

## 조력발전용 수문 형상에 따른 통수성능에 관한 실험적 연구 - II. 실험결과 및 분석

### Experimental Investigation of Water Discharge Capability According to Shape of Sluice for Tidal Power Generation - II. Experimental Results and Analysis

이달수\* · 오상호\* · 이진학\* · 박우선\* · 조휴상\*\* · 안석진\*\*

Dal Soo Lee\*, Sang-Ho Oh\*, Jin-Hak Yi\*, Woo Sun Park\*, Hyu-Sang Cho\*\* and Suk-Jin Ahn\*\*

**요 지 :** 이 연구에서는 개수로시스템에 설치된 조력발전용 수문(sludge)에 대한 수리모형실험을 수행하여 취득된 자료의 분석 결과를 제시하였다. 실험은 수문 최소단면의 폭 및 바닥높이가 서로 다른 여섯 가지 수문 모형에 대하여 이루어졌다. 수문의 측면형상이 같을 경우에 수문 최소단면의 폭을 증가시키므로써 수문의 유량계수는 대체로 증가하였지만, 유량이 작고 수문 상류측의 수위가 낮을 때는 유량계수가 증가하다가 감소하는 경향이 나타났다. 또한, 최소단면의 폭에 무관하게 최소단면의 바닥높이가 높은 경우에 유량계수가 크게 나타났다. 실험결과로부터 기존의 타당성조사 사업 등의 수문 설계시에 주로 적용하였던 유량계수 값은 과소산정되었으며, 따라서 유량계수 값을 상향조정하여 사용하는 것이 타당하다는 결론을 얻었다.

**핵심용어 :** 수문, 수문 형상, 조력발전, 통수성능, 유량계수

**Abstract :** In this study, the analysis results were presented for the experimental data of sluice for tidal power generation that were installed in an open channel flume. The experiment was carried out for the six different sluice models of different widths and bottom heights of the sluice throat section. If the side shape of the sluice was the same, the coefficient of discharge generally increased by increasing the width of the throat section. However, when the water discharge was small and the upstream water level was low, the coefficient of discharge increased for a while but decreased later with the increase of the throat section width. In addition, the coefficient of discharge was larger when the bottom height of the throat section was higher, regardless of the width of the throat section. It was concluded that the values of coefficient of discharge that were frequently used in the previous feasibility studies were underestimated so that should be adjusted to higher values.

**Keywords :** sluice, sluice shape, tidal power generation, water discharge capability, discharge coefficient

## 1. 서 론

최근 전세계적으로 미래의 안정적인 에너지원 확보를 위해서 기존 화석연료를 대체할 수 있는 신재생에너지 자원을 개발하는 데 총력을 기울이고 있다. 이에 따라 세계 10위의 온실가스 배출국이며 에너지 다소비 국가인 우리나라에서도 개발 가능한 신재생에너지 자원에 대한 관심이 점차 증대되고 있다. 그 중에서도 우리나라 서해안 일

대는 조석간만의 차가 크고 해안선이 복잡하여 조지면적을 넓게 조성할 수 있어서 조력에너지가 풍부하므로, 이 지역에서 조력발전소를 건설하기 위한 타당성조사가 지금까지 여러 차례 시행된 바 있다. 현재 경기도 시화호에 국내 최초로 시설용량 254 MW급의 조력발전소가 건설되고 있으며, 향후 다른 지역에도 조력발전소를 건설하는 방안이 다각도로 검토되고 있는 실정이다.

일반적으로 조력발전소를 건설하려면 사전에 개발 타

\*한국해양연구원 연안개발연구본부 항만·연안공간연구사업단(Corresponding author: Dal Soo Lee, Coastal Engineering Research Department, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Gyeonggi 426-744, Korea, dslee@kordi.re.kr)

\*\* (주)헤이이엔씨 기술연구소(Technology R & D Institute, Hyein E & C Co., Ltd., Seoul 150-854, Korea)

당성 조사를 수행하여 조력에너지 개발의 경제성을 조사하게 된다. 이러한 타당성 조사사업에서는 수문(sluiice)과 수차의 설치대수 조합을 변경해가면서 조력발전소 건설에 따른 연간발전량 및 공사비를 산정하여 적정시설용량을 결정하게 된다. 연간발전량을 산정하는 데에는 조석, 수위별 조지면적, 수문 및 수차의 제원 및 통과유량특성 자료 등이 입력 자료로 필요한데, 해수의 유출입 통로가 되는 수문의 통과유량 특성은 수문의 형상에 따라서 크게 달라진다. 따라서 통수능력이 좋은 고효율의 수문을 사용하게 되면 목표하는 연간발전량을 달성하기 위한 수문의 설치 대수를 감소시킬 수 있어서 공사비를 절감하는 효과를 얻을 수 있다. 따라서 조력발전소 건설의 경제적 타당성을 제고하고, 발전효율을 극대화하기 위해서는 수문의 최적형상 설계기술에 대한 체계적인 연구가 이루어져야 할 필요성이 있다.

이 연구에서는 이러한 목적으로 개수로시스템에서 수행한 정밀 수리모형실험 자료를 이용하여 수문의 최소단면 폭 및 바닥높이 변화에 따른 수문의 통수능력 변화 양상을 분석하여, 고효율의 수문형상 및 통과유량특성을 예측하는데 유용하게 쓰일 수 있는 기초적인 연구결과를 제시하였다. 본 논문의 내용을 이해하는데 필요한 수리모형 실험의 장치 구성, 실험방법 및 수두차 평가 방법 등에 관해서는 이 등(2008)에 상세하게 기술되어 있다.

## 2. 실험결과 및 분석

### 2.1 수문모형 및 실험조건

조력발전용 수문의 전체적인 형상을 결정짓는 대표적

인 파라미터들은 이 등(2008)에서 이미 설명하였지만, 본 실험결과 및 분석 내용을 보다 쉽게 이해하는데 필요하기 때문에 Fig. 1에 다시 제시하였다. Fig. 1에서  $W$ 는 수문 1개에 해당하는 수문 케이슨의 전체 폭,  $W_i$ 는 유입부(inlet) 단면의 폭,  $W_t$ 는 통수단면 또는 최소단면(throat)의 폭,  $W_o$ 는 유출부(outlet) 단면의 폭을 각각 나타낸다. 길이 방향의 파라미터로는  $L$ 은 수문 케이슨의 전체 길이,  $L_c$ 는 수축구간(contraction)의 길이,  $L_t$ 는 통수단면(throat) 구간의 길이,  $L_e$ 는 확장구간(expansion)의 길이,  $L_o$ 는 유출구간(outlet)의 길이를 각각 나타낸다. 한편, 연직방향의 파라미터로는  $h_m$ 은 수문 케이슨이 놓이게 되는 사석 마운드(mound)의 높이,  $h_b$ 는 수문 통수단면의 바닥(bottom)의 높이,  $h_t$ 는 통수단면(throat)의 높이,  $h_{su}$  및  $h_{sd}$ 는 수문 상부구조물 상류측(upstream)과 하류측(downstream)에서의 통수단면 상부의 최저점이 수중에 잠긴(submerged) 깊이를 나타낸다. 따라서 수문 전·후면에서 수면으로부터 수평 해저면까지의 수심은 각각  $h_{UP} = h_m + h_b + h_t + h_{su}$  및  $h_{DN} = h_m + h_b + h_t + h_{sd}$ 로 나타내어진다. 또한,  $R$ 은 수문 상부구조물 해측부의 곡률반경을 나타낸다.

이 연구에서는 Fig. 2에 보인 것처럼 수문의 최소단면 폭( $W_t$ )이 세 가지, 수문 최소단면의 바닥높이( $h_b$ )가 두 가지로 서로 다른 여섯 개의 모형을 제작하였다. 여섯 가지 수문 모형의 전체 폭( $W$ ) 및 길이( $L$ )는 각각 50 cm와 110.8 cm로 동일하다. 기존에 시화 및 가로림 조력발전소 등에서 검토된 수문 1개에 해당하는 케이슨의 폭이 대략 20 m 정도인 점을 고려하면, 제작된 수문 모형은 실제 현장에 설치되는 수문 크기의 대략 1/40정도라고 할 수 있다. 한편,  $W_t$ 와  $h_b$  외의 다른 파라미터의 값은 여섯

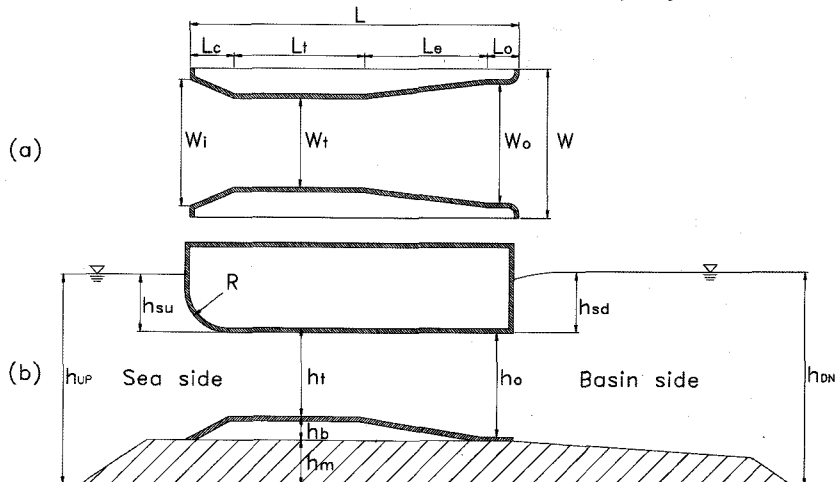


Fig. 1. Lengthwise parameters relating to the shape of a sluice. (a) Plan view and (b) Side view.

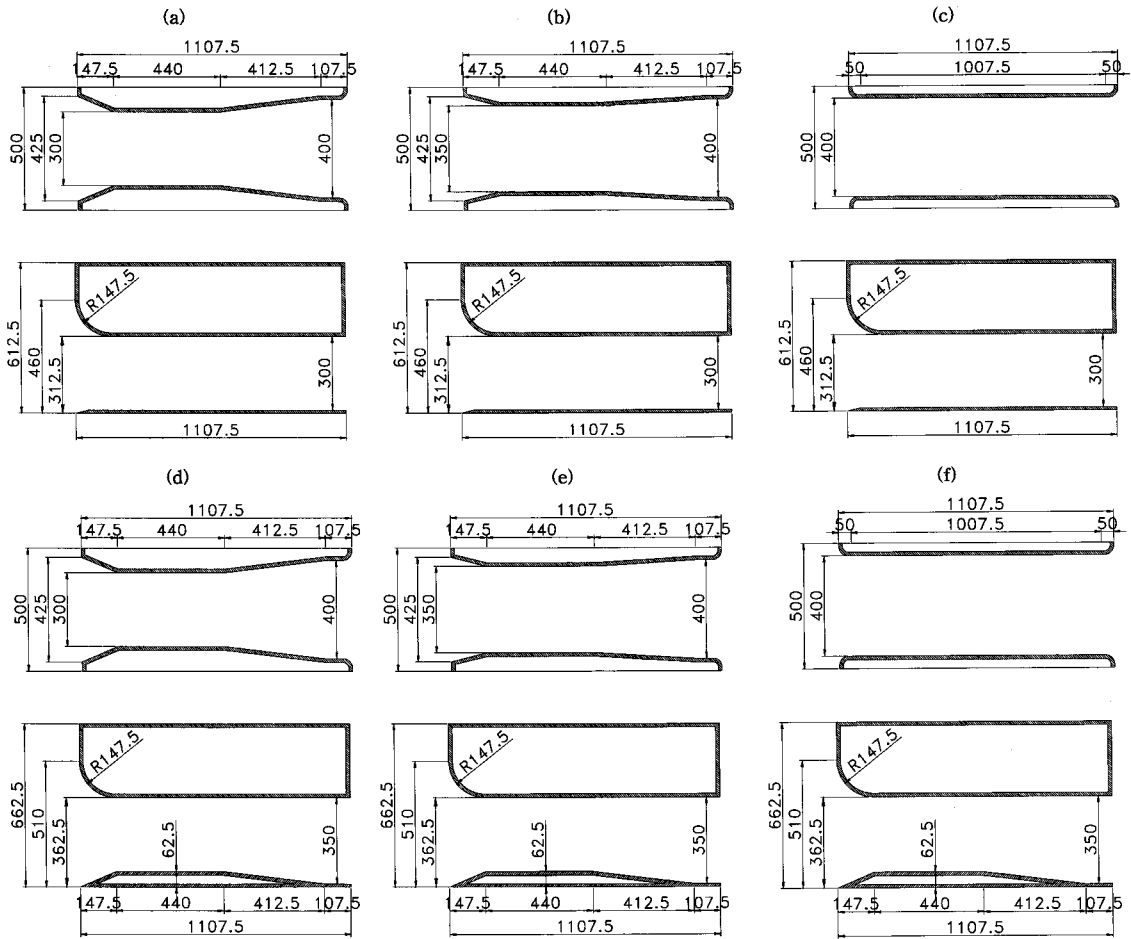


Fig. 2. Sketch of plan and side view of the six sluice models. (a) W60H04, (b) W70H04, (c) W80H04, (d) W60H21, (e) W70H21, (f) W80H21.

가지 모형에서 동일하였다.

제작된 여섯 가지 수문 모형의 형상이 서로 비슷하기 때문에, 자료 분석 및 결과 해석에 있어서 혼동을 피하고 이해를 빠르고 쉽게 하기 위해서 수문 모형의 분류기호를 수문의 평면 및 측면 형상을 반영하도록 다음과 같은 방법으로 결정하였다. 평면 형상의 경우에는 수문 케이슨 전체 폭에 대한 최소단면 폭의 비의 백분율을 분류기호로 하였다. 예를 들어 Fig 2(d)에 보인 모형의 분류기호는 W60H21 인데, 여기에서 W60이 수문의 평면형상과 관련된 분류기호이며, 60은 최소단면의 폭(W) 30 cm를 수문 케이슨의 폭(W) 50 cm로 나눈 백분율을 의미한다. 비슷한 방법으로, 측면형상의 경우에는 수문 케이슨의 바닥으로부터 최소단면 하단면까지의 높이를 최소단면의 높이로 나눈 백분율을 분류기호로 사용하였다. 즉, 예를 들어 Fig 2(d)의 경

우에 H21은 수문의 측면 형상과 관련된 분류기호이며, 21은 수문케이슨 바닥으로부터 최소단면 하단면까지의 높이( $h_b$ ) 6.25 cm를 최소단면의 높이( $h$ ) 30 cm로 나눈 백분율을 의미한다. 여섯 가지 수문 모형에 대해서, 평면형상은 수문 케이슨의 폭이 50 cm로 고정되어 있고 최소단면의 폭이 가변적인 반면에, 측면 형상은 최소단면의 폭이 30 cm로 고정적이며 수문케이슨 바닥으로부터 최소단면 하단면까지의 높이가 변화하므로 위와 같은 방법으로 분류기호를 지정하였다. 이렇게 각 수문 모형의 분류기호를 수문 형상의 평면 및 측면 형상과 관련된 무차원수를 이용하여 지정함으로써, 분류기호만으로 수문 모형의 형상을 직관적으로 이해하는 데 도움이 되었고, 또한 축척과 형상이 달라지는 경우에도 수리모형실험의 결과를 유추해서 활용할 수 있도록 하였다.

**Table 1.** Summary of experimental flow conditions

Target discharge ( $Q$ )	Target upstream water level from underside of superstructure ( $h_{su}$ )
0.065 m <sup>3</sup> /s ( $Q_1$ )	11.0 cm ( $h_{LW}$ )
	14.8 cm ( $h_{MW}$ )
	18.5 cm ( $h_{HW}$ )
0.095 m <sup>3</sup> /s ( $Q_2$ )	11.0 cm ( $h_{LW}$ )
	14.8 cm ( $h_{MW}$ )
	18.5 cm ( $h_{HW}$ )
0.125 m <sup>3</sup> /s ( $Q_3$ )	11.0 cm ( $h_{LW}$ )
	14.8 cm ( $h_{MW}$ )
	18.5 cm ( $h_{HW}$ )
0.155 m <sup>3</sup> /s ( $Q_4$ )	11.0 cm ( $h_{LW}$ )
	14.8 cm ( $h_{MW}$ )
	18.5 cm ( $h_{HW}$ )
0.185 m <sup>3</sup> /s ( $Q_5$ )	11.0 cm ( $h_{LW}$ )
	14.8 cm ( $h_{MW}$ )
	18.5 cm ( $h_{HW}$ )

수리모형실험은 Table 1에 보인 것처럼 다섯 가지의 유량 조건에 대하여 외해측 수위 조건을 세 가지로 달리하면서 실험을 수행하였다. 따라서 각 수문 모형에 대하여 총 실험 조건은 15개가 된다. Table 1에서  $h_{HW}$ ,  $h_{MW}$ ,  $h_{LW}$ 는 각각 전면 수위가 높을 때, 중간일 때, 낮을 때를 의미한다. 실험조건에 대한 더 자세한 내용은 이 등(2008)에 기술되어 있다.

## 2.2 실험결과 및 분석

Table 2에는 W60H21 모형 예에 대하여 계측된 유량, 상류측의 수위 및 수두차를 제시하고, 그로부터 계산된 유량계수 값을 나타내었다. 나머지 다섯 가지 모형의 경우에도 Table 2에 보인 것처럼 계측을 수행하여 수두차를 평가하고 그로부터 유량계수를 계산하였다.

한편, Fig. 3~8은 여섯 개 수문모형에 대한 실험결과를 보여준다. Fig. 3~5까지는 수문 최소단면의 바닥높이( $h_b$ )가 1.25 cm인 경우(H04)에 대하여 최소단면의 폭( $W$ )이 수문 1개에 해당하는 케이스 폭( $W$ )의 60%, 70%, 80%로 변화하는 경우에 대한 실험결과이다. Fig. 3(a)에서 알 수 있듯이 유량( $Q$ )과 수문 상·하류측의 수두차( $\Delta H$ )는 대체로 선형적인 관계를 나타내었다. 즉, 수두차가 클수록 수문을 통과하는 유량은 증가하게 된다. 또한 수두차가 동일한 경우에는 수문 상류측의 수위가 낮을 수록 수문 통과 유량이 더 크음을 알 수 있다. Fig. 3(b)에는 상·하류측의 수두차( $\Delta H$ )와 유량계수( $C_d$ )의 관계를 도시하였다. 유량계수의 값은 1.72~2.22 사이에 분포하였으며 수두차가 커질수록

**Table 2.** An example of measured values of the water discharge, the upstream water level, the head difference, and thus calculated values of coefficient of discharge (W60H21 model).

$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$h_{su}$ (cm)	$\Delta H$ (cm)	$C_d$
0.065	10.97	0.58	2.14
0.066	14.84	0.63	2.09
0.065	18.57	0.66	2.01
0.095	11.10	1.06	2.32
0.095	14.80	1.15	2.22
0.095	18.55	1.27	2.12
0.124	11.02	1.65	2.42
0.125	14.69	1.77	2.36
0.124	18.63	1.96	2.22
0.151	11.03	2.47	2.41
0.151	14.72	2.57	2.36
0.152	18.61	2.89	2.24
0.182	11.07	3.34	2.50
0.181	14.86	3.49	2.43
0.182	18.51	3.67	2.39

유량계수는 완만하게 증가하는 경향을 보였다. 유량과 수두차가 대체로 선형적인 관계를 가지기 때문에 유량에 따라서도 유량계수가 완만하게 커지는 경향이 나타나게 된다. 다만, 유량에 대한 유량계수의 변화 양상은 Fig. 3(b)와 유사하기 때문에 본 논문에는 제시하지 않았다. 한편, Fig. 3(c)에는 수문 상류측의 수위( $h_{su}$ )에 대한 유량계수( $C_d$ )의 변화를 나타내었다. 모든 유량조건에 대하여 수문 상류측의 수위가 낮아질수록 유량계수가 증가함을 알 수 있다. 이것은 수면 부근의 물이 수문의 유입구를 통과할 때 유입구 상부면의 곡률에 따라 형성되는 유선(stream line)의 형상이 다르기 때문에 나타나는 현상으로 추측된다.

Fig. 4 및 Fig. 5에는 각각 W70H04와 W80H04 모형에 대한 실험결과를 제시하였다. Fig. 3(a)에서와 마찬가지로 유량과 수문 상·하류측 간 수두차는 선형적인 관계를 나타내며, 동일한 수두차에 대해서는 수문 상류측의 수위가 낮은 경우에 수문 통과유량이 더 큰 경향도 같다. Fig. 3(a)의 경우에는 유량이 가장 큰 경우에( $Q_5$ ) 수두차가 4.13~4.88 cm 정도임에 비해서 Fig. 4(a)에서는 2.70~3.39 cm, Fig. 5(a)에서는 2.24~2.95 cm이다. 즉, 최소단면의 폭( $W$ )이 증가할수록 수두차가 감소하게 되는 것이다. 이것은 역으로 수문 상·하류측의 수두차가 동일한 경우에는 최소단면의 폭이 넓을수록 통과유량이 많음을 의미한다.

Fig. 4(b) 및 Fig. 5(b)를 보면, Fig. 4(b)의 경우에는 수두차가 증가함에 따라서 유량계수의 값이 완만하게 증가하여 Fig. 3(b)에서와 비슷한 경향을 나타내었다. 다만

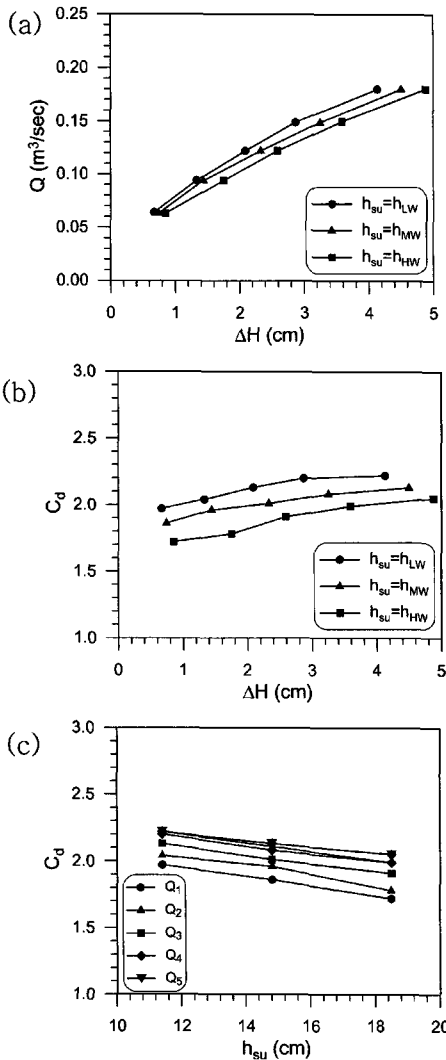


Fig. 3. Experimental results of the W60H04 model. (a) Values of  $Q$  as a function of  $\Delta H$ . (b) Values of  $C_d$  as a function of  $\Delta H$ . (c) Values of  $C_d$  as a function of  $h_{su}$ .

유량계수의 값은 1.88~2.39 사이에 분포하여 Fig. 3(b)에 비해서 전체적으로 다소 증가하였다. 그러나, Fig. 5(b)의 경우에는 수문 상류층의 수위 조건에 따라서 유량이 증가할 때의 유량계수의 변화 양상이 다르다. 즉, 상류층 수위가 낮은 경우에( $h_{su}=h_{LW}$ ) 유량계수는 수두차가 작은 경우에는 크나 이후 수두차가 증가함에 따라서 대체로 감소하는 경향이 나타났다. 반면에 상류층 수위가 높은 경우에는( $h_{su}=h_{HW}$ ) 앞의 두 그림에서처럼 유량계수가 수두차 증가에 따라 완만하게 상승하였다. 중간 수위인 경우에는( $h_{su}=h_{MW}$ ) 유량계수 값에 큰 변화가 없었다. 한편, 수문 상류층의 수위( $h_{su}$ )가 증가할수록 유량계수가 감소하는

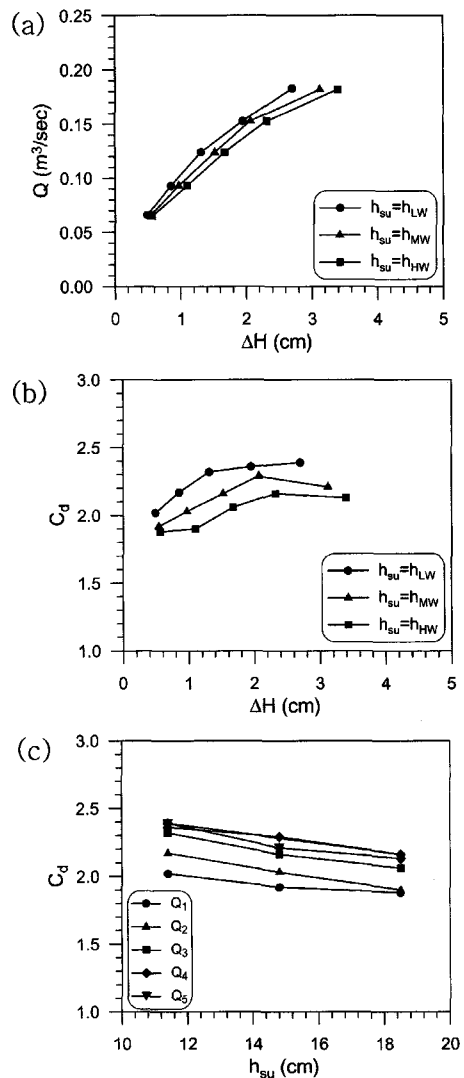


Fig. 4. Experimental results of the W70H04 model. (a) Values of  $Q$  as a function of  $\Delta H$ . (b) Values of  $C_d$  as a function of  $\Delta H$ . (c) Values  $C_d$  as a function of  $h_{su}$ .

경향은 Fig. 4(c) 및 Fig. 5(c)에서도 동일하게 나타났다.

한편, Fig. 5에서는 유량이 제일 작고( $Q_1$ ) 수문 상류층의 수위가 낮을 때( $h_{su}=h_{LW}$ )와 중간일 때( $h_{su}=h_{MW}$ )의 자료가 포함되어 있지 않다. 이것은 이 경우에는 수문 상하류층의 평가 수두차의 값이 매우 작아서 유량계수의 값이 지나치게 크게 평가되었다고 판단되어 자료분석에서 제외하였기 때문이다. Table 2에서도 알 수 있듯이 유량이 작은 경우에는 수문 상하류층의 수두차( $\Delta H$ )는 매우 작다. 유량계수는 수두차의  $-1/2$  제곱에 비례하므로 수두차가 실제보다 작게 평가되면 유량계수가 실제보다 훨씬 크게 평

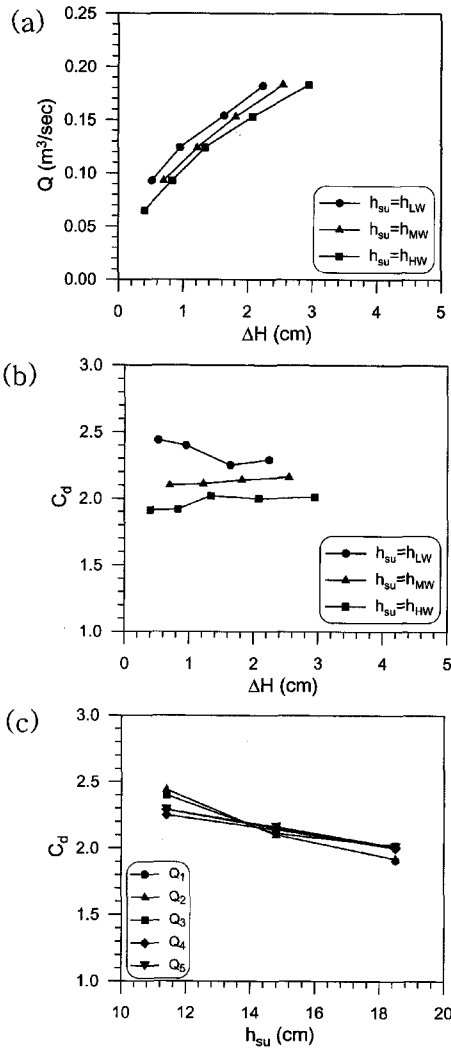


Fig. 5. Experimental results of the W80H04 model. (a) Values of  $Q$  as a function of  $\Delta H$ . (b) Values of  $C_d$  as a function of  $\Delta H$ . (c) Values of  $C_d$  as a function of  $h_{su}$ .

가될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 여섯 가지 수문 모형에 대한 실험자료에 대하여 Fig. 5(b) 및 Fig. 5(c)와 같은 그림을 도시하였을 때 평가 수두차는 매우 작으나, 유량계수는 값이 지나치게 크다고 판단되는 몇 개의 자료 점들을 분석에서 제외하였다. 제외된 자료는 모두 다섯 개로서 W80H04 모형에서 두 개, W80H21 모형에서 세 개였다. 이 경우 수문 상하류측의 수두차는 모두 0.35 cm보다 작았다. 이는 각 측정점에서 수면의 변동이 심한 수리 현상을 계측하게 됨에 따라 1 mm 내외의 수위 계측 정밀도로 측정된 두 개의 값의 차이를 구한 결과에 포함된 오차는 최대 2 mm까지 될 수 있는 여건을 고려하여 보수

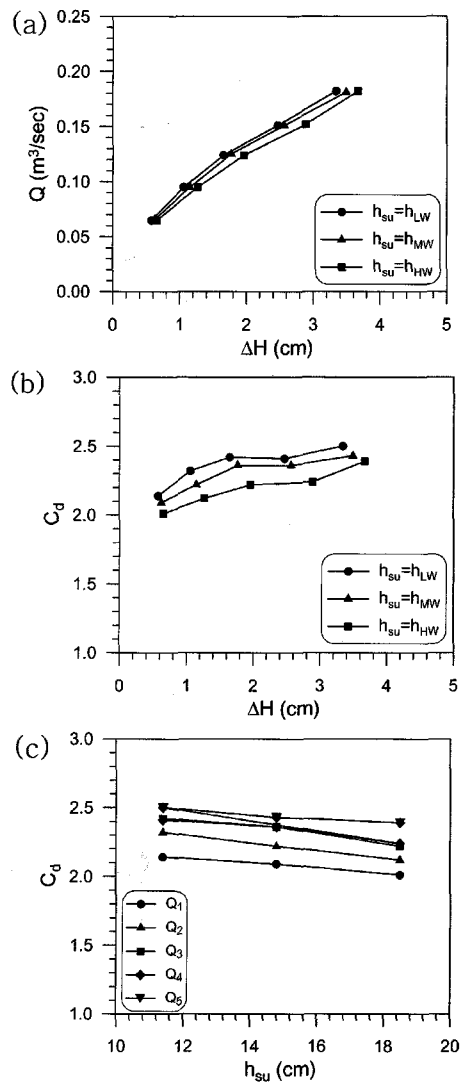


Fig. 6. Experimental results of the W60H21 model. (a) Values of  $Q$  as a function of  $\Delta H$ . (b) Values of  $C_d$  as a function of  $\Delta H$ . (c) Values of  $C_d$  as a function of  $h_{su}$ .

적 결론을 얻기 위함이었다.

Fig. 6~8까지는 수문 최소단면의 바닥높이( $h_b$ )가 6.25 cm인 경우(H21)에 대하여 최소단면의 폭이 위와 마찬가지로 세 가지(W60, W70 및 W80)로 변화하는 경우에 대한 실험결과이다. Fig. 6(a)~8(a)로부터 이 경우에도 유량은 수문 상하류측의 수두차와 거의 선형적인 관계를 나타냄을 알 수 있다. 또한 Fig. 6(b) 및 7(b)에서 볼 수 있듯이 W60 및 W70의 경우에는 상류측 수위조건 세 가지 경우에 대하여 모두 수두차가 증가함에 따라서 유량계수가 전반적으로 증가하는 경향이 나타났다. 반면에, W80

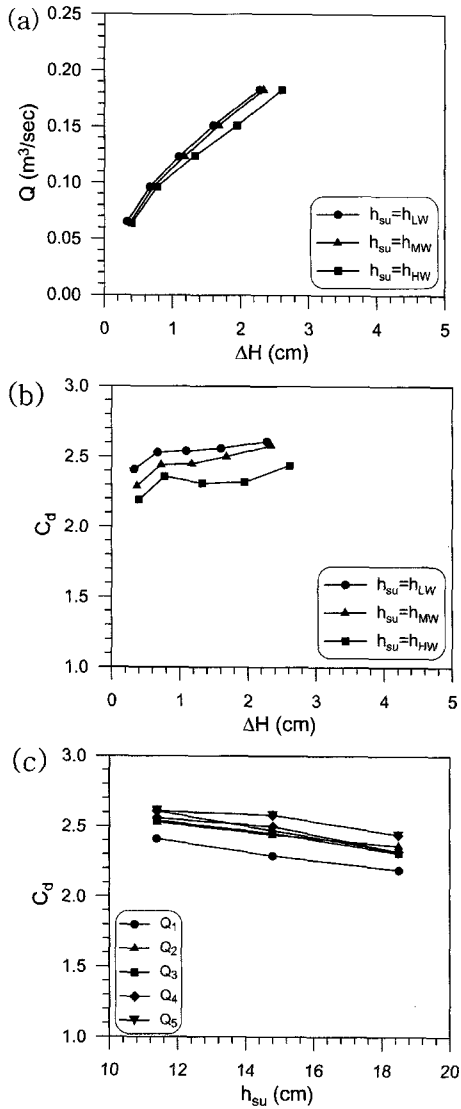


Fig. 7. Experimental results of the W70H21 model. (a) Values of  $Q$  as a function of  $\Delta H$ . (b) Values of  $C_d$  as a function of  $\Delta H$ . (c) Values of  $C_d$  as a function of  $h_{su}$ .

인 경우에 대한 결과인 Fig. 8(b)에서는 상류측 수위가 낮을 때는 ( $h_{su}=h_{LW}$ ) 유량계수가 수두차가 작을 때에는 크다가 수두차가 증가함에 따라 감소하고, 나머지 수위 조건에 대해서는 완만하게 상승하는 경향이 나타났다. 이러한 모든 경향은 수문 최소단면의 바닥높이( $h_b$ )가 1.25 cm인 경우와 일치하였다. 다만 유량계수의 값은 각각 2.01~2.50 (W60), 2.19~2.61(W70), 2.28~2.65(W80) 사이에 분포하여, 최소단면의 바닥높이가 1.25 cm인 경우에 비해서 전체적으로 더 컸다. 또한, Fig. 6(c)~8(c)에 보인 것처럼 수

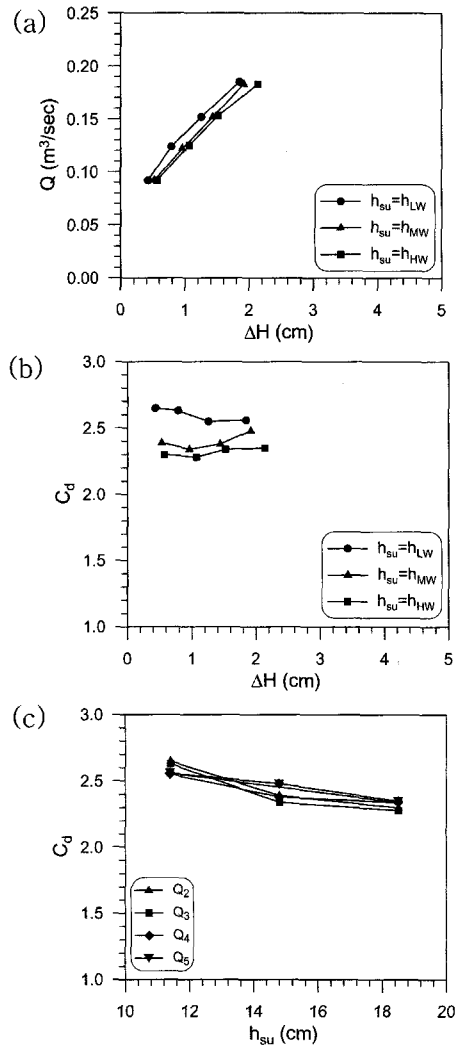


Fig. 8. Experimental results of the W80H21 model. (a) Values of  $Q$  as a function of  $\Delta H$ . (b) Values of  $C_d$  as a function of  $\Delta H$ . (c) Values of  $C_d$  as a function of  $h_{su}$ .

문 상류측 수위가 증가할수록 유량계수가 감소하는 경향은 Fig. 3(c)~5(c)에서와 동일하였으며 전체적인 감소 양상도 매우 유사하였다.

### 2.2.1 수문 최소단면 폭( $W$ )에 따른 유량계수 변화

Fig. 3~8에 제시된 여섯 가지 모형에 대한 실험결과를 토대로 수문 최소단면의 폭 변화가 수문의 통수성능에 미치는 영향을 더 구체적으로 검토하기 위하여 Fig. 9에 보인 것처럼 수문 최소단면의 바닥높이( $h_b$ )가 1.25 cm인 세 가지 모형에 대하여(W60H04, W70H04 및 W80H04) 수문 상류측의 수위별로 각각 최소단면의 폭 증가에 따른 유

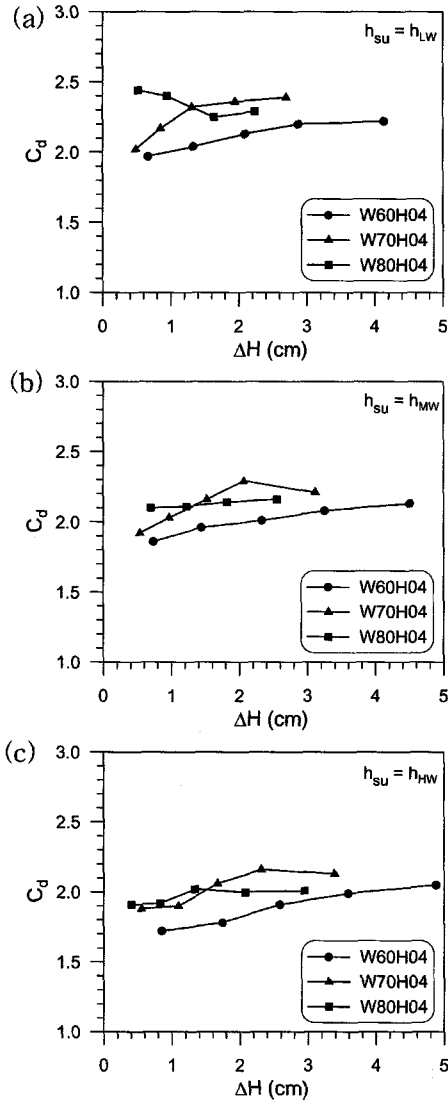


Fig. 9. Difference in the coefficient of discharge ( $C_d$ ) due to different throat width ( $W_t$ ) when  $h_d/h_t=0.04$ . (a)  $h_{su}=h_{LW}$ , (b)  $h_{su}=h_{MW}$ , and (c)  $h_{su}=h_{HW}$ .

량계수의 변화 양상을 도시하였다. Fig. 9에서 W60H04과 W70H04만의 결과만을 비교해 보면, 모든 경우에 대해서 W70H04의 유량계수가 W60H04에 비해서 크다. 이 두가지 모형의 수문의 측면 형상이 동일하므로(H04), 최소단면의 폭을 증가시키므로써 유량계수가 증가하여 수문의 통수능력이 향상됨을 알 수 있다. 특히 통과유량은 유량계수 및 수문 최소단면 폭에 함께 비례하므로 통과유량은 유량계수의 증가율에 비해서 더 크게 증가하게 된다.

한편, W70H04과 W80H04의 결과를 서로 비교해보면, 대

체로 수문 상하류측 수두차가 작을 때에는 W80H04의 유량계수가 크고, 수문 상하류측 수두차가 클 때에는 W70H04의 유량계수가 컸다. 이것은 W70H04의 경우 수위 조건 세 가지 경우에 모두 유량이 증가함에 따라서 유량계수가 커지는 반면, W80H04의 경우에는 그 경향이 다르게 나타나기 때문이다. W80H04 모형의 유량계수는 수문 상류측 수위가 낮은 경우에는( $h_{su}=h_{LW}$ ) 수두차가 작을 때 W70H04의 유량계수에 비해서 훨씬 크며, 수두차가 커짐에 따라서 점차적으로 감소하였다. 반면에, 수문 상류측 수위가 높은 경우에는( $h_{su}=h_{MW}$ ) W60H04 및 W70H04처럼 수두차가 커짐에 따라서 유량계수가 증가하는 경향이 나타났다. 상류측 수위가 중간인 경우에는( $W_t$ ) 유량계수의 변화가 크지 않았다. 따라서, 수문 최소단면 폭( $W_t$ )을 수문 1개에 해당하는 케이슨 폭( $W$ )의 60%에서 70%로 증가시키면 수문의 유량계수가 증가하게 되지만 그보다 더 크게 80%까지 증가시키게 되면 수두차가 작을 때는 유량계수의 증가하며, 특히 수문 상류측의 수위가 낮을 때 그 효과가 더 두드러지게 나타나지만 유량이 클 때는 오히려 유량계수의 값이 70%일 때에 비해서 더 작아짐을 알 수 있다.

Fig. 10에는 수문 최소단면의 바닥높이( $h_b$ )가 6.25 cm인 경우(H21)에 대하여 Fig. 9와 같이 최소단면 폭 변화에 따른 영향을 나타내었다. 이 경우에도 대체로 Fig. 9와 거의 동일한 경향이 나타났다. 즉, W60H21에 비해서는 W70H21의 유량계수가 더 크게 나타났으며, W80H21의 경우에는 수두차가 작고 수문 상류측의 수위가 낮을 때에는 유량계수의 값이 증가하지만, 나머지 경우에는 W70H21과 비슷하거나 오히려 감소하였다. 수문 최소단면의 폭 변화에 따른 유량계수의 전반적인 증가 효과가 유량이 작을 때는 크며, 유량이 클 때에는 작은 경향도 수문 최소단면의 바닥높이가 1.25 cm인 경우(H04)와 동일하게 나타났다. 따라서 수문 최소단면의 폭 변화에 따른 유량계수의 정성적인 변화 양상은 바닥 높이와 무관하게 동일하게 나타난다고 볼 수 있다.

한편, 수문 모형의 최소단면 폭 변화에 따른 유량계수의 증감은 Fig. 11 및 12를 통하여 더 분명하게 파악할 수 있다. Fig. 11에는 수문 최소단면의 바닥높이( $h_b$ )가 1.25 cm인(H04) 모형의 최소단면 폭 변화에 따른 유량별 유량계수의 변화 양상을 나타내었다.  $W_t/W$ 의 값이 60%에서 70%로 증가함에 따라서 유량계수의 값은 대체로 완만하게 상승하지만, 70%에서 80%로 증가함에 따라서는 실험조건에 따라서 증가하기도 감소하기도 하였다. 최소



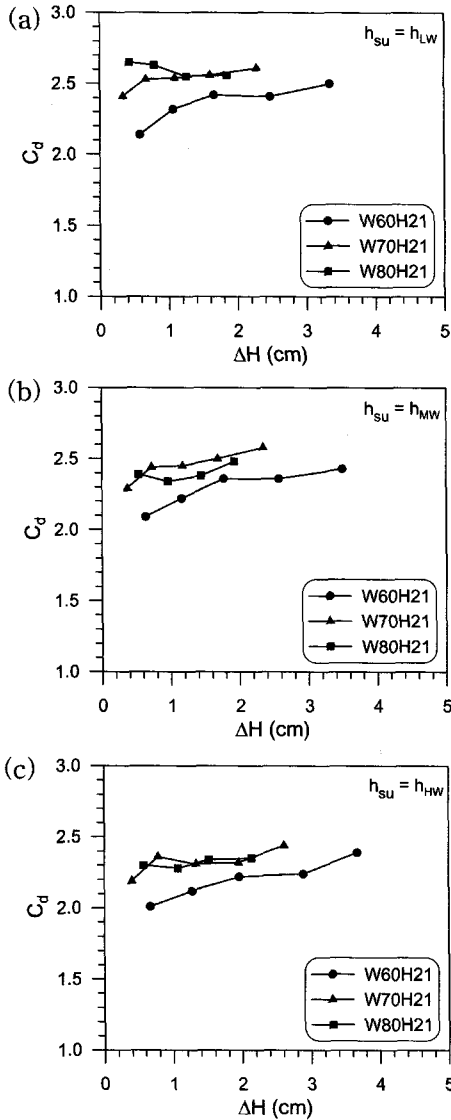


Fig. 10. Difference in the coefficient of discharge ( $C_d$ ) due to different throat width ( $W$ ) when  $h_d/h_t=0.21$ . (a)  $h_{su}=h_{LW}$ , (b)  $h_{su}=h_{MW}$ , and (c)  $h_{su}=h_{HW}$ .

단면의 폭이 수문 1개에 해당하는 케이스 폭의 60%에서 70%로 증가하는 경우의 평균적인 증감률은 수문 상류측의 수위가 낮을 때는 6.6%, 수위가 중간일 때는 5.6%, 수위가 높을 때는 7.3%로 거의 비슷하였다. 그러나 70%에서 80%로 증가하는 경우의 증감률은 수문 상류측의 수위가 낮을 때는 1.8%, 수위가 중간일 때는 -1.9%, 수위가 높을 때는 -2.5%로서 수문 폭 증가에 따른 수문 통수 성능의 변화가 상류측 수위에 따라서 서로 다르게 나타났다.

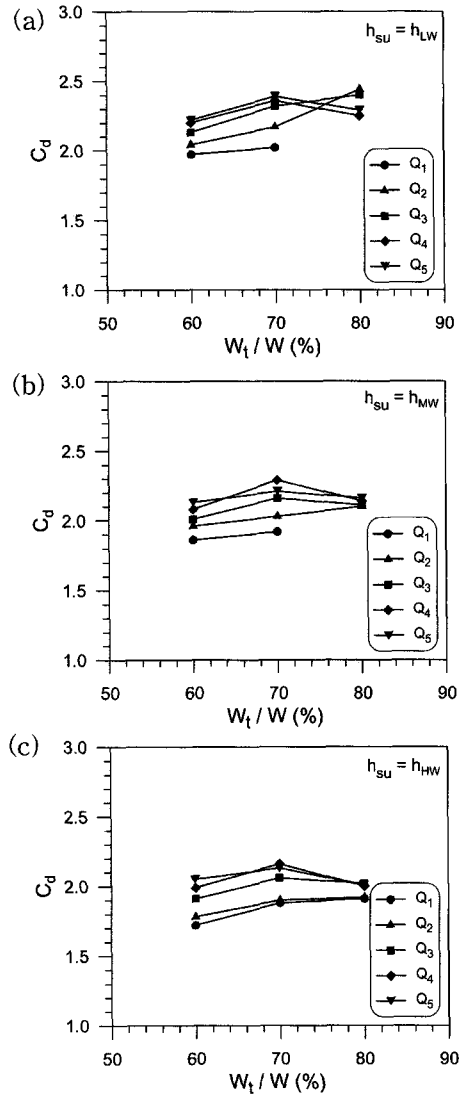
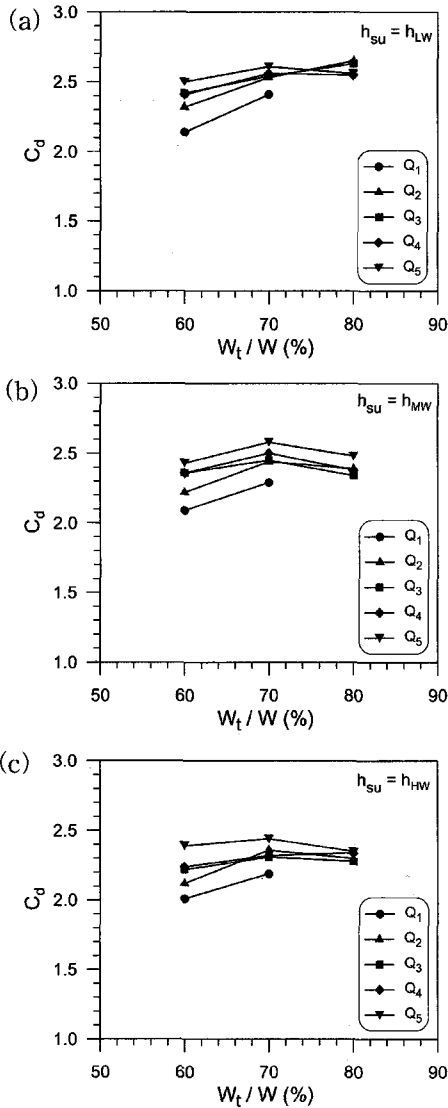


Fig. 11. Change of the coefficient of discharge ( $C_d$ ) with the throat width ( $W$ ) when  $h_d/h_t=0.04$ . (a)  $h_{su}=h_{LW}$ , (b)  $h_{su}=h_{MW}$ , and (c)  $h_{su}=h_{HW}$ .

Fig 12에 보인 수문 최소단면의 바닥높이( $h_b$ )가 6.25 cm인 (H21) 경우의 경향도 Fig. 11과 매우 유사하였다. 최소단면의 폭( $W$ )이 수문 1개에 해당하는 케이스 폭( $W$ )의 60%에서 70%로 증가하는 경우의 평균적인 증감률은 수문 상류측의 수위가 낮을 때는 7.5%, 수위가 중간일 때는 7.1%, 수위가 높을 때는 6.0%로 서로 비슷하였고, 수문 최소단면의 바닥높이( $h_b$ )가 1.25 cm인(H04) 경우와도 큰 차이를 보이지 않았다. 한편,  $W/W$ 의 값이 70%에서 80%로 증가하는 경우의 유량계수의 증감률은 수문 상류측의

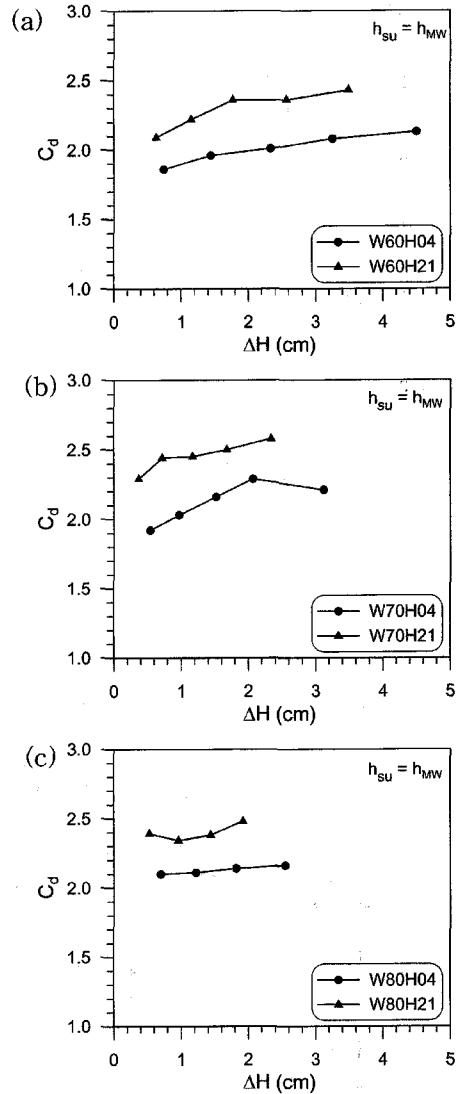


**Fig. 12.** Change of the coefficient of discharge ( $C_d$ ) with the throat width ( $W_t$ )  $h_d/h_t=0.21$ . (a)  $h_{su}=h_{LW}$ , (b)  $h_{su}=h_{MW}$ , and (c)  $h_{su}=h_{HW}$ .

수위가 낮을 때는 1.5%, 수위가 중간일 때는 -3.8%, 수위가 높을 때는 -1.7%로서 수위에 따라 다르게 나타났으며 특히 중간 수위인 경우에도 유량계수의 값이 감소하였다.

2.2.2 수문 최소단면 바닥높이( $h_b$ )에 따른 유량계수 변화

Fig. 13에는 수문 상류측의 수위가 중간일 때( $h_{su}=h_{MW}$ ) 유량계수의 변화양상을 수문 최소단면의 바닥높이( $h_b$ )가 1.25 cm(H04) 및 6.25 cm(H21)인 경우로 구분하여 도시



**Fig. 13.** Difference in the coefficient of discharge ( $C_d$ ) due to different bottom height ( $h_b$ ) of the sluice caisson. The results are shown only when  $h_{su}=h_{MW}$ . (a)  $W/W=0.60$ , (b)  $W/W=0.70$ , and (c)  $W/W=0.80$ .

하였다. 그림에서 알 수 있듯이 최소단면의 폭에 관계없이 모든 경우에 최소단면의 바닥높이가 큰 경우에 유량계수가 증가함을 알 수 있다. Fig. 13(a)~(c)의 각 경우는 수문 케이슨의 평면적 형상은 동일하므로, 이로부터 수문의 폭이 어떠한든지 최소단면의 바닥높이를 조정함으로써 수문의 통수성능을 증대시킬 수 있음을 알 수 있다. 이것은 벤츨리형 수문이 가지는 통수능력 측면에서의 장점이라고 평가된다. 한편, 수문 상류측의 수위가 높거나( $h_{su}=h_{HW}$ ) 낮은 경우( $h_{su}=h_{LW}$ )에도 Fig. 13과 거의 동일한 경향이 나

타났기 때문에 이에 대한 그림은 제시하지 않았다.

수문 모형의 최소단면 바닥높이가 1.25 cm(H04)로부터 6.25 cm(H21)로 증가함에 따른 유량계수의 증가율은 수문 상류측의 수위가 낮을 때는 W60의 경우 11.6 %, W70의 경우 12.6%, W80의 경우 10.8%였다. 한편, 수문 상류측 수위가 중간일 때에는 W60의 경우 14.1 %, W70의 경우 15.8%, W80의 경우 12.7%였고, 수문 상류측 수위가 높을 때에는 W60의 경우 16.3 %, W70의 경우 15.0%, W80의 경우 16.6%였다. 즉, 수문 상류측 수위가 높아질수록 유량계수의 증가율도 다소 증가하였다. 평균적으로는 수문의 바닥 높이를 증가시킴에 따른 유량계수의 증가율은 약 14% 정도로 나타났다.

그러나, 본 연구에서는 수문 최소단면의 바닥높이를 두 경우만 검토하였기 때문에 수문 최소단면의 바닥높이 변화에 따른 유량 변화의 일반적 결론은 도출할 수 없다. 따라서 수문 최소단면의 바닥높이가 H04 및 H21과는 다른 경우에 대해서도 수리모형실험을 수행하여 Fig. 11~12와 유사한 그림을 그려봄으로써 수문 최소단면의 바닥높이 변화에 따른 유량계수의 변화 특성을 보다 세밀하게 검토할 필요가 있다.

### 3. 토 의

기존에 국내의 조력발전소 타당성 조사사업 등에서는 벤츄리형 수문의 유량계수 값으로 1.78을 주로 사용하였다(한국해양연구소, 1993; 한국수자원공사, 2002). 이것은 타당성 조사사업에서 주로 채택되었던 수문의 형상이 영국의 Severn 조력발전소의 수문과 유사하기 때문에, Severn 조력발전소 사업에서 적용한 값을 그대로 적용하게 된 것이다. 수리모형실험 대상 여섯 가지 수문 모형 중에서 Severn 조력발전소 수문과 가장 유사한 형태의 모형은 W60H21이다. 이 모형에 대해서 본 실험을 통해서 구해진 유량계수의 값은 대체로 2.01~2.50의 값을 가지는데, 이것은 기존에 설계에서 사용된 값에 비해서 약 10~40% 정도 큰 값이다. W60H21에 비해서 최소단면의 폭이 더 넓은 W80H21의 모형의 유량계수는 2.28~2.65까지의 값을 가지므로 기존 설계에서 사용된 유량계수 값과 더욱 큰 차이를 보이게 된다.

또한 수리모형실험 대상 모형 중에서 최소단면의 바닥높이가 낮고 최소단면의 폭이 가장 넓은 수문 형상(W80H04)은 기존의 방조제 배수 갑문 등에 자주 시공된 형태로서 현재 시공되고 있는 시화호 조력발전소의 수문

형상도 이와 유사한 것이다. 이러한 형식의 수문의 유량계수는 대략 1.0 내외의 값이 쓰이는 것으로 알려져 있는데, 본 수리모형실험에서는 1.91~2.44 정도의 값을 보임으로써 거의 2배 정도 큰 값을 나타내었다. 이러한 연구 결과로부터 기존의 수문 설계시에 적용하였던 유량계수 값은 다소 과소산정된 것으로 보인다. 따라서 향후의 설계에서는 본 수리모형실험 결과를 기초로 하여 유량계수의 값을 상향조정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

과거의 조력발전 설계시에는 수문 개방에 따른 조지 내의 수위상승을 계산할 때, 유량계수를 외해의 수위와 관계없이 하나의 상수값으로 가정하여 사용해왔다. 그러나 낙조식 발전에서 조지 내로 해수를 유입하기 위해 수문을 개방할 때에 외해의 수위는 조석에 따라 계속 변화하며, 조지 내의 수위도 통과유량에 따라서 역시 계속 변한다. 따라서 통과유량을 계산하는 과정에서 이용되는 유량계수는 조지 내외의 수두차 뿐만 아니라 그 때의 외해수위에 따라서도 다르게 주어지는 것이 타당하다. 이를 위해서는 Fig. 14에 보인 것처럼 고려 대상 수문에 대하여 유량계수를 외해수위 및 수두차 모두의 함수로 표현해야 할 필요성이 있다. Fig. 14는 W60H21모형의 경우 예로

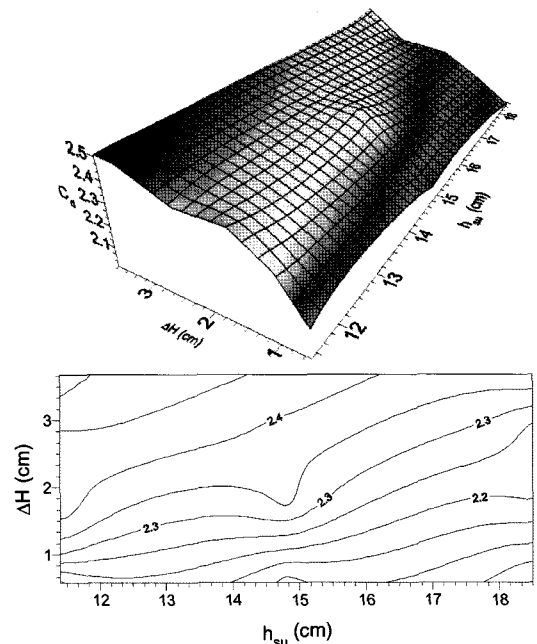


Fig. 14. Surface plots and contour maps showing values of coefficient of discharge ( $C_d$ ) as a function of both the head difference ( $\Delta H$ ) and the upstream water level ( $h_{su}$ ) for the W60H21 model.

서 유량계수가 수문 상류측(외해측) 수위 및 조지 내외의 수두차에 따라서 입체적으로 변화하는 모습을 잘 보여준다. Fig. 14는 W60H21모형의 실험자료를 바탕으로 크리깅(Kriging) 기법을 사용하여 유량계수의 3차원적 분포도 및 등고선도를 나타낸 것이다. Fig. 14에 보인 유량계수의 등고선도를 이용하면 외해수위 및 조지 내외의 수두차를 알고 있을 때 그에 해당하는 유량계수 값을 근사적으로 찾아낼 수 있다.

#### 4. 결론 및 제언

조력발전소 건설의 경제적 타당성을 제고하고 발전효율을 극대화하기 위한 목적으로 개수로시스템에서 수행된 정밀 수리모형실험 자료를 분석한 결과로부터 기존의 조력발전 타당성 조사사업 등에서 자주 사용되었던 수문의 유량계수 값이 실제보다 작게 평가되었음을 발견하였다. 따라서 기존 타당성 조사사업 등에서는 조력발전소 수문의 설치 대수를 적정 수량보다 많게 산정하게 함으로써 경제성 평가에 불리하게 작용했을 것이라는 결론을 얻었다. 본 연구에서는 서로 다른 여섯 가지 모형에 대한 실험결과로부터 수문 최소단면의 폭 및 바닥높이, 상류측의 수위 조건에 따라서 통수성능의 변화 경향이 명확하게 나타나므로 실험은 설계목적에 관한한 충분히 정밀하게 이루어졌다고 판단된다.

수문의 전체적인 형상을 결정짓는 주요한 파라미터 중에서 수문 최소단면의 폭이 서로 다른 세 가지, 최소단면의 바닥높이가 서로 다른 두 가지 형상에 대하여 총 여섯 가지의 서로 다른 수문형상의 통수성능을 비교하였다. 수문 최소단면의 폭이 수문케이스 1개에 해당하는 폭의 60%에서 70%로 증가하면 모든 실험조건에 대해서 유량계수가 증가하였다. 그러나 최소단면의 폭을 수문케이스 1개 폭의 70%에서 80%로 증가시키면 외해의 유량계수는 수위가 낮고 통과유량이 작을 때는 수두차가 증가할 때 크게 시작해서 감소하지만, 그 외의 실험에서는 작게 시작해서 증가함을 발견하였다. 최소단면의 바닥높이에 관

해서는 수문 최소단면의 폭에 상관없이 최소단면의 바닥높이가 높은 경우에 유량계수가 더 크게 나타났다. 그러나 수문 최소단면의 바닥높이가 서로 다른 두 가지 조건에 대해서만 실험을 수행하였기 때문에 이에 따른 통수성능 변화의 일반적인 경향을 파악하기 위해서는 수문 최소단면의 바닥높이가 이 두 가지 경우와 다른 조건에 대해서도 실험을 수행해야 할 필요가 있다. 아울러 최소단면 구간의 길이 또는 수문케이스가 놓이게 되는 사석마운드의 높이 등 수문의 전체적 형상에 영향을 미치는 기타 주요한 형상 파라미터를 변화시키면서도 실험을 수행하여 최적 수문형상 설계를 위한 보다 종합적인 결론을 이끌어낼 필요가 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 신재생에너지기술개발사업의 일환(2005-N-OC02-P-01)으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 이달수, 오상호, 이진학, 박우선, 조휴상, 김덕구 (2008). 조력발전용 수문 형상에 따른 통수성능에 관한 실험적 연구 - I. 수리모형실험, 한국해양-해양공학학회논문집, 20(1), 73-80.
- 한국수자원공사 (2002). 시화호 조력발전 건설사업 타당성 조사 및 기본계획 보고서.
- 한국해양연구소 (1993). 가로림 조력 개발 타당성 조사 보고서.
- 해양수산부 (2001). 해양에너지 실용화 기술개발(I): 조력조류에너지.
- 해양수산부 (2002). 해양에너지 실용화 기술개발(II): 조력조류에너지.

Received January 15, 2008

Accepted February 12, 2008