

## Keulegan Method를 이용한 Fort Pierce Inlet의 영향평가 Impact Study of Fort Pierce Inlet using Keulegan Method

장창환<sup>1</sup>, 김효섭<sup>2</sup>, 박인보<sup>3</sup>, 장석환<sup>4</sup>

Changhwan Jang<sup>1</sup>, Hyoseob Kim<sup>2</sup>, Inbo Park<sup>3</sup>, and Sukhwan Jang<sup>4</sup>

### 1. 서 론

조석의 흐름은 근해 영역과 조석 하구 영역의 수위 차이에 의해서 발생한다. 이런 수위 차이에 의한 흐름의 동역학적 특징들은 여러 연구자들에 의해서 오랜 기간 동안 연구되어져 왔으며, 현재 까지도 연구되고 있다. 조석의 흐름과 하구의 영향을 이해하고 평가하기 위한 수리학적 정상흐름의 접근법을 이용하여 해안 수리학의 발전을 위해 타당한 결과들이 제시되었으며(Brown 1928), Keulegan(1951, 1967)은 흐름에 대하여 1차원 수심평균 천해파 공식을 이론적으로 풀어냈고, 다른 많은 연구자들은 하구의 흐름을 다양한 분석기법으로 공식화하였다(King (1974) and Escoffier and Walton (1979). 유사해석기법과 수리모형을 통한 하구의 설계가 심도 있게 연구·수행되었으며, 가장 최근에는 수치모형을 이용하여 1차원, 2차원, 그리고 3차원 장파공식을 사용하여 더욱 자세하고 정교한 결과들을 제공하고 있다. 다른 해석학적 모형들을 통한 하구의 연구는 최소한의 노력을 통해 실제로 사용 가능한 결과와 필요한 정보를 제공 받을 수 있도록 하며, 하구의 시스템을 이해하기 위하여 최적의 모형 구축이 필요로 되어져야 한다.

조석 하구의 동역학적 특징을 평가하기 위해서 해석학적 기법, 수치모형, 그리고 수리모형과 같은 여러 접근법들이 사용되고 있다. Figure 1에

서와 같이, 본 연구는 미국 플로리다 동부의 Fort Pierce inlet을 선정하여 인근 해역에 대한 조위의 변화를 이용하여 하구내의 조위, 지체시간 그리고 최대 유속을 결정하고 평가하였다. 또한 선정된 대상 지역에 대하여 조석 영향권의 표면적과 그 외에 중요한 매개변수들을 수집하여 각 대상 지역에 대한 수리 동역학적 이해를 도울 것이다.



Fig. 1. Study area

### 2. Keulegan Method

본 연구를 위해 수집된 자료들과 매개변수들은 Matlab 2007a를 이용하여 조석 하구를 쉽게 접근하고 평가하도록 하였고, Channel Equilibrium Area model를 이용하여 결과값을 비교·검증할 것이다. 조석의 영향을 받는 하구의 표면적, 근해의

1 발표자: 국민대학교 건설시스템공학부 박사수료

2 국민대학교 건설시스템공학부 교수

3 국민대학교 건설시스템공학부 교수

4 대전대학교 건설시스템공학과 부교수

조위, 주기, 하구의 길이, 손실 계수 등의 입력 데이터들은 미 공병대(U.S. Army Corp.)와 미국 해양대기 관리처(NOAA)의 기존 자료 및 관측 자료로부터 획득되었다.

Keulegan Method는 King's Method와는 다르게 관성의 항을 적게 고려하고 하구의 길이에 대하여 공식을 단순화하였다. 하구에 대한 흐름의 연속방정식은 다음과 같다.

$$VA_c = A_b \frac{dh_b}{dt} \quad (2.1)$$

여기서  $A_c (= B \times d)$ 은 하구의 단면적이며, 하구의 폭과 평균수심에 의해서 구해진다.  $A_b$ 는 조석의 영향권의 하구의 표면적, 그리고  $dh_b/dt$ 은 시간에 대한 하구의 수심 변화율이다.

Keulegan은 유속에 대하여  $K$ 라는 무차원 매개 변수의 식을 개발하였으며, 이  $K$ 는 충만계수(coefficient of repletion or filling)로 알려져 있고, 아래와 같이 나타낸다.

$$K = \frac{TA_c}{2\pi A_b} \sqrt{\frac{2g}{a_o[k_{e,n} + k_{e,r} + \frac{fL_c}{4R}]}} \quad (2.2)$$

$$= \frac{T}{2\pi a_o} \frac{A_c}{A_b} \sqrt{\frac{2ga_o}{F}}$$

여기서  $T$ 는 1일2주조의 조석주기를 의미하고 (12.42 hrs or 44712 sec),  $a_o$ 는 근해 조석의 진폭이며(one-half of the ocean tide range),  $k_{e,n}$ 과  $k_{e,r}$ 는 각각 조류의 유입과 유출시 에너지 손실 계수이다.  $L_c$ 은 하구의 길이이고, 합성계수는  $F = k_{e,n} + k_{e,r} + (fL_c/4R)$ 이다.  $g$ 는 중력가속도이다. 유입 손실계수  $k_{e,n}$ 은 주로 0.005에서 0.25값을 사용한다. 인공 구조물이 없는 자연 하구로 입구가 완만한 경우  $k_{e,n} = 0.05$ 이거나 이보다 작은 값을 사용한다. 만약, 하구에 인공구조물(jetty)이 설치되어있는 경우나 입구가 길게 구부러져있는 흐름이 저항을 받을 경우  $k_{e,n} = 0.25$ 를 적당한 값으로 사용한다. 유출 손실계수  $k_{e,r}$ 는 보통 거의 1.0값을 갖는다. 이것은 운동역학적으로 수두가 거의 없어진다고 볼 수 있다. 만약 흐름에 특정한

관성이 있다고 한다면  $k_{e,r}$ 는 1.0 보다는 작은 값을 가지게 될 것이다.

### 3. 결 과

Fig. 2는 한 주기 조석에 대하여 근해와 하구 내의 조위 곡선과 하구내로 유출입하는 조류의 변화를 보여주고 있다.

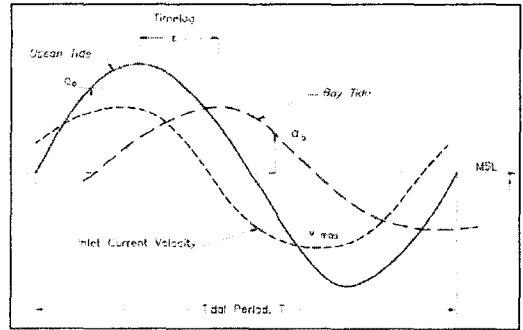


Fig. 2. Sample tides and currents for an ocean-inlet-bay system that satisfy the Keulegan assumptions (1967)

기존의 평가 방식은 Keulegan의  $K$ 값을 계산한 후에, Keulegan이 제시한 3가지의 그래프들을 이용하여  $a_b/a_o$ ,  $V_{max}$ , 그리고  $\epsilon$ 값들을 인위적으로 얻은 후, 그 결과들을 다시 해당 방정식들을 이용하여 원하는 결과들을 도출하였지만, 본 연구는 사용이 쉽고, 입력 값들로부터 원하는 결과들을 시간적으로 빠르게 얻을 수 있도록 Matlab을 이용하여 구현하였다. Fig. 3에서와 같이, 각각의 필요한 입력데이터들을 이용하여 충만계수  $K$ 를 계산 후, 하구 내 진폭( $a_b$ )의 변화, 최대 조류 속도( $V_m$ ), 위상각도( $\epsilon$ )와 지체시간( $\tau$ )등의 결과들을 얻었다. 또한 창조시 해수의 하구내 유입량(hydraulic tidal prism ( $P_h$ ))도 아래의 식으로 계산되어졌다.

$$P_h = \int_0^T Q dt = \int_0^T V_m A_c \sin \omega t dt \quad (3.1)$$

$$= \frac{TV_{m,max}}{\pi C} = \frac{TV_m A_c}{\pi C}$$

조석에 의한 하구 내 유입량(tidal prism)은

유속과 하구면적의 곱으로 또는, 유량에 의해서 계산되어질수 있다( $Q_m = V_m A_c$ ). 하구 내에서 사인파적인 유입·유출량은 가정될 수 있으며, 조석의 순환으로부터 창조시와 낙조시에 대하여 적분되어질 수 있다. 원형의 흐름을 비 사인파적으로 단순화하기 위해서 Keulegan은 공식 (3.1)의 두 번째 줄과 같이 나타냈으며,  $C$  라는 보정계수를 만들었고, 범위는 0.81에서 1.0사이로  $K$ 값에 의존한다.  $0.1 \leq K < 1.8$ 일 때,  $C=0.86$  그리고  $K \geq 1.8$ 이면,  $C=1.0$ 을 사용한다.

또 하나의 단순한 하구 내 해수 유입량을 설명하기 위하여 아래와 같은 공식이 사용되어졌다.

$$P_v = 2a_b A_b \quad (3.2)$$

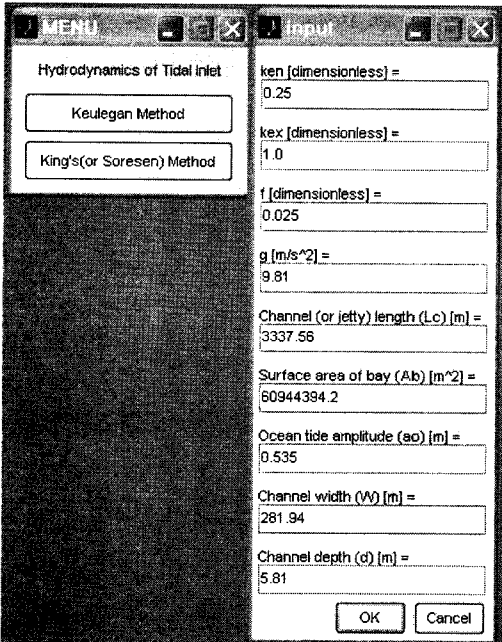


Fig. 3. First step and input window

Fig. 4을 보면, Fort Pierce inlet에 대하여 총만계수는  $K=0.52$ 로 계산되어졌으며, Jarrett (1975)은 Keulegan의  $K$ 값을 기준으로 하여 “수리학적 분류법”을 3가지(Class I, II, III)로 수행하였다. Jarrett이 제안한 분류법에 의해서 대상지역은 Class III으로 선정되었다. Class III은 위상각도가  $40^\circ < \epsilon < 70^\circ$  이어야 하며, 지체시간은  $1hr25min < \tau < 2hr25min$ 이어야 한다. 그리고 대상 지역은 중간크기의 하구입을 나타내

며, 만약  $0.6 < K < 0.8$ 의 범위를 갖는다면 그 하구는 자연적 토사의 유출입 능력을 가진다고 볼 수 있다.

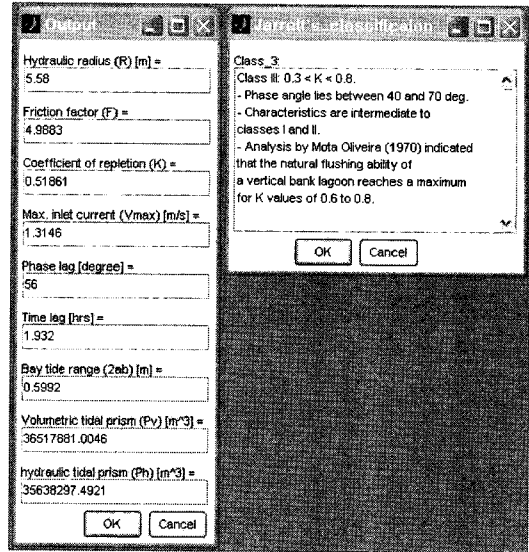


Fig. 4. Output window and Jarrett's classification

Fort Pierce inlet은  $V_{max} = 1.31m/s$ 로 4 knots( = 2.057 m/s)이하의 값을 가지므로 선박의 입/출입시 항행성이 양호하고,  $a_b/a_o$ 값은 1에 가까울수록 그 하구가 매우 안정하다고 평가할 수 있으나 대상 하구는 0.56으로 안정하다고 볼 수는 있다. 위상각도  $56^\circ$ 와 지체시간 1.932hrs로 대상 하구는 효율성이 매우 우수하지 않으나, 양호하다고 판단되었다. 창조시 하구내로 유입하는 해수의 용적은 약  $3.65 \times 10^7 m^3$ 으로 계산되었다.

#### 4. 결 론

Fort Pierce Inlet은 Keulegan  $K$ 값을 이용하여 평가되어졌다.  $K$ 값이 증가하면 하구의 안정성은 높게 평가되어지고, 반대로  $K$ 값이 감소할수록 하구의 안정성은 낮게 평가되어진다.

Fig. 5는 앞에서 언급한 CEA model로 같은 입력값을 넣어 시간에 따른 조위변화와 조류변화 곡선을 얻었다. 위상각도는 약  $60^\circ$ 로 지체시간은 약 2시간으로 계산되어졌고,  $V_{max} = 1.5m/s$ 로  $2a_b = 0.6m$ 로 두 결과 값들이 매우 일치하였다.

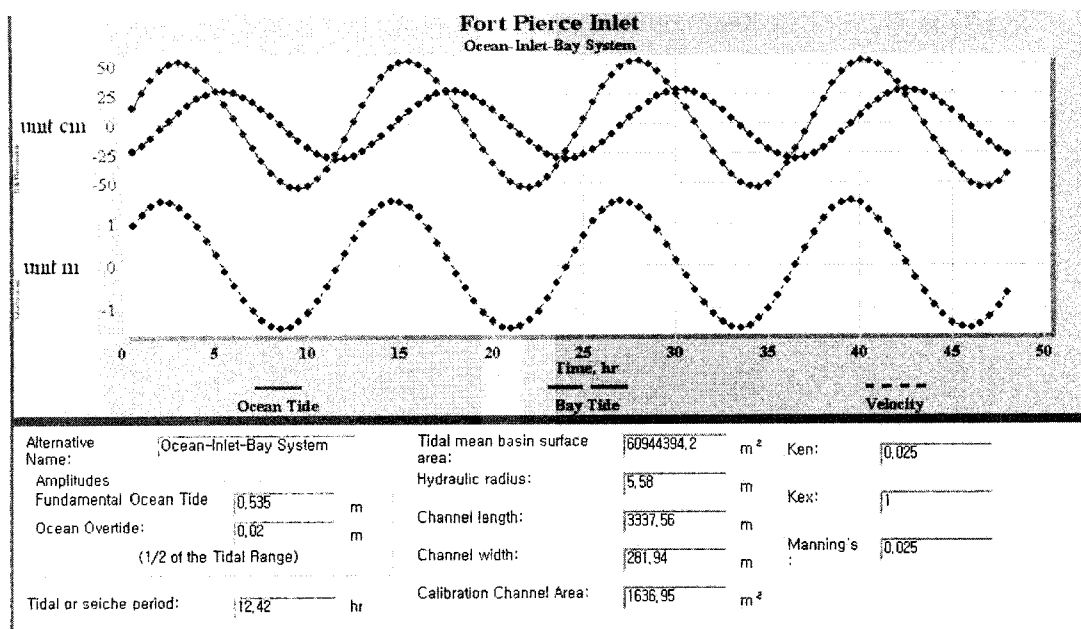


Fig. 5. Tides and currents for the ocean-inlet-bay system using Channel Equilibrium Area model

### 참고문헌

- Brown, E. I. 1928. "Inlets on Sandy Coasts," Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol 54, Part I, pp 505-523.
- Escoffier, F. F., and Walton, T. L. 1979. "Inlet Stability Solutions for Tributary Inflow," Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 105, No. WW4, Proc. Paper 14964, pp 341-355.
- Keulegan, G. H. 1951. "Third Progress Report on Tidal Flow in Entrances, Water Level Fluctuations of Basins in Communication with Seas," Report No. 1146, National Bureau of Standards, Washington, D.C.
- Keulegan, G. H. 1951. "Third Progress Report on Tidal Flow in Entrances, Water Level Fluctuations of Basins in Communication with Seas," Report No. 1146, National Bureau of Standards, Washington, D.C.
- King, D. B. 1974. "The Dynamics of Inlets and Bays," Technical Report No. 2, Coastal and Oceanographic Engineering Laboratory, University of Florida, Gainesville.
- U. S. Army Corp. 2002. Coastal Engineering Manual. Part II, Chapter 6.
- U. S. Army Corp. 1984. Shore Protection Manual. Volume I, Chapter 4.