

## 조력발전용 수문케이슨의 통수성능에 관한 수리모형실험

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

### Physical Experiment on Water Discharge Capability of Sluice Caisson for Tidal Power Plant

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

**Key Words** : sluice(수문), tidal power generation(조력발전), water discharge capability(통수성능), discharge coefficient(유량계수)

#### Abstract

An hydraulic experiment was carried out in an open channel flume in order to investigate the water discharge capability of the sluice caisson for tidal power generation, which greatly affects the economical efficiency of the construction of a tidal power plant. To predict the influence of change in the major design parameters relating to the sluice shape on the water discharge capability of the sluice, the experiment was carried out very precisely. The experiment was carried out for the six different sluice models of different widths and bottom heights of the sluice throat section. The experimental data showed that the water discharge generally increased by increasing the width of the throat section if the side shape of the sluice was the same. In addition, the coefficient of discharge was larger when the bottom height of the throat section was higher for the two bottom heights that were tested.

#### 1. 서론

조력발전은 조석에 따른 해수면의 상승 및 하강 현상을 이용하여 전기를 생산하는 발전 방식으로서, 조차가 큰 하구나 만에 방조제를 설치하여 조지를 형성하고 외해와 조지 간의 수위차를 이용하여 발전을 하게 된다. 조력에너지는 고갈될 염려가 없고, 최소한의 시설 개·보수만으로 지속적으로 전기를 생산할 수 있는 장점이 있다. 우리나라 서해안 일대는 조석간만의 차가 크고 해안선이 복잡하여 조지면적을 넓게 조성할 수 있어서 조력발전이 유리한 조건을 갖추고 있다[1,2].

조력발전소 건설사업에서 조지 내·외로 해수의 유출입 통로가 되는 수문(sluice)의 형상 설계 기술은 조력발전의 경제성에 직결되는 핵심적인 기술이다. 통수성능이 좋은 고효율의 수문을 사용하게 되면 목표하는 연간발전량을 달성하기 위한 수문의 설치 대수를 감소시킬 수 있어서 공사비를 절감하는 효과를 얻을 수 있다. 이 연구에서는 수문 최소단면의 수평폭 및 바닥높이가 조금씩 다른 수문 모형 여섯 개를 제작하고 개수로시스템에 설치하여 정밀 수리모형실험을 수행하고, 실험자료를 분석하여 고효율의 수문형상 개발을 위한 기초적인 연구결과를 제시하였다.

#### 2. 수리모형실험

##### 2.1 실험 시설

수리모형실험은 한국해양연구원 평면수조실에 설치된 개수로 시스템에서 수행되었다. Fig. 1에 개수로의 모식도를 제시하였다. 이 수로의 길이는 23.8 m, 폭은 0.6 m, 높이는 0.8 m이며, 수로의 바닥 높이는 지면으로부터 0.65 m이다. 단면수로의 상류측에는 웨어 수조를 설치하여 고수조로부터 유입된 유량을 측정하고, 목표유량이 개수로로 공급될 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 폭이 0.6 m인 관측수로 내에 종방향으로 연직 분할판을 설치하여 실험 구간의 수로 폭을 0.5 m로 하였다.

실험유량은 웨어수조의 수위를 측정하여 웨어공식으로부터 산정하였다.

$$Q = Kb^3h^{3/2} \quad (1)$$

여기서,  $K$ 는 유량계수,  $b$ 는 노치(notch)의 폭,  $h$ 는 웨어의 수

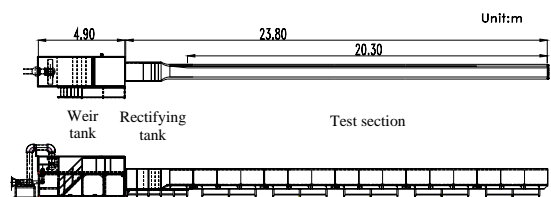


Fig. 1. Schematic diagram of the open channel flume.

\* 한국해양연구원 항만·연안공간연구사업단, dslee@kordi.re.kr  
\*\* 한국해양연구원 항만·연안공간연구사업단, ohsangho@kordi.re.kr  
\*\*\* 한국해양연구원 항만·연안공간연구사업단, yijh@kordi.re.kr  
\*\*\*\* 한국해양연구원 항만·연안공간연구사업단, wspark@kordi.re.kr  
\*\*\*\*\* (주)헤인이앤씨 기술연구소, chohs@hyein.com  
\*\*\*\*\* (주)헤인이앤씨 기술연구소, asj2xxmp@empal.com

위를 나타낸다. 본 연구에서는 유량을 정밀하게 평가하기 위하여 웨어탱크 내 2개소에서 계측된 수위 평균값을 웨어공식에 적용하여 유량을 평가하였다.

한편, 관측수로의 최하류 끝에는 관측수로로부터 빠져나가는 유량을 조절하기 위하여 연직 방향으로 움직이는 게이트를 설치하였다. 게이트에는 기어 및 핸들을 부착하여 게이트의 높이가 원하는 위치에 오도록 조작하였다. 게이트의 높이에 따라서 배출되는 유량이 매우 민감하게 변화하기 때문에 게이트를 매우 미세하게 조작할 수 있도록 별도로 감속기어를 설치하였다.

## 2.2 모형제작 및 설치

수문 모형은 최소단면 폭( $W_f$ )이 세 가지, 수문 최소단면의 바닥 높이( $h_b$ )가 두 가지로 서로 다른 여섯 개를 제작하였다. Fig. 2에 여섯 개 수문 모형의 평면도 및 측면도를 제시하였다. 수문 모형은 아크릴로 제작하여 관측수로 내 수평 바닥면에 설치하였고, 설치 예를 Fig. 3에 제시하였다.

수문 모형의 분류기호는 수문의 평면 및 측면 형상을 반영하도록 결정하였다. 예를 들어 Fig. 2(d)에 보인 모형의 분류기호는 W60H21인데, 여기에서 W60은 최소단면의 폭( $W_f$ ) 30 cm를 수문 케이슨의 폭( $W$ ) 50 cm로 나눈 백분율을 의미한다. 한편, H21은 수문케이슨 바닥으로부터 최소단면 하단면까지의 높이( $h_b$ ) 6.25 cm를 최소단면의 높이( $h_f$ ) 30 cm로 나눈 백분율을 의미한다.

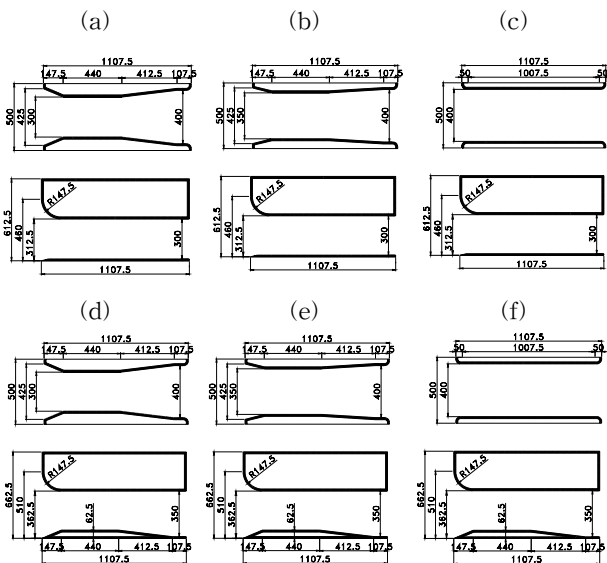


Fig. 2. Sketch of plan and side view of the six sluice models. (a) W60H04, (b) W70H04, (c) W80H04, (d) W60H21, (e) W70H21, (f) W80H21.

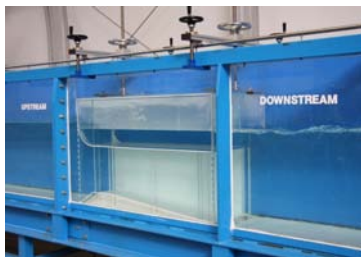


Fig. 3. A general view of the sluice model installed in the open channel flume.

한편, 관측수로 내 모형의 설치 위치는 수문 케이슨 전·후면의 수위 변동 및 수위 계측점의 위치를 고려하여 결정해야 한다. 수문 케이슨의 설치 위치가 관측수로 상부의 유량 유입부로부터 멀수록 흐름이 안정화되어 수문 케이슨 전면에서의 수위 변동이 작아지게 된다. 그러나 수문 케이슨 설치 위치가 관측수로 후면의 게이트로부터 지나치게 가까우면 수문 케이슨 후면에서의 수위가 충분히 안정화되지 못하게 된다. 따라서 가능한 관측수로 내로 유입되는 흐름이 조기에 안정화되도록 하고, 수문 케이슨의 설치 위치를 상부 쪽에 가깝게 하는 것이 바람직하다. 이 실험에서는 예비실험 결과를 토대로 관측수로 시작점으로부터 10.4 m 떨어진 위치에 수문을 설치하기로 결정하였으며, 이는 관측수로의 대략 중간에 해당하는 위치가 되었다.

## 2.3 실험조건 및 계측

실험은 Table 1에 보인 것처럼 다섯 가지의 유량 조건에 대하여 각각 외해측 수위가 높을 때, 중간일 때, 낮을 때의 세 가지( $h_{su} = h_{LW}, h_{MW}, h_{HW}$ )조건에 대하여 실험을 수행하였다. 따라서 하나의 수문 모형에 대하여 총 실험 조건은 15개가 된다. 웨어수조 및 관측수로 내 수위는 용량식과과고계를 이용하여 측정하였다. 수문 모형 전면에서는 모형으로부터 2m 떨어진 위치에서 수위를 계측하였고, 후면에서는 모형으로부터 1~5 m 거리에 1m 간격으로 과고계 다섯 개를 설치하여 각 지점에서의 수위를 계측하였다. 각 실험 조건에 대하여 2분간 25Hz로 수위를 계측하여 각 개별 계측의 평균값을 구하고, 이 과정을 5회 반복하여 5회 계측의 평균값을 최종적인 수위로 결정함으로써 급수펌프에 의해서 공급되는 유량의 시간에 따른 편차의 영향을 가능한 한 감소시켰다.

Table 1. Summary of target experimental conditions

Discharge ( $Q$ )	Upstream water level ( $h_{su}$ )
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 ( $h_{HW}$ )

## 3. 실험 결과

### 3.1 수두차 평가 및 유량계수 계산

수문 전·후면의 흐름에서 유량( $Q$ ) 및 수두차( $\Delta H$ ) 사이의 관계는 다음 식으로 표현될 수 있다[3].

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

여기에서,  $C_d$ 는 유량계수(coefficient of discharge),  $A_t$ 는 최소 단면의 단면적,  $g$ 는 중력가속도를 나타내며,  $\Delta H$ 는 수문 전면에서의 전수두에서 후면에서의 전수두를 뺀 값으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta H = \left( h_{UP} + \frac{V_{UP}^2}{2g} \right) - \left( h_{DN} + \frac{V_{DN}^2}{2g} \right) + h_f \quad (4)$$

식 (4)에서  $V_{UP}$  및  $V_{DN}$ 은 각각 수문 상·하류측에서의 평균 유속으로서 유량을 계측위치에서의 통수단면적으로 나눈 값이며,  $h_f$ 는 개수로 흐름에서 수로 바닥면 및 양측면에서의 마찰 때문에 발생하는 손실 수두를 의미한다. 유량계수는 수문의 통수 단면 단위 면적당의 통수성능을 나타내는 지표로서 널리 사용되며, 통수단면의 크기가 동일한 경우 유량계수의 값이 클수록 수문의 통수성능이 우수함을 의미한다.

### 3.2 수문 최소단면 폭( $W_t$ )에 따른 변화

Fig. 4는  $h_b/h_t = 0.04$ 인 세 가지 모형(W60H04, W70H04 및 W80H04)에 대하여 수문 상류측의 수위가 중간일 때 ( $h_{su} = h_{MW}$ ) 수문 최소단면의 폭 변화에 따른 유량계수 및 유량의 변화 양상을 도식한 것이다. W60H04와 W70H04만의 결과만을 비교해 보면, 모든 경우에 대해서 W70H04의 유량계수가 W60H04에 비해서 크다. 이 두가지 모형의 수문의 측면 형상은 동일하므로, 최소단면의 폭을 증가시킴으로써 유량계수가 증가하여 수문의 통수성능이 향상됨을 알 수 있다. 특히 Fig. 4(b)에 보인 것처럼 통과유량은 유량계수 및 수문 최소단면 폭에 함께 비례하므로 통과유량은 유량계수의 증가율에 비해서 더 크게 증가하게 된다. 한편, 70H04과 W80H04의 결과를 서로 비교해보면, 대체로 수문 상·하류측 수두차가 작을 때에는 W80H04의 유량계수가 크고, 수문 상·하류측 수두차가 클 때에는 W70H04의 유량계수가 컸다. 그러나 W70H04에 비해서 W80H04 모형의 최소단면 폭이 더 크기 때문에 통과유량은 수두차에 상관없이 W80H04 모형의 경우가 컸다. 따라서, 수문의 통과유량은 최소 단면 폭( $W_t$ )을 증가시킴에 따라서 증가하지만, 그 증가율은 최소 단면 폭을 수문 1개에 해당하는 케이슨 폭( $W$ )의 60%에서 70%로 증가시킬 때가 더 크며, 70%에서 80%로 증가시킬 때는 더 작음을 알 수 있다.

마찬가지로 Fig. 5에는  $h_b/h_t = 0.21$ 인 세 가지 모형(W60H21, W70H21 및 W80H21)에 대하여 수문 상류측의 수위가 중간일 때( $h_{su} = h_{MW}$ ) 수문 최소단면의 폭 변화에 따른 유량계수 및 유량의 변화 양상을 도식하였다. 이 경우에도 대체로 Fig. 4와 거의 동일한 경향이 나타났다. 즉, W60H21에 비해서는 W70H21의 유량계수가 더 크게 나타났으며, W80H21의 경우에는 수두차가 작을 때에는 유량계수의 값이 증가하지만, 수두차가 증가함에 따라 W70H21에 비해서 유량계수의 값이 감소하였다. 한편, Fig. 5(b)에서 알 수 있듯이 수문의 통과유량은 최소 단면의 폭을 증가시킴에 따라서 증가하였다. 따라서 Fig. 4 및 Fig. 5로부터 수문 최소단면의 폭이 증가함에 따라서 유량계수 및 유량이 증가하는 양상은 수문 최소단면의 바닥 높이와 무관하게 동일하게 나타난다고 할 수 있다.

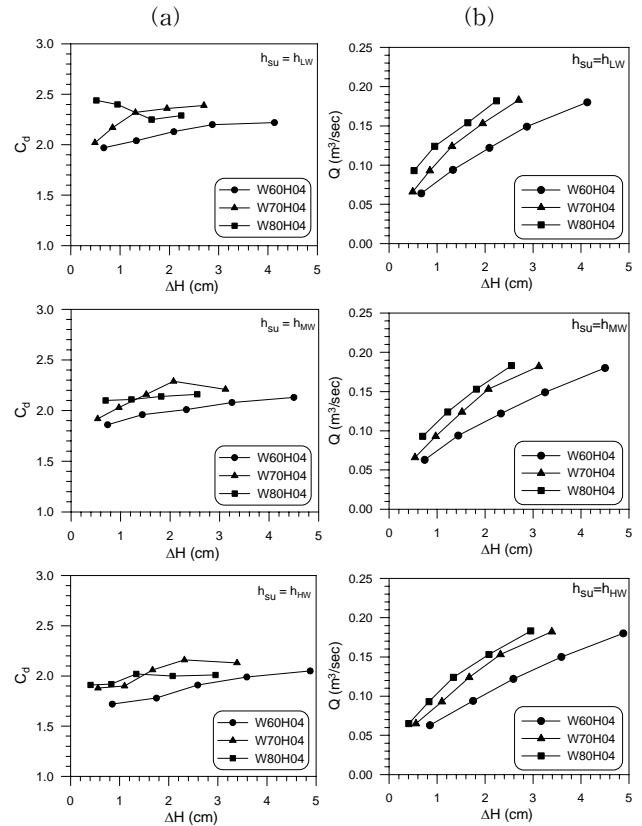


Fig. 4. Values of the (a) coefficient of discharge( $C_d$ ) and (b) water discharge( $Q$ ) for different throat width( $W_t$ ) when  $h_b/h_t = 0.04$ .

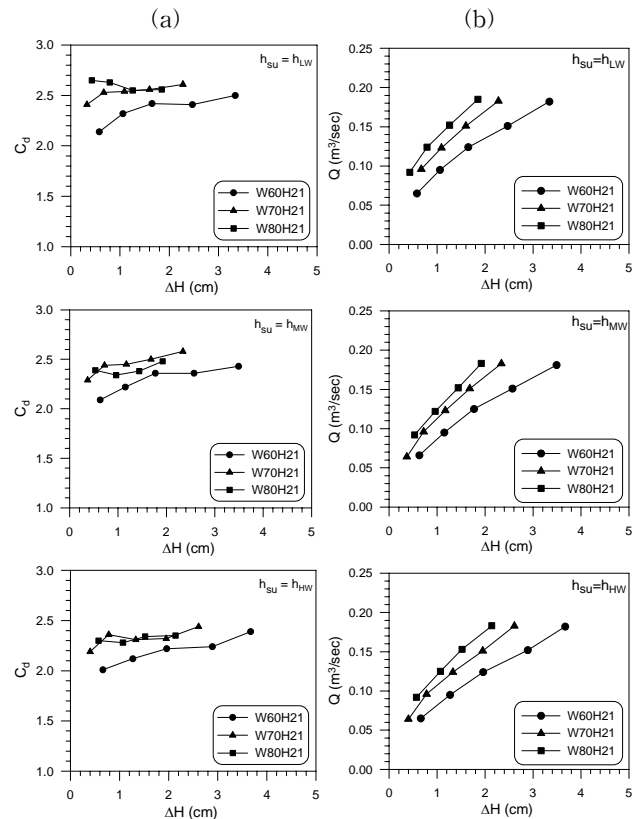


Fig. 5. Values of the (a) coefficient of discharge( $C_d$ ) and (b) water discharge( $Q$ ) for different throat width( $W_t$ ) when  $h_b/h_t = 0.21$ .

### 3.3 수문 최소단면 바닥높이( $h_b$ )에 따른 변화

Fig. 6은 수문 상류측의 수위가 중간일 때( $h_{su} = h_{MW}$ ) 수문의 평면 형상은 동일하고 최소단면의 바닥높이가 서로 다른 모형들끼리의 실험 결과를 비교한 것이다. 수문 최소단면의 바닥높이가 더 높은 W60H21, W70H21 및 W80H21 모형의 유량계수가 W60H04, W70H04 및 W80H04에 비해서 각각 더 큼을 알 수 있다. 이것은 수문케이슨의 최소단면의 바닥높이를 어느 정도까지는 높게함으로써 수문의 통수성능을 증대시킬 수 있음을 의미한다. 상류측의 수위가 낮거나( $h_{su} = h_{LW}$ ) 높은 경우( $h_{su} = h_{HW}$ )에도 Fig. 6과 같은 경향이 나타났다. 다만 이 연구에서는 수문 최소단면의 바닥높이가 서로 다른 두 가지 조건에 대해서만 실험을 수행하였기 때문에 수문 최소단면의 바닥높이가 이 두 가지와 다른 조건에 대해서도 실험을 수행하여 최소단면 바닥높이에 따른 통수성능의 변화를 검토해야 할 필요가 있다.

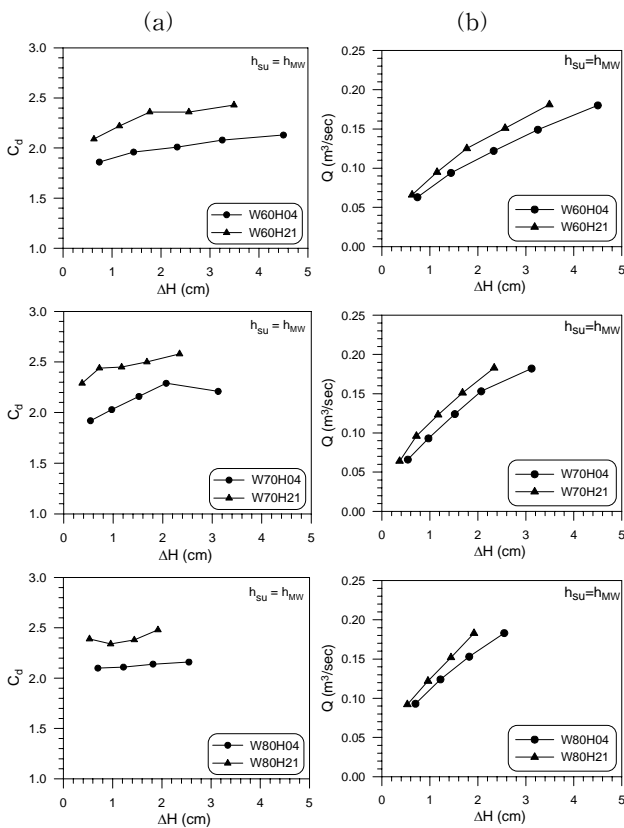


Fig. 6. Values of the (a) coefficient of discharge( $C_d$ ) and (b) water discharge( $Q$ ) for different bottom height( $h_b$ ) when  $h_{su} = h_{MW}$ .

### 4. 토의 및 결론

이 연구에서는 개수로시스템에 수문 최소단면의 폭이 서로 다른 세 가지, 최소단면의 바닥높이가 서로 다른 두 가지의 총 여섯 개 수문케이슨 모형을 설치하고 수리모형실험을 수행하여 각 모형의 통수성능을 서로 비교하였다. 실험자료의 분석결과로부터 수문 최소단면의 폭을 증가시킴에 따라서 대체로 유량계수 및 통과유량이 증가함을 확인하였다. 또한 최소단면의 바닥높이가 낮을 때보다는 높을 때 통수성능이 향상됨을 알 수 있었다.

기존에 국내의 조력발전소 타당성 조사사업 등에서는 벤츄리형 수문의 유량계수 값으로 1.78을 주로 사용하였다. 이 연구에서 수리모형실험을 수행한 여섯 가지 모형 중에서 기존의 벤츄리형 수문과 가장 유사한 형태의 모형은 W60H21이며, 실험을 통해서 구해진 유량계수는 2.01~2.50의 값을 가진다. 즉, 기존 설계에서 사용된 값에 비해서 약 10~40% 정도 큰 값이다. 더욱이 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 알려지고 있는데, 본 수리모형실험에서는 1.91~2.44 범위의 값을 보임으로써 거의 2배 정도 큰 값을 나타내었다. 이러한 연구 결과로부터 기존의 수문 설계시에 적용하였던 유량계수 값은 다소 과소산정된 것으로 판단된다. 따라서 향후 다른 입지의 조력발전소 수문설계에서는 본 수리모형실험 결과를 기초로 하여 유량계수의 값을 상향조정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

### 후 기

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

### 참고문헌

- [1] 해양수산부, 해양에너지 실용화 기술개발(I): 조력·조류에너지 (2001).
- [2] 해양수산부, 해양에너지 실용화 기술개발(II): 조력·조류에너지 (2002).
- [3] Baker, A.C. Tidal Power. (1991), Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.