

## 조력발전용 수문 형상에 따른 통수성능에 관한 실험적 연구 - I. 수리모형실험

### Experimental Investigation of Water Discharge Capability According to Shape of Sluice for Tidal Power Generation - I. Physical Experiment

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

Dal Soo Lee\*, Sang-Ho Oh\*, Jin-Hak Yi\*, Woo Sun Park\*, Hyu-Sang Cho\*\* and Duk-Gu Kim\*\*

**요 지 :** 이 연구에서는 조력발전소 건설의 경제성에 큰 영향을 미치는 수문(sluiice) 형상의 설계기술을 향상시키기 위해서 개수로 시스템에서 수리모형실험을 수행하였다. 수문 형상을 결정짓는 주요한 설계 파라미터의 변화가 수문의 통수성능에 미치는 영향이 예측 가능하게 되기 위해서는 기존의 조력발전소 타당성조사 및 설계사업 등에서의 수리모형실험 방법과 차별화되는 정밀한 실험을 수행해야 할 필요성이 있었다. 이를 위해서 유량공급시설 및 정류수조 내에 다양한 정류장치를 그 형상 및 배치 방법을 다르게 설치하여 관측수로 내 흐름이 최대한 안정화되도록 실험시설을 구성하였다. 그리고 유량 및 수위 계측 과정에서 개입되는 계측 오차를 최소화하기 위한 실험이 이루어질 수 있도록 계측장비의 종류 및 수위 계측위치를 결정하였다. 또한, 개수로 내 흐름에서 불가피하게 발생하는 바닥 및 양측면 마찰에 의한 수두 손실효과를 고려하는 수두차 평가 방법도 제시하였다.

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

**Abstract :** An hydraulic experiment was carried out in an open channel flume in order to improve the technique of designing shape of the sluice used 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, it was necessary to perform a precise experiment that is discriminated to previous feasibility studies or design projects. For this purpose, by installing various flow straighteners and rectifying structures inside the water supply system and the rectifying tank, the flow in the flume was stabilized as tranquil as possible. In addition, the measuring instruments and the location of installing them were carefully determined so as to minimize the errors intervened during the measurement of water discharge and water level. The method of estimating head difference between upstream and downstream of the sluice was also developed by taking account of the head loss due to the friction at the bottom and side walls in the flume.

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

## 1. 서 론

조력발전은 조석에 따른 해수면의 상승 및 하강 현상을 이용하여 전기를 생산하는 발전 방식이다. 조력발전 방식에는 일정중량의 부체가 받는 부력을 이용하는 부체식, 수위의 상승 하강에 따라 밀실에 공기를 압축시키는 압축공

기식, 방조제를 축조하여 조지를 형성하여 발전하는 조지식이 있다(해양수산부, 2001). 이 중에서 현재 실용화된 조력발전 방식은 조지식으로서, 조차가 큰 하구나 만에 방조제를 설치하여 조지를 형성하고 외해와 조지 간의 수위차를 이용하여 발전을 하게 된다.

조력이너지는 고갈될 염려가 없고, 최소한의 시설 개보

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

수만으로 지속적으로 전기를 생산할 수 있는 장점이 있다. 특히 최근 화석 연료 사용에 따른 지구온난화 등의 환경문제, 화석연료 고갈 및 수급 불균형에 따른 유가 상승 등으로 인하여 신재생에너지 개발이 절실하게 필요해짐에 따라 해상에서 얻을 수 있는 청정에너지인 조력에너지 이용에 대한 관심도 증대되고 있다. 우리나라의 서해안 중부, 경기만 일대는 세계적인 조력에너지 개발 적지로서 어느 정도의 경제성 확보가 가능한 조력에너지가 약 2,400 MW 정도로 추정된다(이, 2005; 오 등, 2007). 본격적인 조력에너지 개발을 위한 타당성조사는 1970년대 후반부터 가로림만을 중심으로 여러 차례 수행되었으며(한국해양연구소, 1993; 한국수자원공사, 2002), 현재 경기도 시화호에 2009년 완공을 목표로 시설용량 254 MW급의 조력발전소가 건설되고 있어서 가까운 장래에 조력발전을 통한 전력 생산이 현실화될 전망이다.

조력발전에 관한 기술은 유럽을 중심으로 연구가 이루어져서 6-cycle 발전방식, 저낙차 발전에 유리한 bulb형 수차발전기 개발, 기존의 가물막이 방식의 시공법을 대체할 수 있는 caisson 형식의 시공법 등 여러 분야에서 상당한 발전이 있었다. 현재 조력발전에 관한 기술적인 문제는 대부분 해결되었으나 조력발전소 건설의 타당성을 뒷받침할 수 있는 새로운 기술 개발의 필요성은 여전히 남아 있는 실정이다(해양수산부, 2001). 그 중에서도 해수의 유출입 통로가 되는 수문(sluiice)의 형상 설계 기술은 조력발전의 효율성에 직결되는 핵심적인 기술이다. 그러나 수문 형상에 관한 체계적 연구는 전 세계적으로도 그 사례를 찾아보기 어려우며, 다만 과거에 프랑스, 캐나다, 러시아 등에 시공되었던 몇몇 조력발전소 건설사업 당시의 관련 자료 일부만을 참고할 수 있는 실정이다. 이에 따라서 국내에서 수행되는 조력발전 타당성 조사 연구 등에서는 조력발전 후보지의 수

리학적, 지형적 특성을 반영한 검토가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 따라서 조력발전소 건설의 경제적 타당성을 제고하고, 발전효율을 극대화하기 위해서는 수문의 최적형상 설계기술에 대한 체계적인 연구가 이루어져야 할 필요성이 있다.

이러한 연구를 위해서는 조력발전용 수문 형상을 결정짓는 주요한 설계 파라미터들의 값이 약간 달라짐에 따른 수문의 통수성능 차이를 파악해 낼 수 있어야 한다. 이것은 기존의 국내·외 조력발전소 수문 설계사업에서처럼 그 형상이 전혀 다른 두세 개 수문 설계안의 통수성능을 주로 비교하는 것에 비해서는 훨씬 어렵고 세심한 주의가 필요한 일이다. 실험적으로 이러한 목적을 달성하기 위해서는 형상 설계 파라미터의 변화가 수문의 통수성능에 미치는 영향이 예측 가능하게 되도록 실험에 개입되는 오차의 크기가 최대한 작게 되도록 실험을 수행해야 한다. 이 연구에서는 수문 최소단면의 수평폭 및 바다높이가 조금씩 다른 수문 모형 여섯 개를 제작하고 개수로에 설치하여 정밀한 실험을 수행하는데 많은 노력을 기울였다. 이 논문에서는 수리모형실험의 장치 구성, 실험방법 및 수두차 평가방법 등에 대하여 상세하게 설명하였고, 실험 데이터의 분석 결과는 별도의 논문(이 등, 2008)을 통해 기술하였다. 연구 목적이 통수성능이 좋은 수문형상을 도출하는 것이기 때문에 실험 중 수문케이슨(sluiice caisson) 내 수문(gate)은 완전히 개방되어 있는 상태만을 대상으로 하였다.

## 2. 수리모형실험

### 2.1 실험수로 및 유량공급시설

수리모형실험은 한국해양연구원 평탄수조실에 설치된 개수로시스템에서 수행되었다. Fig. 1에 개수로의 모식도를 제

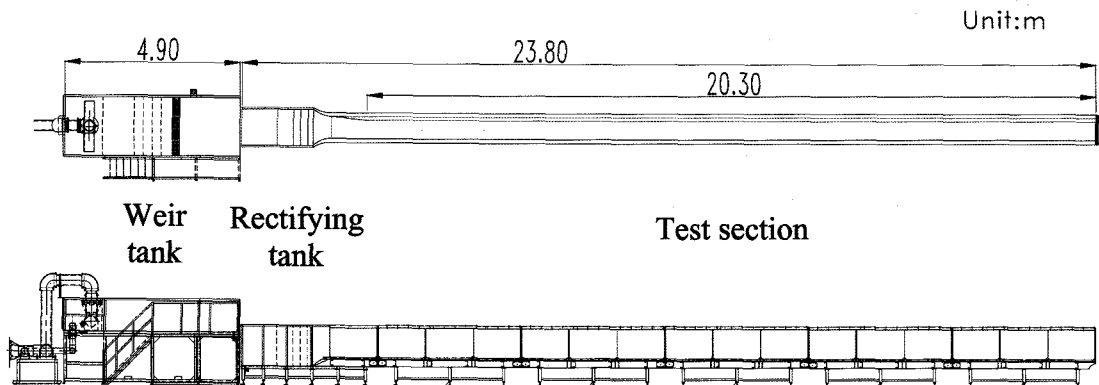


Fig. 1. Schematic diagram of the open channel flume.

시하였다. 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. 개수로는 웨어수조로부터 공급되는 물을 정류시키기 위한 정류수조 및 관측수로 두 부분으로 구성된다. 정류수조에는 관측수로 내로 유입되는 물을 효과적으로 정류시키기 위하여 수평 및 연직 방향으로 다열의 타공판 및 플라스틱 그물을 설치하여 수면의 진동을 최소화하고 관측수로 내측으로 유입되는 흐름의 평면분포가 최대한 균일하게 유지될 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 폭이 0.6 m인 관측수로 내에 중방향으로 연직 분할판을 설치하여 실험 구간의 수로 폭을 0.5 m로 하였다.

실험수는 평면수조실 하부에 있는 지하 저수조로부터 급수펌프를 이용하여 고수조로 끌어올려진 후에 배관을 통하여 웨어수조로 공급된다. 웨어수조로 공급되는 물이 일정한 수두를 가지도록 하기 위해서 고수조에는 율류벽을 설치하였으며, 급수펌프로 끌어올려진 물이 고수조 내에 유입됨으로 인해서 고수조 내에 심한 수위 변동이 발생하지 않도록 유공벽 및 정류시설을 설치하여 고수조 내 수위를 안정화시켰다. 마찬가지로, 웨어수조에도 다열의 타공판 및 플라스틱 그물로 구성된 정류시설을 설치하여 수조 내 수위 진동을 최소화시켰다.

실험유량은 웨어수조의 수위를 측정하여, 다음과 같은 웨어공식으로부터 산정하였다.

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

여기서,  $K$ 는 유량계수,  $b$ 는 노치(notch)의 폭,  $h$ 는 웨어의 수위를 나타내며, 유량계수  $K$ 의 계산식은 다음과 같이 주어진다(한국표준협회, 2001).

$$K = 107.1 + \frac{0.177}{h} + 1.42 \frac{h}{D} - 25.7 \sqrt{\frac{(B-b)h}{DB}} + 2.04 \sqrt{\frac{B}{D}} \quad (2)$$

여기에서  $B$ 는 수조의 폭,  $D$ 는 수조 바닥면에서 노치 하단면까지의 높이를 나타낸다. 본 연구에서는 유량을 정밀하게 평가하기 위하여 웨어탱크 내 2개소(Fig. 5(a)의 WG1 및 WG2)에서 측정한 수위 평균값을 웨어공식에 적용하여 유량을 평가하였다. 한편, Fig. 2에 보인 것처럼 웨어공식으로부터 측정한 유량은 유량공급시설에 부착된 전자식유량계의 지시값과의 차이가 다양한 펌프 내 밸브 개

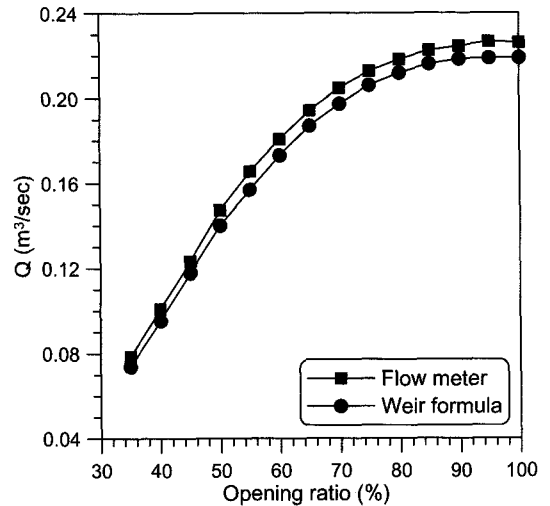


Fig. 2. Comparison of the water discharge measured by both the flow meter and the weir formula.

도율(opening ratio)에 대하여 3% 이내였다. 이 연구에서는 유량계수 값을 보수적으로 평가하기 위하여 이 두 가지 유량값 중에서 값이 작은 웨어공식으로 평가한 유량값을 사용하였다.

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

## 2.2 모형제작 및 설치

조력발전용 수문의 형상에 따른 수리학적 특성을 파악하기 위해서는 우선적으로 수문 형상을 구성하는 각종 파라미터들을 일목요연하게 정리하여 그 중에서 주요한 파라미터들을 변화시킨 모형들을 제작하고 수리모형실험을 수행하는 것이 바람직하다. 그런데, 수문이 3차원적인 구조물이므로 수문 형상에 관련된 파라미터는 매우 많으며, 이 중에서 국부적인 세부 형상에 관련된 파라미터는 규격화하기 어려운 경우도 있다. 따라서 이 연구에서는 Fig. 3에 보인 것처럼 수문의 전체적인 형상을 결정짓는 대표적인 파라미터들만을 선별하여 제시하였다. Fig. 3에서  $W$ 는 수문 1개에 해당하는 수문 케이스의 전체 폭,  $W_1$ 는 유입부(inlet) 단면의 폭,  $W_2$ 는 통수단면 또는 최소단면(throat)의 폭,  $W_3$ 는 유출부(outlet) 단면의 폭을 각각 나타낸다. 길이 방향의 파

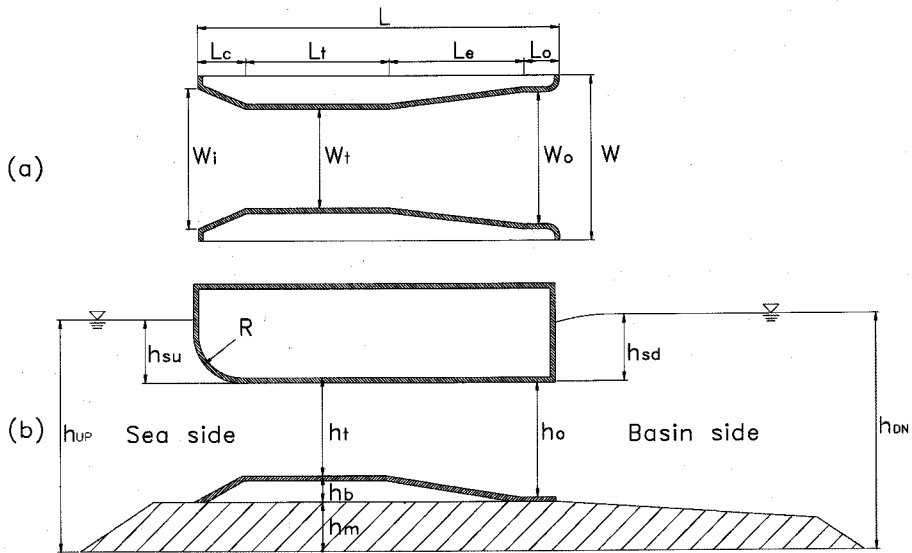


Fig. 3. Lengthwise parameters relating to the shape of a sluice. (a) Plan view and (b) Side view.

라미터로는  $L$ 은 수문 케이슨의 전체 길이,  $L_c$ 는 수축구간(contraction)의 길이,  $L_t$ 는 최소단면(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 최소단면의 바닥(bottom)의 높이,  $h_t$ 는 최소단면(throat)의 높이,  $h_o$ 는 유출구간(outlet)의 높이  $h_{su}$  및  $h_{sd}$ 는 수문 상부구조물 상류측(upstream)과 하류측(downstream)에서의 최소단면 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. 수문이 설치되는 곳의 수심이 얕은 경우에는 해저를 굴착하여 수문에서의 수심이 주변 지반보다도 낮게 될 수도 있는데 이 경우에는  $h_m$ 의 값은 음수가 된다. 또한,  $R$ 은 수문 상부구조물 해측부의 곡률반경을 나타낸다.

이 연구에서는 기존에 국내에서 이루어진 조력발전소 타당성 조사 연구 등에서 주로 채택되었던 몇몇 수문 형상을 기초로 하여, 수문의 최소단면 폭( $W$ )이 세 가지, 수문 최소단면의 바닥 높이( $h_b$ )가 두 가지로 서로 다른 여섯 개의 모형을 제작하였다. 수문 모형은 아크릴로 제작하여 관측수로 내 수평 바닥면에 설치하였다. Fig. 4에 수문 모형의 설치 예를 제시하였다. 한편, 관측수로 내 모형의 설치 위치는 수문 케이슨 전후면의 수위 변동 및 수위 계측점의 위치를 고려하여 결정해야 한다. 수문 케이슨의 설치 위치가

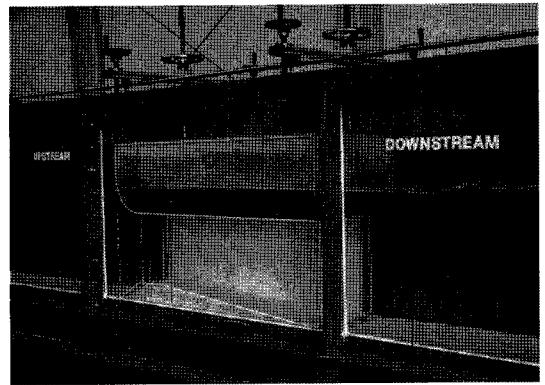


Fig. 4. A general view of the sluice model installed in the open channel flume.

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. 수문 모형의 설치 위치에 대한 자세한 설명은 3장에 기술하였다.

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

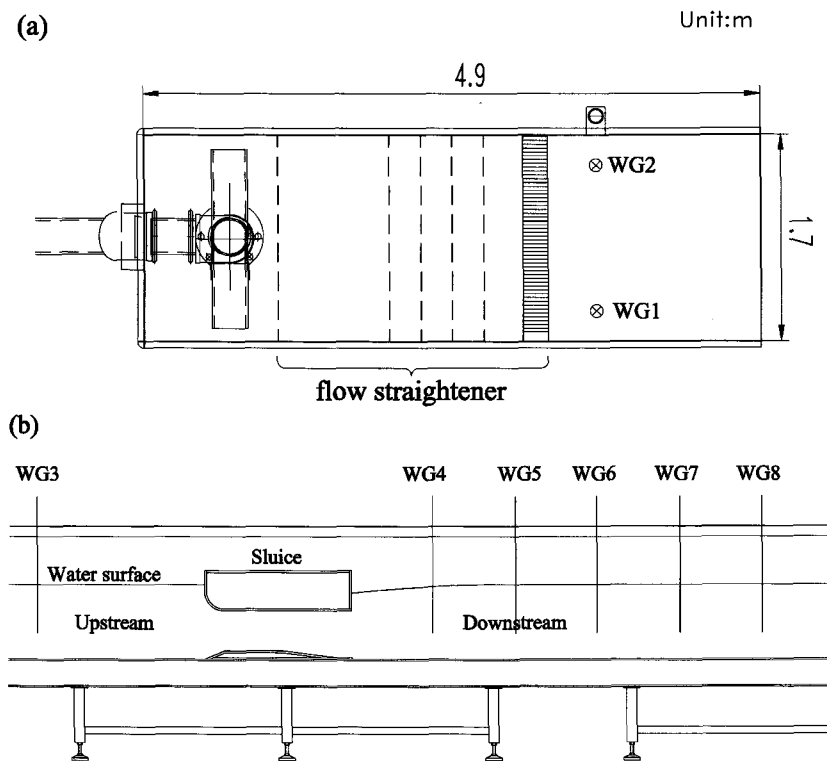
| Target discharge ( $Q$ )          | Target upstream water level from underside of superstructure ( $h_{sw}$ ) |
|-----------------------------------|---|
| 0.065 m <sup>3</sup> /s ( $Q_1$ ) | 11.0 cm ( $h_{LW}$ )  |
|                                   | 14.8 cm ( $h_{MW}$ )  |
|                                   | 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 ( $h_{HW}$ )  |

**2.3 실험조건 및 계측**

수리모형실험은 Table 1에 보인 것처럼 다섯 가지의 유량 조건에 대하여 외해측 수위 조건을 세 가지로 달리하면

서 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. 실제 수리모형실험에서는 고수조 급수량의 시간에 따른 미세한 변화, 웨어수조 수위의 미세한 진동, 관측수로 내에서의 수면 변동, 그리고 하류 게이트 조작에 따른 회류유량의 편차 등으로 인해서 수문 상류에서의 계측 수위가 실험 조건에 해당하는 목표 수위와 정확하게 일치하도록 할 수 없기 때문에, 최대한 목표 수위에 가깝게 되도록 시행착오를 거치면서 실험을 수행하였다. 대부분의 경우에 목표 수위와 계측 수위의 수위차는 1 mm 이내였으며, 수위차가 다소 크게 발생하는 일부 실험조건의 경우에도 수위차는 최대 2 mm 이내였다.

웨어수조 및 관측수로 내 수위는 용량식파고계를 이용하여 측정하였다. Fig. 5에 웨어수조 및 관측수로 내에 설치된 파고계의 위치를 표시하였다. 통상적으로 웨어의 수위는 웨어수조 측면에 수두관을 설치하고 수위계를 이용하여 계측하지만, 이 연구에서는 실험이 진행되는 동안 웨어수조의 수위를 지속적으로 모니터링하여 유량의 안정화 정도



**Fig. 5.** (a) Plan view of the weir tank showing arrangement of flow straightener and two wave gauges. (b) Side view of the open channel flume showing arrangement of six wave gauges near the sluice model.

를 판단하고 만약 유량이 급격하게 변화할 경우에 효과적으로 대처하기 위하여 파고계를 이용하였다. 수위계 및 파고계의 성능 비교를 위한 예비실험 결과, 수위계는 수문을 통과한 흐름의 수면이 장·단기적 파동형상으로 매우 심하게 변화하는 본 실험 조건에서는 mm 단위보다 작은 수위 변화를 계측하기 어렵기 때문에, 파고계를 이용하여 수위를 계측하는 것이 수위를 더 정밀하게 평가함을 확인하였다. 관측수로 내 수위는 수로 상부에 설치된 레일을 따라 움직이는 대차에 파고계를 고정시켜서 계측하였다. 개수로 흐름에서는 계측 위치에 따라서 수위가 일정하지 않고 약간씩 다르며, 특히 수로 중간에 수문 케이슨이 설치되어 있기 때문에 수위 계측 위치를 결정하는 것은 매우 중요하다. 이 연구에서는 Fig. 5(b)에 보인 것처럼 수문 모형 전면에서는 모형으로부터 2 m 떨어진 위치에서 수위를 계측하였고, 후면에서는 모형으로부터 1~5 m 거리에 1 m 간격으로 파고계 다섯 개를 설치하여 각 지점에서의 수위를 계측하였다. 각 실험 조건에 대하여 2분간 25 Hz로 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. 만약 개수로 내 수위가 충분히 안정화되지 못한 경우에는 2분간 5회 계측하는 동안에 수위가 점진적으로 상승 또는 하강하게 되므로 수집되는 데이터는 실험 조건에 적합한 것임을 확증하게 되었다.

### 3. 수두차 평가 및 유량계수 계산

수문 전·후면의 흐름에서 유량( $Q$ ) 및 수두차( $\Delta H$ ) 사이의 관계는 다음 식으로 표현될 수 있다(Baker, 1991).

$$Q = C_d A_v \sqrt{2g\Delta H} \quad (3)$$

여기에서,  $C_d$ 는 유량계수(coefficient of discharge),  $A_v$ 는 최소단면의 단면적,  $g$ 는 중력가속도를 나타내며,  $\Delta H$ 는 수문 전면에서의 전수두( $H_{UP}$ )에서 후면에서의 전수두( $H_{DN}$ )을 뺀 값으로서 다음과 같이 정의된다.

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

식 (4)에서  $V_{UP}$  및  $V_{DN}$ 은 각각 수문 전·후면에서의 평균 유속으로서 유량을 계측위치에서의 통수단면적으로 나눈 값이다.

한편, 식 (3)을 유량계수에 대하여 나타내면 다음과 같다.

$$C_d = \frac{Q}{A_v \sqrt{2g\Delta H}} \quad (5)$$

유량계수는 수문의 통수단면 단위 면적당의 통수성능을 나타내는 지표로서 자주 사용되며, 통수단면의 크기가 동일한 경우 유량계수의 값이 클수록 수문의 통수성능이 우수함을 의미한다.

한편, 개수로 흐름에서는 수로 바닥면 및 양측면에서의 마찰 때문에 발생하는 수두 손실로 인하여, 수문이 설치되어 있지 않은 경우에도 수로의 상류와 하류측 사이에 수위차가 발생한다. 이처럼 수로 내의 마찰에 의한 수두 손실의 대부분은 실제의 조력발전소 내·외측의 수위차를 평가할 경우에는 무시될 수 있는 것으로, 본질적으로 3차원적인 수문 주변의 수리현상을 2차원 단면모형실험으로 모의함에 따라서 발생하는 추가적인 수두 손실로 간주할 수 있다. 따라서 실험에서 수문 전·후면에서의 수두차를 평가할 때에는 이를 고려하여 보정할 필요가 있다. 수로의 마찰에 의한 수두 손실 효과를 고려할 경우에 식 (4)는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta H = \left( h_{UP} + \frac{V_{UP}^2}{2g} \right) - \left( h_{DN} + \frac{V_{DN}^2}{2g} \right) + h_f \quad (6)$$

여기에서  $h_f$ 는 개수로의 마찰 손실 수두를 나타낸다.

마찰 손실 수두의 크기를 평가하기 위하여 수문이 설치되지 않은 상태에서 수로 최상류로부터 0.5~19.5 m 사이에서 2 m 간격의 위치에서 평균수위를 계측하고 평균유속에 의한 수두를 더하여 각 계측점에서 전수두를 계산하였다. 이 때 수심은 수문 모형이 설치될 경우에 수문 전·후면에서의 대략적인 수심을 고려하여 50 cm로 하였고, 유량은 Table 1에 보인 유량 조건의 범위에서 네 가지 경우에 대하여 계측을 수행하였다. Fig. 6에 그 계측 결과를 나타내었으며, 이로부터 수로 하류의 유출부 근처에서의 전수두가 상류 유입부 근처의 전수두에 비해서 유량에 따라서 0.15~1.06 cm 정도 감소함을 알 수 있다. 전수두에는 이미 속도수두가 포함되어 있으므로, 이 수두차는 주로 수로 바닥면 및 양측면에서의 마찰에 의해서 발생한 수로 손실수두로 볼 수 있다. Fig. 6에서 전수두는 관측수로 최상류측으로부터 약 11.5 m 정도까지는 비교적 완만하게 감소하다가 그 이후로부터 급격하게 감소하며 감소폭은 유량이 증가할수록 증가하는데, 이것은 개수로 흐름에서는 어느 정도 거리까지는 마찰에 의한 감속 효과와 중력에 의한 가속

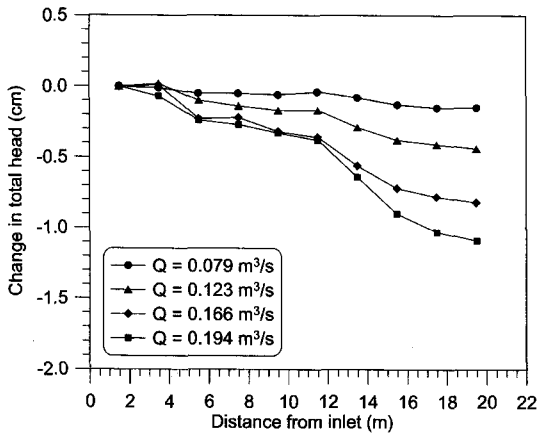


Fig. 6. Decrease of total head along the flume due to the friction effect at the bottom and side walls.

효과가 균형을 이루어서 수면경사가 거의 직선형으로 유지되며 그에 따라 임의 위치에서의 수위도 비교적 안정한 상태를 유지하지만, 관측수로 하류쪽에 가까워질수록 최하류측에서 유량이 자유낙하하면서 흐름이 가속화되는 효과가 커지게 되어 유속이 빨라지고 그에 따라서 수위가 급격하게 감소하게 되기 때문에 나타나는 현상이다(Street et al., 1996).

이러한 개수로 흐름의 특성을 고려하여 본 연구에서는 2.2절에서 설명한 바와 같이 수문의 설치위치를 관측수로 최상류측으로부터 10.4 m 위치로 결정하였다. 즉, 관측수로 내 수위가 비교적 안정화된 구간 내에 위치하면서 수문 상류측의 수위가 장·단기적 파동형상으로 변화하는 영향을 최소화할 수 있도록 수문 최상류측으로부터 가능한 먼 위치에 수문을 설치하였다. 한편, 수문 하류측에서는 상류측과는 달리 목표한 수위를 재현하지 않고 유량 및 상류측 수위 조건에 의해 자연스럽게 형성되는 수위를 계측하였으므로 상류측에서와 같이 수면 변화량을 최소화하기 위해 주의할 기울여야 할 필요성이 상대적으로 적었다. 이에 따라 관측수로 최상류측으로부터 수위 계측점의 위치는 2.3절에서 설명한 바와 같이 상류측에서는 8.4 m가 되며, 하류측에서는 11.4-15.4 m 사이에서 1 m 간격의 다섯 점이 된다.

한편, 관측수로 내에서 발생하는 마찰 손실수두의 영향을 고려하며 수문 상·하류측 사이의 수두차를 평가하기 위하여 Fig. 6에 보인 전수두 차를 흐름이 진행한 거리로 나눈 값인 수로손실수두 경사(S)를 유량(Q)의 함수로 나타내어 Fig. 7에 제시하였다. 이 때 S를 계산하는데는 계측점 전체 자료를 사용할 경우 실제보다 마찰에 의한 수로손실수두를 크게 평가함으로써 수문의 통수성능을 과대평가할 가

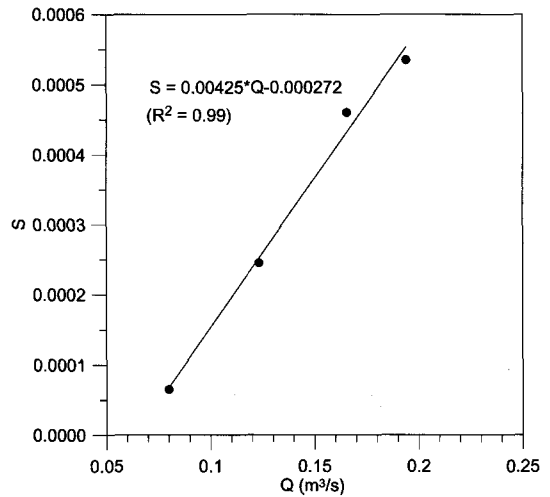


Fig. 7. Relationship between the slope of head loss due to friction in the flume and the water discharge.

능성이 있기 때문에 관측수로 최상류측으로부터의 거리가 13.5 m인 위치까지의 계측값들만을 이용하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 수로 손실수두 경사는 유량이 커짐에 따라서 거의 선형적으로 증가하였다. 따라서 다음과 같은 선형 회귀식을 통하여 수로 손실수두 경사를 유량의 함수로 표현할 수 있다.

$$S = 0.00425Q - 0.000272 \quad (7)$$

식 (7)의 결정계수(coefficient of determination) 값은  $R^2 = 0.99$ 이다. 식 (7)을 이용하여 수로 내 마찰에 의한 손실 수두는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$h_f = S \cdot (\Delta D - L) \quad (8)$$

여기에서  $\Delta D$ 는 수문 상·하류로 떨어진 계측점 사이의 거리이며,  $L$ 은 수문 케이슨의 길이를 나타낸다.

한편, 수리모형실험에서는 수문 후면의 수로 길이가 충분히 길지 않고 수로 최하류의 게이트를 통과한 유량이 자유낙하하므로 게이트 부근에서 유속이 점차 빨라지기 때문에 나타나는 수위 저하 효과로 인해서, 수문 후면에서의 수위는 하류측으로 가면서 상승하다가 다시 완만하게 하강하는 양상을 나타낸다. 따라서, 수문 후면에서는 Fig. 5(b)에 보인 것처럼 모두 다섯 지점(WG4-WG8)에서 수위를 계측하고, 그 중에서 최고 수위값을 후면수위로 선정하였다. 그러므로 식 (8)에서  $\Delta D$ 는 하류측의 WG4-WG8 중에서 수위가 최고인 지점으로부터 상류측의 WG3 지점 사이의 거리가 된다.

#### 4. 요약 및 결론

최근 여러 형태의 신재생에너지를 개발하기 위한 노력이 전세계적으로 활발하게 펼쳐짐에 따라서 해양에서 얻을 수 있는 청정에너지인 조력에너지를 이용하는 조력발전에 대한 관심도 증대되고 있다. 조력발전소 건설에 기술적인 어려움은 거의 없지만, 건설사업이 대규모로 진행되기 때문에 타당성 조사 연구등이 선행되는 것이 일반적이다. 그러나 조력발전의 경제성에 직결되는 핵심기술인 수문(sluiice)형상의 설계 기술에 관해서는 기존에 국내·외에서 체계적인 연구가 이루어진 바가 없으며 관련 참고자료도 많지 않은 실정이다.

이에 본 연구에서는 수리모형실험을 통하여 형상이 조금씩 다른 수문의 수리학적 통수성능을 비교·검토하여 수문형상의 최적 설계 방안을 도출하고자 하였다. 이를 위해서 수문 최소단면의 폭 및 바닥 높이가 조금씩 다른 수문 모형을 여섯 개 제작하여 개수로에 설치하고 정밀한 수리모형실험을 수행하였다. 특히 수문의 전체적인 형상을 결정짓는 대표적인 파라미터들을 선별하여 제시하고, 수문 형상이 조금씩 다른 모형에 대한 실험 결과로부터 설계 파라미터 변화의 경향성을 예측할 수 있도록 정밀한 실험시설을 제작·설치하였으며, 실험오차를 가능한 한 최소화하는 실험 및 분석 방법을 제시함으로써, 수문형상의 최적설계 기술을 개발하는 데 그 기초를 마련하였다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌

- 오명학, 박진순, 이광수 (2007). 우리나라의 조력에너지 개발 여건. 대한토목학회지, 55(12), 135-140.
- 이달수, 오상호, 이진학, 박우선 (2008). 조력발전용 수문 형상에 따른 통수성능에 관한 실험적 연구 - II. 실험자료 분석, 한국해양·해양공학회논문집, 20(1), 81-92.
- 이광수 (2005). 한반도 조력자원 개발타당성. 한국신재생에너지학회 학술대회논문집, 342-350.
- 한국표준협회 (2001). 펌프 토출량 측정 방법 KS B 6302.
- 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.
- Baker, A.C. (1991). Tidal Power. Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.
- Street, R.L., Watters, G.Z., and Vennard, J.K. (1996). Elementary Fluid Mechanics (7th Ed.). John Wiley & Sons, Inc., New York.

Received January 15, 2008

Accepted February 12, 2008