

적정 수로 폭의 선정과 수문이 설치된 인공 해수호수의 수위 및 유속의 변화 분석

장 창 환* / 김 효 섭** / 장 석 환*** / 임 남 재****

Analysis of Alteration for Water Level and Velocity in Tidal Artificial Lake Installed Water Gate and Adoption of Proper Channel Width

Jang, Changhwan* / Kim, Hyoseob** / Jang, Sukhwan*** / Ihm, Namjae****

요약 : 조석의 영향에 의해 해수의 유·출입이 용이한 해수호수를 친수 친환경으로 조성하는 계획이 인천 송도에 수행되었다. 본 연구는 조석의 영향을 받는 해수호수의 수리동역학적 거동을 분석하기 위해서 1차원 수치모형인 CEA모형과 2차원 수치모형인 FLOW2DH를 이용하여 수로의 폭에 따라서 변화하는 해수호수 내의 수위 및 유속을 계산하였다. 연구 결과, CEA모형을 이용하여 수로의 적정 폭은 100.0m로 선정되었고, 외해 조위와 인공호수 수위의 지체시간과 수로 내 최대 유속이 계산하였다. 이 결과를 FLOW2DH와 연동하여 해수호수 내의 수위 및 유속을 각각 선정된 관측점에 대하여 비교 분석하였다. 또한, 인공호수의 유지관리 측면에서 수문이 설치된 경우에 대하여 수치모형 실험을 추가하여 수문이 설치되지 않은 경우보다 유속이 창조 시 약 20%, 낙조 시 약 50% 감소하는 효과를 얻었다.

핵심용어 : 인공호수, 수리동역학적 거동, 수위, 지체시간, 최대 유속

Abstract : Tidal artificial lake capable of inflow and outflow of seawater is planned for waterfront and eco-friendly space at Songdo, Incheon, Korea. This study for hydrodynamic behaviors of tidal artificial lake was carried out and predicted about water level and velocity within the lake corresponding to width of channel or waterway using by 1 dimensional numerical model(CEA) and 2 dimensional numerical model(FLOW2DH). As a result, the proper width, 100.0m of the channel between the lake and the open sea was calculated reasonable conclusions such as tidal phase lag and maximum velocity from CEA. Also, water level and velocity of each point within the lake was predicted and compared to the measured data from FLOW2DH. FLOW2DH was added to the gate control case for maintenance and administration purpose of the lake and obtained the results that the velocity was decreased by approximately 20% at flood and 50% at ebb than the case without gate control.

Keywords : tidal artificial lake, hydrodynamic behavior, water level, phase lag, maximum velocity

1. 서 론

최근 동북아 금융 및 경제 허브를 목표로 우리나라 서해안과 일부 남해안 지역에 경제 자유구

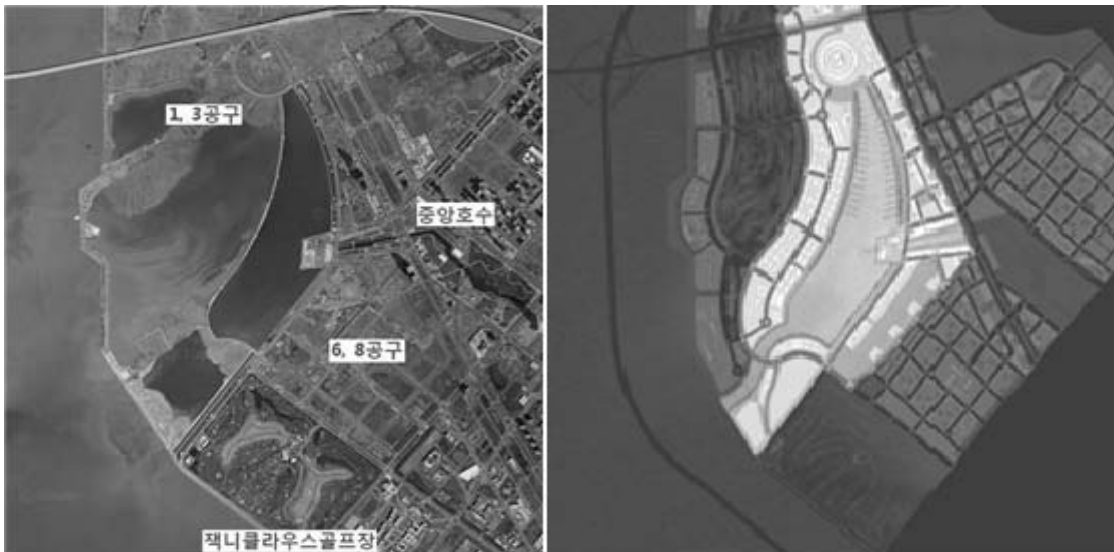
역 지정 및 관련 개발사업이 활발하게 추진되고 있는 실정이다. 특히 갯벌을 호안구조물로 막아 간척지와 산업단지 그리고 항만 및 물류단지와 관련 배후 시설을 건설하고 있는데 새만금, 군산

+ Corresponding author : hkim@kookmin.ac.kr
* 정희원 · 특허청 건설기술심사과 심사관(공학박사) · Email : cjang@kipo.go.kr
** 국민대학교 건설시스템공학부 교수 · Email : hkim@kookmin.ac.kr
*** 대전대학교 건설시스템공학과 교수 · Email : drjang@daejin.ac.kr
**** 정희원 · 동해기술종합공사 사장 · Email : njihm@donghae.eng

산업단지, 그리고 송도 국제도시 건설 등이 좋은 실례라 할 수 있다. 그 중 송도지구는 인천경제자유구역으로서 국제 규모의 경제 및 금융중심 신도시 건설사업이 급속히 진행되어 국제적 규모의 시설물들이 준공단계에 있으며, 인천경제자유구역은 총 9개의 공구로 구성되어 건설이 추진 중에 있다. 특히, 총 9개의 공구 중 1, 3공구와 6, 8공구에 인접한 위치에 해수호수 건설이 계획되어 있으며, 국내최초로 추진되고 있는 인공적 해수호수의 건설은 완공 후 조석의 영향과 관련하여 해수호수 내의 안정적 유지관리를 위한 수리동역학적 거동의 면밀한 검토와 해결방안 수립이 중요하게 대두될 수밖에 없는 현실이다.

이에 본 연구에서는 조석의 영향을 받는 인공 해수호수의 수리동역학적 검토를 위해 미공병단에서 개발한 1차원 수치모형실험인 Channel Equilibrium Area(CEA) 모형을 사용하여 인공 해수호수의 적정 수로 폭을 결정하고 이 결과를 연동하여 국민대학교에서 개발한 2차원 수치모형실험인 FLOW2DH를 모의하여 외해와 인공 해수호수의 해수유동현상에 대하여 수리동역학적 분석 및 계획된 인공 해수호수의 수리적 안정성을 확보할 수 있도록 하는데 연구의 목적을 두고 있다.

상기에서 언급된 수리동역학적 특성은 여러 연구자들에 의해서 오랜 기간 동안 연구되어져 왔으며, 현재까지도 연구되고 있다. 특히 조석의 흐름과 반폐쇄적인 하구나 해수호수의 영향을 이해하고 평가하기 위한 수리학적 정상흐름의 접근법을 이용하여 해안 수리학의 발전을 위해 타당한 결과들이 Brown(1928)에 의해서 제시되었으며, Keulegan(1951, 1967)은 흐름에 대하여 1차원 수심평균 천해파 공식을 이론적으로 풀어냈고, King(1974)과 Escoffier and Walton(1979)은 해수호수의 흐름을 다양한 분석기법으로 공식화하였다. 그 후, 발전된 해석기법과 수리모형을 통한 해안역의 연구가 심도 있게 수행되고 있으며, 가장 최근에는 수치모형을 이용하여 1차원은 물론, 2차원, 3차원적 해석과 사용자편의기법(Graphic User Interface, GUI)을 통하여 보다 쉽게 입력과 출력을 처리하여 더욱 자세하고 정교한 결과들을 제공하고 있다. 현재 여러 개발된 모형들을 이용한 해수호수의 연구는 최소한의 노력을 통해 실제로 사용 가능한 결과와 필요한 정보를 제공할 수 있도록 해야 하기 때문에 해수호수의 시스템을 이해하기 위하여 최적의 모형을 구축하는 것이 필요로 되어져야 한다.



(a) (b)
Fig. 1. Study Area ((a) present state, (b) blueprint)

Fig. 1은 인천 경제자유구역 송도지구의 1, 3공구와 6, 8공구에 인접한 해수호수이며, 조석간만의 차가 큰 인천해역에 대한 조위변화에 따른 해수호수 내의 수위변화, 지체시간, 그리고 수로의 최대 유속 등이 수로 단면적과 어떠한 관계가 있는지를 CEA 모형을 이용하여 규명하고 FLOW2D와 연동하여 해수호수의 관측점에 대한 수리동역학적 특성을 평가하기로 한다.

2. 지배방정식

2.1 CEA 모형

CEA(Channel Equilibrium Area) 모형은 1차원 연속방정식과 운동방정식을 이용하여 수로에서의 최대 유속과 해수호수내의 조위 및 지체시간(phase lag), 조석 1주기에 대하여 해수호수내로 유입되는 해수의 용적(tidal prism)이 계산 가능하다. 그리고 해수호수의 면적, 수로 폭, 수로 수심, 수로의 길이, 외해 조위 및 주기, 그리고 손실계수 등이 입력조건으로 사용된다.

본 모형에서는 Keulegan(1967)이 제안한 다음의 가정이 허락된다.

- 해수호수의 사면은 직립이다.
- 해수호수의 수로 이외에 다른 유입은 없다.
- 밀도류는 존재하지 않는다.
- 조위는 선형파(sinusoidal)로 오르내린다.
- 해수호수내의 수위는 균일하게 오르내린다.
- 수로에서 관성의 영향은 무시한다.

수로에서 흐름에 대한 1차원 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = -g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{f}{8R} v |v| \quad (1)$$

여기서 v 는 수로의 평균유속, h 는 수로의 수심, f 는 Darcy-Weisbach 마찰손실계수, R 은 경심, 그리고 g 는 중력가속도이다. 특히, 해수호수의 사면은 선박의 접안이 용이하도록 계획되어 있어 해수호수의 사면이 직립이라는 가정은 유효하

다고 사료된다.

Keulegan은 위 식에서 국부가속도를 무시하고, 수로의 길이에 대하여 적분하였다. 수로를 통해 해수호수로 유·출입되는 흐름에 대한 연속방정식은 아래와 같다.

$$vA_c = A_b \frac{dh_b}{dt} \quad (2)$$

여기서 A_c 는 수로 길이에 대한 평균 단면적, A_b 는 해수호수의 수면적, 그리고 dh_b/dt 는 시간에 대한 해수호수의 수위변화이다.

위의 연속방정식과 운동방정식을 합성하여 Keulegan은 해수호수의 조위 변화와 수로내 유속을 계산할 수 있도록 무차원 매개변수 K 를 개발하였으며, 다음의 식으로 정의된다.

$$K = \frac{TA_c}{2\pi A_b} \sqrt{\frac{2g}{a_o \left[k_{en} + k_{ex} + \frac{fL}{4R} \right]}} \quad (3)$$

여기서 T 는 조석 주기, a_o 는 외해의 반조차, k_{en} 은 유입손실계수, k_{ex} 는 유출손실계수, L 은 수로 길이, 그리고 $F = k_{en} + k_{ex} + fL/4R$ 로 마찰계수들의 합이다.

유입손실계수인 k_{en} 은 일반적으로 0.005에서 0.25의 값을 사용하는데, 자연적인 수로나 인공적이지만 입구가 완만한 경우 0.05나 보다 적은 값을 사용하며, 인공적인 도류제(jetty)를 설치하거나 자연적이지만 입구가 각이진 경우는 0.25를 사용하는 것이 적합하다. 유출손실계수 k_{ex} 는 대체로 1.0을 사용하는데, 동적수두(kinetic head)가 완전히 소실되었다는 의미이다. 만약 관성의 영향을 고려하고자 한다면, 1.0보다 적은 값을 사용할 수 있다.

마찰손실계수인 f 는 자연적인 수로에서는 모래결(ripple)이나 하상둔덕(duned bottom)이 형성되어 마찰저항이 증가함으로 이상적인 개수로 보다

는 다소 높다고 할 수 있으나, 본 연구에서는 무차원 매개변수 K 에 관련된 마찰손계수인 0.03을 채택하였다.

Fig. 2는 지배방정식들의 이해를 돕기 위하여 미공병단의 Coastal Engineering Manual(CEM)에서 발췌한 전형적인 해수호수의 형상을 평면도와 측면도로 제시하고 있으며, B 는 수로의 폭 그리고 d 는 수로의 수심으로 정의된다.

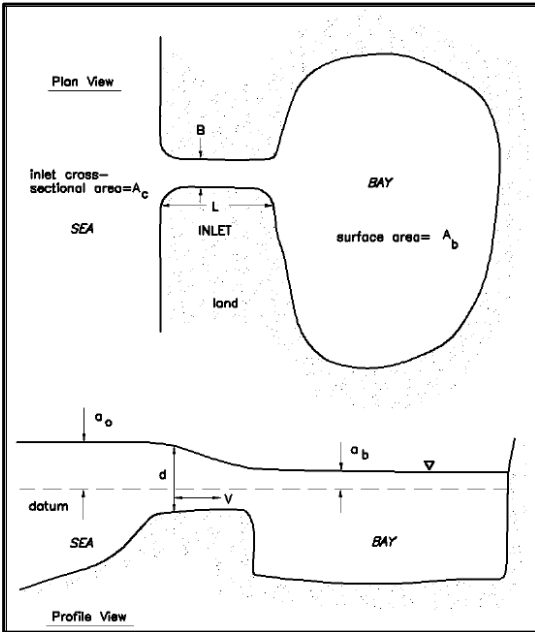


Fig. 2. A Schematic of idea tidal lake(from CEM)

2.2 FLOW2DH 모형

본 연구에서 사용된 FLOW2DH 모형은 수심적분 평면 2차원(x, y 방향) 해수유동 수치모형으로 기본방정식은 3차원 연속방정식과 운동방정식에서 유도된다. 질량보존법칙으로부터 유도되는 3차원 비압축성 유체의 연속방정식 및 난류유체의 운동량보존방정식인 3차원 Reynolds 방정식 중 수심방향으로 적분하면 수위와 수평방향 유속에 대한 다음의 세 식이 된다.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - 2\omega(\sin\phi)V \\ + \frac{fU\sqrt{U^2+V^2}}{8H} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} \\ - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial U}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial U}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + 2\omega(\sin\phi)U \\ + \frac{fV\sqrt{U^2+V^2}}{8H} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} \\ - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial V}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial V}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 t 는 시간, x 는 Cartesian 좌표계의 한 수평축, y 는 Cartesian 좌표계의 x 축과 직교되는 다른 한 축, ξ 는 평균해면을 기준으로 한 해수위 상승높이, U, V 는 x, y 방향의 연직평균수평유속 성분, H 는 총수심($h + \xi$), h 는 평균수심, $f = (8\tau_b)/(\rho|\vec{V}|^2)$ 는 Darcy-Weisbach의 마찰손실계수, τ_b 는 해저면에서의 전단응력, ρ 는 해수 밀도, g 는 중력가속도, D_x, D_y 는 x, y 방향의 난류 확산/분산계수, ω 는 지구자전 각속도, ϕ 는 계산점 위도이다.

2.2.1 해저면 마찰손실계수

자유수면을 갖는 해수유동에서 해저면에서 해수면까지의 전단응력 연직분포를 직선형이라 하면 난류확산계수의 연직분포는 포물선형, 수평유속의 연직분포는 대수형에 근접한다. Darcy-Weisbach는 관수로의 에너지 손실을 다음 식으로 표현하였다.

$$\Delta h = f \frac{l}{D} \frac{U^2}{2g} \quad (7)$$

여기서 Δh 는 손실수두, l 은 길이, D 는 직경, U 는 평균유속이며, 위의 관수로 마찰손실계수를 개수로에 확장하여 적용하면 아래의 식과 같이 되며, 대수형태의 유속분포를 이용하여 마찰손실계수 f 는 다음과 같이 된다.

$$f = \frac{8\tau_b}{\rho U^2} \quad (8)$$

$$f = 8\kappa^2 l_n^{-2} \left(\frac{d}{e z_0} \right) \quad (9)$$

여기서 κ 는 von Karman 상수(=0.4), d 는 수심, e 는 Euler 상수, $z_0 = k_s/30$, k_s 는 해저면 조도로 $3d_{50}$ 과 $3r$ 중 큰 값을 사용하며, d_{50} 는 해저면의 평균입경, r 은 해저면 모래결(ripple)의 높이이다.

2.2.2 확산계수

본 수치모형에서는 난류마감을 위해 난류응력이 평균속도 변화율에 비례한다고 가정하는 1872년 Boussinesq의 와동점성계수 개념을 도입하였으며, 현장에서 확산계수를 직접 측정하여 수치모형실험에서 사용할 수도 있다. 본 수치모형실험에서는 전단 흐름관련 수평확산계수와 이와 비례하는 수평방향 난류확산계수를 $\nu_t = 0.07du_*$ 를 선택하여 사용했다. 혼합거리 개념을 적용한 0 방정식(zero equation) 모형은 와동점성계수(ν_t)가 평균유속(v)과 Length Scale(L)에 비례한다는 가정하에 유도된다.

$$\nu_t \propto v \cdot L \quad (10)$$

$$v = l_m \cdot \left| \frac{\partial U}{\partial H} \right| \quad (11)$$

이 관계로부터 와동점성계수(ν_t)는 다음 식과 같다.

$$\nu_t = (l_m)^2 \cdot \left| \frac{\partial U}{\partial H} \right| \quad (12)$$

여기서, l_m 은 혼합거리 (= κL), L 은 거리 비율을 나타낸다. Prandtl은 위 식이 혼합거리 평균 유속변화율의 함수라고 주장한 바 있다.

2.2.3 경계조건

개방경계조건은 외해 또는 하천과의 경계면에서 수위 또는 유속, 또는 이들의 방사 방식의 조건을 선택하여 지정할 수 있으며, 본 실험에서는 수위 및 유량 지정 방식을 사용하였다. 외해측 개방경계조건은 기존의 조석관측 결과를 분석한 조화상수를 이용하여 입력하였다. 외해 개방경계조건은 모형의 개방경계의 각 격자소에서의 시간에 따른 해수위의 변화를 입력하는 조건을 사용한다. 경계조건으로 입력되는 시간별 해수위는 특정 일시의 조위-조류를 재현하고자 하는 경우에는 필요한 수의 조석분조를 선정하여 경계면을 따라 지정한다.

$$Z(t) = Z_0 + H \cos(\omega t + (V_0 + u) - K)$$

$$Z(t) = Z_0 + \sum_i H_i \cos(\omega_i t + (V_0 + u)_i - K_i) \quad (13)$$

여기서 $Z(t)$ 는 임의 시간의 해수위, Z_0 는 평균해면, H 는 M2, S2 분조의 진폭의 합(대조기) 또는 차(소조기), ω 는 M2 분조의 각속도, $(V_0 + u)$ 는 천문상수, K 는 M2 분조의 지각이다. 또한 H_i 는 각 분조의 진폭, ω_i 는 각 분조의 각속도, $(V_0 + u)_i$ 는 각 분조의 천문상수, K_i 는 각 분조의 지각이다. 이 때 지각은 동경 135° 기준 표준시이다.

육지경계조건은 연안에 수직인 방향으로의 유량은 영(0)으로 지정하며, 이 때 연안에 평행한 방향의 유속에는 제약을 두지 않는다.

3. 모형의 적용 및 결과

3.1 CEA 모형의 적용

해수호수의 수로 폭은 너무 좁거나 넓지 않도록 적절한 폭을 결정하여야 한다. 그 이유는 외해 조석의 영향을 크게 받기 때문에 수로가 너무 좁으면 외해와 해수호수의 조위 상승 및 하강에 대한 지체시간이 길어져 안정성 및 유지관리가 곤란하며, 너무 넓으면 해수호수 수로의 시공시 경제성이 용이하지 못하다. 따라서, 해수호수의 수로 폭은 안정성, 경제성 및 유지관리를 고려하여야 한다. 이에 본 연구는 해수호수의 적정 폭을 선정하기 위하여 Table 1과 같이 3가지 CASE를 고려하기로 한다. 외해 조위는 약최고조위의 반조차인 4.635m, 해수호수의 수면적은 약 730,000m², 수로의 길이는 800.0m, 수로의 수심 E.L. (-)3.5m, 손실계수, 그리고 각각의 수로 폭을 모형의 입력자료로 사용하였다. 특히, 외해 조위의 1주기는 태음(M₂)시간인 12.42hrs를 입력하였고, 유입손실계수 k_{en} 은 0.25, 유출손실계수 k_{ex} 는 1.0, 그리고 마찰손실계수 f 는 0.03을 사용하였다.

Table 1 Input data of each case for CEA model

Parameter (Unit)	CASE 1	CASE 2	CASE 3
B (m)	50.0	100.0	150.0
A_c (m ²)	175.0	350.0	525.0
R (m)	3.07	3.27	3.34
a_o (m)	4.635	4.635	4.635
A_b (m ²)	730,000	730,000	730,000
L (m)	800.0	800.0	800.0
k_{en}	0.25	0.25	0.25
k_{ex}	1.0	1.0	1.0
f	0.03	0.03	0.03
T (hrs)	12.42	12.42	12.42

3.2 CEA 모형의 결과

Fig. 3은 CASE 1에 대한 외해 조위, 해수호수 내의 수위변화, 그리고 수로에서의 유속 분포 곡선이다. 외해 조위의 반조차는 4.635m이며, 해수호수내 수위는 최대 4.405m까지 상승하였다. 외해 조위에 비하여 해수호수내 수위가 적게 상승한 이유는 수로의 단면적이 작아 외해수가 충분히 유입되지 못하기 때문이다. 외해의 약최고조위가 3시에 발생하였지만, 해수호수의 최고 수위는 약 4시에 발생하여 약 1시간의 지체시간이 발생하였다. 수로 최대 유속도 약 2.7m/s까지 상승하여 외해수의 유출입시 수로내에 상당한 침식이 발생하여 창조시 해수호수를 퇴적시킬 것으로 사료된다. Fig. 4는 CASE 2에 대한 결과로 해수호수내 수위는 최대 4.535m까지 상승하였다. 해수호수의 최고 수위는 약 3시 15분에 발생하여 약 15분의 지체시간이 발생하였다. 수로 최대 유속도 약 1.3m/s로 외해수의 유출입이 CASE 1에 비해서 안정적임이 나타났다. Fig. 5는 CASE 3의 결과로 외해 조위와 해수호수의 조위가 지체시간 거의 없이 동시에 상승과 하강을 하고 있음을 볼 수 있다. 또한 최대 유속도 0.9m/s로 CASE 2와 같이 안정적일 것으로 평가된다.

CEA 모형을 이용하여 수로의 단면적에 대한 해수호수의 수리동역학적 특성 변화를 평가하였다. 수로의 단면적이 크면 해수의 유통이 원활하고, 외해 조위와 해수호수의 수위변화가 지체시간이 거의 없이 동시에 발생하여 해수호수의 운영에 편리 할 것으로 사료된다. 따라서, 해수호수의 안정성, 경제성, 그리고 유지관리를 고려하여 CASE 2를 해수호수의 적정 폭으로 선정하였다. 이 CASE 2는 2차원 해수유동 수치모형인 FLOW2DH 모형에서 입력조건으로 고려하기로 한다.

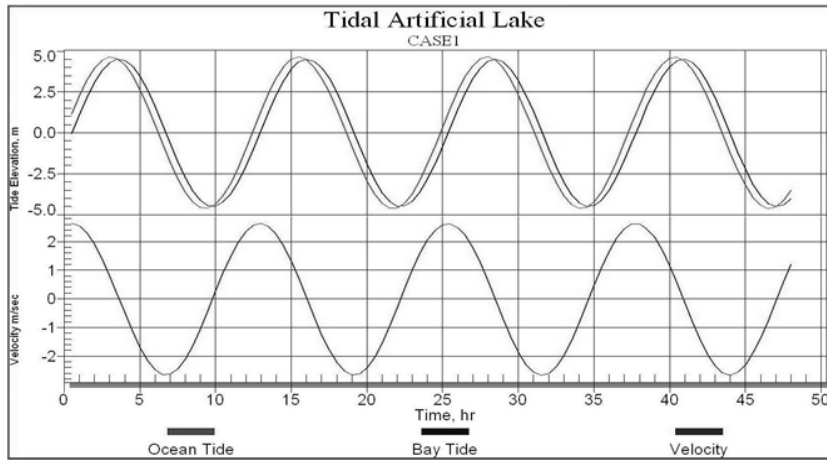


Fig. 3. Water level and velocity distribution of CASE 1

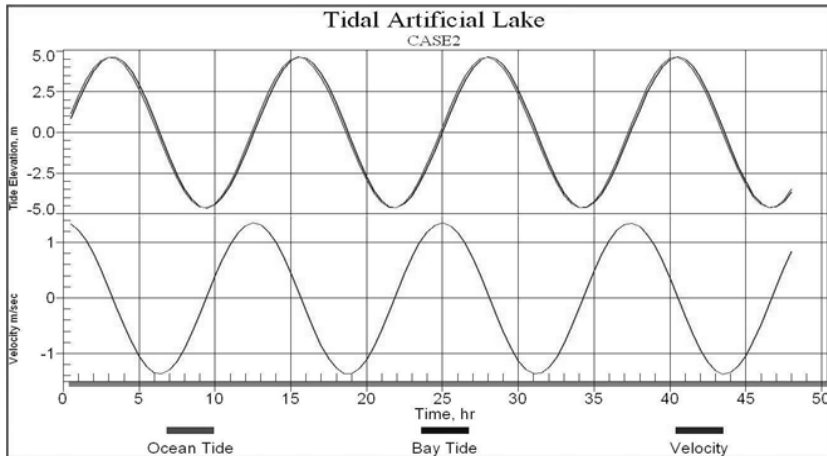


Fig. 4. Water level and velocity distribution of CASE 2

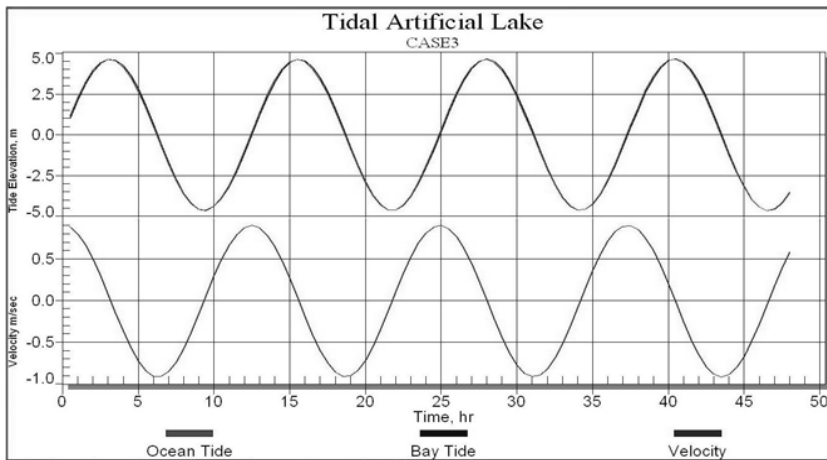


Fig. 5. Water level and velocity distribution of CASE 3

3.3 FLOW2DH 모형의 적용

해수호수의 면밀한 수리동역학적 해석을 위하여 모의영역을 Table 2에 제시하였다. FLOW2DH 모형의 실험안은 3.2 CEA 모형의 결과로 도출한 해수호수 수로의 적정 폭인 CASE 2를 적용하였으며, 수로와 연결된 외해 항로는 곡선형으로 진출한 경우에 대해서 수심도를 수정하였다. 또한, CASE 2는 해수호수의 수로가 외해에 접하는 구간에 갑문 운영을 적용한 CASE2-GATE를 추가적으로 모의하여 조석에 영향을 받는 해수호수의 해안 수리동역학적 특성을 평가하기로 한다.

CASE 2에서 외해 항로가 북서측 곡선형(Fig. 6 참조)으로 진출한 이유는 해수호수 수로와 외해 접경구간에 넓은 조건대가 분포하고 있는데, 추후, 해수호수에 마리나 시설을 고려한다면 선박의 통행을 원활하게 하기 위해서는 조건대를 준설하여 항로를 설정하여야 한다. 그래서 준설의 효율과 항로의 유지관리를 고려하여 최대한 수심이 깊은 곳을 따라 항로를 설정하였다. CASE 2-GATE와 같이 갑문 운영의 이유는 인천의 조차가 9.0m를 넘기 때문에 이상 파랑이나 태풍 등으로부터 해수호수 내를 정온하게 보호 할 수 있으며, 해수호수의 유지관리 및 퇴적물 유입 방지를 용이하게 하기 위한 목적으로 설치하였다.

특히, 갑문 운영은 외조위가 창조시 E.L. 1.5m로 상승하면 갑문을 열어 외해수가 호수내로 유입되도록 하고, 낙조시 호수내 수위가 E.L. 1.5m까지 하강하게 되면 갑문을 닫아 항상 호수내 최저 수위가 E.L. 1.5m를 유지하도록 수치해석의 코드를 수정하여 수행한다. 다시 말해, 호수의 저면이 E.L. (-)3.5m이므로 호수의 수심은 최저 5.0m로 유지가 된다. 이는 해수호수로 선박이 운항될 경우 안정한 여유수심까지 확보가 되므로 추후 마리나로도 운영을 할 수 있을 것으로 사료된다. 각 실험안의 해수유동 양상을 전체적으로 비교하기로 한다. 또한 해수유동 수치해석으로 얻은 각

실험안의 조위 및 조류속에 대하여 정점별 우열(relative merit)을 판단하기로 한다.

Table 2. Mesh system of each case for FLOW2DH model and input data

Mesh system	Model range	5.6km × 7.4km
	Number of cell	280 × 370 (103,600 cells)
	Size of cell	20m × 20m
	CASE2	without Gate (Natural)
	CASE2-GATE	with Gate
Input data and applied model	Depth data	Digital map for 2010 and measured depth contour
	Latitude	37.5° (for Incheon)
	Mean sea level	464.0cm (for Incheon)
	Approximate highest high water	927.0cm (for Incheon)
	Model	FLOW2DH (Ver. 2010.1)

3.4 FLOW2DH 모형의 결과

해수호수의 내부 및 외해역의 조위 및 조류 특성을 재현하기 위하여 해수유동 수치해석을 수행하여 연속 계산으로부터 얻은 결과를 시계열로 취득하였다. 실험 결과중 대표적으로 약최고고조위에 대하여 실험안별 조석 1주기 동안의 태음 1시간 간격의 조류변화를 예측하였다. 최강 창조시(태음 3시)와 낙조시(태음 9시)의 조류 흐름에 대하여 CASE 2는 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 도시하였으며, CASE 2-GATE는 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 도시하였다. 또한, Fig. 10은 각각 CASE 2과 CASE 2-GATE에 대한 7개의 선정된 정점을 도시하여 최강 창조와 최강 낙조의 유속을 Table 3에 비교하여 다음과 같이 분석하였다. 선정된 7개의 정점 중 P1은 외해 구간, P2는 수로 구간, 그리고 P3-P7은 해수호수 구간으로 나누어 면밀히 검토하고자 한다.

CASE 2에서는 P1의 최대 유속이 낙조시에 $0.401m/s$ 이며, P2의 최대 유속은 창조시에 $2.361m/s$ 로 나타났고, P3의 최대 유속은 창조시에 $2.827m/s$, P4의 최대 유속은 창조시 $0.523m/s$, P5의 유속은 창조시 최대 $0.428m/s$, P6의 최대 유속은 창조시 $0.185m/s$, P7의 최대 유속은 창조시 $0.039m/s$ 로 계산되었다.

CASE 2-GATE에서는 P1의 최대 유속이 낙조시에 $0.316m/s$ 로 나타났으며, P2의 최대 유속은 낙조시에 $0.762m/s$, P3의 최대 유속은 창조시에 $0.590m/s$, P4의 최대 유속은 창조시 $0.149m/s$, P5의 유속은 낙조시 최대 $0.075m/s$, P6의 최대 유속은 낙조시 $0.028m/s$, P7의 최대 유속은 낙조시 $0.006m/s$ 로 계산되었다.

특히, 해수호수내 정점인 P3 내지 P7인 5개 구간 중에 P3과 P4는 낙조시 조류속이 타 정점과 양상이 다르게 창조시 보다 느리게 계산되었는데,

유출손실로 인한 유속의 감소라 사료된다. 또한 P7에서는 해수호수내 조위가 $4.683m$ 까지 상승하였다. 약최고고조위가 $4.635m$ 이므로 약 4.0 내지 $5.0cm$ 의 편구배현상(super-elevation)이 관측되었는데, 이 현상은 해수호수내 수리동역학에 문제를 야기하는 것은 아니지만, 보다 심도있는 연구를 통한 결과를 도출한다면 학술적인 가치가 있다고 사료된다.

갑문 비운영인 CASE 2의 경우 최대 조류속이 P3지점에서 창조시 $2.827m/s$, 낙조시 $0.728m/s$ 로 모의되었다. 반면에 갑문을 운영할 경우인 CASE 2-GATE의 창조시 최대 조류속은 $0.590m/s$, 낙조시 $0.333m/s$ 로 갑문 비운영시 보다 창조시 약 20%, 낙조시 약 50%의 조류속 감소가 계산되어 해수유통에 안정성이 확보 될 수 있다고 사료된다.

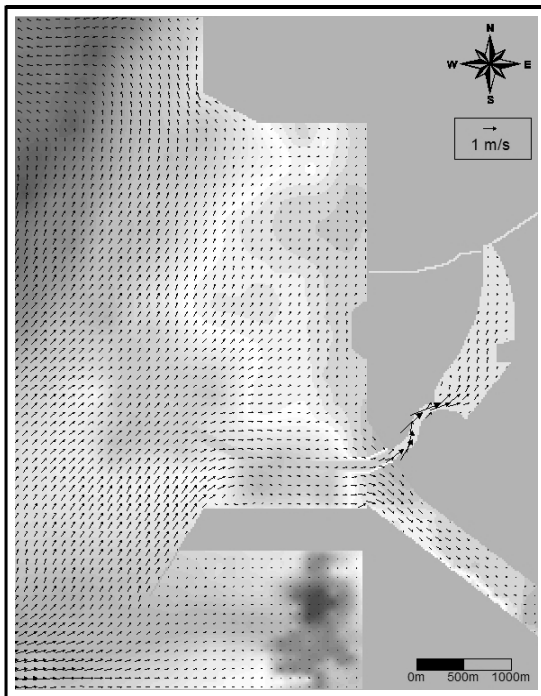


Fig. 6. Velocity distribution of CASE 2 at flood

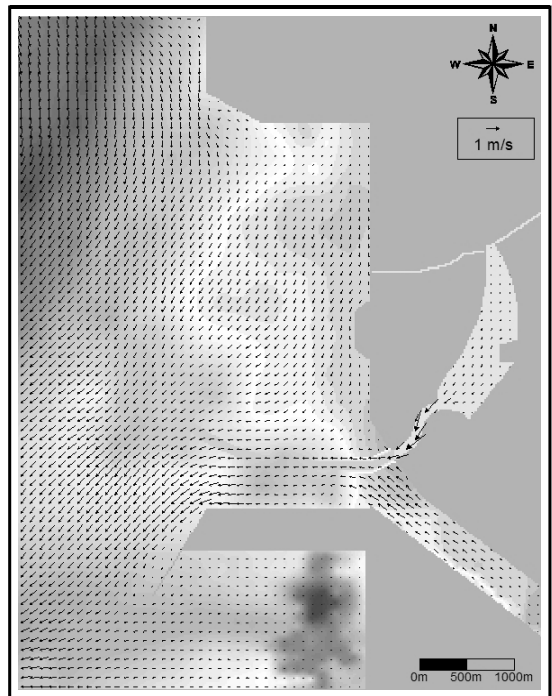


Fig. 7. Velocity distribution of CASE 2 at ebb

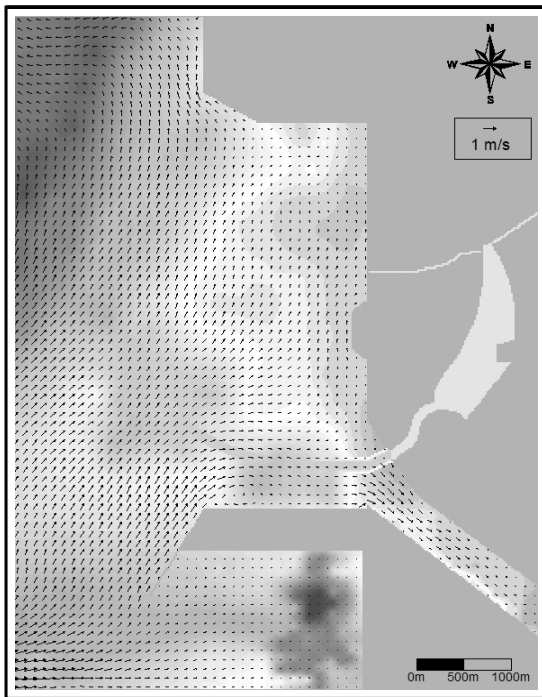


Fig. 8. Velocity distribution of CASE 2-GATE at flood

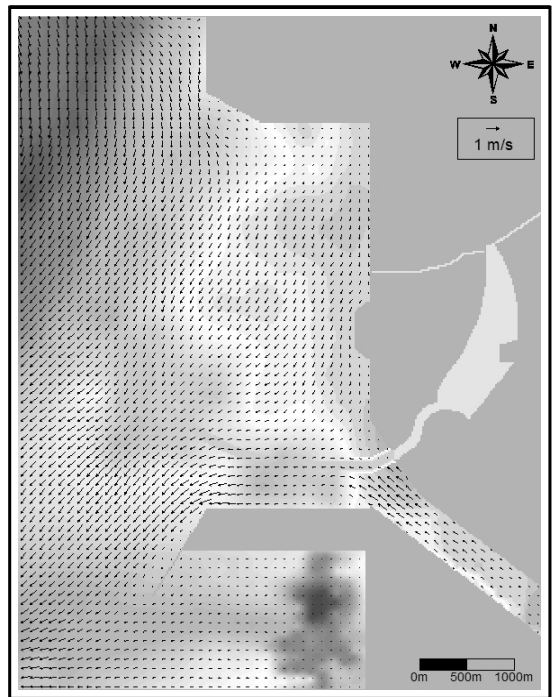


Fig. 9. Velocity distribution of CASE 2-GATE at ebb

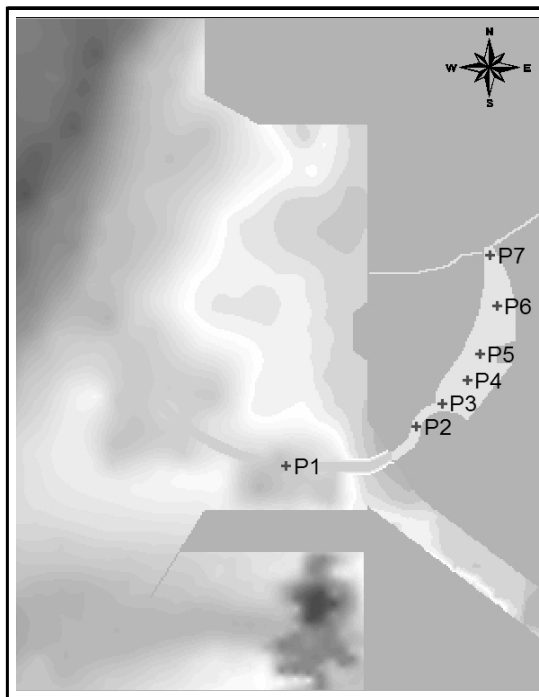


Fig. 10. Measured points

Table 3 Comparison of the maximum velocities in CASE 2 and CASE 2-GATE

Unit : m/s	CASE 2		CASE 2-GATE	
	Max. Flood	Max. Ebb	Max. Flood	Max. Ebb
P1	0.374	0.401	0.305	0.316
P2	2.361	1.886	0.739	0.762
P3	2.827	0.728	0.590	0.333
P4	0.523	0.210	0.149	0.077
P5	0.428	0.201	0.067	0.075
P6	0.185	0.066	0.023	0.028
P7	0.039	0.013	0.005	0.006

Table 4는 CEA 모형과 FLOW2DH 모형에 대한 결과를 위해 조위, 해수호수내 수위, 그리고 수로의 유속에 대하여 비교하였다. 최대 외해조위는 CEA 모형에서 4.535m까지 상승하였고, FLOW2DH 모형에서 4.571m까지 상승하여 두 모형이 유사함을 나타냈다. 하지만 해수호수의 최고 수위는 CEA 모형에서 4.535m까지 상승하였고, FLOW2DH 모형에서 4.6m까지 상승하여

0.065m의 수위차를 발생하였는데, 이 0.065m의 수위차는 편구배 현상(superelevation)의 영향으로 사료된다. 또한, CEA 모형은 외해 조위와 해수호수의 수위가 사인함수적으로 대칭적으로 오르내린다. 하지만, FLOW2DH 모형에서는 외해 조위는 대칭적으로 오르내리지만, 해수호수의 수위는 지형 형상 및 관성에 의해서 비대칭적으로 오르내린다.

Table 4 Comparison of the velocities calculated from CEA and FLOW2DH

lunar hours	Ocean tide level unit : m		Bay tide level unit : m		Velocities of the channel unit : m/s	
	CEA	FLOW2DH	CEA	FLOW2DH	CEA	FLOW2DH
1	1.750	1.706	1.750	0.800	1.100	1.151
2	3.402	3.635	3.402	3.582	0.850	0.290
3	4.535	4.571	4.535	4.600	0.0	0.003
4	3.402	4.324	3.402	4.365	-0.850	-0.764
5	1.750	2.908	1.750	3.032	-1.100	-1.337
6	0.0	0.714	0.0	1.083	-1.350	-1.886
7	-1.750	-1.664	-1.750	-0.784	-1.100	-1.483
8	-3.402	-3.594	-3.402	-1.919	-0.850	-0.885
9	-4.535	-4.570	-4.535	-3.500	0.0	0.147
10	-3.402	-4.325	-3.402	-3.500	0.850	0.817
11	-1.750	-2.907	-1.750	-2.450	1.100	1.475
12	0.0	-0.683	0.0	-1.059	1.350	2.361

수로 최대 유속도 CEA 모형에서는 $1.35m/s$ 로 측정되었으나, FLOW2DH 모형에서는 약 $2.4m/s$ 가 계산되었다. FLOW2DH 모형에서 수로의 유속이 크게 계산된 이유는 외해와 해수호수의 면적 및 수심에 비해서 수로의 폭이 상대적으로 적기 때문이며, 관성의 효과 등을 고려하고 있기 때문이라고 사료된다.

CEA 모형은 1차원 해석 및 여러 가정을 도입하였고, 조간대(tidal flat or wetting and drying zone) 처리를 고려하지 않고 모의하기 때문에 추후, 2차원 해수유동 수치모형실험의 결과와 상이할 수 있다. 하지만, 1차원 해석 결과로 볼 때, 본 연구에서 필요한 해수호수의 적정 수로 폭을 설정하는데 있어서 합리적인 모형임은 분명하다.

4. 결 론

1차원 수치모형인 CEA 모형은 Keulegan(1967)에 의해서 기본적으로 여러 가지 가정을 설정하였는데, 특히, 조위는 사인함수로 오르내리고, 관성의 영향은 무시한다는 가정이 비교 및 평가 대상에서 가장 중요한 요소들로 사료된다. 2차원 수치모형인 FLOW2DH는 해저면의 마찰손실계수, 관성의 영향, 코리올리(Coriolis) 효과, 그리고 확산계수 등을 고려하여 실제의 흐름과 유사하도록 개발되었으나, 입력 자료의 설정 및 모의 결과를 도출하는데 상당한 시간이 필요하다.

FLOW2DH 모형의 경우, 조류속이 $2.0m/s$ 이상인 정점이 P2와 P3 구간으로 이는 해양환경에 불안정한 결과를 초래할 수 있다. 예를 들어, 해수유통의 불균형, 해저면 침식 유발 그리고 선박의 운항에 위험을 가져온다. 따라서 창조와 낙조시 해수유통 및 조류속의 안정화는 물론 선박운항의 조건에서도 갑문 운영을 통한 수위조절이 호수내 안정화에 바람직하며, 최강 창·낙조시 수로의 유속 증가로 인한 저면전단응력을 상승시키게 되는데 이로 인하여 수로의 침식으로 인한 부유사농도를 증가시켜 목표 수질을 유지할 수 없게 되므로 갑문 설치의 필요하다고 사료된다.

이처럼, 2차원 수치모형인 FLOW2DH가 자연현상과 유사하게 외해와 해수호수의 흐름을 재현한다고 할 수 있겠으나, 설계시에 수로 폭 또는 수심을 결정하는데 있어, 2차원 수치모형을 이용하는 경우 상당한 시간을 소요하게 된다. 더불어, 1차원 수치모형으로 충분히 설계시에 고려할 수 있는 결과를 얻을 수 있기 때문에 1차원 수치모형과 2차원 수치모형을 필수적으로 병행하여 사용하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 논문은 ‘송도신도시 해수호수 및 Waterfront 수리·환경분석 및 개발대안 검토’에 대한 연구결과의 일부로서 한국습지학회의 지원과 ‘인공구조물 설치/제거에 의한 해양환경 예측모델링 기술개발’에 대한 연구결과의 일부로서, 국토해양부와 한국해양과학기술진흥원의 지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 임남재. 2011. 조석의 영향을 받는 인공호수의 수리동역학적 거동에 관한 연구. 석사학위논문. 대전대학교
2. 장창환. 2009. 비점작성 퇴적환경변화 예측기술개발. 박사학위논문. 국민대학교.
3. 한국습지학회. 2011. 송도신도시 해수호수 및 Waterfront 수리·환경분석 및 개발대안 검토 연구보고서.
4. Boussinesq, J. 1872. Theorie des ondes et de remous quise propagent le long d'un canal rectangulaire horizontale, en communiquant an liquis contenue dans le canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond, J. Math. Pures Appliquess, Ser. 2. 17, pp. 55-108.
5. Brown, E. I. 1928. Inlets on Sandy Coasts, Proceedings of the American Society of

- Civil Engineers, Vol 54, Part I, pp. 505-523.
6. 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.
 7. Flather, R. A. and Heaps, N. S. 1975. Tidal computations for Morecamble Bay. Geophys. J. R. Astro. Soc. 42.
 8. 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, DC.
 9. Keulegan, G. H. 1967. Tidal Flow in Entrances Water-Level Fluctuations of Basins in Communications with Seas, Technical Bulletin No. 14, Committee on Tidal Hydraulics, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
 10. King, D. B. 1974. The Dynamics of Inlets and Bays, Technical Report No. 2, Coastal and Oceanographic Engineering Laboratory, University of Florida, Gainesville.
 11. U.S. Army Corps of Engineers. 2002. The Coastal Engineering Manual (CEM), Part II-Chapter 6.
 12. U.S. Army Corps of Engineers. 2003. Channel Equilibrium Area User's Guide, pp. 1-14.
- 논문접수일 : 2012년 04월 22일
○ 심사의뢰일 : 2012년 04월 26일
○ 심사완료일 : 2012년 05월 30일