 수위차 변화에 대하여 비교적 크게 변하지 않는 것은 최근에 수행된 연구결과(오 등, 2011)와 동일한 경향이며, 현업에서 유량계수를 수위차 또는 유량에 따른 함수 형태가 아닌 상수(constant)로 적용할 수 있음을 의미한다. 즉, Fig. 4의 결과에 의하면 $B/B_t \geq 3$ 이고, $2 \leq S \leq 10$ 인 조건에서는 ΔH 의 값과 무관하게 유량계수(C_d) 값을 1.4~1.5 정도의 상수로 평가할 수 있다. 한편, 식(1)에서 유량계수는 통과유량(Q)에 비례하고 수위차의 제곱근($\sqrt{\Delta H}$)에 반비례하는 것으로 정의되어 있기 때문에 이처럼 유량계수 값이 일정하게 유지되기 위해서는 Q 와

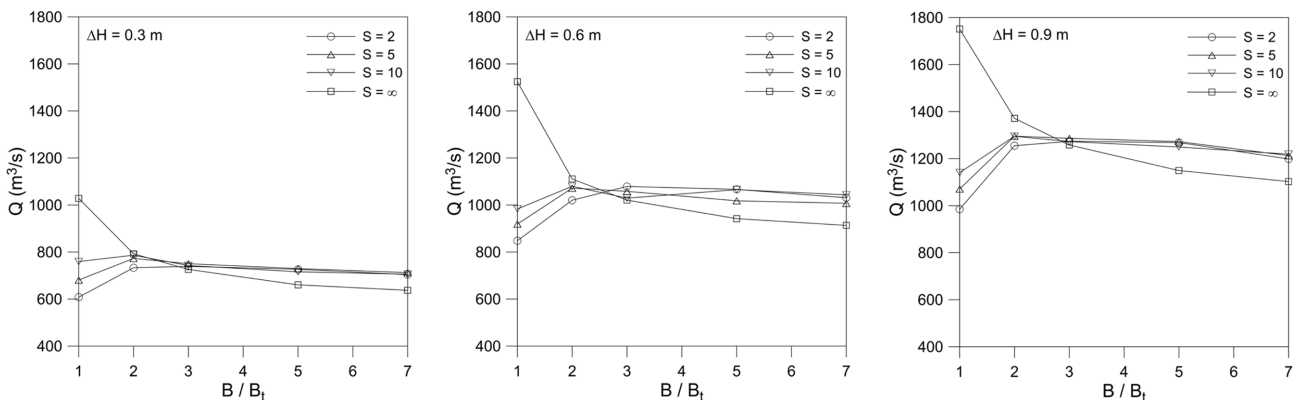


Fig. 3. Water discharge as a function of B/B_t for different values of the apron slope and the head difference.

$\sqrt{\Delta H}$ 의 증가율이 거의 같아야 함을 유추할 수 있으며, 본 실험자료에서 이러한 관계가 나타남을 확인하였다.

Fig. 3과 4에 보인 것처럼 $B/B_t = 1$ 인 경우에 물받이 경사에 따라서 수문 통과유량에 큰 차이가 발생하는 이유는 수문 상류측의 폭(B)과 수문의 폭(B_t)이 같기 때문에 물받이 경사 구간의 경사가 급해짐에 따라 통수 공간이 감소하게 되는 직접적인 영향으로 수문에 도달하는 유량이 현저하게 감소하게 되기 때문이다. Fig. 5에는 다른 조건은 동일하고 B/B_t 의 값만 서로 다른 경우에 대한 유속장 및 유적선(streamline)을 예시로서 제시하였는데, Fig. 5(a)에 보인 것처럼 $B/B_t = 1$ 인 경우와 $B/B_t = 7$ 인 경우의 수문 유입부에서의 평면적 유속 분포가 다를 수 있음을 정성적으로 파악할 수 있다. 즉 $B/B_t = 1$ 인 경우에는 물받이 경사에 따라 수문 상·하류측의 통수공간이 변화하는 영향이 통수성능에 직접 영향을 미치게 되지만, $B/B_t = 7$ 인 경우에는 물받이 경사가 변하여도 수문 유입부에서 평면적으로 수렴되는 유속장의 특성으로 인해 통수성능에 미치는 영향이 더 작게 나타날 수 있다.

이러한 현상을 보다 자세히 설명하기 위하여 Fig. 6과 Fig. 7에는 $B/B_t = 1$ 및 $B/B_t = 3$ 인 경우에 수문 유입부(Fig. 1에서

I와 I' 사이 구간) 및 유출부(Fig. 1에서 O와 O' 사이 구간)에서의 흐름방향 속도를 비교하여 제시하였다. 각각의 그림은 $\Delta H = 0.3$ m인 조건에 대한 결과이며, 속도는 유·출입부 단면에서 연직방향으로 중간 높이에서 중앙으로부터 양 방향으로 1 m 간격으로 19점을 추출하였다. Fig. 6에 보인 것처럼 $B/B_t = 1$ 인 경우에는 물받이 구간 경사에 따라서 유입부 속도 분포에 큰 차이가 나타났다. 특히 물받이 구간 경사가 1:5보다 급한 경우에는 횡방향으로 중앙부에서의 유속에 비해서 양쪽 벽 근처 측면에서의 유속이 크게 저하된 상태로 흐름이 유입부에 도달함을 알 수 있다. 또한, 물받이 구간 경사가 없이 바닥이 평평한 경우($S = \infty$)와 경사가 1:10인 경우($S = 10$)를 비교해보면 평면적 분포 형태는 유사하지만, 유속 값이 큰 차이를 나타냄을 알 수 있다. 반면에 $B/B_t = 3$ 인 경우에는 이와 같은 경사에 따른 유속분포의 차이가 상대적으로 크지 않았다. 이 경우에는 $S = 2$ 일 때를 제외하고는 중앙부에 비해서 양 측면에서의 속도가 약 10% 정도 크게 나타났는데, 이것은 수문 양 측면 벽 근처에서는 흐름이 조력댐을 감싸면서 수문으로 유입되므로 평면적인 수렴 현상으로 인해 중앙부에 비해서 유속이 더 빨라지게 되는 것으로 이해할 수 있다. 한편,

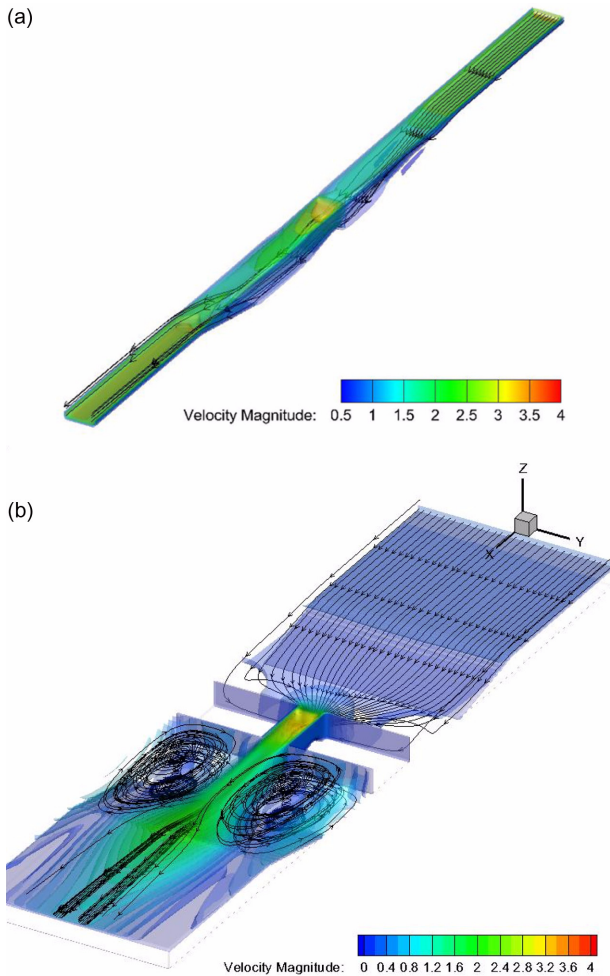


Fig. 5. General view of the velocity fields including streamlines (a) $B/B_t = 1$, $S = 5$, $L = 50$ m, $\Delta H = 0.3$ m, (b) $B/B_t = 7$, $S = 5$, $L = 50$ m, $\Delta H = 0.3$ m.

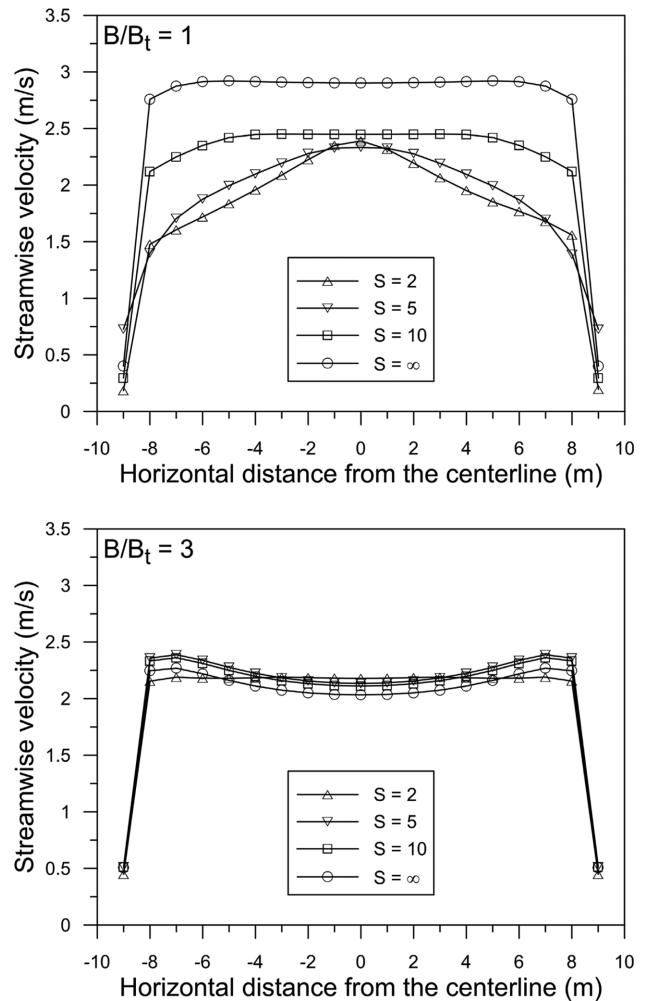


Fig. 6. Distribution of streamwise velocity at the inlet of the sluice caisson.

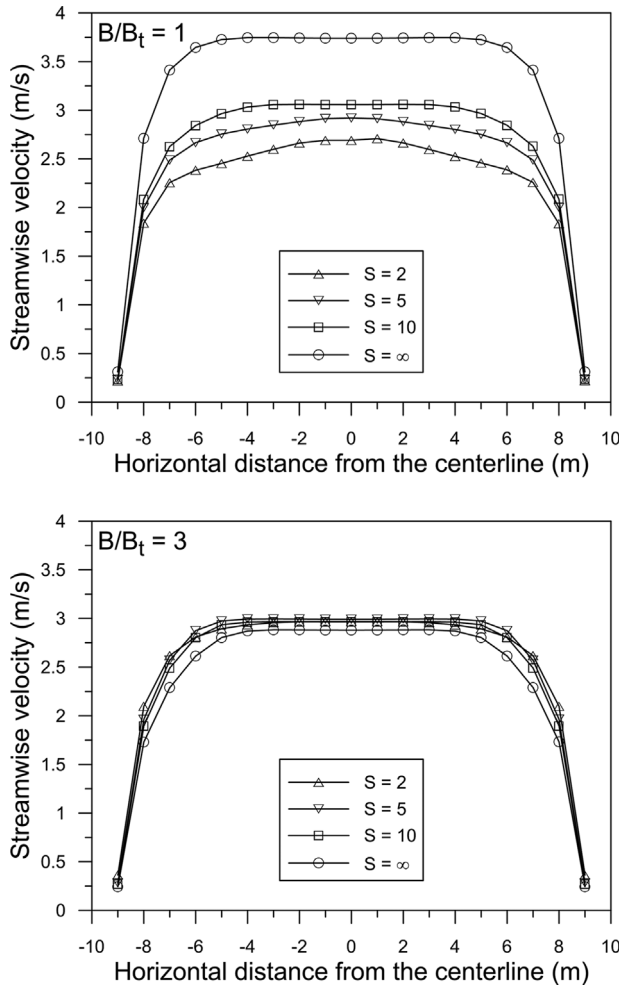


Fig. 7. Distribution of streamwise velocity at the outlet of the sluice caisson.

$B/B_t = 5$ 및 7 인 조건에서의 수문 유입부 평면적 유속분포는 $B/B_t = 3$ 인 경우와 큰 차이가 없었다.

Fig. 7에 보인 것처럼 수문 유출부에서도 $B/B_t = 1$ 인 경우에는 물받이 구간 경사에 따라서 속도 분포에 큰 차이가 나타났다으며, 이는 근본적으로 Fig. 6에 보인 것처럼 물받이 구간 경사에 따른 유입 속도에 차이가 존재하기 때문에 당연히 나타나는 결과라고 할 수 있다. 반면에, $B/B_t = 3$ 인 경우에는 물받이 경사에 따른 유속값의 차이가 거의 없었다. 한편, Fig. 7에 보인 두 그림 모두에서 전체적인 속도 분포 형태는 Fig. 6에 보인 수문 유입부에서의 속도 분포 형태와 차이가 있었으며, 이것은 수문을 통과하는 동안 수문 가장자리 쪽에서는 벽마찰로 인해 유속이 감소하며, 벽에서 다소 떨어진 중앙부근에서는 유속이 증가하기 때문에 나타나는 차이점이다.

4.2 물받이 경사(S)에 따른 통수성능 변화

물받이 경사에 따른 통수성능을 고찰하기 위하여 Fig. 8에 보인 것처럼 수치모델링에 의해 계산된 유량계수의 값을 경사(S)에 대하여 도시하였다. 4.1절에서 살펴본 것처럼 $B/B_t = 1$ 인 경우에는 S 의 값이 증가할수록, 즉 사면 경사가 완만해질

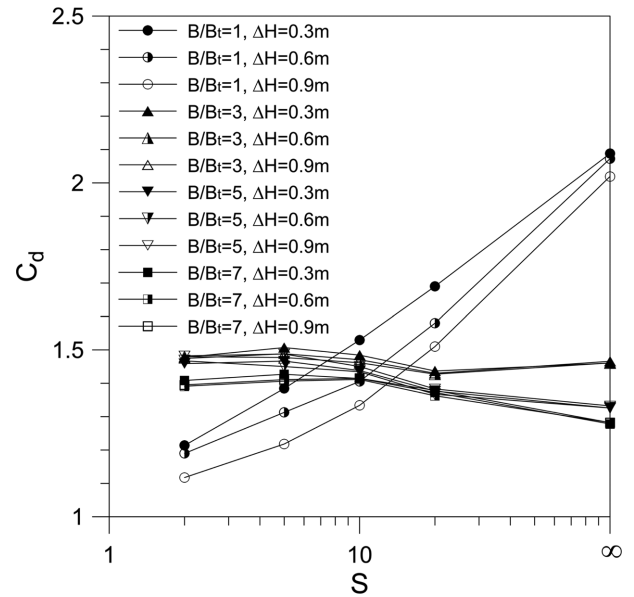


Fig. 8. Values of the discharge coefficient as a function of the apron slope.

수록 유량계수의 값이 현저하게 증가하였다. 반면에 $B/B_t \geq 3$ 인 범위에서는 사면 경사에 따른 유량계수의 변화량이 상대적으로 작은 편이었다. 실제로 현장에 건설되는 조력발전소의 평면적인 배치를 고려해 본다면 수문 구조물 상·하류측, 즉 조지 및 외해 쪽의 폭은 수문 구조물 전체 폭에 비해서 넓은 경우가 많기 때문에 $B/B_t = 1$ 인 조건은 비현실적이라고 할 수 있다. 왜냐하면 $B/B_t = 1$ 인 조건에서는 수문 케이슨 양측면에 있는 연결구조물 및 조력댐 등에 의해 평면적으로 통수구간이 급격하게 달라지는 현장 여건이 고려되지 못하기 때문이다. 따라서 $B/B_t = 1$ 인 조건에서 수치모델링 또는 수리모형실험이 수행될 경우 실제 현장 여건과는 다른 결과를 얻게 된다. 이 등(2008b)의 실험 결과에서 유량계수 값이 대부분 2 이상의 값을 얻었던 것도 당시 수리모형실험이 $B/B_t = 1$ 이고, $S = \infty$ 인 조건에서 수행되었기 때문이다.

이러한 점을 고려하여 Fig. 8에서 $B/B_t = 1$ 인 경우의 자료를 제외한 나머지 조건에 대한 실험 결과만을 별도로 정리한 그림을 Fig. 9에 제시하였다. 이 그림으로부터 Fig. 8에서는 서로 구분하기 어려웠던 $B/B_t \geq 3$ 인 조건에서의 물받이 경사에 따른 유량계수의 변화를 더 자세히 고찰할 수 있다. $B/B_t = 7$ 이고 $\Delta H = 0.6, 0.9$ m인 조건을 제외하면 $S = 5$ 인 경우에 유량계수의 값이 가장 크게 나타났다. S 에 따른 유량계수 평균값은 $S = 5$ 인 경우에 비해서 $S = 2$ 및 $S = 10$ 일 때는 2~3% 작았으며, $S = 20$ 일 때는 약 5%, $S = \infty$ 일 때는 약 8% 작았다. 이러한 수치모델링 결과는 $B/B_t \geq 3$ 인 조건에서는 $2 \leq S \leq 10$ 인 범위에서 통수성능에 큰 차이가 없음을 나타내며, $B/B_t \geq 3$ 인 조건에서는 수문 상류측 물받이 경사에 따른 수문 유입부에서의 흐름장 변화가 제한적임을 시사한다. 실제로 본 논문의 4.1절에서 언급한 것처럼 수문 유입부의 평면적 유속 분포는 $B/B_t \geq 3$ 인 경우 큰 차이가 없었다.

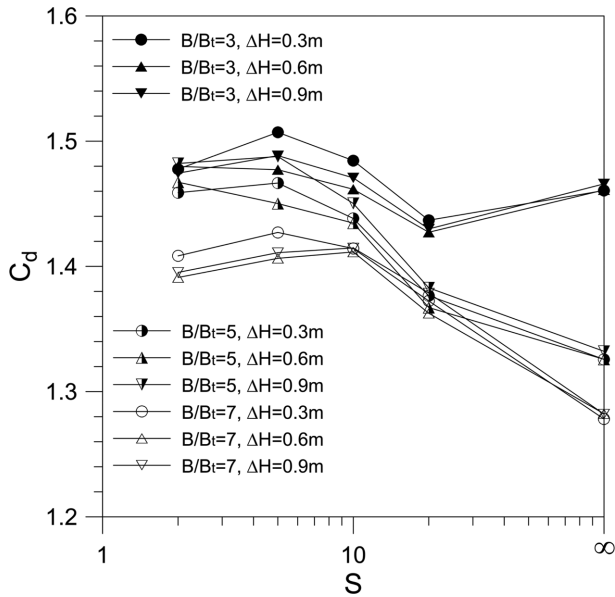


Fig. 9. Values of the discharge coefficient as a function of the apron slope (only for $B/B_t \geq 3$).

비록 $B/B_t \geq 3$ 이고 $2 \leq S \leq 10$ 일 때 유량계수 값의 차이가 몇 % 이내로 작긴 하였지만, 이러한 범위 내에서는 평균적으로 $S=5$ 일 때 유량계수가 가장 컸는데, 이것은 물받이 경사를 극단적으로 완만하게 하는 것($S \rightarrow \infty$)보다는 적절한 경사를 두는 것이 통수성능을 근소하게나마 극대화하는 데 유리함을 의미한다. 이러한 결과가 나타나는 이유에 대해서 명확하게 설명하기는 어렵지만 물받이 경사가 존재할 경우 수문 상류측 물받이 경사구간에서는 통수면적 증가에 따라 유속이 감소하며, 수문 하류측 물받이 경사구간에서는 통수면적 감소에 따라 유속이 증가하는 현상이 나타나게 되는데 이처럼 유속장이 감속 후 가속되는 동적 변화가 통수성능 향상에 기여하는 것으로 보인다. 단, 물받이 경사가 지나치게 급할 경우에는 감속 및 가속이 급격하게 발생하면서 에너지 손실이 다소 크게 발생하게 되므로 적정 물받이 경사($S \approx 5$)를 유지하는 것이 통수성능을 가장 좋게 하는 것으로 판단된다. 그러나 이것은 수치모델링 결과에 따른 해석 차원에서 도출된 결론이므로 보다 엄밀한 고찰이 요구된다.

또한, Fig. 9에서 평균적으로 B/B_t 의 값이 증가할수록 유량계수가 감소하는 경향을 확인할 수 있는데, 이것은 B/B_t 의 값도 무한히 크게 하는 것보다는 적절한 값을 유지하는 것이 통수성능을 근소하게나마 증가시키는데 효과적임을 시사한다. 앞서 Fig. 4에 대한 설명에서 $B/B_t=1$ 또는 2인 경우에는 상대적으로 유량계수의 편차가 크게 나타나며, $B/B_t \geq 3$ 이고, $2 \leq S \leq 10$ 인 조건에서는 ΔH 의 값과 무관하게 유량계수(C_d) 값이 일정한 범위(1.4~1.5)에서 형성됨을 언급하였는데, 이러한 점을 고려하면 $B/B_t \approx 3$ 으로 하는 것이 통수성능을 몇 % 정도의 작은 비율일지라도 유량계수 값을 극대화하는데 유리할 것으로 사료된다. 이처럼 B/B_t 의 값을 $B/B_t \approx 3$ 이상으로 증가시키기에 따라 유량계수 값이 감소하는 이유 역시 명확하

게 설명하기는 어렵지만 값이 적정 수준 이상으로 커질 경우 흐름과 직각 방향인 횡방향으로의 유속 변동성이 더 커지는 것이 원인이 될 수 있을 것으로 보인다. 한편, $B/B_t \geq 5$ 인 조건에서는 바닥 표고에 변화가 없는 $S=\infty$ 인 경우는 $2 \leq S \leq 10$ 인 범위에 비해서 유량계수 값이 뚜렷하게 작은 값을 보였는데, 이러한 현상이 나타나는 이유에 관해서도 추가적인 고찰이 필요하다.

4.3 물받이 수평구간 길이(L)에 따른 통수성능 변화

물받이의 횡방향 폭(B) 및 경사(S)에 이어서 물받이 수평구간의 길이(L)에 따른 통수성능 변화 양상을 고찰하였다. 앞서 4.1절 및 4.2절에서 제시한 결과는 모두 물받이 수평구간의 길이가 $L=50$ m인 조건에 대한 것이며, L 의 영향을 살펴보기 위하여 추가로 $L=20, 35, 65, 80$ m인 조건에 대한 수치모델링을 수행하였다. 위에서 언급한 것처럼 $B/B_t=1$ 인 실험 조건은 조력발전소 수문의 현장 배치 여건에 부합되지 않기 때문에 이 조건은 수치실험에서 고려하지 않았다. 또한 수문의 통수성능이 상·하류측의 수위차(ΔH)에 따라서 유의미한 차이를 나타내지 않았기 때문에 본 연구에서 고려한 세 가지 수위차 조건 중에서 가장 발생빈도가 높을 것으로 판단되는 $\Delta H=0.3$ m인 경우에 대해서만 모델링을 수행하였다. 이 수치모델링 결과를 Fig. 10에 나타내었으며, 이 그림으로부터 물받이 수평구간의 길이 증감에 따른 유량계수가 1.35~1.51의 좁은 범위 내에서 변화하고 대체로 L 의 값이 증가함에 따라 유량계수의 편차는 더 작아지게 되는 경향을 나타냄을 알 수 있다. L 의 값에 따른 유량계수 평균을 비교해 보면 $L=50$ m인 경우의 유량계수 평균값이 1.45로 가장 컸지만, 나머지 네 경우에도 모두 이보다 약 1% 작은 정도에 불과하여 유의미한 차이는 없었다.

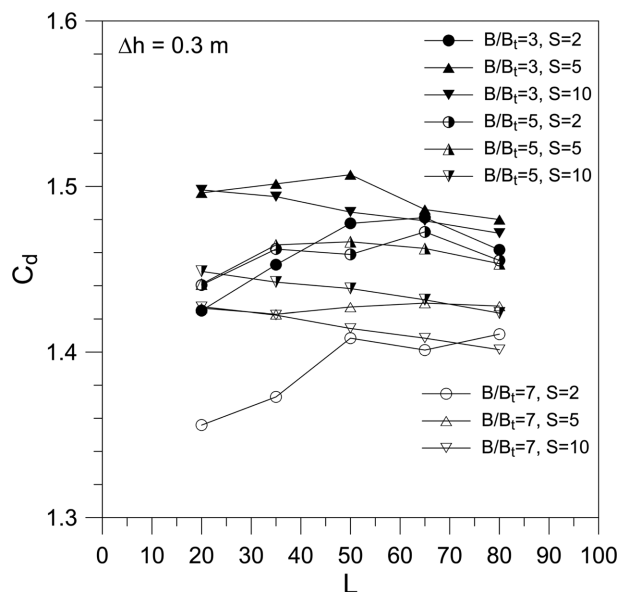


Fig. 10. Values of the discharge coefficient as a function of the apron length.

4.4 토의

Fig. 4에 보인 것처럼 수문 폭(B_i) 대비 유·출입부의 폭(B)이 수문의 통수성능에 미치는 영향이 매우 컸으며, 특히 B/B_i 의 값이 3보다 작은 경우에는 물반이 경사에 따른 통수성능 편차가 뚜렷하게 나타났다. 비록 본 연구에서는 수문 1개만을 대상으로 수치모델링이 수행되었지만 수문이 여러 개 설치되는 경우 수문 구조물 전체 폭(수문 1개 폭 \times 개수)을 B_i 라고 정의할 수 있으며, 이 경우에는 수문 및 수차 구조물을 포함하는 조력댐 전체 폭(연장)이 B 에 해당한다고 가정할 수 있다. 따라서 조력발전소 입지의 현장 여건에 문제가 없다면 $B/B_i \geq 3$ 의 조건을 만족시키도록 수문 구조물 양 측면으로 수문 전체 폭 B 만큼의 여유를 두는 것이 바람직할 것으로 추정해 볼 수 있다. 다만, 이것은 본 연구에서 얻어진 결과를 토대로 추정해 본 것일 뿐이기 때문에 수문 구조물이 여러 개 병렬로 배치된 조건에서의 수치모델링을 수행하여 이를 확인하는 것이 반드시 필요하다. 또한, 통상적으로 수문 구조물 전·후면에는 유·출입부 흐름을 유도하기 위하여 날개벽 구조물이 설치되는데, 이 날개벽의 형상 및 길이가 전체적인 통수성능에 중요한 영향을 미칠 수 있으며, 그에 따라서 통수성능 증대와 관련한 B/B_i 의 요구 조건도 달라질 수 있다.

한편, 수치모델링 조건 중에서 $B/B_i = 1$ 이며 $S = \infty$ 일 때에는 유량계수가 매우 크게 평가되었는데, 실제 조력발전소가 건설되는 현장에서는 조력발전소 수문의 폭보다는 유·출입부의 폭이 클 수 밖에 없으며 또한 수문 구조물이 설치되는 수심과 주변 지반고 사이에 높이차가 존재하는 경우가 대부분일 것이므로 $B/B_i = 1$ 이며 $S = \infty$ 인 조건은 비현실적이라고 할 수 있다. 이러한 조건에서는 Fig. 6에서도 보인 것처럼 수문 유입부의 유속이 실제에 비해서 지나치게 크게 평가됨으로써 수문 통수성능을 과대 산정할 가능성이 있다. 따라서, 수리모형실험 또는 수치모델링 수행 시에도 이처럼 현장 여건과 동떨어진 조건에서 수문의 통수성능 평가가 이루어지지 않도록 유의할 필요가 있다.

물반이의 경사와 관련해서는 $B/B_i \geq 3$ 의 조건에서는 유량계수의 값이 B/B_i 및 ΔH 값에 따라서 최대 15% 정도의 편차를 나타내었으며, 평균적으로는 $S = 5$ 일 때의 유량계수 값이 가장 컸다. 다만, $B/B_i \geq 3$ 이고 $2 \leq S \leq 10$ 인 범위 내에서는 비교적 유량계수 값의 변화가 크지 않은 편이었다. 반면, 물반이의 경사가 없는, 즉 바닥이 평평한($S = \infty$) 경우에는 물반이 경사가 존재하는 경우($S \neq \infty$)에 비해서 뚜렷하게 통수성능이 저하되는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 물반이 경사가 있는 편이 수문 구조물 하류측에서의 유속 강화 효과가 있기 때문에 나타나는 것으로 추정되지만 근본적인 이유에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

물반이 수평구간 길이(L)에 관해서도 실험 조건에 따라서 최대 10% 정도의 통수성능 변화가 나타났으며 평균적으로는 $L = 50$ m일 때의 유량계수 값이 가장 크게 나타났다. 그러나 평균적으로는 유의할만한 수준의 큰 통수성능 변화는 나타나

지 않았다. 통상적으로 수문 케이슨의 흐름 방향의 길이(L_c)가 도로 및 부대시설 배치 등을 고려하여 40~45 m 정도로 계획되는 점을 고려하면 물반이 길이는 대략 $L/L_c \approx 1$ 정도가 되도록 설계하면 충분할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구를 통해서 물반이 구조물의 횡방향 폭(B), 경사(S), 수평구간 길이(L)가 조력발전용 수문의 통수성능에 미치는 영향을 고찰하였다. 수치모델링 결과 물반이 구조물의 형상 및 제원에 따라서 수문 구조물의 형상 자체는 동일하더라도 전반적인 통수성능에 큰 차이가 발생할 수 있음을 확인하였다. 이러한 측면에서 조력발전용 수문 자체의 통수성능 뿐만 아니라 수문 구조물 상·하류측의 3차원적 지형을 함께 고려하여 통수성능을 종합적으로 평가하는 것이 중요하다. 본 연구에서 고려 대상으로 삼은 물반이의 세 가지 형상 파라미터와 관련해서는 $B/B_i \geq 3$, $S \approx 5$, $L/L_c \approx 1$ 의 조건이 되도록 물반이 구조를 결정하게 되면 수문의 통수성능이 최적 조건으로 유지될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 한국해양과학기술원(KIOST) 주요사업 “조력발전 시스템 성능향상 기술개발(PE98763)” 및 “조류발전 시스템 성능향상 기술개발(PE98943)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 권순국, 나정우 (1986). 배수갑문 유량계수 결정에 대한 실험적 연구. 한국농공학회지, 28(1), 51-59.
- 김진홍 (1994). 수리구조물 하류부에서의 Vortex의 특성 및 세굴량 산정에 관한 연구. 한국수문학회지, 27(1), 101-109.
- 김창성, 강준구, 여홍구, 여운광 (2010). 연직낙차공 하류부 사석보호공 침하량 산정식에 관한 실험 연구. 한국수자원학회 논문집, 43(5), 433-443.
- 오상호, 이광수, 장세철, 이달수 (2011). 조력발전용 수문 성능 평가를 위한 평면 수리모형실험. 한국해양·해양공학학회 논문집, 23(6), 474-481.
- 윤광석, 여규동 (2005a). 물반이 길이 및 접근경사에 따른 조력발전 배수구조물 통수능 검토 실험 연구. 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 1026-1030.
- 윤광석, 여규동 (2005b). Apron 경사 및 길이에 따른 수문 구조물 배수능 평면실험 연구. 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 1031-1035.
- 이달수, 오상호, 이진학, 박우선, 조휴상, 김덕구 (2008a). 조력발전용 수문 형상에 따른 통수성능에 관한 실험적 연구-I. 수리모형실험. 한국해양·해양공학학회 논문집, 20(1), 73-80.
- 이달수, 오상호, 이진학, 박우선, 조휴상, 김덕구 (2008b). 조력

- 발전용 수문 형상에 따른 통수성능에 관한 실험적 연구-II. 실험결과 및 분석. 한국해안·해양공학회논문집, 20(1), 81-92.
- 이중기 (1968). 스루스 게이트의 유량공식. 한국농공학회지, 10(2), 1476-1484.
- 지식경제부 (2008). 조력발전용 고효율 수문형상 설계기술 최종 보고서.
- 한국서부발전 (2007). 가로림조력 타당성 조사(2단계) 최종보고서.
- 한국수자원학회 (2009). 하천설계기준 · 해설.
- Baker, A.C. (1991). Tidal Power. Peter Peregrinus Ltd., London,

United Kingdom.

Hirt, C.W. and Nichols, B.D. (1981). Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. Journal of Computational Physics, 39, 201-225.

원고접수일: 2012년 11월 26일

수정본채택: 2013년 4월 2일

게재확정일: 2013년 4월 18일